

反演含碎石碳酸盐岩红土水力特性

冯娜¹, 刘冬冬¹, 丁继辉², 夏薪怡³

(1.贵州大学资源与环境工程学院,喀斯特地质资源与环境教育部重点实验室,贵阳 550025;2.河海大学农业科学与工程学院,南京 210098;3.贵阳市排水有限公司,贵阳 550000)

摘要:为探究喀斯特地区碎石夹层对碳酸盐岩红土水力特性的影响因素,通过室内模拟土柱入渗试验,采用垂直入渗水头法研究 3 种碎石体积含量(0,40%,80%)和 3 种碎石埋藏深度(0,5,15 cm)分别与累积入渗量、湿润锋、入渗特性和土壤水分特征曲线之间的关系,并采用 3 种模型分析了含碎石土壤对传统土壤入渗模型的适用性,将实测入渗数据结合改进的 Green-Ampt 模型反演 Brooks-Corey 模型参数。结果表明:在相同碎石埋藏深度下,累积入渗量、湿润锋、初始入渗率、平均入渗率和稳定入渗率均随碎石含量增加而减小;当碎石含量为 40%时,埋藏深度是 15 cm 的土壤稳定入渗率最大(12.71 mm/h),是埋藏深度为 0 cm 的 1.33 倍。Horton 模型对含碎石夹层土壤入渗规律的适用性要优于 Kostiaikov 模型和 Philip 模型。反演参数 a 、 n 和 h_d 在同一碎石埋藏深度(0,5 cm)下,随碎石含量增加而增大,而 K_s 随碎石含量增加而减小。通过土壤水分特征曲线可知,对照组土壤持水性最低;含碎石夹层土壤持水性随碎石含量增加而减弱,但碎石埋藏深度为 15 cm 时,含碎石夹层土壤持水性随碎石含量增加而增强;当碎石含量为 40%时,不同碎石埋藏深度下土壤持水能力大小为埋藏深度 0 cm>埋藏深度 5 cm>埋藏深度 15 cm。研究结果可为西南喀斯特地区水资源利用提供数据参考。

关键词: Brooks-Corey 模型;碳酸盐岩红土;碎石体积含量;碎石埋藏深度;土壤水力特性

中图分类号: S152.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2022)01-0101-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.01.015

Inversion of Hydraulic Properties of Carbonate-Derived Laterite Containing Gravel

FENG Na¹, LIU Dongdong¹, DING Jihui², XIA Xinyi³

(1.College of Resources and Environmental Engineering, Key Laboratory of Karst Georesources and Environment, Ministry of Education, Guizhou University, Guiyang 550025; 2.College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098; 3.Guiyang Drainage Co.,Ltd., Guiyang 550000)

Abstract: In order to explore the influence of the gravel interbed on the carbonate-derived laterite hydraulic properties, indoor soil column infiltration and vertical infiltration experiments were conducted to examine the relationship of 3 different gravel volume contents (0, 40% and 80%) and 3 different gravel burial depths (0, 5 and 15 cm) between the cumulative infiltration, wetting front, infiltration characteristics, and soil water characteristic curves. The applicability of the traditional soil infiltration model was analyzed by three models. These Brooks-Corey model parameters were inverted by the measured infiltration data and the modified Green-Ampt model. The results showed that the cumulative infiltration, wetting front, initial infiltration rate, average infiltration rate, and steady infiltration rate obviously decline, along with the increase of the gravel content at the same gravel burial depth. When the gravel content was 40%, the largest soil steady infiltration rate (12.71 mm/h) was found in gravel burial depth of 15 cm, which was 1.33 times higher than that of 0 cm. The Horton equation's validation of the infiltration characteristics were superior to those expressed by the Kostiaikov model and Philip formula. At the same gravel burial depth (0 and 5 cm), the inverted parameters a , n , and h_d increased with the increase of gravel content, while K_s decreased. The soil water

收稿日期:2021-07-06
资助项目:国家自然科学基金项目(41807016);黔科合基础项目[2019]1081;贵州省水利科技项目(KT201803)
第一作者:冯娜(1996—),女,硕士研究生,主要从事岩溶区生态水文过程研究。E-mail:1012079037@qq.com
通信作者:刘冬冬(1989—),男,博士,特聘教授,硕士生导师,主要从事地球关键带水土过程及生态环境效应研究。E-mail:liudongdongen@foxmail.com

retention of control group was the lowest, and the soil water retention of the gravel interbed decreased with the increase of the gravel content. However, when the gravel burial depth was 15 cm, the soil water retention of the gravel interbed increased with the increase of the gravel content. As the gravel content arrived at 40%, the relationship of soil water retention in different gravel burial depths was 0 cm > 5 cm > 15 cm. These results can provide data reference for the taking advantage of water resource in the southwest karst regions.

Keywords: Brooks-Corey model; carbonate-derived laterite; gravel volume content; burial depth of gravel; soil hydraulic properties

土壤水力特性包括土壤水分特征曲线及饱和土壤水力传导系数。土壤水分特征曲线是指土壤水吸力与土壤含水量之间的关系^[1]。研究土壤水力特性对描述和预测土壤水分运动非常关键,有助于分析土壤水分运动过程^[2]。而在石质山区,土壤表层常含有大量碎石,如在石漠化地区的喀斯特地貌,碳酸盐岩分布广泛及成土过程缓慢,加之人类过度垦殖和不合理的开发利用,导致水土流失严重^[3],土层变薄,基岩裸露,因此,土壤中常出现夹杂碎石的现象,且喀斯特地区局部石质土地面积率可达 80%~100%,形成强度石漠化石质地区^[4]。土壤中碎石的存在,不仅对土壤孔隙度和土壤体积质量等产生影响,也对土壤水力特性存在影响。主要是由于碎石的存在,改变了土壤水分原本的运动通道和过水断面,增加了土壤孔隙的弯曲程度,导致含碎石土壤的水分运动较均质土壤更为复杂^[5]。

土壤中碎石的存在,一方面阻断了土壤原有的入渗通道或增加了水流弯曲程度,导致水分入渗减少;另一方面,因为径流路径和土壤中大孔隙数量增加,导致土壤中水分出现优先流现象,促进水分入渗。具体影响与碎石种类、含量、尺寸和埋藏深度等有关。朱元骏等^[6]通过多重相互作用连续体(MNC)组件,模拟含砾石土壤降雨入渗过程并进行数值模拟发现,不同砾石含量导致土壤中水分饱和度增加,使得土壤总入渗量和降雨入渗深度降低。李雪垠等^[7]通过室内模拟土柱入渗试验发现,含砾石紫色土阻碍土壤水分下渗,且砾石粒径与其对湿润锋的阻碍程度呈负相关。房凯等^[8]通过砾石覆盖及土石混合入渗试验也指出,土壤吸渗率、稳定入渗率及导水率与碎石含量呈负相关。但 Cerda^[9]研究表明,砾石促进土壤入渗。胡廷飞等^[5]通过一维垂直入渗土柱试验发现,砾石覆盖厚度(0,3,6,9,12 cm)会显著增加斥水土壤湿润锋迁移距离,且斥水性红壤累积入渗量与砾石覆盖厚度呈正相关关系。

