

引用格式:冯娅瑛,牟丽敏,周娜娜,韩珍. 喀斯特地区含碎石土壤水分扩散能力[J]. 山地学报, 2024, 42(2): 185-195.

FENG Yaying, MOU Limin, ZHOU Nana, HAN Zhen. Moisture diffusion of soils with gravel in the karst region [J]. Mountain Research, 2024, 42(2): 185-195.

喀斯特地区含碎石土壤水分扩散能力

冯娅瑛,牟丽敏,周娜娜,韩珍*

(贵州大学 林学院,贵阳 550025)

摘要: 中国喀斯特地区基岩裸露、土层浅薄,碎石(粒径 $>2\text{ mm}$) 在土壤中广泛分布,土壤水分迁移具有一定复杂性。已有研究多集中于水动力条件下土壤的垂直入渗分析,针对喀斯特含碎石土壤的水分水平扩散能力方面的研究鲜见。本研究以贵阳花溪区含碎石土壤为研究对象,通过水平土柱扩散法对比分析不同碎石含量(0、10%、20%、30%、40%)土壤湿润锋的前进状况以及土壤水分扩散率变化特征,探讨喀斯特地区不同碎石含量的土壤水分扩散能力。结果表明:(1)碎石含量相同时,湿润锋前进距离和前进速率与时间之间均呈幂函数关系;随着水分水平扩散的进行,土柱的体积含水率逐渐减小,玻尔兹曼(Boltzmann)变换参数 λ 则随着体积含水率的减小而呈指数增大;随着体积含水率减小,土壤水分扩散率呈递减趋势。(2)碎石含量不同时,湿润锋前进距离和平均速率随着碎石含量的增加总体呈现出增大趋势,但碎石含量为 10% 时湿润锋前进距离与平均速率均有所减小;同一位置的体积含水率随碎石含量的增加而增加;体积含水率相同条件下,土壤水分扩散率随碎石含量增加呈递增趋势。本研究结果可为喀斯特地区土壤水文循环和过程研究提供科学参考。

关键词: 碎石含量;水分扩散;湿润锋;喀斯特地区

中图分类号: S157.1

文献标志码: A

中国西南地区有世界上最大的喀斯特连续带^[1]。喀斯特地区土层浅薄、基岩裸露率高^[2],碎石(粒径 $>2\text{ mm}$) 在土壤中广泛分布^[3]。土壤碎石的富积改变了喀斯特地区土壤水文特性,其土壤水分运动过程较不含碎石土壤存在明显差异。土壤水分运动是土壤元素和营养物质运移的媒介,是土壤表面与内部生物赖以生存的关键过程^[4-5]。开展喀斯特地区不同碎石含量土壤水分扩散运动研究、明确喀斯特地区土壤水文循环过程,对推动区域生态系统可持续发展具有实际意义^[6]。

粒径 $>2\text{ mm}$ 的砾石土水分运动规律是土壤水分研究的热点问题^[7-8]。土壤水分入渗受土壤水分

运输中碎石大小和位置分布的影响^[9],表现出土石介质中碎石含量增加阻碍水分下渗或促进土壤水分入渗和稳渗的差异性^[10-11]。研究发现,土壤表层砾石覆盖增加了土壤水分累积入渗量^[12],完全插入土壤表层的碎石使土壤入渗率和土壤含水率降低^[13],埋藏于土壤中的碎石埋藏深度与累计入渗量存在显著正相关关系^[3],较大体积的砾石聚集时能明显增强其渗水性^[14]。

上述研究多考虑水动力条件下含碎石土壤(粗砾土)垂直入渗研究,而对含碎石土壤水分扩散能力的研究鲜见。土壤水分扩散率表征了水分在土壤中的扩散能力,是以土壤基质势为主要动力的水分

收稿日期(Received date): 2023-10-24;改回日期(Accepted date): 2024-03-22

基金项目(Foundation item): 贵州省基础研究项目(自然科学)(黔科合基础-ZK[2023]一般 065)。[Guizhou Provincial Basic Research Program (Natural Science) (QKHJC-ZK[2023]YB65)]

作者简介(Biography): 冯娅瑛(2001-),女,贵州遵义人,硕士研究生,主要研究方向:土壤侵蚀及流域治理。[FENG Yaying (2001-), female, born in Zunyi, Guizhou province, M.Sc. candidate, research on soil erosion and watershed management] E-mail: fengyayi0@163.com

* 通讯作者(Corresponding author): 韩珍(1994-),女,博士,讲师,主要研究方向:土壤侵蚀及流域治理。[HAN Zhen (1994-), female, Ph.D., lecturer, research on soil erosion and watershed management] E-mail: zhan@gzu.edu.cn

运动过程,且扩散速率随梯度势的增加而逐渐加快^[15],其值是分析土壤水力性质的重要参数^[16]。碎石的存在改变了土壤的结构特性,导致水分过水断面减少,同时土壤的孔隙弯曲度增加,造成了含碎石土壤中水分扩散的复杂化^[17-18]。

喀斯特地区特殊的地质条件造成该区生态环境脆弱,工程性缺水问题已成为制约社会经济发展的重要因素^[19]。本研究以喀斯特地区含碎石土壤为研究对象,通过水平土柱扩散法分析喀斯特地区不同碎石含量(0、10%、20%、30%、40%)的土壤水分扩散能力。本研究有利于了解碎石对土壤水分扩散过程的影响,深化喀斯特地区土壤水分运动的基础性研究,为喀斯特地区土壤水文循环和过程研究提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

花溪区(106°07'E ~ 107°17'E, 26°11'N ~ 26°55'N)地处黔中高原丘陵区中部、贵州省贵阳市南部,海拔 1100 ~ 1300 m,是长江和珠江两大水系的上游交错地带^[20](图 1)。属亚热带温湿季风气候区,降水丰富,主要集中在夏季,多年平均降水量为 1129.5 mm,年日照时长约为 1278 h^[21],年均温 14.9 °C^[22]。区内地貌以山地、丘陵为主^[23],山高坡陡,在暴雨季节易造成水土流失。该区域属中亚热带常绿阔叶林红壤-黄壤地带,其中黄壤占该区总面积的 35.36%^[24]。

1.2 研究方法

1.2.1 供试土样

试验选取喀斯特广泛分布的黄壤为供试土壤。试验前对土壤基本物理性质进行测定,其中土壤容重使用环刀法测定,机械组成使用比重计法测定^[25]。研究区土壤基本物理性质如表 1 所示。

