



博士后文库

中国博士后科学基金资助出版

分区异步元胞自动机 模型及其应用

柯新利 著



科学出版社



博士后文库
中国博士后科学基金资助出版

分区异步元胞自动机模型及其应用

柯新利 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

针对传统元胞自动机模型难以表达地理现象及其演化规律和演化速率空间异质性从而制约地理元胞自动机模型模拟精度的不足,作者对传统的元胞自动机模型进行改进并提出了分区异步元胞自动机模型。一方面,在对元胞空间分区的基础上,采用分区转换规则代替统一转换规则,以表达地理现象及其演化规律的空间差异;另一方面,在元胞自动机模型中引入异步演化速率以表达地理现象演化速率的空间异质性。结果表明,与传统元胞自动机模型相比,分区异步元胞自动机模型在逐点对比精度和 Moran I 指数两方面都具有明显的优势。依托分区异步元胞自动机模型,在综合考虑自然资源禀赋和社会经济条件区域差异的基础上,开展了土地利用的区际优化配置与未来情景分析,为区域土地资源的合理开发和可持续利用提供科学依据。

本书可以作为土地利用变化、土地利用建模、土地资源优化配置、土地资源可持续利用,以及城市扩张等领域的科研人员与从业人员及相关专业本科生与研究生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

分区异步元胞自动机模型及其应用/柯新利著. —北京:科学出版社, 2016.8

(博士后文库)

ISBN 978-7-03-050748-8

I. ①分… II. ①柯… III. ①自动机—模型 ②自动机—应用
IV. ①TP23

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 280458 号

责任编辑:苗李莉 李 静/责任校对:何艳萍

责任印制:张 伟/封面设计:陈 敬

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2016 年 8 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2016 年 8 月第一次印刷 印张: 15 1/2 插页: 4

字数: 300 000

定价: 128.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《博士后文库》编委会名单

主任 陈宜瑜

副主任 詹文龙 李 扬

秘书长 邱春雷

编 委 (按姓氏汉语拼音排序)

付小兵	傅伯杰	郭坤宇	胡 滨	贾国柱
刘 伟	卢秉恒	毛大立	权良柱	任南琪
万国华	王光谦	吴硕贤	杨宝峰	印遇龙
喻树迅	张文栋	赵 路	赵晓哲	钟登华
周宪梁				

《博士后文库》序言

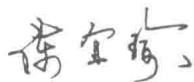
博士后制度已有一百多年的历史。世界上普遍认为，博士后研究经历不仅是博士们在取得博士学位后找到理想工作前的过渡阶段，而且也被看成是未来科学家职业生涯中必要的准备阶段。中国的博士后制度虽然起步晚，但已形成独具特色和相对独立、完善的人才培养和使用机制，成为造就高水平人才的重要途径，它已经并将继续为推进中国的科技教育事业和经济发展发挥越来越重要的作用。

中国博士后制度实施之初，国家就设立了博士后科学基金，专门资助博士后研究人员开展创新探索。与其他基金主要资助“项目”不同，博士后科学基金的资助目标是“人”，也就是通过评价博士后研究人员的创新能力给予基金资助。博士后科学基金针对博士后研究人员处于科研创新“黄金时期”的成长特点，通过竞争申请、独立使用基金，使博士后研究人员树立科研自信心，塑造独立科研人格。经过30年的发展，截至2015年年底，博士后科学基金资助总额约26.5亿元人民币，资助博士后研究人员5.3万余人，约占博士后招收人数的1/3。截至2014年年底，在我国具有博士后经历的院士中，博士后科学基金资助获得者占72.5%。博士后科学基金已成为激发博士后研究人员成才的一颗“金种子”。

在博士后科学基金的资助下，博士后研究人员取得了众多前沿的科研成果。将这些科研成果出版成书，既是对博士后研究人员创新能力的肯定，也可以激发在站博士后研究人员开展创新研究的热情，同时也可以使博士后科研成果在更广泛范围内传播，更好地为社会所利用，进一步提高博士后科学基金的资助效益。

