

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2024.04.018

黄光灵, 王星, 徐勤学, 等. 西南喀斯特区砾石对石灰土土壤孔隙及水分入渗的影响[J]. 水土保持学报, 2024, 38(4): 312-321, 334.

HUANG Guangling, WANG Xing, XU Qinxue, et al. Effect of gravel on soil porosity and water infiltration of lime soil in Southwest Karst Area [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(4): 312-321, 334.

西南喀斯特区砾石对石灰土土壤孔隙及水分入渗的影响

黄光灵^{1,2}, 王星³, 徐勤学^{1,2}, 敖利满^{1,2}, 秦湛博^{1,2}, 张帅普^{1,2}

(1. 桂林理工大学广西岩溶地区水污染控制与用水安全保障协同创新中心, 广西 桂林 541006;

2. 桂林理工大学广西环境污染控制理论与技术重点实验室, 广西 桂林 541006;

3. 广西壮族自治区水利科学研究院, 南宁 530023)

摘要: [目的] 砾石是影响土壤孔隙和水分入渗的重要因素, 明确砾石通过改变哪些土壤孔隙特征进而影响水分入渗具有重要意义。[方法] 以西南喀斯特地区砾石含量高的石灰土为研究对象, 采用 CT 扫描和室内一维土柱入渗试验, 对比分析 2 种砾石粒径 (2.0~5.0, 5.0~12.5 mm) 和 5 种砾石含量 (0, 10%, 20%, 30%, 40%) 条件下的土壤孔隙特征及水分入渗特性, 并使用结构方程模型探究土壤孔隙特征与入渗特性之间的耦合关系。[结果] (1) 含砾石土壤的大孔隙度、孔隙连通率、孔隙形状因子、孔隙表面积和孔隙体积均高于无砾石土壤; 且当砾石含量为 20% 和 30% 时, 孔隙连通率与孔隙形状因子和无砾石土壤之间存在显著性差异 ($p < 0.05$); (2) 砾石改善土壤入渗性能, 粒径为 2.0~5.0 mm 时, 砾石含量从 10% 到 40% 的稳定入渗率分别是无砾石土壤的 4.02, 5.00, 2.88, 5.14 倍, 累积入渗量分别是 1.67, 1.76, 2.49, 2.39 倍; 粒径为 5.0~12.5 mm 时, 土壤稳定入渗率分别是无砾石的 2.20, 2.67, 4.78, 2.78 倍, 累积入渗量分别是 1.42, 1.75, 2.46, 2.02 倍。 (3) 在结构方程模型中砾石含量与孔隙连通率、孔隙等效直径呈正相关关系, 孔隙连通率对稳定入渗率的影响最大, 孔隙等效直径对累积入渗量的影响最大。[结论] 砾石含量主要通过增加土壤孔隙连通率和孔隙等效直径促进水分入渗, 研究结果可为深入认识西南喀斯特地区含砾石土壤的水文过程提供科学依据与理论参考。

关键词: 砾石; CT; 土壤孔隙; 入渗; 结构方程模型

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)04-0312-10

Effect of Gravel on Soil Porosity and Water Infiltration of Lime Soil in Southwest Karst Area

HUANG Guangling^{1,2}, WANG Xing³, XU Qinxue^{1,2}, AO Liman^{1,2}, QIN Zhanbo^{1,2}, ZHANG Shuaipu^{1,2}

(1. Collaborative Innovation Center for Water Pollution Control and Water Safety in Karst Area, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541006, China; 2. The Guangxi Key Laboratory of Theory and Technology for

Environmental Pollution Control, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541006, China;

3. Guangxi Institute of Hydraulic Research, Nanning 530023, China)

Abstract: [Objective] Gravel is an important factor affecting soil porosity and water infiltration. Therefore, it is of great significance to determine the specific soil porosity characteristics that are impacted by gravel-induced changes. [Methods] Taking lime soil with high gravel content in southwest karst area as the research object, CT scanning and one-dimensional soil column infiltration test were used to compare and analyze the soil pore characteristics and water infiltration characteristics under two gravel particle sizes (2.0~5.0 and 5.0~12.5 mm) and five gravel contents (0, 10%, 20%, 30%, 40%). The structural equation model was used to explore the coupling relationship between soil pore characteristics and infiltration characteristics. [Results] (1) The macroporosity, pore connectivity, pore shape factor, pore surface area and pore volume of

收稿日期: 2024-02-02

修回日期: 2024-03-09

录用日期: 2024-03-19

网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-05-10

资助项目: 广西重点研发计划项目 (桂科 AB22035058); 国家自然科学基金项目 (42067014, 51769005)

第一作者: 黄光灵 (1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事水土保持与流域水文研究。E-mail: 964113520@qq.com

通信作者: 徐勤学 (1982—), 男, 博士, 教授, 主要从事水土保持与农业生态研究。E-mail: xqx@glut.edu.cn

http://stbcbx.alljournal.com.cn

gravel-bearing soil are higher than those of gravel-free soil. When the gravel content was 20% and 30%, there was significant difference between pore connectivity and pore shape factor ($p < 0.05$). (2) Gravel improved soil infiltration performance, with stable infiltration rates of gravel content from 10% to 40% being 4.02, 5.00, 2.88 and 5.14 times higher than those of gravel-free soils, and cumulative infiltration being 1.67, 1.76, 2.49 and 2.39 times higher, respectively, for particle sizes ranging from 2.0 to 5.0 mm. When the particle size was 5.0~12.5 mm, the stable infiltration rate was 2.20, 2.67, 4.78 and 2.78 times of that without gravel, and the cumulative infiltration amount was 1.42, 1.75, 2.46 and 2.02 times of that without gravel, respectively. (3) In the structural equation model, gravel content was positively correlated with pore connectivity and pore equivalent diameter. Pore connectivity had the greatest influence on the steady infiltration rate, and pore equivalent diameter had the greatest influence on the cumulative infiltration rate. [Conclusion] Gravel content promotes water infiltration mainly by increasing soil pore connectivity and pore equivalent diameter. The research results can provide scientific basis and theoretical reference for further understanding the hydrological process of gravel-bearing soil in southwest karst area.

Keywords: rock fragments; CT; soil pores; infiltration; structural equation model

Received: 2024-02-02

Revised: 2024-03-09

Accepted: 2024-03-19

Online(www.cnki.net): 2024-05-10

土壤水分入渗是水文循环的重要环节,与地表产流、土壤侵蚀和溶质运移等密切相关^[1]。砾石的广泛存在直接改变土壤孔隙特征进而影响水分入渗特性,使含砾石土壤的水分入渗比无砾石土壤更复杂。砾石对土壤水文过程的影响研究已成为国内外学者的关注焦点^[2-5]。砾石的粒径大小、含量与位置分布等特征均对土壤中的水分入渗产生不同程度的影响,开展此类研究时往往需要严格控制变量,因此大量学者主要采取室内模拟试验进行研究。已有研究^[6]表明,高砾石含量下,砾石粒径为 2~3 mm 时阻碍水分入渗,而>25 mm 则促进水分入渗。砾石含量对土壤入渗影响的研究结果并不统一,部分研究^[7-8]指出砾石含量的增加降低入渗速率和饱和导水率,但也有学者^[9]认为,入渗速率可能随之增加。覆盖在地表和嵌入土壤的砾石也有可能增大土壤水分入渗率,增强土壤保水能力^[10-11]。西南喀斯特地区土层浅薄,但砾石含量高,该地区石灰土渗漏速度快,持水能力差,部分学者^[12]在该地区开展砾石对土壤水分入渗过程的研究,但对砾石如何影响土壤水分入渗还缺乏较为深入的认识,这在一定程度上制约了该地区水土保持的有效性。

