

文章编号 1001-8166(2002)02-0188-08

基于 CA 的城市空间动态模型研究

何春阳,陈晋,史培军,于章涛

(北京师范大学环境演变与自然灾害教育部重点实验室,北京师范大学资源科学研究所,北京 100875)

摘 要 综述了当前基于 CA (Cellular Automata) 的城市空间动态模型研究的基本进展,介绍了我国发展的基于 CA 的大都市区城市扩展模型(City Expanding Model in Metropolitan area, CEM)以及利用该模型对北京地区城市发展过程的初步模拟结果。认为离散化的“自下而上”的微观个体模型代表了当前城市空间动态模型的最新发展方向,建立基于 CA 的城市动态模型,开展中国大都市区城市发展演变过程的模拟研究在当前具有重要的理论和实践意义。

关 键 词 CA 城市发展 动态模型

中图分类号 P90 **文献标识码** A

0 前 言

城市是一个典型的动态空间复杂系统,具有开放性、动态性、自组织性、非平衡性等耗散结构特征。城市的发展变化受到自然、社会、经济、文化、政治、法律等多种因素的影响,因而其行为过程具有高度的复杂性。静态、宏观和确定的传统城市模型受到前所未有的挑战,开展城市空间动态模型研究正成为当前地理学研究的难点和热点问题^[1,2]。

改革开放以来,中国正在经历快速的城市化过程。从 1970—1997 年,年均增加 0.63 个百分点,是前 29 年的 2.5 倍,是世界同期城市化平均速度的 2 倍。目前,中国的城镇人口已经达到 3.89 亿,城市化水平已经达到 30.9%。设市城市 668 个,建制镇 19 000 多个。但是,与中国工业化和整个国民经济的发展水平相比,中国城市化仍然滞后。预计 21 世纪,中国人口将由 12 亿增长到 16 亿,伴随着人口的持续增长和经济的快速发展,中国的城市化过程将呈现出进一步加速的趋势^[3,4]。然而,城市化在为我们提供更多就业机会和制造更多福利的同时,也产生了如环境污染、交通拥挤、犯罪、居住环境恶

化等的一系列城市问题。此外,由于以自然为主的土地利用/覆盖变成了以工厂和住宅为主的人为土地利用/覆盖,往往导致对各种自然过程如径流、蒸发过程和生态过程等的改变,带来复杂的生态环境后果,影响区域和全球的可持续发展^[5]。因此,认识和理解中国城市化过程的基本特征规律,建立城市空间动态模型对城市发展变化过程中的动态行为进行有效的描述、模拟和分析,并在此基础上提供区域发展决策支持,从而降低中国城市化过程的风险水平,不仅具有重要的理论意义,而且也具有突出的现实意义。

本文首先对当前城市空间动态模型的基本思路进行了评述,然后详细综述了目前基于 CA 的城市空间动态模型的基本研究进展,最后介绍了我国发展的基于 CA 的大都市区城市扩展模型(CEM)以及对北京地区城市发展过程的初步模拟结果,目的在于为相关的研究提供借鉴和参考。

1 城市发展动态模型的基本思路

城市运动的高度复杂性决定了城市空间增长的

收稿日期 2001-12-07,修回日期 2002-03-19。

* 基金项目 国家自然科学基金重大项目“中国东部陆地农业生态系统与全球变化相互作用机理研究”(编号:39899374),教育部高等学校重点实验室访问学者基金资助。

作者简介:何春阳(1975-),男,四川射洪人,博士生,主要从事遥感应用与土地利用/覆盖变化研究。E-mail: hcy@bnu.edu.cn
赵宝江,中国城市化战略高级国际研讨会,北京,2000。

动态模拟是一项异常艰巨的工作。从 20 世纪 60 年代以来,在以中心地方论为代表的城市形态结构模型和以空间相互作用模型为代表的静态城市模型的研究基础上,地理学家的主要研究目标转向了动态城市模型的构建^[1,2]。在这个探索过程中,存在两种代表方向,一是“自上而下”的基于微分方程的动力学模型;二是“自下而上”的基于 CA 等概念的离散动力学模型。

