

基于 APSIM 模型的 2015—2100 年气候变化对中国玉米生产力影响

巩敬锦¹, 刘志娟^{1*}, 祝光欣¹, 史登宇¹, 张镇涛¹, 付真真¹, 鲁潇蒙¹, 曲辉辉²,
杨晓光¹

(1. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193; 2. 黑龙江省气象科学研究所, 哈尔滨 150030)

摘 要: 全球气候变化直接影响作物生产。玉米是中国种植面积最大的粮食作物, 系统探究未来气候变化对其生产力的影响对保障玉米高产稳产和粮食安全具有重要意义。为探究未来气候变化对中国玉米生产力影响, 该研究基于 SSP1-2.6 和 SSP5-8.5 共 2 种气候情景 (shared socioeconomic pathways, SSP) 1981—2100 年逐日气象资料以及中国气象局农业气象观测站玉米生育期数据和土壤数据, 使用调参验证后的农业生产系统模拟模型 (agricultural production systems simulator, APSIM-Maize) 解析了气候变化对中国玉米主产区高产性和稳产性的影响。结果表明: 1) 未来气候情景下, 中国玉米主产区生育期内气温和 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温总体呈增加趋势, SSP5-8.5 气候情景下升温幅度高于 SSP1-2.6 气候情景; 降水量年际波动大, 变化趋势不显著; 太阳总辐射呈先增加后减少趋势。2) 若不采取适应措施, 未来气候变化使玉米全生育期、营养生长期和生殖生长期总体呈缩短趋势, 且 SSP5-8.5 情景下缩短幅度大于 SSP1-2.6 情景, 2080 s 缩短幅度大于 2030 s 和 2050 s。3) 无适应措施条件下, 未来气候变化下研究区域玉米光温潜在产量和雨养潜在产量总体呈下降趋势, SSP5-8.5 情景下较 SSP1-2.6 情景下减产效应更大, 2 个情景光温潜在产量减产率平均值分别为 13.8% 和 11.9%, 雨养潜在产量减产率平均值分别为 17.5% 和 14.0%。玉米潜在产量的稳定性略有提高, 但区域间存在差异。因此, 未来气候变化使中国玉米生产力总体下降, 稳定性略有提高。研究为未来玉米高产稳产和中国玉米种植区划提供理论依据。

关键词: 气候变化; 温度; 产量; CMIP6; APSIM-Maize 模型; 中国; 玉米; 生育期长度

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202207115

中图分类号: P467; S513

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2023)-08-0167-12

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. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202207115 http://www.tcsae.org

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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(8): 167–178. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202207115 http://www.tcsae.org

0 引 言

玉米是中国种植范围最广的作物之一, 是集口粮、饲料粮、工业原料和生物能源等用途于一体的兼用作物^[1]。中国 2021 年玉米种植面积和总产量分别占全国粮食作物的 36.8% 和 39.9%^[2], 在中国粮食安全中占据重要地位。联合国政府间气候变化专门委员会 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 第六次评估报告指出, 气候变暖毋庸置疑, 相比于 1850—1900 年, 2001—2020 年全球地表平均气温升高了 0.99°C , 而 2011—2020 年全球地表平均气温上升了约 1.09°C ^[3]。农业是受气候变化影响最为敏感的领域之一^[4-5]。研究表明^[6-7], 气温升高会导致农作物产量显著降低, 玉米生长季内平均温度每升高 1°C 会导致全球玉米产量降低 7.4%。自 1980 年以来, 气候变化已导致全球玉米减产了 3.8%^[8]。气候变化直接影响中国的

农业气候资源, 最终将影响粮食生产。中国玉米种植地域广阔, 气候特征和农业技术差异较大, 在不同的环境、气候条件和农业技术条件下, 气候变化对玉米产量的影响机制和程度仍不清楚。因此, 研究中国玉米种植区未来农业气候资源的变化特征和玉米生产力对未来气候变化的响应, 对保障中国玉米生产及粮食安全具有重要的理论价值和实践意义。

作物生产力按照不同的生产水平及限制条件可分为不同的层次。其中, 光温潜在产量是指一个地区作物生长发育过程中不受水肥病害等条件的限制, 在当地辐射和温度条件下, 采用适宜作物品种所能达到的最高产量, 可以代表一个地区充分灌溉条件下玉米所能达到的最高产量; 雨养潜在产量又称光温降水生产潜力, 是指作物生长过程中不受养分和病虫害等条件的限制, 在当地气候条件下所能达到的最高产量, 可以代表一个地区雨养条件下的最高产量^[9-11]。前人对未来作物生产力的研究主要采用实验室模拟^[12-13]、作物生长模型模拟^[14-18]和经验-统计分析^[19-21]等方法。近年来作物生长模拟模型不断发展, 能够精确定量描述外界条件对作物生长发育的影响^[22], 已经广泛应用于气候变化对作物生产潜力影响研究中, 是区域尺度作物生产力研究的重要手段^[12,14-15,18]。在众多作

收稿日期: 2022-07-12 修订日期: 2023-01-12

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2019YFA0607402); 中国农业大学“2115 人才工程”; 黑龙江省科学基金项目 (LH2020D017)

作者简介: 巩敬锦, 研究方向为气候变化对玉米影响。

Email: gjj1949@163.com

*通信作者: 刘志娟, 博士, 副教授, 研究方向为气候变化对作物体系的影响。Email: zhijuanliu@cau.edu.cn

物模型中, 农业生产系统模型 (agricultural production systems simulator, APSIM-Maize) 是由隶属澳大利亚联邦科工组织和昆士兰州政府的农业生产系统研究组 (agricultural production system research unit, APSRU) 联合开发的作物模拟系统, 可用于模拟农业系统中各主要组分的机理过程。该模型通过设计“插-拔”式结构构建高度独立的作物生长模块、土壤水分模块、土壤氮素模块等, 便于不同组合的种植方式和管理措施的模拟。近年来, APSIM 模型已经广泛应用于世界各地以及中国的不同区域, 并取得了很好的效果^[23]。

前人围绕气候变化对中国玉米生产力影响研究方面做了大量工作^[24-28], 主要集中在特定区域玉米产量水平的变化^[29-33], 而面向全国尺度的未来玉米生产潜力影响的研究还较少, 特别是对于玉米稳产性的关注较少^[34]。为探究未来气候变化对中国玉米生产力的影响, 本文以中国玉米潜在种植区作为研究区域, 参照前人研究结果将研究区域划分为 5 个亚区, 利用调参验证后的作物生长模型 APSIM-Maize, 分析未来气候情景下不同产区玉米全生育期的农业资源变化规律, 解析玉米光温潜在产量和雨养潜在产量对气候变化的响应, 并进一步解析不同产区气候变化对玉米高产性和稳产性的影响, 以期对未来玉米高产稳产和中国玉米种植区划提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域

本文研究区域为中国玉米潜在种植区。以喜温作物的生长下限温度和早熟玉米所需的积温确定中国玉米潜在种植北界^[35], 即计算 1981—2017 年各气象格点 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的活动积温, 以 80% 保证率达到 $2\ 100\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 作为种植北界。由于青藏高原地区海拔较高, 黑龙江省和内蒙古自治区北部纬度较高, 热量资源相对匮乏, 难以广泛种植玉米, 故不作为本文研究区域; 台湾省由于数据资料缺失, 故也不作为本文研究区域。

中国玉米潜在种植区范围广, 气候资源和种植制度差异大, 本研究参照前人^[36]对中国玉米种植区划的研究结果, 将研究区域划分为北方春播玉米区 (NC), 黄淮海夏播玉米区 (HHH), 西北灌溉玉米区 (NWC), 南方丘陵玉米区 (SC) 和西南山地玉米区 (SWC), 如图 1 所示。

1.2 数据来源

本文使用的气象数据来自于影响模式国际比较计划项目 (The Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project, ISIMIP) 下 ISIMIP3b 计划下 MPI-ESM1.2-HR 模式输出的 CMIP6 的 2 个气候变化情景, 即 SSP1-RCP2.6 (SSP1-2.6, 低排放情景) 和 SSP5-RCP8.5 (SSP5-8.5, 高排放情景) 2015—2100 年的逐日气象资料。其中 SSP1-2.6 气候情景为低减缓压力和低辐射强迫影响下的未来气候情景, 至 2100 年辐射强迫稳定在 2.6 W/m^2 , 在该情景下, 相对于工业化革命前多模式集合平均的全球平均气温升温结果将显著低于 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$, 也称之为可持续发展情景; SSP5-8.5 代表高辐射强迫下的未来气候情景, 至 2100 年

辐射强迫达到 8.5 W/m^2 。上述数据已基于 W5E5 v2.0 数据集进行了偏差校正及降尺度处理, W5E5 v2.0 数据集结合了陆地的 WFDE5 数据和海洋的 ERA5 数据, 包括了全球 1979—2019 年间的逐日数据, 空间分辨率为 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$, 在 v1.0 基础上进行了算法的调整和完善, 避免了在一些网格单元某些月份过高的日最高温度值的出现。本研究使用的数据包括日平均气温、日最低气温、日最高气温、降水量和日总辐射量。

