

DOI:10.11918/202406033

增湿过程花岗岩残积土微观结构演变规律

赵艳龙^{1,2,3},冯文凯^{1,2,3},易小宇^{1,2,3},白慧林⁴,李双权¹,赵家琛¹

(1. 地质灾害防治与地质环境保护全国重点实验室(成都理工大学),成都 610059;

2. 自然资源部丘陵山地地质灾害防治重点实验室,福州 350002;

3. 福建省地质灾害重点实验室,福州 350002;4. 四川公路工程咨询监理有限公司,成都 610041)

摘要:为探明花岗岩残积土在增湿过程中微观结构变化特征,采用电镜扫描试验,通过PCAS软件分析土体非饱和-饱和状态下孔隙变化,实现孔隙结构的定量表征,并通过核磁共振试验分析土体非饱和-饱和状态的 T_2 曲线,进一步分析其三维分形维度特征。研究表明:非饱和状态下,随着含水率的增加,整体呈现较小孔隙数量减少、而较大孔隙增多的趋势,小的团粒在此过程中吸纳粗颗粒扩大形成较大团粒;达到饱和状态后,团粒解体,呈现相反的发展趋势;基于横向弛豫时间(T_2)可将孔隙分为团粒孔隙、粒间孔隙、微裂隙3类,其中粒间孔隙受孔隙水影响最为显著,团粒孔隙和微裂隙受孔隙水影响则较弱;三维结构分形维度随含水率提高而呈现降低趋势,并与含水率具有指数函数关系。对花岗岩残积土增湿过程中微观结构变化规律的研究为分析花岗岩残积土群发性滑坡的启动机理提供理论依据,通过监测土体含水率变化可预判孔隙结构演化阶段,结合分形维度模型可建立边坡稳定性评价指标,为闽粤丘陵区花岗岩残积土滑坡预警提供了关键判据。

关键词:花岗岩残积土;微观结构;扫描电镜;核磁共振;分形维度

中图分类号: TU43

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2025)07-0132-09

Microstructural changes of granite residual soil during humidification process

ZHAO Yanlong^{1,2,3}, FENG Wenkai^{1,2,3}, YI Xiaoyu^{1,2,3}, BAI Huilin⁴, LI Shuangquan¹, ZHAO Jiachen¹

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection(Chengdu University of Technology), Chengdu 610059, China; 2. Key Laboratory of Geological Hazard Prevention and Control in Hilly and Mountainous Areas, Ministry of Natural Resources, Fuzhou 350002, China; 3. Key Laboratory of Geological Hazards in Fujian Province, Fuzhou 350002, China; 4. Sichuan Highway Engineering Consulting and Supervision Co., Ltd., Chengdu 610041, China)

Abstract: In order to explore the characteristics of microstructural changes of granite residual soil during wetting, the electron microscope scanning test was used to analyze the pore changes of the soil under unsaturated-saturated state by PCAS software to achieve quantitative characterization of the pore structure, and the three-dimensional fractal dimension characteristics were further analyzed by analyzing the T_2 of the soil under unsaturated-saturated state by nuclear magnetic resonance test. The research results show that under unsaturated state, with the increase of water content, the number of smaller pores decreases and the number of larger pores increases. In this process, small aggregates absorb coarse particles to expand and form larger aggregates; after reaching the saturated state, the aggregates disintegrate and show the opposite development trend; reaching the saturated state. Based on the transverse relaxation time (T_2), the pores can be divided into three categories: aggregate pores, intergranular pores, and microcracks. Among them, intergranular pores are most significantly affected by pore water, while aggregate pores and microcracks are less affected by pore water; the three-dimensional structural fractal dimension shows a decreasing trend with the increase of water content, and has an exponential function relationship with the water content. The study on the change law of microstructure during the wetting process of granite residual soil provides a theoretical basis for analyzing the initiation mechanism of mass landslides of granite residual soil. The microstructure evolution stage can be predicted by monitoring the changes in soil moisture content. The slope stability evaluation index can be established by combining the fractal dimension model, which provides a key criterion for early warning of granite residual soil landslides in the hilly areas of Fujian and Guangdong.

Keywords: granite residual soil; microstructure; scanning electron microscopy; nuclear magnetic resonance; fractal dimension

收稿日期: 2024-06-14; 录用日期: 2024-08-01; 网络首发日期: 2024-11-22

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.t.20241122.0919.002>

基金项目: 国家自然科学基金(U2005205); 自然资源部丘陵山地地质灾害防治重点实验室(福建省地质灾害重点实验室)开放基金(FJKLGH2024K005)

作者简介: 赵艳龙(2000—),男,硕士研究生;冯文凯(1974—),男,教授,博士生导师

通信作者: 冯文凯, fengwenkai@cdu.cn

中国东南沿海地区广泛分布花岗岩地层,仅闽、粤两省分布的花岗岩面积就占到全国总面积的30%~40%^[1]。受温暖湿润的亚热带海洋性季风气候影响,岩体风化作用强烈,漫长的地质演化过程中形成了厚度较大、分布广泛的花岗岩残积层,作为母岩风化的产物,花岗岩残积土的矿物成分除保留部分抗风化能力强的石英、长石外,富含亲水性较强的次生黏土矿物^[2]。由于陆地与海洋气候差异,东南沿海地区台风、热带风暴、局部强对流气候现象突出且频繁,时常出现短时强降雨、极端暴雨,引起土体含水率短时突变,导致花岗岩地区频繁发生群发性滑坡灾害^[3]。滑坡的变形破坏与花岗岩残积土的非饱和-饱和过程联系紧密,揭示增湿过程土体微观结构演变规律有助于揭示花岗岩残积土群发性滑坡的启动机理,对该地区的防灾减灾工作具有重要指导意义。

