

» 数据分析与模拟丛书

Marie-Josée Fortin Mark Dale 著

杨晓晖 时忠杰 朱建刚 译

Spatial Analysis
A Guide for Ecologists

空间分析

—— 生态学家指南

高等教育出版社

CAMBRIDGE

» 数据分析与模拟丛书 ·

Marie-Josée Fortin Mark Dale 著

杨晓晖 时忠杰 朱建刚 译

Spatial Analysis: A Guide for Ecologists

空间分析

——生态学家指南

KONGJIAN FENXI — SHENGTAIXUEJIA ZHINAN

高等教育出版社·北京

图字：01-2010-3902 号

Spatial Analysis (A Guide for Ecologists), 1st Edition, ISBN: 9780521009737 by Marie-Josée Fortin, Mark R. T. Dale, first published by Cambridge University Press 2005.

All rights reserved.

This Chinese translation edition for the People's Republic of China is published by arrangement with the Press Syndicate of the University of Cambridge, Cambridge, United Kingdom.

© M. -J. Fortin and M. R. T. Dale 2005

This book is in copyright. No reproduction of any part may take place without the written permission of Cambridge University Press or Higher Education Press Limited Company.

This edition is for sale in the mainland of China only, excluding Hong Kong SAR, Macao SAR and Taiwan, and may not be bought for export therefrom.

此版本仅限于中华人民共和国境内（但不允许在中国香港、澳门特别行政区和中国台湾地区）销售发行。不得出口。

图书在版编目 (CIP) 数据

空间分析：生态学家指南 / (加) 福廷
(Fortin, M. J.) (加) 戴尔 (Dale, M.) 著；杨晓晖，
时忠杰，朱建刚译。北京：高等教育出版社，2014.9

书名原 * Spatial analysis: a guide for
ecologists

ISBN 978-7-04-031888-3

I. ①空… II. ①福… ②戴… ③杨… ④时… ⑤朱…
… III. ①生态学-数学方法-指南 IV. ①Q14-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 123233 号

策划编辑 柳丽丽

责任编辑 柳丽丽

封面设计 张楠

版式设计 马敬茹

插图绘制 杜晓丹

责任校对 刘春萍

责任印制 张泽业

出版发行 高等教育出版社
社址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120
印刷 中国农业出版社印刷厂
开本 787 mm×1092 mm 1/16
印张 20
字数 370 千字
购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598
网址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
版次 2014 年 9 月第 1 版
印次 2014 年 9 月第 1 次印刷
定价 49.00 元

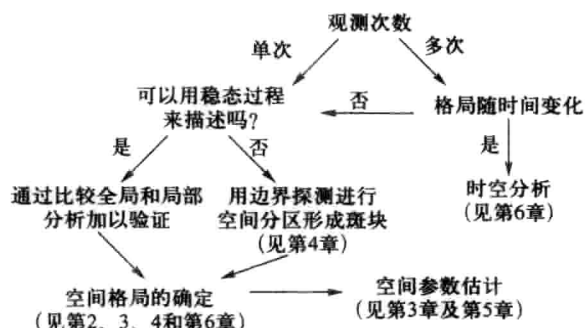
本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题，请到所购图书销售部门联系调换

