



国家自然科学基金研究专著
NATIONAL NATURAL SCIENCE FOUNDATION OF CHINA

工程与材料科学系列
N S F C



土壤水盐信息空间变异的 预测理论与条件模拟

陈亚新 史海滨 魏占民 等 著





国家自然科学基金研究专著
NATIONAL NATURAL SCIENCE FOUNDATION OF CHINA



土壤水盐信息空间变异的 预测理论与条件模拟

陈亚新 史海滨 魏占民 等 著

科学出版社

内 容 简 介

本书将地质统计学理论用于水土科学领域,探讨水盐空间变异规律及其应用。主要内容包括:土壤水盐信息的空间变异与尺度效应,合理采样与蒙特卡洛模拟检验,基本预测方法的理论与实践,大区域复杂情况的预测理论与实践,条件模拟原理与实践,稳健变异函数的推求与稳健分析方法,人工神经克里金法与普通克里金法在条件模拟方面的对比分析,区域性土壤水盐环境动态监测。

本书可供水利工程、土壤物理、水文地质、地质矿业、精确农业和生态环境等领域科技人员和高等学校教师、研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

土壤水盐信息空间变异的预测理论与条件模拟/陈亚新,史海滨,魏占民等著. —北京:科学出版社,2005

ISBN 7-03-016399-0

I. 土… II. ①陈… ②史… ③魏… III. 地质统计学-应用-土壤-水盐体系-研究 IV. S151.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 125881 号

责任编辑:胡晓春 卜 新/责任校对:朱光光

责任印制:钱玉芬/封面设计:王 浩

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社编务公司排版制作

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005 年 12 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2005 年 12 月第一次印刷 印张:14 插页:2

印数:1~1 500 字数:332 000

定价:42.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(科印))

序

空间变异理论与空间格局及其尺度效应问题是当今世界科学发展前沿关注的热点。由于空间变异的非均一性、复杂性和非线性,这一研究颇具挑战性,产生了跨学科交叉性和综合性工程技术新问题。

环顾当今世界,国家的发展、民族的振兴,都离不开科学技术的推动。自1962年法国数学家 Matheron 运用区域化变量理论,以变异函数为工具创立地质统计学(geostatistics),并在固体资源储量精确预测评估等方面取得突破以来,地质统计学很快向非地质领域的水资源、土壤资源和生态资源等领域开拓,表现了独特的学术优势。由于区域化变量具有随机性和结构性的双重特征,使传统的数学理论和数学工具得到改造和更新,地质统计学开始在数学地质学科中发展成独立的新兴分支。目前,凡是具有地学特征的空间信息工程问题都可运用地质统计学理论及其方法,它为解决大规模经济建设和社会发展中的空间统计问题提供了新的理论依据和技术基础,形成了新的科学技术生产力。

我国的空间变异性研究虽起步较晚,但发展很快。为了从高起点开展研究,该书瞄准了世界科技前沿,结合以中国北方两大河流(黄河、辽河)为水源的诸灌区实际需要,以连续资助的三个国家自然科学基金项目研究成果为基础,将新兴科学——地质统计学理论开拓性地用于非地质领域的水科学与土壤科学,重点探索了不同尺度下的土壤水盐信息空间变异规律及其预测理论和条件模拟的仿真方法,对传统随机理论、趋势面理论的一些不足和国内外在此领域研究中的某些薄弱之处进行了弥补与更新,为进一步满足区域性空间格局和信息统计的发展要求,如水土资源的时空分布、储量估计、规划设计、预测监测和现代管理,提供了解决问题的新理论、新方法和新技术。

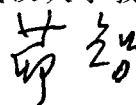
该书的特点是:抓住了新兴科学研究的生长点,将地质统计学的两个主要内容即“预测估计”与“条件模拟”结合起来进行系统、深入的综合研究,实现优势互补,这有利于发挥地质统计学的全部优点;从学科发展与学术融合角度出发,引进了稳健统计学和非参数统计学,加强了空间变异数据处理理论和空间格局信息统计分析的研究基础,由此构成预测理论、条件模拟和数据分析处理三个相关内容的科学技术集成,具有新的学术思维和自成体系的创新特色;对空间变异科学领域中的主要研究热点和前沿问题,如尺度效应、各向异性的简化、最优内插方法的外推扩大、条件模拟方法改进、高效优质蒙特卡洛模拟仿真技术、人工神经克里金法的应用、影响点和特异值结合处理及调控技术、稳健型变异函数的逼近方法等,做了多方面的探索,具有知识创新和技术创新相结合的特色;在完成基础研究的同时,积极向应用研究推进,结合水土科学与工程的生产需求,提供了有重要实用价值和广泛推广前景的应用成果,如不同尺度空间变异情况的土壤调查、合理采样数目、网格设计和操作指南,土壤特性动态监测方法与评估技术、土壤墒情预测预报和大面积非规则采样的正则化技术,地质统计学在水土工程方面的相

