

引用格式:董南,杨小唤,黄栋,等.引入城市公共设施要素的人口数据空间化方法研究[J].地球信息科学学报,2018,20(7):918-928. [Dong N, Yang X H, Huang D, et al. Spatialization method for demographic data based on urban public facility elements[J]. Journal of Geo-information Science, 2018,20(7):918-928.] DOI:10.12082/dqxxkx.2018.170625

引入城市公共设施要素的人口数据空间化方法研究

董 南¹,杨小唤^{2,3*},黄 栋^{2,3},韩冬锐^{2,3}

1. 建设综合勘察研究设计院有限公司, 北京 100007; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所 资源环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101; 3. 中国科学院大学, 北京 100049;

Spatialization Method of Demographic Data Based on Urban Public Facility Elements

DONG Nan¹, YANG Xiaohuan^{2,3*}, HUANG Dong^{2,3}, HAN Dongrui^{2,3}

1. Comprehensive Institute of Geotechnical Investigation and Surveying, Company Limited, Beijing 100007, China; 2. State Key Lab of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Science, Beijing 100101, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The spatial distribution of population at fine-scale has increasingly become research hotspot and a difficulty issue in the field of population geography. It has practical application value and scientific significance for relevant researches, such as disaster assessment, resource allocation and construction of smart cities. The population is concentrated in the urban area. Revealing the population distribution difference in this area is the core content of spatializing population data at the fine scale. In this paper, the urban area of Xuanzhou District was selected as the research area. The population distribution vector data at residential building scale was established by proposing a spatialization method based on urban public facility elements. The method classified residential building patches. And it treated residential building patches as population distribution locations in geographical space with community boundary and community-level demographic data as the control unit. A multiple regression model of patch area and population was constructed. The spatialization method used in this study can reveal the detailed information about the population distribution in urban area. Results show that: ① The population distribution data, obtained by adopting urban public facility elements, is proved to be high accurate and reliable. The number of patches with estimated population in a reasonable range is 35.4% of 779 residential building patches. And the proportion of patches with relative errors of $\pm 20\%$ in population estimation is 61.2%. Moreover, the Chengdong community and Sijia community served as accuracy verification units, the absolute relative error of population estimation in these communities is less than 9%; ② Urban public facility elements, especially primary and secondary schools and kindergartens, vegetable markets and fruit shops, are important factors for accurate estimation of population within a residential building. Their estimation accuracy of number of people is high ifor multi-storied building, but lower for moderate high-rise building.

收稿日期 2017-12-21;修回日期:2018-01-22.

基金项目 :国家自然科学基金项目(41771460,41271173)。 [**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China, No.41771460, 41271173.]

作者简介 :董 南(1984-),男,河北唐山人,博士,注册测绘师,主要从事人口地理、智慧城市、遥感与GIS应用研究。

E-mail: dongnan67@126.com

*通讯作者 :杨小唤(1965-),男,安徽潜山人,博士,研究员,主要从事遥感和GIS应用、资源环境科学空间数据库等研究。

E-mail: yangxh@igsrr.ac.cn

Key words: population; spatialization; public facility elements; residential building; patch

***Corresponding author:** YANG Xiaohuan, E-mail: yangxh@igsnnr.ac.cn

摘要 精细尺度的人口分布是当前人口地理学研究的热点和难点,其在灾害评估、资源配置、智慧城市建设等方面应用广泛。城区是人口分布集中的区域,揭示该区域人口分布差异是精细尺度人口空间化研究的核心内容。本研究基于城市公共设施要素点位数据,对居住建筑斑块进行分类,以社区作为人口数据空间化转换尺度,构建各类别斑块面积与人口数量的多元回归模型,生成了宣州城区居住建筑尺度的人口空间数据,揭示了研究区人口空间分布差异。结果表明:①该方法生成的人口空间数据精度较高,结果可信。779个居住建筑斑块中,估算人数在合理区内的斑块个数占比为35.4%,相对误差在-20%~20%范围内的斑块个数比例之和为61.2%;城东社区、思佳社区作为精度验证单元,其人数估算的相对误差绝对值低于9%;②城市公共设施要素数据,尤其是中小学及幼儿园、菜市场及水果店,是建筑物尺度上人口分布的指示性因素,其对多层居住建筑人数的估算精度较高,但对中高层居住建筑人数的估算精度偏低。

关键词: 人口;空间化;公共设施要素;居住建筑;斑块

1 引言

精细尺度的人口空间分布是当前人口地理学研究的热点和难点^[1],该尺度上人口空间数据在灾害评估、资源配置、智慧城市建设等方面应用广泛^[2]。城市区域是人口分布集中的区域,揭示该区域人口分布差异是精细尺度人口空间化研究的重要内容^[2-4]。现代测绘技术的飞速发展,为获得精细地理空间数据提供支持,丰富了人口空间化数据源。在这种情况下,如何合理利用新型数据进行城区精细尺度人口数据空间化的研究具有一定的指导意义。目前人口数据空间化研究水平很高,人口空间化模型众多,建模因素丰富。常用的人口空间化模型包括多元回归、多因素融合、核密度估计、负指数等模型^[5-8]。建模因素从采用土地利用、地形地貌、河流水系、交通路网、城市规模、居民点位、人口密度、夜间灯光、高精度不透水面等传统数据^[9-16],到引入城市公共设施要素数据^[17]、LiDAR点数据^[18-19]、tweets数据^[20]、移动基站数据^[21]、手机通讯数据^[22]等新型数据,建模数据源向多源化、新型化发展。

