

DOI: 10.11779/CJGE201909010

# 含盐遗址重塑土的吸力测定及土水特征曲线拟合

张 悅<sup>1</sup>, 叶为民<sup>\*1,2</sup>, 王 琼<sup>1</sup>, Alessandro Tarantino<sup>3</sup>

(1. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 教育部城市环境与可持续发展联合研究中心, 上海 200092;  
3. 斯克莱德大学土木与环境工程系, 英国 格拉斯哥 G1 1XJ)

**摘要:** 在水、盐等多种因素的长期共同影响下, 珍贵的交河故城本体普遍形成了表层结皮剥蚀病害, 引发遗址不可逆转的破坏。非饱和土的特性与其吸力大小密切相关, 因此准确确定土水特征曲线是深入研究土遗址劣化机理的基本前提。针对交河遗址土配制 NaCl 含量不同的泥浆, 采用 5 种吸力测定方法(盐溶液蒸气平衡法、露点水势仪、滤纸法、压力膜仪和高容量张力计)获取被测土体干燥过程中的总吸力和基质吸力, 开展不同方法所得吸力值之间的差异分析, 借助 van Genuchten (vG) 和 Fredlund & Xing (FX) 两种模型拟合基质吸力的土水特征曲线。结果表明, NaCl 对遗址土基质吸力几乎没有影响, 但由于引发渗透吸力而使总吸力在高含水率段显著增大。不同吸力测定方法反映的遗址土持水特性大体相似; 综合多组试验数据可降低曲线拟合误差, 在全吸力范围内获得可靠的土水特征脱湿曲线。vG 模型和 FX 模型的拟合效果都比较好, 结果为进一步定量化分析土遗址表层结皮开裂病害的形成演变过程提供了科学依据。

**关键词:** 非饱和土; 持水性; 吸力; NaCl; 土遗址保护

中图分类号: TU431 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)09-1661-09

作者简介: 张 悅(1989—), 女, 博士, 主要从事非饱和土力学和岩土质文物保护方面的研究工作。E-mail:  
2012zhangy@tongji.edu.cn。

## Suction measurement and SWRC modelling for reconstituted salt-laden soils in earthen heritages

ZHANG Yue<sup>1</sup>, YE Wei-min<sup>1,2</sup>, WANG Qiong<sup>1</sup>, Alessandro Tarantino<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. United Research Center for Urban Environment and Sustainable Development, the Ministry of Education, Shanghai 200092, China; 3. Department of Civil & Environmental Engineering, University of Strathclyde, Glasgow G1 1XJ, UK)

**Abstract:** Under the long-term impacts of influencing factors including water and soluble salts, the Site of Yarkhoto Ancient City which is a precious earthen heritage is subjected to irreversible deterioration. Exfoliation of surface crusts on the remaining walls is one of the commonly observed pathologies. The behaviors of unsaturated soils are dependent on suction, thus making it crucial to obtain reliable soil-water retention curve (SWRC) for investigating the deterioration mechanisms of earthen heritages. The slurries with different NaCl contents are prepared from the local soils. The total suction and matric suction during desiccation are determined using five methods (vapor equilibrium, water potentiometer, filter paper, pressure plate and high-capacity tensiometer), and the discrepancies are further discussed. Meanwhile, two models, i.e., van Genuchten (vG) and Fredlund & Xing (FX), are adopted to model the SWRC. The results show that NaCl has insignificant effect on the matric suction but induces osmotic suction, leading to a great increase in the total suction especially at high water contents. The general trend of water retention behavior of soils obtained by various methods is consistent. Based on the data obtained by different methods, the errors of curve fitting can be minimized, and a reliable SWRC on drying path is acquired in the full suction range. Both vG and FX models can model the experimental data well, which provides a scientific basis for further quantitative analysis of the evolution process of surface crusts cracking in earthen heritages.

**Key words:** unsaturated soil; water retention; suction; NaCl; earthen heritage conservation

## 0 引言

交河故城地处新疆维吾尔自治区吐鲁番盆地西部, 自古是中国丝绸之路名城。该遗址因其独特的历

基金项目: 国家自然科学基金项目(41672271, 41527801)

收稿日期: 2018-06-25

\*通讯作者(E-mail: ye\_tju@tongji.edu.cn)

史、艺术、科学和社会价值，于 1961 年成为国务院公布的首批全国重点文物保护单位，并在 2014 年作为中国、哈萨克斯坦和吉尔吉斯斯坦三国联合申遗的“丝绸之路：长安—天山廊道的路网”中的一处遗址点成功列入《世界遗产名录》。

作为世界上同类遗址中最古老、保存最完整的生土建筑城市，交河故城地处中国气候极度干燥、炎热的西北地区。当地的强烈蒸发引起易溶盐在遗址本体尤其是其表面的富集，其含量可高达 2%~5%<sup>[1-2]</sup>，其中氯化钠和硫酸钠是对遗址危害较大的两种主要易溶盐<sup>[3]</sup>。另外，加之其他自然及人为因素的综合作用，遗址的耐久性在持续降低。剥蚀是交河遗址现场分布最广泛的表面风化病害之一：墙体表部附着的一层片状硬壳呈龟裂破碎状，并在风沙等外营力的作用下剥离、脱落，造成遗址的破坏和损耗<sup>[2]</sup>。表层结皮的出现与集中式强降雨对遗址的软化和溅蚀有关，其形成、开裂的本质是降雨过程中产生的表面泥浆层在后续强烈蒸作用下的干燥收缩变形和强度破坏<sup>[4-6]</sup>。在脱湿阶段，遗址土经历了从饱和到非饱和状态的变化。非饱和土具有多相混合、非均质、颗粒化及多孔隙等特点，颗粒-水-气分界面处的可收缩弯液面和易溶盐的出现，分别使土体内部产生基质吸力和渗透吸力。吸力是决定非饱和土水力和力学等工程特性关键因素，其大小与含水率密切相关。因此，获取准确的土水特征曲线是深入探究土遗址劣化机理的基本前提之一。

