

DOI: 10.11779/CJGE20220169

关于持水特性曲线研究的几个问题

陈正汉¹, 苗强强^{*2}, 郭楠³, 程香¹

(1. 陆军勤务学院军事设施系, 重庆 401311; 2. 西北民族大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730000; 3. 兰州理工大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 对持水特性当前的研究中存在的 3 个问题进行了分析讨论, 指出持水特性是非饱和土的本构关系之一, 它不能代替其他本构关系; 用研究本构关系的观点、理论和方法探索持水特性可提升研究水平; 不同类别、不同地区土的持水特性曲线形态差异很大, 用现有文献中的任一经验公式都难以描述, 用试验方法确定具体对象的持水特性曲线是有效可靠途径; 通过改进测试吸力技术和试验方法可以显著缩短测定持水特性曲线的历时; 工程中经常遇到的填土、黄土、膨胀土、红黏土等在工作环境下的实际吸力不超过 1500 kPa, 而对土的变形和强度影响比较显著的吸力范围就更窄, 没有必要花费很长的时间去测定全吸力范围的完整持水特性曲线。

关键词: 持水特性曲线; 力学定位; 节省时间的测定 SWCC 的方法; 合理吸力范围

中图分类号: TU433 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2023)04-0671-09

作者简介: 陈正汉(1947—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事非饱和土与特殊土力学的科研和教学工作。E-mail: chenzhenghan47@163.com。

On some problems of researches on soil-water retention curve

CHEN Zhenghan¹, MIAO Qiangqiang², GUO Nan³, CHENG Xiang¹

(1. Department of Military Installation, Army Logistics University, Chongqing 401311, China; 2. College of Civil Engineering, Northwest Minzu University, Lanzhou 730000, China; 3. College of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Three problems in the current researches on soil-water retention characteristics are analyzed and discussed, and the following main conclusions are drawn. The soil-water retention characteristics are one of the constitutive relations of unsaturated soils, and they cannot replace other constitutive relations. Exploring the soil-water retention properties with perspectives, theories and methods for studying the constitutive relations can improve the research level. The forms of the soil-water characteristic curve of soils with different types and in different regions are very different, and it is difficult to describe them with the same empirical equation in the existing literatures. The testing method is an effective and reliable way to determine the soil-water characteristic curve. The time required to measure the soil-water retention characteristic curve can be dramatically shortened by improving the suction-measuring technology and the testing method. The actual suction magnitude of filling soil, loess, expansive soil, red clay, etc., which are often encountered in projects, does not exceed 1500 kPa in their working environment. The reasonable suction range, which has a significant effect on deformation and strength of soils, is narrower. So there is no need to spend a long time to obtain the complete soil-water retention characteristic curve for the full suction range.

Key words: soil-water retention curve; mechanics role; time-saving method to measure SWCC; reasonable suction range

0 引言

持水特性是非饱和土力学的一个基本课题, 受到学术界的广泛关注。笔者认为在当前的研究中有 3 个问题值得注意: 一是持水特性曲线(soil-water retention curve/surface, 简称为 SWRC 或者 SWRS; 亦称为 soil-water characteristics curve, 简称为 SWCC)的力学定位和作用; 二是缩短测定持水特性曲线试验历时的方

法; 三是确定持水特性曲线的实用方法与合理吸力范围。分述如下。

基金项目: 国家自然科学基金项目(52168051, 11672330); 甘肃省青年科技基金计划项目(20JR10RA200)

收稿日期: 2022-02-18

***通信作者** (E-mail:miaoqiang2008@qq.com)

1 持水特性曲线的力学定位和作用

非饱和土是固液气三相介质,其本构关系包含多方面的内容^[1-2]。除土骨架的应力-应变关系和强度条件外,气液两相的运动方程(渗透规律)、气体状态方程及土中水量的变化规律都是必不可少的本构关系。文献[3,4]指出:“从现代土力学观点来看,持水特性是非饱和土的本构关系之一。因此,用研究本构关系的观点、理论和方法探索持水特性可提升该领域的研究水平”。例如,笔者在1991年做过理论分析,对饱和度(或持水特性)提出了以下理论表达式^[5-6]:

$$S_r = f(\varepsilon, u_a, u_w) \quad (1)$$

式中: S_r 为饱和度; ε 为土的应变张量; u_a 和 u_w 分别为孔隙气压力和孔隙水压力。式(1)表明,饱和度与吸力及应变张量有关。由于饱和度是标量,而应变张量是二阶张量,故饱和度对应变张量的依存关系只有通过其3个不变量才能实现。应变张量的第一不变量是体应变,等价于土的密度变化。暂且不考虑应变第二不变量和第三不变量对饱和度的影响。

式(1)是根据岩土力学的公理化理论体系^[2]通过理论分析^[5-6]得出的持水特性一般表达式,其中的应变张量可通过其3个不变量体现。受应力-应变关系和强度准则研究的启示,用应力张量取代式(1)中的应变张量更符合岩土力学研究的惯例,亦更方便应用。对非饱和土而言,应力张量包括两个方面,即净总应力张量和吸力张量,笔者团队相继提出考虑密度、净平均应力和偏应力影响的广义持水特性曲线公式^[7-12]就是这一思路的具体体现。文献[13~17]用边界模型和内变量构建的描述干湿循环引起的持水特性曲线滞后效应和滞回圈的数学模型也是把持水特性当作本构关系进行研究的结果。

顾名思义,持水特性曲线的作用就是描述土中水分与应力张量之间相互依赖的本构关系,是非饱和土的本构关系之一,它不能代替土的其他本构关系,如应力-应变关系、强度准则、渗水规律和渗气规律、气体状态方程、气体在水中溶解的亨利定律等。Fredlund学派对传统持水特性曲线赋予更多的功能,用其估算土的强度、变形和渗水系数,似欠妥当。文献[18]指出,“土的变形、强度和渗流特性是很复杂的,他们的方法过于简化,所得结果难有代表性”。以非饱和土的强度为例,文献[19]给出了如下强度表达式:

$$\tau_f = c'(\sigma - u_a)_f \tan \phi' + \tan \phi' \int_0^{\psi} \left[\frac{S_r - S_{res}}{1 - S_{res}} \right] d(u_a - u_w) \quad (2)$$

