doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.22.011

基于 WheatSM 模型的华北地区冬小麦灌溉次数与时期优化研究

赵　锦[1]　李浩天[1]　赵　闯[1]　陈先冠[2]　毛晓敏[3]　杨晓光[1]

（1. 中国农业大学资源与环境学院，北京 100193；2. 福建农林大学农学院，福州 350002；
3. 中国农业大学水利与智能工程学院，北京 100083）

摘要：全球气候变化背景下，华北地区作为中国冬小麦主产区，种植面积扩张与水资源紧缺矛盾日益凸显，优化灌溉制度对保障小麦生产和水资源高效利用具有重要科学价值与实践意义。尽管“少量多次”灌溉可实现节水并提高资源利用效率，但在大规模农业生产实践中有限灌溉次数的优化可操作性更强。本文基于验证后的 WheatSM 小麦机理模型，比较分析了 1988—2016 年华北地区不同降水年型下灌溉次数与灌溉时期对冬小麦产量及水分利用效率的影响，明确不同气候背景下区域灌溉次数和灌溉时期优化方案。结果表明，华北地区冬小麦推荐灌溉次数为 2～3 次；尽管产量随灌溉水量和次数增加而上升，但 3 次灌溉对产量提升作用有限；以生长季平均降水量 504、463 mm 2 条等降水量线作为灌溉次数选择阈值，生长季降水偏少地区返青期灌 1 水的优势明显。研究结果可为华北地区冬小麦区域性节水高效灌溉管理提供量化依据。

关键词：冬小麦；灌溉；作物模型；华北地区

中图分类号：P46　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2026)22-0133-09　　**OSID**：

Optimization of Irrigation Frequency and Timing of Winter Wheat in North China Based on WheatSM Model

Zhao Jin[1]　Li Haotian[1]　Zhao Chuang[1]　Chen Xianguan[2]　Mao Xiaomin[3]　Yang Xiaoguang[1]

(1. *College of Resources and Environment*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100193, *China*
2. *College of Agriculture*, *Fujian Agriculture and Forestry University*, *Fuzhou* 350002, *China*
3. *College of Water Resources and Intelligent Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: Under the context of global climate change, the North China, as the main winter wheat production region of China, has faced an intensifying conflict between the expansion of cultivation area and severe water scarcity. Optimizing the irrigation system held great scientific and practical significance for ensuring wheat production and efficient utilization of water resources. Although the “few but frequent” irrigation could achieve water conservation and enhance resource utilization efficiency, optimizing the number of irrigation events within practical limits in large-scale agricultural production was more feasible. Based on the validated WheatSM crop model, aiming to clarify the impact of irrigation frequency and timing under different precipitation types in North China from 1988 to 2016 on winter wheat yield and water use efficiency. The results indicated that the recommended irrigation frequency for the region was 2～3 times. Although yield was increased with additional water inputs, the effect of three times irrigation was limited. Two growing-season precipitation isolines (504 mm and 463 mm) served as effective thresholds for irrigation planning. In areas with below-average seasonal precipitation, a single irrigation during the green-up stage delivered a clear yield advantage. The research result can provide quantitative guidelines for region-specific, water-saving, and efficient irrigation management in winter wheat production in the North China.

Key words: winter wheat; irrigation; crop model; North China

收稿日期：2026－04－02　修回日期：2026－05－15

基金项目：农业科技重大项目

作者简介：赵锦(1987—)，男，副教授，博士，主要从事气候变化与种植制度和粮食安全研究，E-mail：jinzhao@cau.edu.cn

0 引言

冬小麦作为华北地区的主要粮食作物,产量约占全国的 50%[1-2]。然而,华北地区面临突出的水资源短缺问题,而地下水超采现象严重加剧了农业用水矛盾[3]。华北地区降水年内分布极不均匀,冬小麦主要生长季降水量仅占年降水量的 30% 左右,难以满足冬小麦生长季内高达 400 mm 的实际耗水需求[4]。为保障粮食产量,华北地区 40% 的灌溉都用于小麦生产,其中以 4、5 月灌溉需水量最高,分别占全年的 18.1% 和 25.4%[5-6]。长期依赖灌溉导致华北地区地下水埋深以每年约 1 m 的速度下降,形成地下水漏斗[7]。因此,在水资源与粮食生产矛盾日益凸显的背景下,提高水资源利用效率、实现冬小麦高产与节水,是华北地区冬小麦生产亟待解决的问题。

当前围绕华北地区的冬小麦灌溉制度已有大量研究。王军等[8]基于长时间序列研究河南南阳不同类型地区冬小麦节水灌溉制度,在灌水量较低情况下,小麦产量与耗水量间具有明显的正相关关系,超过最大适宜灌溉量后产量反而降低,全生育期内灌溉 3 次即可接近最高产量,多雨年适当减少灌溉量,干旱年适当增加 1 次灌溉,并且越冬期、拔节孕穗期、灌浆前期灌水利于籽粒形成,增产效果明显;陈宗培[9]根据河北平原实际水分生产潜力和实际产量,结合 APSIM 作物模型研究不同灌溉情景对河北平原小麦产量及耗水量的影响,得出在全年灌溉 4 ~ 5 次前提下,小麦播种期、拔节期、开花期各灌溉 75 mm 时可达最高理论产量,根据目前河北平原实际水资源储量和供应情况,小麦播种及拔节期各灌溉 75 mm 时可达最高灌溉水分生产力。进一步研究表明,限额灌溉策略可将灌溉频率由 4 次减至 2 次,减少灌溉量的同时提高水分利用效率且对冬小麦高产没有显著影响[10]。

然而,当前灌溉管理优化研究与实践中,一方面,仅以产量为目标的灌溉模式易导致水分利用效率下降[11]。尽管“少量多次”灌溉可实现节水并提高资源利用效率[12],但在大规模农业实际生产中因成本过高、可操作性低而难以落地[13-14]。自 20 世纪 60 年代以来,农户更倾向于采用 3 ~ 4 次集中灌溉,总灌溉量超 300 mm[15-16],但增加灌溉量无法持续提升产量和水分利用效率,反而会加速地下水下降[17]。另一方面,现有灌溉研究存在明显侧重偏差和场景局限,众多学者聚焦于灌溉总量控制与优化,通过限水灌溉试验探索产量、水分利用效率与总灌溉量间的平衡关系[11],却对灌溉次数的合理配置及关键灌溉时期的选择关注不足。已有研究虽指出关键时期灌溉能够提高生物量、籽粒数和水分利用效率[18-19],但由于此类结论常基于单站点、年份短的小尺度试验,并且各站点田间管理措施、气候条件存在差异,试验结果的区域尺度普适性有待提高[20],特别是华北地区冬小麦灌溉需水量主要受有效降水量影响,年际波动较大,干旱胁迫在华北平原呈持续加剧趋势,尤其在拔节至抽穗期影响最为严重[21],单一灌溉方案已无法有效适配区域降水时空分布差异[22]。

