

基于投影寻踪的湖泊富营养化程度评价模型

王贵作^{1,2},任立良¹,王 斌³,余钟波¹

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室 ,江苏 南京 210098 ; 2. 水利部发展研究中心 ,北京 100038 ; 3. 东北农业大学水利与建筑学院 ,黑龙江 哈尔滨 150030)

摘要 :针对湖泊富营养化评价指标的不相容性以及现有方法对等级的分辨率较粗略等问题 ,基于我国湖泊富营养化评价标准构建了投影指标函数 ,引入粒子群算法优化投影指标函数寻求最佳投影方向 ,应用最佳投影方向计算投影值 ,从而建立了评价湖泊富营养化等级的投影寻踪模型。同时引入混沌变量解决了采用随机生成样本系列的方法确定分段函数端点值存在的困难。实例应用结果表明 ,基于混沌映射的投影寻踪评价模型以投影值为单指标 ,采用分段函数的模型形式解决了湖泊富营养化的多指标综合评价问题 ,且该模型对湖泊富营养化等级的分辨率较高。

关键词 :湖泊 ;富营养化 ;投影寻踪 ;粒子群算法 ;混沌变量 ;分段函数

中图分类号 :X524 文献标识码 :A 文章编号 :1004-693X(2009)05-0014-05

Lake eutrophication evaluation model based on projection pursuit method

WANG Gui-zuo^{1,2} , REN Li-liang¹ , WANG Bin³ , YU Zhong-bo¹

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China ; 2. Development and Research Center , Ministry of Water Resources , Beijing 100038 , China ; 3. College of Water Conservancy and Building Engineering , Northeast Agricultural University , Harbin 150030 , China)

Abstract :In connection with the problems of incompatibility of evaluation indexes and low resolution of the evaluation grade , and based on the assessment criteria for lake eutrophication in China , a projection index function was constructed. Particle Swarm Optimization(PSO) was introduced to search for the optimal projection direction , which was then used to calculate the projected value. The Projection Pursuit Model , which describes the relationship between the projected value and the grades of lake eutrophication , was developed based on these approaches. The difficulty in determining the end point values of the piecewise function was solved by introducing a chaotic variable when using a randomly generated sample series. The results from the practice application showed that based on the chaotic mapping the Projection Pursuit Model used projected value as a single index and adopted a piecewise function solved the problem in using a multi-index comprehensive assessment method. The model has a high resolution in grading lake eutrophication.

Key words :lake ; eutrophication ; projection pursuit ; Particle Swarm Optimization ; chaotic variable ; piecewise function

湖泊富营养化是湖泊水体在自然因素和人类活动的影响下 ,逐渐由生产力较低的贫营养状态向生产力较高的富营养状态变化的一种现象^[1-3]。湖泊水域富营养化现象的发生 ,会给人民的生活生产带来许多不利因素 ,造成的危害也很大 ,因此 ,科学、客观地评价湖泊的富营养化状态具有重要意义。舒金

华^[1-4]在湖泊富营养化的含义、发生原因、防治对策等方面 ,曾开展了大量的研究工作 ,探求了适合评价我国湖泊富营养化程度的评价指标、评价标准以及评价方法 ,这为其后的湖泊富营养化评价工作的开展打下了坚实的基础。针对文献 [2] 的评价实例 ,李祚泳等^[5-11]先后将主分量分析、模糊度、多目标模糊

灰色决策、灰色局势决策、灰色聚类、模糊数运算、灰色层次决策等方法和概念引入到湖泊富营养化评价中[陈守煜^[12]基于模糊集合论的相对隶属度概念与定义,提出湖库水体富营养化评价的模糊识别与级别特征联合模型;谢平等^[13]提出了基于贝叶斯公式的湖泊富营养化随机评价方法;赵晓莉等^[14]将人工鱼群算法引入到湖泊富营养化综合评价中;李祚泳等^[15-16]还建立了基于进化算法的湖泊富营养化投影寻踪回归预测模型,并详细评价了常见的诸多方法的利弊,提出了湖泊富营养化评价的幂函数加和型普适指数公式。

