

DOI: 10.11779/CJGE20221426

基于 NMR 的非饱和土相对渗透系数快速预测新方法

陶高梁^{1,2}, 彭寅杰¹, 陈 银¹, 肖衡林^{*1}, 罗晨晨¹, 钟楚珩¹, 雷 达¹

(1. 湖北工业大学河湖健康智慧感知与生态修复教育部重点实验室, 湖北 武汉 430068; 2. 武昌理工学院智能建造学院, 湖北 武汉 430223)

摘要: 非饱和土的渗透系数作为研究非饱和土中水分运移的重要参数, 直接测量方法原理简明但试样尺寸较大, 耗时较长; 土-水特征曲线(SWCC)间接预测方法由于需要获取土-水特征曲线, 同样较为耗时, 工作量较大。为此, 结合核磁共振(NMR)理论与渗流理论提出了不同孔径孔隙通道渗透系数与弛豫时间的关系, 通过对不同大小孔隙通道渗透系数进行累加, 提出了基于核磁共振的饱和/非饱和土渗透系数预测模型和快速预测方法。为验证模型的合理性, 以湖南黏土为研究对象, 进行了不同初始孔隙比试样脱湿、吸湿过程以及饱和状态下的 95 次核磁共振试验, 获取相应的 NMR 曲线, 采用瞬时剖面法获取不同初始孔隙比试样非饱和相对渗透系数, 并与该模型预测值对比。研究发现: 利用脱湿、吸湿过程不同含水率下 NMR 曲线以及饱和状态的 NMR 曲线均具有较好的预测效果, 但基于饱和状态下试样的 NMR 曲线预测效果相对最好, 测量成本和耗时也最小, 因此建议采用饱和状态试样 NMR 曲线直接预测非饱和相对渗透系数。

关键词: 核磁共振; 饱和/非饱和渗透系数; 孔隙通道; 弛豫时间

中图分类号: TU443 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2024)03-0470-10

作者简介: 陶高梁(1979—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事非饱和土工程性质及边坡生态修复的研究工作。

E-mail: tgl1979@126.com。

A new fast prediction method for relative permeability coefficient of unsaturated soils based on NMR

TAO Gaoliang^{1,2}, PENG Yinjie¹, CHEN Yin¹, XIAO Henglin¹, LUO Chenchen¹, ZHONG Chuheng¹, LEI Da¹

(1. Key Laboratory of Intelligent Health Perception and Ecological Restoration of Rivers and Lakes, Ministry of Education, Hubei

University of Technology, Wuhan 430068, China; 2. School of Intelligent Construction, Wuchang University of Technology, Wuhan
430223, China)

Abstract: The permeability coefficient of unsaturated soils is a particularly important parameter to study the moisture migration in unsaturated soils. The direct measurement methods have a straightforward principle, but they require larger sample sizes and longer testing time. The indirect prediction methods based on the soil-water characteristic curve (SWCC) also demand significant time and effort due to the necessity of acquiring the SWCC data. Thus, this paper combines the nuclear magnetic resonance (NMR) theory with the seepage theory to establish the relationship between the permeability coefficient and the relaxation time of pore channels with different pore sizes. Through the accumulation of permeability coefficients of different pore channels, an NMR-based prediction model and a rapid prediction method for the permeability coefficients of saturated/unsaturated soils are proposed. To verify the rationality of the model, taking the Hunan clay as the research object, 95 times NMR tests are conducted on desorption, absorption and saturated samples with different initial void ratios to obtain the corresponding NMR curves. The unsaturated relative permeability of samples with different void ratios is gained by the instantaneous profile method and compared with the predicted value of the model. The study shows that the NMR curves of desorption, absorption and saturated samples all possess good prediction effect, while the saturated state NMR curves have the best prediction accuracy with the lowest measurement cost and the shortest time consumption. Therefore, it is suggested to use the NMR curves of saturated samples to predict the unsaturated relative permeability coefficient directly.

Key words: nuclear magnetic resonance; saturated/
unsaturated permeability coefficient; pore channel;
relaxation time

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51978249, 52078195); 国家
自然科学基金联合基金项目(U22A20232)

收稿日期: 2022-11-18

*通信作者(E-mail: xiaohenglin_0909@163.com)

0 引言

非饱和渗透系数是非饱和土水力特性研究的重要参数之一^[1],它是基质吸力(或体积含水量)的函数,变化范围可达数个数量级。目前,室内试验测定非饱和渗透系数,耗时费力,尤其是在高吸力阶段,测量周期较长。因此,学界建立了不同的模型来间接预测非饱和土的渗透系数。这些模型大致可分为经验模型^[2]、宏观模型^[3]和统计模型^[4-5]等。经验模型和宏观模型一般采用相对简单的数学公式对渗透系数进行预测,需要较多试验数据以获得最佳拟合参数,不便于复杂条件下的非饱和土水力特性理论分析。统计模型往往利用土-水特征曲线(SWCC)确定非饱和土渗透系数,是目前比较流行的方法,常见的基本统计模型有Childs Collis-George(CCG)模型^[4],Mualem^[5],Burdine模型^[6]等,许多学者对模型进行了修正,以便更准确地预测非饱和渗透系数。Van Genuchten(VG)^[7]建立了土-水特征曲线模型,并结合Burdine和Mualem提出的传导率模型建立了相对渗透系数方程。Fredlund等^[8]提出了一种新的SWCC模型,并结合CCG模型推导了整个吸力范围内的相对渗透系数函数方程。陶高梁等^[9-10]将SWCC视为反映土体不同尺寸孔隙渗透通道的间接指标,建立了考虑微观渗透通道起始水力梯度的饱和黏性土非线性渗透模型;基于渗透通道分形特性,建立了不同水力梯度下的饱和黏性土非线性渗透分形新模型。

除了基于SWCC模型的方法外,陈正汉等^[11]、姚志华等^[12]结合自主设计的原状黄土取样设备对原状和重塑黄土的渗水特性进行了一维水平土柱入渗试验,形成了成套的直接取样测量方法,该方法过程简明,原理清晰,所得结果较为可靠。

值得一提的是,直接测量方法一般试样尺寸较大,试验过程耗时相对较长,工作量较大;对于基于SWCC的间接预测方法,由于需要获得SWCC,同样需要较长的测量时间与较大的工作量。因此,提出一种可快速准确预测非饱和渗透系数的方法具有重要的实际意义和工程应用价值。

核磁共振(NMR)技术是一种灵敏度高、测试速度快、无破坏性的先进水分探测技术,核磁共振技术可应用于岩土工程领域中土料水分和孔隙变化的准确测量,具有测量时间快的优点,需要指出的是,NMR方法设备昂贵,相关成本较高。

