

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2023.08.018

杨寻, 汪时机, 李贤, 等. 三峡库区紫色土土-水特征曲线模型对比研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2023, 45(8): 201-210.

三峡库区紫色土土-水特征曲线模型对比研究

杨寻¹, 汪时机^{1,2}, 李贤¹, 黎桢君¹, 夏浩城¹, 张继伟¹

1. 西南大学 工程技术学院, 重庆 400715;

2. 重庆市建筑物全生命周期健康检测与灾害防治工程研究中心, 重庆 408100

摘要: 土-水特征曲线(SWCC)本构模型是非饱和土力学研究中重要的本构关系, 它是反映非饱和土持水特性的重要表征曲线. SWCC 的影响因素很多, 外部因素如应力状态、气候变化等, 内部因素如干密度、孔隙连通状态、矿物成分等. 本文基于滤纸法试验, 测定三峡库区重庆段非饱和紫色土土-水特征曲线, 考虑其拟合参数对于分析非饱和土的持水特性具有重要意义, 采用 Gardner、van Genuchten、Fredlund-Xing、双应力变量广义土-水特征曲线模型(W-G)等 4 种模型对试验结果进行拟合, 通过整体拟合与分点拟合对比验证 W-G 模型的拟合效果; 进而依据 W-G 模型探讨初始干密度对非饱和紫色土土-水特征曲线的影响规律. 结果表明: ① 从整体拟合来看 van Genuchten 和 W-G 模型拟合效果最好; 从分点拟合来看, 与 van Genuchten 模型相比, W-G 模型的拟合精度更好且更稳定, 对试验数据量的依赖程度较低. ② 初始干密度对非饱和紫色土土-水特征曲线有较显著的影响; 干密度大的土样具有较低的初始饱和含水率、较高的进气值和良好的持水性能, SWCC 形态平缓; 与土体进气值相关的参数 α 随干密度增大呈幂函数减小, 土壤的实际残余含水率随干密度增大呈线性增长. W-G 模型可以很好地描述和预测非饱和紫色土的持水特性, 特别适用于试验数据点不多的情况.

关键词: 非饱和紫色土; 土-水特征曲线; 初始干密度; 持水特性; 滤纸法

中图分类号: TU43

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 1673-9868(2023)08-0201-10



Comparative Study of Soil-Water Characteristic Curve Model of Purple Soil in the Three Gorges Reservoir Area

YANG Xun¹, WANG Shiji^{1,2}, LI Xian¹,
LI Anjun¹, XIA Haocheng¹, ZHANG Jiwei¹

1. College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. Chongqing Engineering Research Center for Structure Full-Life-Cycle Health Detection and Disaster Prevention, Chongqing 408100, China

收稿日期: 2022-08-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(11972311); 西南大学创新研究 2035 先导计划项目(SWU-XDPY22003).

作者简介: 杨寻, 硕士研究生, 主要从事土体水力-力学方面的研究.

通信作者: 汪时机, 博士, 教授, 博士研究生导师.

Abstract: The constitutive model of the soil-water characteristic curve is an important constitutive relation in the study of unsaturated soil mechanics. It is an important characterization curve reflecting the water-holding characteristics of unsaturated soil. There are many factors affecting the soil-water characteristic curve, including external factors such as stress state, climate change, and internal factors such as dry density, pore connectivity state, mineral composition. In this paper, based on the filter paper method test, the soil-water characteristic curve of the unsaturated purple soil in the Chongqing section of the Three Gorges Reservoir was determined. Since its fitting parameters are of great significance for analyzing the water-holding characteristics of unsaturated soils, four models, Gardner, van Genuchten, Fredlund-Xing, and two-stress variable generalized soil-water characteristic curve model (W-G), were used to fit the test results. Then, the fitting effect of the W-G model was verified by comparing the overall fitting and the point fitting. Furthermore, the regularity of the influence of initial dry density on the soil-water characteristic curve of unsaturated purple soil was discussed based on the W-G model. The results show that: ① From the overall fitting point of view, the van Genuchten and W-G models have the best fitting effect. From the point of point fitting, compared with the van Genuchten model, the fitting accuracy of the W-G model is better and more stable. Data volume dependency is lower. And W-G is less dependent on the amount of experimental data. ② The initial dry density has a significant effect on the soil-water characteristic curve of unsaturated purple soil. Soil samples with high dry density have lower initial saturated water content, higher air intake value and good water holding capacity. Its corresponding SWCC is relatively flat. The parameter α related to the air intake value of the soil decreases as a power function with the increase of the dry density, and the actual residual water content of the soil increases linearly with the increase of the dry density. The W-G model can well describe and predict the water-holding properties of unsaturated purple soils, especially when there are few experimental data points.

Key words: unsaturated purple soil; soil-water characteristic curve; initial dry density; water holding property; filter paper method

紫色土在我国西南地区分布广泛,主要集中在长江中上游地区^[1],在农业生产和工程建设中^[2]起着重要作用。西南地区降雨丰富,由于长期受到水力侵蚀,土体出现结构松散、土层薄、易崩解蚀变、抗蚀性弱、强度降低^[3-7]等特点,以致产生滑坡、泥石流、路基塌陷等地质灾害,对该地区水土资源、生态安全以及人民群众生命财产安全产生了巨大威胁。因此,如何防治西南紫色土区严重的水土流失问题成为诸多学者研究的热点。