中国博士后科学基金会从2013年起实施博士后优秀学术专著出版资助工作。经专家评审，评选出博士后优秀学术著作，中国博士后科学基金会资助出版费用。专著由科学出版社出版，统一收入《博士后文库》。

资助出版工作是中国博士后科学基金会“十二五”期间进行基金资助改革的一项重要举措，虽然刚刚起步，但是我们对它寄予厚望。希望通过这项工作，使博士后研究人员的创新成果能够更好地服务于国家创新驱动发展战略，服务于创新型国家的建设，也希望更多的博士后研究人员借助这颗“金种子”迅速成长为国家需要的创新型、复合型、战略型人才。



中国博士后科学基金会理事长

前 言

地理元胞自动机模型是地理模拟的主流工具，在地理学研究，尤其是城市扩张模拟与优化等领域发挥了巨大的作用。已有研究对地理元胞自动机模型的转换规则获取、邻域效应、元胞形状等方面开展了较为深入和系统的研究。然而，由于忽略了地理现象及其演化规律与演变速率的空间异质性，传统元胞自动机模型对现实地理世界的表达能力受到了约束。一方面，传统地理元胞自动机模型忽略了地理现象演化规律的空间异质性，元胞空间内所有的元胞都采用统一的转换规则；另一方面，传统地理元胞自动机模型忽略了地理现象演变速率的空间异质性，元胞空间内所有的元胞都按统一的演变速率进行演变。因此，传统的地理元胞自动机模型难以表达地理现象及其演化规律和演变速率的空间异质性，成为地理元胞自动机模型发展的瓶颈。

针对上述问题，本书提出并实现了分区异步元胞自动机模型：一方面，在对元胞空间分区的基础上分别求取各分区的转换规则，以分区转换规则代替统一转换规则，以表达地理现象演化规律的空间异质性；另一方面，在元胞自动机模型中引入异步演变速率，赋予不同的元胞不同的演变速率，以表达地理现象演化速率的空间异质性。通过改进，缩短了元胞自动机模型与现实地理现象演变过程的差异，从而使得分区异步元胞自动机模型更好地表达现实地理现象的演化过程。

本书包括上、下两篇，上篇主要介绍分区异步元胞自动机模型的理论与方法，下篇主要介绍分区异步元胞自动机模型的应用。

在分区异步元胞自动机模型的理论与方法部分，从元胞自动机模型的研究进展出发，分别讨论了分区异步元胞自动机模型的概念模型、基于空间聚类的元胞空间分区、元胞转换规则的获取方法、分区异步元胞自动机模型演化速率获取和分区异步元胞自动机模型的实现。在此基础上，开展了分区异步元胞自动机模型尺度敏感性研究。

在分区异步元胞自动机模型的应用部分，分别介绍了基于分区异步元胞自动机模型的耕地区际优化布局、基于土地利用效率区域差异的建设用地区际优化配置、基于资源禀赋和经济发展区域差异的耕地优化布局、权衡粮食安全与经济发展区域差异的土地资源优化配置，以及协调城市扩张、耕地保护与生态保育的土地优化布局、气候变化背景下城市扩张合理模式选择和基于生产力总量平衡的耕

地区际优化配置等内容。

在本书的编写过程中，得到了中国科学院地理科学与资源研究所刘纪远研究员、邓祥征研究员和武汉大学边馥苓教授的指导。华中农业大学公共管理学院张安录教授、杨钢桥教授也给本书的编写提供了大力的支持。笔者的研究生杨柏寒、胡少华、廖平凡、李红艳、郑伟伟、温槟荧、普鸱鹏、祁凌云和黄翔等为书稿的修改和校对提供了帮助。在此，一并表示感谢！

本书的出版得到了中国博士后科学基金会 2015 年度博士后优秀学术专著出版资助，书中部分研究内容得到了中国博士后科学基金项目（20100480442）、国家自然科学基金项目（41101098、41371113）和国家社科基金项目（13CGL092）的资助！