版权所有 侵权必究

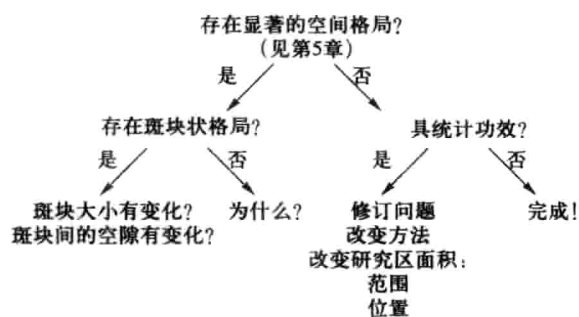
物料号 31888-00

内容简介

空间分析目前已成为生态学中发展最为迅速的领域之一，然而许多生态学家所熟悉的参数统计方法并无法应用于存在空间自相关的数据上。本书旨在通过介绍空间分析研究的基础理论，让生态学家更为广泛地了解空间分析的方法，本书在对书中可能用到的相关术语和概念简介的基础上，从种群数据（完全调查）分析方法、样本数据分析方法、边界探测方法、空间自相关方法以及时空分析方法等五个方面，通过方法描述、实例分析、方法特点评价以及方法选择建议等结构性的内容对每一种方法进行了详细的分析说明，进而对这一领域未来的发展方向以及进一步开展工作的领域进行了综合性的总结。本书是一本介绍空间分析在生态学中应用的教材或参考书，力求为在空间分析过程中出现问题的生态学研究者以及想把空间分析方法用于生态学研究的初学者提供一本有用的指南。



本书中所介绍的空间分析方法的决策树



分析空间生态数据时提出的关键问题

译者前言

空间分析是生态学领域最为重要的研究方法之一，随着计算机技术的飞速发展，大量空间分析专用软件的出现使得空间分析方法在生态学中得到了更为广泛的应用。然而我们必须清楚地认识到，许多生态学家由于缺乏必要的数学基础、计算机编程基础等，常常无法从大量的软件中选择他们研究中所需要的软件，即便他们能够选择出正确的软件，但由于对软件中的数据结构、参数设置、生态学假设等不熟悉，造成了对软件中方法的误用，得到了与实际生态学过程相悖的结论。正是考虑到这些可能出现的问题，本书的原著者通过对大量已有的空间分析方法的介绍，为广大生态学家提供了一本实用性的指南。全书力图回避以往教科书中大量的数学推导公式，而是通过各种实例对所介绍的方法进行简明扼要的说明，因此不需要读者具有很好的数学基础。也正是看到了这一点，我们才决定在大量的相关书籍中选择这本进行翻译，希望能为有志于生态学研究的读者打开一扇兴趣的大门。更为重要的是，在多年的研究和教学实践中我们发现国内的生态学家与国外的生态学家相比最为显著的差距之一是前者的数学基础要更弱一些，难以准确地将最新的空间分析理论应用到生态学研究中去，无疑本书也可为国内的生态学家开展空间相关的研究提供一些参考。本书的第1章、第2章和第7章由杨晓晖翻译，第3章和第4章由时忠杰、杨晓晖翻译，第5章和第6章由朱建刚、杨晓晖翻译，全书由杨晓晖校订。

本书是在公益性行业专项“森林对PM_{2.5}等颗粒物的调控功能与技术研究”（项目编号：201304301）和国家自然科学基金（41271033）及高等教育出版社的资助下翻译完成的，在整个翻译的过程中，高等教育出版社的柳丽丽编辑给予了无私的帮助和充分的理解，在此一并表示感谢。

鉴于译者专业和英文水平所限，译稿中难免存在一些对原文作者真正涵义理解偏差之处，希望得到读者的批评指正。

译者

2014年元月

谨以此书献给

Ferko, Ian, Phyllis, John 和 Martha

前言

空间分析目前已成为生态学中发展最为迅速的领域之一，究其原因主要有三点：一是生态学家越来越认识到空间结构在生态学研究中的重要性；二是我们所处的景观变化越来越快，需要对其空间异质性进行不间断的评价；三是大量空间分析专用软件的出现使得空间分析研究成为可能。然而这些软件常常被误用，原因是生态学家大多没有参加过生态学尺度方面的培训，同时他们并未充分认识到空间自相关的数据并非独立的样本数据，并不符合其所熟悉的参数统计方法中的假设条件。因此本书的目的就是力求解决目前生态学研究中对空间分析的需求与许多生态学家不能正确进行空间分析之间的矛盾。

