

# 基于地下水多变量空间聚类分析的变异性评价

赵玉婷<sup>1</sup>, 张 征<sup>1</sup>, 吕连宏<sup>1,2</sup>, 牟向玉<sup>1</sup>, 李道峰<sup>1</sup>

(1 北京林业大学 环境科学与工程学院, 北京 100083; 2 中国环境科学研究院, 北京 100012)

**摘要:** 在现存地下水监测网站中, 观测站点分布的任意性、随意性和层次不清以及观测数据的冗余性等问题普遍存在, 应用空间聚类原理, 对所选研究区域廊坊地下水的监测点位及监测指标分别进行了空间聚类分析, 对原始数据和经聚类处理后的数据分别进行了空间变异性评价, 结果显示空间聚类分析是有效合理的。试图将空间变异性与空间聚类方法结合起来, 为环境监测点的重新布置提供了理论依据, 使提高监测效率与监测点的代表性、优化监测网格成为了可能; 了解监测指标及监测点位在空间上的相关程度, 为环境监测指标的确定提供理论依据, 进而为环境管理、污染物控制以及环境资源的综合利用提供基础依据。

**关键词:** 空间聚类分析; 变异性评价; 地下水; 多变量; 地质统计学

中图分类号: X523; P628<sup>+</sup>.2 文献标志码: A 文章编号: 1672-6561(2009)01-0079-06

## Spatial Variability Assessment Based on Spatial Cluster Analysis of Groundwater Variables

ZHAO Yu-ting<sup>1</sup>, ZHANG Zheng<sup>1</sup>, LU Lian-hong<sup>1,2</sup>, MU Xiang-yu<sup>1</sup>, LI Dao-feng<sup>1</sup>

(1. School of Environmental Science and Engineering, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

**Abstract:** There are lots of problems in the implantation of monitoring points, such as the randomness and turbid hierarchical structure of the monitoring points, the redundancy of the monitoring data and so on. Applying the spatial cluster principles, the authors make cluster analysis on the monitoring points and the monitoring indicators of those in Langfang region. The assessment and contrast of the variability of the original data and the transacted data by cluster analysis are done, which proves that the cluster analysis is reasonable and valid. Combing spatial clustering analysis with spatial variety may provide the theoretical evidence for the re-implantation of the monitoring net, and the possibility to improve the representativeness of the monitoring net. It also provides the theoretical principles to confirm the monitoring indicators by figuring out the correlation between the monitoring points and the monitoring indicators, and then to establish the foundation for the further research of environmental management, pollution controlling and comprehensive utilization of environmental resource.

**Key words:** spatial variety; spatial cluster analysis; groundwater; variables; geostatistics

## 0 引言

地下水系统是由多种因子构成的复杂系统, 水质质量受到诸多指标的影响, 每项指标从不同角度反映水质状况, 但依据其作综合评价却有一定难度。仅仅实用单一的确定性或者纯粹的随机模型是难以描述一个完整的水环境污染迁移参数空间变异图

景的, 而地质统计学由于能够同时处理空间结构信息和随机信息, 是刻画这种不确定性的有效分析方法<sup>[1]</sup>。聚类分析是将研究对象按其共性进行分类, 以便系统地加以科学研究的一种有效方法, 目的在于辨认在某些特征上相似的事物, 并把事物就这些特征划分成若干类, 使在同一类的事物具有高度同质性, 不同类的事物具有高度相异性。它作为现代

收稿日期: 2008-04-01

基金项目: 教育部科学技术研究重点项目(03028); 北京林业大学振兴计划人才培养专项项目(200202013)

作者简介: 赵玉婷(1983-), 女, 黑龙江哈尔滨人, 工学硕士研究生, 从事污染模拟与环境评价研究。E-mail: ciro830612@163.com

© 1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

多元分析的一个重要分支,正是将多维因子纳入同一体系加以综合研究的定量化方法,随着计算机的普及和软件开发,已在地下水多变量研究领域得以越来越多的应用。本研究利用廊坊市地下水污染物的现场数据,试图将空间变异性和空间聚类方法结合起来,对环境监测中优化监测网格和选取代表性指标提供一定的理论指导,为以后的研究进行铺垫。

