

文章编号: 1672-3317(2022)06-0097-08

长江上游低山丘陵区土壤水分特征曲线传递函数研究

孙志祥^{1,2}, 邓建波^{1,3}, 吕玉娟^{1,2}, 崔俊芳^{1,2}, 唐翔宇^{1,2*}

(1.中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041; 2.中国科学院大学, 北京 100049; 3.四川农业大学水利水电学院, 四川 雅安 625000)

摘要:【目的】土壤水分特征曲线是定量研究土壤水分运动和溶质迁移的重要参数, 为估算长江上游低山丘陵区土壤水力学参数提供实用的函数工具。【方法】以长江上游低山丘陵区盐亭万安小流域为研究区, 测定3种不同土地利用类型(水田、旱地、林地)土壤水分特征曲线与土壤基本理化性质, 在 van Genuchten (1980) 模型参数拟合及 Pearson 相关分析的基础上, 运用多元逐步线性回归分析法, 分别建立模型参数 θ_r 、 θ_s 、 α 和 n 的土壤传递函数, 并进行准确度评估与分析。【结果】①研究区不同土地利用方式下土壤持水量的大小顺序为: 水田>旱地>林地, 但土壤供水能力差异不明显; ②采用本研究建立的传递函数所得的土壤水分特征曲线估算与实测值对3种不同土地利用类型土壤的决定系数(R^2)均高于0.97, 旱地的估算效果最佳; ③与4种常用传递函数(Vereecken (1989)、Wösten (1999)、Weynants (2009)和Schaap (2001))相比, 采用本研究构建的土壤传递函数的估算准确度最高。【结论】本文构建的土壤传递函数可用作该地区土壤水分特征曲线模型参数估算的实用工具。

关键词: 土壤水分特征曲线; van Genuchten 模型; 土壤传递函数

中图分类号: X143; P951

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2021609

OSID:



孙志祥, 邓建波, 吕玉娟, 等. 长江上游低山丘陵区土壤水分特征曲线传递函数研究[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(6): 97-104.

SUN Zhixiang, DENG Jianbo, LYU Yujuan, et al. Pedo-transfer Function for Estimating Hydraulic Properties of Soils in Hilly Areas in the Upper Reach of the Yangtze River[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(6): 97-104.

0 引言

【研究意义】土壤水分特征曲线表示土壤水吸力(基质势)和土壤含水率之间的关系, 即土壤水能量和数量之间的关系, 是研究土壤水分入渗、蒸发、土壤侵蚀及溶质运移过程的关键参数^[1]。在较小的空间尺度上(如地块), 高密度采样并测定土壤水分特征曲线具有一定的可行性, 但在较大的空间尺度(流域、区域)上, 土壤性质往往呈现较高的空间变异性, 受限于巨大的人力、物力以及资金耗费, 通过大量的网格布点采样测定以直接获得水力学参数的可行性较低^[2]。土壤传递函数是利用容易获得的土壤基本性质(如粒径分布、体积质量、有机质量等)通过某种算法(如回归分析、最优规划法、神经网络、分类回归树、分形机理等)间接估算水分特征曲线的一种有效方法^[3-4]。采用传递函数进行土壤水力学参数空间化估算赋值, 使得大尺

度土壤水分运动、溶质迁移、土壤侵蚀过程研究变得更为可行^[5]。【研究进展】自20世纪70年代以来, 国内外的许多学者都致力于土壤水分特征曲线模型参数与基本理化性质之间定量关系的研究^[6-7], 构建了适用于不同地区的土壤传递函数^[8](Pedo-Transfer Functions, PTFs)。被广泛采用的传递函数有 Vereecken 模型、Wösten 模型和 Schaap 模型等。其中, Vereecken 等^[9]是根据比利时土壤基本理化性质($n=182$), 基于多元线性回归分析构建的 van Genuchten (VG, 1980)^[7]模型参数(θ_r 、 θ_s 、 α 和 n)的传递函数; Wösten 等^[10]利用欧洲 HYPRES 土壤数据库($n=552$)构建了土壤水力学参数(θ_r 、 θ_s 、 α 、 n 、 m 、 l 和 K_s)的传递函数; Schaap 等^[11]基于神经网络开发了 Rosetta 传递函数, 并简化土壤水力学参数的求解过程。国内也有学者针对封丘地区潮土和风沙土、科尔沁沙地典型沙丘-草甸地区开展了土壤水力学参数传递函数研究, 构建了基于土壤基本理化性质的表土饱和导水率和水力学参数传递函数^[12-15]。

【切入点】尽管土壤传递函数研究已较多, 但大多集中在平原区, 仅关注单一土地利用方式下的土壤, 目前关于紫色土丘陵区不同土地利用方式的水力学传递函数的研究却鲜有报道。紫色土属初育土纲、

收稿日期: 2021-10-12

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA23090202); 国家自然科学基金重大项目课题(41790431); 青藏科考重大山洪专题(2019QZKK0903)

