

城市规划 中的 空间地理信息 与 决策支持

GEO-SPATIAL INFORMATION AND
DECISION SUPPORT FOR URBAN PLANNING

▶ 詹庆明 主编



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

国家自然科学基金 (40871211、70671076)

国家高技术研究发展计划 (2006AA12Z151、2007AA11Z207)

武汉大学数字城市研究中心

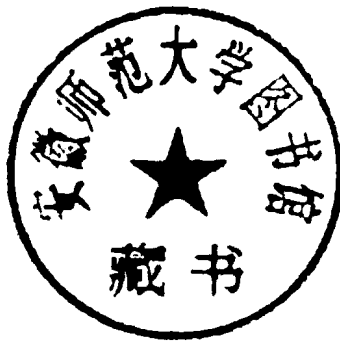
共同资助

城市规划 中的 空间地理信息 与 决策支持

GEO-SPATIAL INFORMATION AND
DECISION SUPPORT FOR URBAN PLANNING

主编 詹庆明

副主编 黄正东 肖映辉



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

城市规划中的空间地理信息与决策支持/詹庆明主编. —武汉:武汉大学出版社,2009. 1

ISBN 978-7-307-06669-4

I. 城… II. 詹… III. 地理信息系统—应用—城市规划—文集 IV. TU984-53 P208-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 175989 号

责任编辑:任仕元 夏炽元 责任校对:黄添生 版式设计:马 佳

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:湖北地矿印业有限公司

开本:787×1092 1/16 印张:25 字数:602千字 插页:2

版次:2009年1月第1版 2009年1月第1次印刷

ISBN 978-7-307-06669-4/TU·73 定价:58.00元

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,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。

内 容 简 介

为了更好地满足国内读者对城市规划中应用空间信息和决策支持技术发展的了解和学习交流的需要,更好地为我国快速城市化和城市规划新技术发展服务,本书收集了“城市规划——空间信息与决策支持”国际学术研讨会与会代表提交论文的中文稿。论文作者来自英国、荷兰、美国、澳大利亚、新加坡、中国等国家和我国的香港地区的著名大学和研究机构,代表了该领域的发展前沿。根据其内容,可分为五个部分。第一部分为城市系统建模与分析,以英国院士 Michael Batty 关于城市复杂性的论文为代表;第二部分为决策支持系统的理论与方法,以阿姆斯特丹大学的研究成果为主体,侧重于决策支持系统应用环境因素的分析;第三部分为城市空间与土地利用的建模与分析,包括土地转换特征、城市土地利用结构分析、城市增长模型等;第四部分为城市基础设施及公共服务设施的建模与分析,包括公共交通潜力分析、道路选线、防灾设施、公共设施的可达性分析、道路交通数据融合及数据库等;第五部分为城市形象塑造的技术方法,包括景观分析、城市空间形态分析、古建筑保护等。

本书适合城市规划、人文地理学、地理信息系统专业学生作为教学参考书,也可以作为相关专业科研和设计人员的技术参考书。

前 言

20 世纪 90 年代以来，中国经济以前所未有的速度快速发展。伴随着这种大规模经济发展浪潮的是城市规模的快速扩张，主要表现在城市人口、建成区的增长。根据统计，我国过去 15 年城市新区的开发规模已经较原来的规模翻了一番。城市规模的扩张给城市规划带来了挑战，规划需求量激增，也刺激了设计市场的繁荣。然而人们很快发现，随着市场机制的逐步深入以及城市招商引资、房地产开发热情空前高涨，城市规划面临的挑战日益严峻。城市规划传统的技术方法已很难跟上现实的需要，相关领域技术手段的可用性日益显现。

我国当前的城市规划在很大程度上属于空间规划的范畴，因此，城市空间要素的分析十分重要。空间信息技术发展为城市空间分析与决策提供了技术与方法的保障。首先，空间数据获取质量不断提高。航空、航天遥感继续为城市增长提供监测数据，其空间分辨率和时间分辨率都在提高，更精确的数据产生更丰富和准确的信息。同时，激光遥感数据提供了三维信息，构成了城市立体空间分析的基础。其次，以全球定位系统（GPS）为代表的地面定位技术进一步发展，精度逐步提高，借助逐步设立的基准站，可以快速获得厘米级的位置精度。这些都为城市中特征点数据的采集提供了快捷精确的手段。另外，地理信息系统（GIS）技术在数据管理、多源数据融合、空间分析功能、数据发布等方面的功能日益完善，使得城市规划与管理对其依赖逐步增强。

