

# 九寨沟黏性土含量对改良碎石土水分特性的影响

朱锦宇<sup>1,3</sup>, 裴向军<sup>2,3</sup>, 肖维阳<sup>4</sup>, 张晓超<sup>2,3</sup>, 张文翔<sup>1,3</sup>, 王益<sup>1,3</sup>

(1.成都理工大学 环境与土木工程学院, 四川 成都 610059; 2.成都理工大学  
生态环境学院, 四川 成都 610059; 3.成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护  
国家重点实验室, 四川 成都 610059, 4.九寨沟风景名胜区管理局, 四川 阿坝藏族羌族自治州 623402)

**摘要:** [目的] 分析九寨沟2017年“8·8”地震后崩坡积碎石土和当地沉积黏性土不同比例混合体的土壤水分特性, 选出适宜研究区植物生长的最佳改良碎石土, 为九寨沟地区灾后生态环境修复提供科学依据。[方法] 将九寨沟当地黏性土与九寨沟地区碎石土以不同体积比进行混合, 通过土水特征曲线试验、水分常数试验、土柱试验来探究不同比例下土壤水分特性, 挑选适宜于植物生长的混合土比例。[结果] ① van Genuchten模型能够很好地拟合改良碎石土的土水特征曲线, 土壤进气值随着黏性土比例的增加而增加, 参数 $\alpha$ 在一定程度上能够表征进气值的状态。②改良后的碎石土使吸湿系数、凋萎系数、田间持水量、饱和含水量等都随着黏性土比例的增加而增加。相较于碎石土, 添加黏性土的改良碎石土可用水量增大22.26%~50.00%, 最大有效水量增大70.96%~131.46%, 更加有利于植物生长。③3种模型对比下, Philip模型对土壤水分入渗模拟效果最好, 吸渗率 $S$ 大小能够在一定程度上代表初始入渗速率的变化趋势。[结论] 综合对比不同比例改良碎石土水分特性可见, 当下覆土层为储水层, 可选择碎石土与黏性土比例为7:3作为改良碎石土最佳配比; 当下覆土层为非储水层, 无法储存水分时, 可选择碎石土与黏性土比例为3:7作为改良碎石土最佳配比。

**关键词:** 改良碎石土; 水分特性; 黏性土含量; 九寨沟

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)01-0040-10

中图分类号: S152.3

**文献参数:** 朱锦宇, 裴向军, 肖维阳, 等. 九寨沟黏性土含量对改良碎石土水分特性的影响[J]. 水土保持通报, 2024, 44(1): 40-49. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.01.005; Zhu Jinyu, Pei Xiangjun, Xiao Weiyang, et al. Effect of cohesive soil content on water properties of improved gravel soil in Jiuzhai Valley [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(1): 40-49.

## Effect of Cohesive Soil Content on Water Properties of Improved Gravel Soil in Jiuzhai Valley

Zhu Jinyu<sup>1,3</sup>, Pei Xiangjun<sup>2,3</sup>, Xiao Weiyang<sup>4</sup>, Zhang Xiaochao<sup>2,3</sup>, Zhang Wenxiang<sup>1,3</sup>, Wang Yi<sup>1,3</sup>

(1. School of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology,

Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. College of Ecology and Environment, Chengdu

University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 3. State Key Laboratory of Geological Hazard

Prevention and Geological Environmental Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan

610059, China; 4. Jiuzhaigou Administration, Aba Tibetan and Qiang Autonomous State, Sichuan 623402, China)

**Abstract:** [Objective] The soil water characteristics of the mixture of landslide gravel soil and local sedimentary cohesive soil in different proportions in Jiuzhai Valley after the “8·8” earthquake in 2017, were analyzed, and the best improved gravel soil suitable for plant growth in the study area was selected in order to provide scientific basis for ecological environment restoration after earthquake in Jiuzhai Valley region. [Methods] A local clay soil from Jiuzhai Valley and gravel soil from the Jiuzhai Valley region were mixed at different volume ratios, and soil water characteristics were investigated by soil water characteristic curve test, water constant test, and soil column test to investigate the soil water characteristics under the different

收稿日期: 2023-06-01

修回日期: 2023-09-06

资助项目: 九寨沟风景名胜区管理局采购项目“九沟湖泊沼泽化及河道生态恢复研究项目”(N5132112022000246); 四川省自然科学基金(2023NSFSC0378)

第一作者: 朱锦宇(1998—), 男(汉族), 河南省周口市人, 硕士研究生, 研究方向为生态环境修复。Email: 1354092611@qq.com。

通信作者: 裴向军(1970—), 男(蒙古族), 内蒙古自治区赤峰市人, 博士, 教授, 主要从事地质灾害、岩石力学、工程边坡稳定性评价及水土保持等方面的教学与研究工作。Email: peixj0119@tom.com。

mixing ratios in order to select soil mixing ratios suitable for plant growth. [Results] ① The van Genuchten model was able to fit the soil-water characteristic curve of the improved gravel soil well, and the soil air-entry value increased as the proportion of clay soil increased. The parameter  $\alpha$  characterized the state of the air-entry value to a certain extent. ② The improved gravel soil increased the water absorption coefficient, wilting coefficient, field water-holding capacity and saturated water content as the proportion of clay soil increased. The water availability and maximum effective water volume of the gravel soil increased by 22.26% ~ 50.00% with the addition of clay soil (compared with the gravel soil), and the maximum effective water volume similarly increased by 70.96% ~ 131.46%. ③ Of the three models evaluated, the Philip model simulated soil water infiltration the best, and the size of the uptake rate ( $S$ ) can represent the change trend of the initial infiltration rate to a certain extent. [Conclusion] Comprehensive comparisons of the water characteristics of different ratios of improved gravel soil showed that, when the overlying soil layer is a water storage layer, a gravel soil to clay soil ratio of 7 : 3 can be selected as the optimal ratio for improved gravel soil. When the overlying soil layer is a non-storage layer that is not capable of storing water, a gravel soil to clay soil ratio of 3 : 7 can be selected as the optimal ratio for improved gravel soil.

**Keywords:** improved gravel soil; water characteristics; cohesive soil content; Jiuzhai Valley

受 2017 年“8·8”地震影响,九寨沟生态环境保护区存在大量崩塌、滑坡、泥石流等次生灾害,这类次生灾害不仅严重影响了人类生命财产安全,还使景区内产生大量碎石土堆积体。这类碎石土堆积体土质松散,具有稳定性弱,土壤孔隙度大等特点,极易发生水土流失<sup>[1]</sup>。同时,这类土壤无法满足植物生长所需要的基本水分要求,使植被系统受损,严重威胁区域植物多样性和生态系统的稳定性,也会对景区形象造成负面影响,因此,灾后生态环境修复迫在眉睫。灾后生态修复系统重建的主要制约因素是自然生态恢复中土壤对于水资源的低效利用,为保证生态修复中植物能够良好的融入当地生态环境,能够进行正常演替,后期土壤水分条件极其关键,因此,土壤改良成为生态修复的首要条件<sup>[2]</sup>。

对于土壤改良,前人已经对此进行了众多研究。常见的土壤改良方法有 2 种:①在原土壤中添加微量元素或保水剂,改善土壤物理特性和水分特性等来达到改良土壤的目的。②将两种性质差异较大的基质进行不同比例的混合,根据不同比例混合下土壤的水文特性及植生特性来选择适宜当地植物生长的改良土壤。邱学礼等<sup>[3]</sup>通过在黏性土中添加不同的添加材料(沸石、河沙等)使土壤砂粒含量增加,黏粒含量减小,肥力增加;程东娟等<sup>[4]</sup>在土壤中施加低含量有机硅,使土壤水分有效性增加,蒸发损失降低;颜永毫等<sup>[5]</sup>在黄土中添加生物炭,使其田间持水量明显提高,且添加生物炭含量越高,田间持水量增加越大;李琳<sup>[6]</sup>将污泥与沙土以不同比例复配,发现污沙比例为 20% 的复合土壤抑制水分蒸发、保水持水性最好;王志刚等<sup>[7]</sup>把黏土与矿场的表土和沙土混合,提高了土壤的持水性及酶活性,且黏土与表土比例为 1 : 2 时

