

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2024.01.005

考虑干缩裂隙动态变化的优势流入渗模型

程 实^{1,2}, 陈 瑾³, 罗 易⁴

(1. 湖北经济学院工程管理学系, 湖北 武汉 430074;
2. 湖北经济学院碳排放权交易省部共建协同创新中心, 湖北 武汉 430074;
3. 湖北省地质实验测试中心, 湖北 武汉 430074; 4. 中国地质大学(武汉), 湖北 武汉 430074)

摘要:为解决定量评估干缩裂隙优势流的难题,基于双孔隙域入渗理论,将开裂土体分为裂隙两侧基质域、裂隙底部基质域与裂隙域三部分,结合 Green-Ampt 入渗模型,提出了一种考虑干缩裂隙动态变化的优势流入渗模型,并基于该模型探讨了降雨强度、裂隙初始面积率及裂隙深度对土体两域积水时间、优势流入渗量及入渗深度的影响规律。结果表明:干缩裂隙产生的优势流入渗量占总降水量的 73.4%~91.4%,入渗深度为裂隙深度的 3.1~7.2 倍;降雨强度增大将缩短土体基质域积水时间,增大优势流入渗深度;降雨过程中干缩裂隙面积率减小使优势流入渗量减小;裂隙初始面积率增大使两侧基质域入渗量减小,优势流入渗量增大但入渗深度减小;裂隙深度增大使裂隙域积水时间延后,优势流入渗深度增大;模型计算结果与干缩裂隙实际入渗规律相符,同时避免了为裂隙域赋水力学参数带来的误差与不便。

关键词:干缩裂隙;优势流;双孔隙域;Green-Ampt 入渗模型

中图分类号:TV443.1 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2024)01-0037-09

A preferential flow model considering the dynamic changes of desiccation cracks

CHENG Shi^{1,2}, CHEN Jin³, LUO Yi⁴

(1. Department of Engineering Management, Hubei University of Economics, Wuhan 430074, China;
2. Collaborative Innovation Center for Emissions Trading system Co-constructed by the Province and Ministry, Hubei University of Economics, Wuhan 430074, China;
3. Hubei Provincial Geological Experiment Test Center, Wuhan 430074, China;
4. Faculty of Engineering, China University of Geoscience, Wuhan 430074, China)

Abstract: To address the problem of quantitative evaluation of the preferential flow model under the desiccation cracks, based on the double pore domain infiltration theory, this paper proposes a new preferential flow model considering the dynamic changes of desiccation cracks with the combination of Green-Ampt infiltration model. In the proposed model, the cracked soil is separated into matrix domains besides the cracks (L-matrix domain), under the cracks (B-matrix domain) and crack domain. Then, the effects of rainfall intensity, initial crack area ratio, and crack depth on the water ponding time, infiltration amount and depth of preferential flow are simulated and discussed. The results show that infiltration amount of preferential flow produced by desiccation cracks occupies 73.4% to 91.4% of the total precipitation. Its ultimate infiltration depth during rainfall is 3.1 to 7.2 times deeper than the crack depth. With the increase of rainfall intensity, the water ponding time of matrix domain decreases and the infiltration depth of preferential flow increases. During rainfall, the decreased crack area ratio leads to the decrease of infiltration amount of preferential flow. Moreover, it is found that with the increase of initial crack area ratio, the infiltration amount of the L-matrix domain decreases and the preferential flow infiltration increases, whereas its infiltration depth decreases. The increased crack depth mainly delays the water ponding time of the crack domain and increase the infiltration depth of preferential flow. In conclusion, the simulated results are consistent with the practical infiltration process within the desiccation cracks, and it also avoids errors and inconvenience caused by the defining hydraulic property of cracks.

Key words: desiccation cracks; preferential flow; double pore domain model; Green-Ampt infiltration model

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(42177166);湖北省地质局科研项目(KJ2023-42);安徽省 2018 年度交通运输科技进步计划项目(2018030);安徽交通控股集团交通科技攻关项目(JKKJ-2017-20)

作者简介: 程实(1986—),男,高级工程师,博士,主要从事特殊土及边坡稳定性研究。E-mail: chinacheng@yeah.net

通信作者: 陈瑾(1984—),女,工程师,硕士,主要从事桩基检测及岩土工程测试工作。E-mail: 1830213684@qq.com

引用本文: 程实,陈瑾,罗易.考虑干缩裂隙动态变化的优势流入渗模型[J].河海大学学报(自然科学版),2024,52(1):37-45.

CHENG Shi, CHEN Jin, LUO Yi. A preferential flow model considering the dynamic changes of desiccation cracks [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(1): 37-45.

自然界中,土体因失水收缩产生表面裂缝的现象十分普遍,对于含亲水性矿物(伊利石、蒙脱石)较多的裂土,这种现象尤为突出^[1-3]。干缩裂隙的产生为雨水入渗提供优势通道,导致大量雨水绕过土体基质进入裂隙底部,形成优势流^[4-5]。优势流使雨水快速入渗至土体深部,是造成地下水污染^[6]、水资源流失^[7]及边坡失稳破坏^[8-9]的重要影响因素。

为模拟雨水在裂土中的运移过程,Chen 等^[10-11]基于双孔隙域理论建立了优势流入渗模型。此类模型将土体孔隙分为大孔隙(常指植物根孔、生物孔洞及天然裂缝,本文特指裂隙域)与小孔隙域(常指土体基质域),认为入渗只发生在大孔隙域内(如干缩裂隙)。然后,诸多学者利用 Richard 方程^[12]或 Green-Ampt 入渗模型^[13]、Poiseuille 方程^[14]、运动波方程^[13]等描述大孔隙域内的水体流动特征。然而,大量试验表明^[7,15-17],雨水在裂土中的入渗同时发生在基质域与裂隙域内,雨水只在裂隙域内入渗的假设与真实情况不符。为此,Gerke 等^[18]基于 Richard 方程提出了双重渗透模型,可模拟雨水在大孔隙与小孔隙域内的入渗过程。该模型因具有明确的物理意义得到了广泛使用。Larsbo 等^[19-20]将其改进后用于模拟裂土的水分运移过程。其中大多数研究均假定土体基质域与裂隙域的孔隙体积及孔隙分布特征保持不变。然而,裂土中的孔隙系统往往随着含水率变化而动态变化,导致雨水入渗过程十分复杂。例如,干缩裂隙在降雨入渗过程中随含水率的增加会逐渐闭合,Favre 等^[21-22]认为裂隙闭合会显著降低土体渗透性,甚至使优势流现象消失。因此,静态的双域入渗模型难以用于预测干缩裂隙中产生的优势流。Liu 等^[23]将两域的孔隙体积变化作为土体收缩指标的函数,考虑了裂隙动态变化对入渗过程的影响,但其提出的函数关系不仅缺乏物理一致性,还包含大量难以确定的参数,导致模型存在等效性问题。此外,上述模型均基于 Richard 方程,存在较为明显的数值收敛问题。