柯新利

目 录

《博士后文库》序言

前言

上篇 分区异步元胞自动机模型的理论与方法

第 1 章 绪论	3
1.1 引言	3
1.2 土地利用变化元胞自动机模型研究进展	6
1.3 主要研究内容	14
主要参考文献	15
第 2 章 分区异步元胞自动机概念模型	20
2.1 地理元胞自动机模型基本理论	20
2.2 空间分异规律	28
2.3 地理过程及其空间差异性	30
2.4 分区异步元胞自动机概念模型	31
2.5 小结	36
主要参考文献	36
第 3 章 基于空间聚类的元胞空间分区	38
3.1 基于空间聚类的元胞空间分区	38
3.2 基于双约束空间聚类的元胞空间分区	44
3.3 小结	50
主要参考文献	51
第 4 章 基于 C5.0 决策树算法的元胞转换规则获取	52
4.1 元胞转换规则	52
4.2 C5.0 决策树算法	57
4.3 基于 C5.0 决策树算法的元胞转换规则获取	59
4.4 小结	69
主要参考文献	70
第 5 章 分区异步元胞自动机模型演化速率获取	72
5.1 元胞演化速率	72

5.2	分区异步元胞自动机模型元胞演化速率获取	77
5.3	小结	81
	主要参考文献	82
第 6 章	分区异步元胞自动机模型的实现	84
6.1	模型总体架构	84
6.2	模型实现	86
6.3	实证研究	89
6.4	小结	99
	主要参考文献	100
第 7 章	分区异步元胞自动机模型尺度敏感性研究	102
7.1	地理元胞自动机的尺度问题	102
7.2	元胞尺度敏感性分析	104
7.3	速率格网尺度敏感性分析	109
7.4	小结	114
	主要参考文献	114
第 8 章	分区异步元胞自动机模型总结与展望	116
8.1	分区异步元胞自动机模型构建总结	116
8.2	研究展望	119
	主要参考文献	120

下篇 分区异步元胞自动机模型的应用

第 9 章	基于分区异步元胞自动机模型的耕地区际优化布局	125
9.1	引言	125
9.2	研究区域与数据来源	127
9.3	模型与方法	129
9.4	武汉城市圈耕地利用布局优化	143
9.5	小结	147
	主要参考文献	148
第 10 章	基于土地利用效率区域差异的建设用地区际优化配置	150
10.1	研究背景	150
10.2	以土地利用效率区域差异为依据的建设用地区际优化方法	151
10.3	武汉城市圈及其土地利用变化	154
10.4	土地利用效率区域差异下的武汉城市圈建设用地区际优化配置	155
10.5	小结	158

主要参考文献	159
第 11 章 基于资源禀赋和经济发展区域差异的耕地优化布局	161
11.1 研究背景	161
11.2 武汉城市圈概况	163
11.3 基于资源禀赋和经济发展区域差异的耕地优化布局方法	163
11.4 基于资源禀赋和经济发展区域差异的耕地优化布局结果	166
11.5 小结	171
主要参考文献	172
第 12 章 权衡粮食安全与经济发展区域差异的土地资源优化配置	174
12.1 引言	174
12.2 研究区域与数据来源	175
12.3 权衡粮食安全与经济发展区域差异的土地资源优化配置方法	176
12.4 权衡粮食安全与经济发展区域差异的武汉城市圈土地资源优化配置	177
12.5 小结	183
主要参考文献	183
第 13 章 协调城市扩张、耕地保护与生态保育的土地优化布局	185
13.1 研究背景	185
13.2 武汉市土地利用概况	187
13.3 城市扩张、耕地保护与生态保育的协调方法	190
13.4 协调城市扩张、耕地保护和生态保育的武汉市土地利用布局优化	194
13.5 小结	198
主要参考文献	199
第 14 章 气候变化背景下城市扩张合理模式选择	201
14.1 引言	201
14.2 武汉城市圈土地利用与气候变化	202
14.3 城市群扩张与气候变化的耦合模型	204
14.4 气候变化背景下武汉城市圈城镇扩张合理模式分析	208
14.5 小结	215
主要参考文献	216
第 15 章 基于生产力总量平衡的耕地区际优化配置	217
15.1 研究背景	217
15.2 基于生产力总量平衡的耕地区际优化配置方法	218

