

# 城市居住空间扩张的多主体模拟模型研究

单玉红<sup>1,2</sup>, 朱欣焰<sup>3</sup>

(1. 华中农业大学经济管理学院, 武汉 430070; 2. 湖北省农村发展研究中心, 武汉 430070;

3. 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430079)

**摘 要:**借助 GIS 技术, 本文构建了包含微观智能主体和环境主体的城市居住空间演化的多主体模型, 旨在探讨城市居住空间增长的过程中市场机制和计划机制之间的相互作用和消长规律。模型分析总结了城市居住空间增长过程中城市居民、住宅开发商和城市政府的目标函数, 认为城市空间扩张形态和土地集约利用水平主要取决于土地市场发育状态的不同阶段及城市政府的土地利用决策。通过调整城市政府主体的土地利用和环境政策设定了城市居住空间扩张的紧凑型、松散型和适度型 3 种情景类型, 以 ArcGIS 和 VC 为运行环境实现情景模型, 为城市政府的土地利用规划政策提供事前指导。以武汉市的洪山和武昌两区为实验区, 分别模拟了基于 3 种规定情景下 1998-2008 年期间的居住空间演化情况, 并与实验区居住空间的实际演化情况进行了形态、土地利用结构变化和土地利用社会效益的概略对比分析, 结论为实验区 1998-2008 年的居住空间扩张基本属于适度型, 但尚需要加强城市的内城市化。

**关 键 词:**城市居住空间演化; 土地利用; GIS; 多主体; 情景分析; 武汉

## 1 引言

多主体模型 MAS (Multi-Agent-Model) 是一种用于系统建模的离散数据模型, 它没有严格的建模程序, 而只是提供了一种由个体到系统、微观到宏观的建模机制, 广泛应用于生态系统演化及海岸环境管理<sup>[1-4]</sup>、土地利用与土地规划<sup>[5-8]</sup>、城市增长及居住区管理<sup>[6, 9-12]</sup>等空间规划领域, 归纳分析这些系统中人、生物、环境等主、客观微观个体作用对于系统的影响, 建立了微观个体行为驱动的空间规划动态决策模型。比较有代表性的有 Ligtenberg 的一系列研究, 通过分析土地利用主体行为、作用过程及空间系统的复杂性, 构建结合扩展 CA 的 MAS 模型模拟主体的决策过程来确定规划因素<sup>[6-8]</sup>。就城市(居住空间)增长研究而言, 与 CA 模型相比较, MAS 模型的优势就在于可以通过研究主体之间的相互作用明确地揭示城市增长的动力机制<sup>[9]</sup>, 在人口空间聚集、城市活动复杂化以及城市居住区等级分化的社会背景下, 通过分析土地所有者、房屋开发商以及城市居民等主体的行为, 构建明晰的城市居住用

地供给的理论模型<sup>[9]</sup>以及城市(居住)系统的动态仿真模型<sup>[10-12]</sup>。

国内这方面的研究起步不久, 比较有代表性的有刘小平、黎夏等的研究<sup>[13-14]</sup>, 但仍然有很大的探索空间。从研究方法看, 基于土地利用的主、客体关系的城市土地利用行为是典型的社会经济行为, 社会经济中的自主体研究应侧重于对自主体经济行为的定义, 通过自主体在市场经济中的经济联系观察整体经济现象来建立从微观到宏观的演化机制。从研究目的来看, 城镇土地国家所有的制度背景下, 城市的扩张会呈现出不同的情景主要取决于土地利用主体的行为决策, 可研究不同行为决策下城市居住空间演化的规律, 从而为城市决策者提供事前指导。而与基于其他方法建立的 LUCC 模型相比, 多主体模型正是在表现土地利用规划的制定者和决策者的意愿上比较有优势<sup>[15-17]</sup>。本文分析了城市政府这一计划机制主体和城市居民和住宅开发商两类市场机制主体在城市居住空间过程中的相互作用, 在此基础上构建多主体模型, 根据城市政府的土地利用政策设定城市居住空间扩张的紧凑型、

收稿日期: 2010-12; 修订日期: 2011-04.

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(40801224)。

作者简介: 单玉红(1976-), 女, 山东日照人, 副教授, 硕士生导师, 主要从事土地信息系统及土地利用规划研究。

E-mail: syh311@sina.com

松散型和适度型3种情景类型,并以武汉市的武昌和洪山区为例进行了模型的有效性的验证。

2 模型的总体框架

主体性能—环境—执行器—传感器(简称PEAS)是多主体建模的常用方法,该方法中,主体被抽象为通过传感器感知所处的环境并通过执行器对该环境产生作用的实体<sup>[18]</sup>,使用PEAS方法对现实城市扩张过程中三类智能土地利用主体(城市政府、住宅开发商和城市居民)之间以及分别和环境主体(土地利用客体)之间的相互作用进行归纳(表1)。

将表1给出的多智能主体和环境主体之间的相互作用和关系移植到基于GIS的离散栅格数据框架上构建可执行模型,总体框架见图1。

2.1 环境主体

城市区域中自然及社会经济资源条件的空间分异特性是城市政府、住宅开发商和城市居民的区位选择行为的前提,为表现这种空间分异特性,将城市区域划分为 $M \times N$ 的规则格网单元的集合,把各类资源条件因子值匹配叠加到相应网格单元上得到环境主体,表示城市不同微观区位上自然和社会经济资源量的相对等级。由于各资源因子的量纲不同,而且对居住区位等级的贡献度不同,需对不同类型的资源因子标准化后再进行叠加。

(1) 效益型资源因子:对城市住宅区位等级的贡献为正向,如交通通达度、绿地景观、水域景观的辐照度(休憩功能)、公共服务/基础设施密度等。修正方法见式(1)。

(2) 成本型资源因子:对城市住宅区位等级贡献为负向,如坡度、噪声等。修正方法见式(2)。

表1 各类主体(智能体)的PEAS描述

Tab.1 PEAS description of the intelligent agents

主体类型	作用顺序	行为性能指标	环境主体	执行器	传感器
城市居民	1	收入预算限制条件下的效用最大化	城市自然/社会经济资源位势场	选定满意的居住区位	存在一定的路径依赖特征
住宅开发商	2	住宅用地投资的利润最大化	住宅市场的供求状况;城市居民的选择情况	开发获利较大的区位	对于(潜在的市场需求)产生的吸引力的响应
双目标型城市政府	3	综合考虑地方财政收入和城市社会主体的福利	考虑城市区域住宅开发的综合效益	有效配置/供应土地资源	城市房地产开发增加财政收入/城市其他主体的福利增加

