

DOI: 10.16285/j.rsm.2023.1150

黄土微观结构优先连通模型及其对优先渗流的意义

潘网生¹, 赵恬茵¹, 李 鑫²

(1. 黔南民族师范学院 旅游与资源环境学院, 贵州 都匀 558000; 2. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043)

摘 要: 开展黄土微观结构研究有助于揭示宏观黄土体渗流、黄土滑坡滑动面形成机制和过程。构建了含裂隙和不含裂隙两类黄土微观结构连通模型, 探讨了孔隙连通率 p 、孔隙变异系数 λ 、裂隙最大跨度 ω 及裂隙网络贯通率 q 等参数之间的关系, 并通过黄土微观结构扫描式电子显微镜试验和野外渗流试验对两类模型的连通阈值进行了验证。结果表明: 裂隙的存在, 特别是其跨度大小, 对黄土孔隙形态大小及其分布特征具有重要影响; 裂隙是优先流的重要通道, 是较低孔隙率条件下发生黄土优先流的重要原因; 黄土微观结构优先连通模型研究结论与黄土渗流试验结论基本吻合, 揭示了泾阳南塬“漫灌式”灌溉行为对含裂缝的高陡边坡稳定性的不利影响以及东风村、蒋刘村等大型滑坡发生的根本原因。

关 键 词: 黄土; 优先流; 连通性; 微观结构; 地理信息系统

中图分类号: TU444

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2024) 06-1709-11

Priority connectivity model of loess microstructure and its significance for preferential flow

PAN Wang-sheng¹, ZHAO Tian-yin¹, LI Xin²

(1. School of Tourism and Resources Environment, Qiannan Normal University for Nationalities, Duyun, Guizhou 558000, China;

2. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China)

Abstract: Investigation of loess microstructure can reveal information on the seepage of loess masses and the formation and evolution of sliding surfaces in loess landslides at both macroscopic and mesoscopic levels. A loess microstructure connectivity model, both with and without fractures, is established to investigate the relationships among pore connectivity p , pore variation coefficient λ , maximum fracture span ω , and fracture network penetration q . The connectivity thresholds of these two models are verified through scanning electron microscopy analysis and field seepage tests of loess microstructure. The results show that the existence of fractures, especially their time spans, substantially affects the morphology, size, and distribution of pores in loess. Fractures are important channels for preferential flow and significant contributors to loess preferential seepage under low porosities. The research conclusions from the loess microstructure preferential connectivity model studies agree with the loess seepage test results. These results explain the negative effects of the “flooding-type” irrigation in Nanyuan, Jingyang County, on the stability of high-angle slopes containing fractures and the occurrence of major landslides in Dongfeng and Jiangliu villages.

Keywords: loess; preferential flow; connectivity; microstructure; geographic information system(GIS)

1 引 言

黄土是一种在独特的气候环境下沉积形成的具有一定结构性质的土体^[1]。外界因素作用下, 黄土会产生湿陷、液化、震陷、滑移等不良地质灾害

现象。在此过程中, 黄土颗粒产生空间位移, 结构体遭受破坏, 孔隙结构、数量和大小等均会发生改变^[2-3]。开展黄土微观结构研究是揭示这一现象的本质和内在规律的直接有效手段。

早在 20 世纪 60 年代, 朱海之^[4]基于油浸光片

收稿日期: 2023-07-30

录用日期: 2023-10-19

基金项目: 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室基金课题 (A314021402-202113); 中央引导地方科技发展资金项目 (No.236Z5405G); 河北省自然科学基金 (No.E2021210092); 黔南民族师范学院支持引进高层次人才研究专项项目 (2021qnsyrc03); 黔南民族师范学院 2024 年度重点研究科研能力提升项目 (2024zdzk07)。

This work was supported by the Fund Program of State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau (A314021402-202113), the Central Leading Local Science and Technology Development Fund Program (236Z5405G), the Natural Science Foundation of Hebei Province (E2021210092), the High-level Talent Research Project of Qiannan Normal University for Nationalities (2021qnsyrc03) and the 2024 Key Research and Capacity Improvement Project of Qiannan Normal University for Nationalities(2024zdzk07).

第一作者简介: 潘网生, 男, 1975 年生, 博士, 副教授, 主要从事黄土优先流与黄土地质灾害等方面的研究。E-mail: 450392404@qq.com

法观测马兰黄土微观结构,建立了黄土颗粒结构形态与地理分布之间的联系,为黄土岩石学研究提供了有价值的资料。张宗祜^[5]对黄土粗颗粒接触关系、孔隙特征及胶结特征开展研究,并归纳了 7 种主要的显微结构类型。20 世纪 80 年代以后,高国瑞^[6]、雷祥义^[7]、李云峰^[8]、李华斌^[9]分别围绕黄土显微结构类型、变化特征、渗透性及其对滑坡的影响等开展相关研究。21 世纪以来,李康等^[10]探讨了不同孔隙率的黄土对湿陷变形的贡献量,并解释了黄土湿陷变形的内在结构因素。邓津^[11]、裘国荣^[12]、任权^[13]等基于震陷试验研究了黄土微观结构变化规律及其与宏观力学性质的联系。王家鼎^[14]、刘红玫^[15]等从微观视角探讨了饱和黄土液化前后的孔隙变化特征和规律。樊成意^[16]、唐东旗^[17]等基于扫描式电子显微镜 (scanning electron microscope, 简称 SEM) 研究了黄土微观结构,并将研究成果应用于滑坡机制分析。吴光辉等^[18]基于 SEM 研究了西峰塬原状 Q₃ 黄土湿陷性前后的微观结构变化特征和规律。郭泽泽等^[19]基于 SEM 和能量色散光谱仪 (energy dispersive spectrometer, 简称 EDS) 研究了黄土黏土矿物成分与湿陷性之间的关系。田晖等^[20]应用 SEM 方法研究了干湿和冻融循环对黄土微观结构及黄土边坡坡面土层稳定性的影响。张俊然等^[21]借助 SEM 和压汞仪探讨了非饱和黄土微观结构性差异对水力力学特性的影响。文少杰等^[22]基于 SEM 和 X 射线技术研究了铅污染对黄土微观结构演化及宏观持水性能的影响。近年来,更为先进的三维仪器投入黄土微观结构研究,李鑫等^[23]通过计算机断层扫描 (computerized tomography, 简称 CT) 对泾阳南塬古土壤试样进行扫描,初步探讨了古土壤微观三维结构与水力学性质的联系。郑佳等^[24]基于 CT 图像研究了剪切试验前后黄土微观结构,揭示了其演变源于颗粒破碎、旋转和滑移,孔隙的坍塌与填充以及粒间胶结物的溶解。何晟迪等^[25]基于 CT 技术提出了一种自适应阈值分割方法的黄土孔隙结构特征识别技术,并通过数值模拟试验和室内试验进行了验证。王超等^[26]基于 CT 图像分析了黄土岩微观孔隙特征,揭示了云母对黄土孔隙形成和渗透率各向异性的重要作用。宁瑞浩等^[27]基于 CT 技术量化研究黄土孔隙网络模型,揭示了裂隙和管状通道的优先流特性。

