

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2020.01.007

DRAINMOD 和 HYDRUS-1D 模型对水稻 控制灌排条件下农田水位的模拟

俞双恩,李倩倩,陈凯文,张梦婷,王梅,王煜,刘子鑫

(河海大学农业工程学院,江苏南京 210098)

摘要:为研究水稻控制灌排条件下农田水位的变化,根据 2017 年的水稻测坑种植试验资料,率定 DRAINMOD 模型和 HYDRUS-1D 模型参数,以相关系数、平均偏差及纳什效率系数为评价标准,通过比较 2018 年农田水位模拟值与实测值的吻合程度,分析 2 种模型模拟稻田干湿交替条件下农田水位的可靠性。结果表明:DRAINMOD 模型和 HYDRUS-1D 模型的模拟结果均能较好地反映农田水位的实际变化情况,模拟值与实测值的相关系数分别为 0.778 和 0.849,平均偏差分别为 2.051 cm 和 1.809 cm,纳什效率系数分别为 0.509 和 0.360,且 2 个模型模拟结果没有显著差别;DRAINMOD 模型和 HYDRUS-1D 模型均可用于模拟水稻控制灌排条件下农田水位变化,为稻田水分运移研究提供方便可行的方法。

关键词:控制灌排;测坑试验;水稻种植;农田水位;DRAINMOD 模型;HYDRUS-1D 模型

中图分类号:S274 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2020)01-0046-07

Simulations on water level of farmland under controlled irrigation and drainage of rice based on DRAINMOD and HYDRUS-1D Models

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

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

Abstract: In order to study the change of water level of rice farmland under controlled irrigation and drainage mode, the parameters of DRAINMOD model and HYDRUS-1D model were determined based on the planting test data of rice pit in 2017, and the correlation coefficient, average deviation and efficiency coefficient were used as the reference evaluation criteria. Comparing the simulated values of farmland water level with the measured values in 2018, the reliability of two models to simulate farmland water level was analyzed. The results show that both the simulation results of DRAINMOD model and HYDRUS-1D model can reflect the actual changes of farmland water level. Correlation coefficients between simulated and measured values are 0.778 and 0.849, the average deviations are 2.051 cm and 1.809 cm, and the Nash efficiency coefficients are 0.509 and 0.360, respectively. There is no significant difference between the simulation results of two models. Both DRAINMOD model and HYDRUS-1D model can be used to simulate the change of water level in rice field under controlled irrigation and drainage, and this conclusion provides a convenient and feasible method for the study of water transport in rice field.

Key words: controlled irrigation and drainage; leaching-pond experiment; rice cultivation; farmland water level; DRAINMOD model; HYDRUS-1D model

基金项目:国家自然科学基金(518035711,51479063)

作者简介:俞双恩(1961—),男,教授,博士,主要从事水稻灌排理论与节水灌溉研究。E-mail:seyu@hhu.edu.cn

引用本文:俞双恩,李倩倩,陈凯文,等. DRAINMOD 和 HYDRUS-1D 模型对水稻控制灌排条件下农田水位的模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(1):46-52.

YU Shuang'en, LI Qianqian, CHEN Kaiwen, et al. Simulations on water level of farmland under controlled irrigation and drainage of rice based on DRAINMOD and HYDRUS-1D Models [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2020, 48(1): 46-52.

水稻是我国三大粮食作物之一。作为世界上重要的水稻生产国,我国水稻种植面积占耕地总面积的 26%^[1-2],但稻作区灌溉用水量占农业用水量的 70%^[3],水资源短缺已成为水稻生产的重要制约因素。水稻种植区主要分布在雨水充沛的湿润地区,其生长期与各地汛期重合。为了充分利用天然降雨,俞双恩等^[4]将节水灌溉与控制排水技术有机结合,形成了以稻田水位作为灌排控制指标的水稻控制灌排技术。控制灌排技术作为南方稻作区的核心灌排技术,综合考虑了节水灌溉与控制排水的协同效应,对实现稻作区的节水、减排、控污、高产具有重要意义^[5-7]。