砾石是影响土壤孔隙的重要因素,土壤孔隙则直接影响水分入渗,连通的孔隙决定着土壤的持水性能、水分运移的形式及速率等^[13]。砾石影响土壤的孔隙度、孔隙数量及孔隙体积,随着砾石含量的增加,土壤可能产生更多的孔隙数量,增大土壤有效孔隙度与总孔隙度的比值^[14-15]。但有研究^[16]认为,影响孔隙形成机制的砾石含量存在一个阈值,且同时也受到

土壤类型的控制。而受到砾石影响的总孔隙度、孔隙连通性和孔隙复杂度影响土壤的水分入渗特征^[17]。WANG 等^[18]研究发现,土壤入渗速率随着非毛管孔隙度的降低而减小,且入渗率与土壤总孔隙度和饱和含水量呈显著正相关。吴继强等^[19]利用模具模拟出不同直径的概化大孔隙区域并进行入渗试验,结果表明,大孔隙的连通性在一定条件下对土壤水分的优先入渗起主导作用。然而,迄今为止大多数学者都是单独研究砾石对土壤孔隙的影响,或者单独研究砾石对土壤水分入渗的影响,缺少含砾石土壤条件下进行二者的耦合研究,因此含砾石条件下哪些土壤孔隙特征决定土壤入渗率仍无共识。

基于此,本文以西南喀斯特地区不同砾石含量的石灰土为研究对象,首先通过 CT 扫描技术^[20]和图像处理技术评估和量化不同砾石粒径和含量条件下的土壤孔隙特征,包括大孔隙度、孔隙体积、孔隙表面积、孔隙等效直径、孔隙形状因子、孔隙分形维数等指标,并在三维可视化上区分孤立孔隙和连通孔隙。然后利用一维定水头垂直入渗法测定不同砾石含量土壤的水分入渗特性,最后通过结构方程模型(SEM)来耦合土壤孔隙特征与水分入渗特性的相关关系,以期从孔隙特征变化的角度来理解砾石对土壤水分入渗的影响。

1 材料与方法

1.1 试验土壤

供试土壤为西南喀斯特地区 10—40 cm 深度范围的石灰土,砾石为大块的石灰岩经破碎过筛后所得,两者均采自广西壮族自治区桂林市灵川县海洋乡

枇杷塘村(25°17′32″N,110°33′42″E)。研究区属典型喀斯特峰丛洼地地貌,多年平均气温 17.5 ℃,年平均降水量 1 601 mm,属亚热带季风性湿润气候区。采样地点为研究区典型峰丛坡地,坡度为 30°,采样点平均分布在坡地中部的裸岩石砾地区,土壤层浅薄,砾石含量较高。在实验室测定填装土柱前的土壤容重为 1.20 g/cm³,用 MS 3000 激光粒度分析仪测量土壤粒径,其中黏粒含量 49.10%,粉粒含量 32.50%,砂粒含量 18.40%。用重铬酸钾容量法测量得到土壤有机质含量 31.33 g/kg。

1.2 试验设计

将取回的土样置于室内自然风干,然后去除植物根系等杂质,再过 2 mm 网筛。依据前人^[21]研究,石灰土砾石粒径主要分布范围在 2~75 mm,其中 5~20 mm 粒级为坡面土壤砾石含量的优先粒级。本试验选择的砾石粒径分别为 2~5,5~12.5 mm 2 组粒径,将砾石含量(质量百分比)分别设计为 10%,20%,30%,40%。将砾石与土样混合均匀后分别填入透明有机玻璃圆柱(高为 50 cm,内径为 10 cm),填土高度为 40 cm。将无砾石添加的组合设为对照组(CK),设置 2 次重复试验。控制装填到土柱内的纯土壤容重与实测土壤容重保持一致,均为 1.20 g/cm³。使用公式(1)~公式(3)计算砾石质量百分比和容重,土柱组合配置见表 1。

$$M_R = \rho_R \cdot V_R \tag{1}$$

式中: M_R 为砾石质量(g); ρ_R 为砾石的密度,为 2.69 g/cm³; V_R 为土石混合介质中砾石的体积(cm³)。

$$P_R = \frac{M_R}{M_R + M_S} \cdot 100\% \tag{2}$$

式中: P_R 为砾石质量百分比(%); M_S 为土壤质量(g)。

$$BD_R = \frac{M_R + M_S}{V_A} \cdot 100\% \tag{3}$$

式中: BD_R 为土石混合物容重(g/cm³); V_A 为土石混合物总体积(cm³)。

填土过程产生的裂隙影响土体的孔隙度,因此在填土完成后需要经过干湿循环来稳定土壤孔隙结构的完整性,当孔隙发育稳定后可以排除因人为填土对孔隙度产生的影响。张光辉等^[22]在进行 4 次干湿循环后发现孔隙结构发育趋于稳定,本研究借鉴前人^[22]经验,设置 6 次干湿循环。将土柱放置在盛满水的圆桶中浸泡 24 h,浸泡过程使水面高于土面约 5 cm,然后将完成湿润过程的土柱放入 60 ℃烘箱内烘干 72 h,此为 1 次干湿过程。在土柱经 6 次干湿循环后,将其送至计算机层析成像设备进行断层扫描。

入渗试验采取一维定水头垂直入渗法,用马氏瓶为试验土柱供水,水头控制在 5 cm 左右。入渗试验前,将滤纸和纱布放置在试验土柱底部,以防止土壤颗粒流失。试验开始后利用秒表记录试验时间,每 3 min 观测 1 次马氏瓶的液面下降高度并记录。根据前期预试验可知,试验时间为 90 min 时,所有条件下的土柱中,湿润锋均已到达土柱底部,并形成稳定出流,因此设置试验时长为 90 min。初始入渗率为试验开始 3 min 时的入渗速率,稳定入渗率根据土壤水分入渗曲线的趋势而定,设置为 30~90 min 内的平均入渗速率。

表 1 试验土柱配置

Table 1 Configuration of test soil column

土柱编号	砾石配置		土石混合物		砾石质量 百分比/%	砾石体积 百分比/%
	粒径/mm	砾石含量/%	容重/(g·cm ⁻³)	纯土 容重/(g·cm ⁻³)		
1	—	—	—	1.20	—	—
2	2~5	10	1.27	1.20	10	4.73
3	2~5	20	1.35	1.20	20	10.05
4	2~5	30	1.44	1.20	30	16.08
5	2~5	40	1.54	1.20	40	22.96
6	5~12.5	10	1.27	1.20	10	4.73
7	5~12.5	20	1.35	1.20	20	10.05
8	5~12.5	30	1.44	1.20	30	16.08
9	5~12.5	40	1.54	1.20	40	22.96

1.3 CT 扫描与孔隙特征计算

本试验使用 CT 机器型号为 Discovery CT HD 750,扫描模式为 GSI。将土柱进行垂直扫描后,使用 CT 自带软件的背景投影算法进行图像重建。土柱断层扫描层厚度为 1.25 mm,单张切片体素为

0.390 2 mm×0.390 2 mm×1.250 0 mm,像素为 512 pixel×512 pixel 的图像,每个土柱共扫描出 320 张切片图像。

将 CT 扫描得到的 DICOM 格式图片导入 ImageJ 6.4 软件,对单张切片进行裁剪,裁减掉土柱

的外围图像,得到直径为 100 mm 的圆形区域。使用 Adjust/Brightness 功能将灰白图像进行对比度增强,对比 4 种降噪算法后(高斯滤波、中值滤波、均质滤波和卷积滤波),选取效果最好的中值滤波对单张切片进行模糊处理和去噪。采用全阈值分割得到二值图像,最后进行 Stack 堆叠还原土柱连续系列图片。将 Stack 堆叠后的图片导入 Avizo 2019.1 软件,在 Image Read Parameters 界面设置好 CT 切片的 voxel size 值。采用 Volume Rendering 功能得到孔隙三维空间结构可视化,使用 Label Analysis 模块对大孔隙度、孔隙体积、孔隙表面积、孔隙等效直径、孔隙形状因子和孔隙分形维数等参数进行计算和统计,最后利用 Axis Connectivity 模块进行孔隙连通性分析。

