

# 北京城市人口空间分布特征的 GIS 分析

匡文慧<sup>1</sup>, 杜国明<sup>2\*</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 东北农业大学资源与环境学院, 哈尔滨 150030)

**摘要:** 城市人口空间分布特征分析是城市化影响下的局地尺度人类-环境(Human-Environment)相互作用研究的一个重要内容。本研究以第五次人口普查数据, 采用 GIS 网格计算方法, 模拟北京市 2000 年人口空间分布, 并从宏观、微观、中观 3 个不同层次分析其空间分布与变异特征。研究表明, 从宏观角度分析, 各环路间人口密度具有较大的差异, 自内向外整体上呈现先增加后减少的态势; 从微观角度分析, 人口分布具有高度的集聚性和空间自相关性, 小尺度变异在全局变异中所占的比重较小, 表现出良好的整体结构特征; 从中观角度分析, 人口密度从城市中心向外围呈现阶段波动性递减特征, 在 0~8.5、8.5~13.5、13.5~33.0km 范围内分别符合抛物线模型, 各段内人口密度在小距离增加后表现出长距离的减少趋势。城市空间结构分布所呈现的“单中心波浪散射”布局模式, 显著区别于国外经典的城市人口空间结构。

**关键词:** 城市; 人口密度; 变异特征; 北京; 空间格局

**DOI:** 10.3724/SP.J.1047.2011.00506

## 1 引言

人口数据是地理科学、灾害学、全球变化科学等研究中最为常用的基础信息<sup>[1-3]</sup>。人口统计数据的空间与时间分析, 是从数据挖掘到知识发现的深化, 是从随机取样到有序现象和规则的进步, 是从低级的复杂走向高级的简单的升华<sup>[4-5]</sup>。同时城市人口空间分布特征分析是在局地尺度研究城市内部空间结构及人类-环境相互作用的一个重要内容<sup>[6-7]</sup>。近年来, 以人口统计数据为基础, 国内外学者开展了大量的城市内部空间结构研究<sup>[8-13]</sup>。北京市作为中国首都、具有重要世界影响的国际性城市, 其内部结构更为广大学者所关注。黄荣清研究发现 1982 年以来, 北京城市化步伐加快, 城市中心区人口减少、人口分布趋向于均等化, 外围区人口迅速增长、地域人口密度差别很大, 郊区人口缓慢增长, 人口分布向单极集中<sup>[14]</sup>。袁长丰等认为 1982 - 2000 年北京市中心区范围扩大, 其人口密度显著下降, 近郊区人口大量增加, 城市人口分布出现明显的郊区化特点<sup>[15]</sup>。冯建、周一星研究发现相

对于 1982、2000 年北京市的社会空间结构则趋于复杂, 主要以同心圆的方式组合, 也伴有多核心和扇形结构, 异质性的特征十分突出<sup>[16]</sup>。马清裕、张文尝认为, 北京市居住区空间以沿各环路圈层扩展、沿向外辐射主干道带状延伸及在现代产业集聚区周边扩展为基本特征, 而且居住区类型日益多样化, 分布趋向区域化<sup>[17]</sup>。这些研究分别从不同角度对北京市人口分布状况进行了探讨, 但缺乏细致而全面的刻画。本文以 2000 年北京市人口普查数据、航空影像等多源数据, 采用 GIS 方法从宏观、微观、中观 3 个不同尺度分析北京市人口分布特征, 以期认识特大型城市人口分布的一般规律。在第六次人口普查数据即将公布之际, 深入分析 2000 年人口分布状况, 可为研究北京市 2000 - 2010 年人口分布格局的变迁提供科学依据。

## 2 研究区数据源与方法

### 2.1 研究区背景与数据

北京是全国的政治、文化中心和国际交往的枢

收稿日期: 2011 - 03 - 14; 修回日期: 2011 - 07 - 10.

