

大规模灌溉对海河流域气候影响模拟研究

桂云鹏, 赵勇^{*}, 杨明祥, 王庆明, 翟家齐

(中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

摘要: 为保障粮食安全, 海河流域常年灌溉水量 200 亿 m^3 以上, 而大规模灌溉对区域气候产生显著影响, 为揭示大规模灌溉的气候效应, 该研究构建海河流域区域气候模式 WRF (weather research and forecasting model), 在 WRF 陆面模块中, 开发灌溉精细化模拟的新方案, 设计关闭灌溉的控制试验与开启灌溉的敏感性试验, 模拟分析大规模灌溉对海河流域气候的影响。结果表明, 灌溉使得海河流域潜热通量增加, 显热通量减少, 4—6 月变幅最大。灌溉导致流域 3—11 月气温降低, 其中 4—6 月降温最大, 且空间上总体表现为灌溉量越多的地区降温越大, 4—6 月平原区降温 $0.64\text{ }^{\circ}\text{C}$, 子牙河平原与大清河淀西平原交界地带降温超过 $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。灌溉主要影响对流性降水, 导致海河流域年降水增加 6.07 mm , 集中在 4—6 月, 空间上主要在大清河流域与子牙河流域, 其中大清河山区 4—6 月降水增加 $15\sim 30\text{ mm}$ 。灌溉改变近地表气象要素, 使得流域参考作物蒸散发量减少, 单位面积作物需水量降低。因此, 大规模灌溉的气候效应在供需两侧支撑保障流域水安全, 在一定程度上缓解流域水资源供需矛盾。研究可为水资源优化配置与水资源安全保障布局等提供基础支撑。

关键词: 灌溉; 气候变化; 气候模型; 海河流域

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202309138

中图分类号: P463.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-03-0138-09

桂云鹏, 赵勇, 杨明祥, 等. 大规模灌溉对海河流域气候影响模拟研究[J]. 农业工程学报, 2024, 40(3): 138-146. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202309138 <http://www.tcsae.org>

GUI Yunpeng, ZHAO Yong, YANG Mingxiang, et al. Simulation of climate effect of large-scale irrigation in Haihe River Basin[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(3): 138-146. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202309138 <http://www.tcsae.org>

0 引言

灌溉用水量占人类使用淡水量的 70% 左右^[1], 在保障粮食安全和农业发展中发挥着重要作用^[2-3], 支持着全球大约 40% 的粮食生产^[4-5]。大量的灌溉用水被输送到农田土壤中, 增加土壤湿度, 改变地表反照率、土壤热导率和能量分配, 对区域气候系统产生重要影响^[6], 特别是在灌溉强度大的地区导致局地生态环境改变, 影响灌区作物种植与生长^[7]。因此, 研究灌溉对区域气候的影响对全面认识区域气候变化、水资源管理以及保障粮食安全具有重要意义。

灌溉的气候效应存在一定的不确定性, 与区域地理环境、灌溉强度等因素相关。已有研究表明灌溉增加地表水分, 导致地表潜热通量增加, 更少能量用于加热地面, 从而降低地表温度^[8-9], 在大规模灌溉地区, 灌溉降温效应甚至可以减弱全球变暖的影响。灌溉对降水的影响存在很大的不确定^[10-11], 一方面, 灌区蒸散发量增大引起地表水汽含量增加, 有利于形成更多的对流有效势

能, 这对对流性降水的产生有积极影响^[12-13]。另一方面, 灌溉的冷却效应可能导致大气边界层高度降低, 大气更稳定, 抑制对流, 这对对流性降水的形成产生负效应^[8,14]。同时, 灌溉由于水汽输送和云的形成影响下风向地区的降水^[15], 灌溉还通过土壤湿度的记忆性对非灌溉季节的降水产生影响^[16-17]。

海河流域是中国重要的粮食生产基地, 是中国冬小麦和夏玉米的主产区^[18], 自然降水无法满足农作物需水量, 通过补充灌溉来满足作物生长需求。海河流域从 20 世纪 60 年代开始大规模引水灌溉, 显著改变流域陆地水循环过程及通量, 由横向地表径流改为垂向蒸发耗散, 使得区域原本入海的部分径流量消耗于流域陆面。海河流域在 20 世纪 50 年代平均入海水量达 241 亿 m^3 , 到 60、70 年代分别下降至 161 亿 m^3 和 115.6 亿 m^3 , 而在 2001—2020 年多年平均入海水量为 39.4 亿 m^3 。海河流域入海水量急剧减少很大一部分原因是受农业灌溉用水活动的影响。大规模灌溉引起区域内土壤水分、陆-气之间水热通量的变化, 必然对区域气候产生影响。灌溉对海河流域及其相关地区的气候影响已开展部分研究^[19-24], 例如 ZOU 等^[19-20] 利用区域气候模式研究用水对海河流域气候的影响, YANG 等^[22] 利用气候模式研究灌溉对黄淮海平原的气候影响。在保障海河流域粮食生产安全的同时, 需要进一步深入了解当地灌溉的复杂效应, 以减少灌溉的负面影响同时获得其益处。

收稿日期: 2023-09-18 修订日期: 2024-01-23

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFC3200200); 国家杰出青年科学基金项目 (52025093)

作者简介: 桂云鹏, 博士, 工程师, 研究方向为陆-气耦合模拟与水循环模拟。Email: guiyp@iwhr.com

^{*}通信作者: 赵勇, 博士, 正高级工程师, 博士生导师, 研究方向为水循环模拟与水资源高效利用。Email: zhaoyong@iwhr.com

数值模拟是研究灌溉对气候影响的主要方法，通常是在气候模式中耦合灌溉方案研究其气候效应。灌溉方案是对实际灌溉的刻画和模拟，只有尽可能反映实际灌溉过程，才能更精确地模拟灌溉对气候的影响。气候模式中模拟灌溉主要是3种方法。第1种方法是将土壤含水量设置为固定数值，通常将农田土壤含水量固定为田间持水量或饱和含水量^[25-26]。这种方法操作简单方便，但适用地区有限。第2种方法是设置动态灌溉方案，根据土壤中水分状况判断是否需要灌溉^[24, 27-28]，或综合叶温、叶面积指数和根部水分胁迫来判断是否启动灌溉^[29-30]。该方法理论性强，但实际灌溉水量往往与模拟值不同^[31]。第3种方法是将调查统计的灌溉水量作用于农田^[32-33]。这种方法是采用真实的灌溉水量，但在灌溉水量时空平均化处理过程中可能产生误差。

为完善灌溉方案，精确刻画与模拟灌溉，基于土地利用分布、作物灌溉面积以及灌溉制度，将统计的灌溉水量在时空上细化展布，开发新的灌溉方案，使灌溉模拟值接近于真实情况，以精细化研究大规模灌溉对区域气候的影响。本文以海河流域为对象，构建区域气候模式，采用开发的灌溉方案，开展定量解析大规模灌溉的气候效应研究，有利于深入认识陆-气相互作用规律，可为水资源优化配置、水资源安全保障布局等提供基础支撑。

