



WUHAN UNIVERSITY PRESS  
武汉大学出版社



# 空间信息的尺度 不确定性 与融合

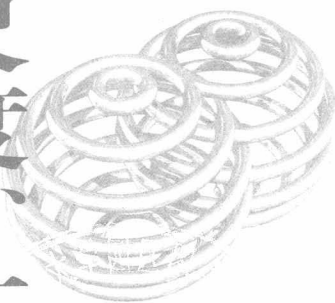
武  
汉  
大  
学  
学  
术  
丛  
书

Academic Library

张景雄 著

Wuhan University

国家重点基础研究发展计划 (973计划) 资助项目 (2007CB714402)  
国家重点基础研究发展计划 (973计划) 资助项目 (2006CB701302)



# 空间信息的尺度、不确定性 与融合

武汉大学学术丛书

张景雄 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS  
武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

空间信息的尺度、不确定性与融合/张景雄著. —武汉: 武汉大学出版社, 2008. 12

武汉大学学术丛书

ISBN 978-7-307-06658-8

I. 空… II. 张… III. 地理信息系统—研究 IV. P208

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 167241 号

责任编辑: 王金龙      责任校对: 刘 欣      版式设计: 支 笛

---

出版发行: 武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件: cbs22@whu.edu.cn 网址: www.wdp.com.cn)

印刷: 武汉中远印务有限公司

开本: 720 × 980 1/16      印张: 20.75      字数: 291 千字      插页: 3

版次: 2008 年 12 月第 1 版      2008 年 12 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-307-06658-8/P · 141      定价: 45.00 元

---

版权所有, 不得翻印; 凡购我社的图书, 如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 请与当地图书销售部门联系调换。



武汉大学学术丛书  
自然科学类编审委员会

主任委员 ▶ 刘经南  
副主任委员 ▶ 卓仁禧 李文鑫 周创兵  
委员 ▶ (以姓氏笔画为序)

|     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|
| 文习山 | 石 兢 | 宁津生 | 刘经南 |
| 李文鑫 | 李德仁 | 吴庆鸣 | 何克清 |
| 杨弘远 | 陈 化 | 陈庆辉 | 卓仁禧 |
| 易 帆 | 周云峰 | 周创兵 | 庞代文 |
| 谈广鸣 | 蒋昌忠 | 樊明文 |     |

武汉大学学术丛书  
社会科学类编审委员会

主任委员 ▶ 顾海良  
副主任委员 ▶ 胡德坤 黄 进 周茂荣  
委员 ▶ (以姓氏笔画为序)

|     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|
| 丁俊萍 | 马费成 | 邓大松 | 冯天瑜 |
| 汪信砚 | 沈壮海 | 陈庆辉 | 陈传夫 |
| 尚永亮 | 罗以澄 | 罗国祥 | 周茂荣 |
| 於可训 | 胡德坤 | 郭齐勇 | 顾海良 |
| 黄 进 | 曾令良 | 谭力文 |     |

秘书长 ▶ 陈庆辉



## 张景雄

1964年11月出生于湖北新洲，1981年9月考入原武汉测绘学院航空摄影测量专业学习，1985年9月至1988年6月在原武汉测绘科技大学攻读硕士学位，1988年6月留校任教。1992年9月由国家教育委员会公派赴英国爱丁堡大学攻读博士学位，1997年4月学成回校工作，任副教授。2000年至2003年，由单位公派自费赴美国加利福尼亚大学圣芭芭拉分校、美国国家地理信息与分析中心从事博士后研究，专攻地理信息科学的基础研究。2003年至2005年在美国宇航局(NASA)的哥达德空间飞行中心(Goddard Space Flight Center)从事MODIS陆地信息产品的质量分析等方面的研发工作。2005年应聘回国工作，现任武汉大学遥感信息工程学院教授。

长期研究兴趣是遥感与GIS集成、空间分析、地统计学(geostatistics)、空间不确定性、尺度、空间信息融合、时间序列分析、遥感信息真实性检验(validation)、遥感定量方法等。最具有代表性的成果是与美国科学院院士Goodchild教授出版了专著《Uncertainty in Geographical Information》(Taylor & Francis, 2002)。该书作为第一本全面反映不确定性课题过去十五年来的科研成就而填补了一个非常重要的空白。书中许多实例来自博士论文，而更多的内容是从浩瀚的文献中整理加工而成。大部分实例归入空间分析应用。另一个重要研究方向是空间数据套合(spatial data conflation)，即对同一现象不同数据表达的合成。这是影像处理中有关融合的一种概括，适用