城市规划与管理过程包含从结构化到非结构化的系列问题，涉及从定性到定量的技术方法。数据处理能力的提高、空间数据分析方法的改善、信息表达手段的提升都为规划提供了辅助决策的可能性。以现有技术为基础，已经出现了多种适合于特定需求的决策支持工具，如 What-if、Community-Viz 以及各类城市发展模型。可以预见，随着我国城市开发趋于稳定，有关部门将逐步加强决策的科学性和适用性，决策支持技术也将得到广泛应用。

为了适应我国快速城市化的进程，促进我国城市规划与管理决策理论、方法的发展，扩大与发达国家的学术交流，由武汉大学城市设计学院联合国际著名学府荷兰乌德勒支大学（Utrecht University）、阿姆斯特丹大学（Amsterdam University）、荷兰地理信息科学与对地观测学院（ITC）以及爱尔兰国立梅努斯大学（National University of Ireland, Maynooth）于 2006 年 10 月 30 ~ 31 日在武汉大学举办了“城市规划——空间信息与决策支持”国际学术研讨会。多名院士在大会上作了精彩的演讲。

本书为“城市规划——空间信息与决策支持”国际学术研讨会与会代表提交论文的中文汇总。根据其内容，可分为五个部分。第一部分为城市系统建模与分析，以 Michael Batty 关于城市复杂性的论文为代表；第二部分为决策支持系统的理论与方法，

以阿姆斯特丹大学的研究成果为主体，侧重于决策支持系统应用环境因素的分析；第三部分为城市空间与土地利用的建模与分析，包括土地转换特征、城市土地利用结构分析、城市增长模型等；第四部分为城市基础设施及公共服务设施的建模与分析，包括公共交通潜力分析、道路选线、防灾设施、公共设施的可达性分析、道路交通数据融合及数据库等；第五部分为城市形象塑造的技术方法，包括景观分析、城市空间形态分析、古建筑保护等。

目 录

第一部分 城市系统建模与分析

城市系统的复杂性和突现及其在城市规划中的意义	Michael Batty(3)
中国城市规划中的地理空间环境的比较性研究	程建权 詹庆明 张小男(14)
浅议信息技术对知识管理变革的影响	罗名海(29)
城市仿真系统关键问题研究	方 浩 廖启鹏 李待宾(35)
基于全球卫星定位系统和运动能量监视器的儿童行走行为的可 视化 ... Yi Gong Roger Mackett James Paskin Kay Kitazawa Brown Belinda(42)	
基于元胞自动机模型的城市发展的可视化方法	张 军 周玉红(54)

第二部分 决策支持系统的理论与方法

规划支持系统:如何提升其应用?	Stan Geertman(65)
战略空间规划中的信息支持 Marco te Brömmelstroet, Perry Hoetjes & Thomas Straatemeier(70)	
社会和空间网络互相依赖的离散选择——一个应用场效应和“小组”效应的混合 GEV 模 型实证	Elenna R. Dugundji Joan L. Walker(87)
城市环境中行人冲撞危险强度的空间分析及其对规划决策的 意义	Hoe-Hun Ha Jean-Claude Thill(101)
用户为本的土地利用与交通运输规划支持系统	Marco te Brömmelstroet(127)
基于涉众系统设计的城市规划政策设计框架	马永驰 西 宝(138)
参与式制图与参与式地理信息系统在新农村规划之迁村并点中的应用 ...	周玉红(146)

第三部分 城市空间与土地利用的建模与分析

深圳市土地利用结构的信息熵和分形分析	詹庆明 祁 磊(157)
多时相城乡土地转换的空间分析	黄 波(168)
居住用地扩展的多主体模型研究:以武汉市洪山区为例	彭 翀 程建权(182)
GIS 在城市规划用地评价中的应用——以云南楚雄市为例	廖伟华(191)
应用景观指数的 SLEUTH 城市增长模型规划方案评价 ——以重庆市为例	黄经南 刘 勇(196)
基于 GIS 的武汉市总体规划实施研究	肖映辉 詹庆明(213)
城市总体规划实效研究——以天津市为例	蒲向军 陈 剑(221)

