

# 基于 HYDRUS 模型渠道渗漏模拟及影响因素分析

张健<sup>1</sup>, 魏占民<sup>1</sup>, 张金丁<sup>1</sup>, 苏日娜<sup>2</sup>

(1.内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院,呼和浩特 010018; 2.内蒙古自治区水利新闻宣传中心,呼和浩特 010000)

**摘要:** 为探明影响有压入渗渠道渗漏的主要因素,采用恒水位静水试验的方法开展渠道渗漏试验,试验设置8个入渗水头,探究不同水深情况下渠道的累积入渗量及入渗速率的变化规律,并选用 HYDRUS-2D 软件进行模拟分析。结果表明:实测值与模拟值的变化规律基本吻合,入渗速率的 RMSE 值为 0.003 6~0.376 3 cm/h,累积入渗量的 RMSE 值为 0.001 7~0.300 9 m<sup>3</sup>,R<sup>2</sup> 的值均达到 0.9 以上,说明选定的土壤水分运动方程合理,选取的相关参数值合适,用于渠道渗漏评价是可行的。采用 HYDRUS-2D 模型野外拓展试验对渠道水深、底宽及边坡系数进行影响分析,渠道水深的变化对入渗速率的影响较大,而渠道底宽、边坡系数的变化对入渗速率的影响较小。渠道水深、底宽及边坡系数对累积入渗量的影响均呈现极显著相关( $P < 0.01$ ),对累积入渗量的影响程度大小为渠道水深>渠道底宽>边坡系数。其中渠道底宽和边坡系数的交互作用对累积入渗量的影响并不显著( $P > 0.05$ ),渠道水深和边坡系数的交互作用对累积入渗量的影响呈极显著相关( $P < 0.01$ ),渠道水深和底宽的交互作用对累积入渗量的影响同样呈极显著相关( $P < 0.01$ )。研究结果为探明渠道水分入渗规律、改进渠道防渗技术及开发新的渠道渗漏损失计算方法等提供参考。

**关键词:** HYDRUS-2D; 渠道渗漏; 累积入渗量; 入渗速率; 数值分析

中图分类号:S274

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2020)01-0141-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2020.01.021

## The Channel Leakage Simulation and Its Influence Factors Analysis Based on HYDRUS Model

ZHANG Jian<sup>1</sup>, WEI Zhanmin<sup>1</sup>, ZHANG Jinding<sup>1</sup>, SU Rina<sup>2</sup>

(1.College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018;

2.Center of Water Conservancy News Propaganda of Inner Mongolia Municipality, Hohhot 010000)

**Abstract:** In order to find out the main factors affecting the leakage of pressure infiltration channels, the constant water level static water test method was adopted to carry out the leakage test of channels. Eight infiltration heads were set up to explore the change rules of the cumulative infiltration amount and infiltration rate of channels under different water depths, and Hydrus-2D software was selected for simulation analysis. The results showed that the simulated values and measured values were basically consistent. The RMSE values of infiltration rate were 0.003 6 ~ 0.376 3 cm/h, and RMSE was 0.001 7 ~ 0.300 9 m<sup>3</sup> for cumulative infiltration amount, the average of R<sup>2</sup> was always more than 0.9, indicating that the soil water movement equation and its related parameters were reasonable, the channel leakage evaluation was feasible. The influence of water depth, bottom width and slope coefficient were analyzed by field expansion test of Hydrus-2D model. The results showed that the change of channel water depth had a great influence on the infiltration rate, while the change of channel bottom width and slope coefficient had a small influence on the infiltration rate. The influence of channel water depth, bottom width and slope coefficient on cumulative infiltration amount was extremely significant ( $P < 0.01$ ), and the degree of influence on cumulative infiltration amount was: channel water depth > channel bottom width > slope coefficient. Among them, the interaction between channel bottom width and slope coefficient had no significant influence on cumulative infiltration amount ( $P > 0.05$ ), but the interaction between channel water depth and slope coefficient had an extremely significant correlation with cumulative infiltration amount ( $P < 0.01$ ), and the interaction between channel water depth and slope width had an equally significant correlation with cumulative infiltration amount ( $P < 0.01$ ). This study could provide a reference for exploring the rule of water infiltration, improving the technol-

收稿日期:2019-06-26

资助项目:内蒙古自治区水利科研专项(NSK2017-S2)

第一作者:张健(1988—),男,博士研究生,主要从事节水灌溉理论与新技术研究。E-mail:zhangjian19881212@163.com

通信作者:魏占民(1960—),男,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉原理及应用研究。E-mail:weizhanmin@aliyun.com

ogy of seepage prevention and developing a new method for calculating leakage loss.

**Keywords:** Hydrus-2D; leakage of channels; cumulative infiltration; infiltration rate; numerical analysis

渠系灌溉水损失包括渠道渗漏、水面蒸发和管理弃漏等 3 部分,其中渠道渗漏占灌溉水损失的 30%~50%<sup>[1-2]</sup>,渠道渗漏引起的水量损失导致渠系水利用系数降低,已有研究<sup>[3-4]</sup>表明,渠道平均渠系水利用系数不足 0.5。渠道渗漏属于二维入渗的范畴,分析影响渠道渗漏的原因比较复杂。国内外许多学者在室内模拟渠道渗漏方面做了大量的试验研究,孙美等<sup>[5]</sup>研究表明,砂层能够起到阻水、减渗作用;入渗水头对稳定入渗率的影响较大,入渗水头越大,相应的稳定入渗率越大;孙美等<sup>[6]</sup>研究认为,当渠道水位较低时,夹砂层的阻水减渗现象在渠道水位较低时比较明显,渠道水位较高时,夹砂层的存在甚至会增大入渗量;Phogat 等<sup>[7]</sup>用壤质土槽模拟了渠床高程对渠道渗漏量和地下水升高的影响,结果表明,渠道渗漏量和地下水壅水高度随渠床高程增加而线性增加,且用 HYDRUS-2D 模型模拟验证,实测与模拟结果基本吻合;付强等<sup>[8]</sup>研究表明, HYDRUS-2D 模型用于模拟渠道渗漏是可行的,边坡系数对土壤水分入渗过程的影响较为微弱,渠道底宽变化对累积入渗量和运移距离的影响极显著;李红星<sup>[9]</sup>研究认为,土壤质地越重,土壤入渗能力越小;土壤结构越密实,入渗能力越小;入渗水头增加,土壤的累积入渗量和稳定入渗率呈增大趋势;张勇勇<sup>[10]</sup>研究发现,沟底宽度对累积入渗量影响显著,灌溉水深对垄沟灌溉入渗量影响较大;李玥<sup>[11]</sup>研究表明,初始含水率、边坡系数对累积入渗量的影响较小,渠道底宽、土壤容重和入渗水头

