

DOI: 10.12401/j.nwg.2023097

# 全吸力范围非饱和黄土土-水特征 曲线的一种测试方法

江睿君<sup>1,2</sup>, 张茂省<sup>1,2,3,\*</sup>, 张宇航<sup>1</sup>, 冯立<sup>3</sup>, 孙萍萍<sup>3</sup>

(1. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 2. 自然资源部黄土地质灾害重点实验室/中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710119; 3. 西安交通大学人居环境与建筑工程学院, 陕西 西安 712000)

**摘要:** 土-水特征曲线是反映非饱和土中水分运移现象以及力学行为的重要参数。笔者采用等温吸附分析法(VSA)和传统的瞬态脱湿吸湿法(TRIM)相结合, 提出了一种测定黄土全吸力范围的土-水特征曲线的方法。通过 VSA 持续测定样品的相对湿度和重量, 计算获得高吸力范围内 ( $7.1 \times 10^3 \sim 4.8 \times 10^5$  kPa) 脱湿与吸湿路径下的基质势与体积含水率的系列离散数据点。依据 VSA 测试结果确定样品的残余含水率以限定 TRIM 反演过程, 修正了 TRIM 试验结果的准确性。选用 F&X 数学模型光滑连接了 TRIM 在低吸力范围内 ( $0 \sim 300$  kPa) 与 VSA 的实测结果。该方法具有测量的吸力范围大 ( $1 \sim 10^6$  kPa), 测量时间短 ( $5 \sim 8$  天), 数据准确度高 ( $R^2=0.999$ ) 的优点。将此方法应用于甘肃董志塬剖面黄土-古土壤 ( $L_5-S_5$ ) 的土-水特征曲线的测试, 结果表明, 预测模型得出的非饱和黄土土-水特征曲线和 TRIM-VSA 的实测值具有很好匹配性, 证实了该方法的可靠性。该测定非饱和土-水特征曲线的方式快速、有效, 在工程实际中有重要的应用价值。

**关键词:** 黄土; 古土壤; 土-水特征曲线; 全吸力范围; TRIM 试验; VSA 试验

中图分类号: P69

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2023)03-0214-09

## A Test Method for Soil-Water Characteristics Curve of Unsaturated Loess in the Full Suction Range

JIANG Ruijun<sup>1,2</sup>, ZHANG Maosheng<sup>1,2,3,\*</sup>, ZHANG Yuhang<sup>1</sup>, FENG Li<sup>3</sup>, SUN Pingping<sup>3</sup>

(1. School of Geological Engineering and Surveying, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory for Geo-Hazards in Loess Area, Ministry of Natural Resources / Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an 710119, Shaanxi, China; 3. School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 712000, Shaanxi, China)

**Abstract:** The soil-water characteristic curve is an important parameter which reflects the moisture movement characteristic and mechanical behavior in unsaturated soil. A method is proposed based on vapor sorption analyzer combined with transient water release and imbibition method to determine soil-water characteristic curve in the full suction range. First, the relative humidity and the mass of the sample are continuously measured by VSA, series of discrete data points of matrix suction and volume water content are calculated under drying and wetting paths in the high suction range ( $7.1 \times 10^3 \sim 4.8 \times 10^5$  kPa). Second, the TRIM inversion process is limited

收稿日期: 2022-12-29; 修回日期: 2023-05-12; 责任编辑: 贾晓丹

基金项目: 国家自然科学基金项目“黄土水敏性的力学机制及致滑机理”(41530640), 重点研发计划“黄土滑坡失稳机理、防控方法与防治示范”(2018YFC15047000)联合资助。

作者简介: 江睿君(1996-), 女, 博士研究生, 主要从事非饱和黄土方面的研究。E-mail: jiangruijun96@163.com。

\* 通讯作者: 张茂省(1962-), 男, 博士, 研究员, 长期从事地质调查、灾害防治与生态修复研究工作。E-mail: xjtzms@xjtu.edu.cn。

through the residual water content of VSA test results. The accuracy of inversion results of TRIM is increased. Finally, the F&X model is used to smoothly connect the test data from TRIM and VSA. The measurement of suction range of this method is wide ( $1\sim 10^6$  kPa), the measurement time of this method is short (5~8 days), and the measurement accuracy of the method is high ( $R^2=0.999$ ). In this paper, the method is applied to test soil-water characteristic curve of the loess ( $L_s$ ) and paleosol ( $S_s$ ) in Dongzhiyuan, Gansu Province. The results show that the predicted results of this method are consistent with the measured results in the full suction range. The method of determining soil-water characteristic curve of unsaturated soil is fast and effective, and important value in engineering application.

**Keywords:** loess; paleosol; SWCC; full suction range; TRIM test; VSA test

非饱和土土-水特性的研究可分两大模块:土水特性的试验研究和土水特性的模型预测。在土水特性的试验研究中,测量土的吸力和相应的土-水特征曲线(SWCC)的方法有很多种。用于测量 SWCC 的试验方法,通常获得揭示吸力和含水率之间关系的一系列离散数据点,将测得的数据用连续的数学公式表达,预测发生在非饱和土内的流动、应力和变形现象。

目前吸力试验测定技术可分为直接测量法和间接测量法。最常见的直接测方法有张力计法和压力板仪法。张力计是室外测量土吸力最常用的方法,受环境限制小、体型小、易携带。但由于测试过程反应迅速,受“气蚀”现象限制,测量范围( $0\sim 100$  kPa)较小。该方法由 Knodel(1992)提出,其测量原理为以大气压为基准,测试该仪器与土中的孔隙水压力在平衡状态下的压力差,但由于张力计中的水一旦发生空化就无法传递全部负压,同时张力计中气泡和其他杂质的存在,会使测定范围更小(陈锐等, 2013)。轴平移技术是通过增加气压,将孔隙水压力由负值变为正值,由不可测变为可测,测量设备有压力板仪,最大吸力可测到 1 500 kPa。压力板仪由于其测量精度高,是目前室内测量土吸力最常用的测试方法。但该方法试验周期较长,在试验过程中,水压力量测系统会由于溢出水分的蒸发,及气泡析出陶土板等问题,造成实测的溢出水量与真实的溢出水量存在误差。

