

居住空间行为模拟与城市空间增长

张新生

王宝山

(中科院地理所资源与环境信息系统国家重点实验,北京 100101) (焦作工学院测量系,焦作 454000)

摘要 模拟城市要素空间增长对城市系统的合理调控有着十分重要的意义,而居住的空间增长是城市空间增长的主要部分。本文将在分析城市要素空间相互作用的基础上,建立居住空间选择行为模型。并在地理信息系统和空间分析支持下,建立城市居住的空间增长动态模拟系统。

关键词 效用函数,空间格局,空间动力学,地理信息系统

1 问题的提出

城市要素空间增长和格局变化是城市化近域扩展的体现,有效地预测和模拟城市空间增长过程对城市系统调控有着十分重要的意义^[1]。预测城市增长不仅要预测城市要素增长的数量,更重要的是预测该要素的空间分布和格局变化。预测城市空间增长的核心之一是研究城市各要素的空间行为,更重要的是建立城市要素的空间选择模型,并模拟要素空间增长的过程,从而把握城市要素增长的驱动力和空间相互作用机理,为适时控制城市要素空间增长提供决策依据。

Burgess 1925年提出的同心圆模型,Hoyt 1939年提出的城市增长扇形模型以及 Alonso 1960年提出的互换论在解释城市景观结构的演变过程都有十分重要的意义,但它们的共同缺陷是,都只是定性的解释,只从宏观上指出了城市空间格局的演变规律^[2]。尽管有人以互换论和微观经济学为基础建立了居住的空间选择模型,但这种模型由于缺乏空间分析理论和技术支持,多假定城市是一个均质的地域空间,以欧氏距离做为唯一的空间要素,这显然使此类模型无法真正地模拟居住的空间行为。研究居住空间选择的行为学派有 Bell 和 Anas 等人^[3],

Anas 1975年从研究人类空间行为入手,利用详细的社会、经济、旅行等数据将居民分为不同偏好的家庭类型,分别解释了6种家庭类型的空间行为,这一模型的明显不足是没有考虑居住环境和交通对居住空间选择行为的影响。

地理信息系统的出现为预测城市空间增长提供了极大的支持,使城市空间增长的预测真正进入实用化阶段^[4~6],然而大多研究是基于空间统计分析,John R. Jenson 等利用统计分析配合一组居住和商业区位选择规则模型,对城市空间增长和格局变化进行趋势预测,但这些研究没有从城市增长的动力机制和空间相互作用机理上观测城市空间增长。R. parrott 的研究是基于居住和商业活动的空间配置模型,从某种程度上考虑了空间增长的机理^[7]。但他的模型是 lowry 类空间配置模型,是基于聚集的空间行为模拟,并假设所有个体都是理性经济人,以空间距离作为唯一的空间因子,因而,忽视了个体的社会特征在空间选择中的作用,也忽视了不同个体在居住空间选择的差异性。

要真正模拟城市要素空间增长过程,必须全面考察城市非均质性对城市居住选择的影响,按照个体的不同偏好建立不同类型个体空间选择模型,并在地理信息系统,空间分析及可视的空间表达理论和技术支持下,寻求模型的求解策略。

2 城市居住空间选择行为模型

2.1 个体的理想点位置

假设将城市区域划分为有限的空间单元,描述空间单元特征的属性集为 $\{k_i, i=1, 2, \dots, n\}$, 显然任一属性都是空间位置的函数, 即 $k_i = f(x, y)$ 或 $k_i(x, y)$ 。个体对空间位置的选择其实是在特征属性不同组合所形成的集合中, 尽可能选择最佳的一组属性。

微观经济理论认为, 效用就是消费者从消费品中得到的满足程度。当人们购买到一件适用的物品时, 心理就得到某种满足, 这种满足的程度就是效用, 消费者在一定时期内从不同商品中所获得的效用是各种商品消费量的函数。

