

面向农业环境监测 的空间插值方法

陆安祥 曹姗姗 高秉博 /等编著

Mianxiang Nongye

Huanjing Jiance de

Kongjian Chazhi Fangfa



Mianxiang Nongye

Huanjing Jiance de

Kongjian Chazhi Fangfa

面向农业环境监测 的空间插值方法

陆安祥 曹姗姗 高秉博 /等编著



图书在版编目 (CIP) 数据

面向农业环境监测的空间插值方法/陆安祥等编著.

—北京: 经济科学出版社, 2017. 7

ISBN 978 - 7 - 5141 - 8179 - 1

I. ①面… II. ①陆… III. ①农业环境 - 环境监测 - 插值法 IV. ①X322

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 154288 号

责任编辑: 王 丹 王 莹

责任校对: 徐领柱 杨 海

版式设计: 齐 杰

责任印制: 邱 天

面向农业环境监测的空间插值方法

陆安祥 曹姗姗 高秉博 等编著

经济科学出版社出版、发行 新华书店经销

社址: 北京市海淀区阜成路甲 28 号 邮编: 100142

总编部电话: 010 - 88191217 发行部电话: 010 - 88191522

网址: [www. esp. com. cn](http://www.esp.com.cn)

电子邮件: [esp@ esp. com. cn](mailto:esp@esp.com.cn)

天猫网店: 经济科学出版社旗舰店

网址: [http: //jjkxcbs. tmall. com](http://jjkxcbs.tmall.com)

北京财经印刷厂印装

710 × 1000 16 开 15 印张 270000 字

2017 年 7 月第 1 版 2017 年 7 月第 1 次印刷

ISBN 978 - 7 - 5141 - 8179 - 1 定价: 40.00 元

(图书出现印装问题, 本社负责调换。电话: 010 - 88191510)

(版权所有 侵权必究 举报电话: 010 - 88191586)

电子邮箱: [dbts@ esp. com. cn](mailto:dbts@esp.com.cn))

编写组

陆安祥 曹姗姗 高秉博
徐 笠 王纪华

前 言

环境科学研究中, 需要了解的往往是研究变量在空间的连续变化情况, 而不仅仅是有限的采样检测点处的数据的空间分布情况。空间插值技术就是根据给定的一组或多组离散的采样点的检测数据及其空间位置拟合出一个能充分反映采样点数据与空间位置间的数学关系的函数方程, 从而推断一定区域范围内非采样点的数值。

现有研究中常用的空间插值方法众多, 可根据方法是否考虑研究变量的空间相关性将空间插值方法分为非地统计空间插值方法和地统计空间插值方法两大类。本书旨在向环境科学领域、气象、土壤、生态、水文, 以及地理信息系统和遥感等专业本科生和研究生, 系统介绍常用的空间插值方法的基本原理, 为研究中空间插值方法的选择提供参考。为便于理解, 提供了环境科学领域研究中常用的空间插值方法的应用实例。

本书是以行业(农业)科研专项“农产品产地重金属污染安全评估技术与设备开发”的研究为基础而完成的。本书共分为13章。第1章系统地阐述了空间插值技术的概念、起源与发展历程、应用领域及常用的空间插值软件。第2章详细介绍了常用的非地统计空间插值方法的基本原理、方法的优缺点及适用性。第3章介绍了地统计分析前的数据准备工作, 地统计学空间插值方法的理论基础以及常用的地统计学空间插值方法的基本原理、方法的优缺点和适用性。第4~6章分别介绍了空间插值方法的特征、评价技术及常用空间插值方法的分类与选择。第7~13章介绍了空间插值方法在环境科学研究领域的应用实例。由于编者水平有限, 编写过程仓促, 书中难免有错误和不妥之处, 恳请读者批评指正。

