基于核磁共振干湿循环影响下土壤斥水性分析

李同海1,赵仕2

(1.中铁十七局集团有限公司,太原 030006; 2.华南理工大学土木与交通学院,广州 510641)

摘 要:为探究干湿循环对土壤斥水性的影响,揭示斥水性随含水率变化内在机理,测定1~3次干湿循环过 程中水滴穿透时间(WDPT)和不同含水率土壤核磁共振(T₂)曲线,建立孔隙水分布与WDPT内在联系。结果表 明,随土壤含水率增加,WDPT值先增后减;相同含水率下,吸湿过程WDPT值略高于脱湿过程;1次循环后, 土壤斥水性出现大幅衰减(减小65%以上)。含水率减小,T₂曲线积分面积和峰值均随之减小;含水率低于17.1% 时,T₂曲线最大值明显减小。研究发现,干湿循环不会改变土壤斥水性对含水率的依赖;给定相对湿度下,孔径 大于临界孔径rc的孔隙水同时开始蒸发,较大孔隙内水首先蒸发;孔隙内"填充气"变化是导致土壤斥水性对含水 率依赖的主要原因。

李同海,赵仕.基于核磁共振干湿循环影响下土壤斥水性分析[J].东北农业大学学报,2021,52(6):63-69.DOI:10.19720/j.cnki. issn.1005-9369.2021.06.007.

Li Tonghai, Zhao Shi. Analysis on soil water repellency under influence of dry-wet cycle based on NMR[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2021, 52(6): 63-69. (in Chinese with English abstract) DOI: 10.19720/j.cnki.issn.1005-9369.2021.06.007.

Analysis on soil water repellency under influence of dry– wet cycle based on NMR/LI Tonghai¹, ZHAO Shi²(1. China Railway 17th Bureau Group Co., Ltd., Taiyuan 030006, China; 2. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: This study explored the effect of dry-wet cycle on soil water repellency, and revealed the internal mechanism of water repellency changing with water contents. The water drop penetration time (WDPT) during 1-3 dry-wet cycle was tested, and the change law of soil water repellency in the process of drying and wetting was analyzed; the T_2 curve of specimen under different water contents in drying process was also measured to establish the internal relationship between pore water distribution and WDPT. The results showed that the WDPT of soil first increased and then decreased with the increase of water content; under the same water content, the WDPT during the moisture absorption process was slightly higher than that during the dehumidification process; the soil water repellency decreased significantly (more than 65%) after one cycle. The integral area and peak value of T_2 curve decreased significantly when the water content; was less than 17.1%. This study found that dry-wet cycle did not change the

基金项目:国家自然科学基金项目(51909095)

作者简介:李同海(1974-),男,高级工程师,研究方向为路基工程及土壤渗流特性。E-mail: yang_jy2016@163.com

dependence of soil water repellency on water content; at a certain relative humidity, the evaporation of water in the pore with pore size larger than r_c occurred simultaneously, but the water in the larger pores finished this evaporation first. The change of "filling gas" was the main reason that caused the dependence of soil water repellency on moisture content.

Key words: dry-wet cycle; soil water repellency; nuclear magnetic resonance(NMR); "filling gas"

土壤斥水性是水分滞留在土壤表面、难以入 渗的现象。地表浅层土壤受自然和人类行为因素 影响导致含水率改变,斥水性表现出明显差异。土 壤斥水性差异会引起土壤中水分分布不均,导致 土壤不均匀变形, 增加地表径流^[1-2]; 斥水性土壤中 还可形成优先流,增加土壤渗流和失稳风险^[3]。接 触角和水滴穿透时间(Water drop penetration time, WDPT)是描述土壤斥水性常用指标。WDPT因测 试程序简单、试验耗时短、可迅速得到土壤斥水 性等特点被广泛应用于学术和工程领域。影响土 壤斥水性有诸多因素,如土粒比重、孔隙结构、 干燥状态、物质组成、自然环境变迁等。Renáta 等发现土壤斥水性程度与土质、气候环境、植被 覆盖程度等密切相关,当斥水性土壤经历一系列 干湿循环后,其斥水性表现出不同变化规律。 Subedi 等认为干湿循环作用导致土壤钙含量变化, 显著影响土壤接触角和渗水性,在水势函数中应 考虑干湿循环的影响^[5]。Laurengo等在石油污染土 渗透性研究中发现,土壤斥水性随干湿循环次数 增加而降低16。我国南方夏季高温多雨, 地表浅层 土壤不可避免经历干湿循环过程。土壤经历干湿 循环后,其他物理力学性质发生显著改变,土颗 粒表面特性也表现明显变化四。经历干湿循环作用 后土壤,其脱湿和吸湿过程中斥水性变化可导致 土壤渗流、不连续变形、威胁工程边坡及其上等 构筑物的安全。土壤斥水性受干湿循环影响变化 规律,受到学术界和工程界广泛关注。