## 1 方法概述

### 1.1 空间聚类原理

自从 20 世纪 30 年代开始,人们一直不恰当的把传统聚类分析应用到区域化变量(主要是在地质、生态、环境、地震等方面)中来。传统的聚类分析方法只考虑数据之间的相互关系,而对样品点的空间分布及各变量的空间变异性考虑不足。尽管用稳健传统方法可部分改善数值计算,但效果并不理想,对变量之间的关系评价仍不够客观。有时各个变量之间的相互关系混乱不清或相互矛盾。传统聚类分析的致命缺陷还在于影响区域化变量的因素不只有一个时,不能分辨各因素而有区别地处理。空间聚类分析的基础就是定义了空间相关系数(Spatial Correlation Coefficient):度量两个区域化变量在一定空间区域内依据其空间变异特征计算而得到表示数据变化相关程度的参数,称作空间相关系数<sup>[2]</sup>。

### 1.2 针对点的空间聚类算法

均值聚类算法(K-Means, KM)是一种经典的空间聚类算法。首先,要给定聚类数目  $K$  创建一个初始划分,然后根据聚类准则函数将空间对象与这些聚类中心和初始类逐一作比较,判断对象的归属。 $K$  均值算法<sup>[3]</sup>是用每个聚类中所有对象的平均值作为该聚类(簇)的中心,采用误差平方和最小准则判断对象的归属。

Getis 和 Ord 根据不同统计方法对  $Y_{ij}$  的假设和观念的差异,总结了几种不同的表达方式,如:

Getis 统计法

$$Y_{ij} = X_i \quad \text{或} \quad Y_{ij} = X_i + X_j$$

Moran I 统计法

$$Y_{ij} = (X_i - \bar{X})(X_j - \bar{X})$$

Geary C 统计法

$$Y_{ij} = (X_i - X_j)^2$$

选择 Getis 统计法表达式,令  $Y_{ij} = X_j$ ,  $Y_{ij}$  为像元  $i$  与  $j$  的属性值的关联性,  $X_j$  表示像元  $j$  的属性值,  $X_i$  表示像元  $i$  的属性值。因此像元  $i$  的空间关

联指标可表示为

$$T_i = \sum_j (W_{ij} X_j) \quad i \neq j \quad (1)$$

式中:  $W_{ij}$  为行标准化权重矩阵。每个像元都有相应的  $T_i$  值来表征与相邻像元的空间关联程度,  $T_i$  的变化可以反映变量在空间上分布的差异性。因此,以  $T_i$  为权重来修正每个像元的属性值,然后再进行  $K$  均值聚类,这样分类时不仅考虑了像元属性值的相似性而且还兼顾了像元之间的空间关联性

$$X'_i = T_i X_i \quad (2)$$

基于此思想和  $K$  均值聚类算法,应用空间连续性聚类 SC-KM 算法<sup>[4]</sup>,具体步骤如下:

(1)根据反射率转换后的遥感影像提取每个像元的 NDVI 值  $X_i$ 。

(2)根据八邻域(Eight-Neighborhood)判断像元是否相邻,像元  $i$  与  $j$  相邻时,  $C_{ij}$  为 1, 否则为 0, 计算归一化权重矩阵

