



基于 HYDRUS 对稻田不同阶段土壤水分的模拟与分析

马黎华¹, 胡笑涛², 蒋先军¹, 王文娥^{2*}

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100)



马黎华

摘要:为探寻稻田不同阶段土壤水分状况下的差异性,基于重庆丘陵区紫色土常规轮作水稻土壤水分的连续监测数据,利用 HYDRUS-1D 模型对稻田淹水、排水落干和收获后 3 个不同干湿阶段(阶段 I, II, III)的土壤水力参数和土壤含水量开展验证模拟分析.研究表明:①根据 R^2 与 $RMSE$ 的误差分析结果, HYDRUS 可以实现对不同阶段稻田土壤水分变化的有效模拟.②根据土壤水量平衡分析,阶段 I 的稻田土壤水分以水分补充的形式为主;阶段 II 和 III 的土壤水分以水分损失为主,底层渗漏量分别占总水分损失量的 52% 和 95%.③根据 HYDRUS 的模拟结果,降雨直接影响土壤上下边界流的变化;阶段 II 的实际作物蒸腾量和实际地表蒸发量低于阶段 I 的,阶段 III 稻田土壤的地表实际蒸发量与日照时数的关系更密切.

关键词: HYDRUS 模型; 稻田; 土壤含水量; 边界流; 水量平衡

中图分类号: S274; S152 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2022)07-0729-08

Doi: 10.3969/j.issn.1674-8530.21.0019

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



马黎华, 胡笑涛, 蒋先军, 等. 基于 HYDRUS 对稻田不同阶段土壤水分的模拟与分析[J]. 排灌机械工程学报, 2022, 40(7): 729-736.

MA Lihua, HU Xiaotao, JIANG Xianjun, et al. Simulation and analysis of soil water in different stages paddy field based on HYDRUS[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering(JDIME), 2022, 40(7): 729-736. (in Chinese)

Simulation and analysis of soil water in different stages paddy field based on HYDRUS

MA Lihua¹, HU Xiaotao², JIANG Xianjun¹, WANG Wen'e^{2*}

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to explore the differences of soil moisture status in different stages of rice field, based on the continuous monitoring data of soil moisture of conventional rotation rice in purple soil in Chongqing hilly area. The HYDRUS-1D model was used to verify and simulate the soil hydraulic parameters and soil content in three different dry and wet stages (stage I, II, III) of rice flooding, drainage drying and post-harvest. The results indicate that: ① according to the error analysis from R^2 and $RMSE$ results, pressure heads and vertical fluxes simulated using HYDRUS-1D match measured data well. The HYDRUS-1D can be used to simulate the change of soil water content in the paddy field; ② According to the analysis of soil water balance, the rice soil water in stage I is mainly in the form of water supplement. The soil water loss in stage II and III is mainly water loss, and water leac-

收稿日期: 2021-01-29; 修回日期: 2022-03-15; 网络出版时间: 2022-07-07

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20220706.1049.018.html>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0300901); 四川省区域创新合作项目(22QYCX0073)

第一作者简介: 马黎华(1983—), 女, 河南舞钢人, 副教授, 博士(malh@swu.edu.cn), 主要从事农业科学中与水文过程相关的数据模拟研究.

通信作者简介: 王文娥(1975—), 女, 河南孟州人, 教授, 博士生导师(wangwene@nwsuaf.edu.cn), 主要从事节水灌溉技术、流体机械及排灌设备研究.

hing (approximately 52% and 95% in stage II and stage III, respectively) is the main path of water loss from the flood to dryland rice field; ③ According to the simulation results of HYDRUS, the rainfall directly affects the change of upper and lower boundary flow of soil. Following the simulation results, the sunshine hours bring obvious diurnal variation rule for evapotranspiration fluxes. The actual crop transpiration and surface evaporation of stage II are lower than those of stage I, while the actual surface evaporation of stage III is more closely related to the sunshine hours.

Key words: HYDRUS model; rice field; soil water content; boundary flow; water balance

在水稻生育后期,一般要进行排水干田或自然落干的过程,稻田土壤水分状况实现由饱和态到非饱和态的转变.在这一转变过程中,土壤水分运移方式以及涉及土壤水分各平衡要素的转化均存在差异性.加深对稻田不同水分状况的认识和理解,对于农业水管理、水分高效利用以及减缓农业面源污染等方面具有实际意义.在水稻生产过程中的水量平衡要素如地表蒸发量、作物蒸腾量以及底层渗漏量等难以实现连续和有效地监测.土壤水分的数值模拟可以利用模拟结果为一些较难实现连续监测的指标提供更多的数据信息,加强对土壤水分运移过程以及环境因素影响的认知和理解.稻田的水分运移与消耗包括地表蒸发、植物蒸腾、深层渗漏和其他边界水分损失等.蒸发量与蒸腾量发生在稻田的土壤上边界,受降雨与日照气象因素的影响较为直接^[1].底层渗漏量取决于土壤的水力特性、压力水头以及田块的状态^[2]等多种因素.底层渗漏量占稻田水分损失总量的50%~80%^[3].稻田采用干湿交替和节水控灌等不同水分管理措施会对稻田水分运移规律和稻田水分利用效率产生影响^[1,4].

