doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2023.02.005

基于地理国情数据的人口空间化方法

刘恩来[1]，李治泓[2*]，石瑞琪[3]，李　亮[1]，黄琼仪[1]
（1. 自然资源部第六地形测量队，四川 成都 610000；2. 昆明理工大学国土资源工程学院，云南 昆明 650000；
3. 自然资源部第三地理信息制图院，四川 成都 610000）

摘　要：为进一步研究不同类型区域人口空间化方法，基于地理国情数据中精细化的房屋建筑分类数据和户籍人口数据，借鉴土地利用密度法的基本原理，提出了一种基于地理国情数据的适合不同区域的人口空间化方法。利用该方法，选择人口稀疏的草原地区和人口密集的城市集中发展地区2种不同类型区域，考虑居住建筑人口密度差异，开展了居住人口空间化模拟研究，得到了100 m栅格的人口居住密度图，并进行了空间分布分析。结果表明地理国情数据中的高精度建筑物分类数据能够自适应不同区域的人口空间化模拟，使用该方法能取得较好的模拟结果，不同类型区域人口空间分布格局具有明显的地域分异特征。

关键词：人口空间化；地理国情数据；房屋建筑类型；草原地区；城市规划集中发展区
中图分类号：P208　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）02-0023-06

Population Spatialization Method Based on Geographical Conditions Data

LIU Enlai[1], LI Zhihong[2], SHI Ruiqi[3], LI Liang[1], HUANG Qiongyi[1]
(1. Sixth Topographic Survey Team of the Ministry of Natural Resources, Chengdu 610000,China;
2. Faculty of Land and Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650000, China;
3. The Third Institute of Geographic Information Mapping of the Ministry of Natural Resources, Chengdu 610000, China)

Abstract: In order to further study the spatialization method of population distribution in different areas, we proposed a spatialization method for different areas based on geographical conditions data, which included the detailed classification data of buildings and the household registration data, referencing from land-use density method. We carried out a spatialization simulation study based on the method above. Taking the differences in residential building population density into account, we tested two different areas, which were sparsely populated grassland area and densely populated urban development area, obtained the 100-meter grid population density map, and analyzed the spatial distribution. The results show that the high-precision classification data of buildings can be self-adapted to the spatialization of population distribution in different areas and a satisfactory simulation result can be obtain by using this method, with significant geographical characteristics in spatial distribution pattern of population in different areas.

Key words: population spatialization, geographical conditions data, building type, grassland area, centralized development area of urban planning

掌握城市人口空间分布信息对于合理制定区域人口、经济和社会发展政策具有重要意义[1-2]，也是实施城市日常管理、改善居民生活环境、开展灾害应急救援等工作的重要科学依据。为进一步研究不同类型区域人口空间化方法，本文基于地理国情数据中精细化的房屋建筑分类数据和户籍人口数据，借鉴土地利用密度法的基本原理，提出了一种基于地理国情数据的适合不同区域的人口空间化方法。选择人口稀疏的草原地区——若尔盖县和人口密集的城市集中发展地区——南充市城市规划集中发展区两种不同类型区域，考虑区域内部居住建筑形式和密度差异，开展居住人口空间化模拟实证研究，得到100 m栅格的人口居住密度图，实现了不同区域人口空间化的精细化模拟，结果能较好的反映人口密度空间分异情况，对我国不同类型区域精细化的人口空间模拟分析具有借鉴意义[3-14]。

1　研究区概况及数据来源

1.1　研究区概况

若尔盖县位于青藏高原东部边缘地带，四川省阿坝藏族羌族自治州北部，地理坐标介于102°08′～103°39′E、32°56′～34°19′N之间，县城驻地达扎寺镇。国土面积10 436.58 km^2，境内地形复杂，中西部

收稿日期：2021-10-12。
项目来源：四川省科技计划项目（2020YFS0453，2020YFS0365）；四川省测绘地理信息学会资助项目（GCX202118）。
（*为通信作者）

和南部为典型丘状高原，平均海拔3 500 m以上；北部和东南部山高谷深，地势陡峭，海拔2 400～4 200 m。若尔盖县是典型的牧区县，辖4镇13乡，1个国有牧场、1个省属牧场，全县2017年户籍总人口79 934人，其中城镇户籍人口13 203人，乡村户籍人口66 731人；常住人口7.81万人，城镇化率（常住人口）为29.5%。藏族人数占全县总人口的89.2%，是一个以藏族为主的少数民族聚居县，人口密度为7.66人/km^2，属于人口稀少区。

