

徐俊康,陈新,王建勋,等.崩岗侵蚀区花岗岩土壤孔隙的定量表征及渗流模拟[J].华中农业大学学报,2026,45(2):122-136.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2026.02.013

崩岗侵蚀区花岗岩土壤孔隙的定量表征及渗流模拟

徐俊康¹,陈新¹,王建勋²,魏玉杰¹,张光辉^{1,3},蔡崇法¹

1. 华中农业大学资源与环境学院,武汉 430070; 2. 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,武汉 430079;
3. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司,杭州 311100

摘要 为揭示花岗岩残积土孔隙的渗流规律,解析孔隙尺度水分运移机制,选取崩岗完整风化剖面,对全部面原状花岗岩风化土体进行X射线计算机断层扫描(CT),并利用AVIZO软件进行三维重构、构建孔隙网络模型,量化分析花岗岩风化土全剖面孔隙结构特征。结果显示:土壤孔隙度随着风化深度增加呈现下降趋势(4.2%~25.1%),上层土壤(A和B层)明显高于下层砂层($P<0.05$)。各层次土壤孔隙等效直径主要集中分布于0.1~0.2 mm,方向角集中于 $40^{\circ}\sim 50^{\circ}$,且各层次方位角分布较为一致。大孔隙($>100\ \mu\text{m}$)形状以规则球形孔隙为主(0.8~1.0),上层规则孔隙较下层更多。风化剖面上到下游连通孔隙与非连通孔隙变化呈现相反趋势,孔隙连通性逐渐减弱。各层次土壤孔隙网络模型(pore network model, PNM)中连通孔隙半径(0.1~1.0 mm)、配位数及表面积在剖面上均呈现逐渐减少的趋势,上层平均孔喉长度整体高于下层土壤,孔隙网络结构随风化程度增大而逐渐复杂。基于孔隙网络的渗流模拟结果与实测值存在较高拟合度($R^2=0.96$)。孔隙结构参数与渗流导水率之间相关性分析显示,PNM参数(孔喉直径、通道长度、PNM孔隙直径)之间存在显著正相关($P<0.05$),孔隙形态和方向参数(球度、方向角与方位角)与迂曲度呈显著正相关($P<0.05$),孔隙连通性与分形维数、孔隙率、配位数、孔喉面积为渗透导水率关键影响因素($P<0.05$),孔隙几何特征共同影响孔隙网络的结构和功能。结果表明,可以通过花岗岩风化土孔隙的三维重建及孔隙网络结构定量分析,明确风化土壤内部孔隙拓扑空间结构差异特征,解释风化作用下花岗岩土壤非均质性、各向异性、亚稳定结构形成的关键原因。

关键词 崩岗侵蚀;水土流失;花岗岩残积土;孔隙结构参数;孔隙网络模型;渗流模拟;X射线计算机断层扫描(CT)

中图分类号 S157 文献标识码 A 文章编号 1000-2421(2026)02-0122-15

崩岗是指在水力和重力的综合作用下,山坡受到破坏而发生崩塌和受到冲刷的侵蚀现象,是我国红壤区特有的水土流失现象^[1],在我国南方热带、亚热带花岗岩丘陵地区广泛分布。崩岗侵蚀不仅导致土地资源的破坏和农田的流失,还严重影响生态环境和基础设施的安全。据水利部全国崩岗最新调查数据显示,中国南方丘陵花岗岩地区约有239 100个沟壑^[2],崩岗侵蚀的年平均侵蚀模数约为59 000 t/($\text{km}^2\cdot\text{a}$),是较缓坡或高植被覆盖坡侵蚀量的50多倍^[3]。此外,花岗岩地区受崩岗侵蚀影响的面积达1 220 km^2 ,导致1950—2005年的土壤流失量超过60万t^[4],造成严重的土壤退化,是制约当地经济发展的主要因素。花岗岩残积土作为一种代表性结构土,

在我国南方分布极广,具有孔隙比大、扰动性强等特点^[5],其分布区域极易发生崩岗、滑坡等地质灾害。据调查,我国花岗岩出露面积为90.9万 km^2 ,占全国陆地面积的10%以上,而发生在花岗岩区域的土壤侵蚀面积达19.7万 km^2 ,占南方土壤侵蚀总面积的28%,是南方地区土壤侵蚀的重要组分^[6]。花岗岩残积土风化壳深厚,结构松散,具有高孔隙率和低黏结性,在强降雨条件下极易发生崩解,易产生孔隙流,诱发边坡失稳、渗透变形等不良地质灾害,进一步加剧崩岗侵蚀^[7]。水分条件影响孔隙结构和裂隙发育,引起土壤结构、强度的不可逆劣化和衰减,加速土体失稳和侵蚀^[8],而土壤孔隙结构直接影响水分在土体中渗透能力的强弱,因此,对花岗岩残积土孔隙结构

收稿日期:2025-05-19

基金项目:国家自然科学基金面上项目(42277329);国家自然科学基金青年科学基金项目(41807065)

徐俊康, E-mail: xxxjkkk@webmail.hzau.edu.cn

通信作者: 魏玉杰, E-mail: wyj@mail.hzau.edu.cn

特征进行定量化研究,可以揭示水流在土壤中的迁移路径和侵蚀行为,从而为防治水土流失提供科学依据。

近年来,国内外学者长期致力于研究土体的微观结构。迄今为止,许多微观结构量化方法,如微型计算机成像、压汞测试(mercury intrusion porosimetry, MIP)、扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)、场发射扫描电镜(field-emission scanning electron microscope, FESEM)、X射线荧光(X-ray fluorescence, XRF)和X射线衍射(X-ray diffraction, XRD)等,为土壤孔隙结构的研究提供了许多重要的分析方法和定量结果,包括孔隙类型、形状、大小、取向和聚集特征等,然而这些方法都有一定的局限性。例如,MIP和SEM方法可以获得黄土的孔隙大小分布,并对黄土孔隙进行分类^[9],但无法区分颗粒内和颗粒间孔隙,且MIP方法可能会破坏完整的孔隙,导致汞无法进入一些封闭的孔隙,从而导致与实际情况有偏差^[10]。此外,二维结构性质不足以描述孔隙的三维形态和拓扑特征,借助X射线计算机断层扫描(X-ray computed tomography, CT)可以很好地解决上述问题。CT扫描作为一种高效的非破坏性的技术,还具有精确定量检测以及三维结构可视化等优点,被广泛用于识别和表征多孔材料内部3D结构^[11]。例如,黄彦华等^[12]基于CT扫描和图像处理技术,建立真实原状土样的三维模型;黎澄生等^[13]采集花岗岩残积土CT图像后重构孔隙三维结构,定量分析花岗岩残积土的孔隙连通性、孔隙曲折度、孔径分布、孔隙方向、分形维数等孔隙结构特征。

随着三维重构和可视化软件(如AVIZO、VG-studio、MIM-ICS)的发展,基于CT的多孔介质孔隙参数提取和特征研究变得更加方便。通过三维重构,可以直观展示土壤内部孔隙网络的空间分布,并为后续的渗流数值模拟提供基础数据。Li等^[14]采用CT技术获得花岗岩残积土在不同试验加载阶段的三维应变场和剪切带,在此基础上进一步测量剪切带内外裂纹的演化特征,确定了裂缝和剪切带的演化特征对于理解岩土材料的损伤机制至关重要。Zhao等^[15]利用CT和三维重构技术,定量分析了花岗岩残积土不同粒径土颗粒的接触方式。目前CT技术在岩土领域的应用较为成熟,许多学者利用CT技术研究土壤内部结构,然而利用CT扫描研究全土层花岗岩残积土孔隙结构的相关报道较少。

渗流是指饱和土体中的水分在孔隙或裂隙中发

生不均衡流动的现象,广泛存在于地下水运动、土壤水分运移、坝体渗透和防渗工程等领域,常伴有失稳、渗透变形等不利影响^[16]。渗流研究方法主要包括实验法和数值模拟法。实验法多集中于宏观尺度,通过模拟降雨、入渗和径流过程,研究水分在土壤中的运移规律,但这种方法受实验条件限制,无法准确直观地描述土壤孔隙结构特征、流体渗流路径以及孔隙结构与渗流特性之间的内在联系,难以全面揭示复杂的孔隙流行为^[17]。随着科学技术的发展,一些细观尺度上的数值模拟方法得到了迅速发展和应用,以克服上述试验方法的不足。采用数值模拟分析细观渗流特性,模拟流体流动的整个过程,具有可重复、方便和可视化等优点。目前,细观尺度下流体流动的数值模拟方法主要包括:格子波尔兹曼方法(lattice Boltzmann method, LBM)、等效孔隙网络模型(pore network model, PNM)和水平集(Level Set)等。崔冠哲等^[18]基于LBM方法建立水压力作用下土体和重构土体细观渗流场的二维模型,分析整体和局部渗流速度的变化规律。Liu等^[19]通过构建砂岩孔隙网络模型并进行渗流模拟,通过模拟结果预测相对渗透率。蔡沛辰等^[20]用Level Set方法进行数值模拟,刻画了土壤内部各孔隙区域水-气两相驱替的动态可视化过程。其中LBM计算很费时,Level Set方法多集中在二维孔隙结构模型层面,而PNM方法可以很方便地求解3D复杂孔隙模型单相流问题,且求解时间较短,能够更精确地模拟土壤孔隙流过程。PNM是采用模型对多孔介质孔隙结构进行等效替代,并保留其孔隙间的连通性,从而简化渗流模拟过程。该模型能够建立细观孔隙结构与宏观渗流行为之间的关系,有助于更有效地进行渗流分析^[21]。相关学者通常通过试验研究土壤孔隙结构,然后结合数学模型分析土壤中的孔隙流动和迁移,或者通过孔隙流试验结合渗流理论计算孔隙分布,然而,很少有研究能够同时定量分析同一原状土中的孔隙空间分布和孔隙流动迁移。

