

# 含岩屑紫色土水分扩散规律

李江文, 冉卓灵, 韩珍, 曾蔓漫, 魏朝富

(西南大学资源环境学院, 重庆 400715)

**摘要:** 紫色土中存在的岩屑显著影响土壤水分扩散。以往研究主要集中在 $> 2$  mm岩屑上而忽视了 $< 2$  mm岩屑的作用。因此,探讨 $> 2$  mm岩屑对紫色土水分扩散的影响基础上,明确 $< 2$  mm岩屑的作用对完善含岩屑紫色土水分扩散规律的研究具有重要的意义,从而为土壤水动力学模型的构建提供理论依据。以四川盆地紫色页岩发育的暗棕紫泥土和泥岩发育的红棕紫泥土为研究对象,设置3种岩屑粒径(0.25~2, 2~5, 5~10 mm)和4种岩屑含量(0, 30%, 50%, 70%),利用水平土柱吸渗法测定含岩屑土壤湿润锋变化特征、水分扩散率 $D(\theta)$ 和土壤含水率 $\theta$ ,并拟合 $D(\theta)$ 、Boltzmann参数 $\lambda$ 与 $\theta$ 之间的关系。结果表明:对于暗棕紫泥土,岩屑粒径为2~5 mm时,土壤湿润锋前进速率和 $D(\theta)$ 随岩屑含量增加呈先增加后降低再增加的趋势;岩屑粒径为0.25~2, 5~10 mm时,土壤湿润锋前进速率和 $D(\theta)$ 随岩屑含量增加逐渐增加。对于红棕紫泥土,岩屑粒径为2~5, 5~10 mm,随岩屑含量增加,70%岩屑含量的土壤 $D(\theta)$ 明显大于其余3个岩屑含量的土壤,而30%岩屑含量和50%岩屑含量土壤之间的 $D(\theta)$ 无显著差异,且土壤湿润锋前进速率均呈先增加后降低再增加的趋势;岩屑粒径为0.25~2 mm时,土壤湿润锋前进速率和 $D(\theta)$ 随岩屑含量增加逐渐增加。因此,随岩屑含量提高,土壤水分扩散速率整体呈现增加趋势;且泥岩发育的土壤水分扩散速率高于页岩发育的土壤。

**关键词:** 岩屑; 湿润锋; 含水率; 水分扩散率

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)01-0178-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.01.026

## Water Diffusion Law of Purple Soil Containing Rock Fragments

LI Jiangwen, RAN Zhuoling, HAN Zhen, ZENG Manman, WEI Chaofu

(College of Resource and Environment, Southwest University, Chongqing 400715)

**Abstract:** Rock fragments in purple soil can directly affect soil water diffusion. The past research mainly focused on the rock fragments with particle size  $> 2$  mm, while the particle size of  $< 2$  mm was ignored. Therefore, based on discussing the influence of the particle size  $> 2$  mm on the water migration of purple soils, it is of great significance to clarify the influence of  $< 2$  mm rock fragments on the moisture diffusion of purple soil containing rock fragments, thus providing theoretical basis for the construction of soil hydrodynamic model. Purple shale and mudstone in Sichuan basin and their developed soils (dark brown purple soil and red brown purple soil) were taken as research objects, three kinds of rock fragments particle sizes (0.25 ~ 2, 2 ~ 5, 5 ~ 10 mm) and four kinds of rock fragments contents (0, 30%, 50%, 70%) were set. The horizontal soil column suction method was used to determine the progress of wet front of the soils containing rock fragments, the water diffusivity  $D(\theta)$  and the soil moisture content  $\theta$ , Fitting the relationship between  $D(\theta)$ , Boltzmann parameters  $\lambda$  and  $\theta$ . The result showed that for dark brown purple soil, when the particle size of the rock fragment was 2 ~ 5 mm, with the increase of rock fragments contents, the advancing rate of soil wetting front and  $D(\theta)$  both had a tendency of increasing first, then decreased and finally increased; while when the particle size of the rock fragment was 0.25 ~ 2, 5 ~ 10 mm, with the increase of rock fragments contents, the advancing rate of soil wetting front and  $D(\theta)$  gradually increased. For red brown purple soil, when the size of rock fragment was 2 ~ 5, 5 ~ 10 mm, the  $D(\theta)$  of 70% rock fragments content was obviously larger than that of the other three rock fragments content of soils. The  $D(\theta)$  of 30% rock frag-

收稿日期: 2019-05-20

资助项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0800505); 重庆市研究生科研创新项目(CYB18089)

第一作者: 李江文(1995-), 男, 黑龙江牡丹江人, 硕士研究生, 主要从事土壤物理研究。E-mail: 1390545024@qq.com

通信作者: 魏朝富(1962-), 男, 四川乐山人, 研究员, 博士生导师, 主要从事土壤物理、土地利用与生态过程研究。E-mail: weicf@swu.edu.cn

ments contents and 50% rock fragments contents were not significantly different. The advancing rate of soil wetting front had a tendency of increasing first, then decreased and finally increased. While when the particle size of the rock fragments was 0.25 ~ 2 mm, with the increase of rock fragments contents, the advancing rate of soil wetting front and  $D(\theta)$  gradually increased. Therefore, with the increase of rock fragments contents, the soil water migration rate showed an increasing trend as a whole, and the water migration rate of soil which was developed by mudstone was higher than that by shale.