南充位于四川盆地东北部，地处嘉陵江中游。介于30°35′～31°51′N，105°27′～106°28′E之间。地势从北向南倾斜，海拔256～889 m，地貌类型以丘陵为主，浅丘平坝、中丘中谷、高丘低山类型。本次研究区域处于顺庆、高坪、嘉陵三区的中心城区，是全市经济社会发展中心，常住人口达到200万，常住人口城镇化率达到75%以上，由46个街道、乡镇组成，共计960余km^2，2017年户籍总人口1 238 766人，人口密度为1 290.38人/ km^2，属于人口密集区。

1.2 数据来源

数据源主要有研究区2017年乡镇户籍人口数据及居住建筑图斑数据，是从2017年四川省基础性地理国情房屋建筑分类数据中提取的。

地理国情房屋建筑类型主要包括房屋建筑区、独立房屋建筑、废弃房屋建筑3大类，10小类。其中房屋建筑区是指城镇、城中村、乡村集中居住区域内，被连片房屋建筑遮盖的地表区域，进一步划分为高密度多层及以上房屋建筑区、低密度多层及以上房屋建筑区、高密度低矮房屋建筑区、低密度低矮房屋建筑区，主要为人口居住区域；独立房屋建筑包括城镇地区规模较大的单体建筑和空间分散的居民点、规模较小的散落房屋建筑，进一步划分为多层及以上独立房屋建筑、低矮房屋建筑两大类，前者多为写字楼、大型商业综合体等不以居住为主要功能的建筑单体，低矮房屋建筑多为城市边缘区、农村地区的居住建筑类型。废弃房屋建筑没有承载居住人口，在本研究中不考虑。

2 研究方法与结果

2.1 研究方法

若研究区域内有 m 个乡镇（街道）单元，从该区域地理国情数据中提取 n（$n\leqslant 10$）种承载人口的居住建筑类型，各单元人口为 P_m。假设同一单元内同一类居住建筑的人口密度相同，各类居住建筑的人口密度分别为 D_1，D_2，…，D_n；提取每个单元内各类居住建筑的面积 S_{mn}（$m=1$，2，…，m；$n=1$，2，…，n），即可建立线性方程组（1），当单元个数大于居住建筑类型数，即 $m>n$ 时，依据最小二乘法原理，即可求得该区域内与统计人口误差最小的各类居住建筑的人口密度估计值，进而可以求得各行政单元人口估计值 P_e（式2），并分析估算误差 ΔP（式3）。

$$\begin{aligned} P_1&=S_{11}\cdot D_1+S_{12}\cdot D_2+\cdots+S_{1n}\cdot D_n\\ P_2&=S_{21}\cdot D_1+S_{22}\cdot D_2+\cdots+S_{2n}\cdot D_n\\ &\vdots\\ P_m&=S_{m1}\cdot D_1+S_{m2}\cdot D_2+\cdots+S_{mn}\cdot D_n \end{aligned} \tag{1}$$

$$P_e=S_1\cdot D_1+S_2\cdot D_2+\cdots+S_n\cdot D_n \tag{2}$$

$$\nabla p=\frac{|P_m-P_e|}{P_m} \tag{3}$$

进一步可以构建适宜尺度的栅格单元，按（4）式计算各栅格单元的人口密度。

$$D(P_x)=\sum_{n=1}^{N}S_nD_n/u \tag{4}$$

式中，D（P_x）为格网 x 内的人口密度；n 和 N 分别为格网内居住建筑的类型和类型总数；S_n 和 D_n 分别为格网中第 n 类居住建筑的面积和居住建筑人口密度；u 为格网面积。

计算过程中将估算人口误差小于或接近10%的乡镇单元居住建筑密度确定为此乡镇该种类型居住房屋密度，大于10%的单元按高估和低估分组进行重新计算；多次计算后，确定所有乡镇单元居住建筑人口密度；按公式（4）计算单个格网人口，形成人口的空间化分布。据杨瑞红[15]等人研究，采用地理国情普查数据源进行人口数据空间化的适宜格网尺度是100～250 m，并且当格网大小为100 m时，人口空间化结果更加精细，相较250 m的空间化结果更真实。因此根据2个研究区的实际，考虑大江大河无法承载人口和广大无人口区域的模拟真实性等情况，本研究栅格尺度选择100 m。

