

文章编号: 1007-4619(2007)02-0252-05

基于遥感的城乡人口分布模拟

——以松原市为例

杜国明^{1,2}, 张树文¹

(1. 中国科学院 东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130012; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100031)

摘 要: 利用遥感数据模拟基于居民地的人口空间分布, 须解决两大难题: ①居民地类型、面积、位置的精确获取; ②居民地类型、面积与人口数量间的关系。本文根据地理意义和数学意义, 对经典的城市人口-面积异速生长模型进行扩展, 推导出城乡人口-面积统一模型。进而以松原市为例, 以 1:5 万地形图为辅助数据, 建立居民地分类体系, 利用 ETM 影像提取居民地信息, 在以上模型的基础上采用“城乡人口分割”算法模拟城乡人口的空间分布。本研究可为中尺度人口分布的理论与应用研究借鉴。

关键词: 城乡人口; 空间模拟; 遥感**中图分类号:** TP79 **文献标识码:** A

Simulating Urban-rural Population Distribution Based Remote Sensing: Taking Songyuan City As a Case Study

DU Guoming^{1,2}, ZHANG Shuwen¹

(1. Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology CAS, Jilin Changchun 130012, China;

2. Graduate University Chinese Academy of Sciences, Beijing 100031, China)

Abstract There are two main problems for simulating distribution of population using RS data: ① how to obtain information of residential type, area and position; ② what relation between residential type, area and position and amount of population. Basing on geographical sense and mathematical sense, this paper extends the model of allometric growth of urban population-area study works out model of rural and urban population-area. Then, taking Songyuan city as a case, using 1:50000 relief map as assistant data, building up classification system of residential points, using the method of “detaching urban-rural population” based on above the models, this paper uses ETM images to extract information of residential area and simulates population distribution in the urban and rural region. The method used in this paper can be referenced by the theoretic and applied researches for middle-scale population distribution.

Key words: urban-rural population; spatial simulating; RS

1 引 言

人口地域分布是人口地理学研究的核心问题。近年来, 基于 RS 和 GIS 的人口空间模拟研究成为人口地域分布研究的热点, 并可以分为人口地域分布的宏观研究和微观研究两个方面。宏观方面研究集中

于模拟和探讨大尺度的人口分布格局, 其结果多以一定空间分辨率的栅格数据来表示^[1-4]; 微观方面研究集中于模拟和探讨城市内部及边缘区的人口分布格局, 一般以高分辨的遥感影像或街道办事处级的人口统计数据为数据源, 以矢量数据对结果加以表示^[5-8]。对于中观层次的人口分布研究, 如城乡人口分布, 更多的是基于统计资料, 没有落实到具体的空

收稿日期: 2006-02-23; 修订日期: 2006-06-23; 中国知网 Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>**基金项目:** 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (编号: KZCX2-SW-320-1)。**作者简介:** 杜国明 (1978—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为地理信息系统和遥感应用。E-mail: nmgdgm@126.com。

间上,成为人口地理学研究中的缺憾。

正如周一星教授所言,“城镇人口”概念在中国十分混乱^[9]。不同人士在表征城市规模时所使用的城市人口包括“市域户籍总人口”、“市区户籍总人口”、“市区户籍非农业人口”等多种指标,参差不齐,大相径庭。而实际上,在中国现有行政区划方式和人口统计方法的情形下,无论哪种指标都与作为地域实体的城市范围内的人口数有一定的差异。这给与之相关的研究造成极大的障碍。

本文以松原市为研究区,以 ETM 影像、1:5 万地形图和统计年鉴为数据源,以“面向对象”的人口分配原则,采取城乡“分割”算法,模拟基于居民地的人口空间分布,以对中尺度人口分布研究初作探讨,特别是为城市地域实体人口数量计算提供可参之策。

2 理论模型

2.1 问题分析

松原市地处松嫩平原腹地,人口聚集居住,居民地多呈团块状。居民地是人们居住的场所,是存在居住人口的必要条件。因此,要高精度模拟城乡人口空间分布,须解决两大核心问题:①居民地类型、面积、位置的精确获取;②居民地类型、面积与人口数量间的关系。

2.2 城市人口面积的异速生长模型及其推广

在区域城市化过程中,城市人口和建设用地区积之间通常具有一定的数理规则,即异速生长关系和分形几何结构^[10],满足如下幂指数模型^[11, 12]:

$$A = a_1 P^{b_1} \quad (1)$$

式中, P 为城市人口数量; A 为城区面积; a_1 为常数; b_1 为指数。

该模型可以描述两类地理现象:①描述相关增长的异速增长,解释人口与城市随时间序列的非同速增长问题;②表征人口规模城市位序的关系,描述城市人口面积的统计分布。本文对该模型的后两者进行探讨。