人口地理学家将人口分布影响因素归纳为自然地理与社会经济二类^[23-24]。在城区小尺度区域内,地形地貌、气候、水文等自然地理因素的空间差异很小,不能较好地揭示城区内人口分布差异。相反,城市公共设施要素数据等社会经济类因素是城市区域人口空间分布的指示性因素^[25-26]。目前,采用城市公共设施要素数据进行人口数据空间化研究时,相关研究采用多因素融合方法,取得了较好成果。但存在较难确定各城市公共设施要素的权重,缺少各要素间的相关性分析,数据处理复杂等

问题。能否借鉴居民地再分类的思想^[27-28],对城市公共设施要素的使用方法进行新尝试,值得探讨。

本文以安徽宣州市区作为研究区,引入城市公共设施要素点位数据,对居住建筑斑块进行分类,以社区作为人口数据空间化转换尺度,构建各类别斑块面积与人口数量的多元回归模型,实现居住建筑尺度的人口空间化。本文旨在提出一个基于城市公共设施要素对居住建筑斑块进行分类的人口空间化方法,探讨城市公共设施要素对人口分布的指示作用,为精细尺度人口数据空间化研究提供新视角。

2 研究区概况及数据源

2.1 研究区概况

城市公共设施要素基本上分布在城区,故选择该要素分布相对集中的安徽宣州15个社区,包括西林、塔影、城西、宝城、阳德、思佳、锦城、城东、九同、澄江、济川、昭亭、城南、花园、东河社区,作为开展引入城市公共设施要素的人口数据空间化方法的研究区(图1)。研究区位于安徽省东南部,是宣城市人口分布集中区,2015年常住人口约16.6万人,总面积约14 km²,东西跨度约4.5 km,南北跨度约4.3 km。

2.2 数据源

本研究的基础数据如表1所示。

(1)城市公共设施要素点位数据

已获取的城市公共设施要素点位数据包括中小学及幼儿园、菜市场及水果店、超市及便利店、银

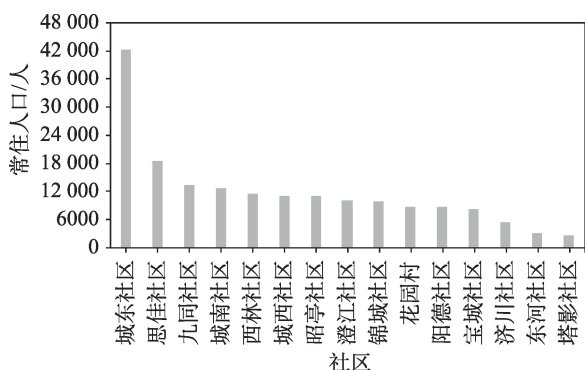


图2 2015年宣州区15社区的常住人口数量柱状图

Fig. 2 Resident population histogram for 15 communities in Xuanzhou District in 2015

城社区的人口数量相似,可划分为第一建模区,济川、东河、塔影社区的人口数量相似,可划分为第二建模区。因城东社区、思佳社区与其他社区的人口数量相差较大,将其作为模型检验单元。

3.2 基于城市公共设施要素对居住建筑斑块进行分类

居住建筑斑块分类是指从各居住建筑斑块人口密度不同的角度出发,将斑块进行分类,体现“类间人口密度差异较大、类内人口密度差异较小”的特点。分类建模也是提高人口数据空间化模型精度的有效措施之一^[8]。

3.2.1 城市公共设施要素与人口分布关系分析

本文选取与居民生活关系密切的城市公共设施要素:中小学及幼儿园、菜市场及水果店、超市及便利店、银行及ATM、药店诊所及卫生站、公交车站等设施。

城市公共设施要素是人口分布的指示性因素^[17,25,29]。以超市为例,来说明城市公共设施与人口分布相互吸引的关系。超市以经营大众日常消费品的特点决定了其具有追随人口分布的性质。通常情况下,对于居住区,随着居住人口的增多,购物需求大量增长,在市场经济的作用下,居住区附近的超市数量(规模)会增加,反过来吸引人口入住超市周边的居住区,人口数量进一步增大,当达到综合超市的商圈及目标顾客数量要求时,综合超市乃至大型超市开设,以满足人口购物消费需求。鉴于出行的时间经济成本,及超市的辐射半径,不同地方的居住区会伴有不同超市网点的开设,人口分布与超市网点布局构成相互吸引的关系^[29]。

3.2.2 主要城市公共设施要素筛选

本文采用城市公共设施要素与研究区已有人

口空间数据进行缓冲区分析的方法,筛选主要城市公共设施要素。研究区已有人口空间数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心,该数据基于居住空间属性的人口空间化方案而生成^[2]。

以50 m为间距,做各城市公共设施要素点的多级缓冲区:0~50 m, 50~100 m, 100~150 m, 150~200 m, 等(标准:覆盖95%以上研究区),分别与人口空间数据进行叠加分析,统计各要素缓冲区内的人口总量及有人区域面积,计算平均人口密度值,用散点图的方式统计分析人口密度与缓冲区距离的关系,计算决定系数,筛选主要设施要素。

图3表明平均人口密度值与中小学及幼儿园、菜市场及水果店、公交车站要素缓冲区距离的决定系数最大,分别为0.82、0.68、0.66,与其他要素的决定系数都很小。由于公交站点要素所指示的平均人口密度值明显分为两个级别:缓冲区距离在50~450 m范围内,平均人口密度范围为5~7.6人/100 m²,变化不大,缓冲区距离在500~750 m范围内,平均人口密度范围为15~23人/100 m²,变化较大,整体来看,虽然决定系数高达0.66,但不能较好指示人口密度的规律性变化。综上,最终选定中小学及幼儿园、菜市场及水果店为主要设施要素。

