

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2019.0014

CHEN Xin, ZHANG Ze, LI Dongqing. Study on the pore features of freezing-thawing loess based on different fractal models[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(4):1238-1248. [陈鑫, 张泽, 李东庆. 基于不同分形模型的冻融黄土孔隙特征研究[J]. 冰川冻土, 2020, 42(4):1238-1248.]

基于不同分形模型的冻融黄土孔隙特征研究

陈鑫^{1,2}, 张泽¹, 李东庆¹

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院 冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为了得到冻融作用对黄土孔径分布的影响规律, 以重塑黄土为研究对象, 利用压汞法测试经历不同冻融循环次数后黄土样品的孔隙特征, 采用3种分形模型对冻融作用后的黄土微观孔隙结构进行定量表征和对比研究。结果表明: 未经冻融作用的黄土孔隙分布曲线呈单峰分布, 经历冻融作用的黄土孔隙分布曲线呈双峰甚至多峰分布。冻融作用对黄土中孔径分布在 $0.1 \sim 10 \mu\text{m}$ 范围内的孔隙影响较大。前10次冻融作用使黄土孔隙率增加, 特别是经历6次冻融作用后, 与未经历冻融作用的黄土相比孔隙率增大约18.8%。随着冻融作用的继续, 黄土孔隙率减小且趋于稳定。经历不同冻融循环次数后的黄土孔隙分布均具有良好的统计分形特性。基于热力学模型和毛细管压力曲线法表征黄土孔隙结构时, 黄土孔隙呈现显著的分形特性, 可在整个孔径尺度范围内给出唯一且合理的分形维数。基于Menger海绵模型表征的经历冻融作用后黄土孔隙分形特征呈现多尺度分形, 在不同的尺度范围内, 有不同的分形维数。结合分形理论可知冻融作用改变了黄土孔隙均匀性及复杂程度。

关键词: 黄土; 冻融循环; 压汞试验; 孔隙率; 分形模型

中图分类号: P642.13⁺1; P642.14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2020)04-1238-11

0 引言

受气温周期波动的影响, 寒区活动层内土体会产生反复的冻结和融化, 循环冻融改变了土体的内部结构, 并由此导致土体物理力学性质的改变^[1-5]。因此, 在寒区进行工程建设时需要考虑冻融作用的影响^[6]。冻融作用引起的土体结构形态的变化宏观上表现为孔隙率的变化^[6]。土力学中的三个重要课题渗透性、压缩变形特性、强度特性均与土的孔隙性密切相关^[7-11]。因此, 深入研究冻融作用下土体孔隙特征的变化规律是十分必要的。

目前关于冻融作用对土体孔隙特征的影响已有了一些研究结论。扫描电子显微镜(SEM)试验和压汞(MIP)试验是岩土体微观孔隙研究中使用最广泛的两种手段^[12-14]。很多学者借助这2种方法对冻融作用后土体孔隙特征进行了研究。张英等^[15]

对经历不同冻融次数的青藏铁路沿线粉质黏土进行了单轴抗压强度试验、扫描电子显微镜试验和压汞试验, 通过数字图像处理技术对土样的微结构图像进行定量分析, 揭示了冻融循环对土体强度影响的微观机制。谈云志等^[16]则借助压汞和氮吸附试验研究了冻融循环作用对改良粉土孔隙结构的影响规律, 试图揭示冻融循环对改良土强度损伤的作用机制。马骏骅等^[17]基于温差和冻融次数, 从孔径分布各区间的变化曲线入手, 定量分析了土体冻融劣化规律。肖东辉等^[18-19]基于颗分实验和压汞实验结果, 采用分形理论揭示了冻融循环后黄土渗透性变化的原因, 指出土颗粒粒径对渗透性的影响大于孔隙孔径对渗透性的影响。郑郎等^[20]通过压汞试验研究发现反复冻融使土样孔隙分布发生变化, 土样中的大、中孔隙含量总体增加, 小孔隙的含量减少, 而微孔隙的含量基本保持不变。

收稿日期: 2018-08-07; 修订日期: 2019-02-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(41771078; 41771074); 冻土工程国家重点实验室自主研究项目(SKLFSE-ZT-19)资助

作者简介: 陈鑫(1990-), 男, 山西襄汾人, 2013年在中国矿业大学获学士学位, 现为中国科学院西北生态环境资源研究院在读博士研究生, 从事冻土物理力学性质研究。E-mail: 1273078175@qq.com

通信作者: 张泽, 副研究员, 从事寒区工程与环境研究。E-mail: zhangze@lzb.ac.cn.

从以上研究可以看出, 定量描述土体的孔隙特征, 是建立土体孔隙微观结构特征与宏观物理力学性质之间关联模型的基础, 是揭示冻融作用造成土体强度劣化机制的前提。土体是典型的多孔介质, 由于其内部孔隙结构十分复杂, 欧氏几何已经无法对其内部结构进行准确的描述, 而分形理论可较好的描述土体不规则的孔隙结构特征^[21-23]。已有研究以 SEM 试验或 MIP 试验为基础, 结合分形理论对土体的微观结构特征进行表征, 通过不同的分形模型得到土体孔隙分形维数值, 定量描述分形维数随冻融循环次数的变化规律^[24-26]。不同类型的岩土体由于地质成因不同其孔隙结构形态不同^[27-28], 甚至同一类型的土, 压实度不同也会造成孔隙结构形态不同^[29]。不同分形数学模型对同一研究对象定量表征结果也不相同。因此, 有必要研究某种特定的土在经历冻融作用后其孔隙分布的变化规律及分形特征。考虑到黄土在我国中西部季节冻土区广泛分布, 以重塑黄土作为研究对象。鉴于根据 SEM 图像进行微结构研究多是二维的定性与定量分析^[12], 得到的孔隙率不能反映实际情况, 本文采用压汞法对经历不同冻融循环次数后黄土样品的孔隙特征进行测试, 获得了冻融作用次数对黄土孔径分布和孔隙率影响规律, 基于压汞试验结果研究了 3 种分形模型在黄土微观孔隙结构定量表征中的适用性。

1 试验内容与方法

试验所用黄土取自陕西富平, 取土深度为当地最大冻结深度以下 2 m。原状黄土基本物理性质指标: 含水量为 13.7%, 密度为 $1.64 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 液限为 26.7%, 塑限为 16.2%, 塑性指数 10.5。黄土粒径分布如表 1 所示。

表 1 试验土的粒径分布

Table 1 The distribution of grain size of the tested soil

颗粒粒径	>0.05 mm	0.005 ~ 0.05 mm	<0.005 mm
百分比/%	21.7	61.6	16.7

1.1 样品制备和冻融循环试验

严格按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123-1999) 中的步骤制备饱和试样。将试验所用土样风干、碾压、过 2 mm 筛, 测定土样的初始含水率; 加入所需的去离子水后充分搅拌, 密封静置 24 h, 以使土样中各处水分均匀; 采用压样机制取直径

61.8 mm、高度 20 mm 的标准环刀样, 试样含水量为 16.7%, 干密度为 $1.74 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。随后把试样放入饱和缸进行抽真空饱和。

