

泾阳浅层黄土细微观孔隙结构试验

冯笑瑞, 朱兴华, 孙恒飞, 俱 量, 温瑞祥, 肖永玖

Meso and micro pore structure test of Jingyang shallow loess

FENG Xiaorui, ZHU Xinghua, SUN Hengfei, JU Liang, WEN Ruixiang, and XIAO Yongjiu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202305008>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同沉积环境下马兰黄土孔隙分布与土水特征的模式分析

Mode analysis of pore distribution and soil -water characteristic curve of Malan loess under different depositional environments

李同录, 张辉, 李萍, 康海伟, 葛书磊 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 107-114

典型地貌区原状黄土孔隙细观特征研究

Research on pore microscopic characteristics of undisturbed loess in typical geomorphologies

刘钊钊, 钟秀梅, 张洪伟, 高中南, 梁收运, 王谦 水文地质工程地质. 2019, 46(2): 148-148

融化压缩下水泥改良冻土的微观孔隙特征演变

Microcosmic pore characteristics evolution of the cement improved frozen soil after thawing compression

尹振华, 张建明, 张虎, 王宏磊 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 97-105

改性糯米灰浆固化黄土的微观机理试验研究

A test study of the microscopic mechanism of modified glutinous rice mortar solidified loess

贾栋钦, 裴向军, 张晓超, 周立宏 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 90-96

基于广义径向流模型的非均质孔隙含水层井流试验分析

Pumping tests analyses of a heterogeneous pore aquifer based on the Generalized Radial Flow model

邓祺文, 陈刚, 郑可, 施雯, 胡成 水文地质工程地质. 2022, 49(2): 17-23

竹节桩复合地基沉桩施工超孔隙水压力研究

A study of the excess pore water pressure during pile-sinking construction of nodular pile composite foundation

叶俊能, 周晔, 朱瑶宏, 刘干斌 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 103-103



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202305008

冯笑瑞, 朱兴华, 孙恒飞, 等. 泾阳浅层黄土细微观孔隙结构试验 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(6): 138-148.

FENG Xiaorui, ZHU Xinghua, SUN Hengfei, et al. Meso and micro pore structure test of Jingyang shallow loess[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(6): 138-148.

泾阳浅层黄土细微观孔隙结构试验

冯笑瑞^{1,2}, 朱兴华^{1,2}, 孙恒飞^{1,2}, 俱 量^{1,2}, 温瑞祥^{1,2}, 肖永玖^{1,2}

(1. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054;

2. 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘要: 降雨与灌溉是黄土地区最常见的地灾驱动力。通常情况下, 入渗深度较浅且主要受细微观通道的控制, 孔隙结构对渗流特性的影响十分显著。为了研究浅层黄土孔隙结构分布规律, 以泾阳南塬黄土为研究对象, 采用 CT 断层扫描法和压汞法分析黄土结构, 观察并讨论细微观孔隙结构特性随黄土埋深的变化规律。研究表明: ①泾阳浅层黄土根据其孔隙结构特征可划分为三层, 1~2 m 为第一层, 3~4 m 为第二层, 5 m 为第三层; ②孔径小于 1.0 mm 的孔隙占总孔隙数量的 95% 以上, 以类球状和柱状的封闭孔隙为主; ③孔径大于 0.8 mm 的孔隙占总孔隙体积的 65% 以上, 多为枝杈状和柱状的连通孔隙; ④随着埋深的增加, 连通性逐渐降低, 大孔隙的变形破坏对黄土结构的稳定起着关键作用; ⑤根据压汞试验可知, 集粒内孔隙以 0.2 μm 为界, 随着埋深的增加左侧孔隙占比无明显变化, 右侧随之增大。研究成果可为进一步探索浅表层黄土细微观孔隙渗流机制提供参考。

关键词: 孔隙大小; 孔隙形状; CT 试验; 马兰黄土; 孔隙分类

中图分类号: P642.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2024)06-0138-11

Meso and micro pore structure test of Jingyang shallow loess

FENG Xiaorui^{1,2}, ZHU Xinghua^{1,2}, SUN Hengfei^{1,2}, JU Liang^{1,2}, WEN Ruixiang^{1,2}, XIAO Yongjiu^{1,2}

(1. School of Geological Engineering and Surveying, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China;

2. Key Laboratory of Western Mineral Resources and Geological Engineering,

Ministry of Education, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: Rainfall and irrigation are the most common driving forces of geological disasters in loess areas. Generally, the infiltration depth is shallow and mainly controlled by microchannels. The pore structure has a significant influence on the seepage characteristics. Aiming to study the distribution of pore structure in shallow loess, this study analyzes the structural samples of loess using CT tomography and mercury intrusion methods in the southern plateau of Jingyang, Shaanxi Province. The changes in meso and micro pore structure characteristics with the burial depth of loess are observed and revealed. The results show that Jingyang shallow loess can be divided into three layers according to its pore structure characteristics: ① 1–2 m as the first layer, 3–4 m as the second layer, and 5 m as the third layer; ② The diameter of more than 95% of the total pores are less than 1.0 mm, which mainly are spherical and columnar closed pores; ③ while more than 65% of the total pore are larger than

收稿日期: 2023-05-04; 修订日期: 2023-09-12

投稿网址: www.swd zgcdz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(442090053; 42041006; 41877249)

第一作者: 冯笑瑞(2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事黄土渗流及其致灾效应方面的工作。E-mail: 15248416209@163.com

通讯作者: 朱兴华(1984—), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事地质灾害防治方面的科研与教学工作。E-mail: zhuxinghua@chd.edu.cn

0.8 mm, and most of them are branched and columnar connected pores; ④ With depth increasing, the pore connectivity gradually decreases, and the deformation and failure of macropores play a key role in the stability of loess structure; ⑤ In the mercury intrusion test, intragranular pores are bounded by 0.2 μm . The proportion of pores on the left side shows insignificant change with depth, while on the right side, it increases with depth. This study provides a basis for further exploring the micro pore seepage mechanism of shallow loess in the future.

Keywords: pore distribution; pore shape distribution; CT test; Malan loess; pore classification

黄土在我国分布广泛, 据统计, 我国三分之二的滑坡灾害发生在黄土高原^[1]。黄土自身的结构特性与水理性质是导致黄土地区灾害频发的主要原因。陕西省泾阳县南塬自引水灌溉以来发生了 50 多起黄土滑坡, 严重威胁塬上居民及耕地的安全^[2-3]。究其原因, 一方面是灌溉水入渗改变了当地的水文地质环境, 导致地下水位上升以及黄土物理力学性质的弱化, 进而诱发大量的黄土滑坡^[4-6]; 另一方面, 泾阳南塬是渭北黄土台塬的组成部分, 上部覆盖厚 10~15 m 的马兰黄土, 结构疏松, 落水洞、垂直节理发育, 能使水体快速运移至坡体内部, 加速滑坡形成^[7-8]。因此, 研究原状黄土结构有助于分析灌溉型滑坡的诱发机制, 并为黄土地区的水诱发灾害防控提供依据。

