

DOI: 10.11779/CJGE2022S1033

# 边坡植被恢复中植被水泥土 Green-Ampt 入渗模型的改进与应用

黄良誉<sup>1</sup>, 何廷全<sup>2</sup>, 周成<sup>1\*</sup>, 曾红艳<sup>1</sup>, 陈群<sup>1</sup>, 钟启明<sup>3</sup>

(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. 南京水利科学研究所, 江苏 南京 210029)

**摘要:** 在边坡植被恢复中降雨入渗情况的预测尤为重要, 为探究石漠化边坡格构内植被水泥土的降雨入渗过程, 基于5组叠合式土柱降雨入渗试验, 包括纯土、纯土+植株孔、2%和4%水泥含量土、4%水泥含量土+植株孔5组土柱, 针对传统 Green-Ampt 入渗模型过于简化地把土柱分为饱和区与非饱和区, 而不能模拟试验中发现的植株孔优先蓄水入渗产生的非饱和区前的过渡区问题, 将土柱降雨入渗模型分为饱和区、湿润过渡区和非饱和区。在分层假设的基础上, 对 Green-Ampt 入渗模型进行了改进, 研究了植被水泥土的累计入渗深度、累计入渗量等随时间变化规律, 并结合试验结果对改进后的模型进行了分析。结果表明: 湿润锋运移深度的改进 Green-Ampt 模型计算值和试验实测值吻合较好, 可以有效地模拟植被水泥土一维垂直入渗过程。改进 G-A 模型为针对石漠化边坡格构内植被水泥土生态恢复技术进行入渗分析, 具有一定的工程实用价值。

**关键词:** 边坡植被恢复; 植被水泥土; 降雨入渗; 植株孔优先流; 解析解; Green-Ampt 模型

**中图分类号:** TU43

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4548(2022)S1-0183-06

**作者简介:** 黄良誉(1998—), 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:1909784791@qq.com。

## Improvement and application of Green-Ampt infiltration model for vegetated cement soil in vegetation restoration of slopes

HUANG Liang-yu<sup>1</sup>, HE Ting-quan<sup>2</sup>, ZHOU Cheng<sup>1</sup>, ZENG Hong-yan<sup>1</sup>, CHEN Qun<sup>1</sup>, ZHONG Qi-ming<sup>3</sup>

(1. College of Water Resource & Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Guangxi New Development Transportation Group Co., Ltd., Nanning 530029, China; 3. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** Prediction of rainfall infiltration in vegetation restoration of slopes is particularly important. In order to explore the rainfall infiltration process of filling soil in rock-desertified slopes lattice, the rainfall infiltration modeling of five groups of composite soil columns is conducted, including pure soil, pure soil plus plant hole, soil with cement content of 2%, soil with cement content of 4%, and soil with cement content of 4% plus plant hole. The traditional Green-Ampt infiltration model is too simplified, which divides the rainfall infiltration of soil column into saturated zone and dry zone. Therefore based on the layered soil assumption, the Green-Ampt infiltration model is improved, and the rainfall infiltration of soil column is divided into saturated zone, transitional zone and dry zone. The cumulative infiltration depth and cumulative infiltration amount of new vegetated cement soil with time are studied, and the improved model is verified by comparing with the test results. It is shown that the calculated values by the improved Green-Ampt model for wetting front migration depth are in good agreement with the measured ones, and the calculation accuracy is significantly improved. The improved Green-Ampt model can be used to analyze the cumulative infiltration (water-storage capacity) for the ecological restoration technology in vegetated cement soil in the rock-desertified slope lattices, which is of a positive engineering practical value.