目 录

1	绪论	1
1.1	空间插值概述	1
1.2	空间插值方法的起源与发展	3
1.3	空间插值技术在环境科学中的应用研究	6
1.4	空间插值常用软件	9
	参考文献	11
2	非地统计空间插值方法	16
2.1	最近邻插值法	16
2.2	不规则三角网法	16
2.3	自然邻近法	17
2.4	反距离权重法	17
2.5	多项式内插法	18
2.6	回归模型法	19
2.7	趋势面分析法	20
2.8	样条函数法	20
2.9	径向基函数插值法	21
2.10	分类与回归树法	21
2.11	随机森林	22
2.12	神经网络	23
	参考文献	23
3	地统计空间插值	25
3.1	探索性空间数据分析	25

3.2	区域化变量理论	29
3.3	变异函数结构分析	40
3.4	克里金法	48
3.5	地统计加权回归	68
3.6	贝叶斯最大熵方法	69
	参考文献	70
4	空间插值方法的特征	72
4.1	主要特征	72
4.2	特征对比	75
	参考文献	80
5	空间插值方法评价	83
5.1	空间插值精度的影响因素	83
5.2	变异函数模型评价	90
5.3	空间插值方法评价	90
5.4	不同采样数量的插值方法评价	92
5.5	不同预测变量的插值方法的评价	92
	参考文献	93
6	空间插值方法分类与选择	96
6.1	空间插值方法分类	96
6.2	空间插值方法选择	101
	参考文献	103
7	北京顺义区农田土壤重金属的多元统计及地统计分析	105
7.1	案例分析	105
7.2	案例数据与方法	106
7.3	结果与讨论	108
7.4	本章小结	116
	参考文献	117
8	京郊小尺度农田土壤中重金属的统计分析与时空分布研究	120
8.1	案例分析	120

8.2	案例数据与方法	121
8.3	结果与讨论	122
8.4	本章小结	128
	参考文献	129
9	官厅水库重金属的空间分布与影响因素分析	131
9.1	官厅水库周边土壤中重金属污染的基本概况	131
9.2	土壤重金属的空间变异特征函数与格局	132
9.3	官厅水库周边土壤中重金属残留特征的影响因素	138
9.4	本章小结	144
	参考文献	144
10	空间分层非平稳区域无偏最优插值制图方法 (P-MSN)	147
10.1	方法简介	147
10.2	案例分析	152
10.3	本章小结	161
	参考文献	161
11	时空自组织分层与时空非平稳区域单目标抽样优化方法	162
11.1	自组织特征映射及分层方法	162
11.2	基于多期观测数据的时空自组织分层方法	163
11.3	时空非平稳区域单目标抽样优化方法	165
11.4	时空非平稳抽样优化方法计算案例	168
11.5	本章小结	178
	参考文献	179
12	空间非平稳区域等级边界确定抽样优化方法	180
12.1	等级边界确定抽样优化的需求及特点	180
12.2	基于指示克里金的等级边界确定抽样优化	183
12.3	案例分析	190
12.4	本章小结	205
	参考文献	205

13	多目标抽样优化方法及综合优化案例	206
13.1	空间抽样中多目标优化问题	206
13.2	模拟空间多路退火多目标抽样优化方法	208
13.3	长江口及临近海域海洋环境监测站位多目标优化综合案例	211
13.4	本章小结	227
	参考文献	227

绪 论

通过采样检测的方式获取研究对象的特征是环境科学研究常用的方法，而实际上，研究者要获取的不仅仅是有限的采样点处的研究对象的信息，更关心研究对象在空间的连续变化情况。如环境污染研究人员需要了解土壤中重金属含量的连续变化情况，有针对性地开展土壤污染治理工作；地貌学家需要掌握地形在空间的连续变化情况，而不只是有限的采样点的高程。问题的解决方式有两种，一种是加密采样，然而由于人力、物力、财力等客观因素的限制，样本数量不可能无限增多；另一种是通过采样点的值估计非采样点上的值，从而得到研究对象在整个土地上的连续分布情况，即空间插值。空间插值是一种通过已知空间数据推求未知空间数据的方法，在环境科学领域有着重要的应用。