基于此,本研究聚焦于华北地区冬小麦灌溉制度优化,应用 WheatSM 作物模型,以灌溉次数优化与关键灌溉时期选择为核心,结合不同生长季降水特征提出兼顾产量和效率的灌溉方案,以期为农业生产灌溉策略、实现产量和水分利用效率的协同提升提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域

研究区域(图 1)为华北地区,包括北京市、天津市、山东省、河北省和河南省。该区域是我国冬小麦主产区,尤其是河北省中南部、山东省、河南省中北部及北京市、天津市部分地区,种植面积广泛,产量占全国的 50% 以上[23-24]。该地区位于中国东部的温带大陆性季风气候区,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥,降水集中于夏季,雨热同期,年降水量 400 ~ 800 mm 且自东南向西北减少。

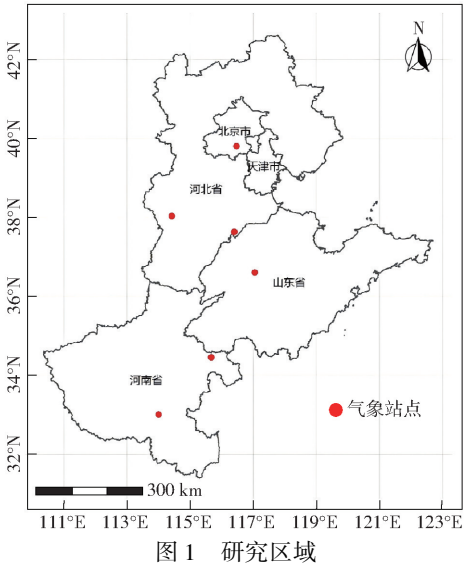


图 1 研究区域

Fig. 1 Study area

1.2 数据来源

1988—2016 年历史逐日气象数据来自中国气象数据网(https://data.cma.cn),选择北京、济南、商丘、吴桥、石家庄、驻马店 6 个气象站为典型站点

开展研究，气象要素包括逐日最高温度（T_{max}，℃）、最低温度（T_{min}，℃）、降水量（P_{cp}，mm）、相对湿度（RH_{mean}，%）、2 m 风速（U_2，m/s）、日照时数（n，h）、太阳总辐射（R_s，MJ/m^2）。逐日气象数据作为气候数据输入，用于驱动作物模型。同时使用 2020 年发布在国家青藏高原科学数据中心的中国 1 km × 1 km 分辨率逐月降水量数据集（https://doi.org/10.5281/zenodo.3114194）进行生长季降水空间分布特征阈值识别。

土壤数据主要来源于世界土壤数据库 SoilGrids 官网（https://soilgrids.org/），分辨率 250 m ×250 m，包括各层土壤容重、黏粒含量、pH 值、土壤有机碳含量等参数，同时结合我国土壤数据集 HWSD v2.0 中不同土壤类型下 7 个土壤不同深度的容重、含沙量、黏粒含量、pH 值、可用储水量、有机碳含量等与土壤水和灌溉量有关的土壤理化性质数据，该数据集分辨率为 1 km × 1 km，作为作物模型的土壤数据输入项。

选用的“济麦 22”是山东省农业科学院作物研究所育成品种，为半冬型品种，具有产量高、适应性强、抗倒伏能力强等特点，华北地区种植面积广泛，作物数据获取依赖于对冬小麦生长过程的长期观测，主要来源于中国气象局农业气象观测站、中国统计局《农业统计年鉴》、河南省郑州农业气象野外科学观测研究站，包括冬小麦生物量、产量以及田间管理措施、土壤墒情。试验站内选取具有代表性的冬小麦种植地块，对冬小麦生育期、生物量积累过程及产量形成进行全程记录，特别是冬小麦全生育期内关键生育期（如出苗期、拔节期、开花期、灌浆期等）时间、产量构成要素（如穗数、穗粒数、千粒质量等），为模型参数本地化提供数据支撑。

1.3　研究方法

1.3.1　WheatSM 模型

WheatSM 模型是一种适用于大面积范围应用、具有自主版权的小麦机理模型，可用于动态模拟小麦生长发育和产量形成的整个过程。模型包括气象、土壤、作物生长、田间管理等模块，优势在于将生育期分为不同阶段，尤其是考虑到春化作用和光周期、生理过程及同化物分配、作物生长与环境要素间的非线性关系，适用于华北冬小麦种植区，并作为华北地区各省份灌溉决策、产量预测等农业气象服务的重要工具。采用 WheatSM v5.2 版本。

1.3.2　灌溉情景设置

设置 WheatSM 模型田间管理模块中灌溉情景（表 1），模拟冬小麦产量动态。将冬小麦生育期分为播种期、返青期、拔节期、灌浆期，结合农户生产实际和田间试验的建议量，按照不同站点不同年份下模型模拟的生育期进行灌水次数和总量设置，按生育期灌水即灌溉次数分类，分为灌 1 水、灌 2 水、灌 3 水、灌 4 水，根据前人高产灌水设定每次、每个生育期灌水 75 mm[9]。

表 1　灌溉情景设置

Tab.1　Irrigation scenario design

灌溉次数	灌溉情景编号	播种期	返青期	拔节期	灌浆期	总灌水量/mm
灌 1 水	1	√				75
	2		√			
	3			√		
	4				√	
灌 2 水	5	√	√			150
	6	√		√		
	7	√			√	
	8		√	√		
	9		√		√	
	10			√	√	
灌 3 水	11	√	√	√		225
	12	√	√		√	
	13	√		√	√	
	14		√	√	√	
灌 4 水	15	√	√	√	√	300

注：√表示该生育期灌水。

1.3.3　减产率

基于 WheatSM 作物模型模拟 1988—2016 年 6 个站点种植、共 15 种灌溉情景（表 1）下输出的冬小麦产量，以灌 4 水情景下产量为理论产量，分别计算 6 个站点灌 1 水、灌 2 水、灌 3 水情景下冬小麦减产率 y_w，计算式为

$$y_w = \frac{y_t - y}{y_t} \times 100\% \tag{1}$$

式中　y_t——理论产量，即当地当年灌 4 水情景下产量，kg/hm^2

y——实际产量，即灌 1 水、灌 2 水、灌 3 水灌溉情景下产量，kg/hm^2

1.3.4　水分利用效率

定义产量水平上水分利用效率（WUE，kg/(hm^2·mm)）为

$$WUE = \frac{Y}{P_{cp} + I_{RCUM}} \tag{2}$$

式中　Y——产量，kg/hm^2

I_{RCUM}——总灌溉量，mm

1.3.5　最小显著差异法

以灌溉时期和灌溉次数作为因素，年份作为重复项，为明确不同灌溉次数以及相同次数下不同灌溉时期冬小麦减产率与水分利用效率差异，对各站

点同一指标采用最小显著差异法(Least significant difference,LSD)方法比较不同处理间差异显著性($P<0.05$)。

1.3.6 生长季降水量确定

研究区域内冬小麦生长季降水量时段选取每年10月1日—次年6月30日。为剔除极端降水事件干扰,对研究区域生长季内逐日降水数据进行排序,分别计算5%分位数(P5)和95%分位数(P95),保留5%~95%分位数区间内有效降水数据,计算研究时段内生长季平均降水量。

