

DOI: 10.11779/CJGE202102003

9种土样高吸力下的持水特征

周葆春, 赵鑫鑫, 马全国, 郎梦婷

(信阳师范学院建筑与土木工程学院, 河南 信阳 464000)

摘要: 持水特征曲线(SWRC)是非饱和土重要的本构关系。大部分 SWRC 由轴平移方法获得, 其所能控制的吸力范围较小; 然而工程实践中相对湿度常低于 95% (吸力高于 7.1 MPa); 因此采用动态露点法测定 Wyoming 膨润土、宁明膨胀土、荆门黄褐色膨胀土、Denver 黏土岩、荆门棕褐色膨胀土、武汉黏土、三门峡粉质黏土、郑州粉土、开封黄河砂相对湿度 3%~95% 范围的吸脱湿过程 SWRC。采用相对湿度 95% 下吸湿质量含水率 w_{95} 量化高吸力下持水能力, 采用吸脱湿 SWRC 间滞回区域面积 HHA 量化高吸力下 SWRC 滞回效应强弱, 采用同一吸力下吸脱湿 SWRC 含水率之差最大值 Δw_{\max} 量化水力滞回导致的含水率偏差范围。获得了 w_{95} , HHA, Δw_{\max} 与液限、塑性指数、阳离子交换量、比表面积等土性参数间的量化关系, 建议了 w_{95} 作为膨胀潜势判别标准并验证其可行性, 改进了 Fredlund-Xing (1994) 模型以描述高吸力下上述 9 种土样吸脱湿过程 SWRC, 以期为高吸力下相关土力学工程实践提供依据和参考。

关键词: 持水特征曲线; 高吸力; 动态露点等温线方法; 水力滞回; 膨胀潜势; 阳离子交换量; 比表面积; Fredlund-Xing(1994) 模型

中图分类号: TU443 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)02-0236-09

作者简介: 周葆春(1978—), 男, 博士, 教授, 主要从事非饱和土与特殊土力学方面的研究工作。E-mail: zhoubc@xynu.edu.cn。

Soil-water retention of 9 kinds of soils under high suctions

ZHOU Bao-chun, ZHAO Xin-xin, MA Quan-guo, LANG Meng-ting

(College of Architecture and Civil Engineering, Xinyang Normal University, Xinyang 464000, China)

Abstract: The soil-water retention curve (SWRC) is the important constitutive relation of unsaturated soil. Most SWRCs are determined by the axis translation method which is suitable for suctions in the range of 0 to 1.5 MPa. However, the relative humidity is usually less than 95 % in engineering practice, which means suctions larger than 7.1 MPa. For this reason, the SWRCs for adsorption (wetting) and desorption (drying) of Wyoming bentonite, Ningming expansive soil, Jingmen yellowish-brown expansive soil, Denver claystone, Jingmen brown expansive soil, Wuhan clay, Sanmenxia silty clay, Zhengzhou silt and Kaifeng sand are determined by the dynamic dewpoint isotherm method under the relative humidity in the range of 3 % to 95 % (for suctions in the range of 7.1 to 482.9 MPa). w_{95} (gravimetric water content under relative humidity of 95%) is adopted to quantify the soil-water retention capacity. HHA (hydraulic hysteresis area between adsorption branch and desorption branch of SWRCs) is adopted to quantify the magnitude of hydraulic hysteresis. Δw_{\max} (the maximum value of the difference of gravimetric water content between adsorption branch and desorption branch of SWRCs under the same suction) is adopted to quantify the deviation of gravimetric water content caused by hydraulic hysteresis. The quantitative relationships among w_{95} , HHA, Δw_{\max} and liquid limit, plastic index, cation exchange capacity and specific surface area are constituted. w_{95} is proposed as the criterion for the classification of expansive soils, and its feasibility is verified. The Fredlund and Xing (1994) equation is modified to simulate the adsorption and desorption branches of SWRCs of the above 9 kinds of soils under high suctions satisfactorily.

Key words: soil-water retention curve; high suction; dynamic dewpoint isotherm method; hydraulic hysteresis; swelling potential; cation exchange capacity; specific surface area; Fredlund and Xing (1994) equation

0 引言

持水特征曲线指土体持水状态(可用体积含水率、质量含水率或饱和度表达)与土中水的能量状态(可

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(11772290); 信阳师范学院“南湖学者奖励计划”青年项目

收稿日期: 2020-01-31

用吸力、势能或相对湿度表达)之间的关系^[1], 描述了土中水(液相)与土(固相)间的能量平衡状态^[2]。

土体持水的物理化学机制有毛细、吸附与渗透。毛细机制与弯液面上的表面张力有关, 受Young-Laplace方程控制(土体孔径越小其毛细吸力越大), 当土中水能量状态低至其空化点以下, 毛细水汽化, 相应毛细机制消失。吸附机制指(黏)土颗粒表面由于van der Waals力、双电层力、阳离子水化等造成的短程吸附作用导致的土中水能量降低, 可用Kelvin方程描述。通常将毛细与吸附机制导致的土中水相对自由水状态而言势能的降低称为基质势(用负值表达); 将对应土体固相的持水/吸水能力(用正值表达)称为基质吸力; 二者数值相等, 符号相反。此外, 渗透机制指溶解盐会降低土中水的能量状态, 其能量降低程度与溶质类型和浓度相关。

SWRC表征土体持水能力, 原本用于农业领域, 随后的研究表明非饱和状态下的渗流、强度与变形等土力学行为^[1]乃至土的成分与结构等土质学特征^[2]均与SWRC密切相关, 因而成为描述非饱和状态下土体性状的关键指标与工具, 在非饱和土力学研究与工程应用中具有基础的、特殊的、关键的作用与位置, 其研究成果亦非常丰富^[1-3], 但大部分SWRC^[1-3]由轴平移方法获得, 受陶土板进气值限制, 其基质吸力目前仅能控制在1500 kPa以内, 根据Kelvin方程(式(1))可知其对应的相对湿度RH为98.9%以上(环境温度25℃时)。然而, 自然界中RH变化范围远比轴平移方法所能控制的RH范围大; 例如中国主要城市各月RH统计^[4]显示, 最低14% (拉萨, 2月), 最高90% (长沙, 10月与11月; 海口, 1月); 因而高吸力(RH低于95%或吸力高于7.1 MPa)下的土体持水特征研究具有特别的现实意义。

