

气候变化条件下海河平原作物灌溉策略优化模拟

谭丽丽^{1,2,3}, 冯璞玉^{1,2}, 刘德立⁴, 乔学瑾⁵, 李保国^{1,2*}

(1. 中国农业大学土地科学与技术学院, 北京 100193; 2. 农业农村部华北耕地保育重点实验室, 北京 100193; 3. 鲁东大学资源与环境工程学院, 烟台 264025; 4. 澳大利亚新南威尔士州初级产业部 Wagga Wagga 农业研究所, Wagga Wagga 2650; 5. 烟台职业学院, 烟台 264670)

摘要: 定量化评估未来气候变化条件下农田水分利用和作物产量变化, 并探究适应气候变化的灌溉策略对水资源紧缺粮食主产区的农业可持续发展具有重要意义。该研究应用改进的 SWAT (soil and water assessment tool) 模型与 CMIP6 (coupled model intercomparison project phase 6) 的大气环流模式 (general circulation model, GCM) 相结合的方法, 在 3 种共享社会经济路径 (SSP1-2.6, SSP2-4.5 和 SSP5-8.5) 下评估了未来时期 (2041—2070 年) 海河平原实际蒸散量、灌溉量、地下水净使用量 (net groundwater use, NGU) 和作物产量的变化情况, 探究了未来气候情景中适宜的作物灌溉策略。结果表明: 1) 与历史时期 (1971—2000 年) 相比, 未来时期区域年实际蒸散量增加 5.5%、年灌溉量和年地下水净使用量分别减少 5.9% 和 25.8%。在 SSP5-8.5 情景下, 年实际蒸散量的增幅最低, 年灌溉量和年地下水净使用量的减幅最高。2) 相较于历史时期, 未来时期冬小麦和夏玉米产量分别增加 14.3% 和 6.5%, 其中夏玉米产量增幅随温室气体排放情景的增强而降低。3) 在未来气候情景中, 雨养夏玉米结合冬小麦拔节期进行灌溉 (灌水定额为 25 mm, 根据自动灌溉系统确定灌水频率) 或可最大限度地实现该区地下水资源恢复。从确保粮食安全的视角, 推荐雨养夏玉米与冬小麦在拔节期和灌浆期灌溉相结合。研究结果可为区域农业水资源合理规划、可持续的粮食生产政策的制定提供参考。

关键词: 气候变化; 地下水; 灌溉; SWAT 模型; CMIP6; 作物产量; 海河平原

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202312189

中图分类号: S274

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-16-0084-10

谭丽丽, 冯璞玉, 刘德立, 等. 气候变化条件下海河平原作物灌溉策略优化模拟[J]. 农业工程学报, 2024, 40(16): 84-93. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202312189 <http://www.tcsae.org>
TAN Lili, FENG Puyu, LIU Deli, et al. Optimization of crop irrigation strategies using modeling in Haihe Plain under climate change[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(16): 84-93. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202312189 <http://www.tcsae.org>

0 引言

剧烈的气候变化和高强度的人类活动使实现全球可持续发展的目标面临严峻挑战。水、粮食和能源之间的关联是实现区域可持续发展的核心, 其中最为核心的是水资源。在全球严重缺水的粮食主产区, 粮食生产主要依赖抽取地下水进行灌溉, 过度抽取地下水使得地下水位持续下降, 这不仅严重破坏了区域生态环境, 而且威胁到区域粮食安全和农业可持续发展^[1-3]。在气候变化可能进一步加剧全球水资源和粮食危机的背景下, 如何发展水资源短缺条件下的适水农业不仅是实现可持续发展目标过程中亟需回答的科学问题之一, 也是世界上存在地下水超采问题的国家和地区关注的热点^[4-5]。

海河平原对保障国家粮食安全至关重要。在水资源短缺条件下, 海河平原农业为国家和区域粮食安全及农村经济发展做出了重大贡献。但多年地下水超采造成该

区地下水位持续迅速下降, 不仅引发了严重的生态环境问题, 而且威胁该区域灌溉农业的可持续发展^[6]。区内一年两熟 (冬小麦和夏玉米轮作) 作物中的冬小麦全生育期严重依赖地下水进行灌溉是海河平原地下水超采的主要原因^[7]。为了治理该区域地下水超采问题, 中央和地方政府制定了一系列以“节水限采”为目标的政策和措施^[8-9]。非充分灌溉已被证明是可以显著提高水资源利用效率的节水灌溉技术, 诸多学者对此开展了广泛的研究^[7, 10]。但这些研究多是在过去气象条件下的模拟结果, 随着全球气温普遍增加, 可能需要更多的灌溉水才能满足作物正常生长。因此, 定量化评估未来气候变化对区域粮食产量和地下水利用的影响, 在此基础上探索利于地下水资源恢复和粮食安全的优化灌溉策略对该区农业可持续发展至关重要。

大气环流模式 (general circulation model, GCM) 等是地球系统模式中的核心分量系统模式之一, 它使用数值计算的方法来模拟和预测地球系统中的大气圈的演变^[11]。目前, CMIP (coupled model intercomparison project) 的 GCM 与水文 (或作物) 模型相结合是科学家们研究气候变化及其对水文过程和作物影响的主流方法^[12-13]。例如 XIAO 等^[14]应用 APSIM 作物模型与 CMIP5 的 33 个 GCMs 评估了未来气候变化对华北平原作物产量和水

收稿日期: 2023-12-26 修订日期: 2024-04-25

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (42301294)

作者简介: 谭丽丽, 博士, 研究方向为水土资源可持续利用。

Email: tanll@cau.edu.cn

※通信作者: 李保国, 教授, 研究方向为水土资源利用与资源信息技术。

Email: libg@cau.edu.cn

分利用的影响。BAI 等^[15]应用 CMIP6 的 13 个 GCMs 评估了未来极端气候对华北平原小麦生育期水热状况的影响。除了上述提到的作物模型外，一些水文模型也参与了相关研究，其中较为具有代表性的是 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 模型^[16]。SWAT 模型作为分布式流域水文模型已被广泛应用于水文、作物和气候模拟等领域^[17-18]。NADERI 等^[19]应用 SWAT 和 CMIP5 的 22 个 GCMs 评估了伊朗南部多鲁赞大坝流域未来时段 (2026—2085 年) 蓝水和绿水资源，该研究表明未来气候变化将加剧地下水危机。ALIYARI 等^[20]在考虑灌溉的情况下，利用 SWAT-MODFLOW 和 CMIP5 模拟了位于科罗拉多半干旱气候区的南普拉特河流域在 1980—2100 年地下水灌溉和作物产量的变化情况，结果表明：在未来气候情景下，当气温升高 1℃，年降水量减少 1.3%，地下水储量减少 2%~5%，农作物产量减少 11%。由此可见，SWAT 模型不仅仅关注水文过程，而且可以将大气、植物、土壤和地下水这几个相互影响、相互联系的层面结合在一起，更好地模拟地下水-土壤-植物-大气连续体。本研究团队应用改进的 SWAT 模型与 GCMs 相结合评估了气候变化对海河流域农业水文过程和作物生长的影响，结果表明：相较于历史时期 (1981—2010 年)，在未来时期 (2041—2070 年和 2071—2100 年) 作物生长季内的灌溉量减少而作物产量增加^[21]。基于这个结论，并考虑到该区长久以来存在的地下水超采与粮食产量之间的矛盾，拟进一步在未来气候情景下对作物灌溉策略进行优化模拟。因此，本文旨在利用改进的 SWAT 模型与 CMIP6 的多个 GCMs 相结合，在不同气候变化情景下量化海河平原未来时期 (2041—2070 年) 气象因子、作物产量以及农田水分利用相较于历史时期 (1971—2000 年) 的变化，进而模拟作物灌溉情景，探索既适应气候变化又节水稳产的灌溉策略，以期为该区及其他类似区域可持续的水资源利用和粮食生产提供决策依据。

1 研究区概况

研究区东邻渤海，西接太行山脉，主要包含保定、石家庄、邢台、邯郸、廊坊、沧州和衡水 7 个地级市。总面积 42 017 km²，地理位置介于 114°14'E~117°35'E，36°18'N~39°50'N 之间 (图 1)。研究区内地势平坦，

