

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2026.03.018

CSTR:32310.14.stbcbx.2026.03.018

任菲菲,吴海林,安敏.未来气候情景下东北地区农业用水安全时空演变评价[J].水土保持学报,2026,40(3):351-366.

REN Feifei, WU Hailin, AN Min. Spatiotemporal evaluation of agricultural water security in northeast China under future climate scenarios[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(3):351-366.

未来气候情景下东北地区农业用水安全时空演变评价

任菲菲^{1,2}, 吴海林^{1,2}, 安敏^{1,3}

(1.水电工程施工与管理湖北省重点实验室(三峡大学),湖北 宜昌 443002; 2.三峡大学水利与环境学院,湖北 宜昌 443002; 3.三峡大学经济与管理学院,湖北 宜昌 443002)

摘要: [目的] 农业作为高耗水产业,其作物水分利用依赖蓝绿水协同,而未来气候变化会通过影响作物需水量(ETc)扰动蓝绿水循环并威胁农业用水安全。因此,面临严峻的水资源可持续管理挑战,预测农业用水安全具有重要意义。[方法] 以东北地区为研究区域,基于 1998—2024 年 CMFD 再分析数据集及 CMIP6 中 5 个气候模式的 2031—2090 年 SSP245 与 SSP585 2 种排放情景下的气象资料,采用 Hargreaves 公式和作物系数计算作物需水量(ETc),并构建蓝绿水双指标评价体系,结合水分亏缺指数(CWDI)分析未来气候情景下东北地区农业用水安全时空演变趋势。[结果] 未来气候情景下东北地区农业绿水与蓝水安全时空特征差异显著。时间上,绿水风险在 SSP245 和 SSP585 情景下均显著降低,且 SSP245 远期绿水风险较 SSP585 降低 12.4%,蓝水风险较 SSP585 高 4.1%。空间上,SSP245 情景驱动绿水高风险区集中在辽宁,且蓝水胁迫在辽宁、内蒙古东四盟显著加剧;SSP585 情景驱动绿水风险整体降低,蓝水极高胁迫区集中在辽宁。在 SSP245 情景驱动下,吉林、辽宁、黑龙江省的绿水风险较 SSP585 情景分别降低 2.2%、13.4% 和 1.6%;而内蒙古东四盟、辽宁、黑龙江省的蓝水风险较 SSP585 情景分别升高 13.1%、55.1% 和 15.0%。未来气候情景下农业用水在生育前期风险集中的原因是供需水错配与补给的不稳定。[结论] 作物绿水供需失衡进一步强化蓝水代偿需求,高排放情景下农业用水的不确定性与风险更高,研究结果为区域提升农业气候韧性、实现粮食安全与水资源可持续利用提供了科学支撑。

关键词: 农业用水安全; 作物需水量; CMIP6; 东北地区

中图分类号: P467; S162.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)03-0351-16

Spatiotemporal Evaluation of Agricultural Water Security in Northeast China under Future Climate Scenarios

REN Feifei^{1,2}, WU Hailin^{1,2}, AN Min^{1,3}

(1.Hubei Provincial Key Laboratory of Hydropower Engineering Construction and Management

(China Three Gorges University), Yichang, Hubei 443002, China; 2.College of Hydraulic and

Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China;

3.College of Economics and Management, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China)

Abstract: [Objective] As a high water-consuming industry, agriculture relies on the coordination of blue and green water for crop water use. Future climate change will disturb the blue and green water cycles by affecting crop water requirements (ETc) and threaten agricultural water security. Therefore, in the face of severe challenges for sustainable water resource management, predicting agricultural water security is of great significance. [Methods] Taking northeast China as the study area, based on the CMFD reanalysis dataset from 1998 to 2024 and meteorological data under two emission scenarios (SSP245 and SSP585) from 2031 to 2090 derived from five climate models in CMIP6, the Hargreaves equation and crop coefficients were used to calculate ETc, and a dual-index evaluation system for blue and green water was constructed. Combined with the crop water

收稿日期: 2025-10-28

修回日期: 2025-12-22

录用日期: 2025-12-29

网络首发日期(www.cnki.net): 2026-03-03

资助项目: 教育部人文社科基金项目(24YJC790002); 国家自然科学基金项目(72004116)

第一作者: 任菲菲(2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事区域农业用水安全研究。E-mail: renfeifei@ctgu.edu.cn

通信作者: 吴海林(1977—), 男, 博士, 教授, 主要从事水资源管理研究。E-mail: whlctgu@ctgu.edu.cn

http://stbcbx.alljournal.com.cn

deficit index (CWDI), the spatiotemporal evolution trends of agricultural water security in northeast China under future climate scenarios were analyzed. **[Results]** The spatiotemporal characteristics of agricultural green and blue water security in northeast China differed significantly under future climate scenarios. Temporally, the green water risk decreased significantly under both SSP245 and SSP585 scenarios. In the long term, the green water risk under SSP245 was 12.4% lower than that under SSP585, while the blue water risk was 4.1% higher. Spatially, under the SSP245 scenario, high-green-water-risk areas were concentrated in Liaoning Province, and blue water stress intensified significantly in Liaoning Province and the four eastern leagues of Inner Mongolia. Under the SSP585 scenario, the overall green water risk decreased, and areas with extremely high blue water stress were concentrated in Liaoning Province. Under the SSP245 scenario, the green water risk in Jilin, Liaoning, and Heilongjiang decreased by 2.2%, 13.4%, and 1.6%, respectively, compared to the SSP585 scenario, while the blue water risk in the four eastern leagues of Inner Mongolia, Liaoning, and Heilongjiang increased by 13.1%, 55.1%, and 15.0% respectively. The concentration of agricultural water use risk in the early growth stage under future climate scenarios was attributed to the mismatch between water supply and demand and unstable water recharge. **[Conclusion]** The imbalance between the supply and demand of crop green water further strengthens the compensatory demand for blue water. The uncertainty and risk of agricultural water use are higher under the high-emission scenario. The findings of this study provide scientific support for enhancing regional agricultural climate resilience and achieving food security and sustainable water resources utilization.

Keywords: agricultural water security; crop water requirement; CMIP6; northeast China

Received: 2025-10-28

Revised: 2025-12-22

Accepted: 2025-12-29

Online(www.cnki.net): 2026-03-03

农业作为全球水资源消耗的首要产业,其用水量占人类总取水量的比例高达 70%^[1]。2023 年中国农业用水量为 3 672.40 亿 m³,占用水总量的 62.0%。其中,蓝水(地表水或地下水)作为灌溉系统的关键水源^[2-3],与绿水(土壤水)构成的雨养农业动态平衡机制^[4],共同形成作物水分利用的完整路径^[5]。而未来气候变化作为 21 世纪全球可持续发展的核心挑战^[6],通过气温与降水模式改变显著影响作物需水量(ETc),进而导致农业蓝水与绿水循环发生变化,最终影响区域农业用水安全^[7]。农业用水安全是未来气候情景下保障粮食安全和农业可持续发展的关键议题^[8-9],东北地区作为我国重要的粮食生产基地,其农业用水安全对全国粮食供给具有重大战略意义^[10]。然而,该地区以仅占全国 8.9% 的水资源总量,支持的粮食产量占比高达 26.4%,并且受气候变化影响,ETc 改变导致土壤水分流失加速、灌溉需求持续攀升,进一步激化蓝绿水资源的平衡危机^[11-12]。尽管现有研究^[13]已关注到未来气候变化对农业用水安全的影响,但在农业用水安全的评价与预测方面仍存在不足,特别是在未来气候情景下,对农业用水动态变化研究较为欠缺,难以全面反映东北地区农业用水安全状况。

近年来,农业用水安全研究逐步从单一要素评估转向蓝绿水协同评估模式。从研究脉络来看,早

期研究多聚焦于单一水资源要素的分布变化,如赵良仕等^[14]基于灌溉用水需求构建农业灌溉用水需求模型发现,农作物种植结构、用水效率等是影响农业灌溉用水需求的主要因素;王玉宝等^[15]、邢霞等^[16]通过构建农业用水安全模型评估绿水资源对农业用水安全的影响发现,农业绿水的空间分布不平衡,没有考虑蓝水与绿水对农业用水安全的共同作用。随后,研究视角扩展至蓝水和绿水对农业用水安全的综合影响,如韩子言等^[17]、田嘉欣等^[18]、MA 等^[19]基于华北与黄河流域的研究结果显示蓝水不安全性高于绿水,表明单一水资源评估已难以全面反映农业用水安全的真实情况,凸显蓝绿水协同评估的重要性。然而,作为重要农业区的东北黑土区,现有研究多关注于绿水要素的影响,忽视波动性更大的蓝水要素。

同时,农业用水安全研究也逐步从历史时期静态分析转向未来情景动态预测。早期研究多依赖历史数据,如 DEHGHANPIR 等^[20]、庞爱萍等^[21]基于历史气象数据研究区域农业用水安全,没有考虑到未来气候变化对农业用水的动态影响。随后,ABDO 等^[7]、闫旖君等^[22]虽基于 CMIP5 气候模式预测未来农业用水安全的时空变化趋势,但其粗分辨率限制预测结果的实践价值。综上,当前农业用水安全研究存在 2 个方面局限性:一是时序上多聚焦于历史时期,未来导向

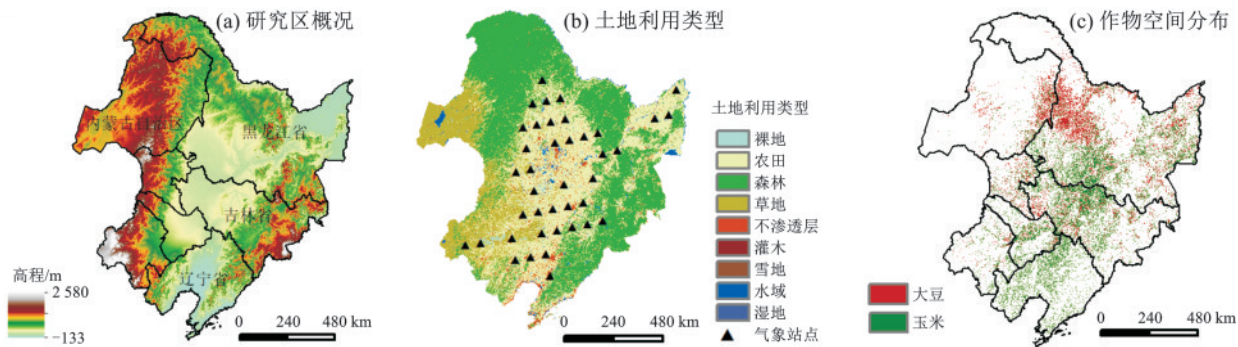
的研究不足;二是要素评估上仍以单一蓝水或绿水为主,尚未形成未来预测和蓝绿水结合的评价体系。因此,本文基于实测气象数据和CMIP6多模式数据,构建PCDI指数和AWSI指数,并结合CWDI指数对基准期(1998—2024年)和未来期(2031—2090年)在不同情景(SSP245、SSP585)下农业用水安全的时空变化进行深入分析,综合评估绿水和蓝水2种因素对东北地区的农业用水安全的影响。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