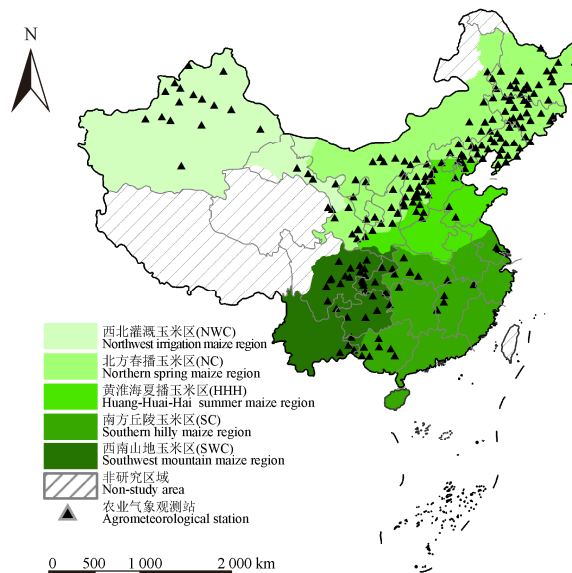


图 1 研究区域及 5 个分区图示意图

Fig.1 Schematic of study area and five subregions

玉米播种期数据来源于中国气象局 280 个农业气象观测站 (如图 1 所示), 为与未来气候情景数据的格点形式相匹配, 本文基于反距离权重法, 将各农业气象观测站的播种期数据插值得到各格点的播种期数据。

土壤数据来源于各农业气象观测站及中国科学院南京土壤研究所, 包括容重、pH 值、全氮含量、有机质含量、田间持水量和凋萎系数等。

1.3 研究方法

1.3.1 作物生长模拟模型参数设置

玉米光温潜在产量和雨养潜在产量由调参验证后的农业生产系统模拟模型 APSIM-Maize 模拟获得。研究团队已基于试验数据对模型参数调整验证获得了各研究区域玉米品种参数, 包括控制生育期和产量形成的参数^[37-40], 本研究假设各年代内作物品种不变, 采用现有作物品种进行模拟; 播种日期采用农业气象站的实际平均播种日期, 以各站点近年 (2011—2015 年) 实际播期平均值作为模拟未来时段的播期。播种深度为 5 cm , 行距为 0.6 m , 播种密度为 $90\ 000\text{ 株/hm}^2$ 。光温潜在产量模拟设置为自动灌溉 (当土壤可利用水低于田间持水量的 80% 即进行灌溉) 以保证作物生长过程不受水分限制, 雨养潜在产量设置全生育期无灌溉。2 种潜在产量模拟时均设置氮肥充足, 确保作物整个生长过程不受氮肥限制。需要指出的是, 由于西北灌溉玉米区玉米生产季内有灌溉措施, 因此模拟雨养潜在产量时该区域未列入研究区域。

1.3.2 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 有效积温

有效积温即作物某生育时期内日有效温度(即日平均温度减去生物学下限温度的差值)的总和。本文采用式(1)计算玉米全生育期内 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 有效积温^[41]。

$$A = \sum_{i=1}^n (\bar{T} - T_L) \quad (1)$$

式中 A 为玉米全生育期内 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 有效积温, $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$; n 为玉米全生育期内日平均温度 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的天数, d ; \bar{T} 为平均气温, $^{\circ}\text{C}$; T_L 为玉米生物学下限温度, $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

1.3.3 变化趋势

各指标的时间变化趋势通过气候倾向率表示。气候倾向率由最小二乘法进行估计, 即建立时间与各要素的一元线性回归方程^[42]。

$$\hat{x}_i = at_i + b \quad t = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2)$$

式中 t_i 表示年份; \hat{x}_i 表示各要素值; a 表示方程的回归系数; b 表示截距。以 $10a$ 作为气候倾向率, 即该指标的 $10a$ 变率, 气候倾向率大于 0 表明该指标随时间变化而增加, 小于 0 表明随时间变化而减小。

采用 t 检验对农业气候资源的年际变化趋势进行显著性检验, 结果通过 $P < 0.05$ 的显著性检验, 为变化趋势显著; 通过 $P < 0.01$ 的显著性检验, 为变化趋势极显著。

1.3.4 气候变化对玉米高产性影响

为更好地解析未来不同时段气候变化对玉米生产力的影响, 本文将研究时段进一步划分为 3 个时段, 即 2030 s (2015—2040 年)、2050 s (2041—2070 年) 和 2080 s (2071—2100 年)。以不同气候变化情景下未来各时段产量均值与基准时段 (1981—2014 年) 产量均值的相对变化率表示气候变化对玉米高产性的影响, 其计算式为

$$Y_c = \frac{\bar{Y}_f - \bar{Y}_{bl}}{\bar{Y}_{bl}} \quad (3)$$

式中 Y_c 为气候变化对玉米高产性的影响, %; Y_c 为正值代表气候变化使得玉米产量增加, 负值则代表气候变化使得玉米产量减少; \bar{Y}_f 和 \bar{Y}_{bl} 分别为未来某时段产量均值和基准时段产量均值, t/hm^2 。

1.3.5 气候变化对玉米稳产性影响

采用变异系数 (C_v) 来评价未来气候变化背景下玉米产量的稳定性, 变异系数越小, 稳定性越好; 相反, 变异系数越大, 则稳定性越差。变异系数计算式如下

$$C_v = \frac{S_i}{M_i} \quad (4)$$

式中 M_i 为平均值, S_i 为标准差。

以不同气候变化情景下未来各时段产量变异系数与基准时段产量变异系数的变化量表示气候变化对玉米稳产性的影响, 其计算式为

$$C_{vc} = (C_{vf} - C_{vbl}) \times 100\% \quad (5)$$

式中 C_{vc} 为气候变化对玉米稳产性的影响, 正值代表气候变化使得玉米稳产性提高, 负值则代表气候变化使得玉米稳产性降低; C_{vf} 和 C_{vbl} 分别为未来某时段产量变异系

数和基准时段产量变异系数, %。

2 结果与分析

2.1 未来情景下中国玉米全生育期农业气候资源变化特征

图 2 为 SSP1-2.6 和 SSP5-8.5 气候情景下 2015—2100 年不同时段 (2030 s、2050 s 和 2080 s) 各亚区玉米全生育期农业气候资源的变化特征。由图可知, SSP1-2.6 情景下 2030 s 和 2050 s 研究区域内各亚区玉米全生育期平均气温均呈上升趋势, 而 2080 s 时段即本世纪末期出现下降趋势。2030 s 西北灌溉玉米区升温幅度最大, 平均每 10 a 升高 $0.31\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2050 s 黄淮海夏播玉米区升温幅度最大, 平均每 10 a 升高 $0.45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。SSP5-8.5 情景下研究区域内各亚区玉米全生育期平均气温均呈持续上升趋势 (均通过 0.05 显著性检验) 且均高于 SSP1-2.6 气候情景。各时段各亚区升温幅度均高于 $0.30\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。

研究区域各亚区玉米全生育期 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 有效积温变化趋势与平均气温一致。SSP1-2.6 气候情景下, 在 2030 s 时段呈增加趋势, 而在 2050 s 和 2080 s 部分亚区出现减少趋势。2030 s 西北灌溉玉米区有效积温增加幅度最大, 达 $30.6\text{ }(^{\circ}\text{C}\cdot\text{d})/10\text{ a}$; 2050 s 仅南方丘陵玉米区呈现小幅下降趋势, 黄淮海夏播玉米区增加趋势显著, 倾向率为 $45.9\text{ }(^{\circ}\text{C}\cdot\text{d})/10\text{ a}$ 。2080 s 各亚区都出现一定幅度上的减少, 其中黄淮海夏播玉米区减少趋势显著, 倾向率为 $-33.0\text{ }(^{\circ}\text{C}\cdot\text{d})/10\text{ a}$ 。SSP5-8.5 气候情景下研究区域各亚区玉米全生育期积温在各时段均呈增加趋势, 且均高于 SSP1-2.6 气候情景, 尤其是西南山地玉米区。

2015—2100 年研究区域各亚区玉米全生育期降水量年际波动大, 线性增减趋势不明显。SSP1-2.6 情景下, 2030 s 黄淮海夏播玉米区、南方丘陵玉米区和西南山地玉米区降水量增加速率明显高于北方春播玉米区和西北灌溉玉米区, 南方丘陵玉米区增加速率最高, 达到了 $50.8\text{ mm}/10\text{ a}$ 。2050 s 除南方丘陵玉米区降雨量呈增加趋势外, 其余亚区均为减少趋势, 以黄淮海夏播玉米区减少最为显著, 达到了 $-30.1\text{ mm}/10\text{ a}$ 。SSP5-8.5 情景下 2030 s 和 2050 s 黄淮海夏播玉米区和南方丘陵玉米区降水量均呈增加趋势, 其他 3 个地区降水量均呈减少趋势。2080 s 各亚区降水量均呈增加趋势。

SSP1-2.6 和 SSP5-8.5 情景下研究区域玉米全生育期太阳总辐射在 2030 s 和 2050 s 大部分区域呈增加趋势, 而 2080 s 出现减少趋势。2030 s 南方丘陵玉米区上升趋势最大, SSP1-2.6 和 SSP5-8.5 气候情景下变化趋势分别达到 58.5 和 $75.6\text{ MJ}/(\text{m}^2\cdot 10\text{ a})$ 。2050 s 除 SSP1-2.6 情景下南方地区小幅下降外, 其余均呈上升趋势。两个气候情景下 2080 s 黄淮海夏播玉米区和北方春播玉米区均呈减少趋势。

总体而言, 未来研究区域各亚区玉米全生育期升温显著, 且北方增幅明显高于南方; $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 有效积温总体呈上升趋势, SSP5-8.5 气候情景下各时段升温幅度均高于 SSP1-2.6 气候情景; 降水量整体年际波动大变化趋势不明显, SSP1-2.6 情景下略有增加, 而