土体的微观结构是土体的一个重要质量特性,土体的宏观物理力学性质很大程度上受到其微观结构的影响和控制。目前,土体微观结构特征的研究常用的技术手段有计算机图像分析计算、电镜扫描技术、核磁共振等技术。文献[4]利用扫描电子显微镜(SEM)发现孔隙度较低、破坏程度较低的黄色砂岩往往表现为双锥破坏,孔隙较小,穿晶裂缝较多;文献[5]利用X射线计算机断层扫描(CT)分析了放置在有机玻璃柱中的松散土(饼)干湿路径中的裂隙演化过程;文献[6]采用核磁共振技术检测固化盐渍土的微观特征,讨论了强度成因的微观特征机制;文献[7]利用核磁共振和扫描电镜相结合,从微观角度揭示了固化砂土的固结演化过程;文献[8]利用电镜扫描和核磁共振技术分析膨胀土石灰-火山灰改良前后的孔隙特征,获得孔隙变化及分布规律。文献[9]开展核磁共振(NMR)试验及扫描电镜(SEM)试验,解释了马兰黄土在不同初始含水率及不同干密度下的渗透特性及损伤微观特征。

近年来,众多学者对花岗岩残积土微观结构特征进行了大量研究。文献[10]基于SEM影像,对干燥土样进行拍摄,通过自行研发的图像处理系统,建立孔隙面积、孔隙直径与压力的量变规律;文献[11]利用压汞发对原状和重塑残积土测试,发现孔隙分布呈双峰特征,小孔隙模式有助于形成为微孔隙构成的集料内部孔隙度;文献[12]对花岗岩残积土进行原状、饱和及重塑状态下的压缩试验,引入应力综合结构势,论证了含水率对花岗岩残积土的结构性具有显著影响;文献[13]通过对天然状态下的花岗岩残积土的研究,发现在湿侧形态下以团聚形态为主,团聚体之间呈架空结构,累计孔隙体积呈明显的双峰分布。文献[14-15]对花岗岩残积土开展反复干湿循环下的三轴固结不排水(CU)剪切试验和核磁共振试验,分析了花岗岩残积土强度衰减与微结构损伤规律。

实际降雨过程中,土体含水率不断增大,呈现非饱和-饱和的发展过程,目前,对花岗岩残积土微观结构特征的研究大多集中于对干燥土样、天然状态土样或饱和土样的单独研究,对花岗岩残积土非饱和-饱和发展过程中微观结构特征的变化研究不足。基于此,本文采用扫描电镜及核磁共振技术,对不同含水率的花岗岩残积土试样进行试验,深入分析花岗岩残积土在增湿过程中微观结构特征及演变规律。

1 试验

1.1 试验材料

试验所用花岗岩残积土均取自福建省闽清县,该花岗岩地层属于燕山晚期酸性中性侵入岩,岩性以黑云母二长花岗岩、石英闪长岩为主。在常年风化作用下,花岗岩斜坡表部普遍形成风化残积层,呈红棕色、红褐色、浅肉红色,质地纯净,极少含杂质,风化厚度在几米至十几米不等(图1)。



(a) 花岗岩残积层开挖断面



(b) 现场取样

图1 试验土样

Fig. 1 Test soil samples

依据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[16],测得花岗岩残积土天然密度为 1.6 g/cm^3 ,干密度约为 1.3 g/cm^3 ,天然含水率约为 20%,测得饱和含水率为 33%。通过筛分试验得出花岗岩残积土级配曲线,其中小于 2 mm 粒径含量(质量分数)可达 95%以上,而小于 0.075 mm 粒径的细粒组分占比小于 10%,优势粒径集中在 0.5 ~ 2 mm,级配不良(图 2)。土体矿物组成中以抗风化能力强的石英、长石为主,颗粒粒径相对较大,而高岭石等黏土矿物风化形成细小颗粒。

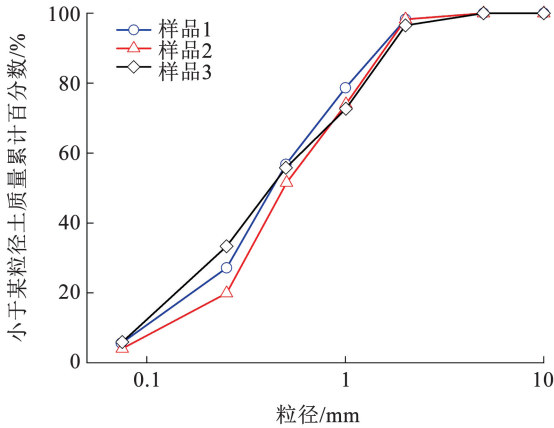


图 2 花岗岩残积土级配曲线

Fig. 2 Granite residual soil gradation curve

1.2 试验方法

试验模拟降雨过程中花岗岩残积土由低含水率

状态逐渐吸水发展为饱和状态过程,故而将样品设置成多个含水率梯度,直至饱和试样,由此得出随着含水率变化花岗岩微观结构的变化特征与发展趋势。基于此目的,试验样品采用重塑样,取筛分后的 < 2 mm 全级配粒组按照 1.3 g/cm^3 的干密度制样,设定 10%、15%、20%、25%、30%、33% (饱和) 6 个质量含水率梯度,计算出达到预定含水率所需滴定的水的质量后进行滴定,将滴定好的试样放入小号自封袋中挤出多余空气后密封保存 24 h 使试样内的水分平衡。将所制试样按试验要求处理后分别进行扫描电镜试验及核磁共振试验。

1.2.1 扫描电镜试验

扫描电镜 (SEM) 试验可以得到更多土体微观结构信息,如颗粒形态、颗粒接触方式等,可以定性描述土体的结构变化。试验为获取花岗岩残积土微观结构特征影像,采用赛默飞扫描电子显微镜 (型号 Prisma E) (图 3)。该设备精确度较高,是首台支持一体化 Color SEM 技术进行直观元素分析的钨灯丝扫描电子显微镜,可以一次性测试 18 个样品,实现高质量成像操作。将试样修整后按顺序放入样品室检测,放大 1 000 倍,获取扫描电镜图像,研究花岗岩残积土在增湿过程中颗粒与孔隙的变化,并采用孔隙和裂隙图像识别与分析系统 (PCAS) 软件对 SEM 图像进行分析。