作者简介: 孙志祥(1994-), 男, 博士研究生, 主要从事土壤水文学研究。E-mail: sunzhixiang@imde.ac.cn

通信作者: 唐翔宇(1972-), 男, 研究员, 主要从事土壤水文学研究。

E-mail: xytang@imde.ac.cn

石质初育土亚纲，是发生分类中的一种土壤类型，土层较薄，孔隙较大，下渗能力强，是我国重要的土壤资源^[16]。【拟解决的关键问题】本研究以川中低山丘陵区盐亭万安小流域为研究区，主要土壤类型为紫色土，土地利用类型主要包括林地、旱地和水田。利用土壤基本理化性质和水分特征曲线的实测数据，在 Pearson 相关分析的基础上，运用多元逐步线性回归方法，构建与验证 van Genuchten (1980) 模型参数 (θ_r 、 θ_s 、 α 和 n) 的土壤传递函数，并与现有常用传递函数做比较，为该研究区土壤水力学参数的估算提供科学依据和实用函数工具。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于四川省绵阳市盐亭县万安小流域，依托位于林山乡 (115°27'E, 31°16'N) 的中国科学院盐亭紫色土农业生态试验站。该区海拔 400~600 m，为低山深丘地貌，属于中亚热带季风湿润气候，年均气温 17.3 °C，年降雨量 800~1 200 mm^[17]，主要集中在 7—8 月。林地植被以桉木、柏木的混交林和散生乔木为主，农地以旱坡地和水田为主，农作物主要有小麦、油菜、玉米和水稻，土壤类型为非地带性紫色土，广泛分布在长江上游丘陵地山区，面积 26 万多 km²，集中分布在四川盆地丘陵区 and 三峡库区，面积 16 万 km²，代表了中亚热带四川盆地紫色土农田生态系统，区域地处中国地势第二、第三阶梯的过渡地带，位于长江上游生态屏障的最前沿，具有特殊的生态敏感性。

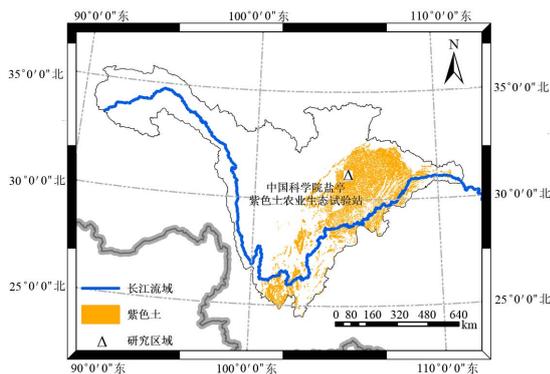


图 1 研究区地理位置

Fig.1 Location of study area

1.2 样品采集与测定

试验于 2020 年 8 月在中国科学院盐亭紫色土农业生态试验站进行，选取天然林地、水田和旱地 3 种土地利用方式的土壤作为研究对象，首先对研究区各土地利用方式下的地块分别设置 3 个采样区，每个样区的面积为 1 500 m² (50 m×30 m)，在每个样区内按照“网格”法设置 9 个采样点，在每个样

方内的各采样点，首先用铲子清除土壤表层覆盖物，并平整表面，以达到取样的标准。然后用环刀采样器 (荷兰 Eijkelkamp 公司，型号 07.53.SE) 在 0~20 cm 深度取体积为 100 cm³ (高 5 cm，内径 5 cm) 原状环刀土样用于测定土壤水分特征曲线。每块样地 3 个重复，共计 81 个环刀样 (54 个用于构建模型，另外 27 个用于验证模型)，将样品带回实验室，于 4 °C 冷藏。同时，在环刀采集点周围与相同土壤深度取散土样，带回实验室自然风干后研磨分别过 2 mm 和 0.25 mm 筛后用于测定土壤基本理化性质。

水分特征曲线的测定采用自制沙箱-压力膜仪法。沙箱排干法的原理是将悬挂水柱产生的一系列低负压 (-2.5、-10.0、-31.6、-63.1 cm 和 -100.0 cm) 作用在环刀土样上，通过水力学排水使得土样含水量达到平衡后称质量，测得土样在低吸力段的干化水分特征曲线^[14]。压力膜仪法是通过在土样施加不同的压力使水分从土壤中流出，从而得到对应压力下土壤的含水率。沙箱法完成低吸力段的测定后，用压力膜仪测定在高吸力段 (-330、-500、-1 000、-5 000 cm 和 -15 000 cm) 的干化水分特征曲线^[18]。最后采用烘干法在 105 °C 下烘干 8~12 h，对烘干前后的环刀土样称质量，测定含水率，计算土壤体积质量。土壤有机质量采用重铬酸钾外加热法来测定^[19]；土壤机械组成采用吸管法测定^[20]，土壤颗粒粒级按照美国制，将土壤颗粒组成分为 3 级：0.05~2 mm 砂粒、0.002~0.05 mm 粉粒和 <0.002 mm 黏粒。

1.3 研究方法

1.3.1 水分特征曲线参数的拟合

参数传递函数以容易测得的土壤基本物理性质为自变量，建立以水分特征曲线模型参数为因变量的回归方程。本研究应用最为广泛的 van Genuchten (1980) 模型，拟合水分特征曲线 $\theta(h)$ 实测数据。如下：

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |ah|)^m} \quad (1)$$

式中： $\theta(h)$ 为体积含水率 (cm³/cm³)； θ_s 为土壤饱和含水率 (cm³/cm³)； θ_r 为土壤残余含水率 (cm³/cm³)； h 为土壤吸力 (cm)； a 是与进气吸力相关的参数， n 和 m ($m=1-1/n$) 是形状系数。本研究利用 RETC 软件，对水分特征曲线实测值进行拟合，获得研究区土样 van Genuchten 模型的 4 个参数 θ_r 、 θ_s 、 α 和 n 。

1.3.2 土壤传递函数的构建

传递函数的构建是根据最小二乘法建立 4 个参数的非线性方程组，用 Picard 迭代法进行求解^[21]。该模型利用 57 个土壤样品的基本理化性质和土壤水分特征曲线模型参数的实测值分别建立 van

Genuchten 模型的 4 个参数 θ_r 、 θ_s 、 α 和 n 的多元逐步线性回归方程。

具体构建步骤如下：

1) 建立多元回归模型 $Y=a+b \times x_1+c \times x_2+d \times x_3$ (a 、 b 、 c 分别为各自变量 x_1 、 x_2 、 x_3 的回归系数)。