15.3 基于生产力总量平衡的中国耕地生产力区际优化配置	220
15.4 小结	231
主要参考文献	231
编后记	233
彩图	

上篇 分区异步元胞自动机
模型的理论与方法

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

20 世纪 70 年代以来,以地理信息系统(GIS)、遥感(RS)和全球定位系统为代表的空间信息技术在诸多领域得到了广泛的应用,呈现出迅猛的发展势头(边馥苓, 2006)。其中,作为空间信息技术的重要组成部分, GIS 技术在空间数据采集、管理、处理、分析和可视化等方面表现出强大的能力。遗憾的是, GIS 虽然对静态的地理信息具有很强的表达与处理能力,但是对复杂地理现象动态演变特征的表达能力却十分有限。元胞自动机模型(cellular automata, CA)是网格动力学模型,它将空间划分为离散的元胞,每一个元胞被赋予离散的状态并在离散的时间步长内进行演化。元胞自动机模型能较好地表达局部的时间因果关系和空间的相互作用。元胞自动机模型可以很好地模拟自组织系统的演化过程,同时它也具有很强的空间运算能力。因此,元胞自动机模型非常适合用来开展土地利用变化的动态模拟(周成虎等, 2001)。自元胞自动机模型被提出以来,在诸如人类移居、生物系列和城市扩张等复杂系统演化的时空过程模拟等方面得到了广泛的应用。在模拟复杂地理现象时空演化过程方面,元胞自动机模型比线性回归模型和系统动力学模型等具有更加准确、清楚和完整等特性(Smith, 1969)。元胞自动机模型提供了“自下而上”的模拟思路,并且具有强大的复杂运算能力和高度的动态计算特征,又可以清晰、完整地表达空间概念。因此,元胞自动机模型在表达复杂地理过程和地理现象的时空演化方面具有得天独厚的优势,非常适用于模拟与解析复杂地理现象的时空演化规律(周成虎等, 2001)。近些年来,学者们利用元胞自动机模型模拟和解释了城市扩张、火灾演进和水灾演变等复杂的时空动态过程,取得了一系统具有重要研究意义的成果。因此,元胞自动机模型为时空动态过程的研究与模拟提供了新的方法,为复杂地理现象的解析提供了新的视角和思路。尤其为土地利用变化的动态模拟提供了一种由局部涌现全局、由微观规则产生宏观格局的新的研究方法、思路和视角。

近 20 年以来,尤其是近年来,诸多学者采用元胞自动机模型对城市扩张、土地利用优化布局、洪水演进、生态系统演进、人群疏散、交通格局等方面开展了深入系统的研究,形成了一批有影响的研究成果(Batty et al., 1999; Almeida et al.,

2003; Fang et al., 2005; 刘耀林等, 2004; 罗平等, 2004 a,b; Batty and Xie, 1994; Clarke et al., 1997; Li and Yeh 2000; White and Engelen 1993; Cao et al., 2015; Dahal and Chow, 2014; Li et al., 2013; Liu et al., 2014)。已有的研究说明, 将元胞自动机模型与地理信息技术结合, 可以发展和丰富地理信息技术的时空动态分析能力, 提升元胞自动机模型模拟和解释复杂地理过程的时空演化能力, 从而克服地理信息系统在表达与解释时空动态过程方面的不足。然而, 遗憾的是, 目前大多数研究在采用元胞自动机模型开展复杂地理现象或地理过程时空动态过程时, 存在着一些局限性, 主要表现在如下两个方面。