1.2.2 试验装置

试验采用室内模拟水平土柱^[5]的方法,在一定

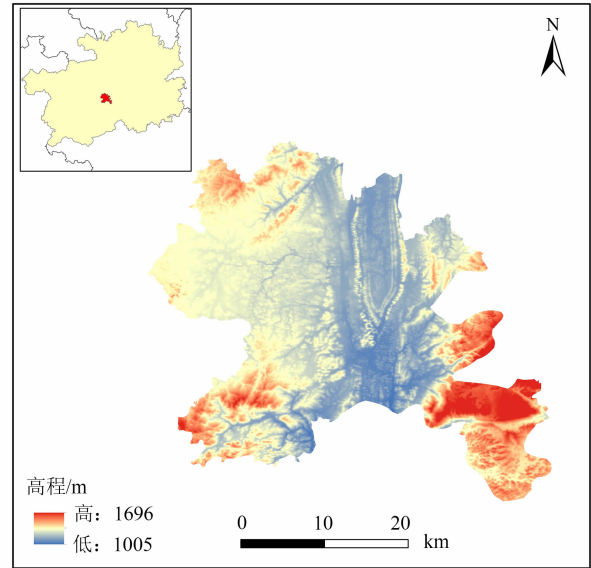


图 1 研究区地理位置图

Fig. 1 Geographic location of study area

厚度条件下,水平土柱法可以消除重力影响,土壤基质吸力为土柱内水分水平运动提供动力。室内模拟水平土柱装置如图 2。土柱总长 60 cm,内径为 10 cm,与马氏瓶相连,实现自动供水。土柱与马氏瓶均用刻度尺胶带在管(瓶)身标注,以厘米为单位,精确到毫米;贮水室长 5 cm,过滤层填装 5 cm 石英砂以达到缓冲水流的目的,使水流保持层流状态;填土室长 50 cm,填装试验土样 50 cm。

1.2.3 样品采集及处理

装样具体步骤如下:从土壤样本中去除动植物的残留物及其他不纯物质,在通风环境下风干一周后将土壤磨碎并过 2 mm 筛子备用。将直径为 2 ~ 10 mm 碎石与土壤按照 0、10%、20%、30%、40% 的比例混合均匀,结合贵州喀斯特地区土壤平均容重^[26],制成容重为 1.20 g/cm³ 的含碎石土壤土样,再装入上述试验装置的有机玻璃管内(表 2)。

试验设置碎石含量为 0、10%、20%、30%、40% 五个处理,各三个重复,其中以碎石含量为 0 作为对照组。

表 1 土壤基本物理特性

Tab. 1 Fundamental physical properties of soil

试验土壤	含水率/%	容重/ (g/cm ³)	机械组成		
			砂粒(2 ~ 0.05 mm)	粉粒(0.05 ~ 0.002 mm)	粘粒(<0.002 mm)
粘土	37.06	1.20 ± 0.08	4.24 ± 0.61	39.16 ± 1.55	56.60 ± 2.00

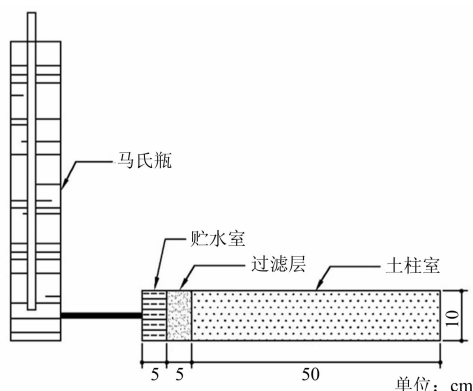


图2 水分扩散试验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the moisture diffusion test device

表2 不同碎石含量土样装样情况

Tab. 2 Loading of the soil samples with different gravel contents

碎石含量/%	碎石重量/g	土壤重量/g
0	0	4712.39
10	471.24	4241.15
20	942.48	3769.91
30	1413.72	3298.67
40	1884.96	2827.43

1.2.4 试验过程

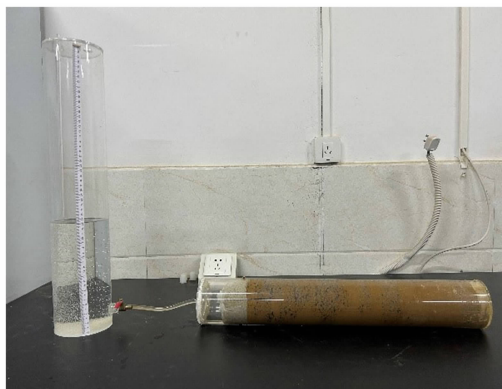
试验开始后,观测并记录湿润锋前进情况与马氏瓶内水位下降情况,每组试验均需在湿润锋到达整数刻度时记录时间。每次试验完成后排去贮水室内剩余的水,打开有机玻璃管底盖,从湿润锋端向土柱进水端依次取出整数刻度位置的湿土样放入铝盒中测定计算土样的含水率。

1.2.5 数据计算及分析

非饱和土壤水分扩散率可以反映土壤孔性、孔隙分布和导水性,受土壤质地、土壤密度和土壤有机质等诸多因素的影响^[27],是土壤水分运动的重要参数。利用理查兹(Richards)一维水平流方程和玻尔兹曼变换可求出土壤水分扩散率。土壤一维水平流的微分方程如下:

$$\begin{cases} \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} [D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x}] \\ \theta = \theta_a & x > 0, t = 0 \\ \theta = \theta_b & x = 0, t > 0 \\ \theta = \theta_a & x > 0, t \rightarrow \infty \end{cases} \quad (1)$$

式中, θ 为距进水边界 x 处的体积含水率; θ_a 为风干



土含水率; θ_b 为土柱进水端含水率; x 为土柱中断面距始端的距离; t 为入渗时间; $D(\theta)$ 为土壤水分扩散率。

将式(1)用玻尔兹曼变换,转化为常微分方程, $D(\theta)$ 的计算公式为:

$$D(\theta) = \frac{-1}{2(d\theta/d\lambda)} \int_{\theta_a}^{\theta} \lambda d\theta \quad (2)$$