实验室内常用的吸力测定方法分为直接法和间接法<sup>[7-8]</sup>。直接法的典型仪器包括张力计和轴平移装置，通过使用具有一定进气值的陶瓷板，在阻隔空气穿过的时保证土中孔隙水与量测系统中的水相连接，从而维持一定的孔隙水、气压差，即基质吸力。间接法主要通过量测土体相对湿度，或与土体达到水分平衡的其他孔隙材料的物理参数（如含水率、热传导系数和电导率），并根据相应的率定曲线得到对应总吸力或基质吸力值。常用的间接方法包括蒸气平衡法<sup>[9]</sup>、渗析法<sup>[9]</sup>、滤纸法<sup>[10-12]</sup>和露点水势仪<sup>[12]</sup>等。

Patrick 等<sup>[12]</sup>采用露点水势仪和滤纸法研究了 8 种土的持水特性，发现这两种方法获取的曲线趋势大体一致。局部误差可能来自：试样在露点水势仪中未达到完全平衡；未考虑所选滤纸吸力率定曲线的普适性。吴宏伟等<sup>[13]</sup>详细对比了轴平移、渗透和湿度控制吸力 3 种技术的原理、应用和优缺点等，指出不同方法会引起吸力平衡状态差异，从而对土体力学性状造成重大影响。多名学者<sup>[14-16]</sup>对比了张力计与压力膜仪获取的土水特征曲线，发现两组数据在待测土体饱和度高

于 80% 时存在较大偏差。Nam 等<sup>[17]</sup>证实滤纸法、轴平移法、露点水势仪、蒸气平衡法和渗析法的结果并非完全一致，但综合分析仍可有效反映不同性质土体在全吸力范围内的持水规律。

针对含盐土的持水特性，前人开展有一系列试验研究，多以原状土或重塑压实样为主<sup>[18-22]</sup>。结果表明，盐分使土样的总吸力普遍提高，然而对基质吸力的影响规律较为复杂，与易溶盐类型、土体矿物成分及其微结构中大、小孔分布等有关。目前，关于盐分对初始泥浆状态的重塑土脱湿曲线影响的成果则不多见。

本文以交河故城遗址土为对象，配制不同 NaCl 含量的泥浆，采用盐溶液蒸气平衡法、露点水势仪、滤纸法、压力膜仪和高容量张力计 5 种方法，获取含盐泥浆干燥过程中的基质吸力和总吸力变化规律，重点分析含盐量以及试验方法的影响，并选用两种典型的数学模型拟合遗址土的脱湿土水特征曲线，获取相应的模型参数。结果为进一步定量化分析土遗址表层结皮开裂病害的形成演变过程，预测材料变形、强度等性质的发展规律等提供了丰富、可靠的数据支撑。

## 1 试验材料与试样制备

### 1.1 试验材料

试验材料取自交河故城遗址，其基本物理、化学性质如下：颗粒相对密度 2.70，液限 30%，塑限 19%，塑性指数 11；颗粒组成中粉粒（0.002~0.075 mm）含量高达 79.4%，砂粒（0.075~2 mm）和黏粒（<0.002 mm）含量分别为 4.4% 和 16.2%；主要矿物成分有石英、斜长石、微斜长石和方解石；黏土矿物含量总体较低，以伊利石-蒙脱石互层型为主，另有少量伊利石和绿泥石；易溶盐总量为 3663.2 mg/kg，其中阳离子  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  含量较高，阴离子以硫酸盐和硝酸盐为主。

### 1.2 试样制备

首先，将原状土风干并充分碾碎过 2 mm 筛，再对其进行脱盐处理，以排除固有易溶盐的干扰。为此，称取一定质量土，按土水质量比 1:5 注入去离子水浸泡、搅拌、分离，重复相关步骤直至上部滤液电导率小于 100  $\mu\text{s}/\text{cm}$  时结束脱盐<sup>[23]</sup>。

将完成脱盐的土体放入 60℃ 烘箱内完全烘干，重新碾碎过 2 mm 筛。随后配制初始含水率为 45%（1.5 倍液限）、NaCl 质量分数分别为 0, 2% 和 5% 的 3 组泥浆试样，记为 C0、C2 和 C5。充分混合固、液体并振动排除内部气泡后，密封静置 48 h，以保证土中的水盐分布均匀。平衡后的泥浆干密度为 1.25  $\text{Mg}/\text{m}^3$ ，流动性较强，无团聚体存在。

所有试验在 20±0.5℃ 的温控环境下进行。烘箱烘

干试样的时长均为 24 h。

## 2 试验方法

本文所选用的 5 种室内吸力测定方法及其适用对象、吸力范围和操作规范如表 1 所示。

表 1 所选用的吸力测定方法汇总

Table 1 Summary of methods selected for suction measurement

方法	适用对象	吸力范围 /MPa	文献
盐溶液蒸气平衡法	控制总吸力	3.3~286.7	[24, 25]
露点水势仪	测量总吸力	0~300	[26]
滤纸法	测量总、基质吸力	全范围	[27]
压力膜仪	控制基质吸力	0~1.5	[26]
高容量张力计	测量基质吸力	0~1.5	[28]

### 2.1 盐溶液蒸气平衡法

采用国药集团化学试剂有限公司的 8 种易溶盐(分析纯级别)分别配制饱和溶液, 20℃条件下, 饱和溶液对应的相对湿度和总吸力如表 2 所示。

针对 C0、C2 和 C5 泥浆, 各制备 16 个试样(8 个吸力点、每个吸力点 2 个平行样): 向每个铝盒中注入 10 g 泥浆形成 1 个试样。试验时, 将试样置于干燥器内的瓷板上, 瓷板下部盛放选定饱和盐溶液, 密封静置存放。定期称量试样重量, 当质量连续一周稳定不变时认为吸力达到平衡。取出试样并在 105℃条件下烘干测定其含水率, 获取各吸力对应的平衡含水率平均值。

表 2 饱和盐溶液的相对湿度及对应总吸力(20℃)

Table 2 Relative humidities and corresponding total suctions of saturated salt solutions (20℃)

饱和盐溶液	相对湿度/%	总吸力/MPa
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	97.6	3.3
ZnSO <sub>4</sub>	91.1	12.6
KCl	85.1	21.8
NaCl	75.5	38.0
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	54.5	82.0
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	43.2	113.5
MgCl <sub>2</sub>	33.1	149.5
LiCl	12.0	286.7