试验设定土样冻融过程中只与外界进行热交换。为避免试样与外界进行质量交换, 用保鲜膜密封试样。冻融作用会造成冻土内部水分重分布^[30], 为保证冻融循环过程中试样中的水分迁移不致引起试样的不均匀性, 同时考虑实际工程最不利情况, 将冻结与融化温度分别设定为 $-20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 与 $17 \sim 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 在冻融循环箱中对试样进行快速多向冻结。根据测定, 在冻融循环箱中分别冻结 2 h 和融化 2 h 即可保证标准环刀土样完全冻透及融化。冻融循环周期设定为 4 h, 冻融循环次数设定为 0、4、6、8、10、50、100 次。将达到设定冻融循环次数的土样取出在室温条件下自然风干^[31], 随后进行 MIP 试验, 每个设定的冻融循环次数下均进行 3 组平行试验。

1.2 压汞试验

压汞试验采用 Auto Pore IV 9500 型全自动压汞仪。其原理是基于汞不会浸润被它压入的大多数材料, 由于多孔介质中毛细管力的存在, 只有在一定压力下, 汞才能进入孔喉半径大于该压力对应的孔喉半径的孔隙中, 从而可通过压汞数据来测定土样的总孔隙体积、孔径分布等^[12]。将经历不同冻融循环次数后的试样中间部位用小刀修整成直径为 10 mm、高度为 10 mm 的圆柱体, 制样过程中尽量减少对土柱的扰动。将制备好的圆柱体分别浸入汞中进行压汞试验, 外界所施加压力与试样毛细孔中汞的表面张力相等。圆柱形毛细孔径与外界施加压力满足 Washburn 方程^[25]:

$$P = -\frac{4\sigma\cos\theta}{r} \quad (1)$$

式中: P 为外界施加给汞的压力 (MPa); σ 为汞的表面张力, 取 $0.485 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$; θ 为汞对土体的润湿角, 取 140° ; r 为圆柱形孔径 (m)。

压汞过程中只需记录外界施加的压力 P 和对应的进汞量。通过 Washburn 方程得到与压力 P 对应的当量孔径 r , 进汞量就是试样中孔隙尺寸大于等于 r 的孔隙总体积, 进而绘制出孔隙含量与孔径的关系曲线。据此研究冻融循环对黄土孔径分布的影响规律。

2 黄土孔隙分形模型

2.1 毛细管压力曲线法确定分形维数

利用毛管压力对数与润湿相饱和度对数的线

性关系可求取孔隙分形维数,详细的推导过程可参考文献[32],最终计算公式如下:

$$\lg S = (3 - D_s) \lg P_{\min} + (D_s - 3) \lg P \quad (2)$$

式中: S 为黄土中孔径小于 r 的累积孔隙体积分数,在压汞试验中即为毛管压力为 P 时润湿相的饱和度(%); D_s 为分形维数; P_{\min} 为黄土中最大孔径对应的毛管压力,也就是压汞试验中的入口毛管压力(MPa); P 为孔径 r 对应的毛管压力(MPa)。

利用压汞试验结果进行线性回归分析,根据直线斜率和截距可得到反映孔隙结构的孔隙分形维数和入口毛管压力。

2.2 Menger 海绵模型

黄土是由大小不同的颗粒堆积而成,可用 Menger 海绵的构造思想来模拟黄土颗粒间的孔隙特性^[33]。考虑一边长为 L 的立方体作为初始元,将边长分成 m 等份,得到 m^3 个立方体,边长为 L/m ,选定一个规则去掉其中 n 个小立方体,剩余立方体的个数为 $(m^3 - n)$ 。按照此规律不断分割-去掉,剩余立方体的尺寸不断减小,数目不断增加。当第 i 次分割-去掉后,立方体尺寸 r_i 为 L/m^i ,立方体数目 N_i 为 $(m^3 - n)^i$ 。剩余 N_i 个小立方体构成黄土的颗粒骨架,而去掉的不同阶次小立方体构成黄土内不同阶次孔隙。

根据标度不变定律,可观测到的黄土颗粒数目 N_i 与观测尺度 r_i 的关系满足^[34]:

$$N_i = k r_i^{-D_M} \quad (3)$$

式中: k 为常数; D_M 为基于 Menger 海绵模型的黄土颗粒分形维数。

所以,当第 i 次分割、去掉后,黄土颗粒体积 V_i 为:

$$V_i(\geq r_i) = k r_i^{-D_M} r_i^3 = k r_i^{3-D_M} \quad (4)$$

孔隙度 ϕ 为:

$$\phi = 1 - V_i(\geq r_i) / L^3 = 1 - k L^{-D_M} (r_i / L)^{3-D_M} \quad (5)$$

考察初始元,即 $r=L$ 时,孔隙率为 0,可知 $k = L^{D_M}$,则 $\phi = 1 - (r_i / L)^{3-D_M}$ 。结合式 3 可知:

$$D_M = \frac{\lg(m^3 - n)}{\lg m} \quad (6)$$

孔径大于或等于 r_i 的孔隙体积 V_p 为:

$$V_p(\geq r_i) = L^3 \phi = L^3 - L^{D_M} r_i^{3-D_M} \quad (7)$$

一个单元体积的黄土中孔隙和颗粒的数目十分巨大,即 $i \gg 1$,类比麦克斯韦提出的气体分子速率分布函数,可把离散的和连续的孔隙体积 V_p 和孔隙尺寸分布 r 的关系看成是连续和可微分函数,有:

$$\frac{dV_p(\geq r)}{dr} \propto -r^{2-D_M} \quad (8)$$

黄土中孔隙体积和孔隙尺寸的关系可根据压汞试验得到:

$$\frac{dV_p(\geq r)}{dr} = -\frac{P}{r} \frac{dV_p(\geq r)}{dP} \quad (9)$$

变形可得:

$$\frac{dV_p(\geq r)}{dP} \propto P^{D_M-4} \quad (10)$$

两边取对数即可得到:

$$\lg \frac{dV_p(\geq r)}{dP} \propto (D_M - 4) \lg P \quad (11)$$

从式(11)可以看出,以 $\lg \frac{dV_p(\geq r)}{dP}$, $\lg P$ 为纵

横坐标,求得拟合直线斜率 a ,便可求得黄土颗粒分形维数 $D_M = 4 + a$ 。在假设孔隙具有相同体积形状因子时,孔隙分形维数等于颗粒分形维数,孔隙分布也就符合分形特征^[27]。

2.3 热力学模型

压汞试验进汞过程中,随着外界施加给汞的压力 P 增加,进入黄土孔隙中的汞体积增加,系统的表面能增加。外界环境对汞所做的功等于进入孔隙内汞的表面能增量。结合 Mandelbrot 给出的分形体表面积及其孔隙体积的关系式,最终可得到进汞操作中施加于汞的压力 P 和进汞量 V 应满足的等式^[26,35]:

$$\sum_{i=1}^n \bar{P}_i \Delta V_i = K r_n^2 (V_n^{1/3} / r_n)^{D_T} \quad (12)$$

式中: \bar{P}_i 为第 i 次进汞操作的平均压力, kPa; ΔV_i 为第 i 次进汞操作的进汞量, $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$; n 为在进汞操作中施加压力的间隔次数; r_n 为第 n 次进汞时对应的孔隙半径, nm; V_n 为压力间隔次数为 n 时的累计进汞量, $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$; D_T 为基于热力学关系的分形维数; K 为参数。