式中, $\lambda = xt^{-1/2}$ 为玻尔兹曼变换参数。

试验时测算 t 时刻土柱的体积含水量并计算对应的 λ 值,绘制 $\theta = f(\lambda)$ 关系曲线。将式(2)改写为差分形式:

$$D(\theta) = -\frac{1}{2} \frac{\Delta \lambda}{\Delta \theta} \sum_{\theta_a}^{\theta} \lambda \Delta \theta \quad (3)$$

然后计算出 $D(\theta)$ 。

使用 Excel 2019 软件记录并整理数据,使用 Origin 2022 进行拟合分析与图表绘制。

2 结果与分析

2.1 不同碎石含量土壤水分水平扩散过程的时间动态特征

与不含碎石土样进行比较发现,碎石含量为20%、30%和40%的试验土样湿润锋前进的平均速率分别为不含碎石土样的1.31、1.42和5.89倍,而碎石含量为10%时则为不含碎石土样的0.86倍,平均速率随碎石含量的增加总体呈增大的趋势。碎石含量相同时扩散速率均随着时间的增加而减缓,0~40%五组最大速率与最小速率的差值分别为0.229、0.250、0.365、0.218和0.746 cm/min,除30%组外,其余处理的速率差值均随着碎石含量的

增大而增大(表3、图3、图4)。可以发现,此次试验总体呈现出试验土样的扩散距离、最大速率、最小速率和平均速率随着碎石含量的增大而增大。当碎石含量为20%~40%时水平扩散距离随碎石含量的增加而增加,平均速率值增大,且40%时增幅显著;当碎石含量为10%时水平扩散距离较0时短,平均速率值也减小,由此可知,对扩散距离与平均速率来说10%的碎石含量是此次试验中的一个阈值。

通过对湿润锋的前进速率、前进距离与时间的关系进行拟合得到二者之间呈幂函数关系。拟合后

表3 试验土样的湿润锋前进情况

Tab. 3 Moisture front advance of the test soil samples

碎石含量/%	距离/cm	历时/min	前进速率 cm/min		
			最大值	最小值	均值
0	25.100	4320	0.235	0.006	0.032 ± 0.01b
10	16.500	4320	0.253	0.004	0.028 ± 0.00ab
20	36.200	4320	0.373	0.008	0.042 ± 0.01b
30	38.800	4320	0.227	0.009	0.046 ± 0.00b
40	50.000	481	0.847	0.100	0.191 ± 0.04a

注:同列不同小写字母表示不同碎石含量之间各指标在0.05水平上差异显著。

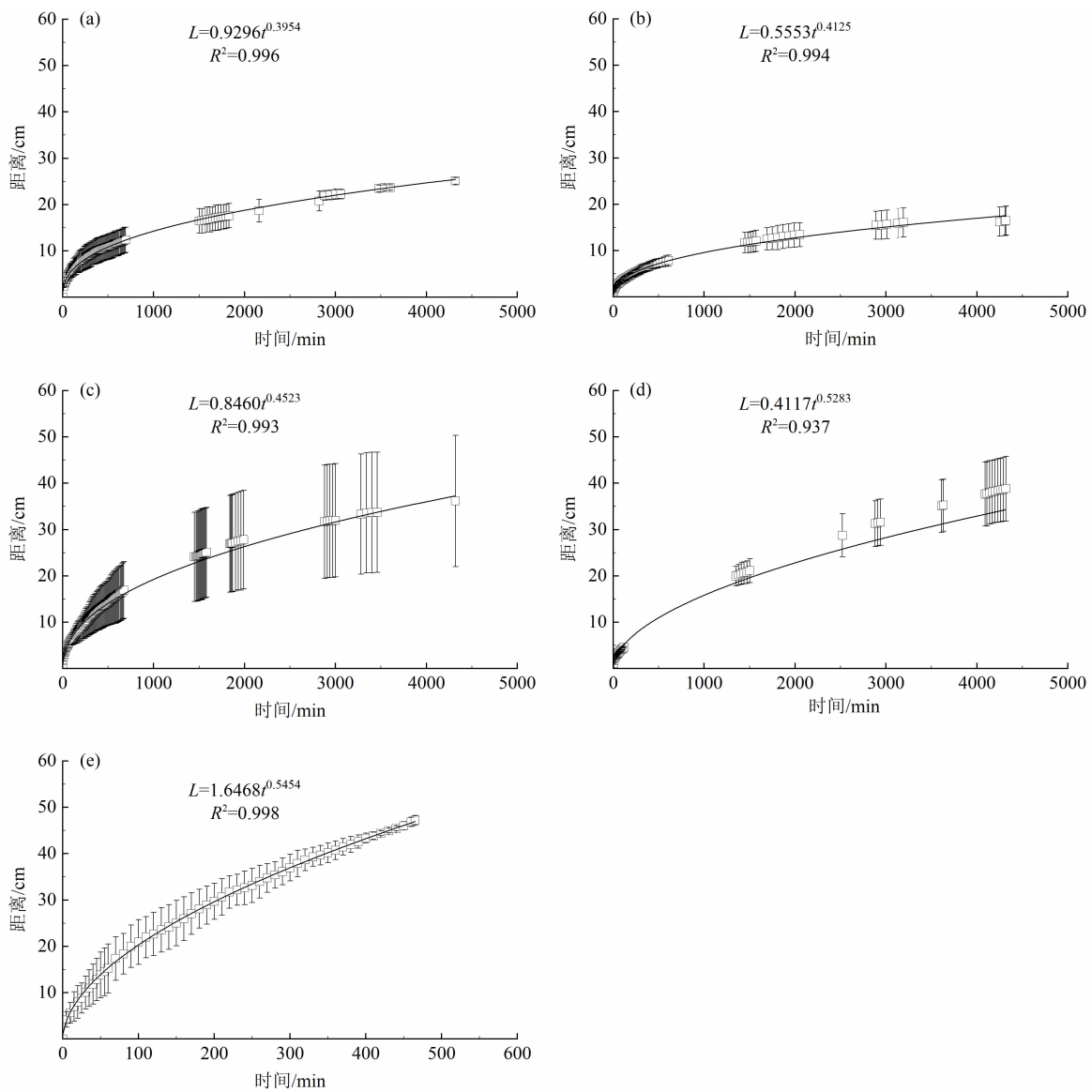


图3 试验土样的湿润锋前进 $L-t$ 关系图:

(a) 碎石含量0%; (b) 碎石含量10%; (c) 碎石含量20%; (d) 碎石含量30%; (e) 碎石含量40%

Fig. 3 $L-t$ relationship of the moisture front forward for the test soil samples: (a) gravel content of 0;