鉴于此,本研究选用湖北省通城县的原状花岗岩残积土进行工业CT扫描,采用AVIZO软件进行三维重构、提取PNM参数,进行渗流数值模拟,研究不同层次花岗岩残积土的孔隙空间分布和结构特征,建立孔隙网络模型,探究不同深度孔隙的网络结构特征,通过模拟结果预测渗透率,揭示崩岗侵蚀区花岗岩残积土的水分运移机制及孔隙参数对渗流的影响机制,旨在为进一步认识花岗岩残积土孔隙的

渗流规律提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试样取自湖北省通城县五里镇(29°12'39"N, 113°46'26"E),该地区以燕山期形成的花岗岩红壤为主,是典型的崩岗发生区。该区属于典型的亚热带季风湿润气候,年平均气温为15.5~16.7℃,年平均降水量为1450~1600 mm,全年约75%的降雨发生在3~9月,降雨具有很强的季节性。主要植物种

类有金樱子(*Rosalaevigata*)、铁芒萁(*Dicranopteris linearis*)、马尾松(*Pinus massoniana*)、菝葜(*Smilax china*)等^[22]。

崩壁土壤剖面根据土壤颜色和土壤发生层自上而下划分为5个层次(图1),依次为A层(0~45 cm)、B层(45~110 cm)、BC层(110~170 cm)、C1层(170~430 cm)和C2层(>430 cm),从上到下逐层采集原状土样进行饱和导水率试验,各土层的基本特征见表1。

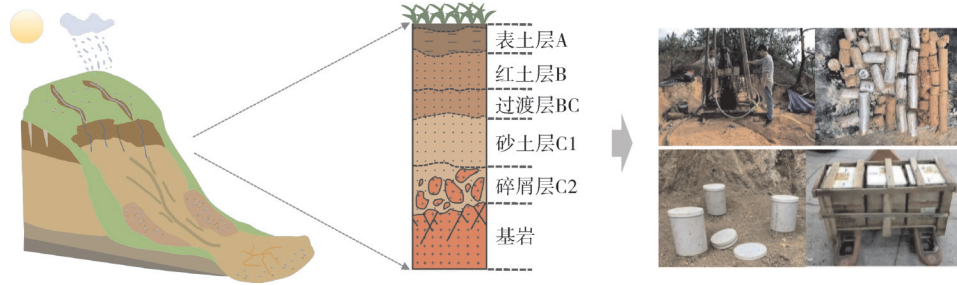


图1 剖面 and 采样示意图

Fig.1 Schematic of profiles and sampling

表1 崩岗侵蚀区花岗岩边坡风化剖面特征

Table 1 Description of weathering profile of granite slopes in the region of gully erosion

| 土层 Soil layer | 描述 Description |
|------------------|--|
| A | 土壤呈现棕红色,含有较多有机质,植物根系分布广泛。土壤为呈颗粒状结构的黏土砂,长石强烈高岭土化和氧化;黏土基质中混有残余石英颗粒,存在裂隙,且用手容易断裂,浸泡后迅速崩解。 |
| B | 土壤为红色砂砾状黏土,根系较少,表现为块状结构。土壤均匀致密,Al ₂ O ₃ 和Fe ₂ O ₃ 含量高,含石英颗粒的细黏土基质;长石完全分解为黏土矿物;可见裂隙,很容易破碎,水下快速崩解。 |
| BC | 土壤表现为黄或者浅红,层中存在浅色黏土脉或者斑,少量氧化铁锰结核。矿物成分以石英和云母为主,土壤砂砾含量增加。石英含量高于上层,可见裂隙极少。 |
| C1 | 土壤呈现黄色和灰白色,结构疏松,为砂质土层。土壤颗粒较大,石英砂较多,长石、云母风化不完全,次生矿物较少。角状石英颗粒越多,含量越高,可见裂缝越少;容易用手破碎,在水中缓慢分解。 |
| C2 | 土壤呈灰白色,结构疏松,粒径大,长石、云母风化不完全,次生矿物较少。以粗砾石和砂为主;大块可以用手掰碎,在水中熟化。 |

1.2 CT扫描及图像处理

采用工业X射线显微断层扫描仪扫描土壤样品。利用AVIZO软件进行一系列图像处理工作,即图像滤波、图像分割、可视化和量化,对原状土孔隙结构进行三维重构,基于三维重构模型建立孔隙网络模型(PNM),扫描土壤样品图像的像素分辨率为30 μm。为了避免取样过程中土柱边缘可能产生的部分扰动,从土柱中央部分选择内径为30 mm、高度为50 mm的感兴趣区域(以下简称ROI)。本研究采用克里金方法对灰度图像切片进行二值分割^[23-24],在分割前对图像采用三维中值滤波器进行降噪处理。

1.3 孔隙特征参数提取

利用AVIZO软件在二值化和三维重构的基础上提取参数,包括孔隙度 n 、体积 V 、等效直径 D_{Eq} 、形状因子 F 、方向角 φ 、方位角 θ (φ 和 θ 统称倾角)、迂曲度 τ 、球度 C 和分形维数 D (表2)。其中形状因子和球度是表征孔隙三维形状的参数, F 会随着孔隙形状变得纤细、扁平或不规则而增加,当孔隙为标准球体时 $F=1$,球度越大,孔隙形状也越接近圆形^[25]。在本研究中,将孔隙分为规则孔隙($F \geq 0.5$)、不规则孔隙($0.2 < F < 0.5$)和细长孔隙($F \leq 0.2$)^[26]。倾角是表征土体孔隙空间取向最直观的参数,迂曲度表征了流体在土壤孔隙中流动路径的复杂性。孔隙分形

维数描述孔隙结构复杂性和表面粗糙度,采用盒子计数法计算分形维数,用 C/I 评价孔隙的连通性^[27]。采用这些孔隙参数对花岗岩残积土孔隙形状和结构进行高级量化和表征。

表2 孔隙参数定义及解释

Table 2 Definition and explanation of pore parameters

| 参数 Parameter | 公式 Formula | 解释 Interpretation |
|--|--|---|
| 孔隙度(n) Porosity | V_V/V_T | (1) V_V 和 V_T 分别表示孔隙的体积和切片的总体积, μm^3 |
| 体积(V) Volume | $N \times V_0$ | (2) V_0 是最小体素单元的体积, μm^3 ; N 是孔隙包含的体素的计数个数 |
| 等径(D_{Eq}) Equivalent diameter | $\sqrt[3]{6V/\pi}$ | (3) V 代表单个孔隙的体积, μm^3 |
| 形状因子(F) Shape factor | $\frac{A_e}{A}$ (4) | A_e 代表球体表面积, μm^2 ; A 为测得的孔隙表面积, μm^2 |
| 倾角方向角(φ) Dip angle | $\sin^{-1} \frac{ Z_k - Z_i }{\sqrt{(x_k - x_i)^2 + (y_k - y_i)^2 + (z_k - z_i)^2}}$ (5) | 式(5)、(6)和(7)中 (x_i, y_i, z_i) 和 (x_k, y_k, z_k) 分别表示孔隙段起始节点和结束节点的坐标 |
| 倾角方位角(θ) Dip direction | $\tan^{-1} \frac{y_k - y_i}{x_k - x_i}$ (6) | $l(n)$ 代表被无数个点划分的离散片段,其数值等于两点间的欧氏距离, μm |
| 迂曲度(τ) Tortuosity | $\frac{\sum_i^k l(n)}{\sqrt{(x_k - x_i)^2 + (y_k - y_i)^2 + (z_k - z_i)^2}}$ (7) | |
| 球度(C) Sphericity | $4\pi A/P^2$ | (8) A 为孔隙面积, μm^2 ; P 为孔隙周长, μm |
| 分形维数(D) Fractal dimension | $-\lim_{\epsilon} \frac{\ln N(\epsilon)}{\ln \epsilon}$ | (9) $N(\epsilon)$ 为覆盖孔隙图形的小盒子个数; ϵ 为小盒子边长 |
| 孔隙连通性(C/I) Connectivity index | $\frac{C}{I}$ | (10) C 为连通孔隙度,%; I 为非连通孔隙度,% |

ROI的孔隙系统分为连通孔隙和孤立孔隙,图2为连通孔隙和孤立孔隙的三维重构模型。为了便于比较,本研究根据孔隙等效直径,将孔隙分为6个等级:100~200(1级)、200~300(2级)、300~600(3级)、600~800(4级)、800~1 000(5级)、>1 000(6级) μm 。

1.4 孔隙网络模型

孔隙网络模型(PNM)是一种用于描述多孔介质(如岩石、土壤等)内部孔隙结构和孔隙空间分布的理论模型^[28]。为进一步提取孔隙结构参数,建立孔隙网络模型(图3)。模型中的球形代表土样的孔隙结构,连接孔隙的通道为孔喉,对不同的孔隙大小采用不同的颜色进行渲染,可以看出土壤中的孔隙连通结构。在本研究中,PNM连通孔隙主要选取孔隙半径、孔隙表面积和配位数进行孔隙结构分析,PNM孤立孔隙主要选取孔喉半径、孔喉表面积和通道长度进行孔喉特征分析,其中配位数代表孔隙网络的连通性,能够有效反映渗流途径^[29],配位数越大说明孔隙的连通性越好,配位数为0表示孔隙为孤立

