

轮作期内冬小麦不同灌溉制度对夏玉米水分利用效率的影响

孟 娇¹, 张晓涛^{2,3}, 党红凯⁴, 蒋 静¹

(1. 太原理工大学水利科学与工程学院, 山西 太原 030024; 2. 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; 3. 国家节水灌溉北京工程技术研究中心, 北京 100038; 4. 河北省农林科学院旱作农业研究所, 河北 衡水 053000)

摘要:为研究华北平原黑龙港流域轮作期内冬小麦不同灌溉制度对雨养旱作夏玉米水分利用效率的影响,在冬小麦生长季设置5种灌溉制度:IS0(不灌水)、IS1(拔节期灌水)、IS2(拔节和扬花期灌水)、IS3(起身、扬花和灌浆期灌水)和IS4(起身、拔节、扬花和灌浆期灌水),分析了冬小麦季不同灌溉制度对后茬作物夏玉米生长期间土壤水分动态变化、有效降雨利用、耗水特性、产量和水分利用效率的影响,并通过TOPSIS-熵权法对耗水量、降雨利用率、产量和水分利用效率4个指标进行综合评价。结果表明:夏玉米季0~30 cm土层的含水率最低,30~60 cm土层的含水率最高,60~100 cm土层的含水率较低;夏玉米生长季的降雨利用率随冬小麦灌溉次数的增加而降低,IS0的降雨利用率最高,达54.31%,IS1、IS2、IS3、IS4分别较IS0降低了7.81%、24.98%、27.49%、28.32%;随着冬小麦灌溉次数的增加,夏玉米季的总耗水量呈增加趋势,IS1、IS2、IS3、IS4的耗水量分别较IS0提高了5.98%、7.23%、14.35%、20.77%;除IS2外,夏玉米的籽粒产量整体上随冬小麦灌溉次数的增加而增加,水分利用效率则随灌溉次数的增加而降低,其中IS2的籽粒产量和水分利用效率均最大,分别为17593.87 kg/hm²和3.43 kg/m³;IS2的相对接近度约为0.60,相较其他灌溉制度更高,在灌溉制度评价上最优;冬小麦在拔节期和扬花期灌溉两次水(IS2,总灌水量为150 mm),在保证后茬作物夏玉米产量和轮作节水的同时还可以有效利用降雨,水分利用效率整体得到提升。

关键词:冬小麦灌溉;夏玉米;水分利用效率;有效降雨量;TOPSIS-熵权法

中图分类号:S274.1

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2025)04-0102-09

Effects of different irrigation regimes for winter wheat on water use efficiency of summer maize during rotation period//MENG Jiao¹, ZHANG Xiaotao^{2,3}, DANG Hongkai⁴, JIANG Jing¹ (1. College of Water Resources Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 3. National Center for Efficient Irrigation Engineering and Technology Research-Beijing, Beijing 100038, China; 4. Dryland Farming Institute of Hebei Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Hengshui 053000, China)

Abstract: To investigate the effects of different irrigation regimes for winter wheat during the rotation period on the water use efficiency (WUE) of rainfed summer maize in the Heilonggang River Basin of the North China Plain, five irrigation regimes were established during the winter wheat growing season: with no irrigation (IS0), irrigation at the jointing stage (IS1), irrigation at jointing and flowering stages (IS2), irrigation at erecting, flowering, and grain filling stages (IS3), and irrigation at erecting, jointing, flowering, and grain filling stages (IS4). The study analyzed the impacts of these irrigation regimes on soil water dynamics, effective rainfall utilization, water consumption characteristics, yield, and WUE of subsequent summer maize. A comprehensive evaluation was conducted using the TOPSIS-entropy weight method based on four indicators: water consumption, rainfall utilization efficiency, yield, and WUE. The results show that soil water content during the summer maize season was lowest in the 0-30 cm layer, highest in the 30-60 cm layer, and relatively low in the 60-100 cm layer. Rainfall utilization efficiency during the summer maize growing season decreased with increasing winter

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFB3900602)

作者简介:孟娇(1999—),女,硕士研究生,主要从事节水灌溉研究。E-mail:1428921371@qq.com

通信作者:蒋静(1984—),女,副教授,博士,主要从事节水灌溉、水土资源与环境研究。E-mail:jiangjing@tyut.edu.cn

wheat irrigation frequency. IS0 had the highest rainfall utilization efficiency of 54.31%, while IS1, IS2, IS3, and IS4 showed decreases of 7.81%, 24.98%, 27.49%, and 28.32%, respectively, compared to IS0. Total water consumption during the summer maize season increased with winter wheat irrigation frequency, with IS1, IS2, IS3, and IS4 increasing by 5.98%, 7.23%, 14.35%, and 20.77%, respectively, compared to IS0. Except for IS2, summer maize grain yield generally increased with winter wheat irrigation frequency, whereas WUE decreased. IS2 achieved the highest grain yield (17593.87 kg/hm²) and WUE (3.43 kg/m³). IS2 had the highest relative closeness (approximately 0.60), making it the optimal irrigation regime. In conclusion, irrigating winter wheat twice during the jointing and flowering stages (IS2, with total irrigation of 150 mm) can ensure high summer maize yield while conserving water and effectively utilizing rainfall resources, thereby improving overall WUE during the crop rotation.

Key words: irrigation of winter wheat; summer maize; WUE; effective rainfall; TOPSIS-entropy weight method

黑龙港流域位于河北省中南部平原,是我国重要的粮食产区之一^[1]。该地区主要采用冬小麦-夏玉米轮作制度^[2]。夏玉米生育期降水量约占全年降水量的70%~80%,可以满足夏玉米的生长需求^[3-4]。冬小麦必须依靠灌溉才可以保证正常生长^[5],其灌溉用水的主要来源为地下水^[6-7]。然而,地下水长期超采导致水资源短缺加剧,因此适宜的灌溉制度对于缓解该地区农业用水的紧张局面具有重要意义。