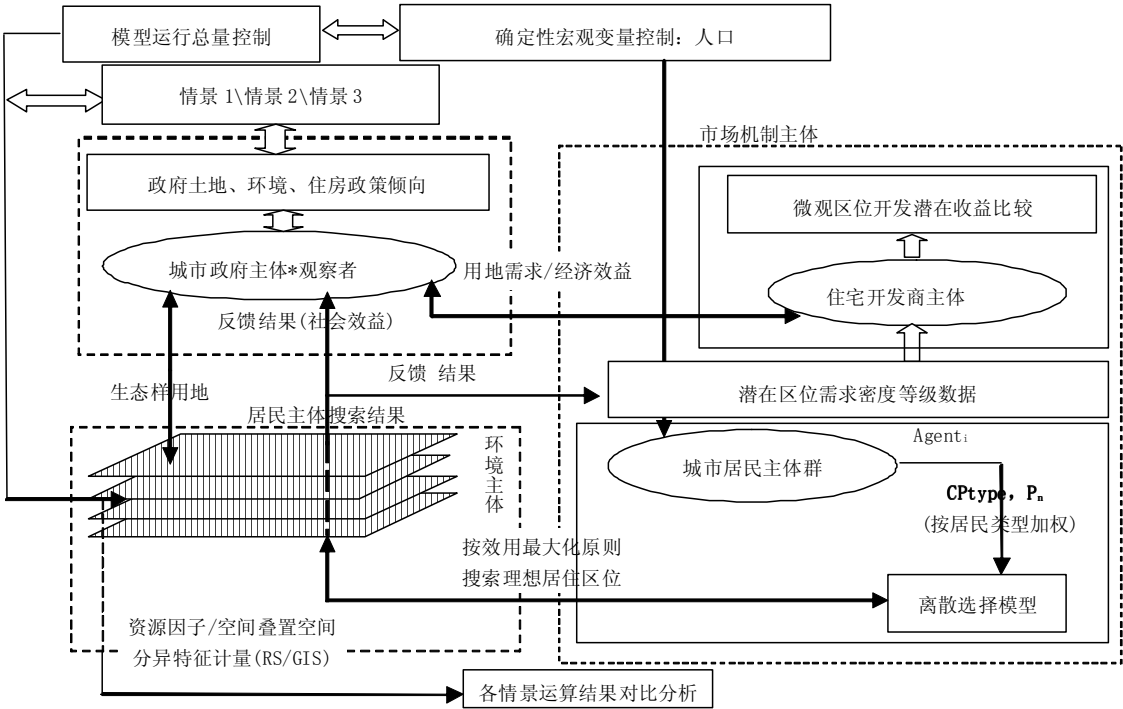


图1 模型的总体框架图

Fig.1 The overall framework of the MAS model

(3) 适度型资源因子:该类资源因子的特点是其值宜在一定范围内,当其值在该范围内时对于城市住宅用地区位等级的贡献度是最大的,如人口密度、温度等生态位因子。修正方法见式(3)。

$$S_k = \begin{cases} 0, & A_k < D_{k \min} \\ 1, & A_k > D_{k \max} \\ A_k / D_{k \text{accept}}, & D_{k \min} < A_k < D_{k \text{accept}}; \end{cases} \quad (1)$$

$$S_k = \begin{cases} 1, & A_k < D_{k \min} \\ 1 - \frac{(A_k - D_{k \max})}{(D_{k \min} - D_{k \max}) \cdot D_{k \text{accept}}}, & D_{k \min} < A_k < D_{k \text{accept}} \\ (D_{k \max} - A_k) / (D_{k \max} - D_{k \text{accept}}), & A_k > D_{k \max}; \end{cases} \quad (2)$$

$$S_k = \begin{cases} 0, & A_k < D_{k \min} \text{ 或 } A_k > D_{k \max} \\ (A_k - D_{k \min}) / (D_{k \text{accept}} - D_{k \min}), & D_{k \min} < A_k < D_{k \text{accept}} \\ (D_{k \max} - A_k) / (D_{k \max} - D_{k \text{accept}}), & D_{k \text{accept}} < A_k < D_{k \max} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $A_k$  和  $S_k$  分别为第  $k$  类资源因子的原始值和修正值,  $D_{k \min}$  为对该种资源要求的最低量值,  $D_{k \text{accept}}$  为对该种资源要求的理想量值,  $D_{k \max}$  表示对第  $k$  种资源的需求的最高量值。

在 ArcGIS 环境下,将单元  $i$  上各资源因子的标准化值匹配在一起得到该单元的属性集,见式(4):

$$\text{Grid}_i = f(\text{Attr}_{\text{Location}(i)}, \text{Attr}_{\text{National}(i)}, \text{Attr}_{\text{Se}(i)}) \quad (4)$$

式中:  $\text{Attr}_{\text{Location}(i)}$ 、 $\text{Attr}_{\text{National}(i)}$  和  $\text{Attr}_{\text{Se}(i)}$  分别表示单元  $i$  的位置、自然资源属性值和社会经济资源属性值。

## 2.2 基于各智能主体交互作用的微观区位开发的优先级顺序

图2给出了城市居住空间扩张过程中各微观智能主体的相互作用和影响。在城市居民的住宅区位需求和开发商的利润最大化需求驱动的市场机制的调节下,城市居住空间呈现出一种自组织行为,反映了级差地租效应对于土地资源的有效配置,因此在一定程度上是良性的。但是这种有效配置是不完全良性的,城市政府需从土地利用的综合效益的角度出发对这种自组织行为进行规制,放大其良性作用,遏制其恶性行为。城市政府是城市住宅市场的宏观调控者也是直接参与者<sup>[19]</sup>。中国宏

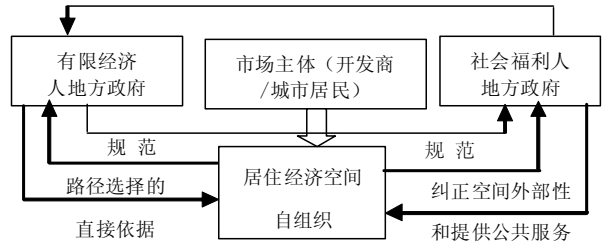


图2 微观智能主体间的交互作用

Fig.2 Interactions among the microscopic intelligent agents

观社会经济背景下,完全经济人型或完全福利人型的城市政府均没有存在的条件,本文中城市政府均为双目标型政府(图2),其社会福利人的目标对有限经济人目标构成约束;相应地,有限经济人则是实现社会福利目标的客观手段<sup>[13]</sup>。对于完全经济人型政府,自身利益的追求常以牺牲其他各主体的利益为代价。有限经济人政府的行为路径则强调对于空间自组织规律的遵循,是否能促进所辖区域的其他主体的福利的优化同样成为有限经济人政府的行为准则。

根据土地利用开发的边际原则,土地利用主体总是倾向于首先开发收益较高的区位<sup>[14]</sup>,城市居民、开发商和政府三类土地利用主体住宅区位选择行为共同决定某微观区位最终被开发优先级顺序。