2.2 研究结果

结合若尔盖国土空间开发实际，通过统计分析，若尔盖房屋建筑以低矮房屋建筑为主，主要承载人口房屋建筑类型为高密度低矮房屋建筑区、低密度低矮房屋建筑区、低矮独立房屋建筑。居住建筑空间分布如图1所示。从图中看出，整个居住建筑在空间上分布差异不大，绝大部分国土没有居住建筑覆盖，少部分镇区有较小的集中分布区，以低密度低矮房屋建筑区为最多，其次是高密度低矮房屋建筑区，班佑乡、红星镇、阿西乡、麦溪乡分布有相对较多的低密度低

矮房屋建筑区，县城达扎寺镇分布有较多的高密度低矮房屋建筑区。计算时，白河牧场合并到唐克镇，辖曼种羊场合并到辖曼乡。

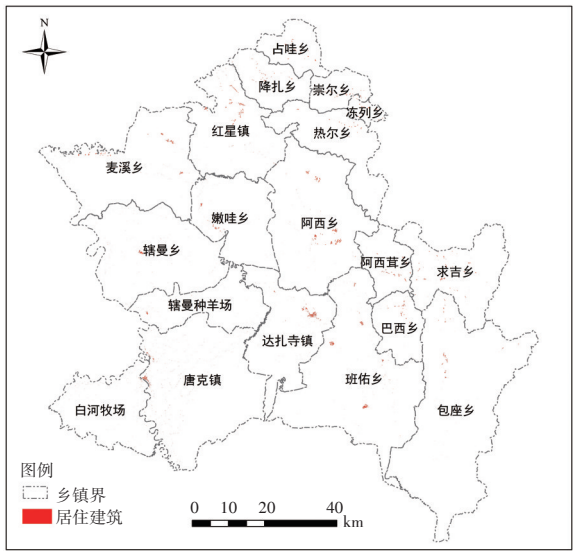


图1　若尔盖县居住建筑分布图

对17个乡镇的人口、三类居住建筑面积建立多元线性方程组，利用最小二乘法进行求解三类房屋建筑的人口密度。第一次求解后，得到符合要求的5个乡镇结果（如表1），红星镇、阿西乡、降扎乡、冻列乡、达扎寺镇预测残差比在10%以内，效果较好，回归决定系数调整平方达到0.880 713，方差分析、估计密度均在0.05水平上显著，其他高估乡镇有6个，低估乡镇有6个。

对高估的巴西乡、求吉乡、包座乡、唐克镇、阿西茸乡、班佑乡进行第二次方程求解，得到如表2所示统计分析结果。第二次残差显著降低，且大部分在10%以下，只有巴西乡残差比显著高于10%。阿西茸乡为11.26%，考虑到人口年度统计数据的误差，拟合效果可以接受，整体回归决定系数调整平方达到0.662 739，方差分析、估计密度均在0.05水平上显著。经分析，巴西乡残差较大，主要原因有4个方面：一是该镇是巴西会议遗址所在地，有较大规模无人居住建筑；二是当地建有周边三个乡镇共用的规模较大的中小学；三是有寺庙（班佑寺）在境内；四是巴西乡有大骨节病搬迁地，但后期并未投入使用，以上原因客观导致房屋建筑面积与户籍统计人口建立方程解算误差较大，因此可以接受巴西乡的较大估计误差。

表1　若尔盖县人口数据第一次拟合达到要求乡镇结果

乡镇	红星镇	阿西乡	降扎乡	冻列乡	达扎寺镇
高密度低矮房屋建筑区面积/km²	0.450 610	0.146 983	0.352 336	0.370 648	1.025 223
低密度低矮房屋建筑区面积/km²	1.045 874	1.712 231	0.011 494	0.001 489	0.308 408
低矮独立房屋建筑面积/km²	0.050 447	0.029 796	0.027 830	0.013 820	0.102 264
实际人口/人	6 606	6 368	2 895	2 668	10 327
预测人口/人	6 724.679	6 230.318	2 774.378	2 440.102	9 424.468
残差	−118.679	137.681 6	120.621 7	227.898 4	902.531 6
残差比/%	−1.80	2.16	4.17	8.54	8.74

