doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.12.029

多气候情景下中国主要粮食作物灌溉需求与发展潜力

王玉宝[1,2]　邢　欣[1,2]　孙博宁[1,2]　张　文[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)

摘要:灌溉是保障我国粮食增产稳产的重要途径,但未来多气候情景下主要粮食作物的灌溉需求及其发展潜力仍有待进一步研究。本研究选取 SSP2 - 45、SSP3 - 70 和 SSP5 - 85 3 种气候情景,利用降水量与作物需水量计算 2030、2040、2050 年中国耕地灌溉需求指数(I_{RI});结合净灌溉需水量和可利用灌溉水资源量,量化主要粮食作物灌溉发展潜力。结果表明:2030—2050 年,玉米、水稻和小麦灌溉需求均呈上升趋势,3 种作物分别在 SSP5 - 85、SSP3 -70 和 SSP5 -85 情景下灌溉需求程度最高。空间分布上,西南和西北地区是 3 种主要粮食作物灌溉需求较高区域,此外华中地区玉米农田以及华北和华中地区小麦农田灌溉需求程度也较高。灌溉发展潜力由大到小依次为水稻、玉米、小麦。在 3 种气候情景下,玉米可充分灌溉地区占比从 2030 年的 18.8% ~21.8% 降至 2050 年的 4.0% ~6.2%,集中收缩至川渝及华中地区;水稻可充分灌溉地区占比从 30.0% ~34.6% 降至 7.1% ~8.2%,保留在长江中下游省份;小麦可充分灌溉地区占比从 2.7% ~4.1% 降至 1.5%,仅集中在西藏。针对灌溉需求与发展潜力的区域差异,玉米可通过推广节水技术提高用水效率缓解灌溉需求;水稻需通过加大农业水利工程建设,加强水资源精准分配;小麦主产区则需通过跨流域调水、节水技术集成和种植规模调控构建多维缓解机制。研究结果可为制定气候适应型粮食生产空间布局规划提供参考。

关键词:气候变化;灌溉;粮食安全;作物;中国

中图分类号:TV212.1　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2026)12-0310-10　　**OSID**:

Irrigation Demand and Development Potential of Major Food Crops in China under Multi-climate Scenarios

WANG Yubao[1,2]　XING Xin[1,2]　SUN Boning[1,2]　ZHANG Wen[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 Regions of China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: Irrigation plays a critical role in ensuring stable and increased grain production in China. However, under multiple future climate scenarios, the irrigation demands and development potential of major cereal crops remain insufficiently understood. The irrigation requirements and potential for maize, rice, and wheat in China under three climate scenarios, SSP2 - 45, SSP3 - 70, and SSP5 - 85 were evaluated by calculating the irrigation requirement index (I_{RI}) based on precipitation and crop water requirements in 2030, 2040 and 2050. In addition, irrigation development potential was quantified by integrating net irrigation requirements with regionally available irrigation water resources. Results indicated a consistent increase in irrigation demand for all three crops from 2030 to 2050. Among the scenarios, the highest irrigation demand was observed under SSP5 - 8.5 for maize and wheat, and under SSP3 - 70 for rice. Spatially, southwestern and northwestern China emerged as shared high-demand regions for all three crops. Moreover, maize farmlands in central China and wheat fields in both northern and central China exhibited particularly high irrigation requirements. Rice exhibited the greatest irrigation development potential, followed by maize and then wheat. From 2030 to 2050, the proportion of maize cropland with sufficient irrigation capacity declined from 18.8% ~21.8% to 4.0% ~6.2%, becoming increasingly confined to the Sichuan - Chongqing region and central China. For rice, this proportion

收稿日期:2025 - 03 - 25　修回日期:2025 - 04 - 25

基金项目:国家自然科学基金项目(42271306)

作者简介:王玉宝(1975—),男,研究员,博士生导师,主要从事农业水土资源高效利用研究,E-mail:wangyb@nwafu.edu.cn

dropped from 30.0% ~34.6% to 7.1% ~8.2%, with adequate irrigation maintained primarily in the middle and lower Yangtze River Basin. For wheat, it fell from 2.7% ~4.1% to 1.5%, becoming limited to the Tibet Autonomous Region. Given these regional disparities, differentiated adaptation strategies were required. For maize, improving irrigation efficiency through water-saving technologies was key. Rice production should prioritize enhanced investment in agricultural water infrastructure and more precise allocation of water resources. In major wheat-producing areas, a multi-dimensional strategy integrating inter-basin water transfer, advanced water-saving technologies, and optimized planting scales was essential. These findings can provide scientific support for climate-adaptive spatial planning of cereal production in China.

Key words: climate change; irrigation; food security; crop; China

0　引言

气候变化[1]和水土资源[2-4]日渐紧张导致粮食安全问题日益严峻。预计到2050年,世界人口将增加约22.5亿,将导致农业消费需求增长60%[5]。中国作为人口和农业大国,以7%土地养活了全世界18%的人口。在资源有限的背景下,满足日益增长的粮食需求对中国粮食安全构成了巨大挑战。全球灌溉农业产量远远超过雨养农业,甚至单产水平达到雨养农业的2.5倍[6]。因此,发展灌溉农业以提高粮食产量,是解决饥饿问题并确保中国粮食安全的关键步骤。

识别区域灌溉需求以及发展潜力是制定灌溉政策的重要前提。降水模式、极端天气以及水资源分布不均[7],使这一任务变得复杂。气候变化对作物需水量的影响具有高度复杂性:气温上升会缩短作物生长期和增加作物日耗水量[8-12],但作物生长期缩短可能导致总耗水量减少[13]。同时,降水模式改变也在极大程度上影响了作物需水量变化[14]。此外,中国农业领域面临尤为严峻的水资源短缺问题,平均水资源量为21 600 m^3/hm^2,仅占世界平均水平的1/2[15]。因此,深入研究未来多气候情景下中国各地区灌溉需求以及灌溉发展潜力,对于制定合理的灌溉政策以及保障国家粮食安全具有重要意义。

目前已有较多关于灌溉需求以及发展潜力时空分布特征[16-20]的研究,王电龙等[21]研究了降水对华北主要粮食作物灌溉需求的影响特征;雷宏军等[22]计算贵州省5种主要粮食作物净灌溉需水量及灌溉需求指数并分析其时空分布特征;刘小刚等[23]针对河南省主要粮食作物灌溉需水量进行研究,指出灌溉需求指数随经纬度增大而增大;XIAO等[24]利用APSIM模型模拟了21世纪40年代和80年代华北平原小麦和玉米作物产量和用水量,分析了未来气候变化情景对小麦和玉米水分利用效率的影响;ROSA等[25]研究了未来气温升高3℃气候条件下全球灌溉发展潜力,发现目前多达35%的雨养农田可将发展灌溉作为提高农业稳定性的有效手段。但在未来多气候情景下,中国主要粮食作物灌溉需求以及灌溉发展潜力尚不明晰。

在上述研究基础上,本文考虑未来多种气候情景以及水资源的可持续利用,结合农田蒸发蒸腾量和降水量数据,评估各区域主要粮食作物(小麦、玉米和水稻)农田灌溉需求状况;计算区域可利用灌溉水资源量,评估各区域的灌溉发展潜力,为保障国家粮食安全以及制定相关的灌溉政策提供参考。