在数学上,如果要求两个变量成比例,它们的量纲必须是一致的,“量纲”的本质与“维数”(dimension d)有关,即两个变量的维数必须一致才能形成比例。对于几何体,长度 L 为 1 维,面积 S 为 2 维,体积 V 为 3 维,所以它们间的比例关系可以表示为:

$$L \propto S^{1/2} \propto V^{1/3} \quad (2)$$

故, L 、 S 、 V 之间存在异速生长关系。因此,可以将幂

指数的这个几何意义引入人口面积异速生长模型的分析。城市面积 A 是 2 维的,所以可以通过 b_1 的大小来考察城市人口数量的维度。

当 $b_1 < 1$ 时,表示人口数量的维度高于面积的维度,即随着城市面积的扩张,人口数量具有比城市面积更快的增长速度,说明城市人口密度相应提高;

当 $b_1 = 1$ 时,表示人口数量的维度等于面积的维度,人口数量与城市面积同速增长,说明城市的人口密度保持不变。上述的幂指数模型变为线性模型。

当 $b_1 > 1$ 时,表示人口数量的维度低于面积的维度,人口数量的增长速度慢于城市的扩张速度,说明随着城市的扩张人口密度降低。

大量研究证明^[13],对于城镇,除了个别情况 $b_1 < 1$ 之外,在绝大多数情况下 $b_1 > 1$,即人口数量的维度大于城市面积的维度,大于 2 维。

另外,可以通过该模型的几何意义和地理意义来考察该模型的适用范围。对于农村居民地,居住房屋的类型为庭院式,居民地内每增加一户,就会增加一套宅基地。而中国各省区对于农村宅基地都有具体的面积标准。显然,人口数量与居民地面积之间存在着线性关系。随着经济的发展,居民地内的居民出现了产业结构上的分化,第二、第三产业人口出现,并导致居住的房屋类型向公寓式转化,人口密度开始增加,农村景观逐渐变为城市景观。这时,就可以用城市人口面积的幂指数模型来描述该居民地的人口增长与面积的扩张关系。在中国,较为发达的镇、县城及以上居民地可以看作是城市;其余居民地可以看作是农村居民地。

2.3 城乡人口面积统一模型

根据式 (1),求其反函数,可表示为:

$$P = e^{\frac{-\ln A}{b_1}} e^{\frac{\ln A}{b_1}} \quad (3)$$

令 $a = e^{\frac{-\ln A}{b_1}}$, $b = 1/b_1$, 则上式可以进一步表示为:

$$P = aA^b \quad (4)$$

式中, P 为城市人口数量; A 为城区面积; a 为常数; b 为指数。

可见,式 (1)与式 (4)具有形式上的不变性。

由前文分析可知,农村居民地的人口数量与面积是同维的,满足线性关系,则一个区域内的农村人口数可表示为:

$$P_r = D_r \sum_i A_{ri} \quad (5)$$

式中, P_r 为农村人口数; D_r 为农村居民地人口密度; A_{ri} 为第 i 个农村居民地的面积。

城镇人口数可根据式 (4) 计算:

$$P_u = a \sum_j A_{uj}^b \quad (6)$$

式中, P_u 为城镇人口数; A_{uj} 为第 j 个城镇居民地的面积; a 、 b 为参数。

一个区域内的人口数是城镇人口与农村人口之和。所以, 总人口数 (P) 可表示为:

$$P = a \sum_j A_{uj}^b + D_r \sum_i A_{ri} \quad (7)$$

3 研究方法

3.1 研究思路

本文以松原市为例进行方法性的探讨, 以乡镇为基本统计单元。研究区范围包括松原市宁江区和前郭尔罗斯县的前郭镇, 共计 23 个乡镇、街道办事处。其中, 13 个街道办事处全部位于松原市建成区内, 另有 3 个乡镇部分在建成区内, 部分在建成区外, 含有农村居民地。研究区内的居民地, 只有松原市建成区可视为城市, 其余皆为农村居民地。所以研究中, 在提取居民地信息和分乡镇统计的基础上, 基于上述线性模型, 根据人口统计数据, 首先计算农