表2　若尔盖县高估乡镇人口数据第二次拟合结果

乡镇	巴西乡	求吉乡	包座乡	唐克镇	阿西茸乡	班佑乡
高密度低矮房屋建筑区面积/km²	0.351 101	0.705 617	0.568 290	0.509 457	0.428 044	0.228 746
低密度低矮房屋建筑区面积/km²	0.069 589	0.059 269	0.039 218	0.827 841	0.125 204	1.363 621
低矮独立房屋建筑面积/km²	0.012 794	0.030 678	0.037 804	0.154 042	0.030 231	0.078 296
实际人口/人	1 557	3 442	3 506	7 890	3 086	6 327
第一次残差比/%	−59.55	−43.02	−23.32	−20.22	−15.43	−13.23
预测人口/人	1 857.326	3 657.477	3 258.13	7 967.954	2 738.373	6 294.029
第二次残差	−300.326	−215.477	247.869 9	−77.954 3	347.627	32.970 53
第二次残差比/%	−19.29	−6.26	7.07	−0.99	11.26	0.52

对低估的麦溪乡、崇尔乡、热尔乡、占哇乡、嫩哇乡、辖曼乡进行第二次方程求解，得到如表3所示统计分析结果。第二次残差显著降低，全部都在10%以下，拟合效果很好，回归决定系数调整平方达到0.665 923，方差分析、估计密度均在0.001水平上显著。

通过三大类居住建筑类型两次分类拟合，得到全部乡镇分建筑类型的人口密度拟合数据，除巴西乡残差比较大外，其余乡镇都在10%左右及以内，整体的

表3　若尔盖县低估乡镇人口数据第二次拟合结果

乡镇	麦溪乡	崇尔乡	热尔乡	占哇乡	嫩哇乡	辖曼乡
高密度低矮房屋建筑区面积/km²	0.090 957	0.332 391	0.304 033	0.301 107	0.066 465	0.442 486
低密度低矮房屋建筑区面积/km²	1.103 61	0.005 508	0.000 547	0.006 696	0.395 985	0.207 802
低矮独立房屋建筑面积/km²	0.041 478	0.016 266	0.010 796	0.010 762	0.029 102	0.074 921
实际人口	5 836	2 911	2 514	2 705	3 258	8 038
第一次残差比/%	20.43	20.57	21.08	26.68	30.45	35.77
预测人口/人	5 847.952	3 069.365	2 530.674	2 525.368	3 228.782	8 031.750
第二次残差	−11.951 6	−158.365	−16.674 3	179.631 7	29.217 72	6.249 543
第二次残差比/%	−0.20	−5.44	−0.66	6.64	0.90	0.08

残差比例为1.67%，精度较高。选择适合的100 m栅格尺度进行栅格化处理，得到的人口密度栅格图（如图2所示）。人口密度空间分布与居住建筑分布较为一致，空间差异不大，大部分国土无人口分布，在空间分布上呈现低密度均质状态，符合人口分布实际情况。人口密度最高为11 026.3人/km²，高密度主要分布在县城达扎寺镇、红星镇等少数几个重点镇的镇区。计算得到若尔盖县以行政单元统计人口计算的人口密度分布图（如图3）。对比图2和图3，可以发现通过若尔盖居住建筑拟合求解得到的人口空间分布情况更接近若尔盖人口分布真实情况，能在更小尺度上体现人口分布的空间差异，若尔盖县行政单元人口密度极小，呈现出行政区域面积小的乡镇人口密度相对较大。