第四部分 城市基础设施及公共服务设施的建模与分析

公交潜力指数——分析城市公交潜力的空间分布	姚小白	周月琴	(233)
公共交通数据模型与公共交通规划的有效关联方法	黄正东		(242)
提高发展中国家邮政服务设施可达性的研究	司马艺娜	张 点	(248)
公园游憩设施与防灾设施的和谐设计——防灾公园的重要规划			
设计思想	初建宇	苏幼坡	(258)
GIS 支持下城市公共服务设施规划的可达性研究	吕 毅	庞前聪	(263)
城市道路基础数据库的道路编码、数据结构和更新			
研究	庞前聪	詹庆明 吕 毅 王 昭 肖 晶	(268)
基于 GIS 技术的海口市滨江东路道路选线研究	雷 鹏	黄正东 李 磊	(279)
基于 GIS 的决策支持系统在城市公墓选址规划中的应用	张 点	司马艺娜	(287)

第五部分 城市形象塑造的技术方法

基于分形方法的城市空间形态特征研究	张 毅	余 洁	樊 玮	(305)
基于 GIS 的北京市建筑密度空间分布特征分析	郑新奇	象伟宁	李丽华	(318)
论中国古建筑的现状与保护	密新武	常兆选		(325)
运用基于 GIS 的水质保护区分析为河岸带景观规划提供科学				
依据	象伟宁	周玉红		(333)
长江中下游流域环境保全和景观规划管理手法的研究	许艳玲	何 经		(346)
GIS 和遥感在城市环境质量模糊评价中应用的关键问题探讨	窦凯丽	詹庆明		(354)
附录一 论文英文摘要				(364)
附录二 作者名录				(387)

第一部分

城市系统建模与分析

城市系统的复杂性和突现及其在城市规划中的意义

Michael Batty

【摘要】 城市被认为是复杂系统的精华实例。似乎有一双无形的手控制着城市的形态，它把规划和建造城市的个体和群体的各种行为紧密地联系在一起。自 20 世纪中期“系统论”问世以来，城市被认为是能代表系统之间的基本要素相互作用的绝佳例子，完美地体现了“总体大于个体之和”这一法则。此后，随着复杂系统理论发展并吸收系统科学和系统动力系统的内涵，城市再一次被用来展示一系列的基本主题，例如：基于局部行为的总体组织，由简单空间决策而引发的突变形态，不确定性和局部个体的随机决策引发的总体有序，由协同进化、竞争和无限的变化而来的演化和进步。

我们将会以城市为例来概述这些思想，举例说明 3 个关键的概念和它们之间的关系——连续变化系统、定性转变和由于系统整体属性出现变化而发生的突变。我们的这些分析意味着构筑城市是由下而上而建的新理论，而不是传统理论里自上而下的以建设更好的城市为名进行的各种干预。现今，像种族隔离、城市扩展、交通挤塞、城市衰落和再发展等社会问题，都体现了我们在这里谈到的复杂系统的特点。

【关键词】 城市形态 系统科学 复杂性

1. 早期开端

城市从来就是复杂的和表里不一的。当试着去理解它的形式和功能时，我们通常的反应是回到我们被灌输的它的早期形态，即整体是通过许多个体的简单累加而形成的。但是我们知道，甚至在我们开始之前就知道，对于城市这个策略是行不通的。个人的行为是很难和我们所观察到的日常次序协调起来的，尤其是在人们的工作地点，兴建房屋的地址，以及娱乐中心、体育场馆和大型购物中心所见到的盲目蜂拥的现象。总之，“总体大于个体之和”（Simon, 1962），简单地把个体加起来不可能组合成整个社会，我们都意识到还有些额外的东西使城市运行得像个有次序的整体。同样，通过简单地分解整个系统和检验局部，我们还是找不到它的本质。当我们试图了解这种复杂性，传统科学中的简化策略失灵了。

半世纪前，在“系统论”的旗帜下，科学开始涉及复杂系统（van Bertalanffy, 1972），从那时起，很多科学领域发生了转变。高度集中、由上而下的纯粹解释不再能满足我们的需要。随着分权政府和行动的逐渐演化，至少在西方学术界，传统形式的科学已变得不太可信。这一现象随着信息技术的普及而大大地加速了。以至于用于解释的

主流模式也转变为对由下而上的现象进行解释。一百多年前，城市规划作为一种政府的职能而产生，目标是将城市建设成为更具吸引力、更高效率和更公平的居住地，但是从历史上看，它从来没有达到这一目标（Batty, 2008），就像所有运用于复杂系统的管理，它并不能预见从下往上的变化。