2 结果与分析

2.1 WheatSM模型参数设置

前人已基于WheatSM模型在华北地区不同水分条件下冬小麦生长发育和产量形成模拟进行了有效性验证[25-26],并明确了模型中水分管理的敏感参数。基于验证后的WheatSM模型,以“济麦22号”为模拟品种,经对模型参数敏感性分析可得,出苗-拔节基本发育系数、温度敏感系数、春化敏感系数、光周期敏感性系数对播种期、拔节期影响显著,拔节-开花基本发育系数、开花-成熟基本发育系数对开花期、成熟期影响较大。品种类型、品种敏感系数调参范围及调参后取值如表2所示,模拟结果表明,经过对关键参数进行调参验证,模拟值与测量值之间在播种-抽穗期、播种-开花期和播种-成熟期均方根误差(RMSE)分别为4.3、5.8、2.8 d,标准化均方根误差(NRMSE)分别为2.5%、2.9%、1.2%,校准参数对提高土壤水分动态变化、冬小麦生育期、生物量和产量的模拟精度有较好效果。

表2 WheatSM(v5.2)中品种敏感参数设置

Tab.2 Cultivar-sensitive parameters in WheatSM (v5.2)

参数	数值范围	取值
出苗-拔节基本发育系数	[-3.5,-2.0]	-2.37
拔节-开花基本发育系数	[-3.5,-2.0]	-3.04
开花-成熟基本发育系数	[-3.5,-2.0]	-3.42
温度敏感系数	[0.1,2.0]	0.88
春化敏感系数	[0.1,2.0]	0.55
光周期敏感性系数	[0.1,2.0]	1.89

2.2 不同降水条件下灌溉量选择

选择华北地区降水量年际波动大且存在显著差异的6个气象站点开展研究,由图2(图中虚线分别对应各气象站点生长季降水量多年平均值)可知,驻马店生长季降水量多年平均值接近500 mm,降水充沛,商丘多数年份在300~400 mm区间波动,济南在300~600 mm范围内波动,北京、石家庄、吴桥生长季降水量整体偏低,多年平均值约为200 mm,气候偏干旱。

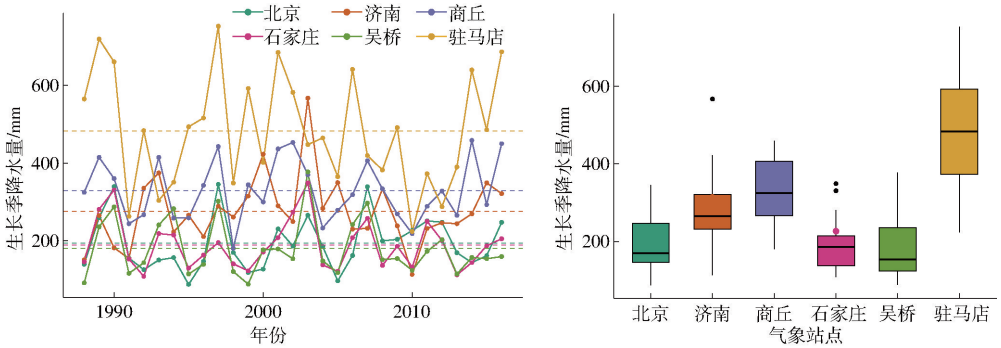


图2 1988—2016年冬小麦生长季内6个气象站点降水量年际变化与分布特征

Fig.2 Interannual variation and distribution characteristics of winter wheat growing-season precipitation at six meteorological stations during 1988—2016

2.3 灌溉时期选择

比较6个站点不同灌溉次数下产量和WUE(图3,不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$),下同)可知:随灌溉次数增加,冬小麦产量上升、WUE下降;与灌1水相比,灌2水产量提升显著但WUE降幅较小;灌3、4水产量提升边际效益递减、WUE持续下降。与此同时,这一响应规律在气象站点之间存在差异,商丘、驻马店等降水充沛地区在不同灌溉次数下均能保持高产且稳定,北京、吴桥等生长季降水较少的地区灌2水时WUE达到峰值。

在灌1水情景下(图4),北京和吴桥返青期灌溉减产率最低且WUE超20 kg/(hm^2·mm),显著高于播种期、拔节期、灌浆期。因此,返青期是北京、吴桥灌1水的最佳时期;济南和石家庄在返青期和灌浆期灌溉时,产量与WUE均有一定优势,可通过在这2个关键生育期进行灌溉,实现产量与水分利用效率的协同提升;商丘和驻马店各时期产量及WUE差异不大,均保持较高水平,4个时期灌溉减产率均低于10%。