HYDRUS-1D 模型是由美国国家盐分实验室 (US-Salinity Laboratory) 研发的土壤水、热及溶质运移数值模拟软件。近年来,HYDRUS-1D 在农田水分运移模拟方面应用较广。张海阔等^[8]通过比较分析 HYDRUS-1D 输出变量土水势和累积入渗量,探讨了变水头入渗条件下 VG 模型参数的敏感性;赖晓明等^[9]应用 HYDRUS-1D 模型模拟太湖流域的农田水分渗漏规律,分析了太湖流域农田氮磷流失特征;Li 等^[10]利用 HYDRUS-1D 模拟在水稻直播情况下,稻田中氮磷运移规律,分析评价农田水氮平衡。但是将 HYDRUS-1D 模型应用于干湿交替的稻田水分模拟不多见。另外,20 世纪 70 年代末由 Skaggs^[11]开发的 DRAINMOD 模型广泛应用于农田排水的理论分析和工程设计,可以较准确地预测田间地下水位、地表和地下排水量及作物产量等^[12-13]。2006 年,罗纨等^[14]将 DRAINMOD 模型应用于水稻灌区,模拟了宁夏银南灌区稻田排水过程;2011 年,高学睿等^[15]研究了 DRAINMOD-N II 模型在气候湿润的南方水稻灌区的适用性,模拟了湖北漳河灌区排水和氮素流失规律,认为该模型可有效地模拟预测水稻田排水特性及氮素运移特性;王宁等^[16]利用 DRAINMOD-N II 模型模拟了暴雨后稻田排水量及其氮素流失规律。前人对于 DRAINMOD 模型在水稻田的应用研究多基于常规灌排模式,但对于控制灌排条件下水稻田的应用研究鲜有报道。

综上,DRAINMOD 模型和 HYDRUS-1D 模型在控制灌排条件下水稻田应用较少,本文利用这 2 个模型对试验区农田水位进行模拟研究,探讨它们在水稻控制灌排模式下的适用性,旨在为水稻控制灌排条件下农田水分运移模拟和研究提供方便可行的方法。

1 材料与方法

1.1 试验区基本情况

试验分别于 2017 年和 2018 年的 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园区内进行。试验区(31°54'N,118°46'E)属于亚热带湿润性气候,多年平均降雨天数为 120 d,多年平均降雨量 1 072.9 mm。该地区多年平均日照时数 2 017.2 h,多年平均蒸发量 900 mm,多年平均无霜期 224 d,年平均气温 15.7℃。试验区内设有 32 个固定式蒸渗测坑(有底 28 个,无底 4 个),每个蒸渗测坑的规格为 2.5 m×2 m×2 m(长×宽×高),按南北方向布置,共 2 排,每排 16 个,试验区布置见图 1。地下设有廊道和设备间,地上设有移动式雨棚。测坑内土壤为黏壤土,全氮、速效氮、全磷、速效磷质量比分别为 0.91 g/kg、27.65 mg/kg、0.32 g/kg、12.5 mg/kg。土壤的物理性质指标见表 1。

