

DI TONGJIXUE ZAI
TURANGXUE ZHONG DE YINGYONG

地统计学

在土壤学中的应用

史 舟 李 艳 编著

地统计学

在土壤学中的应用

■ 史舟 李艳 编著

中国农业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

地统计学在土壤学中的应用/史舟, 李艳编著. —北京: 中国农业出版社, 2006. 5

ISBN 7-109-10855-4

I. 地... II. ①史...②李... III. 地质统计学-应用-土壤学 IV. S15

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 037982 号

中国农业出版社出版

(北京市朝阳区农展馆北路 2 号)

(邮政编码 100026)

出版人: 傅玉祥

责任编辑 贺志清

中国农业出版社印刷厂印刷 新华书店北京发行所发行

2006 年 6 月第 1 版 2006 年 6 月北京第 1 次印刷

开本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 12.75

字数: 320 千字 印数: 1~1 000 册

定价: 30.00 元

(凡本版图书出现印刷、装订错误, 请向出版社发行部调换)



土壤是处在地球表层的岩石圈、水圈、大气圈和生物圈的接触界面上，并在多种自然因素和人为因素综合作用下，不断演变着的自然客体。它不仅是构成地理景观和自然环境的重要组成部分，而且又是人类赖以生存的不可替代的有限的基本资源。因此，人们通过不断利用土壤、研究土壤、认识土壤，以发展土壤科学，其重要性是不言而喻的了。

土壤，从理论上讲是一个极其复杂的多界面的开放系统，基于土壤形成发育和处于特殊的界位，对土壤的形态、分布、性质和演变过程的研究难度都很大，其中尤以对土壤性质的空间变异及其相关性很难作出动态的定量的准确的描述和定位。随着基于区域化变量理论和变异函数为工具的地统计学的出现，并被引用到土壤学中来，很快就成为土壤界的研究热门。地统计学在土壤中的应用虽然只有 30 余年的研究历史，但在土壤地理学、土壤物理学、土壤化学、土壤生物学、土壤污染学和土壤修复、土壤采样策略等各个领域中所取得的研究成果，已经足以表明地统计学在土壤学中具有巨大的应用前景，有可能发展成为土壤学的一个新的分支学科——土壤地统计学。

《地统计学在土壤学中的应用》一书的主要作者史舟是我的硕士和博士研究生，是一位德才兼备的优秀研究生。他工作七年来，专心致志地钻研业务，已经发表较高水平的科技论文 50 余篇，出版科技专著和统编教材 4 部，获得浙江省科技进步二等奖 2 项，是我一生培养硕士 21 名和博士 36 名中的佼佼者；另一位作者李艳是我的最后一批博士研究生，她跟从史舟博士运用地统计学相关技术开展土壤空间变异特性研究，取得优异成绩。因此，我有机会第一个通读他俩协作完成的《地统计学在土壤学中的应用》专著，虽然我在土壤地理和土地资源、作物营养诊断与施肥、农业遥感与信息技术等领域从事科教 50 余年，但读后仍是受益匪浅。该书的最大特点是把地统计学技术融合到土壤学的各个研究领域中去，极有利于从事土壤与自然环境科学工作者的学习与应用。最值得提出的是作者根据地统计学的基本原理和方法，自主开发出地统计软件包 (GeoSTATer)，不仅适

用于土壤学的各个领域，而且也适用于生态、气象、森林等与环境科学有关的学科领域，很有特色。该书的主要内容已经在农业资源利用、环境科学等相关专业的本科生、硕士研究生中作为教材试用，取得了良好的教学效果。

作者要我为本书写个序，就以此读感代序。

王人潮

2006年1月

前 言

地统计学 (Geostatistics) 是应用数学迅速发展的一个分支, 它是 20 世纪 50 年代初在南非采矿业中为了预测矿石储量而发展应用起来的, 首先被采矿工程师 Krige 和统计学家 Sichel 应用于南非的采矿工作中。在 50 年代后期, 法国工程师 Matheron 发展了 Krige 的创新性概念, 在作了大量理论工作的基础上提出了区域化变量理论, 形成了地统计学的基本框架。在 70 年代, 这项技术开始被引进地学领域。1975 年在罗马举行了关于该学科的第一个国际性会议, 这以后乃至今天, 关于该学科的国际会议还在世界各地陆续不断地召开。