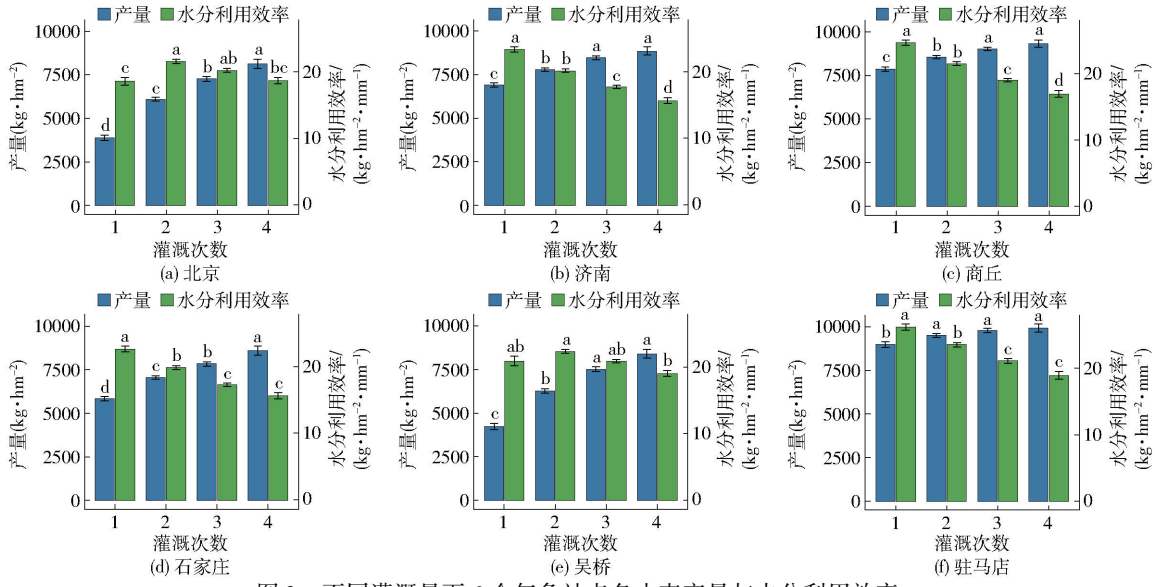


图 3　不同灌溉量下 6 个气象站点冬小麦产量与水分利用效率

Fig. 3　Winter wheat yield and water use efficiency under different irrigation amounts at six stations

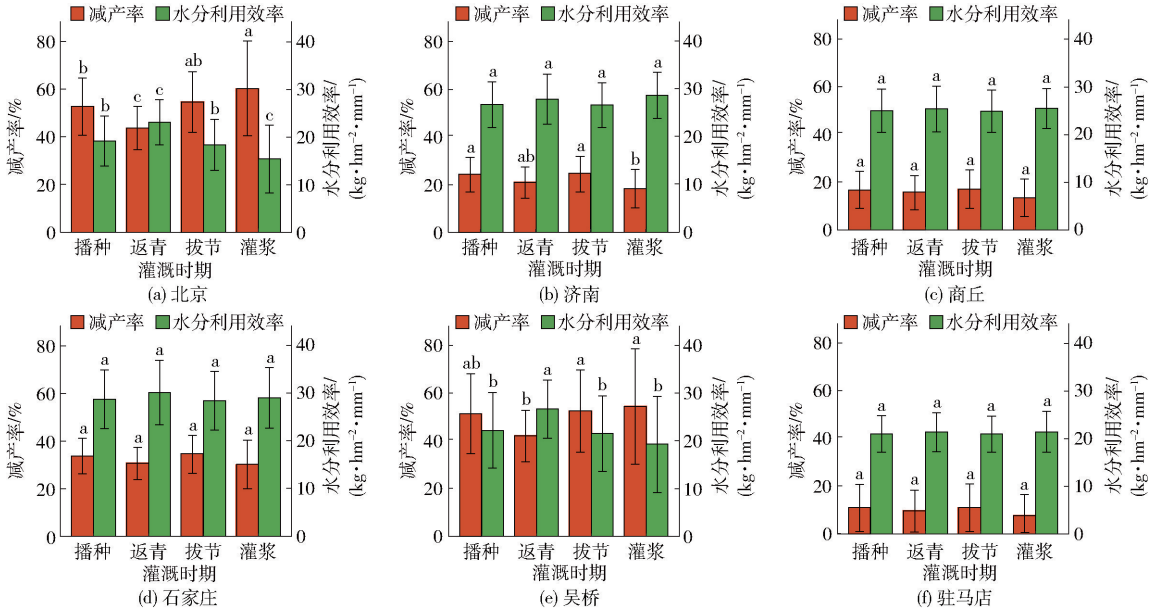


图 4　不同时期灌 1 水情景下 6 个气象站点冬小麦减产率与水分利用效率

Fig. 4　Winter wheat yield reduction rate and water use efficiency under one-time irrigation scenarios at different growth stages across six stations

灌 2 水情景下(图 5),北京和吴桥选择返青期与灌浆期结合灌溉时,减产率低于 15%,显著低于其他灌溉时期组合,且 WUE 显著较高;而在济南、石家庄、商丘、驻马店灌 2 水各时期组合下,产量和水分利用效率差异不大。

灌 3 水情景下(图 6),各区域产量和 WUE 均未因灌溉时期组合不同出现明显波动,相对灌 1 水和灌 2 水灌溉情景而言,减产率普遍降低,WUE 与灌 2 水情景相近。因此,灌 3 水时灌溉时期选择对产量无明显影响,但对 WUE 的提升效果有限。

为实现高产目标,基于生长季降水量(P_{cp})与产量的关系构建不同灌溉次数处理下线性回归模型,明确灌溉量及灌溉时期优化策略(图 7),灌 1 水处理为 $y = 12.848\,9P_{cp} + 2\,775.8$ ($R^2 = 0.56$),灌 2 水处理为 $y = 9.277\,9P_{cp} + 5\,001.17$ ($R^2 = 0.50$),灌 3 水处理为 $y = 6.986\,2P_{cp} + 6\,402.44$ ($R^2 = 0.39$),生长季降水量与产量呈显著正相关,且灌溉次数越少,产量对生长季降水量响应程度越高。

通过对不同灌溉次数处理下产量与生长季降水量关系的 95% 置信区间进行统计分析,确定灌溉次数选择的生长季降水量阈值。当 $P_{cp} \geqslant 504$ mm 时,灌 1 水为最优选择,产量可达 9 500 kg/hm^2 以上;当 463 mm $< P_{cp} <$ 504 mm 时,选择灌 2 水可确保产量接近 9 500 kg/hm^2;当 $P_{cp} \leqslant 463$ mm 时,为保证产量