**Key words:** vegetation restoration of slope; vegetated cement soil; rainfall infiltration; preferential flow of vegetation; analytical solution; Green-Ampt model

## 0 引言

石漠化边坡存在着一些严重阻碍植被恢复的难题, 例如水土流失、地表缺失或者土层浅薄致使水分会快速流失, 还常出现蒸发量大于降水量的干燥期,

基金项目: 国家自然科学基金/联合基金项目(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); 四川省国际科技创新合作/港澳台科技创新合作项目(2019 YFH0076)

收稿日期: 2022-09-28

\*通信作者(E-mail: czhou@scu.edu.cn)

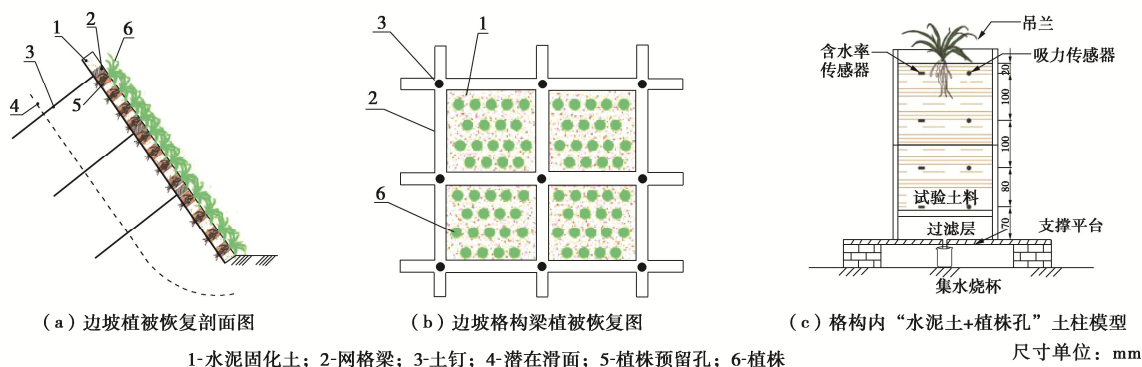


图1 蓄水型植被水泥土联合格构护坡技术示意图

Fig. 1 Slope protection technology for water storage vegetated cement-soil combined project

都会造成土壤季节性干旱。近年来,国内外学者提出了框格梁填土复绿护坡技术、植被水泥土等边坡生态恢复方法<sup>[1]</sup>。本课题组提出在石漠化边坡框格内填水泥土并预留植株孔的技术,降雨在植被水泥土中的入渗情况直接影响边坡植被土层的稳定性与植被存活率。降雨入渗情况可以通过模型试验、数值模拟与降雨入渗解析模拟等方法开展研究。

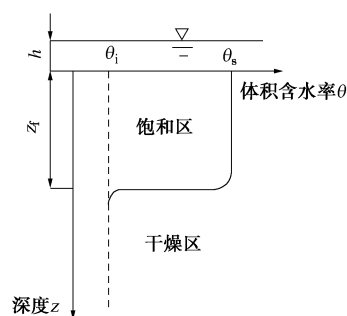
为了研究边坡土体的降雨入渗,叶万军等<sup>[2]</sup>通过室内模型试验研究黄土边坡的降雨入渗规律。潘振辉等<sup>[3]</sup>用 Hydrus-1D 软件研究了土水特征曲线参数与边界条件变化对黄土中水分入渗的影响。经典降雨入渗模型主要有 Green-Ampt 模型、Horton 模型和 Philip 模型等。Green-Ampt 模型<sup>[4]</sup>因其具有物理意义明确、形式简单和模型参数少等优点而被多数学者广泛应用改进。郭向红等<sup>[5]</sup>建立了能模拟不同入渗水头对入渗影响的改进 Green-Ampt 模型。Chen 等<sup>[6]</sup>通过扩展 G-A 模型,成功地应用到斜坡降雨入渗中。雷文凯等<sup>[7]</sup>能模拟不同边坡倾角对入渗影响的改进 Green-Ampt 模型。范严伟等<sup>[8]</sup>针对夹砂层土壤量化了上层土壤的导水程度来改进 Green-Ampt 入渗模型。王文焰等<sup>[9]</sup>根据黄土土壤水分剖面改进了 Green-Ampt 模型。彭振阳等<sup>[10]</sup>针对沙土特性在分层 Green-Ampt 入渗模型基础上调整了分层假定中的湿润区形状。