正如书名所反映的那样，本书力图通过对大量已有的空间分析方法的介绍为生态学家提供一本指南，故此本书所涉及的范围相当广泛，从专业性的角度看与早前 Dale (1999) 所著的有关静态空间格局分析的论著不具可比性。本书是一本向生态学科的学生介绍空间分析的教材或参考书，同时也为空间分析的初学者和在空间分析过程中出现问题的生态学研究提供提供一个有用的指南。书中的每一章都是相对独立的，但在方法的应用和解决生态学问题等方面各章间仍存在着一定的联系。我们的目的是尽可能对现有的各种空间分析方法进行一个全面的概述，因此在书中并不提供更多的数学理论背景及出处（相关的知识可以从更为专业的教材中获取，如 Cressie, 1993），但我们希望本书为生态学家掌握并应用这些方法提供足够详细的指南。尽管本书不可能涵盖目前已有的所有方法，但我们还是尝试有选择地将其他一些领域（如地理学、地质学和流行病学）的内容包括进来，从而使得本书的内容超出了目前易于获得的生态学文献中所介绍的内容。

大部分的生态学研究都旨在通过对生态学过程及其相互作用进行假设性检验，对自然现象的复杂性及其运行规律有一个更为深入的了解，这种知识建构主要是基于观测、格局探测、实验和模拟。对生态学家来说，格局的认知只是解释自然系统复杂性的一系列方法中的第一步，生态学中的空间分析虽然旨在探测格局，但这也仅是解答某一较大问题的开始，生态学家的最终目的是弄清产生这种格局的生态学过程；同样格局描述也是地理学家们的研究兴趣所在，但并非其最终目标。流行病学实质上也是一门通过探测格局来发现过程的应用生态学，最为经典的研究实例是 19 世纪 50 年代约翰·斯诺 (John Snow) 用

疾病发生范围的空间格局确定了伦敦百老大街 (Broad Street) 的水泵是霍乱爆发的源头 (参阅 Haining, 2003)。无疑格局的确定能够使我们了解导致这种格局的过程有一定的了解, 然而许多生态学问题远比探寻疾病的源头更为复杂, 如温带林中 20 个树种空间格局形成过程的复杂性……热带林中上百个树种空间格局形成过程的复杂性……乃至热带林中所有昆虫空间格局形成过程的复杂性等。

本书的内容主要是两位作者在各自的大学中多年从教实践积累的结果, 也是多年来学习并与诸多良师益友合作的结果, 包括 Barry Boots、Ferkó Csillag、Geoffrey M. Jacquez、Pierre Legendre、Neal Oden、Chris Pielou、Robert Sokal、Tony Yarranton 以及“空间数据统计模型在生态学中的应用”NCEAS 工作组的同事们。

在本书的编写过程中, 我们很荣幸地得到许多人的全程帮助, Gillian Forbes、Patrick James、Stephanie Melles 和 Agnes Wong 绘制了书中的所有图件, Gillian Forbes、Stephanie Melles 和 Rebecca Torretti 对本书不同阶段的版本进行了编辑, Patrick James、Yuanyuan Liang、Stephanie Melles 和 Agnes Wong 完成了书中数据的空间分析, Ilka Bauer、Vernon Peters、Steve Kembel、Michael Simpson 和 Agnes Wong 参与了大量的野外调查工作。我们也荣幸地从 Mike Rosenberg (PASSAGE) 和 Geoffrey Jacquez (BoundarySeer and ClusterSeer by TerraSeer, 2001) 处获取到了一些优秀的分析软件。

我们还要感谢下面的朋友对本书编写的建议和帮助, 他们是 Ferkó Csillag、Stewart Fotheringham、Norm Kenkel、Charles Krebs、Pierre Legendre、Stephanie Melles、Evie Merrill、Joe Perry 和 Mike Rosenberg, 感谢 Joe Perry 在动物移动分析方面同我们所进行的讨论, 感谢 Ferkó Csillag 为小波分析的实例提供了必要的技术支持。此外作者之一 (M.-J.F.) 要感谢同 Ferkó Csillag 所进行的有关空间统计分类及模拟的多次讨论, 作者不仅从中获益匪浅, 更重要的是获得了巨大的精神上的支持。