选择空间单元, 可以理解为对空间单元特征属性的选择, 在此效用可以理解为选择某一属性值时所得到的满意程度, 若 $\{k_i, i=1, \dots, n\}$ 为某一空间单元的特征属性集, 则该空间单元的效用函数为:

$$U = f[k_1(x, y), k_2(x, y), \dots, k_n(x, y)] \quad (1)$$

边际效用就是增加一单位某一特征属性值时, 总效用的增加量。假设考虑距离市中心的距离这一要素, 向市中心移动单位距离所得到的效用增加量, 即为该属性的边际效用。边际效用递减律认为, 在一定的时间内, 个体对某种特征属性值不断增加, 但其边际效用必然减小。

在此分析一下效用函数的特性:

(1) 根据边际效用的定义, 第 i 种要素的边际效用表示为:

$$U(k_i) = \frac{\partial U}{\partial k_i}$$

一般情况下: $\frac{\partial U}{\partial k_i} > 0$

当 $\frac{\partial U}{\partial k_i} = 0$ 时, 说明 k_i 要素分值的增加量已经达到饱和。

(2) 要使边际效用递减律成立: $\frac{\partial^2 U(k_i)}{\partial^2 k_i} \leq 0$, 即总效用函数为凹形曲线。

假设 I 为某类个体的总收入, W 为扣除交通和房费的其它消费, P_i 为单位路程交通费用, 若某一类个体平均出行目的地和次数已知, 并假定某一类个体至各目的地的加权路程为 $\{S_i[(x, y), (x_{ai}, y_{ai})], i=1, \dots, t\}$, 出行次数为 $\{n_i, i=1, \dots, t\}$, 该类个体的平均需求面积为 Ra , 单位面积租金为 $P_L(x, y)$, 则

该类个体理想的居住位置由下列模型确定。

$$\text{Max: } U(x, y, t) = f[k_1(x, y, t), k_2(x, y, t), \dots, k_n(x, y, t)] \quad (2)$$

$$\text{st. } P_i \sum_{i=1}^t n_i S_i[(x, y, t), (x_{ai}, y_{ai})] + RaP_L(x, y, t) + W \leq I \quad (3)$$

显然人们会尽可能选择效用值最大的位置, 但要受到收入水平的约束, 同时还受到出行地、就业位置、设施位置等的影响。

2.2 个体的空间选择功效函数

假定式(2), (3)组成的模型所求出的理想点为 (x_0, y_0, t) , 理想点是该类个体最理想的位置, 但由于种种原因(如该位置已经被其它个体占有), 该个体往往并不能得到此位置。那么在这种情况下, 个体该如何做出决策? 此时个体的决策原则有许多^[8], 但是最为合理的决策原则是理想点规则, 即某一个体在 t 时刻居住空间选择的功效函数为:

$$\begin{aligned} \Delta U(x, y, t) = & -f[|k_1(x, y, t) - k_1(x_0, y_0, t)|, \\ & |k_2(x, y, t) - k_2(x_0, y_0, t)|, \\ & \dots, |k_n(x, y, t) - k_n(x_0, y_0, t)|] \end{aligned} \quad (4)$$

3 居住空间增长模型

居住空间增长可以看做由两部分组成, 一是由于就业增长所带来的城外人口的迁外; 二是现有人口的出生/死亡过程。就业增长所带来的居住的空间增长, 可以看做是人口从就业区单元 $z' = (x', y')$ 扩散过程, 这要由个体居住空间选择行为决定, 一个体从单元 z' 向单元 $z = (x, y)$ 扩散将取决于两单元的功效差(即空间势), 按照 logit 模型^[5], t 时刻一个体 i 从单元 z' 迁移到 z 单元的概率(也可称为 i 个体的平均转移率)为:

$$W^i(z'z, t) = v_{z'z}^i \exp[\Delta U^i(z, t) - \Delta U^i(z', t)] \quad (5)$$

式中: $\Delta U^i(z, t)$ 为 i 类个体选择 z 单元的功效函数; $\Delta U^i(z', t)$ 为 i 类个体选择 z' 单元的功效函数; $v_{z'z}^i$ 为平衡系数。

