

基于多智能体系统的城市增长时空动态模拟 以江苏省连云港市为例

张鸿辉^{1,2}, 王丽萍^{1,3}, 金晓斌^{1,2}, 宋 歌¹, 周寅康^{1,2}, 杨悉廉¹

(1. 南京大学地理与海洋科学学院, 江苏 南京 210093; 2. 南京大学人文地理研究中心, 江苏 南京 210093;
3. 连云港师范高等专科学校旅游系, 江苏 连云港 222006)

摘要 城市化是土地利用/覆盖变化中最典型形式之一, 探索城市增长的驱动机制并预测其未来变化, 对于实现城市可持续发展十分重要。鉴于多智能体系统强大的模拟复杂空间系统的能力, 基于联合“自上而下”和“自下而上”决策行为的视角, 构建了一个城市增长时空动态模拟多智能体模型。在模型中, 宏观 Agent 实施的“自上而下”的宏观土地利用规划行为和微观 Agent 自主发起的“自下而上”的微观土地利用空间诉求行为通过二维空间网格相互作用, 并通过联合决策共同推动研究区域的城市化进程。以连云港市中心城区为例, 考虑了基于目前趋势、经济发展优先和环境保护优先的3种目标情景, 并进行了相应的城市增长情景模拟。模拟结果表明, 联合“自上而下”和“自下而上”决策行为的城市增长时空动态模拟多智能体模型能够充分发挥多智能体系统的潜力来了解城市化的驱动机制, 为城市管理提供基于情景分析的决策支持。

关键词 城市增长; 时空动态模拟; 多智能体系统; 联合决策; 情景分析; 连云港市
中图分类号 F219 **文献标识码** A **文章编号** 1000-0690(2012)11-1289-08

土地利用/覆盖变化已被广泛认为是全球生态系统变化的主要驱动力和全球气候变化的关键因素^[1]。城市化是土地利用/覆盖变化的最典型的形式, 深刻地影响生物多样性、生态过程和生态系统服务, 并导致了热岛效应、农用地减少、生态环境质量下降等一系列问题^[2-3]。探索城市增长的驱动机制并预测其未来变化, 对于实现城市可持续发展具有十分重要的意义^[3-4]。

为了更好地研究城市发展动态, 研究人员已经开发了各种不同的城市增长建模方法。其中, 元胞自动机(Cellular Automata, 简称CA)模型已被广泛应用于模拟城市增长^[5]。虽然CA模型在一定程度上已经可以成功地模拟城市土地利用的变化, 但其通常基于对城市增长过程的直观认识, 通过定义启发式规则模拟城市增长^[4], 在模拟过程中较难融合个人或组织的决策知识, 从而限制了其进一步应用^[6-8]。作为弥补这一不足的一

种很有潜力的方法, 多智能体系统(Multi-Agent System, 简称MAS)建模提供了一个更强大的工具来模拟多层次的城市增长动态决策过程^[9]。在MAS模型中, Agent代表不同的个人或群体, 在绝大多数情况下, 各种Agent都在城市增长过程中发挥着作用。基于MAS的模型展示了决策主体之间的交互行为, 能通过模拟决策过程和人类与环境的相互作用, 加强对城市增长过程的了解^[10, 11], 为城市增长过程研究提供了提供定量和可验证的方法^[12, 13]。

城市增长空间格局不仅受以政府为代表的宏观决策行为主体制定的“自上而下”的土地利用规划的制约(包括数量和空间两个方面), 而且受居民、企业等各种微观土地利用行为主体的“自下而上”的土地利用空间诉求的影响^[4, 14]。然而, 政府在制定土地利用规划的宏观决策过程中往往未能充分考虑到本地尺度的微观因素及其交互作用, 而

收稿日期 2012-04-23 **修订日期** 2012-07-09

基金项目 国家“973”计划项目(2011CB952001)、国家自然科学基金项目(41201386、41171326)、中央高校基本科研业务费专项资金资助。

作者简介 张鸿辉(1980-), 男, 湖南长沙人, 博士后, 主要从事遥感与GIS应用研究。E-mail: zhhgis@163.com

通讯作者 王丽萍, 副教授。E-mail: 0518liping@163.com

微观土地利用行为主体在决策过程中则往往忽略了更大尺度上的宏观制约因素^[15]。因此,为实现宏观土地利用行为主体与微观土地利用行为主体在决策过程中的有效沟通,开发一个既能实现城市增长决策过程直观模拟,又能统筹考虑宏、微观行为主体的决策行为的城市增长模型非常必要。本研究基于联合“自上而下”和“自下而上”决策行为的视角,提出了统筹考虑宏、微观土地利用行为主体决策行为的城市增长时空动态模拟 MAS 模型。模型包括宏观(以政府为代表)和微观(以居民、农民、工业企业主、环境保护主义者为代表)2类 Agent,建立了 Agent 的互动关系及联合决策规则,并以江苏省连云港市为例,模拟了该市中心城区的3种城市增长情景,以期更好地了解该地区的城市增长驱动机制。