土-水特征曲线(soil-water characteristic curve, SWCC)表示土中吸力与土壤含水率(体积含水率、质量含水率或饱和度)之间的关系^[8],是揭示非饱和土持水特性的重要研究工具,也是研究非饱和土水力-力学性质的重要手段。SWCC 对非饱和土的强度特性、变形特性和渗透特性^[9-11]均会产生影响。为探究土壤水对非饱和土力学性质的影响,国内外学者做了大量研究。关于 SWCC 影响因素的研究,主要集中在干密度^[12]、粒径级配、有机组成、孔隙比^[13]和孔隙尺寸等方面。蔡国庆等^[14]在讨论各模型参数与土体孔隙比之间的变化规律时,提出一种考虑初始干密度影响的 SWCC 预测方法,认为随着土样初始干密度增大,进气值逐渐增大。伊盼盼等^[15]通过压力板仪量测不同击实度下非饱和和重塑粉土的 SWCC,分析认为干密度和初始含水率增加均会导致土样进气值增大,原因在于干密度影响土样的孔隙数量,初始含水率影响孔隙的结构,从而造成试样 SWCC 的位置和形状发生明显改变。刘星志等^[16]基于分形理论,主要通过不同颗粒级配土样的分形特征及分形维数来研究颗粒级配在非饱和红土的 SWCC 的影响,结果表明,对于不同颗粒级配的 SWCC,同一体积含水率下细土颗粒含量越多的土样,其基质吸力越大。高游等^[17]研究不同水力路

径下初始孔隙比或干密度对非饱和土土-水特性的影响,提出通过归一化方法可以将不同初始孔隙比的主脱湿和主吸湿土-水特征曲线处理为一条曲线.由上述研究可知,关于土-水特征曲线影响因素的研究已取得较好成果,且确定了干密度是主要影响因素之一.

基质吸力作为表征非饱和土特性的最重要参数之一^[18],其测量方法对土-水特征曲线的测定影响较大.目前,土中吸力测量方法主要有直接测量法和间接测量法两种^[19],直接法通过测量负孔隙水压力获得吸力^[20, 21],常用方法主要是张力计法、压力板仪法;间接法通过测量其他参数,如含水率、相对湿度、电导率、电阻率等,然后计算得到相应吸力^[22-23].间接法主要包括滤纸法、热传导探头法、盐溶液法等.此外,不同测量方法测量吸力范围不同,普通张力计所测基质吸力范围主要受高进气值陶瓷材料进气压力值和水空化负压值的限制,为保证张力计法可靠性,其范围一般选择在 0~90 kPa.压力板仪的主要组成部件是金属压力容器和饱和高进气值陶土板,因此其测量范围受陶土板最大进气值限制,目前压力板仪最大量程为 1 500 kPa^[24].热传导传感器主要通过实践热脉冲测量相应内热耗散率从而获得多孔介质的传导性能,其测量吸力范围在 0~400 kPa.盐溶液法可以测取较高吸力范围内的吸力,一般用于 $3\ 000\sim4\times10^5$ kPa 范围内吸力的测量.但盐溶液法需要大量试剂和试样进行试验才能构建一条土-水特征曲线.滤纸法是在密闭恒温环境下通过测量从非饱和土样向干燥滤纸转移的水量间接确定非饱和土中的吸力,其基质吸力范围与滤纸率定公式有关,一般为 $0\sim3\times10^5$ kPa.滤纸法不仅能测量土总吸力,还能测量基质吸力,且该方法具有价格低廉、操作简单、量程大^[25]等优点.

相关研究表明,非饱和和紫色土的 SWCC 受干密度、颗粒级配及覆土压力影响较大.梁广川^[26]利用压力板仪讨论了不同干密度及不同颗粒级配对紫色土 SWCC 的影响,发现紫色土受到水力侵蚀时,较小颗粒易流失,SWCC 会出现“双峰”甚至“多峰”的情况.而汪时机等^[27]提出的双应力变量广义土-水特征曲线(下文简称 W-G)方程能够较好地体现这一变化,该方程综合考虑了土体孔隙比变化以及双应力变量(吸力和净法向应力)引起的体变,能够包容各种孔隙分布情况的复杂土-水关系.李达等^[28]采用 W-G 模型研究了不同覆土压力下紫色土 SWCC 的变化,发现随覆土压力和吸力的增大,紫色土的持水特性降低,并说明了在紫色土土样存在上覆压力的条件下,W-G 模型的适用效果较好.此外,该模型也可以通过较少的数据点预测较大吸力范围的土-水关系^[29],节省试验时间,便于 SWCC 在工程上应用.但 W-G 方程的精确性及实用性需要在试验研究中进一步检验.基于此,本文采用滤纸法对不同干密度的紫色土样进行土-水特征试验,研究了干密度对紫色土土-水特征曲线的影响规律,并通过数据来验证 W-G 模型对非饱和和紫色土的适用性.

1 土-水特征曲线本构模型

土-水特征曲线(SWCC)表征了土持水量与基质吸力之间的关系,它是描述土壤持水特性的重要手段.对于非饱和土,SWCC 本构方程并不是唯一的,且一种本构方程对不同类型土样的 SWCC 存在不同精度的描述结果.目前,大部分 SWCC 数学模型是通过试验数据整理、拟合和总结而来的.这从本质上解释了现有的 SWCC 本构模型不能通用地描述各种类型土的土-水特征曲线.为了探究更适合非饱和和紫色土的 SWCC 本构模型,本文采用了经典的 Gardner、Fredlund-Xing、van Genuchten 模型以及本课题组提出的双应力变量广义土-水特征曲线模型(W-G 模型)进行拟合.模型方程如下:

1) Gardner 模型

$$\theta(\psi) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{1 + (\alpha \cdot \psi)^n} \quad (1)$$

式中 θ 为体积含水率,%; ψ 为吸力, kPa; θ_s 为饱和体积含水率,%; θ_r 为残余体积含水率,%; α 为与进气值 ψ_{AEV} 相关的土性参数, kPa^{-1} ; n 为 $\psi > \psi_{AEV}$ 时与土体脱湿速率相关的土性参数,无量纲.

