孙艳萍,陈文凯,张苏平,等.基于居民点密度的人口空间化及在四川九寨沟 7.0 级地震中的应用[J].地震工程学报,2018,40(增刊):174-179.doi:10.3969/j.issn.1000－0844.2018.Supp.174

SUN Yanping,CHEN Wenkai,ZHANG Suping,et al.Population Spatialization Research Based on Settlements Density and Its Application in Jiuzhaigou, Sichuan M_S7.0 Earthquake[J].China Earthquake Engineering Journal,2018,40(Supp):174-179.doi:10.3969/j.issn.1000－0844.2018.Supp.174

基于居民点密度的人口空间化及在四川九寨沟 7.0 级地震中的应用

孙艳萍[1,2], 陈文凯[1,2], 张苏平[1,2], 徐 钦[1,2]

(1. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000; 2. 甘肃省地震局, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 采用核密度估计法得到甘肃省村级居民点密度后,运用基于居民点密度的人口密度空间化计算公式获得甘肃省 1 000 m×1 000 m 的人口密度空间格网图。经检验,格网化结果达到了较高的精度,可满足防震减灾工作对高精度人口分布信息的需求。以四川九寨沟 7.0 级地震甘肃境内Ⅵ度区为例,利用 ArcGIS 空间分析功能,将格网人口数据和统计单元人口数据分别与地震烈度进行叠加,对比受灾人口估算结果。研究结果表明,基于公里格网的受灾人口估算方法避免了行政区划分割造成的数据分配错误,能够合理反映行政单元内部的人口分布,从而保证灾情快速评估结果的实际性和有效性。

关键词: 居民点密度; 人口空间化; 四川九寨沟地震; 受灾人口估算

中图分类号: P316 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000－0844(2018)增刊－0174－06

DOI:10.3969/j.issn.1000－0844.2018.Supp.174

Population Spatialization Research Based on Settlements Density and Its Application in Jiuzhaigou, Sichuan M_S7.0 Earthquake

SUN Yanping[1,2], CHEN Wenkai[1,2], ZHANG Suping[1,2], XU Qin[1,2]

(1.*Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou* 730000, *Gansu, China*;
2.*Earthquake Agency of Gansu Province, Lanzhou* 730000, *Gansu, China*)

Abstract: The density of village settlements is obtained by Kernel density estimation method, and then a 1 000 m×1 000 m grid map of Gansu population density is obtained based on the settlements density. Taking a Ⅵ degree area of Jiuzhaigou, Sichuan M_S7.0 earthquake in Gansu Province as an example, the grid population data and statistical unit population data are overlaid to obtain estimates of earthquake-affected population corresponding with ArcGIS. The results show that the affected population estimate method based on kilometer grid avoids the data allocation

收稿日期: 2017-09-11

基金项目: 甘肃省科技支撑计划(1504FKCA065); 国家重点研发计划(2017YFC1500905); 中国地震局兰州地震研究所地震科技发展基金项目(2017Q01)

第一作者简介: 孙艳萍(1986－),女,硕士,工程师,主要从事地震应急工作。E-mail:yrrgyoyo@163.com。

通信作者: 徐 钦(1986－),女,硕士,主要从事强震动台网运维管理与数据处理等研究工作。E-mail:xuqinhu2008@163.com。

error caused by administrative division, and can express the population distribution in the administrative unit, thus ensuring the practicality and effectiveness of the disaster rapid assessment.

Keywords: settlements density; population spatialization; Jiuzhaigou earthquake in Sichuan Province; affected population estimate

0　引言

地震灾害快速评估是在地震发生后，在最短时间内给出地震所造成的经济损失和人员伤亡情况，是地震应急决策系统的重要基础和科学依据[1-2]。人口是重要的受灾体，准确的人口空间分布信息是判断地震灾情、开展抗震救灾工作、进行震害评估的关键。传统的地震灾害预测和评估中人口数据是以统计单元为基础，由于居民点分布的非均衡性，使得以行政区平均密度来表征的人口空间分布信息欠精细，无法反映行政区内部的分布细节，导致地震灾害损失初评估出现偏差[3]。而人口数据空间化可以有效地解决这一问题，即通过人口统计数据，采用定性或定量分析的模型方法，反演出人口在一定时间和一定地理空间中的分布状态，实现在不同尺度上的空间单元转换和人口估计[4]。