### 2.2 露点水势仪

采用 Decagon 仪器公司的露点水势仪 WP4C, 可测量水势范围为 0~−300 MPa, 测量误差在 0~−5 MPa 范围内为±0.05 MPa, 在 −5~−300 MPa 范围内为待测值的±1%。使用厂家提供的 0.5 mol/kg KCl 标准液标定仪器, 其在 20℃下的理论水势值为 −2.19 MPa。

针对 C0、C2 和 C5 泥浆, 各制备 16 个试样: 向每个内部涂抹了凡士林的圆形培养皿( $D=6.5\text{ cm}$ ,  $H=2$

cm) 中注入 80 g 泥浆形成 1 个试样。首先在室内将试样从初始含水率 45% 缓慢风干至不同的目标含水率, 再用石蜡膜将其密封保存 24 h, 以确保其内部水、盐分布均匀。试验时, 将待测试样切成薄片状, 称取 4 g 平铺于样品容器内, 确保能够覆盖容器底部且不超过其高度的一半。选择精确测量模式, 当实测水势自动显示在仪器电子屏上时测量结束, 用时一般不超过 30 min。随后, 取出试样并在 105℃ 条件下烘干测定含水率。每个试样切片 3 次进行平行测量, 以获取总吸力和平衡含水率的平均值。

### 2.3 滤纸法

采用 GE 医疗生命科学的 Whatman 42 号无灰级定量滤纸(W42), 技术指标为: 厚度 0.2 mm, 直径 55 mm, 灰分含量 0.007%。保护滤纸采用杭州特种纸业有限公司的新星牌定量滤纸, 技术指标为: 直径 70 mm, 灰分小于 0.1 mg, 滤速为慢速。所有滤纸在烘箱中以 105℃ 烘干备用。

W42 的总吸力率定曲线通过盐溶液蒸气平衡法实测获得<sup>[6]</sup>

$$\log_{10} \psi_t = \begin{cases} 7.729 - 0.2057w_f & (w_f \geq 23\%) \\ 5.867 - 0.1244w_f & (w_f < 23\%) \end{cases} \quad (1)$$

基质吸力率定曲线直接采用 Leong 等<sup>[29]</sup>的公式:

$$\log_{10} \psi_m = \begin{cases} 2.909 - 0.0229w_f & (w_f \geq 47\%) \\ 4.945 - 0.0673w_f & (w_f < 47\%) \end{cases} \quad (2)$$

式中  $\psi_t$  是土体总吸力(kPa);  $\psi_m$  是土体基质吸力(kPa);  $w_f$  是滤纸平衡含水率(%)。

针对 C0、C2 和 C5 泥浆, 各制备 25 个试样, 制样方法与露点水势仪法相同。为满足试验的可操作性, 确保待测试样的刚度和完整性, 风干目标含水率均设定在液限以下。试验时, 在待测试样下方插入 3 张滤纸: 两张保护滤纸间夹一张 W42, 呈“三明治”状叠放, 以测基质吸力; 土样上表面放置 PVC 方块(5×5×2 cm, 约 60 g) 和两张 W42, 以测总吸力(图 1)。

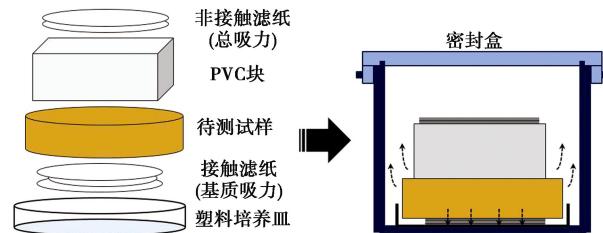


图 1 滤纸法装置示意图

Fig. 1 Schematic drawing of filter paper method

PVC 块能施加一定重量, 使底部滤纸尽量与土体保持接触; 同时能占据空间, 减小盒内空气体积, 缩短平衡时间。试样与滤纸整体被移入 300 mL 的密封

盒中静置保存 14 d，随后在 105℃下烘干试样和 W42 滤纸测定其含水率，计算对应的吸力值。试验全程佩戴塑料手套并使用镊子移动滤纸，操作仔细、快速，尽量避免引起滤纸含水率的变化。称重时采用测量精度为 0.1 mg 的电子天平。

## 2.4 压力膜仪

采用美国土壤水份仪器公司的 15 bar 压力膜仪，其主体由压力室、高进气值陶瓷板、压力表和控制阀门组成。

针对 C0、C2 和 C5 泥浆，各制备 3 个平行试样：在已预先抽真空饱和的陶瓷板上方依次铺放保护滤纸和环刀 ( $D=6.18 \text{ cm}$ ,  $H=2 \text{ cm}$ )，向每个环刀内缓慢注入泥浆形成初始高度为 1.5 cm 的试样，注意避免空气混入。保护滤纸可有效防止细小土颗粒渗入并阻塞陶瓷板，同时能保证试样与陶瓷板的良好接触。试验时，封闭压力室并施加 20 kPa 气压，当排水量连续 24 h 小于 0.01 g 时认为土体已达水力平衡，卸除气压后拆样称重。重新装回试样，继续按 40, 60, 90, 150, 200, 300, 400, 500, 700, 1100 kPa 逐级升高气压，即土中基质吸力。结束后在 105℃下烘干试样测定最终含水率，并利用此前测得的质量变化反算出每级基质吸力下的平衡含水率，求取平行样的平均值。

## 2.5 高容量张力计

采用斯克莱德大学的 Trento 高容量张力计<sup>[30]</sup>，其基本构造如图 2 所示：主体外壳为金属材质，内置 15 bar 高进气值陶瓷板和膜片式压力传感器，两者之间为极小的储水腔室，完全由去离子水填充。测量时，张力计一旦与待测试样接触，储水腔室中的部分水分会经过陶瓷板流向水势更低的试样，从而形成一定的张拉力。边缘固定的平圆隔膜在该力的作用下发生稳定变形，隔膜上应变计测得的应变分布情况与水分张拉力（基质吸力）的大小密切相关。为消除陶土板及储水腔室内部的残余气泡，有效降低气蚀的可能性，张力计的前期预饱和过程十分关键，包括多次的脱湿-饱和循环以及在 40 bar 高压水腔内的密封保存<sup>[28]</sup>。