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(40801059); 国家自然科学基金青年基金项目(40901224); 中国博士后科学基金项目(200902366)。

作者简介: 匡文慧(1978 -), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事土地变化科学、城市遥感应应用研究工作。

E-mail: kuangwh1978@sina.com

\* 通讯作者: 杜国明(1978 -), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为土地利用与人地关系。E-mail: nmugdgm@126.com

组,有着 3000 余年的建城史和 850 余年的建都史,是一座著名的历史文化名城。首都北京位于华北平原西北边缘,市中心位于 N39°54',E116°25'。全市南北跨纬度 1°37',东西跨经度 2°5'。北京为暖温带半湿润大陆性季风气候,夏季炎热多雨,冬季寒冷干燥,春、秋短促,年平均气温 10~12℃。全市土地总面积 1.6 万余 km<sup>2</sup>。截至 2008 年底,全市辖 14 个市辖区、2 个县,常住人口 1 695 万人。本文以 2000 年街道(乡镇)人口密度高于 1 000 人/km<sup>2</sup> 的区域为研究区,涉及东城区、西城区、石景山区、宣武区、崇文区、朝阳区、海淀区、昌平区、通州区、门头沟区、丰台区、大兴县,总面积为 1 336.40km<sup>2</sup>,常住人口 883.36 万人。

北京城市发展规划“两轴一两带一多中心”的城市空间结构。两轴:指沿长安街的东西轴和传统中轴线的南北轴。两带:指包括通州、顺义、亦庄、怀柔、密云、平谷的“东部发展带”和包括大兴、房

山、昌平、延庆、门头沟的“西部发展带”。多中心:指在市域范围内建设多个服务全国、面向世界的城市职能中心,提高城市的核心功能和综合竞争力,包括中关村高科技园区核心区、奥林匹克中心区、中央商务区(CBD)等。

本研究数据包括北京市 2000 年第五次人口普查数据,城市乡镇界线、交通道路基础地理信息数据,以及城市居住建筑与楼层分布数据。城市居住建筑与楼层分布影像数据主要来源于 2000 年航空影像图,分辨率 0.5m。在 GIS 支持下,应用人机交互方法通过高分辨率航空影像的色彩,纹理、形态等信息识别城市居住建筑用地,并开展大量的城市野外调查,验证了城市建筑与楼层分布空间信息(图 1)。评价结果表明,城市居住建筑分布信息提取综合精度达到 95%以上,楼层数判读综合精度达 93%以上。

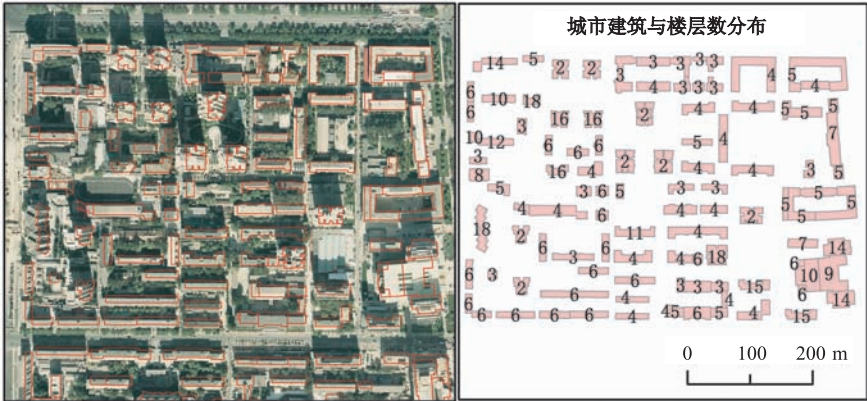


图 1 航空像片判释的城市居住建筑与楼层分布图

Fig. 1 Urban residential buildings and their floor distribution based on airphoto images

2.2 研究方法步骤

本文分析的宏观尺度为交通环路间区域,中观尺度为 500m 间距的同心圆环,微观尺度为 300m 规则格网。这些分析单元均是打破行政界线的,因此,需要对原始的人口统计数据进行空间化处理。空间化处理的基本思路首先是将各街道办事处的人口数按照居住建筑物的建筑面积平均赋予各所属居住建筑物,再通过空间叠加的形式分别赋予各分析的基本单元,并计算其人口密度(即该区域内的人口数据除以土地面积),以作为后续分析的依据。人口统计数据空间化处理的步骤如下:

(1)根据居住建筑物的分布及楼层数数据,形

成建筑物图层,计算各房屋占地面积及建筑面积。

(2)依据行政区划代码将人口普查统计数据与行政区划图相关联。

(3)采用面插值法实现人口普查数据的空间化。将居住建筑物图层与行政区划图层进行空间叠加,统计每一街道内居住房屋建筑面积,并依此计算各街道内居住建筑物人口密度,计算公式如下:

$$D_i = P_i / A_i \tag{1}$$

式中, $D_i$  代表第  $i$  个街道内居住建筑物人口密度; $P_i$  代表第  $i$  个街道人口数; $A_i$  代表第  $i$  个街道内居住建筑物的总建筑面积。故此可最大限度地消除

非居住用地对街道人口密度值的影响。

(4)宏观尺度即计算各环路间区域人口数和人口密度。根据北京市主要道路的中心线数据及研究区边界数据,生成包含核心区、二环路内、三环路内、四环路内、五环路内、五环路外的环路间区域数据,并与居住建筑物图层相叠加,分别计算各区域内的人口数和人口密度。人口数的计算公式为:

$$P_j = \sum_i A_{ij} \times D_{ij} \tag{2}$$

式中, $P_j$  代表第  $j$  个区域内的人口数; $A_{ij}$  代表落入第  $j$  个区域内的第  $i$  个街道的居住建筑物建筑面积; $D_{ij}$  表示落入第  $j$  个区域内的第  $i$  个街道的居住建筑物建筑人口密度。

(5)中观尺度即 500m 同心圆环人口数和人口密度计算。以北京市长安街与中轴线交叉点为中心、以 500m 间距构建多环状缓冲区,共计 66 圈,并用研究区边界数据将研究区外的缓冲区数据剪除,再将之与居住建筑物图层相叠加,分别计算各缓冲区内的人口数和人口密度(计算方法同上)。

(6)微观尺度即 300m 规则格网人口数和人口密度计算。以 300m 为边长生成覆盖研究区的规则格网数据,并将之与居住建筑物数据相叠加,分别计算各网格内的人口数和人口密度(计算方法同上)。

3 北京城市人口空间分布特征分析

3.1 宏观特征分析

由街道办事处人口密度分布图(图 2)所见,研究区人口分布存在较大的区域差异,平均人口密度为 0.66 万人/ $\text{km}^2$ ,根据各街道人口密度情况进行分级,统计结果见表 1。北京市人口密度最高的街道为宣武区的椿树街道,高达 5.7 万人/ $\text{km}^2$ 。若以长安街与北京市中轴线的交叉点为市中心,则椿树街道位于市中心的西南侧 2km 处。级别为 1 级的区域面积占研究区总面积的 0.08%,人口占总数的 0.85%;级别为 2 级的区域面积占研究区总面积的 1.16%,人口占总数的 5.84%,平均人口密度为 3.32 万人/ $\text{km}^2$ ;级别为 3 级的区域面积占研究区总面积的 9.23%,人口占总数的 33.31%,平均人口密度为 2.39 万人/ $\text{km}^2$ ;级别为 4 级的区域面积占研究区总面积的 12.01%,人口占总数的 26.89%,平均人口密度为 1.48 万人/ $\text{km}^2$ ;级别为 5 级的区域面积占研究区总面积的 77.52%,人口

则仅占总数的 33.30%,平均人口密度为 0.28 万人/ $\text{km}^2$ ,远低于其他区域。

表 1 北京市不同级别人口密度统计表  
Tab. 1 Population density statistics from different grades in Beijing proper

密度级	分级依据 (万人/ $\text{km}^2$ )	面积 ( $\text{km}^2$ )	人口数 (万人)	人口密度 (万人/ $\text{km}^2$ )
1	>4.0	1.01	5.78	5.70
2	3.0~4.0	15.56	51.61	3.32
3	2.0~3.0	123.35	294.27	2.39
4	1.0~2.0	160.51	237.53	1.48
5	<1.0	1035.96	294.17	0.28

