

# 基于多智能体的城市人口分布模型

康停军<sup>1,2</sup>, 张新长<sup>1</sup>, 赵 元<sup>3</sup>, 王海鹰<sup>1</sup>, 张 维<sup>1</sup>

(1. 中山大学地理科学与规划学院, 广东 广州 510275; 2. 佛山市城市规划勘测设计研究院, 广东 佛山 528000;  
3. 华南农业大学信息学院, 广东 广州 510642)

**摘要:** 人口是城市发展中最为活跃的因素, 快速增长的人口给城市安全、经济和生态环境带来了深远的影响, 获取不同尺度的高精度人口空间分布信息对于城市安全管理、提高资源环境的综合管理能力具有非常重要的意义。针对常用的城市人口空间分布模拟方法存在的不足, 构建了基于多智能体的城市人口分布模型, 模型由影响要素、智能体、决策规则等组成。在两个不同尺度区域进行了模型应用实验, 并以重力模型进行了对比分析。实验结果表明, 与重力模型相比, 此模型所模拟的结果具有更高的精度, 且接近于实际的人口空间分布, 为城市人口分布模拟提供了新的思路。

**关键词:** 人口分布; 模拟; 多智能体; 广州

**中图分类号:** P208      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-0690(2012)07-0790-08

人口是城市发展中最为活跃的因素, 人口的急剧增长给城市安全、经济社会和生态环境带来了深远的影响, 是制约区域全面协调可持续发展的重大问题, 受到了广泛的研究关注<sup>[1-5]</sup>。获取不同尺度的高精度人口空间分布信息对于城市安全管理、提高资源环境的综合管理能力、地理国情监测等具有非常重要的意义<sup>[6-9]</sup>。中国的人口数据通常是按照行政单元统计汇总而得到, 人口分布的网格化比传统的人口密度分布行政单元化更接近实际的人口分布, 而且便于数据整合及跨学科的综合研究<sup>[10-6]</sup>。通过建模方法模拟人口在空间的分布成为近几年的研究热点, 多种模型方法<sup>[2, 9-12]</sup>得到广泛应用。上述研究多采用“自上而下”的计量学模型, 由于涉及参数太多或者模型较复杂, 限制了模型的广泛适用。城市人口分布是微观个体运动而导致的宏观现象, 是一个典型的“自下而上”的复杂问题, 以多智能体建模技术为代表的地理模拟系统(Geographical Simulation System)<sup>[13]</sup>为此类问题提供了新的解决方法, 已在多个领域取得了广泛的应用<sup>[13-20]</sup>。在这些研究中居住选择/分异模型<sup>[15-17]</sup>较成熟, 模型中每一个格网最多容纳一个智能体, 一个智能体并不是代表

一个人或一个家庭, 仅反映了比例关系, 实际含义为规则格网内平均容纳的人口数量<sup>[18]</sup>。人口在空间的分布并非均质的, 很多城市的人口分布呈现从中心到外围人口密度逐渐递减的规律; 因此, 一个格网最多容纳一个智能体在城市人口空间结构模拟中具有局限性。部分学者进行了基于多智能体的城市人口分布或增长模拟的尝试研究<sup>[19-21]</sup>, 但仍然存在一些问题: ① 模拟结果以街道地块为单位, 不考虑街道内部的差异性, 这与实际的人口分布规律是不相符合的; ② 以 Clark 模型模拟结果进行初始化和精度检验, 适用性受到限制<sup>[19]</sup>; 所构建模型中, 每个智能体分别代表几千至几万个具有决策能力的个体, 忽略了个体之间的差异性, 模拟结果过于概略<sup>[20, 21]</sup>; ③ 没有考虑智能体之间的互动竞争<sup>[19-21]</sup>。

本文通过探讨微观个体与城市外部环境之间的相互作用、智能体之间的互动竞争协商, 构建了基于多智能体的城市人口分布模型, 通过居民智能体的微观活动模拟宏观的城市人口分布, 分别以中等尺度、小尺度两个研究区域验证了模型的有效性, 为城市人口空间分布补充了新的研究思路。

**收稿日期:** 2012-02-18; **修订日期:** 2012-04-13

**基金项目:** 国家自然科学基金(40971216、41071246)资助。

**作者简介:** 康停军(1981-), 山东聊城人, 博士研究生, 主要从事城市地理信息系统研究。E-mail: giskitj@163.com

**通讯作者:** 张新长, 博士, 教授。E-mail: eeszc@mail.sysu.edu.cn

# 1 城市人口分布模型建立

## 1.1 模型框架及关键问题

### 1.1.1 模型框架

模型框架主要由多智能体、决策规则、影响要素、居住格网等各部分有机耦合组成。在居住影响要素的影响下,智能体感知居住压力并做出是否迁居的决策。如果迁居则寻找新的居住格网,智能体通过直接搬迁或者协商后搬迁进入目标格网。通过所有智能体的不断决策、搬迁活动,模拟人口在城市各居住格网的分布。模型仅考虑居民智能体,由于居民在城市内部的移动行为一般以家庭为单位,因此本文设计的居民智能体以家庭为单位,每个智能体代表一个家庭。