吸力的间接测量方法有滤纸法、电热传导法、热偶干湿计法、冷凝镜湿度计法、等压湿度控制法和双压力湿度控制法等(Lu, 2004; Fredlund, 2012)。其中,滤纸法被普遍使用,量程不受限制,且经济实惠,该法已纳入美国 ASTM 的标准(ASTM, 2013)。Haghighi 等(2012)利用蒸汽平衡技术与轴平移技术标定了 Whatman No.42 滤纸,从而给出该类型滤纸含水率与吸力的函数关系。该方法先测量滤纸与土样吸力平衡状态下的含水率,然后通过已有的校准曲线确定相

应的吸力值(Gardner, 1958)。由于其测试精度较依赖试验人员的操作水准,且试验周期长,导致测试结果的不确定性较高。

现有的各种常用测试方法都有其适用范围及优缺点,在不同吸力范围内,土水运移过程中的作用机理也不相同。因此,许多学者通过多种测试方法结合的方式以获取全吸力范围内的 SWCC。例如,叶为民等(2006)通过滤纸法、渗析法和气相对上海软土的 SWCC 进行了分析与测试; Nam 等(2010)通过压力板仪、滤纸法、蒸汽平衡法与渗透技术和冷镜湿度计、测取了各类土样的 SWCC,并分析了其适用的数学模型;孙德安等(2013)通过压力板仪、滤纸法及饱和盐溶液法获取了全吸力范围膨胀土、红黏土的 SWCC。通过这些方法虽然能够准确获取土样在全吸力范围的 SWCC,但也存在成本高、试验周期长等缺点,较难在工程实践中应用。

如何快速获得全吸力范围内非饱和土的水力特性,并为非饱和土本构模型提供试验参数。为此,Wayllace 等(2012)提出了一种测试 SWCC 的瞬态脱湿与吸湿方法(TRIM),该方法对常规试验系统进行了改进和完善,增加了气泡冲刷和量测装置,通过精准测量溢出陶土板的气泡体积从而优化溢出水量,使优化后的溢出水量更加接近于真实值;压力室由上、下盖板都装有陶土板改为仅下盖板安装陶土板,进气方向也由原来的环向进气改为从顶部进气,使其能更好的描述以为流动问题。伊盼盼等(2012)分别对比了不同土样平衡态的 SWCC 与该方法获得的 SWCC 测试所需的时间,该方法仅需 5~8 天时间即可获取全吸力范围( $1\sim 10^6$  kPa)内脱湿与吸湿路径下的 SWCC,所用的时间都远远小于其他方法所用的时间,但 TRIM 方法是基于轴平移技术控制吸力,从而获取的溢出水量随时间的变化曲线,因设计原理的限制,以毛细作用为主的土-水相互作用范围内的测试结果

较为精准,在低吸力范围内(0~300 kPa)可较好的与常规试验数据吻合(陈辉等,2010)。在高吸力条件下(>300 kPa),尤其在以吸附作用为主的水土相互作用范围内的测试结果存在缺陷(郭龙等,2013;牛庚,2016),试验精度较差,这也限制了SWCC较干燥段的发展(马田田等,2015)。

综上所述,关于如何快速、有效的获取非饱和黄土全吸力范围内的SWCC仍存在一定的局限性。鉴于此,笔者基于VSA-TRIM进行全吸力范围SWCC测试。通过VSA持续测定样品的相对湿度和重量,计算获得高吸力范围内( $7.1 \times 10^3 \sim 4.8 \times 10^5$  kPa)脱湿与吸湿路径下的基质势与体积含水率的系列离散数据点。通过VSA测试结果确定样品的残余含水率以限定TRIM反演过程,修正了TRIM试验结果的准确性。选用F&X数学模型光滑连接了TRIM在低吸力范围内(0~300 kPa)与VSA的实测结果。将此方法应用于甘肃董志塬剖面黄土-古土壤(L<sub>5</sub>~S<sub>5</sub>)的SWCC的测试,并将预测模型得出的SWCC与实测数据对比,以证实方法的可靠性。本研究进一步完善了黄土和古土壤SWCC的测试方法,以期在工程实际中推广和应用,为定量分析黄土高原地区水分运移机制及水致黄土滑坡机理提供科学支撑。

## 1 基于TRIM-VSA的全吸力范围SWCC获取方法

基于VSA改进TRIM的全吸力范围SWCC获取共包含4个部分。①TRIM试验和VSA试验的完成。②通过VSA的试验结果限定TRIM反演初值。③TRIM和VSA获取的SWCC的结合。④预测模型的选用与分析。

### 1.1 低吸力段SWCC测试

通过TRIM试验装置获取试样的SWCC,该装置向处于一定初始和边界条件下的土施加一定的吸力变化量,此时试样中流出或流入的瞬态水流量与时间的函数关系由土样性质所决定。在试验初始与边界条件已知的情况下,通过一维水分运移过程分析软件Hydrus-1D分别对脱湿段和吸湿段溢出水量随时间的变化曲线进行拟合,同时反算出难以实测的水力参数,进而能够快速得到非饱和土的SWCC(伊盼盼等,2012)。TRIM的试验系统见图1,其试验步骤详情参见相关文献(Wayllace et al., 2012)。



图1 瞬态脱湿吸湿试验系统(TRIM)