东北地区(38°43′~53°30′N,115°30′~135°30′E),包括黑龙江、辽宁、吉林三省及内蒙古东四盟(兴安、

赤峰、通辽、呼伦贝尔),是我国重要的温带农业区与粮食主产区。该地区耕地面积 $23.3\times10^6\text{ hm}^2$,占全国耕地总面积16.8%,其玉米、大豆产量分别占全国总产量的35%和45%,是我国优质耕地资源集中分布区。区域农业以雨养农业为主,占耕地总面积65%以上,广泛分布于黑龙江、吉林中西部、内蒙古东四盟及辽宁西部,生产完全依赖自然降水;土地利用以农田、森林、草地为主,主要作物类型有大豆和玉米,其中2024年大豆和玉米种植面积分别占全国的62.03%和40.94%(图1)。该地区年降水量400~1 000 mm,降水集中在6—8月占全年60%~70%,此种气候条件导致“春旱夏涝”的水资源错配格局。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号GS(2019)1822号的标准地图制作,底图无修改。下同。

图1 研究区概况、土地利用类型及作物空间分布

Fig.1 Overview, land use type, and spatial distribution of crops in study area

1.2 数据来源

基于国家地球系统科学数据中心发布的东北地区2021年玉米、大豆30 m分辨率的作物分布数据(<https://essd.copernicus.org>)确定站点位置。基准期的逐日最高气温、最低气温、平均气温、降水数据来自国家青藏高原科学数据中心(<https://data.tpcd.ac.cn>)提供的中国区域地面气象要素驱动数据集(1979—2024)(China meteorological forcing dataset, CMFD),逐日作物需水量数据是由降尺度矫正后的CMFD数据计算得到。从水资源公报^[23]中获得1998—2024年区域水资源数据、1998—2024年总用水量。1998—2024年耕地面积、灌溉面积和作物播种面积数据源自《中国统计年鉴》^[24]。作物系数(K_c)取值参考针对东北地区的既有研究,并结合东北地区气象要素特征进行区域针对性修正^[10]。

采用CMIP6情景数据中2种共享社会经济路径(shared socioeconomic pathways, SSPs)和5种全球气候模式(global climate models, GCMs)分析未来气候情景下的农业用水安全。采用的5种气候模式为国际广泛认可且对东北地区有较好适用性的ACCESS-C、CanESM5、IPSL-CM6、MIROC6、MRI-ESM2^[25-26],

为减少每种模式的特异性,降低模式之间的差异,将5种模式进行集合平均处理。气候情景采用中等强迫SSP245和高强迫SSP585 2种情景,并选取1998—2024年作为基准期,将未来2031—2090年划分为3个研究时段:近期(2031—2050年)、中期(2051—2070年)和远期(2071—2090年)。为提高研究结果的精度,所有气象栅格数据采用Delta降尺度方法统一处理为 $1^\circ\times1^\circ$ 空间分辨率,具体信息见表1。

1.3 作物需水量计算

1.3.1 未来气象数据处理 CMIP6气候模式的空间分辨率普遍较低,难以直接用于模拟区域尺度的气候情景演变。为满足区域尺度气候模拟对高分辨率数据的需求,文章选用Delta降尺度方法进行数据处理。该方法主要是通过叠加气象站点历史实测数据与区域未来气候情景的变化值(含相对变化、绝对变化),修正未来气候情景下的模式输出偏差^[27]。Delta降尺度方法计算公式为:

$$\Delta(P) = P_{\text{obs}} / P_{\text{gcm}_{\text{s}}_{\text{his}}} \tag{1}$$

$$\Delta(T) = T_{\text{obs}} - T_{\text{gcm}_{\text{s}}_{\text{his}}} \tag{2}$$

$$P'_{\text{gcm}_{\text{s}}_{\text{rcp}}} = \Delta(P) \times P_{\text{gcm}_{\text{s}}_{\text{rcp}}} \tag{3}$$

$$T'_{\text{gcm}_{\text{s}}_{\text{rcp}}} = \Delta(T) + T_{\text{gcm}_{\text{s}}_{\text{rcp}}} \tag{4}$$

式中: P_{obs} 为观测的降水数据, mm; $P_{\text{gcms_his}}$ 为 GCMs 数据的历史降水, mm; $\Delta(P)$ 为降水差异系数; $P_{\text{gcms_rcp}}$ 为未矫正的降水, mm; $P'_{\text{gcms_rcp}}$ 为偏差矫正后的降水, mm; T_{obs} 为观测的气温数据, $^{\circ}\text{C}$; $T_{\text{gcms_his}}$ 为 GCMs 数据的历史气温, $^{\circ}\text{C}$; $\Delta(T)$ 为气温差, $^{\circ}\text{C}$; $T_{\text{gcms_rcp}}$ 为未矫正的气温, $^{\circ}\text{C}$; $T'_{\text{gcms_rcp}}$ 为偏差矫正后的气温, $^{\circ}\text{C}$ 。

表 1 5 种全球气候模型 (GCMs)
Table 1 Overview of five global climate models (GCMs)

模式 编号	模式名称	所属国家	原始分辨率/ ($^{\circ}$)	处理后分 辨率/($^{\circ}$)
1	ACCESS-C	澳大利亚	0.5×0.5	1×1
2	CanESM5	加拿大	2.8×2.8	1×1
3	IPSL-CM6	法国	2.50×1.25	1×1
4	MIROC6	日本	1.4×1.4	1×1
5	MRI-ESM2	日本	1.1×1.1	1×1

研究未来气候变化时,采用多种气候模式集合平均的计算方法来降低单一模式所带来的不确定性

影响,得到的数值称为平均值(MME),计算公式为:

$$P_{\text{MME}}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^nP_i$$

(5)

式中: P_{MME} 为多模式集合平均的结果; n 为多模式的模式总数; P_i 为某模式的模拟值。

基于 CMIP6 多模式集合数据,采用 Delta 降尺度方法将原始气象数据统一至 $1^{\circ}\times1^{\circ}$ 空间分辨率,并结合东北地区 40 个气象观测站点的实测数据(1998—2024 年)进行偏差矫正与精度验证。由图 2 可知,降雨模拟值与观测值的线性拟合 R^2 为 0.68,表明降雨的模拟效果相对一般,数据离散性略高;而平均气温、最高气温、最低气温的模拟值与观测值拟合 R^2 分别达 0.98、0.92、0.92,数据点紧密贴合线性拟合线,体现出气温类变量的模拟精度较高; ET_0 的模拟值与观测值拟合 R^2 为 0.91,同样表现出较好的一致性。综上所述,该模拟方案对气温及 ET_0 的模拟能力较强,对降雨的模拟精度虽稍弱但仍具备一定可靠性,在地形复杂、气候异质性显著的东北地区具有较好的适应性。

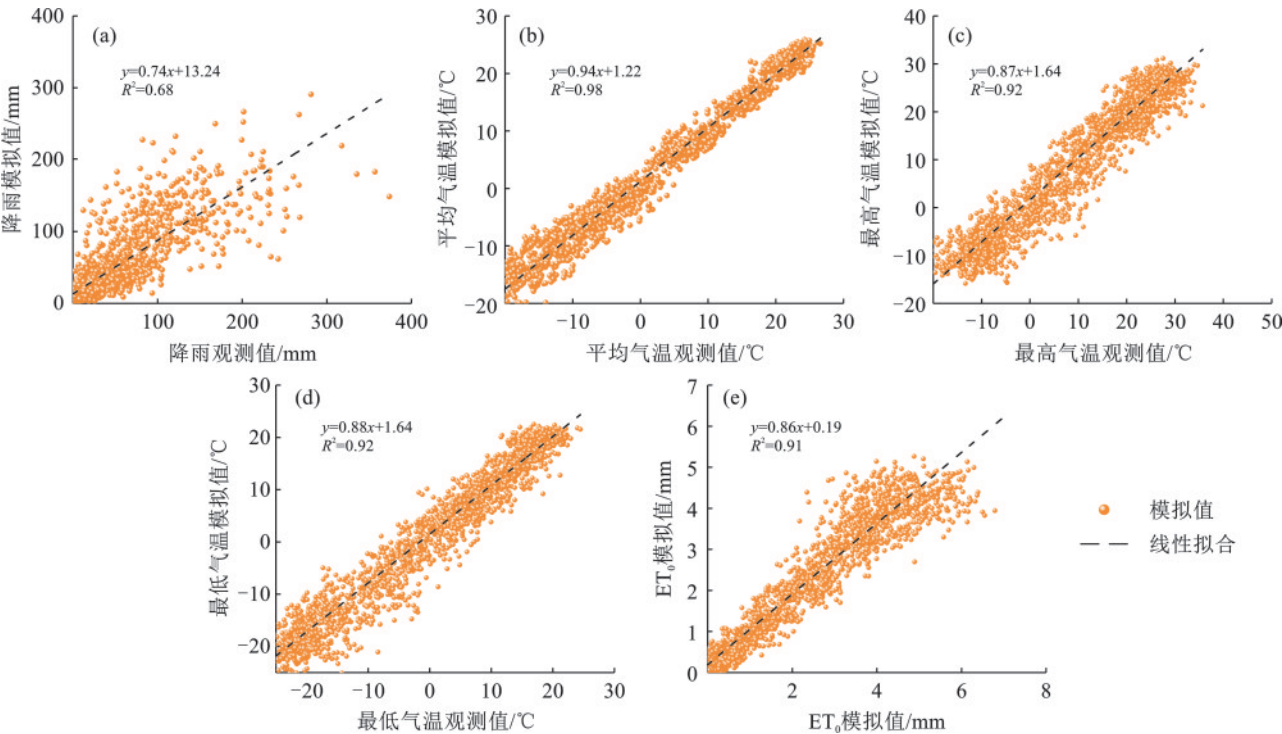


图 2 1998—2024 年各气象要素矫正后数据相关性
Fig.2 Correlation analysis of corrected data for meteorological elements (1998—2024)

1.3.2 作物需水量计算 使用 HARGREAVES 等^[28]在 1985 年提出的 H-S 模型计算参考作物蒸散量 (ET_0),该方法在缺少太阳辐射和风速等气象资料的地区被广泛使用。计算公式为:

$$\text{ET}_0=0.002\,3\times\left[(T_{\text{max}}-T_{\text{min}})^{0.5}\right](T_{\text{mean}}+17.8)\frac{R_a}{\lambda}(6)$$

$$R_a=\frac{24\times60}{\pi}G_{\text{sc}}d_r\times(\omega_s\sin\varphi\times\sin\delta+\cos\varphi\times\cos\delta\times\sin\omega_s)$$

(7)

式中: ET_0 为参考作物蒸散量, mm/d; T_{max} 、 T_{min} 和 T_{mean} 分别为日最高温度、日最低温度、日平均温度, $^{\circ}\text{C}$; R_a 为大气顶层辐射, $\text{MJ}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$; λ 为汽化潜热常数,取

值 2.45 MJ/kg; G_{sc} 为太阳常数,取值 0.082 0 MJ/($m^2 \cdot min$); dr 为日地相对距离的倒数, km; ω_s 为日落时角, rad; φ 为纬度所转换的弧度, rad; δ 为太阳磁偏角, rad。其中, dr 、 ω_s 、 φ 、 δ 等计算公式为:

$$\delta = 0.409 \sin \left(\frac{2\pi}{365} J - 1.36 \right) \quad (8)$$

$$dr = 1 + 0.033 \cos \left(\frac{2\pi}{365} J \right) \quad (9)$$

$$\phi = \frac{\pi}{180} (\varphi) \quad (10)$$

表 2 不同生长季玉米、大豆的作物系数及天数

Table 2 Crop coefficients and days of maize and soybean during different growing seasons