$$W_{ij} = C_{ij} \setminus \sum_{i=1}^N C_{ij} \quad (3)$$

式中:  $C_{ij}$  为二值空间权重矩阵,代表像元  $i$  与  $j$  的空间位置的关联性;  $N$  为像元总数。

(3)利用式(1)计算图像每个像元的局部空间关联指标。

(4)利用式(2)修正图像每个像元的属性值。

(5)用  $K$  均值聚类算法对修正后图像进行分类。

SC-KM 算法在空间聚类分析中,既考虑了空间单元空间位置的关联性又考虑其属性数据的相似性,为空间单元区域划分问题的解决提供了有效途径。

### 1.3 实验变异函数

实验变异函数就是根据观测数据构造变异函数  $\gamma(h)$  的估计值  $\gamma^*(h)$ 。

在满足二阶平稳假设或本征假设条件下,  $\gamma^*(h)$  的计算公式<sup>[5]</sup>为

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (4)$$

式中:  $h$  为样本间距;  $x$  为步长;  $N(h)$  为  $x$  轴上相隔  $h$  点的对数;  $Z(x_i)$  为点  $x_i$  的观测值;  $Z(x_i)$  和  $Z(x_i + h)$  为观测值  $Z(x)$  和  $Z(x + h)$  的  $N(h)$  对现实。  $\gamma^*(h)$  是作为  $[Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2$  项的平均值来估计。

对不同的滞后距  $h$ , 式(4)可以算出相应的  $\gamma^*(h)$  值来。对于每一个滞后距  $h_i$ , 把诸点  $[h_i, \gamma^*(h)]$  在  $h-\gamma^*(h)$  图上标出, 再将相邻的点用线段连接起来所得到的图形, 称为试验变异函数图。

在变异函数图中, 可以看到几个重要的参数。变异拟合模型第一次达到水平的这个距离叫做变程(range), 变程反映了空间自相关距离, 空间自相关距离反映了污染物的影响范围, 空间自相关距离大的具有较大的影响范围, 反之影响范围较小。空间自相关范围的大小和污染物的性质及其迁移的多孔介质的性质都有关。掌握空间自相关距离对于环境污染物的预测、模拟、管理及治理都具有重要的意义。半变异函数在自相关阈值点获得的值(y 轴上的值)就是基台值(sill)。理论上讲, 当间隔距离为 0 时, 半变异函数的值应该为 0, 实际中在一个无穷小的间隔距离上, 观测值的方差并不趋近于 0, 这就叫做块金效应(nugget)。块金值的大小可反映区域化变量随机性的大小。

不同方向上的变异函数图可反映区域化变量的各向异性。一般来讲, 东西、北东、北西和南北这 4 个特定方向是最常用的变异函数图方向。通过作出不同方向上的变异函数图, 可以确定区域化变量

的各向异性(包括有无各向异性以及各向异性的类型等), 对于掌握区域化变量的空间结构特征, 反映其各向异性是很有必要的。变异函数在原点处的性状反映了变量的空间连续性; 变异函数如果是跃迁型的, 其基台值的大小可以反映区域化变量在该方向上变化幅度的大小。

2 应用实例

2.1 数据来源

本研究所用的现场数据为廊坊市地下水常规监测数据及污染物浓度, 监测点分布在廊坊市城区及各个县区。地下水污染物包括铜、镉、铅、硝酸盐、锌和汞 6 个指标, 每个指标共 228 个具有空间坐标的浓度数据。

2.2 数据预处理

根据经典统计方法应用 SPSS 软件, 分析研究用现场和实验数据, 分别计算了现场数据各变量的最大值、最小值、全距、均值、标准差及变异系数(表 1)。

表 1 污染物浓度的统计特征值

Tab. 1 Statistical Feature Values of Concentration of Contamination						$\rho_B / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$
项目	最大值	最小值	全距	均值	标准差	变异系数
Cu	0.008 200	0.001 400	0.006 800	0.004 300	0.001 100	0.248 900
Cd	0.013 800	0.003 800	0.010 000	0.007 400	0.002 300	0.313 800
Pb	0.093 400	0.020 400	0.073 000	0.046 100	0.014 400	0.311 700
$\text{NO}_2^-$	0.583 800	0.009 800	0.574 000	0.117 400	0.119 400	1.017 000
Zn	0.061 800	0.007 800	0.054 000	0.025 700	0.008 700	0.337 100
Hg	0.000 233	0.000 040	0.000 200	0.000 110	0.000 050	0.468 600

表 1 表明在污染物监测数据中, 铜的变异系数最小, 锌、镉、汞、铅的变异系数中等, 而亚硝酸盐的变异系数最大。变异系数反映了各变量各点浓度仅从数值方面考虑的变异程度。