土壤是多孔隙介质,水分入渗通过孔隙实现, 孔隙水分布特征是影响土壤斥水性重要因素。土壤 斥水性对含水率具有依赖性,含水率高土壤常常具 有更好亲水性,而干燥土壤斥水性显著提高^[8]。研 究显示,随含水率增加,土壤斥水性逐渐增大并 达到极值,之后随含水率的增加而降低至消失^[9]。 陈俊英等提出的数学模型对不同土壤斥水性回归 适应性较好,可准确反映斥水性随含水率先升后降 降趋势^[10]。但土壤斥水性随含水率变化呈先升后降 机理仍缺少清晰认识。因此,揭示孔隙水分布于 土壤斥水性内在联系,对多雨地区土壤水分保持和 土体稳定具有重要意义。核磁共振技术广泛应用于 岩土工程领域,可动态监测土壤孔隙水变化,反映 吸湿、脱湿过程孔隙水分布特征,为揭示土壤斥 水性与含水率关系提供新途径。

本研究测试经历1~3次干湿循环后土壤在脱 湿、吸湿过程中WDPT值,分析循环次数与土壤斥 水性关系;基于核磁共振技术,从孔隙水分布角 度揭示土壤斥水性随含水率先升后降的内在机 理。研究结果可为土壤斥水性深入研究和工程方 案制定提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验用土

本研究用土取自贵阳至遵义高速公路扩建项 目K29+870附近,取土深度为地表以下1~3 m。取 土时,剖去地表腐殖土,人工挖取1 m×1 m 正方形 土样,土样为褐色,稍湿,干强度及韧性中等, 切面较光滑,手捏有滑腻感,天然含水率高、可 塑性较强、含有少量铁锰结核和未风化岩石。将 土壤自然晒干并碾碎,去除其中植物根系、有机 物残渣、岩石等杂质。试验中晒干土样过2 mm圆 孔筛,参照土工试验方法标准GB/T50123-2019^[11], 通过室内试验和X 衍射得到该土壤基本物性指标 为:土壤天然含水率43.5%,孔隙度34.8%,液限 57.8%,塑限28.3%,粒径<0.005 mm的土粒占比 46.5%。土壤黏土矿物主要包含高岭土24.39%、伊 利石11.9%、针铁矿13.31%、石英50.4%。

1.2 试验方法

1.2.1 WDPT及核磁共振测试

试验用试样为常规环刀试样(直径 61.8 mm, 高 20.0 mm),如图1所示,为防止金属材料对核磁 共振系统磁场影响,试验采用特制聚四氟乙烯环 刀。采用3个平行试样,以间距为3%设置含水率控 制点。试样脱湿、吸湿达到预定含水率点时,先 称重计算含水率,再作核磁共振测试和WDPT测 试。WDPT是在试样表面放置3个去离子水滴(每 个50μL),记录其完全入渗试样时间,取平均值 作为该含水率下WDPT值。为确保水分在土壤中重 新分配,在脱湿或吸湿到预定含水率后,需经历 密封平衡期,再作斥水性测试。



图 1 测试试样 Fig. 1 Testing specimen

图2中试验步骤包括如下阶段:

A. 取过2 mm筛干燥土壤, 配制含水率约12% 湿土, 用静压法制取干密度1.6 g·cm⁻³的3个试 样。将试样采用抽真空方法饱和, 试样饱和含水 率约47%;

B. 脱湿过程中,湿润试样在恒温恒湿箱(T= 30℃, RH=40%)内干燥 2~3 h;吸湿过程中,采用 喷壶少量喷洒增加试样含水率;达到预定含水率 点后,样品放置在常温保湿缸内密封保存48 h;

C. 使用电子天平称量试样质量并记录(精确到 0.01g), 计算试样含水率;

D. 核磁共振测试,试样表面使用保鲜膜密封 以防止测试过程中水分蒸发;

E.用滴管在试样表面放置3个水滴,秒表记录 3个水滴完全入渗时间;为减少水滴间相互干扰, 水滴间间距>10 mm,且水滴与试样边缘间距> 10 mm;但吸湿过程,水滴放置可导致试样局部润 湿性逆转(该区域局部润湿,试样干燥),这是不 可避免的,这也是WDPT缺点。

