

DOI: 10.11779/CJGE20221050

边坡植被恢复中考虑微生物矿化和植被作用的 Green-Ampt 模型

李旭¹, 高山², 周成^{*1}, 王一冰¹, 钟启明³, 陈群¹

(1. 四川大学水利水电学院, 四川 成都 610065; 2. 广西新发展交通集团有限公司, 广西 南宁 530029;

3. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024)

摘要: 在边坡植被恢复中降雨入渗量的估算是很重要的, 为探究石漠化边坡格构内微生物矿化联合植被作用的填土降雨入渗过程, 在传统 Green-Ampt 模型基础上, 针对表层矿化的土柱引入稳定入渗率, 提出考虑微生物表层矿化 (M) 作用的改进 G-A 模型 (M-G-A); 针对含植株土柱, 考虑复合土层的入渗过程, 分别提出考虑植被 (P) 作用的改进 G-A 模型 (P-G-A) 以及考虑微生物矿化联合植被作用的改进 G-A 模型 (PM-G-A)。利用改进 G-A 模型进行累计入渗量计算, 并将计算结果与土柱试验实测值、Hydrus 数值解进行对比分析。结果表明: M-G-A 模型可以较好地描述累计入渗量随时间的变化, 且矿化程度越高模型计算偏差越小, 在强矿化作用下误差可控制在 5% 以内; P-G-A 模型的计算误差随降雨历时而增加, 但相较于 Hydrus 数值解可以减少误差约 10%; PM-G-A 模型的计算偏差随降雨历时呈现先增加后减小的趋势, 总体上优于 Hydrus 数值解。改进 G-A 模型能够针对微生物表层矿化石漠化边坡格构内填土的生态恢复技术进行累计入渗量即蓄水量分析, 具有一定的工程实用价值。

关键词: 边坡植被恢复; 降雨入渗; 植株孔优先流; 微生物表层矿化; Green-Ampt 模型解析解; 数值计算

中图分类号: TU431

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2023)09-1953-10

作者简介: 李旭(1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事环境岩土工程方面的研究工作。E-mail: 1901652414@qq.com。

Improved Green-Ampt model considering effects of microbial mineralization and vegetation in biological restoration of slopes

LI Xu¹, GAO Shan², ZHOU Cheng¹, WANG Yibing¹, ZHONG Qiming³, CHEN Qun¹

(1. College of Water Resources & Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Guangxi New Development

Transportation Group Co., Ltd., Nanning 530029, China; 3. Geotechnical Engineering Department of Nanjing Hydraulic Research Institute,

Nanjing 210024, China)

Abstract: The estimation of rainfall infiltration is very important in vegetation restoration of slopes. In order to explore the rainfall infiltration process of filling soil under microbial mineralization combined with vegetation in rock desertification slope lattice, based on the traditional Green-Ampt model, the stable infiltration rate is introduced into the surface mineralized soil column, and then an improved G-A model (M-G-A) considering microbial surface mineralization is proposed. For the soil column containing vegetation and considering the infiltration process of composite soil layer, an improved G-A model (P-G-A) considering the effects of vegetation and an improved G-A model (PM-G-A) considering the effects of microbial mineralization combined with vegetation are proposed respectively. The cumulative infiltration is calculated by using the improved G-A model, and the calculated results are compared with the measured values of soil column tests and Hydrus numerical solutions. The results show that the M-G-A model can well describe the variation of cumulative infiltration with time. The calculation accuracy of the model increases with the degree of mineralization, and the error can be controlled within 5% under the action of strong mineralization. The calculation error of the P-G-A model increases with the rainfall duration, but the error can be reduced by about 10% compared with the Hydrus numerical solution. The calculation deviation of the PM-G-A model first increases and then decreases with the rainfall duration, which is generally better than the numerical solution. The improved G-A model can be used to analyze the cumulative infiltration (water-storage capacity) for the ecological restoration technology in microbial mineralized soil in rocky desertified slope lattice, which has a positive engineering practical value.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U22A20602, 41977239); 2020 年度第三批广西交通运输行业重点科技项目 (XFZ-KY-LYH-20200112)

收稿日期: 2022-08-24

*通信作者: (E-mail: czhou@scu.edu.cn)

Key words: vegetation restoration of slopes; rainfall infiltration; preferential flow of vegetation; surface microbial mineralization; Green-Ampt model analytical solution; numerical calculation

0 引言

石漠化边坡由于地下岩溶通道的存在,具有坡面表土层浅薄、不连续、土壤有效水分和养分供应及保存能力差等特点,极大限制了边坡植被恢复工程的进行^[1]。近年来,国内外学者也提出了框格梁填土复绿护坡技术、板槽法绿化技术等^[2]边坡生态恢复方法。

为了研究边坡土体的降雨入渗,吴庆华等^[3]进行了室内模型试验与数值模拟,研究优先通道发育程度对不同降雨强度下优先流特征的影响。潘振辉等^[4]利用 Hydrus-1D 软件,使用控制变量法研究了土水特征曲线参数与边界条件对黄土中水分入渗的影响。

1911 年 Green 等^[5]根据毛细管理论提出了 Green-Ampt 入渗模型,随后众多学者针对不同的入渗条件进行了一系列改进。王文焰等^[6]在 Green-Ampt 入渗模型基础上,将非饱和湿润层的含水率变化视为施加于饱和区的吸力势,得出适用于黄土的积水入渗模型。王全九等^[7]在研究层状土入渗时改进了 Green-Ampt 模型,并对相关参数进行了讨论。周宏^[8]为寻求适合沙质土壤积水入渗的方法,分别采用 Kostikov、Green-Ampt、Philip 入渗模型和 Hydrus-1D、Hydrus-2D/3D 水文模型模拟了砂质土壤水分垂直入渗过程。雷文凯等^[9]对土体入渗势能梯度进行修正,建立了考虑土质边坡倾角并分层假定入渗的模型。

范严伟等^[10]引入导水度系数来量化上层土壤的导水程度,建立了改进的夹砂层土壤 Green-Ampt 入渗模型。Sung 等^[11]基于初始含水量非均匀分布的 Green-Ampt 模型,建立了残积土基岩边坡浅层破坏分析方法。苏永华等^[12]考虑到干湿循环对土体的劣化作用,建立了间歇性强降雨下边坡稳定性分析方法。宋宜祥等^[13]基于 Green-Ampt 对传统多层结构土质边坡降雨入渗深度计算方法进行改进,分析了潜在滑动面位置随降雨历时动态变化情况以及对边坡稳定性的影响。目前 Green-Ampt 模型的研究侧重于不同类型土壤、层状土壤、土壤入渗区域划分与湿润锋曲线设定以及入渗过程对无限长土质边坡稳定性的影响等方面,但针对微生物矿化或植被作用对坡土降雨入渗影响的模型研究鲜有报道。

本文利用喷洒法微生物矿化边坡格构内的填土,并在框格内满堂预留植株孔(图 1),把容器苗移植入各孔,以便解决框格内填土在降雨作用下易局部失稳、在非季节性施工苗木发育生长困难,易导致植被恢复失败以及植被恢复不能草灌结合的难题。开展利用喷