最佳;张露等<sup>[8]</sup>利用砒砂岩和风沙土土壤特性的差异,以不同比例将两种土壤掺和,得出砒砂岩:风沙土在 1 : 2 或 1 : 5 的情况下级配较好,持水性较强,有利于沙化治理。王佳欢等<sup>[9]</sup>以采石场弃渣与农田土为重构基质,采用不同体积比将其混合,得出弃渣:农田土在 3 : 7 时土壤稳定性、保水性、渗水性表现最好。综上所述,土壤改良无论是添加微量元素还是以不同基质进行重构都能使其在结构、水文特性方面得到良好的改善,使改良后的土壤能够更加适合植物生长和生态环境修复。但是,针对于九寨沟地区震后产生的大量崩塌积碎石土,由于碎石土其结构、孔隙的特殊性,第一类改良方式并不适用。

为此,基于因地制宜、以废治废的环保思想,本文采用九寨沟当地沉积黏性土与九寨沟地区崩塌积碎石土为基质进行改良,以不同体积比将两者进行混合,通过土水特征曲线试验、水分常数试验、土柱试验来探究不同比例下土壤水分特性,选出适宜九寨沟地区植物生长的最佳改良碎石土,为九寨沟地区灾后生态环境修复提供科学依据。

## 1 研究区概况

研究区位于四川省阿坝藏族羌族自治州九寨沟县漳扎镇九寨沟风景保护区(103°46'10"—104°03'38"E, 32°54'19"—33°16'15"N),地处岷山南段贡嘎岭东北侧,海拔高度介于 1 800~3 200 m 之间,主要分布在高山峡谷区,年最大降雨量 622 mm,属高原湿润性气候。降雨主要集中在 6—9 月之间,且随海拔的增高降雨量逐渐增大,冬季常年积雪,年日照时间约为 1 800 h。2017 年“8·8”地震导致九寨沟风景区产生大量崩塌堆积体,其成分多为土石混合体,土质松散,

孔隙较大,裸露于地表,极易产生水土流失,难以保证植物的正常生长。常见的本土植物有油松、白桦、高山柳、高山绣线菊、高山蒿草、垂穗披碱草、紫花苜蓿等。

## 2 材料与方法

### 2.1 试验材料

(1) 崩坡积碎石土。材料于 2022 年 10 月取自九寨沟风景区熊猫海附近 1 km 内崩塌堆积体,采用 9 点取样法在堆积体表层上、中、下各设置 3 个取样点,每点取 4 个重复样。碎石土风干后磨细过 20 mm 筛,并捡除植物腐烂根系等杂质后,充分混匀作为供试土壤待用。下文用碎石土代替。

(2) 九寨沟沉积黏性土。取自九寨沟当地农田土,距离碎石土取样点 5 km 以内,风干后去除植物腐烂根系等杂质备用。下文用黏性土代替。

按照《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)对供试土壤进行基本物理试验,其物理性质和土壤颗粒

级配曲线见表 1 和图 1。从颗粒级配曲线中可得,碎石土中石砾含量为 42.0%,砂粒含量为 11.0%,粉粒含量为 17.0%,黏粒含量为 1.0%;黏性土中石砾含量为 42.0%,砂粒含量为 44.0%,粉粒含量为 13.4%,黏粒含量为 0.6%。

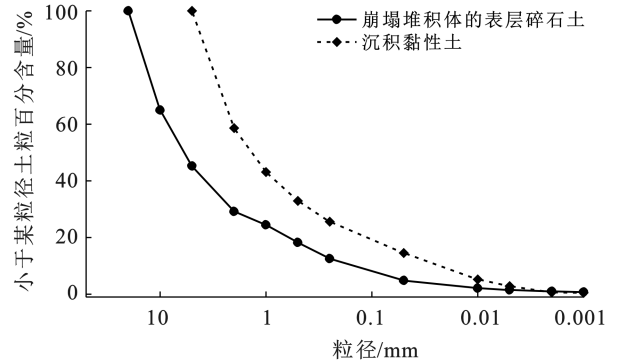


图 1 供试土壤颗粒级配曲线

Fig.1 Particle grading distribution curve of test soil

表 1 供试土壤基本物理性质

Table 1 Basic physical properties of test soil

土壤类型	最大干密度/ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	最优含水率/ %	饱和含水率/ %	渗透系数 $k_s/m$	孔隙比 $e$	黏粒含量/%
崩坡积碎石土	2.08	8.78	13.93	$7.08 \times 10^{-5}$	0.27	1.0
沉积黏性土	1.64	18.61	29.71	$2.83 \times 10^{-6}$	0.44	0.6

### 2.2 试验设计

将黏性土根据不同体积比配入碎石土当中,使其碎石土与黏性土比例分别为 0:10( $C_L$ ),3:7( $C_7$ ),5:5( $C_5$ ),7:3( $C_3$ ),10:0( $C_k$ ),每组设置 3 组重复,搅拌均匀后备用。

2.2.1 土壤水分常数试验 土壤水分常数是反映土壤水和性质转变点的几个特征含水量,同时也在一定程度上反映了土壤持水能力水平,常用的几个水分常数包括吸湿系数、萎蔫系数、田间持水量、饱和含水量等等<sup>[10]</sup>。在土壤水分当中,能被植物生长所吸收的水分称为有效水,不能被植物根系吸收的水分称之为无效水。田间持水量被认为是土壤所能稳定保持的最大含水量,一般将其视为土壤有效水的上限。当土壤水分小于萎蔫系数的时候,植物则不能从土壤中吸收水分,因此,往往将萎蔫系数视为土壤有效水的下限。土壤的有效水范围决定着植物生长所能利用水的范围,极大影响了植物生长的整个过程,因此,对于土壤水分常数的研究是非常有必要的。

本试验参照森林和森林土壤稳定凋萎含水量的测定(LY/T 1217—1999)、森林土壤最大吸湿量的测定(LY/T 1216—1999)和土壤水分—物理性质的测

定(LY/T1215—1999),分别测定不同比例复配土的饱和含水量、田间持水量和最大吸湿量。土壤萎蔫系数的测量方法有公式法和生物法两种,本文采用公式法计算,共设置 3 组重复,具体公式为:

$$\text{土壤萎蔫系数} = \text{最大吸湿量} \times 1.5 \quad (1)$$

2.2.2 土壤水分特征曲线试验 土壤水分特征曲线是表征土壤水和土壤中基质吸力关系的曲线,代表了土壤水中能量和数量之间的关系,同时也是研究土壤水分的保持和运动所用到的反映土壤基本特性的曲线<sup>[10]</sup>。本文采用晁建红的改良滤纸法<sup>[11]</sup>,其改善了普通滤纸法的密封罐易密封不严以及取样不便的问题,密封结果较为理想。试验共设置三组重复。图 2 为滤纸法试样示意图。

具体步骤如下:

(1) 将 Whatman No.42 型作为测量滤纸在福尔马林溶液中浸泡,两个小时后取出在烘箱中烘干 12 h,然后放入带有干燥剂的干燥器中密封备用。

(2) 称取环刀样质量,利用滴水法使用胶头滴管将环刀分别配至预设含水率然后用保鲜袋将配水土样密封保存 3 d,使土样内部水分均匀分布。

(3) 从干燥器中迅速取一张测量滤纸放入分析天

平中,关闭防风罩,待数据稳定后记录数据。取出测量滤纸,将测量滤纸夹在两张保护滤纸之间,置于 2 个土样中间。然后用电工胶带将两个土样接缝处密封。

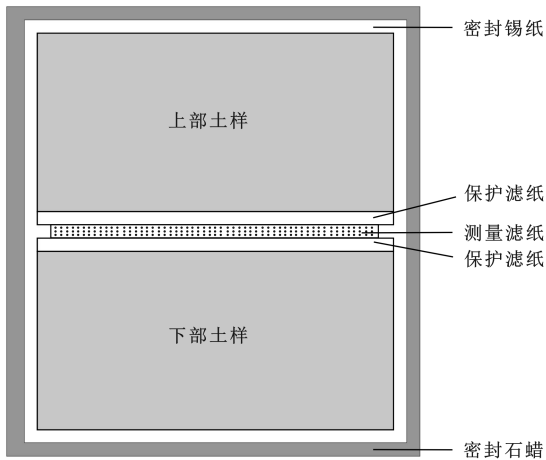


图 2 滤纸法示意图

Fig.2 Schematic diagram of filter paper method

(4) 将土样用锡箔纸进行完全包裹然后用刷子对土样表层涂蜡密封,最后将密封好的试样放入温度为 20 °C 的恒温箱。

(5) 土样在恒温箱中静置 15 d,取出土样并剥去密封装置,将测量滤纸迅速取出在梅特勒—托利多分析天平上称量质量,计算出滤纸含水率。基质吸力率定曲线采用 ASTM<sup>[12]</sup> 给定的率定方程,见式 2:

$$\begin{cases} \lg\psi = 2.412 - 0.0135w_{fp} & (w_{fp} < 45.3\%) \\ \lg\psi = 5.327 - 0.0779w_{fp} & (w_{fp} \geq 45.3\%) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\psi$  为基质吸力; $w_{fp}$  为滤纸的含水率。

本文选用的拟合土水特征曲线的模型为 van Genuchten(VG)模型,是 van Genuchten 在 1980 年提出一个平滑封闭的三参数模型,其模型参数意义较为明确,且曲线模型与实测数据能够较好地吻合,因此受到学术界的广泛认可<sup>[13-14]</sup>。结合滤纸法获取的试验数据,以 van Genuchten 模型[式(3)]表示脱湿条件下基质吸力和土壤饱和度的关系。

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = [1 + (\alpha\psi)^n]^{-m} \quad (3)$$

式中: $\theta$  为土壤含水率( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ); $\theta_r$  为残余土壤含水率( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ); $\theta_s$  为饱和含水率( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ); $\alpha$  是进气值的倒数; $n$  是形状系数; $m$  为拟合经验参数,取  $m = 1 - 1/n$ 。

2.2.3 土柱试验 本试验为一维土柱入渗试验,土柱材质为亚克力板圆柱管,外径 22 cm,内径 20 cm,高度 40 cm,沿孔壁每隔 5 cm 往下螺旋开孔,距离分别为 5, 10, 15, 20, 25 cm,用于放置土壤水分传感器,开孔用热熔胶密封,保证水分不外流。供水装置选用外

径 13 cm,内径 12 cm,高 100 cm 的马氏瓶,试验前加压保证气密性,采用一维垂直定水头法,调整马氏瓶高度,使其水头保持在水面上 3 cm。试样填筑采用分层填筑法,每隔 5 cm 进行一次击实并刮毛,以保证土样密度均匀且达到天然密实度,同时管壁涂抹凡士林,以避免优势流的产生,模型底部设有反滤网,防止细颗粒流失堵住渗流收集装置。具体模型如图。试验开始后,迅速加水至既定水头高度,同时打开阀门,依据王佳欢等<sup>[9]</sup>的试验设计,分别在阀门打开后 1, 3, 6, 10, 15 min 时记录湿润锋运移位置及马氏瓶刻度,之后每隔 5 min 记录 1 次数据。当出现 3 次相同时间内渗流量相同时,表明此时水分入渗已经达到稳渗,此时记录数据并停止试验。最后整理数据并依次计算初始入渗速率、平均入渗速率、稳定入渗速率、累计入渗量以及稳渗时间。试验共设置两组重复。

目前对于土壤水分入渗的模型有很多,其中较为常用的有 Green-Ampt 模型、Kostiakov 模型、Horton 公式、Philip 模型等。不同模型适应的场景和优缺点各不相同,Kostiakov 模型能够较好地预测入渗过程,尤其是长时间入渗,对比其他公式精度更高;Horton 公式这类经验虽然缺乏物理基础,但其应用方便,因此很多研究中仍然在使用;Philip 模型物理意义明确,短历时入渗情况下模拟较为精确,适用于均质土壤,但对于长历时入渗的情况下,对参数精度要求较高<sup>[15]</sup>。因此,为了更好地模拟整个入渗过程,本文拟采用 Kostiakov 模型、Horton 公式、Philip 模型 3 个模型分别来对其进行拟合,其拟合公式分别为:

Kostiakov 模型<sup>[16]</sup>:

$$f(t) = \beta \times t^{-\alpha} \quad (4)$$

式中: $t$  为入渗时间; $\alpha, \beta$  为模型拟合参数。

Horton 公式<sup>[17]</sup>:

$$i = i_c + (i_0 - i_c)e^{-kt} \quad (5)$$

式中: $i_c$  为稳定入渗速率; $i_0$  为初始含水率; $t$  为入渗时间; $k$  为经验系数。

Philip 模型<sup>[18]</sup>:

$$i = \frac{1}{2}St^{-0.5} + A \quad (6)$$

式中: $S$  为土壤吸渗率; $t$  为入渗时间; $A$  为经验参数。

## 2.3 数据处理

应用 Excel 2021 和 SPSS 24.0 软件对数据进行处理,利用 Origin 2022 绘制图形,采用 RETC 软件求解 VG 模型参数。

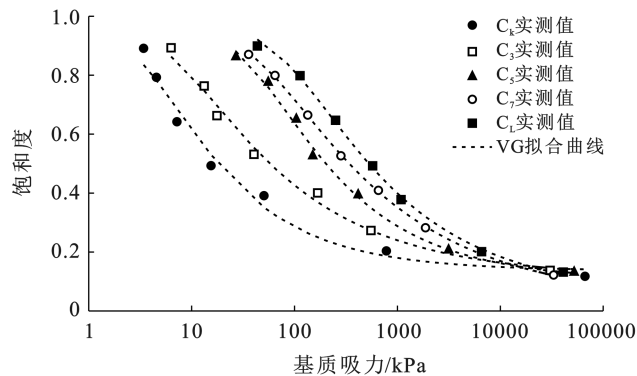
## 3 结果与分析

### 3.1 细颗粒含量对土壤水分特征曲线的影响

根据图 3 可得,土壤水分特征曲线的变化可分为 3 段。

(1) 低吸力段。初始时土体处于饱和状态,土体内大小孔隙被水分充满,且孔隙间水分连通性较好,此时土体处于易失水状态。

(2) 中吸力段。随着基质吸力的逐渐增加到某一个值时,此时土体中最大孔隙无法抵抗吸力去保持水分,宏观孔隙中的水分率先流失,土体由水连通转向水气共存的非饱和状态,此时的基质吸力的大小被称为进气吸力,又称进气值。基质吸力大于进气值以后,土壤中重力水和毛管水迅速丧失,土体含水率迅速降低,土水特征曲线处于快速降低段,此段区间也是不同土质土水特征曲线差异最大的阶段。



注: $C_L, C_7, C_5, C_3, C_k$  是碎石土与黏性土比例分别为 0:10, 3:7, 5:5, 7:3, 10:0 的处理。下同。

图 3 不同配比复配土壤的土壤水分特征曲线

Fig.3 Soil-water characteristic curves of compounded soils with different ratios

(3) 高吸力段。随着水分的不断流失,土壤基质吸力逐渐增大,当含水率低于某一个极限值时,含水率不再随着基质吸力的增加而发生明显变化,此时的含水率被称为是残余含水率,土壤水分特征曲线在这一段表现为缓平段。从图 3 中可以看出,5 条曲线逐渐靠拢并趋向于平直,且基质吸力越大,含水率越趋向于一致。

