中国农业科学 2026,59(22):5039-5062
Scientia Agricultura Sinica DOI: 10.3864/j.issn.0578-1752.2026.22.007

基于作物模型的黄淮海平原冬小麦-夏玉米轮作系统周年生产潜力预测分析

丁硕秋[1,2]，杨田[1,2]，段玉鹏[1,2]，梁超[1,2]，高春瑞[1,2]，陈柏青[1,2]，冯浩[2,3]，于强[3,4]，何建强[1,2,4]✉

[1]西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室，陕西杨凌 712100；[2]西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院，陕西杨凌 712100；[3]水土保持与荒漠化整治全国重点实验室，陕西杨凌 712100；[4]陕西省气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室，西安 710016

摘要：【目的】从周年生产视角，量化分析未来气候变化背景下黄淮海平原冬小麦-夏玉米轮作（简称麦玉轮作）系统生产潜力及产量差的时空分布情况，并解析其驱动机制，揭示气候变化对麦玉轮作系统生产潜力的影响，拟为当地优化种植布局、稳产增产及应对气候风险提供科学指导。【方法】首先将研究区域划分为6个不同的二熟农业生态区，包括环渤海二熟区（Zone1）、太行山前二熟区（Zone2）、海河平原二熟区（Zone3）、鲁西平原二熟区（Zone4）、黄淮平原二熟区（Zone5），以及江淮平原二熟区（Zone6）；其次采用作物模型（APSIM与DSSAT）集成模拟历史基准时期（1980—2020年）和未来时期（2040s和2080s）SSP245与SSP585，2种排放情景下的麦玉轮作系统周年潜在产量、实际产量、产量差演变及作物物候动态，并识别影响作物潜在产量的主导限制因子。【结果】（1）冬小麦和夏玉米物候期在未来时期普遍缩短，2080s时期SSP585情景下缩短最为明显；未来时期冬小麦、夏玉米生育期内积温与平均温度显著上升，累积太阳辐射在高排放背景下显著下降。（2）历史基准时期的麦玉轮作系统周年产量差约为11.35—15.45 t·hm^{-2}，其中Zone1区最高（15.45 t·hm^{-2}）；未来时期周年产量差水平普遍缩小，但Zone1-Zone3区仍维持较高水平（4.93—8.27 t·hm^{-2}），而Zone4、Zone5、Zone6区急剧收缩至3.68 t·hm^{-2}及以下，其中Zone4区的产量差水平与基准期相比下降最为严重（-10.92 t·hm^{-2}）。（3）历史基准期内，累积太阳辐射是夏玉米潜在产量的绝对主导因子（% IncMSE > 200）；冬小麦潜在产量则受多因子共同调控，不存在单一主导因子。未来情景时期，累积太阳辐射对夏玉米潜在产量的相对重要性逐步降低，物候因子的重要性持续上升；对冬小麦而言，累积太阳辐射与累积降水量的相对重要性逐渐上升。【结论】（1）黄淮海平原麦玉轮作系统未来产量差呈现显著缩小趋势，且该趋势具有较强的空间异质性，其中环渤海二熟区（Zone1）、太行山前二熟区（Zone2）、海河平原二熟区（Zone3）仍保持较大增产潜力；黄淮平原二熟区（Zone5）次之；江淮平原二熟区（Zone6）及鲁西平原二熟区（Zone4）增产潜力最弱。（2）相较于基准期，未来时期黄淮海平原麦玉轮作系统周年生产潜力呈现出波动或者缓慢下降的趋势，其中鲁西平原二熟区（Zone4）的周年潜在产量水平最低，且在高排放背景（SSP585）下，该区域的下降趋势更明显。（3）从历史基准时期到未来时期，夏玉米潜在产量的限制因子逐渐由累积太阳辐射转为物候因子，而冬小麦潜在产量在历史基准期由多因子共同调控，未来时期，生长季内累积太阳辐射和累积降水量的重要性增加，成为相对重要的2个因子。

关键词：黄淮海平原；冬小麦-夏玉米轮作系统；产量差；气候变化；作物模型

Prediction and Analysis of the Annual Production Potential of the Winter Wheat-Summer Maize Rotation System in the Huang-Huai-Hai Plain Based on Crop Model Ensemble Simulations

DING ShuoQiu[1,2], YANG Tian[1,2], DUAN YuPeng[1,2], LIANG Chao[1,2], GAO ChunRui[1,2], CHEN BaiQing[1,2], FENG Hao[2,3], YU Qiang[3,4], HE JianQiang[1,2,4]✉

[1]Key Laboratory for Agricultural Soil and Water Engineering in Arid Area of Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi; [2]Institute of Water-saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi; [3]State Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Control, Yangling 712100, Shaanxi; [4]Key Laboratory of Eco-Environment and Meteorology for the Qinling Mountains and Loess Plateau, Shaanxi Provincial Meteorological Bureau, Xi'an 710016

收稿日期：2026-03-04；**接受日期：**2026-06-01
基金项目：国家自然科学基金（52079115，41961124006）
联系方式：丁硕秋，E-mail：dingshuoqiu_2023@nwafu.edu.cn。通信作者何建强，E-mail：jianqiang_he@nwsuaf.edu.cn

Abstract: 【Objective】This study aimed to quantify the spatiotemporal distributions of the production potential and yield gaps of the winter wheat-summer maize rotation systems in the Huang-Huai-Hai Plain under future climate scenarios and to analyze their driving mechanisms as well, so as to offer the scientific references for regional planting layout optimization, yield stabilization and improvement, and climate change adaptation. 【Method】The study area was divided into six different agro-ecological zones (Zone1-Zone6). The crop model ensemble (including APSIM and DSSAT models) was employed to simulate the annual potential yield, actual yield, yield gap evolution, and crop phenology dynamics both in the historical baseline period (1980-2020) and two future periods (2040s and 2080s) under the SSP245 and SSP585 emission scenarios in CMIP6. Additionally, the dominant limiting factors affecting potential yield were identified. 【Result】 (1) The phenological stages of winter wheat and summer maize were generally shortened in future periods, with the most obvious reduction in the 2080s period under SSP585 scenario. In the future periods, both the accumulated temperature and the mean temperature during the growing seasons of the two crops increased significantly, while the accumulated solar radiation decreased significantly under the high-emission scenario. (2) In the baseline period (1980-2020), the annual yield gap was about 11.35-15.45 t·hm^{-2}, with the highest value of 15.45 t·hm^{-2} in Zone1. In future periods, the annual yield gap generally decreased. However, Zones 1-3 still maintained relatively high annual yield gap levels (4.93-8.27 t·hm^{-2}), while Zones 4-6 exhibited a sharp reduction to no more than 3.68 t·hm^{-2}, and among all zones, Zone4 exhibited the most severe decline in yield gap relative to the baseline period (-10.92 t·hm^{-2}). (3) Accumulated solar radiation was the dominant factor affecting the potential yield of summer maize during the baseline period (%IncMSE > 200). In the future period, its relative importance gradually declined, whereas that of phenological factors increased. For winter wheat, potential yield was regulated by multiple factors with no single dominant factor in the baseline period; in the future period, the relative importance of accumulated solar radiation and accumulated precipitation progressively increased.【Conclusion】(1) The future yield difference of wheat-maize rotation system in Huang-Huai-Hai Plain showed a significant narrowing trend, and this trend had strong spatial heterogeneity. Among them, the yield-increasing potential was the greatest in the second-cropping zone around the Bohai Sea (Zone1), the piedmont second-cropping zone of the Taihang Mountains (Zone2), and the second-cropping zone of the Haihe Plain (Zone3); it was moderate in the second-cropping zone of the Huanghuai Plain (Zone5); the second-cropping zone of the Jianghuai Plain (Zone6) and the Luxi Plain second-cropping zone (Zone4) showed the weakest yield-increasing potential. (2) Compared with base period (1980-2020), the annual production potential of the wheat-maize rotation system in the Huang-Huai-Hai Plain would show a fluctuting or slow downward trend in the future. Among them, the annual potential yield level of the secondary cropping area in the Luxi Plain (Zone4) was the lowest, and under the background of high emission (SSP585), the downward trend in this area was more obvious. (3) From the historical base period to the future period, the limiting factor of the potential yield of summer maize gradually changed from cumulative solar radiation to phenological factors, while the potential yield of winter wheat was regulated by multiple factors in the historical base period. In the future period, the importance of cumulative solar radiation and cumulative precipitation in the growing season would increase and become two relatively important factors.

Key words: Huang-Huai-Hai plain; winter wheat-summer maize rotation system; yield gap; climate change; crop model

0 引言

【研究意义】随着气候变化问题加剧、耕地资源减少以及土壤肥力下降，全球粮食安全正面临日益严峻的挑战[1-3]。作为我国重要的粮食生产基地，黄淮海平原在保障我国小麦与玉米稳定供应中发挥着不可替代的作用[4-6]。然而，该区域粮食生产正面临气候变化引起的多重压力。在此背景下，明晰气候变化对于黄淮海平原地区粮食作物生产潜力的影响，对于保障我国粮食安全具有重要战略意义[7-8]。【前人研究进展】已有研究利用作物模型的定量模拟优势，围绕黄淮海平原主要粮食作物的生产潜力及产能提升策略展开了广泛探讨。例如，Zhang 等[9]利用 WOFOST 模型模拟发现夏玉米在黄淮海中部地区仍具有约 2.2 t·hm^{-2} 的增产潜力；Wang 等[10]结合农户调查与作物模型模拟发现，优化种植密度与水肥管理可使雨养和灌溉夏玉米增产约 30%，并可以提高肥料利用效率与农户收益；Senapati 等[11]借助 Sirius 模型提出优化品种与栽培管理可有效缩小冬小麦的遗传产量差；Wang 等[12]通过 DSSAT 模型与田间试验，验证了综合管理措施在缩小玉米产量差与提升氮肥效率方面的潜力。此外，部分研究还关注了作物潜在产量与产量差的时空演变特征及其驱动机制。例如，Li 等[13]基于 APSIM 模型分析了

华北平原冬小麦 30 年的产量差变化，发现品种更替促使潜在产量稳步提升，农户产量增长更快，导致产量差以每年约 69 kg·hm^{-2} 的速度缩小，但在约 1/3 种植区出现产量停滞现象，未来需依靠品种突破与农艺创新来进一步缩差。Li 等[14]通过多尺度评估框架分析了冬小麦产量差，发现山东菏泽示范区平均产量约为潜在产量的 72%，西南部亚区缩差潜力最大，而西北部亚区因高灌溉率提升空间有限。Liu 等[15]则结合 31 年的气象数据，发现品种更新与氮肥管理在轻旱年份对缩小产量差效果显著，并强调基于干旱预测的精准管理对提升小麦产量的重要性。【本研究切入点】然而，现有研究多聚焦于单一作物，未能充分考虑黄淮海平原广泛采用的冬小麦-夏玉米轮作（简称麦玉轮作）制度。这种单一作物视角可能导致研究提出的生产潜力在周年尺度上缺乏协同，未能考虑轮作系统中另一作物对于土壤理化性质的影响，导致模拟的初始条件偏离实际[16]。同时，Liang 等[17]的研究指出，冬小麦-夏玉米轮作系统中的水肥投入会产生跨季交互影响。因此，将冬小麦-夏玉米轮作视为一个完整的生态系统，系统考虑轮作系统中的光、温、水、热等资源利用情况，对于黄淮海平原农业可持续发展具有更为重要的理论意义与实用价值。【拟解决的关键问题】结合作物模型、历史气象数据与未来 CMIP6 气候情景，通过作物模型集成模拟来系统评估黄淮海平原不同分区麦玉轮作系统的周年生产潜力及其增产空间，并识别影响黄淮海平原麦玉轮作系统生产潜力的关键生态因子，旨在揭示气候变化对于黄淮海平原麦玉轮作系统生产潜力的影响，从而为黄淮海平原优化种植布局，应对气候风险提供科学指导，并保障冬小麦-夏玉米轮作系统稳产增产。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

黄淮海平原位于中国东部，包括黄河、淮河和海河流域的大部分地区，总面积约 30×10^4 km^2，是中国三大平原之一。该地区地势平坦，土壤肥沃，气候属温带季风气候，年降水量一般在 600—800 mm，年均气温一般在 10—15 ℃，小麦产量约占全国的 40%，玉米产量约占全国的 35%。本研究根据中国农作制和黄淮海农业区的区划[18-19]，将黄淮海平原划分为 6 个农业生态区，包括：环渤海二熟区（Zone1）、太行山前二熟区（Zone2）、海河平原二熟区（Zone3）、鲁西平原二熟区（Zone4）、黄淮平原二熟区（Zone5），以及江淮平原二熟区（Zone6）（图 1）。在不同分区的基础上，本研究选用各个分区具有 3 年以上的站点观测数据作为作物模型校准验证的全部数据，并使其与对应的气象站点相互匹配，每个分区的观测数据被分为物候数据（开花期、成熟期）和产量数据两大类，并在每个分区的基础上随机抽取该分区一半的数据用于该地区的模型校准，其余数据用于该分区的模型验证。