以往对水诱发黄土地质灾害的研究多集中在宏观层面, 即基于水文资料建立滑坡灾害预测模型^[9-10], 通过物理模型试验揭示滑坡演化模式^[11], 或探讨水分入参与黄土物理性质的客观规律与联系^[12-13]。实际上, 外力作用下土体的力学性质是其微观结构状态的宏观反映, 渗流过程与土体内部孔隙结构息息相关^[14]。增加黏粒含量会导致黄土渗透系数逐渐降低, 主要原因是黏粒导致微观结构由分散变为致密^[15]。浸水作用下黄土渗透性会明显降低, 其原因是浸水后粗颗粒逐渐向细颗粒转化, 细颗粒填充土体孔隙造成渗流通道减少^[16]。杨博等^[17]发现大中孔隙对渗透系数有决定意义, 并以此建立了渗透系数与孔隙比的回归方程; 马巍等^[18]、肖东辉等^[19]认为冻融作用对黄土工程性质的影响, 是因为多次的冻融循环破坏了黄土的原生结构。由于渗流会随着入渗深度的加深而逐渐减弱、消失, 一些学者对地表水在黄土地区的入渗深度进行探究。丁勇^[20]选取典型黄土边坡进行降雨试验, 发现最大入渗深度为 4 m; 张茂省等^[21]通过观察疏松的马兰黄土, 发现在经过持续降雨后, 入渗深度仅为 1 m。综上所述, 目前有关黄土宏观渗透性质与孔隙结构内在联系与机制的研究较少, 并且没有考虑入渗深度的影响。因此, 选取泾阳南塬 1~5 m 埋深的浅层原状黄土, 分析孔隙结构特征随深度的变化规律, 以期为后

续进一步探索黄土结构与渗流机制的互馈机制提供基础资料。

1 室内试验准备与方法

1.1 试样准备

取土场地为泾阳县西庙店村某浸水试验场地旁的空地, 从地表开始, 每隔 1 m 使用刻槽法取一层原状黄土, 共 5 层, 试样尺寸为 20 cm×20 cm×20 cm。

对浅层黄土进行室内基础物理试验, 获得基本物理指标如表 1 所示, 粒径分布如图 1 所示。可以看出, 浅层 1~5 m 都属于马兰黄土; 试验土样的黏土质量分数为 35%~43%, 粉土质量分数为 56%~62%, 试样用土为细粒土; 孔隙率均在 0.5 左右, 属于疏松多孔性土。

表 1 泾阳不同深度黄土基本物理参数表

Table 1 Basic physical parameters of Jingyang loess at different depths

埋深/m	天然密度 /(g·cm ⁻³)	含水率 /%	干密度 /(g·cm ⁻³)	比重	孔隙结构	
					孔隙比	孔隙率
1	1.43	15.97	1.23	2.68	1.180	0.54
2	1.50	19.34	1.26	2.69	1.135	0.53
3	1.52	20.80	1.26	2.68	1.130	0.53
4	1.58	22.54	1.29	2.70	1.090	0.52
5	1.58	20.25	1.31	2.70	1.060	0.51

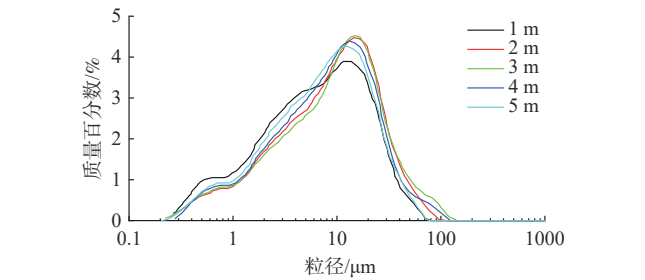


图 1 泾阳不同深度黄土粒径分布占比图

Fig. 1 Proportion of particle size distribution of loess at different depths in Jingyang

1.2 试验方法

研究采用压汞试验和 CT 扫描对细微观层面的黄

土孔隙进行综合表征,同时借助三维可视化软件构建微观孔隙结构。

1.2.1 CT 扫描试验

采用 Multiscale-Voxel45 工业 CT 进行测试,系统的有效成像面积为 427 mm^2 ,像素尺寸为 $139\text{ }\mu\text{m}$,可检测样品尺寸为 $\Phi 800\text{ mm}\times 1\text{ }100\text{ mm}$,最高分辨率为 $0.5\text{ }\mu\text{m}$,能实现对黄土微观结构的扫描。

由于样品尺寸与扫描精度成反比,合理选择试样尺寸对结果的准确性至关重要。基于连续性建模理论确定最优分析尺度。李鑫^[22]通过分析泾阳黄土孔

隙度与 CT 切片数的关系,发现当代表性体积单元 (RVE) 是边长为 28.4 mm 的正方体时孔隙度达到稳定。因此,选择 $\Phi 61.8\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 的原状土柱作为试验样品,分析发现切片数为 180 张时,即 RVE 为边长 16.4 mm 的正方体时可代表黄土孔隙属性,后续的分析在该尺度上进行。

扫描结束后,使用 Avizo 软件进行数字图像处理,包括裁剪原始图像、灰度调节、滤波处理去除噪点、阈值分割提取孔隙、图像二值化和三维重构,图像处理流程如图 2 所示。

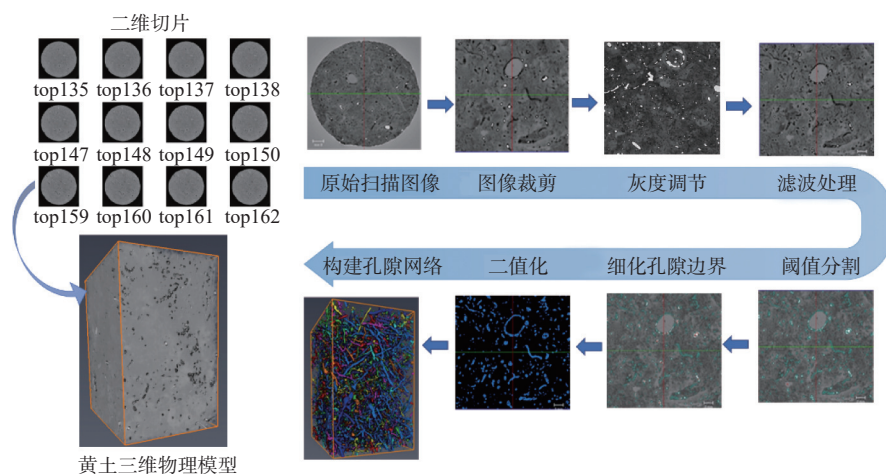


图 2 CT 图像处理流程图

Fig. 2 Flow chart of CT image processing

1.2.2 压汞试验

压汞试验所用仪器为 AutoPore9520 型全自动孔径分布压汞仪,每层土切取两个 $1.5\text{ mm}\times 1.5\text{ mm}\times 1.5\text{ mm}$ 且重量大于 2 g 的原状块状试样用于试验测定。试验步骤如下:使用冷冻干燥仪对土样进行干燥处理;选择合适的样品杆,保证样品占比大于 25%;先对试样抽真空,之后加压至 3.45 kPa 开始低压分析,最大压力为 206.84 kPa ;低压分析结束后,通过油压进行高压分析,最大压力为 $413\text{ }688\text{ kPa}$;电容检测进汞量,得出汞体积与压力关系。

2 浅层黄土细微观孔隙结构试验结果

2.1 微观孔隙结构试验结果

通过压汞试验获得泾阳浅层黄土微观孔隙数据,探究微观孔隙结构特征。表 2 为各埋深黄土的微观孔隙尺度分布,孔隙尺度划分方法遵循雷祥义^[23]对黄土微孔隙的划分。不同埋深黄土中,占据主导地位的孔隙类型并不相同:1 m 黄土中微孔隙占比最大,大孔