作物	参数	初始生长期	生长发育期	生长中期	生长末期	生长季/d
玉米	时间(月-日)	05-01—05-20	05-21—06-25	06-26—08-25	08-26—09-26	149
	K_c	0.30	0.80	0.80	0.35	
大豆	时间(月-日)	05-10—06-05	06-06—06-30	07-01—08-25	08-26—09-06	120
	K_c	0.40	0.78	0.78	0.50	

1.4 农业用水安全计算方法

1.4.1 降水栽培可靠性指数(PCDI) ABDO等^[7]提出一种新型的简化指数,来描述气候变化条件下农业绿水的变化^[30]。该指数通过有效降水体积与作物需水量的比值计算得出。计算公式为:

$$PCDI = \frac{AWR_{green}}{ETc} \quad (13)$$

式中:PCDI为降水栽培可靠性指数,衡量的是“绿水”的充足性与稳定性,其值越接近1,说明降水越能满足作物水分需求; <1 则表明存在干旱胁迫,需要灌溉补充。根据植物的平均土壤耗水量进行分类^[29]:极高可靠性区间($PCDI \geq 1.00$,降水完全满足作物需水,无需灌溉)、高可靠性区间($0.85 \leq PCDI < 1.00$,降水高度满足,灌溉需求较低)、中可靠性区间($0.70 \leq PCDI < 0.85$,降水中度满足,需适度灌溉)、低可靠性区间($0.40 \leq PCDI < 0.70$,降水低度满足,灌溉需求较高)、极低可靠性区间($PCDI < 0.40$,降水极低满足,需大量灌溉)。耕地有效降水量 AWR_{green} 由耕地面积和有效降水量确定^[31],计算公式为:

$$AWR_{green} = 10 \times A \times Pe \quad (14)$$

$$Pe = \begin{cases} P \times (4.17 - 0.02P) & P < 8.3 \\ 4.17 + 0.1 \times P & P \geq 8.3 \end{cases} \quad (15)$$

式中: AWR_{green} 为耕地有效降水量, m^3 ; A 为区域耕地面积, hm^2 ; Pe 为有效降水量, mm ; P 为日降水量, mm/d 。

1.4.2 农业水分胁迫指数(AWSI) 农业水分胁迫指数与作物蒸散量、有效降水量和水资源量等有关,

$$\omega_s = \arccos(-\tan \phi \times \tan \delta) \quad (11)$$

式中: J 为农作物生育期的时间序数; φ 为研究区域的纬度, rad。

作物需水量根据作物系数(K_c)和参考作物蒸散量(ET_0)计算,计算公式为:

$$ETc = K_c \times ET_0 \quad (12)$$

式中:ETc为作物需水量, mm/d ; K_c 为作物系数。采用孙敬轩等^[12]基于FAO56划分的生长季,并结合东北地区气象要素和实际作物需水量对作物系数进行修正的值^[29](表2)。

反映区域农业缺水情况^[32]。具体计算公式为:

$$AWSI = \frac{\sum_{k=0}^n (ETc + NW - Pe)}{AW_{blue}} \quad (16)$$

式中: NW 为用于补偿所用系统灌溉效率降低所需的水量, m^3/hm^2 ; AW_{blue} 为常规资源量, m^3 ; n 为农作物种类。AWSI根据缺水情况可分为5类:无水胁迫(<0.1)、低水胁迫($0.1 \sim 0.2$)、中水胁迫($0.2 \sim 0.4$)、高水胁迫($0.4 \sim 0.8$)和极高水胁迫(>0.8)。计算公式为:

$$NW = \alpha \times ETc \quad (17)$$

$$AW_{blue} = WR \times \frac{AWU}{WU} \quad (18)$$

式中: WR 、 AWU 、 WU 分别为区域水资源总量、区域农业用水量、总用水量, m^3 ; α 为蒸发损失系数, %。其中,灌溉面积 $< 2 \times 10^4 \text{ } hm^2$, $\alpha = 3.0\%$;灌溉面积 $= 2 \times 10^4 \sim 2 \times 10^5 \text{ } hm^2$, $\alpha = 5.0\%$;灌溉面积 $> 10^5 \text{ } hm^2$, $\alpha = 8.0\%$ ^[33]。

1.4.3 作物水分亏缺指数(CWDI) 作物水分亏缺指数(CWDI)能够量化作物在特定时段内的累计水分盈亏状态,直观反映作物供水与需水的匹配关系,且可有效表征农田土壤湿润程度及作物面临的旱涝胁迫状况^[34-35]。

$$CWDI = \begin{cases} \frac{ETc_i - P_i}{ETc_i} \times 100\% & ETc_i \geq P_i \\ 0 & ETc_i < P_i \end{cases} \quad (19)$$

式中: P_i 为第*i*月的降水量, mm ; ETc_i 为第*i*月的作物需水量, mm 。根据农业干旱等级分级及其他研究^[36]

结果,确定农作物干旱分级标准:特旱, $CWDI>70\%$;重旱, $50\%<CWDI\leq 70\%$;中旱, $35\%<CWDI\leq 50\%$;轻旱, $20\%<CWDI\leq 35\%$;无旱, $<20\%$ 。

不同等级农业干旱发生频率是刻画作物生育期内干旱风险分布特征的关键量化指标之一。该频率的计算方式定义为某一时段内发生某等级干旱的年次数(n)与统计年份总年数(N)的比值,计算公式为:

$$F=\frac{n}{N}\times 100\%$$

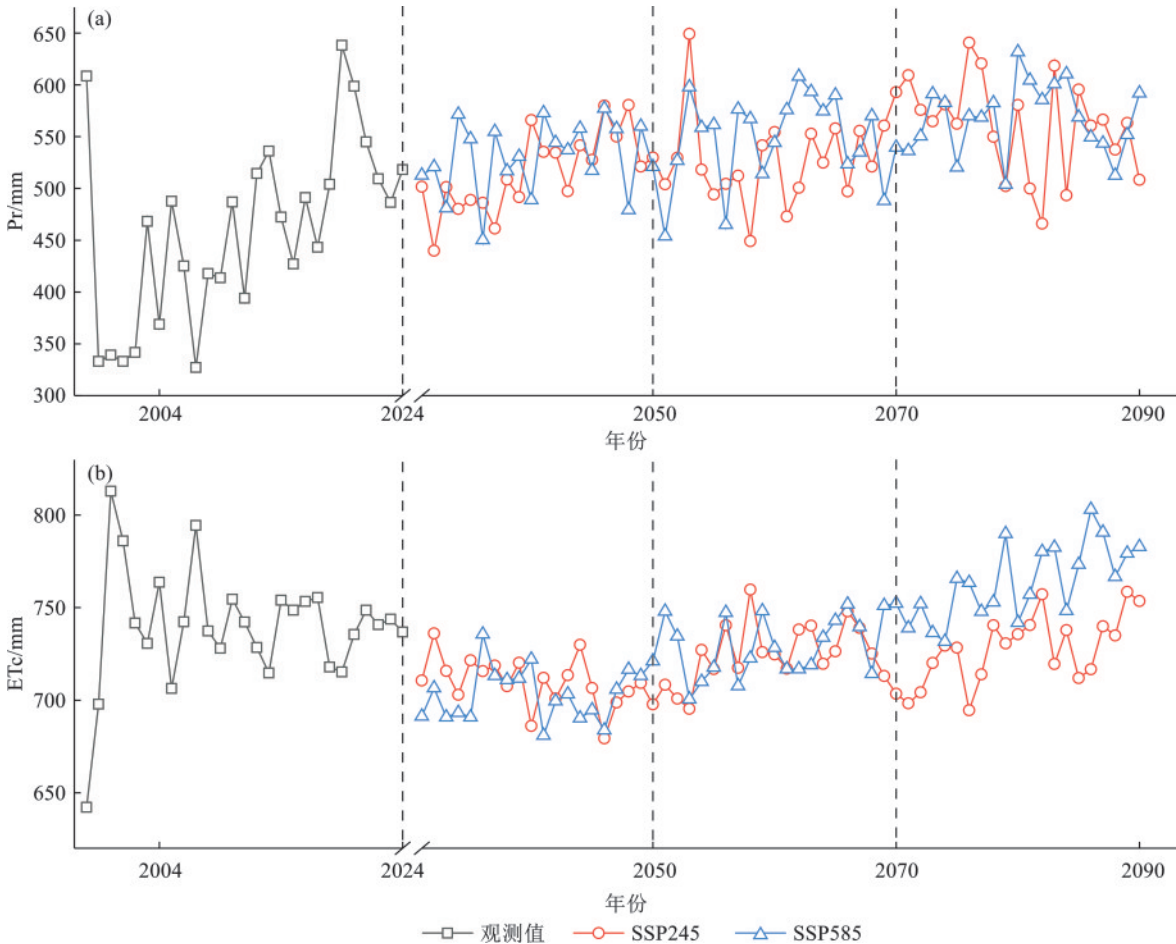
(20)

式中: F 为某等级农业干旱的发生频率, $\%$; n 为统计时段内发生该等级干旱的年次数; N 为统计年份的总年数。

2 结果与分析

2.1 作物需水量时空变化趋势

2.1.1 时间变化趋势 作物需水量与降水紧密相关,研究降水量的时空变化对评估农业用水安全至关重要。由图 3 可知,降水量在基准期呈增加趋势,未来期波动幅度较大。基准期(1998—2024 年)东北地区 5—9 月降水整体上呈增加趋势,增加速率为 $44.7\text{ mm}/(10\text{ a})$ 。与基准期相比,未来气候情景 SSP245 和 SSP585 情景下,2031—2090 年降水呈现波动上升趋势,增加速率分别为 10.77 、 $9.38\text{ mm}/(10\text{ a})$ 。在 SSP245 情景下,降水总体增加 26.9% ,在近期、中期及远期分别增加 22.5% 、 25.9% 、 30.0% ;在 SSP585 情景下,降水总体增加 30.1% ,在近期、中期及远期分别增加 26.1% 、 31.2% 、 35.9% 。



注:Pr为降水量;ETc为作物需水量;图a为每年5—9月总降水量变化趋势;图b为每年5—9月总ETc变化趋势。

图 3 基准期及未来气候情景下 5—9 月东北地区降水量和 ETc 年际变化趋势

Fig.3 Interannual variation trends of precipitation and ETc in northeast China from May to September under baseline period and future climate scenarios

作物需水量(ETc)在基准期逐渐减少,未来期 2071 年后作物需水量依次为 $ETc(SSP585)>ETc(SSP245)$ 。基准期(1998—2024 年)东北地区 5—9 月作物需水量整体呈微弱减少趋势,增速为 $5.91\text{ mm}/(10\text{ a})$ 。与基准期相比,未来气候情景 SSP245 和

SSP585 情景下 2031—2090 年作物需水量的增加速率分别为 4.76 、 $14.84\text{ mm}/(10\text{ a})$ 。在 SSP245 情景下, ETc 在近期无明显增加趋势,中期及远期分别增加 1.6% 、 3.8% ;在 SSP585 情景下, ETc 近期、中期无明显增加趋势,远期增幅 3.3% 。远期 ETc 平均值

(763.80 mm)超过基准期水平(739.64 mm)。

结合东北地区主要作物(玉米、大豆)的生育期特征,将5—9月划分为生育前期(5月)、生育中期(6—8月)及生育后期(9月)3个关键阶段,基于此探究基准期与未来(SSP245、SSP585情景)降水与作物需水量(ETc)的阶段化演变规律(图4)。1)生育中期7月为降水峰值期(中位数普遍超过150 mm),与作物需水关键期形成自然供需耦合状态;而生育前期5月及生育后期9月降水相对匮乏(中位数多低于100 mm)。2)从时期变化看,基准