洒法微生物矿化边坡格构内的填土并结合植株预留孔的石漠化边坡植被恢复的土柱试验研究^[14],植株土柱是从图 1(a),(b)框格梁内填土中截取的一个以预留植株孔为中心的复合单元体。拟通过改进 Green-Ampt 模型,考虑微生物矿化和植被作用,对此进一步开展降雨入渗研究,分别建立考虑微生物表层矿化、植被作用、微生物矿化联合植被作用 3 种工况下土柱的降雨入渗模型,并利用 Hydrus 数值软件并行开展计算。将各土柱累计入渗量的模型计算值与土柱试验实测值、Hydrus 数值解对比分析,探究石漠化边坡格构内填土的降雨入渗问题。

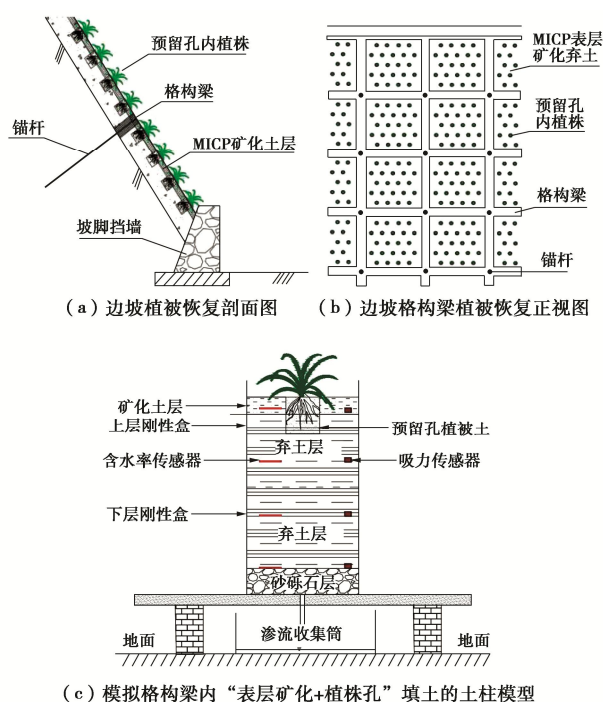


图 1 石漠化边坡格构内微生物矿化填土的蓄水型植被恢复
Fig.1 Vegetation restoration in microbial mineralized soil with water storage in rocky desertified slope lattice

1 考虑微生物矿化和植被作用改进的 Green-Ampt 模型

在改进 G-A 模型和利用 Hydrus 软件进行降雨入渗计算分析时,土柱累计入渗量为垂直于坡面的降雨入渗量,其余雨水将以地表径流的方式沿坡面排出;土柱湿润锋推进方向也为垂直于坡面方向。

1.1 传统的 Green-Ampt 模型

传统 Green-Ampt 模型将水分入渗过程近似为湿润锋推进过程,假定入渗过程湿润锋面将土体划分为饱和区和干燥区两个区域,具体如图 2 所示。假定根据 Darcy 定律,确定入渗率为

$$i = K_s \frac{H + S_f + Z_f}{Z_f} \quad (1)$$

式中: i 为入渗强度 (cm/min); K_s 为饱和导水率 (cm/min); H 为积水层厚度 (cm); Z_f 为湿润锋面推进距离 (cm); S_f 为以水头高度表示的湿润锋面吸力 (cm)。

在 t 时间内, 累计入渗量 I 为

$$I = (\theta_s - \theta_o) Z_f \quad (2)$$

式中: θ_s , θ_o 分别为土壤饱和和体积含水量与初始体积含水量。

湿润锋面推进距离与时间 t 的关系为

$$t = \frac{\theta_s - \theta_o}{K_s} \left[Z_f - (S_f + H) \ln \frac{Z_f + S_f + H}{S_f + H} \right] \quad (3)$$

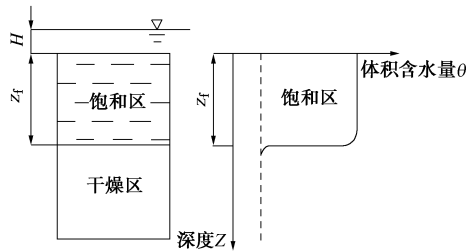


图2 Green-Ampt 模型计算简图

Fig. 2 Schematic diagram of Green-Ampt model

1.2 非均质多层土的 Green-Ampt 模型

传统的 Green-Ampt 模型仅适用于均质土层, 对于非均质土层来说, 韩用德等^[15]把有效导水系数取为各土层饱和和导水系数的均值, 定义非均质土层的入渗率为

$$i = \bar{K}_s \frac{H + S_f + Z_f}{Z_f} \quad (4)$$

$$\bar{K}_s = \frac{\sum_{j=1}^M D_j}{\sum_{j=1}^M \left(\frac{D_j}{K_{s,j}} \right)} \quad (j=1, 2, 3, \dots, M) \quad (5)$$

在 t 时间内, 累计入渗量 I 为

$$I = \sum_{j=1}^M D_j (\theta_{s,j} - \theta_{o,j}) + (Z_f - \sum_{j=1}^M D_j) \cdot (\theta_{s,M+1} - \theta_{o,M+1}) \quad (6)$$

湿润锋面推进距离与时间 t 的关系为

$$t - t_M = \frac{\theta_{s,M+1} - \theta_{o,M+1}}{\bar{K}_s} \left[(Z_f - D) - (S_f + H) \ln \frac{Z_f + S_f + H}{D + S_f + H} \right] \quad (7)$$

式中: $K_{s,j}$ 为各土层的饱和导水率 (cm/min); \bar{K}_s 为土层有效导水率 (cm/min); D 为土层厚度 (cm); θ 为土体体积含水量 (cm³/cm³); 下标 j , M 分别为土壤层数和已完全饱和的土层数目。

基于该模型的改进方法, 下面将进一步针对表层矿化土层、植被土层、填土层等构成的非均质土柱分别建立改进的 Green-Ampt 模型。

1.3 考虑表层矿化 (M) 作用的改进 Green-Ampt 模型 (M-G-A 模型)

雨水在表层矿化土柱中的入渗, 可按照湿润锋面的迁移路径, 将其分为两个阶段进行入渗模拟, 如图3所示。

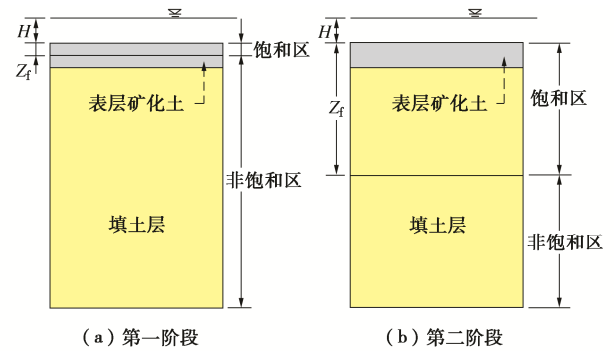


图3 表层矿化土柱概化土层模型

Fig. 3 Generalized model for surface mineralized soil column

(1) 第一阶段 (湿润锋面位于矿化土层内)