人们首先在基于微分方程的动力学模型中取得了进展,发展了一系列有影响的模型,如 1969 年麻省理工学院的 Forrester 将系统动力学应用于城市结构的动态变化研究中,建立了城市系统动力学模型;1971 年 Wilson 通过改造 Lowry 类模型,引入最大熵原理,建立的可以反映城市突变等复杂动态特征的城市动态模型;1994 年 Wegener 将交通、人口、雇员等城市子系统模型用某种复杂方式联系起来,建立的 Dortmund 模型等^[1]。总的看来,这些基于微分方程的动态模型,在一定程度上是可以反映城市发展动态特征的。但是,这类自上而下的模型普遍存在以下两点不足:一是模型的空间尺度多从宏观出发,研究对象往往是对城市居住区、工作区、商业区等的机械划分,无法反映城市的微观结构特征和个体行为,而这恰恰是造成城市动态性、自组织性、突变性等复杂特征的原因;二是模型变量多是一些社会、经济指标,如人口、收入等,强调系统变量间的相互作用和反馈,并通过人口等指标与空间增长的相互关系来间接推断城市空间结构的可能变化,因此,难以反映城市内部由于空间格局变化造成的空间反馈。由此可见,这些所谓的动态城市模型,大多反映的只是城市中社会、经济指标的动态变化,而不是真正的城市空间结构变化^[1,2]。

越来越多的研究表明,作为一个典型的复杂系统,城市的动态发展是空间个体相互作用的结果。因此,从空间个体行为的微观角度入手,在较高的空间和时间分辨率下,“自下而上”地研究城市的发展变化是深入理解城市空间动态演变特征和规律的必然要求^[1,2]。Batty 等^[6-10]在 80~90 年代应用分形理论和 CA 对城市的形成和扩展进行了深入细致的研究,并于 1995 年在《自然》杂志上发表了题为“研究城市的新方式”一文,指出自上而下的宏观城市模型正逐渐被那种基于局部个体空间相互作用的微观离散动力学模型所代替。同年,Markes 等^[11]在《自然》杂志上发表的“模拟城市增长模式”一文中,利用逾渗模型(Percolation)对柏林市的城市增长进

行了有效的实验模拟。虽然这类离散动力学模型还处于起步阶段,但不可否认的是这类离散化的“自下而上”的微观动力学模型代表了城市动态模型的最新发展方向^[1,2]。

2 基于 CA 的城市动态模型研究现状

CA 是一种时间、空间、状态都离散,(空间上的)相互作用和(时间上的)因果关系皆局部的格网动力学模型,它“自下而上”的研究思路,强大的复杂计算功能、固有的并行计算能力、高度动态特征以及具有空间概念等特征,使得它在模拟空间复杂系统的时空演变方面具有很强的能力,在地理学研究中具有天然优势^[11]。其中,CA 在城市增长、扩散和土地利用演化的模拟方面研究最早,最为深入,同时也是当前 CA 应用的热点^[1,2]。

Tobler 在 20 世纪 70 年代认识到 CA 在模拟地理复杂现象方面的优势,首次正式采用 CA 的概念来模拟当时美国五大湖区底特律城市的迅速扩展^[2]。随后,Coucleis^[12-15]的工作使人们看到了应用 CA 进行城市模拟的巨大潜力,引起了人们应用 CA 开展城市模拟的极大兴趣。Batty 等,Longley, Xie, Clarke 等,White, Wu 等^[16-33]先后开展了相关的研究,并取得了积极的进展。如 Xie^[19]借助 GIS 技术和 CA 模型对布法罗(Buffalo)城市土地利用变化的有效模拟;Clarke 等^[20-22]根据城市发展的历史数据对美国西海岸的旧金山(San Francisco)和东部的华盛顿—巴尔的摩(Washington-Baltimore)都市区城市发展的模拟和长期预测;White 等^[23-27]应用 CA 模型对美国辛辛那提(Cincinnati)市的城市增长、全球气候变化对加勒比(Caribbean)岛的土地利用构成变化影响进行的系列研究;Wu F^[31]集成 CA 模型和多因子评价模型(Multicriteria Evaluation, MCE)对我国广州市城市扩展的模拟研究等,均是 CA 模型在城市模拟中较为成功的应用案例。此外,受国际研究的推动,国内地理学界近年来也开始了类似的研究尝试,周成虎等^[1]于 1999 年出版了《地理元胞自动机》一书,对相关工作进行了介绍和总结,并提出了地理元胞自动机(GeoCA)的概念。黎夏等^[34,35]在对广东东莞土地利用变化系统研究的基础上,利用约束 CA 模型对广东东莞的土地利用变化进行了成功模拟。

