

DOI: 10.11766/trxb202003250399

高鹏飞, 冉卓灵, 韩 珍, 李江文, 李兰亭, 魏朝富. 含岩屑紫色土水力特性及饱和导水率传递函数研究[J]. 土壤学报, 2021, 58 (1): 128–139.

GAO Pengfei, RAN Zhuoling, HAN Zhen, LI Jiangwen, LI Lanting, WEI Chaofu. Hydraulic Properties and Saturated Hydraulic Conductivity Pedo-Transfer Function of Rocky Purple Soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58 (1): 128–139.

含岩屑紫色土水力特性及饱和导水率传递函数研究*

高鹏飞, 冉卓灵, 韩 珍, 李江文, 李兰亭, 魏朝富[†]

(西南大学资源环境学院, 重庆 400715)

摘 要: 紫色土中存在的岩石碎屑会对土壤的水力性质如饱和导水率、水分特征曲线产生显著影响。以两种不同母质发育的土壤(紫色页岩和紫色泥岩)为研究对象, 设置 0.25~2、2~5、5~10 mm 三个岩屑粒径水平, 0、30%、50%、70%、100% 五个岩屑含量水平, 采用压力膜仪法和定水头法分别测定水分特征曲线和土壤饱和导水率。利用 BP 神经网络, 选择特定输入变量建立土壤饱和导水率传递函数 PTF1 和 PTF2 (PTF1 的输入变量为岩屑含量、岩屑粒径、初始土壤容重和机械组成, PTF2 的输入变量为岩屑含量、岩屑粒径、初始土壤容重、机械组成、进气压力值和 S 指数(土壤水分特征曲线拐点处斜率的绝对值))。结果表明: 添加岩屑极大提高了土壤饱和导水率和 S 指数, 并且随岩屑含量的增加而增加, 相比之下, 进气压力值随岩屑含量增加而减小, 饱和导水率也随岩屑粒径的增加而增加, 岩屑粒径从 0.25~2 mm 增加至 5~10 mm, 饱和导水率平均提高了 2.3 倍。岩屑粒径对进气压力值和 S 指数影响较小。PTF1 和 PTF2 的几何平均数、几何标准偏差、均方根误差以及 AIC 指数分别为 1.27、5.57、0.16、2.94 和 1.17、1.70、0.06、-53.28, PTF2 的相关值均小于 PTF1, 表明 PTF2 模型的预测效果更好。综上所述, 岩屑的存在显著影响了紫色土的水力特性, 使饱和紫色土导水能力增加而保水能力减弱, 利用神经网络所构建的传递函数 PTF2 可很好地实现含岩屑土壤饱和导水率的预测。

关键词: 紫色土; 岩屑; 土壤水分特征曲线; 进气压力值; S 指数

中图分类号: S152.7 文献标志码: A

Hydraulic Properties and Saturated Hydraulic Conductivity Pedo-Transfer Function of Rocky Purple Soil

GAO Pengfei, RAN Zhuoling, HAN Zhen, LI Jiangwen, LI Lanting, WEI Chaofu[†]

(College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: [Objective] The knowledge about soil hydraulic characteristics plays an important role in optimal soil water management and conservation practices, and hence is essential to evaluation of soil water storage capacity and prediction of water and solute fluxes in soil, which may affect crop yield, fate of agrochemicals, and eventually groundwater quality. Rock fragments are the main factor in rocky purple soils affecting hydraulic properties, such as saturated hydraulic conductivity and water

* 国家重点研发计划项目(2017YFD0800505)资助 Supported by the National Key Research and Development Program of China (No.2017YFD0800505)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: weicf@swu.edu.cn

作者简介: 高鹏飞(1995—), 男, 山西晋城人, 硕士, 主要从事与土壤物理方面相关的研究, E-mail: 18404983640@163.com

收稿日期: 2020-03-25; 收到修改稿日期: 2020-06-27; 网络首发日期(www.cnki.net): 2020-08-04

characteristic curve. 【Method】 Two soils derived from different parent materials, i.e. purple shale and purple mudstone, separately, were studied in this paper. The soils were divided into groups, separately, different in rock fragment size (0.25~2, 2~5 and 5~10 mm) and in rock fragment content (0, 30%, 50%, 70% and 100%) for test. Soil particle size composition was measured with the pipette method. Microscopic morphologies of the purple shale, the purple mudstone, and the groups of soils were observed with a ZEISS EVO 18 scanning electron microscope. Water characteristic curves and saturated hydraulic conductivities of the soils were measured with the pressure film method and constant head method, respectively. Two transfer functions (PTF1 and PTF2) were established to predict saturated hydraulic conductivity with the aid of the BP neural network. PTF1 consisted of four input variables (rock fragment content, rock fragment size, initial soil bulk density, and texture), while PTF2 did of two more input variables (air entry value and S index (absolute value of the slope at the inflection point of water characteristic curve) in addition to the four in PTF1. 【Result】 Results show that saturated hydraulic conductivity was significantly related to rock fragments content, S index, and air entry value. Saturated hydraulic conductivity and S index of the soil improved with increasing rock fragments content, while air entry value did reversely. Moreover, with increasing rock fragment size from 0.25~2 to 5~10 mm, saturated hydraulic conductivity increased by 2.3 times on average. Rock fragment size had little effects on air entry value and S index. The maximum error between predicted and measured values was 0.2225 and 0.1058, and the average error, 0.0756 and 0.0422, respectively for PTF1 and PTF2. The regression coefficients of PTF1 and PTF2 was 0.9416 and 0.9873, respectively. The geometric mean, geometric standard deviation, root mean square error, and AIC index of PTF1 and PTF2 was 1.27 and 1.17, 5.57 and 1.70, 0.16 and 0.06, 2.94, and -53.28, respectively, and the correlation value of PTF2 was lower than that of PTF1, indicating that PTF2 performed better than of PTF1 in predicting saturated hydraulic conductivity. 【Conclusion】 In summary, the presence of rock fragments significantly affects the hydraulic properties of the purple soil, thus improving water conductivity and decreasing water holding capacity of the saturated purple soil. The transfer function PTF2 based on the neural network performs well in predicting saturated hydraulic conductivity of rock-containing soils.