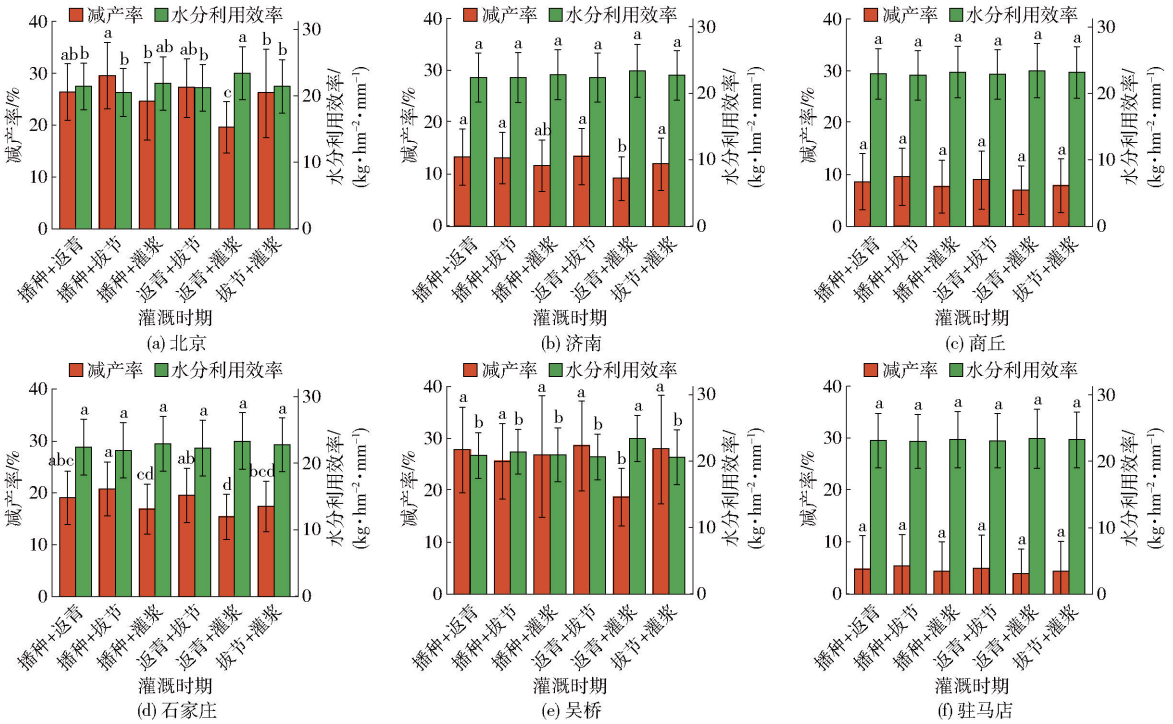


图 5 不同时期灌 2 水情景下 6 个气象站点冬小麦减产率与水分利用效率

Fig. 5 Winter wheat yield reduction rate and water use efficiency under two-time irrigation scenarios at different growth stages across six stations

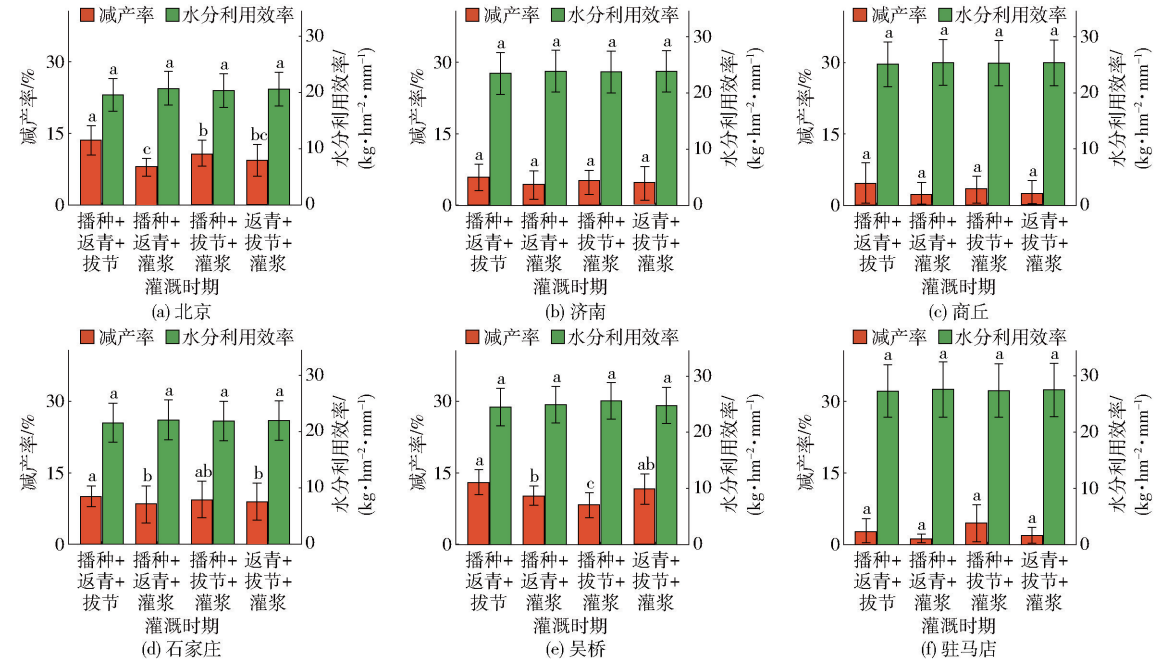


图 6 不同时期灌 3 水情景下 6 个气象站点冬小麦减产率与水分利用效率

Fig. 6 Winter wheat yield reduction rate and water use efficiency under three-time irrigation scenarios at different growth stages across six stations

需要灌 3 水。

去除极端降水事件下冬小麦生长季多年平均降水量表明(图 8),研究区域内生长季降水量存在自南向北、自东向西递减的梯度差异,尤其是河南南部生长季平均降水量可达 600 mm 以上,而其余省份平均降水量多在 400 mm 以下。区域内降水量空间分布直接影响灌溉方案选择,根据灌溉量阈值选择灌溉量,504 mm 等降水量线以南区域灌 1 水即可,463 mm 等降水量线以北大部分区域需灌 3 水,463 mm 和504 mm 区间内区域灌 2 水。

3 讨论

基于华北区域冬小麦生长季降水空间分布,系统比较了不同灌溉次数与灌溉时期选择对冬小麦产

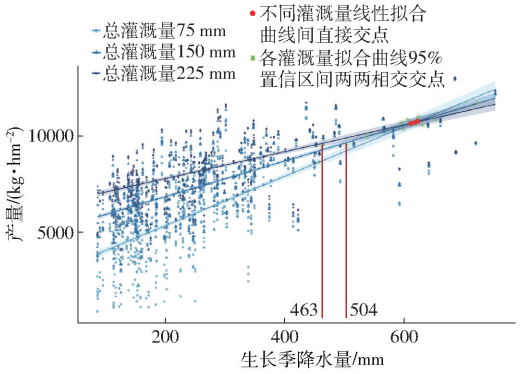


图 7　不同灌溉量下生长季降水量与产量的线性响应关系

Fig. 7　Linear response relationships between growing-season precipitation and yield under different irrigation amounts

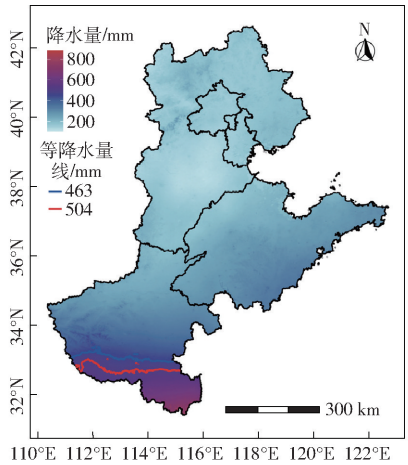


图 8　生长季降水量空间分布与阈值选取

Fig. 8　Spatial distribution of growing-season precipitation and threshold selection