总的看来,这些基于 CA 的城市空间动态模型从内容上主要集中在两个方面,一是对虚拟城市发展演变过程的模拟,目的在于着重了解城市发展的

自组织特征;二是对城市实际发展过程进行重建和城市未来可能的发展趋势进行预测,目的着重于提供城市和区域发展的决策支持^[36]。与微分方程模型相比,这些基于CA的城市模型表现出以下优点:一是更为简单、自然;二是建立在空间相互作用,而不是社会、经济指标间的相互影响关系的基础上,更能反映空间格局变化以及由此带来的进一步的反馈作用;三是由于模型中的单元空间划分可以非常小,因此它能够在精细的尺度上表现城市空间结构的变化;另外,该类模型通常可以在更长时间尺度上反映城市的产生、发展直到消亡的生命历程;最后,作为复杂性科学的重要研究工具,CA可以较好地模拟城市作为一个开放的耗散体系所表现的突变、自组织、混沌等复杂现象^[1,2]。

但由于CA模型自身的限制以及城市系统本身的复杂性,这些基于CA的城市模拟也面临着以下一些问题^[1,2]:

首先是简单性和复杂性的问题。传统CA一般不考虑宏观因素,其系统的自组织来自于系统元素的局部相互作用,控制因素单一,状态变化取决于自身和邻居的状态组合。尽管可以模拟出各种复杂系统,但城市的发展演变并不仅仅取决于系统本身局部规则的作用,而是各种尺度的多种因素的综合作用结果。微观自组织和宏观影响因素的有效合理结合,应该在这类CA模型中得到充分重视。

其次是CA空间尺度的划分问题。不同的空间尺度下,由于模型的表现效果以及影响模型的各种外在因素作用程度的差异,系统单元表现的规律也不相同,因此,如何确定合适的空间分辨率也是一个需要考虑的问题。

再者是演化规则的定义问题。合理的演化规则是CA模型成功的关键。作为复杂的城市系统,其演化规律表现出鲜明的时空差异,同时也存在着复杂系统的不确定。因此,如何在CA中引入随机干扰因素,如何在CA中根据不同的区域特征和城市发展的不同阶段,调整各种影响因素和单元演化规则,也是这类模型面临的问题。

3 基于CA的城市动态模型研究的发展趋势

在近年来的研究中,针对传统CA模型的局限,研究者在实践中对基于CA的空间动态城市模型进行大量改进,表现出以下几方面的研究趋势:

(1) 模拟思路的转变,不再单纯把城市系统看

成是一个自组织系统,而是把城市发展看作一个受到大尺度因素限制和修改的局部尺度上的自组织过程,在模拟时更多考虑宏观外部因素的影响^[36]。如Wu^[31]利用多标准评价模型在CA模型中引入各种约束因素,黎夏等^[34,35]在研究中从影响因素空间作用范围的角度把约束因素分为局部、区域和全局性3类,Ward等^[36]在影响因素属性分析的基础上把约束因素分为制度控制制止生长约束和生长调节因素三大类,通过构造约束矢量来控制CA模型等。不过为了有效合理地把大尺度因素加入CA模型中,有两个方面的问题值得注意:重新构造的演化规则必须既能反映影响城市发展的重要因素,又能同时有效地结合各种社会经济和生物物理因素^[27],在这方面Wu^[28]的工作具有一定的启发性,他把与土地利用类型有关的转移规则看成是一个模糊集,只有具有较高隶属度的转移规则可以改变单元状态;

各种影响因素的权重确定问题,现有的研究中,权重一般都利用专家打分,AHP法事先给定的,然后在计算过程中保持固定,以简化模型。事实上,随着城市的发展变化,各种影响因素的作用能力也是在不断变化的,因此,其作用权重应该随着模型的执行保持动态的变化^[27]。最近,史培军等^[37]在进行深圳土地利用/覆盖变化模拟时,利用Monte Carlo方法来确定各种影响因素权重,具有一定的借鉴意义。

(2) CA与其它空间模型,特别是用经济学模型相互耦合来研究城市问题。Wu^[38]在近期的研究中,把微观CA过程宏观经济学模型相联系,建立混合模型来进行城市发展的过程研究,取得了较为满意的结果。White等^[27]也积极开展了这方面的研究,他们在最近的研究中正尝试把区域发展模型与CA模型相联系,来模拟城市和研究区域的整体发展。在这样的模型中,CA的状态可以看成是一个代表许多属性的状态向量,不但可以表示土地利用/覆盖情况,还可以根据模拟动态过程的目的表示任意的空间分布变量,如人口密度等^[39]。这种混合模型大大拓宽了CA的应用范围和模拟功能,正逐渐引起了人们的重视。

(3) CA正与GIS进行充分紧密的结合。Clarke等^[22]指出,就CA而言,GIS表现出3种强大的功能,强大的数据预处理功能,可以充分满足CA对空间数据的要求;完善的可视化功能,可以及时显示和反馈CA在各种情景下的模拟效果;日益强大的空间分析功能,可以与CA形成良好的互补。因此,与GIS的有效结合,是CA走向应用化的有效

