

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.10.039

# 基于饱和土壤埋深调控的水稻节水灌溉技术研究

徐俊增<sup>1,2</sup> 程衡<sup>1</sup> 卫琦<sup>1</sup> 陈鹏<sup>1</sup> 栾雅珺<sup>1</sup> 蔡少杰<sup>1</sup>

(1. 河海大学农业科学与工程学院, 南京 210098; 2. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098)

**摘要:** 采用盆栽试验和 Hydrus-1d 模型模拟相结合的方法, 研究了不同耗水强度下稻田落干脱水过程中土壤含水率与饱和土壤埋深的变化规律, 建立了土壤含水率与饱和土壤埋深之间的定量关系。结果表明, 在稻田落干脱水过程中, 土壤含水率与饱和土壤埋深具有很好的同步变化规律, 采用率定后的 Hydrus-1d 模型能够较好地模拟稻田落干脱水过程中二者的变化。试验和模拟结果均显示, 节水灌溉稻田土壤含水率与饱和土壤埋深之间呈明显的二次抛物线关系, 即饱和土壤埋深随着稻田落干脱水过程中土壤含水率的降低而增大。基于二者之间的定量关系与传统土壤含水率指标临界值, 计算得到了饱和土壤埋深指标临界值, 确定了各生育期饱和土壤埋深临界值区间为(0.27 m, 0.50 m), 由此提出了以饱和土壤埋深为调控指标的水稻节水灌溉技术。该技术采用易于观测的饱和土壤埋深作为控制指标, 克服了以土壤含水率、田间无水层天数等控制指标带来的监测成本高、测量精度低等问题, 在准确反映田间水分状况的同时, 满足了节水灌溉规模化应用的需求。

**关键词:** 节水灌溉; 土壤含水率; 饱和土壤埋深; Hydrus-1d

中图分类号: S275 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)10-0345-08

OSID:



## Water-saving Irrigation Technology of Rice Based on Regulation of Depth of Saturated Soil

XU Junzeng<sup>1,2</sup> CHENG Heng<sup>1</sup> WEI Qi<sup>1</sup> CHEN Peng<sup>1</sup> LUAN Yajun<sup>1</sup> CAI Shaojie<sup>1</sup>

(1. College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China

2. State Key Laboratory of Hydrology - Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Putting forward easily-observed and operate rice water-saving irrigation regulation indicators is of great significance to promote the large-scale application of rice water-saving irrigation technology. The method of pot experiment and model scenario simulation (Hydrus-1d) was used to study the variation of soil moisture and the depth of saturated soil during the drying and dehydration of paddy fields under different water intensities. The quantitative relationship between the soil moisture and the depth of saturated soil were established. The results show that the soil moisture and the depth of saturated soil during the paddy field dehydration had a good synchronous change law. The correlation coefficient between the measured soil moisture and the simulated soil moisture was 0.758 by using the Hydrus-1d model, which can better simulate the synchronous change of the two in the process of rice field dehydration. Both the experiment and the simulation results showed that there was a clear quadratic parabolic relationship between the soil moisture and the depth of saturated soil in the water-saving irrigation paddy field, that was, the depth of saturated soil was increased with the decrease of soil moisture in the process of rice field dehydration. In addition, based on the quantitative relationship between the two and the traditional critical value of soil moisture index, the critical value of the depth of saturated soil index was calculated, and the critical value of saturated soil depth in each growth period was ranged from 0.27 m to 0.50 m, forming a water-saving irrigation technology of rice with saturated soil depth as the control index. The technology used easily-observed depth of saturated soil as a control index, which overcame the problems of high monitoring cost and low measurement accuracy brought by using the soil moisture and a fixed number of days in an anhydrous layer as the control index, accurately reflecting the field moisture status, and at the same time, it met the needs of large-scale application of water-saving irrigation.

**Key words:** water-saving irrigation; soil moisture; depth of saturated soil; Hydrus-1d

收稿日期: 2020-05-26 修回日期: 2020-07-25

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0400103)和江苏省高校优秀科技创新团队项目

作者简介: 徐俊增(1980—),男,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉理论及其农田生态效应研究,E-mail: xjz481@hhu.edu.cn

通信作者: 卫琦(1986—),男,副研究员,博士,主要从事节水灌溉理论与技术研究,E-mail: weiqi8855116@163.com

## 0 引言

随着水资源的日益紧缺,提高农业用水效率已成为保障粮食安全和水安全的重要措施<sup>[1-5]</sup>。水稻作为我国主要粮食作物,其耗水量约占农业用水量的70%、全国总用水量的50%<sup>[6]</sup>。在此背景下,“浅、湿、晒”灌溉<sup>[7-8]</sup>、水稻强化栽培<sup>[9]</sup>、控制灌溉<sup>[10]</sup>、间歇灌溉<sup>[11]</sup>等节水灌溉技术已被大规模应用。尽管不同节水灌溉制度对水稻增产作用还存在不确定性,但在提高水分利用效率方面已被广泛认可<sup>[12]</sup>。