2.3 正态分布检验及数据标准化

为获得研究用数据的正态分布统计信息, 利用 SPSS 统计软件中的 P-P 正态概率图方法, 分别对廊坊地区地下水现场污染物浓度数据进行了正态分布检验。可知, 研究所用数据铜、镉接近正态分布, 亚硝酸盐、汞、铅、锌服从对数正态分布, 进行空间变异分析时需先将原始数据取对数后计算<sup>[6]</sup>。结果表明, 研究所用数据的正态分布性满足地质统计学的要求。

2.4 空间聚类分析

2.4.1 监测点位的空间聚类

通过 SPSS 对经预处理后的数据进行处理, 采

用系统聚类方法进行处理, 由于时间限制, 未能进行更深层次的细化研究, 决定选取最大聚类数目为 4 和 3, 得到结果分别如下图 1、2。

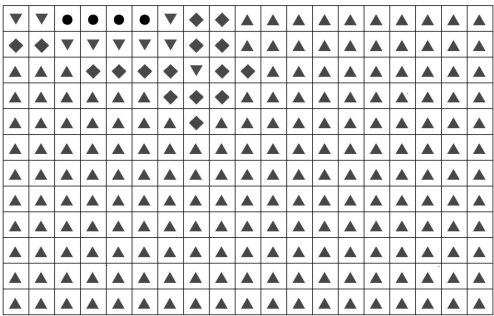


图 1 污染物指标监测点位空间聚类结果(聚类数目  $n=4$ )

Fig. 1 Result of Monitoring Points of Pollutant Concentration by Spatial Cluster Analysis( Number= 4)

对于监测点位而言, 进行空间聚类时, 聚类类别数目越高, 聚类结果的差异程度也就越明显。

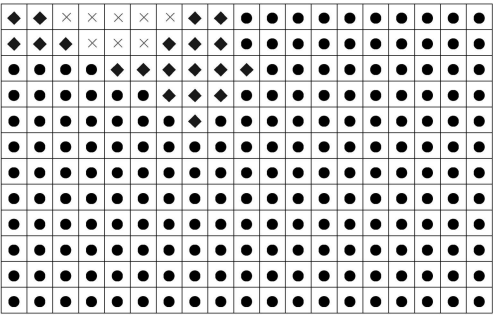


图 2 污染物浓度监测点位空间聚类结果(聚类数目  $n=3$ )

Fig. 2 Result of Monitoring Points of Pollutants Concentration by Spatial Cluster Analysis( Number=3)

2.4.2 监测点位的空间变异性评价

采用张征<sup>[7]</sup>等构造的空间结构信息方向综合变异指标  $D_v$ , 用以反映地下水环境多变量的空间变异性。为保证监测指标应能反映聚类分析后的客观结果, 尽可能兼顾监测指标空间聚类 4 个方向上的关系, 根据监测点位的空间聚类结果, 选用如图 3 的81个监测点位, 对 镉、铜、硝酸盐和汞 进行空间

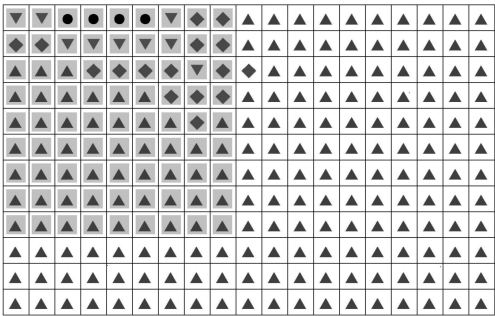


图 3 污染物监测点位选取结果

Fig. 3 Chosen Result of Monitoring Points of Pollutants 变异性评价<sup>[8]</sup>。

计算结果与原始数据的变异性评价结果对比如表 2~5。通过表 2~5 可以得出, 污染物中的镉为 0°和 45°方向上变异较弱, 在 90°和 135°方向变异性强; 亚硝酸盐、铜却表现出了相反的规律, 即在 0°和 45°方向上变异较强, 另外两方向较弱; 汞在 0°和 135°方向上表现出较强的变异性, 在 45°和 90°方向上变异性较弱。