F. 重复步骤B至E, 直至样品完全干燥或饱和。

上述测试过程中,试样含水量3%~47%,所有 WDPT测试试样均经3次干湿循环。因测试条件 限制,文中仅测定第1次脱湿路径下试样核磁共振 数据。





1.2.2 核磁共振原理

核磁共振技术作为快速、无损检测技术,被 广泛应用于医学、井水勘探、岩土工程等领域。 本研究利用H质子核磁共振探讨土壤脱湿过程中 孔隙水分布特征。H核磁共振是指H质子在外加磁 场作用下吸收能力发生能级间共振跃迁核, 弛豫 时间则为H质子从高能级状态恢复到初始稳定状 态所用时间。通过H质子自旋轴的弛豫时间 (T_2) 曲 线,可得到样品中H质子数量和偏转后恢复到初 始平衡的顺序^[12]。当土壤孔隙充满水时(饱和状 态), T₂曲线与横轴积分面积代表土壤含水量, T₂ 数值也与土壤孔隙半径存在对应关系。因而,T2曲 线也间接反映土壤中孔隙大小和不同大小所占比 率。弛豫时间T2与孔隙半径关系可用式(1)表 示^[13],其中,ρ₂为常数,为由颗粒表面物理化学性 质决定的表面弛豫强度;r代表孔隙半径;而(S/ V)为孔隙表面积与内部流体体积比值; F。为孔隙 形状因子(对柱状孔, F=2), C为某一常数。

试验所用仪器为苏州纽迈生产的 MiniMR60型 NMR 仪, 共振频率为 23.309 MHz, 磁感应强度为 0.55 T, 线圈直径为 60 mm, 磁体温度为 32.00 ℃。 试验参数如下: 90°脉宽为 17.5 µs, 180°脉宽为 35.0 µs, 采样点数 266 424, 采用频率为 200 kHz, 射频延时为 80 µs, 重复采样等待时间为1 000 ms, 模拟增益为 20, 数字增益为 3, 采样累加次数为 4, 回波时间为 260 µs, 回波个数为4 000。

$$\frac{1}{T_2} \approx \rho_2(\frac{S}{V}) \text{pore} = \frac{\rho_2}{r} F_s = \frac{2}{r} \rho_2 = \frac{C}{r}$$
(1)

2 结果与分析

2.1 脱湿-吸湿过程 WDPT

干湿循环过程为水反复进出土壤孔隙过程, 进水使土壤孔隙膨胀,冲刷土粒表面,而脱湿过程 中孔隙出现一定程度收缩^[3]。土壤孔隙水分布和土粒 表面特性发生改变后,必然导致土壤斥水性差异。 图3描绘1~3次干湿循环下土壤斥水性与含水率ω关 系,图3a为脱湿过程中WDPT与含水率ω变化规律。

如图 3a 所示, 土壤含水率由约47%减小到约 3%, 1~3次脱湿过程中WDPT值均呈先增后减趋 势,WDPT最大值点分布在试样含水率变化区间中 间段(ω=20%~30%)。第1次脱湿过程中,含水率 从46.8%减小到3.5%,WDPT值先从5.9 s增加至 141.6 s,此时ω=25.61%),而后又逐渐减小至 2.68 s;WDPT平均值为51.4 s,最大值为平均值 2.76倍。第2次脱湿过程中,含水率从45.2%减 至约3.1%,WDPT值先由3.9 s增至50.6 s(此时 ω=29.3%),而后又减至6.4 s;WDPT平均值为 21.8 s,最大值为平均值2.32倍。第3次脱湿过程 中,含水率从43%减至5.4%,WDPT值先由2.4 s 增至38.0 s(此时 ω=29.6%),而后又减至6.5 s; WDPT平均值为19.5 s,最大值为平均值1.95倍。 第1次脱湿过程中,试样WDPT值变化范围最大, 土壤斥水性随含水率变化而发生巨大转折。而第 2~3次脱湿过程中,试样WDPT值之间差异显著减 小,随含水率先增后降变化幅度也显著减小,即 土壤斥水性差异降低。图3b试样吸湿过程WDPT 值变化规律与脱湿过程类似。随试样含水率由3% 增至约47%,1~3次吸湿过程土壤斥水性均表现为 先增后减。第1次吸湿过程土壤斥水性变化幅度远 大于后续吸湿过程。