目前利用NMR技术探究土壤中孔隙水分布和迁移的微观机理的研究已有一定基础^[13]。在多孔介质渗透特性预测方面,Seevers^[14]推导了基于弛豫时间原理

的砂岩饱和渗透率方程。在此基础上,Kleinberg等^[15]提出了Schlumberger-Doll Research (SDR)方程,并采用平均弛豫时间作为预测岩土饱和渗透系数的参数。然而,现有的NMR试验经典模型主要通过连通孔隙的宏观总体积来描述岩石的渗透率,并未充分考虑核磁共振中横向弛豫时间分布几何形态等信息。综上所述,上述模型大多依赖于经验模型来推导渗透率函数,适用范围较小,并且预测对象都是饱和土,对于非饱和土渗透系数的预测较少,而本文的研究重点是通过NMR技术提出一种能够快速预测非饱和渗透系数的新方法。

结合NMR理论和渗流理论,本文提出了一种基于NMR曲线快速预测饱和/非饱和渗透系数的方法。为验证该方法的准确性,以湖南黏土为例,制备不同初始孔隙比土样,采用瞬时剖面法得到了非饱和渗透系数与体积含水量的关系;利用核磁共振技术测量了不同初始孔隙比试样脱湿及加湿过程的NMR曲线,分析了基于试样不同状态下NMR曲线的非饱和渗透系数预测结果,并与已有基于SWCC的预测模型预测结果进行了比较。

1 基于NMR曲线的饱和/非饱和渗透系数新模型

假设土样由不同孔径的连通孔隙通道组成,土料中水的渗流运动皆发生于这些连通的孔隙通道中。饱和土的渗透系数即为海量连通孔隙通道饱和渗透系数的叠加值,可表示为^[16]

$$k_s = \frac{Q}{AJ} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\gamma d_i^2}{32\mu} \times A_i J}{AJ} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\gamma d_i^2}{32\mu} \times A_i}{A} \quad (1)$$

式中: Q 为单位时间流量(cm^3/s); J 为水力梯度(cm); A 为分析土样的横截面总面积(cm^2); μ 为黏度($\text{Pa}\cdot\text{s}$); γ 为水的重度(N/m^3); d_i (cm)为第*i*级孔隙通道的直径; A_i (cm^2)为第*i*级孔隙通道的横截面积。

假设第*i*级孔隙通道的实际长度与土样长*l*(cm)之比为 p_i ,则孔隙通道实际长度可记为 $p_i l$ 。若第*i*级孔隙通道的所含水分对应的体积含水量为 θ_i ,则相应的水分总体积为 $\theta_i V_T$,其中 V_T (m^3)为土样的总体积。则第*i*级孔隙通道截面积为

$$A_i = \frac{\theta_i V_T}{p_i l} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)中可得

$$k_s = \sum_{i=1}^n \frac{\gamma d_i^2}{32\mu} \times \frac{\theta_i V_T}{p_i l A} = \sum_{i=1}^n \frac{\gamma d_i^2}{32\mu} \times \frac{\theta_i}{p_i} \quad (3)$$

通过核磁共振(NMR)技术可获得土样的弛豫时

间 (T_2) 分布曲线, 该曲线反映了信号幅度和弛豫时间的对应关系。已有研究^[17]表明, 弛豫时间 T_2 与土料孔隙特性直接相关:

$$\frac{1}{T_2} \approx \rho_2 \frac{S}{V} = \frac{\lambda \rho_2}{d} \quad . \quad (4)$$

式中: S , V 分别为水分所处孔隙的表面积 (cm^2) 与体积 (cm^3); ρ_2 为横向弛豫率 (Hz), 其与土颗粒表面的物理化学性质有关; d 为孔隙直径 (cm), 与式(3) 中 d_i 都表示孔径, λ 为与孔隙形状相关的因子, 柱状孔隙为 4, 球形孔隙为 6。

将式(4) 简化后可得

$$d = \lambda \rho_2 T_2 \quad . \quad (5)$$

由上式可知, 横向弛豫时间 T_2 与孔隙直径 d 成正比, 因此弛豫时间 T_2 分布曲线实际上反应了孔隙分布特性。将 T_2 分布曲线的横坐标从右至左依次划分为 n , $n-1$, $n-2$, …, 2 级, 1 级, 假设大小相近的第 i 级孔隙组成连续孔隙通道, 其等效孔径为 d_i (n 级孔隙最大、1 级孔隙最小), 通过标定 T_2 分布曲线总信号幅度为土样总体积含水量, 可得到该级通道对应的体积含水量 θ_i , 如图 1 所示, 图中编号表示了孔隙通道的分级方式。

将式(5) 代入式(3), 得到

$$k_s = \sum_{i=1}^n \frac{\gamma \lambda^2 \rho_2^2 \theta_i T_{2i}^2}{32 \mu p_i} \quad . \quad (6)$$

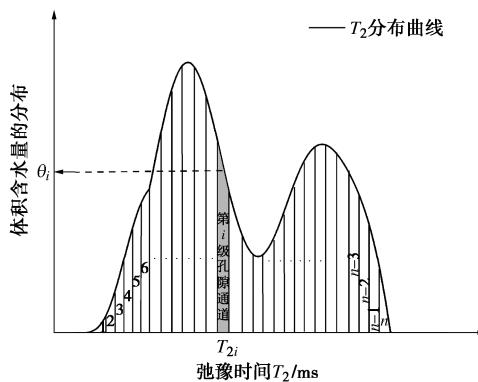


图 1 孔隙通道分级示意图

Fig. 1 Schematic diagram of classification of pore channels

陶高梁等^[16]认为对于同一种土而言, p_i 可假设为常数, 于是上式可简化为

$$k_s = \sum_{i=1}^n k_c \theta_i T_{2i}^2 \quad . \quad (7)$$

式中: $k_c = \gamma \lambda^2 \rho_2^2 / (32 \mu p_i)$, 对于同一种土为常数。

假设总孔隙通道分为 n 级, 现只有 $1 \sim m$ 级通道

表 1 不同初始孔隙比试样的饱和渗透系数 (20°C)

Table 1 Saturated permeability coefficients of soil samples with different initial void ratios (20°C)

初始孔隙比	1.12	1.04	0.97	0.90	0.84
渗透系数 $k_s / (\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	7.72×10^{-4}	4.15×10^{-4}	2.49×10^{-4}	1.73×10^{-4}	7.63×10^{-5}