为避免 NaCl 对张力计的污染，仅针对 C0 泥浆进行吸力量测。参照露点水势仪法的制样方法制备 15 个试样，风干目标含水率均设定在液限以下。在密封试样的石蜡膜中心位置开直径 2 cm 左右的孔，将陶瓷板表面涂有遗址土泥糊（含水率 30%）的张力计从孔中插入，轻轻按压使之与试样顶面紧密接触。再次用石蜡膜将试样与张力计整体密封包裹，避免水分蒸发。数据采集系统以 1 min 为间隔自动记录水势的实时发展曲线，24 h 后结束试验并拆除张力计，在 105℃下烘干张力计接触部位下方的土体，测定其含

水率。

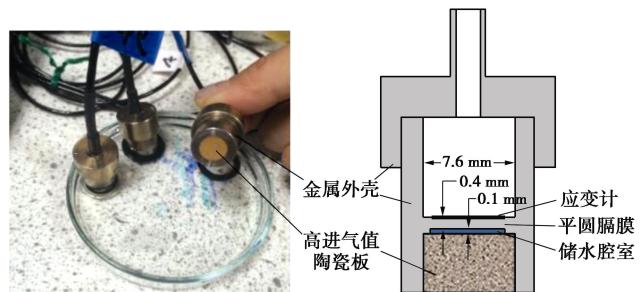


图 2 Trento 高容量张力计的基本构造

Fig. 2 Structure of Trento high-capacity tensiometer

## 3 试验结果

### 3.1 总吸力变化规律

图 3 为质量含水率 - 总吸力关系曲线。图中曲线表明，土体总吸力随含水率的降低和 NaCl 含量的升高而增大。含水率较高时，不同含盐量试样的总吸力差异显著，最大可相差 2 到 3 个数量级；但这一差异随着含水率的降低而逐渐减小，当含水率低于 3% 时，总吸力值趋于相同。Thyagaraj 等<sup>[18]</sup>和 He 等<sup>[19]</sup>学者也得到类似结论。

值得注意的是，总吸力大于 10 MPa 时，试验方法对测得的吸力值几乎没有影响；总吸力小于 10 MPa 时，滤纸法和蒸气平衡法结果较为一致，而 WP4C 测得的总吸力偏大，以不含盐试样 C0 尤为明显。这 3 种方法测定吸力的原理相似，均以试样在封闭空间中与环境达到水气平衡为基础，然而试验周期差别很大。蒸气平衡法最慢，耗时一至数月不等，滤纸法静置时间为 14 d，WP4C 测吸力仅用时 15~30 min。这一阶段中，试样自身的陈化效应及其和环境的水气平衡状态实际上均有所不同。Agus 等<sup>[31]</sup>发现，采用露点水势仪量测吸力前，将试样的平衡静置（陈化）时间延长至和滤纸法相同，则可有效消除两者结果间的差异。

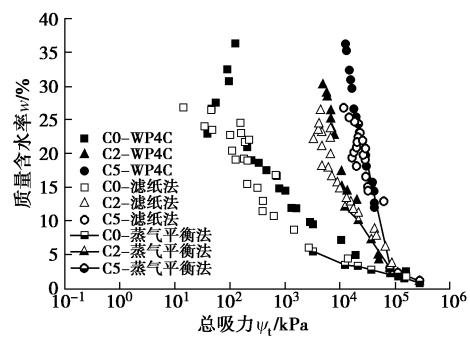


图 3 不同方法测定的质量含水率 - 总吸力关系曲线

Fig. 3 Relationship between gravimetric water content and total suction measured by different methods

从图 3 还可以发现，对 C0 试样而言，含水率在

25%以上时, WP4C 实测总吸力值表现出随试样含水率降低而略有减小的趋势, 这一异常现象与露点水势仪自身的测量准确度有关。实际上, 采用 WP4C 针对每个试样进行 3 次平行测量, 所得吸力并不完全相同。若将其平均值视为土中实际吸力, 则每个实测值偏离平均值的百分比, 即可定义为仪器的相对测量误差。如图 4 所示, 高吸力段的相对测量误差始终较小, 普遍在  $\pm 1\%$  之间, 最大不超过  $\pm 5\%$ ; 当吸力降至 1 MPa 以下时, 相对测量误差值的波动更加明显, 并随总吸力的降低呈非线性增大的趋势。总吸力 250 kPa 时, 三次平行测量的相对误差分别为 32%, -24% 和 -8%; 总吸力为 90 kPa 时达到 -56%, 22% 和 77%。该现象会对低吸力段的土水特征曲线形态造成极大影响。

WP4C 的测量误差与仪器自身的传感器精度有关, 此外还受到传感器与试样及上部空间的温度平衡状态(是否存在梯度或波动)、多余水蒸气的冷凝以及实验人员操作方法等因素的影响<sup>[31-32]</sup>。仪器测量腔室具有维持内部温度恒定的功能, 然而试样放入后仍会造成扰动。温度波动引起的测量误差也会随着吸力的降低和温度变化幅度的增大而呈非线性增加<sup>[32]</sup>。

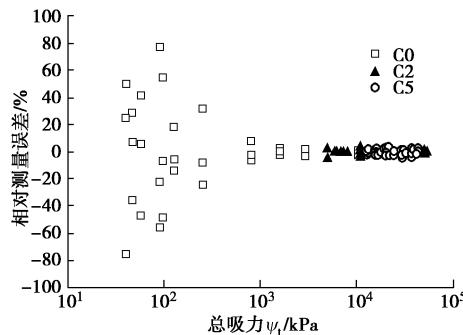


图 4 WP4C 测量总吸力的相对误差变化

Fig. 4 Relative errors of total suction measured by WP4C

### 3.2 基质吸力变化规律

压力膜仪实测质量含水率-基质吸力关系曲线如图 5 所示。随着基质吸力的增大, 试样的含水率持续降低, 1100 kPa 时约为 11.5%。含盐量不同的泥浆试样在同一基质吸力下的平衡含水率几乎相同, 相差最大也未超过含水率的测量允许误差 1%, 因此可认为基质吸力持水曲线形态不受 NaCl 含量影响, 这与前人所得的规律一致<sup>[20, 33]</sup>。

