

大区域尺度下地理系统的空间直观模拟与景观演变

冯永玖

(上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306)

摘 要:元胞自动机(CA)支持下的地理系统空间直观模拟(SEM),能够以空间可视化方式显示模拟结果,不仅能够弥补缺失的资料,更能够推演土地利用的未来趋势和可能情景,从而揭示土地利用的时空过程与变化规律。基于 Logistic 回归的 CA 模型,模拟了大区域尺度下的上海市陆域土地利用变化,并利用景观指标对结果进行刻画和分析。研究表明:上海市城市建设用地面积持续增加,植被面积不断减少,而水域面积保持稳定;此外,景观指标揭示的土地利用空间形态变化过程及趋势,与所采用的元胞尺度有较大关系,即空间直观模拟结果与景观指标具有显著的尺度敏感性。

关键词:元胞自动机;大区域尺度;空间直观模拟;土地利用;景观演变

中图分类号:P901

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2011)05-0048-04

Spatially-explicit Modelling and Landscape Evolution of Geographical System in a Large Scale Area

FENG Yong-jiu

(College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Spatially-explicit modelling(SEM) of land use under the support of cellular automata (CA) is capable of displaying the results with spatial visualization, recovering the missing materials, and inferring the future tendency and feasible scenarios of geographical system, thus to reveal the spatiotemporal process and change rules of land use. With the Logistic regression based on CA model, followed by a landscape pattern analysis, the land use in main land of Shanghai Municipality was simulated. The results demonstrate that the area of building land use type in Shanghai is increasing, that of vegetation is decreasing, and that of water is almost maintaining its state since 1992. Moreover, landscape metrics revealing land use change process and tendency are observed relating with the cell size used, that is, spatially-explicit modelling and landscape metrics is remarkably sensitive to the cell size.

Key words: cellular automata(CA); large scale; spatially-explicit modelling; land use; landscape evolution

元胞自动机(Cellular Automata, CA)作为一种协同作用之后具有复杂行为的数学系统及认识系统复杂性的模拟框架,于 1984 年由 Wolfram 给出其定义、构成元素以及转换规则等。此后,CA 的理论发展和应用研究如雨后春笋般在众多领域得到推广和应用,例如物理、交通、生态、地学等领域^[1]。

城市是一种复杂的地理系统,城市发展是一种最常见的地理现象,关系到国民经济和人民生活的方方面面,是各种自然因素和社会因素互相作用而产生的复杂动态过程。在城市化进程中需要进行统筹规划,选择最优的城市规划方案,在最大限度地发挥城市功

能的同时,控制城市和土地利用的扩张,减低城市化过程对环境和生态带来的副作用。鉴于此,利用元胞自动机模拟城市系统与土地利用的时空演变过程,有助于认识当前的城市规划方案以及土地利用变化模式^[2]。

关于地理元胞自动机的文献较多,在地理系统领域,最近有了一些新的进展。柯新利等以杭州市土地利用变化为例,研究了空间直观模拟元胞模型的尺度敏感性,认为孤立元胞是尺度敏感性产生的主要原因^[3]。此外,柯新利等以武汉城市圈为例,研究了基于分区异步元胞自动机模型的耕地利用布局优化,实现了区域间建设用地的合理配置^[4]。于欢等基于元

收稿日期:2011-03-13

修回日期:2011-04-14

资助项目:上海市教育委员会科研创新项目(11YZ154);上海高校选拔培养优秀青年教师科研专项基金(SSC09018);上海海洋大学校博士启动基金及环境工程重点学科基金(A-2400-10-0134)