(1)大孔隙度(P)为三维孔隙总体积与土样总体积之比。计算公式为:

$$P = \frac{V_v}{V_T} \cdot 100\% \quad (4)$$

式中: V_v 为三维孔隙总体积(mm^3); V_T 为土样总体积(mm^3)。

(2)孔隙连通率(n)。三维图像是由多个体素(边长为 1 的立方体)组成的三维矩阵,当 2 个孔隙体素以面连接时视为连通。计算公式为:

$$n = \frac{V_c}{V_v} \cdot 100\% \quad (5)$$

式中: V_c 为连通孔隙总体积(mm^3)。

(3)孔隙等效直径(d)利用不同直径的球来填充孔隙空间,用来表征土样中的孔隙尺寸参数。计算公式为:

$$d = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot V_a}{\pi}} \quad (6)$$

式中: V_a 为三维孔隙体积(mm^3)。

(4)孔隙形状因子(S)是表征三维空间几何体相对于球体褒贬长短的形状特性,用以表征土壤孔隙连通网络的复杂程度。计算公式为:

$$S = \frac{A_{3D}^3}{36 \cdot \pi \cdot V_a^2} \quad (7)$$

式中: A_{3D} 为三维孔隙表面积(mm^2)。

(5)三维分形维数(DF)。将分形维数应用于三维图像中,是测量和比较表面粗糙度的一种有效的指标。表面越不光滑,分形维数越大,分形维数可以解释孔隙表面复杂程度以及填充空间的过程。三维孔隙分形维数为严格大于 2 且小于 3 的数。

1.4 数据分析

采用 Excel 2019 软件对试验原始数据进行整

理,采用 SPSS 25.0 软件进行显著性分析(本文中 $p < 0.05$ 为关系显著),Origin 2021 软件进行数据处理及制图分析。利用 AMOS 24.0 软件中的结构方程模型(SEM)建立各指标间的关系,采用极大似然估计法对潜在变量与观测变量之间的关系进行定量分析。本文选用土壤孔隙特征(孔隙等效直径、孔隙平均体积、孔隙平均表面积、孔隙分形维数、孔隙连通率、大孔隙度)与水分入渗特性(初始入渗速率、稳定入渗速率、累积入渗量)构建结构方程模型。采用绝对拟合指标(absolute fit index)和相对拟合指标(relative fit index)对结构方程模型进行检验^[23]。

2 结果与分析

2.1 砾石对土壤孔隙特征的影响

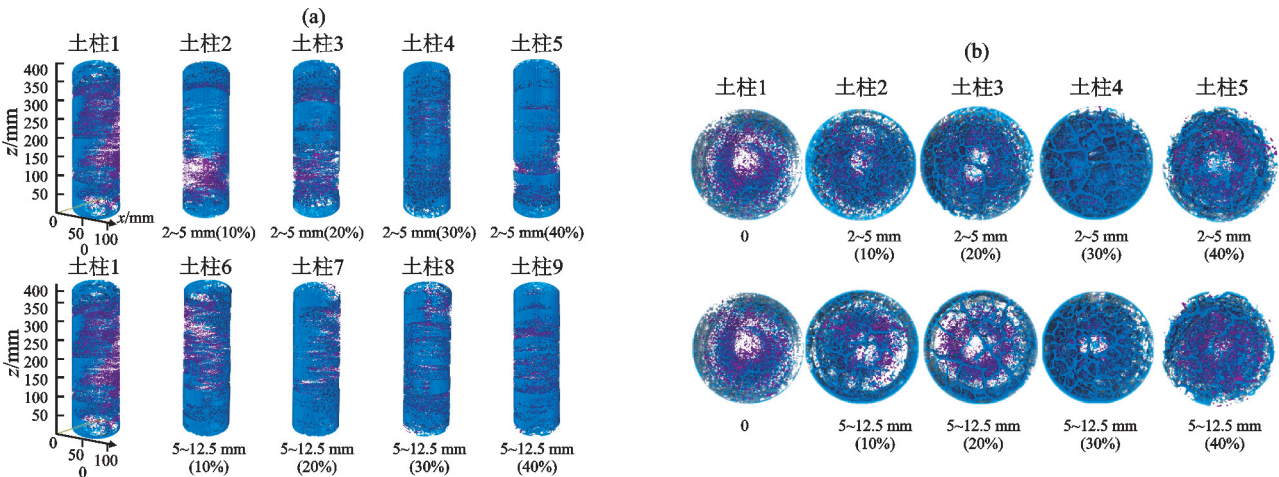
不同粒径和砾石含量条件下的土壤孔隙特征参数见表 2。2 种粒径条件下,含砾石土壤大孔隙度、孔隙连通率、孔隙形状因子、孔隙表面积和孔隙体积随砾石含量的增大均呈现出非显著的先增大后减小的趋势,而且均在砾石含量为 30% 时达到最大值,无砾石土壤的所有孔隙特征参数均最小。在砾石含量为 20% 和 30% 时,孔隙连通率与孔隙形状因子和无砾石土壤之间存在显著性差异($p < 0.05$)。砾石含量从 10%~40%,大孔隙度分别是无砾石土壤的 1.05~1.31 倍;孔隙连通率分别是无砾石土壤的 1.05~1.23 倍;孔隙形状因子分别是无砾石土壤的 1.05~1.81 倍;孔隙表面积分别是无砾石土壤的 1.02~2.02 倍;孔隙体积分别是无砾石土壤的 1.27~2.73 倍。孔隙分形维数和孔隙等效直径随砾石含量的变化规律不明显,但总体上均比无砾石土壤大。

与无砾石土壤相比,砾石含量从 10%~40% 明显降低孤立孔隙的数量。无砾石土壤中心部位大多为孤立孔隙且整体上孔隙分布比较分散,含砾石土壤中心部位孔隙发育呈网络状向下延伸(图 1)。含砾石土壤中心部位连通孔隙比无砾石土壤发育更好,且空间异质性更强,孔隙连通网络发育更加复杂。小粒径孔隙连通网络比大粒径更发达,在砾石含量为 30% 时最复杂(孔隙平均形状因子最高为 2.98)。当砾石含量达到 40% 时连通孔隙率又开始下降,中心部分的孔隙分布开始变得破碎化。含砾石土壤的连通孔隙在 350~400 mm 土壤深处的孔隙聚集成团的形态明显,除无砾石土壤外,各土柱的孔隙分布均表现出两端连通性较好而中间连通性较差的整体趋势。