1　材料与方法

1.1　总体研究思路

由于未来耕地面积和空间分布易受政策引导、气候变化等影响,假定未来中国耕地面积和分布状况维持现状保持不变。首先,识别各区域主要作物灌溉需求程度。通过量化各区域作物需水量,结合降水量评估不同气候情景下中国不同区域耕地灌溉需求程度。其后,评估灌溉发展潜力。依据水资源开发利用率阈值,计算各区域可利用灌溉水资源量,结合净灌溉需水量,评估农田灌溉发展潜力。使用最新国际第六耦合模式比较计划(Coupled model intercomparison project phase 6, CMIP6)推出的SSP2-45、SSP3-70和SSP5-85情景作为未来预测的气候背景,同时耦合10种适用于中国的气候模式(表1)。CMIP6数据是不同共享经济路径(Shared socioeconomic pathways, SSPs)与典型浓度排放路径(Representative concentration pathways, RCPs)的耦合(SSPs-RCPs)。

表1　CMIP6全球气候模式及分辨率

Tab.1　CMIP6 global climate models and resolution

气候模式	分辨率/((°)×(°))	气候模式	分辨率/((°)×(°))
ACCESS-CM2	1.2×1.8	FGOALS-g3	2.3×2.0
ACCESS-ESM1-5	1.2×1.8	IPSL-CM6A-LR	1.3×2.5
CanESM5	2.8×2.8	MIROC6	1.4×1.4
CMCC-ESM2	0.9×1.2	NorESM2-LM	1.8×2.5
EC-Earth3	0.7×0.7	NorESM2-MM	1.9×2.5

1.2 研究区域划分

根据地理区位、地貌、气候、经济、农业类型与灌溉制度等因素,将中国大陆划分为东北、华北、西北、华中、东南和西南 6 个地区(图 1,GS(2023)2767)。

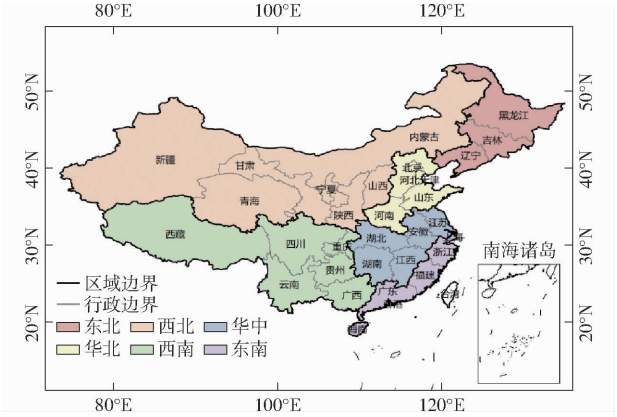

图 1 中国农田灌溉分区

Fig. 1 Irrigation zoning of farmland in China

1.3 研究方法

1.3.1 农田灌溉需求指数评估

将作物需水量与有效降雨量差值定义为净灌溉需水量 I_R,将净灌溉需水量与作物需水量比值定义为灌溉需求指数 I_{RI}[21],用以评估作物生长对灌溉水的需求程度,计算式为

$$I_{RI}=\frac{I_R}{C_{WR}} \tag{1}$$

其中

$$I_R=C_{WR}-P_e \tag{2}$$

式中 C_{WR}——作物需水量,mm

P_e——有效降雨量,mm

作物需水量和作物腾发量在数值上相等。作物需水量为参考蒸发蒸腾量与作物系数乘积,其中作物系数依据 FAO 1956 年作物系数表取值。参考蒸发蒸腾量采用联合国粮农组织 FAO-56 作物需水量计算指南中推荐的 Penman-Monteith 综合法[26]计算。

有效降雨量采用美国农业部土壤保持局推荐的方法计算[27],计算式为

$$P_e=\begin{cases}P(4.17-0.2P)/4.17 & (P\leqslant 8.3\ \text{mm})\\ 4.17+0.1P & (P>8.3\ \text{mm})\end{cases} \tag{3}$$

式中 P——降雨量,mm

灌溉需求指数取值范围为 0~1,ROSA 等[25]认为当 $I_{RI}>0.1$ 时,该地区处于缺水状态,但灌溉通常在 $I_{RI}\geqslant 0.2$ 的地区进行[28-29],因此用 $I_{RI}=0.1$ 作为评判是否缺水的阈值较为保守[30],本研究以 0.15 作为评判区域是否缺水的阈值,具体评级标准为 $0\leqslant I_{RI}\leqslant 0.15$,不缺水;$0.15<I_{RI}\leqslant 0.2$,轻度缺水;$0.2<I_{RI}\leqslant 0.25$,中度缺水;$I_{RI}>0.25$,重度缺水。

1.3.2 灌溉发展潜力计算

(1)可利用灌溉水资源量

发展灌溉既要有需要灌溉而尚未灌溉的耕地,也要有富余的可利用灌溉水资源量。鉴于水资源对于生态可持续的重要性,需保证 60% 地表和地下径流总量为环境流量[25]。因此,以 40% 作为水资源开发利用率上限,即当地水资源开发利用率超过 40% 后,不具备发展灌溉的潜力。采用跨部门影响模型比对项目(The inter-sectoral impact model intercomparison project,ISIMIP)中水文模型(WATERGAP 和 PCR-GLOBW)模拟得地表水和地下水资源量,以及生活用水和工业取水量预测值(0.5°×0.5°),设定可利用灌溉水资源量为可利用水资源量去除环境流量、人类生活和工业取水量。

(2)灌溉发展潜力

将净灌溉需水量和可利用灌溉水资源量比值定义为灌溉发展潜力指数 S_I[25],用以评估区域可持续灌溉扩张潜力,计算式为

$$S_I=\frac{I_R}{W_{AI}} \tag{4}$$

式中 W_{AI}——可利用灌溉水资源量,mm

当 $S_I\leqslant 0$ 时,表示该地区无法发展灌溉;当 $0<S_I\leqslant 1$ 时,表示该区域可发展充分灌溉;当 $S_I>1$ 时,表示该区域没有充足的水资源支撑农田发展充分灌溉。

1.4 数据来源

气象数据主要来源于 CMIP6 中 10 种气候模式的输出结果,主要包括:3 种不同气候情景(SSP2-45、SSP3-70 和 SSP5-85)下 2010—2050 年最高气温、最低气温、平均气温、风速、降水量、相对湿度、太阳辐射的日尺度栅格数据;作物分布数据来源于 EarthStat 的“Harvested Area and Yield for 175 Crops Year 2000”数据集,内容包括全球 175 种作物产量和收获面积平均值,分辨率为 0.008 3°。因此,最后处理完的分辨率均为 0.008 3°。相关数据见表 2。

表 2 数据来源

Tab. 2 Data source

数据	来源	网址
未来气象	WCRP 耦合模型比较项目(CMIP)	https://www.wcrp-climate.org/wgcm-cmip
土地利用	EarthStat	http://www.earthstat.org/
作物分布	MIRCA2000	https://www.uni-frankfurt.de/45218031/data_download?
未来径流	ISIMIP 项目	https://www.isimip.org/

2　结果与分析

2.1　主要作物灌溉需求时空变化特征

2.1.1　玉米

图 2、3 为 2030、2040、2050 年中国玉米在 SSP2－45、SSP3－70 和 SSP5－85 3 种气候情景下灌溉需求指数的空间分布和时间演变特征。总体而言，随着气温升高和降水模式变化，在 2030、2040、2050 年，SSP2－45 情景下玉米灌溉需求程度先上升后保持稳定；SSP3－70 和 SSP5－85 情景下，玉米灌溉需求程度总体呈上涨趋势但增幅逐渐变缓。从空间分布来看，在 3 种气候情景下，西南、西北和华中地区玉米灌溉需求程度较高，且 I_{RI} 增长尤为显著。

