基于 MapInfo 的多孔介质微观孔隙结构分析

李合莲[1,2],陈家军[1],杨 建[1]

(1.北京师范大学环境学院环境模拟与污染控制国家重点联合实验室,北京 100875;2.济南大学化学化工学院,山东 济南 250022)

摘要:采用标准砂制作了多孔介质的铸体薄片,利用 MapInfo 软件从铸体薄片图像中提取了孔腔和喉道的面积、周长、中心点坐标及喉道直径、孔隙配位数、孔隙连通情况等信息,采用 SPSS 软件对孔腔和喉道面积、孔隙配位数、喉道直径进行了统计分析。结果表明,孔腔和喉道的面积、喉道直径、孔隙配位数均较好地遵循对数正态分布规律。

关键词:多孔介质;孔隙结构;孔腔;喉道

中图分类号:TU411.92;P642.11+3 **文献标识码**:A **文章编号**:1004-6933(2009)05-0010-04

Microscopic pore structure analysis for porous media based on MapInfo software

LI He-lian[1,2], CHEN Jia-jun[1], YANG Jian[1]

(1. *State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing* 100875, *China*; 2. *School of Chemistry and Chemical Engineering, University of Jinan, Jinan* 250022, *China*)

Abstract: The casting thin sections of porous media were made with standard sand. Mapinfo software was used to extract the area, perimeter, center point coordinates of pores and throats, throat diameters, pore coordination numbers, and connectivity information. SPSS software was used to statistically analyze the properties of the pore and throat areas, hole coordinates and throat diameters. The results show that the areas of pore space and pore throats, throat diameters and pore coordination numbers all have logarithmic normal distribution.

Key words: porous media; pore structure; pore space; pore throat

溢油或地下储油罐泄漏造成的土壤和地下水非水相液体(non-aqueous phase liquids,简称 NAPLs)污染是世界各工业化国家普遍存在的问题,近年来,NAPLs 污染修复问题受到了极大关注。NAPLs 在土壤和地下水中的运动属于多相流问题,网络模型是从孔隙尺度上研究多相流问题的重要工具,孔隙结构定量分析是建立网络模型的基础。目前,沉积岩的孔隙结构分析方法已经比较成熟,而土壤、含水层等松散多孔介质的微观孔隙结构的研究和应用却非常少。

土壤及含水层属于松散多孔介质,目前关于土壤微观孔隙的研究多采用图像分析法,研究内容仅限于土壤的孔隙度、孔隙尺寸分布、分形维数、连通度等方面[1-6],关于孔隙几何和拓扑结构的系统研究还不多见。多孔介质由固体骨架和其中的孔隙空间所构成,孔隙空间又可以分为 2 部分:固体颗粒之间较大的孔隙空间,称作孔腔;固体颗粒之间狭窄的孔隙空间,称作喉道,喉道是孔腔之间连通的通道。孔腔和喉道的尺寸分布、孔隙配位数、喉道直径等是网络模型的重要输入参数。本文采用 MapInfo 的图像矢量化和统计功能来提取松散砂介质的孔隙结构及孔隙参数并利用 SPSS 软件对获取的参数进行了统计分析,以便为松散砂孔隙网络模型的建立提供必备的数据,从而为表面活性剂冲洗治理 NAPLs 污染网络模拟奠定基础。

1 薄片图像的获取

目前表面活性剂冲洗治理 NAPLs 污染的方法主要应用于砂质土壤或砂砾含水层,故本文采用小

基金项目:国家自然科学基金(40772148)

作者简介:李合莲(1975—),女,山东高唐人,讲师,博士研究生,主要从事多孔介质水分及污染物运移模拟研究。E-mail:lihelian2004@yahoo.com.cn