充满水 ($m < n$), 此时试样总体积含水量为 θ ($\theta < \theta_s$, θ_s 为试样饱和体积含水量), 根据式(7) 可得到此时非饱和渗透系数 $k(\theta)$:

$$k(\theta) = \sum_{i=1}^m k_c \theta_i T_{2i}^2 \quad . \quad (8)$$

结合式(7), (8), 非饱和相对渗透系数 k_r 可以表示为

$$k_r = \sum_{i=1}^m \theta_i T_{2i}^2 / \sum_{i=1}^n \theta_i T_{2i}^2 \quad . \quad (9)$$

综上所述, 基于 NMR 曲线, 本文建立的饱和土渗透系数预测模型如(7)式所示, 建立的非饱和土绝对渗透系数和相对渗透系数模型分别如式(8), (9)所示。

2 湖南黏土饱和/非饱和渗透试验与 NMR 试验

2.1 饱和土渗透试验

本试验研究对象为湖南邵阳某地非饱和黏性土, 属于原生黏土经过再次搬运堆积形成的次生黏土, 土粒相对质量密度为 2.76, 液限 w_L 为 46.3%, 塑限 w_p 为 27.8%。

将土料风干后碾碎, 过 2 mm 圆孔筛, 配置含水率一定的土料, 选用直径为 45 mm, 高度为 2 mm 的环刀制样, 制备初始孔隙比为 1.12, 1.04, 0.97, 0.90, 0.84 的试样, 抽真空饱和, 采用变水头法测量其饱和和渗透系数。为提高试验精度, 经多次重复试验取得平均值, 进行温度修正后, 得到 20°C 条件下不同初始孔隙比土样的饱和渗透系数^[18-19], 如表 1 所示。

2.2 非饱和土渗透试验

采用瞬时剖面法测量非饱和渗透系数。试验装置为课题组自主设计的有机玻璃桶, 直径 23 cm, 高 1 m, 沿桶周均匀钻打五列竖向排列的圆形孔, 孔与孔之间的间距为 5 cm, 直径为 1 cm, 并用 A、B、C、D、E 进行标记。试验开始前将这些小孔封闭以防漏水, 本试验采用土仍为 2.1 节所述湖南黏土。在该试验的准备阶段, 配置含水率为 19% 的土样待用, 待水分迁移均匀后复测含水率, 采用特制击实器分层击实, 并在土柱顶部铺上 8 cm 厚的细砂层, 随后从土柱顶部持续加水 20 min, 共计 1500 mL, 使水分在整个界面下渗均匀, 观察湿润锋动态变化特点; 分不同时间间隔于打好的孔中取土烘干以实测 A、B、C、D、E 列不同深度

表 2 脱湿及吸湿过程 NMR 试验方案及其对应的试样含水率
Table 2 Moisture contents of samples corresponding to NMR tests of desorption and absorption process

孔隙比	脱湿过程					吸湿过程				
	1.12	1.04	0.97	0.90	0.84	1.12	1.04	0.97	0.90	0.84
体积含水量/%	53.16	52.35	50.39	49.18	48.36	19.85	20.61	21.38	22.14	22.91
	46.49	45.62	43.69	42.62	41.91	22.87	23.45	24.36	24.48	25.62
	40.89	40.16	38.44	36.74	36.53	29.17	26.43	27.15	27.49	28.07
	36.49	35.59	34.38	32.58	32.33	29.77	29.85	30.30	30.01	30.84
	36.15	35.21	34.08	32.23	31.98	32.75	32.85	33.28	32.70	33.65
	30.67	29.09	28.10	26.74	26.75	36.50	36.38	36.34	35.44	36.36
	29.69	28.05	27.13	25.69	25.62	40.57	39.62	39.40	38.21	39.23
	25.62	23.92	23.25	22.07	21.90	43.33	42.63	42.30	40.86	41.78
	14.35	13.64	14.36	13.17	14.13	46.72	45.56	45.26	43.50	44.52
	11.91	11.64	12.22	11.49	12.00					

土样的含水率。结合所测试样的土-水特征曲线^[18], 计算得到非饱和渗透系数和体积含水量的关系^[18-19]。

将图 2 中非饱和渗透系数实测值除以表 1 中饱和渗透系数实测值, 得到非饱和相对渗透系数实测值并用于后续验证。值得指出, 瞬态剖面法试验中, 上部土料以脱湿为主, 下部土料以吸湿为主, 研究表明土料脱湿与吸湿过程非饱和渗透系数存在一定差异, 但相对于含水率的影响, 该因素可以忽略不计^[8]。故一般情况下本文不考虑非饱和土渗透系数的滞回效应。

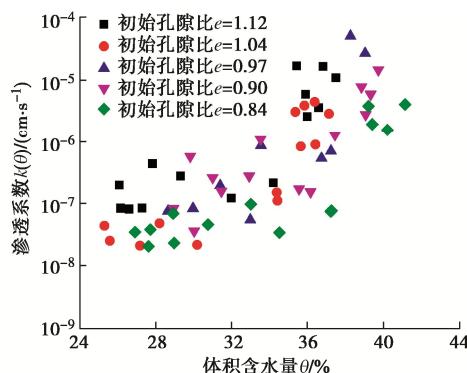


图 2 湖南红黏土非饱和渗透系数实测数据

Fig. 2 Measured data of unsaturated permeability coefficient of Hunan clay

2.3 核磁共振试验

(1) 试验设备及原理

本文核磁共振试验于中科院武汉岩土所进行, 所用仪器为苏州纽迈公司研发的 PQ-001 低磁场核磁共振仪。该试验过程中, 试样置于试管中, 其有效测试范围是 $60 \text{ mm} \times \Phi 60 \text{ mm}$ 。

核磁共振(NMR)的信号来源主要为氢质子, 氢质子越多, 表明含水率越大, 反之则越低。因此通过信号量定标的方法, 该技术可以用来测量物质中水的质量。NMR 通过测定土样弛豫时间与信号强度的关系, 计算峰面积, 进而获得土样的水分尺度分布及孔隙分布特性。为了消除磁体磁场的非均匀性对 T_2 测量的影响, 运用 NMR 测量分析软件及 CPMG 序列采集

