

# 地质统计学在环境科学领域的应用进展

吕连宏, 张 征, 迟志淼, 李道峰, 尚晓颖

(北京林业大学 资源与环境学院, 北京 100083)

[摘要] 介绍了地质统计学的产生与发展现状, 回顾了其在土壤环境、水环境等环境科学领域应用的一些成果。这些成果表明, 地质统计学方法是污染物空间分布状况精确估值的有效方法。在此基础上, 就地质统计学在环境科学领域的应用前景进行了展望。

[关键词] 地质统计学; 环境科学; 空间变异性; 克立格法

[中图分类号] X50; P628+.2 [文献标识码] A [文章编号] 1672-6561(2006)01-0101-05

## Application and Development of Geostatistics in Environmental Sciences

LÜ Lian-hong, ZHANG Zheng, CHI Zhi-miao, LI Dao-feng, SHANG Xiao-ying

(School of Natural Resources and Environment, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract** The formation and development of geostatistics was introduced, and the application results in environmental sciences were reviewed. These examples indicate that geostatistics is an effective method to predict the spatial distribution of contaminations in the environment. Based on the knowledge mentioned above, the perspective of the application of geostatistics in environmental sciences was discussed.

**Key words:** geostatistics; environmental sciences; spatial variation; kriging method

## 0 引言

地质统计学(Geostatistics), 近年来又被称为空间信息统计学(Spatial-information Statistics)<sup>[1-3]</sup>, 是数学地质领域中一门发展迅速且有着广泛应用前景的新兴学科。它以区域化变量为核心和理论基础, 以多孔介质空间结构的变异函数为基本工具, 研究那些分布于空间中并显示出一定结构性和随机性的自然现象的一种数学地质方法, 在优化采样方案、处理不规则采样及最优化插值计算等方面有明显的优点, 在地学、矿业、石油、农林、环境、生态及医学等方面都有成功应用的实例。

## 1 地质统计学的产生和发展现状

20世纪50年代初期, 南非矿山工程师D G Krige根据多年对南非金铀砾岩型金矿储量计算的经验和提出随样品空间位置不同, 样品间相关性不同, 应对每个样品赋予一定权值进行滑动加权平均来代替传统平均值对盘区块段金品位进行估计。60年代, 法国著名统计学家G Matheron经过大量工作将Krige的成果理论化、系统化, 提出“区域化变量”概念, 创立了这门新的统计学分支学科。

地质统计学的基本理论与研究方法于1978年由地质学家侯景儒等人系统引入中国科研工作中,

[收稿日期] 2005-03-15

[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课题(200202013); 北京林业大学研究生培养基金(04zy027)

[作者简介] 吕连宏(1981—), 男, 北京人, 硕士研究生, 从事环境模拟与环境评价研究。

经历了曲折的发展后,目前地质统计学在中国的理论方法与实际应用均达到一定的水平<sup>[2-3]</sup>,但在环境科学领域的应用时间还很短。

在不到半个世纪的时间里,地质统计学已在需要评估空间和时间变异的许多领域得到广泛应用。

(1)形成了两大理论学派<sup>[4]</sup>:即以法国统计学家 G Matheron 为代表的“枫丹白露地质统计学派”和以美国统计学家 A G Journel 为代表的“斯坦福地质统计学派”。由于实际计算和应用方法不同,又称为“参数地质统计学”和“非参数地质统计学”。

(2)发展了多种空间局部估计方法,如普通克立格法、协同克立格法、泛克立格法、析取克立格法、对数克立格法、随机克立格法、因子克立格法、指示克立格法等。

(3)多学科相互渗透,拓宽了地质统计学的理论体系,使其不断应用于新的领域,如石油和煤炭勘探与开发、水文工程地质、环境污染预测、农林科学、生物科学、医学等领域。

(4)国内外学者已经研究开发出一批基于地质统计学计算方法的软件<sup>[5]</sup>。

## 2 在环境科学领域的应用进展

20 世纪 80 年代以前,对于空间变异性的研究大多采用 R A Fisher 所倡导的经典统计学,将采集的信息作为独立观测值——纯随机事件处理。但是,随着人们认识水平和信息掌握程度的提高,这种方法逐渐显示出其不足,已经不能对污染物迁移的空间变异性做出客观的评价与分析。经过多年的努力,地质统计学首先被成功引入到土壤环境科学领域的研究中,并取得了许多成功应用的经验。