SSP5-8.5 情景下总体呈下降趋势,截至到本世纪末期全生育期降水量减少 6.5%,但区域差异较大,北方略有减少、南方略有增多,西北地区趋势较为平缓,变

化不大;太阳总辐射呈先增加后减少趋势,且 SSP5-8.5 气候情景下减少速率逐渐增大,北方地区减少速率明显高于南方地区。

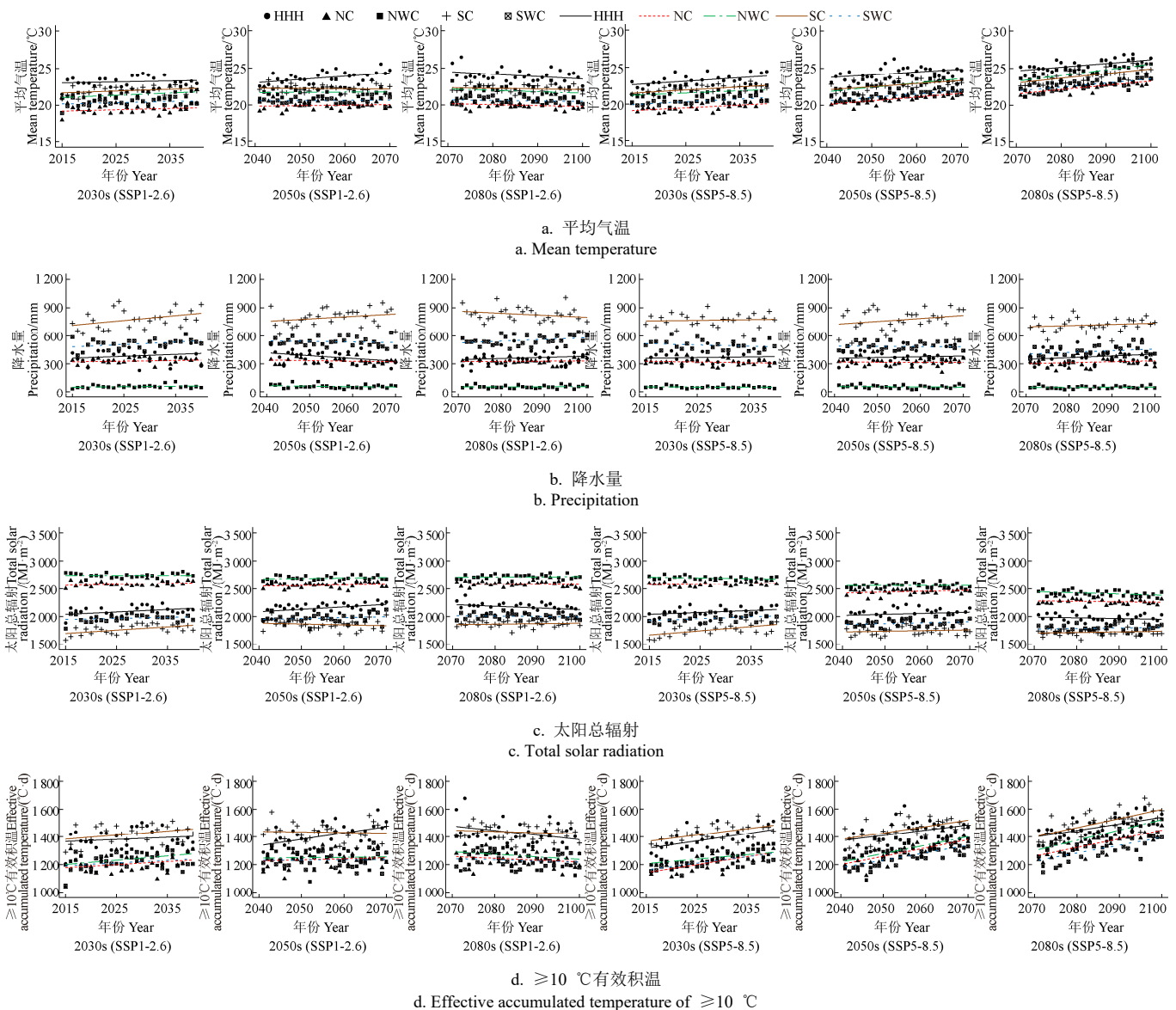


图2 2种气候变化情景下各亚区玉米全生育期内农业气候资源变化趋势

Fig.2 Time trends of agricultural climate resources during the maize whole growth period in each subregion under two climate scenarios

2.2 未来气候变化对玉米生育期的影响

图3和图4为无适应措施条件下,与基准时段1981—2014年相比,SSP1-2.6和SSP5-8.5气候情景下2015—2100年不同时段(2030s、2050s和2080s)玉米全生育期、营养生长期和生殖生长期长度及与基准时段相比的变化量。由图可知,在无适应措施条件下,未来2个气候情景下各时段气候变化均使玉米全生育期总体上呈缩短趋势,且SSP5-8.5情景下缩短趋势大于SSP1-2.6情景。仅SSP1-2.6和SSP5-8.5气候情景下2030s黑龙江省北部部分地区玉米全生育期出现延长趋势,主要集中在0~5d。从全区来看,与基准时段相比,SSP1-2.6气候情景下2030s、2050s和2080s玉米全生育期分别缩短(4.5±1.2)、(6.4±1.3)和(5.8±1.4)d;SSP5-8.5气候情景下2030s、

2050s和2080s玉米全生育期分别缩短(5.0±1.3)、(11.4±2.8)和(19.0±4.8)d。空间上表现为北部地区缩短趋势大于南部地区,特别是北方春播玉米区缩短趋势最大。

在无适应措施条件下,未来气候变化将导致玉米营养生长期缩短,且SSP5-8.5情景下缩短趋势大于SSP1-2.6情景。从全区来看,SSP1-2.6气候情景下2030s、2050s和2080s玉米营养生长期分别缩短(2.3±0.8)、(3.4±0.4)和(3.7±0.5)d,随着时间推移,缩短趋势并不明显,且同一时段内空间差异性较小;SSP5-8.5气候情景下2030s、2050s和2080s玉米营养生长期分别缩短(2.3±0.5)、(5.7±0.6)和(10.1±1.7)d,由此可见,随着时间推移,缩短趋势明显增大,且空间差异性增大,特别是2080s北方春播玉米区和西南山地玉米区缩短趋势最大。

表 1 2 种气候变化情景下各亚区玉米全生育期内农业气候资源变化趋势

Table 1 Time trends of agricultural climate resources during the maize whole growth period in each subregion under two climate scenarios (SSP)

地区	情景	年代	平均气温	降水量	太阳总辐射	≥10℃有效积温
Region	SSP	Age	Mean temperature	Precipitation	Total solar radiation	Effective accumulated temperature of ≥10℃
HHH	SSP1-2.6	2030s	0.14	20.3	43.7	14.4
		2050s	0.45	-30.1*	43.6*	45.9**
		2080s	-0.33	12.3	-29.6	-33.0
	SSP5-8.5	2030s	0.48**	6.9	34.2	54.3**
		2050s	0.38*	8.1	19.2	38.1**
		2080s	0.50**	18.6	-12.1	47.4**
NC	SSP1-2.6	2030s	0.18	7.1	19.4	21.6
		2050s	0.07	-6.4	12.1	8.1
		2080s	-0.13	2.5	-5.6	-13.0
	SSP5-8.5	2030s	0.37**	-8.0	11.4	58.0
		2050s	0.51**	-1.4	16.7	59.7**
		2080s	0.57**	9.91	-8.4	62.2**
NWC	SSP1-2.6	2030s	0.31*	4.9	-1.4	30.6*
		2050s	0.03	-4.7	9.6	2.6
		2080s	-0.19	1.3	3.8	-18.1
	SSP5-8.5	2030s	0.30*	-1.4	-13.7	32.2*
		2050s	0.60**	-2.2	0.6	60.7**
		2080s	0.77**	2.1	-20.7*	74.5**
SC	SSP1-2.6	2030s	0.25	50.8*	58.5*	29.5
		2050s	-0.05	25.9	-14.9	-4.0
		2080s	-0.09	-21.8	8.2	-8.4
	SSP5-8.5	2030s	0.42**	7.3	75.6**	46.6
		2050s	0.43**	31.6	11.6	46.6**
		2080s	0.64**	12.1	10.2	65.2**
SWC	SSP1-2.6	2030s	0.16	26.4*	18.3	19.0
		2050s	0.01	-5.4	16.2	2.3
		2080s	-0.07	19.1	-8.2	-8.3
	SSP5-8.5	2030s	0.38**	-14.6	33.4	47.9
		2050s	0.48**	-2.3	16.3	53.7**
		2080s	0.55**	18.8	9.2	56.5**

注：*, $P<0.05$; **, $P<0.01$ 。
Note: *, $P<0.05$; **, $P<0.01$.