量和水分利用效率的影响，明确了最佳灌溉次数和灌溉时间空间差异。已有研究指出，华北平原最优灌溉量在 3 ~ 286 mm 范围内波动，并呈现气候主导的空间分布特征[27]，与本研究提出的基于生长季降水空间变异的区域化灌溉策略一致。就总灌溉量而言，本研究结果表明最佳灌溉量随气候条件的不同而不同，为基于生长季降水空间变异的差异性灌溉提供依据。为实现高产目标，基于多项研究给出的冬小麦最优总灌溉量为 80 ~ 240 mm，在此基础上，根据生长季降水量灌溉具有区域差异性，降水较少地区可将灌溉次数或灌溉量上调，但在部分生长季降水充足区域，可适当降低灌溉量，以小幅产量损失换取显著节水效益[28]。该结论与基于田间试验得到的最佳灌溉量存在区域差异的结论具有一致性，相较于统一定额灌溉，基于降水空间分布的分区灌溉策略更符合华北区域实际生产需求。

从灌溉时期来看，将灌溉集中在关键生育期如拔节期、灌浆期能够在较低灌溉总量下保持高产潜力并显著提升水分利用效率。与传统的 4 ~ 5 次灌溉相比，合理安排 1 ~ 2 次关键期灌溉可获得与多次灌溉相近产量，同时实现节水目标[29-30]，原因在于关键期灌溉直接影响籽粒数与籽粒质量形成，对产量形成至关重要，而在非敏感时期灌溉对产量提升的边际效益较低[31-32]。本研究发现，当灌溉量达到某一阈值后，单位灌溉量带来的产量增益逐渐减小，与前人在试验中观察到的边际效益递减规律一致[33]，因此，若目标为追求最高产量，则需接受水分利用效率较低及耗水量增加，若在最高水分利用效率附近选择灌溉策略则必须接受少量产量下降以换取显著的节水[33-34]。因此，将目标从单一的最大产量调整为最大产量和水分利用效率的综合收益最优，应考虑不同区域水资源及产量目标因素，在双目标下合理配比，将区域间差异纳入灌溉定额制定。同时，健全节水保障机制，实行分区分类分档水价，对灌 1 水优先区实施基础水价与节水奖励，对灌 2 水区执行基准水价，对灌 3 水限制区实行累进加价与超采管控，精细管水用水，落实奖补制度。

本研究还存在以下局限和不足：气候年际变率会改变水分敏感时期及灌溉需求[35]，作物模型在气候变化影响评估及适应性评价中作为主要不确定性来源，输入数据、作物模型参数化以及模型自身响应机制均会对冬小麦产量模拟结果产生明显影响[36]，且在未来气候情景下可能进一步放大[37]。土壤空间异质性也影响模型模拟土壤水分过程[38]，同时品种参数具有较强不确定性，不同温度响应函数及参数化方法会导致冬小麦物候模拟结果存在明显差异[39-40]。地下水超采现象严重，应在长期管理中考虑对区域水循环与气候的反馈机制，对灌溉资源进行评估[41-42]。本研究参考生产实践，单次灌溉量设置为 75 mm[9]，与滴灌、喷灌等节水方式比偏高[43-45]，未来应细化灌溉频次实现更精准的水分调控，充分发挥节水设施精准灌溉优势。

华北平原冬小麦生产对生育期气候波动较为敏感，高温干旱复合事件会显著加剧产量波动[46]。未来可进一步结合 CMIP6 气候情景、多模型集成模拟及机器学习方法，通过敏感性分析、动态参数率定及数据同化等方式，提高模型在极端气候条件下适应性与预测稳定性[47]。由于华北地区降水季节性差异显著，冬小麦生育期内随机降水事件会直接影响农田土壤水分平衡[48]，实际生产中灌溉决策还需进行动态调整，可在本研究阈值分区的基础上，在播种期基于旬、月尺度降水预报划分丰水、平水、枯水年[49-50]，并结合土壤墒情监测动态优化关键生育期补水方案，减少浅层地下水开采，保障冬小麦稳产。

4　结论

(1)随灌溉量和次数增加，华北地区冬小麦产

量上升、水分利用效率下降;为确保全区域内实现高产,推荐灌溉次数为 2 ~ 3 次。

(2)根据生长季平均降水量 463 mm 和 504 mm 2 条阈值线划分,504 mm 等降水量线以南尤其以河南南部小部分地区为主,灌 1 水即可,463 mm 等降水量线以北大部分区域灌 3 水,463 mm 和 504 mm 区间内区域灌 2 水。

(3)以生育期为单位灌溉,灌 1 水时生长季降水偏少地区返青期灌溉优势明显,其他地区返青期、灌浆期灌溉产量略高于播种期、拔节期灌溉,因此要精准把握灌溉时期,灌 2 水时返青期与灌浆期结合的灌溉组合可实现高产和水分高效利用,灌 3 水时各组合进一步实现高产、稳产,水分利用效率方面效果不显著。

参 考 文 献

[1] 吴东. 基于土壤有效含水量和蒸散的华北冬小麦干旱指数构建[D]. 南京:南京信息工程大学,2021.
Wu Dong. Creation of drought index for winter wheat based on effective soil moisture and evapotranspiration on the North China Plain[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2021. (in Chinese)

[2] 孙爽,杨晓光,李克南,等. 中国冬小麦需水量时空特征分析[J]. 农业工程学报,2013,29(15):72 - 82.
Sun Shuang, Yang Xiaoguang, Li Kenan, et al. Analysis of spatial and temporal characteristics of water requirement of winter wheat in China[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(15): 72 - 82. (in Chinese)

[3] Zhang X Y, Qin W L, Xie J N. Improving water use efficiency in grain production of winter wheat and summer maize in the North China Plain: a review[J]. Front. Agric. Sci. Eng., 2016, 3(1): 25 - 33.

[4] Zheng H, Zheng C, Sun C, et al. Micro-sprinkler irrigation with optimal irrigation regimes maintain grain yields while increasing carbon emission efficiency and water productivity of winter wheat on the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2025, 321: 109933.

[5] Wang S, Mo X, Hu S, et al. Assessment of droughts and wheat yield loss on the North China Plain with an aggregate drought index (ADI) approach[J]. Ecological Indicators, 2018, 87: 107 - 116.

[6] Wu D, Fang S, Li X, et al. Spatial-temporal variation in irrigation water requirement for the winter wheat - summer maize rotation system since the 1980s on the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2019, 214: 79 - 86.

[7] Kong X, Zhang X, Lai R, et al. Groundwater depletion by agricultural intensification in China's HHH Plains, since 1980s[J]. Advances in Agronomy, 2016, 135: 59 - 106.

[8] 王军,赵建伟,尹延飞. 南阳市冬小麦灌溉制度优化措施浅析[J]. 河南水利,2003(1):32.