此时湿润锋面位于矿化土层内, 实质为均质土的入渗问题, 根据 Green-Ampt 模型, 入渗率 i 为

$$i = K_{s, \text{矿化土}} \frac{H + S_{f, \text{矿化土}} + Z_f}{Z_f} \quad (8)$$

在 t 时间内, 累计入渗量 I 为

$$I = (\theta_{s, \text{矿化土}} + \theta_{o, \text{矿化土}}) Z_f \quad (9)$$

湿润锋面推进距离与时间 t 的关系为

$$t = \frac{\theta_{s, \text{矿化土}} - \theta_{o, \text{矿化土}}}{K_{s, \text{矿化土}}} \left[Z_f - (S_{f, \text{矿化土}} + H) \ln \frac{Z_f + S_{f, \text{矿化土}} + H}{S_{f, \text{矿化土}} + H} \right] \quad (10)$$

式中: $K_{s, \text{矿化土}}$ 为矿化土的饱和渗透系数 (cm/min); $S_{f, \text{矿化土}}$ 为矿化土湿润锋面基质吸力 (cm); $\theta_{s, \text{矿化土}}$ 为矿化土饱和和体积含水量 (cm³/cm³); $\theta_{o, \text{矿化土}}$ 为矿化土初始体积含水量 (cm³/cm³)。

(2) 第二阶段 (湿润锋面离开矿化土层, 进入填土层)

当矿化土层中的水分在基质势和重力势的作用下入渗至矿化土-填土层交界面处, 即 $Z_f = D_{\text{矿化土}}$ 时, 若矿化土的势值大于填土的势值, 则湿润锋不再向下运移。随着矿化土含水率的增加, 势值随之降低, 直到小于填土势值, 湿润锋面开始进入填土层。

假设矿化土层基本达到饱和, 由于填土的渗透系数大于矿化土, 因此水分入渗主要受饱和和矿化土层的控制, 此时入渗率可视为常数^[16-17]。土体中的水分除了受到重力势和压力势的作用外, 还存在湿润锋面所

在层的吸力作用,即进水吸力,因此可定义该阶段入渗率:

$$i = K_{s, \text{矿化土}} \frac{D_{\text{矿化土}} + S_{f, \text{填土}} + H}{D_{\text{矿化土}}} \quad (11)$$

式中: $D_{\text{矿化土}}$ 为矿化土层厚度; $S_{f, \text{填土}}$ 为填土湿润锋面处的基质吸力 (cm)。

当湿润锋进入填土层后,由于交界面处土体含水率大于湿润锋面土体含水率,交界面基质吸力 $S_{\text{界面}}$ 小于填土湿润锋处基质吸力 $S_{f, \text{填土}}$, 即

$$0 < S_{\text{界面}} < S_{f, \text{填土}} \quad (12)$$

则进入填土层的稳定入渗率 i_{st} 满足

$$K_{s, \text{矿化土}} \frac{D_{\text{矿化土}} + S_{f, \text{填土}} + H}{D_{\text{矿化土}}} < i_{\text{st}} < K_{s, \text{矿化土}} \frac{D_{\text{矿化土}} + H}{D_{\text{矿化土}}} \quad (13)$$

考虑矿化土层厚度小及不同矿化效果下带来的土体饱和和层厚度差异,在计算填土入渗率时乘以一个矿化效应系数 ξ 能更准确地描述填土层内的水分入渗情况,可考虑填土层的稳定入渗率为

$$i_{\text{st}} = \xi K_{s, \text{矿化土}} \frac{D_{\text{矿化土}} + \frac{1}{2} S_{f, \text{填土}} + H}{D_{\text{矿化土}}} \quad (14)$$

则湿润锋进入填土层后的累计入渗量 I 为

$$I = (\theta_{s, \text{矿化土}} - \theta_{o, \text{矿化土}}) D_{\text{矿化土}} + (\theta_{s, \text{填土}} - \theta_{o, \text{填土}}) (Z_f - D_{\text{矿化土}}) \quad (15)$$

湿润锋面推进距离与时间 t 的关系为

$$t - t_1 = \frac{(\theta_{s, \text{填土}} - \theta_{o, \text{填土}}) D_{\text{矿化土}}}{\xi K_{s, \text{矿化土}} (D_{\text{矿化土}} + \frac{1}{2} S_{f, \text{填土}} + H)} (Z_f - D_{\text{矿化土}}) \quad (16)$$

式中: $\theta_{s, \text{填土}}$ 为填土饱和体积含水量 (cm^3/cm^3); $\theta_{o, \text{填土}}$ 为填土初始体积含水量 (cm^3/cm^3)。当 $Z_f = D_{\text{矿化土}}$ 时, $t = t_1$ 。

在湿润锋正好达到矿化土层和下部的填土层的交界面时,上下两个阶段的解析解都可以采用,分别采用交界面的深度值输入,计算入渗量和湿润锋达到的时间,可以取保守值。

1.4 含植株土柱的改进 Green-Ampt 模型

对于植株土柱,将其概化为植被土复合土层和填土层的两层土结构。其中植被土复合土层可视为植被土-填土的组合格构,如图 4 (a) 所示。对于“表层矿化+植株”土柱,将其概化为植被矿化复合土层、植被填土复合土层和填土层的 3 层土结构,其中植被矿化复合土层可视为矿化土-植被土-矿化土的组合格构,如图 4 (b) 所示。植被影响深度主要取决于根据容器苗的土球高度而施工的植株预留孔的深度。在植被恢复初期,植被影响深度可视为等于植株预留孔的

深度。随着时间的推移,灌草根系可能会扎入框格内填土,植被影响深度就可以视为框格内填土的整个厚度。

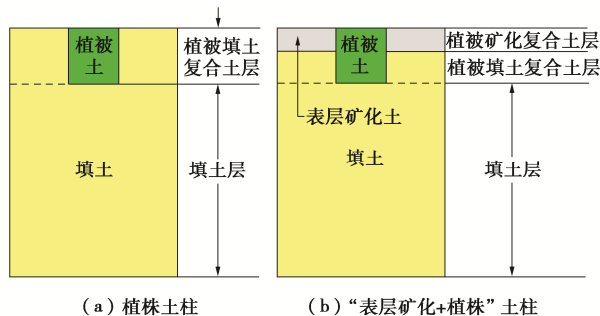


图 4 含植株土柱概化土层模型

Fig. 4 Generalized model for soil columns with vegetation

(1) 考虑植被 (P) 作用的改进 Green-Ampt 模型 (P-G-A 模型)

a) 第一阶段 (湿润锋面位于植被填土复合土层中)

此时湿润锋面位于植被填土复合土层内,实质为均质土的入渗问题,入渗率 i 为

$$i = K_{s, P-上} \frac{H + S_{f, P-上} + Z_f}{Z_f} \quad (17)$$

在 t 时间内,累计入渗量 I 为

$$I = (\theta_{s, P-上} - \theta_{o, P-上}) Z_f \quad (18)$$

湿润锋面推进距离与时间 t 的关系为

$$t = \frac{\theta_{s, P-上} - \theta_{o, P-上}}{K_{s, P-上}} \left[Z_f - (S_{f, P-上} + H) \ln \frac{Z_f + S_{f, P-上} + H}{S_{f, P-上} + H} \right] \quad (19)$$