Green-Ampt 入渗模型因其物理意义明确、形式简单而被广泛应用于一维均质入渗问题的研究中。该模型可预测积水时间、累积入渗量及湿润锋深度等水文参数,对研究地表径流、评价灌溉效率及边坡稳定性具有重要意义。然而,目前仅有少量学者将 Green-Ampt 入渗模型^[24-26]用于模拟裂土中的优势流,但同样未考虑干缩裂隙的动态变化。Stewart 等^[26]虽然考虑了干缩裂隙的动态变化,但其参数过多且仅适用于裂隙发育程度较低的情况。此外,不论是基于 Richard 方程还是 Green-Ampt 入渗模型,在模拟裂土中的优势流时,均将裂隙域作为透水材料处理,赋予其水力学参数,如渗透系数或单位水力梯度。然而,裂隙的水力学参数不能通过试验测得,其水力梯度也常远大于单位梯度,经验赋值或反算法不仅带来了误差,还严重削弱了模型的预测能力。

为此,本文基于双孔隙域入渗理论,结合 Green-Ampt 入渗模型,提出了可考虑干缩裂隙动态变化的优势流入渗模型,探讨了降雨强度、裂隙初始面积率及裂隙深度对土体两域积水时间、优势流入渗量及入渗深度的影响规律。

1 优势流概念模型

如图 1(a)(b)所示(图中 β 为裂隙面积率),将土体中多条干缩裂隙按照等效面积与体积视为单个裂隙域,裂隙两侧和底部的土体基质分别划分为 L 基质域、B 基质域。降雨过程中(定雨强),由于土体基质吸水膨胀,裂隙域与 B 基质域的体积将会减小。本文假设:①裂隙深度不变,土体表面的沉降忽略不计,则各域的体积与其表面积成比例变化,如图 1(c)所示;②雨水仅在竖直方向运移,不考虑通过裂隙壁在 L 基质域与裂隙域之间的水分交换;③土体基质域的饱和渗透系数远小于裂隙域,则降雨时基质域表面将先于裂隙域积水(裂隙域积水指裂隙空间被雨水填满)。将基质域与裂隙域的积水时间分别表示为 $t_{p,m}$ 与 $t_{p,c}$ 。当降雨强

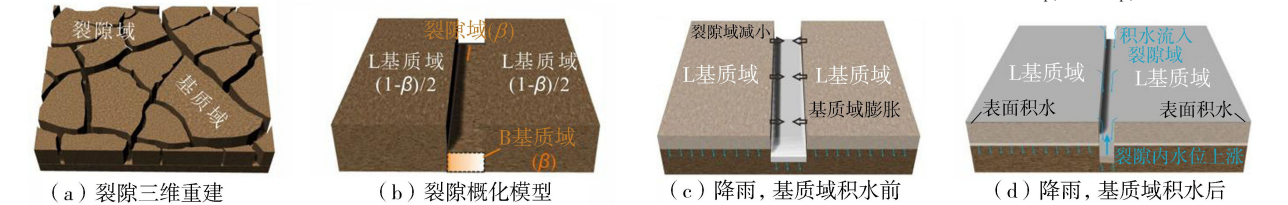


图1 裂土优势流建模过程示意图

Fig.1 Modeling process of preferential flow in cracked soil

度大于基质域饱和渗透系数时,考虑上述假设可将入渗过程分为 3 个阶段:

a. 基质域积水前, $t < t_{p,m}$ 。如图 1(c) 所示,该阶段 L 基质域、B 基质域及裂隙域的入渗能力均大于降雨强度。因此,土体不产生积水,各区域的入渗速率等于降雨强度,入渗流量等于按面积占比分配的降水量。

b. 裂隙域积水前,基质域积水后, $t_{p,m} \leq t < t_{p,c}$ 。如图 1(d) 所示,基质域积水后,进入基质域流量将小于按其面积占比分配的降水量。L 基质域与 B 基质域表面将同时产生积水。其中 L 基质域表面积水将沿着裂隙壁迅速到达裂隙底部,使得 B 基质域表面水头(裂隙域内水位)增加。此过程中,L 基质域内的入渗速率与流量可由 Selker 等^[27]提出的土体弱积水条件下入渗预估模型计算得到。B 基质域内的入渗速率与流量可由变水头条件下的 Green-Ampt 入渗模型求解得到。若 B 基质域表面积水达到某一水位时,B 基质域的入渗速率等于进入裂隙内的雨水流速,则裂隙域不会产生积水。反之,裂隙域将产生积水。

c. 裂隙域积水后, $t \geq t_{p,c}$ 。裂隙域被雨水填满后,B 基质域内的入渗由定水头边界条件下的 Green-Ampt 模型求解。

此外,基于大量土体干缩裂隙发展演化规律室内试验成果,在上述过程中引入裂隙面积率、质量含水率与时间之间的经验函数,考虑了干缩裂隙动态变化对入渗过程的影响。

2 模型控制方程

2.1 双孔隙域 Green-Ampt 入渗模型

裂土的总入渗速率定义为^[18]

$$i_{\text{total}} = \frac{Q_m + Q_c}{A_m + A_c} = \frac{A_m}{A_m + A_c} i_m + \frac{A_c}{A_m + A_c} i_c = (1 - \beta) i_m + \beta i_c \quad (1)$$

式中: i_{total} 为总入渗速率; Q 为水通量,下标 m 和 c 分别代表基质域与裂隙域; A 为表面积; i 为入渗率; β 为裂隙域的体积权重系数,本文中为裂隙面积率相等。