土地利用类型主要包括耕地、城镇和水体，其中耕地面积占 90% 以上，以冬小麦-夏玉米轮作为主要种植制度。研究区属半干旱半湿润大陆性季风气候，年平均降水量在 500~600 mm，降水年内分配不均，70% 以上的降水发生在 7—9 月，年平均气温在 8~15℃。冬小麦-夏玉米轮作周年耗水约为 800 mm，尤其在冬小麦生育期内降水量严重不足，难以满足作物正常生长的水分需求，因此主要依靠地下水进行灌溉来保障作物产量^[7]。

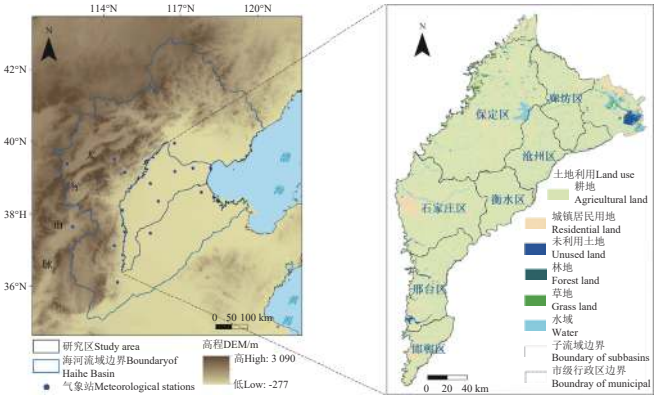


图 1 研究区域地理位置、气象站点分布及分区
Fig.1 Location of the study area, distribution of meteorological stations, and regional division

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

2.1.1 气象数据来源

本文选取了研究区内及其周边共计 17 个气象站点，如图 1 所示。为了进行比较分析，本研究将 1971—2000 年定义为历史时期，将 2041—2070 年定义为未来时期。历史时期气象数据来源于中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>)，数据类型包括降水量、最高气温、最低气温、风速、相对湿度和日照时数日值，日太阳辐射依据 Angstorm 方程^[22]根据日照时数计算。未来时期气象数据来源于 CMIP6 的 22 个 GCMs，如表 1 所示。本文利用澳大利亚沃加沃加农业研究所开发的统计降尺度方法^[23]将逐月栅格未来气象数据进行时空降尺度处理，获得日尺度站点数据。

表 1 本研究中 CMIP6 的 22 个大气环流模式列表

Table 1 List of 22 general circulation models (GCMs) from CMIP6 projections used in this study							
编号 No.	机构 ID Institute ID	缩写 Abbreviation	国家 Country	编号 No.	机构 ID Institute ID	缩写 Abbreviation	国家 Country
1	ACCESS-CM2	ACC1	澳大利亚	12	GFDL-CM4	GFD2	美国
2	ACCESS-ESM1-5	ACC2	澳大利亚	13	GISS-E2-1-G	GISS	美国
3	BCC-CSM2-MR	BCCC	中国	14	INM-CM4-8	INM1	俄罗斯
4	CanESM5	Can1	加拿大	15	INM-CM5-0	INM2	俄罗斯
5	CanESM5-CanOE	Can2	加拿大	16	IPSL-CM6A-LR	IPSL	法国
6	CNRM-CM	CNR1	法国	17	MIROC6	MIR1	日本
7	CNRM-CM6-1-HR	CNR2	法国	18	MIROC-ES2 L	MIR2	日本
8	CNRM-ESM	CNR3	法国	19	MPI-ESM1-2-HR	MP11	德国
9	EC-Earth3	ECE1	欧洲	20	MPI-ESM1-2-LR	MP12	德国
10	EC-Earth3-Veg	ECE2	欧洲	21	MR1-ESM2-0	MR1E	日本
11	FGOALS-g3	FGOA	中国	22	UKESM1-0-LL	UKES	英国

2.1.2 气候情景设置

选择了 3 种共享社会经济路径 (shared socioeco-

nomic pathways, SSPs) 开展气候情景模拟，分别为：SSP1-2.6 代表可持续发展路径，低浓度温室气

体排放情景；SSP2-4.5 代表与历史格局基本一致的中间路径，中等浓度温室气体排放情景；SSP5-8.5 代表依赖化石燃料的路径，高浓度温室气体排放情景^[24]。

2.1.3 SWAT 模型建立、率定和验证数据来源

通过输入数字高程数据 (digital elevation models,

DEM)、数字河流、土壤数据、土地利用数据和气象数据等 (表 2)，并划分了多个表征农业管理措施空间变异的分区，如作物播种-灌溉-收获时间分区、灌溉来源分区、施肥制度分区以及作物生长参数分区等 (表 3)，由此建立了研究区 SWAT 模型。有关模型建立等更详细的信息请参见文献 [21]。

表 2 研究区 SWAT 建立所搜集的数据信息及来源

Table 2 Data information and sources for SWAT establishing in the study area

类型 Type	描述 Discription	来源 Source
DEM	空间分辨率 90 m×90 m	地理空间数据云 (http://www.gscloud.cn/)
数字河流	1:250 000	国家基础地理信息中心 (http://www.ngcc.cn/)
子流域出口位置	水文站地理坐标	海河流域水文资料
土地覆被类型	2015 年土地覆被类型图 (空间分辨率 30 m×30 m)	中国科学院资源环境科学数据中心 (http://www.resdc.cn/)
水文站流量	水文站逐月平均流量	海河流域水文资料
实际蒸散量	平原区子流域月尺度实际蒸散量	SEBS 反演的月尺度实际蒸散量
作物数据	站点尺度作物产量、地上部生物量、叶面积指数	文献 [21]
土壤数据	空间分辨率为 5 km×5 km	WETechData (https://www.2w2e.com/)
	雨量站降水量日值	海河流域水文资料和 TRMM 3B42 V7 (http://apdr.csoest.hawaii.edu/)
气象数据	日值最高温、最低温、平均风速、平均相对湿度、日照时数 (国家基本气象站)	中国气象数据网 (http://data.cma.cn/)
	日值最高温、最低温、平均风速、平均相对湿度、日照时数 (河北省气象站)	河北省气象局

表 3 研究区农业管理信息分区及依据

Table 3 Agricultural management information subdivision and basis in the study area

名称 Name	依据 Basis	数据来源 Data source
作物播种-收获时间	涿州、定州、栾城、内丘、河间、深州农业气象站作物生育期信息	中国气象数据网 (http://data.cma.cn/)
灌溉制度分区	河北省农业灌溉分区	中国农业科学院农业资源与农业区划研究所
灌溉来源分区	子流域灌溉来源	文献 [25-26]
施肥制度分区	石家庄、保定、邢台、邯郸、沧州、衡水、廊坊 1998-2016 年氮肥 (磷肥) 施用量和粮食作物总播种面积	各市统计年鉴和经济年鉴
作物生长参数分区	河北省粮食作物种植区划	中国农业科学院农业资源与农业区划研究所

2.2 研究方法

2.2.1 SWAT 模型改进

SWAT 模型是由美国农业部农业发展中心开发的、以水量平衡原理为基础的、基于物理过程的流域水文模型^[16]。SWAT 做为开源软件，自开发以来研究者们根据研究需求对其进行了多方改进，使其模拟的范围更广、精度更高。本文中融合了以下 2 个方面的改进：

1) 大气 CO₂ 浓度模块。SWAT 中的大气 CO₂ 浓度值是一个重要的参数，它不仅通过影响植物冠层阻力来控制潜在蒸散发的计算 (式 (1) 和式 (2))，而且还参与辐射利用效率的计算进而影响生物量 (式 (3))。本文使用的 SWAT2012.10_3.19 版本 (Revision 664) 中仅允许输入大气 CO₂ 浓度固定值。鉴于大气 CO₂ 浓度在未来气候情景中逐年变化较大^[24]，通过修改相应的子程序代码使得模型可以读取预先存储的逐年大气 CO₂ 浓度^[27]。

$$r_c = (0.5g_L \cdot S_{LAI})^{-1} \quad (1)$$

$$g_L = g_L \cdot \left[1.4 - \frac{0.4C}{330} \right] \quad (2)$$

$$S_{RUE} = \frac{100C}{C + \exp(r_1 - r_2 \cdot C)} \quad (3)$$

式中 r_c 为冠层阻力，m/s； g_L 为植物叶片的气孔导度最大值，m/s； S_{LAI} 为叶面积指数，m²/m²； g_L 为受 CO₂ 浓度

影响而修正的植物叶片气孔导度，m/s； C 为大气 CO₂ 浓度，1×10⁻⁶； S_{RUE} 为辐射利用效率，(kg·hm²)/(MJ·m²)； r_1 和 r_2 为形状系数。