**Keywords:** rock fragment; wetting front; moisture content; water diffusivity

紫色土是一种侵蚀型的高生产力岩性土,广泛分布于四川盆地,同时紫色土也是一种初育土,结构疏松、发育时间短暂、强烈的物理风化及严重的土壤侵蚀导致其土壤中存在大量岩石碎屑,构成了西南地区土地资源的重要组成部分<sup>[1-3]</sup>。相关研究<sup>[4-6]</sup>表明,岩屑粒径、含量和镶嵌状况等特征使得原本均质土壤的某些物理特性,如孔隙度、过水断面和土壤机械组成等发生改变。土壤中可移动水存在于不同粒径的岩屑表面、岩屑之间以及岩屑与土壤接触点处,造成毛管孔隙度不断变化<sup>[7]</sup>,从而导致含岩屑土壤水分运动规律较为复杂<sup>[8-11]</sup>。因此,明确含岩屑土壤水分扩散规律对土壤水动力学模型的构建具有重要意义。

土壤水分扩散作为土壤水动力学参数之一,在土壤水分运动过程中扮演着重要因素。目前,已有部分学者<sup>[12-13]</sup>研究了有关岩屑含量及粒径对土壤水分扩散的影响。然而,由于岩屑在土壤中的空间位置、及其物理性质的差异使结论不一致,甚至相互矛盾。一方面,岩屑含量及粒径的增加,导致土壤大孔隙数量增加,水分扩散率加快。吕国安等<sup>[14]</sup>通过对石渣土水分有效性的研究表明,土壤水分扩散率与砾石含量呈正相关,从而提高土壤水分有效性。另一方面,岩屑结构及其在土壤中的空间位置能够影响土壤水分扩散,且岩屑含量及粒径的增加会加大土壤孔隙的弯曲程度,减少水流有效断面。尤其在较小的土水势下,水仅在细小的弯曲通道中运动,可能会抑制土壤水分扩散,进而影响土壤水分扩散速率<sup>[15-18]</sup>。周蓓蓓等<sup>[19]</sup>研究表明,碎石直径越大,含量越高,孔隙不均匀性的概率越大,导致水分通道复杂,抑制水分扩散。并且,王慧芳等<sup>[20]</sup>通过研究含碎石土壤水分运移的规律发现,2~3 mm 粒径的碎石与水分运移速率呈显著负相关关系,而>25 mm 粒径的碎石有利于水分运移。朱元骏等<sup>[21]</sup>通过室内试验得出,在保持细土容重不变的条件下,土壤中砾石的存在将阻碍水分运移过程,且随着砾石含量的增加,水分运移速率降低。此外,龚久平等<sup>[22]</sup>和李燕等<sup>[23]</sup>研究发现,砾石对土壤水分扩散率的影响存在一个阈值,当砾石含量小于 10% 时,土壤水分扩散率随岩屑含量的增加而增加;当砾石含量大于 10% 时,土壤水分扩散率随岩屑含量的降低而降低。然而,长期以来,国内外主要

针对>2 mm 粒径岩屑对土壤水分扩散的影响进行研究,<2 mm 粒径的岩屑对土壤水分扩散的影响尚未报道。而在紫色丘陵地区,<2 mm 土壤颗粒中存在大量 2~0.25 mm 砂粒级岩屑,这部分由黏土岩物理风化而成砂粒级岩屑与花岗岩或砂岩风化形成的砂粒不同,后者主要是原生矿物晶体(如石英和云母等),前者则是粉粒和黏粒的结合体或聚合体<sup>[3,24]</sup>。本文选择页岩发育的暗棕紫泥土和泥岩发育的红棕紫泥土作为研究对象,在探讨>2 mm 粒径岩屑对土壤湿润锋前进情况和  $D(\theta)$  的影响基础上,研究<2 mm 粒径岩屑对土壤水分扩散的影响,分析  $D(\theta)$  及 Boltzmann 参数  $\lambda$  与  $\theta$  的定量关系,以期完善含岩屑紫色土水分扩散规律的研究提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试土壤采集与处理

于 2018 年 6 月进行样品的采集,分别采集重庆市北碚区(29°45'48"N,105°25'40"E)三叠系飞仙关组( $T_1f$ )紫色页岩及其发育的土壤和潼南区(30°09'04"N,105°45'31"E)侏罗系遂宁组( $J_3sn$ )紫色泥岩以及其发育的土壤。选取样地后,除去土壤表面的杂草后,开挖土壤剖面并采集 0—20 cm 表层土壤,同时采集新鲜母岩。紫色页岩具有结构致密、硬度低、不透水,极易吸水膨胀,崩解速度极快等特点。紫色泥岩有很多细微裂隙,遇水不易变软,可塑性差;在外力作用下,很快沿裂隙崩解,形成细小的颗粒,其物理风化和成土速度也较快。

去除样品中较大的动植物残体及其他杂质,于室内通风环境下自然风干,其中土壤样品研磨过筛制备成粒径小于 2 mm 的土样备用,母岩样品破碎后,研磨过筛得到 0.25~2,2~5,5~10 mm 3 种粒径的碎屑备用。土壤基本性质采用常规分析法<sup>[25-26]</sup>测定,其基本性质见表 1。

### 1.2 试验方法与步骤

利用水平吸渗装置<sup>[27]</sup>(图 1)测定土壤水分扩散规律,有机玻璃管总长 100 cm,内径 5 cm,贮水室长 10 cm,连接马利奥特瓶进行自动供水;滤水室长 10 cm,内填石英砂缓冲水流,使水流保持层流状态;填装供试土样,土样填装长度为 60 cm。

表 1 供试土壤样品基本性质

母岩类型	土壤类型	有机质/(g·kg <sup>-1</sup> )	pH	容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	砂粒/%	粉粒/%	黏粒/%
页岩(T <sub>1</sub> f)	暗棕紫泥土	13.95±1.26	8.2±0.2	1.25±0.08	32.24	36.69	31.06
泥岩(J <sub>3</sub> sn)	红棕紫泥土	11.42±2.20	8.4±0.1	1.24±0.09	25.45	45.88	28.67

注:表中数据为平均值±标准差。

在 < 2 mm 的纯土中分别加入不同粒径(0.25~2, 2~5, 5~10 mm)和不同含量(0, 30%, 50%, 70%)的母岩岩屑制成供试土样,根据紫色丘陵区耕层土壤平均容重,可将供试土样容重设定 1.3 g/cm<sup>3</sup>[28];根据水平扩散土柱体积 1 177.50 cm<sup>3</sup>,按照设定容重及水分系数确定装样质量。再根据确定的装样质量和岩屑含量明确纯土的质量,最后将纯土与岩屑分层填装进土柱内,并保证土壤容重。每个处理设置 2 组重复,0 为不加岩屑的对照试验。按一定时间间隔记录湿润锋的前进距离,试验结束时记下试验总历时,从湿润锋开始取土,用烘干法测定土壤含水率[26]。