作者简介:冯永玖(1981—),男,博士,讲师,主要研究方向为空间直观模拟、遥感与 GIS 应用。E-mail: yjfeng@shou.edu.cn

胞自动机技术,探讨了三江平原典型内陆淡水湿地景观变化过程,揭示了该区域景观演替的机制与规律^[5]。杨娟等以眉山市东坡区为例,开展了土地利用空间规划辅助研究,利用 CA-Markov 模型在 3 种情况下模拟了研究区 2014 年的情景^[6]。冯永玖等利用核主成分分析和偏最小二乘方法建立了不同的城市生长空间直观模拟模型,并用于上海市区县的城市扩展模拟^[7-8]。这些研究,不断拓宽了元胞自动机的研究领域,在土地利用与城市发展纵深方向上取得了有意义的结果。

本文利用基于 Logistic 回归的元胞自动机模型,以上海陆域除崇明三岛以外的大尺度区域为例,探讨该区域 1992 年以来城市土地利用变化的时空过程与景观变化,可望为高度城市化区域的土地利用变化与景观演替研究提供一定的参考作用。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区域

上海市地处长江三角洲东缘,介于北纬 30°40′—31°53′、东经 120°51′—122°12′,南北长约 120 km,东西宽约 100 km。上海东濒东海,南临杭州湾,西接江浙两省,北界长江入海口^[9]。上海全域总面积为 6 340.5 km²,本研究所指的研究区域不包括崇明三岛,研究区面积为 5 626 km²。改革开放以来,尤其是浦东开放开发以来,上海市土地利用变化速度加剧,城市化水平不断攀升,人口机械增长攀升。据统计,上海市城市建成区面积从 1992 年的 1 020 km²,增加到了 2006 年的 2 200 km²,面积增加超过 100%,增长速度迅猛。鉴于此,上海市可以作为长三角甚至中国快速城市化的典型代表,研究其土地利用变化、城市生长与景观演变过程,有利于揭示类似区域城市发展的机制、规律、动力学和发展特征,具有理论意义与实践上的示范作用。

本文利用的数据包括:Landsat TM/ETM+遥感影像,分别为 1992 年 8 月和 2006 年 4 月两组,用于获取图像中的土地利用采样点的光谱信息;上海市地籍图数据和交通地图数据。以 2000 年上海市数字矢量地籍图作为基准图件(在 ArcGIS 中将其转换为 30 m 栅格地籍图),对遥感影像进行几何精校正,校正后的 1992 年影像和 2006 年分别作为研究的初期和末期的基准数据。

1.2 研究方法

1.2.1 空间直观模拟 CA 方法 元胞自动机是一类模型的总称,或者说是一个方法框架,其特点是规则网格中的每一个元胞(Cell)取有限的离散状态,遵循

一定的转换规则,依据确定的局部规则作同步更新。大量元胞通过“自下而上”的底层相互作用,构成了系统的动态演化及其全局结果。元胞自动机不同于一般动力学模型之处,在于它不是严格按照物理方程或数学函数而确定的,而是由元胞要素和一系列规则构成。地理 CA 在地学领域的应用,在保留 CA 基本要素的同时增加 CA 的地理特性,是传统城市模型的动力学空间可视化方法,也是对 GIS 空间分析方法的重要补充。

1.2.2 CA 要素与转换规则 CA 要素是空间直观模拟建模不可或缺的组成部分,包括元胞、状态、邻域和时间等。元胞是 CA 最基本的组成部分。在城市土地利用空间直观模拟中,元胞指土地单元,即栅格影像的一个像素,根据所用的空间尺度,单一元胞所代表的土地面积会存在差异。状态是元胞可能呈现的各种离散状态。城市发展模拟中,存在城市(建设用地)、非城市(植被)及水域等多种状态,在复杂土地模拟中,每种土地利用类型代表一种元胞状态,根据土地分类的详细程度,将存在更多的元胞状态。邻域是中心元胞一定半径范围内包含的元胞集合,半径不同则邻域数量也不同。在地理元胞自动机的城市模拟中,通常采用 Moore 型或扩展 Moore 型邻域。由于 CA 是一个动态系统,因此时间是一个不可或缺的要害。在城市模拟中,每一次循环代表一个固定的时间长度,但是该时间长度究竟相当于多长的实际时间,需要通过模拟结果与城市实际发展进行对比来确定。