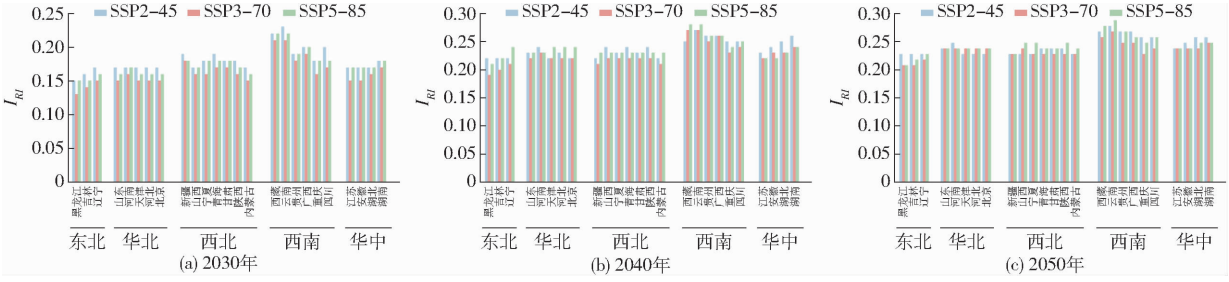

图 2　未来不同气候情景下玉米灌溉需求指数空间分布

Fig. 2　Spatial distribution of maize irrigation requirements index under different climate scenarios in future

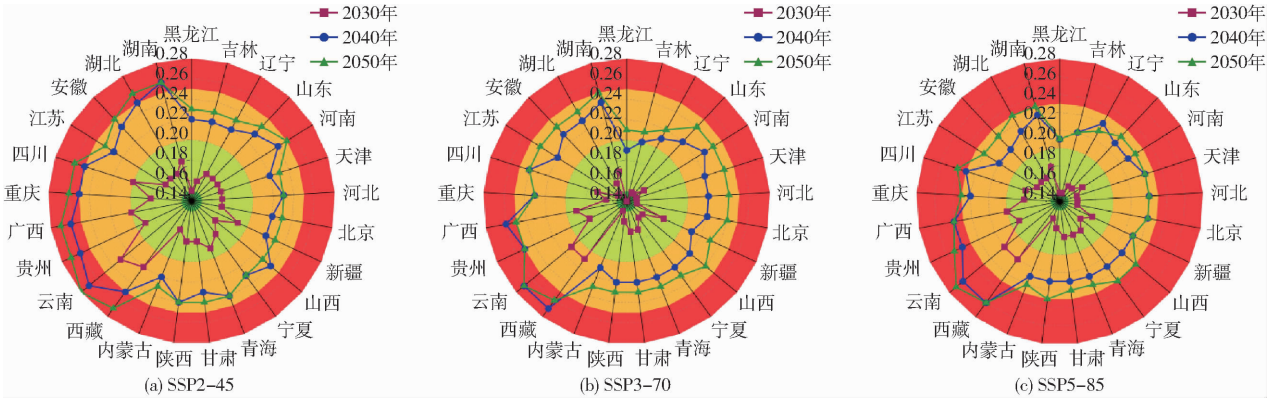

图 3　未来不同气候情景下玉米灌溉需求指数时间演变特征

Fig. 3　Temporal variation of maize irrigation requirements index under different climate scenarios in future

西南地区降水分布不均，干旱季节降水量较少，导致需要更多的灌溉水源保证作物生长。其中，云南和贵州 I_{RI} 增幅较大，表明随着气温升高和水分蒸发加剧，灌溉需求程度显著上升。具体而言，2030—2050 年，在 3 种气候情景下（SSP2－45、SSP3－70 和 SSP5－85 情景），云南 I_{RI} 均值分别增长 22.4%、30.2% 和 29.4%；贵州 I_{RI} 均值分别增长 39.2%、40.4% 和 39.7%。

西北地区玉米灌溉需求程度较高地区主要分布在新疆和陕西。2030—2050 年，新疆玉米 I_{RI} 均值分别增长 16.9%、26.7% 和 24.5%；陕西玉米 I_{RI} 均值分别增长 34.7%、47.9% 和 45.2%。西北地区属于典型的干旱和半干旱区域，水资源本就匮乏，气候变化加剧了干旱状况，导致这些地区对灌溉的依赖性更强。

华中地区湖北和湖南玉米灌溉需求也有一定增长。这些地区气候条件较为温和，在 2030 年，相较于西北和西南地区，湖北和湖南灌溉需求较低，但随着气候变化带来的高温和降水波动，灌溉需求上涨较快。2030—2050 年，湖北玉米 I_{RI} 均值分别增长 46.4%、51.1% 和 42.6%；湖南玉米 I_{RI} 均值在 3 种气候情景下分别增长 44.9%、48.3% 和 36.9%。

综上所述，西南、西北和华中地区大多存在干旱、半干旱气候或降水不均现象，加上气候变化的进一步加剧，导致玉米灌溉需求程度持续上升，这些地区需特别关注水资源的高效利用，以应对未来水资源压力的挑战。

2.1.2　水稻

图 4、5 为 2030、2040、2050 年中国水稻在 SSP2－45、SSP3－70 和 SSP5－85 3 种气候情景下灌溉需求的空间分布和时间演变特征。随着时间推移，水稻 I_{RI} 在所有情景下逐年增加，但仅在 SSP5－85 情景中，I_{RI} 自 2040 年后趋于稳定。空间分布上，所有情景下灌溉需求程度较大地区位于西北和西南。

2030 年，3 种气候情景（SSP2－45、SSP3－70 和 SSP5－85）下，中国水稻田普遍处于轻度灌溉需求

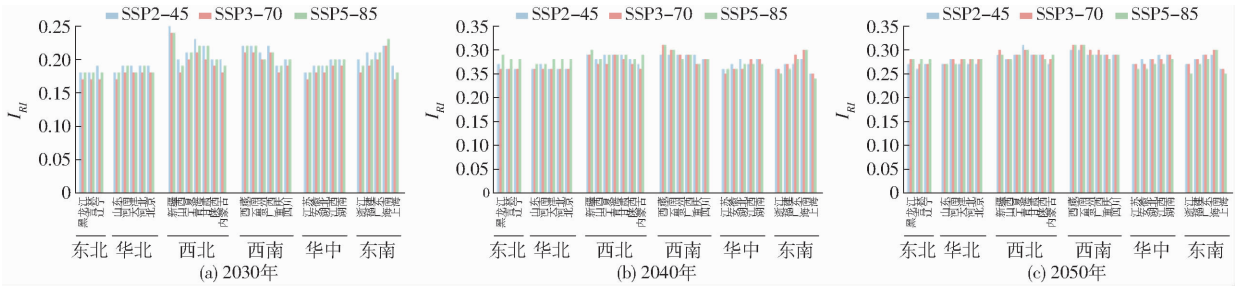

图 4 未来不同气候情景下水稻灌溉需求指数空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of rice irrigation requirements index under different climate scenarios in future