作者简介

于各种空间数据,包括矢量和栅格。近年来,从事对地观测与地球空间信息领域的地学抽象、表达、量测、分析、建模等基础研究和应用基础研究,如空间信息逻辑框架、尺度模型、真实性检验、不确定性、土地覆盖、生态环境建模、影像/空间信息论等。

曾讲授了城市空间信息系统、摄影测量原理、地理信息系统、高等统计概论和空间信息技术集成(双语课)等本科生和研究生课程。正在撰写国家“十一五”规划教材《地理信息科学与技术》(Geographic Information Systems and Science)。

他是国际计量地理学领域知名学术期刊《地理分析》(Geographical Analysis)编委。该期刊位列地理学研究领域的学术期刊之首,是最常为引用的;它刊登有关地理理论的数学或非数学阐述以及分析范式的论文,主导方向是空间数据分析、空间计量经济学以及空间统计学。他是国际自然资源与环境科学领域空间精度研究协会指导委员会成员(member of the Steering Committee, International Spatial Accuracy Research Association, <http://www.spatial-accuracy.org>)。他还是 International Journal of Geographical Information Science, International Journal of Remote Sensing, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, The Annals of the Association of American Geographers, Computers, Environment and Urban Systems, European Journal of Soil Science等国际学术期刊的审稿专家。

# 前言

21 世纪是科学与技术一体化的信息时代,随着遥感技术、全球定位系统、因特网和地理信息系统等现代化信息技术之间的相互渗透,逐渐形成了以地理信息系统为中心的集成化的技术系统。地理信息系统作为传统学科(如地理学、地图学和测量学等)与现代科学技术(如遥感技术、计算机科学等)相结合的产物,正在逐步发展成为一门处理空间数据的现代化综合性学科。Michael Goodchild 教授于 1992 年提出了地理信息科学(geographic information science)的概念。这一概念的提出是空间信息科学发展历程中极具里程碑意义的转折点,也是地理信息系统技术及其应用发展的必然要求;它是人们不再满足于仅仅利用计算机技术对地理信息进行可视化表达及空间查询,而强调地理信息系统的空间分析和模拟能力时应运而生的产物;它在注重空间信息技术发展的同时,还注意到与空间信息有关的理论问题,包括地学信息时空特征(如尺度)、信息传输机理、空间分析与建模的不确定性等。理论的深入探讨和方法的日臻完善使得地球空间信息科学跨越了 GIS 作为空间信息技术的局限性,逐步发展成为一门独特的科学。

伴随着信息源的多样化、技术的不断进步、产业链的形成与完善

等, GIS 的发展格局号召人们从更高层次上关注地理空间基础理论的研究, 以指导这一空间信息集成化技术体系的完善, 促进应用水平的提高和应用领域的延伸。只有完善的技术体系与完备的科学理论相结合, 新世纪地理信息系统的科学基础才能更臻成熟。因此, 本书的重点在于阐明地球空间信息尺度、不确定性和集成的理论体系, 为空间信息系统和技术的正确运用及其应用成果的评价提供科学依据。

空间信息需要空间化的集成处理策略, 地质统计学 (geostatistics) 正是构筑空间信息尺度模型和集成方法论的一块基石。本书是作者投身于地质统计学学习和研究十余载的阶段性感悟与成果, 着眼于研修方向的广度和深度的均衡发展。在作者本人的学术成长道路上, 有关空间信息技术 (如摄影测量与遥感)、地理科学、地质统计学、空间分析等方面的知识积淀和能力提高是循序渐进的, 作者有幸成为一名学术海洋的拾贝者并且庆幸有机会将这些学术成长轨迹以文字的形式加以反映。本书在筹备过程中参考了国内外大量的相关文献, 同时融入了作者自己的相关研究成果, 希望能为相关领域的读者提供指引和帮助。

本书在构思、立项和撰写过程中得到了许多专家和领导的大力支持与帮助, 其中包括中国科学院院士、中国工程院院士李德仁教授, 中国工程院院士、武汉大学校长刘经南教授, 中国工程院院士宁津生教授, 美国科学院院士 Michael Goodchild 教授, 中国工程院院士张祖勋教授, 中国科学院院士李小文教授, 中国测绘科学研究院科学技术委员会主任林宗坚教授, 中国基础地理信息中心主任陈军教授, 中国科学院遥感所所长顾行发教授, 香港中文大学林珪教授, 武汉大学遥感信息工程学院院长万幼川教授、于子松书记, 张剑清教授, 舒宁教授, 袁修孝教授 University of Nottingham 的 Giles Foody 教授, USFS (美国林业服务局) 的 Robert Bailey 博士, Rutgers University 的 David Robinson 教授, University of Southampton 的 Peter Atkinson 教授, University of California 的 Phaedon Kyriakidis 教授, Wageningen University 的 Gerard Heuvelink 教授等。武汉大学遥感信息工程学院的领导和老师们对作者的教学和科研工作给予了大力支持和帮助; 武