期的降水离散度显著大于未来情景,而未来从近期到中期、远期在SSP245和SSP585情景下的降水量中位数呈波动上升趋势,分布范围也逐渐增加,其中生育前期5月降水波动性加剧,进一步放大春旱风险的不确定性。3)从情景差异看,SSP585情景的降水量始终高于SSP245,二者的降水差距随时期推进有所扩大,且SSP585的降水量离散度更突出,表明高排放情景下降水供给增量显著但稳定性弱化,容易引发生育前期干旱、生长中期涝渍的情况。

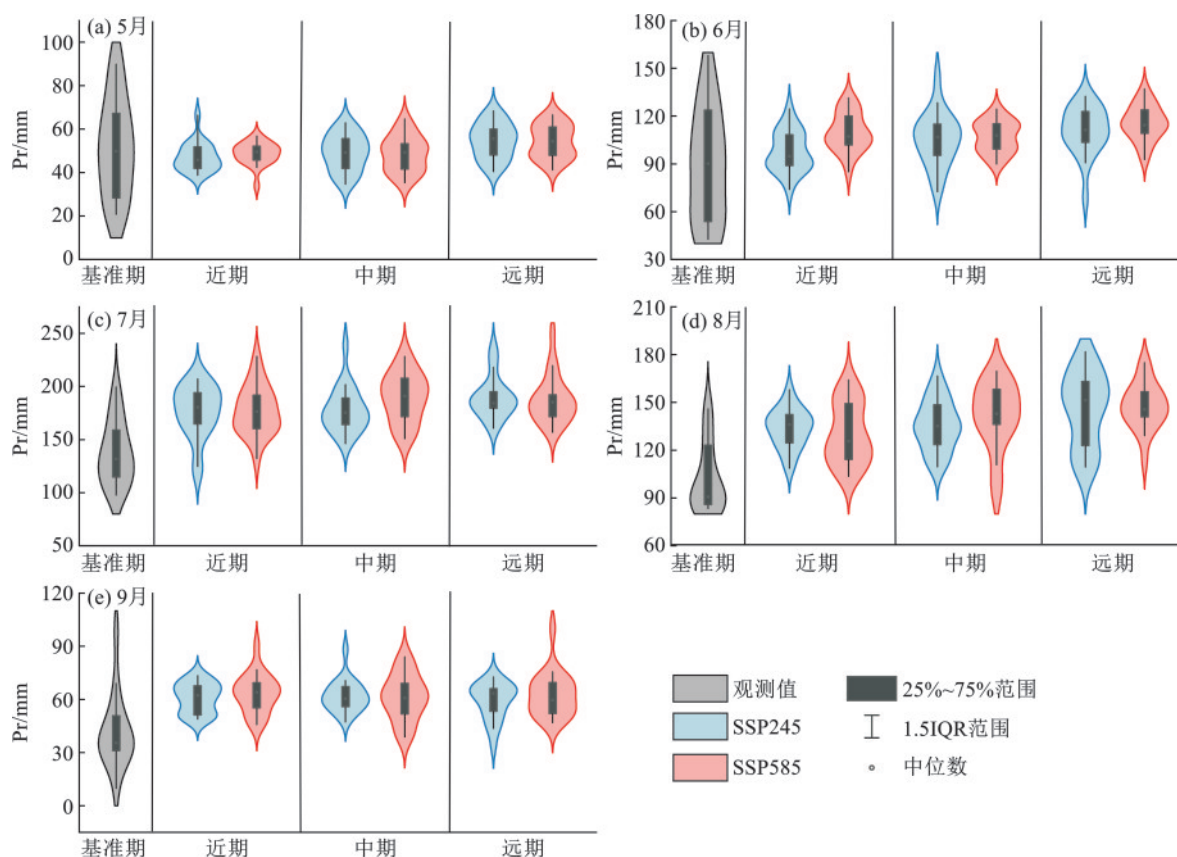


图4 基准期及未来气候情景下5—9月东北地区逐月降水量变化趋势

Fig.4 Variation trends of monthly precipitation in northeast China from May to September under baseline period and future climate scenarios

从作物需水量演变特征(图5)来看,作物需水的阶段分异与作物生育规律高度契合:1)生长中期6—8月为作物需水高峰期,中位数普遍超过200 mm,该阶段作物需水量占全生育期的70%以上,是农业水资源调配的核心时段;生育前期5月作物需水量虽低(占比约10%),但需水稳定性直接决定作物生长;生育后期9月作物需水量逐步降低。2)从时间变化上来看,从基准期到未来各阶段,各生长阶段需水量中位数均呈持续上升趋势,其中生长期增幅最显著,SSP585远期较基准期增幅达38%。3)情景对比上,SSP585情景各阶段需水量均高于SSP245情景,而基准期需水量离散度大于未来情景,反映未来气候

情景下作物需水量波动更趋于稳定。此特征表明,未来气候情景下东北地区作物需水压力将沿“生育前期-生长中期-生育后期”逐阶段凸显,高排放情景下压力更突出,尤其是作物生长中期需水量高峰与降水波动的叠加,以及生育前期干旱风险的加剧,需重点优化农业水资源的阶段性调配策略。

2.1.2 空间分布特征 由图6可知,从空间分布上来看,总降水量在基准期和未来SSP245情景下整体上呈西低、南北高,未来SSP585情景下呈现东北低、西北高的空间分布特征。具体来看:1)基准期降水量在东南部最大超过730 mm,西部地区局部降水量最低达100 mm,其中黑龙江(453.82 mm) > 吉林

(441.13 mm) > 辽宁(438.54 mm) > 内蒙古东四盟(345.95 mm)。2) 未来期降水量空间分布, 在 SSP245 情景下各地区年平均降水量依次为辽宁(601.75 mm) > 吉林(557.28 mm) > 黑龙江(541.70 mm) > 内蒙古东四盟(470.28 mm); 在 SSP585 情景

下西部降水量增加, 东北部降水量逐渐减少, 其中吉林(561.16 mm) > 内蒙古东四盟(555.53 mm) > 黑龙江(550.18 mm) > 辽宁(505.36 mm)。3) 降水量空间相对变化, 未来 2 种情景下东北地区降水量增加量呈西高东低的空间分布特征。

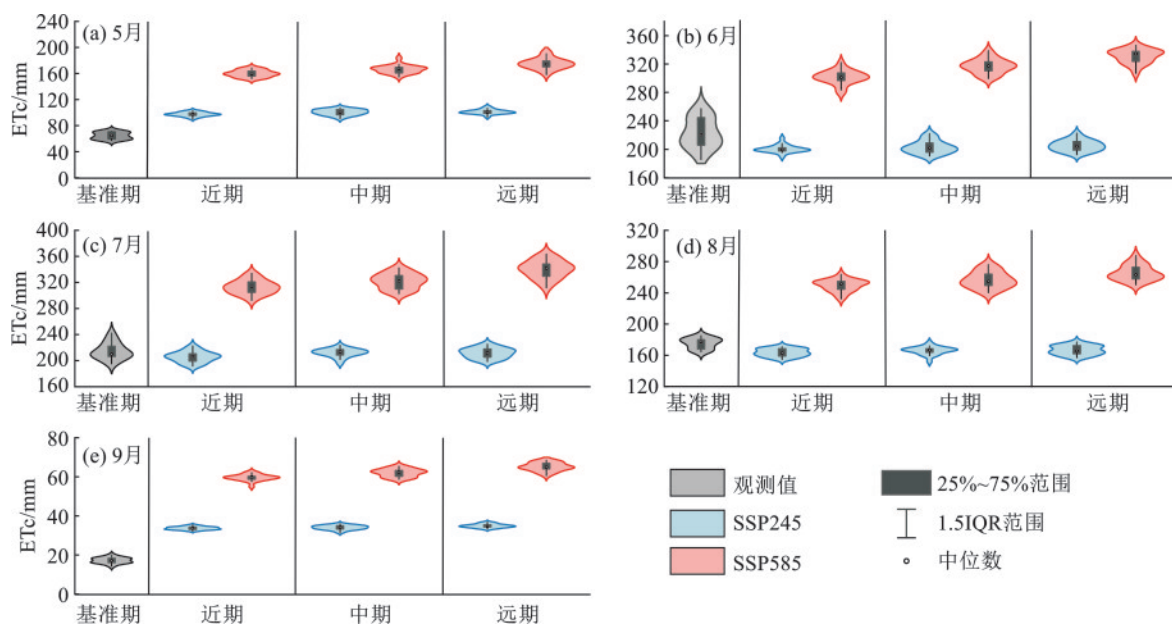


图5 基准期及未来气候情景下5—9月东北地区逐月作物需水量变化趋势

Fig.5 Variation trends of monthly crop water requirements in northeast China from May to September under baseline period and future climate scenarios

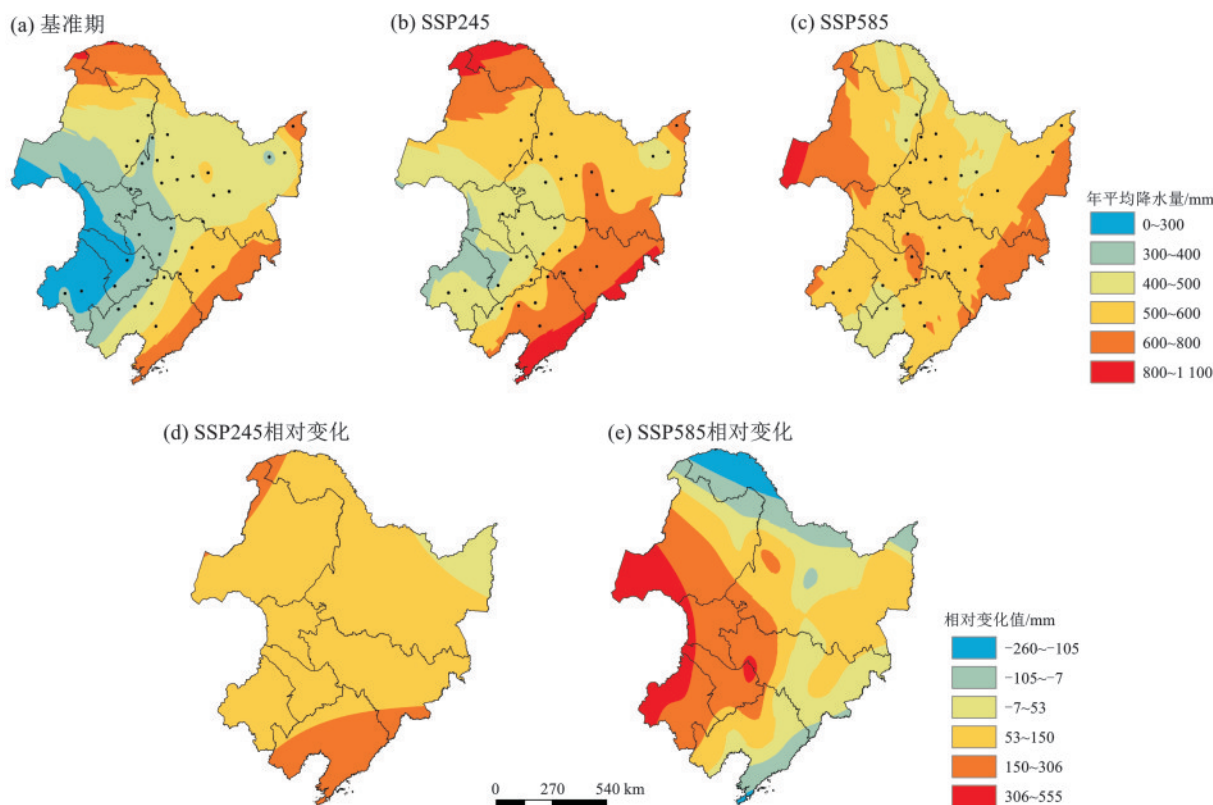


图6 基准期及未来气候情景下5—9月东北地区总降水量空间变化趋势

Fig.6 Spatial variation trends of total precipitation in northeast China from May to September under baseline period and future climate scenarios