国内外学者关于含碎石土壤水力特性做了大量研究,并逐步发展成利用数学模型来反演土壤水分的运动过程。其中,对含碎石土壤水力特性的研究主要

是针对土壤表面碎石种类、含量和粒径等因素对土壤水力特性的影响,而在西南喀斯特地区,碎石埋藏深度和含量对土壤水分过程影响的研究少之甚少。因此,本文采用垂直入渗土柱模拟试验的方式,选取适用于含碎石碳酸盐岩红土入渗模型,并根据实测数据反演 Brooks-Corey (BC)模型参数,准确探讨碎石埋藏深度和含量对喀斯特地区表层碳酸盐岩红土水力特性的影响,不仅有助于促进喀斯特地区土壤水分入渗理论的发展,也可为喀斯特地区地表地下水动力学模型提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于贵州省贵阳市花溪区贵州大学岩溶植被恢复试验场(106°40′05″E,26°25′39″N),属于典型的亚热带季风气候区。年平均气温 15.6℃,年均最高气温 33.4℃,年均最低气温-3.8℃,年均降水量 1 185 mm,降水时间分布不均,降雨主要集中在夏季和秋季,年均蒸发量为 738 mm,年均日照时间 1 686.8 h,无霜期 246 天。研究区主要土壤类型为具有高塑性和高含水性的碳酸盐岩红土,其岩溶表层常富含大量碎石,土壤层浅薄,土壤肥力低。

1.2 试验材料

研究样品为土石混合介质。混合介质中的土样均采自贵州大学岩溶植被恢复试验场土壤(106°40′05″E,26°25′39″N),扰动土样经充分风干后碾压粉碎、过 2 mm 土筛(其中砂砾含量为 3%,粉粒含量为 81.3%,黏粒含量为 15.7%)。根据美国农业部标准可知,土壤质地为粉砂质壤土。土样初始容重为 1.30 g/cm³,有机质含量为 7.5 g/kg,pH 为 6.4,土壤电导率(EC)为 291 μS/cm,饱和含水率(θ_s)、初始含水率(θ_i)和残余含水率(θ_r)分别为 0.60,0.15,0.01 cm³/cm³。试验所用碎石为表面较为粗糙且接近方体的石灰岩碎石,易与土壤表面较紧密接触,其粒径大小为 1.5~2.5 cm,密度为 2.60~2.75 g/cm³,几乎不渗水。

1.3 试验设计

本试验采用垂直定水头入渗法模拟土石混合介质

的入渗过程,研究碎石对土壤水力特性(累积入渗量、入渗率、湿润锋和 BC 模型参数)的影响。供水马氏瓶和土柱均采用有机玻璃制作,外表均贴有刻度尺。马氏瓶高 64 cm,内径 6 cm;土柱高 50 cm,内径 20 cm。供水水头固定在 4 cm,达到稳压供水目的。整个试验过程中实验室温度为常温,无外在影响因素。

将土样与 3 组不同埋藏深度(0,5,15 cm)的碎石分别按碎石含量 0,40%和 80%(体积含量)混合,共设置 7 个处理,0 为不加碎石的对照试验,每个处理 3 次重复。按土壤容重为 1.35 g/cm³和碎石混合进行分层(5 cm)填装,每个土柱共 5 层。碎石埋藏深度为 0 cm 时,填装土壤至设计高度,自然沉降 24 h 后,将碎石按照 40%,80%的体积含量覆盖在土壤表面。试样填装完毕后,土柱上层表面放置铁丝网,防止供水对表层土壤的冲刷。在入渗过程中,前 20 min,每 2 min 读 1 次数据,20~40 min,每 5 min 读 1 次,40~90 min,每 10 min 读 1 次,90 min 以后,每 30 min 记录 1 次数据,主要根据先密后疏的原则观测记录湿润锋及马氏瓶读数,直至湿润锋到达土柱底部为止。

1.4 模型拟合

采用 Philip 入渗公式、Horton 模型和 Kostiakov 模型拟合含碎石碳酸盐岩红土入渗过程。

(1)Philip 入渗公式为:

$$I(t)=\frac{1}{2}St^{-\frac{1}{2}}+A \tag{1}$$

式中: $I(t)$ 为入渗率(mm/min); t 为入渗历时(min); S 为吸渗率(mm/min); A 为稳定入渗率(mm/min)。

(2)Horton 模型为:

$$I(t)=f_c+(f_0-f_c)e^{-bt} \tag{2}$$

式中: $I(t)$ 为入渗率(mm/min); t 为入渗历时(min); f_c 为稳定入渗率(mm/min); f_0 为初始入渗率(mm/min); b 为经验参数。

(3)Kostiakov 模型为:

$$f(t)=at^{-b} \tag{3}$$

式中: $f(t)$ 为入渗率(mm/min); t 为入渗历时(min); a 、 b 为根据试验所求得模型参数。

1.5 推求含碎石土壤水力参数

GAME 模型是基于初始水分均匀分布和恒定水头的条件推导得出,与传统方法相比精度较高。Ma 等^[10]通过试验证明,将实测入渗数据结合 GAME 模型反演含碎石土壤获取的 Brooks-Corey(BC)模型参数,具有较高的精度,且表明土壤的均质性与非均质性并非是影响该模型精度的主要因素。因此,可将该方法直接用于推导含碎石土壤的水力特性(BC 模型参数)。本文利用 BC 模型结合改进的 Green-Ampt

(GAME)模型^[11-12]反演含碎石碳酸盐岩红土水分特征曲线和非饱和导水率为:

$$S=\begin{cases} \frac{\theta-\theta_r}{\theta_s-\theta_r}=\left|\frac{h_d}{h}\right|^n & h<-h_d \\ 1 & h\geq-h_d \end{cases} \tag{4}$$

$$K(S)=K_s\left(\frac{h_d}{h}\right)^m=K_sS^{l+1+2/n} \tag{5}$$

$$\alpha=\frac{n}{2n+2} \tag{6}$$

式中: S 为土壤水饱和度(%); θ 为土壤含水量(cm³/cm³); θ_r 为残余含水量(cm³/cm³); θ_s 为饱和含水量(cm³/cm³); h 为土壤基质吸力(cm); h_d 为进气吸力(cm); n 为与土壤水分特征曲线有关的形状系数; K_s 为饱和导水率(mm/h); m 为常数; l 为孔隙弯曲度因子^[12],通常取 2, $m=(l+1)n+2$; a 为土壤水分剖面的形状系数。

