

基于数据挖掘的土-水特征曲线演化规律研究

陈 勇^{1,2}, 苏 剑², 曹 玲^{1,2}, 王 力², 王世梅^{1,2}

(1. 三峡大学 三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡大学 土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002)

摘 要: 土-水特征曲线是非饱和土持水性能和水气运移规律的重要表征, 由于其测试过程繁杂、影响因素众多, 很难通过系列试验和数学模型全面表达。为探索土的类型和物理状态对土-水特征曲线的影响, 以国内外大量试验数据为基础, 以反映其形态的 3 个特征值(进气值、减湿率、残余含水率)为对象, 采用数据分析统计方法揭示不同赋存条件对特征值的作用规律, 采用机器学习方法探究影响因素的敏感性。研究结果表明: 土体的物质组成(颗粒级配、粒径尺度、塑性指数)及赋存状态(密实程度、饱和含水率、干湿循环作用、环境温度)是影响其持水性能的常见分析指标, 各影响因素对 3 个特征值的影响特征既有巨大差异也有相互联系, 敏感性成果表明代表黏粒含量的塑性指数和反映密实程度的干密度是影响土体持水性能的最主导因素, 给出的特征值分布范围考虑了两个主导因素的影响, 具有较强的代表性和借鉴意义。

关 键 词: 非饱和土; 土-水特征曲线; 数据挖掘; 影响机制; 敏感性分析

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2022) 增刊 2-0023-12

Evolution law of the soil-water characteristic curve based on data mining method

CHEN Yong^{1,2}, SU Jian², CAO Ling^{1,2}, WANG li², WANG Shi-mei^{1,2}

(1. Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China;

2. College of Civil Engineering & Architecture, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China)

Abstract: The soil-water characteristic curve (SWCC) is an important characterization of the water-holding performance and water-vapor transport law of unsaturated soil. Due to its complicated testing process and many influencing factors, it is difficult to fully express it through a series of tests and mathematical models. The aim of this study is to explore the influences of soil type and physical state on SWCC. The abundant test data from worldwide research are collected as the database, and three characteristic values of SWCC (air-entry value, dehumidification rate and residual volumetric water content) are selected as the analytic target. Then, some data analyses are adopted to reveal the influence and sensitivity of different occurrence conditions on the characteristic values, and machine learning methods are employed to analyze the sensitivity. In the database, the material composition (particle gradation, particle size, plasticity index) and occurrence state (compactness, saturated water content, dry-wet cycle and ambient temperature) of the soil are common indicators that affect its water holding capacity. The influence mechanism of above factors presents some great differences but also obvious interrelation. The results of sensitivity analysis indicates that the plasticity index that reflects the clay content and the dry density that represents compactness) are two dominant factors influencing the water retention capacity of unsaturated soils. The distribution ranges of three characteristic values are also provided with considering the influences of two dominant factors, and can present most of test results and guide the engineering application.

Keywords: unsaturated soils; soil-water characteristic curve; data mining; influence mechanism; sensitivity analysis

1 引 言

土-水特征曲线 (soil-water character curve, 简

称 SWCC) 是描述土体基质吸力与含水状况之间变化关系的基本函数, 可体现土体孔隙分布状态和持水能力的变化, 常应用于深基坑支护、隧道开挖、

收稿日期: 2021-07-08

修回日期: 2022-04-11

基金项目: 国家自然科学基金区域发展联合基金重点项目 (No.U21A2031)。

This work was supported by the Joint Funds of NSFC (U21A2031).

第一作者简介: 陈勇, 男, 1980 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事非饱和土的力学特性及边坡稳定分析研究。E-mail: cyonger@126.com

通讯作者: 曹玲, 女, 1979 年生, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事非饱和土裂隙与微观结构研究。E-mail: 10346058@qq.com

滑坡灾害、核废料污染处理等工程问题在瞬态渗流、固结变形及强度发挥等方面的分析与计算,以提高数值模拟精度。

近年来,国内外学者针对土-水特征曲线的影响因素和作用规律的探索,多集中于室内试验测试和拟合模型构建,研究角度非常全面,试验数据十分丰富,规律总结相当细致,理论成果可谓丰硕^[1-57]。然而,由于分析对象和研究目的存在差异,来之不易的试验数据以服务单项科研任务为主,数据的分析深度有余而横向联系甚少,少有学者对海量数据进行再分析和再利用,鲜有研究探讨各影响因素的主导地位和相互作用。同时,随着数据挖掘理论的提出和快速发展,传统的数据统计方法逐渐向机器学习算法转变,且相关算法模型和应用领域层出不穷,通过对已有数据的挖掘来寻找数据间的联系和规律,已经越来越多地应用于岩土研究领域^[58-60]。

鉴于此,本文以搜集的国内外相关试验数据为基础,分析影响土体持水性能的内在特征和赋存条件,并选取粒径级配、塑性指数、密实程度、初始含水率、干湿循环、温度等 6 个影响因素,揭示不同因素对 SWCC 3 个特征值(进气值、减湿速率、残余体积含水率)的影响规律和内在机制,并结合数据挖掘方法探究各赋存条件对 SWCC 的影响程度和敏感性,为非饱和土的持水性能演变规律研究奠定基础。

2 数据来源及组成

本文以国内外土-水特征曲线研究文献以及非饱和土水力数据库为基础,收集、整理了试验土样的颗粒级配、塑性指数、干密度(或孔隙比)、初始含水率及试验控制条件(应力状态、干湿循环次数、温度)等数据信息,并确定了每一条土-水特征曲线的 3 个特征值、并与其所有的影响因素汇总形成原始数据集,共计约 500 组数据。限于篇幅,只列出近十年所发表的部分参考文献^[1-57]。其中,部分曲线纵坐标以质量含水率表示、未测定试样体积变化,部分试验曲线吸力范围较小、未达到残余状态,均予以删除处理;对剩余数据进行异常值检测,结合箱型图结果,对偏离异常数据进行清洗过滤,剩余约 370 组用于影响规律分析。最后,考虑到特征值与各影响因素数据间存在不同的分布范围和量纲单位,对数据集进行归一化处理转化到 $[0, 1]$ 范围,以消除不同量纲对敏感性分析的影响。

3 赋存条件对特征值的影响研究

3.1 颗粒级配对特征值的影响分析

土体的颗粒级配可反映土颗粒的粒径分布状态、均匀性及连续性,常用不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c 两个定量指标来表示,不同级配土体的粒间结构、比表面积等都会存在明显差异,进而导致毛细效应、渗透性、持水性能呈现显著区别。对数据库中 3 个特征值及颗粒级配齐备的 120 组数据进行统计分析,如图 1~4 所示。