孔隙,配位数为1时说明该孔隙仅作为储层^[30]。通道长度越大表明流体在流动过程中遇到的摩擦和阻力越大,孔隙结构越复杂。

1.5 饱和导水率计算

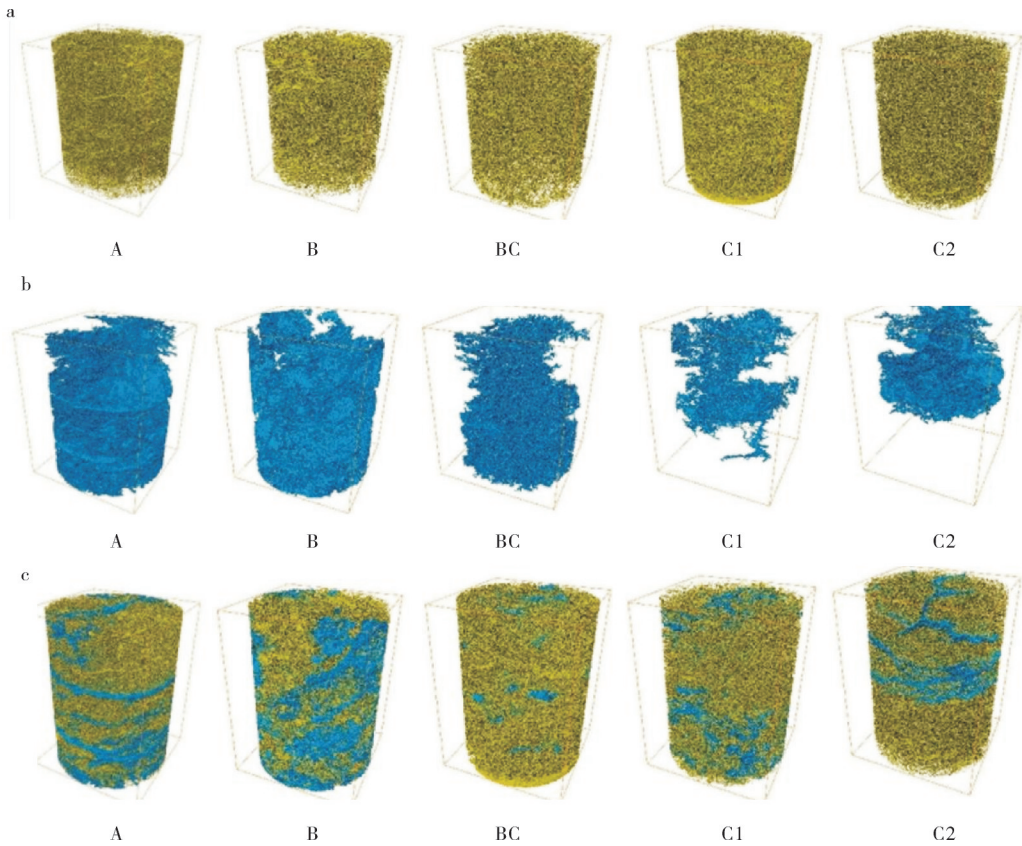
饱和导水率 K_s 是表征土壤或其他多孔介质水力特性的重要指标,反映了水在土壤中的渗透速度和能力;饱和导水率越高,表明水流速度越快,渗透能力越强。将饱和的环刀土样放在试验平台上调整适合的水头高度后开始向样品供水,当样品下方排出水量稳定时,根据达西定律方程(10)计算得到土样的饱和导水率。

$$K_s = \frac{QL}{A(h_1 - h_2)} \quad (11)$$

式(11)中, K_s 为土壤饱和导水率, cm/s ; Q 为体积流量, m^3/s ; A 为土柱横截面积, cm^2 ; h_1 为测量段初始段水头压力, cm ; h_2 为测量段末端水头压力, cm ; L 为测量段土柱长度, cm 。

1.6 细观渗流仿真模拟

水分在土体孔隙中发生不均衡流动的现象称为



a: 孤立孔隙三维重构 Three-dimensional reconstruction of isolated pores; b: 连通孔隙三维重构 Three-dimensional reconstruction of connected pores; c: 连通孔隙+孤立孔隙三维重构 Three-dimensional reconstruction of connected and isolated pores

图2 不同土层孔隙三维重构模型

Fig.2 Three-dimensional reconstruction model of pores in different soil layers

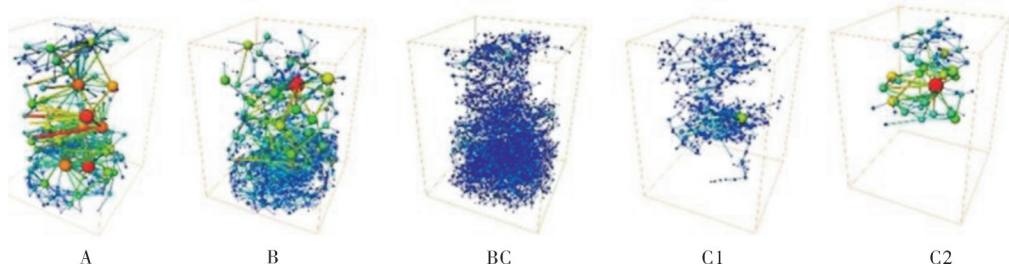


图3 不同土层孔隙网络模型

Fig.3 Modeling of pore network in different soil layers

渗流，而渗流能力的大小用绝对渗透率来表征^[31]。渗透率是指水通过土壤颗粒间孔隙的渗透特性，是岩土材料最重要的水力参数之一^[32]。本研究利用AVIZO软件对花岗岩残积土的孔隙网络模型进行数值模拟。该软件提供了1个函数AVIZO XLab Hydro Extension,可以根据Navier-Stokes方程进行绝对渗透率测试模拟,计算出的绝对渗透率和流线模型的结果能够准确反映花岗岩残积土的渗透特性。在本研究中,采用不可压缩流体流动的Navier-Stokes方程来模拟孔隙结构中的渗流过程。基于AVIZO

软件计算流体力学(CFD)方法给定土壤渗流模拟的控制方程为^[33]:

$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla(\rho u) = 0 \\ \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla(\rho uu) = \nabla \sigma \\ \frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla(\rho uE) = \sigma \cdot \nabla u - \nabla q \end{cases} \quad (12)$$

式(12)中, u 为流速, m/s ; ρ 为流体密度, kg/m^3 ; t 为时间, s ; E 为内能, m^2/s^2 ; σ 为应力张量, $kg/(m \cdot s^2)$; q 为热流密度, kg/s^3 ; ∇ 为拉普拉斯算子, m^{-1} 。

根据 Navier-Stokes 方程,用达西定律^[34]计算土壤的绝对渗透率(K):

$$K = \frac{Q\mu L}{A\Delta P} \quad (13)$$

式(13)中, Q 为体积流量, m^3/s ; μ 为流体的黏度系数, $Pa \cdot s$; L 为计算样品的长度, m ; A 为流动截面积, m^2 ; ΔP 为进出口流体压强差, MPa 。

1.7 数据处理与分析

采用 Excel 2013 和 SPSS 20.0 统计软件进行数据处理,利用最小显著差异法对不同处理间差异进行统计学分析,对于微观结构参数敏感性分析,通过 Pearson 相关系数(r)评估对于渗流特性的影响程度大小,并采用决定系数(R^2)衡量模型的拟合程度:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (14)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (15)$$

2 结果与分析

2.1 花岗岩土壤孔隙定量表征

1) 孔隙结构定量表征。图4为花岗岩残积土不同土层切片数量上的孔隙度分布情况,以及各土层的平均孔隙度;其中切片数代表单个土壤样品的长度,孔隙数量越多代表距离样品顶面的距离越远。由图4可见,土壤孔隙度及连通孔隙度随着土壤深度的增加整体呈下降趋势,单个土壤样品的孔隙度变化范围均在4.2%~25.1%,样品内部随着距样品顶面距离的增加,孔隙度有减小的趋势。随着土壤深度的增加,平均孔隙度分别为11.5%、11.1%、8.9%、8.4%和5.8%,A层平均孔隙度最高,其大小顺序为A>B>BC>C1>C2,其中A层孔隙度比其他土层分别增加了0.4、2.6、3.1和5.7个百分点,C2层孔隙度下降了A层的1倍左右,表明水和空气更容易在表层土壤中移动(A层和B层),土壤质地较为松散,具有良好的渗透性和通气性,过渡层和深层土壤水和空气的移动受到限制(C1层和C2层),排水性差和通气性不足。

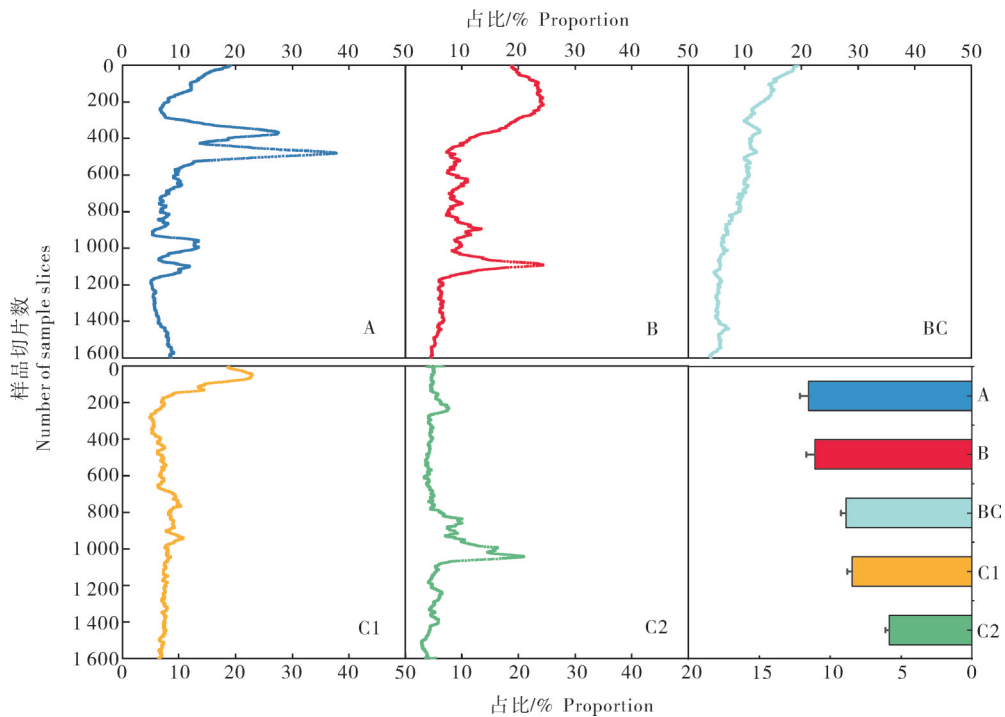


图4 不同土层土壤孔隙度分布

Fig.4 Distribution of soil porosity in different soil layers

在所有处理中,在100~200 μm 范围内的花岗岩残积土孔隙占全部孔隙的65%(图5a),随着等效直径的增加,孔隙数量占比明显减少,大孔隙占比较少。随着土壤深度增加,孔隙大小变化趋势不太明

