

未来气候变化对黄淮海冬小麦-夏玉米轮作系统生产力影响

董文彪^{1,2} 冯文哲^{1,2} 屈萌钰^{1,2} 冯浩^{2,3} 于强^{3,4} 何建强^{1,2}

(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. 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 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: 揭示未来气候变化对黄淮海平原冬小麦-夏玉米轮作系统作物物候和产量的影响,对保障我国粮食安全具有重要意义。本研究基于文献收集的多站点多年份大田试验数据来校准和验证 APSIM - Wheat 和 APSIM - Maize 模型,并结合 CMIP6 数据集 10 个全球气候模型(Global climate models, GCMs)预测的未来气象数据,驱动校准验证后的 APSIM 模型,模拟分析了 SSP2 - 4.5 和 SSP5 - 8.5 两种温室气体排放情景下黄淮海地区冬小麦-夏玉米轮作系统在 2021—2060 年(2040s)和 2061—2100 年(2080s)作物物候期和产量的变化情况。基于多元线性回归方法分析其变化趋势,并结合随机森林(Random forest, RF)模型分析了气候要素与作物生殖生长期变化对作物产量的正负效应及其重要性。结果表明:与基准期(1981—2020 年)相比,冬小麦营养生长期总体缩短,生殖生长期总体延长,产量增加,且在 SSP5 - 8.5 情景下变化更明显;与基准期相比,夏玉米营养生长期、生殖生长期都将缩短,产量增加,但相较于 SSP2 - 4.5,夏玉米在 SSP5 - 8.5 情景下出现减产趋势;与 SSP2 - 4.5 相比,在 SSP5 - 8.5 情景下冬小麦-夏玉米轮作系统的周年全生育期缩短,周年总产量增加,且冬小麦产量占比有所增加。在未来时段,冬小麦产量主要与生育期内太阳辐射、日均温及累计降雨量之间呈正相关关系,但日均温及累计降雨量的增加不利于在 SSP5 - 8.5 情景下 2080s 时间段内实现冬小麦增产;夏玉米产量与气象因子的相关性与冬小麦类似,但夏玉米产量始终与日均温直接呈显著负相关。通过随机森林模型分析可知,冬小麦生殖生长期、生育期内累计降雨量对冬小麦产量影响最大;夏玉米生育期内 CO₂ 浓度、日均温及累计降雨量对夏玉米产量影响最大。总体上,未来气候变化将导致黄淮海地区冬小麦生殖生长期延长,夏玉米生殖生长期缩短,产量增加;但随着时间推移,温度及降雨量对作物产量的正效应会逐渐转变为负效应,导致夏玉米在 SSP5 - 8.5 情景下 2080s 时间段内出现减产趋势,可见未来作物产量变化主要取决于气候因子对作物产量的正效应与作物生长期缩短的负效应的共同作用结果,而非单一因素所决定。本研究可为黄淮海地区冬小麦-夏玉米轮作系统作物生产及应对未来气候变化影响提供科学依据和理论指导。

关键词: 冬小麦; 夏玉米; 物候期; 产量; 气候变化; 黄淮海平原

中图分类号: S162.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)11-0429-17

OSID:



Influences of Climate Change on Productivity of Winter Wheat and Summer Maize Rotation System in Huang - Huai - Hai Plain

DONG Wenbiao^{1,2} FENG Wenzhe^{1,2} QU Mengyu^{1,2} FENG Hao^{2,3} YU Qiang^{3,4} HE Jianqiang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Institute of Water-saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

3. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Water and Soil Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resource, Yangling, Shaanxi 712100, China

4. Key Laboratory of Eco-Environment and Meteorology for the Qinling Mountains and Loess Plateau, Shaanxi Provincial Meteorological Bureau, Xi'an 710016, China)

Abstract: It is of great significance to explore the influences of climate change on crop phenology and yield of the rotation system of winter wheat and summer maize in the Huang - Huai - Hai Plain, a major

收稿日期: 2024-01-10 修回日期: 2024-04-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(52079115)、国家重点研发计划项目(2021YFD1900700)、西北农林科技大学人才专项资金项目(千人计划项目)和高等学校学科创新引智计划(111 计划)项目(B12007)

作者简介: 董文彪(1998—),男,博士生,主要从事农业生态系统模拟研究,E-mail: dwb2021050958@nwfau.edu.cn

通信作者: 何建强(1977—),男,教授,博士生导师,主要从事农业生态系统模拟研究,E-mail: jianqiang_he@nwfau.edu.cn

grain production base in China, for guaranteeing the food security of China. The APSIM – Wheat and APSIM – Maize models (V 7.6) were calibrated and verified based on experimental data of multiple years and multiple sites, which were obtained based on literature review. Then, future meteorological data predicted by ten different global climate models (GCMs) in the CMIP6 dataset were used to drive the verified APSIM models to simulate the changes of phenology and yield of winter wheat and summer maize in the time periods of 2021—2060 (2040s) and 2061—2100 (2080s) under two greenhouse gas emission scenarios of SSP2 – 4.5 and SSP5 – 8.5. Based on the analyses with multiple linear regression and random forest model, the positive and negative effects of climatic factors and change of crop reproductive stage on crop yield were analyzed and their importance was clarified. The result showed that compared with the baseline period (1981—2020), the vegetative stage of winter wheat was shortened, the reproductive stage was prolonged, and wheat yield was increased. These changes were more obvious under the SSP5 – 8.5 than that under the SSP1 – 2.6 scenario. The vegetative and reproductive stages of summer maize were both shortened, and maize yield was increased. However, compared with SSP2 – 4.5, maize yield would be reduced under the SSP5 – 8.5 scenario. Compared with SSP2 – 4.5, the total growth period of winter wheat – summer maize rotation system was shortened, the annual yield was increased, and the proportion of winter wheat yield was increased under SSP5 – 8.5 scenario. In the future, winter wheat yield was mainly positively correlated with solar radiation, daily mean temperature, and cumulative precipitation during the whole growing season. However, the increase of daily mean temperature and cumulative precipitation was unfavorable to yield increase in 2080s under the SSP5 – 8.5 scenario. Summer maize experienced the similar changes as winter wheat under future climate change, but daily mean temperature had a negative effect on maize yield. Based on the random forest model, the length of winter wheat reproductive stage and accumulated precipitation in the whole growing season had the greatest impacts on winter wheat yield. At the same time, CO₂ concentration, daily average temperature, and accumulated precipitation in the whole growing season had the greatest impacts on summer maize yield. Future climate change would prolong winter wheat reproductive stage and shorten summer maize reproductive stage, but increase winter wheat and summer maize yields in the Huang – Huai – Hai Plain. However, the positive effects of temperature and precipitation on crop yield would become negative over time, resulting in a reduction of summer maize yield in 2080s under the SSP5 – 8.5 scenario. In general, crop yield mainly would depend on the synergistic effect of climate change and the change of crop growing stage. The results would provide a scientific base and theoretical guidance for the management and the adaption to future climate change of the rotation system of winter wheat and summer maize in the Huang – Huai – Hai Plain of China.

Key words: winter wheat; summer maize; phenology; yield; climate change; Huang – Huai – Hai Plain

0 引言

由气候变化引起的温度升高、极端降雨、极端干旱等气象灾害事件发生的频率、强度和持续时间都在增加,可能会对全球生态系统、农业生产以及社会经济造成不利影响^[1]。据联合国政府间气候变化专门委员会预测,到 21 世纪末,全球地表温度将升高 3 ~ 6℃,降雨量将增加 12% ~ 14%,这将加剧未来农业生产的压力。同时,近年来我国主要粮食作物产区出现产量停滞现象,其中超过 32% 的小麦和玉米种植地区出现产量停滞不前的问题^[2]。因此,提高粮食单产、减缓气候变化的不利影响是保障我国粮食安全的有效途径。黄淮海平原是我国主要粮食生产区之一,粮食播种面积和粮食产量分别占全国的 28.79% 和 29.77%,其中小麦、玉米播种面积分别占全国播种面积的 71% 和 31%^[3]。因此,深入了解未来气候变化对黄淮海地区冬小麦-夏玉米轮

作系统生产力的影响及其主要影响因素,将有利于合理制定气候变化适应措施,保障我国粮食安全^[4]。已有研究表明气候变暖加速了作物物候发育,造成生育期缩短,从而减少作物光合作用和生物量积累的持续时间,对作物生长发育产生一定的负面影响^[5]。在过去几十年里,华北平原温度升高对玉米产量产生了负面影响,其中 1981—2009 年气候变暖使玉米产量每年下降 0.1% ~ 0.3%^[6]。然而气候变化对作物的生产也有一定的积极影响,例如华北平原过去 40 年小麦-玉米轮作体系产量增加 4% ~ 6%,这可能一方面是因为部分耐热晚熟作物品种在一定程度上能够缓解气候变化的不利影响^[7],另一方面是得益于太阳辐射和 CO₂ 浓度的升高,作物通过提高光合作用速率来增加产量,从而抵消热胁迫带来的负效应^[8]。在未来时段下,史鑫蕊等^[9]发现早熟和晚熟小麦产量都将增加,且在 RCP8.5 条件下 2081—2100 年最高;在黄淮海平原

冬小麦和夏玉米预计将增产,且夏玉米在 RCP8.5 情景下会出现减产趋势^[10],但其未揭示气候因子和生长期变化对作物生产的协同效应。为进一步解释气候要素对作物产量的影响,大量研究通过回归分析建立了产量与作物生育期内气候要素间的关系。例如,史印山等^[11]通过多项式拟合分析了 1951—2006 年冬小麦气候产量与气温和降雨的关系;XIAO 等^[12]将小麦和玉米的年份间产量变化与气候要素变化进行多元线性回归。尽管多元线性回归模型能够反映作物产量与气候要素之间的大致相关关系,但由于作物产量与气候要素之间的关系非常复杂,且对气候变化的响应多呈现非线性关系,因此建立的多元线性回归模型可能在反映气候要素的影响方面存在偏差,而基于统计模型的机器学习算法能够较好地模拟作物产量与气候因子之间的非线性关系。目前,已有大量研究分析了气候变化对小麦、玉米产量的影响,但大多数研究聚焦于单一作物,较少针对冬小麦-夏玉米轮作系统开展研究;且多数研究往往只使用单个全球气候模型(Global climate model,GCM)预测的未来气象数据,因此忽略了全球气候模式所产生的预测结果不确定性^[13-14]。更重要的是,气候变化对作物产量的影响非常复杂,气候变暖会加速作物生长,缩短作物生长期,对作物生产具有负效应,但一定程度的温度升高和辐射增加又会对作物生产具有一定的正效应,二者对作物产量作用的复合效应尚不十分明确。

本研究基于最新的 CMIP6 数据集,将 10 个不同 GCMs 产生的降尺度数据作为未来气象数据来驱动校准后的 APSIM 模型,模拟分析 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 两种温室气体排放情景下黄淮海地区冬小麦-夏玉米轮作系统在 2021—2060 年(2040s)和 2061—2100 年(2080s)的作物物候和产量变化,并明确各阶段气候因子变化对作物产量的正负效应,以为当地冬小麦-夏玉米轮作系统高产稳产和适应气候变化提供理论依据和科学指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄淮海平原位于我国华北地区(29°24′~42°36′N,110°21′~122°42′E),是我国冬小麦-夏玉米轮作栽培模式的主要区域(图 1)。黄淮海平原属半湿润暖温带季风气候,光热资源丰富,年平均气温 8~15℃,适合一年两熟种植模式。年累计降雨量 500~600 mm,且 70% 降雨主要集中在 7—9 月,降雨量基本能满足夏玉米需求,但冬小麦生育期内需水量难以满足,冬小麦主要依赖区域开采地下水灌