表 2 不同粒径和砾石含量条件下孔隙特征参数汇总

Table 2 Summary of pore characteristic parameters under different particle sizes and gravel contents									
土柱 编号	砾石配置		大孔隙度/ %	孔隙连通率/ %	孔隙形状 因子	表面积/ mm ²	体积/ mm ³	等效直径/ mm	分形维数
	粒径/	砾石含量/							
	mm	%							
1	—	—	8.44±0.85a	72.57±3.03c	1.65±0c	31.81±1.49a	12.08±8.73a	1.27±0.37a	2.31±0a
2	2~5	10	9.26±1.55Aa	82.83±3.07Aabc	1.98±0.23Aabc	45.56±2.15Aa	23.25±3.53Aa	1.47±0.04Aa	2.35±0.07Aa
3	2~5	20	9.45±1.50Aa	85.73±2.11Aab	2.32±0.08Aab	48.12±5.23Aa	23.14±4.28Aa	1.48±0.02Aa	2.36±0.07Aa
4	2~5	30	11.07±1.18Aa	89.34±1.97Aa	2.98±0.53Aab	63.90±25.72Aa	29.56±14.71Aa	1.47±0Aa	2.38±0.08Aa
5	2~5	40	8.91±0.86Aa	81.57±0.68Aabc	2.74±0.61Aa	34.45±17.18Aa	17.09±5.64Aa	1.50±0.07Aa	2.36±0.01Aa
6	5~12.5	10	8.89±0.12Ba	76.86±3.69Bbc	1.74±0Ac	32.49±3.94Ba	15.34±1.20Ba	1.50±0Aa	2.40±0.13Aa
7	5~12.5	20	9.42±1.87Ba	85.10±4.87Bab	2.30±0.33Ab	55.20±21.60Ba	27.52±13.09Ba	1.52±0.08Aa	2.34±0.04Aa
8	5~12.5	30	11.03±3.49Ba	86.83±7.48Bab	2.54±0.09Aab	64.25±10.78Ba	33.03±8.76Bb	1.50±0.06Aa	2.38±0.04Aa
9	5~12.5	40	9.49±1.71Ba	80.58±8.55Babc	2.38±0.21Aabc	49.69±11.73Ba	23.26±6.76Ba	1.51±0Aa	2.41±0.02Aa

注：表中数据为平均值±标准差；同列不同小写字母表示不同砾石含量间差异显著（ $p<0.05$ ）；不同大写字母表示不同粒径间差异显著（ $p<0.05$ ）。下同。



注：(a)为正视图，(b)为俯视图；蓝色表示连通孔隙，紫色表示孤立孔隙，白色表示土壤基质以及砾石。

图 1 不同粒径和不同砾石含量条件下孔隙三维可视化图像

Fig. 1 Three-dimensional visualization image of pores under different particle sizes and gravel contents

2.2 砾石对土壤孔隙入渗特征的影响

不同砾石含量的水分入渗特性差异见表 3。在 2~5 mm 粒径条件下，稳定入渗率从大到小的排序为 40%>20%>10%>30%，分别是无砾石土壤的 5.14, 5.00, 4.02, 2.88 倍；砾石含量从 10%~40% 的累积入渗量分别是无砾石土壤的 1.67, 1.76, 2.49, 2.39 倍。在 5~12.5 mm 粒径条件下，30% 砾石含量的土壤稳定入渗率是最高为 4.97 mm/min，砾石含量从 10%~40% 的土壤稳定入渗率分别是无砾石的 2.20, 2.67, 4.78, 2.78 倍；砾石含量从 10%~40% 的累积入渗量分别是无砾石的 1.42, 1.75, 2.46, 2.02 倍。

水分入渗曲线结果(图 2)显示，2~5 mm 粒径条件下稳定入渗率随砾石含量的变化规律无显著差异，

5~12.5 mm 粒径条件下稳定入渗率随砾石含量增大呈现出先增大后减小的趋势。在 2~5 mm 粒径条件下，初始入渗率随砾石含量的变化规律无显著差异，但均比无砾石土壤大，在最初入渗的 0~9 min 内，30% 砾石含量的土壤初始入渗率下降最明显，而 0, 10%, 20%, 40% 相差不大。5~12.5 mm 粒径条件下初始入渗率随砾石含量增大呈减小的趋势，在砾石含量为 10%, 20% 时初始入渗速率比无砾石土壤大，而当砾石含量为 30%, 40% 时初始入渗速率要比无砾石土壤小。在最初入渗的 0~9 min 内，20% 砾石含量的土壤初始入渗率下降最明显，入渗率从 20.33 mm/min 下降至 10.50 mm/min，而 0, 10%, 30%, 40% 的土壤初始入渗率相差不大。

2~5 mm 粒径的累积入渗量比 5~12.5 mm 粒

径大,2种粒径的累积入渗量随砾石含量增大呈现先增大后减小的趋势(图3)。在入渗初始阶段至稳定入渗前期阶段,砾石粒径与砾石含量对累积入渗量影响差异性不明显,随着入渗过程的进行,土柱逐渐湿

润后,砾石含量对累积入渗量的影响才慢慢表现出来。进入稳定入渗阶段后,随着砾石含量的增加,单位入渗历时累积入渗量迅速增大。2种粒径均在砾石含量为30%时,出现累积入渗量的最大值。

表3 不同粒径和砾石含量条件下入渗特征汇总

Table 3 Summary of infiltration characteristics under different particle sizes and gravel contents

土柱编号	砾石配置		初始入渗率/ (mm·min ⁻¹)	稳定入渗率/ (mm·min ⁻¹)	累积入渗量/mL
	粒径/mm	砾石含量/%			
1	—	—	15.83±10.60a	1.04±0.63b	439.73±47.48b
2	2~5	10	21.67±5.18Aa	4.18±2.46Aab	735.32±379.16Aa
3	2~5	20	19.67±2.82Aa	5.19±0.44Aa	772.48±1.87Aa
4	2~5	30	21.33±6.59Aa	2.99±0.41Aa	1 094.18±64.78Aa
5	2~5	40	15.83±5.89Aa	5.34±2.84Aa	1 048.96±9.96Aa
6	5~12.5	10	20.33±1.41Ba	2.29±0.97Aa	625.90±21.69Ba
7	5~12.5	20	19.66±4.23Ba	2.78±0.96Aa	770.18±451.00Ba
8	5~12.5	30	13.50±9.43Ba	4.97±0.72Aa	1 080.81±486.72Ba
9	5~12.5	40	13.33±0.24Ba	2.89±0.33Aa	888.07±86.37Ba

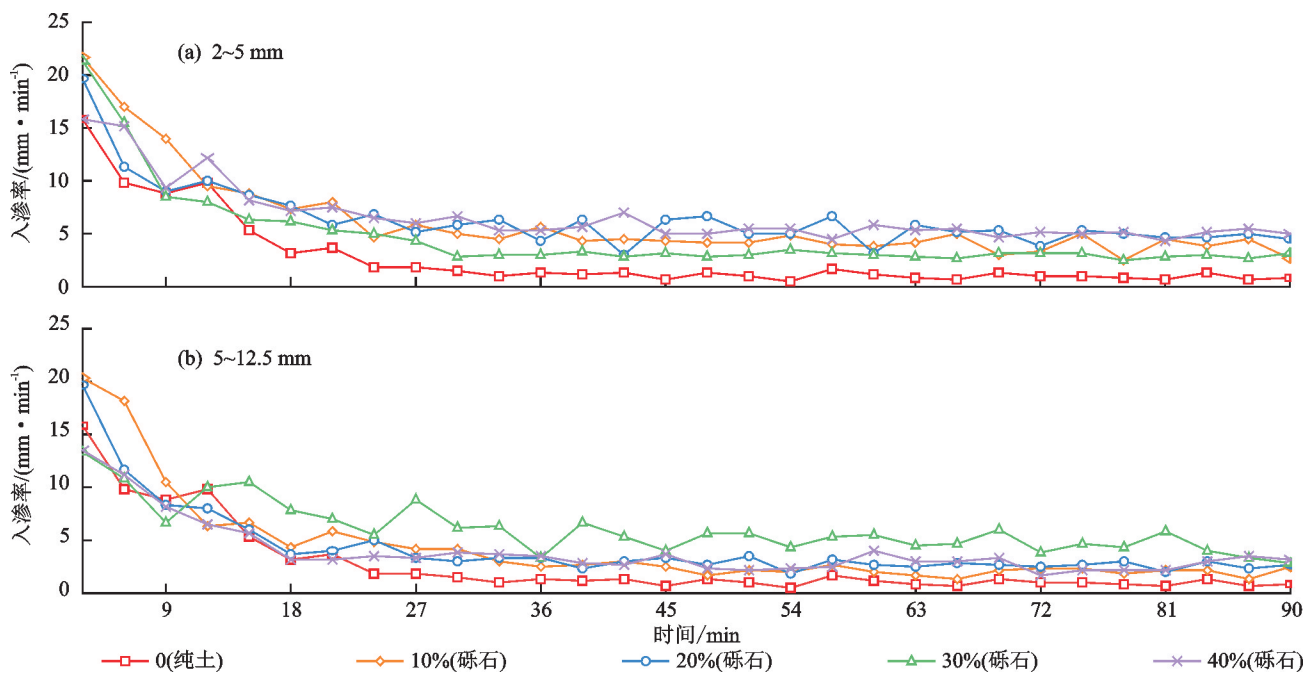


图2 不同粒径和不同砾石含量条件下入渗率随时间变化

Fig. 2 Variation of infiltration rate with time under different particle sizes and gravel contents