轮作制度利用不同作物对茬口水分的需求差异,能够实现土壤水分和自然降雨在时空维度上的优化配置,从而降低对灌溉水的依赖^[8-9]。冬小麦的灌溉制度不仅影响当季作物的生长,还会通过改变土壤底墒状况影响后茬夏玉米的生长发育^[10-12]。近年来,国内外学者围绕冬小麦灌溉次数和底墒对夏玉米生长及水分利用的影响开展了一系列研究。例如:赵鑫等^[13]在黑龙港流域的研究表明,增加冬小麦灌水次数会提高夏玉米的耗水量,并明显降低水分利用效率;侯玉虹等^[14]通过土壤底墒对玉米的出苗率和苗期生长影响的试验研究,明确了土壤底墒状况直接影响夏玉米出苗率及后期的生长发育;魏钟博等^[15]基于黑龙港流域地下水压采的背景,通过分析该地区的气象资料及夏玉米生育期的调查数据,发现夏玉米苗期和抽雄期的有效降雨量较为充沛,而灌浆成熟期的有效降雨量显著低于同期夏玉米的需水量,因此进一步量化夏玉米需水量与有效降雨量之间的关系对提高该地区夏玉米的降雨资源利用效率具有重要意义;韩美坤等^[16]研究指出,与灌溉模式相比,旱作模式下的冬小麦可减少灌溉用水,增加土壤水的消耗,使作物收获后扩大土壤水库容,有利于增强对夏季雨水的蓄纳能力,减少雨水流失。然而,目前对于黑龙港流域冬小麦不同灌溉制度对夏玉米季降雨利用率(降雨前后1 m土体储水量的变化量占降雨总量的比率)和水分利用效率的影响研究鲜见报道。因此,分析冬小麦不同灌溉制度对雨养旱作夏玉米生育期土壤含水率动态变化的影响,研究冬小麦不同灌溉制度对夏玉米季降雨利

用率、籽粒产量和水分利用效率的影响,对制定轮作体系下冬小麦适宜的灌溉制度具有重要的理论意义和实践价值。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2022—2023年在位于华北平原黑龙港流域的河北省农林科学院旱作农业研究所试验站(37°44'N,115°47'E,海拔21 m)进行。该区属于温带大陆性季风气候,年平均气温12.4℃,年平均降水量约550 mm,降水主要集中在6—9月。试验地的土壤质地为黏潮土,0~20 cm土层有机质含量为20.14 g/kg,0~100 cm平均土壤容重为1.40 g/m³,田间持水量为23.57%。玉米供试品种为郑单958,于2023年6月14日进行播种,2023年10月5日收获,全生育期共计113 d。玉米季底施复合肥(N、P₂O₅和K₂O含量分别为20%、8%和12%)750 kg/hm²。气象数据由试验站内自动气象站提供,夏玉米全生育期降水量和温度见图1。

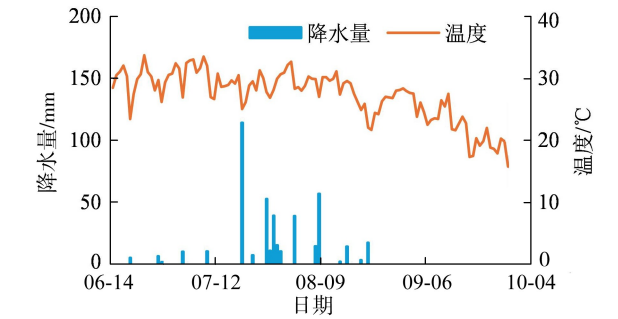


图1 2023年夏玉米生育期降水量和气温分布

1.2 试验方法

采用大田试验方法,冬小麦设置5种灌溉制度:①全生育期不灌水(IS0);②拔节期灌水75 mm(IS1);③拔节期和扬花期各灌水75 mm(IS2);④起身期、扬花期和灌浆期各灌水75 mm(IS3);⑤起身期、拔节期、扬花期和灌浆期各灌水75 mm(IS4),具体灌水情况见表1。由赵鑫等^[13]的试验结果可知,冬小麦的产量整体随灌水次数的增加而增加;而随灌水量的增加,产量之间的差异不明显,说明少量多

次灌水可以获得小麦的高产。夏玉米在播种后对所有灌溉制度统一灌水 75 mm,以保障种子的发芽和玉米苗期的正常生长。试验采用裂区设计,每个设 3 组重复,随机区组排列,小区面积为 66.5 m²(7 m×9.5 m)。夏玉米采用机械播种,田间管理同当地生产一致。夏玉米生育阶段划分为:①苗期(6 月 14 日至 7 月 2 日);②拔节期(7 月 3 日至 7 月 18 日);③大喇叭口期(7 月 19 日至 7 月 25 日);④抽雄期(7 月 26 日至 8 月 7 日);⑤灌浆期(8 月 8 日至 8 月 17 日);⑥成熟期(8 月 18 日至 10 月 5 日)。

表 1 冬小麦春季灌水情况

灌溉制度	春季灌溉 水量/mm	灌溉日期			
		第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次
IS0	0				
IS1	75	04-15			
IS2	150	04-10	05-07		
IS3	225	03-25	04-25	05-21	
IS4	300	03-25	04-10	05-02	05-21

1.3 测定项目与方法

a. 土壤含水率:在夏玉米播种前、苗期、拔节期、大喇叭口期、抽雄期、灌浆期和成熟期利用土钻分层采集土样,每 10 cm 一层。采用烘干法测定每个小区 0~100 cm 土层(共 10 个土层)的土壤含水率。

b. 耗水量:

$$T_E = P + I + K + \Delta W - D - R \tag{1}$$

式中: T_E 为玉米生育期耗水量,mm; P 为降水量,mm,由试验地内自动气象站提供; I 为灌水量,mm; K 为地下水补给量,mm; ΔW 为播种前和收获后 0~100 cm 土壤贮水量的差值,mm; D 为深层渗漏量,mm; R 为地表径流量,mm。试验地地势平坦且地下水埋深较深,试验期间没有特大暴雨发生,故 K 、 D 、 R 忽略不计。

c. 土壤贮水量:

$$W = 10\gamma\theta H \tag{2}$$

式中: W 为土壤贮水量,mm; γ 为土壤容重,g/cm³; θ 为土壤含水率,%; H 为土层厚度,cm。

d. 水分利用效率:

$$E_{WU} = Y/10T_E \tag{3}$$

式中: E_{WU} 为玉米水分利用效率,kg/m³; Y 为籽粒产量,kg/hm²。

e. 次降雨量:次降雨量是指某次降雨开始至结束,中间间断不超过 6 h 的一次降雨总量。

f. 有效降雨量:采用田间 10 个土壤水分传感器测得 0~100 cm 土层含水率以及降水量等数据。将传感器测得土壤水分数据与烘干法测量数据进行率定,得到 0~100 cm 各土层的土壤含水率。有效降