2) Fredlund-Xing 模型

$$\theta(\psi) = \frac{\left\{1 - \frac{\ln(1 + \psi/\psi_r)}{\ln[1 + 10^6/\psi_r]}\right\} \cdot \theta_s}{\left\{\ln\left[\exp(1) + \left(\frac{\psi}{\alpha}\right)^n\right]\right\}^c}$$

式中 ψ_r 为残余含水率对应的吸力, kPa. c 为与残余含水量相关的土性参数,无量纲. 其余符号含义同式(1).

3) van Genuchten 模型

$$\theta(\psi) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha \cdot \psi)^n]^c}$$

式中 c 为与残余含水率相关的土性参数,无量纲. 其余符号含义同式(1).

4) 双应力变量广义土-水特征曲线模型(W-G 模型)

$$\theta(\psi, \sigma'_v) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left\{1 + \left[\frac{v_0}{v} \cdot \frac{10^B \cdot \psi^A}{\theta_s - \theta_r}\right]^{-1/c}\right\}^c}$$

式中 σ'_v 为净法向应力; θ 、 θ_r 与 θ_s 分别为体积含水率、广义残余含水率和饱和体积含水率, %; A 、 B 分别为双对数相对体积含水比吸力 $\lg(\psi)$ - $\lg(\Gamma_w)$ 平面特征吸力域内的曲线斜率和截距, 包含了单应力或双应力的耦合影响. c 为与残余含水率相关的土性参数,无量纲; $v_0 = 1 + e_0$ 及 $v = 1 + e$ 分别为初始比容和比容; 如果土体孔隙比随吸力变化很小或是不考虑其变化时, 式(4)退化为 van Genuchten 形式

$$\theta(\psi, \sigma'_v) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\{1 + [Z^{1/A} \cdot \psi]^n\}^c}$$

$$Z = \frac{10^B}{(\theta_s - \theta_r)}$$

其中与进气值相关的参数 α 计算公式如下:

$$\alpha = \left[\frac{v_0}{v} \cdot \frac{10^B}{\theta_s - \theta_r}\right]^{\frac{1}{\lambda}}$$

由于试验过程中土体孔隙比随吸力变化很小, 因此不考虑其影响, 拟合采用式(5). 该方程有 2 种拟合方法: (1) 使用较少的试验数据由 $\lg(\psi)$ - $\lg(\Gamma_w)$ 平面得到参数 A 、 B , 将 A 、 B 代入式(4)进行非线性最小二乘法拟合得到 SWCC; (2) 直接将所有的土-水试验数据点带入式(4)进行拟合得到整条 SWCC. 具体如下:

在 $\lg(\psi)$ - $\lg(\Gamma_w)$ 平面中, 令 $\lg(\psi) = x$, $\lg(\Gamma_w) = y$, 则有

$$y_d = A * x_d + B \tag{8}$$

其中 d 表示在第 d 个吸力平衡时的所对应的数据, 下同.

由图 1 可以看出, 土-水特征曲线试验点分布趋势在双 log 坐标轴内呈负线性相关.

其中斜率 A 恒为负值, 为避免 A 对 log 计算带来误解. 因此将式(8)改为

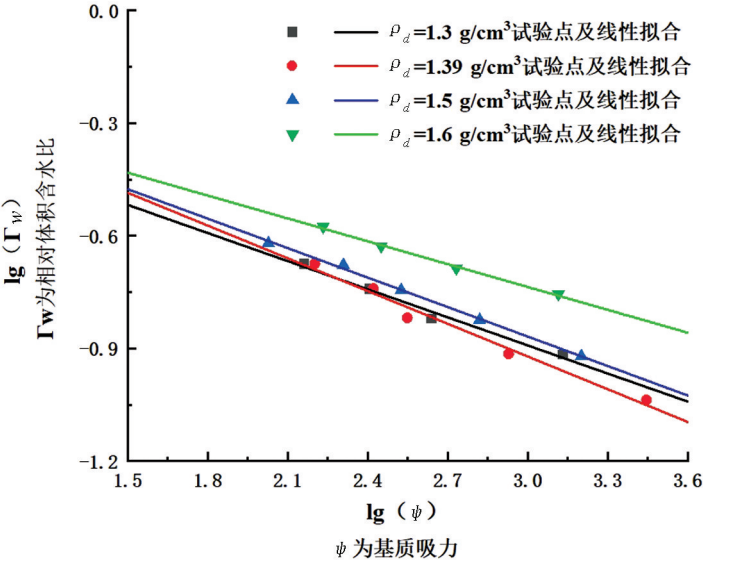


图 1 不同干密度下相对体积含水比与吸力拟合图

$$y_d = B - A * x_d$$

(9)

此外, 残余体积含水率对 W-G 模型具有较大的影响, 在上述拟合过程中, 一般将模型的饱和含水率、残余含水率视为已知点, 饱和含水率一般由试验获得, 残余含水率一般从图中取得. 但是残余含水率取值较为繁琐且不唯一, 为降低主观误差, 结合以上两种拟合方法, 先利用式(5)整体拟合出 SWCC, 取该次拟合的残余体积含水率作为在 $\lg(\psi)\text{-}\lg(\Gamma_w)$ 平面中的计算值, 再将拟合出的 A 、 B 值代入方程进行拟合, 最后采用决定系数 R^2 和残差平方和 S^2 来判断拟合的精度.