最后我们要感谢加拿大国家科学与工程研究会和艾伯塔大学, 他们提供的资助使得与书中所有内容相关的研究得以开展, 同时感谢多伦多大学和艾伯塔大学 (以及我们的顶头上司 James Thomson 和 Carl Amrhein) 让我们有足够的时间完成本书。

郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其为人将承担相应的民事责任和行政责任；构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人进行严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话 (010) 58581897 58582371 58581879

反盗版举报传真 (010) 82086060

反盗版举报邮箱 dd@hep.com.cn

通信地址 北京市西城区德外大街4号 高等教育出版社法务部

邮政编码 100120

目录

前言	XIII
第1章 简介	1
简介	1
1.1 格局和过程	2
1.2 空间格局：空间依赖与空间自相关	6
1.3 稳态的概念	9
1.4 取样	11
1.4.1 生态数据	15
1.4.2 取样设计	16
1.5 空间统计	22
1.5.1 生态数据的显著性检验	24
1.6 结论性评述	27
第2章 种群数据的空间分析	28
简介	28
2.1 二维空间上的点图数据	29
2.1.1 邻体距离法	29
2.1.2 精确最近邻体分析	31
2.1.3 二阶点格局分析	32
2.1.4 双变量数据	36
2.1.5 多变量点格局分析	39
2.2 标记相关函数	46
2.3 对象网络	48
2.4 面状单元的网络分析	53
2.5 其他空间上的点格局	59
2.5.1 一维空间	59
2.5.2 三维及三维以上	62
2.6 相邻单元分析	63
2.6.1 样方方差方法	64
2.6.2 样方方差方法的显著性检验	66

2.6.3 两个或两个以上物种的应用	68
2.6.4 二维及二维以上	72
2.6.5 谱分析及相关技术	74
2.6.6 小波分析	75
2.7 外切圆方法	77
2.7.1 单变量分析	77
2.7.2 双变量分析	79
2.7.3 多变量分析	80
2.8 结论性评述	81
第3章 样本数据的空间分析	87
简介	87
3.1 取样单元间“相邻”关系的确定	88
3.2 连接计数统计方法	93
3.2.1 进一步考虑以及其他连接计数统计方法	96
3.3 全局空间统计	97
3.3.1 单变量空间自相关系数	98
3.3.2 变异函数法	104
3.3.3 分维数方法	109
3.3.4 取样设计对空间格局估计的影响	112
3.3.5 两个变量间的空间关系	116
3.3.6 多个变量间的空间关系	117
3.4 局部空间统计	121
3.5 内插法和空间模型	126
3.5.1 邻域多边形分析	127
3.5.2 趋势面分析	128
3.5.3 反距离加权法	130
3.5.4 克里格法	131
3.6 结论性评述	135
第4章 区域的空间分区：斑块和边界	138
4.1 斑块确定	139
4.1.1 斑块属性	139
4.1.2 空间聚类法	140
4.1.3 模糊分类法	144
4.2 边界描绘	146
4.2.1 生态边界	146

4.2.2	边界特性	147
4.2.3	基于多变量的边界探测	148
4.2.4	边界统计	159
4.2.5	叠加统计	161
4.2.6	基于单变量的边界探测	163
4.3	结论性评述	167
第5章	空间自相关分析	169
	简介	169
5.1	解决方法	176
5.1.1	迅速固定	176
5.1.2	调整有效样本数	177
5.1.3	其他种类的模型	183
5.1.4	特殊实例	187
5.1.5	限制随机化与 Bootstrap 方法	191
5.1.6	模型和 Monte Carlo 方法	193
5.2	有关诱导自相关和变量间关系的更多内容	194
5.3	模型和真实	197
5.4	取样和实验设计方面的考虑	198
5.4.1	取样设计	198
5.4.2	实验设计	202
5.5	结论性评述	203
第6章	时空分析	205
	简介	205
6.1	空间统计的变化	208
6.2	时空连接计数	210
6.3	聚集度和蔓延度的时空分析	212
6.4	多边形变化分析	215
6.5	移动分析	218
6.6	过程和格局	232
6.6.1	树木的更新、生长和死亡	232
6.6.2	植物移动	233
6.6.3	地衣边界	233
6.7	时空有序和空间协同	237
6.8	混沌	241
6.9	结论性评述	248