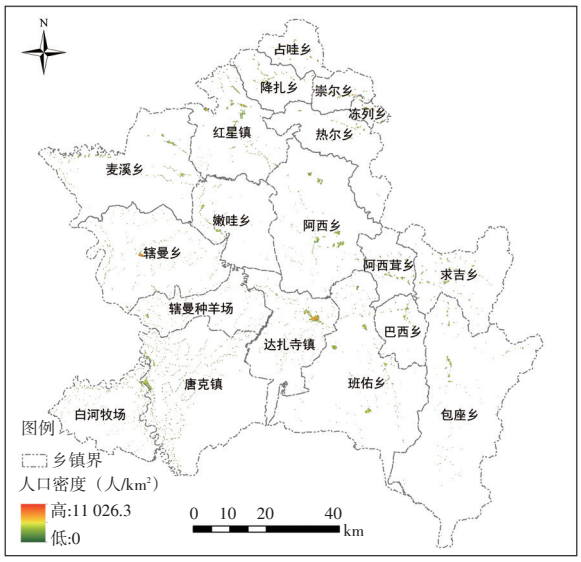


图2　若尔盖县人口居住密度空间分布图

结合南充市城市规划集中发展区国土空间开发实际，通过统计分析，集中发展区内房屋建筑既有多层及以上房屋建筑，又有低矮房屋建筑，但城市区域密度都较高，以高密度多层及以上房屋建筑区、高密度

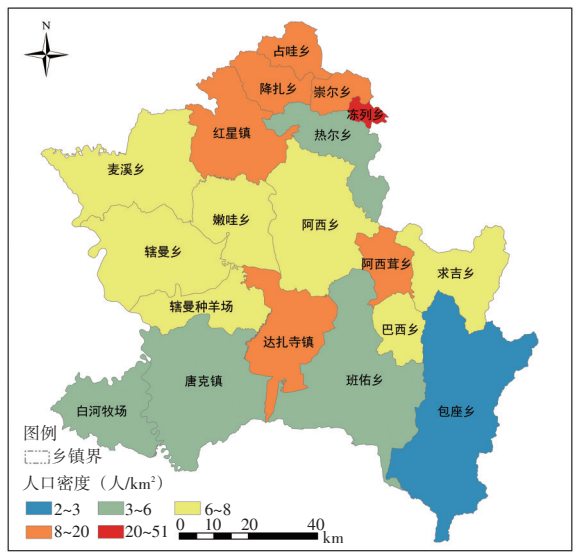


图3　若尔盖县行政单元统计人口密度空间分布图

低矮房屋建筑区、独立多层及以上房屋建筑为主，农村地区以低矮房屋建筑为主，主要承载人口房屋建筑类型为高密度多层及以上房屋建筑区、高密度低矮房屋建筑区、低矮独立房屋建筑。三类建筑组成的居住建筑空间分布如图4所示。以城区沿嘉陵江两岸区域最密集，且多以高密度多层及以上房屋建筑区和高密度低矮房屋建筑区为主，外围区域以低矮独立房屋建筑零散分布为主。居住建筑类型空间分布差异较大，凤凰乡、木老乡、新复乡、喻家乡、河西镇处于区域边缘，没有高密度多层及以上房屋建筑区，以高密度低矮房屋建筑区为主；舞凤街道、西城街道、和平路街道、北城街道、凤垭街道、新建街道、中城街道等城区街道以高密度多层及以上房屋建筑区为主；整体来看以高密度低矮房屋建筑区为主要承载人口类型，其次是高密度多层及以上房屋建筑区。

对46个街道、乡镇单元的人口、三类居住建筑面积建立多元线性方程组，利用最小二乘法进行求解三

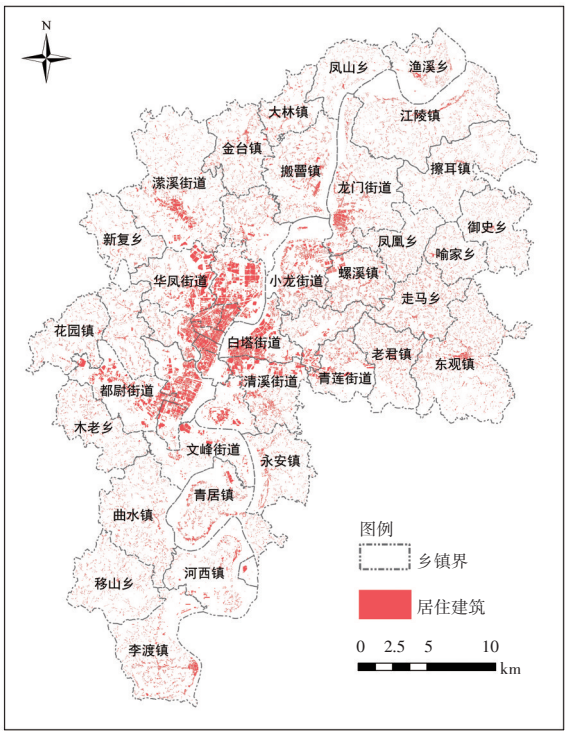


图4　南充市城市规划集中发展区居住建筑空间分布图

类居住建筑的密度，通过多次低估、高估分组迭代求解后，得到最终居住建筑人口密度求解结果，所有乡镇街道残差比例都在10%左右及以下，整体残差比为0.67%，精度较高。选择适合的100 m栅格尺度进行栅格化处理，得到的人口密度栅格图如图5所示。人口疏密分布与居住建筑空间分布基本一致，人口密度空