将基质域内的入渗视为活塞流(Green-Ampt 入渗模型中的假定)并对式(1)应用 Darcy 定律可得:

$$i_{\text{total}} = K_{\text{total}} \left(\frac{d\psi}{dz} \right) = (1 - \beta) K_m \left(\frac{d\psi_m}{dz} \right) + \beta i_c \quad (2)$$

式中: K_{total} 为裂土的整体饱和渗透系数; $d\psi/dz$ 为竖向水力梯度; K_m 为土体基质的饱和渗透系数(包括 L 与 B 基质域)。

需要说明的是,以往的双孔隙域渗透模型也将式(2)右端第 2 项裂隙域中的入渗过程视为活塞流,然后为裂隙赋水力学参数并应用 Darcy 定律。考虑裂隙为容水空间而非透水性材料,Darcy 定律不适用于雨水在裂隙中的运移过程,因此本文式(2)中只给出裂隙域的渗透速率广义表达式。

根据 Green-Ampt 入渗方程解,可得水力梯度的表达式为

$$\frac{d\psi}{dz} = 1 + \frac{h_0 + s_f}{z_w} \quad (3)$$

其中 $z_w = I/n$ $n = \theta_s - \theta_0$

式中: h_0 为土体表面积水深度; s_f 为湿润锋处土体基质吸力水头; z_w 为湿润锋深度; I 为累积入渗量; n 为容水孔隙体积率; θ_s 、 θ_0 分别为土体的饱和与初始体积含水率。

根据累积入渗量与入渗速率的导数关系,联立式(2)与式(3)得湿润等深度与时间的关系:

$$\frac{tK_{\text{total}}}{n(s_f + h_0)} = \frac{I}{n(s_f + h_0)} - \ln \left[1 + \frac{I}{n(s_f + h_0)} \right] \quad (4)$$

裂隙面积率变化是本文考虑干缩裂隙动态变化的核心思想。大量室内外裂隙发展演化规律试验结果^[8-9]表明干缩裂隙形成时,裂隙面积率与表层土体质量含水率具有良好的线性关系,即:

$$\beta = aw + b \quad (5)$$

式中: a 、 b 为拟合参数,可通过裂隙面积率与含水率曲线得到^[7]; w 为质量含水率。当认为土体胀缩为一可逆过程时,式(5)可用于描述降雨过程中裂隙的闭合规律。

降雨过程中 w 随时间的变化曲线可通过现场实测得到。为便于后续模型的敏感性分析,本文基于室内不同降雨强度下得到的土柱表层质量含水率测试结果,采用 Boltzmann 生长模型描述含水率增长过程:

$$w = w_s + \frac{w_0 - w_s}{1 + e^{(t-t_{\text{mid}})/t_{\text{con}}}} \quad (6)$$

式中: w_s 为土体饱和质量含水率; w_0 为初始质量含水率; t_{mid} 为含水率达到 $w = (w_0 + w_{\text{max}})/2$ 的时间; t_{con} 为拟合参数。需要说明的是, 此处选用 Boltzmann 生长模型不仅是因为其与测试数据的拟合程度较高, 还考虑到该模型有较为清楚的物理意义, 与定雨强条件下表层土体质量含水率的增长过程相符。

将式(6)代入式(5)可得:

$$\beta(t) = a \left[w_s + \frac{w_0 - w_s}{1 + e^{(t-t_{\text{mid}})/t_{\text{con}}}} \right] + b \quad (7)$$

2.2 分阶段基质域与裂隙域入渗方程

2.2.1 入渗方程($t < t_{p,m}$)

当 $t < t_{p,m}$ 时, 各域的入渗速率等于按面积占比分配的降雨强度:

$$i_{L-m} = \left(\frac{A_{L-m}}{A_{L-m} + A_c} \right) r = (1 - \beta(t)) r \quad (8)$$

$$i_c = \left(\frac{A_c}{A_{L-m} + A_c} \right) r = \beta(t) r \quad (9)$$

式中: r 为降雨强度; A_{L-m} 为 L 基质域表面积。

各域的累积入渗量为

$$I_{L-m} = r \int_0^t (1 - \beta(t)) dt = r \left[at_{\text{con}}(w_0 - w_{\text{max}}) \ln \frac{1 + e^{(t-t_{\text{mid}})/t_{\text{con}}}}{1 + e^{-t_{\text{mid}}/t_{\text{con}}}} - (aw_0 + b - 1)t \right] \quad (10)$$

$$I_c = r \int_0^t \beta(t) dt = r \left[at_{\text{con}}(w_0 - w_{\text{max}}) \ln \frac{1 + e^{-t_{\text{mid}}/t_{\text{con}}}}{1 + e^{(t-t_{\text{mid}})/t_{\text{con}}}} + (aw_0 + b)t \right] \quad (11)$$

2.2.2 入渗方程($t_{p,m} \leq t < t_{p,c}$)

当 $t_{p,m} \leq t < t_{p,c}$ 时, 首先确定 L 基质域的积水时间。由 Green-Ampt 入渗理论可知, 当 L 基质域的入渗速率等于其降雨强度时, 积水便会产生。根据 Selker 等^[27] 提出的弱积水条件下土体的入渗速率预估模型, L 基质域的入渗速率可表示为

$$i_{L-m} = (1 - \beta(t)) K_m \left[1 + \frac{\lambda + \sqrt{n_m s_{f,m} / (2K_m t)}}{1 + \lambda K_m t / (n_m s_{f,m}) + \sqrt{2K_m t / (n_m s_{f,m})}} \right] \quad (12)$$

式中: λ 为常数, 常取为 2/3; $s_{f,m}$ 为土体基质域中湿润锋处的基质吸力水头; n_m 为基质域的容水孔隙体积率。

令 $C = K_m / n_m s_{f,m}$, 联立式(8)与式(12)可得 $t_{p,m}$ 的隐式表达式:

$$\frac{r}{K_m} - 1 = \frac{\lambda + \sqrt{1/(2Ct_{p,m})}}{1 + \lambda C t_{p,m} + \sqrt{2C t_{p,m}}} \quad (13)$$

$t_{p,m}$ 确定后, L 基质域内的累积入渗量可表示为

$$I_{L-m} = r \int_0^{t_{p,m}} (1 - \beta(t)) dt + \int_{t_{p,m}}^t i_{L-m}(t) dt \quad (14)$$

