西北农林科技大学

博 士 学 位 论 文

中国主要粮食产区玉米、小麦和水稻产量差与缩差措施

学 科 专 业　土地资源与空间信息技术

研 究 方 向　作物模型

论 文 作 者　戎亮秉

指 导 教 师　于　强 研究员

联合指导教师　周文彬 研究员

论文提交时间　2025 年 12 月 10 日

中国知网 https://www.cnki.net

Dissertation Submitted to Northwest A&F University

in Partial Fulfillment of the Requirements

for Degree of

Doctor of Philosophy

Yield Gaps of Maize, Wheat and Rice in China's Major Grain-producing Areas and Measures to Closing the Gap

Major: Land Resources and Spatial Information Technology

Research Field: Crop Model

Candidate: Liangbing Rong

Supervisor: Prof. Qiang Yu

Co- Supervisor: Prof. Wenbing Zhou

Date of submission:2025.12.10

College

Northwest A&F University

中国知网 https://www.cnki.net

分类号：S127　　学校代码：10712
UDC： 631　　研究生学号：2019060335
密级：公开

西北农林科技大学博士学位论文

中国主要粮食产区玉米、小麦和水稻产量差与缩差措施

论文作者：戎亮秉

指导教师：于强 研究员

答辩委员会：
西北农林科技大学水土保持科学与工程学院赵刚研究员（主席）
中国农业大学资源与环境学院冯璞玉副教授
西北农林科技大学水土保持科学与工程学院吴耕泓教授
中国农业大学资源与环境学院王靖教授
西北农林科技大学水利与建筑工程学院何建强教授

答辩日期：2025 年 12 月 9 日

中国知网 https://www.cnki.net

本研究得到国家重点研发计划（编号：2016YFD0300100）
资助。

中国知网 https://www.cnki.net

摘要

随着人口增长和消费结构改变，现有耕地需要生产更多的粮食以满足粮食需求。已有大量研究表明中国目前的粮食产量仍存在提升空间，且提供了一些增产途径。但过去基于单因素试验提出的增产措施对气候、管理、土壤等环境因素间的交互作用研究有限，也缺乏针对产量限制因素的配套措施。因此，本研究基于2016 - 2019 年 80 个站点的田间试验，结合基于过程的作物模型和机器学习的方法，系统性评估中国玉米、小麦和水稻的主要种植区的产量差，量化气候、土壤和管理因素对三种作物产量的作用，针对主要限制因素提供增产缩差方案，并预测到本世纪中叶气候变化情景下三种作物的产量变化情况。本论文的主要研究结果和结论如下：

（1） 中国三大主粮作物的潜在产量

本研究利用站点试验数据校正东北平原、华北平原和长江中下游平原玉米、小麦和水稻代表性品种的遗传参数，通过 DSSAT 模型模拟三种作物的潜在产量。站点尺度的结果表明作物种植制度显著影响潜在产量，春玉米、单季稻的潜在产量普遍高于夏玉米和双季稻；区域尺度的结果表明中国玉米、小麦和水稻的潜在产量分别为 14.6，10.0 和 11.6 Mg ha^{-1}，且存在明显的空间异质性。潜在产量的空间分布具体表现为：玉米呈东北高西南低的趋势，小麦呈西北高东南低的趋势，水稻呈东北高东南低的趋势。

（2）栽培管理措施造成的产量差和产量构成差异

本研究基于田间试验的观测数据分析不同区域玉米、小麦和水稻的三种作物土壤基础肥力、农户管理实践、高效措施和高产措施的产量，解析不同管理水平下产量构成因素的变化情况。结果显示不同栽培管理措施收获的产量存在显著差异，玉米土壤基础肥力、农户管理实践、高效措施和高产措施的产量分别为 7.1，9.3，10.7 和 11.7 Mg ha^{-1}，小麦四种栽培管理措施的产量分别为 4.6，6.9，7.8 和 8.2 Mg ha^{-1}，水稻四种栽培管理措施的产量分别为 5.9，8.5，9.3 和 10.2 Mg ha^{-1}。栽培管理措施导致的产量构成差异表现为：玉米主要通过增加亩穗数增产，而小麦和水稻则更多受到亩穗数和穗粒数的影响。对比不同管理措施的作物产量发现，目前农民管理实践的产量仅兑现了 58 – 71%的潜在产量，仍有上升的空间。玉米、小麦和水稻通过农民管理实践在土壤基础肥力的基础上能够增产 2.2 – 2.5 Mg ha^{-1}；引入农学专家建议的高效措施能够在农民管理实践基础上增产 0.7 – 1.5 Mg ha^{-1}；而不计成本投入资源的高产措施则能够进一步增产 0.8 – 1.1 Mg ha^{-1}，且同一产量差在不同区域存在较大差距，栽培管理措施在土壤基础肥力产量低的

中国知网 https://www.cnki.net

区域增产效果更好。综上所述，不同栽培管理措施显著提升玉米、小麦和水稻产量，其中高效与高产措施在低基础肥力区域增产效果更为显著，而农民管理实践产量仅兑现了潜在产量的 58–71%，仍存在增产空间。

（3）主粮作物的产量限制因子

本研究在田间试验的基础上，使用机器学习算法（随机森林）量化气象、管理和土壤因素在作物产量中的的作用。结果表明，在影响作物产量的三大类因素中，管理因素的贡献度最为突出，达到 55%以上，显著高于其他因素。具体而言，氮、磷和钾肥施用量是影响所有作物产量的关键限制因子，玉米产量还显著受到种植密度的调控。相比之下，气象因素对产量的贡献率为 15-30%，且不同作物的主要气象限制因子存在明显差异。土壤因素的贡献度最低，不足 5%。部分依赖图的结果显示玉米、小麦和水稻施肥量与产量间存在边际递减效应，即施肥水平低时，单位肥料增长效果显著，但施肥量超过临界阈值后，对产量提升的幅度急剧下降，且不同区域不同作物施肥量的阈值存在差异。综上所述，作物产量主要受管理因素驱动，氮磷钾施用量为关键限制因子，并呈边际递减效应，而气象和土壤因素贡献相对较低且不同作物间存在差异。

（4）多目标优化的缩差措施

本章将随机森林与多目标优化算法结合，利用 GYGA 升尺度方法得到三大粮食作物在中国主要种植区域的最优栽培管理组合。结果表明，与当前农民管理相比，优化措施总体上减少了氮肥施用量（玉米、小麦和水稻平均施氮量分别为 241.7、155.2 和 59.6 kg ha^{-1}），增加了磷肥（P_2O_5，分别为 216.4、162.6 和 85.0 kg ha^{-1}）和钾肥（K_2O，分别为 246.6、119.5 和 247.6 kg ha^{-1}）投入比例，并提高了玉米种植密度（平均 9.3×10^4 株 ha^{-1}）。考虑到气候、土壤等环境因素的空间异质性，我们构建了针对不同农业气候区的具体优化措施数字地图。优化在栽培管理措施的采用能实现中国的玉米、小麦和水稻生产过程中提高产量、增加农民收入和减少环境污染三个目标之间的平衡。具体表现为：对比目前农民的生产情况，优化栽培管理措施玉米、小麦和水稻产量分别增加 25.8%，9.0%和 28.4%；氮损失分别减少 14.4%，43.2%和 45.9%；农民收入分别增加 22.1%，11.4%和 30%；另外氮利用效率也提高了 28%以上。

（5）未来作物产量变化

本研究利用构建好的随机森林模型评估了未来气候变化情景下，截止到 2050 年不同栽培管理措施的产量变化。研究表明，未来气候总体表现为最高温、最低温、降水和太阳辐射不同程度的上升，且不同气候情景存在差异。其中，SSP585 最高温和最低温的升高趋势最明显，SSP126 太阳辐射量的增加趋势最明显，SSP245 介于二者之间。气候变化对将使玉米和小麦产量减产，但能提高水

中国知网 https://www.cnki.net

稻产量；不同气候情景中，玉米和水稻在 SSP126 情景下获得较高产量，小麦则在 SSP585 情景下获得高产。栽培管理措施对气候变化的响应不同，其中优化栽培管理措施产量最高且波动最小，在五种管理措施中是应对气候变化最好的选择。到 2050 年，实施优化栽培管理措施基本能满足我国玉米和水稻的需求，但无法满足小麦的需求。

本研究构建了从“产量差测算—限制因子诊断—优化措施制定—未来气候适应性评估”的研究流程。通过系统解析粮食产能提升的关键路径，突破了传统农业研究的时空尺度局限，为协调产量增长、环境保护和农民积极性的动态平衡提供决策支持，这对破解我国农业现代化进程中的产量和资源的矛盾具有重要的战略指导价值。研究成果可向农民提供针对性的栽培管理措施，为政府制定宏观决策提供数据支持。

关键词：潜在产量；产量差；随机森林；多目标优化；气候变化

中国知网 https://www.cnki.net

ABSTRACT

With population growth and shifts in consumption patterns, existing arable land must produce more grain to meet food demand. Numerous studies have shown that China's current grain yields still have room for improvement and have proposed various approaches for yield enhancement. However, yield-increasing measures derived from past single-factor trials have provided limited insight into the interactions among climatic, management, and soil factors, and have not been supported by corresponding measures tailored to the yield limiting factors. Therefore, based on field experiments conducted at 80 sites from 2016 to 2019, this study combined process-based crop models and machine learning methods to systematically evaluate yield gaps for maize, wheat, and rice in China's major production regions, quantify the effects of climate, soil, and management factors on the yields of the three crops, propose yield-gap-closing strategies targeting the main limiting factors, and project yield changes for these crops under mid-century climate change scenarios. The main research findings and conclusions of this thesis are as follows:

（1） Potential yields of China's three staple crops

This study used site-specific experimental data to calibrate the genetic parameters of representative maize, wheat, and rice varieties in the Northeast Plain, North China Plain, and the middle and lower reaches of the Yangtze River Plain. The DSSAT model was then employed to simulate the potential yields of these three crops. Site-scale results indicated that cropping systems significantly influence potential yields, with spring maize and single-season rice generally exhibiting higher potential yields than summer maize and double-season rice. Regional-scale results showed that the potential yields of maize, wheat, and rice in China are 14.6, 10.0, and 11.6 Mg ha^{-1}, respectively, with distinct spatial heterogeneity: maize yields follow a northeast-high and southwest-low trend, wheat yields show a northwest-high and southeast-low trend, and rice yields display a northeast-high and southeast-low trend.

（2） Yield gaps and yield component differences caused by cultivation management practices

This study analyzed yield data from high-yield measures, efficient measures, farmer management practices, and soil baseline fertility across different regions for maize, wheat, and rice, based on field observations. The results revealed significant differences in yields under different cultivation management practices. Specifically,

中国知网 https://www.cnki.net

maize yield increases were primarily driven by higher ear numbers per unit area, while wheat and rice yields were more influenced by both ear numbers and grain numbers per ear. Compared to different management practices, current farmer management practices achieved only 58–71% of the potential yield, indicating substantial room for improvement. Farmer management practices increased yields by 2.2–2.5 Mg ha^{-1} over soil baseline fertility. Introducing agronomist-recommended efficient measures further increased yields by 0.7–1.5 Mg ha^{-1}, while high-yield measures with unlimited resource inputs boosted yields by an additional 0.8–1.1 Mg ha^{-1}. The same yield gap varied significantly across regions, with cultivation management practices showing greater yield improvement effects in areas with low soil baseline fertility. In summary, different cultivation and management practices significantly increased maize, wheat, and rice yields, with high-efficiency and high-yield practices showing greater yield benefits in areas with low baseline soil fertility. Under farmers' management practices, yields reached only 58–71% of the potential yield, indicating considerable room for improvement.

（3） Yield-limiting factors of staple crops

Building on field experiments, this study employed machine learning algorithms to quantify the roles of climatic, management, and soil factors in crop yields. The results showed that among the three categories of factors influencing crop yields, management factors were the most prominent, contributing over 55%, significantly higher than other factors. Specifically, nitrogen, phosphorus, and potassium fertilizer application rates were key limiting factors for all crops, with maize yields also significantly regulated by planting density. In contrast, climatic factors contributed 15–30% to yields, with notable differences in the main climatic limiting factors among crops. Soil factors had the lowest contribution, at less than 5%. Partial dependence plots revealed a diminishing marginal effect between fertilizer application and crop yields: at low fertilization levels, yield increases were significant per unit of fertilizer, but beyond critical thresholds, the magnitude of yield improvement declined sharply. These thresholds varied across regions and crops. In summary, crop yields were primarily driven by management factors, with nitrogen, phosphorus, and potassium application rates identified as key limiting factors, exhibiting a diminishing marginal return. In contrast, the contributions of climatic and soil factors were relatively low and varied among different crops.

（4） Optimized cultivation management practices

中国知网 https://www.cnki.net

This chapter integrates the random forest algorithm with a multi-objective optimization approach, applying the GYGA upscaling method to determine the optimal crop management packages for maize, wheat, and rice across China's major production regions. The results show that, compared with current farmer practices, the optimized strategies generally reduced nitrogen fertilizer application rates (averaging 241.7, 155.2, and 59.6 kg ha^{-1} for maize, wheat, and rice, respectively), while increasing the input ratios of phosphorus (P_2O_5; 216.4, 162.6, and 85.0 kg ha^{-1}, respectively) and potassium (K_2O; 246.6, 119.5, and 247.6 kg ha^{-1}, respectively), as well as enhancing maize planting density (averaging 9.3×10^4 plants ha^{-1}). Considering the spatial heterogeneity of climatic, soil, and other environmental factors, we developed digital maps illustrating specific optimization measures for different agro-climatic zones. The adoption of these optimized management practices enables a balance among three objectives in maize, wheat, and rice production in China: increasing yield, improving farmers' income, and reducing environmental pollution. Specifically, compared with current farmer practices, the optimized strategies increased yields by 25.8%, 9.0%, and 28.4% for maize, wheat, and rice, respectively; reduced nitrogen losses by 14.4%, 43.2%, and 45.9%; raised farmers' income by 22.1%, 11.4%, and 30%; and improved nitrogen use efficiency by more than 28%.

（5） Future crop yield changes

This study employed the constructed random forest models to assess yield changes under different crop management practices in future climate change scenarios up to 2050. The findings show that future climates will generally feature varying degrees of increase in maximum temperature, minimum temperature, precipitation, and solar radiation, with differences across climate scenarios. Specifically, SSP585 exhibits the most pronounced increases in maximum and minimum temperatures, SSP126 shows the most significant rise in solar radiation, and SSP245 lies between the two. Climate change will reduce maize and wheat yields but increase rice yields. Among the climate scenarios, maize and rice achieve higher yields under SSP126, while wheat performs best under SSP585. Cultivation management practices respond differently to climate change, with optimized practices yielding the highest and most stable outputs, making them the best choice for climate adaptation among the five management approaches. By 2050, implementing optimized cultivation management practices can largely meet China's demand for maize and rice but will fall short for wheat.

The study established a research framework encompassing "yield gap assessment

中国知网 https://www.cnki.net

– identification of limiting factors – formulation of optimization measures – evaluation of future climate adaptability". By systematically elucidating the key pathways for enhancing grain production capacity, this research breaks through the traditional spatio-temporal limitations of agricultural studies and provides decision-making support for dynamically balancing yield growth, environmental protection, and farmer incentives. These findings hold significant strategic value for addressing the contradictions between yield and resource constraints in China's agricultural modernization process. The results can deliver targeted crop management recommendations to farmers and offer data-driven support for government macro-level policy formulation.

KEY WORDS: potential yield; yield gap; random forest; multi-objective optimization; climate change

中国知网 https://www.cnki.net

目　录

第一章 绪论.....1
1.1 研究背景、目的和意义.....1
1.1.1 粮食安全问题突出.....1
1.1.2 缩减产量差是提高粮食产量的有效途径.....1
1.1.3 研究目的和意义.....2
1.2 国内外研究进展.....3
1.2.1 作物产量差的定义与发展.....3
1.2.2 作物产量差的量化方法.....5
1.2.3 作物产量限制因子研究.....8
1.2.4 产量限制因子分析方法.....12
1.2.5 优化栽培管理措施的方法.....15
1.2.6 作物产量预测的方法.....17
1.3 研究中存在的问题.....18
1.4 研究内容.....19
1.5 技术路线.....20
第二章 材料与方法.....22
2.1 研究区概况.....22
2.2 试验设计.....23
2.3 测定项目与方法.....24
2.3.1 生育期.....24
2.3.2 产量构成因素和籽粒产量.....24
2.4 数据来源.....24
2.4.1 气象数据.....24
2.4.2 未来气候数据.....25
2.4.3 土壤数据.....26
2.4.4 作物数据.....27
2.5 GYGA 升尺度方法.....27
2.6 潜在产量模拟.....28
2.6.1 模型参数.....29
2.6.2 模型表现.....30
2.7 产量差计算.....30
2.8 随机森林.....31
2.9 经济效益和环境效益平均.....32
2.10 非支配排序遗传算法.....34

中国知网 https://www.cnki.net

第三章 中国粮食主产区作物潜在产量 37
3.1 作物代表性品种参数校正 38
3.2 农业气候区代表性站点的选择 41
3.3 作物潜在产量的空间特征 43
3.4 讨论 47
3.5 小结 49
第四章 栽培措施对产量构成和产量差的影响 51
4.1 不同栽培措施的产量 51
4.2 不同栽培管理措施的产量构成 54
4.3 产量差的空间分布 57
4.4 讨论 61
4.5 小结 62
第五章 主粮作物的产量限制因素解析 63
5.1 量化产量限制因子的作用 64
5.2 主要限制因子的部分依赖图分析 67
5.2.1 玉米 67
5.2.2 小麦 70
5.2.3 水稻 72
5.3 讨论 75
5.4 小结 77
第六章 多目标优化的缩差措施制定 78
6.1 基于多目标优化的栽培管理组合 78
6.2 不同栽培管理措施的氮流失 82
6.3 不同栽培管理措施的氮利用效率 85
6.4 推荐措施的环境效益和经济效益 87
6.5 讨论 88
6.6 小结 89
第七章 气候变化对主粮作物产量的影响 90
7.1 未来气候的变化情况 90
7.2 气候因素对产量的影响 91
7.3 气候变化背景下的作物产量变化 93
7.4 讨论 96
7.5 小结 97
第八章 结论与展望 98
8.1 主要结论 98
8.2 论文创新点 100
8.3 不足与展望 100
参考文献 102

中国知网 https://www.cnki.net

附录.....121

中国知网 https://www.cnki.net

第一章 绪论

1.1 研究背景、目的和意义

1.1.1 粮食安全问题突出

粮食供应能力决定人口增长的上限，许多研究表明短期内粮食需求将进一步面临压力（Cirera and Masset., 2010）。一方面，联合国预计未来三十年地球人口将增加 20 亿，达到 97 亿（UN, 2019）；另一方面，消费水平与饮食结构的变化增加了农产品的需求量，卡路里消耗量从 19 世纪 60 年代的人均每天 2250 千卡增加到 2015 年的 2880 千卡，且有人估计到 2050 年将达到 3900 千卡（Pardey et al., 2014, Valin et al., 2014）。FAO 认为到本世纪中叶，全球农作物产量至少需要增加 70% 才能保障粮食安全（FAO, 2009）。中国作为重要的粮食生产国，则需保持至少 2%的粮食增长率（Fan et al., 2011）。

近 60 年来，中国的主要作物（玉米、小麦和水稻）产量显著增长，从 1961 年的 8854 万吨稳步增长到 2024 年的 7.06 亿吨。在此期间，玉米的年增长率达到 4.2%，小麦和水稻则分别为 3.0%和 3.1%，均高于同一时期世界谷物的增长水平。截至 2024 年，中国约占全球玉米产量的 24%，水稻产量的 27％和小麦产量的 18%。粮食产量的快速增长主要得益于单位面积产量的增加，而不是耕地面积的增加。1961-2024 年间，玉米单位面积产量提高了 5.5 倍（从 1.2 Mg ha^{-1} 到 6.6 Mg ha^{-1}），小麦单产提高了 9.8 倍（从 0.6 Mg ha^{-1} 到 5.9 Mg ha^{-1}），水稻单产提高了 3.4 倍（从 2.1 Mg ha^{-1} 到 7.2 Mg ha^{-1}）。同一时期，三种作物的种植面积仅增加不到 40%，从 1961 年的 6.8 Mha 到 2024 年的 9.7 Mha（https://www.stats.gov.cn/）。

尽管中国主要粮食作物的产量和单产增幅明显，但其年增长率均呈下降趋势。上世纪 60 年代主要作物平均单产年增长率为 5.8%，70-80 年代减为 3.7%左右，90 年代以后则不足 1.5%。在耕地面积增加有限的情况下，谷物产量年增长率则由 60 年代的 8.4%降至 90 年代以后的 1.6%。若维持这一趋势，中国在未来将无法实现粮食年增长率 2%的目标，粮食供应面临威胁。

1.1.2 缩减产量差是提高粮食产量的有效途径

目前实现粮食增产的主要策略通常可归纳为两大方向：其一是通过扩展农业用地规模来实现耕地面积增加从而总产量增长，其二则着重于提升既有农田的单产水平达到更高的生产效能。具体而言，前者涉及对未开发土地资源的合理规划

中国知网 https://www.cnki.net

与科学利用，通过耕地面积的增加直接扩充粮食总产量；后者强调在现有耕作区域内实施集约化农业技术，包括但不限于应用精准施肥手段及管理措施，从而显著提高单位面积产量。值得注意的是，由于区域资源禀赋差异显著，耕地扩展的可行性存在明显地域局限性，全球范围内，仅南美洲和非洲热带地区有大量潜在耕地可以转化（Bruinsma, 2003, Rosegrant et al., 2001）。而中国近 20 年来，由于土地退化、城市化、资源开采等因素（Fitzgerald et al., 2020, Lu et al., 2007），耕地面积逐年下降，从 1996 年 14362.6 万平方千米降至第二次土地普查时的 13516.3 万平方千米（陈印军 等., 2016）。因此，通过增加耕地面积来使粮食产量大幅度增加是难以实现的，中国未来粮食产量的增加主要依靠单产的提升。

近 5 年来，中国的玉米平均单产为 6.0 Mg ha^{-1}，水稻为 6.9 Mg ha^{-1}，小麦为 5.4 Mg ha^{-1}。对比其它主要粮食生产国，美国玉米平均单产可以达到 11.4 Mg ha^{-1}，法国小麦单产达到 6.9 Mg ha^{-1}。除水稻单产较高外，小麦和玉米单产水平均存在明显差距。造成这一差距的主要原因是不适当的作物管理做法，特别是养分、土壤和水分管理不当（Dawe et al., 2000, Peng et al., 2002, Ladha et al., 2003, Zhang et al., 2018, Peng., 2011）。因此，量化小麦、玉米和水稻的产量差，探明造成产量差距的限制因素，制定合适的缩差措施是提高粮食产量，确保粮食安全的重要途径。

1.1.3 研究目的和意义

研究目的：本研究以中国主要粮食产区（东北平原、华北平原和长江中下游平原）小麦、玉米和水稻为研究对象，将田间试验、农户调查数据，作物模型，机器学习和多目标优化算法结合起来，探究不同产量水平下产量构成因素的变化规律，明确区域尺度三种作物潜在产量和产量差的空间分布特征，解析不同区域不同作物产量的主要限制因子，在此基础上制定相应的缩减产量差措施，并确定气候变化对不同管理措施作物产量的影响，为构建产量提高、环境友好、农民增收的可持续农业生产模式提供理论基础和技术支持。

研究意义：本研究通过产量差-产量限制因子-优化栽培措施-应对气候变化的研究思路，回答了我国粮食生产的四大问题：（1）基于潜在产量和产量差的研究，明确主粮作物能否增产以及存在多少增产空间；（2）通过产量限制因子解析，揭示增产瓶颈的作用机理；（3）依托限制因子量化分级，构建增产缩差的技术路径；（4）结合未来气候情景，选择减缓气候影响的调控方式。研究成果可向农民提供针对性的栽培管理措施，为政府制定宏观决策提供数据支持。

本研究构建的理论框架与方法体系，通过系统解析粮食产能提升的关键路径，突破了传统农业研究的时空尺度局限，为协调产量增长、环境保护和农民积极性的动态平衡提供决策支持，这对破解我国农业现代化进程中的产量和资源的矛盾

中国知网 https://www.cnki.net

具有重要的战略指导价值。

1.2 国内外研究进展

1.2.1 作物产量差的定义与发展

产量差距理论体系的发展历程呈现出多维度演化的特征。产量差的理论研究基础可追溯至 1970 年代国际水稻研究所（IRRI）在亚洲六国开展的稻作系统研究，关于产量限制因子，该研究提出了三个假设：（1）农田实际产量与潜在产量间存在可量化的产量差距；（2）产量在不同农业生态区及作物栽培品种间存在显著差异；（3）为识别产量制约要素，作物产量差限制因子可以被分解（Inst et al., 1979）。随后，de Datta（1981）在农业生产力评估框架中系统构建了产量差的理论模型，将其概念定义为农户田间实际产出与科研试验田最优产量间的差距，并创新性提出"潜在产量"概念，用以表征特定耕作条件下生产者可实现的最大产能水平，如农民实现的最高产量为农民潜在产量。Fresco 在农民实际产量和试验站产量基础上，提出了“技术上限产量”和“经济上限产量”，将产量差分为三个等级。技术上限产量即为农田能够达到的最大产量，等同于农民潜在产量；经济上限产量则指农户利润最高时的产量，由于农民的投入水平低于最大产量所必需的投入，经济上限产量低于技术上限产量（Fresco, 1984）。Rabbinge 提出了“潜在产量”和“可获得产量”的概念，潜在产量是在试验站栽培管理措施下，采用适宜品种，不受水肥胁迫，作物生长良好条件下可能达到的产量，它反映了当地仅受光温条件和遗传特性决定的产量。可获得产量是在最优栽培管理措施下实际所能达到的产量（Rabbinge, 1993），它与农户潜在产量和技术上限产量的意思基本相同。De Bie（2000）通过系统整合前人既有研究成果，归纳建立了五个产量水平：实际农田产量、经济上限产量、农田潜在产量、试验站条件的最大产量以及试验站模型模拟的潜在产量，并由此将产量差分为 3 个等级（de Bie, 2000），如图 1-1。Lobell 在 2006 年提出将田块产量差定义为田块最高产量与区域平均产量间的差距（Lobell and Ortiz-Monasterio, 2006）。随着理论深化，Lobell 于 2009 年构建了时空耦合分析框架，进一步明确定义产量差为特定时空尺度下平均农户产量和潜在产量之间的差值，其定义取决于潜在产量的定义及测量方式，其中潜在产量被解构为理想品种在充分满足光温条件且无资源限制情境下的生产潜力，在确定的生长季和站点，其本质由作物生理特性与环境因子的交互作用所决定（Lobell et al., 2009）。在此基础上，2013 年刘志娟创新性地定义了四个作物产量水平，涵盖农户实际产量、潜在农户产量、可获得产量以及潜在产量，进而构建出包含三个层次的产量差分析体系。

中国知网 https://www.cnki.net

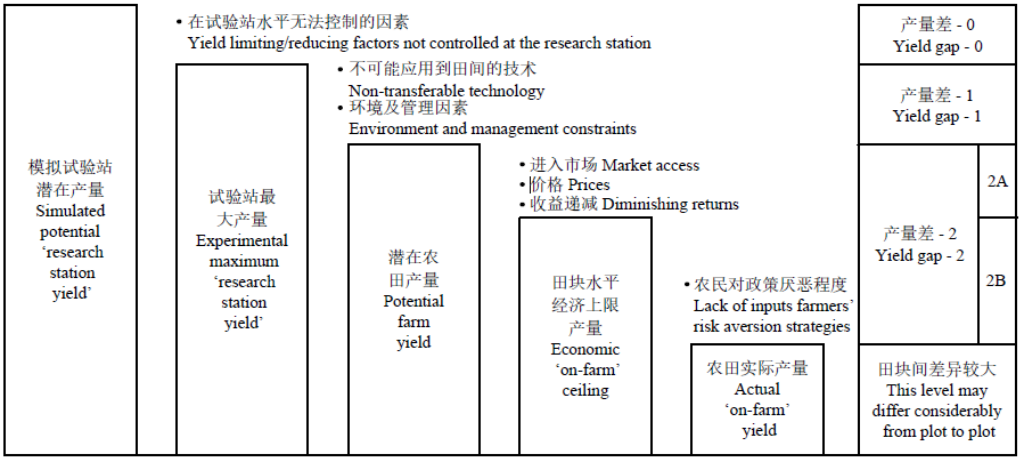


图 1-1 产量差及其限制因素

Figure1-1 yield gaps and limiting-yield factors

在实际生产中，受太阳辐射和温度等不可控的生长决定因子的限制，作物潜在产量是理论上限，所以很多学者在研究过程中加入了农户田间可获得产量水平（Cassman et al., 2003），但是很难界定在什么样的管理条件下才能达到可获得产量，并且可获得产量的计算方法在不同的研究中也存在一定的差异。Lobell（2009）将农户在田间可获得的最高产量界定为潜在产量的 80%，当农户产量超过这一阈值时，所需的水肥投入将会很高，资源利用效率下降。

在农业生产实践中，作物理论产量上限即潜在产量的上限受限于温度、太阳辐射等非可控的生长环境要素，这促使很多研究者引入"农户田间可达到的产量水平"概念用以评估现实生产潜力（Cassman et al., 2003），然而该指标的量化标准面临两个挑战：一方面，管理条件与产量形成的动态耦合机制尚未明确，对于管理条件来说，到底应该达到什么样的水平才能实现可获得产量；另一方面，现有研究在计算可获得产量中存在显著异质性。针对此问题，Lobell（2009）通过实证分析提出操作性定义，潜在产量的 80%定义为农户可获得的田间最高产量，并揭示当农户产量突破该临界阈值时，将触发水肥投入的边际效益递减效应，显著降低资源利用效率。

综上所述，首先，在概念框架层面，不同学者基于研究目标差异，对产量水平划分标准及其限制因子的识别缺乏统一界定；其次，在方法论层面，不同产量水平之间的差距代表着不同的增产潜力，导致产量差概念的定义及阐述内容众多，方法各异，并且不同层次的产量差对应的限制因子也存在较大差异。尽管如此，该领域研究的核心目标都是明确实际产量的限制因子，量化和缩减不同产量水平之间的差距。

中国知网 https://www.cnki.net

1.2.2 作物产量差的量化方法

产量水平不同其测定方法也存在差异，农田和试验站各级产量水平可以通过田间试验法和农户调查法获得，而潜在产量由于无法通过实际生产得到，其量化通常借助模型来实现。

田间试验法：作物产量形成机制具有显著的多因子互作特征，涉及遗传特性、气候条件、土壤理化性质及管理措施等多元驱动要素，且这些因素间存在复杂的关联机制。因此，解析产量限制因子通常采用变量控制试验，针对一个或几个因子，通过在农户田间或试验站进行不同处理的对比分析，系统隔离非目标变量的干扰，从而精准评估目标因子对产量的影响（Sun and Wang, 2002）。

Meertenst 等（1992）通过对棉花产量的限制因子进行研究，设置杂草、养分供应、病虫防控等六个处理组，证实仅杂草处理组对其产量具有统计学显著影响（$P<0.05$）。Calviño 与 Sadras（2002）基于多站点田间试验数据，构建气象要素（温度、降水等）与田块产量的回归模型，并分析产量对土壤深度、水肥管理措施以及降雨之间相互作用的响应机制，最终通过线性预测模型量化产量，定量得到了田块潜在产量与可获得产量和实际产量得到差距：潜在产量与可获得产量差距达 22%-40%，而这一差距主要是由水分限制因子引起的。Sumarno 等（1988）在农民不知情的况下，在农民爪哇大豆田块里布置试验，揭示不利灌溉措施、土壤肥力以及虫害是爪哇大豆的主要产量限制因子。

尽管在作物产量形成中，田块尺度的田间试验法能够明确特定因子的作用，却不能很好地解释时空变异情况。首先，由于固定和舍弃了某些因子的作用，通过试验控制得到的产量限制因子间的相互关系存在一定的局限性（Lobell et al., 2002）。其次，在田块尺度和区域尺度，产量限制因子对作物产量的影响存在尺度效应，例如试验站点与周边农业生态系统的管理措施及土壤理化性质存在显著空间异质性；另外，试验布置所需工作量较大，且不同年份间作物潜在产量波动性较大，有限的试验及样本数量也很难评估产量限制因子之间的相互作用。所以，但是田间试验的结果仅能反映当地当年的情况，不能将其扩展到区域尺度和长时间序列上。

农户调查法：基于农户的实证调研方法即农户调查法，通过整合土壤属性、作物栽培品种及农户管理等多源数据估算区域尺度的不同产量水平和产量差。Sarobol 等等利用农户调查结合相关农业统计数据，系统揭示泰国大豆的产量限制因子包括：不合理的土地利用、生物胁迫（杂草与虫害）高发、整地质量不足及落后的生产技术（Sarobol et al., 1989）。王崇桃和李少昆（2010）创新性构建多层级分析框架，采用参与式农村评估（PRA）方法对我国三大玉米主产区（西南山地、黄淮海双季及东北春玉米带）的产量限制因子进行评估，明确了目前我国

中国知网 https://www.cnki.net

玉米主要限制因子，为区域差异管理措施制定提供了科学依据。

不过农户调查通常采用提问方式，主观性较强，可能遗漏造成产量差的相关信息，且难以获得准确的农田管理信息。而且这一过程需要耗费大量人力物力及时间，并且难以收集到准确的土壤和作物管理信息。

模型模拟法：产量差研究中使用的模型可以分为两类：经验模型和机理模型（曹宏鑫 et al., 2011）。经验模型是以试验数据为基础，基于生物量-气候因子统计耦合关系构建的数理统计模型，如：Miami 模型（程曼 等., 2012, 罗永忠 等., 2011, 余海龙 等., 2012）、Thornthwaite Memorial 模型（李晓冬 等., 2009, 毛裕定 等., 2008）、Wagenigen 模型（林忠辉 等., 2003）、AEZ 模型（刘建栋 等., 2001, 王恩利 和 韩湘玲, 1990）。经验模型的不足在于其忽略了作物自身的因素，且利用平均气候资料难以获取不同气候年型的潜在产量（Morell et al., 2016）。

机理模型应用数理方法模拟作物生理生态过程以及解释作物整体功能，像 WOFOST 模型（Wu et al., 2006）、Hybirtd Maize 模型、DSSAT 模型、EPIC 模型、APSIM 模型、ORYZA 模型、RZWQM 模型等。通过设定管理情景、整合多源数据输入，并且确定生产投入水平，通过作物生长模型可系统解析品种（生物因素）、外界环境因素（土壤、天气等气象因素）及农艺管理措施（病虫草害控制、播种密度、播种方式、肥料施用与水分控制等）对作物生长过程的影响（Rabbinge et al., 1991）。并且，通过多情景对比，明确各生产投入水平产量之间，实际产量与各生产投入水平产量之间的差距，进而识别各级产量关键约束因子并制定精准调控策略，优化其决策（Fischer, 2015）。Verdoodt 等人于 2003 年开展相关研究，在南非旱作农业系统中，通过多情景模拟（自然生产潜力、光温生产潜力以及水分因子限制下的生产潜力），利用作物生长模型进行模拟，结果显示，太阳辐射与温度是影响作物生产力的两个重要因子，证实降水量是实际生产量的决定性因素，因此，其区域系统稳定性受降水量的年际波动影响（Verdoodt et al., 2003）。Bhatia 等人以印度雨养大豆种植区为研究区域，运用 CROPGRO-Soybean 模型并进一步调参，发现水分限制产量与潜在产量之间的差距达潜在产量的 28%，且当地实际产量较二者分别低 1.2 Mg ha^{-1} 和 2.0 Mg ha^{-1}（Bhatia et al., 2008）。Boling 等人在印度尼西亚爪哇岛，以水稻为研究对象，采用 ORYZA2000 模型模拟了氮素限制产量、水分限制产量以及水稻的潜在产量，通过计算各级产量差解析水分和氮素限制对水稻产量的影响，结果表明，各农田之间由水分限制引起的产量差变化范围是 0~28%，由氮素限制引起的产量差变化范围是 35~63%。Wu 等（2006）在气候变化背景下，以华北平原为研究区域，使用 WOFOST 模型，对冬小麦的水分限制产量及潜在产量进行了模拟，并通过比较这二者之间的差距来分析水分限制对冬小麦产量的影响，其中华北平原北部地区潜在产量和水分限制产量分别

中国知网 https://www.cnki.net

为 9.7 Mg ha^{-1} 和 3 Mg ha^{-1}，而南部地区的潜在产量和水分限制产量均在 7.5 Mg ha^{-1} 左右，结果表明，降雨量是华北平原北部地区冬小麦产量的主要限制因子，而南部地区冬小麦产量限制的因子主要是太阳辐射和温度。Li 等（2014）利用 APSIM-Wheat 模型模拟了华北平原 1981~2010 年冬小麦潜在产量，并结合农户实际产量分析了潜在产量与农户实际产量之间的产量差，结果表明，华北平原小麦产量差是 3630 $kgha^{-1}$，在各地区之间的变化范围是 1.1~6.8 Mg ha^{-1}。

作物模型通过动态量化作物生长生育对生物与非生物环境要素的响应，既能解析多因子耦合效应的空间分异规律，又可精准确定各关键环境胁迫因子的作用强度及其时间。此外，还具有覆盖面积广泛、可重复性强、动态表达作物生长过程、功能强大、使用方便、节省人力物力等诸多优点（Marin et al., 2014）。然而，作物模型也不是万能的，也存在一定的缺点。现阶段的作物模型模拟过程中存在很多基于田间均一的理想假设，很多生理生态过程的描述都是经验型的，而实际生产中，管理措施、作物品种、土壤理化性质和气候要素都存在较大的空间异质性，并且在区域尺度中，难以获取其参数也给应用模型增加了难度（曹宏鑫 等., 2011）。鉴于此，构建多源数据融合的复合评估框架成为突破技术瓶颈的关键路径，通过整合过程模型与地面观测（如遥感数据同化反演）、空间信息技术（如 GIS 空间分析）等多元方法，可显著提升区域生产潜力评估的精度与可靠性（解毅 et al., 2015），GIS 与作物模型耦合和遥感数据协同作物模型是目前常用的方法。

作物模型与遥感结合法利用作物模型模拟作物潜在产量，并与遥感技术估算的作物实际产量对比，一方面可以得到实际产量与潜在产量的产量差，并且通过遥感的空间耦合分析，解析产量差的限制因子以及空间分异规律。另一方面，还可以利用遥感信息对作物模型的参数进行初始化或参数化，提高作物模型在区域尺度模拟的准确性。该方法通过构建"模型模拟-遥感验证-参数优化"的机制，既能识别关键产量差限制因子，又可实现区域参数化校正。Lobell 等（2005a）根据墨西哥亚基河小麦的 Landsat 卫星遥感数据，得到其空间分布信息，并且通过作物模型估算小麦产量，最终定量明确小麦产量对于土壤状况、气候条件以及管理措施的响应。王纯枝等（2005）在河北省邯郸地区，通过 NOAA-14 AVHRR 热红外遥感反演冠层温度，构建夏玉米生长模拟模型，并进一步对实际生产力、水分限制生产力以及光温生产潜力进行模拟，并通过对不同模拟水平产量和农户调查产量进行比较，分析了区域产量差。张黎等 （2007）在 WOFOST 模型本地化、区域化改进中融合 MODIS 地表蒸散数据，使华北平原区域冬小麦水分限制产量模拟精度提升。该方法虽然有利于开展区域尺度的作物产量差定量研究，但是由于作物模型模拟与遥感观测尺度的不匹配，且遥感反演本身由于存在光谱混合效

中国知网 https://www.cnki.net

应（SME）干扰，使得田块尺度产量估算的不确定性提高，制约了技术体系的实际应用价值。

作物模型与 GIS 耦合方法则主要通过多源数据融合、模型耦合和系统功能集成（徐春华 等., 2015）。基于 DSSAT 平台集成的豆科类模型（如 CROPGRO）及禾本科作物模型，目前已初步实现与地理信息系统的技术耦合（对区域内输入资料进行内插，并对输出资料进行归并），而且基于 ArcView 开发的 AEGIS/WIN 系统已成功应用于区域农业环境模拟，然而 GIS 和作物模型的耦合研究方法仍较为薄弱。Lu 和 Fan（2013）结合 EPIC（Environment Policy Integrated Climate）模型和 GIS 技术对华北地区冬小麦的潜在产量和产量差进行分析。Li 等（2014）利用华北平原 1981~2010 年的农户产量，结合 APSIM-Wheat 模型和 GIS 技术分析了华北平原冬小麦产量差的时空分布。石晓燕（2009）将小麦生长模型 WheatGrow 与 GIS 技术进行耦合，实现了作物生长模型区域应用的升尺度连接以及空间生产力预测，并且根据情景模拟和分析方法，评估了气候变化情景和不同生产水平对区域小麦生产力的可能影响。

1.2.3 作物产量限制因子研究

产量差的形成机制繁多且复杂，不同研究者对其进行了多角度的阐述。在气候变化方面，影响农业实际生产中作物产量最重要的是气候资源，起到决定性作用（Lobell et al., 2005b）；在栽培品种方面，作物品种演化通过优化表型可塑性与资源利用效率，使作物产量水平提高（Xiao and Tao, 2014）；从栽培管理方面，土壤养分和质地、作物种植制度、施肥措施、灌溉措施都是引起产量差的原因（Zhang et al., 2013., Pandey, 2000）；从经济学方面，生产要素投入阈值、关键生育期水分亏缺及市场激励不足共同构成农户潜在产量与农户的实际产量差距的主要成因（Raghunadha Reddy., 1997）。

（1）气候对产量的影响：作物生长发育受制于光温水土等环境要素，气候变化驱动因子（温度波动、CO_2浓度升高等）通过改变光温水及风速等的时空格局与胁迫强度阈值，进而引发作物生长发育过程的生理生态响应，最终对作物产量产生影响（李克南., 2014）。

许多研究表明，气候变暖将在一定程度上降低农作物产量，而且气候变暖仅在中国东北等少数地区产生积极的单产响应，这可能是由于这些地区的高纬度，以及当前温度不在该范围内而无法促进最大的生长和产量（Kukal and Irmak, 2018, Assefa et al., 2018, Tao et al., 2006）。降雨的区域趋势明显，国干旱地区夏季和秋季降水有所减少。相反，在中国潮湿的南部地区，夏季降水更多，对农业生产产生了负面影响（Fan et al., 2011）。Yu 等（2001）根据 1961~1990 年苏州地区水稻总产量数据，应用逐步差分法，首先用连续两年的产量差异产生一个新的序列，

中国知网 https://www.cnki.net

再利用多元回归确定变量和气候变化的关系，探讨了日照时数、温度和降水等气候因子对中国长江三角洲地区水稻产量的影响。Liu 等（2010）结合中国华北地区 25 年的作物数据、每日天气数据以及 APSIM 作物模型，通过多源数据融合分析冬小麦-夏玉米轮作系统对于气候变化的响应，发现在品种一致的情况下，气候变暖使得华北平原冬小麦、夏玉米两者潜在产量均降低。Xiong et al.（2007）采用 CERES-Maize 作物模型分析我国玉米主产区的潜在产量，在未来气候变化情景下，结果显示，在不采取气候变化适应措施的前提下，气候变化使得产量降低。Chen 等（2013a）比较了 1961~2013 年华北地区温度、辐射和降雨对冬小麦-夏玉米潜在产量的影响，结果表明，太阳辐射降低是该地区小麦和玉米潜在产量下降的主要因素。王静等（2012）利用 APSIM 作物模型结合黑龙江省气候资料、土壤资料及该地区春玉米的生育期和栽培管理信息，分析了 1981~2010 年该地区春玉米潜在产量的变化特征，结果表明，降水是黑龙江省西部玉米产量的主要限制因子。基于 APSIM-Wheat 模型的多情景模拟框架，李克南等（2012）对华北平原冬小麦水氮限制产量、水分限制产量以及潜在产量形成机制进行分析，重点解析其时空异质性特征，以明确气候因子对不同等级冬小麦潜在产量分布特征的影响程度，结果表示，潜在产量下降主要是由光合有效辐射降低引起。

目前大部分研究表明，在不采取适应措施的情况下，气候驱动因子对实际产量以及潜在产量普遍负向调控，最终导致减产效应（Chen et al., 2013b, Lobell et al., 2011a, Tao et al., 2008）。此类研究主要集中在辐射和温度对产量的影响分析上，而降水因其变化趋势不显著且灌溉对其有补偿作用，较少有人对其影响进行分析（李克南, 2014）。辐射降低对大部分地区主要作物产量都是负效应，而温度对作物产量的影响因地区和作物类型而异，其对产量形成的影响途径主要有以下几种：作物的呼吸、光合及灌浆速率均受温度影响，其平均温度由于空间异质性也存在差异，如 1）净光合速率受温度升高影响而增加或降低，并且夜间呼吸消耗增加，最终使得有机物的积累下降（李克南, 2014）；2）积温累积加速导致生育进程缩短，使灌浆期在生长季减少，最终使得产量下降（Stone, 2001）；3）气温上升通过提升空气饱和水汽压梯度，加剧作物蒸腾胁迫，致使水分利用效率（WUE）降低，最终影响光合速率（Ray et al., 2002）；4）极端高温事件（>35°C）触发细胞膜脂过氧化反应，使光系统 II（PSII）最大量子产率下降，最终损害光合器官（Lobell and Gourdji, 2012, Lobell et al., 2011b）。

（2）土壤对作物产量的影响：土壤作为地气交换的界面及农作物生长的载体，是组成农业生态系统的重要成分，在农业生产中起着重要作用（郑亮, 2014）。受成土因素的影响，不同地区土壤的生物、物理和化学性质存在较大差异，具有明显的区域性，导致区域作物产量和产量差存在较大的波动（肖婧 等., 2017），

中国知网 https://www.cnki.net

同时，土壤属性变化也会引起大气温度和湿度等发生变化，最终对作物产量产生一定的影响。

Casanova 等（1999）在全灌溉直播条件下，利用边界线方法定量分析了西班牙三角洲地区土壤属性对水稻产量的限制作用，结果表明，土壤含盐量与地下水电导率呈正相关，与产量呈负相关，并且由土壤属性产生的产量差约为 3.0 Mg ha^{-1}。Lobell 等（2002）利用遥感在区域范围内研究了墨西哥东北部地区小麦产量的限制因子，通过方差分析得出气候变化和土壤类型对小麦产量的影响分别为 4.6%和 6.6%，而管理条件对区域小麦产量的影响最大，达到了 88.6%。陈健等（2008）利用逐步回归方法建立的土壤属性、品种及管理措施等因子构成的产量差模型能够解释 63%的产量差异，并且研究结果显示，冬小麦产量的主要限制因子是土壤肥力、土壤盐碱度及咸水灌溉，其产生的产量差是 727 kg ha^{-1}，占总产量差的 52%。王纯枝等（2005）结合作物生长模型和遥感对作物产量差进行估测，结果表明，引起 PS-1 和 PS-2 水平之间产量差的主要因子是水分和土壤质地，并且相比壤质和粘质土壤区，砂质土壤区模拟的作物产量较低。

（3）品种对作物产量的影响：近几十年以来，全球粮食产量显著增加，品种更替在这当中发挥着重要作用（Evenson and Gollin, 2003），主要表现为：1）通过种质创新、品种改良优化作物物候期适应性，使得其更够适应气候变化；2）抗性基因的定向选育即培育抗逆性品种使作物能够更好的应对外界不良环境；3）耐密型品种突破传统种植密度限制，使单位面积光合有效辐射截获率提高，增加单位面积作物产量（Aneani and Ofori-Frimpong, 2013）。

Duvick 和 Cassman（1999）的研究显示，美国中北部玉米带 19 世纪 60 年代自绿色革命之后，潜在产量增加的主要原因是杂交品种的推广。Liu 等（2010）对 1981~2005 年华北平原冬小麦-夏玉米的长时间序列实验数据进行分析，结果表明，品种更替能够消除气候变暖引起的生育期缩短，有效补偿气候变暖导致的积温损失，使得夏玉米、冬小麦花前生育期仍然保持，使灌浆期延长，最终提升作物产量。Zhou 等（2007）通过研究发现，1949~2000 年期间，中国南方地区冬小麦发生了 4-5 次较大规模的品种更替，由此使得小麦平均年产量增加 0.31~0.74%，主要源于穗粒重、千粒重、收获指数等的增加以及矮化植株；并且，我国北方 60 年代至本世纪初，冬小麦进行了 6-7 次大规模栽培品种改良，并因此使得小麦平均年产量增加 0.48~1.23%，其中产量增加主要归功于每穗粒重的增加、收获指数的增加和株高降低（Zhou et al., 2007）。Tao 等于 2008 年通过作物模型进行了进一步的研究，研究小麦生育期对小麦品种更替的响应，结果表明，培育的小麦新品种完成生育期需增加有效积温，其所需的热量资源增加，缓解了气候变暖引起的作物生长速率加快以及缩短生育期等的负效应（Tao et al., 2008）。

中国知网 https://www.cnki.net

Wang 等人在 2007 年在澳大利亚采用 APSIM 模型预测显示，未来气候条件下，小麦品种的生态适应性差异导致产量波动。Senapati 和 Semenov（2020）认为，在开花期耐高温和干旱，具有最佳冠层和根部结构的育种品种可使小麦增产 3.5-5.2 t ha^{-1}。刘等（2012）通过选育新的玉米品种，使生育期延长，最终提升作物产量。改良品种在提高水稻产量中也发挥了重要作用（Peng et al., 2008, Takai et al., 2006, Espe et al., 2018），而最佳品种应具有更长的生长季节，更大的穗数和更大的籽粒重量（Zhang et al., 2019）。为了在气候变化，病虫害和疾病的压力下在美国获得更高的产量，农作物生产系统广泛使用对环境具有更好适应性的杂交种和抗除草剂品种（Nalley et al., 2016）。

（4） 栽培管理措施对作物产量的影响：过去几十年中，全球粮食产量的大幅提升的另一个重要原因是栽培管理措施的革新，例如种植密度提升、物候期精准调控（播期调整）、水肥耦合效率提升、病虫草害管理以及全程机械化覆盖率提高等（Challinor et al., 2016）。目前已经有研究表明，优化栽培体系，栽培管理技术更加合理高效能够显著增强作物对环境波动的适应性，有助于作物高产潜力的发挥，提高作物实际产量水平（Marin, 2012 , Licker et al., 2010）。Ortiz-Monasterio 和 Lobell（2007）研究了栽培管理措施对墨西哥亚基河春小麦产量的影响，偏离推荐播期播种使得小麦产量大幅度降低；而通过实施季节性杂草综合防控，则可提高 5%的当地总产。Kucharik（2008）研究了在美国内布拉斯加、南达科塔、明尼苏达、爱荷华、威斯康星和密歇根等 6 个州播期调整对玉米产量增加的贡献，结果表明，在 1979~2005 年期间进行物候期优化，玉米产量由于提前播种可提升 19%~53%，播种期每提前 1 天，有效积温增加，使籽粒灌浆持续期延长，产量可增加 60~140 kg ha^{-1}。Khaliq 等（2019）使用 APSIM 模型来模拟播种期对水稻和小麦产量的影响。他们发现，巴基斯坦大米的最佳播种日期比当前使用的播种日期晚一个月，而小麦的最佳播种日期比当前使用的播种日期至少早一个月。华北平原冬小麦的适宜播种期为 10 月 3 日至 10 月 8 日，播种期是影响穗数的最大限制因素（Cao et al., 2019）。水稻的移栽日期将影响生长期的天数以及生长期收到的气候条件（Hu et al., 2017）。许多研究表明，面临全球变暖负面影响的温带地区可以通过更早的播种和出苗来增加产量，其中一些研究涉及澳大利亚的小麦（Zeleke and Nendel, 2016）、中国和美国的水稻（Linquist and Espe, 2015, Hardke et al., 2013, Ding et al., 2020）。

Mueller 等（2012）根据目前世界上最全面的农作物产量和施肥管理数据，分析了主要农作物的产量提升情况，研究发现，通过增加灌溉量和改善养分管理，可以使大部分农作物的产量增加 45~70%。Xiao 和 Tao（2014）结合中国华北平原四个站点 1980~2009 年详细的田间试验数据与作物模型对冬小麦进行研究，

