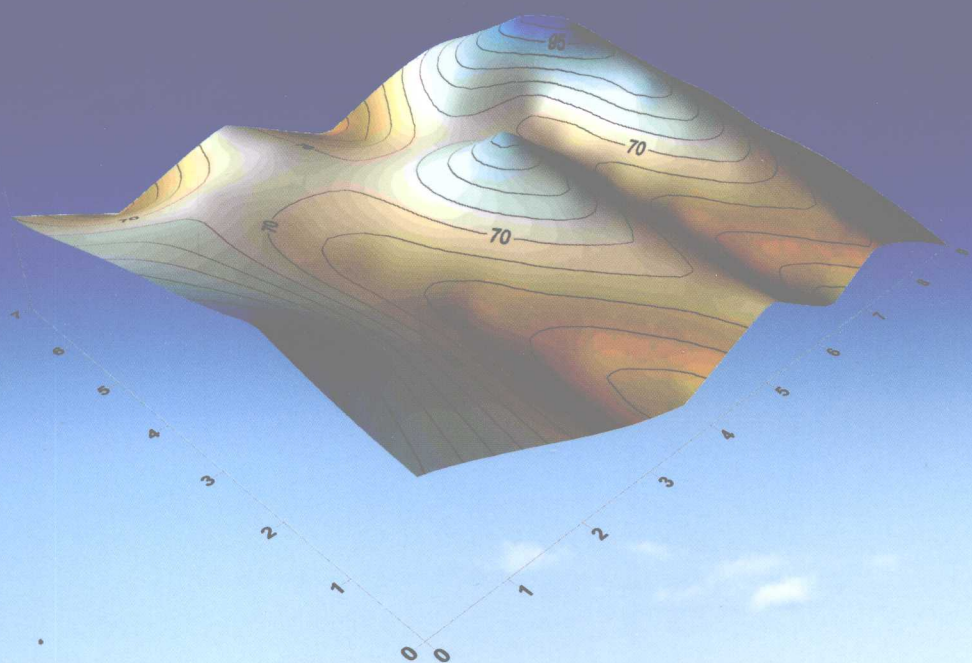


空间统计学理论及其 在林业中的应用

冯益明 编著



中国林业出版社

国家自然科学基金项目 (30500390、30771723)
和国家林业局“948”项目 2006-4-22 项目

空间统计学理论及其 在林业中的应用

冯益明 编著

中国林业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

空间统计学理论及其在林业中的应用/冯益明 编著. - 北京: 中国林业出版社, 2008. 6

ISBN 978-7-5038-5242-8

I. 空… II. 冯… III. 空间科学: 统计学 - 应用 - 林业 IV. S711

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 087725 号

中国林业出版社·环境景观与园林园艺图书出版中心

责任编辑: 吴金友 李 顺

电话: 66176967 66189512 传真: 66176967

出版 中国林业出版社 (100009 北京西城区刘海胡同7号)

E-mail cfphz@public.bta.net.cn 电话 66184477

网址 www.cfph.com.cn

发行 新华书店北京发行所

印刷 北京中科印刷有限公司

版次 2008 年 7 月第 1 版

印次 2008 年 7 月第 1 次

开本 787mm × 1092mm 1/16

印张 13.25

字数 300 千字

印数 1 ~ 2000 册

定价 40.00 元

序

地统计学出现于 20 世纪 50 年代，它是研究某些变量（或特性）的空间分布以及变量在空间位置中相关关系的理论与应用的学科，是空间统计学的主要内容之一。自从它诞生以来，受到许多有关学科，例如地质、探矿、生态学、农业、水文、气象、环境等领域的重视，并已获得广泛应用。

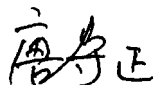
森林是地球上最大的陆地生态系统，它分布广泛，由于森林的自然演替或人为干扰活动都具有空间分布的特点，因此，地统计学应该在林业领域有着广泛的应用前途，应用地统计学可以帮助解决一些林业上有关变量空间分布的技术难题。