2.3 土壤孔隙特征与入渗特性的相关性分析

结构方程模型的拟合评价指标见表4。各指标均符合模型检验标准表明构建的结构方程模型可以研究各参数的相关性。由构建好的结构方程模型结果(图4)显示,砾石含量与稳定入渗率、累积入渗量呈正相关关系(标准化通路系数分别为0.29,0.35),与初始入渗率呈负相关(标准化通路系数为-0.12)。砾石含量与孔隙表面积呈微弱正相关关系(标准化通路系数分别为0.08),砾石含量与孔隙等效直径、孔隙体积、大孔隙度、孔隙分形维数、孔隙连通率呈正相关关系(标准化通路系数分别为0.10,0.12,0.27,0.30,

0.39)。孔隙分形维数与初始入渗率呈负相关关系(标准化通路系数为-0.39),大孔隙度与初始入渗率呈正相关关系(标准化通路系数为0.33)。孔隙连通率与稳定入渗率和累积入渗量呈正相关关系(标准化通路系数分别为0.26,0.28),孔隙连通性越好入渗能力越强。孔隙等效直径与累积入渗量呈正相关关系(标准化通路系数为0.81)。绝对相关系数越大则因子间的相关性越强,发现稳定入渗率与孔隙连通率的绝对相关系数为最大值(0.26),初始入渗率与孔隙分形维数的绝对相关系数为最大值(0.39),累积入渗量与孔隙等效直径的绝对相关系数为最大值(0.81)。

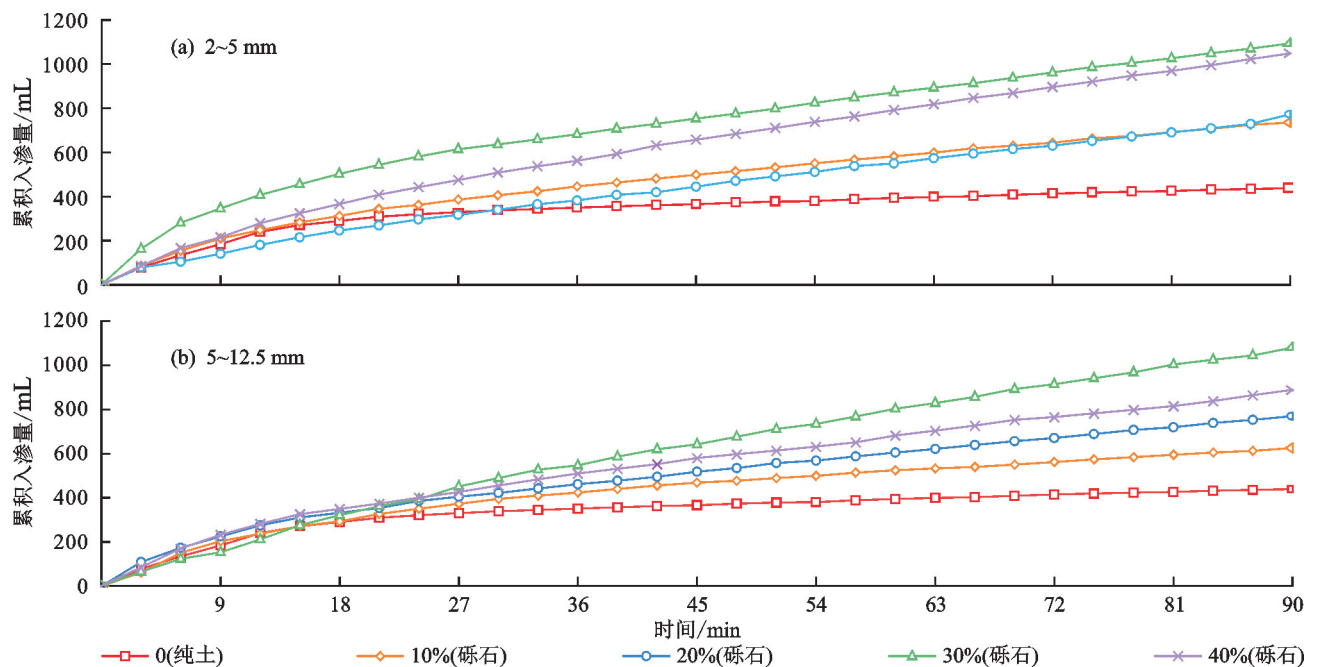


图 3 不同粒径和不同砾石含量条件下累积入渗量随时间变化

Fig. 3 Variation of cumulative infiltration with time under different particle sizes and gravel contents

表 4 SEM 拟合参数评价评价及结果

Table 4 Evaluation and results of SEM fitting parameters

指标类型		参数含义	实际值	标准值	拟合结果
绝对拟合指数	χ^2/df	卡方自由度比	1.023	<3.00	符合
	GFI	适配度指数	0.881	>0.80	符合
	RMSEA	均方根误差	0.037	<0.10	符合
相对拟合指数	NFI	规准适配指数	0.909	(0,1);越接近 1,表示 模型适配度越好	符合
	TLI	Tucker Lewis 指数	0.988		符合
	CFI	比较适配指数	0.997		符合