应软件开发等。这些成果为生产应用提供了许多科技支撑，改造了行业的传统技术，正在形成科学发展的生产力，为地质统计学的深入研究及广泛应用做出了突出贡献。这在一般应用基础性研究中是少见的。

该书的主要成果是 10 年来为满足国家西部大开发的需要，面向未来、潜心研究、多方积累而取得的，可谓十年磨一剑。陈亚新教授率领的学术群体通力合作，发表了一大批高水平的学术论文，它们刊登于《水利学报》、《水科学进展》、《农业工程学报》、《地质论评》及大型国际会议论文集等。这些论文得到中国水利学会、中国农业工程学会和中国地质学会及国际同行专家的广泛重视，其中 7 篇被美国 EI 收录，3 篇被 SCI 收录，4 篇被 ISTP 收录，3 篇在英国牛津大学 EB 发表。这提高了我国在地质统计学前沿领域中的国际地位。实践证明，该学术群体是一支有强大创新能力的科学团队，无愧于国家自然科学基金委员会给予的连续资助。

该书具有突出的学术先进性、内容新颖性和创新性，是优秀科研成果的缩影。该书的出版将会引起我国水利工程、土壤物理、水文地质、地质矿业、精准农业、生态系统领域的学者和研究生的广泛兴趣，对推动我国新兴科学的进一步发展将产生显著影响。

中国工程院院士
武汉大学教授



2005 年 6 月 20 日

前 言

在大面积区域性水土资源的调查勘探、规划设计和监测实施中,最大的难题在于田间观测和采样系统受土壤信息空间变异性影响,这种变异性的试验观测与试验面积、观测时间、地质结构和尺度效应有关,至今尚无规范可依。我国早期(20世纪50年代)的土壤和水文地质调查曾参考苏联的有关规定。80年代以后虽有改进,灌溉土壤调查开始参考《不同土壤调查强度与取样密度和进展速度情况说明》(FAO, 1979),但它们本质上仍是将水土信息作为纯随机事件处理,这种调查和制图完全是依据 Fisher (1956)所倡导的经典统计理论,而忽视了区域化变量同时具有随机性与结构性的双重特征,未考虑其空间变异性。

水土资源系统的空间非均一性称为空间变异性(spatial variability)或空间异质性(spatial heterogeneity)。分析、揭示、预测和模拟这种变异性的理论和主要工具是地质统计学及其方法,也称空间信息统计学(statistics of spatial information)及其方法。近年来,空间信息的统计分析与数据处理中的位置和属性以及两者相结合时的不确定性是当代诸多学科广泛关注的前沿问题。

地质统计学(geostatistics)的主要方法于20世纪50年代初在南非金矿开采的储量计算过程中由 Krige 工程师首先提出,1962年由法国数学家 Matheron 教授系统化和理论化而创立,使之成为数学地质独立分支的一个新兴边缘学科。随着40多年的不断开拓,它不仅广泛应用于地质领域,而且扩大到许多具有地学特征的非地质领域,如土壤、地理、水文、气象、海洋、水资源、水土保持、森林草原、昆虫种群、农业生态、人口分布、环境等学科,从而发展为能表征和估计具有区域化变量特征的多种自然资源的工程科学。由于能够同时反映空间信息的结构性和随机性,它被公认为揭示空间信息分布格局和变异性的先进科学和重要工具,表现了独特的学术优势和适应能力。它从产生开始,就对传统的经典统计学理论、趋势面理论和方法提出了挑战。目前,凡是研究空间信息分布格局、揭露空间相关性或变异性规律并指导预测和模拟,均可运用地质统计学理论及其方法。地质统计学为解决经济建设和社会发展中空间信息分布问题提供了重要依据和科学基础,对近代科学事业的成长和技术进步产生了重要的推动作用。

地质统计学最早应用于传统的地质研究,矿业的勘探、开采精确设计以及储量估计和管理预测。由于土壤的不均一性,地质统计学也广泛用于土壤物理、土壤化学和土壤调查。虽然 Mercer 和 Hall 于1919年已发现土壤具有空间变异性,Youden 和 Mercer 于1937年共同提出这种变异性具有结构性和随机性的双重特征,但由于缺乏数学理论和数学工具指导,有关的研究受到很大约束。在地质统计学的推动下,20世纪70年代国外对土壤特性的空间变异性研究出现高潮(Hillel, 1980),弥补了研究土壤物理特性时传统纯随机概念在理论上的不足。20世纪70年代中、后期地质统计学逐渐应用于水文水资源领域。1990年在德国卡尔斯鲁厄由 UNESCO 举办的地质统计学方法在地表水-地下水