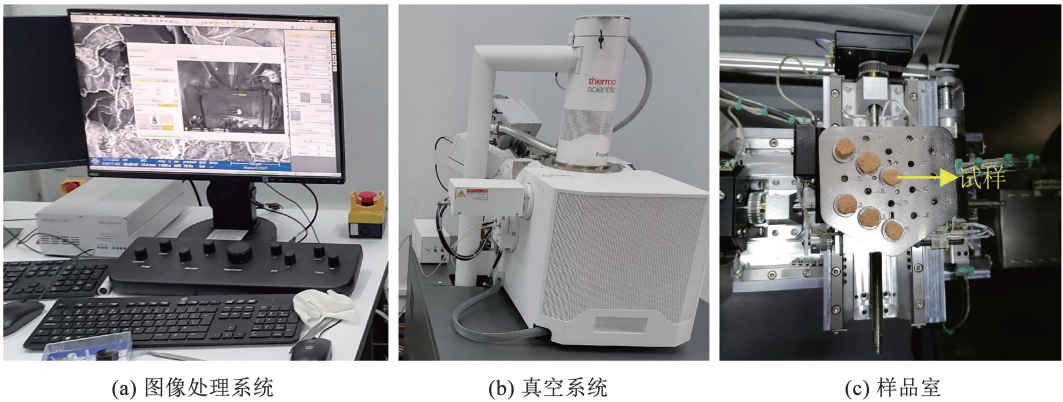


图 3 扫描电子显微镜 (SEM)

Fig. 3 Scanning electron microscope (SEM)

1.2.2 核磁共振试验

核磁共振 (NMR) 技术是一种迅速无损探测单位体积研究对象中氢质子含量与分布情况的试验手段。通过试验舱射频与材料内 ^1H 质子产生共振,从而得到内部水分的弛豫情况, T_2 弛豫时间值越小则

孔径越小,反之则越大。试验采用 MacroMR12-150H-I 大口径核磁共振成像系统 (岩心分析与成像仪) (图 4),将试验材料按要求放入试验舱,调摄合理的试验参数,获取 T_2 弛豫时间与信号强度之间的关系等信息。

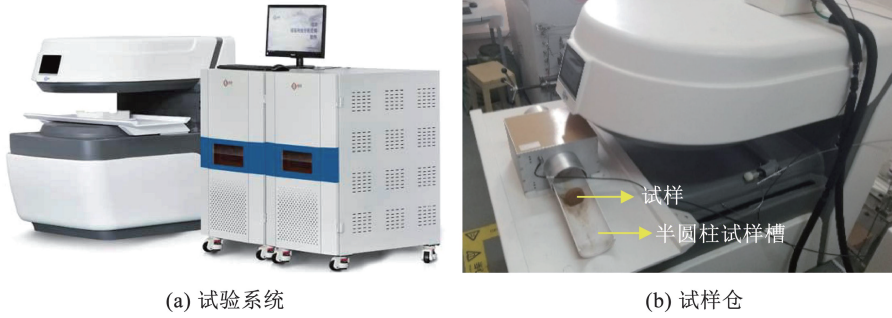


图 4 核磁共振测试仪
Fig. 4 Nuclear magnetic resonance tester

2 试验结果与分析

试验制样过程中严格按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[16]进行,确保样品达到所需的含水率并稳定,试验完成后,立即使用烘干法重新测定试样的含水率,其结果与试验前含水率基本保持一致,试验结果基本准确可靠。