3 讨论

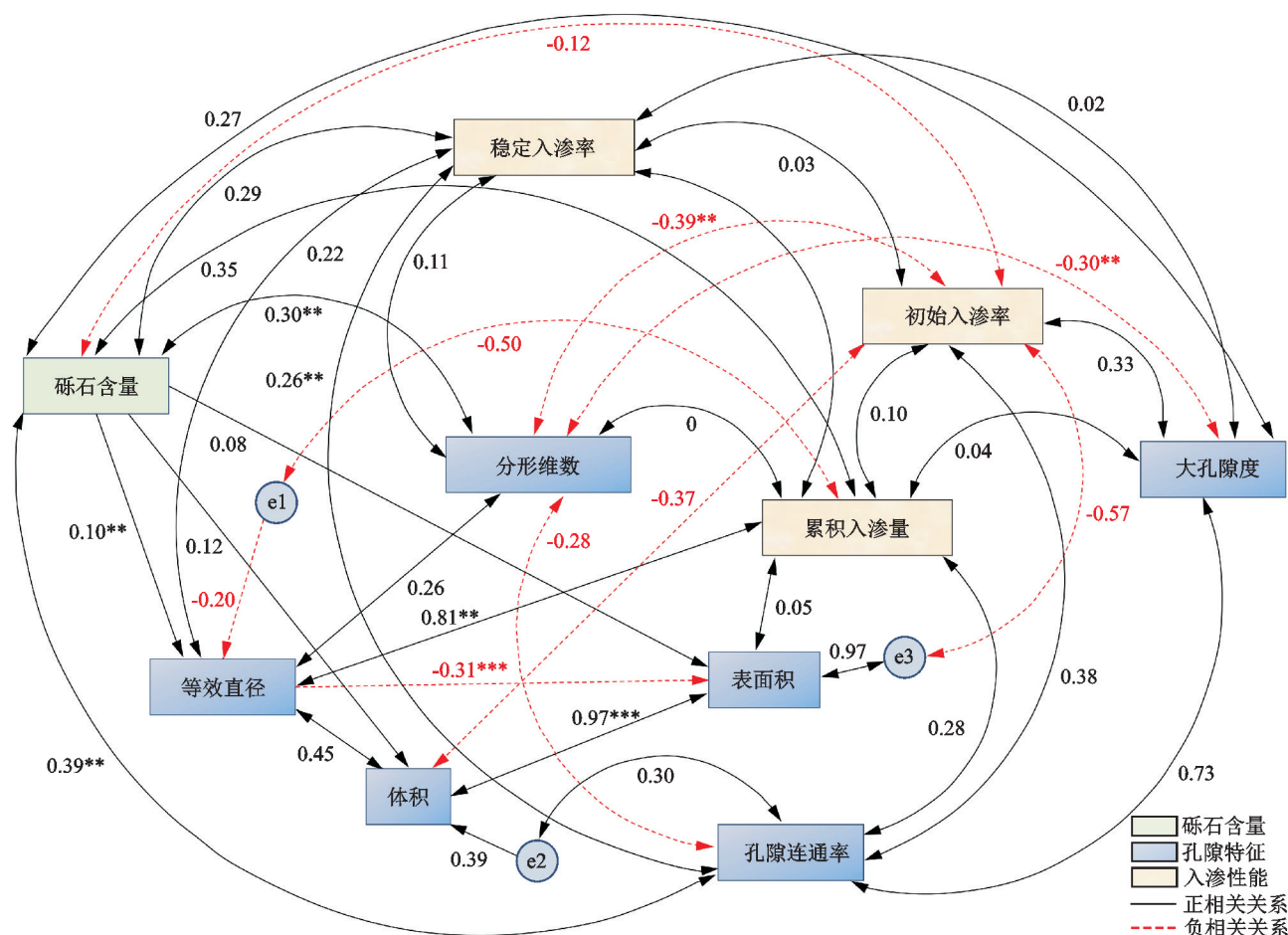
本文研究结果显示,与无砾石土壤相比,含砾石土壤的大孔隙度、孔隙连通率、孔隙形状因子、孔隙表面积和孔隙体积均有所增加。在 10%~30% 砾石含量区间呈增加趋势,在 30% 时达到峰值,随后开始减缓。这可能是因为砾石添加到土壤后,占据原本属于土壤基质的空间,砾石与土壤基质之间、砾石与砾石的界面形成新的孔隙^[24-25],并且随着砾石含量的增大,界面孔隙的数量也相应增加。然而这种增加趋势不是线性的,当砾石含量过高时,可能因土石排列愈加紧密而堵塞原有的土壤孔隙^[26-27],导致大孔隙度降低。本试验条件下,30% 砾石含量可能是大孔隙形成机制的阈值,当超过该阈值时孔隙特征的发育开始受到限制^[28]。这与 GARGIULO 等^[16]研究发现,砾石含量阈值为 10% 的结果有一定差异,可能是意大利南部的高活性淋溶土与我国西南喀斯特地区石灰土土壤性质不同所致,我国西南喀斯特地区石灰土有良好的土壤孔隙结构^[29]。土壤孔隙连通率和形状因子随砾石含量呈先增大后减缓,这可能与砾石在土壤中的分布和排

列方式有关^[30],当砾石含量适中时,砾石之间的孔隙和土壤基质之间的相互作用达到最佳状态,从而形成更加连通的孔隙网络。当砾石含量相同时,大粒径砾石(5~12.5 mm)的孔隙体积和孔隙等效直径高于小粒径砾石(2~5 mm)。这是因为大粒径砾石体积较大,土石排列组合不如小粒径砾石紧密^[31],导致砾石与砾石界面、砾石与土壤界面之间形成的孔隙往往较大。小粒径的孔隙连通率和孔隙形状因子高于大粒径,可能是因为随着砾石粒径的增大,细小孔隙的连续性阻断,土壤中孤立孔隙产生的可能性增加^[24],因此小粒径孔隙连通网络比大粒径砾石更复杂。

本研究发现,添加砾石改善土壤的入渗性能,相较于无砾石土壤,稳定入渗率和入渗总量都有所增加。在 2 种粒径条件下,随着砾石含量的增加,稳定入渗率和累积入渗量先增大后减小,在砾石含量为 30% 时出现最大值。KHETDAN 等^[8]的研究结论与本试验有所差别,他们在野外试验发现,当砾石含量从 0 增加到 20% 时,土壤稳定入渗率逐渐降低,这可能是其采集的原状土受土壤容重、团聚体、砾石排列

组合以及土石镶嵌模式影响^[32]。相同砾石含量条件下,小粒径的累积入渗量高于大粒径,这与党宏宇等^[33]研究结果一致。这是因为本试验条件下小粒径的孔隙连通率优于大粒径,而连通的大孔隙有助于土壤产生优先流^[34-35],从而增加入渗总量。但与前人^[6]研究发现,粒径在2~3 mm时阻碍水分入渗,在粒径>25 mm促进水分入渗有一定差异。这可能是因为

高砾石含量阻碍原有的孔隙路径,而他们选用的大粒径砾石由于其较高的风化程度和表面丰富的细小缝隙,可以形成比均质土壤更粗大的毛管孔隙,更有利于入渗。此外,砾石在土壤中的空间位置对入渗速率的影响不容忽视,本研究填装过程中土样与砾石充分均匀混合后再填装入土柱,因此土壤孔隙特征的变化才是本研究中水分入渗的主要影响因素。



注:标准化通径系数代表起始变量对终端变量的影响大小;e表示变量间的残差;单箭头表示因果关系,即起始变量对终端变量的直接影响;双箭头表示变量间的相关关系,即2个变量间可能存在相互影响;*表示5%的显著水平;***表示1%的显著水平。

图 4 结构方程模型示意

Fig. 4 Schematic diagram of structural equation model

SEM 结果显示,砾石含量与孔隙分形维数正相关,而孔隙分形维数与初始入渗率呈负相关。这表明,土壤孔隙结构的复杂性在水分入渗初期产生阻碍作用。其原因可能是,入渗初期水流在运动过程中需要先将部分孔隙体积填充满然后再向下传输,然而砾石的存在增加土壤的孔隙分形维数,使得孔隙结构更加复杂,造成水流需要经过更复杂的孔隙路径才能抵达土柱底部出口,从而降低初始入渗率,这与砾石含量和初始入渗率呈负相关的结果相符合。ZHOU 等^[7]的研究也证实了这一点,砾石导致使水分运动通道变得曲折复杂,进而抑制水分入渗。本试验条件下,入渗初期孔隙分形维数对初始入渗率的负向影响

超过大孔隙度的正向影响。在 SEM 中,砾石含量与孔隙连通率正相关,孔隙连通率与稳定入渗率之间也呈正相关。这是因为当土壤进入稳定入渗阶段后,土柱中的孔隙体积全部被水流填满,从水流运动的角度看,只有相互连通的有效孔隙才对水分入渗具有实际传输意义,因此孔隙的连通率成为决定水分入渗速率的关键因素^[19]。这意味着砾石通过增加土壤中的大孔隙和构建孔隙连通网络,促进水分在土壤中的有效传输^[14],从而增强土壤的水分储存和传输功能^[36]。此外,砾石含量与孔隙等效直径正相关,孔隙等效直径与累积入渗量之间也呈正相关,这是因为当孔隙等效直径越大,孔隙体积也越大,这意味着大孔隙可以