1.1 空间插值概述

空间插值技术是在已知一定数量采样点信息的基础上，分析和发掘属性域和空间域的映射关系，通过空间建模生成充分逼近要素空间分布特征的数学模型，根据该模型推求出区域范围内其他任意点或任意分区的属性信息。通过插值，可以估计某一点缺失的观测数据，以提高数据密度；对数据进行网格化，把非规则分布的空间数据内插为规则分布的空间数据；内插等值线（面），以等值线（面）的形式直观地显示数据的空间分布。

用于空间插值的方法众多，按照不同的分类标准，有不同的分类结果。

（1）黄杏元等依据点和分区数据将插值方法分为点的内插和区域的内插。

（2）依据区域内的点数据和已知分区的数据。

郭伦等将空间插值方法分为空间内插和外推两类：通过已知点的数据推求区

域内其他位置点数据的计算方法，即空间内插；通过已知区域的数据，推求其他区域数据的方法，则是空间外推；

(3) 依据其基本假设和数学本质。

空间插值方法可分类为：几何方法、统计方法、空间统计方法、函数方法、随机模拟方法、确定性模拟和综合方法；

(4) 依据创建的表面是否经过所有采样点。

空间插值方法分为精确性插值和非精确性插值两类。精确性插值法的样点处的预测值与实测值相等，非精确性插值法样点处的预测值与实测值一般不相等。使用非精确性插值法可以避免在输出表面上出现明显的波峰或波谷。精确性插值方法包括反距离权插值和径向基插值，非精确性插值方法包括全局多项式插值、局部多项式插值，以及克里格插值。

(5) 依据方法实现的数学原理。

空间插值方法可划分为非地统计空间插值（确定性插值）方法和地统计空间插值方法两类，如图 1-1 所示。

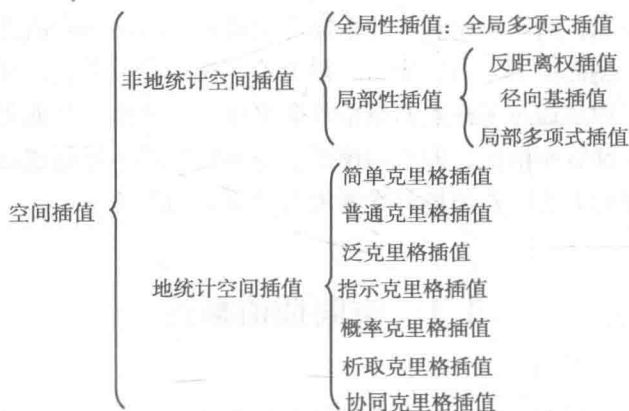


图 1-1 空间插值方法分类

非地统计插值方法是直接通过周围观测点的值内插或者通过特定的数学公式来内插来创建表面，如反距离加权插值法、全局多项式插值法、径向基函数插值法等，较少考虑观测点的整体空间分布情况。非地统计空间插值方法又可分为全局性插值方法和局部性插值方法两种，全局性插值是以整个研究区的样点数据集为基础来计算预测值，而局部性插值则使用研究区域内较小的空间区域内的已知样点来计算预测值。

地统计空间插值方法则是建立在对观测点的空间自相关分析基础之上，依据自然现象的空间变异规律进行插值，从而可以得到无偏最优估计量，并且能给出

插值的精度的方法。

本书介绍了环境科学研究中常用的空间插值方法，并非涵盖所有。表 1-1 列出了 38 种空间插值方法，并给出了方法的英文缩写，方法分为 3 类：①非地统计空间插值方法；②地统计空间插值方法；③组方法。几乎所有的插值方法都是某种采样点数据的加权平均，预测点处的属性值可用下面的这个式子表示：