中国知网 https://www.cnki.net

其产量增加的主导因素是栽培管理措施优化以及品种改良更替，施肥技术优化贡献 2.1~3.6%。值得注意的是，水肥协同效应显著影响养分利用效率，Balboa 等人 2019 年在美国西部玉米-大豆轮作系统研究发现，灌溉条件下氮肥增产贡献率为 24%，然而在非灌溉条件下，仅施用氮肥并不增产（Balboa et al., 2019）。多营养元素协同限制效应研究揭示，除氮素外，磷、钾等元素也是产量限制因子（Hajjarpoor et al., 2018），特别在种植玉米时，玉米对钾肥的需求强度显著高于小麦和水稻，钾素亏缺导致的产量下降要比小麦和水稻下降更大（Jin, 2012, Dai et al., 2013, Xu et al., 2016）。

（5）社会经济因素对产量的限制：作为农业生产的主体，农民的目标通常是获得最大的经济利益，而不一定是获得最高的产量。通过更好的管理措施来缩小产量差距并非在所有地区都可行，因为这意味着更高的经济和资源投资。尽管非洲改良品种的产量可能是农民平均产量的三倍，但由于较高的种子成本和抗旱性，他们通常不考虑使用这些改良品种（van Loon et al., 2019）。在西北地区，由于缺水，农户无法通过大规模的小麦和玉米间作来增加产量，因为间作和种植密度的增加都导致需水量的增加（Fang et al., 2017）。此外，诸如农场规模（Dutta et al., 2020），劳动力人数和性别（Mahmood et al., 2019）以及农民的教育水平（Assefa et al., 2020）等因素也会影响农民的决策过程，以及最终获得的最终产量。

总的来说，在解析作物产量差的限制因子时，需多种研究方法结合，如统计建模、设计控制变量田间试验方法和作物生长模型，并且需要合理利用基于机理的作物模型，设置多情景模拟方案，分析作物产量在不同产量限制因子下的受限程度，并且进一步根据田间实际生产活动验证其结果。

1.2.4 产量限制因子分析方法

在进行作物产量限制因素解析时，影响作物生长发育和产量形成的因素众多，并且各因素之间存在一定的关联性，为解决这些问题，目前已有多种分析方法：回归分析法、通径分析法、主成分分析法（PCA）以及回归树模型等。

（1）回归分析法：回归分析是一种基于两个或多个变量之间的关系，通过解析变量间的数学关联构建预测模型。主要包括四种类型：一元线性回归、非线性回归、逐步回归以及多元线性回归。其中，在产量差中分析研究中应用最为广泛饿的是逐步回归与多元线性回归。Lobell 等人（2011a）采用多元回归分析，研究 1980-2008 年全球四大主粮（玉米、小麦、大豆、水稻）对气候变化的响应。在区域尺度应用方面，Casanova 等（1999）利用逐步回归，解释了西班牙埃布罗河三角洲水稻高产区再充分灌溉下，水稻产量对土壤属性（土壤 PH、土壤养分含量、土壤质地以及盐碱性）等指标的响应。Muller 等（2012）采用线性回归分

中国知网 https://www.cnki.net

析方法对环境因子对全球尺度作物产量的影响进行分析，量化水肥耦合管理对产量差额影响。刘园等（2010）基于华北平原气候变化下，利用线性回归分析方法研究了华北平原地区影响参考作物蒸散量及其构成项变化的主次气候因子，为该地区农田水分管理提供了有效的科学指导。

在实际农业实践中，回归分析法存在局限性：一方面回归分析模型通常基于变量正交性假设，各变量之间假设具有独立性，但是实际农业生产中普遍存在多因子协同效应，当各变量之间具有较大相关性时，多元回归的最小二乘估计值会产生偏差，难以得到合理的结果（Montgomery et al., 2012）。另一方面，逐步回归分析方法一般假设存在全局最优解，然而农业生产中普遍存在局部最优子集（游士兵 和 严研., 2017）。

（2）通径分析法：通径分析方法是一种能够反映多元回归中自变量相对重要性的分析方法，其基本原理涉及通径网络理论，也是一种更善于研究变量间因果关系的多元统计分析方法（Taga and Honda, 1982, 谢仲伦, 1996）。其优势体现在：通过通径网络图，可以表示出回归关系与相关关系，并且能进一步量化预测变量对响应变量的直接影响效应，基于此，比较各原因因子的相对贡献率，同时由于自变量之间相关性较强，找出引起多重共线性的自变量，剔除冗余变量，提升模型简约性，最终得到“最优”回归方程。

通径分析法在实际农业实践中展现出独特的方法学价值，其通过构建因果路径网络解析多因子交互作用，目前已经采用此方法得到一系列的创新性成果。吴玉鸣和李建霞（2003）采用此方法，分析了 1978~2000 年中国粮食生产的 7 个影响因子对粮食生产的影响及各因子间的相互影响关系，揭示我国粮食产量主要限制因子是：有效灌溉面积、农业机械总动力以及化肥施用量。张玉铭（2004）等在华北平原玉米高产区研究中，通过路径系数分解发现产量主要限制因子的相对重要性，研究发现，氮素对玉米产量的影响最为重要。通径分析的技术优势体现在：将影响作物生长的环境因子作为原因变量，将作物产量作为响应变量，能揭示环境因子对产量的直接作用和间接作用，通过标准化路径系数识别关键限制因子，最终能够识别作物产量的限制因素（刘建刚, 2015）。并且能够同时量化变量间的统计关联性与因果路径效应，使得多元变量系统的统计分析更符合实际，被广泛应用于作物单产分析和气候变化对作物生产的影响中（徐春华 等., 2015，Wang et al., 2011）。

（3）比较优势分析法：比较优势分析（Comparative Performance Analysis，CPA）方法假设农民有着各自管理作物和经营土地的手段，这些不同管理方法和经营手段导致不同田块的实际生产力存在差异，通过比较农民实际生产情景对产量差进行分析，以找出作物产量的主要限制因子，并定量分析限制因子。国际水

中国知网 https://www.cnki.net

稻研究所（IRRI）在菲律宾对水稻产量评估中系统应用该方法，发现耕作制度差异导致产量变化（Inst et al., 1979）。De Bie（2000）对 CPA 的详细技术流程进行介绍，对泰国的芒果和水稻的产量限制因子进行识别。刘明强（2006）在河北曲周通过农户调查数据与田间监测数据融合，采用比较优势分析方法定量分析冬小麦-夏玉米轮作系统的产量限制因子。陈健等（2008）基于农户调查数据，利用 CPA 方法分析了曲周县 2003~2004 年度冬小麦产量差异，结果表明，冬小麦的主要产量限制因子为微咸水灌溉频率、土壤盐碱度以及土壤有机质含量，除了气候状况和土壤属性，管理措施也是引起产量差的重要因子，优化管理措施可以大大缩小产量差。

比较优势分析方法在农业决策支持中发挥跨学科整合功能，其通过构建"情景模拟-资源优化"决策框架，衔接社会经济要素与农业生产系统（Montgomery et al., 2012）。然而，该方法存在三方面局限性：1）该方法在应用时，依赖区域特异性参数，导致在其他区域应用时需进行参数重校准；2）该方法基于多元线性回归，存在多重共线性、变量正交性假设等相关缺点，导致在非线性交互作用显著时解释力下降；3）气候因子存在动态性，其时间异质性需引入滑动窗口分析法量化对产量波动的贡献率。

（4）主成分分析法：主成分分析（Principal Component Analysis, PCA）是一种常用的多因素多变量统计分析方法，其目的是通过线性组合将变量减少，并将原始变量转换为一组彼此独立且具有最大方差的新变量即主成分，从而实现数据降维与压缩冗余信息。该方法能够在保留原始数据主要信息的基础上，减少变量间的多重共线性，提高数据解释效率与建模精度。其优势体现在：通过载荷矩阵解析原始变量与主成分的相关系数，基于主成分得分矩阵从而实现样本的谱系聚类，根据变量在特征向量中的权重系数进行特征重要性排序。得分相近的样品可视为在属性特征上具有较高相似性，因而可归为同一类。权重系数相近的变量通常表现出较强的相关性，而对主成分贡献较大的变量则在总体变异中起主导作用，说明其对综合特征的影响程度较高。其在揭示变量之间的潜在结构、识别主导因子及构建综合评价指标等方面具有重要意义。

李方敏等对渍害土壤的 10 项肥力指标进行 PCA 降维，发现前三个主成分累计方差贡献率可概括绝大部分信息，其中 PC1 与作物产量呈显著正相关（李方敏 等., 2001）。郭笃发和王秋兵（2005）在山东莒南县，使用主成分分析方法，研究小麦产量与土壤表层、表下层氮磷钾养分含量及有机质含量的关系，并进行田间验证。杨月峰和徐学荣（2014）基于 1978~2012 年福建省粮食产量的统计数据，通过 PCA 识别出影响粮食产量的因素，结果表明，价格政策和农业现代化水平是影响福建省粮食产量变化的主要因素。该方法的优势体现在：通过特征值

中国知网 https://www.cnki.net

最大化准则实现高维数据简约化；基于各指标的权系数，规避人为主观偏差。因此，在产量差研究中得到广泛应用，PCA 可有效识别关键限制因子的空间分异规律，为精准管理措施提供量化依据。

（5） 回归树方法：基于分类与回归树（CART）的决策树模型，通过递归二分法构建二叉树架构，适用于离散分类（分类树）与连续变量（回归树）预测（Loh, 2011）。其特征体现在：输入数据无统计分布要求，连续、离散变量都可以作为输入数据，包容数据缺失和错误；非线性建模，通过方差最大化准则自动识别交互作用；实现简单，计算效率高；可以给出测试变量的重要性。回归树方法通过递归地对数据集进行划分（亦即分枝），在每个节点处选择能够最小化样本内方差的最优特征与切分点，从而建立一组层次分明的决策规则，实现对连续型响应变量的预测。Lobell 等（2005b）在墨西哥亚基河流域对小麦产量限制因子进行分析，对比 t 检验、线性回归与 CART 模型发现：CART 模型由于充分考虑了其非线性关系及各因子间的交互作用，模型解释能力显著高于线性回归。回归树方法在产量限制因子分析中的优势：回归树方法对输入数据没有任何统计分布要求，还能处理非线性关系，在作物产量限制因素解析中有较好的应用效果。

1.2.5 优化栽培管理措施的方法

发展协同提升作物产量与养分利用效率的优化栽培管理体系对农业生产具有重要意义。近年来，中国通过实施多种优化养分管理策略，在作物产量和氮素利用效率（NUE）方面已显著优于传统施肥模式（Peng et al. 2006; Zhao et al. 2010; Miao et al. 2011）。研究表明，品种选育、种植密度调控和氮肥管理是影响作物产量的三大关键要素（Arunakumari and Rekha 2016），其协同优化对实现高产高效至关重要。

作物产量表现高度依赖其与地理环境的适配性。作物品种的产量与环境因素密切相关，每个品种都在其最适宜的地理环境中生长得最好（Huang et al. 2013）。此外，作物育种过程复杂、耗时耗力（Han et al. 2017; Han et al. 2020）。目前，作物品种的选育和推广是基于传统的生态区域划分，通过区域试验确定特定品种的适应生态区域（Zabel et al. 2021）。然而，由于中国气候条件的复杂性和区域试验覆盖范围的有限性，一些适应特定生态区域的品种可能会被淘汰（Adams et al. 2025）。因此，为了有效地利用已育成的作物品种，有必要通过产量预测的方法找到指定品种的适宜生态区域（Studnicki et al. 2019）。此外，由于气候变化，我们需要定期为不同的生态区域寻找合适的高产品种。

株型改良与密植栽培的协同增效。在品种选育方面，紧凑型和理想型品种通过调节中上部叶片直立性，可有效改善密植条件下的冠层光分布（Shao et al. 2024）。这种形态优势不仅能延缓叶片衰老、维持高光合叶面积，还能显著提升

中国知网 https://www.cnki.net

干物质积累与籽粒灌浆速率，较传统平展型品种平均增产 15%-20%（Liu et al. 2017; Liu et al. 2019）。

分子育种技术的突破性进展。作物品种选育是提升粮食产量和保障粮食安全的核心手段。，选育高产、稳产品种一直是国内外育种研究的重点。近年来，随着基因组学、分子标记辅助育种及智能育种技术的发展，作物产量潜力不断被突破。目前小麦、水稻产量提升主要得益于半矮秆基因（如 Rht 基因）的广泛应用及广适性品种的选育（Zhou et al. 2007; Dixit et al. 2014）。随着基因编辑和全基因组选择技术的应用，研究者能够加速育种进程，例如 CRISPR-Cas9 系统在调控小麦穗粒数和千粒重方面表现出巨大潜力（Li et al. 2021）。同时，我国长期致力于高产抗逆小麦新品种选育，如“中麦 578”、“郑麦 136”等品种通过系统选育实现了高产、优质和抗病的多重性状改良（Gao et al. 2017）。特别是利用高通量表型组技术筛选高光合效率材料，进一步助推了小麦产量提升（Shakoor et al. 2017）。美国等国家通过杂交育种大幅度提高了玉米单产水平，以双单倍体技术（DH 技术）为代表的加速育种体系，显著缩短了育种周期（Chaikam et al. 2019）。此外，利用 GWAS（全基因组关联分析）挖掘产量相关位点，并结合基因编辑手段，实现了精准改良（Rasheed et al. 2023）。我国玉米育种注重高产与抗逆结合，如“郑单 958”、“先玉 335”等品种长期保持大面积推广。近年来，通过基因组选择（GS）和大数据智能算法，选育了多种耐密高产品种（Wang et al. 2025）。超级稻育种（如以中国袁隆平团队为代表）持续推进，通过穗型、粒型和生物量协调改良，产量持续增长（Yuan 2017）。我国目前水稻育种进入了“超高产群体”与“优质高效”并重的新阶段，分子模块化设计育种成为热点，如通过整合粒数、粒重、株型等基因模块，开发出一系列高产优质新品种（Zeng et al. 2017）。

增加种植密度是获得作物高产的重要途径（Tollenaar et al. 2006）。然而，增加种植密度也加剧了植物间对光、水，尤其是养分的竞争（Li et al. 2016）。在中国，平均种植密度从 20 世纪 50 年代的 3.0×10^4 plants ha^{-1} 增加到 21 世纪 10 年代的 6.0×10^4 plants ha^{-1}，同期玉米平均产量从 1.3 t ha^{-1} 增加到 5.9 t ha^{-1}（FAO 2022）。然而，增加种植密度会减少单株可利用的资源，从而导致单株产量严重下降（Gonzalez et al. 2018; He et al. 2022）。单株生长与群体产量之间存在冲突，密植在提高群体产量的同时，又能减轻单株影响。两者之间的平衡决定了农学最优种植密度。确定农学最优种植密度和提高单株产量是提高总产量的关键因素（Assefa et al. 2018）。Yan 等人的研究表明，中等种植密度可获得最高的玉米产量和平均年产量（Yan et al. 2016）。

氮肥管理方面，合理施用可显著促进作物生长，但过量投入不仅造成资源浪费，还会引发环境风险（Zhang et al. 2020）。中国玉米氮肥施用研究显示，当施

中国知网 https://www.cnki.net

氮量从 162 kg ha^{-1} 增至 274 kg ha^{-1} 时，产量仅从 7.05 t ha^{-1} 提升至 9.89 t ha^{-1}，而氮肥偏生产力（PFPN）和农学效率（AEN）分别下降至 54.5 kg kg^{-1} 和 11.1 kg kg^{-1}（Zhang et al. 2008; Yu and Shi 2015）。最新数据表明，在氮肥投入稳定条件下，通过栽培技术创新可将平均氮肥利用率提升至 10.1 kg kg^{-1}（闫湘 et al. 2017），验证了优化管理的重要性。

现代农艺技术的创新应用显著提升了资源利用效率。膜下滴灌技术整合了滴灌精准供水和地膜覆盖保墒的双重优势（Zhang et al. 2017; Zhang et al. 2019），在中国北方干旱区推广成效显著。该技术可实现水肥药协同调控，较传统沟灌节水 41.9%、节肥 18.4%，使棉花产量和水分利用效率分别提升 23.2%和 70.7%（Fan et al. 2012）。在西北玉米种植中，膜下滴灌使单产达到 20.4 t ha^{-1}，较传统方式增产 36.8%，经济效益提高 55.5%（万晓菊 et al. 2019）。研究还证实该技术可使棉花农学效率（AEN）提升 28%-35%（Luo et al. 2018），展现出显著的技术集成优势。

上述研究表明，通过品种改良、密度优化、精准施肥与现代灌溉技术的系统整合，可有效突破单因素调控的局限性，为实现作物高产高效提供综合解决方案。未来研究需重点关注各要素间的协同机制，建立区域特异性的优化栽培模式。

1.2.6 作物产量预测的方法

气候变化通过改变降水格局、增加蒸发蒸腾（ET）和水资源分配不均，显著影响农业水供应，进而威胁作物生产（Kumar 2016）。研究表明，全球干旱区面积从 1950 年代的 17%增至 2000 年代的 27%，直接导致玉米等作物减产（Thornton et al. 2014）。模型预测，到 2080 年全球作物灌溉需求可能增加 5%-20%（Döll 2002; Fischer et al. 2007），而高纬度地区径流增加与中纬度地区径流减少的格局差异加剧了区域水资源分配矛盾（Immerzeel et al. 2010; Hagemann et al. 2013）。干旱对作物产量的影响尤为显著,高温（>30 ℃）与干旱协同作用可使玉米单产下降 1.7%（Lobell et al. 2011），而捷克的小麦产量与干旱指数呈现显著负相关（Hlavinka et al. 2009）。

温度升高通过缩短生育期、加速叶片衰老和降低光合效率影响作物产量（Kumar 2016）。全球平均气温若上升 2-7 ℃，预计 2050 年作物减产超 10%（Tai et al. 2014）。小麦对高温尤为敏感，澳大利亚小麦单产在生长季温度波动±2 ℃时可下降 50%（Asseng et al. 2011），印度小麦灌浆期温度骤升导致减产 20%（Gupta et al. 2010）。夜间最低温（Tmin）升高速率高于日间最高温（Tmax），加剧呼吸消耗并缩短作物生育期（Haris et al. 2013）。然而，温度效应存在作物和区域差异，亚洲水稻因 Tmin 与 Tmax 的抵消作用，对历史变暖响应较弱（Welch et al. 2010），而高纬度地区水稻甚至可能受益于变暖（Lobell et al. 2011）。玉米对温度变化高

中国知网 https://www.cnki.net

度敏感，模拟显示每升温 1 ℃单产下降 0.5 Mg ha^{-1}（Bassu et al. 2014），非洲南部玉米产量或于 2030 年前减少 30%（Lobell and Burke 2008）。研究强调，CO_2施肥效应可部分抵消升温负面影响，但其实际效果仍存争议（Long et al. 2006; Tubiello et al. 2007）。

大气 CO_2浓度升高对 C3 和 C4 作物产生差异化影响。C3 作物（如小麦、水稻）通过增强光合作用（RuBisCO 酶活性提升）和降低气孔导度（gs）提高水分利用效率（Long et al. 2006）。理论上，CO_2浓度升至 550 ppm 和 700 ppm 可分别使 C3 作物增产 29%和 39% （Leakey et al. 2009），但实际 FACE 试验显示增幅仅为 10%-12%（Ainsworth and Long 2005）。例如，水稻 FACE 试验增产幅度仅为密闭试验的一半（Ainsworth 2008），小麦实际增产贡献率仅 0.3%（Fischer and Edmeades 2010）。C4 作物（如玉米、高粱）因光合机制不同，对 CO_2响应较弱，仅在干旱条件下通过水分效率改善小幅增产（Long et al. 2006）。此外，CO_2升高可能降低 C3 作物籽粒锌、铁含量和蛋白质浓度（Myers et al. 2014），威胁粮食营养安全。模型预测，尽管 CO_2施肥效应可部分补偿气候变化损失，但热带地区作物减产趋势难以逆转（Parry et al. 2004）。

目前研究侧重区域适应性技术，如通过调整播期与灌溉管理缓解小麦热害（Gupta et al. 2010），中国西北通过膜下滴灌提升资源效率（万晓菊 et al. 2019），同时还聚焦于多模型耦合与机制解析，如整合作物模型与生理生化过程以降低预测不确定性（Rötter et al. 2011）。未来需加强跨学科模型开发，融合品种选育与环境互作，并提升高分辨率气候数据的应用（Yin 2013），以制定区域特异性适应策略。

1.3 研究中存在的问题

目前关于潜在产量、产量差、优化栽培措施和应对气候变化方面的研究有很多，且都取得了很好的成果，但仍有一些问题没有被解决：

（1）产量差的空间分布。尽管有大量关于潜在产量和产量差的研究，但受限于作物模型的尺度是单个站点，区域尺度的研究多通过空间插值实现。这一方法没有考虑到环境因素（气象，土壤等）、作物品种的空间差异，且结果严重依赖站点的选择，导致结果误差大，不能代表实际情况。另外空间插值将变化平均反映在整个区域，没有考虑实际的土地利用情况，对没有作物种植的区域并未剔除。

（2）产量限制因子的作用。目前产量差的研究多以量化产量差的时空变化为主，缺乏对造成产量差原因——产量限制因子的研究。而涉及到产量产量限制因子的相关研究大都通过田间梯度试验解释单一因子的影响，缺乏对多因子内部

中国知网 https://www.cnki.net

及因子与环境交互作用的研究，也较少涉及到量化不同限制因素对产量的作用。

（3）综合栽培管理措施。关于优化栽培管理措施，目前的研究仍以单因子梯度试验为主，且大多聚焦与氮肥管理和水分管理。少数提供包括施肥、灌溉等完整方案的研究，其最优结果也仅针对试验地块附近区域和试验设置的管理组合，导致其结果并不一定是真正意义上的最优组合，也不适合推广到其他区域。

（4）气候变化的影响。关于气候变化影响作物产量的研究，基本只考虑了气象因素变化对产量的影响，忽略了管理因素与气象因素的耦合作用，同样的管理因素在气候变化时对作物的影响不同，如肥料的有效性。

1.4 研究内容

基于研究目的和目前研究中存在的问题，本研究主要包括以下 5 方面的内容：

（1）中国粮食主产区作物潜在产量

基于 DSSAT 模型模拟玉米、小麦和水稻的潜在产量，揭示中国粮食主产区作物的增产潜力。由于不同区域作物种植品种不同，本研究筛选了玉米、小麦和水稻分别在东北平原、华北平原和长江中下游平原种植最多的品种作为代表性品种，并利用站点试验数据对筛选品种的遗传参数进行校正。通过 DSSAT 模型和 GYGA 升尺度方法分别得到站点和区域尺度的潜在产量，并分析潜在产量的空间分布规律。

（2）栽培管理措施对产量构成和产量差的影响

基于 2016-2019 年 80 个田间试验站点的观测数据分析不同区域三种作物高产措施、高效措施、农户管理实践和土壤基础肥力的产量，解析不同管理水平下产量构成因素的变化情况，结合上一部分的潜在产量和 GYGA 升尺度方法，量化不同栽培管理措施的产量差及其空间分布。

（3）主粮作物产量限制因素解析

基于田间试验数据，构建不同产区玉米、小麦和水稻产量与产量限制因子的随机森林模型，阐明产量形成过程中不同限制因子的重要性，探究主要气象因子对产量限制的发生时间及其随作物类型、空间区域变化特点。本研究综合考虑了气象、管理和土壤因素共计 17 个变量作为随机森林输入的产量限制因子。考虑到种植制度和生育阶段的差异，本研究将玉米分为春玉米和夏玉米，水稻分为单季稻和双季稻，气象因素按生育阶段分为营养生长期、开花期和灌浆期。

（4）多目标优化的栽培管理措施制定

基于田间试验数据、随机森林和多目标优化算法，根据上一部分作物产量的主要限制因子，利用 GYGA 升尺度方法，提供区域尺度的优化的栽培管理措施，

中国知网 https://www.cnki.net

并评估优化栽培管理措施在资源利用效率、环境影响、作物产量和经济收益方面的优势。

（5）气候变化对主粮作物产量的影响

基于 CMIP6 的 27 个全球气候模型的 2020-2050 年的气象数据，预测在 SSP126、SSP245 和 SSP585 情景下土壤基础肥力、农民管理实践、高效措施、高产措施和上一部分的优化栽培管理措施下玉米、小麦和水稻的产量变化趋势和产量空间分布情况。

1.5 技术路线

本研究基于中国东北平原、华北平原和长江中下游平原三大粮食主产区中小麦、玉米和水稻不同产量水平的田间试验，确定不同管理水平下产量构成要素的变化。结合作物模型、气象数据、土壤数据、试验站管理数据和 GYGA 升尺度方法，分析区域尺度下粮食主产区小麦、玉米和水稻的产量和产量差的空间分布规律。借助随机森林揭示不同产区三种作物产量限制的主要因子及气候敏感期。在此基础上，利用多目标优化算法对产量、资源利用效率、氮流失量和经济指标评估，获得最优的栽培管理措施以缩小产量差。最后，结合未来气候情景，评估基础土壤肥力、农民管理实践、高效措施、高产措施和优化栽培管理措施的的产量变化。

本研究的技术路线具体如下：

中国知网 https://www.cnki.net

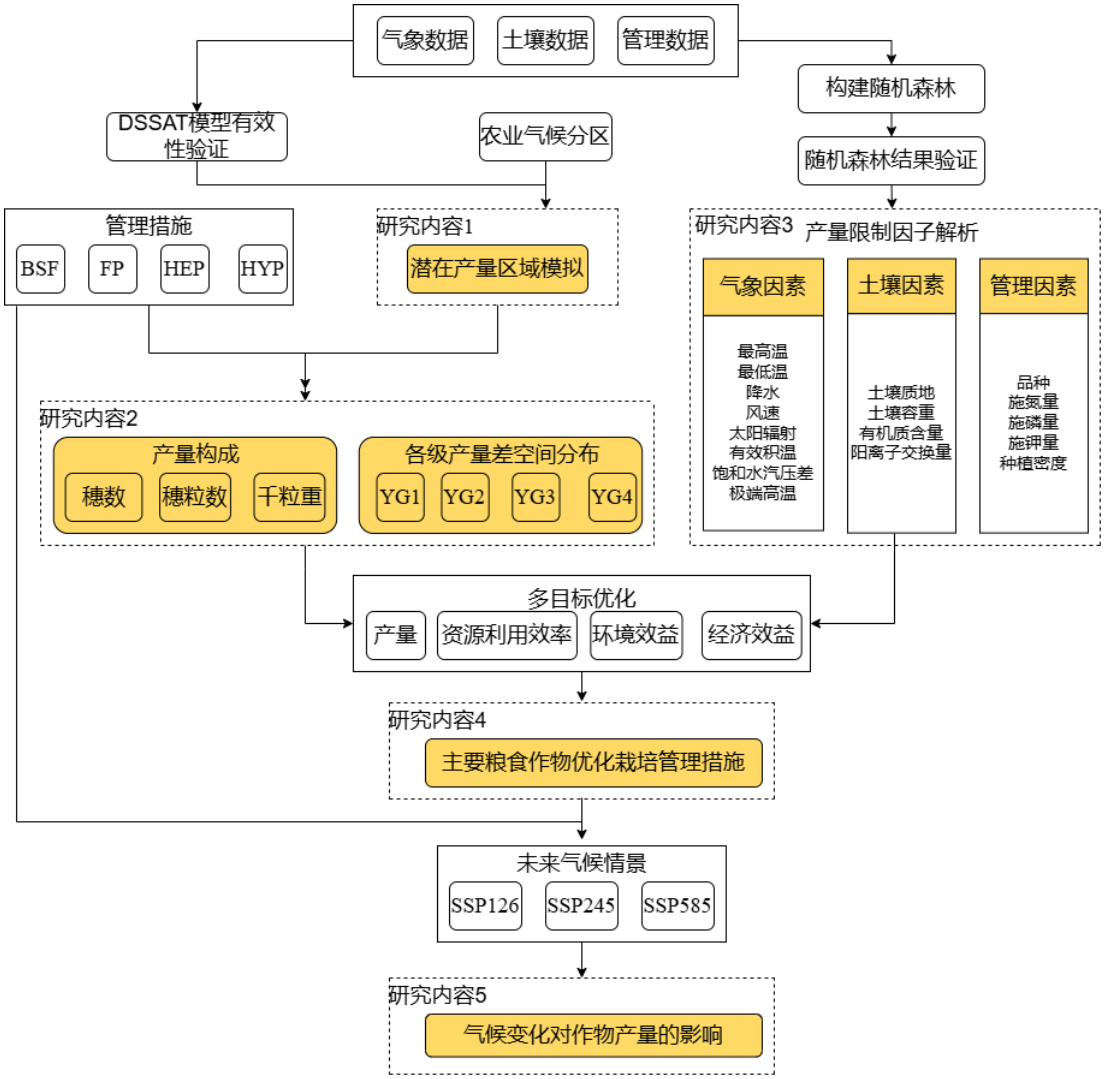


图 1-2 技术路线图（黄色部分代表研究内容）

Figure 1-2 Technology Roadmap （The yellow part represents the research content）

中国知网 https://www.cnki.net

第二章 材料与方法

2.1 研究区概况

根据气候条件和地理位置将研究区划分为 3 个子区域：东北平原（NEC）、华北平原（NCP）和长江中下游平原（SC）（图 2-1）。

东北平原以东北地区辽宁省、吉林省、黑龙江省和内蒙古东四盟（呼伦贝尔、兴安盟、通辽市、赤峰市）为研究对象。该区域地理位置为北纬 38~54°，东经 115~135°，是中国纬度最高的地区。东北地区地势南北两侧与东西两侧高、中间低，自北向南主要可划分为大兴安岭、小兴安岭、长白山、三江平原、松嫩平原、辽河平原、辽东丘陵等山脉、平原和丘陵三类地貌类型。该地属于温带湿润半湿润大陆性季风气候，年平均温度-3.8~11.3 ℃，由北向南温度逐渐增高。光照时间由南向北、自西向东逐渐减少。全年降水量 368~1064mm，呈东高西低分布，且集中在夏秋季。全年无霜期 140~170 天。区域总面积约 124.1 万平方千米，占全国国土面积的 15.3%，粮食作物以春玉米和单季稻为主。

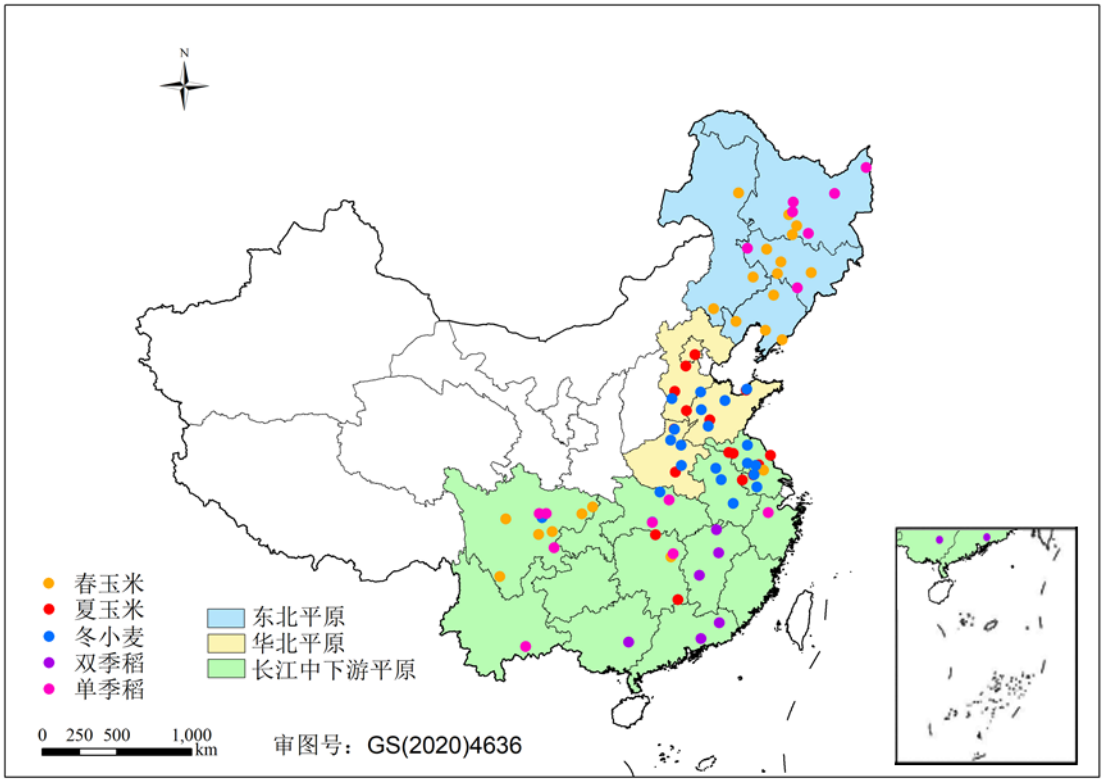


图 2-1 作物田间试验点空间分布和主要粮食产区

Figure 2-1 Spatial distribution of crop field test sites and major grain production areas

中国知网 https://www.cnki.net

华北平原以河北省、山东省、河南省和北京市为研究对象。该区域位于北纬32~40°，东经 114~121°，地势低平，海拔多在 50 米以下，是典型的冲积平原。华北地区属于暖温带季风气候，夏季高温多雨，冬季寒冷干燥，热量资源和光照资源充足，年平均气温在 10~15 ℃之间，大于 0 ℃积温在 4200~5500 ℃ d 之间，年降水量为 500~950 mm，主要集中在夏季，由北向南逐渐增多。区域总面积 30 万平方公里，占中国陆地总面积的 3.1%，粮食作物以夏玉米和冬小麦为主。

长江中下游平原以江苏省、浙江省、湖南省、湖北省、安徽省、江西省为研究对象，此外四川省和广东省分别作为重要的玉米和水稻种植区，也将划入这一区域。该区域位于北纬 27~34°，东经 111~123°。地势低平，河渠纵横，湖泊星步，中部和沿海地区为泛滥平原和滨海平原。气候主要为亚热带季风性气候，年均温 14~18 ℃，1 月均温 0~5.5 ℃，7 月均温 27~28 ℃，无霜期 210~270 ℃天。年降水量 1000～1500 毫米，季节分配较均，每年 6 至 7 月受夏季风和北方冷空气的影响，形成“梅雨”，出现长时间的连阴雨天气。梅雨季节过后受西太平洋副热带高压影响，台风活动较少，会形成“伏旱”。粮食作物以水稻为主，部分地区也有玉米和小麦种植。

根据作物种植分布情况共布设了 80 个田间试验战点，其中东北平原有 14 个春玉米站点，7 个单季稻站点；华北平原有 10 个冬小麦站点，8 个夏玉米站点，长江中下游平原有 8 个春玉米站点，8 个夏玉米站点、11 个冬小麦站点，8 个单季稻站点和 6 个双季稻站点。

2.2 试验设计

连续进行四年站点试验（2016-2019 年），每个站点设置 4 个处理：（1）土壤基础肥力（BSF），反映当地的最低产量，试验田没有灌溉和肥料投入，仅依靠土壤和气候条件获得的作物产量水平；（2）农民管理实践（FP），反映当地农民的生产情况，试验田采用与当地农民相同的田间管理措施，具体的品种选择、种植密度、施肥量等根据当地农户调查等数据确定；（3）高效措施（HEP），通过农业技术的综合和集成创新同时实现作物的高产与资源的高效利用，具体遵循《主要作物高产高效技术规程》或当地农业专家的建议进行农田管理；（4）高产措施（HYP），反映试验站最大产量，管理措施参照当地高产记录的生产模式，不计投入成本，保证充足的水肥供应。每个处理设置 3 个重置，采取随机区组设计。

中国知网 https://www.cnki.net

2.3 测定项目与方法

2.3.1 生育期

根据试验站点的气象条件确定适宜的播种日期并记录，位于同一个试验站的四个处理同时播种。另外记录作物的出苗期、开花期和成熟期，记录标准为小区中超过一半的作物出苗、开花和成熟。

2.3.2 产量构成因素和籽粒产量

成熟期玉米每个小区取中间5 m×4行记录有效穗数，从中选取20个均匀穗，记录穗粒数，脱粒并烘干至恒重后测定籽粒重，换算成含水率14%的千粒重和籽粒产量。

小麦取样点为1 m×4 行，穗数、穗粒数、千粒重和籽粒产量的测定方法与玉米一致，标准含水率为13%。

水稻随机选择 3 个长势一致的正常的普查点，每个点普查连续 20 穴，3 个点平均茎蘖数作为有效穗数，按平均分蘖数选取 6 穴，测定总穗数后脱粒，通过称重法计算总粒数，得到平均穗粒数，籽粒烘干后换算成标准含水量的千粒重和籽粒产量（籼稻含水量13.5%，粳稻含水量14.5%）。

2.4 数据来源

2.4.1 气象数据

本研究所需的站点气象数据由中国气象科学数据共享服务网（http://data.cma.cn/）提供，取距离田间试验站最近的气象站点观测数据作为试验站的气象数据。指标包括日尺度的最高气温（TMAX，℃）、最低气温（TMIN，℃）、降水量（PRCP，mm）、风速（WS，m s^{-1}）和日照时数（Q，h）。此外，我们选取了其他研究中已证明对产量有重要影响的气候指数，包括太阳辐射（Rs，MJ m^{-2} day^{-1}）、生长积温（GDD，℃ d）、水汽压差（VPD，hPa）和极端高温（EDD，℃ d）（Allen et al., 1998 , Hoffman et al., 2020 , Jin et al., 2020）。这些指数的计算方法如下：

$$\mathrm{Rs} = \left[a_s + b_s\left(\frac{n}{N}\right)\right] \times R_a \qquad (2\text{-}1)$$

$$\mathrm{Ra} = \frac{24 \times 60}{\pi} \times 0.082 \times d_r \times \left(W_s \times \sin\varphi \cos\delta + \cos\varphi \sin\delta\right) \qquad (2\text{-}2)$$

$$d_r = 1 + 0.033 \times \cos\frac{2\pi \times J}{365} \qquad (2\text{-}3)$$

中国知网 https://www.cnki.net

$$W_s = \cos^{-1}（-\tan\varphi\tan\delta）\quad（2\text{-}4）$$

$$\varphi = 0.494 \times \sin\frac{2\pi \times J}{365}\quad（2\text{-}5）$$

$$N = W_s \times 24/\pi\quad（2\text{-}6）$$

$$\mathrm{GDD} = \sum_1^m（\frac{TMAX + TMIN}{2}）- T_{base}\quad（2\text{-}7）$$

$$\mathrm{VPD} = 0.6108 \times e^{\frac{17.27T_a}{T_a+237.3}} \times（1 - RH）\quad（2\text{-}8）$$

$$\mathrm{EDD} = \begin{cases} 0, & \mathrm{TMIN} < 30 \\ \dfrac{T_a - 30}{TMAX - TMIN}, & \mathrm{TMIN} \geq 30 \end{cases}\quad（2\text{-}9）$$

式中，R_a 为地外太阳辐射（MJ m^{-2} day^{-1}）；n 为实际日照时数（h）；N 为最大可能日照时数（h）； a_s 为经验常数 0.25；b_s 为经验常数 0.50；d_r 为日地距离因子；J 为日序；W_s 为日落时角（rad）；φ为纬度（rad）；δ为太阳赤纬（rad）；m 为作物发育天数；TMAX、TMIN 分别为当日最高（℃）、最低气温（℃）；Tbase 为作物发育基准气温，在本研究中取 10 ℃；Ta 为实际气温（℃）；RH 为相对湿度（%）。

2.4.2 未来气候数据

本研究采用了第六次耦合模式比较计划 CMIP6（https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip6/）中的 3 种未来气候情景：（1）SSP126，全球走向可持续发展，注重绿色技术、国际合作与社会公平，人口增长放缓，能源快速转型为低碳系统，资源利用效率高，代表最佳缓解路径；（2）SSP245，延续目前的趋势，中等发展路径，区域发展不均衡，技术进步和减排政策逐步推进，但力度不足，代表现实可能的折中路径；（3）SSP585，高能耗、高排放的化石燃料驱动发展，全球化石能源依赖加剧，区域竞争激烈，人口与经济快速增长，代表不采取行动面临的最严峻的气候危机。未来气象数据利用 NWAI-WG 统计降尺度方法对 27 个气候模型的结果取平均值获得（详情见表 2-1），包括三种气候情景下试验站点 2020 年至 2050 年逐月的最高温、最低温、降水和太阳辐射（Liu et al., 2017b）。

中国知网 https://www.cnki.net

表 2-1 本研究使用的 27 个气候模型的信息

Table 2-1 Information on the 27 climate models used in this study

名称	缩写	所属国家	分辨率
ACCESS–CM2	ACC1	Australia	1.8° × 1.2°
ACCESS–ESM1–5	ACC2	Australia	1.8° × 1.2°
BCC–CSM2–MR	BCCC	China	1.1° × 1.1°
CanESM5	Can1	Canada	2.8° × 2.8°
CanESM5–CanOE	Can2	Canada	2.8° × 2.8°
CIESM	CIES	China	0.9° × 1.3°
CMCC–CM2–SR5	CMCS	Italy	0.9° × 1.3°
CNRM–CM6–1	CNR2	France	1.4° × 1.4°
CNRM–CM6–1–HR	CNR3	France	1.4° × 1.4°
CNRM–ESM2–1	CNR1	France	1.4° × 1.4°
EC–Earth3	ECE1	Europe	0.7° × 0.7°
EC–Earth3–Veg	ECE2	Europe	0.7° × 0.7°
FGOALS–g3	FGOA	China	5.2° × 2.0°
GFDL–CM4	GFD1	USA	1.0° × 1.3°
GFDL–ESM4	GFD2	USA	1.0° × 1.3°
GISS–E2–1–G	GISS	USA	2.0° × 2.5°
HadGEM3–GC31–LL	HadG	UK	1.3° × 1.9°
INM–CM4–8	INM1	Rusia	1.5° × 2.0°
INM–CM5–0	INM2	Rusia	1.5° × 2.0°
IPSL–CM6A–LR	IPSL	France	1.3° × 2.5°
MIROC6	MIR1	Japan	1.4° × 1.4°
MIROC–ES2L	MIR2	Japan	2.7° × 2.8°
MPI–ESM1–2–HR	MPI1	Germany	0.9° × 0.9°
MPI–ESM1–2–LR	MPI2	Germany	1.9° × 1.9°
MRI–ESM2–0	MTIE	Japan	1.1° × 1.1°
NESM3	NESM	China	1.9° × 1.9°
UKESM1–0–LL	UKES	UK	1.3° × 1.9°

2.4.3 土壤数据

本研究的所需的土壤数据来源于世界土壤数据库 HWSD v2.0（Harmonized World Soil Database，https://gaez.fao.org/pages/hwsd），该数据库由国际应用系统分析研究所和粮农组织于 2008 年建立，并与国际土壤参考和信息中心、欧洲土壤局网络和中国科学院土壤科学研究所合作，数据分辨率为 1 公里。提供了 DSSAT 模型需要的土壤参数，包括土层深度、有机质含量、萎蔫系数、田间持水量、饱和含水量、土壤容重、土壤质地等。关于土壤对作物产量的限制，本研究主要采用了四个指标：土壤容重（BD）、有机碳含量（OC）、土壤阳离子交换容量（CEC）和土壤全氮（TN）。

中国知网 https://www.cnki.net

2.4.4 作物数据

本研究所需的作物数据来源于粮食作物产量与效率层次差异及其丰产增效机理项目建立的数据库。该数据库包含各站点观测的生育期、种植密度、施肥量、籽粒产量和产量构成因素（穗数、穗粒数和千粒重）等数据。

2.5 GYGA 升尺度方法

本研究在进行区域尺度模拟时引入了全球产量差距地图集提供的农业气候区（GYGA-CZ），其根据生育期积温，年干旱指数（AI）和温度季节性划分，具体标准如表 2-2。

表 2-2 GYGA-CZ 的变量分类

Table 2-2 Variable classification of GYGA-CZ

生育期积温（°Cd）	GYGA-CZ 值	年干旱指数	GYGA-CZ 值	温度的季节性	GYGA-CZ 值
0 - 2670	1000	0 - 2695	000	0 - 3832	01
2671 - 3169	2000	2696 - 3893	100	3833 - 8355	02
3170 - 3791	3000	3894 - 4791	200	> 8356	03
3792 - 4829	4000	4792 - 5689	300		
4830 - 5949	5000	5690 - 6588	400		
5950 - 7111	6000	6589 - 7785	500		
7112 - 8564	7000	7786 - 8685	600		
8565 - 9311	8000	8686 - 10181	700		
9312 - 9850	9000	10182 - 12876	800		
> 9851	10000	> 12877	900		

其中，生育期积温根据公式 2-1 计算，温度的季节性由 12 个月平均温度的标准差计算，年干旱指数计算公式为：

$$AI = MAP/MAE \quad (2\text{-}10)$$

式中，MAP 是年均降水量（mm），MAE 是年均潜在蒸散量（mm $year^{-1}$）。

最终的农业气候区编号为生育期积温、年干旱指数和季节性温度的 GYGA-CZ 值之和。农业气候区编号相同说明其作物生长的气候环境一致，可以认为同一农业气候区作物的栽培管理措施、潜在产量和作物产量受到气候因素影响的情况接近。因此可以通过选取能够代表农业气候区的气象站反映整个农业气候区的情况，实现由点（气象站）到面（气候区甚至国家）的评估。本研究代表性气象

中国知网 https://www.cnki.net

站点选择按照以下方法：（1）仅保留所研究作物种植面积超过 1%的气候区，以提高结果的相关性；（2）通过与农业气候区的空间叠加确定各气象站的气候区，删除气候区外的气象站；（3）在所有气象站周围增加半径为 100 km 的缓冲区，删除缓冲区中没有作物种植面积或与其他有较大作物种植面积的缓冲区重叠的气象站。

2.6 潜在产量模拟

本研究的潜在产量（Y_p）采用 Rabbinge 的定义，即在试验站栽培管理措施下，采用适宜品种，不受水肥病虫害等胁迫，作物生长良好条件下的光温生产潜力。玉米、水稻和小麦的潜在产量通过农业技术转移决策支持系统（DSSAT v4.7）模拟。DSSAT 由美国农业部和国际农业研究中心联合组织开发，被广泛应用于模拟作物生长、产量形成、管理和环境的交互作用等。软件由数据库、作物模型系统、辅助软件、应用系统和用户界面五部分组成，具体结构如图 2-2：

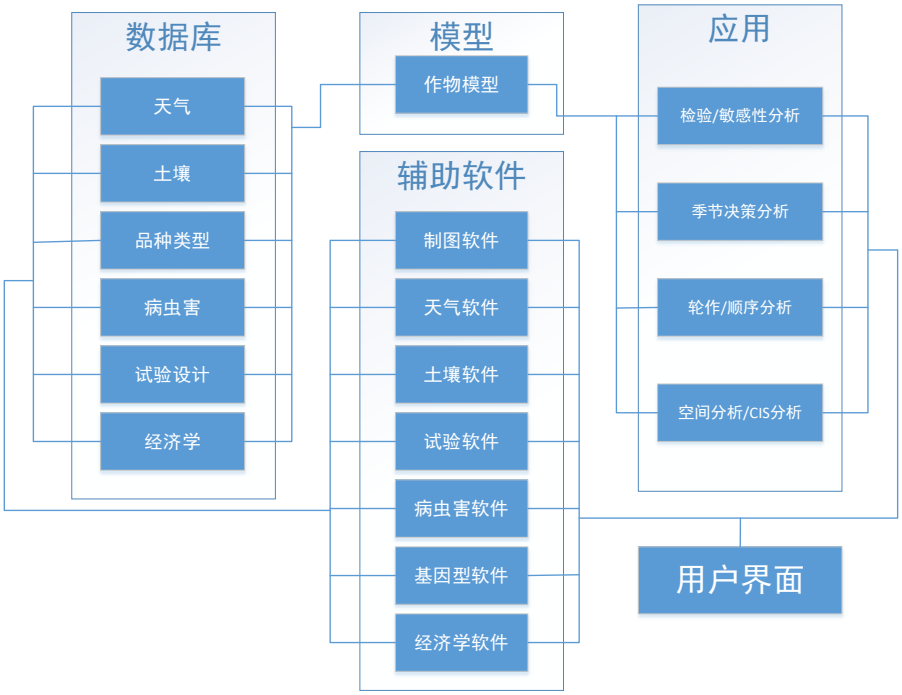


图 2-2 DSSAT 模型结构图

Figure 2-2 DSSAT model structure diagram

其中，作物模型系统是 DSSAT 的核心，用于模拟规定管理条件下作物的生长发育情况和土壤养分（土壤水、氮含量等）的动态变化，模拟步长为一天。该作物模型系统包括了 CROPGRO 系列模型、CERES 系列模型、CANEGRO 模型、CROPSIM-cassava 模型和 OILCROP 模型等，能够模拟 42 种作物类型（Hoogenboom et al., 2021）。本研究使用了其中的 CERES-Maize、CERES-Wheat

中国知网 https://www.cnki.net

和 CERES-Rice 分别模拟玉米、小麦和水稻的潜在产量。

2.6.1 模型参数

DSSAT 模型中的大部分参数是通用参数，需要输入或调整的参数主要包括气象参数、土壤参数、田间管理参数和遗传参数。

气象参数需要为每个站点建立文件（.WTH），数据包括日尺度的最高温、最低温、降水量、风速、太阳辐射和日期等，数据来源和计算见 2.4.1。土壤参数需要为每个站点建立文件（.SOL），数据包括各土层砂粒和粘粒的比例、土壤有机质、土壤容重、土壤全氮和土壤 PH 等，数据来源见 2.4.3。田间管理参数主要包括播种日期、播种密度、灌溉量、灌溉时间、施肥量、施肥时间和方式、耕作方式等，数据来源于田间试验，每个站点建立（.X）文件。

表 2-3 CERES-Maize，CERES-Wheat 和 CERES-Rice 的遗传参数

Table 2-3 Genetic parameters of CERES-Maize，CERES-Wheat and CERES-Rice

作物	遗传参数	含义	备注
玉米	P1	出苗到幼穗分化结束的热时间	营养生长期越长，值越大
	P2	光周期敏感性系数	长日照延迟吐丝越久，值越大
	P5	从吐丝到成熟的热时间	灌浆期越长千粒重越大，值越大
	G2	单株潜在籽粒数	穗粒数越多，值越大
	G3	籽粒灌浆速率	籽粒增重越快，值越大
	PHINT	出叶间隔积温	冠层形成越晚，生成叶片间隔越久，值越大
小麦	P1V	春化天数	春化所需低温天数越长，值越大
	P1D	光周期敏感性系数	长日照延迟开花越久，值越大
	P5	从开花到成熟的热时间	灌浆期越长千粒重越大，值越大
	G1	开花期单位冠层重量的籽粒数	穗粒数越多，值越大
	G2	最佳条件下的标准籽粒重	千粒重越大，值越大
	G3	分蘖系数	分蘖数越多，值越大
	PHINT	出叶间隔积温	生成叶片间隔越久，值越大
水稻	P1	出苗到植株开始分蘖的热时间	营养生长期越长，值越大
	P2O	临界光周期	水稻最大发育速率的光周期
	P2R	生殖生长期光周期敏感性系数	长日照延迟开花越久，值越大
	P5	开花到成熟所需的累积热时间	灌浆期越长千粒重越大，值越大
	G1	开花期每单位主杆干重的穗数	穗数越多，值越大
	G2	理想生长条件下的单粒重量	千粒重越大，值越大
	G3	分蘖系数	分蘖数越多，值越大
	G4	耐温系数	越适应高温环境，值越大

遗传参数用于描述作物的生理特性和对环境因素的响应，体现出作物品种的差异，是模型参数校正的重点。模型中不同作物的遗传参数存在差异（表 2-3）。本研究根据试验站点数据确定了三种作物在东北平原、华北平原和长江中下游平

中国知网 https://www.cnki.net

原种植最广泛的品种作为区域代表性品种，使用 DSSAT 模型内置的 GLUE（Generalized Likelihood Uncertainty Estimation）程序校准并验证了这些品种的遗传参数（Ma et al., 2020），并用它来替换样本量不足，仅在 1 到 2 个站点种植的品种。其中，使用 2016-2018 年代表性品种的数据用来校正遗传参数，使用 2019 年的数据进行验证。