[9] 陈宗培. 河北平原小麦-玉米不同灌溉制度下产量和水分生产力潜力及差距研究[D]. 保定:河北农业大学,2020.
Chen Zongpei. Potential and gap of yield and water productivity of wheat - maize under different irrigation systems in Hebei Plain [D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2020. (in Chinese)

[10] Qiu G Y, Wang L, He X, 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.

[11] 丁蓓蓓,张雪靓,赵振庭,等. 华北平原限水灌溉条件下冬小麦产量及水分利用效率变化的 Meta 分析[J]. 灌溉排水学报,2021,40(12):7 - 17.
Ding Beibei, Zhang Xueliang, Zhao Zhenting, et al. Change in winter wheat yield and its water use efficiency as affected by limited irrigation in North China Plain: a Meta-analysis[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(12): 7 - 17. (in Chinese)

[12] 陈震,黄修桥,段福义,等. 基于 CROPWAT 模型对不同典型年冬小麦灌溉制度的研究[J]. 灌溉排水学报,2012,31(6):32 - 34,59.
Chen Zhen, Huang Xiuqiao, Duan Fuyi, et al. Winter wheat irrigation scheduling in different hydrological years based on CROPWAT[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2012, 31(6): 32 - 34,59. (in Chinese)

[13] 柳长顺,杜丽娟,王红坤. 农户灌溉决策行为影响因素比较研究[J]. 中国水利,2018(19):36 - 38,42.
Liu Changshun, Du Lijuan, Wang Hongkun. Comparative analysis of influential factors on irrigation decision making of farmers [J]. China Water Resources, 2018(19): 36 - 38,42. (in Chinese)

[14] 陈茂山,戴向前,周飞,等. 关于水费占农业生产成本合理比重的思考:以粮食作物为例[J]. 水利发展研究,2024,24(10):7 - 13.
Chen Maoshan, Dai Xiangqian, Zhou Fei, et al. Reflection on the appropriate proportion of water costs in agricultural production expenses:a case study of grain crops[J]. Water Resources Development Research, 2024, 24(10): 7 - 13. (in Chinese)

[15] Sun Chen, Ren Li. Assessing crop yield and crop water productivity and optimizing irrigation scheduling of winter wheat and summer maize in the Haihe plain using SWAT model[J]. Hydrological Processes, 2014, 28: 2478 - 2498.

[16] Xu X, Zhang M, Li J, et al. Improving water use efficiency and grain yield of winter wheat by optimizing irrigations in the North China Plain[J]. Field Crops Research, 2018, 221: 219 - 227.

[17] Yang X, Wang G, Chen Y, et al. Reduced groundwater use and increased grain production by optimized irrigation scheduling

in winter wheat－summer maize double cropping system：a 16-year field study in North China Plain[J]. Field Crops Research, 2022, 275：108364.

[18] Man J, Shi Y, Yu Z, et al. Dry matter production, photosynthesis of flag leaves and water use in winter wheat are affected by supplemental irrigation in the Huang－Huai－Hai Plain of China[J]. PloS One, 2015, 10(9)：e0137274.

[19] Wang B, Zhang Y, Hao B, et al. Grain yield and water use efficiency in extremely-late sown winter wheat cultivars under two irrigation regimes in the North China Plain[J]. PloS One, 2016, 11(4)：e0153695.

[20] 周丽涛,孙爽,张镇涛,等. 基于 Meta 分析华北冬小麦高产高效协同提升灌溉方案[J]. 中国农业气象,2022,43(7)：515－526.
Zhou Litao, Sun Shuang, Zhang Zhentao,et al. High yield and water use efficiency synergistical improvement irrigation scheme of winter wheat in North China Plain based on Meta-analysis[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2022, 43(7)：515－526.（in Chinese）

[21] Zhang L, Cao Y, Qian W, et al. Spatiotemporal optimization of irrigation practices for winter wheat in China：rationale, implications, and solutions[J]. Agricultural Water Management, 2025, 308：109297.

[22] 胡玮,严昌荣,李迎春,等. 气候变化对华北冬小麦生育期和灌溉需水量的影响[J]. 生态学报,2014,34(9)：2367－2377.
Hu Wei, Yan Changrong, Li Yingchun,et al. Impacts of climate change on winter wheat growing period and irrigation water requirements in the North China Plain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(9)：2367－2377.（in Chinese）

[23] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京：中国统计出版社, 2024：379－385.

[24] 赵广才,常旭虹,王德梅,等. 小麦生产概况及其发展[J]. 作物杂志,2018(4)：1－7.
Zhao Guangcai, Chang Xuhong, Wang Demei,et al. General situation and development of wheat production[J]. Crop Journal, 2018(4)：1－7.（in Chinese）

[25] 陈先冠,冯利平,白慧卿,等. 基于小麦模型算法集成平台的三种水分胁迫算法比较[J]. 农业工程学报,2021,37(16)：47－57.
Chen Xianguan, Feng Liping, Bai Huiqing,et al. Comparison of three water stress algorithms based on the integration platform of wheat model algorithms[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(16)：47－57.（in Chinese）

[26] 陈先冠,冯利平,白慧卿. 小麦模型算法集成平台在华北平原区的适应性评价[J]. 农业工程学报,2023,39(7)：128－136.
Chen Xianguan, Feng Liping, Bai Huiqing. Adaptability of wheat model algorithms integration platform in North China Plain[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(7)：128－136.（in Chinese）

[27] Zheng J, Wang J, Ren W, et al. Modeling the impacts of climate, soil, and cultivar on optimal irrigation amount of winter wheat in the North China Plain[J]. Agronomy Journal, 2020, 112(2)：1176－1189.

[28] Shi X, Shi W, Dai N, et al. Optimal irrigation under the constraint of water resources for winter wheat in the North China Plain[J]. Agriculture, 2022, 12(12)：2057.

[29] Xu X, Zhang Y, Li J, et al. Optimizing single irrigation scheme to improve water use efficiency by manipulating winter wheat sink-source relationships in Northern China Plain[J]. PLoS One,2018, 13(3)：e0193895.

[30] Li J, Inanaga S, Li Z, et al. Optimizing irrigation scheduling for winter wheat in the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2005, 76(1)：8－23.

[31] Feng S, Ding W, Shi C, et al. Optimizing the spatial distribution of roots by supplemental irrigation to improve grain yield and water use efficiency of wheat in the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2023, 275：107989.

[32] Hu C, Delgado J A, Zhang X, et al. Assessment of groundwater use by wheat (*Triticum aestivum* L.) in the Luancheng Xian region and potential implications for water conservation in the Northwestern North China Plain[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 60(2)：80－88.