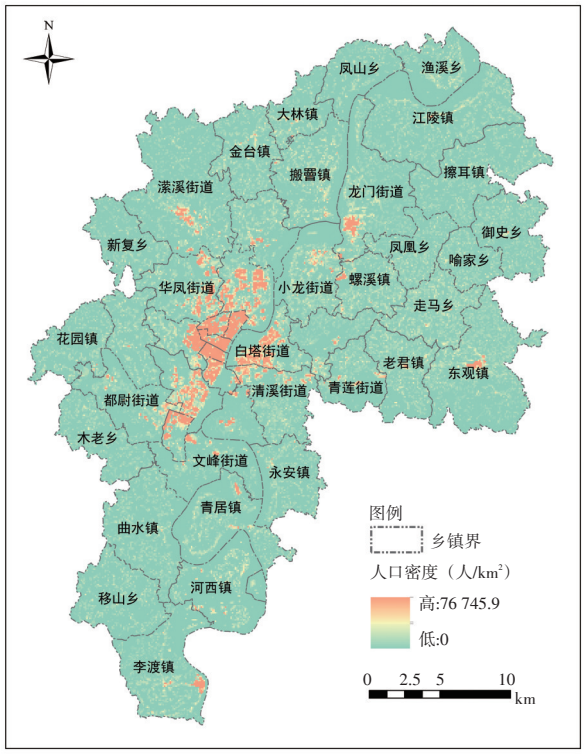


图5　南充市城市规划集中发展区人口居住密度空间分布图

间差异较大，最大密度达到76 745.9人/ km²，城区嘉陵江沿岸几个街道人口分布最为密集，龙门街道、漯溪街道、东观镇、李渡镇等周边重点地区的镇区有小范围人口分布集中区，广大外围农村地区分布较稀疏，甚至大片区域没有人口分布。在此尺度下，嘉陵江水域覆盖区和外围区域形成了明显人口真空地带，空间模拟较真实。并计算得到南充市城市规划集中发展区以行政单元统计人口计算的人口密度分布图，如图6所示。对比图5和图6，可以发现通过居住建筑拟合求解得到的人口空间分布情况更接近南充市城市规划集中发展区人口分布真实情况，能在更小尺度上体现人口分布的空间差异，整体分布格局与以行政单元统计人口计算的人口密度分布情况基本一致，从行政单元上呈现出南充市城市规划集中发展区人口密度显著高于若尔盖县。