上述各种评价方法的计算结果大多是一些离散的等级,对湖泊富营养化程度的分辨率较粗略,而实际的湖泊富营养化等级值一般是连续的实数值;另外,同一级水体对应的各评价指标值往往差异显著,直接应用单项评价指标对实际水体的评价结果常常是不相容的。因此,科学、客观地将湖泊富营养化评价的多指标问题综合成单一指标问题具有重要现实意义,投影寻踪方法恰好可以解决这个问题。

1 基于粒子群算法的投影寻踪等级评价模型

1.1 投影寻踪方法

投影寻踪(projection pursuit,PP)方法的基本思路是:将高维数据投影到低维子空间上,采用投影目标函数来衡量投影暴露某种结构的可能性大小,寻找出使投影目标函数达到最优的投影值,再根据投影值分析高维数据的结构特征^[17]。投影目标函数的构造及其优化问题是应用投影寻踪方法的关键,该问题一般很复杂,在一定的程度上限制了投影寻踪方法的深入研究和广泛应用。在优化投影目标函数时,遗传算法(genetic algorithm,GA)是经常采用的算法^[17-19],但遗传算法在应用时常常受到较大限制,往往不可避免地出现“早熟”,不一定总能获得全局最优解^[20],需要针对具体问题进行相应改进,且改进操作一般较复杂。粒子群算法(particle swarm optimization,PSO)^[21]有深刻的智能背景,也是一种基于群体的优化方法,其优势在于算法的简便有效和容易实现。本文采用粒子群算法优化投影目标函数,提出基于粒子群算法的投影寻踪等级评价模型,使得在一维空间中综合评价湖泊富营养化问题成为可能。

1.2 粒子群算法

粒子群算法首先生成初始种群,即在可行解空间初始化一群随机粒子,每个粒子都为优化问题的一个潜在解,并可由目标函数为之确定一个适应值,通过个体间的协作与竞争实现复杂空间中的最优解搜索。在每次迭代中,粒子通过跟踪2个“极值”来

更新自己,一个为粒子本身迄今找到的最优极值;另一个为整个种群迄今找到的全局极值。

设在一个 n 维搜索空间中,由 m 个粒子组成一个种群,其中第 i 个粒子在 n 维搜索空间中的位置为 $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})$,则每个粒子的位置就是目标函数的一个潜在解。将 x_i 代入目标函数可以计算出每个粒子的适应值,根据适应值的大小衡量 x_i 的优劣。第 i 个粒子“飞翔”的速度也是一个 n 维向量,记为 $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{in})$ 。记第 i 个粒子迄今为止搜索到的最优位置为 $p_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{in})$,整个粒子群迄今为止搜索到的最优位置为 $p_g = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gn})$ 。第 i 个粒子 x_i 将按下面两式改变速度和位置:

$$v_{ij}^{(k+1)} = wv_{ij}^{(k)} + c_1r_1(p_{ij}^{(k)} - x_{ij}^{(k)}) + c_2r_2(p_{gi}^{(k)} - x_{ij}^{(k)}) \quad (1)$$

$$x_{ij}^{(k+1)} = x_{ij}^{(k)} + v_{ij}^{(k+1)} \quad (2)$$

式中: $i = 1, 2, \dots, m$, m 为种群规模; $j = 1, 2, \dots, n$, n 为搜索空间的维数; k 为当前进化代数; w 为惯性权重; c_1 和 c_2 为加速常数; r_1 和 r_2 为 $[0, 1]$ 区间均匀分布的随机数。此外,为使粒子的速度不至于过大,可设定速度上限为常数 $v_{\max}$,使 $v_{ij} \in [-v_{\max}, v_{\max}]$ 。

1.3 基于粒子群算法的投影寻踪等级评价模型建模步骤

基于粒子群算法的投影寻踪等级评价(projection pursuit grade evaluation model based on PSO, PSOPPE)模型的建模过程包括以下几个步骤:

a. 步骤1 指标值的归一化处理。基于湖泊富营养化评价标准,设湖泊富营养化经验等级及各评价指标值的样本集分别为 y 和 x_{ij}^* ($t = 1, 2, \dots, s$; $j = 1, 2, \dots, n$),其中 s 为样本个数, n 为与粒子群算法搜索空间相对应的评价指标数,也即本文粒子群算法的每维搜索空间对应湖泊富营养化评价的一个指标。为消除各指标值的量纲和统一各指标值的变化范围,可选用下面两式进行极值归一化处理:

对于越小越优的指标:

$$x_{ij} = \frac{x_{j\max} - x_{ij}^*}{x_{j\max} - x_{j\min}} \quad (3)$$

对于越大越优的指标:

$$x_{ij} = \frac{x_{ij}^* - x_{j\min}}{x_{j\max} - x_{j\min}} \quad (4)$$

式中: x_{ij} 为第 j 个指标值的归一化序列; $x_{j\max}$ 、 $x_{j\min}$ 分别为原第 j 个指标值的最大和最小值。

b. 步骤2 构造投影目标函数。建立投影寻踪等级评价模型就是把 n 维数据 x_{ij}^* ($t = 1, 2, \dots, s$; $j = 1, 2, \dots, n$) 综合成以 $a = (a_1, a_2, \dots, a_n)$ 为投影方向的一维投影值 z ,再根据 z 与 y 的散点图建立数学模型。

z = \sum_{j=1}^n (a_j x_{ij}) \tag{5}

式中： a_j 为投影方向 a 的分量。在综合投影值时，要求投影值 z 应尽可能大地提取 x_{ij} 中的变异信息，即 z 的标准差 S_z 应尽可能大，同时要求 z 和 y 的相关系数的绝对值 $|R_{zy}|$ 尽可能大。这样得到的投影值就可望尽可能多地携带原评价指标系统 x_{ij} 的变异信息，并且能够保证投影值对因变量具有很好的解释性。基于此，投影目标函数可构造为 $Q(a) = S_z |R_{zy}|$ 。

c. 步骤 3：优化投影目标函数。投影目标函数 $Q(a)$ 只随投影方向 a 的变化而变化，不同的投影方向反映不同的数据结构特征，最佳投影方向就是最大可能暴露高维数据某类特征结构的投影方向，可通过求解投影目标函数的最大化问题来估计最佳投影方向，即 $\max Q(a) = S_z |R_{zy}|$ s.t. $\sum_{j=1}^n a_j^2 = 1$ 。这是一个以 a 为优化变量的复杂非线性优化问题，用常规的优化方法处理比较困难，粒子群算法可方便有效地求解上述优化问题。

d. 步骤 4：建立投影寻踪等级评价模型。将步骤 3 求得的最佳投影方向估计值 a^* 代入式 (5) 后即得第 i 个样本的投影值的计算值 z^* ，根据 z^* 与 y 的散点图特征建立相应的数学模型。

2 湖泊富营养化评级模型的建立

2.1 评价指标和评价标准

应用叶绿素 a (Chl a)、总磷 (TP)、总氮 (TN)、高锰酸盐指数 (COD $_{Mn}$) 和透明度 (SD) 作为评价指标，选取我国主要湖泊的调查资料进行实例分析，其中各指标的评价标准见表 [4]，这里将湖泊的营养程度按由轻到重分别记为 1、2、3、4、5、6 级。对于贫营养的左端点值分别取其右端点值的 0.5 倍 (SD 取 2 倍)，重富营养的右端点值分别取其左端点值的 2 倍 (SD 取 0.5 倍)，这样处理后，所有的营养程度等级都对应了一个实数区间范围。如果实际湖泊的某种指标超出了贫营养的左端点值或重富营养的右端点值，则取其为该端点值，这并不影响评价结果。

表 1 中国湖泊富营养化评价标准[4]

富营养化程度	富营养化等级	评价指标				
		$\rho(\text{Chl}a)(\text{mg}\cdot\text{m}^{-3})$	$\rho(\text{TP})(\text{mg}\cdot\text{m}^{-3})$	$\rho(\text{TN})(\text{mg}\cdot\text{m}^{-3})$	$\rho(\text{COD}_{Mn})(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	SD/m
贫营养	1	≤ 1.0	≤ 2.5	≤ 30.0	≤ 0.3	≥ 10.0
贫中营养	2	(1.0, 2.0]	(2.5, 5.0]	(30.0, 50.0]	(0.3, 0.4]	[5.0, 10.0)
中营养	3	(2.0, 4.0]	(5.0, 25.0]	(50.0, 300.0]	(0.4, 2.0]	[1.5, 5.0)
中富营养	4	(4.0, 10.0]	(25.0, 50.0]	(300.0, 500.0]	(2.0, 4.0]	[1.0, 1.5)
富营养	5	(10.0, 64.0]	(50, 200.0]	(500.0, 2000.0]	(4.0, 10.0]	[0.4, 1.0)
重富营养	6	> 64.0	> 200.0	> 2000.0	> 10.0	< 0.4