在国内，地统计学在林业中应用刚刚起步，还处于探索阶段。绝大多数林业工作者，甚至是林业研究人员对地统计学缺乏基本了解。该书主要内容是作者在完成博士论文以及完成国家林业局“948”项目和国家自然科学基金项目过程中逐渐积淀下来的。本书较为系统地介绍了空间统计学的基本理论、方法及其在林业中应用情况，内容涵盖了区域化变量理论、变异函数及其结构分析、克里格插值、条件模拟、采样策略以及自主研发的林业空间统计分析软件等。在本书的最后一章，作者给出空间统计学及其在林业中的应用案例，这些案例均是作者近年来研究工作的总结，具有示范作用。从应用案例中，读者可以更好地掌握空间统计学理论知识，对其在实际中的应用可以更好地把握。

我相信本书的出版将会促进地统计学方法在林业中更为广泛的应用，并对推动我国林业进一步的发展发挥作用。我相信本书对林学、生态学、土壤、地学等相关专业的研究生、教学和科研人员是一本很好的教材与参考书。

谨在本书出版之际表示祝贺。

中国科学院院士



2008 年 2 月

前 言

空间统计学是近几十年来发展起来的一种新的分析方法，它是以区域化变量理论为基础，以变异函数为基本工具来研究那些分布于空间并呈现出一定的随机性和结构性的自然现象的科学。显然，凡是要研究某些变量（或特征）的空间分布特性并对其进行最优估计，或要模拟所研究对象的离散性、波动性或其他性质时都可应用空间统计学的理论与方法。

在不到 50 年的研究和实践中，该学科已被扩展到分析各种自然现象的空间异质性和空间格局。森林受物理环境、自然干扰、人为干扰、树种特性、树种对干扰的反应等因素及其相互作用的影响，使其具有高度空间异质性和时间异质性。因此，空间统计学在林业领域有着广泛的应用前景。根据编者多年来的研究经验，应用空间统计学可以帮助解决一些困扰林业发展的问题（如森林分布图自动精准绘制、林分测树因子定量估计、采样设计等）。本书的出版，意在促进空间统计学方法在林业中更为广泛的应用。

全书共包括 10 章。第 1 章是绪论；第 2 章主要是统计学方法概述；第 3 章主要介绍区域化变量概念及理论；第 4 章主要介绍变异函数及其结构分析；第 5 章主要介绍空间统计学中空间局部估计（不同克里格方法）的基本理论和方法；第 6 章主要介绍协同克里格与拟协同克里格的基本理论和方法；第 7 章重点介绍随机场产生的方法以及变量的随机模拟；第 8 章重点讨论估值的不确定性和采样策略；第 9 章简要介绍空间统计学软件；第 10 章介绍一些空间统计学在林业中应用实例。

本书部分成果是在完成国家自然科学基金项目（30500390、30771723）和国家林业局“948”项目 2006-4-22 过程中逐渐积淀下来的。在该书完成过程中，得到了有关领导和同仁的大力支持与帮助，谨以本书出版之际，感谢所有对完成书稿给予支持与帮助的领导、同事与同仁。

由于水平有限，实践还不够多，成书过程仓促，书中定有错误与不妥之处，恳请读者批评指正。

冯益明

2008 年 1 月

目 录

序

前 言

第1章 概 论	(1)
1.1 林业中为什么要用空间统计学	(1)
1.2 空间统计学发展历史	(2)
1.3 空间统计学特点	(3)
1.4 林业中应用空间统计学的必要性和现状	(5)
1.5 本书主要内容	(8)
参考文献	(9)
第2章 统计学方法概述	(11)
2.1 单变量基本统计	(11)
2.2 双变量	(16)
参考文献	(21)
第3章 区域化变量理论	(22)
3.1 随机场与区域化变量	(22)
3.2 协方差函数与变异函数	(24)
3.3 平稳假设与本征假设	(27)
3.4 实验变异函数的计算公式	(28)
3.5 估计方差	(32)
3.6 承载效应与离散方差	(37)
3.7 正则化概念及性质	(40)
参考文献	(41)
第4章 变异函数及结构分析	(42)
4.1 变异函数图结构分析	(42)
4.2 变异函数的性质	(43)
4.3 变异函数的功能	(45)
4.4 变异函数模型	(47)
4.5 变异函数的结构分析	(52)