2.6.2 模型表现

本研究使用决定系数（R^2），均方根误差（Root Mean Square Error，RMSE）和归一化均方根误差（the normalized root mean square error, NRMSE）作为模型模拟准确性的评价指标，计算方法如下：

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}（O_i - P_i）^2}{\sum_{i=1}^{n}（O_i - \bar{O}）^2} \quad （2\text{-}11）$$

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{n}} \quad （2\text{-}12）$$

$$\mathrm{NRMSE} = \mathrm{RMSE}/\bar{O} \times 100\% \quad （2\text{-}13）$$

式中，P_i 和 O_i 分别是模型预测值和实际观测值；$\bar{O}$是观测值的平均值；n 是样本数量。

R^2 反映模拟值与观测值之间的线性相关程度，量化模型对观测数据变异的解释能力，值越接近 1 表示拟合效果越好。RMSE 用来直观反映模拟值与观测值的平均绝对偏差，值越小表示模型模拟值越接近实测值。NRMSE 用于衡量模拟值与观测值之间的误差大小占平均值的比例，值越小表示模型误差越小，低于 20%时可以认为模型误差在可接受范围内，低于 10%时认为模型能较好模拟出实际情况。

2.7 产量差计算

本研究共涉及 5 个产量水平，包括田间试验设置的土壤基础肥力、农民管理实践、高效措施、高产措施和由 DSSAT 模型模拟的潜在产量。各产量水平和影响因素见表 2-4。

比较同一站点不同产量水平的产量差能够体现管理措施对作物产量的影响和增产空间，计算公式为：

$$\mathrm{YG1} = Y_P - Y_{HYP} \quad （2\text{-}14）$$

$$YG2 = Y_{HYP} - Y_{HEP} \quad （2\text{-}15）$$

中国知网 https://www.cnki.net

$$YG3 = Y_{HEP} - Y_{FP} \quad (2\text{-}16)$$

$$YG4 = Y_{FP} - Y_{SBF} \quad (2\text{-}17)$$

式中，YG1-YG4 分别表示对应管理水平造成的产量差（Mg ha^{-1}）。

表 2-4 各级产量水平及其影响因素

Table 2-6 Yield levels at various levels and their influencing factors

产量水平	定义	影响因素
潜在产量（Y_P）	试验站栽培管理措施下，不受水肥胁迫，作物生长良好条件下可能达到的产量	当地的光温条件
高产措施产量（Y_{HYP}）	试验站高产措施获得的产量	实际生产中不可控的环境因素
高效措施产量（Y_{HEP}）	试验站高效措施获得的产量	肥料的利用效率
农民管理实践产量（Y_{FP}）	农民管理实践获得的产量	农民风险规避策略，水肥投入不足
土壤基础肥力产量（Y_{SBF}）	试验站没有灌溉和肥料投入获得的产量	田间管理

此外，本研究使用了响应率（lnR）作为作物产量对管理措施响应的指标，距平值（ΔMean）作为观测产量对于平均土壤基础肥力产量的偏差的指标，探究不同区域不同管理措施对产量的影响。其计算公式为：

$$\ln（R）= \ln（\frac{Y_{i,j}}{Y_{i,BSF}}）\quad (2\text{-}18)$$

$$\Delta\text{Mean} = Y_{i,BSF} - \overline{Y_{BSF}} \quad (2\text{-}19)$$

式中，i 为试验站点；j 为栽培管理措施，包括农民管理实践、高效措施和高产措施三种；Y 为作物产量（Mg ha^{-1}）；$Y_{i,BSF}$ 为站点 i 的土壤基础肥力的产量；$\overline{Y_{BSF}}$ 为土壤基础肥力的平均产量（Mg ha^{-1}）。

2.8 随机森林

随机森林（RF）是一种用于分类和回归问题的集成学习算法（Breiman, 2001）。它通过集成大量决策树来有效避免过拟合风险，多样化的决策树群的构建主要依赖选取随机样本和选取随机特征。随机抽样方法是从原始训练集中有放回的随机抽取形成多个新的训练集，每个训练集用来训练一棵决策树，其大小与原训练集相同。随机特征选取是在每棵决策树的分裂节点，随机选取部分特征作为候选，而非使用全部特征寻求最佳结果。所有的决策树完全生长，直到达到最大深度或叶节点纯度达到阈值，取所有树的预测平均值作为回归的最终结果。另外，随机

中国知网 https://www.cnki.net

森林能够给出特征的重要性值。回归问题的特征重要性是根据均方误差的将减少量计算的，决策树节点分裂时的特征对均方误差改善程度越高，其重要性值越大，所有树的平均结果归一化后得到最终的特征重要性。先前的研究表明，RF 模型在农业领域的性能优于其他机器学习方法（Barbosa dos Santos et al., 2022 , PS, 2019 , Yuan et al., 2017）。

在本研究中，我们使用 Python 中的“Sklearn”包（版本 3.7.11）实现 RF 模型。我们分别以气候、管理和土壤因子作为随机森林的输入，以作物产量作为输出构建了模型。对于每个 RF 模型，随机选择 70%的数据集进行训练，30%的数据集进行测试。为减少随机误差，将随机森林运行 100 次的平均值作为最终结果。此外，我们使用 Python 中的“GridSearchCV”包优化了随机森林（RF）的三个参数：随机森林中生长的树的数量（n_estimators）、每个节点上随机选择的最大特征数（max_features）以及单棵决策树的最大深度（max_depth）。我们进一步使用偏相关图 （PDP） 来了解这些变量如何影响产量 （Greenwell 2017）。随机森林的模型表现通过 R^2 和 NRMSE 两个指标评估，计算公式见公式 2-11 和公式 2-13。

2.9 经济效益和环境效益平均

经济效益方面从农民的收入和支出两个方面考虑，收入主要来源于出售农产品，支出方面本研究主要考虑了购买肥料的支出，计算公式如下：

$$ECB = Y \times Py - FI \quad (2\text{-}20)$$

式中，ECB 代表经济效益（¥ ha^{-1}），Y 代表作物产量（kg ha^{-1}），Py 代表粮食作物价格（¥ kg^{-1}），FI 代表化肥投入成本（¥ ha^{-1}，包括氮肥、磷肥和钾肥），化肥和农产品价格来自国家统计局（https://www.stats.gov.cn）。

表 2-5 化肥和农产品价格

Table 2-5 Prices of fertilizers and agricultural products

项目	单位	价格
氮肥	¥ kg^{-1}	4.40
磷肥（P_2O_5)	¥ kg^{-1}	5.47
钾肥（K_2O）	¥ kg^{-1}	5.25
玉米	¥ kg^{-1}	2.27
小麦	¥ kg^{-1}	2.27
水稻	¥ kg^{-1}	2.70

环境效益方面，氮肥用量的增加会导致多余氮素通过氮循环进入环境，造成污染。主要途径有：（1）氨气和氮氧化物挥发进入大气造成气态氮污染，其沉降

中国知网 https://www.cnki.net

到陆地和海洋中，影响森林生态系统的功能，并进一步加剧水体的富营养化，破坏水生环境（Vitousek et al., 1997）；（2）硝酸盐通过反硝化作用产生强效温室气体氧化亚氮，进入大气后进一步加剧了全球变暖效应（Vitousek et al., 2009）；（3）硝态氮通过淋溶作用随雨水或灌溉水进入地下水系统，并导致土壤中钙和钾等其他养分的流失（Abdalla et al., 2019）；（4）氮氧化物随地表径流向水体迁移影响饮用水质量，导致水体的富营养化（Zhao et al., 2012）。

本研究评估了不同管理措施通过氨（NH_3）挥发、氧化亚氮（N_2O）、淋溶（NO_3^-）和径流（runoff）排放造成的氮损失。采用了以下经验模型来预测氮损失（Zhang et al., 2016）：

$$N\ loss = NH_3 + N_2O + NO_3^- + runoff \quad (2\text{-}21)$$

$$NH_3 = a \times N_{rate} + b \quad (2\text{-}22)$$

$$N_2O = b \times \exp（a \times N_{rate}） \quad (2\text{-}23)$$

$$NO_3^- = b \times \exp（a \times N_{rate}） \quad (2\text{-}24)$$

式中，N_{rate} 为氮肥施用量（kg ha^{-1}），a 和 b 为经验常数，具体数值见表 2-6。

氮利用效率是衡量作物对肥料中氮素吸收和利用效率的关键指标，一定程度上也能反映氮肥造成的环境影响。氮利用效率低说明由大量氮素留存在土壤中，未被植物吸收利用，这些残留的氮素将通过淋溶、挥发等途径污染环境（张福锁 et al., 2008）。常用的氮利用效率有氮农学效率（NAE），氮吸收效率（NRE）和氮肥偏生产力（NPFP）（RONG et al., 2021）。NAE 和 NRE 要求设有没有氮素输入的地块作为对照，并通过长期试验消除土壤中氮肥残留的影响。尽管本研究设置了土壤基础肥力，但 3 年的试验时间不足以完全消除之前施氮的影响，为保障结果的准确，采用 NPFP 反映氮利用效率的指标，其计算公式如下：

$$NPFP = Y/F \quad (2\text{-}25)$$

式中，Y 为施加氮肥时籽粒产量（kg ha^{-1}）；F 为施氮量（kg ha^{-1}）。

中国知网 https://www.cnki.net

表 2-6 估算农田生态系统中 NH_3、N_2O、NO_3^-和径流的经验常数。

Table 2-6 Empirical constants for estimating NH3, N2O, NO3- and runoff in farmland ecosystems.

变量	作物	区域	a	b
		东北平原	0.058	2.53
	玉米	华北平原	0.099	7.98
		长江中下游平原	0.071	1.93
		东北平原	0.068	3.21
NH_3	小麦	华北平原	0.069	2.69
		长江中下游平原	0.13	-0.61
		东北平原	0.10	3.83
	水稻	华北平原	0.20	-0.54
		长江中下游平原	0.17	4.95
		东北平原	0.0035	0.68
	玉米	华北平原	0.0047	0.99
		长江中下游平原	0.0045	0.60
		东北平原	0.0045	0.26
N_2O	小麦	华北平原	0.0032	0.50
		长江中下游平原	0.0060	0.59
		东北平原	0.0029	0.32
	水稻	华北平原	0.0040	0.65
		长江中下游平原	0.0094	0.10
		东北平原	0.0041	2.38
	玉米	华北平原	0.0060	10.7
		长江中下游平原	0.0059	8.35
NO_3^-		东北平原	0.0057	4.93
	小麦	华北平原	0.0080	3.63
		长江中下游平原	0.0078	1.64
	水稻	-	0.0033	2.25
		东北平原	0.0037	1.20
Runoff	水稻	华北平原	0.0040	3.05
		长江中下游平原	0.0033	2.62

2.10 非支配排序遗传算法

非支配排序遗传算法（NSGA-II）是一种常用的多目标优化算法，用于在多个冲突目标中找到一组均衡解，即帕累托最优解集（Deb et al., 2002）。其核心是非支配排序和拥挤度距离。当一个解在所有目标上均不差于另一个解，且至少在一个目标上更好时称其为支配。算法通过非支配排序将所有解的集合按支配关系分层形成非支配前沿，优先保留不被其他解支配的优质解；之后利用拥挤度距离

中国知网 https://www.cnki.net

计算同一层级解的分布密度，去掉拥挤度距离小的解（解的分布集中），保持解集的多样性。具体流程如图 2-3。

本研究使用 Python 中的“Pymoo”包（版本 3.7.11）执行 NSGA-II算法。管理措施中的氮肥用量、磷肥用量（P_2O_5)、钾肥用量（K_2O）和种植密度被定义为需要优化的参数，我们根据大田试验数据设置了参数的上限和下限。优化目标是作物产量最高、经济效益最高、氮素损失最低。产量由随机森林模拟，经济效益和环境效益分别通过公式 2-18 和公式 2-19 计算。

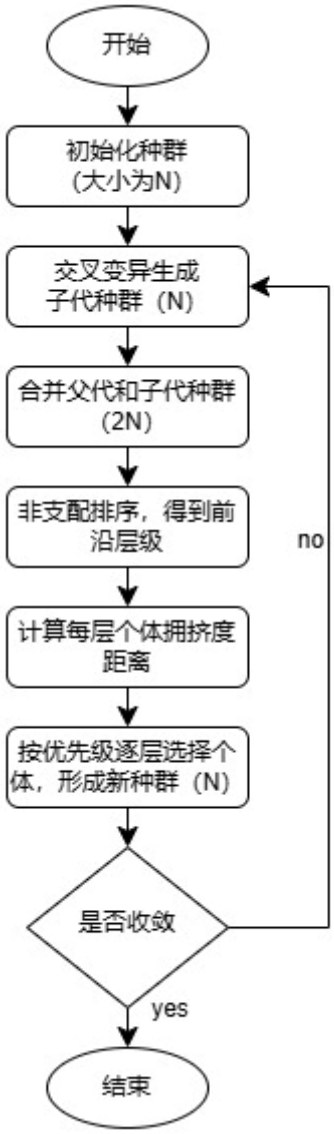


图 2-3 NSGA-II算法流程图

Figure 2-3 NSGA-II algorithm flow chart

由于 NSGA-II 提供的管理组合不唯一，本研究采用熵权法对三个目标赋予权重，取加权和最高的管理措施集作为最优解。熵权法是一种基于数据自身信息熵确定权重的方法，目标数据的差异性越大，说明其提供的信息越多，赋予的权

中国知网 https://www.cnki.net

重也越大（邹志红 et al., 2005）。利用这种方法有效避免了主观赋权的不确定性，保障了不同目标权重分配的客观性。其计算公式如下：

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - \min（x_j）}{\max(x_j) - \min（x_j）} \quad （2\text{-}26）$$

$$y_{ij} = \frac{\max(x_j) - x_{ij}}{\max(x_j) - \min（x_j）} \quad （2\text{-}27）$$

$$p_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sum_{i=1}^{m} y_{ij}} \quad （2\text{-}28）$$

$$e_j = -\frac{1}{\ln m}\sum_{i=1}^{m} p_{ij} \ \ln（p_{ij}） \quad （2\text{-}29）$$

$$w_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{i=1}^{n}（1 - e_j）} \quad （2\text{-}30）$$

式中，y_{ij}为标准化数据，公式 2-24 和公式 2-25 分别计算正向指标和负向指标的数据标准化；x_{ij}表示第 i 个对象在第 j 个指标上的取值；p_{ij}为归一化后的比重；m 为样本数；e_j为信息熵；w_j为权重；n 为指标数。

中国知网 https://www.cnki.net

第三章 中国粮食主产区作物潜在产量

近年来中国粮食产量持续增长，常年稳定在 1.3 万亿斤以上，是世界主要的粮食生产国之一。目前，中国口粮自给率达到 100%以上，谷物自给率在 98%以上，基本实现“谷物基本自给，口粮绝对安全”的目标（杨明智 et al., 2019，严定春 et al., 2024）。粮食产量的增加得益于农业机械推广、作物品种改良、基础设施建设、农业技术进步和相关政策的实施（如守住 18 亿亩耕地红线、建设高标准农田等）。然而，粮食产量的增加和“谷物基本自给，口粮绝对安全”并不意味着中国可以脱离国际市场完全实现自给自足。部分作物仍然依赖进口来满足国内需求，尤其是玉米，2021 年进口量超过 3000 万吨（Bren d’Amour et al., 2017，彭越 et al., 2024）。随着城镇化发展和消费结构转型，肉类、乳制品和深加工食品的需求将持续增长，进而带动饲料需求的上升，使得粮食需求量将进一步增加。而中国耕地面积难以增加的现状要求现有的每一公顷农田都需要产生远高于当前产量水平的产量（王禹, 2016，刘珍环 et al., 2013）。因此，明确中国粮食主产区的潜在产量，探明粮食作物产量的提升空间，对中国政府政策制定和保障未来的粮食安全具有重要意义。

潜在产量仅受当地的光温条件影响，是作物的理论产量上限。由于田间试验会受到多种因素干扰，如病虫害、管理措施无法实时适配作物需求等，难以反映最优条件的产量潜力（Cassman et al., 2010 , Van Ittersum et al., 2013）。通常使用经验公式或作物模型评估潜在产量。经验公式以试验数据为基础，建立生物量和气候因子的统计相关关系。例如，使用太阳辐射和植物生物量生产之间的通用、非物种特异性关系来估计潜在产量（De Vries et al., 1997）。作物模型模拟作物生理过程，包括光合作用、生物量积累、干物质分配等。例如，使用 DSSAT、ORYZA2000、APSIM 等作物模型模拟潜在产量 （Van Wart et al., 2013 , Gunawat et al., 2022 , Zhu et al., 2022）。两种方法相比，经验公式仅需气象数据，操作简单；作物模型考虑到了气象、土壤、管理和作物遗传因素对产量的影响，结果更准确。

本章研究通过 DSSAT 模型对中国主要粮食产区，包括东北平原、华北平原和长江中下游平原的玉米、小麦和水稻的潜在产量做系统性评估。首先，对作物品种的遗传参数进行校正，保障模型模拟的准确性；其次，作物模型的模拟对象为单个站点，通过农业气候区和选取代表性站点将模型结果升尺度到区域水平，实现全国主要粮食作物潜在产量的空间化估算。

中国知网 https://www.cnki.net

3.1 作物代表性品种参数校正

本研究对玉米（表 3-1）、小麦（表 3-2）和水稻（表 3-3）各试验站点的种植品种进行统计，筛选选出了各区域三种作物种植最多的品种，分别是玉米：玉米先玉 335（东北平原）、郑单 958（华北平原）、登海 605（长江中下游平原，春玉米）和苏玉 29（长江中下游平原，夏玉米）；小麦：济麦 22（华北平原）和宁麦 13（长江中下游平原）；水稻：龙粳 21（东北平原）、聚两优 751（长江中下游平原，双季稻）和 Y 两优 900（长江中下游平原，单季稻）。这些品种有足够的数据支持调参，且可以认为是在该区域适宜广泛种植的品种。

表 3-1 试验站点玉米种植品种

Table 3-1 Maize varieties planted at the experimental sites

区域	站点	经度	纬度	种植品种
	内蒙古赤峰市	118.7	42.4	登海 618、MC703
	内蒙古通辽市	122.4	43.7	京科 968、晋单 27、农华 101
	内蒙古呼伦贝尔市	123.1	48.6	富单 12、内早 209
	吉林省桦甸市金沙乡	126.9	42.9	先玉 335、翔玉 998
	吉林省公主岭	124.3	43.5	先玉 335、郑单 958
	吉林省乾安县	124.0	45.0	先玉 335、翔玉 998
东北	吉林省农安县	124.9	44.1	先玉 335、翔玉 998
平原	辽宁省北票市蒙古营	120.3	41.4	郑单 958
	黑龙江绥化市北林区	126.6	46.5	先玉 335
	黑龙江哈尔滨香坊区	126.9	45.8	先玉 335
	黑龙江哈尔滨双城区	126.4	45.4	先玉 335
	辽宁省丹东市	123.4	39.7	宏硕 899、丹玉 311
	辽宁省铁岭市	123.6	42.4	先玉 335、郑单 958
	辽宁省海城市	122.3	40.5	先玉 335、郑单 958
	河北省馆陶县	115.4	36.7	郑单 958
	河北省藁城市	114.7	37.9	郑单 958
	河北省高碑店市	115.8	39.3	郑单 958
华北	河南省鹤壁市	114.3	35.7	登海 605
平原	河南省驻马店市	114.0	33.2	登海 605
	山东省烟台市	119.9	37.3	登海 605
	山东省泰安市	116.9	35.9	登海 605
	北京市通州区	116.7	39.9	京农科 728、郑单 958
	江苏省盐城市东台市	120.1	32.6	江玉 877、苏玉 29
长江	江苏省泰州市兴化市	119.89	32.9	江玉 877、苏玉 29
中下	江苏省盐城市大丰区	120.8	33.3	江玉 877、苏玉 29、苏玉 30
游平	湖南省郴州市	113.3	25.6	登海 605、登海 618
原	湖南省常德市	112.2	29.6	登海 605、登海 618
	湖南省长沙市	113.1	28.2	湘康玉 7 号、登海 605、登海 618

中国知网 https://www.cnki.net

区域	站点	经度	纬度	种植品种
	江苏省扬州市	119.4	32.4	江玉 877、苏玉 29
	江苏省宿迁市	118.2	33.8	江玉 877、苏玉 44
	江苏省徐州市	117.9	33.9	江玉 877、苏玉 29
长江	四川省达州市	108.0	31.5	登海 605
中下	四川省凉山彝族自治州	101. 5	27.5	先玉 696
游平	四川省甘孜藏族自治州	101.9	30.9	凉单 10 号
原	四川省巴中市	107.2	31.2	成单 60、延科 288、仲玉 3 号
	四川省资阳市	105.1	30.2	仲玉 3 号
	四川省眉山市	104.2	30.0	仲玉 3 号、成单 30
	江苏省南京市六合区	118.6	32.2	苏玉 29

表 3-2 试验站点小麦种植品种

Table 3-2 Wheat varieties planted at the experimental sites

区域	站点	经度	纬度	种植品种
	河北省沧州市	116.6	37.7	济麦 22
	河南省鹤壁市	114.3	35.7	矮抗 58
	河北省石家庄	114.4	37.5	济麦 22
	河南省周口市	114.5	33.5	周麦 27
华北	河南省开封市	114.6	34.7	周麦 27
平原	山东省烟台市	120.0	37.4	济麦 22、鲁原 502
	山东省济宁市	116.8	35.6	济麦 22、鲁原 502
	河南省新乡市	114.0	35.1	周麦 27、济麦 22
	山东省淄博市	118.3	37.0	济麦 22
	山东省德州市	116.5	36.7	济麦 22、鲁原 502
	江苏省泰兴市	119.1	33.1	扬麦 25、宁麦 13
	江苏省扬州市	119.4	32.4	扬麦 25、宁麦 13
	四川省广汉市	104.4	31.0	川麦 104、川麦 66
	安徽省合肥市	117.1	32.4	镇麦 12、扬麦 20、苏麦 10 号
长江	安徽省铜陵市	117.7	30.9	镇麦 12、扬麦 20、浩麦 1 号
中下	安徽省蚌埠市	116.9	33.1	镇麦 12、苏隆 128、荃麦 725、泛麦 5 号
游平	江苏省连云港市	119.3	34.2	连麦 7 号
原	江苏省常州市	119.5	31.7	扬辐麦 4 号
	湖北省荆州市	112.1	30.4	郑麦 9023
	江苏省高邮市	119.6	32.9	宁麦 13
	湖北省枣阳市	112.8	32.1	郑麦 9023

中国知网 https://www.cnki.net

表 3-3 试验站点水稻种植品种

Table 3-3 Rice varieties planted at the experimental sites

区域	站点	经度	纬度	种植品种
东北平原	吉林省白城市	122.5	45.4	吉粳 88
	黑龙江省绥化市绥棱县	127.3	47.2	龙粳 31、龙粳 46
	吉林省梅河口市	125.5	42.4	吉粳 88
	黑龙江省哈尔滨市	127.7	45.2	东农 427
	黑龙江省富锦市	130.8	46.8	龙粳 21
	黑龙江省绥化市	127.0	46.6	龙粳 21
	黑龙江双鸭山市	134.0	47.4	空育 131
长江中下游平原	浙江富阳	120.0	30.1	甬优 1540、甬优 1538、春优 927
	广东省兴宁市	115.9	24.1	聚两优 751
	广西桂平市	109.9	23.3	聚两优 751、Y 两优 143
	江西省吉安县	114.9	27.0	鹏优 5774、优 I651、丰两优晚三
	江西省抚州市	116.3	28.2	软华优 1179、潭两优 39、株两优 171
	湖北省随州市	113.4	31.6	Y 两优 900
	湖北省荆州市	112.1	30.4	Y 两优 900
	云南保山	103.2	23.3	隆科 16
	湖南省长沙市	113.3	28.4	Y 两优 900
	广东省惠州市	114.6	23.2	聚两优 751
	四川省德阳市	104.7	31.2	天优华占
	江西省九江市	116.3	29.5	湘早籼 45
	四川省自贡市	105.2	29.2	天优华占
	四川省绵竹市	104.2	31.3	天优华占

通过 GLUE 校正代表性品种的遗传参数（表 3-4），同一作物不同品种间的遗产参数有很大差异。例如与郑单 958 相比，先玉 335 的 P2、P5 和 PHINT 值更大，说明郑单 958 冠层形成晚，吐丝和灌浆期更长，籽粒成熟时间晚。

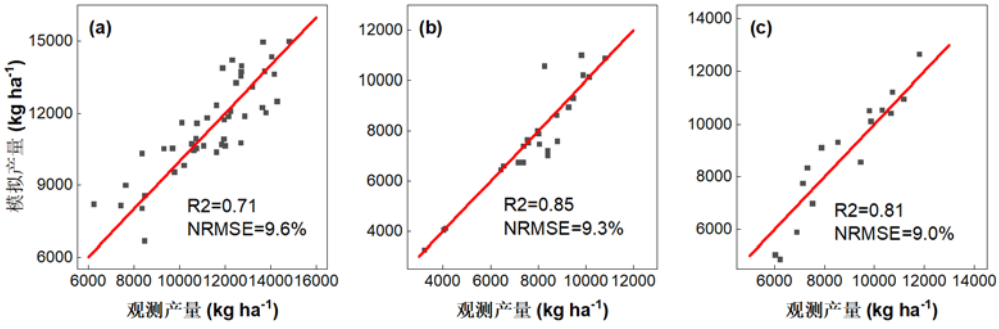


图 3-1 调参后 DSSAT 模型的模拟产量和实际观察产量的关系。（a）、（b）和（c）分别为玉米、小麦和水稻，红线为 1：1 线

Figure 3-1 The relationship between the simulated yield of the DSSAT model after parameter adjustment and the actual observed yield. （a）, （b） and （c） are maize, wheat and rice respectively, and the red line is the 1:1 line

中国知网 https://www.cnki.net

参数校正后模型的模拟值接近试验站点的观测值（图 3-1），玉米、小麦和水稻的 NRMSE 均小于 10%。小麦和水稻产量的模拟值与试验站点的观测值间的 R^2 超过 0.8，玉米的结果稍差，R^2 为 0.71，且模拟值与实测值集中分布在 1：1 线附近。这说明校正后的品种遗传参数能够反映该品种的特性，DSSAT 模型能够准确模拟各个区域玉米、小麦和水稻代表性品种的产量。

表 3-4 玉米、小麦和水稻代表性品种的遗传参数

Table 3-4 Genetic parameters of representative varieties of maize, wheat and rice

遗传参数	先玉 335	郑单 958	登海 605	苏玉 29	济麦 22	宁麦 13	龙粳 21	聚两优 751	Y 两优 900
P1	369.1	303.7	103.9	277.8			306.8	628.8	689.9
P2	0.145	0.566	0.426	0.265					
P5	840.1	851.6	923.9	883.8	685.0	735.0	503.3	559.1	529.8
G2	685.2	650.5	540.0	692.9	42.7	26.7	0.02	0.02	0.02
G3	11.77	11.57	11.68	9.62	3.0	3.0	0.822	0.426	0.558
PHINT	32.4	42.49	44.70	45.98	95.0	83.0			
P1V					57.0	55.0			
P1D					120.0	109.0			
G1					27.0	31.5	50.8	51.7	50.3
P2R							30.3	169.3	190.4
P2O							12.35	10.99	12.32
G4							0.807	1.029	0.977

3.2 农业气候区代表性站点的选择

本研究按照 GYGA 的农业气候区划和站点选择方法，分别为玉米、小麦和水稻筛选出了 85、62 和 66 个代表性气象站点，空间分布如图 3-2 所示。这些站点所在的气候区基本覆盖了中国主要的玉米、小麦和水稻种植区，能够反映全国的生产状况。

中国知网 https://www.cnki.net

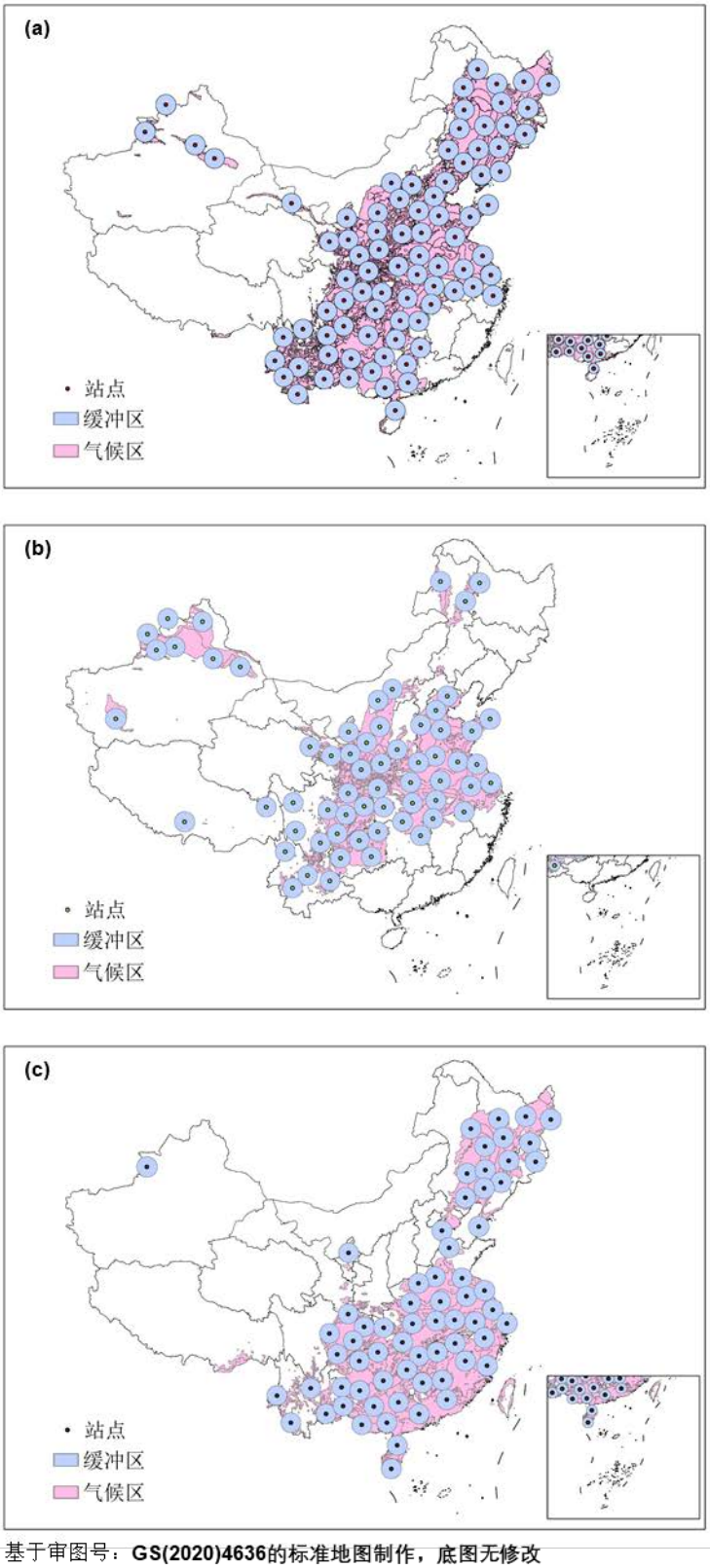


图 3-2 农业气候区和代表性站点的分布。（a）、（b）和（c）分别为玉米、小麦和水稻

Figure 3-2 Distribution of agricultural climate zones and representative stations. （a）, （b） and （c） are maize, wheat and rice respectively.

中国知网 https://www.cnki.net

附表 S1-S3 分别列出了玉米、小麦和水稻三种作物的代表性气象站点的基本信息，包括气象站名称、所属省份、经纬度和其在农业气候分区中的编号。玉米 85 个站点分布在 43 个农业气候区，根据气候区编号，其生育期积温范围从 0 到 9311°Cd；小麦 62 个站点分布在 42 个农业气候区，生育期积温范围从 0 到 7111°Cd；水稻 66 个站点属于 32 个气候区，其生育期积温范围最广，为 0-9850°Cd。且三种作物筛选出的气候区年干旱指数和温度季节性均涵盖了给出的所有情形（表 2-2）。

本研究所筛选的站点基本覆盖全国，除中国台湾缺少数据外，其他所有省份都分布有至少一个站点。鉴于气候的空间差异性，即使同一个省份内有时也会存在多个气候区，例如云南玉米和水稻分别涵盖了 8 个和 5 个不同气候区，这主要是因为当地的地形复杂。同样的情况也出现在四川，一个省包含了 7 个农业气候区。新疆的情况有所不同，其面积约 166 万平方公里，占中国陆地总面积的六分之一，极大的空间跨度致使其出现 7 个农业气候区。这体现了本研究选取的三种作物种植区域的气候条件的多样性，也说明本研究结果具有广泛代表性。

3.3 作物潜在产量的空间特征

通过 DSSAT 模型模拟了各试验站点种植该区域适宜品种 2016-2019 年的潜在产量的平均值，如图 3-3 所示。玉米潜在产量最高值出现在东北地区的内蒙古赤峰市，达到 20.9 Mg ha^{-1}；辽宁省丹东市潜在产量最低，仅为 9.6 Mg ha^{-1}，不到赤峰市的一半（图 3-3a）。小麦潜在产量最高为 16.4 Mg ha^{-1}，位于山东省济宁市；潜在产量最低的是安徽省合肥市的 7.3 Mg ha^{-1}，约为济宁市的 45%（图 3-3b）。水稻潜在产量最高为四川省绵竹市的 14.0 Mg ha^{-1}，最低为江西九江市的 9.5 Mg ha^{-1}，约为绵竹市的 68%（图 3-3c）。另外，玉米潜在产量高值多分布在中国东北和西南地区，说明春玉米的产量潜力高于夏玉米，这是由于春玉米较长的生育期且灌浆期较少受高温胁迫的影响（戴明宏 et al., 2008）；水稻潜在产量高值多分布在西南地区，说明单季稻的产量潜力高于双季稻，这也得益于单季稻更长的生育期和更好的光温条件（Huang et al., 2019 , Deng et al., 2019）。这些结果说明，站点间潜在产量的差异能够反映出不同站点的种植制度、气候和土壤条件对该作物生产的适宜性。

中国知网 https://www.cnki.net

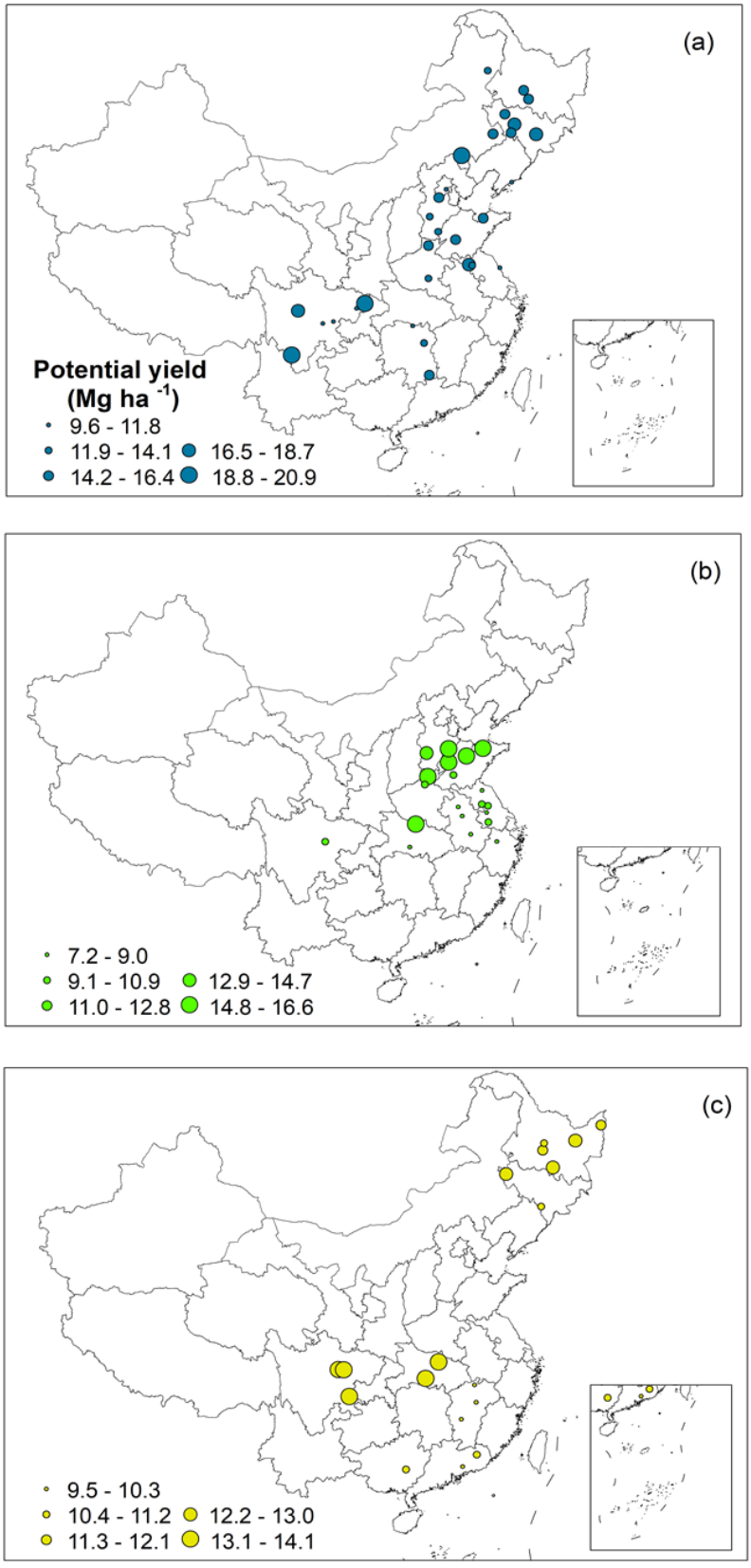


图 3-3 试验站点 2016-2019 年潜在产量的平均值

Figure 3-3 Average potential yield of the experiment sites from 2016 to 2019

中国知网 https://www.cnki.net

对站点所属区域而言，东北平原的玉米潜在产量平均值最高，达到了 15.5 Mg ha^{-1}，其次为长江中下游平原的 14.2 Mg ha^{-1}，华北平原玉米潜在产量最低，仅为 13.6 Mg ha^{-1}，但不同区域间的差异并不显著（图 3-4a）。小麦潜在产量在三种作物中最低，且区域间存在显著性差异，华北平原潜在产量接近 13.6 Mg ha^{-1}，而长江中下游平原平均潜在产量仅为 8.9 Mg ha^{-1}（图 3-4b）。不同区域水稻的潜在产量非常接近，东北平原为 12.0 Mg ha^{-1}，仅比长江中下游平原高 0.1 Mg ha^{-1}，两个区域间没有显著差异（图 3-4c）。这一结果说明作物的潜在产量主要取决于气候、土壤和种植制度等因素，而非其所在地理区域。这也凸显了通过农业气候区升尺度代替传统空间插值的必要性。

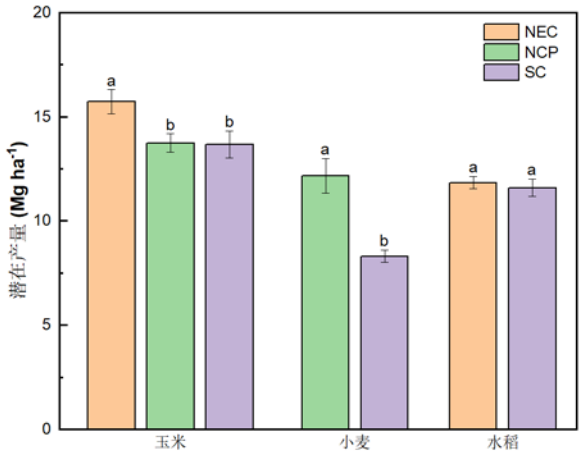
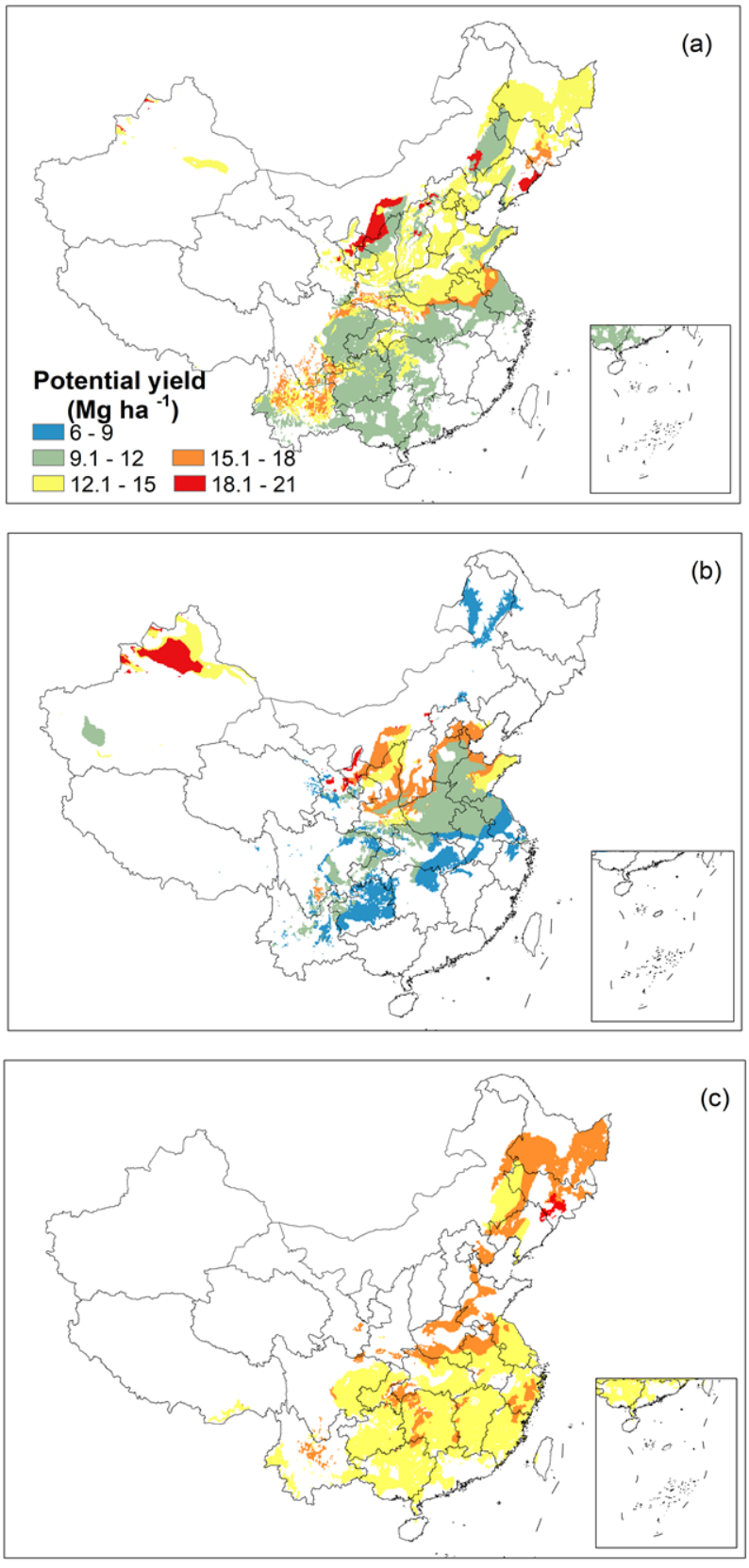


图 3-4 主要粮食产区玉米、小麦和水稻的潜在产量（东北玉米 n=14、水稻 n=7；华北玉米 n=8、小麦 n=10；长江中下游玉米 n=16、小麦 n=11、水稻 n=14）。误差线代表 SE，Welch 方差分析检验显著性，不同字母表示差异显著（$P < 0.05$）。

Figure 3-4 Potential yields of maize, wheat and rice in major grain producing areas (maize n=14, rice n=7 in Northeast China; maize n=8, wheat n=10 in North China; maize n=16, wheat n=11, rice n=14 in the middle and lower reaches of the Yangtze River). Error bars represent SE, significance was determined by Welch's analysis of variance. Different letters indicate significant differences ($P < 0.05$).

通过 GYGA 升尺度的方法，将多个站点处于同一农业气候区时取平均值，从而得到各农业气候区的潜在产量，如图 3-5 所示，能更详细的展示潜在产量的空间分布。

中国知网 https://www.cnki.net



基于审图号：GS(2020)4636的标准地图制作，底图无修改

图 3-5 中国玉米(a)、小麦(b)和水稻(c)主要种植区作物的潜在产量

Figure 3-5 Potential yields of maize (a), wheat (b) and rice (c) in major growing areas of China

中国知网 https://www.cnki.net

农业气候区编号为3103和3803时玉米潜在产量最高，约为2.1 Mg ha^{-1}。其中，3103分布在我国新疆和内蒙古河套地区，3803分布在我国辽宁和内蒙古东四盟（图3-5a）。潜在产量最低的区域在广西和广东等地，农业气候区编号为7601和7802，潜在产量不超过1.0 Mg ha^{-1}。整体来看，中国玉米潜在产量的空间分布整体呈东北高西南低的趋势。

小麦潜在产量最高接近18. 5Mg ha^{-1}，主要分布在中国西北地区，包括新疆、甘肃和宁夏等地，农业气候区编号为4003（图3-5b）。潜在产量最低的区域主要分布在云贵高原，气候区编号为5602、5701和5802，其潜在产量仅为0.8 Mg ha^{-1}，不到4003气候区的一半。小麦潜在产量的空间分布特征为由西北向东南方向递减。

水稻的潜在产量在空间是的差异是三种作物中最小的，最小值为1.0 Mg ha^{-1}，最大值为1.6 Mg ha^{-1}。其中高值出现2703农业气候区，主要分布在吉林和辽宁的部分地区；低值出现在6802和6902气候区，广泛分布在中国南方湖南、广西、福建等地（图3-5c）。空间分布上，水稻的潜在产量呈现出由南向北递增的趋势。

整体来看，玉米、小麦和水稻三种作物的潜在产量在空间分布上具有相似的特点，即高纬度区域的光温条件更适宜这些作物生长，具有更高的潜在产量（Yu et al., 2022 , 江铭诺 et al., 2018）。一方面，高纬度区域光照资源资源更丰富，尤其是作物生长的夏季昼长显著延长，使作物光合作用时间延长，能利用的太阳辐射增加；另一方面，高纬度区域夏季温度能够满足作物生长发育需求，但超过30 ℃的极端高温较少，避免作物受到高温胁迫，同时较大的昼夜温差也有利于作物干物质向籽粒分配。

3.4 讨论

上世纪60年代以来，中国在粮食生产方面取得了巨大成果，这主要依赖于单产的提升：玉米产量从1961年的1.18 Mg ha^{-1}提高到了2023年的6.53 Mg ha^{-1}；小麦产量从0.56 Mg ha^{-1}提高到了5.78 Mg ha^{-1}；水稻产量从2.08 Mg ha^{-1}增加到7.14 Mg ha^{-1}，过去60多年，中国三大粮食作物的年增产率均超过了8%。但目前大量研究表明中国三大主粮作物的产量增长放缓，甚至出现停滞（Yang et al., 2017 , Liu et al., 2016a , Xiong et al., 2014），国家统计局（https://www.stats.gov.cn）的数据也显示2015年以来水稻产量的年增长率仅为3.5%（表3-5）。针对产量增长放缓的现象，需要明确是由于产量接近上限出现了边际递减效应，还是由于农户管理措施不满足作物生长发育需求

中国知网 https://www.cnki.net

表 3-5 2015-2023 年中国玉米、小麦和水稻的平均产量

Table 3-8 Average production of maize, wheat and rice in China from 2015 to 2023

年份	玉米（Mg ha^{-1}）	小麦（Mg ha^{-1}）	水稻（Mg ha^{-1}）
2015	5.89	5.39	6.89
2016	5.97	5.33	6.86
2017	6.09	5.41	6.91
2018	6.11	5.42	7.02
2019	6.32	5.63	7.06
2020	6.31	5.74	7.04
2021	6.29	5.81	7.11
2022	6.43	5.86	7.08
2023	6.53	5.78	7.14

本研究通过代表性气象站和农业气候区，将作物潜在产量由作物模型的站点尺度上升到区域尺度，对比之前基于站点的空间插值方法是更科学、合理的（Zhao et al., 2016 , Liu et al., 2016b）。目前，这种升尺度方法已经被广泛接受，并被应用于最新的空间产量分析中（Deng et al., 2019 , Aramburu-Merlos et al., 2024）。另外，对区域代表性品种的筛选和遗传参数的校正也保证了区域尺度结果的合理性，因为单一作物品种在气候条件差异很大的大空间尺度下生产表现存在差异。因此，本研究的方法在空间分析时更接近真实情况。

中国玉米、小麦和水稻的潜在产量分别为 14.6，10.0 和 11.6 Mg ha^{-1}，这一结果高于先前研究得到的潜在产量（Gou et al., 2017 , Li et al., 2014 , Lu and Fan, 2013 , Espe et al., 2018 , Liu et al., 2017a）。主要原因是不同研究对潜在产量的定义和测定方法存在差异，例如作物模型模拟的光温潜在产量，无灌溉条件的水分限制潜在产量（Liu et al., 2017a）、边界线分析的最大产量（Hajjarpoor et al., 2018）、最佳养分条件的试验站产量（Xu et al., 2016）和农民最高产量（Lobell et al., 2009）。研究站点不具有代表性或所选站点产量偏低也会造成潜在产量的模拟值偏低。此外，与一些拥有先进生产技术的国家相比，我国的潜在产量偏低，例如阿根廷和巴西玉米的潜在产量超过 15 Mg ha^{-1}，美国水稻的潜在产量最高可达 14.5 Mg ha^{-1}（Andrea et al., 2018 , Carciochi et al., 2020 , Espe et al., 2018）。这意味着我国光温条件与部分发达国家相比存在限制，同时我国的作物品种未能充分利用光温资源，需要加快品种改良速度（Liu et al., 2021 , Ci et al., 2011）。

玉米、小麦和水稻的潜在产量最高值集中在中国北部（东北或西北），这主要得益于该区域优越的农业气候条件与单季作物栽培制度。在中国北方，作物生育期普遍具有更长的日照时数和适宜的温度条件。伴随近几十年来气候变暖，生育期内的热量资源显著增加，进一步延长了作物的适宜生长窗口期，增加了有效生长期（Xiong et al., 2009）。同时，东北和西北地区多采用单季种植体系，使作

中国知网 https://www.cnki.net

物能够在更长的生育期内充分利用光温资源，提升光合积累与产量潜力（Liang et al., 2023）。相比之下，中国南方虽具备充足的热量资源，但高温高湿气候、频繁的台风侵袭及病虫害风险对作物生产形成不利影响。此外，南方普遍实行双季甚至三季种植制度，光温资源在多季作物之间分配，降低了单一作物生长季的光温利用效率，从而制约了潜在产量的提升。以水稻为例，东北地区普遍采用单季稻种植体系，具有光照时间长、日照强度高、生育期集中的优势，其潜在产量平均可达 11.8 Mg ha^{-1}；而南方受双季稻种植制度及高温胁迫的影响，潜在产量平均为 11.6 Mg ha^{-1}，这一趋势与先前研究结果一致（Zhang et al. 2019）。

3.5 小结

本章选择了 4 个玉米品种、2 个小麦品种和两个水稻品种作为三种作物在东北平原、华北平原和长江中下游平原的代表性品种。经过参数验证，DSSAT 模型模拟这些品种的产量和实际观测值具有良好的一致性，能够用于潜在产量的模拟。

利用 DSSAT 模型模拟得到，中国玉米、小麦和水稻的潜在产量分别为 14.6，10.0 和 11.6 Mg ha^{-1}。利用 GYGA 升尺度方法表明三种作物潜在存在明显的空间异质性：玉米呈东北高西南低的趋势，小麦呈西北高东南低的趋势，水稻呈北高南低的趋势。而目前的作物产量分别为玉米 6.53 Mg ha^{-1}，小麦 5.78 Mg ha^{-1} 和水稻 7.14 Mg ha^{-1}，距离潜在产量还有较大的差距，说明目前产量增长减缓并不是增产空间不足造成的。

中国知网 https://www.cnki.net

中国知网 https://www.cnki.net

第四章 栽培措施对产量构成和产量差的影响

栽培管理措施是作物产量的重要影响因素，其通过调控资源供应影响作物的源库分配，最终影响产量构成因素（包括穗数、穗粒数和千粒重）。播种日期调控了气象资源的分配，播种过晚会导致生育期缩短，减少穗粒数和千粒重；而过早播种作物苗期易受低温影响，不利于出苗和分蘖，降低穗数和千粒重（陈春花, 2025，李令伟 et al., 2013）。施肥调控了养分的分配，充足的肥料供应提高作物的穗粒数和千粒重（Fageria et al., 2006，张满利 et al., 2010）。施肥的时间选择同样重要，小麦拔节期追施氮肥能有效提高千粒重（姜丽娜 et al., 2010）。灌溉调控了水分的分配，与雨养作物相比，灌溉显著增加了穗粒数和千粒重（Geerts and Raes, 2009）。种植密度影响群体结构，进而改变植株个体间资源竞争关系。增加种植密度能够提高穗数，但密度过高会使穗粒数和千粒重降低（Maddonni et al., 2006）。本章基于 2016 - 2019 年 80 个田间试验站点的观测数据分析不同区域玉米、小麦和水稻三种作物高产措施、高效措施、农户管理实践和土壤基础肥力的产量，解析不同管理水平下产量构成因素的变化情况，结合上一部分的潜在产量和 GYGA 升尺度方法，量化不同栽培管理措施的产量差及其空间分布。

4.1 不同栽培措施的产量

本研究在 80 个站点均设置了四个栽培措施水平，不同站点根据当地的气候土壤条件设置施肥量和种植密度，具体数值存在差异，表 4-1 展示了三个区域（东北平原、华北平原和长江中下游平原）的平均施肥量和种植密度。

对于不同区域不同作物，我们设置的四个栽培措施几乎都表现出产量差异显著，且表现为土壤基础肥力最低，其次为农民管理实践和高效措施，高产措施产量最高。（图 4-1）。对玉米来说，华北平原的土壤基础肥料产量最高，达到 8.8 Mg ha^{-1}，而作为改良方案的高效措施和高产措施产量最高值均出现在东北平原。同一管理梯度下长江中下游平原的产量均为三个区域最低，这一趋势也适用于小麦和水稻。误差是由于同一区域多个试验站之间的产量差异造成的，反映了相同管理条件下气候和土壤差异对作物产量的影响。

三种作物中，玉米平均产量最高，其次是水稻，小麦的产量最低。同一作物在三个种植区域间产量差异不明显（图 4-2）。东北平原的玉米平均产量为 10.2 Mg ha^{-1}，与华北平原的产量接近（10.5 Mg ha^{-1}），显著高于长江中下游平原的 8.7 Mg ha^{-1}。小麦方面，华北平原的产量比长江中下游平原高 1.7 Mg ha^{-1}；水稻产量在两个区域间没有差异，均接近 8.5 Mg ha^{-1}。

中国知网 https://www.cnki.net

表 4-1 不同栽培管理措施的施肥量（单位：kg ha^{-1}）和种植密度（×10^4 株 ha^{-1}），氮肥折算为纯氮用量，磷肥折算为 P_2O_5 用量，钾肥折算为 K_2O 用量

Table 4-1 Fertilizer application (Unit: kg ha^{-1}) and planting density (×10^4 plants ha^{-1}) for different cultivation management measures. Nitrogen fertilizer is expressed as pure N, phosphate fertilizer as P_2O_5, and potash fertilizer as K_2O.