3.2.3 居住建筑斑块分类

将中小学及幼儿园、菜市场及水果店要素缓冲区与居住建筑斑块数据进行叠加,可以获得每个居住建筑斑块到两类要素的距离,依据图3(a)、(b)中的线性拟合方程,可以反算出每个居住建筑斑块的人口密度拟合值,确定分类阈值,将第一建模区的居住建筑斑块分成高、中、低人口密度斑块3类;将第二建模区的居住建筑斑块分成高、低人口密度斑块2类,因为第二建模区只有3个社区,为保证该模型能进行显著性检验分析,故将斑块分成2类。

居住建筑斑块分类阈值的选择(图4):采取迭代思路,选择某初始阈值 T ,对居住建筑斑块进行分类,分别汇总每个社区各类别斑块的面积,与其常住人口数量进行线性回归分析,回归模型如式(1)、(2)所示,计算决定系数和人口分布系数 a_{ih} 、 a_{im} 、 a_{il} ,为保证模型精度及合理性,当决定系数 >0.97 时,并且满足条件: $a_{ih} > a_{im} > a_{il}$,则判定所选择的阈值有效,否则将阈值 T 递增0.1,进行迭代选择阈值。因为 a_{ih} 、 a_{im} 、 a_{il} 分别为社区 i 的高、中、低人口密度斑块的人口分布系数,所以必须满足条件: $a_{ih} > a_{im} > a_{il}$ 。

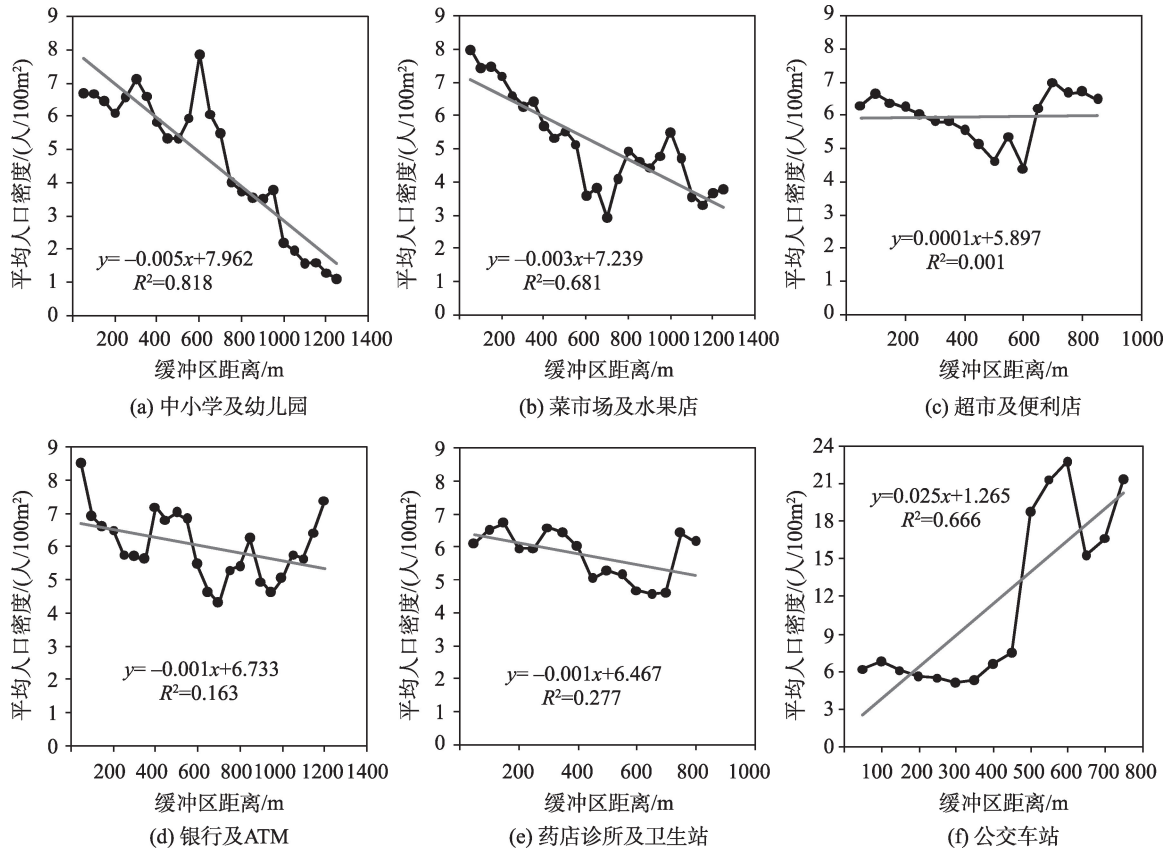


图3 平均人口密度与城市公共设施要素缓冲区距离散点图

Fig. 3 Scatter diagram of average population density and buffer area of urban public facility elements

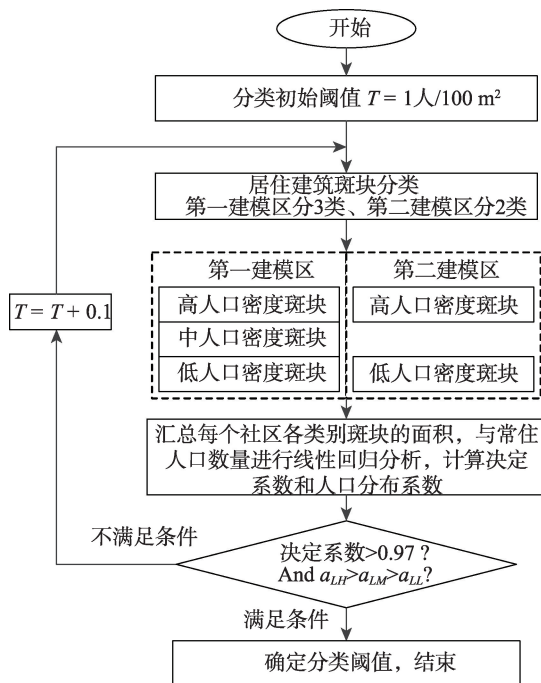


图4 确定居住建筑斑块的分类阈值流程图

Fig. 4 The flow chart for determining classification threshold for residential building patches