于 0.25 mm、0.25 ~ 0.5 mm、0.5 ~ 1 mm 3 种不同粒径的普通标准砂作为研究对象，采用图像分析法来研究松散介质的孔隙结构。

采用图像分析法研究松散介质的孔隙结构，首先需要将砂粒制作成薄片，并获得薄片的二维显微图像。薄片的制作过程如下：①取一定量的石英砂，按自然堆放的方式放置于制样盒中并压实；②从上面注入添加了油溶蓝的环氧树脂，使样品固结；③依次用 200、600 和 1200 目的磨片机进行初磨，然后用 3000 目的玛瑙板进行精磨；④将打磨后的样品用环氧树脂粘在载玻片上，上切片机切出 3 ~ 4 mm 厚的切片；⑤重复③中的操作步骤，再进行 6 000 目的精磨；⑥在载玻片上对薄片进行人工修片，使其光滑和平整，在打磨好的薄片上加上盖片。在显微镜下用数码相机从每个薄片上随机拍摄了 2 幅图像照片。

2 孔隙微观结构参数的提取

从薄片图像中提取孔隙结构参数按以下步骤进行：图像二值化、图像配准、图像矢量化、参数提取。

2.1 薄片图像的二值化

薄片图像二值化在 Photoshop 中进行，由于灰度直方图呈明显的双峰状，选择双峰间的中值作为阈值，生成二值图像，叠加对比二值图像和原始图像以保证二值化操作的准确性。图 1 为二值化后的图像。

(a)细砂　(b)中砂　(c)粗砂

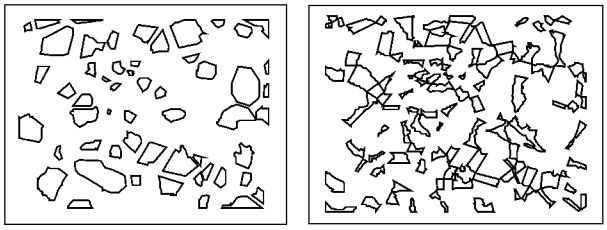
图 1　二值化图像

2.2 图像配准

在 MapInfo 中打开二值化后的图像并进行配准，选择投影系统为非地球坐标系统，单位为 mm，根据图像实际代表的样本尺寸给定 4 个角点的坐标作为控制点。

2.3 矢量化

为了提取孔腔和喉道的尺寸分布等参数，将其分别作为单独的图层进行矢量化。孔腔和喉道的分割参考了岩石孔隙结构分析方法[7]：3 个或 3 个以上颗粒包围的空间为孔腔；相邻 2 孔腔之间的连接部分(2 个颗粒之间的空间)为喉道。将孔腔面积、喉道面积、喉道直径分别进行矢量化保存为 pore、throat、throatdiameter 3 个图层，分别给每一图层的图形对象赋予互不重复的 ID 编号。孔腔和喉道面积为多边形要素，喉道直径为线状要素。喉道直径取喉道最窄处的距离。图 2 为中砂图像矢量化后的结果，图 2 中孔腔和喉道的叠加结果正好是图 1(b)中孔隙部分(空白部分)。



(a)孔腔　(b)喉道

图 2　中砂孔腔和喉道分布矢量图

2.4 参数的提取

从图像中提取的参数包括孔腔和喉道的面积、周长、中心点坐标及喉道直径、孔隙配位数、孔隙连通情况等信息。孔隙配位数及孔隙连通情况手工统计，多边形的面积、周长、中心点坐标采用 MapBasic 命令批量获取，结果存储在 MapInfo 的表中。以从 pore 表中查询每一个孔腔的面积为例，查询多边形面积的 Mapbasic 语句为：

Select ID, Area(obj, " sq mm ") from pore into porearea

porearea 为存储查询结果的表名称。查询周长的函数为 perimeter(obj, " mm ")，查询中心点坐标的函数为 CentroidX(obj)、CentroidY(obj)，查询喉道直径的函数为 ObjectLen(obj, " mm ")。

需要注意的是，MapBasic 默认的坐标系统是经纬度坐标，采用 CentroidX(obj)、CentroidY(obj)对多边形中心点坐标进行查询时返回值为 0，需要在查询之前将坐标系设为和地图窗口中一样的坐标系统。MapBasic 中设置坐标系统的语句为：

