

气候变化背景下未来黑龙江玉米 生育期气候资源变化

刘兴丽¹, 初征², 陈畅³, 王鑫楚⁴, 巩敬锦², 王秋京², 吕佳佳²

(1. 黑龙江省气象数据中心, 哈尔滨 150000; 2. 黑龙江省气象科学研究所, 哈尔滨 150000;
3. 齐齐哈尔市气象局, 黑龙江 齐齐哈尔 161000; 4. 通河县气象局, 黑龙江 通河 150900)

摘要: 黑龙江作为我国重要的玉米生产基地与输出基地, 玉米产量与播种面积多年稳居全国第一。同时, 黑龙江地区是气候变化的敏感区域, 玉米受气候变化的影响复杂多变, 对产量的影响具有不确定性。对于玉米不同生育期间的气候资源变化分析不够充分, 制约着未来玉米的科学生产。因此, 研究客观捕获 2021–2050 年玉米各生育期的气候资源变化, 采用 IPCC 发布的高排放(RCP8.5)和中排放(RCP4.5)两种不同情景的日平均气温和降水, 揭示气候变化影响玉米营养生长和生殖阶段的气候资源变化特征。结果表明, 未来玉米出苗至抽雄期和抽雄至成熟期均呈缩短趋势, 其中 RCP8.5 情景缩短更快。相同情景下, 抽雄至成熟期缩短更多; 各生育期中, RCP8.5 情景下温度更高, 升温速率也更快。相同情景下, 抽雄至成熟期温度普遍更高。未来 RCP4.5 情景下水资源更为丰富, 但时空分布也更为不均。

关键词: 玉米; 气候变化; 气候资源; 生育期

中图分类号: S513.01

文献标识码: A

Future Changes in Climate Resources during the Growth Stages of Maize in Heilongjiang Province under Climate Change

LIU Xing-li¹, CHU Zheng², CHEN Chang³, WANG Xin-chu⁴, GONG Jing-jin², WANG Qiu-jing², LÜ Jia-jia²

(1. Heilongjiang Meteorological Data Center, Heilongjiang 150000;

2. Heilongjiang Province Institute of Meteorological Science, Heilongjiang 150000;

3. Qiqihaer Meteorological Bureau, Heilongjiang 161000;

4. Tonghe Meteorological Bureau, Heilongjiang 150900, China)

Abstract: Heilongjiang is a region highly sensitive to climate change, introducing uncertainty in maize yield outcomes. Although many studies have been conducted on the impact of climate change on maize, there is insufficient analysis regarding climate resource changes during different growth stages of maize—an important index for maize production. This limitation hinders scientific advancements in maize production for future endeavors. Therefore, this study objectively quantified changes in climate resources during each growth stage of maize from 2021 to 2050 and elucidated the characteristics of these variations that impact both vegetative growth and reproductive stages. The results indicate a shortening trend in the emerging–tasseling and tasseling–maturity stages of maize, with a more pronounced shortening under the RCP8.5 scenario. Within each growth period, temperatures are expected to be higher, with faster warming rates under the RCP8.5 scenario, especially observed in the tasseling–maturity stage. Under the RCP4.5 scenario, water resources are anticipated to be more abundant but unevenly distributed both spatially and temporally.

Key words: Maize; Climate change; Climatic resource; Growth stage

录用日期: 2024-06-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD2300201)、黑龙江省自然科学基金项目(LH2021D020)、黑龙江省气象局科技创新发展项目(HQZC2022031)

作者简介: 刘兴丽(1978–), 女, 辽宁葫芦岛人, 高级工程师, 从事气象观测、数据处理方面的研究工作。E-mail: 6299136@qq.com

初征为本文通信作者。E-mail: chuzheng1985@126.com

气候变化是当今研究的热点问题。以温度升高为代表的气候变化对社会、生态和农业等系统产生了深远的影响^[1]。在过去的百年中,全球平均温度升高了约0.85℃^[2]。研究表明,温度升高的真实情况和影响比预估的更为严峻,全球变暖在未来很长时间仍将持续发生^[3-4]。与历史时期相比较,截至2035年全球地表温度可能升高0.3~0.7℃,截至2100年可能升高0.3~4.8℃。除了温度的变化,温室气体的排放还可能影响水分的时空分布,使降水的季节和区域格局发生改变,变幅约为10%^[5-7]。黑龙江地处我国东北地区,处于气候变化的敏感地区,未来降水量将会有较大变率^[8]。有学者认为,未来降水量区域北上,我国东部降水量减少,北方降水量增加,但时空变化不均^[9]。未来温度升高和降水的变化对黑龙江农业将产生重大影响。黑龙江作为我国粮食安全的“压舱石”,对我国粮食安全具有重要作用。因此,必须充分了解未来气候变化对黑龙江农业的影响,才能在未来达到持续稳产、增产的目的。