土壤水分特征曲线能够完整表征不同土质、不同吸力情况下土壤的持水特性和持水机理,吸力不同,土壤含水率变化也不同。在低吸力范围,水分的保持基本上由土壤毛管作用和孔隙分布状况决定,即受土壤结构特性的影响,尤其是大孔隙的数量;在高吸力段,吸附作用制约着水分的保持,质地和颗粒比表面大小的影响增强,结构特性的影响不断减弱<sup>[19]</sup>。如图所示,在低吸力段,由于土体处于饱和状态,含水率为饱和含水率,此时的基质吸力为 0。随着基质吸力的增大,土壤基质吸力到达进气值,此时土壤当中大孔隙优先失水。进气值的大小往往与土壤质地有关,根据图中可知, $C_k$  曲线率先发生改变,然后依次是

$C_3, C_5, C_7, C_L$ , 表明随着黏性含量的增加,土壤进气值逐渐增大,与前人研究的结果相符合<sup>[10]</sup>。这是由于黏性土的增加使碎石土大孔隙中进入黏土颗粒,并以碎石土砂性颗粒为结核黏聚成为团聚体,使土壤中大孔隙逐渐转化为中小孔隙的原因。当基质吸力大于进气值以后,土壤处于易失水状态,土壤中的孔隙由大到小依次排水,含水率迅速下降,相较于微小孔隙,毛管孔隙中的毛管水更易失去,因此在低吸力状态下,水分降低的速率受毛管水的影响更大。对比图中五条土壤水分特征曲线可以得出,当基质吸力大于进气值以后, $C_L$  曲线下降低速率最快,且下降幅度最大,其后依次为  $C_7, C_5, C_3, C_k$ , 含水率下降速率越快代表着与土壤中毛管孔隙占比越大;含水率下降幅度越大,代表着土壤中持水孔隙越多,也即土壤持水性越好。以  $C_k$  曲线下降低幅度为对比值, $C_3, C_5, C_7, C_L$  依次增大了 22.07%, 27.21%, 28.18%, 30.82%;说明随着黏性土的添加,土壤的持水性得到显著提高;同时,曲线下降低速率从大到小依次为: $C_L > C_7 > C_5 > C_3 > C_k$ , 说明随着黏性土的添加,改善了碎石土当中孔隙分布,土壤中大孔隙转化为对降低速率影响更大的毛管孔隙,使土壤中毛管孔隙占比逐渐增大,这与上文的研究结果相符。同时,从这一部分的曲线可以看出,在相同吸力情况下  $C_k$  含水率最小,对应的团聚体含量是最低的,随着团聚体含量的增加,土体含水率逐渐增大,从下到上依次为  $C_3, C_5, C_7, C_L$ 。在此阶段,当含水率相同的情况下, $C_k$  基质吸力最小,且团聚体含量越大,吸力越大,从左到右依次为  $C_3, C_5, C_7, C_L$ 。这表明黏粒含量越高,相同吸力下土壤含水量越高。随着基质吸力的继续增大,含水率的变化逐渐趋向于平缓并逐步靠近,这是由于在高吸力情况下,土壤的水分保持与土颗粒本身的质地和比表面积有关的,比表面积越大,高吸力下土壤含水率越高<sup>[19]</sup>。从图 3 中可以看出,在高吸力情况下,土壤含水量大小为: $C_L > C_7 > C_5 > C_3 > C_k$ , 这正是由于黏性土当中的土颗粒粘连在碎石土的砂粒、粉粒级颗粒表面,并以其为核形成不同大小的团聚体,从而使土颗粒的比表面积发生改变,使得土壤最终含水量大小不一。

进一步分析不同配比下土壤水分特征曲线参数的变化,具体参数见表 2。以 VG 模型为拟合模型,其拟合曲线与实测曲线的决定系数的值  $R^2$  范围处在 0.990~0.999 之间,表明该模型适用于改良后的碎石土。 $\theta_r$  是残余含水量,表示当吸力无限增大时,土壤间所能保持的含水量,一般与其土颗粒本身特性相关,能够体现土颗粒表面的持水特征。 $S_r$  则代表着

残余饱和度,为残余含水量与饱和含水量的比值;由表 2 可见,5 种土样的  $\theta_s$  大小顺序为: $C_k > C_3 > C_5 > C_7 > C_L$ ,  $S_r$  大小顺序为: $C_k > C_3 > C_5 > C_7 > C_L$ ,也即也就是土壤的残余含水量在逐渐增加,表明随着黏土含量的增加,增大了土体颗粒的总比表面积,土颗粒表面的持水特性得到了增加,这与上文结果相同。 $\alpha$  是与土壤进气值有关的参数,一般被认为是土壤进气值的倒数,其值与土壤质地以及土壤结构相关<sup>[20]</sup>。

由表 2 可见,以  $C_k$  的  $\alpha$  值为对比参照, $C_3, C_5, C_7, C_L$  依次降低了 89.19%, 90.73%, 92.28%, 96.14%, 黏土含量越大, $\alpha$  值越小,其对应点的吸力越大,因此  $\alpha$  在一定程度上能够表征进气值的状态。参数  $n$  在一定程度上代表曲线的斜率,曲线越陡对应的  $n$  值越大,单位吸力下水分变化越大,但不一定完全合理<sup>[21]</sup>。已知 5 种曲线斜率变化从大到小为: $C_L > C_7 > C_5 > C_3 > C_k$ ,但其  $n$  值大小从大到小为: $C_k > C_5 > C_L > C_3 > C_7$ ,并不能代表曲线中斜率的变化趋势,这与董义阳等<sup>[22]</sup>、胡杨等<sup>[23]</sup> 研究得到的结果相似,因此,对于参数  $n$  是否能够代表曲线斜率还需进一步探讨。

### 3.2 细颗粒含量对土壤有效水分和土壤孔隙结构的影响

从表 3 中可以看出,在经历过改良后的碎石土各水分常数均大于  $C_k$ ,吸湿系数、凋萎系数、田间持水量、饱和含水量均有所增加,且随着细颗粒含量的增加,吸湿系数、凋萎系数、田间持水量、饱和含水量皆

呈上升趋势。表明细颗粒的增加能够显著改善土壤本身的持水性能。以  $C_k$  的各水分常数作为对比参照, $C_3, C_5, C_7, C_L$  的凋萎系数较  $C_k$  依次增加了 15.42%, 30.62%, 47.58%, 106.39%,  $C_7, C_L$  增加较为显著; $C_3, C_5, C_7, C_L$  的田间持水量较  $C_k$  依次增加了 42.58%, 47.74%, 82.32%, 153.29%,  $C_7, C_L$  增加较为显著; $C_3, C_5, C_7, C_L$  的饱和含水量较  $C_k$  依次增加了 31.02%, 41.39%, 65.99%, 119.05%,这是由于细颗粒的增加改变了碎石土本身粒径分析结构,同时由于细颗粒与粗颗粒的链接产生团聚体,改变了碎石土的比表面积以及持水孔隙的数量,使改良碎石土的凋萎系数、田间持水量、饱和含水量都有所增加,符合土水特征曲线的研究规律。同时,结合 SPSS 显著性分析可以得出, $C_k, C_3, C_5, C_7, C_L$  的饱和含水量都增加较为显著,除  $C_3, C_5$  外, $C_k, C_7, C_L$  的凋萎系数、田间持水量增加都比较显著。

表 2 不同配比复配土的土壤水分特征曲线参数  
Table 2 Parameters of soil-water characteristic curves of compounded soils with different ratios

处理	饱和含水量 $\theta_s / \%$	残余饱和度 $S_r / \%$	进气值倒数 $\alpha / \text{cm}^{-1}$	形状参数 $n$	模型拟合 参数 $R^2$
$C_k$	13.61	3.0	0.259	1.539	0.985
$C_3$	17.83	4.8	0.028	1.396	0.991
$C_5$	19.50	10.2	0.024	1.491	0.995
$C_7$	22.76	11.3	0.020	1.365	0.996
$C_L$	29.99	13.6	0.010	1.416	0.998

