

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2020.03.027

寇青青, 运剑苇, 汪明星, 等. 渝东北紫色土饱和导水率传递函数研究. 土壤, 2020, 52(3): 611–617.

## 渝东北紫色土饱和导水率传递函数研究<sup>①</sup>

寇青青<sup>1</sup>, 运剑苇<sup>1</sup>, 汪明星<sup>2</sup>, 张卫华<sup>1\*</sup>, 魏朝富<sup>1</sup>, 刘淑婧<sup>1</sup>

(1 西南大学资源环境学院, 重庆 400716; 2 泸州市水务局, 四川泸州 646000)

**摘要:** 为研究渝东北紫色土理化性质在垂直空间上的分布情况以及对饱和导水率的影响, 进而建立饱和导水率与各理化性质间的关系函数, 推求饱和导水率的传递函数, 选择渝东北开州区、云阳县等 7 个区县内 45 个紫色土典型田块为研究区域, 运用 Excel 2013 和 Matlab 2015b 软件统计分析后, 利用多元非线性回归法推求并验证了渝东北紫色土饱和导水率传递函数模型和模型参数。研究表明: ①研究区土壤饱和导水率变化范围在 0.16~195.68 cm/d, 变化范围广, 空间变异系数大, 变异性较强; 同一采样点深度越大, 饱和导水率越小; ②土壤饱和导水率与有机质含量有显著的指数函数关系, 与饱和含水量有较强的二次函数关系, 与土壤容重和土壤颗粒的相关性不大; ③本次试验建立的土壤饱和导水率传递函数模型及模型系数检验合格, 预测值与实际测算值误差较小, 精度良好, 可用于渝东北紫色土饱和导水率的预测工作。

**关键词:** 紫色土; 饱和导水率; 传递函数; 多元非线性回归模型

**中图分类号:** S152.7      **文献标志码:** A

## Study on Pedotransfer Function of Saturated Hydraulic Conductivity of Purple Soil in Northeast Chongqing

KOU Qingqing<sup>1</sup>, YUN Jianwei<sup>1</sup>, WANG Mingxing<sup>2</sup>, ZHANG Weihua<sup>1\*</sup>, WEI Chaofu<sup>1</sup>, LIU Shujing<sup>1</sup>

(1 College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China; 2 Luzhou Water Authority, Luzhou, Sichuan 646000, China)

**Abstract:** Soil samples of different layers were collected from 45 typical fields of purple soil in the 7 districts and counties of northeast Chongqing, the physicochemical properties and saturated hydraulic conductivity ( $K_s$ ) of the samples were measured, and the corresponding pedotransfer function of  $K_s$  were setup by using Microsoft Excel 2013 and Matlab 2015b software. The results showed: 1)  $K_s$  varied from 0.16 to 195.68 cm/d, indicating a wide range, a large spatial variation coefficient and a strong variability.  $K_{sat}$  decreased gradually with the increase of soil depth. 2)  $K_s$  had significant exponential correlation with SOM and significant quadratic correlation with saturated water content, but did not correlated with soil bulk density and particle composition. 3) The established multiple nonlinear regression models had high accuracy, and could predict well  $K_{sat}$  with high accuracies, thus could be used to predict  $K_s$  of purple soil in northeast Chongqing.

**Key words:** Purple soil; Saturated hydraulic conductivity; Pedotransfer function; Multivariate nonlinear regression

土壤水是指土壤颗粒表面附着和在土壤空隙间存在的水分, 是联系大气水、地表水及地下水的重要桥梁<sup>[1]</sup>, 在土壤物理、化学、生物过程中扮演者重要角色。饱和导水率(saturated hydraulic conductivity,  $K_s$ )是土壤重要的物理性质, 是指土壤水分饱和时单位水势梯度下单位时间内通过单位面积的水流量或渗流速度, 是重要的土壤参数, 也是重要的水文模型参数。土壤传递函数(pedotransfer functions, PTFs)

是利用容易测得的基本土壤理化性质数据来估算土壤水力学参数的方法, 利用 PTFs 可以节省测量土壤水力学参数的大量工作, 只要构建的 PTFs 估算精度满足要求, 对于大数据及大尺度上的研究是一条很好的便捷途径。当下, 国内外的很多学者对土壤  $K_s$  及 PTFs 的构建、验证做了大量的研究与应用。Vikas 等<sup>[2]</sup>通过对淤泥土基质吸力值的测定, 运用体积、质量和颗粒分布特性建立了淤泥土的 PTFs, 并应用该