一些地统计学工作者认为, 地统计学是指对自然现象的统计学研究, 这些自然现象的一个最明显的特征是一个或多个变量的实测值是空间分布并且相关的。地统计学提供了一个描述性的工具如变异函数来对这些具有连续性和结构性的空间数据进行分析 and 解释, 并利用观测值之间的空间相关关系建立空间预测模型, 运用不同的克立格估值技术从空间的意义上对未采样点进行无偏最优预测, 且给出了估计误差。它可以使我们理解那些非系统的、在多个空间尺度上变化的自然现象的属性, 还可以使我们估测未知点的预测值超过给定阈值的概率, 并结合专家知识对预测值的不确定性进行评估和风险评价, 降低由估测误差产生的经济损失。正是由于其强大的功能, 这项技术吸引了越来越多科学家的注意, 并被应用到更多的学科来帮助解决各种复杂的空间问题, 从而使其理论和方法得到进一步的完善和发展。现如今, 随着信息科学和计算机技术日新月异的发展, 地统计学已经在需要进行相关数据的时间和空间预测的许多科学和工业领域得到了广泛的应用, 像地球物理学、水文地理学、土壤科学、气象学、生态学、林学、环境科学、公共健康与安全等诸多方面。

土壤是一形态和演化过程都十分复杂的自然综合体。对土壤形态和性质作定量化描述, 尤其是对土壤过程的空间不确定以及空间相关性和依赖性作定量描述相当困难, 70 年代地统计学引入到土壤学科中来, 大大推动了这一研究的向前发展。如今, 地统计学已被证明是分析土壤特性空间分布特征及其变异规律最为有

效的方法之一。

地统计学对于土壤研究的主要贡献,在于它对土壤变异的结构分析、内插估值以及空间随机模拟中的运用。土壤科学家对地统计学的兴趣日益增加,也是由于他们越来越意识到要对空间预测进行量化必须要把目标物的空间相关性结合起来,地统计学提供的各种广泛的技术可以用来解决空间信息的多样性,这正是土壤科学家不得不解决的问题。根据 SCI 科学引文检索库 (ISI), 80 年代土壤空间变异相关研究报告每年只有 10 篇左右,从 90 年代开始相关研究报告成倍增加,2004 年达到 1 439 篇,涉及范围也从土壤基本理化性质,到土壤生物性质、土壤重金属污染、土壤修复、土壤采样及精准农业等新领域。

本书以讲解地统计学的基本理论、技术和方法为主,同时结合著者的研究成果,具体介绍其在土壤学中的应用实例,帮助读者了解基本理论和掌握实际技能。全书结构从简到难共分九章介绍地统计学的理论、方法和应用。

第一章绪论,介绍了地统计学的发展简史,并就国内外地统计学在土壤学科的应用进行了综述。

第二章是样本数据的统计分析和预处理,包括对样本数据进行传统的统计描述,如平均值、方差、频数分布等,提供了异常值的识别和处理,给出了正态分布检验方法以及数据的正态转换处理方法等。

第三章阐述地统计学的基础理论,包括随机函数及其实现、区域化变量、平稳性假设、本征假设,并引出变异函数的概念。

第四章以介绍半方差函数开始,紧接着是影响半方差函数的因素。引入半方差函数理论和空间协方差理论,这是地统计学的核心。使用者将会学习如何来计算半方差函数,了解影响半方差函数的因素,如何使用合适的理论模型来对其进行描述以及如何拟合之。

第五章首先简要介绍了目前常用的各种空间插值方法,并指出这些方法的特点,然后特别介绍了地统计学的各种线性、非线性和协同克立格插值算法,如普通克立格法和简单克立格法,利用两个或多个变量的协同克立格法以及估计预测值超过某一给定阈值概率的析取克立格法和指示克立格等,并给出了对克立格预测结果进行检验的方法。

第六章介绍了地统计学的空间随机模拟技术,它与克立格估值是地统计学的两大重要组成部分。本章首先简要介绍了非条件高斯随机模拟的两个方法——楚

列斯基分解法和谱分解法,然后着重阐述了条件高斯随机模拟的几个重要算法,如转向带法、序贯模拟、模拟退火。最后结合实例来比较序贯高斯模拟法和克里格方法分别进行土壤特性随机模拟和估值的结果,以及利用序贯指示模拟方法进行土壤重金属含量超标概率模拟和空间不确定性评价。