表 2 空间聚类前后镉的空间变异性评价指标

Tab. 2 Spatial Variety Evaluation Indicator Before and After Spatial Cluster Analysis of Cd							
评价参数	方向/(°)	变程/m	基台	块金	最大变程/m	最大基台	$D_v$
空间聚类前	0	29 774	$7.778\ 0\times 10^{-6}$	$6.569\ 0\times 10^{-8}$	29 774	$7.778\times 10^{-6}$	0.500 000
	45	29 774	$6.905\ 7\times 10^{-6}$	$3.935\ 1\times 10^{-7}$			0.440 803
	90	26 857	$7.449\ 5\times 10^{-6}$	$1.371\ 8\times 10^{-7}$			0.529 942
	135	22 359	$7.007\ 6\times 10^{-6}$	$9.541\ 6\times 10^{-8}$			0.590 058
空间聚类后	0	9 924.7	0.057 153	0	9 924.7	0.057 153	0.500 000
	45	9 924.7	0.050 153	0			0.435 042
	90	8 686.4	0.057 153	0			0.566 242
	135	7 498.6	0.053 283	0			0.603 577

表 3 空间聚类前后铜的空间变异性评价指标

Tab. 3 Spatial Variety Evaluation Indicator Before and After Spatial Cluster Analysis of Cu							
评价参数	方向/(°)	变程/m	基台	块金	最大变程/m	最大基台	$D_v$
空间聚类前	0	4 886.6	$1.24\times 10^{-6}$	$2.394\ 4\times 10^{-8}$	13 888	$1.24\times 10^{-6}$	0.889 835
	45	7 032.1	$1.24\times 10^{-6}$	$2.727\ 6\times 10^{-7}$			0.795 935
	90	13 888	$1.24\times 10^{-6}$	$2.394\ 4\times 10^{-8}$			0.500 000
	135	11 189	$1.24\times 10^{-6}$	$2.727\ 5\times 10^{-7}$			0.606 396
空间聚类后	0	4 962	0.035 893 0	0	9 924.7	0.036 161 2	0.797 630
	45	5 241	0.034 744 7	0.001 425 7			0.768 010
	90	9 924.7	0.035 893 0	0			0.496 278
	135	6 511	0.036 161 2	0.002 348 2			0.699 111

2.4.3 聚类前后监测指标空间变异性对比

通过对聚类前后的监测指标分别计算其空间

结构信息方向综合变异指标  $D_v$ , 可以得出表 6~9 的结果。

表 4 空间聚类前后亚硝酸盐的空间变异性评价指标

Tab. 4 Spatial Variety Evaluation Indicator Before and After Spatial Cluster Analysis of NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>							
评价参数	方向/(°)	变程/m	基台	块金	最大变程/m	最大基台	D <sub>v</sub>
空间聚类前	0	21 075	0.020 219	0.006 308 7	29 774	0.020 219	0.666 211
	45	21 442	0.019 940	0.006 577 9			0.652 212
	90	29 774	0.020 219	0.006 308 7			0.500 000
	135	29 774	0.019 940	0.006 577 9			0.493 053
空间聚类后	0	7 606.7	0.748 990	0	9 924.7	0.817 88	0.588 075
	45	8 289.3	0.777 590	0			0.564 413
	90	9 924.7	0.748 990	0			0.500 726
	135	9 910.3	0.817 880	0			0.4561 18

表 5 空间聚类前后汞的空间变异性评价指标

Tab. 5 Spatial Variety Evaluation Indicator Before and After Spatial Cluster Analysis of Hg							
评价参数	方向/(°)	变程/m	基台	块金	最大变程/m	最大基台	D <sub>v</sub>
空间聚类前	0	17 178	0.244 950×10 <sup>-6</sup>	0	29 774	0.251 190×10 <sup>-6</sup>	0.720 266
	45	29 774	0.251 190×10 <sup>-6</sup>	0.007 500×10 <sup>-7</sup>			0.474 043
	90	19 327	0.228 770×10 <sup>-6</sup>	0.018 750×10 <sup>-7</sup>			0.639 538
	135	15 937	0.264 587×10 <sup>-6</sup>	0.000 897×10 <sup>-7</sup>			0.777 297
空间聚类后	0	5 954.8	0.110 870 0	0	9 924.7	0.133 891	0.655 730
	45	9 924.7	0.133 891 0	0.001 569 1			0.500 000
	90	6 800.0	0.114 706 4	0.004 996 4			0.609 904
	135	4 984.6	0.108 810 0	0			0.723 622