将式(10)、式(12)代入式(14)可得:

$$I_{L-m} = r \left[at_{\text{con}}(w_0 - w_{\text{max}}) \ln \frac{1 + e^{(t_{p,m}-t_{\text{mid}})/t_{\text{con}}}}{1 + e^{-t_{\text{mid}}/t_{\text{con}}}} - (aw_0 + b - 1)t_{p,m} \right] + \int_{t_{p,m}}^t i_{L-m}(t) dt \quad (15)$$

对于裂隙域, 在其未被雨水填满之前, 入渗速率可由降雨强度与 L 基质域的入渗速率之差求得:

$$i_c = r - i_{L-m} \quad (16)$$

相应的裂隙域累积入渗量为

$$I_c = r \int_0^{t_{p,m}} \beta(t) dt + r(t - t_{p,m}) - \int_{t_{p,m}}^t i_{L-m} dt \quad (17)$$

为确定裂隙域的积水时间, 现对 B 基质域的雨水入渗过程进行分析。B 基质域在积水前, 其入渗速率和入渗量与裂隙域相等, 仍可由式(9)(11)求得。当积水开始出现在 B 基质域表面时, 由式(12)可得其入渗速率为

$$i_{B-m} = \beta(t) K_m \left[1 + \frac{\lambda + \sqrt{1/(2Ct)}}{1 + \lambda Ct + \sqrt{2Ct}} \right] \quad (18)$$

式中 i_{B-m} 为 B 基质域入渗速率。

联立式(9)与式(18),可得 B 基质域积水时间 $t_{p,B-m}$ 的隐式表达式:

$$\frac{r}{K_m} - 1 = \frac{\lambda + \sqrt{1/(2Ct_{p,B-m})}}{1 + \lambda Ct_{p,B-m} + \sqrt{2Ct_{p,B-m}}} \quad (19)$$

显然,B 基质域与 L 基质域的积水时间相等。

B 基质域表面积水后(裂隙域积水前),其边界条件由流量边界转为变水头边界。根据式(3), i_{B-m} 可表示为

$$i_{B-m} = \beta(t) K_m \left[1 + \frac{n_m(h_c + s_{f,m})}{I_{B-m}} \right] \quad (20)$$

其中

$$h_c = I_c - I_{B-m} = r(t - t_{p,m}) - \int_{t_{p,m}}^t i_{L-m} dt - \int_{t_{p,m}}^t i_{B-m} dt$$

式中: h_c 既为 B 基质域的表面水头高度,也为裂隙内的水位高度; I_{B-m} 为 B 基质域累积入渗量。

根据累积入渗量与入渗速率的导数关系, I_{B-m} 的隐式微分表达式为

$$\frac{dI_{B-m}}{dt} = \beta(t) K_m \left[1 + \frac{n_m(h_c + s_{f,m})}{I_{B-m}} \right] \quad (21)$$

将式(7)、式(20)表达式代入式(21),可得 I_{B-m} 关于时间的常系数隐式微分方程:

$$\begin{cases} \frac{dI_{B-m}}{dt} = \left\{ a \left[w_s + \frac{w_0 - w_s}{1 + e^{(t-t_{mid})/t_{con}}} \right] + b \right\} K_m \left[1 + \frac{n_m(I_c - I_{B-m} + s_{f,m})}{I_{B-m}} \right] \\ \frac{dI_c}{dt} = r - \left\{ 1 - a \left[w_s + \frac{w_0 - w_s}{1 + e^{(t-t_{mid})/t_{con}}} \right] - b \right\} K_m \left[1 + \frac{\lambda + \sqrt{1/(2Ct)}}{1 + \lambda Ct + \sqrt{2Ct}} \right] \end{cases} \quad (22)$$

2.2.3 入渗方程($t \geq t_{p,c}$)

当 $t \geq t_{p,c}$ 时,首先确定裂隙域积水时间。定义有效裂隙深度 D_c 表示裂隙有限的容水空间,当裂隙内水位深度达到有效裂隙深度时,裂隙域即产生积水,由 h_c 表达式可得:

$$I_c - I_{B-m} = D_c \quad (23)$$

式(23)可通过式(22)得到的 I_c 、 I_{B-m} 的时间变化曲线求解。

然后,裂隙域积水后,整个土体表面均开始产生积水,在土层缓倾斜的条件下,将产生径流,此时 L 基质域仍将处于弱积水状态,其入渗速率与累积入渗量仍可按式(12)、式(14)计算。

B 基质域在裂隙域积水后将处于定水头边界条件直至降雨停止,其累积入渗量的隐式微分表达式为

$$\frac{dI_{B-m}}{dt} = \left\{ a \left[w_s + \frac{w_0 - w_s}{1 + e^{(t-t_{mid})/t_{con}}} \right] + b \right\} K_m \left[1 + \frac{n_m(D_c + s_{f,m})}{I_{B-m}} \right] \quad (24)$$

因此,通过式(10)(11)(15)(17)(22)(24),可求得降雨期间各域任一时刻的累积入渗量。最后,各域的湿润锋深度按照容水孔隙空间大小可计算为

$$z_{L-m} = \frac{I_{L-m}}{n_m S_{m,a}} \quad (25)$$

$$z_c = D_c - h_c \quad (26)$$

$$z_{B-m} = D_c + \frac{I_{B-m}}{n_m S_{c,a}} \quad (27)$$

其中 $S_{m,a} = \frac{1}{t} \int_0^t (1 - \beta(t)) dt$ $n_m = \theta_{s,m} - \theta_{0,m}$

式中: z_{L-m} 、 z_{B-m} 、 z_c 分别为 L 基质域、B 基质域及裂隙域的湿润锋深度; $S_{m,a}$ 为 L 基质域面积率的平均值; $S_{c,a}$ 为裂隙域面积率的平均值; $\theta_{s,m}$ 、 $\theta_{0,m}$ 分别为基质域的饱和体积含水率与初始体积含水率。

总体说来,本文所提模型主要包括以下参数: a 、 b 、 w_0 、 w_s 、 t_{mid} 、 t_{con} 、 r 、 K_m 、 n_m 、 D_c 、 $s_{f,m}$ 、 λ 。除了最后 2 个参数,其他参数均可通过试验获得,具有较高的实用性。其中, $s_{f,m}$ 可由 Morel-Seytoux 等^[28] 提出的预估模型求得。