式中: τ_f 为土破坏时破坏面上的抗剪强度; $(\sigma - u_a)_f$ 为破坏时破坏面上的净法向应力; c' 和 ϕ' 分别为饱和

土的有效凝聚力和有效内摩擦角; ψ 表示吸力, S_{res} 为残余饱和度; $d(u_a - u_w)$ 为基质吸力增量。

如果把被积函数用 Fredlund-Xing 持水特性模型^[20]式(3)代入式(2),则所得表达式极其复杂,难以得出积分的具体结果。此外,采用不同的持水特性模型得到的抗剪强度包线相差甚远(图1)。

$$S_r = \left[1 - \frac{\ln(1 + s/S_{res})}{\ln(1 + 10^6/S_{res})} \right] \left\{ \frac{1}{\ln[\exp(1) + (s/a)^n]} \right\}^m \quad (3)$$

式中: s 为吸力,与式(2)中的积分上限 ψ 的含义相同; a , m 和 n 为土性参数。

众所周知,抗剪强度公式中的所有状态变量(包括正应力、剪应力和孔隙水压力)都是土在破坏时的数值,而不是初始值或试验过程中任意时刻的数值。在不排水剪切过程中,有的土发生剪缩孔隙水压力上升(在排水剪切过程中排水量增加),有的土则发生剪胀孔隙水压力减小甚至出现负值(在排水剪切过程中出现吸水)。传统持水特性曲线试验时试样不受外力,仅考虑吸力的作用,在吸力增加的脱湿过程中试样的水分一直减少,在吸力减小的增湿过程中试样的水分一直增加,与试样剪切破坏时应力状态及水分变化情况相差甚远,几乎没有可比性,因而用其预测非饱和土的强度难以得出合理的结果。

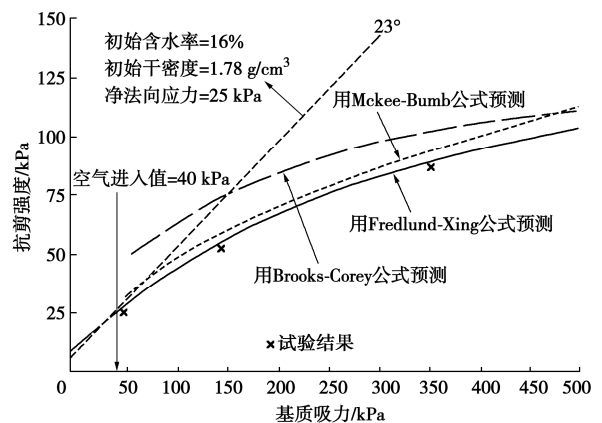


图1 不同持水特性模型预估的抗剪强度包线和重塑冰碛土试验结果的比较^[19]

Fig. 1 Comparison of shear strength envelopes predicted by models for different soil-water retention curves and test results of remodeled glacial soil^[19]

另一方面,随着非饱和土固结仪、直剪仪和三轴仪的普及,测定非饱和土的变形参数、强度参数和水量变化特性已变得比较容易^[8,21],例如,用同一组控制吸力和净围压的三轴排水剪切试验就可以确定非饱和土的非线性模型参数、强度参数和水量变化规律^[8,22](此处所说的水量变化规律实质上就是考虑应力状态和应力路径的广义持水特性曲线),而不必借助传统的

持水特性曲线。如果只测定非饱和土的强度参数, 应用非饱和土四联直剪仪一次就可对同一控制吸力做 4 个不同净竖向压力的剪切试验, 试验时间需 3 d 左右即可, 远远低于做持水特性曲线的历时, 且更符合土的实际应力状态和工作条件。

2 缩短测定持水特性曲线试验历时的方法

测定持水特性曲线的历时通常需要数月, 如何减少试验历时是一个值得探讨的问题。Wang 等^[23]建议采用小直径的圆柱试样或大面积的环形试样以缩短 SWCC 试验的历时。Toll 等^[24]应用英国 Durham 大学制造的高量程张力计(可快速量测 2000 kPa 以下的吸力)研发了一套土-水特征曲线快速测定装置, 可同时连续量测圆柱形试样的基质吸力(用高量程张力计)、含水率(用电子秤称重)和体变(用 4 个位移传感器量测径向位移, 用两个位移传感器量测轴向位移); 其最大特点是不使用轴平移技术, 不必施加气压力, 试样自然风干, 产生负孔隙水压力, 完成一个干燥过程只需 2 d 左右; 用注射器给试样缓慢注水, 完成干燥-湿化全过程需要 7 d, 大大缩短了土-水特征曲线的测定时间。

传统持水特性曲线不考虑土样在脱湿过程中的体积变化。这对体变不大的土可以忽略, 但对试验过程体变较大的土的持水特性曲线的影响就不容忽视^[25-27]。这时的持水特性试验结果就不只是水量与吸力的关系, 而且涉及到土的干缩变形(或孔隙比)与吸力的关系, 可视为一个包含吸力、水分和变形 3 个变量的水-力耦合问题。有的学者同时将吸力和孔隙比都作为独立变量建立持水特性曲线模型。事实上, 从持水特性试验过程可知, 每施加一级吸力, 既引起土中水分排出, 又同时引起土样干缩变形; 换言之, 吸力是自变量, 水分和变形(或孔隙比)都是吸力的函数。众所周知, 土样的固体质量在持水特性试验过程中保持常数, 质量含水率不受试样体变的影响, 用 $w-s$ (s 为基质吸力) 形式表达土-水特征曲线就不存在体变影响的问题; 但饱和度与孔隙体积有关(饱和度定义为土孔隙中水分体积与孔隙体积之比), 体积含水量(θ)与饱和度及孔隙率(n)有关($\theta = nS_r$), 故用 S_r-s 形式或 $\theta-s$ 形式表达持水特性曲线时必须考虑体变的影响。周葆春等^[28-29]和邹维列等^[30]依据各自的试验结果, 将 Fredlund-Xing 模型中的参数视为初始孔隙比的函数, 分别建立了能考虑膨胀土体积变化^[28, 30]或密度影响^[29]的 SWCC 模型。