(b) gravel content of 10%; (c) gravel content of 20%; (d) gravel content of 30%; (e) gravel content of 40%

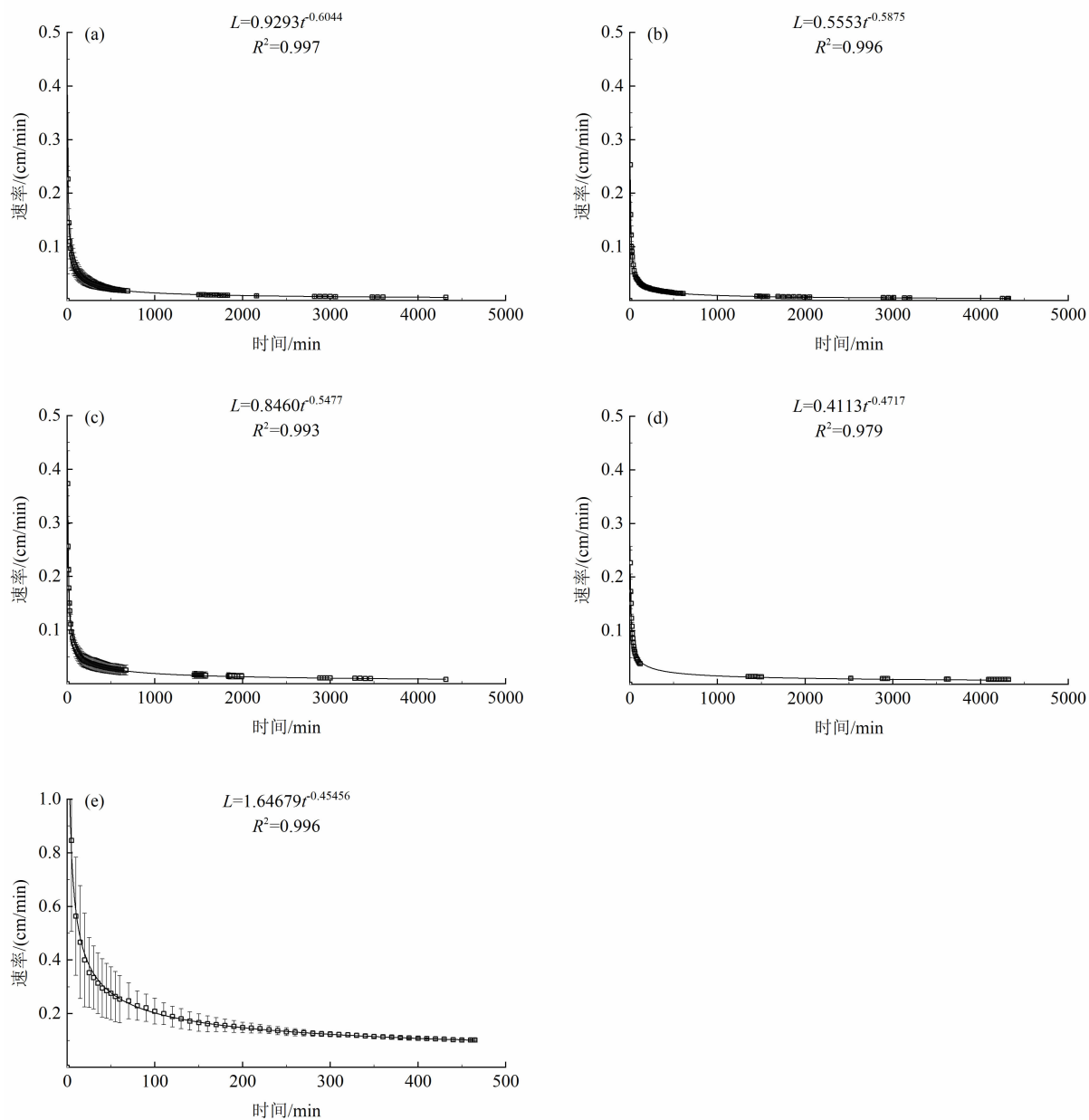


图4 试验土样的湿润锋前进 $v-t$ 关系曲线:

(a) 碎石含量 0%; (b) 碎石含量 10%; (c) 碎石含量 20%; (d) 碎石含量 30%; (e) 碎石含量 40%

Fig. 4 Advance $v-t$ relationship curve of the wetting front of the test soil sample: (a) gravel content of 0;

(b) gravel content of 10%; (c) gravel content of 20%; (d) gravel content of 30%; (e) gravel content of 40%

所有数据的决定系数 R^2 均 ≥ 0.900 , 拟合度较高, 也表明拟合方程预测的可靠程度高(图3、图4)。

2.2 土壤水分水平扩散特征对碎石含量变化的响应

从碎石含量 0 ~ 40% 每组试验测得 t 时刻 x 处的体积含水率分别为 49.78% ~ 12.84%、49.34% ~ 15.77%、46.27% ~ 10.31%、38.04% ~ 6.17% 和 32.23% ~ 4.14%; λ 则分别为 0.015 ~ 0.244、0.016 ~ 0.245、0.0368 ~ 0.4031、0.017 ~ 0.343 和

0.052 ~ 0.920。二者的关系曲线表明在不同碎石含量的土壤中, θ 与 λ 的曲线变化趋势基本一致, θ 随 λ 的增大而逐渐减小。使用指数函数对二者关系曲线进行拟合, 决定系数 R^2 为 0.945 ~ 0.974, 拟合效果较好(图5、表4)。