4.6	模型的最优拟合	(61)
4.7	结构分析的一般步骤	(65)
	参考文献	(66)
第5章	克里格估计方法	(68)
5.1	克里格估计方法概述	(68)
5.2	简单克里格 (SK)	(78)
5.3	普通克里格 (OK)	(81)
5.4	对数正态克里格法 (LK)	(85)
5.5	块克里格法 (BK)	(85)
5.6	克里格法综合计算	(87)
5.7	指示克里格法 (IK)	(95)
5.8	泛克里格法 (UK)	(96)
	参考文献	(103)
第6章	协同克里格与拟协同克里格法	(106)
6.1	协同克里格法	(106)
6.2	拟协同克里格法	(115)
	参考文献	(122)
第7章	条件模拟	(124)
7.1	模拟技术产生的背景及其特点	(124)
7.2	转动带模拟	(125)
7.3	LU 三角分解	(126)
7.4	序列指示模拟	(128)
7.5	模拟退火	(129)
	参考文献	(132)
第8章	估值的不确定性和采样策略	(133)
8.1	估值的不确定性	(133)
8.2	采样设计策略	(134)
8.3	样本形状的影响和最佳样块大小	(141)
	参考文献	(146)
第9章	空间统计学软件	(148)
9.1	空间统计学发展状况与趋势	(148)
9.2	林业空间统计学软件设计	(153)
9.3	林业空间统计分析系统简介	(158)
	参考文献	(172)

第 10 章 空间统计学在林业中的应用	(174)
10.1 基于高空间分辨率影像的林分冠幅估计	(174)
10.2 不同密度林分冠幅的遥感定量估计	(178)
10.3 应用空间统计学理论解译遥感影像信息“缺失”区	(184)
10.4 松材线虫病在我国适生性分布的定量估计	(188)
10.5 应用序列指示条件模拟算法模拟森林类型空间分布	(194)
参考文献	(202)

第1章 概 论

1.1 林业中为什么要用空间统计学

空间统计学(Spatial Statistics), 又称地统计学(Geostatistics, 从事地理学方面研究人员称), 亦称地质统计学(从事地质学方面研究人员称), 于20世纪50年代初开始形成, 60年代在法国著名统计学家 Matheron 的大量理论研究工作基础上形成了一门新的统计学分支, 它包括空间结构分析、克里格分析、空间自相关分析以及空间模拟等技术, 用于分析具有空间坐标的变量的空间特征, 并可进行过程模拟以及空间插值等。

空间统计学是以区域化变量理论(Theory of regionalized variable)为基础, 以变异函数(Variogram)为基本工具来研究那些分布于空间并呈现出一定的随机性和结构性的自然现象的科学。显然, 凡是要研究某些变量(或特征)的空间分布特性并对其进行最优估计, 或要模拟所研究对象的离散性、波动性或其他性质时都可应用空间统计学的理论与方法(侯景儒, 1997)。

空间统计学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科学。空间统计学的基本思想从20世纪50年代初开始提出, 经过广大数学地质工作者、空间统计学工作者、矿山地质和采矿设计专家及其他空间统计学应用者和爱好者的不断努力, 现在已经形成了一套独立的理论体系, 成为数学地质中比较活跃的一个分支。空间统计学在国内外诸多领域的生产实践中表明, 空间统计学除了在找矿勘探、矿体圈定、储量计算、采矿设计、矿山生产及地学科研等方面具有明显的优越性外, 它在石油地质、生物学、生态学、岩石学、地球化学、地震地质、海洋地质、农业、水文、古气候、古地理、气象学、遥感地质、环境、林业、医学等许多方面都有成功应用的实例(肖斌等, 2000)。因此, 空间分析在不到50年的研究和实践中, 它的应用已被扩展到分析各种自然现象的空间异质性(Spatial heterogeneity)和空间格局(Spatial pattern)。空间异质性是指某种变量在空间分布上的不均匀性及复杂程度。空间格局是指某种变量在空间上的分布与配置(邬建国, 2000)。