第一建模区:

$$P_i = a_{iH} \times \sum S_{iH} + a_{iM} \times \sum S_{iM} + a_{iL} \times \sum S_{iL} + b \quad (1)$$

第二建模区:

$$P_i = a_{iH} \times \sum S_{iH} + a_{iL} \times \sum S_{iL} + b \quad (2)$$

式中: P_i 为社区 i 的常住人口; $\sum S_{iH}$ 、 $\sum S_{iM}$ 、 $\sum S_{iL}$ 分别为社区 i 的高、中、低人口密度斑块的总面积; a_{iH} 、 a_{iM} 、 a_{iL} 分别为社区 i 的高、中、低人口密度斑块的人口分布系数/(人/ m^2); b 为模型常数项。

经过多次分析,将第一建模区的居住建筑斑块分成3类,分类阈值分别为6.2和4人/100 m^2 ;将第二建模区的居住建筑斑块分成2类,分类阈值为6.2人/100 m^2 (表2)。

3.3 人口数据空间化模型建立

本文以社区作为人口数据空间化转换尺度,汇总每个社区高、中、低人口密度斑块的总面积,与各社区的常住人口数量进行线性回归分析。采用逐步回归方法分别对第一建模区的10个社区、第二建模区的3个社区进行建模,根据“无土地则无人口”

表2 第一建模区、第二建模区居住建筑斑块分类情况

Tab. 2 Classification of residential building patches in different modeling areas

建模区名称	居住建筑斑块分类	分类后名称
第一建模区	A≥6.2人/100 m ² 和 B≥6.2人/100 m ²	高人口密度斑块
	A≥4人/100 m ² 和 B≥4人/100 m ² 并去掉高人口密度斑块	中人口密度斑块
	高、中人口密度斑块之外的剩余斑块	低人口密度斑块
第二建模区	A≥6.2人/100 m ² 和 B≥6.2人/100 m ²	高人口密度斑块
	高人口密度斑块之外的剩余斑块	低人口密度斑块

注:A为中小学及幼儿园的线性拟合方程计算的人口密度拟合值;B为菜市场及水果店的线性拟合方程计算的人口密度拟合值

的原则^[30],即无居住建筑则无人口,建模时常数项*b*应设为0,最终确定第一建模区、第二建模区的人口数据空间化模型:

第一建模区:

$$P_i = 0.18 \times \sum S_{ih} + 0.165 \times \sum S_{im} + 0.038 \times \sum S_{il} \quad (3)$$

第二建模区:

$$P_i = 0.145 \times \sum S_{ih} + 0.039 \times \sum S_{il} \quad (4)$$

式中:*P_i*为社区*i*的常住人口; $\sum S_{ih}$ 、 $\sum S_{im}$ 、 $\sum S_{il}$ 分别为社区*i*的高、中、低人口密度斑块的总面积。

3.4 模型显著性检验

在模型建立过程中,人口数量与不同类别(高、中、低人口密度)居住建筑斑块面积之间的关系只是被假设为线性关系,必须对模型进行假设检验,来说明所采用的线性模型具有统计学意义。

表3展示了模型的显著性检验结果,模型显著性水平均小于0.05,表明第一建模区、第二建模区的模型均具有统计学意义,能够用于表达人口数量与不同类别居住建筑斑块面积之间的线性关系。因此,可以用该模型来获取研究区的人口空间数据。

图5为根据第一建模区模型、第二建模区模型生成的宣州城区居住建筑尺度的人口空间数据,揭示了研究区人口空间分布差异。

4 精度验证及误差分析

4.1 精度验证

本文分别从居住建筑尺度和社区尺度2方面进行模型精度验证。

(1)居住建筑尺度精度验证

利用式(3)、(4)计算每一个居住建筑斑块的估算人数,同该斑块内人数参考真值进行比较,人数参考真值等于每套房屋的平均人数(本文采用2~3人)乘以斑块内房屋套数:人数低估区,以每套房屋2人乘以套数作为参考真值下限;人数高估区,以每套房屋3人乘以套数作为参考真值上限^[2]。采用式(5)可对比分析模型估算人数与参考真值的相对误差情况。

$$E_{ij} = \begin{cases} P'_{ij}/(2 \times T_{ij}) - 1, & P'_{ij} < 2 \times T_{ij} & \text{低估区} \\ 0, & 2 \times T_{ij} \leq P'_{ij} \leq 3 \times T_{ij} & \text{合理区} \\ P'_{ij}/(3 \times T_{ij}) - 1, & P'_{ij} > 3 \times T_{ij} & \text{高估区} \end{cases} \quad (5)$$

式中:*E_{ij}*、*P'_{ij}*、*T_{ij}*分别为社区*i*斑块*j*的相对误差、模型估算人数和房屋套数。

本文从2050个居住建筑斑块中,随机选取了779个斑块,对比分析模型估算人数相对误差。图6显示,相对误差范围在-20%~20%的斑块个数比例之和为61.2%,其中,居住建筑斑块估算人数在合理区内的斑块个数为276,所占比例35.4%;相对误差较大的斑块个数比例普遍低于5%。表明该人口数据空间化模型精度较高。

(2)社区尺度精度验证

选取未参与建模的城东社区、思佳社区进行精度验证,鉴于2个社区属于人口数量较大的情况,与第一建模区社区情况相似,所以将2个社区不同类别居住建筑斑块的总面积,代入式(3),获取2个社区的估算人数,与其实际人数进行对比,相对误差绝对值分别为8.6%、7.6%。表明该人口数据空间化模型精度较高。