本课题组<sup>[11]</sup>曾开展了 5 组叠合式土柱的降雨入渗试验,如图 1 所示,包括纯土、纯土+植株孔、2%和 4%水泥含量土、4%水泥含量土+植株孔 5 组土柱,针对传统 Green-Ampt 入渗模型仅将土柱分为饱和区与非饱和区,与土柱试验中植株孔优先蓄水入渗产生的非饱和区前的过渡区情况不符,本文将土柱降雨入渗模型分为饱和区、湿润过渡区和非饱和区。在分层假设的基础上,对 Green-Ampt 入渗模型进行了改进,研究了植被水泥土的累计入渗深度、累计入渗量等随时间变化规律,并结合试验结果对改进后的模型进行分析。

## 1 Green-Ampt 模型及其改进模型

### 1.1 Green-Ampt 模型

Green-Ampt 模型是描述非饱和土中水分瞬时入渗的经典模型,该模型通过干燥土柱的积水入渗试验,直接采用达西定律求解土壤水分入渗速率,很好地描述了薄层积水条件下水分的入渗过程,因其阶梯状湿润锋面,所以又被称为活塞入渗模型。该模型的基本假定是:①土体表面至湿润锋面之间的水分均匀连续分布;②土体表面至湿润锋面区域含水率为饱和含水率  $\theta_s$ ,干土层含水率为初始含水率  $\theta_i$ 。传统的 Green-Ampt 模型示意图如图 2 所示。

图2 传统的 Green-Ampt 模型示意图<sup>[4]</sup>Fig. 2 Diagram of traditional Green-Ampt model<sup>[4]</sup>

在 Green-Ampt 模型中,

$$i = K_s \frac{z_f + s_f + h}{z_f}, \quad (1)$$

$$I = (\theta_s - \theta_i) z_f. \quad (2)$$

式中  $i$  为入渗率 (cm/min);  $K_s$  为土壤饱和导水率 (cm/min);  $z_f$  为湿润锋深度 (cm);  $s_f$  为湿润锋平均基质吸力 (cm);  $h$  为地表积水深度 (cm);  $I$  为累计入渗量 (cm);  $\theta_s$ ,  $\theta_i$  分别为土壤饱和含水率与初始含水率。

累计入渗量对时间的导数即为入渗速率,根据式 (1), (2) 可推导出时间与湿润锋深度、累计入渗量关系,如式 (3), (4) 所示:

$$t = \frac{(\theta_s - \theta_i)}{K_s} \left[ z_f - (s_f + h) \ln \frac{h + z_f + s_f}{h + s_f} \right], \quad (3)$$

$$t = \frac{I}{K_s} - \frac{(h + s_f)(\theta_s - \theta_i)}{K_s} \ln \left( 1 + \frac{I}{(h + s_f)(\theta_s - \theta_i)} \right). \quad (4)$$

## 1.2 改进的 Green-Ampt 模型

Green-Ampt 入渗模型假定湿润锋前面为干燥区, 湿润锋后面湿润层为饱和区, 与一般的土柱试验结果不符。王文焰等<sup>[9]</sup>针对黄土的 Green-Ampt 入渗模型作了如下假定: ①在积水入渗过程中, 任意时刻的土壤水分剖面均概化为两部分, 即将饱和层与传导层统一视为饱和区, 其导水率为  $K_s$ , 而含水率变化较大的湿润层仍视为非饱和区; ②土壤含水率由饱和含水率  $\theta_s$  至初始含水率  $\theta_i$  的剖面分布以椭圆曲线示之; ③湿润区深度近似实际湿润锋深度的一半, 即  $z_1 = z_2$ 。王文焰模型将湿润区深度假设为实际湿润锋深度的一半是基于黄土入渗的水分剖面分布特征而来的, 不同土体的含水率的剖面分布不一致, 因此本文引入系数  $m$ , 定义  $m$  为非饱和区厚度与饱和区厚度的比值, 即  $m = z_2/z_1$ , 如图 3 所示。当  $m = 0$  时, 改进的 Green-Ampt 模型为传统 Green-Ampt 模型; 当  $m = 1$  时, 改进的 Green-Ampt 模型为王文焰模型。