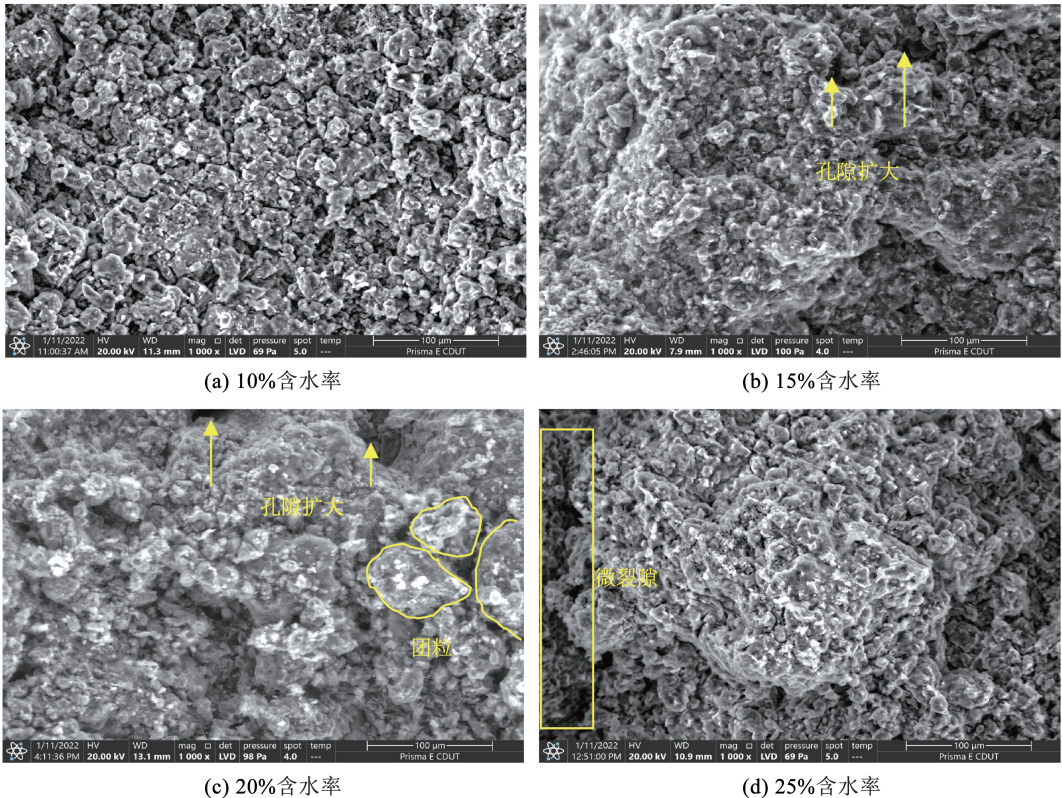
2.1 扫描电镜试验结果分析

2.1.1 孔隙形态变化特征

通过扫描电镜试验获得的不同含水率及饱和试样放大后 SEM 图像,如图 5 所示。在低含水率时(10%),土体微观结构中颗粒与孔隙分布较为均匀,土体结构中粗细颗粒间作用力较弱,随着含水率提高,孔隙扩大,孔隙水作用于颗粒之间,其张力作用促使颗粒相互连接在一起,含水率达到 20% 以

后,形成团粒。随着含水率进一步增大,小的团粒开始吸纳粗颗粒,并逐渐扩大形成较大团粒,团粒间形成的较大的孔隙更为显著,甚至发展成为微裂隙。达到饱和状态时,粒间孔隙水的大量增加使孔隙水对颗粒的作用能力减弱,团粒表现出解体的变化趋势,数量明显减少,较大的孔隙或微裂隙被解体的小颗粒充填后数量也相应减少,被切割为大量较小的孔隙。

由非饱和理论可知^[17],非饱和状态下土体结构中孔隙水压力与孔隙气压力差形成基质吸力,导致颗粒间的孔隙水具有凹液面,凹液面处孔隙水的张力作用使花岗岩残积土细颗粒受到一个拉力,周围颗粒以孔隙水为中心发生汇聚,形成团聚团粒,而无水充填的孔隙则增大,随着含水率增大至饱和,土体结构中孔隙水增多、分布范围扩大,土水相互作用发

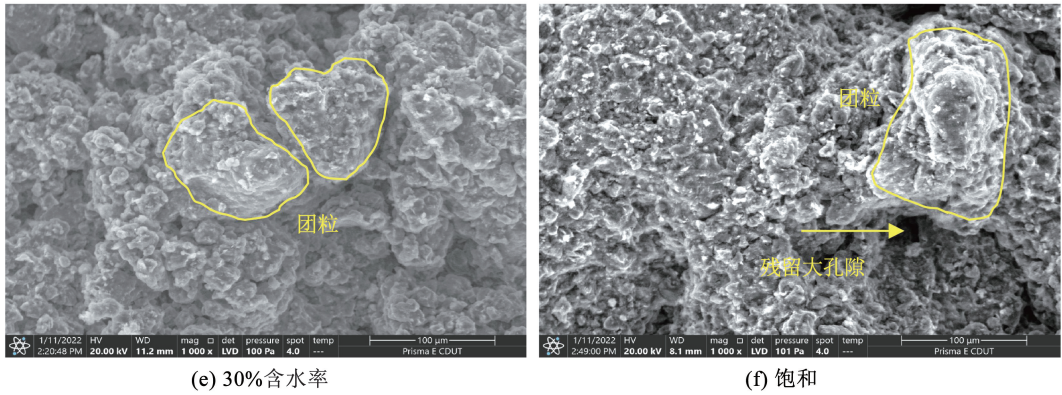


(a) 10%含水率

(b) 15%含水率

(c) 20%含水率

(d) 25%含水率



(e) 30%含水率

(f) 饱和

图 5 试样 SEM 图像

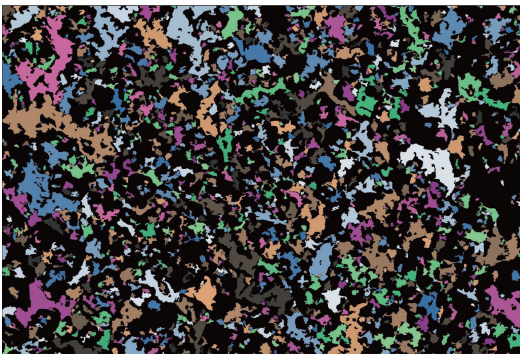
Fig. 5 Sample SEM image

生改变。含水率较低时,土体基质吸力较小,孔隙水周围颗粒所受作用力较强,但此时孔隙水分布范围小,对土体整体结构的影响并不显著。而后随着含水率的增加,孔隙水的影响范围不断增大,孔隙水的作用使大部分土体颗粒位置变化,表现出孔隙增大、出现团粒的现象。当含水率接近饱和含水率时,基质吸力极大减小,孔隙水对土体颗粒的作用能力减弱,此时孔隙结构的发展接近停滞状态,从土体弹塑性力学角度可知,当土颗粒间作用力减弱或消失后,其结构自身也具有一定恢复至原结构状态的能力,因此在饱和状态时大孔隙及微裂隙相对于 25%、30% 含水率反而有所减小。由于土体以塑性特征为主,故其结构恢复程度有限,即便达到饱和状态,其仍然较大程度保持着孔隙水影响下的结构状态。

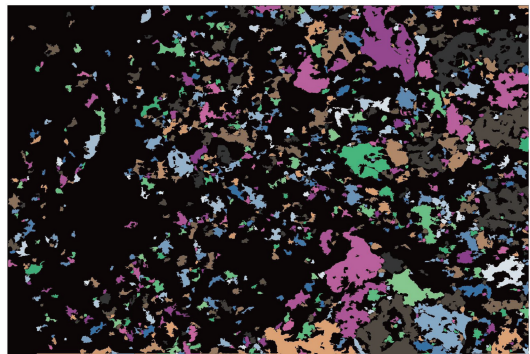
2.1.2 孔隙结构定量表征

利用 PCAS 软件将图 5 的 SEM 图像进行二值化处理,根据颜色不同将黑、灰、白图像中孔隙与颗粒区分开。完成二值化处理后,由系统进行分析,将所以颗粒、孔隙的各类参数进行分类统计,进一步得出表征土体颗粒形态的各习惯参数,实现孔隙结构的定量分析。