2.2 PSOPPE 模型的初步建立

在各指标的等级取值范围内均匀随机产生 50 个、100 个、500 个、1 000 个、2 000 个样本，与对应的营养程度等级一起组成样本系列。根据前述 PSOPPE 建模步骤，求得的最大投影目标函数值和最佳投影方向分别为：0.529 6 (0.436 2, 0.446 1, 0.439 4, 0.455 6, 0.458 4)、0.526 8 (0.447 2, 0.446 5, 0.444 2, 0.450 5, 0.447 7)、0.518 2 (0.432 6, 0.441 1, 0.438 4, 0.468 5, 0.454 7)、0.516 3 (0.435 6, 0.448 9, 0.439 2, 0.456 4, 0.455 6)、0.515 6 (0.442 3, 0.441 4, 0.427 5, 0.462 6, 0.461 2)。可见随着样本数的增大，目标函数值有减小趋势，但对于投影方向的影响相对较小。随着样本数的增大，计算量和计算耗时也相应增大，为了使算法具有说服力，并综合考虑目标函数值的优劣和建模的简便性，本文选取在各个等级区间随机生成 1 000 个样本的方法进行寻优，将得到的最佳投影方向代入式 (5)，得到投影值与对应的营养程度经验等级散点图，见图 1。

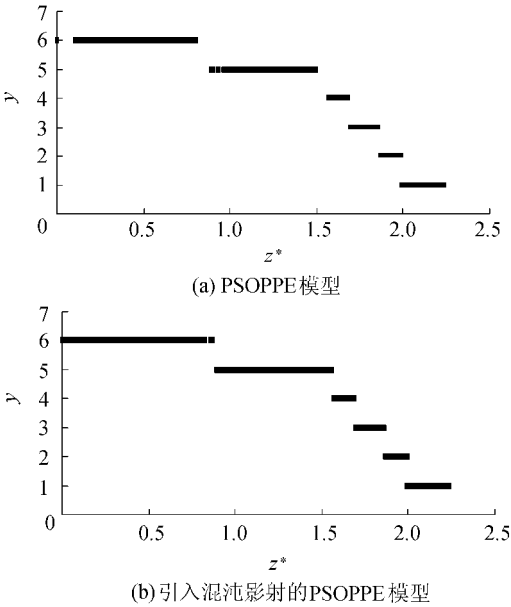


图 1 投影值 z^* 与经验等级 y 的散点图

由图 1(a) 可见，投影值在每个等级值处没有凝聚成点或团，而呈跳跃的阶梯形，采用以往曲线拟合散点图的方法 [17-18] 效果不是很好。由于本文所取的样本点较多，因此可以采用阶梯形曲线 [19] 对应的

函数建立湖泊富营养化等级评价数学模型。笔者通过多次计算发现 采用区间随机生成大样本的方法 ,再由 PSOPPE 模型计算的投影值确定阶梯曲线各区间端点时 ,在不同区间的端点处投影值有时相差较大 采取加大随机生成样本数的方法不但耗时 效果也不显著。以图 1 中第 5 和第 6 营养等级为例 ,若某湖泊富营养化程度的投影值恰位于这 2 个等级的空白处 则不能准确判断其营养程度。

2.3 引入混沌映射的 PSOPPE 模型

混沌是确定性系统由于非线性变量间相互作用而产生的貌似随机性的现象 ,它最主要的特征是对初始条件的极端敏感性、内随机性、遍历性、周期点的稠密性等^[22]。由于在各指标评价区间随机生成样本系列的方法对于确定分段函数的端点值存在一定的困难 本文利用经过适当改变参数和变量定义的虫口模型^[23]生成具有遍历性的混沌样本系列解决这一问题。

C_{d+1} = 4λC_d(1 - C_d) (6)