雨量的计算参考陈俊克等^[17]对有效降雨量的定义,即降雨前后 1 m 土体储水量的差值。将 0~100 cm 土层看作玉米的有效吸水根系层^[18],土壤含水率超出田间持水率的那部分降雨被视为无效降雨。

g. 产量及构成要素:成熟后期,在每个小区选取中间两行 40 穗收获,罩纱网袋自然风干,并对穗数、株数和空杆数进行统计以计算种植密度。用 PM8188-A 谷物水分测定仪测定籽粒含水量,折算为 14%安全含水量下的百粒重和产量。

1.4 TOPSIS-熵权法

TOPSIS-熵权法^[19]是经典的多目标决策与评价方法。在计算数据时,先利用熵值计算得到各评价指标的权重,然后将评价指标数据与权重相乘,得到新的数据,再利用 TOPSIS 法研究评价对象与理想解的距离,计算得到最终相对接近度 C 值。

首先进行数据标准化处理^[20]。正向指标数值越大,评价得分越高,逆向指标则相反。其中,正、逆向指标分别采用式(4)和(5)计算:

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{j\min}}{x_{j\max} - x_{j\min}} \tag{4}$$

$$x'_{ij} = \frac{x_{j\max} - x_{ij}}{x_{j\max} - x_{j\min}} \tag{5}$$

式中: x_{ij} 为第 i 个评价对象第 j 项指标的数值; x'_{ij} 为标准化值; $x_{j\max}$ 为第 j 项指标的最大值; $x_{j\min}$ 为第 j 项指标的最小值。

然后利用熵权法求权重^[21]:①计算第 j 项指标下,第 i 个评价对象的比重 P_{ij} ;②计算指标信息熵 e_j ;③计算该指标的权重 w_j 。

利用 TOPSIS 法进行方案决策^[22]:①构建加权规范矩阵;②分别定义正、负理想解;③计算第 i 个评价对象到正理想解 x^* 的距离 d_i^* 和到负理想解 x^0 的距离 d_i^0 ;④进行归一化处理得到相对接近度 C 值。

C 的取值范围为 $[0,1]$,指某评价对象接近灌溉制度最优的程度。评价的基本原则是: C 越高,代表评价对象的灌溉制度越好,反之则代表评价对象的灌溉制度越差。

1.5 数据处理

利用 Microsoft Excel 2016 进行数据处理和作图;采用 SPSS 27.0 对数据进行方差分析、回归分析和模型拟合;运用最小显著差异法(least significant difference, LSD)进行显著性检验。

2 结果与分析

2.1 冬小麦不同灌溉制度对夏玉米土壤水分动态变化的影响

图 2 为不同冬小麦灌溉制度下夏玉米土壤水分

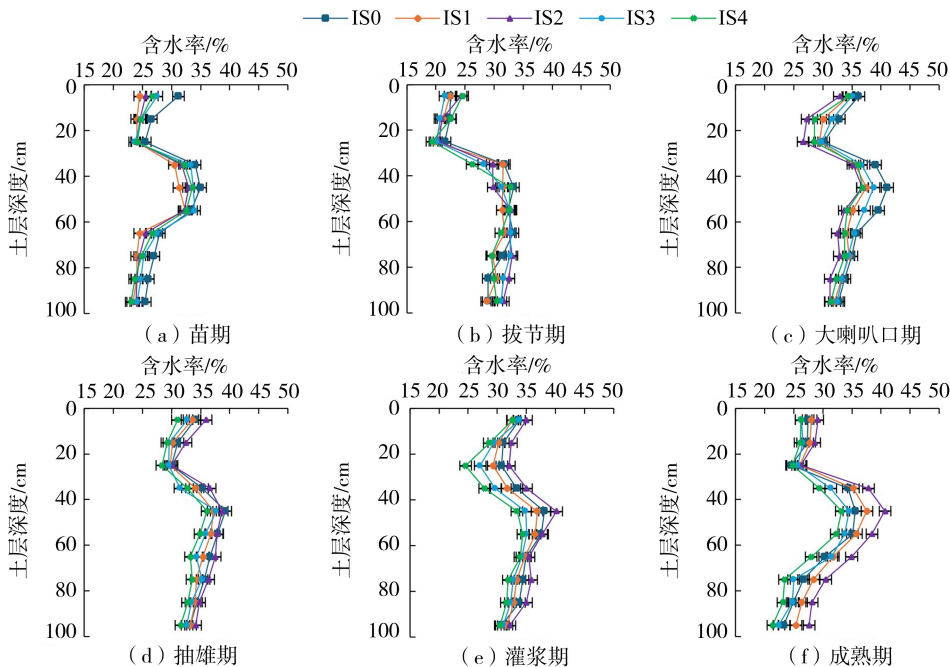


图2 冬小麦灌溉制度对夏玉米土壤水分的影响

的动态变化。由图2可以看出,夏玉米不同生育期的土壤含水率呈现不同的分布规律。总体来看,0~30 cm 土层含水率最低,变化范围为21.64%~31.17%;30~60 cm 土层含水率最高,变化范围为31.21%~37.51%;60~100 cm 土层含水率相对较低,变化范围为25.37%~34.31%。其中,0~30 cm 土层由于受地表蒸发和作物根系吸水的影响,土壤含水率较低;30~60 cm 土层因水分向上蒸发和向下移动较少,成为主要的水分储存层,土壤含水率较高;60~100 cm 土层受降雨补给较少,土壤含水率呈缓慢下降趋势。

夏玉米苗期和拔节期,不同灌溉制度的土壤含水率整体差异较小。苗期,IS0灌溉制度下0~30 cm 土层的土壤含水率明显高于其他灌溉制度,IS1、IS2、IS3、IS4 的土壤含水率较 IS0 分别降低了12.66%、10.88%、8.59%、9.19%。大喇叭口期,IS1、IS2、IS3、IS4 灌溉制度下30~60 cm 土层的土壤含水率较 IS0 分别降低了9.61%、11.70%、5.95%、10.58%。抽雄期至灌浆期,土壤含水率从大到小依次为 IS2、IS0、IS1、IS3、IS4。其中,抽雄期间正值8月上中旬,降水量达112.87 mm,各灌溉制度下土壤含水率差异较小;灌浆期各灌溉制度下0~60 cm 的土壤含水率差异较大,IS2 的土壤含水率较 IS0 高3.84%,而 IS1、IS3、IS4 较 IS0 的土壤含水率分别降低3.59%、7.21%、11.29%。成熟期,土壤含水率从大到小依次为 IS2、IS1、IS0、IS3、IS4。IS2 和 IS1 的土壤含水率较 IS0 分别提高13.23%和4.87%,而 IS3 和 IS4 的土壤含水率较 IS0 分别降低3.36%和