### 1.1.2 关键问题

基于空间的多智能体一般借助于CA(Celluar Automata)的思想,智能体分布在规则的二维格网上<sup>[13]</sup>,智能体的基本属性是其空间坐标信息与身份信息,二者构成其在空间存在的基本特征<sup>[22]</sup>,通常可以标识为:

$$Agent \{ID_{Geo}, Attribute\} \quad (1)$$

式中,  $ID_{Geo}$  为智能体在居住格网层的坐标索引值,  $Attribute$  为智能体身份信息。通常情况下,每一个格网容纳一个  $Agent$  (智能体), 即格网与  $Agent$  为 1:1 的关系, 每个  $Agent$  均有唯一的  $ID_{Geo}$ , 一般用  $ID_{Geo}$  区分智能体。

由于本文模型每个居住格网可容纳不定数量的  $Agent$ , 即格网与  $Agent$  为 1:n 的关系, 位于同一居住格网且  $Attribute$  相同的  $Agent$  具有相同的  $ID_{Geo}$ , 同类型的  $Agent$  通常具有相同的  $Attribute$ ; 按照公式 (1) 的标识方法, 类型相同且处于同一格网的  $Agent$

具有相同的标识, 容易引起标识混乱。

例如, 图 1a 为 9 个类型相同(假设其类型为  $Type1$ ) 的智能体分布在 4 个格网( $GeoCell$ ) 中, 编号为 2、3、4 的智能体具有相同的类型及相同的  $ID_{Geo}$  (格网 2 的索引), 在模拟时, 使用  $ID_{Geo}$  无法区分智能体(2、3、4)。本文构建了图 1b 所示的“索引—计数”以解决格网与  $Agent$  为 1:n 时标识混乱的问题, 具体如下:

1) 构建  $M$  行  $N$  列的索引网格  $Ref$  (图 1b),  $M \times N$  为总的智能体数量, 每个索引网格容纳一个智能体, 每个智能体的标识(式 1)均增加其所在索引网格的唯一索引值  $ID_{Ref}$ , 则每个智能体的标识方式扩展为:

$$Agent \{ID_{Geo}, ID_{Ref}, Attribute\} \quad (2)$$

利用  $ID_{Ref}$  对空间位置相同、 $Attribute$  相同的  $Agent$  进行区分。

2) 图 1a 智能体移动层中每个居住格网(图 1 中的  $GeoCell$ ) 均包含一个“计数器(图 1b 的  $Counter$ )”。“计数器”负责记录其所在格网各种类型(如图 1b  $Counter$  中  $Type1$ ) 智能体的数量及总智能体的数量(图 1b  $Counter$  中  $Total$ )。当智能体进入或迁出某个居住格网时, 智能体改变自身的  $ID_{Geo}$ , “计数器”更改该居住格网内与此智能体同类型的智能体数量以及总的智能体数量。

通过“索引—计数”的方法将索引网格、智能体、智能体移动层有机结合在一起, 每个格网可以容纳不定数量的智能体, 可以更好地模拟人口在空间分布的差异性。

## 1.2 运行机制

模型运行机制可以描述为:

步骤 1: 生成智能体

根据统计资料生成与家庭数量相同的智能

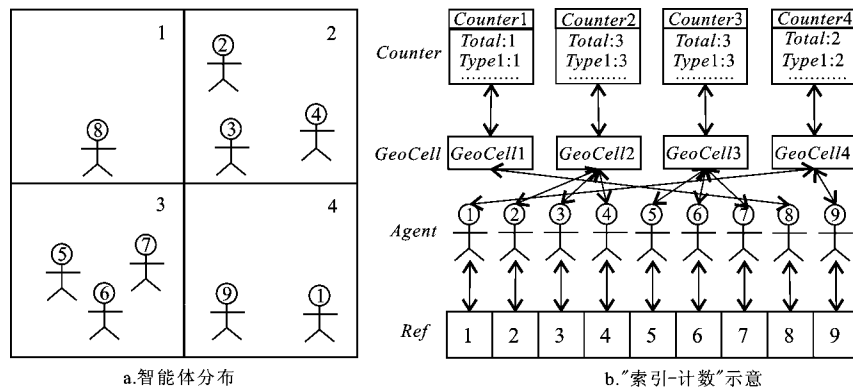


图 1 智能体分布及“索引—计数”图

Fig. 1 Distribution of agents and “index-counter”

体,按照经济状态及属性对智能体进行分类;

步骤2:选择智能体,更新排名及经济状况

随机选取  $ID_{ref}$ , 其标识的智能体记为  $q$ , 根据式(2)可知  $q$  的  $ID_{Geo}$ , 通过  $ID_{Geo}$  定位  $q$  现在的居住格网  $GeoCell$ , 记为  $G_{xy}$  ( $x, y$  分别为当前居住格网的行、列数标识)。