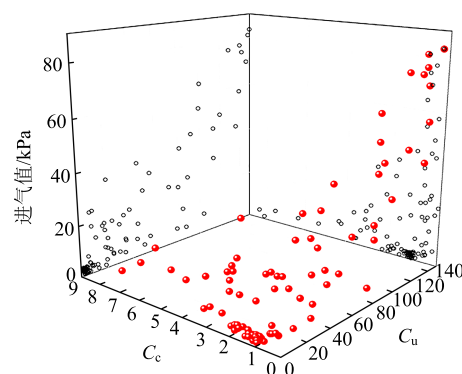


图 1 颗粒级配指标对进气值的影响规律

Fig.1 Influence of particle gradation on air-entry value

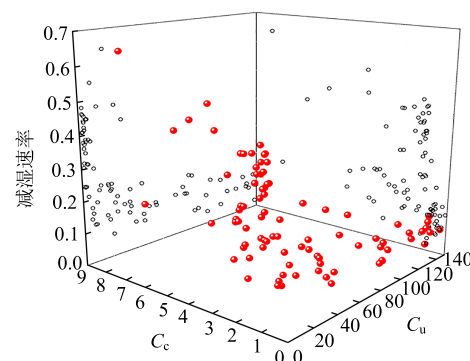


图 2 颗粒级配指标对减湿速率的影响规律

Fig.2 Influence of particle gradation on desaturation rate

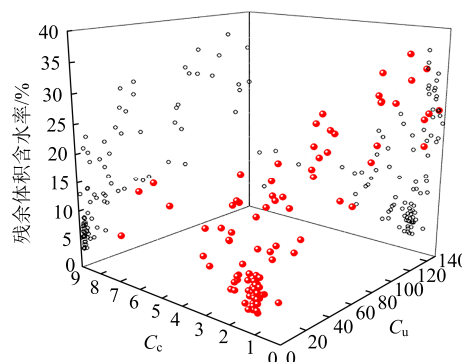
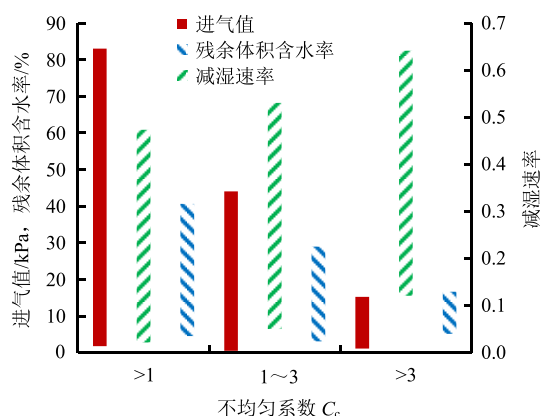


图 3 颗粒级配指标对残余体积含水率的影响规律

Fig.3 Influence of particle gradation on residual volumetric water content

图 4 C_c 取值范围与 3 个特征值的分布规律Fig.4 Value range of C_c and distribution of three eigenvalues

由 C_u 和 C_c 对特征值的影响规律可知：土体持水性能与 C_u 呈较好的正相关关系。当 C_u 较小时，土体颗粒分布相对均匀、密实度较低、大孔隙含量多，此时土体的进气值和残余含水率数值较小，水分迁移速度很快；随着 C_u 值不断增加，粗颗粒和细颗粒的分布差距增大，各粒组间孔隙的连锁充填效应增强，具有较高的密实度和较低的透水能力，因此进气值、残余体积含水率的数值逐渐增大，且水分迁移速度迅速减缓。

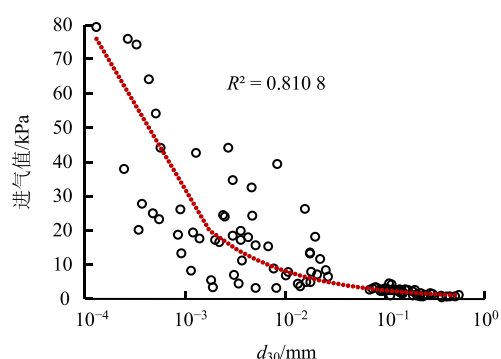
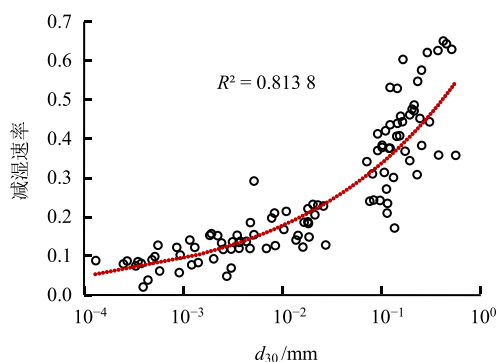
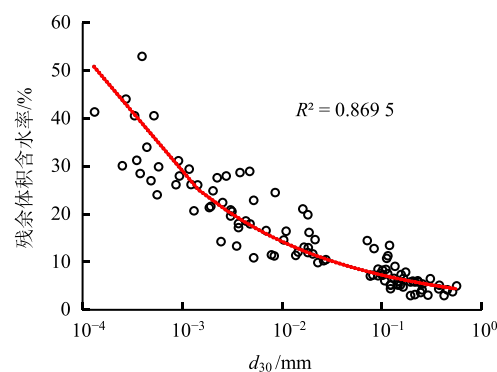
再结合图 4 可知，曲率系数 C_c 对各特征值的影响较大，但作用规律不明显，尤其当 $C_c < 1$ 、亦即中值粒径 d_{30} 与限制粒径 d_{60} 间的粒组缺失严重时，数据库中各特征值的分布范围均较广；即使 C_c 在 1~3 之间、无粒组缺失时，各特征值的变化规律也不明显。

将 C_u 与 C_c 结合起来探究级配良好程度对特征值的影响规律，也可总结以下认识：级配良好土的持水能力并不一定优于级配不良土，尤其对于 $C_c < 1$ 的级配不良土；即使颗粒级配指标数值相同的土体，其持水性能也极可能差异巨大。

简单采用 C_u 和 C_c 两个指标不足以全面分析颗粒级配对土体持水性能的影响，因此，有必要深入分析土-水特征曲线各特征值随土体关键粒径的演化规律。由于土体持水性能与细颗粒含量密切相关，本文仅列出中值粒径 d_{30} 和细粒含量对各特征值的影响规律，如图 5~10 所示。

由图 5~7 知：当 d_{30} 在 0.075~0.500 mm 范围内、即细颗粒含量小于 30% 时，土体进气值位于 5 kPa 以内、残余体积含水率普遍小于 10%、土体排水速度较快，持水性能很低，而随着 d_{30} 的不断减小，进气值和残余含水率呈指数级增大，持水性

能快速提高；由图 8~10 看出：当 0.075 mm 以下细颗粒含量大于 30% 时，各特征值均出现明显的拐点。

图 5 d_{30} 对进气值的影响规律Fig.5 Influence of d_{30} on air-entry value图 6 d_{30} 对减湿速率的影响规律Fig.6 Influence of d_{30} on dehumidification rate图 7 d_{30} 对残余体积含水率影响规律Fig.7 Influence of d_{30} on residual volumetric water content

可见，粒径尺度对土-水特征曲线的影响比颗粒级配指标更明显。换言之，细粒含量高相比级配良好更会增大土体的持水性能。其内在机制是非饱和土中颗粒比表面积的大小、粒间孔隙分布被视为影响其持水能力的最直观指标：从比表面积的角度来看，细粒含量越高，进气值和残余含水率越高，