隙占比最少,各类孔隙占比极差为 19.3%;2~4 m 黄土中小孔隙占比最大,大孔隙占比最少,孔隙占比极差依次为 24.67%、49.46%、33.83%;5 m 黄土中微孔隙占比最大,大孔隙占比最少,孔隙占比极差为 75.83%。

表 2 不同深度黄土微观孔隙尺度分布

Table 2 Distribution of micro-pore size of loess at different depths

深度/m	孔隙尺度分布			
	微孔隙/%	小孔隙/%	中孔隙/%	大孔隙/%
1	36.80	17.66	28.03	17.50
2	26.63	37.28	23.47	12.61
3	28.52	51.96	17.02	2.50
4	31.43	37.25	27.90	3.42
5	77.84	14.43	5.72	2.01

图 3 为不同埋深黄土的孔隙密度分布曲线,可以看出,1 m 和 2 m 处存在 3 个优势孔隙(峰值处的孔隙),分别是 $0.03, 15.42, 142.64\text{ }\mu\text{m}$; $0.03, 2.87, 142.26\text{ }\mu\text{m}$ 。3~5 m 处存在两个优势孔隙,分别在 $0.03, 6.03\text{ }\mu\text{m}$; $0.03, 8.04\text{ }\mu\text{m}$; $0.03, 0.43\text{ }\mu\text{m}$ 。同一土层中,将密度值最

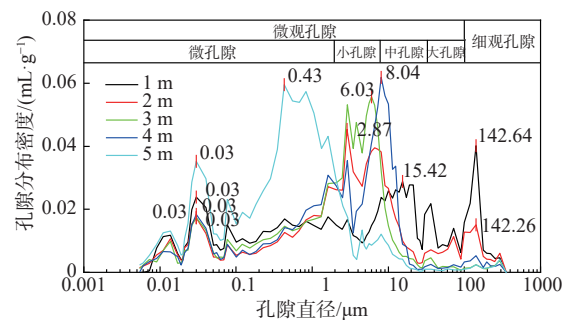


图 3 孔隙密度分布曲线

Fig. 3 Pore density distribution curve

表 3 细观孔隙结构定量分析参数

Table 3 Quantitative analysis parameter of mesoscopic pore structure

参数名称	符号	定义	公式	作用
孔隙度	n_{3D}	土体中孔隙体积所占总体积的百分比	$n_{3D} = \frac{V_V}{V_T}$ $V_V \text{——孔隙体积}/\mu\text{m}^3;$ $V_T \text{——土壤总体积}/\mu\text{m}^3$	反映土体的连通程度
连通孔隙度	n_e	土体中连通孔隙(本研究中,认为有公共面接触的孔隙才视为连通孔隙)体积所占总体积的百分比	$n_e = \frac{V_c}{V_T}$ $V_c \text{——连通孔隙体积}/\mu\text{m}^3;$ $V_T \text{——土壤总体积}/\mu\text{m}^3$	反映土体的有效孔隙体积占比
孔隙体积	V_{3D}	孔隙的总体积	$V_{3D} = N \cdot V_0$ $V_0 \text{——最小体素单元的体积}/\mu\text{m}^3;$ $N \text{——三维孔隙所包含的体素单元数目}$	反映孔隙的体积变化
等效直径	d_{3D}	在构建三维孔隙结构时,采用形态模型的方法 ^[25] ,即认为孔隙空间是不同直径的重叠球体的集合,孔隙直径是包含该孔隙体率的最大球体的直径	$d_{3D} = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot V_{3D}}{\pi}}$ $V_{3D} \text{——孔隙体积}/\mu\text{m}^3$	表示孔隙直径的参数
配位数	C_n	每个孔道所连通的喉道个数 ^[26]	$C_n = \frac{2 \cdot N_B - N_E}{N_J}$ $N_B \text{——支点所连分支孔隙数量};$ $N_E \text{——端点孔隙数量};$ $N_J \text{——节点数}$	反映孔隙连通性的指标
形状因子	S_{3D}	孔隙空间的形状是非常复杂的,所以在网络模型中,以球体作为标准单元,采用等价的规则的几何形状近似描述	$S_{3D} = \frac{A_{3D}^3}{36\pi V_{3D}^2}$ $A_{3D} \text{——三维孔隙表面积}/\mu\text{m}^2;$ $V_{3D} \text{——孔隙体积}/\mu\text{m}^3$	反映孔隙形状,定量表征孔隙形状偏离球体的程度

2.2.1 二维孔隙结构随深度的变化

通过观察不同埋深黄土的中心切片,探究二维层面上的孔隙变化。由于单个切片观察到的孔隙有限,一些大孔隙和贯通孔隙并不能看到。根据孔隙数量的变化,将孔隙划分为细微孔隙($r<500\text{ }\mu\text{m}$),细小孔隙($500\text{ }\mu\text{m}\leq r<800\text{ }\mu\text{m}$),细中孔隙($800\text{ }\mu\text{m}\leq r<1\text{ }200\text{ }\mu\text{m}$),细大孔隙($r\geq 1\text{ }200\text{ }\mu\text{m}$)。

如图 4 所示,孔隙之间互有连通,其中多为细大孔隙和细中孔隙,细小和细微孔隙则零星分布在连通孔隙周围。随着黄土埋深的增加,面积较大的呈片状的细大孔隙和细中孔隙受上覆土压力的影响,变形、破碎成长条状和许多分散的细小、细微孔隙,进而导致孔隙区域密集化、黄土连通性减弱以及密实度的增加。

随着埋深的增加,细大孔隙和细中孔隙的面积占

大的优势孔隙定义为主优势孔隙,其余的优势孔隙统称为次优势孔隙^[24]。对比不同埋深黄土的优势孔隙,发现均在 $0.03\text{ }\mu\text{m}$ 处存在一个次优势孔隙,且除 2 m 土样外,其余土样的主优势孔隙尺寸均大于次优势孔隙。

2.2 细观孔隙结构试验结果

通过 CT 试验获得泾阳浅层黄土细观孔隙数据,先是从二维、三维层面定性分析细观孔隙随深度的变化,再基于统计分析参数(表 3)定量分析孔隙结构。

比仍大于细小和细微孔隙,浅层黄土的孔隙特征仍由细大孔隙和细中孔隙为主导,并没有因为孔隙的变形破碎发生改变。

2.2.2 三维孔隙结构随深度的变化

通过 Avizo 软件构建三维孔隙模型,探究三维层面上的孔隙变化。对孔隙模型进行分割标记(图 5),可以直观地看到浅层黄土孔隙网络复杂、连通程度较好,内部有许多贯通孔隙,为水分入渗提供了优先渗流通道。随着埋深的增加,孔隙数量和体积都不断减小,孔隙复杂程度降低;连通孔隙中贯通孔隙比例增大、作为枝杈的小孔隙减少,此外,连通孔隙孔径较大且多呈柱状。