途径。目前的结合思路主要有两种思路。松散结合模型系统与 GIS 系统相互并行、独立,各自拥有独立的数据结构和用户界面,二者之间通过文本等中间文件或是相互提供读写标准实现数据通信。紧密结合或是在 GIS 中嵌入 CA 模型,以 GIS 为核心进行开发;或是在 CA 模型中嵌入 GIS 功能,以 CA 为核心开发^[21]。两种思路各有特点,前者灵活,开发难度小,但统一性和稳定性差,在早期的 CA 城市模拟中被广泛应用,如 Wu^[32]建立了二者松散结合的理论框架模型 Simland 并进行了相关研究。后者开发难度较大,但更灵活,适用性更强,近期的研究中,研究者已经开始从底层开发这种模型。如 Batty 等^[18]采用面向对象的方法,建立了 CA 与 GIS 紧密结合的系统来进行城市模拟。总的看来,随着研究的深入,CA 与 GIS 的结合将更加紧密,对城市的模拟也将更加有效。

(4) CA 模型应用正向大尺度范围扩展。目前 CA 的模拟区域正逐渐从局部走向区域甚至更大的范围。例如,Clarke 等^[22]正扩展他们的 CA 模型以进行更大范围的土地利用/覆盖变化的研究,计划在安德森(Anderson)一级土地利用/覆盖分类的基础上,以 1 km 的分辨率对全美土地利用/覆盖变化进行模型和预测,从而评价人类活动对土地利用/覆盖变化的影响。

总之,现有的研究已经充分证明了 CA 在城市动态模拟中的有效性和巨大的发展潜力,这为研究工作的进一步开展奠定了有力的基础,同时也提出了更高的挑战。

4 基于 CA 的大都市区城市扩展动态模型(CEM)研究

所谓大都市区是指一定规模的中心城市和与中心城市具有紧密社会经济联系的外围地域。作为城市地域的一种高级形式,大都市区是城市化达到较高水平才出现的。当城市规模较小时,城市功能的对应空间主要集中在中心区和建成区;而当核心城市的集聚超过一定的门槛规模时,核心与周围地域的空间相互作用将产生具有一体化特征的紧密联系区,即大都市区^[39]。事实上,从空间上看,中国近 20 多年的城市化过程主要可以概括为两大类,一是新兴城市的崛起与发展;二是原有大城市在改革开放背景下快速发展,并在部分地区形成大都市区和都市连绵区^[2]。后者与前者相比,在中国的城市化进程中也是普遍存在的,而且无论是空间形态、变化

过程、驱动机制还是后果影响都比前者更为复杂^[3]。已有的研究表明,随着中国城市化进程的进一步深入发展,大都市将成为中国城市化进程中最引人注目的地区,同时也是中国未来城市化最具有活力的地区^[4]。因此,建立和发展基于 CA 的大都市区城市发展动态模型,对中国大都市区城市发展演变过程进行模拟研究无疑具有重要的理论和实践意义。

基于上述理解和认识,在利用 CA 对新兴城市深圳模拟研究的基础上^[37],我们进一步发展了一个针对大都市区城市发展特征规律的动态模型(CEM)。

4.1 CEM 的城市模拟

目前已有的 CA 城市模拟工作主要把城市的发展看成是在一定外部约束条件影响下,二维平面上非城市单元在现有城市单元的影响下向城市单元的转化^[35,38]。尽管已有的部分工作在利用 CA 进行虚拟城市研究时对城市单元本身的发展演变能力也进行了定义和考虑^[18],但在目前利用 CA 模型进行的实际城市模拟中,主要还是使用各种不同尺度下的外部约束条件来对城市单元的局部发展过程进行控制和影响,而较少考虑城市单元本身发展能力的变化^[35,38]。事实上,随着城市的发展,在有限用地的限制和周围城市单元的竞争影响下,在城市发展到一定阶段后,原有城市单元事实上往往向三维方向发展,常常表现为空间容积率的提高和自身平面扩展能力的下降。这种现象,在城市发展的中后期阶段,尤其是大都市阶段,显然是比较明显的。因此,CEM 将大都市区的城市发展演变是一个在不同尺度的外部约束因素和局部城市单元自身扩展能力变化因素共同影响作用下的变化过程,认为大都市区的城市发展演变模拟不仅要考虑各种外部约束因素的影响,而且还要考虑局部城市单元自身平面扩展能力变化因素的影响(图 1)。对于影响城市发展演变的各种外部约束性因素,根据其城市发展过程的作用效果,CEM 将它们分为一般约束性因素和起强制约束性因素两大类。前者一般包括交通状况、到 CBD 的耗费距离、坡度坡向等因素,它们对城市的发展只起到一般性的限制作用,后者一般包括湖泊、水库、规划保护用地、河流洪泛区等因素,它们对城市的发展起到绝对性的排斥作用。