3 实例模拟验证

选取文献[28]边坡足尺模型试验用土作为模拟对象,土体基本物理及水力学参数:相对密度为 2.72,液限为 35.7%,缩限为 8.2%,塑性指数为 17.3%,最佳含水率为 17%,最大干密度为 1.71 g/cm³,自由膨胀率为 42.5%。土体水力学拟合参数 α_m 为 0.002 mm⁻¹、 m_m 为 0.53,初始体积含水率为 20.7%,饱和体积含水率为 38.1%,残余体积含水率为 10.1%,饱和渗透系数为 8.45×10⁻³ mm/min, n_m 为 0.174, $s_{f,m}$ 为 173.36 mm。土体裂隙率与质量含水率的线性关系式为(土体初始质量含水率为 14.7%,饱和质量含水率为 27.6%)为

$$\beta = -0.0019w + 0.0542 \tag{28}$$

不同降雨强度下的土体入渗试验测得表层土体(2~5 cm)的质量含水率变化曲线及 Boltzmann 生长模型拟合曲线如图 2 所示。随后开展降雨强度、裂隙初始面积率、裂隙深度变化对雨水入渗过程的影响分析,各工况模拟参数见表 1。

表 1 不同工况模拟参数

Table 1 Simulation parameters of different conditions

工况	编号	$r/(mm/h)$	a	b	t_{mid}/min	t_{con}/min	$\beta/\%$	D_c/mm
不同降雨强度	1	15			42.2	4.1		
	2	30	-0.00190	0.05420	31.3	3.4	2.43	100
	3	45			18.2	3.7		
不同初始裂隙面积率	4		-0.00097	0.00286			1.43	
	5	15	-0.00190	0.05420	42.2	4.1	2.43	100
	6		-0.00410	0.11460			5.43	
不同裂隙深度	7							50
	8	45	-0.00190	0.05420	18.2	3.7	2.43	100
	9							300

注: β_0 为初始裂隙面积率。各工况 $k_m=8.45\times10^{-3}$ mm/min, $\theta_0=14.7\%$, $\theta_s=27.6\%$, $n_m=0.174$, $s_{f,m}=173.36$ mm, $\lambda=2/3$,降雨持续时间均为 120 min。

3.1 不同降雨强度的影响

由图 3 可知,裂隙域累积入渗量在降雨前期小于 L 基质域入渗量,随后超过 L 基质域并快速增加;随着降雨过程的进行,L 基质域入渗速率降低,累积入渗量增幅逐渐变缓;B 基质域累积入渗量较少,后期受裂隙闭合影响较大,累积入渗量增幅减小。总体看来,裂隙域最终累积入渗量显著大于基质域,且随降雨强度增大而增大,增幅达 29.73 mm;L 基质域的最终累积入渗量也随降雨强度增大而增大,但其增幅较小,仅为 0.28 mm;然而,B 基质域最终累积入渗量却随降雨强度增加而减小,降幅分别为 0.09 mm 及 0.16 mm。此外,随降雨强度增大,基质域积水时间与裂隙域入渗量超过基质域入渗量的时间均明显缩短。

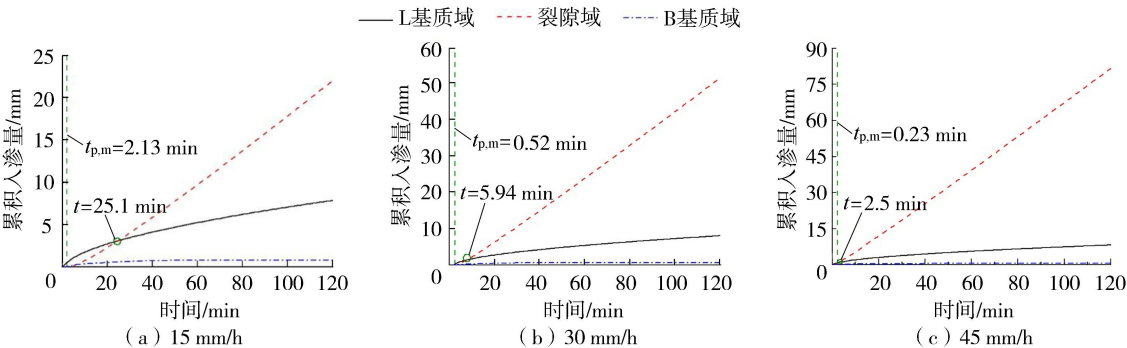


图 3 累积入渗量

Fig. 3 Cumulative infiltration amount

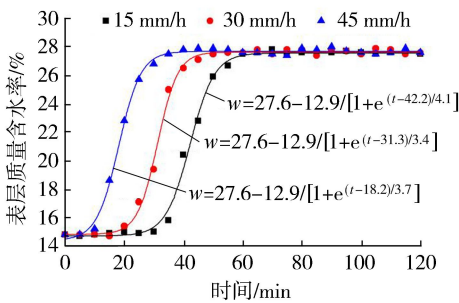


图 2 不同降雨强度下质量含水率变化拟合曲线
Fig. 2 Fitting curves of mass water content under different rainfall intensity

由图 4 可知,L 基质域入渗深度随降雨时间增加增幅逐渐变缓;B 基质域入渗深度积水后先陡增,后缓增,最后以近线性方式增加;裂隙域积水水位高度(入渗深度)逐步上涨,并在降雨强度为 30 mm/h 及 45 mm/h 的条件下与 L 基质域湿润锋(入渗深度)相交。总体看来,B 基质域最终入渗深度远大于 L 基质域,并随降雨强度增大而增大,增幅分别为 69 mm 及 124 mm;L 基质域最终入渗深度随降雨强度增大增幅较小,仅为 1.486 mm 及 0.5113 mm;裂隙域内最终积水水位高度随降雨强度而增大,分别为 22.02 mm、51.76 mm 及 81.65 mm,均小于 100 mm,故裂隙域未达到积水产生的时间。

3.2 不同初始裂隙面积率的影响

式(28)表明在初始质量含水率为 14.7% 时,裂隙面积率为 2.63%,在饱和质量含水率为 27.6% 时,其裂隙面积率为 0.176%。保持饱和含水率对应的裂隙率不变,通过改变初始含水率下的裂隙面积率,可模拟土体胀缩能力对降雨入渗的影响。模拟的工况参数见表 1,计算结果如图 5 所示。