表3 第一建模区、第二建模区模型的显著性检验分析表

Tab. 3 Significance test of models of different modeling areas

模型名称	变差来源	平方和	自由度	均方	F统计量	显著性水平(Sig.)
第一建模区模型	回归	1.140E+09	3	3.801E+08	107.132	0.000
	残差	2.483E+07	7	3.548E+06	-	-
	总离差	1.165E+09	10	-	-	-
第二建模区模型	回归	5.028E+07	2	2.514E+07	359.586	0.037
	残差	6.991E+04	1	6.991E+04	-	-
	总离差	5.035E+07	3	-	-	-

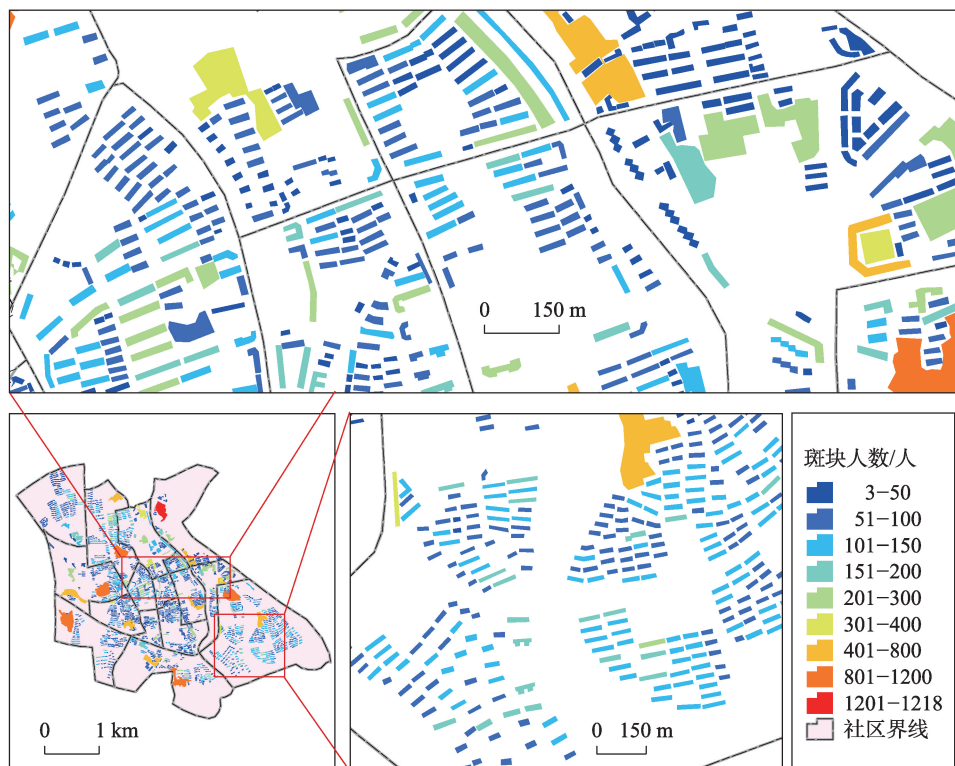


图5 2015年宣州城区居住建筑尺度人口空间分布图

Fig. 5 Population distribution map at the residential building scale for urban area of Xuanzhou District in 2015

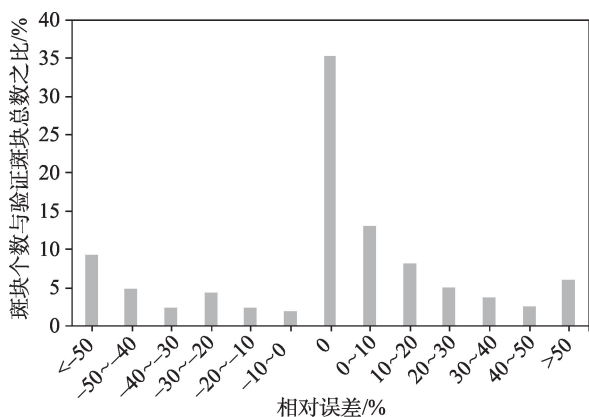


图6 估算人数相对误差范围内斑块个数比重

Fig. 6 The proportion of the number of patches within the relative error range of the estimated population

4.2 误差分析

排除回归模型中随机误差的影响,人数估算误差主要来源于2个方面:①居住建筑斑块分类错误引起的误差;②居住建筑轮廓遥感影像矢量化误差引起的误差。通过对误差分析可知,引入城市公共设施要素的人口数据空间化方法,对中高层居住建筑人数的估算精度偏低。

4.2.1 居住建筑斑块分类错误引起的误差

以图7(a)中低估区居住建筑斑块为例进行说明。共有40个人数低估区斑块,其相对误差平均值为-60.2%,是整个研究区低估误差最大的斑块群,对其进行人数低估的原因分析具有代表性。

图7(a)中可见的居住建筑斑块共有116个,其信息统计见表4。通过基于城市公共设施要素对居住建筑斑块进行分类(见3.2节),将位于中小学及幼儿园的600~1000 m缓冲区内的40个低估区斑块,分在低人口密度斑块类别中;将位于150~600 m缓冲区内的46个高估区斑块、30个合理区斑块,分在中人口密度斑块类别中。在中人口密度斑块类别中,不但包括30个合理区斑块,而且46个高估区斑块的相对误差平均值为19.2%,远小于60.2%,说明将斑块分在中人口密度斑块类别中,人数估算精度要高。40个低估区斑块被分在低人口密度斑块类别中,导致估算人数偏低。