为掌握水稻水分亏缺状况,及时进行灌溉管理,需要确定合理的灌溉调控指标。现行的各种水稻节水灌溉技术在调控指标与触发灌溉的指标阈值方面略有不同。对于传统淹水灌溉来说,田间水层是稻田灌溉的首要控制指标。浅湿灌溉秉承浅水勤灌的理念,一般以30 mm为上限、5 mm为下限,其灌水量有所降低,但灌水频率增加。通常情况下在一次足量灌溉后维持田面3~5 d内有水层,当水全部下渗进入土壤后再保持田面无水层3~5 d,之后复水,使稻田呈现周期性的干湿状态,称之为干湿交替灌溉<sup>[13]</sup>。田间试验发现,在生育期内控制稻田呈现周期性无水层变化的水稻长势较好。土壤水势被用来作为水稻节水灌溉的调控指标,相关研究表明,水稻节水灌溉的水势阈值范围一般为-40~-20 kPa,且在不同生育阶段其阈值有所差异<sup>[14]</sup>。与土壤水势相似,土壤体积含水率也作为水稻节水灌溉控制指标(多为相对饱和含水率,在0.60~0.85 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>之间),并被广泛应用,但二者都具有空间变异性大等缺点,因此在大面积推广应用时需要大量的传感器来满足对土壤水分状况的监测。为了解决监测精度低、测量成本高等问题,在节水灌溉技术推广过程中,也有采用足迹深度、稻田裂缝程度等对设备依赖性较小的土壤描述性指标,以触发节水灌溉<sup>[15]</sup>。但足迹深度、裂缝程度、无水层天数主要依靠农民的生产经验,其精确性尚不明确,甚至无法合理度量,因此在指导水稻节水灌溉方面存在明显缺陷。

上述提到的大部分水稻节水灌溉技术,在灌溉

后田面大多处于淹水或饱和状态,随着水分的消耗淹水层逐渐消失,一定厚度的土壤开始呈现非饱和状态,且随着落干脱水过程而逐渐变厚。这就意味着在饱和与非饱和土层之间存在一个向下移动的浅层水位,其对应深度定义为饱和土壤埋深。假设不同生育期根区饱和土壤埋深存在一个临界点,该点能否成为触发节水灌溉的替代指标值得进一步探讨。因此,本文结合在黑龙江省大面积推广应用的稻田控制灌溉技术<sup>[16]</sup>,采用盆栽试验与模型(Hydrus-1d)模拟相结合的方法,研究稻田无水层阶段饱和土壤埋深与土壤体积含水率的变化规律,以确定水稻不同生育阶段的饱和土壤埋深临界值。

## 1 材料与方法

本试验于2017年5—11月在黑龙江省庆安灌溉试验站进行,该地区属于寒温带大陆性季风气候,多年平均气温2.5℃,多年平均降水量550 mm,降雨多集中在7—9月。试验区土壤类型为黑土,有机质质量比41.5 g/kg,碱解氮质量比154.7 mg/kg,有效磷质量比32.3 mg/kg,速效钾质量比122.9 mg/kg。盆栽试验在直径50 cm、高度70 cm柱形桶中进行,将风干、破碎、过筛(4 mm)预处理后的土壤装入桶内,土壤基本物理性质如表1所示。在每个桶底部土壤下面铺设厚度为5 cm的细砂过滤层,过滤层内部埋设透水管,透水管通过筒壁连接一个控制阀门,通过调节阀门开度收集排水,模拟深层渗漏。

表1 土壤基本物理性质

Tab.1 Soil basic physical properties

土层深度/ cm	土壤容重/ (g·cm <sup>-3</sup> )	土壤饱和体积含水 率/(cm <sup>3</sup> ·cm <sup>-3</sup> )	粒径质量分数/%		
			砂粒	粉粒	黏粒
0~10	1.11	0.53	68	17	15
10~30	1.32	0.47	68	17	15
30~50	1.40	0.43	67	19	14

水稻采用控制灌溉模式进行灌溉管理,不同生育期土壤灌水下限如表2所示。根据试验区深层渗漏情况设置3种渗漏强度(1、2、3 mm/d;记为D1、D2、D3)。渗漏水由与细砂过滤层相连的控制阀门按设定体积每小时排出1次,D1、D2、D3处理对应

表2 不同时期水稻根系深度、根区及土壤水分下限

Tab.2 Root depth, root zone and soil water lower limit of rice in different periods

生育期 时段	分蘖前期 06-01—06-12	分蘖中期 06-13—06-28	分蘖后期 06-29—07-10	拔节孕穗期 07-11—07-28	抽穗开花期 07-29—08-08	乳熟期 08-09—08-28
根长/cm	5	10	20	30	40	40
灌水下限	80% $\theta_s$	70% $\theta_s$	65% $\theta_s$	80% $\theta_s$	85% $\theta_s$	75% $\theta_s$
根系层深度/cm	20	20	30	30	40	40

注: $\theta_s$ 为土壤饱和体积含水率。

的排水量分别为 8.2、16.4、24.5 mL/h。水稻品种为龙庆 3 号,于 2017 年 5 月 20 日以 4 株/盆的密度移栽至盆栽,9 月 27 日收获;根据当地栽培习惯,全生育期的氮肥(N)、磷肥(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)、钾肥(K<sub>2</sub>O)的施用量分别为 110、45、80 kg/hm<sup>2</sup>。

每个盆栽分别在 5、15、25、35 cm 深度埋设 HOBO EC-5 型土壤水分传感器测量土壤含水率,并使用 HOBO H21-002 型数据记录仪记录每小时的土壤含水率。背离排水口一侧预埋直径为 50 mm 的 PVC 管,管身钻孔并用土工布包裹防止泥沙进入,管内放置 Dataflow 型电容式水位记录仪,用于测量饱和土壤埋深,监测频率为每小时 1 次。每次灌水至土壤饱和并在田面保留约 3 cm 水层,灌水量采用量程为 100 mL、精度为 1 mL 的玻璃量筒记录。降雨量由气象站测定。当降雨后桶内水层高度超过 3 cm 时,记录初始水层高度,并排水至土表水层为 3 cm。土壤水分蒸发采用蒸发皿(直径 113 cm、高度 150 cm)进行观测,监测频率为每 2 h 1 次,蒸散发量通过水量平衡方程计算<sup>[17]</sup>。