溉^[15]。根据不同农作制度与气候条件^[16-17],黄淮海平原种植区可划分为 6 个主要分区(图 1a):环渤海二熟区(Zone 1)、太行山山前平原二熟区(Zone 2)、海河平原二熟区(Zone 3)、鲁西平原二熟区(Zone 4)、黄淮平原二熟区(Zone 5)、江淮平原二熟区(Zone 6)。本研究基于国家气象站数据和未来气候情景数据,在 6 个分区共选择 69 个不同气象站点(图 1b)的气象数据驱动作物模型来研究气候变化对当地冬小麦-夏玉米轮作系统生产力的影响。

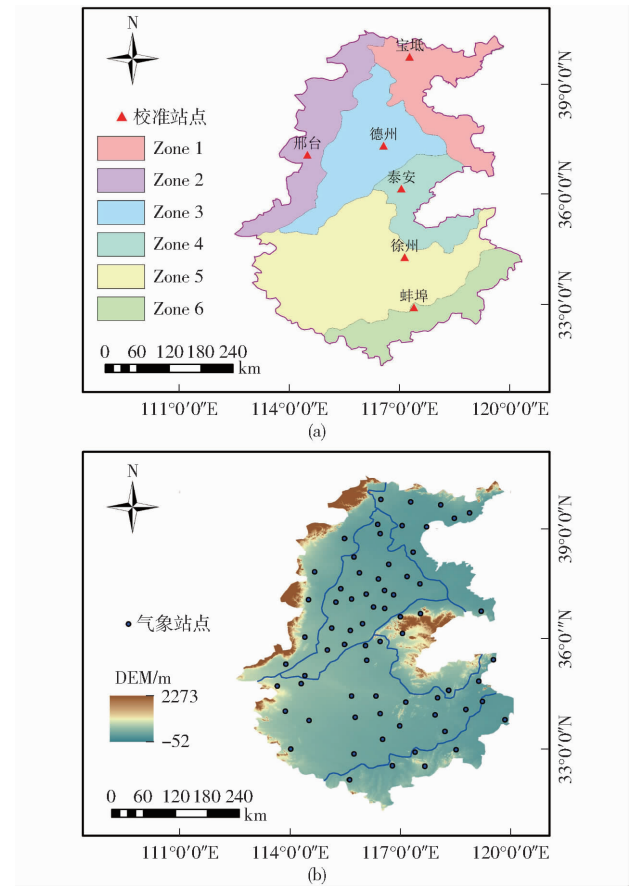


图 1 黄淮海平原冬小麦-夏玉米种植区划及研究所选气象站点

Fig.1 Regionalization of winter wheat - summer maize rotation system and locations of meteorological stations in Huang - Huai - Hai Plain

1.2 土壤数据和作物数据

本研究使用的数据主要包括土壤数据、作物栽培数据、气象数据等,其中土壤数据主要来源于中国土壤数据库及 1:1 000 000 空间土壤数据集(Harmonized world soil database,HWSD),具体包括土壤容重、pH 值、有机碳含量、硝态氮含量等;而不同土层的土壤凋萎系数、田间持水率、饱和含水率等数据,来源于中国土壤水文数据集(<http://westdc.westgis.ac.cn>)^[18]。在黄淮海平原 6 个主要分区内各选取一个代表性站点,即宝坻站(Zone 1)、邢台站(Zone 2)、德州站(Zone 3)、泰安站(Zone 4)、徐州站

(Zone 5)、蚌埠站 (Zone 6) 共 6 个站点,利用这些站点以往进行的大田试验数据对 APSIM 模型的冬小麦和夏玉米品种参数进行校准和验证,以校准和验证后的遗传性状参数作为该分区的代表性作物品种参数。

表 1 黄淮海平原 6 个不同分区内代表性站点信息及数据来源

Tab.1 Information and data sources of representative sites selected in six different zones of Huang – Huai – Hai Plain								
分区	站点名称	经纬度	作物	施氮量/ (kg·hm ⁻²)	灌溉量/ mm	校准年份	验证年份	数据来源
Zone 1	宝坻站	39. 73°N, 117. 28°E	小麦	150	150	2010、2011	2012、2013	国家区试品种报告
			玉米	150	75			
Zone 2	邢台站	37. 07°N, 114. 50°E	小麦	270	120	2008、2009、2011	2012、2013	国家区试品种报告
			玉米	270	60			
Zone 3	德州站	37. 32°N, 116. 57°E	小麦	320	180	2008、2011	2012、2013	国家区试品种报告
			玉米	290	90			
Zone 4	泰安站	36. 15°N, 117. 06°E	小麦	325	80	2005、2006	2007、2008	文献[19]
			玉米	240	40			
Zone 5	徐州站	34. 28°N, 117. 15°E	小麦	165	90	1993、1994、1996	1997、1998、2000	文献[20]
			玉米	190	45			
Zone 6	蚌埠站	32. 92°N, 117. 40°E	小麦	270		2010、2011	2012	国家区试品种报告
			玉米	225				

1.3 气象数据

历史气象数据源于中国气象局 (China Meteorological Administration, <https://data.cma.cn/>), 共收集黄淮海平原 69 个气象站点共 40 年 (1981—2020 年) 的日尺度气象数据, 主要包括最高温 ($T_{\max}$, ℃)、最低温 ($T_{\min}$, ℃)、日照时数、降雨量。由于 APSIM 模型中气象数据驱动包括太阳辐射, 因此需要根据 Angstrom 方程利用气象站数据 (站点纬度和日照时数) 计算每日太阳辐射^[21]。

未来气候预测数据来源于第六次国际耦合模式比较计划 (Coupled model intercomparison project phase 6, CMIP6) 发布的气候预测数据集, 即 CMIP6 数据集, 主要包括: 站点每日太阳辐射、最高温、最低温、降雨量。目前, CMIP6 是最新的耦合模式比较计划, 也是 CMIP 计划自实施以来模式最多、试验最完善、空间分辨率更高的一次比较计划, CMIP6 能够较好地模拟未来气候变化。相较于 CMIP5 的代表性浓度路径情景 (Representative concentration pathways, RCPs), CMIP6 基于共享社会经济路径 (Shared socioeconomic pathways, SSPs) 的排放情景, 加入了对排放轨迹和土地利用变化的描述与量化, 可以更好地综合研究人类社会和自然生态系统的影响与适应性^[22]。由于观测景观、分辨率等因素限制, 全球气候模型自身具有一定的不确定性, 为减小不同排放情景的误差与 GCMs 的不确定性^[23], 更有效地评估气候变化对黄淮海平原冬小麦和夏玉米生产的影响, 本研究使用最新的 CMIP6 数据集, 选取

所选代表性站点的管理栽培数据来源于国家区试品种报告、农气站及国内外已发表文献, 主要包括冬小麦和夏玉米的关键物候期 (播期、开花期、成熟期)、产量^[19-20]以及种植区的管理栽培资料等 (表 1)。

10 个不同 GCM 模型预测的该区域未来气象数据 (表 2), 作为 APSIM 模型在 2021—2060 年 (2040s) 和 2061—2100 年 (2080s) 两个未来时段模拟冬小麦和夏玉米生长的气象驱动数据, 并将最终模拟结果集成分析。首先将月尺度网格数据经空间降尺度转换为气象站点数据, 经偏差校正后, 通过天气发生器生成特定地点的日尺度气象数据, 有关降尺度方法的更多信息, 详见文献[24]。同时, 本研究还考虑了 CO₂ 的施肥效应及 SSP2 – 4. 5 和 SSP5 – 8. 5 两种不同共享社会经济路径排放情景。其中 CO₂ 施肥效应模拟主要通过年际拟合公式计算 SSP2 – 4. 5 和 SSP5 – 8. 5 两种情景下每年的 CO₂ 浓度嵌于 APSIM 模型插件中^[25]; SSP2 – 4. 5 为 RCP4. 5 的更新, 属于中等辐射强迫情景, 预计 2100 年辐射强迫达到

表 2 采用的 10 个全球气候模式信息

Tab.2 Ten global climate models (GCMs) used		
GCM 名称	缩写	国家
ACCESS1. 0	AC1	澳大利亚
BBC – CSM1. 1	BC1	中国
CanESM5	Can1	加拿大
CMCC – CM2 – SR5	CMCS	意大利
CNRM – CM6 – 1	CNR2	法国
MPI – ESM1 – 2 – LR	MPI2	德国
GFDL – CM4	GFD1	美国
UKESM1 – 0 – LL	UKES	英国
INM – CM4 – 8	INM1	俄罗斯
MIROC – ES2L	MIR2	日本

4.5 W/m²;SSP5-8.5 为 RCP8.5 的更新,属于高等辐射强迫情景,预计 2100 年辐射强迫达到 8.5 W/m²。

SSP2-4.5 情景下 CO₂ 浓度计算公式为

$$Y_{CO_2}=62.044+\frac{34.002-3.8702y}{0.24423-1.1542y^{2.4901}}+0.028057(y-1900)^2+0.00026827(y-1960)^3-9.2751\times10^{-7}(y-1910)^4-2.2448(y-2030)$$

(1)

式中 Y_{CO_2} ——不同年份的 CO₂ 浓度
其中 y 为 2021—2100 年,即 y 分别取 2021, 2022, …, 2100。

SSP5-8.5 情景下 CO₂ 浓度计算公式为

$$Y_{CO_2}=757.44+\frac{84.938-1.537y}{2.2011-3.8289y^{-0.45242}}+2.4712\times10^{-4}(y+15)^2+1.9299\times10^{-5}\times(y-1937)^3+5.1137\times10^{-7}(y-1910)^4$$

(2)

1.4 APSIM 模型适用性评价

APSIM 作物模型是澳大利亚联邦科工组织(Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation,CSIRO)和昆士兰政府农业生产研究组(Agriculture Production System Research Unit,APSRU)共同开发的农业生产系统模拟模型^[25]。APSIM 由相互关联的气象模块、土壤模块、作物模块、管理模块等组成,这些模块描述了作物生长对土壤水分、土壤养分、有机质、天气和管理之间的生物物理响应。

表 3 研究区冬小麦-夏玉米主要品种参数

Tab.3 Calibrated genetic parameters of winter wheat and summer maize cultivars used in APSIM model								
作物	参数类型	品种参数	数值					
			Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5	Zone 6
冬小麦	物候参数	始花期积温 (TT_floral_initiation)/(℃·d)	605	608	596	615	672	661
		开始灌浆阶段积温 (TT_start_grain_fill)/(℃·d)	606	635	578	685	602	602
		春化指数 (Vern_sens)	2.15	2.70	2.38	3.50	2.40	2.40
		光周期指数 (Photop_sens)	1.50	2.85	2.50	3.20	2.40	3.50
	产量参数	潜在灌浆速率 (Potential_grain_filling_rate)/(mg·粒 ⁻¹ ·d ⁻¹)	0.0045	0.0033	0.0035	0.0028	0.0030	0.0045
		单位茎重籽粒数 (Grains_per_gram_stem)/(粒·g ⁻¹)	36	29	25	27	23	34
最大籽粒质量 (Max_grain_size)/g		0.042	0.042	0.039	0.030	0.045	0.047	
夏玉米	物候参数	出苗至拔节结束积温 (TT_emerg_to_endjuv)/(℃·d)	110	130	121	185	200	211
		拔节结束至始花期积温 (TT_endjuv_to_init)/(℃·d)	118	128	122	38	39	42
		花期至成熟期积温 (TT_flower_to_maturity)/(℃·d)	690	850	762	744	775	816
		光周期临界值1 (Photoperiod_crit1)/h	14.5	14.5	15.0	12.1	12.3	11.8
		光周期斜率 (Photoperiod_slope)/(℃·h ⁻¹)	21.0	21.5	21.5	18.0	15.0	15.0
	产量参数	辐射利用效率 (Rue)/(g·MJ ⁻¹)	2.45	2.28	2.10	2.05	2.00	2.40
		最大籽粒系数 (GNmaxCoef)	182	175	187	183	148	196