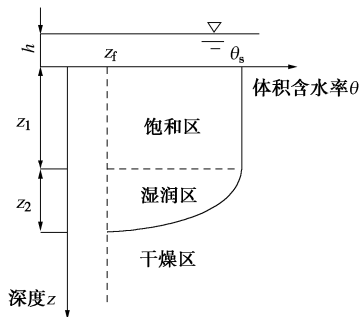


图 3 改进的 Green-Ampt 模型分区示意图

Fig. 3 Zoning of improved Green-Ampt model

根据以上假定, 由达西定律可写出入渗水流的地表通量  $q$  为

$$q = K_s \left[ \frac{(1+m)h + z_f}{z_f} + \frac{(1+m)s_f}{z_f} \right]. \quad (5)$$

同时由水量平衡原理可知, 在任一时刻  $dt$  内地表入渗通量  $q$  应等于土体内饱和区与湿润区的水分增量之和, 即

$$qdt = (\theta_s - \theta_i) \frac{dz_f}{m+1} + \frac{\pi}{4} (\theta_s - \theta_i) \frac{mdz_f}{m+1}. \quad (6)$$

将式 (5) 代入式 (6) 经整理后为

$$\frac{dz_f}{dt} = \frac{4(m+1)K_s}{(4+m\pi)(\theta_s - \theta_i)} \left[ \frac{(1+m)h + z_f}{z_f} + \frac{(1+m)s_f}{z_f} \right]. \quad (7)$$

对上式积分, 并整理可得时间与湿润锋移移深度

的关系式:

$$t = \frac{(4+m\pi)(\theta_s - \theta_i)}{4K_s} \left[ \frac{z_f}{(1+m)} - (h+s_f) \ln \left( 1 + \frac{z_f}{(1+m)(h+s_f)} \right) \right]. \quad (8)$$

在取得以上各基本关系式的基础上, 累计入渗量可由下式求得

$$I = \frac{(4+m\pi)z_f}{4(1+m)} (\theta_s - \theta_i). \quad (9)$$

将式 (9) 代入式 (8) 得到时间与累计入渗量的关系如下所示:

$$t = \frac{I}{K_s} - \frac{(4+m\pi)(\theta_s - \theta_i)(h+s_f)}{4K_s} \ln \left( 1 + \frac{4I}{(4+m\pi)(\theta_s - \theta_i)(h+s_f)} \right). \quad (10)$$

上述式子中各参数的物理意义与式 (1) 和式 (2) 相同。

## 2 改进的 Green-Ampt 模型参数取值及计算分析

### 2.1 模型参数的确定

在 G-A 模型中,  $K_s$  和  $s_f$  是两个关键参数, 不少学者对这两个参数的取值进行了研究, 一般而言 G-A 模型中的渗透系数小于饱和渗透系数, 本文根据 Bouwer<sup>[12]</sup>的建议, 取湿润锋后的导水率为饱和渗透系数  $K_b$  的一半, 湿润锋处基质吸力的取值同样取土壤进气压力值的一半, 由式 (11), (12) 计算。

$$K_s = \frac{K_b}{2}, \quad (11)$$

$$s_f = \frac{P_b}{2\rho g}, \quad (12)$$

式中,  $K_b$  为土柱饱和渗透系数 (cm/min),  $P_b$  为土柱的土壤进气压力值 (kPa),  $\rho$  为水密度, 取  $1000 \text{ kg/m}^3$ ,  $g$  为重力加速度, 取  $10 \text{ N/kg}$ 。