森林是陆地生态系统的主体(2003年9月10日新华网公布的《中共中央、国务院关于加快林业发展的决定》中提出), 森林属于再生的自然资源。森林生

长发育是生态系统动态中森林资源再生产的一个自然的生物学过程。在这个过程中,以木本树木为主的生物种群在时间和空间上不断延续、发展或发生演替,其间,由于森林会受到环境条件、自然干扰、人为干扰、更新树种的生理生态学特性、现存树种与更新树种的关系、竞争植物种和其他生物种的特性等因素及其相互作用的影响,生物和非生物因素随时间和空间变化,使森林具有高度的空间和时间异质性。经典统计学主要研究“属性”的特征,一般不涉及到“属性”的空间分布,难以分析和解释“属性”的空间分布与格局。空间统计学为我们提供了一个非常有效的分析和解释空间数据的方法(Robertson, 1987; Rossi et al., 1992)。具体说,它可以为我们在研究林业各种复杂问题时提供:(1)定量地描述和解释空间异质性或空间相关的方法;(2)建立各种有关的空间预测模型,并进行空间数据插值和估计;(3)对空间格局的尺度、几何形状、变异方向进行定量地分析和有效的估计,并将空间格局与生态学过程联系起来;(4)它为我们各种尺度上进行空间抽样时,提供最优的抽样方法;(5)它可以帮助景观生态学家建立景观模型,并进行景观模拟;(6)环境因子的空间统计学分析有助于我们更深刻地了解生命有机体(个体、种群和群落)空间变异的机制(王政权, 1998)。因此,空间统计分析技术在林业领域有着广泛的应用前景。

1.2 空间统计学发展历史

统计学在地质领域的应用从 100 多年前就开始了,早在 30 年代,原苏联地质勘探人员就开始应用数理统计方法研究矿床变化性、勘探密度和储量误差三者之间的关系。后来他们发现,地质变量并不总是纯随机变量,而是既有随机性又有结构性(指在空间分布上有某种程度的相关性或连续性)的变量,因而认识到要用简单的统计方法来解决复杂的地质勘探问题是十分困难的。经典统计学在应用于地质变量时存在如下缺陷(王仁铎等, 1987), (1)经典统计方法在统计样品值的频率和作频率直方图时均不考虑各样品的空间分布。但在地质、采矿工作中,这种空间分布则是非常重要,不容忽视的。因为若高观测值样品的空间位置都很接近,则意味着该处有矿化;反之,则认为无矿化。正因为经典统计不考虑样品的空间分布,故它不能反映矿化强度在空间的变化性。(2)经典概率统计学的研究对象必须是纯随机变量,而地质、采矿中所遇到的许多地质变量并不是纯随机变量,是既有随机性又有结构性(指在空间分布上有某种程度的相关性或连续性)的变量。(3)经典概率统计学所研究的变量原则上都是可以无限次重复试验或大量观测的,但地质变量则不行。因为一旦在矿体某处取一样品后,严格说来,就不可能在同一地方再次取到样品了。(4)经典概率

统计学一般要求每次抽取样品必须是独立进行的,但地质变量在两个相邻样品中的值就不见得独立,往往有某种程度的空间相关性(或说某种程度的连续性)。

为了解决在地质变量具有随机性和结构性的条件下仍能使用统计方法的问题,20世纪40年代末出现了变异函数,或变差图(variogram),或叫半变异函数(semivariogram)。由于它能够同时描述地质变量的随机性和结构性变化,这就为在地质、采矿中使用统计方法铺平了道路。

从1951年起,南非的矿山地质工程师D. G. 克里格和统计学家H. S. 西舍尔等人根据他们对南非金矿多年来的工作经验,提出了根据样品空间位置不同和样品间相关程度的不同,对每个样品观测值赋予一定的权,进行滑动加权平均,来估计中心块段平均值的方法(侯景儒等,1998),这就是克里格法(也称为“克里金”,kriging)。虽然他们自己常说只用了经典统计学,然而实际上他们的方法已很不同于经典统计学了。

变异函数的产生和克里格法的提出为地质统计学的诞生准备了重要的条件。到了50年代后期,法国著名的矿山主任工程师兼概率统计学家G·马特隆教授在认真研究了D. G. 克里格和H. S. 西舍尔等人工作的基础上,从理论和实践上进行了系统的研究。他在研究了10个国家40多个矿床(其中有6个不同类型的铀矿、块状和浸染状有色金属硫化矿、铁矿以及锡、金、钨、滑石、萤石等矿床)的丰富实践基础上,把D. G. 克里格等人的研究成果进一步理论化、系统化,又采用了随机函数来同时描述地质变量的结构性和随机性,从而提出“区域化变量”的概念。1962年,G·马特隆为了指明综合随机性与结构性两种特性的领域,第一次提出了“空间统计学”这个名词,并发表了专著《应用空间统计学论》,阐明了一整套区域化变量的理论,为空间统计学奠定了理论基础。从此,空间统计学就作为一门新兴的边缘学科诞生了。