### 2.2.1 城市居民主体的居住区位选择

城市居民是收入约束条件下的效用最大化的满意人,其目标函数见式(5):

$$\begin{aligned} \max U_i &= \max u_i(x_1, x_2) \\ s.t. \quad \text{Income} &= wN = P_1 x_1 + P_2 x_2 + C \end{aligned} \quad (5)$$

式中:  $P_1$  为单位住宅服务流量的购买价格,  $x_1$  为住宅服务流量的总和;  $P_2$  为非住宅类商品价格;  $x_2$  为非住宅类商品量;  $C$  为通勤成本。基于消费者效用的离散选择模型符合现实生活中城市居民的居住区位选择行为的自发性 and 随机性特征,根据离散选择模型得到城市居民主体  $n$  选择单元  $i$  的概率  $P_{in}$ :

$$P_{in} = P_r(U_{ni} > U_{nj}; \forall i) = P_r(U_{ni} + \varepsilon_{ni} > U_{nj} + \varepsilon_{nj}; \forall i) = \exp(U_{ni}) / \sum_n \exp(U_{nj}), i, j = 1, \dots, I; i \neq j, n = 1, \dots, N \quad (6)$$

由式(6),  $P_{in}$  的含义为城市居民主体  $n$  单元  $i$  上获得的效用  $U_{ni}$  当且仅当大于在其他位置上所获得的效用  $U_{nj}$  的概率;  $i, j$  表示单元号,单元总数

为  $I$ ;居民主体总数为  $N$ 。根据式(1)解算  $U_{ni}$ ,其中为表现收入的约束条件,将地价和通勤成本作为消费行为的成本因子加入效用函数,得公式(7):

$$\max U_{ni} = \max \sum [P_{\text{National}(n)} \cdot \text{Attr}_{\text{National}(i)} + P_{\text{Se}(n)} \cdot \text{Attr}_{\text{Se}(i)} + P_{\text{Lp}(n)} \cdot \text{Attr}_{\text{Lp}(i)} + P_{\text{Tc}(n)} \cdot \text{Tc}(i)] + \varepsilon_{(n,i)} \quad (7)$$



式中:  $Attrib_{National(i)}$ 、 $Attrib_{Se(i)}$  同式(7);  $Attrib_{Lp(i)}$  表示单元  $i$  的地价等级;  $Tc_{(i)}$  表示居民主体  $n$  的通勤(时间)成本;  $P_{National(n)}$ 、 $P_{Se(n)}$ 、 $P_{Lp(n)}$ 、 $P_{Tc(n)}$  分别表示城市居民主体  $n$  对自然资源、社会资源服务流量及地价、通勤时间成本的偏好程度;  $\varepsilon_{(n,i)}$  为随机扰动项,即不能观测到的效用。由于信息的不完全对称性,并非所有主体均能够按照效用最大化的原则进行选择,因此设置随机扰动项。

2.2.2 住宅开发商的开发区位选择

理论上是平均销售价格和平均开发成本的函数。首先,就特定区位  $i$  而言,土地成本是一种固定成本,而非土地成本是一种可变成本,开发商可以用非土地投入要素来替代土地要素,即通过提高容积率  $Q$  来增加总收益以降低中心城区开发的平均成本,最终与新区开发的平均成本持平,从而弱化了开发成本与区位的关系<sup>[21]</sup>;其次,根据供求关系基本规律,区位  $i$  上的居住需求密度是影响住宅销售价格的主要因素,但考虑住宅开发商对投资回报时效性的要求,可知开发商选择区位  $i$  进行开发所获得的利润主要取决于区位  $i$  上的有效需求密度,由此可得到开发商的开发区位选择的优先级函数,如式(8):

$$P_{benefit(i)} = \frac{f(P_i, Buyab_i)}{MAX(f(P_j, Buyab_j))} = \frac{k_i \cdot P_i}{MAX(k_j \cdot P_j)} \quad (8)$$

式中:  $P_{benefit(i)}$  表示在模型所有单元中单元  $i$  被住宅开发商选择的优先级等级;  $P_i$  意义同式(7),即潜在需求概率;  $k_i$  (购买力参数)表示单元  $i$  上潜在需求可实现的程度,即有效需求修正系数,可按照城市居民主体的收入等级的高、中、低对其选择结果进行购买力加权,模型中取其值为 1.0、0.6 和 0.2。

2.2.3 城市政府的调控:基于规定情景下的居住区位开发优先级函数

基于住宅开发用地综合效益的考虑,不同类型的城市政府会采用不同的土地利用和环境保护政

策来调控住宅市场对土地区位的需求,图3给出城市政府定位的理论模型。假设当总体利益在  $U_{value}$  和  $U_{welfare}$  之间的分配比例为  $n$  时,可实现经济发展和社会总体福利函数的共同优化,为理想的双目标型政府;否则为偏福利型或偏经济人型的双目标型的城市政府。应用时,  $n$  值的确定比较困难,可通过设定相关政策的倾向性差异来表现城市政府的定位。根据研究的需要,文中主要是根据城市政府的土地利用和环境保护政策的差异对应设定 3 种城市居住空间扩张演化情景类型。

设情景  $m$  中单元  $i$  被开发为居住用地的优先级为  $P_{end(im)}$  :

$$P_{end(im)} = q_{m1} \cdot P_{benefit(i)} + q_{m2} \cdot P_{welfare(i)} + q_{m3} \cdot P_{ecolo(i)} \quad (9)$$

式中:  $P_{benefit(i)}$  同式(8),  $P_{welfare(i)}$  和  $P_{ecolo(i)}$  分别为考虑社会效益和生态成本时单元  $i$  的开发优先级;  $q_{m1}$ 、 $q_{m2}$ 、 $q_{m3}$  表示城市政府对经济效益、社会效益和生态成本的关注程度。设  $P_{zd(i)}$  表示单元  $i$  被中低收入人群选择的概率,则  $P_{zd(i)}/MAX P_{zd(j)}$  表示模型中单元  $i$  被中低收入人群选择的概率等级,该值越大,表明中低收入人群居住在区位  $i$  的意愿越高,则如果城市政府对这些区域的关注度较高并进行住宅开发,总体上就会取得较高的社会效益。定义林地、水域等用地类型为生态样用地,定义  $QU_{ecologrid(i)}$  为单元  $i$  的  $5 \times 5$  邻域中生态样用地单元数目,该值越大,表明单元  $i$  处于大面积生态样用地中的概率越大,若将  $i$  开发为住宅用地,大面积的生态样用地被分割成小块生态样用地,生态功能受

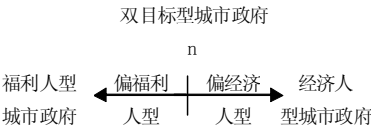


图3 城市政府定位理论模型  
Fig.3 Theoretical model of city type

表2 基于差异化的土地利用和环境保护政策的城市居住空间发展情景类型

Tab.2 Scenarios of urban residential space extension based on different land use and environment protection polices

