



上海市科学技术协会
“晨光计划”资助出版

城乡路网系统的 空间复杂性

刘承良 著



上海科学普及出版社

国家自然科学基金项目（项目编号：41201130、41571123）研究成果

城乡路网系统的 空间复杂性

刘承良 著



上海科学普及出版社

图书在版编目(CIP)数据

城乡路网系统的空间复杂性/刘承良著.--上海:上海科学普及出版社,2017.12

ISBN 978-7-5427-6611-3

I. ①城… II. ①刘… III. ①道路网—研究
IV. ①U412.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 284091 号

责任编辑 张 帆

城乡路网系统的空间复杂性

刘承良 著

上海科学普及出版社出版发行

(上海中山北路 832 号 邮政编码 200070)

<http://www.pspsh.com>

各地新华书店经销 上海惠敦印务科技有限公司印刷

开本 787×1092 1/16 印张 23.5 字数 470 000

2017 年 12 月第 1 版 2017 年 12 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5427-6611-3 定价: 60.00 元



上海科技发展基金会(www.sstdf.org)的宗旨是促进科学技术的繁荣和发展,促进科学技术的普及和推广,促进科技人才的成长和提高,为推动科技进步,提高广大人民群众的科学文化水平作贡献。本书受“上海科技发展基金会”资助出版。

“上海市科协资助青年科技人才出版 科技著作晨光计划”出版说明

“上海市科协资助青年科技人才出版科技著作晨光计划”(以下简称“晨光计划”)由上海市科协、上海科技发展基金会联合主办,上海科学普及出版社有限责任公司协办。“晨光计划”旨在支持和鼓励上海青年科技人才著书立说,加快科学技术和传播,促进青年科技人才成长,切实推动建设具有全球影响力的科技创新中心。“晨光计划”专门资助上海青年科技人才出版自然科学领域的优秀首部原创性学术或科普著作,原则上每年资助10人,每人资助一种著作1500册的出版费用(每人资助额不超过10万元)。申请人经市科协所属学会、协会、研究会,区县科协,园区科协等基层科协,高等院校、科研院所、企业等有关单位推荐,或经本人所在单位同意后直接向上海市科协提出资助申请,申请资料可在上海市科协网站(www.sast.gov.cn)“通知公告”栏下载。

序 言 一

我认识承良时,他还是华中师范大学的博士生。交流中,得知他研究的兴趣在城市与区域中的交通网络复杂性。他提到当时基于中国的复杂交通网络研究,一般出自物理学家和工程类学者,所以空间因素考虑得不多,结果也缺乏对于社会经济因素的考量。我非常赞同,鼓励他用中国的案例,从地理学角度继续深化拓展。

当时,承良虽然在职于湖北大学,但只用三年的时间,就完成了这篇成果良多的博士论文。期间部分成果也陆续发表在中国地理学的几大杂志上,很快成长为一个小有声誉的交通复杂网络青年学者,随后调入华东师范大学。我回顾他的成长,起点并不起眼,跨越的历程却很可观。究其原因,起码有三点:一是研究方向的选择,是从中西文献的广泛涉猎中寻找到的切实缺口,真正拓展了自己可能生长的空间;二是研究计划中当遇到自己技能的短板时,积极寻找合作伙伴;三是比较擅长保护自己的研究时间、环境和心境。最后这点,在当今“外面的世界日益精彩”的中国尤为难能可贵。

作为第一个外国读者,读罢,我认为这本由其博士论文拓展的专著有三个亮点。首先,是研究区域界定为“都市圈”,从高城市化的大都市核心区到偏远的乡村聚落,范围涵盖了城乡渐变的整个“波段”,揭示了交通网络与城乡联系、人类住行的互动机理。其次,是研究时段为1989~2010年,正是中国交通网络(特别是公路网)发展最快的20余年,是用较短时间浓缩极大变化的难得案例。第三,正如前面提及的,它不仅仅梳理了复杂道路网的统计规律,而且更关注道路网的空间结构自组织演化,努力讲述了数值背后的故事,即社会经济发展格局如何影响甚至决定城乡道路网的复杂性“涌现”过程。