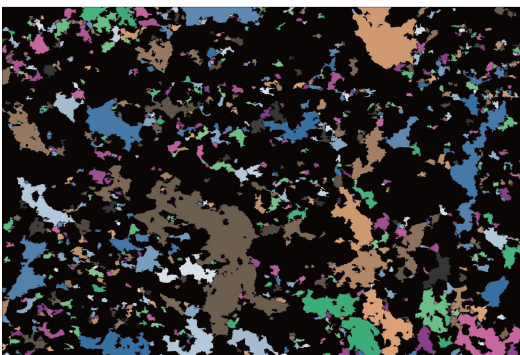
不同含水率条件下图像识别结果如图 6 所示。彩色部分代表颗粒间的孔隙,黑色部分则代表颗粒。随着含水率提高至饱和状态,识别结果中大块彩色区域逐渐增多、增大,而颗粒数量呈减小趋势,可见在孔隙水作用下,土体矿物颗粒相互联结形成团粒的过程中孔隙也逐渐合并,形成较大尺度的孔隙。



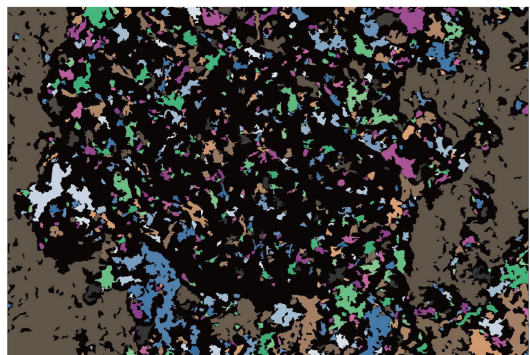
(a) 10%含水率



(b) 15%含水率



(c) 20%含水率



(d) 25%含水率

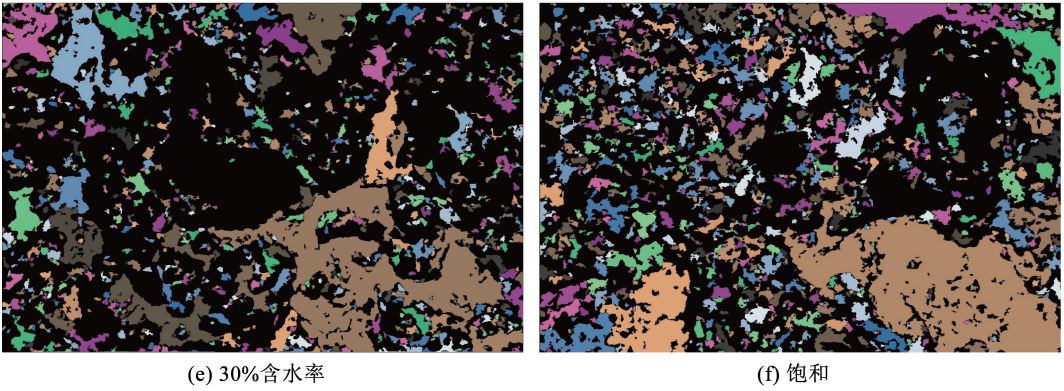


图6 不同条件下 SEM 图像识别结果

Fig. 6 SEM image recognition results under different conditions

使用 PCAS 软件对不同含水率花岗岩残积土试样 SEM 图像进行分析得到孔隙相关参数见表 1。随着含水率的提高,孔隙数量呈先减小后增大的趋势,究其原因,是因为含水率增大,孔隙水的作用使土体颗粒连接在一起,形成小的团粒。随着含水率的继续升高,小的团粒吸纳粗颗粒形成较大的团粒,在此过程中,较小的孔隙合并,数量减少,较大的孔隙数量增加。在接近饱和时,团粒又开始解体,较大的孔隙被小颗粒充填,被切割为大量较小的孔隙,数量增加。形状因子在含水率增长过程中减小,表明含水率增加,孔隙边缘棱角增大更加复杂。接近饱和时,团粒解体,较大的孔隙被切割,形状因子明显增大。而试样概率熵均大于 0.9,接近于 1,表明试样内孔隙分布较为随机且均匀,无明显定向性。

表 1 土体孔隙微观参数统计

Tab. 1 Statistics of soil pore mesoscopic parameters

| 含水率/% | 孔隙数量 | 孔隙度 | 形状因子 | 概率熵 |
|--------|-------|-------|---------|---------|
| 10 | 1 178 | 46.54 | 0.376 9 | 0.992 3 |
| 15 | 760 | 56.69 | 0.371 8 | 0.984 8 |
| 20 | 730 | 53.38 | 0.351 4 | 0.978 7 |
| 25 | 532 | 54.42 | 0.351 1 | 0.991 3 |
| 30 | 745 | 55.56 | 0.380 4 | 0.982 6 |
| 33(饱和) | 814 | 56.94 | 0.399 4 | 0.980 1 |

2.2 核磁共振试验结果分析

2.2.1 T_2 分布特征

通过对不同含水率试样进行核磁共振扫描,获得孔隙水在整个试验过程中的电信号变化,得到 T_2 弛豫时间与信号强度变化的关系如图 7 所示。在非饱和状态下, T_2 谱表现为单峰,饱和时表现为双峰。随着试样含水率的不断增大, T_2 曲线中的峰值信号不断增强,并且对应的 T_2 轴向右逐渐偏移,达到饱和后,核磁信号强度也达到最大值,同时在之后的时间出现次峰现象,当 T_2 小于 0.43 ms 时,不同含水率