Set CoordSys Table Tablename

将面积、周长、中心点坐标和喉道直径的查询结果通过 Table → Update Column 菜单更新到 pore、throat、throatdiameter 3 个表的相应列中。

2.5 导出数据文件

为了便于数据处理，将以 * .tab 文件存储的参数导出为 * .txt 文件，并在 Execl 中打开，保存为 * .xls 文件。在 Excel 中通过公式求取孔隙率、孔腔直径、形状因子等参数值。孔腔直径用等效面积圆直径表征。形状因子定义为面积和周长平方的比值。

3 孔隙结构参数分析

基于前面提取的孔隙结构参数，采用 SPSS 软件对孔隙配位数、孔腔和喉道的面积、孔径进行了统计分析。由于位于图像边界上的孔腔和喉道信息不完整，在统计分析中需要将这些数据剔除。

3.1 孔腔和喉道面积

各种粒径标准砂图像孔腔和喉道面积统计结果见表 1，将孔腔和喉道多边形的面积求和并除以样本

图像的面积可得样本的孔隙率数值。由表 1 可见，随着粒径的增大，单个孔腔或喉道的面积逐渐增大，而由于孔隙数量的减小，使得介质的孔隙率逐渐减小。

表 1　孔隙面积统计分析结果

砂样	最大值/mm²		最小值/mm²		平均值/mm²		标准差/mm²		孔隙率/%
	孔腔	喉道	孔腔	喉道	孔腔	喉道	孔腔	喉道	
细砂	0.1313	0.0209	0.0006	0.0004	0.0077	0.0043	0.0179	0.0033	58.81
中砂	0.1694	0.0548	0.0017	0.0009	0.0323	0.0139	0.0331	0.0106	46.24
粗砂	0.1973	0.1268	0.0084	0.0077	0.0691	0.0430	0.0548	0.0316	39.97

各样本图像中孔腔和喉道的面积分配情况见表 2。从表 2 可以看出，随着粒径的增大，喉道面积所占比例不断增加，对于细砂和中砂，尽管喉道的数量远多于孔腔的数量，但由于其孔隙空间狭小，对整个孔隙率的贡献小于孔腔，但对于粗砂来说，由于喉道较为宽大，喉道所占的面积略大于孔腔。

表 2　孔腔和喉道的数量及面积分配

砂样	孔腔			喉道		
	个数	面积/mm²	占孔隙面积的百分比/%	个数	面积/mm²	占孔隙面积的百分比/%
细砂	158	2.39143	61	318	1.5367	39
中砂	44	1.6577	54	90	1.4286	46
粗砂	14	1.2684	48	24	1.3999	52

为了得到各种粒径介质的孔腔和喉道尺寸分布规律，利用 SPSS 软件分别统计了孔腔和喉道面积频数(频率)分布，见表 3。在细砂介质中，孔腔面积小于 0.03 mm² 的占总数的 89.2%，其中 58.9%的孔腔面积小于 0.01 mm² ；喉道面积小于 0.01 mm² 的占总数的 93.4%，其中 69.2% 的喉道面积小于 0.005 mm²。在中砂介质中，孔腔面积小于 0.09 mm² 的占总数的 90.9%，其中 65.9%的孔腔面积小于 0.03 mm² ；喉道面积小于 0.04 mm² 的占总数的 97.8%，其中 48.9%的喉道面积小于 0.01 mm²。在粗砂介质中，小于 0.05 mm² 的孔腔最多，占总数的 42.9% ；喉道面积小于 0.06 mm² 的占总数的 79.2%。