(1) 用统一的转换规则驱动元胞空间内所有的元胞进行演化。元胞转换规则的获取是元胞自动机模型的核心问题, 在整个模拟过程中对元胞自动机模型的运行起着控制作用, 对模型的模拟结果具有重要的影响。当前, 大量的元胞自动机模型采用统计学或数据挖掘的方法在整个元胞空间内求取元胞的转换规则, 并将这一转换规则赋予元胞空间内所有的元胞, 从而驱动元胞自动机模型进行演化。实际上, 无论是在地理现象的空间分布, 还是在地理规律的空间特征, 都存在着空间异质性。因此, 作为地理现象和地理过程模拟重要工具的元胞自动机模型, 其元胞转换规则应该相对地表现出空间异质性。所以, 当前大多数元胞自动机模型在整个元胞空间采用统一的转换规则驱动元胞自动机模型进行地理现象和地理过程的模拟, 企图用经过平均化处理的元胞转换规则表达现实世界具有空间异质性的地理现象和地理过程的时空演化规律, 抹杀了地理现象与地理过程的空间异质性, 因而制约了地理元胞自动机模型精度的提升, 成为地理元胞自动机模型模拟精度提高的一个瓶颈。

(2) 元胞空间内所有的元胞都以相同的变化速度发生演化。然而, 现实的地理现象或地理过程在整个研究区域的演化速率是存在着显著的空间差异的, 在不同的区域表现出不同的演化速率。以城镇建设用地扩张为例, 在经济发展迅速的大城市或者经济技术开发区, 城镇建设用地扩张较为迅速; 而在经济较为落后的小城镇或者人口数量有限的城镇, 城镇建设用地的扩张则较为缓慢。因此, 采用元胞自动机模型开展地理现象或者地理过程的动态模拟与预测时, 赋予元胞空间内所有的元胞相同的演化速率, 与实际地理现象或地理过程的时空动态变化规律是不相符的。因而, 阻碍了元胞自动机模型对地理现象或地理过程表达精度的提高, 成为元胞自动机模型在地理学研究中应用的瓶颈。

针对当前元胞自动机模型在模拟地理现象时空动态演化过程中存在着这两方面的问题, 本书提出了分区异步元胞自动机模型。一方面, 针对元胞自动机模型难以表达地理现象时空动态演化规律的空间异质性的问题, 按地理现象及其驱动要素的空间异质性对元胞空间进行分区, 并对不同的分区别获取转换规则; 另

一方面,针对元胞自动机模型难以表达地理现象时空动态演化速率空间异质性的不足,提出异步演化速率的概念,赋予不同的元胞不同的演化速率。通过上述两方面的改进,从理论上构建了符合地理现象时空动态演化规律和速率空间异质性的地理元胞自动机模型,从而可以更真实地表达与解释地理现象演化过程的时空动态特征。具体而言,本书主要有如下五个目标。

(1)根据地理现象时空动态过程演化规律的空间异质性,根据地理现象及其影响因素的特征将元胞空间分成若干个性质相对一致的区域。在此基础上,分别求取每个子区域的转换规则。从而用分区转换规则驱动元胞自动机模型对地理现象的时空动态过程进行模拟和解析,使元胞自动机模型能更好地表达地理现象时空动态演化规律的空间异质性,提升元胞自动机模型的模拟与解释能力。

(2)开展元胞空间分区方法研究,分别采用传统空间聚类算法和双约束空间聚类算法开展元胞空间分析,从而保证各分区不仅在空间上相互邻接,而且在非空间属性上保持相对一致。使得各分区具有相对一致的属性和动态演化规律,保证元胞自动机模型在各分区上的表达精度。

(3)深入研究元胞自动机模型转换规则的获取方法,重点讨论 C5.0 决策树算法在元胞自动机模型转换规则获取方面的应用。发挥 C5.0 决策树算法在获取转换规则方面的科学性、直观性和可靠性,在分区的基础上,采用 C5.0 决策树厘定各分区的元胞转换规则,保证元胞自动机模型对地理现象时空动态演化模拟和解释的精度。