9.25%。这一时期降雨资源匮乏,但作物需水要求仍较高。土壤水分主要储存在30~60 cm 的土层中,此时底墒水平最高的 IS3 和 IS4 的含水率却低于 IS0,原因可能是过高的土壤含水率加快了作物的耗水速度,使得作物耗水量升高,土壤含水率变低。

2.2 夏玉米不同灌溉制度下降雨特性对有效降雨量的影响

有效降雨量指储存在土壤计划湿润层内可供作物利用的雨量^[23]。夏玉米整个生育期内,随着次降雨量的增加,有效降雨量也呈增加趋势。回归分析表明,不同灌溉制度下夏玉米的有效降雨量与次降雨量之间存在一元线性回归关系(图3(a))。拟合结果显示,有效降雨量随着次降雨量的增加而增加,5种灌溉制度的数据模型的决定系数 R^2 均超过0.90。模型的斜率表示有效降雨量在不同灌溉制度下占次降雨量的平均比例,单因素方差分析表明,不同灌溉制度下有效降雨量与次降雨量之间的模型存在显著差异($P<0.05$)。各灌溉制度的降雨利用率整体上随着冬小麦季灌溉次数的增加而降低,IS0 和 IS1 的降雨利用率明显高于其他灌溉制度。IS0 的初始土壤贮水量最低,生育期内能够充分存储降雨资源,提高了降雨利用率。图3(b)显示,夏玉米全生育期内有效降雨量也会随着降雨强度的增加而增加。回归分析表明,有效降雨量与降雨强度呈正相关关系,不同灌溉制度的有效降雨量与降雨强度的模型具有显著差异($P<0.05$)。

2.3 冬小麦不同灌溉制度对夏玉米生育期降雨利用率的影响

有效降雨量是自然降雨再分配后可供作物利用

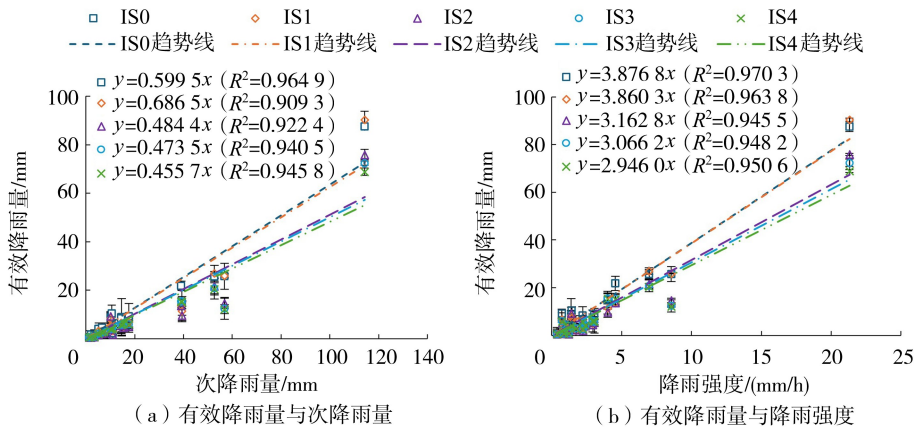


图3 夏玉米不同灌溉制度下有效降雨量与次降雨量和降雨强度的关系

的重要部分。夏玉米生育期内有效降雨量的分配见表2。根据夏玉米试验设计,数据分为5组,每组左侧表示该灌溉制度在相应生育期的有效降雨量,右侧为对应的降雨利用率。全生育期内,仅播种后对所有灌溉制度统一灌水75 mm,以保障种子发芽和玉米初期的正常生长,其他生育期内均无灌水。由于灌水量相同,不同灌溉制度对夏玉米的作用效果一致,不会对有效降雨的利用产生其他影响。因此,降雨利用率仅为降雨前后1 m 土体储水量的变化量占降雨总量的比例。

由表2可见,全生育期内夏玉米不同灌溉制度的降雨利用率整体随冬小麦灌溉次数的增加而降低。其中IS0的降雨利用率最高为54.31%,IS1、IS2、IS3和IS4相比IS0分别降低了7.81%、24.98%、27.49%和28.32%。苗期至拔节期,降雨利用率从高到低依次为IS0、IS1、IS2、IS3、IS4,IS0较IS1、IS2、IS3和IS4分别提高了3.10%、19.01%、25.30%和28.24%。而大喇叭口期至灌浆成熟期,降雨利用率从高到低依次为IS0、IS1、IS4、IS3、IS2,IS0较IS1、IS2、IS3和IS4分别提高了12.33%、26.83%、26.37%和22.11%。在该生育阶段,仅大喇叭口期IS2的降雨利用率低于IS3和IS4,原因可能是大喇叭口期处于夏玉米的快速生长期,作物需水量大,较高的底墒促进了作物根系吸水,从而增加了土壤库容,吸纳更多的降雨,最终提高了降雨利用率。夏玉米全生育期内,降雨利用率随着玉米的生

长先增大后减小,苗期的降雨利用率为54.58%,拔节期达到最高,为59.06%,至抽雄期降为33.56%。夏玉米苗期和拔节期的降雨利用率较高,大喇叭口期尽管降水量增加,但叶面积指数和冠层覆盖度的增加使得截留量增大,降雨利用率降低。之后随着降水量的减少,抽雄期土壤蓄水量的变化量减少,降雨利用率进一步下降。灌浆成熟期蓄水量的变化量与苗期接近,但降水量高于苗期,降雨利用率降低。不同生育期内,降雨利用率存在显著差异($P<0.05$),这种差异可能与玉米的冠层结构(如叶面积指数、冠层覆盖度等)随植株生长发育的变化有关。这些因素决定了玉米在不同生育阶段对降雨的再分配作用显著不同($P<0.05$)。