样品 T_2 衰减曲线, 运用反演软件得到 NMR 试验数据。

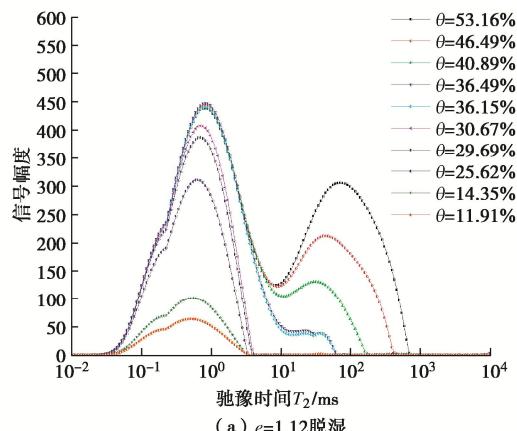
(2) 试验方案

本试验同样采用 2.1 节所述湖南黏土, 制作两组平行试样, 每组试样分别包含初始孔隙比为 1.12, 1.04, 0.97, 0.90, 0.84 的 5 个试样, 用于脱湿与吸湿试验, 分别模拟上层土料脱湿与下层土料吸湿过程。脱湿过程中, 对饱和试样进行称重并记录, 将不同初始孔隙比试样放在小铝盒中, 自然风干。开始时, 需每小时一次对试样进行称重, 避免结果差异过大。土样脱水速度逐渐变慢后, 可逐渐增大测量间隔。吸湿过程中, 将初始与饱和含水率的间隔分为十级, 每级之间的差相同以确定每级加湿目标含水率。由初始含水率开始, 用滴水球分级向试样加水, 密封 72 h 使水分均匀分布, 最终使每个试样达到该初始含水率下的饱和含水率。利用核磁共振测试系统分别测定不同初始孔隙比土样在吸湿和脱湿过程中不同含水率试验的 NMR 曲线, NMR 试验对应试样的含水率如表 2 所示, NMR 试验共计 95 次。

(3) 试验结果

a) 不同初始孔隙比试样脱湿过程 NMR 曲线

按上节试验方案进行脱湿过程的核磁共振试验, 获得不同初始孔隙比核磁共振试验反演后获得的核磁共振曲线, 由于篇幅限制, 本节选用 $e=1.12$ 与 $e=0.84$ 两种初始孔隙比结果作为代表, 如图 3 所示。



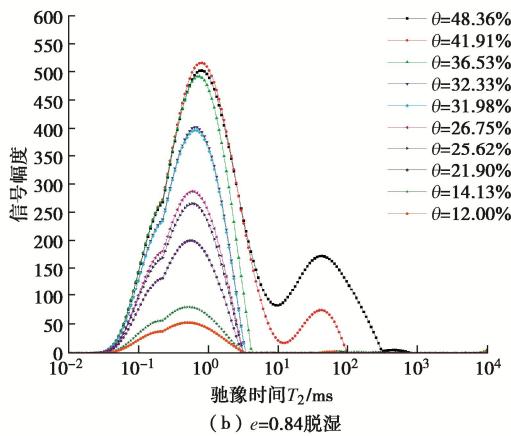


图 3 脱湿过程中核磁共振分布曲线试验数据

Fig. 3 Experimental data of NMR distribution curves during desorption process

由图 3 可知, 从饱和含水率到残余含水率过程中, 曲线所围成的峰面积逐渐减小, 表明含水率逐渐减少。不同初始孔隙比试样的 NMR 曲线变化规律存在相似之处, 即均存在两个峰值, 第一个峰值在 0.5~0.8 ms 处, 第二个峰值在 30~80 ms 处。在脱湿过程中, 随着含水率的降低, 第二峰逐渐消失, 说明在脱湿过程前期, 大孔隙优先排水; 而后第一峰值逐渐降低, 表明在脱湿过程后期以小孔隙排水为主。

b) 不同初始孔隙比试样吸湿过程 NMR 曲线

按上节试验方案进行吸湿过程的核磁共振试验, 同样以 $e=1.12$ 与 $e=0.84$ 两种初始孔隙比反演后获得的核磁共振曲线为代表, 如图 4 所示。

可以看出, 与脱湿过程类似, 不同初始孔隙比的 NMR 曲线所包围的峰面积随着含水率的增加而增加, 不同初始孔隙比试样的 NMR 曲线同样有两个峰值, 且第一个峰值的位置与脱湿过程大致相同, 第二峰值点在 20~30 ms。随着含水率的增加, 第一峰值逐渐升高; 然而不同初始孔隙比试样的 NMR 曲线在后五级吸湿过程中, 其曲线峰值几乎不变。第二峰在前期吸湿过程中并未出现, 直到含水率增加至较大含水率时, 峰值略有起势, 之后随含水率上升逐渐升高。这一试验结果表明, 在吸湿过程中, 水分优先进入小孔隙, 由于小孔隙数量远多于大孔隙, 因此小孔隙含水率总和大于大孔隙。NMR 曲线表现为: 第一峰面积明显大于第二峰面积, 随着初始孔隙比的减小, 大孔隙体积压缩量高于小孔隙, 使得二者间差值增大。

c) 不同初始孔隙比试样饱和 NMR 曲线

图 5 为不同初始孔隙比下饱和试样的核磁共振反演曲线。

随着初始孔隙比的减小, NMR 曲线所围成的总面积逐渐减小, 即饱和土样的含水率减少。饱和试样的 NMR 曲线同样有两个峰值, 大约分别位于 0.8 ms 和 30~50 ms。随着初始孔隙比的减小, 第二峰峰面

积明显减小, 而第一峰峰面积略有增加。上述现象表明, 随着土样初始孔隙比的降低, 大孔隙体积急剧减小, 导致孔隙总体积减小, 孔隙水质量随之减少。

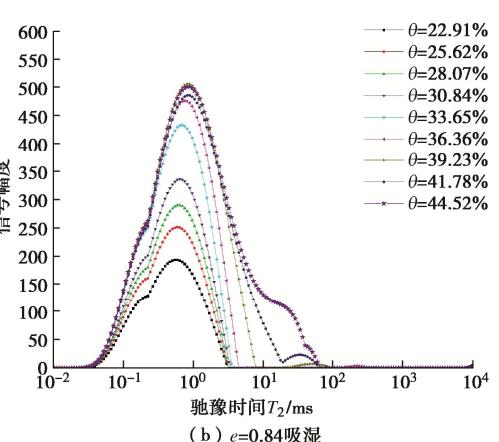
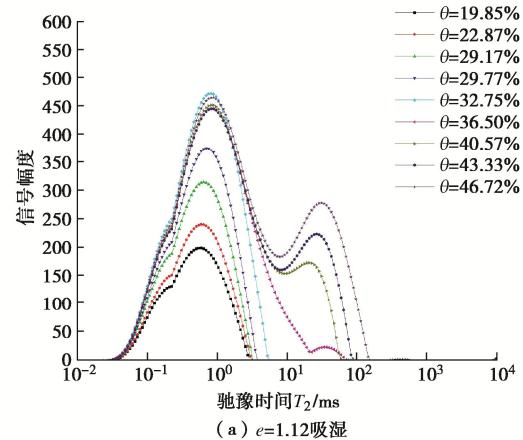