2) 回归系数显著性检验，将不显著变量剔除，再次进行回归；回归方程显著性 F 检验，确保 P 值小于显著性水平 0.05。

3) 模型检验，进行模型多重共线性检验，如果变量之间存在共线性则剔除该变量；通过自相关检验，消除自相关带来的误差；

4) 重复以上步骤 1) 一步骤 3)，直至模型中各自变量与因变量达到统计学意义上的显著相关。

1.3.3 准确度评估的统计分析方法

1) 平均误差 ME

$$ME = \frac{\sum (M-E)^2}{n}, \quad (2)$$

2) 均方根误差 $RMSE$

1) Vereecken et al.(1989) 模型^[9]

$$\theta_s = 0.81 - 0.283 (Bd) + 0.001 (Clay), \quad (5)$$

$$\theta_r = 0.015 + 0.005 (Clay) + 0.014 (SOC), \quad (6)$$

$$\lg(\alpha) = -2.486 + 0.025 (Sand) - 0.351(SOC) - 2.671 (Bd) - 0.023 (Clay), \quad (7)$$

$$\lg(n) = 0.053 - 0.009 (Sand) - 0.013 (Clay) + 0.000 15 (Sand)^2, \quad (8)$$

2) Wösten et al.(1999) 模型^[10]

$$\begin{aligned} \theta_s = & 0.791 9 + 0.001 691 (Clay) - 0.296 19 (Bd) - 0.000 001 491 (Silt)^2 + 0.000 082 1 + 0.024 27/(Clay) \\ & + 0.011 13/(Silt) + 0.014 72 \ln(Silt) 0.000 073 3+(SOM)(Clay) - 0.000 619 (Bd) (Clay) \\ & - 0.001 183 (Bd)(SOM) - 0.000 166 4 (topsoil) (Silt), \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \alpha = e^{ & [-14.96 + 0.031 35 (Clay) + 0.035 1 (Silt) + 0.646 (SOM) + 15.29 (Bd) - 0.192 (topsoil) - 4.671(Bd)^2 - 0.000 781 (Clay)^2 - 0.006 87 (SOM)^2 \\ & + 0.044 9/(SOM) + 0.066 3 \ln(Silt) + 0.148 2 \ln(SOM) - 0.045 46 (Bd)(Silt) - 0.485 2 (Bd)(SOM) + 0.006 73 (topsoil)(Clay)], \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} n = 1.0 + e^{ & [-25.23 - 0.021 95 (Clay) + 0.007 4 (Silt) - 0.194 0 (SOM) + 45.5 (Bd) - 7.24(Bd)^2 + 0.000 365 8(Cl原因)^2 + 0.002 885 - 12.81/ (Bd) \\ & - 0.152 4/ (Silt) - 0.019 58/ (SOM) - 0.287 6 \ln(Silt) - 0.070 9 \ln(SOM) - 44.6 \ln(Bd) - 0.022 64 (Bd)(Clay) + 0.089 6(Bd)(SOM) + 0.007 18(topsoil)(Clay)], \end{aligned} \quad (11)$$

$$\theta_r = 0, \quad (12)$$

3) Weynants et al. (2009) 模型^[23]

$$\theta_s = 0.635 5 + 0.001 3 (Clay) - 0.163 1(Bd), \quad (13)$$

$$\alpha = e^{-4.300 3 - 0.009 7 (Clay) + 0.013 8 (Sand) - 0.099 2 (SOC)}, \quad (14)$$

$$n = 1.0 + e^{-1.084 6 - 0.023 6 (Clay) - 0.008 5 (Sand) + 0.000 1 (Sand)^2}, \quad (15)$$

$$\theta_r = 0, \quad (16)$$

式中： $Sand$ 、 $Silt$ 、 $Clay$ 分别为土壤砂粒、粉粒和黏粒量 (%)； Bd 为土壤体积质量 (g/cm^3)； SOM 为土壤有机质量 (%)； SOC 为土壤有机碳量 (%)， $SOM=SOC \times 1.724$ ； $topsoil$ 是值为 1 (深度 0~30 cm) 或 0 (深度 >30 cm) 的序数变量，本研究中取 1。

4) Schaap et al. (2001) 模型^[11]

参照文献[11]的步骤，运用 RETC 软件的 Rosetta Lite v.1.1 模块进行参数估算。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (M-E)}{n}}, \quad (3)$$

3) 决定系数 R^2

$$R^2 = \frac{\text{cov}(M, E)}{\text{var}(M) \text{var}(E)}, \quad (4)$$

式中： M 为模型参数实测值； E 为模型参数估算值 (θ_r 、 θ_s 、 α 和 n)； n 为测量数据点的数量； ME 反映了估算值相对实测值的平均偏离程度， ME 值越接近于 0，模型拟合效果越好； $RMSE$ 反映估算值与实测值的吻合程度， $RMSE$ 值越小，则越接近于实测值； R^2 反映了估算值与实测值在变化趋势上的相似性， R^2 越接近 1，说明估算值与实测值在变化趋势上越相似^[22]。

1.3.4 模型比较

选取 4 种常用的参数传递函数与本研究构建的传递函数做比较，根据参数估算值的相对误差和平均相对误差的大小，衡量传递函数的优劣，验证模型的适用性。选用的传递函数如下：

2 结果与分析

2.1 不同土地利用类型土壤的基本理化性质

研究区 81 个土壤样品基本理化性质由表 1 所示，土壤质地主要分为壤土和砂壤土，占比分别为 46.67% 和 43.33%，其次是粉壤土，质地较细。从不同土地利用类型来看，水田土壤有机质量最高 (均值为 13.97 g/kg)，较早地有机质量高出 27.81%，差异达显著性水平；较林地有机质量高出 8.38%，差