$$Z^*(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(X_i) \quad (1)$$

其中， $Z^*(x)$ 表示预测点位置的预测属性值， λ_i 表示第 i 个采样点的权重值， $Z(X_i)$ 表示第 i 个采样点位置的属性值。

表 1-1 本书中涉及的插值方法名称及其英文缩写

非统计学方法	统计学方法		组方法
	单变量	多变量	
最近邻 (NN)	简单克里金 (SK)	泛克里金 (UK)	分类器与插值方法的组合
不规则三角网络 (TIN)	普通克里金 (OK)	带可变局部均值的克里金 (SKlm)	趋势面和克里金的组合
自然近邻 (NaN)	因子克里金 (FK)	带外部漂移的克里金 (KED)	线性混合模型
反距离加权 (IDW)	对偶克里金 (DuK)	简单协克里金 (SCK)	回归树和克里金的组合
回归模型 (LM)	指示克里金 (IK)	普通协克里金 (OCK)	残差最大似然—经验最优线性
趋势面分析 (TSA)	析取克里金 (DK)	标准普通协克里金 (SOCK)	无偏估计 (REML - EBLUP)
带局部趋势的样条插值	基于模型的克里金 (MBK)	主成分克里金 (PCK)	回归克里金 (RK)
薄板样条插值 (TPS)		同位协克里金 (CCK)	梯度加反距离 (GIDS)
分类方法 (CI)		带稳态的克里金 (KWS)	
回归树 (RT)		多变量因子克里金 (MFK)	
		带漂移的指示克里金 (IKED)	
		指示协克里金 (ICK)	
		概率克里金 (PK)	

1.2 空间插值方法的起源与发展

1.2.1 非地统计空间插值方法

1911 年，荷兰气象学家 A. H. Thiessen 提出一种根据离散分布的气象站的降雨量来计算平均降雨量的插值分析方法，泰森多边形法（又称最邻近插值法），该方法根据多边形块段内的已知样本估算未知值，没有考虑其他已知信息，应用

范围比较局限。

20 世纪 60 年代, Shepard 最早提出并发展起来的反距离加权法 (IDW) 是根据研究区域内的样本点实测值加权计算待估点值, 权重由距离决定, 样本点离待插点越近, 对插值点的影响越大, 反之影响越小。该方法综合了泰森多边形的临近点法和多元回归法的渐变方法的长处, 算法简单, 易于实现, 至今仍被广泛应用。

1985 年, 径向基函数 (RBF) 作为一种潜在的功能函数被 Powell 提出, 径向基函数网络是第一个用来解决多变量插值问题的模型。近些年, 径向基神经网络被广泛地应用, 然而在过去的研究中忽视了空间相关性对其插值的影响。

1.2.2 地统计空间插值方法

1951 年, 南非矿产地质工程师 Krige 和 H. S. Sichel 在估计南非金矿储量时, 提出了用样品的空间位置和相关程度估算储量的方法, 形成了地统计学空间插值方法的雏形, 该方法克服了经典统计学将地质变量看成纯随机变量而忽略其空间相关性的不足, 降低了估计误差。之后法国著名统计学家马特隆 (G. Matheron) 教授把早期的零散科研成果进行归纳、整理、理论化和系统化, 从理论和实践上进行了系统研究, 于 1962 年提出了区域化变量的概念, 首次采用“地统计学”一词, 并将地统计学定义为“地统计学是区域化变量理论在评估矿床上的应用 (包括采用的各种方法和技术)”, 阐明了地统计学原理, 奠定了地统计学的理论基础。20 世纪 70 年代, 地统计学理论和方法进一步得到完善和改进, 出现了多元、非线性地统计方法, 如普通克里金法、泛克里金法、析取克里金法以及条件模拟法等。同时, 一批地统计学研究理论和应用的专著相继出版, 如 *Geostatistical Ore Reserve Estimation* (David, 1977) 和 *Mining Geostatistics* (Journel, 1978) 等, 其中 Journel 等的 *Mining Geostatistics* 一书全面总结了 80 年代以前的地统计学理论和应用研究成果, 其影响较大, 成为该时期地统计学理论和应用研究的经典参考书。我国地统计学的发展起源于该时期, 1977 年, 美国福禄尔采矿金属有限公司的 H. M. Parker 博士将地统计学的基本概念和内容系统地介绍给我国的数学地质及勘探、矿山设计人员, 随后侯景儒、王仁铎、孙洪泉等深化了地统计学在我国地质、矿业领域的应用。80 年代, 出现了非参数和非稳态地统计学, 非线性地统计学得到发展。该时期的经典著作包括 *Spatial Statistics* (Ripley, 1981)、*An Introduction to Applied Geostatistics* (Issaks, 1989) 和 *Stochastic Simulation* (Ripley, 1987) 等。我国侯景儒等将 Journel 和 Huijbregts 的 *Mining Geostatistics* 译成中文