增加土壤的储水能力^[37],并且大孔隙更容易引起土壤中的优先流现象^[38],因此较大的孔隙等效直径更有利于水分的快速运输,提高入渗总量。结构方程模型的通径系数和这种双重正相关性表明,水分入渗受到孔隙分形维数、孔隙连通率和孔隙等效直径的综合影响,当孔隙连通率的促进作用大于分形维数的抑制作用时,提高土壤入渗性能,反之亦然。此外,室内填土试验与自然条件下的土壤孔隙和入渗特性存在一定差异,后续的研究中应该加强含砾石原状土的扫描和入渗试验,以便更深入地了解砾石对土壤孔隙和入渗的影响。

4 结 论

(1)含砾石土壤的大孔隙度、连通率、形状因子、表面积和体积均较无砾石土壤有所增加,砾石含量对土壤孔隙的促进发育可能存在一个阈值。大粒径砾石(5~12.5 mm)孔隙体积和等效直径更大,而小粒径砾石(2~5 mm)连通孔隙网络更复杂。

(2)添加砾石后,2种粒径条件下均提升入渗性能。在小粒径条件下,累积入渗量随着砾石含量的增加而增加,但在较高砾石含量时,增长速度有所减缓。在大粒径条件下,稳定入渗率与累积入渗量随砾石含量先增加后减少,二者峰值均出现在砾石含量为30%。在西南喀斯特区的石灰土中适量加入砾石可以改善其渗透性能,从而提高土壤的水分利用效率。

(3)在SEM中孔隙分形维数与初始入渗率呈负相关,而孔隙连通率与稳定入渗率呈正相关、孔隙等效直径与累积入渗量呈正相关。砾石在土壤中促进大孔隙的形成,增加孔隙的连通性,构建土壤孔隙连通网络,使分形维数变复杂,从而改变土壤水分入渗性质。

参考文献:

- [1] 吴佩瑶,秦富仓,董晓宇,等.坡度影响下的砒砂岩区裸露坡面水分入渗特征及模拟[J].水土保持学报,2022,36(2):64-69.
WU P Y, QIN F C, DONG X Y, et al. Water infiltration characteristics and simulation on exposed slope in Pisha rock area under the influence of slope[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(2): 64-69.
- [2] LIU W P, CUI Y W, OUYANG G Q, et al. An experimental study on influence of grain-size composition on collapsing erosion of granite residual soil[J]. Catena, 2023, 223: e106949.
- [3] ZHANG L T, SHUAI F, CHEN L B, et al. Effect of gravel content on the detachment of colluvial deposits in Benggang[J]. Journal of Mountain Science, 2022, 19(11): 3088-3104.
- [4] NASERI M, JOSHI D C, IDEN S C, et al. Rock fragments influence the water retention and hydraulic conductivity of soils[J]. Vadose Zone Journal, 2023, 22(2): e20243.
- [5] ZHANG Y H, ZHANG M X, NIU J Z, et al. Rock fragments and soil hydrological processes: Significance and progress[J]. Catena, 2016, 147: 153-166.
- [6] 王慧芳,邵明安.含碎石土壤水分入渗试验研究[J].水科学进展,2006,17(5):604-609.
WANG H F, SHAO M A. Experimental study on water infiltration of soil containing rock fragments[J]. Advances in Water Science, 2006, 17(5): 604-609.
- [7] ZHOU B B, SHAO M A, WANG Q J, et al. Effects of different rock fragment contents and sizes on solute transport in soil columns[J]. Vadose Zone Journal, 2011, 10(1): 386-393.
- [8] KHETDAN C, CHITTAMART N, TAWORNPRUEK S, et al. Influence of rock fragments on hydraulic properties of Ultisols in Ratchaburi Province, Thailand[J]. Geoderma Regional, 2017, 10: 21-28.
- [9] 杨艳芬,王全九,曾辰,等.土石混合介质水分入渗特性试验研究[J].水土保持学报,2009,23(5):87-90,132.
YANG Y F, WANG Q J, ZENG C, et al. Experimental research on water infiltration characteristics of stony-soil medium[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(5): 87-90, 132.
- [10] 王冬林,冯浩,李毅.砾石覆盖对土壤水热过程及早作小麦玉米产量的影响[J].农业工程学报,2017,33(7):132-139.
WANG D L, FENG H, LI Y. Effects of gravel mulch on soil hydro-thermal process and rain-fed wheat-maize yields[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(7): 132-139.
- [11] WANG X Y, LI Z X, CAI C F, et al. Effects of rock fragment cover on hydrological response and soil loss from Regosols in a semi-humid environment in South-West China[J]. Geomorphology, 2012, 151/152: 234-242.
- [12] 焦锡桦,彭韬,李社红,等.喀斯特坡地侵蚀性降雨阈值初探[J].水土保持学报,2023,37(5):57-63.
JIAO X H, PENG T, LI S H, et al. Preliminary research on the threshold of erosive rainfall on karst slopes[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(5): 57-63.
- [13] 阙晓晴,程金花,王葆,等.基于工业CT扫描的不同类型土壤孔隙结构研究[J].西南林业大学学报,2021,41(4): 25-34.
KAN X Q, CHENG J H, WANG B, et al. Soil structural pore network under different soil types by industrial computed tomography[J]. Journal of Southwest For-