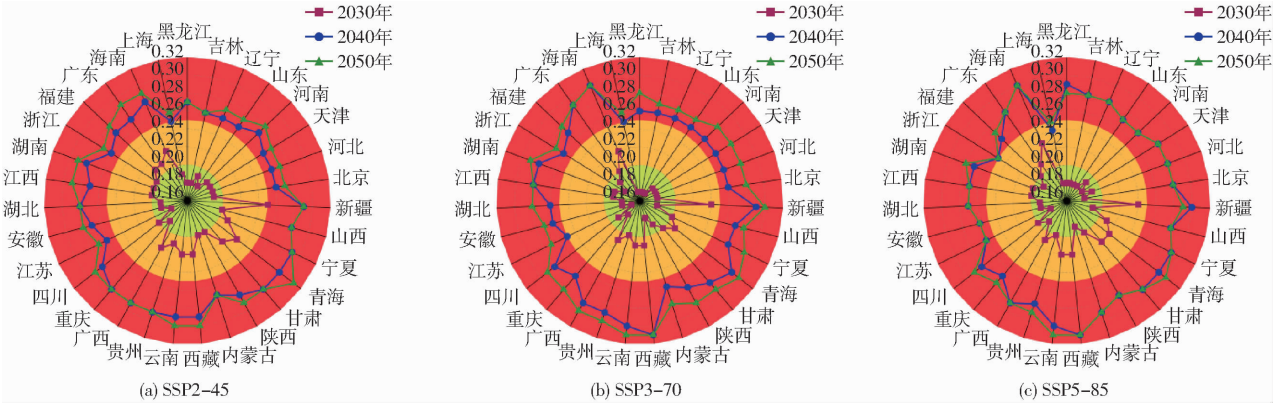

图 5 未来不同气候情景下水稻灌溉需求指数时间演变特征

Fig. 5 Temporal variation of rice irrigation requirements index under different climate scenarios in future

状态，I_{RI}均值分别为 0.20、0.19 和 0.20。水稻对水分需求较高，尤其在降水稀缺或降水高峰与水稻需水高峰错配的地区，表现出较高灌溉需求。在 SSP2－45 情景下，灌溉需求程度较大地区主要集中在西北、西南和东南，灌溉需求程度最大省份分别为新疆、西藏和江西。对于 SSP3－70 和 SSP5－85 情景，西北和西南是灌溉需求程度最大区域，尤其是新疆和云南，成为这些情景下灌溉需求程度最大省份。

进入 2040 年，随着气温升高，3 种气候情景下水稻灌溉需求显著增加，整体上水稻农田处于重度灌溉需求程度，I_{RI}均值较 2030 年分别增加 35.2%、43.7% 和 40.9%。在空间分布上，SSP2－45 和 SSP3－70 情景下，西南地区 I_{RI}最高，而在 SSP5－85 情景下，西北和西南地区 I_{RI}均值均较高。在省级分布上，SSP2－45 情景下西南地区灌溉需求较为均衡，除四川外，其他省份 I_{RI}均值相近；在 SSP3－70 情景下，西藏 I_{RI}均值明显高于西南地区其他省份，成为该地区灌溉需求程度最大省份；在 SSP5－85 情景下，新疆和西藏灌溉需求程度最大。从时间变化来看，与 2030 年相比，东北地区在所有气候情景下 I_{RI}增幅最大，在 SSP2－45 和 SSP3－70 情景下，黑龙江省 I_{RI}增幅最为显著，而在 SSP5－85 情景下，辽宁省增幅最大。

与 2040 年相比，2050 年在 SSP2－45 和 SSP3－70 情景下水稻 I_{RI}略有上升；而 SSP5－85 情景下灌溉需求保持稳定。从空间分布来看，SSP2－45 和 SSP5－85 情景下，西北（新疆和青海）和西南（西藏和云南）依然是 I_{RI}最高地区，且 SSP2－45 情景下这些地区 I_{RI}高于 SSP5－85 情景。SSP3－70 情景下，西南地区 I_{RI}最高，西藏和云南为灌溉需求最高省份。从时间变化来看，在 SSP2－45 情景下，东南地区 I_{RI}增幅最大，广东 I_{RI}增幅最为突出；在降水量较低的 SSP3－70 情景下，东北地区水稻 I_{RI}增幅最大，黑龙江表现尤为突出；在 SSP5－85 情景下，由于温度和降水变化，东北和华北地区水稻 I_{RI}出现小幅下降，天津和辽宁为各地区 I_{RI}下滑最严重省份，西南（四川）是该情景下 I_{RI}上涨幅度最大地区。

综上所述，随着气候变化持续，水稻灌溉需求程度地区性差异愈加明显，尤其是西北干旱区和西南湿润区逐渐成为灌溉需求最高地区。

2.1.3 小麦

图 6、7 为 2030、2040、2050 年中国小麦在 SSP2－45、SSP3－70 和 SSP5－85 3 种气候情景下灌溉需求的空间分布和时间演变特征。随着时间推移，3 种气候情景下，小麦灌溉需求整体程度逐年加大，但增幅逐渐放缓。从空间分布来看，在 SSP2－45 情景下，灌溉需求程度较大地区逐步从中国北方扩展至西北、西南和华中地区；在 SSP3－70 情景下，灌溉需求程度较大地区从西北向华北和华中扩展；而在 SSP5－85 情景下，西北和华北地区灌溉需求程度在

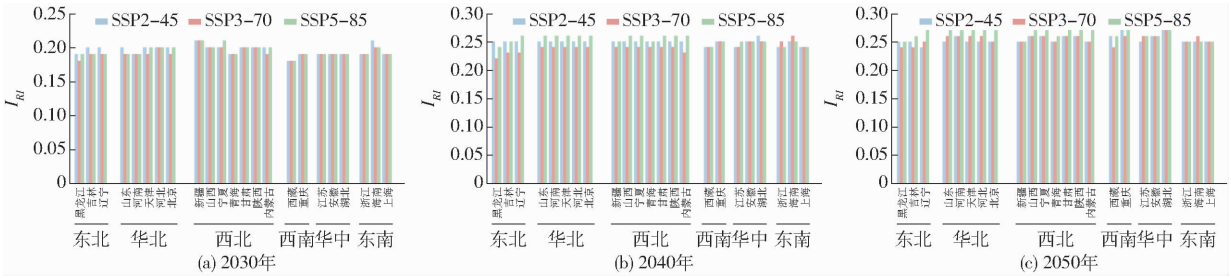

图 6　未来不同气候情景下小麦灌溉需求指数空间分布

Fig. 6　Spatial distribution of wheat irrigation requirements index under different climate scenarios in future

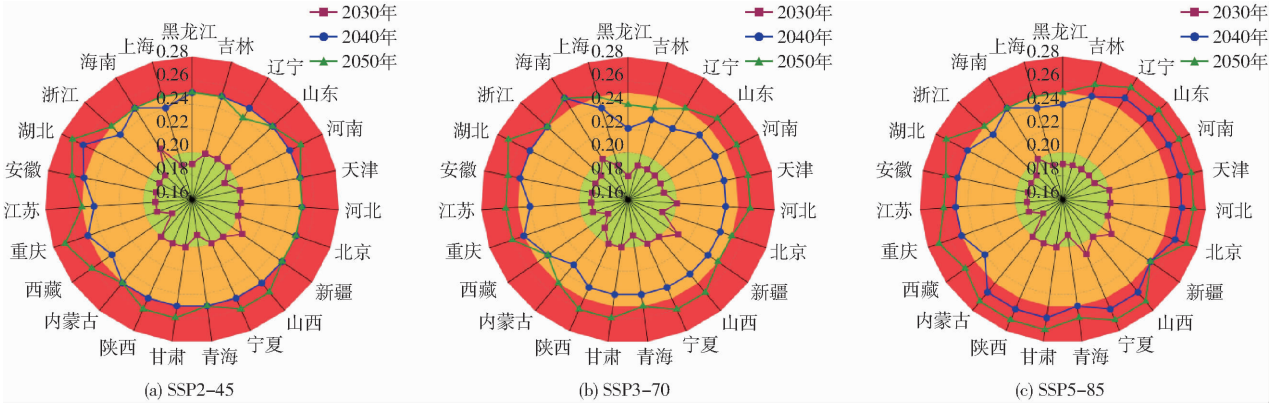

图 7　未来不同气候情景下小麦灌溉指数时间演变特征

Fig. 7　Temporal variation of wheat irrigation requirements index under different climate scenarios in future