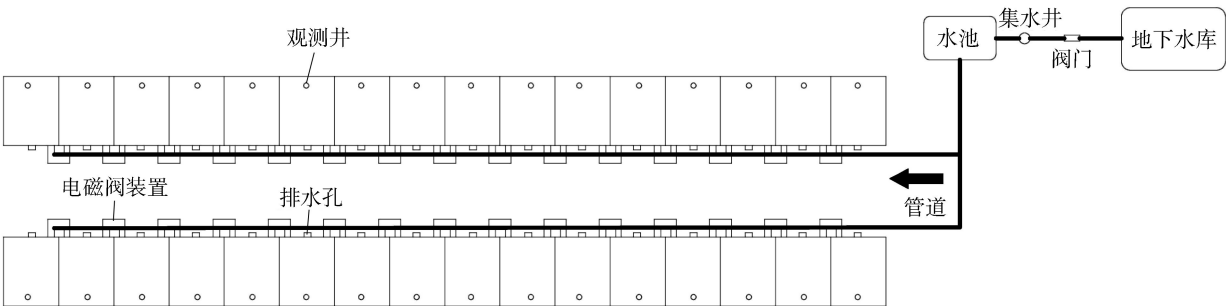


图 1 试验区平面布置示意图
Fig.1 Schematic diagram of plane layout of the study area

1.2 试验设计

供试的水稻品种为南粳 9108。2017 年,水稻于 5 月 29 日育秧,6 月 29 日移栽,10 月 27 日收割。2018 年,水稻于 5 月 27 日育秧,6 月 27 日移栽,10 月 23 日收割。水稻控制灌排处理设置 3 个重复,农田水位指标如下:分蘖期、拔节孕穗期、抽穗开花期、乳熟期的灌水适宜下限值分别为-20cm、-30cm、-20cm、-30cm,灌水

适宜上限皆为 3 cm,降雨时允许蓄水深度分别为 10 cm、15 cm、15 cm、15 cm。农田水位调控值以田面为基准,正值表示地表水层深度,负值表示田间地下水埋深。黄熟期遇雨排水、自然落干。试验以农田水位为控制指标,当稻田水位超过蓄水上限时,采用抽水泵排水至蓄水上限,然后自然耗干田面水层直到地下水埋深达到设定的灌水下限值后立即灌至田间适宜水层。田面有水层时,保持 2 mm/d 的田间渗漏量;田面无水层时,控制渗漏量为 0 mm/d。

1.3 试验观测

- a. 气象资料:节水园区内气象站观测的气象要素,包括降水量、最高温度、最低温度、相对湿度、风速、日照时长、辐射等,缺省值来自于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。
- b. 农田水位:在距离蒸渗测坑边缘 50 cm 处埋设由 PVC 管制成的地下水位观测井,每天 7:00~8:00 定时观测水位。以测坑内土壤表面为基准点观测农田水位:基准点以上为正,表示田面积水深度;基准点以下为负,表示田间地下水埋深。
- c. 株高:每个蒸渗测坑设置 6 个观测点,从水稻移栽之日起,每 5 d 在固定观测点观测水稻株高的动态变化情况,测量作物地面以上的长度作为株高,不包括根部;扬花之前测量测坑地面线至最高叶尖的高度,扬花后测量稻田地面线至穗顶(不计芒)的高度。
- d. 叶面积指数 LAI: 每 5 d 使用 LAI-2000 叶面积仪(LI-COR, USA)定时观测水稻群体 LAI。

2 模型建立

2.1 模型原理

2.1.1 DRAINMOD 模型原理

DRAINMOD 模型是一个田间水文模型^[11],适用于地下水位较高的情况,用来模拟农业水管理对农田的水文效应以及对作物产量的影响。DRAINMOD 水文模型以土壤剖面水量平衡原理为基础^[17],在时间增量 Δt 内,土壤剖面的水量平衡方程^[18]可表示为

$$\Delta V_a = D_s + ET - I$$

(1)

式中: ΔV_a ——土壤中的水量变化; ET ——作物腾发量; D_s ——渗流量,包括深层渗漏量和侧向排水量; I ——入渗量。

土壤表面的水量平衡方程可表示为

$$\Delta S = P - I - R$$

(2)

式中: ΔS ——土壤表面蓄水变化量; P ——降水量; R ——地表排水径流量。

2.1.2 HYDRUS-1D 模型原理

HYDRUS-1D 模型利用一维 Richards 方程描述饱和-非饱和土壤水运动,并考虑了植物根系吸水,适用于各种恒定或非恒定的边界条件^[18]。不考虑土壤水的水平运动,只考虑一维垂向运移,含根系吸水源汇项的土壤水分运动 Richards 方程为

$$C(h) \frac{\partial h}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K(h) \frac{\partial h}{\partial z} - K(h) \right) - S(z, t)$$

(3)

其中

$$C(h) = \frac{d\theta}{dh}$$

式中: $C(h)$ ——比水容量, cm^{-1} ; θ ——土壤体积含水率, cm^3/cm^3 ; h ——压力水头, cm ; $K(h)$ ——非饱和导水率, cm/d ; $S(z, t)$ —— t 时刻 z 深度处耗水速率,取该处作物根系吸水率, $\text{cm}^3/(\text{cm}^3 \cdot \text{d})$ 。

