

不同水文年型下水稻节水灌溉技术方案模拟与评价

陈凯文 俞双恩 李倩倩 张梦婷 王煜 刘子鑫

(河海大学农业工程学院, 南京 210098)

摘要: 为探究适宜的水稻节水灌溉模式,于2016—2017年在蒸渗测坑内进行水稻栽培试验。基于2年试验数据对SWAP-WOFOST模型进行参数的率定与验证,基于1956—2015年60年的降雨资料完成丰、平、枯3种年型的分组,同时改进了SWAP的灌溉排水模块以适应本地化的灌排需求,并由率定后的模型模拟了丰、平、枯3种年型下4种节水灌溉模式的稻田水分运移及水稻生长过程,通过对比不同水文年型下田间水分管理及水稻产量的差异,分析了4种节水灌溉模式的节水、减排与高产效果。结果表明:经率定的SWAP-WOFOST模型可以较好地模拟干湿交替条件下稻田水分运移和水稻生长过程;节水灌溉技术可以减少灌排水量与灌排次数,减少水稻的生理需水和田间渗漏,并能够维持水稻高产,提高水分利用效率;60年模拟期内,控制灌排的灌溉水分生产率在丰、平、枯3种年型下分别为5.52、4.65、3.83 kg/m³,各年型下均为最高,控制灌溉的作物水分生产率在丰、平、枯3种年型下分别为2.45、2.31、2.06 kg/m³,各年型下均为最高。应用熵权TOPSIS模型对水稻节水灌溉技术方案进行评价优选,结果表明,在保证产量的前提下控制灌排模式具有稳健的节水省工效果。

关键词: 水稻; 节水灌溉; 水文年型; 排水; SWAP-WOFOST模型; TOPSIS模型

中图分类号: S274 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)12-0268-10

Simulation and Evaluation of Technical Schemes for Water-saving Irrigation of Rice in Different Hydrological Years

CHEN Kaiwen YU Shuang'en LI Qianqian ZHANG Mengting WANG Yu LIU Zixin

(College of Agricultural Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to explore the suitable water-saving irrigation mode of rice, the cultivation experiment of rice under controlled irrigation and drainage conditions was conducted in the lysimeters from 2016 to 2017. The SWAP-WOFOST model was calibrated and validated against the data in observations of two-year agricultural field experiment. And rainfall data of 60 years were grouped according to the type of hydrological years. At the same time, the irrigation and drainage module of SWAP model was improved to meet the local irrigation and drainage needs. The validated SWAP-WOFOST model was then used to simulate soil moisture transportation and rice growth process. By comparing the difference in field water management and rice yield under different hydrological year scenarios, the effects of four water-saving irrigation modes on reducing irrigation drainage and improving yield were analyzed. The results showed that water-saving irrigation technology could reduce the amount and frequencies of irrigation and drainage, reduce the physiological water demand of rice and field leakage, maintain high yield of rice and improve water use efficiency. During the 60-year simulation period, the irrigation water productivity of controlled irrigation and drainage mode was 5.52 kg/m³, 4.65 kg/m³ and 3.83 kg/m³, respectively for the wet year, normal year and dry year, which was the highest of four modes. Crop water productivity of controlled irrigation mode was 2.45 kg/m³, 2.31 kg/m³ and 2.06 kg/m³, respectively for the wet year, normal year and dry year, which was the highest of four modes. Applying the entropy weighted TOPSIS model to evaluate and optimize the four modes of water-saving irrigation of rice, the results showed that controlled irrigation and drainage mode had a steady effect of water-saving and labor-saving on the premise of guaranteeing yield. Water-saving irrigation technology had guiding significance for irrigation

收稿日期: 2019-04-24 修回日期: 2019-05-11

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51879074, 51479063)

作者简介: 陈凯文(1995—),男,博士生,主要从事水稻节水灌溉研究, E-mail: 1451568389@qq.com

通信作者: 俞双恩(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事水土资源高效利用研究, E-mail: seyu@hhu.edu.cn

and drainage practices in rice-growing areas of Southern China.

Key words: rice; water-saving irrigation; hydrological year; drainage; SWAP – WOFOST model; TOPSIS model

0 引言

水稻是我国主要的粮食作物之一,我国南方地区水稻种植面积占全国水稻种植面积的 78.9%^[1]。作为一种喜湿耐淹作物,水稻全生育期内需要消耗大量水。近年来随着城镇化进程加快,工业和城市居民用水增加,农业可用水量呈下降趋势,水资源不足是制约水稻种植的重要瓶颈,水稻节水灌溉势在必行。研究表明,合理地调控农田水分状况是实现水稻高产、稳产的基础,对提高水资源利用效率、减轻农业面源污染具有重要意义^[2-3]。

水稻生长发育与耗水不仅与水管理模式有关,而且受不同水文年型的影响,需要进一步研究分析与评估科学、合理的水稻灌排制度。长系列的田间灌排试验是制定水稻节水高效灌排制度的重要依据,但是多年的田间试验需要大量人力、物力和财力,尤其是进行多因子耦合试验。运用农业水文模型模拟不同条件下农田水分变化和作物生长情况,为研究不同气候情景下水稻生长与需水规律提供了有效途径。其中,SWAP – WOFOST 模型综合考虑了植株蒸腾、棵间蒸发与根系吸水等过程,并耦合了作物光合、呼吸和干物质积累过程^[4],可以从机理上认识农田水分转化过程和作物耗水规律,为定量分析水稻生长与节水减排等问题提供了重要的技术支撑。

目前,国内外多应用 SWAP (Soil – Water – Atmosphere – Plant) 模型模拟土壤包气带的水、热及溶质的运移,并结合 WOFOST (World food studies) 模型研究与植物生长的交互作用。缴锡云等^[5]基于江苏省高邮灌区的田间试验,在格田尺度上研究并确定了 SWAP 模型在稻田水分运移模拟的应用条件。李小梅等^[6]通过不同灌溉制度下灌水水平、土壤水势及水稻产量等试验资料,对 SWAP 模型模拟旱稻灌溉制度及作物生长的适应性进行了验证。XUE 等^[7]针对春小麦、春玉米和向日葵 3 种主要作物,应用 SWAP – WOFOST 模型进行了参数率定和验证,探讨了这 3 种作物合理的咸淡水轮灌模式及对耕作层土壤的影响。目前,SWAP – WOFOST 模型运用多见于北方干旱、半干旱地区,而对于南方地区水稻干湿交替条件下的研究尚不多见。