2.3 碎石含量对土壤水分扩散率的影响

在求得 θ 、 λ 后, 根据式(3)进行计算得出试验土样的 $D(\theta)$ 从碎石含量 0 ~ 40% 分别为 0 ~ 0.136、

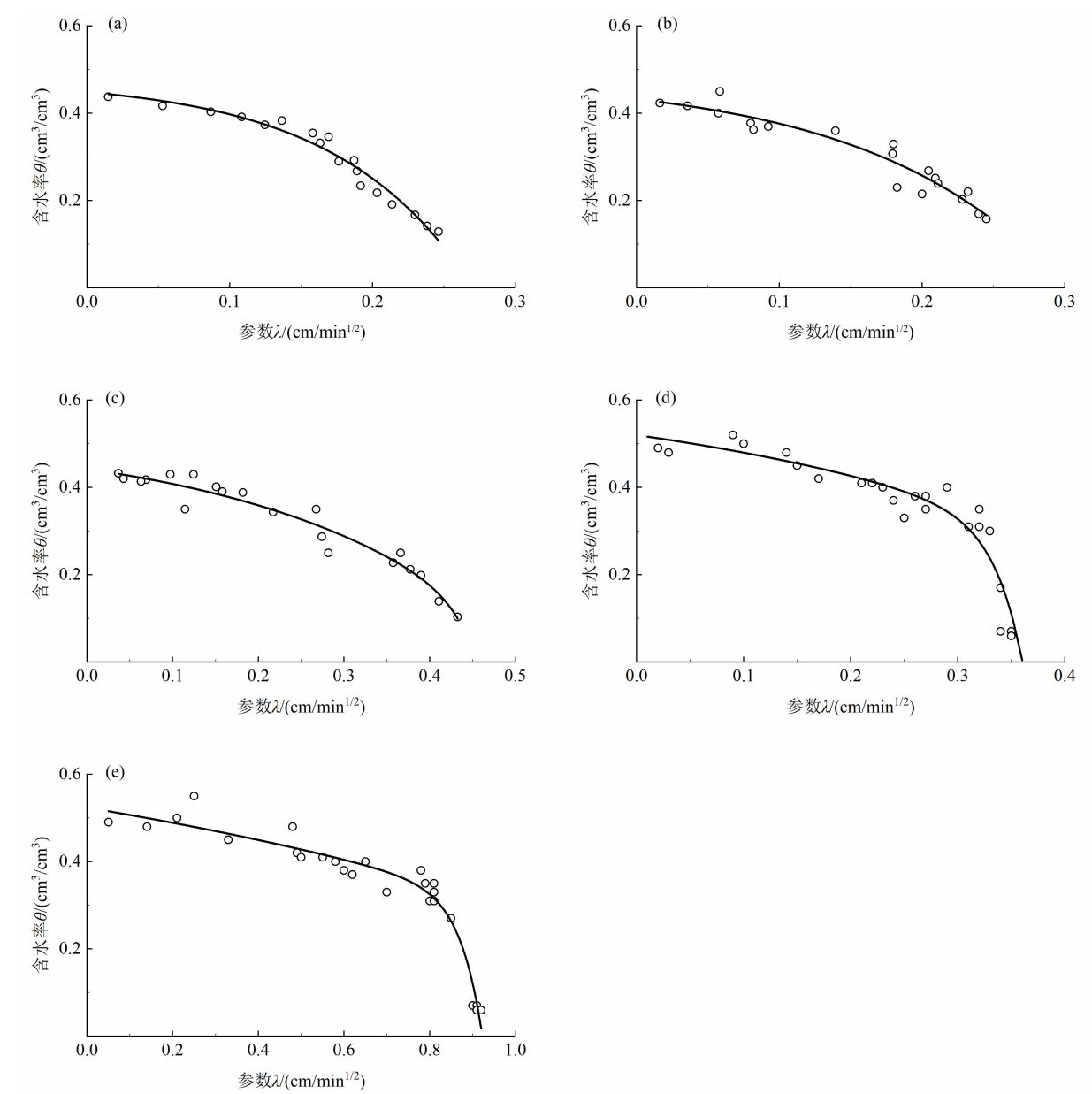


图 5 试验土样的 $\theta=f(\lambda)$ 关系曲线：
(a) 碎石含量 0%；(b) 碎石含量 10%；(c) 碎石含量 20%；(d) 碎石含量 30%；(e) 碎石含量 40%
Fig. 5 Relationship curve of $\theta=f(\lambda)$ for the test soil samples: (a) gravel content of 0%；(b) gravel content of 10%；
(c) gravel content of 20%；(d) gravel content of 30%；(e) gravel content of 40%

表 4 试验土样的 $\theta=f(\lambda)$ 关系曲线拟合公式

碎石含量/%	$\theta=f(\lambda)=y_0+A_1e^{-\lambda/t'}+A_2e^{-\lambda/t''}$					R^2
	y_0	A_1	t'	A_2	t''	
0	0.546	-0.014	-0.093	-0.017	-0.093	0.967
10	0.674	-1.850	-0.040	-0.567	-0.489	0.945
20	0.723	-0.712	-0.130	-0.449	-0.078	0.949
30	0.441	-0.037	-0.187	-0.020	-0.188	0.955
40	0.358	-0.014	-0.419	-0.021	-0.419	0.974

0 ~ 0.371、0.001 ~ 3.137、0.001 ~ 7.200 和 0.002 ~ 7.941。根据经验公式 $D(\theta) = ce^{d\theta}$ 对其与土壤含水率之间进行关系拟合并绘制土壤水分扩散率曲线散点图。由图可知,对于同一碎石含量的试验土样,扩散率随含水率的增大而增大;对于不同碎石含量的试验土样,随着碎石含量的增加,扩散率也呈现出增大的趋势(图6)。因此,碎石存在能增大土壤水分扩散率,有利于土壤水分扩散。

对于相同碎石含量的试验土样,使用指数函数对二者关系进行拟合,各处理的决定系数 R^2 为 0.893 ~ 0.976,拟合效果较好,表明本试验土样的 $D(\theta)$ 与 θ 符合经验公式,呈指数型曲线变化(表5)。

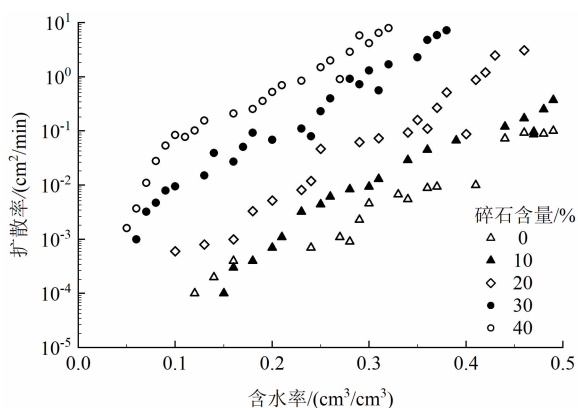


图6 试验土样的水分扩散率曲线

Fig. 6 Moisture diffusivity curves of the test soil samples

表5 试验土样的扩散率关系曲线拟合公式

Tab. 5 Diffusivity relationship curve fitting equation for the test soil samples

碎石含量/%	$D = ce^{d\theta}$		R^2
	c	d	
0	5.252	15.691	0.923
10	7.582	26.488	0.893
20	3.691	24.803	0.897
30	2.680	26.889	0.976
40	0.003	24.401	0.942