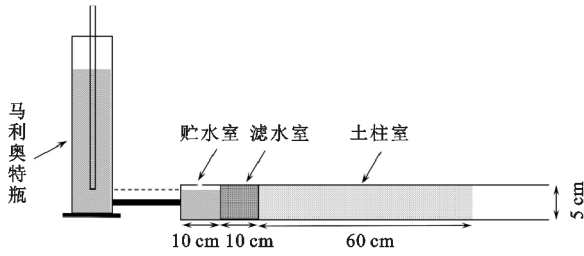


图 1 水分扩散试验装置示意

### 1.3 数据处理与分析

为消除重力影响,试验过程利用水平土柱方法进行试验。试验过程中土柱内的土样质地及初始含水率均一、土柱进水端(水室)水位恒定,压力为 0。这样水分在土柱中作水平吸渗运动,其前进的最主要动力便是土壤基质吸力。此时,不饱和水分在水平土柱中运动可视为一维水平运动。土壤中一维水平流动方程及其边界条件见公式(1)~公式(3)[27]:

土壤中一维水平流方程及其定界条件为:

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

式中: $\theta$  为距进水边界  $x$  处的土壤含水率(m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>); $\theta_a$  为土柱初始含水率(风干土壤含水率)(m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>); $\theta_b$  为土柱始端维持的饱和含水率(m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>); $x$  为土柱中断面距始端的距离(cm); $t$  为时间(min); $D(\theta)$  为土壤水分扩散率(cm<sup>2</sup>/min)。

采用 Boltzmann 变换,将公式(1)变为常微分方程, $D(\theta)$ 求解得到的计算公式为:

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

式中: $\lambda = xt^{-\frac{1}{2}}$  为 Boltzmann 变换的参数。

进行水平土柱吸渗试验时,测出  $t$  时刻土柱含水率分布,并计算出各  $x$  点的  $\lambda$  值,从而绘制出  $\theta = f(\lambda)$  关系曲线。由曲线可以求出相应于不同  $\theta$  值的  $\frac{d\theta}{d\lambda}$  值和  $\int_{\theta_a}^{\theta} \lambda d\theta$  值,应用公式(2)就可以计算出  $D(\theta)$ 。为了便于计算,通常将公式(2)改写为差分形式:

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

这样可将  $\theta-\lambda$  图划分成条状,然后列表计算得出土壤水分扩散率  $D(\theta)$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤湿润锋变化特征

由图 2 可知,当岩屑粒径为 0.25~2, 2~5, 5~10 mm 时,岩屑含量从 0 增加到 70% 的过程中,随着时间的增加,扩散距离增加幅度较小。从  $T_1f$  与  $J_3sn$  湿润锋前进时间可以看出, $J_3sn$  的扩散时间明显低于  $T_1f$ ,因此, $J_3sn$  的湿润锋前进速率大于  $T_1f$ 。从曲线斜率看出,随岩屑含量增加, $J_3sn$  的湿润锋前进速率的增大程度明显高于  $T_1f$ 。对于  $T_1f$ ,当岩屑粒径为 0.25~2, 5~10 mm 时,随岩屑含量增加,湿润锋前进速率整体呈现增加趋势;然而,当岩屑粒径为 2~5 mm 时,湿润锋前进速率却为  $0 < 50\% < 30\% < 70\%$ 。不同粒径岩屑间的湿润锋前进速率也存在差异,当岩屑含量为 30% 和 70% 时,土壤湿润锋前进速率随粒径大小的增加呈增大的趋势,而岩屑含量为 50% 时,土壤湿润锋前进速率随岩屑粒径的增加先降低后升高。这可能是由于岩屑含量为 50% 时,存在 2 种效应影响土壤湿润锋前进速率,一种效应是在一定扩散时间内,岩屑粒径增加将占据了可进行水分传导的土壤孔隙体积从而阻碍了水分扩散;另一种效应是对于一定质量的土壤,岩屑粒径增加,水分湿润土壤的体积减小,从而促进了湿润锋的运移。当后者效应大于前者效应时,湿润锋前进速率加快,反之则变慢[29]。对于  $J_3sn$ ,当岩屑粒径为 0.25~2 mm 时,岩屑含量增加,湿润锋前进速率整体呈增加趋势;而当岩屑粒径为 2~5, 5~10 mm 时,除岩屑含量为 50% 外其余岩屑含量条件下,土壤湿润锋前进速率均随岩屑粒径的增加而增加。