## 2 Hydrus-1d 模型构建

### 2.1 Hydrus-1d 模型

Hydrus-1d 是根据 Richard 方程数值解建立的适用于饱和区和非饱和区的土壤水分运移模拟模型<sup>[18]</sup>,采用正交试验法,可模拟水稻根区土壤水分的动态变化过程,公式为

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

式中  $\theta$ ——土壤体积含水率,cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>

$K$ ——渗透系数,cm/d

$\psi$ ——基质势头,cm

$S$ ——根系吸水速率,cm<sup>3</sup>/(cm<sup>3</sup>·d)

$z$ ——土层深度,cm

$t$ ——时间,d

稻田土壤的水力特性用 Van Genuchten 的  $K-\theta$  和  $\psi-\theta$  关系进行描述,即

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

$$K(\psi) = K_s \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^l \left\{ 1 - \left[ 1 - \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{\frac{1}{m}} \right]^n \right\}^2 \quad (3)$$

其中  $m = 1 - 1/n$  (4)

式中  $\theta_r$ ——残余体积含水率,cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>

$K_s$ ——饱和导水率,cm/h

$\alpha$ ——经验拟合参数,cm<sup>-1</sup>

$n$ ——孔径指数

$l$ ——孔隙连通性参数,取 0.5

同时根据 Feddes 模型计算根系吸水速率,即

$$S(z, t) = \alpha'(\psi, z) b(z) T_p \quad (5)$$

其中  $\int_0^d b(z) dz = 1$  (6)

式中  $\alpha'(\psi, z)$ ——水分胁迫响应函数

$b(z)$ ——根系分布函数

$T_p$ ——作物潜在蒸腾速率,cm/d

$d$ ——根系层深度,cm

将水稻潜在蒸散发划分为潜在植物蒸腾和土壤蒸发量,即

$$T_p = ET_p (1 - e^{-kLAI}) \quad (7)$$

$$E_p = ET_p e^{-kLAI} = ET_p - T_p \quad (8)$$

式中  $ET_p$ ——潜在蒸散发量,cm/d

$E_p$ ——作物潜在蒸发速率,cm/d

$LAI$ ——叶面积指数

$k$ ——冠层消光系数,水稻一般取 0.3

### 2.2 边界与初始条件

假设模拟区域为一维剖面,将 40 cm 土层深度有限差分为 41 个节点网格,所有节点间距均为 1 cm。土壤剖面按深度分为 0~10 cm、10~30 cm 和 30~40 cm 共 3 层。地表边界(上边界)采用表面可产流的大气边界,边界条件为能反映大气、水、土壤和植物相互作用的时间变量;水分从土壤表面蒸发的速率等于潜在蒸发速率,假定基质势的临界值比土壤表面的基质势低,此处取 -10 000 cm;底部边界为变通量边界,流量为深层渗漏量;侧边界为不透水边界。土壤初始水分状况设置为饱和含水率并用压力水头进行表征。

### 2.3 模型率定与验证

基于表 1 土壤容重和粒径质量分数测定结果以及 Hydrus-1d 自带神经网络预测模块预测得到的 0~10 cm、10~30 cm、30~40 cm 土层土壤水动力参数初选值,利用 D1 和 D3 的实测数据对 Hydrus-1d 模型进行率定,并通过在模型中输入每小时的潜在蒸发、蒸腾、基质势头、降水、灌溉和土壤水力参数等数据,反演得到 Hydrus-1d 模型中的  $\alpha$ 、 $n$  和  $k$  参数值。在此基础上,根据 D2 的实测数据对率定模型的准确性进行验证。

### 2.4 模拟情景设置

由于实际应用中不同灌区阳光照射时长、降雨量、温度、下垫面等环境因素存在差异,因此,其相应的土壤渗漏及作物蒸发蒸腾量也有所不同。为进一步分析不同耗水强度导致的饱和土壤埋深指标差异,借助率定的 Hydrus-1d 模型对不同渗漏强度和

蒸发蒸腾强度组合进行了情景模拟。其中蒸发蒸腾强度的选择参考了相关研究结果<sup>[19-21]</sup>以及本研究的试验结果,渗漏强度根据当地土壤类型及地区经验进行确定。如表3所示,在每个生育阶段,按照蒸发蒸腾强度和渗漏强度不同组合均设置了9种模拟情景,每种组合的小时蒸发蒸腾量根据日蒸发蒸腾量乘以加权系数进行划分,其中06:00—18:00的

加权系数为0.067,其余时段的值均为0.016。由于仅针对一次落干脱水过程开展模拟,因此不考虑降雨的影响。基于模拟的土壤水分与饱和土壤埋深动态变化,分析不同耗水强度下两者之间的定量关系,对照水稻控制灌溉土壤水分控制指标,计算对应的饱和土壤埋深临界值,研判耗水强度差异对饱和土壤埋深控制指标的影响。

表3 水稻各生育期稻田蒸发蒸腾强度及渗漏强度控制指标

Tab.3 Control index of evapotranspiration intensity and seepage intensity in rice fields at different stages mm/d