### 2.1 地质统计学在土壤环境研究中的应用

自然界土壤分布极为复杂,同一质地的土壤在同一平面或不同深度上并不完全均质,其他土壤物理特性如天然密度、粒径组成等在各点的值也并不相同,这些土壤特征在空间分布的非均一性就构成了土壤特性的空间变异性,使得土壤理化性质及污染物分布也具有复杂的空间变异性。

从 20 世纪 70 年代开始,在北美和西欧出现了一个土壤物理性质空间变异性研究的高潮。70 年代初的有关研究导致了把土壤水分参数作为随机变量的处理方法以及土壤水分运动随机模型的发展<sup>[6]</sup>。1978 年, Campbell<sup>[7]</sup> 在研究两个土壤制图单

元中沙砾含量和 pH 值的空间变异性时,首先采用了地质统计学的方法。80 年代尤其 90 年代以来,国外应用地质统计学方法对土壤养分空间变异性进行了大量研究,给出了土壤中一些有机质以及元素的空间相关距离,并对变异存在的尺度范围进行了探讨<sup>[8-10]</sup>。近几年如 Ardahanlioglu<sup>[11]</sup> 等利用块状克立格对土耳其某平原地区不同尺度下(30 cm, 60 cm, 90 cm)钠盐土壤中可交换性钠、电导率、pH 值以及硼的含量进行了分析,成功验证了这些指标并没有显著性的差异。

由于地质统计学方法能够有效刻画土壤多孔介质的空间变异性,因此,借助其可以很好地估计土壤中污染物的分布情况。近些年来,国外学者又成功地将其研究方法运用于土壤污染物分布空间变异性的研究中。Paz-Gonzalez<sup>[12]</sup> 等对其研究地块内重金属的空间变异性进行了比较,指出了半变异函数和克立格图研究该类问题的特点,并对比了不同克立格法的优缺点;Cattle<sup>[13]</sup> 等运用 4 种克立格法对市区土壤中铅残留量的空间分布进行了分析,并指出多指标克立格法所做估计的精度是最高的。此外,Goovaerts, Juang 和 McGrath<sup>[14-16]</sup> 等都使用地质统计学分析方法估计受污染土壤中重金属的含量。

地质统计学被引入中国后,许多学者也将地质统计学的理论和方法应用到土壤理化性质和土壤污染的研究中。如白红军<sup>[17]</sup>、朱益玲<sup>[18-19]</sup>、刘付程<sup>[20-21]</sup>、苏伟<sup>[22]</sup> 等人在借鉴国内外经验的基础上,运用地质统计学对研究区域土壤 N、P 养分和一些微量元素含量的空间变异性进行了分析研究;李毅<sup>[23-24]</sup> 等使用普通克立格法对土壤含水量等特性的空间变异性进行了研究;而郭旭东<sup>[25]</sup> 等人则在研究河北遵化地区土壤养分空间变异性的工作中将地质统计学方法与地理信息系统相结合,使得大尺度的环境科学研究中地质统计学分析方法的应用更加便利和准确;赵士鹏<sup>[26]</sup> 则以钙元素为例使用 3 种克立格方法研究了地质统计学方法在土壤环境背景值制图工作中的应用,研究得到的等值线较为平滑,表明克立格法在绘制土壤性质等值线图的工作中非常有效;龚元石<sup>[27]</sup> 等还将地质统计学与分形理论相结合来研究土壤含水量和容重,指出土壤只是在一定空间尺度内才具有分形特征,丰富了地质统计学相关的研究方法;郑一<sup>[28]</sup> 等应用克立格法研究了天津地区表层土壤中多环芳烃的含量水平及