表 6 空间聚类前后镉 D<sub>v</sub> 方向排序对比

Tab. 6 D <sub>v</sub> Rank in Four Directions Before and After Spatial Cluster Analysis of Cd					
变量	方向/(°)	聚类前		聚类后	
		D <sub>v</sub>	排序	D <sub>v</sub>	排序
镉	0	0.500 000	3	0.500 000	3
	45	0.440 803	4	0.435 042	4
	90	0.529 942	2	0.566 242	2
	135	0.590 058	1	0.603 577	1

表 7 空间聚类前后铜 D<sub>v</sub> 方向排序对比

Tab. 7 D <sub>v</sub> Rank in Four Directions Before and After Spatial Cluster Analysis of Cu					
变量	方向/(°)	聚类前		聚类后	
		D <sub>v</sub>	排序	D <sub>v</sub>	排序
铜	0	0.889 835	1	0.797 630	1
	45	0.795 935	2	0.768 010	2
	90	0.500 000	4	0.496 278	4
	135	0.606 396	3	0.699 111	3

表 6~9 表明,对于空间结构信息方向综合变异指标 D<sub>v</sub>,聚类前后的大小差异只是发生了程度极小地改变,但其各个方向上的大小排序却均保持了很好的一致性,这与空间聚类分析的初衷完全吻

表 8 空间聚类前后亚硝酸盐 D<sub>v</sub> 方向排序对比

Tab. 8 D <sub>v</sub> Rank in Four Directions Before and After Spatial Cluster Analysis of NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>					
变量	方向/(°)	聚类前		聚类后	
		D <sub>v</sub>	排序	D <sub>v</sub>	排序
硝酸盐	0	0.666 211	1	0.588 075	1
	45	0.652 212	2	0.564 413	2
	90	0.500 000	3	0.500 736	3
	135	0.493 053	4	0.456 118	4

表 9 空间聚类前后汞 D<sub>v</sub> 方向排序对比

Tab. 9 D <sub>v</sub> Rank in Four Directions Before and After Spatial Cluster Analysis of Hg					
变量	方向/(°)	聚类前		聚类后	
		D <sub>v</sub>	排序	D <sub>v</sub>	排序
汞	0	0.720 266	2	0.655 730	2
	45	0.474 043	4	0.500 000	4
	90	0.639 538	3	0.607 954	3
	135	0.777 297	1	0.723 622	1

合,也在一定程度上验证了空间聚类分析的可靠性与准确性。

### 3 结语

(1)利用空间聚类方法,对所选区域内环境监测指标进行了聚类分析,空间聚类很好的弥补各向异性所造成的影响,避免了以往研究无根据地挑选因子,为数据处理和简化提供了便利。

(2)利用空间聚类后的结果,选取了具有代表性的监测网点以及监测指标  $D_v$ ,利用空间结构信息方向综合变异指标,用以反映所选取的数据中各监测指标的空间变异性,并对结果进行排序,总结出了所选变量 4 个方向上的空间变异程度,并与原始数据的评价结果进行了对比。结果显示,聚类前后的空间结构信息方向综合变异指标  $D_v$  大小差异只是发生了程度极小地改变,但其各个方向上的大小排序却均保持了很好的一致性,这与空间聚类分析的初衷是完全吻合的。

(3)在对监测点位和监测变量进行聚类时,选取的最大聚类数目时是人为规定,未能进行更深层次的细化研究,以后再做类似研究时,可以适当增加聚类数目,以期获得更加准确全面的结果。