处理	水平	分蘖前期	分蘖中期	分蘖后期	拔节期	孕穗期	抽穗开花期	乳熟期
蒸发蒸腾强度	蒸1	2	3	4	5	4	3	2
	蒸2	3	5	6	7	6	5	3
	蒸3	4	7	8	9	8	7	4
渗漏强度	渗1	1	1	1	1	1	1	1
	渗2	2	2	2	2	2	2	2
	渗3	3	3	3	3	3	3	3

## 3 结果与讨论

### 3.1 土壤含水率和饱和土壤埋深同步变化规律

盆栽试验结果如图1、2所示,各处理土壤含水率在灌水后均随着时间的延续而减少,且在不考虑处理间水稻腾发量差异的情况下,耗水量均随深层渗漏强度的增加而增加,其相应的土壤含水率下降幅度也依次增大。时间变化方面,当作物蒸腾作用较强时,土壤含水率下降较快,且饱和土壤埋深随土壤含水率的降低而增加(图2)。不同处理饱和土壤埋深呈现与土壤含水率变化相似的规律,即随着灌溉后时间的推移,饱和土壤埋深随土壤含水率的降低而增加(水位下降)。由此推断,可以考虑将饱和土壤埋深作为土壤含水率的替代指标,用于触发水稻节水灌溉。

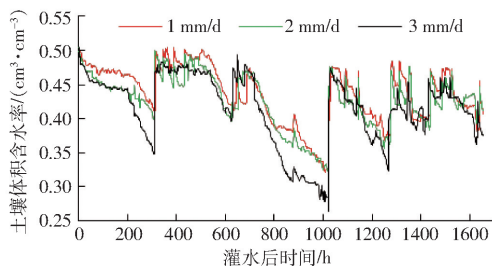


图1 节水灌溉稻田土壤体积含水率变化趋势

Fig.1 Trend of soil moisture content in water-saving irrigation paddy field

水稻根系层土壤含水率与饱和土壤埋深之间存在较好同步关系。通常情况下,渗漏强度越大,饱和土壤埋深增加的速率越大,而土壤体积含水率与饱和土壤埋深随时间的变化趋势则呈负相关关系,由统计可知两者同步变化规律均符合二次抛物线关系,具体见表4,决定系数 $R^2$ 基本达到0.96以上。

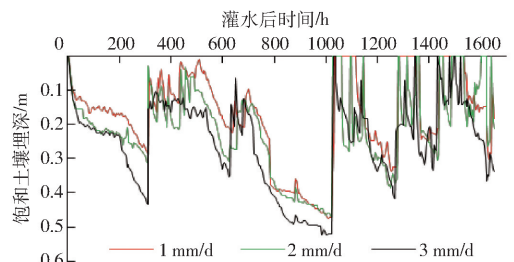


图2 节水灌溉稻田饱和土壤埋深变化趋势

Fig.2 Trend of depth of saturated soil in water-saving irrigation paddy field

因此,基于二者之间的定量关系,将黑龙江省水稻控制灌溉常用的土壤含水率灌水下限换算成对应的饱和土壤埋深,如表5所示。结果发现水稻不同生育阶段的饱和土壤埋深临界值主要维持在0.31~0.50 m范围内,其中分蘖后期饱和土壤埋深临界值最大,其对应的节水灌溉土壤水分控制下限也最低。

### 3.2 模型率定与应用

#### 3.2.1 模型率定与验证

利用2017年D1和D3处理(渗漏强度为1 mm/d和3 mm/d)数据对Hydrus-1d模型进行率定,相关参数见表6。且图3结果表明,D1和D3模拟的土壤含水率与实测土壤含水率具有较好的相关性,相关系数分别为0.806和0.831,均方根误差分别为 $0.019 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 和 $0.023 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。此外,基于D2(渗漏强度为2 mm/d)数据对率定模型的准确性进行验证,结果(图4)表明率定模型模拟的土壤体积含水率与实测的土壤体积含水率变化趋势较为吻合,其相应的相关系数和均方根误差分别为0.758和 $0.021 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。据此,率定后的Hydrus-1d模型能够较好地模拟节水灌溉稻田落干脱水过程中土壤水分动态,可以作为模拟更多耗水强度情境下稻

表 4 水稻不同生育期土壤含水率与饱和土壤埋深的关系

Tab. 4 Relations between soil moisture content and depth of saturated soil in different growth stages of rice

生育期	渗漏强度/(mm·d <sup>-1</sup> )					
	1		2		3	
	曲线方程	R <sup>2</sup>	曲线方程	R <sup>2</sup>	曲线方程	R <sup>2</sup>
分蘖前期	$\theta = -0.6479H^2 - 0.1439H + 0.5074$	0.9850	$\theta = -0.6906H^2 - 0.1251H + 0.5052$	0.9605	$\theta = -0.4617H^2 - 0.1573H + 0.5040$	0.9858
分蘖中期	$\theta = -0.8545H^2 - 0.2154H + 0.5029$	0.9940	$\theta = -0.6037H^2 - 0.1447H + 0.4989$	0.9763	$\theta = -0.4604H^2 - 0.1356H + 0.5035$	0.9851
分蘖后期	$\theta = -1.5303H^2 + 0.5538H + 0.4049$	0.9658	$\theta = -1.2271H^2 + 0.3169H + 0.4451$	0.9856	$\theta = -0.8806H^2 + 0.0766H + 0.4831$	0.9908
拔节孕穗期	$\theta = -0.6952H^2 + 0.0143H + 0.4656$	0.9753	$\theta = -0.5094H^2 - 0.0542H + 0.4726$	0.9909	$\theta = -0.5259H^2 - 0.0926H + 0.4732$	0.9901
抽穗开花期	$\theta = -0.4829H^2 - 0.0394H + 0.4552$	0.9867	$\theta = -0.6243H^2 + 0.0366H + 0.4529$	0.9629	$\theta = -0.5282H^2 - 0.0178H + 0.4627$	0.9926
乳熟期	$\theta = -0.5273H^2 - 0.0171H + 0.4538$	0.9735	$\theta = -0.8845H^2 + 0.1697H + 0.4525$	0.8764	$\theta = -0.7871H^2 + 0.1423H + 0.4496$	0.9864