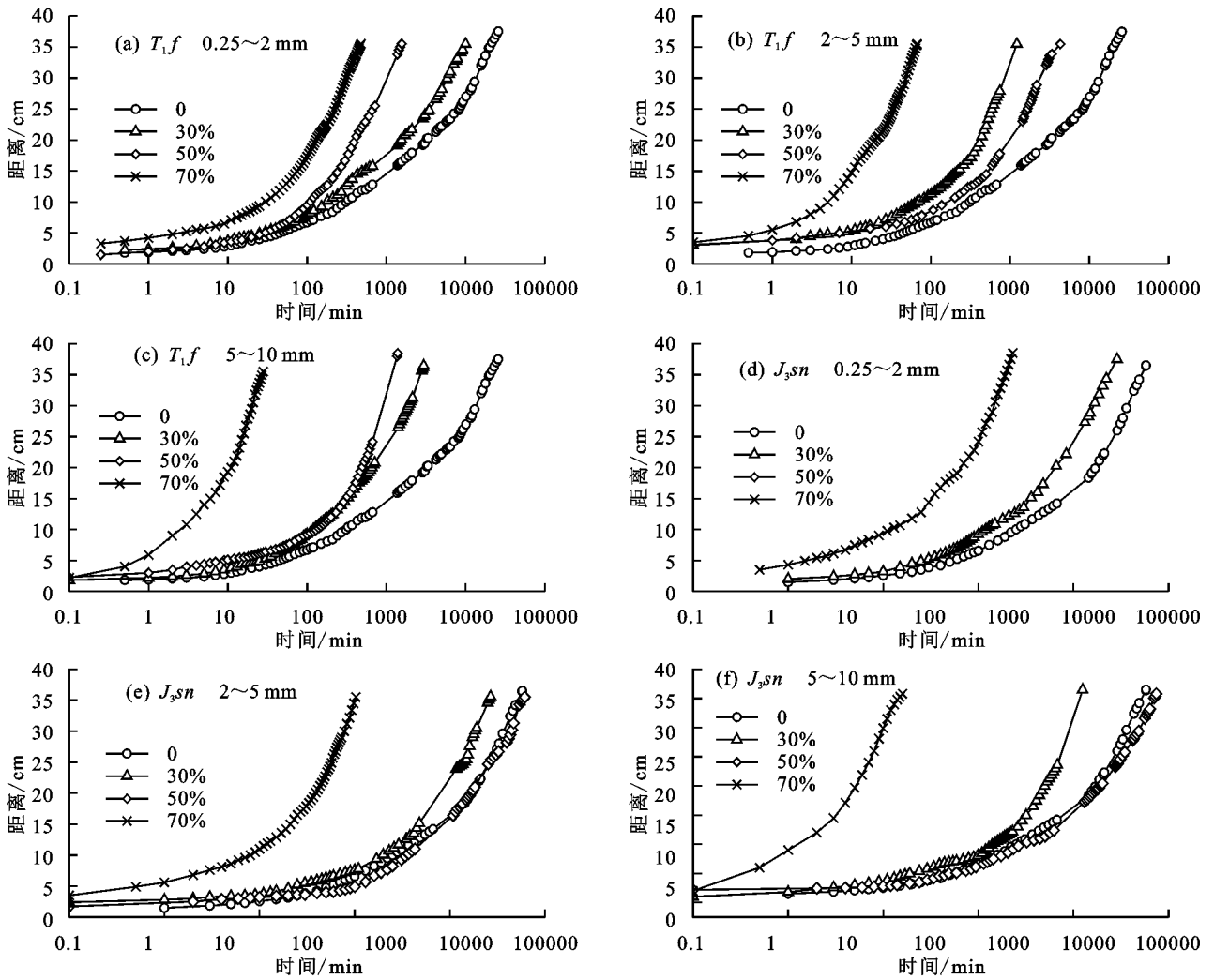


图2 土壤湿润峰前进距离与时间曲线

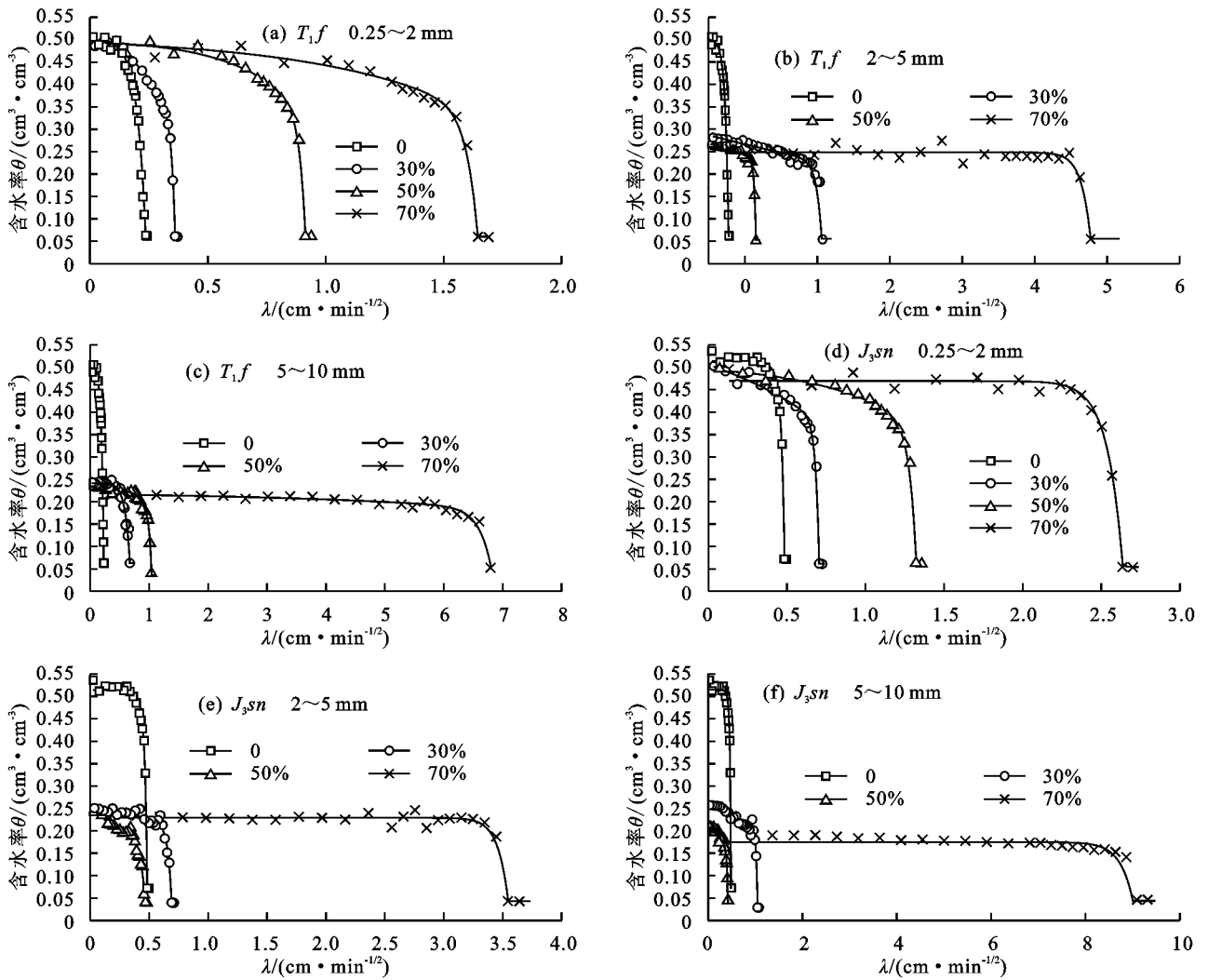
## 2.2 土壤含水率 $\theta=f(\lambda)$ 关系曲线

Boltzmann 参数  $\lambda = x t^{-\frac{1}{2}}$  ( $x$  为水平入渗距离,  $t$  为时间) 反映了土壤水分扩散的湿润峰向前移动的快慢程度<sup>[22]</sup>。不同岩屑粒径含量的  $\theta-\lambda$  关系曲线见图 3, 随  $\lambda$  逐渐增加,  $\theta$  逐渐降低最后趋于稳定, 且每一条曲线上都相应有一个拐点。相同土壤类型和岩屑粒径下, 随岩屑含量的变化,  $\theta-\lambda$  曲线的拐点位置存在差异。从图 3 可以发现, 当岩屑粒径为 0.25~2, 5~10 mm, 随岩屑含量增加,  $\theta-\lambda$  曲线降低的趋势越缓慢; 而当岩屑粒径为 2~5 mm, 随岩屑含量增加,  $\theta-\lambda$  曲线降低的趋势为 70% < 30% < 50% < 0,  $\theta$  降低越快,  $\lambda$  越低。可能是因为当岩屑含量为 2~5 mm 时, 含 50% 岩屑含量的土壤湿润峰前进时间大于 30% 和 70% (图 2),  $\lambda$  与  $t$  成反比, 50% 岩屑含量的  $\lambda$  低于 30% 和 70% 岩屑含量的  $\lambda$ 。当岩屑粒径为 0.25~2 mm, 随岩屑含量增加,  $\theta-\lambda$  曲线降低的趋势越缓慢; 然而当岩屑粒径为 2~5, 5~10 mm, 则呈现出 50% 岩屑含量的  $\theta-\lambda$  曲线降低趋势最快, 70% 岩屑含量的  $\theta-\lambda$  曲线降低趋势最缓。并采用指数函数对扩散段进行拟合(表 3), 拟合相关系数  $R^2$  均大于 0.92, 拟合结果能够较好说明岩屑含量

及粒径的变化对  $\theta-\lambda$  关系曲线的影响。

## 2.3 土壤水分扩散率 $D(\theta)$ 与含水率 $\theta$ 的关系

由图 4 可知, 2 种土壤类型在不同岩屑含量及粒径条件下,  $D(\theta)$  均随  $\theta$  增加整体上呈增加的趋势, 但不同处理之间的增幅不同。当岩屑粒径为 0.25~2 mm 时, 2 种土壤类型的  $D(\theta)$  均随岩屑含量增加而增加; 当岩屑粒径为 2~5, 5~10 mm 时, 随岩屑含量增加, 2~5, 5~10 mm 岩屑之间的  $D(\theta)$  差异较大。然而, 不同土壤类型间的  $D(\theta)$  与  $\theta$  关系曲线也存在差异, 对于  $T_1f$ , 当岩屑粒径为 2~5 mm 时,  $D(\theta)$  均表现为随岩屑含量增加而增加; 当岩屑粒径为 5~10 mm 时,  $D(\theta)$  在岩屑含量为 50% 时出现转折点。对于  $J_3sn$ , 当岩屑粒径为 2~5, 5~10 mm 时, 70% 岩屑含量的土壤  $D(\theta)$  明显大于其余 3 个岩屑含量的土壤, 而 30% 岩屑含量的土壤  $D(\theta)$  与 50% 岩屑含量的土壤  $D(\theta)$  无明显差异。对比  $D(\theta)$  与  $\theta$  的关系发现, 当岩屑含量为 30% 时, 0.25~2 mm 粒径的岩屑对土壤水分扩散抑制作用最大, 当岩屑含量为 50% 和 70% 时, 则表现出 2~5 mm 粒径岩屑对土壤水分扩散抑制作用最大(表 4)。利用幂函数拟合  $D(\theta)$  与  $\theta$  之间的关系能进一步说明岩屑含量及粒径的变化对  $D(\theta)$  的影响。