根据已有研究^[12-13]的结果,利用所提出的 GAME 模型来确定 BC 模型的参数(α 、 n 、 K_s 、 h_d)。其中,将土柱入渗数据作为运行 GAME 模型的数据集。除了已知参数 h_p 、 θ_s 、 θ_i 和 θ_r 外,只需要累积入渗量 I (cm)和润湿峰 Z (cm)的时间数据方可确定 BC 模型参数。

首先,累积入渗量与湿润锋之间的关系及 α 和 n 计算公式为:

$$I=AZ \tag{7}$$

$$\alpha=\frac{\theta_s-\theta_i-A}{\theta_i-\theta_r+A} \tag{8}$$

$$n=\frac{2\alpha}{1-2\alpha} \tag{9}$$

式中: A 为湿润区含水率平均增加量(cm³/cm³); Z 为湿润锋面的位置(cm); θ_s 为饱和含水率(cm³/cm³); θ_i 为初始含水率(cm³/cm³); θ_r 为残余含水率(cm³/cm³)。

其次,采用近似解的反函数进行拟合方程求得 K_e 和 s ,从而估计 K_s ^[10]:

$$t=\frac{I}{K_e}-\frac{s^2}{2K_e^2}\ln\left(1+\frac{2K_eI}{s^2}\right) \tag{10}$$

$$K_s=\frac{(\alpha+2)(\theta_s-\theta_i-\alpha(\theta_i-\theta_r))}{(\alpha+1)(\theta_s-\theta_i)}K_e \tag{11}$$

式中: t 为入渗历时(h); I 为累积入渗量(mm); K_e 为有效导水率(mm/h); s 为吸附率(mm/h^{0.5}); K_s 为饱和导水率(mm/h)。

最后用方程估计进气吸力:

$$h_d=\frac{(1+4a)}{2(1+a)}\left(\frac{s^2}{2K_s(\theta_s-\theta_i)}-h_p\right) \tag{12}$$

式中: h_p 为施加在土壤表面的压力水头(cm)。

1.6 数据处理

试验数据均取 3 次重复的平均值,采用 Excel 2017 和 Python 等软件进行数据统计分析和作图分析,使用

1Stopt 软件的最小二乘法对实测入渗数据进行碳酸盐岩红土入渗过程模拟,双因素方差分析和最小显著差异法(LSD)分析不同碎石含量和碎石埋藏深度对含碎石碳酸盐岩红土水力特性的显著性差异。

2 结果与分析

2.1 含碎石夹层对碳酸盐岩红土水分入渗的影响

由图 1 可知,在同一埋藏深度和入渗历时内,随着碎石含量的增加累积入渗量随之减少,说明高碎石含量对土壤水分入渗的抑制作用随着碎石含量的增加而增大。在碎石埋藏深度为 0 cm 时,对照组和 40%碎石含量入渗曲线非常接近,说明碎石在未埋藏下,碎石含量<40%时,对土壤入渗影响不大。入渗初期,累积入渗量随碎石埋藏深度变化甚小,随着入渗历时推移,碎石埋藏深度对累积入渗量的影响逐渐显著。在一定入渗历时内,累积入渗量均随碎石埋藏深度增加而增加。碎石含量为 80%时,累积入渗量

随碎石埋藏深度变化显著。表明本试验中累积入渗量并不是一直随碎石埋藏深度均匀增加。

在 3 种碎石埋藏深度下,初始入渗率、平均入渗率和稳定入渗率均随碎石含量的增加而降低,但稳定入渗历时则相反(图 2)。对照组土壤的稳定入渗率为 19.61 mm/h,其分别是 40%和 80%碎石含量的 1.31~1.56,1.76~2.51 倍。当碎石含量 40%时,土壤平均入渗率和稳定入渗率均随碎石埋藏深度增加而增加,碎石埋藏深度达到 15 cm 时最大,分别是 12.99,82.67 mm/h;但 80%碎石含量土柱稳定入渗率随碎石埋藏深度的增加而减小。由表 1 可知,碎石含量和碎石埋藏深度均对土壤平均入渗率、稳定入渗率和稳定入渗历时影响显著($P<0.01$)。碎石含量和碎石埋藏深度的交互作用对初始入渗率、平均入渗率和稳定入渗率无显著影响($P>0.05$),但对稳定入渗历时呈极显著影响($P<0.001$)。