从居住建筑斑块数据可知,116个斑块内的建筑物层数为6层,表明每个斑块的居住人口密度相似,如果基于人口密度值对这116个斑块进行分类,

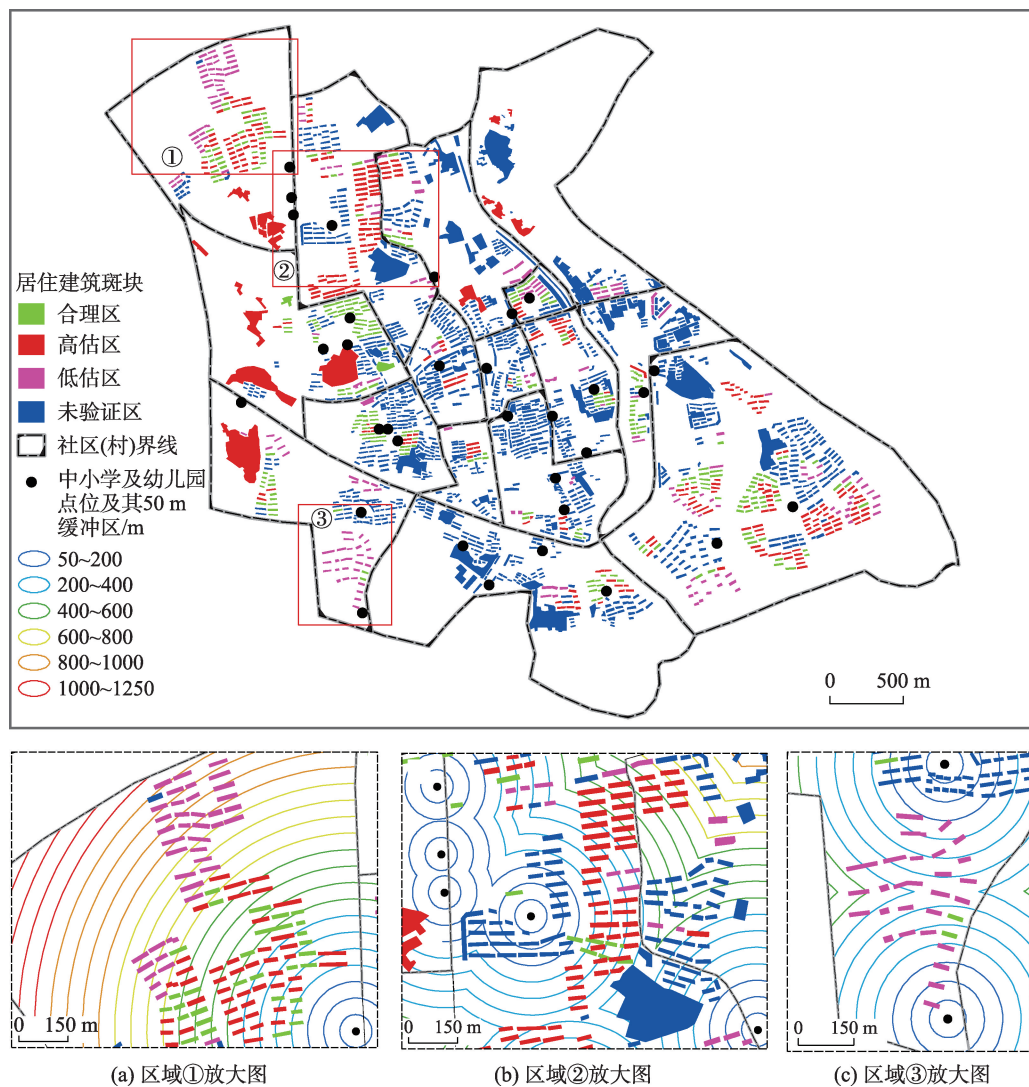


图7 估算人数相对误差空间分布图

Fig. 7 Spatial distribution map of the relative error of the estimated number of people

表4 示例区内的居住建筑斑块的信息统计

Tab. 4 Information statistics of residential building patches in sample area

误差类别	斑块个数	斑块个数比重/%	相对误差平均值/%	居住建筑斑块类别	斑块内建筑物层数/层
低估区	40	34.5	-60.2	低人口密度斑块	6
高估区	46	39.6	19.2	中人口密度斑块	6
合理区	30	25.9	0	中人口密度斑块	6

理应分成一类。因此,将其中40个斑块分在低人口密度斑块类别中,产生了分类错误情况。对该情况进行分析,经调研,该116个居住建筑均位于新建住宅小区,并且只有东南角有中小学及幼儿园要素,该小区配套设施尚在完善之中。基于本文的居住建筑斑块分类原理可知,如果在小区西北角有中小学及幼儿园要素,居住建筑斑块分类结果将趋于准确,低估区斑块的估算人数误差将会显著降低。综

上,部分区域的城市公共设施要素欠缺,会导致居住建筑斑块分类错误,最终影响人数估算精度。

4.2.2 居住建筑轮廓遥感影像矢量化误差引起的误差

以图7(b)中高估区居住建筑斑块为例进行说明。共有58个人数高估区斑块,其相对误差平均值为51.6%,是整个研究区高估误差最大的斑块群,对其进行人数高估的原因分析具有代表性。

从居住建筑斑块数据库可知这58个斑块的建筑面积,以此作为参考真值,并与Quick Bird遥感影像矢量化提取的这58个居住建筑斑块面积相比,发现矢量化提取的面积较参考真值平均偏大约13%,导致人数高估。

从居住建筑斑块数据可知,58个斑块内的建筑物层数为5~6层,表明每个斑块的居住人口密度相似,如果基于人口密度值对这58个斑块进行分类,理应分成一类。通过基于城市公共设施要素对居住建筑斑块进行分类(见3.2节),将位于中小学及幼儿园的200~650 m缓冲区内的58个高估区斑块,都分在高、中人口密度斑块类别中,由式(3)可知,2个类别的人口密度分别为18、16.5人/100m²斑块,相差很小,基本上可认为是同一类,这与实际情况相符,可以排除斑块分类错误引起的误差。综上,Quick Bird遥感影像矢量化提取的居住建筑斑块面积偏大,会导致人数高估。