用函数 $y = y(x)$ 对试验数据 $\{x_d, y_d, d = 0, 1, 2, \cdots, m\}$ 进行拟合, 误差记为

$$\delta y = y(x_d) - y_d (d = 0, 1, 2, \cdots, m)$$

(10)

则残差平方和为

$$S^2 = \|\delta\|^2 = \min \sum_{d=0}^m [y(x_d) - y_d]^2$$

(11)

2 土-水特征曲线试验

2.1 试样制备和试验方法

试验土样为三峡库区北碚段水土保持基地紫色土, 按照《土工试验方法标准》对土样进行室内试验. 将试验土样过 2 mm 筛, 再置于 105 ℃ 烘箱充分烘干, 然后使用标准土壤筛对试验土样进行筛分. 其中粒径大于 0.075 mm 的颗粒含量占 79.54%, 属于砂土, 其塑性指数达到 14.8, 具有明显黏性土特征, 结合土的工程分类和土壤分类方法, 将其定义为砂质黏性紫色土, 相关物理参数见表 1, 土样颗粒级配见表 2、图 2. 通过计算可以得出试验紫色土的不均匀系数 $C_u = 9.67$, 曲率系数 $C_c = 1.66$. 满足 $C_u > 5, 1 \leq C_c \leq 3$, 级配良好.

表 1 试验紫色土基本物理性质

相对密度 G_s	密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	含水率 $w/\%$	塑限 w_p	液限 w_l	塑性指数 I_p	孔隙率 $n/\%$
2.69	1.39	15.8	19.5	34.3	14.8	50.83

表 2 试验紫色土颗粒级配

颗粒粒径	2~1 mm	1~0.5 mm	0.5~0.25 mm	0.25~0.075 mm	0.075~0 mm
质量分数	8.65	18.85	15.22	36.82	20.46

初始制样物性指标为: 含水率 18%, 相对密度 2.69, 干密度分别为 1.3, 1.39, 1.5, 1.6 g/cm³. 将土烘干后过 2 mm 筛, 在制样器内击实, 做成直径 61.8 mm, 高 20 mm 土样, 存放于保湿缸, 然后用于试验.

试验采用“双圈”牌 No. 203 型定量滤纸, 滤速为慢速, 灰分为每张 0.000 035 g, 直径为 7 cm. 其率定方程用式(12)^[30]表示:

$$\lg(\psi) = \begin{cases} 5.493 - 0.076w_f & w_f \leq 47\% \\ 2.470 - 0.012w_f & w_f > 47\% \end{cases}$$

(12)

式中 ψ 为基质吸力(kPa), w_f 为滤纸的含水率(%).

试验所需仪器设备包括: 电子天平, 精度为 0.000 1 g; 烘箱, 控制温度为 $10^5 \pm 5$ ℃; 恒温箱, 控制温度为 25 ± 0.5 ℃; 密封罐, 高度为 10.8 cm, 体积为 500 cm³; 铝盒、镊子、橡皮手套、防水胶带、保鲜袋等. 按照图 3 的方法在土样下方依次放置 3 张滤纸, 装入密封袋, 水平放置于玻璃密封罐中, 将密封罐放入 25 ℃ 的恒温箱中.

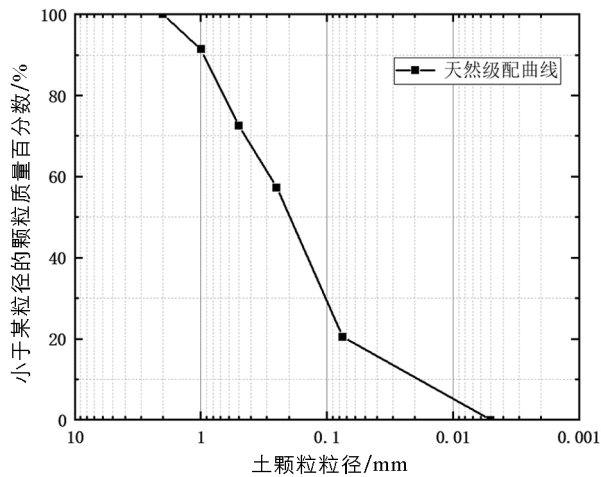


图 2 试验紫色土级配曲线

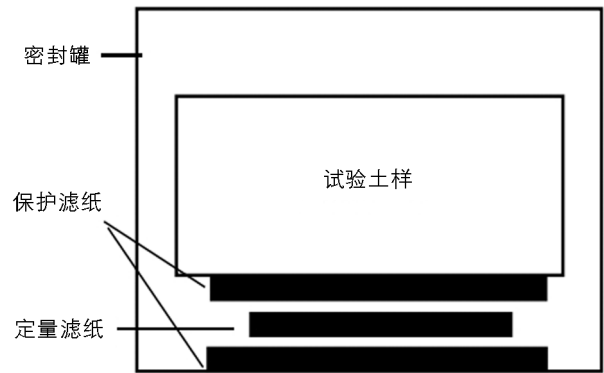


图 3 滤纸法试验装置图

待试样静置至少 7 d 后,土样和测试滤纸间达到水分平衡^[31].快速取出测试滤纸并迅速使用电子天平(精度 0.000 1 g)称量测试滤纸质量.鉴于滤纸具有重量轻、水分敏感性高、易挥发等特点,试验过程中需操作细致,称量迅速,避免用手直接触碰测试滤纸,防止测试滤纸水分发生变化.

2.2 试验方案

准备干密度分别为 1.3,1.39,1.5,1.6 g/cm³ 的 4 组试样,如表 3 所示.