本文利用大型蒸渗测坑水稻控制灌排的试验资料,结合南方水稻灌区实际情况^[8],通过改进 SWAP

模型的灌溉排水模块,以适应本地化的灌排需求,由 SWAP – WOFOST 模型模拟不同年型下多种情景的农田水分动态变化和水稻的生长过程,分析丰、平、枯 3 种年型下不同节水灌溉模式的水稻需水及产量变化,评估适宜的水稻节水灌溉模式,以期为指导南方稻作区灌排实践提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验分别于 2016 年和 2017 年 5—10 月在河海大学南方地区高效灌排与农业水土环境教育部重点实验室节水与农业生态试验场内进行。试验区 (31.92°N, 118.79°E) 属于亚热带湿润气候,年均降雨量 1 021.3 mm,其中 5—9 月降雨量占年平均降雨量的 60% 以上,年均蒸发量 900 mm,年平均无霜期 237 d,年平均气温 15.7℃,日照时数 2 212.8 h。试验区共有 32 个长 2.5 m、宽 2.0 m 的蒸渗测坑,按南北方向布置,共 2 排,每排 16 个,地面设移动式雨棚,地下为廊道及设备室。土壤 pH 值为 6.82,有机质质量分数 2.19%,氮质量比 0.98 g/kg,全磷质量比 1.12 g/kg,其他主要物理性质见表 1。

表 1 供试土壤的主要物理性质

Tab.1 Main physical properties of soil in experiment site

土壤深度/ cm	容重/ (g·cm ⁻³)	土壤粒径质量分数/%		
		砂粒	粉粒	粘粒
0 ~ 20	1.36	40.12	38.21	21.67
20 ~ 40	1.40	39.12	39.16	21.72
40 ~ 60	1.43	39.04	39.95	21.01
60 ~ 150	1.48	40.25	38.12	21.63

1.2 试验控水方案设计

结合南方地区水稻生长特点及气候条件,参照文献^[9],设计不同的处理控水方案(表 2)。各处理田面有水层时,保持 2 mm/d 的田间渗漏量,田间水层深度超出上限时人工辅助抽排至蓄雨上限;田面无水层时,禁止地下排水。供试水稻品种为南粳 9108,2016 年为 6 月 23 日移栽,10 月 20 日收割;2017 年为 6 月 29 日移栽,10 月 25 日收割。全生育期共施肥 3 次,基肥为氮磷钾复合肥(N、P、K 质量比为 15:15:15),施肥量 900 kg/hm²;分蘖肥与穗肥均为尿素(氮质量分数为 46.4%),施肥量均为 100 kg/hm²。

1.3 测定指标与方法

(1)气象数据。由节水园区内的气象站观测气

表 2 各处理控水方案
Tab.2 Water control program of each treatment

处理	农田水位/cm			
	分蘖期	拔节孕穗期	抽穗开花期	乳熟期
对照(CK)	1、3、6	1、3、10	1、3、10	1、3、10
控制灌排(浅蓄)(T1)	-20、3、6	-30、3、10	-20、3、10	-30、3、10
控制灌排(深蓄)(T2)	-20、3、10	-30、3、15	-20、3、15	-30、3、15

注:左侧数值为控水下限,中间数值为灌水上限,右侧数值为蓄雨上限。农田水位以田面为“0”,正值表示田面水层深度,负值表示农田地下水的埋深,下同。

象要素,包括降水量、最高温度、最低温度、相对湿度、风速、日照时长等,1956—2015 年的长序列气象资料来自中国气象科学数据共享服务网(<http://data.cma.cn/>)提供的南京(StationID:58238)气象数据。

(2)农田水位、土壤含水率及灌排水量。当田面有水层时,通过竖尺在固定观测点测量田面水层深度。无水层时则由地下水位观测井观测并记录各处理的地下水埋深。蒸渗测坑中田面无水层及受旱时期,采用土钻取土法采样,由干燥法测定 0 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm、40 ~ 60 cm 土层的土壤质量含水率。灌排水量均接流量计进行测量,每天 09:00 对农田水分进行调控。

(3)水稻生长指标。叶面积指数(Leaf area index,LAI):每 5 d 使用 LAI-2000 型叶面积仪(LI-COR,美国)定时观测水稻群体 LAI。株高:水稻移栽前测量 1 次株高,从分蘖期开始,每隔 5 d 定点观测 6 穴株高,用竖尺测量作物地面以上的长度(不包括根部),扬花前为田面至最高叶尖的高度,扬花后为田面至穗顶(不计芒)的高度。考种:每个处理随机选取 5 穴,测量每穴的穗长、穗数及干物质的质量,脱粒、晒干并计产。

1.4 试验模型

1.4.1 土壤水分运动

SWAP 模型将土壤水分简化为垂向一维运动,

并采用经典的 Richards 方程予以描述。对于土壤水力特性,即土壤持水曲线和非饱和水力传导率函数,采用 Mualem-van Genuchten 模型进行计算,计算式为

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)^m}$$

$$K(h) = K_s S_e^\lambda [1 - (1 - S_e^{\frac{1}{m}})^m]^2$$

其中

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$$

$$m = 1 - \frac{1}{n}$$

- 式中 θ_s ——土壤饱和含水率,cm³/cm³
 θ_r ——土壤残余含水率,cm³/cm³
 h ——土壤压力水头,cm
 θ ——土壤含水率,cm³/cm³
 α ——进气值倒数,cm⁻¹
 K_s ——土壤饱和水力传导率,cm/d
 $K(h)$ ——土壤非饱和水力传导率,cm/d
 m ——经验系数
 λ ——孔径连通系数
 n ——孔径分布系数
 S_e ——相对饱和度

根据土壤组分,利用 RETC 软件生成模型所需的 van Genuchten 模型的输入参数,经率定后的参数取值见表 3。

表 3 率定后 SWAP 模型的主要输入参数
Tab.3 Calibrated values of primary input parameters for SWAP model

土壤深度/ cm	残余含水率/ (cm ³ ·cm ⁻³)	饱和含水率/ (cm ³ ·cm ⁻³)	进气值倒数/ cm ⁻¹	孔径分布 系数	饱和水力传导率/ (cm·d ⁻¹)	孔径连通 系数
0 ~ 20	0.065 9	0.417 5	0.009 5	1.525 5	15.19	0.5
20 ~ 40	0.065 3	0.408 2	0.009 5	1.521 1	12.48	0.5
40 ~ 60	0.063 4	0.399 7	0.009 6	1.512 7	11.27	0.5
60 ~ 150	0.062 7	0.390 6	0.010 8	1.483 8	9.08	0.5

1.4.2 作物需水量

模型采用 FAO 推荐的 Penman-Monteith 公式^[10]计算作物潜在腾发量 ET_p 。在田面有植株覆盖的情况下,模型利用叶面积指数和土壤覆盖率将