玉米是我国粮食产量中最重要的组成部分,在我国农业中具有举足轻重的地位,也是黑龙江最主要的粮食作物,其种植面积约占黑龙江粮食播种面积的40%,产量约占黑龙江粮食产量的50%^[10]。气候变化对玉米的影响本质是气候资源的变化对玉米的影响,表现在多种形式上,如品种布局、种植区域、生产潜力等多方面,其中,生育期作为玉米生长过程中最主要的指标,比分析产量更具有前瞻性^[11-13]。对气候资源研究较为丰富,依据研究时间段不同,可分为过去气候变化(事实)和未来气候变化(预测)对农业气候资源的影响两部分。研究历史结果认为,我国热量资源主要呈增加趋势,其中,东北地区增温最为迅速,辐射资源大部分呈减少趋势^[14-18]。具体表现,我国年平均气温的气候倾向率为-0.20~0.79℃/10a,平均值为0.28℃/10a,空间分布为南低北高,气候倾向率的负值区域分布在西南四川地区。各区域间降水变化趋势有所不同,其中,降水量增加的区域有长江中下游、华南、西北、东北,而西南、华北区域年降水量减少。1960年以来,我国大部分地区太阳辐射降低,日照时数总体呈下降趋势,倾向率范围在-196.0~149.2h/10a,平均值为-39.7h/10a。未来气候变化情景下农业气候资源变化的研究也取得了一定进展。王冀等采用A2、B1排放情景作为气候背景,认为未来东北地区气温和降水呈增加趋势^[19]。初征等采用订正后的RCPs(代表性浓度路径, Representative Concentration Pathways)资料分析了东北区玉米对农业气候资源变化

响应和适应^[20]。巩敬锦采用SSP(共享社会经济路径, Shared Socioeconomic Pathway)资料分析了气候变化对于玉米的影响^[21]。以上研究较为全面地分析了气候变化背景下气候资源的时空变化特征,但玉米生育期作为衡量玉米生产中的指标,生育期间的气候资源变化对玉米播种收获、玉米品种布局具有重要的指示作用。

基于此,本研究将以我国重要的商品粮基地——黑龙江为研究区域,以产量最大的玉米为研究对象,分析未来不同气候情景玉米营养生长和生殖生长期气候资源的变化,为黑龙江的玉米科学发展、科学应对未来气候变化、保障国家粮食安全提供依据。

1 数据来源与方法

1.1 数据来源

本研究数据主要为历史气象资料、未来气候模拟资料及历史玉米生育期资料。

(1)气象和玉米历史观测数据:数据来源于黑龙江逐日气象资料,该历史观测数据用于建立生育期模型。因建立模型需要较长时间且稳定的玉米资料进行分析,本研究采用1971–2018年的泰来、安达、哈尔滨、尚志、佳木斯作为研究站点。

(2)未来气候模拟资料:采用IPCC发布的高排放(RCP8.5)和中排放(RCP4.5)两种不同情景的日平均气温和降水,分析未来玉米生育期气候资源的变化。通常研究认为,黑龙江玉米生长不会受到辐射的胁迫,因此本研究将主要分析温度和水资源的变化情况。其中,高排放(RCP8.5)情景被认为是气候变化的最坏结果,是通常不可能达到的情景,但分析RCP8.5情景可对人们产生警示作用,认识到气候变化的严峻性;中排放(RCP4.5)是可持续发展的情景,是人与自然和谐共处的结果,也是人们最有可能达到的结果,最具有现实意义。

1.2 研究方法

未来黑龙江玉米生育期预估:本研究采用活动积温作为衡量玉米生育期的气象指标,根据刘丹^[22]的研究成果,选择日平均温度作为对积温稳定性影响最为关键的气象因子,该模型对活动积温与发育期的二次曲线关系提出了订正。

$$\beta = \frac{F(T_0)}{F(\bar{T})} \times \bar{T} \times d$$

式中, β 为订正模型积温; $F(T_0)$ 为发育期平均温度为 T_0 时二次拟合曲线对应的活动积温; $F(\bar{T})$ 为发育期平均温度为 $\bar{T}$ 时二次拟合曲线对应的活动积

温; $\bar{T}$ 为发育期平均温度; d 为发育期日数。

通过该玉米生育期的模型订正,结果表明,预估生育期比原模型误差均有减少,减少约1~3 d。因此,本研究采用上述模型对未来不同情景下的玉米生育期进行预估,分析期间气候资源的变化。本研究中采用 Matlab 气候资源分析和生育期建模,依靠 SPSS 25 对生育期日数进行趋势分析检验,图表制作由 Excel 完成。