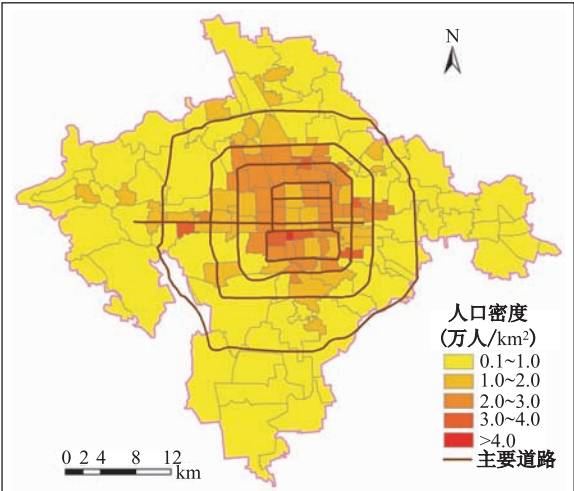


图 2 北京市街道办事处行政单元人口密度分布图  
Fig. 2 Population density distribution map from street units in Beijing proper

交通环路对于北京城市发展和空间结构具有重要影响,因此分别统计了各环路间的人口密度,并将其分为 6 个区域(见图 3)。由内向外,人口密度分别为 1.67、2.33、2.07、1.31、0.53 和 0.26 万人/ $\text{km}^2$ ,即以四环线为界,其内人口密集,人口密度在 1 万人/ $\text{km}^2$  以上;其外人口相对稀疏,人口密度在 1 万人/ $\text{km}^2$  以下。北京城市人口密度整体上呈现先增加后减少的态势。

3.2 微观特征分析

根据 300m 格网数据绘制人口密度分布图(图 4)及人口分布洛伦兹曲线(图 5)。据图 4,网格最高人口密度为 14.56 万人/ $\text{km}^2$ ;人口密度超过 10

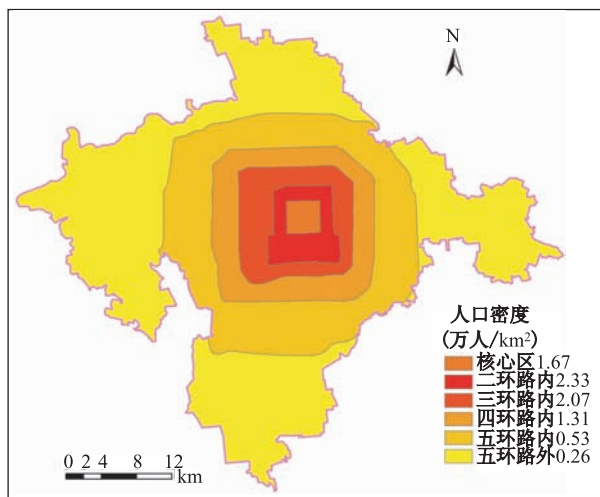


图3 北京市各环路间人口密度分布图

万人/km<sup>2</sup> 的网格共有 6 个,其中的 5 个网格分布在二环路之内。人口密度超过 1 万人/km<sup>2</sup> 即人均建设用地少于 100m<sup>2</sup> 的网格为 3 098 个,占研究区总面积的 20.86%。另由图 5 可见,洛伦兹曲线远离对角线。以上两点充分说明北京城市人口分布具有较强的非均衡性。据统计,60%的人口居住在 12.3%的区域范围内,80%的人口居住在 22.4%的区域范围内,另有 29.04%的范围内无人居住。根据 300m 格网数据计算人口密度的空间自相关指数——Moran's 指数为 0.67,其 Z 值为 116.26。这也充分说明北京市区人口分布具有高度的集聚性。这一方面反映了城市内部功能结构的空间分异,另一方面也反映了各类居住用地内部建筑密度及建筑容积率的巨大差异。在以上两方面因素的叠加影响下,北京城市内部人口分布在微观尺度上表现出显著的空间变异性。据地统计学计算网格人口密度的半变异函数(半变异函数云图如图 6 所示)。半变异值随着变程的增加而增加,但增加至一定程度后基本保持稳定,因此,半变异函数符合球状模型。