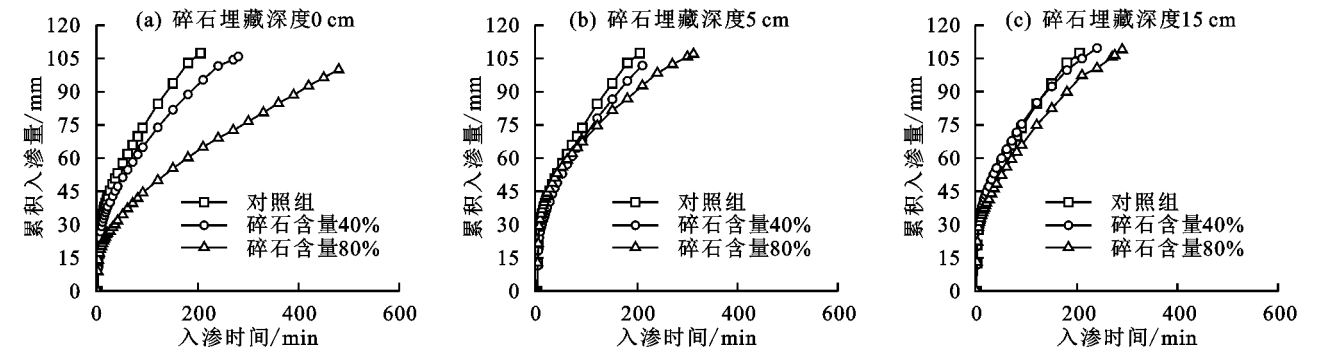


图 1 碎石含量对累积入渗量随时间变化的影响

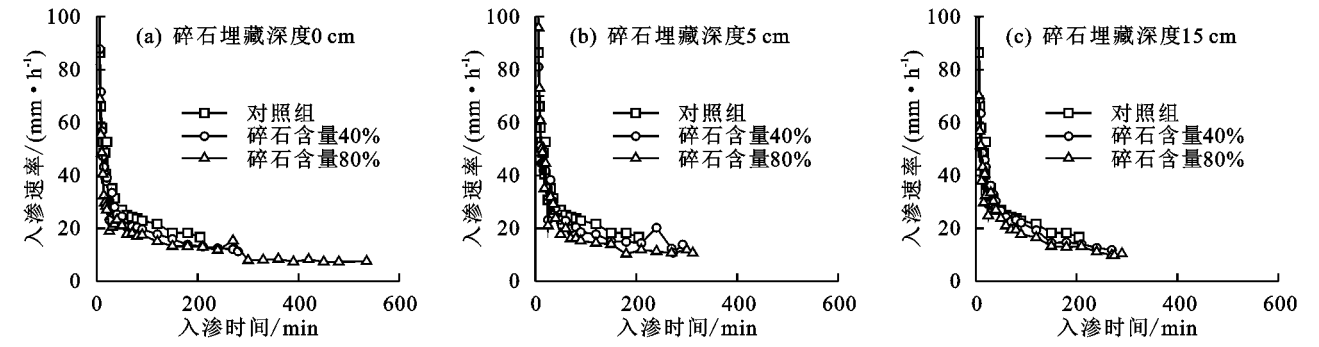


图 2 碎石含量对入渗速率随时间变化的影响

表 1 碎石含量和碎石埋藏深度对碳酸盐岩红土入渗特性影响的双因素方差分析

影响因素	初始入渗率/ ($10^4 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$)	平均入渗率/ ($10^4 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$)	稳定入渗率/ ($10^3 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$)	稳定 入渗历时/h
碎石含量	9.868n.s.	4.884***	8.526***	3.927***
碎石埋藏深度	9.836n.s.	4.731**	7.511**	4.318**
碎石含量×碎石埋藏深度	9.717n.s.	4.687*	7.556n.s.	4.361***

注:***表示 $P<0.001$; **表示 $P<0.01$; *表示 $P<0.05$; n.s.表示差异不显著。

2.2 含碎石碳酸盐岩红土入渗过程模拟分析

选用 Horton 方程、Philip 公式和 Kostiaikov 模型 3 种经典土壤入渗模型进行拟合,分别探讨其对含碎石夹层碳酸盐岩红土入渗的适用性。由表 2 可知,

3 种入渗公式拟合结果均有较高的决定系数 R^2 。在 Horton 方程拟合结果中,决定系数 R^2 均达到 0.99;在 Philip 公式拟合的结果中,决定系数 R^2 最小为 0.84,最大为 0.89;在 Kostiaikov 模型拟合结果中,决

定系数 R^2 最小为 0.96, 最大为 0.99。不同碎石含量和埋藏深度下, 3 种模型的拟合效果排序为 Horton 方程>Kostiakov 模型>Philip 公式, Horton 方程拟合效果最好。

表 2 Horton 入渗方程、Philip 入渗公式和 Kostiakov 模型参数的拟合结果

碎石埋藏深度/cm	碎石含量/%	Horton 方程拟合参数				Philip 公式拟合参数			Kostiakov 模型拟合参数		
		f_0	f_c	$b_{(1)}$	R^2	S	A	R^2	a	$b_{(2)}$	R^2
0	0	19.96	0.52	0.47	0.99	15.69	0.33	0.88	13.10	0.97	0.98
	40	15.46	0.41	0.41	0.99	13.77	0.21	0.89	10.88	0.92	0.97
	80	15.41	0.30	0.50	0.99	11.82	0.13	0.84	9.76	1.01	0.99
5	40	18.61	0.43	0.48	0.99	14.59	0.24	0.86	12.12	0.99	0.98
	80	18.97	0.38	0.41	0.99	16.68	0.18	0.88	13.33	0.95	0.97
15	40	16.99	0.42	0.37	0.99	16.12	0.22	0.89	12.51	0.90	0.96
	80	21.02	0.35	0.47	0.99	16.42	0.19	0.84	13.78	1.03	0.96

注: f_0 为初始入渗率 (mm/min); f_c 为稳定入渗率 (mm/min); $b_{(1)}$ 为 Horton 入渗方程的经验参数; A 为 Philip 方程的稳定入渗率 (mm/min); S 为吸渗率 (mm/min^{0.5}); a 为初始时段入渗率 (mm/min); $b_{(2)}$ 为 Kostiakov 模型中与土壤性质有关的参数; R^2 为决定系数。

2.3 含碎石碳酸盐岩红土对湿润锋进程的影响

湿润锋进程与累积入渗量随入渗历时变化趋势基本相似。在 3 种碎石埋藏深度下, 相同入渗历时内的湿润锋深度均随碎石含量的增加而减小 (图 3)。在入渗初始阶段, 不同碎石含量下土壤湿润锋变化速率较大且湿润锋的推进过程线基本重合, 随着入渗时间推移, 湿润锋变化曲线趋向平缓。在 0 cm 碎石埋藏深度下, 碎石含量为 80% 的湿润锋深度变化速率最小且到达相同湿润锋深度所需时间最长; 在 5~15 cm 碎石埋藏深度下, 碎石含量对湿润锋深度的变化

不具有显著差异性, 变化趋势基本相同, 均表明了碎石含量对湿润锋进程具有一定的阻碍作用。

湿润锋推进速率与碎石埋藏深度呈正相关 (图 3)。当碎石埋藏深度为 0 cm 且碎石含量 < 40% 时, 碎石埋藏深度对湿润锋随入渗历时变化影响较小, 曲线的重叠性较大 (图 3a); 碎石含量为 80% 时, 湿润锋深度随碎石埋藏深度变化显著, 入渗历时为 180 min 时, 不同碎石埋藏深度下 (0, 5, 15 cm) 的平均湿润锋深度分别为 147.0, 197.5, 220.0 mm。表明本试验中湿润锋深度受到碎石含量和碎石埋藏深度的交互影响。