1.5 冬小麦-夏玉米轮作系统模拟设置

根据黄淮海平原农业气象站的作物物候记录数据,确定 6 个分区的冬小麦、夏玉米多年的品种和平均播种日期(表 4),并以 APSIM 模型模拟的作物生

通过输入的逐日气象数据和土壤特性来模拟以天为步长的土壤-植物-大气连续体过程,并能够及时记录作物的生长发育时期、叶面积、生物量、作物产量以及土壤水氮含量的动态变化。APSIM 模型通过大量数据对全球不同气候条件下、不同种植系统、不同作物进行了校准验证^[26]。目前,APSIM 模型是农业领域中广泛使用的基于过程的作物生长模拟模型之一,能够较好地模拟不同种植制度下作物生长发育和产量形成过程^[11, 26-29]。有关 APSIM 模型的详细介绍及操作可在其官方网站(<http://www.apsim.info>)查看。

作物模型虽然应用广泛,但应用于新的生长环境前需对模型进行校准和验证,以减小模型的模拟误差,确保作物模型的模拟精度。通常,作物模型的参数取值及输入数据的可靠性都会严重影响模型的模拟性能^[29-30]。本研究通过常用的试错法,基于每个分区代表性站点的田间试验数据分别对 6 个分区进行参数校准和模型验证。采用决定系数(R^2)、均方根误差(RMSE)作为 APSIM 模型模拟性能的评估指标。共选取 6 个代表性站点 3 年以上的观测数据(表 1),前 2 年或前 3 年的田间试验数据用于 APSIM-Wheat 和 APSIM-Maize 模型参数校准,剩余年份数据用于模型验证,并将经过校准验证后的遗传性状参数作为该分区的代表性作物品种参数(表 3)。

理成熟期作为冬小麦、夏玉米的成熟收获期。在未来多年长时间序列模拟中,为保证作物发芽出苗,模型中设置作物播种前土壤初始含水率为 50% 的田间持水率,同时为避免长期模拟使得根系土壤缺水

严重,模拟时每年对土壤初始含水率进行重置。由于冬小麦生育期为 220 ~ 250 d,夏玉米生育期为 100 ~ 110 d^[31],在冬小麦-夏玉米轮作系统中,由于气候及周围环境的变化,冬小麦的收获时间可能与夏玉米的播种时间冲突,因此在 APSIM 模型中,为保证两熟作物生产及机械收获需要,冬小麦的最晚收获时间设定在夏玉米播种前 3 d,若冬小麦在夏玉米常规播期前成熟,则按照冬小麦成熟期正常收获。未来时段冬小麦和夏玉米的种植密度参照当地的常规栽培措施,分别为 300 株/m² 和 6 株/m²;灌溉施肥数据综合参考调查数据及当地多年常规种植技术设定^[19-20,32],冬小麦生长季内灌溉 2 次,夏玉米生长季灌溉 1 次(表 1)。

表 4 黄淮海平原 6 个分区的冬小麦-夏玉米代表性栽培品种及其平均播期

Tab.4 Representative cultivars for winter wheat and summer maize and sowing dates in six sub-regions of Huang - Huai - Hai Plain				
分区	冬小麦		夏玉米	
	品种	多年平均播期	品种	多年平均播期
Zone 1	中麦 175	10 月 5 日	京单 28	6 月 20 日
Zone 2	石 4185	10 月 10 日	郑单 958	6 月 10 日
Zone 3	石 4185	10 月 15 日	郑单 958	6 月 15 日
Zone 4	济麦 22	10 月 10 日	农大 108	6 月 20 日
Zone 5	周麦 18	10 月 10 日	郑单 958	6 月 10 日
Zone 6	周麦 18	10 月 15 日	郑单 958	6 月 25 日

1.6 未来气候变化趋势分析

区域气候是作物关键物候期及产量形成过程的重要因素,气候变化通过温度、降雨量及太阳辐射等主要气候要素的波动变化影响作物生长发育过程。为了解未来气候变化情景下冬小麦和夏玉米的生育期内气候要素变化,需要通过气候倾向率表征各气候要素的时间变化趋势,本研究采用最小二乘法进行估计,建立各气候要素与时间的一元线性回归模型^[13]

$$x_i = at_i + b \tag{3}$$

式中 x_i ——各气候要素年均值(其中降雨量为年累计降雨量)

t_i ——未来时段的年份,取 1、2、⋯、 n

a ——线性回归模型拟合参数

b ——常数

以 10 a 表示该气候要素每 10 年中的平均变率,平均变率大于 0 时,表明该气候要素在未来呈现增加趋势,小于 0 则表明其呈现减小趋势。

1.7 作物产量与气候要素之间关系及重要性分析

进一步分析未来不同排放情景和时段中作物产量与气候要素间的线性关系,量化未来时段各气候

要素变化趋势对冬小麦、夏玉米产量的正负效应。首先,通过一阶差分法(后一年作物产量与前一年作物产量之差)减少或消除时间序列中相邻年份间相同因素造成的产量影响,能够客观反映作物产量的年际变化^[33-34]。由于 CO₂ 浓度与温度相关性较高,未将其进行回归分析。将去趋势后的作物产量与气候因子(太阳辐射 R 、生育期均温 T_{mean} 、累计降雨量 P)进行多元线性回归^[12],可得

$$\Delta Y = a_1 \Delta R + b_1 \Delta T_{\text{mean}} + c_1 \Delta P + \varepsilon \tag{4}$$

式中 ΔY ——年份间产量差值,kg/hm²

ΔR ——年份间作物生长季内太阳辐射差值, MJ/m²

ΔT_{mean} ——年份间作物生长季内均温差值,℃

ΔP ——年份间作物生长季内累计降雨量差值,mm

$a_1、b_1、c_1$ ——对应的回归系数

ε ——回归方程截距

随机森林回归是一种基于多棵分类回归树的集成学习方法,通过自助法(Bootstrap)有放回地从初始样本集随机采样,得到构建多颗决策树所需的多个采样集,而未被抽取的数据称为袋外数据(Out-of-bag, OOB)。在生成决策树时,将随机选择少量解释变量作为特征。使用随机森林算法计算特征变量重要程度时,通常是对某个特征的袋外数据误差增加程度进行评估。本研究中,使用 R 语言中 random forest 包实现特征变量的重要性排序。以作物产量作为因变量,3 个气候要素(太阳辐射、生育期均温、累计降雨量)、CO₂ 浓度及生殖生长期(Reproductive growth period, RGP)作为输入自变量,并根据 %IncMSE 指标(The increase in mean squared error)对 5 个自变量进行重要性排序。其中,%IncMSE 值越大表明特征扰动所导致的误差增加越大,其特征变量越重要,反之亦然。

2 结果与分析

2.1 APSIM 模型校准和验证

总体而言,冬小麦和夏玉米开花期和成熟期的模拟值与观测值大致都分布在 1:1 线上,其模拟值线性回归的决定系数 R^2 均大于 0.80,整体模拟效果较好(图 2a、2b、2d、2e)。开花期和成熟期的模拟值与观测值之间的差异小于 4 d,说明整体上模拟结果与观测数据较为吻合。冬小麦和夏玉米模拟产量与实测产量间的平均差异均小于 700 kg/hm²,夏玉米产量的模拟值线性回归的 R^2 稍低(图 2f),仅为 0.56,但整体模拟效果良好。因此,可以认为 APSIM

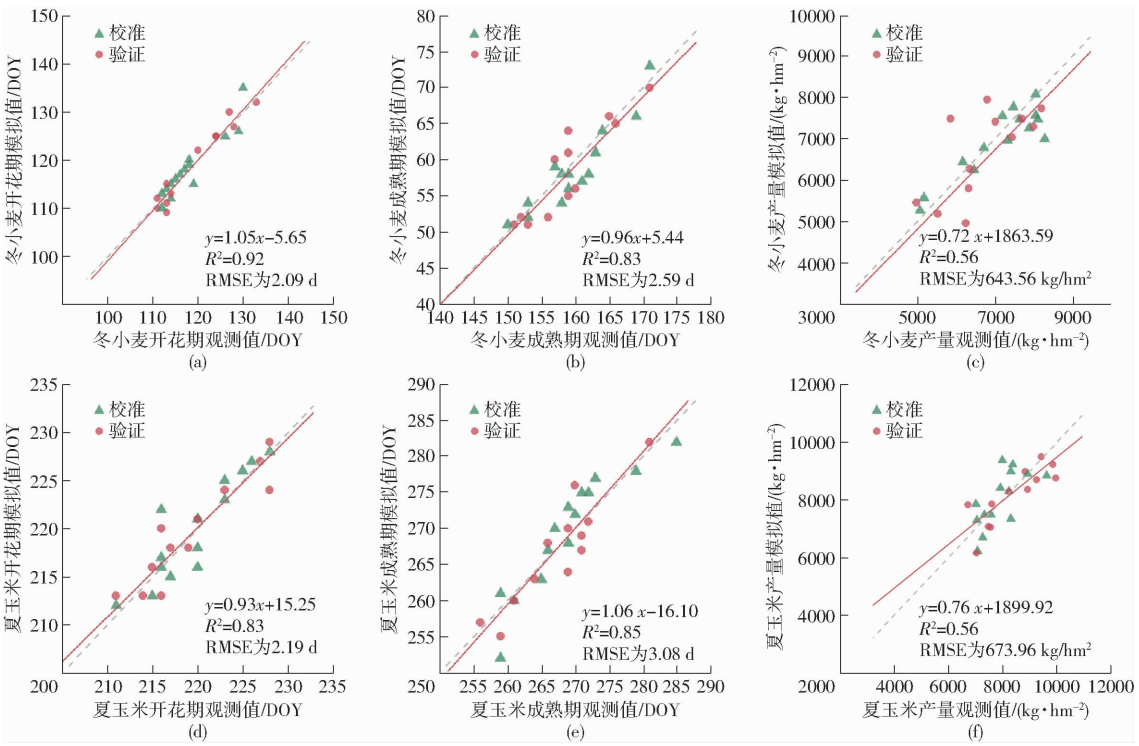


图 2 APSIM 模型校准和验证过程中不同品种冬小麦和夏玉米开花期、成熟期和产量模拟结果
Fig. 2 Comparisons between observed and simulated flowering and maturity dates and yields of different winter wheat and summer maize cultivars in processes of calibration and validation of APSIM model

模型模拟黄淮海平原冬小麦-夏玉米轮作系统作物物候期和产量可靠性较高,可用于后期气候变化背景下的多年生长模拟。

2.2 未来气候变化情景下农业气候变化趋势

未来在 SSP2-4.5 情景下 2040s 和 2080s 时段,冬小麦、夏玉米生育期内平均日辐射均呈增加趋势;SSP5-8.5 情景下 2040s 和 2080s 时段,夏玉米生育期内平均日辐射也呈增加趋势,但冬小麦呈减小趋势,且在 2080s 减小最为显著,倾向率为 $-0.08 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot 10\text{a})$ (图 3a、3b,图中蓝色、红色直线为 SSP2-4.5 (SSP245) 和 SSP5-8.5 (SSP585) 情景下各气候因子的回归线,灰色区间为回归线的 95% 置信区间;表 5)。未来不同情景时段下,冬小麦、夏玉米全生育期内降雨量年际变化较大,线性变化趋势不明显。除 SSP5-8.5 情景下 2080s 时段,冬小麦全生育期内降雨量呈减小趋势,其他情景时段下,冬小麦、夏玉米全生育期内降雨量均呈增加趋势 (图 3c、3d)。其中,冬小麦在 SSP5-8.5 情景下 2040s 时段增加速率最大,达 $7.13 \text{ mm}/(10\text{a})$,而夏玉米在 SSP2-4.5 情景下 2040s 时段增加速率最大,达 $17.89 \text{ mm}/(10\text{a})$ (表 5)。在 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 情景下所有时段,冬小麦和夏玉米全生育期内的日均最高温 (图 3e、3f)、日均最低温 (图 3g、3h) 均呈上升趋势,且 SSP5-8.5 情景增温幅度明显大于 SSP2-4.5 情景。其中,冬小麦日均