第七章和第八章着重介绍地统计学在土壤科学中的部分应用实例。其中第七章首先介绍了如何描述土壤时空变异特性的方法,然后介绍了地统计学作为一个基本工具在当前精确农业的研究热点之一——精确管理分区划分中的应用。

第八章主要介绍地统计学在土壤采样设计中的应用。首先介绍了传统采样设计方法,然后介绍了普通克里格方法在野外采样布点设计中的应用,以及分别利用协同克里格方法、回归克里格方法和辅助数据来介绍采样布点方面的应用,最后介绍了一个较为新颖的方法,即利用方差四叉树法和变异函数来自动产生采样布点设计图。这些应用的目标就是在网格采样的基础上,如何来指导采样方案的设计,以便更好地揭示土壤特性的空间变异规律,提高采样的精度,节省采样的成本。

第九章介绍了作者自主开发的地统计软件包 GeoSTATer,介绍了该软件的总体设计思路、主要功能模块和开发使用,并用实例土壤数据演示了软件的操作计算过程,并将计算结果与其他的地统计软件进行了比较。

另外,本书附录还介绍了当前最常用的几个地统计学软件产品所具有的功能,包括 Gamma Design Software 公司开发的 GS+、ESRI 公司 ArcGIS 软件的 Geostatistical Analyst 模块、美国斯坦福大学应用地球科学系开发的 GSLIB 软件、美国 Golden Software, Inc 开发的 Surfer 软件等。

在每一章里,我们都尽力提供充足的理论和公式来加强文章的逻辑性和结构的严密性,并以作者本人研究的成果作为应用案例来阐明研究的方法和结果。本书可用作空间统计及相关专业本科教材和攻读硕士研究生的专业参考教材,还可以作为从事生态学、农学、土壤学、气象学、海洋、森林、地学、环境科学等科研人员的参考书。

由于受编写时间和作者水平之限,全书难免存在缺点甚至错误,敬请读者朋友批评指正。

最后,本书很多实例和基本材料是著者主持或参加的国家自然科学基金、中英文化交流合作项目的研究成果。感谢英国贝尔法斯特女皇大学农业与环境科学

系在本人学术访问期间从事地统计方面工作所给予的支持，以及合作方 John S. Bailey 博士的帮助。在本书出版之际，要特别感谢浙江大学农业遥感与信息技术应用研究所、浙江省农业遥感与信息技术重点研究实验室给予的大力支持，以及程街亮、金辉明、李洪义等研究生在软件开发、数据和资料整理中付出的辛勤劳动，在此一并致谢。

编著者

2005 年 10 月

目 录

序 前言

第一章 绪论	1
第一节 地统计学的发展和现状	1
一、地统计学的概念	1
二、地统计学的发展简史	1
第二节 地统计学在土壤科学中的应用	3
一、地统计学在土壤科学中的应用	3
二、地统计学在土壤科学中的应用展望	7
主要参考文献	9
第二章 样本数据的统计分析和预处理	13
第一节 描述性统计	13
一、频数分布	13
二、集中趋势的度量	14
三、离散性度量	15
四、偏度和峰度	16
五、实例	17
第二节 数据检查和分布分析	19
一、异常值的识别和处理	20
二、正态分布的检验方法	21
三、数据转换处理	24
四、实例	25
第三节 相关分析和回归分析	27
一、回归分析	27
二、相关分析	30
主要参考文献	31
第三章 地统计学基础理论	32
第一节 随机函数及其实现	32
第二节 区域化变量	33
第三节 概率分布	34
第四节 平稳假设(Stationarity assumption)	34

一、平稳性·····	34
二、二阶平稳性假设·····	35
第五节 本征假设(Intrinsic assumption) ·····	35
第六节 变异函数和协方差函数 ·····	36
一、协方差和变异函数的关系等式·····	36
二、协方差函数、自相关函数和变异函数的一些性质 ·····	37
主要参考文献 ·····	39
 第四章 变异函数和拟合模型 ·····	40
第一节 半方差函数 ·····	40
一、半方差云图·····	40
二、经验半方差函数·····	40
三、区域化半方差函数·····	43
四、理论半方差函数·····	43
五、协方差函数·····	44
六、其他方差函数·····	44
七、趋势和漂移 ·····	45
第二节 影响经验半方差函数的因素 ·····	47
一、统计方面·····	47
二、样品大小和设计·····	48
三、采样间距·····	50
第三节 变异函数的理论拟合模型 ·····	51
一、用理论的半方差函数代替经验半方差函数·····	51
二、对变异函数的限制条件·····	51
三、变异函数的理论模型·····	53
四、套合模型·····	57
五、周期性·····	58
六、各向异性·····	59
七、拟合模型·····	60
主要参考文献 ·····	62
 第五章 空间插值与克里格法 ·····	63
第一节 主要空间插值法简介 ·····	63
一、空间整体插值法·····	64
二、空间局部插值法·····	65
第二节 线性预测克里格法 ·····	70
一、普通克里格法(Ordinary Kriging, OK) ·····	70
二、简单克里格法(Simple Kriging, SK) ·····	73
三、泛克里格法(Universal Kriging, UK) ·····	74
第三节 非线性预测克里格法 ·····	75