2.2.3 孔隙率与孔隙连通性随深度的变化

表 4 为浅层黄土的基本信息,从统计结果来看,孔

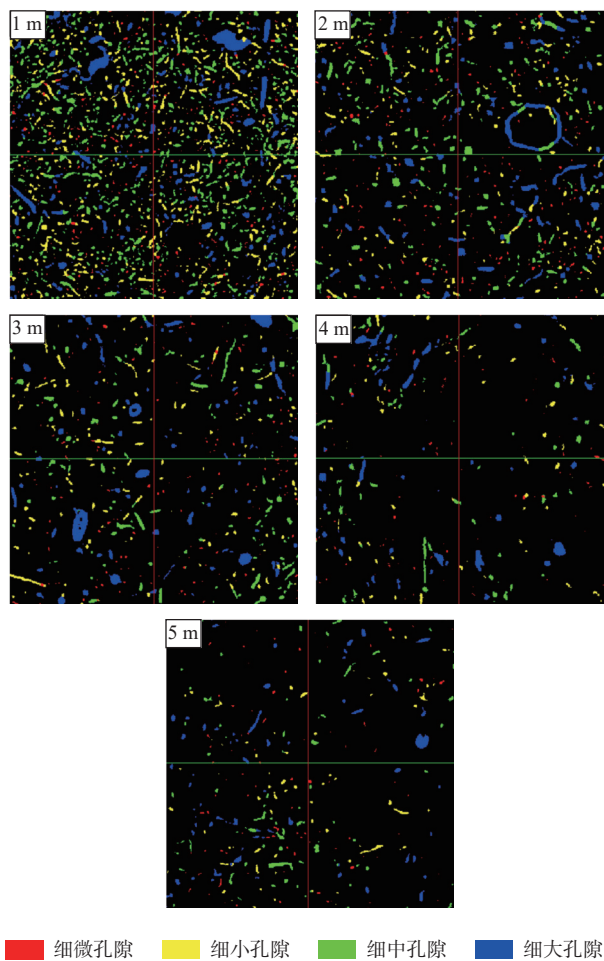


图 4 二维层面不同埋深孔隙大小分布

Fig. 4 Two-dimensional distribution of pore size at different burial depths

隙参数具有明显差异,但也表现出规律性:随着深度的增加,孔隙度、连通孔隙度减小,连通性越来越差,与室内试验测得的土体物理参数规律相同;5层土样的最小孔径相同,随着深度的增加,最大孔径先减小后增大,平均孔径逐渐增大。

对孔隙配位数进行统计,浅层黄土总孔隙配位数均值为 2.56, 3.29, 0.73, 0.18, 0.31, 连通孔隙配位数为 3.29, 2.61, 2.39, 2.15, 2.08。可见,总孔隙配位数随着埋深的增加没有表现出规律性,连通孔隙配位数则随着埋深的增加而减小,原因是在计算总孔隙配位数均值时,认为封闭孔隙(图 6)的配位数为 0。对比两组数据,说明随着埋深的增加封闭孔隙的数量远超连通孔隙,但只有相互连通的孔隙(图 6)具有导水的作用,因此在评判黄土连通性时主要是研究连通孔隙。

2.2.4 孔径分布与孔隙体积分布随深度的变化

浅层黄土孔径分布如图 7 所示,可知:①浅层黄土孔隙主要分布在 0.1 ~ 1.0 mm 之间,数量占比 96.79% ~

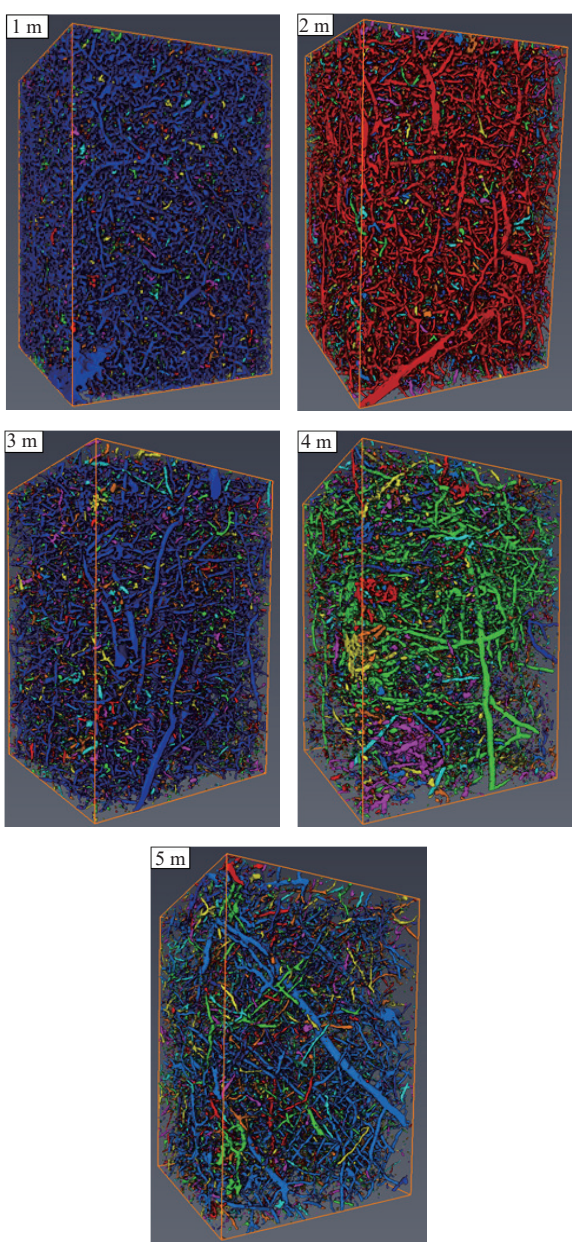


图 5 浅层黄土三维孔隙网络

Fig. 5 Three-dimensional pore network of shallow loess

表 4 不同深度土样孔隙的基本几何参数

Table 4 Basic geometric parameters of pores in the soil samples at different depths

土样	孔隙度	连通孔隙度	平均直径/mm	最小直径/mm	最大直径/mm	孔隙连通度/%
JY-1	0.16	0.15	0.495	0.124	4.321	91.69
JY-2	0.09	0.08	0.513	0.124	2.733	83.06
JY-3	0.07	0.05	0.524	0.124	3.427	74.87
JY-4	0.03	0.01	0.531	0.124	4.559	43.06
JY-5	0.03	0.02	0.523	0.124	4.002	50.22

97.97%, 1.0 ~ 2.0 mm 占比 1.93% ~ 3.13%, 大于 2.0 mm 的仅占 0.08% ~ 0.21%, 孔隙数量的贡献主要来源于

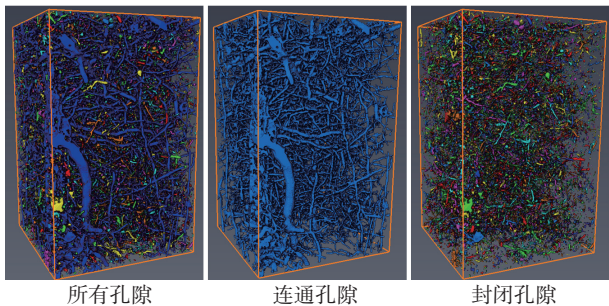


图 6 黄土中的孔隙

Fig. 6 Porosity in loess

1 mm 以下的孔隙。②将孔径大于 1 mm 的孔隙记为大孔隙, 绘出其空间分布图, 发现大于 1 mm 的孔隙在底部分布较少, 主要集中在中上部。总体上看, 随着埋深的增加, 大于 1 mm 的孔隙逐渐向土样表层集中且孔隙数量越来越少。③除 1 m 土样表现为孔隙数量