高吸力下土体持水特征测试常用方法主要有: 滤纸法^[5-8] (适用于10~100 MPa)、冷镜湿度计法^[9] (适

用于0~300 MPa)、饱和盐溶液等压湿度控制法^[10-12] (适用于3~400 MPa)、干湿空气混合湿度控制法^[13] (适用于7~600 MPa)等。前两种为吸力量测方法, 难以控制吸力; 后两种为吸力控制方法, 适于测定完整的SWRC, 但蒸汽平衡历时漫长, 如文献[14]采用饱和盐溶液等压湿度控制法测定3.3~359.1 MPa吸力范围的膨胀土SWRC耗时319 d, 阻碍了高吸力下土体持水特征的研究与应用。

近年来出现的动态露点等温线方法^[15-16]使得上述情况有所改观, 该方法能够在较短时间(几天内)获得相对湿度在3%~95%范围的SWRC。为了给高吸力下相关土力学工程实践提供依据和参考, 本文采用该方法: ①对从黏土质砂到极高塑性黏土的9种土样开展高吸力下吸脱湿过程持水特征测试; ②采用RH=95%下的吸湿质量含水率 w_{95} 量化高吸力下持水能力, 采用吸脱湿SWRC间滞回区域面积HHA量化高吸力下SWRC滞回效应强弱, 采用同一吸力下吸脱湿SWRC含水率之差最大值 Δw_{\max} 量化水力滞回导致的含水率偏差范围; ③探讨 w_{95} 、HHA、 Δw_{\max} 与液限 w_L 、塑性指数 I_p 、阳离子交换量CEC、比表面积SSA等土性参数间量化关系; ④构建修正的Fredlund-Xing模型描述高吸力下吸脱湿过程SWRC。

1 研究方案

1.1 试验土样

试验采用Wyoming膨润土、宁明膨胀土、荆门黄褐色膨胀土、Denver黏土岩、荆门棕褐色膨胀土、武汉黏土、三门峡粉质黏土、郑州粉土和开封黄河砂共9种土样, 其物理性质指标测试结果见表1。

1.2 蒸汽吸附分析仪工作原理

美国Meter公司生产的蒸汽吸附分析仪(Vapor Sorption Analyzer, VSA)见图1, 用于测试动态的或平

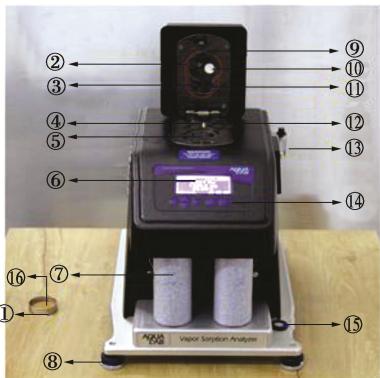
表1 试验用土的物理性质指标

Table 1 Physical property indexes of soils

土样名称	颗粒 相对质 量密 度 ^[17]	颗粒所占比例 ^{[17]/%}				液限 ^[17]	塑限 ^[17] /%	塑性 指数 ^[18]	USCS 定名 ^[19]	比表面积 EGME ^[20] /(m ² ·g ⁻¹)	自由 膨胀 膨胀潜 势 ^[21] /%	
		> 0.075 mm	0.005~ 0.075 mm	0.002~ 0.005 mm	< 0.002 mm							
Wyoming膨润土	2.70	5.1	14.2	3.8	77.0	217.7	33.1	184.5	极高 CH	500.1	621	775 强
宁明膨胀土	2.73	5.8	2.9	0.3	91.1	164.6	37.6	127.0	极高 CH	393.0	508	655 强
荆门黄褐色膨胀土	2.75	2.1	47.4	21.5	29.0	62.9	25.5	37.4	高 CH	236.5	309	75 中
Denver黏土岩	2.72	8.5	44.2	20.6	26.7	46.0	23.2	22.8	中等 CL	88.7	160	38 —
荆门棕褐色膨胀土	2.72	11.6	42.4	26.7	19.3	41.8	20.7	21.1	中等 CL	110.4	254	40 弱
武汉黏土	2.73	5.5	63.9	9.6	21.0	40.3	18.2	22.1	中等 CL	112.5	154	39 —
三门峡粉质黏土	2.72	0.5	82.8	5.7	11.1	35.2	19.1	16.1	中等 CL	108.5	149	30 —
郑州粉土	2.70	8.7	77.4	2.5	11.4	26.1	14.8	11.3	低 CL	27.7	50	9 —
开封黄河砂	2.68	62.6	36.0	0.2	1.3	—	—	—	SC	7.5	16	— —

衡的水分吸附等温线 (moisture sorption isotherms), 即给定温度下的 SWRC。

VSA 采用动态露点等温线 (dynamic dew point isotherm, DDI) 方法获得动态水分吸附等温线; 采用控制湿度下测试样质量的方法 (dynamic vapor sorption, DVS) 获得静态 (平衡) 水分吸附等温线。其工作原理是: DDI 方法既不控制含水率亦不控制 RH, 而是在用湿气流湿化/干气流脱湿过程中通过高精度天平测试样质量变化、通过冷镜露点法测 RH 得到动态水分吸附等温线。DVS 方法是在控制 RH 条件下跟踪试样质量变化以获得静态 (平衡) 水分吸附等温线, 每级湿度下的稳定 (平衡) 标准可用预设时间间隔或预设试样质量变化幅度。Likos 等^[15]与 Arthur 等^[22]试验证实了 DDI 方法的精度与可靠性, 系统试验研究表明 DDI 方法与 DVS 方法获得的 SWRC 无明显偏差。



①—样品杯 ②—热电堆 ③—冷镜 ④—光学传感器 ⑤—天平 (之上为试样室 试验时放置样品杯) ⑥—显示屏 ⑦—干燥管 ⑧—调平脚 ⑨—O型圈 ⑩—电容滤波器 ⑪—风扇 ⑫—气泵检查阀 ⑬—水箱 ⑭—显示屏按键 ⑮—气泡水平仪 ⑯—土样

图 1 蒸汽吸附分析仪

Fig. 1 Vapor sorption analyzer

VSA 相对湿度控制范围是 3%~95% (25℃下对应吸力范围为 7.1~482.9 MPa), 试样质量建议范围为 500~5000 mg, 试样温度可控范围为 15℃~60℃。

1.3 高吸力下持水特征试验方案

采用 VSA 测定 9 种土样高吸力下 SWRC。将土样风干碾散过 0.5 mm 筛, 置于烘箱中烘至衡量 (105℃下烘干 48 h), 取出置于干燥器内冷却至室温, 每次取约 1000 mg 试验。试验方案与步骤如下:

(1) 仪器准备

将 VSA 在工作台上调平, 安装干燥管, 水箱中注入去离子水, 检查天平, 标定相对湿度。

(2) 设定 SWRC 量测步骤

鉴于采用 DDI 方法与 DVS 方法测土样 SWRC 具有很好的一致性^[22], 且前者测试历时约为后者的 1/25^[15], 因此采用 DDI 方法。由于试样是完全烘干后