2.2 模型参数输入

2.2.1 气象资料

模型中需要输入的气象资料包括降雨量(将灌溉量转化为降雨量)和潜在蒸发蒸腾量及日最高、最低气温。潜在蒸发蒸腾量是由 HYDRUS-1D 模型中的 Penman-Montheith 公式计算得到的。

2.2.2 土壤参数

试验区土壤为黏壤土,将 0~160 cm 土层分为 4 层,各层土壤的组成成分见表 1。采用 RETC 软件根据土壤粒径分级(砂粒、粉粒和黏粒的质量分数)和土壤干密度数据反演获得模拟所需的土壤水力特性参数的初始值^[19-20],模型原理见文献[20]。利用 2017 年实测水位数据对土壤水分运动模型进行率定,率定过的土壤水力特性参数见表 2。

表 2 土壤水力特性参数
Table 2 Hydraulic characteristics of soil

土层/cm	$\theta_r/(\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	$\theta_s/(\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	α/cm^{-1}	n	$K_s/(\text{cm} \cdot \text{d}^{-1})$	l	$K_{ls}/(\text{cm} \cdot \text{d}^{-1})$
0~20	0.065 9	0.417 5	0.009 5	1.525 5	15.19	0.45	3.5
20~40	0.065 3	0.408 2	0.009 5	1.521 1	12.48	0.45	3.5
40~60	0.063 4	0.399 7	0.009 6	1.512 0	11.27	0.45	3.5
60~160	0.062 7	0.390 6	0.010 8	1.483 8	9.08	0.45	3.5

注: θ_r 为土壤残余含水率, θ_s 为土壤饱和含水率, α 、 n 分别为土壤水分特征曲线统计参数, K_s 为土壤饱和导水率, l 为土壤孔径连通系数, K_{ls} 为土壤侧向饱和导水率。

2.2.3 作物参数

作物参数包括作物有效根深、株高及叶面积指数,取 2017 年和 2018 年试验观测得到数据的平均值作为水稻作物参数输入模型。

2.2.4 模型其他参数

除土壤参数和气象资料外,DRAINMOD 模型还需输入排水参数。杨琳等^[21]在探讨暗管控制排水对地下水位的调控作用时,对测坑的边界条件进行概化,将 DRAINMOD 模型应用于测坑尺度,并取得较好的模拟效果。在蒸渗测坑中,距地表 150 cm 深度处理设有效半径 2 cm 的集水管,用于收集渗漏水,因此,将集水管概化为有效半径 2 cm、埋深 150 cm、间距 200 cm 的暗管排水系统,排水系数为 0.2 cm/d,Kirkham 积水深度为 3 cm。

HYDRUS-1D 模型需要确定其定解条件。水稻插秧时地表有水层,初始时刻分别实测地表淹水深度及底部测压管水头,经过线性插值得到土壤剖面水头分布,以此作为初始条件。上边界条件采用有表层积水的大气边界条件,最大积水深度分蘖期为 10 cm,其他生育期为 15 cm。当降水量超过地表最大积水深度时将产生地表径流。在模拟时段,逐日输入上边界通量值,包括降雨量(将灌溉量转化为降水量)和潜在蒸发蒸腾量。下边界条件采用时变通量边界条件,逐日输入蒸渗测坑底部的实测排水量。

2.3 模型的评价标准

模型模拟的效果通过图形法和统计参数指标来评价。采用相关系数 R 、平均偏差 $\bar{\delta}$ 及纳什效率系数 N_s ^[22]作为模拟效果的评价指标,用来定量描述模拟值与实测值之间的差异程度。 R 是反映模拟值与观测值之间相关程度的统计指标, $R \in (0,1)$, $R=1$ 表示二者相关性最优,值越小相关性越差; $\bar{\delta}$ 反映模拟结果高估或者低估实际情况的程度; N_s 反映模型模拟效率,其值范围为 $-\infty \sim 1$,越接近于 1,表明模拟效率越高。各评价参数计算方法见文献[22-23]。