当然,好的博士论文,不单是解答了多少问题,更重要的是提出了多少有价值的问题,以便自己随后完善和其他学者跟踪。基于承良的大作,我粗略地整理

了三大未来可能拓展的方面,以资借鉴。其一就是不同方式(类型)交通网络的交叉互补性研究,特别是城区的公交网络(地铁和汽车公交),其结点和线路通行时间与一般性路网是不一致的。其二是现实生活中的网络不只局限于交通路网,比如劳务人员流动、资金流、信息流,等等,可能揭示的空间交互作用更为丰富多彩。其三是现有研究区的界定多少带有一点随意性。显而易见,研究区趋中的位置导致各种中心度指标偏高,研究区中添加(或划去)一块都会影响整个中心度值的空间态势,这就是常说的“边界影响(edge effect)”。什么样的一个地理范围是一个相对完整的区域?这就需要在更大地理尺度上(比如全国范围),根据网络内的各种交互量(如客流或货流),通过优化手段划分相对自成体系的区块(community),这样产生的每个区块,就是比较客观的完整区域。

承良得益于国家留学基金委的资助,来美国路易斯安那州立大学访学一年。他很珍惜这个机会,并在此基础上努力开展相关研究,撰写英文论文,把这些成果推向国际。我预祝他的事业蒸蒸日上!



(王法辉,美国路易斯安那州立大学终身教授、系主任)

2016年2月于美国巴吞鲁日

序 言 二

六年前,承良邀我为他第一本学术专著《武汉都市圈空间发展机理与调控战略》作序,该书是承良在其硕士毕业论文的基础上,结合其主持的国家社会科学基金和湖北省社会科学基金项目,付梓形成的研究成果,为鼓励青年学者步入著书立说之道我欣然应之。六年后,承良早已博士毕业并踏上治学和“东征”之路,再次邀我为他的新作《城乡路网系统的空间复杂性》写序;这是承良在其博士毕业论文的基础上,结合其主持的国家自然科学基金和中央高校自主科研项目,而整理的研究成果。转眼六年过去,承良已经论著等身,在城乡关系的空间复杂性领域积累颇丰,作为导师,为激励他“百尺竿头,更进一步”,再次欣然应允。

20 多年前,我就曾试图为构建一个描绘城乡发展之间互动关系的一般理论而努力,在博士论文的基础上完成了《现代城乡网络化发展模式》一书,提出了一条可供选择的符合中国国情的城镇化发展模式——“城乡网络化”,得到了学界的广泛认同和称赞。承良的这本专著正是在城乡网络化发展理论的框架下,以城乡道路网为载体,从关系复杂性视角系统梳理城乡网络化空间的复杂性机理,可是说是对本人城乡网络化空间发展理论的实证和升华,且又印证了 21 世纪以来的经济地理学的关系转向和复杂性特征。

近年来,城市-区域一体化进程加速,城乡道路网发展迅猛,城乡空间系统不断进行重构与转型,伴随着急剧的动态跃迁和螺旋演替,整个系统在组分、结构、功能、演化和相互作用机制方面日趋复杂。根植于还原论思维的传统人文地理学,在解释城乡空间系统的复杂性关系及其自组织涌现规律时往往“捉襟见肘”。同时,有关人文地理复杂性的研究渐成热点和前缘,空间复杂性研究已经成为人文地理学研究的新主题词。作为一动态而非线性的空间网络系统,城乡空间系统“复杂的非线性”特征已在学术界达成共识;但与物理学、社会学等学科相较,

仍属于“跟随型”角色,建构城乡空间系统自组织演化理论研究比较薄弱。理论研究滞后于实践发展的直接结果便是,人们在面对道路网发生拥堵、运行低效、易受攻击、脆弱不稳时,变得束手无策,道路网控制和预警苍白无力。因此,将视角投向城乡空间系统,以道路网为载体,构建系列复杂地理网络模型,系统全面分析城乡路网系统形态、结构、功能的空间复杂性机理,架构复杂城乡系统研究平台显得十分必要和迫切。