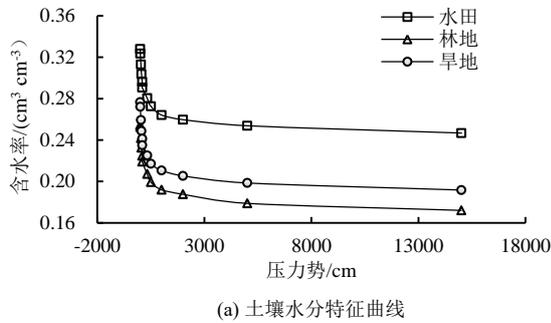
异不显著。旱地土壤体积质量与林地没有显著性差异，均显著大于水田，较水田体积质量分别增加 5.52% 和 6.90%。不同土地利用类型下土壤机械组成没有显著性差异，水田和旱地机械组成相近，林地黏粒量低于水田和旱地，砂粒和粉粒量略高于水田和旱地。

表 1 不同土地利用类型土壤基本理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of the soils under different land uses

土地利用类型	体积质量/ (g kg ⁻¹)	有机质量/ (g kg ⁻¹)	砂粒量/%	粉粒量/%	黏粒量/%
水田	1.45 b	13.97 a	51.29 a	34.12 a	14.59 a
林地	1.53 a	12.89 a	52.05 a	35.14 a	12.81 a
旱地	1.55 a	10.93 b	51.95 a	34.05 a	14.01 a

注 同一列中不同小写字母表示不同处理在 0.05 水平上达到显著差异。



2.2 不同土地利用类型土壤的水分特征曲线

通过计算不同土地利用类型下所有土壤样品在不同吸力下的土壤体积含水率的平均值，绘制该土地利用类型土壤的水分特征曲线（图 2 (a)）。由图 2 (a) 可知，在相同的吸力条件下，水田土壤含水率最大，其次是旱地土壤，林地土壤含水率最低，表明水田土壤持水能力优于林地和旱地。图 2 (b) 是对水分特征曲线求导数，以此获得不同压力下土壤的比水容量，反映土壤水分的有效程度以及土壤供水能力，是评价土壤水分有效性、供水性及耐旱性的重要指标^[24]。由图 2 (b) 可知，不同土地利用类型土壤在不同吸力下比水容量没有差异，结合图 2 (a) 在试验吸力变化范围内，不同水分特征曲线在形态上是大体平行的，因此不同处理比水容量（单位基质势变化引起的含水率变化）相近，不同土地利用类型土壤供水能力没有明显差异。

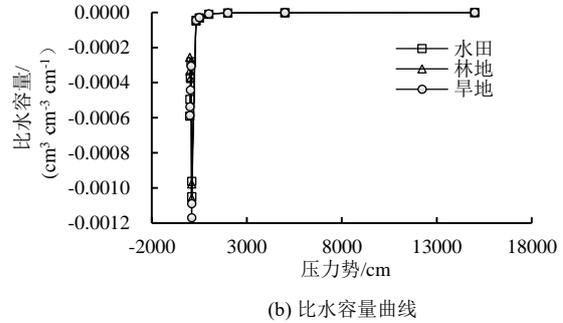


图 2 不同土地利用类型土壤的水分特征曲线和比水容量曲线

Fig.2 Water retention curves and specific water capacity curves of the soils under different land uses

2.3 van Genuchten (1980) 模型参数与土壤基本理化性质的相关性分析

采用 van Genuchten 模型对土壤水分特征曲线测定结果进行拟合，得到模型参数，van Genuchten 模型参数 θ_r 和 θ_s 符合正态分布，但参数 α 和 n 不能满足线性回归模型所要求的正态性假设，需将参数值转换为常用对数后用于进一步统计分析。模型参数与土壤基本理化性质之间的相关分析结果如表 2 所示。土壤残余含水率 θ_r 与体积质量在 0.01 的概率水平下显著负相关，与有机质量和粉粒量分别在 0.01 和 0.05 的概率水平下显著正相关。土壤饱和含水率 θ_s 与体积质量显著负相关，和有机质量显著正相关。 $\lg\alpha$ 与体积质量显著负相关， $\lg n$ 与土壤砂砾量显著正相关，与粉粒和黏粒量分别在 0.05 和 0.01 的概率水平下显著负相关。总体来说，体积质量、有机质量和粉粒是影响土壤水分参数的主要指标；土壤颗粒组成是影响土壤水分特征曲线模型形状参数的主

要指标，因此，用这些指标来估算土壤的水分特征曲线是可行的。

表 2 van Genuchten (1980) 模型参数与土壤基本理化性质的 Pearson 相关性

Table 2 Pearson correlations between van Genuchten (1980) model parameters and soil basic properties

参数	体积质量/ (g cm ⁻³)	lg(SOM)/ (g kg ⁻¹)	lg(sand)/%	lg(silt)/%	lg(clay)/%
θ_r	-0.700**	0.498**	-0.348	0.389*	0.226
θ_s	-0.742**	0.372*	-0.089	0.228	-0.206
$\lg\alpha$	-0.512**	0.307	-0.069	0.204	-0.026
$\lg n$	0.268	-0.318	0.429*	-0.431*	-0.552**

注 *和**分别表示在 0.05 及 0.01 概率水平下相关性显著。

2.4 土壤水分特征曲线传递函数的建立

将 81 个采样点分为 2 组，第一组 54 个用于模型参数传递函数的建立，包括林地（18 个）、旱地（18 个）和水田（18 个）；另一组 27 个用于传递函数的验证。本研究建立土壤水分特征曲线模型参数与基本理化性质指标之间的土壤传递函数关系式如下：

$$\theta_r = 0.357 - 0.24 (Bd) - 0.021 \lg (SOM) + 0.042 \lg (Clay) + 0.095 \lg (Silt) \quad (R^2=0.541), \quad (17)$$

$$\theta_s = 0.676 - 0.304 (Bd) + 0.167 \lg (Silt) - 0.159 \lg (Clay) \quad (R^2=0.629), \quad (18)$$

$$\lg (\alpha) = -0.29 - 0.857 (Bd) \quad (R^2=0.236), \quad (19)$$

$$\lg(n) = 0.204 + 0.049(Bd) - 0.095 \lg(\text{Clay}) \quad (R^2=0.330), \quad (20)$$