图 4 吸湿过程中核磁共振分布曲线试验数据

Fig. 4 Experimental data of NMR distribution curves in absorption process

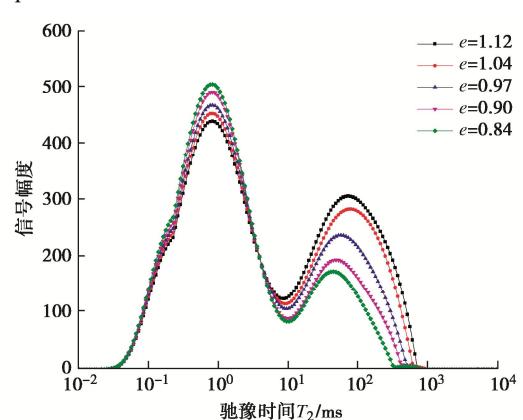


图 5 饱和状态试样 NMR 曲线

Fig. 5 NMR curves under saturated state

3 NMR 非饱和渗透系数模型验证

利用 NMR 试验预测渗透系数, 关键是通过弛豫时间 T_2 分布曲线获得各孔隙通道对应的含水率。将不同初始孔隙比试样的总含水率除以各自的总信号幅度便可确定不同初始孔隙比试样中单位信号幅度对应的含水率, 随后便可将各弛豫时间 T_{2i} 对应的信号幅度转

变为相应的体积含水量 θ_i 。

将图5中不同初始孔隙比试样NMR曲线的纵坐标分别求和, 得到总信号幅度, 随后将不同初始孔隙比试样的饱和含水率分别除以相对应的总信号幅度, 得到单位信号幅度对应的含水率, 信号幅度与单位信号幅度对应的含水率的乘积即为每个纵坐标对应的含水率, 如此便将每级横向弛豫时间 T_{2i} 对应的信号幅度转换为对应 θ_i 。基于式(7), 将每级横向弛豫时间 T_{2i} 平方后乘以对应 θ_i 求和, 便得到 $\sum_{i=1}^n \theta_i T_{2i}^2$, 将其作为横坐标, 表1的饱和渗透系数实测值作为纵坐标进行线性拟合, 设置截距为0, 结果如图6所示。

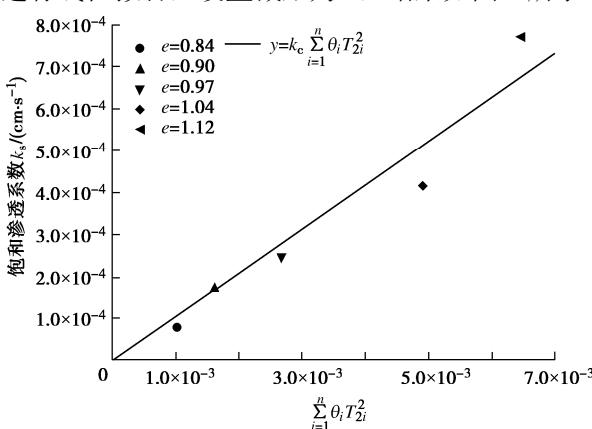


图6 不同初始孔隙比湖南黏性土 k_c 线性拟合

Fig. 6 Linear fitting of k_c of Hunan clay with different initial void ratios

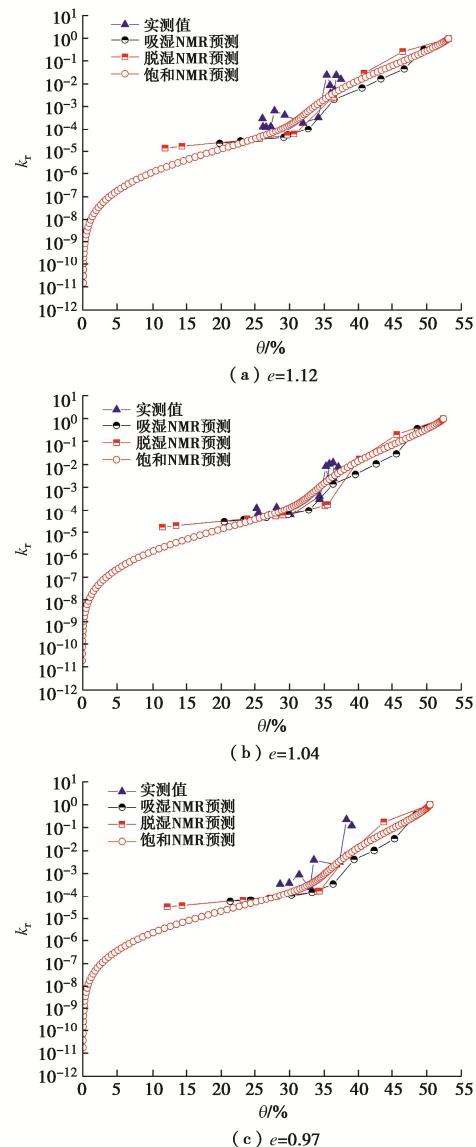
对于湖南黏土, 其计算结果 $k_c=0.1046 \text{ cm/s}^3$, 均方根误差为 7.151×10^{-5} , 相关系数为 0.9311, 说明拟合结果良好, k_c 对于同种类土样来说可视为定值。图6证明了式(7)的合理性, 式(9)是基于式(7)推导而来, 因而证明了式(9)的理论基础是科学的。

利用脱湿、吸湿过程及饱和试样的NMR曲线, 基于式(9)分别预测非饱和相对渗透系数。值得说明的是, 本文为了准确刻画土料脱、吸湿路径不同含水率状态水分分布特性, 共进行了95次核磁共振试验, 在利用式(9)预测非饱和相对渗透系数时, 计算方法有3种, 即: 吸湿NMR曲线预测方法、脱湿NMR曲线预测方法和饱和NMR曲线预测方法。3种方法的具体预测计算过程分别如下:

(a) 对于脱湿、吸湿核磁共振方法而言, 分母部分 $\sum_{i=1}^n \theta_i T_{2i}^2$ 按照土料饱和状态NMR曲线(图5)进行计算, 采取的方法与图6中横坐标的获取方式一致, 分子部分 $\sum_{i=1}^m \theta_i T_{2i}^2$ 的计算方法与分母相同, 只不过需要分别选取非饱和相对渗透系数对应含水率的NMR曲线(图3与图4)计算得到的 θ_i 和 T_{2i} 。