2 结果与分析

2.1 未来玉米生育期变化

2.1.1 未来玉米生育期

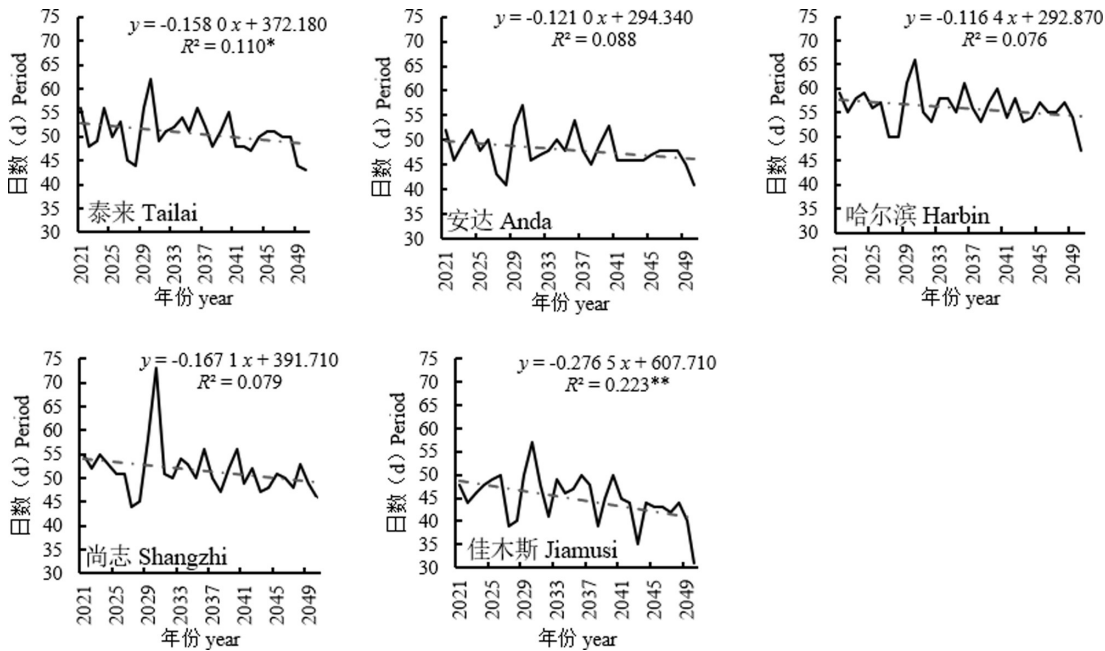
在 RCP4.5 和 RCP8.5 排放情境对比下,各站点出苗日期无明显差异,出苗日期基本相同(表 1)。抽雄日期和成熟日期在 RCP8.5 排放情景下更提前,相比 RCP4.5,抽雄日期和成熟日期分别提前 2 和 6 d。RCP8.5 比 RCP4.5 出苗至抽雄日期提前 1 d,抽雄至成熟日期提前 4 d。

2.1.2 RCP4.5 情景下玉米生育期演变

黑龙江各站出苗至抽雄期日数均呈减少趋势,其中,尚志站日数减少最快,减小速率为 0.82 d/10 a (图 1,图 2)。抽雄至成熟期日数也都呈减少趋势,减

表 1 RCP4.5和RCP8.5情景下2021–2050年玉米生育期日数
Table 1 Days in maize growth stage from 2021 to 2050 under the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios d

站 点 Station	情 景 RCPs	出苗日序 Emergence	抽雄日序 Tasseling	成熟日序 Maturity
泰 来	4.5	130	197	250
	8.5	129	194	245
安 达	4.5	137	199	249
	8.5	137	197	245
哈尔滨	4.5	137	195	253
	8.5	137	193	249
尚 志	4.5	142	203	256
	8.5	142	202	253
佳木斯	4.5	152	205	262
	8.5	152	204	249



注: *表示 $P<0.05$ 水平下差异显著; **表示 $P<0.01$ 水平下差异显著。下图同。
Note: *, $P<0.05$; **, $P<0.01$. The same below.

图 1 RCP4.5 情景下 2021–2050 年出苗至抽雄期生育期平均日数时间变化

Fig.1 Changes in the average days of growth stage from emergence to tasseling in 2021–2050 under the RCP4.5 scenario