Key words: Purple soils; Rock fragments; Soil water characteristic curve; Air intake pressure value; S index

紫色土广泛分布于四川盆地,是西南地区重要的耕作土壤之一^[1]。特殊的物理风化作用使得紫色土中含有大量的岩石碎屑^[2-3],岩屑的存在会影响土壤水分物理性质,从而对土壤入渗、蒸发、径流与土壤侵蚀等水文过程产生影响。岩屑对土壤入渗的影响研究表明,当岩屑覆盖于土壤表面时,可以增加土壤入渗速率,提高土壤水分入渗能力^[4]。当岩屑存在于土壤内部时,岩屑在土壤中的位置、岩屑粒径、及岩屑含量均会对土壤的入渗过程产生影响,其中,学者普遍认为岩屑含量对土壤水分入渗能力的影响存在阈值,但不同的学者所得到的阈值不同。如王小燕等^[5]认为当岩屑含量为 20%~30%时,岩屑的存在增强了土壤入渗能力,当岩屑含量提高至 30%时,土壤的入渗能力被削弱。而朱元骏和邵明安^[6]的研究表明,岩屑含量为 10%时,土壤入渗率最大,当岩屑含量超过 10%时,入渗率反而降低。岩屑对土壤蒸发的影响研究表明,当岩屑覆盖于土壤表面时,可显著降低土壤水分的蒸发速率,还能作为作物生长持续提供有效水^[7],在土壤岩屑含量为 0~20%时,土壤蒸发速率随岩屑含量增

加而降低,但在岩屑含量超 20%时,土壤蒸发速率基本保持稳定,土壤蒸发速率随岩屑粒径增大有升高的趋势^[8]。岩屑对径流及土壤侵蚀的影响研究表明,岩屑的存在改变了土壤的物质组成和结构,增强了土壤的抗蚀性和抗冲性,随着岩屑含量的增加,径流含沙率和土壤流失量显著降低^[5-9]。还有一些学者对岩屑对土壤饱和导水率及水分特征曲线的影响做了相关研究^[10-11]。此外,神经网络作为一种非常有效的预测技术,已被用于土壤水分特征曲线^[12-13]、土壤饱和导水率^[14-15]、土壤阳离子交换量^[16]等一些土壤理化指标的预测中。学者们在研究岩屑对土壤水力特性的影响时,主要关注点为土壤中>2 mm 的岩屑,鲜有学者关注土壤中<2 mm 的岩屑对土壤饱和导水率产生的影响,且未能建立含岩屑紫色土饱和导水率的传递函数实现对含岩屑紫色土饱和导水率的预测。本文以四川盆地发育的页岩紫色土和泥岩紫色土为研究对象,探讨土壤类型以及岩屑含量和粒径对紫色土饱和导水率的影响并构建传递函数对含岩屑紫色土饱和导水率进行预测,旨在揭示含岩屑紫色土导水特性,为紫色土地区

农田水分管理工作提供有效的数据支撑及技术指导。

1 材料与方 法

1.1 样品采集与分析

本文以重庆地区紫色页岩和紫色泥岩发育的紫色土(称页岩紫色土和泥岩紫色土)为研究对象,试验所用页岩紫色土采自重庆市北碚区龙车寺

(105°25'40"E, 29°45'48"N), 试验所用泥岩紫色土采自重庆市潼南区柏梓镇(105°45'31"E, 30°09'04"N)。将采集来的两种不同母质发育的土壤去除杂质后, 风干、研磨、过筛制成小于 2 mm 的土样, 对土壤的基础物理特性进行测定, 其中土壤含水率采用烘干法^[17], 土壤容重采用环刀法^[17], 颗粒组成采用吸管法^[17]。结果如表 1。同时利用 ZEISS EVO 18 扫描电镜对紫色页岩、紫色泥岩及其发育的土壤的微观形态进行观察。

表 1 供试土壤基本物理特性

Table 1 Physical properties of tested soils

土壤类型 Soil type	容重 Bulk density/ (g·cm ⁻³)	含水率 Water content/%	砂粒 Sand/% (0.05~2 mm)	粉粒 Silt/% (0.002~0.05 mm)	黏粒 Clay/% (<0.002 mm)
页岩紫色土 ^①	1.21	21.24	29.01	37.88	33.11
泥岩紫色土 ^②	1.25	21.20	20.28	42.29	37.43

①Purple shale-derived soil, ②Purple mudstone-derived soil

李燕等^[2]研究指出丘陵紫色土中岩屑含量最高可达 70%以上。将采集的碎石筛分成 0.25~2、2~5 和 5~10 mm 三个粒级组, 将两种紫色土分别与各粒级组的碎石按碎石质量 0、30%、50%、70%、100% 均匀混合, 同时控制装样容重为 1.3 g·cm⁻³。其中 0 和 100% 为不添加岩屑和纯岩屑结构的对照试验。利用定水头法^[18]测量含岩屑土壤的饱和和导水率, 选用压力膜仪法^[19]测量含岩屑紫色土的水分特征曲线, 每个处理重复 3 次。设置水柱压力分别为 101.9、305.9、509.8、713.8、1 019.7、2 039.4、3 059.1、5 098.6、6 118.3 cm。

1.2 土壤水分特征曲线参数计算

Dexter^[20]提出 S 指数, 并将其定义为土壤水分特征曲线拐点处斜率的绝对值, 通过将水分特征曲线表示为压力水头的对数与重量含水率的曲线, 并在此基础上对 S 值进行求解。而 Guimarães Santos 等^[21]认为将水分特征曲线表示为体积含水率与压力水头的曲线是描述土壤水力特性的最可靠的方法。为此, 结合 Dexter 对 S 指数的定义求得了水分特征曲线表示为体积含水率与压力水头的曲线条件下, 推求 S 指数的计算公式。经过变形后, 其表达式与 Sillers 等^[22]提出的 S 值计算公式相同。土壤水分特征曲线参数进气压力值和 S 指数由式(1)~式(4)

计算, 其结构如下:

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) / [1 + (ah)^n]^m \quad (1)$$

$$H_{aev} = 1/a \quad (2)$$

$$H_i = \left[\frac{n-1}{nma^n + a^n} \right]^{1/n} \quad (3)$$

$$S = \frac{am(mn+1)^{\frac{nm+1}{n}} (n-1)^{\frac{n-1}{n}} (\theta_s - \theta_r)}{n^m (m+1)^{m+1}} \quad (4)$$

式中, θ 为土壤体积含水量 (cm³·cm⁻³), h 为压力水头 (cm), θ_r 为土壤残余含水率 (cm³·cm⁻³), θ_s 为土壤饱和含水率 (cm³·cm⁻³), a 与土壤进气值有关 (cm⁻¹), n 和 m 为表征土壤水分特征曲线形状的参数。利用 RETC 软件对所测得土壤水分特征曲线数据行拟合, 拟合方程为 van Genuchten 方程^[23](式(1)), 拟合 van Genuchten 方程参数见表 2。进气压力值近似为参数 a 的倒数(式(2))。对式(1)求二阶导数令二阶导数为 0, 可得到土壤水分特征曲线拐点压力 H_i (式(3)), 将 H_i 代入式(1)的一阶导数, 可得到土壤水分特征曲线拐点处的斜率的绝对值即 S 指数(式(4))。

1.3 含岩屑紫色土饱和导水率传递函数的构建

1.3.1 BP 神经网络简介及其实现 BP 神经网络是一种基于误差反向传播算法训练的多层神经网络。由输入层，输出层，一个或多个隐含层构成。本论文中 BP 神经网络的构建在 Matlab2016a 中的神经网络工具箱中进行。其中，隐含层神经元个数为 10，使用算法为 Levenberg-Marquardt 算法，将所有 30 个样本随机分为两份样本子集：训练集、测试集，样本个数分别为 20 和 10，利用训练集来建立模型，测试集用于模型验证。