作物潜在腾发量划分为土壤潜在蒸发量 E_p 及作物潜在蒸腾量 T_p 。在湿润土壤表面,实际蒸发量主要由气象条件控制,等于土壤的潜在蒸发量 E_p 。当土壤变干时,土壤表面可传输的最大蒸发量 E_{max} 通过

达西定律进行计算^[4],然后模型取 E_p 和 $E_{\max}$ 中的较小值作为实际的土面蒸发量 E_a 。而作物实际蒸腾量 T_a 则等于根系吸水分布函数对水稻根区进行积分。

1.4.3 作物生长

WOFOST 模型模拟作物生长及产量,能够模拟详细的作物光合、呼吸和干物质积累过程,具体模型

介绍见文献[4]。该模型在南方水稻作物中研究得较少,参考 Oryza2000 模型中相同参数的默认值及相关文献的研究结果^[11-13]对模型的水稻初始生长参数进行设置,模型中水稻不同生育期的株高和叶面积指数均来自于蒸渗测坑试验观测。根据 2016 年和 2017 年的试验数据对作物主要生长参数进行率定,结果如表 4 所示。

表 4 率定后的 WOFOST 模型作物生长参数

Tab.4 Calibrated values of primary crop biological parameters for WOFOST model

参数	数值	参数	数值
从出苗到开花所需积温/℃	1 450	初始根深/cm	5
从开花到成熟所需积温/℃	850	作物最大扎根深度/cm	80
适宜条件下叶片生命期/d	30	根系吸水土壤水压上限/cm	-10
同化物转移至叶片的效率/(kg·kg ⁻¹)	0.754	适宜根系吸水条件下上层土壤水压上限/cm	-20
同化物转移至籽粒的效率/(kg·kg ⁻¹)	0.688	适宜根系吸水条件下下层土壤水压上限/cm	-20
同化物转移至根的效率/(kg·kg ⁻¹)	0.754	高潜在腾发条件下根系吸水土壤水压下限/cm	-300
同化物转移至茎的效率/(kg·kg ⁻¹)	0.754	低潜在腾发条件下根系吸水土壤水压下限/cm	-600

1.4.4 模型评价标准

采用相对误差(Relative error,RE)、纳什效率系数(Nash-Sutcliffe efficiency coefficient,NSE)、均方根误差(Root mean square error,RMSE)和决定系数 R^2 对模型进行定量评价^[14]。其中, R^2 越接近 1、RMSE 越接近 0,说明模型模拟效果越好。而 NSE 的取值范围为 $-\infty \sim 1$,数值越接近 1 则模拟得越好。

1.4.5 模拟方案设置

借助江苏省水稻灌溉方面多年积累的实际经验,《江苏省水稻节水灌溉技术规范》(DB32/T 2950—2016)对水稻节水灌溉技术类型、技术要点和实施要求等提出明确规定^[8],并逐步在全省范围内进行推广。根据规范及参考文献[15-16],拟定 4 种水稻节水灌溉模式,如表 5 所示。

表 5 不同生育期水稻节水灌溉田间水分调控指标

Tab.5 Water control thresholds of water-saving irrigation of rice at different growth stages

节水灌溉模式	控制指标	返青期	分蘖期	拔节孕穗期	抽穗开花期	乳熟期
浅水勤灌(S1)	灌水上限/mm	30	30	30	30	30
	灌水下限/mm	10	10	10	10	10
	蓄雨上限/mm	80	120	200	200	100
浅湿灌溉(S2)	灌水上限/mm	30	10	30	30	10
	灌水下限	20 mm	70% θ_s	80% θ_s	90% θ_s	80% θ_s
	蓄雨上限/mm	80	120	200	200	100
控制灌溉(S3)	灌水上限	30 mm	100% θ_s	100% θ_s	100% θ_s	100% θ_s
	灌水下限	10 mm	60% θ_s	70% θ_s	80% θ_s	70% θ_s
	蓄雨上限/mm	70	80	150	150	80
控制灌排(S4)	灌水上限/mm	30	30	30	30	30
	灌水下限/mm	10	-200	-300	-200	-300
	蓄雨上限/mm	100	100	150	150	150

采用 Fortran90 语言进行编程,对 SWAP 模型的灌溉排水模块进行本地化改进:在地表径流计算模块中将作物生长的积温计算作为回调函数,允许按照积温来划分不同生育期的最大积水深度(蓄雨上限);根据输入的灌水阈值,判断是土壤含水率还是农田水位的指标,以满足在同一灌溉技术体系内两种指标的切换要求;增加灌水指标的数组上界,在分蘖期末(浅水勤灌模式下)和黄熟期不设置灌水、并

将蓄雨上限设为 0 cm,分别模拟排水晒田和田面落干。同时设置判定雨天的 24 h 降雨量阈值为 0.5 cm/d,避免模型在阴雨天进行不必要的灌溉,以模拟现实情况下的稻田灌排。

2 结果与分析

2.1 模型验证及适用性评价

通过 2016 年和 2017 年 2 年试验监测,利用

2016 年的 3 种试验处理的观测资料对模型参数进行率定,再由 2017 年的试验数据验证校正后的模型。模型的上边界选取有地表积水的大气边界,土体下边界设在 150 cm 处,下边界条件为每天实测蒸渗测坑的地下排水量。模拟初始时刻田面为泡田水层,则模型的初始条件为各蒸渗测坑中实测的水层深度。蒸渗测坑四周均为不透水边界。

如图 1 所示,稻田田面水层深度模拟值与实测值的数据点均落在 1:1 线附近。由表 6 可知,田间水层深度模拟值与实测值的 RMSE 在 0.54 ~

0.98 cm,NSE 均不小于 0.935,决定系数 R^2 均不小于 0.880;在田面无水层及晒田、落干等时期取土样,由干燥法测土壤含水率,其模拟值与实测值的 RMSE 在 0.007 ~ 0.010 cm^3/cm^3 ,NSE 均不小于 0.813,决定系数 R^2 均不小于 0.831。如表 7 所示,率定期水稻产量分布在实测产量 6.1% 误差以内,而验证期水稻产量略低于实测值,但相对误差均在 5% 以内。由此说明,率定后的 SWAP – WOFOST 模型较好地适应南方地区水稻生长条件,能够较好地模拟稻田干湿交替情况下的土壤水分变化及作物生长过程。