一、对数正态克立格法	76
二、指示克立格法(Indicator Kriging)	77
三、析取克立格法(Disjunctive Kriging)	81
第四节 协同克立格法(Cokriging)	85
一、协同区域化特性与相关函数	85
二、普通协同克立格法(Ordinary Cokriging)	87
三、简单协同克立格法(Simply Cokriging)	89
第五节 精度检验	89
主要参考文献	91
第六章 空间随机模拟	92
第一节 非条件高斯随机模拟	93
一、楚列斯基分解法(Cholesky Decomposition)	93
二、谱分解法(Spectral Decomposition)	94
第二节 条件高斯随机模拟	94
一、转向带法(Turning-Bands method)	95
二、序贯高斯模拟(Sequential Guassian Simulation)	96
三、协方差矩阵 LU 分解法	97
四、模拟退火(Simulated annealing)	98
五、实例应用	100
主要参考文献	106
第七章 土壤时空变异和管理分区应用	109
第一节 土壤时空变异特性	109
一、土壤时空变异特性研究进展	109
二、基于方差函数的土壤时空变异特性研究	111
第二节 土壤管理分区研究	121
一、土壤管理分区研究进展	121
二、基于时空变异的管理分区应用	121
三、基于遥感信息的管理分区应用	127
主要参考文献	133
第八章 土壤采样设计应用	136
第一节 传统采样设计方法	137
一、简单随机采样	137
二、分层采样	139
第二节 地统计的土壤采样设计	141
一、地统计采样设计主要方法	142
二、普通克立格法在地统计采样设计的应用	144
三、协克立格法在优化插值和采样研究中的应用	148

四、回归克里格法在优化插值和采样研究中的应用	155
第三节 基于变异函数的四叉树采样设计法	162
主要参考文献	168
第九章 地统计软件包 Geo-STATer 的开发和使用	170
第一节 程序设计与开发	170
一、模型与算法	170
二、程序设计	171
第二节 操作和应用	173
一、实例计算过程	173
二、结果和讨论	178
主要参考文献	179
附录 常用地统计软件简介	181
一、GS+	181
二、ArcGIS - Geostatistical Analyst	181
三、GSLIB	184
四、Surfer	185
五、其他软件	186
英中文名词索引	187
英文缩写索引	190

第一章 绪 论

现代地统计学 (Geostatistics) 从 20 世纪 50 年代初首先被应用于矿藏勘探工作中, 已经发展了近半个世纪。目前, 它已广泛应用于空间域或时空域自然变量的定量化描述, 如空间变异和结构分析、空间预测、空间模拟等众多领域。70 年代后, 地统计学被引入到土壤学科, 并逐渐在土壤物理、土壤化学、土壤生物等方面得到了很好的应用。本章首先阐述地统计的基本概念, 并回顾其发展简史, 然后, 就地统计学在土壤学科的发展进行详细的介绍, 并对地统计学在土壤科学中的进一步发展进行展望。

第一节 地统计学的发展和现状

一、地统计学的概念

地统计学 (Geostatistics) 是应用数学迅速发展的一个分支, 它是 20 世纪 50 年代初在南非采矿业中为了计算矿石储量而发展应用起来的。首先被采矿工程师 Krige 和统计学家 Sichel 应用于南非的采矿工作中。

在 50 年代后期, 这项技术吸引了一些法国工程师尤其是年轻的 Matheron 的注意, 他发展了 Krige 的创新性概念, 在作了大量理论工作的基础上提出了区域化变量理论 (The theory of regionalized variable), 形成了地统计学的基本框架 (Cressie, 1990)。