2) 自动灌溉。SWAT 中的自动灌溉是根据土壤水分或植物水分需求通过设置水分胁迫阈值来触发。但 SWAT 中的自动灌溉存在一定缺陷，如在作物非生长季仍有灌溉发生、灌溉操作不能根据实际需求随时停止等。由此，CHEN 等^[28] 将 MAD (management allowed depletion) 自动灌溉算法引入到 SWAT 中，该算法通过将作物有效水 (plant available water, PAW) 允许消耗的百分比作物触发灌溉的阈值来模拟自动灌溉 (式 (4))。该算法可以根据特定需求设置开始和停止灌溉的具体日期。

$$(S_{FC} - S_{SW})/S_{PAW} > S_{MAD} \quad (4)$$

式中 S_{FC} 为田间持水量，mm； S_{SW} 为土壤含水量，mm； S_{PAW} 为作物有效水分，mm； S_{MAD} 为作物有效水允许损耗的百分比，范围是 0~100%。

2.2.2 SWAT 模型率定和验证

在之前的研究中^[21]，本研究团队利用水文站月流量、遥感反演的月尺度实际蒸散量 (ET_a) 和作物数据率定了模型的水文和作物参数，经验证水文站月平均流量决定系数 (R^2) 大于等于 0.87，纳什效率系数 (Nash-Sutcliffe efficiency coefficient, NSE) 大于等于 0.75；实际蒸散量 R^2 为 0.68~0.77，百分比偏差 (percent bias,

PBIAS) 为 8.0%~17.7%; 冬小麦和夏玉米产量 PBIAS 分别为-3.7% 和-1.6%。此外, 通过“试错法”确定了适合本研究区冬小麦和夏玉米触发自动灌溉的 MAD 阈值, 分别为 0.3 和 0.4, 灌水定额均为 25 mm, 并对改进了自动灌溉的 SWAT 模型进行了验证^[21], 结果表明^[21]: 冬小麦生长季灌溉量、实际蒸散量和产量的 PBIAS 分别为 -7.1%、3.3% 和 1.1%; 对于夏玉米, 改进自动灌溉的 SWAT 模型能够较为精确地对水文年型作出响应, 生长季内实际蒸散量和产量 PBIAS 分别为 1.6% 和-0.4%。综上, 经过充分率定验证的改进 SWAT 模型在模拟流域水文、农田水分利用和作物产量上具有较高的模拟精度, 可以将其应用于未来气候情景和灌溉情景的模拟研究工作。

2.3 灌溉情景设置

在本研究区内已经开展了诸多有关冬小麦和夏玉米灌溉情景优化的田间试验研究^[29-31], 并取得了较好的效果, 这些试验研究和模拟工作为本文设计科学合理的灌溉方案提供了参考。基于此, 本文在未来气候条件下设置了 6 种灌溉情景, 如表 4 所示。在所有灌溉情景模拟中, 均采用 MAD 自动灌溉, 作物自动灌溉的 MAD 阈值和灌水定额如 2.2.2 节所述, 灌溉频率由 MAD 自动灌溉模型确定。冬小麦拔节期自动灌溉启动和停止时间分别为 4 月 1 日和 4 月 20 日, 灌浆期启动和停止灌溉的时间为 5 月 1 日和 5 月 20 日; 冬小麦在越冬前一水为手动灌溉方式, 灌水定额为 75 mm^[21]。夏玉米自动灌溉启动时间为播种日, 停止时间为收获日^[21]。根据已经划分的灌溉来源分区可知^[21], 灌溉来源在山前平原区为浅层含水层, 在中部平原区为深层含水层。分别以月尺度和日尺度运行模型, 在子流域尺度输出蒸散量、灌溉量、渗漏量、冬小麦产量和夏玉米产量, 并计算地下水净使用量 (net groundwater use, NGU) ^[32-33] (式 (5))。在与历史时期模拟结果对比中使用二次偏差矫正方法 (式 (6)) ^[14]。

$$S_{NGU} = I_{tw} - q_{nr}$$
(5)

$$\Delta o = \frac{S_{GCM} - S_{history}}{S_{observed}} \times 100\%$$
(6)

式中 S_{NGU} 为地下水净使用量 NGU 的值, mm; I_{tw} 为地下水抽取量, mm; q_{nr} 为地下水净回补量, mm。 S_{NGU} 为正值表示地下水蓄存量处于亏损状态, S_{NGU} 为负值表示地下水接受了一定的补给, 对于地下水的恢复具有积极作用。 Δo 为输出变量相较于历史时期的变化, %; S_{GCM} 、 $S_{history}$ 、和 $S_{observed}$ 分别为 GCMs 未来时期、GCMs 历史时期和实测历史时期气象数据投入模型的模拟输出结果。

表 4 未来气候条件下灌溉情景设计

Table 4 Design of irrigation scenarios under future climate scenarios

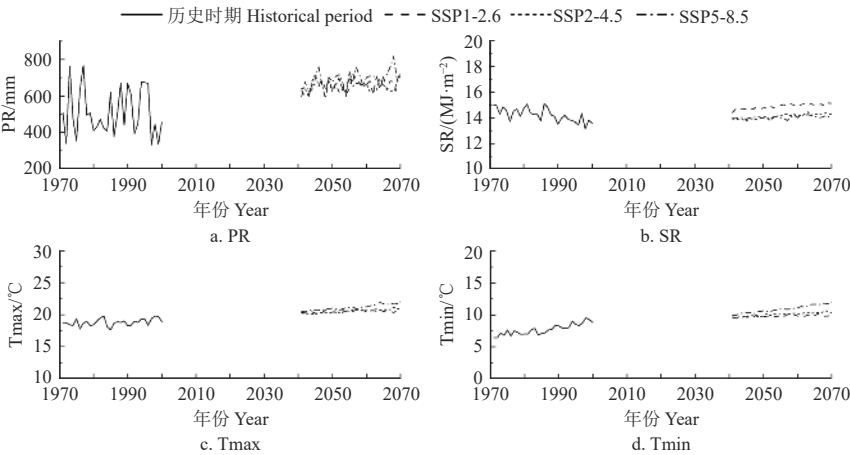
时期 Period	情景 Scenarios	冬小麦 Winter wheat			夏玉米 Summer maize
		越冬前 Before winter	拔节期 Jointing stage	灌浆期 Filling stage	
历史时期 Historical period (1971—2000 年)	常规灌溉	Π	Π	Π	Π
未来时期 Future period (2041—2070 年)	I	Π	Π	Π	-
	II	Π	Π	-	-
	III	Π	-	Π	-
	IV	-	Π	Π	-
	V	-	Π	-	-
	VI	-	-	Π	-

注: Π表示灌溉。
Note: Π means irrigation.

3 结果与分析

3.1 未来气候情景下降水、太阳辐射和气温的变化

由图 2 可以看出, 与历史时期相比, 未来时期的降水量、太阳辐射量、最高气温和最低气温均呈现增加的趋势。对于降水量、最高气温和最低气温来说, 增加幅度随温室气体排放情景的增强而变大 (图 2)。



注: SSP1-2.6 为低浓度温室气体排放情景; SSP2-4.5 为中等浓度温室气体排放情景; SSP5-8.5 为高浓度温室其他排放情景。下同。
Note: SSP1-2.6, SSP2-4.5 and SSP5-8.5 are senarios of low, middle and high greenhouse gas emission, respectively. Same as below.