表 3 试验方案设计

编号	$\omega_0/\%$	$\rho_d/(g\cdot cm^{-3})$	$\omega_b/\%$
FP1	18.1	1.3	6~24
FP2	17.8	1.39	6~24
FP3	18.2	1.5	6~24
FP4	18.0	1.6	6~24

采用并联滤纸法测定 FP1~FP4 号试样的持水曲线,先采用 FP3 的试验数据拟合常用的 SWCC 模型以及本课题组提出的 W-G 模型,通过对比验证本模型的精度及适用性,然后对模型参数进行分析,定性研究初始干密度对紫色土持水特性的影响规律.

3 结果与分析

3.1 模型拟合分析

采用 FP2 试样的数据进行模型拟合,拟合结果如图 4 所示,Gardner 模型的拟合效果较 van Genuchten 和 W-G 模型差.而对于 Fredlund-Xing 模型,直接采用数据对方程进行拟合时,其参数拟合值为复数,拟合失败,故本文通过控制方程参数残余含水率为 3 000 kPa^[32]进行拟合,可以看出拟合效果较其他模型差.

通过对现有 SWCC 模型分析发现,要保证 SWCC 理论模型的适用,模型应该具有足够的

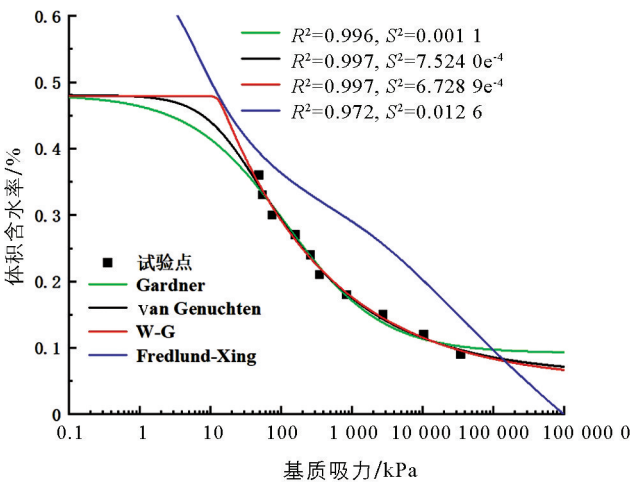


图 4 四个 SWCC 模型(Gardner, Van Genuchten, Fredlund-Xing, W-G)拟合图

表征精度、较少的方程参数以及对试验数据量依赖性低等特点。因此, 拟合精度稳定且能适应复杂孔隙分布情况的 SWCC 模型能为水土力学的研究提供便利。W-G 方程的优势正在于此, 它可以在“ $\lg(\psi)$ - $\lg(\Gamma_w)$ ”双对数坐标平面中通过最小二乘法线性拟合得到参数 A 、 B , 再通过非线性最小二乘法拟合得到参数 c 。通过分别取三、六、九、十一个点拟合出 van Genuchten 和 W-G 方程, 并将其绘制在全部数据的散点图上进行对比分析, 如图 5~8 所示, van Genuchten 方程的拟合精度随数据试验点的增加逐渐提高, 数据越多, 精度越高; W-G 方程整体来看拟合精度高且更为稳定, 对试验点的数量依赖程度较低。