其空间分布规律, 发现区域土壤已经受到不同程度的多环芳烃污染, 指出地质统计学方法有助于进行全面而细致的环境影响评价。

土壤中的重金属污染是目前土壤污染治理的重要内容, 克立格插值为土壤特性的空间预测提供了一种无偏最优估计方法, 因此, 中国越来越多的研究者开始利用地质统计学对受重金属污染的土壤进行克立格空间插值和制图。陈慧选<sup>[29]</sup>等以砷为例对土壤重金属含量进行了估值, 提出地质统计学克立格法能够得出某一特定区域最好的估计值, 同时还能有效地清除系统误差; 汪景宽<sup>[30]</sup>等采用经典统计学与地质统计学相结合的方法研究了黑龙江省海伦县中部地区 6 种重金属的空间变异性及分布规律, 取得了比较满意的结果; 郑袁明<sup>[31]</sup>等运用地质统计学方法对北京近郊区土壤镍含量进行了估值和制图, 发现北京地区土壤镍含量呈西北低东南高的趋势, 且全市土壤并不存在严重的镍污染, 其分布主要受成土母质的影响; 王学军<sup>[32]</sup>、张乃明<sup>[33]</sup>等对污水灌溉地区土壤重金属含量进行克立格插值, 更加直观的反应了污灌区土壤重金属的空间变异性, 以便于进一步深入进行土壤环境质量评价; 张朝生<sup>[34]</sup>等利用地质统计学方法研究了长江水系沉积物中 11 种金属元素含量的空间分布特征, 采用变异函数定量描述空间分布结构特征和克立格法进行最优插值, 发现所研究的重金属在长江水系沉积物中均有显著的空间结构性特点。

国内外的相关研究表明, 地质统计学方法被应用于土壤理化性质和污染物含量的研究中后, 估计精度得到了显著的提高, 且大大减少了工作量。

## 2.2 地质统计学在水环境研究中的应用

水环境污染物迁移参数离散性和不确定性问题的研究是水环境污染物空间分布模拟和预测领域的前沿课题之一。地质统计学被引入前, 基于传统地下水水流和水质迁移模型及经典概率统计学的求参方法已不能对迁移参数的空间变异性做出客观的分析与评价。仅仅实用单一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物迁移参数空间变异图景, 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。

从 70 年代起, 一些外国学者就将地质统计学方法运用到地下水水位预测和污染物迁移扩散参数的估计工作中, 如 Neuman<sup>[35]</sup>用剩余克立格法研

究区域地下水位的空间变异性; Hoeksema<sup>[36]</sup>用协同克立格法去估计丘陵山区某时刻的水面标高; Woldt 等<sup>[37]</sup>提出用多重标准决策和地质统计方法来优化地下水监测网点的位置和数目; Grabow 等<sup>[38]</sup>利用克立格插值方法来研究监测点数目多少与污染物质量和浓度方差等信息的得失关系, 大大减少了监测工作量, 有效提高了监测效率。地质统计学还被应用于分析预测水环境污染污染物浓度, Soutter<sup>[39]</sup>使用地质统计学对瑞士西部区域农药污染对地下水脆弱性的影响进行了评价; Beliaeff<sup>[40]</sup>应用普通克立格法分析预测了法国海岸地区水产养殖场生物排泄物污染的空间变异性, 这些研究都是利用地质统计学方法准确估计水环境污染污染物迁移扩散参数而实现污染物分布浓度的准确估值的。国外学者在地下水水位预测和迁移扩散参数估计研究工作中已经获得了一些成功经验。