由图3可知,3%≤ω<17%、38%≤ω≤47%段, WDPT值较小,土壤斥水性较弱。当17%≤ω<38% 时,WDPT值较大,土壤斥水性较强。干湿循环对 试样WDPT值存在显著影响,但该影响主要体现在 第1次循环过程。2~3次循环过程中,试样WDPT 值差异小且变化相对平缓。经历不同干湿循环次 数后,不论吸湿还是脱湿过程,处于非饱和状态土 壤斥水性显著高于饱和或者干燥状态;土壤斥水 性对含水率有显著依赖性,与Oekker等研究结果一 致^[8]。可见,非饱和状态为研究土壤斥水性关键, 也是揭示斥水性随含水率变化机理关键。



图3 土壤斥水性与含水率关系

Fig. 3 Relationship between water repellency and water content

2.2 脱湿过程核磁共振

非饱和土 T₂曲线可用于分析孔隙水分布特征,为揭示土壤斥水性随含水率变化内在机理提

供新思路。图4列出试样第1次脱湿过程中不同含 水率控制点T₂曲线。为便于曲线间区分,文中仅 选取6条T₂曲线作分析;图中横坐标为横向弛豫时 间,单位为ms;纵坐标为各弛豫时间对应幅值, 为无量纲量。表1列出图4中各条*T*2曲线特征值及 积分面积,便于对比分析。

由图4、表1可知,随含水率减小, T_2 曲线峰 值逐渐减小, T_2 曲线与横坐标轴积分面积也逐渐减 小;当 ω =46.8%时, T_2 曲线积分面积为120.9 ms, 当 ω =3.1%时, T_2 曲线积分面积为20.3 ms; T_2 曲线 积分面积变化规律,与试样含水率变化相对应。 不同含水率下 T_2 曲线最小值保持不变(约0.01 ms), 但含水率越高, T_2 曲线最大值也越大(1~3 ms)。研 究证实, T_2 值与孔径之间存在对应关系;对不同土 壤,二者之间转换系数不同^[14-15]。

图4中 T_2 值跨越3个数量级,说明试样孔隙结构复杂。弛豫时间 $T_2 \le 0.1 \text{ ms}$ 对应孔隙水较少,大部分孔隙水弛豫时间为0.1~3 ms。当试样含水率从46.8%降至17.1%时, T_2 曲线最大值略有减小(2.912 ms减至2.280 ms)、最小值几乎不改变,但曲线积分面积逐渐减小,其减小部分主要发生在 $T_2 \ge 0.1 \text{ ms}$ 段。试样含水率从17.1%降至8.2%过程中, T_2 曲线最大值(2.28 ms减至1.04 ms)和积分面积相应减小,其减小部分也主要发生在 $T_2 \ge 0.1 \text{ ms}$

段。试样含水率从8.2%降至3.1%过程中,T₂曲线 积分面积减小,最大值、最小值未发生明显变 化。故而,文章定义T₂=0.1 ms对应的孔为临界孔 径r_c,即脱湿现象主要由于孔径大于r_c的孔隙内的 水逐渐蒸发。



图4 航座过程12四线

Fig. 4 T₂ curve during drying process

特性参数 Characteristic parameter	含水率(%) Water content					
	46.8	37.5	26.3	17.1	8.2	3.1
峰值T ₂ (ms) Peak value	0.424	0.231	0.142	0.142	0.136	0.11
最大幅值 Maximum amplitude	102.5	88.9	77.9	59.8	35.8	28.7
最大 T_2 值(ms) Maximum T_2 value	2.912	2.76	2.690	2.280	1.040	1.01
最小T2值(ms) Minimum T2 value	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
T ₂ 曲线积分面积(ms) Integral area of T ₂ curve	120.9	101.7	82.7	65.7	28.4	20.3

表1 不同含水率下 T_2 曲线特性参数 Table 1 Characteristic parameters of T_2 curve with various water content

3 讨 论

3.1 循环次数对土壤斥水性影响

在有限次干湿循环影响下,土壤中微孔隙量 几乎保持不变,而中孔隙和大孔隙量随循环次数 增加而增加^[16-17]。对非饱和土而言,Young-Laplace 方程(式2)是描述气-固-液三相相互关系的经典理 论。其中, σ 为液体表面张力; θ 为土壤固-液接 触角, ΔP 为气-液界面两侧压力差值,即基质吸 力; r 为孔隙半径。在土水特征曲线中, ΔP 、r与 土壤进气值相关。研究发现,经历有限次干湿循环后,土壤孔隙结构发生显著变化,土壤斥水性也随之改变。孔隙孔径越大,其对应进气值越小,即较小压力即可将孔隙水排出;同理,大孔隙阻碍水滴下渗阻力也越小,即水滴在重力作用下更易渗入大孔隙,使得大孔隙具有较低WDPT值(见图3)。干湿循环对斥水性影响主要体现在第1次循环作用,因经历1次干缩过程后试样孔隙发生显著变化(如微裂隙和损伤),而后续吸湿、脱湿过程均在1次干缩基础上完成。