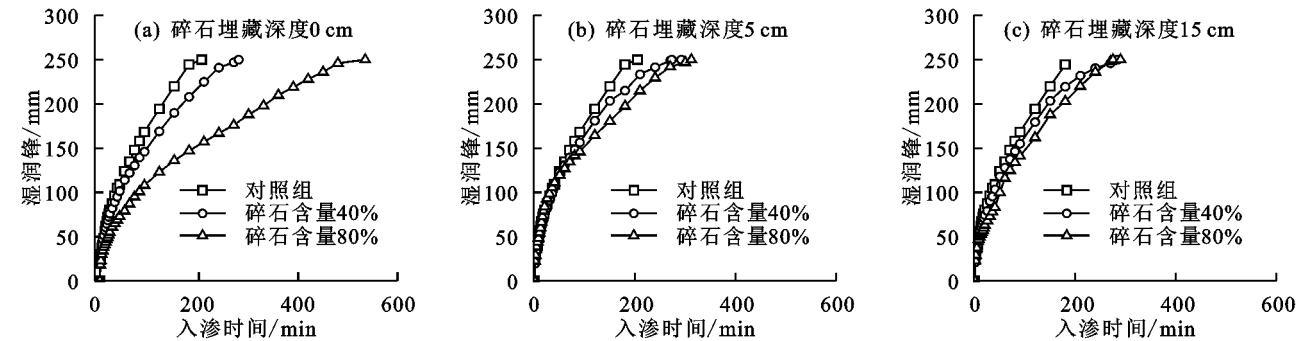


图 3 碎石含量对湿润锋随时间变化的影响

2.4 含碎石碳酸盐岩红土水分特征曲线反演结果

由表 3 可知, 不同碎石埋藏深度下不同碎石含量的湿润区含水率平均增加量 (A)、吸附率 (S)、有效导水率 (K_e) 和饱和导水率 (K_s) 存在明显的差异。其中, 参数 a、n 和 h_d 在同一碎石埋藏深度下 (0~5 cm), 随碎石含量增加而增大, 而 K_s 则相反。值得注意的是, 碎石埋藏深度为 0 cm 且碎石含量为 80% 时, h_d 最大, 为 984.704 mm, 约为对照组的 2.92 倍; 而 K_e 和 K_s 减至最小, 分别为 1.850, 0.715 mm/h, 与对照组相比, 分别降低了 81.49% 和 82.31%。另外, 碎石含量分别为 40%, 80% 时, 随着碎石埋藏深度增加, 参数 K_e 和 K_s 均随之增大, K_s 最大为 2.600~3.943 mm/h。而 h_d 逐渐减小, 碎石埋藏深度达到 15

cm 时最小为 342.669~368.186 mm, 分别约为对照组的 0.98, 0.37 倍。

含碎石夹层对碳酸盐岩红土水力特性有显著的影响 (图 4)。本研究采用 GAME 模型计算了所有处理下土壤水分特征曲线拟合参数。值得注意的是, 对照组反演的土壤水力参数结果与碎石埋藏深度为 15 cm, 含量为 40% 的结果非常相似, 且该 2 组的土壤处理比整个测量压力水头范围内的其他处理保留的水分更少, 而碎石埋藏深度为 15 cm 含量为 80% 和碎石埋藏深度为 0 cm 含量为 40% 的土壤处理保留了更多的水分。另外, 碎石含量均为 40% 时, 岩溶山区碳酸盐岩红土土壤持水能力随碎石埋藏深度的增加而减弱, 其变化趋势为埋藏深度 0 cm>埋藏深度 5 cm>埋藏深度 15 cm。

表 3 基于 Green-Ampt (GAME)模型估算碳酸盐岩红土水力特性参数

碎石埋藏深度/cm	碎石含量/% ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	$A/$	R^2	$s/$ ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-0.5}$)	$K_e/$ ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)	R^2	a	n	$K_s/$ ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)	$h_d/$ mm
0	0	0.389	0.941	52.323	9.995	0.991	0.115	0.300	4.042	337.453
	40	0.440	0.995	43.005	6.865	0.989	0.017	0.036	2.741	350.521
	80	0.437	0.981	33.739	1.850	0.971	0.023	0.047	0.715	984.704
5	40	0.434	0.989	42.739	7.053	0.987	0.028	0.059	2.797	346.679
	80	0.433	0.983	43.037	3.124	0.976	0.030	0.063	1.236	858.205
15	40	0.389	0.988	52.101	9.750	0.983	0.115	0.300	3.943	342.669
	80	0.448	0.983	43.580	6.442	0.959	0.003	0.007	2.600	368.186

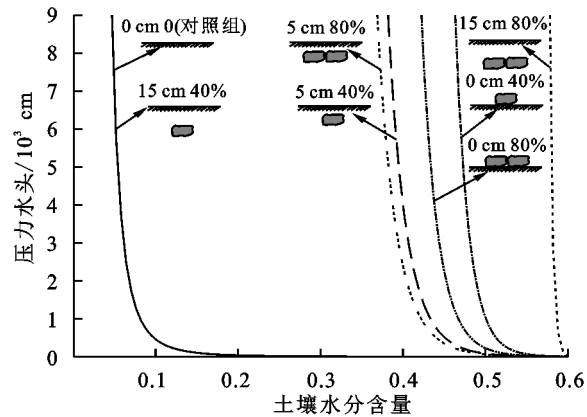


图 4 含碎石夹层对岩溶地区碳酸盐岩红土土壤水分特征曲线的影响

3 讨论

3.1 不同碎石夹层对碳酸盐岩红土入渗的影响

浅表层土壤是土壤水分入渗和蒸发过程发生的重要介质,对农作物的生长、发育具有重要意义。喀斯特地区浅表层土壤中常含有大量碎石,土壤中大量碎石的存在会影响土壤物理特性和水力特性,从而对土壤入渗规律造成影响。碎石作为不透水介质,可以减小土壤的总孔隙度和非毛管孔隙度,并减小水流过水断面的面积,增加孔隙弯曲程度,从而阻碍土壤水分下渗^[14]。在本研究中,当碎石含量分别为 40%,80%,且覆盖在土壤表面时,其累积入渗量、平均入渗率及湿润锋与碎石埋藏深度为 5,15 cm 相比均最小,表明其与碎石埋藏深度呈正相关。这是由于碎石容重大于土壤容重,且随着碎石埋藏深度的加深,本应处于碎石夹层下部的一部分土壤被运移到碎石上部,且这部分土壤不再受到碎石的压密作用,导致土壤总孔隙度和非毛管孔隙度减小的幅度有所降低,从而减小了碎石对土壤入渗特性的影响。因此,加深碎石埋藏位置能削弱碎石对土壤水分入渗的阻碍作用。另外,党宏宇等^[15]通过室内模拟土柱试验发现,煤矸石处于土壤表面时会促进土壤水分入渗,当煤矸石埋藏深度加深时,反而会对土壤水分入渗产生阻碍作用,与本文研究结果不一致。这很有可能是由于试验材质不同导致,煤矸石大孔隙多,透水率相对较高,而本