3 模拟结果及分析

3.1 模拟结果

采用 2017 年 7—9 月期间的农田水位对模型进行参数率定,采用 2018 年 7—9 月期间的农田水位进行模型验证,对比分析 2 个模型在干湿交替的控制灌排模式下的适用性。2017 年和 2018 年农田水位观测值与模拟值见图 2,地表积水深度的观测值与模拟值见图 3。根据实测值与模拟值计算评价 2 个模型模拟效果的指标(表 3)。

图 2 给出了 2017—2018 年控制灌排条件下农田水位观测值与模拟值之间的对比。从图 2 中可以看出,观测到的农田水位与模型模拟结果之间吻合较好,模拟结果能较好地反映实际情况。从图 3 可以看出,测坑内稻

田积水深度散点都较好地集中在 1 : 1 直线附近,表明 2 个模型在模拟稻田积水深度时具有较好的适用性。

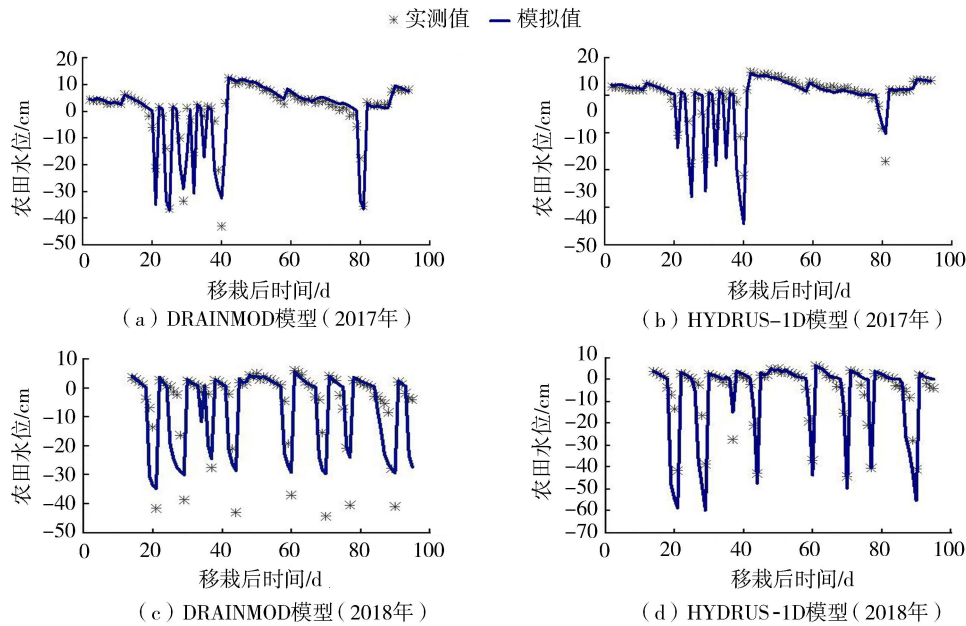


图 2 农田水位模拟值与实测值
Fig. 2 Simulated and measured farmland water level

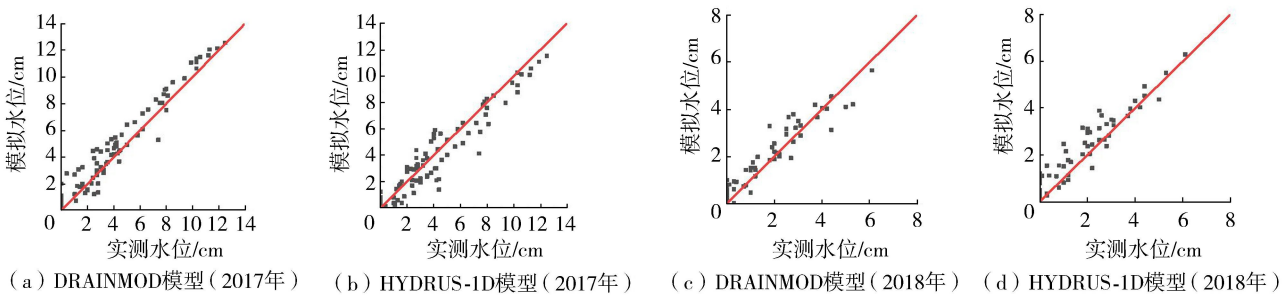


图 3 地表积水深度散点图
Fig. 3 Scatter diagram of the layer depth of surface water

表 3 不同模型模拟农田水位的拟合参数							
Table 3 Fitting parameters of farmland water level simulated by different models							
模拟年份	观测变量	DRAINMOD 模型			HYDRUS-1D 模型		
		R	$\bar{\delta}/\text{cm}$	N_s	R	$\bar{\delta}/\text{cm}$	N_s
2017	地表积水深度	0.977	-0.413	0.930	0.973	0.365	0.930
	农田水位	0.904	0.816	0.720	0.888	2.162	0.378
2018	地表积水深度	0.959	-0.116	0.913	0.959	-0.247	0.881
	农田水位	0.778	2.051	0.509	0.849	1.809	0.360

表 3 给出控制灌排条件下 2 种模型相应的农田水位和地表积水深度观测值与模拟值间的统计参数指标对比。在参数率定期,DRAINMOD 模型和 HYDRUS-1D 模型模拟值平均偏差 $\bar{\delta}$ 分别为 0.816 cm、2.162 cm,相关系数 R 均在 0.888 以上,拟合效果较好,拟合效率 DRAINMOD 模型($N_s=0.720$)高于 HYDRUS-1D 模型($N_s=0.378$)。对于农田地表积水深度, R 均在 0.950 以上,模拟值与实测值的 $\bar{\delta}$ 在-0.413 ~ 0.365 cm 之间, N_s 均大于 0.930。总体来说,DRAINMOD 模型和 HYDRUS-1D 模型拟合相关性较好,拟合效率较高。因此,可以认为 2 个模型均适用于干湿交替的控制灌排模式下农田水位的模拟,参数设置合理,模型可靠。