模型运行过程中,智能体的经济状态会随着其所在居住格网房价的变化而变化。 $q$  在  $t$  时刻位于居住格网  $G_{xy}$  的收入为:

$$I(q, t, G_{xy}) = I(q, t_0, G_{xy}) - H_{xy}^{t_0} + H_{xy}^t \quad (3)$$

式中,  $I(q, t, G_{xy})$  为  $q$  在  $t$  时刻位于  $G_{xy}$  的收入,  $I(q, t_0, G_{xy})$  为  $q$  最近一次(记为  $t_0$  时刻)迁居至居住格网  $G_{xy}$  时所拥有的收入,  $H_{xy}^{t_0}, H_{xy}^t$  分别为  $t_0, t$  时刻  $G_{xy}$  的房屋价格,  $q$  的收入变化导致其在整个群体中的排名及类型发生变化,如收入的增加可能使智能体由低收入状态变为高收入状态。

模型运行过程中居住格网房价更新机制为:

$$H_{xy}^{t+1} = \begin{cases} w_1 \times (1 + \alpha) \times H_{xy}^t + w_2 \times \left[ \frac{\sum_{z \in \Omega(\overline{xy})} H_z^t}{Num_z} + \rightarrow \right. \\ \left. \frac{\sum (I(q, t_0, G_{xy}) - H_{xy}^{t_0})}{Pop(t, G_{xy})} \right], Pop(t, G_{xy}) > 0 \\ (1 - \beta) \times H_{xy}^t, Pop(t, G_{xy}) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $H_{xy}^{t+1}$  为  $t+1$  时刻  $G_{xy}$  的房屋价格,  $\alpha$  表示房屋价格随时间的增值率,  $\beta$  为折旧率,  $\sum_{z \in \Omega(\overline{xy})} H_z^t$  为  $t$  时刻邻域居住格网房屋价格总和,  $Pop(t, G_{xy})$  表示  $t$  时刻格网  $G_{xy}$  所居住的智能体数量,  $w_1, w_2$  为权重, 二者之和为 1, 其它参数含义同上。

步骤3:计算智能体的居住压力及效用

居住压力是居民产生搬迁意念的驱动力<sup>[15, 17]</sup>, 可以简化为两部分:经济压力、社会压力。经济压力由居民的收入与房屋价格之间的差异及其与居住在同一居住格网内部其它居民平均收入的差异构成,差异越大,居民所感知的经济压力越大。社会压力同样可以简化为两部分:类型压力、效用压力。居民更倾向于与其类型相同的居民(在本文中简化为处于相同收入区间)居住在同一居住小区(本文为  $100\text{m} \times 100\text{m}$  的居住格网),该类型居民在所居住小区的比例越大,类型压力越小。效用压力源自于居民的效用满足感,由该居民在当前居住格网的效用与其在邻域其它居住格网可获得

的效用均值之间的差异构成。

$t$  时刻,智能体  $q$  在其居住格网  $G_{xy}$  由于居住不协调所感受到的居住压力为:

$$D(q, t, G_{xy}) = \theta \times D_E(q, t, G_{xy}) + (1 - \theta) \times D_S(q, t, G_{xy}) \quad (5)$$

式中,  $\theta$  为取值范围为  $[0, 1]$  的压力权重,  $D_E(q, t, G_{xy})$  为  $t$  时刻智能体  $q$  在居住格网  $G_{xy}$  的经济压力,  $D_S(q, t, G_{xy})$  表示  $q$  在格网  $G_{xy}$  的社会压力。其中,

$$D_E(q, t, G_{xy}) = 1 - [1 - w_H \times |I(q, t, G_{xy}) - H_{xy}^t| \times [1 - w_A \times |I(q, t, G_{xy}) - I_{xy}/Pop(t, G_{xy})|]] \quad (6)$$

$$D_S(q, t, G_{xy}) = 1 - [1 - w_T \times D_T(q, t, G_{xy}) \times [1 - w_U \times D_U(q, t, G_{xy})]] \quad (7)$$

式中,  $I_{xy}$  为格网  $G_{xy}$  居住的所有智能体的收入,  $w_H, w_A$  为权重,假定各种压力对于家庭的居住压力具有同等的贡献,  $w_H, w_A$  各取值 0.5。  $D_T(q, t, G_{xy})$  表示  $t$  时刻  $q$  在格网  $G_{xy}$  的类型压力,  $D_U(q, t, G_{xy})$  表示  $t$  时刻  $q$  在格网  $G_{xy}$  的效用压力,  $w_T, w_U$  为权重,各取值 0.5。

$$D_T(q, t, G_{xy}) = 1 - \frac{Pop(q, t, G_{xy})}{Pop(t, G_{xy})} \quad (8)$$

$$D_U(q, t, G_{xy}) = \begin{cases} 0, U(q, G_{xy}) \geq \sum_{z \in \Omega(\overline{xy})} U_z^q / Num_r \\ 1 - \frac{U(q, G_{xy})}{\sum_{z \in \Omega(\overline{xy})} U_z^q / Num_r}, \\ U(q, G_{xy}) < \sum_{z \in \Omega(\overline{xy})} U_z^q / Num_r \end{cases} \quad (9)$$

