

空间异质性定量研究方法

岳天祥

(中国科学院地理研究所资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京, 100101)

摘要: 空间异质性是景观生态学量化研究的核心, 其定量研究方法包括景观综合图、数学模型和地学信息图谱。本文概括总结了景观综合图的内容和量化指标, 分析了这种量化方法的优势和局限; 对数学模型的复杂性、优点和与景观综合图的互补性作了简要分析, 指出了数学模型研究需要进一步探讨和重视的问题; 通过对地学信息图谱三个阶段(景观制图实验, 图谱概念的提出和地学信息图谱理论的形成)的回顾和对其特点的分析, 我们认为地学信息图谱综合了景观综合图和抽象的数学模型可以提供的互补信息, 吸收了两者的优点, 是空间异质性的综合定量研究方法。

关键词: 空间异质性 景观综合图 数学模型 地学信息图谱

景观生态学的前提条件是生态格局与生态功能和过程之间的密切联系。生态系统在空间上是异质的, 它表现为系统特性在时间和空间上的复杂性和易变性。环境异质性的量化一直是生态学的目标^[1]。虽然最近几十年才开始重视发展景观空间异质性的量化方法, 但由于它的加速发展, 到目前为止, 已经有几百种景观格局的量化标准问世。尽管如此, 由于景观现象的复杂性和异质性元素的不确切定义, 空间异质性的量化仍然不能令人满意^[2]。

空间异质性 (spatial heterogeneity) 被定义为系统特性在时间和空间上的复杂性和易变性^[3]。系统特性可以近似为任何可度量的实体, 例如, 景观镶嵌的构形, 植物生物量, 年降雨量, 或土壤养分等。空间结构 (spatial structure) 是空间异质性概念的一个重要子集, 通常指系统特性的空间构型 (spatial configuration)。空间格局 (spatial pattern) 是在景观生态学中被广泛使用的术语, 它起初被用来描述景观的组成和结构^[4]。近年来, 空间异质性和空间格局被当作同义词来使用, 它们综合地指空间异质性的组成、构型和时间方面。这里的时间要素是指空间异质性是动态的, 而不是静态的。同时, 异质性是尺度的函数。也就是说, 系统特性的时空变异依赖于时空尺度。

空间异质性有许多量化途径, 主要包括景观综合图、数学模型和地学信息图谱。

1 景观综合图

景观是地表的一个地段, 它在性质上不同于其

它地段, 它为天然的界线围绕起来, 而且是一个完整的、相互制约的、有规律的、各种物体和现象的组合, 这种组合典型地表现在巨大的空间上, 而且在各方面都与景观外壳有着不可分割的联系^[5]。因为任何一个自然综合体虽是独立的, 但它们也是整体的一部分, 所以景观的区域特性既从属于地带的共同性又具有局部的异质性。从这一观点出发, 陈述彭先生对景观综合图在景观研究中的重要作用和数学模型在景观研究中的必要性作了以下概括: (1) 如果景观图不只是局限于简单的地理资料的整理, 而是从景观地带性特征的区域分异问题着眼, 具体分析导致景观异质性的主导因素的内在联系, 那么, 景观综合图的内容可以初步揭露出区域自然历史发展的密钥, 确定制图区域对其周期地区的曲型性; (2) 地质、地貌、地方气候、水文地质、土壤、地植物等自然要素的野外制图, 是景观综合图的必不可少的原始资料, 但是, 为了进一步对自然综合体进行综合全面的分析研究, 就不仅是获取各种自然要素的实际资料, 还要借助数学模型研究它们的区域分布规律, 探索它们在一定区域单位内的相互制约性与关联性, 以便明确它们在自然历史过程中的作用和地位。

景观综合图用以说明各种要素的结构和组成以及自然综合体的分布规律, 它包括景观类型图、景观分区图和景观综合剖面图^[6]。景观类型图是一种初步的总结性地图, 主要表现出自然的综合体的形态特征和组合类型, 是采用空间方法来研究景观的主要图式。虽然景观类型图有很大的实用价值和客

观需要,但它们还不能体现景观的发展动态、景观中的作用过程和不同景观要素之间的相互影响,这些不足需要景观分区图来弥补。景观分区图是在景观类型图基础上的进一步综合,是体现运用历史方法研究区域景观的主要图型。景观综合剖面图是一组剖面图或断面图的总称,是研究和阐述垂直地带性的独立图形。