由图 7 可知,作物需水量在基准期和未来期 2 种情景下整体上呈西高东低的空间分布特征。具体来看:1)基准期平均年作物需水量依次为内蒙古东四盟(730 mm)>辽宁(697 mm)>吉林(690 mm)>黑龙江(671 mm)。2)未来期作物需水量空间分布,在 SSP245 情景下作物需水量呈自西向东逐渐递减的空间分布特征,其中依次为内蒙古东四盟(731 mm)>辽宁(713 mm)>吉林(710 mm)>黑龙江(699 mm);在 SSP585 情景下作物需水量空间分布特征和 SSP245 一致,其中内蒙古东四盟(750 mm)>吉林(734 mm)>辽宁(731 mm)>黑龙江(719 mm),较基准期分别增加 2.7%、6.4%、4.9%、7.2%。3)从作物需水量空间相对变化上可看出,SSP245 情景下作物需水量在吉林增加最多(65 mm);在 SSP585 情景下作物需水量增加量呈中间高、两边低的特征。

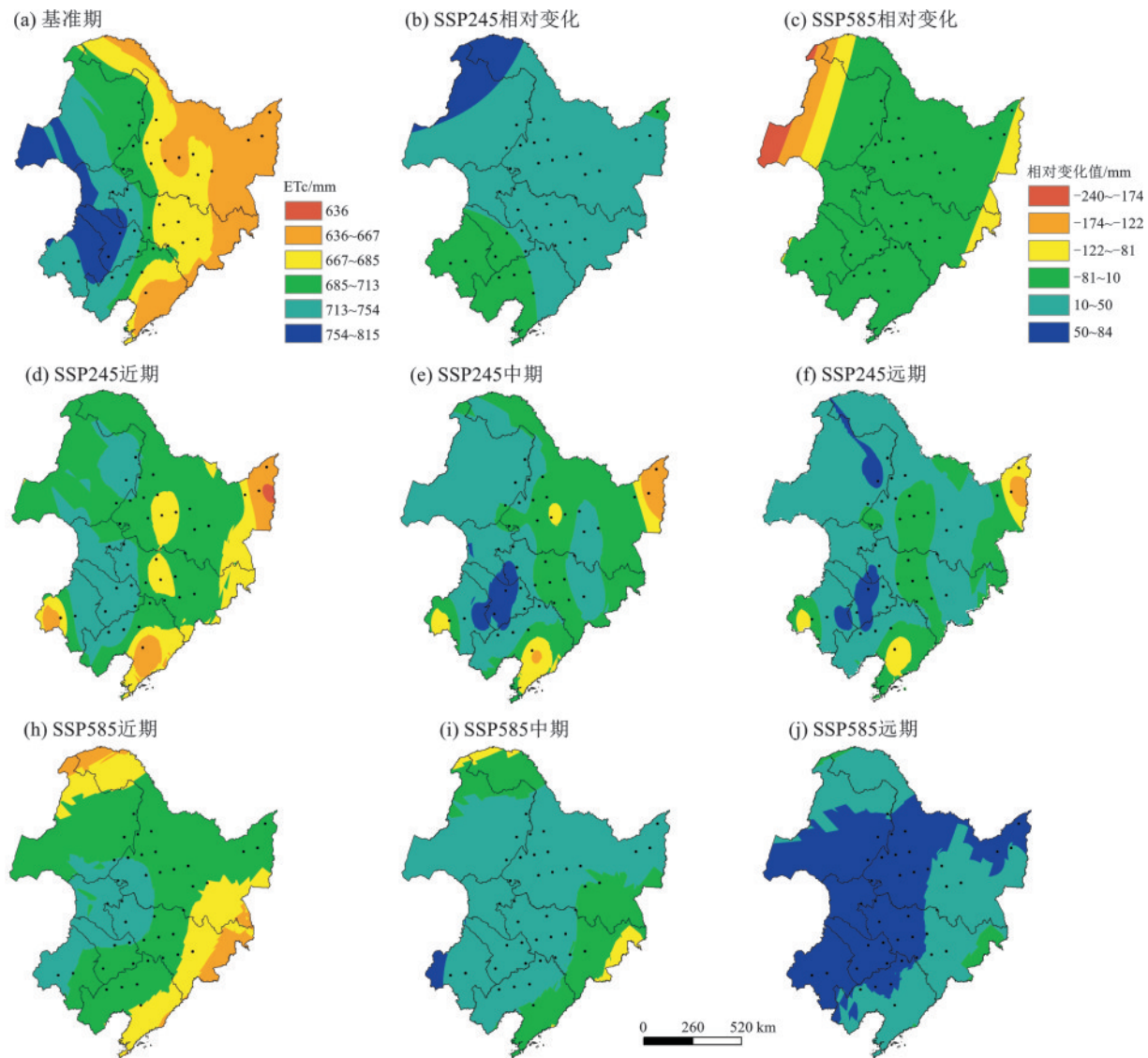


图 7 基准期及未来气候情景下 5—9 月东北地区 ETc 空间变化趋势

Fig.7 Spatial variation trends of ETc in northeast China from May to September under baseline period and future climate scenarios

2.2 东北地区蓝绿水时空变化特征分析

2.2.1 未来气候情景下农业绿水安全时空分布特征

由表 3 可知,未来 2031—2090 年不同情景(SSP245、SSP585)下,东北地区旱作物农业绿水安全呈现动态变化特征。基准期 PCDI 平均值为 0.54,整体处于低可靠性区间($0.4 \leq \text{PCDI} < 0.7$),表明该时段自然降水对旱作物栽培支撑有限,雨养农业“靠天吃饭”风险较高。相

较于基准期,不同情景下东北地区旱作物 PCDI 指标均有提升。在 SSP245 情景下,近期、中期、远期 PCDI 相对基准期的增长率分别约为 83.3%、79.6%、87.0%; SSP585 情景下,近期、中期、远期增长率分别约为 81.5%、79.6%、74.1%。对比 2 种情景,SSP245 情景下 PCDI 涨幅在远期更为突出。其中,远期 SSP245 情景下 PCDI 指标比在 SSP585 情景下高约 7.4%。

表 3 各情景下东北地区旱作物 PCDI 指标
Table 3 PCDI of dry crops in northeast China under different scenarios

地区	基准期	SSP245				SSP585		
	1998—2024 年	2031—2050 年	2051—2070 年	2071—2090 年	2031—2050 年	2051—2070 年	2071—2090 年	
吉林	0.55	0.99	0.97	1.01	0.99	0.97	0.95	
辽宁	0.51	1.01	0.99	1.04	0.91	0.89	0.87	
黑龙江	0.64	1.06	1.06	1.07	1.07	1.05	1.02	
内蒙古东四盟	0.46	0.88	0.87	0.91	0.97	0.95	0.93	
平均值	0.54	0.99	0.97	1.01	0.98	0.97	0.94	

由图 8 可知,从空间上来看,东北地区旱作物绿水安全呈现基准期全域中高风险、未来情景下整体风险降低但空间分化差异明显。基准期 PCDI 整体处于低可靠性区间($0.4 \leq \text{PCDI} < 0.7$),绿水用水风险程度呈现黑龙江(0.64) $<$ 吉林(0.55) $<$ 辽宁(0.51) $<$ 内蒙古东四盟(0.46)的格局。未来气候 SSP245 情景下,绿水安全整体上有所提升。其中黑龙江和辽宁的 PCDI 指标均 >1 ,PCDI 越高降水支撑越可靠、绿水风险越低,即黑龙江降水支撑可靠性最高,内蒙古东四盟相对低,且辽宁等区域随远期发展 PCDI 有波

动变化。SSP585 情景下风险整体降低但区域差异持续,风险程度依次为黑龙江(1.04) $<$ 吉林(0.97) $<$ 内蒙古东四盟(0.96) $<$ 辽宁(0.89),黑龙江、吉林中西部等农作物雨养区,降水对旱作物的支撑能力优于其他区域。2 种情景对比显示,相对于 SSP585 情景,在 SSP245 情景驱动下吉林、辽宁、黑龙江 PCDI 分别增加 2.2%、13.4%、1.6%,内蒙古东四盟下降 6.3%,该区域差异表明东北雨养区的绿水安全对不同气候情景的差异化响应,与东北灌溉区的分布无直接关联。

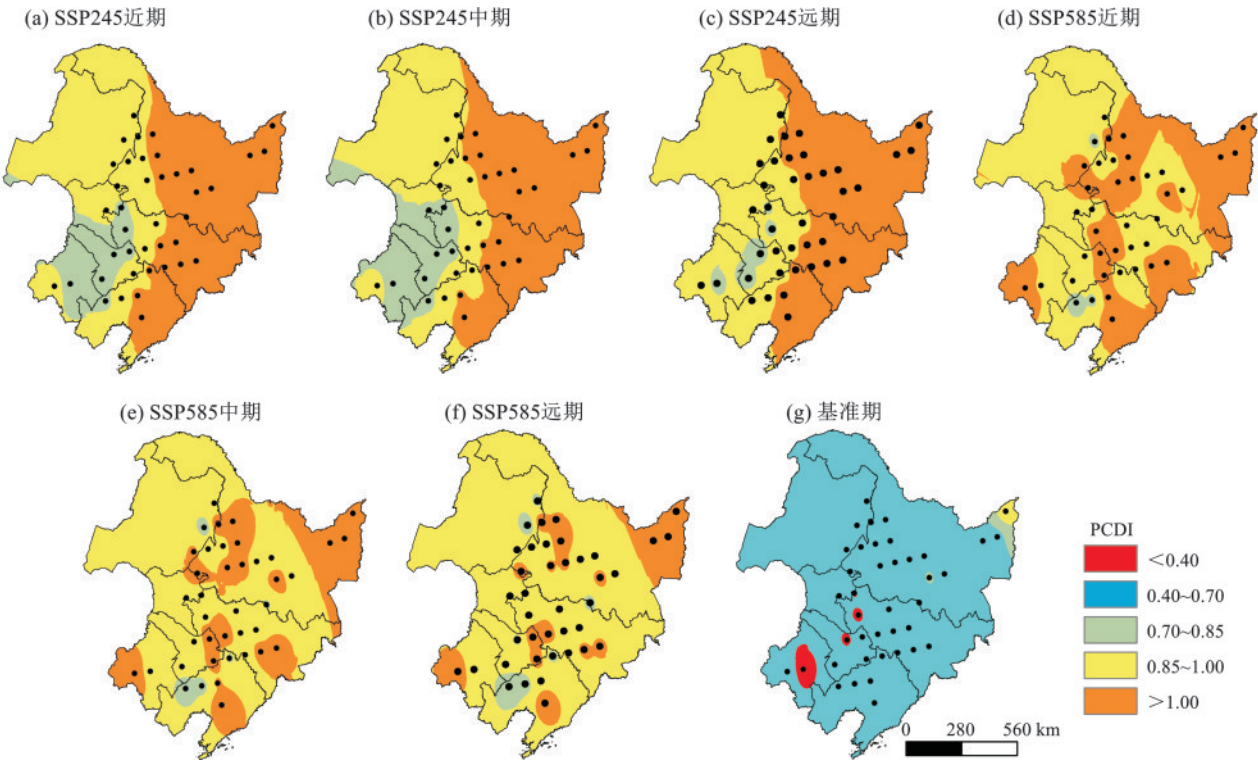


图 8 未来气候情景下东北地区旱作物 PCDI 指数的空间分布
Fig.8 Spatial distribution of PCDI index for dry crops in northeast China under future climate scenarios