是否可以改进测定持水特性曲线的方法而不必进行体变修正呢? 陈正汉等^[7]曾通过一系列控制试样干

密度和质量含水率为常数的试验研究了土的密度对 SWCC 的影响, 建立了相应的数学表达式。该方法仅需测试吸力, 试样不发生干缩或湿胀, 也不必区分增湿过程与脱湿过程; 对低吸力可用张力计量测, 对高吸力可用滤纸或热传导探头量测; 当有多台套设备时, 可大大缩短试验总历时, 提高工作效率。完成一种土样的完整持水特性试验只需 10 d 左右。显然, 该法可用于膨胀土的 SWCC 研究。周葆春等^[31]采用相同的试验方法研究了荆门重塑膨胀土的 SWCC, 对同一干密度配制 14 个质量含水率(7%, 11%, 14%, 17%, 19%, 20%, 22%, 23%, 26%, 29%, 32%, 34%, 35%, 38%), 用 Whatman No. 42 型滤纸(直径 55 mm)量测土体的总吸力与基质吸力, 采用双圈牌 No. 201 型快速定量滤纸(裁剪为直径 61 mm)作为基质吸力量测时的保护滤纸。试样和滤纸被置于密闭容器中, 再将密闭容器放入恒温恒湿箱中, 温度控制为 20°C, 吸力平衡时间控制为 8 d。试样相应的饱和度变化为 17.5%~98.2%, 孔隙比变化为 0.539~1.089, 测得的吸力值为 100~100000 kPa。但缺少吸力在 0~100 kPa 的试验资料。显而易见, 如果有 14 套密闭容器, 在 8 d 内就可以得到对应于某一干密度的持水特性曲线。

3 确定持水特性曲线的实用方法与合理吸力范围

图 2 是文献[1, 32]中给出的几类土在脱湿过程中的持水特性曲线。可见不同类土的持水特性曲线形态是相当复杂的, 文献中提出的任一公式都不可能适用于所有土。如同没有万能的本构模型一样, 不可能有描述各种土在不同条件下的持水特性模型。

近年来在持水特性研究方面的一个倾向是, 用很窄的低吸力范围(0~500 kPa, 或更窄)的试验资料去套用文献中的公式以描述全吸力范围(0~10⁶ kPa)的持水特性。其缺点有二: 一是不分青红皂白套用现成公式, 实属削足适履, 生搬硬套, 不宜提倡, 文献[33]发现, “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。”二是对依据少量试验资料进行外推, 其结果不是唯一的^[34], 是不可靠的, 特别是外推得到的残余含水率有时严重失真, 不能使用。例如, 文献[19]是 Fredlund 等用自己提出的 Fredlund-Xing 持水特性模型对重塑冰碛土的持水特性试验资料(图 3)拟合得出的残余饱和度竟高达 65%, 失去了该参数的本意。事实上, 图 3 的曲线不存在反弯点, 强行用 Fredlund-Xing 持水特性模型进行拟合就是死搬硬套。因此, 目前获得持水特性曲线的最可靠的方法

法仍然是试验。

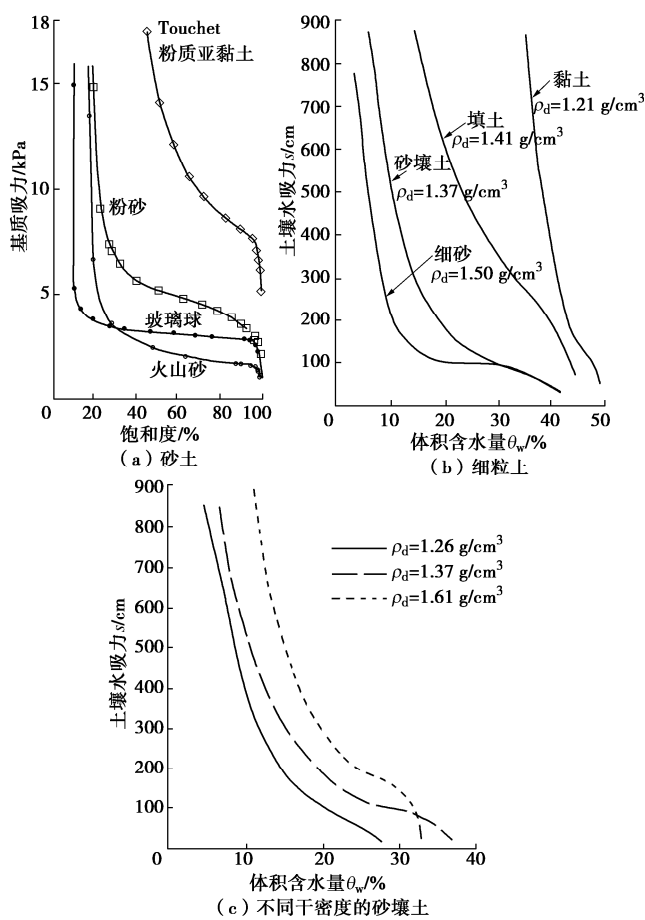


图2 几类土在脱湿过程中的土-水特征曲线 (ρ_d 为初始干密度)

Fig. 2 Soil-water characteristic curves of several types of soils during process of desorption (ρ_d is initial dry density)