所有年份中始终保持较高水平。

在 2030 年，3 种气候情景（SSP2－45、SSP3－70 和 SSP5－85）下中国小麦农田整体处于轻度灌溉需求状态，I_{RI}均值分别为 0.20、0.19 和 0.20。具体来看，在 SSP2－45 情景下，小麦灌溉需求呈明显的北高南低空间格局，东北、华北和西北地区 I_{RI}均值相近，略高于南方地区。北方各省份 I_{RI}较为接近，无特别突出省份；在 SSP3－70 情景下，西北地区 I_{RI}略高于其他地区，其中新疆因降水量较少，成为 I_{RI}最高省份；在 SSP5－85 情景下，西北和华北 I_{RI}较高，华北没有明显突出省份，而西北地区的新疆和宁夏 I_{RI}均值较高。

进入 2040 年，3 种气候情景下，中国小麦农田 I_{RI}大幅上升，分别增加 27.1%、24.7% 和 30.3%，整体处于中度灌溉需求状态。从空间分布来看，相较于 2030 年，SSP2－45 情景的小麦灌溉需求继续呈北高南低格局；在 SSP3－70 情景下，灌溉需求的空间格局转为南高北低，I_{RI}均值最高地区转移至东南和华中，且向北逐渐递减；在 SSP5－85 情景下，华北和西北成为 I_{RI}均值最高地区，这 2 个地区大部分省份进入重度需求状态。从时间变化角度看，相较于 2030 年，西南地区在 SSP2－45 和 SSP3－70 情景下受到气候变化影响最大，成为 I_{RI}增幅最大地区。在温度上升和降水不均的共同作用下，西藏成为这 2 种气候情景下 I_{RI}增幅最大省份；而在 SSP5－85 情景下，华北地区 I_{RI}增幅最大，表明在干旱和半干旱地区，降水量提升无法有效抵消高温对作物蒸发的负面影响。

与 2040 年相比，2050 年 3 种气候情景下小麦灌溉需求略有增加，且空间格局保持稳定。从空间分布来看，SSP2－45 和 SSP3－70 情景下，小麦灌溉需求分别呈“西北、西南、华中”和“西北、华北、华中”的 3 高格局，除新疆和内蒙古等少数省份外，其他大多数省份都处于重度灌溉需求程度；在 SSP5－85 情景下，西北和华北依旧是 I_{RI}最高地区。时间变化方面，相较于 2040 年，在 SSP2－45 情景下，多数地区 I_{RI}略有上升，西南地区增幅最大，而局部降雨增加使东北地区 I_{RI}有所下降；在降水最少的 SSP3－70 情景下，由于北方大部分地区为干旱或半干旱，I_{RI}增幅显著高于南方，华北地区增幅尤为突出；在 SSP5－85 情景下，I_{RI}增幅表现为南高北低趋势，东南地区 I_{RI}增幅最大。

2.2　主要作物灌溉发展潜力

2.2.1　玉米

在 SSP2－45、SSP3－70、SSP5－85 情景下，2030、2040、2050 年中国玉米灌溉发展潜力逐渐降低（图 8），灌溉发展潜力表现为 SSP3－70 > SSP2－45 ≈ SSP5－85。2030 年，3 种气候情景下可充分灌溉面积分别占 21.8%、19.4% 和 18.8%。SSP3－70 情景下可充分灌溉面积最大，可充分灌

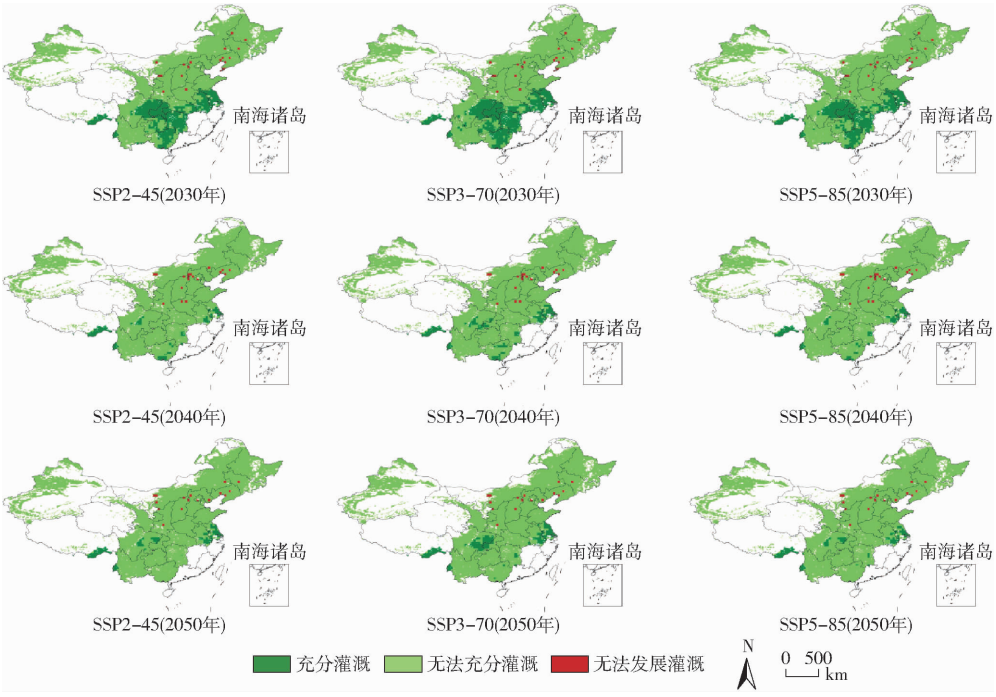

图 8 未来不同气候情景下玉米灌溉发展潜力空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of maize irrigation development potential under different climate scenarios in future

溉农田主要分布在华中和西南东部地区(广西、四川、贵州和重庆),较 SSP3 - 70 情景,SSP2 - 45 和 SSP5 - 85 情景下,在四川、广西和贵州可充分灌溉农田有所减少。

2040 年,3 种气候情景下可充分灌溉面积分别占 6.8%、4.9% 和 5.2%。从空间分布来看,3 种气候情景下可充分灌溉地区空间分布特征类似,主要集中在江苏到广西沿线省份,无法发展灌溉农田零星分布在华北地区。从时间变化角度来看,相较于 2030 年,中国玉米灌溉发展潜力大幅降低,3 种气候情景下西南地区可充分灌溉面积大幅减少。

2050 年,3 种气候情景下可充分灌溉地区分别占 6.2%、3.9% 和 4.0%。从空间分布来看,3 种气候情景下可充分灌溉地区空间分布特征类似,主要集中在四川、重庆以及华中地区,SSP3 - 70 情景下可充分灌溉面积最大,SSP2 - 45 和 SSP5 - 85 情景下四川、重庆、安徽以及江苏可发展充分灌溉地区显著低于 SSP3 - 70 情景。从时间变化角度来看,较 2040 年,玉米灌溉发展潜力整体出现小幅度下降,3 种情景下西南地区灌溉发展潜力大幅下跌,可充分灌溉农田面积大幅减少。