综观国内外城市交通空间复杂性研究,尽管在交通分形和自相似性、小世界性与无标度性等复杂性挖掘上取得重大突破,但仍有以下几个方面有待进一步深化:(1) 系统管理学研究居多,人文地理学研究不够全面,尤其在流量系统和复杂网络复杂性分析,地理学鲜有涉及,交通网络系统的空间复杂性研究不够全面系统;(2) 虽然地理学已经开始重视和认识城乡关系的复杂性,但还未全面系统架构城乡关联网络系统复杂性研究体系,仍然停留在呼吁阶段,关联网络结构及演化的复杂性理论与实证研究薄弱;(3) 研究尺度以城市—区域系统为主,乡村空间系统研究甚少,乡村地域处于从属地位,城乡地域系统的空间复杂性研究几乎空白;(4) 研究方法单一,综合性方法集成研究少见,且模型多忽视空间—行为变量,缺乏地理学意义。

承良是国内较早的从地理学视域开展道路网空间复杂性研究的学者,本书以武汉城市圈为研究区域,对城乡路网系统空间复杂性涌现这一命题进行了较深入的分析,对当前中国交通运输地理学以及都市圈城乡关联空间理论有所裨益。纵观全书,作者在以下几个方面值得肯定,且较有特色。

其一,研究范式上彰显结构主义特色。构建关系(空间复杂性理论认识)—映射(复杂网络模型建模)—反演(复杂性涌现机理挖掘)的研究框架,从构成、形态、结构、功能、组织和演化几个维度,系统归纳和阐述了城乡路网系统复杂性理论(关系),从空间形态+结构(实空间)和空间演化(相空间)两个方面,构建系列加权复杂网络模型(映射),实证分析研究区城乡道路网的空间自组织演化机理(反演)。

其二,研究内容上突出系统性解析。界定“复杂性=要素(构成+形态)+关

联(时间+空间结构)”逻辑框架,从城乡网络关系视角介入城乡空间复杂性研究,注重空间形态的多视角透析、空间结构的多维度评价和空间演化的多尺度分析:首先,构建系列加权分维模型,从路网密度分布、覆盖形态、连通程度和伸展形态四个方面,多视角透析城乡路网的空间形态自相似性;其次,运用复杂网络模型,从网络重要性、可达性、集聚性、相关性、模块性五个方面,构建多维度网络自组织信息度量模型,多角度刻画城乡路网的空间异质性特征;最后,归纳不同时段、不同区域(圈域、城域、村域)形态结构的通达性变化(功能效应),时间-空间多尺度分析城乡路网的空间伺服能力和等级层次组织机制。

其三,研究方法上注重前沿计量分析。遵循定性归纳与定量分析相结合、理论总结与实证分析相结合、实地调研与实验计算相结合、还原论和整体论分析相结合、静态分析和动态研究相结合的研究方法,综合图论-拓扑学、空间句法、分形、复杂网络等网络信息挖掘理论和方法,融合 GIS 空间分析技术和数理统计方法,实现了研究方法上的一定创新和突破。

时隔六年,承良已由当初的敢闯敢拼的青年才俊成长为成熟稳重的学者,其严谨治学、无畏敢为的精神也给他打下了坚实的基础,使他不断登上学术路途的新台阶,我甚感欣慰。为之,欣然作序。

曾菊新

(曾菊新,华中师范大学教授、博士生导师)

2015年7月于桂子山

前言

美国圣菲研究所(Santa Fe Onstitute, 简称 SFI)的创建人 G. Cowan 曾说过,通往诺贝尔奖的堂皇道路通常是由还原论思维开创的(Waldrop, 1992、1997)。还原论是当代科学的主流,这种思维方式在一定的时空条件下的确有效(陈昌曙, 2000)。然而,在简单性原则和还原论思维(线性方法和机械思维)的指引下,科学发展在取得了辉煌成就的同时,也遇到了难以逾越的障碍:它不能解释自组织和整体功能“涌现”现象,人们不得不逐渐认识复杂性是世界的本质属性(甘国辉和杨国安, 2004)。受此驱动,一门专门系统研究复杂系统和复杂性的科学——复杂科学应运而生,成为 21 世纪的“前沿科学”和“科学前沿”,引起物理学、系统学、信息科学、经济学、地理学等学科的广泛关注,掀起阵阵科学研究浪潮。一场新的激烈的国际竞争正在进行,丝毫不亚于 20 世纪的超导技术及当前的纳米技术引导的国际竞争,显然哪个国家能在这方面遥遥领先,它就会在 21 世纪的现代高新科技竞争中掌握主动权(陈彦光, 2004)。