(4)针对现实地理现象时空动态演化速率的空间异质性,提出采用异步演化速率驱动不同的元胞以不同的速率进行演化的思路,从而提高元胞自动机模型对现实地理现象时空动态演化过程的表达能力。本书讨论了元胞自动机模型异步演化速率的计算依据以及测算方法。

(5)剖析元胞自动机模型的尺度效应,以及分析不同的元胞尺度划分对元胞自动机模型模拟精度的影响。此外,还针对本书提出的分区异步元胞自动机模型的特征,深入剖析速率格网的大小,以及每个速率格网的最大演化间隔对分区异步元胞自动机模型模拟精度的影响,从而为元胞自动机模型元胞尺度的合理确定和速率格网的合理划分与设定提供依据。

本书不仅提出了元胞自动机模型改进的新视角,丰富了元胞自动机模型的理论,同时也实现了本书提出的分区异步元胞自动机模型并将其应用于杭州市土地利用变化模拟的实践中,对提高土地利用变化模拟与预测能力具有重要的现实意义。具体而言,本书提出的分区异步元胞自动机模型有如下三方面的意义。

(1)本书是对元胞自动机模型的有益补充。针对元胞自动机模型难以表达真实地理现象时空动态过程演化规律的空间异质性和演化速率空间异质性的不同,将

地理现象演化规律与演化速率的空间异质性整合到元胞自动机模型之中,从空间异质性的视角探讨了元胞自动机模型的理论与应用,对元胞自动机模型理论的丰富与发展作出了一定的贡献,使元胞自动机模型能更真实有效地表达地理现象的时空动态演化特征。

(2) 实现了空间数据挖掘算法与元胞自动机模型理论的有效结合。空间数据挖掘算法可以从大量的空间数据出发挖掘与发现有用的知识,为空间决策提供科学依据。元胞自动机模型的转换规则是元胞自动机模型的核心,空间数据挖掘算法可以提供元胞自动机模型转换规则的获取方法。此外,空间数据挖掘算法还可以提供元胞空间分区的方法,保证获得客观、合理、科学和可靠的元胞空间分区结果。本书将空间数据挖掘算法与元胞自动机模型相结合,对元胞自动机模型和空间数据挖掘都可以起到推动作用。

(3) 提出并实现了分区异步元胞自动机模型。针对传统元胞自动机模型的不足,提出了较为完善的分区异步元胞自动机模型框架,深入剖析了分区异步元胞自动机模型的元胞空间分区、分区转换规则的获取、异步演化速率的概念与计算。在此基础上,实现了分区异步元胞自动机模型,并应用分区异步元胞自动机模型对杭州市土地利用变化进行了模拟。本书提出的分区异步元胞自动机模型为长时间、大区域的复杂地理现象的模拟与解析提供了新的视角和方法。

1.2 土地利用变化元胞自动机模型研究进展

1.2.1 元胞自动机的应用研究

元胞自动机模型最早由著名数学家、现代计算机之父 Von Neumann 提出。1948 年, Von Neumann 在其同事 Ulam 的建议下设计出了一种可以自我复制的自动机,并在此基础上提出了元胞自动机模型的概念。在元胞自动机模型提出之后,很多专家注意到元胞自动机模型能够较好地模拟自组织复杂系统的自组织过程,因而有可能被用于模拟复杂的自组织现象,如晶体构造和生长、生物生长和繁殖、竞争与进化、地理现象的动态演化等 (Itami, 1994; Perrier et al., 1996; Bays, 1988; Bennett and Grinstein 1985; Culik et al., 1990; Dewdney, 1990; Ermentout and Edelstein-Keshet, 1993)。此后,元胞自动机模型在经济、科学研究、社会和军事等诸多领域得到了广泛的应用,涉及地理学、信息科学、生物学、物理学、数学、化学、生态学、社会学、军事学、环境学等 (Gardner, 1971; Gutowitz, 1990; Siebrug et al., 1990; Sternberg, 1980; Toffoli and Margolus, 1987; Turing, 1936; Vichniac, 1984; Victor, 1990; Wolfram, 1983; Wolfram, 1986)。