Fig. 1 Transient water release and imbibition method

### 1.2 高吸力段SWCC测试

通过等温吸附法(VSA)获取试样在高吸力范围( $7.1 \times 10^3 \sim 4.8 \times 10^5$  kPa)脱湿和吸湿路径的SWCC,仪器精度可达 $\pm 0.005$ (Likos, 2003; Arthur, 2013)。

#### (1) 试验原理

VSA的试验原理是设置吸、脱湿两种水力路径,测定持续时间段内土样的相对湿度和重量;土样相对湿度的测量依赖于内置的冷镜露点传感器,土样重量的测量依赖于高精度的磁力天平(图2)。其中,在吸湿过程中,不断给样品室通入固定温度的饱和水汽(储水槽固定在控温模块上,以确保气体湿度饱和,并使得温度波动最小),脱湿过程是不断地给样品室通入干空气(外界气体中的水汽在经过干燥剂管后被完全吸收)(Mcqueen et al., 1974)。



图2 等温吸附仪(VSA)

Fig. 2 Vapor sorption analyzer

#### (2) 试验方案

选择天然黄土L<sub>5</sub>和古土壤S<sub>5</sub>,在试验开始前,所有样品均做高温干燥(110 °C, 8 h)处理,碾碎并过筛(2 mm)以粉末形式制备。完成仪器的安装和校准,试验参数设置为:选择动态等温线测量模式(DDI);数据

采集的分辨率为 0.01; 水蒸气流量为 100 mL/L; 相对湿度测试范围为 0.03~0.95; 样品室温度为 25 °C; 土样质量为 1.0~1.5 g。

### (3) 数据处理

试验结束后, 将直接获得质量含水率  $w$  与相对湿度  $RH$  的关系曲线, 根据吸附的公式(1)将  $RH$  转化为吸力  $\psi_i$ , 根据粉末样所对应的 TRIM 平行试样数据 ( $G_s$ 、 $e$ ), 由公式(2)将  $w$  转化为体积含水率  $\theta$ 。最后, 将等温吸附分析仪所测  $w-RH$  关系曲线转化为  $\theta-\psi$  关系曲线。

$$\psi_i = -\frac{RT}{w_v} \ln\left(\frac{u_v}{u_{v,0}}\right) \quad (1)$$

式中:  $\psi_i$  为总吸力, 单位为 Pa;  $R$  为通用气体常数 8.314 J/mol·K;  $T$  为热力学温度, 25 °C 对应  $T=298.15$  K;  $w_v$  为水的摩尔体积  $1.8 \times 10^{-5}$  m<sup>3</sup>/mol;  $u_v/u_{v,0}$  为相对湿度。

$$\theta = \frac{w \times G_s}{1 + e} \quad (2)$$

式中:  $\theta$  为体积含水率,  $w$  为质量含水率,  $G_s$  为比重,  $e$  为土样孔隙比。

### 1.3 SWCC 反演参数的确定

通过 Hydrus-1D 反演 TRIM 获得目标函数的详细过程是: 首先, 输入土样的基础信息: 试样尺寸、孔隙度、饱和渗透系数和修正后的目标函数。然后, 设置脱湿路径下参数, 饱和体积含水率  $\theta_s^d$  通过公式(3)进行计算得出, 进气值参数  $\alpha^d$  和孔隙分布系数  $n^d$  根据以往的经验值, 限定在一定范围内, 进行反复迭代计算, 直到拟合曲线与实测值完全匹配。对残余含水率  $\theta_r^d$  的设定, 由于历史局限性导致的仪器测量量程有限, 并未到真正的残余值, 因此引入 VSA 试验, 并通过对其实验结果做双切线找到交点, 确定吸附区的界限值。初始设置参数中除  $\alpha^d$  和  $n^d$ , 其他均为实测值, 这为结果的准确性奠定了基础。

$$\theta_s^d = n = 1 - \frac{m_s}{G_s \times \rho_w \times V} \quad (3)$$

式中:  $n$  为试样的孔隙率,  $m_s$  为试样干重,  $\rho_w$  为水密度,  $V$  为试样体积。

脱湿路径反演结束后, 开始设置吸湿路径的参数值, 需要用到脱湿结束时的压力水头分布结果, 其他步骤与脱湿路径计算过程相似, 但增加了吸湿路径下  $K_{sat}^w$  的迭代求解, 不断修正参数, 直至反演的预测结果与试验得到的实际结果吻合, 即认为完成反演。

### 1.4 全吸力范围内 SWCC 的获取路径

为了获取全吸力范围内土样的 SWCC, 对传统的

TRIM 试验数据处理进行改进: 引入 VSA 试验, 获得高吸力范围内吸力与含水率一一对应的系列实测数据点; 通过 VSA 的试验结果限定 TRIM 反演初值; 选用适合的数学模型。

已有的 SWCC 数学模型多是根据经验或半经验模型、理论推导、数值模拟等建立的。在众多模型中, 目前对黄土的测试结果普遍采用 Van Genuchten (1980) 和 Fredlund 等 (1994) 的函数拟合, 拟合效果较好 (Sillers et al., 2001; 牛庚等, 2016; 谏文武等, 2020)。

VG 模型用于描述毛细水阶段的持水特性, 无法预测薄膜水占优势时, 以吸附作用为主的土壤水分运动特征 (Ryel et al., 2002)。当吸力到达  $\theta_r$  时, 无论  $\psi$  如何增加,  $\theta$  不再发生变化, 总是无限趋近于  $\theta_r$ , 这显然与实际情况相悖。同时, 从 VSA 获取的高吸力范围内的实际数据可以看出, 即使在土壤处于非常干燥的状态下,  $\psi$  与  $\theta$  之间仍呈现出很强的线性函数关系, 随着  $\psi$  的逐渐增大,  $\theta$  趋近于 0 (图 3)。