最高温增幅最大达 $0.41^\circ\text{C}/(10\text{a})$,日均最低温增幅最大达 $0.42^\circ\text{C}/(10\text{a})$;夏玉米日均最高温增幅最大达 $0.58^\circ\text{C}/(10\text{a})$,日均最低温增幅最大可达 $0.76^\circ\text{C}/(10\text{a})$ (表 5)。整体而言,未来黄淮海地区冬小麦全生育期内升温趋势显著,且日均太阳辐射在 SSP2-4.5 情景下呈增加趋势,在 SSP5-8.5 情景下呈减小趋势;年累计降雨量除在 SSP5-8.5 情景 2080s 时段略有降低外,其他情景均呈增加趋势。不同于冬小麦,在未来不同排放情景下和时段内,夏玉米全生育期内日均太阳辐射、年累计降雨量、日均最高温、日均最低温均呈增加趋势。

2.3 冬小麦-夏玉米物候期和产量对气候变化的响应

2.3.1 基准期 (1981—2020 年) 冬小麦-夏玉米物候期和产量

本研究模拟了黄淮海地区 69 个站点 1981—2020 年的冬小麦-夏玉米开花期、成熟期及产量,将其作为基准期结果,以分析未来气候变化对冬小麦-夏玉米生产的影响 (图 4)。1981—2020 年,大部分站点冬小麦营养生长期为 $189.2 \sim 202.3 \text{ d}$,生殖生长期为 $38.1 \sim 40.5 \text{ d}$,产量为 $5790 \sim 6817 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 。北部地区冬小麦营养生长期和产量大于南部,生殖生长期则反之。大部分站点夏玉米营养生长期为 $51.9 \sim 54.2 \text{ d}$,生殖生长期为 $43.9 \sim 48.3 \text{ d}$,产量为 $7714 \sim 8850 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 。北部地区夏玉米的营养生长期、生殖生长期以及产量均大于南部地区。

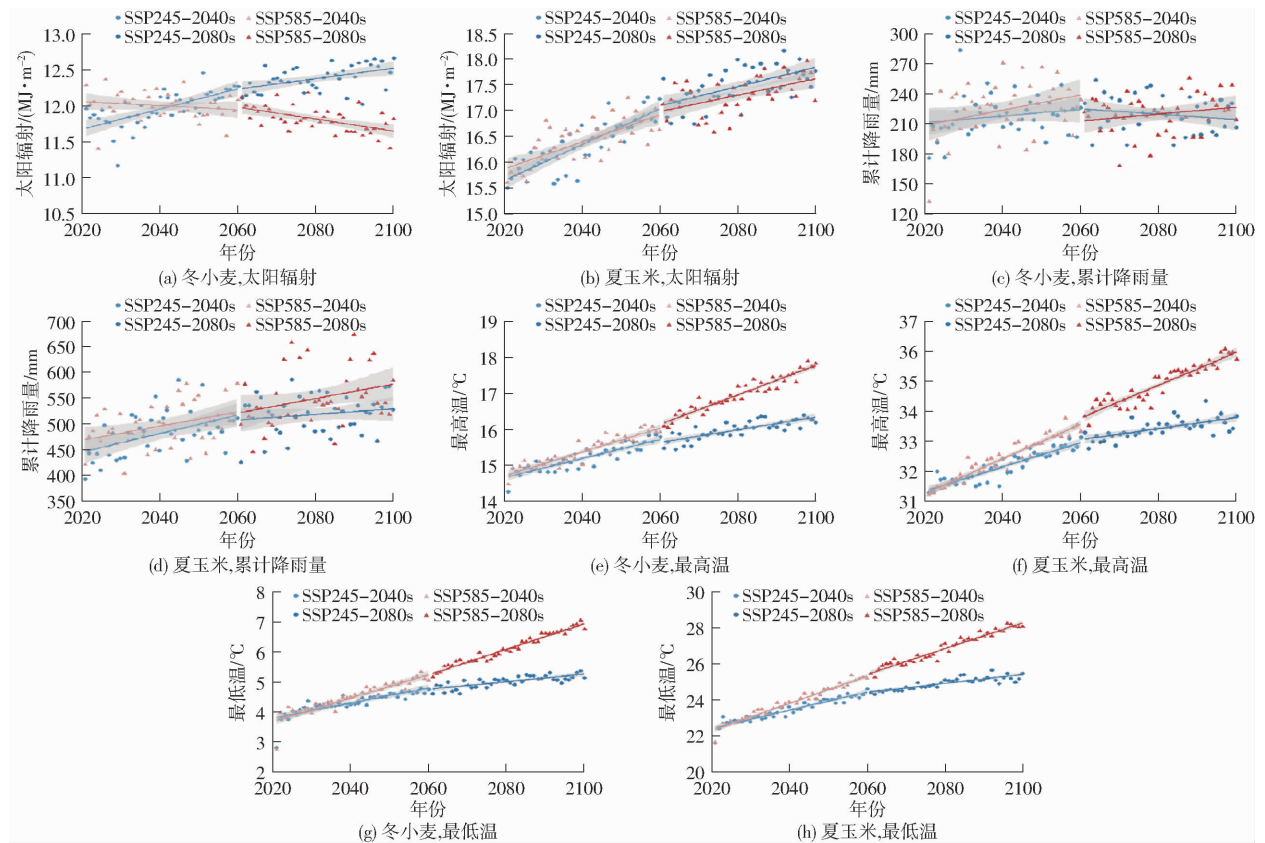


图3 2021—2100年SSP2-4.5和SSP5-8.5情景下黄淮海地区冬小麦和夏玉米全生育期内太阳辐射、
累计降雨量、日最高温度、日最低温度的变化趋势

Fig.3 Trends of climatic variables of solar radiation, accumulative precipitation, daily maximum temperature, and daily mininum temperature during growing seasons of winter wheat and summer maize in Huang-Huai-Hai Plain from 2021 to 2100 under greenhouse gas emission scenarios of SSP2-4.5 and SSP5-8.5

表5 2021—2100年SSP2-4.5和SSP5-8.5情景下黄淮海冬小麦-夏玉米全生育期内气候因子变化趋势
Tab.5 Trends of climatic variables during whole growing seasons of winter wheat and summer maize in Huang-Huai-Hai Plain from 2021 to 2100 under SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios

作物	情景	时段	太阳辐射/ (MJ·m ⁻² ·(10 a) ⁻¹)	累计降雨量/ (mm·(10 a) ⁻¹)	最高温/ (℃·(10 a) ⁻¹)	最低温/ (℃·(10 a) ⁻¹)
冬小麦	SSP2-4.5	2040s	0.14 ***	3.04	0.27 ***	0.25 ***
		2080s	0.07 **	-2.59	0.18 ***	0.13 ***
	SSP5-8.5	2040s	-0.03	7.13 *	0.33 ***	0.39 ***
		2080s	-0.08 ***	3.08	0.41 ***	0.42 ***
夏玉米	SSP2-4.5	2040s	0.35 ***	17.89 ***	0.41 ***	0.51 ***
		2080s	0.19 ***	5.58	0.19 ***	0.25 ***
	SSP5-8.5	2040s	0.26 ***	13.86 *	0.58 ***	0.76 ***
		2080s	0.16 ***	14.08	0.55 ***	0.72 ***

注:变化趋势为该要素10 a的平均变率;***表示 $p < 0.001$,**表示 $p < 0.01$,*表示 $p < 0.05$,下同。

2.3.2 未来(2021—2100年)冬小麦-夏玉米物候期和产量变化

本研究分析了SSP2-4.5和SSP5-8.5两种不同排放情景下未来时段(2021—2100年)冬小麦、夏玉米及轮作系统生长期和产量对气候变化的响应(图5~7)。与基准期(1981—2020年)相比,在SSP2-4.5和SSP5-8.5情景下,黄淮海平原大部分地区冬小麦营养生长期缩短,生殖生长期延长,产

量分别平均增加约20.15%和27.09%(图5、8)。其中,在SSP2-4.5情景下2040s和2080s时段,大部分地区冬小麦营养期分别平均缩短3.84~6.87 d和12.34~15.28 d,生殖生长期分别延长0.38~1.64 d和1.06~2.50 d,产量分别增加196.2~1455.3 kg/hm²和863.4~2262.9 kg/hm²。在SSP5-8.5情景下2040s和2080s时段,黄淮海平原大部分地区冬小麦营养期分别平均缩短5.57~8.74 d和

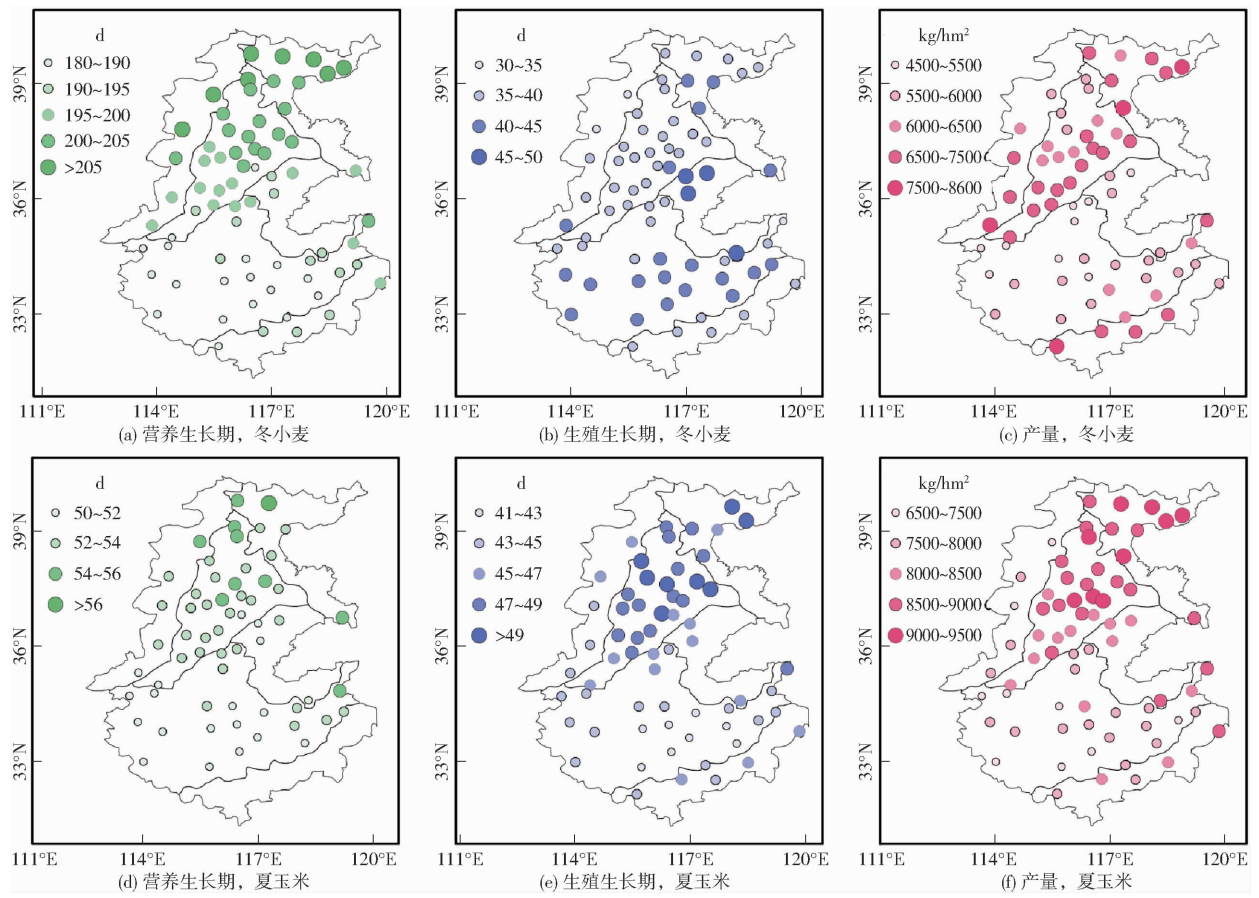


图 4 基准期(1981—2020 年)黄淮海平原冬小麦-夏玉米营养生长期、生殖生长期及产量空间分布

Fig.4 Geographic distributions of lengths of vegetative growth period and reproductive growth period, and yields of winter wheat and summer maize in Huang-Huai-Hai Plain in baseline period (1981—2020)