城市规划的失败往往缘于缺乏对城市运行情况的正确把握和深层次的理解，正如在政治和意识形态层面上试图通过政治或意识形态的方式来控制和管制社会。城市不仅仅是它的各个环节的总和。试图通过焊接各个环节而使其工作的思想违背了其本质。事实上，现今的复杂性理论在原有的基础上已经前进了一步。举例来说，Anderson（1972, 393 页）写道，“……整个……（是）……不仅仅是更多，而且非常不同于部分的和”。但是，是 Jane Jacobs（1961）首先提出城市应该被看成一个有组织的复杂系统。在一系列有先见之明的书籍和文章中，她主张多样性和多样化是城市的特点，但是这一特性被当代城市规划理论忽视了。Warren Weaver（1948）在 Rockefeller 基金会的一次演讲上提出系统根据其应用可以分为 3 类：简单系统问题，无组织复杂系统问题和有组织复杂系统问题。Jane Jacobs 受这一启发从而创造出了一门新的城市科学，即 Warren Weaver 的第三类系统，从而成为新的学术研究前沿。其主要论点认为：大多数科学问题一旦离开了受控制的实验室环境，就变得复杂但又具有组织性。因此，这需要新的方法来处理这一自下而上的演化过程。由自下而上这一思想生成的理论和应用的过程代表了对真相的探索。

在这篇文章里，我们将会阐明复杂系统如何适用于城市系统。城市形态和功能的变化揭示了这一扑朔迷离的模式和过程通常被过于简单化了。许多用于解释城市形态的理论错误地假设了工业时代的城市可以用相对简单的增长和变化过程来解释。工业时代的城市不仅仅是围绕传统集市中心的有次序的环状模式，它现在被称之为核心或者是中心商务区（CBD）。物资的交换形成了城市，传统的城市中心也就是进行贸易的集市。大多数的城市理论认为城市是介于离市中心尽可能地近，物品在市中心的交换价值和生产这一物品所需空间这 3 种条件之间的一种折中。在假定无特殊性的情况下，这种模型是有效的。但是它不适用于多核心的情况，因此，多中心和单中心之间的竞争成为一个很大的问题。同时，这种模型过于简单地看待旅行和交通，尤其是在现今这个充满其他可选择的通信方式的社会。因此，出现使用这样的理论模拟城市及决策不能够很好地反映实际情况的现象也就不奇怪了。此外，这类模型是完全静态的，它假设城市是稳定不变的。尽管城市乍看起来像没有变，但这是不符合实际的。事实上，看上去稳定不变的是城市中的实物，例如，城市的结构、房屋和街道，在经济和社会的理论中城市是处在不断发展之中的。仅就曼哈顿闹市区或伦敦金融城而言，在过去的 50 年里，城市面貌本身似乎没有什么变化，但是从其功能和行为上而言，一切都在变化。事实上，比想象中更多的城市环境在变化，城市发展中的破坏和重建过程包含了在连续的模式下进行的重建和翻新城市面貌的过程，虽然这一过程通常发生在原址（Batty, 2007）。

我们从以下三个角度来探讨城市的变化：相对于不连续和分歧的连续、在形式和职能上的各种模式之间的演变、新的质和结构上的变化而引起的突现。在一定意义上讲，这一动态过程意味着城市是运转在不同的时间和空间尺度上的。采用的看问题角度和表

达方式决定了我们看待这些变化的重点。我们将举例从其本身和空间上说明这三个角度。城市的一个主要特点是它的空间次序从来不像它所表现的那样，可由不同过程而生成同样的模式。这就意味着，我们需要非常谨慎地通过城市空间模式来解释其复杂性，通过解释每个例子来揭示其产生过程。

城市进化中的连续性是我们的第一个例子。在这个例子中，我们将详述缓慢和渐进的变化是如何产生突变的，但又巧妙地显露了可能发生的分歧。演变是看待这一问题的另外一种方式，第二个例子将说明系统是如何适应不同的临界值的。自我组织理论中的临界状态很好地解释了这一变化，尤其是在何种情况下会发生戏剧性的转变推动系统迈向一个新的状态。这些观点同样也可以归纳为突现这一概念。John Holland (1998) 恰当地总结道，“……很多是由少许构成的……”（第 1 页），完全一致的结构是不同于并且多于其各个部分的总和。本文将以当代城市的城市扩展、边缘城市、双核或多核的中心商业区（CBDs）、不同类型居住区、少数民族聚居区和由于技术进步所引发的新的交通方式、全球和世界城市格局等为例来说明我们的观点。