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha\psi)^n]^m} \quad (4)$$

式中:  $\alpha$  是与进气压力相关的参数 (kPa<sup>-1</sup>),  $n$  是过渡段与土样排水速率相关,  $m$  是与 SWCC 整体形状相关的参数。

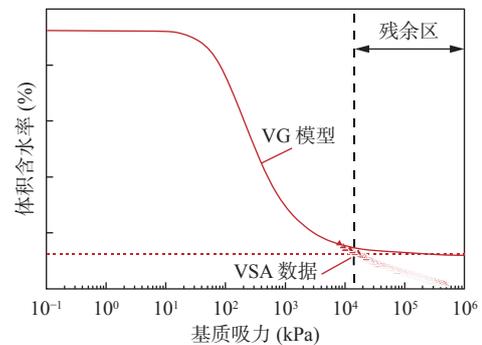


图3 Van Genuchten 模型缺陷

Fig. 3 The limitation of Van Genuchten model

为了描述吸附水阶段的持水特性, Fredlund & Xing 于 1994 年引入了修正因子, 提出一个与 VG 模型形式相近的 F&X 预测模型 (公式 5), 增加的修正因子极大地提高了 F&X 模型的适用范围。

$$\theta = C(\psi)\theta_s \left[ \frac{1}{\ln\left[e + \left(\frac{\psi}{\alpha}\right)^n\right]} \right]^m \quad (5)$$

$$C(\psi) = 1 - \frac{\ln(1 + \psi/\psi_r)}{\ln(1 + 10^6/\psi_r)} \quad (6)$$

式中： $\psi_r$ 是与残余值相关的拟合参数。

综上所述,本研究将选取 TRIM 实测数据(0~300 kPa)及 VSA 实测数据( $7.1 \times 10^3 \sim 4.8 \times 10^5$  kPa)作为有效数据,保证试验数据的准确度以限定曲线形态,采用 F&X 模型对所获取的数据进行拟合。

## 2 案例验证

### 2.1 试验材料

试验土样取自庆阳董志塬剖面,该地区发育有完整的黄土-古土壤地层序列,布设并实施了 250m 深的勘探钻孔,全孔连续取芯,每层采取原状土样。笔者选取  $L_5$  和  $S_5$  作为研究对象(图 4),开展了基本物理特性试验,包括含水率、颗粒级配、液限、塑限、塑性指标、比重、密度、饱和渗透系数,矿物成分、化学成分等,为开展黄土的非饱和土-水特性研究提供基础资料。通过室内常规试验测得这些土的基本物理参数及饱和渗透系数(表 1)。其中,干密度用环刀法,液、塑限用碟式仪法和搓条法,比重采用比重瓶法,饱和渗透系数是通过变水头渗透试验测得。粒度分布曲线和粒度累积曲线用马尔文激光粒度仪(MAZ3000)

测得。

$L_5$  和  $S_5$  的碎屑矿物成分测定结果显示(表 2),其既有各种岩浆岩矿物,也有变质岩和沉积岩中的矿物,可见黄土碎屑矿物具有“多矿性”。其中,石英、斜长石、钾长石、方解石、白云石等为轻矿物。角闪石、赤铁矿、黄铁矿、TCCM 等为重矿物,含量相对最多的是稳定和较稳定的不透明金属矿物,含量较少的是角闪石类不稳定矿物。

$L_5$  和  $S_5$  的黏土矿物成分含量测定结果显示(表 3),其黏土矿物组成相似,但伊利石含量占比最多,其他由高岭石、蒙脱石、绿泥石及少量混合层结构矿物共同组成。黏粒中绿泥石和高岭石含量比较接近, $S_5$  中伊利石含量相较于  $L_5$  略高。同时,伊利石具有由云母和蒙脱石晶层组成的混层结构,这种混层结构在 X 射线中反映出不对称性。

$L_5$  和  $S_5$  的化学成分含量测定结果显示(表 4),其主要包括不可溶性的次生矿物二氧化硅( $SiO_2$ )及伴生氧化物( $R_2O_3$ , 即  $Al_2O_3$ 、 $Fe_2O_3$  等)。其中, $SiO_2$ 、 $Al_2O_3$  和 CaO 的含量最高,这与主要矿物成分石英、长石和云母有关。 $Fe_2O_3$ 、FeO、CaO、MgO、 $K_2O$ 、 $Na_2O$ 、 $TiO_2$ 、 $P_2O_5$  和 MnO 等含量甚微, $Fe_2O_3$ 、FeO、MgO 与含有的

岩性 年代 地层	柱状图	古气候地层				地层特征描述
		代号	层底 深度 (m)	分层 深度 (m)	层底 年代 ( $10^4$ a)	
离石 黄土		$L_5$	44.8	6.6	46.8	棕黄色,湿,可塑-硬塑,均匀块状结构,含少量钙质结核,可见蜗壳和红色状包裹体,顶部有一层结核层,为上层古土壤中的钙质淋滤形成
		$S_5$	50.2	5.4	60.0	红褐色,湿,硬塑,团块及棱柱状结构,裂隙发育,裂隙间被白色钙质粉末充填,形成网状白色条带,有三层钙质结核,并有大量结核零散分布,该层厚度大,颜色深,是一标志层

图 4 剖面柱状图

Fig. 4 Logging of the  $L_5$  and  $S_5$

表 1 基本物理参数与饱和渗透系数表

Tab. 1 Basic physical parameters and saturated permeability coefficient

土层	土样基本物理参数									
	深度 (m)	含水率 (%)	密度 $\rho$ ( $g/cm^3$ )	干密度 $\rho_d$ ( $g/cm^3$ )	比重 ( $G_s$ )	孔隙比 ( $e$ )	饱和渗透系数 $k_s$ ( $10^{-5}$ m/s)	塑限 PL(%)	液限 LL(%)	塑性指数 $I_p$ (%)
$L_5$	39.2	18.8	1.727	1.454	2.71	0.689	0.652	22.9	30.1	11.4
$S_5$	42.1	19.60	1.975	1.651	2.73	0.653	0.218	16.7	31.8	15.0