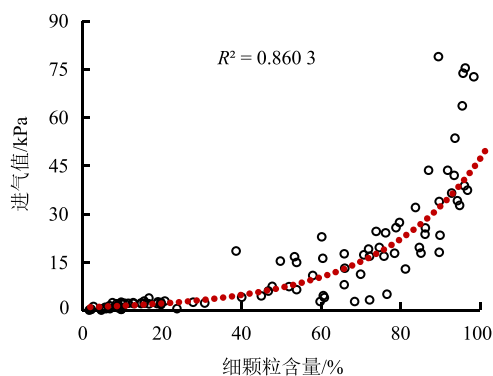


图 8 细颗粒含量对进气值的影响规律
Fig.8 Influence of fine content on air-entry value

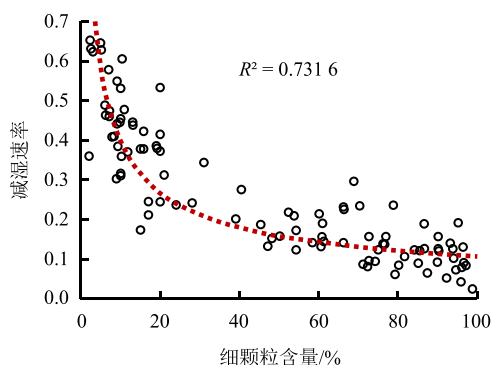


图 9 细颗粒含量对减湿速率的影响规律
Fig.9 Influence of fine content on dehumidification rate

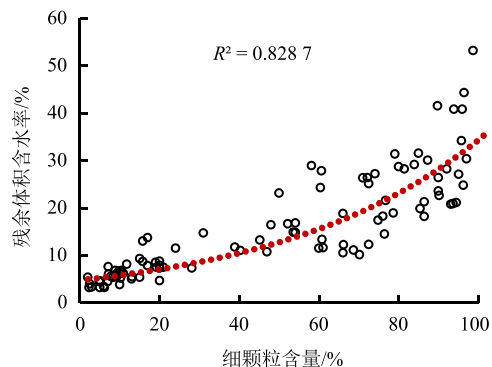


图 10 细颗粒含量对残余体积含水率的影响规律
Fig.10 Influence of fine content on residual volumetric water content

而排水速率越缓,若细粒含量高且土体级配良好,则该效应更加显著;从孔隙分布的角度来看,相同总体积下,粒径增大、粒间吸力减小,呈现进气值与残余体积含水率不断降低、减湿速率相应加快的现象,尤其当颗粒级配不良时,孔隙连锁充填效应降低,这种现象更加明显。

3.2 塑性指数对各特征值的影响分析

基于细颗粒含量的影响特征,进一步分析细颗

粒的矿物成分对土体持水性能的影响。对数据库中特征值及塑性指数齐备的 150 余组数据进行统计分析,如图 11~13 所示。由图可知,进气值与塑性指数呈正线性相关,塑性指数越大,对结合水的吸附能力越强、孔隙气越难进入土体内部,同时残余体积含水率也越高,土体的持水能力更强;减湿速率与塑性指数呈幂次负相关,随着塑性指数的增加,孔隙水的流动能力数倍减小。其影响机制包括两个方面,从物理性质来看,塑性指数越高,试样黏粒含量越多、比表面积更大、亲水性更强,孔隙水在较低的基质吸力下不易产生流动;从矿物成分来看,

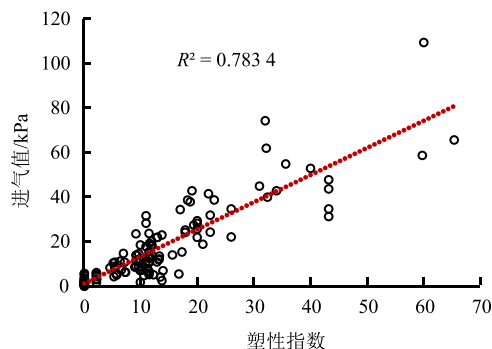


图 11 塑性指数对进气值的影响规律
Fig.11 Influence of plasticity index on air-entry value

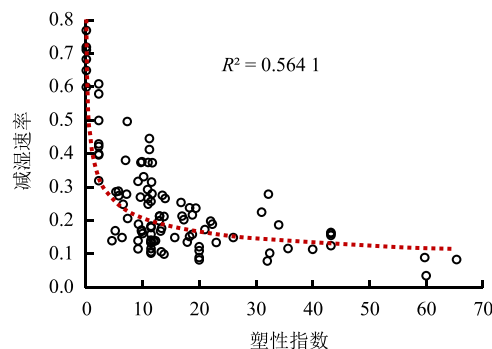


图 12 塑性指数与减湿速率分布规律
Fig.12 Influence of plasticity index on dehumidification rate

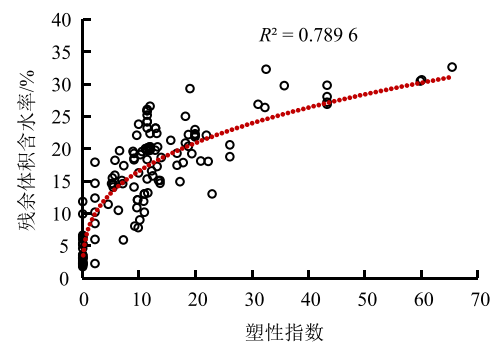


图 13 塑性指数与残余体积含水率分布规律
Fig.13 Influence of plasticity index on residual volumetric water content

当塑性指数越大时,蒙脱石、伊利石等矿物成分含量就越高,对于水分子的吸收作用增强,土中水流动能力极弱,减湿速率极慢,残余体积含水率必然很高。

多数研究对象的塑性指数位于 10~25 之间,即土性为粉质黏土和黏土;对比塑性指数值大于 35 的 8 组数据,减湿速率和残余含水率基本不再变化,说明塑性指数值过大对土-水特征曲线的过渡段及残余段的影响效应会衰减并保持基本稳定,其原因应归结于细粒含量过高可能导致土的颗粒级配不良、密实程度不高、孔隙体积不再持续减小。

3.3 密实程度对特征值的影响规律

非饱和土受其成土历史、赋存深度和人类工程活动的影响,存在不同的密实程度和孔隙结构,对土体渗透特性和持水性能起到重要影响。国内外学者分别从土体干密度、初始孔隙比、压实度或固结应力等角度,分析了密实程度对其持水性能的作用规律,相关试验数据达 300 多组,测定了体积变化且 3 个特征值齐备的数据约 180 组。为统一表达,将压实度或孔隙比转换成对应的干密度值,如图 14~16 所示。