6.9.1 建议	248
第7章 综合评述和未来发展方向	249
回到基础部分	249
7.1 编程技巧	251
7.2 数据稳态	252
7.3 零假设	253
7.4 量化分析方法	254
7.5 统计上的难度	255
7.6 随机化和限制随机化检验	256
7.7 方法间的互补性	258
7.8 未来的工作	262
附录	265
参考文献	268
索引	290

第 1 章 简介

简介

自然系统的过程及其产生的格局存在于生态的时间和空间中，要了解自然现象的结构及其功能，必须确定其发生的时空尺度。一直以来生态现象的时空特征都是生态学概念化框架中一个固有的组成部分，但直到最近才在生态学理论、取样设计、实验设计和模型中得到足够的重视（Levin, 1992）。例如，McIntosh（1985）在早期描述生态学研究背景形成的概念及理论时，仅对生态过程的空间特征进行了很少的讨论。然而近年来大量的教科书中已经开始出现这方面的内容，从空间理论框架的构想到空间分析的统计学方法均有所涉及，如 Cliff 和 Ord（1973, 1981）、Getis 和 Boots（1978）、Ripley（1981）、Upton 和 Fingleton（1985）、Anselin（1988）、Haining（1990, 2003）、Cressie（1991, 1993）、Bailey 和 Gatrell（1995）、Manly（1997）、Legendre 和 Legendre（1998）、Dale（1999）、Fotheringham 等（2000）以及 O'Sullivan 和 Unwin（2003）。

本书将重点放在生态数据的空间分析方面，力求为生态学家提供一些建议和指南。因为所有的生态现象都可以用确定的地理坐标来描述其空间位置和可测定的属性等其他特征，因此在对其进行分析时应考虑不同的方面：

- 为了掌握生态现象的空间结构和格局，应明确地将空间位置信息纳入到分析中；
- 生态现象的其他特征可以通过忽略或控制其空间相对位置（如邻体间的拓扑关系）或绝对位置（ x - y 地理坐标）进行独立分析；
- 空间位置的信息可以直接包括在对其他特征的分析过程中。

几本高级空间统计学专著已对这些方法的数学理论基础进行了详细的介绍（如 Ripley, 1981；Cressie, 1993），但对生态学家来说这些专著读起来有些困难，无法立即应用到生态学研究中去，甚至由于某些方法的误用可能会产生一些错误的推断，因此本书的目的就是为正确的空间分析及其生态解译提供一些科学的概念。为达到这一目的，书中采用了不同的数据序列来说明各种方法的特征及其相互间的关系。

目前空间统计的方法众多且新方法层出不穷,本书不可能对所有的方法都加以介绍,而是将重点放在我们认为生态学分析中最主要的方法上。不可否认我们忽略了几个重要的研究领域和话题,如书中没有涉及生物多样性、信息理论和时空模型等方面的内容,这些内容中的任何一个可能都需要用一本专著来论述。

本书旨在通过介绍空间分析研究的基础理论,让生态学家更为广泛地了解空间分析的方法,读者对象也包括研究生和其他研究人员。本书的组织结构非常直观。第1章介绍了相关的术语和概念,让读者更为清楚地了解其在下面章节中的意义;随后的5章主要介绍了基于研究目的的不同空间分析方法,即:种群数据(完全调查)分析方法、样本数据分析方法、边界探测方法、空间自相关方法以及时空分析方法,每一章均由方法描述、实例分析、方法特点评价以及包括方法选择建议的结论性评述组成;最后一章我们试图回答“下一步要走的路在哪里?”,讨论了这一领域未来的发展方向以及进一步开展工作的领域,同时对贯穿全书的一些个人想法进行了综合性的总结,并对生态学的学生在未来的工作中需要掌握的一些技巧提出了一些建议。