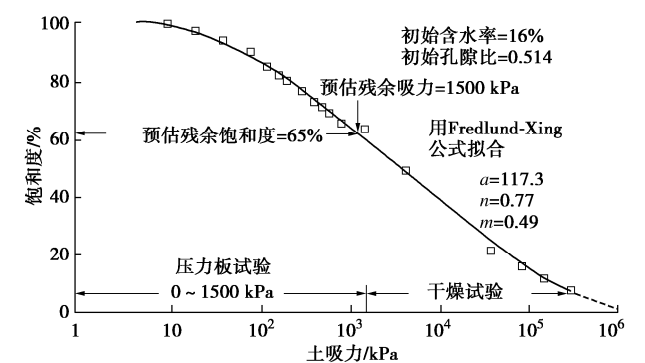


图3 用 Fredlund-Xing 模型拟合重塑冰碛土的持水特性试验结果^[19]

Fig. 3 Fitting test results of soil-water retention curve of remoulded glacial soil with Fredlund-Xing model^[19]

完整的土-水特征曲线的吸力范围从 0~10⁶ kPa, 但并非整个吸力范围内的吸力对土的力学性状都有明显影响。众所周知, 正常固结饱和土达到临界状态时的 $v-\ln p'$ 关系和 $q-p'$ 关系具有唯一性, 即二者分别

满足如下关系式:

$$v = \Gamma - \lambda \ln p' \quad , \quad (4)$$

$$q = Mp' \quad . \quad (5)$$

式中: $v=1+e$ 为土的比容 (specific volume), Γ 和 λ 为土性参数, 分别表示式 (4) 描述的直线的截距和斜率; M 为式 (5) 描述的临界状态线的斜率; p' 和 q 分别为饱和土在临界状态时的有效平均应力和偏应力。Toll^[35]应用净平均应力和吸力描述非饱和土的应力状态, 将式 (4), (5) 分别推广为

$$v = \Gamma_{aw} - \lambda_a \ln p - \lambda_w \ln(u_a - u_w) \quad , \quad (6)$$

$$q = M_a p + M_w(u_a - u_w) \quad . \quad (7)$$

式中: Γ_{aw} , λ_a , λ_w , M_a , M_w 都是与饱和度有关的土性参数, p 是净平均应力。 λ_a 和 M_a 分别代表净平均应力对变形和强度的贡献, λ_w 和 M_w 则分别代表基质吸力对变形和强度的贡献。如果吸力保持为常数, λ_a 和 M_a 就是依赖于吸力的参数, 式 (6), (7) 就退化为巴塞罗那模型^[36]的相应表达式。Toll^[35]做了 23 个击实非饱和土试样的试验 (控制气压压力, 量测水压力, 不排水剪切) 与 6 个饱和土试样的不排水剪切试验, 在剪切过程中含水率不变而饱和度变化, 通过二元线性回归技术得到该 4 个参数的变化规律是 (图 4): M_w 随饱和度降低而减小, 当饱和度低于 55% 以后, 吸力对强度不再有任何影响, 这意味着土中水只存在于土团粒内细小孔隙中, 而对发生在颗粒或团粒接触处的剪切毫无作用; M_a 则随饱和度的降低而增大, 说明净平均应力在低饱和度时对强度的贡献增加; 在高饱和度和时, M_a 和 M_w 都逼近于饱和土的临界应力比 M , 式 (7) 最终退化为式 (5)。 λ_a 和 λ_w 的变化规律 (图 5) 与 M_a 和 M_w 相似。不独有偶, 陈正汉等^[37]在研究非饱和土的有效应力参数的变化规律时发现, 在饱和度低于 70% 时有效应力参数 χ 值很小, 即高吸力对变形的影响不大 (表 1)。

表 1 不同干密度的土样的有效应力参数^[37]

Table 1 Effective stress parameters of soil samples with different dry densities^[37]

干密度/ (g·cm ⁻³)	饱和度							
	70%	75%	80%	85%	90%	95%	98%	100%
1.56	0.10	0.15	0.21	0.32	0.46	0.68	0.86	1.00
1.70	0.13	0.18	0.26	0.36	0.51	0.71	0.87	1.00

近年来有的研究者对各类土都在不遗余力地测定或预测完整的持水曲线。事实上, 除了作为高放废物地质库缓冲材料的膨润土等^[38-39]在工作环境下吸力可高达数百兆帕外, 工程中经常遇到的填土、黄土、膨胀土、红黏土等在工作环境下的吸力不超过 1500 kPa, 而对土的

变形和强度影响比较显著的吸力范围就更窄。

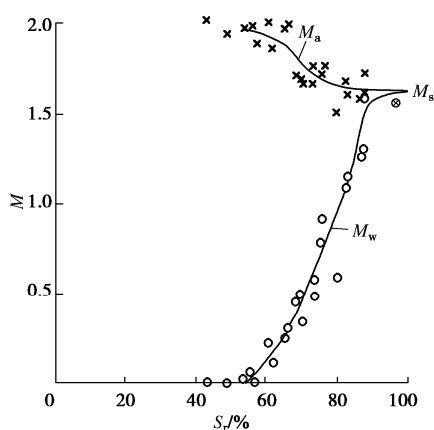


图4 M_a 和 M_w 随饱和度的变化^[35]

Fig. 4 Variation of M_a and M_w with saturation^[35]

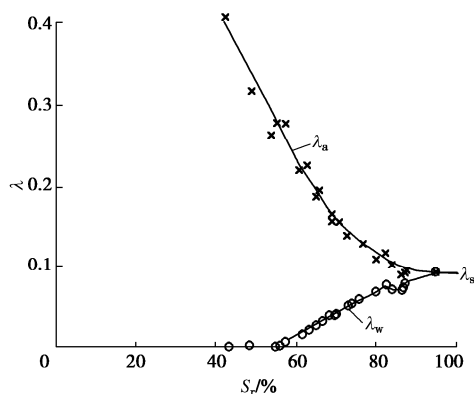


图5 λ_a 和 λ_w 随饱和度的变化^[35]

Fig. 5 Variation of λ_a and λ_w with saturation^[35]