的, 质量含水率 w 为 0, 第 1 步设置初始 RH 为 3%, 最终 RH 为 95%, 用 DDI 方法采集吸湿过程 w 数据 RH, 即土样 SWRC 吸湿边界线; 第 2 步设置初始 RH 为 95%、最终 RH 为 3%, 目的是获得土样 SWRC 的脱湿曲线; 由于脱湿曲线起始点为 RH=95% 对应点, 所以并非脱湿边界线。此外, 设定样品室温度为 25℃。

(3) 测定 SWRC

将试样置入样品杯, 放入试样室开始测试, 测试由 VSA 自动执行。试验结束后, 取出试样杯称试样质量, 烘干后复测干土质量, 并在计算机终端下载 SWRC 试验数据。

2 试验结果分析

由于 Kelvin 方程 (式(1)) 确定了吸力 ψ 与 RH 间关系, VSA 试验结果既可用 w - RH 关系亦可用 w - ψ 关系表达; 鉴于非饱和土力学中常用 w - ψ 关系, 因此将 9 种土样 w - ψ 关系表达的 SWRC 绘制在图 2 中, 将每种土样试验历时, 试验数据点数, 吸湿起始点、吸湿结束点 (脱湿起始点)、脱湿结束点对应的 RH, ψ , w 值列在表 2 中。

$$\psi = -\frac{RT}{V_w} \ln RH \quad , \quad (1)$$

式中 ψ 为吸力 (kPa); $R = 8.314 \text{ J/(K}\cdot\text{mol)}$, 为通用气体常数; T 为热力学温度, 样品室温度 25℃ 对应 $T = 298.15 \text{ K}$; $V_w = 1.8 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{mol}$, 为水的摩尔体积; RH 为相对湿度, 量纲为 1。

由表 2 可见, 9 种土样中宁明膨胀土测试历时最长, 为 3777 min, 即 2.6 d, 且有 205 个数据点。一方面说明试验历时为文献[14]中饱和盐溶液等压湿度控制法测试历时 (319 d) 的 1/122, 极大缩短了测试时间; 另一方面说明数据点丰富, 能够更好描述土样的持水特征。

从以下 3 方面探讨高吸力下的 SWRC: ①反映土样亲水性强弱的持水能力特征点 w_{95} ; ②描述水力滞回效应强弱的 SWRC 滞回区域面积 HHA; ③反映水力滞回导致的含水率偏差范围的 SWRC 滞回效应最大值 Δw_{\max} 。

2.1 高吸力下持水能力特征点 w_{95}

由图 2 与表 2 可见: 9 种土样从完全干燥状态吸湿结束时 (控制 RH 为 95%) 对应的质量含水率 w_{95} 差别相当大, 高至 Wyoming 膨润土的 21.46%, 宁明膨胀土的 19.45%, 表明持水能力/亲水性非常强, 低至开封黄河砂的 1.28%, 表明其持水能力/亲水性非常弱。由此可见, w_{95} 作为 RH = 95% 下的吸湿质量含水率, 是表征土样持水 (吸水) 能力的特征点, 其数值

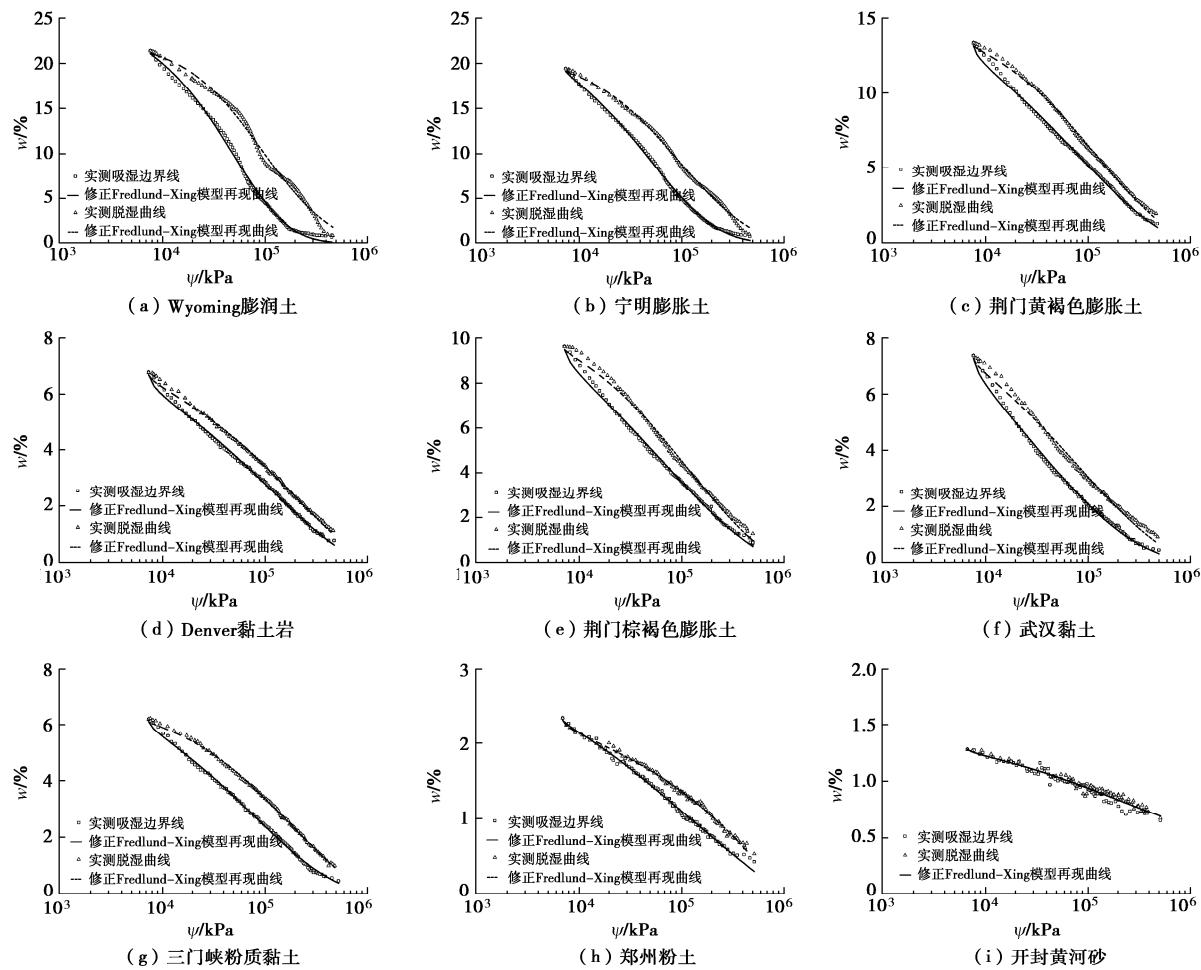


图 2 高吸力下的 SWRC (RH = 3%~95%)