式中,  $Pop(q, t, G_{xy})$  为  $t$  时刻居住在  $G_{xy}$  且与  $q$  同类型的智能体数量。  $\Omega(\overline{xy})$  表示  $5 \times 5$  邻域中除  $G_{xy}$  的其它居住格网,  $Num_r$  为领域中不包含  $G_{xy}$  的居住格网数量,  $\sum_{z \in \Omega(\overline{xy})} U_z^q$  表示  $q$  在邻域居住格网可获得的效用总和,  $U(q, G_{xy})$  为  $q$  在居住格网  $G_{xy}$  的效用, 可以表示如下:

$$U(q, G_{xy}) = w_{Envi} \times F_{xy}^{Envi} + w_{Traf} \times F_{xy}^{Traf} + w_{Convi} \times F_{xy}^{Convi} + w_{Edu} \times F_{xy}^{Edu} + e_{xy} \quad (10)$$

式中,  $F_{xy}^{Envi}, F_{xy}^{Traf}, F_{xy}^{Convi}, F_{xy}^{Edu}$  为环境、交通通达度、公共设施、教育资源等因素在  $G_{xy}$  的影响值,  $w_{Envi}, w_{Traf}, w_{Convi}, w_{Edu}$  分别为  $q$  对上述影响因素的偏好权重, 其总和为 1,  $e_{xy}$  为服从韦伯分布的随机扰动项。

步骤4:智能体判断是否迁居

$t$  时刻智能体  $q$  在居住压力作用下以一定的概率决定是否进行迁居, 概率为<sup>[16]</sup>:

$$P'_q = P_0 + (1 - P_0) \times D(q, t, G_{xy}) \quad (11)$$

式中,  $P'_q$  为  $q$  在  $t$  时刻离开现有居住地的概率,  $P_0$  为属于  $[0, 1]$  的常数, 其它参数含义同上。如果  $q$  迁居则执行步骤5, 否则  $q$  继续居住在  $G_{xy}$ , 然后执行步骤7。

步骤5: 选择迁居目标格网

q 确定离开  $G_{xy}$  后开始寻找候选点, 其是否将候选居住格网  $G_{ij}$  作为迁居候选地的意愿为:

$$TF_{ij} = \begin{cases} \text{True}, U(q, G_{ij}) > U(q, G_{xy}) \text{ 并 } I(q, t, G_{xy}) \\ \geq H_{ij}^t \text{ 并 } P(q, t, G_{xy}) \geq P(q, t, G_{ij}) \\ \text{False}, \text{Else} \end{cases} \quad (12)$$

式中,  $TF_{ij}$  为  $q$  是否将  $G_{ij}$  作为迁居候选地的意愿, 其它参数含义同上。选择符合条件的多个居住格网之后, 利用离散选择模型<sup>[14,15,23]</sup>确定迁居的最终位置。

步骤6: 搬迁及更新信息

如果目标格网  $G_{ij}$  所居住的智能体数量没有达到最大限制, 则直接搬迁至  $G_{ij}$ 。如果已经达到最大限制, 则  $q$  与居住格网  $G_{ij}$  中的任一智能体  $s$  进行协商搬迁, 协商成功的概率取决于  $q, s$  在  $G_{ij}$  的效用  $[U(q, G_{ij}), U(s, G_{ij})]$  大小, 如果  $U(q, G_{ij})$  不大于  $U(s, G_{ij})$ , 则协商失败, 如果  $U(q, G_{ij})$  大于  $U(s, G_{ij})$ , 则协商成功的概率为:

$$P_{Consult} = 1 - \text{Exp}[U(q, G_{ij}) - U(s, G_{ij})] \quad (13)$$

式中,  $P_{Consult}$  表示协商成功的概率, 其它参数含义同上。

协商成功, 则智能体  $s$  重复步骤3~6, 如果  $s$  搬迁成功, 则  $q$  进入  $G_{ij}$ ,  $q$  搬迁成功后更新自身的  $ID_{Geo}$ ,  $G_{xy}$ 、 $G_{ij}$  的计数器均对其内部智能体数量进行更新; 如果协商失败或者  $s$  搬迁失败, 则  $q$  返回  $G_{xy}$ 。

步骤7: 判断是否已达到稳定状态, 如果已达到稳定状态, 则执行步骤8, 否则执行步骤2;

步骤8: 输出结果, 模型停止运行。

## 2 模型应用及对比分析

### 2.1 实验区概况及数据

本文采用两个面积相差较大的实验区对模型

进行验证, 并采用常用的重力模型进行模拟对比。实验区一的范围为: 广州市2006年所辖的荔湾区(不含原芳村区)、越秀区、天河区、海珠区及白云区的14个行政街道(江高镇、人和镇、太和镇、钟落潭镇4个镇除外); 实验区二的研究区为2006年广州市海珠区。

模拟所采用的空间数据主要包括: 居住地分布图、乡镇街道界限图、交通分布图(包括高速路、主干道、次干道、地铁)、绿地林地分布图、水系河流分布图、省市级及普通中小学分布图(不同等级的学校赋予不同权重, 并按照“就近入学”的原则划定影响范围)、银行、公园、医院、商业大厦等公共服务设施分布图。图2为依据上述数据制作而成的居住影响因素分布图, 其空间分辨率均为  $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ 。人口数据为《广州统计年鉴2007》<sup>[24]</sup>获取的研究区2006年各街道常住人口家庭数。社会经济资料包括《2006年广州市国民经济和社会发展统计公报》<sup>[25]</sup>、教育局统计资料等。