分析图 14~16 中规律发现:干密度与土-水特

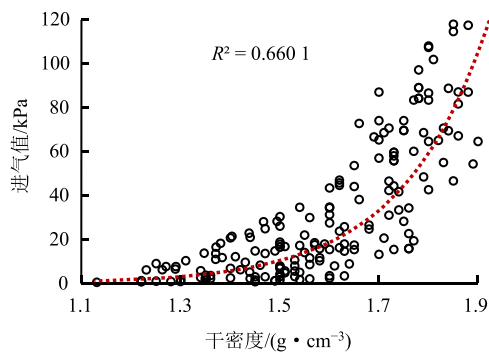


图 14 干密度对进气值的影响规律

Fig.14 Influence of dry density on air-entry value

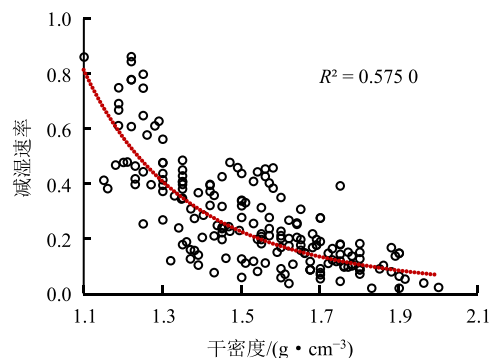


图 15 干密度对减湿速率的影响规律

Fig.15 Influence of dry density on dehumidification rate

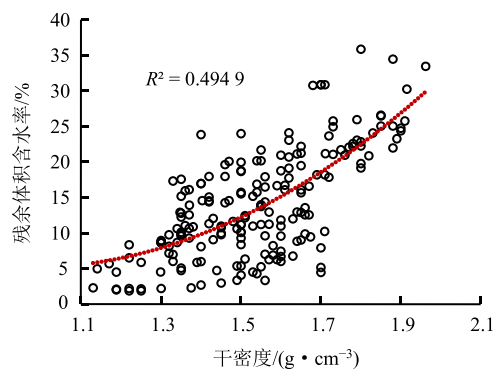


图 16 干密度对残余体积含水率的影响规律

Fig.16 Influence of dry density on residual volumetric water content

征曲线各特征值总体呈单调影响关系,即随着干密度的增大,非饱和的进气值和残余体积含水率相应更大、而减湿速率逐渐减小,这种现象主要与弯液面曲率半径的大小有直接联系。当表面张力一定时,土颗粒距离越紧凑、孔隙半径越小,进气值也就更大;同时,单位体积内土颗粒比表面积增大,对孔隙水的吸附作用越强,残余体积含水率越高;而且干密度增大还会压缩大孔隙并导致单位体积内小孔隙数量占比更高,孔隙水流动难度增加造成减湿速率随之减小。

3.4 初始饱和和含水率对特征值的影响规律

土的饱和含水率既与土的种类相关、也与其密实程度密切相关,是反映土体初始孔隙分布的一个综合性指标。如图 17~19 所示,初始饱和含水率与各特征呈现较好的线性关系。随着初始饱和含水率升高,说明容纳孔隙水的大孔隙更多,亦即土颗粒尺寸或间距更大、渗透性越强、吸附水的能力越弱,因此进气值和残余体积含水率随之逐渐降低,而减湿速率逐渐增大。

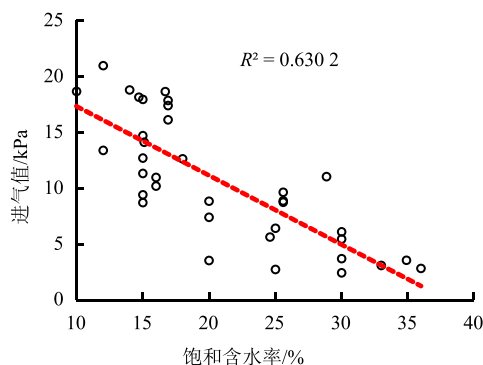


图 17 初始饱和含水率对进气值的影响规律

Fig.17 Influence of initial saturated moisture content on air-entry value

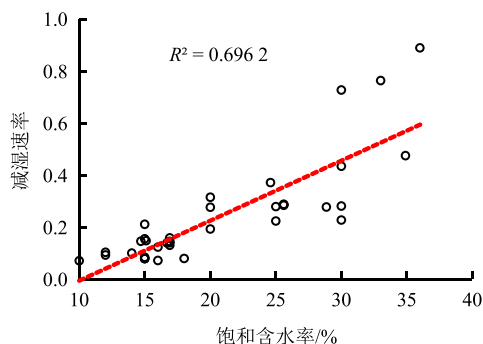


图 18 初始饱和含水率对减湿速率的影响规律
Fig.18 Influence of initial saturated moisture content on dehumidification rate

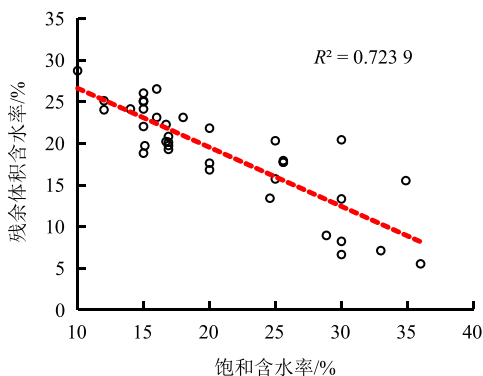


图 19 初始饱和含水率对残余体积含水率的影响规律
Fig.19 Influence of initial saturated moisture content on residual volumetric water content

3.5 干湿循环对特征值的影响规律

从干湿循环的作用机制以及增减湿曲线的路径差异分析降雨蒸发等气候变化对非饱和土的水-力学特性的影响,是近年来被普遍关注的研究视角。由于试验周期长、控制难度高,相关文献与试验数据较少,且较多文献中试验未达到残余阶段,因此满足研究条件(完成多次干湿循环并能确定每一个脱湿阶段 3 个特征值)的数据仅 20 余组,其中粉土 8 组、粉质黏土 3 组、黏土 10 组,相关影响规律如图 20~22 所示。

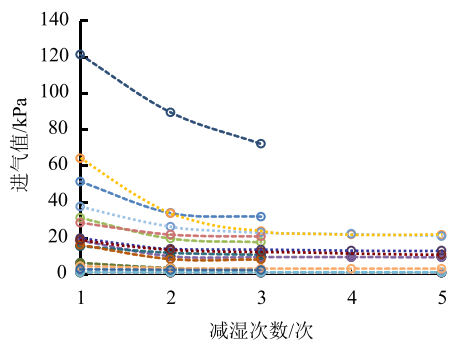


图 20 减湿次数对进气值影响规律
Fig.20 Influence of drying number on air-entry value

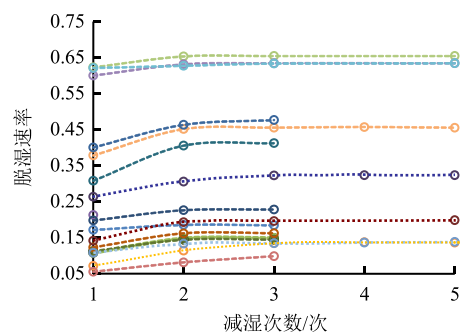


图 21 减湿次数对减湿速率的影响规律
Fig.21 Influence of drying number on dehumidification rate

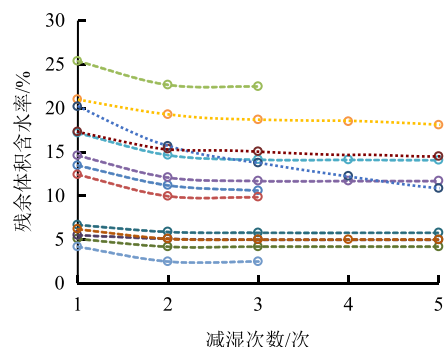


图 22 减湿次数对残余体积含水率的影响规律
Fig.22 Influence of drying number on residual volumetric water content

其中,同时给出减湿增湿曲线(有多个滞回圈)的试验仅 6 组,本研究以滞回度(定义为减湿曲线和增湿曲线中含水率的最大差值 $\Delta\theta_{\max}$ 与饱和含水率 θ_s 和残余含水率 θ_r 差值 $(\theta_s - \theta_r)$ 的比值)为分析对象,滞回度随干湿循环次数的变化规律如图 23 所示。