[33] Zhang Xiying, Qin Wenli, Xie Juanna. Improving water use efficiency in grain production of winter wheat and summer maize in the North China Plain：a review[J]. Frontiers of Agricultural Science and Engineering, 2016, 3(1)：25－33.

[34] Lü L, Yao Y, Zhang L, et al. Winter wheat grain yield and its components in the North China Plain：irrigation management, cultivation, and climate[J]. Chilean Journal of Agricultural Research, 2013, 73(3)：233－242.

[35] Zeng R, Lin X, Welch S M, et al. Impact of water deficit and irrigation management on winter wheat yield in China[J]. Agricultural Water Management, 2023, 287：108431.

[36] Luo Qunying, Gerrit H, Yang Hong. Uncertainties in assessing climate change impacts and adaptation options with wheat crop models[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2022, 149：805－816.

[37] Liu Huan, Xiong W, Diego P,et al. Exploring the uncertainty in projected wheat phenology, growth and yield under climate change in China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2022, 326：109187.

[38] Yang Xu, Zhang Jiahua, Yang Shanshan,et al. Modelling the crop yield gap with a remote sensing-based process model：a case study of winter wheat in the North China Plain[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2023, 22(10)：2993－3005.

[39] Wu Dingrong, Wang Chunyi, Wang Fang,et al. Uncertainty in simulating the impact of cultivar improvement on winter wheat phenology in the North China Plain[J]. Journal of Meteorological Research, 2018, 32(4)：636－647.

（下转第 153 页）

estimating daily reference evapotranspiration in sub-humid and semi-arid climates[J]. Scientific Reports, 2025, 15(1): 2542.

[31] 闫浩芳, 毋海梅, 张川, 等. 基于修正双作物系数模型估算温室黄瓜不同季节腾发量[J]. 农业工程学报, 2018, 34(15): 117 - 125.
Yan Haofang, Wu Haimei, Zhang Chuan, et al. Estimation of greenhouse cucumber evapotranspiration in different seasons based on modified dual crop coefficient model[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(15): 117 - 125. (in Chinese)

[32] Song Y H, Chung E S, Shahid S. Global future potential evapotranspiration signal using Penman-Monteith and Hargreaves-Samani method by latitudes based on CMIP6[J]. Atmospheric Research, 2024, 304: 107367.

[33] 鲁琳君. 基于机器学习的生态系统蒸散发分割及其时空变化[D]. 青岛: 青岛大学, 2024.
Lu Linjun. Partitioning of ecosystem evapotranspiration and its spatiotemporal variations based on machine learning[D]. Qingdao: Qingdao University, 2024. (in Chinese)

[34] 陈图强, 李晗, 黄津辉, 等. 基于机器学习的遥感蒸散发估算研究进展[J]. 水资源保护, 2025, 41(6): 95 - 104.
Chen Tuqiang, Li Han, Huang Jinhui, et al. Research progress on remote sensing evapotranspiration estimation based on machine learning[J]. Water Resources Protection, 2025, 41(6): 95 - 104. (in Chinese)

[35] 张冬冬, 邵延慧, 焦润兴, 等. 滴头流量对不同质地棉田土壤湿润区的影响研究[J]. 绿洲农业科学与工程, 2026, 11(1): 50 - 59.
Zhang Dongdong, Shao Yanhui, Jiao Runxing, et al. Research progress on remote sensing-based evapotranspiration estimation using machine learning[J]. Oasis Agriculture Science and Engineering, 2026, 11(1): 50 - 59. (in Chinese)

[36] 殷文, 柴强, 赵连豪, 等. 西北旱区覆盖措施对土壤水分调控及生态改良效应研究进展[J]. 灌溉排水学报, 2025, 44(6): 11 - 21.
Yin Wen, Chai Qiang, Zhao Lianhao, et al. Effects of mulching on soil water regulation and ecological improvement in arid regions in Northwest China: a review[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2025, 44(6): 11 - 21. (in Chinese)

(上接第 141 页)

[40] Yuan Y, Lin F, Maucieri C, et al. Efficient irrigation methods and optimal nitrogen dose to enhance wheat yield, inputs efficiency and economic benefits in the North China Plain[J]. Agronomy, 2022, 12(2): 273.

[41] Fan Y, Yang Z, Lo M H, et al. Deciphering the capricious precipitation response: irrigation impact in the North China Plain [J]. NPJ Climate and Atmospheric Science, 2025, 8(1): 211.

[42] Koch J, Zhang W, Martinsen G, et al. Estimating net irrigation across the North China Plain through dual modeling of evapotranspiration[J]. Water Resources Research, 2020, 56(12): e2020WR027413.

[43] 王晓燕,尹德超,王雨山,等. 太行山前平原不同灌溉方式对冬小麦耗水规律及产量的影响[J]. 华南农业大学学报, 2026,47(3):422 - 430.
Wang Xiaoyan, Yin Dechao, Wang Yushan, et al. Effects of different irrigation modes on water consumption and yield of winter wheat in the piedmont plain of the Taihang Mountain[J]. Journal of South China Agricultural University, 2026, 47(3): 422 - 430. (in Chinese)

[44] 刘海军,黄冠华,王明强,等. 基于蒸发皿水面蒸发量制定冬小麦喷灌计划[J]. 农业工程学报,2010,26(1):11 - 17.
Liu Haijun, Huang Guanhua, Wang Mingqiang, et al. Sprinkler irrigation scheme of winter wheat based on water surface evaporation of a 20 cm standard pan[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(1): 11 - 17. (in Chinese)

[45] Si Z, Zain M, Mehmood F, et al. Effects of nitrogen application rate and irrigation regime on growth, yield, and water-nitrogen use efficiency of drip-irrigated winter wheat in the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2020, 231:1 - 8.

[46] Yang Rui, Dai Panhong, Wang Bin, et al. Over-optimistic projected future wheat yield potential in the North China Plain: the role of future climate extremes[J]. Agronomy, 2022, 12(1): 145.

[47] Zhuang Huimin, Zhang Zhao, Cheng Fei, et al. Integrating data assimilation, crop model, and machine learning for winter wheat yield forecasting in the North China Plain[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2024,347:109909.

[48] 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)

[49] 茅卫平,王奇,岳琨,等. 数值预报在天气预报中应用技术[C]//中国气象学会. 第33 届中国气象学会年会 S8 数值模式产品应用与评估,2016:261 - 265.

[50] 王浩栋,李佩. 区域尺度冬小麦产量与水分利用效率对灌溉定额和农田蒸散量的响应[J]. 灌溉排水学报,2024,43(8): 47 - 55.
Wang Haodong, Li Pei. The effect of irrigation amount and evapotranspiration on regional-scale winter wheat yield and water use efficiency[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024, 43(8): 47 - 55. (in Chinese)