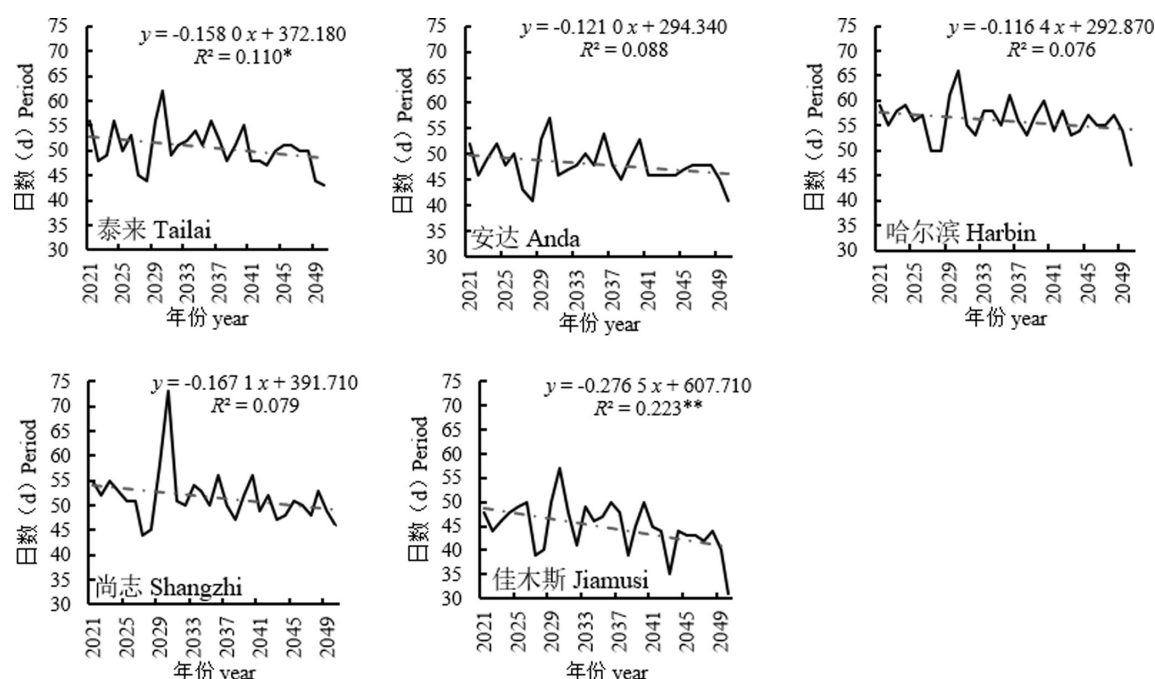


图2 RCP4.5情境下2021–2050年抽雄至成熟期生育期平均日数时间变化

Fig.2 Changes in the average days of growth stage from tasseling to maturity in 2021–2050 under the RCP4.5 scenario

小最快的为泰来,减小速率为0.82 d/10 a。在两个生育阶段中,抽雄至成熟日数减少速率更快,平均减少速率为0.59 d/10 a,比出苗至抽雄期高0.17 d/10 a。

2.1.3 RCP8.5情景下玉米生育期演变

RCP8.5情景下,玉米出苗至抽雄阶段整体呈减少趋势,其中,减少最快的为安达,减少速率为

0.89 d/10 a;抽雄至成熟阶段也呈减少趋势,减少速率明显升高,其中,佳木斯减少速率最快为2.76 d/10 a (图3,图4)。玉米出苗至抽雄期在21世纪20年代生育期最长,最长可达64 d,在21世纪40年代生育期最短,最短出现在佳木斯只需要49 d。在拔节至成熟期年代表现与出苗至抽雄期类似。