3 讨论

湿润锋推移速度能反映含碎石土壤对水分的吸

渗能力^[28],本研究结果表明,碎石含量为 20% ~ 40% 时,随着碎石含量增加,湿润锋推移速度亦明显增加,且碎石含量为 40% 时增幅显著。一定质量的土壤,碎石含量增加时,水分所需湿润的土壤体积减小^[29],同时,土壤孔隙数量随碎石含量的增加而增加,土壤中出现连通的大孔隙^[30],从而促进了湿润锋推移速度,因此,湿润锋推移速度与碎石含量呈正比关系。但碎石含量为 10% 时,水平扩散距离较 0 时短,平均速率值也减小,并没有随着碎石含量增加而增加。既往研究表明,土壤中的碎石会占据水分运输的有效孔隙面积,使其在一定时间内增大通道的弯曲度,抑制土壤水分扩散能力^[30],这可能导致该碎石含量下湿润锋的扩散速率减小。因此,对湿润锋扩散距离与平均速率来说,10% 的碎石含量是此次试验中的一个阈值。

本研究中,碎石含量为 30% 时,土壤湿润锋前进速率差值随着碎石含量的增大而减小。这可能是因为碎石含量为 30% 时,土壤湿润锋的移动速度会受到两种不同效应的影响。一方面,一定时间内,碎石含量的增加使水分通道的弯曲程度增大从而抑制了水分扩散;另一方面,土壤质量一定时,碎石含量的增加占据了一定的体积,使得土壤体积减小,从而促进了土壤湿润锋的前进^[29]。当两种效应都发生且后者影响较大时,出现土壤湿润锋前进速率增加但增加速率差值减小的现象。在碎石含量相同的情况下,本研究结果表明试验土样的湿润锋前进平均速率随着时间的增加逐渐减缓,湿润锋前进距离和前进速率都与时间呈幂函数关系,这是因为土壤水分扩散依赖于毛管吸力作用,而毛管水分的连续性随着水分扩散的发生而变差,土壤导水性能下降^[31],因此湿润锋推移速度随着时间增加而减小。

本研究中同一位置的体积含水率随碎石含量的增加而增加,土壤水分扩散率与含水率呈正相关关系,且相同碎石含量土样的水分扩散率与含水率呈指数型曲线变化,与已有研究结果基本一致^[32],说明喀斯特地区黄壤中碎石的存在对土壤水分扩散率具有显著的影响。

除此之外,土壤水分吸持毛管孔隙及吸附土壤固体颗粒的能力对扩散率有一定的影响^[33],相较于砂性土壤,粘性土壤组成的颗粒更细,土壤质地越

粘,膨胀性增加,土壤对水分的约束越强,土壤中的水分更易受基质吸力的影响而不易扩散,从而削弱土壤水分扩散率^[34]。因此,土壤质地、结构和孔隙特征也是影响土壤水分扩散的重要因素^[5]。本研究选取的供试土样为粘性土(国际制土壤质地分类),研究结果对于该区其他类型土壤的解读尚有不足,未来研究需进一步探讨碎石存在对该区不同质地土壤水分扩散能力的响应。

4 结论

本研究通过水平土柱扩散法对比分析喀斯特地区不同碎石含量(0%、10%、20%、30%、40%)土壤湿润锋的前进状况以及土壤水分扩散率变化特征,探讨喀斯特地区不同碎石含量的土壤水分扩散能力,得出以下主要结论。

(1)碎石含量相同时,试验土样的湿润锋前进平均速率随着时间的增加逐渐减缓,且湿润锋前进距离和前进速率都与时间呈幂函数关系;随着水分水平扩散的进行,土柱的体积含水率逐渐减小,玻尔兹曼变换参数 λ 则随着体积含水率的减小而呈指数增大;土壤水分扩散率随体积含水率减小而逐渐减小。

(2)碎石含量不同时,湿润锋前进距离和平均速率随着碎石含量的增加总体呈现出增大趋势,但碎石含量为10%时湿润锋前进距离与平均速率均有所减小;同一位置的体积含水率随碎石含量的增加而增加;含水率相同条件下,土壤水分扩散率随碎石含量增加而增加,土壤中碎石的存在对土壤水分扩散率具有显著的影响。

参考文献 (References)

- [1] 管凝,程金花,侯芳,等. 不同入渗水量下的西南喀斯特地区人工林土壤优先流特征[J]. 土壤通报, 2023, **54**(3): 587 – 595. [GUAN Ning, CHENG Jinhua, HOU Fang, et al. Characteristics of preferential flow of artificial forest in karst areas of southwest China under different infiltration amounts [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2023, **54**(3): 587 – 595] DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2022042403
- [2] LAN Xue, DING Guijie, DAI Quanhui, et al. Assessing the degree of soil erosion in karst mountainous areas by extenics [J]. Catena, 2022, **209**: 105800. DOI: 10.1016/J.CATENA.2021.105800
- [3] 冯娜,刘冬冬,丁继辉,等. 反演含碎石碳酸盐岩红土水力特