随着孔径的增大先减少后增多然后再减少, 其余土样的孔隙数量都随着孔径的增大而减少。

为探究孔隙体积与孔隙数量关系, 采用与孔径分布分析时相同的区间划分标准: 即 0 ~ 2.4 mm, 每隔 0.2 mm 划分一孔径区间; 大于 2.4 mm 的所有孔隙为一孔径区间。图 8 为各孔径区间内的孔隙体积占比与数量曲线, 可以看出: ①0.1 ~ 0.8 mm 区间内孔隙体积占比 28.84% ~ 34.58%, 0.8 ~ 1.0 mm 区间内孔隙体积占比 12.88% ~ 21.98%, 1.0 ~ 2.0 mm 区间内孔隙体积占比 35.63% ~ 43.65%, 大于 2.0 mm 区间内孔隙体积占比 5.98% ~ 18.61%, 浅层黄土中孔隙体积的贡献主要来源于 0.8 mm 以上的孔隙; ②经统计, 各小区间孔隙体积占比均值为 4.2%, 将孔隙体积占比大于均值的孔径区间定义为优势区间。浅层黄土的优势区间基本相同, 为 0.6 ~ 1.5 mm, 0.7 ~ 1.0 mm 区间内孔隙

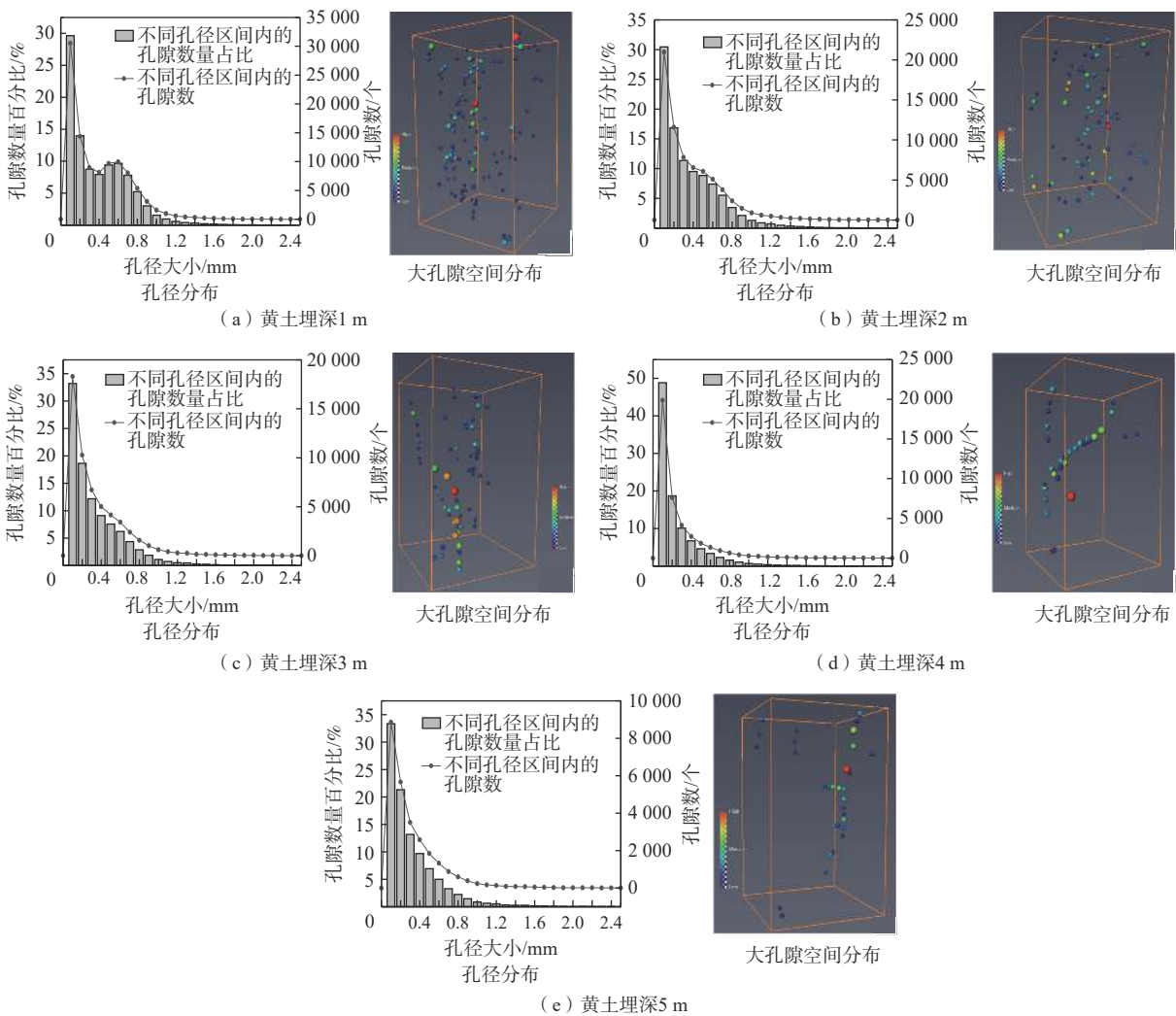


图 7 不同深度黄土的孔径分布图与大孔隙空间分布图

Fig. 7 Different depth distribution of pore size and large pore space in loess

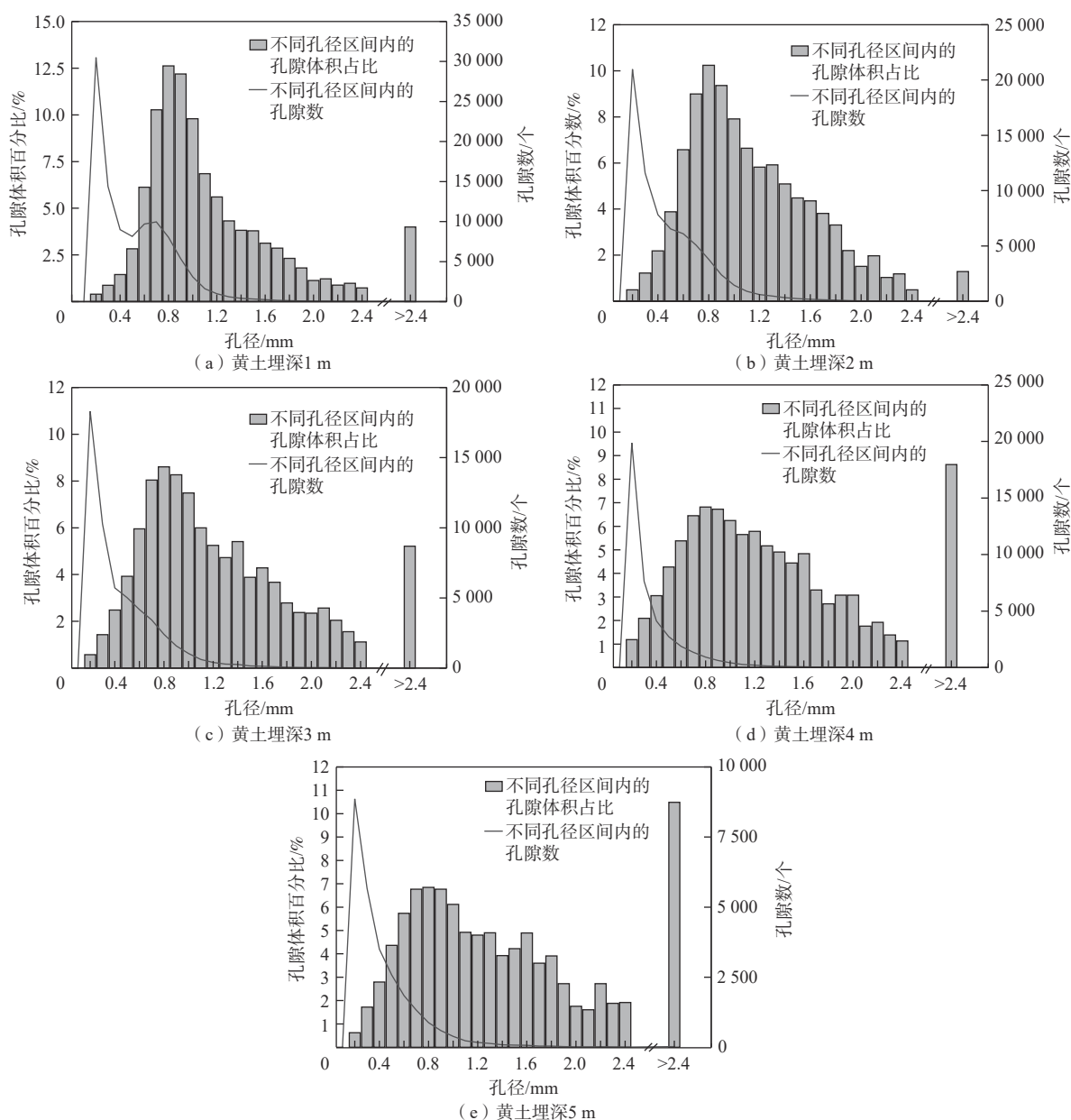


图 8 不同孔径区间内孔隙数量与体积分布

Fig. 8 Number and volume distribution of pores in the different pore size intervals

体积占比相差较大;当孔径大于 2.4 mm 时,孔隙体积占比随着埋深的增加而增大,是 3~5 m 黄土样的另一个优势区间。

2.2.5 孔隙形状随深度的变化

形状因子可作为孔隙形状分类的有效参数,魏亚妮^[27]结合形状因子与费雷特直径将黄土颗粒形状分为扁片状、板状、次棱角状以及次圆状颗粒。Pulido-Moncada 等^[28]根据形状因子将孔隙划分为扁片状、等径状、三轴状和长条状孔隙。李鑫^[22]则根据三维形状因子将马兰黄土孔隙分为球状、椭球状、柱状、枝杈状孔隙。

由计算式可知,孔隙为标准球体时形状因子为 1,形状因子越大孔隙形状越不规则。通过改变形状因子大小,发现存在孔隙形态转变的临界值,即形状因子阈值。分析发现浅层黄土的形状因子阈值相差不大,可取阈值的均值作为孔隙分类的依据,结果如图 9 所示,各类孔隙数量与体积占比见表 5。

根据表 5 所列的形状因子阈值,将孔隙分为类球状、柱状和枝杈状。类球状孔隙,主要是在黄土堆积过程中形成的原生孔隙,形状因子介于 1.0~2.5,该类孔隙数量占比为 74.76%~89.34%,体积占比为 20.71%~28.01%,大多为封闭孔隙,连通性较差;柱状孔隙,大

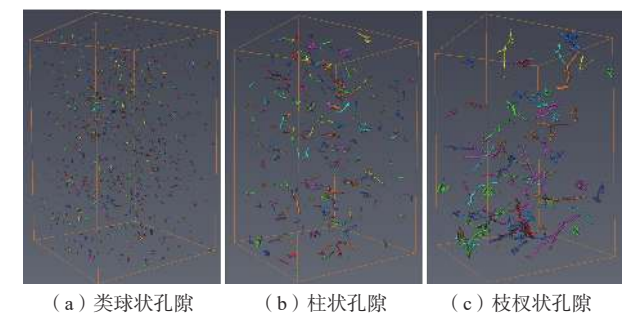


图 9 基于三维形状因子的黄土孔隙分类

Fig. 9 Classification of loess pore based on three-dimensional shape factor

表 5 基于不同形状因子的孔隙分类表

Table 5 Pore classification based on different shape factors					