①基金项目: 国家自然科学基金项目(41671291) 和重庆市社会民生类重点研发项目(cstc2018jscx-mszdX0052)资助。

\* 通讯作者(swuwater@126.com)

作者简介: 寇青青(1994—), 女, 重庆垫江人, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤水文学。E-mail: kqinger@126.com

PTFs 与已有的 PTFs 对比测算了淤泥土水分特征曲线,验证了建立的 PTFs 可用于水分特征曲线的计算。Abdelbaki<sup>[3]</sup>将已有的 22 组 PTFs 分组,采用混洗复合进化算法进行自动校准标定,结果表明自动校准是提高 PTFs 性能和精确度的有效途径。Becker 等<sup>[4]</sup>在半干旱地区收集有地壳覆盖和无地壳覆盖表层土  $K_s$  的数据,并与常用的方法推求的  $K_s$  数据结果进行比较,结果表明通常用于估计  $K_s$  的指数衰减函数或 PTFs 等方法不适用于半干旱地区  $K_s$  的测算。姚淑霞等<sup>[5]</sup>采用 Guelph 入渗仪直接测量了不同沙漠化水平下不同土壤深度土壤的  $K_s$ ,分析了沙漠化程度、土壤厚度等土壤理化性质与  $K_s$  的关系;孙美等<sup>[6]</sup>将现有土壤  $K_s$  的 PTFs 与在研究区建立的 PTFs 的预测结果进行对比分析,结果显示针对研究区建立的 PTFs 测算结果较其他 PTFs 更精确,说明 PTFs 自身具有地域性。我国大部分学者对土壤  $K_s$  的 PTFs 的研究更多集中在土壤表层,对于垂直深度上多层次的  $K_s$  的 PTFs 研究较少。针对重庆山地丘陵地区典型紫色土  $K_s$  的 PTFs 的研究资料也较少。

紫色土属初育土纲、石质初育土亚纲,是发生分类中的一种土壤类型<sup>[7]</sup>,土层较薄,孔隙较大且数量丰富,下渗能力强<sup>[8]</sup>,是我国重要的土壤资源,也是重庆市最主要的一种土壤类型。其呈块状多分布于海拔 800 m 以内的中低山丘陵地带<sup>[9-10]</sup>,是渝东北主要的耕地土壤类型<sup>[11]</sup>。渝东北生态涵养发展区位于长江重庆段下游,分布于长江干流沿岸,涉及万州区、梁平县、城口县、丰都县、垫江县、忠县、开州区、云阳县、奉节县、巫山县、巫溪县 11 个区县,幅员面积 339 万  $\text{hm}^2$ ,占重庆市幅员面积的 41.1%,年降雨量 1 000 ~ 1 200 mm,降雨充裕且多集中在夏季,土地利用多为林地、旱地,其次为水田,土壤侵蚀包括重力侵蚀和水力侵蚀<sup>[12]</sup>。研究渝东北不同深度紫色土  $K_s$  的 PTFs,可为渝东北紫色土水分运移和溶质迁移研究提供理论基础,也对削减耕地水土流失及预防农业面源污染有着重要的现实意义及实践价值。本文选择渝东北丰都、云阳、开州、万州、梁平、奉节、忠州 7 个区县为研究区域。

## 1 材料与方法

根据均匀分布和随机布点的原则,在渝东北研究区域内共布设了 45 个土壤样品采集点。在确定各采样点位置、作物种植、利用频率等情况的基础上,针对每个采样点,采集浅层(0 ~ 10 cm)、中层(10 ~ 20 cm)和深层(20 ~ 30 cm)3 个土壤深度样品。用标准的 100

$\text{cm}^3$  环刀采取原状土样,并采集部分自然土壤样品放入密封采样袋中一并带回实验室。各采样点均取 3 个重复。

采用 F-HZ-DZ-TR-0021《土壤饱和导水率的测定—环刀法》测定土壤  $K_s$ <sup>[13]</sup>、常规环刀法测定饱和含水量<sup>[14]</sup>和土壤容重、吸管法测定土壤颗粒组成<sup>[15]</sup>、重铬酸钾容量法测定土壤有机质<sup>[16]</sup>等土壤理化指标。

运用 Excel 2013 和 Matlab 2015b 统计分析各土层土壤理化指标在垂直空间上的变化规律,分析不同土层土壤理化性质对  $K_s$  的影响及其之间的函数关系,再采用非线性回归法<sup>[17-18]</sup>推求不同深度紫色土  $K_s$  的 PTFs 模型和模型参数,同时对 PTFs 进行验证、精度分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 土壤理化性质及饱和导水率统计特征