条件下的 T_2 曲线相互靠近,这表明该尺寸下孔隙受不同含水率下的孔隙水影响微弱; T_2 处于 0.43 ~ 5.33 ms 之间时,曲线受含水率的影响变化最为显著,峰值随着含水率的增加而增大,曲线中轴线 T_2 值也向右移动; T_2 大于 5.33 ms 时,非饱和条件下试样的核磁信号强度基本消失,仅饱和试样在短时间回落后形成次峰,即水分充满试样内部大小孔隙。

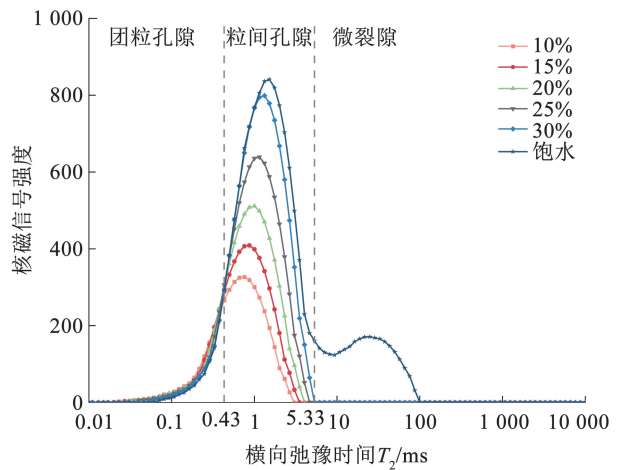


图 7 不同含水率条件下花岗岩试验 T_2 谱分布

Fig. 7 T_2 spectral distribution of granite tests under different water content conditions

根据相关孔隙研究资料^[18-20],此次试验数据中 T_2 曲线可分为 3 段,即 $T_2 < 0.43$ ms、 0.43 ms $\leq T_2 < 5.33$ ms、 $T_2 \geq 5.33$ ms,进而将试样内的孔隙分为团粒孔隙、粒间孔隙、微裂隙。团粒孔隙指颗粒体内部的孔隙,或封闭状态,或与外部孔隙联结作用较弱,受不同含水率下的孔隙水影响程度较弱,因而在 T_2 曲线上未表现出显著差异性特征。粒间孔隙则为颗粒间相互搭接形成的孔隙,代表了颗粒之间的间距,这一尺寸下孔隙最容易受孔隙水作用影响, T_2 曲线变化最明显。微裂隙指饱和后部分孔隙合并或孔隙水导致内部产生较大的孔隙,尺寸较大,但数量较小,受孔隙水张力作用开始减弱。随着含水率的变

化, T_2 曲线峰值的增加与曲线的右移, 反映了试样结构受孔隙水影响发生的变化。

2.2.2 三维分形维度特征

由花岗岩残积土微观结构特征可知, 自然条件下土体结构中存在大量细小孔隙、微裂隙, 孔隙水渗入后形成三相介质, 并造成土体微观结构发生变化。随着含水率的提高, 土体微观结构受影响范围、程度逐渐加深, 在评价分析中多以定性为主, 假如能对其微观结构的微弱改变进行量化, 则有助于更为准确的掌握土体结构的变化规律, 基于自相似特性的分形理论能很好的解决这一问题。本文从孔隙体积方面进行分形维度量, 用以度量三维空间下土体结构特征。

通过以下公式计算孔径在 $0 \sim V_i$ 之间的孔隙累计体积^[15]:

$$V_i = \frac{A_i}{\sum A_i} \frac{m_w}{\rho_w} \quad (1)$$

$$V_c = \sum V_i \quad (2)$$

式中: V_i 为某直径下的孔隙体积; A_i 为 T_2 谱中对应的核磁信号峰值; m_w 为被测样品中孔隙水的质量; ρ_w 为水的密度; V_c 为累计孔隙体积。

某一孔径下累计孔隙体积与孔径、分形维度之间的关系^[21]为

$$\log V_r \propto (3 - D) \cdot \log r \quad (3)$$

式中: V_r 为小于某孔径 r 时的累计孔隙体积, D 为分形维度, r 为孔隙半径。

以 $\log V_r$ 为纵坐标, $\log r$ 为横坐标, 线性拟合求出斜率 k , 则粒度分布分维数 $D = 3 - k$ 。 $\log V_r - \log r$ 的关系曲线见图 8。