1 研究方法

1.1 研究区域

海河流域位于东经112°~120°，北纬35°~43°范围内，包含北京、天津、河北、山西、山东、河南、内蒙古和辽宁8省市区的全部或部分地区，总面积31.8万km²。流域总体呈现西北高东南低，分为高原、山地和平原3种地貌类型，其中山地和高原面积18.9万km²，占流域总面积的60%；东部和东南部平原面积12.9万km²，占流域总面积的40%。海河流域多年平均降水量为526mm，主要集中在夏季，占全年降水量的70%以上，流域平均气温为1.5~14.0℃。海河流域是中国冬小麦和夏玉米的主产区，但仅有约30%降水发生在冬小麦生长季节，因此，灌溉对于维持作物高质量产出十分关键，2020年流域灌溉水量占用水总量的53%。

1.2 模式介绍与配置

WRF (weather research and forecasting model) 是由美国国家大气研究中心等多家科研机构开发的一种中尺度气候模式，被广泛应用于区域气候模拟研究。本研究模拟区域 (图1) 的中心点为 (39°N, 116°E)，水平分辨率为10km，东西、南北方向各120个网格点，在垂直方向上，模式顶层气压为50hPa，从地表到顶层共32层。模式模拟时初始与侧边界条件使用欧洲中期天气预报中心提供第五代全球气候再分析数据集ERA5^[34]，时间分辨率为小时，水平分辨率为0.25°×0.25°。模式静态地理数据采用默认数据。WRF模式提供大量的参数化方案，这些参数化方案主要包括云微物理过程方案、积云对流方案、辐射传输方案、边界层方案、陆面过程方

案等。在参数化方案比选过程中，选择对降水与气温影响较大的参数化方案，形成参数化方案组合，开展模拟试验，基于实测数据，比选较优的参数化组合方案。比选评价结果表明模式采用WSM3微物理过程方案、Grell-Devenyi积云方案、RRTM长波辐射方案、Dudhia短波辐射方案、YSU边界层方案、Noah-MP陆面方案，模拟效果最优，该参数化方案组合用于后续的模式试验中。

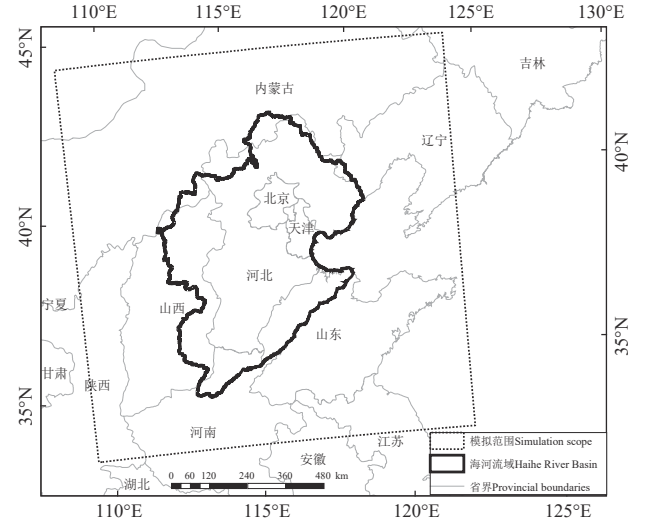


图1 气候模式模拟范围

Fig.1 Scope of climate model simulation

1.3 模式评价指标

本研究采用统计指标空间相关系数 (spatial correlation coefficient, S_{CC})、均方根误差 (root means square error, R_{MSE})、相对偏差 (relative bias, B_{IAS}) 来评价 WRF 模式模拟效果。空间相关系数计算式如下：

$$S_{CC} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_a)(y_i - y_a)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - x_a)^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - y_a)^2}} \quad (1)$$

式中 S_{CC} 为空间相关系数； n 为气象站点的数量； x_i 为第 i 个气象站观测值； x_a 为所有气象站观测值算数平均； y_i 为第 i 个气象站处的模式模拟值； y_a 为在所有气象站处的模式模拟值的算数平均。

均方根误差计算式如下：

$$R_{MSE} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (x_{mi} - x_{oi})^2} \quad (2)$$

式中 R_{MSE} 为均方根误差； m 为月份的数量； x_{mi} 为第 i 个月份研究区模拟平均值； x_{oi} 为第 i 个月份研究区观测平均值。

相对偏差计算式如下：

$$B_{IAS} = \frac{\sum_{i=1}^m (x_{mi} - x_{oi})}{\sum_{i=1}^m x_{oi}} \quad (3)$$

式中 B_{IAS} 为平均偏差；其他变量含义与式 (2) 相同。

1.4 灌溉方案

为尽可能反映实际灌溉过程，本研究在 WRF 模式

Noah-MP 陆面方案中开发新的灌溉方案, 将统计的灌溉水量数据耦合到陆面过程中, 具体过程如下:

首先, 根据行政分区统计的灌溉水量, 以网格单元耕地面积占总耕地面积的比例为权重, 确定各模拟网格单元灌溉水量。其次, 根据区域主要作物灌溉面积与灌溉制度, 将单元灌溉水量分配到年内 12 个月份, 同时设定月内日灌溉水量相同。最后, 在灌溉方案中设定灌溉时间为每日当地时间 8:00—10:00, 灌溉水量以有效降水形式作用于土壤中, 加入到第一层土壤。第一层土壤含水率计算式为

$$S_f = S_p + W_a / D_{zs} \times 100 \quad (4)$$

$$S_f = \begin{cases} S_f & S_f \leq S_m \\ S_m & S_f > S_m \end{cases} \quad (5)$$

式中 S_p 、 S_f 分别为网格单元灌溉前、后第一层土壤含水率, %; W_a 为网格单元灌溉水量, m; D_{zs} 为网格单元第一层土壤厚度, m; S_m 为网格单元第一层土壤饱和含水率, %。若灌溉后第一层土壤含水率达到饱和, 多余的灌溉水量加入到第二层土壤。本研究使用的灌溉水量数据来源于海河流域水资源公报。

1.5 试验设计

本研究设计 2 组试验, 一组为不考虑灌溉的控制试验, 另一组为考虑灌溉的敏感性试验, 其余设置完全相同。2 组试验的模拟时间都是 2010 年 1 月 1 日 00:00—2020 年 12 月 31 日 23:00, 其中 2010 年为气候模式预热期, 分析时段为 2011—2020 年。灌溉的气候效应由敏感性试验与控制试验的模拟结果差值得到。

2 结果与分析

2.1 灌溉分布

海河流域 2011—2020 年平均灌溉水量为 222.17 亿 m^3 , 其中 4—6 月灌溉水量为 127.67 亿 m^3 , 占全年总灌溉水量的 57.46%, 5 月灌溉水量最多, 占全年总量的 21.55% (图 2)。从空间上看 (图 3), 灌溉水量主要分布在流域平原区, 单位面积灌溉水量大多高于 100 mm, 其中子牙河平原与大清河淀西平原交界地带灌溉量最大, 单位面积灌溉量超过 200 mm。黑龙港及运东平原东部与大清河淀东平原灌溉量相对较少, 单位面积灌溉水量为 50~100 mm。山区大部分地区单位面积灌溉水量低于 50 mm。