1 研究区域和数据来源

本文选择连云港市中心城区作为研究区域(图1)。研究所使用的数据包括地理信息、社会经济统计等多种数据,地理信息数据主要来源于连云港市国土资源局和连云港市规划局,社会经济统计数据主要来源于连云港市统计局。地理信息数据包括2008年、2010年连云港市中心城区土地利用现状,连云港市土地利用总体规划(2006~2020年),连云港市城市总体规划(2008~2030年),连云港市交通图、地价图、电子地图(包括学校、医院、银行、居民点、商业、工业等多种专题信息)等;社会经济统计数据包括人口、GDP、第二、三产业产值等。

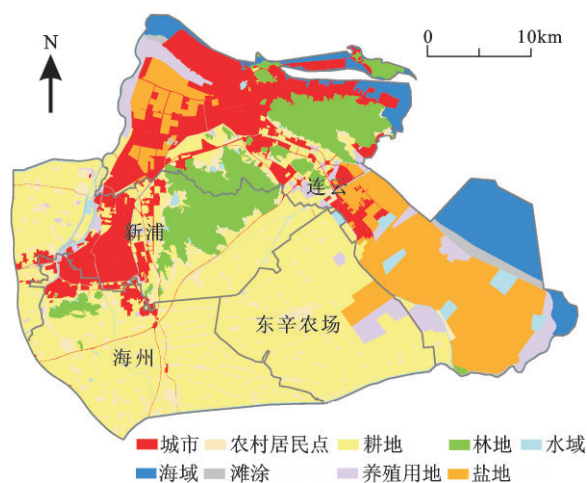


图1 研究区示意图

Fig.1 Map of study area

2 城市增长时空动态模拟 MAS 模型建立

2.1 模型的概念框架

在本文构建的 MAS 模型中,根据土地利用政策实施的层次,Agent 被分为宏观(以政府为代表)和微观(以居民、农民、工业企业主、环境保护主义者为代表)2类。宏观 Agent 的决策行为代表政府实施的“自上而下”的宏观土地利用规划行为,微观 Agent 的决策行为代表居民、农民、工业企业主、环境保护主义者等行为主体自主发起的“自下而上”的微观土地利用空间诉求行为。当面向不同的社会目标(如侧重发展经济或加强环境保护)时,宏观 Agent 和微观 Agent 均通过调整相应决策变量的权重影响土地用途转换的概率,二者最终通过联合决策推动研究区域的城市化进程。模型主要由3部分组成,分别为多智能体系统(包括宏观 Agent、微观 Agent)、决策框架和外部环境(包括土地利用、地价等信息),多智能体系统需要从外部环境提取信息以供决策,同时又将宏观 Agent 与微观 Agent 相互作用的结果反馈给外部环境,从而引起外部环境(如土地利用)的变化。决策框架包括基于 GIS 的环境数据和 Agent 决策规则。

2.2 多智能体联合决策

2.2.1 宏观 Agent 的决策行为

在城市增长模型中,政府是一类特殊的 Agent。它不具备空间属性,是通过制定土地利用规划对城市用地进行宏观数量控制与空间布局。用地数量控制通过预测用地需求实现,空间布局借鉴多准则判断元胞自动机模型(Multi-Criteria Evaluation Cellular Automata, MCE-CA)模拟。MCE-CA 模型最早由 Wu 和 Webster 提出^[16],是一种简单、易于实现的 CA 模型。模型中一个土地利用单元(i, j)在 $t+1$ 时刻转变为城市用地的概率由该单元及其邻域在 t 时刻的状态所决定,状态转换的规则如公式(1)和(2)所示:

$$S_{i,j}^{t+1} = f(Q_{i,j}^t) \quad (1)$$

$$Q_{i,j}^t = \exp\{a \times [(r_{i,j}^t / r_{\max}) - 1]\} \quad (2)$$

式中, $S_{i,j}^{t+1}$ 为土地利用单元(i, j)在 $t+1$ 时刻的状态, $Q_{i,j}^t$ 为土地利用单元(i, j)在 t 时刻转变为城市用地的概率。转换概率由土地利用单元(i, j)的区位属性 $r_{i,j}^t$ 来确定, r_{\max} 是最高的属性值。 a 为扩散系数。