1.3 空间统计学特点

1.3.1 空间统计学与GIS技术

空间统计学主要包括空间结构分析、克里格分析、空间自相关分析以及空间模拟等技术,可用于分析具有空间坐标变量的空间特征,并可进行过程模拟以及空间插值。

地理信息系统是对地理信息进行获取、存储、显示、分析、输出等处理的技术。GIS研究的主要对象是具有空间特性的地理信息及其属性,GIS的研究方

式主要是图形图像的处理和空间模型的建立。通常所指的空间统计学不同于一般地理信息系统提供的某些空间分析功能,空间统计分析是以数学操作为主,如空间结构分析、空间自相关分析、空间内插技术等以及空间模拟模型,而GIS中的空间分析以图形操作为主,如叠置分析、缓冲区分析、临近分析、空间联结、网络分析等,二者之间有很大区别,GIS通常并不提供空间统计分析功能。

GIS在存储、查询和显示地理数据方面发展得相当快,但在提供空间分析模块方面则发展得比较慢,由于缺少能用的空间分析模块,使得GIS在解决某些空间问题中的应用效果受到很大限制,未来GIS技术的发展将在很大程度上依赖于其与功能强大的空间分析模型的结合。

空间统计学与GIS既有相同之处,又有区别。两者均能处理具有空间坐标的信息,不同的是地理信息系统侧重于图形显示,即描述空间现象及其属性特征的相互关系;而空间统计学侧重于数值计算,即应用空间分析模型进行有关空间自相关、空间结构特征、空间插值、空间模拟等方面的计算。

1.3.2 空间统计学与经典统计学

经典统计是以概率论为基础的一门研究随机现象统计规律的应用数学学科。空间统计与经典统计存在较大区别(王政权,1999):(1)经典统计研究的变量必须是纯随机变量。该随机变量的取值按某种概率分布而变化,而空间统计研究的变量不是纯随机变量,是区域化变量。该区域化变量根据其在域内的空间位置取不同的值,它是随机变量与位置有关的随机函数。(2)经典统计所研究的变量理论上可无限次重复或进行大量重复观测试验,而空间统计研究的变量则不能进行重复试验。因为区域化变量一旦在某一空间位置上取得一样品后,就不可能在同一位置再次取到该样品。(3)经典统计的每次抽样必须独立进行,要求样本中各个取值之间相互独立,而空间统计中的区域化变量是在空间不同位置取样,因而,两个相邻样品中的值不一定保持独立,具有某种程度的空间相关性。(4)经典统计以频率分布图为基础研究样本的各种数字特征。空间统计除了要考虑样本的数字特征外,更主要的是研究区域化变量的空间分布特征。因此,空间统计的主要研究是围绕着变量空间分布理论和估计方法。正是上述主要区别,导致空间统计研究与经典统计相比具有较多优点与特色,并在具体实践中得到迅速发展。

1.4 林业中应用空间统计学的必要性和现状

1.4.1 应用的必要性

空间统计学是以区域化变量理论为基础,它的应用已被扩展到分析各种自然现象的空间异质性和空间格局。森林受物理环境、自然干扰、人为干扰、树种特性、树种对干扰的反应等因素及其相互作用的影响,具有高度空间异质性和时间异质性。因此,空间统计学在林业领域有着广泛的应用前景。

1.4.2 林业中应用空间统计学现状

(1) 森林土壤空间变异研究 土壤的形成过程包括物理过程、化学过程和生物过程。由于不同地区在气候、母岩、地形、植被和动物等方面的不同,形成了各种土壤类型,导致土壤性质存在明显的差异。即使在土壤质地相同的区域内,同一时刻土壤特性值(物理、化学、生物性质等)在不同空间位置上也具有明显差异,这种属性称为土壤特性的空间变异性(Webster, 1985)。土壤空间异质性是土壤重要的属性之一(Burgess, 1980)。在不同的尺度上研究土壤的空间异质性,不但对了解土壤的形成过程、结构和功能具有重要的理论意义,而且对了解植物与土壤的关系,如更新过程、养分和水分对根系的影响以及植物的空间格局等也具有重要的参考价值(Fortin *et al.*, 1989)。Farley 等(1999)在英国北约克郡的落叶林中发现,各种土壤养分浓度空间变化表现为林分内局部范围可形成养分浓度较高的土壤斑块,这些斑块的峰值期可持续约4周,土壤P、NH₄和硝酸盐的含量在2m的空间尺度上有显著差异。土壤的水分、容重、毛管持水量和孔隙度也是重要的土壤物理因子。在森林土壤中,这些因子的空间变化与养分一样,影响着树木的根系,进而影响林分的生长。王政权等(2000)采用空间统计学的理论和方法,定量研究了阔叶红松林土壤上层(0~20 cm)的水分、容重、毛管持水量和孔隙度的空间异质性,为深入研究土壤空间异质性与根系结构和生长的关系提供重要的参考。