HYDRUS模型基于Richards方程在饱和-非饱和和不同状态下的对流-弥散方程开展数值运算分析^[5-6],可以用于稻田土壤水分状况、水稻的水分利用效率和稻田氮淋失等方面的研究^[1,4,7].HYDRUS在水分运移模拟过程中对土壤水力特性参数的选取至关重要,考虑到田间实际水分变化的复杂性,往往进行求逆解(inverse solution)模块对模型输入的参数进行校验,校验过程也是对土壤水分运移规律的再认识过程^[1].

文中充分考虑稻田土壤水分的状态因素和作物生长情况,利用HYDRUS-1D模型,对常规水旱轮作(conventional paddy-upland rotation tillage, CT)水稻生育后期和收获后的田间水分状况进行定量分析.①选择水稻种植后期淹水、排水干田及收获后3种不同土壤水分状况的典型阶段(阶段I——淹水、阶段II——排水干田、阶段III——收获后),使用HYDRUS-

1D模型对不同土壤深度的土壤含水量进行模拟,通过试验数据率定土壤水力参数,确定模拟的有效性;②根据水量平衡分析,估算3个不同阶段底层渗漏量的差异性;③根据3个不同阶段的模拟结果,分析降雨和日照时数对水稻土壤上下边界流的影响,阐明气象因素影响下土壤水分的变化规律.

1 材料和方法

1.1 试验设计

试验于2017年在重庆市北碚区西南大学稻田长期定位试验站(106°26'E, 30°26'N)开展.试验站海拔230 m,年均温度为18.3℃,年日照时数为1 277 h,年均降水量为1 105 mm,无霜期约为334 d;土壤类型为灰棕紫色沙泥岩母质上发育的中性紫色水稻土,属于重庆地区典型丘陵紫色土稻田区.水稻品种为炳优6号(炳优6028),为早籼三系杂交稻品种.处理CT在夏季种植水稻,收获后粉碎秸秆翻耕20 cm深;冬春季节种植油菜.

2017年试验水稻全生育期101天(5月5日移栽,8月14日收获),第101天进行水稻收割.在水稻生长季,处理CT使表层土壤的水深保持在5 cm左右,从成熟后期进行田间排水直至收获.降水量 P 、田间水分管理以及所选择的3个阶段如图1所示,图中 H_w 为水层深度, d_s 为播种后天数.选取的3个阶段分别为阶段I(7月14—28日),持续14 d(336 h),稻田淹水,土壤水分为饱和状态;阶段II(7月30日—8月13日),持续14 d(336 h),稻田排水干田,土壤水分从饱和状态到非饱和状态;阶段III(8月17—24日),持续7 d(168 h),稻田收获后,该阶段为持续无降雨阶段,稻田土壤为非饱和状态.

在水稻生长季节和收获后收集气象和土壤含水量等相关数据.气象数据采用HOBO小型气象站(H21-USB, ONSET, America)和HOBO U30 USB气象站数据记录器(U30-NRC, ONSET, America)采集,包括降水量(mm)、日最高气温(℃),日最低

气温(°C),日照时数(h),地面2 m处风速(m/s).土壤含水量(体积,下同)(cm³/cm³)采用 EC5 土壤水分智能传感器(S-SMC-M005, ONSET, America)监测,安装在10,20,30,40和50 cm土层深度处.

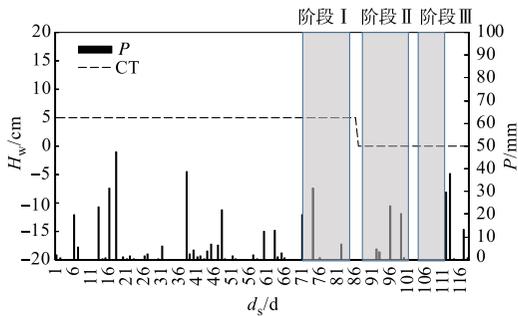


图1 常规水旱轮作(CT)降雨、稻田水分管理以及三阶段选取示意图

Fig.1 Precipitation and water management of conventional paddy-upland rotation tillage (CT) in paddy field during three chosen stages

1.2 HYDRUS 模型描述

HYDRUS 用于描述饱和-非饱和态土壤水分运动的方程为 Richards 方程,即

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] - S, \quad (1)$$

式中: θ 为土壤体积含水量, cm³/cm³; t 为时间, h; z 为空间坐标, cm; K 为土壤导水率, cm/h; h 为压力水头, cm; S 为根系吸水量, cm³/(cm³ · h).

土壤体积含水量 $\theta(h)$ 和土壤导水率 $K(h)$ 由 Van Genuchten(1980)公式计算,即

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha h)^n]^m}, & h < 0, \\ \theta_s, & h \geq 0, \end{cases} \quad (2)$$

$$K(h) = K_s S_e^l [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2, \quad (3)$$

式中: θ_s 为饱和含水量, cm³/cm³; θ_r 为滞留含水量, cm³/cm³; m, α 和 n 为决定水分特征曲线形状的经验参数,其中 $m = 1 - 1/n$; K_s 为饱和导水率, cm/h; l 为土壤孔隙连通性参数,一般在 HYDRUS 模拟中选择 $l=0.5$; S_e 为相对饱和度,定义为

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}. \quad (4)$$

1.2.1 土壤机械组成与水力参数确定

对于水力参数的估计采用了 Neural Network Prediction 模块的 Rosetta Lite v.1.1^[8] 转换实现,主要由土壤质地即土壤的机械组成决定^[6].土壤的机械组成和容重转化为6个土壤水力参数,分别为饱和含水量(θ_s),滞留含水量(θ_r),饱和导水率(K_s),

进气吸力倒数(α),孔隙尺寸分布指数(n)(n 大于1),土壤孔隙连通性参数(l)取常数0.5.