- 性[J]. 水土保持学报, 2022, **36**(1): 101 – 109. [FENG Na, LIU Dongdong, DING Jihui, et al. Inversion of hydraulic properties of carbonate-derived laterite containing gravel [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, **36**(1): 101 – 109] DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2022.01.015
- [4] 孙福海,肖波,李胜龙,等. 黄土高原藓类生物结皮对表层土壤水分运动参数的影响[J]. 农业工程学报, 2021, **37**(14): 79 – 88. [SUN Fuhai, XIAO Bo, LI Shenglong, et al. Effects of moss-dominated biocrusts on surface soil-water movement parameters in the Chinese Loess Plateau [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, **37**(14): 79 – 88] DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.14.009
- [5] 冉卓灵. 岩石碎屑对紫色土水力学特性的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2018: 25 – 43. [RAN Zhuoling. Effect of rock fragments on hydraulic characteristics of purple soil [D]. Chongqing: Southwest University, 2018: 25 – 43]
- [6] 吴远菲. 黄丘区典型植被坡面土壤水分变化过程研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2022: 9 – 14. [WU Yuanfei. Study on soil moisture change process of typical vegetation slope in the loess hilly-gully region [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2022: 9 – 14] DOI: 10.27144/d.cnki.ghbsc.2022.000532
- [7] LAI Xiaoming, LIU Ya, LI Liuyang, et al. Spatial variation of global surface soil rock fragment content and its roles on hydrological and ecological patterns [J]. Catena, 2022, **208**: 105752. DOI: 10.1016/J.CATENA.2021.105752
- [8] GONG Tiexiong, ZHU Yuanjun, SHAO Ming'an. Effect of embedded-rock fragments on slope soil erosion during rainfall events under simulated laboratory conditions [J]. Journal of Hydrology, 2018, **563**: 811 – 817. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.06.054
- [9] KATO H, ONDA Y, TANAKA Y, et al. Field measurement of infiltration rate using an oscillating nozzle rainfall simulator in the cold, semiarid grassland of Mongolia [J]. Catena, 2009, **76**(3): 173 – 181. DOI: 10.1016/j.catena.2008.11.003
- [10] 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. [SI Manfei, GAN Yongde, LIU Huan, et al. Effects of gravel properties on soil infiltration and runoff in soil-rock medium [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science and Technology, 2018, **16**(2): 59 – 63 + 107] DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdk.2018.0039
- [11] 吴海蛟. 掺入不同组分碎石的土石混合物入渗模拟研究[D]. 太谷: 山西农业大学, 2014: 6 – 37. [WU Haijiao. Simulation of infiltration of soil mixed with different components of gravels [D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2014: 6 – 37] DOI: 10.3969/j.issn.1672-3007.2014.03.003
- [12] 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. [HU Tingfei, WANG Hui, HU Chuanwang, et al. Effect of thickness of gravel cover on infiltration characteristics of water repellent soils and its model optimization [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, **33**(2): 17 - 22 + 29] DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2019.02.003
- [13] WANG Yongwu, ZHU Qing, LAI Xiaoming, et al. Response of soil hydrological processes to soil rock fragments: A global Meta-analysis [J]. Science China Earth Sciences, 2023, **66**(9): 2066 - 2080. DOI: 10.1007/S11430-023-1132-4
- [14] WANG Di, NIU Jianzhi, YANG Tao, et al. Soil water infiltration characteristics of reforested areas in the paleo-periglacial eastern Liaoning mountainous regions, China [J]. Catena, 2024, **234**: 107613. DOI: 10.1016/J.CATENA.2023.107613
- [15] 张志刚, 李宏, 李疆, 等. 地表滴灌条件下滴头流量对土壤水分入渗一再分布过程的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2016, **34**(2): 224 - 231. [ZHANG Zhigang, LI Hong, LI Jiang, et al. Effects of different dripper discharges on soil water infiltration / redistribution under drip irrigation [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2016, **34**(2): 224 - 231] DOI: 10.7606/j.issn.1000-7601.2016.02.36
- [16] 帅嘉伟. 非饱和土壤水分扩散率和渗透系数的计算方法研究 [D]. 赣州: 江西理工大学, 2023: 8 - 13. [SHUAI Jiawei. Research on the test method of water diffusivity and infiltration coefficient of unsaturated soil [D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2023: 8 - 13] DOI: 10.27176/d.cnki.gnfy.2022.000170
- [17] 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. [LYU Gang, WANG Ting, WANG Yunce, et al. Effect of gravel content and particle size on soil infiltration in low mountainous upland region of western Liaoning province [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, **31**(4): 86 - 92] DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2017.04.015
- [18] 韩珍, 王小燕, 李馨欣. 土石混合紫色土坡面水文过程的实验研究[J]. 山地学报, 2017, **35**(4): 451 - 458. [HAN Zhen, WANG Xiaoyan, LI Xinxin. Effects of rock fragment cover on hydrological processes in purple soils [J]. Mountain Research, 2017, **35**(4): 451 - 458] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000242
- [19] 王耀鑫, 高家勇, 张玉珊, 等. 喀斯特流域水源涵养功能时空分异及其对景观格局的响应[J]. 水土保持学报, 2023, **37**(2): 169 - 178. [WANG Yaoxin, GAO Jiayong, ZHANG Yushan, et al. Spatial and temporal differentiation of water conservation function in karst basin and its response to landscape pattern [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, **37**(2): 169 - 178] DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2023.02.020
- [20] 田力, 安明态, 杨淼冰, 等. 贵州省分布的国家重点保护野生植物组成特征与地理分布格局[J]. 植物资源与环境学报, 2023, **32**(3): 83 - 91. [TIAN Li, AN Mingtai, YANG Yanbing, et al. Composition characteristics and geographical distribution pattern of national key protected wild plants distributed in Guizhou province [J]. Journal of Plant Resources and Environment, 2023, **32**(3): 83 - 91] DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2023.03.09
- [21] 颜蒙蒙, 周洲, 王济, 等. 喀斯特地区土壤水分随降雨的动态变化研究——以贵阳市花溪区为例[J]. 中国岩溶, 2016, **35**(4): 446 - 452. [YAN Mengmeng, ZHOU Zhou, WANG Ji, et al. Study on the dynamic change of soil moisture in karst area: A case of Huaxi district in Guiyang city [J]. Carsologica Sinica, 2016, **35**(4): 446 - 452] DOI: 10.11932/karst20160413
- [22] ZHOU Qiuwen, KEITH D M, ZHOU Xu, et al. Comparing the water-holding characteristics of broadleaved, coniferous, and mixed forest litter layers in a karst region [J]. Mountain Research and Development, 2018, **38**(3): 220 - 229. DOI: 10.1659/MRD-JOURNAL-D-17-00002.1
- [23] 苏维词. 中国西南岩溶山区石漠化的现状成因及治理的优化模式[J]. 水土保持学报, 2002, **16**(2): 29 - 32 + 79. [SU Weici. Controlling model for rocky desertification of karst mountainous region and its preventing strategy in southwest, China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2002, **16**(2): 29 - 32 + 79] DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2002.02.008
- [24] 杨懿, 高华端, 王群, 等. 多因素影响下的喀斯特山区坡耕地分布特征——以贵阳市花溪区为例[J]. 水土保持研究, 2022, **29**(1): 361 - 367. [YANG Yi, GAO Huaduan, WANG Qun, et al. Study on the distribution characteristics of sloping farmland in karst mountain area under the influence of multiple factors: A case study of Huaxi district of Guiyang [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, **29**(1): 361 - 367] DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2022.01.040
- [25] LY/T 1225 - 1999. 森林土壤颗粒组成 (机械组成) 的测定 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1999. [LY/T 1225 - 1999. Determination of forest soil particle-size composition (mechanical composition) [S]. Beijing: Standards Press of China, 1999]
- [26] 盛茂银, 熊康宁, 崔高仰, 等. 贵州喀斯特石漠化地区植物多样性与土壤理化性质[J]. 生态学报, 2015, **35**(2): 434 - 448. [SHENG Maoyin, XIONG Kangning, CUI Gaoyang, et al. Plant diversity and soil physical-chemical properties in karst rocky desertification ecosystem of Guizhou, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, **35**(2): 434 - 448] DOI: 10.5846/stxb201303220488
- [27] 王鹤. 黑土区施用生物炭的土壤水动力学后效应及其数值模拟[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2020: 61 - 66. [WANG He. Post-hydrodynamic effects and numerical simulation of biochar applied to black soil [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2020: 61 - 66] DOI: 10.27010/d.cnki.gdbnu.2020.000506
- [28] 吴凤平, 王辉, 卢霞, 等. 砂石含量及粒径对红壤水分扩散率