对累积入渗量的影响较显著。入渗水头决定土壤入渗初期的压力势,土壤水分入渗的驱动力会随着水头的变化而变化<sup>[12-15]</sup>。以上研究表明,渠道渗漏分析主要集中在室内模拟试验,且大多为均质土壤和夹砂层土壤,而实际渠道土质及外界条件的变异性难以在室内模拟试验体现出来,况且渠道的水深对入渗界面的压力势影响较显著,再者国内外针对 HYDRUS-2D 模型应用于实际渠道的研究尚不多见。因此,有必要针对有压入渗渠道采用恒水位静水试验的方法开展渠道渗漏试验研究,探究渠道渗漏损失的主要影响因素。旨在为进一步探明渠道水分入渗规律、改进渠道防渗技术及开发新的渠道渗漏损失计算方法等提供参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

试验于 2017 年 5 月在内蒙古巴彦淖尔市临河区永济试验站内进行,站内备有小型自动农田气象站,监测内容包括:环境温湿度、风速风向、累积降雨量等气象数据。该区为温带大陆性气候,多风少雨,气候干燥,冬季漫长寒冷,夏季短促温热,年平均降水量 142.1 mm。2017 年 6 月开始在试验范围内取土样,取样深度为 0—200 cm,采用 HELOS(H2528)&RODOS 型激光粒度分析仪对土样做土壤颗粒分析(表 1)。土壤初始含水率及饱和土壤体积含水率见表 2。由土壤质地分析表可知,土壤呈明显的分层结构,其中 0—60 cm 土质为粉壤土;60—150 cm 土质为粉土;150—200 cm 土质为砂土。试验期间观测地下水水位在 4.24~5.17 m。

表 1 试验区土壤质地

土层 深度/cm	土壤颗粒分布/%			土壤质地	土壤干体积质量/ (g·cm <sup>-3</sup> )
	0.05~2 mm	0.002~0.05 mm	<0.002 mm		
0—60	13.28	76.35	10.37	粉壤土	1.42
60—150	6.69	90.88	2.43	粉土	1.45
150—200	95.86	4.00	0.14	砂土	1.59

表 2 不同深度土层初始含水率及饱和土壤体积含水率

单位:%

指标	0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm	60—80 cm	80—100 cm	100—120 cm	120—140 cm	140—160 cm
初始含水率	24.58	41.34	38.62	38.63	37.90	40.50	42.02	34.82
饱和体积含水率	50.27	44.89	43.82	44.26	44.34	45.12	47.51	42.02

### 1.2 试验设计与方法

试验渠道为全挖方无衬砌的土质渠道,渠道长度为 30 m,梯形断面渠道底宽 1 m,断面水深 1.2 m,设计最大水深 1 m,边坡系数 1.0,渠道顶宽 3.4 m。依照《渠道防渗工程技术规范 GB 50600—2010》<sup>[16]</sup>需修筑隔离堤和渗漏平衡区,渠道渗漏试验采用静水位法。测试渠道的布设内容:以渠道中心处为零点向一

侧布设 TDR 管,中心处的 TDR 管为 1 号,隔 50 cm 布设 2 号 TDR 管,依次间隔 2 个 60 cm 布设 3,4 号 TDR 管,再次间隔 4 个 30 cm 布设 5,6,7,8 号 TDR 管,具体试验渠道布置见图 1 渠道的横纵断面。在渠道中间布设 1 m 水尺。测试渠道的观测内容:用水尺观测水位的变化;秒表记录水位下降的时间;气象站可记录降雨时段及降雨量;在试验开始前和结束后

用 Diviner 2000 型便携式 TDR 土壤水分廓线仪测定不同位置处不同深度的土壤含水率,并且在试验进行中每隔 1 h 或 2 h 测量 1 次土壤含水率。试验变量设为渠道水深,入渗水头(渠道水深)分别为 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 cm, 采用统一的方法进行渠道入渗试验。试验开始时从临近水源(水井、机电井)用水泵同时向测验段、渗漏平衡区注水,并应使两侧水位基本相同,在观测的同时进行降雨量的观测。

本试验采用恒水位静水试验中的水位下降法进行观测,具体步骤为:

(1) 试验段水位加至相应渠道的试验水位加上

1/2 加水前后水位的差值处,即加水前水位和加水后水位的平均值等于试验水位。当水位平稳后记录时间及水位。

(2) 待水位下降到规定的加水前水位时,记录其时间及相应水位。同时迅速将水位加至规定的加水后水位,再重复作下一时段观测。

(3) 当连续出现 10 次以上观测时段基本相同,渗漏量接近,渗漏强度的最大、最小值小于平均渗漏强度的 10% 时,认为渗漏稳定,恒水位静水试验完成。

(4) 加水前、后水位差值,可在 5%~10% 测验水深间选用。

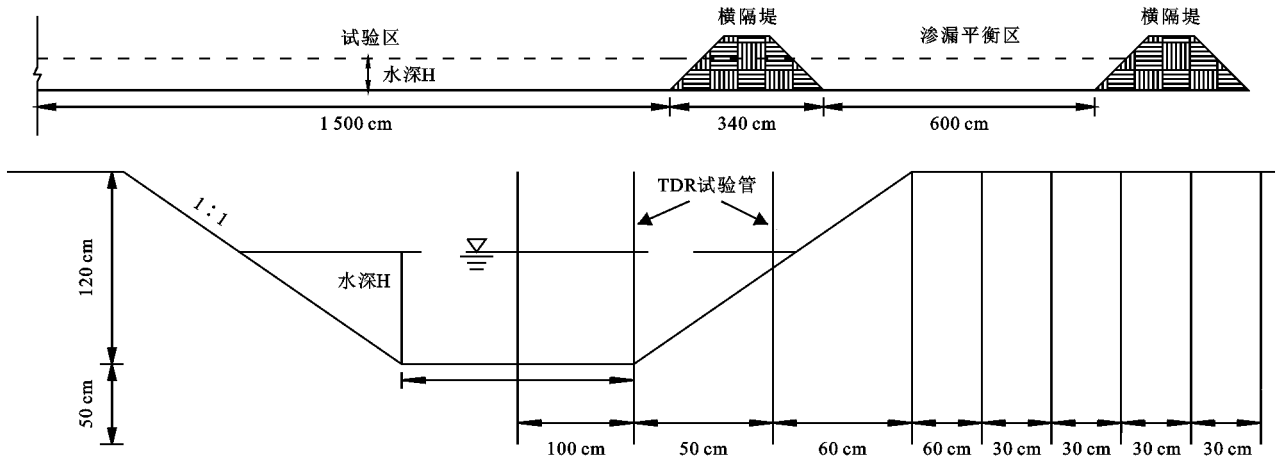


图 1 渠道的横纵断面示意

### 1.3 HYDRUS 模型建立

1.3.1 渠道水分运动模型 渠道水分入渗过程属于二维入渗,垂直方向上入渗与底宽有关,水平方向上入渗与边坡有关,故渠道水分入渗问题可概化为二维饱和-非饱和土壤水分运动问题,采用 Richards 方程进行描述:

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

式中: $\theta$  为土壤体积含水率( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ); $t$  为入渗时间(min); $h$  为基质势(cm); $x, z$  为水平坐标和垂直距离,规定  $z$  向下为正(cm); $K(\theta)$  为非饱和导水率( $\text{cm}/\text{min}$ )。

公式(1)中涉及到  $\theta, h$  和  $K(\theta)$  三者之间的关

系,模拟中采用 Van Genuchten-Mualem 公式表述土壤水力函数,表达式为:

$$K(\theta) = K_s \theta_e' [1 - (1 - \theta_e')^m]^2 \quad (2)$$

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)^m} \quad (3)$$

式中: $K_s$  为土壤饱和导水率( $\text{cm}/\text{d}$ ); $\theta_e$  为土壤相对饱和度, $\theta_e = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$ ;  $\theta_r$  为土壤剩余体积含水率( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );  $\theta_s$  为土壤饱和体积含水率( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );  $n$  为经验拟合参数,其中  $m = 1 - 1/n$ ;  $\alpha$  为与土壤物理性质有关的参数( $\text{cm}^{-1}$ );  $l$  为经验拟合参数,通常取平均值为 0.5。具体不同质地土壤水力参数见表 3。

表 3 试验土壤 VG-M 模型水力特性参数初始值

土壤质地	土层深度/cm	残余含水率 $\theta_r / (\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	饱和含水率 $\theta_s / (\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	进气值倒数 $\alpha$	经验参数 $n$	饱和导水率 $K_s / (\text{cm} \cdot \text{h}^{-1})$
粉壤土	0-60	0.0569	0.46	0.0053	1.6732	0.4436
粉土	60-150	0.0490	0.45	0.0074	1.6351	0.3327
砂土	150-200	0.0488	0.40	0.0334	3.7854	11.3123

1.3.2 初始条件设置 由于水位下降静水法测渗试验是在野外进行,实际试验过程中发现渠床土壤及渠道边坡下方湿润土体均为不规则的非饱和带,又因测量区域较大,所布置的 TDR 探测点位有限,故在模拟分析的过程中只能概括化的将整个模拟区域的初

始含水率有规则地分散成若干含水率模拟区块。故初始条件可设置为:

初始条件:

$$\theta(x, z, t) = \theta_1(x, z, 0) \quad t = 0, 170 \leq x \leq 260, 60 \leq z \leq 120$$

$$\theta(x, z, t) = \theta_2(x, z, 0) \quad t = 0, 50 \leq x \leq 260, 0 \leq z \leq 60$$

$$\begin{aligned} \theta(x, z, t) &= \theta_3(x, z, 0) \quad t=0, 0 \leq x \leq 110, -30 \leq z \leq 0 \\ \theta(x, z, t) &= \theta_4(x, z, 0) \quad t=0, 0 \leq x \leq 110, -60 \leq z \leq -30 \\ \theta(x, z, t) &= \theta_5(x, z, 0) \quad t=0, 110 \leq x \leq 260, -30 \leq z \leq 0 \\ \theta(x, z, t) &= \theta_6(x, z, 0) \quad t=0, 110 \leq x \leq 260, -60 \leq z \leq -30 \\ \theta(x, z, t) &= \theta_7(x, z, 0) \quad t=0, 0 \leq x \leq 260, -70 \leq z \leq -60 \end{aligned} \quad (4)$$

式中:  $\theta_1 \sim \theta_7$  为不同模拟区块初始体积含水率 ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ , 不同渠道水深下同一模拟区块初始体积含水率均不相同)。

1.3.3 边界条件设置 由图 2 可知, 渠道关于 ED 所在面对称, 故在模拟渠道入渗过程中只需考虑 ABCDEFG 区域内的土壤水分运动即可。

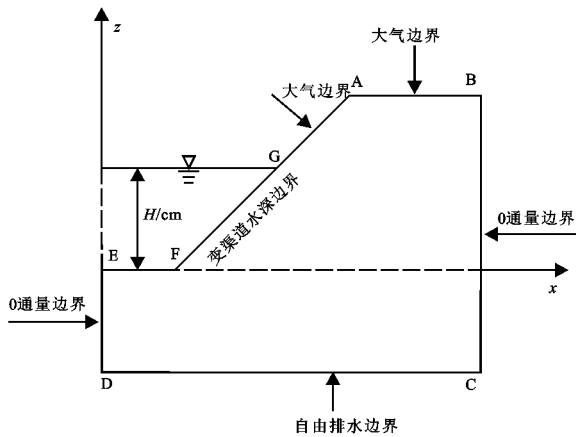


图 2 模拟渠道边界条件示意图

因试验的特殊性, 在水位下降静水测渗试验的准备阶段需将渠道里的水量加到特定渠道水深, 在加水的过程中渠床表层土壤便已被水分湿润至接近饱和状态, 水深越大的情况下土壤含水率基本处于饱和状态。故 EF 和 FG 边的初始条件可设为饱和含水率, 在不同渠道水深情况下这一饱和体积含水率的值均为  $0.45 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。渠道水深以上部分, GA 和 AB 边界接触大气选择大气边界。