在模型验证阶段,DRAINMOD 模型和 HYDRUS-1D 模型模拟值均略大于田间实际水位, $\bar{\delta}$ 分别为 2.051 cm、1.809 cm, R 均在 0.778 以上,DRAINMOD 模型($N_s=0.509$)和 HYDRUS1D 模型($N_s=0.360$)拟合效率均较低。对于农田地表积水深度, R 均在 0.95 以上,模拟值与实测值的 $\bar{\delta}$ 在-0.116 ~ -0.247 cm 之间,

N_s 均大于 0.881。总体来说,DRAINMOD 模型和 HYDRUS-1D 模型模拟结果与实测水位存在偏差,但具有良好的-致性,模拟结果较好地反映了实际情况,田间地表积水深度模拟值与实测值吻合较好,2 个模型均可较好地模拟农田水位变化。

3.2 模拟结果讨论

a. DRAINMOD 模型和 HYDRUS-1D 模型在模拟计算中,采用的土壤水力特性参数是根据土壤颗粒级配和干密度反演得到的,可能与实际的土壤物理性质存在一定出入。此外,气象条件和土壤条件在实际中也存在较大空间-变异性,观测数据质量的好坏能直接影响模拟质量的好坏,这些是导致模拟误差偏大的原因之一。由图 2 可以看出,当地表无积水(农田水位小于 0)时,模拟值与实测值之间存在较大偏差。王少丽^[23]认为可能是因为在地下水位较浅时,土壤水力学特性对地下水位的预测比较敏感,因此,在这个时期模拟的水位波动较大,可能会产生大的误差。也可能是由于稻田土壤的包气带存在饱和与非饱和频繁交替的情况,土壤处于反复脱湿与吸湿的过程,而土壤水分特征曲线存在滞后效应,干湿交替条件下描述稻田土壤水分运移的 VG 模型参数会发生变化,因此,农田水位波动频繁、变幅较大,可能会对模拟精度产生影响。总体而言,DRAINMOD 模型和 HYDRUS-1D 模型能够很好地适应试验区以农田水位为控制指标的灌排模式。

b. 根据表 3 中的模拟效果评价结果,可以认为本文中对于排水系统的概化是合理的,即将测坑中埋设的集水管概化为相同埋深的以测坑宽度为间距的排水暗管,通过概化可将 DRAINMOD 模型应用于测坑尺度下农田水分运动的模拟研究,以分析稻田水分运动规律。

c. HYDRUS-1D 模型采用有限单元法经过反复迭代求解。在模型模拟过程中,最大迭代步长能较为明显地影响模拟结果,而土层网格的密度划分影响模拟结果的精度。关于迭代步长的设置和土层网格密度的划分对 HYDRUS-1D 模型模拟结果的影响机理还需进一步探讨。