表 1 所示为研究区不同土壤层次理化性质统计特征,可见,不同土壤深度的紫色土理化性质变化较为明显。越深的土壤,  $K_s$ 、饱和含水量及有机质含量越小,容重越大。这是由于随着土壤深度的增加,土壤结构越为紧实,导致较深层次土壤的通气透水能力较差<sup>[19]</sup>。土壤质地试验数据显示,研究区各深度土壤颗粒中粉粒含量均接近 500 g/kg,含量最大,其次为砂粒,黏粒含量最少。

变异系数可反映实测数据与平均值之间的差异性,可表示数据的离散程度,用实测数据标准差与平均值的比来表示。变异系数 < 0.15 属于弱变异性, 0.16 ~ 0.35 属于中等变异性, > 0.36 表示较强的变异性<sup>[20]</sup>。表 1 给出了不同土壤层次各理化性质的变异系数,可得:①各深度土壤容重和饱和含水量的变异系数均 < 0.15,在空间分布上属于弱变异性,其中容重的空间变异性最弱;②各深度土壤有机质含量的变异系数在 0.16 左右,粉粒含量的变异系数在 0.27 左右,在空间分布上均为中等变异性;③砂粒和黏粒含量的变异系数均 > 0.36,具有较强的空间变异性;④各土层的  $K_s$  空间变异性最强,其变异系数均 > 1.0,这可能是由于各采样点在空间分布上地理位置不同、土地利用类型有差异引起的。

### 2.2 土壤理化性质与饱和导水率的相关性

土壤在垂直方向上是不间断的,在不同土壤深度采集的土壤样品其理化性质也应有相似不间断性。分析土壤理化性质在各土层之间的相关性,发现连续土层的相关性如  $L_1$  与  $L_2$  或  $L_2$  与  $L_3$  要大于  $L_1$  与  $L_3$  土层的相关性,印证了土壤是一个连续体,连续土层间

表 1 研究区不同土层紫色土理化性质统计特征  
Table 1 Statistics of physiochemical properties of purple soils in different layers in the study area

土壤性质	土层	平均值	最大值	最小值	中值	标准差	变异系数
$K_s$ (cm/d)	L <sub>1</sub>	37.86	195.68	0.37	11.96	52.45	1.39
	L <sub>2</sub>	14.11	76.52	0.16	5.13	19.28	1.37
	L <sub>3</sub>	7.63	45.26	0.17	3.07	11.47	1.50
有机质(g/kg)	L <sub>1</sub>	30.03	38.40	21.01	30.30	0.44	0.14
	L <sub>2</sub>	28.05	37.25	19.06	28.34	0.43	0.15
	L <sub>3</sub>	26.13	34.50	14.46	26.70	0.44	0.17
容重(g/cm <sup>3</sup> )	L <sub>1</sub>	1.24	1.41	1.12	1.24	0.08	0.07
	L <sub>2</sub>	1.30	1.43	1.16	1.31	0.07	0.05
	L <sub>3</sub>	1.33	1.46	1.17	1.33	0.06	0.05
饱和含水量(g/kg)	L <sub>1</sub>	432.52	546.86	331.86	429.09	5.62	0.13
	L <sub>2</sub>	395.57	483.97	321.94	386.53	4.13	0.10
	L <sub>3</sub>	374.09	474.36	308.23	368.91	3.74	0.10
砂粒(g/kg)	L <sub>1</sub>	304.93	704.29	92.00	291.40	14.07	0.46
	L <sub>2</sub>	313.66	562.56	100.10	307.05	11.83	0.38
	L <sub>3</sub>	319.03	559.55	70.67	310.01	12.76	0.40
粉粒(g/kg)	L <sub>1</sub>	477.64	819.29	198.11	470.08	13.58	0.28
	L <sub>2</sub>	473.84	812.40	269.15	456.29	12.63	0.27
	L <sub>3</sub>	478.13	807.60	259.26	460.39	13.51	0.28
黏粒(g/kg)	L <sub>1</sub>	217.42	462.97	67.67	226.11	9.68	0.45
	L <sub>2</sub>	212.50	449.00	66.10	205.90	8.98	0.42
	L <sub>3</sub>	202.84	455.71	61.20	184.75	9.06	0.45