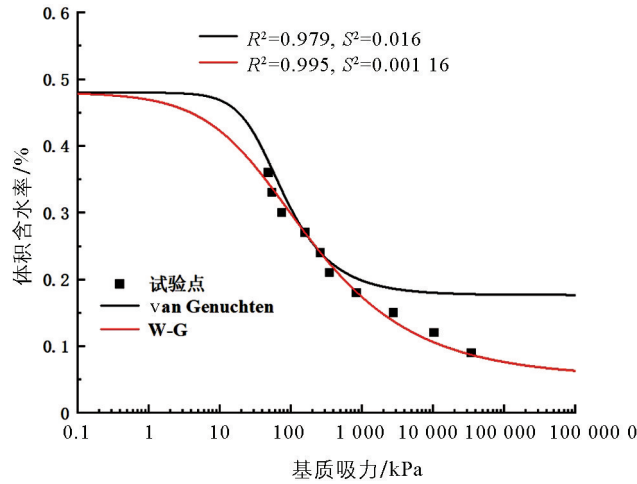


图 5 三点拟合图

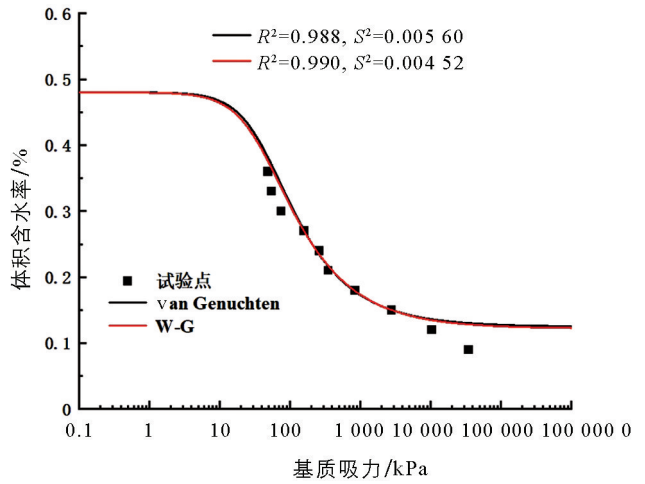


图 6 六点拟合图

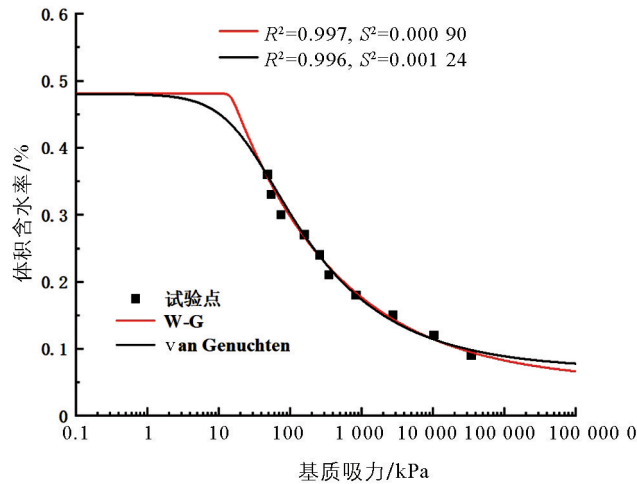


图 7 九点拟合图

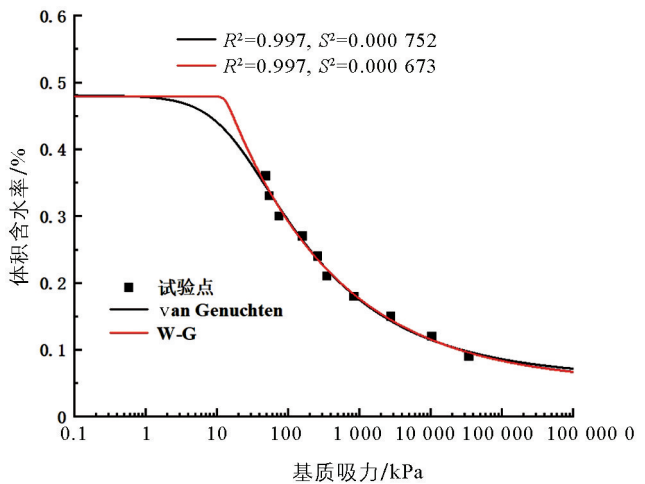


图 8 十一点拟合图

3.2 干密度对非饱和紫色土 SWCC 的影响

在测定了不同干密度的持水曲线后, 采用 W-G 模型对试验数据进行拟合, 拟合图像如图 9 所示, 由该图可以看出, 初始干密度对紫色土的 SWCC 有较大影响, 试样干密度越大, 同一体积含水率下所对应的基质吸力越大, 说明要达到该含水率, 需要更大的基质吸力才能实现, 土体的持水能力得以增强。不仅如此, 干密度越大的试样, 其曲线的过渡段和残余段就越向上移, 曲线的“平台”逐渐明显, 这说明在体积含水率开始剧烈下降时所对应的基质吸力逐步增大, 换句话说, 空气开始进入土中最大孔隙的基质吸力逐渐增大, 即进气值增大。

试样干密度不同, 其饱和含水率亦有所差异, 试样干密度越小, 土孔隙越多, 对应的饱和含水率越大。同时, 随着基质吸力的增加, 试样逐渐脱湿, 各条曲线的含水率逐渐降低, 相较于低密度试样, 干密度越大

的试样曲线下降趋势越缓慢,所剩余的体积含水率越高。在高吸力阶段,体积含水率很低,不同干密度试样的体积含水率有逐渐接近的趋势,这是因为理论上吸力足够大时,土中的水会被完全排出。

此外,由图 9 可知,在整个吸力范围内,因干密度变化而造成的土壤体积含水率的变化比较明显,具体表现为干密度小、孔隙多的试样,有较高的饱和含水率,随着吸力增加,试样的排水量较干密度大的试样更多,曲线开始相交。在过渡区,各曲线逐渐分离,干密度越大的试样,对应的曲线越高,基质吸力越大;在残余区,曲线的下降速率变慢,各曲线趋于平缓。

总体来看,干密度越大的试样,持水效果越好,持水能力越强。该规律可利用毛细管原理进行解释:

$$\psi = \frac{2TS\cos\theta}{r}$$

(13)

式中 θ 为弯液面与毛细管壁的接触角, ($^{\circ}$); r 是毛细管半径, m; TS 是弯液面的表面张力, N/m。因为干密度决定了土体结构的密实度,土样干密度越大,土壤孔隙越小,孔隙结构越紧凑,孔隙半径相对越小,孔隙弯液面的曲率半径也越小,对水分的束缚能力也就越强,在相同的吸力范围内,干密度大的土体较难失水。

3.3 模型参数分析

相关拟合参数如表 4 所示。由该表可以看出参数 α 与干密度呈负相关的关系。采用幂函数进行描述(相关系数 $R^2=0.967$)

$$\alpha = 0.631\ 6(\rho_d)^{-5.991}$$

(14)

式中 0.631 6, -5.991 均为拟合参数。这说明土的进气值与干密度有很强的相关性,且能用幂函数进行表达。不仅如此,在 W-G 模型中,与进气值有关的参数 α 是通过拟合出的 A 、 B 值计算得来的。进气值 ψ_{AEV} 的一般求解办法是在 SWCC 上作图取值,即做 SWCC 陡降段拐点(下拐点)切线,与饱和度 $S=1$ 相交所对应的基质吸力作为土体的进气值 ψ_{AEV} 。因此,在 $\lg(\psi)$ - $\lg(\Gamma_w)$ 平面中拟合 A 、 B 值时,所采用的试验点应尽量处于过渡区段,尽可能保证拟合的精度。