图 6 为滤纸法实测质量含水率-基质吸力关系曲线。试样含水率低于 20% 时, C2 和 C5 的基质吸力明显高于 C0 试样。该现象可能是由于含盐试样中的 NaCl 晶体随含水率降低逐渐析出并阻塞孔隙, 从而使非饱和土中的毛细水迁移变得更加困难导致的。这种情况下, 含盐试样底部用以测定基质吸力的 W42 滤纸与土体的有效接触程度降低, 因此两者未能在 14 d 时

间内达到吸力平衡, 滤纸测得的吸力与土体实际吸力存在偏差。当试样含水率较高时, 滤纸的平衡含水率也随之升高, Rainwater 等<sup>[34]</sup>发现此时滤纸法测量结果变得离散, 数据可重复性变差, 因此低吸力段的数据也需慎重采用。

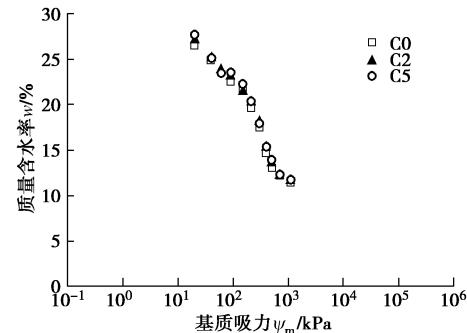


图 5 压力膜仪实测质量含水率-基质吸力关系曲线

Fig. 5 Relationship between gravimetric water content and matric suction measured by pressure plate method

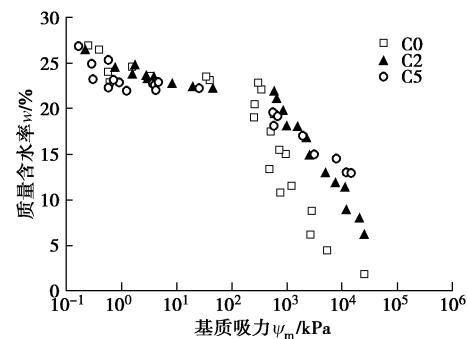


图 6 滤纸法实测质量含水率-基质吸力关系曲线

Fig. 6 Relationship between gravimetric water content and matric suction measured by filter paper method

张力计与土体接触后, 实测水势随时间的发展曲线如图 7 所示, 不同试样的曲线形态相似。以含水率 18.9% 的试样为例, 发现张力计水势在前 80 min 内迅速降低; 随后逐渐拐平并趋于稳定, 200 min 左右达到平衡; 随着试验的持续进行, 水势继续呈线性降低, 但变化程度很小, 这可能与试样的微量蒸发相关。总体而言, 张力计能在 2~3 h 内快速与试样达到吸力平衡。

对比滤纸法、张力计和压力膜仪测得的 C0 试样质量含水率-基质吸力关系曲线(图 8), 可以看出, 滤纸法试验结果覆盖的吸力范围很广(0.1 kPa~26 MPa), 而后两者的吸力测量上限严格受到陶瓷板进气值的限制。压力膜仪属于控制吸力法, 滤纸法测量的基质吸力值与其结果吻合很好, 表明 Leong 等<sup>[29]</sup>提出的 W42 基质吸力率定曲线适用于交河遗址土的土水特征描述; 同时也表明初始干燥的接触滤纸能在 14 d 内与不含盐试样达到吸力平衡, 这与谌文武等<sup>[11]</sup>

的结果十分相似。

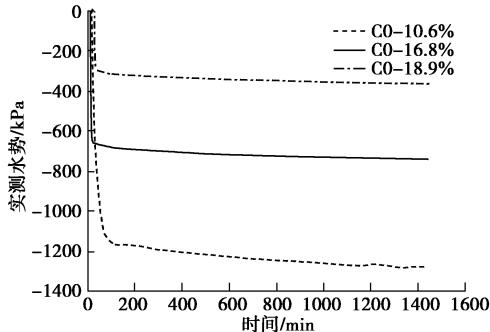


图 7 张力计实测水势随时间的发展曲线

Fig. 7 Evolution of water potential with time measured by tensiometers

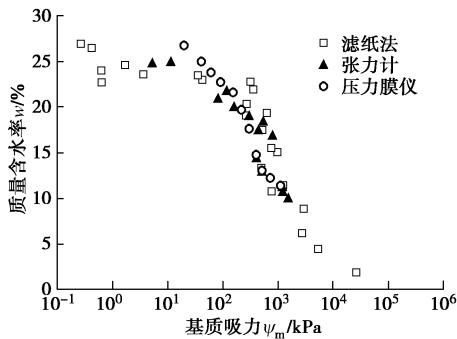


图 8 C0 试样质量含水率 - 基质吸力关系曲线对比

Fig. 8 Comparison of relationships between gravimetric water content and matric suction of C0

前人研究还发现，张力计与压力膜仪的数据在中间吸力段（对应土体饱和度 0.7~0.8）极易出现差异，即相同基质吸力下后者对应的含水率或饱和度偏高。这通常是由于张力计平衡时间不足<sup>[33]</sup>，或压力膜仪测试的试样内含有独立封闭气泡，孔隙气压增加仅使气泡体积压缩，而试样本身并无排水导致的<sup>[16]</sup>。图 8 结果表明，通过预先排除泥浆中的气泡，并保证张力计有足够的测量时间（24 h），则能有效保证两者结果的一致性。

### 3.3 土水特征曲线的拟合

基质吸力对非饱和土的体变、强度、渗透等性质具有显著的影响。本文采用 van Genuchten (vG)<sup>[35]</sup> 及 FX 等<sup>[36]</sup>这两种典型的土水特征模型对遗址土泥浆的质量含水率 - 基质吸力关系进行描述：

$$\frac{w(\psi_m) - w_r}{w_s - w_r} = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{\psi_m}{a}\right)^n\right]^m}, \quad (3)$$

$$\frac{w(\psi_m)}{w_s} = \left[1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\psi_m}{h_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{10^6}{h_r}\right)}\right] \times \frac{1}{\left\{\ln\left[\exp(1) + \left(\frac{\psi_m}{a}\right)^n\right]\right\}^m}. \quad (4)$$