图 3 土壤的  $\theta=f(\lambda)$  关系曲线表 3 土壤的  $\theta=f(\lambda)$  关系曲线拟合公式

土壤类型	岩屑 粒径/mm	岩屑 含量/%	$\theta=A1 * e(-\lambda/t') + A2 * e(-\lambda/t'') + y0$					$R^2$
			$y0$	$A1$	$t'$	$A2$	$t''$	
暗棕紫泥 ( $T_1f$ )	0.25~2	0	0.5010	-4.10E-04	-0.0374	-4.10E-04	-0.0374	0.9885
	0.25~2	30	0.5222	-0.0224	-0.1558	-1.90E-12	-0.0140	0.9945
	0.25~2	50	0.5000	-0.0059	-0.2697	-1.00E-15	-0.0257	0.9828
	0.25~2	70	0.5059	-1.80E-16	-0.0470	-0.0134	-0.6452	0.9819
	2~5	0	0.5010	-4.40E-04	-0.0374	-4.10E-04	-0.0374	0.9885
	2~5	30	0.3297	-9.8319	-0.03147	-0.0695	-1.9795	0.9657
	2~5	50	0.2668	-1.7942	-0.01998	-0.0223	-0.6087	0.9864
	2~5	70	0.3069	-3.3221	-0.0880	-0.0739	-23.8250	0.9271
	5~10	0	0.5010	-4.10E-04	-0.0374	-4.10E-04	-0.0374	0.9885
	5~10	30	0.2431	-2.3604	-0.0895	-6.0464	-0.0895	0.9480
	5~10	50	0.2234	1.7094	-0.0794	-1.7419	-0.0794	0.9502
	5~10	70	0.2231	-1.0469	-0.2260	-0.0064	-3.8924	0.9538
红棕紫泥 ( $J_3sn$ )	0.25~2	0	0.5104	-4.5186	-0.0229	4.5189	-0.0229	0.9583
	0.25~2	30	0.6105	-1.0656	-0.0229	-0.1048	-0.8900	0.9809
	0.25~2	50	0.5086	-0.0137	-0.5639	-1.7362	-0.0434	0.9820
	0.25~2	70	0.4693	-2.3942	-0.1091	-6.0165	-0.0975	0.9822
	2~5	0	0.5104	-4.5186	-0.0229	4.5189	-0.0229	0.9583
	2~5	30	0.2620	-0.0120	-0.4990	-8.3375	-0.0323	0.9633
	2~5	50	0.1818	-5.2767	-0.0458	0.0733	0.2433	0.9713
	2~5	70	0.2230	-2.1417	-0.0966	1.8373	-0.1041	0.9212
	5~10	0	0.5104	-4.5186	-0.0229	4.5189	-0.0229	0.9583
	5~10	30	0.4046	-0.1417	-2.7487	-8.9510	-0.0280	0.9720
	5~10	50	0.2366	-2.6270	-0.0210	-0.0264	-0.3636	0.9737
	5~10	70	0.2682	-0.0765	-24.8457	-4.4370	-0.1916	0.9859