文献[40]的表 10.41~10.49 是黄土主要分布地区(包括兰州、陕西、山西、宁夏、河南等 5 省市)的多个黄土地场通过挖探井采取原状土样实测的含水率,表中的含水率代表了不同地貌(阶地、高边坡、丘陵沟壑、平原等)和不同生成年代黄土(Q_4 、 Q_3 、 Q_2)的天然湿度状态。从地域上看,甘肃和宁夏的黄土含水率较低,而陕西、山西和河南的黄土含水率较高。总的看来,黄土地基中含水率变化多为 10%~27%,相应的饱和度变化为 20%~85%;高边坡临空面和高阶地上层的黄土含水率较低,在 10%左右,相应的饱和度变化为 15%~30%。渭北张桥黄土地基、汾阳机场跑道黄土地基和郑州—西安客运专线郑州—洛阳西 10 km 段黄土路基等 3 个场地的最低含水率分别是 12.1%, 11.3%和 12.7%,与西安曲江原状 Q_3 黄土试验的最低含水率为 13%很接近,后者在含水率为 13%时的基质吸力等于 449 kPa,由此推断上述 3 个场地黄土的基质吸力在 500 kPa 左右。宝鸡第二发电厂黄土地基和郑州—西安客运专线西安火车站附近黄土

地基的最低含水率为 20.2 %和 18.3 %,该 2 个场地黄土的基质吸力约为 100 kPa。宁夏扶贫扬黄工程 11 号泵站场地黄土的体积含水量为 6.9 % (相应的质量含水率为 5.3%)时的基质吸力是 800 kPa。兰州钢厂黄土地基、宁夏扶贫扬黄工程 11 号泵站、兰州理工大学后山黄土高陡边坡的临空面附近和郑州—西安客运专线 3 个区段黄土路基的最低含水率分别为 9.0%, 7.5%, 6.1%和 5.6%,均大于 5.3%,由此推断该 4 个场地黄土的最大基质吸力约为 800 kPa。

综上可知,黄土在工作环境下的吸力上限约为 1000 kPa 左右。另一方面,西安曲江原状 Q_3 黄土的缩限含水率是 14.13%,由缩限的定义可知,当含水率小于缩限含水率之后,水分变化亦即吸力变化就不再引起土的体积变形。换言之,做黄土持水特性试验的合理吸力范围为 0~1000 kPa。

膨胀土和红黏土的含水率普遍较高。大多数关于膨胀土和红黏土的文献只有取样地点而没有取样深度,文献[41]的表 3~6 汇总了国内外 17 项水利工程场地膨胀土物性指标,其中含水率分布范围为 19%~33%;该文第二章第一节还指出,南水北调中线工程陶岔渠首层间滑动带的 41 组土样含水率平均值为 38%。文献[40]的表 10.50~10.56 是采用探井或探坑或钻孔取原状土样测定的鄂桂豫陕川滇等地膨胀土和红黏土的含水率等物性指标,地貌包括渠道滑坡、铁路堑坡、平坝、三级阶地和高速公路路基。由上述各表可知,即便是浅表层的膨胀土和红黏土,其含水率也比较高,均超过 20%;除个别地点外,饱和度均超过 80%。多地铁路路堑边坡坡顶处膨胀土的含水率均高于 20%。虽然广西邕江三级阶地膨胀土边坡的第 4 层和第 8 层土的含水率在 17%左右,但全部土层的饱和度都大于 83%,其基质吸力不会太高。还应当指出,工程上对于表层土和浅层土,都要予以挖除、处理、换填或防护(包括植被),而不会直接使用或让其裸露,因而土中的含水率一般不会低于上述诸表所列数值。

图 6 是文献[42]测定的南阳膨胀土(原状和重塑)持水特性曲线。由该图可知,南阳原状膨胀土的含水率在 23%时的基质吸力为 1000 kPa (图 6 (a)),南阳重塑膨胀土的含水率高于 18%时的基质吸力不超过 500 kPa (图 6 (b))。表 2 是文献[26]用压力板仪测定的湖北荆门重塑膨胀土(5 个干密度)的持水特性曲线,当含水率在 20%左右时,不同干密度的重塑膨胀土的基质吸力不超过 1200 kPa。表 3 是文献[29]用滤纸法测定的荆门重塑膨胀土(6 个干密度、14 个初始含水率)的吸力,在含水率为 20 %左右时各干密度对应的基质吸力均在 1500 kPa 左右。由此推断,膨胀土

的基质吸力通常不会超过 1500 kPa。换言之，做膨胀土持水特性试验的合理吸力范围为 0~1500 kPa，而没必要花费很长的时间去测定全吸力范围的完整持水特性曲线。

表 4 是文献[41]汇总的国内 10 个地区膨胀土的收缩特性指标，其中 8 个地区的缩限大于 9 %。仅从变形角度考虑，膨胀土持水特性试验的吸力上限应是缩限对应的吸力。事实上，实际土体中的含水率远远高于缩限，故没有必要把持水特性试验的含水率做到缩限。

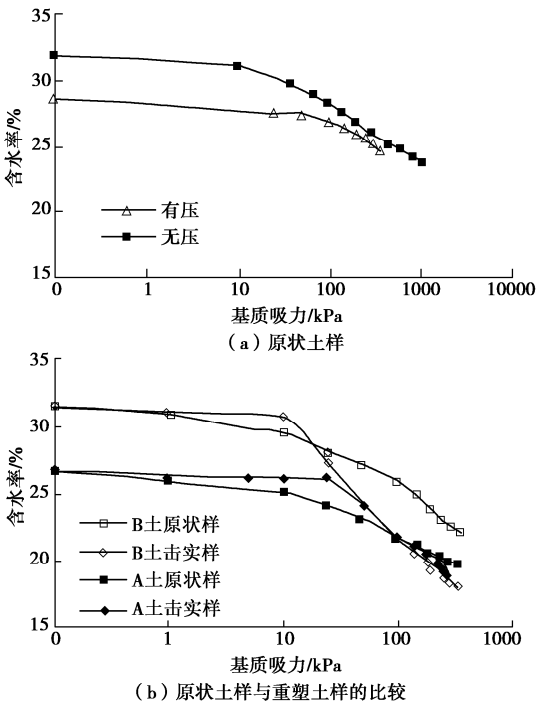


图 6 南阳膨胀土的持水特性曲线^[42]