23.89 ~ 27.92 d, 生殖生长期分别延长 0.28 ~ 1.51 d 和 2.92 ~ 4.21 d, 产量分别增加 398.1 ~ 1 724.5 kg/hm² 和 1 048.5 ~ 2 982.8 kg/hm² (图 8)。在空间上, 生长期和产量的变化存在明显差异, 营养生长期缩短在最南部的江淮平原最为明显; 生殖生长期延长整体在南部地区较为明显; 产量增幅主要在中北部最大, 其中 SSP5 - 8.5 情景下 2080s 时段冬小麦产量在西南部增幅最大。

与基准期(1981—2020 年)相比, 在 SSP2 - 4.5 和 SSP5 - 8.5 情景下, 黄淮海平原大部分地区夏玉米营养生长期缩短, 生殖生长期缩短, 产量分别平均增加约 10.14% 和 8.45% (图 6、8)。其中, 在 SSP2 - 4.5 情景下 2040s 和 2080s 时段, 黄淮海平原大部分地区夏玉米营养期分别平均缩短 3.12 ~ 4.45 d 和 4.41 ~ 6.02 d, 生殖生长期分别缩短 5.01 ~ 6.54 d 和 6.81 ~ 9.37 d, 产量分别增加 579.6 ~ 1 070.2 kg/hm² 和 555.4 ~ 1 162.7 kg/hm²。在 SSP5 - 8.5 情景下 2040s 和 2080s 时段, 大部分地区夏玉米营养期分别平均缩短 3.54 ~ 4.87 d 和 5.01 ~ 7.17 d, 生殖生长期分别缩短 5.34 ~ 7.22 d 和 7.98 ~ 11.70 d, 产量分别增加 544.7 ~ 999.2 kg/hm² 和 309.9 ~ 971.6 kg/hm² (图 8)。在空间上, 夏玉米营养生长期缩短在最南

部的江淮平原最为明显, 生殖生长期缩短在西南部较为明显, 西南部产量增加较为明显。

与基准期(1981—2020 年)相比, 黄淮海平原大部分地区冬小麦-夏玉米轮作系统的周年营养生长期缩短, 周年生殖生长期缩短, 周年产量增加(图 7)。其中, 在 SSP2 - 4.5 情景下 2040s 和 2080s 时段, 分别有 33 个站点和 62 个站点周年营养生长期缩短 9.5 ~ 29.5 d, 主要在海河平原和黄淮平原; 分别有 42 个站点和 44 个站点周年生殖生长期缩短 3.5 ~ 8 d, 主要集中在海河平原等中部地区; 分别有 41 个站点和 47 个站点周年总产量增加 1 250 ~ 3 000 kg/hm², 主要集中在西北部地区。SSP5 - 8.5 情景下轮作系统生产力的空间变化规律与 SSP2 - 4.5 类似, 但变化更明显。在 SSP5 - 8.5 情景下 2040s 和 2080s 时段, 分别有 49 个站点和 21 个站点周年营养生长期缩短 9.5 ~ 29.5 d, 主要在海河平原和黄淮平原; 分别有 48 个站点和 31 个站点周年生殖生长期缩短 3.5 ~ 8 d; 分别有 46 个站点和 32 个站点周年总产量增加 1 250 ~ 3 000 kg/hm²。

在 SSP2 - 4.5 和 SSP5 - 8.5 情景下, 黄淮海平原冬小麦-夏玉米轮作系统的周年全生育期平均值分别为 315.30 d 和 307.61 d (图 9, 图中 *r* 表示冬小

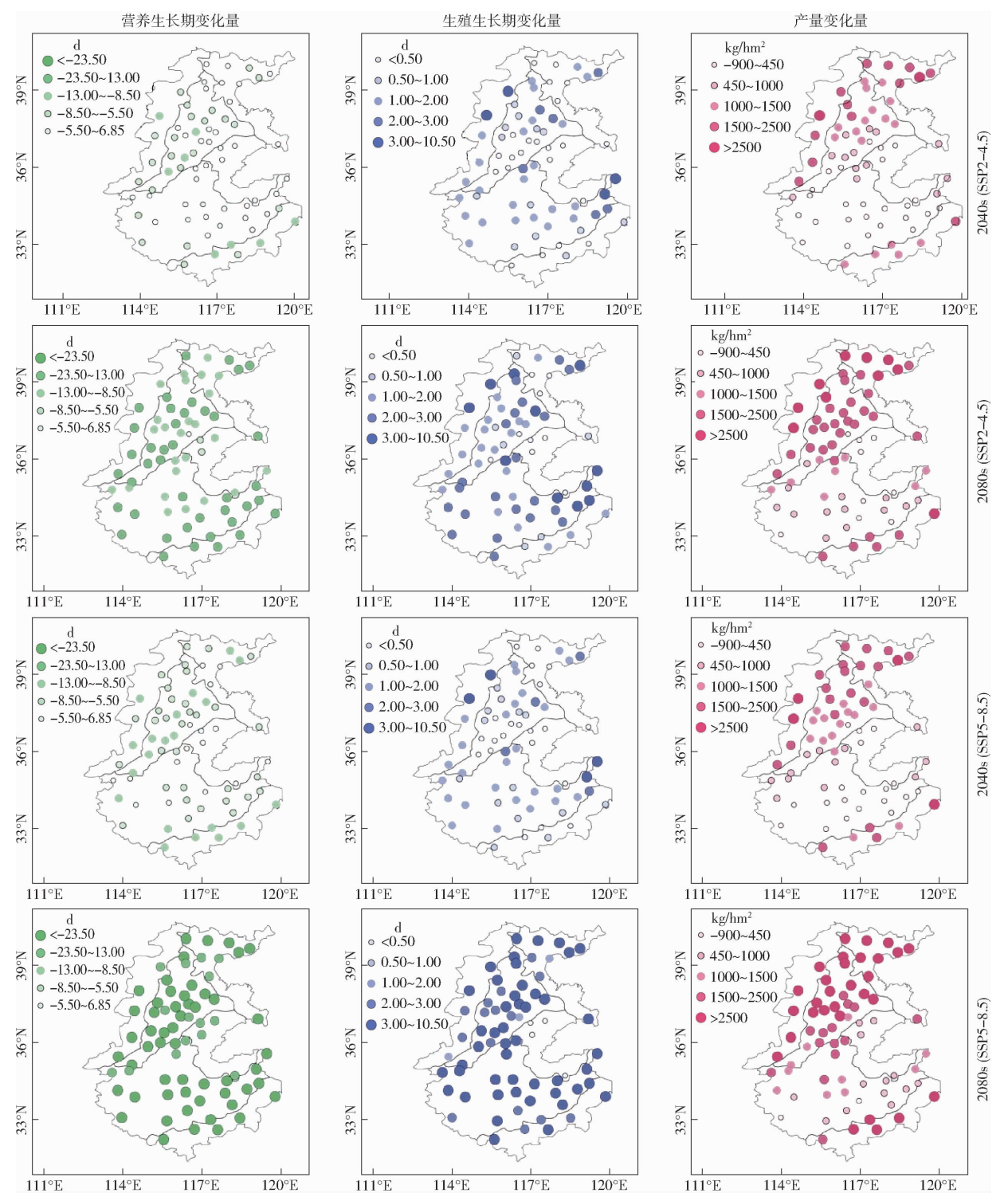


图5 与基准期(1981—2020年)相比SSP2-4.5和SSP5-8.5温室气体排放情景下2021—2100年黄淮海地区冬小麦营养生长期/生殖生长期及产量时空变化

Fig.5 Temporal and spatial changes of vegetative growth period, reproductive growth period, and yields of winter wheat in period of 2021—2100 under two greenhouse gas emission scenarios of SSP2-4.5 and SSP5-8.5 in contrast to base period (1981—2020)

麦生长期和产量与周年生长期和周年总产量的比值),其中冬小麦全生育期平均分别为227.67 d和221.55 d,分别占周年全生育期的72.2%和72.0%;周年总产量平均分别为16 614.75 kg/hm²和16 902.92 kg/hm²,其中冬小麦产量平均分别为7 545.41 kg/hm²和7 979.93 kg/hm²,分别占周年总

产量的45.4%和47.2%。

2.4 作物产量与气候因子间相关性和重要性分析

通过在作物产量与全生育期内各气候因子间建立多元线性回归模型,能够获取作物产量对未来气候因子变化的响应关系。研究结果表明:在SSP2-4.5情景下2040s和2080s时段,冬小麦产

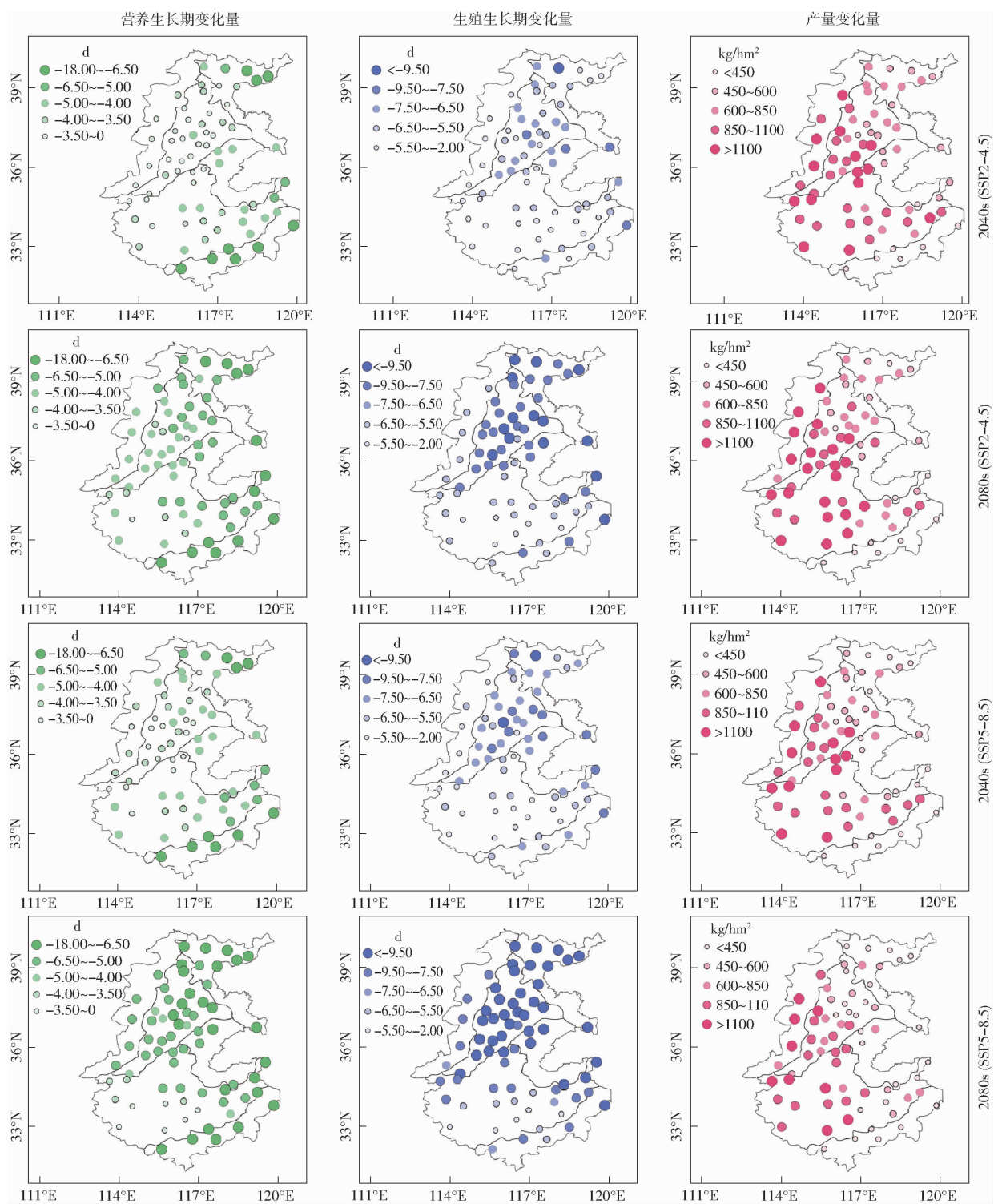


图 6 与基准期(1981—2020 年)相比 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 温室气体排放情景下黄淮海地区 2021—2100 年夏玉米营养生长期、生殖生长期及产量时空变化