方面最新进展和应用国际会议上讨论了昆虫与生态问题。1975、1983、1988 年召开的三次国际地质统计学大会和国际地质统计学协会(IGEOSTA)的成立标志着地质统计学已经发展到一个成熟的阶段。1993 年,美国第 78 届生态学年会以地质统计学与生态学为主题,阐明了地质统计学在生态学理论与实际研究中的潜力和前景。Kareiva (1994)认为“空间问题是目前生态学理论研究的前沿”。Li 等(1995)从生态学观点把空间异质性定义进一步区分为定性与定量两部分,即系统或系统属性在空间上的复杂性(complexity)和变异性,指出系统属性可以是生态学所涉及的任何变量(植物类型、种群生物量和土壤特性),复杂性涉及系统属性的定性和类型描述,而变异性是指系统属性的定量或数量描述。

地质统计学引入我国得益于一个偶然的機會,即 1977 年由美国 Flour Mining & Meta Incorporation 的 Parke 随美中贸易全国委员会来华访问传入,但存在必然发生的背景。经过 10 年的引进、消化、吸收,结合中国国情的大量应用和探索地质统计学完成了起步阶段。1989 年 4 月,Matheron 教授的学生——美国斯坦福大学应用地球科学系主任 Jounel 等来华举办讲座。同年 11 月,在江西九江市召开第一届全国地质统计学学术讨论会,将研究从地矿领域扩大到水文地质、工程地质、土壤调查、水文站网划分和农田水利作物需水量的空间分布研究,使这一先进理论和技术方法开始在我国多领域中实践。20 世纪 80、90 年代,地质统计学开始进入一个活跃的开拓、创新阶段,在我国政府的某些主要部门得到行为确认,并在多元地质统计学、非线性地质统计学和稳健地质统计学及条件模拟等多方面有了开拓发展,逐渐扩大为广义的空间信息统计学,预示应用理论和应用领域的加深和拓宽,正走在指导我国生产实践和探索科学研究的前列。

对于国外已经走在前面并对我国经济建设和科学发展有重要影响和广泛应用前景的新兴科学,在国家自然科学基金的强力资助下,由国家自然科学基金委员会地球科学部、工程技术与材料科学部和生命科学部分别完成了 3 批新原理、新方法、新技术共计 6 项课题的立项,为发展我国的应用基础研究做出了重要贡献。其中,由侯景儒教授主持的有 2 项——“多元及非参数地质统计学理论分析及在金属矿床的应用”(1990~1992 年)、“空间域及时—空域中多元地质信息的地质统计学理论分析及其应用”(1993~1995 年),由陈亚新教授主持的有 3 项——“土壤水盐空间变异理论与预测”(1993~1995 年)、“条件模拟理论在农田水盐时空变异分析与监测中的应用”(1998~2000 年)、“水盐时空变异数据的稳健性与稳健估计方法研究”(2002~2004 年),由王政权教授主持的有 1 项——“土壤养分和水分的空间异质性与树木根系结构和功能研究”(1995~1997 年)。这些最新研究成果不仅在地质、矿业界更新了勘探工作的惯用原则,建立了一种全新的我国标准化储量计算方法,促进了勘探、设计和生产三个传统工作阶段的一体化,得到了国家的认同,显示了其在数据处理中可最大限度利用信息资源的能力,而且在水土工程和生态学科中揭示了空间变异性是导致空间格局和尺度效应形成的主要原因,提供了多种条件模拟的可行案例,促进了田间采样与监测的新的可操作技术指南的形成,为深入揭示自然资源信息时空分布特征和生态学规律,提供了带有普遍性的科学方法,为加强地质统计学的相关基础研究扩大了学科交叉领域,也填补了国外科学中的某些不足。

陈亚新教授在其主持的上述 3 项课题中将地质统计学用于水土科学领域,对土壤水盐空间变异性预测、条件模拟和变异函数稳健估计方法进行了较为全面、深入的研究。

土壤水盐预测研究处理了国内外对土壤盐分时空变异性研究的薄弱环节。针对大型

灌区水盐预测和监测需要提出了田间采样的基本操作要求, 为了保持合理采样数目的评估, 应根据不同深度土层信息变异系数值的变化在相同精度要求下确定不同采样数目。为了实现纯随机目标, 采样点间保持的距离应大于变程, 并用蒙特卡洛模拟试验进行了合理采样数的检验。地质统计学的采样设计系统不仅可获得空间估计值, 而且可以在采样实施前预先获得采样的估计方差, 使较传统的采样要求及 FAO《不同土壤调查强度与取样密度和进展的情况说明》更加合理。

在规则和非规则采样实践中, 普通克里金(ordinary Kriging)法的应用经过线状空间克里金系数分布规则的研究, 在分析信息“减弱丛聚效应(declustering effect)”[也称“屏蔽(masking)影响”]的基础上获得最优内插估计的有效信息数。当已知信息居待估信息域的一侧或中心时, 在考虑邻域的环境相似及允许误差控制条件下可将常用的最优内插克里金估计适当扩大为外推估计, 使传统的最优内插发展成具外推趋势功能并应用于土壤墒情的二维网状和非规则信息的大面积墒情预报。