显然:

$$\sum_z W^i(z'z, t) = 1 \quad (6)$$

由式(5)、(6):

$$v_{z'z}^i = 1 / \sum_z \exp[\Delta U^i(z, t) - \Delta U^i(z', t)] \quad (7)$$

在此必须考虑 3 个约束,即土地单元的饱和度,土地适宜性和家庭—工作出行对个体居住选择的约束。

设土地适宜性所确定的选择域为 X_1 ,土地单元的饱和度所确定的域 X_2 需满足:

$$L(z,t) \cdot C(z,t) - \sum_i R_a^i \cdot P^i(z,t) > 0 \quad (8)$$

$L(z,t)$ 为可利用的居住用地空间分布,即 t 时刻 z 单元的总的居住用地面积, $C(z,t)$ 为容积率分布。 R_a^i 为 i 类家庭人均居住面积, $P^i(z,t)$ 为 t 时刻 z 单元 i 类个体的总人口。

工作出行约束是指在 i 类个体可以承担的交通工具条件下,在可以容忍的工作出行时间约束下, i 个体所能选择的单元所组成的域 X_3 ,则模型(5)将是一分段函数:

$$W^i(z',z,t) = \begin{cases} v_{zz'}^i \exp[\Delta U^i(z,t) - \Delta U^i(z',t)], & z \in X_1 \cap X_2 \cap X_3 \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (9)$$

设 I_m 为单位时间段外来迁入就业人口与该时间段总就业人口增加量之比, I_c 为总就业人口与总人口之比, $e(z',t)$ 为 t 年单位时间内新增就业人口空间分布,则 t 时刻单位时间(一年)内,人口空间增长动力学方程为:

$$dP(z,t)/dt = \sum_i \sum_{z'} I_m \cdot I_c \cdot e^i(z',t) W^i(z',z,t) + P(z,t)[\beta(z,t) - \delta(z,t)] \quad (10)$$

式中: $P(z,t)$ 为 t 时刻的人口空间分布;

$\beta(z,t),\delta(z,t)$ 分别为 t 时刻出生,死亡率空间分布;

$e^i(z',t)$ 为属 i 类家庭的就业空间分布(按社会经济特征分类),显然有:

$$\sum_i e^i(z',t) = e(z',t) \quad (11)$$

则 $t+1$ 年人口的空间分布为:

$$P(z,t+1) = P(z,t) + dP(z,t)/dt \quad (12)$$

以上所建立的城市空间增长动力学模拟模型,用解析方法是无法求解的,这是因为,模型中两点之间关系用加权路径来度量而不是希尔伯特空间上的欧氏距离,而且上述模型中的函数都不是连续的解析函数,因为地价、设施便利度等要素是空间位置(x,y)的函数,不可能用一个连续的曲面来描述。然而地理信息系统和空间分析可以提供上述模型的求解方法。接下来将结合实例讨论模型的求解策略。