注：L<sub>1</sub>、L<sub>2</sub>、L<sub>3</sub>分别代表 0~10、10~20、20~30 cm 土壤深度。下同。

的相关性更好。各土层  $K_s$  与理化性质之间的相关分析结果显示(表 2)：①各土层  $K_s$  与有机质含量均在  $P<0.01$  水平下显著正相关，与有机质含量的联系密切；②浅层(0~10 cm)和 中层(10~20 cm)土壤  $K_s$  与饱和含水量分别在  $P<0.05$ 、 $P<0.01$  水平下显著正相关，深层(20~30 cm)土壤  $K_s$  与饱和含水量的相关性不显著；③仅深层土壤  $K_s$  与粘黏粒含量在  $P<0.01$  水平下显著负相关，其余土层  $K_s$  与砂粒、黏粒、粉粒含量联系不紧密，表明研究区土壤质地对  $K_s$  的影响不大；④各土层  $K_s$  与土壤容重的相关性均未达显著水平，相关性不强，表明渝东北紫色土  $K_s$  受土壤容重的影响也不大。

表 2 土壤  $K_s$  与理化性质的相关性分析  
Table 2 Correlation coefficients among soil  $K_s$  and physiochemical properties

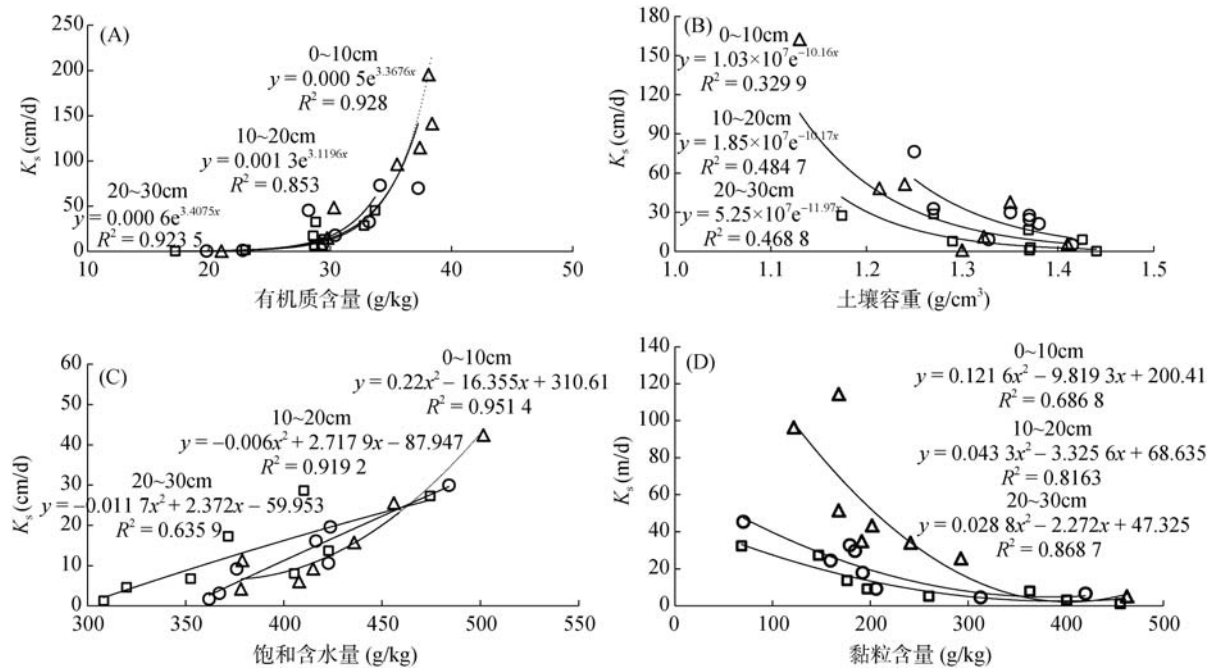
土层	有机质	容重	饱和含水量	砂粒	粉粒	黏粒
L <sub>1</sub>	0.71**	-0.26	0.31*	-0.15	0.27	-0.16
L <sub>2</sub>	0.72**	-0.29	0.49**	0.18	-0.03	-0.19
L <sub>3</sub>	0.70**	-0.28	0.26	0.28	-0.07	-0.30**