对于线性非平稳型的土壤水分漂移(drifting)问题, 采用泛克里金(universal Kriging, UK)法, 利用变程以内的变差函数可获得一定精度条件下的简化预测结果。

运用多元地质统计学的协同克里金(co-Kriging)法, 针对氯化物为主的盐渍土, 用易于观测的 EC 值对主要阴离子 Cl^- 进行含量估计, 利用 EC 和 Cl^- 对较难观测的主要阳离子 $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ 进行联合估计, 实现盐溶质的离子含量及空间变异性协同估计, 获得较好效果, 并对多元地质统计学的应用前景做了可行性展望。这成为目前我国应用协同克里金法中资料比较完整的一个典型案例。

空间变异性与尺度(scale)有关, 是水文学、土壤学科的前沿性课题。本书还对不同条件下尺度效应、空间异质问题的各向同性近似, 套合结构模型简化、非规则采样条件下正则化、大面积区域土壤墒情预报和 ET_0 的最优等值线图绘制技术做了大区域复杂条件的具体应用。对于结构性较弱而随机性较强的空间信息分布问题, 提出了适合用随机理论的最大熵谱分析方法研究揭示其空间变异性。

在对国外条件模拟(conditional simulation)理论及其多种方法分析研究的基础上, 选择 Matheron 首创的转向带(turning band)法, 进行了二维空间的水盐信息的条件模拟, 并与普通克里金法估值比较。结果表明, 条件模拟的突出优点是在非实测点上的模拟值能处于某一合理范围, 能较好地重现信息的离散性和波动性, 可消除普通克里金法的强烈平滑效应。但从估计方差的角度看, 模拟值不如普通克里金估计更接近试验值, 故模拟值并非最优估计量。因此, 这两种方法各有不同优缺点, 不能相互替代。由于模拟与估计的目标不同, 因此必须结合使用才能发挥地质统计学的全部威力。在掌握了一定距离(如中尺度)若干控制点试验值以后, 利用条件模拟技术可模拟控制点间(如小尺度)资源信息的空间变异动态。转向带法虽是目前能在大尺度网格(如 20 000 个节点)上实现模拟的高效方法, 但只适合于平稳的、具辐射状对称协方差的函数结构, 在 n 维空间的模拟只是近似的, 加之要进行两次相反方向的空间变换, 受各向异性影响较大。

为了改善转向带法的适用性, 在我国首次引进了协方差矩阵 LU 三角分解(LU triangle decomposition)法。该法适用于中等尺度(如 700 个以下的网格节点)。LU 三角分解法不仅原理简明, 计算精度高, 而且由于条件化和模拟同时进行, 对数据结构分布无明显特殊要求, 易于使用, 并可避免转向带法与快速傅里叶变换(fast Fourier transform)

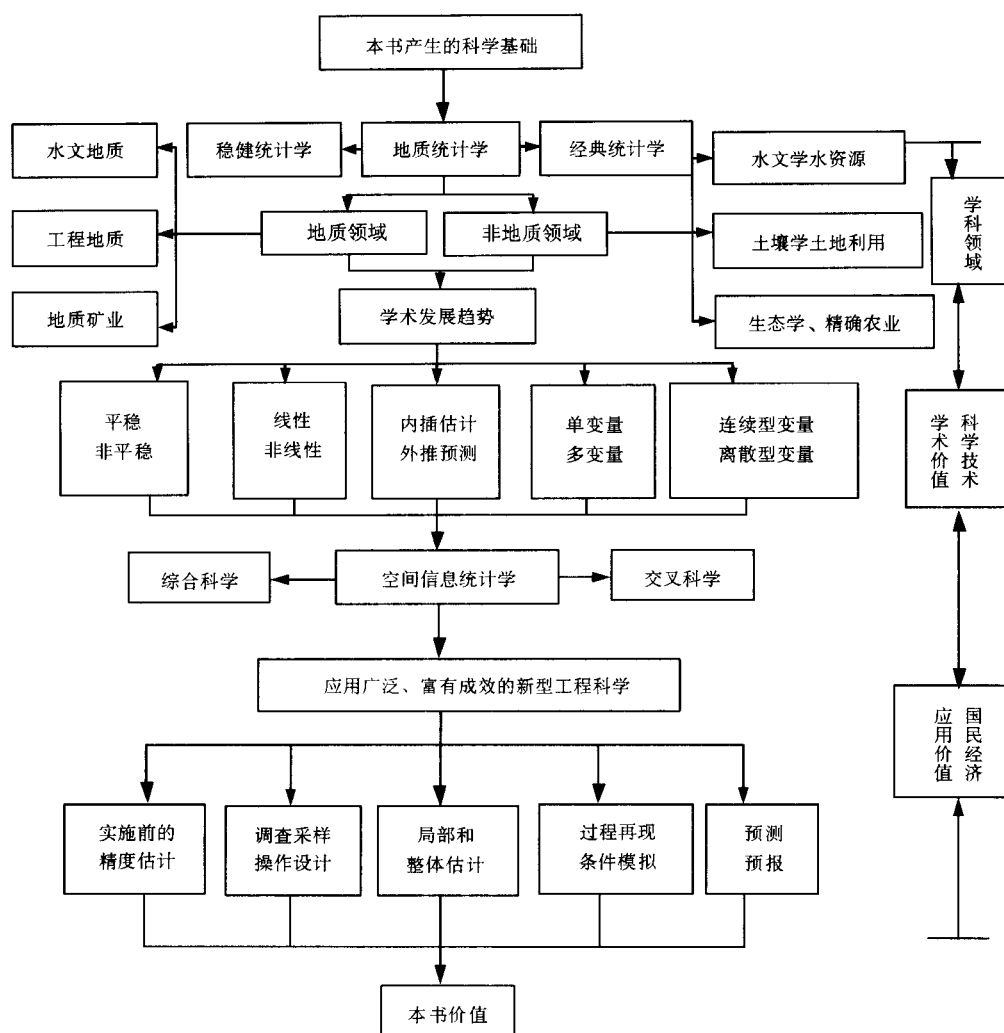
法的一些缺点。实践证明,该法是中等尺度网格或非规则网格条件模拟的较好方法。对于超过 700 个网格节点的问题,可以通过移动计算窗口方法解除该法限制。该法具有广泛的应用前景。