注: H 为饱和土壤埋深(m)。

表 5 不同耗水强度下水稻不同生育阶段饱和土壤埋深控制指标

Tab. 5 Control index of depth of saturated soil in different growth stages of rice under different water consumption intensities

生育期	土壤含水率下限/%	土壤饱和和体积含水率/ (cm <sup>3</sup> ·cm <sup>-3</sup> )	饱和土壤埋深临界值/m		
			渗漏强度 1 mm/d	渗漏强度 2 mm/d	渗漏强度 3 mm/d
分蘖前期	80	0.504	0.31	0.31	0.32
分蘖中期	70	0.504	0.31	0.39	0.44
分蘖后期	65	0.504	0.50	0.49	0.50
拔节期	80	0.478	0.44	0.47	0.43
孕穗期	80	0.478	0.36	0.38	0.34
抽穗开花期	85	0.465	0.38	0.39	0.40
乳熟期	75	0.465	0.38	0.41	0.42

注: 土壤含水率下限为占饱和含水率的百分比; 不同阶段对应根系层深度见表 2。

表 6 率定后的 Hydrus - 1d 水力参数

Tab. 6 Calibrated hydraulic parameters of Hydrus - 1d model

土层深度/cm	土壤干容重 $\rho_s/(g \cdot cm^{-3})$	$\theta_r/(cm^3 \cdot cm^{-3})$	$\theta_s/(cm^3 \cdot cm^{-3})$	$\alpha/cm^{-1}$	$n$	$K_s/(cm \cdot h^{-1})$	$l$
0 ~ 10	1.11	0.0585	0.4930	0.0243	1.4258	5.94708	0.5
10 ~ 30	1.42	0.0559	0.4408	0.0253	1.4670	3.09125	0.5
30 ~ 40	1.50	0.0522	0.4163	0.0261	1.4668	2.30042	0.5

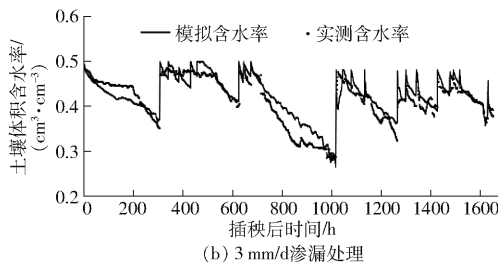
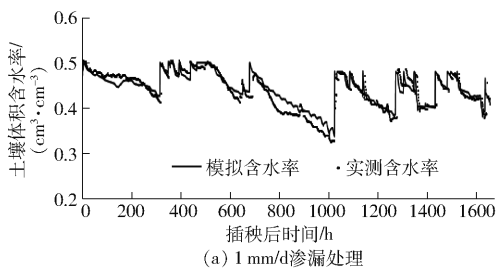


图 3 土壤水分运动模型率定

Fig. 3 Calibration of soil water movement model

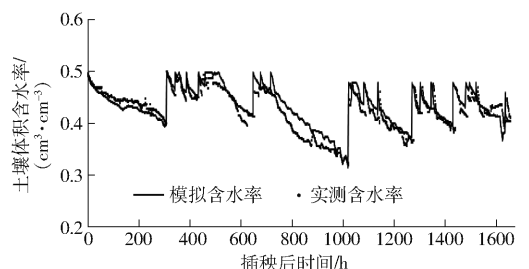


图 4 土壤水分运动模型验证

Fig. 4 Validation of soil water movement model

田水分落干脱水过程中土壤水分变化的工具。

### 3. 2. 2 基于 Hydrus - 1d 的情景模拟分析

借助率定模型对稻田不同蒸发蒸腾强度与渗漏

强度组合下稻田落干脱水过程进行情景模拟, 得到了水稻各生育期 9 组水分与水位同步变化的曲线。以分蘖前期为例展开分析, 由图 5 可以看出, 其土壤体积含水率指标的灌水下限为 0.4 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>。不同耗水处理下土壤水分运动规律较为相似, 即随着耗水过程中土壤含水率的降低, 饱和土壤埋深逐渐增加; 且耗水强度越大, 土壤含水率下降越快、饱和土壤埋深增加越快, 到达灌水下限所需的时间越短。此外, 基于多种情景模拟下土壤含水率与饱和土壤