在 70 年代, 随着计算机的出现, 这项技术由最初的预测矿石储量进而被引进地学领域。1975 年在意大利的罗马举行了关于该学科的第一个国际性会议, 然后 1983 年在美国的塔霍湖, 1988 年在法国的阿维尼昂, 1992 年在葡萄牙陆续举行了国际会议。

Journel 和 Huijbregts (1978) 认为, 地统计学是指对自然现象的统计学研究, 这些自然现象的一个最明显的特征是一个或多个变量的实测值是空间分布并且相关的。地统计学通过假设相邻的数据空间相关, 并假定表达这种相关程度的关系可以用一个函数来进行分析和统计, 从而来对这些变量的空间关系进行研究。因而地统计学具有确认数据之间的空间关系的能力, 由于它能定量地描述这种空间关系, 因此可以解决一些问题, 例如对未采样点的值进行预测。

地统计学理论最初由 Matheron (1963) 发展起来, 主要用来预测矿物贮量的矿石级。今天, 地统计学已经在需要进行相关数据的时间和空间预测的许多科学和工业领域得到了广泛的应用, 像地球物理学、水文地理学、土壤科学、气象学、海洋、生态、林学和人口遗传学和环境治理许多方面。地统计学被认为是统计方法针对区域化变量的应用。一些地统计学工作者对它下的定义是: “地统计学是以区域化变量理论为基础, 以变异函数为主要工具, 研究那些在空间分布上既有随机性又有结构性, 或空间相关性和依赖性的自然现象的科学” (王政权, 1999)。

二、地统计学的发展简史

尽管采矿是 20 世纪 60 年代地统计学发展的推动力量, 但它是在其他学科领域被最先用到的。Mercer 和 Hall (1911) 在调查小地块上的作物产量变异时发现, 当地块增加到一定量时,

地块之间的方差变小,并注意到相邻地块上的产量比相隔较远地块之间的产量更为接近,从而提出了产量变异的两个来源,一个是自相关性,另一个是完全随机性。其研究提出了现代地统计学的很多基本概念,如空间相关性、自相关距离、支撑效应和块金方差等,为统计学家提供了地统计学发展的萌芽,但其观点几十年以来对空间分析几乎没产生什么影响。

1919年,Fisher研究作物对不同农业管理措施反馈时发现了田间的空间变异现象,设计了试验消除短程变异和远程变异的影响,发展了方差分析方法来检测其效果,并在随后十年将其大大发展。Youden和Mehlich将方差分析作为预测空间变异的工具,采用Fisher的理论来分析变异的空间尺度,根据所获取的信息来设计采样策略。但他们没有意识到该项研究的重要性,将成果发表于内部刊物,被搁置多年后才被重新发现。

1930年,Kolmogorov研究气象湍流现象时,想要描述其变异并对其进行预测。但发现这是个极其复杂的系统,现在我们称之为混沌,同时也发现了空间自相关性并构造了结构函数来描述它,且设计出一种函数来进行无偏和最小方差插值。但当时计算机还没有得到普及,不能将其理论和方法在计算机上得到实现和推广。Kolmogorov的结构函数就是半方差函数,其插值方法就是现在所谓的克里格技术。

20世纪30年代是采样理论大力发展的时代。现在所用到的大部分基于设计的采样预测方法都是在当时发展起来的。Yate在其系统采样调查中引入了半方差值的概念。Von Neumann提出了一种基于均方的时间序列方法来进行样本的相关性测试,后来被Durbin和Watson发展为Durbin-Watson统计学。但所有这些都未在空间分析方面很好地进行下去。

瑞典科学家Matern(1960)也在探索行之有效的采样方法。他意识到空间自相关性的意义,从随机点推移法在理论上来推导空间协方差函数,并表明其对全局预测的影响,这就是今天所谓的变异函数。Langsaetter(1926)早先已经用同样的方法来描述林业调查的空间变异性。

20世纪60年代,南非的采矿工程师Krige注意到,如果考虑了邻近矿区的等级,可以提高所开采矿区矿石等级的预测精度,提出了用样品的空间位置和相关程度来估计块段品位及储量,使其估计误差最小的计算方法,即初步的Kriging插值(侯景儒等1993)。同时法国数学家Matheron将前人研究成果归纳、整理和系统化,并进行了大量理论和实际研究,根据随机过程的基本理论,利用自相关样本数据来提高矿石等级的预测,并称这种理论为区域化变量理论。