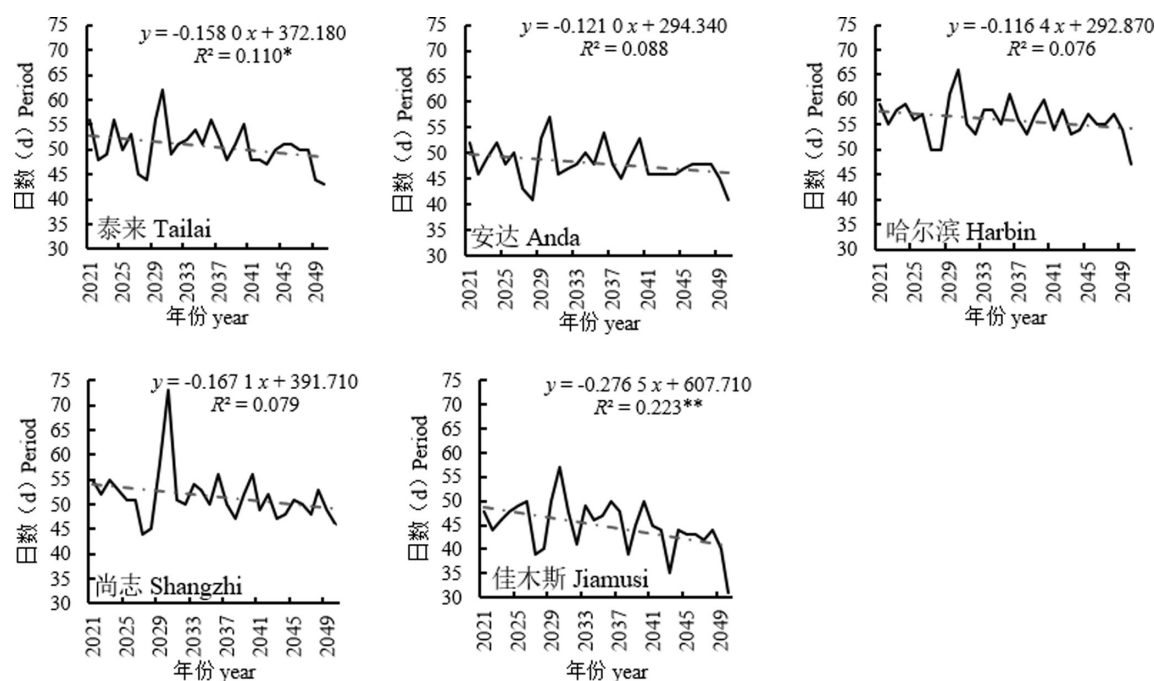


图3 RCP8.5情境下2021–2050年出苗至抽雄期生育期平均日数时间变化

Fig.3 Changes in the average days of growth stage from emergence to tasseling in 2021–2050 under the RCP8.5 scenario

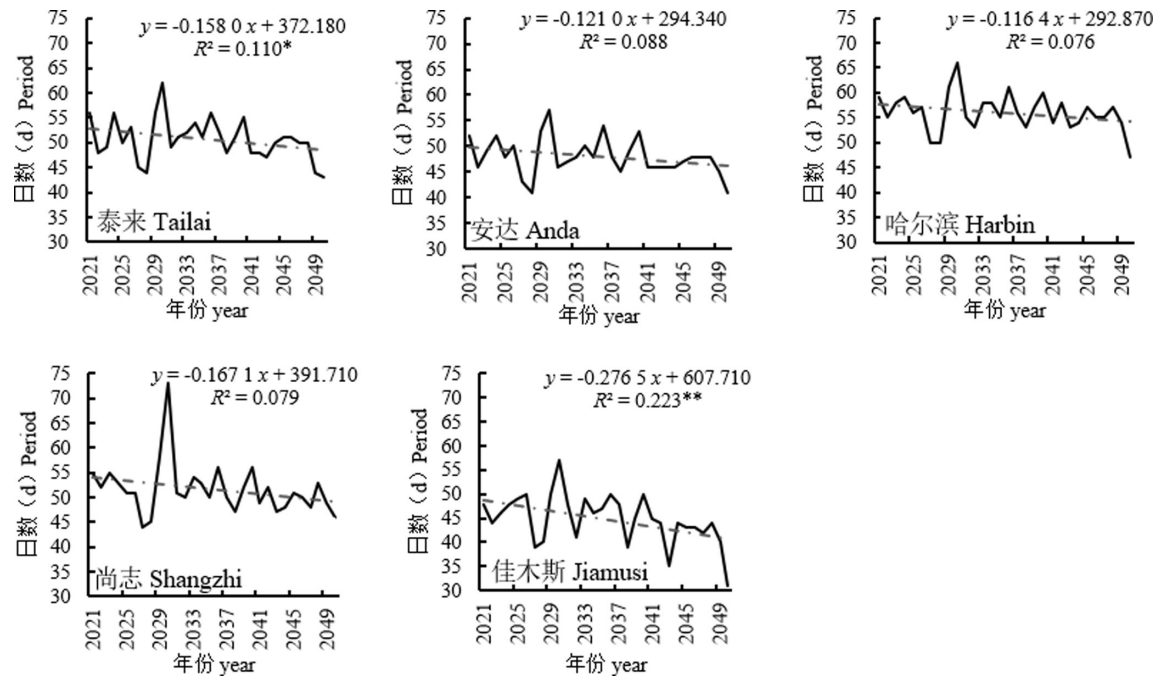


图4 RCP8.5情境下2021–2050年抽雄至成熟期生育期平均日数时间变化

Fig.4 Changes in the average days of growth stage from tasseling to maturity in 2021–2050 under the RCP8.5 scenario

2.2 气候变化下黑龙江玉米生育期内气候资源变化

2.2.1 RCP4.5情景下玉米生育期气候资源变化

RCP4.5情景下,出苗至抽雄阶段平均气温大多低于抽雄至成熟阶段,平均低于 1.07°C ,只有佳木斯地区出苗至抽雄期的气温偏高。平均气温全部呈增

加趋势,出苗至抽雄期安达地区增速最快,抽雄至成熟期泰来增速最快。出苗至抽雄期降水量约为 165.48 mm ,各站点均低于抽雄至成熟期。在玉米出苗至抽雄期,降水均呈减少趋势,其中泰来减少最快;在抽雄至成熟期除了佳木斯均为增加趋势,其中哈尔滨增加最快(图5)。