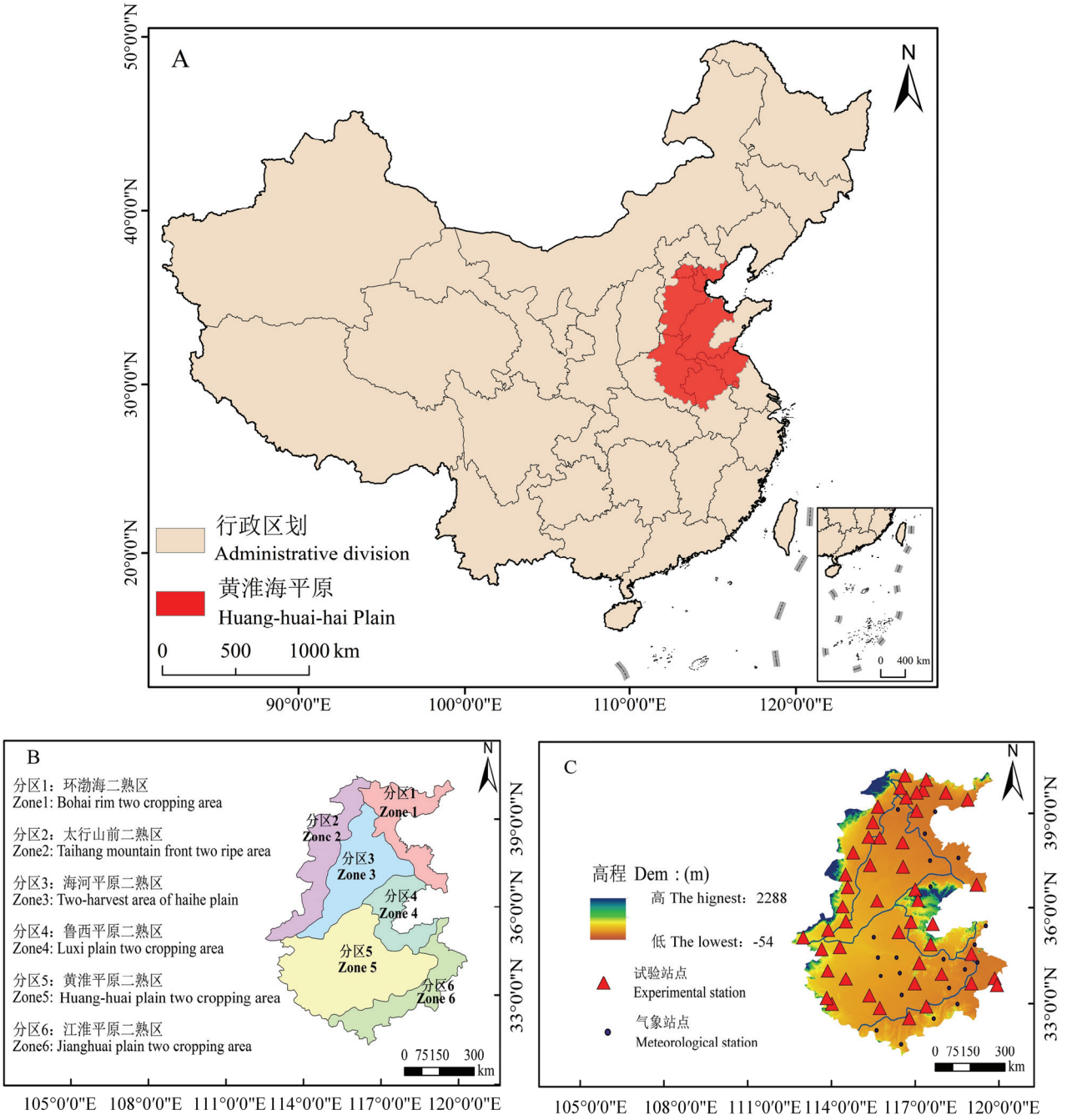
1.2　作物模拟模型

1.2.1　APSIM 模型　APSIM（agricultural production systems simulator）模型由澳大利亚联邦科学与工业研究组织（CSIRO）等机构开发，是一个模块化的农业系统模拟平台[20-22]。该模型运行所需的输入数据包括：逐日气象数据（日照、温度、降水）、研究点的土壤剖面理化属性数据，以及详细的田间管理措施（如播种、灌溉、施肥方案）等[23]。本研究采用 APSIM-7.9 模型模拟分析黄淮海平原麦玉轮作系统的潜在产量时，针对不同分区（图 1-B）设定了不同的代表性品种（表 1）。然后，针对不同的代表性品种进行模型校准和验证，所需数据主要来自收集到的相关文献[24-26]和国家品种区试报告。

1.2.2　DSSAT 模型　DSSAT（decision support system for agrotechnology transfer）由美国佛罗里达大学牵头，联合全球多所科研机构共同开发的作物模型系统。其核心是一个集成的软件环境[27-28]，包含了超过 40 种特定的作物模型[29]，并耦合了统一的土壤水分动态、土壤氮磷平衡等模块。模型运行所需数据包括：气象数据、土壤剖面理化性质数据、田间管理数据，以及作物遗传参数来精确刻画作物生长发育特性[20,30]。本研究采用 DSSAT V4.8 模拟分析黄淮海平原麦玉轮作系统的潜在产量时，为更准确地反映不同生态区的作物生长特性与品种适应性，依据区域气候条件、耕作制度及主栽品种分布，为每个分区设置相应的冬小麦和夏玉米代表性品种及其关键生理生态参数（包括生育期、光周期敏感性、积温需求、最大叶面积指数、籽粒灌浆速率等；表 2），不同分区的校准验证数据与 APSIM 模型所需数据来源相同。

1.2.3　作物模型集成　本研究使用加权平均法进行 DSSAT 和 APSIM 模型的集成模拟。首先，针对每个

作物模型，计算其不同模拟结果（开花期、成熟期、产量）的 R^2、RMSE 和 RRMSE（公式 1—3）等评价指标，这些指标反映了每个模型的预测精度，R^2 值越接近 1、RMSE 和 RRMSE 越小，说明模拟结果越好；然后，根据评价指标对不同模型模拟结果的 R^2、1/RMSE 和 1/RRMSE 进行等权重加权平均，计算模型在不同模拟结果上的权重（公式 4）；最后，根据权重进行集成模拟[31]（公式 5）。



审图号：GS 京（2026）2687 号

图 1 黄淮海平原（A）和内部 6 个农业生态区（B）以及区域内试验站和气象站分布（C）

Fig. 1 Overview of the Huang-Huai-Hai Plain (A), six agro-ecological zones (B) and distribution of experimental stations and meteorological stations in the region (C)

表 1　APSIM 模型作物品种参数设置

Table 1　Crop cultivar parameter values in the APSIM model

作物品种 Crop cultivar	参数 Parameter	分区 Zone					
		分区 1 Zone1	分区 2 Zone2	分区 3 Zone3	分区 4 Zone4	分区 5 Zone5	分区 6 Zone6
冬小麦 Winter wheat	tt_floral_initiation （始花期积温 Accumulated temperature at floral initiation，（℃·d））	475	496	331	176	500	427
	tt_end_grain_fill （终止灌浆积温 Accumulated temperature at the end of grain filling，（℃·d））	624	559	588	372	658	672
	tt_end_of_juvenile （拔节期积温 Accumulated temperature at jointing stage，（℃·d））	575	591	545	278	548	572
	tt_start_grain_fill （灌浆起始积温 Accumulated temperature at the start of grain filling，（℃·d））	104	141	175	139	117	152
	startgf_to_mat （灌浆结束积温 Accumulated temperature from grain filling initiation to maturity，（℃·d））	728	700	763	510	775	825
	potential_grain_filling_rate （籽粒潜在灌浆速率 Potential grain filling rate，（mg·d^{-1}））	0.0067	0.0075	0.0065	0.0070	0.0090	0.0090
	grains_per_gram_stem （茎秆籽粒数量 Grain number per unit stem mass）	70	80	75	55	65	80
夏玉米 Summer maize	tt_emerg_to_endjuv （出苗至三叶期积温 Accumulated temperature from emergence to the end of juvenile stage，（℃·d））	171	255	220	122	166	167
	tt_flower_to_maturity （开花至成熟期积温 Accumulated temperature from flowering to maturity，（℃·d））	740	780	796	933	789	511
	tt_endjuv_to_init （三叶期至拔节期积温 Accumulated temperature from juvenile end to jointing stage，（℃·d））	50	0	0	38	106	170
	tt_flag_to_flower （旗叶期至开花期积温 Accumulated temperature from flag leaf stage to flowering stage，（℃·d））	116	93	143	110	69	109
	tt_flower_to_start_grain （开花期至灌浆期积温 Accumulated temperature from flowering to early grain filling stage，（℃·d））	321	309	327	233	90	90
	potKernelWt （潜在籽粒重 Potential kernel weight，（mg））	500	528	300	350	300	528
	photoperiod_crit1 （光周期下限 Lower limit of photoperiod，（h））	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5
	photoperiod_crit2 （光周期上限 Upper limit of photoperiod，（h））	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
	photoperiod_slope （光周期斜率 Photoperiod sensitivity slope，（%））	0	0	0	0	0	0

$$R^2=\left[\frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i-\overline{O})(S_i-\overline{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(O_i-\overline{O})^2\sum_{i=1}^{n}(S_i-S)^2}}\right] \quad (1)$$

$$RMSE=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(S_i-O_i)^2}{n}} \quad (2)$$

$$RRMSE=\frac{RMSE}{\overline{O}}\times 100\% \quad (3)$$

$$w_i=\frac{\frac{1/RMSE_i}{\sum_{i=1}^{n}(1/RMSE_i)}+\frac{1/RRMSE_i}{\sum_{i=1}^{n}(1/RRMSE_i)}+\frac{R^2}{\sum_{i=1}^{n}(R^2)}}{3} \quad (4)$$

$$\overline{y}=\sum_{i=1}^{n}w_i\cdot y_i \quad (5)$$

表 2 DSSAT 模型作物品种参数设置

Table 2 Crop cultivar parameter values in the DSSAT model

作物品种 Crop cultivar	参数 Parameter	分区（Zone）					
		分区 1 Zone1	分区 2 Zone2	分区 3 Zone3	分区 4 Zone4	分区 5 Zone5	分区 6 Zone6
冬小麦 Winter wheat	P1V（最适温度条件下通过春化阶段所需天数 Days required for vernalization under optimal temperature conditions，（d））	99.20	50.20	50.20	40.20	50.20	60.20
	P1D（光周期参数 Photoperiod parameter，（%））	122.00	112.00	95.00	55.00	110.00	100.00
	P5（籽粒灌浆期积温 Accumulated temperature during grain filling period，（℃·d））	725.00	735.00	799.00	700.00	729.00	799.00
	G1（开花期单位株冠质量的籽粒数 Grain number per unit canopy weight at anthesis，（grains/g））	30.00	30.00	35.00	40.00	40.00	40.00
	G2（最佳条件下标准籽粒质量 Standard kernel weight under optimal conditions，（mg））	31.00	21.00	30.00	35.00	25.00	25.00
	G3（成熟期非胁迫下单株茎穗标准干质量 Standard dry weight of single plant stem and spike under non-stressed conditions at maturity，（g））	1.08	1.00	1.65	1.00	1.00	1.00
	PHINT（完成一片叶生长所需积温，Accumulated temperature required for the growth of one leaf（℃·d））	140.00	80.00	90.00	140.00	190.00	160.00
夏玉米 Summer maize	P1（完成非感光幼苗期的积温（基础温度为 8 ℃） Thermal time from seedling emergence to the end of the juvenile (base temperature is 8 ℃)，（℃·d））	105.00	200.00	190.00	90.00	200.00	280.00
	P2（光周期敏感系数 Photoperiod sensitivity coefficient，（%））	0.60	0.95	0.90	0.50	0.95	1.90
	P5（灌浆特性参数 Grain filling characteristic parameter，（℃·d））	715.00	780.00	860.00	980.00	860.00	500.00
	G2（单株最大穗粒数 Maximum kernel number per plant）	850.00	820.40	840.00	880.00	820.40	745.00
	G3（最大灌浆速率参数 Maximum grain filling rate parameter，（mg/(grains·d)）	13.00	6.60	7.00	7.00	6.60	19.00
	PHINT（完成一片叶生长所需积温 Accumulated temperature required for the growth of a single leaf，（℃·d））	65.00	38.90	30.00	38.90	38.90	40.00

式中，O_i 和 S_i 为观测值和模拟值；O 和 S 分别为观测值和模拟值的平均值；n 表示数据样本数；w_i 是第 i 个模型的权重，$\bar{y}$ 是集成结果；y_i 是第 i 个模型的预测值。

1.2.4 不同作物模型校准验证结果及权重 根据不同模型（APSIM 和 DSSAT）针对开花期、成熟期、产量的模型校准结果，计算其在模拟结果上的权重（表 3）。在确定不同模型权重的基础上，计算 APSIM 模型，DSSAT 模型，集成模型的模型验证结果（表 4）。

1.3 主要数据来源

1.3.1 黄淮海平原历史基准期的产量数据 本研究历史基准期（1980—2020 年）黄淮海平原麦玉轮作系统的产量数据来自公开发表的数据集[32-34]，采用线性插值法对部分缺失的年份进行补齐，将其作为基准期的实际作物产量，并根据作物模型模拟的潜在产量来计算作物产量差。

1.3.2 黄淮海平原麦玉轮作区空间分布 本研究中黄淮海平原麦玉轮作区的空间分布数据来自 Qiu 等[35]发布的全球作物耕种方式数据集。该数据集利用机器学习算法融合多源卫星遥感数据生成空间分辨率为 30 m 的空间分布底图。本研究从该数据集中提取了黄淮海平原范围内的冬小麦-夏玉米轮作区域，作为后续模拟分析的空间底图。

1.3.3 土壤数据 作物模型所需的土壤数据主要包括：土壤容重、饱和含水量、田间持水量、凋萎系数

表 3　APSIM 模型和 DSSAT 模型参数校准结果及权重设置

Table 3　Parameter calibration results and weight setting of APSIM model and DSSAT model

作物品种 Crop cultivar	作物模型 Crop model	指标 Index	开花期 Anthesis date	成熟期 Maturity date	产量 Yield
冬小麦 Winter wheat	APSIM	R^2	0.97	0.96	0.76
		RMSE	3.18	2.88	1106.51
		RRMSE	0.016	0.012	0.160
		权重设置 Weight setting	0.54	0.49	0.48
	DSSAT	R^2	0.95	0.96	0.86
		RMSE	4.03	2.87	1065.76
		RRMSE	0.020	0.011	0.160
		权重设置 Weight setting	0.46	0.51	0.52
夏玉米 Summer maize	APSIM	R^2	0.93	0.78	0.55
		RMSE	1.52	2.46	1279.03
		RRMSE	0.029	0.025	0.156
		权重设置 Weight setting	0.73	0.44	0.50
	DSSAT	R^2	0.42	0.97	0.60
		RMSE	4.53	2.88	1358.52
		RRMSE	0.087	0.012	0.164
		权重设置 Weight setting	0.27	0.56	0.50

表 4　APSIM 模型、DSSAT 模型及集成模型校准验证结果

Table 4　Calibration and validation results of the APSIM, DSSAT and integrated models