村居民地人口密度; 进而依此估算含有建成区的乡镇的农村居民地人口数据, 最后在总人口数中减去农村人口就是建成区范围内的人口数, 此即为“城乡人口分割”算法。另外, 对于农村居民地, 由于受到地形条件、经济发展水平、思想观念等因素的影响, 居民地内的房屋集聚状况有很大的差异, 因此, 其人口密度亦有较大的差别。所以, 对于农村居民地, 也有必要区分类型。

3.2 数据来源与处理

本研究的数据包括 Landsat7 的 ETM 影像数据 (2001 年 8 月), 分辨率为 14.25m; 1:5 万地形图 (主要是 1990 年代的); 吉林省松原市宁江区国民经济统计资料 (2003 年) 和松原统计年鉴 (2005 年)。研究中, 首先根据地形图对 ETM 影像进行纠正, 进而以 ETM 影像为基准、以地形图为参照, 根据居民地分类和解译标志提取居民地信息。

3.3 居民地类型的划分与解译标志

居民地的类型分为城镇和农村居民地两大类, 农村居民地又分为紧密型和松散型。具体的分类、含义和影像特征见表 1。在建立解译标志的基础上, 参考地形图, 对 ETM 影像进行解译, 提取居民地信息 (图 1)。

表 1 居民地分类表

Table 1 Classification of residential area

类型	代码	含义	影像特征
城镇	51	指城市及县镇以上建成区用地, 居住房屋以公寓式楼房为主	几何形状特征明显, 边界清晰; 青灰色, 杂有白色或杂色栅格状斑点; 影像结构粗糙; 道路在内部穿插, 并呈辐射状向外延伸
农村居民地	紧密型	指城镇以外居民地, 房屋排列有序、紧凑; 基本没有公寓式楼房	几何形状特征明显, 边界清晰; 青色, 灰色; 一般只有一两条道路向外延伸, 没有明显街区特征
	松散型	指城镇以外居民地, 房屋排列无序、零散, 居住房屋全部为庭院式	几何形状不明显, 边界模糊; 青色、灰色, 杂有其他地类色调; 影像结构粗糙; 无明显道路

3.4 参数计算

在居民地信息提取的基础上, 分乡镇统计居民地类型和面积。对于非城区的 7 个乡镇分别建立如下方程:

$$P_i = D_{r1} \sum A_{521} + D_{r2} \sum A_{522} \quad (8)$$

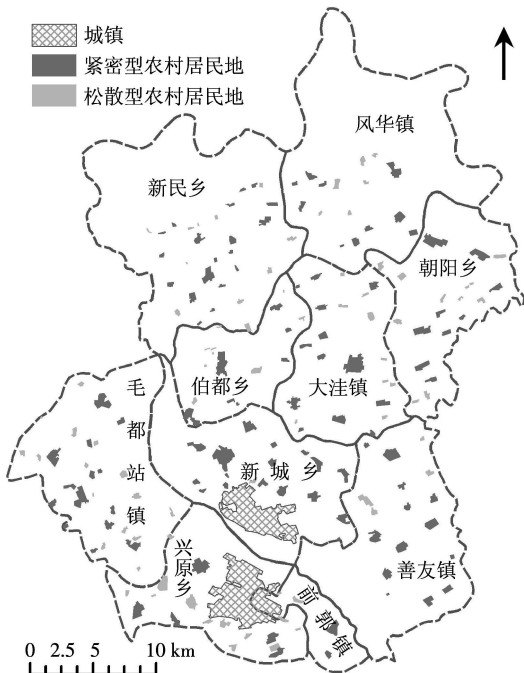
式中, P_i 为某乡镇人口数; $\sum A_{521}$ 和 $\sum A_{522}$ 分别为该乡镇紧密型和松散型农村居民地总面积; D_{r1} 和 D_{r2} 为待求常数, 分别表示紧密型和松散型农村居民

地人口密度。根据这 7 个方程, 在 SPSS11.0 支持下进行多元线性回归分析, 计算 D_{r1} 和 D_{r2} , 分别为 3.738×10^{-3} 和 2.647×10^{-3} 人 / m^2 , 其相关系数 r 高达 0.99。

对于涉及建成区的街道办事处和乡镇, 将总人口数加和 (P), 可以建立如下方程:

$$P = P_u + D_{r1} \sum A_{521} + D_{r2} \sum A_{522} \quad (9)$$

式中, P_u 为建成区人口。



注:街道办事处界线图中没有表示

图 1 居民地分布图

Fig 1 Distribution map of residential area

$$R_{ri} = (P_i - \hat{P}_i) / P_i * 100\% \quad (10)$$

$$D'_{52} = D_{52} / (1 + R_{ri})$$

式中, R_{ri} 为人口回归值的相对残差; P_i 为人口统计值; \hat{P}_i 为人口回归值; D_{52} 为 D_{r1} 或 D_{r2} ; D'_{52} 为 D_{r1} 或 D_{r2} 的修正值。