4 居住空间增长的时空模拟

4.1 居住空间增长的模拟过程

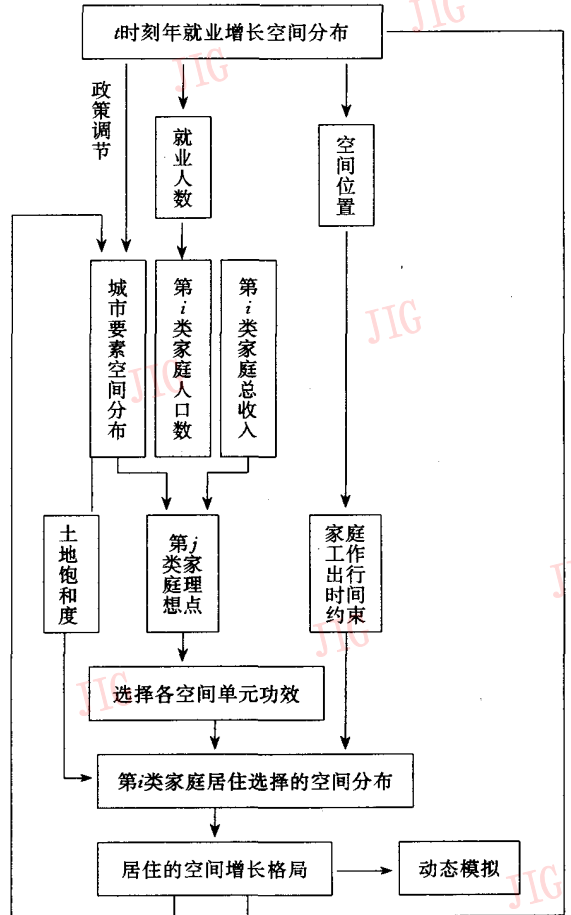


图1 居住空间增长的模拟过程

Fig. 1 Simulation process of residential spatial growth

图 1 描述了居住空间增长的模拟过程,新增就业项目提供了新的就业机会,必然吸引域外人流,从而带动人口的增长。不同类家庭有不同的空间选择行为,对任一类家庭可以根据 2.1 节所建的模型求出其理想点,然后根据 2.2 节所建模型求各单元功效值,并考虑各种约束即可求出该类家庭的空间分布。城市的要素及要素的空间分布构成城市某一特定时间的状态,这一状态随着时间推移在不断变化之中,在城市空间增长预测过程中必须考虑这样一个问题,当每一个体在空间选择之后,城市的状态将发生变化,从而影响下一轮要素空间选择的决策行为,因而城市空间增长模拟必须考虑这种变化,并及时改变城市状态变量,提高模拟的可靠性。

4.2 居住空间选择的功效函数构造

在此结合研究区北海来说明构造过程:

根据研究区现有的居住空间分布与影响居住空间的可能性因子作主成分分析,选择了居住环境、服务设施便利度、交通可达度、房价和城市环境污染做为建立功效函数的因子。

4.2.1 效用函数的构造

构造效用函数必须做如下假设,现状居住的分佈遵循构造的效用函数,也就是说效用函数与现状人口分佈成正比。遵循以上假设若已知某类家庭的人口分佈和各影响要素的因子分佈,就可以根据效用函数的特征来构造该效用函数,在研究区内,现以中等收入家庭为例说明效用函数的构造过程。

设人口密度分佈为 $P(x, y)$, 中等收入家庭的效用函数为 U 。

$$P(x, y) = C \cdot U(k_1, k_2, \dots, k_n)$$

式中: k_i 为居住选择的影响因素; C 为常数。

若将居住环境、房租金、城市污染、交通可达度相同分值的所有栅格组成一个子集,可以认为这些栅格单元人口密度变化仅仅由设施便利度 k_1 引起,则:

$$Mu(k_{1i}) = \frac{1}{C} \cdot \frac{\Delta P_i}{\Delta k_{1i}}$$

式中: $Mu(k_{1i})$ 为设施便利度第 i 处的边际效用;

Δk_{1i} 为设施便利度第 i 处的变化量;

ΔP_i 为设施便利处第 i 处的变化量对应的人口密度变化量。

对于设施便利度分值与人口密度变化率之间的二元关系可以用某一函数拟合。设 $Mu(k_i)$ 为拟合的曲线,则 k_i 的总效用为:

$$U(k_1) = \int_0^{K_1} Mu(k_1) dk_1$$

利用同样的方法可以求出所有其它要素的效用函数: $U(k_2), U(k_3), U(k_4), U(k_5)$ 。则中等收入家庭空间选择的总效用函数为:

$$U(k_1, k_2, k_3, k_4, k_5) = \sum_{i=1}^5 U(k_i)$$

由于 k_i 是位置 (x, y) 的函数,则

$$U(k_i(x, y), i = 1, \dots, 5) = \sum_{i=1}^5 U(k_i(x, y))$$

根据最近4年城市扩展区中等收入人口密度分佈,最终求出的中等收入总的效用函数为:

$$U(x, y) = 35 - 13.5e^{-0.06k_1(x, y)} - 10.36e^{-0.07k_2(x, y)} - 5.4e^{-0.025k_3(x, y)} - 3.5e^{-0.09k_4(x, y)} - 2.17e^{-0.001k_5(x, y)}$$