4 结 语

将 DRAINMOD 排水模型和 HYDRUS-1D 模型应用于水稻控制灌排蒸渗测坑试验的农田水位模拟,采用 2017 年试验观测数据进行参数率定、2018 年数据对模型进行验证,通过农田水位的模拟值与实测值比较,分析控制灌排条件下 2 个模型在稻田水分运移模拟研究中的实用性。确定了模型运行所需的参数设置和概化方法,并以相关系数、平均偏差及纳什效率系数为评价指标,检验农田水位模拟值与实测值的吻合程度,分析模型的可靠性。结果表明,DRAINMOD 模型和 HYDRUS-1D 模型均可用于模拟控制灌排条件下稻田的水分运移,模型模拟结果较好地反映了水稻控制灌排条件下农田水位的变化情况,为稻田水分管理提供方便可行的方法。

参考文献:

[1] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.

[2] 薛超,周宏. 污染排放约束下中国水稻生产用水效率与影响因素分析[J]. 水资源保护, 2018,34(3):52-56. (XUE Chao, ZHOU Hong. Analysis on rice production water use efficiency and its influencing factors in China under constraint of pollutant emission[J]. Water Resources Protection, 2018,34(3):52-56. (in Chinese))

[3] 姚林,郑华斌,刘建霞,等. 中国水稻节水灌溉技术的现状及发展趋势[J]. 生态学杂志, 2014,33(5):1381-1387. (YAO Lin, ZHENG Huabin, LIU Jianxia, et al. Current situation and prospect of rice water-saving irrigation technology in China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2014,33(5):1381-1387. (in Chinese))

[4] 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 Wengang, 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))

[5] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering,2018,34(7):128-136. (in Chinese))

[6] 刘笑吟,徐俊增,杨士红,等. 节水灌溉稻田蒸散时空尺度特征及影响因素[J]. 水资源保护, 2018,34(2):42-51. (LIU Xiaoyin, XU Junzeng, YANG Shihong, et al. Characteristics and influencing factors of evapotranspiration in water-saving irrigation paddy field on different space-time scales[J]. Water Resources Protection, 2018,34(2):42-51. (in Chinese))