式中: $K_{s, P-上}$ 为植被填土复合土的饱和渗透系数 (cm/min); $S_{f, P-上}$ 为植被填土复合土湿润锋面基质吸力 (cm); $\theta_{s, P-上}$ 为植被填土复合土饱和体积含水量 (cm^3/cm^3); $\theta_{o, P-上}$ 为植被填土复合土初始体积含水量 (cm^3/cm^3)。

b) 第二阶段 (湿润锋面位于填土层中)

此时湿润锋面离开植被填土复合土层,进入填土层中。由于填土的渗透系数小于植被填土复合土,因此水分在该层入渗主要受填土层的渗透系数和基质吸力控制,入渗率 i 为

$$i = K_{s, P-下} \frac{H + S_{f, P-下} + Z_f}{Z_f} \quad (20)$$

在 t 时间内,累计入渗量 I 为

$$I = (\theta_{s, P-下} - \theta_{o, P-下}) Z_f + I_1 \quad (21)$$

湿润锋面推进距离与时间 t 的关系为

$$t = \frac{\theta_{s, P-下} - \theta_{o, P-下}}{K_{s, P-下}} [(Z_f - D_{\text{上}}) - (S_{f, P-下} + H) \ln \frac{Z_f + S_{f, P-下} + H}{D_{\text{上}} + S_{f, P-下} + H}] + t_1 \quad (22)$$

式中: $K_{s,P-下}$ 为填土的饱和渗透系数 (cm/min); $S_{f,P-下}$ 为填土湿润锋面基质吸力 (cm); $\theta_{s,P-下}$ 为填土饱和体积含水量 (cm^3/cm^3); $\theta_{o,P-下}$ 为填土初始体积含水量 (cm^3/cm^3); $D_{上}$ 为植被填土复合土层厚度 (cm); 当 $Z_f = D_{上}$ 时, $I = I_1$, $t = t_1$ 。上述推导中的这些参数可以基于“植被土复合土层”土柱的降雨入渗试验测定或利用反演确定,以便反映均质土中根-土间隙优先流的影响,其合理性仍然值得进一步研究。

(2) 考虑表层矿化 (M) 联合植被 (P) 作用的改进 Green-Ampt 模型 (PM-G-A 模型)

植被对土体渗透系数的影响有增加也有减小,与植被种类、龄期、种类与种间生物密度有关。本文考虑边坡框格内填土中灌草根-土间隙优先流的作用,一般会导致复合体的等效或综合渗透系数要大一些,因此假定填土复合土层的渗透系数小于植被土。如果出现填土渗透系数大于植被-填土复合土的情况,则入渗会加快。

a) 第一阶段(湿润锋面位于植被矿化复合土层中)

此时湿润锋面位于植被矿化复合土层内实质为均质土的入渗问题,根据 Green-Ampt 模型,入渗率 i 为

$$i = K_{s,PM-上} \frac{H + S_{f,PM-上} + Z_f}{Z_f} \quad (23)$$

在 t 时间内,累计入渗量 I 为

$$I = (\theta_{s,PM-上} - \theta_{o,PM-上})Z_f \quad (24)$$

湿润锋面推进距离与时间 t 的关系为

$$t = \frac{\theta_{s,PM-上} - \theta_{o,PM-上}}{K_{s,PM-上}} [Z_f - (S_{f,PM-上} + H)] \cdot \ln \frac{Z_f + S_{f,PM-上} + H}{S_{f,PM-上} + H} \quad (25)$$

式中: $K_{s,PM-上}$ 为植被矿化复合土的饱和渗透系数 (cm/min); $S_{f,PM-上}$ 为植被矿化复合土湿润锋面基质吸力 (cm); $\theta_{s,PM-上}$ 为植被矿化复合土饱和体积含水量 (cm^3/cm^3); $\theta_{o,PM-上}$ 为植被矿化复合土初始体积含水量 (cm^3/cm^3)。

b) 第二阶段(湿润锋面位于植被填土复合土层中)

此时湿润锋面离开植被矿化复合土层,进入植被填土复合土层中。植被土通过打破矿化土层的阻渗效应,成为雨水入渗优势通道,促进雨水向下入渗。水分在该层入渗主要受本层土的饱和渗透系数和基质吸力控制,入渗率 i 为

$$i = K_{s,PM-中} \frac{H + S_{f,PM-中} + Z_f}{Z_f} \quad (26)$$

在 t 时间内,累计入渗量 I 为

$$I = (\theta_{s,PM-中} - \theta_{o,PM-中})Z_f + I_2 \quad (27)$$

湿润锋面推进距离与时间 t 的关系为

$$t = \frac{\theta_{s,PM-中} - \theta_{o,PM-中}}{K_{s,PM-中}} [(Z_f - D_{上}) - (S_{f,PM-中} + H)] \cdot \ln \frac{Z_f + S_{f,PM-中} + H}{D_{上} + S_{f,PM-中} + H} + t_1 \quad (28)$$

式中: $K_{s,PM-中}$ 为植被填土复合土的饱和渗透系数 (cm/min); $S_{f,PM-中}$ 为植被填土复合土湿润锋面基质吸力 (cm); $\theta_{s,PM-中}$ 为植被填土复合土饱和体积含水量 (cm^3/cm^3); $\theta_{o,PM-中}$ 为植被填土复合土初始体积含水量 (cm^3/cm^3); 当 $Z_f = D_{上}$ 时, $I = I_1$, $t = t_1$ 。

c) 第三阶段(湿润锋面位于填土层中)

湿润锋面离开植被填土复合土层,进入填土层中。由于填土的渗透系数小于植被填土复合土,因此水分在该层入渗主要受本层土的饱和渗透系数和基质吸力控制,因此入渗率 i 为

$$i = K_{s,PM-下} \frac{H + S_{f,PM-下} + Z_f}{Z_f} \quad (29)$$

在 t 时间内,累计入渗量 I 为

$$I = (\theta_{s,PM-下} - \theta_{o,PM-下})Z_f + I_2 \quad (30)$$

湿润锋面推进距离与时间 t 的关系为

$$t = \frac{\theta_{s,PM-下} - \theta_{o,PM-下}}{K_{s,PM-下}} [(Z_f - D_{上} - D_{中}) - (S_{f,PM-下} + H)] \cdot \ln \frac{Z_f + S_{f,PM-下} + H}{D_{上} + D_{中} + S_{f,PM-下} + H} + t_2 \quad (31)$$

式中: $K_{s,PM-下}$ 为填土的饱和渗透系数 (cm/min); $S_{f,PM-下}$ 为填土湿润锋面基质吸力 (cm); $\theta_{s,PM-下}$ 为填土饱和体积含水量 (cm^3/cm^3); $\theta_{o,PM-下}$ 为填土初始体积含水量 (cm^3/cm^3); $D_{中}$ 为植被填土复合土层厚度 (cm); 当 $Z_f = D_{上} + D_{中}$ 时, $I = I_2$, $t = t_2$ 。

2 Hydrus 数值计算模型

Hydrus 软件是一款模拟水、热、溶质运移的有限元软件,可模拟大气边界、水头边界、自由排水边界、渗出面边界等多种边界条件,能够考虑土壤特性、水分蒸腾、根系吸水等因素,通过迦辽金有限元法求解 Richards 方程计算土体内部水分运移情况。