在无适应措施条件下，未来气候变化将使得玉米生殖生长期总体呈缩短趋势。部分区域如黑龙江北部等地区因开花期提前使得生殖生长阶段气温偏低，进而导致生殖生长期呈延长趋势，主要集中在 0~5 d。从全区来看，SSP1-2.6 气候情景下 2030 s、2050 s 和 2080 s 玉米生殖生长期分别缩短(2.3±0.7)、(3.1±0.9)和(2.8±1.0) d，随着时间推移，缩短趋势并不明显；SSP5-8.5 气候情景下 2030 s、2050 s 和 2080 s 玉米生殖生长期分别缩短(2.7±1.1)、(5.7±2.4)和(8.9±3.9) d，由此可见，随着时间推移，缩短趋势明显增大，且空间差异性增大，特别是北方春播玉米区、西南山地玉米区和西北灌溉玉米区缩短趋势最大。

2.3 未来不同情景下气候变化对玉米潜在产量的影响

2.3.1 光温潜在产量

图 5 为基准时段（1981—2014 年）和 2015—2100 年（SSP1-2.6 和 SSP5-8.5 气候情景下）不同时段玉米光温潜在产量均值和变异系数。图 6 为与基准时段 1981—2014 年相比，2015—2100 年中国玉米光温潜在产量均值和变异系数的变化量。由图可知，1981—2014 年研究区域玉

米光温潜在产量为(9.3±1.6) t/hm²，其中黄淮海夏播玉米区、北方春播玉米区、西北灌溉玉米区、南方丘陵玉米区和西南山地玉米区分别为(8.7±1.4)、(9.8±1.9)、(10.3±1.3)、(7.7±1.7)和(9.2±1.8) t/hm²，光温潜在产量高值区主要位于西北灌溉玉米区和北方春播玉米区，低值区主要位于南方丘陵玉米区和西北灌溉玉米区部分区域（图 5）。在无适应措施条件下，与基准时段相比，SSP1-2.6 情景下未来 3 个时段（2030 s、2050 s 和 2080 s）研究区域玉米分别减产 12.8%、11.9%和 11.1%，其中减产幅度最大的区域为西北灌溉玉米区，未来 3 个时段分别减产 17.3%、18.7%和 19.3%，减产幅度最小的为南方丘陵玉米区，分别减产 9.8%、4.8%和 4.3%。SSP5-8.5 气候情景下未来 3 个时段研究区域玉米分别减产 12.7%、12.2%和 16.5%，其中减产幅度最大的区域为西北灌溉玉米区，未来 3 个时段分别减产 17.3%、21.2%和 36.6%，减产最小的为南方丘陵玉米区，分别减产 11.9%、12.4%和 13.8%。总体来看，SSP5-8.5 情景下较 SSP1-2.6 情景下减产效应更大，2 个情景减产率平均值分别为 13.8%和 11.9%。

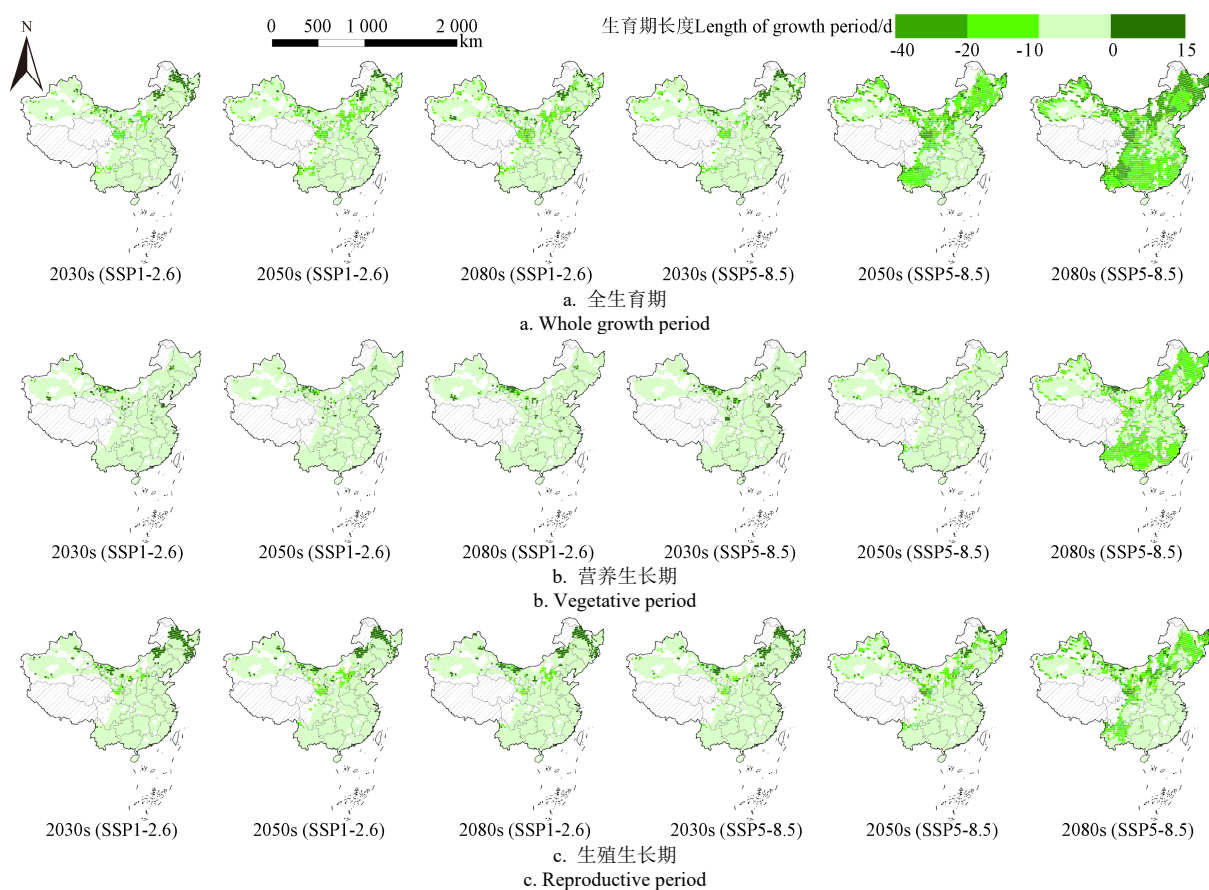
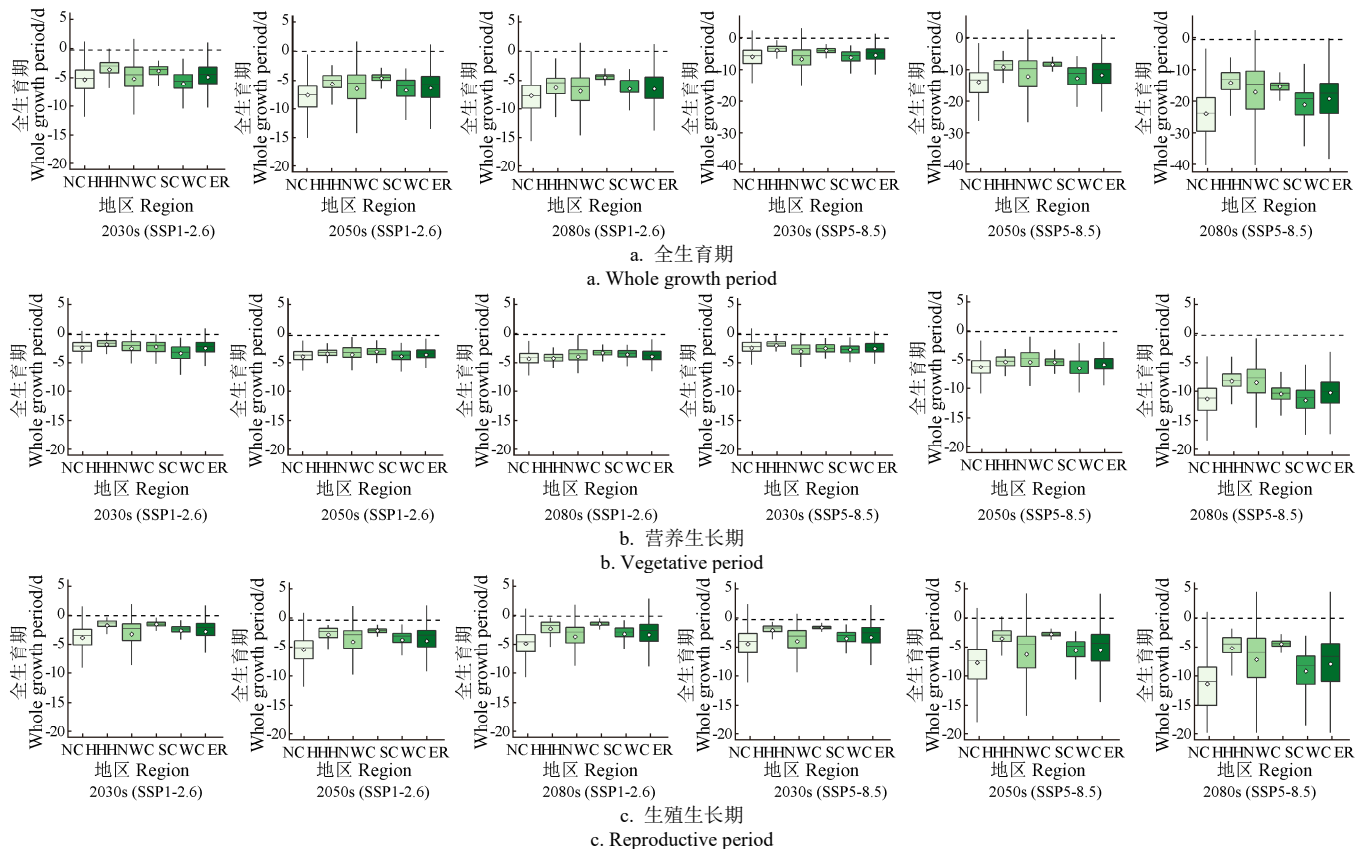


图3 2015—2100年玉米全生育期、营养生长期和生殖生长期长度

Fig.3 Length of the whole growth period, vegetative period and reproductive period of maize from 2015 to 2100



注: ER 为整个研究区域。

Note: ER is the entire study area.