图 2 历史时期和未来时期年降水量 (PR)、太阳辐射量 (SR)、最高气温 (Tmax) 和最低气温 (Tmin) 动态
Fig.2 Dynamics of annual precipitation (PR), solar radiation (SR), maximum air temperature (Tmax), and minimum air temperature (Tmin) during the historical period and future period

图 2 所示, 降水量在未来时期的 SSP1-2.6、SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 排放情景下分别增加 25.7%、26.3% 和 32.9%; 最高气温分别增加 1.7、1.8 和 2.4 °C; 最低气温分别增加 2.3、2.6 和 3.4 °C。而对于太阳辐射量来说,

随着温室气体排放情景的增强, 太阳辐射量增加幅度减少, 甚至略低于历史时期, 具体地, 在 SSP1-2.6、SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 下变化幅度分别为 0.81 MJ/m²、0.04 MJ/m² 和-0.03 MJ/m²。这可能与气候变化情景下降水量增加有关, 而降雨的前提是云量增加, 有研究表明引起中国太阳辐射变化的主要因素之一即是云量^[34-35]。

3.2 未来气候情景下农田水分利用和作物产量的变化

在 3 种 SSPs 下模拟了未来时期常规灌溉情景下实际蒸散量、灌溉量、地下水净使用量和作物产量相较于历史时期常规灌溉情景的变化情况, 如图 3 所示。未来时期整个区域的年实际蒸散量有所增加, 并且增加幅度随着温室气体排放情景的增强而降低, 在 SSP1-2.6、SSP2-

4.5 和 SSP5-8.5 排放情景下增幅分别为 7.9%、4.8% 和 3.7% (图 3a)。整个研究区年灌溉量和地下水净使用量在未来时期有所减少 (图 3b 和图 3c), 且在高排放情景 SSP5-8.5 下减少幅度最大, 具体表现为: 在 SSP1-2.6、SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 排放情景下年灌溉量变幅分别为 -0.9%、-5.9% 和 -11.0%, 年地下水净使用量变幅分别为 -16.2%、-24.2% 和 -36.9%。全区冬小麦和夏玉米产量在未来时期也有所增加, 其中冬小麦产量在 3 种排放情景下增幅相对稳定, 平均增加 14.3% (图 3d); 而夏玉米产量增加幅度随着温室气体排放情景的增强略有下降, 即在 SSP1-2.6、SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 排放情景下增幅分别为 7.5%、6.2% 和 5.7% (图 3e)。

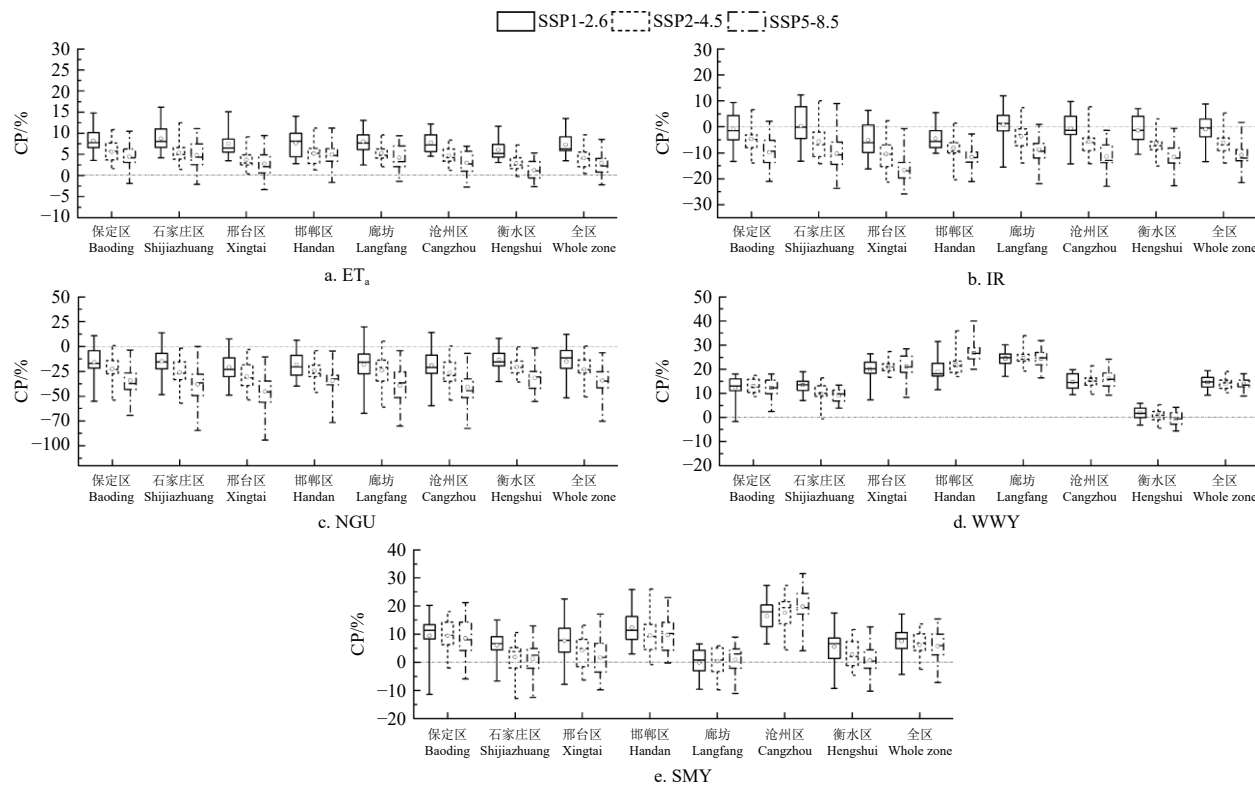


图 3 未来气候情景下年实际蒸散量 (ET_a)、灌溉量 (IR)、地下水净水用量 (NGU)、冬小麦产量 (WWY) 和夏玉米产量 (SMY) 相较于历史时期的变化

Fig.3 Change (CP) in annual evapotranspiration(ET_a), irrigation (IR), net groundwater use (NGU), winter wheat yield (WWY), and summer maize yield (SMY) under the future climate scenarios compared to the historical period

各分区年实际蒸散量、灌溉量和地下水净使用量在未来气候情景中的变化趋势与全区一致, 但在变化幅度上有一定差异 (图 3)。各分区冬小麦和夏玉米产量在未来气候情景下的变化趋势不尽相同, 但整体上均呈现增加的趋势。

3.3 未来气候条件下灌溉情景模拟

3.3.1 不同灌溉情景下分区农田水分利用变化

由表 5 和表 6 可知, 未来气候条件下 6 种灌溉情景中各分区年实际蒸散量、灌溉量和地下水净使用量相较于历史时期均有所减少。

表 5 历史时期年实际蒸散量 (ET_a)、灌溉量 (IR)、地下水净使用量 (NGU) 和作物产量

Table 5 Annual ET_a, irrigation (IR), net groundwater use (NGU), and crop yield during the historical period

分区 Zone	ET _a /mm	IR/mm	NGU/mm	产量 Yield / (kg·hm ⁻²)	
				冬小麦 Winter wheat	夏玉米 Summer maize
保定区 Baoding	779.2	344.7	293.5	6 108.0	6 597.6
石家庄区 Shijiazhuang	750.0	311.7	261.8	6 807.6	7 644.8
邢台区 Xingtai	746.1	325.7	272.5	6 094.1	6 204.6
邯郸区 Handan	804.3	381.5	324.4	6 525.9	6 683.4
廊坊市 Langfang	769.1	340.5	283.4	5 419.4	6 448.5
沧州市 Cangzhou	759.6	334.5	280.6	5 040.0	5 198.0
衡水区 Hengshui	865.9	453.3	399.1	5 884.9	5 650.0

表 6 未来时期不同灌溉情景下各分区年实际蒸散量、灌溉量和地下水净使用量（NGU）相较于历史时期的变化
Table 6 Change of annual ET_a, irrigation (IR), and net groundwater use (NGU) under various of irrigation scenarios during the future period compared to the historical period mm