2. 连续性：相对缓慢的变化

城市增长的过程在本质上不同于城市衰退，这是因为增长的表现形式在于某些地点的土地用途由非城市到城市的转变，但是衰退则不一定意味着这一过程的逆转。在很长的时期内，城市的规模在不停地增大和缩小。但在这里我们关注的是以增长为主导模式的当今社会。到这个世纪末，我们相信几乎所有地方都将会城市化。因此，我们会面临一个相当不同的发展趋势：是什么构成了一个城市与城市的增长。我们的讨论仅限于在过去 200 年以及未来 100 年里城市的增长。在微观空间尺度上，增长涉及个体在土地利用、功能和密度，以及变化的快慢，可渐进也可突变。但是一旦我们从宏观上看，这种不确定性就被平均化了。就整个城镇和市区而言，尽管事实上绝对增长的活动量可能会是指数式的增长，但是空间模式上的变化往往是缓慢而逐渐变化的。

在过去 100 多年里拉斯维加斯的增长体现了这种缓慢的变化（见图 1）。在不同时期，城市蔓延的模式看上去似乎是相同的。但是就城市而言，拉斯维加斯由 1950 年前的沙漠中的绿洲中转站完全转变为如今以娱乐和赌博为名的美国大都会。图 1 显示了指数式的人口增长、就业和旅游业，但是增长模式大体相同，为连续性的边缘扩展。事实上，城市增长方向的不同是取决于地理和偶然的历史因素，并不意味着在不同时期里增长方式有所不同。

这种变化证实了对于具有相对简单结构的城市，其增长形态和格局在很长一段时间里可以用一般涵盖性的观点来解释。不论大小，自下而上的发展过程同样发生作用，类似作用也发生于大型和小型结构。理想化模式是指由单一的根源而生成，其局部以统一的模式发展而形成城市，这种模式往往产生分形模式。所谓的分形模式是指形式上的自相似模式，相对于现实的城市里的实物观察尺度。假设单元只能在其紧邻的周围有且仅有一个单元被发展的情况下得以发展，图 2 展示了这一确定性规则是如何运作而发展成新的结构。这是一个典型模块化原理的例子——当开始发展时保留一定的密度和空间，

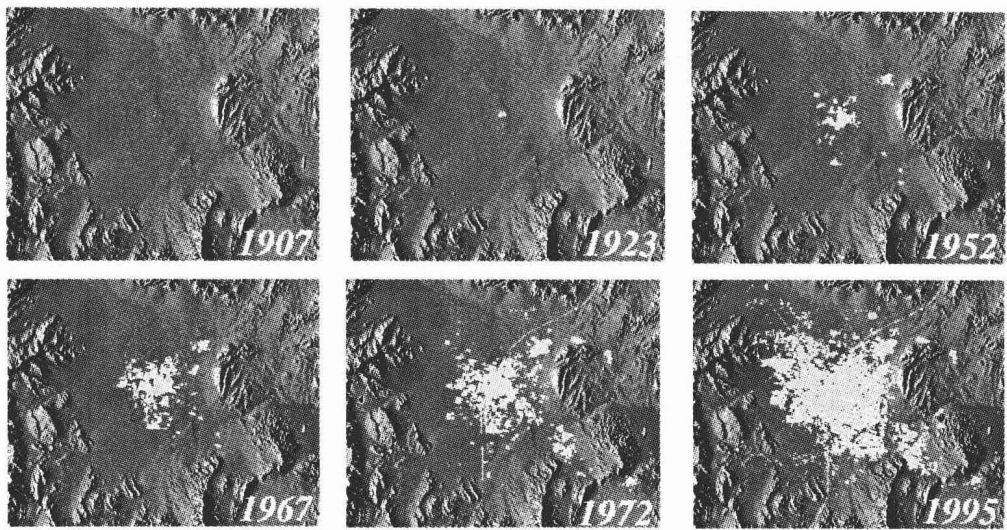


图 1 拉斯维加斯在 1907 年至 1995 年间的增长 (摘自 Acevedo et al. , 1997)

但当持续发展时它又在不同尺度上表现出既有规则又自我相似的个体单元增长。其典型案例为文艺复兴时期的城镇，往往是以这种基于古典建筑风格的理想城市为模式。如果加入一些噪音或误差，这一结构的对称性将会立即被破坏。如果假设单元发展的可能性直接和其紧邻的单元是否得以发展有关，这将产生无定形的结构，类似于我们所看到的拉斯维加斯发展而产生的辐射状中心结构。图 3 是发展无处不在的圆形结构。虽然城市空间被完全充满，但每个单元的发展次序是取决于各个时期的随机概率。