(2)

$$\Delta P = \frac{2\sigma\cos\theta}{r}$$

另外,吸湿过程中WDPT值略高于脱湿过程WDPT值,这是因为土壤含水率相同,但吸湿、脱湿过程中孔隙水形态存在差异。通过喷洒改变环境相对湿度使土壤吸湿,较小孔隙先发生凝结,直到环境相对湿度不再升高,完成小孔隙凝结,所以吸湿稳定时试样含水率通常小于饱和含水率。脱湿过程与之相反,较大孔隙先完成蒸发过程。因而,吸湿、脱湿过程含水率相同时,土壤孔隙水形态明显不同,这也是造成干湿循环中WDPT出现明显区别原因之一^[18-19]。

3.2 斥水性与土壤含水率关系

饱和土中不同孔径孔隙均处于满水状态,对 脱湿、吸湿过程的非饱和土而言,部分孔隙处于 非满水状态。土壤吸湿过程中 T_2 曲线与脱湿过程 类似,本研究仅对脱湿过程作详细讨论。如图4所 示,试样从饱和状态脱湿至含水率约17.1%过程 中,孔隙水(T_2 曲线积分面积)明显减少。但可观测 到仅弛豫时间 $T_2 \ge 0.1$ ms的孔隙内水发生部分蒸 发,而 $T_2 < 0.1$ ms的孔隙内水尚未开始蒸发,即孔 隙水蒸发现象先发生在较大孔隙内。在含水率 $\omega \ge$ 17.1%段, T_2 曲线最大值并未明显减小,说明土壤 中不同孔径的孔中均含水,但非满水状态。在 8.2% $\le \omega < 17.1$ %段, T_2 曲线最大值明显减小,即部 分孔隙内水已蒸发完全,为无水孔。

图5为土壤脱湿过程中孔隙水变化示意图。根据压汞法对孔径的分类^[20-21],可将土壤孔隙分为微孔(<2 nm),介孔(2~50 nm),大孔(>50 nm)。本研究假定图5中不同大小的3种孔分布代表大孔、介孔和微孔。

由图5可知,在A阶段,3类孔隙均处于满水状 态,此时水滴无入渗阻力,WDPT值较小,与图3中 47%>ω≥38%段相对应。试样脱湿到达B阶段时, 试样含水率约38%> $\omega \ge 17\%$, $r \ge r_0$ (即 $T_2 \ge 0.1 \text{ ms}$) 的部分大孔和介孔已处于非满水状态,这些孔内 液面与孔口之间存在一定量"填充气",与图4中孔 隙水T2曲线变化规律一致。此阶段WDPT值明显更 大,表现为土壤斥水性更强。水滴入渗时,"填充 气"无法及时排出而对水滴形成阻力。其中,试样 含水率从约38%减至约25%过程,大孔、介孔中水 逐渐减少,孔隙内"填充气"增多,对入渗水滴的阻 力逐渐增大, 故该段 WDPT 值随含水率减小而逐渐 增大。在25%>ω≥17%段,土壤中部分大孔径毛管 水已蒸发完; 而介孔中仍存在"填充气", 此时"填 充气"对入渗水滴的阻力随蒸发而逐渐减小,此阶 段WDPT值随含水率减小而减小。试样继续脱湿至 C阶段, 仅微孔中还存有少量水; 大孔和介孔成为无 水孔,这部分孔隙内不存在难以排除的"填充气" 阻碍水滴入渗、WDPT值较低、土壤斥水性较小。