情景类型	土地利用政策和环境保护政策	含 义	关联情景参数-容积率
紧凑型	严格控制的刚性管理模式及政策	优先保护耕地以及生态环境;对于城市的扩张实行甚为严格的管制;对于水域、农业用地、山体绿地等实行严格的保护。	限制最低容积率 $Q_{min}$
松散型	宽松的土地及环境管理政策	政府土地供给较为宽松,较为满足城市居民的区位选择和开发商的用地需求,不过于考虑生态样用地的保护问题。	不限制最低容积率 $Q_{min}$
适度型	弹性管理模式及政策	综合考虑经济发展、社会福利的增加和耕地保有量、环境保护的要求;辨识和避开不易建设的生态敏感用地,克服或减缓生态限制因子的消极影响,将可能发生的生态风险减缓到最低程度。	容积率在一定范围

损。根据以上分析,得到:

$$P_{end(im)} =$$
$$q_{m1} \cdot P_{benefit(i)} + q_{m2} \cdot \frac{P_{zd(i)}}{MAX(P_{zd(i)})} + q_{m3} \cdot \frac{QU_{eco\log rid(i)}}{25} \quad (10)$$

3 实证研究

本文以武汉市的武昌区和洪山区为实验区对情景模型的有效性进行实证研究。武汉市很久以来就存在着“三镇鼎立”的局面,近些年来虽然三镇之间的交通状况有所改善,但是武汉市居民在选择居住区位时,很少会出现跨“江”房买的情况;江南的洪山和武昌两区不仅在地理位置上相互依存在社会经济生活中的联系也非常紧密:从区域的社会形态考虑,武昌区为洪山区所环抱,武昌区为典型的老城区,洪山区则是典型的城乡二元结构的代表;从自然环境来看,实验区地处江汉平原北端,内部具有大量的水域和绿地资源,具备了对于情景规定的多样性要求(图4)。

3.1 环境主体数据处理

模型基础数据包括空间数据和社会经济数据两大类。空间数据包括1998年10月16日的TM多光谱数据及2005年12月15日的Spot5 HRG2全色波段数据;1998年的土地利用现状数据、城市总体规划数据、1998年住宅用地基准地价数据、武汉市行政区划矢量数据、道路交通(含规划)数据等GIS数据;社会经济数据包括根据1998-2008年期间各年的武汉市统计年鉴、国土资源年鉴、房地产年鉴、2006年武汉市住户调查等资料整理得到的1998-2008年期间实验区的非农人口增长数据、住宅竣工及新开工面积、城市居民可支配收入等社会经济统计数据。社会经济数据城区以街道、近郊区以行政村为单位。

基础数据处理和资源因子数据提取:在ArcGIS环境下以grid数据格式按50 m的分辨率将多源基础数据配准在一起,各专题数据层有水域数据、公共绿地数据、交通网数据、工业用地、商业中心数据、基础设施及公共服务用地数据、铁路数据、建城区周边耕地数据、建成区与非建成区分界数据。根据实验区的实际自然环境和社会经济环境特点从以上基础数据提取6类资源因子数据并按式(1)~(3)进行标准化(表3)。

定义时间距离门槛值  $T_{max}$  为,可以容忍的居住地点距离工作地点的通勤时间的最大值。根据2006年武汉春交会住宅市场需求调查报告的调查显示,81.71%的受访者都希望通勤时间控制在1小时以内<sup>[22]</sup>;另据2011年一季度青岛市居民所能接受的通勤时间调查结果显示,选择30分钟以内的为33.33%,30~59分钟的56.54%,60~89分钟的为8.64%,90分钟以上的为1.48%<sup>[23]</sup>。另外将此调查结果与不同属性的人群进行交叉分析,证明不同收入等级的人群对于日常通勤时间偏好上的一致性,过长的交通时间成本都是大多数人不能接受的。基于以上调查资料,  $T_{max}$  设置为45分钟。

3.2 城市居民居住区位偏好因子的权重

收入、家庭结构等因素都会影响到城市居民的选择偏好,但是影响城市居民购房行为的最主要因素还是收入/房价比,因此,本文将城市居民按收入等级进行划分,分别测算每一类型城市居民的权重。城市居民对理想的居住区位进行选择时对考虑的因素的重视程度首先代表了个人的偏好,因此采用主观的权重评价方法是合理的和必要的;但认知程度等的限制会造成城市居民主体在选择时的信息不完全对称现象,从而干扰了城市居民对因素权重值的评判精度,需要采用一种客观的因素权重确定方法对主观的权重评判结果进行修正<sup>[24]</sup>。

3.2.1 权重的主观评判赋值

选用特尔斐法评判主观权重。以主体代替专家,采用书面问卷和网络调查等方法收取每类城市居民在选址行为中要考虑的因素及其权重信息,计算所有打分值的均值和方差,然后再采用多准则判

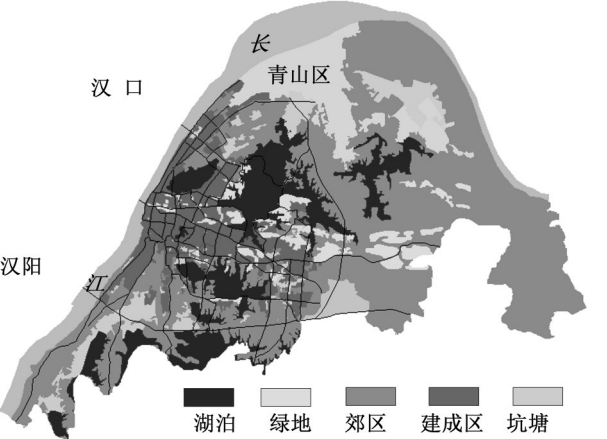


图4 1998年实验区土地利用状况示意图  
Fig.4 Sketch map of land use structure in the experimental districts