显。1级孔隙数量占比分别为70.16%、64.75%、52.42%、57.07%和66.35%,A层、B层、C1层和C2层比BC层的孔隙数量分布高17.74%、12.33%、4.65%和13.93%,BC层孔隙数量占比最少。而2~4

级别的BC层中的孔隙占比最多,分别为24.21%、16.27%和1.71%,与1级情况相反。由图5b所知,从A层到C2层,随着土壤深度的增加,连通孔隙度逐渐降低,孤立孔隙度逐渐增加,孔隙连通性值呈连续下降趋势,表明土壤的连通性逐渐减弱。从A层到C2层连通孔隙度不断下降,分别为82.54%、78.75%、64.67%、47.53%和45.93%,孔隙连通性依次下降了1.02、1.88、0.92和0.06, A层连通孔隙度最大

(82.54%),孤立孔隙度最小(17.46%),孔隙连通性值最大(4.73),土壤连通性最好,这是因为表层土壤受到更多风化和生物活动的影响,有机质含量较高,土壤结构疏松,因此渗透性强。BC层后孤立孔隙度超过连通孔隙度占据主体地位,孔隙连通性值明显低于上土层,表明C1和C2层存在大量孤立孔隙,大孔隙连通性较差,保水能力较强,水流下渗能力较弱。

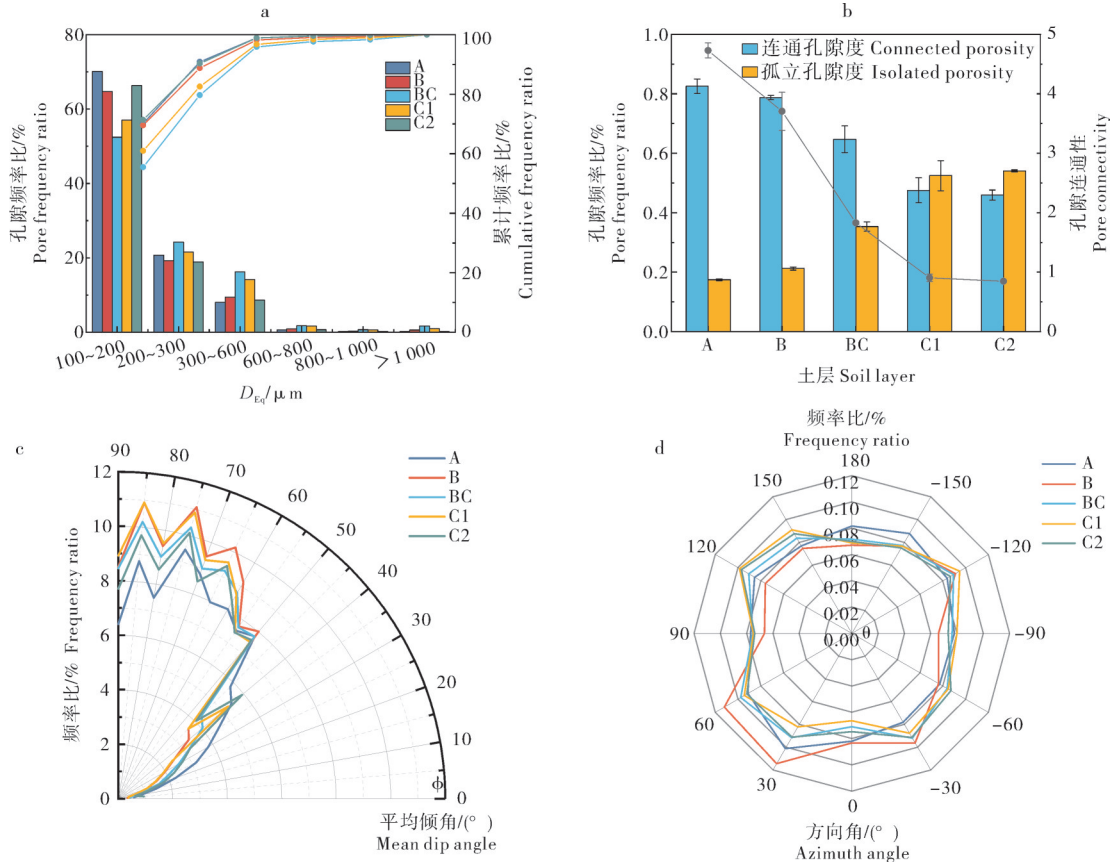


图5 不同土层孔隙等效直径占比(a)、不同土层孔隙连通性(b)、不同土层孔隙倾角方向角(c)和方位角的频率分布(d)
Fig.5 Percentage of pore equivalent diameter in different soil layers (a), pore connectivity of different soil layers (b), frequency distribution of direction angle (c) and azimuth angle of pore inclination angle in different soil layers (d)

由表3可知,随着土壤深度的增加,孔隙连通性逐渐减弱,孤立孔隙度逐渐增加,土壤的渗透性逐层降低,分形维数和迂曲度的变化表明虽然土层间孔隙形状复杂性较为一致,但孔隙路径在B层较为曲折(3.07),这会影响土壤中水和溶质的流动性。A层连通孔隙度为82.54%,孤立孔隙度为17.46%,孔隙连通性良好,总孔隙度为11.69%,分形维数为1.45,迂曲度为1.99,表示孔隙结构较为简单且路径较直。从A层到C2层的分形维数分别为1.45、1.40、1.41、1.39和1.36,相差不超过6%,说明土壤的粗糙程度不受深度的影响。迂曲度也是判别花岗岩残积土渗

透性的关键因素,迂曲度的大小顺序为B>C2>C1>BC>A层,说明表层的孔隙结构具有较好的连通性。B层迂曲度最高(3.07),比其他土层分别增加了54.3%、49.8%、42.1%和29.0%。

2) 孔隙形态定量表征。由不同深度土层孔隙倾角方向角 φ (图5c)和倾角方位角 θ 的频率分布(图5d)可见,不同土层的孔隙倾角变化趋势大致相似,不同深度土层的孔隙在水平面上的分布相对均匀,孔隙的取向不受土壤深度的影响。在从A到C2层方向角平均值为58.36°、64.15°、62.22°、63.17°和60.30°(图6a),频率分布无显著差异。以A层为例,

表3 孔隙结构参数

Table 3 Definition and explanation of pore parameters

| 土层 Soil layer | 连通孔隙度/% Connected porosity(PC) | 非连通孔隙度/% Isolated porosity(PI) | 总孔隙度/% Total porosity(TP) | 分形维数 Fractal dimension | 迂曲度 Tortuosity |
|------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|---------------------------|-------------------|
| A | 82.54 | 17.46 | 11.69 | 1.45 | 1.99 |
| B | 78.75 | 21.25 | 10.44 | 1.40 | 3.07 |
| BC | 64.67 | 35.33 | 8.88 | 1.41 | 2.05 |
| C1 | 47.53 | 52.47 | 8.42 | 1.39 | 2.16 |
| C2 | 45.93 | 54.07 | 5.83 | 1.36 | 2.38 |

1.42%在0°~10°范围内,34.17%在10°~50°范围内,64.41%在50°~90°范围内,表明大部分花岗岩残积土孔隙为近垂直性,这会促进水分的垂直渗透和溶质迁移。

由图6可知,花岗岩残积土各土层的大孔隙主要为规则孔隙,孔隙形状接近于圆形,极少部分为细长孔隙,花岗岩残积土整体渗透性较强。各土层的规则孔隙占比分别为52.02%、52.41%、55.74%、53.26%和51.88%,是不规则孔隙的1.09倍、1.12倍、1.27倍、1.15倍和1.09倍。由图6b可见,随着土

壤深度增加,孔隙形状无显著差异,F值均在0.12附近。但误差线相对较长,说明各土层土壤的孔隙形状因子存在一定的变异性。由图6c可见,浅层土壤(A层和B层)的孔隙形状更为规则、更接近圆形,上层土壤渗透性较好。而深层土壤(C1层和C2层)的孔隙形状较不规则,相比较而言渗透性更差。当球度>0.5时,各土层孔隙占比分别为97.16%、97.01%、95.34%、96.62%和96.89%,球度<0.5的孔隙占比均低于5%,同样说明规则孔隙为孔隙主体。