Fig. 6 Temporal and spatial changes of vegetative growth period, reproductive growth period, and yield of summer maize in period of 2021—2100 under two greenhouse gas emission scenarios of SSP2-4.5 and SSP5-8.5 in contrast to base period (1981—2020)

量与各气候因子均存在正相关关系(表 6);但随着辐射强迫的增加,均温和降雨量的增加不利于作物增产,即在 SSP5-8.5 情景下 2080s 时段,冬小麦产量与生育期内的均温和降雨量负相关。不同于冬小麦,在未来两个情景时段下,夏玉米产量

均与均温 T_{mean} 显著负相关,说明未来气候变暖可能加大夏玉米遭受热胁迫的风险,从而导致减产。同时,在 SSP5-8.5 情景下 2080s 时段,夏玉米产量主要与生育期内的均温和降雨量显著负相关,表明过多的降雨可能会进一步降低夏玉米产量。

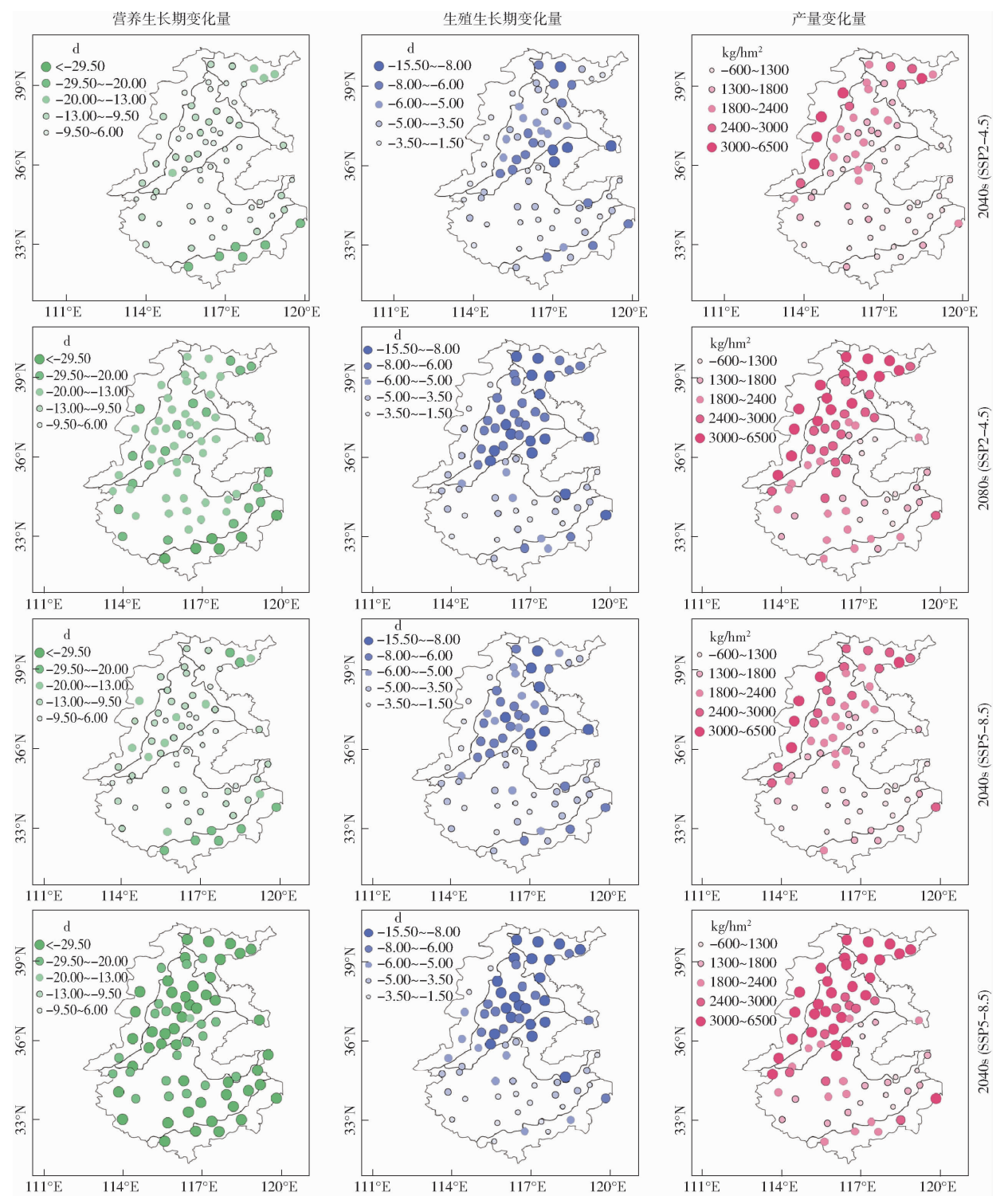


图7 与基准期(1981—2020年)相比 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 温室气体排放情景下黄淮海地区 2021—2100 年冬小麦-夏玉米轮作系统周年营养生长期、周年生殖生长期及周年产量时空变化

Fig.7 Temporal and spatial changes of vegetative growth period, reproductive growth period, and yield of winter wheat-summer maize rotation system in period of 2021—2100 under two greenhouse gas emission scenarios of SSP2-4.5 and SSP5-8.5 in contrast to base period (1981—2020)

通过随机森林算法构建拟合模型后,根据输出的%IncMSE 指标对 5 个自变量进行重要性排序(图 10)。结果表明:生殖生长期和降雨量对冬小麦产量影响最大,CO₂ 浓度的重要性次之;但随着时间发展,降雨量的重要性降低,生殖生长期和均

温对冬小麦产量的影响会进一步加大(图 10)。这表明未来时段冬小麦产量可能主要取决于其生殖生长期和生育期内均温的变化。对于夏玉米,大部分自变量对产量的影响差异不大。在 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 两种情景下 2040s 时段,CO₂ 浓

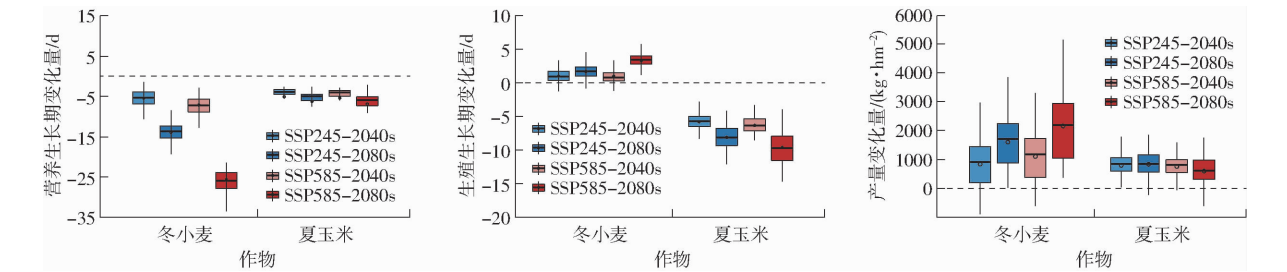


图 8 与基准期(1981—2020 年)相比黄淮海地区所有 69 个站点冬小麦和夏玉米营养生长期、生殖生长期及产量

Fig. 8 Changes of vegetative growth period, reproductive growth period and yield of winter wheat and summer maize in all of 69 sites in Huang - Huai - Hai Plain , in contrast to baseline period of 1981—2020

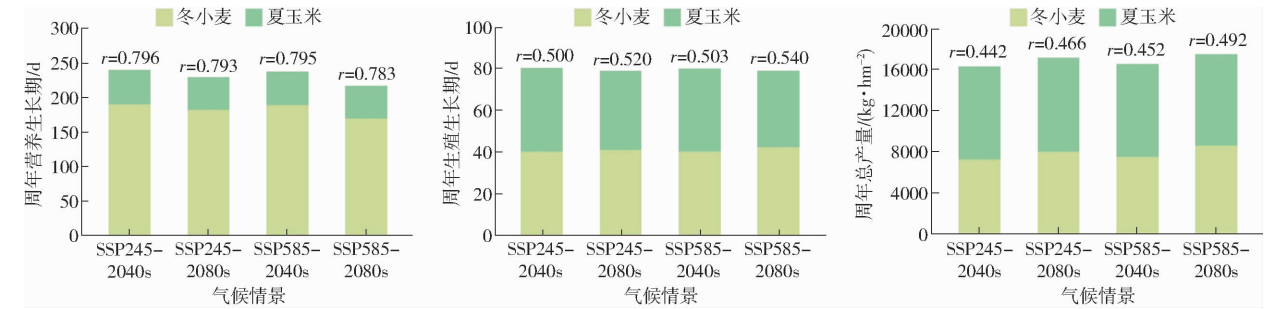


图 9 不同排放情景下黄淮海所有 69 个站点冬小麦-夏玉米轮作系统周年营养生长期、周年生殖生长期及周年总产量

Fig.9 Annual vegetative growth period, annual reproductive growth period and annual yield of winter wheat - summer maize rotation system in all of 69 sites in Huang - Huai - Hai Plain under different emission scenarios

表 6 黄淮海地区在不同排放情景和不同时期下冬小麦和夏玉米产量与气候因子之间的多元回归分析结果
Tab.6 Multiple regression analyses of yields of winter wheat - summer maize and climatic factors in Huang - Huai - Hai Plain in different periods under different greenhouse gas emission scenarios