表 2 碎屑矿物成分含量表

Tab. 2 Detrital mineral compositions

样品编号	石英	斜长石	钾长石	方解石	白云石	角闪石	赤铁矿	黄铁矿	TCCM
$L_5$	40.6	11.3	3.9	6.5	1.3		0.4		36.0
$S_5$	43.1	12.5	1.7	5.7	0.7			1.2	35.1

表 3 黏土矿物成分含量表

Tab. 3 Clay mineral compositions

样品编号	黏土矿物相对含量(%)						混层比(%)	
	蒙脱石(S)	I/S	伊利石(It)	高岭石(Kao)	绿泥石(C)	C/S	I/S	C/S
L <sub>5</sub>		47	38	6	9		55	
S <sub>5</sub>		46	40	6	8		55	

表 4 化学成分含量表

Tab. 4 Chemical compositions

样品编号	主要化学成分含量平均值(%)										
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO
L <sub>5</sub>	57.35	11.91	3.59	1.01	9.05	2.16	2.39	1.52	0.64	0.14	0.08
S <sub>5</sub>	65.43	14.51	5.17	0.61	1.73	2.1	2.87	1.21	0.74	0.11	0.11

辉石类、角闪石类以及各种铁矿类相关。对比 L<sub>5</sub> 和 S<sub>5</sub>, 其化学成分的含量无太大的差异, 其相似性反映了成因的一致性和沉积作用的持续稳定性。

L<sub>5</sub> 和 S<sub>5</sub> 粒度成分含量都是以粉粒占绝对优势, 黏粒次之, 砂粒最末, 说明不同时代的黄土在成因上没有根本区别。黄土由风尘堆积而成, 特点是沉积作用与成壤作用同时进行, 间冰期时夏季风盛行, 温暖

多雨, 成壤作用强烈, 形成红褐色的古土壤。冰期时冬季风盛行, 但成壤作用较弱。L<sub>5</sub> 黄土呈“双峰”型颗粒分布形态, 而 S<sub>5</sub> 古土壤呈“三峰”型, 其粒度分布曲线的主峰为 20~40 μm, 次峰为 0.5~0.8 μm。在一定程度上, 20~40 μm 的主峰反映了古环境的季风强度, 而 0.5~0.8 μm 的次峰则反映了沉积后土壤化的强度(图 5)。

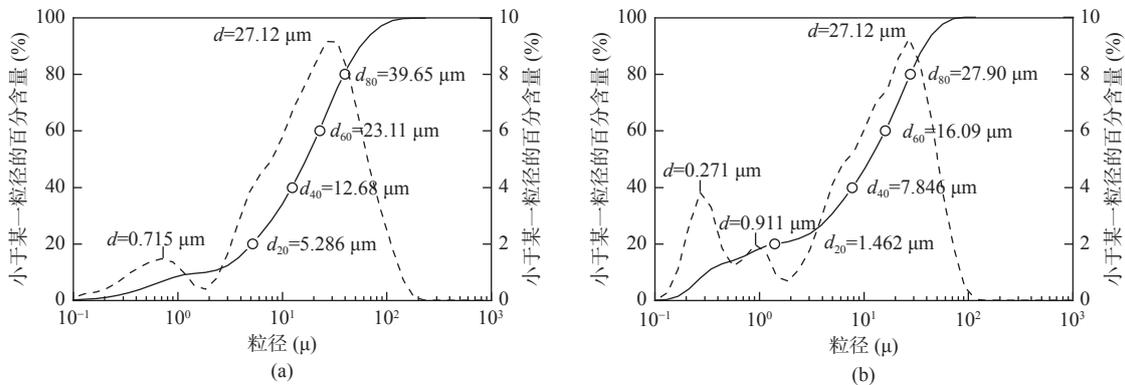


图 5 L<sub>5</sub>(a)和 S<sub>5</sub>(b)粒径级配累积曲线图

Fig. 5 (a) L<sub>5</sub> and (b) S<sub>5</sub> cumulative particle size distribution curves

2.2 低吸力段 SWCC

通过 TRIM 试验得到的目标函数(图 6), 以 L<sub>5</sub> 和 S<sub>5</sub> 为例, 可以明显看出 L<sub>5</sub> 土层瞬态流出(流入)量大于相邻层 S<sub>5</sub> 的瞬态流出(流入)量, 其原因主要有 2 点: ①相较于相邻黄土层 L<sub>5</sub>, 古土壤 S<sub>5</sub> 的干密度更大, 孔隙比更小, 试样密实程度也更大, 故其排、吸水能力较弱。②古土壤 S<sub>5</sub> 的黏粒含量远大于相邻层黄土 L<sub>5</sub>, 其持水性较黄土更强, 故其排水量更少。通过 Hydrus-1D 反演获得脱湿与吸湿条件下的模型参数。脱湿条件下的模型参数:  $\theta_r^d, \theta_s^d, \alpha^d, n^d, K_{sat}^d$ ; 吸湿条件下的模型参数:  $\theta_r^\omega, \theta_s^\omega, \alpha^\omega, n^\omega, K_{sat}^\omega$ 。反演计算得到其模型参