武汉大学遥感信息工程学院的博士生姚娜同学为本书的完稿付出了艰辛的努力;张金平等研究生协助完成了文字处理和英文翻译的浩繁工作。武汉大学出版社的编辑王金龙同志为本书的及时出版提供了大力帮助。作者的家人对其所从事的基础型研究的清苦予以充分的理解和支持,常年过着平淡和简朴的生活,使人心里沉甸甸的,也催人奋进。作者对专家们、领导们、同事们、朋友们和亲人们一如既往的关心、支持和帮助表示由衷的感谢!

本研究得到了两个国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目课题“地表时空变化特征参数的遥感定量描述与尺度转换(2007CB714402)”与“遥感几何物理成像模型与一体化求解方法(2006CB701302)”的联合资助。

由于作者水平有限,书中错误疏漏难免,恳请读者批评指正。

张景雄

2008 年 9 月 于武昌珞珈山

|    |       |               |    |
|----|-------|---------------|----|
| 01 | ..... | 第一章 绪论        | 1  |
| 02 | ..... | 第二章 空间数据模型    | 23 |
| 03 | ..... | 第三章 空间数据集成    | 5  |
| 04 | ..... | 第四章 空间数据尺度    | 8  |
| 05 | ..... | 第五章 空间数据不确定性  | 14 |
| 06 | ..... | 第六章 空间数据内容介绍  | 19 |
| 07 | ..... | 第七章 空间数据模型    | 23 |
| 08 | ..... | 第八章 空间数据集成    | 5  |
| 09 | ..... | 第九章 空间数据尺度    | 8  |
| 10 | ..... | 第十章 空间数据不确定性  | 14 |
| 11 | ..... | 第十一章 空间数据内容介绍 | 19 |

## 目 录

|                 |    |
|-----------------|----|
| 第 1 章 概述        | 1  |
| 1.1 空间信息        | 1  |
| 1.2 空间信息集成      | 5  |
| 1.3 尺度          | 8  |
| 1.4 不确定性        | 14 |
| 1.5 内容介绍        | 19 |
| 第 2 章 空间数据模型    | 23 |
| 2.1 概述          | 23 |
| 2.2 场           | 26 |
| 2.2.1 模型        | 26 |
| 2.2.2 地形因子      | 31 |
| 2.3 对象          | 36 |
| 2.3.1 模型        | 36 |
| 2.3.2 矢量数据结构    | 40 |
| 2.3.3 若干几何及拓扑操作 | 44 |
| 2.4 讨论          | 47 |

|                                         |    |
|-----------------------------------------|----|
| 第3章 数理统计基础 .....                        | 49 |
| 3.1 概述 .....                            | 49 |
| 3.2 随机事件与概率 .....                       | 50 |
| 3.2.1 随机事件 .....                        | 50 |
| 3.2.2 概率 .....                          | 52 |
| 3.2.3 概率模型 .....                        | 53 |
| 3.2.4 条件概率、概率的乘法公式、全概率公式、Bayes 公式 ..... | 54 |
| 3.2.5 事件的独立性 .....                      | 55 |
| 3.3 随机变量及其分布 .....                      | 56 |
| 3.3.1 随机变量的定义 .....                     | 56 |
| 3.3.2 随机变量的分布函数 .....                   | 57 |
| 3.3.3 离散型随机变量 .....                     | 58 |
| 3.3.4 连续型随机变量 .....                     | 59 |
| 3.3.5 二维随机变量 .....                      | 60 |
| 3.4 随机变量的数字特征 .....                     | 64 |
| 3.4.1 数学期望 .....                        | 64 |
| 3.4.2 方差 .....                          | 65 |
| 3.4.3 几种重要随机变量分布的数学期望及方差 .....          | 66 |
| 3.4.4 协方差及相关系数、矩 .....                  | 66 |
| 3.5 大数定律和中心极限定理 .....                   | 68 |
| 3.5.1 大数定律 .....                        | 68 |
| 3.5.2 中心极限定理 .....                      | 70 |
| 3.6 统计推断基础 .....                        | 71 |
| 3.6.1 统计推断的几个基本概念 .....                 | 72 |
| 3.6.2 统计量的描述 .....                      | 73 |
| 3.6.3 统计量的分布 .....                      | 76 |
| 3.7 区间估计 .....                          | 77 |
| 3.7.1 点估计 .....                         | 77 |
| 3.7.2 估计量的评价标准 .....                    | 77 |
| 3.7.3 区间估计 .....                        | 78 |
| 3.8 假设检验 .....                          | 79 |