2.2.2 微观 Agent 的决策行为

微观 Agent 由一系列具有共同规划愿景的兴趣组和组织组成, 而不是单纯的个人, 从而为城市增长过程建模提供一种更为现实的方式。它还可以根据 Agent 种类的不同分为更多的子类。微观 Agent 具有观察、感知、产生土地利用偏好等行为, 在城市增长过程中, 微观 Agent 将根据其空间诉求表达某种特定的期望, 这些期望决定了微观 Agent 在城市空间系统中的观察内容, 其观察结果称为事件, 而通过感知与评价这些事件, 微观 Agent 将形成自己的感觉, 这种感觉与城市空间系统的状态直接相关。

1) 观察

观察行为是指参与型 Agent 将期望(D)映射为事件(F)的过程, 每个微观 Agent 有一套期望集合 ($Desires$), $D \in Desires$, 每个期望均代表一个偏好主题或空间布局方案, 每个期望基于下面的规则被映射为一个关于空间信息的定量的观察事件:

$$\text{观察 } D \times F \rightarrow F \quad (3)$$

通过该公式, 先前产生的事件和期望能够被映射为一个新的事件^[10]。

2) 感知

感知行为是指微观 Agent 将事件映射为感觉(p), 感觉用于衡量事件对微观 Agent 实现期望的贡献度, 亦即事件的价值。感知行为可用下式表示:

$$\text{感知 } F \times U \rightarrow P \quad (4)$$

式中 P 为感觉集合, 感觉($p \in P$)的计算公式为:

$$p_{ij}^t = f_{ij}^t \times u_f^t \quad (5)$$

式中, f_{ij}^t 为 t 时刻在土地利用单元(i, j)发生的事件 f , u_f^t 为事件 f 的效用函数, p_{ij}^t 为 t 时刻在土地利用单元(i, j)发生的事件 f 被映射后所形成的感觉。

3) 产生城市化偏好

城市化偏好(L_{PREF})决定了城市空间系统中的微观 Agent 成功选择到土地利用单元的可能性, 其产生通过联合环境中的每个土地利用单元所承载的微观 Agent 的感觉而得到, 具体计算公式如下所示:

$$L_{PREF,ij}^t = \sum_{f=1}^n p_{ij}^t \times w_f \quad (6)$$

式中, $L_{PREF,ij}^t$ 为土地利用单元(i, j)在时刻 t 所对应的城市化偏好, n 为土地利用单元所承载的事件的总数量, w_f 为事件 f 的权重。

2.2.3 宏观 Agent 与微观 Agent 联合决策

就某个土地利用单元而言, 其城市化是在宏观 Agent 与微观 Agent 的共同作用下而实现的。为了将二者决策的效果联合为一个表征土地利用单元城市化概率的公式, 借鉴加权求和模型^[17], 将宏观 Agent 与微观 Agent 联合决策的城市化概率可用下式表示:

$$T = [\theta Q_{ij}^t + (1 - \theta) L_{PREF,ij}^t] \quad \forall \theta \in [0, 1] \quad (7)$$

式中, θ 为权重参数, T 表示单元(i, j)在宏观 Agent 与微观 Agent 联合决策作用下的城市化概率。 Q_{ij}^t 与 $L_{PREF,ij}^t$ 的意义同上文。在模型中, 依据 T 值从高到低进行城市用地的时空配置。

3 连云港市中心城区城市增长时空模拟

3.1 宏观 Agent 决策及其实现

采用 MCE-CA 模型模拟宏观城市空间布局, 所考虑的布局因素包括一系列空间决策变量^[18,19] 距市区距离(v_1)、距高速公路距离(v_2)、距道路距离(v_3)、距海岸线距离(v_4)、距农田保护区距离(v_5)、距限制发展区域距离(v_6)等因素。此外, 城市发展概率还与局部邻域的发展密度 Ω 有关^[19,20]。本文将邻域定义为 3×3 单元的摩尔邻域, 发展密度 Ω_{ij}^t 表示为:

$$\Omega_{ij}^t = \frac{\sum_{3 \times 3} \text{con}(s_{i,j} = \text{urban})}{3 \times 3 - 1} \quad (8)$$

式中, $\sum_{3 \times 3} \text{con}(s_{i,j} = \text{urban})$ 表示邻域中城市单元的个数。城市发展还受随机性因素 ε 的影响。最后, 在考虑发展区位、邻域发展密度和随机性因素后, 政府将单元(i, j)布局为城市用地的概率(Ω_{ij}^t)可以用公式(9)表示:

$$Q_{ij}^t = \exp\{\alpha \times [(r_{ij}^t / r_{\max}) - 1]\} \times \Omega_{ij}^t \times \varepsilon \quad (9)$$