交通网络是一个典型的、开放的、复杂的巨系统(胡一兹, 2008),其复杂性研究备受交通规划管理、交通系统工程和交通地理等领域学者关注,交通网络形态的分形与自相似特征(Batty M, 2008; Benguigui L, 1995)、结构的小世界与无标度特征(Latora V & Marchiori M, 2002)、演化的自组织性特征(Jiang B, 2007)被广泛揭示。然而,作为一复杂适应系统,交通网络系统的发展与演化机制研究仍显薄弱,理论认识还只停留在探索阶段。

20 世纪 80 年代以来,经济全球化、信息化进程加速,城市—区域要素流动频率、规模和范围不断增长。一方面,全球分工和联系日益紧密,形成一种多层次的全球城市网络体系(曹小曙等, 2006);另一方面,城市—区域不断融合扩张,形成巨型化规模、网络化关联的都市圈(群)。传统的城镇等级体系正向竞争协同的城乡网络关系所转变,传统的城镇线性产业布局正被非线性的城乡网络组织

所取代,传统的城乡独立极化正为城乡相互依赖共生所代替(曾菊新,2001),道路网空间不断进行重构与转型,伴随着急剧的动态跃迁和螺旋演替,整个城乡道路网系统在组分、结构、功能、演化和相互作用机制方面日趋复杂。

随着社会经济的高速发展和城市化进程的加快,我国机动车拥有量及道路交通量急剧增加(吴建军,2008)。尤其是在人口密集、经济发达的都市圈(群),交通结构性问题和矛盾突出:层次不合理、衔接无序、交通拥堵、交通事故频发、环境污染加剧,成为我国最受关注的“城市病”之一。作为基础设施建设的一个重要环节,道路网的优化与规划亟需当前学科为其提供科学理论分析,其关键是厘清城乡路网空间运行的复杂性机理,即“是什么?知其然”的命题:如城乡路网系统形态、结构、功能和演化的空间复杂性规律有哪些?复杂城乡路网系统的自相似性、自组织性、等级层次性、小世界性、无标度性、非线性、动态性等复杂性规律如何通过分形、复杂网络、空间句法、图论(拓扑学)等理论和方法进行演绎和归纳?

因此,本书试图构建关系(空间复杂性认识)—映射(复杂网络模型)—反演(复杂地理机理揭示)的研究框架,遵循理论与实证分析、定量与定性分析相结合的研究范式,架构了城乡路网系统的空间复杂性理论体系,运用图论、分形、复杂网络、空间句法等网络信息挖掘理论和方法,构建系列复杂网络模型,从形态—结构—功能三个方面,实证研究了城乡路网的空间复杂性规律,论述展开分七章:

(1) 第1章为导论,基于问题域,指出本书的选题背景和依据,研究意义和特色创新,研究目标、框架和内容,研究方法和技术路线,以及研究区域和数据来源。

(2) 第2、第3章为理论研究。通过总结国内外研究成果,运用系统科学—非线性科学—复杂性科学理论,构建城乡路网系统的空间复杂性理论体系。其中,第2章为城乡路网系统空间复杂性的研究进展,从复杂科学、地理系统、城乡系统、交通网络四个方面,梳理国内外空间复杂性研究进展和现状,并指出当前研究的不足和本书研究的出发点。第3章为城乡路网系统空间复杂性的系统学认识。从构成、形态、结构、功能、组织和演化几个维度,系统归纳和阐述城乡路网的系统内涵和空间复杂性理论,并从结构主义视角架构城乡路网的空间复杂性研究体系:实空间(real space,地理空间刻画,对应于几何形态+拓扑结构复杂性)—序空间(ordering space,等级序列描述,对应于功能和组织复杂性)—相空间