(4)针对地下水多变量的空间聚类计算过程较为繁琐,如何利用现有的软件或程序,乃至开发新

的程序,实现算法的简化,对研究具有极其重要的影响。

(5)在本文的空间聚类的研究结果中,只得出了各监测指标在  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $135^\circ$  4 个方向上的聚类树状图,能否将之形成空间综合聚类,值得进一步研究和探讨。

#### 参考文献:

- [1] 吕连宏, 张征, 池志森, 等. 地质统计学在环境科学领域的应用进展[J]. 地球科学与环境学报, 2006, 28(1): 101-105.
- [2] 陈明. 区域化变量的空间聚类分析[J]. 长春地质学院学报, 1995, 25(2): 222-228.
- [3] 戴晓燕, 过仲阳, 李勤奋, 等. 空间聚类的研究现状及其应用[J]. 上海地质, 2003(4): 41-46.
- [4] 李翔, 潘瑜春, 赵春江, 等. 基于空间连续性聚类算法的精准农业管理分区研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(8): 78-82.
- [5] 张征, 沈珍瑶, 韩海荣, 等. 环境评价学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [6] 朱益玲, 刘洪斌, 江希流. 江津市紫色土中 N、P 养分元素区域空间变异性研究[J]. 环境科学, 2004, 25(1): 138-143.
- [7] 张征, 解明曙, 王毅力, 等. 环境模拟与评价中多变量空间结构模型及应用[J]. 北京林业大学学报, 2003, 25(5): 59-63.
- [8] 姚永慧, 潘志强, 孙英君, 等. ArcGIS 地统计分析实用指南[M]. 北京: ArcInfo 中国技术咨询与培训中心, 2002.

(上接第 78 页)

使用趋势面分析提取局部异常,突出氡活度浓度的富集部位,为确定地下热水的有利远景区提供了手段。通过以上工作,可以得到以下几点结论:

(1)无论是水中氡活度浓度还是土壤氡活度浓度原始数据都不服从正态分布,反映了某一因素引起了氡元素的富集,即构造是氡富集和迁移的主要因素。采用对数转换可将氡活度浓度分布正态化,为数据进一步统计处理打下基础。

(2)氡元素具有断裂构造的指示作用,无论是水中氡还是土壤氡对断裂构造具有不同程度的反映,水中氡活度浓度的富集范围大,受局部影响小,土壤氡活度浓度的富集以串珠状异常形式出现,信息量多,受地表干扰也较大。两者在同一地区具有较好的一致性。

(3)进行土壤氡活度浓度和水中氡活度浓度的趋势面分析,使反映深部和浅部的异常更清晰,异常的一致性反映更明确,对于局部异常的解释可进行地下热水有利远景区的划分,所划分出的有利远景区与遥感确定的线性构造的交汇位置基本吻合。

所以氡活度浓度测量对于有利远景区的区划,具有较好的效果。

#### 参考文献:

- [1] 贾文懿, 章晔, 李淑仪. 核地球物理勘查方法应用实例选编[M]. 北京: 地质出版社, 1989.
- [2] 胡耀飞, 李晓, 贾疏源. 峨眉山柿子坪热田地表氡气异常特征[J]. 矿物岩石, 1999, 19(2): 77-80.
- [3] 程业勋, 王南萍, 侯胜利. 核辐射场与放射性勘查[M]. 北京: 地质出版社, 2005.
- [4] 薛忍霞. 静电  $\alpha$  核法及其在地热勘探中的应用[J]. 勘察科学技术, 1997(5): 56-58.
- [5] 刘菁华, 王祝文, 王晓丽, 等. 放射性测量在佳木斯城区地下热水勘探中的应用[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2008, 38(5): 892-898.
- [6] 袁晓庆. 核技术找水在九龙潭地段的应用[J]. 华东地质学院学报, 1996, 19(4): 405-411.
- [7] 孙二虎, 陈爱珍, 刘鸿福, 等. 测氡法-磁法在祁县王村地热勘探中的应用[J]. 太原理工大学学报, 2004, 34(3): 307-310.
- [8] 张锦由, 黎春华. 铀矿物化探数据处理方法[M]. 修订版. 北京: 原子能出版社, 2001.