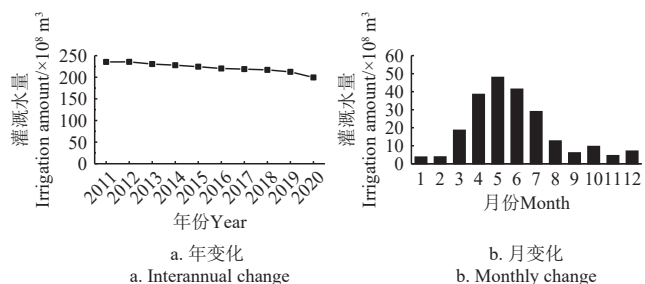


图 2 海河流域 2011—2020 年灌溉水量年际与年内变化
Fig.2 Interannual and monthly changes of irrigation water volume in the Haihe River Basin from 2011 to 2020

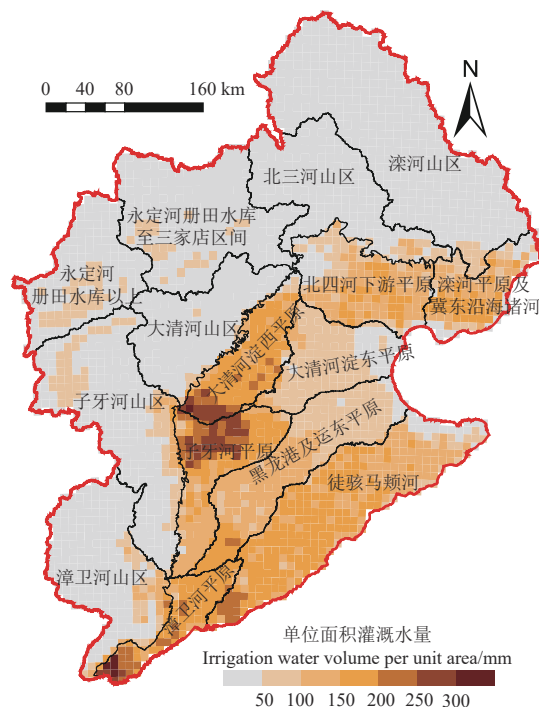


图 3 海河流域 2011—2020 年单位面积灌溉水量空间分布
Fig.3 Spatial distribution of irrigation water volume per unit area in the Haihe River Basin from 2011 to 2020

2.2 模式验证

本研究利用国家气象站点降水和气温观测数据对比 WRF 模式模拟结果, 评估气候模式模拟效果。从海河流域 2011—2020 年各月降水模拟值与观测值对比情况来看 (图 4a), 气候模式对海河流域降水除在 7 月份模拟偏大外, 其他月份降水模拟值与观测值吻合较好, 月降水模拟均方根误差为 23.53 mm, 年降水模拟的相对偏差为 8.40%。从空间上看, 气候模式对海河流域降水模拟值的空间变化跟观测值基本一致 (图 5a 与 5b), 均呈现由东南向西北递减的趋势, 降水模拟值与观测值的空间相关系数达到 0.82。

从海河流域 2011—2020 年各月平均气温模拟值与观测值对比情况来看 (图 4b), 气候模式对海河流域冬季气温模拟偏低外, 其他季节气温模拟值与观测值基本吻合, 平均气温模拟偏差为 $-1.64^{\circ}C$, 均方根误差为 $2.17^{\circ}C$ 。从空间上看, 平均气温模拟值的空间变化趋势与观测值展现很好的一致性 (图 5c 与 5d), 均呈现由南向北递减的趋势, 气温模拟值与观测值的空间相关系数达到 0.93。根据气温与降水模拟效果可以看出在现有参数化方案下 WRF 模式能够很好地模拟海河流域当地降水、气温等气候要素。

2.3 灌溉对地表能量和气温的影响

灌溉引起农田土壤湿度增加, 导致蒸发量增大, 潜热通量增加, 显热通量减少。模拟结果表明灌溉引起海河流域潜热通量平均增加 $4.54 W/m^2$, 4-6 月潜热通量平均增加 $10.76 W/m^2$, 其中 5 月份潜热通量增加 $13.01 W/m^2$ 。

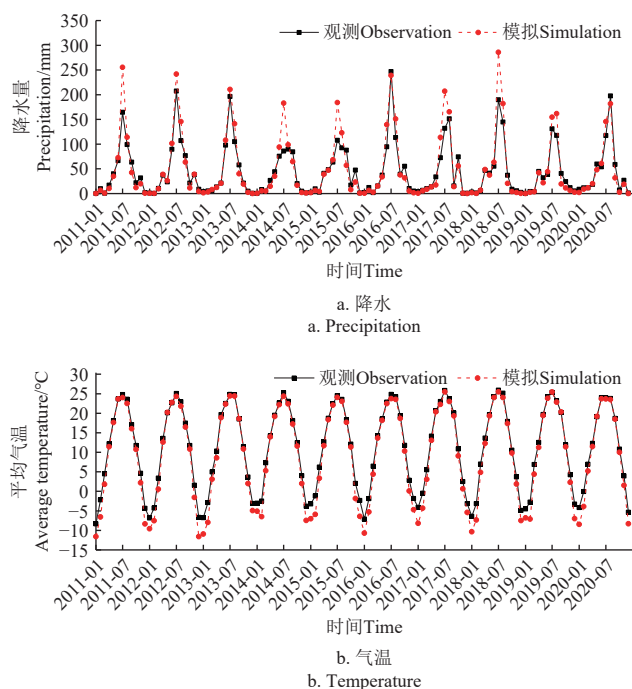


图4 海河流域2011—2020年各月降水与平均气温的模拟值和观测值对比

Fig.4 Comparison of simulated and observed values of monthly precipitation and average temperature in the Haihe River Basin from 2011 to 2020

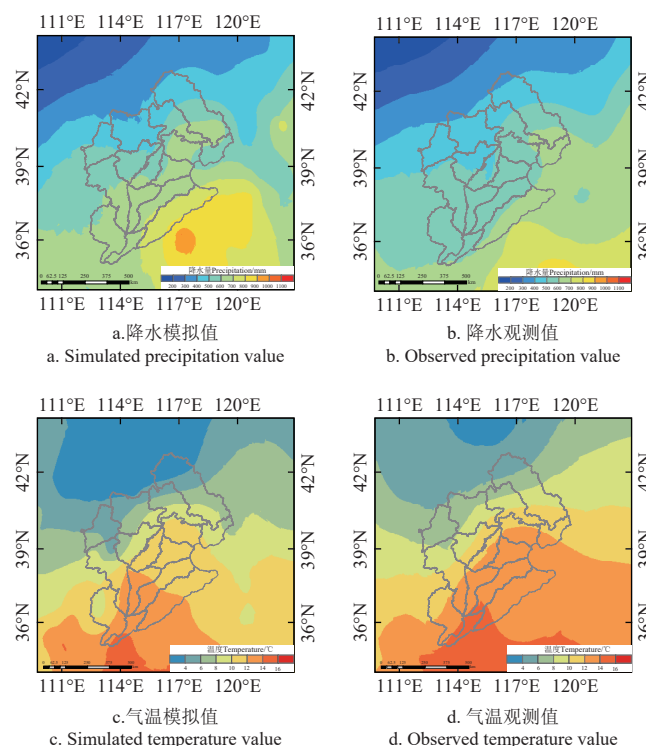


图5 2011—2020年海河流域多年平均降水与气温的模拟值与观测值空间分布

Fig.5 Spatial distribution of simulated and observed values of annual average precipitation and temperature in the Haihe River Basin from 2011 to 2020