因模拟区域关于 ED 所在面对称, 故左边界 ED 可视作水平通量为 0, 设为 0 通量界面; 右边界 BC 亦视为 0 通量界面; 下边界 DC 视为自由排水边界。综上所述, 边界条件可总结为:

边界条件:

$$\begin{aligned} \theta &= \theta_s \quad t \geq 0 \text{ 沿渠道内浸水边界 EF 和 FG 处} \\ -K(\theta) \left( \frac{\partial h}{\partial n} + 1 \right) &= 0 \quad t \geq 0 \text{ 沿渠道水深以上边界 GA 和 AB 处} \\ -K(\theta) \frac{\partial h}{\partial n} &= 0 \quad t \geq 0 \text{ 左边界 DE 和右边界 BC 处} \\ -K(\theta) \left( \frac{\partial h}{\partial n} + 1 \right) &= 0 \quad t \geq 0 \text{ 下边界 CD 处} \end{aligned} \quad (5)$$

式中:  $n$  为边界法线方向;  $\theta_s$  为饱和体积含水率 ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ )。

1.3.4 数值计算 为了求解上述偏微分方程, 采用

HYDRUS-2D 软件对试验方案下的累积入渗量及入渗速率进行数值模拟, 并将所得结果与试验结果进行比较分析, 采用平均绝对误差 (MAE)、整群剩余系数 (CRM)、均方根误差 (RSME) 和决定系数 ( $R^2$ ) 检验所选定的土壤水分运动方程的合理性。

## 2 结果与分析

### 2.1 模型验证

2.1.1 入渗速率的对比 由图 3 可知, 渠道水深越大, 对应的稳定入渗速率越大。实测值和模拟值变化趋势基本吻合, 均表明入渗初期速率变化较快, 如 30 cm 水深情况下, 开始入渗速率为  $0.37 \text{ cm/h}$ ,  $0.857 \text{ h}$  时入渗速率为  $0.11 \text{ cm/h}$ , 在  $0.857 \text{ h}$  内入渗速率的变化较快;  $70 \text{ cm}$  水深情况下, 开始入渗速率为  $4.60 \text{ cm/h}$ ,  $3.5 \text{ h}$  时入渗速率为  $1.60 \text{ cm/h}$ , 在  $3.5 \text{ h}$  内入渗速率的变化较快。随着时间的延长入渗速率逐渐减小, 到达一定时间入渗速率趋于稳定, 如  $30 \text{ cm}$  水深情况下,  $1.198 \text{ h}$  后入渗速率基本变为稳定入渗, 稳定入渗率为  $0.106 \text{ cm/h}$ ;  $70 \text{ cm}$  水深情况下,  $8.2 \text{ h}$  后入渗速率基本变为稳定入渗, 稳定入渗率为  $1.4 \text{ cm/h}$ 。选取的 4 种渠道水深下入渗速率的实测值和模拟值的 MAE、CRM、RMSE 及  $R^2$ 。由表 4 可知, MAE 的值为  $0.0031 \sim 0.2556 \text{ m}^3$ , CRM 的值为  $0.0239 \sim 0.0897 \text{ m}^3$ , RMSE 的值为  $0.0036 \sim 0.3763 \text{ cm/h}$ ,  $R^2$  的值为  $0.94 \sim 0.99$ , 说明试验模拟效果较好。

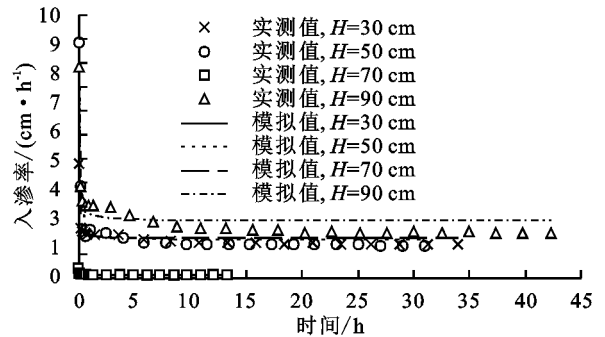


图 3 不同水深条件下入渗率的实测值和模拟值对比

2.1.2 累积入渗量的对比 由图 4 可知, 渠道水深越大, 对应的累积入渗量越大。其实测值和模拟值变化趋势基本吻合, 均表明累积入渗量的变化基本呈线性变化规律, 如  $50 \text{ cm}$  水深情况下,  $0.95 \text{ h}$  累积入渗量约为  $0.1 \text{ m}^3$ ,  $31.04 \text{ h}$  累积入渗量约为  $1.3 \text{ m}^3$ , 相比较模拟值, 实测值和模拟值相差  $4.4\%$ ;  $90 \text{ cm}$  水深情况下,  $1.22 \text{ h}$  累积入渗量约为  $0.3 \text{ m}^3$ ,  $42.29 \text{ h}$  累积入渗量约为  $5.7 \text{ m}^3$ , 相比较模拟值, 实测值和模拟值相差  $6.2\%$ 。选取的 4 种水深下入渗速率的实测值和模拟值的 MAE、CRM、RMSE 及  $R^2$ 。由表 5 可知, MAE 的值为  $0.0014 \sim 0.2693 \text{ m}^3$ , CRM 的值为  $0.0058 \sim 0.0473 \text{ m}^3$ , RMSE 的值为  $0.0017 \sim 0.3009 \text{ m}^3$ ,  $R^2$  的值为  $0.94 \sim 0.99$ , 说明对