|                           |               |     |
|---------------------------|---------------|-----|
| 3.8.1                     | 假设检验的基本概念     | 79  |
| 3.8.2                     | 正态总体参数的假设检验   | 80  |
| <b>第4章 空间变异与分析</b> 83     |               |     |
| 4.1                       | 概述            | 83  |
| 4.2                       | 随机函数          | 84  |
| 4.3                       | 区域化变量         | 85  |
| 4.4                       | 协方差函数和变异函数    | 87  |
| 4.4.1                     | 协方差函数         | 87  |
| 4.4.2                     | 变异函数          | 87  |
| 4.4.3                     | 协方差函数和变异函数的关系 | 89  |
| 4.5                       | 内蕴假设及平稳假设     | 91  |
| 4.5.1                     | 内蕴假设          | 91  |
| 4.5.2                     | 平稳性假设         | 92  |
| 4.6                       | 估计方差          | 93  |
| 4.7                       | 离差方差          | 98  |
| 4.8                       | 变异函数及结构分析     | 99  |
| 4.8.1                     | 变异函数的性质       | 100 |
| 4.8.2                     | 变异函数的理论模型     | 100 |
| 4.8.3                     | 结构分析          | 104 |
| <b>第5章 空间预测: 克里格法</b> 116 |               |     |
| 5.1                       | 概述            | 116 |
| 5.2                       | 克里格法的基本原则     | 117 |
| 5.3                       | 普通克里格法        | 118 |
| 5.3.1                     | 简单克里格法与普通克里格法 | 118 |
| 5.3.2                     | 普通克里格法的解算过程   | 119 |
| 5.3.3                     | 点克里格的计算实例     | 124 |
| 5.3.4                     | 块段普通克里格的计算实例  | 128 |

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 5.4 泛克里格法                      | 130 |
| 5.4.1 泛克里格法概述                  | 130 |
| 5.4.2 漂移及其形式                   | 131 |
| 5.4.3 泛克里格法的基本假设及非平稳区域化变量的变异函数 | 132 |
| 5.4.4 点支撑条件下的泛克里格法             | 135 |
| 5.4.5 块段支撑条件下的泛克里格法            | 138 |
| 5.4.6 漂移的估计                    | 143 |
| 5.5 协同克里格法                     | 146 |
| 5.5.1 协同变异函数                   | 146 |
| 5.5.2 协同克里格方程组                 | 147 |
| 5.6 指示克里格法                     | 148 |
| 5.6.1 指示变异函数                   | 148 |
| 5.6.2 指示克里格方程组                 | 149 |
| 第6章 随机模拟与空间不确定性建模              | 151 |
| 6.1 概述                         | 151 |
| 6.2 随机模拟的原理                    | 153 |
| 6.2.1 条件模拟                     | 153 |
| 6.2.2 条件模拟的前提                  | 154 |
| 6.3 序贯高斯模拟                     | 155 |
| 6.3.1 单个变量的模拟                  | 156 |
| 6.3.2 涉及多变量的随机模拟               | 162 |
| 6.4 协同区域化的模拟                   | 164 |
| 6.4.1 共位协同克里格和马尔可夫模型           | 166 |
| 6.4.2 带有外部漂移的克里格法              | 167 |
| 6.4.3 带有趋势模型的克里格法              | 167 |
| 6.4.4 多变量的联合模拟                 | 169 |
| 6.5 块段的模拟                      | 170 |

|                 |                               |     |
|-----------------|-------------------------------|-----|
| 6.5.1           | 模拟点的平均                        | 170 |
| 6.5.2           | 点的非条件模拟和块段为条件化                | 172 |
| 6.5.3           | 块段的直接条件模拟                     | 173 |
| 6.6             | 空间不确定性建模                      | 174 |
| 6.6.1           | 随机模拟与空间不确定性建模                 | 174 |
| 6.6.2           | 实例——矢量数据的误差建模                 | 177 |
| 6.6.3           | 实例——数字摄影测量中 DEM—DOM—DLG 的误差传递 | 183 |
| 第 7 章 尺度模型与尺度转换 |                               | 190 |
| 7.1             | 概述                            | 190 |
| 7.2             | 变异函数的正则化及其求逆                  | 197 |
| 7.3             | 遥感场景离散目标的正则化                  | 202 |
| 7.4             | 土地覆盖专题类别场的尺度转换                | 215 |
| 第 8 章 空间信息集成    |                               | 235 |
| 8.1             | 概述                            | 235 |
| 8.2             | 协同克里格法的深化                     | 239 |
| 8.3             | 数据源误差的处理                      | 245 |
| 8.4             | 回归克里格法                        | 250 |
| 8.5             | 积雪参数数据的套合                     | 254 |
| 第 9 章 时空模型与信息融合 |                               | 260 |
| 9.1             | 概述                            | 260 |
| 9.2             | 卡尔曼滤波原理与算法                    | 262 |
| 9.3             | 卡尔曼滤波的扩展                      | 271 |
| 9.3.1           | 空间维扩展                         | 271 |
| 9.3.2           | 序贯数据同化                        | 274 |
| 9.3.3           | 多尺度空间树模型                      | 276 |
| 9.3.4           | 时空模型                          | 279 |