表 3 不同配比复配土壤基本水分常数

Table 3 Basic moisture constants of compounded soils with different ratios

处理	饱和含水量/ $\%$	吸湿系数/ $\%$	凋萎系数/ $\%$	田间持水量/ $\%$
$C_k$	13.7 $\pm$ 0.20 <sup>e</sup>	3.21 $\pm$ 0.15 <sup>d</sup>	4.94 $\pm$ 0.08 <sup>e</sup>	7.75 $\pm$ 0.19 <sup>e</sup>
$C_3$	17.95 $\pm$ 0.18 <sup>d</sup>	5.67 $\pm$ 0.20 <sup>c</sup>	7.24 $\pm$ 0.08 <sup>cd</sup>	11.15 $\pm$ 0.18 <sup>cd</sup>
$C_5$	19.37 $\pm$ 0.13 <sup>c</sup>	6.16 $\pm$ 0.10 <sup>b</sup>	8.93 $\pm$ 0.09 <sup>c</sup>	12.45 $\pm$ 0.17 <sup>c</sup>
$C_7$	22.74 $\pm$ 0.16 <sup>b</sup>	6.62 $\pm$ 0.11 <sup>b</sup>	9.60 $\pm$ 0.08 <sup>b</sup>	14.13 $\pm$ 0.19 <sup>b</sup>
$C_L$	30.01 $\pm$ 0.17 <sup>a</sup>	8.80 $\pm$ 0.14 <sup>a</sup>	12.87 $\pm$ 0.05 <sup>a</sup>	19.63 $\pm$ 0.18 <sup>a</sup>

土壤孔隙结构特征与土壤宏观水力特征具有一定的密切关系<sup>[21]</sup>。表 4 为不同黏性土添量碎石土的土壤粒径结构特征参数变化,从表中可以得知,随着细颗粒含量的增加,土壤容重、总孔隙度、毛管孔隙度均呈现增加的趋势,土壤非毛管孔隙度呈现降低的趋势,这与各配比土壤饱和含水量、田间持水量的增加趋势相符,且结合 SPSS 分析可得,各配比间增加或减少较为显著,表明细颗粒含量的增加能够显著改善改良土的孔隙结构。

从图 4 中可以看出,随着细颗粒的增加,土壤可

用水量、最大有效水量、多余水量整体呈上升趋势,但  $C_5$  的可用水量以及最大有效水量均小于  $C_3$ 。土壤可用水量代表着植物生长所能吸收到的最大含水量范围,相较于未改良的  $C_k, C_3, C_5, C_7, C_L$  的可用水量分别增加了 22.26%, 19.18%, 50.00%, 96.01%, 其中  $C_7$  增加较为显著。

5 种土壤的多余水量则是随着黏性土的增加逐渐增加,其增加范围为 14.29%~74.45%。土壤最大有效水量是指田间持水量与萎蔫系数的差值,代表着植物常态下所能利用到的水的含水量范围,是关乎植

物生长相当密切的 1 个土壤水分指数,对比  $C_k$  的最大有效水量,  $C_3$ ,  $C_5$ ,  $C_7$ ,  $C_L$  分别增大了 80.99%, 70.96%, 131.46%, 219.62%, 因此,对于植物生长来说,土壤性能从优到劣依次为  $C_L > C_7 > C_3 > C_5 > C_k$ 。

表 4 不同配比复配土壤粒径结构特征参数

Table 4 Characteristic parameters of soil grain size structure of compounded soils with different ratios

处理	容重/( $g \cdot cm^{-3}$ )	总孔隙度/%	毛管孔隙度/%	非毛管孔隙度/%
$C_k$	$1.91 \pm 0.01^a$	$26.17 \pm 0.18^f$	$20.65 \pm 0.22^f$	$5.52 \pm 0.19^f$
$C_1$	$1.85 \pm 0.03^b$	$29.40 \pm 0.19^e$	$25.06 \pm 0.17^e$	$4.34 \pm 0.18^e$
$C_3$	$1.78 \pm 0.01^c$	$31.95 \pm 0.16^d$	$28.67 \pm 0.14^d$	$3.28 \pm 0.15^d$
$C_5$	$1.73 \pm 0.01^d$	$33.51 \pm 0.17^c$	$30.98 \pm 0.16^c$	$2.53 \pm 0.16^c$
$C_7$	$1.66 \pm 0.02^e$	$37.75 \pm 0.14^b$	$35.62 \pm 0.13^b$	$2.13 \pm 0.14^b$
$C_L$	$1.48 \pm 0.01^f$	$44.41 \pm 0.21^a$	$42.47 \pm 0.17^a$	$1.94 \pm 0.19^a$

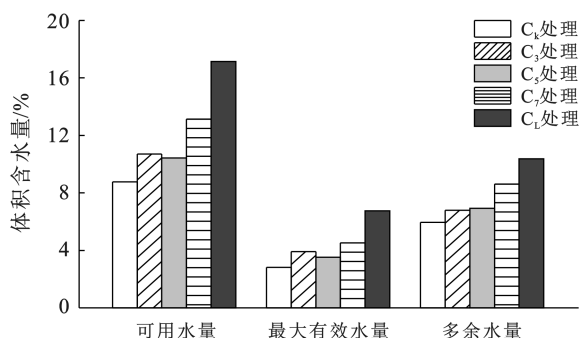


图 4 不同配比复配土壤有效水量分析

Fig.4 Analysis on effective water quantity of compounded soil with different ratios

### 3.3 细颗粒含量对土壤水分入渗的影响

当水分入渗过程中,其湿润区先头部位与干土层之间形成的明显交界面被黏为湿润锋,湿润锋的移动能够直观反映出土壤中水分在基质势和重力势共同影响下的运动特征<sup>[6]</sup>。图 5 为不同配比土壤的湿润锋运移距离随时间变化。

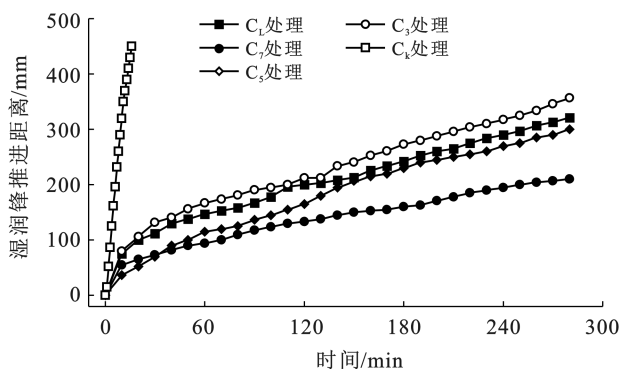


图 5 不同配比复配土壤湿润锋随时间变化曲线

Fig.5 Curve of wetting peak variation with time for compounded soil with different ratios

由图 5 可得,湿润锋运移至 20 cm 处所需时间从短到长依次为  $C_k(6) < C_3(112) < C_L(126) < C_5(145)$

综上所述,相较于未改良碎石土,改良碎石土的饱和持水量、田间持水量大大增加,并降低了其萎蔫系数,增大了土壤本身的可用水量 and 最大有效水量,更加有利于植物生长。

$< C_7(246 \text{ min})$ ,其中, $C_k$ 所用时间远小于其余改良碎石土,表明随着细颗粒含量的增加,湿润锋运移速率越来越慢。湿润锋初始运移速率从大到小为: $C_k > C_3 > C_L > C_7 > C_5$ ,而湿润锋整个入渗过程平均运移速度从大到小为: $C_k < C_3 < C_L < C_5 < C_7$ ,产生这种差异的原因在于入渗初期,湿润锋两侧含水量差异较大,势能差带动水分快速移送,同时,湿润锋在一定程度上取决于优势孔隙的存在<sup>[24]</sup>,而碎石土中由于存在各向异性,导致土壤中存在部分优势孔隙,因此会使入渗初期湿润锋速率  $C_7$  大于  $C_5$ 。