图4 与1981—2014年相比, 2015—2100年玉米全生育期、营养生长期和生殖生长期长度的变化

Fig.4 Changes of the length of the whole growth period, vegetative period and reproductive period of maize from 2015 to 2100 compared with 1981-2014

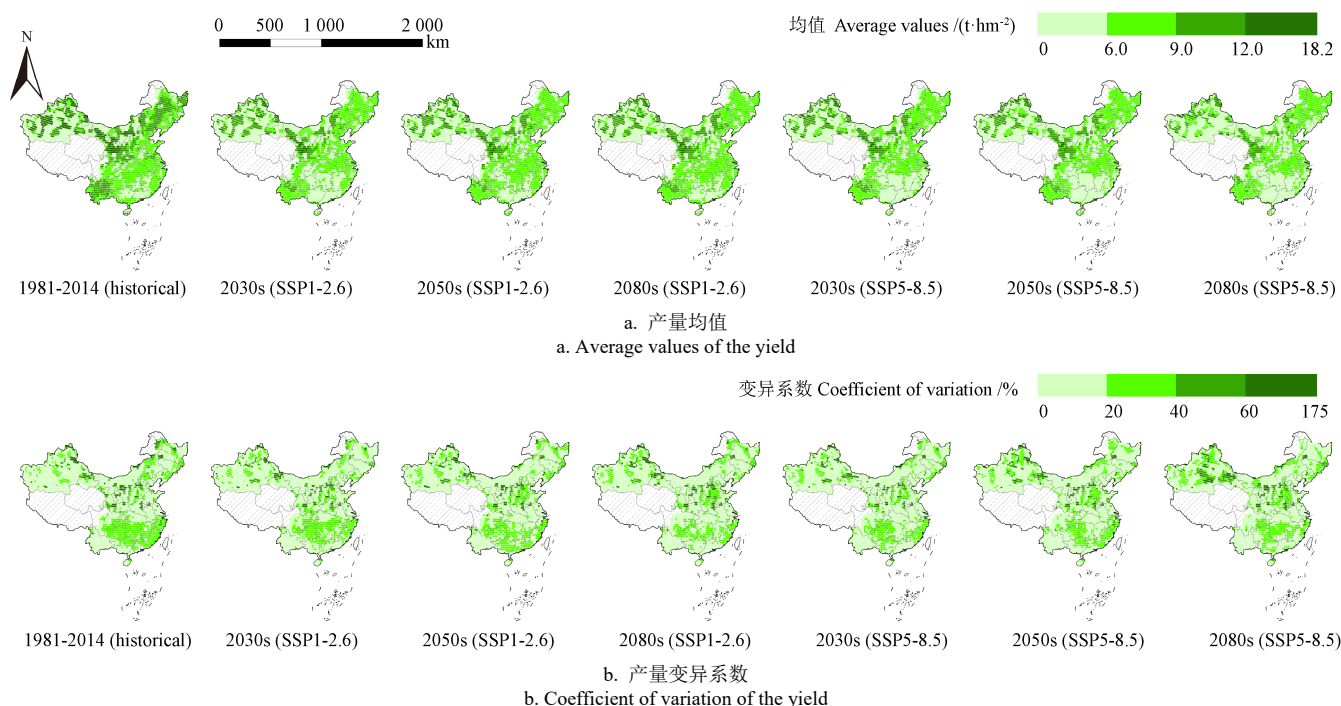


图 5 1981—2100 年中国玉米光温潜在产量均值和变异系数
Fig.5 Average values and coefficient of variation of the potential yield of maize in China from 1981 to 2100

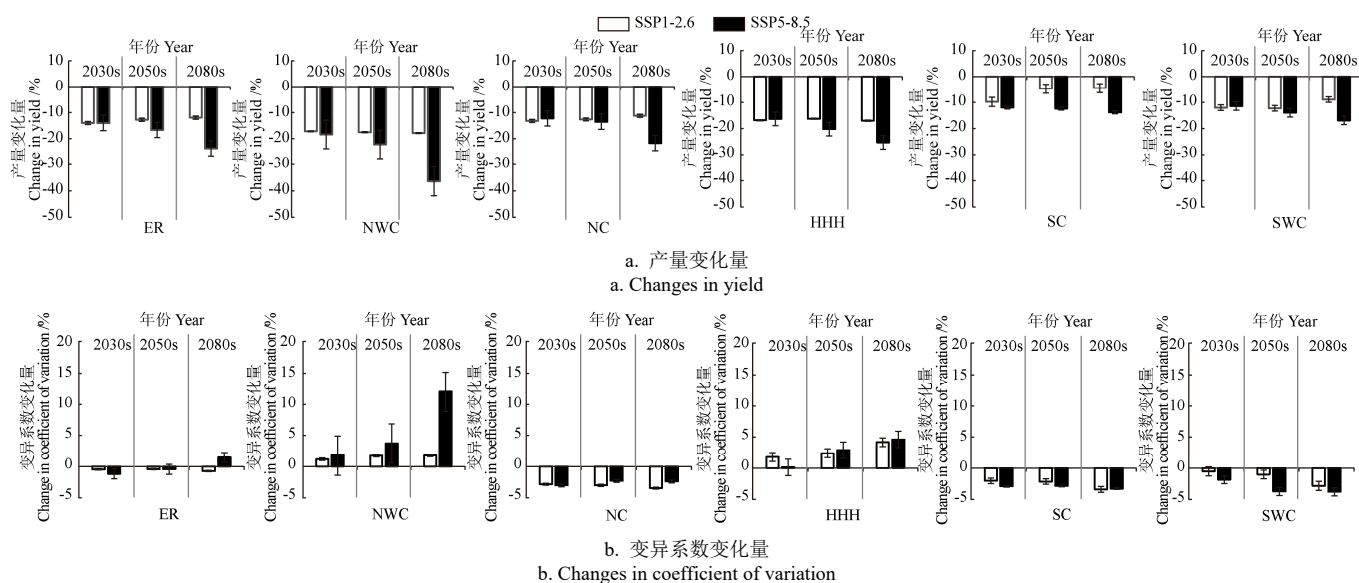


图 6 与 1981—2014 年相比, 2015—2100 年玉米光温潜在产量均值和变异系数的变化

Fig.6 Changes of the average values and coefficient of variation of the potential yield of maize from 2015 to 2100 compared with 1981-2014

1981—2014 年研究区域光温潜在产量变异系数为 22.7% (图 5b), 其中黄淮海夏播玉米区、北方春播玉米区、西北灌溉玉米区、南方丘陵玉米区和西南山地玉米区分别为 19.5%、25.2%、22.2%、22.4% 和 20.1%, 由此可见, 北方春播玉米区玉米光温潜在产量稳定性最差, 而黄淮海夏玉米区光温潜在产量稳定性最好。SSP1-2.6 气候情景下, 未来 3 个时段 (2030 s、2050 s 和 2080 s) 研究区域变异系数分别为 21.0%、21.8% 和 21.3%, SSP5-8.5 气候情景下, 未来 3 个时段研究区域变异系数分别为 20.5%、21.5% 和 22.8%, 由此可见, 未来气候变化使得研究区域玉米光温潜在产量稳定性略有提高, 但区域间存在差异, 西北灌溉玉米区和黄淮海夏播玉米区

稳定性降低, 而北方春播玉米区、南方丘陵玉米区和西南山地玉米区稳定性有所提高。从空间差异来看, 在无适应措施条件下, 未来时段光温潜在产量变异系数从南向北呈上升趋势, 北方变异性高于南方, 其中西南山地玉米区稳定性最好, 西北灌溉玉米区稳定性最差。

2.3.2 雨养潜在产量

图 7 为基准时段 (1981—2014 年) 和 2015—2100 年 (SSP1-2.6 和 SSP5-8.5 气候情景下) 不同时段玉米雨养潜在产量均值和变异系数。图 8 为与基准时段相比, 2015—2100 年中国玉米雨养潜在产量均值和变异系数的变化量。1981—2014 年研究区域玉米雨养潜在产量为 $(7.4 \pm 2.1) \text{ t/hm}^2$, 其中黄淮海夏播玉米区、北方春

播玉米区、南方丘陵玉米区和西南山地玉米区分别为 (6.7 ± 2.1) 、 (6.7 ± 2.5) 、 (7.6 ± 1.7) 和 (9.1 ± 1.9) t/hm^2 , 高值区主要位于西南山地玉米区, 低值区主要位于北方春播玉米区和黄淮海夏玉米区。在无适应措施条件下, 相较于基准时段, SSP1-2.6 气候情景下 2030 s、2050 s 和 2080 s 研究区域玉米分别减产 14.8%、14.8% 和 12.4%, SSP5-8.5 气候情景下分别减产 13.6%、17.6% 和 21.5%, 其中减产幅度最大的区域为黄淮海夏玉米区, 2 种气候情景下未来各

时段分别减产 16.7%、24.9%、21.8% 和 15.8%、22.7%、28.6%, 减产幅度最小的为南方丘陵玉米区, 2 种气候情景下未来各时段分别减产 9.7%、5.6%、4.4% 和 11.9%、12.5%、14.6%。总体来看, 在无适应措施条件下, 未来气候变化将使得研究区域玉米雨养潜在产量降低, SSP5-8.5 情景下较 SSP1-2.6 情景下减产效应更大, 2 种气候情景下减产率平均值分别为 17.5% 和 14.0%。从空间差异来看, 减产率呈由南向北减少趋势。