虽然景观综合图中量化的系统特性在空间上没有连续性,但景观综合图是空间异质性的常用量化方法。景观综合图忽略了景观元^①(ecotope)内部的空间差异和跨越景观的系统属性趋势。景观综合图的量化指标可归纳为两大类:(a)评价景观综合图组成(composition)的指标,(b)借助空间信息评价系统特性的空间构型(spatial configuration)的指标。

景观综合图组成的量化描述包括,(a)地图中景观元的类型数,(b)每种类型所占的比例,(c)景观元多样性。景观元的类型数和每种类型所占的比例可通过简单的计算完成。景观元多样性包括两个组成部分:丰富程度(richness),指景观元的类型数;均匀程度(evenness),指各类景观元的面积分布。

系统特性的空间构型是较难量化的,它需要描述每个景观元的空间特征和景观元之间的空间关系。基于景观元的空间格局量度包括景观元的大小,数量和密度。这些量度可以用来评价所有类型的景观元或某种特定类型的景观元。有用的边界信息包括每个景观元的周长,特定景观元邻接的频率和体现景观元间反差的各种边界标度。

景观综合图是通过识别在特定尺度的特性相对均一的景观元,把有关的系统特性绘制在地图上。它在景观研究方面有它的局限性,因为定义景观元的标准有时候是随机的,它依赖于在景观元中有关特性的变异程度、景观元的最小制图尺寸以及与有关生物或生态过程相关的系统要素,另外,同一个景观可能会展示许多不同的景观元结构,它们取决于被度量的系统特性。

2 数学模型

数学模型是另一种有效的空间异质量化途径。它假定系统特性是空间连续的,并对空间结构的性质不作过多的假设。在大多数研究中,刻画空间异质性的数学模型和景观综合图没有被结合起来使用,因此,它们的互补性没有得到发挥。基于景

观元的景观综合图是对系统的简洁描述,它比数学模型分析更容易为大家所接受;而数学模型分析至少能够回答空间异质性分析中的两个最重要问题:(a)什么是进行空间异质性分析的最恰当尺度?(b)什么是空间结构的本质?数学模型提供了可靠的推理能力。

目前最常用的数学模型分析法是统计分析法。它与适用于类型数据的景观综合图相反,统计分析模型适用于通过实地抽样调查得来的数据,它假定系统特性在空间是连续变化的,并以此为依据,运用数理统计方法模拟这些系统属性的空间变化规律。统计分析法不同于景观综合图,它不需要在地图上勾画边界。

趋势面分析法(trend surface analysis)是另一种较常用的数学模型分析法。这种用来估计系统特性空间趋势的简单方法是运用回归分析法对有关数据的趋势面拟合。估计模型描述了数据的系统趋势,数据与趋势面的偏差描述了系统的随机成分。虽然趋势面分析法使用起来很方便,但应特别注意它的许多弊端:(a)当数据点较少的时候,回归分析法对外界影响的反应非常敏感;(b)高阶方程有非常大的边际效应;(c)实际研究的内容常常违背空间独立和正态残余的有关假设。

到现在为止,还没有行之有效且被广泛接受的数学模型。它的原因之一是因为这种方法比较复杂,并且,它们不如景观综合图那么直观;同时,大家还没有意识到这种方法在空间异质性研究中的重要作用^[8]。数学模型研究需要进一步探讨和重视以下几个问题。

(1)为了使有关分析在恰当的尺度上,严格地确认景观异质性的尺度是最重要的一步。然而,由于常常需要收集附加数据、用不熟悉的方法进行空间信息分析,大多数情况下这一步都被忽略掉了。同时,确认的尺度应当与所研究的生态过程 and 对应于景观异质性的生物联系起来给予充分地考虑。

(2)生态近邻(ecological neighborhood)的概念还没有得到广泛地运用。这是一个很有用的概念,它由生物或与其环境相互作用过程的时段和空间区域定义,它强调生物和生态过程。景观异质性由此被表达为相对于近邻的大小。例如,相对景观元大小

^① 不管对景观生态学还是生态系统生态学,景观元作为生态系统的空间描写是最基本和关键性的空间单元。景观元的特征可概括为最小均一的、可在地图上标出的土地单元^[7]。