其累积入渗量的模拟效果也较好。结合对渠道入渗速率及累积入渗量的模拟结果分析,表明所选定的土壤水

分运动方程合理,选取的相关参数值合适,用于渠道渗漏评价入渗速率和累积入渗量是可行的。

表 4 入渗速率实测值及模拟值的统计分析

编号	渠道水深/cm	渠道底宽/m	边坡系数	湿周/m	稳定入渗率/(cm·h <sup>-1</sup> )		MAE/(cm·h <sup>-1</sup> )	CRM/(cm·h <sup>-1</sup> )	RMSE/(cm·h <sup>-1</sup> )	R <sup>2</sup>
					实测值	模拟值				
1	30	1	1	1.85	0.107	0.105	0.0031	0.0239	0.0036	0.99
2	50	1	1	2.41	1.235	1.477	0.2021	0.0342	0.0875	0.94
3	70	1	1	2.98	1.276	1.510	0.1837	0.0994	0.2196	0.96
4	90	1	1	3.55	1.738	2.190	0.2556	0.0897	0.3763	0.94

表 5 累积入渗量实测值及模拟值的统计分析

编号	渠道水深/cm	渠道底宽/m	边坡系数	湿周/m	累积入渗量/m <sup>3</sup>		MAE/m <sup>3</sup>	CRM/m <sup>3</sup>	RMSE/m <sup>3</sup>	R <sup>2</sup>
					实测值	模拟值				
1	30	1	1	1.85	0.245	0.243	0.0014	0.0058	0.0017	0.99
2	50	1	1	2.41	1.309	1.369	0.0447	0.0342	0.0507	0.98
3	70	1	1	2.98	2.215	2.316	0.0796	0.0365	0.0275	0.98
4	90	1	1	3.55	5.559	5.929	0.2693	0.0473	0.3009	0.94

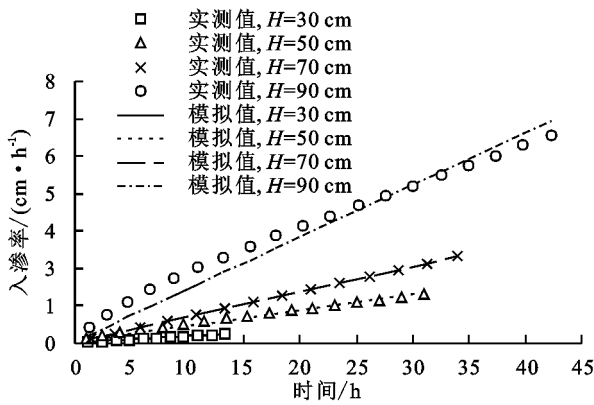


图 4 不同水深条件下累积入渗量的实测值和模拟值对比

### 2.2 基于 HYDRUS 模拟入渗速率的变化分析

为了分析渠道底宽  $D$ 、渠道水深  $H$ 、边坡系数  $B$  对入渗速率的影响,应用 HYDRUS-2D 模型拓展野外试验,在不同水深的条件下设置不同底宽和边坡的试验处理,并保持土壤水力特性参数、概化下的不同范围的初始含水率以及边界条件不变。本次模拟试验设置水深处理为 30, 50, 70, 90 cm, 每个水深条件下设置底宽处理为 60, 100, 140 cm, 边坡系数设置为 0.857, 1, 1.2, 共计模拟试验 36 组。

由图 5 可知,在边坡系数为 1、渠道底宽为 1 m 情况下,当渠道水深为 30 cm 时,入渗初期的速率为 1.83 cm/h,入渗时间为 0.74 h 左右时入渗速率基本保持为 0.55 cm/h;渠道水深为 50 cm 时,入渗初期的速率为 2.44 cm/h,入渗时间为 2.18 h 左右时入渗速率基本保持为 0.75 cm/h;渠道水深为 90 cm 时,入渗初期的速率为 4.15 cm/h,入渗时间为 5.40 h 左右时入渗速率基本保持为 1.10 cm/h。4 种水深均呈现入渗初期速率变化幅度较大,水分入渗到一定时间后基本保持稳定的状态,且随着水深的增加,入渗速率对应不同程度的增大。主要原因为土壤水势梯

度是水分运动的驱动力,随着水深的增加,入渗界面的压力势相应增大,在其他条件不变的情况下,入渗速率也会相应增大。在边坡系数为 1 及渠道水深为 70 cm 情况下,随着渠道底宽的增大,入渗初期的速率变大,但入渗界面的湿周对应增大,相应到达稳定入渗速率的时间变长,3 种底宽对应的稳定入渗速率基本一致,稳定入渗速率为 0.76 cm/h。根据渠道底宽为 1 m 及渠道水深为 70 cm 对应边坡系数 0.857, 1, 1.2 的入渗速率对比情况可知,随着渠道边坡系数的增大,入渗初期的速率变大,但入渗界面的湿周对应减小,相应到达稳定入渗速率的时间变短,3 种边坡系数对应的稳定入渗速率基本一致,稳定入渗速率为 0.75 cm/h 左右。由此可见,渠道水深的变化对入渗速率的影响较大,而渠道底宽、边坡系数的变化对入渗速率的影响较小。

### 2.3 基于 HYDRUS 模拟的累积入渗量影响因素分析

由图 6 可知,底宽  $D$  为 60, 100, 140 cm, 边坡系数  $B$  为 0.857, 1, 1.2 的 9 个处理在入渗初期 5 h 内的累积入渗量的差异变化不大,累积入渗量的范围在 0~1 m<sup>3</sup> 内,随着时间的推移,各处理之间的变化出现显著差异,但累积入渗量均是按照一定斜率增加。如渠道水深为 70 cm、底宽为 60 cm,随着边坡系数的增大,累积入渗量逐渐变小,时间为 33.99 h 时,对应湿周 2.75, 2.58, 2.42 m 的累积入渗量分别为 3.83, 3.42, 3.00 m<sup>3</sup>,相对于边坡系数为 1 比较湿周及累积入渗量的变化,对于边坡系数为 0.857 时,湿周变化 6.59% 对应的累积入渗量变化 12%;边坡系数为 1.2 时,湿周变化 6.2% 对应的累积入渗量变化 12.2%,可知对于边坡系数的变化对入渗速率的影响较小,与 2.2 章节的结论一致,基于水头高度及土壤水力参数的不变,入渗速率基本为同一常数,累积入渗量随着