上述研究主要集中于黄土湿陷、液化、滑移、震陷等领域,与渗透性有关的黄土微观结构研究较少,与优先流有关的黄土微观结构研究更是不多。当前,尽管优先流学术研究相当活跃,但主要侧重

于细观尺度的优先流现象描述、试验验证以及宏观尺度的优先流灾害现象描述和分析,而微观尺度的优先流研究较为薄弱,尚未建立黄土微观结构与宏观层面的黄土优先流之间的联系。根据孙银磊等^[28]的观点,微观黄土结构特征是宏观黄土结构特征的缩影,也是宏观物理力学性质与基质吸力之间联系的桥梁。因此,本文以陕西省泾阳县南塬黄土为研究对象,开展黄土微观结构优先连通模型及参数研究,以期建立微观黄土结构优先连通模型与宏观黄土优先流的本质联系,揭示泾阳南塬滑坡发生的根本原因。

2 材料与方法

2.1 材料来源

泾阳南塬位于陕西省泾阳县城南的泾河右岸 (见图 1),是渭北黄土台塬的一部分,塬面开阔、地势呈西北高而东南低,塬边相对高差较大、坡度较陡,与泾河河漫滩或一级阶地相连接^[29-30]。地裂缝和黄土落水洞发育,且分布不均匀,主要集中在滑坡相对活跃地段,如太平镇寨头村和高庄镇东风村。地裂缝发育及高陡的滑坡后壁可能是造成滑坡演化与群体性分布的内在动力机制^[31]。泾阳南塬土壤序列见图 2,由上至下分别由全新世、晚更新世以及中更新世黄土构成。研究区浅层地下水储存地层及埋深不尽一致,上游地段主要储存在 L₅ 黄土层中,埋深 40~50 m。下游地段主要储存在 L₉ 黄土层中,埋深 50~70 m,且研究区地下水水位与水量变化受控于大气降雨和农业灌溉^[29]。

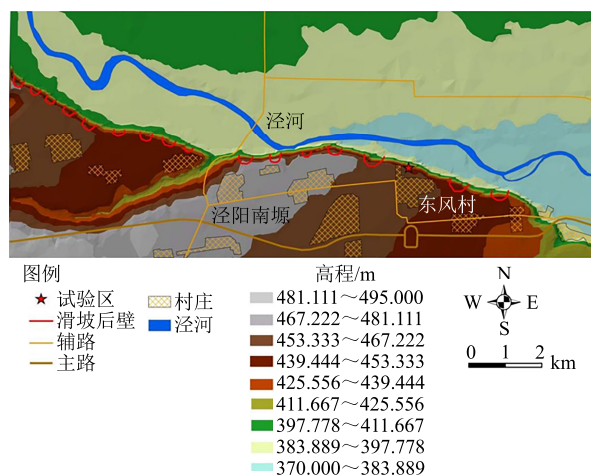


图 1 研究区地形地貌

Fig.1 Topography and geomorphology of the study area

试验黄土土样来自泾阳南塬东风村(泾河南岸)弃耕地,地理位置为 108° 50'48"E, 34° 29'25"N,采

样时间为 2023 年 2 月 6 日。根据来源不同，将土样划分为 A、B 两组。采样前，铲除表层腐殖质土，直至无植被根茎土层。A、B 两组土样均采自表层土以下 1 m 的深度部位，根据对原状黄土表面特征的眼观测，A 组土样的原状黄土体表面分布有清晰的微小裂隙和孔隙（见图 3(a)），B 组土样的原状黄土体表面并无明显裂隙，且孔隙较小（见图 3(b)）。A、B 采样区黄土物理性质见表 1，试样编号见表 2。

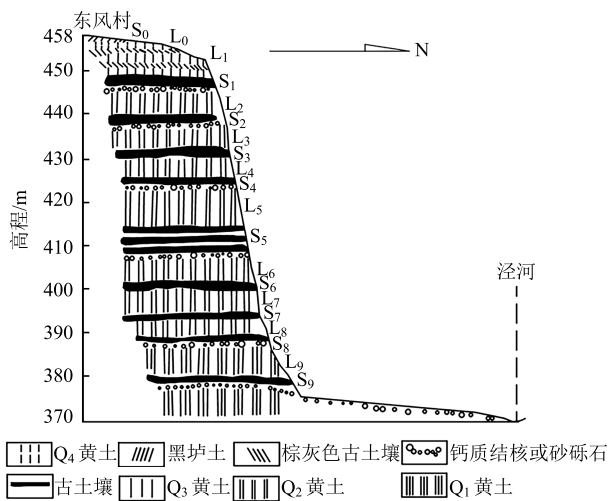


图 2 采样区剖面示意图^[29]
Fig.2 Topographic profile diagram of sampling site^[29]

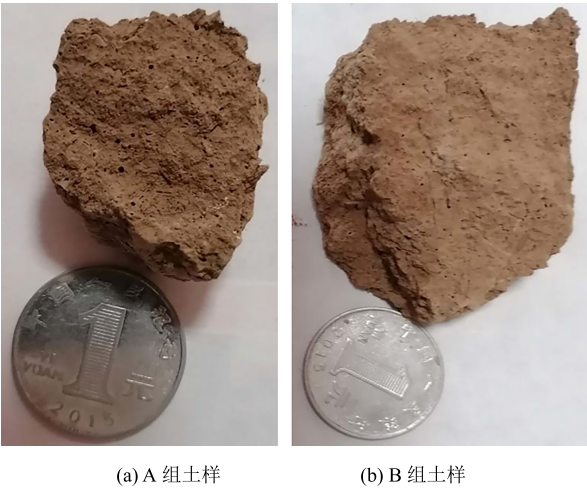


图 3 采样黄土表面特征
Fig.3 Surface characteristics of sampled loess

2.2 方法

2.2.1 模型构建流程

为使黄土微观结构研究具有典型代表意义，避免导致研究结论的片面性，本文首先构建黄土微观结构优先连通模型，确定模型参数；其次，采用 MATLAB 平台，基于蒙特卡洛法随机模拟一定倍数的 SEM 二维照片^[32]，并基于 BresenhamDraw 函数输出任意裂隙最大跨度 ω 的裂隙网络随机样本矩

表 1 不同采样区黄土的物理性质参数
Table 1 Physical properties of loess at different sampling sites

组别	土层深度 /cm	干密度 /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	土壤含水率/%	饱和含水率/%	残余含水率/%	孔隙率 /%	饱和渗透系数 /($\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$)
A	0~20	1.45	20.4	49.8	4.4	49.6	0.068
	20~40	1.45	21.6	49.8	4.4	49.6	0.068
	40~60	1.45	22.3	49.8	4.4	49.6	0.058
	60~80	1.46	23.6	49.8	4.4	49.5	0.056
	80~100	1.46	24.4	49.8	4.4	49.4	0.055
B	0~20	1.46	22.1	50.1	4.6	46.5	0.043
	20~40	1.46	22.8	50.1	4.6	46.5	0.043
	40~60	1.46	23.6	50.1	4.6	46.5	0.043
	60~80	1.47	24.8	50.1	4.6	46.4	0.042
	80~100	1.47	26.1	50.1	4.6	46.1	0.042