形状因子	孔隙类型	试样埋深/m	数量比/%	体积占比/%	孔径范围/ μm
<2.5	类球状	1	74.76	20.71	124 ~ 2 848
		2	82.79	27.19	124 ~ 2 027
		3	84.27	28.01	124 ~ 3 298
		4	89.34	24.73	124 ~ 2 371
		5	84.67	24.60	124 ~ 3 231
2.5 ~ 6	柱状	1	19.19	40.30	336 ~ 2 308
		2	13.87	42.55	389 ~ 1 966
		3	12.23	40.35	347 ~ 2 812
		4	8.09	32.98	331 ~ 2 406
		5	11.08	29.45	325 ~ 3 666
>6	枝杈状	1	6.05	38.99	566 ~ 23 838
		2	3.34	30.26	570 ~ 2 733
		3	3.51	31.64	520 ~ 2 987
		4	2.47	42.28	530 ~ 4 549
		5	4.25	45.95	583 ~ 4 002

多分布在连通孔隙附近,形状因子介于 2.5 ~ 6.0,数量占比为 8.09% ~ 19.19%,体积占比为 29.45% ~ 42.55%,是因为水压力不够,没有被完全打通所形成的孔隙,可认为是储水孔隙;枝杈状孔隙,形状因子大于 6.0,数量占比 2.47% ~ 6.05%,体积占比 30.26% ~ 45.95%,是水分入渗时的主要导水孔隙,决定着土体的渗透性。

3 分析与讨论

3.1 细微观孔隙尺度的划分

土体结构的研究可划分为宏观、细观和微观 3 个层次,由于影响土体结构的因素复杂多变,不同土体参数差别显著,当前没有统一的层次划分标准。

根据压汞试验结果(图 3)显示,孔径小于 0.1 μm 和大于 100 μm 时,各埋深黄土孔隙密度分布曲线发生突变的波段相同,表现出高度的相似性,这与 0.1 ~ 100 μm 区间内的曲线表现出不同的规律。因此认为 100 μm 为细观与微观的分界,也符合目前学界广泛接

受的划分标准(正常视距下肉眼可见约为 100 μm ,肉眼不可见即为微观)。

后续学者在微观层面可根据雷祥义^[23]对黄土孔隙的划分进行分析,细观层面则着重探究孔径大于 100 μm 的孔隙,细微观孔隙划分尺度如表 6 所示。

Table 6 Scale division of Fine and Micro Pores				
微观孔隙/ μm				细观孔隙/ μm
微孔隙	小孔隙	中孔隙	大孔隙	
<2	[2, 8)	[8, 32)	[32, 100)	≥ 100

3.2 浅层黄土微观孔隙结构分析

Li 等^[29]基于雷祥义对黄土孔隙的讨论,总结了原状黄土孔隙的分类。结合前人研究对浅层黄土微观孔隙分布形态进行分析,并对泾阳浅层黄土微观孔隙结构进行层次划分。

(1)微孔隙是集粒内孔隙,从图 3 中可以直观地看到:孔径小于 0.2 μm 时,各埋深黄土孔隙曲线形态没有明显差别;孔径处于 0.2 ~ 2.0 μm 时,曲线形态差异随着孔径的增大而增大。由此可见,集粒内的孔隙还应有更细的划分。蔡国庆等^[30]认为集粒内部是由若干片层状颗粒群组成,称之为片层群结构。因此集粒内部孔隙也就包含两种,片层群结构间的孔隙和片层群自身结构内的孔隙。黄土集粒也存在着类似结构,小于 0.2 μm 的孔隙正是片层群内部的结构,基本不受渗流影响;0.2 ~ 2.0 μm 是片层群间孔隙,随着上覆压力的增加,优先发生各类孔隙向此范围内的微孔隙的转变。