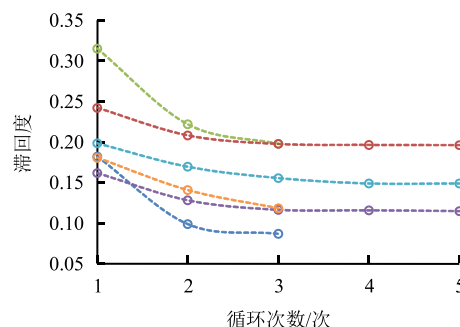


图 23 循环次数对滞回度的影响规律
Fig.23 Influence of drying-wetting cycles on hysteresis degree

由图 23 可知:进气值、残余体积含水率以及滞回度都随着循环次数不断进行而逐渐减少,减湿速率随循环次数逐渐增加,且 4 个指标的变化幅度主

要都集中在前 1~2 次干湿循环循环阶段,之后土体持水性能将逐渐稳定。且初始进气值在 40~120 kPa 之间的土样,受干湿循环次数的影响最为明显,对比图 11 和图 14 的关系发现,这类土样的塑性指数普遍大于 17 或者干密度普遍大于 1.7 g/cm^3 。

3.6 温度对特征值的影响规律

自 20 世纪 50 年代起,由于地下核废料的处置、二氧化碳地下封存、地热资源开发、石油开采等工程的广泛开展,温度对非饱和土特性的影响作用逐渐被重视,普遍认为温度上升引起的水黏度下降会导致孔隙水的传导性和流动性增加、表面张力减小。数据库中考虑温度对 3 个特征值影响的数据近 10 组,其中粉土 2 组、粉质黏土 1 组、黏土 6 组,主要规律如图 24~26 所示。随着温度升高,同一种土的进气值和残余体积含水率整体呈减小趋势,而减湿速率略有增大;且当温度超过 40°C 以后,对各个特征值的影响效应明显衰减,这应与高温条件下水分的汽化密切相关。

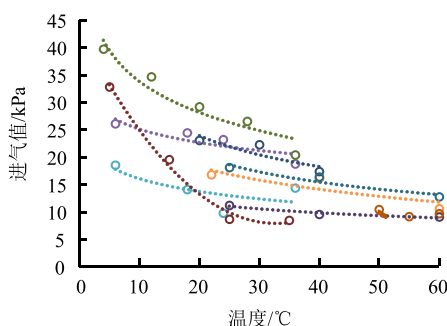


图 24 温度对进气值的影响规律

Fig.24 The influence rule on air-entry value of temperature

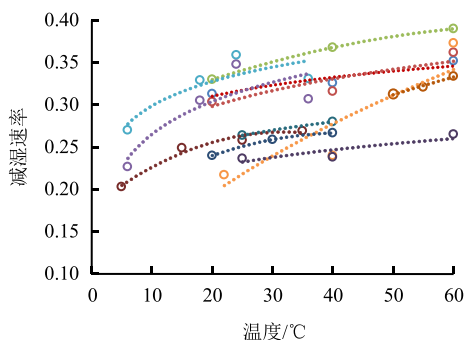


图 25 温度对减湿速率的影响规律

Fig.25 The influence rule on dehumidification rate of temperature

4 赋存条件的敏感性分析

上述影响规律分析,综合反映出不同赋存条件对土-水特征曲线具有不同的作用机制,影响因素

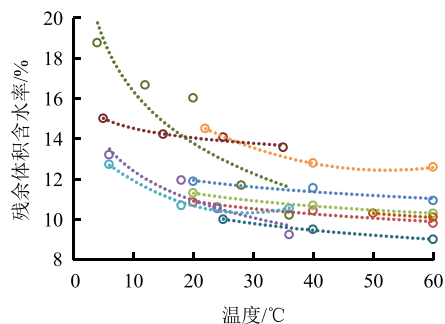


图 26 温度对残余含水率的影响规律

Fig.26 Influence of temperature on residual volumetric water content

中既有反映颗粒吸附水能力的指标(如粒径尺寸、塑性指数),也有反映颗粒间距的指标(如干密度、干湿循环)以及综合性的指标(初始饱和含水率),还有影响孔隙水运动能力和水化学特征的因素(温度),且多个因素之间存在着相互影响和耦合作用,因此,有必要进一步分析各因素对土-水特征曲线的主导影响地位。

由于文献资料和原始数据的有限性,各赋存条件指标对应数据量大小不一,且赋存条件与特征值呈现的非线性相关会导致分析误差,为了获得准确描述多个自变量共同作用下因变量的变化规律,对前文使用的数据进行量化处理,结合机器学习方法实现对各赋存条件的敏感性研究,主要方法包括多元线性回归分析(line regression)、随机森林算法(random forest)、梯度极限提升模型(XGBoost)。3 种模型的均方误差 MSE、标准误差 RMSE、拟合度 R 如表 1 所示。

表 1 分析模型的误差结果

Table 1 Error results of different analysis models				
分析模型	特征值	RMSE	MSE	R
Line Regression	进气值	0.660	0.435 6	0.087
	减湿速率	0.131	0.017 0	0.286
	残余含水率	0.165	0.027 0	0.246
XGBoost	进气值	0.070	0.004 9	0.863
	减湿速率	0.089	0.008 0	0.657
	残余含水率	0.123	0.015 0	0.582
Random Forest	进气值	0.071	0.005 0	0.775
	减湿速率	0.092	0.008 4	0.620
	残余含水率	0.126	0.015 9	0.570

根据对比结果来看:无论是对于进气值、减湿速率还是残余体积含水率,多元线性回归模型的拟合度 R 值相比于另两种非线性算法模型要低很多、波动性也是最大的,说明以非线性算法模型对数据集描述的效果更好。同时,在两种非线性算法模型

中, 梯度极限提升算法模型的均方误差值更低、拟合度 R 值最高, 适用性是最优的, 更能反映数据中真实的变化规律, 在此列出基于该算法确定的各个赋存条件对 3 个特征值的重要性权重, 如图 27 所示。

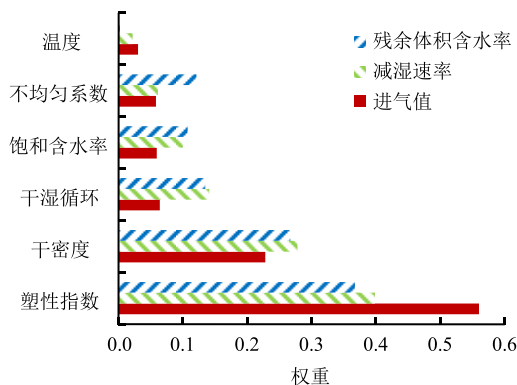


图 27 影响因素的权重分布图

Fig.27 Weight distribution of influence factors

采用机器学习的敏感性分析表明: 不同的赋存条件对进气值、减湿速率、残余含水率的确发挥着不同程度的影响作用, 其中, 塑性指数与干密度对 3 个特征值的重要性都较高, 属于主导性影响因素。由于塑性指数与干密度分别代表土体黏土矿物含量和密实程度, 说明对土-水特征曲线分布规律影响最大的还是黏粒含量及微小孔隙占比。

事实上, 土体各赋存条件对其土-水特征曲线的影响, 主要从化学反应和物理变化两个角度来作用。其中, 塑性指数的影响包括物理化学两个方面, 既反映了 0.005 mm 以下黏粒的含量 (亦即比表面积的量级), 也反映了以蒙脱石、伊利石为主的亲水性矿物的含量 (亦即水化作用的剧烈程度和低价阳离子的浓度); 干密度的影响主要体现在物理变化方面, 亦即孔隙尺寸和弯液面曲率半径的变化; 干湿循环和不均匀系数最终也是改变了土体内部孔隙分布和密实程度, 初始饱和含水率与干密度和黏粒含量有较强的相关性, 但此三者影响权重明显减小; 而温度主要是通过改变水的黏滞性和粒间双电层厚度来间接影响土体持水性能, 相比其他因素而言, 其影响权重微乎其微, 但却是一个物理化学作用并存且长期动态调整的活跃因素。