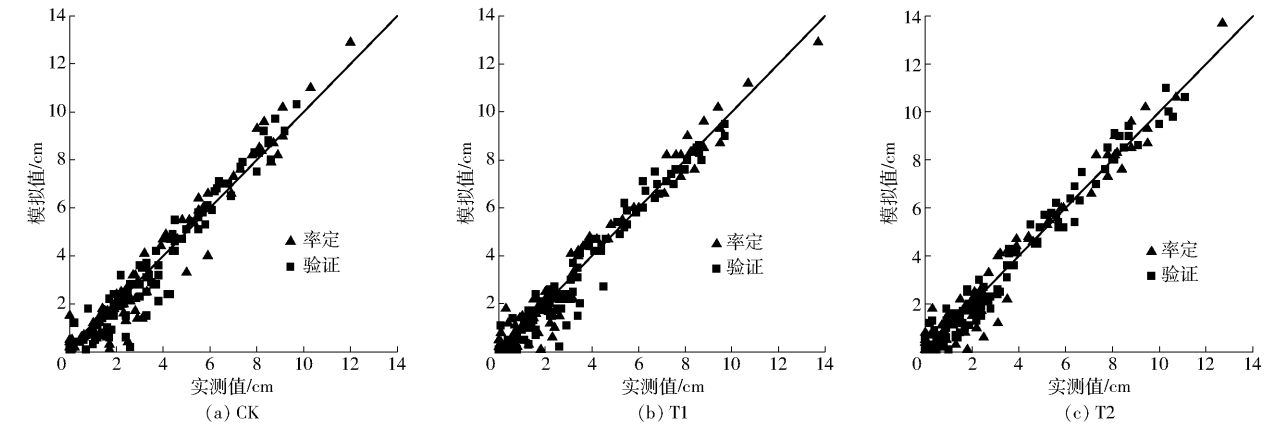


图 1 稻田水层深度模拟值与实测值比较结果

Fig. 1 Comparison of simulated and observed values of ponded water depth

表 6 稻田水分运移的模拟结果统计参数

年份		田面水层深度			土壤含水率		
		RMSE/cm	NSE	R^2	RMSE/($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	NSE	R^2
2016	CK	0.66	0.943	0.906	0.007	0.870	0.873
	T1	0.63	0.958	0.922	0.008	0.858	0.904
	T2	0.98	0.935	0.880	0.009	0.813	0.884
2017	CK	0.66	0.950	0.889	0.007	0.869	0.871
	T1	0.56	0.957	0.918	0.010	0.823	0.831
	T2	0.54	0.964	0.941	0.009	0.854	0.911

表 7 水稻产量模拟值与实测值比较

Tab. 7 Comparison of simulated and observed values for rice yield				
年份	处理	实测值/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	模拟值/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	相对误差/ %
2016	CK	8 236	8 742	6.1
	T1	8 559	8 845	3.3
	T2	7 946	7 621	-4.1
2017	CK	8 567	8 241	-3.8
	T1	8 883	8 506	-4.2
	T2	8 354	8 021	-4.0

2.2 灌排试验数据分析

对 2 年的测坑灌排试验数据取平均,全生育期内,对照、控制灌排(浅蓄)和控制灌排(深蓄)的灌溉定额为 347.8、322.7、299.0 mm,地表排水量分别

为 216.7、201.3、185.1 mm。即与 CK 相比,T1 和 T2 处理的灌溉定额分别减小了 7.2% 和 14.0%,T1 和 T2 处理的地表排水量分别减小了 7.1% 和 14.6%,有效利用了天然降雨。由表 7 可知,与 CK 相比,T1 产量增加了 3.8%,T2 产量减小了 3.0%,水稻年均产量为控制灌排(浅蓄)最大、对照次之、控制灌排(深蓄)最小。CK、T1 和 T2 处理的灌溉水分生产率分别为 2.42、2.70、2.73 kg/m^3 ,在 2 年试验期内控制灌排(深蓄)处理的灌溉水分生产率均为最高,并充分蓄集雨水,在灌排实践中达到了节水省工的目的。

2.3 不同年型的灌排方案模拟分析

2.3.1 水文年型划分

根据 1956—2015 年 60 年降雨资料,分别统计

各年份水稻主要生育期 6—10 月之间的降雨量之和,并进行排频计算,由皮尔逊-Ⅲ型适线法可以得到不同年型的生育期降雨量,并对降雨频率 $p \leq 37.5\%$ 、 $37.5\% < p \leq 62.5\%$ 和 $p > 62.5\%$ 分别划分

为丰水年组、平水年组、枯水年组^[17],其中丰水年和枯水年组均有 22 年,平水年组有 16 年,各年型分组情况见表 8。设立了 4 种节水灌溉方案,每种节水灌溉方案模拟 60 年,即模型共模拟 240 次。

表 8 1956—2015 年水文年型分组
Tab.8 Hydrological year groups from 1956 to 2015

年型	年份	数量
丰水年	2015、1991、2003、1975、1962、1956、2011、1999、2009、1969、1983、1996、1974、2007、1987、2010、1972、1989、1980、1982、1970、1998	22
平水年	1981、1971、2000、1958、1961、2014、2005、1965、1985、1963、1984、2013、2008、2006、1957、1993	16
枯水年	1979、1976、1988、1973、2002、1992、2012、2004、1977、1968、1986、1990、1964、1997、1995、1960、1967、2001、1959、1978、1994、1966	22

2.3.2 节水减排效果分析

不同节水灌溉模式下水稻灌排水量与频次多年平均的统计结果见表 9。其中,将 24 h 累计降雨量大于 50.0 mm 的降雨记为暴雨,将 24 h 累计降雨量大于 25.0 mm 的降雨记为大雨,对 1956—2016 年水稻全生育期的降雨量、暴雨次数和大雨次数进行统计。

由表 9 可知,降雨量对稻田灌排具有明显影响。同一节水灌溉模式下,水稻本田期内降雨量越大,则所需灌溉定额越小,排水量越大。以控制灌溉为例,丰水年和平水年的水稻灌水量比枯水年分别减小 29.6% 和 16.7%,灌水次数比枯水年分别减少 16.9% 和 11.7%;而控制灌溉在枯水年和平水年的排水量比丰水年分别减小 89.4% 和 60.4%,排水次数比丰水年分别减少 78.4% 和 51.2%。由于减小了排水量和排水次数,充分利用天然降雨,不同的节水灌溉模式均减小了水稻灌溉定额和灌溉次数,以实现控灌减排、节省人工的效果。