(2)小孔隙与中孔隙是粒间孔隙,2 ~ 4 m 黄土的主优势孔隙都是粒间孔隙,3 m、4 m 与 2 m 处的孔隙密度分布曲线差异明显(图 3)。泾阳地区多年农业灌溉,表层黄土受入渗影响较大,大孔隙占比提高,因此 2 m 孔隙曲线表现出不同规律,也从另一方面说明水在黄土中的入渗深度有限。

(3)大孔隙多是在黄土形成后由于环境所形成的次生孔隙,3 ~ 5 m 孔隙曲线差别不大,1 m 主优势孔隙在这范围内。

由以上可知,泾阳南塬浅层 1 ~ 5 m 黄土根据孔隙结构可分为 3 层:第一层为 1 ~ 2 m 黄土,受环境影响强烈,部分微、小孔隙被拓展成为中、大孔隙,孔隙分布规律与其他深度黄土不同;第二层为 3 ~ 4 m 黄土,受渗流等外界影响比较小,具体表现为大孔隙占比迅速降低。且由于上覆压力的增加,孔隙结构主要发生

大、中孔隙向小孔隙的转变,具体表现为当埋深从2 m增加到3 m时,大、中孔隙减少16.56%,小孔隙增加14.68%,微孔隙仅增加约2%;第三层为5 m黄土,孔隙结构主要发生各类孔隙向微孔隙的转变,当埋深从4 m增加到5 m时,除微孔隙外的各类孔隙都减少,说明小孔隙发生变形的临界值为上覆4 m黄土压力时。

3.3 浅层黄土细观孔隙结构分析

整体上看,浅层黄土细观孔隙结构差异较小。当孔径为0.4~0.8 mm时,1 m土样与其余土样的孔隙结构有明显不同。分析发现,随着埋深的增加,浅层黄土在该区间内的孔径分布曲线和体积分布曲线形态逐渐趋于一致,差异性逐渐降低,说明该地区由于环境作用而形成的次生孔隙多为0.4~0.8 mm。

随着上覆压力的增大以及生物活动影响的减弱,一部分连通孔隙被挤压破碎成封闭的小孔隙,表现为类球状孔隙多作为封闭孔隙集中于连通孔隙网络内部。柱状孔隙是由于水流量的减小,水流没能为小孔隙的拓展提供足够大的水动力条件而形成的潜在储水孔隙,多分布于连通孔隙周围。枝杈状孔隙孔径较大,多为连通孔隙,是水分入渗的主要通道。因此进行渗流研究时,采用球棍模型构建孔隙结构是比较合适的。

随着埋深的增加,细观孔隙结构仍以大孔隙为主,大孔隙的体积占比对浅层黄土结构稳定性起着主要作用,枝杈状、柱状孔隙的数量占比是评价黄土连通程度的重要指标。

4 结论

通过探究黄土细微观孔隙结构与埋深之间的联系,发现浅层1~2 m埋深黄土主要受降雨、生物等影响,也是浅表层黄土结构疏松、大孔隙较多的主要原因。3~5 m埋深黄土主要受上覆压力的影响,不断发生大孔隙向小孔隙的转变,土层越来越密实。具体结论如下:

(1)浅层黄土中,孔隙数的贡献主要来自1 mm以下的类球状孔隙;孔隙体积的贡献则来自0.8 mm以上的柱状、枝杈状孔隙,也是主要的导水孔隙。随着埋深的增加,孔隙数减少,一些大孔隙和贯通孔隙由于上覆压力的增大被挤压破碎成小孔隙,黄土孔隙特征仍由大孔隙主导,大孔隙的变形与破坏对黄土结构的稳定起着关键性的作用。

(2)根据微观孔隙分布显示,1~2 m黄土孔隙曲线呈现三峰特征,3~5 m黄土孔隙曲线呈现双峰特

征,且均在0.03 μm 处存在一个次优势孔隙。以0.2 μm 为界,集粒内孔隙还应有更详细的划分,体现为:小于0.2 μm 时,各深度黄土孔隙曲线形态相似、几近重合,受渗流影响不大;大于0.2 μm 时,微孔隙段曲线形态差异随着孔径的增大而增大。

(3)泾阳浅层黄土可根据孔隙结构划分为3层:1~2 m土体受环境影响较大,孔隙数量多、结构复杂,微小孔隙被不断地拓宽、打通,次生孔隙较多,主要体现在细观尺度和微观大孔隙尺度;3~4 m土体受环境影响较小,细观孔隙结构复杂程度大幅度降低,柱状、枝杈状孔隙减少,微观孔隙以中孔隙和大孔隙向小孔隙的转变为主;5 m黄土基本不受环境影响,与4 m土样在细观层面差别较小,微观层面差异显著,孔隙结构逐渐由各类大、中孔隙向微孔隙转变。同时说明,小孔隙发生变形的临界值为上覆4 m黄土压力时。

受限于仪器精度,本文只开展了通过压汞试验进行微观孔隙结构描述,今后还需进一步开展微观层面的三维孔隙模拟研究。此外,细观研究中,球棍模型所能模拟的最小孔径与实际最小孔径相差较大,所构建的三维孔隙结构不能完全代表真实结构,在以后的研究中还需探究其他构建方式。

参考文献 (References):

- [1] 彭建兵,林鸿州,王启耀,等.黄土地质灾害研究中的关键问题与创新思路[J].工程地质学报,2014,22(4): 684 - 691. [PENG Jianbing, LIN Hungchou, WANG Qiyao, et al. The critical issues and creative concepts in mitigation research of loess geological hazards[J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22(4): 684 - 691. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 赵志强,戴福初,闵弘,等.黄土中灌溉水入渗过程的现场试验研究[J].岩土工程学报,2022,44(3): 569 - 575. [ZHAO Zhiqiang, DAI Fuchu, MIN Hong, et al. Field tests on irrigation infiltration in thick loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(3): 569 - 575. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 许领,戴福初,闵弘,等.泾阳南塬黄土滑坡类型与发育特征[J].地球科学,2010,35(1): 155 - 160. [XU Ling, DAI Fuchu, MIN Hong, et al. Loess landslide types and topographic features at South Jingyang Plateau, China[J]. Earth Science, 2010, 35(1): 155 - 160. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 朱才辉,李宁.降雨对沟谷状黄土高填方地基增湿影