(b) 对于饱和NMR曲线预测方法, 同样是利用式(9)进行计算, 分母 $\sum_{i=1}^n \theta_i T_{2i}^2$ 仍然按照饱和状态的NMR曲线进行同样的计算, 不同的是, 在计算分子 $\sum_{i=1}^m \theta_i T_{2i}^2$ 时, 假设土料排水为大孔先排出, 再排小孔的水(图3脱湿NMR曲线也证明了这一现象), 因此在计算某一特征含水率 θ 对应的非饱和相对渗透系数时, 以饱和状态NMR曲线为基础, 如图1所示, 根据NMR数据所得的 T_2 驰豫时间分布将孔隙通道分为 $1 \sim n$ 级, 若 θ 值与第 $1 \sim i$ 级孔隙的累计体积含水量相等(或处于第 $1 \sim (i-1)$ 级孔隙的累计体积含水量与第 $1 \sim i$ 级孔隙的累计体积含水量之间), 则分子 $\sum_{i=1}^m \theta_i T_{2i}^2$ 计算时只计算饱和NMR曲线 $1 \sim i$ 级孔隙的对应数值, 如此便得到利用饱和NMR曲线的不同特征含水率下的非饱和相对渗透系数预测值。

将脱湿、吸湿及饱和状态NMR曲线的非饱和相对渗透系数式(9)预测值和实测值进行比较, 见图7。



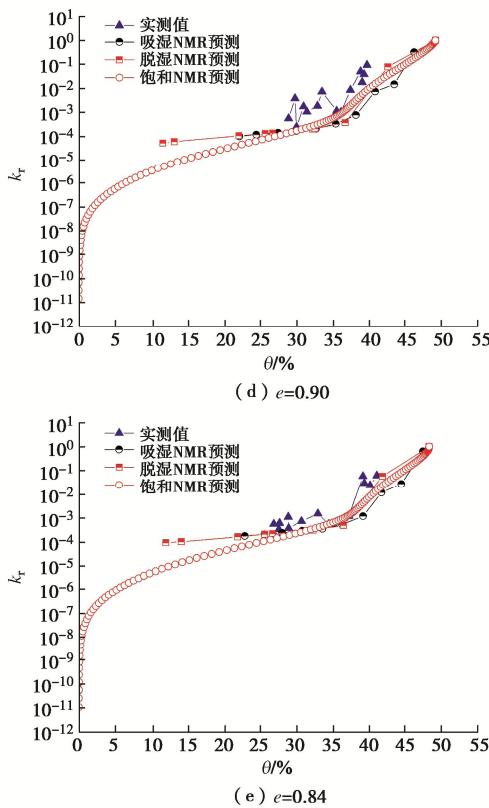


图 7 式(9)非饱和渗透系数预测值与实测值对比

Fig. 7 Comparison between predicted values from three kinds of NMR curves and experimental results

由图 7 可知, 基于脱湿、吸湿过程及饱和状态 NMR 预测值整体上与实测值基本吻合, 吸湿和脱湿过程 NMR 曲线预测值整体低于实测值。其中, 当含水率大于 35% 时, 吸湿过程 NMR 曲线预测误差最大, 其预测值低于实测值、脱湿过程 NMR 曲线预测值和饱和 NMR 曲线预测值; 当含水率达到 35% 左右时, 脱湿过程 NMR 曲线预测值要低于实测值和饱和状态 NMR 曲线预测值, 并与吸湿过程 NMR 曲线预测值相近, 与实测值相差较远, 此时饱和状态 NMR 曲线预测值更接近实测值。整体上看, 饱和状态 NMR 曲线预测值误差最小, 其预测值与实测值总体较为吻合, 尤其在初始孔隙比为 1.04 时基本重合。

在含水率大于 35% 时, 瞬态剖面法中土料一般处于上部土体脱湿过程中, 因此脱湿过程 NMR 预测方法所得误差较小。在吸湿过程中, 滴水球滴入试样中的水分不能完全被试样吸收, 部分水分会在空气中挥发; 而在密封迁移水分的过程中, 部分水分会残留这密封膜上, 导致试样的实际含水率偏小。在脱湿过程中, 随着含水率的降低, 试样慢慢收缩, 逐渐与环刀脱离, 试验过程中需要对试样进行频繁称重, 导致部分土颗粒脱落, 形成质量误差。对于饱和状态 NMR 曲线预测方法而言, 该方法并没有上述试验操作过程, 因此避免了试验操作带来的各项误差, 对于其深层次

的机理原因, 有待进一步深入研究与分析。

4 分析与讨论

4.1 核磁共振曲线缺级的影响

由 2.3 节(3) 中的 T_2 分布曲线可知, 较为密实的饱和试样及低含水率的非饱和试样容易出现孔隙水含量缺级, 如图 8 所示, 连续 NMR 曲线出现中断的现象被称为缺级。

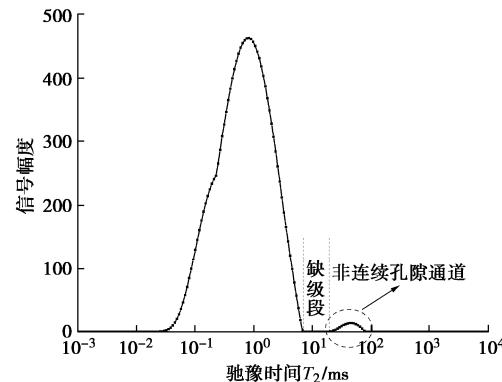
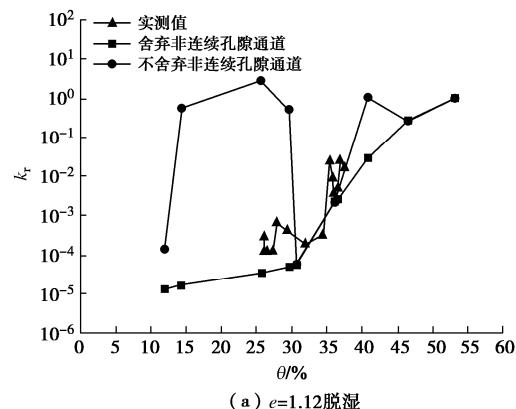


图 8 核磁共振曲线缺级示意图

Fig. 8 Schematic diagram of missing grade of NMR curves

此时, 大孔隙水分总含量较少, 大孔隙间很难形成直接的联通孔隙, 需借道小孔隙形成联通孔隙通道, 因此连通孔隙通道的等效孔径由小孔隙孔径控制。本文将这部分水分所对应的孔隙通道称为“非连续孔隙通道”, 其对土样的渗透系数不起控制作用。若按照式(7)~(9)计算, 会产生较大误差, 应舍弃这些数据。图 9 分别分析了在上述 $e=1.12$ 试样中, 脱湿 NMR 曲线和吸湿 NMR 曲线预测非饱和相对渗透系数时, NMR 曲线缺级的影响。