灌溉引起海河流域显热通量平均减少 3.01 W/m^2 , 4—6月显热通量平均减少 7.19 W/m^2 , 其中, 5月份显热通量减少 8.48 W/m^2 。从空间上看, 灌溉对潜热通量和显热

通量的影响主要在平原区, 灌溉导致平原区4—6月潜热通量增加 15 W/m^2 以上, 子牙河平原与大清河淀西平原交界地带潜热通量增加 25 W/m^2 ; 而平原区显热通量减少 10 W/m^2 以上, 子牙河平原与大清河淀西平原交界地带显热通量减少 20 W/m^2 。从图6与图7可以看出, 灌溉引起潜热通量与显热通量变化总体与灌溉量时空分布一致, 灌溉量越大的地区和月份, 潜热通量和显热通量变化量越大。潜热通量与显热通量变化的大小总体保持一致, 但方向相反, 且潜热通量增加量大于显热通量减少量, 这主要与灌溉使得流域净辐射增加有关。

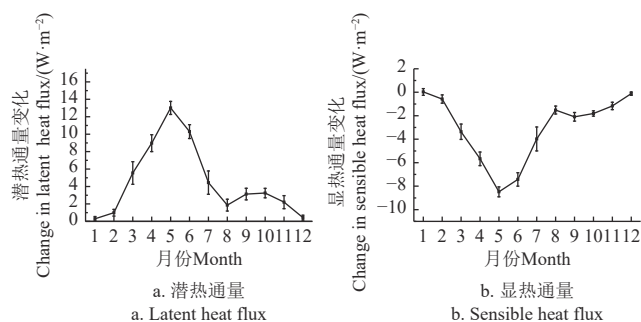
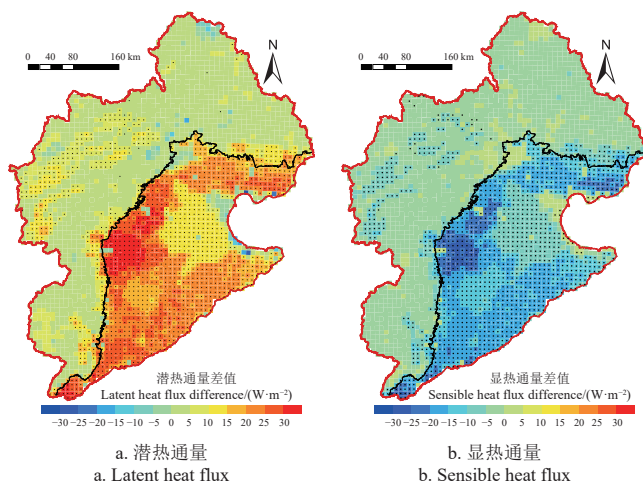


图6 海河流域潜热与显热通量差值的年内分布模拟

Fig.6 Monthly distribution simulation of latent and sensible heat flux differences in the Haihe River Basin



注: 打点区域表示通过95%的置信度检验。

Note: The dotted areas indicate where the differences are statistically significant at 95% confidence level.

图7 海河流域4—6月潜热与显热通量差值的空间分布模拟

Fig.7 Spatial distribution simulation of latent and sensible heat flux differences in the Haihe River Basin from April to June

灌溉导致流域平均气温降低 0.14°C , 3—11月气温降低, 而冬季气温有所升高, 其中, 4—6月降温最大, 平均降低 0.30°C (图8a)。灌溉使得冬季气温升高的主要原因是冬季太阳辐射少且气温低, 蒸发量少, 灌溉引起的冷却效应影响较小, 而灌溉增加土壤湿度, 土壤热导率增加, 使得土壤热通量向上传导增大, 导致地表气温升高。如图8与图9所示, 灌溉的降温效应主要集中在平原区4—6月, 平均降低 0.64°C , 大多单元降温超过 0.4°C , 子牙河平原与大清河淀西平原交界一带降温最大, 降温超过 1.0°C 。

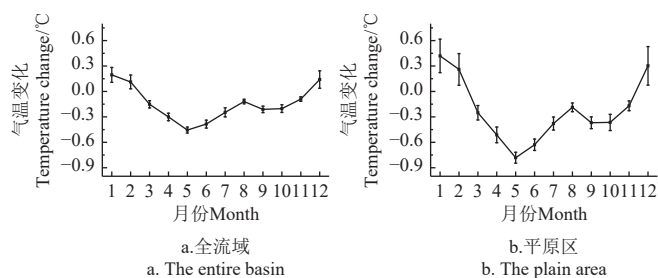
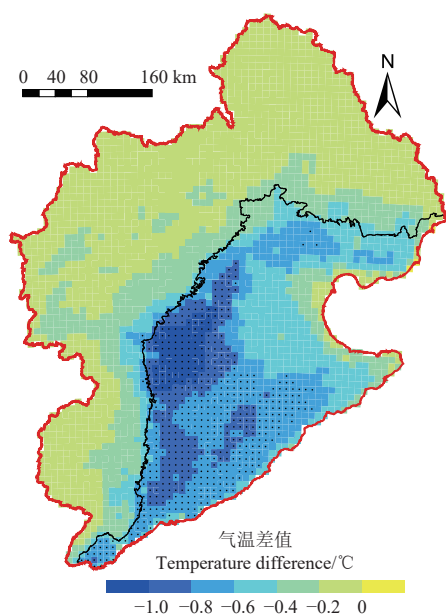


图8 海河全流域与平原区气温差值的年内分布模拟
Fig.8 Monthly distribution simulation of temperature differences in the entire Haihe River basin and plain areas



注：打点区域表示通过 95% 的置信度检验。
Note: The dotted areas indicate where the differences are statistically significant at 95% confidence level.