- 的影响[J]. 水土保持学报, 2009, **23**(2): 228 – 231. [WU Fengping, WANG Hui, LU Xia, et al. Effect of rock fragment content and size on red soil water diffusivity [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2009, **23**(2): 228 – 231] DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2009.02.030
- [29] 周蓓蓓, 邵明安. 不同碎石含量及直径对土壤水分入渗过程的影响[J]. 土壤学报, 2007, **44**(5): 801 – 807. [ZHOU Beibei, SHAO Ming'an. Effect of content and size of rock detritus on infiltration [J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, **44**(5): 801 – 807] DOI: 10.3321/j.issn:0564-3929.2007.05.005
- [30] 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 Jiangwen, RAN Zhuoling, HAN Zhen, et al. Water diffusion law of purple soil containing rock fragments [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, **34**(1): 178 – 185] DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2020.01.026
- [31] 冯艳, 谢栋博, 陈军洲, 等. 城市绿地不同植被群落对表层土壤入渗的影响[J]. 西北林学院学报, 2021, **36**(3): 267 – 272. [FENG Yan, XIE Dongbo, CHEN Junzhou, et al. Effects of different vegetation communities on infiltration of surface soil in urban green space [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, **36**(3): 267 – 272] DOI: 10.3969/j.issn.1001-7461.2021.03.39
- [32] 马效松, 付强, 徐淑琴, 等. 不同冻融时期土壤水分运动参数特征分析及数值模拟[J]. 应用基础与工程科学学报, 2020, **28**(4): 774 – 787. [MA Xiaosong, FU Qiang, XU Shuqin, et al. Analysis and simulation of soil moisture movement parameters during different freezing-thawing periods [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2020, **28**(4): 774 – 787] DOI: 10.16058/j.issn.1005-0930.2020.04.003
- [33] 陈功, 刘虎, 魏占民. 草原露天矿区劣质土壤水平扩散特征与模拟[J]. 水土保持学报, 2023, **37**(2): 76 – 82 + 89. [CHEN Gong, LIU Hu, WEI Zhanmin. Horizontal diffusion characteristics and simulation of poor soil in grassland open-pit area [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, **37**(2): 76 – 82 + 89] DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2023.02.010
- [34] 魏飒, 任树梅. 承德围场地区土壤水分分散率的研究[J]. 中国农村水利水电, 2007, **48**(1): 55 – 56 + 61. [WEI Sa, REN Shumei. Soil moisture diffusivity in Chengde Weichang region [J]. China Rural Water and Hydropower, 2007, **48**(1): 55 – 56 + 61] DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2007.01.016

Moisture Diffusion of Soils with Gravel in the Karst Region

FENG Yaying, MOU Limin, ZHOU Nana, HAN Zhen *

(College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: Karst topography is primarily developed in southwestern China, heavily featured by shallow soil layers and exposed bedrock. Gravel (particle size >2 mm) are the regular components of the soil in karst areas, leading to complex soil moisture migration in the soil.

Most previous studies focused efforts on vertical infiltration analysis of karst soils under hydrodynamic conditions, and little addressed to their horizontal water diffusion capacities.

In this study, it experimentally investigated the soil moisture diffusion capacity of karst soils. Horizontal soil column diffusion experiments were designed to examine the progressive phases of soil wetting front and soil moisture diffusion rate for five sets of remolded karst soils with gravel contents of 0, 10%, 20%, 30%, 40%.

(1) With the same gravel content of all soil samples, the advancement distance and speed of soil wetting front both had a power function relationship with time. As horizontal diffusion of moisture progressed, the volumetric moisture content of the soil column gradually decreased, accompanied by Boltzmann transformation parameter λ increasing exponentially, suggesting soil moisture diffusion rate decreasing simultaneously.

(2) With the gravel content of soil samples increasing, the advancement distance and speed of soil wetting front generally show an increasing trend with the increase of gravel content, but both the advancing distance and

average speed of the wetting front decrease when the gravel content is 10%. At the same location, volumetric water content increased with a higher gravel content, accompanied by soil moisture diffusion rate in descending trend of 40% > 30% > 20% > 0 > 10% of gravel contents.

The study would provide a experimental basis for understanding of soil hydrological cycles and processes in karst region of China.

Key words: gravel content; moisture diffusion; wetting front; karst region

(责任编辑 李嵘)

三江源——中国重要的生态安全屏障

(杨祎,中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所)

三江源地处青藏高原腹地,生态环境脆弱,具有典型的高寒草地植被系统,其水土保持与防风固沙功能对中国及其周边地区生态安全具有重大意义。在全球环境变化和人为因素的影响下,三江源草地持续退化,生态环境问题日益突出。植被覆盖度是测度草地维持水土保持与防风固沙功能的关键指标,然而三江源区临界植被覆盖度变化尚不明确。

中国实施三江源生态环境保护 and 建设工程,合理利用和保护该地区植被,确定水土保持与防风固沙功能临界植被覆盖度,是三江源草地多维度、多目标、系统性管理的重要部分之一。

详见本期《三江源区草地水土保持与防风固沙功能临界植被覆盖度时空变化分析》一文。