同一年型下,不同节水灌溉模式的灌水量由大到小依次为浅水勤灌、控制灌排、浅湿灌溉、控制灌溉。由于控制灌溉模式下地表不需要维持水层,仅保持稻田土壤湿润即可,4 种模式的灌水次数均为控制灌溉最小,浅水勤灌最大。而对于稻田的排水量和排水次数,浅水勤灌模式最大,其他 3 种节水灌溉模式较为接近。以丰水年组为例,对比浅水勤灌,浅湿灌溉、控制灌溉和控制灌排 3 种模式的节水率分别为 34.4%、47.6% 和 32.6%,排水量分别减少 9.8%、12.2% 和 13.8%,灌水次数分别减少 25.7%、36.6% 和 33.7%,排水次数分别减少 11.4%、10.7% 和 10.7%,有利于降低农民负担、减少劳动强度。与浅湿灌溉相比,另外 3 种节水灌溉模式在枯水年的排水次数均小于 3 次,且小于大雨次数,平水年的排水次数与大雨次数均小于 7 次,说明节水灌溉模式有效发挥了稻田的湿地作用,提供的蓄滞“库容”能够有效承纳雨水、减轻防洪压力。

表 9 不同年型下水稻不同节水灌溉模式的控灌减排效果
Tab.9 Effect of reducing irrigation and drainage under different irrigation and drainage patterns in different hydrological years

年型	节水灌溉模式	降雨量/mm	暴雨次数	大雨次数	灌水量/mm	灌水次数	排水量/mm	排水次数
丰水年	浅水勤灌	699.7 ± 119.5	3.6 ± 1.4	8.5 ± 1.6	273.0 ± 67.4	10.1 ± 2.6	376.7 ± 108.1	14.0 ± 4.1
	浅湿灌溉				178.9 ± 47.0	7.5 ± 1.2	340.5 ± 107.2	12.4 ± 4.4
	控制灌溉				143.3 ± 26.4	6.4 ± 0.9	330.8 ± 113.6	12.5 ± 4.8
	控制灌排				184.0 ± 64.3	6.7 ± 1.9	325.2 ± 120.5	12.5 ± 3.9
平水年	浅水勤灌	502.6 ± 85.6	2.3 ± 1.0	6.1 ± 1.4	317.1 ± 90.3	11.4 ± 3.2	185.8 ± 52.5	9.6 ± 2.9
	浅湿灌溉				214.5 ± 66.5	7.9 ± 1.6	141.2 ± 56.4	6.8 ± 2.4
	控制灌溉				168.5 ± 45.0	6.8 ± 1.5	131.1 ± 58.6	6.0 ± 2.3
	控制灌排				234.9 ± 89.6	7.8 ± 2.6	140.3 ± 61.9	6.1 ± 2.4
枯水年	浅水勤灌	339.3 ± 88.8	1.1 ± 0.9	3.7 ± 1.5	402.1 ± 92.5	13.9 ± 3.5	76.2 ± 54.0	5.0 ± 2.4
	浅湿灌溉				269.5 ± 65.1	8.9 ± 1.5	38.6 ± 47.3	2.6 ± 2.7
	控制灌溉				202.5 ± 54.8	7.7 ± 1.9	35.8 ± 42.6	2.6 ± 3.2
	控制灌排				320.5 ± 93.3	10.0 ± 2.8	39.7 ± 32.2	2.7 ± 2.5

2.3.3 节水高产效果分析

稻田水分管理除了调节田面水层、满足水稻生理需水(主要为蒸腾蒸发)外,还需要维持一定的田间渗漏量。从表 10 可知,同一节水灌溉模式下,不同年型的腾发量由大到小依次为枯水年、平水年、丰水年。这是因为枯水年晴好天气较多,净太阳辐射更大,则相同节水灌溉模式下枯水年蒸腾蒸发量更高。另外,丰水年稻田蓄雨次数多、雨量大,丰水年的稻田渗漏量也高于平水年和枯水年。以控制灌溉为例,枯水年和平水年的腾发量比丰水年分别增加了 16.4% 和 10.1%,而渗漏量比丰水年分别减小了

21.8% 和 3.6%。可见在节水灌溉模式下,降雨量越小的年份,水稻用于蒸腾蒸发的生理需水越多,进行田间渗漏的生态用水越少。

而对于同一年型,水稻腾发量一般为浅水勤灌模式最大,控制灌溉与控制灌排模式较小,渗漏量由大到小依次为浅水勤灌、控制灌排、浅湿灌溉、控制灌溉。以丰水年组为例,控制灌溉的腾发量比浅水勤灌减小了 5.4%,渗漏量减少了 21.4%。由于浅水勤灌需要保持田面薄水层,在地表有积水情况下土壤蒸发量按水面蒸发进行计算,同时地表水头越高渗漏量也越大,不利于减少田间耗水。

表 10 不同年型下水稻不同节水灌溉模式的田间耗水量和产量

Tab. 10 Field water consumption and yield of rice under different water-saving irrigation modes in different hydrological years				
年型	节水灌溉模式	腾发量/mm	渗漏量/mm	产量/(kg·hm ⁻²)
丰水年	浅水勤灌	354.4 ± 64.5	280.3 ± 10.5	7 940.3 ± 844.4
	浅湿灌溉	336.4 ± 67.9	242.8 ± 19.1	8 163.2 ± 809.9
	控制灌溉	335.2 ± 65.8	219.6 ± 35.7	7 917.4 ± 817.8
	控制灌排	331.7 ± 53.4	268.6 ± 10.0	8 129.2 ± 756.9
平水年	浅水勤灌	388.7 ± 59.7	282.8 ± 7.8	8 310.6 ± 527.4
	浅湿灌溉	372.9 ± 59.7	241.6 ± 21.4	8 596.9 ± 468.0
	控制灌溉	369.3 ± 63.1	211.6 ± 36.5	7 843.0 ± 524.0
	控制灌排	363.7 ± 61.1	271.7 ± 8.5	8 372.1 ± 565.5
枯水年	浅水勤灌	422.5 ± 61.7	282.9 ± 7.3	7 915.5 ± 776.4
	浅湿灌溉	395.1 ± 65.4	221.7 ± 30.8	8 142.5 ± 637.7
	控制灌溉	390.2 ± 60.7	171.9 ± 37.9	7 764.7 ± 627.6
	控制灌排	395.1 ± 57.9	269.1 ± 9.5	8 109.6 ± 622.6

取水稻生育期内降雨量与排水量之差占降雨量的百分数作为稻田雨水利用率,取水稻产量与作物需水量的比值为作物水分生产率,而水稻产量与灌水量的比值为灌溉水分生产率。不同节水灌溉模式的雨水利用率和水分生产率如图 2 所示。其中各年型下浅水勤灌的雨水利用率均为最小,在丰、平、枯 3 种年型下雨水利用率分别为 46.1%、63.0% 和