球状模型的表达式为:

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & h = 0 \\ C_0 + C_1 \left( \frac{3}{2} \frac{h}{a} - \frac{1}{2} \frac{h^3}{a^3} \right) & 0 < h \leq a, \\ C_0 + C_1 & h > a \end{cases} \quad (4)$$

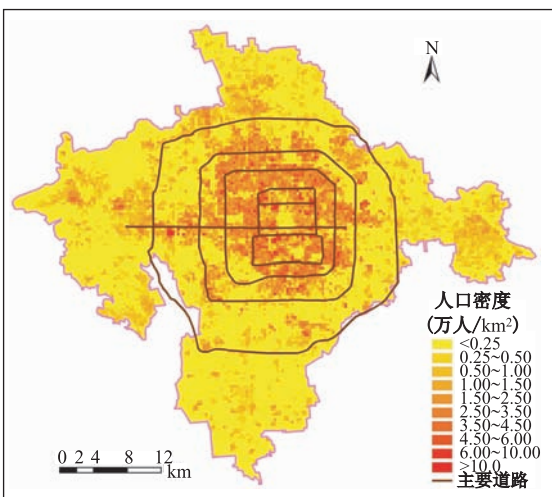


图4 北京市 300m 格网人口密度分布图

Fig. 4 Population density distribution map based on 300m-grid in Beijing proper

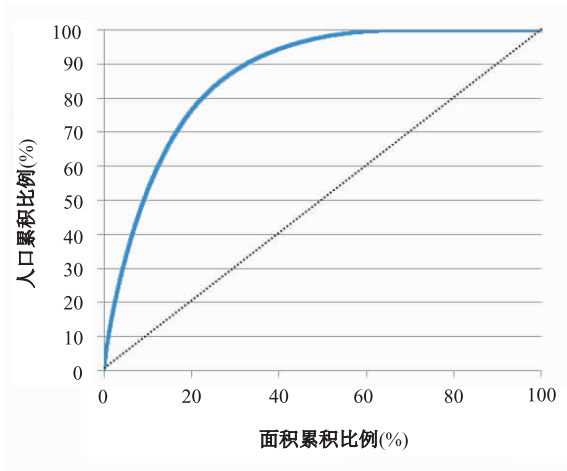


图5 北京市人口分布洛伦兹曲线

Fig. 5 Lorenz curve of population distribution in Beijing poper

式中, $r(h)$ 为半变异函数; $h$ 为样本距; $C_0$ 为块金值,即 nugget; $C_0 + C_1$ 为基台值,即 still; $a$ 为变差距离,即自相关尺度。

据计算,北京市人口分布的自相关尺度  $a$  为 15.80km,即相当于从市中心到五环路之外的距离;样本距  $h$  为 1.66km,略长于 5 个网格的距离;块金值  $C_0$  为 7 252,偏基台值为 10 709,基台值 still 为 17961,比值  $C_0$ /still 为 0.40,说明小尺度变异在全局变异中所占的比重较小,表现出良好的整体结构性特征。