1.3.2 传递函数输入变量的选择 含岩屑土壤饱和导水率与岩屑含量密切相关^[24-26]。有学者研究发现土壤水分特征曲线 van Genuchten 方程参数 a （进气压力值倒数）及 S 指数与土壤饱和导水率的数值高度相关^[20, 27-28]，使用 SPSS 对这些参数进行相关性分析，结果如表 2。以岩屑含量、岩屑粒径、初始土壤容重、颗粒组成为输入变量建立传递函数 PTF1，岩屑含量、岩屑粒径、初始土壤容重、初始土壤颗粒组成、 S 指数、进气压力值为输入变量，建立传递函数 PTF2。

表 2 饱和导水率与传递函数输入变量 Pearson 相关系数

Table 2 Pearson coefficient between saturated hydraulic conductivity and input variables of transfer functions

	饱和导水率 ^①	岩屑粒径 ^②	岩屑含量 ^③	S 指数 S-index	进气压力值 ^④	砂粒 Sand	粉粒 Silt	黏粒 Clay
饱和导水率 ^①	1							
岩屑粒径 ^②	0.138	1						
岩屑含量 ^③	0.699**	0.000	1					
S 指数 S-index	0.665**	-0.090	0.545**	1				
进气压力值 ^④	0.630**	-0.128	0.537**	0.984**	1			
砂粒 Sand	-0.166	0.000	0.000	-0.077	-0.053	1		
粉粒 Silt	0.166	0.000	0.000	0.077	0.053	-1.000**	1	
黏粒 Clay	0.166	0.000	0.000	0.077	0.053	-1.000**	1.000**	1

注：**，*分别表示极显著（ $P<0.01$ ）和显著（ $P<0.05$ ）相关。Note: **, * represents extremely significant ($P<0.01$) and significant ($P<0.05$), respectively. ①Saturated hydraulic conductivity, ②Rock fragments size, ③Rock fragments content, ④Air intake pressure value

1.3.3 传递函数模型评价指标 模型评价指标采用样本误差比的几何平均数（GMER）、几何标准偏差（GSDER）、均方根误差（RMSE）、AIC 指数（Akaike's information criterion），通过式（5）~式（9）进行计算。

$$GMER = \text{Exp} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(\varepsilon_i) \right) \quad (5)$$

$$GSDER = \text{Exp} \left[\left(\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [\ln(\varepsilon_i) - \ln(GMER)]^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (6)$$

$$\varepsilon_i = \frac{k_{pi}}{k_{mi}} \quad (7)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (K_{pi} - K_{mi})^2} \quad (8)$$

$$AIC = 2p + n \ln \left(\sum_{i=1}^n (K_{pi} - K_{mi})^2 \right) \quad (9)$$

式中， n 为样本点数量， K_{pi} 为饱和导水率预测值， K_{mi} 为饱和导水率实测值， p 为传递函数输入变量个数。若 $GMER=1$ ，则表示预测值与实测值完全吻合；若 $GMER < 1$ ，则表示预测值要小于实测值；若 $GMER > 1$ ，则表示模型对实测值预测偏高。如果 $GSDER=1$ ，则表示预测值与实测值完全吻合，且其值会随样本偏差增大而增大。RMSE 和 AIC 的值越小，模型的预测效果越好。

2 结果

2.1 土壤类型和岩屑粒径及含量的改变对饱和导水率的影响

由图 1 可得，无岩屑页岩紫色土饱和导水率

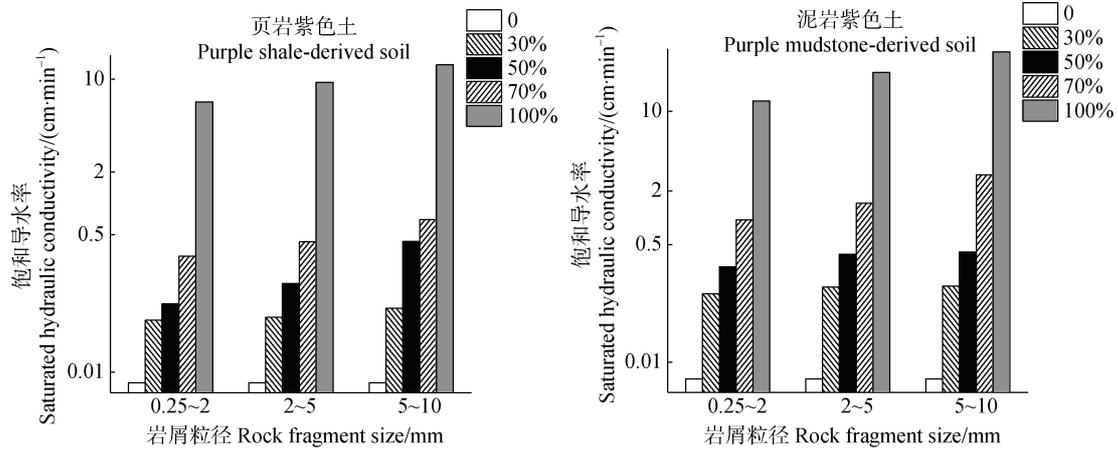
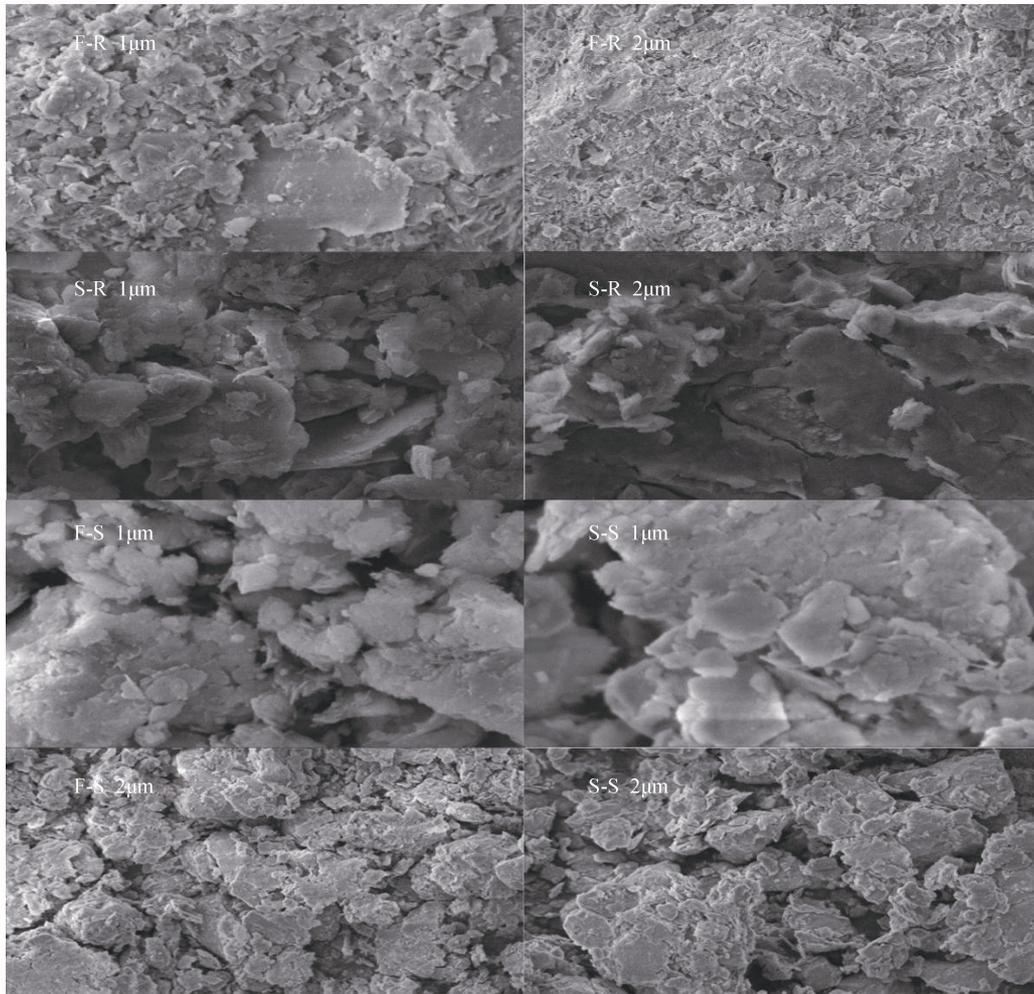