湿周的变化而变化。

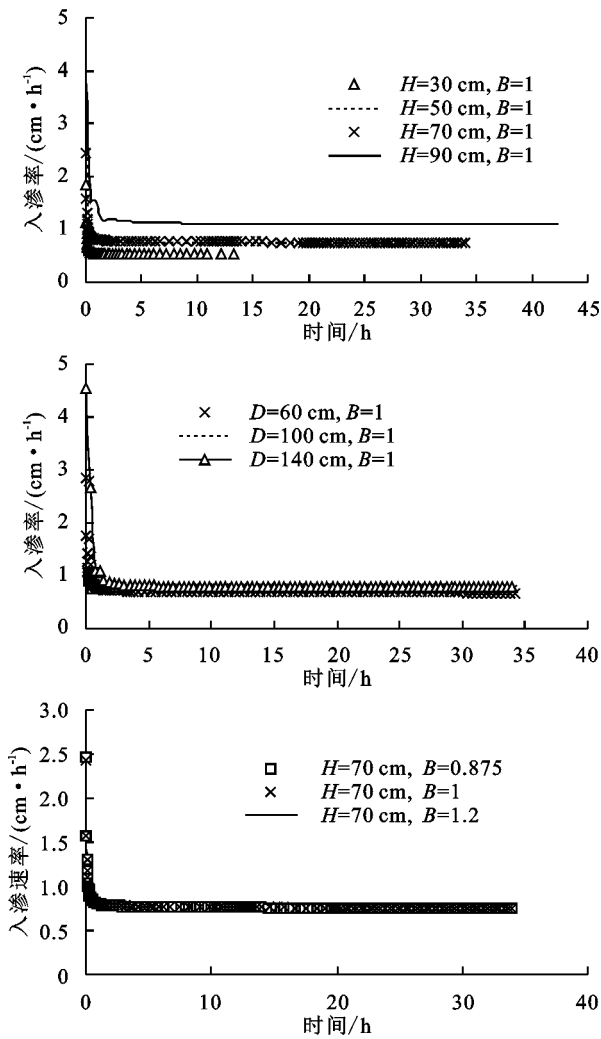


图 5 不同条件下入渗速率的对比

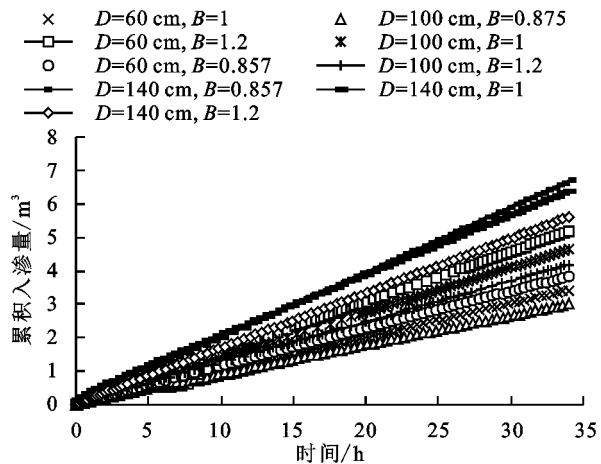


图 6 不同条件下累积入渗量的对比

由表 6 可知,在水深为 70 cm 条件下,渠道底宽对累积入渗量影响的  $F$  值为 325.39,远大于显著性水平  $\alpha=0.01$  时的临界值 6.01,说明渠道水深对累积入渗量的影响极显著( $P<0.01$ ),同时渠道边坡系数对累积入渗量的影响的  $F$  值为 38.58,大于显著性水平  $\alpha=0.01$  时的临界值 6.01,说明渠道底宽对累积入渗量的影响极显著( $P<0.01$ ),渠道底宽和边坡系数

共同交互作用对累积入渗量的影响的  $F$  值为 0.6,小于显著性水平  $\alpha=0.05$  时的临界值 2.93,说明渠道底宽和边坡系数的交互作用对累积入渗量的影响不显著( $P>0.05$ )。这表明底宽及边坡系数对累积入渗量的影响极显著,入渗速率一定的前提下,湿周越大,累积入渗量越大,但底宽对累积入渗量的影响比边坡对累积入渗量的影响更显著。

表 6 不同边坡系数和渠道底宽下累积入渗量的双因素方差分析

渠道底宽 $D/cm$	边坡系数 $B$	湿周/cm	累积入渗量/ $m^3$
60	0.857	2.75	3.83
60	1	2.58	3.42
60	1.2	2.42	3.00
100	0.857	3.15	5.16
100	1	2.98	4.63
100	1.2	2.82	4.18
140	0.857	3.55	6.70
140	1	3.38	6.38
140	1.2	3.22	5.61
$D F$ 值			325.39
$B F$ 值			38.58
$D * B F$ 值			0.60

由图 7 可知,4 种渠道水深之间的累积入渗量变化较显著,水深越大,对应的累积入渗量越大。在同一种水深情况下,随着边坡系数的增大,渠道水深 30,50 cm 的累积入渗量变化不显著,而水深 70,90 cm 的累积入渗量呈现明显差异。综上可知,渠道水深的变化比边坡系数的变化对累积入渗量的影响要显著,且水深达到一定深度时边坡系数的变化才会使累积入渗量的值产生差异。

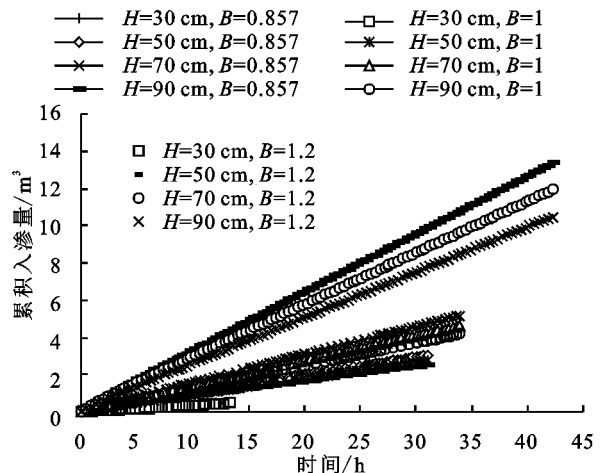


图 7 不同条件下累积入渗量的对比

由表 7 可知,在渠道底宽为 1 m 条件下,渠道水深对累积入渗量影响的  $F$  值为 1 643.90,远大于显著性水平  $\alpha=0.01$  时的临界值 5.61,说明渠道水深对累积入渗量的影响极显著( $P<0.01$ ),同时渠道边坡系数对累积入渗量的影响的  $F$  值为 41.63,大于显著性水平  $\alpha=$