试验所用碎石材质为石灰岩,其透水性低,从而抑制了土壤水分入渗。

在碎石埋藏深度和粒径(1.5~2.5 cm)不变情况下,且在相同入渗时间内,随碎石含量的增加,累积入渗量逐渐减小,说明高碎石含量对土壤水分入渗具有抑制作用,其抑制作用随碎石含量的增加而增大。主要是因为本研究所选碎石(石灰岩)透水率非常低,对土壤过水通道和有效孔隙度造成影响。当碎石含量和粒径较小时,其累积入渗量因碎石存在而减小了过水断面,导致湿润锋慢速运移且累积入渗量变大。而在较高碎石含量和相同时间内,土壤中细小孔隙的连续性被明显阻断,且土壤水分入渗路径变得弯曲复杂,从而阻碍了土壤入渗。由图 2 可知,在同一碎石埋藏深度下,对照组平均入渗速率和稳定入渗速率均最高,土壤入渗速率随碎石含量的增加而降低,且对照土柱的稳定入渗率分别是 40%和 80%碎石含量的 1.31~1.56,1.76~2.51 倍,40%,80%碎石含量土柱的稳定入渗历时分别是对照土柱的 1.17~2.07,1.32~2.61 倍,均表明了碎石含量对土壤入渗的阻碍作用。吕刚等^[16]基于室内模拟土柱入渗试验发现,粒径(2~5,5~10,10~20,>20 mm)一定时,砾石含量为 0,5%,10%的土壤累积入渗量较大,而砾石质量含量为 15%~30%时土壤累积入渗量较小。该结果变化趋势和本论文研究结果相似。司曼菲等^[17]采用室内模拟土柱试验同样发现,在同种岩石(片麻岩/石灰岩)和相同时间内,随碎石质量含量(15%,45%,65%,90%)的增加,土壤累积入渗量减少,这与本研究相似。此外,土壤本身的种类特性也对含碎石土壤的入渗作用产生一定的影响。如李雪垠等^[7]研究紫色土中砾石夹层对土壤水分入渗的影响得出,紫色土对照土柱的稳定入渗率为 66~72 mm/h,40%砾石含量土柱的稳定入渗率为 42~54 mm/h,而本研究中碳酸盐岩红土对照土柱的稳定入渗率为 16.71~22.95 mm/h,40%碎石含量土柱的稳定入渗率为 12.59~14.98 mm/h,即紫色土对照土柱的稳定入渗率是碳酸盐岩红土的 2.88~4.31 倍,40%砾石含量土柱的稳定入渗

率是碳酸盐岩红土的 2.80~5.00 倍,与紫色土入渗能力相比,碳酸盐岩红土入渗能力相对较弱。因此,尽管高碎石含量增加了土柱中土壤大孔隙,但由于碎石含量的增加,且碎石本身质硬和透水性较低,降低了土柱过水断面,加之碳酸盐岩红土本身的入渗能力较弱,导致产生的大孔隙优先流作用低于过水断面减小的阻碍作用,从而在相同时间内,含碎石夹层的碳酸盐岩红土累积入渗量随碎石含量增加而减少。

另外,在 3 种碎石埋藏深度下,初始入渗率、平均入渗率和稳定入渗率均与碎石含量呈负相关。当碎石含量相同时,碎石埋藏深度为 15 cm 的土壤初始入渗率较大,说明碎石埋藏深度为 15 cm 的土柱有利于入渗初期水分快速下渗,主要原因是入渗初期土壤基质吸力较大,且基质吸力是水分向下运动的主要驱动力。Zhou 等^[18]在黄土高原的研究中指出,碎石含量 <40% 时,入渗速率与碎石含量呈负相关,当碎石含量 >40% 时,入渗速率与碎石含量呈正相关,这与本研究结果不一致。主要是因为当碎石含量 >40% 时,碎石之间开始形成一个更加连续的孔隙系统,从而提高了大孔隙之间的连续性,且连续的大孔隙系统促进了水分入渗。此外,土壤种类特性也会对土壤入渗产生重要影响,碳酸盐岩红土本身入渗能力较弱,土柱中碎石含量增加所形成的大孔隙作用对入渗的影响并不显著^[18]。

随着时间的变化,在碎石埋藏深度和含量均不变的情况下,土柱湿润锋深度随着累积入渗量的增加呈增大趋势且增大速率逐渐变缓。此外,湿润锋推进速率随碎石埋藏深度增加而增加。在入渗初期,各组试验的湿润锋深度差异并不显著,随着试验进行,同一碎石埋藏深度下不同碎石含量湿润锋大小的差异性逐渐显著,且随着碎石含量的增加而逐渐减小。这主要是因为入渗初期土壤水势梯度较大,相比较大的水吸力作用,土壤中碎石对土壤入渗的影响较小,随着试验的进行,土柱中土壤含水量增加,水势梯度减小,较大的水分含量梯度促进湿润锋前进,因而碎石对土壤入渗的控制作用逐渐显著^[6]。另外,本试验所用碎石形状接近方体,但事实上喀斯特地区碎石种类繁多,且土壤入渗特性也受碎石粒径及碎石覆盖度等因素影响^[19],因此,在日后研究中,尚需综合考虑碎石粒径、碎石覆盖度等因素对其进行充分研究。

3.2 不同碎石夹层对碳酸盐岩红土水分特性的影响

由于通过试验获取土壤水分特征曲线的时间和经济成本较高,且受到众多因素的影响致使误差较大,因此,人们常在大量试验数据的基础上,拟合出经验公式反演土壤水分特征曲线参数。其中,BC 模型形式简单,易于推导出土壤水分运动参数。本文根据

实测入渗数据结合 GAME 模型反演出含碎石碳酸盐岩红土的 BC 模型参数,通过该方法反演得到的 BC 模型参数的确定系数均在 0.90 以上,表明该模型适用于含碎石碳酸盐岩红土水力性质(BC 模型参数)的反演,亦证明了土壤的均质性与非均质性并非是影响 GAME 模型精度的主要因素,同时也为碳酸盐岩红土水力参数的选取提供了参考。本试验中,在同一碎石埋藏深度下,随着碎石含量增加,参数 a 、 n 和 h_d 逐渐增加,而 K_s 逐渐减小,这主要是因为碎石含量增加改变了土壤孔隙尺寸、形状及其分布,导致土壤总孔隙度和非毛管孔隙度减小,土壤通透性降低。杨艳芬^[20]对新疆吐哈盆地砂壤土采取水平入渗法推求 BC 模型参数,在碎石粒径为 0.5~1.0 cm 时发现,参数 n 随碎石含量增加呈“N”形变化,转折点出现在碎石含量 30%~40%,与本文研究结果有差异。因为本研究的碎石粒径为 1.5~2.5 cm,是已有研究^[20]碎石粒径的 1.5~5.0 倍,大粒径易形成连通的大孔隙条件对土壤入渗产生促进作用,但也对过水断面产生阻碍作用,由入渗试验可知碳酸盐岩红土本身入渗能力较弱,导致本试验中碳酸盐岩红土大孔隙数量增加所产生的促进作用小于过水断面减小的阻碍作用。此外,该试验中细土容重为 1.5 g/cm³,而在本研究中的细土容重为 1.35 g/cm³,王清等^[21]研究发现,容重较大的土样土壤湿润锋下移速率和渗透系数高于容重较小的土样。因此,随碎石含量的增加,参数 n 呈先增加再减小后增加的趋势,和本研究中参数 n 随碎石含量增加而增加的趋势有所不同。此外,碎石埋藏深度增加会降低碎石对 h_d 和 K_s 的影响,这是由于随着碎石夹层下沉,土壤总孔隙度和非毛管孔隙度减小幅度降低,土壤通透性增加。