分层由种植前测得的土壤分层与土壤组成,见表1,表中 H_s, τ, ρ 分别为土层深度、颗粒体积分数、土壤容重.表1表明,根据 Rosetta Lite v.1.1 得到的第2层的土壤水力参数 K_s 比第1层减小了27.3%.

表1 水稻土的土壤机械组成
Tab.1 Physical properties of paddy soil

H_s/cm	$\tau/\%$			$\rho/(g \cdot cm^{-3})$
	砂粒 (>0.05 mm)	粉粒(0.002~0.050 mm)	黏粒 (<0.002 mm)	
(0,17]	45.12	36.75	18.13	1.23
(17,33]	33.75	38.44	27.81	1.48
(33,63]	41.34	38.75	19.91	1.27
(63,100]	43.28	36.53	20.19	1.31

考虑到实际情况的复杂性,采用田间土壤含水量的观测数据和求逆解(inverse solution)模块,对土壤的水力参数进行参数拟合,结果见表2.

表2 土壤水分特征参数初始值以及 Hydrus 的优化值

Tab.2 Initial and optimized values of hydraulic parameters in HYDRUS

H_s/cm	条件	$\theta_r/(cm^3 \cdot cm^{-3})$	$\theta_s/(cm^3 \cdot cm^{-3})$	$\alpha/(cm^{-1})$	n	$K_s/(cm \cdot h^{-1})$
(0,17]	初始值	0.061 9	0.439 0	0.009 4	1.537 0	1.462 9
	阶段 I (无效值)		0.526 1	0.009 4	1.537 0	1.463 0
	阶段 II	0.060 0	0.542 1	0.007 5	1.562 3	1.477 4
	阶段 III	0.034 2	0.428 3	0.003 2	1.579 2	1.480 0
(17,33]	初始值	0.064 9	0.432 9	0.008 8	1.548 7	1.044 6
	阶段 I	0.065 8	0.535 5	0.008 8	1.548 7	1.044 6
	阶段 II	0.065 0	0.510 0	0.006 7	1.602 3	1.112 4
	阶段 III	0.106 7	0.364 2	0.001 4	1.103 0	1.711 0
(33,63]	初始值	0.073 2	0.406 3	0.010 5	1.464 3	1.288 3
	阶段 I	0.062 1	0.504 5	0.010 5	1.464 3	1.288 3
	阶段 II	0.067 8	0.503 2	0.008 8	1.432 1	1.321 1
	阶段 III	0.132 2	0.600 0	0.001 0	1.100 0	1.230 0

注:土壤孔隙连通性参数(l)取常数0.5,故未列表中

在土壤水处于饱和状态的阶段 I,拟合值表明 θ_s 的拟合结果为测量数据的最大值,其他值保持初始设定不变.在非饱和阶段 III, HYDRUS 的拟合值主要是关于 α, n, K_s 的拟合值变化,其中 17~33 cm 的 K_s 与初始值的差异最大.具体有(0,17] cm, K_s 拟合值的变化范围为 1.46~1.48 cm/h,在3个阶段的对比中,阶段 I 略小于阶段 II 和阶段 III; (17,33] cm, K_s 拟合值的变化范围为 1.04~1.71 cm/h,在3个阶段的比较中,阶段 I (1.04 cm/h) 小于阶段 II (1.11 cm/h), 小于阶段 III (1.71 cm/h); (33,63] cm, K_s 拟合值的变化范围为 1.23~1.32 cm/h, 阶段 II 大于

阶段 I 和 III.

1.2.2 HYDRUS 边界条件设定

HYDRUS-1D 的模拟设定为 1 m 深度的土壤剖面上,边界条件不考虑土壤水分的侧向流动.考虑到该区域的地下水位深度大约为 3 m,底部的边界条件设定为自由排水,土壤剖面的上边界条件设定为大气边界.初始条件为每个阶段初始时刻的测量土壤含水量 (cm^3/cm^3).

1.2.3 模型误差分析

通过计算决定系数 R^2 和均方根误差 $RMSE$ 将不同土壤深度土壤含水量的 HYDRUS 模型模拟值与观测值进行比较.

R^2 的值在 0 到 1 之间,越接近于 1 表明模型的模拟效果越好; $RMSE$ 与土壤含水量观测值具有相同的量纲,便于对不同阶段之间的模拟误差进行比较.

1.3 潜在地表蒸发量 E_p 和潜在植物蒸腾量 T_p 的估算方法

HYDRUS 模型中的潜在蒸发量 ($E_p, \text{cm}/\text{h}$) 与潜在蒸腾量 ($T_p, \text{cm}/\text{h}$) 之和为作物的蒸发蒸腾量,以作物系数 K_c [9] 结合 Penman-Monteith 公式 [10] 组合计算得到 [11]. E_p 和 T_p 因作物在土壤表面覆盖度差异而不同,与太阳辐射值 K_{gr} [12] 以及叶面积指数 LAI 密切相关,计算公式为

$$ET_C = ET_0 \cdot K_c, \quad (5)$$

$$E_p + T_p = ET_C, \quad (6)$$

$$E_p = ET_C \cdot e^{K_{gr} \cdot LAI}. \quad (7)$$

水稻的叶面积指数 LAI 根据生育期的划分 [6] 实测得到:阶段 I 取 6.2,阶段 II 取 4.7,阶段 III 为无植株,故 LAI 为 0.由此得到的地表蒸发量 (E_p) 和植物蒸腾量 (T_p) 如图 2 所示.