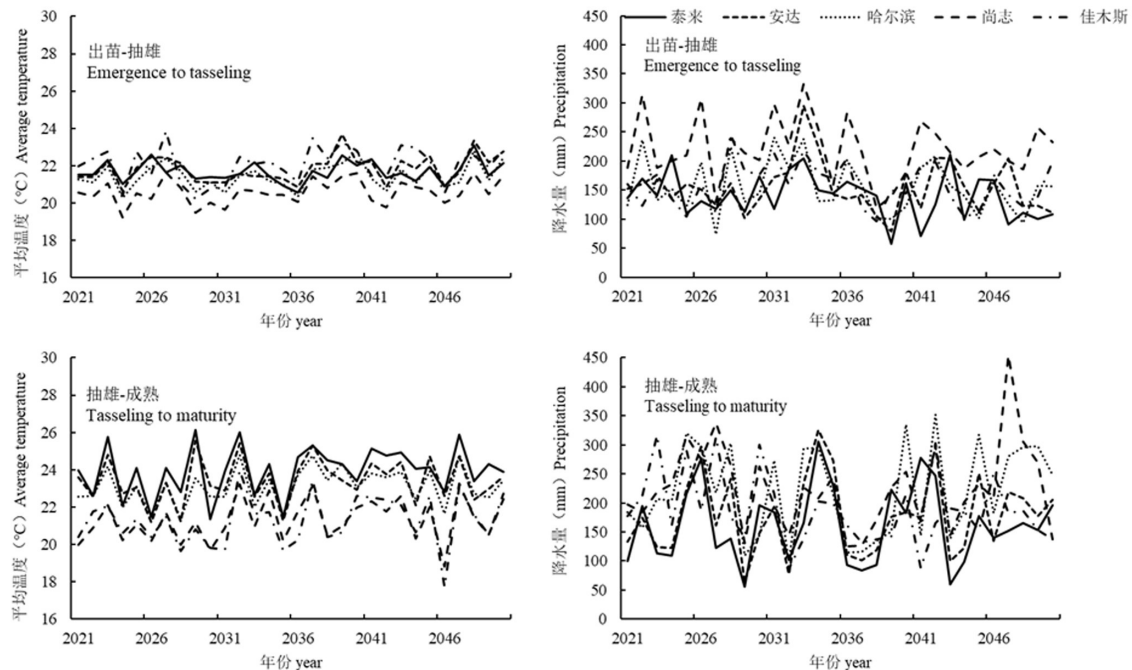


图5 RCP4.5情景下玉米出苗至抽雄期和抽雄至成熟期气候资源时间变化

Fig.5 Changes in the time of climate resources during maize emergence– tasseling and heading–maturity under the RCP4.5 scenario

2.2.2 RCP8.5情景下玉米生育期气候资源变化

RCP8.5情景下玉米各生育期平均温度均好于RCP4.5情景,其中,出苗至抽雄阶段平均气温为21.89℃,比RCP4.5情景高0.47℃,其中佳木斯依旧最高。抽雄至成熟期平均气温为23.76℃,比

RCP4.5情景下高1.15℃,泰来依旧为平均气温最高地区。平均温度整体呈增加趋势,抽雄至成熟期增幅速率更快(图6)。RCP8.5情景下各生育期平均降水量均低于RCP4.5情景。