表 2 土块与土样编号分组
Table 2 Serial number of soil block and soil sample

土块编号	土样编号	土块编号	土样编号	土块编号	土样编号	土块编号	土样编号
1 [#]	A1~A5	2 [#]	A6~A10	3 [#]	A11~A15	4 [#]	A16~A20
5 [#]	A21~A25	6 [#]	A26~A30	7 [#]	A31~A35	8 [#]	A36~A40
9 [#]	B1~B5	10 [#]	B6~B10	11 [#]	B11~B15	12 [#]	B16~B20

阵，经 GIS 软件栅格化，并做叠合分析，获得相应孔隙率 n 条件下 ω 的栅格样本矩阵；最后，基于 MATLAB 计算黄土微观孔隙分形维数^[33]，基于 GIS 软件实现栅格-矢量转化，计算相应孔隙率 n 的均值 μ 、标准方差 σ 、裂隙最大跨度 ω 和孔隙连通率 p ，判断模型连通阈值，揭示微观尺度下黄土结构优先连通性及其内在规律。

$$\left. \begin{aligned} \omega &= \max(l_i) / L \\ p &= \frac{\max(s_i)}{\sum_{i=0}^{i=n} s_i} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中： l_i 为第 i 条裂隙长度； L 为正方向栅格样本矩阵轮廓的边长； s_i 为第 i 个微观孔隙面积。本文孔隙连通率定义为微观研究区域中最大孔隙的面积与所有孔隙面积之和的比值。

2.2.2 模型构建方法

本文重点研究含裂隙的黄土微观结构连通模型，同时构建不含裂隙的黄土微观结构模型，以作对比分析。含裂隙的黄土微观结构模型参数包括孔隙率 n 、孔隙连通率 p 、孔隙分形维数 D 、孔隙变异系数 λ 、裂隙最大跨度 ω 和裂隙网络贯通率 q 。

$$\left. \begin{aligned} \lambda &= \sigma / \mu \\ q &= d / L \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中： σ 为孔隙面积标准方差； μ 为孔隙面积平均值； d 为裂隙连通网络的最大空间跨度。

由此,含裂隙的黄土微观结构连通模型表述为:当 n 、 D 、 p 、 λ 、 ω 等参数满足一定条件,使得函数 $f_c(n, D, p, \lambda, \omega) > 0$ 时,模型优先连通。不含裂隙的黄土微观结构连通模型表述为:当 n 、 D 、 p 、 λ 、 ω 等参数满足一定条件,使得函数 $f_c(n, D, p, \lambda) > 0$ 时,模型优先连通。

2.2.3 连通阈值判断方法

孔隙连通率并不能作为判断模型优先连通的决定性指标。有时虽然孔隙率和孔隙连通率很低,但若孔隙的分布形态呈尖锐状分布,且该尖锐状端头接近黄土结构评价单元的边缘,则该评价单元也可以实现优先连通。因此,连通阈值判断方法如下:首先,开展裂隙网络贯通率 q 与孔隙率 n 、孔隙连通率 p 、孔隙变异系数 λ 及孔隙分形维数 D 等相互关系研究;其次,基于GIS网络分析功能,获取最佳裂隙网络贯通率 q ;最后,确定与该 q 值相对应

的孔隙率 n 、孔隙连通率 p 、孔隙变异系数 λ 及孔隙分形维数 D 等。

2.2.4 土样制备与 SEM 成像

土样制备参照《建筑工程地质勘探与取样技术规程》(JGJ/T 87—2012)^[34],试验土样尺寸大致为 $5\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 。SEM 成像试验土样表面必须为原状、真实、清晰的土块断面,不能进行任何形式的打磨和加工。因此,本文采用手工掰开土块断面进行拍照;SEM 成像试验前,必须对土样断面做空气吹风处理,去除表面碎屑和浮灰,以便成像清晰;采用 BAL-TEC SCD 005 离子溅射仪对其进行喷金处理;将土样断面放置在 Quanta 200 (荷兰 FEI 公司)型电子显微镜下扫描。每一土样分别采用 800 倍、1 000 倍和 2 000 倍等不同焦距成像(见图 4)。基于黄土微观孔隙结构和颗粒骨架结构的整体性特征及评价尺度因素考虑,本文采用 1 000 倍 SEM 图

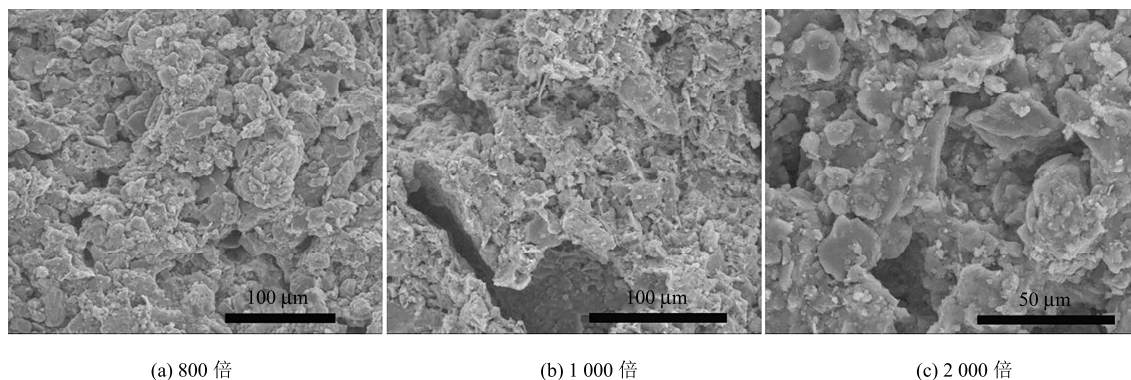


图 4 不同放大倍数下 SEM 图像
Fig.4 SEM images of different times

像开展黄土微观结构研究。

2.2.5 渗流试验验证

渗流试验为黄土微观结构研究的验证性试验,试验时间为 2023 年 2 月 20 日—2023 年 2 月 26 日。本次试验分别在 A、B 组采样区各开挖两个试验坑(见图 5(a)),依据双环渗透原理,每个试验坑分别由两个同心正方形土坑组成,内、外坑深度均为 10 cm,外坑尺寸为 $100\text{ cm} \times 100\text{ cm}$,内坑尺寸为 $50\text{ cm} \times 50\text{ cm}$ (见图 5(b))。渗流示踪剂采用淀粉—碘化钾,辅助试剂为硝酸铁,试剂溶液的浓度与试验方法参考文献[35]。外坑注满清水,内坑注满碘化钾溶液(见图 5(c)),直至清水和碘化钾溶液完全渗入土体,之后在试验坑上方覆盖塑料薄膜,以防水分流失或降水影响。渗流试验后 12~24 h 即可开挖垂直剖面(见图 5(d))。每个剖面间隔约为 5 cm,剖面开挖完成后,对其均匀喷洒适量的硝酸铁和淀