图1 不同岩屑粒径和岩屑含量对紫色土饱和导水率的影响

Fig. 1 Effect of rock fragments on saturated hydraulic conductivity of purple soil relative to particle size and content of the rock fragment

($0.007 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$) 大于无岩屑泥岩紫色土的饱和导水率 ($0.0052 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$)。页岩紫色土和泥岩紫色土岩屑粒径为 $0.25\sim 2$ 、 $2\sim 5$ 、 $5\sim 10 \text{ mm}$ ，纯岩屑结构饱和导水率分别为 7.10 、 9.60 、 $12.32 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ 和 11.90 、 18.30 、 $24.11 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ 。纯岩屑结构与无岩屑紫色土相比，饱和导水率均提高了千倍以上。岩屑含量 30% 时，页岩紫色土三种岩屑粒径 ($0.25\sim 2 \text{ mm}$ 、 $2\sim 5 \text{ mm}$ 、 $5\sim 10 \text{ mm}$) 饱和导水率分别为 0.051 、 0.055 、 $0.072 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ ，泥岩紫色土 3 种岩屑粒径 ($0.25\sim 2 \text{ mm}$ 、 $2\sim 5 \text{ mm}$ 、 $5\sim 10 \text{ mm}$) 饱和导水率分别为 0.11 、 0.14 、 $0.14 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ ，相较于无岩屑紫色土，饱和导水率均有明显提升。岩屑的存在会改变岩屑与土壤细土部分交界处的土壤结构，一方面使土壤过水断面增加，阻碍水分的移动，另一方面岩屑会增加土壤中大孔隙的数量，促进水分的运输。不同类型岩屑对不同类型土壤中水分运动的促进（阻碍）作用不同。如王慧芳等^[11]的研究表明，风化程度低的碎石对黏壤土具有明显的增大饱和导水率的作用，且碎石含量越高，增加效果越明显。而风化程度高的碎石对土壤结构无明显的改善作用，且对黏壤土具有减小饱和导水率的作用。Khetdan 等^[29]的研究表明饱和导水率随岩屑含量的增加（从 0 增加到 20%）而降低，但随后随着岩屑含量的增加而增加。本论文研究结果表明岩屑含量为 30% 时，岩屑对页岩紫色土和泥岩紫色土水分运动的促进作用大于对水分运动的阻碍作用，饱和导水率相比无岩屑紫色土有一定提升。其中，泥岩紫色土饱和导水率提升幅度（平均提升 25.5 倍）要大于页岩紫色土（平均提升 8.5 倍）。这主要是因

为紫色页岩、紫色泥岩及其发育的土壤的结构特征不同。紫色页岩结构紧密，孔隙面积占比小，其表面微观形态主要表现为片状体主要以面-面接触方式聚合形成较大的块状或粒状体，颗粒之间的孔隙多数为几微米甚至更小的小孔隙为主。紫色泥岩结构松散，孔隙占比大，其表面微观形态主要表现为小片状体主要以边-边接触、面-面接触聚合形成片状体与块状体的大颗粒，其大孔隙面积占比比较紫色页岩大（图 2）。与紫色页岩发育而来的土壤相比，紫色泥岩发育的土壤的聚合体的尺寸更大，大孔隙数量更多，较小孔隙的数量少（图 2）。当岩屑与土壤充分混合后，泥岩紫色土的结构特征决定了土壤与岩屑交界处更容易产生大孔隙，而土壤中大孔隙的数量及连通性是影响饱和导水率的主要因素^[30-31]。岩屑含量增加到 50% 以上时，土壤的骨架部分可视为由岩屑构成，土壤细土部分作为填充物分散在岩屑周围，此时随岩屑含量的增加，水分在土壤与岩屑交界处运动路径的曲折性及优先流动路径的连续性均会增加^[32]，继而导致页岩紫色土和泥岩紫色土饱和导水率随岩屑含量的增加而继续增加。页岩紫色土、泥岩紫色土岩屑粒径由 $0.25\sim 2 \text{ mm}$ 增加至 $5\sim 10 \text{ mm}$ ，饱和导水率平均增加了 2.7 倍和 2.0 倍。饱和导水率随岩屑粒径的增加而增加，但增加幅度较小。表明在高岩屑含量状态下，岩屑粒径不是影响紫色土饱和导水率的主要因素。由岩屑含量增加所引起的土壤大孔隙数量增加及连通性的提升对水分运动的促进作用要远远大于岩屑粒径所引起的土壤中溶质运移路径的曲折度的增加对水分运动的阻碍作用。



注：F-R 代表紫色页岩，S-R 代表紫色泥岩；F-S 代表页岩紫色土，S-S 代表泥岩紫色土。Note: F-R stands for purple shale, S-R stands for purple mudstone; F-S represents purple shale-derived soil, S-S represents purple mudstone-derived soil.