图 6 为水分入渗速率随时间变化的情况。从图 6 中可以看出,不同配比土壤的初始入渗速率、平均入渗速率、稳定入渗速率均达到显著水平( $p > 0.05$ ),同时,随着时间的增加,入渗速率整体呈降低的趋势,整体可分为 3 段:①入渗速率快速降低阶段。此阶段时间较短且入渗速率较快,土壤初始入渗速率从大到小为: $C_k(9.32) > C_3(4.14) > C_L(3.18) > C_5(2.64) > C_7(0.92 \text{ mm/min})$ 。由于初始入渗时湿润锋表面两者含水率差值最大,水势差值最大,因此初始入渗速度一般为均质土壤入渗过程当中入渗速度最大值。②入渗速率缓慢降低阶段。随着入渗深度的增加,土壤水分再分布会使湿润锋表面两侧含水率差值逐渐减小,水势差逐渐降低,同时土壤会对水分入渗产生阻力<sup>[25]</sup>,会使入渗速率逐渐降低。在此阶段,相较于  $C_L$ ,其余土壤水分入渗速率波动更大,这是碎石土本身的土壤特性所导致的,土壤中碎石的存在使不同平面上有效孔隙面积<sup>[26]</sup>不同,一个平面内碎石越多,其有效孔隙面积就越少,水分下渗所能通过的断面越少,入渗速率也就越小,因此,相较于  $C_L$ ,其余配比土壤波动较大。③入渗速率稳定阶段。当土壤中含水率增加至一定程度,土壤中基质势能增加,土壤表面接受水的能力与土壤水分入渗能力相同,此时的入渗

速度保持稳定,此时入渗速率大小通常用来表示土壤水分的入渗能力<sup>[6]</sup>。从图中可以看出,土壤稳定入渗速率从大到小依次为: $C_k(5.28) > C_3(0.026) > C_5(0.021) > C_L(0.019) > C_7(0.014 \text{ mm/min})$ ,则可以表明,随着细颗粒的增加,改良碎石土的渗透性逐渐降低,同时,由于细颗粒的逐渐增多,填充了碎石土当中的大中孔隙,使  $C_7$  中水分渗流通道面积相较于  $C_L$  更小,因此入渗能力更小,这与摄晓燕等<sup>[27]</sup> 研究结论相似。

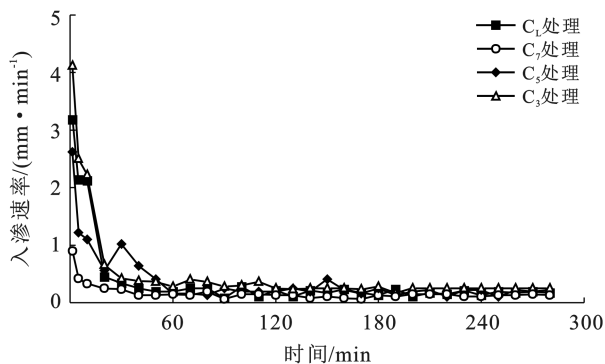


图 6 不同配比复配土壤入渗速率随时间变化曲线  
Fig.6 Curve of infiltration rate variation with time for compounded soil with different ratios

图 7 表示累积入渗量与时间的关系。累积入渗量可以用来表示水分入渗稳定之前的土壤水分入渗能力<sup>[28]</sup>。由图 7 中可以得知,累积入渗量随时间的增加而逐渐增大,累积入渗量从大到小依次为: $C_k > C_3 > C_5 > C_L > C_7$ ,到达稳渗所用时间从大到小依次为: $C_7(300) > C_5(205) > C_L(160) > C_3(100) > C_k(8 \text{ min})$ , $C_k$  累积入渗量远大于其余土壤,稳渗用时远小于其余土壤,说明  $C_k$  入渗能力最强,同时,相较于  $C_L$ ,改良后的  $C_3$  累积入渗量更大,提高了入渗能力,而  $C_7$  累积入渗量小于  $C_L$ ,降低了其入渗能力,与上文研究结果相符。

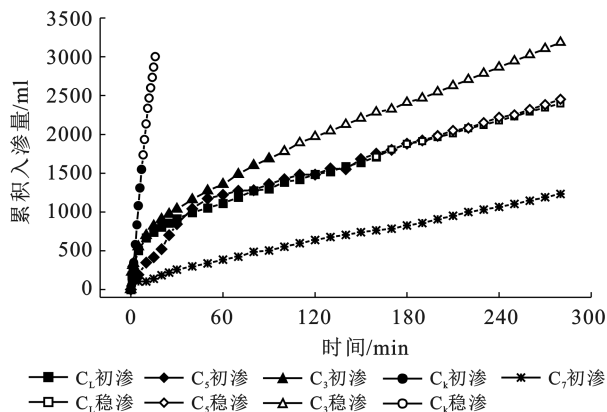


图 7 不同配比复配土壤累积入渗量随时间变化曲线  
Fig.7 Cumulative infiltration curves with time for compounded soil with different ratios

为了更好地探究不同配比改良土的入渗规律,采用 Kostikov 模型、Horton 公式、Philip 模型 3 个模型分别来对其进行拟合,具体拟合数据如表 5 所示。根据表 5 中数据可知,对于 3 类模型,除 Philip 模型中参数  $A$  外,其余参数  $S, \alpha, \beta, k, i_0, i_c$  随着细颗粒含量的增加,皆呈现出先减小后增大的趋势。 $C_k, C_3, C_5, C_7, C_L$  的  $R^2$  的取值范围分别为  $0.782 \sim 0.884, 0.927 \sim 0.942, 0.956 \sim 0.776, 0.789 \sim 0.763, 0.819 \sim 0.925$ ,其模拟适宜程度从大到小为: $C_3 > C_L > C_5 > C_k > C_7$ ,表明 3 种模型能够较好地模拟  $C_3, C_L$  两种土壤的水分入渗过程。同时,经过对比可得,Philip 模型相较于其他两个模型能够更好地模拟土壤的入渗过程。Philip 模型中的土壤吸渗率( $S$ )是指土壤依靠毛管力吸收或释放液体的能力,能够反映土壤前期入渗能力,对土壤初期入渗率有着决定性的作用<sup>[6]</sup>,5 种土壤吸渗率从大到小为: $C_k > C_3 > C_L > C_5 > C_7$ ,得出土壤初始入渗速率从大到小依次为: $C_k, C_3, C_L, C_5, C_7$ 。这与上文中土壤初始入渗速率的大小关系相符合,表明  $S$  的大小关系在一定程度上能够代表土壤初始入渗速率快慢。

表 5 不同配比复配土壤水分入渗模型分析

Table 5 Modeling of water infiltration of compounded soil with different ratios

土壤类型	Philip 模型			Kostiakov 模型			Horton 公式			
	$S$	$A$	$R^2$	$\beta$	$\alpha$	$R^2$	$i_c$	$i_0$	$k$	$R^2$
$C_k$	10.437	3.014	0.782	10.440	0.268	0.836	4.247	9.931	0.133	0.884
$C_3$	8.779	-0.147	0.927	4.669	0.625	0.942	0.255	4.142	0.148	0.942
$C_5$	5.332	0.015	0.956	3.010	0.455	0.776	0.221	1.219	0.048	0.796
$C_7$	1.559	0.059	0.784	0.684	0.347	0.763	0.127	0.421	0.053	0.789
$C_L$	8.154	-0.202	0.925	4.373	0.661	0.942	0.173	3.178	0.073	0.819