饱和渗透系数  $K_b$  由土柱试验数据得出, 土壤进气压力值  $P_b$  通过不同土体的土水特征曲线根据传统图解法得出。传统图解法获得的进气吸力值与潘登丽等<sup>[13]</sup>提出的单峰 SWCC 基本参数的确定方法计算结果接近。对于含植株的土柱, 其饱和渗透系数和土壤进气压力值采用体积加权法求得, 由式 (13), (14) 计算, 含植株土柱概化模型图如图 4 所示。

$$K_b = \frac{\sum_{i=1}^{n=2} K_{b,i} V_i}{\sum_{i=1}^{n=2} V_i}, \quad (13)$$

$$P_b = \frac{\sum_{i=1}^{n=2} P_{b,i} V_i}{\sum_{i=1}^{n=2} V_i}. \quad (14)$$

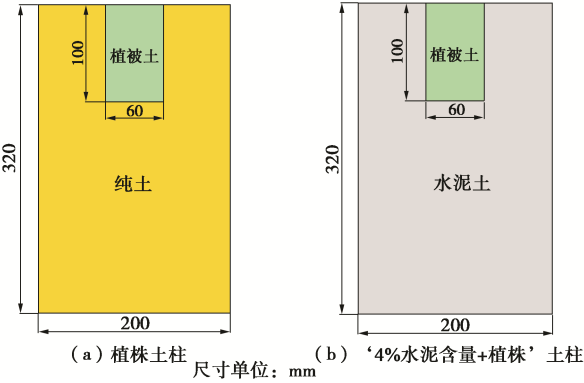


图 4 含植株土柱的概化模型

Fig. 4 Generalized model for vegetated soil columns

式中  $K_{b,i}$  为各类土的饱和渗透系数 (cm/min);  $P_{b,i}$  为各类土的土壤进气压力值 (kPa);  $V_i$  为各类土体积 (cm<sup>3</sup>);  $K_b$  和  $P_b$  的物理意义与式 (11), (12) 相同。通过传统图解法、文献[13]中的单峰 SWCC 基本参数的确定方法得出水泥土和植被土的土壤进气吸力值,再联合式 (12), (14) 计算出湿润锋基质吸力值  $s_f$ , 结果如表 1 所示。

表 1 土壤进气吸力值和湿润锋基质吸力值的确定

Table 1 Determination of soil suction value and matrix suction value of wetting front

土柱	传统图解法 $P_b$ /kPa	文献[13]中方 法 $P_b$ /kPa	$s_f$ /cm
纯土	1.84	2.22	9.20
纯土+植株	1.75	2.04	8.75
2%水泥含量	2.34	2.44	11.70
4%水泥含量	3.53	4.37	17.65
4%水泥含量+植株	3.43	4.06	17.20

将土柱试验得到的饱和渗透系数代入式 (11), (13) 计算出各组土柱饱和和导水系数  $K_s$ 。另外,模型中积水水头  $h$  为实际入渗的水头高度 3 cm, 初始体积含水率和饱和体积含水率根据制样完成后和入渗结束时各传感器的监测结果取平均值, 如表 2 所示。

改进的 G-A 模型中的系数  $m$  通过实测的湿润锋和时间的数据点进行拟合得到, 不同土柱由于土体性质

的差异, 入渗特性不同, 饱和区与湿润区厚度所占的比例也不同。由 MATLAB 软件 1stOpt 非线性曲线拟合软件得到各土柱  $m$  系数的取值如表 3 所示。

表 2 改进的 G-A 模型参数取值

Table 2 Parameters of improved Green-Ampt model

土柱	$\theta_i$	$\theta_s$	$K_s$ /(cm·min <sup>-1</sup> )	$s_f$ /cm
纯土	0.14	0.30	0.011	9.20
纯土+植株	0.15	0.30	0.012	8.75
2%水泥含量	0.13	0.32	0.069	11.70
4%水泥含量	0.14	0.30	0.018	17.65
4%水泥含量 +植株	0.14	0.30	0.017	17.20