2.4 冬小麦不同灌溉制度对夏玉米水分利用效率的影响

2022—2023年冬小麦不同灌溉制度下夏玉米的水分利用效率及相关参数见表3。夏玉米季各灌溉制度下的播前贮水量随冬小麦季灌溉次数的增加而增加。IS1、IS2、IS3和IS4较IS0分别提高了15.12%、23.61%、26.64%和34.49%。收获后贮水量从高到低依次为IS2、IS1、IS0、IS3、IS4。各灌溉制度在整个生育期的耗水量随冬小麦灌溉次数的增加而增加,其中IS4的耗水量最高,IS0的最低,IS1、IS2、IS3和IS4的耗水量较IS0分别提高5.98%、7.23%、14.35%和20.77%。不同灌溉制度之间玉米的产量差异明显,夏玉米生育期玉米产量从大到

表2 夏玉米生育期有效降雨量的分配特征

生育期	总降雨量/mm	有效降雨量/mm					降雨利用率/%				
		IS0	IS1	IS2	IS3	IS4	IS0	IS1	IS2	IS3	IS4
苗期	23.60	17.88	15.59	13.45	8.79	8.69	75.77	66.05	56.97	37.25	36.84
拔节期	147.34	100.86	99.58	82.72	77.40	74.51	68.45	67.59	56.14	52.53	50.57
大喇叭口期	168.20	73.56	63.52	55.04	64.22	64.03	43.74	37.77	32.73	38.18	38.07
抽雄期	73.74	36.35	32.47	20.64	16.96	17.29	49.30	44.04	28.00	23.01	23.46
灌浆成熟期	38.70	16.62	14.93	12.14	11.39	11.84	42.95	38.58	31.37	29.44	30.61
全生育期	453.30	245.27	226.10	183.99	178.77	176.37	54.31	50.07	40.74	39.44	38.91

表 3 冬小麦不同灌溉制度下夏玉米的水分利用效率

灌溉制度	播前贮水量/mm	收获后贮水量/mm	夏玉米生育期降水量/mm	田间耗水量/mm	夏玉米产量/(kg/hm ²)	水分利用效率/(kg/m ³)
IS0	249.73±13.81 ^c	300.29±13.47 ^{ab}	453.30	477.74±2.32 ^c	15194.34±365.53 ^c	3.18±0.26 ^{ab}
IS1	287.48±17.31 ^{bc}	309.48±13.10 ^{ab}	453.30	506.30±7.81 ^{bc}	15477.85±371.76 ^{bc}	3.06±0.37 ^{bc}
IS2	308.68±15.79 ^{ab}	324.69±18.02 ^a	453.30	512.29±8.72 ^{bc}	17593.87±553.56 ^a	3.43±0.29 ^a
IS3	316.27±14.20 ^{ab}	298.29±12.12 ^{bc}	453.30	546.28±2.40 ^{ab}	16128.92±416.51 ^{ab}	2.95±0.34 ^{bc}
IS4	335.86±11.37 ^a	287.18±11.34 ^c	453.30	576.98±9.64 ^a	16369.94±456.12 ^{ab}	2.84±0.18 ^c

注:不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

小依次为 IS2、IS4、IS3、IS1、IS0。IS2 分别与 IS1 和 IS0 之间的差异达到显著水平 ($P<0.05$), IS2 与 IS3 和 IS4 之间的差异不显著 ($P>0.05$)。IS2 产量最高, IS0 产量最低, IS1、IS2、IS3 和 IS4 较 IS0 分别增产 1.87%、15.79%、6.15% 和 7.74%。水分利用效率从高到低依次为 IS2、IS0、IS1、IS3、IS4, 其中 IS2 与 IS1、IS3 和 IS4 之间差异显著 ($P<0.05$), 与 IS0 之间差异不显著 ($P>0.05$)。IS2 的水分利用效率较 IS0 提高了 7.98%, 而 IS1、IS3 和 IS4 的水分利用效率较 IS0 分别降低了 3.87%、7.14% 和 10.79%。夏玉米季各灌溉制度下的土壤水分利用效率整体上随冬小麦季灌溉次数的增加呈下降趋势。

2.5 TOPSIS-熵权法模型对夏玉米水分利用效率的综合评价

本研究通过分析大田试验中影响灌溉制度的各种因素, 采用 TOPSIS-熵权法充分提取数据信息, 进行综合评价与排序, 以确定最优的灌溉制度。选取耗水量、产量、水分利用效率和降雨利用率作为评价指标。其中, 产量、水分利用效率和降雨利用率为正向指标, 耗水量为逆向指标。首先利用式(4)和(5)对数据进行标准化和无量纲化处理, 得到标准化矩阵; 然后通过熵权法得到熵权值分别为 0.816、0.764、0.731、0.637; 最后, 得出各指标的权重系数分别为 0.175、0.224、0.256、0.345。

基于熵权法生成的加权数据, 采用 TOPSIS 法对 4 个灌溉制度评价指标(耗水量、产量、水分利用效率和降雨利用率)进行评价, 得出排序结果(表 4)。由表 4 可知, IS2 的相对接近度 C 值最高为 0.6029, 表明 IS2 灌溉制度表现最优; 其次是 IS0, 相对接近度为 0.5860; IS4 的相对接近度最小。

表 4 TOPSIS 评价计算结果

评价对象	正理想解距离	负理想解距离	相对接近度	排序结果
IS0	0.5441	0.7702	0.5860	2
IS1	0.5708	0.5586	0.4946	3
IS2	0.4960	0.7531	0.6029	1
IS3	0.8003	0.2539	0.2409	4
IS4	0.9001	0.2476	0.2157	5

3 讨论

本文研究表明, 随着冬小麦春季灌水次数的增加, 夏玉米播种前的土壤贮水量呈上升趋势, 其他灌溉制度较 IS0 增加了 15.12%~34.49%。这与赵鑫等^[13]的研究一致, 即冬小麦的不同灌溉模式显著影响了夏玉米播种前的土壤贮水量, 表现为递增趋势。作物生长初期, IS0 表层土壤含水率明显高于其他灌溉制度, 主要原因可能是夏玉米生育期末进行水分处理, 表层土壤含水率的差异主要受冬小麦的灌溉和自然降雨的影响。该期间 IS0 的土壤墒情最低, 能够充分存储降雨。侯玉虹等^[14]发现, 适当提高底墒对作物苗期生长有明显促进作用, 甚至影响后期的生长发育。因此, 拔节期至大喇叭口期, 作物进入快速生长期, 需水要求高, 较高的底墒水平有助于促进作物耗水, 加快生长, 使得 IS0 的土壤含水率整体高于其他灌溉制度。大喇叭口期至抽雄末期, 降水量增多, 夏玉米灌浆期后, 冬小麦灌溉导致的土壤贮水差异逐渐减小, 这与付佳祥等^[24]的研究结果一致。