令:

$$W_n = \sum_{i=1}^n \bar{P}_i \Delta V_i, Q_n = V_n^{1/3} / r_n \quad (13)$$

代入式(12),两边取对数得:

$$\lg(W_n / r_n^2) = D_T \lg Q_n + C \quad (14)$$

从式(14)可以看出,以 $\lg(W_n / r_n^2)$ 、 $\lg Q_n$ 为纵横坐标,对不同冻融循环次数作用后的黄土压汞试验中进汞过程数据进行拟合,求得拟合直线斜率 b ,便可求得热力学分形维数 D_T 。

3 压汞试验结果分析

3.1 黄土进-退汞曲线

图 1 为经历不同冻融次数后黄土累积进汞量曲

线。压汞试验分为进汞过程和退汞过程, 进汞曲线即为大于某孔径孔隙体积累计曲线。

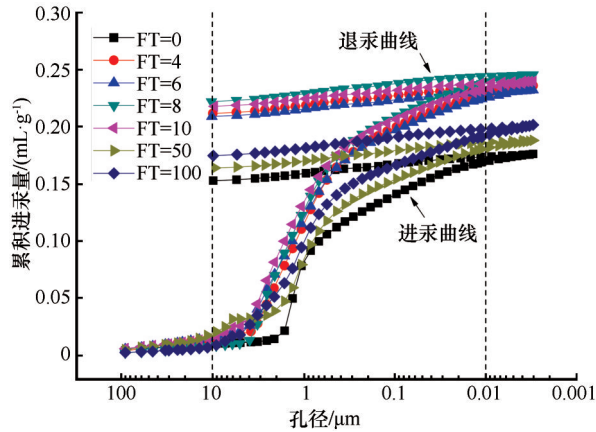


图1 经历不同冻融次数后黄土的累积进汞量曲线

Fig. 1 Cumulative mercury intrusion curves of loess after various freeze-thaw cycles

结合 Washburn 方程可知, 当外界施加的压力较小时, 与压力 P 对应的当量孔径 r 较大, 汞只能进入黄土中较大的孔隙, 累积进汞量较小。随着压力逐渐增大, 与压力 P 对应的当量孔径 r 越来越小, 汞逐渐进入黄土中较小的孔隙, 累积进汞量也逐渐增大。经历不同冻融次数后的黄土进、退汞曲线形状相似, 进汞曲线以孔径 $0.01 \mu\text{m}$ 和 $10 \mu\text{m}$ 为界可分为三个阶段。压汞试验初始阶段, 汞液只能被压入孔径大于 $10 \mu\text{m}$ 的孔隙中, 累积进汞量增量较小; 随着汞液被压入孔径分布在 $0.01 \sim 10 \mu\text{m}$ 的孔隙中, 累积进汞量迅速增长; 继续增大外界施加的压力, 汞液被压入孔径小于 $0.01 \mu\text{m}$ 的孔隙中, 但此阶段累积进汞量基本不再增加。

未经历冻融作用的黄土最大累积进汞量为 $0.176 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$, 与其相比, 经历冻融作用的黄土最大累积进汞量明显较大, 尤其是经历 4、6、8、10 次冻融作用的黄土最大累积进汞量分别增至 0.232 、 0.246 、 $0.240 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$, 增加了 $32\% \sim 40\%$ 。经历 50、100 次冻融作用的黄土最大累积进汞量分别为 0.188 、 $0.201 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$, 可见随着冻融循环次数的继续增加, 最大累积进汞量有减小的趋势, 且趋于稳定。

退汞过程中随着外界施加压力的减小, 累积进汞量减小, 但量值变化较小。相同外界压力下, 退汞过程中的累积进汞量明显大于进汞过程中的累积进汞量。试验结束后, 进汞曲线和退汞曲线不闭合, 说明有一部分汞液残留在黄土孔隙中。这种滞

留现象与黄土孔隙结构形态密切相关, 较为认可的解释是在黄土这种多孔介质材料中存在一些“墨水瓶”型孔隙, 导致当汞压入窄小孔隙时有“瓶颈”效应, 退汞时部分汞滞留在孔隙内部无法排出, 图 2 中蓝色部分所示。

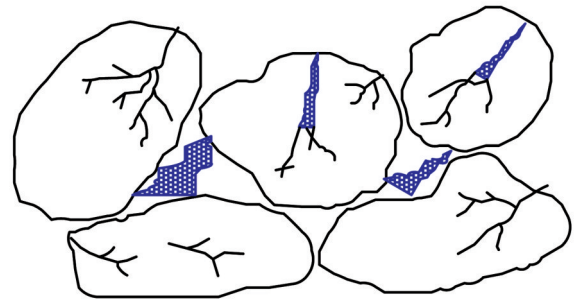


图2 墨水瓶型孔隙

Fig. 2 Ink bottle type pore

3.2 孔隙分布特征

国内外学者根据不同的研究对象、方法及目的提出了很多孔径划分理论。本文根据压汞试验测得的黄土孔隙组成, 结合刘松玉等^[36]关于土中孔隙分布的分形特征研究, 按孔径大小将黄土中孔隙划分为 4 种: 超微孔, 孔隙孔径小于 $0.1 \mu\text{m}$, 孔隙类型为黄土颗粒内孔隙; 微孔, 孔隙孔径在 $0.1 \sim 2 \mu\text{m}$ 范围, 孔隙类型为黄土颗粒间孔隙; 小孔, 孔隙孔径在 $2 \sim 10 \mu\text{m}$ 范围, 孔隙类型为部分黄土颗粒间孔隙和团粒内孔隙; 大孔, 孔隙孔径大于 $10 \mu\text{m}$, 孔隙类型为部分团粒内孔隙和团粒间孔隙。根据进汞曲线, 可获得相应孔径下的孔隙体积及所占比例, 如图 2、图 3 所示。

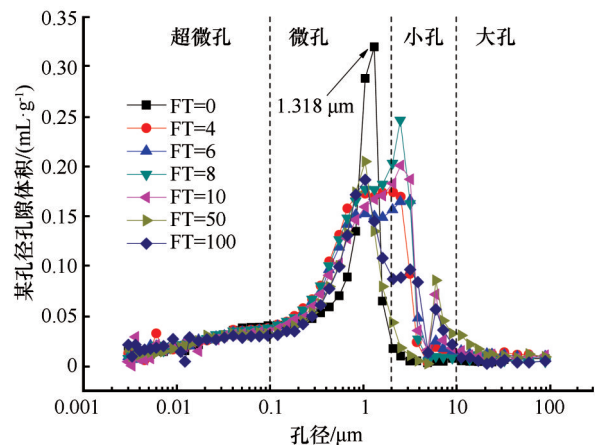


图3 经历不同冻融次数后黄土的孔隙分布曲线

Fig. 3 Pore size distribution curves of loess after various freeze-thaw cycles

从图3可以看出,经历不同冻融次数后黄土中孔隙孔径主要分布在 $0.01 \sim 10 \mu\text{m}$ 范围内。冻融作用对黄土中孔径分布在 $0.1 \sim 10 \mu\text{m}$ 范围内的孔隙影响较大,孔径在 $2 \mu\text{m}$ 附近孔隙受冻融作用影响最大。