式中： Bd 为土壤体积质量 (g/cm^3)； SOM 为土壤有机质量 (g/kg^3)； Silt 为粉粒量 (%)； Clay 为黏粒量 (%)。由函数的决定系数可见，饱和含水率 θ_s 的传递函数 (式 (6)) 的拟合效果最好，决定系数 R^2 达 0.629，包含体积质量、粉粒和黏粒量 3 个自变量。其中，体积质量为其主要影响因子，体积质量越高，土壤颗粒之间的孔隙越少，饱和含水率越低，故体积质量的偏回归系数为负值。对于残余含水率 θ_r (式 (5))，体积质量是其主要影响因子，其偏回归系数的绝对值略小于饱和含水率的传递函数，粉粒量是次要影响因子，其偏回归系数为正值，有机质对残余含水率 θ_r 影响较小，其偏回归系数为负值。 $\lg n$ 模型中黏粒量和体积质量是主要影响因子，其中 $\lg(\text{clay})$ 的偏回归系数绝对值较高，且为负相关，与 Vereecken 等^[9] (1989) 模型相似。 $\lg \alpha$ 仅与体积质量呈线性负相关，其偏回归系数达到 0.857，但其决定系数 R^2 较低。

2.5 土壤水分特征曲线传递函数的检验与比较

用于传递函数验证的 27 组数据经正态性检验及必要的取对数处理后，均满足正态分布。表 3 为应用 4 种常用土壤水分特征曲线传递函数和本研究传递函数计算所得参数估算值与实测值的 $RMSE$ 、 ME 和 R^2 。结果发现，对于残余含水率 θ_r ，4 种常用模型 $RMSE$ 和 ME 分别介于 0.049~0.204、0.041~0.200 cm^3/cm^3 之间，估算准确度一般，其中，Vereecken 模型估算效果优于 Wösten、Weynants 和 Schaap 模型，其 $RMSE$ 与 ME 最低，分别为 0.049、0.041 cm^3/cm^3 。而本研究新建函数 $RMSE$ 与 ME 分别为 0.033、0.028 cm^3/cm^3 ，低于 4 种经典模型， R^2 达 0.541，总体提高了参数残余含水率 θ_r 估算的准确度。饱和含水率 θ_s ，Wösten 模型 $RMSE$ 和 ME 较其他 3 种经典模型最低，分别为 0.065、0.061 cm^3/cm^3 ，估算效果最佳，Schaap 模型次之。本研究新建函数， $RMSE$ 值与 ME 值分别为 0.035 和 0.029，低于 4 种

经典模型， R^2 达 0.629，总体提高了参数残余含水率 θ_s 的估算准确度。类似地，对于进气系数 α 和形状系数 n ，Schaap 模型虽优于其他 3 种常用模型， $RMSE$ 值与 ME 值分别为 0.041、0.023 和 0.214、0.121，但其 $RMSE$ 值与 ME 值仍高于本研究新建函数，预测精度低于本研究模型。

对比 5 种不同模型参数估算值与实测值的结果 (图 3)，可以看出，Schaap 和 Weynants 模型极大低估了残余含水率 θ_r ，Vereecken 和 Wösten 模型低估了参数 α 和参数 n ，4 种经典传递函数均低估了土壤饱和含水率 θ_s 。本研究所建土壤传递函数对模型参数的估算值均分布在 1:1 线二侧附近，对模型参数的估算准确度均高于 4 种经典土壤传递函数。

新建传递函数所得的水分特征曲线估算值与实测值在不同土地利用类型的表现如图 4 所示。可以看出，新建的传递函数对旱地、水田和林地土壤的估算值与实测值基本重合， $R^2 > 0.97$ ，旱地土壤预测效果最佳，林地次之。

表 3 4 种经典传递函数和本文所建传递函数的土壤水分特征曲线模型参数估算值的误差

Table 3 Comparison of estimation accuracies of soil hydraulic parameters by four classical pedotransfer functions and the transfer functions developed in this study

评价指标	本研究 新建函数	Vereecken (1989)	Wösten (1999)	Weynants (2009)	Schaap (2001)	
$RMSE$	θ_r	0.033	0.049	0.204	0.204	0.158
	θ_s	0.035	0.116	0.065	0.128	0.092
	α	0.029	0.049	0.045	0.045	0.041
	n	0.119	0.460	0.352	0.258	0.214
ME	θ_r	0.028	0.041	0.200	0.200	0.153
	θ_s	0.029	0.114	0.061	0.124	0.088
	α	0.013	0.035	0.027	0.027	0.023
	n	0.082	0.450	0.338	0.247	0.121
R^2	θ_r	0.541	0.177	/	/	0.227
	θ_s	0.629	0.831	0.807	0.802	0.756
	α	0.236	0.026	0.010	0.111	0.029
	n	0.330	0.034	0.043	0.001	0.039

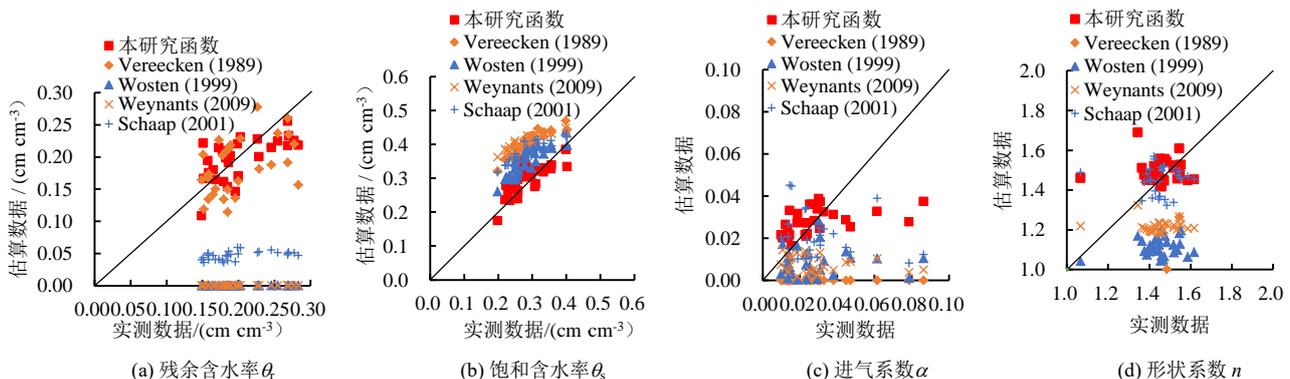


图 3 不同传递函数对土壤水分特征曲线模型参数的估算值与实测值的对比

Fig.3 Comparison of estimated and measured values of model parameters of soil water retention curve by different pedo-transfer functions