粉混合溶液,待显色完成(约为 1 h),即可拍摄该垂直剖面的染色图像。示踪显色随时间增加而变深,一般由浅紫色逐步向褐色过渡。为获得真实的优先流试验数据,避免因显色试验导致未开挖剖面含水率增加,各剖面的开挖间隔时间需要足够长,一般为 24 h。

3 结果与分析

设优先连通模型孔隙率 n 分别为 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5,该取值考虑泾阳南塬黄土孔隙率不超过 0.5 这一实际情况。裂隙最大跨度 ω 分别取值 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8, ω 取值依据 MATLAB 模拟试验结果。当 $\omega = 0.8$ 时,裂隙和孔隙所构成的网络空间的贯通率 q 将达到 0.8,即表明黄土微观结构表面多个“分支连通网络”所组成的“连通集团”可以实现整体贯通。借助 MATLAB 软件的蒙特卡

洛随机模拟功能, 分别输出不同孔隙率 n 的随机样本矩阵图像和不同裂隙最大跨度 ω 的随机样本矩阵图像各 50 个。前者为不含裂隙的优先连通模型, 后者为裂隙随机样本矩阵, 两者随机组合与叠加即为含裂隙的优先连通模型。

3.1 不含裂隙模型分析

模拟试验结果显示, 不同 n 取值时孔隙分形维数 D 与孔隙变异系数 λ 呈现两阶段正相关(见图 6)。

当 $n < 0.4$ 时, 孔隙分形维数 D 随孔隙变异系数 λ 的增加而急剧增加; 当 $n \geq 0.4$ 时, 孔隙分形维数 D 随孔隙变异系数 λ 增加而趋于稳定。说明 $n = 0.4$ 是一个明显临界点, 对孔隙分形维数 D 和孔隙变异系数 λ 的函数关系具有明显影响。

此外, 不同 n 取值时孔隙变异系数 λ 与孔隙连通率 p 之间表现为明显的线性正相关(见图 7)。孔隙连通率 p 随孔隙变异系数 λ 的增加而增加, 即孔



图 5 渗流试验场地与试验坑
Fig.5 Site and test pit of seepage test

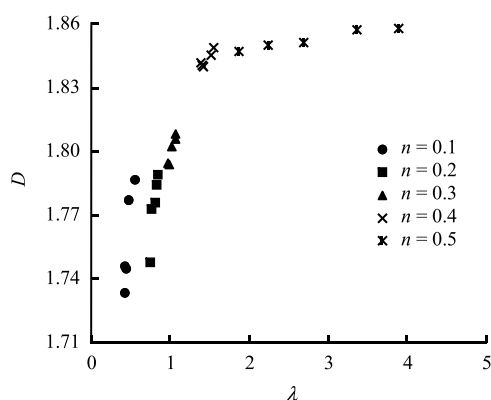


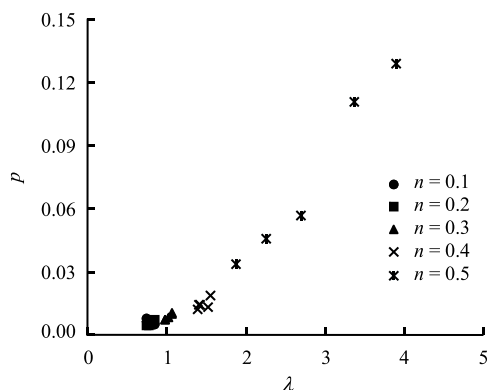
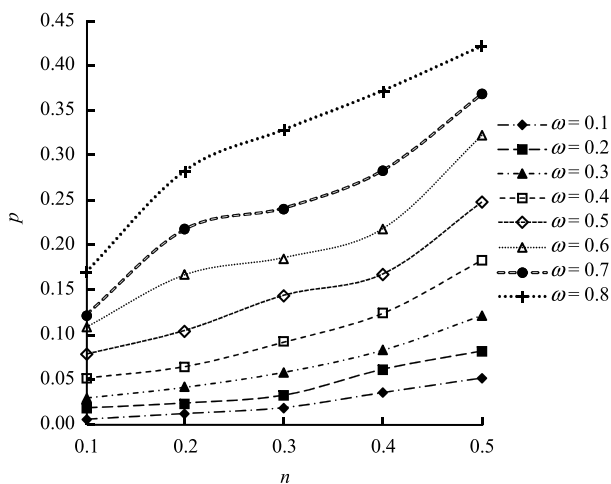
图 6 不同 n 下 λ - D 关系
Fig.6 Relationship of λ - D under different n

隙率 n 任意取值不影响孔隙变异系数 λ 和孔隙连通率 p 的函数关系。

3.2 含裂隙模型分析

模拟试验结果显示, 无论裂隙最大跨度 ω 取值如何, n - p 的关系始终正相关(见图 8), 即孔隙连通率 p 随孔隙率 n 的增大而增大, 与不含裂隙模型的结论相一致。所不同的是, 任意孔隙率 n 情况下, 孔隙连通率 p 会随 ω 的增加而增加, 且 ω 越大, 孔隙连通率 p 的增幅也越大。表明裂隙最大跨度 ω 对孔隙连通率 p 有显著影响。

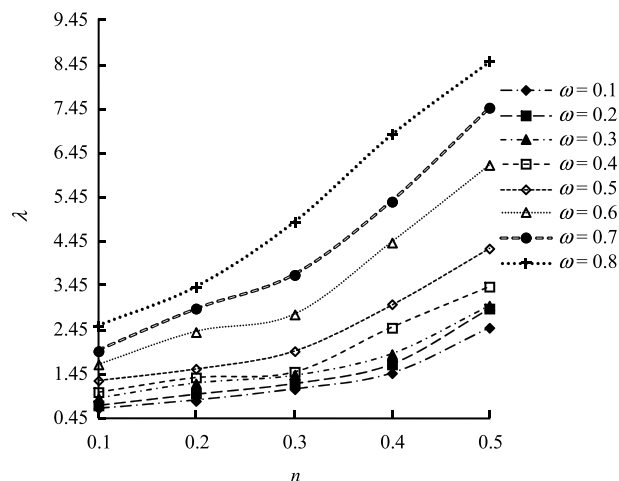
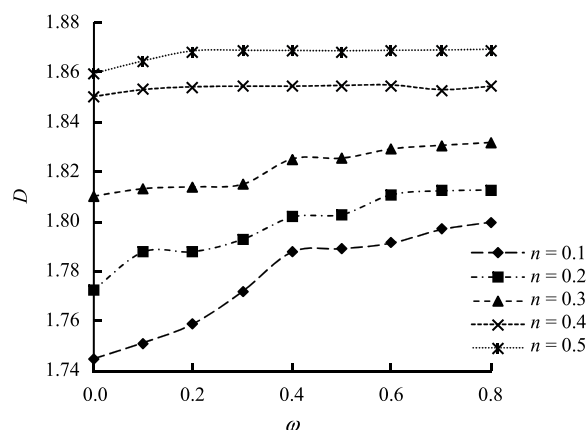
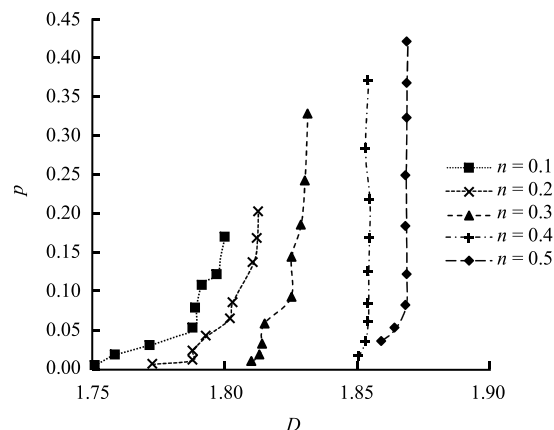
ω 任意取值情况下, 孔隙变异系数 λ 与孔隙率 n