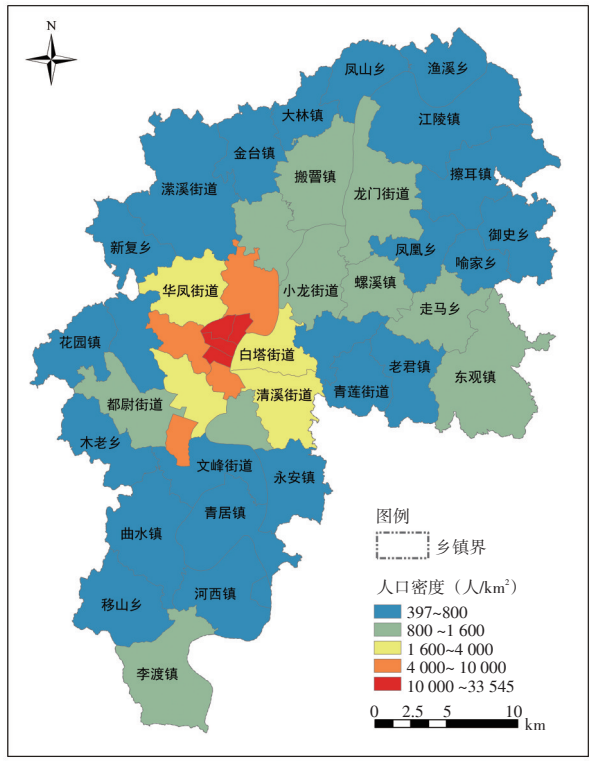


图6　南充市城市规划集中发展区行政单元统计人口密度空间分布图

3　结论与讨论

本文选择若尔盖县和南充市城市规划集中发展区，利用土地利用密度法，开展了2种不同类型区域居住人口空间化模拟研究，取得了良好效果。可以得出以下结论：

1）地理国情数据为人口空间化提供了重要信息，高精度建筑物分类数据能够自适应不同区

域。不同居住建筑类型承载人口的密度有较大差异，同样类型的居住建筑在不同区域承载人口密度差异也较大，必须对不同建筑类型、不同区域进行差异化考虑，地理国情数据中精细化的建筑分类数据能发挥重要作用。直接采用居住建筑作为人口密度指示因子模拟不同类型区域的人口分布，对人口高估和低估的单元进行分组，多次迭代解算密度，能取得精确的模拟结果。通过居住建筑拟合求解得到的人口空间分布密度更接近人口分布真实情况，能在更小尺度上体现人口分布的空间差异，相对以行政单元统计人口计算的人口密度能提供更丰富的信息。

2）人口空间分布格局具有明显的地域分异特征。不同类型区域人口空间分布格局差异较大，城市化水平较高的人口集中区域，多呈现中心聚集、边缘分散的人口空间差异化分布格局，人口稀疏地区的人口分布在空间上呈现低密度均质化分布格局，人口集中区域人口密度显著大于人口稀疏地区。

3）本文在选择居住建筑时，直接使用地理国情建筑分类数据，没有对建筑图斑进行进一步的甄别筛选，后期可以开展对不同建筑图斑的实际人口调查，进一步改进模拟效果，另外在大数据时代，在若尔盖等旅游热点地区或者南充市城市化集中区等城市人口流动频繁地区，借用大数据的一些技术方法开展人口热力研究[16]，也具有现实意义。

参考文献

[1] 杨续超,高大伟,丁明军,等. 基于多源遥感数据及DEM的人口统计数据空间化:以浙江省为例[J]. 长江流域资源与环境,2013,22(6):729-734

[2] 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):1 110-1 119

[3] 叶宇,刘高焕,冯险峰. 人口数据空间化表达与应用[J]. 地球信息科学,2006,8(2):59-65

[4] 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] 王钊,杨山,刘帅宾. 基于DMSP/OLS数据的江苏省城镇人口空间分异研究[J]. 长江流域资源与环境,2015,24(12):2 021-2 029

[6] 邹雅婧,闫庆武,黄杰,等. 基于LJ1-01夜间灯光影像的苏锡常地区人口空间化研究[J]. 长江流域资源与环境,2020,29(5):1 086-1 094

[7] 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

[8] 周天绮. 基于移动通信大数据的城市人口空间分布统计[J]. 计算机与现代化,2018(5):45-49+55

[9] 郭洪旭,黄莹,赵黛青. 城市居住人口空间分布的模拟研究:以广州市天河区为例[J]. 热带地理,2013,33(1):81-87

[10] 胡焕庸. 句容县之人口分布[J]. 地理学报,1936,3(3):621-627

[11] Lo C P. A Raster Approach to Population Estimation Using High-Altitude Aerial and Space Photographs[J]. Remote Sensing of Environment,1989,27(1):59-71

[12] 朱瑾,李建松,蒋子龙,等. 基于“实有人口、实有房屋”数据的精细化人口空间化处理方法及应用研究[J]. 东北师大学报(自然科学版),2018,50(3):133-140

[13] 杨瑞红,董春,张玉. 地理国情普查数据支持下的人口空间化方法[J].测绘科学,2017,42(1):76-81

[14] 阿荣,佟宝全.人口密度空间化模拟研究进展[J]. 赤峰学院学报(自然科学版),2012,28(24):44-47

[15] 杨瑞红. 基于高精度数据的人口空间化方法和应用研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2014

[16] 罗名海,谭波,秦思娴,等.大数据视角下的武汉市人口格局探析[J]. 地理空间信息,2019,17(10):1-6+10

第一作者简介：刘恩来（1990—），硕士，工程师，主要从事地理国情监测、人口分布与国土空间优化研究工作。