作物	区域	变量	BSF	FP	HEP	HYP
玉米	东北平原	N	-	278.6 ± 14.5	275.1 ± 14.2	344.6 ± 17.8
		P_2O_5	-	155.2 ± 9.1	126.2 ± 7.6	129.5 ± 8.4
		K_2O	-	125.6 ± 6.3	131.8 ± 7.8	144.4 ± 8.0
		种植密度	5.9 ± 0.1	5.6 ± 0.1	7.1 ± 0.1	8.4 ± 0.2
	华北平原	N	-	171.4 ± 1.2	378.2 ± 9.1	565.1 ± 24.3
		P_2O_5	-	77.1 ± 10.1	167.6 ± 9.4	209.4 ± 15.0
		K_2O	-	77.1 ± 10.1	258.9 ± 13.1	330 ± 14.3
		种植密度	6.6 ± 0.1	6.7 ± 0.1	8.1 ± 0.1	8.3 ± 0.04
	长江中下游平原	N	-	327.0 ± 24.6	358.4 ± 22.4	523.7 ± 26.9
		P_2O_5	-	112.9 ± 8.5	140.2 ± 7.7	162.2 ± 8.1
		K_2O	-	114.4 ± 8.3	150.3 ± 8.0	177.3 ± 9.8
		种植密度	5.8 ± 0.1	5.9 ± 0.1	6.9 ± 0.1	7.7 ± 0.1
小麦	华北平原	N	-	321.7 ± 7.6	238.1 ± 9.9	309.8 ± 11.3
		P_2O_5	-	104.3 ± 5.0	119.0 ± 2.6	170.9 ± 4.6
		K_2O	-	67.5 ± 6.1	98.2 ± 3.9	140.4 ± 4.7
		种植密度	400.7 ± 22.4	404.1 ± 21.7	350.2 ± 18.1	347.5 ± 18.2
	长江中下游平原	N	-	230.0 ± 11.6	219.6 ± 8.1	249.3 ± 10.9
		P_2O_5	-	72.1 ± 10.8	73.0 ± 9.7	79.2 ± 10.1
		K_2O	-	66.9 ± 11.3	73.0 ± 9.7	79.2 ± 10.1
		种植密度	285.1 ± 10.6	270.8 ± 11.9	273.6 ± 8.1	268.8 ± 13.7
水稻	东北平原	N	-	150.8 ± 11.0	215.4 ± 17.2	246.5 ± 11.9
		P_2O_5	-	62.6 ± 4.9	133.1 ± 17.7	139.1 ± 15.6
		K_2O	-	52.2 ± 1.2	116.6 ± 15.7	159.4 ± 21.5
		种植密度	97.4 ± 6.4	100.1 ± 7.3	96.4 ± 6.5	111.9 ± 4.8
	长江中下游平原	N	-	194.8 ± 6.9	162.8 ± 6.4	189.4 ± 7.6
		P_2O_5	-	78.7 ± 4.1	78.2 ± 4.7	89.1 ± 6.5
		K_2O	-	149.1 ± 7.0	140.0 ± 6.6	183.0 ± 5.9
		种植密度	54.3 ± 2.2	53.6 ± 2.2	62.9 ± 2.9	69.1 ± 3.6

中国知网 https://www.cnki.net

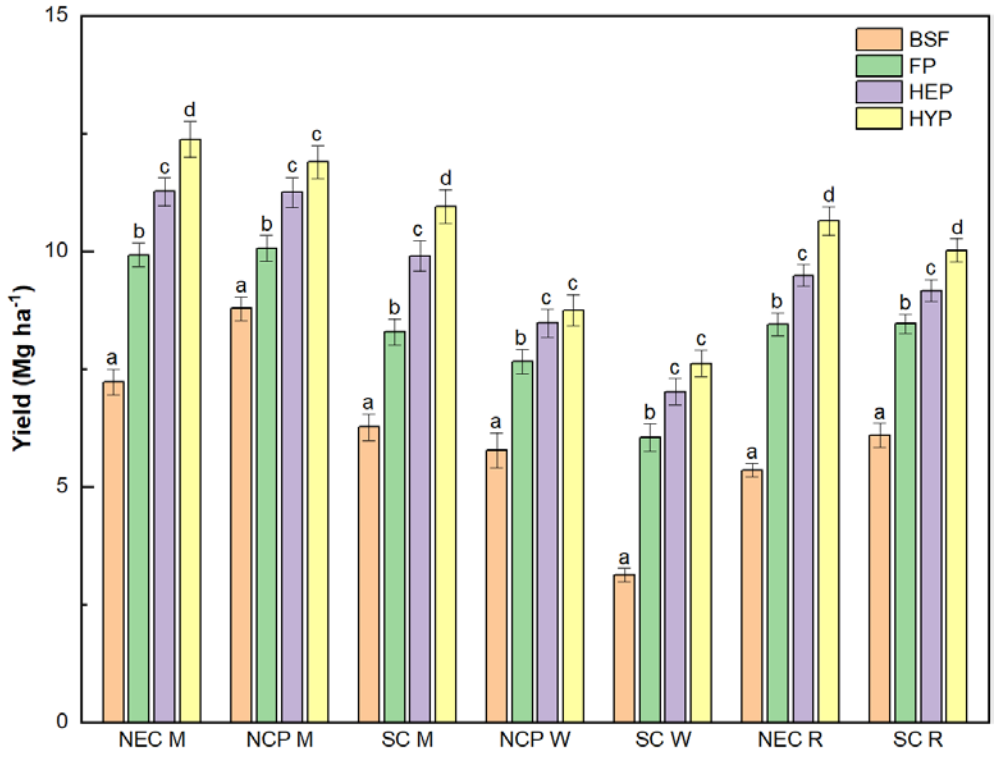


图 4-1 中国主要粮食产区玉米、小麦和水稻不同栽培管理措施的产量。NEC、NCP、SC 分别代表东北平原、华北平原和长江中下游平原，M、W、R 分别代表玉米、小麦和水稻，BSF、FP、HEP、HYP 分别代表土壤基础肥力、农民管理实践、高效措施和高产措施（东北玉米 n=14、水稻 n=7；华北玉米 n=8、小麦 n=10；长江中下游玉米 n=16、小麦 n=11、水稻 n=14）。误差线是 SE，Welch 方差分析检验显著性，字母不同表示差异显著（$P < 0.05$）.

Figure 4-1 Yields of maize, wheat and rice under different cultivation management measures in major grain producing areas in China. NEC, NCP and SC represent the Northeast Plain, North China Plain and the middle and lower reaches of the Yangtze River Plain, respectively; M, W and R represent maize, wheat and rice, respectively; BSF, FP, HEP and HYP represent basic soil fertility, farmer management practices, high-efficiency measures and high-yield measures, respectively (maize n=14, rice n=7 in Northeast China; maize n=8, wheat n=10 in North China; maize n=16, wheat n=11, rice n=14 in the middle and lower reaches of the Yangtze River). Error bars mean SE, significance was determined by Welch's analysis of variance, and different letters indicate significant differences ($P < 0.05$).

中国知网 https://www.cnki.net

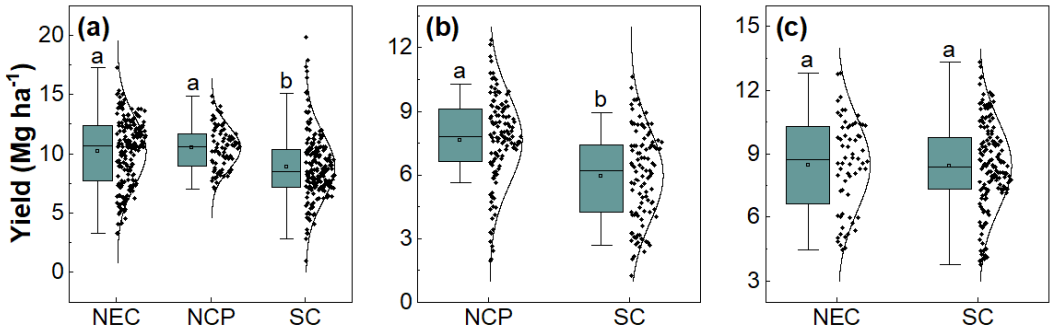


图 4-2 玉米、小麦和水稻不同区域的产量。（a）、（b）、（c）分别代表玉米、小麦和水稻，NEC、NCP、SC 分别代表东北平原、华北平原和长江中下游平原（东北玉米 n=14、水稻 n=7；华北玉米 n=8、小麦 n=10；长江中下游玉米 n=16、小麦 n=11、水稻 n=14）。Welch 方差分析检验显著性，不同字母表示差异显著（$P < 0.05$）。

Figure 4-2 The yields of maize, wheat and rice in different regions. (a), (b) and (c) represent maize, wheat and rice, respectively. NEC, NCP and SC represent the Northeast Plain, North China Plain and the middle and lower reaches of the Yangtze River Plain, respectively (maize n=14, rice n=7 in Northeast China; maize n=8, wheat n=10 in North China; maize n=16, wheat n=11, rice n=14 in the middle and lower reaches of the Yangtze River). Significance was determined by Welch's analysis of variance, and different letters indicate significant differences ($P < 0.05$).

4.2 不同栽培管理措施的产量构成

亩穗数、穗粒数和千粒重是决定最终产量的核心因素。试验站点的数据表明，农民管理实践和土壤基础肥力的亩穗数没有显著差异，而作为改良方案的高效措施和高产措施对比农民管理实践，亩穗数有显著增加（图 4-3）。东北平原、华北平原和长江中下游平原高效措施每亩的玉米有效穗分别比农民管理实践高 880、897 和 603；高产措施则分别比农民管理高 1631、1088 和 1087。相比之下，小麦和水稻仅土壤基础肥料的亩穗数显著低于其他栽培措施，另外三个处理的穗数几乎相同，除长江中下游平原的水稻。

东北平原和华北平原玉米的穗粒数最高值出现在农民管理实践，分别为 538 和 504 粒（图 4-4）。但三个区域农民管理实践的穗粒数与高效措施和高产措施均不存在在显著差异。小麦的情况与玉米类似，土壤基础肥力的穗粒数显著低于其他三个栽培措施，而农民管理实践、高效措施和高产措施间差异不显著。不同的是高产措施的穗粒数最多，华北平原和长江中下游平原分别为 36 和 37 粒。相比之下水稻四个栽培措施的穗粒数最接近，仅土壤基础肥力和高效、高产措施间存在差异，农民管理实践的穗粒数与其他三个措施没有差异。

中国知网 https://www.cnki.net

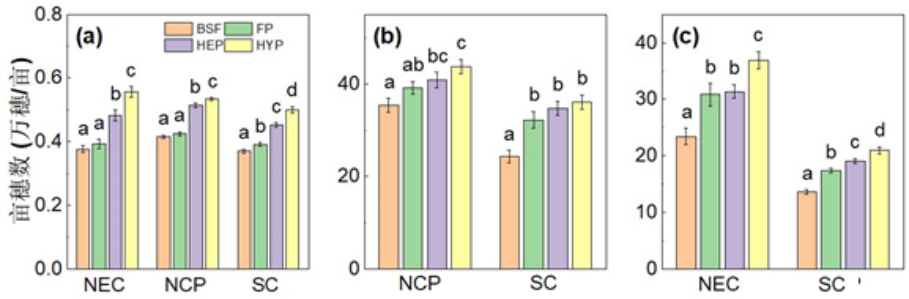


图 4-3 中国主要粮食产区玉米、小麦和水稻不同栽培管理措施的亩穗数。（a）、（b）、（c）分别代表玉米、小麦和水稻。NEC、NCP、SC 分别代表东北平原、华北平原和长江中下游平原，BSF、FP、HEP、HYP 分别代表土壤基础肥力、农民管理实践、高效措施和高产措施（东北玉米 n=14、水稻 n=7；华北玉米 n=8、小麦 n=10；长江中下游玉米 n=16、小麦 n=11、水稻 n=14）。误差线是 SE，Welch 方差分析检验显著性，不同字母表示差异显著（$P < 0.05$）。

Figure 4-3 Number of ears per mu of maize, wheat and rice under different cultivation management measures in China's major grain-producing areas. (a), (b) and (c) represent maize, wheat, and rice, respectively. NEC, NCP, and SC represent the Northeast Plain, the North China Plain, and the middle and lower reaches of the Yangtze River Plain, respectively. BSF, FP, HEP, and HYP represent basic soil fertility, farmer management practices, high-efficiency measures, and high-yield measures, respectively (maize n=14, rice n=7 in Northeast China; maize n=8, wheat n=10 in North China; maize n=16, wheat n=11, rice n=14 in the middle and lower reaches of the Yangtze River). Error bars mean SE, significance was determined by Welch's analysis of variance, and different letters indicate significant differences ($P < 0.05$).

如图 4-5 所示，三种作物的千粒重几乎不受栽培措施的影响，尤其是水稻。东北平原不同栽培措施的水稻千粒重在 24.4 – 25.9 g，长江中下游平原千粒重较东北略低，为 23.6 - 23.9 g。东北平原土壤基础肥力的千粒重为 316.8 g，低于有人为干预的其他三个栽培措施（336.5 – 343.3 g），且差异显著。与之相反，华北平原的土壤基础肥力得到了最大的小麦千粒重，较其他三个处理重 2.2 g。

产量构成三要素中，穗粒数对种植区域最不敏感。玉米和小麦在不同种植区域的平均穗粒数分别保持在 486 -508（图 4-6d）和 32 - 34 粒（图 4-6e）。但对水稻而言，东北平原穗粒数平均值为 92 粒，仅为长江中下游平原的一半左右（图 4-6f）。另外，长江中下游平原三种作物的亩穗数和千粒重均显著低于其他两个区域，这正是该区域玉米和小麦产量偏低的原因。

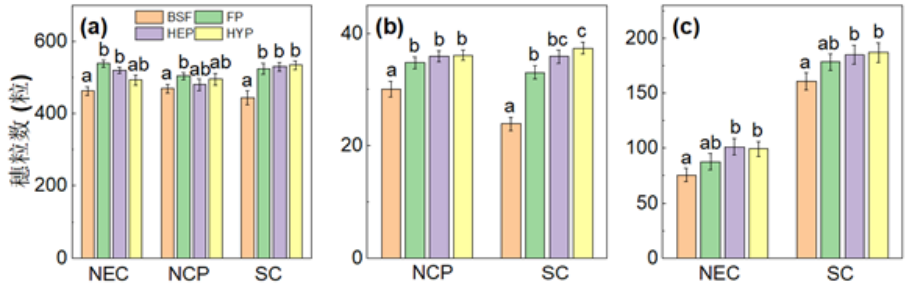


图 4-4 中国主要粮食产区玉米、小麦和水稻不同栽培管理措施的穗粒数。（a）、（b）、（c）

中国知网 https://www.cnki.net

分别代表玉米、小麦和水稻。NEC、NCP、SC 分别代表东北平原、华北平原和长江中下游平原，BSF、FP、HEP、HYP 分别代表土壤基础肥力、农民管理实践、高效措施和高产措施（东北玉米 n=14、水稻 n=7；华北玉米 n=8、小麦 n=10；长江中下游玉米 n=16、小麦 n=11、水稻 n=14）。误差线是 SE，Welch 方差分析检验显著性，不同字母表示差异显著（$P < 0.05$）。

Figure 4-4 Number of grains per ear of maize, wheat and rice under different cultivation management measures in China's major grain-producing areas. (a), (b) and (c) represent maize, wheat, and rice, respectively. NEC, NCP, and SC represent the Northeast Plain, the North China Plain, and the middle and lower reaches of the Yangtze River Plain, respectively. BSF, FP, HEP, and HYP represent basic soil fertility, farmer management practices, high-efficiency measures, and high-yield measures, respectively (maize n=14, rice n=7 in Northeast China; maize n=8, wheat n=10 in North China; maize n=16, wheat n=11, rice n=14 in the middle and lower reaches of the Yangtze River). Error bars mean SE, significance was determined by Welch's analysis of variance, and different letters indicate significant differences ($P < 0.05$).

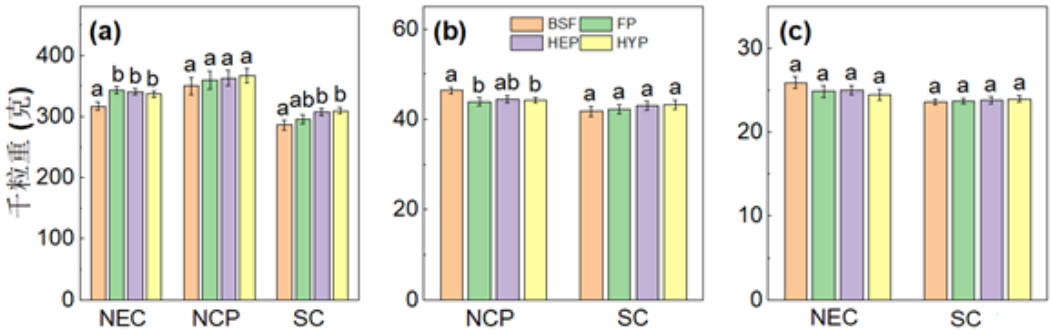


图 4-5 中国主要粮食产区玉米、小麦和水稻不同栽培管理措施的千粒重。（a）、（b）、（c）分别代表玉米、小麦和水稻。NEC、NCP、SC 分别代表东北平原、华北平原和长江中下游平原，BSF、FP、HEP、HYP 分别代表土壤基础肥力、农民管理实践、高效措施和高产措施（东北玉米 n=14、水稻 n=7；华北玉米 n=8、小麦 n=10；长江中下游玉米 n=16、小麦 n=11、水稻 n=14）。误差线是 SE，Welch 方差分析检验显著性，不同字母表示差异显著（$P < 0.05$）

Figure 4-5 Thousand-grain weight of maize, wheat and rice under different cultivation management measures in China's major grain-producing areas. (a), (b) and (c) represent maize, wheat, and rice, respectively. NEC, NCP, and SC represent the Northeast Plain, the North China Plain, and the middle and lower reaches of the Yangtze River Plain, respectively. BSF, FP, HEP, and HYP represent basic soil fertility, farmer management practices, high-efficiency measures, and high-yield measures, respectively. (maize n=14, rice n=7 in Northeast China; maize n=8, wheat n=10 in North China; maize n=16, wheat n=11, rice n=14 in the middle and lower reaches of the Yangtze River). Error bars mean SE, significance was determined by Welch's analysis of variance, and different letters indicate significant differences ($P < 0.05$).

中国知网 https://www.cnki.net

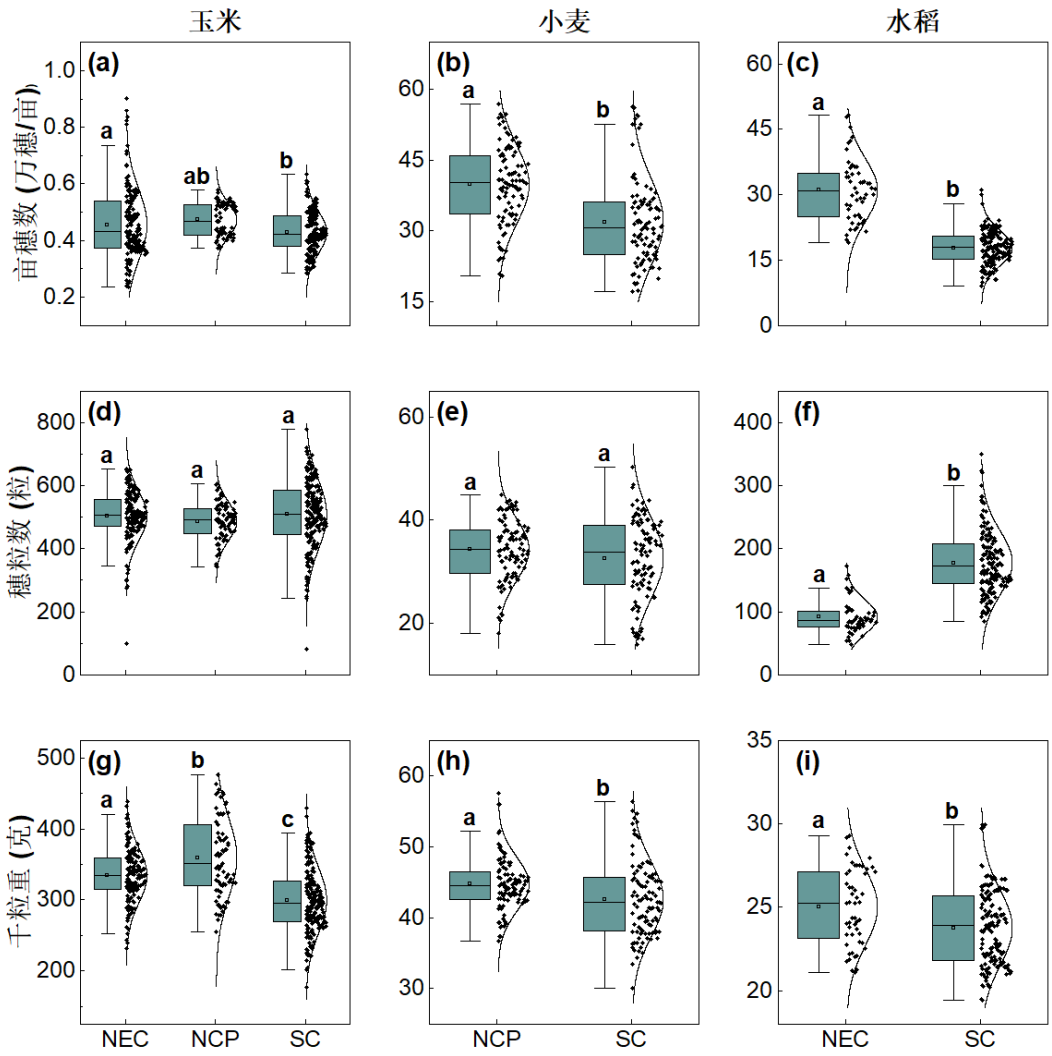


图 4-6 玉米、小麦和水稻不同区域的产量构成要素。（a, d, g）、（b, e, h）、（c, f, i）分别代表玉米、小麦和水稻，NEC、NCP、SC 分别代表东北平原、华北平原和长江中下游平原（东北玉米 n=14、水稻 n=7；华北玉米 n=8、小麦 n=10；长江中下游玉米 n=16、小麦 n=11、水稻 n=14）。Welch 方差分析检验显著性，不同字母表示差异显著（$P < 0.05$）。

Figure 4-6 Yield components of maize, wheat and rice in different regions. (a, d, g), (b, e, h), (c, f, i) represent maize, wheat and rice respectively, NEC, NCP and SC represent Northeast Plain, North China Plain and Middle and Lower Yangtze Plain respectively (maize n=14, rice n=7 in Northeast China; maize n=8, wheat n=10 in North China; maize n=16, wheat n=11, rice n=14 in the middle and lower reaches of the Yangtze River). Significance was determined by Welch's analysis of variance. Different letters indicate significant differences ($P < 0.05$).

4.3 产量差的空间分布

结合试验站点实测的产量数据和第三章通过 DSSAT 模型模拟的潜在产量数据，可以得到玉米、小麦和水稻在三大粮食主产区的产量差（表 4-2）。可以发现，潜在产量与高产措施间的产量差（YG1）以及农户管理实践和土壤基础肥力间的

中国知网 https://www.cnki.net

产量差（YG4）在普遍偏高。鉴于潜在产量是作物的理论上限产量，导致 YG1 的因素主要是实际生产中不可控的环境因素，它更多的作用是展示作物可能存在的增产空间。而 YG4 主要体现出农民的田间管理对作物产量的提升幅度，YG4 越小的区域说明其气象和土壤条件越适宜该作物生长，例如华北平原的玉米（YG4 为 1Mg ha^{-1}）。

对实际生产而言，YG2 和 YG3 的研究价值更大。基于农学专家经验的高效措施在东北平原和长江中下游平原使农民玉米产量提高了 1.5 Mg ha^{-1}，增产最多。而在长江中下游平原水稻生产中，高效措施仅能增产 0.6 Mg ha^{-1}，这一方面是因为水稻目前的产量更接近潜在产量，增产难度高；另一方面也说明目前的专家提供的方案可能仍有待改善。高产措施是不计投入成本的，YG2 反映出在农学专家方案基础上，以产量为最终目的能够实现的增产空间。从表 4.2 中可以发现这一梯度的产量差是最小的，仅在东北平原能够提升超过 1 Mg ha^{-1} 的玉米和水稻产量，这意味着过度投入资源可能出现边际效益呈现递减趋势。

另外，本研究通过 GYGA 升尺度方法得到了中国主要粮食产区不同梯度产量差的空间分布，如图 4-7 所示。与农民管理实践相比，高效措施条件下玉米、小麦和水稻的产量分别增加了 15.1%、13.0%和 9.4%，而高产措施条件下的产量分别增加了 26%、18.8%和 20%。目前，玉米、小麦和水稻的农民管理实践产量分别占潜在产量的 63%，58%和 71%。这些结果表明，实施高效措施和高产措施可以提高农民的作物产量，而采用最优管理策略可以进一步缩小产量差距，从而实现在当前基线之上的持续增产。

空间分布方面，农民管理实践和高产措施之间产量差距最大的是华南玉米（2.6 Mg ha-1）、华南小麦（1.6 Mg ha-1）和东北水稻（2.1 Mg ha-1）。在土壤基础肥力产量较低的地区，通过改变管理措施可带来更大的产量增长，例如位于我国西南的玉米带（图 4-7）。进一步的分析结果也证实了这一观点，在作物类型和管理措施之间，响应比 ln（R）与土壤基础肥力产量的距平值呈显著负线性关系（$p < 0.001$）（图 4-8），这表明 BSF 产量较低的地区应优先改进管理措施。

中国知网 https://www.cnki.net

表 4-2 中国主要粮食产区玉米、小麦和水稻的产量差。YG1、YG2、YG3 和 YG4 分别为潜在产量与高产措施、高产措施与高效措施、高效措施与农民管理实践、农民管理实践与土壤基础肥力间的产量差。

Table 4.2 Yield differences of maize, wheat and rice in major grain producing areas in China. YG1, YG2, YG3 and YG4 represent the yield differences between potential yield and high-yield measures, high-yield measures and high-efficiency measures, high-efficiency measures and farmers' management practices, and farmers' management practices and basic soil fertility, respectively.

作物	区域	YG1 Mg ha^{-1}	YG2 Mg ha^{-1}	YG3 Mg ha^{-1}	YG4 Mg ha^{-1}
玉米	东北平原	2.9 ±0.3	1.1 ±0.2	1.5 ±0.2	2.7 ±0.5
	华北平原	1.8 ±0.4	0.7 ±0.2	1.1 ±0.1	1.3 ±0.3
	长江中下游平原	3.3 ±0.4	1.0 ±0.2	1.5 ±0.2	2.0 ±0.3
	区域平均	2.8±0.2	1.0±0.1	1.5±0.1	2.2±0.2
小麦	东北平原				
	华北平原	4.1±0.8	0.3±0.1	1.0±0.3	1.8±0.5
	长江中下游平原	1.3±0.4	0.5±0.1	0.9±0.1	2.7±0.3
	区域平均	2.6±0.5	0.4±0.1	0.9±0.1	2.3±0.3
水稻	东北平原	1.5±0.2	1.1±0.1	1.0±0.2	2.6±0.2
	华北平原				
	长江中下游平原	1.9±0.1	0.7±0.1	0.6±0.2	2.5±0.2
	区域平均	1.7±0.1	0.8±0.1	0.7±0.1	2.5±0.2

中国知网 https://www.cnki.net

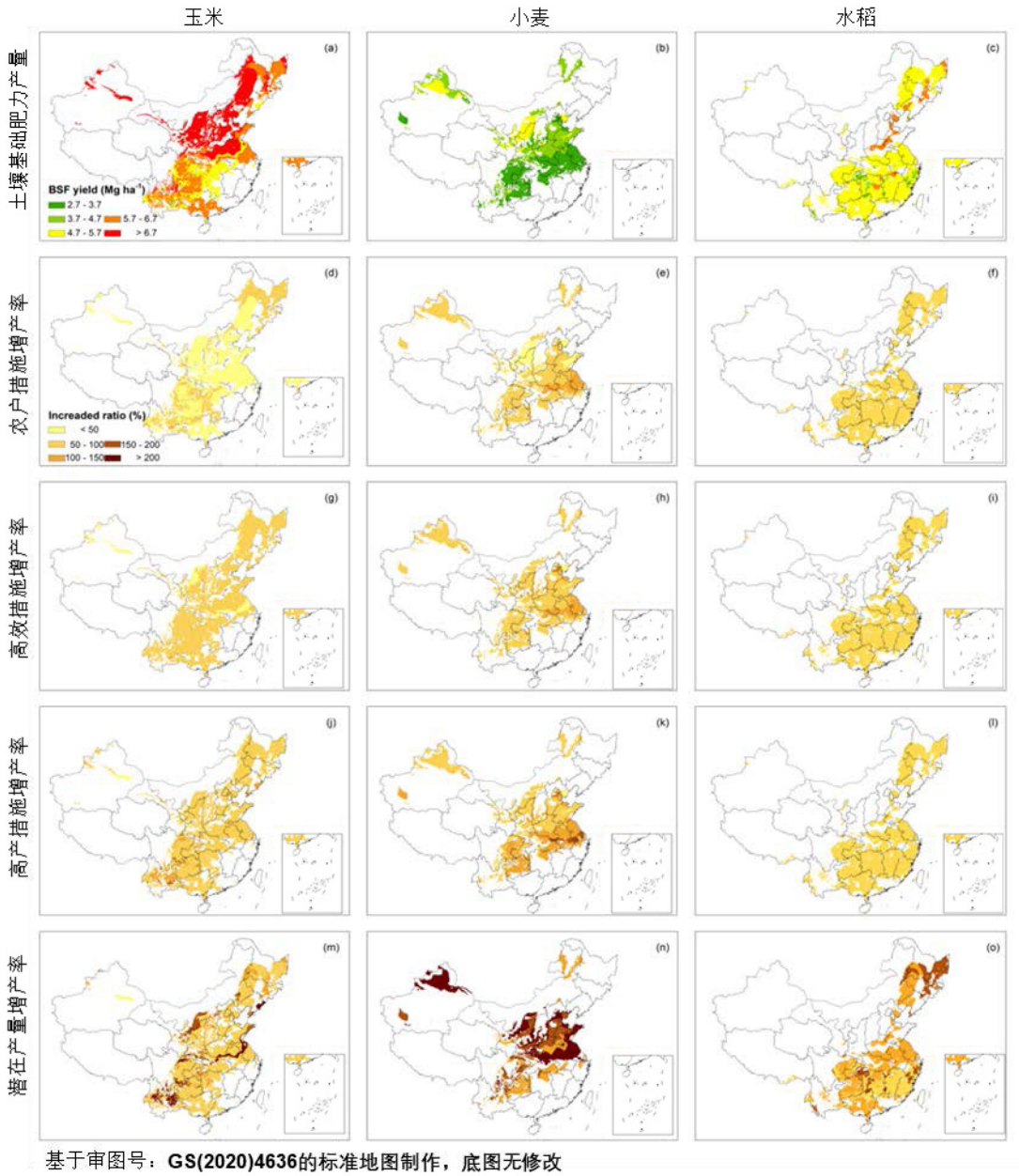


图 4-7 中国主要粮食产区玉米、小麦和水稻的土壤基础肥力和在不同管理措施的产量变化。BSF、FP、HEP、HYP、PY 分别表示土壤基础肥力、农民管理实践、高产措施、高效措施和潜在产量。

Figure 4-7 Soil basic fertility yield of maize, wheat and rice in China's major grain producing areas and yield changes under different management measures. BSF, FP, HEP, HYP and PY represent basic soil fertility, farmer management practices, high-yield measures, high-efficiency measures and potential yield, respectively.

中国知网 https://www.cnki.net

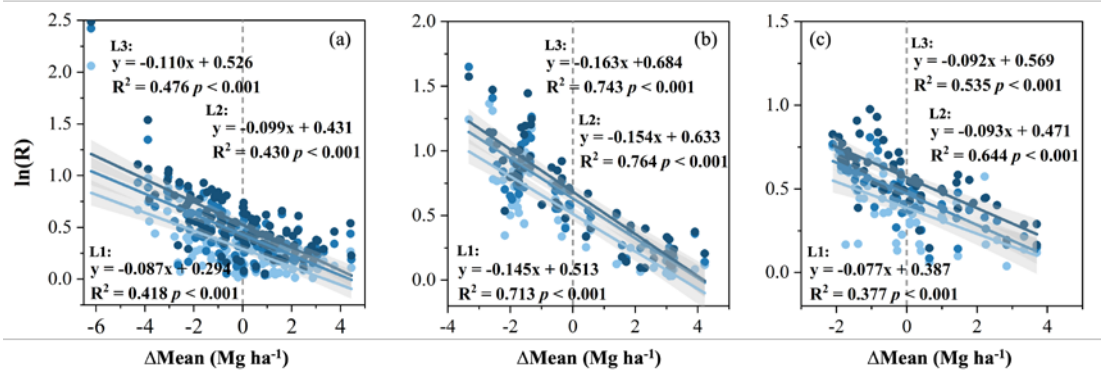


图 4-8 玉米、小麦和水稻产量响应率与土壤基础肥力距平值的关系。浅色、中色和深色分别表示农民管理实践、高效措施、高产措施的拟合曲线，并分别对应 L1、L2 和 L3

Figure 4-8 Relationship between the yield response rate of maize, wheat and rice and the deviation value of soil basic fertility. The light, middle and heavy colors represent the fitting curves of farmers' management practices, high-efficiency measures and high-yield measures, respectively, and correspond to L1, L2 and L3, respectively.

4.4 讨论

本研究表明，栽培措施对作物产量的影响是显著的。事实上，从历史时间尺度来看，农作物产量的提高主要得益于管理实践，这些实践增加了农作物资源的可用性，特别是水分和养分，并培育了对增加的资源有反应的品种与之适配（Slafer and Andrade, 1991 , Evans and Fischer, 1999 , Sinclair and Rufty, 2012）。高效措施、高产措施与农民管理实践间产量的显著性差异也意味这农民采用这两种方案或更科学的栽培措施能有效增长作物产量，目前也有大量关于最佳管理措施的研究，如通过最佳种植密度提高中国玉米产量以满足 2030 年的玉米需求（Luo et al., 2023），通过科学的水氮管理方案减小中国的产量差（Mueller et al., 2012）等。另外，本研究发现同一作物在不同区域间不存在显著的产量差距，这可能是由于不同区域都能满足作物生长的最低限制因子时，产量差会因消除短板效应而趋于一致（Sinclair and Park, 1993）。另外，试验站点种植的均为适应当地环境条件的品种，这在一定程度上也弱化了环境因素对作物生长发育的影响（Heisey, 2015）。

三种产量构成要素之间的相互影响。例如，随着每平方米籽粒数量的增加，小穗内远端位置、次级分蘖穗或两者中潜在重量较低的籽粒比例增加，此时籽粒的数量和重量之间出现了负相关关系，尽管这一现象并不一定涉及籽粒之间的资源竞争（Miralles and Slafer, 1995 , Acreche and Slafer, 2006）。本研究发现，在不同栽培措施条件下，亩穗数是造成玉米产量差的主要原因，这主要与玉米的种植密度有关。先前的一些关于玉米增产的研究也提出了合理增加密度和培育耐密植

中国知网 https://www.cnki.net

株型的重要性（Luo et al., 2023 , Duvick, 2005 , Fischer et al., 2012）。对小麦和水稻而言，亩穗数和穗粒数是调控产量的最主要因素，改变栽培管理措施几乎不影响千粒重。出现这一现象的主要原因是穗数和穗粒数受到环境条件（水分、肥力等投入和土壤养分供给）和栽培措施（播种日期、种植密度等）调控，而千粒重主要依赖于灌浆期有机物的持续累积，与遗传稳定性的保护（Evans and Evans, 1996 , Peltonen-Sainio et al., 2007 , Zhang et al., 2009）。

我们的研究结果表明，随着基线产量（即土壤基础肥力的产量）的提高，进一步管理措施的有效性会降低。例如，虽然在中国华北平原实施高效措施和高产措施可以使玉米获得增产，但这些措施的有效性相对较低。这一发现强调了在不同农业环境中应用统一管理策略的局限性。因此，在选择有效提高产量的管理措施时，必须考虑当地情况。广泛空间尺度上土壤条件信息的不完整，再加上气候变化，导致了特定管理措施下的产量差距。未来的优化工作应针对这些土壤基础肥力产量值低的区域，以增强效果。

4.5 小结

本章基于站点试验和作物模型模拟系统性量化了中国三大粮食产区玉米、小麦和水稻的产量差。结果表明，目前农民管理实践的产量仅兑现了 58 – 71%的潜在产量，仍有上升的空间。玉米、小麦和水稻通过农民管理实践在土壤基础肥力的基础上能够增产 2.2 – 2.5 Mg ha^{-1}；引入农学专家建议的高效措施能够在农民管理实践基础上增产 0.7 – 1.5 Mg ha^{-1}；而不计成本投入资源的高产措施则能够进一步增产 0.8 – 1.1 Mg ha^{-1}，这体现了优化栽培措施的重要性与必要性。

产量构成方面，玉米主要通过增加亩穗数增产，而小麦和水稻则更多受到亩穗数和穗粒数的影响，千粒重对三种作物产量影响很小。这一结果一方面要求在农业生产中应该保障作物所需的水肥条件和适宜的播种日期、播种密度，另一方面也为育种工作指明了方向，实现更多分蘖、更多有效穗以及更多穗粒数的耐密型植株是未来育种的重点方向。

栽培措施增产效果的空间异质性要求我们在制定田间管理措施时需要综合考虑当地的气象、土壤、作物品种等因素，优先在土壤基础肥力产量较低的区域进行栽培措施改良能取得事半功倍的效果。

中国知网 https://www.cnki.net

第五章 主粮作物的产量限制因素解析

作物产量受气候、土壤和农业管理措施等诸多因素的影响。高温胁迫会降低玉米授粉效率，缩短籽粒灌浆期；而低温胁迫主要影响种子萌发、幼苗发育和幼苗生长，最终导致产量下降（El-Sappah 等，2022；Dong 等，2021；Li, Sui 等，2019）。过量降水会直接造成农田洪涝灾害（Li, Guan 等，2019），而持续干旱则会破坏玉米根系的形成（Sheoran 等，2022）。土壤特性，尤其是保水保肥能力，也对作物在逆境中生长至关重要，对产量的影响也很大（Wang 等，2018）。此外，品种选择、种植密度、施肥和灌溉等管理措施对生产力有显著影响 （Lobell 等人 2002；Erenstein 等人 2013；Greveniotis 等人 2019；Bonilla-Cedrez 等人 2021；Wang 等人 2021）。鉴于这种复杂性，确定主要的产量决定因素并阐明它们之间的相互作用对于加强玉米生产系统至关重要。

研究上述因素对产量的影响通常采用田间试验、基于过程的作物模型和机器学习等方法。田间试验通过设计单因素或多因素试验来探索影响产量的因素。例如，Meertens 等人实施了包括杂草、肥料、病虫害在内的六个试验处理，结果表明只有杂草处理对棉花产量有显著影响 （Meertens 等人 1992）。虽然田间试验方法可靠性最高，但其时间、人力和财务成本高，易受环境因素干扰，且可重复性有限。基于过程的作物模型通过整合生理、生态和气候机制来模拟作物生长动态。例如，Jones 利用 CERES-玉米模型估计，到 2055 年，气候变化可能导致玉米减产 10%（Jones 和 Thornton，2003）。与田间试验相比，作物模型可以预测气候、土壤和管理等因素的长期影响，但需要大量观测数据支持，并且无法准确模拟极端气候和病虫害。机器学习通过算法从农业数据集中提取复杂模式，在产量预测和产量限制的研究中占据重要地位。例如，采用 RF 模型证明产量对光截留效率的强烈依赖性（Jin 等人，2020）。机器学习在变量选择方面比基于过程的模型更具灵活性，并且擅长捕捉非线性相互作用。

本章在田间试验的基础上，使用机器学习算法量化气象、管理和土壤因素在作物产量中的的作用。田间试验持续四年（2016-2019），共计 80 个试验站点分布在中国东北平原、华北平原和长江中下游平原，每个站点实施四种栽培管理措施：土壤基础肥力、农民管理实际、高效措施和高产措施。考虑到不同种植制度对资源有效有效性的差异，以及作物不同生育阶段对气象资源敏感性差异，本章将作物分为春玉米、夏玉米、冬小麦、单季稻和双季稻。气象数据根据作物生长周期细分为三个阶段：营养生长期（播种到开花前 7 天）、开花期（开花期前后各 7 天）和灌浆期（开花后 7 天到成熟）。本章研究具体目标是：（1）系统地量化气候、管理措施和土壤因素对作物产量的相对贡献；（2）阐明关键变量如何影

中国知网 https://www.cnki.net

响作物产量。

5.1 量化产量限制因子的作用

本研究的产量限制因子包括气象因子、土壤因子和栽培措施因子，具体见表5-1。由于一些相关性较高的气象变量可能会影响模型结果的解释（Liaw and Wiener, 2002），选取了与产量高度相关（皮尔逊相关系数 $r > 0.15$）且与同类变量互相关性较低（$r < 0.50$）的变量作为代表性气象因素。以图5-1为例，皮尔逊相关分析的结果表明，营养生长期的最低温和太阳辐射，开花期的最低温、风速和太阳辐射，以及灌浆期的最低温和降水是符合要求的代表性气象因子，其他作物的筛选过程见附录。

表5-1 随机森林输入变量

Table 5-1 Random Forest Input Variables

变量		单位	定义
气象因素	TMAX	℃	日最高温
	TMIN	℃	日最低温
	PRCR	mm	累积降水量
	WS	$m\ s^{-1}$	日平均风速
	Rs	$MJ\ m^{-2}day^{-1}$	太阳辐射
	GDD	℃ d	生长度日
	VPD	hPa	饱和水汽压差
	EDD	℃ d	极端度日
管理因素	varieties		试验站种植的作物品种
	N/P/K	$Kg\ ha^{-1}$	试验站施肥量
	density	$Plants\ m^{-2}$	作物种植密度
土壤因素	CLASS		土壤质地
	BULK	$kg\ dm^{-3}$	土壤容重
	OC	%	有机质含量
	CEC	$cmol\ kg^{-1}$	土壤阳离子交换量

中国知网 https://www.cnki.net

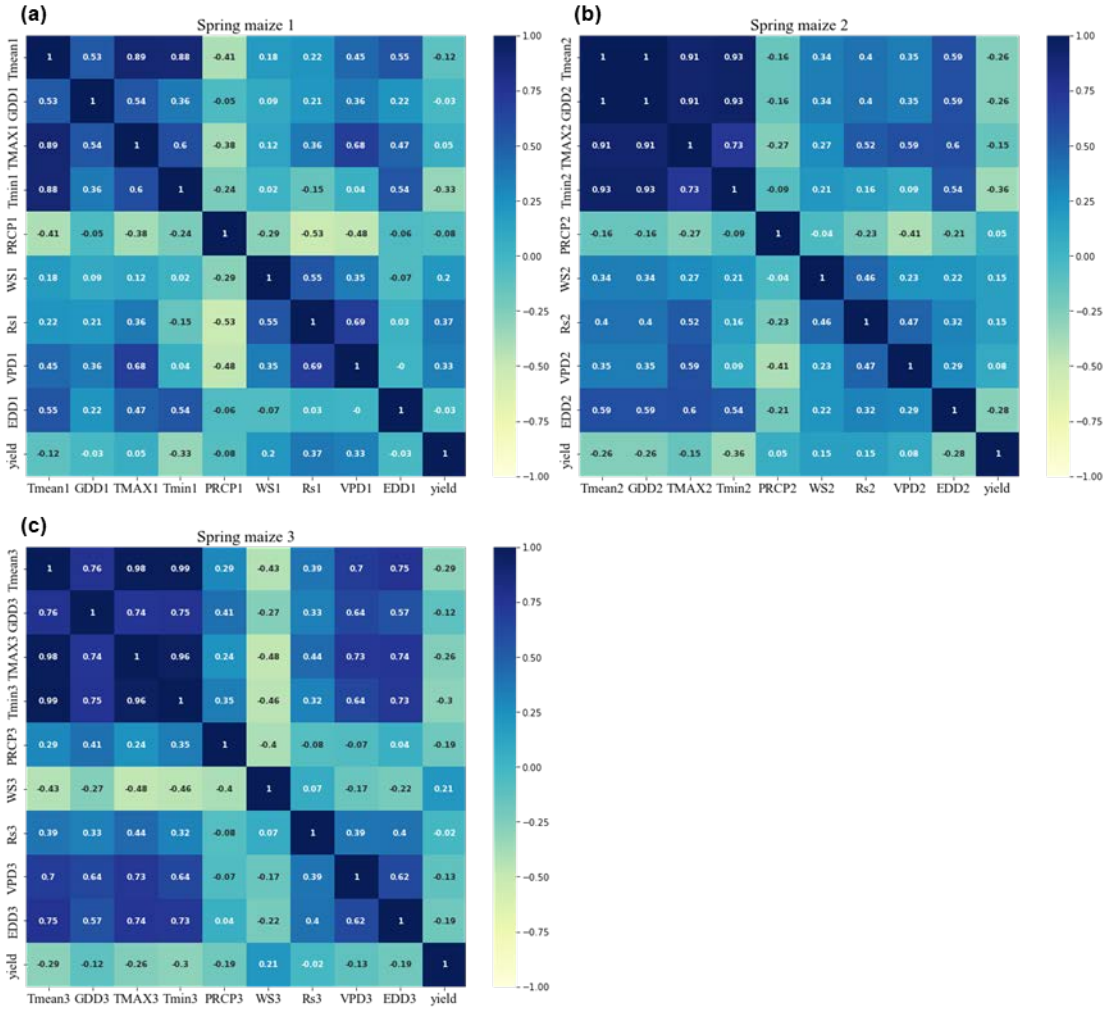


图 5-1 春玉米产量与不同生育段气候变量之间的相关性。1、2 和 3 代表营养生长期、开花期和灌浆期。

Figure 5-1 Correlation between spring maize yield and climate variables in different growth stages. 1, 2 and 3 represent the vegetative growth stage, flowering stage and grain filling stage.