数结果(表 5)。

2.3 高吸力段 SWCC

在不同的吸力范围内, 土颗粒对水的作用性质不同, 孔隙水的赋存形式也不一样, 最靠近土颗粒表面的是吸附水, 吸附水之外是毛细水。当基质吸力大于一定值时, 毛细水发生气化, 土中仅有吸附水, 受颗粒表面吸附作用控制, 且当基质吸力大于该值时, 吸附作用强度是含水率的单值函数。通过 VSA 试验得到土样在脱湿与吸湿路径下的体积含水率与基质吸力一一对应的系列数据散点(图 7), 数据点分辨率较高, 数据变化差值稳定, L<sub>5</sub> 和 S<sub>5</sub> 的曲线形

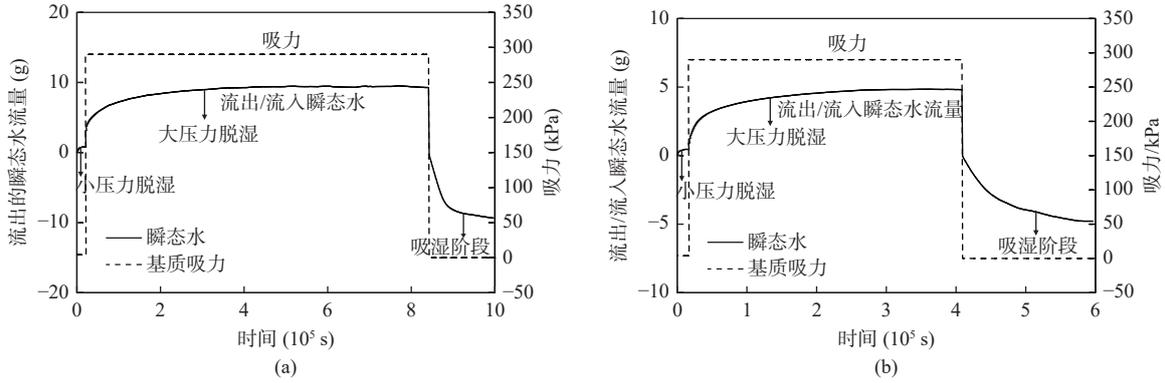


图6 L<sub>5</sub>(a)和S<sub>5</sub>(b)试验记录的目标函数图

Fig. 6 (a) L<sub>5</sub> and (b) S<sub>5</sub> objective function of test record

表5 脱湿与吸湿路径下的模型参数表

Tab. 5 The model parameters of the wetting and drying paths

土层	脱湿路径					吸湿路径				
	$a^d$ (k/Pa)	$n^d$	$\theta_r$	$\theta_s^d$	$K_s^d$ (cm/sec)	$a^w$ (k/Pa)	$n^w$	$\theta_r$	$\theta_s^w$	$K_s^w$ (cm/sec)
L <sub>5</sub>	0.009 9	1.134	0.063	0.408	1.73E-5	0.020 8	1.149	0.06	0.322	4.37E-6
S <sub>5</sub>	0.008 3	1.074	0.083	0.395	1.63E-5	0.013 5	1.085	0.08	0.373	9.43E-7

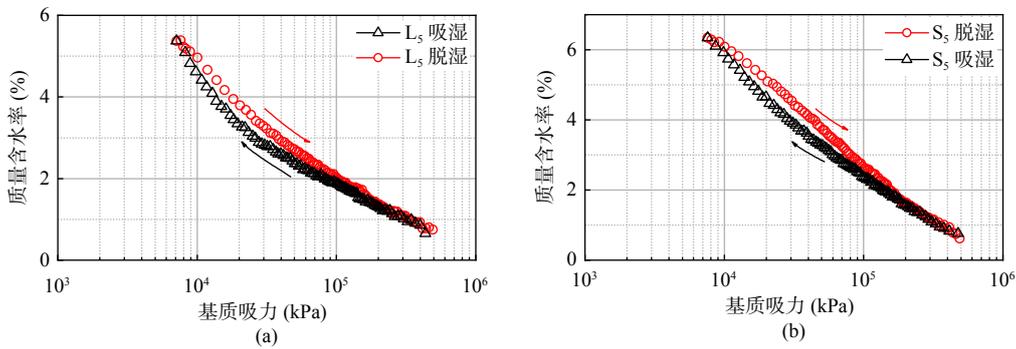


图7 L<sub>5</sub>(a)和S<sub>5</sub>(b)高吸力段的土-水特征曲线图(RH=0.03~0.95)

Fig. 7 (a) L<sub>5</sub> and (b) S<sub>5</sub> soil-water characteristic curve in high suction range (RH=0.03~0.95)

态相似。

为了定量描述与分析高吸力段的SWCC,从以下3个方面讨论:①反映土样亲水性强弱的持水能力特征点RH<sub>0.95</sub>。②反映土样遇水变化快慢的最大减湿率。③描述水力滞回效应强弱的SWCC的滞回区域面积。

(1)持水能力特征点RH<sub>0.95</sub>

提取L<sub>5</sub>和S<sub>5</sub>土层SWCC的吸湿起点、吸湿终点和脱湿终点的体积含水率(基质吸力)(表6)。

(2)最大减湿率

为进一步分析和量化黄土、古土壤在过渡段遇水吸力变化的快慢,通过作图法准确计算各土层SWCC脱湿路径下过渡段斜率,即最大减湿率,具体做法是沿过渡段作切线,取切线上两点(ψ<sub>1</sub>, θ<sub>1</sub>)(ψ<sub>2</sub>, θ<sub>2</sub>),根据式

(6)计算L<sub>5</sub>和S<sub>5</sub>最大减湿率:

$$s = \frac{\theta_1 - \theta_2}{\log\left(\frac{\psi_2}{\psi_1}\right)} \quad (7)$$

(3)滞回面积

由于单一参数并不能有效反映各土层滞后效应的强弱,所以用不同水力路径围成的滞回圈面积衡量各层土的滞后效应的强度,通过公式(7)积分脱、吸湿曲线并作差得到滞回圈面积:

$$HHA = \int_{\psi_{min}}^{\psi_{max}} (\theta_w)_{drying} d\psi - \int_{\psi_{min}}^{\psi_{max}} (\theta_w)_{wetting} d\psi \quad (8)$$