图7 不同 n 下 λ - p 关系Fig.7 Relationship of λ - p under different n 图8 不同 ω 下 n - p 关系Fig.8 Relationship of n - p under different ω

之间始终表现为正相关关系（见图9），也与不含裂隙模型的结论相一致。但随着 ω 增加，特别是当 $\omega > 0.5$ 时，孔隙变异系数 λ 受孔隙率 n 的影响也越大，且 n 越大，孔隙变异系数 λ 的增幅越明显。表明裂隙最大跨度 ω 对孔隙变异系数 λ 具有重要影响。根据不含裂隙模型的试验结果，孔隙变异系数 λ 增大，孔隙连通率 p 也随之增大。因此，裂隙最大跨度 ω 间接影响孔隙连通率 p ，该结论与图8模拟试验结果一致。

不同孔隙率 n 取值情况下， ω - D 的关系见图10。当 $n < 0.4$ 时，分形维数 D 随 ω 增大而增大，但随着 ω 增加，分形维数 D 的增幅趋减。当 $n > 0.4$ 时，随着 ω 增大，分形维数 D 的增幅趋于0。表明孔隙分形维数 D 受裂隙最大跨度 ω 和孔隙率 n 的影响有限。

不同孔隙率 n 取值情况下， D - p 关系见图11。当 $n < 0.4$ 时， D - p 呈现正相关，即孔隙分形维数 D 增大，孔隙连通率 p 也随之增大；当 $n > 0.4$ 时，孔隙分形维数 D 的变化幅度极小，但孔隙连通率 p 则

图9 不同 ω 下 n - λ 关系Fig.9 Relationship of n - λ under different ω 图10 不同孔隙率 n 下 ω - D 关系Fig.10 Relationship of ω - D under different n 图11 不同孔隙率 n 下 D - p 关系Fig.11 Relationship of D - p under different n

会随 D 的增加而急剧增加。表明孔隙率 n 在一定程度上制约着孔隙分形维数 D 对孔隙连通率 p 的影响。

此外，基于不同孔隙率的 λ - ω 模拟试验结果见图12。 λ - ω 满足以下数学关系：

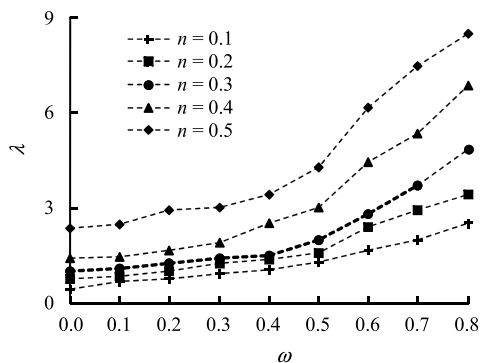


图 12 不同孔隙率 n 下 ω - λ 关系
Fig.12 Relationship of ω - λ under different n

$$\left. \begin{aligned} \omega &= -0.1559\lambda^2 + 0.8477\lambda - 0.3573, n = 0.1 \\ \omega &= -0.11\lambda^2 + 0.7246\lambda - 0.4372, n = 0.2 \\ \omega &= -0.0653\lambda^2 + 0.5576\lambda - 0.4032, n = 0.3 \\ \omega &= -0.0258\lambda^2 + 0.3361\lambda - 0.3228, n = 0.4 \\ \omega &= -0.0207\lambda^2 + 0.3315\lambda - 0.5796, n = 0.5 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

孔隙率 n 越大, 裂隙最大跨度 ω 对孔隙变异系数 λ 的影响越大。总体而言, 随着 ω 增加, 孔隙变异系数 λ 也逐渐增加。表明裂隙的存在, 特别是其跨度大小, 对黄土孔隙形态大小及其分布特征具有重要影响。

3.3 连通阈值判断

GIS Network Analyst 试验结果表明, 当裂隙网络贯通率 $q \geq 0.8$ 时, 黄土微观结构表面多个“分支连通网络”所组成的“连通集团”可以实现整体贯通。基于这一判断, 求解 $q \geq 0.8$ 条件下两类模型的优先连通阈值如下:

当满足 $n = 0.5$, $D = 1.860$, $p = 0.332$, $\lambda = 11.5$ 时, $f_c(n, D, p, \lambda) > 0$, 不含裂隙模型优先连通。

含裂隙模型的优先连通阈值不唯一, 根据不同 ω 值有以下 4 种情形: ①当满足 $n = 0.31$, $D = 1.812$, $p = 0.263$, $\lambda = 3.45$, $\omega = 0.7$ 时, $f_c(n, D, p, \lambda, \omega) > 0$, 模型连通; ②当满足 $n = 0.34$, $D = 1.829$, $p = 0.285$, $\lambda = 4.55$, $\omega = 0.6$ 时, $f_c(n, D, p, \lambda, \omega) > 0$, 模型连通; ③当满足 $n = 0.41$, $D = 1.846$, $p = 0.301$, $\lambda = 5.50$, $\omega = 0.5$ 时, $f_c(n, D, p, \lambda, \omega) > 0$, 模型连通; ④当满足 $n = 0.48$, $D = 1.857$, $p = 0.328$, $\lambda = 6.05$, $\omega = 0.4$ 时, $f_c(n, D, p, \lambda, \omega) > 0$, 模型连通。

3.4 泾阳南塬黄土微观结构连通性分析

基于 GIS 软件对 SEM 图像进行二值化处理, 经由栅格向矢量的转化, 进而统计和计算土样微观结构参数 n 、 D 、 μ 、 σ 、 λ 、 p 、 ω 等。由于土样微观结构被放大 1 000 倍, 为避免给出以偏概全的错

误判断, 故对来源于同一土块的 5 份土样数据求平均值, 并将其作为该土块的连通模型参数 (见表 3)。

表 3 连通模型参数统计结果 (5 份土样的平均值)
Table 3 Statistics results of connectivity model parameters (average values of five soil samples)