3.2 微观 Agent 决策及其实现

在城市增长过程中, 参与决策的微观 Agent 主要包括城市居民 Agent、农民 Agent、工业企业 Agent、环保主义 Agent 等, 每类微观 Agent 被赋予一定的期望(表 1)。

微观 Agent 的期望通过其观察行为将被映射为一个关于环境的事件。例如, 工业企业 Agent 表达期望需要执行以下操作:

观察可供开发的潜力单元; 获取潜力单元的交通条件和地价水平等信息, 并计算其与

表1 微观Agent类型及期望

Table 1 Types and desires of micro agents	
Agent 类型	Agent 期望
城市居民 Agent	(a) 新增城市用地应尽量靠近已有建成区
	(b) 新增城市用地应具有良好的公共设施可达性
农民 Agent	(c) 新增城市用地尽量远离现有农用地区域
	(d) 镇中心尽量向城市区域靠近
工业企业 Agent	(e) 新增城市用地应具有便利的交通条件
	(f) 新增城市用地应向已有工业区集聚
	(g) 新增城市用地尽量选择地价较低的区域
环保主义 Agent	(h) 新增城市用地应尽量远离自然保护区
	(i) 城市扩张过程中应尽量保护滩涂、湿地等自然资源

最近的城市用地单元之间的距离；根据权重，综合工业企业Agent的交通条件、用地集聚水平、地价水平期望，得到环境观察事件分布。

图2为城市居民Agent、农民Agent、工业企业Agent、环保主义Agent通过观察将其对应的期望映射而成的环境观察事件。微观Agent用于感知观察事件的效用函数源于对研究区域各类微观Agent的实际调查，随着空间距离的变化，不同类型

的Agent所表现的效用各异。将微观Agent的观察事件及其对应的效用函数输入公式(5)，形成参与型Agent的感觉 p ，再将 p 及环境观察事件的权重输入公式(6)，形成微观Agent对单元的城市化偏好。

3.3 模型评估

模型构建好以后，需要对模拟的结果进行检验。预测结果的验证方法一般有逐点对比和整体对比2种方法^[21]。逐点对比就是将模拟结果和实际情况叠加，逐点对比其精度，整体对比是指用一些表达整个空间格局情况的指数对模拟结果进行评估^[22]。本研究选择了Kappa系数定量地反映模型运行的模拟结果^[23]，公式表达为：

$$Kappa = (P_o - P_c) / (P_p - P_c) \quad (10)$$

式中， P_o 为正确模拟的比例； P_c 是随机情况下期望的模拟比例； P_p 表示理想分类情况下正确模拟的比例。不同的Kappa系数，表明不同程度的一致性。对中心城区2010年的模拟结果进行Kappa系数检验得到Kappa值为0.727，表明基于多智能体系统模拟的连云港市中心城区城市空间增长有较强的可信度。