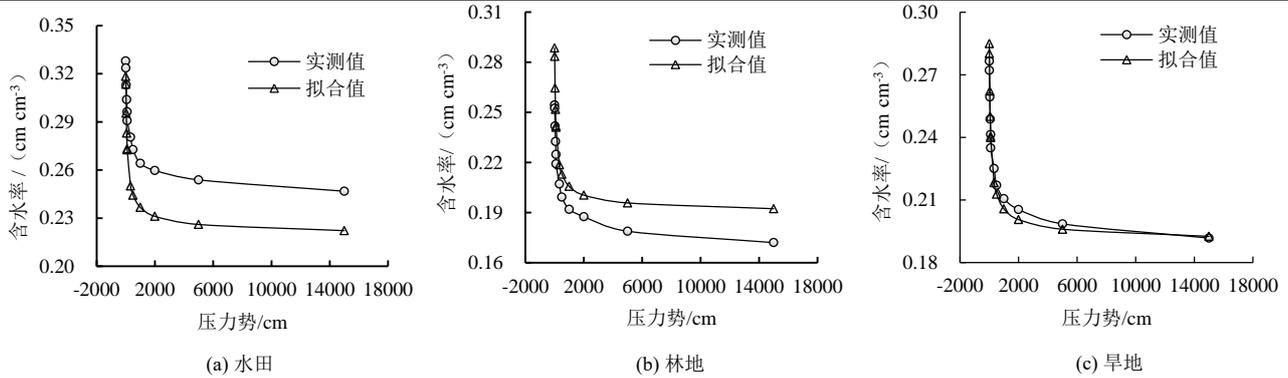


图4 3种不同土地利用类型土壤水分特征曲线估算值与实测值的对比

Fig.4 Comparison of estimated and measured soil water retention curve under different land uses

3 讨论

土壤的水分特征曲线反映的是土壤的持水能力,是土壤最为重要的物理性质之一,其受土壤质地、有机质量、孔隙度、颗粒组成、环境因子和土地利用方式等因素的综合影响^[25],不同土地利用类型土壤水分特征曲线存在差异。本研究结果表明土壤持水能力水田>旱地>林地。陈晨等^[26]、孙永丽等^[27]研究表明,林地根系错综复杂,利于保持涵养土壤水分,林地土壤持水能力大于农耕地,覃淼等^[28]研究结果也表明不同土地利用方式下土壤持水能力林地>农地,与本试验结果不一致。究其原因,土壤持水量主要取决于毛管作用和土壤孔隙大小,任何吸力段土壤含水率随土壤黏粒量增加而增加,因为黏质土中细孔隙较多,表面能比较大,因此吸持的水分比较多^[29],说明土壤质地是影响水分特征曲线以及土壤持水能力的因素中起主导作用。结合表1可知,林地土壤黏粒量低于旱地和水田,故而土壤持水率最低,旱地与水田黏粒量相当,但水田土壤有机质量大于旱地,更加有利于促进土壤团聚体的形成,增加土壤蓄水能力,这与焦梦妍等^[30]的研究结论相似。

本文所构建传递函数所得的水分特征曲线估算值准确度最高,在不同土地利用方式土壤决定系数 R^2 均达到0.97以上。其中,体积质量是饱和含水率 θ_s 的主要影响因子,体积质量越高,土壤颗粒之间的孔隙越少,饱和含水率越低。这与Vereecken等^[9]、Wösten等^[10]和Weynants等^[23]的研究结果一致。粉粒和黏粒量对饱和含水率的影响也不相同,黏粒量的偏回归系数为负值,粉粒量的偏回归系数为正值,与朱安宁等^[12]研究结论相似。另外,Vereecken等^[9]模型中残余含水率 θ_r 影响因子为黏粒和有机质量,而本研究中残余含水率 θ_r 的最主要影响因子是体积质量,其偏回归系数高于有机质量,归因于紫色土具有丰富的孔隙^[31],大孔隙和裂隙对土壤残余含水

率的效应更明显。

由于土壤水分特征曲线具有较大的空间异质性,传递函数具有一定的局限性,因此,本文所建土壤水分特征曲线的传递函数,可以适用于该地区(土壤类型为非地带性紫色土,属紫初育土纲、土层较薄,下渗能力强)不同土地利用方式下的土壤;具有一定的可靠性与广泛性。

4 结论

水田土壤的持水性最好,旱地土壤次之,林地土壤较差。土壤水分有效性在不同土地利用类型之间没有显著差异。

本研究区利用实测数据构建了van Genuchten(1980)模型参数的土壤传递函数,其估算准确度显著高于4种经典的传递函数,新建传递函数在3种土地利用类型土壤水分特征曲线估算值与实测值相近, R^2 均高于0.97。因此,本文构建的土壤传递函数可用作该地区土壤水分特征曲线模型参数估算的实用工具。

参考文献:

- [1] 崔俊芳,邓建波,刘传栋,等.若尔盖高寒草甸表层土壤水分特征曲线传递函数研究[J].山地学报,2021,39(4):483-494.
CUI Junfang, DENG Jianbo, LIU Chuandong, et al. Pedo-transfer functions of soil water retention curve for alpine meadow grassland in zoige area, China[J]. Mountain Research, 2021, 39(4): 483-494.
- [2] 黄元仿,李韵珠.土壤水力性质的估算——土壤转换函数[J].土壤学报,2002,39(4):517-523.
HUANG Yuanfang, LI Yunzhu. Estimation of soil hydraulic properties-pedo-transferfunctions[J]. Acta Pedologica Sinica, 2002, 39(4): 517-523.
- [3] 聂春燕,胡克林,邵元海,等.基于支持向量机和神经网络的土壤水力学参数预测效果比较[J].中国农业大学学报,2010,15(6):102-107.
NIE Chunyan, HU Kelin, SHAO Yuanhai, et al. Comparison of predicting results of soil hydraulic parameters by SVR and Rosetta models[J]. Journal of China Agricultural University, 2010, 15(6): 102-107.
- [4] 徐绍辉,刘建立.土壤水力性质确定方法研究进展[J].水科学进展,2003,14(4):394-401.

- XU Shaohui, LIU Jianli. Advances in approaches for determining unsaturated soil hydraulic properties[J]. *Advances in Water Science*, 2003, 14(4): 394-401.
- [5] VAN LOOY K, BOUMA J, HERBST M, et al. Pedotransfer functions in earth system science: Challenges and perspectives[J]. *Reviews of Geophysics*, 2017, 55(4): 1 199-1 256.
- [6] ASSOULINE S, TESSIER D, BRUAND A. A conceptual model of the soil water retention curve[J]. *Water Resources Research*, 1998, 34(2): 223-231.
- [7] 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.
- [8] TARAWALLY M, VALLE A D, RUIZ M E. Estimating soil water retention curve in rhodic ferralsols from basic soil data[J]. *Geoderma*, 2002, 108(3): 277-285.
- [9] VERECKEN H, MAES J, FEYEN J, et al. Estimating the soil moisture retention characteristic from texture, bulk density, and carbon content[J]. *Soil Science*, 1989, 148(6): 389-403.
- [10] WÖSTEN J H M, LILLY A, NEMES A, et al. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils[J]. *Geoderma*, 1999, 90(3/4): 169-185.
- [11] SCHAAP M G, LEIJ F J, VAN GENUCHTEN M T. Rosetta: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions[J]. *Journal of Hydrology*, 2001, 251(3/4): 163-176.
- [12] 朱安宁, 张佳宝, 陈效民, 等. 封丘地区土壤传递函数的研究[J]. *土壤学报*, 2003, 40(1): 53-58.
ZHU Anning, ZHANG Jiabao, CHEN Xiaomin, et al. Study on pedotransfer function in Fengqiu[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(1): 53-58.
- [13] 姚姣转, 刘廷玺, 王天帅, 等. 科尔沁沙地土壤水分特征曲线传递函数的构建与评估[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(20): 98-108.
YAO Jiaozhuan, LIU Tingxi, WANG Tianshuai, et al. Development and evaluation of pedo-transfer functions of soil water characteristic curves in Horqin sandy land[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(20): 98-108.
- [14] 孙丽, 刘廷玺, 段利民, 等. 科尔沁沙丘-草甸相间地区表土饱和和导水率的土壤传递函数研究[J]. *土壤学报*, 2015, 52(1): 68-76.
SUN Li, LIU Tingxi, DUAN Limin, et al. Prediction of saturated hydraulic conductivity of surface soil in sand-dune-and-meadow interlaced region of horqin with pedo-transfer functions method[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(1): 68-76.
- [15] 黎明扬, 刘廷玺, 罗艳云, 等. 半干旱草原型流域表层土壤饱和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.
LI Mingyang, LIU Tingxi, LUO Yanyun, et al. Pedo-transfer function and remote-sensing-based inversion saturated hydraulic conductivity of surface soil layer in Xilin River Basin[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(1): 90-100.
- [16] 寇青青, 运剑苇, 汪明星, 等. 渝东北紫色土饱和和导水率传递函数研究[J]. *土壤*, 2020, 52(3): 611-617.
KOU Qingqing, YUN Jianwei, WANG Mingxing, et al. Study on pedotransfer function of saturated hydraulic conductivity of purple soil in northeast Chongqing[J]. *Soils*, 2020, 52(3): 611-617.
- [17] 朱波, 彭奎, 高美荣, 等. 川中丘陵区土地利用变化的生态环境效应: 以中国科学院盐亭紫色土农业生态试验站集水区为例[J]. *山地学报*, 2001, 19(S1): 14-19.
ZHU Bo, PENG Kui, GAO Meirong, et al. Land use change and effects on eco-environment in hilly area of central Sichuan Basin[J]. *Journal of Mountain Research*, 2001, 19(S1): 14-19.
- [18] 王红兰, 唐翔宇, 宋松柏. 土壤水分特征曲线测定中低吸力段数据的影响分析[J]. *灌溉排水学报*, 2012, 31(6): 56-59.
WANG Honglan, TANG Xiangyu, SONG Songbai. Analysis of the influence of data obtained at low suctions on soil water retention curve[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2012, 31(6): 56-59.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 中国农业出版社, 2000.
BAO Shidan. *Soil Agrochemical Analysis*[M]. 3 ed. Beijing: China Agricultural Press, 2000.
- [20] 王红兰, 唐翔宇, 张维, 等. 施用生物炭对紫色土坡耕地耕层土壤水力学性质的影响[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(4): 107-112.
WANG Honglan, TANG Xiangyu, ZHANG Wei, et al. Effects of biochar application on tillth soil hydraulic properties of slope cropland of purple soil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(4): 107-112.
- [21] 李光永, 曾德超. 滴灌土壤湿润体特征值的数值算法[J]. *水利学报*, 1997, 28(7): 1-6.
LI Guangyong, ZENG Dechao. The mathematical method for calculating the characteristic value of wetted volume under surface drip irrigation[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1997, 28(7): 1-6.
- [22] 解平静. 高原湿地植被地上生物量遥感估算方法及时空变化研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2012.
XIE Pingjing. Remote sensing estimation method for above-ground biomass of upland wetland vegetation and spatial and temporal variation[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2012.
- [23] WEYNANTS M, VERECKEN H, JAVAUX M. Revisiting vereecken pedotransfer functions: Introducing a closed-form hydraulic model[J]. *Vadose Zone Journal*, 2009, 8(1): 86-95.
- [24] 窦建德, 王绪芳, 熊伟, 等. 宁夏六盘山北侧 5 种典型植被的土壤持水性能研究[J]. *林业科学研究*, 2006, 19(3): 301-306.
DOU Jiande, WANG Xufang, XIONG Wei, et al. Study on soil capacities of water-retention on typical vegetations in the north side of liupan mountains in ningxia[J]. *Forest Research*, 2006, 19(3): 301-306.
- [25] 滕云, 张忠学, 司振江, 等. 振动深松耕作对不同类型土壤水分特征曲线影响研究[J]. *灌溉排水学报*, 2017, 36(5): 52-58.
TENG Yun, ZHANG Zhongxue, SI Zhenjiang, et al. Impact of vibration-tillage of subsoils on their water retention curves[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2017, 36(5): 52-58.
- [26] 陈晨, 高明, 郑杰炳, 等. 缙云山不同森林植被下土壤理化性状研究[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2010, 32(3): 88-92.
CHEN Chen, GAO Ming, ZHENG Jiebing, et al. Investigation of the physico-chemical properties of the soil under different types of forest vegetation[J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2010, 32(3): 88-92.
- [27] 孙永丽, 梅再美. 贵阳市白云岩地区不同土地利用方式对土壤物理性质的影响[J]. *贵州师范大学学报(自然科学版)*, 2006, 24(2): 27-31.
SUN Yongli, MEI Zaimei. Effects of land use on soil physical properties in dolomite area of Guiyang[J]. *Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences)*, 2006, 24(2): 27-31.
- [28] 覃淼, 翟禄新, 周正朝. 桂北地区土地利用类型对土壤饱和和导水率和持水能力的影响研究[J]. *水土保持研究*, 2015, 22(3): 28-32, 39.
QIN Miao, ZHAI Luxin, ZHOU Zhengchao. Influence of land use types on soil saturated hydraulic conductivity and water retention in northern Guangxi[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2015, 22(3): 28-32, 39.
- [29] 程冬兵, 张平仓, 赵健, 等. 三峡库区不同水保措施下紫色土水分特征曲线特征及模型拟合[J]. *长江流域资源与环境*, 2009, 18(11): 1 045-1 049.
CHENG Dongbing, ZHANG Pingcang, ZHAO Jian, et al. Analysis and model fitting for purple soil water retention curve under different measures of soil and water conservation in the Three Gorges reservoir area[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2009, 18(11): 1 045-1 049.