地统计学从采矿开始,延伸到其他好几个应用领域,最先是石油工业,然后进入其他学科如水文、气象、土壤学、农业、渔业、污染和环境保护等,并在技术上得到了很大发展,但Matheron的理论是所有这些发展和应用的基础。

我国于1977年开始介绍地统计学。1982年,侯景儒首先将Journel等的专著《采矿地统计学》(中文名称为《矿业地质统计学》)译成中文,1987年王仁铎等出版了《线性地质统计学》一书作为高等学校教材。1989年孙惠文等翻译出版了M. David的《矿产储量地质统计学评价》。1998年,侯景儒等出版了《实用地质统计学》一书。同年王政权出版了《地统计学及在生态学中的应用》一书。2005年张仁铎出版了《空间变异理论及应用》一书。上述几本专著和译著在中国的出版,为地统计学在中国的理论研究和应用研究打下了基础。

地统计学理论近几十年的研究进展主要表现在:

(1) 稳健地统计学的研究 传统地统计学及Kriging技术在进行变异函数计算时要求观测数据服从正态分布,否则其结果是不稳健的,而应用这种数据进行Kriging估计,其结果也将

是不稳健的,从而提出了稳健地统计学。目前的研究内容主要集中在:各种类型稳健性距离的测度、稳健变异函数、稳健 Kriging 技术的理论与方法等。

(2) 非参数地统计学的研究 非参数地统计学是研究在去掉重要而实际存在的特异值的条件下来处理各种数据进行各种估计,给出在一定概率下估计未知量的最优无偏估计量及空间分布。其主要方法为 Kriging 法,目前的研究主要集中在:特异值的研究、指示函数及其二阶矩、指示变异函数、指示 Kriging 方程及品位最优估计。

(3) 多元地统计学的研究 多元地统计学是以协同区域变量理论为基础,以互变异函数为基本工具,研究那些定义于同一空间域中既有统计相关、又有空间位置相关的多元信息空间结构的地统计学。其主要方法包括协同 Kriging 法及因子 Kriging 法。目前的研究主要集中在线性平稳多元地统计学的研究;线性非平稳多元地统计学的研究;非线性平稳多元地统计学的研究;时间-空间域中多元信息的地统计学研究;协同区域化矩阵的理论研究。

(4) 随机模拟的研究 包括条件模拟和非条件模拟。其中条件模拟是要求在各观测点处的模拟均等于该点处的实测值的方法。目前的研究主要集中在:转向带法、序贯高斯模拟、模拟退火模拟等。

(5) 现代数学方法与地统计学的相互渗透,从而形成新方法的研究 主要表现在贝叶斯 Kriging 法、贝叶斯条件模拟、数学形态学与地统计学的结合、分维学与地统计学的结合、神经网络理论与地统计学的结合、模糊数学与地统计学结合等。

(6) 地统计学的应用 国外应用地统计学的初期主要是对矿产资源的储量进行评价,并逐步应用于采矿设计及矿山开采,这一时期主要采用线性平稳或地统计学的理论和方法。十几年来,为了解决自然乘法和工程技术中存在的实际问题,又相继发展了非线性地统计学、非参数及多元地统计学等,其应用逐步扩展到遥感、物化探矿数据处理、工程及水文地质、城市地质、环境科学、海洋地质、农林以及人文科学等领域。

我国地统计学研究和应用是 1977 年由侯景儒教授、黄竞先教授等首先进行的。应用的领域主要集中在金属矿产的储量计算、数据处理及异常评价、矿产资源预测及勘探方法的研究、矿山地质研究,随后在环境科学、农田水利、土壤学、气象、渔业、森林、海洋等领域也开始涉及,其中在环境科学、渔业、农业土壤等领域均取得可喜的成功应用(侯景儒等,1998)。

第二节 地统计学在土壤科学中的应用

土壤是一形态和演化过程都十分复杂的自然综合体,对土壤形态和性质作定量化描述,尤其是对土壤过程的空间变异以及空间相关性和依赖性作定量描述相当困难,20 世纪 70 年代地统计学引入到土壤学科中来,大大推动了这一研究的向前发展。现今,地统计学已被证明是分析土壤特性空间分布特征及其变异规律最为有效的方法之一。从基本理化性质到土壤生物,乃至土壤修复及土壤采样策略的制定,地统计学在土壤学科中的应用已经渗透到方方面面,成为土壤学研究的一个必不可少的手段之一。也成为许多土壤学家,特别是计量土壤学(Pedometric)研究的一个重要工具。