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 9.4 应用实例 .....         | 282 |
| 第 10 章 结语 .....        | 288 |
| 10.1 尺度 .....          | 288 |
| 10.2 不确定性 .....        | 292 |
| 10.3 时空数据集成与信息融合 ..... | 296 |
| 参考文献 .....             | 300 |

# 第 1 章 概 述

## 1.1 空间信息

空间信息为地学研究、社会经济发展与民生福祉等提供了直接或间接的科技及应用支持。空间信息学界为建造国家空间数据基础设施和数字地球而不懈努力,构建了自身的完整体系,并对科学技术的发展产生了实质影响。这些跨越式发展远远超越了几十年前当计算机仅用来显示和分析数字地图时的局限性,使过去关于栅格和矢量数据结构的争论成为记忆。事实上,空间信息学界更为深远的影响是关于空间信息的新学科在科学意义上的进化,而关于数据结构以及数值算法的概念逐渐过时。为了宽视角地讨论空间信息,我们有必要对地理信息系统(GIS, geographic information systems)的发展历史进行简要的回顾(Longley 等, 2001)。

GIS 的发展历程大多经历了用数字计算机处理和分析地图数据的阶段。GIS 是第一台电子计算机发展和应用许多年后才出现的用于处理地图数据的新技术。20 世纪 50 年代, Coppock 教授用计算机分析了农业地理数据,随后,伦敦大学用计算机分析来自农业人口普

查的大约 50 万条数据记录,并对这些数据进行归类,以满足手工制图的需要。此时,由于受到计算机性能和设备的限制,自动化制图仍缺乏现实基础。60 年代中期,加拿大的 Tomlinson 用计算机完成了某些简单但劳动强度很大的土地详查工作,建立了加拿大地理信息系统(CGIS)。70 年代早中期,地图数字化仪、交互式图形显示设备、绘图仪等设备价格可接受,自动化制图机构随之增加。几乎同期,作为潜在的、方便的与不可替代的地球观测(数据)源,遥感(remote sensing)技术的发展也推动着 GIS 的发展。随着基于多图层的处理技术愈来愈趋向专业化,将遥感信息和其他信息相结合的综合 GIS 系统也就变得愈加重要。如今的 GIS 包含了广泛的图像处理功能和不同类型的遥感数据源,并且可以选择不同功能对其进行处理,尤其在陆地景观动态分析方面,综合 GIS 技术显得更加重要。GIS 是一个技术创新和技术应用的新领域,同时也是一个变化迅速的新领域。毋庸置疑,计算机技术的发展是促进 GIS 快速发展的主要催化剂,这主要表现在计算机硬件、数据存储、显示与管理等方面的改进以及网络技术的发展。

伴随着 GIS 的发展,空间信息的应用不断延伸与深入,其价值也得到越来越多的体现。作为传统学科(如地理学、地图学和测量学等)与现代科学技术(如遥感、计算机科学等)相结合的产物,GIS 正在逐步发展成为一门处理空间数据的现代化综合性学科。Goodchild 教授于 1992 年提出了地理信息科学(geographic information science)的概念,亦称地球空间信息科学(geoinformatics)(Goodchild, 1992)。地理信息科学的提出是地理信息系统技术及其应用发展的必然要求,它强调地理信息系统的空间分析和模拟能力而非可视化和空间查询,着眼于空间信息技术发展,同时更注重有关空间信息的理论问题,如地学信息传输机理、地学信息的时空和多维特征、空间分析与建模及其不确定性等(陈述彭,2001;孙九林,2006)。

随着遥感技术、全球定位系统、因特网和地理信息系统等现代信息技术之间的相互渗透,以地理信息系统为中心的集成化的空间信息技术系统逐渐形成(林珪和龚建华,2002)。高度集成化技术系统的发展、应用的不断扩展给地理空间基础理论研究提出了更高的要