转换规则是 CA 建模的核心,是一种根据元胞当前状态及其邻域状况确定下一时刻该元胞状态的动力学函数。目前城市土地利用空间直观模拟的转换规则有多种类型:(1)空间统计学类型,如层次分析法、逻辑回归法、主成分分析和偏最小二乘回归等;(2)模糊逻辑类型;(3)智能规则类型:如神经网络、遗传算法等。从空间统计学到智能算法,虽然提高了模型的精度,但是降低了 CA 的运行效率;同时,有学者认为目前 CA 算法越来越复杂,已经失去了 CA 规则的简单性。因此,本文中采用简单的逻辑回归(Logistic regression)建立元胞自动机模型。基于逻辑回归的 CA 模型,其规则虽然简单,但是已被大量研究所证实,对于两分类的城市土地利用模拟研究,该方法是行之有效的。

一般基于逻辑回归的 CA 转换规则为下一时刻的状态是上一时刻的状态和邻域的函数,其形式为

$$P_{i,j}^t = \frac{1}{1 + \exp(-a_0 - \sum_{k=1}^n a_k x_k)} \times \frac{\sum_{3 \times 3} (S_{ij} = \text{urban})^t}{3 \times 3 - 1} \times \text{con}(\text{cell}_{ij}^t = \text{suit}) \times R \quad (1)$$

式中: $P_{i,j}^t$ ——元胞 ij 在 t 时刻从非城市类型向城市类型转变的概率; $\frac{1}{1 + \exp(-a_0 - \sum_{k=1}^n a_k x_k)}$ ——受空间变量 x_i 影响的局部概率; a_i ——空间变量的权重; $\frac{\sum_{3 \times 3} (S_{ij} = \text{urban})^t}{3 \times 3 - 1}$ ——Moore 元胞邻域的影响; $\text{con}(\text{cell}_{ij} = \text{suit})$ ——元胞状态转变为城市的限制条件, 本研究中限制条件指的是水域; R ——城市土地利用的随机扰动因素; a ——权重参数, 也是待求的 CA 参数; t ——模拟时间。当该参数利用逻辑回归方式获取, 则该模型就是基于逻辑回归的空间直观模拟 LR-CA 模型。

1.2.3 模拟结果的评价方法 为了评估模拟结果并进行趋势分析, 通过景观指标来进行评价。分别采用斑块数量 NP、斑块密度 PD、最大斑块所占景观面积的比例 LPI、景观形状指标 LSI、斑块分维数 FRAC。

2 结果与分析

城市土地利用空间直观模拟的建模与实践, 其理

论基础是土地利用变化的时空过程与规律。通过 1992 年与 2006 年两期影像的对比, 获取了发生状态转换的元胞, 而这些元胞的状态转换体现在 CA 模型中, 是因为受到了 CA 要素和规则的驱动。1992 年的遥感影像是初始状态、2006 年的影像是末期状态, 本文将这两期影像通过监督分类为三种土地利用类型, 即建设用地、植被和水域。利用上述元胞自动机模型, 对上海市 1992 年以来的土地利用变化过程进行了模拟, 结果如图 1 所示。

图 1 表明, 在上海市土地利用模拟中, 空间直观模拟 CA 模型分别循环了 30, 80, 120, 160, 200 次。上述模拟循环次数代表的具体年份, 在模拟结果产生之后需予以确定; 而年份的确定一向是 CA 模拟的难点之一。本文采用如下方法: 统计每次模拟结果的建设用地面积, 将该面积与真实统计面积进行对比, 如果两者相接近, 则后者对应的年份即可认为是模拟对应的年份。根据上述方法, 将模拟 30, 80, 120, 160, 200 次对应的年份分别确定为 1994 年、1998 年、2001 年、2003 年和 2006 年。