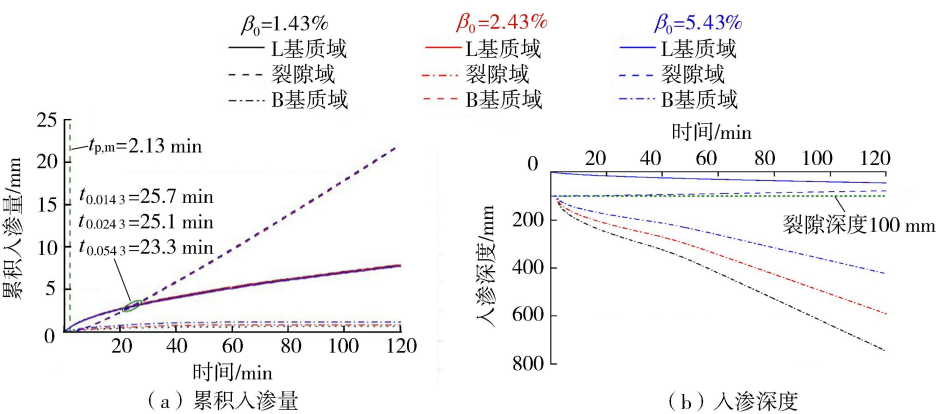


图 5 不同初始裂隙面积率条件下累积入渗量与入渗深度
Fig.5 Cumulative infiltration amount and infiltration depth with different initial crack area ratios

由图 5(a)可知,随着裂隙面积率增大,裂隙域与 B 基质域的累积入渗量增大,L 基质域累积入渗量逐步减小,裂隙域入渗量超过基质域入渗量的时间也逐步缩短。然而,总体看来,不同裂隙面积率下的各域最终入渗量差值相差较小,其中 B 基质域的变化较裂隙域和 L 基质域明显。由图 5(b)可知,随着裂隙面积率增大,L 基质域入渗深度逐渐减小,裂隙域积水水位深度增加,但二者变化均较小。B 基质域入渗深度变化较大,主要表现为随裂隙面积率增大而减小。

3.3 不同裂隙深度的影响

由图 6(a)可知,干缩裂隙深度为 50 mm 时,裂隙域在第 76.23 分钟积满水,由于裂隙域按面积占比计算的降雨强度(18.2×10^{-3} mm/min)大于土体饱和和渗透系数(也大于 B 基质域入渗速率),故裂隙域内累积入渗量、积水水位高度将不再变化,此时 B 基质域表面由变水头边界转换为定水头边界,其最终累积入渗量较裂隙域未积水有所减小;当干缩裂隙深度为 100 mm 及 300 mm 时,裂隙域未积满水,二者各域累积入渗量变化曲线一致。由图 6(b)可知,随着干缩裂隙深度增加,裂隙域内的积水水位与 L 基质域湿润锋深度相交的时间延后甚至不相交;B 基质域最终入渗深度增加;L 基质域入渗深度随裂隙深度增加无明显变化。

3.4 讨论

3.4.1 干缩裂隙对优势流入渗的影响

降雨强度增大不仅增加总降雨量,还会显著缩短裂隙两侧基质域表面积水时间,导致积水更早进入裂隙域,故裂隙域内最终累积入渗量随降雨强度增大而增大。同时,基质域入渗速率在表面积水后将不再受降雨强度控制,不同降雨强度下其最终入渗量差值主要由积水前雨水完全入渗引起,由于基质域积水时间较短,故不同降雨强度下的最终累积入渗量差值亦较小。值得注意的是,随降雨强度增大,裂隙面积减小速度加快,裂隙底部基质域在积水前按面积占比所获得的雨水完全入渗量减少,故其累积入渗量随降雨强度增大不

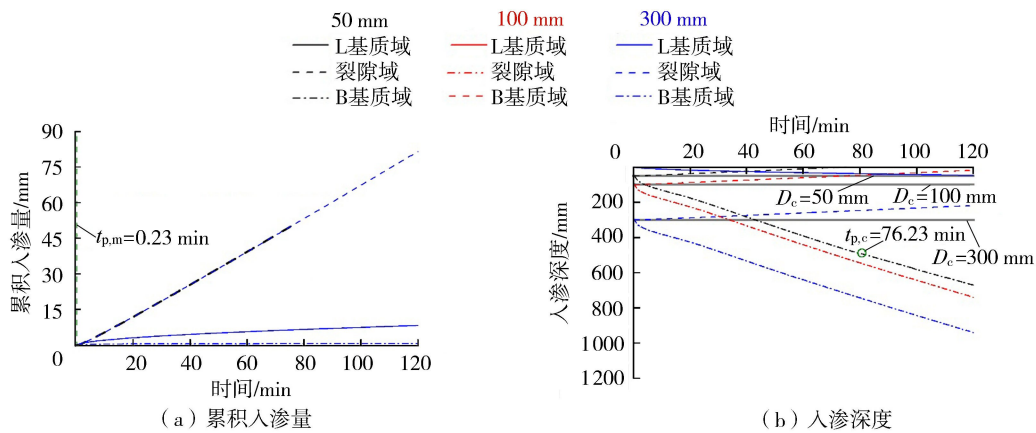


图 6 不同裂隙深度条件下累积入渗量与入渗深度

Fig. 6 Cumulative infiltration amount and infiltration depth with different crack depths

增反减。此外,由于降雨时裂隙两侧基质域膨胀引起的面积增量远小于基质域面积,且不同降雨强度下基质域累积入渗量相差较小,故其入渗深度变化曲线较为平滑且变化较小;裂隙域内积水水位深度与其累积入渗量成正比,故其随降雨强度增加而增加;虽然裂隙底部基质域累积入渗量因裂隙面积的快速减小而减小,但裂隙面积减小不仅使其上部水头快速增大,还使雨水下渗所要填充的总容水孔隙空间减小,故其下渗深度仍随降雨强度增大而增加。

裂隙面积率通过影响各域的受水面积及容水孔隙空间进而影响入渗量及入渗深度。当其他参数不变时,较小的裂隙初始面积率会使优势流入渗量(裂隙域与 B 基质域入渗量)减小,但却会引起优势流入渗深度的增加。例如,当降雨强度为 15 mm/h,裂隙深度为 100 mm 时,1.43% 初始裂隙面积率的优势流最终入渗深度大于裂隙初始面积率为 2.43% 与 5.43% 的入渗深度。上述模拟结果或可解释在诸多前人的试验中存在的普遍现象^[7,29],即在裂隙或者大孔隙不易被观察到的土体中,优势流仍使雨水快速下渗至土体深部。