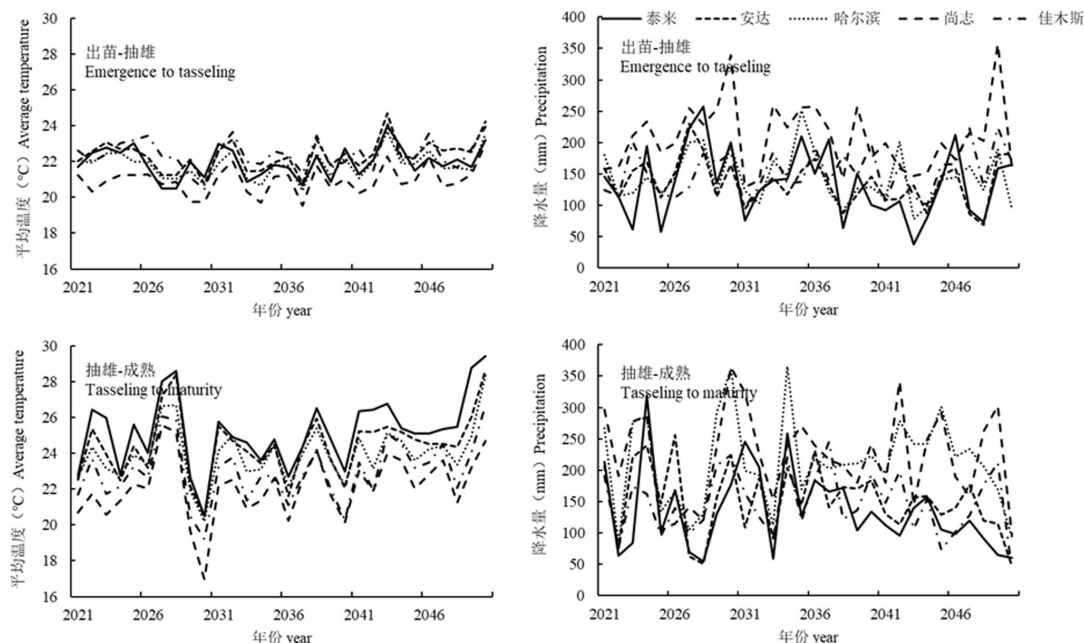


图6 RCP8.5情景下玉米出苗至抽雄期和抽雄至成熟期气候资源时间变化

Fig.6 Changes in the time of climate resources during maize emergence– tasseling and heading–maturity under the RCP8.5 scenario

3 结论与讨论

未来不同气候情景下,玉米各生育期均有缩短,其中,高排放情景和抽雄至成熟期缩短更为迅速,气候资源变化不尽相同。在2021–2050年,抽雄至成熟期热量资源普遍高于出苗至抽雄期,并且热量资源均呈增加趋势,RCP8.5情景下升高的更快;抽雄至成熟期水资源普遍高于出苗至抽雄期,且RCP4.5情景水资源更为丰富。

本研究在准确预估玉米生育期的基础上,聚焦于玉米发育期作为分析未来气候变化对玉米影响的重要指标,分析了未来出苗至抽雄期(营养生长)和抽雄至成熟期(生殖生长)气候资源变化。玉米生长发育过程除了受到自身遗传特性的影响外,还受到光、温、水等气象资源的制约^[23]。气象条件会通过影响作物的干物质累积速率、子粒灌浆等,改变原本的生育期进程,最终影响产量。玉米的生育期是能客观反映玉米生长过程中对外界气候环境,包括温度、辐射、水分等的响应,表现为玉米生育期的提前、推迟及生育阶段的延长、缩短等生育期的改变会使气象资源重新分配,导致作物对气候资源利用率发生

变化,结果可能会出现气候资源过剩或不足的情况出现,所以生育期是研究气候变化对玉米的影响中不可缺失的指示标志^[24]。

未来热量资源的增加会加速玉米的生长速率,具体表现为玉米的生育期缩短。生育期缩短对玉米产量的影响较为复杂,可利用气候资源时间变短,可能会导致干物质累计时间变短,但温度的增加和降水的改变可能会提高作物的光合效率。在不同情景下,降水可能成为玉米高产的限制因素,特别是在RCP8.5情景下,增加的温度和减少的降水可能会对玉米对气候资源的利用造成不利影响。由于未来气候变化的不确定性,导致了气候模式模拟的资料并不能完全代表未来的天气情况。另外玉米生产技术在未来也有不确定性,随着科技的提升,玉米在品种、管理措施等方面可能提升较大。因此,减小和订正上述问题对研究的影响,将是以后研究的重点。

参考文献:

- [1] 王天雪. 近30年来气候变化对中国主要种植区春-夏玉米产量的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2021.
- [2] 赵恩博. 1981–2016年蒙古国气温变化特征研究[J]. 气候变化研究快报,2022,11(5):10.