对于城市单元自身扩展能力的变化,CEM 主要定义了一个随时间变化的指数衰减函数来进行反映。Batty 等^[18]进行城市模拟工作时,引入城市土地单元



图1 基于 CA 的大都市区城市发展概念模型

Fig.1 Concept of city expanding model in the metropolitan area (CEM)

活力值的概念,把城市单元划分为青年、中年和老年,认为城市土地单元有一个从产生到死亡的完整生命周期过程,在不同的阶段具有不同的演化特征。不过城市单元死亡后变成其它用地单元的情况,尽管具有理论上的意义,但在实际的城市发展中,尤其是中国过去 20 多年的快速城市化过程中,还很少出现。在 CEM 中,参考他们的工作,借用相关概念来反映城市单元平面扩展能力自身的衰减性。我们将城市土地单元划分为青年城市单元和非青年城市单元。认为城市单元的平面扩展能力随着年龄的变化而衰减,青年城市单元年龄的较小,平面扩展能力强,可以对周围的非城市单元产生影响。非青年的城市单元年龄较大,平面扩展能力弱,对周围的非城市单元则不产生影响。

设一个城市土地单元 j 产生的时刻为 t_j ,则在时刻 t_i 时,该单元 j 的扩展衰减值 $P_j^i(t)$ 由下式给出,

$$P_j^i(t) = M \exp\{-\lambda(t_i - t_j)\} \quad (1)$$

式中 M 为一标准化常数, λ 表示土地单元平面扩展能力的衰减速率。

在得到该城市单元扩展衰减值后,就可以利用 Monte-Carlo 随机方法确定该单元所处的城市发展阶段^[1]。具体的,设 P_1 代表该单元的扩展衰减值,在 $[0, 1]$ 内产生一个实数 a ,如果 $a \in [0, P_1]$,则认为该单元属于青年,可以对周围的城市单元产生影响,如果 $a \in [P_1, 1]$,则认为该单元属于非青年,对周围的非城市单元不产生影响。

对于各种影响因素的权重,参考我们在深圳的工作,CEM 仍然采用 Monte-Carlo 随机方法进行分配^[37]。

4.2 CEM 的城市发展预测

在预测思路,CEM 认为未来城市的发展格局应该是用地总量最优和位置最佳的有机统一。由于目前“自下而上”的 CA 模型对未来城市发展的总量难以有效控制,因此,CEM 把土地资源视为一种不

可再生资源,首先使用 Tietenberg 资源分配模型来完成未来各个时段内城市用地数量上的最优分配^[34],然后再利用 CA 模型完成位置上的最佳分配(图 2)。

Tietenberg 模型是一个不可再生资源的动态时间分配模型,该模型把涉及时间因素的贴现率放进了模型中,认为对于一定量的不可再生资源,问题是如何在时间上安排它的使用,以获得最大的收益。在 n 年内最有效地分配 Q 总量的资源应该满足如下的最大值条件:

$$\max_{Q_t} \sum_{t=1}^n (a q_t - b q_t^2 - c q_t) / (1+r)^{t-1} + (Q - \sum_{t=1}^n q_t) \quad (2)$$

式中 Q 是所提供的资源总量。 a 是边际收益曲线的截距,即边际收益曲线的最大理论值。 b 是边际收益曲线的斜率,可以选为 1。 c 为边际费用的常数,其值比 a 小,可以选为 $c = a/2$ 。 r 是贴现率, t 是时间,是极值公式的常数。

Yeh 等^[34]采用该模型来进行土地利用总量的分配,建立了下面的方程:

$$(a - b q_t / p_{t,a} - c) / (1+r)^{t-1} - \beta = 0$$

$$t = 1, 2, \dots, n$$

$$Q - \sum_{t=1}^n q_t = 0 \quad (3)$$

式中 $p_{t,a}$ 是 t 时期的增加人口, q_t 是 t 时期所对应的用地量, Q 是分配的土地总量,其它参数的意义同(2)式。Tietenberg 模型和 CA 模型理想结合,可以同时从数量最优和位置最佳两个角度完成未来的城市发展预测。