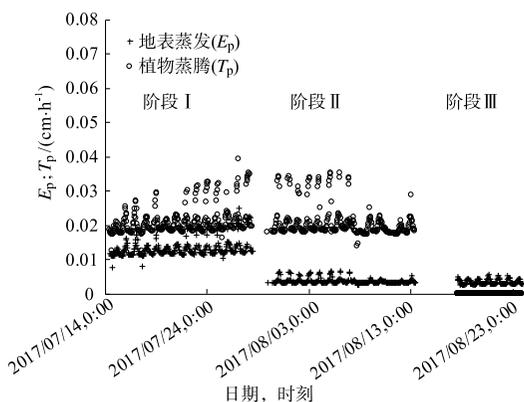


图 2 常规水旱轮作 (CT) 稻田 3 个阶段的潜在地表蒸发量 (E_p) 与植物蒸腾量 (T_p)

Fig.2 Potential values of evaporation (E_p) and transpiration (T_p) for CT during chosen stages

1.4 根系吸水模型

在 HYDRUS-1D 根系吸水模块的计算中,基于利用 FEDDES 等 [13] 提出的水分胁迫响应函数.

采用 SINGH 等 [14] 优化的水稻作物 [$h_1 = 100 \text{ cm}$, $h_2 = 55 \text{ cm}$, h_3 (高) = -160 cm , h_3 (低) = -250 cm , $h_4 = -15000 \text{ cm}$] 的参数值作为水稻根系吸水模型的设定 [6]. 以不同生育期实际测得的实际根系参数 [15] 为根系分布的输入项.

1.5 水量平衡分析

水量平衡分析计算式为

$$P + I = E + T + D + \Delta V, \quad (8)$$

式中: P 为累积降雨量, cm ; I 为累积灌溉量, cm (选取的阶段 I 和 II 无灌溉); E 为实际和累积蒸发量, cm ; T 为实际和累积根系吸水量, cm ; D 为累积底层渗漏量; ΔV 为土壤蓄水量、土壤耗水或补充水量的变化,用于反映从初始时间含水量与结束时间含水量的差异.

2 结果与分析

2.1 实测土壤含水量

稻田土壤不同深度 H_s 的实测土壤含水量在 3 个选取时段的最大值、最小值和均值见表 3.

表 3 不同阶段不同深度的土壤含水量

Tab.3 Soil water content under different chosen stage and depth of paddy soil cm^3/cm^3

H_s / cm	阶段 I			阶段 II			阶段 III		
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
10	0.537	0.499	0.526	0.257	0.117	0.159	0.134	0.055	0.087
20	0.542	0.526	0.534	0.539	0.171	0.299	0.182	0.099	0.143
30	0.541	0.531	0.537	0.533	0.172	0.375	0.172	0.133	0.154
40	0.523	0.505	0.518	0.480	0.233	0.318	0.298	0.206	0.227
50	0.502	0.471	0.491	0.510	0.230	0.429	0.512	0.213	0.235
均值	0.529	0.506	0.521	0.464	0.185	0.316	0.259	0.141	0.169

在选取的阶段 I, 不同深度的土壤含水量均处于饱和含水量的状态, 各个土层之间的最大值、最小值和平均值的差异也很小. 在选取的阶段 II, 除了 10 cm 深度的最大值和最小值的差异不大, 深度 20, 30, 40 和 50 cm 土层含水量的最大值接近饱和含水量 $0.5 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, 最小值为 $0.1 \sim 0.2 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. 在水稻收获后阶段 III 中除 50 cm, 其他土层的含水量明显处于非饱和状态, 最大值和最小值均为 $0.1 \sim 0.2 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. 阶段 I, II, III 的 0~50 cm 平均土壤含水量分别为 $0.521, 0.316, 0.169 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. 选取的 3 个阶段基本代表了稻田土壤处于淹水饱和状态 (阶段 I)、排水干田由饱和状态到非饱和状态的转换过程 (阶段 II) 和收获后完全非饱和状态 (阶段 III).

2.2 模型模拟与误差分析

稻田土壤 10,30 和 50 cm 深度土壤含水量的实测值 θ_t 和 HYDRUS 模拟值 θ_m 如图 3 所示。

在阶段 I,不同深度稻田土壤含水量的实测值均接近其饱和含水量,即 $0.5 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 左右,其中 10 cm 深度的实测值存在微小的波动变化,各土层的 HYDRUS 的模拟值为一条直线,基本等于该土层的饱和含水量值;30 cm 深度土壤含水量的模拟值略低于实测值,模拟值和实测值的平均值分别为 0.52 和 $0.53 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$;50 cm 深度土壤含水量的模拟值略高于实测值,模拟值和实测值的平均值分别为 0.51 和 $0.49 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。