表 3　孔腔和喉道面积频数(频率)分布

砂样	孔腔			喉道		
	面积/mm²	频数	频率/%	面积/mm²	频数	频率/%
细砂	0.00～0.009999	93	58.9	0.000～0.004999	220	69.2
	0.01～0.029999	48	30.4	0.005～0.009999	77	24.2
	0.03～0.049999	12	7.6	0.010～0.014999	16	5.0
	0.05～0.069999	3	1.9	0.015～0.019999	4	1.3
	0.07～0.089999	1	0.6	≥0.020000	1	0.3
	≥0.090000	1	0.6			
中砂	0.00～0.009999	9	20.5	0.00～0.009999	44	48.9
	0.01～0.029999	20	45.5	0.01～0.019999	21	23.3
	0.03～0.049999	8	18.2	0.02～0.029999	19	21.1
	0.05～0.069999	0	0			
	0.07～0.089999	3	6.8	0.03～0.039999	4	4.4
	0.09～0.109999	2	4.5	0.04～0.049999	1	1.1
	0.11～0.129999	1	2.3	≥0.050000	1	1.1
	≥0.130000	1	2.3			
粗砂	0.00～0.049999	6	42.9	0.00～0.029999	10	41.7
	0.05～0.099999	4	28.6	0.03～0.059999	9	37.5
	0.10～0.149999	3	21.4	0.06～0.089999	3	12.5
	0.15～0.199999	1	7.1	0.09～0.119999	1	4.2
				0.12～0.149999	1	4.2

概率分布图可用于检验某一变量是否遵循某一特定的分布，若满足所检验的分布，则所绘制的概率分布图将呈现一条从纵轴零点指向右上角的直线。利用 SPSS 软件对孔腔和喉道的面积分别作概率分布图进行概率分布检验，结果发现孔腔和喉道的面积统计值紧贴对数正态概率线分布，由此可知其服从对数正态分布规律，见图 3～5。由于粗砂样本包含孔腔太少，该分布规律不是很明显。

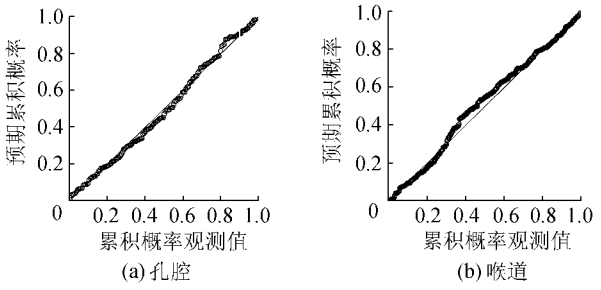


图 3　细砂孔隙面积对数正态概率分布

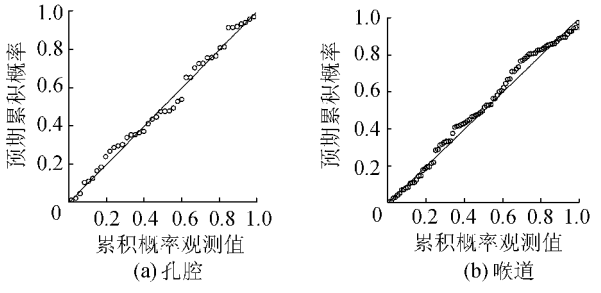


图 4　中砂孔隙面积对数正态概率分布

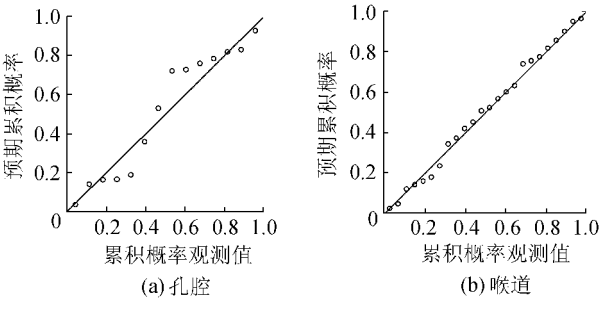


图 5　粗砂孔隙面积对数正态概率分布

3.2　孔隙配位数

粗砂样本的孔隙配位数在 2～5 之间，平均为 3.3，其中配位数为 3 的孔隙占到了总孔隙的 64.3% 中砂样本的孔隙配位数在 2～6 之间，平均值为 3.3，其中配位数为 3 的孔隙占到了总孔隙的 61.4%，配位数较小的孔隙多数是因为与孔腔相连