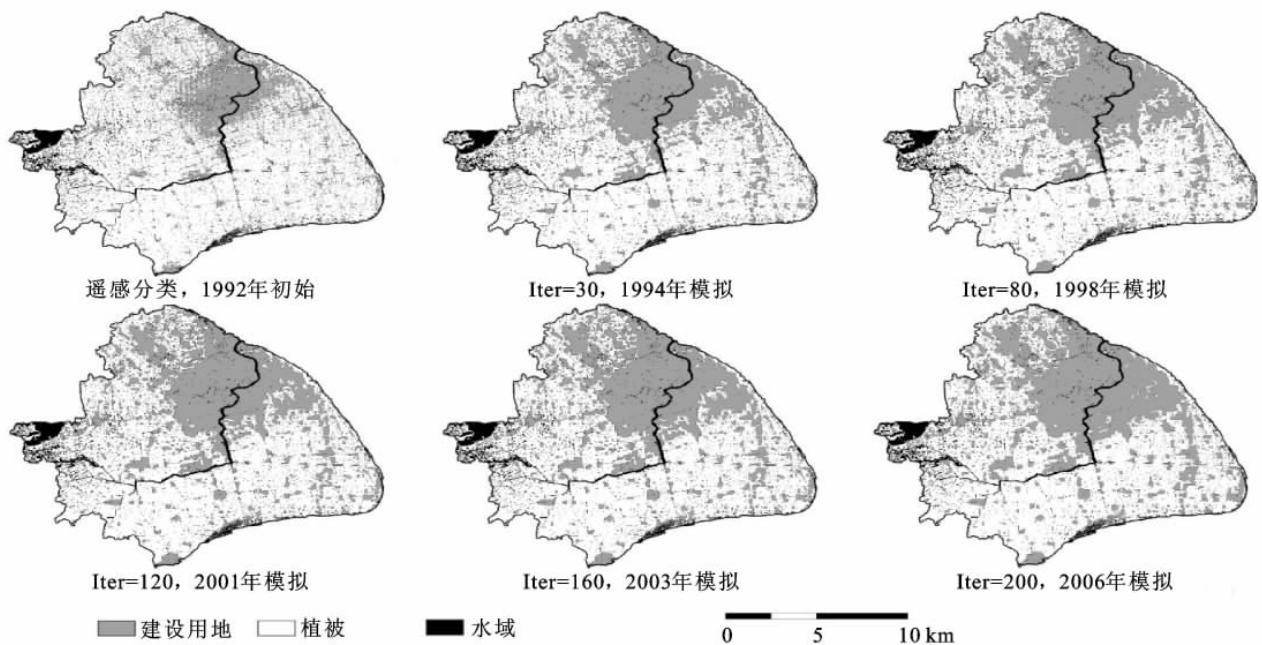


图 1 利用 LSSVM-CA 模型模拟上海市 1992—2006 年土地利用变化

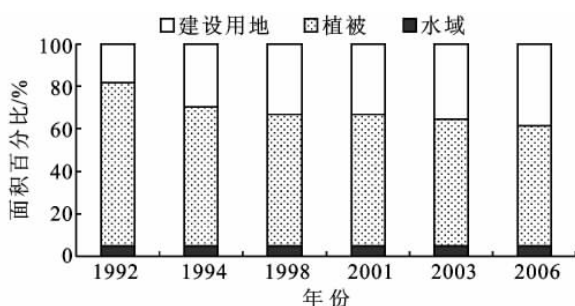


图 2 不同土地利用类型所占面积百分比

从模拟结果来看, 1992 年以来上海市土地利用变化剧烈, 表现为城市建成区面积显著增加, 对应的非建成区面积持续减少, 而水域面积变化不明显。为了验证从模拟中观察到的空间直观结果, 对上述 6 个年份(包括 1992 年)各土地利用类型的面积进行统计, 结果如图 2 所示。