一、地统计学在土壤科学中的应用

1. 地统计学在土壤物理性质空间变异研究中的应用 国外学者自 20 世纪 60 年代提出空间变异性研究以来,经过近 30 年的努力,已经取得了长足的进展,尤其在土壤物理方面,研

究的方法从 Fisher (1956) 的经典统计学分析过渡到 Matheron 提出的地统计学分析, 并已将理论研究成果应用于实际之中。

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较大高潮。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。80 年代初, Burgess (1980) 等在分析土壤性质空间变异规律的基础上, 引进新的土壤预测和模拟技术, 并加以完善和丰富, 大大推动了研究的向前发展。McBratney (1983) 等找出了土壤颗粒组成间的协同区域化关系, 利用采样密度较大的心土粉粒和砂粒含量, 计算表土粉粒含量的协同克里格值。Vauclin (1981) 等以砂粒含量作为协同变量, 对土壤有效水含量进行估值。另外, 以土壤、气候参数与作物参数间的协同区域化关系对作物生长进行空间估值也作了不少的尝试并取得了很好的效果。

在此期间, 国内学者也开始利用地统计学研究土壤物理性质的空间变异, 先后在土壤的物理参数(如颗粒组成、团聚体大小、容重、饱和导水率以及水分特征曲线等)和状态参数(如含水量、土壤水吸力、入渗量、温度及导电率等)方面进行了研究。雷志栋等(1985)与法国的 Vachauol 合作, 做了旱地土壤的有关研究; 徐吉炎等(1983)从事过砂质壤土方面的空间变异性探讨; 吕军和俞劲炎(1990)通过对水稻土的田间观测和分析, 发现土壤物理性质的田间变异不是完全随机, 土壤大团聚体含量在相关空间内的变异, 主要由微团聚体、有机质、粉粒的直接作用及黏粒通过微团聚体的间接作用所造成。梁春祥和姚贤良(1993)对丘陵红壤主要物理性质的空间变异特征的研究表明, Kriging 方法对于未采样区的估测较刀切法和其他线性估测法的精度高; 而 Cokriging 方法用于由样本多的土壤特性去估测样本少的土壤特性, 易测定的性质估测难测定的性质以及表层性质估测深层性质是优越可行的, 它的估测误差仅为线性回归的 54.12%~65.6%, 为普通克里格的 36.17%~85.97%, 明显优于线性回归, 也优于普通克里格法。龚元石和廖超子(1998)将分形理论和地统计学结合起来对土壤含水量和容重进行的研究表明, 土壤并非具有理想分形特征的介质, 它只是在一定的空间尺度内才具有分形特征。

另外, 地统计的随机模拟方法也多数应用于土壤水盐时空动态变化的模拟。如 Castrignano 等利用条件随机模拟进行森林土壤表土含水量超某一阈值的概率分布评价。如李保国等采用序贯高斯方法进行了农田土壤表层饱和导水率的条件模拟, 并与克里格插值结果进行比较。认为条件模拟对于研究那些空间不确定性且会对环境带来不良影响的风险性变量, 更具有优势和实际意义(2002)。陈亚新等采用条件模拟方法对样区水盐空间变异进行模拟, 并与普通克里格方法进行比较。发现条件模拟能更好地揭示水盐特性空间变异的波动过程, 但模拟值不如普通克里格估计能平均的接近实验值。认为两种方法各有优缺点, 应用目标不一。

2. 地统计学在土壤化学性质空间变异中的应用 利用地统计学对土壤化学性质进行空间异质性研究已经作了大量的工作。Davis (1995) 对西非尼日尔土壤化学性质的研究发现, 低矮植物和树木分布使速效磷的各参数值(基台值、变程和块金系数)要比土壤 pH、可交换铝和氢的各个参数值高, 南北方向比东西方向的方差大。国内王其兵(1998)等在内蒙古锡林河流域草原上对土壤有机碳及氮素的空间异质性进行了分析研究, 并应用空间局部内插法, 绘制出了两个因子的空间等值分布图。郭旭东(2000)研究了河北省遵化市土壤表层碱解氮、全氮、速效钾、速效磷和有机质五种养分要素的空间变异规律, 发现五种养分要素的空间自相关程度都属于中等程度的自相关, 但空间变异的尺度范围不同, 全氮最大; 五种养分要素的各向同性的范围也不同, 碱解氮和速效磷在整个范围(0~28 km)都表现出各向同性, 全氮和