分区 Zone	情景 Scenario	ET _a				IR				NGU			
		SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP5-8.5	平均 Mean	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP5-8.5	平均 Mean	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP5-8.5	平均 Mean
保定区 Baoding	I	-40.1	-56.0	-59.9	-52.0	-114.9	-123.2	-135.7	-124.6	-150.0	-163.6	-195.5	-169.7
	II	-116.0	-128.0	-122.7	-122.3	-210.5	-217.3	-222.2	-216.7	-234.6	-245.3	-268.4	-249.4
	III	-64.3	-76.8	-76.2	-72.4	-142.5	-147.9	-156.0	-148.8	-175.8	-186.2	-213.6	-191.9
	IV	-76.8	-89.3	-88.8	-85.0	-162.1	-170.2	-180.4	-170.9	-187.9	-198.2	-225.5	-203.9
	V	-152.6	-161.0	-152.8	-155.5	-255.9	-262.5	-266.2	-261.5	-271.7	-279.0	-299.0	-283.2
	VI	-115.4	-124.1	-119.3	-119.6	-203.9	-208.8	-215.1	-209.3	-228.0	-234.7	-257.9	-240.2
石家庄区 Shijiazhuang	I	-17.3	-41.3	-39.1	-32.6	-89.5	-103.8	-113.9	-102.4	-125.5	-149.7	-178.5	-151.2
	II	-91.8	-106.8	-97.6	-98.7	-181.2	-189.5	-192.6	-187.8	-206.0	-222.5	-244.0	-224.1
	III	-41.9	-59.6	-56.0	-52.5	-117.6	-126.0	-135.2	-126.3	-151.3	-169.6	-197.0	-172.6
	IV	-44.0	-63.2	-58.2	-55.1	-134.5	-147.8	-157.6	-146.6	-153.6	-172.8	-198.4	-174.9
	V	-118.8	-131.3	-119.6	-123.2	-224.4	-233.7	-237.0	-231.7	-234.2	-247.7	-266.6	-249.5
	VI	-83.4	-95.9	-89.1	-89.4	-177.2	-184.3	-192.6	-184.7	-194.3	-207.1	-230.9	-210.8
邢台区 Xingtai	I	-34.5	-55.9	-58.1	-49.5	-118.7	-131.5	-144.5	-131.6	-153.7	-175.9	-208.5	-179.4
	II	-104.0	-117.6	-110.7	-110.8	-201.6	-208.7	-212.6	-207.7	-227.6	-242.6	-266.0	-245.4
	III	-64.5	-80.2	-79.0	-74.6	-150.9	-158.4	-168.2	-159.1	-184.4	-200.9	-230.3	-205.2
	IV	-68.1	-85.0	-85.2	-79.4	-165.1	-176.7	-190.1	-177.3	-187.9	-205.7	-236.0	-209.9
	V	-138.7	-149.1	-139.8	-142.5	-248.0	-255.2	-259.3	-254.2	-262.7	-274.7	-295.5	-277.6
	VI	-111.7	-122.8	-118.3	-117.6	-210.9	-216.8	-226.0	-217.9	-232.2	-244.3	-270.1	-248.9
邯郸区 Handan	I	-133.0	-147.1	-144.8	-141.6	-239.4	-246.3	-256.0	-247.2	-274.0	-287.9	-316.8	-292.9
	II	-176.2	-186.9	-178.7	-180.6	-294.6	-299.2	-302.7	-298.8	-319.4	-330.1	-353.1	-334.2
	III	-151.6	-162.9	-158.4	-157.7	-259.6	-263.8	-271.6	-265.0	-292.9	-304.0	-330.8	-309.2
	IV	-153.3	-165.2	-160.9	-159.8	-267.4	-273.5	-282.7	-274.6	-294.5	-306.3	-333.0	-311.3
	V	-196.5	-205.5	-195.8	-199.3	-321.7	-326.2	-329.6	-325.8	-339.8	-348.8	-370.2	-352.9
	VI	-179.2	-188.1	-181.1	-182.8	-294.8	-298.3	-304.9	-299.3	-320.6	-329.5	-353.6	-334.6
廊坊区 Langfang	I	-24.1	-40.2	-44.9	-36.4	-90.4	-100.6	-111.5	-100.8	-145.0	-157.9	-194.9	-165.9
	II	-123.7	-133.1	-126.6	-127.8	-209.7	-215.8	-218.3	-214.6	-249.9	-256.6	-283.2	-263.2
	III	-54.5	-65.6	-66.8	-62.3	-123.8	-129.3	-137.5	-130.2	-176.2	-184.1	-217.9	-192.7
	IV	-62.9	-74.9	-76.6	-71.4	-138.8	-147.6	-158.2	-148.2	-184.4	-193.0	-226.9	-201.4
	V	-158.3	-165.5	-157.0	-160.2	-252.3	-258.8	-261.8	-257.7	-284.9	-289.4	-313.5	-296.0
	VI	-110.2	-117.2	-114.1	-113.8	-189.3	-193.5	-200.5	-194.4	-232.6	-236.5	-265.7	-244.9
沧州市 Cangzhou	I	-23.6	-41.3	-47.5	-37.5	-97.3	-108.8	-120.9	-109.0	-23.6	-41.3	-47.5	-37.5
	II	-107.6	-118.5	-115.5	-113.9	-199.8	-206.8	-211.0	-205.9	-107.6	-118.5	-115.5	-113.9
	III	-52.9	-65.0	-67.8	-61.9	-129.7	-136.0	-145.2	-137.0	-52.9	-65.0	-67.8	-61.9
	IV	-63.5	-76.6	-80.5	-73.5	-144.8	-154.3	-166.4	-155.2	-63.5	-76.6	-80.5	-73.5
	V	-145.7	-155.3	-149.1	-150.0	-244.3	-252.1	-255.8	-250.7	-145.7	-155.3	-149.1	-150.0
	VI	-106.3	-114.9	-113.7	-111.6	-190.9	-196.1	-203.9	-196.9	-106.3	-114.9	-113.7	-111.6
衡水区 Hengshui	I	-98.3	-118.5	-123.8	-113.5	-169.5	-181.6	-193.2	-181.4	-211.4	-232.2	-258.8	-234.2
	II	-171.3	-187.4	-187.3	-182.0	-273.6	-284.0	-288.5	-282.0	-297.9	-315.4	-336.0	-316.4
	III	-134.1	-150.0	-151.5	-145.2	-209.4	-217.3	-225.3	-217.3	-249.0	-265.4	-288.4	-267.6
	IV	-142.1	-158.1	-160.0	-153.4	-221.8	-232.4	-241.9	-232.0	-256.1	-272.5	-295.4	-274.6
	V	-212.8	-225.0	-221.8	-219.9	-323.2	-332.4	-335.8	-330.4	-340.3	-353.8	-371.3	-355.1
	VI	-188.7	-199.6	-198.1	-195.5	-273.0	-278.5	-285.7	-279.1	-304.8	-316.0	-336.0	-318.9

在情景 V 下，各分区灌溉量和地下水净使用量减少最多，分别减少 231.7~330.4 和 150.0~355.1 mm，其中衡水区减幅最大，邯郸区次之。在“灌水两次”的情景中（II，III，IV），各分区在情景 II 下的灌溉量和地下水净使用量减幅较多，分别减少 187.8~298.8 和 113.9~334.2 mm，其中邯郸区减幅最高。在情景 I 下，各分区灌溉量和地下水净使用量减幅最低，分别减少 100.8~247.2 和 37.5~292.9 mm，其中邯郸区减幅最高，衡水区减幅次之。

3.3.2 不同灌溉情景下分区作物产量变化

由表 5 和表 7 可知，与历史时期相比，各分区夏玉米产量在大部分灌溉情景中均有所增加，平均变幅在 -5.4%~14.1% 之间。对于冬小麦来说，在不同灌溉情景下各分区产量有增有减。具体来说：保定区产量在情景 I 和 IV 下增加较多，分别为 13.0% 和 12.3%，在 II、