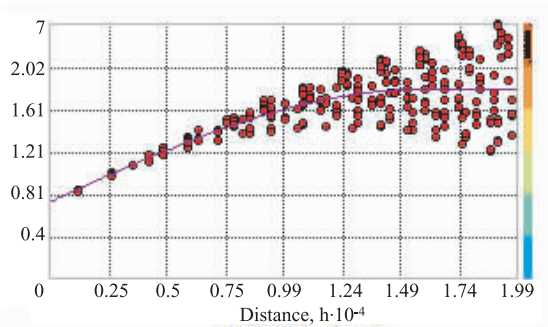


图 6 北京市人口分布半变异函数云图

Fig. 6 Semi-variogram of population distribution in Beijing proper

性特征进一步说明了交通环路对北京市人口分布的影响作用。

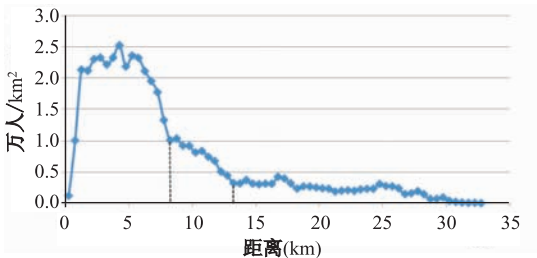


图 7 北京城市人口密度—距离变化曲线

Fig. 7 The curve of population density-distance in Beijing proper

3.3 中观特征分析

在中观尺度上,人口密度变化曲线如图 7 所示,人口密度随距离城市中心增加而迅速增加后快速降低,至 8.5km(大体相当于四环路)后减幅放缓,至 13.5km(大体相当于五环路)后变化降幅进一步减少,呈略有波动的缓慢降低趋势。这一阶段

为进一步分析人口密度-距离变化规律,分别选择线性、指数、对数、抛物线、幂函数对 3 段范围二者关系进行了模型模拟,并选择出  $R^2$  最大者作为最优模型。由表 2 可见,各段最优模型均为开口向下的抛物线模型,且  $R^2$  均在 0.82 以上,拟合效果良好。

表 2 北京市分段人口密度模型

Tab. 2 The sub-section models of population density in Beijing proper

距离范围(km)	样本数	模型类型	$R^2$	表达式
0.0~8.5	17	线性	0.0118	$y=280.13x+17718$
		指数	0.0846	$y=11432e^{0.0848x}$
		对数	0.2443	$y=3412.1\ln(x)+14949$
		幂函数	0.4262	$y=9070.1x^{0.5099}$
		抛物线	0.8283	$y=-1067.9x^2+9357.7x+4835.5$
8.5~13.5	10	线性	0.9504	$y=-1500.8x+23747$
		指数	0.8858	$y=89715e^{-0.234x}$
		对数	0.9289	$y=-16127\ln(x)+45770$
		幂函数	0.8510	$y=2641918.11x^{-2.4933}$
		抛物线	0.9783	$y=-203.27x^2+2971.1x-429.08$
13.5~33.0	39	线性	0.7853	$y=-178.18x+6216.1$
		对数	0.7379	$y=-3843\ln(x)+14047$
		抛物线	0.8285	$y=-8.3152x^2+208.48x+1984.6$

注:(1)y 表示人口密度,单位为人/ $\text{km}^2$ ;x 表示距市中心距离,单位为 km

(2)由于最外圈的的人口密度值为 0,故不能用指数和幂函数模型进行模拟

4 结论与讨论

经不同尺度对北京城市 2000 年人口分布特征进行分析,主要得出以下结论:

(1)从宏观上看,各环路间人口密度具有较大的差异,整体上呈现先增加后减少的态势;尤其是四环路内外人口密度对比鲜明,其内人口密度在 1 万人/ $\text{km}^2$  以上,其外则在 1 万人/ $\text{km}^2$  以下。城市环路显著影响着北京城市内部人口分布的宏观格

局。

(2)从微观上看,人口分布具有高度的集聚性和空间自相关性。人口密度的半变异函数符合球状模型,人口分布的自相关尺度  $a$  为 15.80km,大体相当于从市中心到五环路之外的距离;小尺度变异在全局变异中所占的比重较小,表现出良好的整体结构性特征。

(3)从中观上看,人口密度从城市中心向外围呈现阶段波动性递减特征,在 0~8.5、8.5~13.5、13.5~33.0km 的范围内,均符合开口向下的抛物线模型,即先增加后减少。整体上呈现出“单中心波浪散射”布局模式。