- estry University, 2021, 41(4): 25-34.
- [14] LI J W, HAN Z, ZHONG S Q, et al. Pore size distribution and pore functional characteristics of soils as affected by rock fragments in the hilly regions of the Sichuan Basin, China[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2021, 101(1): 74-83.
- [15] SEKUCIA F, DLAPA P, KOLL'ÁR J, et al. Land-use impact on porosity and water retention of soils rich in rock fragments[J]. Catena, 2020, 195: e104807.
- [16] GARGIULO L, MELE G, TERRIBILE F. Effect of rock fragments on soil porosity: A laboratory experiment with two physically degraded soils[J]. European Journal of Soil Science, 2016, 67(5): 597-604.
- [17] MOHAMMADZADEH - HABILI J, HEIDARPOUR M, KHALILI D. Effect of aggregate size and porosity of clay soils on the hydraulic parameters of the green-ampt infiltration model[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2018, 23(3): e06018001.
- [18] WANG P J, ZHENG H F, REN Z B, et al. Effects of urbanization, soil property and vegetation configuration on soil infiltration of urban forest in Changchun, Northeast China[J]. Chinese Geographical Science, 2018, 28(3): 482-494.
- [19] 吴继强, 张建丰, 高端. 大孔隙对土壤水分入渗特性影响的物理模拟试验[J]. 农业工程学报, 2009, 25(10): 13-18.
- WU J Q, ZHANG J F, GAO R. Physical simulation experiments of effects of macropores on soil water infiltration characteristics[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(10): 13-18.
- [20] 余星兴, 肖波, 曹允松, 等. 黄土高原表层土壤孔隙性状与穿透阻力对藓结皮发育的响应[J]. 水土保持学报, 2023, 37(3): 52-59.
- YU X X, XIAO B, CAO Y S, et al. Effects of moss crusts on topsoil pore characteristics and penetration resistance in Loess Plateau, China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(3): 52-59.
- [21] 刘建伟. 桂西北喀斯特峰丛洼地石质土壤入渗试验研究[D]. 重庆: 西南大学, 2008.
- LIU J W. Water infiltration in soils containing rock fragments in karst peak-cluster depression area of Northwest Guangxi[D]. Chongqing: Southwest University, 2008.
- [22] 张光辉, 魏玉杰, 周小荃, 等. 干湿循环强度与频度对花岗岩红壤孔隙分布的影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(增刊1): 106-113.
- ZHANG G H, WEI Y J, ZHOU X Q, et al. Effect of intensity and frequency of dry-wet cycle on pore distribution in granite red soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(S1): 106-113.
- [23] 杨文静, 赵建世, 赵勇, 等. 基于结构方程模型的蒸散发归因分析[J]. 清华大学学报, 2022, 62(3): 581-588.
- YANG W J, ZHAO J S, ZHAO Y, et al. Factors affecting evapotranspiration analyzed based on a structural equation model[J]. Journal of Tsinghua University, 2022, 62(3): 581-588.
- [24] 吕刚, 王婷, 王韞策, 等. 辽西低山丘陵区坡地砾石含量及粒径对土壤入渗性能的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(4): 86-92.
- LÜ G, WANG T, WANG Y C, et al. Effect of gravel content and particle size on soil infiltration in low mountainous upland region of Western Liaoning Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(4): 86-92.
- [25] NASRI B, FOUCHE O, TORRI D. Coupling published pedotransfer functions for the estimation of bulk density and saturated hydraulic conductivity in stony soils[J]. Catena, 2015, 131: 99-108.
- [26] 史倩华, 王文龙, 郭明明, 等. 模拟降雨条件下含砾石红壤工程堆积体产流产沙过程[J]. 应用生态学报, 2015, 26(9): 2673-2680.
- SHI Q H, WANG W L, GUO M M, et al. Runoff and sediment yielding processes on red soil engineering accumulation containing gravels by a simulated rainfall experiment[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(9): 2673-2680.
- [27] 冀海峰, 刘卫景, 赵国梁, 等. 青岛地铁土压平衡盾构碎石土改良方法研究[J]. 岩土工程技术, 2024, 38(1): 7-13.
- JI H F, LIU W J, ZHAO G L, et al. Research on conditioning method of gravel soil in Qingdao metro shield construction[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2024, 38(1): 7-13.
- [28] 叶瀛韬, 李占玲, 王蕙. 不同含量砾石嵌套对红壤入渗特性的影响[J]. 节水灌溉, 2022(5): 1-6.
- YE Y T, LI Z L, WANG H. Effects of gravel nesting with different contents on infiltration characteristics of red soil[J]. Water Saving Irrigation, 2022(5): 1-6.
- [29] 周炼川, 陈效民, 李孝良, 等. 西南喀斯特地区不同石漠化阶段土壤物理参数的变异研究[J]. 地球科学与环境学报, 2010, 32(2): 195-199.
- ZHOU L C, CHEN X M, LI X L, et al. Variation of physical parameters of soil under different rocky desertification in karst region, Southwest China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2010, 32(2): 195-199.
- [30] DO CARMO F F, DE CAMPOS I C, JACOBI C M. Effects of fine-scale surface heterogeneity on rock outcrop plant community structure[J]. Journal of Vegetation Science, 2016, 27(1): 50-59.

- merica Journal, 2013, 77(2): 606-617.
- [35] 刘园, JAMAL K M, 靳海洋, 等. 秸秆生物炭对潮土作物产量和土壤性状的影响[J]. 土壤学报, 2015, 52(4): 849-858.
- LIU Y, JAMAL K M, JIN H Y, et al. Effects of successive application of crop-straw biochar on crop yield and soil properties in cambosols[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(4): 849-858.
- [36] 潘全良, 陈坤, 宋涛, 等. 生物炭及炭基肥对棕壤持水能力的影响[J]. 水土保持研究, 2017, 24(1): 115-121.
- PAN Q L, CHEN K, SONG T, et al. Influences of biochar and biochar-based compound fertilizer on soil water retention in brown soil[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(1): 115-121.
- [37] FU Q, YAN J W, LI H, et al. Effects of biochar amendment on nitrogen mineralization in black soil with different moisture contents under freeze-thaw cycles[J]. Geoderma, 2019, 353: 459-467.
- [38] 鞠文亮, 荆延德. 陈化处理对棉花秸秆生物炭理化性质的影响[J]. 环境科学学报, 2017, 37(10): 3853-3861.
- JU W L, JING Y D. Effect of aging treatment on physicochemical characteristics of cotton straw biochar[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37(10): 3853-3861.
- [39] ZHAO W, ZHOU Q, TIAN Z Z, et al. Apply biochar to ameliorate soda saline-alkali land, improve soil function and increase corn nutrient availability in the Songnen Plain[J]. The Science of the Total Environment, 2020, 722: e137428.
- [40] 龚子同, 张甘霖, 陈志诚, 等. 土壤发生与系统分类[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- GONG Z T, ZHANG G L, CHE Z C, et al. Soil genesis and system classification[M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [41] 朱继荣, 孙崇玉, 于红梅, 等. 生物炭对土壤肥力与环境的影响[J]. 广东农业科学, 2014, 41(3): 65-69, 73.
- ZHU J R, SUN C Y, YU H M, et al. Effects of biochar on soil fertility and environment[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2014, 41(3): 65-69, 73.
- [42] 王晓巍. 北方季节性冻土的冻融规律分析及水文特性模拟[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2023.
- WANG X W. Study of soil freezing and thawing law and Simulation of hydrologic properties in the northern seasonally frozen soil area[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2010.
- (上接第 321 页)
- [31] 詹振芝, 黄炎和, 蒋芳市, 等. 砾石含量及粒径对崩岗崩积体渗透特性的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(3): 85-90, 95.
- ZHAN Z Z, HUANG Y H, JIANG F S, et al. Effects of content and size of gravel on soil permeability of the colluvial deposit in Benggang[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(3): 85-90, 95.
- [32] ILEK A, KUCZA J, WITEK W. Using undisturbed soil samples to study how rock fragments and soil macropores affect the hydraulic conductivity of forest stony soils: Some methodological aspects[J]. Journal of Hydrology, 2019, 570: 132-140.
- [33] 党宏宇, 陈洪松, 邵明安. 喀斯特地区不同层次土石混合介质对土壤水分入渗过程的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(8): 38-43.
- DANG H Y, CHEN H S, SHAO M A. Effects of laminated rock fragments on soil infiltration processes in Karst regions[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(8): 38-43.
- [34] 于皓, 董智, 杨建英, 等. 基于 CT 扫描的不同土地利用类型土壤大孔隙特征及其入渗能力研究[J]. 干旱区资源与环境, 2023, 37(3): 55-61.
- YU H, DONG Z, YANG J Y, et al. Study on soil macropore characteristics and infiltration capacity of different land use types based on CT scanning[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2023, 37(3): 55-61.
- [35] LESSOVAIA S N, DULTZ S, PLÖTZE M, et al. Soil development on basic and ultrabasic rocks in cold environments of Russia traced by mineralogical composition and pore space characteristics[J]. Catena, 2016, 137: 596-604.
- [36] 李江文, 冉卓灵, 韩珍, 等. 含岩屑紫色土水分扩散规律[J]. 水土保持学报, 2020, 34(1): 178-185.
- LI J W, RAN Z L, HAN Z, et al. Water diffusion law of purple soil containing rock fragments[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(1): 178-185.
- [37] 孟晨, 牛健植, 余海龙, 等. 土壤大孔隙三维特征影响因素和测定方法研究进展[J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(11): 9-16.
- MENG C, NIU J Z, YU H L, et al. Research progress in influencing factors and measuring methods of three-dimensional characteristics of soil macropores[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(11): 9-16.
- [38] 王红兰, 蒋舜媛, 崔俊芳, 等. 紫色土坡耕地土壤大孔隙流的定量评价[J]. 农业工程学报, 2017, 33(22): 167-174.
- WANG H L, JIANG S Y, CUI J F, et al. Quantitative evaluation of macropore flow in purple soil of sloping cropland[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(22): 167-174.