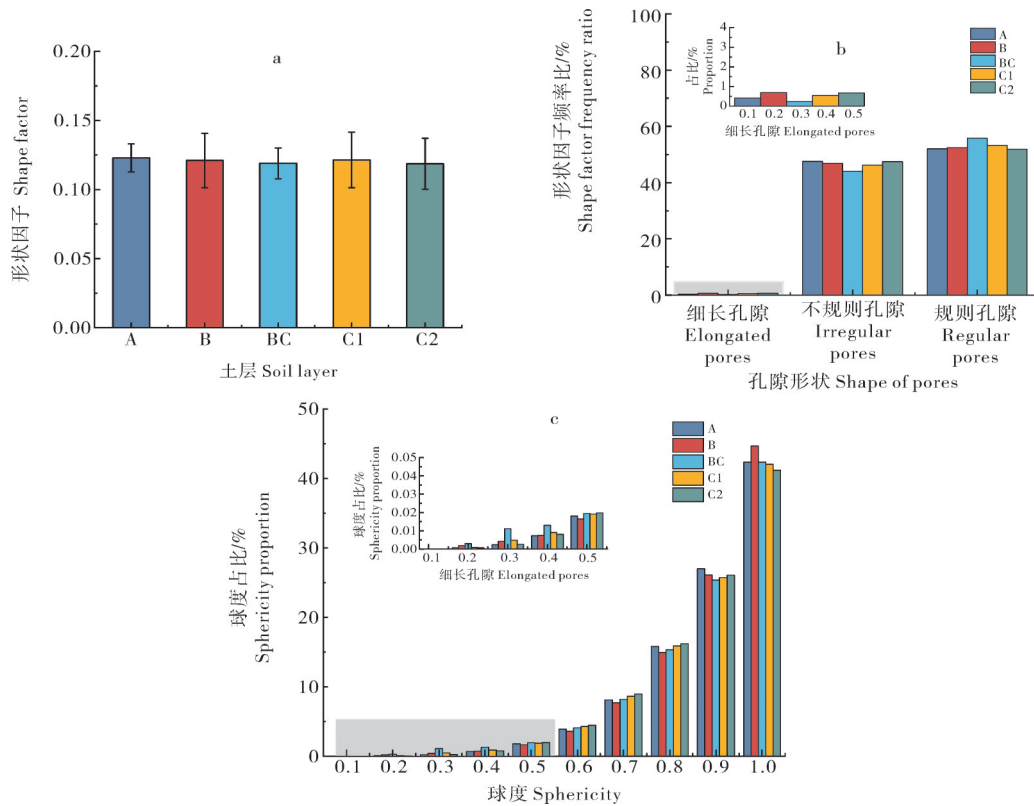


图6 不同土层孔隙平均形状因子(a)、形状因子占比(b)和球度占比(c)

Fig.6 Average shape factor of pores in different soil layers (a), proportion of shape factor (b) and proportion of roundness (c)

2.2 孔隙网络模型

由图7a可以看出PNM连通孔隙半径主要集中在0.1~1 mm范围内,占全部连通孔隙的60%~

90%,随着半径的增加孔隙数量占比急剧减少,不同土层之间孔隙数量相差较大。浅层土壤(A层和B层)孔隙半径和配位数均值分别为1.83、1.38 mm、

4.78和4.91(表4),孔隙半径分别比BC层和C1层增加了0.86、0.8、0.41和0.35 mm,说明表层土壤孔隙较大且连通性好。深层土壤(C1层和C2层)孔隙半径有回升,可能是因为深层土壤中的矿物质成分变化和细颗粒增加,导致孔隙特征的变化。

由表4可见,各土层的孔隙配位数最大值分别为31、54、37、21和13,均值分别为4.78、4.91、4.88、2.71和3.97,由于连通孔隙配位数主要集中在20以内,超

过20的呈离散点状分布且数量较少^[35],因此,主要统计20以内的配位数。从图7b可以看出配位数为0~5的孔隙构成了土壤孔隙的主体,占总孔隙数量的60%以上,配位数>10的连通孔隙数量分别占全部孔隙数的13.1%、11.3%、10.9%、1.8%和1.7%,随着土壤深度的增加土壤连通性降低,深层土壤的孔隙连通性最差,A层土壤连通性最好,C1层和C2层孔隙连通性显著降低。

表4 PNM连通孔隙参数表

Table 4 PNM connected pore parameter table

| 土层 Soil layer | 孔隙半径/mm Pore radius | | | 配位数 Coordination number | | | 孔隙表面积/mm ² Pore surface area | | |
|------------------|------------------------|------|------|----------------------------|-----|------|--|------|--------|
| | Max | Min | Ave | Max | Min | Ave | Max | Min | Ave |
| A | 6.14 | 0.45 | 1.83 | 31 | 1 | 4.78 | 10 693.00 | 4.90 | 703.86 |
| B | 6.78 | 0.32 | 1.38 | 54 | 0 | 4.91 | 7 306.70 | 1.75 | 188.73 |
| BC | 3.09 | 0.29 | 0.97 | 37 | 0 | 4.88 | 913.06 | 1.42 | 60.37 |
| C1 | 4.00 | 0.35 | 1.03 | 21 | 0 | 2.71 | 1 064.35 | 2.00 | 67.99 |
| C2 | 6.14 | 0.50 | 2.47 | 13 | 1 | 3.97 | 7 652.72 | 7.26 | 966.83 |

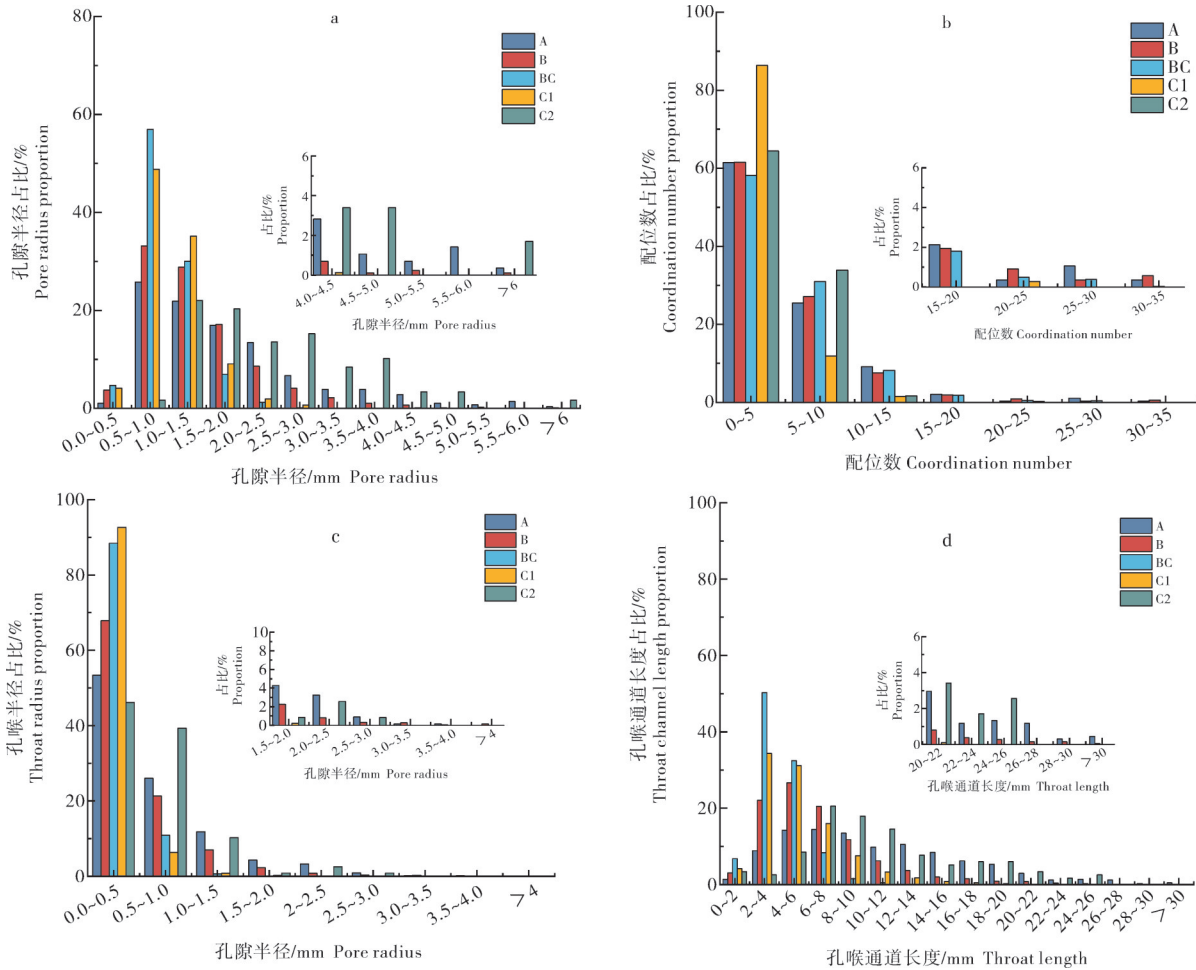


图7 不同土层孔隙半径(a)、配位数占比分布(b)、孔喉半径占比(c)和孔喉通道长度占比(d)

Fig.7 Pore radius of different soil layers(a), distribution of the proportion of allotment numbers(b), percentage of pore throat radius(c) and percentage of pore throat channel lengths(d)

表5 PNM孔喉参数

Table 5 PNM pore throat parameter

| 土层 Soil layer | 孔喉半径/mm Throat radius | | | 孔喉面积/mm ² Throat surface area | | | 通道长度/mm Channel length | | |
|------------------|--------------------------|-------|------|---|------|------|---------------------------|------|-------|
| | Max | Min | Ave | Max | Min | Ave | Max | Min | Ave |
| A | 3.83 | 0.019 | 0.65 | 46.19 | 1.13 | 2.4 | 35.78 | 1.2 | 10.77 |
| B | 4.29 | 0.01 | 0.48 | 57.74 | 0 | 1.42 | 31.65 | 0.94 | 6.81 |
| BC | 1.36 | 0.01 | 0.28 | 5.83 | 0 | 0.35 | 15.68 | 0.73 | 3.98 |
| C1 | 1.92 | 0.02 | 0.24 | 11.53 | 0 | 0.30 | 21.06 | 0.93 | 5.26 |
| C2 | 2.72 | 3.25 | 0.61 | 23.20 | 0 | 1.91 | 26.95 | 0.00 | 12.69 |