表3 选取的资源因子类型及计算方法

Tab.3 Resources factors selected and calculation methods			
资源因子类型	效用/特征	贡献度类型	计算方法/获取方法
水域景观辐射度 (REQwater)	为人们带来开阔的视野、增加空气湿度	效益型	指数衰减: 随着到水域景观距离的增加, 价格会快速下降; $y = b \cdot e^{-ax}$ , $y$ 为水域景观辐射度; $x$ 为到水域的距离
绿地景观辐照度 (REQndvi)	净化空气、消弭噪声、给人带来美感受	效益型	同上
道路数据	由一个区位到其他区位的	效益型	$URconnectivity = P_1 \cdot m_1 + P_2 \cdot m_2 + P_3 \cdot m_3 + P_4 \cdot m_4$ , $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 、 $P_4$ 分别为主干道、次级道路、街巷、对外交通道路对交通通达度的加权重, $m_1$ 、 $m_2$ 、 $m_3$ 、 $m_4$ 表示该栅格单元一定邻域内搜索到的主干道、次级道路、街巷、对外交通道路的数目。 $T=QG \cdot L/S_j$ ; $S_j$ 表示采用第 $j$ 种通勤方式在第 $j$ 个等级道路上的平均速度, $L$ 为模型的采样大小, $Q$ 为居民主体从随机分配的出发点沿道路网树结构按深度优先搜索方法到达搜索点经过的模型单元数目。设置时间距离门限值 $T_{max}$
交通通达度 (Utranscon)	方便程度 (包含道路规划数据)		
通勤成本 (Utranscost)	主要考虑通勤时间成本 使用通勤时间距离表示	成本型	
公共服务/基础设施密度 (Udensitypubser)	表示公共服务及基础设施包括学校、医院等部门在空间上的分布密度	效益型	从土地利用现状图上提取以上类型部门的用地范围和位置, 在 ArcGIS 环境下进行密度制图, 按照标准差(Standard Deviation)分级方法生成。
城市基准地价等级 (Ubaselandprice)	住宅用地使用权区域的平均价格	成本型	从城市住宅用地基准地价图上获取。
城市噪声等级数据 (Unciselaye)	社会噪声、交通噪声。本文主要考虑交通噪声——线性噪声源	成本型	$A_{div} = 10 \lg \frac{1}{2 \pi r l}$ ; $A_{div}$ 为距离衰减值, 单位为 dB; $R$ 为线声源至测算单元的垂直距离, 单位为 m; $l$ 为线声源的长度, 单位为 m。按照城市噪声等级的一级评价范围, 划定线声源两侧各 200 m 以内为城市(交通)噪声评定范围。

断模型, 求出主观偏好权重  $u_k$ 。

3.2.2 采用熵化权法修正主观权重

选用熵化权法对  $u_k$  进行修正。熵在信息论中是关于“不确定性”的一个度量指标, 信息量越大, 熵值就越小, 不确定性也就越大, 反之亦然。熵化权法的理论就是利用熵值来确定权值。各资源因子进行标准化后, 根据熵值的公式计算每类资源因子的信息熵值:

$$E_k = -\frac{1}{\ln N} \cdot \sum_{i=1}^N \left( \frac{a'_{ik}}{\sum_{i=1}^N a'_{ik}} \cdot \ln \frac{a'_{ik}}{\sum_{i=1}^N a'_{ik}} \right) \tag{11}$$

$$H_k = -\frac{1 - E_k}{k - \sum_{k=1}^M E_k}; W_k = u_k \cdot H_k / \sum_{k=1}^M u_k \cdot H_k \tag{12}$$

式中:  $E_k$  为第  $k$  个资源因子的信息熵值;  $N$  为单元总数;  $a'_{ik}$  为第  $k$  个资源因子在区位单元  $i$  上的标准化值;  $H_k$  为第  $k$  个资源因子的信息熵权;  $M$  为资源因子的总类别数;  $W_k$  为资源因子  $k$  的综合权重。根据武汉市统计局 2006 年住户调查资料确定实验区居民的高、中、低收入人群的比例<sup>[25]</sup>。另据住户调查统计, 武汉市城市居民收入来源的 4 个构成部分中工薪收入可支配收入的 73.7%, 继续保持着收入构成的主导地位。由于工薪收入是较为固定性的收入, 因此模型运行期间不考虑实验区城市居民收入比例的变化。表 4 给出了实验区的城市居民主体群的收入比例和每类主体群的住宅

表 4 居民主体收入比例及权重

Tab.4 Percentage and weight of different income groups of residents

收入等级	比例/%	地价	时间成本	公共服务设施密度	通达度	自然环境质量
高	7.3	0.085	0.200	0.192	0.165	0.358
中	77	0.386	0.150	0.164	0.160	0.140
低	15.7	0.575	0.100	0.115	0.120	0.090

偏好权重值, 其中自然环境质量由水域景观辐照度、绿地景观辐照度和噪声等级 3 项因子等权加和得到。

3.3 基于规定情景的模型运行结果和实际演化情景的对比分析

3.3.1 模型的运行环境及条件

(1) 城市居民主体: 每个城市主体代表现实生活中 100 个居民, 主体总数为  $N$ , 根据 1998-2008 期间实验区住宅生产总量和人均住宅面积计算。模型运行初始, 程序随机分配居民主体的收入类型, 高、中、低收入主体的个数按事先给定的比例控制。现实生活中, 虽然城市居民主体的居住区位选择行为是离散独立的, 但是具有一定的路径依赖特征, 因此模型中设定, 单元每被选择一次, 对  $3 \times 3$  邻域单元产生的吸引力系数累加 0.01, 但是每个栅格单元最多可容纳的居民主体数目为 4 个, 以对应现实生活中对最高容积率的限制。

(2) 住宅开发商主体: 在住宅开发利润远高于社会平均利润的条件下, 住宅开发商主体的行为特



征函数是一致的,因此将住宅开发商看为一个整体,忽略其内部竞争问题;住宅开发商主体数目设置为1。

(3) 城市政府主体调控:根据表2给出的城市政府不同的土地利用和环境保护政策,给出紧凑型、宽松型和适度型3种情景的 $q_{m1}$ 、 $q_{m2}$ 和 $q_{m3}$ 分别为(0.4、0.1、0.5)、(0.5、0.4、0.1)和(0.4、0.3、0.3)。

(4) 规定情景下的模型运算量:参照武汉市城市规划条例,对情景1、2、3设置平均容积率分别为3.0、0.82和1.5,以1998-2008年期间实验区的实际住宅生产量(总建筑面积)为控制,除以各情景的平均容积率得到规定情境下模型的演化量(单元数)。

3.3.2 模型运算结果及对比分析

图5-7依次给出城市居民主体的选择数据、有效需求密度数据和实际演化情景数据;图8和图9分别给出3种情景中政府调控下的开发密度数据和实际开发量数据。表5给出4种情景下城市土地利用结构的变化。

情景1的模型输出结果中,住宅开发的高概率区域相对集中在城市中心地带,发展商住用地和将工业用地置换为住宅用地占据了新增住宅用地来源的51.33%,住宅增量建设是以旧城改造为主,新区开发为辅,对于生态样用地来源只占总用地量的25.17%。

情景2的模型输出结果中,开发区位明显不够集中,比较零散。城市居住空间呈现低密度的蔓延扩张,以旧城区为中心向正东、偏东北和偏东南方向呈现出自由发展的态势。对生态样用地的占用占居住用地开发总量的67%,例如武昌火车站附近的晒湖,在周围建设用地的包围下,失去了开敞的空间和自身的净化能力,原本具有优势的自然生态位的宽度被压缩,加剧了被周围建设用地侵占的风险。南湖周围诸多湖汊也被从主体水域切割、分离,生态功能受损。

情景3的模型输出结果中,实验区的居住空间

也明显地表现出3条扩张轴线,相对于情景2中较为松散的开发区位,情景3中开发区位相对较为集中,表现出两个较为集中的新型的大型的居住区中心。情景3中对于生态样用地的占用也达到46.89%。