作物品种 Crop cultivar	作物模型 Crop model	指标 Index	开花期 Anthesis date		成熟期 Maturity date		产量 Yield	
			校准值 Calibration	验证值 Validration	校准值 Calibration	验证值 Validration	校准值 Calibration	验证值 Validration
冬小麦 Winter wheat	APSIM	R^2	0.97	0.94	0.96	0.97	0.76	0.78
		RMSE	3.18	4.33	2.88	2.76	1106.51	901.89
		RRMSE	0.016	0.022	0.012	0.011	0.160	0.138
	DSSAT	R^2	0.95	0.93	0.96	0.98	0.86	0.81
		RMSE	4.03	4.12	2.87	2.23	1065.76	905.57
		RRMSE	0.020	0.021	0.011	0.009	0.160	0.138
	模型集成 Integration	R^2	0.95	0.96	0.97	0.98	0.94	0.94
		RMSE	3.74	3.47	2.58	2.16	498.96	472.80
		RRMSE	0.019	0.018	0.011	0.009	0.074	0.073
夏玉米 Summer maize	APSIM	R^2	0.93	0.93	0.78	0.82	0.55	0.32
		RMSE	1.52	1.39	2.46	2.11	1279.03	1189.96
		RRMSE	0.029	0.027	0.025	0.021	0.156	0.140
	DSSAT	R^2	0.42	0.48	0.97	0.33	0.60	0.67
		RMSE	4.53	4.14	2.88	3.73	1358.52	1101.19
		RRMSE	0.087	0.080	0.012	0.037	0.164	0.130
	模型集成 Integration	R^2	0.89	0.96	0.79	0.98	0.86	0.94
		RMSE	1.81	3.47	2.37	2.16	589.36	472.80
		RRMSE	0.035	0.018	0.024	0.009	0.070	0.073

及土壤有机碳含量等。本研究采用的土壤数据来源于全球农业生态区划（GAEZ v4）数据集。该数据集提供了 0—210 cm 深度范围内共 7 个土层的土壤理化属性数据。对于数据集中的部分缺失值，本研究采用克里金插值法进行了空间插补。

1.3.4 气象数据 本研究使用的气象数据主要为历史气象数据（1980—2020 年）和未来气象数据（2021—2100 年），包括逐日温度（最高温 T_{max}、最低温 T_{min} 和平均温度 T_{mean}，℃），逐日降水量（Prec，mm）以及太阳辐射（Srad，MJ·m^{-2}·d^{-1}）等。其中，未来数据被划分为 2 个时段：历史近期 2040s（2021—2060 年）和历史远期 2080s（2061—2100 年）。历史气象数据来源于中国气象局国家气象信息中心（https://data.cma.cn），其中部分年份缺失的数据由 ERA5 数据集[36]补全。未来气象数据来源于 CMIP6 数据集中 10 种全球气候模式（global climate model，GCM；表 5）产生的 SSP2 4.5 和 SSP5 8.5 2 种温室气体排放情景下的未来气候数据[37]。由于 GCM 产生的气候数据为月尺度栅格数据，而作物模型需要逐日气象数据，因此需要对其进行时间降尺度和空间降尺度处理[38]。

表 5 本研究中用于未来气候预测的 10 种全球气候模式（GCM）

Table 5 Ten global climate models (GCMs) used for future climate forecast in this study

GCM 名称 GCM name	缩写 Abbreviation	国家 Country
ACCESS1.0	AC1	澳大利亚 Australia
BCC-CSM1.1	BC1	中国 China
CanESM5	Can1	加拿大 Canada
CMCC-CM2-SR5	CMCS	意大利 Italy
CNRM-CM6-2	CNR2	法国 France
CIESM	CIES	中国 China
ACCESS-CM2	AC2	澳大利亚 Australia
CanESM5-CanOE	Can2	加拿大 Canada
CNRM-ESM2-1	CNR3	法国 France
CNRM-CM6-1	CNR1	法国 France

1.4 作物产量差与生产潜力影响因素分析

1.4.1 作物产量差计算 本研究中的作物潜在产量定义为在无养分胁迫和水分胁迫理想环境下生长的某个适应作物品种的产量[39-41]。作物实际产量是指在实际灌溉和施用化肥条件下，依靠现有的气候条件而获得的作物产量。在进行产量差计算时，分别计算冬小麦产量差、夏玉米产量差，以及周年产量差，并根据计算结果确定黄淮海平原不同分区麦玉轮作系统的潜在产量变化和增产空间变化情况。

$$Y_g^i = Y_p^i - Y_o^i \quad (6)$$

式中，Y_g^i表示产量差（t·hm^{-2}）；i 表示不同的作物（冬小麦、夏玉米、麦玉轮作系统周年产量）；Y_p^i表示不同作物的潜在产量（t·hm^{-2}）；Y_o^i表示在实际管理所得到的产量（t·hm^{-2}）。

1.4.2 生产潜力影响因素分析 基于历史基准时期（1980—2020 年）与未来时期（2021—2100 年）的作物模型模拟结果，结合历史气象观测数据与未来气候预测数据，本研究选取了 4 个作物生育期内关键气候因子（包括平均温度、积温、累积太阳辐射、累积降水量）和 2 个关键物候因子（包括开花期、成熟期）作为自变量，以作物潜在产量为因变量，构建随机森林回归模型，以量化上述各因子对作物潜在产量的贡献度。该分析通过 R 语言中的 randomForest 包来实现，最终将依据%IncMSE 值（均方误差增加百分比，percent increase in mean squared error）对各驱动因子进行重要性排序，从而识别出影响作物潜在产量的主导因素。

1.5 数据统计

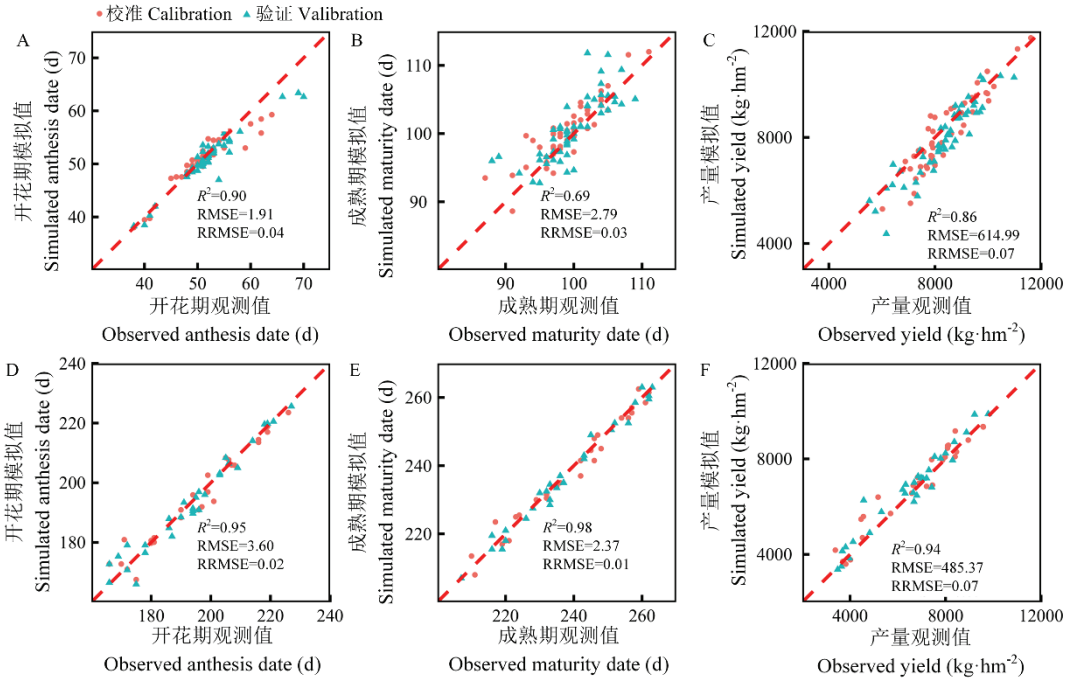
本研究使用 R 语言和 Microsoft Excel 2024 进行数据分析，使用 R 语言 ggplot2 包进行图表制作，采用 R 语言 Tidyverse 包进行 MK 检验以及 Sen 斜率分析。

2 结果

2.1 作物模型校准验证结果

总体而言，APSIM 和 DSSAT 集成模拟的效果良好，观测值和模拟值均分布在 1∶1 等值线上，具备较好的模拟精度（图 2）。分指标来看，物候期模拟精度整体优于产量模拟，其中冬小麦成熟期的模拟精度最高，决定系数 R^2 达 0.98，均方根误差 RMSE 为 2.37 d，相对均方根误差 RRMSE 仅为 0.01；开花期模拟精度次之，RRMSE 低于 0.05；产量模拟精度相对略低，冬小麦和夏玉米的产量模拟 RRMSE 稳定在 0.07。分作物来看，冬小麦的模拟精度整体更优，R^2 普遍高于 0.90；夏玉米成熟期的 R^2 为 0.69，虽低于其他指标，但 RMSE（2.79 d）与 RRMSE（0.03）仍处于较低水平，误差在可接受范围内。

同时，APSIM 与 DSSAT 模型的模拟效果略差于集成模型（图 3、4）。分指标来看，两模型均表现出



图中不同物候期的单位为播种后天数。下同 The unit of different phenophases in the figure is days after sowing (days after sowing, das). The same as below

图 2　集成模型夏玉米（A—C）和冬小麦（D—F）开花期、成熟期和产量的模拟结果

Fig. 2　The simulation results of anthesis date, maturity date and yield of summer maize (A-C) and winter wheat (D-F) by integrated model

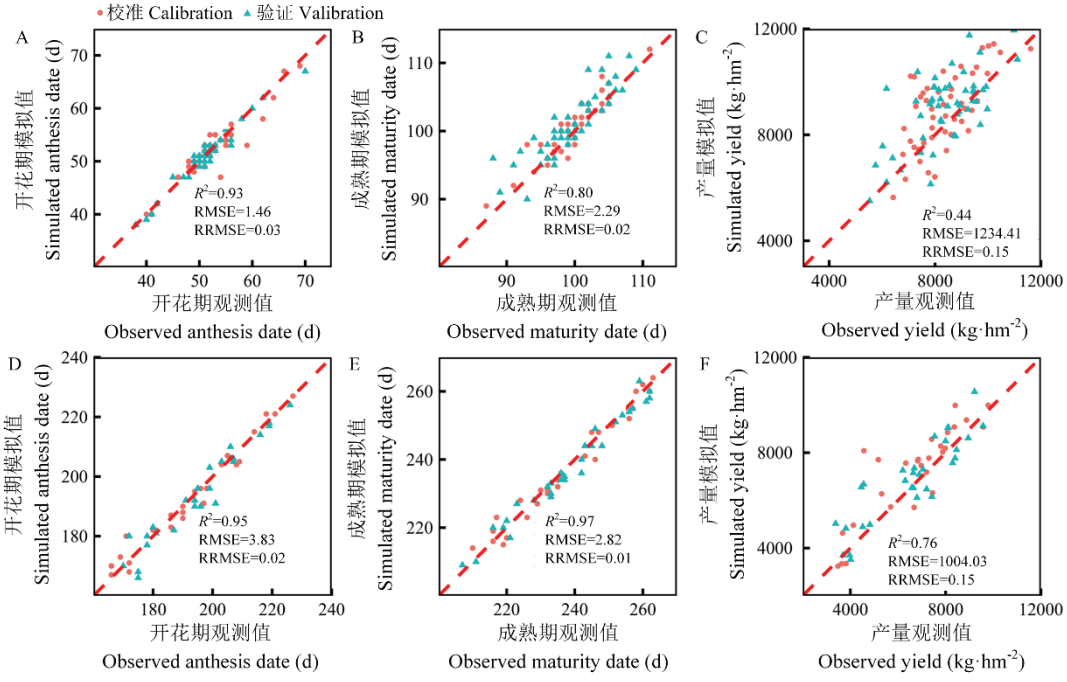


图 3　APSIM 模型夏玉米（A—C）和冬小麦（D—F）开花期、成熟期和产量的模拟结果

Fig. 3　The simulation results of anthesis date, maturity date and yield of summer maize (A-C) and winter wheat (D-F) by APSIM model

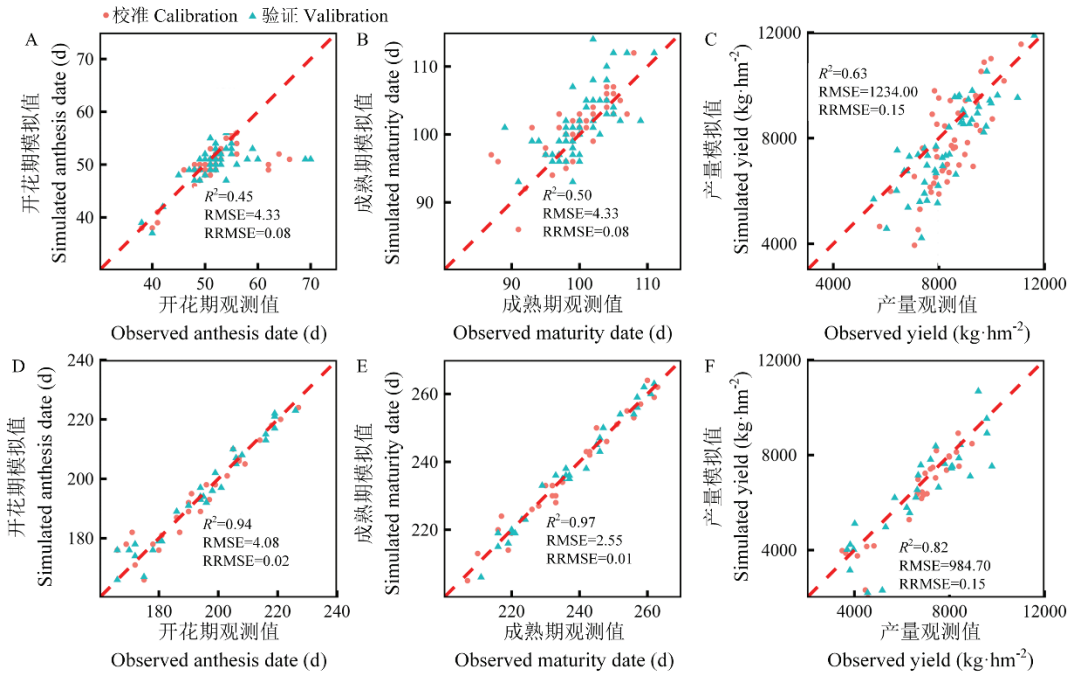


图 4 DSSAT 模型夏玉米（A—C）和冬小麦（D—F）开花期、成熟期和产量的模拟结果

Fig. 4 The simulation results of anthesis date, maturity date and yield of summer maize (A-C) and winter wheat (D-F) by DSSAT model