通过对比和分析图7土层L<sub>5</sub>和S<sub>5</sub>高吸力范围内SWCC变化趋势:①反映土样亲水性强弱的持水能力

表 6 高吸力段土-水特征曲线脱/吸湿起始与结束点表

Tab. 6 The start and end points of wetting/ drying path of high suction range soil-water characteristic curve

土层	试验用时 (Min)	吸湿起始点			吸湿结束点(脱湿起始点)			脱湿结束点		
		RH	w(%)	$\psi$ (kPa)	RH	w(%)	$\psi$ (kPa)	RH	w(%)	$\psi$ (kPa)
L <sub>5</sub>	2384	0.0283	0.97	490929	0.9496	5.37	7122	0.0280	0.74	492397
S <sub>5</sub>	2238	0.0315	0.76	476177	0.9464	6.34	7587	0.0289	0.62	488040

特征点  $RH_{0.95}$ ,  $S_5$  强于  $L_5$ 。②反映土样遇水变化快慢的最大减湿率,  $S_5$  快于  $L_5$ 。③描述水力滞回效应强弱的 SWCC 的滞回区域面积,  $S_5$  大于  $L_5$ 。

2.4 全吸力范围的 SWCC

图 8 为  $L_5$  和  $S_5$  全吸力范围的 SWCC 特征, 其拟

合参数见表 7。可以看到, F&X 模型预测的曲线和实际数据吻合度较高, 可光滑衔接 TRIM 与 VSA 得到的试验数据, 预测模型的拟合精度  $R^2$  均达到了 0.999。说明将两种方法结合获取全吸力 SWCC 是可行的。经过拟合后的曲线可以完整地表征 SWCC 的全周期。

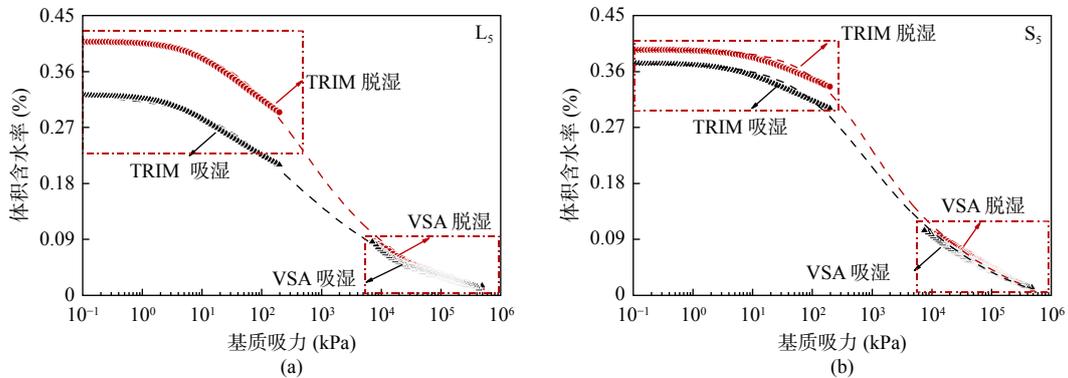


图 8 L<sub>5</sub>(a)和 S<sub>5</sub>(b)全吸力范围内土-水特征曲线图

Fig. 8 (a) L<sub>5</sub> and (b) S<sub>5</sub> soil-water characteristics curve over the full suction range

表 7 脱湿与吸湿路径下的拟合参数表

Tab. 7 The fitting parameters of the wetting and drying paths

土层	脱湿路径					吸湿路径				
	$\theta_s^d$	$\alpha^d$	$\psi_s^d$ (kPa)	$n^d$	$m^d$	$\theta_s^w$	$\alpha^w$	$\psi_r^w$	$n^w$	$m^w$
L <sub>5</sub>	0.408	228.078	18247	0.662	1.425	0.322	101.914	14923	0.571	1.295
S <sub>5</sub>	0.395	370.008	22381	0.836	1.075	0.373	275.134	17542	0.716	1.148

在不同水力路径下, 同一土样的特征参数差别明显, 脱湿曲线高于吸湿曲线, 存在着明显的滞回效应(表 7)。脱湿路径下的饱和含水率  $\theta_s$  大于吸湿路径, 是由于残余含气量效应。在试样经过脱湿排水后重新吸水的过程中, 孔隙中会进入一部分气体, 进入孔隙中的气体占据了一些原本被孔隙水所占的空间, 而毛细力难以将孔隙中留存的气泡完全排除。与此类似的是  $\alpha$  的变化,  $\alpha$  与进气值有关, 脱湿路径下的进气值要大于吸湿路径, 参数  $\alpha$  的差异体现了土体脱湿排水较吸湿进水更难的实际情况, 其原因在于, 脱湿路径下固-液接触角较吸湿路径小。  $n$  与孔径分布情况相关, 对比  $L_5$  和  $S_5$ , 并无明显差异, 这可能与  $L_5$  和  $S_5$  土样中大、中、小、微孔隙分布密度相关, 遇水后土颗

粒间孔隙结构的改变相对复杂, 需要进行更深入的相关性讨论。  $m$  与土样本身的粘粒含量相关, 因粘粒含量成因的一致性和沉积作用的持续稳定性,  $m$  在不同路径下没有体现出明显的规律性。

3 结论

(1)  $L_5$  和  $S_5$  土层高吸力范围内 ( $7.1 \times 10^3 \sim 4.8 \times 10^5$  kPa) SWCC 的对比与分析表明: ① 反映土样亲水性强弱的持水能力特征点  $RH_{0.95}$ ,  $S_5$  强于  $L_5$ 。② 反映土样遇水变化快慢的最大减湿率,  $S_5$  快于  $L_5$ 。③ 描述水力滞回效应强弱的 SWCC 滞回区域面积,  $S_5$  大于  $L_5$ 。