实际情景与情景1、2、3对比:

(1) 将情景1、2、3下模型的输出结果分别与真实的演化情景进行点对点的位置比较,相似度分别为32%、50%和65%,进行5×5邻域比较,相似度提高为40%、72%和86%。从相似度来看,情景2和情景3下模型的运算结果与真实情景下实验区居住空间的演化形态最为相似,基本上准确地描述出了1998-2008年以来,武昌及洪山两区内部珞狮南路、雄楚大道、民族大道和关山大道四条城市居住空间发展轴线,以及由此轴线带动发展起来的徐东住宅片区、南湖住宅片区和光谷住宅片区。

(2) 从表给出的数据来看,实验区居住空间演变的实际住宅用地来源结构数据与情景2和情景3下的新增住宅用地结构来源数据均有相似之处,生态样用地来源比例达58.94%,介于情景2、3之间,对林地占用只有1.09%,表示了城市政府对于绿地和山体严格的保护政策,但对水域来源高达27.58%,在所有情景中是最高的。综上,实验区居住空间的实际发展形态介于情景2和情景3之间,这也说明了城市居住空间发展的复杂性。

对比情景1、2、3和实际情况,在容积率无法无限拔高的情况下,为了满足城市激增的住房需求,对于生地资源的占用是不可避免的。新增住宅用地中的生态样用地来源比例中最高的是近郊区零散的菜地,实验区1998年的耕地总面积为18903.32 hm<sup>2</sup>,至2006年底,耕地只剩余约8800 hm<sup>2</sup>,减少比例为53.45%,除去工业园的建设之外,洪山区集中的住宅用地开发也是造成耕地大量减少的重要原因之一。

表5 各情景下新增住宅用地来源比例的对比分析

Tab.5 The comparison of the land use structures among the four residential space extension scenarios

情景类型	新增单元数/个	生态样用地/%				旧城中心区域/%			其他/%		
		耕地及园地	林地/公共绿地	水域	合计	商住两用	工业用地	合计	未利用地	村镇及其他建设 用地	合计
情景1	3290	12.55	3.15	9.47	25.17	19.49	31.84	51.33	7.55	15.95	23.50
情景2	12000	36.97	6.51	24.03	67.00	3.84	16.59	20.43	3.59	4.64	8.23
情景3	6567	30.86	3.64	12.39	46.89	6.40	27.02	33.42	7.42	11.89	19.31
实际	7258	30.27	1.09	27.58	58.94	8.02	21.70	29.72	5.78	11.30	17.08

3.3.3 各情景下社会效用变化

概略评价4种情景下的住宅开发带来的社会总体效用的变化,包括社会收益和社会成本两项,理论上的居住用地的社会收益即社会价值产出量在于居民居住效用的最大化,包括居民的满意度及相应成本的最小化;而居住用地发生的社会成本包括经济成本和外部成本,经济成本主要指独立的经济利益个体利用土地的经济行为发生的成本,而外部成本则主要指土地利用行为所发生影响社会福利的最大化而产生的成本,主要包括对生态、环境等的影响产生的成本<sup>[26]</sup>,本文只评价外部成本。因为4种情景类型的住宅生产量相同,则假设单位住宅生产成本相同,表6给出在总投资相同的约束条

件下,4种居住空间演化情景下的社会效用总体变化的概略对比:

$$EQ_i = \sum \left[ \frac{(S_{ij} - S_{0j})}{\sum S_j} \right] \cdot P_j \quad (13)$$

表6中区域土地利用结构生态效应变化量根据Costanza提出的全球生态系统服务功能评价模型<sup>[27]</sup>进行修正得到,如式(13)所示,其中,  $EQ_i$  表示各情景下区域土地利用结构演化过程中生态效应的变化值( $i=1,2,3,4$ );  $S_{ij}$  和  $S_{0j}$  分别表示第  $i$  种情景下在演化末期和演化初期的区域中第  $j$  种土地利用类型占总面积的比例;  $P_j$  表示第  $j$  种土地利用类型的生态质量赋值(按全球生态系统服务功能评价模型,林地 1.0,草地 0.768,农田 0.303,水域

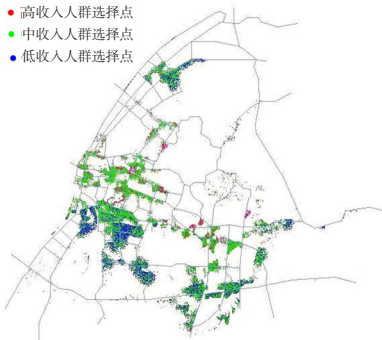


图5 城市居民主体的选择结果  
Fig.5 Results of the residents' choice

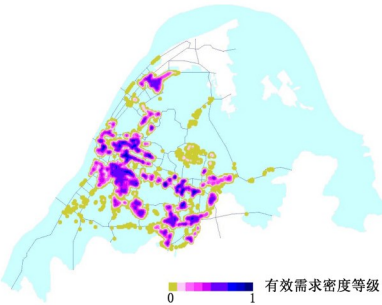


图6 有效需求密度的空间分异特征图  
Fig.6 Spatial differentiation of the effective demand density

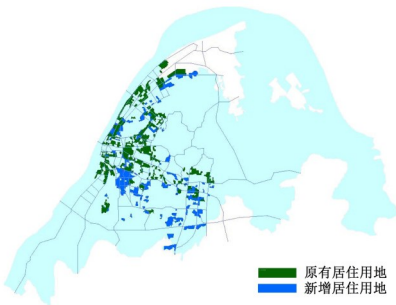


图7 实验区实际新增居住用地的空间分布  
Fig.7 The actual spatial distribution of augmented residential land

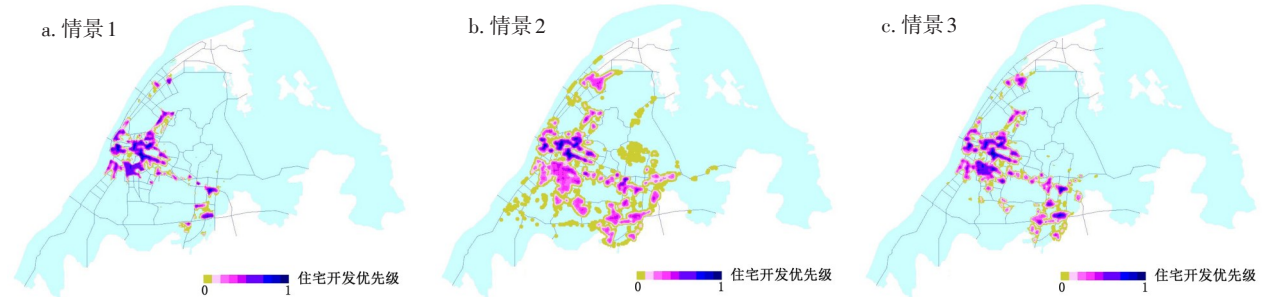


图8 情景1、2、3的住宅区位开发概率示意图  
Fig.8 Sketch maps of the probability for residential development under the three scenarios