图9 4—6月平均气温差值的空间分布模拟
Fig.9 Spatial distribution simulation of average temperature differences from April to June

空间上灌溉导致流域降温幅度与灌溉水量大小基本保持一致，灌溉量大的地区气温降低幅度大，但对周边地区气温影响有限。通过拟合海河流域网格单元4—6月单位面积灌溉水量与气温降幅的线性关系，发现气温降幅与单位面积灌溉水量大小具有很强的相关性，线性决定系数 R^2 达到 0.84 (图10)。根据线性拟合关系得出4—6月单元内单位面积灌溉水量每增加 100 mm，气温平均降低 0.66 °C。

2.4 灌溉对气象要素的垂向影响

灌溉使得地表潜热通量增大、显热通量减少以及气温降低，通过陆-气交互作用，改变大气热力状况。由于4-6月气象要素受灌溉影响最大，本研究着重分析灌溉对该时期气象要素的垂向影响。如图11所示，就气温而言，灌溉的冷却效应随着高度的上升而逐渐减弱，大约持续到地面以上 2 200 m，近地表降温最大，降低约 0.35 °C。就垂向风速而言，灌溉使得垂向风速减小，这种影响持续到地面以上 5 000 m，随着高度上升，垂向风速的减少

量呈现先增大后减小的变化趋势，在地面以上 1 500 m 处的垂向风速减少量最大。就水汽混合比而言，由于灌溉的增湿效应，近地表水汽混合比增加，随着高度上升增加量逐渐减小，增湿影响持续到约地面以上 1 600 m。就云量而言，灌溉导致流域云量增加，垂向上表现为云量增加量随着高度上升而逐渐减小，这种影响可以持续到地面以上 2 000 m。云量增加量低于 0.2%，尽管灌溉使得流域4—6月近地表水汽增多，但由于4—6月大气下沉运动为主，特别是4—5月大气相对稳定，不利于云的形成。

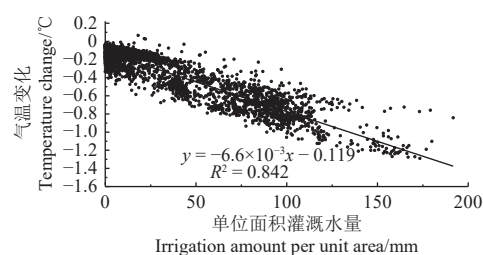


图10 海河流域4—6月各网格单元单位面积灌溉水量与其气温变化量线性拟合
Fig.10 Linear fitting of irrigation water volume per unit area of each grid unit and temperature changes in the Haihe River Basin from April to June

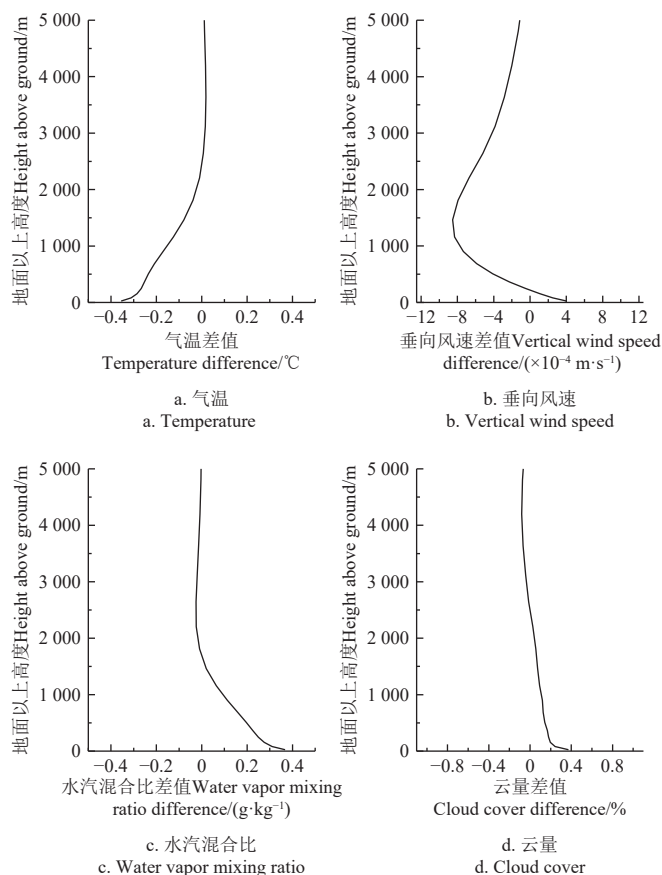


图11 海河流域气温、垂直风速、水汽混合比以及云量差值的垂向分布模拟
Fig.11 Vertical distribution simulation of temperature, vertical wind speed, water vapor mixing ratio, and cloud cover difference in the Haihe River Basin

2.5 灌溉对降水的影响

如图12所示,灌溉导致海河流域年降水平均增加6.07 mm,主要增加在4—6月,增加4.83 mm,占该时期降水总量3.54%。其中,灌溉使得流域6月份降水增加最多,增加2.73 mm;其次为5月份降水增加1.41 mm。尽管5月份灌溉水量最多,但由于流域5月份大气较为稳定,垂向上以下沉运动为主,不易形成降水;6月份灌溉水量仅次于5月份,由于6月份大气对流作用相对较强,灌溉产生的水汽有利于形成降水。因此,灌溉引起6月份降水增加最多。

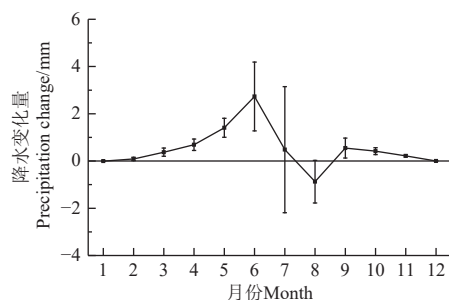


图12 海河流域降水差值年内分布模拟

Fig.12 Monthly distribution simulation of precipitation differences in the Haihe River Basin

在空间上(图13),灌溉主要导致4-6月子牙河流域与大清河流域降水增加,其中,大清河山区降水增加15~30 mm,大清河淀西平原、大清河淀东平原与子牙河流域降水增加量为5~15 mm。而漳卫河平原与徒骇马颊河流域一带灌溉较为强烈,降水变化小。出现这种现象主要是由于海河流域平原区4-6月为东南风,漳卫河平原与徒骇马颊河流域一带位于流域东南部,灌溉产生的水汽被运移输送到下风向地区,同时灌溉具有冷却效应,使得该地区的对流受到抑制,不利于形成降水,甚至部分地区降水减少。而大清河山区与子牙河山区处于平原区的下风向,平原区大规模灌溉产生的水汽被输送到山区,水汽增加,同时灌溉的冷却效应较小,输送来的水汽随着地形的抬升容易形成降水。

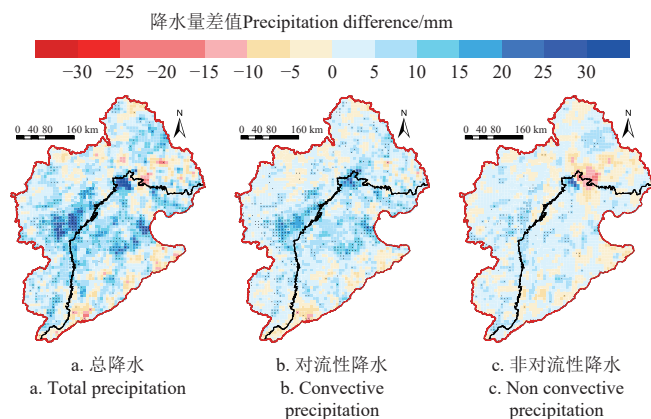


图13 4—6月降水差值的空间分布模拟

Fig.13 Spatial distribution simulation of precipitation difference from April to June