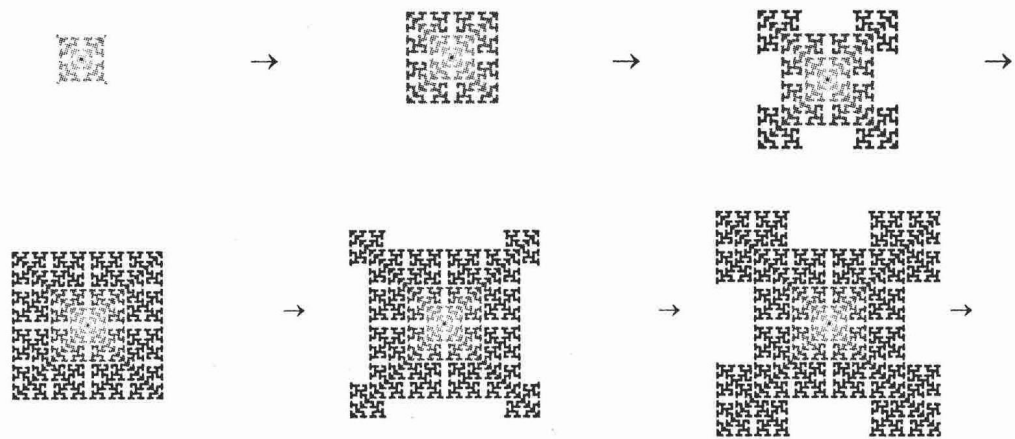


图 2 由下而上的确定性增长：基于该单元的紧邻 8 个单元里有且仅有一个单元被发展

倘若城市增长可以被认为是分形增长里所描述的最简单模块和规模的形式，我们很自然地倾向于不考虑本身增长、而仅靠概括性地解释，来研究这些模式是否代表了一个

规模简化了但又具有相对平衡模式的系统。然而，这却是我们应该极力避免的。如果从本质上检验增长过程及其活动形式、分解规模和改变时间间隔后，这种稳定状态会迅速改变。图 1 中的时代是科学技术突飞猛进发展的时期。尽管拉斯维加斯直到 20 世纪 50 年代才开始发展其赌博业，但那时它已经发展迅速，并且有大量资金流入当地经济。但对于本地居民，就算拥有西方国家最高的人均收入也没有改变其随后爆炸性的增长。马车是早期拉斯维加斯的唯一交通方式，但是城市的发展是需要汽车、飞机和空调的，更不用说现今告诉我们如何赌以及赢和输的信息技术。

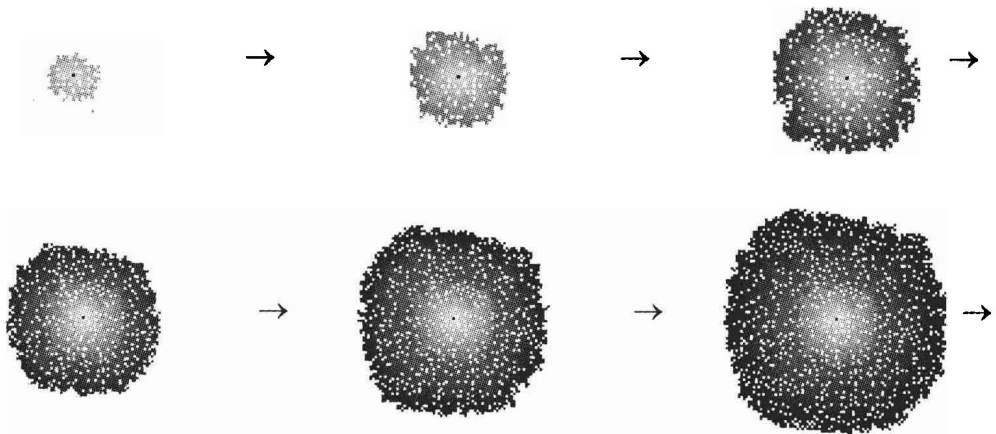


图 3 由下而上的随机性增长：基于在随机情况下该单元的任一紧邻单元里有单元被发展

是不是有一种微妙的分歧发生在这 100 年里的增长过程中？如果有，可从空间模式中看到，似乎又看不到它的存在，但是这一分歧肯定是存在的，那些 1945 年、1970 年和现在都在拉斯维加斯的人很容易证明它的存在。城市从来不是我们所见的样子。