未经历冻融作用的黄土孔隙分布曲线呈单峰分布,峰值对应的孔径为 $1.318 \mu\text{m}$,按照孔径划分标准为微孔。经历冻融作用的黄土孔隙分布曲线呈双峰分布,经历100次冻融作用的黄土孔隙分布曲线甚至呈现三个峰值。经历4、6、8、10次冻融作用的黄土孔隙分布曲线最大峰值对应的孔径处在 $2 \sim 10 \mu\text{m}$ 范围,随着冻融次数的继续增加,经历50、100次冻融作用的黄土孔隙分布曲线最大峰值对应的孔径又处在 $0.1 \sim 2 \mu\text{m}$ 范围。从中可以看出冻融循环这种强风化作用剧烈改变着黄土孔隙结构形态。

从图4可以看出,孔径小于 $0.1 \mu\text{m}$ 的超微孔和孔径大于 $10 \mu\text{m}$ 的大孔所占比例随冻融次数变化较小,二者所占比例基本在20%、4%左右保持不变。也就是说冻融作用对黄土颗粒内孔隙和团粒间孔隙的影响较小。结合累积孔隙比表面积图5可知,虽然黄土中孔径小于 $0.1 \mu\text{m}$ 的超微孔只占总孔隙的20%,但对孔隙比表面积起着决定性作用。

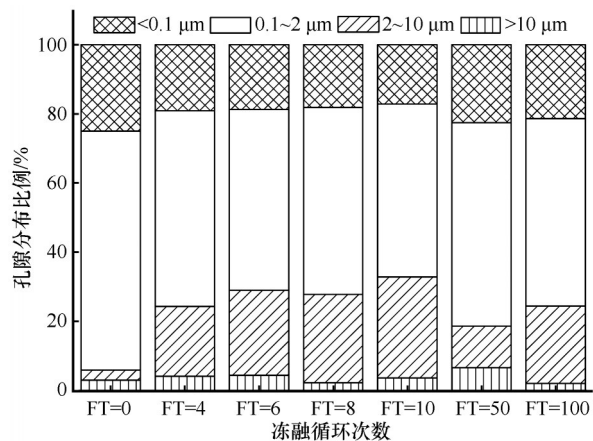


图4 经历不同冻融次数后土样中孔径分布比例

Fig. 4 Proportion of pore size distribution in soil specimens after various freeze-thaw cycles

孔径分别在 $0.1 \sim 2 \mu\text{m}$ 、 $2 \sim 10 \mu\text{m}$ 范围的微孔和小孔所占比例随冻融次数变化如图6所示。孔径在 $0.1 \sim 2 \mu\text{m}$ 范围的微孔所占比例随冻融次数增加而减小,特别是在经历4次冻融作用后,微孔所占比例由未经冻融作用的69.1%减至56.5%。经历6、8、10次冻融作用后,微孔所占比例分别为

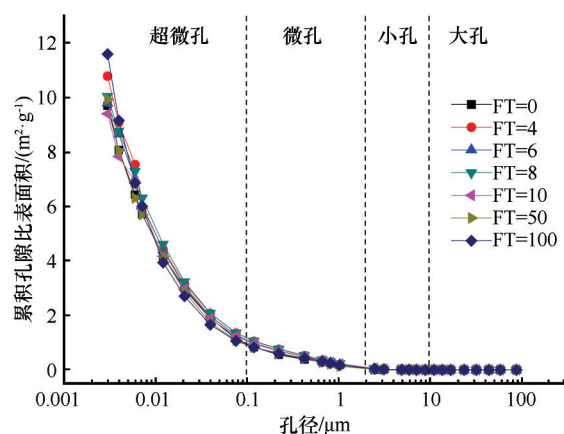


图5 黄土中累积孔隙比表面积-孔径曲线

Fig. 5 Cumulative pore area vs. aperture curves of loess

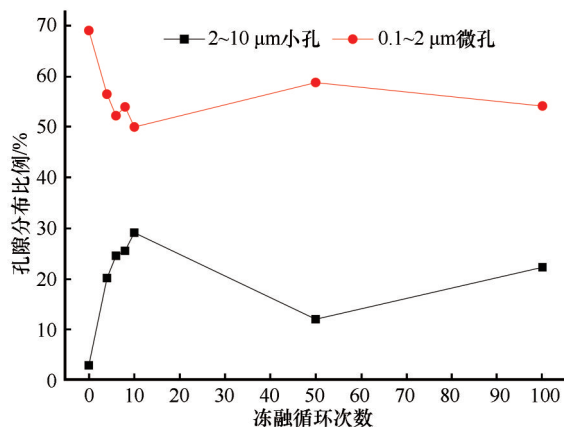


图6 黄土中微孔和小孔比例随冻融次数的变化

Fig. 6 The ratio of micropores and pores in loess changing with number of freeze-thaw cycles

52.2%、54%、50%。随经历冻融作用次数继续增加,微孔所占比例略微增加并趋于稳定,在56%左右波动。孔径在 $2 \sim 10 \mu\text{m}$ 范围的小孔所占比例随冻融次数变化趋势与微孔正好相反,呈现随经历冻融作用次数增加先增加后减小。微孔和小孔所占比例呈现出“此消彼长”的变化趋势。吸附于土颗粒表面的结合水随着温度的下降逐渐冻结,即使在很低的温度条件下,仍会存在一定数量的未冻水,冻融作用对这部分水体积变化影响较小。存在于土中足够大的孔隙和裂隙中的重力水及在毛细孔隙(直径 $2 \sim 60 \mu\text{m}$)中保持和移动的毛细水在冻结过程中可完全相变成冰,冻融作用对重力水和毛细水所占孔隙体积影响较大。前10次冻融循环强烈改变黄土团粒内孔隙和颗粒间孔隙。

3.3 冻融作用对孔隙率的影响

从图7中可以看出,黄土孔隙率随冻融次数的增加呈现出先增加后减小再趋于稳定的变化趋势。

冻融作用造成黄土结构形态和土颗粒联结的变化, 宏观反映为孔隙率的变化。未经历冻融作用的黄土孔隙率为 33%, 经历前 10 次冻融作用后, 黄土孔隙率均明显增大。特别是经历 6 次冻融作用后, 黄土孔隙率达到最大为 39.2%, 与未经历冻融作用的黄土相比增大约 18.8%。值得一提的是, 虽然经历 8 次冻融作用的黄土最大累积进汞量最大, 但由于其表观体积较大, 所求孔隙率略小于经历 6 次冻融作用的黄土孔隙率。冻结过程中孔隙水相变成冰体积膨胀, 引起黄土结构形态和土颗粒联结的变化; 融化时土体骨架在自重作用下压缩但不能完全恢复原状。经历 6~8 次冻融扰动作用, 黄土结构形态和土颗粒联结受到很大破坏, 土颗粒联结松散, 孔隙率较高。随后在冻融作用下这种松散土颗粒逐渐进行重组形成新的结构形态, 使松散土压