### 2.2 智能体分类及模型参数设定

按照家庭月收入状况以及是否有小学初中适龄小孩将智能体划分为6种类型, 式(10)中智能体对影响要素的偏好权重采用专家打分结合AHP决策分析法<sup>[26]</sup>进行确定, 各种类型数量及权重如表1所示。

式(4)中房屋增值率  $\alpha$ 、房屋折旧率  $\beta$  均设为0.002,  $w_1$ 、 $w_2$  的值分别为0.9、0.1。《广州统计年鉴2007》<sup>[24]</sup>显示, 广州家庭平均人口3.21人, 2006年城镇居民人均居住面积  $19.44\text{ m}^2$ 。按照规划最大容积率3.2进行计算, 每公顷内最大住宅数量为  $(3.2 \times 10\,000\text{ m}^2) / (3.21 \times 19.44\text{ m}^2) \approx 513$ , 因此将513

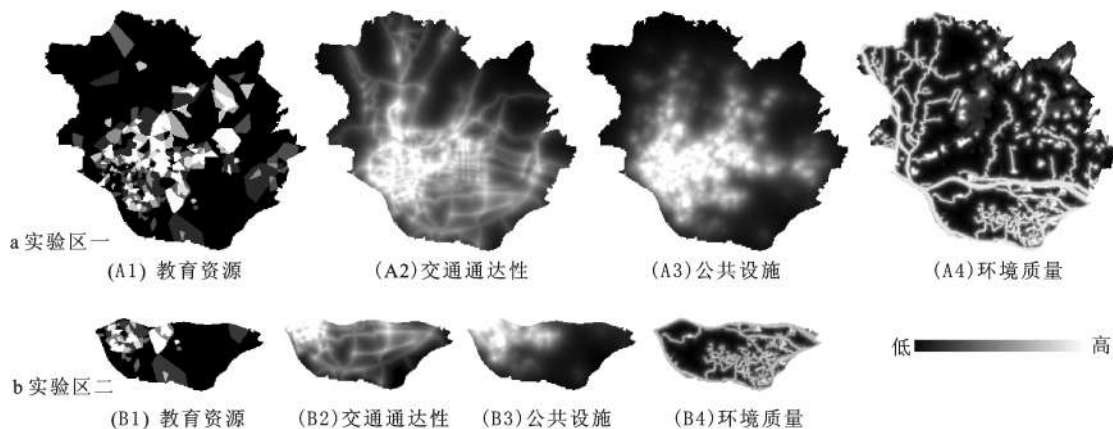


图2 居住影响因素

Fig.2 Impact factor on settlement

表1 不同类型家庭的数量及权重

Table 1 Number and weights of different family agents

Agent类型	实验区一		实验区二		影响因素权重			
	比例(%)	数量	比例(%)	数量	自然环境	交通通达度	教育资源	公共设施
低收入无教育需求	25	278330	22	65235	0.0764	0.5193	0.0489	0.3554
低收入有教育需求	12	133599	11	32617	0.0522	0.4934	0.1427	0.3117
中收入无教育需求	33	367396	33	97853	0.2240	0.3680	0.0399	0.3680
中收入有教育需求	16	178131	18	53374	0.1429	0.2857	0.2857	0.2857
高收入无教育需求	9	100199	10	29652	0.3742	0.2088	0.0427	0.3742
高收入有教育需求	5	55666	6	17791	0.2857	0.1429	0.2857	0.2857

作为每个居住格网可以容纳智能体数量的最大值。

2.3 案例实验

实验区一2006年居住格网数量为9 201,实验区二2006年居住格网数量为1 714,初始时按照1:1的比例生成与实验区家庭数量相等的智能体,每个居住格网分布数量相同、类型随机的智能体。采用常用的重力模型<sup>[1,7,8]</sup>作为检验标准,与本文模型的模拟效果进行对比。利用比率误差和平均偏离度<sup>[27]</sup>衡量模拟精度,比率误差绝对值越小,单个街道精度越高,平均偏离度值越小,总体模拟精度越高。

图3为实验一、实验二模拟迭代次数与偏离度关系图,不同的 $\theta$ 取值得到不同的偏离度曲线。从图3可以发现, $\theta$ 分别取值为0.8、0.7时,实验一、实验二分别取得较好的模拟精度,取 $T(T$ 为模拟运行次数) $=12\ 000$ 时刻模拟结果作为本文构建模型模拟的最终结果。实验一( $\theta=0.8$ )和实验二( $\theta=0.7$ ) $T=12\ 000$ 时刻模拟结果分别如图4所示。

从图4的模拟结果可知,实验一模拟的居住人

口密度呈现出从广州市老城区向周围递减的趋势,而实验二模拟结果呈现出研究区域人口密度从西北向东南递减的趋势,模拟结果所体现的分布形态均与两个实验区居住人口分布结构相符合。

实验区一和实验区二重力模型结构如式(14)、(15)所示:

$$P1_{xy}=1113321 \times (F_{xy}^{Envi})^{0.28} \times (F_{xy}^{Traf})^{0.55} \times (F_{xy}^{Convi})^{0.21} \times (F_{xy}^{Edu})^{0.47} \quad (14)$$

$$P2_{xy}=296522 \times (F_{xy}^{Envi})^{0.17} \times (F_{xy}^{Traf})^{0.38} \times (F_{xy}^{Convi})^{0.1} \times (F_{xy}^{Edu})^{0.34} \quad (15)$$