物候期模拟精度显著优于产量模拟的特征：冬小麦成熟期的模拟精度在两模型中表现最优，R^2 达 0.97，同时 RRMSE 均低至 0.01；开花期模拟精度次之，两模型对冬小麦开花期的 R^2 均高于 0.90，夏玉米开花期 R^2 在 APSIM 模型中为 0.93，在 DSSAT 模型中略低（0.45），但二者 RRMSE 均低于 0.10；产量模拟精度相对偏低，两模型中冬小麦与夏玉米产量的 RRMSE 均为 0.15，其中 APSIM 模型夏玉米产量的 R^2（0.44）为所有指标中最低，而 DSSAT 模型产量指标的 R^2 整体略高（夏玉米：0.63，冬小麦：0.82）。分作物来看，两模型对冬小麦物候期的模拟表现均优于夏玉米，夏玉米成熟期在 DSSAT 模型中的 R^2 为 0.50，RRMSE 为 0.08，虽低于其他物候期指标，但误差仍在可控范围内；整体而言，APSIM 模型对物候期的模拟精度更优，而 DSSAT 模型在产量指标的拟合效果上略占优势。

2.2 气候变化对麦玉轮作系统的影响

2.2.1 基准期作物生长季内气象要素的变化特征

对历史基准期（1980—2020 年）冬小麦与夏玉米生长季内气象要素（包括生长季内累积太阳辐射（Srad）、生长季内累积降水量（Prec）、有效积温（GDD）、平均温度（T_{mean}））进行分析，结果表明，冬小麦生长季内气候要素在不同分区存在明显的空间异质性。对于累积太阳辐射，Zone1—Zone3 分区（3145.34—3581.08 MJ·m^{-2}）显著高于 Zone4—Zone6 分区（2508.98—3004.34 MJ·m^{-2}），其中 Zone4 分区最低（2508.98 MJ·m^{-2}）。对于有效积温，除 Zone4 分区（1615.84 ℃·d）明显偏低外，其余分区均高于 2 000 ℃·d。冬小麦生育期内降水量则表现为 Zone5 和 Zone6 分区（252.84 和 342.99 mm）明显高于其他分区（113.18—155.10 mm），同时不同分区的平均温度范围在 7.37—9.87 ℃（附表 1、图 5）。

与冬小麦相比，夏玉米生长季内累积降水量呈现出“北低南高”的空间格局，Zone4—Zone6 分区的累积降水量（441.85—520.85 mm）明显高于 Zone1—Zone3 分区（354.96—381.01 mm）。而其余气象要素在不同分区较为均匀，有效积温普遍维持在 1452.92—1642.79 ℃·d；累积太阳辐射普遍维持在 1746.37—1938.64 MJ·m^{-2}；平均温度则基本保持在 25.27—26.27 ℃。

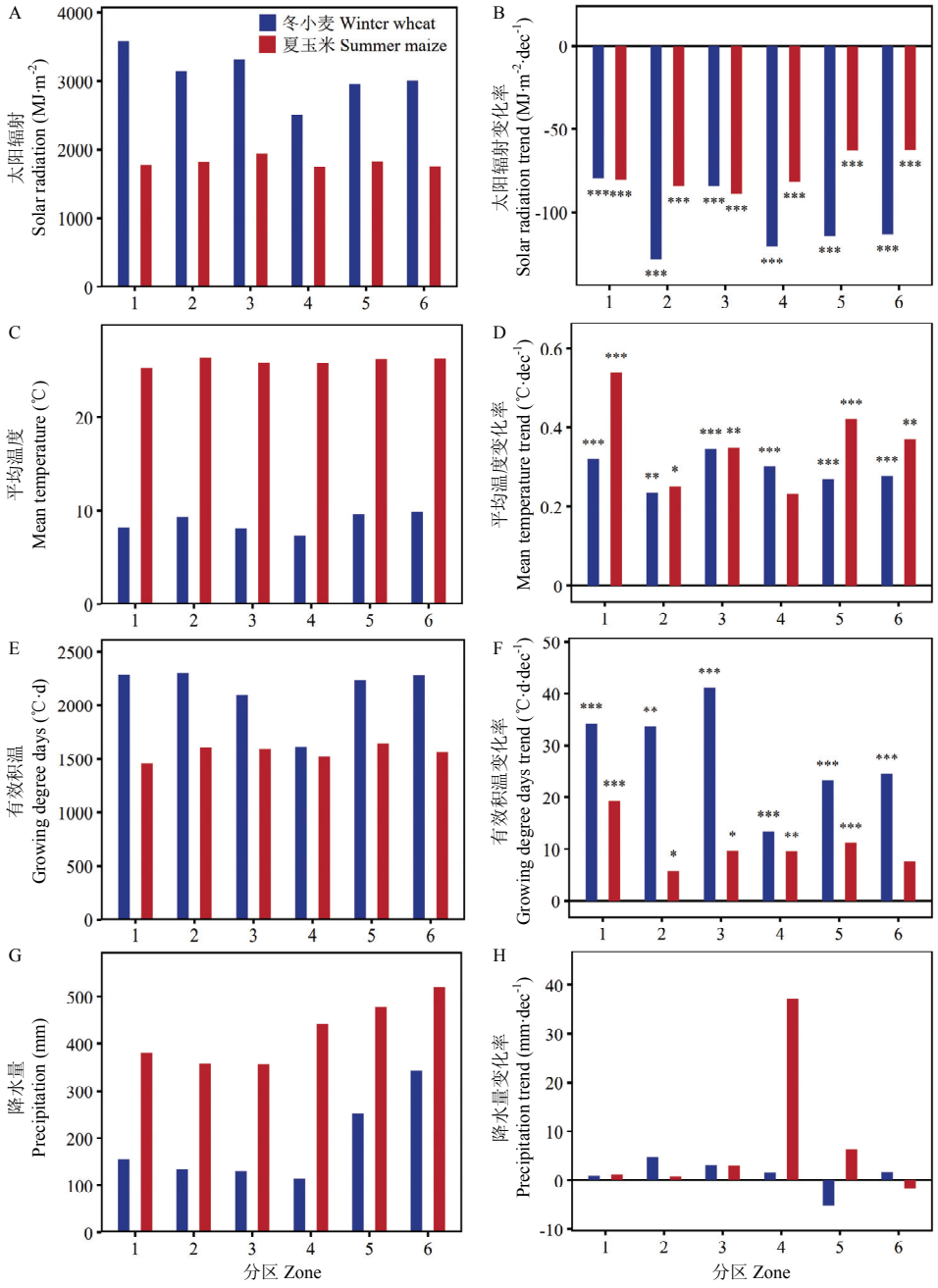


图 5　历史基准期（1980—2020 年）黄淮海平原不同分区冬小麦和夏玉米生育期内气候因子及变化率

Fig. 5　The climatic factors and trends during the growth period of winter wheat and summer maize in different regions of the Huang-Huai-Hai Plain during the historical reference period (1980-2020)

针对基准期不同气候因子的变化特征分析表明，各分区的冬小麦和夏玉米生长季内的累积太阳辐射均显著下降，多数分区的效积温和平均温度显著上升。同时累积降水量无显著变化（图 5、附表 1）。冬小麦生长季内的累积太阳辐射下降趋势（-128.19—-79.70 MJ·m^{-2}·dec^{-1}）显著高于夏玉米生长季（-88.97—-62.29 MJ·m^{-2}·dec^{-1}），其中 Zone2 分区下降最为剧烈（-128.19 MJ·m^{-2}·dec^{-1}）；冬小麦生长季内有效积温增幅（13.47—41.12 ℃·d·dec^{-1}）普遍大于夏玉米生长季（5.81—19.34 ℃·d·dec^{-1}），夏玉米生长季的平均温度的变化幅度（0.23—0.54 ℃）则略高于冬小麦（0.23—0.35 ℃）。

2.2.2　未来时期作物生长季内气象要素的变化特征

对未来时期（2021—2100 年）冬小麦与夏玉米生长季内的气象要素进行分析，结果表明生长季内有效积温与平均温度在未来不同时段（2040s 和 2080s）与不同排放情景下（SSP245 和 SSP585）下均呈现显著上升趋势（$P<0.001$）；太阳辐射在不同情景下表现不同，在 SSP585 情景下保持下降趋势，在 SSP245 情景下，夏玉米生长季内太阳辐射保持略微上升趋势，冬小麦生长季内表现为近未来阶段（2040s）保持上升趋势，远未来阶段（2080s）略微下降；降水量在冬小麦生长季内保持波动，在夏玉米生长季则表现出增加趋势（附表 2、图 6）。对于有效积温与平均温度，SSP585 情景下的增幅明显高于 SSP245 情景，且这种趋势会在未来时段（2080s）持续扩大。生长季内累积太阳辐射的变化在不同作物与排放情景间差异明显，其中 SSP245 情景下夏玉米生长季内的累积太阳辐射呈上升趋势（7.17—7.51 MJ·m^{-2}·dec^{-1}），而冬小麦则由初期的上升逐渐转为下降趋势（12.15→-0.09 MJ·m^{-2}·dec^{-1}）。在 SSP585 情景下，两种作物生长季内的累积太阳辐射均保持显著下降趋势，并且冬小麦的下降趋势（-47.58—-26.06 MJ·m^{-2}·dec^{-1}）远大于夏玉米（-10.48—-7.22 MJ·m^{-2}·dec^{-1}）。对于累积降水量，冬小麦与夏玉米表现出不同的长期变化特征，其中冬

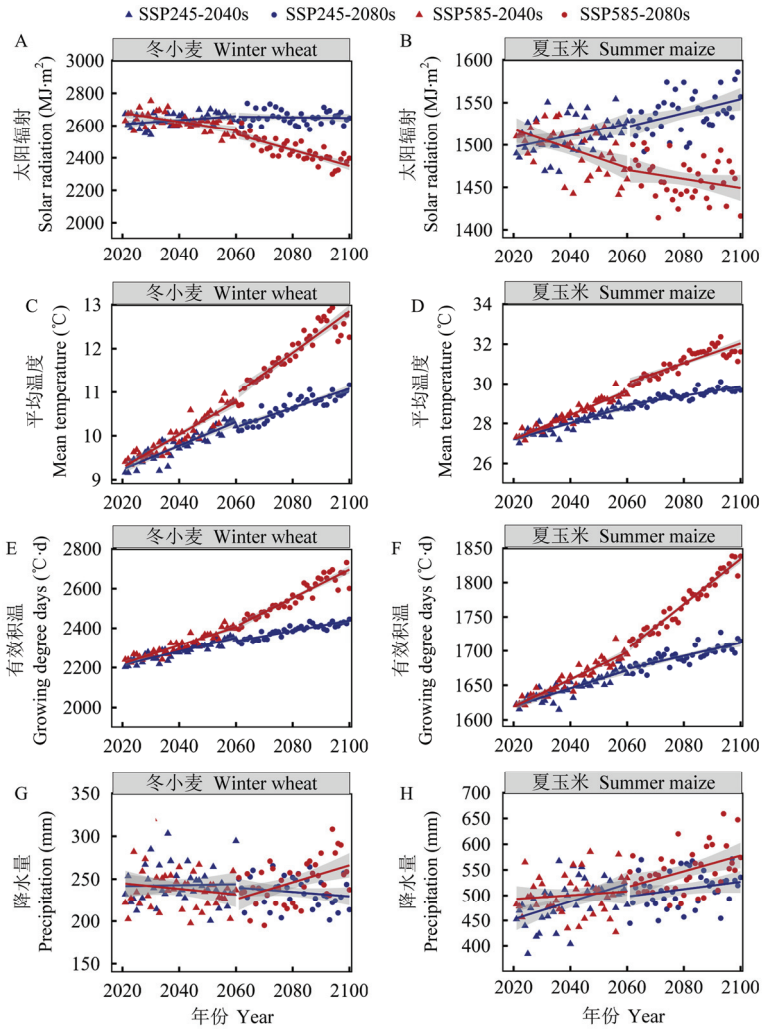


图 6 未来时期（2040s 和 2080s）不同排放情景（SSP245 和 SSP585）下黄淮海平原冬小麦和夏玉米生育期内不同气候因子的变化趋势

Fig. 6 Changes of different climatic factors (accumulative solar radiation, mean temperature, effective thermal time, accumulative precipitation) during the growing seasons of winter wheat and summer maize in the Huang-Huai-Hai Plain in future periods (2040s and 2080s) under two emission scenarios (SSP245 and SSP585)

小麦生长季内累积降水量总体呈现小幅波动，但变化趋势在不同情景有所区别。在 SSP245 情景下，累积降水量由初期的略微上升（0.29 mm·dec^{-1}）逐渐转化为略微下降（-3.05 mm·dec^{-1}），而在 SSP585 情景下则呈相反趋势，即由初期的略微下降（-2.86 mm·dec^{-1}）转变为略微上升（9.48 mm·dec^{-1}）。同时，夏玉米生长季内的累积降水量则始终保持略微上升的趋势（3.20—15.90 mm·dec^{-1}）。