由于条件模拟本质上是一种蒙特卡洛模拟试验,对于随机抽样试验过程,为了实现一维协方差函数的离散和向积分基台值的渐近具高密度的离散逼近趋势,虽然 Journel 曾建议离散逼近的随机数系列长度的选择一般大于 20,但并未指出其上限,也未涉及随机种子数的取值及信息特征(如离散方差)对模拟效果的影响,所以条件模拟实际应用有一定困难。本书对这种新的蒙特卡洛试验技术做了一些较深入的补充与完善。冻土条件下的一维非饱和带采样与模拟表明,土壤水分和盐分在不同深度定位点、不同冻融期有相似模拟规律,当随机种子数为定值,系列长度为 20~100 时土壤水分条件模拟的均值与离散方差比较稳定并接近于试验值。但对于土壤盐分,随机种子数逐渐增大时,模拟值才逐渐平稳。当随机种子数大于 100 时条件模拟结果才较稳定。而当条件模拟的信息目标不同时,随机模拟应根据水、盐特征不同时的系列长度与随机种子数取值区别对待,这有利于提高计算效率和模拟效果。条件模拟对蒙特卡洛模拟技术做了具体量化与完善深化。

为了解决高度非线性问题的曲线拟合,对于蒙特卡洛模拟的空间插值探讨了人工神经网络克里金(artificial neural networks Kriging)法。从数据模拟角度看,人工神经网络克里金法能较好克服普通克里金法的平滑效应,改善试验变异函数的常规最优拟合方法,使模拟值与试验值接近,较好反映数据的波动性,具有条件模拟功能。随着样本容量增大,其估计精度可不断提高。因此,人工神经网络克里金法优于普通克里金法,是一种可改善特异值处理的空间变异预测新方法。在具有协同因子条件下,还可以发展人工神经网络协同克里金法。

当观测数据中存在特异值并导致非正态分布时,信息的非稳健性可能使估计方法的性能很快降低,甚至出现谬误结果。为了加强空间变异信息处理的基础理论研究,研究人员将稳健统计学引入地质统计学之中,形成稳健地质统计学,提出了在分析影响点(influence point)的基础上评估识别特异值(outlier),并对两种常见的特异值识别与处理方法及调控技术做了较深入的比较研究。研究人员在处理特异值基础上寻求稳健型变异函数或直接引进非传统(non Matheron)的新稳健变异函数模型进行两种及三种方法相互结合的试探。针对水盐时空变异的试验条件,筛选了不同时期、不同目标的相应稳健估计方法和抑制特异值的相应技术,获得较好效果,有助于其应用理论研究基础的加强和对复杂问题的适应能力的开发,可用于开拓区域性水盐动态监测。

本书的特点是在水土科学领域对地质统计学的“估计”和“模拟”两个主要方面做了较全面的开拓研究和比较研究,用稳健统计学理论处理空间信息的有效数据,有助于获得稳健变异函数及加强空间变异性研究基础,对水土科学应用地质统计学在内容和技术方面做了一定开拓、完善、创新,并对学科的一些前沿问题做了初步探讨。陈亚新教授主持的 3 项研究课题构成理论、方法和技术内容配套的科学技术集成,促进了新兴科学在非地质领域的应用开拓和创新,具有较好的学术价值和广泛的应用前景。关于本书的科学基础及学术价值和应用前景详见下页框图。