Fig. 2 Soil-water retention curves under high suctions

表 2 高吸力下 SWRC 的吸湿/脱湿起始点与结束点

Table 2 Start point/end point of adsorption/desorption of SWRCs under high suctions

土样名称	试验历时/min	试验数据点数	吸湿起始点			吸湿结束点(脱湿起始点)			脱湿结束点		
			RH	ψ/kPa	$w/%$	RH	ψ/kPa	$w_{95}/%$	RH	ψ/kPa	$w/%$
Wyoming 膨润土	3135	203	0.0375	451647	0.67	0.9457	7686	21.46	0.0350	461106	0.87
宁明膨胀土	3777	205	0.0324	471755	0.76	0.9472	7468	19.45	0.0343	463909	1.02
荆门黄褐色膨胀土	2982	204	0.0297	484119	1.28	0.9456	7700	13.40	0.0331	468823	1.96
Denver 黏土岩	2113	201	0.0313	476506	0.79	0.9476	7410	6.79	0.0338	465943	1.14
荆门棕褐色膨胀土	2523	212	0.0299	483240	0.89	0.9474	7439	9.63	0.0245	510367	1.28
武汉黏土	2343	202	0.0294	485114	0.44	0.9455	7715	7.37	0.0326	470929	0.91
三门峡粉质黏土	2186	203	0.0244	510892	0.43	0.9478	7380	6.19	0.0327	470498	0.97
郑州粉土	1787	197	0.0246	509791	0.42	0.9500	7061	2.34	0.0245	510347	0.52
开封黄河砂	1295	148	0.0245	510383	0.65	0.9519	6786	1.28	0.0247	509237	0.67

反映了土样亲水性强弱。

将 9 种土样的 w_{95} 与表 1 给出的 CEC 对应绘制在图 3 中, 可见 w_{95} 与 CEC 具有非常高的线性相关性, 其线性拟合结果见式 (2), 决定系数 R^2 高达 0.99。

$$w_{95} = 0.035 \text{ CEC} + 1.3 \quad (2)$$

鉴于《膨胀土地区建筑技术规范》^[21]采用 CEC

分别为 340, 260, 170 mmol/kg 作为判断土样膨胀潜势强 (CEC > 340 mmol/kg)、中 (CEC = 260~340 mmol/kg)、弱 (CEC = 170~260 mmol/kg) 的界限, 将其代入式 (2) 得到采用 w_{95} 判别土样膨胀潜势的相应界限分别为 13.0%, 10.2%, 7.1%。即: $w_{95} > 13.0\%$, 判别为强膨胀土; $w_{95}=10.2\% \sim 13.0\%$, 判别为中膨胀

土; $w_{95}=7.1\% \sim 10.2\%$, 判别为弱膨胀土; $w_{95} < 7.1\%$, 判别为非膨胀土。

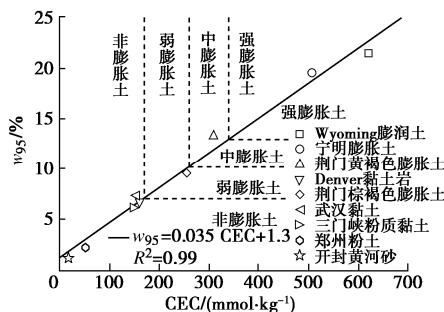


图 3 9 种土的 w_{95} - CEC 关系

Fig. 3 Relationship between w_{95} and CEC of 9 kinds of soils

下面对上述方法的可行性进行验证: 表 3 为根据《膨胀土地区建筑技术规范》^[21]测定的 Denver 膨润土、信阳黏土、商用高岭土的 CEC、自由膨胀率及确定的膨胀潜势。采用 VSA 获得的 w_{95} 亦列在表 3 中, Denver 膨润土 w_{95} 为 22.47%, 大于 13.0%, 根据 w_{95} 判别为强膨胀土; 信阳黏土 w_{95} 为 8.77%, 在 7.1%~10.2%, 根据 w_{95} 判别为弱膨胀土; 商用高岭土 w_{95} 为 1.03%, 小于 7.1%, 根据 w_{95} 判别为非膨胀土。表明采用 w_{95} 作为膨胀潜势判别标准与采用 CEC 的判别结果具有很好的一致性, 至于如何提高其判别精度, 则应收集更多的试验结果, 确定更为可靠的强、中、弱膨胀潜势的 w_{95} 界限值。

表 3 3 种土样膨胀潜势的判别指标

Table 3 Estimation indexes of swelling potential of 3 kinds of soils

土样名称	CEC(NH_4^+) ^[17] ($\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$)	自由膨胀 率 ^{[21]/%}	膨胀潜 势 ^[21]	w_{95} /%
Denver 膨润土	976	111	强	22.47
信阳黏土	206	40	弱	8.77
商用高岭土	4	—	—	1.03

2.2 高吸力下 SWRC 滞回区域面积 HHA

由图 2 可见, 高吸力段($\text{RH} = 3\% \sim 95\%$), 9 种土

表 4 高吸力下 SWRC 滞回效应特征参数 ($\text{RH} = 3\% \sim 95\%$)

Table 4 Hysteresis properties of SWRCs under high suctions

土样名称	滞回区域面积 HHA/kPa	HHA 相对值	Δw_{\max} /%	$\psi(\Delta w_{\max})$ /kPa	$\text{RH}(\Delta w_{\max})$	$w_d(\Delta w_{\max})$ /%	$w_w(\Delta w_{\max})$ /%	w 相对误差/%	
								$\frac{\Delta w_{\max}}{w_d}$	$\frac{\Delta w_{\max}}{w_w}$
Wyoming 膨润土	13641	1.00	6.27	68737	0.6069	13.08	6.81	47.9	92.1
宁明膨胀土	10717	0.79	4.18	72744	0.5895	11.00	6.81	38.0	61.4
荆门黄褐色膨胀土	4512	0.33	1.77	37559	0.7612	9.87	8.10	17.9	21.9
Denver 黏土岩	2367	0.17	0.69	37184	0.7633	4.80	4.11	14.4	16.8
荆门棕褐色膨胀土	3520	0.26	1.38	30993	0.7984	7.41	6.03	18.6	22.9
武汉黏土	3412	0.25	1.15	31077	0.7979	5.13	3.98	22.4	28.9
三门峡粉质黏土	3439	0.25	1.04	89267	0.5228	3.55	2.51	29.3	41.4
郑州粉土	1002	0.07	0.37	155335	0.3235	1.22	0.85	30.3	43.5
开封黄河砂	196	0.01	0.16	221700	0.1999	0.88	0.72	18.2	22.2