裂隙深度主要影响裂隙域积水时间、优势流入渗量及入渗深度。随裂隙深度增大,其容水空间也逐渐变大,当不限制降雨时长时,裂隙域积水时间会逐渐变长。裂隙域积水后,大量雨水通过径流流失,使得优势流入渗量减小,其入渗深度随之减小。本文的模拟结果表明,土体干缩裂隙产生的优势流入渗量占总降水量的 73.4% ~ 91.4%,优势流入渗深度为裂隙深度的 3.1 ~ 7.2 倍。

3.4.2 优势流模型存在的问题

由于本文的优势流模型是基于 Green-Ampt 入渗理论发展而来的,故该模型也将水分在土体基质域的运移过程视为活塞流,且湿润锋后的土体假设达到完全饱和,这有可能高估基质域内(L 基质域和 B 基质域)的累积入渗量,进而高估了优势流的入渗深度。此外,雨水进入干缩裂隙时,部分雨水会通过裂隙侧壁水平入渗至基质域,但该模型目前的形式中未考虑裂隙侧壁的水平入渗,其入渗量可能成为了模型中裂隙域内积水深度 h_c 及 B 基质域入渗量 I_{B-m} 的一部分,导致相应计算结果偏大。有学者认为干缩裂隙形成后其侧壁会产生显著的毛细屏障作用^[28],水平入渗效应被严重削弱,即该部分入渗量对计算结果的影响可能较小,但仍需进一步验证。

尽管本文所提优势流模型存在上述问题,但其具有较为明确的物理意义且较好地体现了干缩裂隙对雨水入渗过程的影响。同时,所提优势流入渗模型将干缩裂隙作为容水空间而非透水性材料,与实际物理过程相符,还可避免为裂隙赋水力学参数带来的不便与误差。该模型还可为目前大量应用 Green-Amp 入渗理论预测边坡失稳的模型提供新思路。未来对该模型的改进应将裂隙底部的雨水弥散与侧壁水平入渗考虑在内。

4 结 论

- a. 土体干缩裂隙产生的优势流入渗量占总降水量的 73.4% ~ 91.4%,优势流入渗深度为裂隙深度的 3.1 ~ 7.2 倍。
- b. 降雨强度增大使基质域积水时间缩短,裂隙闭合速度加快,裂隙两侧基质域及裂隙域内累积入渗量增加,裂隙底部基质域累积入渗量减小,各域入渗深度均增大。

- c. 干缩裂隙动态变化显著影响优势流入渗量与入渗深度。降雨过程中裂隙率减小使优势流入渗量减小;裂隙初始面积率增大使基质域入渗量及入渗深度减小,优势流入渗量增大但入渗深度减小;裂隙深度增大主要使优势流入渗深度增大。
- d. 模型计算结果可较好地反映干缩裂隙雨水入渗的规律,与前人试验结果相符。同时,模型将双孔隙域入渗理论中的裂隙域作为容水空间而非渗透性材料,与实际干缩裂隙入渗过程相符,参数选取简单快捷。

参考文献:

[1] BEVEN K,GERMANN P. Macropores and water flow in soils[J]. Water Resources Research,1982,18(5):1311-1325.

[2] 叶伟,马福恒,胡江,等. 压实黏土干缩裂缝扩展规律试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(1):102-109. (YE Wei,MA Fuheng,HU Jiang,et al. Experimental study on propagation law of shrinkage cracks in compacted clay[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(1):102-109. (in Chinese))

[3] 张勇敢,刘斯宏,鲁洋,等. 袋装膨胀土强度变形特性及其碾压质量控制与检测[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(5):118-123. (ZHANG Yonggan,LIU Sihong,LU Yang,et al. Strength and deformation characteristics,compaction quality control and inspection of soilbags filled with expansive soil[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(5):118-123. (in Chinese))

[4] SANDER T,GERKE H H. Preferential flow patterns in paddy fields using a dye tracer[J]. Vadose Zone Journal,2007,6(1):105-115.

[5] BOUMA J. Soil morphology and preferential flow along macropores[J]. Agricultural Water Management,1981,3(4):235-250.

[6] CHADUVULA U,VISWANADHAM B V S,KODIKARA J. Centrifuge model studies on desiccation cracking behaviour of fiber-reinforced expansive clay[J]. Geotextiles and Geomembranes,2022,50(3):480-497.

[7] GREVE A,ANDERSEN M S,ACWORTH R I. Investigations of soil cracking and preferential flow in a weighing lysimeter filled with cracking clay soil[J]. Journal of Hydrology,2010,393(1/2):105-113.

[8] 罗易,张家铭,周峙,等. 降雨-蒸发条件下土体开裂临界含水率演变规律研究[J]. 岩土力学,2020,41(8):2592-2600. (LUO Yi,ZHANG Jiaming,ZHOU Zhi,et al. Evolution law of critical moisture content of soil cracking under rainfall-evaporation conditions [J]. Rock and Soil Mechanics,2020,41(8):2592-2600. (in Chinese))

[9] 张家铭,罗易,周峙,等. 基于足尺模型试验的边坡裂隙发展演化规律[J]. 中南大学学报(自然科学版),2020,51(4):1037-1048. (ZHANG Jiaming,LUO Yi,ZHOU Zhi,et al. Evolution law of cracks based on full-scale model test of slope [J]. Journal of Central South University(Science and Technology),2020,51(4):1037-1048. (in Chinese))

[10] CHEN C,ROSEBERG R J,SELKER J S. Using microsprinkler irrigation to reduce leaching in a shrink/swell clay soil[J]. Agricultural Water Management,2002,54(2):159-171.

[11] JARVIS N J,STÄHLI M,BERGSTRÖM L,et al. Simulation of dichlorprop and bentazon leaching in soils of contrasting texture using the MACRO model[J]. Journal of Environmental Science and Health,1994,29(6):1255-1277.

[12] AGUILAR-LÓPEZ J P,BOGAARD T A,GERKE H H. Dual-Permeability model improvements for representation of preferential flow in fractured clays[J]. Water Resources Research,2020,56(8):WR027304.