(2) 定义了 VSA 获得的高吸力段 SWCC 的双切

线拐点为土的残余含水率,并以此值限定 TRIM 反演模拟过程,提高了 TRIM 试验反演模拟的准确性。获取了 L<sub>5</sub> 和 S<sub>5</sub> 土层全吸力范围内的 SWCC,均取得了较好的结果,证明该方法是可行的。

## 参考文献(References):

- 陈锐,刘坚,吴宏伟,等.一种装配式新型张力计的研制[J].岩土力学,2013,34(10):3028-3032.
- CHEN Rui, LIU Jian, WU Hongwei, et al. Development of a new fabricated tensometer[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(10): 3028-3032.
- 陈辉,韦昌富,陈盼,等.一种测定非饱和土-水力学参数的方法[J].岩土力学,2010,31(10):3348-3353.
- CHEN Hui, WEI Changfu, CHEN Pan, et al. A method for determining hydraulic parameters of unsaturated soils[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(10): 3348-3353.
- 谌文武,贾全全,童艳梅.莫高窟壁画地仗土-水特征曲线的测定与拟合[J].岩土力学,2020,41(5):1483-1491.
- CHEN Wenwu, JIA Quanquan, TONG Yanmei. Measurement and curve fitting for soil-waterer characteristic curve of mural plaster at Mogao Grottoes[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(5): 1483-1491.
- 郭龙,刘清秉,王菁莪,等.以瞬态方法测试马兰黄土土-水特征曲线试验研究[J].长江科学院院报,2013,(11):67-71.
- GUO Long, LIU Qingbing, WANG Jing'e, et al. Soil-Water Characteristic Curve of Malan Loess by Transient Water Release and Imbibitions Method[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2013, (11): 67-71.
- 马田田,韦昌富,陈盼等.NaCl溶液对土体持水特性影响的试验研究[J].岩土力学,2015,36(10):2831-2836.
- MA Tiantian, WEI Changfu, CHEN Pan, et al. An experimental study of effect of NaCl solution on soil water characteristics[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(10): 2831-2836.
- 牛庚,孙德安,韦昌富,等.全风化泥岩持水特性研究及其预测[J].岩土工程学报,2016,38(S2):216-221.
- NIU Geng, SUN De'an, WEI Changfu, et al. Water retention behaviour of complete-intense weathering mudstone and its prediction[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(S2): 216-221.
- 孙德安,张俊然,吕海波.全吸力范围南阳膨胀土的土-水特征曲线[J].岩土力学,2013,34(7):1839-1846.
- SUN De'an, ZHANG Junran, LÜ Haibo. Soil-water characteristic curve of Nanyang expansive soil in full suction range[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(7): 1839-1846.
- 叶为民,白云,金麒,等.上海软土土水特征的室内试验研究[J].岩土工程学报,2006,28(2):260-263.
- YE Weimin, BAI Yun, JIN Qi, et al. Lab experimental study on soil-water characteristics of Shanghai soft clay[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(2): 260-263.
- 伊盼盼,韦昌富,魏厚振,等.两种快速测定非饱和土水力学参数方法的对比分析[J].岩土力学,2012,33(07):2007-2012+2020.
- YI Panpan, WEI Changfu, WEI Houzhen, et al. Comparison between two methods for quickly determining hydraulic parameters of unsaturated soils[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(07): 2007-2012+2020.
- ASTM International. D5298-10. Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper [S]. West Conshohocken, United States: ASTM International, 2013.
- Arthur E, Tuller M, Moldrup P, et al. Rapid and Fully Automated Measurement of Water Vapor Sorption Isotherms: New Opportunities for Vadose Zone Research[J]. *Educational Technology & Society*, 2013, 7(4): 193-200.
- Fredlund D G, Rahardjo H, Fredlund M D. Unsaturated soil mechanics in Engineering practice[M]. John Wiley & Sons, INC, Hoboken, New Jersey, 2012.
- Fredlund D G, and Xing A. Equation for the soil-water characteristic curve[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1994, 31(4): 521-532.
- Gardner W R. Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table[J]. *Soil Science*, 1958, 85(4): 228-232.
- Genuchten V, Th. M. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, 44(5): 892-898.
- Haghighi A, Medero G M, Marinho A M, et al. Temperature effects on suction measurement using the filter paper technique [J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2012, 35(1): 103575.
- Knodel P C, Stannard D I. Tensimeters—Theory, Construction, and Use[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 1992, 15(1): 48-58.
- Lu N, Likos WJ. Unsaturated soil Mechanics[m]. John Wiley & Sons, INC, 2004.
- Likos WJ, Lu N. Automated Humidity System for Measuring Total Suction Characteristics of Clay[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2003, 26(2): 179-190.
- Mcqueen I S, Miller R F. Approximating soil moisture characteristics from limited data: Empirical evidence and tentative model [J]. *Water Resources Research*, 1974, 10(3).
- Nam S, Gutierrez M, Diplas P, et al. Comparison of testing techniques and models for establishing the SWCC of riverbank soils[J]. *Engineering Geology*, 2010, 110(1-2): 1-10.
- Ryel R, Caldwell M, Yoder C, et al. Hydraulic redistribution in a stand of *Artemisia tridentata*: evaluation of benefits to transpiration assessed with a simulation model[J]. *Oecologia*, 2002, 130(2): 173-184.
- 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*. Springer, Dordrecht, 2001: 243-283.
- Wayllace A, Lu N. A Transient Water Release and Imbibitions Method for Rapidly Measuring Wetting and Drying Soil Water Retention and Hydraulic Conductivity Functions [J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2012.