(译著名称为《矿业地质统计学》),王仁铎和胡光道出版了《线性地质统计学》一书,孙惠文等翻译出版了 David 的《矿产储量的地统计学评价》。90 年代,三维和时空地统计学得以发展,大量地统计学相关软件问世。同时,介绍地统计学基本理论与方法的专著 *Statistics for Spatial Data* (Cressie, 1993),介绍地统计学理论的深化和各种算法的专著 *Geostatistics: Modeling spatial uncertainty* (Chilés, 1999) 以及介绍地统计学领域应用的专著 *Geostatistics for Natural Resources Evaluation* (Goovaerts, 1997) 和 *Geostatistics and Petroleum Geology* (Hohn, 1999) 等相继问世。侯景儒和郭光裕出版了《矿床统计预测及地质统计学的理论和应用》,王政权出版了《地统计学及其在生态学中的应用》。2000 年至今,地统计学方法不断创新,不确定性地统计学和新型地统计学方法得到发展。同期,介绍地统计学基本理论与方法的 *Practical Geostatistics* (Clark, William, 2000),介绍地统计学理论的深化和各种算法的 *Geostatistical Simulation* (Lantuéjoul, 2002) 以及介绍地统计学领域应用的专著 *Geostatistics for Environmental Scientists* (Webster, 2000)、*Geostatistics with Applications in Earth Sciences* (Sarma, 2002)、*Practical Geostatistics* (Clark, William, 2000) 等专著出版。张仁铎出版了《空间变异理论及应用》,刘爱利等出版了《地统计学概论》,上述专著及译著的出版为地统计学的理论和应用研究打下了坚实基础。

地统计学的演变,从不同的角度可概括为以下 5 个方面:①从统计假设角度,地统计空间插值方法的统计假设正逐步由稳态向非稳态的方向演变;②从参与计算的变量的角度,从针对单一变量估计向以协同区域化理论为基础的多变量(含二次信息)同步估计的方向演变;③从插值的不确定性的角度,插值方法从参数地统计学方法向着参数与非参数方法相互补充的方向演变;④从插值的准确度的角度,插值方法从线性向着非线性方法的方向演变;⑤从研究尺度的角度,插值方法从空间静态向着时空动态的方向演变,从而更真实地反映现实情况。

地统计学的发展趋势表现在以下 5 个方面:①参数估计、Kriging 预测和输入数据不确定性等直接影响最终结果,发展不确定性地统计学;②加强时空地统计学与多点地统计学研究,实现真正的动态估值;③发展旧理论,探索新方法,寻求估计变异函数的替代方法,研究机理模型与地统计学的耦合;④注重学科交叉,加强地统计学与专家系统、地理信息系统、神经网络及人工智能之间的结合,注重实际应用;⑤发展基于地统计学的不确定性决策,开展不确定优化与决策,拓宽地统计学应用领域。