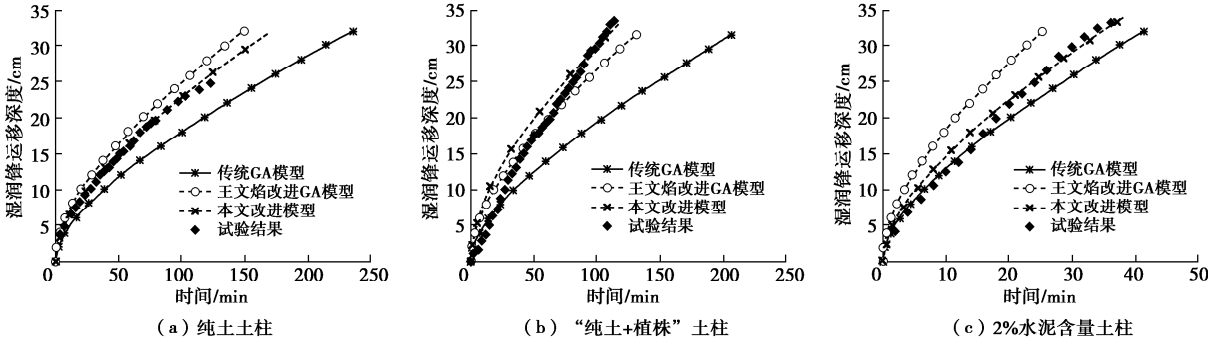
表 3 系数  $m$  拟合结果 ( $m = z_2 / z_1$ )

Table 3 Fitting results of coefficient  $m$  ( $m = z_2 / z_1$ )

参数	纯土	纯土+ 植株	2%水泥 含量	4%水泥 含量	4%水泥含 量+植株
$m$	0.635	1.64	0.283	0.478	0.784
相关系 数 $R^2$	0.996	0.986	0.993	0.981	0.997

2.2 改进 G-A 模型的计算分析

各组土柱改进 G-A 模型的湿润锋运移深度随时间变化的计算结果与传统 G-A 模型、王文焰改进的 G-A 模型计算结果比较如图 5 所示。可以看出,除了“纯土+植株”土柱, 本文改进的 G-A 模型的模拟结果介于 Green-Ampt 模型 ( $m=0$ ) 和王文焰改进的 G-A 模型 ( $m=1$ ) 之间。改进的 G-A 模型和王文焰改进模型的湿润锋模拟结果与试验结果相比都普遍偏高, 采用传统 G-A 模型计算得到的结果则偏低。本文改进模型相较于传统 G-A 模型和王文焰改进的 G-A 模型, 与试验结果的拟合效果最佳。在同一时刻, Green-Ampt 入渗模型的湿润锋运移深度一般小于本文改进模型的湿润锋运移深度和试验结果, 这是由于 Green-Ampt 入渗模型假定存在缺陷导致的, 改进入渗模型考虑了实际入渗的情况, 本文改进模型的湿润锋运移深度的解析解, 更加贴近试验结果。