在阶段 II,土壤含水量的变化范围为 $0.20 \sim$

$0.50 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$.在变化节点附近,实际的土壤含水量的变化比模拟值减小得更为迅速.10 cm 深度的土壤含水量为 $0.20 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 左右,由于降水呈现 2 个峰值的变化,模拟值的变化比实测值的变化更加明显.30 cm 在这一阶段部分仍处于饱和状态,存在饱和态与非饱和状态的转换过程,这可能与犁底层的存在或者水稻土特殊的土层结构有关.在模拟中调整压力水头可以取得较好的模拟效果,由图 3b 部分下降趋势中,实测值比模拟值的变化更陡。

在阶段 III, HYDRUS 能够较好地模拟非饱和状态下无降雨土壤水分持续降低的过程,30 cm 深度处的模拟值略高于实测值,模拟值和实测值的平均值分别为 0.17 和 $0.15 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。

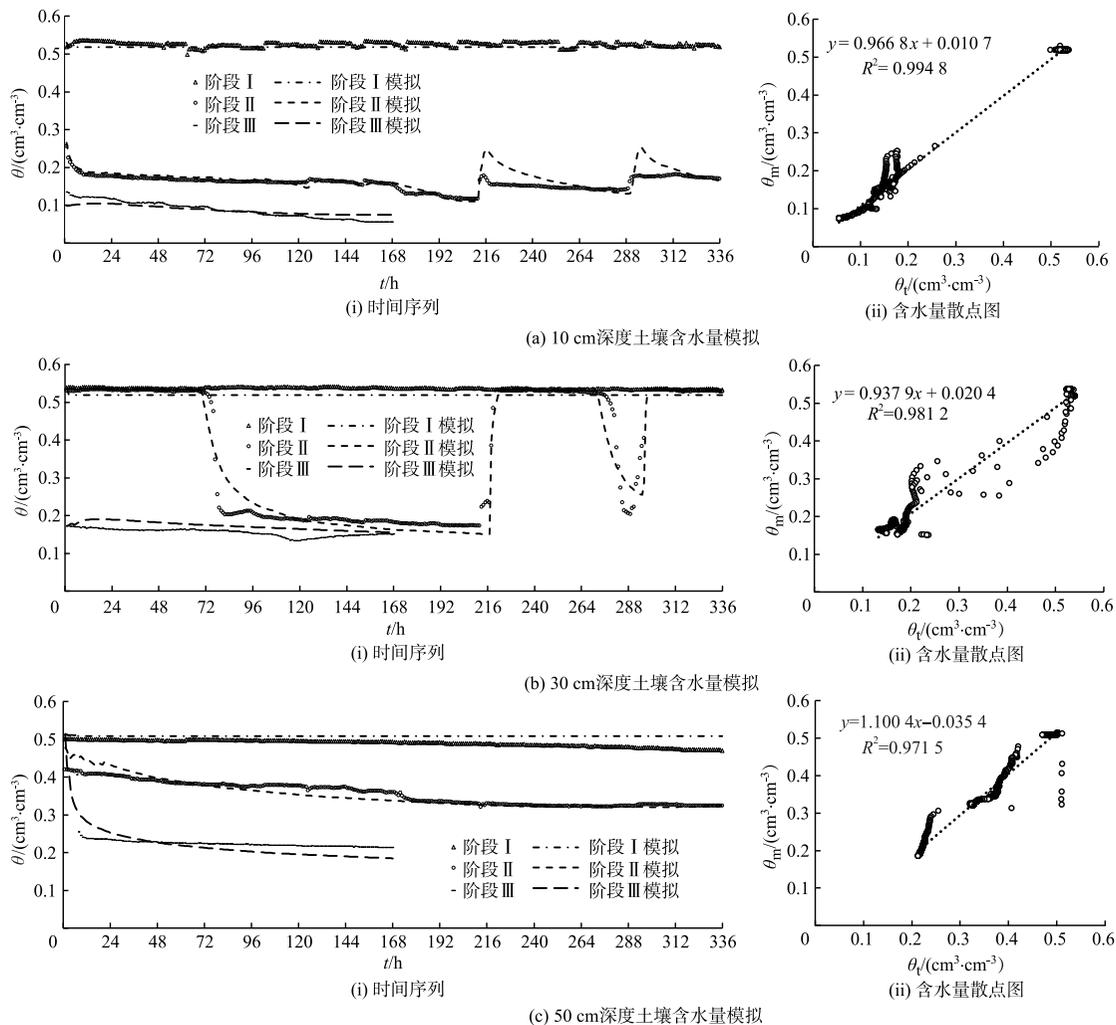


图3 稻田 10,30 和 50 cm 深度阶段 I, II 和 III 土壤含水量

Fig.3 Soil water content under different chosen stage of 10, 20 and 50 cm soil depth for paddy soil

表 4 为 CT 在不同土壤深度、不同阶段的实测和模拟含水量的误差分析结果.除了阶段 I, R^2 均符合模拟值与观测值存在显著 ($P < 0.05$) 线性关系. $RMSE$ 在 3 个阶段均为 $0.00 \sim 0.10 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$.阶段 I

中,除了在 50 cm 处,其他土壤深度处于饱和土壤含水量 ($0.51 \sim 0.53 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$) 中, $RMSE$ 最小 (0.02).阶段 II 中的 R^2 最高 (0.72), $RMSE$ 较低 (0.06);阶段 III 中的 R^2 较高 (0.65), $RMSE$ 最低 (0.05).可以认为