4 结果与讨论

由回归分析和表 2 可见,对于非城区的乡镇,总人口数与农村居民地面积之间存在着密切的相关关系;人口回归值与人口统计值间的相对误差在 $[-8.05\%, 4.16\%]$ 的范围内。这证明基于高分辨影像提取居民地信息,适当划分居民地类型,并依此计算居民地人口密度的方法切实可行。但个别乡镇的相对误差较大(如伯都乡为 -8.05% , 风华镇为 -7.91%),说明本研究中还存在一定的不确定性,可以概括为以下方面:①人口统计中的误差;②居民地面积提取的误差,特别对于那些面积较小、零散分布的居民地,提取中面积误差尤大;③居民地类型的多样性及其与人口密度的非完全映射关系。本文研究区较小,且地处平原,可视为相对的均质地域,农村居民地划分两种类型尚能反映出其内部人口密度差异。对于地理环境较为复杂的区域,居民地的类型必然也复杂多样,在居民地分类体系及模型构建方面须进一步加以研究。另外,定量遥感是遥感应用发展的主要趋势,因此,今后的研究中,当加强遥感影像光谱特征与人口密度间关系的定量研究^[14]。

3.5 结果修正

根据 D_{r1} 和 D_{r2} 的计算结果来计算各乡镇的人口回归值和相对误差。然后根据相对误差对这两个系数进行修正,以保证各个乡镇空间模拟的人口数与人口统计数相等(表 2)。相对误差和参数 D_{r1} 和 D_{r2} 修正计算公式为:

表 2 农村居民地面积、人口数及相关统计

Table 2 Rural resident area, population and relative statistics

乡镇	乡村居民地面积 /m ²		人口数		相对误差 /%	修正人口密度 /(10 ⁻³ 人 /m ²)	
	紧密型	松散型	统计值	回归值		D' ₅₂₁	D' ₅₂₂
伯都乡	2915089.69	861710.70	14331	13178	-8.05	4.065	2.879
善友镇	5070122.33	1063785.76	21992	21768	-1.02	3.776	2.674
大洼镇	5526411.75	1152801.21	22763	23709	4.16	3.589	2.541
新民乡	3779657.76	1271045.91	18305	17493	-4.44	3.912	2.770
朝阳乡	4286618.37	1866792.30	20746	20965	1.05	3.699	2.619
毛都站镇	5737369.93	2193885.91	26391	27254	3.27	3.620	2.563
风华镇	2974678.03	945572.43	14793	13622	-7.91	4.059	2.874

注:(1)人口统计值为 2003 年各乡镇统计数;

(2)13 个街道办事处和松原市建成区涉及的 3 个乡镇紧密型和松散型农村居民地面积分别为 11872704.26m²和 3808915.98m²,建成区面积为 32122274.88m²,人口统计数为 448273 人。

既含有城市建成区又含有农村居民地的乡镇、街道,其农村居民地内的人口密度与作为城市腹地的周边乡镇的农村居民地内的人口密度必然非常接

近。据此,将既含有城市又含有农村居民地的乡镇、街道进行“城乡人口分割”,可以比较准确地计算出城市建成区范围内的人口数。2003 年,本文研究区

内非农业人口数为 380181 人,按照以往做法,这一数字将姑且作为城市人口数来使用。但本研究得出的松原市建成区内的人口数为 434651 人,与上述数据有较大差距。事实上,由于各个城市辖区的范围差别较大,辖区内的人口职业构成更是千差万别,在中国行政区划特别是市辖区行政区划不断调整的情况下,依据市辖区非农业人口数这一统计指标作为城市人口数仅是不得已而为之的权宜做法。本文“城乡人口分割”算法,可作为另一种参照。松原市建成区被松花江隔成南北两块,且总面积较小,没有明显的城乡过渡带。对于城市规模较大的城市,采用本文的研究方法时,必须着重考虑城乡过渡带内人口密度与城市及农村间的关系。

基于“面向对象”的人口分配原则,以高分辨遥感影像为基本数据源,采取“城乡人口分割”算法,以人口统计数据为总量控制来模拟人口分布,既可以保证人口数量上的一致性,又可以将人口统计数据展布于空间之上。人口空间模拟的结果便于防洪、大型工程移民等实际工作的需要。