由于地下水环境是一个较为复杂的灰色系统, 其研究在中国起步较晚, 地质统计学在地下水水位预测和污染物迁移扩散参数估计的研究中应用还比较少。仵彦卿<sup>[41]</sup>、陈家军<sup>[42]</sup>、秦耀东<sup>[43]</sup>、胡克林<sup>[44]</sup>等应用不同的克立格方法对研究区地下水动态水位进行了估值分析; 郭建青<sup>[45]</sup>等应用地质统计学方法对区域潜层含水层导水系数与给水度等水文地质参数进行了分析, 表明地质统计学方法是区域地下水水位估值模型研究中行之有效的方法; 张征<sup>[46-48]</sup>等应用地质统计学方法对水环境污染物迁移参数和水环境评价空间分布的空间变异性进行模拟, 指出该方法能够弥补经典统计数学方法对各种参数空间变异随机性分析的不足, 因而能够获得这类参数空间变化的结构性信息及空间最优估计值, 使得对环境评价中各种参数空间变异不确定性的分析与评价趋于合理; 李保国<sup>[49]</sup>、胡克林<sup>[44]</sup>等应用指示克立格法对研究区浅层地下水中硝酸盐的含量进行分析, 发现非参数的指示克立格法相比普通克立格法能够更好地处理数据分析过程中的特异值。

宋儒<sup>[50]</sup>、郭占荣<sup>[51]</sup>、陶月赞<sup>[52]</sup>等借鉴国外的研究经验, 通过对地下水水位估值分析, 提出了地质统计学方法在地下水动态监测网优化设计中的基本思路 and 实现方法, 可以有效提高监测效率。近几年, 刘瑞民<sup>[53-54]</sup>等还使用地质统计学理论与方法研究湖泊水质参数, 通过对太湖的叶绿素 a、总悬浮物和透明度 3 个水质参数的研究, 指出水质参数具有空间变异性并作出准确地水质评价图, 表明克立格法优化

插值用于绘制水质评价图效果很好。

### 2.3 地质统计学在环境科学其他相关研究中的应用

由于地质统计学能够很好地刻画同时兼有结构性和随机性二重数学属性的流体迁移扩散参数,因此,地质统计学在大气污染物分布研究中也很有地效果。如孟健和马小明<sup>[55]</sup>就使用指示克立格法分析了某市大气 SO<sub>2</sub> 浓度的空间变异特征,指出该方法是研究城市大气污染空间分析、插值的有力工具。

此外,地质统计学分析方法还被 Oliver<sup>[56]</sup>、Hwang<sup>[57]</sup>等应用到环境质量评价与人类健康风险评估评价工作中。

## 3 总结与展望

(1)经过诸多环境工作者的多年努力,地质统计学的基本原理和分析方法已经成功地运用到环境科学的相关领域,并在研究土壤有毒有害物污染、水环境污染物质迁移扩散参数等研究中取得了一定的成功经验。

(2)由于土壤多孔介质特性存在明显空间变异性,使得土壤中各种污染物的分布也存在复杂空间变异性,地质统计学则是研究这种不确定性的最有力工具。目前,对土壤污染物空间分布的估值和预测主要集中在重金属方面,随着人类对一些难降解的有毒有害有机物的关注程度不断加强,如内分泌干扰剂类物质和一些高致癌物质等,其分布形式与重金属有一定相似性,地质统计学方法在这些物质空间分布估值与预测的研究中具有显著优越性。

(3)自然界中含水介质的非均质各向异性导致了各种水环境污染物质迁移参数具有复杂的空间变异性,尤其是地下水环境更是一个复杂的灰色系统,对其中污染物迁移扩散参数的估计与预测具有一定的难度,因此,其研究工作进行的还比较少。在今后的研究工作中,将地质统计学基本方法与分形理论、灰色系统理论等其他相关理论相结合,将会大大降低研究的难度,进一步精确污染物迁移扩散参数的估值与预测,为环境模拟与环境评价工作中正确模型的建立提供有效地依据。