表达为景观元大小与其近邻大小的比率；相对景观元持续时间表达为景观元持续时间与其近邻持续时间的比率。

(3) 许多空间格局模型试图捕捉空间异质性有关方面的所有信息，然而，由于各种不同空间异质性成分相互作用的复杂性，准确地描述所有的生态过程、景观格局和它们之间的关系也许只是一种愿望。但是，通过模型的组合肯定能够充分地挖掘有关特定物种或特定生态过程的空间异质性知识。

(4) 虽然景观综合图很适合于许多景观研究，但有些景观镶嵌更需要表达为系统特性的梯度（或连续变化面）。岛屿模型常常对这种系统的研究产生很强的影响，它一直是我们认识和模拟非离散边界系统中空间格局与生态过程之间关系的概念障碍。

(5) 大多数生态学数据都有自相似性，因此空间的自相似性检验是很重要的研究内容。这种研究借助景观图和空间结构函数对空间结构的描述，需要选择恰如其分的景观分析尺度，应避免违背分析方法的有关假设。

综上所述，正确的空间异质性分析模型研究需要注意以下几点：(1) 找出恰如其分的尺度，包括通过运用地学统计或分形等数学手段确定景观元的尺度和等级结构，同时分析有关生态过程对尺度的要求；(2) 选择基于分析目标和有关系统属性空间特征的分析方法；(3) 选择与生态过程有关的空间异质性模型体系；(4) 用数学模型表达生态过程和有关空间指标之间的理论关系。

这里值得指出的是，有些模型表面上并不是空间异质性的定量化表达，但它量化的对象有非常重要的空间效应，我们把这类模型也纳入空间异质性模型体系来进行处理。事实上，这类模型正是当前空间异质性模型研究的薄弱环节。

3 地学信息图谱

20 世纪兴起的航空摄影方法，不出半个世纪，就根本改变了 300 多年发展起来的地形图的测绘生产过程，为专门地图开辟了新的资料来源。50 年代到 60 年代，航空方法发展最迅速和最重要的两个方面是彩色与光谱摄影的发展和宇宙航行工具与电视传真技术的惊人成就，它们对微观和宏观的自然世界研究起了非常重要的推动作用^[9]。

1972 年第一颗地球资源勘测卫星的发射成功使人类开始从外层空间来观测整个地球。航天遥感

作为一种新型的地图信息源，具有快速、准同步和大面积覆盖的显著特点。它所提供的空前巨大的信息，使地图学面临着新的挑战：(1) 改变了传统的从大比例尺逐级缩编小比例尺地图的逻辑程序；(2) 及时指示地图更新的必要性和解决的办法，并分别利用不同分辨率的卫星影像进行监测或修测；只有在环境变化很大的局部地区才需要使用航空摄影进行重新测绘；(3) 实现准同步的动态制图；(4) 全球与星球制图成为现实^[10]。

七十年代，地图开始以数字信息的新形式问世。以计算机为工具发展起来地理信息系统，在一个公用的空间框架中为地理、文化、政治、环境和统计数据提供了输入、储存、处理、分析和显示能力。地图的编制和卫星影像的自动分类在地理信息系统支持下进行，大大地缩短了地图的生产流程。因此，地图不仅成为描述和表达地理现象分布规律的信息载体，而且是区域综合分析的研究成果，即地理信息系统输出的智能化产品。地图作为信息时代的产品，将以信息流代替物质流的方式来传播。地图学的任务不再局限于满足对地理圈各种原始测绘数据的粗加工，将更多地注意到开发高层次的知识密集型的产品设计。也就是根据开发资源和改善环境的特定目标，对多种来源的信息加以数字处理；根据特定的动态分析模型，为宏观规划与工程设计、施工和效益评价提供预测或预报^[11]。