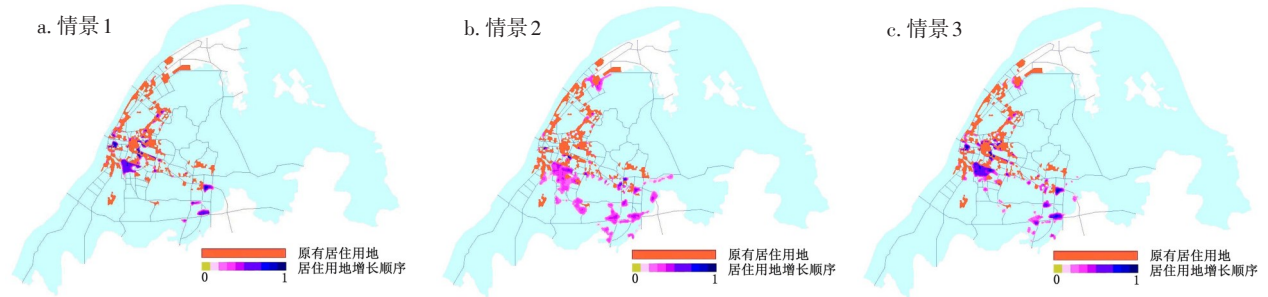


图9 情景1、2、3下新增居住用地空间分布图  
Fig.9 The spatial distribution of augmented residential land under the three scenarios



0.782,建设用地 0.015,未利用地 0.035)。

情景 1 由于采取严格的土地供给和环境保护政策和高容积率的策略来满足城市居民的住房需求,在生态样用地得到较好的保护的同时,单位用地的投资和土地利用的集约程度最高。但是当城市的经济总量超出了城市现有空间的承载力时,过度的住宅用地的集约利用会引起交通堵塞、居住环境的恶化,进而提高社会成本,社会总体效用受损,进入土地空间不足的城市化状态。

情景 2 的较为宽松的供地政策和容积率造成土地利用不够经济、集约;人均居住用地的面积是最大,同时较多地考虑到了城市中低收入人群的住房需求,也具有较高的社会收益;从生态效益的损益来看,对生态样用地的占用比例最高,生态效应变化量最大,而且如果对失地农民的安置不妥,也会使城市整体社会效益受损。情景 2 的模式属于土地空间过度的城市化状态,需要促进城市的内城市化。

情景 3 和实际演化情景最为接近,各评价因子的值比较接近,人均居住用地 24.84 m<sup>2</sup>和 25.84 m<sup>2</sup>均位于人均居住用地的理想值 25 m<sup>2</sup>附近,表明容积率适中,在保证住宅用地开发过程的经济效益的同时较好地保证了社会效益,属于土地空间适度的城市化状态。实际情景中,人均林地减少面积几乎为零,较好地兼顾了实验区自然生态环境的保育和城市发展的需求,但实际情景中人均水域面积减少量最大,根据生态位理论,湖泊缩小或者被分割会造成数量生态位的下降降低,从而加剧了湖泊被其他用地类型侵占的风险。

4 结论和讨论

(1) 侧重于智能体的决策行为及认知行为与土地利用的关系的城市居住空间演化的多主体模型可以有效地解释主体行为对居住空间演化形态的影响机制,但多主体系统缺乏空间的概念,而城市居住空间演化的外在表现正是城市居民、住宅开发

表 6 各情景下居住空间演化的总体社会效用变化比较  
Tab.6 Comparison of the overall social utility changes among the four residential space evolution scenarios

情景类型	社会收益			社会成本		
	人均居住用地/m <sup>2</sup>	中低收入人群满意度比例/%	区域生态效应变化量	人均耕地面积变化/m <sup>2</sup>	人均水域面积变化/m <sup>2</sup>	人均林地面积变化/m <sup>2</sup>
情景 1	20.15	22.05	-0.00257	-0.58	-0.447	-0.149
情景 2	32.65	61.01	-0.0179	-6.37	-4.140	-1.121
情景 3	24.85	35.46	-0.00686	-2.91	-1.168	-0.343
实际	25.84	-----	-0.00780	-3.67	-2.870	-0.114

\*因子说明:人均耕地面积减少量、人均水域面积减少量和人均林地面积减少量仅指由于城市住宅的开发引起的以上各项目量的减少,并不包含因为其他的建设引起的以上各项目量的减少情况;人均居住用地面积是按照模型的运算结果测算的实际数据。中低收入人群满意度指标值是概略值,表示的是每种情景下市居民总体中的中低收入群体居住区位自主选择结果占实际开发区位的比例。

商和城市政府的土地利用区位决策在地理空间的投影,与 GIS 技术的结合可以有效地弥补智能主体在空间认知和空间表现上的不足,这取决于城市基础数据库的完备程度。

(2) 无论基于哪一种城市政府土地供给及环境保护政策的情景,模型的仿真结果,均与城市居民主体自身的对理想居住区位的选择结果有相当比例的交集,表明尽管从目前状况来看,城市居民似乎处于最弱势的地位,但是城市居住空间的扩张演化会自然而然地会受到住宅市场供求基本规律的影响,城市居民主体的影响力即消费者的需求意愿不容许忽视。这也正是城市(居住)空间自组织机制的体现。

(3) 政府的计划机制和市场机制都是调控城市土地利用区位的重要机制。内陆城市土地市场在由计划机制向市场初步形成再向市场发育完善的转轨过程中,市场机制和计划机制具有一定的消长演变规律,不同的市场发育状态及不同类型城市政府的决策会导致不同的土地资源配置效率和集约利用水平,因此研究智能主体的行为与土地利用结构演化之间的关系具有很重要的意义。

(4) 实验区居住空间的实际演化情况表明,城市土地的再开发和新区开发两种城市化方式相比较,新区开发的比例较高,因此,在 2004 年之前,武汉市政府将住宅开发的重点放在了城郊结合部区域的新区开发上,而 2004 年之后,则将重点转移至旧城区的再开发上,一定程度上也验证了模型的有效性。

参考文献

[1] McDonald A D, Little L R, Gray R, et al. An agent-based modeling approach to evaluation of multi-