此外,由于不同土壤受到土壤质地、结构和容重等因素影响,而呈现出不同的土壤水力特性。本研究发现,对照组土壤持水性与埋藏深度为 15 cm 碎石含量为 40% 的土壤持水性极其相似,均低于其他含碎石夹层土壤持水性,原因是碎石间大孔隙的吸力小于上层土壤孔隙的吸力,导致水分在碎石层表面滞留,阻碍了土壤水分运动,且在低吸力阶段,其土壤水分以重力水形式入渗^[22],导致对照组土壤持水能力较差。

当埋藏碎石含量为 40% 时,其含碎石夹层土壤持水能力随碎石埋藏深度加深而降低,即埋藏深度 0 cm > 埋藏深度 5 cm > 埋藏深度 15 cm,这主要是因为碎石容重通常大于土壤容重,因此,土壤表面埋藏碎石含量为 40% 的土壤容重变大,且土壤总孔隙度和非毛管孔隙度减小,阻碍土壤水分下渗,导致土壤表面埋藏碎石含量为 40% 的土壤持水能力更好,这与李源等^[22]研究结果非常相似。

在同一碎石埋藏深度(0,5 cm)下,含碎石夹层土壤持水能力随碎石含量增加而减弱。这主要是因为,在低碎石含量中,土壤水分主要存在于较小孔隙里且不易流动,而对于高碎石含量夹层,其土壤总孔隙度和非毛管孔隙度变大,水分自由流动能力增强,且在低吸力阶段土壤水分以重力水形式排出。因此,其高碎石含量夹层土壤持水能力较差。但值得注意的

是,在碎石埋藏深度为 15 cm 时,其土壤持水能力随碎石含量增加而增强,主要是因为该碎石夹层上覆土壤厚度较厚,且碎石含量越高其大孔隙数量越多,由于碎石之间大孔隙的黏着力小于上层土壤孔隙的黏着力,水便在碎石夹层表面积聚,导致碎石含量越高的土石交界面处更加接近饱和,导致碎石埋藏深度为 15 cm 碎石含量为 80% 的土壤持水性最强。

表 4 含碎石土壤水力特性的以往研究结果

参考 文献	试验设计		土壤 类型	碎石/砾石(其他) 影响因素	研究结果
	土柱直径 (装填高度)/cm	供水 水头/cm			
胡廷飞等 ^[5]	10(35)	2	红壤	砾石覆盖厚度 (0,3,6,9,12 cm)	①砾石覆盖显著增加赤水土壤湿润锋迁移距离; ②提高土壤剖面平均含水率
Lv 等 ^[23]	人工模拟降雨	—	黄土	岩石碎片大小(10~40,40~70,70~100 cm); 含量(0,20%,40%,60%)	①研究区径流率随岩石碎片含量的增加而降低; ②岩石碎片的存在对土壤侵蚀有明显的减缓作用,其含量比岩石碎片大小的作用更显著
吕刚等 ^[16]	10(100)	5	棕壤	粒径(2~5,5~10,10~20,>20 mm) 含量(0,5%,10%,15%,20%,25%,30%)	①粒径一定时,砾石阻碍土壤入渗; ②砾石含量<20%时,土壤累积入渗量随粒径的增加而增大
李雪垠等 ^[7]	(20)	5	紫色土	粒径(10~20,20~76 mm) 含量(0,10%,20%,30%,40%)	①相同砾石粒径下,砾石阻碍土壤入渗; ②砾石粒径大小与其对湿润锋的阻碍程度相似
Qiu 等 ^[24]	—	—	黄土	覆盖厚度(0,2,4,6,8,10 cm); 粒径(2~5,5~20,20~40,40~60,60~80 mm)	①砾石覆盖显著抑制土壤蒸发; ②粒径大小和覆盖度首次被发现为覆盖阻力的敏感指标
Wang 等 ^[25]	人工模拟降雨	—	粗骨土	岩石碎片覆盖范围(0~40%) 粒径(5~20,20~40 mm)	岩石碎片覆盖导致地表径流延迟,入渗和地下径流增加,沉积物浓度和土壤流失减少
党宏宇等 ^[15]	19(40)	3	石灰土	土石隔层位置(上层(0~20 cm),中层(10~30 cm), 下层(20~40 cm))	①土石隔层位置和碎石粒径对初始入渗率没有显著影响; ②当土石隔层位置一定时,碎石粒径较小有利于土壤水分入渗

注:—表示无数据。

4 结 论

相同碎石埋藏深度下,高碎石含量对碳酸盐岩红土水分入渗具有显著抑制作用。反演参数 a 、 n 和 h_d 随碎石含量增加而增大,而 K_s 相反。

相同碎石含量下,累积入渗量和湿润锋均与碎石埋藏深度呈正相关关系。当碎石含量为 80% 时,埋藏深度为 0 cm 的土壤累积入渗量历时最长,分别是埋藏深度为 5,15 cm 土柱的 1.71,1.84 倍。

不同碎石含量和埋藏深度下,3 种模型的拟合效果排序为 Horton 模型>Kostiakov 模型>Philip 模型,Horton 模型更适用于模拟喀斯特地区水分入渗过程。

通过 GAME 模型反演 BC 模型参数绘制土壤水分特征曲线知,对照组土壤持水性最低;当碎石含量为 40% 时,不同碎石埋藏深度下土壤持水性大小为埋藏深度 0 cm>埋藏深度 5 cm>埋藏深度 15 cm;在同一碎石埋藏深度下(0,5 cm),含碎石夹层土壤持水性随碎石含量增加而减弱,但碎石埋藏深度为 15 cm 时则相反。

参考文献:

[1] Qiao J B, Zhu Y J, Jia X X, et al. Development of pe-

dotransfer functions for soil hydraulic properties in the critical zone on the Loess Plateau, China[J].Hydrological Processes,2018,32:2915-2921.