4 结 论

a. 自然干湿循环作用不会改变土壤斥水性对 含水率的依赖性。不同循环次数下,土壤斥水性 均呈随含水率增加而先增后减。第1次干湿循环对 土壤斥水性影响最大,后续增加循环次数未对斥 水性产生明显影响。

b. 随试样含水率减小,核磁共振 T₂曲线积分 面积相应减小,部分孔隙处于非满水状态;含水 率减小到某一临界值时,T₂曲线最大值降低,部分 大孔隙变为无水孔。在本研究脱湿条件下,孔径 大于 $r_c(T_2 \ge 0.1 \text{ ms})$ 的孔隙水蒸发同时进行,但大 孔隙内的水先蒸发。

c. 非饱和土孔隙内存在的"填充气"难以及时排出,阻碍水滴入渗;"填充气"含量随含水率增加 而先增后减,这也是土壤斥水性随含水率先增后 减的主要原因。

d. 本研究结果可对土壤水分保持和相关工程 建设提供一定参考,但仅对特定土壤开展研究, 且T₂曲线数据不够丰富,结果普适性仍有待进一 步探索。

[参考文献]

- Czachor H, Doerr S H, Lichner L. Water retention of repellent and subcritical repellent soils: New insights from model and experimental investigations[J]. Journal of Hydrology, 2010, 380: 104– 111.
- [2] Bombino G, Andiloro S, Folino A, et al. Short-term effects of olive oil mill wastewater application on soil water repellency[J].
 Agricultural Water Management, 2021, 244: 1–10.
- [3] 李进前, 王起才, 张戎令, 等. 膨胀土增湿过程中膨胀规律的试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2018(3): 86-94.
- [4] Renáta S, Massimo I, Lubomir L, et al. Impact of climate, soil properties and grassland cover on soil water repellency[J]. Geoderma, 2021, 383: 1–15.
- [5] Subedi S, Kawamoto K, Komatsu T, et al. Contact angles of waterrepellent porous media inferred by tensiometer-TDR probe measurement under controlled wetting and drying cycles[J]. Soil Science Society of America Journal, 2013, 27: 1944–1954.
- [6] Lourengo S D N, Wakefield C F, Morley C P, et al. Wettability decay in an oil-contaminated waste-mineral mixture with drywet cycles[J]. Environmental Earth Science, 2015, 74: 2563-2569.
- [7] 杨松,吴珺华,黄剑峰.表面张力与接触角对膨胀土干缩开裂 影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(9): 1645-1652.
- [8] Dekker L W, Ritsema C J . Wetting patterns and moisture variabil-

ity in water repellent Dutch soils[J]. Journal of Hydrology, 2000, (231-232): 148-164 .

- [9] 李毅, 商艳玲, 李振华, 等. 土壤斥水性研究进展[J]. 农业机械 学报, 2012, 43(1): 68-75.
- [10] 陈俊英,吴普特,张智韬,等.土壤斥水性对含水率的响应模型 研究[J].农业机械学报,2012,43(1):63-67,82.
- [11] GB/T50123-2019. 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版 社, 2019.
- [12] Conte P, Stefano C D, Ferro V, et al. Assessing hydrological connectivity inside a soil by fast-field-cycling nuclear magnetic resonance relaxometry and its link to sediment delivery processes[J]. Environmental Earth Sciences, 2017, 76: 526.
- [13] 刘勇健,李彰明,郭凌峰,等.基于核磁共振技术的软土三轴剪 切微观孔隙特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(8): 1924-1932.
- [14] Testamanti M N, Rezaee R. Determination of NMR T₂ cut-off for clay bound water in shales: A case study of carynginia formation, Perth Basin, Western Australia[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2017, 149: 497–503.
- [15] 范宜仁,刘建宇,葛新民,等.基于核磁共振双截止值的致密砂 岩渗透率评价新方法[J].地球物理学报,2018,61(4):1628-1637.
- [16] 叶万军,吴云涛,杨更社,等.干湿循环作用下古土壤细微观结构及宏观力学性能变化规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(10): 2126-2137.
- [17] 宋勇军,张磊涛,任建喜,等.基于核磁共振技术的弱胶结砂岩
 干湿循环损伤特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(4):
 825-831.
- [18] 杨松,马泽慧,王磊,等.躺滴法测量干湿循环条件下土壤固-液接触角的滞后特性[J].农业工程学报,2018,34(2):114-119.
- [19] 杨松, 王磊, 周明凯, 等. 干湿循环对土壤斥水性的影响[J]. 土 壤, 2019, 51(6): 1196-1201.
- [20] 中国国家标准化管理委员会.GB/T 21650.1-2008 压汞法和气体吸附法测定固体材料孔径分布和孔隙度,第1部分:压汞法
 [S].北京,中国标准出版社,2008.
- [21] 王小虎, 彭宇, 吉克尼都, 等. 压汞后水泥基材料的孔隙结构变 化[J]. 硅酸盐学报, 2019, 47(11): 1521–1526.