同理可以求出高收入和低收入家庭空间选择效用函数*。功效函数因子的选取必须基于充分的理论分析和经验分析;通过理论分析,尽可能全面罗列所有对居住选择影响的因子,然后通过统计分析进行筛选。按照以上方法构造函数可以避免其它文献中一律按多项式构造功效时出现的人为性。

4.2.2 居住空间选择理想点求定

在计算理想的空間位置时,必须考虑家庭总收入的约束,对每类个体,用于房租费和交通费的总费用加上基本生活费用不得大于总收入,表1为北海市中等收入家庭收支情况:

表1 中等收入收支情况表(据北海95统计年鉴)
Table 1 Situation of income and expenditure of medium-income families

年现金收入(元)	7114	娱乐文教	360
基本生活费(元)	3760	总支出	5282
医疗与通讯(元)	180	剩余(交通和房租)	1832

据北海95年统计年鉴和交通规划报告,北海人口日出行次数为3.5次,中等收入人均居住面积为8m²,职工与总人口之比为1:4。

根据统计数据,利用地理信息系统和空间分析,即可求出在某一就业地就业的某类家庭理想点位置。

4.2.3 居住空间增长模拟

根据研究区的情况,选择三类空间约束:

(1) 工作出行约束,也就是说在可以承担的最快捷交通工具下,在可以容忍的家—工作出行时间下,对不同家庭空间选择的约束,如表2。

表2 研究区居民出行情况

Table 2 Situation of residents travel (Source Beihai traffic planning)

	交通工具	行驶速度 (公里/小时)	45分钟行 驶路程(km)
高收入	自备车	40	30
中等收入	30% 自备车	40	30
	70% 自行车	12	9
低收入	自行车	12	9

* 45分钟做为家—工作地出行约束。

(2) 为空间单元的饱和度,根据居住适宜性分佈、现状居住人口和最大的容积率分佈,计算出各个单元的最大新容积人口数。当人口增加到每个单元

* 因缺少高收入和低收入家庭人口密度分佈数据,所以在实际预测中用中等收入效用函数来代替。

饱和时,将不再增加。

(3) 为基础设施配套情况,以三通(路、电、水)为基本条件。

该模拟模型考虑了这样的情况,当某一就业项目促使人口增长时,城市要素空间分布将发生变化,必须重新确定新的状态变量,然后再进入下一轮的增长模拟。

空间约束反映了政策控制(如容积率、设施配套等)和城市空间增长的自组织特征(如单元居住的饱和度约束),当然还存在着其它空间约束,不同的约束会产生不同的模拟结果,反映了不同政策因素和空间要素的不同分布对空间增长的影响。对多方案比较都有十分重要的意义。

4.2.3 城市空间增长的动态模拟

该系统基于地理信息系统,统计分析和可视的空间表达,实现了居住扩散的动态可视化时空模拟。系统可以模拟城市居住扩散过程。

计算过程如下:

① 就业增长空间分布的时间序列做为外生过程给出;系统首先搜索时间 t 时刻每一空间单元年就业增长,并分别按比例分为高、中、低 3 个类型家庭,然后乘上 I_m 、 I_c 两常数;

② 计算在该就业区就业的各类个体的理想点,然后按三个约束搜索该类个体可以选择的空间单元集合 M ,按功效函数求出 M 中所有空间单元的功效函数,即可将每类家庭按照平均转移率模型(9)配置在 M 集合中的所有单元,每配置一类个体都要检查土地单元的饱和度,一旦该单元饱和,将配置到距该单元最邻近的单元。