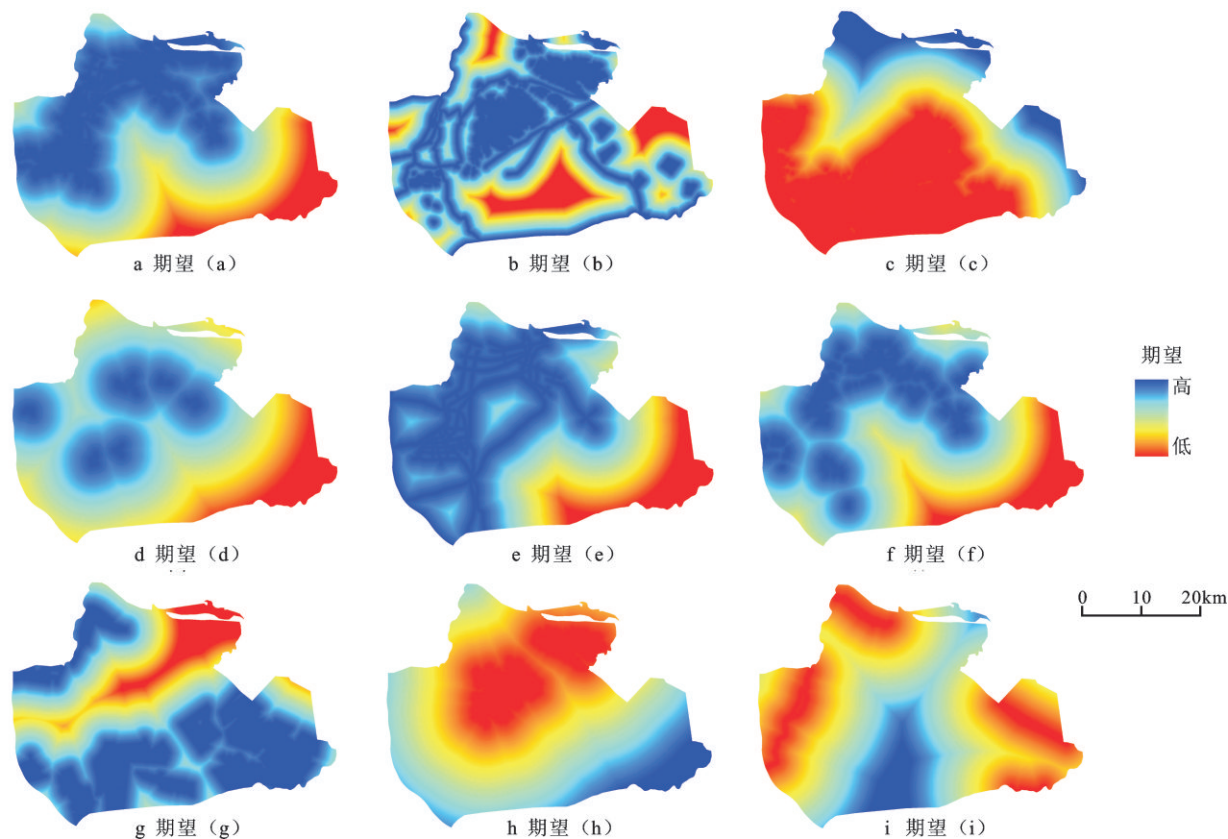


图2 微观Agent期望映射为事件制图

Fig.2 Maps resulting from the observations by the micro agents

3.4 连云港市中心城区城市增长情景模拟

为探索连云港市中心城区可能的城市增长结果,设计了3种情景,代表不同的发展模式。

情景1(基准情景)连云港市着力推进海滨城市建设,中心城区的土地利用需求不会受到政策调整的影响,土地需求依然按照政府预测的规模计算。

情景2(生态保护情景):宏观 Agent 与微观 Agent 都更加重视环境保护,要求经济平稳发展,以保护开放空间、水体及滩涂等生态资源,将云台山森林自然保护区、海岛生态保护区、蔷薇河及其周边区域划为限制建设区域。

情景3(经济发展情景)连云港市大力推进沿海发展战略,要求保证工矿、港口等为区域经济增长贡献份额较大的土地利用类型的充足供应,保障滨海新城等重点建设区域的用地需要,总建设用地规模可突破政府预测的规模。

3种情景下的城市增长模拟主要通过调整宏观、微观 Agent 的决策参数来实现(表2、表3)。将表2及表3中的参数输入模型,得到2020年、2030年连云港市中心城区在3种情景下的城市增长结果(图3)。

表2 不同情景下宏观 Agent 的决策变量权重

Table 2 Weights of decision-making variables of macro agents under different scenarios

	w_1	w_2	w_3	w_4	w_5	w_6
情景1	0.167	0.081	0.245	0.312	0.092	0.103
情景2	0.125	0.096	0.236	0.298	0.114	0.131
情景3	0.139	0.087	0.249	0.363	0.078	0.084

情景1、2、3下,2020年城市用地将分别达到206.58 km²、195.81 km²、229.47 km²,2030年将分别达到234.49 km²、212.42 km²、278.46 km²。情景2的城市增长明显慢于其他2种情景,这是因为对生态环境保护的重视,使得非城市用地转换为城市用地受到更多的限制。情景3侧重发展经济,城市增长最快,到2030年,城市用地的数量已超出政府

规划的城市发展规模的18.58%。3种情景下,均可以发现沿海地区和港口周边地区的城市用地都是增长最快的,体现了沿海开发战略和港口建设对连云港城市发展的驱动。此外,还可注意到的是,随着城市用地的进一步扩张,由于临海地区较好的开发条件,即使在生态保护情景下,临海地区的滩涂和水域均遭到了一定程度的破坏。因此,政府在实际实施沿海开发战略时,需采取更强有力的控制手段保护临海地区的生态环境资源。

为了进一步比较不同情景下的模拟结果,使用景观指数^[24,25]来描述3种情景下2020和2030年的城市规模和城市形态的复杂性。4种景观指数用FRAGSTATS软件计算^[26]:城市斑块数量(NP),城市边缘密度(ED),城市斑块平均大小(MPS),面积加权平均斑块分维数(AWMPFD)。根据已有相关研究,当城市分散增长时NP增加,而当城市增长的同时将小的城市斑块进行合并,NP将减少^[11]。在城市化过程中,当新的城市斑块数量多且面积小,斑块平均面积(MPS)就会减小,否则会增大^[11]。聚合的城市斑块导致较低的ED值,而越不规则或复杂形状的斑块,将会导致更高的AWMPFD值^[11]。