HYDRUS 可以对稻田的水分进行有效模拟,对阶段Ⅲ土壤水分非饱和状态下的模拟效果好于阶段Ⅱ和Ⅰ,即土壤水分饱和或部分饱和状态下的模拟效果。

表4 土壤含水量 HYDRUS 模拟误差分析
Tab.4 Error analysis between HYDRUS model simulated soil water contents and measured soil water contents

H_s/cm	R^2			RMSE		
	阶段Ⅰ	阶段Ⅱ	阶段Ⅲ	阶段Ⅰ	阶段Ⅱ	阶段Ⅲ
10	0.00	0.30 **	0.96 **	0.01	0.04	0.04
20	0.00	0.88 **	0.35 **	0.02	0.07	0.05
30	0.00	0.96 **	0.39 **	0.02	0.03	0.07
40	0.00	0.82 **	0.62 **	0.00	0.04	0.03
50	0.02 *	0.64 **	0.93 **	0.03	0.10	0.05
均值	0.01	0.72	0.65	0.02	0.06	0.05

注:表中*表示 $P<0.05$; **表示 $P<0.01$

2.3 水量平衡分析与底层渗漏量估算

由式(12),考虑不同阶段的降雨 P 、 E 、 T 和土壤水分变化的水量平衡结果见表5,表中 d_1 、 θ_a 、 T_p 、 E_p 、 D_c 、 D_s 分别为天数、0~50 cm含水量均值(cm)、实际蒸腾量、实际蒸发量、底层渗漏量计算值、底层渗漏量 HYDRUS 模拟值.在阶段Ⅰ,水分输入总量来自降水量5.84 cm,其他补充量为3.56 cm,土壤水分损失提供为1 cm;水分损耗中,植株蒸腾量占57%,地表蒸发量占43%.在阶段Ⅱ,水分输入总量来自降水量5.26 cm,土壤水分损失提供的水分补给为5 cm;水分损耗中,植株蒸腾量占36%,地表蒸发量占12%,底层渗漏量占52%.在阶段Ⅲ,水分输入总量来自降水量0 cm,土壤水分损失提供为12 cm;水分损耗中,植株蒸腾量占0%,地表蒸发量占5%,底层渗漏量占95%。

表5 常规水旱轮作(CT)稻田3个阶段的水量平衡分析

Tab.5 Water balance analysis for CT under different chosen stage of paddy soil

阶段	d_1/d	P/cm	θ_a/cm		T_p/cm	E_p/cm	D_c/cm	D_s/cm
			初始	结束				
Ⅰ	14	5.84	52	51	5.90	4.50	-3.56	-3.87
Ⅱ	14	5.26	45	40	3.68	1.28	5.30	5.76
Ⅲ	7	0	26	14	0	0.59	11.41	11.15

在阶段Ⅱ和阶段Ⅲ,底层渗漏量是稻田水分损失的主要来源;阶段Ⅰ以水分补充为主,阶段Ⅱ以底层渗漏为主.在阶段Ⅰ和阶段Ⅱ,土壤含水量变化不大,土壤含水量基本维持和接近土壤饱和含水量.在阶段Ⅲ,由于作物已经被移除,导致土壤含水量的变化主要有地表蒸发和底层渗漏导致,底层渗漏量是水分减少的主要方式。

2.4 HYDRUS 模拟降雨、日照对土壤水分的影响

2.4.1 降雨对 HYDRUS 模拟上、下边界流的影响

根据 HYDRUS 模拟结果中对于上边界流的计算值,降雨对于上、下边界流 q 的影响如图4所示.降雨量的大小影响了边界流的大小.阶段Ⅰ中,3次降雨的累积降雨量分别为1.98,3.14和0.06 cm;对应边界流的变化值为-0.010~0, -0.030~-0.007和-0.007~-0.003 cm/h.