注：\*、\*\*分别代表在  $P<0.05$ 、 $P<0.01$  水平显著相关。

### 2.3 土壤理化性质对饱和导水率的影响

通过上述分析，土壤有机质含量、容重、土壤质地及饱和含水量与  $K_s$  之间均有较大或者较小的相关性，且在不同的垂直深度上各因素与  $K_s$  的相关性大小不同。为探讨各土壤理化性质对  $K_s$  的影响，运用控制变量法，每项分析都在总体数据中挑选出 8 组除该项影响因素外与其他影响因素相仿的样本数据。因土壤质地的影响只表现在深层(20~30 cm)土壤黏粒含量上而砂粒、粉粒含量影响不大。因此，土壤质地中仅选择黏粒含量作为  $K_s$  受土壤质地影响的影响因子。各项土壤理化性质与  $K_s$  拟合的关系曲线如图 1 所示。

由图 1A 分析可得，各土层  $K_s$  与有机质含量呈较好的正相关指数函数关系，与表 2 结果相符。由于本次试验土壤采集点大部分属农田，土壤有机碳含量一般较高，可改变土壤基质势，加大土壤水分入渗，同时高含量有机碳使土壤更易形成团粒结构，土壤更为通畅，导水性能更好。其次，总体上浅层土壤  $K_s$  较深层土壤  $K_s$  大，在其他影响因素相同的前提下，是由于浅层土壤有机质含量更高引起的，与表 1 中有机质含量随土层深度增加而减小的分析结果一致。



(图中  $\Delta$  代表 0~10 cm,  $\circ$  代表 10~20 cm,  $\square$  代表 20~30 cm, -- 代表 0~10 cm 曲线, -.- 代表 10~20 cm 曲线, ... 代表 20~30 cm 曲线)

图 1 土壤  $K_s$  随各理化性质变化的曲线

Fig. 1 Change curves of soil  $K_s$  with physiochemical properties

据前人研究, 土壤  $K_s$  与容重存在负相关关系, 土壤容重越大, 孔隙率越小, 导水性能也相应较弱<sup>[21-22]</sup>, 相对疏松的土壤, 容重相对较小, 土壤孔隙率更大, 透水性能更好。由图 1B 可以看出, 容重越大, 各土层  $K_s$  均减小, 表现为曲线下降变化速率逐渐变缓, 这是因为土壤容重越大, 可变化的土壤空隙率越少, 故  $K_s$  变化越不明显。从函数决定系数可看出, 各土层  $K_s$  与容重函数决定系数都不高, 在 0.5 以下, 相关性不好, 与表 2 分析结果一致, 说明本研究土壤  $K_s$  受容重影响不大。

通过图 1C 可以看出, 各土层饱和含水量较大的土壤, 其土壤导水性能也较好,  $K_s$  更大。其中深层土壤  $K_s$  与饱和含水量函数的决定系数较小, 相关性不高, 而在浅层和深层土壤里决定系数均大于 0.90, 相关性高, 与表 2 结果相符。

土壤中不同土壤粒径的占比决定了土壤的质地<sup>[23]</sup>及土壤的水分保持和移动性能<sup>[24]</sup>。由图 1D 可知, 土壤导水能力随土壤中黏粒含量的增大而变差, 且黏粒含量与  $K_s$  函数的决定系数在浅层和深层土壤上较高, 在深层土壤上较低, 与表 2 结果一致。这是由于黏粒具有较大的比表面积和表面电荷, 是最小的土壤颗粒, 吸附水分子能力强, 所以黏含量越大的土壤, 土壤的吸附能力越强, 土壤孔隙的孔径就越细微, 导水能力越差,  $K_s$  就越低。

## 2.4 土壤饱和和导水率多元非线性传递函数模型

**2.4.1 模型的建立** 在前人研究的多元非线性回归模型构建原理上, 建立多元非线性回归经验模型及其矩阵参数<sup>[25]</sup>, 本文选择土壤有机质含量、饱和含水量、黏粒含量作为经验模型的自变量, 得到如下 PTFs 模型:

$$K_s = C_0 + C_1 \exp(OM) + C_2 \theta_s + C_3 \theta_s^2 + C_4 \exp(BD) + C_5 Cl + C_6 Cl^2 \quad (1)$$

式中:  $K_s$  代表饱和导水率(cm/d);  $\theta_s$  代表土壤饱和含水量(g/kg); BD 代表土壤容重(g/cm<sup>3</sup>); OM 代表土壤有机质含量(g/kg); Cl 代表土壤黏粒含量(g/kg);  $C_0 \sim C_6$  为模型参数。在确定模型自变量组合时, 与  $K_s$  显著相关的自变量每次都选择, 然后再组合其他自变量, 各土层得到 4 组自变量的组合方式。各土层随机选择 40 组数据用于求取模型参数, 其余数据用于验证模型精度。计算各组合模型的  $F$  值和自变量的  $t$  值, 查阅在显著水平  $\alpha=0.05$  下的  $F_{0.05}$  和  $t_{0.025}$  的值, 进行模型显著性检验。多组合下, 各 PTFs 模型及其系数的检验结果如表 3 所示。