V 和 VI 下有所减少，平均减幅在 4.1%~5.7% 之间；石家庄区产量在情景 I 和 IV 下分别增加 11.9% 和 14.0%，在其余情景下有所减少，在情景 VI 下平均减幅最大为 10.1%，在情景 III 和 V 下减幅较小，分别为 1.6% 和 2.2%；邢台区产量仅在情景 VI 下略有减少，在其余情景下均有所增加，平均增幅在 5.2%~21.0% 之间；邯郸区产量在 6 种灌溉情景下均增加；廊坊区产量在情景 I、III、IV 和 VI 下平均增加 5.0%~24.1%，在 II 和 V 下分别平均减少 6.2% 和 7.0%；沧州市产量在情景 I、III 和 IV 下有所增加，在 II、V 和 VI 下减少，平均减幅在 3.4%~7.4% 之间；衡水区产量在情景 I 和 IV 下分别平均增加 1.2% 和 1.1%，在情景 II、III、V 下减少幅度相同均为 5.1%，在 VI 下减少最多为 8.4%。综上，在灌溉情景 I 和 IV 下各分区冬小麦产量均有所增加，且增加幅度较大。

表 7 未来时期不同灌溉情景下各分区作物产量相较于历史时期的变化
Table 7 Change of crop yield under various irrigation scenarios during the future period compared to the historical period %

分区 Zone	情景 Scenario	冬小麦 Winter wheat				夏玉米 Summer maize			
		SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP5-8.5	平均 Mean	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP5-8.5	平均 Mean
保定区 Baoding	I	13.4	12.8	12.8	13.0	5.4	5.4	7.2	6.0
	II	-6.5	-4.9	-1.0	-4.1	8.3	7.9	9.2	8.5
	III	2.3	2.7	3.9	2.9	7.7	8.6	10.0	8.8
	IV	11.9	11.9	13.3	12.3	6.6	6.5	8.2	7.1
	V	-8.9	-7.0	-1.3	-5.7	8.6	7.4	9.3	8.4
	VI	-7.2	-5.6	-4.4	-5.7	9.9	10.4	11.9	10.7
石家庄区 Shijiazhuang	I	14.3	11.8	9.6	11.9	<0.1	-0.8	-1.3	-0.7
	II	-3.9	-4.0	-2.2	-3.4	4.2	2.2	1.5	2.6
	III	-0.5	-1.4	-2.8	-1.6	5.4	3.7	3.1	4.1
	IV	15.4	13.8	12.9	14.0	2.0	0.9	0.9	1.3
	V	-3.6	-3.3	0.4	-2.2	5.9	2.3	2.4	3.5
	VI	-10.7	-9.2	-10.5	-10.1	8.3	6.9	6.8	7.3
邢台区 Xingtai	I	19.0	20.4	23.6	21.0	0.8	-1.2	0.7	0.1
	II	7.1	9.5	16.0	10.9	-3.6	-5.8	-3.6	-4.4
	III	6.2	9.8	14.0	10.0	-0.4	-1.7	0.2	-0.6
	IV	13.0	15.5	20.0	16.2	1.1	-1.5	0.5	<0.1
	V	-0.3	3.6	12.5	5.2	-5.0	-7.5	-3.8	-5.4
	VI	-4.6	-0.8	4.7	-0.2	0.6	-2.3	<0.1	-0.6
邯郸区 Handan	I	18.3	21.3	26.6	22.1	7.9	5.9	7.1	6.9
	II	12.8	15.9	22.8	17.2	4.6	2.0	4.0	3.5
	III	11.5	15.2	18.1	15.0	7.6	5.6	3.3	5.5
	IV	15.1	18.3	23.9	19.1	7.8	5.2	6.1	6.4
	V	9.9	12.3	21.7	14.6	4.5	<0.1	4.4	3.0
	VI	5.0	9.8	16.2	10.4	6.9	5.4	6.7	6.3
廊坊区 Langfang	I	25.0	24.9	22.3	24.1	-3.6	-2.4	-2.5	-2.8
	II	-9.2	-7.1	-2.2	-6.2	7.0	8.7	12.0	9.2
	III	12.5	13.6	12.9	13.0	0.9	1.8	1.9	1.6
	IV	23.3	23.6	25.3	24.0	-1.5	-0.8	1.5	-0.3
	V	-10.6	-8.0	-2.4	-7.0	8.5	10.3	13.2	10.6
	VI	2.5	5.3	7.3	5.0	7.1	8.1	9.2	8.1
沧州市 Cangzhou	I	13.6	15.1	15.6	14.8	8.9	12.8	16.7	12.8
	II	-8.4	-5.4	-1.7	-5.2	7.6	11.2	15.0	11.3
	III	0.6	3.5	6.6	3.6	7.5	12.0	18.5	12.7
	IV	12.0	13.4	15.0	13.5	10.7	12.9	16.7	13.4
	V	-11.4	-8.5	-2.4	-7.4	7.5	10.3	16.2	11.3
	VI	-6.1	-3.9	-0.1	-3.4	11.1	12.5	18.7	14.1
衡水区 Hengshui	I	2.6	1.3	-0.3	1.2	4.9	2.0	0.6	2.5
	II	-3.5	-5.0	-6.8	-5.1	4.8	1.1	-2.8	1.0
	III	-3.5	-4.6	-7.0	-5.1	5.9	2.9	0.3	3.0
	IV	2.5	1.3	-0.5	1.1	4.8	2.0	0.3	2.4
	V	-3.4	-6.1	-5.7	-5.1	4.8	-1.0	-1.4	0.8
	VI	-7.4	-7.9	-9.9	-8.4	6.7	3.9	2.5	4.4

4 讨 论

4.1 农田水分利用和作物产量对气候变化的响应

与历史时期相比，未来时期年实际蒸散量增加、年灌溉量和年地下水净使用量减少，这可能与降水量增加有关。XIAO 等^[14]在华北平原的相关研究中也证实未来蒸散量与降水量呈显著的正相关性，而灌溉量和地下水净使用量与降水量呈显著的负相关性。也有研究表明，未来蒸散量的增加与降水增加和气温升高有关。ABBASZADEH 等^[36]在伊朗北部流域的相关研究表明，与基准期（1989—2014 年）相比，未来时期（2021—2050 年和 2051—2080 年）降水量、最低气温和最高气温增加导致蒸散量增加 12.8%。本文还发现，随着温室气体排放情景的增加，年实际蒸散量增幅减少，甚至一些 GCM 预测蒸散量减少。这主要是由于，在高温温室气体排放情景（SSP5-8.5）下 CO₂ 浓度最高，逐年上升幅度的也最大，而 CO₂ 浓度升高会导致叶片气孔导度降低，进而作物蒸腾速率减少，最终导致蒸散量降低^[37]。此外，未来时期

冬小麦和夏玉米产量增加，且冬小麦产量增幅高于夏玉米。有研究表明，大气 CO₂ 浓度升高有助于光合速率的提高，进而增加作物产量，并且作为 C3 作物的小麦对 CO₂ 浓度升高的敏感程度高于作为 C4 作物的玉米^[38]。另有研究表明，在供水充足的情况下温度和 CO₂ 浓度升高对冬小麦和玉米产量均有正面影响^[39-40]。本文还发现随着温室气体排放情景的增强，夏玉米产量增幅略有降低，这主要是由于大气 CO₂ 浓度升高对作物产量的积极作用可能被持续升高的温度所抵消。因此，作物产量在未来时期的变化是多种因素综合作用的结果。

4.2 未来气候条件下优化的灌溉策略

由上述可知，未来气候条件下实际蒸散量增加，而灌溉量和地下水净使用量减少，冬小麦和夏玉米产量有所增加，这间接表明未来气候变化或有助于海河平原地下水资源恢复。在这种情况下，本文继续探究了未来气候条件下雨养夏玉米结合冬小麦非充分灌溉情景对区域农田水分利用和作物产量的影响。本文的研究结果表明，