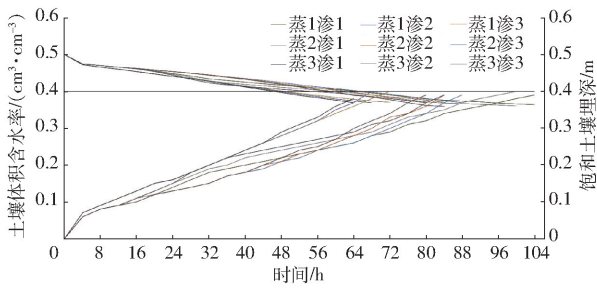
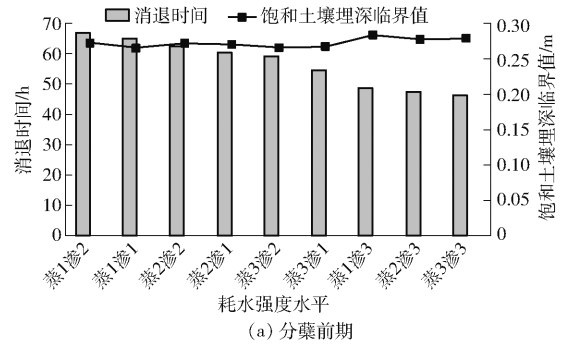


图5 水稻分蘖前期不同耗水组合下土壤体积含水率与饱和土壤埋深变化过程

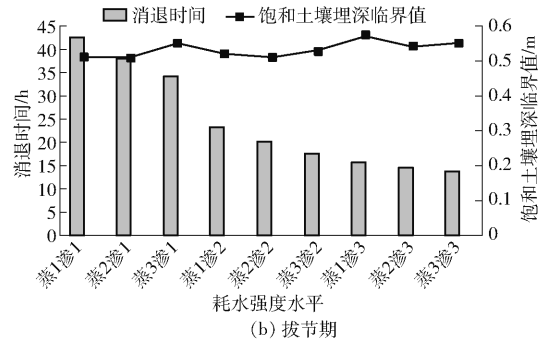
Fig.5 Variation of soil water content and depth of saturated soil under different water consumption combinations in early tillering stage of rice

埋深的结果,定量分析了水分下降过程中土壤体积含水率与饱和土壤埋深的关系,结果表明二者之间呈二次抛物线关系。

基于情景模拟的结果,统计得到了各生育期不同耗水强度下稻田落干脱水到达灌水下限的消退时间及饱和土壤埋深临界值。以分蘖前期和拔节期为例,结合图6和表7可以看出,不同耗水强度条件下饱和土壤埋深临界值变化范围均相对较小,其区间分别为(0.27 m,0.28 m)和(0.51 m,0.57 m)。但消退时间之间存在明显差异,两个生育阶段不同耗水情景下稻田落干脱水到达灌水下限的消退时间之间最大差异分别为20 h和29 h。以往基于无水层天数的研究大多针对固定的无水层持续时间,未考虑土壤渗漏条件、不同生育期作物需水量等因素差异的影响,进而导致不同耗水强度下稻田经落干脱水



(a) 分蘖前期



(b) 拔节期

图6 不同耗水强度下稻田到达灌水下限的消退时间及饱和土壤埋深临界值

Fig.6 Time to reach lower limit of irrigation and critical value of depth of saturated soil under different water consumption intensities

到达灌水下限的消退时间的差异未有呈现,科学性略显不足。相比之下,饱和土壤埋深指标指导水稻节水灌溉在不同耗水强度条件下差异相对较小,较为稳定,因此,可以认为是一个相对通用且合理的控制指标。

表7 不同耗水强度组合下水稻不同生育期饱和土壤埋深临界值

Tab.7 Critical value of depth of saturated soil at different growth stages of rice under different water consumption intensity combinations

生育期	耗水强度水平								
	蒸1渗1	蒸1渗2	蒸1渗3	蒸2渗1	蒸2渗2	蒸2渗3	蒸3渗1	蒸3渗2	蒸3渗3
分蘖前期	0.27	0.27	0.28	0.27	0.27	0.28	0.27	0.27	0.28
分蘖中期	0.42	0.48	0.46	0.40	0.46	0.43	0.40	0.41	0.42
分蘖后期	0.54	0.56	0.53	0.71	0.54	0.63	0.58	0.64	0.61
拔节期	0.51	0.52	0.57	0.51	0.51	0.54	0.55	0.53	0.55
孕穗期	0.37	0.41	0.40	0.37	0.40	0.40	0.37	0.38	0.39
抽穗开花期	0.49	0.53	0.55	0.49	0.54	0.53	0.46	0.53	0.52
乳熟期	0.50	0.53	0.55	0.49	0.53	0.53	0.47	0.54	0.52

### 3.2.3 水稻节水灌溉饱和土壤埋深指标

综合盆栽试验结果和模型模拟结果,在考虑水稻种植区气候、土壤特性等因素的基础上,选取了高、中、低(3、2、1 mm/d)3种渗漏强度,并以不同耗水强度下各生育期试验或模型模拟给定的临界值中的最小值(偏于安全)为控制灌溉最适宜标准,拟定了黑龙江省水稻节水灌溉饱和土壤埋深临界值,如表8所示。结果表明,水稻在分蘖前期(根系较浅)

的饱和土壤埋深控制指标较小,为0.27 m,分蘖后期土壤水分控制下限最低,其相应的饱和土壤埋深控制指标也最大,为0.50 m。对比不同渗漏强度下的结果可以发现,饱和土壤埋深临界值除了在分蘖中期极差达到0.09 m外,在大部分生育阶段的极差均维持在0.04 m以内。

### 3.3 讨论

田间试验和经验总结是确定水稻节水灌溉控制

表 8 不同耗水强度下水稻控制灌溉饱和土壤埋深临界值  
**Tab.8 Critical value of depth of rice saturated soil under controlled irrigation with different water consumption intensities** m