密, 经历 50 次冻融作用后, 黄土孔隙率减小至 33%。

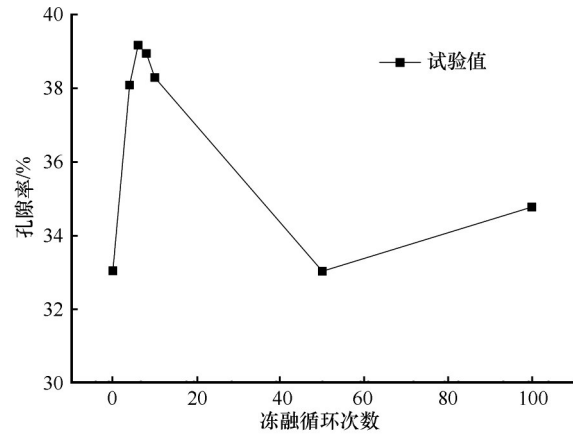


图 7 经历不同冻融次数后土样孔隙率变化曲线
Fig. 7 Soil porosity changing with freeze-thaw cycles

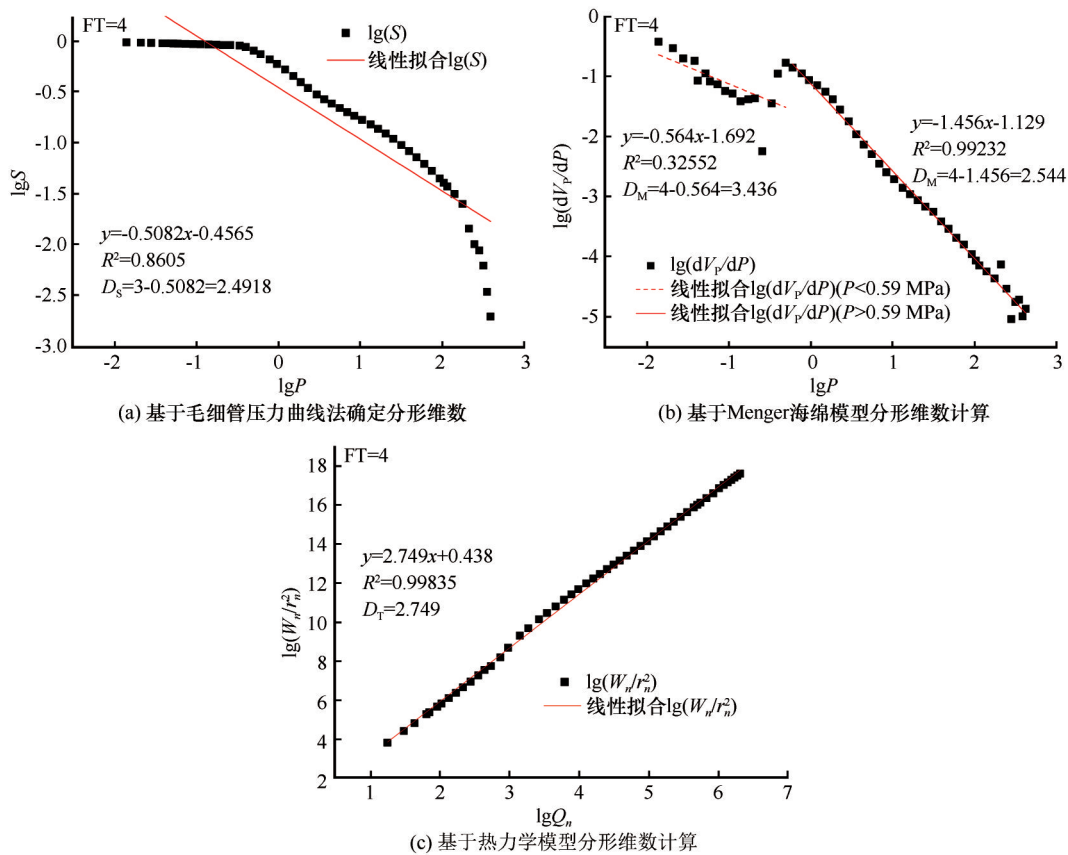


图 8 经历 4 次冻融后土样分形维数计算

Fig. 8 Calculation of pore fractal dimension of soil specimen after 4 freeze-thaw cycles based on capillary pressure curve method (a), Menger sponge model (b) and thermodynamic model (c)

4 黄土孔隙分形特性

4.1 孔隙分形特征

基于以上 3 种分形维数计算方法处理经历不同

冻融次数后黄土的压汞试验数据。图 8 为经历 4 次冻融循环后黄土的压汞试验数据处理结果。其它计算结果见表 2。多孔介质的孔隙结构分形维数的合理范围为 2~3。分形维数为 2 表示完全光滑的平

表2 经历不同冻融次数后土样分形维数计算结果

Table 2 Calculation results of fractal dimension of soil specimen after various freeze-thaw cycles

FT/次	毛细管压力曲线法		Menger海绵模型				热力学模型	
	D_s	R^2	$P < 0.59 \text{ MPa}$		$P > 0.59 \text{ MPa}$		D_T	R^2
			D_M	R^2	D_M	R^2		
0	2.5203	0.8487	2.8578	0.9269	2.636	0.9716	2.8013	0.9979
4	2.4918	0.8605	3.4361	0.3255	2.544	0.9923	2.7489	0.9984
6	2.4716	0.8537	3.6415	0.264	2.567	0.9944	2.7452	0.9985
8	2.4626	0.8563	3.7707	0.0735	2.527	0.9961	2.7462	0.9981
10	2.4489	0.8243	3.7765	0.1002	2.529	0.9864	2.7363	0.9984
50	2.5269	0.8668	3.0759	0.5439	2.625	0.9874	2.76	0.9989
100	2.5413	0.8768	4.0419	0.0037	2.632	0.9789	2.7566	0.9986

面；分形维数为3表示完全粗糙^[37]。分形维数越大，表明多孔介质孔隙表面在空间的形貌特性偏离光滑平面的程度越远，孔隙结构复杂程度越高。

基于毛细管压力曲线法确定经历不同冻融循环次数后的黄土孔隙分形维数时， $\lg S$ 和 $\lg P$ 分阶段线性相关。这说明不同的孔径区间范围内黄土孔隙分布具有不同的自相似度。但从整体上看，毛管压力对数与润湿相饱和度对数的线性相关系数均在0.85左右，所确定的分形维数在2.4489~2.5413之间变化，在分形维数的合理范围内，可认为其在整个区间内孔隙结构具有较好的统计意义上的自相似性，仍可用单一的分形维数表征其孔隙结构分形特征。