### 3.4 改良碎石土土壤水分特性分析

黏性土的添加能够显著改善碎石土土壤水分特

性,随着黏性土配比的增加,土壤进气值、残余含水量、饱和含水量、田间持水量、萎蔫系数都逐渐增大,



其改善碎石土水分特性机制为黏性土中细颗粒的填充使碎石土中大、中孔隙逐渐减少,并以碎石土颗粒为骨架形成团聚体,改善毛管孔隙状况,增大毛管孔隙度,改变并增强颗粒表面分子吸附力的综合作用,以改良土壤的孔隙结构及持水性能,最终改善碎石土土壤水分特性。

对比不同配比改良碎石土的入渗性能,均质粗粒土  $C_k$  拥有更大的孔隙及更多的渗流通道供土壤水分运移,因此入渗能力最强;粗粒土  $C_3$  含有少量细颗粒,连通孔隙有所减少,同时由于土壤中细颗粒的存在使其具有一定的吸水能力;非均质混合土  $C_5$  与  $C_3$  性质相似,相较于  $C_3$  细颗粒含量更多,稳渗率更小;均质黏性土  $C_L$  其本身便具有更强的吸水能力;而细颗粒为主的非均质混合土  $C_7$  中大量细颗粒充填在碎石土大孔隙中,阻塞水分流失,大幅降低渗流通道面积,使其具有更复杂的微观结构,因此具有明显的阻滞水分入渗的效果。

从土壤植生特性而言,非均质混合土  $C_7$ 、 $C_3$  土壤可用含水量、最大有效水量最高,最适宜植物生长,同时,从土壤入渗来考虑,非均质混合土  $C_3$  具有良好的入渗特性,非均质混合土  $C_7$  具有一定的阻渗作用,综合考虑不同比例改良碎石土水分特性可以得出,当植物生长土壤下覆土层为可储水层时,可选择碎石土与黏性土比例为 7:3 时作为改良碎石土最佳配比,使改良碎石土在拥有良好的植生特性的同时具有良好的导水特性,可以快速补给下覆储水层土壤水分,此种类型比较常见,在此不再示例。当植物生长下覆土层为非储水层,无法储存水分时,可选择碎石土与黏性土比例为 3:7 时作为改良碎石土最佳配比,使改良碎石土在拥有良好的植生特性的同时具有一定的阻渗特性,减少土壤水分与土壤细颗粒的流失。本文以九寨沟崩坡积堆积体缓坡剖面修复为例开展研究。崩坡积堆积体由大量碎石组成,碎石粒径约 0.5~6 cm,孔隙较大,无法储存植物生长所需水分,可在崩坡积上部覆盖改良碎石土作为植物生长层土壤。该土壤组成上细下粗的分层土壤结构,在雨水下渗过程中,基于分层土壤毛细阻滞作用<sup>[29]</sup>,在大幅度减少土壤水分流失的同时可增加同深度下土壤含水率。同时,由于其储水能力与土壤饱和含水率相关,可选择饱和含水率更高的改良碎石土—碎石土与黏性土比例为 3:7 作为改良土壤。

## 4 结论

(1) VG 模型能够很好的拟合改良碎石土的土水特征曲线,土壤进气值随着黏性土比例的增加而增

加,参数  $\alpha$  在一定程度上能够表征进气值的状态,但参数  $n$  是否能够代表曲线斜率还需进一步探讨。

(2) 改良后的碎石土使吸湿系数、凋萎系数、田间持水量、饱和含水等水分常数都有所增加,且随着黏土比例的增加呈现增加的趋势。同时,相较于未改良的碎石土,改良碎石土的饱和持水量、田间持水量大大增加,并降低了其萎蔫系数,相较于碎石土,添加黏性土的改良碎石土可用水量增大 22.26%~50.00%,最大有效水量增大 70.96%~131.46%更加有利于植物生长。

(3) 改良碎石土相较于碎石土入渗速率更低,但由于碎石土中大孔隙被黏性土颗粒充填,使得碎石土:黏性土比例为 3:7 的稳定入渗速率和累积入渗量最低,入渗性能最低。同时,3 种模型对比下,Philip 模型对土壤水分入渗模拟效果最好,吸渗率  $S$  大小能够在一定程度上代表初始入渗速率的变化趋势。

(4) 综合考虑不同比例改良碎石土水分特性可以得出,当植物生长土壤下覆土层为储水层时,可选择碎石土与黏性土比例为 7:3 时作为改良碎石土最佳配比;当植物生长下覆土层为非储水层,无法储存水分时,可选择碎石土与黏性土比例为 3:7 时作为改良碎石土最佳配比。

## [ 参 考 文 献 ]

- [1] 吴学敏.改性糯米基材加固震损碎石土斜坡抗侵蚀能力研究[D].四川 成都:成都理工大学,2021.  
Wu Xuemin. Study on anti-erosion ability of modified glutinous rice substrate to strengthen earthquake-damaged gravel slope [D]. Chengdu, Sichuan: Chengdu University of Technology, 2021.
- [2] 赵佳琪,陈晓琳,李玉灵.冀东矿区不同植被恢复类型尾矿基质粒径组成和养分特征研究[J].林业与生态科学,2021,36(3):262-268.  
Zhao Jiaqi, Chen Xiaolin, Li Yuling. Study on the particle size composition and nutrient characteristics of different vegetation restoration in the eastern mining area of Hebei Province [J]. Forestry and Ecological Sciences, 2021,36(3):262-268.
- [3] 邱学礼,高福宏,方波,等.不同土壤改良措施对植烟土壤理化性状的影响[J].西南农业学报,2011,24(6):2270-2273.  
Qiu Xueli, Gao Fuhong, Fang Bo, et al. Effects of different soil improvement measures on physical and chemical properties of tobacco soil [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2011,24(6):2270-2273.
- [4] 程东娟,王利书,郭海刚,等.有机硅对土壤水分有效性和蒸发特性的影响[J].北方园艺,2022(9):88-92.  
Cheng Dongjuan, Wang Lishu, Guo Haigang, et al.