在冬小麦拔节期灌溉, 灌溉量和地下水净使用量最少。在栾城试验站和海河平原的田间试验和模拟研究也显示, 仅在冬小麦拔节期施用一次灌溉, 地下水位下降会明显减缓, 这与本文的研究结果相一致^[7, 28]。此外, 在藁城站和栾城站的相关研究显示, 越冬前和拔节期进行灌溉可以在保证冬小麦减产不多的情况下显著提高水分利用效率^[41-42]。而本文的研究结果也表明, 在冬小麦越冬前和拔节期施用灌溉, 各分区作物产量相较于历史时期的变幅在-10.1%~10.4%之间, 实际蒸散量有所减少, 这间接表明水分利用效率有所提升。由此可见, 本文在未来气候条件下冬小麦非充分灌溉情景的模拟结果较为可靠。因此, 基于本研究的结果, 从确保粮食安全的角度出发, 在未来气候条件下本文推荐各分区冬小麦在越冬前、拔节期和灌浆期进行灌溉, 或在拔节期和灌浆期进行灌溉。此时, 冬小麦产量增幅为 1.1%~24.1%, 夏玉米产量变幅为-2.8%~13.4%, 相应地, 与历史时期相比地下水净使用量减少幅度在 37.5~311.3 mm 之间。从地下水资源恢复的角度来说, 在未来气候条件下本文推荐各分区冬小麦在拔节期进行灌溉。此时, 地下水净使用量与历史时期相比减少幅度最大, 为 249.5~352.9 mm, 相应地, 冬小麦和夏玉米产量变幅分别为-7.4%~14.6%和-5.4%~11.3%。从农业可持续发展的角度, 也就是既确保粮食安全又利于地下水资源恢复的视角来说, 在未来气候条件下本文推荐各分区冬小麦优化灌溉策略分别为: 保定区、石家庄区、邢台区和衡水区在拔节期和灌浆期进行灌溉, 邯郸区在拔节期进行灌溉, 廊坊区在灌浆期进行灌溉, 沧州市在冬小麦越冬前和灌浆期进行灌溉。

5 结 论

本文基于改进的 SWAT 模型量化评估了未来气候变化对海河平原农田水分利用和作物产量的影响, 并在此基础上探索了研究区在未来气候条件下优化的灌溉策略, 得到如下主要结论:

1) 与历史时期相比, 未来时期区域年实际蒸散量增加 5.5%、年灌溉量和年地下水净使用量分别减少 5.9%和 25.8%。随着温室气体排放情景的增强, 年实际蒸散量的增幅降低, 年灌溉量和年地下水净使用量的减幅升高; 未来时期作物产量增加, 冬小麦和夏玉米产量分别增加 14.3%和 6.5%, 其中夏玉米产量增幅随温室气体排放情景的增强而降低。

2) 在未来气候条件下, 夏玉米雨养结合冬小麦拔节期进行灌溉(灌水定额为 25 mm, 根据自动灌溉系统确定灌水频率)是最有利于地下水资源恢复的灌溉策略, 而夏玉米雨养结合冬小麦拔节期和灌浆期进行灌溉是确保粮食安全的优化灌溉策略。

致谢: 感谢中国农业大学土地科学与技术学院陈永教授提供改进自动灌溉和大气 CO₂ 浓度模块 SWAT 模型的源代码和运行程序。

[参 考 文 献]

- [1] 张光辉, 费宇红, 刘春华, 等. 华北平原灌溉用水强度与地下水承载力适应性状况[J]. 农业工程学报, 2013, 29(1): 1-10.
ZHANG Guanghui, FEI Yuhong, LIU Chunhua, et al. Adaptation between irrigation intensity and groundwater carrying capacity in North China Plain[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(1): 1-10. (in Chinese with English abstract)
- [2] FAMIGLIETTI J S. The global groundwater crisis[J]. *Nature Climate Change*, 2014, 4: 945-948.
- [3] 鞠琴, 刘小妮, 刘智天, 等. 淮北平原地下水埋深变化对气候变化的响应及预测[J]. 农业工程学报, 2022, 38(7): 136-145.
JU Qin, LIU Xiaoni, LIU Zhitian, et al. Response and prediction of groundwater depth changes to climate change in the Huaibei Plain of China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(7): 136-145. (in Chinese with English abstract)
- [4] WU W Y, LO M H, WADA Y, et al. Divergent effects of climate change on future groundwater availability in key mid-latitude aquifers[J]. *Nature Communication*, 2020, 11: 3710.
- [5] 乔帅帅, 高晓瑜, 屈忠义, 等. 1959-2018 年气候变化对内蒙古春玉米需水量和产量的影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(增刊): 87-97.
QIAO Shuaishuai, GAO Xiaoyu, QU Zhongyi, et al. Impact of climate change on the water requirements and yield of spring maize in Inner Mongolia of China from 1959 to 2018[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(Suppl): 87-97. (in Chinese with English abstract)
- [6] 杨会峰, 曹文寅, 支传顺, 等. 近 40 年来华北平原地下水位演变研究及其超采治理建议[J]. *中国地质*, 2021, 48(4): 1142-1155.
YANG Huifeng, CAO Wenyin, ZHI Chuanshun, et al. Evolution of groundwater level in the North China Plain in the past 40 years and suggestions on its overexploitation treatment[J]. *Geology in China*, 2021, 48(4): 1142-1155. (in Chinese with English abstract)
- [7] 张喜英. 华北典型区域农田耗水与节水灌溉研究[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(10): 1454-1464.
ZHANG Xiying. Water use and water-saving irrigation in typical farmlands in the North China Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(10): 1454-1464. (in Chinese with English abstract)
- [8] 中华人民共和国中央政府. 国务院关于印发全国国土规划纲要(2016-2030 年)的通知. 第五章 分类保护, 第四节 严格水资源和耕地资源保护[EB/OL]. 2017(2017-01-03). https://www.gov.cn/gongbao/content/2017/content_5171326.htm
- [9] 河北省人民政府. 《加快发展节水农业实施方案》解读[EB/OL]. 2021(2021-09-08). <https://www.hebei.gov.cn/columns/580d0301-2e0b-4152-9dd1-7d7f4e0f4980/202109/08/9a78f769-4d53-11ee-985b-6018954d7f6f.html>
- [10] 王慧军, 张喜英. 华北平原地下水压采区冬小麦种植综合效应探讨[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(5):