鉴于本文的目的,在此不对 CEM 作更详细的介绍,有兴趣的读者可以查看文献[40]。

4.3 CEM 的应用实例——北京地区城市发展模拟

我们利用 CEM 模型,对北京地区 1975—1997 年的城市发展过程进行模拟重建,并在此基础上从

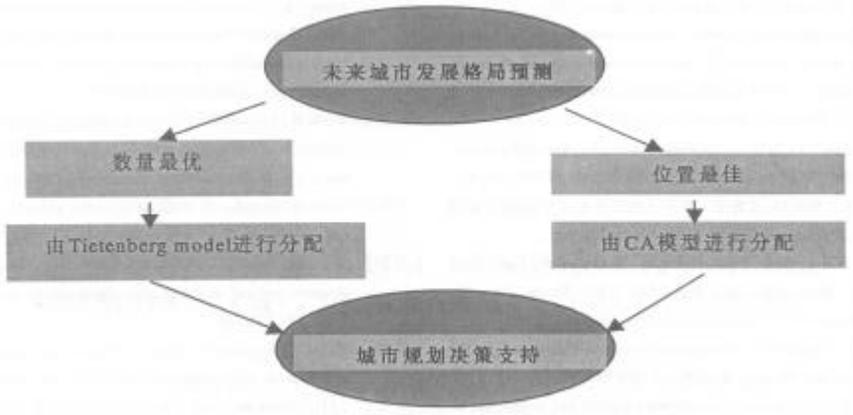


图2 未来城市发展格局预测

Fig.2 Prediction of the future city

城市用地总量最优和位置最佳两个因素相统一的角度对北京地区未来17年(1998—2015)的城市发展格局进行模拟预测。

具体模拟区域主要包括北京城区的东城、西城、宣武、崇文、近郊区的石景山、海淀、朝阳、丰台和远郊区的昌平、顺义、通县等11个区县级行政单元,范围为 $115^{\circ}50'E \sim 116^{\circ}59'E, 39^{\circ}36'N \sim 40^{\circ}23'N$ 。该区人口919.4万,面积4649.9 km^2 ,分别占北京市的74%和28%。地形上西北高东南低,由西北向东南呈现出低地—丘陵—山前洪积—平原区的有序排列,经济上具有从城市核心区、城乡过渡区到远郊区县的明显过渡,映射出人类活动由强到弱的梯度变化,空间上则呈现从中央大区、城市边缘区到外围地域的明显圈层变化并且整体上联系紧密,表现出大都市区的基本特征^[39]。模型中使用的土地利用/覆盖数据主要是来自于编号为123/32的四期 Landsat TM/MSS(1975年5月6日获取的MSS以及1984年10月2日、1991年5月6日和1997年5月16日分别获取的TM)数据^[41],由于遥感影响覆盖能力限制的原因,实际模拟区域总面积为4499.57 km^2 ,实际模拟时的像元大小为150m*150m。

图3(图版)给出了实际遥感监测结果和利用CEM得到的模拟结果,模拟结果和实际结果之间的kappa系数分别达到了0.59、0.65、0.67,图4(图版)给出了贴现率为1%,假定到2015年,区域城镇用地占到区域总面积35%情况下的预测结果,由此可以看出CEM可以在一定程度上反映大都市区城市发展演变的基本特征和规律。

5 结论和讨论

作为一个典型的复杂系统,城市的动态发展是空间个体相互作用的结果,离散化的“自下而上”的微观个体模型代表了当前城市动态模型的最新发展方向。

CA具有较强的模拟空间复杂系统的时空演变的能力,可以进行有效的城市增长、扩散和土地利用演化方面的模拟,建立基于CA的城市空间动态模型应该引起研究者的重视。

随着中国城市化进程的进一步深入发展,大都市将成为中国城市化进程中最引人注目的地区,同时也是中国未来城市化最具有活力的地区。建立和发展基于CA的大都市区城市空间动态模型,对中国大都市区城市发展演变过程进行模拟研究无疑具有重要的理论和实践意义。我们在这方面进行了初步的尝试,发展的大都市区城市扩展动态模型CTM可以在一定程度上反映大都市区城市发展变化的基本特征。

参考文献(References):

- [1] Zhou Chenghu, Sun Zhanli, Xie Yichun. Geographic Cellular Automata Study[M]. Beijing: Science Press, 1999. [周成虎, 孙战利, 谢一春. 地理元胞自动机研究[M]. 北京: 科学出版社, 1999.]
- [2] Chen Shupeng. Urbanization and Urban Geographic Information System[M]. Beijing: Science Press, 1999. [陈述彭主编. 城市