4.2.3 模型对中高层居住建筑人数的估算精度偏低

本文选取的779个估算人数验证斑块中,估算人数在合理区内的斑块个数为276,其中92.8%的斑块,其建筑物层数为5~6层,表明模型对5~6层居住建筑人数的估算精度较高。估算人数在低估区内的斑块个数为200,其中62.5%的斑块,其建筑物层数为9~33层,平均层数为12层,相对误差平均值为-34.4%,表明模型对中高层(9~33)居住建筑人数的估算精度较低。

以图7(c)中低估区居住建筑斑块为例进行说明。共有28个人数低估区斑块,其建筑物层数为9~18层,平均层数为14层,相对误差平均值为-36.8%。各项指标与200个低估区斑块相似,因此对其进行中高层居住建筑人数低估的原因分析具有代表性。

这28个低估区斑块位于中小学及幼儿园的50~400 m缓冲区内,通过基于城市公共设施要素对居住建筑斑块进行分类(见3.2节),将其分在高人口密度斑块类别中。因其层数较高(平均14层),单位面积上的人口密度理应较大,本研究将其分在高人口密度斑块类别是合理的。同时,将28个斑块的矢量化提取的面积与参考真值相比,发现平均偏差低于10%,矢量化精度较高。综上,居住建筑斑块分类错误、居住建筑矢量化误差不是中高层居住建筑人数低估的主要原因。

分析可知,城市公共设施要素对中高层居住建

筑人口分布的指示效果欠佳。通常情况下,居住建筑层数越多,楼间距越大,可以引入居住建筑间距作为中高层居住建筑人口分布的指示性因素。由于基础数据的难获取性,本文只考虑了城市公共设施要素的点位,其实城市公共设施要素的规模,如用教师或学生数量表征的中小学及幼儿园的规模,也是城市区域人口分布的指示性因素。综上,引入城市公共设施要素的人口空间化模型,对中高层居住建筑人数的估算精度偏低。

5 结论

本文以安徽宣州15个社区为研究区,基于城市公共设施要素点位数据,以多级缓冲区为媒介构建其指示人口空间分布的定量关系,对居住建筑斑块进行分类,建立各类别斑块面积与人口数量的多元回归模型,实现居住建筑尺度的人口空间化,揭示了研究区人口分布差异。主要结论如下:

(1) 提出了一种引入城市公共设施要素来实现居住建筑尺度上的人口空间化方法,是对城市公共设施要素使用新方法的新尝试。利用城市公共设施要素对居住建筑斑块进行分类,避免了直接构建城市公共设施要素与人口数量之间的关系所需要的复杂分析和多因素融合处理。该方法精度较高,结果可信。779个居住建筑斑块中,估算人数在合理区内的斑块个数占比为35.4%,相对误差在-20%~20%范围内的斑块个数比例之和为61.2%;城东社区、思佳社区人数估算的相对误差绝对值低于9%。

(2) 城市公共设施要素数据,尤其是中小学及幼儿园、菜市场及水果店,是本研究区人口分布的指示性因素,其对多层居住建筑人数的估算精度较高,对中高层居住建筑人数的估算精度偏低。居住建筑斑块分类错误,居住建筑轮廓遥感影像矢量化误差是导致人数估算误差的主要原因。

(3) 由于基础数据的难获取性,只考虑了城市公共设施要素点位对人口分布的影响,这是本研究的不足之处,其实城市公共设施要素的规模,如用教师或学生数量表征的中小学及幼儿园的规模,也是人口空间分布的指示性因素。后续研究,将收集城市公共设施要素的规模数据,以期提高城区居住建筑尺度人口数据空间化精度。

参考文献(References):