的部分喉道太细小,对水流和污染物迁移的作用可以忽略不计,在统计过程中未予考虑。细砂样本的孔隙配位数在 3 ~ 7 之间,平均值为 3.74,其中孔隙配位数为 3 的孔隙占到了总孔隙的 50%。无论是细砂、中砂还是粗砂,配位数为 3 和 4 的孔隙都占到了总孔隙的 80%以上。表 4 为细砂、中砂和粗砂的孔隙配位数频数分布表。总体看来,随着介质粒径的减小,孔隙的平均配位数增大,孔隙的连通性增强。图 6 为细砂、中砂和粗砂的孔隙配位数对数正态概率分布图,由图 6 可以看出,孔隙配位数较好地遵循对数正态分布规律。

表 4　孔隙配位数频数(频率)分布

孔隙配位数	细砂		中砂		粗砂	
	频数	频率/%	频数	频率/%	频数	频率/%
2	0	0	4	9.1	1	7.1
3	79	50.0	27	61.4	9	64.3
4	51	32.3	10	22.7	3	21.4
5	19	12.0	2	4.5	1	7.1
6	8	5.1	1	2.3	0	0
7	1	0.6	0	0	0	0
总计	158	100.0	44	100.0	14	100.0

3.3　喉道直径

各粒径介质的喉道直径统计值见表 5。从表 5 可以看出,随着粒径的增大,喉道直径也逐渐增大。表 6 为细砂、中砂和粗砂的喉道直径频数分布。从表 6 可以看出,细砂中 85%的喉道直径都在 0.08 mm 以下;中砂中 88.5%的喉道直径都在 0.12 mm 以下;粗砂中 89.8%的喉道直径都在 0.3 mm 以下。图 7 为细砂、中砂和粗砂的喉道直径对数正态分布概率分布图,从图 7 可以看出,细砂、中砂和粗砂的喉道直径均较好地符合对数正态分布规律。

表 5　喉道直径统计值　　mm

砂样	最小值	最大值	平均值	标准差
细砂	0.0016	0.3547	0.0471	0.0378
中砂	0.0024	0.2758	0.0785	0.0572
粗砂	0.0026	0.5457	0.1246	0.1237

表 6　喉道直径频数(频率)分布

砂样	喉道直径/mm	频数	频率/%
细砂	0.00 ~ 0.019 999	70	19.1
	0.02 ~ 0.039 999	138	37.6
	0.04 ~ 0.059 999	64	17.4
	0.06 ~ 0.079 999	40	10.9
	0.08 ~ 0.099 999	23	6.3
	0.10 ~ 0.119 999	10	2.7
	≥0.120 000	22	6.0
中砂	0.00 ~ 0.029 999	14	13.5
	0.03 ~ 0.059 999	40	38.5
	0.06 ~ 0.089 999	22	21.2
	0.09 ~ 0.119 999	8	7.7
	0.12 ~ 0.149 999	8	7.7
	0.15 ~ 0.179 999	2	1.9
	0.18 ~ 0.209 999	5	4.8
	≥0.210 000	5	4.8
粗砂	0.00 ~ 0.099 999	23	59.0
	0.10 ~ 0.199 999	8	20.5
	0.20 ~ 0.299 999	4	10.3
	0.30 ~ 0.399 999	2	5.1
	0.40 ~ 0.499 999	1	2.6
	≥0.500 000	1	2.6