可以明显看出, 若不舍弃非连续孔隙通道(NMR 曲线上缺级部分)的数据, 预测值将非常不稳定, 并且从 10^{-5} 至 10^2 数量级之间变化, 总体上远远偏离实测值; 当舍弃非连续孔隙通道数据时, 预测结果均处于 10^{-4} ~ 10^0 数量级区间, 与实测值吻合较好。因此在模型验证部分, 非连续孔隙通道数据, 本文均予以舍弃。



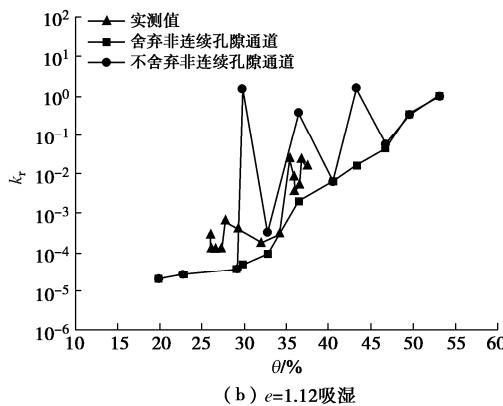


图 9 NMR 曲线缺级对脱湿和吸湿过程非饱和渗透系数预测的影响

Fig. 9 Effects of lack of level in NMR curves on predicted results during desorption and absorption processes

4.2 脱湿、吸湿及饱和状态 NMR 曲线预测方法的比较

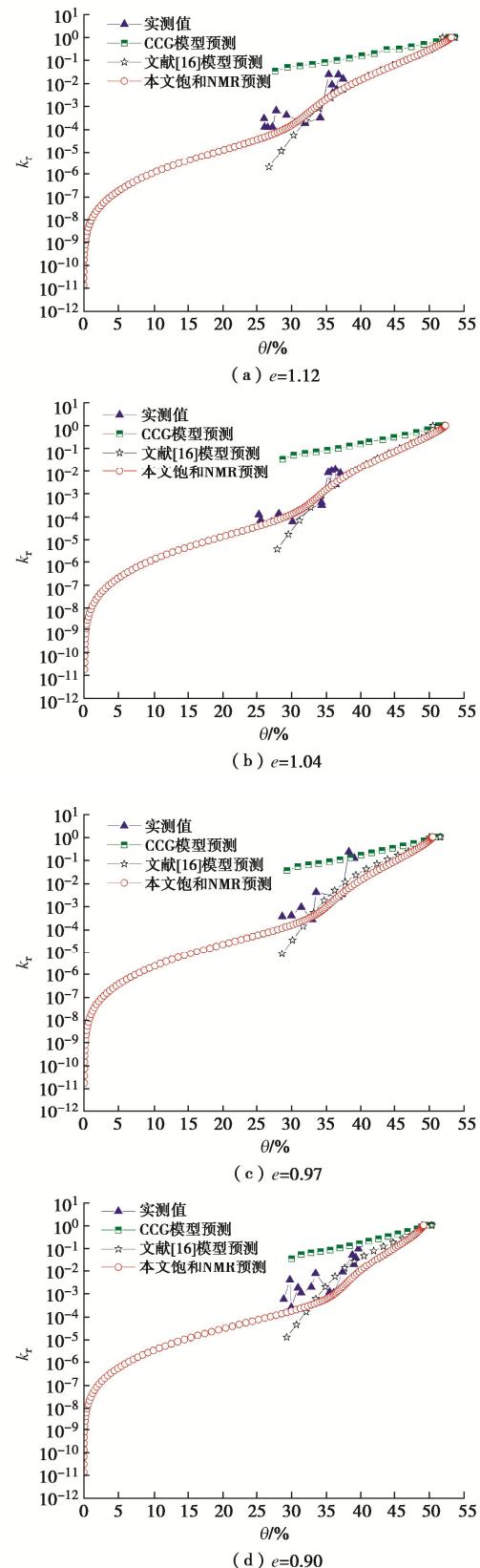
非饱和渗透系数可通过脱湿、吸湿和饱和试样的 NMR 曲线来预测。虽然这 3 种情况下的预测值都与试验值吻合较好，但整体上来看基于饱和状态下的 NMR 曲线总体预测效果更好。另一方面，采用脱湿或吸湿过程的 NMR 曲线对某一含水率条件下的非饱和渗透系数进行预测时，需要先对相应含水率试样进行 NMR 试验测量相应 NMR 曲线，预测不同含水率下的非饱和渗透系数则需要进行多次试验，试验周期长，工作量大，成本高；而饱和 NMR 曲线预测方法仅需要一次核磁共振试验便可预测全含水率区间的所有非饱和相对渗透系数，其工作量和成本远低于其他两种方法。因此，本文建议采用饱和 NMR 曲线直接预测饱和/非饱和渗透系数。

4.3 NMR 曲线预测方法与已有方法对比

目前为止，基于土-水特征曲线 (SWCC) 预测非饱和渗透系数是最常用的方法，然而，SWCC 本身测量周期较长，获取全吸力范围的试验数据较为困难，不利于实际工程应用。值得一提的是，核磁共振 (NMR) 方法具有快速方便的优点，值得进一步研究。前文已对 NMR 方法的有效性进行了论证，其中饱和 NMR 曲线预测方法是最值得推广的方法。为进一步比较 SWCC 预测方法与 NMR 预测方法，本文选取了两种 SWCC 预测方法：CCG (Childs Collis-George) 模型和文献[16]模型，对湖南黏土非饱和相对渗透系数进行预测。图 10 给出了饱和 NMR 预测法、CCG 模型预测法和文献[16]模型预测法结果与非饱和相对渗透系数实测值。

由图 10 可知，CCG 模型预测值均高于实测值，且预测误差较大，土样含水率越小，预测误差越大，当含水率接近 30% 时，预测值偏离较大，可见 CCG

模型对湖南黏土适用性不佳；在含水率高于 35% 时，文献[16]与 NMR 预测方法预测结果接近，且与实测值吻合较好，而在体积含水量低于 35% 时，文献[16]模型预测值远低于实测值，而 NMR 预测方法仍具有较好预测效果。