2.1 Hydrus 数值计算方程

为了和 Green-Ampt 模型的计算结果进行对比分析,进一步利用 Hydrus 数值软件计算表层强/弱矿化土柱、植株土柱、“表层矿化+植株”等 4 种土柱的非饱和降雨入渗过程。主要工作为通过求解 Richards 方程,计算降雨过程中的土柱累计入渗量。

Richards 基本方程为

$$C(h_s) \frac{\partial h_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k(h_s) \frac{\partial h_s}{\partial z} \right) + \frac{\partial k(h_s)}{\partial z} \quad (32)$$

式中: h_s 为土壤基质势 (kPa); $k(h_s)$ 为土壤导水率,

cm/s; $C(h_s)$ 为土壤容水度, $C(h_s) = \partial\theta/\partial h_s$ 。

本文采用文献[14]中土柱试验实测初始含水量作为 Richards 方程中的初始条件。由于 Richards 方程采用自变量 h_s 来描述非饱和土水分入渗, 因此采用土水特征曲线 $\theta(h_s)$ 与非饱和导水率 $k(h_s)$ 与 h_s 的函数关系来描述 $\theta(h_s)$, $k(h_s)$, h_s 间的关系, 本文选用最常用的 Van Genuchten 模型拟合得到土体的土水特征曲线及非饱和水力传导系数, 拟合方程如下所示^[18]:

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r)[1 + (\alpha\psi)^n]^{(-m)}, \quad (33)$$

$$K_w = \frac{K_s[1 - \alpha\psi^{(n-1)} \cdot (1 + (\alpha\psi)^n)^{(-m)}]^2}{[(1 + \alpha\psi)^n]^{\frac{m}{2}}} \quad (34)$$

式中, θ 为体积含水量, θ_s 为饱和体积含水量, θ_r 为残余体积含水量, ψ 为基质吸力, K_w 为非饱和水力传导系数, K_s 为饱和水力传导系数, α , n , m 均为 Van Genuchten 模型拟合参数, $m=1-1/n$ 。

2.2 Hydrus 数值计算建模

参考文献[14]中的叠合式土柱试验, 其中“表层矿化+植株”土柱试验模型如图 1(c) 所示。土柱试验通过 3 cm 深等降雨量的水头浸泡方式模拟降雨入渗, 在入渗过程中每隔 5 min 供水一次以维持恒定水头, 并记录供水量, 供水量与土柱表面积之比即为入渗量 (单位: cm)。土柱不同深度埋设的含水率传感器与吸力传感器所得实测值可为改进 G-A 模型与 Hydrus 数值计算的参数取值提供依据。

基于图 1(c) 土柱试验模型, 建立土柱数值计算模型, 采用多孔介质二维网格 4 节点单元, 模型尺寸与边界条件如图 5 所示。降雨过程中上边界采用水头为 3 cm 的定水头边界。

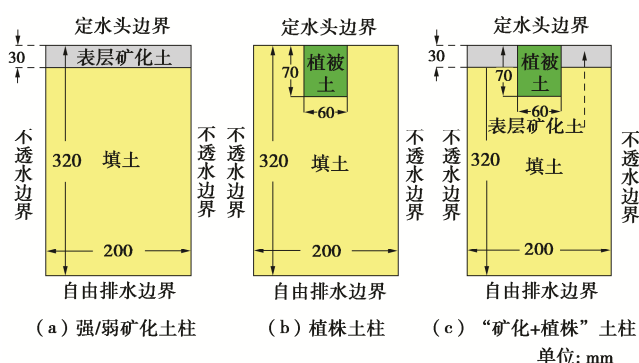


图 5 土柱 Hydrus 计算模型

Fig. 5 Schematic diagram of Hydrus model for soil columns

3 考虑微生物矿化和植被作用改进的 Green-Ampt 模型和 Hydrus 数值模型的计算分析

3.1 改进 Green-Ampt 模型的参数确定

根据文献[14]土柱实测入渗数据反演算规律, 对

于弱矿化土层矿化效应系数 ξ 取 11, 对于强矿化土层矿化效应系数 ξ 取 8。

利用改进的 G-A 模型求解累计入渗量需要确定各土层的湿润锋面吸力 S_r 、初始含水量 θ_0 、饱和含水量 θ_s 和饱和渗透系数 K_s 4 类数据。湿润锋面处的基质吸力 S_r 的确定参考 Bouwer 等的建议, 可取进气值的一半^[19]。其中, 各土层的进气值可通过不同土体的土水特征曲线根据传统图解法依次得出, 对于复合土层还需取加权平均值。

初始含水量 θ_0 根据文献[14]叠合式土柱不同埋深处的测点读数, 按照深度加权的方式取平均值。对于矿化土层的饱和渗透系数取值参考 Bouwer 等的建议, 取实测值的一半^[19]。对于复合土层 (如植被填土复合土层) 的平均渗透系数, 郭满良等^[20]推导得出

$$K = \frac{\sum K_i F_i}{F} \quad (35)$$

式中: K 为铅垂多层土的平均渗透系数 (cm/min); K_i 为第 i 层土的渗透系数 (cm/min); F 为多层土的总渗透截面积 (cm²); F_i 为第 i 层的渗透截面积 (cm²)。

饱和含水量 θ_s 和湿润锋面吸力 S_r 均按照加权的方式取平均值。改进 G-A 模型与 Hydrus 数值计算中各分层土的含水率均根据叠合式土柱试验不同深度含水率传感器实测值确定, 土柱各层土体干密度均为 1.4 g/cm³, 各土层的计算模型的参数取值详见表 1。

3.2 Hydrus 数值计算模型参数确定

按照通常简便做法, 利用王一冰^[14]叠合式土柱试验结果和数值分析反演, 得到各土层 Van Genuchten 模型 (V-G 模型) 水力特性参数, 如表 2。考虑到 V-G 模型在低吸力粗粒土上的适用性, 没有开展相应的粗粒土 SWCC 和相应 V-G 模型参数的测定试验。在改进的 G-A 模型中, 土柱还是主要分为饱和区和非饱和区, 没有涉及到模型底部的粗粒土为饱和区和非饱和区, 没有涉及到模型底部的粗粒土层。在数值模型中, 没有考虑底部粗粒土的 CBS 的毛细阻滞效应, 只是简单作为排水边界模拟自由出流, 进行机理分析研究。模拟结果肯定与下部有一层粗粒土的实测结果相比, 会有较大差别, 也会影响到结果对比分析的精准性, 将在以后的数模工作中吸取经验继续改进。

3.3 改进 G-A 模型的累计入渗量计算结果和试验结果的对比分析

基于第 1, 2 章节两部分所给出的理论模型与上述参数取值, 进行累计入渗量计算即土柱的蓄水量分析, 结果如下。

图 6(a), (b), (c), (d) 分别为表层弱矿化土柱、表层强矿化土柱、植株土柱、“表层矿化+植株”