情景时段	自变量	冬小麦			夏玉米		
		非标准化	标准化	方差膨胀	非标准化	标准化	方差膨胀
		回归系数	回归系数	因子	回归系数	回归系数	因子
SSP2 - 4.5 2040s	常数(Intercept)	33. 634 ***	$8. 792 \times 10^{-17}$		15. 106 *	$- 2. 113 \times 10^{-17}$	
	辐射变化量(Rs_change)	262. 955 ***	0. 226 ***	1. 083	207. 842 ***	0. 304 ***	1. 289
	均温变化量(Tmean_change)	172. 225 ***	0. 078 ***	1. 080	- 475. 243 ***	- 0. 421 ***	1. 253
	累计降雨变化量(Prec_change)	1. 630 ***	0. 144 ***	1. 164	0. 530 ***	0. 097 ***	1. 338
	冬小麦回归方程(Equation)	$\Delta Y = 0. 226 \Delta R + 0. 078 \Delta T_{mean} + 0. 144 \Delta P - 8. 792 \times 10^{-17}$					
	夏玉米回归方程(Equation)	$\Delta Y = 0. 304 \Delta R - 0. 421 \Delta T_{mean} + 0. 097 \Delta P - 2. 113 \times 10^{-17}$					
SSP2 - 4.5 2080s	常数(Intercept)	8. 790	$5. 406 \times 10^{-17}$		10. 838	$- 3. 884 \times 10^{-17}$	
	辐射变化量(Rs_change)	636. 235 ***	0. 301 ***	1. 317	215. 288 ***	0. 313 ***	1. 977
	均温变化量(Tmean_change)	327. 004 ***	0. 122 ***	1. 139	- 586. 578 ***	- 0. 436 ***	1. 532
	累计降雨变化量(Prec_change)	5. 647 ***	0. 400 ***	1. 426	0. 865 ***	0. 205 ***	1. 646
	冬小麦回归方程(Equation)	$\Delta Y = 0. 301 \Delta R + 0. 122 \Delta T_{mean} + 0. 400 \Delta P + 5. 406 \times 10^{-17}$					
	夏玉米回归方程(Equation)	$\Delta Y = 0. 313 \Delta R - 0. 436 \Delta T_{mean} + 0. 205 \Delta P - 3. 884 \times 10^{-17}$					
SSP5 - 8.5 2040s	常数(Intercept)	51. 135 ***	$- 1. 914 \times 10^{-17}$		18. 590 **	$- 3. 712 \times 10^{-17}$	
	辐射变化量(Rs_change)	273. 862 ***	0. 226 ***	1. 234	179. 657 ***	0. 301 ***	1. 291
	均温变化量(Tmean_change)	76. 813	0. 036	1. 308	- 367. 407 ***	- 0. 337 ***	1. 321
	累计降雨变化量(Prec_change)	2. 575 ***	0. 291 ***	1. 531	0. 571 ***	0. 128 ***	1. 559
	冬小麦回归方程(Equation)	$\Delta Y = 0. 226 \Delta R + 0. 036 \Delta T_{mean} + 0. 291 \Delta P - 1. 914 \times 10^{-17}$					
	夏玉米回归方程(Equation)	$\Delta Y = 0. 301 \Delta R - 0. 337 \Delta T_{mean} + 0. 128 \Delta P - 3. 712 \times 10^{-17}$					
SSP5 - 8.5 2080s	常数(Intercept)	39. 925 ***	$1. 882 \times 10^{-17}$		28. 693 ***	$- 8. 388 \times 10^{-17}$	
	辐射变化量(Rs_change)	685. 602 ***	0. 410 ***	1. 491	91. 798 ***	0. 121 ***	1. 825
	均温变化量(Tmean_change)	- 291. 469 ***	- 0. 108 ***	1. 107	- 521. 143 ***	- 0. 453 ***	1. 636
	累计降雨变化量(Prec_change)	- 0. 160	- 0. 014	1. 601	- 0. 685 ***	- 0. 176 ***	1. 960
	冬小麦回归方程(Equation)	$\Delta Y = 0. 410 \Delta R - 0. 108 \Delta T_{mean} - 0. 014 \Delta P + 1. 882 \times 10^{-17}$					
	夏玉米回归方程(Equation)	$\Delta Y = 0. 121 \Delta R - 0. 453 \Delta T_{mean} - 0. 176 \Delta P - 8. 388 \times 10^{-17}$					

度和降雨量对夏玉米产量影响最大;而在 2080s 时段,生育期内均温和 CO₂ 浓度对产量影响最大,生殖生长期的重要性次之。整体上,夏玉米产量主要受 CO₂ 浓度、均温及降雨量的影响,但随着时间

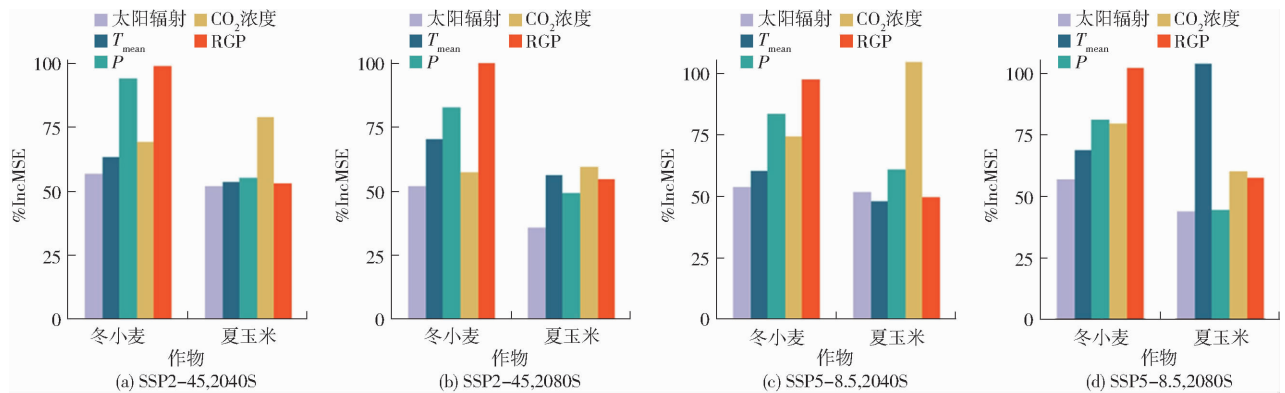


图 10 气候因子及生殖生长期对冬小麦和夏玉米产量影响的重要性排序

Fig. 10 Ranking of importance of climatic factors and lengths of reproductive growth period on yields of winter wheat and summer maize

3 讨论

3.1 未来气候变化对黄淮海冬小麦和夏玉米物候期和产量的影响

全球气候变化对作物生长发育和产量的影响显著,但在不同作物间存在差异^[35]。本研究基于 10 个不同全球气候模式 GCMs 预测的未来气象数据,分析表明整个黄淮海地区冬小麦全生育期内的温度、累计降雨量将会增加,但太阳辐射在 SSP5 - 8.5 情景下呈下降趋势(图 3)。一般来说,升温环境会加速作物生长发育并缩短作物的关键生长期^[36]。由于作物的营养生长期主要指作物开花前的生长阶段,其营养生长期长短主要表现为开花期的变化;而生殖生长期主要指作物开花至成熟的生长阶段,其生殖期长短受限于作物开花期和成熟期的共同变化^[37-38]。在黄淮海地区,相较于基准期(1981—2020 年),未来时段(2021—2100 年)温度升高将导致冬小麦和夏玉米物候期提前,营养生长期缩短,且随着辐射强迫的增加,缩短趋势更加明显(图 8),这与巩敬锦等^[13]的研究结果一致。然而,冬小麦和夏玉米生殖生长期对于气候变化的响应则相反。整体上,未来时段(2021—2100 年)冬小麦生殖生长期将延长,而夏玉米生殖生长期将缩短(图 8),这与 XIAO 等^[12]的研究结果一致。这主要是因为冬小麦一般在每年的 10 月播种,次年 6 月收获,且越冬前是一个持续降温的过程,气候变暖容易使得冬小麦营养生长期缩短,导致生殖生长期发生在相对较低的温度下,从而延长了生殖生长期^[39]。气候变化主要通过缩短冬小麦营养生长期和夏玉米生殖生长期来影响两季作物的周年全生育期,尤其是在 SSP5 -

推移,CO₂ 浓度和降雨量的重要性降低,均温与生殖生长期的重要性将提升(图 10),这表明未来夏玉米产量可能主要取决于生育期内 CO₂ 浓度和均温的变化。

8.5 情景。与 SSP2 - 4.5 情景相比,尽管 SSP5 - 8.5 情景下夏玉米产量出现减产,但冬小麦产量增产幅度更大,产量占比增大,导致周年总产量增加(图 8 和图 9)。

相应地,作物生长过程加速后往往会对作物产量产生重要影响。本研究中,相较于基准期(1981—2020 年),在 SSP2 - 4.5 和 SSP5 - 8.5 情景下,2021—2100 年冬小麦预计将分别平均增产 20.15% 和 27.09%,夏玉米预计分别平均增产 10.14% 和 8.45%。相较于 SSP2 - 4.5 情景,辐射强迫更大的 SSP5 - 8.5 情景下,夏玉米预计将会减产,这与 SHIRAZI 等^[10]的研究结果一致。这主要是因为冬小麦产量主要受生殖生长期和生育期内降雨量的影响,而 SSP5 - 8.5 情景下生殖生长期和生育期内累计降雨量增幅明显大于 SSP2 - 4.5。对于夏玉米,XIAO 等^[12]研究发现在未来情景下,太阳辐射和最低温的增加会对小麦产量具有积极影响,但玉米生殖生长期的缩短可能会降低玉米产量。此外,本研究发现未来气候变化情景下,一定程度的升温 and 降雨量及辐射的增加会有益于作物生产,但温度升高又会缩短作物生长期,加速作物生长从而导致减产,因此作物的最终产量取决于气候因子对作物产量的正效应与作物生长期缩短的负效应的共同作用结果,而非单一因素所决定。

3.2 冬小麦和夏玉米产量与气象因子回归分析和重要性评价

大量研究对作物产量与气候因子之间的关系进行了线性回归分析。例如,LANDAU 等^[40]将不同作物物候阶段的 17 个相对重要变量用于产量回归分析。然而,作物产量与气候因子之间的关系非常复

杂,简单的回归模型不能精确拟合产量与气候因子间的关系。本研究基于多元回归模型分析了作物产量对于生育期内气候因子变化的响应趋势,通过随机森林模型进一步明确气候因子及生殖生长期变化对冬小麦、夏玉米产量的影响,以期进一步了解产量对于气候变化的响应。整体上,冬小麦产量与生育期内太阳辐射、日均温及累计降雨量呈显著正相关关系,但随着辐射强迫的增大及时间的推移,日均温和累计降雨量会转而呈现负相关关系(表 6)。这表明在未来时段,温度的大幅升高及过多的降雨可能会出现高温热害事件^[41-43]、极端降雨等^[44],从而对冬小麦产量造成负面影响。尽管高温和过多降雨会造成一定的减产,但延长的生殖生长期及升高的 CO₂ 浓度又会对冬小麦具有更大的增产作用(图 8 和图 10)。因此,未来时段下冬小麦趋于增产,且 SSP5-8.5 情景下冬小麦增产更大(表 6、图 8 和图 10)。不同于冬小麦,夏玉米始终与生育期内日均温呈显著负相关,随着辐射强迫的增大及时间的推移,生育期内过多的降雨预计会对夏玉米产量产生负效应。与冬小麦相似,在未来时段,温度的大幅升高和过多的降雨同样会对夏玉米产量造成负面影响,这可能是由玉米产量会显著受高温的负面影响所致^[45],气候变化加剧可能会引起夏玉米灌浆期热胁迫及连阴雨等气象灾害事件频发,导致夏玉米在 SSP5-8.5 情景下 2080s 时段出现减产趋势。尽管 CO₂ 浓度的升高及太阳辐射的增加能够促进作物光合作用,对籽粒形成具有正效应,但随着时间的推移,日均温升高和生殖生长期缩短所带来的负效应也会进一步加大,而 CO₂ 浓度升高及太阳辐射增加所带来的正效应却在减小,夏玉米在 SSP5-8.5 情景下容易出现减产趋势。因此,为确保当地粮食稳产高产,在未来需要根据当地的气候条件 and 生产条件,制定有效的适应性措施,以减缓气候变化对作物的不利影响,如更换品种^[46]、调整播期^[47-49]、改变种植制度^[15]等。

3.3 研究的不足

由于气候变化对作物的影响机理十分复杂,本研究仍存在不足之处:①虽然对黄淮海地区进

行了分区,但由于实测资料有限,各个分区仅选取一个代表性站点的多年实测数据来校准和验证 APSIM 模型,未考虑区域内作物品种差异,下一步应充分收集多站点多年份的实测数据对 APSIM 模型进行校准和验证。②基于 APSIM 模型模拟分析了作物生产对气候条件变化的响应,但现有 APSIM 模型未充分考虑杂草、病虫害及高温等减产因素对作物产量的影响,所以模型模拟产量有可能被高估。③只采用 APSIM 一个作物模型,未考虑作物模型自身结构所产生的模拟结果不确定性,今后的研究中应考虑使用多个作物模型进行模型集成模拟分析。

4 结论

(1)与基准期(1981—2020 年)相比,在 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 情景下,冬小麦营养生长期总体缩短、生殖生长期总体延长,产量分别平均增加约 20.15% 和 27.09%,且 SSP5-8.5 情景下生长期和产量的变化趋势更明显;夏玉米营养生长期和生殖生长期总体缩短,产量分别平均增加约 10.14% 和 8.45%,且 SSP5-8.5 情景下生长期缩短更为明显,产量相对 SSP2-4.5 情景有所降低。

(2)在未来时段,冬小麦产量主要与生育期内太阳辐射、日均温及累计降雨量呈正相关关系,除 SSP5-8.5 情景下 2080s 时段,冬小麦产量与生育期内日均温、累计降雨呈负相关关系。夏玉米产量始终与生育期内太阳辐射呈显著正相关关系,与累计降雨呈显著负相关关系,且在 SSP5-8.5 情景下 2080s 时段,产量与生育期内累计降雨量的显著正相关会转变为显著负相关。

(3)在未来时段,冬小麦生殖生长期、生育期内累计降雨量对冬小麦产量影响最大,且随着时间推移,生殖生长期的重要性增大,生育期内累计降雨量的重要性降低。夏玉米生育期内 CO₂ 浓度、日均温及累计降雨量对产量的影响最大,且随着时间推移,CO₂ 浓度及累计降雨量的重要性降低,日均温的重要性增大。

参 考 文 献

[1] GEBRECHORKOS S H, HULSMANN S, BERNHOFER C. Regional climate projections for impact assessment studies in East Africa[J]. Environmental Research Letters, 2019, 14(4): 044031.