[13] WEILER M. An infiltration model based on flow variability in macropores:development,sensitivity analysis and applications[J]. Journal of Hydrology,2005,310(1/2/3/4):294-315.

[14] LEPORE B J,MORGAN C L S,NORMAN J M,et al. A Mesopore and Matrix infiltration model based on soil structure[J]. Geoderma,2009,152(3/4):301-313.

[15] GRECO R. Preferential flow in macroporous swelling soil with internal catchment;model development and applications [J]. Journal of Hydrology,2002,269(3/4):150-168.

[16] KRISNANTO S,RAHARDJO H,FREDLUND D G,et al. Water content of soil matrix during lateral water flow through cracked soil[J]. Engineering Geology,2016,210:168-179.

[17] TUONG T P,CABANGON R J,WOPEREIS M C S. Quantifying flow processes during land soaking of cracked rice soils[J]. Soil Science Society of America Journal,1996,60(3):872-879.

[18] GERKE H H,VAN GENUCHTEN M T. Dual-porosity model for simulating the preferential movement of water and solutes in structured porous media[J]. Water Resources Research,1993,29(2):305-319.

[19] LARSBO M,JARVIS N J. MACRO5. 0. A model of water flow and solute transport in macroporous soil [J]. Technical Description,2003,2003:1-50.

[20] GERKE H H,MAXIMILIAN KÖHNE J. Dual-permeability modeling of preferential bromide leaching from a tile-drained glacial till agricultural field[J]. Journal of Hydrology,2004,289(1/2/3/4):239-257.

刊2):3505-3515. (ZHOU Xiaoxiong,GONG Qiuming,YIN Lijun,et al. Predicting boring parameters of TBM stable stage based on BLSTM networks combined with attention mechanism[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2020,39 (Sup2):3505-3515. (in Chinese))

[33] 闫长斌,汪鹤健,周建军,等. 基于 Bootstrap-SVR-ANN 算法的 TBM 施工速度预测[J]. 岩土工程学报,2021,43(6):1078-1087. (YAN Changbin,WANG Hejian,ZHOU Jianjun,et al. Prediction of TBM advance rate based on Bootstrap method and SVR-ANN algorithm[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2021,43(6):1078-1087. (in Chinese))

[34] 朱宝强,王述红,张泽,等. 基于时间序列与 DEGWO-SVR 模型的隧道变形预测方法[J]. 浙江大学学报(工学版),2021,55(12):2275-2285. (ZHU Baoqiang,WANG Shuhong,ZHANG Ze,et al. Prediction method of tunnel deformation based on time series and DEGWO-SVR model[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science),2021,55(12):2275-2285. (in Chinese))

[35] 牛欣怡,鲁程鹏,卢佳赞,等. 机器学习模型在地下水埋深模拟中的适应性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(4):74-82. (NIU Xinyi,LU Chengpeng,LU Jiayun,et al. Adaptability analysis of machine learning model in groundwater depth simulation[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(4):74-82. (in Chinese))

[36] HUANG X,ZHANG Q T,LIU Q S,et al. A real-time prediction method for tunnel boring machine cutter-head torque using bidirectional long short-term memory networks optimized by multi-algorithm[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering,2022,14(3):798-812.

[37] 张庆龙,朱燕文,马睿,等. 基于注意力加强 Bi-LSTM 模型的 TBM 掘进参数预测研究[J]. 现代隧道技术,2022,59(4):69-80. (ZHANG Qinglong,ZHU Yanwen,MA Rui,et al. Study on prediction of TBM tunnelling parameters based on attention-enhanced Bi-LSTM model[J]. Modern Tunnelling Technology,2022,59(4):69-80. (in Chinese))

[38] LI J H,LI P X,GUO D,et al. Advanced prediction of tunnel boring machine performance based on big data[J]. Geoscience Frontiers,2021,12(1):331-338.

[39] 徐卫亚,徐伟,闫龙,等. 基于 LM-BP 和 SVR 的倾倒变形体变形预测[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(1):64-69. (XU Weiya,XU Wei,YAN Long,et al. Deformation prediction of toppling deformed slope based on LM-BP and SVR[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2021,49(1):64-69. (in Chinese))

[40] 傅康. 基于机器学习的 TBM 隧道围岩分级方法及掘进参数优化研究[D]. 济南:山东大学,2021.

(收稿日期:2023-01-18 编辑:刘晓艳)

(上接第 45 页)

[21] FAVRE F,BOIVIN P,WOPEREIS M C S. Water movement and soil swelling in a dry,cracked vertisol[J]. Geoderma,1997,78 (1/2):113-123.

[22] LIU C W,CHENG S W,YU W S,et al. Water infiltration rate in cracked paddy soil[J]. Geoderma,2003,117(1/2):169-181.

[23] LIU C W,CHENG S W,YU W S,et al. Dual-permeability model for flow in shrinking soil with dominant horizontal deformation [J]. Water Resources Research,2012,48(8):WR011376.

[24] STEWART R D,RUPP D E,ABOU NAJM M R,et al. A unified model for soil shrinkage,subsidence,and cracking[J]. Vadose Zone Journal,2016,15(3):1-15.

[25] STEWART R D. A dynamic multidomain Green-Ampt infiltration model[J]. Water Resources Research,2018,54(9):6844-6859.

[26] STEWART R D,ABOU NAJM M R,RUPP D E,et al. Modeling multidomain hydraulic properties of shrink-swell soils[J]. Water Resources Research,2016,52(10):7911-7930.

[27] SELKER J S,ASSOULINE S. An explicit,parsimonious,and accurate estimate for ponded infiltration into soils using the Green and Ampt approach[J]. Water Resources Research,2017,53(8):7481-7487.

[28] MOREL-SEYTOUX H J, MEYER P D, NACHABE M, et al. Parameter equivalence for the Brooks-Corey and van Genuchten soil characteristics: Preserving the effective capillary drive[J]. Water Resources Research,1996, 32:1251-1258.

[29] LUO Y,ZHANG J M,ZHOU Z,et al. Investigation and prediction of water infiltration process in cracked soils based on a full-scale model test[J]. Geoderma,2021,400(18):11511.

(收稿日期:2023-03-27 编辑:刘晓艳)