由表 3 可知, 0~10 cm 土层, 4 种模型的  $F$  值均大于  $F_{0.05}$ , 说明 4 个模型的拟合度均达到显著水平; 从自变量组合的  $t$  值(绝对值)来看, 仅第 III 组各自变量的  $t$  值全部大于  $t_{0.025}$ , 模型效果最好。故选择

表 3 土壤  $K_s$  的多元非线性 PTFs 模型及其参数检验表  
Table 3 Parameter test of multiple nonlinear PTFs models of soil  $K_s$

土层	变量组合	$F$ 值	$F_{0.05}$	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$	$T_6$	$t_{0.025}$	$R^2$
L <sub>1</sub>	I	17.42	2.84	6.78	0.95	-0.90				2.02	0.60
	II	12.85	2.61	6.71	0.36	-0.39	-0.51			2.02	0.60
	III	18.07	2.45	8.58	2.48	-2.40		-3.14	2.33	2.02	0.73
	IV	14.78	2.34	8.46	0.67	-0.70	-0.53	-2.89	2.05	2.02	0.73
L <sub>2</sub>	I	37.90	2.84	8.07	-2.21	2.39				2.02	0.76
	II	28.32	2.61	6.97	-1.48	1.83	0.82			2.02	0.77
	III	33.35	2.45	9.60	-1.65	1.87		-0.38	-0.49	2.02	0.83
	IV	27.91	2.34	8.41	-0.95	1.32	0.97	-0.42	-0.45	2.02	0.84
L <sub>3</sub>	I	36.59	2.84	9.77				-2.06	0.88	2.02	0.76
	II	24.41	2.45	9.83	-2.38	2.25		2.85	-2.79	2.02	0.79
	III	28.60	2.61	9.83			-1.69	0.54	-1.37	2.02	0.77
	IV	20.36	2.34	9.79	-2.29	1.21	-0.90	1.80	-1.82	2.02	0.79

注： $T_1 \sim T_6$  分别表示自变量影响因素有机质含量 OM、饱和含水量  $\theta_s$ 、饱和含水量  $(\theta_s)^2$ 、容重 BD、黏粒含量 Cl、黏粒含量  $Cl^2$  的  $t$  值； $t$  值为空表示该组无此自变量。

第 III 组作为浅层土壤  $K_s$  多元非线性 PTFs 模型，其相关度  $R^2$  达 0.73，其模型参数见表 4。

10 ~ 20 cm 土层，4 种模型的  $F$  值也大于各自对应的  $F_{0.05}$ ，说明 4 个模型均具有显著性(表 3)。另外，从自变量组合的  $t$  值来看，与  $K_s$  相关性分析达到显著水平的土壤有机质含量和饱和含水量的  $t$  值只有在第 I 组分别大于  $t_{0.025}$ ，而其他 3 组模型参数，只有土壤有机质含量通过了  $t$  检验，其余土壤理化性质模型参数都未通过  $t$  检验，模型系数检验未合格。默认第 I 组模型最优，即使其相关度  $R^2$  最低。故最终选择第 I 组作为中层土壤  $K_s$  多元非线性 PTFs 模型，其模型参数见表 4。

20 ~ 30 cm 土层，4 种模型的  $F$  值均大于各自相对应的  $F_{0.05}$ ，说明模型都具有显著性(表 3)。从自变量组合的  $t$  值来看，第 I 组，黏粒含量的模型系数未通过  $t$  检验；第 II 组各土壤理化性质的模型系数  $t$  值均大于对应的  $t_{0.025}$ ，模型系数达到显著水平；第 III 组、第 IV 组只有土壤有机质的模型系数通过了  $t$  检验。因此，最终选取第 II 组作为深层土壤  $K_s$  多元非线性 PTFs 模型，其模型参数见表 4。

从检验分析可得，任何包含土壤容重作为自变量的模型，容重的参数检验均未合格，说明土壤容重在本研究中对土壤  $K_s$  影响不大，这与  $K_s$  与土壤容重的相关性低的分析结果一致。