从整个生育期来看, 夏玉米的有效降雨量随次降雨量和降雨强度的增加而增加。这可能是由于降水量和降雨强度的增加导致雨滴动能增大, 植株受打击力度增强, 叶片倾角改变或明显抖动, 使叶片上的雨水更多地散落至地表, 增加了有效降雨量^[25-26]。夏玉米不同灌溉制度下的降雨利用率随冬小麦灌溉次数的增加而降低。秦欣等^[27]的研究也表明, 冬小麦生长季随灌水次数的减少, 土壤水分库容呈相反趋势变化, 显著提高了降雨利用率。随着冬小麦灌溉次数的增加, 夏玉米生育期的总耗水量也随之增加^[28]。本文研究表明, IS1、IS2、IS3 和 IS4 的耗水量较 IS0 分别提高了 5.98%、7.23%、14.35% 和 20.77%。除 IS2 外, IS0、IS1、IS3 和 IS4 的水分利用效率整体上随冬小麦季灌溉次数的增加而降低, 这与朱金城等^[29]的研究一致。罗俊杰等^[30]和徐志鹏等^[31]研究表明, 适当提高土壤初始含水率有助于产量和水分利用效率的提升; 但许振柱等^[32]指出, 过高的土壤水分会显著降低灌溉的边际效益, 导致水资源的浪费。本研究中, IS2 的水分

利用效率较 IS0 提高了 7.98%,而 IS3 和 IS4 的水分利用效率较 IS0 分别降低了 7.14%和 10.79%。李全起等^[33]的研究表明,适当提高底墒水平可有效提高夏玉米产量。本研究中,夏玉米生育期的籽粒产量从大到小依次为 IS2、IS4、IS3、IS1、IS0,IS2 与 IS1 和 IS0 之间差异显著($P<0.05$),与 IS3 和 IS4 之间差异不显著($P>0.05$)。

本文研究基于 TOPSIS-熵权法对灌溉制度进行综合评价,该方法避免了数据的主观性,无需复杂的目标函数或检验,对指标数量无严格限制,能够灵活反映多个指标的综合影响。引用 TOPSIS-熵权法模型对夏玉米的 4 个评价指标进行综合分析,量化各指标对灌溉制度的影响,利用不同指标在评价体系中的权重差异^[34],得出 IS2 的相对接近度最高为 0.6029,表明 IS2 灌溉制度表现最优。

4 结 论

a. 夏玉米生育期的降雨利用率和水分利用效率与冬小麦灌溉次数整体呈负相关关系。其中,IS0 的降雨利用率最高,IS4 的最低。IS4 的降雨利用率较 IS0 降低了 28.32%。水分利用效率最高的灌溉制度是 IS2,较 IS4 提高了 20.77%,且两者差异显著($P<0.05$)。

b. 夏玉米的籽粒产量整体随冬小麦季灌水次数的增加而增加,耗水量则随灌水次数的增加而减少。籽粒产量最高的灌溉制度为 IS2,较最低的灌溉制度 IS0 提高了 15.79%;IS0 的作物耗水量最低,IS4 的作物耗水量最高,较 IS0 增加了 20.77%。

c. IS2 在灌溉制度评价中表现最优,其相对接近度最高为 0.6029;而 IS4 的综合表现最差,其相对接近度仅为 0.2157。

d. 冬小麦在拔节期和扬花期共灌溉两次水 (IS2,总灌水量为 150 mm),在保证后茬作物夏玉米产量和轮作节水的同时还可以有效利用降雨,水分利用效率整体得到提升。

参考文献:

[1] 程亚男. 黑龙港地区水资源承载力评估与分析[D]. 保定:河北大学,2019.

[2] 徐丽娜,陶洪斌,黄收兵,等. 黑龙港流域夏玉米产量提升限制因素[J]. 生态学报,2013,33(1):222-228. (XU Lina,TAO Hongbin,HUANG Shoubing,et al. Analysis on the limiting factors to further improve yield of summer maize in Heilonggang River Valley[J]. Acta Ecologica Sinica,2013,33(1):222-228. (in Chinese))

[3] 赵影星,王彪,刘晴,等. 黑龙港平原基于麦-玉复种的两

2022,48(7):1787-1799. (ZHAO Yingxing,WANG Biao,LIU Qing, et al. Characteristics of farmland water consumption under two-year wheat-maize interannual rotation patterns in Heilonggang Plain[J]. Acta Agronomica Sinica,2022,48(7):1787-1799. (in Chinese))

[4] 李榕基,杨天一,刘帆,等. 华北平原冬小麦-夏玉米农田蒸散观测对比研究[J]. 中国生态农业学报(中英文),2024,32(5):851-859. (LI Rongji,YANG Tianyi,LIU Fan, et al. A comparison and discussion of observational studies on farmland evapotran-spiration in the North China Plain [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture,2024,32(5):851-859. (in Chinese))

[5] 陈建忠,肖荷霞. 黑龙港流域气象生态因子对夏玉米穗粒数的影响[J]. 河北农业科学,2000,4(3):23-27. (CHEN Jianzhong,XIAO Hexia. Effects of ecoclimatical factors on grain number of summer maize in Heilonggang area[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences,2000,4(3):23-27. (in Chinese))

[6] 杨美赞. 黑龙港地区地下水灌溉管理现状研究[D]. 保定:河北农业大学,2018.