本书的学术价值与应用价值图

将地质统计学引入水土科学还有待进一步补充与完善。水土科学领域的信息不但受空间格局的影响，还受时间尺度的影响，本书虽做了一些研究，但仍很不够，要在时空因子的联合估计及因子克里金方面做补充和扩展，才能更适合水土资源的特点。将其用于水土资源的时空变异揭露时，要注意其地学背景的分析，以便对其成土原因、土壤结构、生态学原理及环境响应做出机理性的解释，当然二者的难度不在同一水平上，这也是目前研究薄弱之处。利用地质统计学并非仅是建立模型而已，否则将可能导致变异函数的误用或出现伪相关。地质统计学的理论与方法是一种资源与储量信息的严格精确估计，选用这种方法需要根据目标的性质、生产实践的要求、经济与学术意义的具体条件做出决策。此外，它还受到不同应用领域理论和方法的挑战。任何一种统计学都是用有序的模型描述无序的事件的一种不确定的理论。空间信息统计学虽是诸多地学科学所研究的主题之一，但到目前为止还没有一种完整的理论体系可用于处理地学中的各种不确

定性问题。若干现有理论中包括的地质统计学虽被公认可较好地处理地学中的不确定性问题,但每种理论都有其使用范围,只能处理其中不确定性的一部分。用地质统计学处理空间信息并描述连接空间内的统计过程的一个重要应用是可以根据一系列样本预测资源的数量和品位含量,它既模拟空间趋势,又描述其相关关系。这种相关关系或变异关系将影响空间模型的估计预测和模型设计,必须满足地质统计学的使用条件,即区域化变量只存在于一定的空间范围之内并满足二阶平稳假设和本征假设,并处于新兴和发展之中。

地质统计学在时空信息领域中的应用与开发,最终还是需要人们在水土科学自身的研究与探索中依靠实践去检验,并做出科学的判断。本书的研究成果是阶段性和初步的,还需要在科学和技术进步的长河中继续不断地探索,进一步深入和发展。

本书由陈亚新、史海滨、魏占民、徐英、屈忠义、刘全明、霍星撰写。科研工作的主要参加人员还有内蒙古农业大学的潘和平、陈慧新、田圃德、杨贵羽,巴彦淖尔市水利科学研究所的张建国、张新林、刘贵义,解放闸灌域管理局沙壕渠试验站的李延林、张艺强等。全书由陈亚新负责统稿。

感谢武汉大学张蔚榛院士、清华大学雷志栋教授、北京科技大学侯景儒教授等对本书的细心审阅。

感谢中国工程院茆智院士在百忙中为本书作序。

本书出版得到国家自然科学基金委员会研究成果专著出版基金(50244911)资助,由陈亚新教授主持的3项课题还得到了内蒙古自治区水利厅、内蒙古河套灌区管理总局的资助,有关冻土研究的本底资料由日本文部省资助的中日合作科研项目(“寒冷干燥地区土壤盐害防治”)成员、日本岡山大学赤江刚夫教授、冀北平教授协助提供。在此一并表示感谢。

限于作者水平,本书有不够完善和欠妥之处,请读者批评指正。

作 者

2004年12月30日

目 录

序

前言

1 空间变异预测理论在水土资源系统中的应用与进展	1
1.1 国外的应用与发展	1
1.1.1 土壤水资源	1
1.1.2 地下水资源	2
1.1.3 大气降水和地面水资源	3
1.2 我国的应用与发展	3
1.2.1 土壤水资源	3
1.2.2 地下水资源	4
1.2.3 大气降水和地面水资源	5
1.3 小结	5
2 土壤水盐空间变异信息的统计特征	6
2.1 采样系统设计	6
2.1.1 试验区 I 采样网格的设计	6
2.1.2 试验区 II 采样网格的设计	7
2.1.3 试验区 III 采样点的设计	8
2.2 试验原始资料分析	9
2.2.1 土壤水盐原始试验资料的统计特性分析	9
2.2.2 采样数的精度分析	10
2.2.3 试验区 I、II 土壤水分和盐分的频数分布	10
2.3 试验区样本信息统计特征	12
2.3.1 方向变异性	12
2.3.2 以试验区 II 为例	12
2.4 盐分组分的变异模型及方向性变异指标	14
2.4.1 小尺度盐分及各离子组分的变异函数 $\gamma(h)$ 模型	14
2.4.2 变差函数的方向变异指标	14
2.5 土壤水盐空间变异尺度效应的研究	16
2.5.1 尺度效应的概念及其研究的意义	16
2.5.2 采样网格设计	17
2.5.3 地质统计学分析方法	18
2.5.4 土壤水盐的尺度效应研究	19
2.6 小结	23
3 土壤水盐合理采样设计与蒙特卡洛模拟检验	25
3.1 合理采样数目的概念与评估方法	25
3.1.1 正态分布法	25