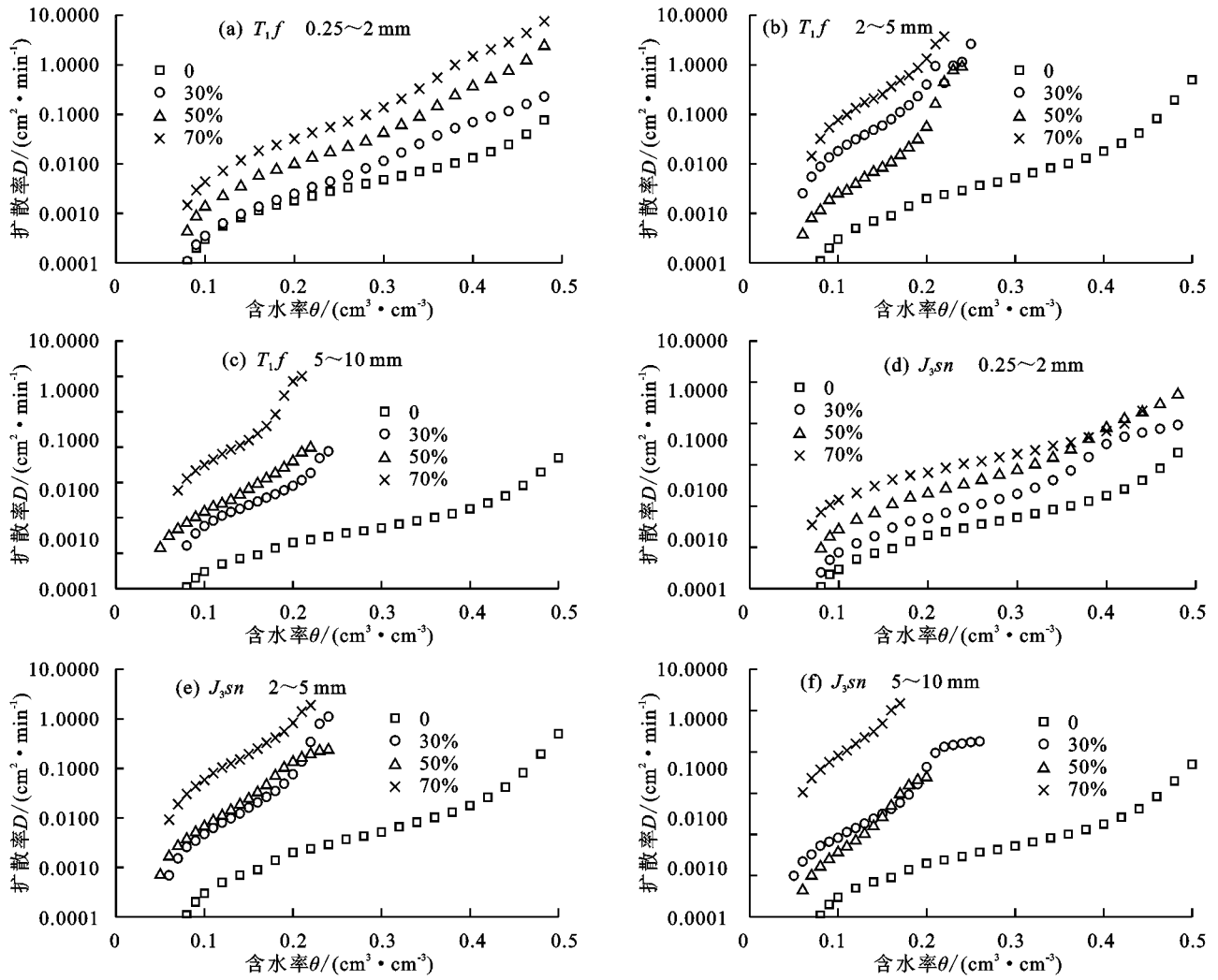


图 4 土壤的  $\theta=D(\theta)$  关系曲线

表 4 土壤的  $\theta=D(\theta)$  关系曲线拟合公式

岩屑 粒径/mm	岩屑 含量/ %	飞仙关组 ( $T_{1f}$ )			$R^2$	遂宁组 ( $J_{3sn}$ )			$R^2$
		$D=D_0\left(\frac{\theta}{\theta_s}\right)^n$				$D=D_0\left(\frac{\theta}{\theta_s}\right)^n$			
		$D_0$	$n$	$\theta_s$		$D_0$	$n$	$\theta_s$	
0.25~2	0	0.23	10.47	0.5368	0.9626	1.98	21.51	0.5332	0.9959
0.25~2	30	0.38	6.54	0.5218	0.9965	1.74	6.66	0.5235	0.9827
0.25~2	50	6.09	12.04	0.5201	0.9883	11.27	10.83	0.5180	0.9973
0.25~2	70	15.71	9.79	0.5189	0.9929	8.31	9.59	0.5138	0.9560
2~5	0	0.23	10.47	0.5368	0.9626	1.98	21.51	0.5332	0.9959
2~5	30	17.54	4.40	0.4805	0.9481	5.78	4.60	0.4714	0.8938
2~5	50	6.60	5.12	0.4693	0.8728	1.96	3.72	0.4424	0.9769
2~5	70	43.98	4.28	0.4569	0.9616	13.38	3.69	0.4364	0.9721
5~10	0	0.23	10.47	0.5368	0.9626	1.98	21.51	0.5332	0.9959
5~10	30	7.66	4.73	0.4844	0.9375	18.16	4.80	0.4634	0.9129
5~10	50	9.67	4.13	0.4622	0.9626	10.08	5.25	0.4366	0.9638
5~10	70	2432.40	6.19	0.4285	0.8987	477.78	4.43	0.4121	0.9729