[7] 井森,张江江,刘瑾,等. 水位、水量、产量联控的华北平原地下水超采区节水灌溉多目标优化[J]. 水资源保护,2025,41(2):184-192. (JING Miao,ZHANG Jiangjiang,LIU Jin, et al. Multi-objective optimization of water-saving irrigation in groundwater over-exploitation area of the North China Plain under joint control of water level,water volume, and crop yield[J]. Water Resources Protection,2025,41(2):184-192. (in Chinese))

[8] 徐建,何昆,郭锦华,等. 小麦、玉米控制灌溉技术研究[J]. 水利水电科技进展,2002,22(6):17-19. (XU Jian,HE Kun, GUO Jinhua, et al. Controlled irrigation technology for wheat and corn[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2002,22(6):17-19. (in Chinese))

[9] 彭世彰. 冬小麦控制灌溉技术[J]. 水利水电科技进展,1996,16(2):33-35. (PENG Shizhang. Controlled irrigation technology for winter wheat[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,1996,16(2):33-35. (in Chinese))

[10] 张金鑫,葛均筑,马玮,等. 华北平原冬小麦-夏玉米种植体系周年水分高效利用研究进展[J]. 作物学报,2023,49(4):879-892. (ZHANG Jinxin,GE Junzhu,MA Wei, et al. Research advance on annual water use efficiency of winter wheat-summer maize cropping system in North China Plain[J]. Acta Agronomica Sinica,2023,49(4):879-892. (in Chinese))

[11] 刘克,张敏洁,秦欣,等. 不同水分处理对当季冬小麦及后茬夏玉米生长与产量的影响[J]. 作物杂志,2010(5):70-73. (LIU Ke,ZHANG Minjie,QIN Xin,et al. Effects of different water treatments on dry matter accumulation and yield of winter wheat and following summer maize[J].

- Crops,2010(5):70-73. (in Chinese))
- [12] 赵龙,蔡焕杰,曹玉鑫.生育期干旱-复水对夏玉米生化指标的影响[J].节水灌溉,2021(6):9-16. (ZHAO Long,CAI Huanjie,CAO Yuxin. Effect of drought stress and re-watering on biochemical indexes of summer maize during growth period[J]. Water Saving Irrigation, 2021 (6):9-16. (in Chinese))
 - [13] 赵鑫,任伟,王云奇,等.冬小麦灌水模式和农艺措施对夏玉米土壤含水量及水分利用效率的影响[J].水土保持学报,2014,28(2):100-104. (ZHAO Xin,REN Wei,WANG Yunqi,et al. Impact of irrigation modes of winter wheat season and agronomy managements on soil water content and WUE of summer maize[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2014,28(2):100-104. (in Chinese))
 - [14] 侯玉虹,尹光华,刘作新,等.土壤底墒与苗期灌溉量对玉米出苗和苗期生长发育的影响[J].干旱地区农业研究,2006,24(4):51-57. (HOU Yuhong,YIN Guanghua,LIU Zuoxin,et al. Effect of soil moisture content in sowing and irrigation quota on maize emergence and growth in seedling period[J]. Agricultural Research in the Arid Areas,2006,24(4):51-57. (in Chinese))
 - [15] 魏钟博,边大红,杜雄,等.黑龙港流域夏玉米生育期降水、需水和干旱时空分布特征[J].农业工程学报,2020,36(9):124-133. (WEI Zhongbo,BIAN Dahong,DU Xiong,et al. Characteristics of spatial-temporal distribution of precipitation,water requirement and drought for summer maize growth period in Heilonggang Basin [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2020,36(9):124-133. (in Chinese))
 - [16] 韩美坤,黄琴,李金鹏,等.贮藏旱作冬小麦耗水特征与水分利用效率[J].中国农业大学学报,2018,23(2):11-19. (HAN Meikun,HUANG Qin,LI Jinpeng,et al. Water use characteristics of no-irrigating winter wheat under storing available soil water before sowing[J]. Journal of China Agricultural University,2018,23(2):11-19. (in Chinese))
 - [17] 陈俊克,缴锡云,庄杨,等.次降雨有效降雨量的影响因素及其估算模型[J].灌溉排水学报,2017,36(4):15-20. (CHEN Junke,JIAO Xiyun,ZHUANG Yang,et al. Investigating effective rainfall and factors affecting effective rainfall using experiments and modelling[J]. Journal of Irrigation and Drainage,2017,36(4):15-20. (in Chinese))
 - [18] 李峰,缴锡云,李盼盼,等.田间土壤水分特征曲线参数反演[J].河海大学学报(自然科学版),2009,37(4):373-377. (LI Feng,JIAO Xiyun,LI Panpan,et al. Parametric inversion of soil water characteristic curves of farmland[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2009,37(4):373-377. (in Chinese))
 - [19] 张晶,赵立志.熵权TOPSIS-灰色关联法在室内环境质量评价中的应用[J].价值工程,2023,42(9):113-115. (ZHANG Jing,ZHAO Lizhi. Application of entropy-weighted grey correlation model in indoor environmental quality assessment[J]. Value Engineering,2023,42(9):113-115. (in Chinese))
 - [20] 杨志豪,何建新,李志华,等.基于PPR-TOPSIS分析法的沥青混凝土配合比方案优选[J].水利水电科技进展,2023,43(2):82-88. (YANG Zhihao,HE Jianxin,LI Zhihua,et al. Scheme optimization of mix proportion for asphalt concrete based on PPR-TOPSIS analysis[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2023,43(2):82-88. (in Chinese))
 - [21] 刘晓君,鲁晶涵.基于Topsis-熵权法的绿色施工节地技术综合效益评价研究[J].数学的实践与认识,2023,53(1):1-10. (LIU Xiaojun,LU Jinghan. Comprehensive benefit evaluation of green construction land saving measures based on Topsis-entropy weight decision method[J]. Practice and Understanding of Mathematics,2023,53(1):1-10. (in Chinese))
 - [22] 张宝文,牛坡,杨欣,等.基于TOPSIS-熵权法的我国直辖市农机社会化服务发展水平评价[J].南方农业学报,2023,54(11):3438-3450. (ZHANG Baowen,NIU Po,YANG Xin,et al. Evaluation of socialized agricultural machinery services development level in municipalities directly under the central government of China:based on TOPSIS-entropy weight method[J]. Journal of Southern Agriculture,2023,54(11):3438-3450. (in Chinese))
 - [23] LOBELL D B,ASNER G P. Moisture effects on soil reflectance[J]. Soil Science Society of America Journal,2002,66(3):722-727.
 - [24] 付佳祥,柴春岭,高惠娟,等.前茬灌溉对夏玉米灌浆特性、土壤呼吸和产量的影响研究[J].节水灌溉,2022(4):54-59. (FU Jiaxiang,CHAI Chunling,GAO Huiyan,et al. Effect of previous crop irrigation on grain filling characteristics,soil respiration and yield of summer maize[J]. Water Saving Irrigation,2022(4):54-59. (in Chinese))
 - [25] 郑静.农田覆盖、种植密度和施氮对夏玉米水氮利用影响机理及其增产减排效应研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2021.
 - [26] 郝芝建,范兴科,吴普特,等.喷灌条件下夏玉米冠层对水量截留试验研究[J].灌溉排水学报,2008,27(1):25-27. (HAO Zhijian,FAN Xingke,WU Pute,et al. Study on summer corn canopy interception under sprinkler irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage,2008,27(1):25-27. (in Chinese))
 - [27] 秦欣,刘克,周丽丽,等.华北地区冬小麦-夏玉米轮作节水体系周年水分利用特征[J].中国农业科学,2012,45(19):4014-4024. (QIN Xin,LIU Ke,ZHOU Lili,et al. Characteristics of annual water utilization in winter wheat-summer maize rotation system in North China Plain[J]. Scientia Agricultura Sinica,2012,45(19):4014-4024. (in Chinese))