③ 当所有单元配置完后,即可得到新增人口的空间分布,加上出生/死亡过程的结果,就可得到新增人口的空间分布,相当于模型(10)的计算结果。

④ 重新计算各空间单元的状态变量(包括功效函数、各因子值和各约束因子),进入下一年度的空间增长模拟。

动态模拟过程如下:

① 计算过程采用的是按城市功能特征划分的 60 个功能单元,以矢量结构存贮。而动态模拟过程采用 $50m \times 50m$ 的栅格结构,每一个功能单元都通过指针变量连接该单元区域的一个栅格文件。

② 然后将每个功能区的人口按照功效值 U 从

大到小,并考虑土地饱和度等约束,配置到各栅格单元,并按新增人口的时间序列转化为具有时间标签的点,整个区域的空间增长动态过程就由带有时间标签的点表达,通过这一技术可以动态模拟、显示并查询城市各时间段的空间增长过程。按照北海“九五”规划,随着 1994 年到 2000 年北海一批新就业项目的投产将为域外提供 2.8 万人就业机会,由此带动的人口增长为 11.2 万。彩色图版 I 为新增主要就业项目位置及居住扩散过程动态模拟。

该系统可以模拟政府通过交通、设施、房价、就业、绿地等因素空间布局的改变对居住扩散时空格局调控效果,从而为多方案比较提供决策依据。

5 结论

城市地理信息系统更深层次的发展,将是集空间分析、城市模型和空间表达为一体,建立复杂的城市时空模型,模拟城市空间格局演变的动力学过程,为适时调控城市系统提供决策依据,本文充分分析了居住空间选择行为,以现有的城市居住分布为基础,建立了城市居住空间增长动力学模拟模型,为城市决策者调控居住的空间增长提供了决策依据。

参考文献

- 1 Jensen John R, et al. Improved Urban Infrastructure Mapping and Forecasting for Bellsouth Using Remote Sensing and GIS Technology, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 1994, 60(3): 339~346.
- 2 张新生,何建邦. 城市可持续发展与空间决策支持. 地理学报, 1997(6).
- 3 周春山. 城市人口迁居理论研究. 《城市规划汇刊》, 1996(3).
- 4 Michael B, et al. Modelling inside GIS: Part 2. Selecting and Calibrating Urban models using ARC/INFO, INT. J. Geographical Information Systems, 1994, 8(5): 451~470.
- 5 Leonardi G, et al. Conceptual foundations of spatial choice models, Environment and planning A, 1992, 24: 1893~1408.
- 6 张新生,何建邦. 城市空间增长与土地开发的时空格局. 《遥感学报》, 1997(2).
- 7 Parrott R, et al. Urban GIS application, In: maguire D. j etc (eds). Geographical Information System, Principles and applications Longann, London, 1991, 247~260.
- 8 Gerhard Bahrenberg, et al. Recent Development in Spatial Data Analysis, Gower House U. S. A. (1984).



张新生,1964年12月生,1997年7月在中国科学院获博士学位,现在伊利诺大学芝加哥校区做博士后研究,主要从事地理信息系统,城市或区域空间分析模型理论,技术与应用研究,近几年在国内外公开刊物发表有关论文20多篇。

Simulation of Resident Spatial Behaviour and Urban Spatial Growth

Zhang Xinsheng, Wang Baoshan

(LREIS, Institute of Geography, Chinese Academy of Science, Beijing 100101)

Wang Baoshan

(Department of Surveying, Jiaozuo Institute of Technology, Jiaozuo 454000)

Abstract Urban growth simulation has a very important significance for rational adjustment and control of Urban System, and Residential spatial growth is a main part of urban spatial growth. Based on spatial interaction analysis among urban elements, resident spatial behavior model is built, and simulation system of urban residential spatial growth is built under the support of GIS and spatial analysis.

Keywords Utility function, Spatial pattern, Spatial analysis, GIS