77.6%;浅湿灌溉、控制灌溉和控制灌排 3 种模式丰水年的雨水利用率大于 51.3%,平水年大于 71.9%,枯水年大于 88.3%,蓄雨效果良好。降雨量越少的年份,节水灌溉模式的雨水利用率越高,而灌溉水分生产率和作物水分生产率均有所降低。控制灌排的灌溉水分生产率在丰、平、枯 3 种年型下分别为 5.52、4.65、3.83 kg/m³,各年型下均为最高;控

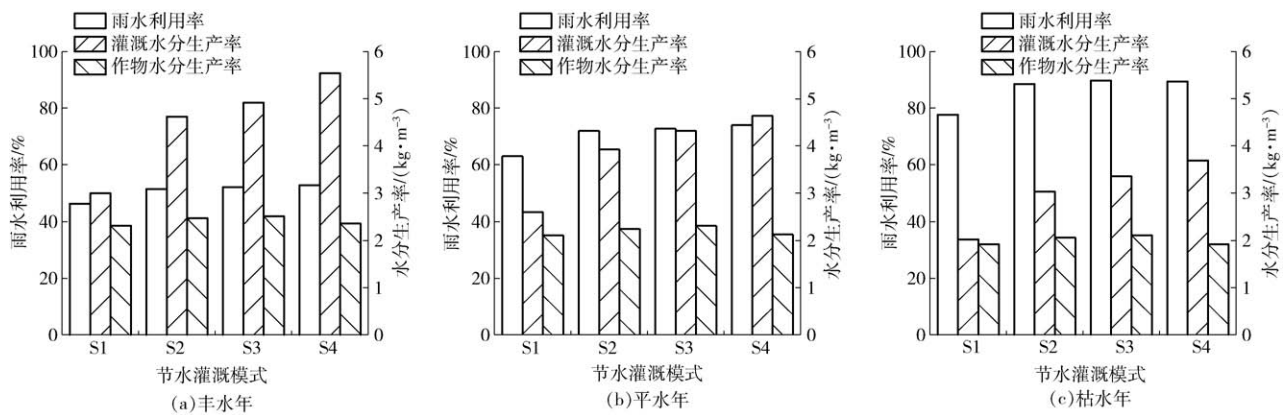


图 2 不同年型下水稻不同节水灌溉模式的雨水利用率和水分生产率

Fig. 2 Rainfall utilization efficiency and water productivity of rice under different water-saving irrigation modes in different hydrological years

制灌溉的作物水分生产率在丰、平、枯 3 种年型下分别为 2.45、2.31、2.06 kg/m³,各年型下均为最高。由于南方地区雨热同期,既是水稻主要生育期,也是南方地区主汛期,稻作区提高蓄雨效果,减少稻田排水,一方面有利于减少稻田氮磷排放、降低面源污染的风险^[18],另一方面通过稻田调蓄汛期雨水,有利

于减轻防洪排涝压力^[19],同时能保证水稻不严重减产。如表 11 所示,各种年型下 4 种节水灌溉模式的作物产量相差不大,浅湿灌溉产量最高,控制灌溉产量最低。与浅湿灌溉相比,控制灌溉丰、平、枯 3 种年型的减产率依次为 3.0%、8.8% 和 4.6%,但灌溉水分生产率分别提高了 21.1%、16.1% 和 26.9%。

表 11 评价指标层及各指标赋值
Tab. 11 Evaluation index layer and indices assignment

年型	节水灌溉模式	节水		省工		高产
		灌水量/mm	雨水利用率/%	灌溉次数	排水次数	产量/(kg·hm ⁻²)
		逆向	正向	逆向	逆向	正向
丰水年	浅水勤灌	273.0	46.2	10.1	14.0	7 940.3
	浅湿灌溉	178.9	51.3	7.5	12.4	8 163.2
	控制灌溉	143.3	52.7	6.4	12.5	7 917.4
	控制灌排	184.0	53.5	6.7	12.5	8 129.2
平水年	浅水勤灌	317.1	63.0	11.4	9.6	8 310.6
	浅湿灌溉	214.5	71.9	7.9	6.8	8 596.9
	控制灌溉	168.5	73.9	6.8	6.0	7 843.0
	控制灌排	234.9	72.1	7.8	6.1	8 372.1
枯水年	浅水勤灌	402.1	77.5	13.9	5.0	7 915.5
	浅湿灌溉	269.5	88.6	8.9	2.6	8 142.5
	控制灌溉	202.5	89.4	7.7	2.6	7 764.7
	控制灌排	320.5	88.3	10.0	2.7	8 109.6

2.4 灌排方案评价优选

为指导南方稻作区灌排实践,采用熵权 TOPSIS 模型,结合模型 60 年的模拟结果,从节水、省工和高产 3 个角度对推荐的 4 种节水灌溉技术方案进行优选。熵权 TOPSIS 模型计算方法详见文献[20],由 Matlab 编写算法实现方案优选。选取 1 级指标层为节水、省工和高产 3 个指标,2 级指标层在节水方面选择灌水量和雨水利用率 2 个指标,省工方面采用灌水次数和排水次数 2 个指标,高产方面则选择了水稻的籽粒产量作为评价指标,评价指标层及各指标赋值如表 11 所示。

熵权 TOPSIS 模型计算所得的相对贴近度越大,表示越接近于最优方案,由图 3 可知,综合考虑节水、省工、高产 3 种效应,丰水年为控制灌排与浅湿灌溉较优,平水年为控制灌排与控制灌溉较优,枯水年为浅湿灌溉与控制灌排较优。由于控制灌排模式的农田水位指标易于观测、便于操作,与土壤含水率指标相比,有利于指导农民的稻作实践^[9],同时控制灌排模式在保证产量的前提下具有稳健的节水省工效果,实际生产中有重要的推广运用价值。

3 讨论

本试验结果表明水稻控制灌排能够节水、高产,并提高了水分生产率。和玉璞等^[21]研究发现,节水

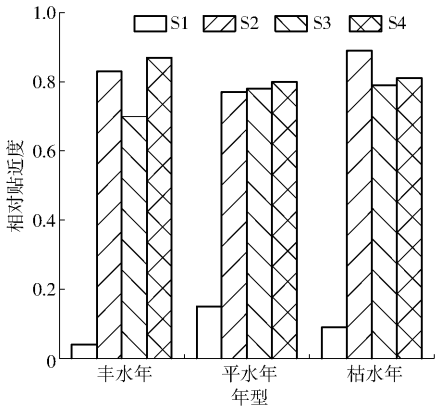


图 3 不同年型下水稻不同节水灌溉模式的熵权 TOPSIS 模型相对贴近度

Fig. 3 Relative adjacency of entropy weighted TOPSIS model under different water-saving irrigation modes in different hydrological years