- 724-733.
WANG Huijun, ZHANG Xiying. Evaluating the comprehensive effects of planting winter wheat in the groundwater depletion regions in the North China Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(5): 724-733. (in Chinese with English abstract)
- [11] 王斌, 周天军, 俞永强, 等. 地球系统模式发展展望[J]. 气象学报, 2008, 66(6): 857-869.
WANG Bin, ZHOU Tianjun, YU Yongqiang, et al. A perspective on earth system model development[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2008, 66(6): 857-869. (in Chinese with English abstract)
- [12] WANG B, LIU D L, O'LEARY G J, et al. Australian wheat production expected to decrease by the late 21st century[J]. Global Change Biology, 2018, 24(6): 2403-2415.
- [13] 康文东, 倪福全, 邓玉, 等. 乌江流域蓝绿水对气候和土地利用变化的响应[J]. 农业工程学报, 2023, 39(19): 131-140.
KANG Wendong, NI Fuquan, DENG Yu, et al. Response of blue and green water to climate and land use changes: A study in the Wujiang River Basin, China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(19): 131-140. (in Chinese with English abstract)
- [14] XIAO D P, LIU D L, WANG B, et al. Climate change impact on yields and water use of wheat and maize in the North China Plain under future climate change scenarios[J]. Agricultural Water Management, 2020, 238: 1-15.
- [15] BAI H Z, XIAO D P, WANG B, et al. Multi-model ensemble of CMIP6 projections for future extreme climate stress on wheat in the North China plain[J]. International Journal of Climatology, 2021, 41: E171-E186.
- [16] NEITSCH S L, ARNOLD J G, KINIRY J R, et al. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009[M]. Texas: Texas Water Resources Institute, 2011.
- [17] 王维刚, 史海滨, 李仙岳, 等. SWAT 模拟耕作方式与盐分对区域土壤氮运移及作物产量影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(3): 55-65.
WANG Weigang, SHI Haibin, LI Xian Yue, et al. Effects of tillage modes and soil salinity on regional nitrate nitrogen transport and crop yields using a SWAT model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(3): 55-65. (in Chinese with English abstract)
- [18] 王慧琳, 邹民忠, 方伟文, 等. 基于 SWAT 模型的武强溪流域非点源污染关键源区界定与控制策略[J]. 农业工程学报, 2024, 40(2): 228-238.
WANG Huilin, ZOU Minzhong, FANG Weiwen, et al. Definition and control strategy of the key source areas of non-point source pollution based on SWAT model in Wuqiang River Basin, Zhejiang of China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(2): 228-238. (in Chinese with English abstract)
- [19] NADERI M. Assessment of water security under climate change for the large watershed of Dorudzan Dam in southern Iran[J]. Hydrogeology Journal, 2020, 28(5): 1533-1574.
- [20] ALIYARI F, BAILEY R T, ARABI M. Appraising climate change impacts on future water resources and agricultural productivity in agro-urban river basins[J]. Science of the Total Environment, 2021, 788: 147717.
- [21] TAN L L, FENG P Y, Li B G, et al. Climate change impacts on crop water productivity and net groundwater use under a double-cropping system with intensive irrigation in the Haihe River Basin, China[J]. Agricultural Water Management, 2022, 266: 107560.
- [22] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements-FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56[M]. Rome: FAO, 1998.
- [23] LIU D, ZUO H. Statistical downscaling of daily climate variables for climate change impact assessment over New South Wales, Australia[J]. Climate Change, 2012, 115(3/4): 629-666.
- [24] O'NEILL B C, TEBALDI C, VAN VUUREN D P, et al. The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6[J]. Geoscientific Model Development, 2016, 9(9): 3461-3482.
- [25] 陈望和. 河北地下水[M]. 北京: 地震出版社, 1999.
- [26] 张宗祜, 李烈荣. 中国地下水资源·河北卷[M]. 北京: 中国地图出版社, 2005.
- [27] ZHANG Y Q, QI J Y, PAN D M, et al. Development and testing of a dynamic CO₂ input method in SWAT for simulating long-term climate change impacts across various climatic locations[J]. Journal of Hydrology, 2022, 614: 128544.
- [28] CHEN Y, MAREK G W, MAREK T H, et al. Improving SWAT auto-irrigation functions for simulating agricultural irrigation management using long-term lysimeter field data[J]. Environmental Modelling & Software, 2018, 99: 25-38.
- [29] 康绍忠, 孙景生, 张喜英, 等. 中国北方主要作物需水量与耗水管理[M]. 北京: 水利水电出版社, 2018.
- [30] ZHANG X Y, QIN W L, CHEN S Y, et al. Responses of yield and WUE of winter wheat to water stress during the past three decades-A case study in the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2017, 179: 47-54.
- [31] SUN H Y, ZHANG X Y, CHEN S Y, et al. Performance of a double cropping system under a continuous minimum irrigation strategy[J]. Agronomy Journal, 2014, 106(1): 281-289.
- [32] AHMAD M D. Estimation of net groundwater use in irrigated river basins using geo-information techniques: A case study in Rechna Doab, Pakistan[D]. Netherlands: Wageningen University, 2002.
- [33] 朱新军, 王中根, 李建新, 等. 地下水净使用量的计算方法及其在海河流域的应用[C]. 全球环境基金 (GEF) 海河流域水资源与水环境综合管理项目国际研讨会. 北京: 水利部, 环保部, 2009.
- [34] SCHWARZ M, FOLINI D, YANG S, et al. Changes in atmospheric shortwave absorption as important driver of dimming and brightening[J]. Nature Geoscience, 2020, 13(2): 110-115.
- [35] WANG K C, DICKINSON R E, WILD M, et al. Atmospheric

- impacts on climatic variability of surface incident solar radiation[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, 12(20): 9581-9592.
- [36] ABBASZADEH M, BAZRAFSHAN O, MAHDAVI R, et al. Modeling future hydrological characteristics based on land use/land cover and climate changes using the SWAT model[J]. *Water Resources Management*, 2023, 37(10): 4177-4194.
- [37] XIONG W, HOLMAN I, LIN E D, et al. Climate change, water availability and future cereal production in China[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2010, 135(1/2): 58-69.
- [38] KIMBALL B A, ZHU J, CHENG L, et al. Responses of agricultural crops to free-air CO₂ enrichment[J]. *Advances in Agronomy*, 2002, 13(10): 1323-1338.
- [39] MORADI R, KOOCHIKI A, MAHALLATI M N, et al. Adaptation strategies for maize cultivation under climate change in Iran: Irrigation and planting date management[J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2013, 18(2): 265-284.
- [40] YANG P, WU W, LI Z, et al. Simulated impact of elevated CO₂, temperature, and precipitation on the winter wheat yield in the North China Plain[J]. *Regional Environmental Change*, 2014, 14(1): 61-74.
- [41] YANG Y H, WATANABE M, ZHANG X Y, et al. Optimizing irrigation management for wheat to reduce groundwater depletion in the piedmont region of the Taihang Mountains in the North China Plain[J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 82(1/2): 25-44.
- [42] QIU G Y, WANG L M, HE X H, et al. Water use efficiency and evapotranspiration of winter wheat and its response to irrigation regime in the North China Plain[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148(11): 1848-1859.

Optimization of crop irrigation strategies using modeling in Haihe Plain under climate change

TAN Lili^{1,2,3}, FENG Puyu^{1,2}, LIU Deli⁴, QIAO Xuejin⁵, LI Baoguo^{1,2*}

(1. College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. Key Laboratory of Arable Land Conservation in North China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100193, China; 3. School of Resources and Environmental Engineering, Ludong University, Yantai 264025, China; 4. NSW Department of Primary Industries, Wagga Wagga Agricultural Institute, Wagga Wagga, NSW 2650, Australia; 5. Yantai Vocational College, Yantai 264670, China)

Abstract: The Haihe Plain has made a great contribution to national food security in the world. The stable production of grain crops can rely mainly on groundwater extraction for irrigation, thus leading to the overexploitation of groundwater in the region. Additionally, the ever-increasing global climate can also threaten water resources and food production. Deficit irrigation can be expected to serve as a water-saving technique under current climate conditions, in order to significantly improve water use efficiency. However, much more irrigation water can be required to fully meet the normal growth needs of crops, particularly with the general increase in temperatures. It is a high demand to quantitatively assess the changes in crop water use and crop yields under future climate scenarios. Adaption irrigation can be used to explore climate change for the sustainable development of agriculture in the major food-producing regions with scarce water resources. In this study, an enhanced SWAT model was combined with the multiple general circulation models (GCMs) from CMIP6, in order to simulate the climate and irrigation scenarios. The improved SWAT model included some enhancements in two aspects: one was an automatic irrigation using MAD (management allowed depletion), and another was the dynamic CO₂ input. Additionally, three shared socioeconomic pathways (SSPs) were selected, namely SSP1-2.6, SSP2-4.5, and SSP5-8.5. Firstly, the enhanced SWAT model and multiple GCMs were applied to simulate the actual evapotranspiration (ET_a), irrigation, net groundwater use (NGU), and crop yields under the SSP1-2.6, SSP2-4.5, and SSP5-8.5 scenarios in the future period (2041-2070). Furthermore, the appropriate irrigation strategies were explored for the future scenarios of climate change. The results showed that: 1) Annual ET_a increased by 5.5%, whereas, the annual irrigation and NGU decreased by 5.9% and 25.8%, respectively, in the future period, compared with the historical period (1971-2000); Under the SSP5-8.5 emission, the annual ET_a increased the least, whereas, the annual irrigation and NGU decreased the most. 2) The winter wheat and summer maize yield increased by 14.3% and 6.5%, respectively; There was the declined yield of summer maize under the greenhouse gas emission scenario. 3) In the future climate, the appropriate schedule of irrigation was achieved in the jointing stage of winter wheat with the rainfed summer maize, indicating the maximum groundwater recovery. In food security, it is recommended irrigation during the jointing and filling stages of winter wheat with the rainfed summer maize. 4) In terms of grain production and groundwater resource recovery, the irrigation strategies can be recommended to vary among different zones. In Baoding, Shijiazhuang, Xingtai, and Hengshui zones, irrigation can be applied during both the jointing and filling stages. In the Handan zone, irrigation can be recommended only during the jointing stage, while in the Langfang zone, it should be during the filling stage. Finally, irrigation can be advised before winter and during the filling stage of winter wheat in the Cangzhou zone. The findings can provide for the rational planning of regional agricultural water resources and sustainable food production.

Keywords: climate change; groundwater; irrigation; SWAT model; CMIP6; crop yield; Haihe Plain