式中 λ 为 0 和 1 之间的数 本文取 λ = 1 ;C_d 为迭代值 ,也为 0 和 1 之间的数。

利用式(6)的迭代值 ,仍采取在各等级之间生成 1000 个样本的方法 根据前述 PSOPPE 建模步骤 ,求得最大投影目标函数值为 0.5165 ,最佳投影方向为 (0.4314 0.4445 0.4437 0.4612 0.4547) ,得到的投

影值与对应的营养程度等级散点图见图 1(b)。根据模型计算的投影值定出各区间的端点 ,最后得到湖泊富营养化评价的 PSOPPE 模型为

y = \begin{cases} 1 & z^* \geq 1.9963 \\ 2 & 1.8643 \leq z^* < 1.9963 \\ 3 & 1.6890 \leq z^* < 1.8643 \\ 4 & 1.5493 \leq z^* < 1.6890 \\ 5 & 0.8688 \leq z^* < 1.5493 \\ 6 & z^* < 0.8688 \end{cases} (7)

3 PSOPPE 模型应用实例

由 PSOPPE 模型的建模过程可见 ,该模型避免了各种人为和主观因素的干扰 ,能够较客观地评价湖泊的富营养化程度。应用 PSOPPE 模型对我国主要湖泊^[4]的富营养化程度进行了评价 结果详见表 2。由表 2 可见 ,PSOPPE 模型的综合评价结果与文献[4] 的评分指数模式结果并不完全一致 ,在 24 个湖泊中 ,有 6 个湖泊(博斯腾湖、于桥水库、固城湖、南四湖、蘑菇湖、邛海)的评价结果比文献[4] 偏大些。

4 结 语

将投影寻踪模型应用到湖泊富营养化评价中 ,应用混沌变量并采用阶梯型曲线描述投影值和湖泊

表 2 我国主要湖泊调查资料及富营养化程度评价结果

湖 泊	χ(Chla)/ (mg · m ⁻³)	χ(TP)/ (mg · m ⁻³)	χ(TN)/ (mg · m ⁻³)	χ(COD _{Mn})/ (mg · L ⁻¹)	SD/ m	投影值 z [*]	评价结果等级	
							本文	文献[4]
洱海(云南)	1.86	22	246	3.09	2.77	1.7181	3	3
高州水库(广东)	1.49	46	358	1.47	1.72	1.6936	3	3
博斯腾湖(新疆)	3.52	23	932	5.96	1.46	1.5382	5	3
淀山湖(上海)	3.00	29	1086	2.87	0.67	1.5698	4	4
于桥水库(天津)	10.79	25	1220	4.11	1.42	1.5214	5	4
固城湖(江苏)	4.99	52	2374	2.75	0.28	1.3878	5	4
南四湖(山东)	3.77	194	3201	6.96	0.44	1.0474	5	4
磁湖(湖北)	14.47	77	1000	3.74	0.36	1.4597	5	5
达理湖(内蒙古)	7.24	153	1671	16.25	0.48	1.0368	5	5
巢湖(安徽)	11.80	115	1786	4.01	0.28	1.3307	5	5
滇池(外海)(云南)	44.43	108	1309	7.11	0.49	1.2140	5	5
滇池(草海)(云南)	298.86	931	15273	16.58	0.23	0.0802	6	6
西湖(浙江)	58.95	161	2478	6.94	0.43	0.9782	5	5
甘棠湖(江西)	75.69	141	1417	7.23	0.38	1.0541	5	5
蘑菇湖(新疆)	54.77	287	2206	10.38	0.53	0.8046	6	5
麓湖(广东)	119.51	372	3038	9.92	0.34	0.4045	6	6
东山湖(广东)	149.45	428	5350	13.40	0.22	0.1538	6	6
墨水湖(湖北)	153.59	232	15692	13.51	0.22	0.3385	6	6
荔湾湖(广东)	162.92	743	7337	14.46	0.31	0.1312	6	6
流花湖(广东)	323.51	643	6777	25.26	0.15	0.0000	6	6
玄武湖(江苏)	168.14	663	4073	10.08	0.22	0.2309	6	6
镜泊湖(吉林)	4.96	316	1270	5.96	0.73	1.1523	5	5
南湖(吉林)	120.60	228	2630	8.22	0.22	0.6435	6	6
邛海(四川)	0.88	130	410	1.43	2.98	1.6261	4	3

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] KENNEDY 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)