渗漏强度/ (mm·d <sup>-1</sup> )	分蘖期			拔节孕穗期		抽穗	乳熟期
	前期	中期	后期	拔节期	孕穗期	开花期	
1	0.27	0.31	0.50	0.44	0.36	0.38	0.38
2	0.27	0.39	0.49	0.47	0.37	0.39	0.41
3	0.27	0.40	0.50	0.43	0.34	0.40	0.42

指标的两种主要方法,其中土壤含水率和田间无水层天数等为控制指标的水稻节水灌溉技术已经得到了较大面积的推广应用,但其在投入成本、空间变异性、数据可靠性等方面存在的缺点仍限制了其更广泛的应用。而本研究提出的以饱和土壤埋深为控制指标的灌溉技术,仅需布置一个水位观测井和一个水位计即可实现对一定范围内不同地下水位的连续测量,克服了传统以土壤含水率为控制指标的节水灌溉技术需要在不同土壤深度埋设多个土壤水分传感器所带来的一系列问题<sup>[22-23]</sup>。且调研结果表明,同等价位下水位计的测量精度远高于土壤水分传感器,因此,在投入成本相近的条件下以饱和土壤埋深为控制指标的灌溉技术具有监测成本低、监测精度高等优势。

此外,文献[24]研究节水灌溉稻田的节水增产机理时发现,当田间无水层持续 3~4 d 后,盆栽中有明显裂痕,大田裂痕逐渐显现。文献[25]通过研究控制灌溉技术与生产用水的关系,提出了以目测稻田裂缝宽度表述土壤水分状况,并给定了不同裂缝宽度对应田面土壤含水率参考值。而本研究结果表明,以饱和土壤埋深为控制指标的灌溉技术主要在田间落干后 3~5 d 进行灌溉,且能够以具体的灌

水下限临界值对稻田水分亏缺状况作出反馈,相比于无水层天数和裂缝宽度等经验性指标更加精准、合理。

本研究通过开展盆栽试验,并结合 Hydrus-1d 模型模拟的方式实现了对不同田间蒸发蒸腾量与渗漏量组合情景的考虑,获得了相对可靠的结果,可以在不同的耗水情境下予以应用和验证。但本研究局限于盆栽试验,且仅针对垂直方向上的水分运移进行了模拟;而在田间尺度上还存在水平方向上的水分运移、以及靠近排水沟一侧大田侧向排水等情况,这些均可能导致饱和土壤埋深的差异。

## 4 结论

(1) 以不同渗漏强度(1、2、3 mm/d)处理下的土壤含水率实测值为依据,对 Hydrus-1d 模型进行了率定及验证,构建了适用于饱和土壤埋深调控指标的 Hydrus-1d 模型,验证结果表明,该模型能够较好地模拟稻田落干脱水过程中饱和土壤埋深和土壤含水率的同步变化规律。

(2) 试验和模拟结果均表明,节水灌溉稻田土壤含水率与饱和土壤埋深之间呈现较好的二次抛物线关系,基于此将试验区传统的土壤含水率指标临界值转换为对应的饱和土壤埋深指标临界值,得到水稻各生育期临界值区间为(0.27 m, 0.50 m),由此提出了基于饱和土壤埋深调控的水稻节水灌溉技术。

(3) 该技术采用易于观测的饱和土壤埋深作为控制指标,具有监测精度高、成本低、空间连续性好等特点,比传统节水灌溉的控制指标更加科学合理,在准确反映田间水分状况的同时,能够满足节水灌溉规模化应用的需求。