- [30] 焦梦妍, 从怀军, 姚静, 等. 自然恢复序列梯度上退耕地土壤体积质量变化及其蓄水性能效应[J]. 水土保持学报, 2018, 32(5): 128-133.
JIAO Mengyan, CONG Huaijun, YAO Jing, et al. Soil bulk density changes and its water-storage capacity of abandoned farmland in natural restoration series gradient of loess hilly-gully region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(5): 128-133.
- [31] 李琰. 不同土地利用方式下紫色土团聚体分形特征和肥力研究[D]. 重庆: 西南大学, 2008.
LI Yan. Study on aggregate fractal characteristics and fertility of purple soil under different land-use[D]. Chongqing: Southwest University, 2008.

Pedo-transfer Function for Estimating Hydraulic Properties of Soils in Hilly Areas in the Upper Reach of the Yangtze River

SUN Zhixiang^{1,2}, DENG Jianbo^{1,3}, LYU Yujuan^{1,2}, CUI Junfang^{1,2}, TANG Xiangyu^{1,2*}

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. College of Water Resources and Hydropower, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625000, China)

Abstract: 【Objective】 Soil water retention curve (SWRC) is an important parameter for studying subsurface hydrological processes and solute transport in soils, but its direct measurement is labor-intensive. For large scale applications, it is often estimated indirectly using some easy-to-measure soil properties. In this paper, we propose a pedo-transfer function to estimate hydraulic parameters of the soils in hilly regions in the upper reach of the Yangtze River. 【Method】 Soil samples were taken from three land usages in the Yanting Wan'as watershed: paddy field, upland and forest. We measured their SWRC and other chemical and physical properties; the measured SWRC was fitted to the van Genuchten formula, from which we derived a pedo-transfer function to estimate the van Genuchten parameters using multiple stepwise linear regression analysis. Accuracy of the function was evaluated using the Pearson correlation analysis. 【Result】 ①Land use affects the ability of the soil to hold water. The land usage that affected water-holding capacity of the soil more was ranked in the order of paddy field > upland > forest land. In contrast, no significance was found in soil water supply capacity between different land usages. ②The coefficient of determination between the measured and predicted SWRC using the pedo-transfer function was greater than 0.97, and the proposed model was most accurate for soils taken from the upland. ③The proposed pedo-transfer function was more accurate than those proposed by Vereecken et al (1989), Wosten et al (1999), Weynants et al (2009) and Schaap et al (2001). 【Conclusion】 The pedo-transfer function proposed in this paper for estimating water release curve using easy-to-measure soil properties is accurate and efficient. It can be used to estimate hydraulic parameters of the soils in the hilly regions in the upper reach of the Yangtze River.

Key words: soil moisture characteristic curve; van Genuchten model; pedo-transfer function; land usage

责任编辑: 赵宇龙