Fig. 6 Soil-water retention curves of Nanyang expansive soil^[42]
表 2 荆门重塑膨胀土的 SWCC 试验在各级吸力下的质量含水率 (w) ^[28]

Table 2 Mass moisture contents of SWCC tests on remodeling expansive soil in Jingmen under different levels of suction ^[28]						
单位: %						
s / kPa	试样的初始孔隙比e ₀					掺灰土
	0.764	0.771	0.888	0.957	0.964	
0	28.08	28.36	32.65	35.17	35.43	23.93
10	27.91	28.19	32.11	33.60	32.71	23.87
20	27.70	28.00	31.49	32.61	31.43	23.68
40	27.10	27.46	30.83	31.50	30.06	23.51
80	26.06	26.39	29.69	29.63	28.13	22.62
150	24.99	25.28	28.45	27.97	26.63	21.96
300	23.36	23.68	26.64	25.73	24.64	21.26
600	21.67	21.86	24.36	23.37	22.59	20.62
1200	19.33	19.61	21.39	20.82	20.26	19.85

表 3 不同干密度的荆门重塑膨胀土在含水率为 20%左右时的基质吸力^[29]

Table 3 Matrix suctions of Jingmen remodeled expansive soil with different dry densities at moisture content of about 20% ^[29]			
试样压实度/%	干密度/(g·cm ⁻³)	含水率/%	基质吸力/kPa
70	1.30	21.12	1058
75	1.40	21.09	1523
80	1.49	21.59	1423
85	1.58	20.85	1336
90	1.67	19.79	1484
95	1.77	—	—

表 4 中国部分地区膨胀土的收缩特性指标^[41]
Table 4 Shrinkage characteristic indices of expansive soil in some areas of China^[41]

地区	初始含水率/%	干密度/(g·cm ⁻³)	缩限含水率/%	线缩率/%	体缩率/%	收缩系数
河南信阳	23.8	1.58	11.4	5.7	19.4	0.36
安徽合肥	24.5	1.53	12.0	5.3	18.5	0.32
湖北荆门	25.6	1.58	14.0	5.0	15.9	0.51
广西上思	27.5	1.59	7.5	6.5	23.5	0.32
四川简阳	16.5	1.74	14.0	8.4	4.0	0.44
贵州贵阳	32.7	1.42	21.7	4.8	20.0	0.29
云南蒙自	20.0	1.64	9.4	4.1	24.2	0.34
河北邯郸	20.3	1.78	11.8	4.4	14.5	0.48
河南鲁山	29.3	1.67	9.1	3.2	4.9	0.13
河南平顶山	27.8	1.66	8.6	6.4	22.7	0.24

4 结 论

(1) 从现代土力学观点来看，持水特性是非饱和土的本构关系之一。用研究本构关系的观点、理论和方法探索持水特性可提升该领域的研究水平，考虑应力状态影响的广义持水特性曲线和应用边界面模型与内变量方法构建的描述干湿循环引起的滞后效应持水特性曲线就是把持水特性当作本构关系研究的结果。持水特性曲线的作用是描述土中水分与应力张量之间相互依赖的本构关系，它不能代替土的其他本构关系，如应力-应变关系、强度准则、渗水规律、渗气规律、气体状态方程等。

(2) 不同类土、不同地区的土的持水特性曲线的形态差异很大，用现有文献中的任一经验公式都难以描述；如同没有万能的本构模型一样，不可能有描述各种土在不同条件下的持水特性模型；用试验方法确定具体对象的持水特性曲线是有效的可靠途径。

(3) 通过改进测试吸力的技术和试验方法可以缩

短测定持水特性曲线的历时。控制干密度和含水率的持水特性曲线试验(不发生体积变化)仅需测试吸力, 试样不发生干缩或湿胀, 也不必区分增湿过程与脱湿过程; 当有多台套设备时, 可大大缩短试验总历时, 完成一种土的完整持水特性试验只需 10 d 左右。

(4)除了作为高放废物地质库缓冲材料的膨润土等在工作环境下的吸力可高达数百兆帕外, 工程中经常遇到的填土、黄土、膨胀土、红黏土等在工作环境下的吸力不超过 1500 kPa, 而对土的变形和强度影响比较显著的吸力范围就更窄。大量现场土样的含水率表明: 做黄土持水特性试验的合理吸力范围为 0~1000 kPa, 做膨胀土持水特性试验的合理吸力范围为 0~1500 kPa, 没有必要花费很长的时间去测定全吸力范围的完整持水特性曲线。

参考文献:

- [1] FREDLUND D G, RAHARDIO H. Soil Mechanics for Unsaturated Soils[M]. New York: Wiley & His Sons, 1993.
- [2] 陈正汉. 岩土力学的公理化理论体系[J]. 应用数学和力学, 1994, **15**(10): 901-910. (CHEN Zhenghan. An axiomatics of geomechanics[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 1994, **15**(10): 901-910. (in Chinese))
- [3] 陈正汉. 非饱和土与特殊土力学的基本理论研究[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(2): 201-272. (CHEN Zhenghan. On basic theories of unsaturated soils and special soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(2): 201-272. (in Chinese))
- [4] 陈正汉, 郭楠. 非饱和土与特殊土力学及工程应用的研究进展[J]. 岩土力学, 2019, **40**(1): 1-54. (CHEN Zhenghan, GUO Nan. Research progress of unsaturated soil and special soil mechanics and engineering application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, **40**(1): 1-54. (in Chinese))
- [5] 陈正汉. 非饱和土固结的混合物理论[D]. 西安: 陕西机械学院, 1991. (CHEN Zhenghan. Mixture Theory of Unsaturated Soil Consolidation[D]. Xi'an: Shaanxi Mechanical College, 1991. (in Chinese))
- [6] 陈正汉, 谢定义, 刘祖典. 非饱和土固结的混合物理(I)[J]. 应用数学和力学, 1993, **14**(2): 137-150. (CHEN Zheng-han, XIE Ding-yi, LIU Zu-dian. Consolidation theory of unsaturated soil based on the theory of mixture(I)[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 1993, **14**(2): 137-150. (in Chinese))
- [7] 陈正汉, 谢定义, 王永胜. 非饱和土的水气运动规律及其工程性质研究[J]. 岩土工程学报, 1993, **15**(3): 9-20. (CHEN Zhenghan, XIE Dingyi, WANG Yongsheng. Experimental studies of laws of fluid motion, suction and pore pressures in unsaturated soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1993, **15**(3): 9-20. (in Chinese))
- [8] 陈正汉. 重塑非饱和黄土的变形、强度、屈服和水量变化特性[J]. 岩土工程学报, 1999, **21**(1): 82-90. (CHEN Zhenghan. Deformation, strength, yield and moisture change of a remolded unsaturated loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, **21**(1): 82-90. (in Chinese))
- [9] 黄海, 陈正汉, 李刚. 非饱和土在 $p-s$ 平面上屈服轨迹及土-水特征曲线的探讨[J]. 岩土力学, 2000, **21**(4): 316-321. (HUANG Hai, CHEN Zhenghan, LI Gang. A study on yield locus of unsaturated soils on $p-s$ plane and soil-water characteristic curve[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, **21**(4): 316-321. (in Chinese))
- [10] 方祥位, 陈正汉, 申春妮, 等. 剪切对非饱和土土-水特征曲线影响的探讨[J]. 岩土力学, 2004, **25**(9): 1451-1454. (FANG Xiangwei, CHEN Zhenghan, SHEN Chunni, et al. A study on effect of shear on soil-water characteristic curve of an unsaturated soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, **25**(9): 1451-1454. (in Chinese))
- [11] 章峻豪, 陈正汉. 南水北调中线工程安阳段渠坡换填土广义土-水特征曲线的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(增刊 2): 3987-3994. (ZHANG Junhao, CHEN Zhenghan. Experimental study of generalized soil-water characteristic curve of backfill soil from canal slope at Anyang district of middle route of south-to-north water diversion project[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(S2): 3987-3994. (in Chinese))
- [12] 苗强强, 张磊, 陈正汉, 等. 非饱和含黏砂土的广义土-水特征曲线试验研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(1): 102-106, 112. (MIAO Qiangqiang, ZHANG Lei, CHEN Zhenghan, et al. Experimental study of generalized SWCC of unsaturated sand and containing clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(1): 102-106, 112. (in Chinese))
- [13] LI X S. Modelling of hysteresis response for arbitrary wetting/drying paths[J]. Computers and Geotechnics, 2005, **32**(2): 133-137.
- [14] WEI C F, DEWOOLKAR M M. Formulation of capillary hysteresis with internal state variables[J]. Water Resources Research, 2006, **42**(7): 45-94.
- [15] 刘艳, 赵成刚. 土水特征曲线滞后模型的研究[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(3): 399-405. (LIU Yan, ZHAO Chenggang. Hysteresis model for soil-water characteristic

- curves[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(3): 399-405. (in Chinese))
- [16] 徐炎兵, 韦昌富, 陈辉, 等. 任意干湿路径下非饱和岩土介质的土水特征关系模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(5): 1046-1052. (XU Yanbing, WEI Changfu, CHEN Hui, et al. A model of soil-water characteristics for unsaturated geotechnical materials under arbitrary drying-wetting paths[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(5): 1046-1052. (in Chinese))
- [17] CHEN P, WEI C F, MA T T. Analytical model of soil-water characteristics considering the effect of air entrapment[J]. International Journal of Geomechanics, 2015, **15**(6): 04014102
- [18] 陈正汉. 中国土木工程学会第十届土力学及岩土工程学术会议论文集[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2007: 172-194. (CHEN Zheng-han. Proceedings of the 10th China Civil Engineering Society Symposium on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2007: 172-194. (in Chinese))
- [19] FREDLUND D, VANAPALLI S, PUFAHL D E. Predicting the shear strength function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve[C]// Proc 1st Int Conf Unsaturated Soils. Paris, 1995: 63-69.
- [20] FREDLUND D G, XING A Q. Equations for the soil-water characteristic curve[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, **31**(4): 521-532.
- [21] 陈正汉, 扈胜霞, 孙树国, 等. 非饱和土固结仪和直剪仪的研制及应用[J]. 岩土工程学报, 2004, **26**(2): 161-166. (CHEN Zhenghan, HU Shengxia, SUN Shuguo, et al. Development & application of consolidation apparatus and direct shear apparatus for unsaturated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, **26**(2): 161-166. (in Chinese))
- [22] 陈正汉, 周海清, FREDLUND D G. 非饱和土的非线性模型及其应用[J]. 岩土工程学报, 1999, **21**(5): 603-608. (CHEN Zhenghan, ZHOU Haiqing, FREDLUND D G. Nonlinear model for unsaturated soils and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, **21**(5): 603-608. (in Chinese))
- [23] WANG M, KONG L W, ZANG M. Effects of sample dimensions and shapes on measuring soil-water characteristic curves using pressure plate[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2015, **7**(4): 463-468.
- [24] TOLL D, ASQUITH J, FRASER A, et al. Tensiometer techniques for determining soil water retention curves[M]// Unsaturated Soil Mechanics-from Theory to Practice. CRC Press, 2015: 15-22.
- [25] MBONIMPA M, AUBERTIN M, MAQSoud A, et al. Predictive model for the water retention curve of deformable clayey soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, **132**(9): 1121-1132.
- [26] SUITS L D, SHEAHAN T C, PÉRON H, et al. An improved volume measurement for determining soil water retention curves[J]. Geotechnical Testing Journal, 2007, **30**(1): 100167.
- [27] SALAGER S, EL YOUSSEFI M S, SAIX C. Definition and experimental determination of a soil-water retention surface[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2010, **47**(6): 609-622.
- [28] 周葆春, 孔令伟. 考虑体积变化的非饱和膨胀土土水特征[J]. 水利学报, 2011, **42**(10): 1152-1160. (ZHOU Baochun, KONG Lingwei. Effect of volume changes on soil-water characteristics of unsaturated expansive soil[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, **42**(10): 1152-1160. (in Chinese))
- [29] 周葆春, 孔令伟, 梁维云, 等. 压缩过程中非饱和膨胀土体变特征与持水特性的水力耦合效应[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(4): 629-640. (ZHOU Baochun, KONG Lingwei, LIANG Weiyun, et al. Hydro-mechanical coupling effects on volume change and water retention behaviour of unsaturated expansive soils during compression[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(4): 629-640. (in Chinese))
- [30] 邹维列, 张俊峰, 王协群. 脱湿路径下重塑膨胀土的体变修正与土水特征[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(12): 2213-2219. (ZOU Weilie, ZHANG Junfeng, WANG Xiequn. Volume change correction and soil-water characteristics of remodeling expansive soil under dehydration path[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(12): 2213-2219. (in Chinese))
- [31] 周葆春, 张彦钧, 冯冬冬, 等. 荆门非饱和压实膨胀土的吸力特征及其本构方程[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(2): 385-392. (ZHOU Baochun, ZHANG Yanjun, FENG Dongdong, et al. Suction characteristics of Jingmen unsaturated compacted expansive soil and its constitutive formula[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(2): 385-392. (in Chinese))
- [32] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988. (LEI Zhidong. Soil Hydrodynamics[M].