基于Menger海绵模型处理的压汞试验数据点 $\lg(dV_p/dP) \sim \lg P$ 分布明显不呈线性分布。若仍在整个区间内进行线性拟合，则得不到合理表征黄土孔隙特性的分形维数。从图8(b)可以看出，若将试验数据以 $\lg P = -0.225$ 为界分段进行线性拟合，则当 $P > 0.59 \text{ MPa}$ 时， $\lg(dV_p/dP)$ 与 $\lg P$ 呈明显的线性关系，相关系数均在0.97以上，所确定的分形维数为2.544；当 $P < 0.59 \text{ MPa}$ 时， $\lg(dV_p/dP)$ 与 $\lg P$ 线性相关性较差，相关系数为0.33，所确定的分形维数为3.436，其值大于3，根据经典几何观点可知其明显偏离了分形维数的合理定义。结合Washburn方程可知，当 $P = 0.59 \text{ MPa}$ 时，孔径为2 μm 。基于Menger海绵模型表征的黄土孔隙结构表现出多尺度分形，在不同的尺度范围里，有不同的分形维数。孔隙的孔径在3 nm~2 μm 区间时，Menger海绵模型所确定的经历不同冻融次数后黄土孔隙的分形维数在2.527~2.636变化；孔径大于2 μm 时，分形维数在2.8578~4.0419变化，经历冻融作用后的孔隙分形维数均大于3，无意义。可以认

为，Menger海绵模型能够较好的表征冻融循环作用后黄土孔径在3 nm~2 μm 区间的孔隙分形特征；对于孔径大于2 μm 的孔隙，Menger海绵模型无法给出合理的分形维数。

由表2可见，基于热力学模型处理的压汞试验数据点 $\lg(W_n/r_n^2) \sim \lg Q_n$ 呈现显著的线性关系，相关系数均在0.99以上，接近于1。对经历不同冻融循环次数作用后的黄土孔隙结构拟合得到的热力学分形维数 D_T 在2.7363~2.8013变化，均在合理范围内。相比于Menger海绵模型计算得到的一些分形维数偏离了孔隙结构的分形意义，热力学模型很好的表征了黄土孔隙表面分形特征。

以上三种分形模型其实是对压汞试验数据的不同处理方法。毛细管压力曲线法和Menger海绵模型横坐标均采用压力常用对数，Menger海绵模型中还涉及到累积进汞量随压力增量的变化率。这两种模型均没考虑到实际进汞操作中间隔施加压力所获得的数据点不是足够密集，导致在整个阶段线性相关系数较小。基于这两种分形模型得到的曲线可更进一步划分为若干个线性段，形成所谓的多尺度分形，在不同的尺度范围里，有不同的分形维数。热力学模型考虑到实际进汞操作中间隔施加压力，在每次进汞操作中取平均压力，基于热力学模型处理的压汞试验数据散点 $\lg(W_n/r_n^2) \sim \lg Q_n$ 线性相关系数接近于1。

4.2 分形维数变化

从孔径分布比例柱状图4可以看出，经历不同冻融次数后黄土中孔径在3 nm~2 μm 的孔隙体积所占比例均在67%以上，未经冻融作用的黄土中更是高达94%。Menger海绵模型中选择孔径在3 nm~2 μm 区间的孔隙的分形维数为研究对象，考察孔隙分形维数随冻融循环次数的变化规律。图9为三

种计算模型所得孔隙分形维数随冻融循环次数的变化情况。

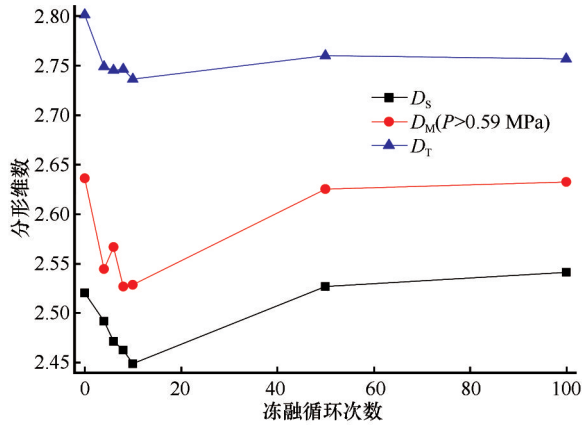


图9 孔隙分形维数随冻融循环次数的变化

Fig. 9 The variation of pore fractal dimension with freeze-thaw cycles

从图9可以看出,基于热力学模型计算得到的孔隙表面分形维数大于其他两种模型得到的孔隙分形维数。三种模型得到的分形维数随冻融次数变化规律相似,均呈现出未经冻融作用的黄土孔隙分形维数较大,随冻融次数的增加,分形维数迅速减小,经历8~10次冻融作用后,分形维数达到最小值,之后随着冻融次数的增加,分形维数逐渐增大并趋于定值。基于Menger海绵模型和热力学模型得到的经历100次冻融作用后黄土孔隙分形维数均小于未经冻融作用的黄土孔隙分形维数;基于毛细管压力曲线法确定的经历100次冻融作用后黄土孔隙分形维数接近未经冻融作用的黄土孔隙分形维数。分形维数越大,表明多孔介质孔隙结构复杂程度越高,未经冻融作用的黄土孔隙结构形态最复杂,可见冻融作用会改变黄土孔隙结构形态。黄土在不补水的情况下冻结,孔隙中的水完全相变成冰体积增大9%,使得土体结构发生破坏,孔隙体积增大,与未经历冻融作用的黄土中孔隙体积相比,经历4、6、8、10次冻融作用的黄土中孔隙体积增大了32%~40%。前10次冻融作用中,孔径在2~10 μm 范围的小孔所占比例随冻融次数增加迅速增加。孔隙中的水相变成冰的过程可近似看作等向膨胀,由于受到冻胀应力的作用,孔隙增大的同时其表面轮廓变得光滑。最终造成孔隙体积增加但其结构复杂程度降低。经历8次冻融作用后黄土孔隙体积最大,此时黄土处于最松散状态。松散土经历冻融后出现类似压实的作用,随冻融次数增加,

孔隙体积又减小,其结构复杂程度又增加,冻融50次后趋于稳定。

5 结论

本文利用压汞法对经历不同冻融循环次数后黄土孔隙特征变化规律进行了研究,并采用3种分形模型定量表征了黄土孔隙结构的分形特性,得出以下结论:

(1) 冻融循环导致黄土结构形态和土颗粒联发生变化。未经冻融作用的黄土孔隙分布曲线呈单峰分布,经历冻融作用的黄土孔隙分布曲线呈双峰甚至多峰分布。冻融作用对黄土中孔径分布在0.1~10 μm 范围内的孔隙影响较大。黄土试样的孔隙率随经历冻融作用次数的增加呈现出先增加后减小再趋于稳定的变化趋势。

(2) 三种分形模型其实是采用不同的方法对压汞试验数据进行处理。基于热力学模型表征孔径分布在3 nm~90 μm 范围的黄土孔隙分形特征时,黄土孔隙结构呈现出显著的分形特性,并可得到唯一且合理的分形维数用于定量表征黄土孔隙表面分形特征。

(3) 采用毛细管压力曲线法表征孔径分布在3 nm~90 μm 范围的黄土孔隙分形特征时,lgS和lgP分阶段线性相关,形成所谓的多尺度分形。但在整个尺度范围内其所确定的分形维数在合理区间内,仍可认为其较好地表征了整个尺度范围内孔隙分形特征。

(4) 基于Menger海绵模型表征的黄土孔隙结构表现出多尺度分形,在不同的尺度范围里,有不同的分形维数。孔隙的孔径在3 nm~2 μm 区间时,Menger海绵模型所确定的分形维数在合理范围,孔径大于2 μm 时,无法确定出合理的分形维数来表征本身具有分形特性的孔隙结构。