2.2.2 未来气候情景下农业蓝水安全时空分布特征 根据上述对绿水用水安全结果的分析,无法全方位地描述未来气候情景下东北地区的农业用水安全,因此在完成绿水用水安全研究的基础上,进一步探讨未来气候对现实中可以控制和管理的农业蓝水安全的影响。

由表 4 可知,未来 2031—2090 年不同情景 (SSP245、SSP585)下,东北地区农业蓝水将面临极高水压胁迫风险($\text{AWSI} > 1$)。基准期东北地区蓝水整体上处于高水压胁迫状态($0.4 < \text{AWSI} < 0.8$)。相较于基准期,未来各情景下东北地区蓝水胁迫将进一步加剧并升级为极高水压胁迫状态。在 SSP245

情景下,近期、中期、远期的蓝水风险增长率分别达到 60.3%、61.4%、69.1%;SSP585 情景下,近期、中期、远期增长率分别为 59.4%、61.8%、65.1%。对比显示,SSP245 情景下蓝水风险涨幅更大。近期、中期

无明显差距,而远期 AWSI 较 SSP585 情景高出 4.1%。这种变化趋势表明极高蓝水胁迫将严重威胁农业用水安全,为东北农业水资源管理提供预警与调控路径。

表 4 各情景下东北地区旱作物 AWSI 指标
Table 4 AWSI of dry crops in northeast China under different scenarios

地区	基准期	SSP245			SSP585		
	1998—2024 年	2031—2050 年	2051—2070 年	2071—2090 年	2031—2050 年	2051—2070 年	2071—2090 年
吉林	0.51	1.26	1.26	1.32	1.27	1.29	1.32
辽宁	1.35	1.92	1.93	2.04	1.77	1.79	1.82
黑龙江	0.37	0.52	0.53	0.54	0.52	0.53	0.54
内蒙古东四盟	0.60	0.90	0.91	0.96	1.02	1.04	1.06
平均值	0.71	1.15	1.16	1.21	1.14	1.16	1.19

由图 9 可知,从空间上来看,东北地区蓝水风险基准期呈南高西低,未来 2 种情景下整体上呈北低南高的分布特征。具体来看:1)基准期蓝水用水安全的风险依次为辽宁(1.35)>内蒙古东四盟(0.60)>吉林(0.51)>黑龙江(0.37)。2)未来气候 SSP245 情景下,蓝水风险格局转变为北低南高。其中蓝水胁迫程度依次为辽宁(1.96)>吉林(1.28)>内蒙古东四盟(0.92)>黑龙江(0.53),吉林蓝水风险增幅较基准期达 2.4 倍,辽宁、内蒙古东四盟、黑龙江分别增加 43.0%、52.0%、46.0%。3)未来气候 SSP585 情景下,极高蓝水胁迫区集中在东北地区南部。其中辽宁达到峰值(1.79),黑龙江维持最低蓝水胁迫(0.60)。4)情景对比显示,SSP245 驱动下内蒙古东四盟、辽宁、黑龙江蓝水风险较 SSP585 分别增加 13.1%、55.1%、15.0%,吉林则下降 27.5%。

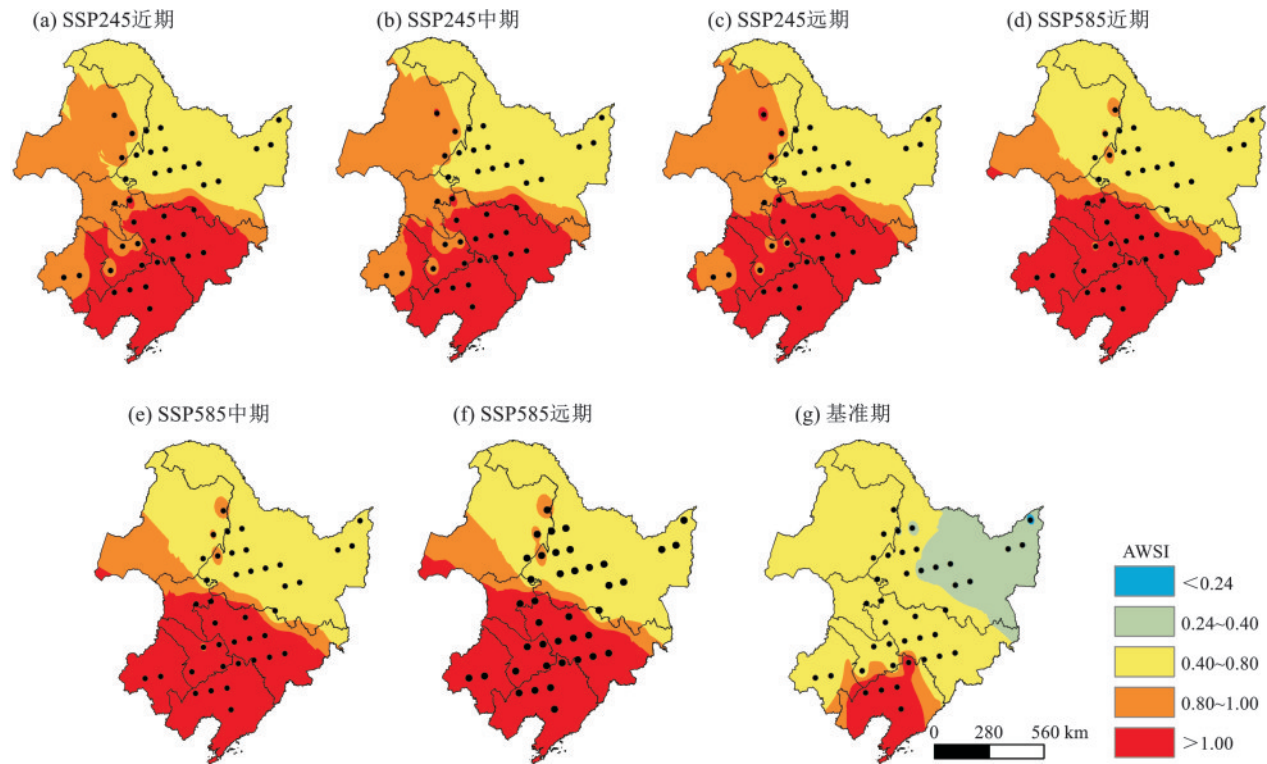


图 9 未来气候情景下东北地区旱作物 AWSI 指数的空间分布
Fig.9 Spatial distribution of AWSI index for dry crops in northeast China under future climate scenarios

2.3 未来气候情景下东北地区农业用水安全分析

2.3.1 未来气候对蓝绿水的综合影响 由图 10 可知,未来气候情景下降水与作物需水的匹配度持续

降低,ETc 的上升与 PCIDI 的衰减共同加剧绿水供需失衡,进而导致雨养农业用水安全风险增加。1)在 SSP245 情景下,ETc 呈波动上升趋势、降水与作物需

水的时空匹配度持续降低,使得PCDI的低可靠性区间占比扩大,农业用水安全风险在近期、中期、远期分别增加71.5%、70.9%、78.1%,而远期AWSI升至1.21,对应极高绿水胁迫状态。2)在SSP585情景下,ETc的上升幅度更显著,降水与作物需水的错配程度加深,风险在近期、中期、远期分别增加71.1%、

75.5%、69.8%,远期AWSI达1.19,同样面临极高绿水胁迫危机。表明随着作物需水上升、降水波动加剧,PCDI持续落入低可靠性区间,绿水的缓冲能力大幅衰减,蓝水的代偿需求与PCDI的关联更紧密,最终呈现绿水供给能力越弱,蓝水胁迫压力越高的趋势。

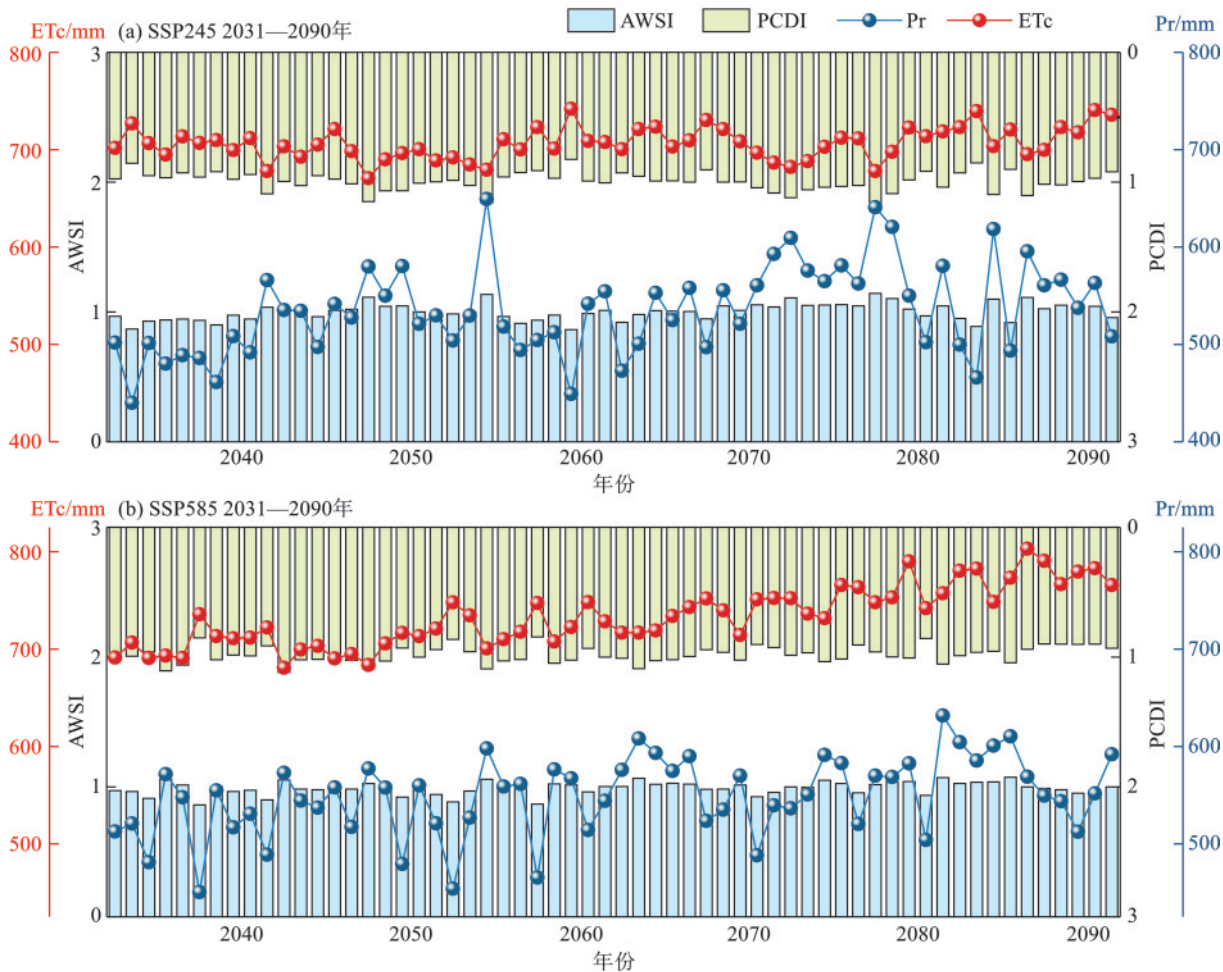


图 10 各情景下 Pr、ETc、PCDI 和 AWSI 的年平均变化趋势
Fig.10 Average annual variation trends of Pr, ETc, PCDI, and AWSI under different scenarios