[2] 李春茂,徐勤学,吴攀,等.不同土地利用方式峰丛坡地土壤入渗特征及其模拟[J].水土保持研究,2019,26(1):47-52.

[3] Zhou L G, Wang X D, Wang Z Y, et al. The challenge of soil loss control and vegetation restoration in the karst area of southwestern China[J].International Soil and Water Conservation Research,2020,8(1):26-34.

[4] 张文源,王百田.贵州喀斯特石漠化分类分级探讨[J].南京林业大学学报(自然科学版),2015,39(2):148-154.

[5] 胡廷飞,王辉,胡传旺,等.砾石覆盖厚度对斥水土壤入渗特性的影响及模型优选[J].水土保持学报,2019,33(2):17-22,29.

[6] 朱元骏,邵明安.含砾石土壤降雨入渗过程模拟[J].水科学进展,2010,21(6):779-787.

[7] 李雪垠,李朝霞,王天巍,等.紫色土中砾石夹层对土壤水分入渗的影响[J].水科学进展,2016,27(5):662-669.

[8] 房凯,郑加兴,张俐,等.砾石覆盖对土壤入渗特性影响的试验研究[J].中国农村水利水电,2020(2):1-10.

[9] Cerda A. Effects of rock fragment cover on soil infiltration, interrill runoff and erosion[J].European Journal of

Soil Science,2001,52(1):59-68.

[10] Ma D H, Zhang J B, Horton R, et al. Analytical method to determine soil hydraulic properties from vertical infiltration experiments[J]. Soil Science Society of America Journal, 2017,81(6):1303-1314.

[11] Brooks R H, Corey A T. Hydraulic properties of porous media[D]. Fort Collins: Colorado State University,1964.

[12] Ma D H, Zhang J B, Lu Y X, et al. Derivation of the relationships between Green-Ampt model parameters and soil hydraulic properties[J]. Soil Science Society of America Journal, 2015,79(4):1030-1042.

[13] Ma D H, Zhang J B, Lai J B, et al. An improved method for determining Brooks-Corey model parameters from horizontal absorption[J]. Geoderma, 2016, 263:122-131.

[14] 王小燕,蔡崇法,李鸿,等.三峡库区碎石含量对紫色土容重和孔隙特征的影响[J].土壤学报,2017,54(2):379-386.

[15] 党宏宇,邵明安,陈洪松,等.不同煤矸石厚度及位置对土壤水分入渗过程的影响[J].水土保持学报,2012,26(3):62-66.

[16] 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.

[17] 司曼菲,甘永德,刘欢,等.土石混合介质碎石性质对土壤入渗和产流过程影响[J].南水北调与水利科技, 2018,16(2):59-63,107.

[18] Zhou B B, Shao M A, Shao H B. Effects of rock fragments on water movement and solute transport in a Loess Plateau soil[J]. Comptes Rendus-Géoscience, 2009,341(6):462-472.

[19] 马晨雷,戴翠婷,刘窑军,等.砾石覆盖对紫色土坡面流水动力学参数的影响[J].水土保持学报,2019,33(6):150-155,161.

[20] 杨艳芬.土石混合介质入渗与干旱区滴灌葡萄生长发育特征试验研究[D].西安:西安理工大学,2010.

[21] 王清,张民,王通.不同石砾条件对土壤水分入渗的影响[J].湖南农业科学,2012,21(13):43-47,50.

[22] 李源,宋维峰,马建刚.中国西南水梯田土壤水分特性研究:以哈尼梯田为例[J].水土保持学报,2021,35(2):160-169.

[23] Lv J R, Luo H, Xie Y S. Effects of rock fragment content, size and cover on soil erosion dynamics of spoil heaps through multiple rainfall events[J]. Catena, 2019,172:179-189.

[24] Qiu Y, Xie Z K, Wang Y J, et al. Influence of gravel mulch stratum thickness and gravel grain size on evaporation resistance[J]. Journal of Hydrology, 2014,519:1908-1913.

[25] 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, 2012,151:234-242.

(上接第 100 页)

[10] 李秀芬,蔡慧君,金磊,等.辽西北土地利用动态变化及影响因素分析[J].沈阳农业大学学报,2019,50(3):257-265.

[11] 卓静,朱延年,何慧娟,等.生态恢复工程对陕北地区生态系统格局的影响[J].生态学报,2020,40(23):8627-8637.

[12] 李华林.塔里木河上游胡杨林遥感动态监测与分析[D].贵阳:贵州大学,2020.

[13] 吕志强,庆旭瑶,任玉芬,等.山地城市河流土地利用结构对水质的影响:以重庆市为例[J].湖泊科学,2016,28(2):319-327.

[14] 钟国敏.河南省典型市域土地利用变化及与土壤多样性的关联分析[D].郑州:郑州大学,2013.

[15] 徐增让,邹秀萍,羌塘高原自然保护区社会生态效果评价[J].生态学报,2020,40(23):8743-8752.

[16] 黄麟,曹巍,巩国丽,等.2000—2010 年中国三北地区生态系统时空变化特征[J].生态学报,2016,36(1):107-117.

[17] 王秀明,苏耀明,许乃中,等.广东南岭生态功能区系统服务功能与人为扰动因素研究[J].环境影响评价, 2020,42(3):52-56.

[18] 肖思思,吴春笃,储金字.1980—2005 年太湖地区土地利用变化及驱动因素分析[J].农业工程学报,2012,28(23):1-11.

[19] 尚雪,何钊全,张铜会.增强型植被指数时空变化特征及其驱动机理[J].森林与环境学报,2020,40(5):478-485.

[20] 胡光印,董治宝,张正偲,等.若尔盖盆地起沙风风况与输沙势特征[J].中国沙漠,2020,40(5):20-24.

[21] 赵国松,刘纪远,匡文慧,等.1990—2010 年中国土地利用变化对生物多样性保护重点区域的扰动[J].地理学报,2014,69(11):1640-1650.

[22] 于博.康平县生态清洁小流域治理措施研究[J].黑龙江水利科技,2021,49(2):179-181.

[23] 刘瀛.辽宁省康平县沙化土地监测与动态分析[J].防护林科技,2020(12):62-63,81.

[24] 戴闻书,潘辉,赵宏利.浅谈康平县生态建设对土地保护和利用的作用[Z].沈阳市委、沈阳市人民政府:沈阳市科学技术协会,2011:6.