1.3 空间插值技术在环境科学中的应用研究

20 世纪 60 年代之前, 环境科学领域的研究者大多将环境空间数据作为随机变量, 不考虑其空间变异结构, 采用 Fisher 的经典统计学方法开展相关研究。20 世纪 60 年代, 地统计学理论被提出, 经过近 20 年的发展, 地统计学应用领域从最初的地质、采矿领域, 已逐步拓展到土壤、气象、农业、生态、环境、公共卫生、社会科学等多个领域, 显示出越来越强大的生命力。经过多年的发展, 空间插值技术在环境科学领域的应用已取得长足的进展。

1.3.1 空间插值技术在气象信息估测中的应用

20 世纪 80 年代, 研究人员为了获得非气象站点所在区域的气象要素的空间分布情况, 使用了数值模拟方法 (如统计模拟法、回归余项法等)。90 年代以后, 随着 GIS (geographic information system) 技术的迅速发展和应用, 空间插值技术为气象要素数据在空间分布上的研究提供了有效的解决方法。常用于气象要素空间插值的方法有反距离权重法、多项式插值法、克里金法、样条插值法等。

Willmott C. J. 等提出了气候辅助的年平均温度反距离权重插值方法; Hutchinson 基于经度、纬度和海拔高度的线性相关关系, 提出了薄板局部光滑样条插值方法用于气候要素插值; Nalder 等考虑温度随经度、纬度和海拔高度的梯度变化提出了梯度距离平方反比法 (GIDS); Vincent T. Hargy 提出了应用人工神经网络方法进行积温插值; 李新等以青藏高原 1961 ~ 1990 年 30 年平均 1 月气温为数据源, 对比分析了反距离平方、趋势面、Kriging 插值、Cokriging 插值和综合方法的插值结果的优劣; 潘耀忠等在充分考虑了温度数据水平和垂直地带性空间分布的特征的基础上提出了基于 DEM 智能插值方法; 甄计国等研究了积温期分解对区域积温插值 GIS 方法的改进; 刘宇等基于最近邻域法和反向距离法的基本原理, 利用空间卷积算法, 采用结合中国大陆气象站点位置的截断高斯滤波算子作为距离权重方程, 给出一种适合中国陆地区域的地面气温插值方法; 徐成东等考虑到降水量与高程存在较强的相关关系, 采用局部线性加权回归模型预测山地和高原区域的降水分布; 王舒等将 PRISM 插值对高程因素的计算方法引入普通 Kriging 插值中, 提出了综合考虑观测点与插值点的位置、距离和高程关系的 PER - Kriging 插值方法; 史婷婷等将 TRMM 数据作为“软数据”、台站数据作为

“硬数据”，两者相结合后采用贝叶斯最大熵方法对福建省降水的时空格局进行分析；夏智武等基于坡面回归插值模型（PRISM）原理，综合考虑海拔、坡向等影响因素，设计开发了山地日气温插值模型。

1.3.2 空间插值技术在土壤学中的应用

（1）空间插值技术在土壤理化性质空间变异中的应用。

空间插值技术主要用于土壤的物理性质如土壤厚度、土壤水分、土壤水力传导度、饱和水压、孔径等，化学性质如氮、磷、钾、钙、镁、土壤有机质及 pH 等土壤养分的空间变异性的研究。1980 年，Burgess 等采用地统计学技术分析了土壤属性空间变异性，并对土壤属性进行预测和模拟。Vauclin 等以沙粒含量为协同变量，使用协同克里金方法对土壤水分含量进行了预测。McBratney 等以采样密度较大的心土粉粒和沙粒为辅助属性采用协同克里金方法计算了表土粉粒含量的空间分布。徐吉炎等使用地统计学研究了沙质壤土物理属性的空间变异性。Webster 和 Nortcliff 对土壤养分含量的空间异质性进行了研究，得到土壤养分含量的空间相关距，并对其尺度依赖关系进行了深入探讨。赵士鹏等应用克里金插值进行土壤环境背景值制图的研究。龚元石等将分形理论与地统计学相结合研究土壤的容重与含水量，并得出土壤只是在一定空间尺度内才具有分形特征的结论。李毅等使用普通克里金研究了土壤含水量等属性的空间变异性。在日本，Yanai 等对稻谷产量和土壤化学属性的空间变异进行了研究。大量的学者对土壤营养元素进行了地统计学制图。李启权应用 RBF 神经网络进行土壤属性信息空间插值研究。Silvio J. Gumiere 等使用反距离加权法、平面样条函数法及具有外部漂移克里金法对土壤物理特性和土壤水分含量进行空间插值预测，利用交叉验证进行精度检验，并参照插值图，得出使用平面样条函数的预测方法最好。