表 4 土壤  $K_s$  的多元非线性传递函数模型参数表  
Table 4 Parameters of multiple nonlinear transfer function models of soil  $K_{sat}$

土层	$C_0$	有机质 $C_1$	饱和含水量 $\theta_s$ $C_2$	饱和含水量 $\theta_s^2$ $C_3$	黏粒含量 Cl $C_5$	黏粒含量 $Cl^2$ $C_6$
L <sub>1</sub>	-448.35	4.37	20.34	-0.22	-5.69	0.09
L <sub>2</sub>	283.10	1.64	-16.36	0.22		
L <sub>3</sub>	-146.71	1.35	-0.85	0.01	7.57	-0.10

将表 4 中的模型参数代入公式(1)，不同土层的土壤  $K_s$  多元非线性 PTFs 模型分别为：

0 ~ 10 cm:  

$$K_s = -448.35 + 4.37 \exp(OM) + 20.34\theta_s - 0.22\theta_s^2 - 5.69Cl + 0.09Cl^2 (R^2 = 0.73) \quad (2)$$

10 ~ 20 cm:  

$$K_s = 283.10 + 1.64 \exp(OM) - 16.36\theta_s + 0.22\theta_s^2 (R^2 = 0.76) \quad (3)$$

20 ~ 30 cm:  

$$K_s = -146.71 + 1.35 \exp(OM) - 0.85\theta_s + 0.01\theta_s^2 + 7.57Cl - 0.10Cl^2 (R^2 = 0.79) \quad (4)$$

2.4.2 模型的验证 从用于模型验证的数据中各土层随机选择 3 组数据，将实测自变量数据输入函数模型，预测各土层的  $K_s$ ，模型预测值、试验实测值以及相对误差见表 5。从表 5 可以看出，各土层  $K_s$  的多元非线性 PTFs 模型的预测值与实测值相当，相

对误差均在 10% 以内, 表明该模型验证合格, 可用于研究区的  $K_s$  估算。从数据对比来看, 整体上透水性好的、 $K_s$  较大的土壤, 模型的预测值较实测值小; 透水性差的、 $K_s$  较小的土壤, 模型的预测值

较实测值大, 可见模型的应用更适宜大部分中等透水性土壤的  $K_s$  预测, 对于较极端的  $K_s$  (极大或极小), 模型的预测值是不精确的, 需要重新修正模型参数。

表 5 土壤  $K_s$  的多元非线性 PTFs 模型验证表  
Table 5 Validation of multiple nonlinear PTFs models of soil  $K_s$

项目	有机质 (g/kg)	饱和含水量 (g/kg)	黏粒 (g/kg)	$K_s$		
				实测值(cm/d)	预测值(cm/d)	相对误差(%)
L <sub>1</sub>	38.40	511.29	356.74	141.38	131.34	-7.10
	37.40	357.94	167.46	114.51	112.44	-1.81
	35.50	378.79	121.65	96.41	103.81	7.68
L <sub>2</sub>	32.80	352.57	159.07	24.61	23.96	-2.66
	33.77	363.38	184.26	29.71	27.80	-6.41
	37.25	463.97	365.70	69.90	66.67	-4.63
L <sub>3</sub>	33.53	368.91	174.45	29.83	27.46	-7.96
	28.60	371.54	73.10	17.29	18.91	9.36
	29.48	422.64	176.08	13.66	14.11	3.28

### 3 结论

1) 土壤  $K_s$  在垂直深度上呈递减规律, 表层  $K_s$  变化范围在 0.37 ~ 195.68 cm/d, 中层变化范围在 0.16 ~ 76.52 cm/d, 深层变化范围在 0.17 ~ 45.26 cm/d, 变异系数分别为 1.37、1.39 和 1.50, 具有较强的空间变异性。

2) 土壤  $K_s$  受各理化性质的影响不同, 与土壤有机质含量呈指数函数关系, 相关性较高; 与饱和含水量在浅层和中层土壤中呈显著的二次函数关系, 在深层土壤中相关性不高; 与土壤容重和土壤质地的联系不大, 只与深层土壤黏粒含量有显著的二次函数关系, 其他相关性不显著。

3) 根据实测数据建立的浅层、中层和深层土壤  $K_s$  的 PTFs 模型及模型系数检验均合格, 模型相关度  $R^2$  分别为 0.73、0.76、0.79, 运用其求取的预测值与试验实测值在误差范围内, 精度良好, 其可用于渝东北紫色土不同土壤层次的  $K_s$  预测工作。

#### 参考文献:

[1] Brussaard L, Peede R, Brown G G. Soil biodiversity for agricultural sustainability[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2007, 121(3): 233-244.