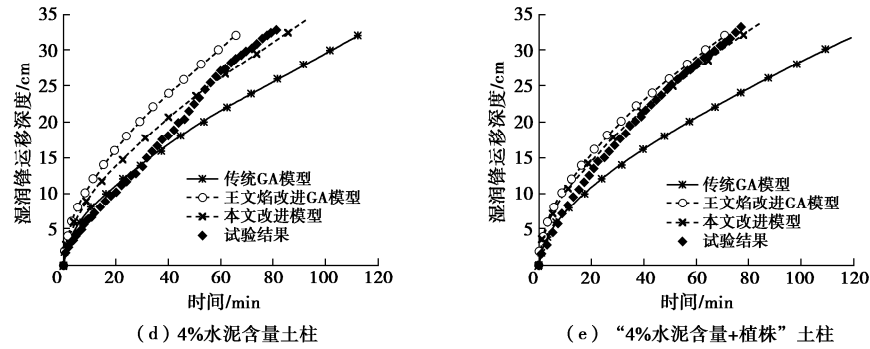


图5 不同计算模型湿润锋运移深度随时间变化曲线

Fig. 5 Curves of migration depth of wetting front with time by different models

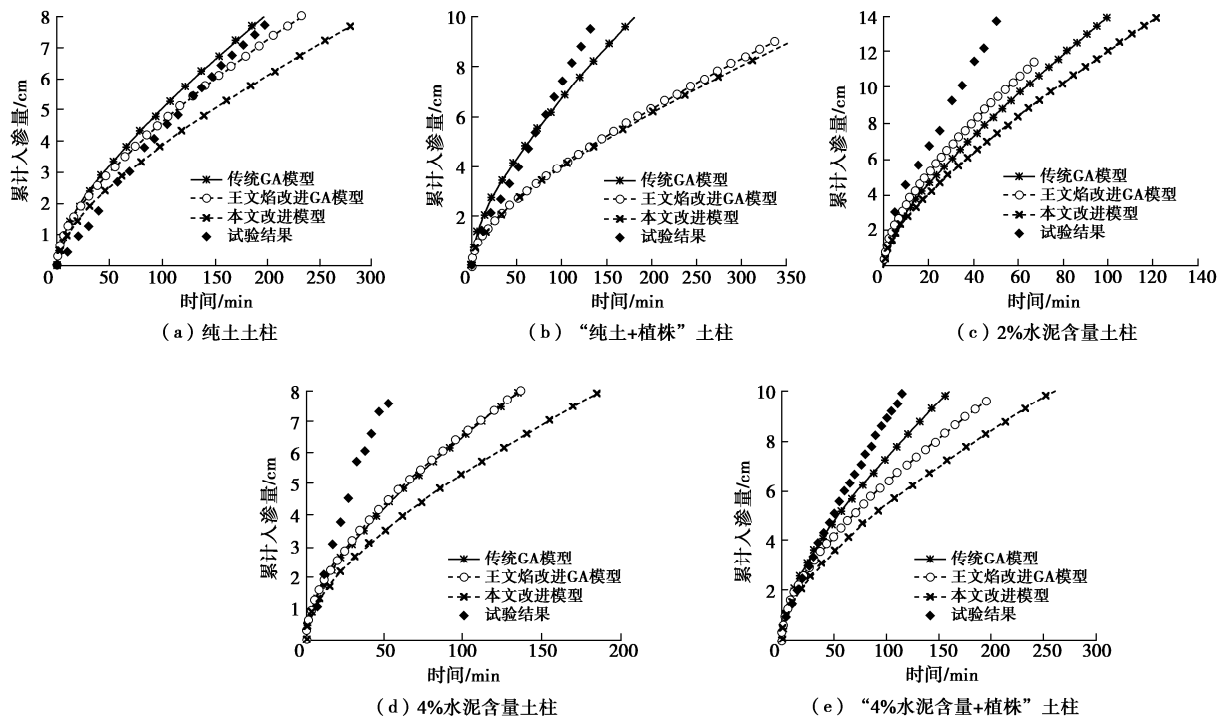


图6 不同计算模型累计入渗量随时间变化曲线

Fig. 6 Curves of cumulative infiltration with time by different models

各组土柱改进 G-A 模型的累计入渗量随时间变化的计算结果与原模型、王文焰改进模型计算结果、试验结果比较如图 6 所示。

从图 6 可以看出,除了纯土中传统 G-A 模型模拟结果大于试验结果,其他所有模拟结果都小于试验结果。本文改进模型的计算结果不再介于 Green-Ampt 模型 ( $m=0$ ) 和王文焰改进的 G-A 模型 ( $m=1$ ) 之间,而是低于其值,计算结果偏保守。

### 3 结 论

(1) 经典 Green-Ampt 入渗模型假定土柱表面至湿润锋面为饱和区,与含有植株土柱入渗存在湿润过渡区的情况不符,而基于分层假定的王文焰修正的 G-A 模型假设湿润过渡区与饱和区比值为 1,与试验

结果不符,因此本文假设过渡湿润区与饱和区的比值为  $m$ 。针对植被土与水泥土在入渗特性上的不同,采用体积加权法计算含植株土柱的改进 G-A 模型参数。

(2) 通过对比分析传统 G-A 模型、王文焰模型、本文改进的 G-A 模型与土柱试验结果,可以看出改进 G-A 模型计算结果和土柱试验结果较一致。对于湿润锋运移深度,改进后的 G-A 模型最贴近实测值,在同一时刻,除“纯土+植株”土柱改进模型计算值大于王文焰模型,其余土柱的改进模型计算值均小于王文焰模型,大于传统 G-A 模型。对累计入渗量而言,相较于试验结果,改进的 G-A 模型的计算值普遍偏低,改进的 G-A 模型计算累计入渗量时偏保守。