灌溉主要影响流域对流性降水,对流性降水变化空间分布趋势与总降水变化基本一致,而灌溉对流域非对

流性降水影响相对较小,大多地区4—6月非对流性降水增加,但增加量低于5 mm,说明灌溉对对流性降水的影响占主导。

3 讨论

3.1 作物需水变化分析

灌溉影响区域气候,引起气象要素变化,进而改变蒸散能力,从而影响作物需水量。灌溉使得区域实际蒸散发增加,增大近地表湿度,降低地表气温,这种对气温与湿度的影响潜在地引起潜在蒸散发量减少。不少学者发现灌溉显著地减小区域潜在蒸散发量,许多地区呈现潜在蒸散发量受灌溉等农业活动影响而减少的现象^[35-39]。基于模式输出数据,利用联合国粮农组织推荐的Penman-Monteith公式^[40-41]计算灌溉前后参考作物蒸散发量,结果表明灌溉使得海河流域参考作物蒸散发量减少38.14 mm/a,灌溉量越多的地区,参考作物蒸散发量减少量越大。在空间上,平原区大多地区参考作物蒸散发量减少50 mm/a以上,其中在子牙河平原与大清河淀西平原交界地带参考作物蒸散发量减少100 mm/a(图14)。综上可以看出灌溉使得单位面积作物需水量降低,且在时空上表现为灌溉越大的地区和月份,单位面积作物需水量减少越多。

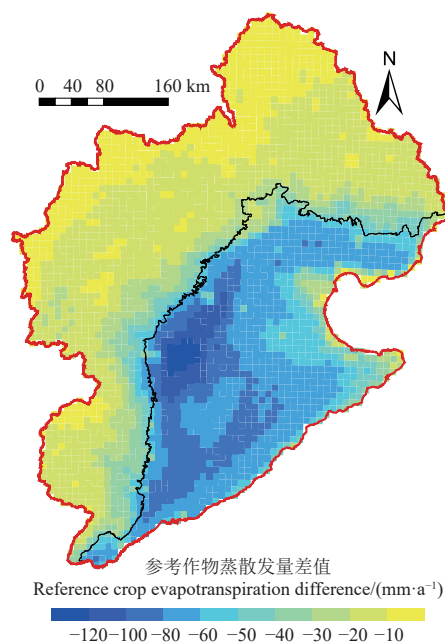


图14 海河流域年参考作物蒸散发量差值空间分布模拟

Fig.14 Spatial distribution simulation of annual reference crop evapotranspiration difference in the Haihe River Basin

3.2 对流域水安全的影响

海河流域水资源供需矛盾十分突出,水资源总量仅占全国总量的2.5%,却承载全国8%的耕地以及10%以上的人口和GDP。海河流域大规模灌溉使得区域降水增加6.07 mm/a,即灌溉使得流域2011—2020年平均每年增加近19亿m³的降水资源,约是南水北调中线一期工程规划调水规模的1/3,在一定程度上缓解流域水资源短

缺形势。同时降水增加主要发生在流域山区,更容易形成地表径流,有利于增加可利用水量。另外,灌溉导致近地表水汽增加,实际水汽压增大,气温降低,将减少潜在蒸散发量。灌溉使得海河流域参考作物蒸散发量年平均减少 3.5%,单位面积农作物用水需求量减少,可从需求端缓解水资源供需矛盾。综上所述,海河流域大规模灌溉除满足当地作物需水要求外,通过影响当地气候还具有额外的补偿效应,从供需两侧支撑保障流域水安全。未来南水北调东中线二期工程实施,增加海河流域外调水量,将增大灌溉的气候影响以及额外的补偿效应。

3.3 不确定性分析

本研究结果表明灌溉导致海河流域春季降水增加、平原区局地降温效应显著等,与其他相关研究成果基本一致^[19, 23-24],但在数值大小与空间分布上存在一定差异。这主要由于灌溉区域、灌溉时间、灌溉数量、气候模式、研究时期等设置选择不同,给评估灌溉的气候效应带来较大的不确定性,使评估结果产生差异。本研究存在部分局限性,造成模拟结果具有一定的不确定性。本研究中气候模式只增加灌溉过程,缺乏动态作物生长过程,而灌溉会影响作物生长,后续研究灌溉对气候影响需考虑作物生长过程,更全面反映灌溉的综合影响。由于模式参数化方案存在不确定性,本研究只采用一组模拟效果最优的物理参数化方案,这对最终评估结果带来一定的不确定性,未来研究可考虑集合不同参数方案模拟试验结果,减小不确定性影响。本研究开发的灌溉方案没有考虑取水过程,未来可以考虑加入地下水取水、地表引水等水循环过程,这将使模式设置更合理。

4 结 论

本文构建海河流域 WRF 气候模式,开发精细化灌溉方案,设计不考虑灌溉的控制试验与考虑灌溉的敏感性试验,模拟分析海河流域大规模灌溉对气候和水安全的影响。主要结论如下:

1) 灌溉改变海河流域地表能量的分配,使得区域潜热通量增加、显热通量减少。灌溉导致海河流域 4—6 月潜热通量平均增加 10.76 W/m^2 ,显热通量平均减少 7.19 W/m^2 ,潜热通量增加量与显热通量减少量在时间与空间上变化趋势保持一致,且潜热通量增幅大于显热通量减幅。灌溉越大的地区和月份,潜热通量的增加量和显热通量的减少量也大。

2) 灌溉有明显的局地降温效应。灌溉导致海河流域 4—6 月气温降低 $0.30 \text{ }^{\circ}\text{C}$;空间上气温降幅与灌溉水量成正相关,平原区 4—6 月降温大多超 $0.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$,灌溉强度大的子牙河平原与大清河淀西平原交界地带降温 $1.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上。另外,灌溉的降温效应更多地局限于本地区,对周边地区影响相对较小。

3) 灌溉有一定程度的增雨效应。灌溉导致海河流域年降水平均增加 6.07 mm ,主要集中在 4—6 月,增加 4.83 mm 。5 月份灌溉最多,但受限于大气稳定,降水受灌溉影响增雨有限,灌溉导致 6 月份降水增加最多。灌

溉主要使得 4—6 月子牙河流域与大清河流域降水增加,其中大清河山区降水增加量最大,为 $15 \sim 30 \text{ mm}$ 。灌溉对对流性降水的影响占主导,非对流性降水变化相对较小。

(4) 灌溉通过影响区域气候,改变气象要素,在供需两侧支撑保障流域水安全。海河流域灌溉使得区域降水增加,流域可利用水量增多。同时灌溉通过增加近地表水汽含量,降低气温,使得流域参考作物蒸散发量减少 38.14 mm/a ,单位面积作物需水量降低。因此,大规模灌溉通过增加海河流域降水与降低作物需水,在一定程度上缓解流域水资源供需矛盾。