式中  $w(\psi_m)$  为任意基质吸力  $\psi_m$  (kPa) 下的质量含水率 (%)； $w_r$  为残余含水率 (%)，即含水率达到该值后不再随吸力的增大而显著降低； $w_s$  为饱和含水率 (%)； $h_r$  为残余含水率状态时的吸力值，取为 3000 kPa； $a$ ,  $n$ ,  $m$  为模型拟合参数。参数  $a$  为曲线反弯点对应的吸力 (kPa)，与土体进气值大小有关； $n$  和  $m$  则反映了土体孔径分布（控制了减饱和段的脱湿速率）及曲线对称性。根据 3 个模型参数的物理意义，拟合时规定其取值下限均为 0，上限为无穷大。另外需要指出，Iyer 等<sup>[37]</sup>的试验表明，对于初始含水率较高的泥浆而言，超过液限部分的水分以自由水形态存在，其蒸发并不会造成土体吸力的增加，因此饱和含水率  $w_s$  直接确定为遗址土液限 30%。

拟合数据选择压力膜仪和盐溶液蒸气平衡法试验中的 C0 试样结果。这两种方法是对吸力进行控制而获取相应的平衡含水率，因此操作便捷、试验误差很小，并且分别覆盖了毛细作用占优的较低吸力（通常为 0~1500 kPa）范围和吸附作用占优的较高吸力范围。值得注意的是，盐溶液蒸气平衡法控制的是土体总吸力，但由于 C0 试样不含盐分，故认为其在数值上与基质吸力相等。

由图 9 (a) 可以看出，单独基于压力膜仪数据进行拟合时，vG 模型和 FX 模型得到的土水特征曲线几乎重合。然而当吸力高于 3 MPa 时，曲线预测的土体含水率与实测值相比普遍偏低。图 9 (b) 表明，单独基于蒸气平衡法数据进行拟合时，选择不同模型得到的曲线形态差异很大。吸力低于 3 MPa 时，vG 模型预测的土体含水率显著小于实测值，两者可相差 10% 以上；相反，FX 模型的预测结果显示土体含水率会在基质吸力 300~1000 kPa 范围内急剧变化，与实测规律也相差较大。当综合压力膜仪和蒸气平衡法数据拟合时，两模型得到的曲线基本相同，相关系数均高达 0.99，如图 9 (c) 所示。唯一差别出现在吸力大于 200 MPa 以后：FX 模型的修正参数使试样含水率在基质吸力为 1000 MPa 时降低至 0，而 vG 模型的残余含水率几乎维持不变，不再随吸力增大而降低。

表 3 为不同拟合条件下，交河遗址土泥浆在脱湿过程中其土水特征曲线的模型拟合参数取值。

很明显，当试验方法单一、数据对应的吸力范围有限时，由于试验点无法代表完整的土水特征曲线形状，拟合结果与实测值在局部存在较大误差。另外，拟合条件的变化对土水特征曲线模型的参数取值也有较大影响。谭晓慧等<sup>[38]</sup>指出，土水特征曲线的拟合存在参数多解性，即解的大小与拟合参数的初值及取值范围的限定密切相关。当参与拟合的试验数据覆盖的吸力范围更为广泛时，不但可以降低拟合误差，同时

也能有效避免参数的多解性问题。

在针对中国西北土遗址的水、盐迁移问题及相关病害开展机理研究时, 前人初步采用压力膜仪测定了土体在低吸力范围内的持水特性, 并基于 vG 模型拟合结果对其非饱和渗透系数进行了预测<sup>[39-40]</sup>。非饱和土水力-力学特性的数值模拟精度取决于土水特征曲线方程反映其持水特性的准确度。因此, 要对真实环境中土遗址材料的各种性能进行定量描述, 将来还需更进一步的分析验证。

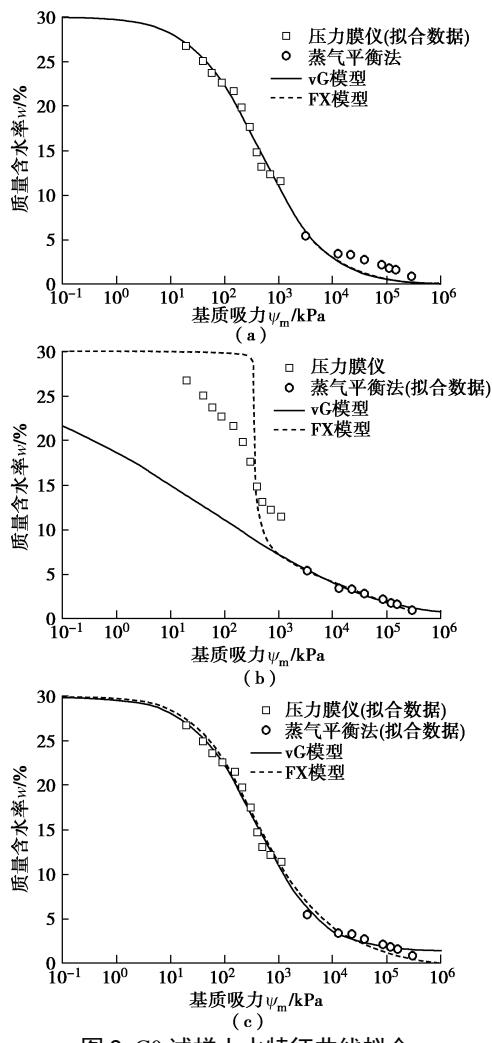


图 9 C0 试样土水特征曲线拟合

Fig. 9 Fitted soil-water retention curves of C0

表 3 土水特征曲线的模型拟合参数

Table 3 Fitting parameters of soil-water retention curve models

拟合条件		拟合参数			相关系数 $R^2$
数据	模型	$a/\text{kPa}$	$n$	$m$	
压力膜仪 (低吸力)	vG	529.49	0.69	1.08	$1.03 \times 10^{-13}$ 0.98
	FX	332.83	0.69	2.11	— 0.98
蒸气平衡 (高吸力)	vG	$1.46 \times 10^6$	0.17	5.67	$5.94 \times 10^{-15}$ 0.99
	FX	337.98	104.87	0.29	— 0.98
全吸力	vG	449.91	0.72	1.09	1.47 0.99
	FX	161.73	0.81	1.38	— 0.99