从分析结果来看(图4),3种情景下,2008~2020年间NP值均大幅下降,2020~2030年之间下降的趋势有所减缓,而MPS值在整个模拟期内均逐步增加,MPS值的变化表明城市化过程中用地扩张的同时伴随着斑块的合并。从NP和MPS数值变化的程度可看出,城市增长在情景3中由于优先发展经济而加速,在情景2中由于重视生态环境保护而减缓。在3种情景下,由于城市斑块的合并,ED值持续下降,与之相伴随的是MPS的增加和NP的减少,AWMPFD的变化结果与ED相符合。

4 结论与讨论

MAS模型能够捕捉人类复杂的决策行为,它已日益成为模拟复杂空间系统的强大工具。在本文所构建的城市增长时空动态模拟MAS模型中,宏观 Agent 与微观 Agent 都具备与土地利用政策或

表3 不同情景下微观 Agent 对不同观察事件的权重

Table 3 Weights of observation facts of micro agents under different scenarios

	a	b	c	d	e	f	g	h	i
情景1	0.134	0.097	0.101	0.077	0.163	0.081	0.109	0.125	0.113
情景2	0.127	0.084	0.102	0.065	0.155	0.075	0.118	0.142	0.132
情景3	0.143	0.105	0.087	0.092	0.189	0.076	0.085	0.115	0.108