地学信息图谱是现代技术和方法与我国传统研究成果相结合的产物，它的发展经历了三个阶段：景观制图实验，图谱概念的提出和地学信息图谱理论的形成。

3.1 景观制图实验

1955—1956 年，陈述彭先生在太湖东西洞庭山进行了综合景观制图实验^[5]，将景观综合图划分为相互补充的三类：景观类型图，景观分区图和景观综合剖面图。在试验总结中他肯定地说：“景观制图是一个有希望、有困难，然而是有办法解决的地理科学问题。在地球化学、水文地质学、地方气候与地植物学的理论基础上，依靠野外制图、定位观测与航摄照片判读等技术方法，是完全有可能建立起自己的理论和方法论体系的”。虽然由于这一时期的技术和方法的发展水平所限，还没有提出一套完整的理论体系，但已看到了景观综合图发展的光明前途。

3.2 图谱概念的形成

六十年代初, 陈述彭先生通过对地图学发展的分析, 提出了图谱的概念。地图学的发展反映了它的既属于技术科学又属于区域科学的性质。其各个发展阶段的进展和成就, 一方面反映当时测绘制印工艺的水平, 另一方面也反映当时数学基础和地理知识的范围。基于技术科学的性质, 就必须密切注意国际先进理论和技术的交流; 基于区域科学的性质, 又要求结合本国实际情况, 自力更生进行基础工作。综合地图集的编制要求经过严格的数量统计, 并按照类型区划的方法加以分析, 制定出可以反映区域地理特征的技术指标, 使地图集能够反映自然、社会经济要素和分布现象的相互制约、相互联系及其区域历史发展的过程。通过地理分布规律和历史发展过程两条线索, 把地图贯穿、交织起来, 使它们成为反映区域全貌和区域特征的图谱^[12]。

这里值得我们特别一提的是, 图谱思想方法的应用已经取得了令人瞩目的成果。例如, 黄河三角洲的成长速率就是通过图谱分析研究得出的结论^[13]。

1963年, 陈述彭先生对我国当时地图学方法论现状、研究任务和发展前景进行了概括和总结^[14], 其中图谱是一个很重要的方面。它们可归纳如下: (1) 我国为地形图建立了的国家体系的数学基础, 对适合我国特点的地图投影进行了初步的分析和设计, 并采用航空摄影方法测制地形图; 普通地图的内容和精度有了明显的提高, 开始研究制图综合原理和方法, 力求反映我国地理环境的特点; (2) 加强地图数学研究的地理观点以及地图的地理分析和数学方法是发展我国地图学的主要生长点之一; 加强航空像片分析原理和综合利用的研究, 运用立体量测和光谱分析方法, 研究地物几何特征的成象规律, 以及反射光谱的成像规律, 并设计自动量测仪器, 提高像片判读的精度和速度; 加强对地理要素的数量分析与类型区划工作, 从不同的角度出发, 制定能够反映我国地理区域特征的制图综合指标, 编制参考样图和图谱; (3) 在适合我国特点的地图数学基础上, 充分利用现代航空方法所取得的制图资料, 通过严密的数理统计与专门制图方法, 进行深入分析; 在保证高度数学精确性与地理规律性的原则下, 进行综合制图。

3.3 地学信息图谱理论的形成

经过近半个世纪的探讨, 终于形成了地学信息

图谱理论的雏形^[15]。地学信息图谱是在继承中国传统研究成果的基础上, 运用卫星遥感、全球定位系统、地理信息系统和信息网络等当代先进技术和现代科学理论发展起来的, 它是一种图谱生成过程智能化的系统理论。地学信息图谱由征兆图、诊断图和实施图组成^[15]。征兆图谱和诊断图谱可表达为各种基础图谱的不同组合、可反映资源环境动态的变化与发展趋势, 这些基础图谱类型包括气象动力图谱、海洋动力图谱、地球动力图谱、环境图谱、资源图谱和人工建筑图谱等^[16]; 实施图谱以诊断图谱为依据, 通过改变各种边界条件, 分析推理不同控制条件下的决策方案, 可为进行规划实验提供依据和预案^[17]。

图谱是一种源远流长的中国传统方式, 主要运用图型语言进行时间与空间的综合表达与分析; 地学图谱则是应用地学分析的系列多维图解来描述现状, 并通过建立时空模型来重建过去和虚拟未来; 地学信息图谱不仅应用于数据采集和数据开发利用, 而且服务于科学预测与决策方案的虚拟^[15]。地学信息图谱具有以下四个重要功能: (1) 借助图谱可以反演和模拟时空变化, 即可反演过去、预测未来; (2) 可利用图的形象表达能力, 对复杂现象进行简洁的表达; (3) 多维的空间信息可展示在二维地图上, 从而大大减小了模型模拟的复杂性; (4) 在数学模型的建立过程中, 图谱有助于模型构建者对空间信息及其过程的理解^[17]。