3. 演变：持续和自我组织的临界状态

我们的六幅拉斯维加斯增长图显示了完整的城市增长过程并不只是周边小范围气泡式发展其后被主体发展所吸收的增长模式。这仅仅是因为在发展的过程中房屋通常被建造在城市边缘。以历史较长的西方居民居住地为例，这可以解释为当城市蔓延时老的村庄和独立的城镇被纳入其范围。图 4 是 1991 年伦敦的人口密度，在历史上，有很多城镇和村庄存在于大伦敦之前。图中这种动态性显示了大城市的转变。假设城市主体可以被定义为相连接的居民居住地，其居民可以直接或间接地相互连接。连接在这个意义上是指从系统一边简单环绕到另一边的能力。在图 4 中的大伦敦形成之前，在没有进入空地和乡村的情况下，这种环绕连接是不可能达到的。此外，我们对大都会的定义是以尽可能简单的形式互相连接的一种城区形式。

就图 4 而言，我们可以设想伦敦的连接方式是一个很稀疏的网络，因为从另一个极端而言，整个空间都是可以被填满的。事实上，随着空间密度而演化的连接性只要充满

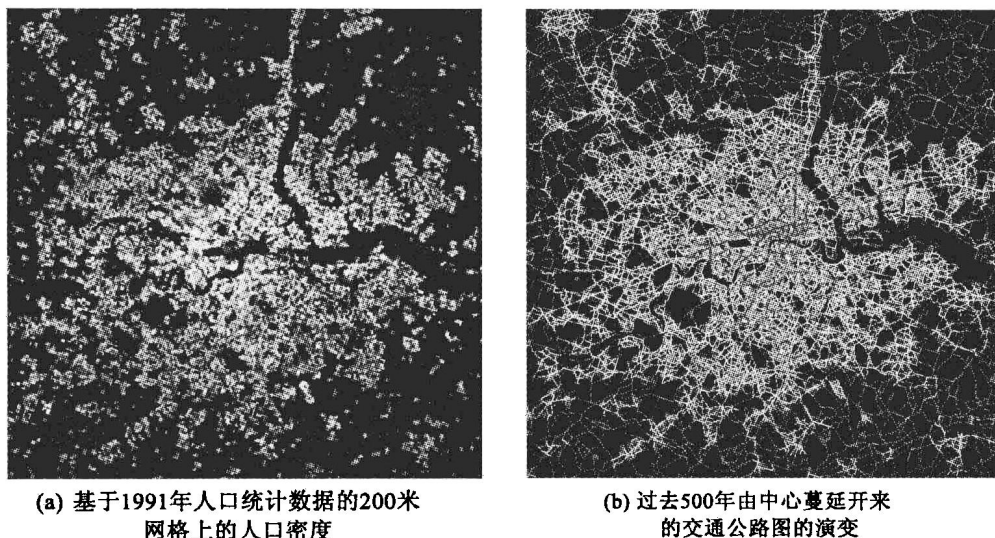


图4 伦敦：蔓延中相连接的城镇和村庄

一定空间就可使其作为整体而运转了，而且正是这种形态和连接性层次标志着城市达到了一种至关重要的自我组织的状态。如果当更多的空间被填满时，虽然这增加了连接性，但是具有一定程度的冗余结构反而降低了其效率。但如果低于这个状态，系统不是连接的，从而不能作为城市主体而运转。

这个比较明显的例子说明了城市演变到一个自我组织的程度，并保留这一状况，直到先进的科学技术推动这一系统到另一个模式。例如，伦敦的形态很大程度上取决于各种不同的交通运输方式——以汽车为主和固定的铁路线路为辅。但在以步行和马车为主的19世纪以前，现今的系统是不可能存在的，而当时伦敦的结构也是非常不同的。以电力为动力而产生物理运动的新科技会给城市形态带来根本性的变化，以至于在突破临界状态后，我们的活动空间会重新调整到一个我们无法想象的方式。科学技术的变革事实上标志着不同的模式。虽然不同阶段和时期是基于弹性系统的演变，但根本性的变化最终将会推动系统突破临界状态至一新模式，然后自我组织至下一个临界水平。有些评论家形容这一过程类似于社会过渡阶段，类似于我们在物理学中明确定义的物理现象。举例来说，Iberall 和 Soodak（1988）描述欧洲过渡过程，“……就像水分子由液体的水转至零结冰状态：好几个世纪以来，人口是流动和不稳定的——突然出现了具有稳定结构的城镇网络，而这将或多或少地保持其完整性直至下一个大转变，也就是19世纪期间兴起的工业大都市。”