5 主导因素共同作用下特征值分布范围

为了增加敏感性分析对土-水特征曲线工程应用的指导意义, 基于敏感性分析结果, 从塑性指数与干密度两个主导因素入手, 结合相应数据给出了

3 个特征值受塑性指数与干密度共同影响下的参考范围, 如表 2 所示。

表 2 主导因素共同作用下特征值参考范围表
Table 2 Reference range of eigenvalues under the combined action of dominant factors

种类	塑性指数	干密度 / (g · cm ⁻³)	进气值/kPa	减湿速率	残余体积含水率/%
砂土类	—	(1.1, 1.3]	[0.97, 3.70]	[0.42, 1.03]	[1.90, 6.70]
		(1.3, 1.5]	[2.38, 6.87]	[0.24, 0.78]	[2.70, 9.80]
		(1.5, 1.7]	[4.29, 16.60]	[0.19, 0.54]	[3.90, 12.15]
		(1.7, 2.0]	[7.21, 23.81]	[0.11, 0.28]	[5.44, 16.50]
粉土类	≤10	(1.1, 1.3]	[2.33, 8.67]	[0.25, 0.61]	[6.80, 15.40]
		(1.3, 1.5]	[3.90, 23.28]	[0.16, 0.38]	[8.69, 17.42]
		(1.5, 1.7]	[5.74, 30.35]	[0.12, 0.28]	[13.50, 20.20]
		(1.7, 2.0]	[10.40, 44.70]	[0.10, 0.23]	[15.37, 23.70]
黏土类	>10	(1.1, 1.3]	[5.05, 17.30]	[0.12, 0.24]	[8.00, 16.40]
		(1.3, 1.5]	[7.30, 37.28]	[0.06, 0.23]	[10.10, 26.78]
		(1.5, 1.7]	[14.75, 87.46]	[0.058, 0.19]	[12.60, 28.75]
		(1.7, 2.0]	[25.44, 118.30]	[0.02, 0.18]	[15.88, 34.90]

从参考范围表中发现: 3 个特征值在不同种类土和干密度中存在明显的梯度性分布规律。一方面, 当土的种类一定时, 越高的干密度范围值对应的进气值和残余体积含水率越高, 减湿曲线越迟缓, 土体持水能力越强, 反之亦然; 另一方面, 当干密度一致时, 不同种类土对应的 3 个特征值也存在明显的递进关系。同时, 砂土的进气值和残余体积含水率的数值及变化范围均小于粉土和黏土的对值, 而其减湿速率远大于粉土和黏土; 由于黏土塑性指数的变化范围更广, 受干密度的影响更大, 其进气值可能超过 100 kPa、最大残余含水率可达 35%。

基于以上规律, 结合试验数据分布密度, 给出特征值取值建议如下: ①砂土的进气值普遍低于 10 kPa, 残余含水率一般低于 10%、对应的吸力值约为 50~100 kPa; ②粉土的进气值在 5~30 kPa 内, 残余含水率一般为 10%~20%、对应的吸力值约为 100~300 kPa; ③黏土的进气值可取 20~80 kPa, 残余含水率一般为 15%~30%、对应的吸力值约在 300~800 kPa; ④对于各类土, 塑性指数越小且干密度越小时取低值, 反之取高值。

由于文献[61]的 SWCC 曲线未达到残余状态, 不在本研究的数据集内, 可作为特征值参考范围的验证数据。试样干密度为 1.31 g/m³、塑性指数为 16.88, 无固结压力作用时进气值约为 10 kPa, 减湿速率约为 0.14, 符合给定参考范围。

6 结 论

在收集分析土-水特征曲线相关文献和试验数

据的基础上, 结合统计对比、机器学习和理论分析等方法, 阐明了各影响因素的内在作用机制、确定了各因素的敏感性和主导地位、给出了 3 个特征值的参考范围, 主要结论如下:

(1) 影响土-水特征曲线发展趋势的因素主要集中于土体颗粒级配曲线、塑性指数、密实程度(干密度、压实度、固结应力)、饱和含水率、干湿循环作用、环境温度等方面, 且各因素对 3 个特征值的影响规律单调性良好。

(2) 各影响因素对土-水特征曲线的作用机制存在明显差异但也联系紧密, 主要内在原因包括黏性颗粒尤其是蒙脱石类矿物对水的吸附作用(比表面积和水化作用)以及颗粒级配和密实程度对孔隙尺寸(弯液面曲率半径)的影响, 而温度变化对土体持水性能的影响相对较小但却长期存在。

(3) 塑性指数和干密度对土体持水性能的影响占主导地位, 因此, 用颗粒级配曲线和塑性指数预测土水特征曲线还应考虑密实程度的影响。

(4) 考虑两个主导影响因素, 给出了 3 个特征值的分布范围, 存在明显的梯度性, 能较好反映数据库的主要成果和总体规律, 为计算分析和工程应用提供借鉴。

鉴于非饱和土水气运移在岩土多场耦合研究中的重要地位, 针对土-水特征曲线演变规律和预测模型的研究方兴未艾, 既需要结合特殊的边界条件、考虑复杂的耦合作用, 持续开展细致全面的试验研究, 也需重视试验步骤和基础资料的完备性, 加强已有海量数据的整理分析和研究成果的总结深化。

参 考 文 献

- [1] SOLTANI A, AZIMI M, DENG A, et al. A simplified method for determination of the soil-water characteristic curve variables[J]. **International Journal of Geotechnical Engineering**, 2019, 13(3-4): 316-325.
- [2] HO K M Y, TSE J M K, Ng C W W. Influence of drying and wetting history and particle size on state-dependent soil-water characteristic curves (SDSWCCs)[C]//Proceedings of 3rd Asian Conference on Unsaturated Soils. Nanjing: Science Press, 2007: 213-218.
- [3] KELISHADI H, MOSADDEGHI M R, AYOUBI S, et al. Effect of temperature on soil structural stability as characterized by high energy moisture characteristic method[J]. **Catena**, 2018, 170: 290-304.
- [4] ROSHANI P, JÁI S. Incorporating temperature effects in soil-water characteristic curves[J]. **Indian Geotechnical Journal**, 2016, 46(3): 1-10.
- [5] GALLAGE C P K, UCHIMURA T. Effects of dry density and grain size distribution on soil-water characteristic curves of sandy soils[J]. **Soils & Foundations**, 2010, 50(1): 161-172.
- [6] RAHARDJO H, SATYANAGA A, D'AMORE G A R, et al. Soil-water characteristic curves of gap-graded soils[J]. **Engineering Geology**, 2012, 125: 102-107.
- [7] ZAPATA C E, HOUSTON W N, HOUSTON S L, et al. Soil-water characteristic curve variability[C]//Geo-denver. [S. l.]: [s. n.], 2015.
- [8] CHEN P, LIU J, WEI C, et al. Approach to rapidly determining the water retention curves for fine-grained soils in capillary regime based on the NMR technique[J]. **Journal of Engineering Mechanics**, 2017, 143[7]: 04017032.
- [9] CHEN X, HU K, CHEN J, et al. Laboratory investigation of the effect of initial dry density and grain size distribution on soil-water characteristic curves of wide-grading gravelly soil[J]. **Geotechnical and Geological Engineering**, 2018, 36(2): 885-896.
- [10] LI J H, LU Z, GUO L B, et al. Experimental study on soil-water characteristic curve for silty clay with desiccation cracks[J]. **Engineering Geology**, 2017, 218: 70-76.
- [11] ABBASZADEH M M, HOUSTON S, ZAPATA C, et al. Laboratory determination of soil-water characteristic curves for cracked soil[C]//Proceedings of 5th International Conference on Unsaturated Soils. Barcelona: CRC Press. 2011: 409-415.
- [12] JIANG Y, CHEN W, WANG G, et al. Influence of initial dry density and water content on the soil-water characteristic curve and suction stress of a reconstituted loess soil[J]. **Bulletin of Engineering Geology & the Environment**, 2016, 76: 1085-1095.
- [13] HARIANTO R, ALFRENDOS S, HANEENA M, et al. Comparison of soil-water characteristic curves from conventional testing and combination of small-scale centrifuge and dew point methods[J]. **Geotechnical & Geological Engineering**, 2019, 37: 659-672.
- [14] CHEN R, QI S, CHENG W, et al. Effect of compactness degree on the hydraulic properties for coarse soils of high-speed railway embankment[J]. **Procedia Engineering**, 2016, 143: 237-243.
- [15] CHEN R, TAN R, CHEN Z, et al. Influence of degree of compaction on unsaturated hydraulic properties of a