(2) 研究物种空间分布 树木种群在自然界中由于受到个体、种群以及与环境之间相互作用的影响,存在着一定的空间分布特征。如果一种群在某一区域分布较多,在其邻近区域分布也较多,而在其他区域的密度较小,那么这个种群在该区域与邻近区域存在空间正自相关,反之则为负自相关(Cliff *et al.*, 1973)。物种的地理分布与地形的关系很早就引起了生态学家的注意,最初发现的欧洲的山体效应就是最典型的例子(Körner, 1998)。方精云(1999)根据我国

水青冈属植物的地理分布资料和地形图资料,利用 Krige 空间统计方法对我国分布较广的 4 种水青冈的空间分布格局及其与地形的关系进行了研究。刘国华等(2001),在广泛收集我国栗属 3 个物种板栗、茅栗和锥栗地理分布资料的基础上,利用空间统计学方法对它们的上限和下限的分布幅度进行了分析,给出了分布高度的插值结果,并对其估值结果进行了分析。此外,陈雄文(2000)运用空间统计学与分形方法对中国东北样带中 16 个主要树种(属)的空间分布特征进行了研究;王政权等(2000)利用空间统计学在较大的尺度上研究了阔叶红松林主要树种具有不同的空间异质性程度、尺度和格局。这些成功实例说明用空间统计学方法可以直观地表达出物种地理分布的空间格局,定量地预测物种在其分布区内不同地点的海拔分布,这为人们全面了解物种资源的分布提供了一个可靠的方法。

(3) 森林干扰方面 森林自然灾害,如风、火、冷暖的季节循环以及森林病虫害等,对森林的干扰可破坏或改变原有的森林景观,形成森林环境和资源的时空异质性。Michael 等(1997),利用瑞士 1986~1990 年森林损害调查数据,应用空间统计方法,在对单个地块平均落针(叶)数据分析的基础上,作出了落针(叶)分布图。根据森林损害的空间分布规律与其他空间相关数据(如空气与土壤污染等数据)结合,理论上可以找出森林受害的原因,为森林监测服务。Marcia 等(1999),应用逻辑斯特回归与空间统计方法结合,对美国南部地区松天牛发生规律进行了时空模拟。此外,我国石根生等(1997),也应用空间统计学方法研究了 3 种松林中马尾松毛虫越冬代蛹及其寄生天敌种群的空间结构和空间相关性,得出湿地松-马尾松-火炬松混交松林中蛹的变异函数曲线为球形,其空间格局为聚集型;受害程度高的马尾松纯林中,蛹的变异函数曲线为指数形,空间格局为聚集型结论。这些结果和方法可应用于种群时空动态格局及自然控制机理的研究。Wallenius 等(2002),以芬兰东部两块老龄林,一块以云杉占优势(*Picea abies*),另一块以松类(*Pinus sylvestris*)占优势,采用空间自相关分析方法,分析研究了林地发生火灾若干年后的林木年龄空间结构。研究结果表明,在林地内林木年龄空间结构存在或多或少的差异,但没有构成明显的空间再生斑块,即使在林火发生已有 200 年以上的老龄林地,也是如此。

(4) 林分因子方面 人们很早就认识到树木种群是一个时空变异混合群体。实测结果表明,树木生长特性在不同空间位置上存在明显的差异,即树木生长的空间变异性。Samra 等(1989),以印度卡尔那尔楝树(*Melia azederach*)高生长为例,用“krige”空间内插技术制作了林业调查结果图。Kuuluvainen 等(1996),在调查芬兰南部经营林地和云杉占优势原始林地的水平和垂直方向活立木林分结构基础上,用变异函数分析了树木大小(包括胸径和树高)的空间自