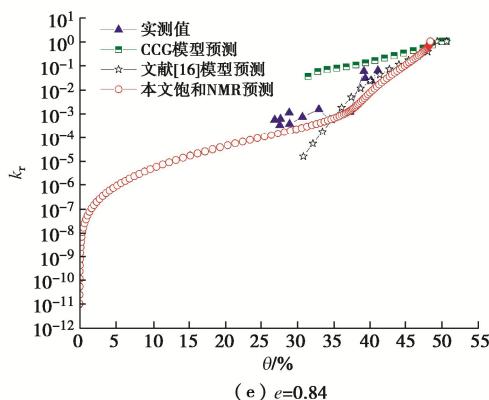


图 10 NMR 预测方法与已有 SWCC 预测方法对比

Fig. 10 Comparison of prediction methods based on NMR curves and SWCCs

本文提出的饱和 NMR 曲线预测方法能够快速与较为准确地预测湖南黏土的非饱和相对渗透系数,但对于其他土类的适用性仍有待验证。同时,对存在缺级现象的土料,直接应用时误差可能较大,应舍弃缺级部分。值得一提的是,在应用式(9)预测非饱和相对渗透系数时不需要获得 k_c ,若需要应用式(7)或式(8)获得非饱和/饱和(绝对)渗透系数,需要对不同初始孔隙比的试样进行多次饱和渗透试验与核磁共振试验以确定 k_c ,增加了试验的工作量。此外,由图 10 可以看出,SWCC 预测方法(CCG、文献[16]模型)无法给出低含水率区间的非饱和相对渗透系数预测结果,其原因在于,SWCC 通常由压力板仪测得,一般无法给出高基质吸力(即低含水率)区间的实测结果,而饱和 NMR 预测方法可以同时给出全含水率范围内的渗透系数预测结果。尽管如此,饱和 NMR 预测方法在低含水率区间的预测效果仍需进一步验证。

5 结 论

结合核磁共振(NMR)理论和渗流理论建立了基于核磁共振曲线的饱和/非饱和渗透系数预测模型。为验证该方法的合理性,以湖南黏土为研究对象,进行了渗透试验及核磁共振试验,利用试验数据验证了该模型的合理性,得到以下 4 点结论。

(1)首次提出了通过核磁共振曲线直接预测饱和/非饱和渗透系数的模型(式(7)~(9)),并结合湖南黏土的饱和/非饱和渗透系数实测值进行了验证,证明该模型可靠有效。

(2)脱湿、吸湿及饱和 NMR 曲线均能较好预测湖南黏土非饱和相对渗透系数,其中饱和 NMR 曲线预测效果最佳。此外,饱和 NMR 曲线预测方法具有成本低、工作量小、速度更快等优点,本文建议采用饱和 NMR 曲线预测方法预测非饱和渗透系数。

(3)对于缺级的 NMR 曲线,非连续孔隙通道数据对预测结果具有较大影响,计算时应舍弃 NMR 曲线缺级之后的大孔隙试验数据,即“非连续孔隙通道”数据。

(4)采用 CCG 模型、文献[16]模型两种基于土-水特征曲线的预测方法对湖南黏土非饱和渗透系数进行了预测,并与本文提出的饱和 NMR 曲线预测方法的预测结果、湖南黏土非饱和渗透系数实测结果进行对比,发现本文提出的饱和 NMR 法的预测结果与实测值吻合更好。

参 考 文 献:

- [1] 孙德安. 非饱和土的水力和力学特性及其弹塑性描述[J]. 岩土力学, 2009, 30(11): 3217-3231. (SUN Dean. Hydro-mechanical behaviours of unsaturated soils and their elastoplastic modelling[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(11): 3217-3231. (in Chinese))
- [2] PHILIP J R. Linearized unsteady multidimensional infiltration[J]. Water Resources Research, 1986, 22(12): 1717-1727.
- [3] BROOKS R H, COREY A T. Hydraulic properties of porous media[J]. Transactions of the ASAE, 1964, 7(1): 0026-0028.
- [4] CHILDS E C, COLLIS-GEORGE N. The permeability of porous materials[J]. Proceedings of the Royal Society of London Series A Mathematical and Physical Sciences, 1950, 201(1066): 392-405.
- [5] MUALEM Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media[J]. Water Resources Research, 1976, 12(3): 513-522.
- [6] BURDINE N T. Relative permeability calculations from pore size distribution data[J]. Journal of Petroleum Technology, 1953, 5(3): 71-78.
- [7] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5): 892-898.
- [8] FREDLUND D G, XING A Q, HUANG S Y. Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31(4): 533-546.
- [9] TAO G L, HUANG Z, XIAO H L, et al. A new nonlinear seepage model for clay soil considering the initial hydraulic gradient of microscopic seepage channels[J]. Computers and Geotechnics, 2023, 154: 105179.

- [10] TAO G L, PENG P, CHEN Q S, et al. A new fractal model for nonlinear seepage of saturated clay considering the initial hydraulic gradient of microscopic seepage channels[J]. Journal of Hydrology, 2023, **625**: 130055.
- [11] 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))
- [12] 姚志华, 陈正汉, 黄雪峰, 等. 非饱和原状和重塑 Q3 黄土渗水特性研究[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(6): 1020-1027. (YAO Zhihua, CHEN Zhenghan, Huang Xuefeng, et al. Hydraulic conductivity of unsaturated undisturbed and remolded Q3 loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(6): 1020-1027. (in Chinese))
- [13] 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 Zhenghan. Mechanics for Unsaturated and Special Soils[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2022. (in Chinese))
- [14] SEEVERS D O. A nuclear magnetic method for determining the permeability of sandstones[C]// Proc, SPWLA 7th Annual Logging Symposium. Tulsa: Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts, 1996.
- [15] KLEINBERG R L, STRALEY, KENYON W E, et al. Nuclear magnetic resonance of rocks: T1 vs. T2[C]// Proc, SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Houston: Society of Petroleum Engineers, 1993.
- [16] 陶高梁, 孔令伟. 基于微观孔隙通道的饱和/非饱和土渗透系数模型及其应用[J]. 水利学报, 2017, **48**(6): 702-709. (TAO Gaoliang, KONG Lingwei. A model for determining the permeability coefficient of saturated and unsaturated soils based on micro pore channel and its application[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, **48**(6): 702-709. (in Chinese))
- [17] JAEGER F, SHCHEGOLIKHINA A, AS V H, et al. Proton NMR relaxometry as a useful tool to evaluate swelling processes in peat soils[J]. The Open Magnetic Resonance Journal, 2010, **3**: 27-45.
- [18] 陶高梁, 吴小康, 甘世朝, 等. 不同初始孔隙比下非饱和黏土渗透性试验研究及模型预测[J]. 岩土力学, 2019, **40**(5): 1761-1770, 1777. (TAO Gaoliang, WU Xiaokang, GAN Shichao, et al. Experimental study and model prediction of permeability coefficient of unsaturated clay with different initial void ratios[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, **40**(5): 1761-1770, 1777. (in Chinese))
- [19] TAO G L, ZHU X L, CAI J C, et al. A fractal approach for predicting unsaturated hydraulic conductivity of deformable clay[J]. Geofluids, 2019, 8013851.