土块编号	n	D	$\mu/\mu\text{m}^2$	$\sigma/\mu\text{m}^2$	λ	p	ω
1 [#]	0.501	1.868	14.298	176.606	11.164	0.322	0.474
2 [#]	0.268	1.844	9.814	75.418	7.364	0.121	0.276
3 [#]	0.273	1.839	11.978	93.974	7.994	0.243	0.316
4 [#]	0.360	1.870	14.042	132.098	9.564	0.333	0.408
5 [#]	0.431	1.872	21.536	216.008	10.212	0.406	0.444
6 [#]	0.411	1.864	28.546	440.940	13.236	0.345	0.608
7 [#]	0.379	1.861	13.056	143.312	10.080	0.304	0.492
8 [#]	0.486	1.863	29.768	374.684	12.442	0.468	0.550
9 [#]	0.189	1.800	6.660	23.554	3.504	0.028	0.133
10 [#]	0.223	1.823	8.870	34.220	3.794	0.024	0.148
11 [#]	0.242	1.833	10.312	43.002	4.072	0.029	0.162
12 [#]	0.226	1.817	11.192	51.044	4.602	0.041	0.189

采用优先连通阈值组合对上述结果进行分析发现, 满足优先连通的土块编号分别为 1[#]、4[#]、5[#]、6[#]、7[#]、8[#], 均来源于 A 采样区, B 采样区的 5 个土块无一满足优先连通条件。

3.5 渗流试验结果分析

图 13 为 A 组取样区的部分试验典型剖面照片。图 14 为 B 组取样区的部分试验典型剖面照片。照片深色部分 (紫色或褐色) 为碘化钾渗流区, 可以明显看到, 碘化钾渗流湿润锋迹线, 黄土渗流试验结果与黄土微观结构优先连通模型试验结果相一致。A 组采样区原状黄土含细微裂隙, 渗流剖面照片清晰显示该渗流过程是沿裂隙优势通道优先下渗。B 组采样区原状黄土不含明显细微裂隙, 孔隙数量也较少, 渗流剖面照片显示该渗流过程为相对均匀下渗。此外, 基于计盒维数法^[35]的 A、B 组渗流湿润锋迹线维数计算结果与黄土微观结构优先连通模型的孔隙分形维数结论相一致。渗流试验从中、细观视角证实了黄土微观结构的优先连通与黄土优先流之间的必然联系。如果再延伸到宏观视角, 可以用来解释不含裂缝的泾阳南塬高陡边坡长期稳固的深层次原因, 也揭示了该区域“漫灌式”灌溉行为对含裂缝^[31]高陡边坡稳定性的不利影响以及泾阳南塬东风村、蒋刘村等大型滑坡发生的根本原因。

4 讨 论

根据达西定律, 无论是饱和黄土还是非饱和黄土, 其渗流过程与黄土渗透系数、水头压力、土体初始含水率、渗流水体的黏滞性以及孔隙中气体等



(a) 优先下渗剖面 1



(b) 优先下渗剖面 2

图 13 A 组试验坑部分渗流剖面

Fig.13 Sections of seepage flow in group A test pit



(a) 相对均衡下渗剖面 1



(b) 相对均衡下渗剖面 2

图 14 B 组试验坑部分渗流剖面

Fig.14 Sections of seepage flow in group B test pit

因素均有密切联系。水头压力越大, 渗流量越大; 土体初始含水率越大, 渗流速度就越快; 水体黏滞性越大, 渗流速度越慢; 孔隙中气体含量越多, 渗流速度则越慢。在整个黄土渗流过程中, 黄土渗透系数是最为关键的影响因素, 其本身受控于黄土孔隙率、孔隙大小及其连通性。由于渗流试验水深为 100 mm, 不存在水平地表径流的水量流失, 所以该水头压力产生的渗流效果可以等同于 100 mm 的强降雨。再者, 渗流试验关注的是最终渗流结果, 并不考虑渗流速度的快慢, 因此, 可以忽略黄土初始含水率、孔隙内气体以及碘化钾溶液黏滞性等因素的影响。最终的渗流示踪影像仅是水头压力和黄土渗透系数这两个因素的综合结果。A 组采样区试验坑各剖面的最大优先入渗深度均不超过 120 cm, B 组采样试验坑各剖面的最大入渗深度均不超过 50 cm, 且每个试验坑的第 1 个剖面 and 最后 1 个剖面的开挖间隔时间至少为 96 h, 由此说明, 一定的水头压力条件下, 入渗深度并没有随时间延长而增加。进而可以推断, 如果没有黄土地裂缝或黄土落水洞等优势渗流通道, 阶段性强降雨或灌溉并不易触发泾阳南塬黄土滑坡或崩塌等地质灾害。

此外, A 和 B 两个采样区相距很近, 但黄土微观结构特征和渗流试验结果的差异较大。基于微观视角的 SEM 成像试验分析表明, 该现象具有普遍性。因为即使来源于同一土块的若干试样, 其微观结构均具有明显差异。但结合黄土形成过程的相关理论, 且从中细观或宏观视角看, 则该现象较为特殊。因此, 这种差异可能源于后期人类活动的影响, 也可能源于黄土形成过程中的渗流作用。

本文研究尚存在一定片面性, 后续可借助 CT 扫描技术构建黄土三维微观结构模型, 深入揭示渗流过程中黄土微观结构变化及其规律, 为进一步完善黄土优先流理论提供科学参考依据。

5 结 论

(1) 不含裂隙的优先连通模型试验表明, 孔隙率对孔隙分形维数的影响有限, 孔隙变异系数与孔隙率之间存在正相关关系, 孔隙连通率随孔隙率增大而增大。某一孔隙率条件下, 孔隙连通率随孔隙变异系数增大而增大。

(2) 含裂隙的优先连通模型试验结果表明, 裂隙最大跨度对孔隙连通率影响显著, 孔隙分形维数受裂隙最大跨度和孔隙率的影响程度有限。孔隙率在一定程度上制约着孔隙分形维数对孔隙连通率的影响, 孔隙率越大, 裂隙最大跨度对孔隙变异系数

的影响就越大, 裂隙的存在, 特别是其跨度大小, 对黄土孔隙形态大小及其分布特征具有重要影响。

(3)黄土微观结构优先连通模型研究结论与中、细观层面的黄土渗流试验结论基本相吻合, 表明二者之间存在必然联系, 证实裂隙是优先流的重要通道, 是较低孔隙率条件下发生黄土优先流的重要原因。从宏观视角解释了泾阳南塬高陡边坡在无裂缝条件下保持长期稳固的深层次原因, 揭示了该区域“漫灌式”灌溉行为对含裂缝高陡边坡稳定性的不利影响以及泾阳南塬东风村、蒋刘村等大型滑坡发生的根本原因。