- [7] 金斌斌,邵孝侯,徐朝辉,等.控灌中蓄及减量施肥对稻田氮素动态的影响[J].水利水电科技进展,2017,37(3):84-88. (JIN Binbin, SHAO Xiaohou, XU Chaohui, et al. Effects of controlled and mid-gathering irrigation and reducing fertilization on dynamics of nitrogen in paddy fields[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017,37(3):84-88. (in Chinese))
- [8] 张海阔,姜翠玲,李亮,等.基于 HYDRUS-1D 模拟的变水头入渗条件下 VG 模型参数敏感性分析[J].河海大学学报(自然科学版),2019,47(1):32-40. (ZHANG Haikuo, JIANG Cuiling, LI Liang, et al. Parameter sensitivity analysis of VG model in the varying-head infiltration based on HYDRUS-1D simulation[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2019,47(1):32-40. (in Chinese))
- [9] 赖晓明,廖凯华,朱青,等.基于 Hydrus-1D 模型的太湖流域农田系统水分渗漏和氮磷淋失特征分析[J].长江流域资源与环境,2015,24(9):1491-1498. (LAI Xiaoming, LIAO Kaihua, ZHU Qing, et al. Feature analysis of soil water leakage and leaching of nitrogen and phosphorus in the typical farmland of Taihu Lake Basin based on Hydrus-1D model[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015,24(9):1491-1498. (in Chinese))
- [10] LI Yong, SIMUNEK J, ZHANG Zhenlin, et al. Evaluation of nitrogen balance in a direct-seeded-rice field experiment using Hydrus-1D[J]. Agricultural Water Management, 2015,148:213-222.
- [11] SKAGGS R W. A water management model for shallow water table soils[R]. Raleigh: Water Resources Research Institute of the University of North Carolina, 1978.
- [12] YOUSSEF M A, SKAGGS R W, CHESCHEIR G M, et al. Field evaluation of a model for predicting nitrogen losses from drained lands[J]. Journal of Environmental Quality, 2006,35(6):2026-2042.
- [13] 温季,宰松梅,郭树龙,等.利用 DRAINMOD 模型模拟不同排水管道间距下的作物产量[J].农业工程学报,2008,24(8):20-24. (WEN Ji, ZAI Songmei, GUO Shulong, et al. Simulation of crop yield for different spacing of drainage ditches by using DRAINMOD model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2008,24(8):20-24. (in Chinese))
- [14] 罗纨,贾忠华,SKAGGS R W,等.利用 DRAINMOD 模型模拟银南灌区稻田排水过程[J].农业工程学报,2006,22(9):53-57. (LUO Wan, JIA Zhonghua, SKAGGS R W, et al. Rice fields drainage process simulation in Yinnan irrigation district with DRAINMOD model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006,22(9):53-57. (in Chinese))
- [15] 高学睿,董斌,秦大庸,等.用 DrainMOD 模型模拟稻田排水与氮素流失[J].农业工程学报,2011,27(6):52-58. (GAO Xuerui, DONG Bin, QIN Dayong, et al. Simulation of drainage process and nitrogen loss in paddy field using DrainMOD[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2011,27(6):52-58. (in Chinese))
- [16] 王宁,俞双恩,叶兴成. DRAINMOD-N II 模拟暴雨后稻田排水及氮素变化[J].人民黄河,2014,36(10):136-140. (WANG Ning, YU Shuang'en, YE Xingcheng. Simulation of drainage and changes of nitrogen in paddy fields during rainstorms using DRAINMOD-N II[J]. Yellow River, 2014,36(10):136-140. (in Chinese))
- [17] SKAGGS R W, YOUSSEF M A, CHESCHEIR G M. DRAINMOD: model use, calibration, and validation[J]. Transactions of the ASABE, 2012,55(4):1509-1522.
- [18] 杜璇,冯浩,MATTHEW J H,等. DRAINMOD-N II 模拟冬季长期覆盖黑麦对地下排水及 $\text{NO}_3\text{-N}$ 流失的影响[J].农业工程学报,2017,33(12):153-161. (DU Xuan, FENG Hao, MATTHEW J H, et al. Simulating effects of winter rye cover on subsurface drainage and $\text{NO}_3\text{-N}$ loss based on DRAINMOD-N II[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2017,33(12):153-161. (in Chinese))
- [19] 魏义长,刘作新,康玲玲.辽西淋溶褐土土壤水动力学参数的推导及验证[J].水利学报,2004,35(3):81-86. (WEI Changyi, LIU Zuoxin, KANG Lingling. Derivation and verification of soil hydrodynamic parameters in cinnamon soil[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004,35(3):81-86. (in Chinese))
- [20] 王志涛,缴锡云,韩红亮,等.土壤垂直一维入渗对 VG 模型参数的敏感性分析[J].河海大学学报(自然科学版),2013,41(1):80-84. (WANG Zhitao, JIAO Xiyun, HAN Hongliang, et al. Sensitivity analysis of VG model parameters with vertical one-dimensional soil infiltration[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2013,41(1):80-84. (in Chinese))
- [21] 杨琳,黄介生,王毅.应用 DRAINMOD 对测坑控制排水条件下地下水位的模拟分析[J].中国农村水利水电,2013(4):153-155, 159. (YANG Lin, HUANG Jiesheng, WANG Yi. Simulation and analysis of water table under controlled drainage in leaching-pond experiment using DRAINMOD[J]. China Rural Water and Hydropower, 2013(4):153-155, 159. (in Chinese))
- [22] NASH J E, SUTCLIFFE J V. River flow forecasting through conceptual models part I: a discussion of principles[J]. Journal of Hydrology, 1970,10(3):282-290.
- [23] 王少丽.农田氮转化运移及流失量模拟预测[D].北京:清华大学,2008.