相关性,结果表明,原始林林木结构在水平与垂直方向上比经营林地具有更高的空间异质性。Yong-Bi Fu 等(1999),利用传统统计方法与空间统计结合,以英国哥伦比亚南海岸6~12年生花旗松66块实验地为基础材料,分析了花旗松树高空间变异特性。研究结果表明,6~12年生花旗松树高,在66块实验地内和实验地间存在较大差异,这些差异由花旗松本身的遗传差异、环境因素以及他们之间的交互作用造成的。我国洪伟、吴承祯(1998)以全国杉木种源试验的43个代表性杉木种源试验的10年生胸径生长量为基础资料,应用克里格插值技术探讨了杉木种源胸径生长的地理变异规律。在2001年,二人又提出应用分形理论与空间统计学原理相结合方法来分析杉木种源的胸径、树高生长的空间变异性及其分形特征,结果说明计算的杉木种源胸径、树高生长特性的分形维数,能切实反映胸径、树高生长在空间上的变异性。

(5) 种子资源 林分中土壤种子库是更新林木生命过程中的一个重要阶段,是林分动态中主要的生态学过程之一(Nathan *et al.*, 2000)。受母树空间位置和种子扩散及林分空间异质性的影响,种子库具有明显的空间格局(Matlack *et al.*, 1990)。这种空间格局在各种生物因子(如真菌腐坏、动物摄食及枯落物覆盖等)和非生物因子(如土壤温度、水分)的作用下常常发生改变,形成新的格局(Oakley *et al.*, 1998)。已有一些研究表明,种子库的空间格局及其生态学过程对苗木的更新格局有决定性的影响(Bekker *et al.*, 2000)。因此,在研究种子库格局向苗木更新格局的转变过程中,种子库格局特征发生什么样的变化及哪些因素控制种子库格局变化过程对认识更新机制具有重要的生态学意义。韩有志等(2002)应用空间统计学方法定量分析了东北林业大学帽儿山实验林场天然次生林中土壤种子库水曲柳种子的统计特征、空间格局、尺度和格局的变化过程。研究结果表明,落种后水曲柳种子库的平均密度有很大变幅。变异函数分析及理论模型拟合显示,一年之内种子库的空间格局强度及尺度变化非常明显。种子雨可形成较强的异质性格局,空间自相关尺度较大。克里格分析显示,种子库空间格局动态变化强烈。落种一年之后,种子库格局强度降低、空间尺度减小、空间格局呈破碎化。在种子库格局变化过程中,小尺度上的土壤真菌腐坏、动物摄食和微生境干扰等起重要作用。姜春玲(1999),应用变异函数维数对蒙古栎萌发的种子分布格局运行分析,表明在自然条件下蒙古栎的发芽率很高,幼苗难以越冬;在样地内,萌发的蒙古栎种子分布极不均匀。此外,Hugo等(2001)运用空间自相关分析,研究了松类树种在受到干扰仅留下单一的种子库和森林在皆伐后,森林的重建情况。得出在干扰地上,树种的重建依赖于距离潜在种子源的远近这样的结论。

(6) 在林业其他方面应用 由于树种的生理生态学特性、现存树种间对养

分的竞争以及林分所处环境的差异,造成林副产品产量的空间异质性。如:Nidos 等(2001)在两个不同尺度上,在调查西班牙中部海岸松 1998 年和 1999 年两个采酯期的树酯产量数据的基础上,采用 Moran' I 和 K 函数,研究林分内各株树间采酯量的空间变异,结果表明,在同一林分内,间距小于 5 m 的单株树间,其产酯量相差不大。采用实验变异函数,分析林分间不同样地的平均采酯量,结果表明,两样地采酯量存有差异,造成差异的主要原因是林分空间结构的差异。林业中还有一些空间统计应用实例如:分析林分中光有效性的空间异质性(Beaudet *et al.*, 1998)等等,这里不再一一介绍。

1.4.3 存在问题

森林分布于地球陆地表面,易受气候、生物、地形、人为等因素影响,因此,森林的空间变异非常复杂。在这种情况下,将空间统计学理论应用到森林空间变异研究中,必然会遇到许多问题。由于森林的空间变异性是否符合平稳或本征假设的条件并无严格的判别标准,因而漂移问题的解决还需进一步探讨。进行变异函数拟合时,模型选择带有一定的主观色彩,因而人们有理由对变异函数的客观性提出质疑。取样数目问题尚需进一步研究。

森林是一个动态变化的生态系统,其在生长过程中,受生物的和非生物的因素影响,随时间而不断变化,森林表现出时间异质性。然而从当前的研究现状中可以看出,对森林变化从时间异质性角度研究尚少。