(4)通过将地质统计学基本方法与地理信息系统等工具相结合,扩大研究范围,将地质统计学推广到大尺度的水体污染及大气污染的研究中,会使得水体、大气污染环境评价及预测更为精确。

(5)需要开发一些与环境科学研究相关的基于地质统计学算法的专业软件,以便于地质统计学在环境科学研究中的进一步推广。

### [ 参 考 文 献 ]

- [ 1 ] 侯景儒,尹镇南,李维明,等.实用地质统计学[M].北京:地质出版社,1998.
- [ 2 ] 侯景儒.中国地质统计学(空间信息统计学)发展的回顾及前景[J].地质与勘探,1997,33(1):53-58.
- [ 3 ] 侯景儒.地质统计学发展现状及对若干问题的讨论[J].黄金地质,1996,2(1):1-11.
- [ 4 ] 王仁铎,胡光道.线性地质统计学[M].北京:地质出版社,1987.
- [ 5 ] 林幼斌,杨文凯.地质统计学研究现状及在中国的应用[J].云南财贸学院学报,2001,17(Supplement):26-30.
- [ 6 ] 李艳史,徐建明,等.地质统计学在土壤学科中的应用及展望[J].水土保持学报,2003,17(1):178-182.
- [ 7 ] Campbell J B. Spatial Variation of Sand Content and pH Within Single Contiguous Delineation of Two Soil Mapping Units[J]. Soil Sci Am J, 1978(42):460-464.
- [ 8 ] Yost R S, Uehara G, Fox R L. Geostatistical Analysis of Soil Chemical Properties of Large Land Areas. I. Semivariograms[J]. Soil Sci Soc Am J, 1982(46):1028-1037.
- [ 9 ] Webster R, Nortcliff S. Improved Estimation of Micro-nutrients in Hectare Plots of the Sonning Series[J]. J Soil Sci, 1984(35):667-672.
- [ 10 ] Cahn M D, Hummel J W, Brouer B H. Spatial Analysis of Soil Fertility for Site-specific Crop Management[J]. Soil Sci Soc Am J, 1994(58):1240-1248.
- [ 11 ] Ardahanlioglu O, Oztas T, Evren S et al. Spatial Variability of Exchangeable Sodium, Electrical Conductivity, Soil pH and Boron Content in Salt- and Sodium-affected Areas of the Igdir Plain (Turkey)[J]. Journal of Arid Environments, 2003(54):495-503.
- [ 12 ] Paz-Gonzalez A, Castro M T T, Vieira S R. Geostatistical Analysis of Heavy Metal in a One-hectare Plot Under Natural Vegetation in a Serpentine Area[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2002, 81(3):469-479.
- [ 13 ] Cattle J A, Mcbrantney A B, Minasny B. Kriging Method Evaluation for Assessing the Spatial Distribution of Urban Soil Lead Contamination[J]. Journal of Environmental Quality, 2002, 31:1576-1588.
- [ 14 ] Goovaerts P, Webster R, Dubois J P. Assessing the Risk of Soil Contamination in the Swiss Jura Using Indicator Geostatistics[J]. Environmental and Ecological Statistics, 1997(4):31-48.
- [ 15 ] Juang K, Chen Y, Lee D. Using Sequential Indicator Simulation to Assess the Uncertainty of Delineating Heavy-metal Contaminated Soils[J]. Environmental Pollution, 2004(127):229-238.
- [ 16 ] McGrath D, Zhang C, Cartona O T. Geostatistical Analyses and Hazard Assessment on Soil Lead in Silvermines Area