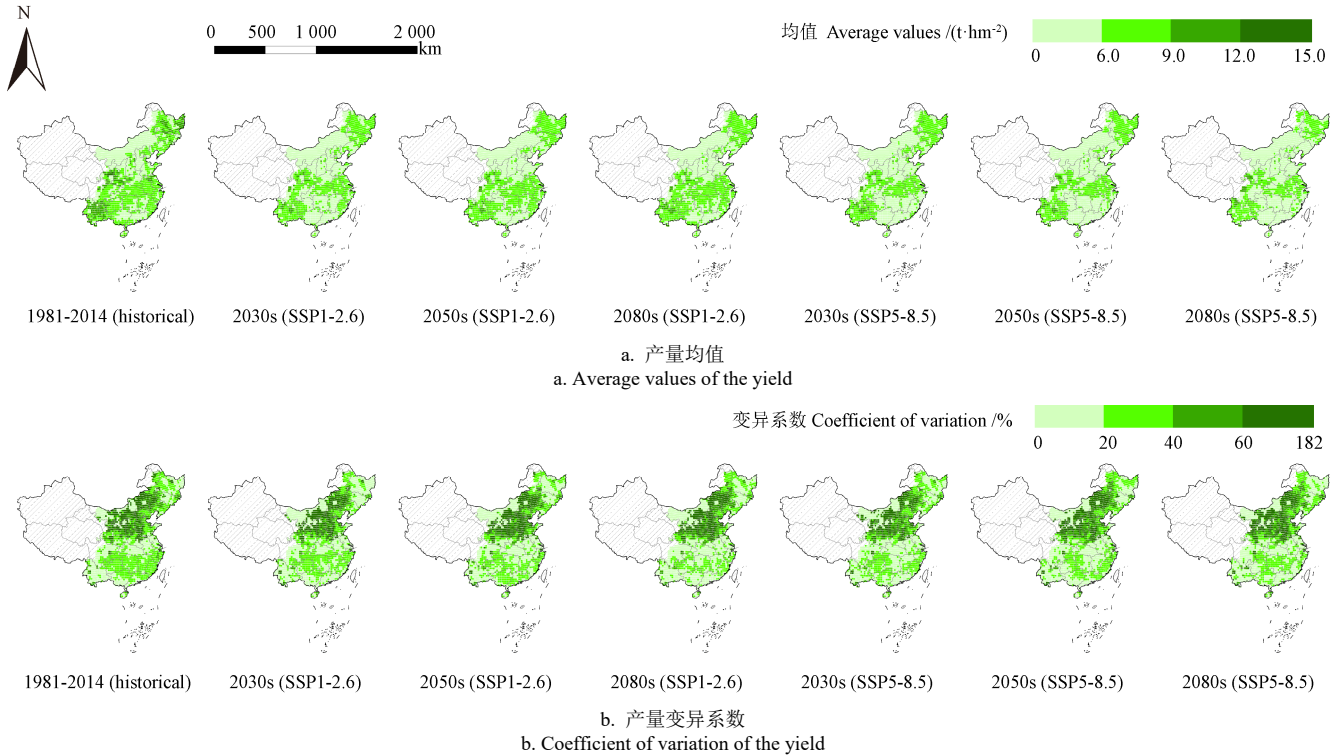


图 7 1981—2100 年玉米雨养潜在产量均值和变异系数

Fig.7 Average values and coefficient of variation of rainfed potential yield of maize from 1981 to 2100

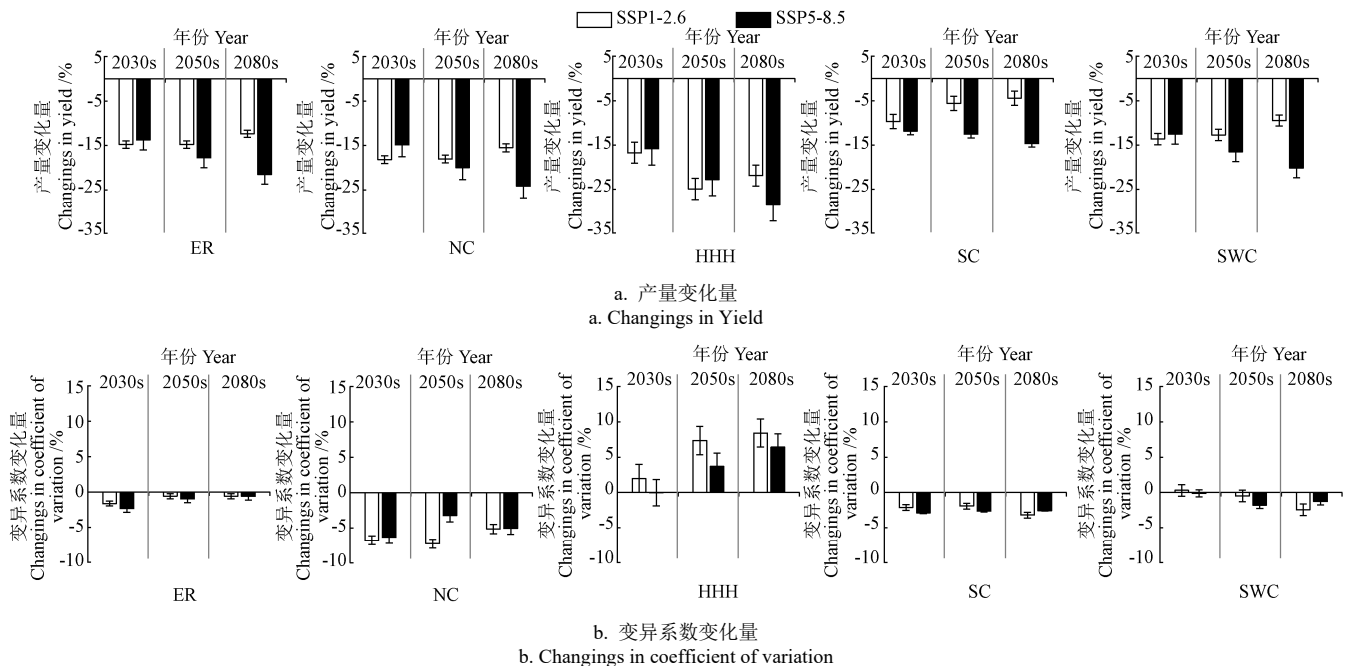


图 8 与 1981—2014 年相比, 2015—2100 年玉米雨养潜在产量均值和变异系数的变化

Fig.8 Changes of the average values and coefficient of variation of rainfed potential yield of maize from 2015 to 2100 compared with 1981-2014

1981—2014 年研究区域雨养潜在产量变异系数为 36.5%，其中黄淮海夏播玉米区、北方春播玉米区、南方丘陵玉米区和西南山地玉米区分别为 39.9%、49.5%、23.1%和 22.1%，由此可见，北方春播玉米区雨养潜在产量稳定性最差，南方丘陵玉米区和西南山地玉米区稳定性相对较好。SSP1-2.6 情景下 2030 s、2050 s 和 2080 s 研究区域变异系数分别为 34.7%、35.2%和 35.5%，SSP5-8.5 情景下分别为 34.1%、35.6%和 35.0%。由此可见，未来气候变化使得研究区域玉米雨养潜在产量变异系数减小，稳产性略有提高，但区域间存在差异，黄淮海夏播玉米区稳定性降低，而北方春播玉米区和南方丘陵玉米区稳定性有所提高，西南山地玉米区稳定性有增有减。从空间差异来看，北方地区稳定性低于南方地区，主要是由于降水的年际波动大造成的。

3 讨 论

本研究首先分析了未来气候条件下玉米生长季内农业气候资源的变化，结果显示，气温持续升高，积温增加，降水年际波动性大但增加趋势不明显，太阳总辐射先增加后减少。随后对比分析了历史和未来气候条件下玉米生育期长度的变化，模拟结果表明，气候变化导致的升温会显著缩短玉米的生育期长度。在无适应措施条件下，生育期缩短将会不可避免地会对玉米产量产生负面影响，进一步综合光热水资源的匹配等，北方春播玉米区和西北灌溉玉米区的热量条件改善将使部分地区玉米产量得到一定程度提高，其余地区的玉米产量将会面临大幅度下降。与此同时，未来气候变化使得研究区域玉米稳产性提高。

未来气候变暖将为热量条件较差的北方地区带来更多的热量资源，使一些原本无法进行玉米种植或玉米难以成熟的地区可以种植玉米，因此玉米种植北界将会北移，玉米可种植区域扩大^[43]。同时热量资源的增加为更换生育期更长的品种提供了热量资源保障，因此通过种植制度调整^[44]、品种更换^[45]、播期调整^[46]等适应措施减缓未来气候变化对作物生产的不利影响，但需要根据当地的气候、土壤和生产条件，因地制宜提出适宜的应对措施。

本文定量分析未来气候变化情景下中国 5 个玉米产区生长季内农业气候资源的变化，以及由此带来的玉米生育期长度的变化，并从高产性和稳产性 2 个方面明确了气候变化对不同区域玉米产量的影响。由于气候变化对作物影响过程的复杂性，本研究结果尚存在一定的不确定性。一方面，本文气候数据来源于最新的 CMIP6 且已进行了修正，但由于气候系统内部的自然变率和气候模式的结构框架等的不确定性，导致气候变化预估还存在一定的不确定性^[47]，因此气候变化对玉米产量影响评估可能存在误差和不确定性，未来可以通过多模式集合评估提高预测精度^[48-49]。另一方面，本文选用的玉米品种为各区域现有种植的主栽品种，但由于资料的限制，各省选择了一个主栽品种进行模拟，未考虑区域内品种的多样性以及区域间品种的差异，这都需要未来深入进行分析。