[2] TAO F L, ZHANG S, ZHANG Z, et al. Temporal and spatial changes of maize yield potentials and yield gaps in the past three decades in China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2015, 208: 12-20.

[3] 李春喜. 黄淮海平原粮食生产绿色发展方向与政策建议[J]. 民主与科学, 2021(6): 22-25.

[4] GREGORY P J, MARSHALL B. Attribution of climate change: a methodology to estimate the potential contribution to increases in potato yield in Scotland since 1960[J]. Global Change Biology, 2012, 18(4): 1372-1388.

[5] LOBELL D B, FIELD C B. Global scale climate-crop yield relationships and the impacts of recent warming[J]. Environmental Research Letters, 2007, 2(1): 014002.

- [6] XIAO D P, TAO F L. Contributions of cultivar shift, management practice and climate change to maize yield in North China Plain in 1981—2009[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2016, 60(7): 1111–1122.
- [7] WANG J, WANG E L, YANG X G, et al. Increased yield potential of wheat-maize cropping system in the North China Plain by climate change adaptation[J]. *Climatic Change*, 2012, 113(3–4): 825–840.
- [8] QIAO S C, HARRISON S P, PRENTICE I C, et al. Optimality-based modelling of wheat sowing dates globally[J]. *Agricultural Systems*, 2023, 206: 103608.
- [9] 史鑫蕊, 韩百书, 王紫芊, 等. 基于 APSIM 模型模拟分析气候变化对不同熟性北方冬小麦生长和产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2023, 56(19): 3772–3787.
- SHI Xinrui, HAN Baishu, WANG Ziqian, et al. Investigation on the effects of climate change on the growth and yield of different maturity winter wheat varieties in Northern China based on the APSIM model[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023, 56(19): 3772–3787. (in Chinese)
- [10] SHIRAZI S Z, MEI X R, LIU B C, et al. Estimating potential yield and change in water budget for wheat and maize across Huang-Huai-Hai Plain in the future[J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 260: 107282.
- [11] 史印山, 王玉珍, 池俊成, 等. 河北平原气候变化对冬小麦产量的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2008, 16(6): 1444–1447.
- SHI Yinshan, WANG Yuzhen, CHI Juncheng, et al. Impact of climate change on winter wheat production in the Hebei Plain[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(6): 1444–1447. (in Chinese)
- [12] XIAO D P, LIU D L, WANG B, et al. 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.
- [13] 巩敬锦, 刘志娟, 祝光欣, 等. 基于 APSIM 模型的 2015—2100 年气候变化对中国玉米生产力影响[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(8): 167–178.
- GONG Jingjin, LIU Zhijuan, ZHU Guangxin, et al. Effects of climate change on maize productivity in China during 2015 to 2100 based on APSIM model[J]. *Transactions of the CSAE*, 2023, 39(8): 167–178. (in Chinese)
- [14] 张文婧, 赵锦, 崔文倩, 等. 气候平均态和极端态变化对东北玉米气象产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2023, 56(10): 1859–1870.
- ZHANG Wenjing, ZHAO Jin, CUI Wenqian, et al. Effect of changing normal and extreme climate states on maize meteorological yield in Northeast China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023, 56(10): 1859–1870. (in Chinese)
- [15] XIAO D P, LIU D L, FENG P Y, et al. Future climate change impacts on grain yield and groundwater use under different cropping systems in the North China Plain[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 246: 106685.
- [16] 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(5): 14–18.
- LIU Xunhao. Farming system and farming system regional planning in China[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2002(5): 14–18. (in Chinese)
- [17] LI X X, JU H, SARAH G, et al. 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.
- [18] DAI Y J, SHANGGUAN W, DUAN Q Y, et al. Development of a China dataset of soil hydraulic parameters using pedotransfer functions for land surface modeling[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2013, 14(3): 869–887.
- [19] XU Jing, HAN Huifang, NING Tangyuan, et al. Long-term effects of tillage and straw management on soil organic carbon, crop yield, and yield stability in a wheat-maize system[J]. *Field Crops Research*, 2019, 233: 33–40.
- [20] LIANG Shuo, LI Yufen, ZHANG Xubo, et al. 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.
- [21] 毛洋洋, 赵艳霞, 张祎, 等. 五个常见日太阳总辐射模型在华北地区的有效性验证及分析[J]. *中国农业气象*, 2016, 37(5): 520–530.
- MAO Yangyang, ZHAO Yanxia, ZHANG Yi, et al. Validation and analysis of five general daily solar radiation estimation models used in Northern China[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2016, 37(5): 520–530. (in Chinese)
- [22] WYSER K, VAN NOIJE T, YANG S T, et al. On the increased climate sensitivity in the EC-Earth model from CMIP5 to CMIP6[J]. *Geoscientific Model Development*, 2020, 13(8): 3465–3474.
- [23] LIU D L, O'LEARY G J, CHRISTY B, et al. Effects of different climate downscaling methods on the assessment of climate change impacts on wheat cropping systems[J]. *Climatic Change*, 2017, 144(4): 687–701.
- [24] 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(3–4): 629–666.
- [25] JIANG T C, WANG B, DUAN X N, et al. Prioritizing agronomic practices and uncertainty assessment under climate change for winter wheat in the Loess Plateau, China[J]. *Agricultural Systems*, 2023, 212: 103770.
- [26] KEATING B A, CARBERRY P S, HAMMER G L, et al. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation[J]. *European Journal of Agronomy*, 2003, 18(3–4): 267–288.
- [27] SUN H Y, ZHANG X Y, WANG E L, et al. Assessing the contribution of weather and management to the annual yield variation of summer maize using APSIM in the North China Plain[J]. *Field Crops Research*, 2016, 194: 94–102.
- [28] YANG X, ZHENG L N, YANG Q, et al. Modelling the effects of conservation tillage on crop water productivity, soil water dynamics and evapotranspiration of a maize-winter wheat-soybean rotation system on the Loess Plateau of China using APSIM

[J]. *Agricultural Systems*, 2018, 166: 111 – 123.

[29] 蒙继华, 王亚楠, 林圳鑫, 等. 作物生长模型研究现状与展望[J]. *农业机械学报*, 2024, 55(2): 1 – 15, 27.
MENG Juhua, WANG Ya'n, LIN Zhenxin, et al. Progress and perspective of crop growth models[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2024, 55(2): 1 – 15, 27. (in Chinese)

[30] 姚宁, 周元刚, 宋利兵, 等. 不同水分胁迫条件下 DSSAT – CERES – Wheat 模型的调参与验证[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(12): 138 – 150.
YAO Ning, ZHOU Yuangang, SONG Libing, et al. Parameter estimation and verification of DSSAT – CERES – Wheat model for simulation of growth and development of winter wheat under water stresses at different growth stages[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(12): 138 – 150. (in Chinese)

[31] SUN H Y, ZHANG X Y, CHEN S Y, et al. Effects of harvest and sowing time on the performance of the rotation of winter wheat-summer maize in the North China Plain[J]. *Industrial Crops and Products*, 2007, 25(3): 239 – 247.

[32] LIANG Z Y, WERF W V D, XU Z, et al. Identifying exemplary sustainable cropping systems using a positive deviance approach: wheat-maize double cropping in the North China Plain[J]. *Agricultural Systems*, 2022, 201: 103471.

[33] NICHOLLS N. Increased Australian wheat yield due to recent climate trends[J]. *Nature*, 1997, 387(6632): 484 – 485.

[34] LOBELL D B, ORTIZ-MONASTERIO J I, ASNER G P, et al. Analysis of wheat yield and climatic trends in Mexico[J]. *Field Crops Research*, 2005, 94(2 – 3): 250 – 256.

[35] HASEGAWA T, WAKATSUKI H, JU H, et al. A global dataset for the projected impacts of climate change on four major crops[J]. *Sci. Data*, 2022, 9(1): 58.

[36] ASSENS S, EWERT F, MARTRE P, et al. Rising temperatures reduce global wheat production[J]. *Nature Climate Change*, 2015, 5(2): 143 – 147.

[37] LIU Y J, ZHANG J, PAN T, et al. Assessing the adaptability of maize phenology to climate change: the role of anthropogenic-management practices[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 293: 112874.

[38] TAO F L, ZHANG L L, ZHANG Z, et al. Climate warming outweighed agricultural managements in affecting wheat phenology across China during 1981—2018[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2022, 316: 108865.

[39] XIAO D P, TAO F L, LIU Y J, et al. Observed changes in winter wheat phenology in the North China Plain for 1981—2009 [J]. *International Journal of Biometeorology*, 2013, 57(2): 275 – 285.

[40] LANDAU S, MITCHELL R A C, BARNETT V, et al. A parsimonious, multiple-regression model of wheat yield response to environment[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 101(2 – 3): 151 – 166.

[41] SHAH F, COULTER J A, YE C, et al. Yield penalty due to delayed sowing of winter wheat and the mitigatory role of increased seeding rate[J]. *European Journal of Agronomy*, 2020, 119: 126120.

[42] GENG X, WANG F, REN W, et al. Climate change impacts on winter wheat yield in Northern China[J]. *Advances in Meteorology*, 2019, 2019(1): 2767018.

[43] 谭凯炎, 杨晓光, 任三学, 等. 高温胁迫对华北地区冬小麦灌浆及产量的影响[J]. *生态学报*, 2015, 35(19): 6355 – 6361.
TAN Kaiyan, YANG Xiaoguang, REN Sanxue, et al. Impact of high temperature stress at the grain-filling stage on winter wheat yield[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(19): 6355 – 6361. (in Chinese)

[44] LI Y, GUAN K Y, SCHNITKEY G D, et al. Excessive rainfall leads to maize yield loss of a comparable magnitude to extreme drought in the United States[J]. *Global Change Biology*, 2019, 25(7): 2325 – 2337.

[45] LESK C, ROWHANI P, RAMANKUTTY N. Influence of extreme weather disasters on global crop production[J]. *Nature*, 2016, 529(7584): 84 – 87.

[46] XIAO D P, LIU D L, WANG B, et al. Designing high-yielding maize ideotypes to adapt changing climate in the North China Plain[J]. *Agricultural Systems*, 2020, 181: 102805.

[47] LIU B B, YANG Y. Large benefits of timely planting[J]. *Nature Food*, 2022, 3(7): 495 – 496.

[48] PAUDEL G P, CHAMBERLIN J, BALWINDER S, et al. Insights for climate change adaptation from early sowing of wheat in the Northern Indo-Gangetic Basin[J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2023, 92: 103714.

[49] 张镇涛, 杨晓光, 高继卿, 等. 气候变化背景下华北平原夏玉米适宜播期分析[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(17): 3258 – 3274.
ZHANG Zhentao, YANG Xiaoguang, GAO Jiqing, et al. Analysis of suitable sowing date for summer maize in North China Plain under climate change[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(17): 3258 – 3274. (in Chinese)