以管理因素、土壤因素和筛选后的气象因素作为随机森林的输入，随机森林模型在调参后能够捕捉五种作物产量 70%以上的变化（图 5-2），参数详情见表 5-2。然而，不同作物的随机森林模型表现存在差异，其中冬小麦 RF 模型的变量解释力最高（R2 = 0.76），双季稻 RF 模型的预测绝对误差低（RMSE = 899.9 kg ha^{-1}）。造成两个指标不同步的原因是：（1）不同作物的试验地点数量不同；（2）不同作物 4 个处理产量的频数分布不同。但总的来说，随机森林对不同作物产量模拟是准确的。

在气象、土壤和管理因素中，管理措施的相对重要性值在所有作物中均为最高，超过了 55%（图 5-3）。气候因素相对重要性合计约 35%，而土壤变量的相对重要性不到 10%。对玉米而言，种植密度是对产量影响最大的因素，在春玉米和夏玉米中相对重要性值均超过了 20%。气象因素中，营养生长期的太阳辐射对春玉米的产量影响最大，相对重要性为 8.7%；营养生长期的饱和水汽压差则是对

中国知网 https://www.cnki.net

夏玉米影响最大的气象因子，相对重要性为 9.1%。另外，营养生长期的最低温在春玉米和夏玉米中均展现了较高的影响，相对重要性接近超过 5%。土壤因素中，对春玉米和夏玉米产量影响最大的是土壤有机质含量（图 5-3a, b）。小麦产量作用最大的因素是施氮量，其相对重要性达到了 20.4%。灌浆期的饱和水汽压差和土壤有机质含量分别是气象因素和土壤因素中相对重要性最高的因子（图 5-3c）。施氮量同样是对水稻产量影响最大的因素，单季稻和双季稻的相对重要性均接近 30%。对单季稻而言，对产量影响最大的气象因子是灌浆期的风速（图 5-3d）；但双季稻产量更容易受营养生长期的风速影响（图 5-3e）。土壤因素中，土壤容重的相对重要性在单季稻和双季稻中均为最大。总体而言，不同种植制度的玉米、小麦和水稻产量的主要限制因素均为管理因素，施肥量在其中扮演着重要角色，气象和土壤对产量的限制则因作物的不同存在差异。

表 5-2 随机森林参数

Table 5-2 The parameters of random forest

作物	n_estimators	max_depth	min_samples_leaf	min_samples_split	max_features
春玉米	700	490	1	2	7
夏玉米	450	440	1	2	6
冬小麦	900	210	1	2	4
双季稻	100	190	1	2	4
单季稻	450	190	1	2	10

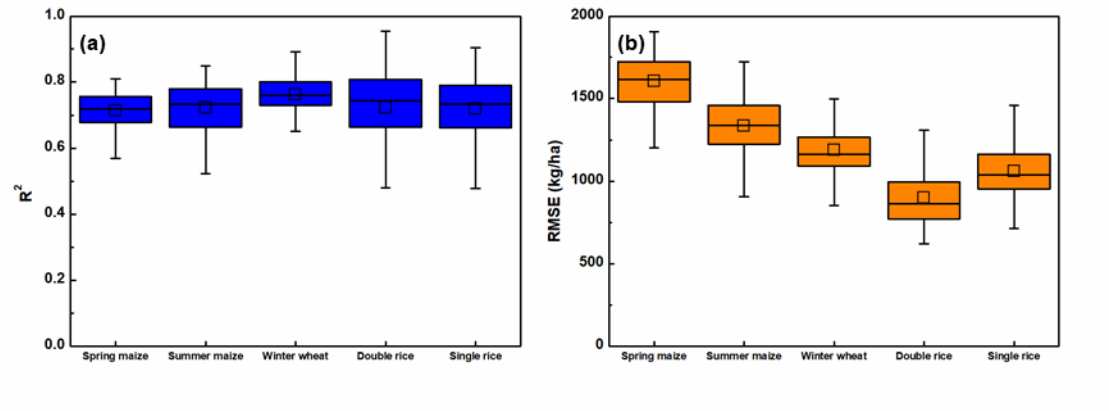


图 5-2 五种作物随机森林的模型表现

Figure 5-2 Model performance of random forests for five crops

中国知网 https://www.cnki.net

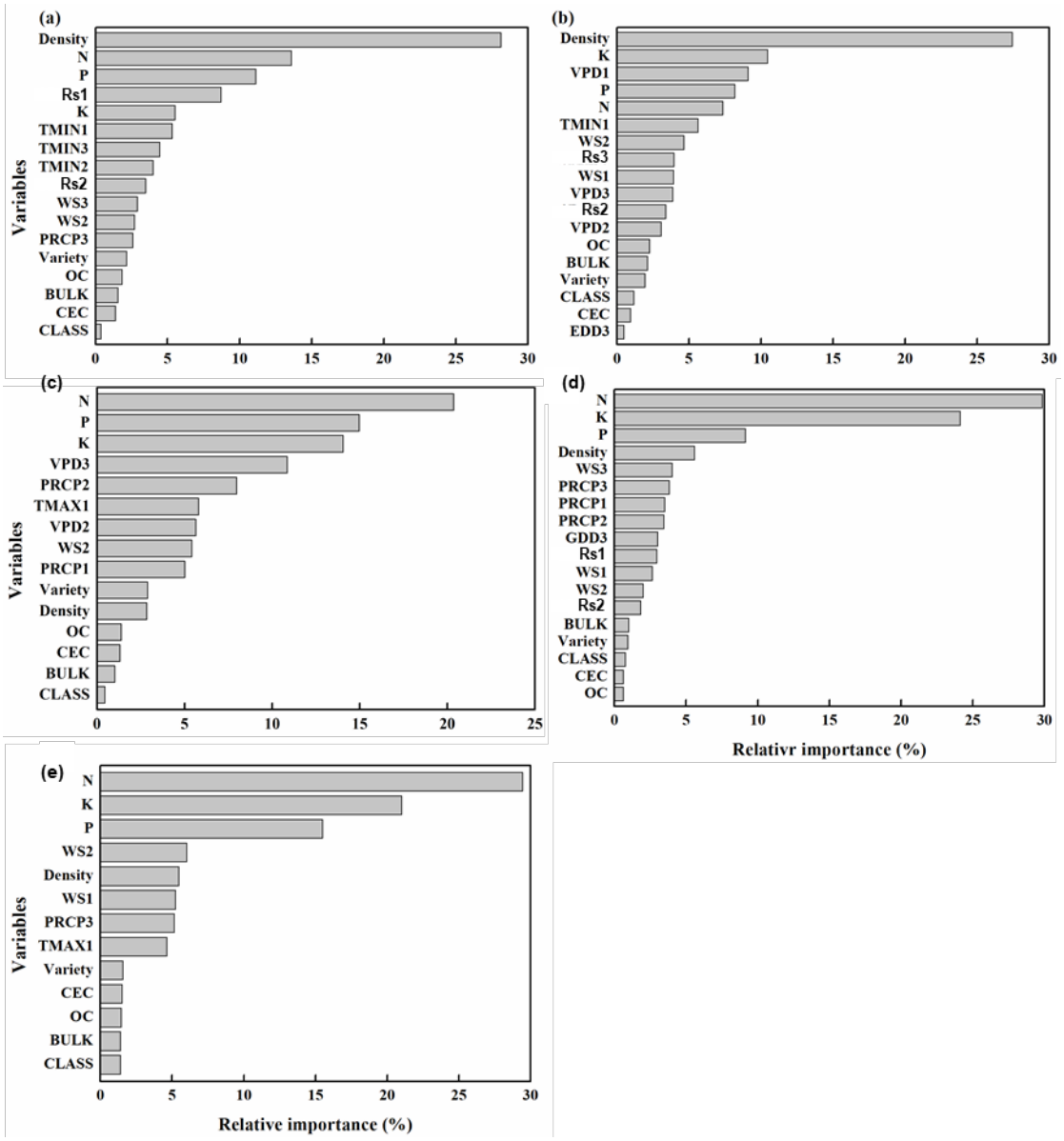


图 5-3 五种作物变量的相对重要性。（a - e）分别代表春玉米、夏玉米、冬小麦、单季稻和双季稻。

Figure 5-3 Relative importance of five crop variables. (a – e) represent spring maize, summer maize, winter wheat, double rice and single rice, respectively.

5.2 主要限制因子的部分依赖图分析

5.2.1 玉米

本研究对相对重要排序前六位的因素进行了部分依赖图分析，以获得作物产量对单个因素的响应关系。春玉米的部分依赖图显示，种植密度在 3.7- 5.8 plants m^{-2} 时，产量基本维持在 9100 kg ha^{-1}，密度范围在 5.8 - 9.1 plants m^{-2} 时，每平方米多种植一株将增产 739.6 kg ha^{-1}（图 5-4a）。施氮量从 0 增加到 324 kg ha^{-1} 时，

中国知网 https://www.cnki.net

每千克氮肥能够增产 4.8 kg ha^{-1}，超过 324 kg ha^{-1} 时，春玉米产量几乎不再增加（图 5-4b）。磷肥和钾肥也显示了类似的关系，P_2O_5和 K_2O 分别超过 120 和 117 kg ha^{-1} 后，产量增加趋于停滞（图 5-4c、e）。气象因素中，营养生长期的太阳辐射和最低温是对春玉米产量较为关键的。其中太阳辐射量超过 21.5MJ m^{-2} day^{-1} 对春玉米而言更易获得高产（图 5-4d），而最低温升高对产量不利（图 5-4f）。

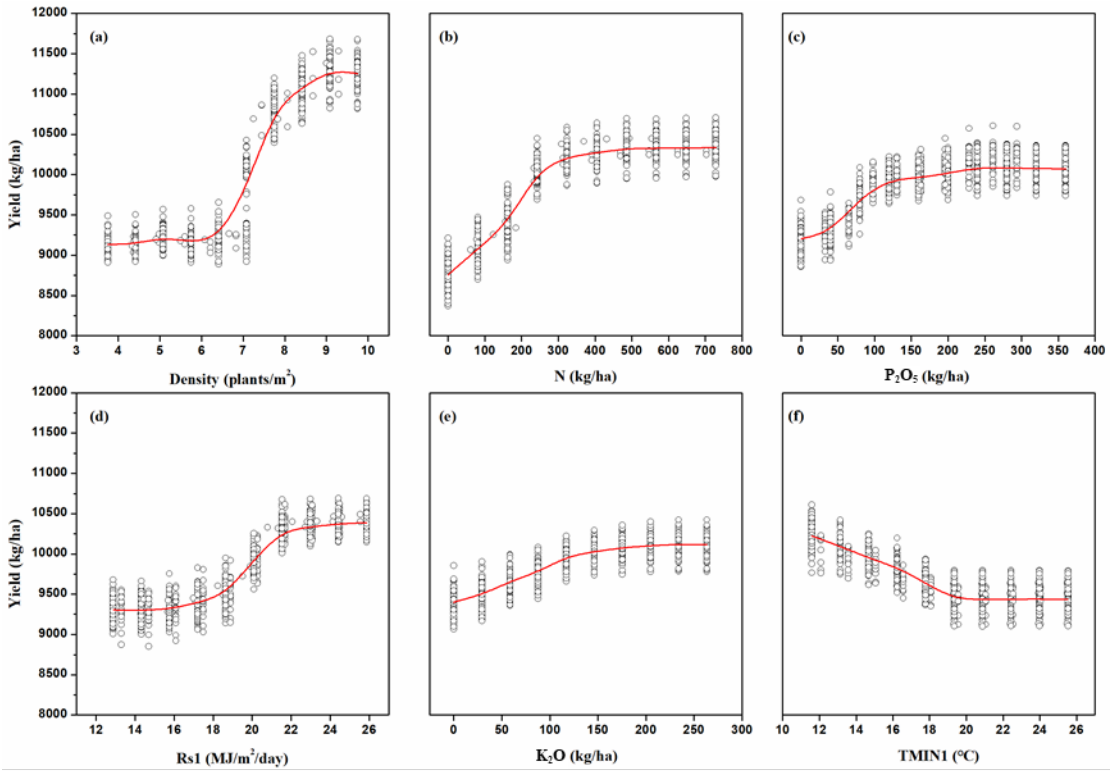


图 5-4 春玉米相对重要性排名前六变量的部分依赖图

Figure 5-4 Partial dependence diagram of the top six variables in relative importance of spring maize

夏玉米种植密度、施氮量、P_2O_5、K_2O 和营养生长期的最低温的部分依赖性结果与春玉米展现了相似的趋势。种植密度在 4.9- 5.9 plants m^{-2} 时，产量基本维持在 8420 kg ha^{-1}，密度范围在 5.9 – 8.3 plants m^{-2} 时，每平方米多种植一株将增产 798.3 kg ha^{-1}（图 5-5a）。施氮量、P_2O_5和 K_2O 分别低于 340、151 和 300 kg ha^{-1} 时，投入肥料能实现产量的增加迅速，每千克氮肥能够为夏玉米增产 1.5 kg ha^{-1}，每千克磷肥（P_2O_5）和钾肥（K_2O）对产量的提升分别为 3.9 和 2.4 kg ha^{-1}（图 5-5b、d、e）。与春玉米一致，营养生长期最低温的升高对夏玉米产量不利，最低温每提高 1 ℃，产量下降 129.1 kg ha^{-1}（图 5-5f）。营养生长期的饱和水汽压差在 1.3 hPa 时夏玉米产量达到峰值，超过这一值后产量略有降低。

中国知网 https://www.cnki.net

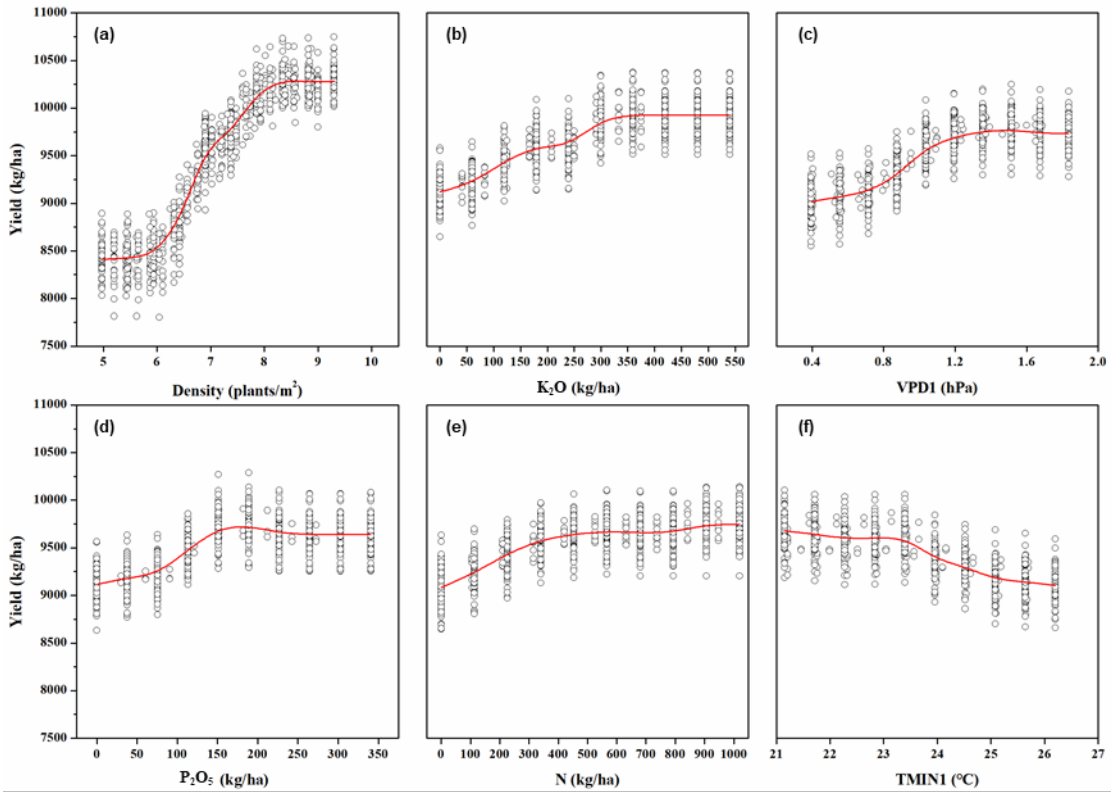


图 5-5 夏玉米相对重要性排名前六变量的部分依赖图

Figure 5-5 Partial dependence diagram of the top six variables in relative importance of summer maize

由于施肥量对春玉米和夏玉米产量均有较高的相对重要性，本研究通过将数据按区域划分输入随机森林，利用部分依赖图进一步分析不同区域产量和施肥量的响应关系。结果显示，玉米产量对施肥的响应情况因种植区域和种植制度的变化而存在显著差异（图 5-6）。在 N、P、K 施用量均低于阈值的情况下，每增加 1 kg ha^{-1} 氮肥，东北平原春玉米增产最多，达到了 5.7 kg ha^{-1}（图 5-6a）；每增加 1 kg ha^{-1} P_2O_5，长江中下游平原的春玉米增产最多 8.7 kg ha^{-1}（图 5-6b）；每增加 1 kg ha^{-1} K_2O，增产最多的是华北平原夏玉米的 5.2 kg ha^{-1}（图 5-6c）；而施肥对长江中下游平原春玉米的增产效果最差，每千克肥料增产不足 2.5 kg ha^{-1}。

中国知网 https://www.cnki.net

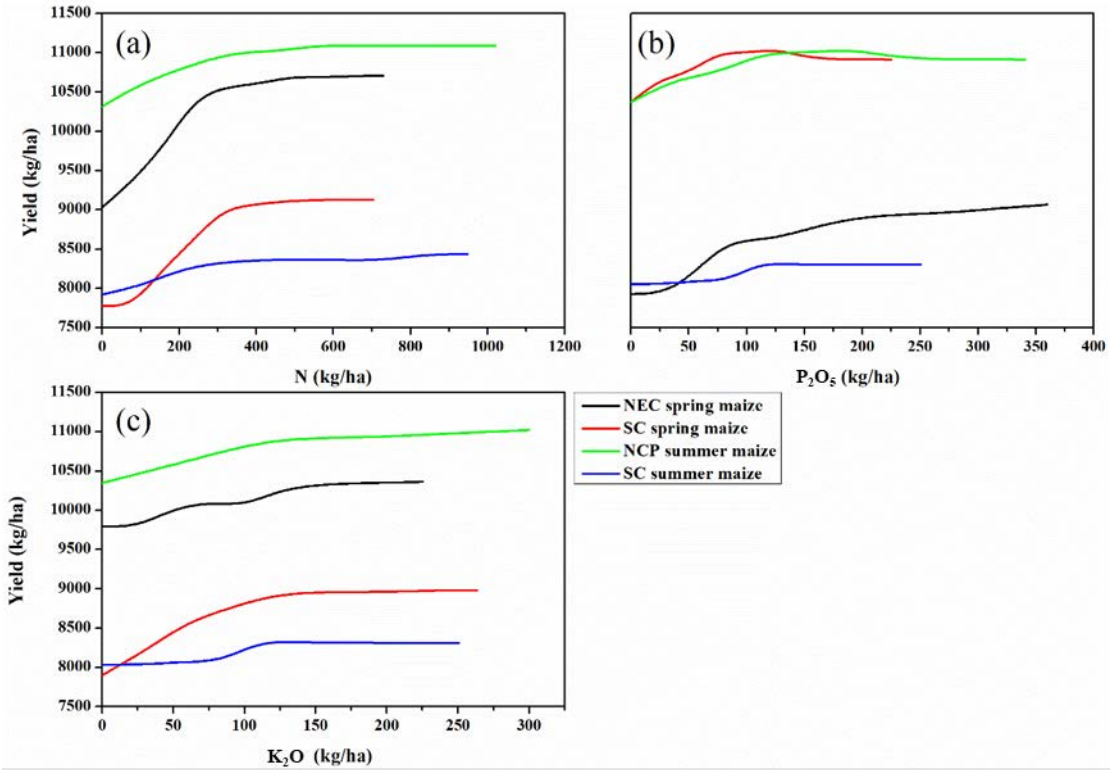


图 5-6 不同地区不同种植制度下玉米产量对施肥量的部分依赖图。

Figure 5-6 Partial dependence of maize yield on fertilizer application under different cropping systems in different regions.

5.2.2 小麦

小麦产量主要受施肥量的影响，施氮量、P_2O_5和 K_2O 的相对重要性排名前三，相对重要性之和超过 50%。施氮量从 0 增加到 267 kg ha^{-1} 时，每千克氮肥增产 6.7 kg ha^{-1}（图 5-6a）；P_2O_5在低于 150 kg ha^{-1} 时，每千克 P_2O_5增产 6.9 kg ha^{-1}（图 5-6b）；K_2O 低于 133 kg ha^{-1} 时，每千克 P_2O_5增产 6.3 kg ha^{-1}（图 5-6c）。在小麦的不同生育阶段对气象因子的敏感性不同，灌浆期的饱和水汽压差、开花期的降水和营养生长期的最高温对小麦产量有较大影响。其中，灌浆期饱和水汽压差在 0.4~1.9 hPa 范围内，每增加 1 hPa 能够增加小麦产量 837 kg ha^{-1}，超过 1.9 hPa 后，产量呈下降趋势图 5-6d）。开花期降水的增加和营养生殖期最高温的增加对小麦产量均呈负面影响图 5-6e, f）。

中国知网 https://www.cnki.net

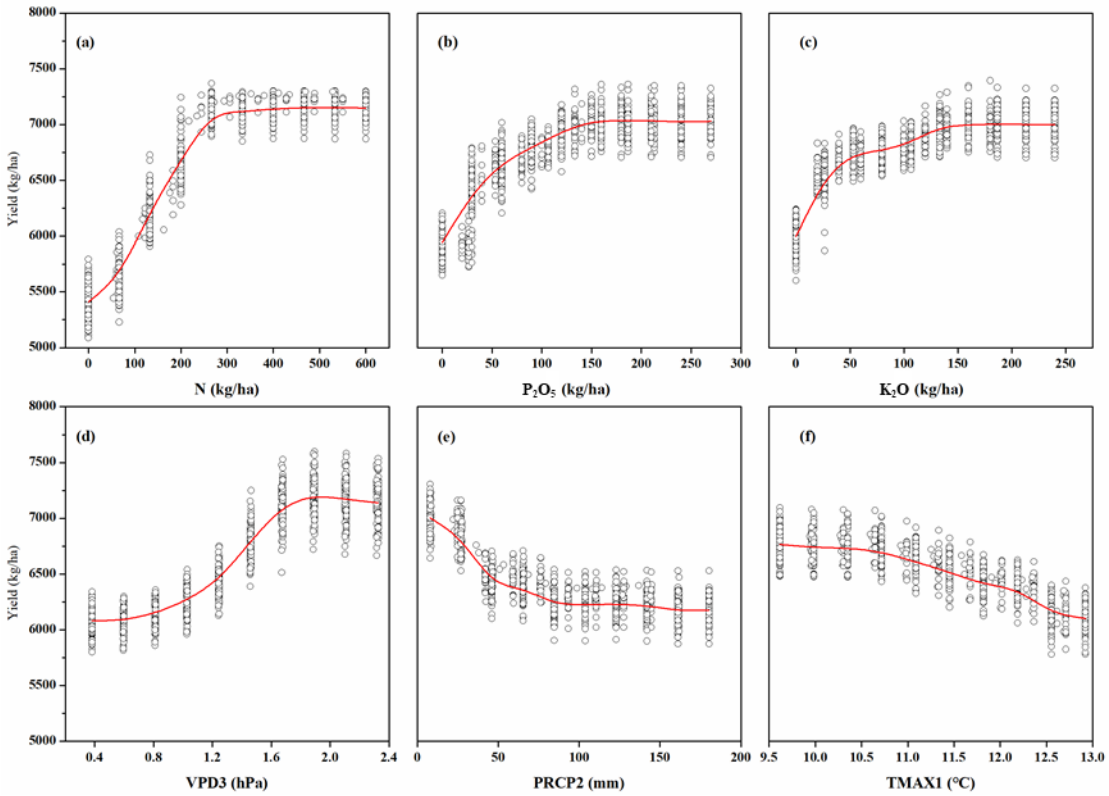


图 5-7 小麦相对重要性排名前六变量的部分依赖图

Figure 5-7 Partial dependence diagram of the top six variables in relative importance of wheat

对比不同区域小麦产量与施肥量的响应关系发现，华北平原冬小麦产量与三种肥料的响应曲线均表现为施肥量超过特定阈值产量不再增加，而南方冬小麦在产量与 K_2O 的关系中并未出现这一趋势（图 5-8）。施氮量低于阈值时，每千克氮肥能使华北平原冬小麦增产 6 kg ha^{-1}，使长江中下游平原冬小麦增产 7.1 kg ha^{-1}。P_2O_5低于阈值时，每千克 P_2O_5对长江中下游平原冬小麦产量的提升幅度更大，为 11.3 kg ha^{-1}。华北平原冬小麦 K_2O 的阈值在 107 kg ha^{-1} 左右，但长江中下游平原在 K_2O 达到 135 kg ha^{-1} 时产量仍在增加。这说明目前试验站点设置的高产措施的 K_2O 仍未能满足小麦的生长发育需求。

中国知网 https://www.cnki.net

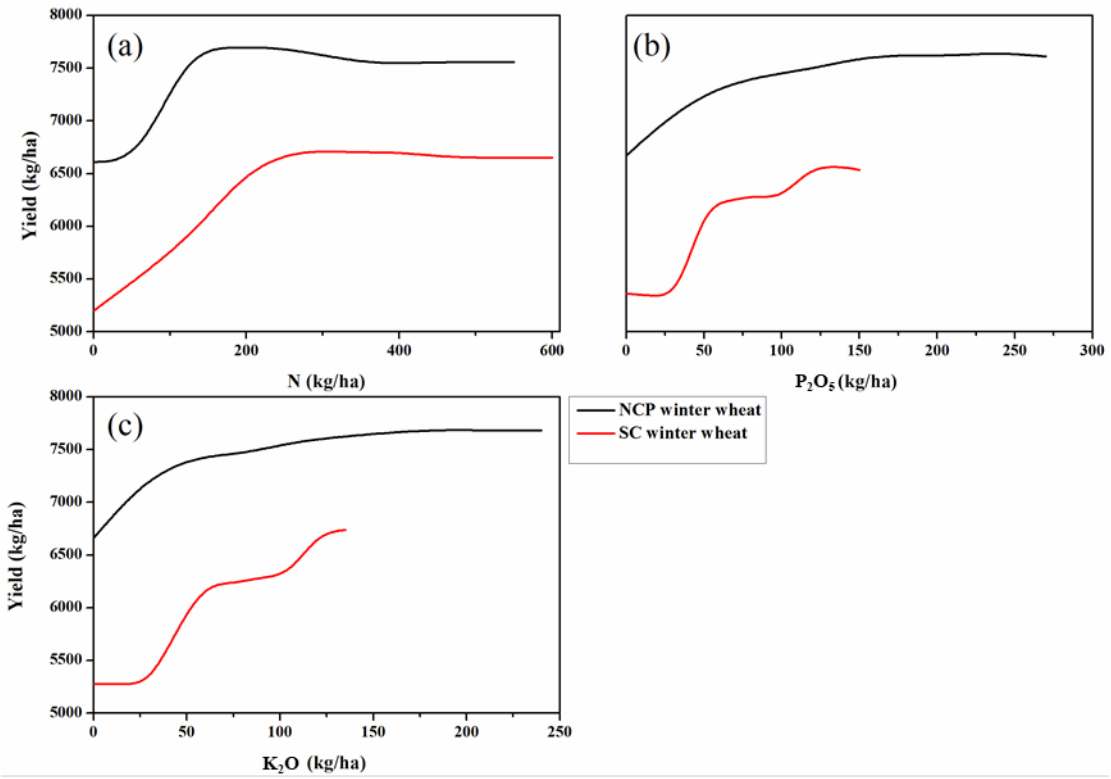


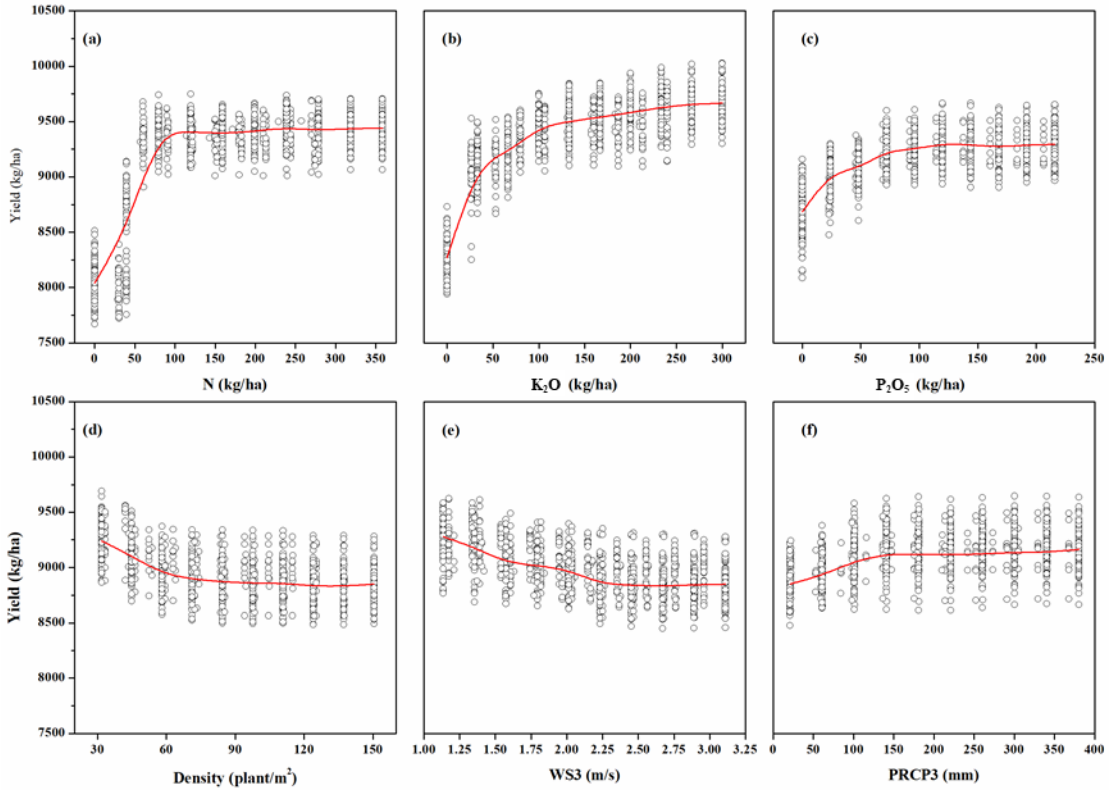
图 5-8 不同地区不同种植制度下冬小麦产量对施肥量的部分依赖图。

Figure 5-8 Partial dependence of winter wheat yield on fertilizer application under different cropping systems in different regions

5.2.3 水稻

对单季稻产量影响排名前六的因素分别时施肥量（氮、钾、磷）、种植密度、灌浆期风速和灌浆期降水量。施肥量的产量响应曲线具有与玉米、小麦相同的趋势，施氮量、K_2O 和 P_2O_5分别在 80、100 和 72 kg ha^{-1} 时曲线出现拐点（图 5-9a, b, c）。当施氮量低于 80 kg ha^{-1} 时，多施加 1 千克氮肥预期能够增产 17.2 kg ha^{-1}；K_2O 低于 100 kg ha^{-1} 时，每千克 K_2O 能够增产 10.9 kg ha^{-1}；P_2O_5低于 72 kg ha^{-1} 时，每千克 P_2O_5能使单季稻产量增加 7.1 kg ha^{-1}。与玉米不同，种植密度增加对单季稻产量是不利的，种植密度每增加 1 plans m^{-2}，产量将下降 2.8 kg ha^{-1}（图 5-9d）。在单季稻灌浆期，风速和降水对产量的影响是相反的。风速超过 1.1 m s-1 后，产量将随风速增加而下降（图 5-9e）。而降水从 20 增加到 140 mm 时，产量增加了 271.2 kg ha^{-1}，超过 140 mm 后降水的增产效率降低（图 5-9f）

中国知网 https://www.cnki.net



5-9 双季稻相对重要性排名前六变量的部分依赖图

5-9 Partial dependence diagram of the top six variables in terms of relative importance of double rice

双季稻相对重要性前三的分别是施氮量、K_2O 和 P_2O_5，与单季稻一致，且产量对施肥的响应曲线也与单季稻相似。但相比单季稻，双季稻对 K_2O 的需求量更高，在 163.3 kg ha^{-1} 时曲线出现拐点；氮肥和磷肥的曲线拐点出现更早，分别为 70 和 24 kg ha^{-1}。当施肥量低于阈值，每多施加 1 千克氮肥、K_2O 和 P_2O_5，双季稻产量将分别增加 17.1，6.7 和 27.9 kg ha^{-1}（图 5-10a, b, c）。开花期的风速、种植密度和营养生长期的风速分别排在四到六位。开花期风速的增加有利于双季稻产量的提高，当风速由 1.2 增加到 2.5 m s^{-1} 时，产量提高了 288 kg ha^{-1}（图 5-10d）。种植密度增加对双季稻产量也是有利的，种植密度每增加 1 plans m^{-2}，产量将增加 2.6 kg ha^{-1}（图 5-10e）。营养生长期风速在低于 1.7 m s^{-1} 时，几乎对产量没有影响，而当风速从 1.7 增加到 2.5 m s^{-1} 时，产量提高了 269.1 kg ha^{-1}（图 5-10f。

中国知网 https://www.cnki.net

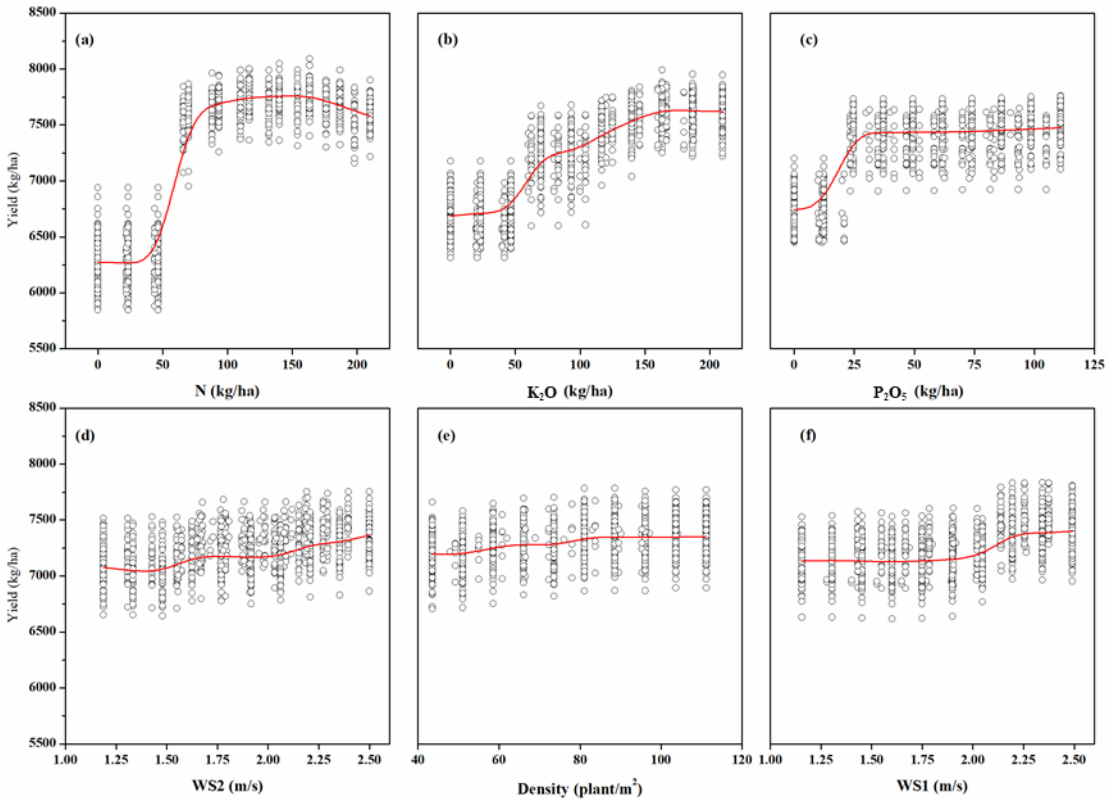


图 5-10 单季稻相对重要性排名前六变量的部分依赖图

Figure 5-10 Partial dependence diagram of the top six variables in terms of relative importance of single rice

施氮量对不同区域不同种植制度的水稻产量均有明显提升，当施氮量分别低于 102、115.3 和 83.4 kg ha^{-1} 时，每投入 1 kg ha^{-1} 氮肥，3 种作物均增产 15 kg ha^{-1} 以上（图 5-11a）。磷肥对长江中下游平原双季稻有较好的增产作用，当 P_2O_5 用量从 0 增加到 33.3 kg ha^{-1} 时，其产量增加了 736.6 kg ha^{-1}（图 5-11b）。K_2O 对东北平原单季稻产量提高最明显，K_2O 在 0 - 74.7 kg ha^{-1} 范围内，多施用 1 kg ha^{-1} K_2O，产量可增加 13.1 kg ha^{-1}（图 5-11c）。

中国知网 https://www.cnki.net

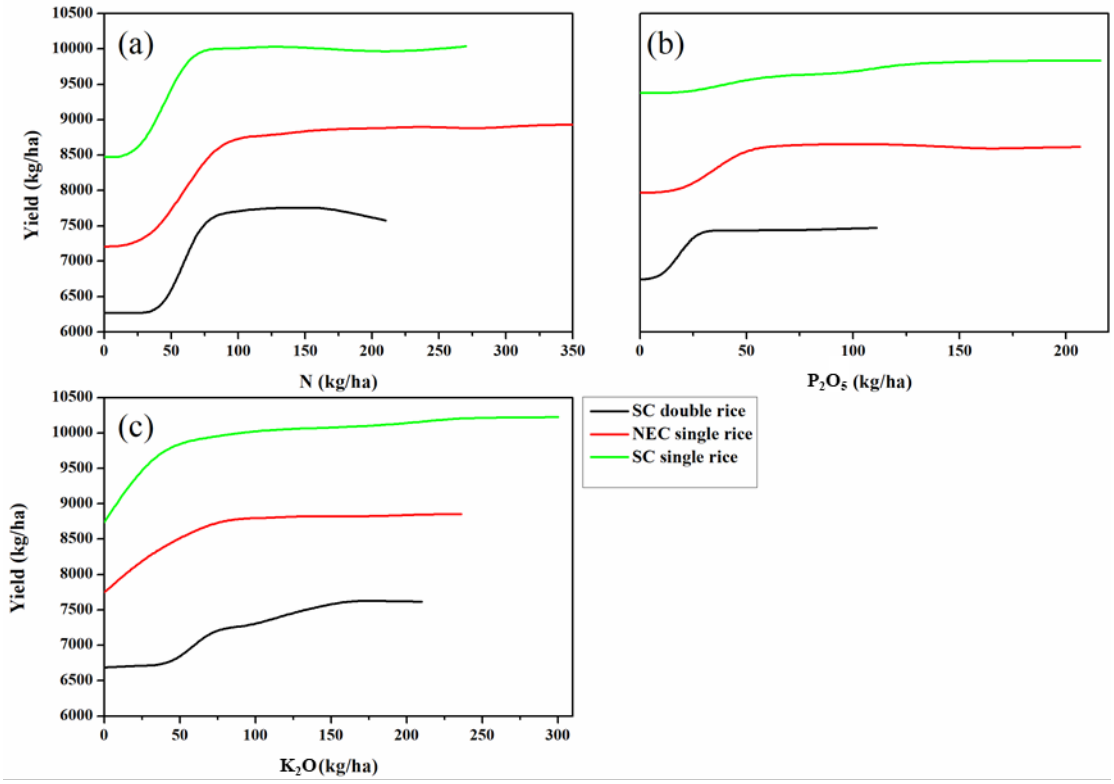


图 5-11 不同地区不同种植制度下水稻产量对施肥量的部分依赖图。

Figure 5-11 Partial dependence of rice yield on fertilizer application under different cropping systems in different regions

综上所述，对不同种植制度的玉米、小麦和水稻而言，施肥量都是重要的产量限制因素，施肥量的增加能够有效提高作物产量直到达到特定的阈值。但施肥的增产效率在不同区域间存在差异，这需要针因地制宜的制定施肥量。

5.3 讨论

产量形成过程是多方面的，受气候、土壤、管理措施和作物品种等多种因素的影响（Liu et al., 2013 , Lobell et al., 2002）。将这些变量作为随机森林的输入参数，我们能够解释 70%以上的产量变异。与一些仅涉及气候变量的模型（Guo et al., 2021）相比，我们的模型更加准确。在这些输入参数中，管理因素的贡献最大，在五种作物类型中均超过 40%；土壤因素的贡献最小，几乎可以忽略不计（图 15-12）。这一结果高于之前基于统计数据和作物模型得到的值：农艺改良贡献了玉米产量增长的 39% （Rizzo et al., 2022），这一差异差异可以归因于我们设置了无化肥投入的土壤基础肥力，这使我们能够从零开始评估化肥增加带来的全部影响。然而，已有众多研究证实了土壤条件（包括土壤类型、土壤速效养分含量、土壤有机质和土壤 pH 值）对作物生长发育的重要作用（Esmaeilzadeh and Ahangar, 2014 , McCauley et al., 2009 , Murphy, 2015）。造成这种现象的主要原因是我们没

中国知网 https://www.cnki.net

有从实验地点获取土壤样本，数据集提供的土壤参数是固定的，不能反映实时的土壤状况。

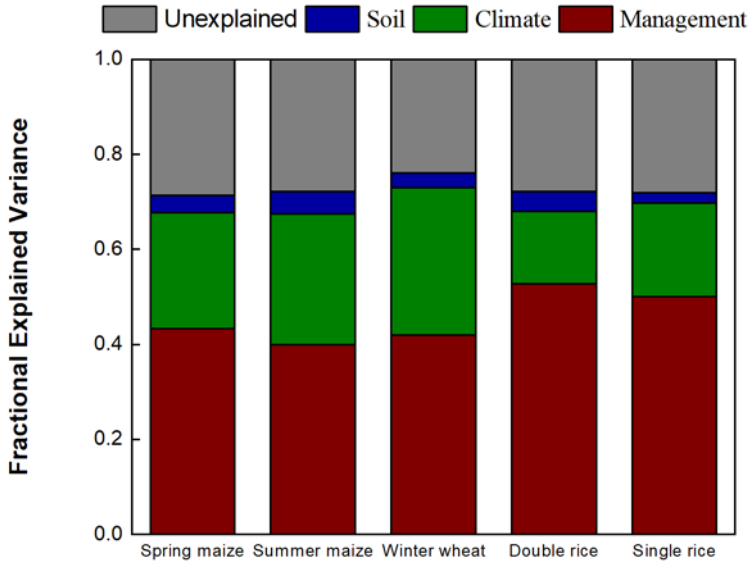


图 5-12 各作物的随机森林模型的分数解释方差。

Figure 5-12 Variable explanatory power of random forest models for each crop.

种植密度是影响玉米产量最重要的管理变量。大量研究表明，增加种植密度或结合其他栽培管理措施可以提高玉米产量。例如，美国（Assefa et al., 2018）和中国（李少昆 et al., 2016）的高产研究试验表明，非常高的种植密度可以获得高产。张等（Zhang et al., 2017）提出的东北地区春玉米最佳种植密度为 9.75 plants m^{-2}，华北平原夏玉米最佳种植密度为 8.25 plants m^{-2}，与我们得到的结果非常接近。当密度超过最佳水平时，作物倒伏等负面影响的风险会增加（Shi et al., 2016），但由于试验站管理水平较高且试验期间未发生倒伏等气象灾害，负面影响并未体现出来。另外，春玉米和夏玉米均表现出低密度时，密度增加对产量增幅有限，其他研究也有类似的现象（Deng et al., 2003 , Tokatlidis and Koutroubas, 2004）。这是由于低密度出现在土壤基础肥力处理中，在没有水肥投入的情况下增加种植密度会导致植株间竞争土壤养分和水分，降低了单株的产量。对小麦和水稻而言，种植密度的对产量影响较小，这是由于小麦水稻等 C3 作物在种植密度降低时会产生更多的分蘖以提高穗数，减弱了种植密度的作用（Jaenisch et al., 2022）。

营养生长期较高的太阳辐射水平会增加作物捕获的光合有效辐射，从而用于生物量生产（Chen et al., 2013）。春玉米主要分布在中国东北（高纬度地区）和四川盆地（低海拔地区），这些地区太阳辐射较低，这可能是 Rs 相对重要性高于其他气候因子的原因。一般来说，VPD 的增加会导致产量的降低（Hoffman et al., 2020），但我们的研究发现，夏玉米营养生长期和冬小麦灌浆期的 VPD 与最终产量呈正相关。这是因为 VPD 是驱动植被和土壤水分流失的力量，VPD 的增加导

中国知网 https://www.cnki.net

致植物蒸腾作用增加，从而促进植物对水分和养分的吸收，保持气孔开放以固定二氧化碳。同时，华北平原和长江中下游平原的夏玉米和冬小麦可以通过灌溉补充水分，防止干旱胁迫的发生。此外，夜间温度升高促进植物呼吸作用，不利于干物质积累。因此，营养生长期较低的最低温度（TMIN）更有利于作物的生长发育。

5.4 小结

本章利用随机森林模拟了不同种植制度下的玉米、小麦和水稻的产量，并量化了气象、管理和土壤因素对这些作物产量的贡献。结果表明管理因素是作物的产量的主要限制因素，其中氮、磷和钾肥施用量是所有作物产量的主要限制因子。此外，玉米产量还高度依赖种植密度。气象因素对产量的贡献在 15 - 30%，不同作物影响其产量的关键气象因子存在差异。土壤因素对产量的贡献最小，不到 5%。

部分依赖图的结果展示了各个作物产量对影响前六因素的响应关系。玉米、小麦和水稻施肥量与产量间存在边际递减效应，即施肥水平低时，单位肥料增长效果显著，但施肥量超过临界阈值后，对产量提升的幅度急剧下降。且不同区域，作物施肥量的阈值存在差异。

中国知网 https://www.cnki.net

第六章 多目标优化的缩差措施制定

优化栽培管理措施是缩减产量差的主要途径，有助于推动农业集约化和可持续发展。本研究中所称的‘缩差措施’，是指基于多目标优化方法制定的、针对主要产量限制因素的栽培管理组合。中国的土壤-作物系统综合管理方案改善了肥料管理，在提高作物产量的同时减少了环境污染（Cui et al., 2018）。美国的综合施肥与灌溉优化策略改善了水肥投入，抵消了气候变化造成的产量损失（Ren et al., 2025）。这些优化方案通过田间的实验获得大量数据，并一定程度上阐明了对作物、环境和栽培管理相互作用的机制，但其结果仅限于特定站点和特定的管理实践。在区域尺度上，考虑到多种管理实践（例如，施肥和种植密度等）与当地土壤和气候动态的非线性相互作用和联系（Du et al., 2021），很难通过进行田间实验来确定最佳管理组合，也很难将优化措施从有限的站点推广到区域尺度（Shang et al., 2021）。

在农业生产中，不同主体间的目标存在差异。国家层面聚焦于两大目标：1. 提高粮食产量，保障国家粮食安全；2. 推动绿色农业转型，减少农业造成的环境污染（于法稳, 2016）。而作为生产主体的农民更关注投入产出比，经济收益是其决策的核心驱动（Wang et al., 2019a）。不同栽培措施下，上述目标之间存在协同作用和权衡取舍。例如，高产通常意味着收入增加，这往往依赖于肥料的广泛使用，但过量施肥等不当的管理措施可能会导致高的环境污染和高的农民投入。

本章将随机森林与多目标优化算法结合，利用 GYGA 升尺度方法得到三大粮食作物在中国主要种植区域的最优栽培管理组合。首先，对 GYGA 筛选的代表性气象站点建立气象、管理和土壤数据集，其中管理数据由多目标优化算法NSGA-II随机生成，并根据田间试验数据确定管理数据包括施肥量和种植密度的上下限。其次，计算随机生成的管理数据组合对应的作物产量、环境效益和经济效益，并确定每个站点最优的栽培管理组合。其中，产量利用上一章中调参后能准确模拟不同栽培管理措施下作物产量的随机森林模拟得到。最后，将优化措施升尺度到全国范围，并评估优化栽培措施对氮利用效率、氮流失方面的影响及其能够实现的经济效益和环境效益。

6.1 基于多目标优化的栽培管理组合

鉴于管理措施与环境因素之间复杂的相互作用，优化栽培管理措施必须综合考虑气候和土壤条件的影响，而非仅仅关注诸如部分依赖图等基于单个管理因素的分析方法。本研究采用了多目标优化算法中常用的 NSGA-II 对三个目标：（1）

中国知网 https://www.cnki.net

最大化产量，（2）最大化农民收入，（3）最小化环境污染，多次迭代获得帕累托解集。以玉米的代表性站安化为例（图 6-1），帕累托解集包括了多个可行的栽培管理方案，图中每个施氮量代表一个组合，包括施氮量、P_2O_5、K_2O 和种植密度。通过熵权法给三个目标赋予权重取，得到加权和最高的管理组合，即黑色箭头所指作为该站点最优方案。对安化站玉米生产而言，最优的栽培管理措施为：施氮量 254 kg ha^{-1}，$P_2O_5$217 kg ha^{-1}，K_2O345 kg ha^{-1}，种植密度 9.7 plants ha^{-1}。此时预期产量达到 10.8 Mg ha^{-1}，农民经济收益 2.1 ×10^4 $ ha^{-1}。

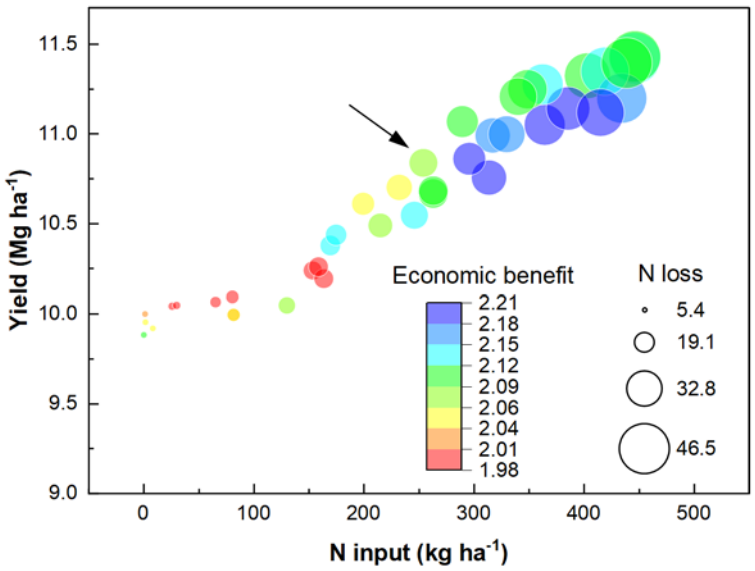


图 6-1 安化站玉米的帕累托解集，箭头位置为综合最优组合。

Figure 6-1 Pareto solution set of maize at Anhua Station, the arrow position indicates the comprehensive optimal combination.