目前国内外,对森林异质性的研究尚不全面,研究主要集中在森林土壤、树种分布、森林干扰、林分因子、种子资源等几个主要方面。尤其在我国,当前运用空间统计于林业领域的研究人员还非常少,而且研究的范围也很窄。

由于空间统计在林业中应用刚刚起步,还处于探索阶段,绝大多数林业工作者,甚至是林业研究人员对空间统计都缺乏基本的了解。对空间统计究竟在林业领域能做什么尚无感性认识(冯益明等,2004)。

1.5 本书主要内容

本书系统介绍空间统计学的基本理论、方法及其在林业中应用状况,同时,本书对一些国内外最新的关于空间统计学理论及应用方面的知识 with 成果也进行相应的分析与介绍,其中也包括不少作者近年来的研究工作。

全书共包括 10 章。第 1 章是绪论;第 2 章主要是统计学方法简述。包括单一变量和双变量之间的数据统计分析方法;第 3 章主要介绍空间统计学理论,包括相关函数、协方差函数、变异函数、估计方差和离散方差等;第 4 章主要

介绍变异函数的结构分析。包括变异函数的性质、功能, 变异函数理论模型, 变异函数的最优拟合及结构分析的基本步骤; 第5章主要介绍空间统计学中空间局部估计(不同克里格方法)的基本理论和方法; 第6章主要介绍协同克里格与拟协同克里格的基本理论和方法; 第7章重点介绍随机场产生的方法以及变量的随机模拟; 第8章重点讨论估值的不确定性和采样策略; 第9章简要介绍空间统计学软件; 第10章介绍一些空间统计学在林业中应用实例。

为了使读者更好地掌握空间统计学的基本理论和方法, 在应用中不致于产生困难, 在给出基本概念和公式的同时, 书中也给出了应用空间统计学方法解决林业中不同层面的几个应用案例。大部分实例都是作者近几年研究工作的总结。由于空间统计学在国内林业领域的应用刚刚开始, 作者所做工作与所列实例难免有些不足之处, 不过, 书中每章后面均给出了有关参考文献, 请读者根据需要进行阅读。

参考文献

1. Beaudet M, Messier G. 1998. Growth and morphological responses of yellow birch, sugar maple, and beech seedlings growing under a natural light gradient. *Canadian Journal of Forest Research*, 28 (7): 1007 ~ 1015.
2. Bekker R M, Verweij G L, Bakker J P *et al.* 2000. Soil seed bank dynamics in hay field succession. *Journal of Ecology*, 88: 594 ~ 607.
3. Burgess T M, Webster R. 1980. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties I: The semivariogram and punctual kriging. *Journal of Soil Science*, 31: 315 ~ 331.
4. Cliff A D, Ord J K. 1973. *Spatial autocorrelation*. London: Point Press, 103 ~ 130.
5. Farley R A, Fitter A H. 1999. Temporal and spatial variation in soil resources in a deciduous woodland. *Journal of Ecology*, 87: 668 ~ 696.
6. Fortin M, Drapeau P, Legendre P. 1989. Spatial autocorrelation and sampling design in plant ecology. *Vegetation*, 83: 209 ~ 222.
7. Körner C. 1998. A re-assessment of high elevation treeline positions and their explanation. *Oecologia*, 115: 445 ~ 459.
8. Kuuluvainen T, Penttinen A, Leinonen K *et al.* 1996. Statistical Opportunities for Comparing Stand Structural Heterogeneity in Managed and Primeval Forest: An Example from Boreal Spruce Forest in Southern Finland. *Silva Fennica*, 30(2 ~ 3): 315 ~ 328.
9. Matheron G. 1963. Principles of geostatistics. *Econ Geol*, 58: 1246 ~ 1266.
10. Matlack G R, Good R E. 1990. Spatial heterogeneity in the soil seed bank of mature Coastal Plain forest. *The Journal of the Torrey Botanical Society*, 117: 143 ~ 152.
11. Nathan R, Safriel U N, Noy-Meir I *et al.* 2000. Spatiotemporal variation in seed dispersal and recruitment near and far from *Pinus halepensis* trees. *Ecology*, 81: 2156 ~ 2169.
12. Nikos N, Tadesse Wmontero G *et al.* 2001. Spatial stochastic modeling of resin yield from pine stands. *Canadian Journal of Forest Research*, 31: 1140 ~ 1147.
13. Oakley B B, Franklin J F. 1998. Bitter cherry (*Prunus marginata*) distribution, successional