2.2.2 水稻

在 SSP2 - 45、SSP3 - 70、SSP5 - 85 情景下,2030、2040、2050 年中国水稻灌溉发展潜力逐渐降低(图 9),灌溉发展潜力表现为 SSP3 - 70 > SSP2 - 45 ≈ SSP5 - 85。2030 年,3 种气候情景下,可充分灌溉地区空间分布特征类似,主要分布在东南地区西部、华中和西南地区,SSP3 - 70 情景下可充分灌溉面积最大,占 34.6%;较 SSP3 - 70 情景,SSP2 - 45 和 SSP5 - 85 情景下湖南、江西以及两广地区灌溉发展潜力有所降低,可充分灌溉面积均占 30.0%。

2040 年,SSP3 - 70、SSP2 - 45h 和 SSP5 - 85 情景下,可充分灌溉面积分别占 11.2%、8.8% 和 8.6%。从空间分布来看,3 种气候情景下可充分灌溉地区均主要分布在四川、江苏、安徽和江西。从时间变化来看,相较于 2030 年,SSP3 - 70 情景下,西南地区可充分灌溉面积下滑较多,其余可充分灌溉地区并未出现明显的灌溉发展潜力下滑;SSP2 - 45 和 SSP5 - 85 情景下,西南和东南地区可充分灌溉面积均大量减少。

2050 年,3 种气候情景下可充分灌溉面积分别占 8.2%、7.1% 和 7.5%。从空间分布来看,SSP3 - 70 情景下水稻灌溉发展潜力最高,可充分灌溉地区主要分布在江西、安徽、四川以及江苏 4 个省份;相较于 SSP3 - 70 情景,SSP2 - 45 和 SSP5 - 85 情景下可充分灌溉地区分别在江西和四川(有小幅度减少)。从时间变化来看,较于 2040 年,3 种气候情景下两广和江西可充分灌溉面积均显著下降,四川可充分灌溉面积均有所上升。

2.2.3 小麦

小麦在 3 种气候情景下灌溉发展潜力如图 10 所示。2030 年,3 种气候情景下,可充分灌溉面积分别占 3.0%、4.1% 和 2.7%,主要分布在西藏;相较于 2030 年,2040 年全国灌溉发展潜力进一步

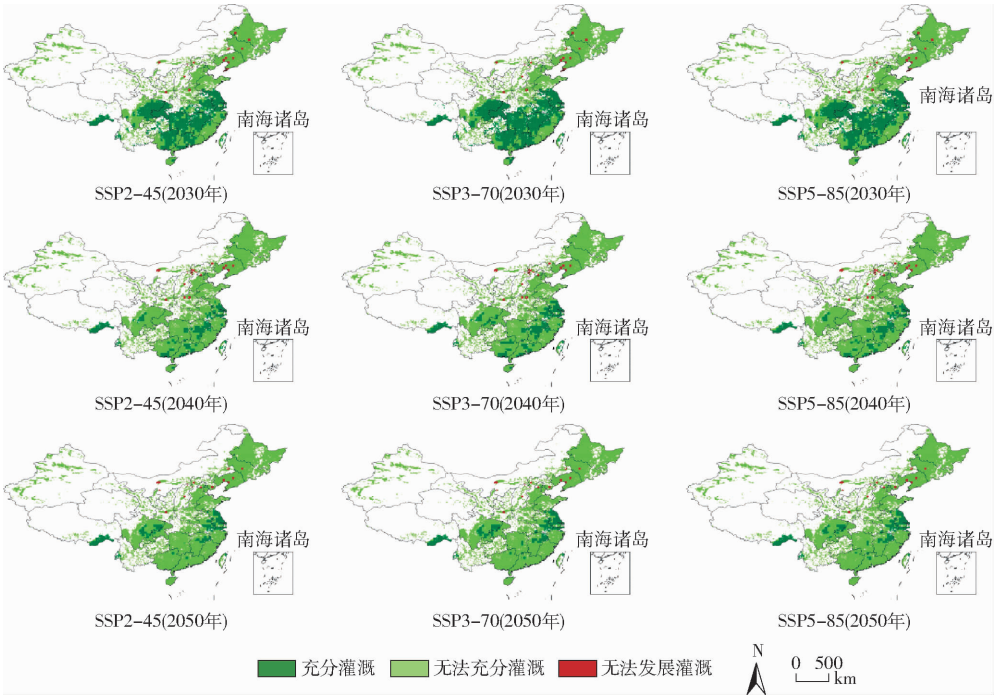

图 9　未来不同气候情景下水稻灌溉发展潜力空间分布

Fig. 9　Spatial distribution of rice irrigation development potential under different climate scenarios in future

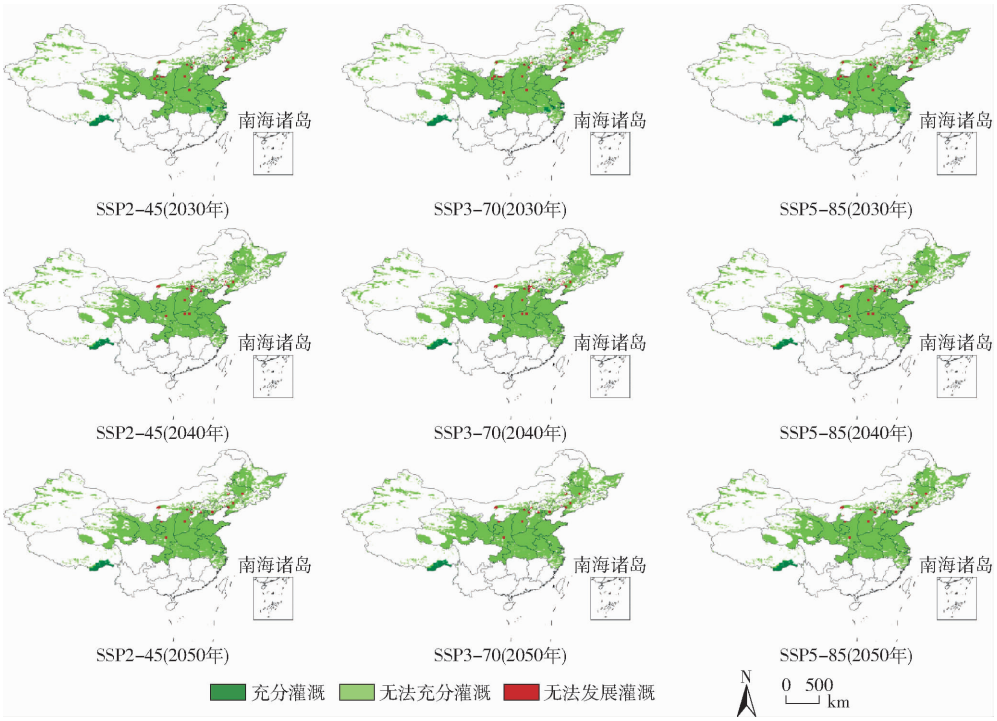

图 10　未来不同气候情景下小麦灌溉发展潜力空间分布

Fig. 10　Spatial distribution of wheat irrigation development potential under different climate scenarios in future

下跌，3 种气候情景下，可充分灌溉面积均为 1.5%，集中在西藏；相较于 2040 年，2050 年全国灌溉发展潜力并没有明显变化，可充分灌溉面积占比也不变。对于小麦种植区，仅西藏部分农田可依靠当地水资源进行充分灌溉，其余当地水资源承载力已无法支撑充分灌溉需求，应通过适当减少作物种植规模，发展节水灌溉技术，调引客水等措施，缓解灌溉压力。

3　讨论

评估了中国未来（2030、2040、2050 年）在 3 种气候情景（SSP2－45、SSP3－70 和 SSP5－85）下 3 种主要粮食作物（玉米、水稻和小麦）的灌溉需求以及发展潜力，为制定区域性灌溉政策提供了参考。根据研究结果，西南和西北地区是 3 种主要粮食作物共同的灌溉需求程度较高地区，这与刘钰等[31]研究