1.1 格局和过程

在生态学研究,空间结构的研究在了解和管理生态过程中扮演了一个重要的角色。在对自然现象的复杂性进行综合分析时,描述和量化生态时空格局是十分重要的第一步,描述本身通常不是一个结束,而恰恰是对自然现象复杂性更为深入了解的开始,随后会产生可以用实验或模型进行检验的新的生态学假设(图1.1)。生态学研究是一个重复的过程,通过对生态格局的重复量化在一定程度上加深了我们对潜在生态过程的了解。遗憾的是,格局和过程间的耦合还远不够完美,相同的过程因强度的变化会产生不同的格局,而不同的过程也会产生相同的格局(图1.2)。此外生态过程可能会产生一个错综复杂的镶嵌的生态格局,而这种空间异质性反过来又会影晌长期作用于其上的生态过程的强度和类型,可见格局和过程间的反馈效应是很难区分开来的(图1.2c)。预先掌握过程的作用范围将有助于我们选择空间格局研究的尺度。生态学家常常用“尺度”这一术语来描述过程的范围和数据时空分辨率等几个相关概念,有关“尺度”概念更为详细的描述和讨论可参照Csillag等(2000)和Dungan等(2002)。当我们无法确定过程发生的尺度时,采用不同的方法和不同的尺度对空间格局进行分析将有助于我们从整体上对生态复杂性有一个更为全面的了解。

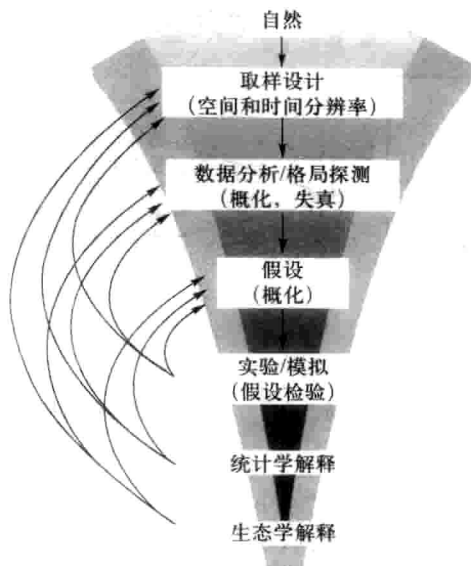


图 1.1 自然及其复杂性研究的流程图。自然现象通常发生在几个不同的时空尺度上，选择性取样设计会缩小研究区域的时空限制（如图中灰色所示的漏斗效果）。由于取样设计中人为确定的尺度存在潜在的不适合性，因此所探测到的空间格局可能是失真的。从这些空间格局中，我们可以获取有关生态过程的概化和假设，然后采用特定的实验或模型对新定义的假设进行检验。最后，我们可以获得一些统计学和生态学上的解译。图中的每一步所推断出的结果时空域都在缩小

为了使我们的讨论更为清晰明了，还需对“格局”加以明确定义并对探测格局的限制因子进行分析。“格局”的一种定义是“一种与众不同的形式”（Webster, 1989），表示格局是可以探测和描述的，而另一种定义是“规则的形式或次序”（Fowler 和 Fowler, 1976），故此格局有时也被用作“随机”的反义词。从研究格局时空组成的角度来说这两个定义均具有一定的局限性，并未表现出格局在生态系统中动态、演变和变化的特征。的确一种空间格局通常是在某一时间内一个或几个过程的“简单表现”或“快照”（Fortin 等, 2003），这也正是我们认为空间格局是重要的且将其作为研究重点的原因。此外一个区域的空间格局与区域面积（范围）和取样单元大小（粒径）直接相关并受到其限制（Wiens, 1989），从空间观测尺度来说，在一个区域中的较小范围内（如一种林分）格局可能是均质的，而在大范围内（如几种林分的镶嵌）则是异质的。在确定某一格局是局部的还是全局的时，所采用的距离尺度因研究对象的不同而不同，正如一种“景观”是根据所研究的有机体（如甲虫或郊狼）特征确定的某一距离范围一样。

生态数据通常包括几种较为复杂的空间格局（图 1.3）：①在较大尺度上表