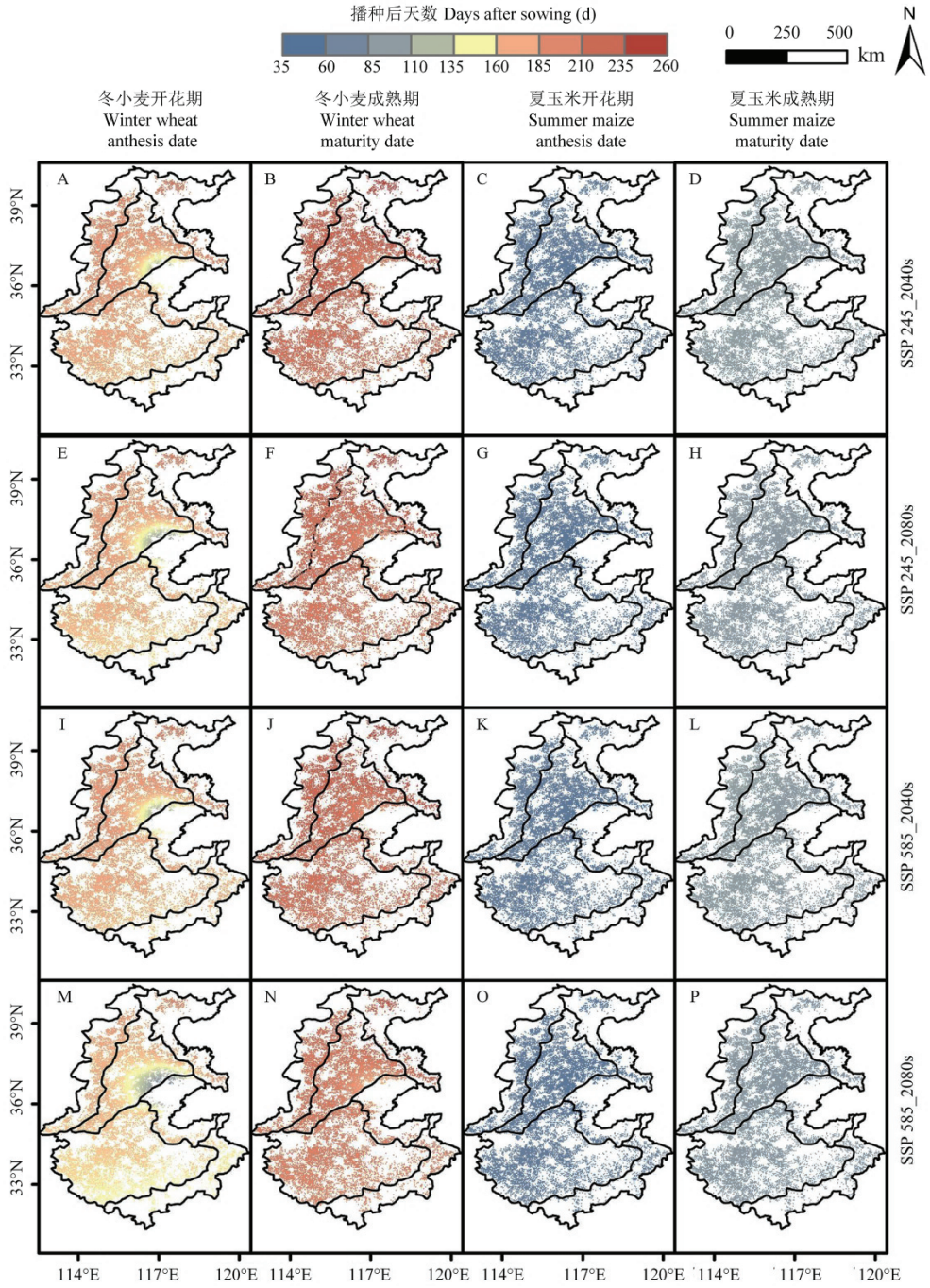
2.2.3　历史基准期作物物候期的变化特征　对历史基准期的作物物候期进行分析，结果表明黄淮海平原冬小麦和夏玉米的物候期在不同分区呈现显著的空间异质性（表 6）。Zone1—Zone3 分区的冬小麦开花期（197—217 d）明显长于 Zone4—Zone6 分区（151—186 d），其中 Zone4 分区最短（151 d）。成熟期与开花期的表现基本一致，Zone1—Zone3 分区（235—256 d）明显长于 Zone4—Zone6 分区（208—229 d），其中 Zone4 分区同样最短（208 d）。夏玉米的物候期特征与冬小麦不同，Zone6 分区的开花期最长（65 d），其余分区次之（39—53 d），Zone4 分区的开花期最短（39 d）；同时各分区的玉米成熟期长度没有显著差别（95—101 d）。

2.2.4　未来时期作物物候期的变化趋势　对未来时期的作物物候期进行分析，结果表明气候变化将显著加速黄淮海平原冬小麦和夏玉米的生长发育进程。总体而言，所有分区两种作物的开花期与成熟期在未来均呈现提前趋势，且这一趋势在冬小麦上更为明显，SSP585 情景下的缩短幅度大于 SSP245 情景，2080s 时期的缩短幅度大于 2040s 时期（表 6、图 7、图 8）。同时，这种物候期变化存在明显的空间异质性。Zone4 分区是物候期变化最为剧烈的区域。在 SSP585-2080s

表 6　历史基准期（1980—2020 年）及未来时期（2040s 和 2080s）两种排放情景（SSP245 和 SSP585）下黄淮海平原不同分区冬小麦和夏玉米的开花期和成熟期

Table 6　Dates of anthesis and maturity stages of winter wheat and summer maize in different agro-ecological zones of the Huang-Huai-Hai Plain in the historical baseline period (1980-2020) and future periods (2040s and 2080s) under two emission scenarios (SSP245 and SSP585)

时期 Period	生育时期 Growth period	作物品种 Crop cultivar	播种后天数 Days after sowing (d)					
			分区 1 Zone1	分区 2 Zone2	分区 3 Zone3	分区 4 Zone4	分区 5 Zone5	分区 6 Zone6
基准期 Baseline period	开花期 Anthesis	冬小麦 Winter wheat	217	197	197	151	186	181
		夏玉米 Summer maize	49	53	51	39	52	65
	成熟期 Maturity	冬小麦 Winter wheat	256	235	240	208	229	229
		夏玉米 Summer maize	95	99	100	96	101	96
SSP245_2040s	开花期 Anthesis	冬小麦 Winter wheat	211	193	189	118	179	173
		夏玉米 Summer maize	47	52	49	36	50	61
	成熟期 Maturity	冬小麦 Winter wheat	251	232	233	198	223	221
		夏玉米 Summer maize	87	93	93	86	92	88
SSP245_2080s	开花期 Anthesis	冬小麦 Winter wheat	204	186	180	94	171	163
		夏玉米 Summer maize	45	50	47	35	49	60
	成熟期 Maturity	冬小麦 Winter wheat	245	226	226	186	216	213
		夏玉米 Summer maize	82	89	89	82	88	84
SSP585_2040s	开花期 Anthesis	冬小麦 Winter wheat	209	191	186	111	177	170
		夏玉米 Summer maize	46	52	49	36	50	61
	成熟期 Maturity	冬小麦 Winter wheat	249	230	231	194	221	219
		夏玉米 Summer maize	85	92	92	85	91	87
SSP585_2080s	开花期 Anthesis	冬小麦 Winter wheat	194	175	165	72	161	150
		夏玉米 Summer maize	44	49	47	35	49	61
	成熟期 Maturity	冬小麦 Winter wheat	236	217	215	168	208	206
		夏玉米 Summer maize	78	86	86	78	85	83



审图号：GS 京（2026）2687 号

图 7 未来时期（2040s 和 2080s）两种不同排放情景（SSP245 和 SSP585）下黄淮海平原冬小麦的开花期（A、E、I、M）和成熟期（B、F、J、N）以及夏玉米的开花期（C、G、K、O）和成熟期（D、H、L、P）

Fig. 7 Flowering (A, E, I, M) and maturity (B, F, J, N) dates (das, days after sowing) of winter wheat, as well as the flowering (C, G, K, O) and maturity (D, H, L, P) dates (das) of summer maize in future periods (2040s and 2080s) under two emission scenarios (SSP245 and SSP585) in the Huang-Huai-Hai Plain

情景下，Zone4 分区冬小麦的成熟期从基准期的 208 d 急剧缩短至 168 d，减少了 40 d；其开花期更是提前了 79 d。与之相比，其他分区的物候期缩短幅度相对较小。同时，冬小麦物候期变化的绝对天数远大于夏玉米。具体地，冬小麦在 SSP245 情景下，开花期提前了 4—57 d，平均约 16 d，成熟期缩短了 3—22 d，

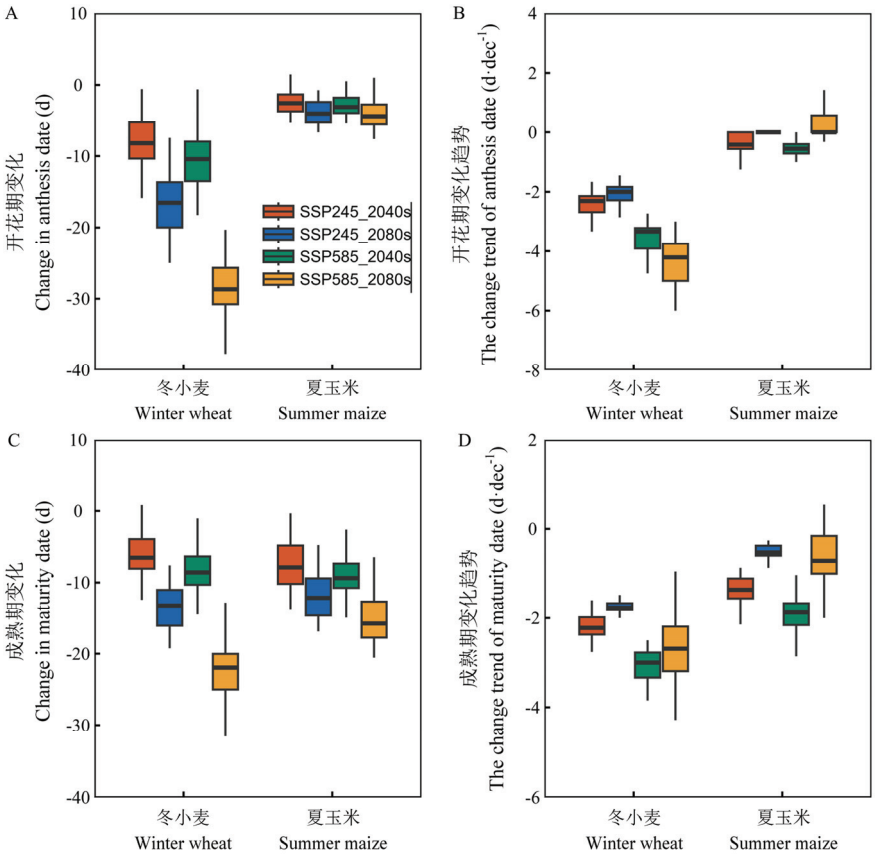


图 8　未来时期（2040s 和 2080s）两种不同排放情景（SSP245 和 SSP585）下黄淮海平原冬小麦和夏玉米开花期和成熟期天数相较于历史基准时期（1980—2020 年）的变化趋势与变化率

Fig. 8　Change trends and change rates in the flowering and maturity dates of winter wheat and summer maize in future periods (2040s and 2080s) under two emission scenarios (SSP245 and SSP585) relative to the historical baseline period (1980-2020) in the Huang-Huai-Hai Plain

平均约 10 d；在 SSP585 情景下，开花期提前了 6—79 d，平均约 25 d，成熟期缩短了 5—40 d，平均约 17 d。夏玉米在 SSP245 情景下，开花期提前了 1—5 d，平均约 3 d，成熟期缩短了 6—14 d，平均约 10 d；在 SSP585 情景下，开花期提前了 1—5 d，平均约 3 d，成熟期缩短了 7—18 d，平均约 12 d。

2.3　黄淮海平原麦玉轮作系统潜在产量、实际产量及产量差

2.3.1　基准期潜在产量、实际产量及产量差　为评估黄淮海平原麦玉轮作系统的产量提升空间，本研究首先基于历史基准期（1980—2020 年）的气候、土壤与管理数据，系统分析了黄淮海平原不同农业生态分区的潜在产量、实际产量及产量差现状。结果表明，全区域麦玉轮作系统的周年潜在产量为 20.96—24.66 t·hm^{-2}，空间异质性显著（表 7、附图 1）。具体地，Zone1（环渤海二熟区）的周年潜在产量最高，达到 24.66 t·hm^{-2}。然而，各分区的实际周年产量普遍较低（9.21—10.29 t·hm^{-2}），远未达到潜在产量上限。由此形成的周年产量差高达 11.35—15.45 t·hm^{-2}，表明潜在产量的 53%—63%未能实现。具体来看，冬小麦的产量差在各分区为 5.85—7.64 t·hm^{-2}，夏玉米则为 4.60—7.81 t·hm^{-2}，其中 Zone1 分区的冬小麦（7.64 t·hm^{-2}）和夏玉米（7.81 t·hm^{-2}）产量差均居首位，合计达 15.45 t·hm^{-2}；而 Zone2（太行山前二熟区）、Zone5（黄淮平原二熟区）和 Zone6（江淮平原二熟区）分区的周年产量差相对较小（11.45、11.35、11.95 t·hm^{-2}），从空间分布上看，Zone1 和 Zone3 分区的周年产量差最为突出，Zone4（鲁西平原二熟区）分区次之，而 Zone2（太行山前二熟区）、Zone5（黄淮平原二熟区）和 Zone6（江淮平原二熟区）分区的相对较小。

表 7 历史基准期（1980-2020 年）黄淮海平原不同分区（Zone1—Zone6）的实际产量、潜在产量及产量差

Table 7 Actual yields, potential yields, and yield gaps in different agro-ecological zones (Zone1-Zone6) of the Huang-Huai-Hai Plain in the historical baseline period (1980-2020)

作物品种 Crop cultivar		产量 Yield (t·hm^{-2})					
		分区 1 Zone1	分区 2 Zone2	分区 3 Zone3	分区 4 Zone4	分区 5 Zone5	分区 6 Zone6
冬小麦 Winter wheat	潜在产量 Potential yield	12.54	11.44	12.22	11.18	11.34	11.97
	实际产量 Actual yield	4.90	5.56	5.31	5.33	5.12	4.62
	产量差 Yield gap	7.64	5.88	6.91	5.85	6.22	7.35
夏玉米 Summer maize	潜在产量 Potential yield	12.12	10.30	10.59	11.05	9.62	9.63
	实际产量 Actual yield	4.31	4.73	4.50	4.24	4.49	5.03
	产量差 Yield gap	7.81	5.57	6.09	6.81	5.13	4.60
周年产量 Annual yield	潜在产量 Potential yield	24.66	21.74	22.81	22.23	20.96	21.60
	实际产量 Actual yield	9.21	10.29	9.81	9.57	9.61	9.65
	产量差 Yield gap	15.45	11.45	13.00	12.66	11.35	11.95

与潜在产量的下降趋势不同，历史基准期（1980—2020 年）内所有分区的实际产量均呈现显著上升趋势（表 8、附图 2）。例如，冬小麦实际产量增幅为 589.40—997.76 kg·hm^{-2}·dec^{-1}，夏玉米则为 530.36—665.25 kg·hm^{-2}·dec^{-1}，但潜在产量却呈普遍下降（夏玉米）或略微上升（冬小麦）趋势。针对夏玉米而言，研究区内大部分地区的潜在产量以-899.57—-606.67 kg·hm^{-2}·dec^{-1} 的速度持续降低；相比之下，冬小麦潜在产量在 Zone2（太行山前二熟区，-97.29 kg·hm^{-2}·dec^{-1}）分区保持微弱下降，其余分区均呈略微增加的趋势（16.85—145.89 kg·hm^{-2}·dec^{-1}）。

这种实际产量上升与潜在产量下降的趋势导致黄淮海平原各分区的产量差在基准期内明显缩小。具体而言，麦玉轮作系统周年的潜在产量下降速率为-844.81—-409.86 kg·hm^{-2}·dec^{-1}，其中 Zone2（太行山前二熟区）和 Zone3（海河平原二熟区）的下降最快，分别达-844.81 和-774.83 kg·hm^{-2}·dec^{-1}。各分区实际周年产量普遍以 1 261.02—1 697.55 kg·hm^{-2}·dec^{-1} 的速度增长，二者共同驱动产量差加速缩减（-2 627.07—-1 855.13 kg·hm^{-2}·dec^{-1}），其中 Zone3 分区的周年产量差降幅在所有分区中最大。