- Effects of organic silicone on soil water availability and evaporation characteristics [J]. *Northern Horticulture*, 2022(9):88-92.
- [5] 颜永毫,郑纪勇,张兴昌,等.生物炭添加对黄土高原典型土壤田间持水量的影响[J].*水土保持学报*,2013,27(4):120-124.  
Yan Yonghao, Zheng Jiyong, Zhang Xingchang, et al. Impact of biochar addition into typical soils on field capacity in Loess Plateau [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013,27(4):120-124.
- [6] 李琳.污泥改良沙土过程水分在复合介质中运移蒸发规律研究[D].辽宁 沈阳:沈阳建筑大学,2019.  
Li Lin. Study on the law of water transport and evaporation in composite medium during the process of sludge improves sand [D]. Shenyang, Liaoning: Shenyang Jianzhu University, 2019.
- [7] 王志刚,毕银丽,宋子恒,等.东部草原露天矿区粘土改良模拟研究[J].*生态学报*,2018,38(16):5865-5875.  
Wang Zhigang, Bi Yinli, Song Ziheng, et al. Substrate compositions facilitate clay restoration of the simulation study in an opencast coal mine in the eastern steppe of China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018,38(16):5865-5875.
- [8] 张露,韩雾昌,王欢元,等.砒砂岩与风沙土复配后的粒度组成变化[J].*中国水土保持科学*,2015,13(2):44-49.  
Zhang Lu, Han Jichang, Wang Huanyuan, et al. Grain size composition change after feldspathic sandstone and aeolian sandy soil compounding [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2015,13(2):44-49.
- [9] 王佳欢,杨新兵,刘彦林,等.采石废弃物弃渣与农田土混合土壤粒径特征及水文效应[J].*水土保持学报*,2022,36(3):338-344.  
Wang Jiahuan, Yang Xinbing, Liu Yanlin, et al. Experimental study on particle size characteristics and hydrological effect of mixed soil of quarrying waste residue and farmland soil [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022,36(3):338-344.
- [10] 黄昌勇,徐建明.土壤学[M].3版.北京:中国农业出版社,2010.  
Huang Changyong, Xu Jianming. *Pedology* [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2010.
- [11] 晁建红.基于滤纸法的黄土土-水特征曲线测试[D].陕西 西安:长安大学,2017.  
Chao Jian-hong. Experimental Study on soil-water characteristic curve of loess using filter paper method [D]. Xian, Shaanxi: Changan University, 2017.
- [12] ASTM. Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper; ASTM D5298—10 [S] USA: ASTM, 2010.
- [13] 刘贤赵,李嘉竹,张振华.土壤持水曲线 van Genuchten 模型求参的一种新方法[J].*土壤学报*,2007,44(6):1135-1138.  
Liu Xianzhao, Li Jiazhu, Zhang Zhenhua. A new method to estimating parameters of van Genuchten model for soil water retention [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007,44(6):1135-1138.
- [14] 刘奉银,张昭,周冬,等.影响 GCTS 土水特征曲线仪试验结果的因素及曲线合理性分析[J].*西安理工大学学报*,2010,26(3):320-325.  
Liu Fengyin, Zhang Zhao, Zhou Dong, et al. Debugging of GCTS-type SWCC device and analysis of the corresponding technical indexes [J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2010,26(3):320-325.
- [15] 原林虎.Philip 入渗模型参数预报模型研究与应用[D].山西 太原:太原理工大学,2013.  
Yuan Linhu. Research and application of Philip infiltration model parameters prediction [D]. Taiyuan, Shanxi: Taiyuan University of Technology, 2013.
- [16] Kostiaikov A N. On the dynamics of the coefficient of water percolation in soils and on the necessity of studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration [J]. *Soil Science*, 1932,97(1):17-21.
- [17] Holton H N. A concept for infiltration estimates in watershed engineering [J]. *Dept. Agr. Res. Service*, 1961,39(30):41-51.
- [18] Philip J R. The theory of infiltration [J]. *Soil Science*, 1957,83(5):345-358.
- [19] 冉艳玲,王益权,张润霞,等.保水剂对土壤持水特性的作用机理研究[J].*干旱地区农业研究*,2015,33(5):101-107.  
Ran Yanling, Wang Yiquan, Zhang Runxia, et al. Research on the mechanism of super absorbent polymer to soil water-holding characteristic [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2015,33(5):101-107.
- [20] 王艳艳.子牙河流域土壤结构分形与其水力性质关系研究[D].河南 郑州:华北水利水电大学,2020.  
Wang Yanyan. Study on the relationship between fractal of soil structure and hydraulic properties in Ziya River basin [D]. Zhengzhou, Henan: North China University of Water Resources and Electric power, 2020.
- [21] 丁新原,周智彬,雷加强,等.塔里木沙漠公路防护林土壤水分特征曲线模型分析与比较[J].*干旱区地理*,2015,38(5):985-993.  
Ding Xinyuan, Zhou Zhibin, Lei Jiaqiang, et al. Analysis and comparison of models for soil water characteristic curves of Tarim Desert highway Shelterbelt [J]. *Arid Land Geography*, 2015,38(5):985-993.

- [27] 刘银良, 阎敏华, 孟宪民, 等. 大兴安岭森林火灾对沼泽土壤的影响[J]. 地理科学, 1995, 15(4): 378-384.  
Liu Yinliang, Yan Minhua, Meng Xianmin, et al. Effect of forest fire of the Da Hinggan Mountain on swamp soil [J]. Scientia Geographica Sinica, 1995, 15(4): 378-384.
- [28] Mataix-Solera J, Cerdà A, Arcenegui V, et al. Fire effects on soil aggregation: A review [J]. Earth-Science Reviews, 2011, 109(1/2): 44-60.
- [29] 徐程, 谷峰, 王瑶, 等. 土壤团聚体和水分动态在 3 种植被覆盖下的关系[J]. 水土保持学报, 2019, 33(1): 68-74.  
Xu Cheng, Gu Feng, Wang Yao, et al. Study on the relationships between soil aggregate and water dynamics under three vegetation cover [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(1): 68-74.
- [30] Small-scale fire temperature patterns in upland quercus communities [J]. Journal of Applied Ecology, 1997, 34(3): 613-630.
- [31] Preisler H K, Haase S M, Sackett S S. Modeling and risk assessment for soil temperatures beneath prescribed forest fires [J]. Environmental and Ecological Statistics, 2000, 7(3): 239-254.
- [32] DeBano L F. The role of fire and soil heating on water repellency in wildland environments: A review [J]. Journal of Hydrology, 2000, 231/232: 195-206.
- [33] Liu Yangxiaoyue, Yang Yaping. Spatial-temporal variability pattern of multi-depth soil moisture jointly driven by climatic and human factors in China [J]. Journal of Hydrology, 2023, 619: 129313.
- [34] Brockett B F T, Prescott C E, Grayston S J. Soil moisture is the major factor influencing microbial community structure and enzyme activities across seven biogeoclimatic zones in Western Canada [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2012, 44(1): 9-20.
- [35] Liu Qi, Yao Fengmei, Garcia-Garcia A, et al. The response and sensitivity of global vegetation to water stress: A comparison of different satellite-based NDVI products [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2023, 120: 103341.

(上接第 49 页)

- [22] 董义阳, 赵成义, 于志同, 等. 古尔班通古特沙漠南缘丘间地土壤水分特征曲线及模拟[J]. 水土保持学报, 2017, 31(1): 166-171.  
Dong Yiyang, Zhao Chengyi, Yu Zhitong, et al. Characteristic curves and models analysis of soil water in interdune at the southern edge of Gurbantunggut Desert [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(1): 166-171.
- [23] 胡杨, 张俊娇, 史常青, 等. 保水剂用量对排土场土壤持水性的影响[J]. 中国水土保持科学(中英文), 2022, 20(2): 115-123.  
Hu Yang, Zhang Junjiao, Shi Changqing, et al. Effects of water-retaining agent content on the water-holding characteristics of soil in waste dump [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2022, 20(2): 115-123.
- [24] 张建丰. 黄土区层状土入渗特性及其指流的实验研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2004.  
Zhang Jianfeng. Experimental study on infiltration characteristics and finger flow in layer soils of the loess area [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2004.
- [25] 包含, 侯立柱, 刘江涛, 等. 室内模拟降雨条件下土壤水分入渗及再分布试验[J]. 农业工程学报, 2011, 27(7): 70-75.  
Bao Han, Hou Lizhu, Liu Jiangtao, et al. Experiment on process of soil water infiltration and redistribution under simulated rainfall [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(7): 70-75.
- [26] 杨博, 张虎元, 赵天宇, 等. 改性黄土渗透性与孔隙结构的依存关系[J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(6): 96-101.  
Yang Bo, Zhang Huyuan, Zhao Tianyu, et al. Responsibility of permeability of modified loess soil on microstructure [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2011, 38(6): 96-101.
- [27] 摄晓燕, 张兴昌, 魏孝荣. 适量砒砂岩改良风沙土的吸水性和保水特性[J]. 农业工程学报, 2014, 30(14): 115-123.  
She Xiaoyan, Zhang Xingchang, Wei Xiaorong. Improvement of water absorbing and holding capacities of sandy soil by appropriate amount of soft rock [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(14): 115-123.
- [28] 李帅霖, 王霞, 王朔, 等. 生物炭施用方式及用量对土壤水分入渗与蒸发的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(14): 135-144.  
Li Shuilin, Wang Xia, Wang Shuo, et al. Effects of application patterns and amount of biochar on water infiltration and evaporation [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(14): 135-144.
- [29] 焦卫国, 詹良通, 季永新, 等. 黄土—碎石毛细阻滞覆盖层储水能力实测与分析[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(6): 1149-1157.  
Jiao Weiguo, Zhan Liangtong, Ji Yongxin, et al. Field tests on water storage capacity of loess-gravel capillary barrier covers [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(6): 1149-1157.