式中, $P1_{xy}$ 、 $P2_{xy}$ 分别为实验一和实验二在格网 $L_{xy}$ 的重力模型模拟值,其它参数含义同上。

重力模型和本文模型模拟得到的实验一、实验二格网总Agent数量汇总到所在街道,与统计年鉴数据进行对比,计算其比率误差(图5)及平均偏离度。由图5可知,对于实验一和实验二,本文模型模拟的大部分街道比率误差小于重力模型模拟的比率误差。本文模型在实验一和实验二的平均偏离度分别为22.6%、13.5%,二者对应低于重力模

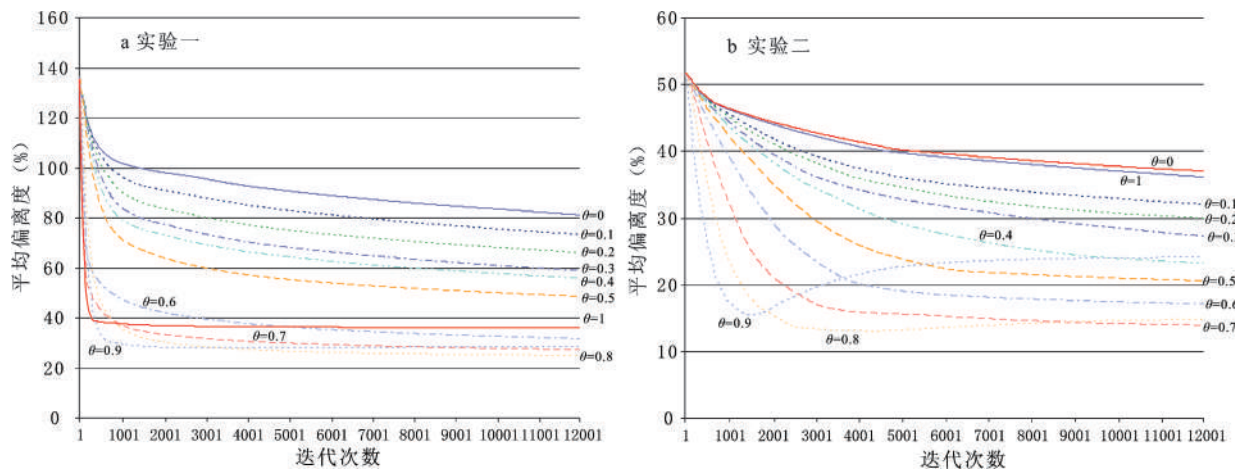


图3 模拟迭代次数与平均偏离度关系

Fig. 3 The relation between iteration and average deviation of different weight

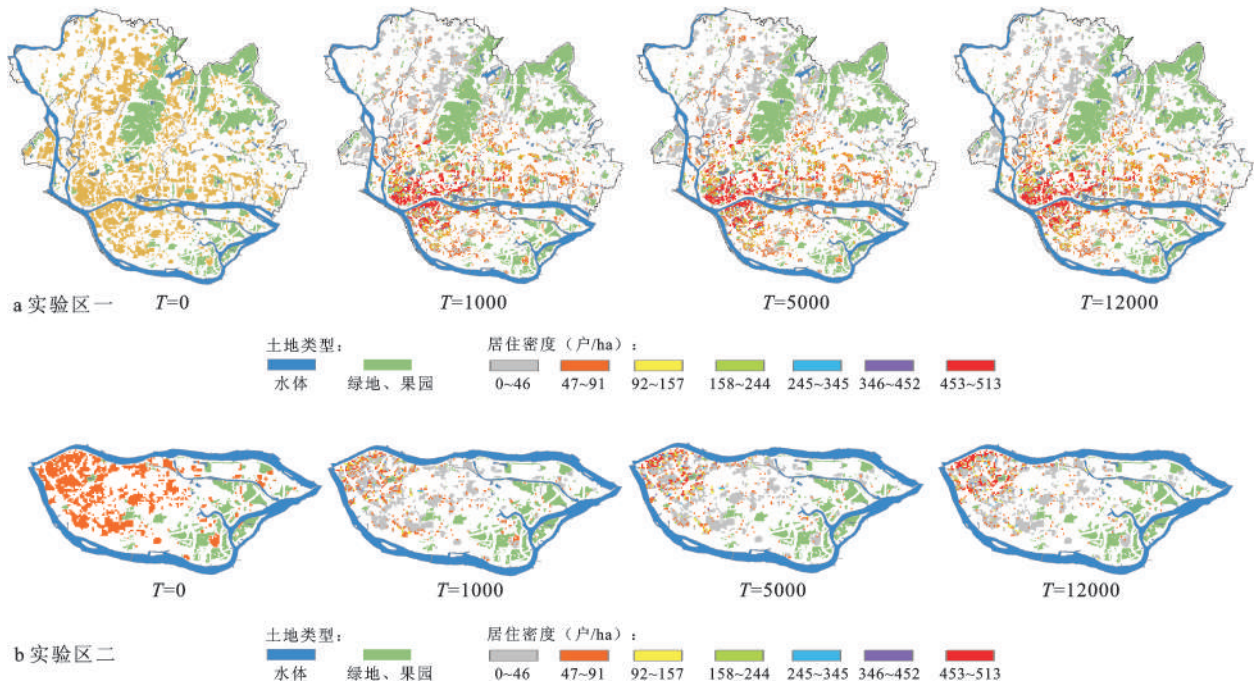


图4 不同时刻人口分布模拟  
 Fig.4 Simulation of population distribution at different time

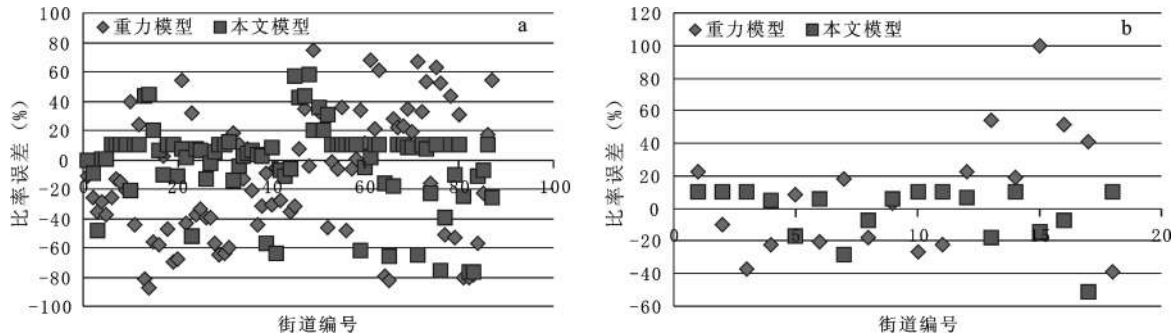


图5 本文模型与重力模型模拟比率误差分布  
 Fig.5 Ratio errors of gravity model and proposed model