(phase space, 时间序列表征, 对应于演化复杂性)。

(3) 第4、第5、第6章为实证研究。复杂网络理论认为, 网络形态影响结构, 结构决定功能, 功能主导演化, 并且存在“复杂性=要素(构成+形态)+关联”的框架。因此, 这里导入实空间—序空间—相空间的广义空间复杂性研究视角, 并考虑序空间+相空间往往内化于实空间, 建立城乡路网系统的形态—结构—功能的空間复杂性研究框架, 以实空间分析为主流, 融合序空间和相空间分析, 以武汉城市圈为例, 系统定量揭示城乡路网系统的空間复杂性机理。其中, 第4章为复杂城乡路网系统形态的自相似性研究, 属于形态(morphology)复杂性研究范畴, 从点线分布和组合角度, 运用分形理论和系列分维模型, 从路网密度分布、覆盖形态、连通程度和伸展形态四个方面, 力图全面揭示武汉城市圈城乡路网的空間形态自相似性。第5章为复杂城乡路网系统结构的空間关联性研究, 属于结构(structure)复杂性研究范畴, 从拓扑连接和关联角度, 引入图论和统计物理学思想, 运用复杂网络模型, 着力揭示城乡路网拓扑连接的空間异质性特征, 及其内在相关性和外在稳定性等自组织空間结构特征。第6章为复杂城乡路网系统功能的空間通达性研究, 属于功能(function)复杂性研究, 在第4、第5章几何形态和拓扑结构分析的基础上, 从拓扑形态和结构的功能效应角度, 以功能的空間结构分析为主线, 着力从拓扑分析(空間句法、拓扑网络分析)和距离分析(最短径时空距离通达性)两个方面, 揭示武汉城市圈城乡路网的空間伺候能力和效应(通达性)的复杂性特征。

以上三章分别从实空间—序空间—相空间三个视角切入, 即综合分析形态、结构和功能的空間分异特征、等级层次组织和時間动态演化, 整体以实空間复杂性分析为主线, 以序—相空間分析为辅线, 在形态和结构的实空間分析基础上(归纳表象), 揉合等级层次性的序空間和动态演化性的相空間分析(厘清机制), 以剖析这种实空間分异的自—他组织机制(深层控制)。

(4) 第7章为结论与展望, 总结本书的主要观点和发现, 并指出本书研究的不足之处和未来研究方向。

刘承良

2015年6月

于华东师大丽娃河畔

目 录

序言一	1
序言二	1
前言	1
第 1 章 导论	1
1.1 研究背景	1
1.1.1 还原论研究思维备受学界质疑,面临复杂性科学挑战	1
1.1.2 地理系统复杂理论研究滞后,成为“追随”学科	1
1.1.3 城市系统复杂性研究成为中心,乡村“被边缘”	1
1.1.4 复杂交通网络研究成为热点,空间研究较薄弱	2
1.1.5 都市圈空间网络化发展迅猛,面临重构和转型	2
1.1.6 城乡道路网结构性问题突出,复杂而苦无良策	2
1.2 研究意义	3
1.3 研究目标、框架和内容	4
1.3.1 问题的提出	4
1.3.2 研究目标	4
1.3.3 研究框架	5
1.3.4 研究内容	6
1.4 研究方法和技术路线	8
1.4.1 研究方法	8
1.4.2 技术路线	9
1.5 研究区域和数据	10
1.5.1 研究区选择缘由	10
1.5.2 研究区地域结构	10
1.5.3 数据来源及处理	11
第 2 章 城乡路网系统空间复杂性的研究进展	13
2.1 复杂系统和复杂性科学	13
2.1.1 复杂性科学研究历程	13
2.1.2 复杂系统及相关概念	19