4 结 论

本文分析了未来 2015—2100 年气候情景下中国玉米全生育期的农业资源变化规律，基于调参验证后的农业生产系统模拟模型（agricultural production systems simulator, APSIM-Maize）模拟了未来气候变化背景下玉米光温潜在产量和雨养潜在产量，并进一步解析了不同地区气候变化对玉米高产性和稳产性的影响。得到以下结论：

1) 2015—2100 年，研究区域内玉米全生育期气温持续升高，且增幅北部高于南部； $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 有效积温总体呈上升趋势，SSP5-8.5 气候情景下各时段升温幅度均高于 SSP1-2.6 气候情景。降水量年际波动大整体线性变化趋势不明显，SSP1-2.6 气候情景下略有增加，而 SSP5-8.5 情景下北方略有减少、南方略有增多，西北地区趋势较为平缓，变化不大。未来不同时段研究区域玉米全生育期内太阳总辐射呈先增加后减少趋势，且 SSP5-8.5 气候情景下减少速率逐渐增大，北方地区减少速率明显高于南方地区。

2) 无适应措施条件下，未来 2 个气候情景下各时段气候变化均使玉米全生育期、玉米营养生长期和生殖生长期总体呈缩短趋势，且 SSP5-8.5 情景下缩短趋势大于 SSP1-2.6 情景。且随着时间推移，缩短趋势明显增大，特别是北方春播玉米区、西南山地玉米区和西北灌溉玉米区缩短趋势最大。

3) 无适应措施条件下，未来气候变化使研究区域玉米光温潜在产量和雨养潜在产量总体下降，SSP5-8.5 情景下较 SSP1-2.6 情景下减产效应更大前者减产率为 17.5%，后者减少为 14.0%。未来气候变化使研究区域玉米光温潜在产量和雨养潜在产量稳定性提高，但区域间存在差异。总体而言，黄淮海夏播玉米区稳定性降低，而北方春播玉米区和南方丘陵玉米区稳定性有所提高。

[参 考 文 献]

- [1] KLOPFENSTEIN T J, ERICKSON G E, BERGER L L. Maize is a critically important source of food, feed, energy and forage in the USA[J]. *Field Crops Research*, 2013, 153: 5-11.
- [2] 中华人民共和国国家统计局. 统计年鉴[EB/OL]. 2022. [2022-06-01]. <http://www.stats.gov.cn>.
- [3] IPCC. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*[M]. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 2021.
- [4] WHEELER T, VON BRAUN J. Climate change impacts on global food security[J]. *Science*, 2013, 341(6145): 508-513.
- [5] ROSENZWEIG C, ELLIOTT J, DERYNG D, et al. Assessing agricultural risks of climate change in the 21st century in a global gridded crop model intercomparison[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2014, 111(9): 3268-3273.
- [6] KUCHARIK C J, SERBIN S P. Impacts of recent climate change on Wisconsin corn and soybean yield trends[J]. *Environment Research Letters*, 2008(3): 034003.
- [7] ZHAO C, LIU B, PIAO S L, et al. Temperature increase reduces global yields of major crops in four independent

- estimates[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2017, 114(35): 9326-9331.
- [8] LOBELL D B, SCHLENKER W, COSTA-ROBERTS J. Climate trends and global crop production since 1980[J]. *Science*, 2011, 333(6042): 616-620.
- [9] 韩湘玲. 农业气候学[M]. 山西: 山西科学技术出版社, 2000.
- [10] GRASSINI P, YANG H S, CASSMAN K G. Limits to maize productivity in Western Corn-Belt: A simulation analysis for fully irrigated and rainfed conditions[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149(8): 1254-1265.
- [11] 刘霞霞, 李扬, 王靖, 等. 基于 APSIM 模型的内蒙古四大生态区不同降水年型下主要作物适应性评价[J]. *中国农业科学*, 2022, 55(10): 1917-1937.
- LIU Xiaxia, LI Yang, WANG Jing, et al. Adaptability evaluation of staple crops under different precipitation year types in four ecological regions of Inner Mongolia Based on APSIM [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(10): 1917-1937. (in Chinese with English abstract)
- [12] PAUL W L, BERT G D. Open top chambers for exposing plant canopies to elevated CO₂ concentration and for measuring net gas exchange[J]. *Plant Ecology*, 1993, 104/105(1): 3-15.
- [13] 徐玲, 赵天宏, 胡莹莹, 等. CO₂ 浓度升高对春小麦光合作作用和籽粒产量的影响[J]. *麦类作物学报*, 2008, 28(5): 867-872.
- XU Ling, ZHAO Tianhong, HU Yingying, et al. Effects of CO₂ enrichment on photosynthesis and grain yield of spring wheat[J]. *Journal of Triticeae Crop*, 2008, 28(5): 867-872. (in Chinese with English abstract)
- [14] 陈明, 寇雯红, 李玉环, 等. 气候变化对东北地区玉米生产潜力的影响与调控措施模拟—以吉林省为例[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(3): 821-828.
- CHEN Ming, KOU Wenhong, LI Yuhuan, et al. Impacts of climate change on maize potential productivity in Northeast China and the simulation of control measures: A case study of Jilin Province, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(3): 821-828. (in Chinese with English abstract)
- [15] 韩智博, 张宝庆, 田杰, 等. 基于 CCSM4 气候模式的未来气候变化对黑河绿洲玉米产量影响预测[J]. *灌溉排水学报*, 2018, 37(10): 108-115.
- HAN Zhibo, ZHANG Baoqing, TIAN Jie, et al. Yield of the maize in Heihe oasis under climate change in northwest China predicted based on the CCSM4 climate model[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(10): 108-115. (in Chinese with English abstract)
- [16] ARAYA A, HOOGENBOOM G, LUEDELING E, et al. Assessment of maize growth and yield using crop models under present and future climate in southwestern Ethiopia[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 214: 252-265.
- [17] ADHIKARI P, ALE S, BORDOVSKY J P, et al. Simulating future climate change impacts on seed cotton yield in the Texas High Plains using the CSM-CROPGRO-Cotton model[J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 164: 317-330.
- [18] YANG C Y, FRAGA H, IEPEREN W V, et al. Assessment of irrigated maize yield response to climate change scenarios in Portugal[J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 184: 178-190.
- [19] 王胜, 宋阿伟, 谢五三, 等. 未来气候变化对安徽淮河以南一季稻气候生产潜力的影响评估[J]. *干旱气象*, 2020, 38(2): 179-187.
- WANG Sheng, SONG Awei, XIE Wusan, et al. Impact assessment of future climate change on climatic productivity potential of single-season rice in the south of the Huaihe river of Anhui province[J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2020, 38(2): 179-187. (in Chinese with English abstract)
- [20] 赵放, 李秀芬, 林伟楠, 等. 气候变化对玉米气候生产潜力的影响[J]. *农业工程*, 2019, 9(8): 132-134.
- ZHAO Fang, LI Xiufen, LIN Weinan, et al. Impact of climate change on climate productivity potential of maize[J]. *Agricultural Engineering*, 2019, 9(8): 132-134. (in Chinese with English abstract)
- [21] 孙彦坤, 田宝星, 高见, 等. 气候变化对黑龙江省黑土区玉米气候生产潜力的影响[J]. *东北农业大学学报*, 2013, 44(11): 44-49.
- SUN Yankun, TIAN Baoxing, GAO Jian, et al. Effect of climate change on potential productivity of climate of corn in black soil region of Heilongjiang[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2013, 44(11): 44-49. (in Chinese with English abstract)
- [22] 谷冬艳, 刘建国, 杨忠渠, 等. 作物生产潜力模型研究进展[J]. *干旱地区农业研究*, 2007, 103(5): 89-94.
- GU Dongyan, LIU Jianguo, YANG Zhongqu, et al. Reviews on crop productivity potential researches[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2007, 103(5): 89-94. (in Chinese with English abstract)
- [23] GAYDON D S, BALWINDER-SINGH, WANG E, et al. Evaluation of the APSIM model in cropping systems of Asia[J]. *Field Crops Research*, 2017, 204: 52-75.
- [24] 黄川容, 刘洪. 气候变化对黄淮海平原冬小麦与夏玉米生产潜力的影响[J]. *中国农业气象*, 2011, 32(S1): 118-123.
- HUANG Chuanrong, LIU Hong. The effect of the climate change on potential productivity of winter wheat and summer maize in the Huang-Huai-Hai Plain[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2011, 32(S1): 118-123. (in Chinese with English abstract)
- [25] 王秀芬, 杨艳昭, 尤飞. 黑龙江省气候变化及其对玉米生产潜力的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2012, 30(5): 25-29.
- WANG Xiufen, YANG Yanzhao, YOU Fei. Climate change and its impact on maize potential productivity of Heilongjiang Province in China[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2012, 30(5): 25-29. (in Chinese with English abstract)
- [26] 赖荣生, 余海龙, 黄菊莹. 宁夏中部干旱带气候变化及其对春玉米气候生产潜力的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2014, 19(3): 108-114.
- LAI Rongsheng, YU Hailong, HUANG Juying. Effects of