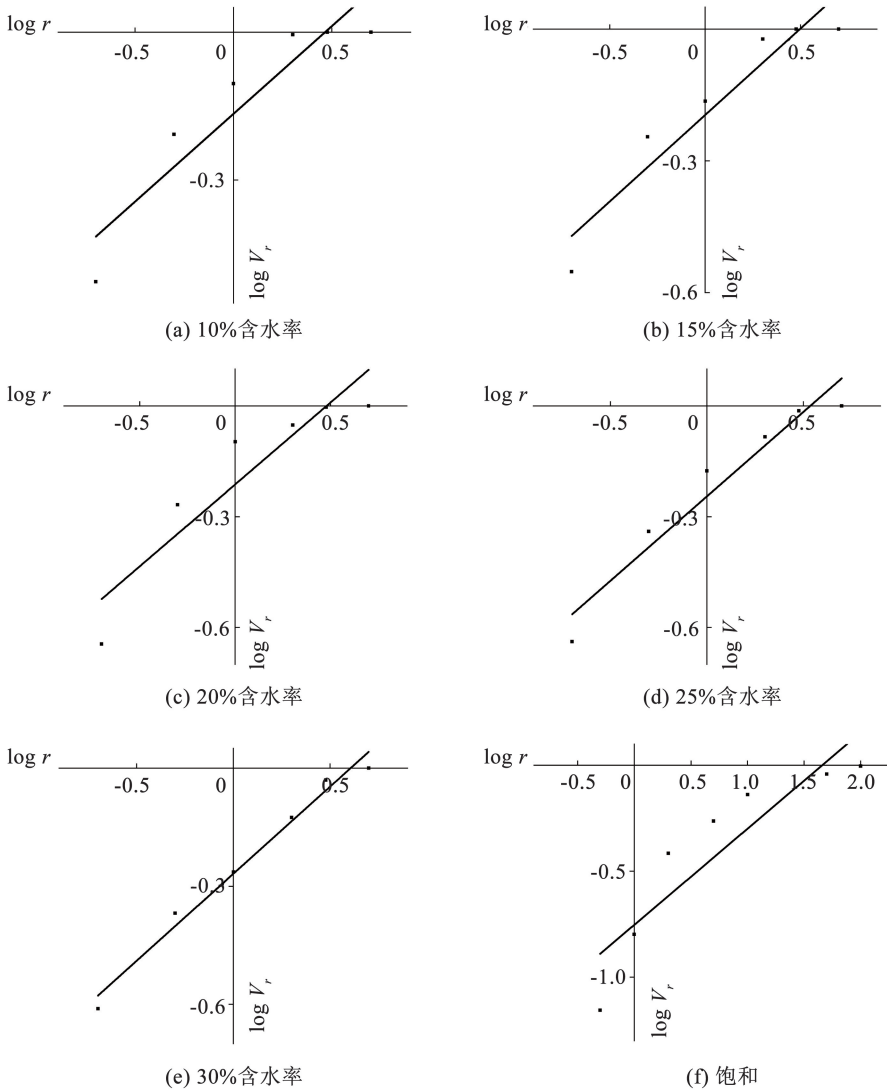


图 8 不同含水率条件下 $\log V_r - \log r$ 关系曲线

Fig. 8 Relationship curve of $\log V_r - \log r$ under different water content conditions

在孔隙水主要充填孔隙结构区,花岗岩残积土孔隙体积分布已表现出良好的自相似性,由此计算出的分形维度能反映孔隙水影响区孔隙结构特征。对 $\log V_r - \log r$ 的关系曲线拟合得出 $\log V_r - \log r$ 线性函数式,拟合度均较好,由函数斜率可求得分形维度,即 $D = 3 - k$, k 为函数斜率。

由低含水率(10%)至饱和状态的分形维度分别为 2.643、2.606、2.556、2.543、2.557、2.546。如图 9 所示,与孔隙面积分形维度发展趋势相似,随着含水率提高,分形维度先表现为快速降低,而后逐渐趋于稳定,可见含水率的变化对花岗岩残积土孔隙结构的影响突出。通过对分形维度与质量含水率的函数拟合, $R^2 = 0.938$, 函数关系式为

$$D = 0.43 \cdot e^{-\omega/0.07} + 2.54 \quad (4)$$

式中: D 为三维分形维度, ω 为质量含水率。

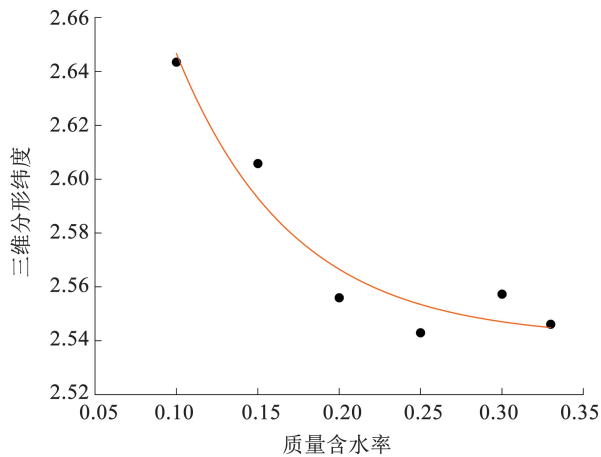


图 9 三维分形维度与含水率的关系

Fig. 9 The relationship between three-dimensional fractal dimensions and moisture content

3 结 论

本文基于扫描电镜与核磁共振技术,分析了非饱和-饱和状态下的花岗岩残积土微观结构特征与演变规律,得出结论如下:

1) 非饱和状态下,随着含水率的生长,土体呈现较小孔隙数量减少,较大孔隙增大的趋势,接近饱和时,呈现相反的变化趋势。孔隙数量在此过程中则呈先减小后增大的趋势,试样内孔隙分布较为随机且均匀,无明显定向性。

2) 非饱和-饱和发展过程中,随着含水率的增大 T_2 曲线中的峰值信号不断增强,并且对应的 T_2 轴向右逐渐偏移,饱和和试样出现次峰现象。根据 T_2 分

布曲线,土体微观结构中孔隙分为团粒孔隙 ($T_2 < 0.43$ ms)、粒间孔隙 ($0.43 \text{ ms} \leq T_2 < 5.33$ ms)、微裂隙 ($T_2 \geq 5.33$ ms) 3 类,其中粒间孔隙受孔隙水作用影响最为显著。