表 8 历史基准期（1980-2020 年）黄淮海平原不同分区（Zone1—Zone6）冬小麦、夏玉米及轮作系统周年的实际产量、潜在产量及产量差变化速率

Table 8 Change rates in the actual yields, potential yields, and yield gaps of winter wheat, summer maize, and annual rotation system in different agro-ecological zones (Zone1-Zone6) of the Huang-Huai-Hai Plain in the historical baseline period (1980-2020)

作物品种 Crop cultivar		产量变化速率 Yield change rate (kg·hm^{-2}·dec^{-1})					
		分区 1 Zone1	分区 2 Zone2	分区 3 Zone3	分区 4 Zone4	分区 5 Zone5	分区 6 Zone6
冬小麦 Winter wheat	实际产量 Actual yield	873.75	891.21	997.76	822.09	943.76	589.40
	潜在产量 Potential yield	107.06	-97.29	16.85	145.89	88.70	135.74
	产量差 Yield gap	-814.65	-1013.09	-998.56	-704.06	-852.31	-454.58
夏玉米 Summer maize	实际产量 Actual yield	553.35	530.36	642.78	561.30	665.25	582.10
	潜在产量 Potential yield	-735.77	-808.87	-899.57	-772.87	-606.73	-606.67
	产量差 Yield gap	-1277.45	-1406.76	-1561.17	-1317.22	-1342.03	-1322.12
周年产量 Annual yield	实际产量 Actual yield	1495.14	1459.29	1697.55	1452.13	1674.64	1261.02
	潜在产量 Potential yield	-629.39	-844.81	-774.83	-571.29	-493.77	-409.86
	产量差 Yield gap	-2200.30	-2477.52	-2627.07	-2074.58	-2291.34	-1855.13

2.3.2 未来气候情景下潜在产量、实际产量及产量差　针对未来时期黄淮海平原的作物产量进行模拟分析，结果表明，不同分区的潜在产量与实际产量呈现出波动或者缓慢下降的趋势，且具有明显的空间异质性（图 9）。具体而言，在潜在产量方面，Zone4 分区（鲁西平原二熟区）的冬小麦潜在产量远低于其他分区，下降趋势最为明显，其余分区则稳定在 10 t·hm^{-2} 左右，同基准期差异较小。夏玉米潜在产量在各区均呈波动状态，潜在产量维持在 8—10 t·hm^{-2}，略低于基准期，而麦玉轮作系统周年潜在产量则基本维持稳定，除了 Zone4 分区低于 15 t·hm^{-2}，其余分区的周年潜在产量均稳定在 15—20 t·hm^{-2}。在实际产量方面，冬小麦实际产量的波动程度比潜在产量更为剧烈，未来 Zone5（黄淮平原二熟区）和 Zone6（江淮平原二熟区）分区的实际产量最高，普遍保持在 8—10 t·hm^{-2}，显著高于基准期，而其余分区的实际产量则维持在 5 t·hm^{-2} 左右，与基准期基本持平；夏玉米实际产量则更加稳定，普遍维持在 7.5 t·hm^{-2} 左右，明显高于基准期实际产量，但不同分区的夏玉米实际产量在未来均保持缓慢下降趋势。各个分区的麦玉轮作系统周年实际产量则具有波动性，总体高于基准期周年实际产量。同时，Zone5 和 Zone6 分区的周年产量略高于其余分区，但这一优势将在 SSP585 情景下随时间推移逐渐减弱。

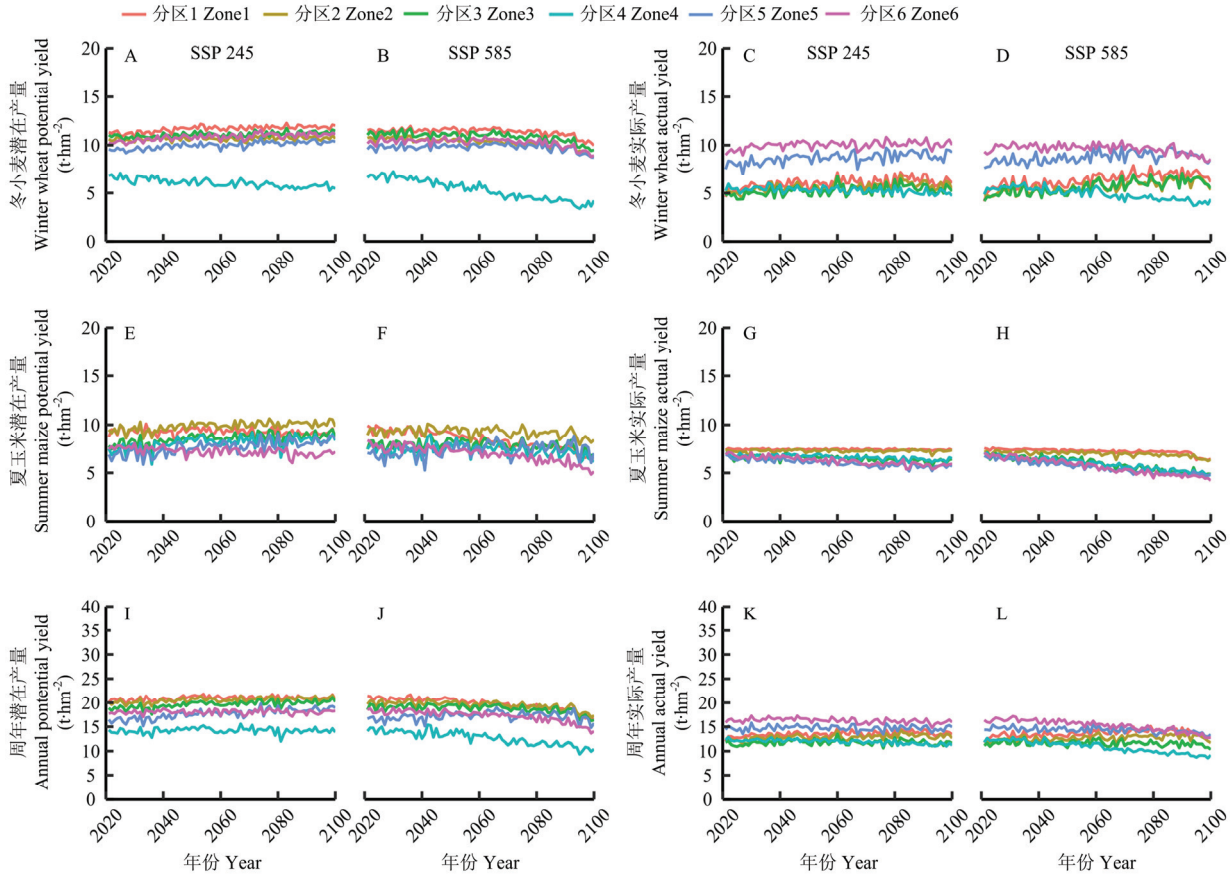


图 A、E、I 和 B、F、J 分别为未来时期 SSP245 和 SSP585 排放情景下不同分区的冬小麦、夏玉米及轮作系统周年潜在产量；图 C、G、K 和图 D、H、L 分别为未来时期 SSP245 和 SSP585 排放情景下不同分区的冬小麦、夏玉米及轮作系统周年实际产量

Figure A, E, I and B, F, J represent the wheat, maize and annual potential yields in different zones under the SSP245 and the SSP585 emission scenarios in the future, respectively. Figure C, G, K and D, H, L represent wheat, maize and annual actual yields in different zones under the SSP245 and SSP585 emission scenarios in the future period, respectively

图 9　未来时期（2021-2100 年）两种排放情景（SSP245 和 SSP585）下黄淮海平原不同分区冬小麦、夏玉米以及轮作系统周年的潜在产量和实际产量变化趋势

Fig. 9　Potential yields and actual yields of winter wheat, summer maize, annual rotation system yields in the future period (2021-2100) under two emission scenarios (SSP245 and SSP585) in different agro-ecological zones of the Huang-Huai-Hai Plain

与潜在产量和实际产量的变化趋势不同，所有分区和情景下的产量差均呈现明显的下降趋势，且这种下降趋势存在明显的空间异质性（附表 3、表 9、图 10）。具体而言，Zone1（环渤海二熟区）、Zone2（太行山前二熟区）和 Zone3（海河平原二熟区）分区在未来各情景下始终维持着较高的周年产量差，其中在 SSP245 情景下周年产量差稳定在 7.34—8.27 t·hm^{-2}，在 SSP585 情景下产量差仍保持了较高水平（4.93—7.52 t·hm^{-2}）。而 Zone4（鲁西平原二熟区）、Zone5（黄淮平原二熟区）和 Zone6（江淮平原二熟区）产量差水平较低，在 SSP245 情境下周年产量差保持在 1.54—3.68 t·hm^{-2}，在 SSP585 情境下则为 1.74—3.27 t·hm^{-2}。与基准期相比，Zone1（环渤海二熟区）、Zone4（鲁西平原二熟区）、Zone5（黄淮平原二熟区）和 Zone6（江淮平原二熟区）的产量差收缩更为明显。尤其在 SSP585 排放情景下，这 4 个分区的周年产量差同基准期相比平均减少 9.64 t·hm^{-2}，其中 Zone4 分区减少最为明显（-10.92 t·hm^{-2}），在 SSP585 2080s 情景，该分区的冬小麦产量差几乎接近消失（0.01 t·hm^{-2}），周年产量差几乎完全由夏玉米贡献。Zone2（太行山前二熟区）和 Zone3（海河平原二熟区）的周年产量差缩减相对较低，保持在 3.70—6.12 t·hm^{-2}。

表 9 未来时期（2040s 和 2080s）两种排放情景（SSP245 和 SSP585）下黄淮海平原不同分区的冬小麦、夏玉米及轮作系统周年产量差相较于基准期（1980—2020）的变化情况

Table 9 Changes of annual yield gap of winter wheat, summer maize and rotation system in different zones (Zone1-Zone6) of Huang-Huai-Hai Plain under two emission scenarios (SSP245 and SSP585) in the future period (2040s and 2080s) compared with the base period (1980-2020)

未来情景 Future scenario	作物品种 Crop cultivar	产量差 Yield gap (t·hm^{-2})					
		分区 1 Zone1	分区 2 Zone2	分区 3 Zone3	分区 4 Zone4	分区 5 Zone5	分区 6 Zone6
SSP245_2040s	冬小麦 Winter wheat	-1.98	-0.68	-1.01	-4.96	-4.90	-6.63
	夏玉米 Summer maize	-5.92	-3.19	-4.46	-5.70	-4.19	-3.78
	周年产量 Annual yield	-7.90	-3.87	-5.47	-10.66	-9.09	-10.41
SSP245_2080s	冬小麦 Winter wheat	-2.11	-0.94	-1.17	-5.22	-4.89	-6.43
	夏玉米 Summer maize	-6.00	-2.76	-3.56	-4.88	-2.78	-3.46
	周年产量 Annual yield	-8.11	-3.70	-4.73	-10.10	-7.67	-9.89
SSP585_2040s	冬小麦 Winter wheat	-2.01	-0.62	-0.98	-4.99	-4.84	-6.71
	夏玉米 Summer maize	-6.05	-3.31	-4.58	-5.73	-4.06	-3.38
	周年产量 Annual yield	-8.06	-3.93	-5.56	-10.72	-8.90	-10.09
SSP585_2080s	冬小麦 Winter wheat	-3.36	-1.98	-2.41	-5.84	-5.54	-6.69
	夏玉米 Summer maize	-7.16	-3.28	-3.71	-5.08	-2.54	-3.21
	周年产量 Annual yield	-10.52	-5.26	-6.12	-10.92	-8.08	-9.90

2.3.3 不同因子对作物潜在产量的重要性分析 为量化不同气候因子（包括作物生长季内积温、平均温度、累积太阳辐射，以及累积降雨量）与不同物候因子（包括开花期、成熟期）对黄淮海平原冬小麦和夏玉米潜在产量的相对重要性，本研究基于随机森林模型计算了不同影响因子的%IncMSE 值（图 11）。可见在历史基准期（1980—2020 年），生长季内太阳辐射是控制夏玉米潜在产量的绝对主导因子（%IncMSE＞200），其重要性远高于其他任何因子。相比之下，冬小麦的潜在产量则受多个因素的共同影响，未出现单一因子绝对主导的情形，各因子的%IncMSE 保持在 50 左右。在未来时期，太阳辐射对夏玉米潜在产量的相对重要性逐渐减弱，尤其在 2080s 时期 SSP245 排放情景下，其%IncMSE 已经降至 100 以下。与此同时，物候因子的重要性持续上升，开花期及成熟期的%IncMSE 在远未来（2080s）情境下，可保持在 50—100。同时，生长季内累积太阳辐射和累积降水量对冬小麦潜在产量的重要性在未来将缓慢上升，逐渐成为相对重要的影响因子。