（2）空间插值技术在土壤重金属的空间分布预测中的应用。

土壤重金属污染是土壤和环境科学领域内的一个重要课题，能否准确地描述土壤重金属含量的空间分布对土壤重金属污染的修复和治理工作的开展至关重要，空间插值技术为土壤污染物的空间分布的预测提供技术支撑。国内外在土壤重金属的空间分布的预测方面开展了大量研究，针对城市土壤、菜园土壤、果园土壤以及矿区周边农田土壤的重金属的含量、对农作物的影响以及空间分布等进行研究。陈慧选利用地统计学对土壤重金属及砷含量的空间分布状况进行了估值，并得出克里金方法不但能够有效地消除系统误差同时还能够得到所研究区域

预测值的最佳估计。Chang 利用半方差函数对台湾省砷含量的空间变异结构进行了分析,并用克里金对其含量的空间分布格局进行制图。Facchinelli 等采用地统计学方法对研究区域内重金属空间分布格局进行了研究,得出重金属铬、钴和镍的空间分布主要受到母岩的影响,而锌、铜和铅的空间分布主要受人类活动的影响。郑一等将克里金应用于多环芳烃空间分布状况的研究中,并指出该区域的土壤已受到不同程度的污染,并得出地统计学有助于进行细致而全面的环境影响评价。McGrath 等采用地统计学方法对土壤中重金属含量的空间分布进行了分析,进而有效地对其进行了健康风险评价。钟晓兰采用因子克里金研究了长三角地区重金属含量的区域分异,同时与空间相关分析和主成分分析相结合揭示了其成因和污染源。史舟利用普通克里格和顺序高斯模拟法对土壤铜含量的空间分布进行了研究。其结果表明普通克里格具有明显的平滑效应,而顺序高斯模拟的结果突出了原始数据分布的波动性。而且在对重金属含量的空间不确定性研究方面,顺序高斯模拟明显具有优势。吴春发等运用顺序指示模拟法模拟了冶炼厂周边土壤重金属含量的空间分布状况,基于污染阈值概率实现了污染区域的划分。

(3) 空间插值技术在土壤及其环境属性制图中的应用。

土壤及其环境属性空间分布图是土壤及其环境属性的空间变异性最直观的表达形式,对农业生产和环境保护治理至关重要。空间插值技术的发展为土壤及其环境属性制图提供了技术支撑,目前常用的土壤及其环境属性制图方法,利用易获取的与土壤及其环境属性密切相关的环境因子数据推导土壤及其环境属性的空间分布并制图。Goovaerts 于 1995 年将土壤图信息和实地采样的土壤属性信息结合,采用克里金方法,实现了土壤属性的高精度制图。Zhang 等分别结合了土地利用信息,土壤图信息以及土地利用图和土壤图叠加后更细小的斑块信息进行土壤属性制图研究,结果表明,尤其是结合土地利用图和土壤图叠加后更细小的斑块信息的制图结果最精确。Bourennane 以实际采集的含水量样本为硬数据,以采集的电阻率为辅助数据,采用同位协同模拟的方法,模拟了水含量的空间分布,结果发现,采用辅助变量可有效减小预测结果的不确定性,提高估计值的精确度。制图结果对于管理者下一步的决策提供了重要的技术支持。

1.3.3 空间插值技术在水环境研究中的应用

地统计学在水环境研究中也得到了成功的应用。20 世纪 70 年代起,地统计学