- 响研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(5): 845 – 854. [ZHU Caihui, LI Ning. Moistening effects of high-fill embankment due to rainfall infiltration in loess gully region[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(5): 845 – 854. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 许强, 亓星, 修德皓, 等. 突发型黄土滑坡的临界水位研究——以甘肃黑方台黄土滑坡为例[J]. 水利学报, 2019, 50(3): 315 – 322. [XU Qiang, QI Xing, XIU Dehao, et al. Critical water level of abrupt loess landslides: A case study in Heifangtai, Gansu Province[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(3): 315 – 322. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 牛兵. 泾阳南塬灌溉诱发黄土滑坡机理[D]. 西安: 西安科技大学, 2020. [NIU Bing. Mechanism of irrigation-induced loess landslide at South Jingyang Plateau[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2020. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 郭晨, 许强, 魏勇, 等. 陕西泾阳南塬多序次黄土滑坡演化特征及成灾模式[J]. 地质科技情报, 2019, 38(5): 204 – 211. [GUO Chen, XU Qiang, WEI Yong, et al. Evolution characteristics and disaster modes of repeatedly failure loess landslides in southern Jingyang Plateau, Shaanxi Province[J]. Geological Science and Technology Information, 2019, 38(5): 204 – 211. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 马鹏辉, 彭建兵, 李同录, 等. 陕西泾阳“3·8”蒋刘黄土滑坡成因及运动特征分析[J]. 工程地质学报, 2018, 26(3): 663 – 672. [MA Penghui, PENG Jianbing, LI Tonglu, et al. Forming mechanism and motion characteristics of the “3·8” jiangliu loess landslide in Jingyang County of Shaanxi Province[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(3): 663 – 672. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 卢盛栋, 李强, 李芬, 等. 大气降水诱发黄土高原滑坡灾害阈值及灾损研究[J]. 灾害学, 2023, 38(3): 53 – 59. [LU Shengdong, LI Qiang, LI Fen, et al. Study on threshold and damage of landslide disaster induced by atmospheric precipitation in loess plateau[J]. Journal of Catastrophology, 2023, 38(3): 53 – 59. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 陈洪凯, 魏来, 谭玲. 降雨型滑坡经验性降雨阈值研究综述[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2012, 31(5): 990 – 996. [CHEN Hongkai, WEI Lai, TAN Ling. Review of research on empirical rainfall threshold of rainfall-induced landslide[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2012, 31(5): 990 – 996. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 彭建兵, 吴迪, 段钊, 等. 典型人类工程活动诱发黄土滑坡灾害特征与致灾机理[J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(5): 971 – 980. [PENG Jianbing, WU Di, DUAN Zhao, et al. Disaster characteristics and destructive mechanism of typical loess landslide cases triggered by human engineering activities[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016, 51(5): 971 – 980. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 安鹏, 张爱军, 邢义川, 等. 伊犁深厚湿陷性黄土浸水入渗及沉降变形特征分析[J]. 岩土力学, 2017, 38(2): 557 – 564. [AN Peng, ZHANG Aijun, XING Yichuan, et al. Analysis of soak infiltration and deformation characteristics for thick collapsible loess in Ili region[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(2): 557 – 564. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 黄雪峰, 张广平, 姚志华, 等. 大厚度自重湿陷性黄土湿陷变形特性水分入渗规律及地基处理方法研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊2): 100 – 108. [HUANG Xuefeng, ZHANG Guangping, YAO Zhihua, et al. Research on deformation, permeability regularity and foundation treatment method of dead-weight collapse loess with heavy section[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(Sup 2): 100 – 108. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 任晓虎, 许强, 赵宽耀, 等. 反复入渗对重塑黄土渗透特性的影响[J]. 地质科技通报, 2020, 39(2): 130 – 138. [REN Xiaohu, XU Qiang, ZHAO Kuanyao, et al. Effect of repeated infiltration on permeability characteristics of remolded loess[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2020, 39(2): 130 – 138. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 王力, 李喜安, 赵宁, 等. 黏粒含量对黄土物理力学性质的影响[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(3): 133 – 143. [WANG Li, LI Xi'an, ZHAO Ning, et al. Effect of clay content on physical and mechanical properties of loess soils[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018, 29(3): 133 – 143. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 邹锡云, 许强, 赵宽耀, 等. 浸水作用下黑方台黄土渗透特性变化微观研究[J]. 人民长江, 2020, 51(6): 166 – 171. [ZOU Xiyun, XU Qiang, ZHAO Kuanyao, et al. Microscopic study on permeability change of loess in Heifangtai Terrace under soaking[J]. Yangtze River, 2020, 51(6): 166 – 171. (in Chinese with English abstract)]

- abstract)]
- [17] 杨博, 张虎元, 赵天宇, 等. 改性黄土渗透性与孔隙结构的依存关系 [J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(6): 96 - 101. [YANG Bo, ZHANG Huyuan, ZHAO Tianyu, et al. Responsibility of permeability of modified loess soil on microstructure[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2011, 38(6): 96 - 101. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 马巍, 徐学祖, 张立新. 冻融循环对石灰粉土剪切强度特性的影响 [J]. 岩土工程学报, 1999, 21(2): 158 - 160. [MA Wei, XU Xuezu, ZHANG Lixin. Influence of frost and thaw cycles on shear strength of lime silt[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(2): 158 - 160. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 肖东辉, 冯文杰, 张泽. 冻融循环作用下黄土孔隙率变化规律 [J]. 冰川冻土, 2014, 36(4): 907 - 912. [XIAO Donghui, FENG Wenjie, ZHANG Ze. The changing rule of loess' s porosity under freezing-thawing cycles[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(4): 907 - 912. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 丁勇. 人工降雨模拟作用下的黄土高边坡稳定性研究 [D]. 西安: 西北大学, 2011. [DING Yong. Study on the stability of high loess slope under artificial rainfall simulation[D]. Xi'an: Northwest University, 2011. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 张茂省, 李同录. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究 [J]. 工程地质学报, 2011, 19(4): 530 - 540. [ZHANG Maosheng, LI Tonglu. Triggering factors and forming mechanism of loess landslides[J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(4): 530 - 540. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 李鑫. 基于 CT 的黄土微细观空隙结构及优先流特性研究 [D]. 西安: 长安大学, 2020. [LI Xin. Research on micro and meso void structure and preferential flow characteristics of loess based on CT[D]. Xi'an: Chang'an University, 2020. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 雷祥义. 中国黄土的孔隙类型与湿陷性 [J]. 中国科学 (B 辑 化学 生物学 农学 医学 地学), 1987, 17(12): 1309 - 1318. [LEI Xiangyi. Pore types and collapsibility of loess in China[J]. Science in China: SerB, 1987, 17(12): 1309 - 1318. (in Chinese)]
- [24] 李华. 不同类型非饱和黄土持水及渗透特性研究 [D]. 西安: 长安大学, 2020. [LI Hua. Water retention and permeability characteristics of different types of unsaturated loess[D]. Xi'an: Chang'an University, 2020. (in Chinese with English abstract)]
- [25] HU Wulong, LIU Guofeng, ZHANG Xiaoxian. A pore-scale model for simulating water flow in unsaturated soil[J]. *Microfluidics and Nanofluidics*, 2018, 22(7): 71.
- [26] HAMAMOTO S, MOLDRUP P, KAWAMOTO K, et al. Pore network structure linked by X-ray CT to particle characteristics and transport parameters[J]. *Soils and Foundations*, 2016, 56(4): 676 - 690.
- [27] 魏亚妮. 水作用下黄土三维微结构演化及湿陷机理研究 [D]. 西安: 长安大学, 2019. [WEI Yani. Research on three-dimensional microstructure evolution during wetting and collapsible mechanism of loess[D]. Xi'an: Chang'an University, 2019. (in Chinese with English abstract)]
- [28] PULIDO-MONCADA M, KATUWAL S, REN Lidong, et al. Impact of potential bio-subsoilers on pore network of a severely compacted subsoil[J]. *Geoderma*, 2020, 363: 114154.
- [29] LI Ping, VANAPALLI S, LI Tonglu. Review of collapse triggering mechanism of collapsible soils due to wetting[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2016, 8(2): 256 - 274.
- [30] 蔡国庆, 尤金宝, 赵成刚, 等. 双孔结构非饱和压实黏土的渗流-变形耦合微观机理 [J]. 水利学报, 2015, 46(增刊 1): 135 - 141. [CAI Guoqing, YOU Jinbao, ZHAO Chenggang, et al. Microcosmic mechanism for flow-deformation coupling of unsaturated compacted clay with double porosity[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(Sup 1): 135 - 141. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 王支农