- ZHAO E B. Study on the characteristics of temperature change in Mongolia from 1981 to 2016[J]. *Climate Change Research Letters*, 2022, 11(5): 10. (in Chinese)
- [3] BROWN P T, CALDEIRA K. Greater future global warming inferred from Earth's recent energy budget[J]. *Nature*, 2017, 552(7683): 45–50.
- [4] HUANG J, JIANG J, WANG J, et al. Crop diversification in coping with extreme weather events in China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, 13(4): 677–686.
- [5] EASTERLING D R, EVANS J L, GROISMAN P Y, et al. Observed variability and trends in extreme climate events: a brief review[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2000, 81(3): 417–426.
- [6] KARL T R, TRENBERTH K E. Modern global climate change[J]. *Science*, 2003, 302(5651): 1719–1723.
- [7] WALLACE J S. Increasing agricultural water use efficiency to meet future food production[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2000, 82(1–3): 105–119.
- [8] 李克让, 陈育峰, 黄玫, 等. 气候变化对土地覆被变化的影响及其反馈模型[J]. *地理学报*, 2000(增刊): 57–63.
- LI K R, CHEN Y F, HUANG M, et al. Model studies of impacts of climate change on land cover and its feedback[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2000(S): 57–63. (in Chinese)
- [9] 吴金栋, 王石立, 张建敏. 未来气候变化对中国东北地区水热条件影响的数值模拟研究[J]. *资源科学*, 2000(6): 36–42.
- WU J D, WANG S L, ZHANG J M. A numerical simulation of the impacts of climate change on water and thermal resources in Northeast China[J]. *Resources Science*, 2000(6): 36–42. (in Chinese)
- [10] 焦子昂. 黑龙江省玉米产业发展状况分析[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2021.
- [11] 初征, 郭建平. 未来气候变化对东北玉米品种布局的影响[J]. *应用气象学报*, 2018, 29(2): 165–176.
- CHU Z, GUO J P. Effect of climatic change on maize varieties distribution in the future of Northeast China[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2018, 29(2): 165–176. (in Chinese)
- [12] 赵静. 东北地区玉米种植界限变迁与冷害风险评估[D]. 长春: 东北师范大学, 2020.
- [13] 何充实. 基于DSSAT模型的湖北玉米产量潜力分析及播期与密度优化[D]. 武汉: 华中农业大学, 2023.
- [14] 杨晓光. 中国气候资源与农业[M]. 北京: 气象出版社, 2006: 78–91.
- [15] 杨晓光, 李勇, 代妹玮, 等. 气候变化背景下中国农业气候资源变化Ⅸ. 中国农业气候资源时空变化特征[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(12): 3177–3188.
- YANG X G, LI Y, DAI S W, et al. Change of China agricultural climate resources under the background of climate change Ⅸ. spatio-temporal change characteristics of China agricultural climate resources[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(12): 3177–3188. (in Chinese)
- [16] 刘志娟, 杨晓光, 王文峰, 等. 气候变化背景下我国东北三省农业气候资源变化特征[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(9): 2199–2206.
- LIU Z J, YANG X G, WANG W F, et al. Characteristics of agricultural climate resources in three provinces of Northeast China under global climate change[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(9): 2199–2206. (in Chinese)
- [17] 徐超, 杨晓光, 李勇, 等. 气候变化背景下中国农业气候资源变化Ⅲ. 西北干旱区农业气候资源时空变化特征[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(3): 763–772.
- XU C, YANG X G, LI Y, et al. Change of China agricultural climate resources under the background of climate change Ⅲ. Spatio-temporal change characteristics of agricultural climate resources in Northwest Arid Area[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(3): 763–772. (in Chinese)
- [18] 赵东, 罗勇, 高歌, 等. 我国近50年来太阳直接辐射资源基本特征及其变化[J]. *太阳能学报*, 2009, 30(7): 7.
- ZHAO D, LUO Y, GAO G, et al. Essential characteristics of solar direct radiation over recent 50 years in China[J]. *Acta Energetica Sinica*, 2009, 30(7): 7. (in Chinese)
- [19] 王冀, 娄德君, 曲金华, 等. IPCC-AR4模式资料对东北地区气候及可利用水资源的预估研究[J]. *自然资源学报*, 2009, 24(9): 1647–1656.
- WANG Y, LOU D J, QU J H, et al. Prediction of climate and utilizable precipitation change in Northeast China by using IPCC-AR4 model data[J]. *Journal of Natural Resources*, 2009, 24(9): 1647–1656. (in Chinese)
- [20] 初征, 郭建平, 赵俊芳. 东北地区未来气候变化对农业气候资源的影响[J]. *地理学报*, 2017, 72(7): 1248–1260.
- CHU Z, GUO J P, ZHAO J F. Impacts of future climate change on agroclimatic resources in Northeast China[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2017, 72(7): 1248–1260. (in Chinese)
- [21] 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 J J, LIU Z J, ZHU G X, 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*, 2023, 39(8): 167–178. (in Chinese)
- [22] 刘丹, 初征, 张浙铭. 黑龙江玉米生育期预估模型研究[J]. *黑龙江气象*, 2022, 39(4): 24–27.
- LIU D, CHU Z, ZHANG Z M. Study on the prediction model of maize growth period in Heilongjiang Province[J]. *Heilongjiang Meteorology*, 2022, 39(4): 24–27. (in Chinese)
- [23] 葛均筑. 气象资源特性对玉米产量形成的影响及长江中游玉米高产关键技术研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2015.
- [24] 黄岩, 李晶, 王莹, 等. 不同生育期干旱对玉米生长及产量的影响模拟[J]. *农业灾害研究*, 2019, 9(6): 47–49, 92.
- HUANG Y, LI J, WANG Y, et al. Impact simulation of drought on maize growth and yield in different growth stages[J]. *Journal of Agricultural Catastrophology*, 2019, 9(6): 47–49, 92. (in Chinese)
- [25] 初征, 郭建平. 东北地区玉米适应气候变化措施对生产潜力的影响[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(6): 1885–1892.
- CHU Z, GUO J P. Impacts of adaptive measures to climate change on maize climatic potential productivity in northeast region of China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(6): 1885–1892. (in Chinese)

(责任编辑: 朴红梅)