3) 随着含水率的生长,三维分形维度与含水率具指数函数关系,呈快速降低后趋于稳定的趋势,含水率的变化对花岗岩残积土孔隙结构有突出影响。

参考文献

- [1] 朱章森, 卢玉蓉, 叶韵琴. 东南沿海花岗岩地质年代的判别分析[J]. 物化探电子计算技术, 1981(3): 29
ZHU Zhangsen, LU Yurong, YE Yunqin. Discriminant analysis of the geological age of granite in the southeast coast[J]. Electronic Computing Technology of Geophysical and Geochemical Exploration, 1981(3): 29
- [2] 王清, 蒋惠忠, 唐大雄. 闽南三角地区花岗岩残积土及其工程地质特性的研究[J]. 福建地质, 1990(2): 90
WANG Qing, JIANG Huizhong, TANG Daxiong. Study on granitic residual soils and their engineering geological properties in Minnan Delta Region[J]. Fujian Geology, 1990(2): 90
- [3] 李荣华, 何明宁, 江思义, 等. 降雨条件下花岗岩残积土边坡失稳模式及预警阈值现场试验[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(10): 4207
LI Ronghua, HE Mingning, JIANG Siyi, et al. Field test on instability model and warning threshold of granite residual soil slope under rainfall condition[J]. Science, Technology and Engineering, 2024, 24(10): 4207
- [4] FANG X, XU J, WANG P. Compressive failure characteristics of yellow sandstone subjected to the coupling effects of chemical corrosion and repeated freezing and thawing [J]. Engineering Geology, 2018, 233: 160
- [5] ZAIDI M, AHFIR N D, ALEM A, et al. Use of X-ray computed tomography for studying the desiccation cracking and self-healing of fine soil during drying-wetting paths [J]. Engineering Geology, 2021, 292: 106255
- [6] 吕擎峰, 周刚, 王生新, 等. 固化盐渍土核磁共振微观特征[J]. 岩土力学, 2019, 40(1): 245
LÜ Qingfeng, ZHOU Gang, WANG Shengxin, et al. NMR microscopic characteristics of solidified saline soils[J]. Geotechnics, 2019, 40(1): 245
- [7] XU Y, ZHANG Y, HUANG J, et al. Mechanical properties, microstructure and consolidation of sand modified with sodium silicate [J]. Engineering Geology, 2022, 310: 106875
- [8] 安爱军, 廖靖云. 基于核磁共振和扫描电镜的蒙内铁路膨胀土改良细观结构研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(增刊2): 152
AN Aijun, LIAO Jingyun. Study on the fine structure of expanded soil improvement in Monnet Railway based on nuclear magnetic

- resonance and scanning electron microscopy [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(Sup. 2): 152
- [9] 李泽坤, 马鹏辉, 彭建兵, 等. 黑方台地区马兰黄土渗透特性及结构损伤试验研究[J]. *地质科技通报*, 2022, 41(6): 200
LI Zekun, MA Penghui, PENG Jianbing, et al. Experimental study on permeability characteristics and structural damage of Malan Loess in Heifangtai Area[J]. *Geoscience and Technology Bulletin*, 2022, 41(6): 200
- [10] 陈嘉鸥, 叶斌, 郭素杰, 等. 珠江三角洲软土 SEM 微结构定量研究[J]. *电子显微学报*, 2001(1): 72
CHEN Jiaou, YE Bin, GUO Sujie, et al. Quantitative SEM microstructure study of soft soils in the Pearl River Delta[J]. *Journal of Electron Microscopy*, 2001(1): 72
- [11] RAO S M, REVANASIDDAPPA K. Role of microfabric in matrix suction of residual soils [J]. *Engineering Geology*, 2005, 80(1/2): 60
- [12] 戴继, 王铁宏, 高广运, 等. 由压缩试验分析砾质花岗岩残积土的结构特性[J]. *地下空间与工程学报*, 2009, 5(4): 675
DAI Ji, WANG Tiehong, GAO Guangyun, et al. Structural properties of gravelly granite residual soil analysed by compression test[J]. *Journal of Underground Space and Engineering*, 2009, 5(4): 675
- [13] 王志兵, 麦棠坤, 齐程. 容县压实花岗岩残积土的力学性质与微结构特性研究[J]. *水文地质工程地质*, 2018, 45(5): 101
WANG Zhibing, MAI Tangkun, QI Cheng. Mechanical properties and microstructural characteristics of compacted granite residual soil in Rongxian [J]. *Hydrogeological Engineering Geology*, 2018, 45(5): 101
- [14] 安然, 孔令伟, 张先伟, 等. 干湿循环效应下花岗岩残积土结构损伤的多尺度研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2023, 42(3): 758
AN Ran, KONG Lingwei, ZHANG Xianwei, et al. Multi-scale study of structural damage of granite residual soil under dry-wet cycle effect [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(3): 758
- [15] 安然, 孔令伟, 黎澄生, 等. 炎热多雨气候下花岗岩残积土的强度衰减与微结构损伤规律[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(9): 1902
AN Ran, KONG Lingwei, LI Chengsheng, et al. Strength attenuation and microstructural damage law of granite residual soil under hot and rainy climate [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(9): 1902
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019
- [17] 栾茂田, 李顺群, 杨庆. 非饱和土的理论土-水特征曲线[J]. *岩土工程学报*, 2005, 27(6): 611
LUAN Maotian, LI Shunqun, YANG Qing. Theoretical soil-water characteristic curve of unsaturated soil[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, 27(6): 611
- [18] 卫国芳. 基于核磁共振的红黏土抗剪强度与孔隙关系研究[J]. *人民长江*, 2021, 52(11): 155
WEI Guofang. Study on the relationship between shear strength and pore space of red clay based on nuclear magnetic resonance[J]. *People's Yangtze River*, 2021, 52(11): 155
- [19] 吕海波, 汪稔, 赵艳林, 等. 软土结构性破损的孔径分布试验研究[J]. *岩土力学*, 2003(4): 573
LÜ Haibo, WANG Nian, ZHAO Yanlin, et al. Experimental study on pore size distribution of structural breakage in soft soil [J]. *Geotechnics*, 2003(4): 573
- [20] 付常青, 朱炎铭, 陈尚斌. 浙西荷塘组页岩孔隙结构及分形特征研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2016, 45(1): 77
FU Changqing, ZHU Yanming, CHEN Shangbin. Study on pore structure and fractal characteristics of shale from the Hotang Formation in Western Zhejiang[J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2016, 45(1): 77
- [21] 王国梁, 周生路, 赵其国. 土壤颗粒的体积分形维数及其在土地利用中的应用[J]. *土壤学报*, 2005(4): 545
WANG Guoliang, ZHOU Shenglu, ZHAO Qiguo. Volume fractal dimension of soil particles and its application in land use[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005(4): 545