优化栽培管理措施条件下玉米、小麦和水稻的平均氮、磷、钾施用量明显低于高产措施条件下的（表 6-1）。推荐措施条件下玉米的氮施用量与农民管理实践条件下的接近，而小麦和水稻的氮施用量远低于农民管理实践条件下的。且所有作物在推荐措施条件下的 P_2O_5和 K_2O 施用量均高于农民管理实践条件下的施用量（表 4-1）。

不同区域施肥量表现出明显的空间异质性（图 6-2）。具体而言，玉米的需肥量存在区域差异，高投入区集中在东北平原和西南春玉米种植区（图 6-2a、d、j）。与长江中下游平原的水稻相比，华北平原水稻需肥量较低，但钾肥需求量较大（图 6-2c、f、i）。在全国范围内，玉米对肥料的需求量，尤其是氮肥（160-300 kg ha^{-1}），高于小麦（40-200 kg ha^{-1}）和水稻（40-120 kg ha^{-1}）（图 6-2）。由于种植密度对玉米产量的影响较大（图 5-3a），在推荐措施条件下，玉米的最佳种植密度约为 93,000 plants ha^{-1}（图 5-4）。鉴于种植密度对小麦和水稻产量的影响较小，这些作物的最优种植密度设定为农民管理实践、高效措施和高产措施种植密度的平均值。

中国知网 https://www.cnki.net

表 6-1 不同区域玉米、小麦和水稻的最优栽培管理措施组合

Table 6-1 Optimal combinations of cultivation and management measures for maize, wheat and rice in different regions

作物	区域	N（kg ha-1）	P_2O_5（kg ha^{-1}）	K_2O（kg ha^{-1}）	种植密度（×10^4 株 ha^{-1}）
玉米	东北平原	268.5 ± 8.1	200.1 ± 13.9	232.4 ± 10.9	9.1 ± 0.1
	华北平原	256.4 ± 9.5	225.7 ±3.1	226.0 ± 18.0	9.2 ± 0.1
	长江中下游平原	223.3 ± 7.3	219.8 ± 4.0	264.2 ± 12.4	9.4 ± 0.1
	区域平均	241.7 ± 5.1	216.4 ± 3.9	246.6 ± 8.1	9.3 ± 0.1
小麦	东北平原	146.9 ± 6.9	190.6 ± 13.6	102.4 ± 7.9	-
	华北平原	161.4 ± 12.2	155.6 ± 8.4	114.4 ± 4.6	
	长江中下游平原	162.0 ± 7.4	158.5 ± 3.8	121.4 ± 4.6	
	区域平均	155.2 ± 5.3	162.6 ± 3.1	119.5 ± 2.9	
水稻	东北平原	65.9 ± 7.4	84.9 ± 0.2	226.4 ± 7.2	
	华北平原	51.6 ± 3.7	85.3 ± 0.2	250.9 ± 10.5	
	长江中下游平原	59.0 ± 3.3	85.0 ± 0.2	255.3 ± 6.1	
	区域平均	59.6 ± 2.7	85.0 ± 0.1	247.6 ± 4.7	

表 6-2 代表性站点多在区域不同栽培管理措施的产量（单位：Mg ha^{-1}）

Table 6-2 Yields of different cultivation and management measures at representative sites in different regions (Unit: Mg ha^{-1})

作物	地区	土壤基础肥力	农民管理实践	高效措施	高产措施	优化栽培管理措施
玉米	东北平原	6.6 ± 0.1	10.3 ± 0.1	10.9 ± 0.1	12.3 ± 0.2	12.5 ± 0.2
	华北平原	7.1 ± 0.2	9.0 ± 0.1	11.4 ± 0.2	11.8 ± 0.2	11.6 ± 0.2
	长江中下游平原	6.0 ± 0.2	9.0 ± 0.2	9.8 ± 0.1	10.9 ± 0.2	11.2 ± 0.2
	区域平均	6.5 ± 0.1	9.3 ± 0.1	10.5 ± 0.1	11.5 ± 0.1	11.7 ± 0.1
小麦	东北平原	4.0 ± 0.2	6.7 ± 0.2	7.1 ± 0.2	7.2 ± 0.2	7.3 ± 0.1
	华北平原	4.4 ± 0.2	6.9 ± 0.1	7.4 ± 0.1	7.4 ± 0.1	7.6 ± 0.1
	长江中下游平原	3.5 ± 0.1	6.3 ± 0.1	6.4 ± 0.1	7.0 ± 0.1	7.0 ± 0.1
	区域平均	4.0 ± 0.1	6.7 ± 0.1	7.0 ± 0.1	7.3 ± 0.1	7.3 ± 0.1
水稻	东北平原	5.4 ± 0.1	8.9 ± 0.1	9.9 ± 0.1	10.0 ± 0.1	11.6 ± 0.1
	华北平原	5.8 ± 0.2	9.3 ± 0.1	9.4 ± 0.1	9.5 ± 0.1	11.4 ± 0.1
	长江中下游平原	5.1 ± 0.1	8.7 ± 0.1	8.8 ± 0.1	9.0 ± 0.1	11.2 ± 0.1
	区域平均	5.7 ± 0.1	8.8 ± 0.1	9.1 ± 0.1	9.3 ± 0.1	11.3 ± 0.1

使用训练好的随机森林模型，优化栽培管理措施的玉米、小麦和水稻的平均预测产量分别为 11.7 Mg ha^{-1}、7.3 Mg ha^{-1} 和 11.3 Mg ha^{-1}（图 6-2）。且不同区域的作物产量差异明显，且基本呈北高南低的趋势。例如，东北平原的玉米（12.3 Mg ha^{-1}）和水稻（11.6 Mg ha^{-1}）产量高于长江中下游平原。对于小麦而言，在优化栽培管理措施下，华北平原产量最高，达到了 7.4 Mg ha^{-1}。对比不同管理措施的产量，玉米、小麦和水稻优化栽培管理措施下的产量与高产措施下的产量接近

中国知网 https://www.cnki.net

（表 6-2）。这些结果表明，在主产粮食区，增加磷钾肥用量、减少氮肥用量的优化栽培管理措施能够有效提高农民产量。

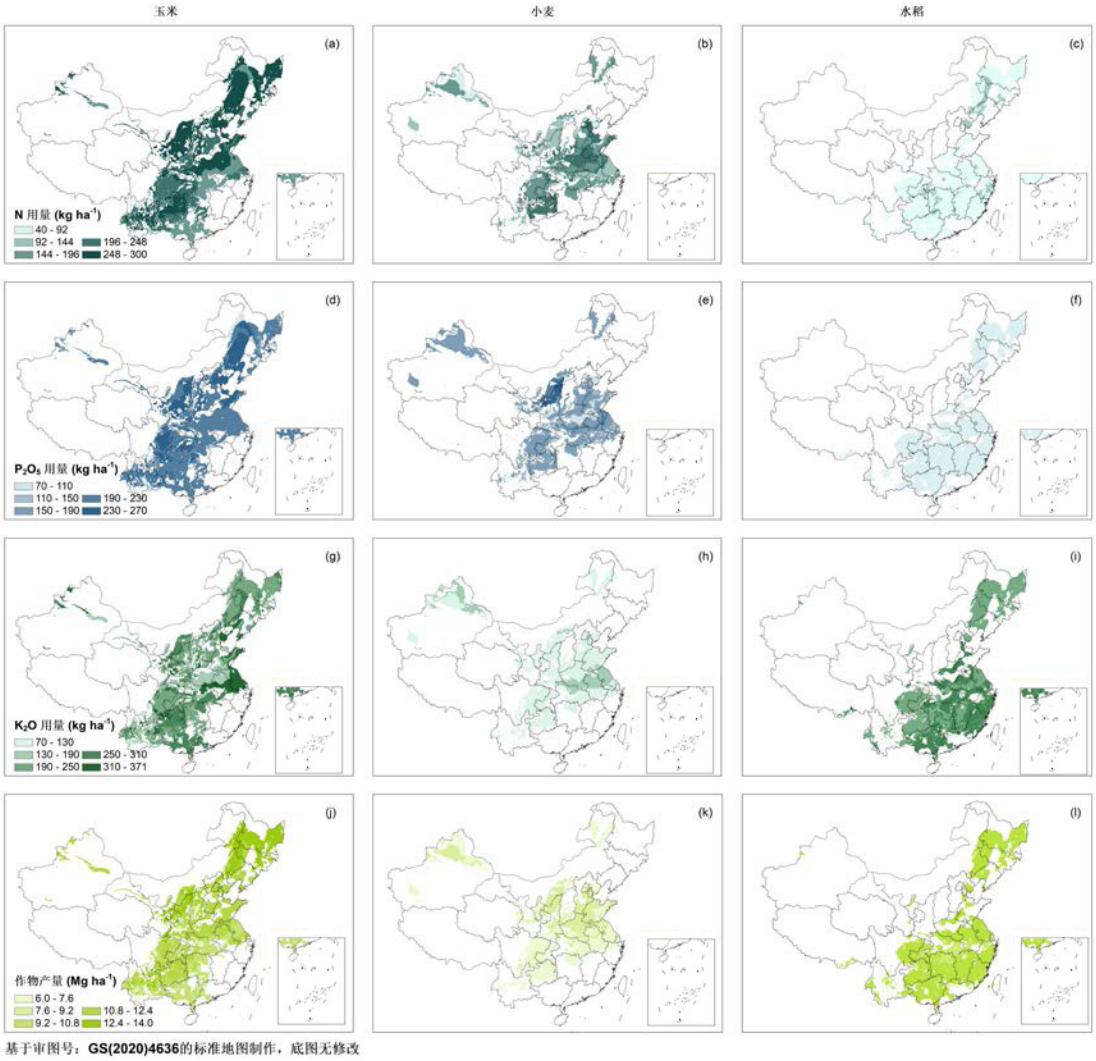


图 6-2 最优施肥量的空间分布及预期产量。

Figure 6-2 Spatial distribution of optimal fertilizer application amount and expected yield.

中国知网 https://www.cnki.net

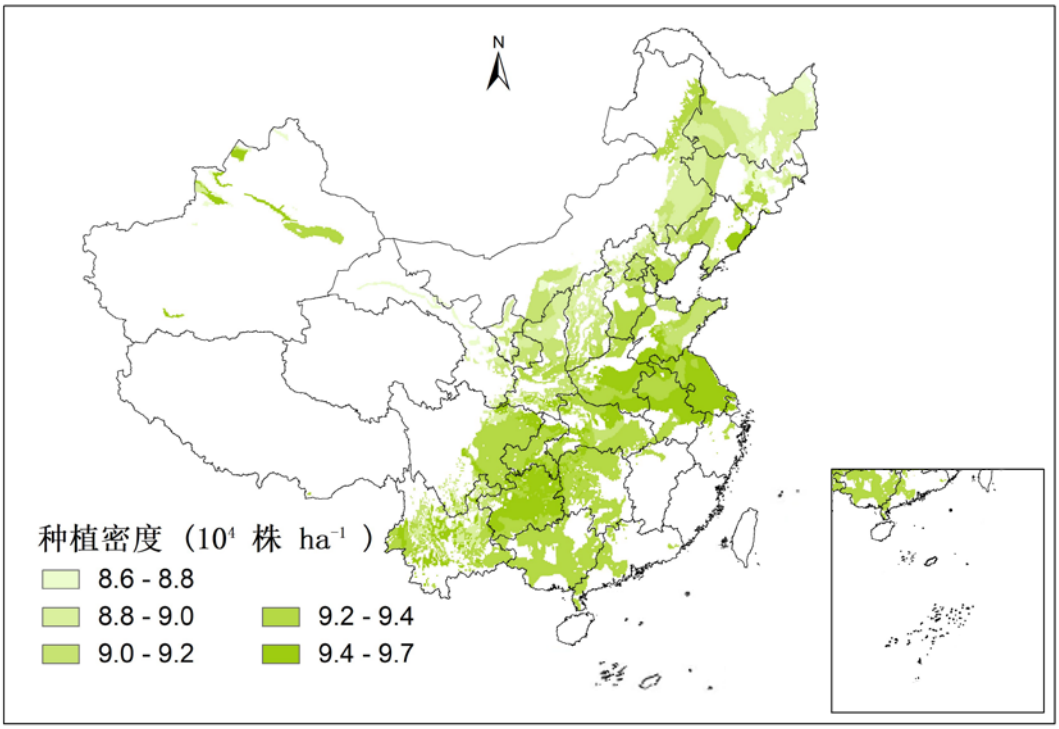


图 6-3 玉米最优种植密度的空间分布。

Figure 6-3 Spatial distribution of optimal maize planting density.

6.2 不同栽培管理措施的氮流失

农民管理实践普遍存在过量施肥的现象，尤其是氮肥。本研究评估了玉米、小麦和水稻三种作物在农民管理实践、高效措施、高产措施和优化栽培管理措施下通过氨（NH_3）挥发、氧化亚氮（N_2O）排放、淋溶（NO_3^-）和径流（runoff）造成的氮损失。不同管理措施下，三种作物的优化栽培管理措施氮流失量均最小，说明基于多目标优化得到的栽培措施有效减少了农田的氮流失。

玉米生产中，过量的氮素主要通过氨挥发和氮淋溶进入环境（表 6-3）。东北平原的氮流失量在三个区域中最低，不同栽培管理措施造成的氮流失量为 27 – 34.6 kg N ha^{-1}，其中氨气挥发占总氮流失量的 65 - 67%。华北平原的氮流失量最高，范围在 57.1 – 395.6 kg N ha^{-1}。与东北平原不同，氮淋溶在总氮流失中的占比最高为 52.4 – 80.3%，氨挥发占比不到 45%。长江中下游平原结果与华北平原类似，61.7 – 80.2%的氮流失以淋溶的途径进入环境，氨挥发的占比低于 35.2%。这些差异反映出区域间的气候和土壤因素对氮流失的影响，东北平原以偏碱性的黑土为主，且施肥时间多在气温较高的夏季，使铵态氮以氨气形式挥发；华北平原玉米生育期降水集中且由良好灌溉条件，使硝态氮随水分下渗；而长江中下游

中国知网 https://www.cnki.net

平原玉米种植区域地形多为丘陵山地，土壤以酸性红壤为主，气温高，降水强度大容易产生地表径流，使硝态氮通过淋溶流失。

表 6-3 主要粮食产区不同栽培管理措施玉米的氮损失（单位：kg N ha^{-1}）

Table 6-3 Nitrogen loss of maize under different cultivation and management measures in major grain producing areas (Unite: kg N ha^{-1})

区域	栽培管理措施	NH_3	N_2O	NO_3^-	runoff	总氮损失
东北平原	农民管理实践	18.7	1.8	7.5	-	28.0
	高效措施	18.5	1.8	7.4	-	27.6
	高产措施	22.5	2.3	9.8	-	34.6
	优化栽培措施	18.1	1.7	7.2	-	27.0
华北平原	农民管理实践	24.9	2.2	29.9	-	57.1
	高效措施	45.4	5.9	103.5	-	154.8
	高产措施	63.9	14.1	317.6	-	395.6
	优化栽培措施	33.4	3.3	49.8	-	86.5
长江中下游平原	农民管理实践	25.1	2.6	57.5	-	85.2
	高效措施	27.4	3.0	69.2	-	99.6
	高产措施	39.1	6.3	183.5	-	228.9
	优化栽培措施	17.8	1.6	31.2	-	50.6

小麦生产中，华北平原过量氮素主要通过淋溶作用进入环境，占总氮损失的47.3 - 64.4%，而在长江中下游平原约 70%的氮损失由氨挥发产生（表 6-4）。造成这一现象的原因是，华北平原小麦灌溉条件良好且集中在春季，土壤排水性好，硝态氮容易通过水分进入地下水；长江中下游平原气候湿热，且稻麦轮作产生淹水层等加剧了氨气的挥发。

表 6-4 主要粮食产区不同栽培管理措施小麦的氮损失（单位：kg N ha^{-1}）

Table 6-4 Nitrogen loss of wheat under different cultivation and management measures in major grain producing areas (Unite: kg N ha^{-1})

区域	栽培管理措施	NH_3	N_2O	NO_3^-	runoff	总氮损失
华北平原	农民管理实践	24.9	1.4	47.6	-	73.9
	高效措施	19.1	1.1	24.4	-	44.6
	高产措施	24.1	1.3	43.3	-	68.7
	优化栽培措施	13.8	0.8	13.2	-	27.9
长江中下游平原	农民管理实践	29.3	2.3	9.9	-	41.5
	高效措施	27.9	2.2	9.1	-	39.2
	高产措施	31.8	2.6	11.5	-	45.9
	优化栽培措施	20.5	1.6	5.8	-	27.8

水稻生产中，过量的氮素主要通过氨挥发（表 6-5）。在东北平原和长江中下游平原，不同栽培管理措施的氨挥发在总氮流失量中的占比高达 68.9 – 79.4%。这主要与水稻的种植方式有关，在淹水灌溉模式下施用的尿素因缺氧不易发生硝化反应，多转化为氨气挥发到大气中。另外，长江中下游平原高温高湿的环境促

中国知网 https://www.cnki.net

进了氨气的挥发，东北平原尽管温度较长江中下游平原低，但在水稻生长的夏季，施肥后也容易产生大量氨气。

表 6-5 主要粮食产区不同栽培管理措施水稻的氮损失（单位：kg N ha^{-1}）

Table 6-5 Nitrogen loss of rice under different cultivation and management measures in major grain producing areas (Unite: kg N ha^{-1})

区域	栽培管理措施	NH_3	N_2O	NO_3^-	runoff	总氮损失
东北平原	农民管理实践	18.9	0.5	3.7	2.1	25.2
	高效措施	25.4	0.6	4.6	2.7	33.2
	高产措施	28.5	0.7	5.1	3.0	37.2
	优化栽培措施	10.4	0.4	2.8	1.5	15.1
长江中下游平原	农民管理实践	38.1	0.6	4.3	5.0	48.0
	高效措施	32.6	0.5	3.9	4.5	41.4
	高产措施	37.1	0.6	4.2	4.9	46.8
	优化栽培措施	15.0	0.2	2.7	3.2	21.1

对比农民管理实践和优化栽培管理措施两种方案的氮流失情况，优化栽培管理措施在四种氮流失途径都有更好的表现。采用优化栽培管理措施，东北平原的玉米能够减少 1 kg N ha^{-1} 氮流失，主要表现为氨挥发量的降低（图 6-4a）；长江中下游平原的玉米能够减少 34.6 kg N ha^{-1} 氮流失，其中氮淋溶减少了 26.3 kg N ha^{-1}（图 6-4c）。华北平原小麦共减少了 46.0 kg N ha^{-1} 氮流失，在所有区域的作物中排名第一，其中氮淋溶贡献了 74.8%（图 6-4c）；长江中下游平原减少了 13.7 kg N ha^{-1} 氮流失，氨挥发降低幅度最大。水稻主要通过减少氨挥发实现氮流失量的降低，东北平原和长江中下游平原分别减少了 8.5 kg N ha^{-1} 和 23.1 kg N ha^{-1}（图 6-4a）。华北平原由于农民管理实践的施氮量未达到优化栽培管理措施的推荐量，农民的氮流失量要低于优化措施。

中国知网 https://www.cnki.net

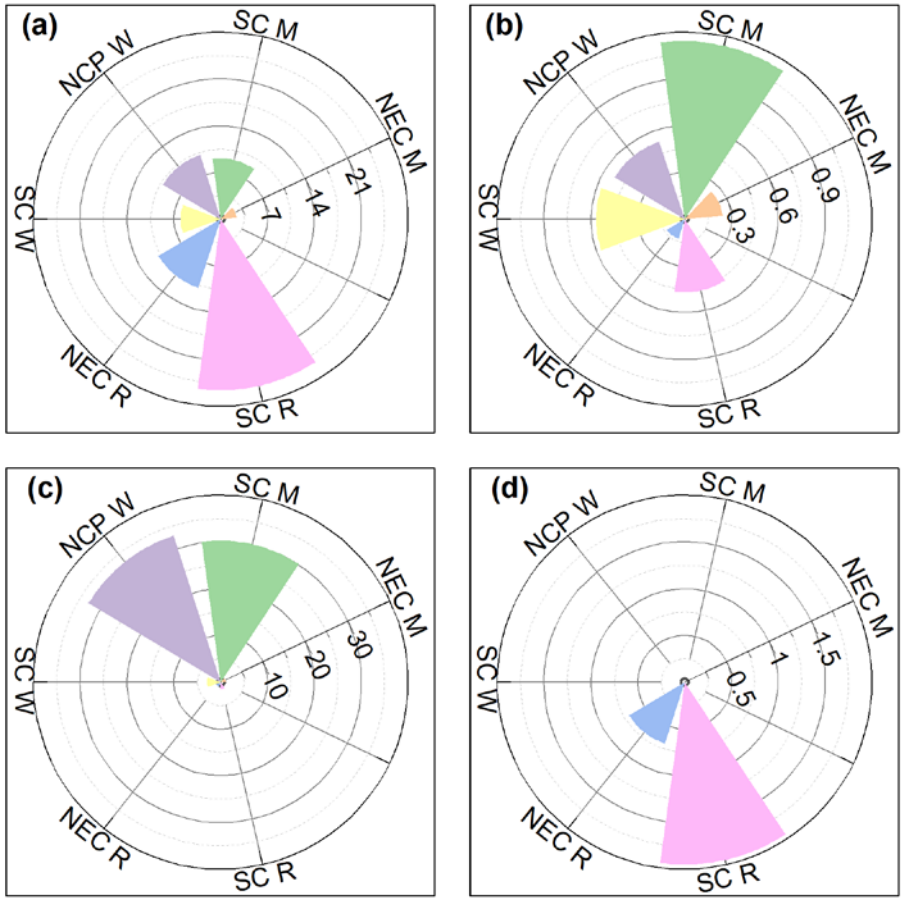


图 6-4 优化栽培管理措施在农民管理实践基础上减少的氮损失。（a）-（d）分别是氮流失的四种途径：氨 （NH3） 挥发、氧化亚氮 （N2O） 排放、淋溶（NO3-）和径流（runoff）

Figure 6-4 Optimizing cultivation management measures to reduce nitrogen losses based on farmers' management practices. (a – d) are the four pathways of nitrogen loss: ammonia (NH_3) volatilization, nitrous oxide (N_2O) emissions, leaching (NO_3^-) and runoff.

6.3 不同栽培管理措施的氮利用效率

本研究分析了代表性站点四种栽培管理措施下玉米、小麦和水稻的氮利用效率。结果显示三种作物在不同栽培管理措施下氮利用效率存在显著差异，仅小麦农户管理实践和高效措施例外。对玉米而言，高产措施的氮利用效率最低，每千克氮肥能够获得 25.7 千克玉米产量。农民管理实践的氮肥利用效率比高效措施高 17.8%，这说明基于专家建议的高效措施并没有提高玉米的氮利用效率。而基于多目标优化的优化管理措施氮利用效率达到 49.8 kg N kg^{-1}，分别比农民管理实践、高效措施和高产措施高 31.8%，55.2%和 94.2%。对小麦而言，氮利用效率最低的是高产措施，每千克氮肥能够获得 24.9 千克小麦产量。高效措施的氮利用效率为 29.8 kg N kg^{-1}，每千克氮肥能比农民管理实践增产 1.7 千克，这说明基于

中国知网 https://www.cnki.net

专家建议的高效措施提高了小麦的氮利用效率，尽管这一差异并不具有显著性。与玉米的结果相似，氮利用效率最高的是优化管理措施的 48.7 kg N kg^{-1}，分别比农民管理实践、高效措施和高产措施高 72.9%，63.1%和 95.1%。对水稻而言，高产措施的氮利用效率为 46.4 kg N kg^{-1}，尽管高于同产量水平下玉米和小麦的氮利用效率，但在水稻的四个栽培管理措施中仍排最后。对比农民管理实践，高效措施有效提高了氮利用效率，每千克氮肥能够增加 4.4 千克水稻产量。优化管理实践的氮利用效率达到 204.8 kg N kg^{-1}，对比其他三个栽培管理措施氮利用效率提高了接近 3 倍。这说明栽培管理措施的改变能够有效的改变氮利用效率，而本研究提供的优化管理措施在三种作物中均有效提高了氮利用效率均。

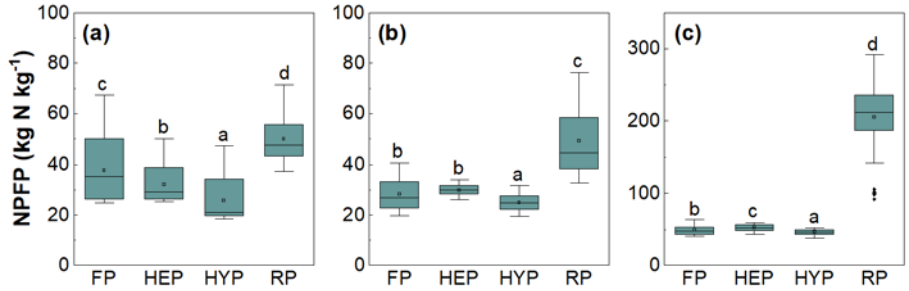


图 6-5 不同栽培管理措施玉米（a）、小麦（b）和水稻（c）的氮肥偏生产力。

Figure 6-5 Partial nitrogen fertilizer productivity of maize (a), wheat (b) and rice (c) under different cultivation and management measures.

对优化的管理措施进一步分析，发现同一种作物在不同区域间的氮利用效率接近（图 6-5）。东北平原玉米的氮利用效率为 47.6 kg N kg^{-1}，华北平原和长江中下游平原分别为 46.4 kg N kg^{-1} 和 51.9 kg N kg^{-1}，仅长江中下游平原显著高于其他两个区域（图 6-5a）。华北平原和长江中下游平原小麦的氮利用效率分别为 47.8 kg N kg^{-1} 和 45.3 kg N kg^{-1}（图 6-5b）。水稻的氮利用效率远超玉米和小麦，东北平原的氮利用效率达到 203.1 kg N kg^{-1}，每千克氮肥比长江中下游平原增加 2.8 千克水稻产量，但差异不显著（图 6-5c）。相比之下，农民管理实践在不同区域间氮利用效率有显著差异（图 6-6）。这说明优化方案有效缓减了区域间自然条件差异对氮素吸收利用的影响，是符合当地气侯土壤条件和作物需求的。

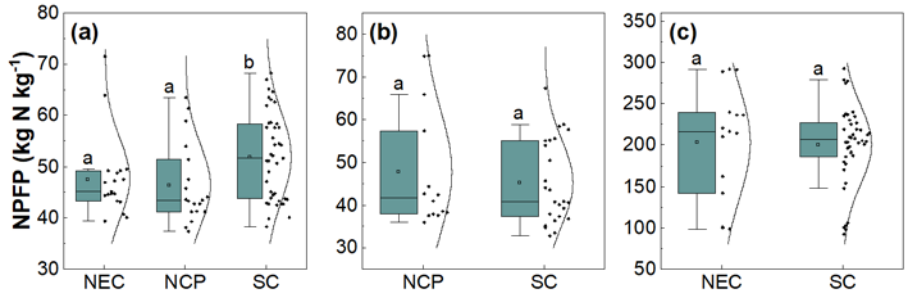


图 6-5 不同区域优化栽培管理措施玉米（a）、小麦（b）和水稻（c）的氮肥偏生产力。

Figure 6-5 Partial nitrogen fertilizer productivity of maize (a), wheat (b) and rice (c) under optimized cultivation management measures in different regions.

中国知网 https://www.cnki.net

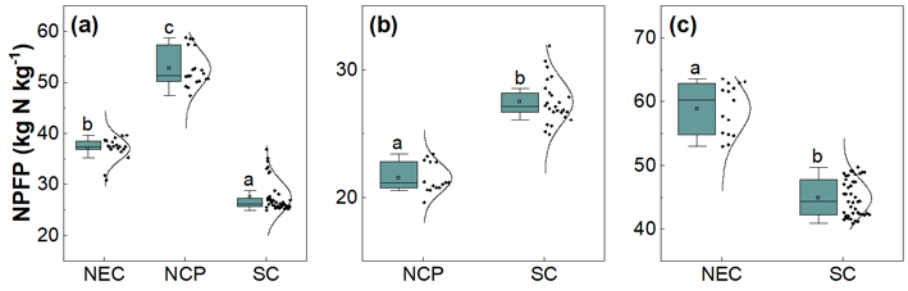


图 6-6 不同区域农民管理实践玉米（a）、小麦（b）和水稻（c）的氮肥偏生产力。

Figure 6-6 Partial nitrogen fertilizer productivity of maize (a), wheat (b) and rice (c) according to farmers' management practices in different regions.

6.4 推荐措施的环境效益和经济效益

本研究在空间尺度上评估了优化栽培管理措施下的产量收益、环境效益以及农民的经济效益。玉米增产最高的农业气候区位于长江中下游平原的云南省，编号为 6502，平均增幅为 37.6%；农业气候区 3803 的产量增幅最低为 16.5%，主要位于东北平原的辽宁省。空间分布上，增产最高的区域集中在我国西北地区和东南地区（图 6-7a）。小麦增产最高和最低的农业气候区编号分别为 6603 和 6702。其中，6603 主要分布在长江中下游平原的湖北省，与农民管理实践相比，优化栽培管理措施能增产 25.9%；6702 分布在长江中下游平原的西南地区，包括四川、重庆和云南，产量增幅仅 1.7%。空间分布上，增产最高的区域集中在我国西北地区和东南地区。空间分布上，我国东南地区整体增幅最高（图 6-7b）。水稻增产最多和最低的农业气候取编号分别为 6801 和 5303。6801 分布在长江中下游平原的云南省，产量增幅为 38.7%；5303 分布在华北平原的山东省和河南省，产量增幅为 20.7%。空间分布上，我国西南和东北地区产量增加最明显（图 6-7c）。总的来说，与农民管理实践相比，优化栽培管理措施在全国范围能够使玉米产量增加 25.8%，小麦产量增加 9.0%，水稻产量增加 28.4%。

从环境效益角度来看，除华北平原玉米外，所有作物的氮肥施用量对比农民管理实践均有所减少（图 6-2 d、e、f），因此在大部分区域降低了氮流失造成的环境污染。玉米氮流失量减少最多的农业气候区是位于长江中下游平原广东省的 7802，降幅为 48.8 kg N ha^{-1}（图 6-7d）；小麦氮流失量减少最多的农业气候区是位于华北平原山东省、河北省以及黄土高原陕西省的 4403，降幅为 62.2 kg N ha^{-1}（图 6-7e）；水稻氮流失量减少最多的农业气候区是华北平原山东省和河南省的 5303，降幅为 34.2 kg N ha^{-1}（图 6-7f）。空间分布上，中国东南地区玉米氮流失降幅最大（图 6-7d），华北平原北部小麦氮流失降幅最大（图 6-7e），而水稻在华北平原和长江中下游平原都显示了超过 40 kg N ha^{-1} 的降幅（图 6-7f）。总体来看，

中国知网 https://www.cnki.net

与农民管理实践相比，优化栽培管理措施的玉米、小麦和水稻的氮损失分别减少了 14.4%、43.2%和 54.9%。

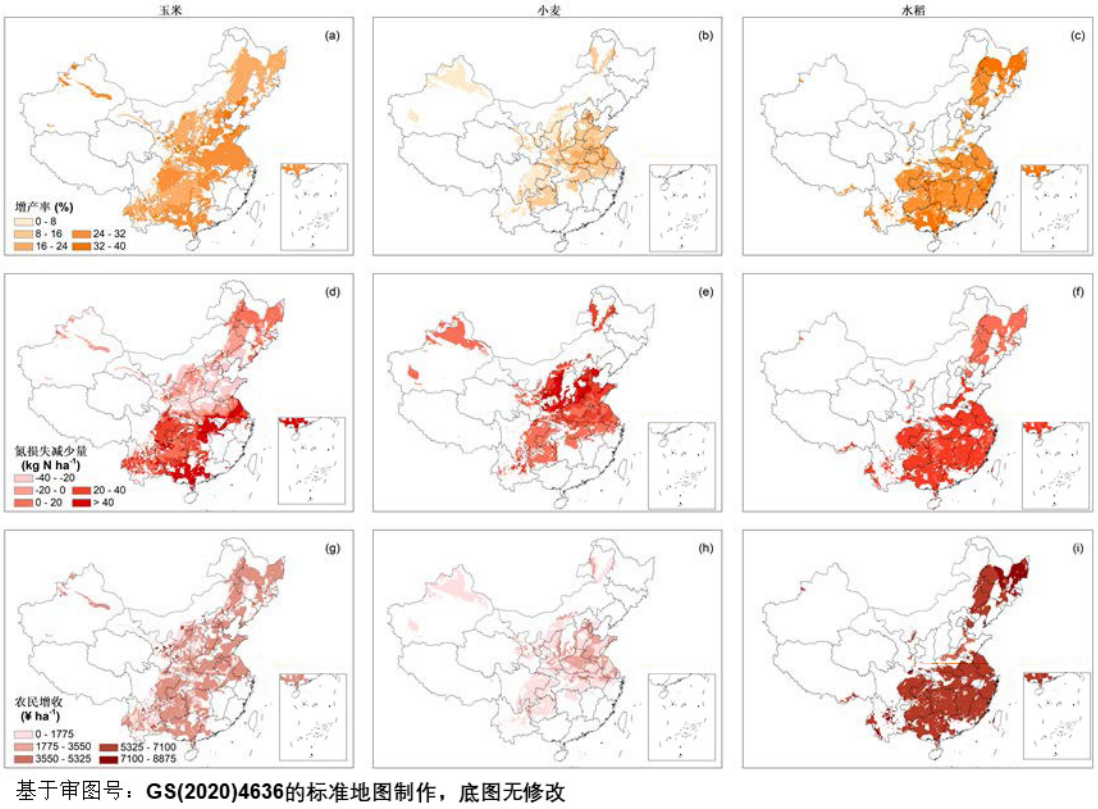


图 6-7 对比农民管理实践，优化栽培管理措施的产量收益、环境效益和经济效益的空间分布

Figure 6-7 Spatial distribution of yield, environmental and economic benefits of optimizing cultivation management measures by comparing farmers' management practices

鉴于优化肥料投入是这一方法的核心，我们计算了扣除肥料成本后的净收入。从空间上看，玉米经济收益增幅最高的区域在我国东北和西北地区，小麦经济收益最高的区域在华北平原，水稻经济收益最高的区域在东北和西南地区。优化栽培管理措施玉米、小麦和水稻的平均净收入分别为 23174.4 ± 265.5 ¥ ha^{-1}、14501.75 ± 156.9 ¥ ha^{-1} 和 28419.88 ± 180.3 ¥ ha^{-1}，与农民管理实践相比分别增长了 22.1%、11.4%和 30.0%。因此，与农民管理实践相比，优化栽培管理措施的实施不仅实现了作物增产，还增加了农民收入，在大部分地区降低了氮流失造成的环境污染，证明了该方案的可行性。

6.5 讨论

管理因素中的施肥量是玉米、小麦和水稻产量的主要限制因子，另外种植密度对玉米产量起到关键作用。鉴于管理实践与气候和土壤存在动态的非线性相互作用，本研究为玉米、小麦和水稻主要种植区所在的农业气候区制定了针对性的

中国知网 https://www.cnki.net

栽培管理措施，并生成了分辨率为 10 km × 10 km 的优化栽培管理措施地图，具体包括施氮量、P_2O_5、K_2O 和玉米的种植密度。之前的优化措施更多聚焦于站点尺度的氮肥改良，例如通过针对地点和季节的动态氮肥管理提高氮肥利用效率并提高产量（Singh, 2006）。通过改变施肥种类（有机肥）和耕作方式（轮作）维持土壤有机碳和总氮，实现农业可持续发展（Purwanto and Alam, 2020）。此外也有基于单一管理的改良，例如改良玉米种植密度实现中国玉米生产自给自足（Luo et al., 2023）。与这些研究相比，本章为农民提供的优化栽培管理措施更全面。

本研究提供的优化方案主要表现为减少氮肥施用，适量增加磷钾肥的比例。其中玉米、小麦和水稻的适宜施氮量分别为 241.7，155.2 和 59.6 kg ha^{-1}，这一结果与之前的研究接近（Qiu et al., 2015 , Chen et al., 2014 , Wang et al., 2017 , Chen et al., 2011）。在减少施氮量的同时增加 P_2O_5和 K_2O 用量以提高也被证实是可行的（Duan et al., 2011 , Yin et al., 2019 , Zhang et al., 2010）。此外，本研究得到玉米最佳种植密度为 9.3 plants ha^{-1}，高于之前研究结果 7.5-7.8 plants ha^{-1}（Luo et al., 2023 , Yan et al., 2016）。这是因为本研究中试验站点的高产措施最高种植密度达到了 9.7 plants ha^{-1}，并投入了足够的肥料保障玉米的养分供应以达到产量最大化，避免了因密度增加导致植株的养分亏缺。事实上，在满足水肥供应条件下，玉米产量最高的种植密度超过了 10 plants ha^{-1}（Li et al., 2015 , 明博 et al., 2017）。

本研究表明，共同优化多种管理实践以更小的环境成本实现农民收入提高和作物产量增加是可行的。为了促进这种优化管理实践的实施，我们建议从农民参与和国家政策两个方面采取行动。中国这的农业生产主体是小农户，他们通常接受的教育较少，获得创新解决方案和实践的机会有限，更容易受到经济波动的影响。让当地农民和社区参与确定和确认最佳做法，将建立农民的成功经验，从而增强采用这些做法的信心和意愿。国家层面，通过提供财政补贴和激励政策，提高农民尝试新技术的积极性，推动优化措施的落实。

6.6 小结

本章通过整合随机数森林、多目标优化算法和 GYGA 升尺度方法，提供了针对不同地区气象、土壤情况的优化栽培管理措施。结果表明，采用优化在栽培管理措施能，中国的玉米、小麦和水稻生产可以在提高产量、增加农民收入和减少环境污染之间实现平衡。具体表现为：玉米、小麦和水稻产量分别增加 25.8%，9.0%和 28.4%；氮损失分别减少 14.4%，43.2%和 45.9%；农民收入分别增加 22.1%，11.4%和 30%。

中国知网 https://www.cnki.net

第七章 气候变化对主粮作物产量的影响

近一个世纪以来，中国平均气温上升了 0.5 – 0.8°C，略高于同期全球气温上升幅度（Tang et al., 2010）。且存在区域性、季节性差异，具体表现为北方增温幅度大，冬季升温更明显（Yu et al., 2011）。年均降水量没有显著的趋势，但区域间存在差异，西北和长江中下游流域降水明显增加，而华北平原的降水显著减少（Ding et al., 2007）。另外，一些研究证实极端天气发生的频率增加（Wang et al., 2012）。预计到本世纪中叶，中国温度将上升 2.3 – 3.3°C，降水将增加 5 -7%（Ju et al., 2013）。

气候变化改变了农业生态条件，影响了粮食生产（Mearns et al., 1999 , Challinor and Wheeler, 2008 , Leng and Huang, 2017）。温度的变化会影响作物生长时间（Challinor et al., 2005），开花期的极端温度会降低授粉率进而减少作物产量（Wheeler et al., 2000）。温度升高也加剧了土壤水分蒸发，造成土壤盐碱化（高浩 et al., 2009）。降水变化导致连续无雨天数增加，影响作物水分供给（Wu et al., 2011）。温度与降水时空间上的耦合关系，例如华南地区温度升高的同时降水减少，导致作物更易遭受干旱胁迫（Ju et al., 2013）。气候变化也将影响农田管理措施，温度升高会导致氮流失加快，降低氮肥的有效性（Ye et al., 2007）。

本章将评估未来气候变化情景下，截止到 2050 年不同栽培管理措施的产量变化。首先，明确未来不同情景的气候变化趋势，本研究选取了三种共享社会经济路径，分别为代表低排放情景的 SSP126，中等排放情景的 SSP245 和高排放情景的 SSP585。其次，利用随机森林量化气象因子在作物产量中的作用，并通过部分依赖图探究作物产量对单个气候因素的响应。最后，将未来气象数据作为随机森林的气象输入，模拟不同栽培管理措施的产量，并结合部分依赖图的分析结果解释产量的变化趋势。

7.1 未来气候的变化情况

本研究对耦合模式比较计划第六阶段（CMIP6）的 27 个全球气候模型（GCMs）模拟的平均值作为未来的气候数据。对所有根据 GYGA 协议筛选的代表性站点分析可得，未来最高温、最低温、降水和太阳辐射均呈上升趋势，但不同气候情景下四个气象因子的表现存在差异。SSP585 情景下变暖的趋势最明显，最高温和最低温每十年增加约 0.5 ℃ 10 a^{-1}；SSP245 情景下最高温和最低温每十年均增加 0.3 ℃ 10 a^{-1}；SSP126 情景与 SSP245 情景接近，最高温每十年增加 0.32 ℃ 10 a^{-1}，最低温上升 0.27 ℃ 10 a^{-1}（图 7-1a, b）。太阳辐射方面，SSP126 情景下增加

中国知网 https://www.cnki.net

趋势最明显，每十年提高约 0.3 MJ m^{-2} day^{-1} 10 a^{-1}，而 SSP245 和 SSP585 每十年分别增加 0.17 MJ m^{-2} day^{-1} 10 a^{-1} 和 0.16 MJ m^{-2} day^{-1} 10a^{-1}（图 7-1d）。不同于温度和太阳辐射，未来降水呈现较大的年际波动，SSP126，SSP245 和 SSP585 平均每年分别增加 2.9，2.3 和 2.4 mm a^{-1}（图 7-1c）。总体而言，SSP585 情景下温度上升幅度大，太阳辐射增加较少；SSP126 情景下增温少但太阳辐射量明显提高；SSP245 情景介于这两者之间。

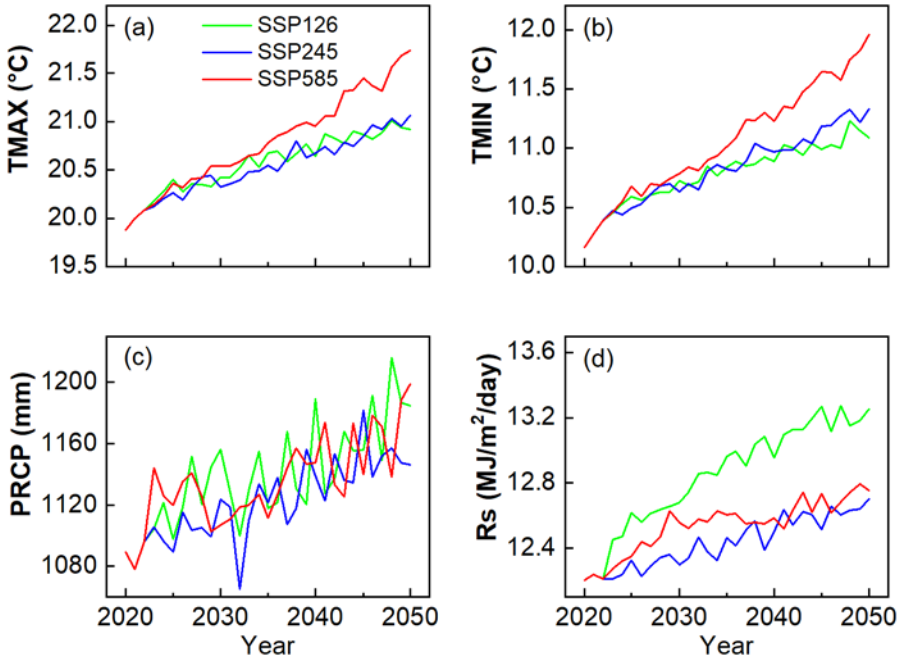


图 7-1 2020-2050 年 SSP126、SSP245 和 SSP585 的气候变化去情况

Figure 7-1 Climate change in SSP126, SSP245 and SSP585 from 2020 to 2050

7.2 气候因素对产量的影响

当随机森林的气象输入为最高温、最低温、降水和太阳辐射，土壤输入和管理输入如表 5.1 时，分别得到了玉米、小麦和水稻四个气象因素的相对重要性（表 7-1）。对玉米而言，气象因素贡献了 32.5%的产量，其中最低温对产量的影响最大，达到了 12.3%，其次是最高温和降水，太阳辐射的影响相对较低。气象因素对小麦产量的贡献与玉米接近（为 36.7%），对产量影响最大的气象因素是降水，重要性值达到了 13.1%，影响最小的是最低温，重要性为 6.6%。相较而言，三种作物中水稻产量受气象因素影响最小，仅贡献了产量的 15.9%，四个气象因素的重要性由高到低依次是降水、太阳辐射、最低温和最高温。

中国知网 https://www.cnki.net

表 7-1 玉米、小麦和水稻随机森林的变量重要性

Table 7-1 Variable importance of random forests for maize, wheat, and rice

	变量	玉米（%）	小麦（%）	水稻（%）
气象因素	TMAX	7.1	9.2	2.6
	TMIN	12.3	6.6	3.1
	PRCP	7.0	13.1	5.9
	SRAD	6.1	7.8	4.3
管理因素		54.1	50	75.7
土壤因素		13.4	13.3	8.4

气象因素的部分依赖图表明，气候变暖对玉米产量不利，生育期最低温每升高 1 ℃产量下降 136.3 kg ha^{-1}（图 7-2b）；最高温的增加对玉米产量影响相对较小，从 22 ℃提高到 32 ℃产量降低 147.4 kg ha^{-1}（图 7-2a）。当生育期累积降水量低于 423 mm 时，每 100mm 降水能为玉米增产 72.8 kg ha^{-1}；超过这一值后，每 100mm 降水将减产 61.1 kg ha^{-1}（图 7-2c）。太阳辐射量由 10 MJ m^{-2} day^{-1} 增加到 20 MJ m^{-2} day^{-1} 时，玉米产量增加了约 1300 kg ha^{-1}，但超过 20 MJ m^{-2} day^{-1} 后产量不再增加（图 7-2d）。

对小麦产量影响最大的气象因子是降水，降水量每增加 100 mm，小麦产量下降 209.5 kg ha^{-1}，超过 500 mm 后产量降幅减缓（图 7-2g）。生育期最高温的上升对小麦产量不利，每增加 1 ℃产量下降 200.5 kg ha^{-1}（图 7-2e）。太阳辐射量的增加同样不利于小麦获得高产，当太阳辐射量由 11 MJ m^{-2} day^{-1} 增加到 13 MJ m^{-2} day^{-1} 时，小麦产量增加了约 300 kg ha^{-1}，但超过 13 MJ m^{-2} day^{-1} 后对产量的影响减弱（图 7-2h）。最低温对小麦产量的重要性最小，生育期最低温每增加 1 ℃产量下降 31.7 kg ha^{-1}（图 7-2f）。

对水稻产量影响最大的气象因子是降水，这一结果于小麦一致。不同的是降水量每增加 100 mm 时，水稻产量将增加 308.2 kg ha^{-1}，直到降水量超过 807 mm 后产量下降（图 7-2k）。太阳辐射量从 14 MJ m^{-2} day^{-1} 增加到 19 MJ m^{-2} day^{-1} 时，水稻产量增加了约 401.4 kg ha^{-1}，但超过 19 MJ m^{-2} day^{-1} 后呈现减产趋势（图 7-2l）。最低温升高对水稻的产量的影响有限，当最低温从 14℃增加到 25 ℃时，产量基本维持在 8390 kg ha^{-1} 左右（图 7-2j）。最高温对水稻产量的影响不同于玉米和小麦，低于 30 ℃时，每升温 1 ℃产量增加 35.2 kg ha^{-1}，而当最高温超过 30 ℃后，每摄氏度升温将导致产量降低 54.1 kg ha^{-1}（图 7-2i）。

中国知网 https://www.cnki.net

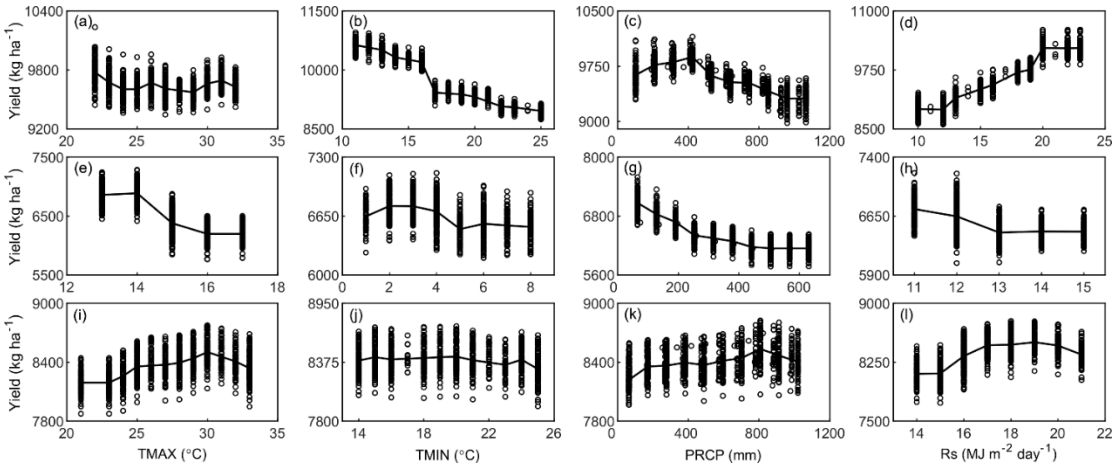


图 7-2 玉米、小麦和水稻的气象变量部分依赖图

Figure 7-2 Partial dependence diagram of meteorological variables for maize, wheat and rice

7.3 气候变化背景下的作物产量变化

本研究对试验站点不同栽培管理措施下三种作物未来产量进行模拟，结果如图 7-3。在未来气候情景下，不同作物和处理的产量变化存在显著差异。在 SSP126 情景下，土壤基础肥力的玉米产量呈上升趋势，其余 4 个处理产量相对稳定，年际变化不超过 1 kg ha^{-1} $year^{-1}$（图 7-3a）。但在 SSP245 和 SSP585 情景下，除土壤基础肥力外，其余处理玉米产量均呈显著下降趋势（图 7-3b、c），且 SSP585 的降幅更大，农民管理实践、高效措施、高产措施和优化栽培管理措施的年际变化分别为 10.6， 15.4，13.2 和 13.2 kg ha^{-1} $year^{-1}$（图 7-3c）。小麦在未来气候情景下所有处理产量均下降，且 SSP126 的降幅大于 SSP245 和 SSP585，土壤基础肥力、农民管理实践、高效措施、高产措施和优化栽培管理措施的年际变化分别为 7.7，12.9，14.4，20.8 和 13.0 kg ha^{-1} $year^{-1}$（图 7-3d、e、f）。水稻产量在 3 种气候情景下均呈上升趋势，且 SSP126 的增幅更大，壤基础肥力、农民管理实践、高效措施、高产措施和优化栽培管理措施的年际变化分别为 2.5， 3.0，5.7， 6.2 和 4.7 kg ha^{-1} $year^{-1}$（图 7-3g、h、i）。此外，优化栽培管理措施的模拟产量与高产措施接近，但其产量波动小于高产措施，是应对气候变化更优的选择。

中国知网 https://www.cnki.net

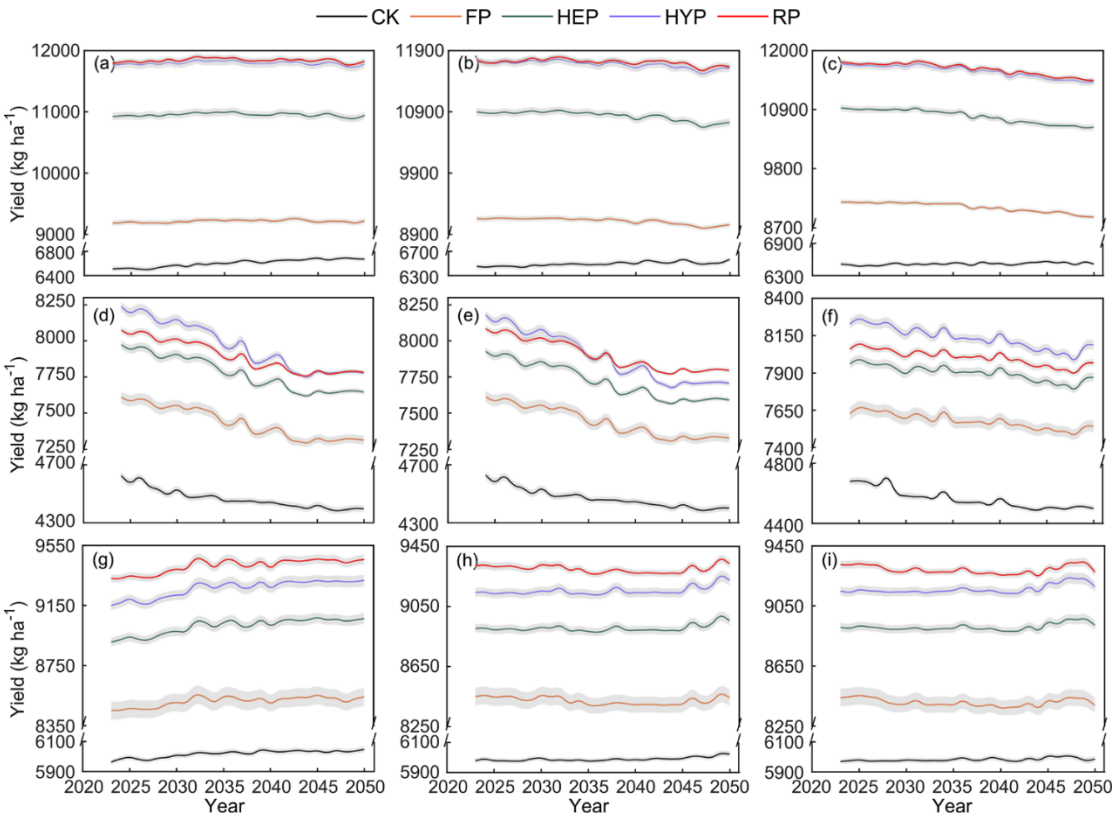


图 7-3 SSP126、SSP245 和 SSP585 情景下试验站点玉米、小麦、水稻不同栽培管理措施的产量变化

Figure 7-3 Changes in yield of maize, wheat and rice under different cultivation management measures at the experimental site under SSP126, SSP245 and SSP585 scenarios

比较试验站点不同气候情景下三种作物优化栽培管理措施的表现，发现玉米和水稻在 SSP126 情景下产量较高，而小麦在 SSP585 情景下产量较高（图 7-4）。这是因为气象因素中最低气温是玉米产量的重要限制因素，较低的最低气温有利于玉米获得高产（图 7-2b），且 SSP126 情景下最低气温的增幅低于 SSP245 和 SSP585 情景（图 7-1b）。与玉米类似，SSP126 情景下降水和太阳辐射的增加的幅度更大，对水稻产量有正向影响（图 7-2k, l）。小麦的气象限制因素主要为降水和最高气温，且与产量呈负相关（图 7-2g, e）。在 3 种气候情景下，SSP126 情景下降水较多，而 SSP585 情景下最高气温的增幅最大。降水的负面影响可能超过最高温度升高的负面影响（刘东 et al., 2024），导致 SSP126 的产量低于 SSP585。