图 2 表明, 上海市建设用地面积逐年增加, 其比例从 1992 年模拟初期的 18.2%, 分别增加到模拟中期 1994 年、1998 年、2001 年和 2003 年的 29.6%,

33.1%,33.1%和 35.4%,截至模拟末期 2006 年,上海市建设用地面积为 38.6%;与此对应,植被面积逐年减少,从 1992 年 76.9%减少到 2006 年 56.4%,而水域面积保持在 5%左右。各类型面积的分析,揭示

了该区域土地利用的数量变化。进一步,本文从景观和空间形态视角分析上海市土地利用变化的时空过程。根据景观指标的测算理论与方法,计算 6 a 中上海市土地利用的 6 种景观指标,详见表 1。

表 1 根据模拟结果测算上海市土地利用的景观变化

景观 指标	1992 年			1994 年			1998 年			2001 年			2003 年			2006 年		
	建设	植被	水域	建设	植被	水域	建设	植被	水域	建设	植被	水域	建设	植被	水域	建设	植被	水域
NP/个	4841	528	1841	2755	181	1650	2394	181	1612	2446	187	1634	2268	186	1637	2173	213	1697
PD	4.74	0.12	6.65	1.65	0.05	5.84	1.29	0.05	5.75	1.31	0.05	5.81	1.14	0.06	5.82	1.00	0.07	5.95
LPI	3.77	42.67	0.59	6.44	36.31	0.59	7.01	34.07	0.57	7.00	34.22	0.59	7.36	32.82	0.59	8.09	29.85	0.58
LSI	72.10	41.24	41.93	37.91	30.67	39.57	33.67	29.41	39.46	33.54	29.47	39.23	31.31	28.88	39.25	28.90	28.50	40.44
FRAC	1.56	1.58	1.50	1.25	1.44	1.47	1.23	1.44	1.46	1.22	1.45	1.47	1.21	1.45	1.47	1.18	1.45	1.46

表 1 显示,1992—2006 年间上海市建设用地的景观斑块数量 NP 呈减小态势,即从 1992 年 4 841 个减少到 2006 年 2 173 个,对应的斑块密度 PD 逐年减小;但是,最大斑块所占景观面积的比例 LPI 呈逐年增加态势,表明中心区面积不断扩大;反映景观形状指标复杂程度的指标 LSI 和 FRAC 呈逐年减小态势,其中 LSI 从 1992 年的 72.10 减小为 2006 年的 28.90,而分维数 FRAC 从 1992 年的 1.56 减小到 2006 年的 1.18。从数据看来,上海市建设用地景观的形态复杂程度不断降低,而实际上,由于所采用的元胞尺度(cell size)较小,细节层次的表现不够精细。由此可见,模拟结果对于所采用的元胞尺度具有较强的敏感性,造成景观指标的变化,但是对于面积的变化趋势而言,元胞尺度的影响则甚微。

对于植被土地类型而言,1992—2003 年其斑块数量 NP 呈急剧下降态势,截至 2006 年斑块数量有少量增加,与此对应的斑块密度 PD 在 1992—2006 年呈先减小后微增规律;最大斑块所占景观面积的比例 LPI 呈逐年降低态势,表明上海陆域植被面积持续减少;形状指标 LSI 和 FRAC 呈逐年减小态势,其中 LSI1992 年的 41.24 减小为 2006 年的 28.50,而分维数 FRAC 在 1992 年为 1.58,此后至 2006 年基本保持不变。景观指标表明,上海陆域植被面积减少、空间形态趋于简单,该结论同样是相对于特定的元胞尺度而言的。植被类型与建设用地类型一样,受到元胞尺度大小的影响,呈现的结果有所差异。