表 1 改进 G-A 模型各土层计算参数取值
Table1 Parameters of soil layers for improved G-A model

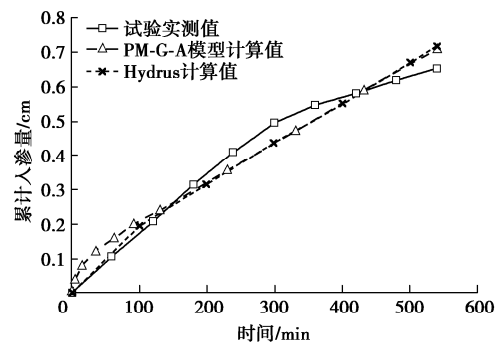
土柱工况设计	土层	对应的模型	θ_0	θ_s	S_f/cm	$K_s/(\text{cm}\cdot\text{min}^{-1})$
表层弱矿化土柱 (T-1)	矿化土 1	M-G-A 模型	0.214	0.30	13.75	0.000185
	填土		0.195	0.30	10.00	0.021700
表层强矿化土柱 (T-2)	矿化土 2		0.213	0.29	14.89	0.000070
	填土		0.169	0.30	10.00	0.021700
植株土柱 (T-3)	植被填土复合土 1	P-G-A 模型	0.160	0.30	9.79	0.023000
	填土		0.150	0.30	10.00	0.021700
“表层矿化+植株”土柱 (T-4)	植被矿化复合土	PM-G-A 模型	0.256	0.29	14.27	0.005000
	植被填土复合土 2		0.223	0.30	9.73	0.025000
	填土		0.126	0.30	10.00	0.021700

注：工况 T-4 表层矿化程度与 T-2 相同，均为强矿化。

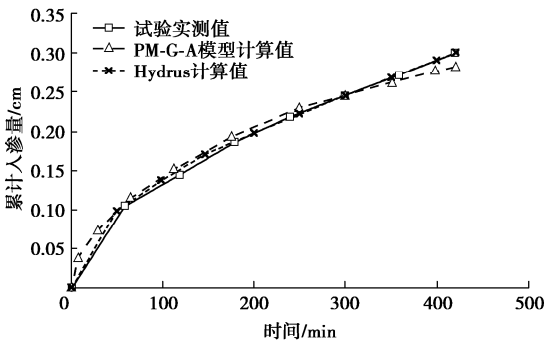
土柱的累计入渗量实测值、模型计算值、Hydrus 数值解的结果对比。

表 2 降雨入渗过程 V-G 模型参数

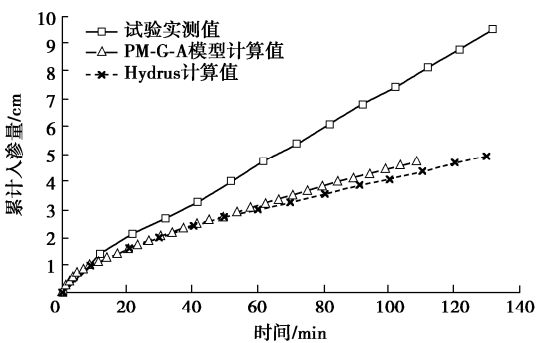
Table 2 Parameters of V-G model for rainfall infiltration process						
工况	土层	θ_r	θ_s	α	n	$K_s/(\text{cm}\cdot\text{d}^{-1})$
T-1	弱矿化土层	0.03	0.296	0.017	1.23	0.5328
	填土层	0.01	0.300	0.020	1.32	31.248
T-2	强矿化土层	0.035	0.290	0.017	1.23	0.2016
	填土层	0.01	0.300	0.020	1.32	31.248
T-3	植被土层 1	0.001	0.330	0.030	1.32	60.48
	填土层	0.01	0.300	0.020	1.32	31.248
T-4	强矿化土层	0.035	0.290	0.017	1.23	0.2016
	植被土层 2	0.01	0.340	0.035	1.35	100.8
	填土层	0.01	0.300	0.020	1.32	31.248



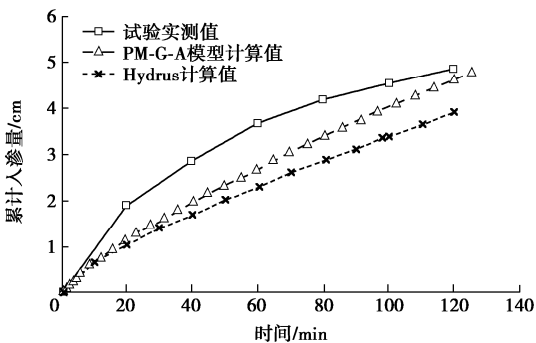
(a) 表层弱矿化土柱累计入渗量



(b) 表层强矿化土柱累计入渗量



(c) 植株土柱累计入渗量



(d) “表层矿化+植株”土柱累计入渗量

图 6 各工况土柱计算和实测的累计入渗量历时曲线对比分析

Fig. 6 Comparative analysis of cumulative infiltration curves of calculated and measured soil columns under different conditions

采用平均绝对百分比误差 MAPE，评价改进模型的性能，表达式为

$$\text{MAPE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{I - I_r}{I_r} \right|$$

(36)

式中： I 为实际的入渗量； I_r 为模型计算的入渗量； n 为样本的个数。指标的值越小，表示模型的偏差越小，吻合度越好。

对于表层弱矿化土柱，M-G-A 模型与数值解的吻合程度高，相对于实测值误差在 12% 左右；对于表层强矿化土柱，M-G-A 模型计算值与实测值的误差在 5% 以内，Hydrus 数值解的计算结果更贴合实测值。总体来看，M-G-A 模型可以较好地预测表层矿化土柱在积雨条件下的累计入渗量随时间变化规律，与

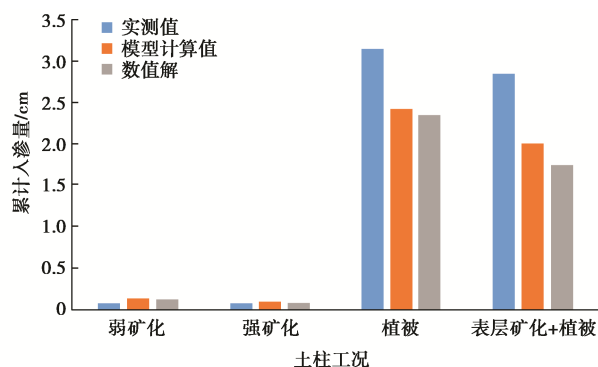
Hydrus 计算值的准确度差别很小,且矿化程度越高计算结果越准确。

对于植株土柱,模型计算值、Hydrus 数值解相对于实测值的误差均随着降雨历时的增加而增大。主要是因为 P-G-A 模型属于一维入渗模型,以加权平均的方式得到植被填土复合土层的平均饱和渗透系数,无法体现植株孔的蓄水漏斗效应,土柱试验中雨水通过优先流通道下渗,累计入渗量大于模型计算值。但 P-G-A 模型计算值相较于 Hydrus 数值解,误差可减少约 10%,主要是 Richards 方程在非饱和土中容水度由于滞后度的影响,会产生数值振荡导致较大误差,且在处理成层土渗流问题时也会存在一定的误差^[21]。