中国知网 https://www.cnki.net

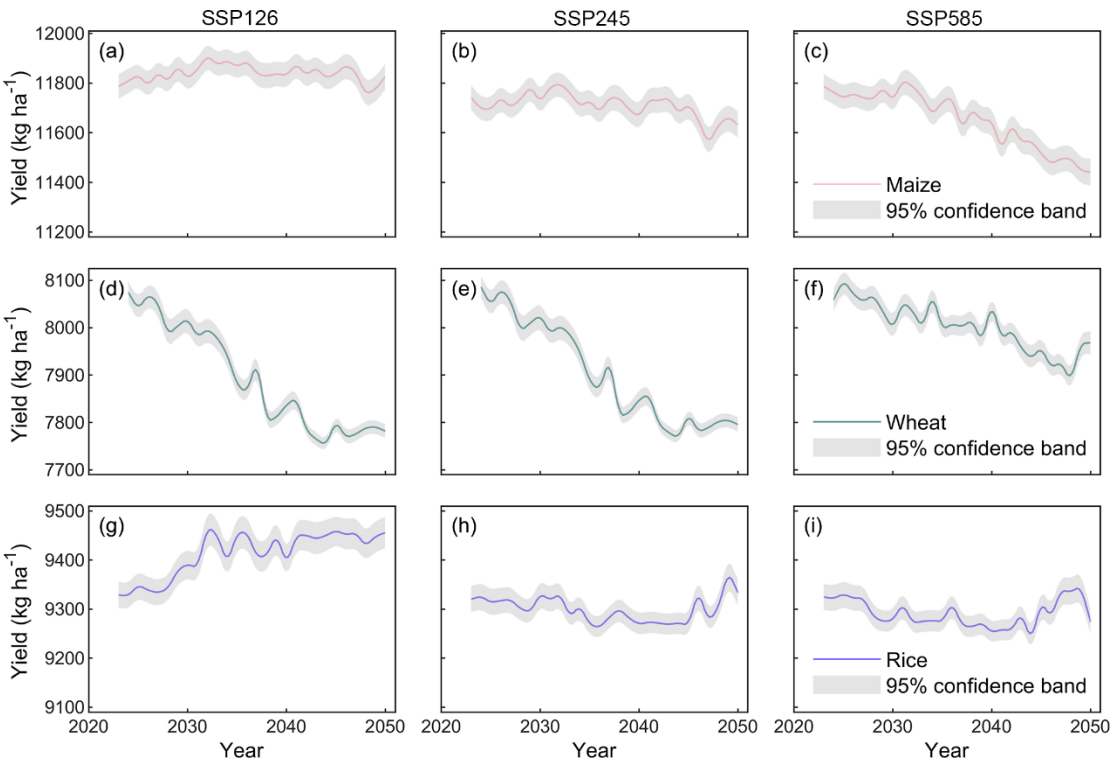
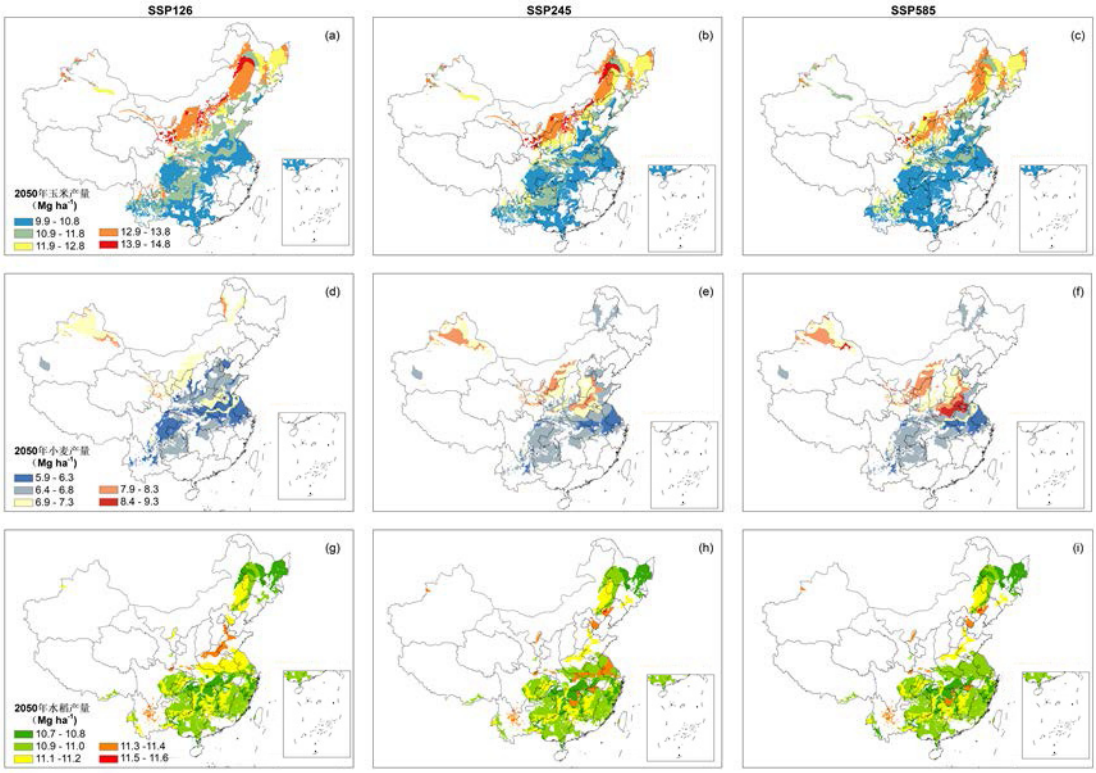


图 7-4 SSP126、SSP245 和 SSP585 情景下试验站点玉米、小麦和水稻优化栽培管理措施的产量变化

Figure 7-4 Changes in yield of maize, wheat and rice under optimized cultivation management measures at the experimental site under SSP126, SSP245 and SSP585 scenarios

本研究按 GYGA 升尺度方法模拟了全国 2050 年作物产量。SSP126、SSP245 和 SSP585 情景下玉米的平均产量分别为 11.7 Mg ha^{-1}，11.6 Mg ha^{-1}，和 11.5 Mg ha^{-1}。空间分布上，高产区域集中在我国北方的东北三省和内蒙古地区，气候模式由 SSP126 到 SSP585，玉米产量普遍下降，其中东北和西南地区产量下降最为明显（图 7-5a, b, c）。小麦在 SSP126、SSP245 和 SSP585 三种情景下产量分别为 6.8 Mg ha^{-1}，6.9 Mg ha^{-1}，和 7.0 Mg ha^{-1}。空间分布上，高产区域主要在我国西北和内蒙古部分地区，气候模式由 SSP126 到 SSP585，小麦产量小幅上升，其中华北地区产量上升最为明显（图 7-5d, e, f）。水稻在 SSP126、SSP245 和 SSP585 三种情景下产量分别为 11.1 Mg ha^{-1}，11.1 Mg ha^{-1}，和 11.0 Mg ha^{-1}。空间分布上，高产区域主要在我国中纬度地区，包括东北平原南部、华北平原和长江中下游平原北部，气候模式由 SSP126 到 SSP585，水稻产量降幅很小且主要发生在江淮地区（图 7-5g, h, i）。

中国知网 https://www.cnki.net



基于审图号：GS(2020)4636的标准地图制作，底图无修改

图 7-5 2050 年优化栽培管理措施玉米、小麦和水稻在不同气候情景的产量分布

Figure 7-5 Distribution of maize, wheat and rice yields under different climate scenarios with optimized cultivation management measures in 2050

7.4 讨论

本研究通过 27 个全球气候模型确定了未来 25 年的不同气候情景的气候变化情况，最高温、最低温，太阳辐射量和降水均有不同程度的增加。对比不同的气候情景，SSP126 情景太阳辐射增加明显，而 SSP585 温度增加最为突出。仅考虑未来气象因素的变化，玉米产量将会下降。这主要是因为未来气候模型中较高的温度将降低玉米授粉率并缩短籽粒灌浆时间（Wang et al., 2019b , Hatfield, 2016）。与最高温相比，最低温对产量的影响更大，这是因为夜间温度较高会促进植物呼吸作用并抑制干物质积累（Abrol and Ingram, 1996 , Jing et al., 2016）。与玉米一样，由于气温升高，尤其是最高气温升高，预计未来小麦产量也会下降（Asseng et al., 2017 , Lobell et al., 2011）。值得注意的是，我们发现在 SSP126 情景下水稻产量有所增加，这归因于高水平的 Rs 增加了作物捕获的光合有效辐射，从而用于生物量生产（Meek et al., 1984 , Chen et al., 2013）。

利用随机森林模拟 2050 年优化栽培管理措施的产量，我们发现在 SSP245 和 SSP585 条件下，玉米产量分别达到了粮食需求（Zhao et al., 2021）的 79.3% 和 75.9%，水稻产量分别达到了粮食需求的 83.8% 和 84.5%（表 7-2）。鉴于我

中国知网 https://www.cnki.net

们所处的农业气候区涵盖了中国 71.8% 的玉米种植面积和 81.1% 的水稻种植面积，可以假设在 SSP245 和 SSP585 条件下，RP 措施无需增加种植面积即可满足中国的玉米和水稻需求。对于小麦，其种植面积占 83.5%，但满足的需求不足 70%，这表明仅靠目前的推荐管理措施无法满足中国的小麦需求。这些信息可以为改善中国粮食安全的决策过程提供参考。

表 7-2 研究区中国三大粮食作物当前产量（单位：百万吨）以及 2050 年优化栽培管理措施下的产量与粮食需求对比。

. The current production （million tonnes） of China's three major food crops in the study area, and the comparison of production under the recommended practice and food demand in 2050.

	当前总产量	2050 年总产量			2050 年粮食需求量	
		SSP126	SSP245	SSP585	SSP2	SSP5
玉米	181.0 ± 0.2	225.6 ± 0.2	222.4 ± 0.2	221.0 ± 0.2	280.5	291.2
小麦	90.9 ± 0. 1	88.3 ± 0.1	94.5 ± 0.1	92.2 ± 0.1	140.5	139.8
水稻	125.7 ± 0.4	156.6 ± 0.1	156.5 ± 0.1	156.1 ± 0.1	186.8	184.8

满足 2050 年的粮食需求需要政府确保充足的耕地。尽管中国政府已出台法规和标准，确保耕地面积不少于 1.2 亿公顷，但未来可能需要更多的耕地才能满足粮食需求（Chen et al., 2020 , Wang et al., 2021），尤其是小麦。国际贸易也是解决粮食安全问题的重要途径。中国的农产品贸易逆差一直在扩大，预计在可预见的未来还将继续（Wang et al., 2021 , Mukhopadhyay et al., 2018）。这将增加中国对进口粮食的依赖，不利于实现政府粮食自给率达到 95%以上的目标。因此，选育更适应未来气候的新品种（Zhang et al., 2018）和更合理的饮食结构（Tian et al., 2021）对于确保中国的粮食安全至关重要。

总体而言，本研究确定了不同农业生态区域的产量动态，以确定作物产量在未来气候条件下如何响应不同的管理措施。未来的气候情景将导致作物产量下降。因此，在农业可持续发展目标的背景下，优化和升级具体的管理措施以应对气候变化下的作物产量下降至关重要。

7.5 小结

未来气候总体表现为最高温、最低温、降水和太阳辐射不同程度的上升，且不同气候情景存在差异，SSP585 增温趋势最明显，SSP126 太阳辐射量的增加趋势最明显。气候变化对玉米和小麦产量不利，但对水稻有利；气候情景中，SSP26 情景玉米和水稻产量较高，小麦则在 SSP585 获得最高产量。

气候变化对不同栽培管理措施下作物产量影响不同，优化栽培管理措施产量最高且波动最小，在五种管理措施中是应对气候变化表现最好的。到 2050 年，优化栽培管理措施基本能满足我国玉米和水稻的需求，但无法满足小麦的需求。

中国知网 https://www.cnki.net

第八章 结论与展望

8.1 主要结论

本研究在中国东北平原、华北平原和长江中下游平原共计 80 个试验站点进行了为期 4 年的田间试验，每个站点设置了土壤基础肥力、农民管理实践、高效措施和高产措施四个处理。利用农业技术转移决策支持系统（DSSAT）模型结合实验数据对三大作物优势品种的遗传参数进行校正，模拟了站点的潜在产量，并利用全球产量差地图集（GYGA）升尺度方法得到作物潜在产量的空间分布特征。之后，量化了区域尺度不同管理措施间的产量差，并分析了管理措施造成的产量构成要素的差异。接着，通过随机森林量化了气象、管理和土壤因素对作物产量的贡献，确定了不同作物主要的产量限制因子，利用部分依赖图分析了主要限制因素和作物产量的响应关系。然后，将随机森林、多目标优化算法和 GYGA 升尺度方法结合，对产量主要限制因素进行优化，得到中国三大作物主要种植区的优化栽培管理措施，并量化了其与农民相比在产量、环境和经济收入方面的优势。最后，结合未来气候变化，模拟了到 2050 年不同管理措施的产量变化趋势。

本研究得到的主要结论如下：

（1）中国三大主粮作物的潜在产量

通过校正东北平原、华北平原和长江中下游平原玉米、小麦和水稻代表性品种的遗传参数，DSSAT 模型能准确模拟出作物产量。在此基础上模拟得到试验站点玉米、小麦和水稻的潜在产量，站点尺度的结果表明作物种植制度显著影响潜在产量，春玉米、单季稻的潜在产量普遍高于夏玉米和双季稻；区域尺度的结果表明中国玉米、小麦和水稻的潜在产量分别为 14.6，10.0 和 11.6 Mg ha^{-1}，且存在明显的空间异质性，具体表现为：玉米呈东北高西南低的趋势，小麦呈西北高东南低的趋势，水稻呈北高南低的趋势。

（2）栽培管理措施造成的产量差和产量构成差异

不同栽培管理措施收获的产量存在显著差异，主要表现为：玉米主要通过增加亩穗数增产，而小麦和水稻则更多受到亩穗数和穗粒数的影响。对比不同管理措施的作物产量发现，目前农民管理实践的产量仅兑现了 58 – 71%的潜在产量，仍有上升的空间。玉米、小麦和水稻通过农民管理实践在土壤基础肥力的基础上能够增产 2.2 – 2.5 Mg ha^{-1}；引入农学专家建议的高效措施能够在农民管理实践基础上增产 0.7 – 1.5 Mg ha^{-1}；而不计成本投入资源的高产措施则能够进一步增产 0.8 – 1.1 Mg ha^{-1}，且同一产量差在不同区域存在较大差距，栽培管理措施在土壤基础肥力产量低的区域增产效果更好。研究表明不同栽培管理措施显著提升玉

中国知网 https://www.cnki.net

米、小麦和水稻产量，其中高效与高产措施在低基础肥力区域增产效果更为显著，而农民管理实践产量仅兑现了潜在产量的 58–71%，仍存在增产空间。

（3）主粮作物的产量限制因子

利用随机森林模拟了不同种植制度下的玉米、小麦和水稻的产量，并量化了气象、管理和土壤因素对这些作物产量的贡献。结果表明管理因素是作物的产量的主要限制因素，重要性超过 55%，其中氮、磷和钾肥施用量是所有作物产量的主要限制因子，玉米的种植密度也是重要的显著因子。气象因素对产量的贡献在 15 - 30%，不同作物影响其产量的关键气象因子存在差异。土壤因素对产量的贡献最小，不到 5%。部分依赖图的结果展示了各个作物产量对影响排名前六因素的响应关系。玉米、小麦和水稻施肥量与产量间存在边际递减效应，即施肥水平低时，单位肥料增长效果显著，但施肥量超过临界阈值后，对产量提升的幅度急剧下降，且不同区域不同作物施肥量的阈值存在差异。研究表明，作物产量主要受管理因素驱动，氮磷钾施用量为关键限制因子，并呈边际递减效应，而气象和土壤因素贡献相对较低且不同作物间存在差异。

（4）多目标优化的缩差措施

通过整合随机数森林、多目标优化算法和 GYGA 升尺度方法，提供了针对不同地区气象、土壤情况的优化栽培管理措施。结果表明，与当前农民管理相比，优化措施总体上减少了氮肥施用量（玉米、小麦和水稻平均施氮量分别为 241.7、155.2 和 59.6 kg ha^{-1}），增加了磷肥（P_2O_5, 分别为 216.4、162.6 和 85.0 kg ha^{-1}）和钾肥（K_2O，分别为 246.6、119.5 和 247.6 kg ha^{-1}）投入比例，并提高了玉米种植密度（平均 9.3×10^4 株 ha^{-1}）。考虑到气候、土壤等环境因素的空间异质性，我们构建了针对不同农业气候区的具体优化措施数字地图。优化在栽培管理措施的采用能实现中国的玉米、小麦和水稻生产过程中提高产量、增加农民收入和减少环境污染三个目标之间的平衡。具体表现为：对比目前农民的生产情况，优化栽培管理措施玉米、小麦和水稻产量分别增加 25.8%，9.0%和 28.4%；氮损失分别减少 14.4%，43.2%和 45.9%；农民收入分别增加 22.1%，11.4%和 30%；另外氮利用效率也提高了 28%以上，对比试验设置的四种栽培管理措施存在明显优势。

（5）未来作物产量变化

未来气候总体表现为最高温、最低温、降水和太阳辐射不同程度的上升，且不同气候情景存在差异。其中，SSP585 最高温和最低温的升高趋势最明显，SSP126 太阳辐射量的增加趋势最明显，SSP245 介于二者之间。气候变化对将使玉米和小麦产量减产，但能提高水稻产量；气候情景中，玉米和水稻在 SSP126 情景下获得较高产量，小麦则在 SSP585 情景下获得高产。栽培管理措施对气候

中国知网 https://www.cnki.net

变化的响应不同，其中优化栽培管理措施产量最高且波动最小，在五种管理措施中是应对气候变化最好的选择。到 2050 年，实施优化栽培管理措施基本能满足我国玉米和水稻的需求，但无法满足小麦的需求。

8.2 论文创新点

（1）本研究通过结合站点试验、作物模型和 GYGA 升尺度方法全面系统的量化了中国玉米、小麦和水稻的潜在产量和产量差，揭示了管理水平对产量构成要素的影响。

（2）本研究综合考虑了气候、土壤和管理因素，利用随机森林量化了这些因素对作物产量的贡献，确定了不同作物产量形成过程中的主要限制因子，并通过部分依赖图揭示单个限制因素对作物产量的影响。

（3）本研究创建了将机器学习、多目标优化和 GYGA 升尺度结合的方法针对作物主要限制因子提出改良方案。同时考虑了管理因素（施肥和种植密度）内部因子的相互作用和管理因素与气象、土壤因素的耦合关系，提供了因地制宜的栽培管理方案。

（4）本研究对比了气候变化对栽培管理措施有效性的影响，确定了气候变化背景下缓减气候影响的最优方案，为中国粮食安全和相关政策的制定提供理论支持。

8.3 不足与展望

本研究将试验站点、作物模型、机器学习和遗传算法结合，量化了我国玉米、小麦和水稻的产量差和主要的产量限制因素，提供了因地制宜的优化栽培管理措施，明确了气候变化对管理措施有效性的影响。尽管取得了一些研究成果，但仍存在以下问题需要在今后的研究中进一步改进：

（1）本研究在模拟作物潜在产量时使用了 DSSAT 模型，在后续产量限制因子解析、优化栽培管理措施和未来产量模拟中使用量随机森林模拟作物产量，单一模型对一些特定情景的模拟结果可能存在误差。目前多模型集成和作物模型与机器学习耦合的方法成为主流，且在模型优势互补、减少模型不确定性、应对复杂环境和提高结果可靠性等方面具有明显优势。在后续的研究中应该考虑使用更多模型互相对比验证，进一步提高预测结果的准确性、稳定性和可靠性。

（2）本研究在一定程度上弱化了土壤因素的作用。研究使用的土壤数据来自世界土壤数据库，尽管其提供了满足模型所需的土壤变量和全国土壤的空间分布，但缺乏土壤的年际变化情况。由于施肥和耕作会随时间影响土壤理化性质，

中国知网 https://www.cnki.net

这种固定的土壤参数与田间实际情况存在差异，导致低估土壤变量对产量的影响，另外对土壤水分、养分等因素的考虑不充分。后续的研究应该在采集作物数据的同时对田块土壤采样，从而提高研究结果的准确性。

（3）本研究未能实施优化栽培管理措施的推广。尽管针对田块位置和种植作物种类制定了包括施氮量、P_2O_5、K_2O 和种植密度（玉米）的优化栽培管理措施，并在产量提升、减少环境污染和增加经济收入等方面表现出明显优势。但现有方案缺乏对施肥时间、施肥次数、肥料种类等更具体的操作安排，使技术推广的可操作性受限。另外，没有建立科学有效的技术转化机制，科研成果难以应用到生产实践。后续研究应该重点提高数据质量和丰富数据类型，制定更具操作性的栽培管理方案，并与农民需求和政府政策相结合，促进优化栽培技术在农业生产中的实际应用，实现科技成果的有效转化，推动中国农业的可持续发展。

（4）本研究对气象因素的分析不够全面。不同的气候情景具有不同的二氧化碳（CO_2）浓度，而我们的研究仅考虑了不同气候模型中最高温、最低温、降水和太阳辐射四个气象因子对产量的影响，而没有考虑二氧化碳浓度变化的影响。这主要是持续 4 年的田间试验无法体现 CO_2 浓度的变化，随机森林在缺乏相关数据的情况下无法模拟其对产量的影响。结合目前的研究结果 C3 作物对 CO_2 浓度变化更敏感，本研究未来气候情景下模拟的作物产量可能偏低，尤其是小麦和水稻。另外，试验持续期间没有观测到足够的气象灾害数据，本研究的结果不适用于极端气象等情况。后续的研究应该结合历史数据，通过延长时间序列捕获气象灾害对产量的影响，更能反映实际的粮食生产情况，增强研究结果的适用性。

中国知网 https://www.cnki.net

参考文献

ABDALLA M, HASTINGS A, CHENG K, et al. 2019. A critical review of the impacts of cover crops on nitrogen leaching, net greenhouse gas balance and crop productivity. Global Change Biology [J], 25: 2530-2543.

ABROL Y P, INGRAM K T 1996. Effects of higher day and night temperatures on growth and yields of some crop plants. Global climate change and agricultural production. Direct and indirect effects of changing hydrological, pedological and plant physiological processes. Wiley, Chichester [J]: 124-140.

ACRECHE M M, SLAFER G A 2006. Grain weight response to increases in number of grains in wheat in a Mediterranean area. Field Crops Research [J], 98: 52-59.

ADAMS C B, NEELY C, GRAEBNER R 2025. Yield variation, plasticity, adaptation, and performance ranking of winter wheat varieties across the environmental gradient of the US Pacific Northwest. Crop Science [J], 65: e70018.

AINSWORTH E A 2008. Rice production in a changing climate: a meta-analysis of responses to elevated carbon dioxide and elevated ozone concentration. Global Change Biology [J], 14: 1642-1650.

AINSWORTH E A, LONG S P 2005. What have we learned from 15 years of free-air CO2 enrichment （FACE）? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO2. New phytologist [J], 165: 351-372.

ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. Fao, Rome [J], 300: D05109.

ANDREA M C D S, BOOTE K J, SENTELHAS P C, et al. 2018. Variability and limitations of maize production in Brazil: Potential yield, water-limited yield and yield gaps. Agricultural Systems [J], 165: 264-273.

ANEANI F, OFORI-FRIMPONG K 2013. An analysis of yield gap and some factors of cocoa （Theobroma cacao） yields in Ghana. Sustainable Agriculture Research [J], 2.

ARAMBURU-MERLOS F, VAN LOON M P, VAN ITTERSUM M K, et al. 2024. High-resolution global maps of yield potential with local relevance for targeted crop production improvement. Nature Food [J], 5: 667-672.

ARUNAKUMARI H, REKHA S 2016. Plant density and nitrogen in sorghum. International Journal of Science Natural [J], 7: 702-706.

ASSEFA B T, CHAMBERLIN J, REIDSMA P, et al. 2020. Unravelling the variability and causes of smallholder maize yield gaps in Ethiopia. Food Security [J], 12: 83-103.

ASSEFA Y, CARTER P, HINDS M, et al. 2018. Analysis of long term study indicates both agronomic optimal plant density and increase maize yield per plant contributed to yield gain. Scientific Reports [J], 8: 4937.

ASSENG S, CAMMARANO D, BASSO B, et al. 2017. Hot spots of wheat yield decline with rising

中国知网 https://www.cnki.net

temperatures. Global Change Biology [J], 23: 2464-2472.

ASSENG S, FOSTER I, TURNER N C 2011. The impact of temperature variability on wheat yields. Global change biology [J], 17: 997-1012.

BALBOA G R, ARCHONTOULIS S V, SALVAGIOTTI F, et al. 2019. A systems-level yield gap assessment of maize-soybean rotation under high- and low-management inputs in the Western US Maize Belt using APSIM. Agricultural Systems [J], 174: 145-154.

BARBOSA DOS SANTOS V, MORENO FERREIRA DOS SANTOS A, DA SILVA CABRAL DE MORAES J R, et al. 2022. Machine learning algorithms for soybean yield forecasting in the Brazilian Cerrado. Journal of the Science of Food and Agriculture [J], 102: 3665-3672.

BASSU S, BRISSON N, DURAND J L, et al. 2014. How do various maize crop models vary in their responses to climate change factors? Global change biology [J], 20: 2301-2320.

BHATIA V, SINGH P, WANI S, et al. 2008. Analysis of potential yields and yield gaps of rainfed soybean in India using CROPGRO-Soybean model. Agricultural and Forest Meteorology [J], 148: 1252-1265.

BOLING A, TUONG T, VAN KEULEN H, et al. 2010. Yield gap of rainfed rice in farmers' fields in Central Java, Indonesia. Agricultural systems [J], 103: 307-315.

BREIMAN L 2001. Random forests. Machine learning [J], 45: 5-32.

BREN D'AMOUR C, REITSMA F, BAIOCCHI G, et al. 2017. Future urban land expansion and implications for global croplands. Proceedings of the National Academy of Sciences [J], 114: 8939-8944.

BRUINSMA J. World agriculture: towards 2015/2030: an FAO perspective[C]//:Earthscan,2003

CALVIñO P, SADRAS V 2002. On-farm assessment of constraints to wheat yield in the south-eastern Pampas. Field Crops Research [J], 74: 1-11.

CAO H Z, LI Y N, CHEN G F, et al. 2019. Identifying the limiting factors driving the winter wheat yield gap on smallholder farms by agronomic diagnosis in North China Plain. Journal of Integrative Agriculture [J], 18: 1701-1713.

CARCIOCHI W D, SADRAS V O, PAGANI A, et al. 2020. Co-limitation and stoichiometry capture the interacting effects of nitrogen and sulfur on maize yield and nutrient use efficiency. European Journal of Agronomy [J], 113: 125973.

CASANOVA D, GOUDRIAAN J, BOUMA J, et al. 1999. Yield gap analysis in relation to soil properties in direct-seeded flooded rice. Geoderma [J], 91: 191-216.

CASSMAN K G, DOBERMANN A, WALTERS D T, et al. 2003. Meeting Cereal Demand While Protecting Natural Resources and Improving Environmental Quality. Annual Review of Environment and Resources [J], 28: 315-358.

CASSMAN K G, GRASSINI P, VAN WART J 2010. Crop yield potential, yield trends, and global food security in a changing climate. Handbook of climate change and agroecosystems. Imperial College Press, London [J]: 37-51.

CHAIKAM V, MOLENAAR W, MELCHINGER A E, et al. 2019. Doubled haploid technology for line development in maize: technical advances and prospects. Theoretical and Applied Genetics [J], 132: 3227-3243.

中国知网 https://www.cnki.net

CHALLINOR A, WHEELER T, CRAUFURD P, et al. 2005. Simulation of the impact of high temperature stress on annual crop yields. Agricultural and Forest Meteorology [J], 135: 180-189.

CHALLINOR A J, WHEELER T R 2008. Crop yield reduction in the tropics under climate change: Processes and uncertainties. Agricultural and Forest Meteorology [J], 148: 343-356.

CHEN C, BAETHGEN W E, ROBERTSON A 2013a. Contributions of individual variation in temperature, solar radiation and precipitation to crop yield in the North China Plain, 1961–2003. Climatic change [J], 116: 767-788.

CHEN C, GREENE A M, ROBERTSON A W, et al. 2013b. Scenario development for estimating potential climate change impacts on crop production in the North China Plain. International journal of climatology [J], 33: 3124-3140.

CHEN G, LI X, LIU X, et al. 2020. Global projections of future urban land expansion under shared socioeconomic pathways. Nature Communications [J], 11: 537.

CHEN J, HUANG Y, TANG Y 2011. Quantifying economically and ecologically optimum nitrogen rates for rice production in south-eastern China. Agriculture, ecosystems & environment [J], 142: 195-204.

CHEN X, CUI Z, FAN M, et al. 2014. Producing more grain with lower environmental costs. Nature [J], 514: 486-489.

CIRERA X, MASSET E 2010. Income distribution trends and future food demand. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences [J], 365: 2821-2834

CI X, LI M, LIANG X, et al. 2011. Genetic contribution to advanced yield for maize hybrids released from 1970 to 2000 in China. Crop science [J], 51: 13-20.

CUI Z, ZHANG H, CHEN X, et al. 2018. Pursuing sustainable productivity with millions of smallholder farmers. Nature [J], 555: 363-366.

DAI X Q, OU YANG Z, LI Y S, et al. 2013. Variation in yield gap induced by nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer in North China Plain. PloS one [J], 8: e82147-e82147.

DAN Z, HONGYUAN W, JUNTING P, et al. 2018. Nitrogen application rates need to be reduced for half of the rice paddy fields in China. Agriculture Ecosystems & Environment [J], 265: 8-14.

DAWE D, DOBERMANN A, MOYA P, et al. 2000. How widespread are yield declines in long-term rice experiments in Asia? Field Crops Research [J], 66: 175-193.

DE BIE C. Comparative performance analysis of agro-ecosystems[C]//,2000

DE DATTA S K. Principles and practices of rice production[C]//:Int. Rice Res. Inst.,1981

DE VRIES F P, RABBINGE R, GROOT J 1997. Potential and attainable food production and food security in different regions. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences [J], 352: 917-928.

DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. 2002. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. IEEE transactions on evolutionary computation [J], 6: 182-197.

DENG N, GRASSINI P, YANG H, et al. 2019. Closing yield gaps for rice self-sufficiency in China. Nature communications [J], 10: 1725.

中国知网 https://www.cnki.net

DENG X, LUN S, INANAGA S, et al. 2003. Compensation effects of planting density and fertilization on grain yield, water use efficiency and seeds nutrient contents of dry land spring wheat. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica [J], 23: 1861-1870.

DING Y, REN G, ZHAO Z, et al. 2007. Detection, causes and projection of climate change over China: An overview of recent progress. Advances in Atmospheric Sciences [J], 24: 954-971.

DING Y M, WANG W G, ZHUANG Q L, et al. 2020. Adaptation of paddy rice in China to climate change: The effects of shifting sowing date on yield and irrigation water requirement. Agricultural Water Management [J], 228: 105890.

DIXIT S, SINGH A, KUMAR A 2014. Rice breeding for high grain yield under drought: a strategic solution to a complex problem. International Journal of Agronomy [J], 2014: 863683.

DöLL P 2002. Impact of climate change and variability on irrigation requirements: a global perspective. Climatic change [J], 54: 269-293.

DUTTA S, CHAKRABORTY S, GOSWAMI R, et al. 2020. Maize yield in smallholder agriculture system—An approach integrating socio-economic and crop management factors. PloS one [J], 15: e0229100.

DUVICK D N, CASSMAN K G 1999. Post–green revolution trends in yield potential of temperate maize in the North-Central United States. Crop science [J], 39: 1622-1630.

DU Y, NIU W, ZHANG Q, et al. 2021. A synthetic analysis of the effect of water and nitrogen inputs on wheat yield and water-and nitrogen-use efficiencies in China. Field Crops Research [J], 265: 108105.

DUAN Y, XU M, WANG B, et al. 2011. Long-term evaluation of manure application on maize yield and nitrogen use efficiency in China. Soil Science Society of America Journal [J], 75: 1562-1573.

DUVICK D N 2005. Genetic progress in yield of United States maize （Zea mays L.）. Maydica [J], 50: 193-202.

ESMAEILZADEH J, AHANGAR A G 2014. Influence of soil organic matter content on soil physical, chemical and biological properties. International Journal of Plant, Animal and Environmental Sciences [J], 4: 244-252.

ESPE M B, HILL J E, LEINFELDER-MILES M, et al. 2018. Rice yield improvements through plant breeding are offset by inherent yield declines over time. Field Crops Research [J], 222: 59-65.

EVANS L, FISCHER R 1999. Yield potential: its definition, measurement, and significance. Crop Science [J], 39: 1544-1551.

EVANS L T, EVANS L T. Crop evolution, adaptation and yield[C]//:Cambridge university press,1996

EVENSON R E, GOLLIN D 2003. Assessing the Impact of the Green Revolution, 1960 to 2000. Science [J], 300: 758-762.

FAN M, SHEN J, YUAN L, et al. 2011. Improving crop productivity and resource use efficiency to ensure food security and environmental quality in China. Journal of Experimental Botany [J], 63: 13-24.

中国知网 https://www.cnki.net

FAN W, WU P, MA F 2012. Socio-economic impacts of under-film drip irrigation technology and sustainable assessment: a case in the Manas River Basin, Xinjiang, China. Shengtai Xuebao/Acta Ecologica Sinica [J], 32: 7559-7567.

FANG G, WEN Y, YU H, et al. 2017. On yield gaps and yield gains in intercropping: Opportunities for increasing grain production in northwest China. Agricultural Systems [J], 151: 96-105.

FAGERIA N K, BALIGAR V C, CLARK R. Physiology of crop production[C]//:crc Press,2006

FAO. 2009. How to Feed the World in 2050, High Level Expert Forum. Rome.

FAO 2022. （Food and Agriculture Organization）. FAOSTAT database. FAO, Rome. [J].

FISCHER G, TUBIELLO F N, VAN VELTHUIZEN H, et al. 2007. Climate change impacts on irrigation water requirements: Effects of mitigation, 1990–2080. Technological Forecasting and Social Change [J], 74: 1083-1107.

FISCHER R, EDMEADES G O 2010. Breeding and cereal yield progress. Crop science [J], 50: S-85-S-98.

FISCHER T, BYERLEE D, EDMEADES G 2012. Crop yields and food security: will yield increases continue to feed the world?

FITZGERALD T, KUWAYAMA Y, OLMSTEAD S, et al. 2020. Dynamic impacts of U.S. energy development on agricultural land use. Energy Policy [J], 137: 111163.

FIXEN P, BRENTRUP F, BRUULSEMA T, et al. Nutrient/fertilizer use efficiency: measurement, current situation and trends[C]//,2015:8-38.

FRESCO L 1984. Issues in farming systems research. Netherlands Journal of Agricultural Science [J], 32: 253-261.

GAO F, MA D, YIN G, et al. 2017. Genetic progress in grain yield and physiological traits in Chinese wheat cultivars of southern yellow and Huai Valley since 1950. Crop Science [J], 57: 760-773.

GEERTS S, RAES D 2009. Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. Agricultural water management [J], 96: 1275-1284.

GONZALEZ V, TOLLENAAR M, BOWMAN A, et al. 2018. Maize yield potential and density tolerance. Crop Science [J], 58: 472-485.

GOU F, YIN W, HONG Y, et al. 2017. On yield gaps and yield gains in intercropping: Opportunities for increasing grain production in northwest China. Agricultural Systems [J], 151: 96-105.

GUNAWAT A, SHARMA D, SHARMA A, et al. 2022. Assessment of climate change impact and potential adaptation measures on wheat yield using the DSSAT model in the semi-arid environment. Natural Hazards [J]: 1-20.

GUO Y, FU Y, HAO F, et al. 2021. Integrated phenology and climate in rice yields prediction using machine learning methods. Ecological Indicators [J], 120: 106935.

GUPTA R, GOPAL R, JAT M, et al. 2010. Wheat productivity in Indo-Gangetic plains of India during 2010: terminal heat effects and mitigation strategies. PACA Newsletter [J], 14: 1-11.

HAGEMANN S, CHEN C, CLARK D B, et al. 2013. Climate change impact on available water resources obtained using multiple global climate and hydrology models. Earth System

中国知网 https://www.cnki.net

Dynamics [J], 4: 129-144.

HAJJARPOOR A, SOLTANI A, ZEINALI E, et al. 2018. Using boundary line analysis to assess the on-farm crop yield gap of wheat. Field Crops Research [J], 225: 64-73.

HAN Y-Y, WANG K-Y, LIU Z-Q, et al. 2020. Research on hybrid crop breeding information management system based on combining ability analysis. Sustainability [J], 12: 4938.

HAN Y-Y, WANG K-Y, LIU Z-Q, et al. 2017. A crop trait information acquisition system with multitag-based identification technologies for breeding precision management. Computers and Electronics in Agriculture [J], 135: 71-80.

HARDKE J, SCHMIDT L, MAZZANTI R 2013. 2013 Arkansas Rice Quick Facts. University of Arkansas Division of Agriculture, Research and Extension. Internet site: http://www. aragriculture. org/crops/rice/quick_facts/2013_rice_quick_facts. pdf （Accessed August 8, 2013） [J].

HATFIELD J L 2016. Increased temperatures have dramatic effects on growth and grain yield of three maize hybrids. Agricultural & Environmental Letters [J], 1: 150006.

HE P, DING X, BAI J, et al. 2022. Maize hybrid yield and physiological response to plant density across four decades in China. Agronomy Journal [J], 114: 2886-2904.

HEISEY P W 2015. Crop Yields and Global Food Security: Will Yield Increase Continue to Feed the World? American Journal of Agricultural Economics [J], 97: 661-663.

HLAVINKA P, TRNKA M, SEMERADOVA D, et al. 2009. Effect of drought on yield variability of key crops in Czech Republic. Agricultural and forest meteorology [J], 149: 431-442.

HOFFMAN A, KEMANIAN A, FOREST C 2020. The response of maize, sorghum, and soybean yield to growing-phase climate revealed with machine learning. Environmental Research Letters [J], 15: 094013.

HOOGENBOOM G, PORTER C H, SHELIA V, et al. 2021. Improvement and Application of Agroecosystem Models: The DSSAT Experience.

HOWELL T A 2001. Enhancing Water Use Efficiency in Irrigated Agriculture. Agronomy Journal [J], 93: 281-289.

HU X, HUANG Y, SUN W, et al. 2017. Shifts in cultivar and planting date have regulated rice growth duration under climate warming in China since the early 1980s. Agricultural and forest meteorology [J], 247: 34-41.

HUANG M, FAN L, ZOU Y 2019. Contrasting responses of grain yield to reducing nitrogen application rate in double-and single-season rice. Scientific Reports [J], 9: 92.

HUANG S, HE H, ZHANG W, et al. 2013. Agronomic performance of different japonica rice varieties in different eco-regions in Jiangxi province. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis [J], 35: 25-32.

IMMERZEEL W W, VAN BEEK L P, BIERKENS M F 2010. Climate change will affect the Asian water towers. science [J], 328: 1382-1385.

INST I R, BANOS L, ENG L. Farm-level constraints to high rice yields in Asia, 1974-77[C]//,1979

JAENISCH B R, MUNARO L B, JAGADISH S K, et al. 2022. Modulation of wheat yield components in response to management intensification to reduce yield gaps. Frontiers in Plant

中国知网 https://www.cnki.net

Science [J], 13: 772232.

JIN J Y 2012. Changes in the efficiency of fertiliser use in China. Journal of the Science of Food and Agriculture [J], 92: 1006-1009.

JIN Y, CHEN B, LAMPINEN B D, et al. 2020. Advancing Agricultural Production With Machine Learning Analytics: Yield Determinants for California's Almond Orchards. Frontiers in Plant Science [J], 11.

JING P, WANG D, ZHU C, et al. 2016. Plant physiological, morphological and yield-related responses to night temperature changes across different species and plant functional types. Frontiers in Plant Science [J], 7: 1774.

JONES J, HOOGENBOOM G, PORTER C, et al. 2003. The DSSAT cropping system model European Journal of Agronomy. European Journal of Agronomy [J].

JU H, VAN DER VELDE M, LIN E, et al. 2013. The impacts of climate change on agricultural production systems in China. Climatic change [J], 120: 313-324.

KHALIQ T, GAYDON D S, AHMAD M-U-D, et al. 2019. Analyzing crop yield gaps and their causes using cropping systems modelling–A case study of the Punjab rice-wheat system, Pakistan. Field Crops Research [J], 232: 119-130.

KUCHARIK C J 2008. Contribution of planting date trends to increased maize yields in the central United States. Agronomy Journal [J], 100: 328-336.

KUKAL M S, IRMAK S 2018. Climate-Driven Crop Yield and Yield Variability and Climate Change Impacts on the U.S. Great Plains Agricultural Production. Scientific Reports [J], 8: 3450.

KUMAR M 2016. Impact of climate change on crop yield and role of model for achieving food security. Environmental Monitoring and Assessment [J], 188: 1-14.

LADHA J, DAWE D, PATHAK H, et al. 2003. How extensive are yield declines in long-term rice–wheat experiments in Asia? Field Crops Research [J], 81: 159-180.

LEAKEY A D, AINSWORTH E A, BERNACCHI C J, et al. 2009. Elevated CO2 effects on plant carbon, nitrogen, and water relations: six important lessons from FACE. Journal of experimental botany [J], 60: 2859-2876.

LENG G, HUANG M 2017. Crop yield response to climate change varies with crop spatial distribution pattern. Scientific Reports [J], 7: 1463.

LI J, XIE R, WANG K, et al. 2015. Variations in maize dry matter, harvest index, and grain yield with plant density. Agronomy Journal [J], 107: 829-834.

LI K, YANG X, LIU Z, et al. 2014. Low yield gap of winter wheat in the North China Plain. European Journal of Agronomy [J], 59: 1-12.

LI S, ZHANG C, LI J, et al. 2021. Present and future prospects for wheat improvement through genome editing and advanced technologies. Plant Communications [J], 2.

LI Y, CUI Z, NI Y, et al. 2016. Plant density effect on grain number and weight of two winter wheat cultivars at different spikelet and grain positions. PloS one [J], 11: e0155351.

LIANG Z, SUN L, TIAN Z, et al. 2023. Increase in grain production potential of China under climate change. PNAS Nexus [J], 2: pgad057.

中国知网 https://www.cnki.net

LIAW A, WIENER M 2002. Classification and regression by randomForest. R news [J], 2: 18-22.

LICKER R, JOHNSTON M, FOLEY J A, et al. 2010. Mind the gap: how do climate and agricultural management explain the ‘yield gap’of croplands around the world? Global ecology and biogeography [J], 19: 769-782

LINQUIST B, ESPE M 2015. When is the optimal time to plant rice in the Sacramento Valley [M].

LIU B, ASSENG S, MüLLER C, et al. 2016a. Similar estimates of temperature impacts on global wheat yield by three independent methods. Nature Climate Change [J], 6: 1130-1136.

LIU B, CHEN X, MENG Q, et al. 2017a. Estimating maize yield potential and yield gap with agro-climatic zones in China—Distinguish irrigated and rainfed conditions. Agricultural and forest meteorology [J], 239: 108-117.

LIU D L, O’LEARY G J, CHRISTY B, et al. 2017b. Effects of different climate downscaling methods on the assessment of climate change impacts on wheat cropping systems. Climatic Change [J], 144: 687-701.

LIU G, HOU P, XIE R, et al. 2019. Nitrogen uptake and response to radiation distribution in the canopy of high-yield maize. Crop Science [J], 59: 1236-1247.

LIU G, HOU P, XIE R, et al. 2017. Canopy characteristics of high-yield maize with yield potential of 22.5 Mg ha− 1. Field Crops Research [J], 213: 221-230.

LIU L, SADRAS V O, XU J, et al. 2021. Genetic improvement of crop yield, grain protein and nitrogen use efficiency of wheat, rice and maize in China. Advances in Agronomy [J], 168: 203-252.

LIU L, ZHU Y, TANG L, et al. 2013. Impacts of climate changes, soil nutrients, variety types and management practices on rice yield in East China: A case study in the Taihu region. Field Crops Research [J], 149: 40-48.

LIU Y, WANG E, YANG X, et al. 2010. Contributions of climatic and crop varietal changes to crop production in the North China Plain, since 1980s. Global Change Biology [J], 16: 2287-2299.

LIU Z J, YANG X G, HUBBARD K G, et al. 2012. Maize potential yields and yield gaps in the changing climate of northeast China. Global Change Biology [J], 18: 3441-3454.

LIU Z, YANG X, LIN X, et al. 2016. Maize yield gaps caused by non-controllable, agronomic, and socioeconomic factors in a changing climate of Northeast China. Science of the Total Environment [J], 541: 756-764.

LOBELL D B, CASSMAN K G, FIELD C B 2009. Crop yield gaps: their importance, magnitudes, and causes. Annual review of environment and resources [J], 34: 179-204.

LOBELL D B, GOURDJI S M 2012. The influence of climate change on global crop productivity. Plant physiology [J], 160: 1686-1697.

LOBELL D B, ORTIZ-MONASTERIO J I 2006. Regional importance of crop yield constraints: Linking simulation models and geostatistics to interpret spatial patterns. Ecological Modelling [J], 196: 173-182.

LOBELL D B, ORTIZ-MONASTERIO J I, LEE ADDAMS C, et al. 2002. Soil, climate, and management impacts on regional wheat productivity in Mexico from remote sensing. Agricultural and Forest Meteorology [J], 114: 31-43.

中国知网 https://www.cnki.net

LOBELL D B, ORTIZ-MONASTERIO J I, ASNER G P, et al. 2005a. Analysis of wheat yield and climatic trends in Mexico. Field Crops Research [J], 94: 250-256.

LOBELL D B, ORTIZ-MONASTERIO J I, ASNER G P, et al. 2005b. Combining field surveys, remote sensing, and regression trees to understand yield variations in an irrigated wheat landscape. Agronomy Journal [J], 97: 241-249.

LOBELL D B, BURKE M B 2008. Why are agricultural impacts of climate change so uncertain? The importance oftemperature relative to precipitation. Environmental Research Letters [J], 3: 034007.

LOBELL D B, SCHLENKER W, COSTA-ROBERTS J 2011a. Climate trends and global crop production since 1980. Science [J], 333: 616-620.

LOBELL D B, TORNEY A, FIELD C B 2011b. Climate extremes in California agriculture. Climatic change [J], 109: 355-363.LU C, FAN L 2013. Winter wheat yield potentials and yield gaps in the North China Plain. Field Crops Research [J], 143: 98-105.

LOBELL D B, BäNZIGER M, MAGOROKOSHO C, et al. 2011c. Nonlinear heat effects on African maize as evidenced by historical yield trials. Nature climate change [J], 1: 42-45

LONG S P, AINSWORTH E A, LEAKEY A D, et al. 2006. Food for thought: lower-than-expected crop yield stimulation with rising CO2 concentrations. science [J], 312: 1918-1921.

LOH W Y 2011. Classification and regression trees. Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery [J].

LU C, FAN L 2013. Winter wheat yield potentials and yield gaps in the North China Plain. Field Crops Research [J], 143: 98-105.

LU C, LI X, TAN M 2007. China's farmland use: a scenario analysis of changes and trends. Dragons with clay feet [J]: 309-326.

LUO N, MENG Q, FENG P, et al. 2023. China can be self-sufficient in maize production by 2030 with optimal crop management. Nature Communications [J], 14: 2637.

LUO Z, LIU H, LI W, et al. 2018. Effects of reduced nitrogen rate on cotton yield and nitrogen use efficiency as mediated by application mode or plant density. Field Crops Research [J], 218: 150-157.

MA H, MALONE R W, JIANG T, et al. 2020. Estimating crop genetic parameters for DSSAT with modified PEST software. European Journal of Agronomy [J], 115: 126017.

MAHMOOD N, ARSHAD M, KäCHELE H, et al. 2019. Wheat yield response to input and socioeconomic factors under changing climate: Evidence from rainfed environments of Pakistan. Science of The Total Environment [J], 688: 1275-1285.

MADDONNI G A, CIRILO A G, OTEGUI M 2006. Row width and maize grain yield. Agronomy journal [J], 98: 1532-1543.

MARIN F R. Understanding sugarcane yield gap and bettering crop management through crop production efficiency[C]//:InTech,2012

MARIN F R, RIBEIRO R V, MARCHIORI P E 2014. How can crop modeling and plant physiology help to understand the plant responses to climate change? A case study with sugarcane. Theoretical and Experimental Plant Physiology [J], 26: 49-63.

中国知网 https://www.cnki.net

MCCAULEY A, JONES C, JACOBSEN J 2009. Soil pH and organic matter. Nutrient management module [J], 8: 1-12.

MEARNS L, MAVROMATIS T, TSVETSINSKAYA E, et al. 1999. Comparative responses of EPIC and CERES crop models to high and low spatial resolution climate change scenarios. Journal of Geophysical Research: Atmospheres [J], 104: 6623-6646.

MEEK D W, HATFIELD J L, HOWELL T A, et al. 1984. A generalized relationship between photosynthetically active radiation and solar radiation 1. Agronomy Journal [J], 76: 939-945.

MEERTENS H, NDEGE L, ENSERINK H 1992. Results of the urea demonstration on-farm trial: Maswa District 1990–91 [M]. Field Note.

MIAO Y, STEWART B A, ZHANG F 2011. Long-term experiments for sustainable nutrient management in China. A review. Agronomy for Sustainable Development [J], 31: 397-414.

MIRALLES D J, SLAFER G A 1995. Individual grain weight responses to genetic reduction in culm length in wheat as affected by source-sink manipulations. Field Crops Research [J], 43: 55-66.

MONTGOMERY D C, PECK E A, VINING G G. Introduction to linear regression analysis[C]//:John Wiley & Sons,2012

MORELL F J, YANG H S, CASSMAN K G, et al. 2016. Can crop simulation models be used to predict local to regional maize yields and total production in the US Maize Belt? Field Crops Research [J], 192: 1-12.

MUELLER N D, GERBER J S, JOHNSTON M, et al. 2012. Closing yield gaps through nutrient and water management. Nature [J], 490: 254-257.

MUKHOPADHYAY K, THOMASSIN P J, ZHANG J 2018. Food security in China at 2050: A global CGE exercise. Journal of Economic Structures [J], 7: 1-29.

MURPHY B 2015. Impact of soil organic matter on soil properties—a review with emphasis on Australian soils. Soil Research [J], 53: 605-635.

MYERS S S, ZANOBETTI A, KLOOG I, et al. 2014. Increasing CO2 threatens human nutrition. Nature [J], 510: 139-142.

NALLEY L, TACK J, BARKLEY A, et al. 2016. Quantifying the Agronomic and Economic Performance of Hybrid and Conventional Rice Varieties. Agronomy Journal [J], 108: 1514-1523.

ORTIZ-MONASTERIO J I, LOBELL D B 2007. Remote sensing assessment of regional yield losses due to sub-optimal planting dates and fallow period weed management. Field Crops Research [J], 101: 80-87.

PANDEY R 2000. Yield gap of wheat and constraints in adoption of new technology by the farmers in Plateau Region of Bihar. Indian Journal of Agricultural Economics [J], 55: 536.

PARDEY P G, BEDDOW J M, HURLEY T M, et al. 2014. A bounds analysis of world food futures: global agriculture through to 2050. Australian Journal of Agricultural and Resource Economics [J], 58: 571-589.

PARRY M L, ROSENZWEIG C, IGLESIAS A, et al. 2004. Effects of climate change on global food production under SRES emissions and socio-economic scenarios. Global environmental

中国知网 https://www.cnki.net

change [J], 14: 53-67.

PELTONEN-SAINIO P, KANGAS A, SALO Y, et al. 2007. Grain number dominates grain weight in temperate cereal yield determination: evidence based on 30 years of multi-location trials. Field Crops Research [J], 100: 179-188.

PENG S, BURESH R J, HUANG J, et al. 2006. Strategies for overcoming low agronomic nitrogen use efficiency in irrigated rice systems in China. Field Crops Research [J], 96: 37-47.

PENG S-B, HUANG J-L, ZHONG X-H, et al. 2002. Challenge and opportunity in improving fertilizer-nitrogen use efficiency of irrigated rice in China. Agricultural Sciences in China [J], 1: 776-785.

PENG S 2011. Water resources strategy and agricultural development in China. Journal of experimental botany [J], 62: 1709-1713.

PENG S, KHUSH G S, VIRK P, et al. 2008. Progress in ideotype breeding to increase rice yield potential. Field Crops Research [J], 108: 32-38.

RABBINGE R. The ecological background of food production[C]//Ciba Foundation Symposium.Wiley Online Library,1993:2-2.