- ple-use management strategies for coastal marine ecosystems. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2008, 78(2-3): 401-411.
- [2] Mathevet R, Bousquet F, Le Page C, et al. Agent-based simulations of interactions between duck population, farming decisions and leasing of hunting rights in the Camargue (Southern France). *Ecological Modelling*, 2003, 165(2-3): 107-126.
- [3] Deadman P, Gimblett R. A role for goal-oriented autonomous agents in modeling people-environment interactions in forest recreation. *Mathematical and Computer Modelling*, 1994, 20(8): 121-133.
- [4] Monticino M, Acevedo M, Callicott B, et al. Coupled human and natural systems: A multi-agent-based approach. *Environmental Modelling & Software*, 2008, 22(5): 656-663.
- [5] Manson S M. Agent-based modeling and genetic programming for modeling land change in the Southern Yucata'n Peninsular Region of Mexico. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2005, 111(1-4): 47 - 62.
- [6] Ligtenberg A, Bregt A K, Lammern van R. Multi-actor-based land use modeling: Spatial planning using agents. *Landscape and Planning*, 2001, 56(1-2): 21-33.
- [7] Ligtenberg A, Wachowicza M, Bregt A K, et al. A design and application of a multi-agent system for simulation of multi-actor spatial planning. *Journal of Environmental Management*, 2004, 72(1-2): 43-55.
- [8] Ligtenberg A, Lammeren van R, Bregt A K, et al. Validation of an agent-based model for spatial planning: A role-playing approach. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2010, 34(5): 424-434.
- [9] Francisco M, Roy J. A model for residential supply. *The Annals of Regional Science*, 2004, 38(3): 531-550.
- [10] Bura S. Multi-agent systems and the dynamics of a settlement system. *Geographical Analysis*, 1996, 28(2): 161-178.
- [11] Benenson I. Multi-agent simulations of residential dynamics in the city. *Computers Environment and Urban Systems*, 1998, 22(1): 25 - 42.
- [12] Otter H S, Veen A, Vriend H J. ABLOoM: Location behaviour, spatial patterns, and agent-based modeling. *J Artificial Soc Social Simul*, 2001, 4(4): 1-21.
- [13] 刘小平, 黎夏, 艾彬, 等. 基于多智能体的土地利用模拟与规划模型. *地理学报*, 2006, 61(10): 1101-1112.
- [14] 刘小平, 黎夏, 叶嘉安. 基于多智能体系统的空间决策行为及土地利用格局演变的模拟. *中国科学: D 辑*, 2006, 36(11): 1027-1036.
- [15] Bah A, Touré L, Page C L, et al. An agent-based model to understand the multiple uses of land and resources around drillings in Sahel. *Mathematical and Computer Modelling*, 2006, 44(5-6): 513-534.
- [16] Castella J C, Kam S P, Quang D D, et al. Combining top-down and bottom-up modelling approaches of land use/cover change to support public policies: Application to sustainable management of natural resources in northern Vietnam. *Land Use Policy*, 2007, 24(3): 531-545.
- [17] Valbuena D, Verburg P H, Veldkamp A, et al. Effects of farmers' decisions on the landscape structure of a Dutch rural region: An agent-based approach. *Landscape and Urban Planning*, 2010, 97(2): 98-110.
- [18] Russell S, Norvig P. 人工智能: 一种现代方法. 姜哲等, 译. 北京: 邮电出版社, 2004.
- [19] 李伯含. 中国房地产业的市场结构与竞争行为研究[D]. 中共中央党校, 2006.
- [20] 金丽国. 区域主体与空间经济自组织. 上海: 上海人民出版社, 2008.
- [21] 邓卫, 宋扬. 住宅经济学. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [22] 2006 年武汉市春交会住宅市场需求调查报告. 2006-6-2[2010-9-10]. [http://news.wuhan.soufun.com/2006-06-02/722966\\_2.html](http://news.wuhan.soufun.com/2006-06-02/722966_2.html), 2006.6.2.
- [23] 中国指数研究院. 2011 年一季度青岛消费者住房消费行为调查报告. 2011-4-1[2011-4-10]. <http://fdc.soufun.com/news/zt/201104/qingdaogoufang2011.htl>, 2011.4.1.
- [24] 徐建华. 现代地理学中的数学方法. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [25] 湖北省统计局武汉市 2006 年住户调查资料. 2007-6-27[2010-9-12]. [http://www.stats-hb.gov.cn/structure/xxgk/tjfx/sztjfxzw\\_8196\\_1.htm](http://www.stats-hb.gov.cn/structure/xxgk/tjfx/sztjfxzw_8196_1.htm), 2007.6.27.
- [26] 王家庭, 张换兆. 中国城市土地集约利用: 理论分析与实证研究. 天津: 南开大学出版社, 2008.
- [27] Costanza Robert, Arge Ralphd', Groot Rudolf de, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260.

# Multi-agents Model for Simulation of Urban Residential Space Evolution

SHAN Yuhong<sup>1,2</sup>, ZHU Xinyan<sup>3</sup>

(1. College of Economic and Land Management, Huazhong Agriculture University, Wuhan 430070, China;

2. Center of Hubei Rural Development, Wuhan 430070, China;

3. State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** Multi-agents model (MAS) is an effective tool for studying and simulating complex social and economic systems. MAS model itself does not have complicated modeling steps, but gives a modeling ideas and mechanisms of "from micro to macro and from bottom to up". In China, market mechanism and planning mechanisms are the major driving and regulation forces of urban residential space evolution. This paper builds an urban residential space expansion model based on GIS and MAS that contains micro intelligent agents and environment agent, aiming to investigate the interactions between the market mechanism and planning mechanism in the process of urban residential space transformation. On the basis of the cognition of the behavior characteristics of the market mechanism agents of urban residents and property developers, the model analyzes the impact of the two market mechanism agents on the evolution direction of urban residential space, and the paper points out that under the policies of state-owned urban land in China, the urban government's land supply decides the urban residential evolution patterns and the total benefits of residential land development. Thus, by adjusting the land use and environment protection policies of urban government, the model sets three policy scenarios and achieves the preview of the evolution of residential space for each scenario, which can provide guidance for land use planning in advance. Wuchang and Hongshan districts in Wuhan city are chosen as the experimental areas. By the MAS model the paper compares the land use structure and land use benefits in the process of the residential space evolution from 1998 to 2008 among the three scenarios and the actual situation respectively. Some main conclusions can be drawn as follows from the model's outputs. Firstly, there are always intersections between the real residential space evolution and the model's simulated results under different scenarios, which means that because of the influence of macroscopic environment, urban government may adjust its land use policy, natural environment protection policy and so on in different periods. this is just one of the characteristics of Chinese real estate market. Secondly, urban residents' residential favor can affect the spatial form and the speed of urban residential space's growth. The third is that compared with land redevelopment of the old urban area, newly developed land in inner suburban districts has a lager proportion in the evolution process of the residential space from 1998 to 2008 in the two experimental districts. In fact, the government of Wuhan city had focused on the development of new residential land in the suburban fringe areas before 2004, but the emphasis has been transferred to the old city transformation and land redevelopment after 2004.

**Key words:** urban residential space evolution; land use; GIS; multi-agents; scenario analysis; Wuhan

本文引用格式:

单玉红, 朱欣焰. 城市居住空间扩张的多主体模拟模型研究. 地理科学进展, 2011, 30(8): 956-966.