图 2 紫色泥岩、紫色页岩及其发育土壤的微观结构

Fig. 2 Micromorphologies of purple shale, purple mudstone, purple shale-derived soil and purple mudstone-derived soil

2.2 土壤类型和岩屑粒径与含量的改变对土壤水分特征曲线参数的影响

S 指数数学意义上是指土壤水分特征曲线拐点处斜率的绝对值，反映土壤中一定体积范围内孔隙分布的集中程度^[20]，并可作为土壤物理质量的评价指标对土壤的耕作性能以及透水性能（非饱和导水率）进行评定^[33-34]。对于含岩屑土壤而言，土壤水分特征曲线拐点压力较小，拐点压力作用下开始排水的孔隙的体积较大。因此在含岩屑土壤中，S 指数可间接反映土壤中孔隙的分布密度。由图 3 可得，页岩紫色土和泥岩紫色土岩屑含量为 100%时，岩屑粒径为 0.25~2、2~5、5~10 mm 的 S 指数均提高了千倍以上。纯岩屑结构紫色土 S 指数相比无岩屑紫色土有巨大提升，表明纯岩屑结构紫色土大

孔隙的分布密度要大于无岩屑紫色土。岩屑含量为 30%时，页岩紫色土和泥岩紫色土三种岩屑粒径（0.25~2 mm、2~5 mm、5~10 mm）S 指数分别为 0.036、0.033、0.036 和 0.092、0.032、0.026。岩屑含量为 50%时，页岩紫色土和泥岩紫色土三种岩屑粒径（0.25~2 mm、2~5 mm、5~10 mm）S 指数分别为 0.180、0.160、0.201 和 0.532、0.056、0.086。岩屑含量为 70%时，页岩紫色土和泥岩紫色土 S 指数随岩屑含量的增加而继续提高。S 指数随岩屑粒径的增加无明显变化规律。页岩紫色土岩屑含量为 30%、50%时，5~10 mm 粒径岩屑 S 指数最大，岩屑含量为 70%时，0.25~2 mm 粒径岩屑 S 指数最大。泥岩紫色土岩屑含量为 30%、50%和 70%时，0.25~2 mm 粒径岩屑 S 指数最大。

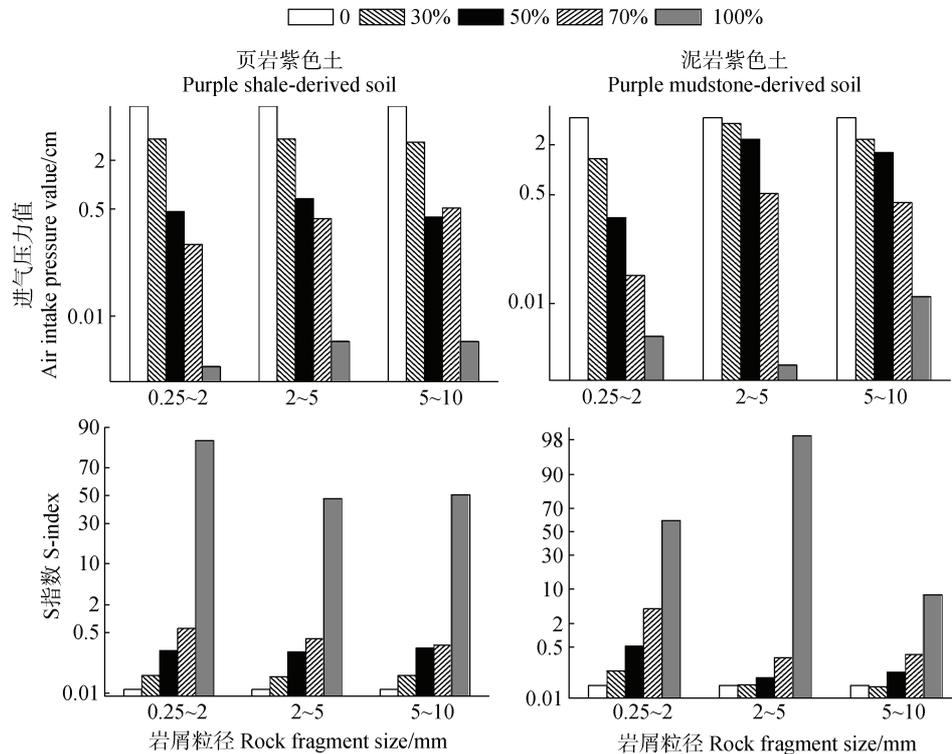


图3 不同岩屑粒径和岩屑含量对进气压力值和 S 指数的影响

Fig. 3 Effect of rock fragment on air intake pressure and S index relative to particle size and content of the rock fragment

进气压力值为空气开始进入土壤时的压力，可间接反映土壤中孔隙的体积，及土壤在低吸力阶段的保水能力。进气压力值越小，表示土壤在低吸力阶段的保水能力越差。由图 3 可得，页岩紫色土和泥岩紫色土岩屑含量为 100% 时，岩屑粒径为 0.25~2、2~5、5~10 mm 的进气压力值较无岩屑紫色土均减小 99% 以上，进气压力值随岩屑含量的增加而减小表明岩屑的存在增加了土壤中大孔隙的体积，使土壤进气压力值降低，土壤在低吸力阶段便开始排水，土壤保水能力下降。岩屑含量为 30% 时，页岩紫色土和泥岩紫色土三种岩屑粒径 (0.25~2 mm、2~5 mm、5~10 mm) 进气压力值分别为 3.38、3.39、3.13 cm 和 1.39、3.36、2.29 cm。岩屑含量由 30% 增加至 70% 时，进气压力值随岩屑含量的增加而降低。岩屑含量达到 70% 时，页岩紫色土和泥岩紫色土进气压力值与对照组相比平均降低了 95% 和 92%。进气压力值随岩屑粒径的增加无明显规律，页岩紫色土岩屑含量为 30% 和 50% 时，2~5 mm 粒径岩屑进气压力值最大，岩屑含量为 70% 时，5~10 mm 粒径岩屑进气压力值最大。泥岩紫色土岩屑含量为 30%、50%、70% 时，2~5 mm 粒径岩屑进气压力值最大。

S 指数以及进气压力值是土壤水分特征曲线参数中最敏感的参数^[35]。本文试验结果表明，S 指数和进气压力值分别随岩屑含量的增加而增加和减小，间接表明岩屑的存在增加了土壤中大孔隙的体积及数量，土壤在低吸力阶段保水能力变差。但 S 指数及进气压力值均由 van Genuchten 方程参数计算得到，其与真实土壤中孔隙分布仍有一定差距。此外，五参数 VG 方程在含岩屑土壤中的适用性以及 S 指数和空气进气值的计算方式均会对 S 指数及空气进气值的精密密度产生影响，导致部分异常值的出现 (如泥岩紫色土岩屑粒径为 5~10 mm，岩屑含量为 100% 时 van Genuchten 方程参数 n 的值偏大)。两种不同母质发育的土壤随岩屑粒径及岩屑含量的变化呈现出不同的变化规律。如泥岩紫色土岩屑粒径为 0.25~2 mm 时，三种岩屑含量 (30%、50%、70%) 对应的 S 指数均大于页岩紫色土，进气压力值均小于页岩紫色土。岩屑粒径增加至 2~5 mm 以及 5~10 mm 时，泥岩紫色土和页岩紫色土的 S 指数与进气值无明显变化规律。这是因为 0.25~2 mm 粒径岩屑其粒径大小与土壤颗粒最为接近，对土壤结构的影响程度最小，其大孔隙的体积和数量和导水性能主要由母岩和土壤的结构特征决定 (由图 2 可得，紫色泥岩及其发

育的土壤中聚合体的尺寸较大, 大孔隙数量较多)。岩屑粒径增加至 2~5 mm 以及 5~10 mm 时, 岩屑对土壤结构的影响较大, 母岩以及土壤的结构特征不再是影响土壤中大孔隙数量的主要因素, 其 S 指数及进气压力值无明显变化规律。