交通环路对北京城市人口分布的影响在宏观和中观尺度上体现的较为明显,这在一定程度上掩盖了其他要素的作用。而近年来北京市地铁快速发展,其对人口分布时空格局所产生的影响尤其值得深入分析。另外,作为中国少数几个国际性巨型城市之一,北京市人口分布自市中心向外围呈现出的阶段波动性递减特征与国外学者所探讨的如 Clark 模型、正态密度模型、负幂指数模型、二次指数模型、多核心模型等有所不同,表现出极大的特殊性,造成这一现象的原因,以及该现象是否也存在于其他中国城市,特别是其他曾作为古都的城市值的进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] 杜国明. 人口数据空间化方法与实践[M]. 北京:中国农业出版社,2008.
- [2] Sabesan A, Abercrombie K, Ganguly A R, *et al.* Metrics for the Comparative Analysis of Geospatial Datasets with? Applications to High-resolution Grid-based Population Data[J]. *Geo Journal*, 2007, 69:81-91.
- [3] Linard C, Alegana V A, Noor A M, *et al.* A High Resolution Spatial Population Database of Somalia for Disease Risk Mapping [J]. *International Journal of Health Geographics*, 2010, 9:45-57.
- [4] 陈述彭. 人口统计的时空分析[J]. *中国人口、资源与环境*, 2002,12(4):3-7.
- [5] 陈述彭. 地学的探索·第六卷·地球信息科学[M]. 北京:科学出版社,2003.
- [6] 许学强,周一星,宁越敏. 城市地理学[M]. 北京:高等教育出版社,2009.
- [7] IHDP. Science Plan: Urbanization and Global Environmental Change (IHDP Report No. 15) [R]. Bonn: IHDP Secretariat, 2005.
- [8] 冯健. 中国城市内部空间结构研究进展与展望[J]. *地理科学进展*, 2003,22(3):304-315.
- [9] 冯健. 转型期中国城市内部空间重构[M]. 北京:科学出版社,2004.
- [10] 杜国明,张树文,张有全. 城市人口分布的空间自相关分析——以沈阳市为例[J]. *地理研究*, 2007, 26(2):383-390.
- [11] 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.
- [12] 金君,印洁,李成名,等. 人口密度推求的技术方法研究[J]. *测绘通报*, 2002,(5):58-60.
- [13] Liu X H. Estimation of the Spatial Distribution of Urban Population Using High Spatial Resolution Satellite Imagery[D]. Santa Barbara: University of California, 2003.
- [14] 黄荣清. 1980 年代以来北京市城市化过程中人口分布的变化[J]. *人口研究*, 2005,29(5):19-26.
- [15] 袁长丰,刘德钦,崔先国. 基于人口 GIS 的北京市人口密度空间分布分析[J]. *测绘科学*, 2004, 29(4):40-42.
- [16] 冯健,周一星. 北京都市区社会空间结构及其演化(1982-2000)[J]. *地理研究*, 2003,22(4):465-483.
- [17] 马清裕,张文尝. 北京市居住郊区化分布特征及其影响因素[J]. *地理研究*, 2006,25(1):121-130.

## Analyzing Urban Population Spatial Distribution in Beijing Proper

KUANG Wenhui<sup>1</sup>, DU Guoming<sup>2</sup>

(1. *Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;*

2. *College of Resources and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China*)

**Abstract:** Analysis of urban population distribution due to urbanization at local scale is important contents in studying human-environment interaction. Based on the urban geographical information framework, in this research we used the fifth population census data of 2000 and urban building spatial data extracted from aerial photos, to simulate population spatial distribution with 300m-grid using GIS grid technology. Then we analyzed population spatial distribution and variability at different scales. The results indicated that, from the macro-view analysis, the ring-roads system had a significant influence on population distribution, that is, considerably different densities among the ring roads with integral decreasing gradients from inner- to out-ring roads. From the micro-view analysis, population distribution had spatial agglomeration and autocorrelation. The micro-scale variation accounted for less proportion in the whole variation. From the middle-view analysis, population distribution appeared strong step-down fluctuations from the city center to the periphery. Within the ranges of 0 – 8.5, 8.5 – 13.5 and 13.5 – 33.0 km, population density showed parabolas with downhill hatch. Meanwhile, population density showed a reduction trend for a long distance but an increase for a short distance. So we concluded that population spatial distribution in Beijing had “single-center and Scattering wave” characteristics, a distinct difference comparing to other urban population distribution.

**Key words:** city; population density; variability; Beijing; spatial pattern