- compacted completely decomposed granite[J]. **Geofluids**, 2020(4): 1-9.
- [16] HAN Z, VANAPALLI S K. Relationship between resilient modulus and suction for compacted subgrade soils[J]. **Engineering Geology**, 2016, 211: 85-97.
- [17] CHEN Y H, LI B Y, XU Y T, et al. Field study on the soil water characteristics of shallow layers on red clay slopes and its application in stability analysis[J]. **Arabian Journal for Science and Engineering**, 2019, 44(5): 5107-5116.
- [18] GU T F, WANG J D, WANG C X, et al. Experimental study of the shear strength of soil from the Heifangtai platform of the loess plateau of China[J]. **Journal of Soil & Sediments**, 2019, 19(10): 3463-3475.
- [19] ZHAI Q, RAHARDJO, et al. Variability in unsaturated hydraulic properties of residual soil in Singapore[J]. **Engineering Geology**, 2016, 209: 21-29.
- [20] CHAI J, KHAIMOOK P. Prediction of soil-water characteristic curves using basic soil properties[J]. **Transportation Geotechnics**, 2019, 22: 100295-100306.
- [21] YANG H, RAHARDJO H, LEONG E C, et al. Factors affecting drying and wetting soil-water characteristic curves of sandy soils[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2004, 41(5): 908-920.
- [22] WON-TAEK H, YOUNG-SEOK J, SEONGHUN K, et al. Estimation of soil-water characteristic curves in multiple-cycles using membrane and TDR system[J]. **Materials**, 2016, 9(12): 1019.
- [23] ZHANG J, JIANG T, WANG X, et al. Influences of drying and wetting cycles and compaction degree on strength of Yudong silt for subgrade and its prediction[J]. **Advances in civil engineering**, 2018, (PT.5): 1364186.1-1364186.10.
- [24] XIE X, LI P, HOU X, et al. Microstructure of compacted loess and its influence on the soil-water characteristic curve[J]. **Advances in Materials science and Engineering**, 2020, 2020(5): 1-12.
- [25] QIAO X, MA S, PAN G, et al. Effects of temperature change on the soil water characteristic curve and a prediction model for the Mu Us Bottomland, Northern China[J]. **Water**, 2019, 11(6): 1235.
- [26] GAO H, SHAO M. Effects of temperature changes on soil hydraulic properties[J]. **Soil & Tillage Research**, 2015, 153: 145-154.
- [27] FANG X W, SHEN C N, LI C H, et al. Test study on effects of temperature, sand mix ratios and dry density on soil water characteristic curves of bentonite-sand mixtures[J]. **Applied Mechanics & Materials**, 2014, 580-583: 359-363.
- [28] FATTAH M Y, SALIM N M, IRSHAYYID E J. Determination of the soil-water characteristic curve of unsaturated bentonite-sand mixtures[J]. **Environmental Earth Sciences**, 2017, 76(5): 201.
- [29] 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.
- [30] ZHOU W H, GARG A, GARG A. Study of the volumetric water content based on density, suction and initial water content[J]. **Measurement**, 2016, 94: 531-537.
- [31] ABEYKOON T, UDUKUMBURAGE R S, GALLAGE C, et al. Comparison of direct and indirect measured soil-water characteristic curves for a silty sand[J]. **International Journal of Geomate**, 2017, 13(39): 9-16.
- [32] PRIONO, RAHARDJO H, CHATTERJEA K, et al. Effect of hydraulic anisotropy on soil-water characteristic curve[J]. **Soils & Foundations**, 2016: 228-239.
- [33] CHEN R P, LIU P, LIU X M, et al. Pore-scale model for estimating the bimodal soil-water characteristic curve and hydraulic conductivity of compacted soils with different initial densities[J]. **Engineering Geology**, 2019, 260: 105199.
- [34] YE Y X, ZOU W L, HAN Z, et al. Predicting the entire soil-water characteristic curve using measurements within low suction range[J]. **Journal of Mountain Science**, 2019, 16(5): 1198-1214.
- [35] SEBOONG O H, LU N, KIM Y K, et al. Relationship between the Soil-water characteristic curve and the suction stress characteristic curve: experimental evidence from residual soils[J]. **Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering**, 2012, 138(1): 47-57.
- [36] MIAO L C, LIU S Y, LAI Y M. Research of soil-water characteristics and shear strength features of Nanyang expansive soil[J]. **Engineering Geology**, 2002, 65(4): 261-267.
- [37] BREITMEYER R J, FISSEL L. Uncertainty of soil water characteristic curve measurements using an automated evaporation technique[J]. **Vadose Zone Journal**, 2017, 16: 15-27.
- [38] 罗启迅, 黄靖, 陈群. 竖向应力及干密度对砾石土土—