2.3 含岩屑紫色土饱和导水率传递函数预测

在 MATLAB 中利用训练集样本建立传递函数 PTF1 和 PTF2, 其中 PTF1 训练集样本 MSE (Mean Squared Error) 为 0.023 6, 决定系数为 0.983 2, epoch

(整个训练集被训练算法遍历的次数) 次数为 89。PTF2 训练集样本 MSE (为 0.003 1, 决定系数为 0.989 9, epoch 次数为 94。利用测试集 10 组预测样本对所构建传递函数 PTF1 和 PTF2 进行检验, 预测结果见表 3。

由表 3 可得, PTF1 预测值的最大误差为 0.222 5, 平均误差为 0.075 6, PTF2 预测值的最大误差为 0.105 8, 平均误差为 0.042 2。岩屑含量较高、饱和导水率数值较大时, PTF1 与 PTF2 的预测效果很好,

表 3 传递函数预测结果

Table 3 Predictions with the transfer functions

土壤类型 Soil type	岩屑粒径 Rock fragments size/mm	岩屑含量 Rock fragments content/%	K_s 实测值 Measured K_s / ($\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$)	K_s 预测值 Predicted K_s / ($\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$)	绝对误差 Absolute error/ ($\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$)	
PTF1	F	0.25~2	0	0.007 0	0.229 5	0.222 5
	F	0.25~2	70	0.295 2	0.424 9	0.129 7
	F	2~5	70	0.423 4	0.553 0	0.129 6
	F	5~10	70	0.717 4	0.732 2	0.014 8
	S	2~5	50	0.379 1	0.329 7	0.049 4
	S	5~10	50	24.111 8	24.002 2	0.109 6
	S	5~10	70	2.880 2	2.883 7	0.003 5
	S	0.25~2	0	0.005 2	0.056 4	0.051 2
	S	0.25~2	50	0.263 0	0.246 0	0.017 0
	S	0.25~2	30	0.113 2	0.084 8	0.028 4
PTF2	S	2~5	50	0.379 1	0.273 3	0.105 8
	S	0.25~2	100	11.895 1	11.892 5	0.002 6
	S	2~5	30	0.113 2	0.113 6	0.000 4
	F	0.25~2	30	0.050 9	0.070 9	0.020 0
	F	0.25~2	70	0.295 2	0.308 7	0.013 5
	F	0.25~2	100	7.098 1	7.122 3	0.034 2
	S	0.25~2	0	0.005 2	0.004 7	0.000 5
	S	5~10	70	2.880 2	3.029 2	0.149 0
	S	5~10	50	0.409 9	0.410 7	0.000 8
	S	2~5	100	18.308 9	18.310 7	0.001 8

注: F 代表页岩紫色土, S 代表泥岩紫色土。Note: F stands for Purple shale-derived soil, and S for Purple mudstone-derived soil.

误差较小,当岩屑含量较低、饱和导水率数值较小时,PTF2的预测效果好于PTF1。

由图4可得,两种传递函数PTF1和PTF2的回归系数均较高,分别为0.9416和0.9873,表明,PTF1和PTF2均很好地拟合了含岩屑紫色土饱和导水率随岩屑粒径及岩屑含量的变化趋势。PTF1和PTF2的GMER值均大于1,表明,两种传递函数的预测值偏高,PTF1的偏高程度更大。PTF1的RMSE、AIC、GSDER的值均大于PTF2,其中PTF2的AIC要远小于PTF1,说明,PTF2传递函数较PTF1传递函数的预测效果好,加入由土壤水分特征曲线推求

出的参数(VG方程参数a、S指数),显著提高了含岩屑紫色土饱和导水率传递函数的预测精度,但另一方面在实验室中要获取VG方程参数a、S指数需对含岩屑土壤的土壤水分特征曲线进行测定,需要消耗一定的时间和精力,这在一定程度上降低了PTF2的实用性。鉴于含岩屑土壤结构的复杂性,利用含岩屑土壤的基本理化性质对其水力特性进行预测十分困难,基于本论文的研究成果,以实验室实测含岩屑土壤的水分特征曲线数据为基础,结合含岩屑土壤的基本理化性质可实现由土壤水分特征曲线数据到饱和导水率和非饱和导水率的推求。

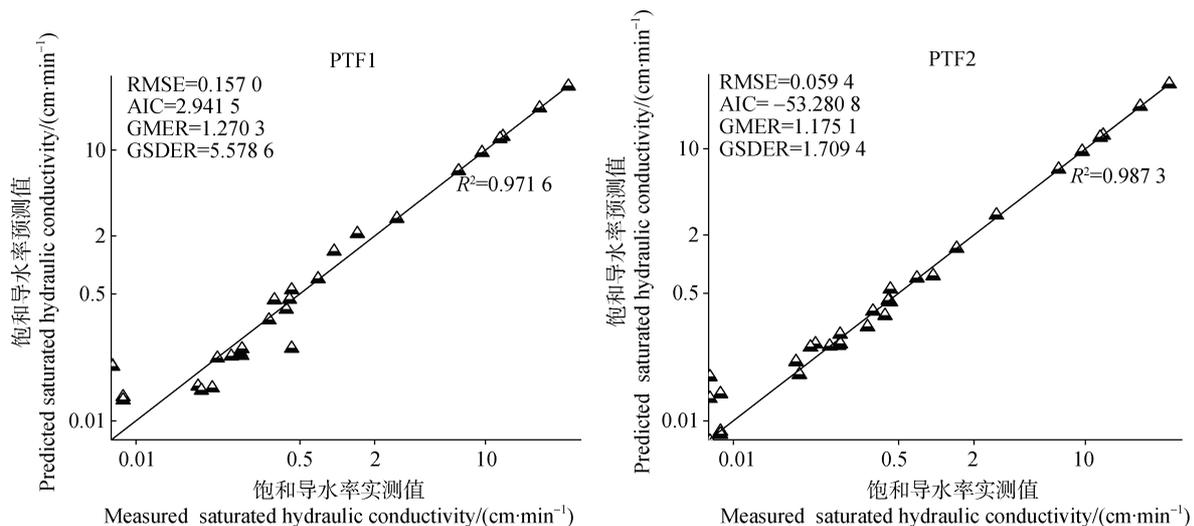


图4 PTF1与PTF2实测值与预测值对比

Fig. 4 Comparison between measured values and predicted values of PTF1 and PTF2

3 讨论

岩屑的存在显著影响了含岩屑土壤中水分的移动,含岩屑紫色土饱和导水率随岩屑含量及岩屑粒径的增加而增加,使得传统的饱和导水率传递函数在含岩屑土壤中的适用性很差^[25]。本研究尝试以岩屑含量、岩屑粒径、以及土壤的基础理化性质为输入变量,BP神经网络为工具建立了含岩屑紫色土饱和导水率的传递函数PTF1,但预测精度相对较差。原因可能是岩屑会改变岩屑与土壤细土部分交界处的孔隙结构,在交界处产生大孔隙。当岩屑含量较低时,随岩屑含量的增加,大孔隙的数量也随之增加,但大孔隙之间的连通性并不高。当岩屑含量增加到某一范围时,大孔隙之间的连通性显著提高,形成大孔隙通道,在大孔隙通道内发生优先流,水