### 3 讨论

岩屑含量及粒径通过影响土壤孔隙大小分布及通道弯曲度,从而影响土壤水分扩散。目前,已有研究<sup>[29-32]</sup>表明,>2 mm 粒径的岩屑存在能够显著影响土壤水分扩散,而<2 mm 粒径的岩屑对土壤水分扩

散的影响并没有引起广大学者的重视。本试验研究表明,当岩屑粒径为 0.25~2 mm 时, $D(\theta)$ 和湿润锋前进速率随岩屑含量增加而增加,用幂函数拟合  $D(\theta)$ 和含水率  $\theta$  间的关系,同时用指数函数拟合 Boltzmann 参数  $\lambda$  与  $\theta$  间的关系后,拟合结果能够较

好说明岩屑含量及粒径与  $D(\theta)$  和湿润锋前进速率的关系。当 0.25~2 mm 粒径的岩屑存在时,该粒径的岩屑与纯土颗粒粒径大小基本一致,组成的含岩屑土壤较为均匀,随着岩屑含量的增加,土壤大孔隙数量随之增加,有利于提高土壤水分扩散速率<sup>[33]</sup>。因此,<2 mm 粒径岩屑的存在对土壤水分扩散规律的影响具有重要意义。当岩屑粒径为 2~5 mm 时,随岩屑含量增加, $D(\theta)$  呈先增加后降低再增加的趋势。一方面,在一定扩散时间内,随岩屑含量增加,岩屑占据了可进行水分传导的有效土壤孔隙体积,导致通道弯曲度增大,从而抑制土壤水分扩散<sup>[29]</sup>;另一方面,由于岩屑含量逐渐增加,水分湿润的土壤体积逐渐减小,促进了土壤水分扩散<sup>[29,33]</sup>。该结果与李燕等<sup>[23]</sup> 研究结果基本一致,即不同岩屑含量的  $D(\theta)$  存在阈值。然而,岩屑粒径也是作为分析土壤水分扩散速率的一个重要因素,其对土壤水分扩散速率的影响十分复杂<sup>[34]</sup>。当岩屑含量为 30% 和 70% 时,0.25~2 mm 粒径岩屑对土壤湿润锋前进速率抑制作用最大,当岩屑含量为 50% 时,却表现为 2~5 mm 粒径岩屑对土壤湿润锋前进速率抑制作用最大。原因可能为当岩屑含量为 30% 时,岩屑含量较低,纯土含量较高,岩屑粒径越小,土壤孔隙度越低,从而抑制水分扩散<sup>[12]</sup>;当岩屑含量为 70% 时,岩屑粒径越大,越容易产生连通的大孔隙,大孔隙数量的增加所产生的促进作用大于过水断面产生的阻碍作用,所以 0.25~2 mm 粒径的岩屑对土壤湿润锋前进速率抑制作用最大<sup>[35]</sup>。而当岩屑含量为 50% 时,岩屑含量较高,纯土含量较低,50% 岩屑含量的土壤非毛管孔隙度差别不大,且 2~5 mm 粒径岩屑颗粒级配配比情况较 0.25~2,5~10 mm 粒径岩屑更合理,2~5 mm 粒径岩屑与纯土混合时颗粒大小搭配得当,形成的土壤孔隙均匀且细密,导致土壤水分扩散率较低,抑制土壤水分扩散<sup>[34]</sup>。因此,岩屑含量及粒径能够影响土壤孔隙度和孔隙通道弯曲程度,2 种因素共同影响土壤水分扩散规律。

母岩决定了土壤及岩屑的物理性质,从而影响了土壤水分扩散。本试验研究表明,在相同容重和岩屑含量及粒径下,红棕紫泥土的湿润锋前进速率大于暗棕紫泥土。主要因为紫色黏土岩发育的岩屑及其土壤在微观结构、矿物组成及基础理化性质上均表现出一定的继承性<sup>[30]</sup>。紫色页岩由极细的黏土经过紧压固结、脱水、重结晶后形成,其固结程度较高,土壤质地紧密,黏土矿物含量(蒙脱石)较高。蒙脱石具有较强的胀缩性,容易吸水膨胀,导致孔隙度较低,影响土壤水分扩散。与紫色泥岩相比,紫色页岩及其岩屑与原状土组成的颗粒更细,黏粒含量更高。黏粒含量越高,水在土壤水平扩散的驱动力—基质势越低,从而

降低水分扩散速率<sup>[36]</sup>。因此,暗棕紫泥土湿润锋前进速率低于红棕紫泥土。

## 4 结论

与不添加岩屑的纯土相比,岩屑能够显著影响土壤水分扩散。用幂函数和指数函数分别拟合不同岩屑含量及粒径的  $D(\theta)$  及 Boltzmann 参数  $\lambda$  与含水率  $\theta$  间的关系,其拟合结果能够较好说明随岩屑含量提高,土壤湿润锋前进速率和水分扩散率  $D(\theta)$  整体呈现增加的趋势,且泥岩发育的土壤水分扩散速率明显高于页岩发育的土壤水分扩散速率。