4 结语

数学始终是景观综合图和图谱理论发展的基础; 数学模型是地学信息图谱实践研究及其应用的重要手段。地学信息图谱综合了景观综合图和数学模型可以提供的互补信息, 吸收了景观综合图的简洁性和数学模型具有抽象推理能力的优点, 它是具有中国特色的、对宏观决策大有可为的综合空间异质性定量研究方法。

参考文献

- [1] Pielou, E. C. *Mathematical Ecology*. New York: John Wiley and Sons, 1997.
- [2] Gustafson, E. J. Quantifying landscape spatial pattern: what is the state of the art. *Ecosystems*, 1998 (1): 143~

- 156.
- [3] Li, H., Reynolds, J. F. A simulation experiment to quantify spatial heterogeneity in categorical maps. *Ecology*, 1994, 75: 2446~2455.
- [4] Turner, M. G. Landscape ecology: the effect of pattern on process. *Annu. Rev. Eco. Syst.*, 1989, 20: 171~197.
- [5] 陈述彭. 太湖东西洞庭山的景观制图实验. 1957, 北京: 科学出版社.
- [6] 陈述彭. 大比例尺景观制图方法及其实验(景观制图研究专辑). 1958, 北京: 科学出版社.
- [7] Forman, R. T. T. *Land Mosaics: The Ecology of Landscapes and Regions*. 1995, New York: Cambridge University Press.
- [8] Turner, M. G., O'Neill, R. V., Conley, W., Conley, M. R., Humphries, H. C. Pattern and scale: statistics for landscape ecology. In: Turner, M. G., Gardner, R. H. (editors), *Quantitative Methods in Landscape Ecology*. New York: Springer-Verlag, 1991, 17~49.
- [9] 陈述彭. 地图学的展望. 地域研究与开发, 1988, 7 (1): 1~6.
- [10] 陈述彭. 地图学的展望. 地域研究与开发, 1988, 7 (2): 1~6.
- [11] 陈述彭. 地学的探索, 第三卷: 遥感应用. 1990, 北京: 科学出版社.
- [12] 陈述彭. 综合地图集的设计与区域特性的反映. 地理学报, 1961, 27 (1): 38~56.
- [13] 陈述彭. 有关地图科学发展的几点历史启示. 地理, 1962, (5): 189~192.
- [14] 陈述彭. 地图学的若干现代特征. 地理学报, 1963, 29 (1): 36~47.
- [15] 陈述彭. 地学信息图谱雏议. 地理研究, 1998, 增刊: 5~9.
- [16] 承继承. 资源环境信息图谱机理探讨. 地理研究, 1998, 增刊: 17~22.
- [17] 周成虎、李宝林. 地球空间图谱初步探讨. 地理研究, 1998, 增刊: 10~16.

Quantitative Research Methods of Spatial Heterogeneity

Yue Tianxiang

(State Key Lab of Resources & Environment Information System, CAS, Beijing 100101)

Abstract

Spatial heterogeneity is the kernel of quantitative studies of landscape ecology. The quantitative research methods include comprehensive landscape mapping, mathematical models and Geo-informatic Tupu. This paper summarizes contents and indexes of the comprehensive landscape mapping, points out the issues needed to be further studied and emphasized in mathematical models, and believes that the Geo-informatic Tupu is the most comprehensive method for quantitative study of spatial heterogeneity. The Geo-informatic Tupu synthesizes the succinctness of comprehensive landscape mapping and the abstractness of mathematical models. The Geo-informatic Tupu is an outcome of the Chinese traditional research achievements combining with relative modern technologies. Its development process can be divided into three stages that are experiment on landscape mapping, proposition of Tupu concept, and formation of Geo-informatic Tupu Theory. It can be used, by applying a series of multi-dimensional graphic solutions and constructing spatial models, to formulate the current situation, to reconstruct the past and to forecast the future of landscape spatial heterogeneity.

Key words: Spatial heterogeneity Comprehensive landscape mapping Mathematical model Geo-informatic Tupu