灌溉与控制排水耦合调控能有效降低水稻各生育阶段的需水强度,减少灌水量,而保持稳定的水稻产量,使得水稻水分生产效率进一步增加。本试验 3 种处理的产量大于 7 946 kg/hm²,水分生产率高于和玉璞等^[21]研究中的 0.97 ~ 1.54 kg/m³以及 TAN 等^[22]研究中的 0.80 ~ 1.24 kg/m³,这可能与土壤质地、灌水量和肥料施用量有密切联系。由于本试验在蒸渗测坑内开展,小尺度的精细管理便于清理杂草、减少水分和肥料流失,有利于提高产量,而在大

田尺度下,土壤与水稻生长条件还存在较大的空间变异性。试验中稻田土壤包气带存在饱和与非饱和频繁交替的情况,土壤处于反复地脱湿与吸湿的过程,土壤落干时期土壤含水率模拟值与实测值的NSE均不小于0.813,决定系数 R^2 均不小于0.831,田面淹水情况下积水层深度的RMSE在0.54~0.98 cm之间,NSE均不小于0.935,决定系数 R^2 均不小于0.880,与采用HYDRUS-1D模型模拟干湿交替稻田中土壤水分变化动态的研究^[23] 相比,SWAP模型表现良好。试验所用蒸渗测坑四周布置有隔水挡板,模拟时将其概化为不透水边界,计算结果中的田间耗水不考虑稻田的侧向渗漏。而南方灌区稻作区的沟、田水体具有相互影响、协同控制的特点^[24],不同节水灌溉模式需要进一步在大田尺度及灌区尺度和不同地理分区中进行验证与推广。

水稻生长依赖于雨热同期的环境条件,夏季正是南方地区高温和降雨易发期。高温胁迫及高温与水分交互胁迫同样会导致田间耗水过程改变,影响水稻生长过程和最终的产量^[25]。在综合考虑节水、省工、高产3种效应前提下,本研究灌排方案评价中虽然浅水勤灌模式相对贴适度均为最低,各年型下表现一般,但浅水勤灌模式在水稻全生育期大部分时间内保持薄水层,有利于维持地温、改善农田小气候,对维持水稻高产具有重要意义。文献[26-28]表明,水稻节水灌溉技术有利于削减氮磷负荷、减少化肥及农药的流失和温室气体的排放,因此灌排方案的优选同样需要考虑减排控污的优点^[29]。同时,在未来气候变化的增温情景下,水文与气候条件的变化影响着水稻作物耗水与灌溉需水规律^[30],不同节水灌溉模式的运用前景和稳健性有待进一步研究。

4 结论

(1)结合2年的试验监测,利用改进后的SWAP-WOFOST模型对干湿交替条件下稻田水分运移和水

稻生长过程进行模拟。土壤落干时期土壤含水率模拟值与实测值的RMSE在0.007~0.010 cm³/cm³之间,NSE均不小于0.813,决定系数 R^2 均不小于0.831;田面淹水情况下积水层深度的RMSE在0.54~0.98 cm之间,NSE均不小于0.935,决定系数 R^2 均不小于0.880,模拟效果较好。经率定后的SWAP-WOFOST模型可用于模拟稻田水分运移和水稻生长过程,为稻田水文研究提供便捷可行的方法。

(2)与浅水勤灌相比,丰、平、枯不同水文年型下浅湿灌溉、控制灌溉和控制灌排3种节水灌溉模式均能有效地削减灌排水量,减少灌溉与排水频次,有利于减轻田间管理负担。以丰水年组为例,对比浅水勤灌,浅湿灌溉、控制灌溉和控制灌排3种模式的节水率分别为34.4%、47.6%和32.6%,排水量分别减少9.8%、12.2%和13.8%,灌水次数分别减少25.7%、36.6%和33.7%,排水次数分别减少11.4%、10.7%和10.7%,节水、减排、省工效果明显。同时节水灌溉模式减少了水稻的生理需水和田间渗漏,并能够维持水稻高产,提高了水分利用效率。60年模拟期内,控制灌排的灌溉水分生产率在丰、平、枯3种年型分别为5.52、4.65、3.83 kg/m³,各年型下均为最高;控制灌溉的作物水分生产率在丰、平、枯3种年型分别为2.45、2.31、2.06 kg/m³,各年型下均为最高。节水灌溉模式在不同水文年型下表现稳定,节水高产效果明显,在实际生产中有推广运用价值。

(3)综合考虑水稻种植中田间劳动、水分投入和产量回报等因素,选取灌水量、雨水利用率、灌溉次数、排水次数和产量5个指标进行灌排方案优选,评价结果表明,丰水年为控制灌排与浅湿灌溉较优,平水年为控制灌排与控制灌溉较优,枯水年为浅湿灌溉与控制灌排较优,这表明对于不同的水文年型,在保证产量的前提下控制灌排具有稳健的节水省工效果,且农田水位指标易于观测、便于操作,有利于指导稻田节水灌溉实践。

参 考 文 献

[1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.

[2] SHAO G C, CUI J T, YU S E, et al. Impacts of controlled irrigation and drainage on the yield and physiological attributes of rice[J]. Agricultural Water Management, 2015, 149: 156-165.

[3] PENG S, HE Y, YANG S, et al. Effect of controlled irrigation and drainage on nitrogen leaching losses from paddy fields[J]. Paddy and Water Environment, 2015, 13(4): 303-312.

[4] KROES J G, Van DAM J C, BARTHOLOMEUS R P, et al. SWAP version 4, theory description and user manual[M]. Wageningen: Wageningen Environmental Research, 2017.

[5] 缴锡云, 虞晓彬, 郭思怡. SWAP模型在稻田水分运移模拟中的应用[J]. 江苏农业科学, 2013, 41(10): 369-372. JIAO Xiyun, YU Xiaobin, GUO Siyi. Application of SWAP model in moisture movement simulation in paddy fields[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2013, 41(10): 369-372. (in Chinese)

[6] 李小梅, 崔远来, 谢先红. 基于SWAP的早稻灌溉模式研究[J]. 中国科技论文在线, 2008, 3(7): 530-535. LI Xiaomei, CUI Yuanlai, XIE Xianhong. Research on the irrigation system of aerobic rice based on the Soil-Water-Atmosphere-Plant[J]. Sciencepaper Online, 2008, 3(7): 530-535. (in Chinese)

[7] XUE J, REN L. Conjunctive use of saline and non-saline water in an irrigation district of the Yellow River Basin[J]. Irrigation and Drainage, 2017, 66(2): 147-162.