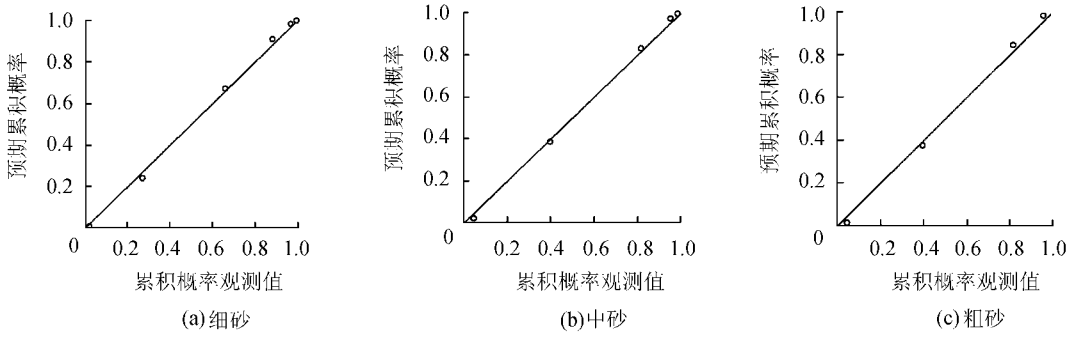


图 6　孔隙配位数对数正态概率分布

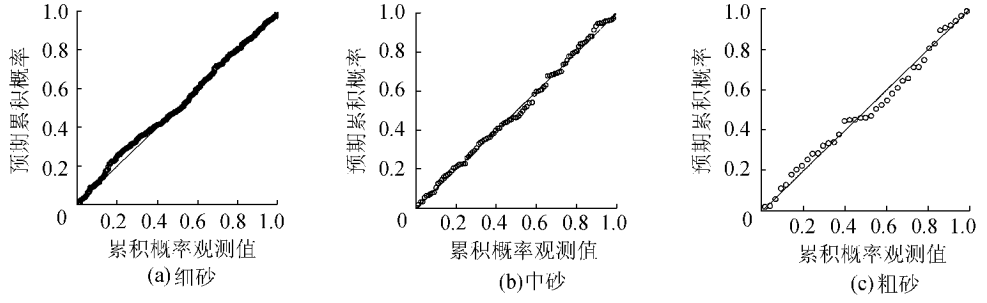


图 7　喉道直径对数正态概率分布

(下转第 18 页)

富营养化等级间的关系，将湖泊富营养化评价的多指标问题转变为以投影值为单指标的评价模式，从而解决了单指标评价结果的不相容问题。本文所建模型简单直观，实例应用结果表明，基于混沌映射的投影寻踪评价模型对湖泊富营养化等级的分辨率较高，为湖泊的富营养化评价提供了一种新方法。

参考文献：

[1] 舒金华.湖泊的富营养化及其防治[J].水资源保护，1985(1)：34-45.

[2] 舒金华.我国主要湖泊富营养化程度的初步评价与防治对策[J].环境科学丛刊，1986，7(2)：1-9.

[3] 舒金华.我国湖泊富营养化程度评价方法的探讨[J].环境污染与防治，1990，12(5)：2-7.

[4] 舒金华.我国主要湖泊富营养化程度的评价[J].海洋与湖沼，1993，24(6)：616-620.

[5] 李祚泳，邓新民，洪继华.主分量分析法用于湖泊富营养化评价的相互比较[J].环境科学学报，1990，10(3)：311-317.

[6] 李祚泳，邓新民，张辉军，等.模糊度概念用于湖泊富营养化评价[J].环境科学研究，1991，4(2)：32-36.

[7] 李祚泳，邓新民，张辉军.湖泊富营养化程度的多目标Fuzzy-Grey决策评价[J].系统工程，1990，8(3)：60-65.

[8] 李祚泳，李继陶，陈祯培.灰色局势决策法用于水质富营养化评价[J].重庆环境科学，1990，12(1)：22-26.

[9] 李祚泳，邓新民，李红卫.湖泊富营养化灰色聚类评价及几种评价方法比较[J].成都气象学院学报，1990(1)：41-48.

[10] 李祚泳，邓新民，张辉军.模糊数运算法用于湖泊营养类别评判[J].重庆环境科学，1990，12(5)：28-32.