- [1] 柏中强,王卷乐,杨雅萍,等.基于乡镇尺度的中国25省区人口分布特征及影响因素[J].地理学报,2015,70(8):1229-1242. [Bai Z Q, Wang J L, Yang Y P, et al. Characterizing spatial patterns of population distribution at township level across the 25 provinces in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015,70(8):1229-1242.]
- [2] 董南,杨小唤,蔡红艳.基于居住空间属性的人口数据空间化方法研究[J].地理科学进展,2016,35(11):1317-1328. [Dong N, Yang X H, Cai H Y. A method for demographic data spatialization based on residential space attributes[J]. *Progress in Geography*, 2016,35(11):1317-1328.]
- [3] 卓莉,黄信锐,陶海燕,等.基于多智能体模型与建筑物信息的高空间分辨率人口分布模拟[J].地理研究,2014,33(3):520-531. [Zhou L, Huang X R, Tao H Y, et al. High spatial resolution population distribution simulation based on building information and multi-agent[J]. *Geographical Research*, 2014,33(3):520-531.]
- [4] Jia P, Gaughan A E. Dasymetric modeling: A hybrid approach using land cover and tax parcel data for mapping population in Alachua County, Florida[J]. *Applied Geography*, 2016,66:100-108.
- [5] 符海月,李满春,赵军,等.人口数据格网化模型研究进展综述[J].人文地理,2006,21(3):115-119. [Fu H Y, Li M C, Zhao J, et al. Summary of grid transformation models of population data[J]. *Human Geography*, 2006,21(3):115-119.]
- [6] 林丽洁,林广发,颜小霞,等.人口统计数据空间化模型综述[J].亚热带资源与环境学报,2010,5(4):10-16. [Lin L J, Lin G F, Yan X X, et al. Spatialization models of census data: A review[J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2010,5(4):10-16.]
- [7] 柏中强,王卷乐,杨飞.人口数据空间化研究综述[J].地理科学进展,2013,32(11):1692-1702. [Bai Z Q, Wang J L, Yang F. Research progress in spatialization of population data[J]. *Progress in Geography*, 2013,32(11):1692-1702.]
- [8] 董南,杨小唤,蔡红艳.人口数据空间化研究进展[J].地球信息科学学报,2016,18(10):1295-1304. [Dong N, Yang X H, Cai H Y. Research progress and perspective on the spatialization of population data[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2016,18(10):1295-1304.]
- [9] 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. [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.]
- [10] 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. [Zhuo L, Chen J, Shi P J, et al. Modeling population density of China in 1998 based on DMSP/OLS nighttime light image [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2005,60(2):266-276.]
- [11] 闫庆武,卞正富,张萍,等.基于居民点密度的人口密度空间化[J].地理与地理信息科学,2011,27(5):95-98. [Yan Q W, Bian Z F, Zhang P, et al. Census spatialization based on settlements density[J]. *Geography and Geo-information Science*, 2011,27(5):95-98.]
- [12] Mennis J. Generating surface models of population using dasymetric mapping[J]. *The Professional Geographer*, 2003,55(1):31-42.
- [13] 廖顺宝,孙九林.基于GIS的青藏高原人口统计数据空间化[J].地理学报,2003,58(1):25-33. [Liao S B, Sun J L. GIS based spatialization of population census data in Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003,58(1):25-33.]
- [14] Yue T X, Wang Y A, Chen S P, et al. Numerical simulation of population distribution in China[J]. *Population and Environment*, 2003,25(2):141-163.
- [15] Su M, Lin M, Hsieh H, et al. Multi-layer multi-class dasymetric mapping to estimate population distribution[J]. *Science of the Total Environment*, 2010,408(20):4807-4816.
- [16] Krunić N, Bajat B, Kilibarda M. Dasymetric mapping of population distribution in Serbia based on soil sealing degrees layer[J]. *Surface Models for Geosciences*, 2015:137-149. DOI: http://doi.org/10.1007/978-3-319-18407-4_12.
- [17] 康停军,张新长,赵元,等.基于GIS和多智能体的城市人口分布模拟[J].中山大学学报·自然科学版,2012,51(3):135-142. [Kang T J, Zhang X C, Zhao Y, et al. Simulation for urban population distribution based on GIS and multi-agent[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2012,51(3):135-142.]
- [18] Dong P L, Ramesh S, Nepalia A. Evaluation of small-area population estimation using LiDAR, Landsat TM and parcel data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2010,31(21):5571-5586.
- [19] Silván-Cárdenas J L, Wang L, Rogerson P, et al. Assessing fine-spatial-resolution remote sensing for small-area population estimation[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2010,31(21):5605-5634.
- [20] Patel N N, Stevens F R, Huang Z, et al. Improving large area population mapping using geotweet densities[J]. *Transactions in GIS*, 2016,20(3):1-15.
- [21] 毛夏,徐蓉蓉,李新硕,等.深圳市人口分布的细网格动态特征[J].地理学报,2010,65(4):443-453. [Mao X, Xu R R, Li X S, et al. Fine grid dynamic features of population distribution in Shenzhen[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2010,65(4):443-453.]
- [22] Kang C G, Liu Y, Ma X J, et al. Towards estimating urban population distributions from mobile call data[J]. *Journal*

- of Urban Technology, 2012,19(4):3-21.
- [23] 胡焕庸.论中国人口之分布[M].北京:科学出版社,1983. [Hu H Y. Distribution of China's population[M]. Beijing: Science Press,1983.]
- [24] 张善余.中国人口地理[M].上海:华东师范大学出版社, 1997. [Zhang S Y. Population geography of China[M]. Shanghai: East China Normal University Press,1997.]
- [25] 何莲娜.基于城市布局要素的人口数据空间化研究[J]. 测绘科学,2011,36(1):38-41. [He L N. A discussion of population spatial distribution based on urban layout parameter[J]. Science of Surveying and Mapping, 2011,36 (1):38-41.]
- [26] 康停军,张新长,赵元,等.基于多智能体的城市人口分布模型[J]. 地理科学,2012,32(7):790-797. [Kang T J, Zhang X C, Zhao Y, et al. Agent-based urban population distribution model[J]. Scientia Geographica Sinica, 2012, 32(7):790-797.]
- [27] 王珂靖,蔡红艳,杨小唤,等.基于城镇居民用地再分类的人口数据空间化方法研究——以长江中游4省为例[J]. 遥感技术与应用,2015,30(5):987-995. [Wang K J, Cai H Y, Yang X H, et al. Spatialization method for census data based on reclassifying residential land use in urban areas—A case study in the middle reaches of the Yangtze River Watershed[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2015,30(5):987-995.]
- [28] 杨小唤,刘业森,江东,等.一种改进人口数据空间化的方法:农村居住地重分类[J].地理科学进展,2006,25(3):62-69. [Yang X H, Liu Y S, Jiang D, et al. An enhanced method for spatial distributing census data: Reclassifying of Rural Residential[J]. Progress in Geography, 2006,25(3):62-69.]
- [29] 董彦景.西安城市大型超市与人口空间分布关联分析[D].西安:西北大学,2012. [Dong Y J. The relevance of the spatial distribution of the large-scale supermarket and population in Xi'an[D]. Xi'an: Northwest University, 2012.]
- [30] 杨小唤,江东,王乃斌,等.人口数据空间化的处理方法[J]. 地理学报,2002,57(增刊):70-75. [Yang X H, Jiang D, Wang N B, et al. Method of pixelizing population data[J]. Acta Geographica Sinica, 2002,57(sup):71-75.]