样 SWRC 均呈现或强或弱的水力滞回行为, 即相同吸力下脱湿路径上的 w 高于吸湿路径上的 w 。

SWRC 水力滞回效应强弱可用脱湿与吸湿曲线间滞回区域面积 HHA (hydraulic hysteresis area) 描述。根据图 2 中的脱湿与吸湿曲线数据在 Origin 软件中数值积分获得 9 种土样滞回区域面积见表 4。

由图 2 与表 4 可见: 9 种土样 HHA 差别显著, 对于强膨胀土, Wyoming 膨润土高达 13641 kPa, 宁明膨胀土亦高达 10717 kPa; 对于中膨胀土, 荆门黄褐色膨胀土为 4512 kPa; 对于弱膨胀土, 荆门棕褐色膨胀土为 3520 kPa; 武汉黏土、三门峡粉质黏土亦达到 3412, 3439 kPa; 而郑州粉土低至 1002 kPa; 开封黄河砂仅有 196 kPa, 是 Wyoming 膨润土的 1/70, 滞回效应可忽略不计。

以上数据表明: HHA 与土样膨胀潜势正相关, 将 9 种土样的 HHA 与表 1 给出的 CEC、SSA 对应绘制在双 y 轴坐标系中, 见图 4, 可见 HHA 与 CEC、SSA 均具有非常高的线性相关性, 其过坐标原点的线性拟合结果为

$$\text{CEC} = 0.049 \text{ HHA} \quad , \quad (3)$$

$$\text{SSA} = 0.037 \text{ HHA} \quad , \quad (4)$$

式中, HHA 与 CEC 线性相关的 R^2 达到 0.94, HHA 与 SSA 线性相关的 R^2 高达 0.97。

CEC 与 SSA 是强烈相关但有明显区别的土性指标。CEC 指单位质量土样吸附的可交换阳离子总量, 反映由于颗粒带负电荷导致的土样吸附阳离子的能力, 更大的 CEC 意味着更强的膨胀潜势。SSA 指单位质量土样具有的表面积, 反映土样的颗粒级配与矿物成分, 更大的 SSA 意味着更大的塑性, 更强的膨胀潜势, 更强的亲水性。HHA 与 CEC、SSA 均正相关表明, 滞回效应大小既受土样吸附阳离子能力的强烈影响, 亦受土样比表面积控制, 且从 R^2 上看, 其受土样比表面积影响更大。

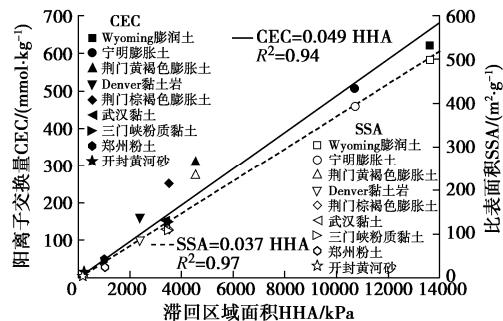
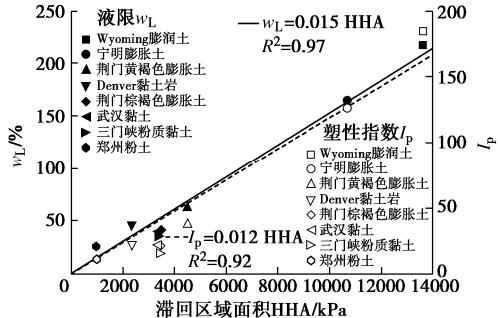


图 4 9种土的 CEC - SSA - HHA 关系

Fig. 4 CEC - SSA - HHA relationship of 9 kinds of soils

将 8 种细粒土 HHA 与其液限 w_L 、塑性指数 I_p 绘制在双 y 轴坐标系中, 见图 5。

图 5 8种细粒土的 w_L - I_p - HHA 关系Fig. 5 w_L - I_p - HHA relationship of 8 kinds of fine-grained soils

可见 HHA 与 w_L 、 I_p 均正相关, 过坐标原点的线性拟合结果分别为

$$w_L = 0.015 \text{ HHA} \quad (5)$$

$$I_p = 0.012 \text{ HHA} \quad (6)$$

式中, HHA 与 w_L 线性相关的 R^2 高达 0.97, HHA 与 I_p 线性相关的 R^2 亦达到 0.92, 表明细粒土 HHA 与 w_L 具有更高的线性相关性。由于 w_L 、 I_p 代表土样塑性大小, 表明 HHA 受土样塑性大小控制。

2.3 高吸力下 SWRC 滞回效应最大值 Δw_{\max}

SWRC 滞回效应指水力滞回 (脱/吸湿路径) 对 SWRC (此处是 w - ψ 关系) 的影响, 此处 SWRC 滞回效应最大值定义为相同 ψ 下, 脱湿曲线对应含水率 w_d 与吸湿曲线对应含水率 w_w 之差的最大值 Δw_{\max} 。根据该定义, 在图 2 中搜索到每种土的 Δw_{\max} , 及其对应的吸力 ψ 、RH、脱湿曲线含水率 w_d 、吸湿曲线含水率 w_w , 列入表 4 中。

由表 4 与图 2 可见, 9 种土样 Δw_{\max} 存在较大差异: 强膨胀土 Δw_{\max} 相当大, 如 Wyoming 膨润土为 6.27%, 宁明膨胀土为 4.18%; 中膨胀土, 荆门黄褐色膨胀土为 1.77%; 弱膨胀土, 荆门棕褐色膨胀土为 1.38%; 中等塑性黏土, 武汉黏土为 1.15%, 三门峡粉质黏土为 1.04%, Denver 黏土岩为 0.69%; 低塑性黏土, 郑州粉土为 0.37%; 开封黄河砂仅为 0.16%。对比表 1 可见, 土样 Δw_{\max} 值与 w_L 、 I_p 、CEC、SSA 均正相关, 反映了水力滞回导致的含水率偏差范围。取

Δw_{\max} 与相应 w_d 、 w_w 的比值作为 SWRC 的含水率相对误差, 计算 9 种土样 $\Delta w_{\max}/w_d$ 、 $\Delta w_{\max}/w_w$ 结果列于表 4 与图 6。