5 结 论

(1) 城市人口面积的异速生长模型,除了可以解释城市人口与面积的异速增长关系和位序关系,还可以通过幂指数函数的数学意义来进一步考察其地理意义,模型适用范围可由城市扩展至农村居民地。这是“城乡人口分割”算法的理论基础。

(2) 由于受到地形条件、经济发展水平、思想观念等因素的影响,农村居民地内的房屋集聚状况有很大的差异,并导致其人口密度亦有较大的差别。适当划分农村居民地类型是精确模拟人口分布的必要条件。

(3) 基于高分辨率影像和“城乡人口分割”算法,以人口统计数据为总量控制来模拟人口分布,可以既保证人口数量上的准确性,又达到较高的空间定位精度。本方法可以用于中尺度人口分布的理论和应用研究。定量遥感是遥感应用发展的主要趋势,今后当加强遥感影像光谱特征与人口密度间关系的定量研究。

致 谢 本研究曾得到张平宇研究员的指点,谨表谢意!

参 考 文 献 (References)

[1] Yue T X, Wang Y A, Liu J Y, et al Surface Modelling of

Human Population Distribution in China [J]. Ecological Modelling, 2005, 181: 461-478

[2] Yang X H, Jiang D, Wang N B, et al Method of Pixelizing Population Data [J]. Acta Geographica Sinica, 2002, 57(7): 70-75. [杨小映, 江东, 王乃斌等. 人口统计数据空间化的处理方法 [J]. 地理学报, 2002, 57(7): 70-75.]

[3] Tian Y Z, Chen S P, Yue T X, et al Simulation of Chinese Population Density Based on Land Use [J]. Acta Geographica Sinica, 2004, 59(2): 283-292. [田永中, 陈述彭, 岳天祥等. 基于土地利用的中国人口密度模拟 [J]. 地理学报, 2004, 59(2): 283-292.]

[4] Liu J Y, Yue T X, Wang Y A, et al Digital Simulation of Population Density in China [J]. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(1): 17-24. [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.]

[5] Feng J Modeling the Spatial Distribution of Urban Population Density and Its Evolution in Hangzhou [J]. Geographical Research, 2002, 21(5): 635-646. [冯健. 杭州市人口密度空间分布及其演化的模型研究 [J]. 地理研究, 2002, 21(5): 635-646.]

[6] Feng J, Zhou Y X. The Growth and Distribution of Population in Beijing Metropolitan Area (1982-2000) [J]. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(6): 903-916. [冯健, 周一星. 近 20 年来北京都市区人口增长与分布 [J]. 地理学报, 2003, 58(6): 903-916.]

[7] Lu A M, Li C M, Lin Z J, et al Modeling Urban Population Density with Remote Sensing Imagery [J]. Acta Geographica Sinica, 2004, 59(6): 158-164. [吕安民, 李成名, 林宗坚等. 基于遥感影像的城市人口密度模型 [J]. 地理学报, 2004, 59(6): 158-164.]

[8] Liu X H. Estimation of the Spatial Distribution of Urban Population Using High Spatial Resolution Satellite Imagery [D]. Santa Barbara: University of California, 2003.

[9] Zhou Y X. The Primary Scientific Issue of Urban Research in China is the Correctness of Basic Urban Concepts [J]. Urban Planning Forum, 2006, (1): 1-5. [周一星. 城市研究的第一科学问题是基本概念的正确性 [J]. 城市规划学刊, 2006, (1): 1-5.]

[10] Lee Y. Allometric Analysis of the US Urban System: 1960-1980 [A]. Environment and Planning A [C]. 1989, 21(4): 463-476.

[11] Naroll R S, Bertalanffy L von. The Principle of Allometry in Biology and the Social Sciences [J]. General Systems Yearbook, 1956, 1: 76-89.

[12] Stewart J Q, Wamts W. Physics of Population Distribution [J]. Journal of Regional Science, 1958, 1: 99-123.

[13] Chen Y G, Xu Q H. Studies on the Fractal Geometric Model of Allometric Growth Relationships between Area and Population of Urban Systems [J]. Journal of Xinyang Teachers College, 1999, 12(2): 198-203. [陈彦光, 徐秋红. 区域城市人口面积异速生长关系的分形几何模型 [J]. 信阳师范学院学报 (自然科学版), 1999, 12(2): 198-203.]

Liolo J. Analyzing Urban Spatial Structure with GIS: Population Surface Models [D]. 2005, Milwaukee: University of Wisconsin