分移动速度加快,饱和导水率有明显跃升。仅仅以岩屑含量及岩屑粒径作为输入参数,有一定的局限性,无法反映出高岩屑含量下饱和导水率随岩屑含量的增加而迅速提高的过程。于是,本研究将由土壤水分特征曲线推求出的进气压力值及S指数加入到传递函数的输入变量中,建立了PTF2。此前已有学者将由土壤水分特征曲线推求出的VG方程的参数a及S指数作为参数对饱和导水率进行计算,如Guarracino^[27](式(10))、Mishra和Parker^[28](式(11))、Aschonitis等(式(12)、式(13))^[35],他们所提出的方程结构如下:

$$K_s = 4.65 \times 10^4 \Phi a^2 \quad (10)$$

$$K_s = C(\theta_s - \theta_r)^{5/2} a^2 \quad (11)$$

$$K_s = C_1 f^{(C_2 f)} \quad (12)$$

$$K_s = C_1 |S_i| (C_2 f)^{(C_3 f)} \quad (13)$$

式中, C_1 、 C_2 、 C_3 为拟合参数, Φ 为有效孔隙度, a 、 θ_s 、 θ_r 为土壤水分特征曲线 VG 方程拟合参数, S_i 为土壤水分特征曲线拐点处的斜率, 即 S 指数, 式 (12)、式 (13) 中 f 为 VG 方程参数 a 与有效孔隙度的乘积。这些方程在不含岩屑的土壤中取得了较好的效果, 表明土壤饱和导水率与进气压力值和 S 指数具有良好的相关性, 但并不适用于含岩屑土壤 (随岩屑含量的增加, 饱和导水率迅速提升, 最高可为对照组的千倍以上, 式 (10)~式 (14) 中方程拟合参数较少, 无法准确拟合出饱和导水率随岩屑含量的增加而迅速提升的趋势)。本论文将进气压力值及 S 指数加入到 PTF1 的输入变量中, 建立了含岩屑紫色土饱和导水率传递函数 PTF2, 并取得了很好的效果。原因是进气压力值以及 S 指数均为敏感性较强的参数^[33-34, 36], 与土壤孔隙分布状况有关, 可以反映土壤中大孔隙结构特征的变化, 继而量化大孔隙结构特征, 改变所引起的含岩屑紫色土饱和导水率的变化。

此外, 本论文研究成果还可为含岩屑紫色土非饱和导水率的研究提供帮助。传统模型如 van Genuchten-Mualem 模型^[23]、Brooks-Corey 模型^[37]、Campbell-Norman 模型^[38], 利用饱和导水率及土壤水分特征曲线对土壤非饱和导水率进行计算。其中饱和导水率及土壤水分特征曲线作为计算使用的参数, 均由实验室测定得到, 在一定程度上增加了实验成本。本论文结果表明, 使用岩屑含量、岩屑粒径、土壤基础理化性质以及由土壤水分特征曲线推求出进气压力值及 S 指数实现了对含岩屑紫色土饱和导水率的预测, 结合上述相关模型, 可实现由含岩屑紫色土基础性质及水分特征曲线到含岩屑紫色土饱和导水率及非饱和导水率的计算。

4 结 论

含岩屑紫色土饱和导水率随岩屑含量及岩屑粒径的增加而增加, 岩屑含量是影响饱和导水率的主要因素, 饱和导水率随岩屑含量的增加平均增加了 14 倍~2 431 倍, 岩屑的存在可显著提高饱和和紫色土的

导水性能。岩屑的存在可显著提高饱和和紫色土的导水性能。进气压力值随岩屑含量增加而减小, 随岩屑粒径增加无明显变化规律。S 指数随岩屑含量增加而显著增加, 平均增加 2 倍~3 043 倍。随岩屑粒径增加无明显变化规律。以 BP 神经网络为工具, 岩屑含量、岩屑粒径、进气压力值、S 指数、及土壤基础理化性质作为输入变量, 建立 PTF2 对含岩屑紫色土饱和导水率的预测, 精度较高, 使用这种方法对含岩屑紫色土饱和导水率进行预测是可行的, 但由于其输入变量中增加了两个不易获取的参数, 这在一定程度上限制了它在生产生活中的应用。

参考文献 (References)

- [1] Yan Z M, Yuan D G, Yu X X, et al. Proposal on revising color definition for "L.C. of Purplish Sandstones and Shales"—Based on color characteristics of parent rock of purplish soil in Sichuan[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57 (1): 60—70. [晏昭敏, 袁大刚, 余星兴, 等. “紫色砂、页岩岩性特征”颜色修订建议——基于四川紫色土母岩颜色特征[J]. *土壤学报*, 2020, 57 (1): 60—70.]
- [2] Li Y, Wei C F, Liu J Z, et al. Characteristics and spatial distribution of rock fragments in hilly purple soils of Sichuan Basin[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2008, 21 (5): 1320—1325. [李燕, 魏朝富, 刘吉振, 等. 丘陵紫色土砾石的性质及其空间分布[J]. *西南农业学报*, 2008, 21 (5): 1320—1325.]
- [3] Wang X Y, Wang T W, Cai C F, et al. Spatial distribution of rock fragments in purple soil in Three Gorges Reservoir area[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52 (2): 293—302. [王小燕, 王天巍, 蔡崇法, 等. 三峡库区紫色土的碎石分布特征[J]. *土壤学报*, 2015, 52 (2): 293—302.]
- [4] Bai Y R, Zhao Y P, Wang Y Q, et al. Soil infiltration process and model analysis of field mulched with different thickness of gravel-sand in Ningxia[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31 (4): 81—85. [白一茹, 赵云鹏, 王幼奇, 等. 宁夏砂田不同砾石覆盖厚度土壤入渗过程及模型分析[J]. *水土保持学报*, 2017, 31 (4): 81—85.]
- [5] Wang X Y, Wang T W, Cai C F, et al. Processes of rainfall infiltration, runoff and sediment yield on purple soil slope containing rock fragments[J]. *Advances in Water Science*, 2014, 25 (2): 189—195. [王小燕, 王天巍, 蔡崇法, 等. 含碎石紫色土坡面降雨入渗和产流产沙过程[J]. *水科学进展*, 2014, 25 (2): 189—195.]
- [6] Zhu Y J, Shao M A. Processes of rainfall infiltration and sediment yield in soils containing different rock fragment