对于水域类型而言,1992 年斑块数量 NP 较大,1994—2006 年基本保持不变,相应的斑块密度与斑块数量的规律一致;最大斑块所占景观面积的比例 LPI 在 1992—2006 年保持平稳态势,该最大斑块为黄浦江,表明黄浦江水域空间特征稳定;形状指标 LSI 在 14 a 间呈微降态势,而分维数 FRAC 则比较稳定。以上分析表明,上海市水域面积和空间形态比较稳定,因此元胞尺度的影响甚微。

3 结 论

利用空间直观模拟(SEM)元胞自动机(CA)模型,模拟大区域尺度下的上海市陆域土地利用变化过程,能够以空间可视化的方式探索和显示其时空过程。空间直观模拟方法,对于缺乏研究中时段期的资料和数据时,能起到有益的补充作用;并且能够推演地理系统的未来趋势和可能情景,为揭示土地利用变化的时空过程与规律提供了重要的方法。

(1)元胞自动机(CA)是一种“自下而上”自动演化的模型框架,能够通过局部的交互形成全局性的结构,能够有效地应用于大区域尺度下的土地利用变化模拟。尽管目前发展了多种智能和非智能 CA 模型,但是基于 Logistic 回归的 CA 模型在土地利用模拟中,并未就此淘汰,该模型表现出了简单性与稳健性的优点。

(2)基于模拟结果对大区域尺度下的土地利用进行景观分析,是一种行之有效的方法。CA 模型的模拟结果,具有时间连续与空间可视化的特点,通过景观指标能够较好地刻画土地利用的空间形态在时间序列上的变化过程。对上海市陆域进行土地利用模拟及景观分析表明,该区域各类型土地利用随时间推移呈现规律性变化。

(3)空间直观模拟结果,特别是部分景观指标与所采用的元胞尺度有较大关系,即 CA 模拟与景观分析具有空间尺度敏感性。元胞尺度对于模拟面积的影响甚微,但是对于有关空间形态的景观指标,则影响比较显著,因此在进行土地利用模拟和景观分析时,须指明所使用的元胞尺度,甚至进行元胞尺度的影响分析。

参考文献:

[1] 李月臣,何春阳.中国北方土地利用/覆盖变化的情景模拟与预测[J].科学通报,2008,53(6):713-723.

该依托风能、光热等自然资源优势发展低碳经济产业,积极引进高新技术项目,大力推进新能源和可再生能源建设。

(2)陇中地区包括处于工业化中级阶段的兰州、白银两市,工业化任务艰巨,还包括中国最贫困的地级市之一——定西,该地区发展低碳经济应该进一步优化中心城市兰州的产业结构,促进资源型城市白银的转型并发展接续产业,同时大力发展定西市农业产业,加强生态环境保护,以兰—白都市经济圈建设为契机,形成节约资源与能源、低碳循环、保护生态环境的产业结构链,杜绝先污染后治理、先粗放后集约的发展思路,辐射和带动整个陇中地区的经济建设。

(3)陇东地区包括平凉和庆阳两市,该地区煤炭、油气资源丰富,在合理开发资源,建设绿色新能源基地的同时,要未雨绸缪及早形成低碳经济模式与低碳生活方式,实现能源化工经济与生态环境的和谐可持续发展,同时要充分利用陇东特色农业和优越的文化资源,发展庆阳香包文化产业,进一步推进庆阳、平凉两市特色农产品产业和旅游业。

(4)陇南地区包括其经济核心城市天水市和经济较为落后的陇南市,该地区发展低碳经济就要打破区位封闭,充分发挥天水市区位优势,承接关中城市的辐射带动作用,搭乘关中天水经济区快车,加快低碳经济发展,凭借地缘优势、丰富的旅游资源和日益完善的交通环境,推动第三产业发展;与平凉、庆阳搞好互动发展,强化生态环境保护,建设生态城市;凭借已有的自然资源优势,大力发展天水市林果特色产业,加快陇南市中药材产业开发,提升市场竞争力,实现该地区人口、资源、环境、经济、社会的协调发展。

参考文献:

[1] 朱守先. 城市低碳发展水平及潜力比较分析[J]. 开放导

报,2009(4):10-13.