0.01 时的临界值 4.72,说明渠道底宽对累积入渗量的影响极显著( $P < 0.01$ ),渠道水深和边坡系数共同交互作用对累积入渗量的影响的  $F$  值为 9.11,大于显著性水平  $\alpha = 0.01$  时的临界值 3.67,说明渠道水深和边坡系数的交互作用对累积入渗量的影响同样达到极显著( $P < 0.01$ )。这表明渠道水深及边坡系数对累积入渗量的影响极显著,且渠道水深和边坡系数的交互作用对累积入渗量的影响同样达到极显著,说明在渠道水深变化的前提下,湿周的改变对累积入渗量的影响较大,但水深对累积入渗量的影响比边坡对累积入渗量的影响更显著。

表 7 不同边坡系数和渠道底宽下累积入渗量的双因素方差分析

渠道水深 $H/cm$	边坡系数 $B$	湿周/ $cm$	累积入渗量/ $m^3$
30	0.857	1.92	0.52
30	1	1.85	0.49
30	1.2	1.78	0.45
50	0.857	2.54	1.35
50	1	2.41	1.23
50	1.2	2.30	1.13
70	0.857	3.15	2.05
70	1	2.98	1.84
70	1.2	2.82	1.67
90	0.857	3.77	4.33
90	1	3.55	3.88
90	1.2	3.34	3.40
$H F$ 值			1643.90
$B F$ 值			41.63
$H * B F$ 值			9.11

由图 8 可知,4 种渠道水深之间的累积入渗量变化较显著,水深越大,对应的累积入渗量越大。在同一种水深情况下,随着渠道底宽的增大,累积入渗量的变化存在差异。综上可知,渠道水深的变化比底宽的变化对累积入渗量的影响要显著,且同一水深时底宽的变化也会使累积入渗量的值产生差异。

- .....  $H=30\text{ cm}, D=60\text{ mm}$
- .....  $H=30\text{ cm}, D=140\text{ mm}$
- $H=50\text{ cm}, D=100\text{ mm}$
- $H=70\text{ cm}, D=60\text{ mm}$
- ◇—  $H=70\text{ cm}, D=140\text{ mm}$
- $H=90\text{ cm}, D=100\text{ mm}$
- $H=30\text{ cm}, D=100\text{ mm}$
- .....  $H=50\text{ cm}, D=60\text{ mm}$
- ×—  $H=50\text{ cm}, D=140\text{ mm}$
- +—  $H=70\text{ cm}, D=100\text{ mm}$
- △—  $H=90\text{ cm}, D=60\text{ mm}$
- ×—  $H=90\text{ cm}, D=140\text{ mm}$

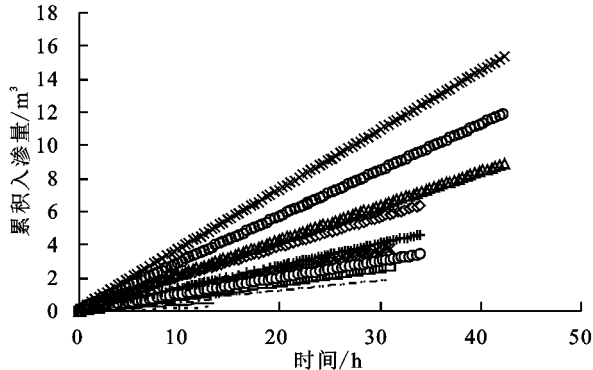


图 8 不同条件下累积入渗量的对比

由表 8 可知,在边坡系数为 1 的条件下,渠道水深对累积入渗量影响的  $F$  值为 1 555.92,远大于显著性水平  $\alpha = 0.01$  时的临界值 5.61,说明渠道水深对累积入渗量的影响极显著( $P < 0.01$ ),同时渠道底宽对累积入渗量的影响的  $F$  值为 321.25,小于显著性水平  $\alpha = 0.05$  时的临界值 4.72,说明渠道底宽对累积入渗量的影响极显著( $P < 0.01$ ),渠道底宽和边坡系数共同交互作用对累积入渗量的影响的  $F$  值为 28.69,大于显著性水平  $\alpha = 0.01$  时的临界值 3.67,说明渠道水深和底宽的交互作用对累积入渗量的影响极显著( $P < 0.01$ )。这表明渠道水深及底宽对累积入渗量的影响极显著,且渠道水深和底宽的交互作用对累积入渗量的影响同样极显著,但渠道水深对累积入渗量的影响比底宽对累积入渗量的影响更显著。

表 8 不同边坡系数和渠道底宽下的累积入渗量的双因素方差分析

渠道水深 $H/cm$	渠道底宽 $D/cm$	湿周/ $cm$	累积入渗量/ $m^3$
30	60	1.45	0.52
30	100	1.85	0.49
30	140	2.25	0.45
50	60	2.01	1.35
50	100	2.41	1.23
50	140	2.81	1.13
70	60	2.58	2.05
70	100	2.98	1.84
70	140	3.38	1.67
90	60	3.15	4.33
90	100	3.55	3.88
90	140	3.95	3.40
$H F$ 值			1555.92
$D F$ 值			321.25
$H * D F$ 值			28.69

### 3 结论

本文在渠道有压入渗条件下开展野外现场水位下降静水法测渗试验,并以二维状态下饱和-非饱和土壤水分运动理论为基础,选用 HYDRUS-2D 软件对实测结果进行数值模拟,模拟结果表明,渠道的实测和模拟入渗速率及累积入渗量基本吻合,所选定的土壤水分运动方程合理,用于渠道渗漏评价入渗速率和累积入渗量是可行的。渠道水深的变化对入渗速率的影响较大,而渠道底宽、边坡系数的变化对入渗速率的影响较小。渠道水深、底宽及边坡系数对累积入渗量的影响均呈现极显著相关( $P < 0.01$ ),对累积入渗量的影响程度大小为渠道水深 > 渠道底宽 > 边坡系数。其中渠道底宽和边坡系数的交互作用对累积入渗量的影响不显著( $P > 0.05$ ),渠道水深和边坡系数的交互作用对累积入渗量的影响呈极显著相