RABBINGE R, WARD S, VAN LAAR H 1991. management in crop protection （Simulation Monographs 32）. Wageningen, The Netherlands: Centre for Agricultural Publishing and Documentation （Pudoc）, 1989. xiv+ 420 pages. Dfl. 125.00. ISBN 90-220-0899-1. Plant Growth Regulation [J], 10: 169-170.

RAGHUNADHA REDDY G 1997. Differential performance of high yielding rice varieties: yield gaps and constraints. CROP RESEARCH-HISAR- [J], 14: 337-346.

RASHEED A, JIE H, ALI B, et al. 2023. Breeding drought-tolerant maize （Zea mays） using molecular breeding tools: recent advancements and future prospective. Agronomy [J], 13: 1459.

RAY J D, GESCH R W, SINCLAIR T R, et al. 2002. The effect of vapor pressure deficit on maize transpiration response to a drying soil. Plant and soil [J], 239: 113-121.

ROSEGRANT M W, PAISNER M S, MEIJER S, et al. Global food projections to 2020: emerging trends and alternative futures[C]//:International Food Policy Research Institute,2001

RöTTER R P, CARTER T R, OLESEN J E, et al. 2011. Crop–climate models need an overhaul. Nature climate change [J], 1: 175-177.

PS M G 2019. Performance evaluation of best feature subsets for crop yield prediction using machine learning algorithms. Applied Artificial Intelligence [J], 33: 621-642.

PURWANTO B H, ALAM S 2020. Impact of intensive agricultural management on carbon and nitrogen dynamics in the humid tropics. Soil Science and Plant Nutrition [J], 66: 50-59.

QIU S, HE P, ZHAO S, et al. 2015. Impact of nitrogen rate on maize yield and nitrogen use efficiencies in northeast China. Agronomy Journal [J], 107: 305-313.

REN C, HE L, ROSA L 2025. Integrated irrigation and nitrogen optimization is a resource-efficient adaptation strategy for US maize and soybean production. Nature Food [J], 6: 389-400.

RIZZO G, MONZON J P, TENORIO F A, et al. 2022. Climate and agronomy, not genetics, underpin recent maize yield gains in favorable environments. Proceedings of the National Academy of Sciences [J], 119: e2113629119.

中国知网 https://www.cnki.net

RONG L-B, GONG K-Y, DUAN F-Y, et al. 2021. Yield gap and resource utilization efficiency of three major food crops in the world–A review. Journal of integrative agriculture [J], 20: 349-362.

SAROBOL N, VIRAKUL P, POTAN N, et al. 1989. Preliminary survey on soybean yield gap analysis in Thailand. Preliminary survey on soybean yield gap analysis in Thailand. [J].

SENAPATI N, SEMENOV M A 2020. Large genetic yield potential and genetic yield gap estimated for wheat in Europe. Global Food Security [J], 24: 100340.

SHANG Z, ABDALLA M, XIA L, et al. 2021. Can cropland management practices lower net greenhouse emissions without compromising yield? Global Change Biology [J], 27: 4657-4670.

SHAKOOR N, LEE S, MOCKLER T C 2017. High throughput phenotyping to accelerate crop breeding and monitoring of diseases in the field. Current opinion in plant biology [J], 38: 184-192.

SHAO H, WU X, DUAN J, et al. 2024. How does increasing planting density regulate biomass production, allocation, and remobilization of maize temporally and spatially: A global meta-analysis. Field Crops Research [J], 315: 109430.

SHI D, LI Y, ZHANG J, et al. 2016. Effects of plant density and nitrogen rate on lodging-related stalk traits of summer maize.

SINCLAIR T R, PARK W I 1993. Inadequacy of the Liebig Limiting-Factor Paradigm for Explaining Varying Crop Yields. Agronomy Journal [J], 85: 742-746.

SINCLAIR T R, RUFTY T W 2012. Nitrogen and water resources commonly limit crop yield increases, not necessarily plant genetics. Global Food Security [J], 1: 94-98.

SINGH U 2006. Integrated nitrogen fertilization for intensive and sustainable agriculture. Journal of Crop improvement [J], 15: 259-288.

SLAFER G A, ANDRADE F H 1991. Changes in physiological attributes of the dry matter economy of bread wheat （Triticum aestivum） through genetic improvement of grain yield potential at different regions of the world: a review. Euphytica [J], 58: 37-49.

STONE P 2001. The effects of heat stress on cereal yield and quality. Crop responses and adaptations to temperature stress [J]: 243-291.

STUDNICKI M, DEREJKO A, WÓJCIK-GRONT E, et al. 2019. Adaptation patterns of winter wheat cultivars in agro-ecological regions. Scientia Agricola [J], 76: 148-156.

SUN K, WANG L 2002. Effect of different fertilization practices on yield of a wheat-maize rotation and soil fertility. Pedosphere [J], 12: 283-288.

TAGA Y, HONDA M 1982. VARIABLE SELECTION IN REGRESSION ESTIMATION.

TAI A P, MARTIN M V, HEALD C L 2014. Threat to future global food security from climate change and ozone air pollution. Nature Climate Change [J], 4: 817-821.

TAKAI T, MATSUURA S, NISHIO T, et al. 2006. Rice yield potential is closely related to crop growth rate during late reproductive period. Field Crops Research [J], 96: 328-335.

TANG G, DING Y, WANG S, et al. 2010. Comparative analysis of China surface air temperature series for the past 100 years. Advances in Climate Change Research [J], 1: 11-19.

中国知网 https://www.cnki.net

TAO F, YOKOZAWA M, LIU J, et al. 2008. Climate–crop yield relationships at provincial scales in China and the impacts of recent climate trends. Climate Research [J], 38: 83-94.

TAO F, YOKOZAWA M, XU Y, et al. 2006. Climate changes and trends in phenology and yields of field crops in China, 1981–2000. Agricultural and forest meteorology [J], 138: 82-92.

THORNTON P K, ERICKSEN P J, HERRERO M, et al. 2014. Climate variability and vulnerability to climate change: a review. Global change biology [J], 20: 3313-3328.

TIAN X, ENGEL B A, QIAN H, et al. 2021. Will reaching the maximum achievable yield potential meet future global food demand? Journal of Cleaner Production [J], 294: 126285.

TOKATLIDIS I, KOUTROUBAS S 2004. A review of maize hybrids' dependence on high plant populations and its implications for crop yield stability. Field Crops Research [J], 88: 103-114.

TOLLENAAR M, DEEN W, ECHARTE L, et al. 2006. Effect of crowding stress on dry matter accumulation and harvest index in maize. Agronomy Journal [J], 98: 930-937.

TUBIELLO F N, AMTHOR J S, BOOTE K J, et al. 2007. Crop response to elevated CO2 and world food supply: a comment on "Food for Thought…" by Long et al., Science 312: 1918–1921, 2006. European journal of agronomy [J], 26: 215-223.

United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. 2019. World Population Prospects 2019: Highlights. ST/ESA/SER.A/423.

VALIN H, SANDS R D, VAN DER MENSBRUGGHE D, et al. 2014. The future of food demand: understanding differences in global economic models. Agricultural Economics [J], 45: 51-67.

VAN ITTERSUM M K, CASSMAN K G, GRASSINI P, et al. 2013. Yield gap analysis with local to global relevance—a review. Field Crops Research [J], 143: 4-17.

VAN LOON M P, ADJEI-NSIAH S, DESCHEEMAEKER K, et al. 2019. Can yield variability be explained? Integrated assessment of maize yield gaps across smallholders in Ghana. Field Crops Research [J], 236: 132-144.

VAN WART J, VAN BUSSEL L G, WOLF J, et al. 2013a. Use of agro-climatic zones to upscale simulated crop yield potential. Field Crops Research [J], 143: 44-55.

VAN WART J, KERSEBAUM K C, PENG S, et al. 2013b. Estimating crop yield potential at regional to national scales. Field Crops Research [J], 143: 34-43.

VERDOODT A, VAN RANST E, VAN AVERBEKE W 2003. Modelling crop production potentials for yield gap analysis under semiarid conditions in Guquka, South Africa. Soil use and management [J], 19: 372-380.

VIETS F G. Fertilizers And The Efficient Use Of Water[C]//A. G. NORMAN. Advances in Agronomy.Academic Press,1962:223-264. https://doi.org/10.1016/S0065-2113（08）60439-3

VITOUSEK P M, ABER J D, HOWARTH R W, et al. 1997. Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences. Ecological applications [J], 7: 737-750.

VITOUSEK P M, NAYLOR R, CREWS T, et al. 2009. Nutrient imbalances in agricultural development. Science [J], 324: 1519-1520.

WANG H-J, SUN J-Q, CHEN H-P, et al. 2012. Extreme climate in China: Facts, simulation and projection. Meteorologische Zeitschrift [J], 21: 279.

WANG E, WANG J 2007. Modelling the performance of different wheat varieties under changed

中国知网 https://www.cnki.net

climate-towards better adaptation. Progress of Information Technology in Agriculture [J].

WANG H, ZHANG Y, CHEN A, et al. 2017. An optimal regional nitrogen application threshold for wheat in the North China Plain considering yield and environmental effects. Field Crops Research [J], 207: 52-61.

WANG M, XU P, LIU X, et al. 2011. Path analysis of summer maize agronomic traits and yield in the Huang-Huai-Hai Plain. Zhongguo Shengtai Nongye Xuebao/Chinese Journal of Eco-Agriculture [J], 19: 1229-1236

WANG S, BAI X, ZHANG X, et al. 2021. Urbanization can benefit agricultural production with large-scale farming in China. Nature Food [J], 2: 183-191.

WANG S, TIAN Y, LIU X, et al. 2019a. How farmers make investment decisions: Evidence from a farmer survey in China. Sustainability [J], 12: 247.

WANG X, WU X, HUA Y, et al. 2025. Optimizing maize production in the Guanzhong Region: An evaluation of density tolerance, yield, and mechanical harvesting characteristics in different maize varieties. European Journal of Agronomy [J], 164: 127500.

WANG Y, TAO H, TIAN B, et al. 2019b. Flowering dynamics, pollen, and pistil contribution to grain yield in response to high temperature during maize flowering. Environmental and Experimental Botany [J], 158: 80-88.

WELCH J R, VINCENT J R, AUFFHAMMER M, et al. 2010. Rice yields in tropical/subtropical Asia exhibit large but opposing sensitivities to minimum and maximum temperatures. Proceedings of the National Academy of Sciences [J], 107: 14562-14567.

WHEELER T, CRAUFURD P, ELLIS R, et al. 2000. Temperature variability and the annual yield of crops Agric. Ecosyst. Environ [J], 82: 159-167.

WU D, QIANG Y, HE L C, et al. 2006. Quantifying production potentials of winter wheat in the North China Plain. European Journal of Agronomy [J], 24: 226-235.

WU X, YANG D, WANG S, et al. 2011. Temporal and spatial characteristic of rainless days in China’s mainland in recent 50 years. Arid Land Geogr [J], 34: 596-603.

XIAO D, TAO F 2014. Contributions of cultivars, management and climate change to winter wheat yield in the North China Plain in the past three decades. European Journal of Agronomy [J], 52: 112-122.

XIONG W, CONWAY D, LIN E, et al. 2009. Potential impacts of climate change and climate variability on China’s rice yield and production. Climate Research [J], 40: 23-35.

XIONG W, MATTHEWS R, HOLMAN I, et al. 2007. Modelling China’s potential maize production at regional scale under climate change. Climatic change [J], 85: 433-451.

XIONG W, VAN DER VELDE M, HOLMAN I P, et al. 2014. Can climate-smart agriculture reverse the recent slowing of rice yield growth in China? Agriculture, ecosystems & environment [J], 196: 125-136.

XU X, HE P, ZHAO S, et al. 2016. Quantification of yield gap and nutrient use efficiency of irrigated rice in China. Field Crops Research [J], 186: 58-65.

XU X P, HE P, PAMPOLINO M F, et al. 2016. Narrowing yield gaps and increasing nutrient use efficiencies using the Nutrient Expert system for maize in Northeast China. Field Crops

中国知网 https://www.cnki.net

Research [J], 194: 75-82.

YAN P, ZHANG Q, SHUAI X, et al. 2016. Interaction between plant density and nitrogen management strategy in improving maize grain yield and nitrogen use efficiency on the North China Plain. The Journal of Agricultural Science [J], 154: 978-988.

YAN P, ZHANG Q, SHUAI X, et al. 2016. Interaction between plant density and nitrogen management strategy in improving maize grain yield and nitrogen use efficiency on the North China Plain. The Journal of Agricultural Science [J], 154: 978-988.

YANG D, XIONG W, XU Y, et al. 2017. Analysis of reason for recent slowing maize yield increase under climate change in China. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering [J], 33: 231-238.

YE Q, ZHANG H, WEI H, et al. 2007. Effects of nitrogen fertilizer on nitrogen use efficiency and yield of rice under different soil conditions. Frontiers of Agriculture in China [J], 1: 30-36.

YIN X 2013. Improving ecophysiological simulation models to predict the impact of elevated atmospheric CO2 concentration on crop productivity. Annals of botany [J], 112: 465-475.

YIN Y, YING H, ZHENG H, et al. 2019. Estimation of NPK requirements for rice production in diverse Chinese environments under optimal fertilization rates. Agricultural and Forest Meteorology [J], 279: 107756.

YU F, SHI W 2015. Nitrogen use efficiencies of major grain crops in China in recent 10 years.

YU H, LIU S, ZHAO N, et al. 2011. Characteristics of air temperature and precipitation in different regions of China from 1951 to 2009. Journal of Meteorology and Environment [J], 27: 1-11.

YU Q, HENGSDIJK H, LIU J 2001. Application of a progressive-difference method to identify climatic factors causing variation in the rice yield in the Yangtze Delta, China. International Journal of Biometeorology [J], 45: 53-58.

YU Y, CLARK J S, TIAN Q, et al. 2022. Rice yield response to climate and price policy in high-latitude regions of China. Food Security [J], 14: 1143-1157.

YUAN H, YANG G, LI C, et al. 2017. Retrieving soybean leaf area index from unmanned aerial vehicle hyperspectral remote sensing: Analysis of RF, ANN, and SVM regression models. Remote Sensing [J], 9: 309.

YUAN L 2017. Progress in super-hybrid rice breeding. The Crop Journal [J], 5: 100-102.

ZABEL F, MüLLER C, ELLIOTT J, et al. 2021. Large potential for crop production adaptation depends on available future varieties. Global Change Biology [J], 27: 3870-3882.

ZELEKE K T, NENDEL C 2016. Analysis of options for increasing wheat（Triticum aestivum L.）yield in south-eastern Australia: The role of irrigation, cultivar choice and time of sowing. Agricultural Water Management [J], 166: 139-148.

ZENG D, TIAN Z, RAO Y, et al. 2017. Rational design of high-yield and superior-quality rice. Nature plants [J], 3: 1-5.

ZHANG D, WANG H, PAN J, et al. 2018. Nitrogen application rates need to be reduced for half of the rice paddy fields in China. Agriculture, Ecosystems & Environment [J], 265: 8-14.

中国知网 https://www.cnki.net

ZHANG F, CHEN X, VITOUSEK P 2013. An experiment for the world. Nature [J], 497: 33-35.

ZHANG F, ELDOMA I M, LI M, et al. 2019. Integrated model and field experiment to determine the optimum planting density in plastic film mulched rainfed agriculture. Agricultural and Forest Meteorology [J], 268: 331-340.

ZHANG FS, WANG JQ, ZHANG WF, et al. 2008. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement.

ZHANG G, LIU C, XIAO C, et al. 2017. Optimizing water use efficiency and economic return of super high yield spring maize under drip irrigation and plastic mulching in arid areas of China. Field Crops Research [J], 211: 137-146.

ZHANG G, SHEN D, XIE R, et al. 2020. Optimizing planting density to improve nitrogen use of super high-yield maize. Agronomy Journal [J], 112: 4147-4158.

ZHANG H, LI Y, ZHU J-K 2018. Developing naturally stress-resistant crops for a sustainable agriculture. Nature plants [J], 4: 989-996.

ZHANG H, TAO F L, ZHOU G S 2019. Potential yields, yield gaps, and optimal agronomic management practices for rice production systems in different regions of China. Agricultural Systems [J], 171: 100-112.

ZHANG H, XU M, SHI X, et al. 2010. Rice yield, potassium uptake and apparent balance under long-term fertilization in rice-based cropping systems in southern China. Nutrient Cycling in Agroecosystems [J], 88: 341-349.

ZHANG Q, WANG K, HAN Y, et al. 2022. A crop variety yield prediction system based on variety yield data compensation. Computers and Electronics in Agriculture [J], 203: 107460.

ZHANG W, CAO G, LI X, et al. 2016. Closing yield gaps in China by empowering smallholder farmers. Nature [J], 537: 671-674.

ZHANG W, YU C, ZHANG K, et al. 2017. Plant growth regulator and its interactions with environment and genotype affect maize optimal plant density and yield. European Journal of Agronomy [J], 91: 34-43.

ZHANG Y, TANG Q, ZOU Y, et al. 2009. Yield potential and radiation use efficiency of “super” hybrid rice grown under subtropical conditions. Field Crops Research [J], 114: 91-98.

ZHAO B Q, LI X Y, LI X P, et al. 2010. Long-term fertilizer experiment network in China: crop yields and soil nutrient trends. Agronomy Journal [J], 102: 216-230.

ZHAO H, CHANG J, HAVLíK P, et al. 2021. China’s future food demand and its implications for trade and environment. Nature Sustainability [J], 4: 1042-1051.

ZHAO J, YANG X, LIU Z, et al. 2016. Variations in the potential climatic suitability distribution patterns and grain yields for spring maize in Northeast China under climate change. Climatic Change [J], 137: 29-42.

ZHAO X, ZHOU Y, MIN J, et al. 2012. Nitrogen runoff dominates water nitrogen pollution from rice-wheat rotation in the Taihu Lake region of China. Agriculture, ecosystems & environment [J], 156: 1-11.

ZHOU Y, ZHU H, CAI S, et al. 2007. Genetic improvement of grain yield and associated traits in the southern China winter wheat region: 1949 to 2000. Euphytica [J], 157: 465-473.

中国知网 https://www.cnki.net

ZHU G, LIU Z, QIAO S, et al. 2022. How could observed sowing dates contribute to maize potential yield under climate change in Northeast China based on APSIM model. European Journal of Agronomy [J], 136: 126511.

曹宏鑫, 赵锁劳, 葛道阔, 等. 2011. 作物模型发展探讨. 中国农业科学 [J], 44: 3520-3528.

陈春花 2025. 播期和移栽密度对超级稻甬优 1540 产量形成的影响. 农业科技通讯 [J]: 50-55.

陈健, 王忠义, 李良涛, 等. 2008. 基于比较优势分析法的冬小麦产量差异. 应用生态学报 [J], 19: 1971-1976.

陈印军, 易小燕, 方琳娜, 等. 2016. 中国耕地资源与粮食增产潜力分析. 中国农业科学 [J], 49: 1117-1131.

程曼, 王让会, 薛红喜, 等. 2012. 干旱对我国西北地区生态系统净初级生产力的影响. 干旱区资源于环境 [J] : 1-7.

戴明宏, 陶洪斌, 王利纳, et al. 2008. 春, 夏玉米物质生产及其对温光资源利用比较. 玉米科学 [J], 16: 82-85.

高浩, 潘学标, 符瑜 2009. 气候变化对内蒙古中部草原气候生产潜力的影响. 中国农业气象 [J], 30: 277-282+288.

郭笃发, 王秋兵 2005. 主成分分析法对土壤养分与小麦产量关系的研究. 土壤学报 [J], 42: 523-527.

解毅, 王鹏新, 刘峻明, 等. 2015. 基于四维变分和集合卡尔曼滤波同化方法的冬小麦单产估测. 农业工程学报 [J], 31: 187-195.

江铭诺, 刘朝顺, 高炜 2018. 华北平原夏玉米潜在产量时空演变及其对气候变化的响应. 中国生态农业学报 （中英文） [J], 26: 865-876.

姜丽娜, 郑冬云, 王言景, et al. 2010. 氮肥施用时期及基追比对豫中地区小麦叶片生理及产量的影响. 麦类作物学报 [J]: 149-153.

李方敏, 艾天成, 周治安, 等. 2001. 用主成分分析法评价渍害土壤肥力. 地域研究与开发 [J]: 65-67.

李克南 2014. 华北地区冬小麦—夏玉米作物生产体系产量差特征解析 [D]. 中国农业大学.

李令伟, 崔丽娜, 杨连俊, et al. 2013. 不同播期对夏玉米产量及产量构成的影响. 安徽农业科学 [J], 41: 7786-7787.

李少昆, 王克如, 谢瑞芝, et al. 2016. 实施密植高产机械化生产实现玉米高产高效协同. 作物杂志 [J]: 1-6.

李晓冬, 杜耘, 吴胜军, 等. 2009. 湖北作物气候生产力演变及其对气候变化的响应. 农业系统科学与综合研究 [J], 25: 294-298.

林忠辉, 莫兴国, 项月琴 2003. 作物生长模型研究综述. 作物学报 [J], 29: 750-758.

刘东, 冯晓龙, 司伟 2024. 中国粮食生产的气候变化适应水平及其机制研究. 经济学（季刊） [J], 24: 1516-1532.

刘海龙 2011. 作物生产系统水分和氮素管理的 DSSAT 模型模拟与评价. 北京: 中国农业科学院 [J]: 4-5.

刘建栋, 周秀骥, 于强 2001. FAO 生产潜力模型中基本参数的修正. 自然资源学报 [J]: 44-

中国知网 https://www.cnki.net

51.

刘建刚 2015. 黄淮海农作区冬小麦—夏玉米产量差及其限制因素解析 [D]. 中国农业大学.

刘明强 2006. 黄淮海平原冬小麦-夏玉米产量差及其影响因素分析 [D]. 中国农业大学.

刘园, 王颖, 杨晓光 2010. 华北平原参考作物蒸散量变化特征及气候影响因素. 生态学报 [J]: 923-932.

刘珍环, 李正国, 唐鹏钦, et al. 2013. 近 30 年中国水稻种植区域与产量时空变化分析(英文). Journal of Geographical Sciences [J], 23: 1005-1018.

刘志娟 2013.东北三省春玉米产量差及限制因素解析 [D]. 中国农业大学.

明博, 谢瑞芝, 侯鹏, et al. 2017. 2005—2016 年中国玉米种植密度变化分析. 中国农业科学 [J], 50: 1960-1972.

罗永忠, 成自勇, 郭小芹 2011. 近 40a 甘肃省气候生产潜力时空变化特征. 生态学报 [J], 31: 221-229.

毛裕定, 苏高利, 李发东, 等. 2008. 气候变化对浙江省植物气候生产力的影响. 中国生态农业学报 [J], 16: 273-278.

彭越, 胡梓坤, 王泽宇 2024. 中国玉米进口贸易风险研究. 全国流通经济 [J]: 68-71.

万晓菊, 张国强, 王克如, et al. 2019. 北疆春玉米覆膜, 滴灌技术效应研究. 作物杂志 [J], 35: 107-112.

王禹 2016. 新形势下我国粮食安全保障研究 [M].

石晓燕 2009. 基于生长模型与 GIS 的小麦生产力预测技术研究 [D]. 南京农业大学.

王崇桃, 李少昆 2010. 玉米生产限制因素评估与技术优先序. 中国农业科学 [J], 43: 1136-1146.

王纯枝, 宇振荣, 辛景峰, 等. 2005. 基于遥感和作物生长模型的作物产量差估测. 农业工程学报 [J], 21: 84-89.

王恩利, 韩湘玲 1990. 黄淮海地区冬小麦, 夏玉米生产力评价及其应用. 中国农业气象 [J], 11:41-46.

王静, 杨晓光, 吕硕, 等. 2012. 黑龙江省春玉米产量潜力及产量差的时空分布特征. 中国农业科学 [J], 45: 1914-1925.

王文佳 2012. 基于 DSSAT 模型的关中灌区冬小麦最优灌溉制度研究 [D]. 中国科学院研究生院 （教育部水土保持与生态环境研究中心）.

吴玉鸣, 李建霞 2003. 通径分析在我国粮食生产相关研究中的应用. 广西师范大学学报（自然科学版） [J]: 95-99.

肖婧, 徐虎, 蔡岸冬, 等. 2017. 生物质炭特性及施用管理措施对作物产量影响的整合分析. 中国农业科学 [J].

谢仲伦 1996. 相关性通径分析问题剖析. 农业系统科学与综合研究 [J]: 161-167.

徐春华, 张华, 张兰, 等. 2015. 基于通径分析的兰州北山三种典型植物光合作用影响因子. 生态学杂志 [J], 34: 1289.

严定春, 李莉, 王跃进, et al. 2024. 积极践行“大食物观”，更好端牢“中国饭碗”. 中国食品安全 [J]: 44-50.

闫湘, 金继运, 梁鸣早 2017. 我国主要粮食作物化肥增产效应与肥料利用效率. 土壤 [J], 49:

中国知网 https://www.cnki.net

1067-1077.

杨明智, 裴源生, 李旭东 2019. 中国粮食自给率研究——粮食、谷物和口粮自给率分析. 自然资源学报 [J], 34: 881-889.

杨月锋, 徐学荣 2014. 福建省粮食产量影响因素主成分分析与产量趋势预测. 南方农业学报 [J], 45: 697-703.

游士兵, 严研 2017. 逐步回归分析法及其应用. 统计与决策 [J]: 31-35.

于法稳 2016. 习近平绿色发展新思想与农业的绿色转型发展. 中国农村观察 [J]: 2-9+94.

余海龙, 黄菊莹, 王亭荷 2012. 宁夏中部干旱带 56 年来气候生产潜力变化特征研究——以宁夏中宁县为例. 水土保持研究 [M], 19: 172-175.

张福锁, 王激清, 张卫峰, et al. 2008. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径. 土壤学报 [J], 45: 915-924.

张满利, 陈盈, 侯守贵, et al. 2010. 氮肥运筹对水稻产量和氮肥利用率的影响. 作物杂志 [J], 26: 46-50.

张黎, 王石立, 何延波, 等. 2007. 遥感信息应用于水分胁迫条件下的华北冬小麦生长模拟研究. 作物学报 [J], 33: 401-410.

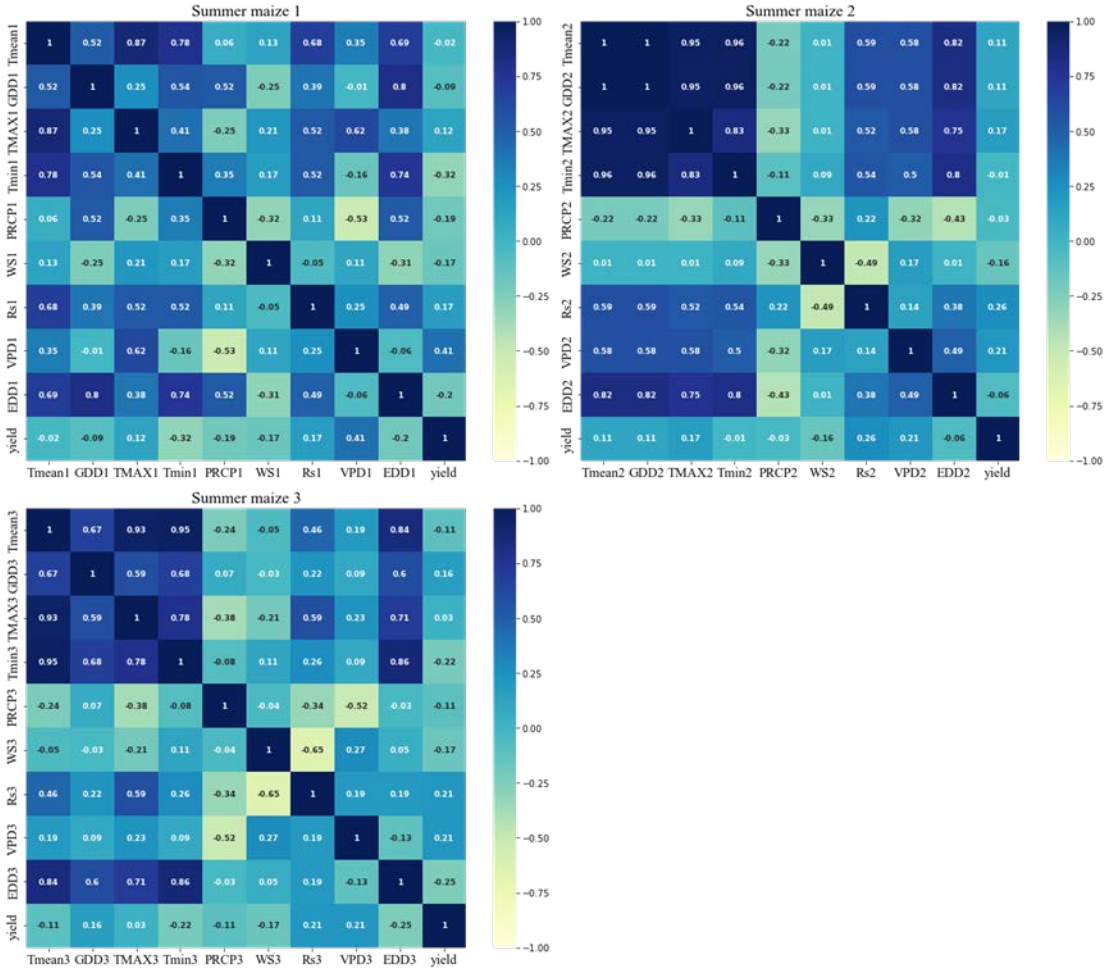
张玉铭, 毛任钊, 胡春胜, 等. 2004. 华北太行山前平原土壤肥力状况与玉米产量相关关系的通径分析. 干旱地区农业研究 [J], 22: 51-55.

郑亮 2014. 华北典型高产粮田土壤有机质时空变异规律与水氮优化管理 [D]. 中国农业大学.

邹志红, 孙靖南, 任广平 2005. 模糊评价因子的熵权法赋权及其在水质评价中的应用 [M].

中国知网 https://www.cnki.net

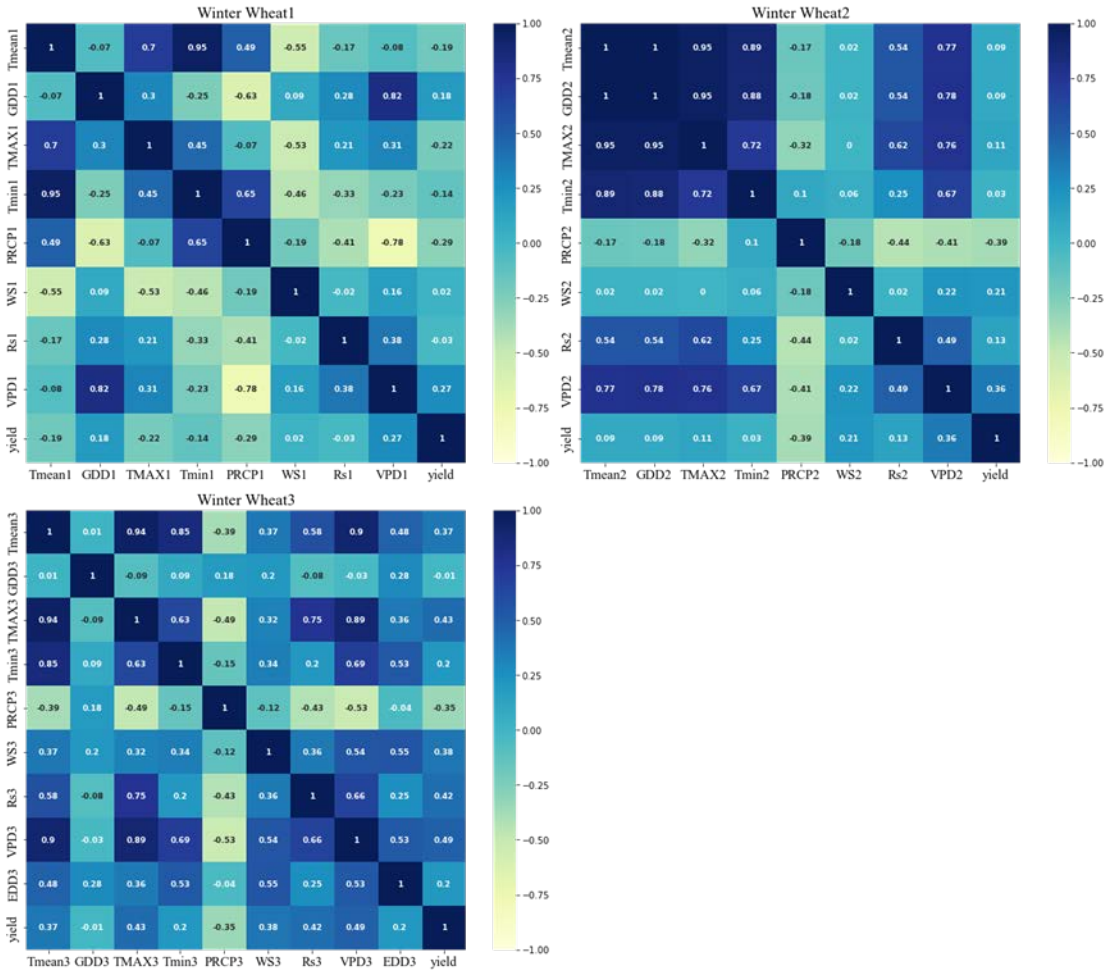
附录



附图 1 夏玉米产量与不同生育段气候变量之间的相关性。1、2 和 3 代表营养生长期、开花期和灌浆期。

Figure S1 Correlation between summer maize yield and climate variables in different growth stages. 1, 2 and 3 represent the vegetative growth stage, flowering stage and grain filling stage.

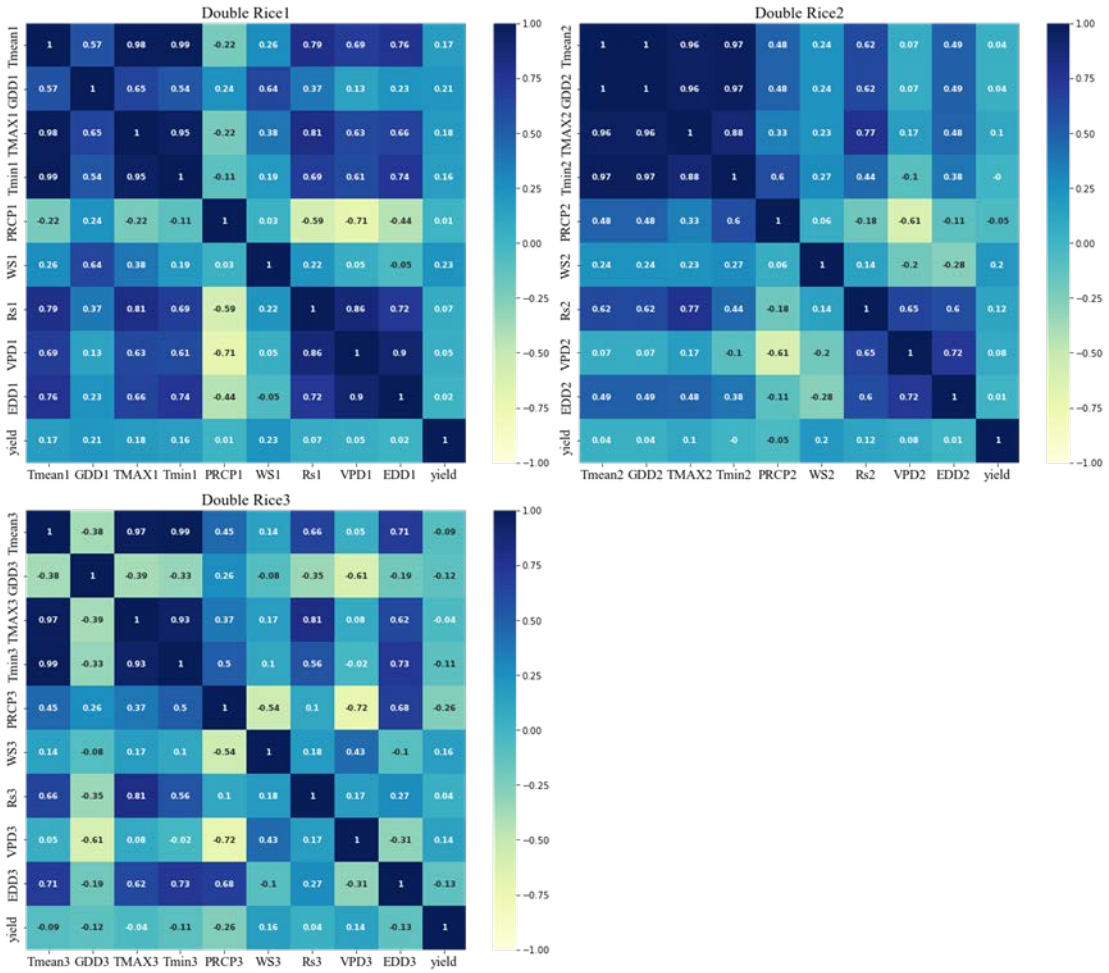
中国知网 https://www.cnki.net



附图 2 冬小麦产量与不同生育段气候变量之间的相关性。1、2 和 3 代表营养生长期、开花期和灌浆期。

Figure S2 Correlation between winter wheat yield and climate variables in different growth stages. 1, 2 and 3 represent the vegetative growth stage, flowering stage and grain filling stage.

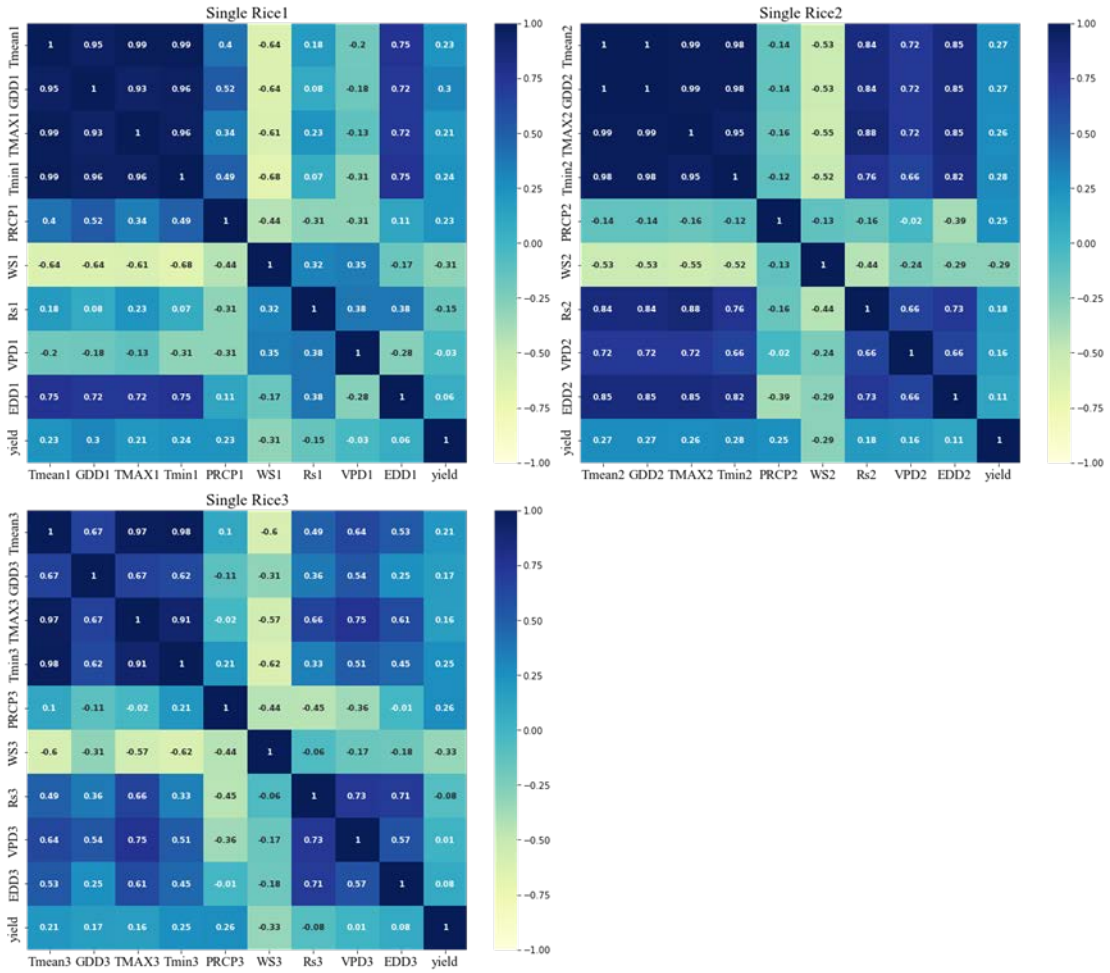
中国知网 https://www.cnki.net



附图 3 双季稻产量与不同生育段气候变量之间的相关性。1、2 和 3 代表营养生长期、开花期和灌浆期。

Figure S3 Correlation between double rice yield and climate variables in different growth stages. 1, 2 and 3 represent the vegetative growth stage, flowering stage and grain filling stage.

中国知网 https://www.cnki.net



附图 4 单季稻产量与不同生育段气候变量之间的相关性。1、2 和 3 代表营养生长期、开花期和灌浆期。

Figure S4 Correlation between single rice yield and climate variables in different growth stages. 1, 2 and 3 represent the vegetative growth stage, flowering stage and grain filling stage.

中国知网 https://www.cnki.net

附表 1 玉米代表性气象站的基本信息

Table S1 Basic information of representative weather stations for maize

站点名	所属省份	经度	纬度	农业气候区编号
嫩江	黑龙江	125.23	49.17	1403
扎兰屯	内蒙古	122.73	48	1403
海伦	黑龙江	126.97	47.43	2503
乌兰浩特	内蒙古	122.05	46.08	2303
佳木斯	黑龙江	130.28	46.82	2503
哈尔滨	黑龙江	126.77	45.75	2503
虎林	黑龙江	132.97	45.77	2503
塔城	新疆	83	46.73	3103
伊宁	新疆	81.33	43.95	4003
乌鲁木齐	新疆	87.65	43.78	3003
鄯善	新疆	90.23	42.85	5003
高台	甘肃	99.83	39.37	2003
榆中	甘肃	104.15	35.87	2103
呼和浩特	内蒙古	111.68	40.82	3203
天镇	山西	114.05	40.43	2103
朔州	山西	112.43	39.3	3203
吴忠	宁夏	106.18	37.98	4003
榆林	陕西	109.78	38.27	3103
石家庄	河北	114.42	38.03	5203
固原	宁夏	106.27	36	2303
延安	陕西	109.5	36.6	4303
安泽	山西	112.25	36.17	4303
安阳	河南	114.4	36.05	5203
蒲城	陕西	109.58	34.95	5203
扎鲁特旗	内蒙古	120.9	44.57	3203
长岭	吉林	123.97	44.25	3303
牡丹江	黑龙江	129.6	44.57	2403
永吉	吉林	126.52	43.7	2603
翁牛特旗	内蒙古	119.02	42.93	3203
彰武	辽宁	122.53	42.42	3303
清原	辽宁	124.92	42.1	2703
松江	吉林	128.25	42.53	2603
朝阳	辽宁	120.45	41.55	4303
遵化	河北	117.95	40.2	4303
熊岳	辽宁	122.15	40.17	4603
丹东	辽宁	124.33	40.05	3803
霸州	河北	116.38	39.12	5203
陵县	山东	116.57	37.33	5203
威海	山东	122.13	37.47	4603

中国知网 https://www.cnki.net

站点名	所属省份	经度	纬度	农业气候区编号
平度	山东	119.93	36.77	4503
费县	山东	117.95	35.25	5503
乐山	四川	103.75	29.57	6802
木里	四川	101.27	27.93	3602
维西	云南	99.28	27.17	4702
昭通	云南	103.72	27.35	4502
腾冲	云南	98.5	25.02	5802
沾益	云南	103.83	25.58	5602
景东	云南	100.87	24.47	6502
耿马	云南	99.4	23.55	6701
景洪（热作所）	云南	100.78	22	7601
蒙自	云南	103.38	23.38	6402
凤翔	陕西	107.38	34.52	4403
许昌	河南	113.87	34.03	5403
西峡	河南	111.5	33.3	5403
广元	四川	105.85	32.43	5502
石泉	陕西	108.27	33.05	5503
桐柏	河南	113.42	32.38	5603
达县	四川	107.5	31.2	6802
奉节	重庆	109.53	31.02	6702
麻城	湖北	115.02	31.18	6803
遂宁	四川	105.55	30.5	6702
荆州	湖北	112.15	30.35	6703
黔江	重庆	108.78	29.53	5902
通山	湖北	114.5	29.6	6803
叙永	四川	105.43	28.17	5702
安化	湖南	111.22	28.38	5802
长沙	湖南	113.08	28.2	6803
余庆	贵州	107.88	27.23	5702
武冈	湖南	110.63	26.73	6802
望谟	贵州	106.08	25.18	6702
融安	广西	109.4	25.22	6802
郴州	湖南	113.03	25.8	6802
大丰	江苏	120.48	33.2	5703
阜阳	安徽	115.73	32.87	5503
滁州	安徽	118.3	32.3	5703
昆山	江苏	120.95	31.42	5803
安庆	安徽	117.05	30.53	6803
宁国	安徽	118.98	30.62	5803
嵊州	浙江	120.82	29.6	6802
都安	广西	108.1	23.93	7802

中国知网 https://www.cnki.net

站点名	所属省份	经度	纬度	农业气候区编号
贺州（贺县）	广西	111.53	24.42	7802
那坡	广西	105.83	23.42	6802
灵山	广西	109.3	22.42	7802
罗定	广东	111.57	22.77	7802
徐闻	广东	110.18	20.33	8702

附表 2 小麦代表性气象站的基本信息

Table S2 Basic information of representative wheat weather stations

站点名	所属省份	经度	纬度	农业气候区编号
额尔古纳	内蒙古	120.18	50.25	1303
嫩江	黑龙江	125.23	49.17	1403
扎兰屯	内蒙古	122.73	48	1403
福海	新疆	87.47	47.12	3003
塔城	新疆	83	46.73	3103
温泉	新疆	81.02	44.97	1203
乌苏	新疆	84.67	44.43	4003
奇台	新疆	89.57	44.02	3003
尼勒克	新疆	82.57	43.8	2003
和田	新疆	79.93	37.13	5003
巴里坤	新疆	93.05	43.6	1003
西宁	青海	101.75	36.72	1203
榆中	甘肃	104.15	35.87	2103
四子王旗	内蒙古	111.68	41.53	1103
包头	内蒙古	109.85	40.67	3103
吴忠	宁夏	106.18	37.98	4003
榆林	陕西	109.78	38.27	3103
石家庄	河北	114.42	38.03	5203
吴旗	陕西	108.17	36.92	3203
固原	宁夏	106.27	36	2303
临汾	山西	111.5	36.07	4203
蒲城	陕西	109.58	34.95	5203
遵化	河北	117.95	40.2	4303
霸州	河北	116.38	39.12	5203
陵县	山东	116.57	37.33	5203
威海	山东	122.13	37.47	4603
平度	山东	119.93	36.77	4503
定陶	山东	115.55	35.1	5303
日喀则	西藏	88.88	29.25	1202
昌都	西藏	97.17	31.15	1302
甘孜	四川	100	31.62	1402
都江堰	四川	103.67	30.98	5802
稻城	四川	100.3	29.05	1502

中国知网 https://www.cnki.net

站点名	所属省份	经度	纬度	农业气候区编号
昭觉	四川	102.85	28	3802
宜宾	四川	104.6	28.8	6802
维西	云南	99.28	27.17	4702
水城	贵州	104.87	26.58	4802
楚雄	云南	101.55	25.03	5502
泸西	云南	103.77	24.53	5602
临沧	云南	100.08	23.88	5701
凤翔	陕西	107.38	34.52	4403
郑州	河南	113.65	34.72	5303
南阳	河南	112.58	33.03	5503
广元	四川	105.85	32.43	5502
安康	陕西	109.03	32.72	5402
达县	四川	107.5	31.2	6802
奉节	重庆	109.53	31.02	6702
钟祥	湖北	112.57	31.17	6603
麻城	湖北	115.02	31.18	6803
遂宁	四川	105.55	30.5	6702
石门	湖南	111.37	29.58	6802
通山	湖北	114.5	29.6	6803
桐梓	贵州	106.83	28.13	5802
酉阳	重庆	108.77	28.83	5802
长沙	湖南	113.08	28.2	6803
凯里	贵州	107.98	26.6	5802
邳县	江苏	117.85	34.3	5403
阜宁	江苏	119.8	33.8	5603
阜阳	安徽	115.73	32.87	5503
南京	江苏	118.8	32	5703
南通	江苏	120.88	31.98	5803
祁门	安徽	117.72	29.85	5903

附表 3 水稻代表性气象站的基本信息

Table S3 Basic information of representative rice weather stations

站点名	所属省份	经度	纬度	农业气候区编号
龙江	黑龙江	123.18	47.33	2303
海伦	黑龙江	126.97	47.43	2503
佳木斯	黑龙江	130.28	46.82	2503
大安	吉林	124.27	45.5	3303
哈尔滨	黑龙江	126.77	45.75	2503
虎林	黑龙江	132.97	45.77	2503
伊宁	新疆	81.33	43.95	4003
吴忠	宁夏	106.18	37.98	4003
牡丹江	黑龙江	129.6	44.57	2403

中国知网 https://www.cnki.net

站点名	所属省份	经度	纬度	农业气候区编号
开鲁	内蒙古	121.28	43.6	3203
双辽	吉林	123.53	43.5	3303
永吉	吉林	126.52	43.7	2603
清原	辽宁	124.92	42.1	2703
延吉	吉林	129.47	42.88	2403
朝阳	辽宁	120.45	41.55	4303
新民	辽宁	122.83	41.98	4403
天津	天津	117.07	39.08	5303
旅顺	辽宁	121.23	38.82	4503
惠民	山东	117.53	37.48	5303
定陶	山东	115.55	35.1	5303
温江	四川	103.83	30.7	6702
宜宾	四川	104.6	28.8	6802
腾冲	云南	98.5	25.02	5802
元谋	云南	101.87	25.73	6202
普安	贵州	104.97	25.78	5802
澜沧	云南	99.93	22.57	6801
蒙自	云南	103.38	23.38	6402
郑州	河南	113.65	34.72	5303
南阳	河南	112.58	33.03	5503
广元	四川	105.85	32.43	5502
达县	四川	107.5	31.2	6802
奉节	重庆	109.53	31.02	6702
钟祥	湖北	112.57	31.17	6603
麻城	湖北	115.02	31.18	6803
合川	重庆	106.28	29.97	6702
石门	湖南	111.37	29.58	6802
桐梓	贵州	106.83	28.13	5802
酉阳	重庆	108.77	28.83	5802
长沙（望城）	湖南	112.92	28.22	6803
宜丰	江西	114.78	28.4	6802
洞口	湖南	111.58	27.07	6902
黎平	贵州	109.15	26.23	5802
罗甸	贵州	106.77	25.43	6702
郴州	湖南	113.03	25.8	6802
赣州（赣县）	江西	115	25.87	7802
郯城	山东	118.37	34.62	5503
盱眙	江苏	118.52	32.98	5603
大丰	江苏	120.48	33.2	5703
阜阳	安徽	115.73	32.87	5503
桐城	安徽	116.95	31.07	5902

中国知网 https://www.cnki.net

站点名	所属省份	经度	纬度	农业气候区编号
昆山	江苏	120.95	31.42	5803
宁国	安徽	118.98	30.62	5803
定海	浙江	122.1	30.03	6902
鄱阳（波阳）	江西	116.68	29	6903
金华	浙江	119.65	29.12	6802
邵武	福建	117.47	27.33	6902
宁德	福建	119.52	26.67	6902
广南	云南	105.07	24.07	6702
都安	广西	108.1	23.93	7802
蒙山	广西	110.52	24.2	6902
龙川	广东	115.25	24.1	7802
高要	广东	112.45	23.03	7802
龙州	广西	106.85	22.33	7702
灵山	广西	109.3	22.42	7802
徐闻	广东	110.18	20.33	8702
三亚	海南	109.52	18.23	9801

中国知网 https://www.cnki.net