- 水特征曲线的影响研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(3): 729-734.
- LUO Qi-xun, HUANG Jing, CHEN Qun. Influence of vertical stress and dry density on soil-water characteristic curve of gravelly soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(3): 729-734.
- [39] 陈宇龙, 内村太郎. 不同干密度下非饱和土土-水特征曲线[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(3): 813-819.
- CHEN Yu-long, UCHIMURA Taro. Soil-water characteristic curve for unsaturated soil at different dry densities[J]. **Journal of Central South University (Science and Technology)**, 2017, 48(3): 813-819.
- [40] 蔡国庆, 刘祎, 徐润泽, 等. 全吸力范围红黏土干湿循环土-水特征曲线[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(增刊 2): 13-16.
- CAI Guo-qing, LIU Yi, XU Run-ze, et al. Experimental investigation for soil-water characteristic curve of red clay in full suction range[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2019, 41(Suppl.2): 13-16.
- [41] 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.
- GAO You, SUN De-an, ZHANG Jun-ran, et al. Soil-water characteristics of unsaturated soils considering initial void ratio and hydraulic path[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2019, 41(12): 2191-2196.
- [42] 田湖南, 孔令伟. 细粒对砂土持水能力影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 56-60.
- TIAN Hu-nan, KONG Ling-wei. Experimental research on effect of fine grains on water retention capacity of silty sand[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(1): 56-60.
- [43] 陈仁朋, 王鹏飞, 刘鹏, 等. 路基煤矸石填料土-水特征曲线试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(2): 372-378.
- CHEN Ren-peng, WANG Peng-fei, LIU Peng, et al. Experimental study on soil-water characteristic curves of subgrade coal gangue filler[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(2): 372-378.
- [44] 张昭, 刘奉银, 齐吉琳, 等. 基于颗粒级配曲线预测非饱和土持水曲线的物理方法[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(增刊 1): 241-246.
- ZHANG Zhao, LIU Feng-yin, QI Ji-lin, et al. Physical approach to predict water retention curves for unsaturated soils based on particle-size distribution[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2018, 40(Suppl.1): 241-246.
- [45] 孙德安, 高游, 刘文捷, 等. 红黏土的土水特性及其孔隙分布[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(2): 351-356.
- SUN De-an, GAO You, LIU Wen-jie, et al. Soil-water characteristics and pore-size distribution of lateritic clay[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2015, 37(2): 351-356.
- [46] 罗小艳, 刘伟平, 扶名福. 颗粒级配及竖向应力对崩岗区土壤土-水特征曲线的影响[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2016, 46(增刊 1): 235-240.
- LUO Xiao-yan, LIU Wei-ping, FU Ming-fu. Effects of gradation and vertical stress on soil-water characteristic curve in collapsing erosion area[J]. **Journal of Southeast University (Natural Science Edition)**, 2016, 46(Suppl.1): 235-240.
- [47] 杨钢, 杨庆. 土-水特征曲线测定过程中潜在影响因素与异常现象研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(2): 397-406.
- YANG Gang, YANG Qing. Experimental research on potential factors and abnormal phenomenon for measuring soil-water characteristic curve[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(2): 397-406.
- [48] 谭洪波, 余成学, 胡明庭, 等. 含大尺寸块石岩土材料土水特征曲线的试验[J]. 武汉大学学报(工学版), 2013, 46(3): 306-311.
- TAN Hong-bo, SHE Cheng-xue, HU Ming-ting, et al. Experiment on SWCC of rock and soil materials with large stone[J]. **Engineering Journal of Wuhan University**, 2013, 46(3): 306-311.
- [49] 张昭, 刘奉银, 赵旭光, 等. 考虑应力引起孔隙比变化的土水特征曲线模型[J]. 水利学报, 2013, 44(5): 578-585.
- ZHANG Zhao, LIU Feng-yin, ZHAO Xu-guang, et al. A soil water characteristic curve model considering void ratio variation with stress[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2013, 44(5): 578-585.
- [50] 汪东林, 栾茂田, 杨庆. 非饱和重塑黏土干湿循环特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(9): 1862-1867.
- WANG Dong-lin, LUAN Mao-tian, YANG Qing. Experimental study on behavior of unsaturated remoulded clay subjected to drying and wetting cyclic paths[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(9): 1862-1867.
- [51] 陈留凤, 彭华. 干湿循环对硬黏土的土水特性影响规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(11): 2337-2344.

- CHEN Liu-feng, PENG Hua. Experimental study on the water retention properties of the hard clay under cyclic suction conditions[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2016, 35(11): 2337-2344.
- [52] 杨何, 汤明高, 叶润青, 等. 三峡库区滑坡堆积体非饱和土的土-水特征研究[J]. 水利水电技术, 2017, 48(9): 168-173.
- YANG He, TANG Ming-gao, YE Run-qing, et al. Study on soil-water characteristics of unsaturated soil of landslide deposits in Three Gorges Reservoir Area[J]. **Water Resources and Hydropower Engineering**, 2017, 48(9): 168-173.
- [53] 王协群, 邹维列, 骆以道, 等. 考虑压实度时的土水特征曲线和温度对吸力的影响[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(3): 368-372.
- WANG Xie-qun, ZOU Wei-lie, LUO Yi-dao, et al. SWCCs and influence of temperature on matrix suction under different compaction degrees[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, 33(3): 368-372.
- [54] 张宏, 刘海洋, 李聪. 风积沙路基土土-水特征曲线温度效应研究[J]. 中国公路学报, 2020, 33(7): 42-49.
- ZHANG Hong, LIU Hai-yang, LI Cong. Study on temperature effect of soil water characteristic curve of Aeolian sand subgrade[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2020, 33(7): 42-49.
- [55] 谈云志, 胡新江, 喻波, 等. 粉土持水性能的温度效应研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(增刊 1): 121-126, 140.
- TAN Yun-zhi, HU Xin-jiang, YU Bo, et al. Study on temperature effect of water holding capacity of silt[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(Suppl.1): 121-126, 140.
- [56] 蔡国庆, 赵成刚, 刘艳. 非饱和土土-水特征曲线的温度效应[J]. 岩土力学, 2010, 31(4): 1055-1060.
- CAI Guo-qing, ZHAO Cheng-gang, LIU Yan. Temperature effect of soil water characteristic curve of unsaturated soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(4): 1055-1060.
- [57] 陈勇, 苏剑, 谈云志, 等. 循环脱吸湿与加卸载耦合作用下土体持水性能试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(8): 2907-2913.
- CHEN Yong, SU Jian, TAN Yun-zhi, et al. Water retention capacities of soils under the coupling actions of cyclic drying-wetting and repeated loading-unloading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(8): 2907-2913.
- [58] 郑帅, 姜谟男, 张峰瑞, 等. 基于机器学习与可靠度算法的围岩动态分级方法及其工程应用[J]. 岩土力学, 2019, 40(增刊 1): 308-318.
- ZHENG Shuai, JIANG An-nan, ZHANG Feng-rui, et al. Dynamic classification method of surrounding rock and its engineering application based on machine learning and reliability algorithm[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(Suppl.1): 308-318.
- [59] 王啟, 杨添微, 刘永震, 等. 基于随机森林算法的复杂碳酸盐岩岩性识别[J]. 工程地球物理学报, 2020, 17(5): 550-558.
- WANG Qi, YANG Tian-wei, LIU Yong-zhen, et al. Identification of complex carbonate lithology based on random forest algorithm[J]. **Chinese Journal of Engineering Geophysics**, 2020, 17(5): 550-558.
- [60] 仇文岗, 顾鑫, 刘汉龙, 等. 基于贝叶斯更新的非饱和土坡参数概率反演及变形预测[J]. 岩土力学, 2022, 43(4): 1112-1121.
- ZHANG Wen-gang, GU Xin, LIU Han-long, et al. Probabilistic back analysis on soil parameters and displacement prediction of unsaturated slopes using Bayesian updating[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2022, 43(4): 1112-1121.
- [61] 陈勇, 严可翔, 苏剑, 等. 湿-载-热对粉质黏土持水性能的影响特征及预测模型[J]. 工程科学与技术, 2021, 53(4): 45-52.
- CHEN Yong, YAN Ke-xiang, SU Jian, et al. Effect and modeling of wetting-loading-heating on water retention capacity of silty clay[J]. **Advanced Engineering Sciences**, 2021, 53(4): 45-52.