(3) 植被水泥土可以抑制旱季表土开裂、减少土壤水分蒸发,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 模型通过室内试验确定参数,针对石漠化边坡格构内植被水泥土生态恢复技术进行入渗分析,具有一定的工程实用价值。

### 参考文献:

- [1] 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 Bing-qin, XIA Zhen-yao, XU Wen-nian, et al. Review on research of slope eco-restoration technique for engineering disturbed area[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, **48**(2): 130 - 137. (in Chinese))
- [2] 叶万军, 张宇鹏. 长期降雨作用下黄土边坡失稳模型试验[J]. 中国科技论文, 2021, **16**(6): 603 - 609. (YE Wan-jun, ZHANG Yu-peng. Model test study on instability of loess slopes under long-term rainfall[J]. China Sciencepaper, 2021, **16**(6): 603 - 609. (in Chinese))
- [3] 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 Zhen-hui, LI Ping, XIAO Tao. The law of water infiltration in loess based on numerical simulation[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2021, **51**(3): 470 - 484. (in Chinese))
- [4] HEBER GREEN W, AMPT G A. Studies on soil physics[J]. The Journal of Agricultural Science, 1911, **4**(1): 1 - 24.
- [5] 郭向红, 孙西欢, 马娟娟, 等. 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. (GUO Xiang-hong, SUN Xi-huan, MA Juan-juan, et al. Green-Ampt model of different infiltration heads[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, **26**(3): 64 - 68. (in Chinese))
- [6] CHEN L, YOUNG M H. Green-Ampt infiltration model for sloping surfaces[J]. Water Resources Research, 2006, **42**(7): 3 - 9.
- [7] 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(6): 101 - 107. (LEI Wen-kai, DONG Hong-yuan, CHEN Pan, et al. Improved Green-Ampt infiltration model of soil slope considering inclination[J]. Hydro-Science and Engineering, 2020(6): 101 - 107. (in Chinese))
- [8] 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 Yan-wei, ZHAO Wen-ju, WANG Yu, et al. Improvement and verification of Green-Ampt model for sand-layered soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, **31**(5): 93 - 99. (in Chinese))
- [9] 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, **34**(5): 30 - 34. (WANG Wen-yan, WANG Zhi-rong, WANG Quan-jiu, et al. Improvement and evaluation of the Green-Ampt model in loess soil[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, **34**(5): 30 - 34. (in Chinese))
- [10] 彭振阳, 黄介生, 伍靖伟, 等. 基于分层假设的 Green-Ampt 模型改进[J]. 水科学进展, 2012, **23**(1): 59 - 66. (PENG Zhen-yang, HUANG Jie-sheng, WU Jing-wei, et al. Modification of Green-Ampt model based on the stratification hypothesis[J]. Advances in Water Science, 2012, **23**(1): 59 - 66. (in Chinese))
- [11] 曾红艳. 新型植被水泥土修复边坡创面的水力特性研究[D]. 成都: 四川大学, 2021. (ZENG Hong-yan. Study on Hydraulic Characteristics of New Vegetation Cement Soil for Repairing Slope Wound[D]. Chengdu: Sichuan University, 2021. (in Chinese))
- [12] BOUWER H. Infiltration of water into nonuniform soil[J]. Journal of the Irrigation and Drainage Division, 1969, **95**(4): 451 - 462.
- [13] 潘登丽, 倪万魁, 苑康泽, 等. 基于 VG 模型确定土水特征曲线基本参数[J]. 工程地质学报, 2020, **28**(1): 69 - 76. (PAN Deng-li, NI Wan-kui, YUAN Kang-ze, et al. Determination of soil-water characteristic curve variables based on vg model[J]. Journal of Engineering Geology, 2020, **28**(1): 69 - 76. (in Chinese))

(编校: 黄贤沙)