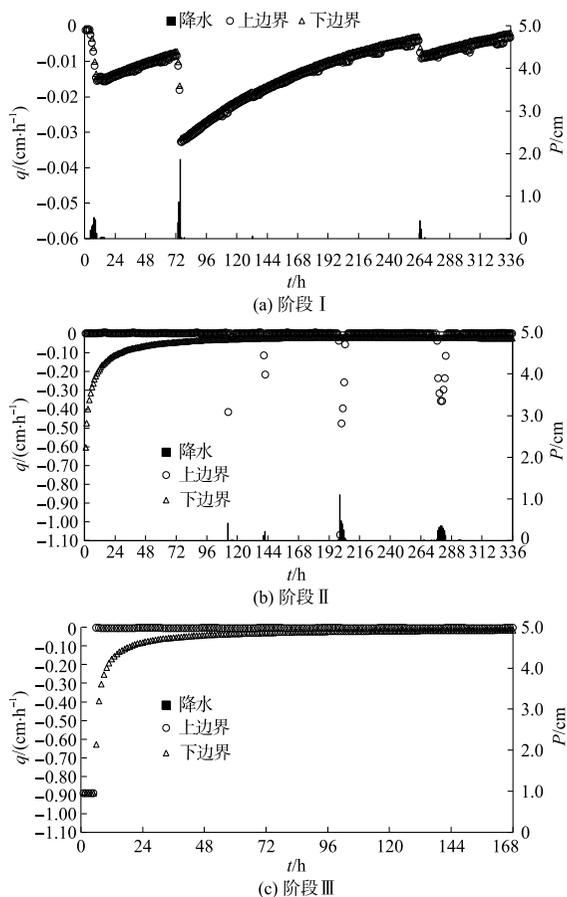


图4 降水量对上、下边界流的影响

Fig.4 Effects of precipitation on upper and lower boundary flow

在阶段Ⅱ,上边界流的变化依然受到降水量的影响较大,下边界流的变化受降雨量影响较小,下边界流先迅速减少然后较为稳定。

在持续无降水的阶段Ⅲ,由于缺少降水量的补给,上边界流为0,下边界流先迅速下降随后趋于稳定。

2.4.2 日照时数对 HYDRUS 模拟实际蒸散发的影响

根据 HYDRUS 的模拟结果,日照时数 t_{sun} 对于实际作物蒸腾量和实际地表蒸发量产生直接的影响如图5所示。

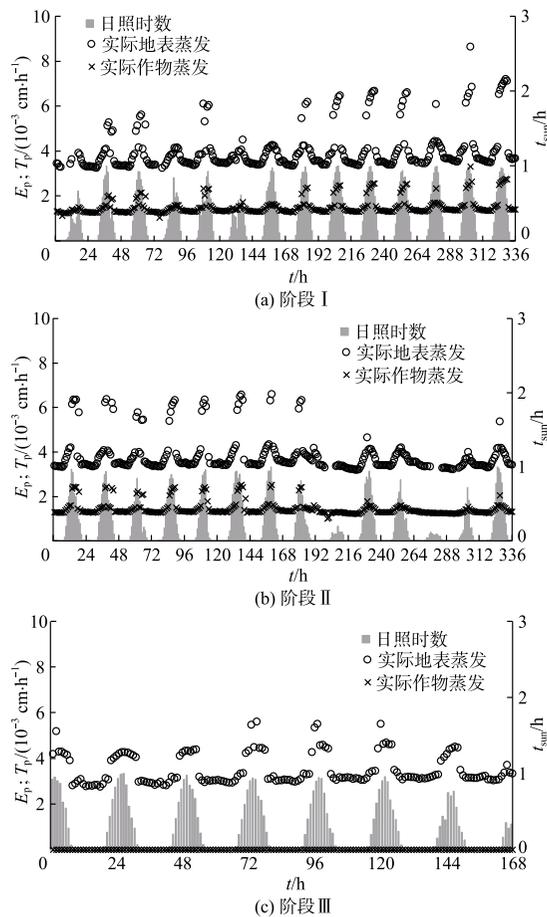


图5 日照时数对于实际作物蒸腾量和实际地表蒸发量的影响

Fig.5 Effects of sunshine hours on actual rice transpiration and actual surface evaporation

由图可以看出,日照时数的日变化规律导致了实际作物蒸腾量和实际地表蒸发量也呈现了明显的日变化规律.总体上,阶段Ⅱ的蒸发蒸腾量低于阶段Ⅰ.在阶段Ⅰ和Ⅱ,对应日照时数最大的正午,实际作物蒸腾量和实际地表蒸发量最大值分别为0.006和0.003 cm/h;对应日照时数为0的夜间,实际作物蒸腾量和实际地表蒸发量最小值分别为0.003和0.001 cm/h.在阶段Ⅲ,实际作物蒸腾量均为0,对应日照时数最大的正午,实际地表蒸发量最大值为0.005 cm/h;对应日照时数为0的夜间,实际地表蒸发量最小值为0.003 cm/h.阶段Ⅲ的地表实际蒸发介于阶段Ⅰ和Ⅱ之间.

3 讨论

不同阶段稻田土壤水分的差异来源之一体现在土壤水力特性参数的差异上.文献[16-17]证实了HYDRUS反推模块在实际使用中的有效性.文中

(见表2)以 K_s 的差异为例,0~17和17~33 cm 2个土层的 K_s 均为阶段Ⅰ的小于阶段Ⅱ和Ⅲ的,即在饱和态到非饱和态的转变过程中, K_s 是逐渐变大的,这与土壤自身饱和-非饱和入渗的规律具有一致性^[18]. K_s 的变化由阶段Ⅰ的1.04 cm/h和阶段Ⅱ的1.11 cm/h,变为阶段Ⅲ的1.71 cm/h.在图3的结果中也可以看到30 cm的土壤水分在阶段Ⅱ中处于饱和与非饱和态交替变化中.在分层界面,当分层土壤水力特性差别较大时,土壤入渗规律存在变化上的复杂性^[17].

稻田水量平衡要素的差异很大程度上取决于降水量和灌溉量的差异^[6].文中研究中选取水稻生育后期,不考虑灌溉因素,水量平衡要素的影响主要来自于降水量与土壤水分变化,以及底层渗漏量的差异上.由图4可知,在假设不产生地表径流的前提下,降雨过程与上边界流和下边界流的变化密切相关;而阶段Ⅱ和Ⅲ中的变化更接近非饱和土壤的变化,即先迅速降低然后趋于平衡的变化^[17].日照对于3个阶段的影响也存在一定的差异性.由图5所示,对地表实际蒸发量而言,阶段Ⅲ中,日照时数的变化与地表实际蒸发量关系的决定系数为0.83,阶段Ⅰ和Ⅱ的该值分别为0.64和0.61.根据HYDRUS这一模拟结果,可以认为在水稻收获后的阶段Ⅲ,稻田土壤的地表实际蒸发量与日照时数的关系更密切.