2.3.2 作物水分盈亏分析 东北农作物5—9月生育期内,各情景下的CWDI指数呈现出不同阶段作物水分供需匹配关系的显著差异,整体表现为生育前期干旱胁迫突出、中后期逐步缓解的特征(表5)。其中,1)5—6月作为作物需水关键期,各情景下CWDI多处于35%以上。而SSP245情景下近期5月CWDI达51.34%,6月达51.17%;SSP585情景下中期5月达52.32%,对应中旱至重旱等级,说明该时段作物供水与需水匹配度较低,农田土壤湿润程度不足,作物面临的干旱胁迫较突出。2)7—8月CWDI处于20%左右及以下,属于轻旱或无旱水平,供水需水匹配关系明显改善。3)9月CWDI基本趋近于0,处于无旱状态,作物水分盈亏关系趋于平衡;同时SSP245、

SSP585情景下近中期5—6月的干旱程度整体偏高,也揭示生育前期是东北农作物干旱风险的重点关注时段。

表 5 各情景下东北地区农作物 CWDI					
Table 5 CWDI for crops in northeast China under different scenarios					
情景	5月	6月	7月	8月	9月
SSP245近期	51.34	51.17	14.50	18.08	0
SSP245中期	50.68	47.65	17.05	18.27	0
SSP245远期	45.83	45.61	11.88	13.61	0.92
SSP585近期	50.48	43.93	15.18	21.65	0
SSP585中期	52.32	48.13	12.17	17.22	0.14
SSP585远期	49.41	46.31	17.65	16.37	0

SSP245与SSP585情景下作物5—9月生育期内不同干旱等级的发生频率整体呈现生育前期高级干旱频率较高、后期以无旱为主的特征(图11)。其中生育前期是作物生育需水关键期,SSP245情景下生育前期重旱、中旱频率占比较高,SSP585情景

下5月以重旱、中旱为主,6月还伴随一定轻旱,说明此阶段作物发生干旱的风险相对较高;生育中期2个情景下轻旱、中旱频率有所降低,无旱占比增加;生育后期(9月)SSP245与SSP585情景下无旱频率均接近100%。

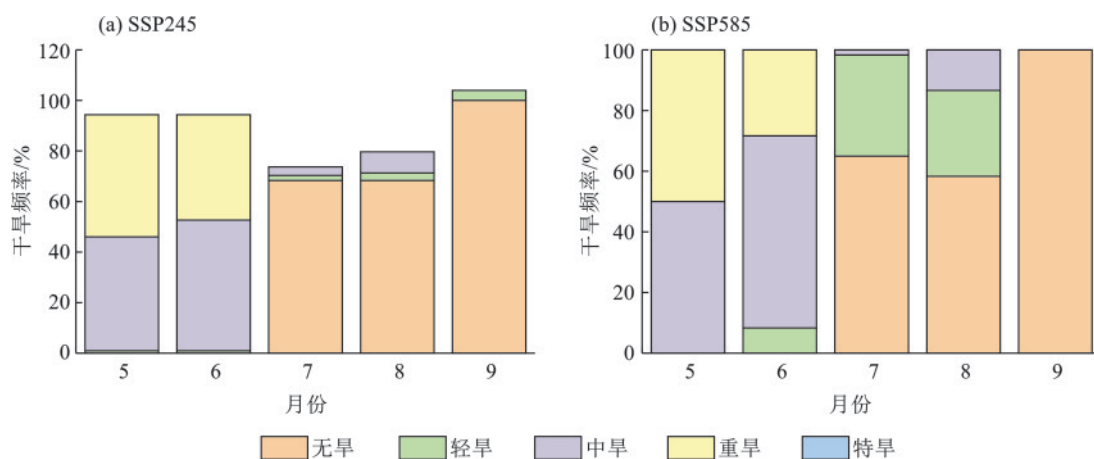


图11 未来各情景下作物生育期内不同干旱等级发生频率

Fig.11 Frequency of different drought levels during crop growth period under different future scenarios

3 讨论

本文基于东北地区气象观测数据和CMIP6模式预测数据,以当地主要耗水作物玉米和大豆为研究对象,采用多维度指标体系与综合分析方法,系统揭示未来气候情景下东北地区农业用水安全时空演变规律,重点分析作物生育期蓝绿水时空变化及水分亏缺特征,为农业水资源高效利用、灌溉制度优化与节水增产提供理论支撑与实践参考。

2031—2090年SSP245和SSP585情景下,东北地区农业用水安全风险较基准期的最高增幅达78.1%,远期农业水分胁迫指数(AWSI)升至1.19~1.21,处于极高胁迫水平;作物水分亏缺指数(CWDI)在5—6月普遍超过50%,呈现生育前期干旱、中期缓解的特征。同时,绿水供给能力与蓝水胁迫压力呈显著负相关,与前人^[7]研究结论一致。已有研究^[37]通过虚拟水量化分析指出,东北地区长期处于水资源重度压力状态,其核心原因在于粮食生产规模扩张与水资源消耗增加的长期矛盾;而作物生育前期(5月)绿水消耗占全生育期的30%以上,但降水贡献不足20%的供需错配特征,进一步印证本研究结论的合理性^[38]。随着东北地区农业用水需求随粮食产能提升持续增长,需水缺口可达40%以上^[39];未来降水的持续增加趋势虽能缓解区域农业绿水资源的供需矛盾,但无法完全解决农业水资源短缺问题^[40]。为应对气候变化带来的负面影响,可从种植结构优化、用水效率提升及节水灌溉技术推广等方面制定针对性政策。

针对同一研究区域采用CMIP5与CMIP6气候数据集开展模拟所得结果常存在显著差异,使得2类数据集的适用性对比成为气候影响研究中的重要前提。已有研究^[32,41]从全国或区域尺度出发,探讨CMIP5与CMIP6在特定区域的气候模拟适应性,结果均表明,相较于CMIP5,CMIP6的模拟性能提升,尤其在对东北地区平均气温时空变化特征的模拟上展现出较好的能力。文章对CMIP6数据进行降尺度处理后进一步验证此结论:降尺度后降水数据的决定系数(R^2)达0.68,平均气温、最高气温、最低气温的 R^2 均高于0.95,充分说明CMIP6模式可较好地模拟东北地区的气候要素变化特征。并且CMIP6能更好地捕捉复杂地形对区域气候的影响,使得模式能够利用更接近真实地形的数据进行数值模拟,对于东北地区尤为重要^[42]。

针对未来农业用水安全调控,可从分时段、分区域等维度制定适应性策略。生育前期(5月)聚焦春旱高风险,通过推广保墒耕作提升绿水利用效率,配套应急灌溉设施补充蓝水;生育中期(6—8月)针对降水波动与需水高峰叠加特征,完善排灌结合工程,兼顾旱涝防控;区域上,对辽宁、内蒙古东四盟等极高蓝水胁迫区,优先升级高效节水灌溉系统并优化种植结构,对黑龙江等低风险区强化雨养农业的绿水适配管理,同时通过调整作物播期、选育耐旱品种等措施,应对高排放情景下的不确定性。

本文主要研究未来气候变化对农业用水安全的影响,在农业用水安全评估的精细化与参数核算层

面仍存在局限,如数据方面,气候情景依赖的CMIP6模式对区域降水时空分布的模拟存在偏差,可能导致未来农业用水安全风险的时空分异评估不够精准;在作物系数的选择上,采用前人研究的区域作物系数,未充分考虑地形、土壤质地差异对作物蒸散发量的影响,难以反映不同地形条件下的实际需水差异。同时,作物需水量计算采用Hargreaves公式和作物系数法,可能会高估干旱时段的实际需水量;生长期阶段评价精细化不足,仅划分5—6月、7—8月、9月3个大阶段,未进一步细化至具体生育时期。未来研究需拓展作物覆盖范围,优化数据处理与参数核算方法,细化生育期评价尺度,全面提升农业用水安全评估的科学性与实用性。

4 结论

1) 研究分析未来气候情景下东北地区作物需水量的时空分布特征,揭示ET_c增加对农业用水安全构成威胁。基准期降水量以26.60 mm/(10 a)的速率增加,导致ET_c下降[−37.20 mm/(10 a)]抵消气温升高的效应;在未来SSP585情景下,由于气温上升导致ET_c增长,增长速率达15.10 mm/(10 a)。空间上,ET_c呈西高东低格局,内蒙古东四盟ET_c(750 mm)较黑龙江(719 mm)高4.3%,揭示作物水分胁迫的不可逆风险。

2) 未来气候情景下东北地区农业用水安全将呈现“绿稳蓝紧”的双重格局:一方面,中排放情景(SSP245)下绿水可靠性持续改善,降水对旱作物支撑力增强,有利于雨养农业潜力释放,高排放情景(SSP585)则因后期降水波动加剧,使绿水安全提升幅度受限;另一方面,未来蓝水胁迫将突破“极高”阈值,辽宁南部成为核心风险区。有效降水量减少与作物需水量的增加导致蓝水短缺主导未来农业水危机,而绿水系统虽在大部分地区趋稳,却难以抵消蓝水缺口。

3) 未来气候情景下东北地区农业用水安全核心呈现绿水缓冲能力弱化、蓝水胁迫持续加剧、生育前期风险高度集中的演变规律,本质是供需错配、需水增长与补给不稳定三重压力叠加的结果。作物生育期内,5月因降水补给不足与需水关键期叠加,成为干旱风险的核心期,而6—8月降水与需水的自然匹配、9月需水强度下降则使风险逐步缓解,这种阶段分异契合东北气候本底与作物生育节律;同时,作物需水持续上升与降水波动加剧导致绿水供需失衡,进一步强化蓝水代偿需求,且在高排放情景下需水增幅更显著、降水稳定性更弱,导致农业用水安全的不确定性与极端风险更高。本研究结果为减缓气候变化的影响和提升农业系统气候韧性,实现粮食安全与水资源可持续利用的协同提供科学支撑。

参考文献:

- [1] MORISON J I L, BAKER N R, MULLINEAUX P M, et al. Improving water use in crop production[J]. *Biological Sciences*, 2008, 363(1491): 639-658.
- [2] 韩海彬, 邱军程, 吴凡. 技术异质性下中国农业水资源绿色全要素生产率的区域差异与动态演进[J]. *干旱区资源与环境*, 2025, 39(1): 60-70.
HAN H B, QIU J C, WU F. Regional differences and dynamic evolution of agricultural water resources green total factor productivity in China under technological heterogeneity[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2025, 39(1): 60-70.
- [3] 聂媛, 李晓云, 江文曲, 等. 基于水足迹视角的中国北方10省三大粮食作物种植结构优化[J]. *资源科学*, 2022, 44(11): 2315-2329.
NIE Y, LI X Y, JIANG W Q, et al. Planting structure optimization of three main grain crops in 10 northern China provinces based on water footprint method [J]. *Resources Science*, 2022, 44(11): 2315-2329.
- [4] 江激宇, 刘嘉铭, 赵勇, 等. 淮河流域气候变化对粮食生产用水绿色效率的影响[J]. *经济地理*, 2024, 44(8): 181-190.
JIANG J Y, LIU J M, ZHAO Y, et al. Impact of climate change on green efficiency of water for food production in Huaihe River basin [J]. *Economic Geography*, 2024, 44(8): 181-190.
- [5] HOEKSTRA A, CHAPAGAIN A, ALDAYA M, et al. The water footprint assessment manual: Setting the global standard [M]. London, Washington DC: Earth-Scan, 2011.
- [6] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2021-the physical science basis: working group I contribution to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2023.
- [7] ABDO A I, ABDELGHANY A E, WEI H, et al. Perspective of agricultural water safety under combined future changes in crop water requirements and climate conditions in China [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2022, 148(3): 1629-1645.
- [8] 彭俊杰. 基于粮食安全的黄河流域农业用水态势分析及应对策略[J]. *农业经济*, 2022(7): 10-12.
PENG J J. Situation analysis and countermeasures of agricultural water use in the Yellow River basin based on food security [J]. *Agricultural Economy*, 2022(7): 10-12.
- [9] 张修宇, 赵济泽, 李颖博, 等. 河南省引黄受水区农业水资源安全综合评价[J]. *人民黄河*, 2024, 46(10): 78-82.
ZHANG X Y, ZHAO J Z, LI Y B, et al. Comprehensive evaluation of agricultural water resources security in Henan Province [J]. *Yellow River*, 2024, 46(10): 78-82.