### 3.4 渗透吸力变化规律

C0 试样的总吸力与基质吸力相等, 而 C2、C5 试样的总吸力显著增大, 这是由于 NaCl 使土中产生额外的渗透吸力。特定含水率下, 通过对实测的试样总吸力和基质吸力做差, 可得到相应的渗透吸力  $\pi$ 。图 10 所示是 C2、C5 试样质量含水率-渗透吸力关系曲线, 可以看出土中 NaCl 含量越高则  $\pi$  值越大, 这与前人<sup>[41]</sup>所得规律一致。另外随着含水率降低, 遗址土泥浆的渗透吸力不断增大, 其对应的变化范围在 3~80 MPa 之间。

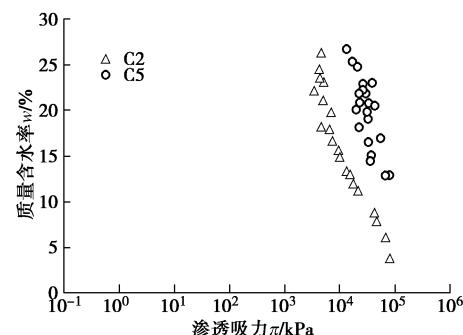


图 10 C2、C5 试样质量含水率-渗透吸力关系曲线

Fig. 10 Relationship between gravimetric water content and osmotic suction of C2 and C5

## 4 结 论

本文通过开展交河遗址土泥浆的脱湿试验, 探究了 NaCl 含量对总吸力与基质吸力变化规律的影响, 并对比分析了 5 种吸力测定方法(盐溶液蒸气平衡法、露点水势仪、滤纸法、压力膜仪和高容量张力计)所得结果之间的差异。在此基础上, 选用 van Genuchten 和 Fredlund & Xing 两种典型的土水特征数学模型拟合遗址土的持水曲线。主要结论如下:

(1) NaCl 对遗址土基质吸力几乎没有影响, 但使总吸力在高含水率段增大 2 至 3 个数量级, 且该差异随着含水率降低而减小, 总吸力最终在数值上趋于相同。

(2) 不同吸力测定方法反映的交河遗址土持水特性大体相似, 局部差异与试样的平衡时间以及仪器自身的测量误差等有关。

(3) 拟合土水特征曲线时, 数据和模型的选择使曲线形态及相关模型参数差别较大。综合压力膜仪和盐溶液蒸气平衡法, vG 模型和 FX 模型均可在全吸力范围内获得可靠的交河遗址土脱湿曲线。

(4) 盐分使土中产生额外的渗透吸力, 其值随着 NaCl 含量的增大和含水率的降低而不断增大。

致 谢: 感谢欧盟 Marie Curie IRSES-GREAT (Geotechnical

and geological responses to climate change: exchanging approaches and technologies on a world-wide scale) 项目 (FP7-PEOPLE-2013- IRSES-612665) 对本研究的资助, 本文部分试验在斯克莱德大学土木与环境工程系实验室完成。

## 参考文献:

- [1] 崔 凯, 谌文武, 韩 琳, 等. 干旱区土遗址掏蚀区土盐渍劣化与风蚀损耗效应[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(9): 1412 – 1418. (CUI Kai, CHEN Wen-wu, HAN Lin, et al. Effects of salinized deterioration and aeolian ullage on soils in undercutting area of earthen ruins in arid region[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(9): 1412 – 1418. (in Chinese))
- [2] 张虎元, 刘 平, 王锦芳, 等. 土建筑遗址表面结皮形成与剥离机制研究[J]. 岩土力学, 2009, **30**(7): 1883 – 1891. (ZHANG Hu-yuan, LIU Ping, WANG Jin-fang, et al. Generation and detachment of surface crust on ancient earthen architectures[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(7): 1883 – 1891. (in Chinese))
- [3] SHAO M S, LI L, WANG S J, et al. Deterioration mechanisms of building materials of Jiaohe ruins in China[J]. Journal of Cultural Heritage, 2013, **14**(1): 38 – 44.
- [4] 刘 平, 张虎元, 严耿升, 等. 土建筑遗址表部土体收缩特征曲线测定[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(4): 842 – 849. (LIU Ping, ZHANG Hu-yuan, YAN Geng-sheng, et al. Determination of soil shrinkage characteristic curve of surface soil on ancient earthen architectures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(4): 842 – 849. (in Chinese))
- [5] ZHANG Y, YE W M, CHEN B, et al. Desiccation of NaCl-contaminated soil of earthen heritages in the Site of Yan City, northwest China[J]. Applied Clay Science, 2016, **124** – **125**: 1 – 10.
- [6] ZHANG Y, YE W M, CHEN Y G, et al. Impact of NaCl on drying shrinkage behavior of low-plasticity soil in earthen heritages[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2017, **54**(12): 1762 – 1774.
- [7] HU P, YANG Q, LI P Y. Direct and indirect measurement of soil suction in the laboratory[J]. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **15**(3): 1 – 14.
- [8] BULUT R, LEONG E C. Indirect measurement of suction[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2008, **26**(6): 633 – 644.
- [9] 叶为民, 唐益群, 崔玉军. 室内吸力量测与上海软土土水特征[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(3): 347 – 349. (YE Wei-min, TANG Yi-qun, CUI Yu-jun. Measurement of soil suction in laboratory and soil-water characteristics of Shanghai soft soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(3): 347 – 349. (in Chinese))
- [10] 朱赞成, 孙德安, 田 进. 高吸力高温度下 2 种滤纸率定曲线及其应用[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(6): 1020 – 1027. (ZHU Zan-cheng, SUN De-an, TIAN Jin. Calibration curves of two filter papers at high suction and temperature and their application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(6): 112 – 117. (in Chinese))
- [11] 谌文武, 刘 鹏, 刘 伟, 等. 接触面滑坡滑带土吸力的滤纸法测试[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(增刊1): 112 – 117. (CHEN Wen-wu, LIU Peng, LIU Wei, et al. Suction tests on sliding soil in interface landslide based on filter paper method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(S1): 1020 – 1027. (in Chinese))
- [12] PATRICK P K, OLSEN H W, HIGGINS J D. Comparison of chilled-mirror measurements and filter paper estimates of total soil suction[J]. Geotechnical Testing Journal, 2007, **30**(5): GTJ100096.
- [13] 吴宏伟, 陈 锐. 非饱和土试验中的先进吸力控制技术[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(2): 123 – 128. (NG C W W, CHEN Rui. Advanced suction control techniques for testing unsaturated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(2): 123 – 128. (in Chinese))
- [14] GUAN Y, FREDLUND D G. Use of the tensile strength of water for the direct measurement of high soil suction[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1997, **34**: 604 – 614.
- [15] MARINHO F A M, TAKE W A, TARANTINO A. Measurement of matric suction using tensiometric and axis translation techniques[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2008, **26**(6): 615–631.
- [16] TARANTINO A, GALLIPOLI D, AUGARDE C E, et al. Benchmark of experimental techniques for measuring and controlling suction[J]. Géotechnique, 2011, **61**(4): 303 – 312.
- [17] NAM S, GUTIERREZ M, DIPLAS P, et al. Comparison of testing techniques and models for establishing the SWCC of riverbank soils[J]. Engineering Geology, 2009, **110**(1-2): 1 – 10.
- [18] THYAGARAJ T, SALINI U. Effect of pore fluid osmotic suction on matric and total suctions of compacted clay[J]. Géotechnique, 2015, **65**(11): 952 – 960.
- [19] HE Y, CHEN Y G, YE W M, et al. Influence of salt concentration on volume shrinkage and water retention characteristics of compacted GMZ bentonite[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, **75**(6): 535.
- [20] 孙德安, 张谨译, 宋国森. 氯盐渍土土-水特征曲线的试