对于残余含水率 θ_r ,拟合参数并不符合实际值,主要问题在于,现有的模型不能完全拟合出经典的 SWCC。在拟合图像中,残余含水率主要是指当拟合曲线趋于平时时所对应的体积含水率,而 Fredlund 等^[32]指出当土的含水率为零时,所有土类的总吸力大致相等,其值略小于 10^6 kPa。因此,将模型拟合参数中的 θ_r 以及 10^6 kPa 所对应的体积含水率作为残余含水率是不妥当的。Sillers 等^[33]认为残余含水率是指当非饱和土中的孔隙水从主要受毛细作用变为受吸附力作用时的非饱和土含水率,并认为当吸力接近 3 000 kPa 左右时非饱和土体对应的含水率就是此状态下的非饱和土的残余含水率。基于此,本文将吸力达到 3 000 kPa 时的状态视为土体的残余状态,即以吸力为 3 000 kPa 对应的体积含水率作为实际残余含水率。实际残余体积含水率与试样初始干密度的单调递增关系用线性函数描述(相关系数 $R^2=0.996$)为:

$$\theta_\psi = 0.19\rho_d - 0.123\ 3$$

(15)

式中 0.19, $-0.123\ 3$ 为拟合参数。由式(15)可以看出,残余含水率随着干密度的增大而增大,这是因为在试样干密度增大、吸力增大的同时,渗透系数在逐渐减小,这就导致了残余体积含水率随之增大。

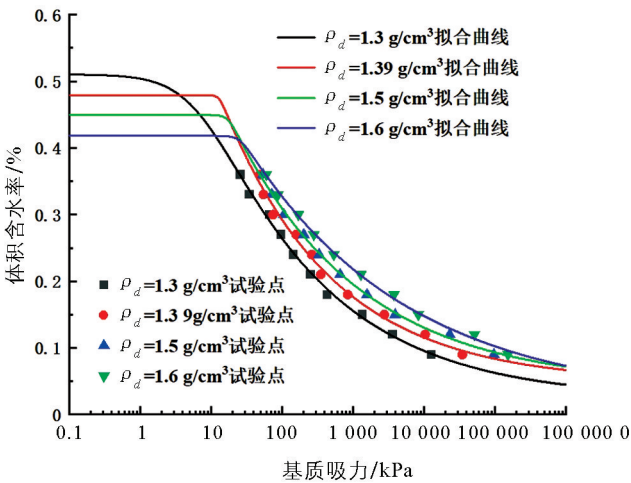


图 9 不同干密度 W-G 拟合图

表 4 W-G SWCC 拟合参数($ABc\theta_r$)及相关参数计算表

干密度	W-G	W-G	W-G	计算进气	W-G	基质吸力	基质吸力
ρ_d	参数 A	参数 B	参数 c	值参数 α	参数 θ_r	$\theta_{\phi=10^6 \text{ kPa}}$	$\theta_{\phi=3\,000 \text{ kPa}}$
1.3	0.249 3	-0.143 9	0.192 1	0.143 4	0.022 9	0.044 7	0.122 7
1.39	0.290 4	-0.050 1	0.208 6	0.076 1	0.048 3	0.066 9	0.142 8
1.5	0.261 5	-0.083 7	0.176 2	0.057 1	0.043 6	0.073 1	0.160 2
1.6	0.202 7	-0.128 1	0.105 5	0.038 9	0.019 6	0.073 4	0.181 0

4 结论

以三峡库区重庆段非饱和紫色土为研究对象,采用滤纸法做出不同干密度下该类土壤基质吸力与含水量之间的数量变化关系,并采用 4 种 SWCC 数学模型进行拟合,通过对比得到更适合非饱和和紫色土的 SWCC 模型.然后利用该模型探讨紫色土的 SWCC 在干密度因素作用下的变化规律.最后对常用的模型参数进行分析,拟合得出参数随干密度变化的数学表达.结论如下:

(1) 广义土-水特征曲线(W-G)能够很好地拟合不同干密度紫色土的 SWCC;与 van Genuchten、Gardner 及 Fredlund-Xing 模型相比,W-G 模型具有相近甚至更好的拟合效果,并且对试验数据依赖性较低,在较少的实测数据点情况下,也能拟合出较高精度的 SWCC,且拟合精度较为稳定.同时,修正后的拟合方法简单易行.通过运用 W-G 方程对已知的全部土-水数据进行拟合,得到残余含水率 θ_r ,再利用过渡区的土-水试验数据点来构建 $\lg(\phi)$ - $\lg(\Gamma_w)$ 平面,拟合出参数 A、B;再增加至少 1 个试验点,即可拟合得到较高精度的整条 SWCC.

(2) 干密度对紫色土的 SWCC 影响较大,试样干密度越大,孔隙数量及半径越小,孔隙就越紧凑,空气开始进入土中最大孔隙的基质吸力越大,在相同的吸力范围内,土体需要更大的基质吸力才能继续失水,在较高的吸力范围,土体的实际残余含水率随着干密度的增大而增大,持水能力得以增强.

(3) 通过 W-G 模型拟合参数 A、B,计算出与进气值有关的参数 α 值,进一步分析得出, α 与干密度之间的关系可以用幂函数进行描述,相关系数为 0.967,相关性较强;对比分析 3 种不同方式得出的残余体积含水率,方程本身的残余体积含水率并不具备实际的物理意义,只是作为数学方程在某处收敛的表现.吸力为 10^6 kPa 对应的残余含水率并不符合实际的状态.相比之下,将吸力为 3 000 kPa 对应的含水率作为实际残余含水率更为合理,然后进一步分析了实际残余体积含水率与试样初始干密度之间的关系,发现可以用线性函数描述,且相关系数为 0.996,说明两者之间具有明显的相关性.