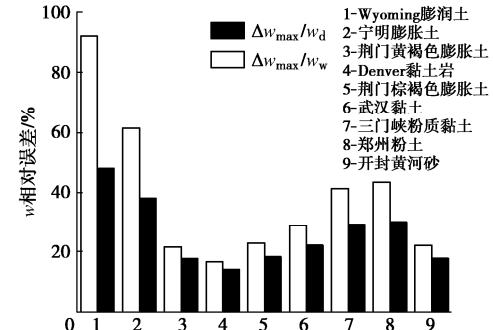


图 6 由于水力滞回导致的含水率相对误差

Fig. 6 Relative errors of water content due to hydraulic hysteresis

表 4 与图 6 中, 同一土样 w_w 小于 w_d , 因此采用吸湿曲线含水率 w_w 作为分母的相对误差比采用脱湿曲线含水率 w_d 作为分母的相对误差要大。由相对误差计算结果可见: 在高吸力范围, 不考虑水力滞回会导至持水特征曲线 SWRC 上质量含水率 w 最高 92.1% (Wyoming 膨润土) 的相对误差。

另一方面, 如果工程中需要用当前含水率估算吸力, 则同一 w 下, 脱湿路径上吸力与吸湿路径上吸力的比值最高可达 2.71 (图 2 中 Wyoming 膨润土, w 为 6%, 脱湿路径上吸力 205959 kPa, 吸湿路径上吸力 76119 kPa, 比值为 2.71), 印证了高吸力下强膨胀土 SWRC 滞回效应之强烈。

2.4 高吸力下 SWRC 滞回行为机制探讨

由图 2 及 2.2 节、2.3 节对 SWRC 滞回区域面积 HHA 与滞回效应最大值 Δw_{\max} 的分析, 可知高吸力下, 9 种土样中, 高塑性 (液限高、塑性指数大)、阳离子交换量大、比表面积大的土样滞回效应大, 在此对高吸力下 SWRC 滞回行为机制展开探讨。

水力滞回行为机制解释主要有墨水瓶效应^[1]与接触角效应^[13], 前者由于土中孔隙尺寸与形状 (可用孔径 r 概化) 的不均匀性所致, 后者由于吸湿接触角 α_w 通常大于脱湿接触角 α_d 所致^[23]。墨水瓶效应与接触角效应均属毛细范畴, 受 Young-Laplace 方程控制:

$$\psi_c = u_a - u_w = \frac{2T_s \cos \alpha}{r} \quad (7)$$

式中 ψ_c 为毛细吸力, 可用孔隙气压力 u_a 与孔隙水压力 u_w 之差表达; T_s 为水的表面张力; α 为接触角; r 为毛细半径。当吸力增大、土中水能量状态低到其空化点以下, 毛细水汽化, (土中毛细水比自由水空化点更低, 但其对应的 ψ_c 或 RH 尚无定论, 一般而言 RH 低于 80%, 毛细水难以存在^[2]), 墨水瓶效应与接触角效应难以解释高吸力下的滞回行为。

Lu 等^[24]给出了高吸力下 SWRC 滞回机制的一种

解释: 非膨胀黏土, 脱湿与吸湿主要发生在颗粒表面, 因而滞回效应较小。膨胀性土, 脱湿与吸湿亦可发生于存在可交换阳离子的晶层之间, 吸湿时阳离子水化吸附极性水分子, 水分子需克服较大的, van der Waals 力方能进入层间; 脱湿时由于层间距离较大 van der Waals 力较弱, 因此相同 ψ 下, 吸湿路径对应较小的 w , 脱湿路径对应较大的 w 。在此结合文中数据探讨该解释的合理性:

高吸力下 Wyoming 膨润土 HHA=13641 kPa, $\Delta w_{\max}=6.27\%$, 滞回效应最大; 自由膨胀率为 775 %, 膨胀性最大; SSA 高达 $500.1 \text{ m}^2/\text{g}$, 表明其包含了较大的层间比表面积^[25], CEC 高达 621 mmol/kg , 表明其可交换阳离子总量大; 印证了吸湿状况下膨胀土层间阳离子水化受 van der Waals 力阻碍致其含水率较低的机制解释。

相对而言, 郑州粉土, SSA 为 $27.7 \text{ m}^2/\text{g}$, CEC 为 50 mmol/kg , 比表面积小, 可交换阳离子总量小。一方面其自由膨胀率 (9%) 为 Wyoming 膨润土的 1.2 %, 表明其为非膨胀土; 另一方面, 其 HHA (1002 kPa) 为 Wyoming 膨润土的 7%, Δw_{\max} (0.37%) 为 Wyoming 膨润土的 6%, 滞回效应很小。印证了非膨胀土脱湿吸湿主要发生在颗粒表面 (而非层间) 致其滞回效应较小的机制解释。

以上讨论明晰了 2.2 节中的论述: 高吸力下滞回效应既受 CEC 的强烈影响, 亦受 SSA 控制, 且从 R^2 上看, 其受 SSA 影响更大。至于是否考虑滞回效应, 应视土样与工况等具体情况而定, 鉴于 Wyoming 膨润土具有最大的 HHA, 可采用其作为标准, 其它土样的 HHA 相对值亦列入表 4 中, 可见从开封黄河砂的 0.01 到宁明膨胀土的 0.79, HHA 相对值可作为实际工况中是否考虑滞回效应的依据。

3 高吸力下持水特征的本构描述

基于对以上 9 种土样高吸力下 SWRC 规律性的认知, 经尝试, 建议了 Fredlund-Xing (1994) 模型^[1]的修正形式描述高吸力下 SWRC:

$$w(\psi) = C(\psi) \frac{w_u}{\left\{ \ln \left[\exp(1) + \left(\frac{(\psi - \psi_b)}{a} \right)^n \right] \right\}^m} \\ = \left[1 - \frac{\ln(1 + \psi / \psi_r)}{\ln(1 + 10^6 / \psi_r)} \right] \frac{w_u}{\left\{ \ln \left[\exp(1) + \left(\frac{(\psi - \psi_b)}{a} \right)^n \right] \right\}^m} \quad (8)$$

式中 w 为质量含水率 (%); ψ 为吸力 (kPa); $w(\psi)$

为质量含水率表达的 SWRC; $C(\psi)$ 为修正系数函数, 能够迫使 SWRC 通过零含水率对应吸力 10^6 kPa 的点。4 个参数 a , n , m , ψ_r 为 Fredlund-Xing(1994) 模型已有参数, a 为与拐点位置相关的土性参数 (kPa); n 为与拐点处斜率相关的土性参数, 量纲为 1, m 为与曲率相关的土性参数, 量纲为 1, ψ_r 为残余吸力 (kPa)。