## 参 考 文 献

- [1] 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)
- [2] KHAN S, HANJRA M A. Footprints of water and energy inputs in food production—global perspectives[J]. Food Policy, 2009, 34(2): 130-140.
- [3] 范群芳,董增川,杜芙蓉. 农业用水和生活用水效率研究与探讨[J]. 水利学报, 2007, 38(增刊1): 465-469.  
FAN Qunfang, DONG Zengchuan, DU Furong. Study of agriculture water and life water use efficiency[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(Supp. 1): 465-469. (in Chinese)
- [4] 吴普特,冯浩,牛文全,等. 中国用水结构发展态势与节水对策分析[J]. 农业工程学报, 2003, 19(1): 1-6.  
WU Pute, FENG Hao, NIU Wenquan, et al. Analysis of developmental tendency of water distribution and water-saving strategies[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(1): 1-6. (in Chinese)
- [5] 赵秋霞,任万超,赵海旺. 抓好节水农业系统工程 促进农业可持续发展[J]. 农业机械学报, 1998, 29(增刊): 165-169.  
ZHAO Qiuxia, REN Wanchao, ZHAO Haiwang. Do a good job in water-saving agricultural system engineering and promote sustainable development of agriculture[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1998, 29(Supp): 165-169. (in Chinese)
- [6] 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)
- [7] 茆智. 水稻节水灌溉[J]. 中国农村水利水电, 1997,39(4): 45-47.  
MAO Zhi. Water saving irrigation of rice[J]. China Rural Water and Hydropower, 1997, 39(4): 45-47. (in Chinese)
- [8] 尹娟, 田军仓, 李培富. 宁夏水稻节水灌溉技术试验研究[J]. 宁夏农学院学报, 2002, 23(2): 12-15.  
YIN Juan, TIAN Juncang, LI Peifu. Experimental study on the deferent irrigation methods for rice[J]. Journal of Ningxia Agricultural College, 2002, 23(2): 12-15. (in Chinese)
- [9] STOOP W A. A review of agricultural research issues raised by the system of rice intensification (SRI) from Madagascar: opportunities for improving farming systems for resource-poor farmers[J]. Agricultural Systems, 2002,71(3): 23-27.
- [10] 彭世彰. 节水高产水稻控制灌溉技术[J]. 河海科技进展, 1991,11(4): 75-77.  
PENG Shizhang. Water saving and high yield controlled irrigation technology of rice[J]. Progress of Science and Technology in Hohai, 1991,11(4): 75-77. (in Chinese)
- [11] 张清文. 关于水稻间歇灌溉法的探讨[J]. 农田水利与小水电, 1986(7): 6-9.  
ZHANG Qingwen. Discussion on intermittent irrigation of rice[J]. Farmland Water Conservancy and Small Hydropower, 1986(7): 6-9. (in Chinese)
- [12] BOUMAN B A M. A conceptual framework for the improvement of crop water productivity at different spatial scales[J]. Agricultural Systems, 2007,93(1-3): 60.
- [13] 王晓煜, 杨晓光, TAO Li, 等. 东北三省水稻干湿交替灌溉模式适宜性分区[J]. 农业工程学报, 2018,34(6): 111-120.  
WANG Xiaoyu, YANG Xiaoguang, TAO Li, et al. Rice suitability zoning of alternative wetting and drying irrigation mode in three provinces of Northeast China[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(6): 111-120. (in Chinese)
- [14] 陈宇眺, 周欢, 熊昊, 等. 基于土壤水势的灌溉对水稻生长和产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2009, 28(5): 82-85.  
CHEN Yutiao, ZHOU Huan, XIONG Hao, et al. Effects of different irrigation based on soil water potential on growth and yield of rice[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2009, 28(5): 82-85. (in Chinese)
- [15] 孙小淋, 杨立年, 杨建昌. 水稻高产节水灌溉技术及其生理生态效应[J]. 中国农学通报, 2010, 26(3): 253-257.  
SUN Xiaolin, YANG Linian, YANG Jianchang. Water-saving and high-yielding irrigation techniques of rice and their physiological and ecological effects[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(3): 253-257. (in Chinese)
- [16] 孟翔燕, 周凌云, 张忠学, 等. 不同灌溉模式对水稻生长、水分和辐射利用效率的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(11):285-292.  
MENG Xiangyan, ZHOU Lingyun, ZHANG Zhongxue, et al. Effects of different irrigation patterns on growth, water and radiation use efficiency of rice[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(11): 285-292. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20191132&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20191132&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.11.032. (in Chinese)
- [17] 刘笑吟, 王冠依, 杨士红, 等. 不同时间尺度节水灌溉水稻腾发量特征与影响因素分析[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(8):91-100,170.  
LIU Xiaoyin, WANG Guanyi, YANG Shihong, et al. Influence factors and characteristics of transpiration and evaporation in water-saving irrigation paddy field under different temporal scales[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(8): 91-100, 170. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20160813&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160813&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.08.013. (in Chinese)
- [18] SIMUNEK J S H S M. The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media[D]. Riverside: Univ. of California Riverside, 2008: 68.
- [19] 南纪琴, 肖俊夫, 刘战东. 东北地区参考作物蒸发蒸腾量随时间变化的研究[J]. 节水灌溉, 2012, 37(1): 15-17.  
NAN Jiqin, XIAO Junfu, LIU Zhandong. Research on reference crop evaporation's variation with time series in Northeast Region[J]. Water Saving Irrigation, 2012, 37(1): 15-17. (in Chinese)
- [20] 庄德续, 司振江, 李芳华. 不同灌溉模式水稻需水规律研究[J]. 节水灌溉, 2014, 39(8): 1-3.  
ZHUANG Dexu, SI Zhenjiang, LI Fanghua. Experimental research on water consumption law of paddy under different irrigation mode[J]. Water Saving Irrigation, 2014, 39(8): 1-3. (in Chinese)
- [21] 于靖. 寒区水稻需水规律及水分胁迫影响研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2013.  
YU Jing. Study of water-demand regulations and water stress of rice in cold regions[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- [22] 田昌玉, 孙文彦, 林治安, 等. 中子仪测定土壤水分方法的研究进展[J]. 中国农学通报, 2011,27(18):7-11.  
TIAN Changyu, SUN Wenyan, LIN Zhi'an, et al. The review on measurement method of soil moisture by neutron probe[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(18):7-11. (in Chinese)
- [23] 周凌云, 陈志雄, 李卫民. TDR法测定土壤含水量的标定研究[J]. 土壤学报, 2003, 40(1): 59-64.  
ZHOU Lingyun, CHEN Zhixiong, LI Weimin. Calibration on measurement of soil water content using time domain reflectometry (TDR)[J]. Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(1): 59-64. (in Chinese)
- [24] 李远华, 张祖莲, 赵长友, 等. 水稻间歇灌溉的节水增产机理研究[J]. 中国农村水利水电, 1998, 40(11): 3-5.  
LI Yuanhua, ZHANG Zulian, ZHAO Changyou, et al. Study on water saving and yield increasing mechanism of rice intermittent irrigation[J]. China Rural Water and Hydropower, 1998, 40(11): 3-5. (in Chinese)
- [25] 胡金忠, 刘洪国. 寒地水稻节水控制灌溉技术研究与探讨[J]. 北方水稻, 2012,42(6): 47-49.  
HU Jinzhong, LIU Hongguo. Research and discussion on water saving irrigation technology of rice in cold region[J]. North Rice, 2012,42(6): 47-49. (in Chinese)