- climate changes on spring maize's climate potential productivity in middle arid region of Ningxia[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2014, 19(3): 108-114. (in Chinese with English abstract)
- [27] 李秀芬, 赵慧颖, 朱海霞, 等. 黑龙江省玉米气候生产力演变及其对气候变化的响应[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(8): 2561-2570.
- LI Xiufen, ZHAO Huiying, ZHU Haixia, et al. Evolution of maize climate productivity and its response to climate change in Heilongjiang Province, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(8): 2561-2570. (in Chinese with English abstract)
- [28] 杨宇. 气候变化对黄淮海平原粮食生产力影响的实证研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2017, 31(6): 130-135.
- YANG Yu. The empirical study on impacts of climate changes on grain productivity in the Huang-Huai-Hai plain[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2017, 31(6): 130-135. (in Chinese with English abstract)
- [29] 常耀杰, 王文忠, 冯宝, 等. 文水县气候变化对玉米产量的影响[J]. *山西农业大学学报(自然科学版)*, 2017, 37(5): 312-319.
- CHANG Yaojie, WANG Wenzhong, FENG Bao, et al. Effects of climate change on corn yield in Wenshui county[J]. *Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition)*, 2017, 37(5): 312-319. (in Chinese with English abstract)
- [30] 姬兴杰, 徐延红, 左璇, 等. 未来气候变化情景下河南省粮食安全气候承载力评估[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(3): 853-862.
- JI Xingjie, XU Yanhong, ZUO Xuan, et al. Estimating the climatic capacity of food security in Henan Province, China under the future climate change scenarios[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(3): 853-862. (in Chinese with English abstract)
- [31] 时荣超, 佟玲, 杜太生, 等. 改进 AquaCrop-KR 模拟不同水分和种植密度制种玉米产量[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(15): 63-71.
- SHI Rongchao, TONG Ling, DU Taisheng, et al. Simulation of hybrid maize seed yield under different water regimes and planting densities based on modified AquaCrop-KR model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(15): 63-71. (in Chinese with English abstract)
- [32] 张元红, 王瑞, 徐宗贵, 等. 不同降水年型下旱地玉米产量性状对种植密度和品种响应[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(22): 136-144.
- ZHANG Yuanhong, WANG Rui, XU Zonggui, et al. Responses of yield traits to planting density and cultivar of spring maize in drylands under different rainfall types[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(22): 136-144. (in Chinese with English abstract)
- [33] 张万锋, 杨树青, 刘鹏, 等. 秸秆覆盖方式和施氮量对河套灌区夏玉米氮利用及产量影响[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(21): 71-79.
- ZHANG Wanfeng, YANG Shuqing, LIU Peng, et al. Effects of stover mulching combined with N application on N use efficiency and yield of summer maize in Hetao Irrigated District[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2020, 36(21): 71-79. (in Chinese with English abstract)
- [34] 刘佳鸿, 何奇瑾, 管玥, 等. 黄淮海北部地区夏玉米稳产高产的播期优选[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(5): 131-138.
- LIU Jiahong, HE Qijin, GUAN Yue, et al. Suitable sowing date for stable and high yield of summer maize in the northern region of Huang-Huai-Hai, China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(5): 131-138. (in Chinese with English abstract)
- [35] 杨镇. 东北玉米[M]. 北京: 中国农业出版社, 2007.
- [36] 全国农业区划委员会. 中国农业自然资源和农业区划[M]. 北京: 中国农业出版社, 1991.
- [37] 刘志娟, 杨晓光, 王静, 等. APSIM 玉米模型在东北地区的适应性[J]. *作物学报*, 2012, 38(4): 740-746.
- LIU Zhijuan, YANG Xiaoguang, WANG Jing, et al. Adaptability of APSIM maize model in Northeast China[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2012, 38(4): 740-746. (in Chinese with English abstract)
- [38] 董朝阳, 刘志娟, 杨晓光. 北方地区不同等级干旱对春玉米产量影响[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(11): 157-164.
- DONG Chaoyang, LIU Zhijuan, YANG Xiaoguang. Effects of different grade drought on grain yield of spring maize in Northern China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2015, 31(11): 157-164. (in Chinese with English abstract)
- [39] 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 with English abstract)
- [40] ZHAO J, YANG X G. Distribution of high-yield and high-yield-stability zones for maize yield potential in the main growing regions in China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 248: 511-517.
- [41] 苏李君, 刘云鹤, 王全九. 基于有效积温的中国水稻生长模型的构建[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(1): 162-174.
- SU Lijun, LIU Yunhe, WANG Quanjiu. Rice growth model in China based on growing degree days[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2020, 36(1): 162-174. (in Chinese with English abstract)
- [42] 沈瑛, 曾燕, 肖卉, 等. 江苏省日照时数的气候特征分析[J]. *气象科学*, 2007(4): 425-429.
- SHEN Zhen, ZENG Yan, XIAO Hui, et al. Changes of sunshine hours in the recent 40 years over Jiangsu

- province[J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2007(4): 425-429. (in Chinese with English abstract)
- [43] 刘志娟, 杨晓光, 王文峰, 等. 全球气候变暖对中国种植制度可能影响IV. 未来气候变暖对东北三省春玉米种植北界的可能影响[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(11): 2280-2291.
- LIU Zhijuan, YANG Xiaoguang, WANG Wenfeng, et al. The possible effects of global warming on cropping systems in China IV. The possible impact of future climatic warming on the northern limits of spring maize in three provinces of Northeast China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(11): 2280-2291. (in Chinese with English abstract)
- [44] GAO J Q, YANG X G, ZHENG B Y, et al. Effects of climate change on the extension of the potential double cropping region and crop water requirements in Northern China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 268: 146-155.
- [45] LIU Z J, YANG X G, XIE R Z, et al. Prolongation of the grain filling period and change in radiation simultaneously increased maize yields in China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021, 308/309: 108573.
- [46] ZHU G X, LIU Z J, QIAO S L, et al. How could observed sowing dates contribute to maize potential yield under climate change in Northeast China based on APSIM model[J]. *European Journal of Agronomy*, 2022, 136: 126511.
- [47] 段青云, 夏军, 缪驰远, 等. 全球气候模式中气候变化预测预估的不确定性[J]. *自然杂志*, 2016, 38(3): 182-188.
- DUAN Qingyun, XIA Jun, MIAO Chiyuan, et al. The uncertainty in climate change projections by global climate models[J]. *Chinese Journal of Nature*, 2016, 38(3): 182-188. (in Chinese with English abstract)
- [48] CHEN X L, LIU Y M, WU G X. Understanding the surface temperature cold bias in CMIP5 AGCMs over the Tibetan Plateau[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2017, 34(12): 1447-1460.
- [49] 孟雅丽, 段克勤, 尚澈, 等. 基于 CMIP6 模式数据的 1961—2100 年青藏高原地表气温时空变化分析[J]. *冰川冻土*, 2022, 44(1): 24-33.
- MENG Yali, DUAN Keqin, SHANG Wei, et al. Analysis on spatiotemporal variations of near-surface air temperature over the Tibetan Plateau from 1961 to 2100 based on CMIP6 models'data[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2022, 44(1): 24-33. (in Chinese with English abstract)

Effects of climate change on maize productivity in China during 2015 to 2100 based on APSIM model

GONG Jingjin¹, LIU Zhijuan^{1*}, ZHU Guangxin¹, SHI Dengyu¹, ZHANG Zhentao¹, FU Zhenzhen¹, LU Xiaomeng¹, QU Huihui², YANG Xiaoguang¹

(1. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. Heilongjiang Province Institute of Meteorological Science, Harbin 150030, China)

Abstract: Global climate change has posed direct challenges to crop production. Among them, maize can be one of the most widely cultivated crops in China. It was important to systematically explore the impacts of future climate change on the potential yield, in order to ensure a high and stable yield and food security. In this research, a systematic investigation was implemented to explore the effects of future climate change on maize productivity using the daily meteorological data of two climate scenarios (Shared Socioeconomic Pathways, SSP1-2.6 and SSP5-8.5) output from MPI-ESM1.2-HR model under the Inter Statistical Impact Model Intercomparison Project from 1981 to 2100, the maize phenology data, and the soil data of the agrometeorological stations of the China Meteorological Administration. Firstly, the changes in agricultural resources were analyzed during the maize growth period in five subregions of the potential maize planting areas. Then, the Agricultural Production Systems sIMulator (APSIM-Maize) was validated to simulate the length of the whole growth period, vegetative period, reproductive period, potential yield, and rainfed potential yield of maize from 1981 to 2100. And the average value and coefficient of variation were selected to quantify the impact of future climate change on the yield of maize in China. The result showed that: 1) Under both SSP1-2.6 and SSP5-8.5 scenarios, there was a rising trend in the temperature and $\geq 10^{\circ}\text{C}$ effective accumulated temperature (EAT) during the whole growth period of maize. The rising amplitude was higher under SSP5-8.5 than that under SSP1-2.6. There was a large interannual fluctuation of precipitation, indicating an insignificant overall change trend. There was a slight increase under SSP1-2.6, but a decrease under SSP5-8.5. The total solar radiation increased first and then decreased. 2) Without adaptation measures, the whole growth period, vegetative period and reproductive period of maize were shortened under climate change. The shortening trend under the SSP5-8.5 scenario was greater than that under the SSP1-2.6 scenario. The shortening trend increased significantly, as time went on. 3) Without adaptation measures, future climate change reduced the potential yield and rain-fed potential yield of maize. The yield reduction rates under the SSP5-8.5 scenario were greater than that under the SSP1-2.6 scenario. The average yield reduction rates of potential yield under SSP5-8.5 and SSP1-2.6 scenarios were 13.8% and 11.9%, respectively, while the average yield reduction rates of rain-fed potential yield were 17.5% and 14.0%, respectively. Future climate change slightly improved the stability of the potential yield and the rain-fed potential yield of maize, but there were differences between subregions. Therefore, future climate change can be expected to decrease the productivity of maize, but slightly improve its stability.

Keywords: climate change; temperature; yield; CMIP6; APSIM-Maize model; China; maize; length of growth period