参考文献

- [1] 谷天峰, 王家鼎, 郭乐, 等. 基于图像处理的Q₃黄土的微观结构变化研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增刊 1): 3185-3192.
GU Tian-feng, WANG Jia-ding, GUO Le, et al. Study of Q₃ loess microstructure changes based on image processing[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(Suppl.1): 3185-3192.
- [2] 赵景波, 陈云. 黄土的孔隙与湿陷性研究[J]. 工程地质学报, 1994, 2(2): 76-83.
ZHAO Jing-bo, CHEN Yun. Study on pores and collapsibility of loess[J]. **Journal of Engineering Geology**, 1994, 2(2): 76-83.
- [3] 王兰民, 刘红玫, 李兰, 等. 饱和黄土液化机制与特性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(1): 92-97.
WANG Lan-min, LIU Hong-mei, LI Lan, et al. Experimental study on the mechanism and behaviors of saturated loess liquefaction[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2000, 22(1): 92-97.
- [4] 朱海之. 黄河中游马兰黄土颗粒及结构的若干特征——油浸光片法观察的结果[J]. 地质科学, 1963(2): 88-100, 102.
ZHU Hai-zhi. Some characteristics of the grain and structure of Malan loess in the middle reaches of the Yellow River: results of observation by oil-immersed plate method[J]. **Scientia Geologica Sinica**, 1963(2): 88-100, 102.
- [5] 张宗祜. 中国黄土类显微结构的研究[J]. 地质学报, 1964, 44(3): 357-364.
ZHANG Zong-hu. Microstructure classification of loess in China[J]. **Acta Geologica Sinica**, 1964, 44(3): 357-364.
- [6] 高国瑞. 黄土显微结构分类与湿陷性[J]. 中国科学, 1980(12): 1203-1208.
GAO Guo-rui. Microstructure classification of loess and collapsibility[J]. **Scientia Sinica**, 1980(12): 1203-1208.
- [7] 雷祥义. 西安黄土显微结构类型[J]. 西北大学学报, 1983(4): 56-65, 127-132.
LEI Xiang-yi. Type of the loess microtextures in Xi'an district[J]. **Journal of Northwest University**, 1983(4): 56-65, 127-132.
- [8] 李云峰. 洛川黄土地层渗透性与孔隙性的关系[J]. 西安地质学院学报, 1991, 13(2): 60-64.
LI Yun-feng. Relationship between the permeability and the porosity of Luochuan's loess layer[J]. **Journal of Xi'an College of Geology**, 1991, 13(2): 60-64.
- [9] 李华斌. 滑坡滑带土微结构的定量研究及其应用[D]. 北京: 中国地质科学院研究生部, 1991.
LI Hua-bin. The quantitative research of soil micro-structure on sliding surface of landslide and application[D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Geological Sciences, 1991.
- [10] 李康, 李永华, 陈燕, 等. 黄土湿陷变形及微观结构特征研究[J]. 工程勘察, 2014, 42(11): 17-23.
LI Kang, LI Yong-hua, CHEN Yan, et al. Research on collapsing deformation and microstructure characteristics of loess[J]. **Geotechnical Investigation & Surveying**, 2014, 42(11): 17-23.
- [11] 邓津, 王兰民, 张振中. 黄土显微结构特征与震陷性[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(4): 542-548.
DENG Jin, WANG Lan-min, ZHANG Zhen-zhong. Microstructure characteristics and seismic subsidence of loess[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(4): 542-548.
- [12] 裴国荣, 石玉成, 刘红玫. 黄土震陷时微观结构随动应力变化分析[J]. 西北地震学报, 2010, 32(1): 42-46.
QIU Guo-rong, SHI Yu-cheng, LIU Hong-mei. Analysis on microstructural variety in seismic subsidence of loess with dynamic stress[J]. **Northwestern Seismological Journal**, 2010, 32(1): 42-46.
- [13] 任权, 王家鼎, 谷天峰, 等. 列车长历时振动引起黄土滑坡滑带土微结构变化研究[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(4): 117-120.
REN Quan, WANG Jia-ding, GU Tian-feng, et al. Research on the micro-structure change of the slide-zone soil in loess landslide caused by train-induced long-term vibration[J]. **Hydrogeology & Engineering Geology**, 2013, 40(4): 117-120.
- [14] 王家鼎, 袁中夏, 任权. 高速铁路地基黄土液化前后微观结构变化研究[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2009,

- 39(3): 480-483.
- WANG Jia-ding, YUAN Zhong-xia, REN Quan. A study on loess microstructure pre and post liquefaction of high-speed railway foundation[J]. **Journal of Northwest University (Natural Science Edition)**, 2009, 39(3): 480-483.
- [15] 刘红玫, 王兰民. 饱和黄土液化的孔隙微结构特征[J]. 西北地震学报, 2002, 24(2): 135-139.
- LIU Hong-mei, WANG Lan-min. Study on the liquefaction mechanism and pore microstructure of saturated loess[J]. **Northwestern Seismological Journal**, 2002, 24(2): 135-139.
- [16] 樊成意. 黑方台黄土的微观结构及对滑坡成因的指示[D]. 兰州: 兰州大学, 2013.
- FAN Cheng-yi. Microstructure of loess in Heifangtai and its indication of the landslide cause[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2013.
- [17] 唐东旗, 彭建兵, 黄强兵. 非饱和黄土微观结构与黄土滑坡[J]. 防灾减灾工程学报, 2012, 32(4): 509-512.
- TANG Dong-qi, PENG Jian-bing, HUANG Qiang-bing. Microstructure of unsaturated loess and loess landslide[J]. **Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering**, 2012, 32(4): 509-512.
- [18] 吴光辉, 王家鼎, 马威, 等. 西峰塬黄土的湿陷性研究[J]. 工程地质学报, 2016, 24(1): 102-108.
- WU Guang-hui, WANG Jia-ding, MA Wei, et al. Uniaxial compression and SEM tests for loess collapsibility at loess plateau of Xifeng[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2016, 24(1): 102-108.
- [19] 郭泽泽, 李喜安, 陈阳, 等. 基于 SEM-EDS 的湿陷性黄土黏土矿物定量分析[J]. 工程地质学报, 2016, 24(5): 899-906.
- GUO Ze-ze, LI Xi-an, CHEN Yang, et al. Analysis of clay minerals in collapsible loess with SEM-EDS[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2016, 24(5): 899-906.
- [20] 田晖, 李丽, 张坤, 等. 基于 SEM 方法分析干湿和冻融循环对黄土微观结构的影响[J]. 兰州理工大学学报, 2020, 46(4): 122-127.
- TIAN Hui, LI Li, ZHANG Kun, et al. Effects of dry-wet and freeze-thaw cycles on microstructure of soil based on SEM[J]. **Journal of Lanzhou University of Technology**, 2020, 46(4): 122-127.
- [21] 张俊然, 宋陈雨, 姜彤, 等. 非饱和黄土高吸力下的水力力学特性及微观结构分析[J]. 岩土力学, 2023, 44(8): 2229-2237.
- ZHANG Jun-ran, SONG Chen-yu, JIANG Tong, et al. Hydromechanical characteristics and microstructure of unsaturated loess under high suction[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2023, 44(8): 2229-2237.
- [22] 文少杰, 郑文杰, 胡文乐. 铅污染对黄土宏观持水性能和微观结构演化的影响研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(2): 451-460.
- WEN Shao-jie, CHENG Wen-chieh, HU Wen-le. Effects of lead contamination on macro-water retention and micro-structural evolution of loess[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2023, 44(2): 451-460.
- [23] 李鑫, 卢玉东, 张晓周, 等. 基于 X-ray CT 的古土壤孔隙裂隙识别与表征[J]. 水土保持通报, 2018, 38(6): 224-230, 239.
- LI Xin, LU Yu-dong, ZHANG Xiao-zhou, et al. Pore-fissure identification and characterization of paleosol based on X-ray computed tomography[J]. **Bulletin of Soil and Water Conservation**, 2018, 38(6): 224-230, 239.
- [24] 郑佳, 庄建琦, 孔嘉旭, 等. 基于 CT 扫描的黄土孔隙结构特征研究[J]. 地质科技通报, 2022, 41(6): 211-222.
- ZHENG Jia, ZHUANG Jian-qi, KONG Jia-xu, et al. Study of loess pore structure characteristics based on CT scanning[J]. **Bulletin of Geological Science and Technology**, 2022, 41(6): 211-222.
- [25] 何晟迪, 李彦荣. 基于计算机断层扫描的岩土体孔隙结构特征识别[J]. 矿业研究与开发, 2021, 41(6): 158-163.
- HE Sheng-di, LI Yan-rong. Identification of pore structure characteristics of rock-soil mass based on computed tomography[J]. **Mining Research and Development**, 2021, 41(6): 158-163.
- [26] 王超, 吴丰, 陈义国, 等. 基于微米 CT 技术的黄土岩孔隙保存机制及渗透率各向异性[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(27): 11527-11535.
- WANG Chao, WU Feng, CHEN Yi-guo, et al. Preservation mechanism of pores and permeability anisotropy of loessite based on micro-CT technology[J]. **Science Technology and Engineering**, 2021, 21(27): 11527-11535.
- [27] 宁瑞浩, 冷艳秋, 何芝远, 等. 基于 CT 的黄土孔隙尺度优先流特性[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(23): 9927-9936.
- NING Rui-hao, LENG Yan-qiu, HE Zhi-yuan, et al. Pore scale preferential flow characteristics of loess based on CT[J]. **Science Technology and Engineering**, 2022, 22(23): 9927-9936.
- [28] 孙银磊, 汤连生, 刘洁. 非饱和土微观结构与粒间吸力的研究进展[J]. 岩土力学, 2020, 41(4): 1095-1122.