- Beijing: Tsinghua University Press, 1988. (in Chinese))
- [33] 张悦, 叶为民, 王琼, 等. 含盐遗址重塑土的吸力测定及土水特征曲线拟合[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(9): 1661-1669. (ZHANG Yue, YE Weimin, WANG Qiong, et al. Suction measurement and SWRC modelling for reconstituted salt-laden soils in earthen heritages[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(9): 1661-1669. (in Chinese))
- [34] 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 Xiaohui, YU Wei, SHEN Mengfen, et al. Experimental study and curve fitting of soil-water characteristic curve[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(S2): 51-56. (in Chinese))
- [35] TOLL D G. A framework for unsaturated soil behaviour[J]. Géotechnique, 1990, 40(1): 31-44.
- [36] ALONSO E E, GENS A, JOSA A. A constitutive model for partially saturated soils[J]. Géotechnique, 1990, 40(3): 405-430.
- [37] 陈正汉, 王永胜, 谢定义. 非饱和土的有效应力探讨[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(3): 62-69. (CHEN Zhenghan, WANG Yongsheng, XIE Dingyi. Effective stress in unsaturated soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 16(3): 62-69. (in Chinese))
- [38] 秦冰, 陈正汉, 孙发鑫, 等. 高吸力下持水曲线的温度效应及其吸附热力学模型[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(10): 1877-1886. (QIN Bing, CHEN Zhenghan, SUN Faxin, 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))
- [39] 陈正汉, 秦冰. 缓冲/回填材料的热-水-力耦合特性及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2017. (CHEN Zhenghan, QIN Bing. Thermal-Hydraulic-Mechanical Coupling Characteristics of Buffer/Backfill Materials and Its Application[M]. Beijing: Science Press, 2017. (in Chinese))
- [40] 陈正汉. 非饱和土与特殊土力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022. (CHEN Zheng-han. Unsaturated Soils and Special Soil Mechanics[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2022. (in Chinese))
- [41] 刘特洪. 工程建设中的膨胀土问题[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997. (LIU Tehong. Expansive Soil Problem in Engineering Construction[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1997. (in Chinese))
- [42] 刘艳华, 龚壁卫, 苏鸿. 非饱和土的土水特征曲线研究[J]. 工程勘察, 2002, 30(3): 8-11. (LIU Yanhua, GONG Biwei, SU Hong. Study on characteristic curve of soil and water for unsaturated soil[J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 2002, 30(3): 8-11. (in Chinese))

第四届全国交通岩土工程学术研讨会 1 号通知

第四届全国交通岩土工程学术研讨会定于 2023 年 5 月 12—14 日在兰州召开。会议由中国土木工程学会土力学及岩土工程分会主办, 由兰州交通大学、甘肃省土木建筑学会等单位承办。

随着“一带一路”倡议的持续推进、交通强国国家战略的实施, 我国高速铁路、轨道交通、高速公路、城市道路、机场、港口等国家重大交通基础设施的大规模建设和运营均取得了举世瞩目的成就, 交通岩土工程的理论和创新水平正在快速提升, 交通岩土工程工作者为中华民族伟大复兴做出了卓越的贡献。为了给工作在科研、设计、施工、教学各个领域的交通岩土工程工作者提供一个交流平台, 由中国土木工程学会土力学及岩土工程分会交通岩土工程专业委员会发起, 每两年召开一次全国交通岩土工程学术会议。

此次会议是继前三届会议(西南交通大学(2016)、北京交通大学(2018)、东南大学(2020))的又一次交通岩土工程界的盛会。为进一步提高研讨会的学术层次及其影响力, 会议期间, 将邀请国内外专家做特约报告和主题报告, 举办新设备和新技术展览活动, 热忱欢迎全国广大交通岩土工程工作者及岩土工程界专家学者共享盛会。会议议题包括: ①绿色交通设计、建造与运维中的岩土工程问题; ②交通基础设施地基基础的设计、施工、检测、监测和加固; ③交通隧道和地下工程的设计、施工和运营安全; ④路基工程设计、建造与运维中的岩土工程问题; ⑤交通岩土工程减隔震与抗震; ⑥路-桥-隧过渡段; ⑦特殊土工程性质与地基处理; ⑧特殊土地区的交通岩土工程; ⑨交通基础工程环境保护与修复; ⑩岩土工程智能化技术。会议联系人: 蒋代军(13893603618; 微信号同手机号)。

(大会组委会)