[11] 李祚泳，邓新民，张辉军.湖泊富营养化的灰色层次决策法综合评价[J].上海环境科学，1992，11(3)：17-21.

[12] 陈守煜.湖库水体富营养化评价级别特征值与识别模型[J].黑龙江水专学报，1999，26(1)：1-8.

[13] 谢平，李德，陈广才，等.基于贝叶斯公式的湖泊富营养化随机评价方法及其验证[J].长江流域资源与环境，2005，14(2)：224-228.

[14] 赵晓莉，李祚泳，闫军.人工鱼群算法在湖泊富营养化综合评价中的应用[J].水资源保护，2008，24(1)：49-51.

[15] 李祚泳，汪嘉杨，金相灿，等.基于进化算法的湖泊富营养化投影寻踪回归预测模型[J].环境科学学报，2008，28(2)：392-400.

[16] 李祚泳，汪嘉杨，赵晓莉，等.富营养化评价的幂函数加和型普适指数公式[J].四川大学学报：工程科学版，2007，39(2)：1-8.

[17] 金菊良.遗传算法在水资源工程中的应用研究[R].成都：四川大学，2000.

[18] 金菊良，魏一鸣，丁晶.水质综合评价的投影寻踪模型[J].环境科学学报，2001，21(4)：431-434.

[19] 杨晓华，杨志峰，夏星辉，等.基于投影寻踪和阶梯型曲线的水质恢复能力评价模型[J].安全与环境学报，2004，4(2)：28-30.

[20] 张国华，张展羽，邵光成，等.基于粒子群优化算法的灌溉渠道配水优化模型研究[J].水利学报，2006，37(8)：1004-1008.

[21] KENNDEY J，EBERHART R C. Particle swarm optimization [C]//IEEE International Conference on Neural Networks. Piscataway：IEEE Service Center，1995：1942-1948.

[22] 王红瑞，宋宇，刘昌明，等.混沌理论及在水科学中的应用与存在的问题[J].水科学进展，2004，15(3)：400-407.

[23] 郝柏林.混沌与分形[M].上海：上海科学技术出版社，2004.

(收稿日期：2008-07-01　编辑：熊水斌)

(上接第13页)

4 结　论

a. 随着介质粒径的增大，喉道面积对孔隙面积的贡献不断增大，根据样本中喉道所占的比例情况可知，在建立网络模型时，不可忽略喉道对孔隙面积或体积的贡献。

b. 从二维图像来看，80%以上孔隙的配位数为3或4，随着介质粒径的减小，孔隙的平均配位数增大，孔隙的连通性增强。

c. 尽管粒径不同，但各介质的孔腔和喉道面积、喉道直径及孔隙配位数均较好地遵循对数正态分布统计规律。

参考文献：

[1] 李德成，VELDE B，DELERUE J F，等. 用于研究土壤孔隙三维结构的连续数字图像的制备[J].土壤与环境，2001，10(2)：108-110.

[2] 王宝军，施斌，刘志彬，等.基于GIS的黏性土微观结构的分形研究[J].岩土工程学报，2004，26(2)：244-247.

[3] 熊承仁，唐辉明，刘宝琛，等.利用SEM照片获取土的孔隙结构参数[J].地球科学：中国地质大学学报，2007，32(3)：415-419.

[4] 易珍莲，梁杏，李富民，等.ERDAS软件在土体微观结构研究中的应用[J].水文地质工程地质，2007，34(1)：113-115.

[5] 袁琴.基于ERDAS的淤泥质土微观孔隙的分形特征研究[J].资源环境与工程，2005，19(4)：323-327.

[6] VOGLE H J. Morphological determination of pore connectivity as a function of pore size using serial sections[J]. European Journal of Soil Science，1997，48(3)：365-377.

[7] SY/T 6103—2004，岩石孔隙结构特征的测定：图像分析法[S].

(收稿日期：2008-07-08　编辑：熊水斌)