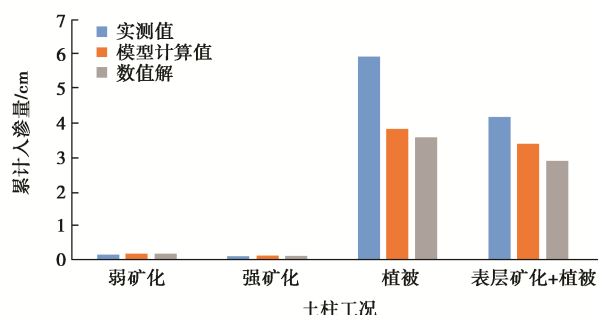
对于“表层矿化+植株”土柱,PM-G-A 模型计算的结果与实测值之间的误差随时间呈现先增大后减小的趋势,在降雨 60 min 时最大为 24%,在降雨 120 min 时缩减至 3%。主要是在降雨初期受植株孔优先流通道的影响,大量雨水通过中间植株孔渗入土柱,实测累计入渗量大于 PM-G-A 模型计算值;但一段时间之后湿润锋全部进入填土层中,填土的渗透系数较小,水分在该层入渗主要受填土饱和渗透系数和基质吸力控制,减小了模型计算误差。相较于 Hydrus 数值解,PM-G-A 模型计算结果更为准确。

总体上,利用改进 G-A 模型描述土柱累计入渗量计算结果的准确度依次为: M-G-A 模型>PM-G-A 模型>P-G-A 模型。

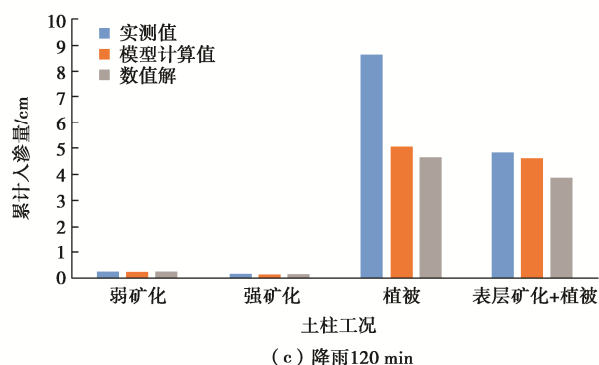
为进一步分析不同工况下土柱的降雨入渗规律,分别将 40, 80, 120 min 时刻各工况土柱累计入渗量进行对比分析,如图 7 所示。



(a) 降雨40 min



(b) 降雨80 min



(c) 降雨120 min

图 7 不同时刻各工况土柱累计入渗量对比分析

Fig. 7 Comparative analysis of cumulative infiltration of soil columns at different time under different working conditions

纯填土土柱试验在 40, 80, 120 min 的累计入渗量实测值依次为 0.25, 0.9, 1.6 cm, 且在历时 167 min 后土柱底部开始产生出流。而强矿化土柱 3 个时刻的累计入渗量均极小, 且直至降雨入渗试验进行 9 h 底部仍未产生出流。利用 M-G-A 模型进行计算, 以强矿化土柱为例, 湿润锋约在降雨入渗 34.98 h 后才运移至土柱底部, 表层矿化处理对降雨入渗的削减作用十分明显。本文还未来得及研究矿化的干燥阶段抑制开裂和降雨坡面冲刷的作用。

引入植株后, 3 个时刻累计入渗量均大大增加, 利用 P-G-A 模型与 PM-G-A 模型进行计算, 植株土柱与“表层矿化+植株”土柱湿润锋约在降雨入渗 107, 133 min 后运移至土柱底部, 待湿润区逐渐饱和后, 土柱底部将产生渗出量。对比文献[14]中植株土柱、“表层矿化+植株”土柱分别在降雨约 130, 235 min 后底部开始产生出流。植株孔的引入可以打破矿化土层的阻渗作用, 为降雨入渗提供优先流通道, 土柱中雨水优先蓄满矿化表土层包围的植被土, 发挥其蓄水漏斗的作用, 有利于进行蓄水型植被恢复。

在图 7 中, 植株土柱的实测值在降雨中后期都明显大于解析法和数值法的计算值, 而有矿化土层的土柱的实测和计算结果吻合较好, 这是因为在土柱的物理模型试验中, 底部设置了一小层粗粒土作为一个出水排水边界, 而在改进的 G-A 模型和数值模型中, 土柱底部粗粒土的 CBS 的毛细阻滞效应没有考虑, 只是简单作为排水边界模拟自由出流, 会影响到结果对比分析的精准性, 将在以后的数模工作中吸取经验继续改进。

4 结 论

(1) 针对表层矿化土柱引入稳定入渗率, 提出考虑微生物表层矿化作用的 M-G-A 改进 G-A 入渗模型。将植株土柱概化为植被填土复合土层和填土层, 建立针对植株土柱的 P-G-A 改进 G-A 入渗模型。将“表层

矿化+植株”土柱概化为植被矿化复合土层、植被填土复合土层和填土层,建立针对“表层矿化+植株”土柱的 PM-G-A 改进 G-A 入渗模型。解析计算结果和土柱试验结果、数值模拟结果较一致。

(2) 对于累计入渗量随时间的变化情况, M-G-A 模型预测效果良好,且矿化程度越高,模型计算结果越准确; P-G-A 模型的计算结果较 Hydrus 数值解可减少误差约 10%,但与实测值的吻合程度较差,且误差随降雨历时的增加而增大; PM-G-A 模型的计算结果与实测值之间的误差随时间呈现先增大后减小的趋势,相较于 Hydrus 数值解更准确。

(3) 表层矿化可以抑制旱季表土开裂、减少土壤水分蒸发、进行坡面水土保持,而植株孔能够增加降雨入渗起到蓄水漏斗的作用,有利于植被恢复。改进 G-A 模型能够针对微生物表土石漠化边坡格构内填土的生态恢复技术进行蓄水量分析,具有一定的工程实用价值。

参考文献:

- [1] 严友进. 喀斯特石漠化区浅层岩溶裂隙及其土壤主要生态功能研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2019. (YAN Youjin. Study on Shallow Karst Fissures and Main Soil Ecological Functions in Karst Rocky Desertification Area[D]. Guiyang: Guizhou University, 2019. (in Chinese))
- [2] 赵冰琴, 夏振尧, 许文年, 等. 工程扰动区边坡生态修复技术研究综述[J]. 水利水电技术, 2017, 48(2): 130-137. (ZHAO Bingqin, XIA Zhenyao, XU Wannian, et al. Summary of research on ecological restoration technology of slope in engineering disturbance area[J]. Water Conservancy and Hydropower Technology, 2017, 48(2): 130-137. (in Chinese))
- [3] 吴庆华, 朱国胜, 崔皓东, 等. 降雨强度对优先流特征的影响及其数值模拟[J]. 农业工程学报, 2014, 30(20): 118-127. (WU Qinghua, ZHU Guosheng, CUI Haodong, et al. Effect of rainfall intensity on preferential flow characteristics and its numerical simulation[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2014, 30(20): 118-127. (in Chinese))
- [4] 潘振辉, 李 萍, 肖 涛. 黄土水分入渗规律的数值模拟研究[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2021, 51(3): 470-484. (PAN Zhenhui, LI Ping, XIAO Tao. Numerical simulation of water infiltration law of loess[J]. Journal of Northwestern University (Natural Science Edition), 2021, 51(3): 470-484. (in Chinese))
- [5] GREEN W H, AMPT G A. Studies on soil physics: I Flow of air and water through soils[J]. Journal of Agricultural Science, 1911, 4: 1-24.
- [6] 王文焰, 汪志荣, 王全九, 等. 黄土中 Green-Ampt 入渗模型的改进与验证[J]. 水利学报, 2003(5): 30-34. (WANG Wenyan, WANG Zhirong, WANG Quanjiu, et al. Improvement and verification of Green-Ampt infiltration model in loess[J]. Journal of Water Conservancy, 2003(5): 30-34. (in Chinese))
- [7] 王全九, 邵明安, 汪志荣, 等. Green-Ampt 公式在层状土入渗模拟计算中的应用[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999(4): 66-70. (WANG Quanjiu, SHAO Mingan, WANG Zhirong, et al. Application of Green-Ampt formula in simulation calculation of layered soil infiltration[J]. Journal of soil erosion and soil and Water Conservation, 1999(4): 66-70. (in Chinese))
- [8] 周 宏. 基于多入渗模型的荒漠砂质土壤积水入渗模拟对比[J]. 干旱区研究, 2022, 39(1): 123-134. (ZHOU Hong. Simulation and comparison of water infiltration in desert sandy soil based on multi-infiltration model[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(1): 123-134. (in Chinese))
- [9] 雷文凯, 董宏源, 陈 攀, 等. 考虑倾角的土质边坡 Green-Ampt 改进入渗模型[J]. 水利水运工程学报, 2020, 42(6): 101-107. (LEI Wenkai, DONG Hongyuan, CHEN Pan, et al. Green-Ampt improved infiltration model of soil slope considering inclination angle[J]. Hydro-Science and Engineering, 2020, 42(6): 101-107. (in Chinese))
- [10] 范严伟, 赵文举, 王 昱, 等. 夹砂层土壤 Green-Ampt 入渗模型的改进与验证[J]. 农业工程学报, 2015, 31(5): 93-99. (FAN Yanwei, ZHAO Wenju, WANG Yu, et al. Improvement and verification of Green-Ampt infiltration model in sandy soil[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2015, 31(5): 93-99. (in Chinese))
- [11] SUNG E C. Prediction of shallow landslide by surficial stability analysis considering rainfall infiltration[J]. Engineering Geology, letin of Engineering Geology and the Environment, 2019, 2: 1315.
- [12] 苏永华, 李诚诚. 间歇性强降雨下基于 Green-Ampt 入渗模型的边坡稳定性分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2020, 47(3): 28-36. (SU Yonghua, LI Chengcheng. Slope stability analysis based on Green-Ampt infiltration model under intermittent heavy rainfall[J]. Journal of Hunan University (Natural Science Edition), 2020, 47(3): 28-36. (in Chinese))
- [13] 宋宜祥, 尹子航, 黄 达. 基于 Green-Ampt 模型的多层

- 结构边坡降雨入渗改进计算方法及稳定性影响研究[J]. 水文地质工程地质, 2022, **49**(6): 162-170. (SONG Yixiang, YIN Zihang, HUANG Da. Study on improved calculation method and stability influence of rainfall infiltration of multi-layer structure slope based on Green-Ampt model. Hydrogeology and Engineering Geology, 2022, **49**(6): 162-170. (in Chinese))
- [14] 王一冰. MICP 表层矿化边坡剖面填土基质的水力特性研究[D]. 成都: 四川大学, 2021. (WANG Yibing. Study on Hydraulic Characteristics of Waste Residue Soil Matrix in Surface Mineralized Slope of MICP[D]. Chengdu: Sichuan University, 2021. (in Chinese))
- [15] 韩用德, 罗毅, 于强, 等. 非均匀土壤剖面的 Green-Ampt 模型[J]. 中国生态农业学报, 2001, **9**(1): 31-33. (HAN Yongde, LUO Yi, YU Qiang, et al. Green-Ampt model of inhomogeneous soil profile[J]. Chinese Journal of Ecological Agriculture, 2001, **9**(1): 31-33. (in Chinese))
- [16] WANG Q J, SHAO M, HORTON R. Modified Green and Ampt models for layered soil and muddy water infiltration[J]. Soil Science, 1999, **164**(7): 445-453.
- [17] PARLANGE J Y, HILL D E. Theoretical analysis of wetting front instability in soils[J]. Soil Science, 1976, **122**(4): 236-239.
- [18] GENUCHTEN M T V. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, **44**: 892-898.
- [19] BOUWER H. Rapid field measurement of air-entry value and hydraulic conductivity of soil as significant parameters in flow system analysis[J]. Water Resources Research, 1966, **2**(4): 729-738.
- [20] 郭满良. 多层土和复合衬垫的渗透性[C]// 中国有色金属学会第二届青年学术年会. 中国有色金属学会, 北京, 1996: 1-3. (GUO Manliang. Permeability of multi-layer soil and composite gasket[C]// The second Youth academic Annual meeting of China Nonferrous Metals Society. China Society of Nonferrous Metals, Beijing, 1996: 1-3. (in Chinese))
- [21] 苏钰钦. 坡面径流与裂隙优先流耦合条件下的边坡稳定性分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2020. (SU Yubin. Slope Stability Analysis under the Condition of Coupling of Slope Runoff and Fracture Preferential Flow[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020. (in Chinese))

《岩土工程学报》征订启事

《岩土工程学报》创办于 1979 年, 是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究院承办, 国内外公开发刊。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表当今先进理论和实践水平的科学研究和工程实践成果等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿, 倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿, 并优先刊用这些稿件。主要栏目有黄文熙讲座、综述、论文、短文、工程实录、焦点论坛、讨论和简讯等。

本刊被《中文核心期刊要目总览》连续多年确认为核心期刊, 并在建筑类核心期刊中位于前列; 本刊被科技部“中国科技论文统计源期刊”(中国科技核心期刊)及“中国科技论文与引文数据库”收录; 本刊被中国科学院“中国科学引文数据库”收录; 本刊被“中国知网”全文收录及“中国学术期刊综合评价数据库”收录; 本刊被“工程索引 Ei Compendex 数据

库”和“日本科学技术振兴机构数据库 JST”等国际数据库收录。本刊网址(www.cgejournal.com)全文发布本刊所有刊载文章。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金和油气资源等行业中从事岩土力学与岩土工程专业的科研、设计、施工、监理和学习人员。

本刊为月刊, A4 开本, 双栏排版, 222 页, 每月中旬出版, 每期定价 40 元, 全年定价 480 元。

本刊国际标准刊号 ISSN 1000-4548, 国内统一刊号 CN 32-1124/TU, 国内发行代号 28-62, 国外发行代号 MO 0520。欢迎广大读者在全国各地邮局订购, 也可在编辑部订购(不另收邮费)。编辑部订购地址: 南京虎踞关 34 号《岩土工程学报》编辑部; 邮编: 210024; 联系电话: 025-85829534, 85829543, 85829553, 85829556; 传真: 025-85829555; E-mail: ge@nhri.cn。

(本刊编辑部)