结果相一致。此外本研究中华中地区玉米农田以及华北和华中地区小麦农田灌溉需求程度也较高。这主要是由于本研究考虑了未来多种气候变化情景，而刘钰等[31]仅研究了历史气候情景。

在玉米灌溉政策制定方面，根据本研究结果，玉米灌溉需求程度较高地区主要集中在西南、西北和华中地区，但随着时间推移，这些地区可充分灌溉面积逐渐减小。针对该趋势，应加强区域水资源的统一调度与管理，优先保障灌溉水源的高效利用，提升灌溉系统水资源利用率。例如，推广滴灌、微喷灌溉等节水灌溉技术，以降低灌溉水浪费。此外，可以优化作物种植结构[32]，建议在水资源紧张区域，增加耐旱作物种植面积。在华北和东北地区，玉米灌溉需求增幅较小，政策上应鼓励合理开发这些区域的灌溉潜力，完善基础设施建设，提高灌溉效率。

对于水稻灌溉政策制定而言，西南和西北地区水稻农田灌溉需求程度较高，但灌溉发展潜力较高地区集中在长江中下游地区。针对不同地区灌溉需求和发展潜力差异巨大现象，应采取差异化的灌溉管理策略。例如，西北和华北干旱半干旱地区，尽管灌溉需求较高，但由于水资源有限，可考虑通过提高水资源利用效率（如再生水利用、雨水收集等）[25]和优化灌溉调度满足需求。长江中下游地区灌溉需求相对较低，且具有较高的灌溉发展潜力，应加强灌溉水资源的精准分配，确保水稻种植地区的水资源能够得到最优分配。

由图 10 可知，在发展灌溉后满足小麦灌溉需求的地区占比均小于 5%，这说明仅依靠当地水资源进行灌溉扩张难以在未来多种气候情景下维持小麦用水需求，小麦缺水风险较高，是农业水管理的重点。各地政府应倡导节水政策[33-36]、不断推广节水技术以提高区域水资源利用率和利用效率；建设跨流域调水工程，从灌溉需求较低、水资源较为丰富的流域引水缓解当地灌溉压力；根据自身气候、土壤、水资源状况，优化作物结构，适当减少小麦种植面积，以实现农业水资源可持续利用。

总体而言，未来农业灌溉政策应聚焦节水优先与效率提升，通过差异化的区域灌溉战略，适应气候变化下各地水资源供需格局。针对水资源压力显著区域，应加强作物种植结构调整与节水型灌溉系统建设，推动集约化、智能化灌溉发展；同时，鼓励技术创新与制度完善，提升农业系统对气候不确定性的响应能力。通过统筹区域水资源与农业发展需求，有望在保障粮食安全的同时，实现水资源可持续利用，提升中国农业在未来气候情景下稳定性。

4 结论

（1）2030—2050 年，3 种主要粮食作物灌溉需求均呈上升趋势。空间分布上，西南和西北地区 3 种作物灌溉需求程度均较为严重，此外华中和华北分别是玉米和小麦灌溉需求程度严重地区。从时间变化来看，2030 年至 2040 年 I_{RI} 急剧上升，2050 年上升幅度有所放缓，且西南和西北地区始终是 3 种作物 I_{RI} 增幅较高区域。

（2）3 种作物灌溉发展潜力均呈显著下降趋势，其中玉米和水稻在 SSP3－70 情景下潜力最大，小麦潜力在 3 种情景下均较低。玉米和水稻可充分灌溉地区主要集中在东南、华中及西南东部，但面积随时间推移大幅减少，空间分布逐渐向四川、重庆、江苏、安徽和江西集中。小麦可充分灌溉地区仅集中在西藏。

（3）未来气候变化将加剧灌溉需求与灌溉潜力间的矛盾，需采取差异化措施保障粮食安全。玉米种植区灌溉发展潜力逐渐下降，应大力推广节水技术，提高水资源利用效率；针对水稻农田灌溉需求与水资源错配的现象，应加大水资源丰富地区的农田水利工程建设，并在水资源匮乏地区推广种植抗旱品种以及节水灌溉措施应用；对于小麦种植区，当地水资源承载力已无法满足灌溉需求，需通过跨流域调水工程、节水技术集成及种植规模调整等措施缓解灌溉压力。

参 考 文 献

[1] ZHANG G, WANG H, GAN T Y, et al. Climate change determines future population exposure to summertime compound dry and hot events[J]. Earth's Future, 2022, 10(11): e2022EF003015.

[2] HE C, LIU Z, WU J, et al. Future global urban water scarcity and potential solutions[J]. Nature Communications, 2021, 12(1): 4667.

[3] TANG F H M, LENZEN M, MCBRATNEY A, et al. Risk of pesticide pollution at the global scale[J]. Nature Geoscience, 2021, 14(4): 206－210.

[4] OMER A, ELAGIB N A, ZHUGUO M, et al. Water scarcity in the Yellow River Basin under future climate change and human activities[J]. Science of the Total Environment, 2020, 749: 141446.

[5] ALEXANDRATOS N, BRUINSMA J. World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2012.

[6] ROCKSTRÖM J, KARLBERG L, WANI S P, et al. Managing water in rainfed agriculture—the need for a paradigm shift[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(4): 543 – 550.

[7] MEHTA P, SIEBERT S, KUMMU M, et al. Half of twenty-first century global irrigation expansion has been in water-stressed regions[J]. Nature Water, 2024, 2(3): 254 – 261.

[8] TAO F, HAYASHI Y, ZHANG Z, et al. Global warming, rice production, and water use in China: developing a probabilistic assessment[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2008, 148(1): 94 – 110.

[9] CHEN C, WANG E, YU Q, et al. Quantifying the effects of climate trends in the past 43 years (1961—2003) on crop growth and water demand in the North China Plain[J]. Climatic Change, 2010, 100(3): 559 – 578.

[10] LIU Y, WANG E, YANG X, et al. Contributions of climatic and crop varietal changes to crop production in the North China Plain, since 1980s[J]. Global Change Biology, 2010, 16(8): 2287 – 2299.

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

[12] TAO F, ZHANG Z, ZHANG S, et al. Historical data provide new insights into response and adaptation of maize production systems to climate change/variability in China[J]. Field Crops Research, 2016, 185: 1 – 11.

[13] TAO F, ZHANG Z. Climate change, wheat productivity and water use in the North China Plain: a new super-ensemble-based probabilistic projection[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2013, 170: 146 – 165.

[14] 冯东溥, 魏晓妹, 降亚楠, 等. 基于 STELLA 和气候变化情景的灌区农业供需水量模拟[J]. 农业工程学报, 2015, 31(6): 122 – 128.
FENG Dongpu, WEI Xiaomei, JIANG Ya'nan, et al. Simulation of agricultural water supply and demand at irrigation district under climate change using STELLA[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(6): 122 – 128. (in Chinese)

[15] 王浩, 王建华. 中国水资源与可持续发展[J]. 中国科学院院刊, 2012, 27(3): 352 – 358,331.
WANG Hao,WANG Jianhua. Sustainable utilization of China's water resources[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2012,27(3):352 – 358,331. (in Chinese)

[16] FOROUHAR L, WU W, WANG Q J, et al. A hybrid framework for short-term irrigation demand forecasting[J]. Agricultural Water Management, 2022, 273: 107861

[17] MASIA S, TRABUCCO A, SPANO D, et al. A modelling platform for climate change impact on local and regional crop water requirements[J]. Agricultural Water Management, 2021, 255: 107005.