- 验研究[J]. 岩土力学, 2013, **34**(4): 955 - 960. (SUN De-an, ZHANG Jin-yi, SONG Guo-sen. Experimental study of soil-water characteristic curve of chlorine saline soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(4): 955 - 960. (in Chinese))
- [21] RAVI K, RAO S M. Influence of infiltration of sodium chloride solutions on SWCC of compacted bentonite-sand specimens[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2013, **31**(4): 1291 - 1303.
- [22] 王毓国, 张爱军, 赵庆玉, 等. 易溶盐含量对伊犁黄土持水特性的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(增刊 1): 212 - 217. (WANG Yu-guo, ZHANG Ai-jun, ZHAO Qing-yu, et al. Effect of soluble salt content on water-holding characteristics of Ili loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(S1): 212 - 217. (in Chinese))
- [23] 崔 凯, 谌文武, 沈云霞, 等. 干旱、半干旱地区干湿与盐渍复合过程遗址土强度响应实验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, **43**(11): 4451 - 4456. (CUI Kai, CHEN Wen-wu, SHEN Yun-xia, et al. Experimental study on response of intensity on earthen ruin's soil undergoing recombination process of salinized and dry-wet in arid and semi-arid regions[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2012, **43**(11): 4451 - 4456. (in Chinese))
- [24] GREENSPAN L. Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions[J]. Journal of Research National Bureau of Standards, 1977, **81A**(1): 89 - 96.
- [25] ASTM E104-02. Standard practice for maintaining constant relative humidity by means of aqueous solutions[S]. 2012.
- [26] ASTM D6836-16. Standard test method for determination of the soil water characteristic curve for desorption using hanging column, pressure extractor, chilled mirror hygrometer, or centrifuge[S]. 2016.
- [27] ASTM D5298—16 Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper[S]. 2016.
- [28] TARANTINO A, MONGIOVÌ L. Experimental procedures and cavitation mechanisms in tensiometer measurements[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2001, **19**(3/4): 189 - 201.
- [29] LEONG E C, HE L, RAHARDJO H. Factors affecting the filter paper method for total and matric suction measurements[J]. Geotechnical Testing Journal, 2002, **25**(3): 322 - 333.
- [30] TARANTINO A, MONGIOVÌ L. Calibration of tensiometer for direct measurement of matric suction[J]. Géotechnique, 2003, **53**(1): 137 - 141.
- [31] AGUS S S, SCHANZ T. Comparison of four methods for measuring total suction[J]. Vadose Zone Journal, 2005, **4**(4): 1087 - 1095.
- [32] AGUS S S, SCHANZ T. Errors in total suction measurements[M]. Experimental Unsaturated Soil Mechanics, 2007: 59 - 70.
- [33] SREEDEEP S, SINGH D N. Critical review of the methodologies employed for soil suction measurement[J]. International Journal of Geomechanics, 2011, **11**(2): 99 - 104.
- [34] RAINWATER N R, McDOWELL L A, DRUMM E C. Measurement of total soil suction using filter paper: investigation of common filter papers, alternative media, and corresponding confidence[J]. Geotechnical Testing Journal, 2012, **35**(2): 295 - 304.
- [35] VAN GENUCHTEN M TH. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, **44**(5): 892 - 898.
- [36] FREDLUND D G, XING A. Equations for the soil water characteristic curve[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, **31**(4): 521 - 532.
- [37] IYER K, JAYANTH S, GURNANI S, et al. Influence of initial water content and specimen thickness on the SWCC of fine-grained soils[J]. International Journal of Geomechanics, 2013, **13**(6): 894 - 899.
- [38] 谭晓慧, 余 伟, 沈梦芬, 等. 土-水特征曲线的试验研究及曲线拟合[J]. 岩土力学, 2013, **34**(增刊 2): 51 - 56. (TAN Xiao-hui, YU Wei, SHEN Meng-fen, et al. Experimental study and curve fitting of soil-water characteristic curve[J]. Rock and Soil Mechanics 2013, **34**(S2): 51 - 56. (in Chinese))
- [39] 李最雄, 邵明申, 陈 锐. PS 加固对非饱和遗址土的渗透特性影响研究[J]. 岩土力学, 2011, **32**(7): 2039 - 2044. (LI Zui-xiong, SHAO Ming-shen, CHEN Rui, et al. Impact of PS on permeability of unsaturated ruins clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(7): 2039 - 2044. (in Chinese))
- [40] 赵天宇, 张虎元, 严耿升, 等. 莫高窟壁画地仗土的土水特性研究[J]. 敦煌研究, 2011(6): 36 - 42. (ZHAO Tian-yu, ZHANG Hu-yuan, YAN Geng-sheng, et al. The soil-water characteristics of base coat in Mogao grottoes murals[J]. Dunhuang Research, 2011(6): 36 - 42. (in Chinese))
- [41] SREEDEEP S, SINGH D N. Methodology for determination of osmotic suction of soils[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2006, **24**(5): 1469 - 1479.