- [10] 孙敬轩,章光新,吴燕锋,等.气候变化下东北地区农业绿水安全风险评估[J].中国科学(地球科学),2024,54(7):2210-2226.
SUN J X, ZHANG G X, WU Y F, et al. Risk assessment of agricultural green water security in northeast China under climate change[J].Scientia Sinica (Terrae), 2024, 54(7):2210-2226.
- [11] 杜国明,马梦琪,张瑞,等.2000—2020年东北地区玉米大豆种植格局演变及其气候驱动机理[J].资源科学,2024,46(11):2251-2262.
DU G M, MA M Q, ZHANG R, et al. Change of maize-soybean cropping patterns and its link with climate warming in northeast China between 2000 and 2020[J].Resources Science, 2024, 46(11):2251-2262.
- [12] 曹永强,齐静威,王菲,等.辽宁省潜在蒸散量演变规律及归因分析[J].生态学报,2020,40(10):3519-3525.
CAO Y Q, QI J W, WANG F, et al. Evolution law and attribution analysis of potential evapotranspiration in Liaoning Province[J].Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(10):3519-3525.
- [13] 刘子源,赵晓丽,左丽君,等.中国主要作物格局优化下的水资源效应分析[J].地理学报,2023,78(3):746-761.
LIU Z Y, ZHAO X L, ZUO L J, et al. Analysis of water resources effect under the pattern optimization of major crops in China[J].Acta Geographica Sinica, 2023, 78(3):746-761.
- [14] 赵良仕,李曼丞.辽宁农业灌溉用水影响因素时空差异性研究[J].中国农业资源与区划,2023,44(9):111-123.
ZHAO L S, LI M C. Study on spatial and temporal differences of factors affecting agricultural irrigation water use in Liaoning Province [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2023, 44(9):111-123.
- [15] 王玉宝,白雅文,刘荣,等.湟水流域绿水管理模拟与水-沙-质协同调控效果评价[J].农业机械学报,2023,54(11):347-358.
WANG Y B, BAI Y W, LIU R, et al. Simulation of green water management and effect evaluation of water sediment quality coordination regulation in Huangshui basin[J].Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(11):347-358.
- [16] 邢霞,修长百,刘玉春.基于水足迹理论的黄河流域水安全评价[J].中国农业资源与区划,2022,43(2):250-258.
XING X, XIU C B, LIU Y C. Water security assessment of Yellow River basin based on water footprint theory[J].Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2022, 43(2):250-258.
- [17] 韩子言,蒙古军,邹易.基于SWAT模型的黑河中游蓝绿水安全时空变化分析[J].生态学报,2024,44(15):6473-6486.
HAN Z Y, MENG J J, ZOU Y. Spatio-temporal variation analysis of blue-green water safety in the middle reaches of the Heihe River basin based on SWAT model [J].Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(15):6473-6486.
- [18] 田嘉欣,党小虎,杨志,等.水足迹视角下黄土高原经济林果扩张的水安全风险:以苹果种植为例[J].自然资源学报,2022,37(10):2750-2762.
TIAN J X, DANG X H, YANG Z, et al. Analysis of water security risk of cash forest expansion in the Loess Plateau in terms of water footprint: A case study of apple planting[J].Journal of Natural Resources, 2022, 37(10):2750-2762.
- [19] MA X L, LIU C M, NIU Y, et al. Spatio-temporal pattern and prediction of agricultural blue and green water footprint scarcity index in the lower reaches of the Yellow River basin [J].Journal of Cleaner Production, 2024, 437:e140691.
- [20] DEHGHANPIR S, BAZRAFASHAN O, FAROKHZA-DEH B. A holistic framework for evaluating water security in agricultural systems in arid and semi-arid climatic regions [J].Ain Shams Engineering Journal, 2025, 16(11):e103689.
- [21] 庞爱萍,易雨君,李春晖.基于生态需水保障的农业用水安全评价:以山东省引黄灌区为例[J].生态学报,2021,41(5):1907-1920.
PANG A P, YI Y J, LI C H. Evaluation of agricultural water-use security with ecological water demand as a priority: A case study of the Yellow River estuary in Shandong Province [J].Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(5):1907-1920.
- [22] 闫旂君,徐建新,肖恒.2021—2050年河南省夏玉米净灌溉需水量对气候变化的响应[J].气候变化研究进展,2017,13(2):138-148.
YAN Y J, XU J X, XIAO H. Summer maize net irrigation water requirement to climate change in Henan Province in China during 2021—2050 [J]. Climate Change Research, 2017, 13(2):138-148.
- [23] 中华人民共和国水利部.中国水资源公报[R].1998-2024.
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. China water resources bulletin[R].1998-2024.
- [24] 国家统计局.中国统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2024.
National Bureau of Statistics. China statistical yearbook [M].Beijing: China Statistics Press, 1998-2024.
- [25] 王海庆,齐鹏,章光新,等.全球气候模型对东北地区地下水储量评估的不确定性[J].水资源与水工程学报,2024,35(6):88-97.
WANG H Q, QI P, ZHANG G X, et al. Uncertainty of global climate model assessment for groundwater storage in northeast China [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2024, 35(6):88-97.
- [26] 赖雨瞳,徐影.CMIP6全球气候模式对中国地区干旱模拟能力评估与预估[J].大气科学,2024,48(6):2157-2177.
LAI Y T, XU Y. Assessment of simulation capability

- and projection of drought over China based on CMIP6 global climate models [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2024, 48(6): 2157-2177.
- [27] 徐帆, 赵俊三, 林伊琳, 等. 耦合气候与土地利用变化的洱海流域径流预测及影响机制[J]. 水土保持学报, 2025, 39(5): 80-91.
- XU F, ZHAO J S, LIN Y L, et al. Runoff prediction and influencing mechanisms in Erhai Lake basin under coupled climate and land use changes [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(5): 80-91.
- [28] HARGREAVES G H, SAMANI Z A. Reference crop evapotranspiration from temperature [J]. Applied Engineering in Agriculture, 1985, 1(2): 96-99.
- [29] ALLEN R G. Using the FAO-56 dual crop coefficient method over an irrigated region as part of an evapotranspiration intercomparison study [J]. Journal of Hydrology, 2000, 229(1/2): 27-41.
- [30] HOMDEE T, PONGPUT K, KANAE S. A comparative performance analysis of three standardized climatic drought indices in the Chi River basin, Thailand [J]. Agriculture and Natural Resources, 2016, 50(3): 211-219.
- [31] CAO X C, WU M Y, GUO X P, et al. Assessing water scarcity in agricultural production system based on the generalized water resources and water footprint framework [J]. Science of the Total Environment, 2017, 609: 587-597.
- [32] PENG D D, ZHOU T J, HU S, et al. Temperature and precipitation change over South China in CMIP5 and CMIP6 models: Historical simulation and future projection [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2025, 42(7): 1423-1441.
- [33] CAO X C, WU P T, WANG Y B, et al. Assessing blue and green water utilisation in wheat production of China from the perspectives of water footprint and total water use [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2014, 118(8): 3165-3178.
- [34] 曹言, 王杰, 王树鹏, 等. 气候变化下滇中地区水稻需水量与灌溉需水指数时空变化研究 [J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(5): 226-235.
- CAO Y, WANG J, WANG S P, et al. Temporal and spatial variation analysis of water and irrigation requirement index of rice in central Yunnan Province under climate change [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(5): 226-235.
- [35] 炎艺霖, 戈文艳, 王飞. 陕西省延安市主要作物生育期降水量和需水量的关系 [J]. 水土保持通报, 2024, 44(6): 399-408.
- YAN Y L, GE W Y, WANG F. Relationship between precipitation and water requirement during growth period of major crops in Yan'an City, Shaanxi Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(6): 399-408.
- [36] 张燕, 廖允成, 强生才, 等. 宁夏地区春玉米灌溉需水量特征研究 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2024, 52(5): 21-32.
- ZHANG Y, LIAO Y C, QIANG S C, et al. Characteristics of irrigation requirement of spring maize in Ningxia [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2024, 52(5): 21-32.
- [37] 鲁仕宝, 张樊, 裴亮, 等. 能源-粮食关联视角下的我国五大典型区水资源安全 [J]. 水土保持学报, 2026, 40(1): 219-230.
- LU S B, ZHANG F, PEI L, et al. Evaluation of water resource security in China's five typical regions from the perspective of energy-food nexus [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(1): 219-230.
- [38] 李博, 李云玲, 章光新, 等. “北粮南运”背景下东北地区粮食虚拟水流动及其对水资源压力的影响 [J]. 水资源保护, 2025, 42(2): 179-189.
- LI B, LI Y L, ZHANG G X, et al. Virtual water flow of grain in northeast China and its impact on water resource pressure under the background of "North-to-South Grain Transport" [J]. Water Resources Protection, 2025, 42(2): 179-189.
- [39] 齐鹏, 孙佳歆, 章光新, 等. 东北黑土区水土资源配置及其空间格局优化 [J]. 科学通报, 2024, 69(27): 4063-4078.
- QI P, SUN J X, ZHANG G X, et al. Allocation of water and land resources and ecological security in the black soil area of northeast China [J]. Chinese Science Bulletin, 2024, 69(27): 4063-4078.
- [40] YU L X, LI X, BU K, et al. Increased background precipitation masks the moisture deficit caused by crop greening in northeast China [J]. Journal of Hydrology, 2023, 623: e129857.
- [41] 何夏曼, 姜超, 汪君, 等. CMIP6与CMIP5全球气候模式对中国东北地区气温模拟性能的比较评估 [J]. 地球物理学报, 2022, 65(11): 4194-4207.
- HE X M, JIANG C, WANG J, et al. Comparison of CMIP6 and CMIP5 models performance in simulating temperature in northeast China [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2022, 65(11): 4194-4207.
- [42] 王予, 李惠心, 王会军, 等. CMIP6全球气候模式对中国极端降水模拟能力的评估及其与CMIP5的比较 [J]. 气象学报, 2021, 79(3): 369-386.
- WANG Y, LI H X, WANG H J, et al. Evaluation of CMIP6 model simulations of extreme precipitation in China and comparison with CMIP5 [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2021, 79(3): 369-386.