4 结论

- 1) HYDRUS 可以实现对稻田不同水分状态3个阶段土壤含水量的有效模拟.
- 2) 根据水量平衡结果,阶段Ⅰ稻田土壤水分以水分补充为主;阶段Ⅱ和Ⅲ的土壤水分以水分损失为主,底层渗漏量是水分损失的主要途径,分别占总水分损失的52%和95%.
- 3) 降雨是土壤上边界流发生变化的直接原因,日照时数为蒸发蒸腾量带来了日变化规律.

参考文献 (References)

- [1] AMIN SALEHI A, NAVABIAN M, VARAKI M E, et al. Evaluation of HYDRUS-2D model to simulate the loss of nitrate in subsurface controlled drainage in a physical model scale of paddy fields[J]. Paddy water environment, 2017, 15:433-442.
- [2] WOPEREIS M C S, BOUMAN B A M, KROPFF M J,

- et al. Water use efficiency of flooded rice fields I. validation of the soil-water balance model SAWAH[J]. Agricultural water management, 1994,26(4):277-289.
- [3] SINGH R, VAN DAM J C, FEDDES R A. Water productivity analysis of irrigated crops in Sirsa district, India[J]. Agricultural water management, 2006, 82(3):253-278.
- [4] DARZI-NAFTCHALI A, KARANDISH F, ŠIMŮNEK J. Numerical modeling of soil water dynamics in subsurface drained paddies with midseason drainage or alternate wetting and drying management[J]. Agricultural water management, 2018,197(15):67-78.
- [5] ŠIMŮNEK J, VAN GENUCHTEN M T. Modeling non-equilibrium flow and transport processes using HYDRUS[J]. Vadose zone journal, 2008,7(2):782-797.
- [6] BEEGUM S, ŠIMŮNEK J, SZYMKIEWICZ A, et al. Updating the coupling algorithm between HYDRUS and MODFLOW in the HYDRUS package for MODFLOW[J]. Vadose zone journal, 2018,17(1):1-8.
- [7] LI Yong, ŠIMŮNEK J, JING Longfei, et al. Evaluation of water movement and water losses in a direct-seeded-rice field experiment using HYDRUS-1D[J]. Agricultural water management, 2014,142(C):38-46.
- [8] SCHAAP M G, LEIJ F J, VAN GENUCHTEN M T. Rosetta; a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions[J]. Journal of hydrology, 2001,251(3/4):163-176.
- [9] 云文丽. 河套灌区向日葵节水灌溉预报模型研究[J]. 江苏农业科学, 2021,49(3):187-191.
YUN Wenli. Study on forecasting model of sunflower irrigation in Hetao irrigation area[J]. Jiangsu agricultural sciences, 2021,49(3):187-191.(in Chinese)
- [10] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D. Cropevapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56 [R]. Rome, Italy: FAO, 1998.
- [11] FAO. Land resources appraisal of Bangladesh for agricultural development. Report 2. Agro-ecological regions of Bangladesh[R]. Rome, Italy: United Nations Development Programme and Food and Agricultural Organization, 1988.
- [12] PHOGAT V, PITT T, COX J W, et al. Soil water and salinity dynamics under sprinkler irrigated almond exposed to a varied salinity stress at different growth stages [J]. Agricultural water management, 2018, 201(31):70-82.
- [13] FEDDES R A, KOWALIK P J, ZARADNY H. Simulation of field water use and crop yield[M]. Wageningen, Netherlands: Centre for Agricultural Publishing and Documentation, 1978.
- [14] SINGH R, VAN DAM J C, JHORAR R K. Water and salt balances at farmer fields [M]//VAN DAM J C, MALIK R S. Water productivity of irrigated crops in Sirsa district, India. Wageningen, Netherlands: Wageningen UR, 2003:41-58.
- [15] 万琪慧, 马黎华, 蒋先军. 垄作免耕对水稻根系特性和氮磷钾养分累积的影响[J]. 草业学报, 2019, 28(10):44-52.
WAN Qihui, MA Lihua, JIANG Xianjun. Root characteristics and accumulation of nitrogen, phosphorus, and potassium in rice plants cultivated under three different systems[J]. Acta prataculturae sinica, 2019,28(10):44-52.(in Chinese)
- [16] SAKAGUCHI A, YANAI Y, SASAKI H. Subsurface irrigation system design for vegetable production using HYDRUS - 2D [J]. Agricultural water management, 2019,219(C):12-18.
- [17] 毛晓敏, 尚松浩. 计算层状土稳定入渗率的饱和层最小通量法[J]. 水利学报, 2010,41(7):810-817.
MAO Xiaomin, SHANG Songhao. Method of minimum flux in saturation layer for calculating stable water infiltration through layered soil[J]. Journal of hydraulic engineering, 2010,41(7):810-817.(in Chinese)
- [18] 刘建军, 王全九, 王卫华, 等. 利用 HYDRUS-1D 反推土壤水力参数方法分析[J]. 世界科技研究与发展, 2010,32(2):173-175.
LIU Jianjun, WANG Quanjiu, WANG Weihua, et al. Inverse solution soil hydraulic parameters and verification using HYDRUS - 1D model [J]. World sci - tech R&D, 2010,32(2):173-175.(in Chinese)

(责任编辑 张文涛)