图7c揭示了孔隙网络模型中孔喉半径分布的变化趋势,孔喉半径集中分布在0~1 mm范围内,占全部孔喉的79%~99%,孔喉半径变化趋势与连通孔隙半径变化趋势相似。随着土壤深度的增加,>1 mm的孔喉数量只占总孔喉数量的20.6%、10.8%、0.64%、1.02%和14.5%。C1层的孔隙几乎全部集中在0~0.5 mm范围内(92.7%),表明深层土壤受压实作用影响最大,形成了大量的小孔隙。由图7d可知孔喉通道长度分布趋势与连通孔隙半径分布变化趋势相似,随着通道长度的增加,孔喉占比总体呈现减少趋势,通道长度主要分布在0~10 mm,其中A层通道长度在5~10 mm范围内最长,C2层通道长度在15~20 mm内最长。由表5可知,随着深度增加,平均通道长度呈现先下降到BC层再增加的趋势,BC

层平均通道长度最短,比A层、B层、C1层和C2层分别缩短了6.79、2.83、1.28和8.71 mm,C2层平均通道长度最长。

2.3 渗流模拟分析

花岗岩残积土不同土层渗流模拟结果如图8所示,直观展现了水分在土壤中的流动路径和速度分布。由图8可见,A层和B层水分流动路径集中,说明孔隙连通性较好;BC层水分流动路径更加分散,表明其孔隙结构更加复杂;C1层和C2层的流动路径更加密集且混乱,C2层混乱程度更剧烈,C1和C2层土壤孔隙更加密集但孔隙大小不一,导致水土流动更加广泛但无序,从渗流模拟结果可以看出孔隙连通性对土壤的渗透性有重要影响。

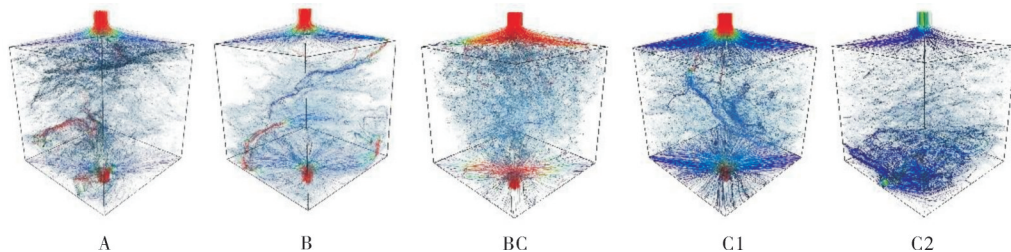


图8 渗流模拟图

Fig.8 Seepage simulation diagram

通过渗流模拟由Navier-Stokes方程测定的绝对渗透率,根据绝对渗透率计算预测的饱和导水率,将实测数据、预测数据和连通孔隙度进行非线性拟合(图9)。由图9可见,花岗岩残积土的饱和导水率随连通孔隙度呈指数增长,预测饱和导水率与实测值非常接近,预测效果好。随着土壤深度的增加,连通孔隙度和饱和导水率均明显降低后趋于稳定,表明连通孔隙度对花岗岩残积土的渗透性起决定性作用。

对湖北省通城县崩岗发生区花岗岩残积土的各类孔隙参数进行相关性分析,结果(图10)显示,随着土壤深度的增加,连通孔隙度、孔隙连通性值、分形维数与饱和导水率呈极显著正相关($P<0.001$),说

明连通孔隙度在决定渗透性中的重要作用。孔隙形态参数(球度)、孔隙方向参数(倾角与方位角)与迂曲度呈显著相关($P<0.05$),说明孔隙形状及垂向角度影响流体在土壤孔隙中的流动路径,进而影响孔隙连通性。PNM参数(孔喉直径、通道长度、PNM孔喉直径)之间存在显著正相关性($P<0.05$),表明这些孔隙几何特征共同影响孔隙网络的结构和功能。

3 讨论

3.1 花岗岩风化土孔隙结构和形态特征

本研究结果表明,不同土层孔隙结构特征差异显著($P<0.05$),随着土壤深度增加,土壤孔隙度逐

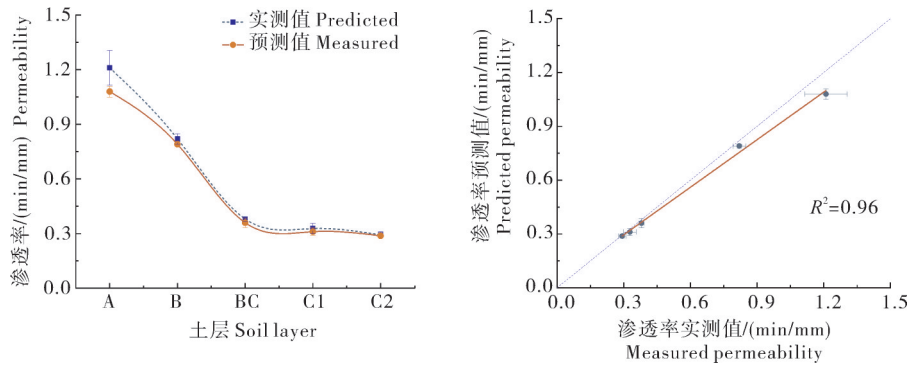
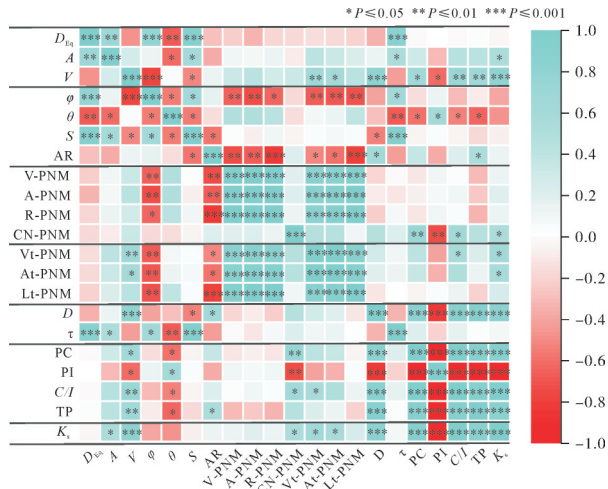


图9 导水率和连通孔隙度的关系

Fig.9 The relationship between hydraulic conductivity and connected porosity



D_{Eq} 为等效直径; A 为孔隙面积; V 为孔隙体积; φ 为方位角; θ 为方位角; S 为球度; AR 为形状因子; V -PNM为孔隙网络模型中连通孔隙体积; A -PNM为孔隙网络模型中连通孔隙面积; R -PNM为孔隙网络模型中连通孔隙半径; CN -PNM为孔隙网络模型中连通孔隙配位数; Vt -PNM为孔隙网络模型中连通孔隙孔喉体积; At -PNM为孔隙网络模型中连通孔隙孔喉半径; Lt -PNM为孔隙网络模型中连通孔隙孔喉长度。*表示显著相关($P < 0.05$); **表示非常显著($P < 0.01$); ***表示极其显著($P < 0.001$)。 D_{Eq} is the equivalent diameter; A is the pore area; V is the pore volume; φ is the azimuth angle; θ is the azimuth angle; S is the sphericity; AR is the shape factor; V -PNM is the connected pore volume in the pore network model; A -PNM is the connected pore surface area in the pore network model; R -PNM is the radius of connected pores in the pore network model; CN -PNM is the coordination number of connected pores in the pore network model; Vt -PNM is the throat volume of connected pores in the pore network model; At -PNM is the throat radius of connected pores in the pore network model; Lt -PNM is the throat length of connected pores in the pore network model. * indicates significant correlation ($P < 0.05$); ** indicate highly significant ($P < 0.01$); and *** indicate extremely significant ($P < 0.001$).

图10 孔隙特征参数与渗流特性相关性分析

Fig.10 Correlation analysis between pore characteristic parameters and seepage characteristics

层降低, 连通孔隙度也随着深度增加逐从A层的82.54%降至C2层的45.93%, 孔隙连通性从4.7下降至0.85, C1和C2层存在大量孤立孔隙, 表明土壤孔隙的连通性逐渐减弱, 深层土壤的渗透性更差。C1层和C2层的孔隙连通性值仅为0.91和0.85, 表明C1和C2层存在大量孤立孔隙, 孤立孔隙无法与其他孔隙相互连通, 导致土壤中水和空气的流动路径受阻, 影响水分和养分的有效传递, 导致土壤孔隙连通性较差, 土壤渗透性低, 通气性差。浅层土壤由于受到植物根系和生物活动的影响, 有机质含量较高, 土壤结构较为疏松, 孔隙连通性好^[21]; 而深层土壤逐渐向母岩过渡, 土壤颗粒间的胶结作用不断增强, 孔隙结构更加致密, 因此, 孔隙连通性较差, 水流下渗能力较弱。随着等效直径的增加, 孔隙数量占比明显减少, 大孔隙占比较少。花岗岩作为一种富含矿物质的侵入岩, 经过长时间的化学风化和物理风化过程, 逐渐破碎成不同粒径的颗粒。化学风化会使花岗岩中的矿物质分解, 形成黏土矿物和其他细粒物质。温度变化、冰冻融化和植物根系等物理因素导致岩石崩解, 生成不同粒径的颗粒, 这种过程通常会生成大量的细颗粒, 故而花岗岩残积土中大孔隙占比较少。

通过对孔隙倾角方向角(φ)和倾角方位角(θ)的频率分布分析, 发现花岗岩残积土的孔隙取向在水平面上相对均匀, 不受土壤深度的显著影响, 各土层孔隙倾角变化趋势大致相似, 且孔隙形状以规则孔隙为主, 孔隙形状接近圆形, 有助于水分的垂直渗透和溶质迁移。Jiao等^[36]对黄土孔隙参数的定量研究发现黄土大孔隙的取向可能不受地质力的控制, 而是受黄土沉积过程的影响, 从侧面说明了孔隙取向不受土壤深度的影响。各土层孔隙形状接近于圆形, 虽然土壤深度增加导致细长孔隙和不规则孔隙的占比略有增加, 但总体上花岗岩残积土的孔隙形