- contents[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22 (2): 64—67. [朱元骏, 邵明安. 不同碎石含量的土壤降雨入渗和产沙过程初步研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(2): 64—67.]
- [7] van Wesemael B, Poesen J, Kosmas C S, et al. Evaporation from cultivated soils containing rock fragments[J]. Journal of Hydrology, 1996, 182 (1/4): 65—82.
- [8] Shi Z J, Wang Y H, Yu P T, et al. Effect of rock fragments on the percolation and evaporation of forest soil in the Liupan Mountains, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28 (12): 6090—6098. [时忠杰, 王彦辉, 于澎涛, 等. 六盘山森林土壤中的砾石对渗透性和蒸发的影响[J]. 生态学报, 2008, 28 (12): 6090—6098.]
- [9] Han Z, Wang X Y, Li X X. Processes of runoff velocity and stages of soil erosion under the effect of rock fragment content[J]. Journal of China Agricultural University, 2016, 21 (10): 102—108. [韩珍, 王小燕, 李馨欣. 碎石含量影响下紫色土坡面径流流速变化过程及土壤侵蚀的阶段性[J]. 中国农业大学学报, 2016, 21 (10): 102—108.]
- [10] Zhou B B, Shao M A. Study on saturated hydraulic conductivity of soil stone mixtures[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20 (6): 62—66. [周蓓蓓, 邵明安. 土石混合介质饱和导水率的研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20 (6): 62—66.]
- [11] Wang H F, Shao M A, Wang M Y. Hydraulic conductivity of mixtures of rock fragments and fine earth[J]. Acta Pedologica Sinica, 2010, 47 (6): 1086—1093. [王慧芳, 邵明安, 王明玉. 小碎石与细土混合介质的导水特性[J]. 土壤学报, 2010, 47 (6): 1086—1093.]
- [12] Koekkoek E J W, Booltink H. Neural network models to predict soil water retention[J]. European Journal of Soil Science, 1999, 50 (3): 489—495.
- [13] Nemes A, Schaap M G, Wösten J H M. Functional evaluation of pedo-transfer functions derived from different scales of data collection[J]. Soil Science Society of America Journal, 2003, 67 (4): 1093—1102.
- [14] Parasuraman K, Elshorbagy A, Si B C. Estimating saturated hydraulic conductivity in spatially variable fields using neural network ensembles[J]. Soil Science Society of America Journal, 2006, 70 (6): 1851—1859.
- [15] Carvalho G R N, Brandao D N, Haddad D B, et al. A RBF neural network applied to predict soil field capacity and permanent wilting point at Brazilian Coast[C]// International Joint Conference on Neural Networks. IEEE, 2015.
- [16] Amini M, Abbaspour K C, Khademi H, et al. Neural network models to predict cation exchange capacity in arid regions of Iran[J]. European Journal of Soil Science, 2005, 56 (4): 551—559.
- [17] Lu R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000. [鲁如坤. 土壤农化分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.]
- [18] Hu W, Shao M A, Wang Q J, et al. Effects of sampling size on measurements of soil saturated hydraulic conductivity[J]. Acta Pedologica Sinica, 2005, 42 (6): 1040—1043. [胡伟, 邵明安, 王全九, 等. 取样尺寸对土壤饱和导水率测定结果的影响[J]. 土壤学报, 2005, 42 (6): 1040—1043.]
- [19] Wang H L, Tang X Y, Xian Q S, et al. Comparison of laboratory methods for determining water retention curves in purple soil[J]. Advances in Water Science, 2016, 27 (2): 240—248. [王红兰, 唐翔宇, 鲜青松, 等. 紫色土水分特征曲线室内测定方法的对比[J]. 水科学进展, 2016, 27 (2): 240—248.]
- [20] Dexter A R. Soil physical quality Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth[J]. Geoderma, 2004, 120(3/4): 201—214.
- [21] Guimarães Santos G, Medrado da Silva E, Leandro Marchão R, et al. Analysis of physical quality of soil using the water retention curve: Validity of the S-index[J]. Comptes Rendus Geoscience, 2011, 343 (4): 295—301.
- [22] Sillers W S, Fredlund D G, Zakerzadeh N. Mathematical attributes of some soil-water characteristic curve models[M]//Unsaturated soil concepts and their application in geotechnical practice. Dordrecht: Springer Netherlands, 2001: 243—283.
- [23] van Genuchten M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44 (5): 892—898.
- [24] Peck A J, Watson J D. Hydraulic conductivity and flow in no n-uniform soil. In: Workshop on soil Physics and field heterogeneity[J]. CSIRO Div. of Environmental Mechanics. Canberra, 1979: 31—39.
- [25] Nasri B, Fouche O, Torri D, et al. Coupling published pedotransfer functions for the estimation of bulk density and saturated hydraulic conductivity in stony soils[J]. Catena, 2015: 99—108.
- [26] Torri D, Poesen J, Monaci F, et al. Rock fragment content and fine soil bulk density[J]. Catena, 1994, 23 (1/2): 65—71.
- [27] Guarracino L. Estimation of saturated hydraulic conductivity K_s from the van Genuchten shape parameter α [J]. Water Resources Research, 2007, 43 (11).
- [28] Mishra S, Parker J C. On the relation between saturated conductivity and capillary retention characteristics[J]. Ground Water, 1990, 28 (5): 775—777.
- [29] 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.

- [30] Liu M X, Wu D, Wu S P, et al. Characteristic of soil macropores under various types of forest coverage and their influence on saturated hydraulic conductivity in the Three Gorges Reservoir Area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36 (11): 3189—3196. [刘目兴, 吴丹, 吴四平, 等. 三峡库区森林土壤大孔隙特征及对饱和导水率的影响[J]. *生态学报*, 2016, 36 (11): 3189—3196.]
- [31] Luo Z T, Niu J Z, Meng C, et al. Effects of distribution of rock fragment on macropores and hydraulic conductivity in forest soil in rocky mountain area of Northern China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30 (3): 305—308, 316. [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, 316.]
- [32] 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.
- [33] Dexter A. Soil physical quality: Part II. Friability, tillage, tilth and hard-setting[J]. *Geoderma*, 2004, 120 (3/4): 215—225.
- [34] Dexter A R. Soil physical quality Part III: Unsaturated hydraulic conductivity and general conclusions about S-theory[J]. *Geoderma*, 2004, 120 (3/4): 227—239.
- [35] Aschonitis V G, Kostopoulou S K, Antonopoulos V Z. Methodology to assess the effects of rice cultivation under flooded conditions on van genuchten's model parameters and pore size distribution[J]. *Transport in Porous Media*, 2012, 91 (3): 861—876.
- [36] Huo S Y, Jin M G. Effect of parameter sensitivity of van Genuchten model on numerical simulation of rainfall recharge[J]. *Earth Science*, 2017, 42 (3): 447—452, 470. [霍思远, 靳孟贵. van Genuchten 模型参数对降水入渗数值模拟的敏感性[J]. *地球科学*, 2017, 42 (3): 447—452, 470.]
- [37] Mualem Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media[J]. *Water Resources Research*, 1976, 12 (3): 513—522.
- [38] Nasta P, Vrugt J A, Romano N. Prediction of the saturated hydraulic conductivity from Brooks and Corey's water retention parameters[J]. *Water Resources Research*, 2013, 49 (5): 2918—2925.

(责任编辑：檀满枝)