型模拟结果的平均偏离度37.6%、29.6%，本文模拟精度(模拟精度=100%-平均偏离度，实验一86.5%、实验二77.4%)均高于重力模型模拟结果。综合分析可知，无论是对于单个街道(比率误差)还是总体(平均偏离度)而言，本文模型模拟结果均优于重力模型的模拟结果。

### 3 结论

本文分析了传统人口数据空间分布化方法存在的不足，提出了基于多智能体的城市人口分布模型。智能体在居住压力作用下，根据自身经济状况及偏好对居住影响因素进行评价并选择适合

的居住地进行搬迁，通过微观个体(家庭)的简单行为形成宏观的城市人口分布格局，实现了以“自下而上”的方式对城市人口分布进行模拟。

以两个面积及人口数量相差较大的区域作为实验案例，动态模拟了两个区域的人口分布。实验结果表明：基于多智能体的城市人口分布模拟模型在两个实验区均取得了较高的模拟精度(尤其是面积较小的实验区模拟精度达到86.5%)，且分布格局与现实相符合；这说明本文模型在中尺度(实验区一)及小尺度(实验区二)城市区域均能取得较好的模拟效果。从本文模型的构建机理而言，基于多智能体的城市人口分布模型适用于任

何尺度城市人口分布模拟;当然,对于更大尺度区域城市(如省乃至国家的城市群体)的人口分布模拟,由于智能体数量巨大(通常为 $10^6\sim 10^7$ ),对运算性能要求极高,则需要高性能计算的支持。