态较为规则,渗透性较强。这是因为花岗岩残积土是由花岗岩风化形成的,其颗粒大小和分布较为均匀,且风化过程使得土壤颗粒之间形成了较为规则的孔隙结构。此外,风化过程中产生的大量细小矿物颗粒在浅层土壤中堆积,使得浅层土壤孔隙度较高,渗透性较好^[37]。

3.2 花岗岩风化土孔隙网络特征

孔隙网络是评价土壤水文特性的一个重要特征。通过对花岗岩残积土孔隙网络模型(PNM)的分析发现,不同土层的连通孔隙半径和配位数均存在显著差异。PNM连通孔隙半径主要集中在0.1~1 mm范围内,占全部连通孔隙的60%~90%,随着半径的增加孔隙数量占比急剧减少,不同土层之间孔隙数量相差较大。浅层土壤(A层和B层)的孔隙半径平均值分别为1.83和1.38 mm,配位数均值分别为4.78和4.91。BC层和C1层的孔隙半径和配位数均值较低,分别为0.97和4.88 mm、1.03和2.71。表层土壤孔隙较大且连通性较好。随着土壤深度的增加,孔隙半径和配位数明显减小。土壤孔隙结构的变化与土壤矿物成分、颗粒大小以及压实程度密切相关^[38]。浅层土壤由于受到更多的风化和生物活动影响,其孔隙结构较为疏松,孔隙半径较大。而深层土壤由于受到压实作用和矿物质成分的影响,上覆压力使深层土壤孔隙被挤压,破碎成较小孔隙,导致孔隙结构趋于紧密,孔隙半径较小。Wei等^[39]对马兰黄土孔隙进行定量分析,发现随黄土埋深增加,孔径大于200 μm 的孔隙面积减小,中等孔径孔隙逐渐出现,而孔径小于120 μm 的孔隙面积逐渐增大,并且随黄土埋深的增加表现得更为明显,本研究得到类似的结果。

孔喉半径的分布与连通孔隙半径的变化趋势相似,孔喉半径主要集中在0~1 mm范围内,占全部孔喉的79%~99%。随着土壤深度的增加,>1 mm的孔喉数量显著减少,进一步说明深层土壤受压实作用影响较大,导致较大的孔隙被压缩,形成了大量的小孔隙。此外,深层土壤经历了更长时间的风化和淋溶作用,大颗粒被逐渐分解和搬运,使得大孔隙数量减少。平均通道长度随着土壤深度的增加先下降后增加,表层土壤由于颗粒较粗,孔隙空间较大,导致平均通道长度较长。随着深度增加,孔隙被压实和填充,小孔隙增多,使得平均通道长度变短。然而,进一步增加深度时,土壤结构趋于稳定,孔隙网络重新形成,平均通道长度再次增加。BC层是土壤剖面中经历明显变化的层次,受到上层土壤压实和

下层土壤的支撑作用,使得孔隙结构最为紧密,平均通道长度最短。过渡层的土壤结构最为致密,是土壤水分和养分垂直移动的关键区域。

3.3 花岗岩风化土孔隙微观特性对渗流特征的影响

本研究中渗流模拟分析结果显示花岗岩残积土的渗透性与孔隙连通性密切相关。随着土壤深度的增加,连通孔隙度和饱和导水率均明显降低后趋于稳定,连通孔隙度对渗透性有决定性作用。本研究中花岗岩残积土的饱和导水率随连通孔隙度呈指数增长关系,预测导水率与实测值非常接近,进一步验证了连通孔隙度对土壤饱和导水率的决定性作用。连通孔隙度较高的土壤,其水分流动路径较为集中,流动速度较快,渗透性较好;而连通孔隙度较低的土壤,其水分流动路径分散,流动速度较慢,渗透性较差。Faloye等^[40]研究结果显示土壤孔隙连通性与渗透性之间存在显著相关性,孔隙连通性越好,土壤渗透性越强,本研究结果与此一致。相关性分析结果显示,连通孔隙度、孔隙连通性与饱和导水率呈极显著正相关($P<0.001$),说明连通孔隙度在决定土壤渗透性中的重要作用。花岗岩残积土孔隙形态参数(形状因子和球度)与迂曲度呈显著相关($P<0.05$),表明孔隙形状与流体在土壤孔隙中的流动路径有关,孔隙形状影响孔隙连通性。PNM各参数之间(PNM孔喉半径、通道长度、PNM孔隙半径)也存在显著的相关性($P<0.05$),表明这些几何特征共同影响着孔隙网络的结构和功能。孔隙网络结构特征与孔隙连通性直接影响土体渗流能力,孔隙形态与方位间接作用于孔隙渗流通道,以上特征参数共同决定花岗岩风化土体水力传导过程。

参考文献 References

- [1] 韩杰欣,邓芷慧,王旌靡,等.干湿交替条件下花岗岩崩岗区土壤裂隙发育规律[J].水土保持学报,2024,38(5):262-271. HAN J X, DENG Z H, WANG J M, et al. Development of soil cracks in granite Benggang area under wetting-drying cycles[J]. Journal of soil and water conservation, 2024, 38(5): 262-271 (in Chinese with English abstract).
- [2] CAMMERAAT E, ANDERS N, SCHOLTEN R, et al. Erosion and sedimentation on an abandoned terraced and gullied hillslope[J/OL]. Catena, 2024, 246: 108393 [2025-05-19]. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108393>.
- [3] WEN Y R, KASIELKE T, JIANG H, et al. Effects of lithology and soil horizons on gully morphology in the Mollisol region of China[J/OL]. Geoderma, 2024, 446, 116907 [2025-

- 05-19].<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.116907>.
- [4] LIU Z, ZHANG S, WEI Y J, et al. Spatial variation of gully erosion determinants across subtropical regions of China [J/OL]. *Soil and tillage research*, 2024, 244: 106275 [2025-05-19].<https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106275>.
- [5] 王飞, 邹岩琳, 庞瑞, 等. 加热-冷却过程中花岗岩细观热破裂机制[J]. *岩土工程学报*, 2024, 46(10): 2138-2147. WANG F, ZOU Y L, PANG R, et al. Thermal cracking mechanism of granite during heating and cooling processes [J]. *Chinese journal of geotechnical engineering*, 2024, 46(10): 2138-2147 (in Chinese with English abstract).
- [6] 辜婧瑶. 干湿循环对崩岗区花岗岩红壤孔隙结构的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2021. GU J Y. Influence of wetting-drying cycles on pore structure of granite red soils in benggang erosional area [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2021 (in Chinese with English abstract).
- [7] LIU B Y, ZHANG B, YIN Z M, et al. Ephemeral gully development in the hilly and Gully Region of China's Loess Plateau [J]. *Land degradation & development*, 2024, 35(1): 128-141.
- [8] CHENG Q, TANG C S, XU D, et al. Water infiltration in a cracked soil considering effect of drying-wetting cycles [J/OL]. *Journal of hydrology*, 2021, 593: 125640 [2025-05-19].<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125640>.
- [9] KANG H L, WANG W L, GUO M M, et al. The allocation and erosive effects of on-wall flow on loess gully heads [J/OL]. *CATENA*, 2024, 246: 108422 [2025-05-19].<https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108422>.
- [10] YIN T B, SU J Z, ZHUANG D D, et al. Experimental study on microscopic characteristics of liquid-cooled granite based on mercury injection method [J]. *Journal of central south university*, 2024, 31(1): 169-181.
- [11] LAN C H, TAO Z Y, WU Y T, et al. Local parallel free generation and dynamic affine transformation method for soil three-dimensional pore structure information model [J/OL]. *Geoderma*, 2024, 448: 116975 [2025-05-19].<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.116975>.
- [12] 黄彦华, 张坤博, 杨圣奇, 等. 高温后花岗岩微观特征及其对强度影响规律研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2025, 44(2): 359-372. HUANG Y H, ZHANG K B, YANG S Q, et al. Study on the microstructure characteristic and its influence on strength properties of granite specimens after high temperature treatment [J]. *Chinese journal of rock mechanics and engineering*, 2025, 44(2): 359-372 (in Chinese with English abstract).
- [13] 黎澄生, 孔令伟, 舒荣军, 等. 花岗岩残积土剪切带上的细观结构损伤规律[J]. *岩土力学*, 2023, 44(11): 3203-3212. LI C S, KONG L W, SHU R J, et al. Meso-structure damage evolution in shear bands of granite residual soil [J]. *Rock and soil mechanics*, 2023, 44(11): 3203-3212 (in Chinese with English abstract).
- [14] LI C S, KONG L W, ZHANG B X, et al. Determination of damage evolution characteristics in granite residual soil shear bands by micro-CT-based advanced digital volume correlation [J/OL]. *Engineering geology*, 2024, 333: 107505 [2024-04-15].<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2024.107505>.
- [15] ZHAO X L, WU Y L, JIA Y, et al. Impact of particle shape on crushing behaviour of rock particles using X-ray micro-CT testing and DEM modelling [J]. *Rock mechanics and rock engineering*, 2024, 57(10): 7813-7834.
- [16] 刘新荣, 张吉禄, 周小涵, 等. 考虑轴向应力作用的贯通裂隙岩体变形及渗流特性研究[J]. *岩土力学*, 2024, 45(12): 3596-3612. LIU X R, ZHANG J L, ZHOU X H, et al. Deformation and seepage characteristics of precast fractured rock mass considering the influence of axial stress [J]. *Rock and soil mechanics*, 2024, 45(12): 3596-3612 (in Chinese with English abstract).
- [17] 钱尼贵. 基于格子 Boltzmann 方法的路面路基细观渗流特性及试验研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018. QIAN N G. Analysis and experimental investigation of mesoscopic seepage characteristics of pavement and subgrade based on lattice Boltzmann method [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018 (in Chinese with English abstract).
- [18] 崔冠哲, 申林方, 王志良, 等. 基于格子 Boltzmann 方法土体 CT 扫描切片细观渗流场的数值模拟[J]. *岩土力学*, 2016, 37(5): 1497-1502. CUI G Z, SHEN L F, WANG Z L, et al. Numerical simulation of mesoscopic seepage field of soil CT scanned slice based on lattice Boltzmann method [J]. *Rock and soil mechanics*, 2016, 37(5): 1497-1502 (in Chinese with English abstract).
- [19] LIU X W, CHEN J X, LIU B, et al. Effects of seepage pressure on the mechanical behaviors and microstructure of sandstone [J]. *Journal of rock mechanics and geotechnical engineering*, 2024, 16(6): 2033-2051.
- [20] 蔡沛辰, 阙云, 李显. 非饱和花岗岩残积土水-气两相驱替过程数值模拟[J]. *水文地质工程地质*, 2021, 48(6): 54-63. CAI P C, QUE Y, LI X. Numerical simulation of water-gas two-phase displacement process in unsaturated granite residual soil [J]. *Hydrogeology & engineering geology*, 2021, 48(6): 54-63 (in Chinese with English abstract).
- [21] 李显. 花岗岩残积土大孔隙特征及细观渗流研究[D]. 福州: 福州大学, 2020. LI X. Study on macropore characteristics and microscopic seepage of granite residual soil [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2020 (in Chinese with English abstract).
- [22] 周小荃. 花岗岩风化岩土体裂隙发育特征及其对崩壁失稳的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2023. ZHOU X Q. Crack development for granitic weathered soil and its influence on wall collapse of Benggang [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023 (in Chinese with English abstract).
- [23] MIAO C, WANG Y. Interpolation of non-stationary geo-data using Kriging with sparse representation of covariance function