关( $P < 0.01$ ), 渠道水深和底宽的交互作用对累积入渗量的影响同样呈极显著相关( $P < 0.01$ )。

本文只针对渠道水深、底宽和边坡系数 3 个因素对渠道入渗速率及累积入渗量的影响进行分析, 此外应开展土壤质地、容重、初始含水率、湿周等因素的交互影响分析, 今后将在多因素互交影响的前提下, 开发新的渠道渗漏损失计算公式。

#### 参考文献:

- [1] 郭元裕主编. 农田水利学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1997: 122-125.
- [2] 郭历华. 渠道防渗衬砌相关技术及其应用[J]. 水利科技与经济, 2014, 20(4): 146-147.
- [3] 刘巍. 黑龙江省灌溉水利用效率时空分异规律及节水潜力研究[D]. 长春: 东北农业大学, 2017.
- [4] 李安国, 建功, 曲强. 渠道防渗工程技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998: 10-15.
- [5] 孙美, 毛晓敏, 陈剑. 渠道渗漏室内试验土壤水分运动数值模拟[C]// 中国农业工程学会. 纪念中国农业工程学会成立 30 周年暨中国农业工程学会 2009 年学术年会 (CSAE 2009). 山西 晋中: 山西农业大学, 2009: 1246-1251.
- [6] 孙美, 毛晓敏, 陈剑, 等. 夹砂层状土条件下渠道渗漏的室内试验和数值模拟[J]. 农业工程学报, 2010, 26(8): 33-38.
- [7] Phogat V, Malik R S, Kumar S. Modelling the effect of channel bed elevation on seepage and water table rise in a sand box filled with loamy soil [J]. Irrigation Science, 2009, 27(3): 191-200.
- [8] 付强, 李玥, 李天霄, 等. 渠道渗漏 HYDRUS 模拟验证及影响因素分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(16): 112-118.
- [9] 李红星. 基于点入渗参数计算土渠床渗漏损失的方法研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2010.
- [10] 张勇勇. 垄沟灌溉土壤水分入渗模拟研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2013.
- [11] 李玥. 基于 HYDRUS 的渠道渗漏室内试验数值模拟及入渗模型建立[D]. 长春: 东北农业大学, 2018.
- [12] 郭向红, 孙西欢. 不同入渗水头条件下的 Green-Ampt 模型[J]. 农业工程学报, 2010, 26(3): 64-68.
- [13] 王春颖, 毛晓敏, 赵兵. 层状夹砂土柱室内积水入渗试验及模拟[J]. 农业工程学报, 2010, 26(11): 61-67.
- [14] 范严伟, 赵文举, 王昱. 入渗水头对垂直一维入渗 Philip 模型参数的影响[J]. 兰州理工大学学报, 2015, 41(1): 65-70.
- [15] 王锐, 孙西欢等. 不同入渗水头条件下土壤水分运动数值模拟[J]. 农业机械学报, 2011, 42(9): 45-49.
- [16] 中华人民共和国水利部. 渠道防渗工程技术规范 GB 50600-2010[S]. 北京: 中国计划出版社, 2011: 92-104.
- [12] Vázquez E V, Vieira S R, Maria I C D, et al. Fractal dimension and geostatistical parameters for soil micro-relief as a function of cumulative precipitation [J]. Scientia Agricola, 2010, 67(1): 78-83.
- [13] 江冲亚, 方红亮, 魏珊珊. 地表粗糙度参数化研究综述[J]. 地球科学进展, 2012, 27(3): 293-298.
- [14] 郑子成, 何淑勤, 吴发启. 坡面水蚀过程中地表糙度的研究进展[J]. 节水灌溉, 2008(8): 8-11.
- [15] 朱良君, 张光辉. 地表微地形测量及定量化方法研究综述[J]. 中国水土保持科学, 2013, 11(5): 114-122.
- [16] Burwell R E, Allmaras R R, Amemiya M. A Field measurement of total porosity and surface microrelief of soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1963, 27(6): 697-700.
- [17] Ali S, 刘增文. 用链条法测定地表糙度[J]. 水土保持科技情报, 1995(1): 14-16.
- [18] Huang C, White I, Thwaite E G, et al. A Noncontact laser system for measuring soil surface topography [J]. Soil Science Society of America Journal, 1988, 52(2): 350-355.
- [19] García M R, Requejo A S, Alonso A M T, et al. Shadow analysis: A method for measuring soil surface roughness [J]. Geoderma, 2008, 146(1/2): 201-208.
- [20] Jester W, Klik A. Soil surface roughness measurement: Methods, applicability, and surface representation [J]. Catena, 2005, 64: 174-192.
- [21] 张姣, 郑粉莉, 温磊磊, 等. 利用三维激光扫描技术动态监测沟蚀发育过程的方法研究[J]. 水土保持通报, 2016, 31(6): 89-94.
- [22] 王贞志. 基于普通数码影像的近景摄影测量技术研究[J]. 电子技术与软件工程, 2017(20): 76.
- [23] 顾峰华, 高井祥, 仇春平. 近景摄影测量监测小变形体的误差分析与精度评定[J]. 矿山测量, 2005(2): 43-45, 48.
- [24] 刘朝辉. 小型无人机遥感平台在摄影测量中的应用[J]. 工程技术研究, 2017(6): 46-47.
- [25] Boiffin J. Structural degradation of the soil surface by the action of rainfall [D]. Paris, France: Institut National Agronomique Paris Grignon, 1984.
- [26] 任磊, 李光录, 杨晨辉, 等. 坡面微地形 DEM 最佳分辨率的选择方法[J]. 西北农林科技大学学报, 2015, 43(5): 129-142.
- [27] 赵龙山, 梁心蓝, 张青峰, 等. 基于 DEM 的黄土坡耕地地表糙度测定方法研究[J]. 地理与地理信息科学, 2010, 26(4): 86-89.
- [28] 宋月君, 黄炎和, 杨洁, 等. 近景摄影测量在土壤侵蚀监测中的应用[J]. 测绘科学, 2016, 41(6): 80-83.
- [29] 杨超. 基于无人机高分数据的紫色土坡耕地微地貌演化过程研究[D]. 成都: 四川师范大学, 2018.

(上接第 140 页)