为描述高吸力下 SWRC, 将 Fredlund-Xing 模型中饱和质量含水率 w_0 用 w_u 替代, w_u 为高吸力下 SWRC 质量含水率上边界 (最大值), 相应吸力为 ψ_b 。增加土性参数 ψ_b 是式 (8) 与 Fredlund-Xing 模型形式上的主要区别, ψ_b 单位为 kPa, 物理意义是高吸力下 SWRC 吸力下边界。由此可见, 修正的 Fredlund-Xing 模型共有 6 个参数: w_u , ψ_b , ψ_r , a , n , m 。为区分吸湿与脱湿过程, 相应参数增加上标 w (wetting, 表示吸湿) 或 d (drying, 表示脱湿)。

采用式 (8) 分别对 9 种土样高吸力下 SWRC 进行拟合, 流程如下:

(1) 采用表 2 给出的吸湿结束点 (脱湿起始点) 含水率 w_{95} 值作为 w_u 值, 对应吸力值作为 ψ_b 值; w_u 与 ψ_b 为吸脱湿过程共用参数值。

(2) 对于吸湿过程, 采用表 2 给出的吸湿起始点吸力值作为 ψ_r 值; 至此, 吸湿过程所需确定的参数仅余 a , n , m 。依据式 (8) 在 Excel 中通过规划求解功能对吸湿过程 SWRC 数据进行非线性拟合获得 a , n , m 最优解以及拟合结果的决定系数 R^2 。

(3) 对于脱湿过程, 采用表 2 给出的脱湿结束点吸力值作为 ψ_r 值; 依据式 (8) 在 Excel 中通过规划求解功能对脱湿过程 SWRC 数据进行非线性拟合获得 a , n , m 最优解以及 R^2 。

前 8 种土样采用上述流程获得的模型参数与 R^2 见表 5, 可见 8 种土样, 无论脱湿吸湿, 修正的 Fredlund-Xing 模型再现结果的 R^2 均在 0.99 以上。为节约篇幅, 其修正 Fredlund-Xing 模型数值再现结果亦放在图 2 中, 可见式 (8) 相当好地再现了高吸力下 8 种土样脱湿与吸湿过程 SWRC。

对第 9 种土样开封黄河砂, 由图 2 可见其 SWRC 滞回行为非常小, 因此采用同一组模型参数描述其 SWRC, 此外不考虑式 (8) 中修正系数函数 $C(\psi)$, 即 $C(\psi) = 1$, 对吸脱湿 SWRC 数据进行非线性拟合获得 a , n , m 最优解见表 5, 同时描述其吸脱湿 SWRC 的 R^2 达到 0.96, 由图 2 的再现结果可见式 (8) 非常好地对其 SWRC 进行了本构描述。

此外, 对比表 5 中吸脱湿过程 a , n , m 值可见, 对同种土样, 相对脱湿过程, 吸湿过程 a 值较大说明其拐点位置靠后, n 值较低说明其拐点处斜率相对较小, m 值较大说明其曲率较大。

表5 高吸力下修正 Fredlund-Xing 模型参数

Table 5 Modified Fredlund-Xing model parameters for 9 kinds of soils under high suctions

土样名称	共用参数			吸湿过程				脱湿过程				
	w_u /%	ψ_b /kPa	ψ_f^w /kPa	a^w /kPa	n^w	m^w	R^2	ψ_f^d /kPa	a^w /kPa	n^d	m^d	R^2
Wyoming 膨润土	21.46	7686	451647	248967	0.94	10.54	1.00	461106	90593	1.06	2.09	0.99
宁明膨胀土	19.45	7468	471755	245967	0.82	8.02	1.00	463909	90230	0.94	2.13	1.00
荆门黄褐色膨胀土	13.40	7700	484119	237692	0.61	4.34	1.00	468823	91452	0.82	1.90	1.00
Denver 黏土岩	6.79	7410	476506	267853	0.57	4.14	1.00	465943	91075	0.66	1.79	1.00
荆门棕褐色膨胀土	9.63	7439	483240	87263	0.64	2.81	1.00	510367	86362	0.80	1.96	0.99
武汉黏土	7.37	7715	485114	81572	0.67	3.77	1.00	470929	80590	0.71	2.39	0.99
三门峡粉质黏土	6.19	7380	510892	213682	0.67	4.50	1.00	470498	91368	0.82	1.56	1.00
郑州粉土	2.34	7061	509791	30152	0.78	1.17	0.99	510347	31576	0.58	0.86	1.00
开封黄河砂	1.28	6786	—	76542	0.66	1.04	0.96	—	76542	0.66	1.04	0.96

由此可见, 文中建议的 Fredlund-Xing 模型修正形式有 6 个参数: w_u , ψ_b , ψ_f 值直接从实测 SWRC 数据确定, a , n , m 值通过非线性拟合获得。Fredlund-Xing(1994)模型中 4 个参数 (a , n , m , ψ_f) 需通过非线性拟合获得, 还有一个参数饱和质量含水率 w_0 需试验测定 (从实测 SWRC 数据确定), 实际上有 5 个参数。文中建议的修正形式仅增加了一个参数 ψ_b , 且 ψ_b 与 w_u 、 ψ_f 直接从实测 SWRC 数据确定, 只需非线性拟合 3 个参数 (a , n , m), 且该修正形式能够很好地分别描述吸湿与脱湿过程中 SWRC 强烈的非线性行为。

4 结 论

(1) 9 种土样高吸力下吸湿与脱湿过程持水特征测试最长历时为 2.6 d, 有 205 个数据点, 说明动态露点法极大缩短了高吸力下 SWRC 测试时间, 且数据点丰富, 能够更好描述土样持水特征。

(2) w_{95} 作为 $RH = 95\%$ 下的吸湿质量含水率, 是表征土样持水能力的特征点, 反映土样亲水性强弱, w_{95} 与 CEC 具有非常高的线性相关性, w_{95} 作为膨胀潜势的判别标准是可行的。

(3) SWRC 水力滞回效应强弱可用吸脱湿曲线间滞回区域面积 HHA 描述, HHA 与 CEC、SSA 均有非常高的线性相关性, 表明滞回效应强弱既受土样吸附阳离子能力的强烈影响, 亦受土样 SSA 控制, 且从 R^2 看, 其受 SSA 影响更大。HHA 与 w_L , I_p 均正相关, 表明 HHA 受土样塑性大小控制。

(4) SWRC 滞回效应最大值可用同一 ψ 下脱湿与吸湿曲线对应 w 之差最大值 Δw_{max} 量化, 土样 Δw_{max} 值与 w_L , I_p , CEC, SSA 均正相关, 反映了水力滞回导致的 w 偏差范围。高吸力范围, 不考虑水力滞回会导致 SWRC 上 w 最高 92.1 % 的相对误差。如工程中需要用当前 w 估算 ψ , 则同一 w 下, 脱湿路径上 ψ 与吸湿路径上 ψ 的比值最高可达 2.71。