### 参考文献:

- [1] 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):26-33.
- [2] Zhang W H, Wei C F, Li Y, et al. Effects of rock fragments on infiltration and evaporation in hilly purple soils of Sichuan Basin, China [J]. Environmental Earth Sciences, 2011, 62(8):1655-1665.
- [3] 钟守琴,刘波,魏朝富,等.紫色泥岩土壤<2 mm 岩屑及其对抗剪强度的作用机制[J].中国农业科学,2015, 48(23):4846-4858.
- [4] 骆紫藤,牛健植,孟晨,等.华北土石山区森林土壤中石砾分布特征对土壤大孔隙及导水性质的影响[J].水土保持学报,2016,30(3):305-308.
- [5] Descroix L, Viramontes D, Vauclin M, et al. Influence of soil surface features and vegetation on runoff and erosion in the Western Sierra Madre (Durango, Northwest Mexico) [J]. Catena, 2001, 43:115-135.
- [6] Poesen J, Lavee H. Rock fragments in top soils: Significance and processes [J]. Catena, 1994, 23:1-28.
- [7] 王小燕.紫色土碎石分布及其对坡面土壤侵蚀的影响[D].武汉:华中农业大学,2012.
- [8] 潘英华,雷廷武,张晴雯,等.土壤结构改良剂对土壤水动力学参数的影响[J].农业工程学报,2003,19(4):37-39.
- [9] 希勒尔.土壤和水:物理原理和过程[M].北京:农业出版社,1981:92-235.
- [10] 李映强.赤红壤非饱和土壤水扩散率及其影响因素[J].华南农业大学学报,1998,18(2):71-75.
- [11] 戴翠婷,刘窑军,王天巍,等.三峡库区高砾石含量紫色土优先流形态特征[J].水土保持学报,2017,31(1):106-111.
- [12] Chen H, Zhang X P, Ablu M, et al. Effects of vegetation and rainfall types on surface runoff and soil erosion on steep slopes on the Loess Plateau, China [J]. Catena, 2018, 170:141-149.
- [13] Meng C, Niu J, Li X, et al. Quantifying soil macropore networks in different forest communities using industrial computed tomography in a mountainous area of North China [J]. Journal of Soils and Sediments, 2016, 17(9):1-14.

- [14] 吕国安,蔡崇法.丹江口库区石渣土土壤水分有效性研究[J].水土保持学报,2002,16(3):106-109.
- [15] 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):87-91.
- [16] Lavee H, Poesen J W A. Overland flow generation and continuity on stone-covered soil surfaces [J]. Hydrological Processes,1991,5(4):345-360.
- [17] Mukhlisin M, Naam S I. Effect of rock fragments on pore water pressure and slope stability at a hillslope [J]. Journal of the Geological Society of India,2015,86(3):337-343.
- [18] Rawls W J, Brakensiek D L, Simanton J R, et al. Prediction of soil cover and soil rock for rangeland infiltration [J]. Journal of Range Management,1988,41(4):307-308.
- [19] 周蓓蓓,邵明安.土石混合介质饱和和导水率的研究[J].水土保持学报,2006,20(6):62-66.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 龚久平,李燕,刘吉振,等.村镇水源地土壤中砾石对水分运动的影响[J].江西农业大学学报,2010,32(3):621-627.
- [23] 李燕,刘吉振,魏朝富,等.砾石对土壤水分入渗(扩散)的影响研究[J].土壤学报,2011,48(2):437-439.
- [24] Kanamaru T, Sukanuma Y, Oiwane H, et al. The weathering of granitic rocks in a hyper-arid and hypothermal environment: A case study from the Sor-Rondane Mountains, East Antarctica [J]. Geomorphology,2018,317:62-74.
- [25] 熊顺贵.基础土壤学[M].北京:中国农业大学出版社,2001:123-140.
- [26] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000:24-60.
- [27] 雷志栋.土壤水动力学[M].北京:清华大学出版社,1988:92-235.
- [28] 汪明星.重庆山地丘陵区紫色土饱和和导水率传递函数研究[D].重庆:西南大学,2017.
- [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.
- [30] 王小燕,李朝霞,蔡崇法.砾石覆盖紫色土坡耕地水文过程[J].水科学进展,2012,23(1):38-45.
- [31] Ravina I, Magier J. Hydraulic conductivity and water retention of clay soils containing coarse fragments [J]. Soil Science Society of America Journal,1984,48(4):736-740.
- [32] Niu Y B, Gao Z L, Li Y H, et al. Effect of rock fragment content on erosion processes of disturbed soil accumulation under field scouring conditions [J]. Journal of Soils and Sediments,2019,19(4):1708-1723.
- [33] 吴凤平,王辉,罗静波,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.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] 孙志高,刘景双.三江平原典型草甸小叶章湿地土壤水分扩散率研究[J].干旱区资源与环境,2008,22(2):152-156.

(上接第 177 页)

- [26] 龙健,廖洪凯,李娟,等.基于冗余分析的典型喀斯特山区土壤-石漠化关系研究[J].环境科学,2012,33(6):2131-2138.
- [27] 盛茂银,刘洋,熊康宁.中国南方喀斯特石漠化演替过程中土壤理化性质的响应[J].生态学报,2013,33(19):6303-6313.
- [28] 田静,盛茂银,汪攀,等.西南喀斯特土地利用变化对植物凋落物-土壤 C、N、P 化学计量特征和土壤酶活性的影响[J].环境科学,2019,40(9):1-15.
- [29] 白义鑫,王霖娇,盛茂银.我国西南岩溶地区自然植被群落与小生境耦合关系研究[J].世界林业研究,2018,31(5):58-63.
- [30] 廖洪凯,龙健,李娟.不同小生境对喀斯特山区花椒林表土团聚体有机碳和活性有机碳分布的影响[J].水土保持学报,2012,26(1):156-160.
- [31] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2000:18-96.
- [32] 解迎革,李霞.土壤中砾石含量的测定方法研究进展[J].土壤,2012,44(1):17-22.
- [33] 李珊珊,耿增超,姜林,等.秦岭火地塘林区土壤剖面碳氮垂直分布规律的研究[J].西北林学院学报,2011,26(4):1-6.
- [34] 王芳丽,高明,代文才,等.不同土地利用方式下土壤有机碳分布特征[J].水土保持学报,2016,30(4):227-232.
- [35] 曾天慧,胡海波,张勇,等.不同植被群落土壤水溶性有机碳的变化特征[J].水土保持通报,2015,35(3):49-54.
- [36] 贾晓红,李新荣,周玉燕,等.干旱沙区人工固沙植被演变过程中土壤有机碳氮储量及其分布特征[J].环境科学,2012,33(3):938-945.
- [37] 闫丽娟,李广,吴江琪,等.黄土高原 4 种典型植被对土壤活性有机碳及土壤碳库的影响[J].生态学报,2019,39(15):1-9.