- [J/OL]. *Computers and geotechnics*, 2024, 169: 106183 [2025-05-19]. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2024.106183>.
- [24] TANG Y D, HE L, XIAO H G, et al. Fracture extraction from smooth rock surfaces using depth image segmentation [J]. *Rock mechanics and rock engineering*, 2021, 54 (8) : 3873-3889.
- [25] SUN F H, XIAO B, LI S L, et al. Direct evidence and mechanism for biocrusts-induced improvements in pore structure of dryland soil and the hydrological implications [J/OL]. *Journal of hydrology*, 2023, 623: 129846 [2025-05-19]. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129846>.
- [26] YUDINA A, KUZYAKOV Y. Dual nature of soil structure: the unity of aggregates and pores [J/OL]. *Geoderma*, 2023, 434: 116478 [2025-05-19]. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116478>.
- [27] 杨欣欣, 邵保平, 何水鑫, 等. 砂岩热冲击破裂特征及其孔隙连通性分析 [J]. *岩土工程学报*, 2022, 44 (10) : 1925-1934. YANG X X, XI B P, HE S X, et al. Fracture characteristics and pore connectivity of sandstone under thermal shock [J]. *Chinese journal of geotechnical engineering*, 2022, 44 (10) : 1925-1934 (in Chinese with English abstract).
- [28] ZHANG S, ZHANG W Y, ZHOU X T, et al. Prediction of the dynamic pressure drop of filter media loaded with water mists based on the deposited droplet mass distributions and pore network model [J/OL]. *Separation and purification technology*, 2025, 354: 128679 [2025-05-19]. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.128679>.
- [29] 余冬立, 韩笑, 孙泉沁, 等. 基于CT扫描的滨海土壤孔隙空间网络表征与渗流模拟 [J]. *农业机械学报*, 2023, 54 (5) : 308-315. SHE D L, HAN X, SUN X Q, et al. Coastal soil pore space network characterization and seepage simulation based on CT scanning [J]. *Transactions of the CSAM*, 2023, 54 (5) : 308-315 (in Chinese with English abstract).
- [30] 徐君, 黄昕, 王君朋, 等. 礁灰岩孔隙结构表征及关键孔隙节点识别研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2023, 42 (S1) : 3355-3366. XU J, HUANG X, WANG J P, et al. Characterization of pore structure of reef limestone and identification of key pore nodes [J]. *Chinese journal of rock mechanics and engineering*, 2023, 42 (S1) : 3355-3366.
- [31] ZHAO J L, QIN F F, DEROME D, et al. Improved pore network models to simulate single-phase flow in porous media by coupling with lattice Boltzmann method [J]. *Advances in water resources*, 2020, 145: 103738 [2025-05-19]. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2020.103738>.
- [32] MENG T, ZHANG Z J, TAHERDANGKOO R, et al. Temperature-dependent evolution of permeability and pore structure of marble under a high-temperature thermo-hydro-mechanical coupling environment [J]. *Acta geotechnica*, 2024, 19 (9) : 5967-5988.
- [33] STARNONI M, POKRAJAC D, NEILSON J E. Computation of fluid flow and pore-space properties estimation on micro-CT images of rock samples [J]. *Computers & geosciences*, 2017, 106: 118-129.
- [34] ROMANO N. Use of an inverse method and geostatistics to estimate soil hydraulic conductivity for spatial variability analysis [J]. *Geoderma*, 1993, 60 (1/2/3/4) : 169-186.
- [35] 蔡沛辰, 阙云, 蒋振梁, 等. 基于CT扫描的花岗岩残积土3D大孔隙定量表征及流动模拟 [J]. *中国科学(技术科学)*, 2022, 52 (7) : 1065-1082. CAI P C, QUE Y, JIANG Z L, et al. 3D quantitative characterization and flow simulation of granite residual soil based on CT scanning [J]. *Scientia sinica (technologica)*, 2022, 52 (7) : 1065-1082 (in Chinese with English abstract).
- [36] JIAO F X, LI G L, LIU Z Q, et al. Changes in the microscopic morphology and microstructure of loess pores under raindrop splash [J/OL]. *CATENA*, 2024, 243: 108150 [2025-05-19]. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108150>.
- [37] PAWLIK Ł, GAŁĄZKA A, GRUBA P, et al. High-resolution soil sampling reveals the pattern of biological weathering and soil formation under trees [J/OL]. *Science of the total environment*, 2024, 941: 173725 [2025-05-19]. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173725>.
- [38] LIU X Y, ZHANG X W, KONG L W, et al. Disintegration of granite residual soils with varying degrees of weathering [J/OL]. *Engineering geology*, 2022, 305: 106723 [2025-05-19]. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106723>.
- [39] WEI Y N, FAN W, YU B, et al. Investigation of the collapse potential of Malan loess from different regions on the Loess Plateau in terms of pore size distribution and clay distribution form [J]. *Acta geotechnica*, 2023, 18 (12) : 6595-6613.
- [40] FALOYE O T, AJAYI A E, ZINK A, et al. Effective stress and pore water dynamics in unsaturated soils: influence of soil compaction history and soil properties [J/OL]. *Soil and tillage research*, 2021, 211: 104997 [2025-05-19]. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.104997>.

Quantitative characterization and seepage simulation of porosity in granite soils of gully erosion areas

XU Junkang¹, CHEN Xin¹, WANG Jianxun², WEI Yujie¹, ZHANG Guanghui^{1,3}, CAI Chongfa¹

1.College of Resources & Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;
2.State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 3.Power China Huadong Engineering Corporation, Hangzhou 311100, China

Abstract The structural characteristics of pore represent a fundamental aspect of the microscale heterogeneity in weathered granite soils, significantly affecting both the water transport processes and the macroscopic mechanical behavior in soils. A fully weathered gully profile was used to analyze the water transport processes and elucidate the seepage mechanisms in granite residual soils. X-ray computed tomography (CT) was conducted on the weathered soil of intact granite in the entire profile. Three-dimensional (3D) reconstruction and pore network modeling (PNM) were performed with Avizo software to quantitatively characterize the pore structure across the entire profile of soil. The results showed that the porosity in soil had a decreasing trend with the increase of weathering depth ranged from 4.2% to 25.1%, with the porosity in the upper layer of soil (layers A and B) significantly higher than that in the lower layer of sand ($P < 0.05$). The equivalent diameter of pores in all layers of soil was predominantly distributed in the range of 0.1-0.2 mm, with inclination angles mainly concentrated in the range of 40°-50°, and the distribution of azimuthal angles across layers was relatively consistent. Macropores ($>100 \mu\text{m}$) were mostly regular and spherical in shape with sphericity of 0.8-1.0, and more regular pores were observed in the upper layers. The connected and isolated pores showed opposite trends from the top to the bottom of the weathering profile, indicating that there is a gradual decrease in pore connectivity with depth. The radius (0.1-1 mm) of connected pore, coordination number, and the surface area of pore decreased gradually along the weathering profile in the pore network models (PNM) of different layers. The average length of pore throat in the upper layers was generally higher than that in the lower layers. Flow simulations based on the PNM had a strong agreement with measured saturated hydraulic conductivity, with a high coefficient of determination ($R^2 = 0.96$). There were significant positive relationships among key PNM parameters including the diameter of pore throat, channel length, and the radius of connected pore ($P < 0.05$). The morphological and directional parameters of pore including the sphericity, inclination angle, and azimuthal angle were significantly positively correlated with tortuosity ($P < 0.05$). The connectivity of pore, fractal dimension, porosity, coordination number, and throat area were identified as key factors affecting the saturated hydraulic conductivity, indicating that the geometric attributes of pore collectively govern the structure and function of the pore network. It is indicated that 3D reconstruction and quantitative analysis of structures of pore network in weathered granite soils can be used to clarify the differences in topological and spatial structure of pores inside weathered soil, and explain the key reasons for the formation of heterogeneity, anisotropy, and metastable structure of granite soils under weathering.

Keywords gully erosion; soil erosion; granite residual soil; structure of porosity; pore network modeling (PNM); seepage simulation; X-ray computed tomography (CT)

(责任编辑:张志钰)