- a, Lreland[ J] . Environmental Pollution, 2004(127): 239 - 248.
- [ 17] 白红军, 余国营, 王国平. 地统计学在湿地土壤养分空间异质性研究中的应用[ J] . 农业环境保护, 2001, 20(5): 311 - 314.
- [ 18] 朱益玲, 刘洪斌, 谢德体, 等. 江津紫色土壤养分空间变异性研究——地统计学法[ J] . 西南农业大学学报, 2002, 24(3): 207 - 210.
- [ 19] 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.
- [ 20] 刘付程, 史学正, 潘贤章, 等. 太湖流域典型地区土壤磷含量的空间变异特征[ J] . 地理科学, 2003, 23(1): 77 - 81.
- [ 21] 刘付程, 史学正, 于东升, 等. 太湖流域典型地区土壤全氮含量的空间变异特征[ J] . 地理研究, 2004, 23(1): 63 - 70.
- [ 22] 苏伟, 聂宜民, 胡晓洁, 等. 农田土壤微量元素的空间变异及 Kriging 估值[ J] . 华中农业大学学报, 2004, 23(2): 222 - 226.
- [ 23] 李毅, 门旗, 罗英. 土壤水分空间变异性对灌溉决策的影响研究[ J] . 干旱地区农业研究, 2000, 18(2): 80 - 85.
- [ 24] 李毅, 王文焰, 王全九. 土壤空间变异性研究[ J] . 水土保持学报, 2002, 16(1): 68 - 71.
- [ 25] 郭旭东, 傅伯杰, 马克明, 等. 基于 GIS 和地统计学的土壤养分空间变异性特征研究[ J] . 应用生态学报, 2000, 11(4): 557 - 563.
- [ 26] 赵士鹏, 金伦. 地统计学及其在土壤环境背景值制图中的应用[ J] . 中国环境监测, 1992, 8(5): 61 - 64.
- [ 27] 龚元石, 廖超子, 李保国. 土壤含水量和容重的空间变异及其分形特征[ J] . 土壤学报, 1998, 35(1): 10 - 15.
- [ 28] 郑一, 王学军, 刘瑞民, 等. 天津地区土壤多环芳烃的克里格插值与污染评价[ J] . 中国环境科学, 2003, 23(2): 113 - 116.
- [ 29] 陈慧选, 吴持平, 吴家华, 等. 应用地质统计法对土壤环境重金属最佳估值的研究[ J] . 农业环境与发展, 1994(3): 19 - 22.
- [ 30] 汪景宽, 赵永存, 张旭东, 等. 海伦县土壤重金属含量的空间变异性研究[ J] . 土壤通报, 2003, 34(5): 398 - 403.
- [ 31] 郑袁明, 陈同斌, 陈煌, 等. 北京市近郊区土壤镍的空间结构及分布特征[ J] . 地理学报, 2003, 58(3): 470 - 476.
- [ 32] 王学军, 席爽. 北京东郊污灌土壤重金属含量的克里格插值及重金属污染评价[ J] . 中国环境科学, 1997, 17(3): 225 - 228.
- [ 33] 张乃明, 李保国, 胡克林. 太原污灌区土壤重金属和盐分含量的空间变异特征[ J] . 环境科学学报, 2001, 21(3): 349 - 353.
- [ 34] 张朝生, 章申, 何建邦. 长江水系沉积物重金属含量空间分布特征研究——地统计学方法[ J] . 地理学报, 1997, 52(2): 184 - 192.
- [ 35] Neuman S P, Jacobson E A. Analysis of Monitintinsic Spatial Variability by Residual Kriging with Application to Regional Groundwater Levels[ J] . Mathematical Geology, 1984, 16(5): 499 - 521.
- [ 36] Hoeksema R J. Cokining Model for Estimation of Water-table Elevation[ J] . Water Resources Reserch, 1989, 25(3): 429 - 438.
- [ 37] Woldt W, Bogardi I. Groundwater Monitoring Network Design Using Multiple Criteria Decision Making and Geostatistics[ J] . Water Resources Bulletin, 1992, 28(1): 45 - 62.