- [8] 江苏省水稻节水灌溉技术规范: DB32/T 2950—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [9] 俞双恩. 以农田水位为调控指标的水稻田间灌排理论研究[D]. 南京: 河海大学, 2008.
- [10] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements[R]. Irrigation and Drainage Paper 56, Rome, Italy, 1998.
- [11] 王相平, 杨劲松, 姚荣江, 等. 苏北滩涂水稻咸水灌溉模式及土壤盐分动态变化[J]. 农业工程学报, 2014, 30(7): 54—63.
WANG Xiangping, YANG Jingsong, YAO Rongjiang, et al. Irrigation regime and salt dynamics for rice with brackish water irrigation in coastal region of North Jiangsu Province[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(7): 54—63. (in Chinese)
- [12] 许小路. 基于 WOFOST 模型的高温热害对江苏省水稻生长及产量的影响模拟[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2015.
XU Xiaolu. Simulating the impact of high temperature stress on growth of rice in Jiangsu Province based on WOFOST[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2015. (in Chinese)
- [13] 徐钰婷. 三江平原水稻节水灌溉模式的模拟及其适宜性区划[D]. 北京: 中国农业大学, 2016.
XU Yuting. Simulation and suitability zoning of water-saving irrigation systems for rice in Sanjiang Plain[D]. Beijing: China Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [14] FANG Q X, MALONE R W, MA L, et al. Modeling the effects of controlled drainage, N rate and weather on nitrate loss to subsurface drainage[J]. Agricultural Water Management, 2012, 103(1): 150—161.
- [15] 彭世彰, 徐俊增, 黄乾, 等. 水稻控制灌溉模式及其环境多功能性[J]. 沈阳农业大学学报, 2004, 35(增刊 1): 443—445.
PENG Shizhang, XU Junzeng, HUANG Qian, et al. Controlled irrigation of paddy rice and environmental multifunctionality [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2004, 35(Supp. 1): 443—445. (in Chinese)
- [16] 俞双恩, 缪子梅, 邢文刚, 等. 以农田水位作为水稻灌排指标的研究进展[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(2): 134—136.
YU Shuang'en, MIAO Zimei, XING Wen'gang, et al. Research advance on irrigation-drainage for rice by using field water level as regulation index[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2010, 29(2): 134—136. (in Chinese)
- [17] 石萍, 纪昌明, 蒋志强. 基于调度特征的水电站水库丰平枯水年划分[J]. 水利学报, 2016, 47(1): 119—124.
SHI Ping, JI Changming, JIANG Zhiqiang. Research of classification for wet/normal/dry year based on the operation characteristics of hydropower station[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(1): 119—124. (in Chinese)
- [18] LU Bin, SHAO Guangcheng, YU Shuang'en, et al. The effects of controlled drainage on N concentration and loss in paddy field[J]. Journal of Chemistry, 2016(2): 1—9.
- [19] 王传娟, 王少丽, 陈皓锐, 等. 稻田水量调控模拟计算及分析[J]. 中国农村水利水电, 2016(8): 137—143.
WANG Chuanjuan, WANG Shaoli, CHEN Haorui, et al. The simulation and analysis of paddy rainfall storage and water conservation[J]. China Rural Water and Hydropower, 2016(8): 137—143. (in Chinese)
- [20] 缪子梅, 李竞春, 陈栋. 基于熵权 TOPSIS 模型评价涝渍条件下冬小麦水位管理方案[J]. 排灌机械工程学报, 2018, 36(12): 1306—1311.
MIAO Zimei, LI Jingchun, CHEN Dong. Evaluation of water level management plan of winter wheat under waterlogging conditions based on entropy weighted TOPSIS model[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2018, 36(12): 1306—1311. (in Chinese)
- [21] 和玉璞, 张建云, 徐俊增, 等. 灌溉排水耦合调控稻田水分转化关系[J]. 农业工程学报, 2016, 32(11): 144—149.
HE Yupu, ZHANG Jianyun, XU Junzeng, et al. Regulation and control of water transformation through coupling irrigation and drainage in paddy field[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(11): 144—149. (in Chinese)
- [22] TAN X Z, SHAO D G, LIU H H. Simulating soil water regime in lowland paddy fields under different water managements using HYDRUS-1D[J]. Agricultural Water Management, 2014(132): 69—78.
- [23] YANG R, TONG J, HU B X, et al. Simulating water and nitrogen loss from an irrigated paddy field under continuously flooded condition with Hydrus-1D model[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24(4): 15089—15106.
- [24] 朱成立, 郭相平, 刘敏昊, 等. 水稻沟田协同控制节水灌溉模式的节水减污效应[J]. 农业工程学报, 2016, 32(3): 86—91.
ZHU Chengli, GUO Xiangping, LIU Minhao, et al. Reduction of nitrogen phosphorous and runoff by coordination controlled drainage with basin and ditch in paddy field[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(3): 86—91. (in Chinese)
- [25] 甄博, 周新国, 陆红飞, 等. 拔节期高温与涝交互胁迫对水稻生长发育的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(21): 105—111.
ZHEN Bo, ZHOU Xinguo, LU Hongfei, et al. Effect of interaction of high temperature at jointing stage and waterlogging on growth and development of rice[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(21): 105—111. (in Chinese)
- [26] PENG S Z, YANG S H, XU J Z, et al. Nitrogen and phosphorus leaching losses from paddy fields with different water and nitrogen managements[J]. Paddy and Water Environment, 2011, 9(3): 333—342.
- [27] GAO S K, YU S E, SHAO G C, et al. Effects of controlled irrigation and drainage on nitrogen and phosphorus concentrations in paddy water[J]. Journal of Chemistry, 2016(1): 1—9.
- [28] 侯会静, SHALAMU Abudu, 陈慧, 等. 水稻控制灌溉下华东稻麦轮作农田 N_2O 排放模拟[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(12): 185—191. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161223&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j. issn. 1000-1298. 2016. 12. 023. (in Chinese)
- [29] 俞双恩, 李偲, 高世凯, 等. 水稻控制灌排模式的节水高产减排控污效果[J]. 农业工程学报, 2018, 34(7): 128—136.
YU Shuang'en, LI Si, GAO Shikai, et al. Effect of controlled irrigation and drainage on water saving, nitrogen and phosphorus loss reduction with high yield in paddy field[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(7): 128—136. (in Chinese)
- [30] 王卫光, 丁一民, 徐俊增, 等. 多模式集合模拟未来气候变化对水稻需水量及水分利用效率的影响[J]. 水利学报, 2016, 47(6): 715—723.
WANG Weiguang, DING Yimin, XU Junzeng, et al. Simulation of future climate change effects on rice water requirement and water use efficiency through multi-model ensemble[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(6): 715—723. (in Chinese)