- Chinese))
- [28] 王海霞,李玉义,任天志,等. 冬小麦生长季不同灌溉模式对冬小麦-夏玉米产量与水分利用的影响[J]. 应用生态学报,2011,22(7):1759-1764. (WANG Haixia,LI Yuyi,REN Tianzhi, et al. Effects of different irrigation modes in winter wheat growth season on the grain yield and water use efficiency of winter wheat-summer maize [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(7): 1759-1764. (in Chinese))
- [29] 朱金城,陶洪斌,高英波,等. 底墒对夏玉米生长发育、水分利用及产量的影响[J]. 中国农业大学学报,2013,18(3):34-38. (ZHU Jincheng, TAO Hongbin, GAO Yingbo, et al. Effects of sowing irrigation on plant establishment, water consumption and yield of summer maize[J]. Journal of China Agricultural University, 2013, 18(3):34-38. (in Chinese))
- [30] 罗俊杰,王勇,樊廷录. 旱地不同生态型冬小麦水分利用效率对播前底墒的响应[J]. 干旱地区农业研究,2010,28(1):61-65. (LUO Junjie, WANG Yong, FAN Tinglu. Effect of winter wheat yield and WUE with different soil water before sowing in semi-arid areas[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2010, 28(1):61-65. (in Chinese))
- [31] 徐志鹏,穆奎,董文俊,等. 关中地区播前土壤墒情对覆膜旱作夏玉米产量和水分利用的影响[J]. 水土保持学
- 报,2021,35(6):123-134. (XU Zhipeng, MU Kui, DONG Wenjun, et al. Effects of soil moisture content before sowing on summer maize yield and water use under plastic mulching in Guanzhong region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(6): 123-134. (in Chinese))
- [32] 许振柱,于振文. 限量灌溉对冬小麦水分利用的影响[J]. 干旱地区农业研究,2003,21(1):6-10. (XU Zhenzhu, YU Zhenwen. Effects of limited irrigation on water use of winter wheat[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2003, 21(1):6-10. (in Chinese))
- [33] 李全起,房全孝,陈雨海,等. 底墒差异对夏玉米耗水特性及产量的影响[J]. 农业工程学报,2004,20(2):93-96. (LI Quanqi, FANG Quanzhao, CHEN Yuhai, et al. Effects of different soil moistures before sowing on water consumption characteristics and yield of summer maize [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2004, 20(2):93-96. (in Chinese))
- [34] 郭三党,李倩,荆亚倩. 基于改进 TOPSIS 法的城市空气质量综合评价[J]. 河南科学,2021,39(11):1842-1849. (GUO Sandang, LI Qian, JING Yaqian. Comprehensive evaluation of urban air quality based on improved TOPSIS method [J]. Henan Science, 2021, 39(11):1842-1849. (in Chinese))

(收稿日期:2024-07-05 编辑:俞云利)

(上接第 101 页)

- [32] 梁鑫,侯精明,陈光照,等. 考虑降雨空间分布的城市内涝对模式雨型响应特征分析[J]. 水利水运工程学报,2024(2):44-54. (LIANG Xin, HOU Jingming, CHEN Guangzhao, et al. Investigation of the response characteristics of urban waterlogging to model rainfall patterns taking into account the spatial distribution of rainfall[J]. Hydro-Science and Engineering, 2024(2):44-54. (in Chinese))
- [33] 李欣怡,侯精明,潘占鹏,等. 城市更新的雨洪过程动态响应模拟研究:以银川市为例[J]. 水利学报,2023,54(11):1347-1358. (LI Xinyi, HOU Jingming, PAN Zhanpeng, et al. Simulation study on dynamic response of rain and flood process in urban renewal: a case study of Yinchuan City [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2023, 54(11):1347-1358. (in Chinese))
- [34] 郭敏鹏. 基于动力波法的城市地表径流与管网排水过程耦合数值模型研究及应用[D]. 西安:西安理工大学,2022.
- [35] 梁鑫,侯精明,王添,等. 基于多源数据融合的城市洪涝模拟高精度地形构建方法[J]. 水利水电科技进展,2024,44(6):56-63. (LIANG Xin, HOU Jingming, WANG Tian, et al. A method for constructing high-precision terrain for urban flood simulation based on multi-source data fusion [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(6):56-63. (in Chinese))
- [36] 刘柯涵. 基于智能算法的 SWMM 模型参数率定和 LID 设施布局优化研究[D]. 西安:西安理工大学,2023.
- [37] 冯孟娟. 基于 SWMM 模型的海绵城市内涝模拟及评价:以广州庙头涌为例[D]. 邯郸:河北工程大学,2023.
- [38] LIU Zhao, LI Wenqing, WANG Lixia, et al. The scenario simulations and several problems of the sponge city construction in semi-arid loess region, Northwest China [J]. Landscape and Ecological Engineering, 2022, 18(1):95-108.
- [39] ROSSMAN L A. Storm water management model: user's manual version 5.1 [EB/OL]. [2024-09-01]. https://www.openswmm.org/content/files/SWMM5.1UserManual_CN.pdf.
- [40] 马鑫,侯精明,李丙尧,等. 建筑小区雨水花园空间布局对径流过程影响规律研究[J]. 环境工程,2022,40(12):105-111. (MA Xin, HOU Jingming, LI Bingyao, et al. Influence law of rainwater gardens spatial layout on runoff process in building communities [J]. Environmental Engineering, 2022, 40(12):105-111. (in Chinese))

(收稿日期:2024-09-15 编辑:俞云利)