[参 考 文 献]

- [1] WADA Y, WISSER D, EISNER S, et al. Multimodel projections and uncertainties of irrigation water demand under climate change[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(17): 4626-4632.
- [2] 赵勇, 李海红, 刘寒青, 等. 增长的规律: 中国用水极值预测[J]. *水利学报*, 2021, 52(2): 129-141.
ZHAO Yong, LI Haihong, LIU Hanqing, et al. The law of growth: prediction of peak water consumption in China[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, 52(2): 129-141. (in Chinese with English abstract)
- [3] 李中赫, 占车生, 胡实, 等. 气候变化条件下中国灌溉面积变化的产量效应[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(19): 94-104.
LI Zhonghe, ZHAN Chesheng, HU Shi, et al. Yield effects of irrigated acreage change under climate change in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(19): 94-104. (in Chinese with English abstract)
- [4] AESCHBACH-HERTIG W, GLEESON T. Regional strategies for the accelerating global problem of groundwater depletion[J]. *Nature Geoscience*, 2012, 5(12): 853-861.
- [5] SIEBERT S, DOLL P, HOOGEVEEN J, et al. Development and validation of the global map of irrigation areas[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2005, 9(5): 535-547.
- [6] 朱秀芳, 赵安周, 李宜展, 等. 农田灌溉对气候的影响研究综述[J]. *生态学报*, 2014, 34(17): 4816-4828.
ZHU Xiufang, ZHAO Anzhou, LI Yizhan, et al. Impact of irrigation on climate[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(17): 4816-4828. (in Chinese with English abstract)
- [7] LIU G S, WANG W G, SHAO Q X, et al. Simulating the climatic effects of irrigation over China by using the WRF-noah model system with mosaic approach[J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2021, 126: e2020JD034428.
- [8] MARCELLA M P, ELTAHIR E A B. Introducing an irrigation scheme to a regional climate model: A case study over West Africa[J]. *Journal of Climate*, 2014, 27(15): 5708-5723.
- [9] HUANG X Y, ULLRICH P A. Irrigation impacts on California's climate with the variable-resolution CESM[J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2016, 8(3): 1151-1163.
- [10] WU L Y, FENG J M, MIAO W H. Simulating the impacts of irrigation and dynamic vegetation over the North China Plain on regional climate[J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2018, 123(15): 8017-8034.

- [11] PEI L, MOORE N, ZHONG S Y, et al. Effects of irrigation on summer precipitation over the United States[J]. *Journal of Climate*, 2016, 29(10): 3541-3558.
- [12] HARDING K J, SNYDER P K. Modeling the atmospheric response to irrigation in the Great Plains. Part I: General impacts on precipitation and the energy budget[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2012, 13(6): 1667-1686.
- [13] 赵勇, 黄亚, 王贺佳, 等. 西部调水下长期气候效应研究[J]. 水利学报, 2022, 53(3): 270-283, 295.
ZHAO Yong, HUANG Ya, WANG Hejia, et al. Study on regional climate effect under water diversion in Northwest China [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2022, 53(3): 270-283, 295. (in Chinese with English abstract)
- [14] ZHANG X Z, XIONG Z, TANG Q H. Modeled effects of irrigation on surface climate in the Heihe River Basin, Northwest China[J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2017, 122(15): 7881-7895.
- [15] WEI J F, DIRMEYER P A, WISSER D, et al. Where does the irrigation water go? An estimate of the contribution of irrigation to precipitation using MERRA[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2013, 14(1): 275-289.
- [16] 史锐光, 刘懿, 袁飞, 等. 多时间尺度下中国区域土壤湿度记忆性时空特征及趋势分析[J]. 农业工程学报, 2023, 39(9): 123-130.
SHI Ruiguang, LIU Yi, YUAN Fei, et al. Spatio-temporal characteristics and trend analysis of soil moisture memory at multiple time scales in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2023, 39(9): 123-130. (in Chinese with English abstract)
- [17] 李若麟, 保鸿燕, 李课臣, 等. 全球土壤湿度的记忆性及其气候效应[J]. 冰川冻土, 2016, 38(6): 1470-1481.
LI Ruolin, BAO Hongyan, LI Kechen, et al. The memory and climate effects of global soil moisture[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2016, 38(6): 1470-1481. (in Chinese with English abstract)
- [18] 韩天富, 李亚贞, 曲潇林, 等. 中国农田小麦和玉米产量时空演变及驱动因素[J]. 农业工程学报, 2022, 38(1): 100-108.
HAN Tianfu, LI Yazhen, QU Xiaolin, et al. Spatio-temporal evolutions and driving factors of wheat and maize yields in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(1): 100-108. (in Chinese with English abstract)
- [19] ZOU J, XIE Z H, YU Y, et al. Climatic responses to anthropogenic groundwater exploitation: A case study of the Haihe River Basin, Northern China[J]. *Climate Dynamics*, 2014, 42(7-8): 2125-2145.
- [20] ZOU J, ZHAN C S, XIE Z H, et al. Climatic impacts of the Middle Route of the South-to-North Water Transfer Project over the Haihe River Basin in North China simulated by a regional climate model[J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2016, 121(15): 8983-8999.
- [21] SHI W J, TAO F L, LIU J Y. Regional temperature change over the Huang- Huai- Hai Plain of China: The roles of irrigation versus urbanization[J]. *International Journal of Climatology*, 2014, 34(4): 1181-1195.
- [22] YANG B, ZHANG Y C, QIAN Y, et al. Climatic effects of irrigation over the Huang-Huai-Hai Plain in China simulated by the weather research and forecasting model[J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2016, 121(5): 2246-2264.
- [23] ZHANG Zhijiang, LIN Aiwen, ZHAO Lin, et al. Attribution of local land surface temperature variations response to irrigation over the North China Plain[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 826: 154104.
- [24] 武利阳, 左洪超, 冯锦明. 华北平原地下水灌溉对区域气候影响的数值模拟[J]. 气象学报, 2018, 76(4): 635-648.
WU Liyang, ZUO Hongchao, FENG Jinming. Numerical simulation of the impacts of groundwater irrigation over the North China Plain on regional climate[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2018, 76(4): 635-648. (in Chinese with English abstract)
- [25] KUEPPERS L M, SNYDER M A. Influence of irrigated agriculture on diurnal surface energy and water fluxes, surface climate, and atmospheric circulation in California[J]. *Climate Dynamics*, 2012, 38(5-6): 1017-1029.
- [26] KANG S, ELTAHIR E A B. Impact of irrigation on regional climate over Eastern China[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(10): 5499-5505.
- [27] ZHANG M, LUO G P, CAO X S, et al. Numerical simulation of the irrigation effects on surface fluxes and local climate in typical mountain-oasis-desert systems in the Central Asia arid area[J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2019, 124(23): 12485-12506.
- [28] 李建云, 王汉杰. 南水北调大面积农业灌溉的区域气候效应研究[J]. 水科学进展, 2009, 20(3): 343-349.
LI Jianyun, WANG Hanjie. Regional climate effects of large-scale agricultural irrigation related to South-to-North Water Transfer Project in China[J]. *Advances in Water Science*, 2009, 20(3): 343-349. (in Chinese with English abstract)
- [29] LU Y Q, JIN J M, KUEPPERS L M. Crop growth and irrigation interact to influence surface fluxes in a regional climate-cropland model (WRF3.3-CLM4crop)[J]. *Climate Dynamics*, 2015, 45(11/12): 3347-3363.
- [30] LENG G Y, HUANG M Y, TANG Q H, et al. Modeling the effects of groundwater-fed irrigation on terrestrial hydrology over the Conterminous United States[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2014, 15(3): 957-972.
- [31] 宋歌, 陈玉珊, 张珊, 等. 非充分灌溉条件下多目标整数规划配水模型构建[J]. 农业工程学报, 2022, 38(9): 129-139.
SONG Ge, CHEN Yushan, ZHANG Shan, et al. Construction of water allocation model with multi-objective integer programming under inadequate irrigation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(9): 129-139. (in Chinese with English abstract)
- [32] SACKS W J, COOK B I, BUENNING N, et al. Effects of global irrigation on the near-surface climate[J]. *Climate Dynamics*, 2009, 33(2-3): 159-175.
- [33] LO M H, FAMIGLIETTI J S. Irrigation in California's Central Valley strengthens the southwestern U.S. water cycle[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(2): 301-306.
- [34] HERBACH H, BELL B, BERRISFORD P, et al. The ERA5 global reanalysis[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020, 146(730): 1999-2049.
- [35] OZDOGAN M, SALVUCCI G D. Irrigation-induced changes in potential evapotranspiration in southeastern Turkey: Test and application of Bouchet's complementary hypothesis[J]. *Water Resources Research*, 2004, 40(4): W04301.