[18] ALOTAIBI M, ALHAJERI N S, AL-FADHLI F M, et al. Impact of climate change on crop irrigation requirements in arid regions[J]. Water Resources Management, 2023, 37(5): 1965 – 1984.

[19] SUNIL A, DEEPTHI B, MIRAJKAR A B, et al. Modeling future irrigation water demands in the context of climate change: a case study of Jayakwadi command area, India[J]. Modeling Earth Systems and Environment, 2021, 7(3): 1963 – 1977.

[20] LE PAGE M, FAKIR Y, JARLAN L, et al. Projection of irrigation water demand based on the simulation of synthetic crop coefficients and climate change[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2021, 25(2): 637 – 651.

[21] 王电龙, 冯慧敏, 张宝忠, 等. 降水对华北主要粮食作物灌溉需求影响特征[J]. 农业机械学报, 2023, 54(1):296 – 305.
WANG Dianlong, FENG Huimin, ZHANG Baozhong, et al. Impacts of precipitation change on irrigation demand of major grain crops in North China Plain[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(1):296 – 305. (in Chinese)

[22] 雷宏军, 乔姗姗, 潘红卫, 等. 贵州省农业净灌溉需水量与灌溉需求指数时空分布[J]. 农业工程学报, 2016, 32(12): 115 – 121.
LEI Hongjun, QIAO Shanshan, PAN Hongwei, et al. Temporal and spatial distribution of agricultural irrigation water requirement and irrigation requirement index in Guizhou Province[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(12): 115 – 121. (in Chinese)

[23] 刘小刚, 符娜, 李闯, 等. 河南省主粮作物需水量变化趋势与成因分析[J]. 农业机械学报, 2015, 46(9): 188 – 197.
LIU Xiaogang, FU Na, LI Chuang, et al. Trends and causes analysis of water requirement for main grain crops in Henan Province[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 188 – 197. (in Chinese)

[24] XIAO D, 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.

[25] ROSA L, CHIARELLI D D, SANGIORGIO M, et al. Potential for sustainable irrigation expansion in a 3℃ warmer climate [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2020, 117(47): 29526 – 29534.

[26] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements[J]. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, 1998, 300(9): D05109.

[27] SMITH M. CROPWAT: a computer program for irrigation planning and management[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1994.

[28] ROST S, GERTEN D, BONDEAU A, et al. Agricultural green and blue water consumption and its influence on the global water system[J/OL]. Water Resources Research, 2008, 44(9). DOI: 10.1029/2007WR006331.

(下转第 342 页)

Environmental Protection of Xinjiang, 2020(2):12 – 23. (in Chinese)
[33] 何振嘉.生物炭对土壤理化特性及作物产量的影响[J].粮食科技与经济,2020,45(5):73 – 75.
HE Zhenjia. Effects of microorganisms on soil physical and chemical characteristics and crop yield[J]. Grain Technology and Economy,2020,45(5):73 – 75. (in Chinese)
[34] 杨丽, 王劲松, 董二伟, 等. 长期施用秸秆生物炭对土壤养分及作物生长的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2024, 42(2): 62 – 70.
YANG Li, WANG Jinsong, DONG Erwei, et al. Effects of long-term application of straw biochar on soil nutrient and crop growth[J]. Agricultural Research in the Arid Areas 2024,42(2):62 – 70. (in Chinese)
[35] 钟行杰.生物炭与化肥配施对大豆田土壤理化特征及产质量的影响[D].大庆:黑龙江八一农垦大学,2023.
ZHONG Xingjie. Effects of biochar and chemical fertilizer application on soil physicochemical characteristics and yield quality in soybean[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University,2023. (in Chinese)
[36] 王春雪, 岳学文, 史亮涛, 等. 元谋干热河谷青枣光合及产量对不同比例有机肥与生物炭配施的响应[J]. 热带作物学报, 2022, 43(1): 128 – 136.
WANG Chunxue, YUE Xuewen, SHI Liangtao, et al. Response of photosynthesis and yield of *Zizyphus mauritiana* lam. to different proportion of organic fertilizer with biochar application in Yuanmou dry-hot valley[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2022,43(1):128 – 136. (in Chinese)
[37] 杨爱峥, 李宏宇, 王秋菊, 等. 减氮配施生物炭对苏打盐碱土壤环境与大豆生长特性的影响[J]. 农业机械学报, 2025, 56(8): 602 – 613.
YANG Aizheng, LI Hongyu, WANG Qiuju, et al. Effect of nitrogen reduction with biochar application on soda saline soil environment and growth characteristics of soybean[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(8):602 – 613. (in Chinese)
[38] 王磊,任树梅,毕勇刚,等. 土壤水分及有机肥料对番茄叶片光合特性及叶绿素含量影响的试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2004, 23(2): 66 – 69.
WANG Lei,REN Shumei,BI Yonggang, et al. Effects of soil water and organic manure to the photosynthesis and chlorophyll of tomato in the greenhouse[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2004, 23(2): 66 – 69 (in Chinese)
[39] 闫春娟, 王昌陵, 孙旭刚, 等. 不同时期水分胁迫对大豆根系特性及产量的影响[J]. 节水灌溉, 2024(8): 43 – 52.
YAN Chunjuan, WANG Changling, SUN Xugang, et al. Effect of water stress in different phases on root characteristics and yield of soybean[J]. Water Saving Irrigation, 2024(8):43 – 52. (in Chinese)
[40] 陈泽林, 林逸帆, 陈国豪,等. 饲用玉米氮素分配与根系特征对不同生物炭施加深度的响应[J]. 草业科学, 2024, 41(1): 143 – 150.
CHEN Zelin, LIN Yifan, CHEN Guohao, et al. Response of nitrogen distribution and roots of forage maize to biochar application at different depths[J]. Pratacultural Science, 2024,41(1):143 – 150. (in Chinese)

(上接第 319 页)

[29] TUNINETTI M, TAMEA S, D'ODORICO P, et al. Global sensitivity of high-resolution estimates of crop water footprint[J]. Water Resources Research, 2015, 51(10): 8257 – 8272.
[30] ROSA L, RULLI M C, DAVIS K F, et al. Closing the yield gap while ensuring water sustainability[J]. Environmental Research Letters, 2018, 13(10): 104002.
[31] 刘钰, 汪林, 倪广恒, 等. 中国主要作物灌溉需水量空间分布特征[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12): 6 – 12.
LIU Yu, WANG Lin, NI Guangheng, et al. Spatial distribution characteristics of irrigation water requirement for main crops in China[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(12): 6 – 12. (in Chinese)
[32] LUO J, ZHANG H, QI Y, et al. Balancing water and food by optimizing the planting structure in the Beijing – Tianjin – Hebei region, China[J]. Agricultural Water Management, 2022, 262: 107326.
[33] ZHAO J, ZHANG X, YANG Y, et al. Alternative cropping systems for groundwater irrigation sustainability in the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2021, 250: 106867.
[34] TI J, YANG Y, PU L, et al. Ecological compensation for winter wheat fallow and impact assessment of winter fallow on water sustainability and food security on the North China Plain[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 328: 129431.
[35] ZHANG F, CUI N, GUO S, et al. Irrigation strategy optimization in irrigation districts with seasonal agricultural drought in southwest China: a copula-based stochastic multiobjective approach[J]. Agricultural Water Management, 2023, 282: 108293.
[36] GONG X, ZHANG H, REN C, et al. Optimization allocation of irrigation water resources based on crop water requirement under considering effective precipitation and uncertainty[J]. Agricultural Water Management, 2020, 239: 10624.