参考文献:

[1] 鲍玉海,丛佩娟,冯伟,等.西南紫色土区水土流失综合治理技术体系[J].水土保持通报,2018,38(3):143-150.

[2] 徐露,张丹,向宇国,等.不同耕作措施下金沙江下游紫色土区坡耕地产流产沙特征[J].山地学报,2020,38(6):851-860.

[3] 蒋顺清,李青云.长江上游紫色岩土特性与水土流失的关系[J].长江科学院院报,1995,12(4):51-57.

[4] 李馨欣,王小燕,蔡崇法,等.紫色土水分和壤中流对降雨强度的响应[J].水土保持学报,2017,31(5):25-31.

[5] 牛俊,张平仑,邢明星.长江上游紫色土坡耕地水土流失特征及其防治对策[J].中国水土保持科学,2010,8(6):64-68.

[6] 秦伟,左长清,晏清洪,等.红壤裸露坡地次降雨土壤侵蚀规律[J].农业工程学报,2015,31(2):124-132.

[7] 许冲,薛乐,李贤,等.粒组缺失对紫色土抗剪强度的影响[J].西南大学学报(自然科学版),2020,42(4):135-141.

[8] 陈正汉.非饱和土与特殊土力学的基本理论研究[J].岩土工程学报,2014,36(2):201-272.

[9] 翟钱,戴国亮,赵学亮.土-水特征曲线对非饱和和砂土抗剪强度的影响[J].岩土工程学报,2020,42(7):1341-1349.

- [10] 王娇. 非饱和黄土土水特性与真三轴屈服及强度变形特性试验研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2018.
- [11] 谭志翔, 王正中, 葛建锐, 等. 北疆白砂岩与泥岩的土水特征曲线及渗透曲线实验研究 [J]. 岩土工程学报, 2020, 42(S1): 229-233.
- [12] 李佳敏, 马丽娜, 张戎令, 等. 饱和度及干密度对弱膨胀土土水特征曲线影响 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2020, 42(4): 142-148.
- [13] 邹维列, 王协群, 罗方德, 等. 等应力和等孔隙比状态下的土-水特征曲线 [J]. 岩土工程学报, 2017, 39(9): 1711-1717.
- [14] 蔡国庆, 张策, 李舰, 等. 考虑初始干密度影响的 SWCC 预测方法研究 [J]. 岩土工程学报, 2018, 40(S2): 27-31.
- [15] 伊盼盼, 牛圣宽, 韦昌富. 干密度和初始含水率对非饱和重塑粉土土水特征曲线的影响 [J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(1): 42-46.
- [16] 刘星志, 吴悦, 潘诗婷, 等. 颗粒级配对非饱和红土土-水特征曲线的影响 [J]. 水利水运工程学报, 2018(5): 103-110.
- [17] 高游, 孙德安, 张俊然, 等. 考虑孔隙比和水力路径影响的非饱和土土水特性研究 [J]. 岩土工程学报, 2019, 41(12): 2191-2196.
- [18] D. G. 弗雷德隆德, H. 拉哈尔佐. 非饱和土土力学 [M]. 陈仲颐, 张在明, 陈愈炯, 等, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [19] 孙文静, 孙德安. 非饱和土力学试验技术 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2018.
- [20] AGUS SS, SCHANZ T. Errors in Total Suction Measurements [M] //Springer Proceedings in Physics, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007: 59-70.
- [21] RIDLEY A M, WRAY W K. Suction Measurement: A Review of Current Theory and Practices [C]. Proceedings of the First International Conference on Unsaturated Soils, Balkema, Paris, France, 1996.
- [22] AGUS SS, SCHANZ T. Comparison of Four Methods for Measuring Total Suction [J]. Vadose Zone Journal, 2005, 4(4): 1087-1095.
- [23] RIDLEY A M, DINEEN K, BURLAND J B, et al. Soil Matrix Suction: Some Examples of Its Measurement and Application in Geotechnical Engineering [J]. Géotechnique, 2003, 53(2): 241-253.
- [24] 崔凯, 林维康. 川西非饱和混合土土水特征曲线研究 [J]. 中国公路学报, 2017, 30(9): 44-50.
- [25] MCQUEEN I S, MILLER R F. Calibration and Evaluation of a Wide-Range Gravimetric Method for Measuring Moisture Stress [J]. Soil Science, 1968, 106(3): 225-231.
- [26] 梁广川. 不同因素对重庆紫色土土-水特征曲线的影响研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2020.
- [27] 汪时机, 程明书, 李贤, 等. 非饱和土双应力变量广义土水特征曲线理论模型构建 [J]. 农业工程学报, 2017, 33(6): 1-7.
- [28] 李达, 汪时机, 李贤, 等. 不同覆土压力下砂质黏性紫色土的土-水特征曲线研究 [J]. 岩土工程学报, 2021, 43(10): 1950-1956.
- [29] 程明书, 李贤, 汪时机, 等. 非饱和土双应力变量广义土水特征曲线模型验证 [J]. 农业工程学报, 2017, 33(6): 8-17.
- [30] 王钊, 杨金鑫, 况娟娟, 等. 滤纸法在现场基质吸力量测中的应用 [J]. 岩土工程学报, 2003, 25(4): 405-408.
- [31] 白福青, 刘斯宏, 袁骄. 滤纸法测定南阳中膨胀土土水特征曲线试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2011, 33(6): 928-933.
- [32] FREDLUND D G, XING A Q. Equations for the Soil-Water Characteristic Curve [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31(4): 521-532.
- [33] SILLERS W S, FREDLUND D G. Statistical Assessment of Soil-Water Characteristic Curve Models for Geotechnical Engineering [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2001, 38(6): 1297-1313.