3.1.2 t 分布法	27
3.2 实测样本的合理采样数目	34
3.3 合理采样数目的蒙特卡洛模拟检验	35
3.3.1 抽样处理及方案	40
3.3.2 抽样样本的方差分析	43
3.3.3 抽样分布检验	50
3.4 土壤盐分的合理采样数	53
3.4.1 采样系统	53
3.4.2 试验方法	54
3.4.3 采样结果	54
3.4.4 合理采样数评估	55
3.5 小结	55
4 克里金估计的基本理论与实践	56
4.1 渠床土壤入渗率空间变异性的普通克里金估计	56
4.1.1 点的克里金插值原理	56
4.1.2 试验方法	57
4.1.3 渠床土壤入渗特性的空间变异性	58
4.1.4 一维空间点的克里金插值规则	63
4.2 农田土壤水分空间变异性的泛克里金估计	66
4.2.1 泛克里金法原理	67
4.2.2 试验区的采样系统	69
4.2.3 变差函数的确定	69
4.2.4 普通克里金法与泛克里金法的应用成果对比	70
4.3 盐溶质及其离子含量空间变异的协同克里金估计	72
4.3.1 协同克里金原理与应用	73
4.3.2 试验的采样系统	75
4.3.3 协同克里金估计案例与分析	75
4.4 小结	78
5 大区域的预测理论与实践	81
5.1 土壤水分空间变异的套合结构模型与估计	81
5.1.1 土壤水分的空间变异性	81
5.1.2 变异函数结构性分析	85
5.1.3 区域信息估值	86
5.2 土壤水盐特性空间变异的各向同性近似	89
5.2.1 各向异性条件下稳健的理论变异函数(套合)模型	89
5.2.2 采样网格设计	90
5.2.3 土壤水盐空间变异各向同性近似的可能性	90
5.2.4 与各向异性条件下的对比评估	91
5.3 西辽河平原大尺度土壤墒情的空间变异性与估计	95
5.3.1 试区自然条件与采样系统	96
5.3.2 土壤墒情信息的空间变异性	97
5.3.3 土壤水分信息的大面积区域预测	99
5.3.4 土壤墒情区域预报应用	101

5.4	大尺度区域非规则采样 ET_0 的最优等值线图的克里金方法	103
5.4.1	参考作物 ET_0	103
5.4.2	研究条件	107
5.4.3	ET_0 成果	107
5.4.4	普通克里金法	108
5.4.5	区域信息正则化	109
5.4.6	最优 ET_0 等值线图绘制	110
5.5	最大熵谱分析在水盐空间变异监测中的应用	112
5.5.1	概述	112
5.5.2	试验采样设计与采样结果	113
5.5.3	应用理论及计算方法	113
5.5.4	土壤水、盐的最大谱分析实例	116
5.6	小结	117
6	条件模拟理论与实践	120
6.1	条件模拟方法与技术进展及在水土资源中的应用	120
6.1.1	概述	120
6.1.2	技术进展	121
6.1.3	在水土资源系统中的应用	123
6.2	冻土水盐时空变异的一维条件模拟	125
6.2.1	条件模拟的基本原理	125
6.2.2	试验采样系统	127
6.2.3	模拟过程	127
6.2.4	成果与讨论	127
6.3	水盐空间变异二维条件模拟的转向带法应用	131
6.3.1	转向带法的基本原理	131
6.3.2	实例分析	133
6.4	水盐空间变异条件模拟的协方差矩阵上下三角分解法应用	137
6.4.1	上下三角分解法的原理	138
6.4.2	采样网格设计	141
6.4.3	土壤水分和盐分的条件模拟	141
6.5	小结	146
7	水盐空间变异数据的稳健性分析与估计	148
7.1	稳健型水盐变差函数的逼近原理与主要方法	148
7.1.1	稳健型变异函数逼近原理	148
7.1.2	特异值处理的影响系数	149
7.1.3	稳健变异函数直接推求法	150
7.1.4	理论变差函数模型的检验	152
7.2	水盐空间变异数据的稳健分析及稳健型变异函数的推求	152
7.2.1	试验数据频数分布直方图	153
7.2.2	稳健型变异函数的逼近计算	153
7.2.3	稳健变差函数的特点	155
7.3	空间信息影响点和特异值的识别、处理及调控技术	156
7.3.1	空间信息影响点的识别原理及方法	157