- SUN Yin-lei, TANG Lian-sheng, LIU Jie. Advances in research on microstructure and intergranular suction of unsaturated soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(4): 1095-1122.
- [29] 雷祥义. 陕西泾阳南塬黄土滑坡与引水灌溉的关系[J]. 工程地质学报, 1995, 3(1): 56-64.
- LEI Xiang-yi. The hazard of loess landslides in the southern tableland of Jingyang County, Shaanxi and their relationship with the channel water into fields[J]. **Journal of Engineering Geology**, 1995, 3(1): 56-64.
- [30] 许领, 戴福初. 泾阳南塬黄土滑坡特征参数统计分析[J]. 水文地质工程地质, 2008, 35(5): 28-32.
- XU Ling, DAI Fu-chu. Statistical analysis of the characteristic parameters of loess landslides at the South Jingyang Plateau[J]. **Hydrogeology & Engineering Geology**, 2008, 35(5): 28-32.
- [31] 许领, 戴福初, 邝国麟, 等. 台缘裂缝发育特征、成因机制及其对黄土滑坡的意义[J]. 地质论评, 2009, 55(1): 85-90.
- XU Ling, DAI Fu-chu, KUANG Guo-lin, et al. Characteristics and forming mechanisms of the plateau-edge cracks and their significance to loess landslides[J]. **Geological Review**, 2009, 55(1): 85-90.
- [32] 乔志甜, 李强, 张杰, 等. 基于 Monte Carlo 法的黄土二维微观结构模型构建[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(4): 79-84, 89.
- QIAO Zhi-tian, LI Qiang, ZHANG Jie, et al. A method for generating two-dimensional microstructure model of loess based on Monte Carlo method[J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 2020, 37(4): 79-84, 89.
- [33] 杨书申, 邵龙义. MATLAB 环境下图像分形维数的计算[J]. 中国矿业大学学报, 2006, 35(4): 478-482.
- YANG Shu-shen, SHAO Long-yi. Estimation of fractal dimensions of images based on MATLAB[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 2006, 35(4): 478-482.
- [34] 中南勘察设计院有限公司. JGJ/T 87—2012 建筑工程地质勘探与取样技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- Central South Survey Design Institute Co., Ltd. JGJ/T 87—2012 Technical specification for engineering geological prospecting and sampling of constructions[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [35] 潘网生, 许玉凤, 卢玉东, 等. 基于非均匀性和分形维数的黄土优先流特征定量分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(3): 140-147.
- PAN Wang-sheng, XU Yu-feng, LU Yu-dong, et al. Quantitative determination of preferential flow characteristics of loess based on nonuniformity and fractional dimension[J]. **Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering**, 2017, 33(3): 140-147.
-
- 上接第 1708 页
- [19] 刘国彬, 侯学渊. 软土的卸荷应力-应变特性[J]. 地下工程与隧道, 1997(2): 16-23.
- LIU Guo-bin, HOU Xue-yuan. Unloading stress-strain characteristics of soft soils[J]. **Underground Works and Tunnels**, 1997(2): 16-23.
- [20] 曾超峰, 薛秀丽, 宋伟伟, 等. 开挖前降水引发基坑变形机制模型试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(9): 2963-2972, 2983.
- ZENG Chao-feng, XUE Xiu-li, SONG Wei-wei, et al. Mechanism of foundation pit deformation caused by dewatering before soil excavation: an experimental study[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(9): 2963-2972, 2983.
- [21] 卢廷浩. 考虑黏聚力及墙背黏着力的主动土压力公式[J]. 岩土力学, 2002, 23(4): 470-473.
- LU Ting-hao. A formula of active pressure including cohesion and adhesion[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 23(4): 470-473.
- [22] 曹雄, 陈奕柏, 柯才桐. 刚性挡土墙后黏性土土压力研究[J]. 海南大学学报(自然科学版), 2013, 31(2): 155-161.
- CAO Xiong, CHEN Yi-bai, KE Cai-tong. Earth pressure of cohesive soil acting on rigid retaining wall[J]. **Journal of Hainan University (Natural Science Edition)**, 2013, 31(2): 155-161.
- [23] 张乐, 党发宁, 王旭, 等. 考虑内摩擦角影响的有限位移条件下土压力计算分析[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(增刊 1): 81-86.
- ZHANG Le, DANG Fa-ning, WANG Xu, et al. Calculation and analysis of earth pressure under limited displacement considering influences of internal friction angle[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2021, 43(Suppl.1): 81-86.