- 化与城市地理系统[M].北京:科学出版社,1999.]
- [3] Chen Shupeng, Xie Chuanjie. Urban remote sensing and urban geo-information system [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2000, 25(1): 35-45. [陈述彭, 谢传节. 城市遥感与城市信息系统[J]. *测绘科学*, 2000, 25(1): 35-45.]
- [4] Gu Chaolin, Xu Haixian. Development of urban geography in China since 1978 [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1999, 19(4): 320-331. [顾朝林, 徐海贤. 改革开放二十年来中国城市地理学研究进展[J]. *地理科学*, 1999, 19(4): 320-331.]
- [5] Turner I B L, Skole D, Sanderson S. Land Use and Land Cover Change: Science/Research Plan [R]. IGBP Report, No. 35, HDP Report No. 7, Stockholm, Geneva, 1995.
- [6] Batty M, Langley P A. The morphology of urban land use [J]. *Environment and Planning B*, 1986, 15: 461-488.
- [7] Batty M. Urban modeling in computer-graphic and geographic information system environment [J]. *Environment and Planning B*, 1992, 19: 663-688.
- [8] Batty M, Longley P A. *Fractal Cities* [M]. London: Academic Press, 1994.
- [9] Batty M, Xie Y. From cells to cities [J]. *Environment and Planning B*, 1994, 21: 31-48.
- [10] Batty M. New ways of looking at cities [J]. *Nature*, 1995, 377: 574.
- [11] Markes H A, Halvin S, Stanley H E. Modeling urban growth patterns [J]. *Nature*, 1995, 377: 608-612.
- [12] Couclelis H. Cellular worlds: a framework for modeling micro-macro dynamics [J]. *Environment and Planning A*, 1985, 17: 585-596.
- [13] Couclelis H. Of mice and men: what do dense population can teach us about complex spatial dynamics [J]. *Environment and Planning A*, 1988, 20: 99-109.
- [14] Couclelis H. Macrostructure and microbehaviour in a metropolitan area [J]. *Environment and Planning B*, 1989, 16: 141-154.
- [15] Couclelis H. From cellular automata to urban models: new principles for model development and implementation [J]. *Environment and Planning B*, 1997, 24: 165-174.
- [16] Batty M, Couclelis H, Eichen M. Urban system as a cellular automata [J]. *Environment and Planning B*, 1997, 24: 159-164.
- [17] Batty M, Xie Y. Possible urban automata [J]. *Environment and Planning B*, 1997, 24: 175-192.
- [18] Batty M, Xie Y, Sun Z. Modeling urban dynamics through GIS-based cellular automata, *Computer [J]. Environmental and Urban Systems*, 1999, 23: 1-29.
- [19] Xie Y. Analytical Models and Algorithms for Cellular Urban Dynamics [D]. Ph D Thesis, University of New York at Buffalo, 1994.
- [20] Clarke K C, Riggan P, Brass J A. A cellular automata model of wildfire propagation and extinction [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1995, 60: 355-367.
- [21] Clarke K C, Gaydos L J, Hoppen S. A self-modified cellular automata model of historical urbanization in the San Francisco Bay area [J]. *Environment and Planning B*, 1997, 24: 247-261.
- [22] Clarke K C, Gaydos L J. Loose-coupling a cellular automata model and GIS: long-term urban growth prediction for San Francisco and Washington/Baltimore [J]. *Int J Geographic Information Science*, 1988, 12(7): 699-714.
- [23] White R, Engelen G. Cellular automata and fractal urban form: a cellular modeling approach to the evolution of urban land use patterns [J]. *Environment and Planning A*, 1993, 25: 1175-1199.
- [24] White R, Engelen G. Cellular dynamics and GIS: modeling spatial complexity [J]. *Geographical Systems*, 1994, 1: 237-253.
- [25] White R, Engelen G. Cellular automata as the basis of integrated dynamic regional modeling [J]. *Environment and Planning B*, 1997, 24: 235-246.
- [26] White R, Engelen G, Ulfsee I. The use of constrained cellular automata for high-resolution modeling of urban land use dynamics [J]. *Environment and Planning B*, 1997, 24: 323-343.
- [27] White R, Engelen G. High-resolution integrated modeling of the spatial dynamics of urban and regional system [J]. *Computer, Environment and Urban System*, 2000, 24: 383-400.
- [28] Wu F. A linguistic cellular automata simulation approach for sustainable land development in a fast growing region [J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 1996, 20: 367-387.
- [29] Wu F. An empirical model of intrametropolitan land use change in a Chinese city [J]. *Environment and Planning B*, 1998, 25: 245-263.
- [30] Wu F. An experiment on the generic polycentricity of urban growth in a cellular automata city [J]. *Environment and Planning B*, 1998, 25: 731-752.
- [31] Wu F, Webster C J. Simulation of land development through the integration of cellular automata and multicriteria evaluation [J]. *Environment and Planning B*, 1998, 25: 103-126.
- [32] Wu F. SimLand: a prototype to simulate land conversion through the integrated GIS and CA with AHP-derived transition rule [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 1998, 12: 63-82.
- [33] Wu F, Webster C J. Simulating artificial cities in a GIS environment: urban growth under alternative regulation regimes [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 1998, 14: 625-648.
- [34] Yeh A G O, Li X. Sustainable land development model for rapid growth areas using GIS [J]. *Int J Geographical Information Science*, 1998, 12(2): 169-189.
- [35] Li X, Yeh A G O. Modeling sustainable urban development by the integration of constrained cellular automata and GIS [J]. *Int J Geographical Information Science*, 2000, 14(2): 131-152.
- [36] Ward D P, Murray A T, Phinn S R. A stochastically constrained cellular model of urban growth [J]. *Computer, Environment and Urban System*, 2000, 24: 539-558.
- [37] Shi Peijun, Gong Peng, Li Xiaobing, et al. Methods and practice of Land Use/Cover Change [M]. Beijing: Science Press, 2000. [史培军, 宫鹏, 李晓兵, 等. 土地利用/覆盖变化研究的方法与实践[M].北京:科学出版社, 2000.]
- [38] Wu F, Webster C J. Simulating artificial cities in a GIS environment