- [ 38] Grabow G I, Mote C R, Sanders W L, et al. Groundwater Monitoring Network Design Using Minimum Well Density[ J] . Water Science and Technology - A Journal of the International Association on Water Pollution Research, 1993, 28: 327 - 335.
- [ 39] Soutter M, Musy A. Coupling 1D Monte-Carlo Simulations and Geostatistics to Assess Groundwater Vulnerability to Pesticide Contamination on a Regional Scale[ J] . Journal of Contaminant Hydrology, 1998, 32: 25 - 39.
- [ 40] Beliaeff B, Cochard M L. Apply Geostatistics to Identification of Spatial Patterns of Fecal Contamination in a Mussel Farming Area (HAVRE DE LA VANLÉ, FRANCE)[ J] . Wat Res, 1995, 29: 1541 - 1548.
- [ 41] 仵彦卿, 李俊亭. 地质统计方法在地下水位动态预测中的应用[ J] . 西安地质学院学报, 1991, 13(Supplement): 84 - 92.
- [ 42] 陈家军, 王红旗, 张征, 等. 地质统计学方法在地下水水位估值中应用[ J] . 水文地质工程地质, 1998, 25(6): 7 - 10.
- [ 43] 秦耀东, 李保国. 应用析取克里格法估计区域地下水埋深分布[ J] . 水利学报, 1998(8): 28 - 33.
- [ 44] 胡克林, 李保国, 陈德立. 区域潜层地下水埋深和水质的空间变异性特征[ J] . 水科学进展, 2000, 11(4): 408 - 414.
- [ 45] 郭建青, 马健, 母敏霞, 等. 潜层含水层水文地质参数的统计分布与空间相关性[ J] . 勘查科学技术, 2002(4): 9 - 16.
- [ 46] 张征, 赵俊琳, 王红旗, 等. 水环境污染迁移参数空间变异性分析原理与方法[ J] . 北京师范大学学报: 自然科学版, 1998, 34(4): 542 - 548.
- [ 47] 张征, 刘淑春. 地下水环境评价中分布参数随机性的空间统计分析[ J] . 环境科学学报, 1999, 19(4): 410 - 414.
- [ 48] 张征, 鞠硕华, 韩守江, 等. 水环境评价参数空间变异模拟数学原理与方法[ J] . 工程勘察, 2002(5): 17 - 19.
- [ 49] 李保国, 胡克林, 黄元仿, 等. 区域浅层地下水硝酸盐含量评价的指示克力格法[ J] . 水利学报, 2001(3): 1 - 5.
- [ 50] 宋儒. 应用 Kriging 方法研究格尔木河流域地下水位动态观测网的优化配置[ J] . 中国煤田地质, 1997, 9(4): 39 - 42.
- [ 51] 郭占荣, 刘志明, 朱延华. 克里格法在地下水观测网优化设计中的应用[ J] . 地球学报, 1998, 19(4): 429 - 433.
- [ 52] 陶月赞, 郑恒强, 汪学福. 用 Kriging 方法评价地下水检测网密度[ J] . 水文, 2003, 23(2): 46 - 46.
- [ 53] 刘瑞民, 王学军, 王翠红, 等. 应用地统计学方法研究湖泊中叶绿素 a 的空间分布[ J] . 农业环境保护, 2001, 20(5): 308 - 310.
- [ 54] 刘瑞民, 王学军, 郑一, 等. 地统计学在太湖水质研究中的应用[ J] . 环境科学学报, 2002, 22(2): 209 - 212.
- [ 55] 孟健, 马小明. Kriging 空间分析法及其在城市大气污染中的应用[ J] . 数学的实践与认识, 2002, 32(2): 309 - 312.
- [ 56] Oliver M A. Kriging: A Method of Estimation for Environmental and Rare Disease Data[M] . London: Geological Society Special Publications, 1997.
- [ 57] Hwang S A, Fitzgerald E F, Cayo M, et al. Assessing Environmental Exposure to PCBs Among Mohawks at Akwesasne Through the Use of Geostatistical Methods[ J] . Environmental Research, 1999, 80: 19 - 199.