- [2] 庄贵阳. 中国经济低碳发展的途径与潜力分析[J]. 太平洋学报,2005(11):79-87.
- [3] 鲁静. 国内外低碳经济综合评价方法评述[J]. 中国投资,2010(8):100-103.
- [4] 陈飞,诸大建. 低碳城市研究的内涵、模型与目标策略确定[J]. 城市规划学刊,2009(4):7-13.
- [5] 任福兵,吴青芳,郭强,等. 低碳社会的评价指标体系构建[J]. 科技与经济,2010,23(2):68-72.
- [6] 李晓燕. 基于模糊层次分析法的省区低碳经济评价探索[J]. 华东经济管理,2010,24(2):24-29.
- [7] 李晓燕,邓玲. 城市低碳经济综合评价探索[J]. 现代经济探讨,2010(2):82-85.
- [8] 中国社会科学可持续发展战略研究组. 2009 中国可持续发展战略报告:探索中国的低碳道路[R]. 北京:社会科学出版社,2009.
- [9] 谭荣波,梅晓仁. SPSS 统计分析实用教程[M]. 北京:科学出版社,2007.
- [10] 陈明星,陆大道,张华. 中国城市化水平的综合测度及其动力因子分析[J]. 地理学报,2009,64(4):387-398.
- [11] 左继宏. 湖北省城市竞争力实证分析[J]. 科技管理研究,2007,27(12):120-122.
- [12] 刘文玲,王灿. 低碳城市发展实践与发展模式[J]. 中国人口·资源与环境,2010,20(4):17-22.
- [13] 吕秀丽,陈兴鹏,赵博,等. 甘肃省 CO₂ 排放与经济发展关系分析[EB/OL]. 中国科技论文在线,2010.
- [14] 张秀梅,李升峰,黄贤金,等. 江苏省 1996 年至 2007 年碳排放效应及时空格局分析[J]. 资源科学,2010,32(4):768-775.
- [15] 高新才,滕堂伟. 西北区域经济发展蓝皮书:甘肃卷[M]. 北京:人民出版社,2008.
- [16] 李明生,袁莉. 中国低碳社会的模式与建设路径探讨[J]. 软科学,2010,24(4):39-42.
- [17] 载奕欣. 中国低碳城市发展的必要性和治理模式分析[J]. 中国人口·资源与环境,2009,19(3):12-17.

(上接第 51 页)

- [2] 刘小平,黎夏,张啸虎,等. 人工免疫系统与嵌入规划目标的城市模拟及应用[J]. 地理学报,2008,63(8):882-894.
- [3] 柯新利,邓祥征,何书金. 地理元胞自动机模型的尺度敏感性及其原因[J]. 地理研究,2010,29(5):863-872.
- [4] 柯新利,邓祥征,刘成武. 基于分区异步元胞自动机模型的耕地利用布局优化:以武汉城市圈为例[J]. 地理科学进展,2010,29(11):1442-1450.
- [5] 于欢,何政伟,张树清,等. 基于元胞自动机的三江平原湿地景观时空演化模拟研究[J]. 地理与地理信息科学,2010,26(4):90-94.
- [6] 杨娟,王昌全,夏建国,等. 基于元胞自动机的土地利用空间规划辅助研究:以眉山市东坡区为例[J]. 土壤学报,2010,47(5):847-856.
- [7] 冯永玖,刘妙龙,童小华,等. 基于核主成分元胞模型的城市演化重建与预测[J]. 地理学报,2010,65(6):665-675.
- [8] 冯永玖,童小华,刘妙龙. 基于偏最小二乘地理元胞模型的城市生长模拟[J]. 同济大学学报:自然科学版,2010,38(4):608-612.
- [9] 曹建军,刘永娟. GIS 支持下上海城市生态敏感性分析[J]. 应用生态学报,2010,21(7):1805-1812.