- [36] 韩松俊, 刘群昌, 胡和平, 等. 灌溉对景泰灌区年潜在蒸散量的影响[J]. 水科学进展, 2010, 21(3): 364-369.
HAN Songjun, LIU Qunchang, HU Heping, et al. Impacts of irrigation on annual potential evapotranspiration in Jingtai irrigation district[J]. Advances in Water Science, 2010, 21(3): 364-369. (in Chinese with English abstract)
- [37] HAN S J, HU H P. Spatial variations and temporal changes in potential evaporation in the Tarim Basin, northwest China (1960-2006): Influenced by irrigation?[J]. *Hydrological Processes*, 2012, 26(20): 3041-3051.
- [38] HAN C Y, ZHANG B Z, HAN S J. Quantitative effects of changes in agricultural irrigation on potential evaporation[J]. *Hydrological Processes*, 2021, 35: e14057.
- [39] 李玖颖, 陈皓锐, 韩松俊. 农业发展对东北地区参考作物蒸散发量变化趋势的影响[J]. 节水灌溉, 2021(6): 81-86.
LI Jiuying, CHEN Haorui, HAN Songjun. Effects of agricultural development on the trends in reference evapotranspiration over Northeast China[J]. Water Saving Irrigation, 2021(6): 81-86. (in Chinese with English abstract)
- [40] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements[R]. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, Rome, Italy, 1998.
- [41] 孙庆宇, 佟玲, 张宝忠, 等. 参考作物蒸发蒸腾量计算方法在海河流域的适用性[J]. 农业工程学报, 2010, 26(11): 68-72.
SUN Qingyu, TONG Ling, ZHANG Baozhong, et al. Comparison of methods for calculating reference crop evapotranspiration in Haihe River basin of China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(11): 68-72. (in Chinese with English abstract)

Simulation of climate effect of large-scale irrigation in Haihe River Basin

GUI Yunpeng, ZHAO Yong^{*}, YANG Mingxiang, WANG Qingming, ZHAI Jiaqi

(China Institute of Water Resources and Hydropower Research, State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, Beijing 100038, China)

Abstract: The Haihe River Basin is one of the most important grain production bases in China, such as winter wheat and summer corn. Natural precipitation cannot fully meet the water demand of crops in this region. Supplementary irrigation has been widely used to meet the growth needs of crops. The annual irrigation water volume has exceeded 20 billion m³, in order to ensure national food security. Large-scale irrigation has posed a significant impact on the climate, thus altering the local ecological environment, crop cultivation and growth in the irrigation area. Therefore, there is a high demand to explore the impact of irrigation on the climate, particularly for a comprehensive understanding of regional climate change, water resource management, and ensuring food security. In this study, a new irrigation scheme was developed in the land surface module of the Weather Research and Forecasting (WRF) model, in order to simulate the climatic effects of large-scale irrigation in the Haihe River Basin. Actual statistical irrigation water volume data was used with the proportion of grid unit cultivated land area to total cultivated land area as the weight to spatially distribute the irrigation water volume. Then, the irrigation water volume was distributed to the month, according to the irrigation area and irrigation system of the main crops. The results indicated that the irrigation caused an increase in the soil moisture in farmland, leading to an increase in the evaporation, and latent heat flux, whereas, there was a decrease in the sensible heat flux. Irrigation led to an average increase of 10.76W/m² in the latent heat flux, and a decrease of 7.19W/m² in the sensible heat flux from April to June. The increase in the latent heat flux was consistent with the decrease in the sensible heat flux in both time and space. The increase in the latent heat flux was greater than the decrease in the sensible heat flux. The larger the irrigation area and month were, the greater the increase in latent heat flux and the decrease in sensible heat flux. Irrigation had a significant local cooling effect. There was a 0.30 °C decrease in temperature from April to June, with the largest decrease in May, reaching 0.45 °C. The decrease in temperature in space was positively correlated with the amount of irrigation water, and the cooling from April to June in plain areas mostly exceeded 0.4 °C. In addition, the cooling effect of irrigation was more limited to the local area, indicating a relatively small impact on the surrounding areas. There was a certain degree of rain increasing. An average increase of 6.07mm was found in the annual precipitation, which was mainly concentrated from April to June, with an increase of 4.83mm. There was an increase in the precipitation in the Ziya and Daqing River Basin from April to June, with the largest increase in the precipitation in the Daqing River Mountain area, ranging from 15 to 30mm. The dominant impact on convective precipitation, with the relatively small changes in the non-convective precipitation. There was the effect of irrigation on the regional climate, meteorological factors, and supported water security in the basin on both supply and demand sides. Regional precipitation also increased for the available water in the basin. At the same time, the irrigation increased the water vapor content near the surface, whereas, there was a decrease in the temperature, and the reference crop evapotranspiration in the watershed by 38.14mm/a, resulting in a decrease in crop water demand per unit area. There was the increasing precipitation while the less crop water demand after irrigation. Therefore, large-scale irrigation can be expected to alleviate the contradiction between water supply and demand in the Haihe River Basin.

Keywords: irrigation; climate change; climate models; Haihe River Basin