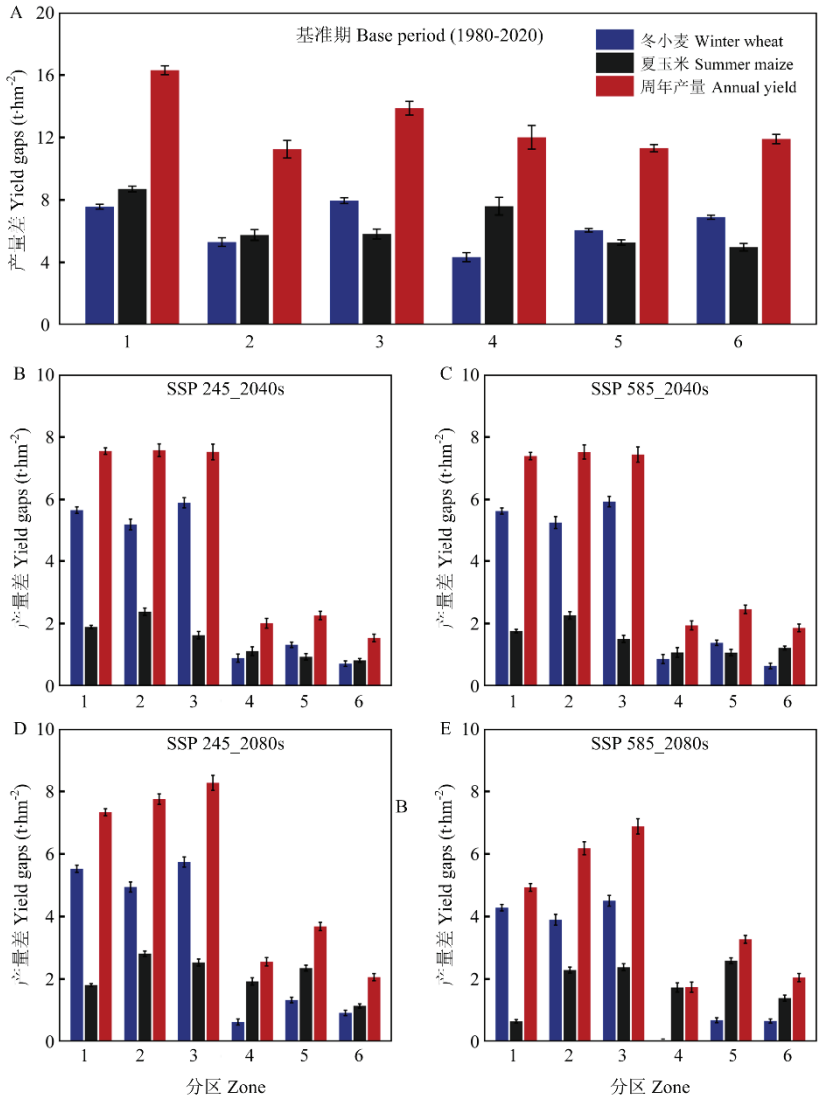


图 10　历史基准时期（1980—2020 年）和未来时期（2040s，2080s）2 种排放情景（SSP245，SSP585）下黄淮海平原不同分区冬小麦、夏玉米及轮作系统周年产量的产量差

Fig. 10　Yield gaps of winter wheat, summer maize, and annual rotation system in historical baseline period and future periods (2040s, 2080s) under two emission scenarios (SSP245, SSP585) in different agro-ecological zones of the Huang-Huai-Hai Plain

3　讨论

3.1　气候变化对黄淮海平原麦玉轮作系统作物物候期变化的影响

相较于历史基准期（1980—2020 年），未来气候变化将显著提高作物生长季内的平均温度与有效积温，并降低生长季内的累积太阳辐射，且上述变化在 SSP585 高排放情景下更为突出。同时，气候变化将缩短黄淮海平原麦玉轮作体系的作物生育期，并且该影响存在空间异质性，黄淮海东部 Zone4（鲁西平原二熟区）的冬小麦物候期缩短幅度最大。

本研究发现：与夏玉米相比，冬小麦物候期缩短更为剧烈。这可能与两种作物生育期内积温变化趋势有关。在两种排放情景下，冬小麦的积温变化趋势均高于夏玉米，这与前人的研究一致[42-43]。同时，冬小麦和夏玉米面对气候变化的响应反映了两种作物的生理特性。在未来时期，冬小麦作为生育期更长的 C_3 作物，生育期内的气象要素变化比作为

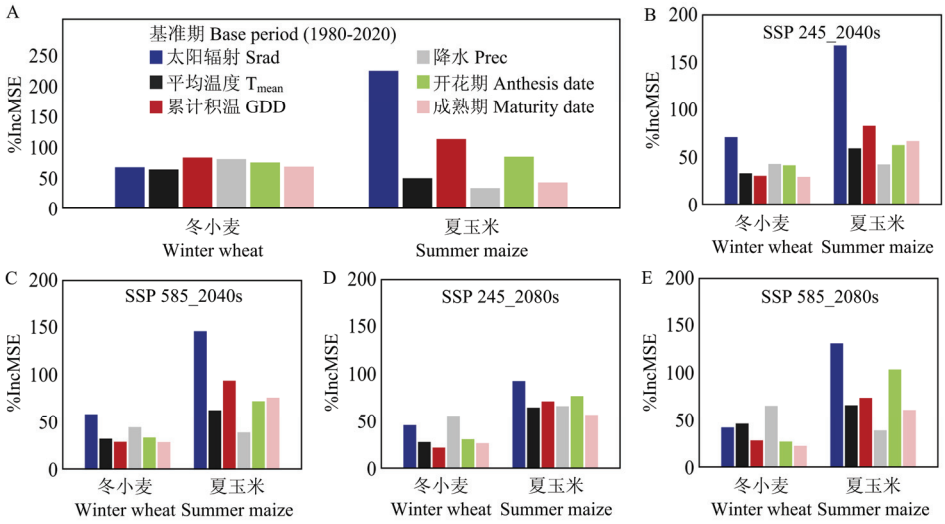


图 11 历史基准时期（1980—2020 年，A）和未来时期（2040s（B，C）和 2080s（D，E））两种不同排放情景（SSP245（B，D）和 SSP585（C，E））下不同气候因子和物候因子对黄淮海平原冬小麦、夏玉米潜在产量贡献的重要性（%IncMSE）排序

Fig. 11 Ranking of the relative importance (%IncMSE) of different climatic and biological factors for the potential yields of winter wheat and summer maize during the historical baseline period (1980-2020; A) and future periods (2040s (B, C) and 2080s (D, E)) under two emission scenarios (SSP245 (B, D) and SSP585 (C, E)) in the Huang-Huai-Hai Plain

C_4 作物的夏玉米更加剧烈，且这一趋势在 SSP585 排放情景下更加明显，这是两种作物物候期变化在不同情景下存在差异的主要原因。与已有研究相比[44]，本研究进一步指出了黄淮海内部 Zone4 分区（鲁西平原二熟区）作为物候期变化最为剧烈的区域，需要将其列为气候变化影响的重点监测区域，制定并实施针对性更强的气候适应性措施。

以往研究指出，黄淮海东部的 Zone4 分区的作物多以种植早熟品种为主[45]，这种策略可以在一定程度上减少水肥投入，而本研究指出这种品种筛选策略可能会在未来时期进一步缩短 Zone4 分区的物候期长度，导致整个生育期长度进一步缩短，对生长季内辐射与降水资源的利用率将进一步降低。同时，生育期的过度缩短将减少光合有效积累时间，不利于冬小麦灌浆和夏玉米籽粒的形成，可能会限制该区域潜在产量提升[46]。未来在 Zone4 等物候变化剧烈的区域，有必要通过优化品种熟性、调整播期以缓解该地区因气候变暖带来的物候期缩短与资源利用下降的问题。

3.2 麦玉轮作系统未来周年生产潜力与产量差的变化

相较于历史基准期，黄淮海平原各分区麦玉轮作系统的未来潜在产量整体呈波动或小幅下降态势。产量差则表现出显著下降趋势，且该变化特征存在明显的空间异质性。从分区增产潜力差异来看，Zone1（环渤海二熟区）、Zone2（太行山前二熟区）、Zone3（海河平原二熟区）分区仍存在较大的周年增产空间，其潜力主要由冬小麦贡献； Zone4（鲁西平原二熟区）、Zone5（黄淮平原二熟区）与 Zone6（江淮平原二熟区）分区的周年增产潜力次之，以夏玉米和冬小麦共同驱动；其中，东部 Zone4（鲁西平原二熟区）分区的周年增产潜力下降最为严重（-10.92 $t \cdot hm^{-2}$），在 SSP585-2080s 远期高排放情景下，其周年增产潜力几乎完全依赖于夏玉米。关于不同因子对于作物潜在产量的影响，本研究发现生长季内累积太阳辐射是影响夏玉米潜在产量的关键主导气候因子，但是该因子的重要性会在未来有所下降，而冬小麦潜在产量在历史基准期则并没有出现由单一因子主导的情况，未来时期生长季内累积太阳辐射和降水量的重要性将逐步增加。

同时，本研究表明未来产量差缩小的主要驱动因素并非源自实际产量的提升，而是由气候变化导致的潜在产量下降所致。气候变化导致生长季累积积温显著增加，促使作物物候期整体缩短，进而造成生长季内累积太阳辐射的减少，这一机理是未来区域潜在产

量下降的核心原因，可为未来产量差的时空演变提供生理学解释。本研究结果与 Liu 等[47]对不同作物物候对潜在产量影响的研究结果一致。此外，本研究的结果还能与在区域尺度上如何有效缩小产量差的相关研究形成互补[48-49]，他们的研究强调通过管理优化缩小产量差，而笔者的结果则强调维持潜在产量本身在未来可能是一个更为严峻的挑战。同时，未来作物潜在产量的下降趋势展现出明显的空间异质性，这也与前人的研究一致。一方面，气候变暖驱动作物生育期缩短、生长季内有效太阳辐射不断降低，冬小麦与夏玉米开花期与成熟期提前，作物光合物质阶段受限，从生理决定了区域潜在产量的上限；另一方面，黄淮海平原长期麦玉轮作生产模式下，可能会导致耕地质量下降，出现土壤板结、耕层变浅、有机质含量偏低的问题，在环境要素上限制了潜在产量的进一步提升[50-51]。

黄淮海平原在未来时段不同因子对于潜在产量的贡献反映了作物对于气候因子的响应情况。对于 C_4 作物夏玉米，其高产高度依赖强光和高温[52-54]，但未来过高的温度可能超越其最适范围，通过加速生育进程、缩短灌浆期持续时间，直接限制光合产物的积累，可解释为何生长季内累积太阳辐射的主导地位会随高温胁迫的加剧而相对减弱[55]。相反地，对于 C_3 植物冬小麦，其产量形成过程同时受到温度、水分和辐射等多种因子的复杂调控[56-57]，未来气候变化打破了现有因子之间的平衡，导致水热胁迫的重要性凸显，但未形成新的单一主导因子，这预示未来冬小麦生产将面临更为复杂的胁迫环境[58-59]。

因此，为有效应对气候变化对于黄淮海平原冬小麦-夏玉米轮作系统的影响，配套的育种与栽培调控策略需要充分兼顾区域特征。对于北部的 Zone1（环渤海二熟区）、Zone2（太行山前二熟区）、Zone3（海河平原二熟区）分区，应强化冬小麦生育期的投入管理，以缩小产量差，挖掘增产潜力；而对于研究区南部的 Zone5（黄淮平原二熟区）与 Zone6（江淮平原二熟区）分区，则需要同时重视冬小麦与夏玉米的生产状况，实现作物协同增产。此外，对于产量差缩减最为严重的东部的 Zone4（鲁西平原二熟区）需将其作为重点监测分区，加快冬小麦品种更新，推广适配性晚熟品种，高效利用光热资源，提升气候适应性与生产稳定性。

4　结论

未来时期（2021—2100 年）气候变化将显著提升黄淮海平原冬小麦—夏玉米轮作系统生长季的平均温度与有效积温，并在高排放情况下降低累积太阳辐射并缩短作物生育期，且上述变化存在显著空间差异，其中东部 Zone4（鲁西平原二熟区）对气候变化响应最为敏感，物候期缩短幅度最大；受此影响，该轮作系统周年产量差将持续缩小，其核心驱动并非实际产量提升，而是潜在产量的持续下降，且产量差的变化趋势同样具有明显空间异质性：北部各分区仍保持较大增产空间，南部次之，东部 Zone4（鲁西平原二熟区）增产潜力缩减最为严重，且增产空间高度依赖夏玉米；进一步的驱动因子分析表明，夏玉米潜在产量主要受生长季累积太阳辐射驱动，但其重要性在未来将逐渐减弱，而冬小麦产量则受多因子共同调控，未呈现单一主导因子的特征。

文章附图附表请见本刊官网：
https://www.chinaagrisci.com/CN/0578-1752/home.shtml

参考文献 References

[1] Wu W B, Verburg P H, Tang H J. Climate change and the food production system: Impacts and adaptation in China [J]. Regional Environmental Change, 2014, 14(1): 1-5.

[2] 李裕瑞, 杨忆, 刘路路, 潘玮. 中国粮食生产的新空间格局及其气候灾害风险[J]. 农业工程学报, 2026, 42(2): 1-13.
Li Y R, Yang Y, Liu L L, Pan W. New spatial pattern of food production and its climatic disaster risk in China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2026, 42(2): 1-13. (in Chinese)

[3] Sena L, Mica E, Valè G, Vaccino P, Pecchioni N. Exploring the potential of endophyte-plant interactions for improving crop sustainable yields in a changing climate [J]. Frontiers in Plant Science, 2024, 15: 1349401.

[4] 刘水苗, 关小康, 赵志恒, 王景辉, 刘世龙, 高培萌, 王艳丽, 吴鹏年, 高晨凯, 李煜铭, 邵京, 于昊琳, 王同朝, 温鹏飞. 冬麦播前耕作方式对麦玉轮作体系中玉米季土壤水分、籽粒灌浆特征及产量的影响[J]. 中国农业科学, 2024, 57(18): 3568-3585. DOI: 10.3864/j.issn.0578-1752.2024.18.005.
Liu S M, Guan X K, Zhao Z H, Wang J H, Liu S L, Gao P M, Wang Y L, Wu P N, Gao C K, Li Y M, Shao J, Yu H L, Wang T C, Wen P F. Residual effects of tillage regime on soil moisture dynamics, grain filling characteristics and yield of summer maize in wheat-maize double cropping system [J]. Scientia Agricultura

Sinica, 2024, 57(18): 3568-3585. DOI: 10.3864/j.issn.0578-1752.2024.18.005. (in Chinese)

[5] de la Cruz V Y V, Tantriani, Cheng W G, Tawaraya K. Yield gap between organic and conventional farming systems across climate types and sub-types: A meta-analysis [J]. Agricultural Systems, 2023, 211: 103732.

[6] 赖奕晨, 任梦, 周袁希, 龚敏, 关浩杰. 黄淮海平原农户粮食生产行为调查分析[J]. 粮食科技与经济, 2021, 46(2): 12-15.
Lai Y C, Ren M, Zhou Y X, Gong M, Guan H J. Analysis of farmers' food production behavior in Huang-Huai-Hai Plain [J]. Grain Science and Technology and Economy, 2021, 46(2): 12-15. (in Chinese)

[7] Mueller N D, Gerber J S, Johnston M, Ray D K, Ramankutty N, Foley J A. Closing yield gaps through nutrient and water management [J]. Nature, 2012, 490(7419): 254-257.

[8] Wang H Z, Ren H, Han K, Zhang L H, Zhao Y L, Liu Y E, He Q J, Li G, Zhang J W, Zhao B, Ren B Z, Liu P. Experimental assessment of the yield gap associated with maize production in the North China Plain [J]. Field Crops Research, 2023, 295: 108897.