2.2 地理系统空间复杂性 22

 2.2.1 国外地理系统复杂性研究进展 22

 2.2.2 国内地理系统复杂性研究进展 23

2.3 城乡系统空间复杂性 23

 2.3.1 城市-区域系统的空间复杂性 23

 2.3.2 城市-乡村关联的空间复杂性 28

2.4 交通网络空间研究 29

 2.4.1 交通-城市系统空间研究 29

 2.4.2 空间通达性研究 36

 2.4.3 空间句法研究 38

2.5 交通网络空间复杂性研究 39

 2.5.1 国外交通网络空间复杂性研究现状 39

 2.5.2 国内交通网络空间复杂性研究现状 42

 2.5.3 简评 44

2.6 国内外研究评价 44

 2.6.1 城市-区域系统领域 44

 2.6.2 交通网络系统领域 44

 2.6.3 城乡网络关系领域 45

 2.6.4 研究尺度 45

 2.6.5 研究方法 45

第3章 城乡路网系统空间复杂性的系统学认识 46

3.1 城乡路网系统 46

 3.1.1 城乡路网系统内涵 46

 3.1.2 城乡路网系统构成 52

 3.1.3 城乡路网系统结构 56

 3.1.4 城乡路网系统功能 60

 3.1.5 城乡路网系统演变 61

3.2 城乡路网系统空间复杂性 62

 3.2.1 构成多维性 64

 3.2.2 状态多样性 65

 3.2.3 边界模糊性 65

 3.2.4 关联耦合性 65

 3.2.5 结构复杂性 67

 3.2.6 功能复杂性 70

 3.2.7 演化复杂性 71

第4章 复杂城乡路网系统形态的空间自相似性	75
4.1 研究框架和方法	75
4.1.1 研究框架	75
4.1.2 分形模型	75
4.1.3 数据来源及处理	81
4.2 城乡路网的空间密度变化分形——容量维数分析	82
4.2.1 分维测算	82
4.2.2 不同类型城乡路网密度分形比较	83
4.2.3 不同时段城乡路网分形演化比较	87
4.2.4 不同区域城乡路网分形结构比较	90
4.3 城乡路网的空间覆盖程度分形——覆盖维数分析	98
4.3.1 分维测算	98
4.3.2 节点覆盖度分析	99
4.3.3 线路覆盖度分析	103
4.4 城乡路网的空间连接水平分形——阻抗维数分析	109
4.4.1 分维测算	109
4.4.2 城乡路网节点通达性分形分析	109
4.4.3 城乡路网节点关联性分形分析	112
4.5 城乡路网的空间渗滤能力分形——分枝维数分析	119
4.5.1 分维测算	119
4.5.2 城乡路网分枝维数时序分析	120
4.5.3 城乡路网分枝维数空间比较	123
4.6 小结与讨论	124
4.6.1 小结	124
4.6.2 讨论	126
第5章 复杂城乡路网系统结构的空间关联性	128
5.1 研究框架和方法	128
5.1.1 研究框架	128
5.1.2 研究方法	128
5.2 城乡路网的拓扑复杂性	131
5.2.1 节点重要性的复杂性	131
5.2.2 节点易达性的复杂性	136
5.2.3 节点集聚性的复杂性	142
5.2.4 网络类型的复杂性	144
5.3 城乡路网的空间异质性	151

5.3.1	节点重要性的空间分异	151
5.3.2	节点易达性的空间分异	158
5.3.3	网络集聚性的空间特征	166
5.3.4	网络社团性的空间划分	170
5.4	城乡路网的空间相关性	173
5.4.1	节点重要性-重要性的空间相关性	174
5.4.2	节点重要性-集聚性的空间相关性	175
5.4.3	节点重要性-易达性的空间相关性	180
5.4.4	节点易达性-集聚性的空间相关性	187
5.4.5	节点易达性-易达性的空间相关性	193
5.5	城乡路网的空间稳定性	200
5.5.1	研究方法	200
5.5.2	随机性故障	202
5.5.3	恶意性攻击	205
5.6	小结与建议	214
5.6.1	小结	214
5.6.2	空间调控建议	216
第6章	复杂城乡路网系统功能的空间通达性	218
6.1	研究框架和方法	218
6.1.1	研究框架	218
6.1.2	空间句法模型	218
6.1.3	通达性模型	221
6.2	城乡路网连接的空间句法分析	226
6.2.1	城乡路网层次性的统计分析	226
6.2.2	城乡道路重要性的空间分析	232
6.2.3	城乡道路控制性的空间分析	235
6.2.4	城乡道路集成性的空间分析	236
6.2.5	城乡路网智能性的时空特征	241
6.2.6	小结与建议	243
6.3	城乡路网连接的空间通达性分析	245
6.3.1	城乡路网的距离通达性	245
6.3.2	城乡路网的拓扑通达性	279
6.3.3	城乡路网的县域通达性	287
6.3.4	小结与讨论	300
第7章	结论与展望	305
7.1	主要结论	305