(5) 建议采用 Fredlund-Xing 模型的修正形式描

述高吸力下 SWRC, 方程有 6 个参数, w_u , ψ_b , ψ_f 值直接从实测 SWRC 数据确定, a , n , m 值通过非线性拟合获得。对 9 种土样 SWRC 的修正 Fredlund -Xing 模型数值再现结果表明该方程可分别很好地描述吸湿与脱湿过程中 SWRC 强烈的非线性行为。

致 谢: 感谢中国科学院武汉岩土力学研究所特殊土力学课题组、土动力学课题组, 美国国家地质调查局—科罗拉多矿业大学岩土工程联合实验室提供的部分土样。

参 考 文 献:

- [1] FREDLUND D G, RAHARDJO H, FREDLUND M D. Unsaturated soil mechanics in engineering practice[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2012.
- [2] LU N. Linking soil water adsorption to geotechnical engineering properties[M]// LU N, MITCHELL J K, ed. Geotechnical Fundamentals for Addressing New World Challenges. Cham: Springer, 2019.
- [3] MERCER K, RAHARDJO H, SATYANAGA A. Unsaturated Soils Guidelines-Volume 1 Soil-Water Characteristic Curves for Materials Classified According to the Unified Soil Classification System[M]. Crawley: Australian Centre for Geomechanics, The University of Western Australia, 2019.
- [4] 许小峰. 中国气象年鉴[M]. 北京: 气象出版社, 2017. (XU Xiao-feng. China Meteorological Yearbook[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2017. (in Chinese))
- [5] 王 刹, 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. (WANG Zhao, YANG Jin-xin, KUANG Juan-juan, et al. Application of filter paper method in field measurement of matric suction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(4): 405 - 408. (in Chinese))
- [6] 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 Wei-min, BAI Yun, JIN Qi, et al. Lab experimental study on soil-water characteristics of Shanghai soft clay[J]. Chinese

- Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(2): 260 - 263. (in Chinese))
- [7] 朱贊成, 孫德安, 田进. 高吸力高溫度下2種濾紙率定曲線及其應用[J]. 岩土工程學報, 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): 1020 - 1027. (in Chinese))
- [8] Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper: ASTM D5298—16[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2016.
- [9] Standard Test Methods for Determination of the Soil Water Characteristic Curve for Desorption Using Hanging Column, Pressure Extractor, Chilled Mirror Hygrometer, or Centrifuge: ASTM D6836—16[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2016.
- [10] 唐朝生, 施斌. 干濕循環過程中膨脹土的脰縮變形特徵[J]. 岩土工程學報, 2011, **33**(9): 1376 - 1384. (TANG Chao-sheng, SHI Bin. Swelling and shrinkage behaviour of expansive soil during wetting-drying cycles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(9): 1376 - 1384. (in Chinese))
- [11] 秦冰, 陳正漢, 孫發鑫, 等. 高吸力下持水曲線的溫度效應及其吸附熱力學模型[J]. 岩土工程學報, 2012, **34**(10): 1877 - 1886. (QIN Bing, CHEN Zheng-han, SUN Fa-xin, et al. Temperature effect on water retention curve under high suction and its modeling based on thermodynamics of sorption[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(10): 1877 - 1886. (in Chinese))
- [12] 孫文靜, 孫德安, 劉仕卿, 等. 高吸力下高廟子鈣基膨潤土的土水-力學特性[J]. 岩土工程學報, 2014, **36**(2): 346 - 353. (SUN Wen-jing, SUN De-an, LIU Shi-qing, et al. Hydro-mechanical behaviour of GMZ Ca-bentonite at high suctions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(2): 346 - 353. (in Chinese))
- [13] LU N, LIKOS W J. Unsaturated Soil Mechanics[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2004.
- [14] 周葆春, 張彥鈞, 湯致松, 等. 荆門壓實弱膨脹土孔隙比-含水率-吸力特徵的滯回效應[J]. 水利學報, 2013, **44**(2): 164 - 172. (ZHOU Bao-chun, ZHANG Yan-jun, TANG Zhi-song, et al. Hydraulic hysteresis effect on void ratio - water content - suction behavior of Jingmen compacted expansive soil[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, **44**(2): 164 - 172. (in Chinese))
- [15] LIKOS W J, LU N, WENSZEL W. Performance of a dynamic dew point method for moisture isotherms of clays[J]. Geotechnical Testing Journal, 2011, **34**(4): 373 - 382.
- [16] 黃偉, 劉清秉, 項偉, 等. 高吸力段黏土水合機制及微觀持水模型研究[J]. 岩土工程學報, 2018, **40**(7): 1268 - 1276. (HUANG Wei, LIU Qing-bing, XIANG Wei, et al. Hydration mechanism and microscopic water retention model of clay at high suction range[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(7): 1268 - 1276. (in Chinese))
- [17] 土工試驗方法標準: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中國計劃出版社, 2019. (Standard for Geotechnical Testing Method: GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese))
- [18] BS 1377 British Standard Methods of Test for Soils for Civil Engineering Purposes[S]. London: British Standards Institution, 1990.
- [19] 土工試驗規程: SL237—1999[S]. 北京: 中國水利電力出版社, 1999. (Specification of Soil Test: SL237—1999[S]. Beijing: China Water & Power Press, 1999. (in Chinese))
- [20] 魯如坤. 土壤農業化學分析方法[M]. 北京: 中國農業科技出版社, 2000. (LU Ru-kun. Agriculture Chemical Analysis Methods Of Soil[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000. (in Chinese))
- [21] 膨脹土地區建築技術規範: GB 50112—2013[S]. 北京: 中國建築工業出版社, 2013. (Technical Code for Buildings in Expansive Soil Regions: GB 50112—2013 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013. (in Chinese))
- [22] ARTHUR E, TULLER M, MOLDRUP P, et al. Evaluation of a fully automated analyzer for rapid measurement of water vapor sorption isotherms for applications in soil science[J]. Soil Science Society of America Journal, 2014, **78**(3): 754 - 760.
- [23] 楊松, 吳珺華, 黃劍峰. 表面張力與接觸角對膨脹土干縮開裂影響的試驗研究[J]. 岩土工程學報, 2017, **39**(9): 1645 - 1652. (YANG Song, WU Jun-hua, HUANG Jian-feng. Effects of pore water surface tension and contact angle on dry-shrinkage cracking of expansive soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(9): 1645 - 1652. (in Chinese))
- [24] LU N, KHORSHIDI M. Mechanisms for soil-water retention and hysteresis at high suction range[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2015, **141**(8): 04015032.
- [25] LU N, ZHANG C. Separating external and internal surface areas of soil particles[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2020, **146**(2): 04019126.