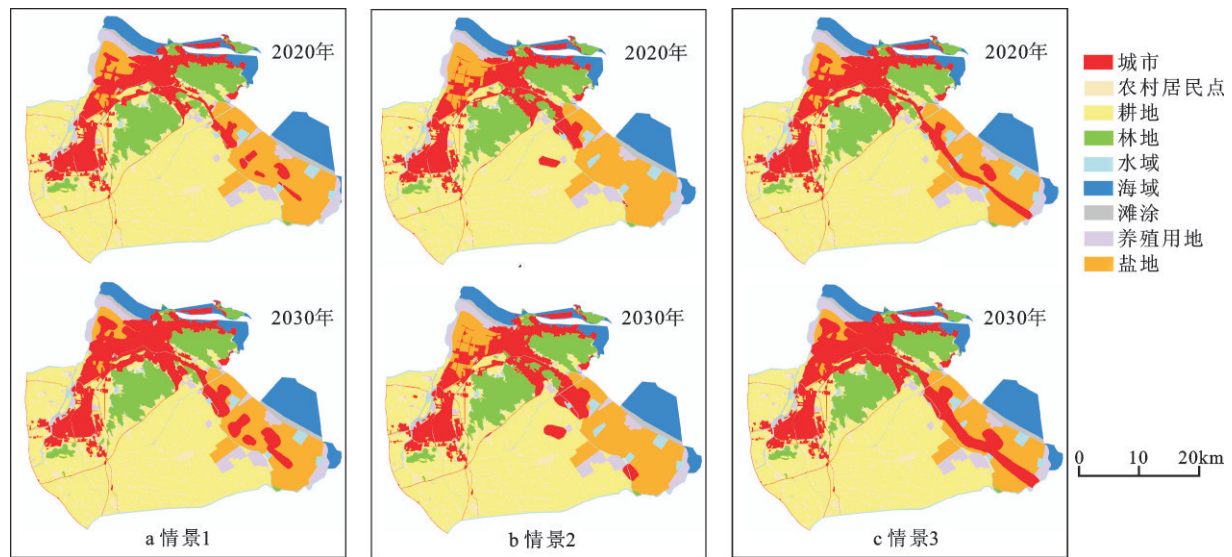


图3 连云港市中心城区2020年、2030年城市增长情景模拟

Fig.3 Land use scenario simulation of central Lianyungang city in 2020 and 2030

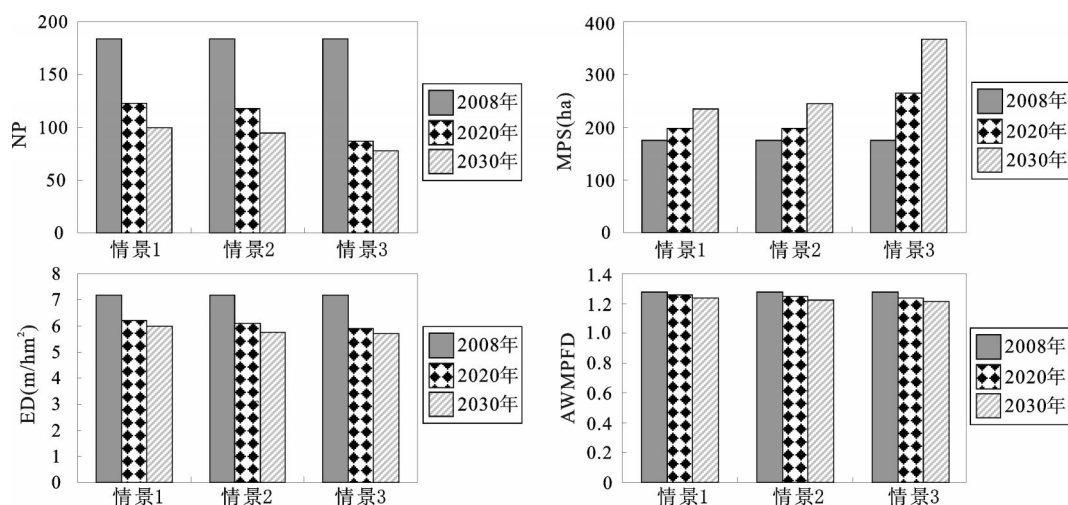


图4 2008、2020和2030年情景模拟结果的景观指数对比

Fig.4 Comparison the land use patterns among the three different development scenarios in 2008, 2020, and 2030

用地诉求相关的决策行为,社会发展目标(如经济发展或环境保护)通过正确定义 Agent 的行为被集成入模型中。宏观 Agent 实施的“自上而下”的宏观土地利用控制行为和微观 Agent 自主发起的“自下而上”的微观土地利用空间诉求行为通过二维空间网格相互作用,并通过联合决策推动研究区域的城镇化进程。宏观 Agent 和微观 Agent 的行为是自适应的,当社会发展目标变化时,可通过调整相应决策变量的权重影响土地用途转换的概率,从而实现多种情景下的城市增长时空动态模拟。

以连云港市中心城区为例,考虑了基于目前趋势、经济发展优先和环境保护优先的3种目标情

景,并进行了相应的城市增长时空动态模拟。模拟结果表明,从2008~2030年,在3种情景下的城市化进程中,城市斑块均会以递增速度扩张和合并。由于优先发展经济,情景3的城市增长的速度比情景1、2都要快,并且城市用地规模突破了政府制定的宏观规划。情景2的城市增长速度比情景1、3都要慢,这主要是对生态环境保护的重视导致更多城市发展受到更多的限制。在3种情景下,沿海地区和港口周边地区的城市用地都是增长最快的,体现了沿海开发战略和港口建设对连云港城市发展的驱动力。同时,从城市增长的情景模拟结果也可发现临海地区的生态环境资源极易受城

市增长的影响而遭到破坏。因此,建议政府需采取更强有力的控制手段保护临海地区的生态环境资源。

本研究基于联合“自上而下”和“自下而上”决策行为的视角,建立了一个统筹考虑宏、微观行为主体的决策行为的城市增长时空动态模拟 MAS 模型,实现了城市增长的时空动态模拟,但是模型对微观行为主体内部的土地利用决策互动行为考虑仍不够,有待于在后续研究中进一步完善。

参考文献:

- [1] Seto K C, Shepherd J M. Global urban land-use trends and climate impacts[J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2009, **1**(1): 89-95.
- [2] Tian Guangjin, Yang Zhifeng, Xie Yichun. Detecting spatiotemporal dynamic landscape patterns using remote sensing and the lacunarity index: a case study of Haikou City, China[J]. *Environment and Planning B: Planning & Design*, 2007, **34**(3): 556-569.
- [3] 高玉宏, 张丽娟, 李文亮, 等. 基于空间模型和 CA 的城市用地扩展模拟研究——以大庆市为例[J]. *地理科学*, 2010, **30**(5): 723-727.
- [4] Li Xia, Liu Xiaoping. Embedding sustainable development strategies in agent-based models for use as a planning tool[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2008, **22**(1): 21-45.
- [5] Wu F, Webster C J. Simulation of land development through the integration of cellular automata and multicriteria evaluation[J]. *Environment and Planning B: Planning & Design*, 1998, **25**(1): 103-126.
- [6] Parker D C, Manson S M, Janssen M A, et al. Multi-agent systems for the simulation of land-use and land-cover change: a review[J]. *Annals of the Association of American Geographers*, 2003, **93**(2): 314-337.
- [7] 康停军, 张新长, 赵元, 等. 基于多智能体的城市人口分布模型[J]. *地理科学*, 2012, **32**(7): 790-797.
- [8] 张鸿辉, 曾永年, 金晓斌, 等. 多智能体城市土地扩张模型及其应用[J]. *地理学报*, 2008, **63**(8): 869-881.
- [9] Torrens P M. Simulating sprawl[J]. *Annals of Association of American Geographers*, 2006, **96**(2): 248-275.
- [10] 杨青生, 黎夏. 多智能体与元胞自动机结合及城市用地扩张模拟[J]. *地理科学*, 2007, **27**(4): 542-548.
- [11] Tian Guangjin, Yun Ouyang, Quan Quan, et al. Simulating spatiotemporal dynamics of urbanization with multi-agent systems—A case study of the Phoenix metropolitan region, USA[J]. *Ecological Modeling*, 2011, **222**(5): 1129-1138.
- [12] 吴文斌, 杨鹏, 柴崎亮介, 等. 基于 Agent 的土地利用/土地覆盖变化模型的研究进展. *地理科学*, 2007, **27**(4): 573-578.
- [13] 张鸿辉, 曾永年, 谭荣, 等. 多智能体区域土地利用优化配置模型及其应用[J]. *地理学报*, 2011, **66**(7): 972-984.
- [14] 杨青生, 黎夏. 城市工业空间增长的多智能体模型[J]. *地理科学*, 2009, **29**(4): 515-522.
- [15] Bone C S, Dragicevic. Modeling-in-the-middle: bridging the gap between agent-based modeling and multi-objective decision-making for land use change[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2011, **25**(5): 717-737.
- [16] Wu F, Webster C J. Simulating artificial cities in a GIS environment: urban growth under alternative regulative regimes[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2000, **14**(7): 625-648.
- [17] Saarloos D, Arentze T, Borgers A. A multi-agent model for alternative plan generation[J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2005, **32**(4): 505-522.
- [18] Liu Xiaoping, Li Xia, Liu Lin, et al. A bottom-up approach to discover transition rules of cellular automata using ant intelligence[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2008, **22**(11-12): 1247-1269.
- [19] Liu Xiaoping, Li Xia, Shi Xiaohu, et al. Simulating land use dynamics under planning policies by integrating artificial immune systems with cellular automata[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, **24**(5): 783-802.
- [20] Li X, Yeh A G. Modelling sustainable urban development by the integration of constrained cellular automata and GIS[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2000, **14**(2): 131-152.
- [21] 刘妙龙, 陈鹏. 基于细胞自动机与多主体系统理论的城市模拟原型模型[J]. *地理科学*, 2006, **26**(3): 292-297.
- [22] Wu Fulong. Calibration of stochastic cellular automata: the application to rural-urban land conversions[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2002, **16**(8): 795-818.
- [23] Potius R G. Quantification error versus location error in comparison of categorical maps[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2000, **66**(8): 1011-1016.
- [24] Luck M, Wu J G. A gradient analysis of urban landscape pattern: a case study from the Phoenix metropolitan region, Arizona, USA[J]. *Landscape Ecology*, 2002, **17**(4): 327-339.
- [25] Berling-Wolff S, Wu J. Modeling urban landscape dynamics: a case study in Phoenix, USA[J]. *Urban Ecosystems*, 2004, **7**(3): 215-240.
- [26] McGarigal K, Marks M. FRAGSTATS: Spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure[R]. Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-351. Portland, OR: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, 1995: 1-132.

Simulation of Spatio-temporal Dynamical Change of Urban Growth Based on Multi-Agent System: Case Study of Lianyungang City, China

ZHANG Hong-hui^{1,2}, WANG Li-ping^{1,3}, JIN Xiao-bin^{1,2}, SONG Ge¹, ZHOU Yin-kang^{1,2}, YANG Xi-lian¹

(1.School of Geographic and Oceanographic Sciences of Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China ;

2. Research Center of Human Geography, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China;

3.Department of Tourism, Lianyungang Normal College, Lianyungang, Jiangsu 222006, China)

Abstract: Since the urbanization is one of the most typical form of land use or land-cover change, the exploration of driving mechanism for urban growth and the forecast of its change in future plays an important role in the achievement of urban sustainable development. In view of multi-agent system 's great capability of simulating complex spatial system, a spatio-temporal dynamical model of urban growth simulation based on multi-agent system is developed from the view of combining "top-down" and "bottom-up" decision-making behaviors. In this model, "top-down" macro land use planning implemented by macro agents and "bottom-up" micro land use spatial appeal sponsored by micro agents interact with each other via two-dimensional spatial grid and promote urbanization process in study area together by joint decision-making. Taking central Lianyungang City as the example, three target scenarios, based on current trends, economic development priorities and environmental protection priorities, were developed, and the corresponding urban growth scenarios were simulated and analyzed. The simulation results show that combining "top-down" and "bottom-up" multi-agent decision-making behaviors to simulate spatio-temporal dynamical urban growth can give full play to the potential of multi-agent system to understand the driving mechanism of urbanization and provide decision-making support based on scenario analysis for urban management.

Key words: urban growth; spatio-temporal dynamical simulation; multi-agent system; joint decision-making; scenario analysis; Lianyungang City