ment, urban growth under alternative regulation regimes[J]. Int J Geographical Information Science, 2000, 14(7): 625-648.

[39] Sun Yinshe. Forming mechanism and delimitation of metropolitan area in China—A case study of Beijing[J]. Acta Geographica Sinica, 1992, 47(6): 552-560. [孙胤社. 大都市的形成机制及其定界——以北京为例[J]. 地理学报, 1992, 47(6): 552-560.]

[40] He Chunyang, Shi Peijun, Chen Jin. Simulation and Prediction of Land use/clover change in metropolitan area, China—As a case study in Beijing[A]. In: Proceedings of International Conference on Land Use/Clover Change Dynamics[C]. 2001. 239-256.

[41] Shi Peijun, He Chunyang, Chen Jin. Study on the land use/clover change in Beijing area, China—analysis of pattern characteristic and change mechanism [A]. In: Proceedings of International Conference on Land Use/Clover Change Dynamics[C]. 2001. 67-86.

STUDY ON THE SPATIAL DYNAMIC CITY MODEL BASED ON CA (CELLULAR AUTOMATA) MODEL

HE Chun-yang, CHEN Jin, SHI Pei-jun, YU Zhang-tao

(Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, Ministry of Education, Beijing Normal University; Institute of Resources Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract In the paper, the Progress in the spatial dynamic city model based on CA (cellular automata) model is reviewed and the new developed CEM model (City Expanding Model in Metropolitan area) with its primary simulation and prediction result in Beijing is introduced. It can be seen that the “bottom-up” dynamic city model based on the individual unit interaction show the last direct of the current spatial city model. At present, it is significant to develop the spatial dynamic city model based on CA and study on the city expanding in metropolitan area in China both in theory and practice.

Key words: Spatial dynamic city model; CA; City expanding model (CEM).

概

下 期 要 目

大地测量学的新进展——参加国际大地测量协会 (IAG) 2001 年科学大会综述	陈俊勇
穿越圈层 横跨时空——记“地球系统过程”国际大会	汪品先
中国黄土堆积的磁性记录与古降雨量重建	胡蒙育, B. Maher
天然放射性碳同位素在海洋有机地球化学中的应用	王旭晨, 戴民汉
¹⁰ Be 在大洋边缘海洋学中的应用及模型	杨永亮
二类水体水色遥感的主要进展与发展前景	任敬萍, 赵进平
大气污染物向海洋的输入及其生态环境效应	高会旺, 张英娟, 张凯
近 20 年来气候模式的发展与模式比较计划	罗勇, 王绍武, 党鸿雁, 赵宗慈
藏南定日地区白垩纪中期地球化学异常对海平面上升的响应	赵文金, 万晓樵
油气成藏年代学研究进展及发展趋势	赵靖舟
空间大地测量测定板块运动新进展	赖锡安, 徐菊生, 王庆廷, 张国安
多普勒天气雷达风场反演技术研究进展	周海光
潮坪风暴沉积特征及其研究意义	胡明毅
1600—2000 年地球主磁场的全球变化	康国发, 吴小平, 胡家富