[2] Vikas K S, Sreedeeep S, Devendra N. Evaluation of various pedo-transfer functions for developing soil-water characteristic curve of a silty soil[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2007, 30(1): 25-30.

[3] Abdelbaki A M. Using automatic calibration method for optimizing the performance of pedotransfer functions of

saturated hydraulic conductivity[J]. *Ain Shams Engineering Journal*, 2016, 7(2): 653-662.

- [4] Becker R, Gebremichael M, Marker M. Impact of soil surface and subsurface properties on soil saturated hydraulic conductivity in the semi-arid Walnut Gulch Experimental Watershed, Arizona, USA[J]. *Geoderma*, 2018, 322: 112-120.
- [5] 姚淑霞, 赵传成, 张铜会. 科尔沁不同沙地土壤饱和和导水率比较研究[J]. *土壤学报*, 2013, 50(3): 469-477.
- [6] 孙美, 张晓琳, 冯绍元, 等. 基于交叉验证的农田土壤饱和和导水率传递函数研究[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(10): 147-152.
- [7] 慈恩, 唐江, 连茂山, 等. 重庆市紫色土系统分类高级单元划分研究[J]. *土壤学报*, 2018, 55(3): 569-584.
- [8] 周志强, 刘琛, 杨红薇, 等. 生物质炭对磺胺类抗生素在坡耕地紫色土中吸附-解吸及淋溶过程的影响[J]. *土壤*, 2018, 50(2): 353-360.
- [9] 郭宏忠, 江东, 蒋光益, 等. 重庆市水土保持科技需求及重点领域[J]. *中国水土保持*, 2015(1): 58-60.
- [10] 汪明星, 张卫华, 靳军英, 等. 重庆秦巴山区农业用水特征分析[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2017, 39(4): 131-137.
- [11] 罗友进, 韩国辉, 孙协平, 等. 三峡库区(重庆段)土壤砾分布特征及影响因素[J]. *土壤*, 2018, 50(1): 131-138.
- [12] 张超, 陈国建, 李春娟, 等. 基于 USLE 模型的重庆生态涵养发展区土壤侵蚀量估算[J]. *水土保持研究*, 2017, 24(3): 33-38.
- [13] 施枫芝, 赵成义, 叶柏松, 等. 基于 PTFs 的干旱地区土壤饱和和导水率的尺度扩展[J]. *中国沙漠*, 2014, 34(6): 1584-1589.
- [14] 张猛. 干湿交替过程中土壤容重、水分特征曲线和热特性的动态变化特征[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
- [15] 黄邦玮. 基于新造水田工程的物理特性研究[D]. 重庆: 西南大学, 2016.

- [16] 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.
- [17] 汪明星. 重庆山地丘陵区紫色土饱和导水率传递函数研究[D]. 重庆: 西南大学, 2017.
- [18] 黎明扬, 刘廷玺, 罗艳云, 等. 半干旱草原型流域表层土壤饱和导水率传递函数及遥感反演研究[J]. 土壤学报, 2019, 56(1): 90-100.
- [19] 韩光中, 王德彩, 谢贤健. 中国主要土壤类型的土壤容重传递函数研究[J]. 土壤学报, 2016, 53(1): 93-102.
- [20] Yavitt J B, Harms K E, et al. Spatial heterogeneity of soil chemical properties in a lowland tropical moist forest, Panama[J]. Australian Journal of Soil Research, 2009, 47: 674-687.
- [21] 刘祖香, 陈效民, 靖彦, 等. 典型旱地红壤水力学特性及其影响因素研究[J]. 水土保持通报, 2013, 33(2): 21-25.
- [22] 贾立志, 张建辉, 王勇, 等. 耕作侵蚀对紫色土坡耕地土壤容重和有机质二维分布的影响[J]. 土壤通报, 2016, 47(6): 1461-1467.
- [23] 姜坤, 秦海龙, 卢瑛, 等. 广东省不同母质发育土壤颗粒分布的分形维数特征[J]. 水土保持学报, 2016, 30(6): 319-324.
- [24] 王冬冬, 高磊, 陈效民, 等. 红壤丘陵区坡地土壤颗粒组成的空间分布特征研究[J]. 土壤, 2016, 48(2): 361-367.
- [25] 韩勇鸿. 土壤持水参数传输函数研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2013.