7.3.2	案例 I 研究与分析	157
7.3.3	空间信息特异值识别、处理方法	159
7.3.4	案例 II 研究与分析	160
7.3.5	空间信息影响点与特异值识别方法的比较	163
7.4	小结	164
8	人工神经克里金法在冻土水盐一维空间的估值	166
8.1	概述	166
8.2	人工神经克里金网络	167
8.2.1	网络结构设计	167
8.2.2	网络结构选取	168
8.3	结果对比分析	169
8.3.1	训练模拟结果对比分析	174
8.3.2	检验结果对比分析	175
8.3.3	估值结果对比分析	175
8.3.4	变异函数对比分析	175
8.3.5	统计参数对比分析	178
8.4	人工神经协同克里金法的提出	178
8.4.1	冻土盐分相关分析与神经协同克里金输入因子的确定	178
8.4.2	神经协同克里金模型的建立与检验	179
8.4.3	结果分析	183
8.5	小结	185
9	人工神经网络模型的区域性土壤水盐环境动态监测	187
9.1	采样系统设计	187
9.2	数据计算与分析	188
9.2.1	BP 网络技术原理	188
9.2.2	计算方案	189
9.2.3	计算成果	190
9.2.4	成果分析	197
9.3	小结	198
	主要参考文献	199

Contents

Foreword

Preface

1	Application and advance of spatial variability prediction theory in soil and water resources system	1
1.1	Foreign application and advance	1
1.1.1	Soil water resources	1
1.1.2	Ground water resources	2
1.1.3	Precipitation and surface water resources	3
1.2	Domestic application and advance	3
1.2.1	Soil water resources	3
1.2.2	Ground water resources	4
1.2.3	Precipitation and surface water resources	5
1.3	Brief summary	5
2	Statistical properties of spatial variability information of water and salt in soil	6
2.1	Sampling system design	6
2.1.1	Sampling grid design in study area I	6
2.1.2	Sampling grid design in study area II	7
2.1.3	Sampling grid design in study area III (frozen soil)	8
2.2	Analysis of original experimental data	9
2.2.1	Analysis of statistical properties of water and salt in soil	9
2.2.2	Analysis of precision of sampling number	10
2.2.3	Frequency distribution of water and salt in soil at study area I and II	10
2.3	Statistical properties of samples in study areas	12
2.3.1	Directional variability	12
2.3.2	Case study (study area II)	12
2.4	Indexes of variability models and directional variability in salt constituents	14
2.4.1	Variograms model of salt and its ions at small scale	14
2.4.2	Directional variability indexes of variogram	14
2.5	Scale effect of spatial variability of water and salt in soil	16
2.5.1	Concept of scale effect and its significance	16
2.5.2	Sampling grid design	17
2.5.3	Analysis method of geostatistics	18
2.5.4	Scale effect of water and salt in soil	19
2.6	Brief summary	23
3	Rational sampling desing and Monte Carlo simulation of water and salt in soil ...	25

3.1	Concept of rational sampling number and its evaluation method	25
3.1.1	Normal distribution method	25
3.1.2	t distribution method	27
3.2	Rational sampling number of measured samples	34
3.3	Test of rational sampling number by Monte Carlo simulation	35
3.3.1	Sample treatment and its scheme	40
3.3.2	Variance analysis of samples	43
3.3.3	Test of sampling distribution	50
3.4	Rational sampling number of water and salt in soil	53
3.4.1	Sampling system	53
3.4.2	Experimental	54
3.4.3	Sampling results	54
3.4.4	Evaluation of rational sampling number	55
3.5	Brief summary	55
4	Basic theory and practice of Kriging estimation	56
4.1	Ordinary Kriging estimation of spatial variability of infiltration ratio into canal bed	56
4.1.1	Point Kriging interpolation theory	56
4.1.2	Experimental method	57
4.1.3	Spatial variability of infiltration ratio into canal bed	58
4.1.4	1-D point Kriging interpolation rule	63
4.2	Universal Kriging estimation of spatial variability of farm field water in soil	66
4.2.1	Principle of universal Kriging estimation	67
4.2.2	Sampling system in study area	69
4.2.3	Variogram determination	69
4.2.4	Comparison of application results by ordinary Kriging and universal Kriging	70
4.3	Co-Kriging estimation of spatial variability of salt and its ions	72
4.3.1	Principle and application of co-Kriging estimation	73
4.3.2	Sampling system	75
4.3.3	Case study and analysis of co-Kriging estimation	75
4.4	Brief summary	78
5	Prediction theory and practice of Kriging estimation in large area	81
5.1	Nested sturcture model and estimation of spatial variability of soil water	81
5.1.1	Spatial variability of soil water	81
5.1.2	Analysis of variogram structure	85
5.1.3	Regional information estimation	86
5.2	Isotropy approximation of spatial variability of water and salt in soil	89
5.2.1	Robust theoretical variogram model (nested) in anisotropy condition	89
5.2.2	Sampling grid design	90
5.2.3	Possibility of isotropy approximation of spatial variability of water and salt in soil	90
5.2.4	Estimation of comparison with anisotropy condition	91
5.3	Spatial variability and estimation of soil moisture on large scale at Xiliao River	