[9] Zhang Z M, Lu C H. Assessing changes in potential yields and yield gaps of summer maize in the North China Plain [J]. Food and Energy Security, 2024, 13: e489.

[10] Wang H Z, Ren H, Zhang L H, Zhao Y L, Liu Y E, He Q J, Li G, Han K, Zhang J W, Zhao B, Ren B Z, Liu P. A sustainable approach to narrowing the summer maize yield gap experienced by smallholders in the North China Plain [J]. Agricultural Systems, 2023, 204(C): 103541.

[11] Senapati N, Semenov M A. Assessing yield gap in high productive countries by designing wheat ideotypes [J]. Scientific Reports, 2019, 9: 5516.

[12] Wang H Z, Ren H, Han K, He Q J, Zhang L H, Zhao Y L, Liu Y E, Zhang J W, Zhao B, Ren B Z, Liu P. Sustainable improvement strategies for summer maize yield, nitrogen use efficiency and greenhouse gas emission intensity in the North China Plain [J]. European Journal of Agronomy, 2023, 143: 126712.

[13] Li K N, Yang X G, Liu Z J, Zhang T Y, Lu S, Liu Y. Low yield gap of winter wheat in the North China Plain [J]. European Journal of Agronomy, 2014, 59: 1-12.

[14] Li S, Liu J, Shang M, Jia H, Feng Y, Chu Q, Chen F. Multi-scale assessment of winter wheat yield gaps with an integrated evaluation framework in the Huang-Huai-Hai farming region in China [J]. The Journal of Agricultural Science, 2019, 157(6): 523-536.

[15] Liu J G, Wang G Y, Kelly T, Zhang Y Y, Yang M, Chu Q Q. Effect of nitrogen and water deficit type on the yield gap between the potential and attainable wheat yield [J]. Chilean Journal of Agricultural Research, 2015, 75(4): 457-464.

[16] Yan Z Z, Du T S. Effects of climate factors on wheat and maize under different crop rotations and irrigation strategies in the North China Plain [J]. Environmental Research Letters, 2023, 18(12): 124015.

[17] Liang S, Li Y F, Zhang X B, Sun Z G, Sun N, Duan Y H, Xu M G, Wu L H. Response of crop yield and nitrogen use efficiency for wheat-maize cropping system to future climate change in northern China [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 262: 310-321.

[18] Li X X, Ju H, Sarah G, Yan C R, Batchelor W D, Liu Q. Spatiotemporal variation of drought characteristics in the Huang-Huai-Hai Plain, China under the climate change scenario [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2017, 16(10): 2308-2322.

[19] 刘巽浩. 农作制与中国农作制区划[J]. 中国农业资源与区划, 2002, 23(5): 11-15.
Liu X H. Farming system and farming system regional planning in China [J]. Journal of China Agricultural Resources and Regional Planning, 2002, 23(5): 11-15. (in Chinese)

[20] 曹宏鑫, 赵锁劳, 葛道阔, 刘永霞, 刘岩, 孙金英, 岳延滨, 张智优, 陈煜利. 作物模型发展探讨[J]. 中国农业科学, 2011, 44(17): 3520-3528. DOI: 10.3864/j.issn.0578-1752.2011.17.004.
Cao H X, Zhao S L, Ge D K, Liu Y X, Liu Y, Sun J Y, Yue Y B, Zhang Z Y, Chen Y L. Discussion on development of crop models [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(17): 3520-3528. DOI: 10.3864/j.issn.0578-1752.2011.17.004. (in Chinese)

[21] Verburg K, Pasley H R, Biggs J S, Vogeler I, Wang E L, Mielenz H, Snow V O, Smith C J, Pasut C, Basche A D, He D, Archontoulis S V, Gaydon D S, Huth N I, Holzworth D P, Sharp J M, Cichota R, Khaembah E N, Teixeira E I, Brown H E, *et al*. Review of APSIM's soil nitrogen modelling capability for agricultural systems analyses [J]. Agricultural Systems, 2025, 224: 104213.

[22] Keating B A, Carberry P S, Hammer G L, Probert M E, Robertson M J, Holzworth D, Huth N I, Hargreaves J N G, Meinke H, Hochman Z, McLean G, Verburg K, Snow V, Dimes J P, Silburn M, Wang E, Brown S, Bristow K L, Asseng S, Chapman S, *et al*. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation [J]. European Journal of Agronomy, 2003, 18(3/4): 267-288.

[23] Keating B A. APSIM's origins and the forces shaping its first 30 years of evolution: A review and reflections [J]. Agronomy for Sustainable

Development, 2024, 44(3): 24.

[24] Bai H Q, Wang J, Fang Q X, Huang B X. Does a trade-off between yield and efficiency reduce water and nitrogen inputs of winter wheat in the North China Plain [J]. Agricultural Water Management, 2020, 233: 106095.

[25] Jiang M N, Liu C S, Chen M S. Quantifying potential yield and water-limited yield of summer maize in the North China Plain [J]. Remote sensing and modeling of ecosystems for sustainability xiv, 2017, 10405.

[26] 任思洋, 张青松, 李婷玉, 张福锁. 华北平原五省冬小麦产量和氮素管理的时空变异[J]. 中国农业科学, 2019, 52(24): 4527-4539. DOI: 10.3864/j.issn.0578-1752.2019.24.008.
Ren S Y, Zhang Q S, Li T Y, Zhang F S. Spatiotemporal variation of winter wheat yield and nitrogen management in five provinces of North China Plain [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(24): 4527-4539. DOI: 10.3864/j.issn.0578-1752.2019.24.008. (in Chinese)

[27] Gavasso-Rita Y L, Papalexiou S M, Li Y P, Elshorbagy A, Li Z H, Schuster-Wallace C. Crop models and their use in assessing crop production and food security: A review [J]. Food and Energy Security, 2024, 13: e503.

[28] Gobezie A, Ademe D, Sharma L K. *CERES*-maize (DSSAT) model applications for maize nutrient management across agroecological zones: A systematic review [J]. Plants, 2025, 14(5): 661.

[29] Jones J W, Hoogenboom G, Porter C H, Boote K J, Batchelor W D, Hunt L A, Wilkens P W, Singh U, Gijsman A J, Ritchie J T. The DSSAT cropping system model [J]. European Journal of Agronomy, 2003, 18(3/4): 235-265.

[30] 王亚莉, 贺立源. 作物生长模拟模型研究和应用综述[J]. 华中农业大学学报, 2005(5): 529-535.
Wang Y L, He L Y. A review on the research and application of crop simulation model [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2005(5): 529-535. (in Chinese)

[31] Dokoohaki H, Kivi M S, Martinez-Feria R, Miguez F E, Hoogenboom G. A comprehensive uncertainty quantification of large-scale process-based crop modeling frameworks [J]. Environmental Research Letters, 2021, 16(8): 084010.

[32] Zhang Z, Luo Y C, Han J C, Xu J L, Tao F L. Estimating global wheat yields at 4 km resolution during 1982-2020 by a spatiotemporal transferable method [J]. Remote Sensing, 2024, 16(13): 2342.

[33] Lizumi T, Sakai T. The global dataset of historical yields for major crops 1981-2016 [J]. Scientific Data, 2020, 7: 97.

[34] Cao J, Zhang Z, Luo X Z, Luo Y C, Xu J L, Xie J, Han J C, Tao F L. Mapping global yields of four major crops at 5-minute resolution from 1982 to 2015 using multi-source data and machine learning [J]. Scientific Data, 2025, 12: 357.

[35] Qiu B W, Hu X, Chen C C, Tang Z H, Yang P, Zhu X L, Yan C, Jian Z Y. Maps of cropping patterns in China during 2015-2021 [J]. Scientific Data, 2022, 9: 479.

[36] Soci C, Hersbach H, Simmons A, Poli P, Bell B, Berrisford P, Horányi A, Muñoz-Sabater J, Nicolas J, Radu R, Schepers D, Villaume S, Haimberger L, Woollen J, Buontempo C, Thépaut J N. The ERA5 global reanalysis from 1940 to 2022 [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2024, 150(764): 4014-4048.

[37] Eyring V, Cox P M, Flato G M, Gleckler P J, Abramowitz G, Caldwell P, Collins W D, Gier B K, Hall A D, Hoffman F M, Hurtt G C, Jahn A, Jones C D, Klein S A, Krasting J P, Kwiatkowski L, Lorenz R, Maloney E, Meehl G A, Pendergrass A G, *et al*. Taking climate model evaluation to the next level [J]. Nature Climate Change, 2019, 9(2): 102-110.

[38] Liu D L, Zuo H P. Statistical downscaling of daily climate variables for climate change impact assessment over New South Wales, Australia [J]. Climatic Change, 2012, 115(3): 629-666.

[39] Senthilkumar K. Closing rice yield gaps in Africa requires integration of good agricultural practices [J]. Field Crops Research, 2022, 285: 108591.

[40] Anderson W, Johansen C, Siddique K H M. Addressing the yield gap in rainfed crops: A review [J]. Agronomy for Sustainable Development, 2016, 36(1): 18.

[41] 卢必慧, 邱琳, 李卫国, 王志明, 田苗, 王晶, 单捷. 基于遥感的作物产量和产量差估算研究进展[J]. 江苏农业学报, 2023, 39(3): 881-894.
Lu B H, Qiu L, Li W G, Wang Z M, Tian M, Wang J, Shan J. Research progress on crop yield and yield gap estimation based on remote sensing [J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2023, 39(3): 881-894. (in Chinese)

[42] Zhao Y, Chen X P, Lobell D B. An approach to understanding persistent yield variation: A case study in North China Plain [J]. European Journal of Agronomy, 2016, 77: 10-19.

[43] Gao Y K, Zhao H F, Zhao C, Hu G H, Zhang H, Liu X, Li N, Hou H Y, Li X. Spatial and temporal variations of maize and wheat yield gaps and their relationships with climate in China [J]. Agricultural Water Management, 2022, 270(C): 107714.

[44] 徐建文, 居辉, 梅旭荣, 刘勤, 杨建莹. 近 30 年黄淮海平原干旱对

冬小麦产量的潜在影响模拟[J]. 农业工程学报, 2015, 31(6): 150-158.
Xu J W, Ju H, Mei X R, Liu Q, Yang J Y. Simulation on potential effects of drought on winter wheat in Huang-Huai-Hai Plain from 1981 to 2010 [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(6): 150-158. (in Chinese)

[45] Hu T X, Zhang X S, Khanal S, Wilson R, Leng G Y, Toman E M, Wang X H, Li Y, Zhao K G. Climate change impacts on crop yields: A review of empirical findings, statistical crop models, and machine learning methods [J]. Environmental Modelling & Software, 2024, 179: 106119.

[46] Silva J V, Baudron F, Ngoma H, Nyagumbo I, Simutowe E, Kalala K, Habeenzu M, Mphatso M, Thierfelder C. Narrowing maize yield gaps across smallholder farming systems in Zambia: What interventions, where, and for whom [J]. Agronomy for Sustainable Development, 2023, 43(2): 26.

[47] Liu Y L, Zhang H, Li G C, Sun X F, Wang M. A comprehensive method to increase yield and narrow the yield gap of winter wheat for sustainable intensification [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2022, 102(10): 4238-4249.

[48] Chen W, Zhang J J, Deng X P. Winter wheat yield improvement by genetic gain across different provinces in China [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2024, 23(2): 468-483.

[49] 赵红. 基于Meta分析和*CERES*-maize模型的玉米施氮增密的产量缩差研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2022.
Zhao H. Reduction of yield gap effect through nitrogen fertilizerand planting density in maize based on Meta-analysisand CERES-Maize model [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2022. (in Chinese)

[50] Chen Y, Zhang Z, Tao F L, Wang P, Wei X. Spatio-temporal patterns of winter wheat yield potential and yield gap during the past three decades in North China [J]. Field Crops Research, 2017, 206: 11-20.

[51] 范兰, 吕昌河, 于伯华, 王涛. 华北平原小麦-玉米两作生产潜力与产量差[J]. 中国农学通报, 2016, 32(9): 33-40.
Fan L, Lü C H, Yu B H, Wang T. Yield potential and yield gap of wheat-maize cropping system in the North China Plain [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(9): 33-40. (in Chinese)

[52] Farooq A, Farooq N, Akbar H, Hassan Z U, Gheewala S H. A critical review of climate change impact at a global scale on cereal crop production [J]. Agronomy, 2023, 13(1): 162.

[53] Tollenaar M, Fridgen J, Tyagi P, Stackhouse P W Jr, Kumudini S. The contribution of solar brightening to the US maize yield trend [J]. Nature Climate Change, 2017, 7(4): 275-278.

[54] Zahra N, Hafeez M B, Wahid A, Al Masruri M H, Ullah A, Siddique K H M, Farooq M. Impact of climate change on wheat grain composition and quality [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2023, 103(6): 2745-2751.

[55] Xiao D P, Liu D L, Wang B, Feng P Y, Bai H Z, Tang J Z. Climate change impact on yields and water use of wheat and maize in the North China Plain under future climate change scenarios [J]. Agricultural Water Management, 2020, 238: 106238.

[56] Singh A, Pandey H, Pandey S, Lal D, Chauhan D, Aparna, Antre S H, B S, Kumar A. Drought stress in maize: Stress perception to molecular response and strategies for its improvement [J]. Functional & Integrative Genomics, 2023, 23(4): 296.

[57] 陈佳义. 气候变化对江苏省冬小麦气候适宜性的影响[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2023.
Chen J Y. Influence of climate change on climate suitability of winter wheat in Jiangsu Province [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2023. (in Chinese)

[58] Aryal J P, Sapkota T B, Khurana R, Khatri-Chhetri A, Rahut D B, Jat M L. Climate change and agriculture in South Asia: Adaptation options in smallholder production systems [J]. Environment, Development and Sustainability, 2020, 22(6): 5045-5075.

[59] 韩守威, 司纪升, 余维宝, 孔令安, 张宾, 王法宏, 张海林, 赵鑫, 李华伟, 孟钰. 山东省冬小麦产量差与氮肥利用效率差形成机理解析[J]. 中国农业科学, 2022, 55(16): 3110-3122. DOI: 10.3864/j.issn.0578-1752.2022.16.004.
Han S W, Si J S, Yu W B, Kong L A, Zhang B, Wang F H, Zhang H L, Zhao X, Li H W, Meng Y. Mechanisms analysis on yield gap and nitrogen use efficiency gap of winter wheat in Shandong Province [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2022, 55(16): 3110-3122. DOI: 10.3864/j.issn.0578-1752.2022.16.004. (in Chinese)

（责任编辑 李秋雨）