参考文献(References):

- [1] Qi Jilin, Zhang Jianming, Zhu Yuanlin. Influence of freezing-thawing on soil structure and its soil mechanics significance [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 10(2): 2-4. [齐吉琳, 张建明, 朱元林. 冻融作用对土结构性影响的土力学意义[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 10(2): 2-4.]
- [2] Song Chunxia, Qi Jilin, Liu Fengyin. Influence of freeze-thaw on mechanical properties of Lanzhou loess [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(4): 1077-1080. [宋春霞, 齐吉琳, 刘奉银. 冻融作用对兰州黄土力学性质的影响[J]. 岩土力学, 2008, 29(4): 1077-1080.]
- [3] Zhang Ze, Ma Wei, Qi Jilin. Structure evolution and mecha-

- nism of engineering properties change of soils under effect of freeze-thaw cycle [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2013, 43(6): 1904 – 1914. [张泽, 马巍, 齐吉琳. 冻融循环作用下土体结构演化规律及其工程性质改变机理[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2013, 43(6): 1904 – 1914.]
- [4] Fang Lili, Qi Jilin, Ma Wei. Freeze-thaw induced changes in soil structure and its relationship with variations in strength [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(2): 435 – 440. [方丽莉, 齐吉琳, 马巍. 冻融作用对土结构性的影响及其导致的强度变化[J]. 冰川冻土, 2012, 34(2): 435 – 440.]
- [5] Wang Dayan, Ma Wei, Chang Xiaoxiao, et al. Physical-mechanical properties changes of Qinghai-Tibet clay due to cyclic freezing and thawing [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(23): 4313 – 4319. [王大雁, 马巍, 常小晓, 等. 冻融循环作用对青藏黏土物理力学性质的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(23): 4313 – 4319.]
- [6] Ma Wei, Wang Dayan. Frozen soil mechanics [M]. Beijing: Science Press, 2014: 89 – 93. [马巍, 王大雁. 冻土力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2014: 89 – 93.]
- [7] Zhang Zhihong, Li Hongyan, Shi Yumin. Experimental study on permeability properties and micro-structure of clay contaminated by Cu^{2+} [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 12(47): 122 – 129. [张志红, 李红艳, 师玉敏. 重金属 Cu^{2+} 污染土渗透特性试验及微观结构分析[J]. 土木工程学报, 2014, 12(47): 122 – 129.]
- [8] Zhou Jian, Deng Yiliang, Cao Yang, et al. Experimental study of microstructure of Hangzhou saturated soft soil during consolidation process [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2014, 45(6): 1998 – 2005. [周建, 邓以亮, 曹洋, 等. 杭州饱和软土固结过程微观结构试验研究[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2014, 45(6): 1998 – 2005.]
- [9] Kong Lingrong, Huang Hongwei, Hicher P Y, et al. Structural changes in the Shanghai silty clay microstructural characteristics and consolidation process [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(12): 3287 – 3292. [孔令荣, 黄宏伟, Hicher P Y, 等. 上海淤泥质黏土微结构特性及固结过程中的结构变化研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(12): 3287 – 3292.]
- [10] Zhang Jiru, Zhu Jie, Huang Li, et al. Evolution of soft clay under consolidation microscopic pore structure and its fractal [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(4): 394 – 400. [张季如, 祝杰, 黄丽, 等. 固结条件下软黏土微观孔隙结构的演化及其分形描述[J]. 水利学报, 2008, 39(4): 394 – 400.]
- [11] Zhou Cuiying, Mu Chunmei. Microstructure characteristics and strength of the relationship of the soft soil rupture surface [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(10): 1136 – 1141. [周翠英, 牟春梅. 软土破裂面的微观结构特征与强度的关系[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(10): 1136 – 1141.]
- [12] Zhang Xianwei, Kong Lingwei, Guo Aiguo, et al. Evolution of microscopic pore of structured clay in compression process based on SEM and MIP test [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(2): 406 – 412. [张先伟, 孔令伟, 郭爱国, 等. 基于 SEM 和 MIP 试验结构性黏土压缩过程中微细孔隙的变化规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(2): 406 – 412.]
- [13] Ding Zhi, Zhang Mengya, Wei Xinjiang, et al. Experimental research on the microstructure of thawed soil after the subway construction of freezing method [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016, 33(11): 106 – 112. [丁智, 张孟雅, 魏新江, 等. 地铁冻结法工后融土微观结构试验研究[J]. 铁道工程学报, 2016, 33(11): 106 – 112.]
- [14] Ding Zhi, Hong Qihao, Wei Xinjiang, et al. Experimental study on micro-structure of artificial freezing and thawing soft soil under subway train load [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2017, 51(7): 1291 – 1299. [丁智, 洪其浩, 魏新江, 等. 地铁列车荷载下人工冻融软土微观结构试验研究[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2017, 51(7): 1291 – 1299.]
- [15] Zhang Ying, Bing Hui, Yang Chengsong. Influences of freeze-thaw cycles on mechanical properties of silty clay based on SEM and MIP test [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(Suppl 1): 3597 – 3603. [张英, 郇慧, 杨成松. 基于 SEM 和 MIP 的冻融循环对粉质黏土强度影响机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增刊 1): 3597 – 3603.]
- [16] Tan Yunzhi, Wu Pian, Fu Wei, et al. Strength and micro-mechanism of improved silt under freeze-thaw cycle effect [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(10): 2827 – 2834. [谈云志, 吴翩, 付伟, 等. 改良粉土强度的冻融循环效应与微观机制[J]. 岩土力学, 2013, 34(10): 2827 – 2834.]
- [17] Ma Junhua, Ma Ke, Xu Guiwa. Study of pore distribution and fractal geometry of loess soil under freeze-thaw cycles [J]. Coal Engineering, 2012(Suppl 2): 129 – 133. [马骏华, 马可, 徐贵娃. 冻融循环作用下黄土状土孔隙分布分形几何研究[J]. 煤炭工程, 2012(增刊 2): 129 – 133.]
- [18] Xiao Donghui, Feng Wenjie, Zhang Ze, et al. Research on the relationship between permeability and construction feature of loess under the freeze-thaw cycles [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(4): 43 – 49. [肖东辉, 冯文杰, 张泽, 等. 冻融循环作用下黄土渗透性与其结构特征关系研究[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(4): 43 – 49.]
- [19] Xiao Donghui, Feng Wenjie, Zhang Ze, et al. Research on the Lanzhou loess permeabilities changing with freezing-thawing cycles [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(5): 1192 – 1198. [肖东辉, 冯文杰, 张泽, 等. 冻融循环对兰州黄土渗透性变化的影响[J]. 冰川冻土, 2014, 36(5): 1192 – 1198.]
- [20] Zhang Yun, Ma Wei, Bing Hui. Impact of freezing and thawing cycles on structure of soils and its mechanism analysis by laboratory testing [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(5): 1282 – 1287. [郑娜, 马巍, 郇慧. 冻融循环对土结构性影响的试验研究及影响机制分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(5): 1282 – 1287.]
- [21] Tao Gaoliang, Zhang Jiru. Fractal theory and its applications in geotechnical engineering [J]. Science Paper Online, 2009, 4(7): 493 – 497. [陶高梁, 张季如. 岩土工程中的分形理论及其应用[J]. 中国科技论文在线, 2009, 4(7): 493 – 497.]
- [22] Tao Gaoliang. Fractal approach on pore structure of rock and soil porous media and its applications [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010. [陶高梁. 岩土多孔介质孔隙结构的分形研究及其应用[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.]
- [23] Xie Heping. Fractal pores and fractal particles of rock and soil materials [J]. Advances in mechanics, 1993, 23(2): 145 – 164. [谢和平. 岩土介质的分形孔隙和分形粒子[J]. 力学进展, 1993, 23(2): 145 – 164.]
- [24] Zhou Jie, Tang Yiqun. Experimental inference on dual-porosity aggravation of soft clay after freeze-thaw by fractal and probability analysis [J]. Cold Regions Science and Technology,