## 参考文献:

- [1] 廖一兰,王劲峰,孟 斌,等.人口统计数据空间化的一种方法[J].地理学报,2007,62(10):1110~1119.
- [2] 金 君,李成名,印 洁,等.人口数据空间分布化模型研究[J].测绘学报,2003,32(3):278~282.
- [3] 段学军,田 方.基于人居环境适宜性的市域人口增长调控分区研究[J].地理科学,2010,30(1):45~52.
- [4] 张洪岩,王 蕾,刘德赢.19世纪以来中国朝鲜族人口迁移分布及聚居区形成研究[J].地理科学,2011,31(9):1079~1083.
- [5] 左永君,何秉宇,龙 桃.1949~2007年新疆人口的时空变化及空间结构分析[J].地理科学,2011,31(3):358~364.
- [6] 卓 莉,陈 晋,史培军,等.基于夜间灯光数据的中国人口密度模拟[J].地理学报,2005,60(2):266~276.
- [7] 刘纪远,岳天祥,王英安,等.中国人口密度数字模拟[J].地理学报,2003,58(1):17~24.
- [8] YUE T X, Wang Y A, Chen S P. Numerical simulation of population distribution in China[J]. Population and Environment, 2003, 25(2): 141-163.
- [9] 吕安民,李成名,林宗坚,等.人口密度的空间连续分布模型[J].测绘学报,2003,32(4):344~348.
- [10] 杜国明,张树文.基于遥感的城乡人口分布模拟[J].遥感学报,2007,11(2):252~256.
- [11] 徐建刚,梅安新,韩雪培.城市居住人口密度估算模型的研究[J].遥感学报,1994,9(3):234~239.
- [12] 廖邦固,徐建刚,韩雪培,等.1990-2000年上海中心城区人口密度模拟与时空变化分析[J].华东师范大学学报(自然科学版),2008,4:130~139.
- [13] 黎 夏,叶嘉安,刘小平等.地理模拟系统:元胞自动机与多智能体[M].北京:科学出版社,2007.
- [14] 刘小平,黎 夏,叶嘉安,等.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[J].中国科学(D辑:地球科学),2006,36(11):1027~1036.
- [15] 刘小平,黎 夏,陈逸敏,等.基于多智能体的居住区位空间选择模型[J].地理学报,2010,65(6):695-707.
- [16] Benenson I, Omer I, Hatna E. Entity-based modeling of urban residential dynamics: the case of Yaffo, Tel Aviv[J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 2002, 29: 491-512.
- [17] 陶海燕,黎 夏,陈晓翔.基于多智能体的居住空间格局演变的真实场景模拟[J].地理学报,2009,64(6):665~676.
- [18] 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.
- [19] 肖 洪,田怀玉,朱佩娟,等.基于多智能体的城市人口分布动态模拟与预测[J].地理科学进展,2010,29(3):347~354.
- [20] 马 永.基于GIS与多智能体的北京市人口分布预测研究[D].北京:首都师范大学,2011,5.
- [21] 魏 芳.北京人口分布CA/MAS仿真模型[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2007,3.
- [22] 赵 元.基于GPU并行技术的地理模拟与优化实现研究[D].广州:中山大学,2011.
- [23] Mcfadden Daniel. Conditional logit analysis of qualitative choice behavior[M]//Zarembka P. Frontiers in Econometrics. New York: Academic Press, 1974: 105-142.
- [24] 广州市统计局.广州统计年鉴2007[M].北京:中国统计出版社,2007.
- [25] 广州市统计局.2006年广州市国民经济和社会发展统计公报[R/OL]. [http://www.gzstats.gov.cn/tjgb/qstjgb/200812/t20081215\\_2221.htm](http://www.gzstats.gov.cn/tjgb/qstjgb/200812/t20081215_2221.htm).
- [26] 徐建华.现代地理学中的数学方法[M].北京:高等教育出版社,2002.
- [27] 唐华秀,马劲松,战金艳,等.江苏省人口数据离散化研究及其精度分析[J].长江流域资源与环境,2008,17(4):506~510.

## Agent-based Urban Population Distribution Model

KANG Ting-jun<sup>1,2</sup>, ZHANG Xin-chang<sup>1</sup>, ZHAO Yuan<sup>3</sup>, WANG Hai-ying<sup>1</sup>, ZHANG Wei<sup>1</sup>

(1. School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou, Guangdong 510275, China;

2. Foshan Urban Planning Surveying Design and Research Institute, Foshan, Guangdong 528000, China;

3. College of Information, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510642, China)

**Abstract:** The acquisition of detailed population distribution has become an important research topic in the fields of geography and its relative disciplines. Urban population distribution is of significance in the correla-

tion analysis among economies, environment protection, resources utilization and urban planning. In recent years, grid transformation of population data based on GIS and RS technologies has become the focus of population spatial distribution. Many transformation models (digital population model, kernel estimate model, gravity model, etc.) and high resolution RS images (ETM image, land use data and aerophotogrammetry image, etc.) are used. The existing researches mainly use the top-down models. The applications of them are limited since there are too many parameters to determine or too complex to execute. Urban population distribution is a typical bottom-up macroscopic phenomenon caused by individual migration at the microscopic level. Multi-agent technology provides a new solution for such problems. It has been widely used in the field of land-use simulation, land-use planning and residential segregation. This article analyzes the importance of spatial distribution of urban population data. To overcome the disadvantages of traditional methods, a framework based on multi-agent system and GIS is proposed to model the spatial distribution of urban population data. This framework consists of external environment controller, housing infrastructure, multi-agent and rule. Impact factors, such as traffic accessibility, education, environment and living facility have been chosen and quantified by GIS. In the framework, each agent represents a family. Within the consideration of economic conditions and school-age children, agents are divided into six categories. The impact factor weights in each category are determined by AHP. Residential land has been rasterized into regular residential cell in initial condition; each residential cell has the same amount of agents. Whether an agent migrates or not depends on the residential pressure, and the probability of leaving its current location increases monotonically with the residential pressure. Under the residential pressure of socio-economy, every agent decides whether to leave the residential location or not. If an agent decides to leave, it must select the optimal location to migrate according to the constraints such as incomes and perception of the environment. If the target location has been full of agents, the migrating agent must consult with every agent living in the target location. Exponential function is introduced to represent the probability of successful consultation, which depends on the utilities in target location of two consulting agents. The population distribution is formed by means of decision-making, consulting and migration of agents. The proposed model is applied to simulating the population distribution of two districts in Guangzhou, Guangdong Province, China. Compared with the gravity model, the model proposed in this article achieves higher accuracy and is closer to the actual distribution pattern. In a conclusion, the simulation model based on multi-agent technology can provide a new method of modeling urban population distribution.

**Key words:** population distribution; simulation; multi-agent; Guangzhou