以系统如何自我组织至一临界状态但又没有突破这一状态为例，可以较为容易地说明这种颇为神秘的城市动态。图5展示了在网格面上5个位置随机设定的小村庄。当我们逐渐增加其人口密度，小村庄也就逐渐发展为大一些的城镇。与此同时，我们计算每个被村庄所占的格子之间的平均距离。在这一过程中，有很长的一段时间里是没有办法在被占格子之间来回走动的，这是因为它们之间没有互相连接。可是，当密度达到

59%左右格子被随机占领的时候，格子和格子之间突然可以相互连接起来。从这一点开始，平均距离突然由‘无限’降至某一现实水平。如果我们继续增加密度，平均距离减少的程度不大，进一步下降的趋势缩小。回到城市这个例子，开始相互连接的临界状态的出现意味着城市在空间上的突现，例如伦敦。而这只有在交通技术达到可以实现这样的连接程度的情况下才有可能。从某种意义上说，现今的全球性的大型城市只可能在当今科学技术的支持下得以实现，这不只包括交通技术，同样还包括其他有助于大规模城市生活的技术。在没有比战车跑得更快交通工具的古代，罗马是当时世界上最大的城市，但其人口并没有增长到超过 100 万。

图 5 生动展示了在一个 101×101 栅格里增长密度和连接性对于分布在里面的居民区的影响。我们看到当 40% ~ 65% 的格子被占满时居民区开始互相合并。如果我们绘制一现实的所有被占点的平均距离的转变图画，以建立临界状态，那么将有一个戏剧性的变化在 59% 左右，这就是物理学中的多孔介质的渗透阈值。在这一临界状态下，平均距离由无限降至定值。但密度达到 65% 时，这个被占点之间的平均距离保持稳定，即使密度上升至高于这个水平。

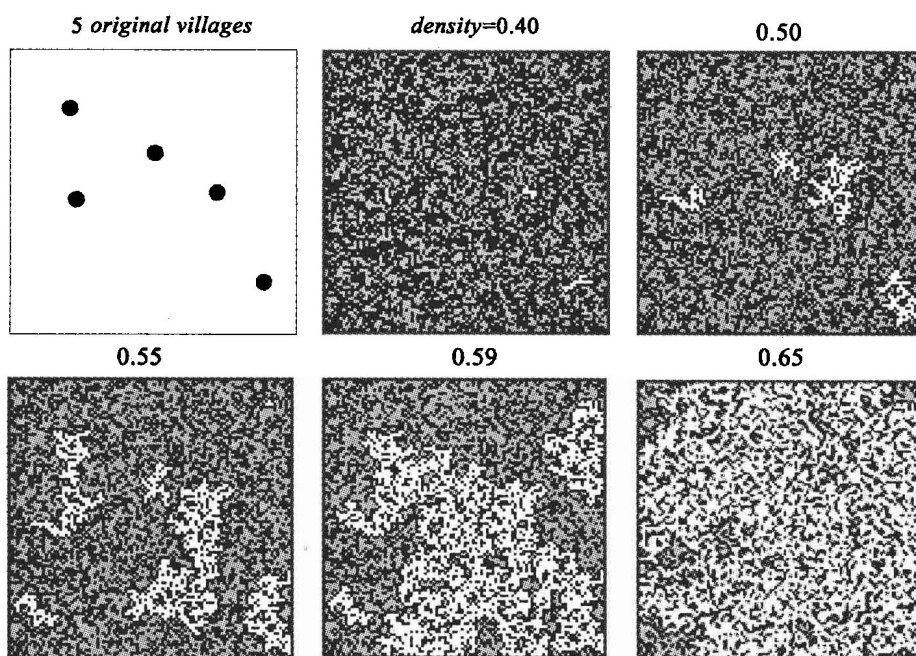


图 5 增长密度和连接性至自我组织的临界状态

4. 突现：突然性的质变

城市中的突然变化很大程度上依赖于我们观察的范围以及其发生的时间间隔。例如，交通堵塞仅仅是由密度增加而引起的，同时其波动现象是由不同加速度和刹车在几