- 2018, 153: 181 – 196.
- [25] Zhang Ying, Bing Hui. Experimental study of the effect of freezing-thawing cycles on porosity characters of silty clay by using mercury intrusion porosimetry[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(1): 169 – 174. [张英, 邴慧. 基于压汞法的冻融循环对土体孔隙特征影响的试验研究[J]. 冰川冻土, 2015, 37(1): 169 – 174.]
- [26] Li Nan, Wang Tianliang, Xu Chang, et al. Study on the micro-cosmic fractal characteristics of silty clay subject to repeated freezing and thawing[J]. Railway Standard Design, 2017, 61(10): 48 – 52. [李楠, 王天亮, 徐昌, 等. 反复冻融作用下粉质黏土的微观分形特征研究[J]. 铁道标准设计, 2017, 61(10): 48 – 52.]
- [27] Zhang Zhizhen, Gao Feng, Gao Yanan, et al. Fractal structure and model of pore size distribution of granite under high temperature[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(12): 2426 – 2438. [张志镇, 高峰, 高亚楠, 等. 高温影响下花岗岩孔径分布的分形结构及模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(12): 2426 – 2438.]
- [28] Rong Huren, Bai Haibo, Wang Zhansheng. Experimental research on mechanical properties and microstructure change law of red sandstone after different temperatures[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(2): 463 – 469. [戎虎仁, 白海波, 王占盛. 不同温度后红砂岩力学性质及微观结构变化规律试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(2): 463 – 469.]
- [29] Wan Yong, Xue Qiang, Wu Yan, et al. Mechanical properties and micro-mechanisms of compacted clay during drying-wetting cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(10): 2815 – 2824. [万勇, 薛强, 吴彦, 等. 干湿循环作用下压实黏土力学特性与微观机制研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(10): 2815 – 2824.]
- [30] Zhou Jiazuo, Li Dongqing. Numerical analysis of coupled water, heat and stress in saturated freezing soil[J]. Cold Regions Science and Technology, 2012, 72: 4 – 49.
- [31] Zhang Ping, Fang Yingguang, Yan Xiaoqing. Study of different dry methods for drying remolded bentonite sample with mercury intrusion test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(1): 388 – 391. [张平, 房莹光, 闫小庆, 等. 不同干燥方法对重塑膨润土压汞试验用土样的影响试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(1): 388 – 391.]
- [32] Zhang Xianguo, Zhang Tao, Lin Chengyan. Based on pore fractal feature of pore structure in low permeability reservoir evaluation[J]. Lithologic Reservoir, 2013, 25(6): 40 – 45. [张宪国, 张涛, 林承焰. 基于孔隙分形特征的低渗透储层孔隙结构评价[J]. 岩性油气藏, 2013, 25(6): 40 – 45.]
- [33] Zheng Ying, Zhou Yingbiao, Zheng Chuguang. The fractal description of pore structure of porous CaO[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2001, 29(3): 82 – 84. [郑瑛, 周英彪, 郑楚光. 多孔CaO孔隙结构的分形描述[J]. 华中科技大学学报, 2001, 29(3): 82 – 84.]
- [34] Zhou Hongwei, Xie Heping. Fractal description of porosity and specific surface area of porous media[J]. Journal of Xi'an Mining Institute, 1997, 17(2): 97 – 102. [周宏伟, 谢和平. 多孔介质孔隙度与比表面积的分形描述[J]. 西安矿业学院学报, 1997, 17(2): 97 – 102.]
- [35] Wang Xiujuan, Yao Huifang, Li Wei, et al. Fractal characterization of pore structure in coals based on thermodynamics model[J]. Coal Geology & Exploration, 2014, 42(6): 20 – 23. [王秀娟, 姚惠芳, 李伟, 等. 基于热力学模型的煤孔隙结构分形表征[J]. 煤田地质与勘探, 2014, 42(6): 20 – 23.]
- [36] Liu Songyu, Zhang Jiwen. Fractal approach to measuring soil porosity[J]. Chinese Journal of Southeast University, 1997, 27(3): 127 – 130. [刘松玉, 张继文. 土中孔隙分布的分形特征研究[J]. 东南大学学报, 1997, 27(3): 127 – 130.]
- [37] Liu Yongzhong, Chen Sanqiang, Chen Hao. Characterizing pores in freeze-dried materials by fractal models and fractal dimensions[J]. Transactions of the Chinese of Agricultural Engineering, 2004, 20(6): 41 – 45. [刘永忠, 陈三强, 陈浩. 冻干物料孔隙特性表征的分形模型与分形维数[J]. 农业工程学报, 2004, 20(6): 41 – 45.]

Study on the pore features of freezing-thawing loess based on different fractal models

CHEN Xin^{1,2}, ZHANG Ze¹, LI Dongqing¹

(1. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to obtain the effect of freezing-thawing cycles on the pore size distribution of loess, remolded loess was taken as the research object, the pore characteristics of loess specimens after different freeze-thaw cycles were tested by mercury intrusion porosimetry. In addition, quantitative characterization and comparative study of microscopic pore structure of loess were carried out by using three kinds of fractal models. The results showed that the pore distribution curve of loess without freezing-thawing action is unimodal, while the pore distribution curve in loess subjected to freezing-thawing is bimodal or even multimodal. The freezing-thawing cycle has a considerable influence on the pore size within the range of 0.1 – 10 μm in loess. The porosity of loess increases during the first ten freezing-thawing cycles, especially after six freezing-thawing cycles, the porosity increases by about 18.8%. As freezing-thawing cycle continuing, the porosity in loess decreased and stabilized. The pore size distribution of loess after various freezing-thawing cycles exhibits a good statistical fractal characteristics. Based on the thermodynamic model and capillary pressure curve method to characterize the pore structure of loess, the loess pores exhibit significant fractal characteristics and can give a unique and reasonable fractal dimension over the entire pore size scale. However, while the Menger sponge model is adopted, the fractal characteristics of loess pores exhibit multi-scale fractal, and there are different fractal dimensions in different scales. Combined with fractal theory, it can be concluded that freezing-thawing changes the porosity uniformity and complexity of loess.

Key words: loess; freeze-thaw cycle; mercury intrusion porosimetry; porosity; fractal model

(责任编辑: 齐吉琳; 编辑: 周成林)