近年来国内外学者在人口数据空间化方法上进行了大量的研究与探索[5-10]。研究方法主要有数学插值方法[11-14]、遥感技术支持下的人口数据空间化[15-17]以及基于遥感和 GIS 的空间化方法等，这些研究大多以遥感数据作为数据源.然后在 GIS 支持下进行处理，得到所需结果。其中通过定量分析影响人口分布的各种自然和人文要素（地形、坡向、植被、灯光、土地利用等）与人口分布的相关性，建立人口密度空间化模型，实现人口数据的空间化的方法应用很广泛。在这些影响人口分布的要素中，居民地和居民点是人口分布的直接指示指标，准确的居民地和居民点数据可以帮助获得相对合理的与人口分布相对应的空间区域，从而提高人口数据格网化的数值精度和空间精度[18-21]。

本文以地震应急基础数据库中人口数据为研究对象，以甘肃省为研究区域，展开人口数据格网化的研究工作，采用核密度估计法（Kernel Density Estimation，KDE）计算甘肃省村级居民点密度，实现基于村级居民点密度的甘肃省乡级单元人口的空间化。研究成果将作为甘肃省地震应急基础数据库的一个重要部分，应用于该地区的灾害分析和灾情快速展布。

1　人口统计数据空间化

居民点密度是一种平均密度，一个乡（镇）的村级居民点密度是指该乡（镇）单位面积上村的数量。由于居民点在区域中的分布不均匀性，且这种不均匀性会随着计算单元的面积大小而发生变化，因此计算居民点密度可以借鉴实体平面上实体密度的计算方法，如核密度估计法（KDE）、泰森多边形法等[22]。

1.1　核密度估计法

核密度估计法是空间分析中运用广泛的非参数估计方法，用于计算要素在其周围领域中的密度。该方法以特定要素点的位置为中心，将该点的属性分布在指定阈值范围内（半径为 h 的圆），在中心位置处密度最大，随距离衰减，到极限距离处密度为 0[23]。衰减方式由核密度函数决定，整个阈值范围内密度的积分之和就等于中心点的属性值，对于独立分布的点来说，属性值为 1。对区域内每个要素点依照同样的方法进行计算，并对相同位置处的密度进行叠加，可得到要素在整个区域的分布密度[24-25]。因此对于任意一点 x，邻域内的已知点 x_i 的距离对它的贡献率取决于 x 到 x_i 的距离，也取决于核函数的形状以及核函数取值的范围（称为带宽）。设核函数为 K，其带宽为 h，则 x 点处的密度估计为：

$$\hat{f}(x)=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}k\left(\frac{x-x_i}{h}\right) \tag{1}$$

其中：$K()$ 为核密度方程；h 为阈值；$x-x_i$ 为估计点 x 到样本 x_i 处的距离。

1.2　数据来源

居民点数据、2016 年乡镇人口和行政区划数据来源于甘肃省地震应急基础数据库；四川九寨沟 7.0 级地震烈度数据来源于中国地震局。ASTER-GDEM 30 m 分辨率高程数据来源于 NASA Reverb（https://reverb.echo.nasa.gov/reverb/）。

1.3　人口数据空间化实现

截至 2013 年底，甘肃省共有 16 365 个行政村，50 044 个自然村，共计 66 409 个村级居民点。利用各行政村、自然村驻地的点状图形数据，采用核密度

估计法生成网格大小为 1 000 m×1 000 m 的甘肃省村级居民点分布密度图(图 1)。甘肃省村级居民点的平均密度为 0.076 个/km²。密度分布总体格局是:临夏州东部及陇南市东南部村级居民点密度大于 3 个/km²的地区成片集中,构成甘肃第一大密集区;在西北部的张掖、武威地区的市政府和县政府所在地也分别形成大小不同的密度大于 3 个/km²的热点地区;密度在 2～3 个/km² 以及 1～2 个/km²的地区主要分布在陇中定西地区、陇东庆阳地区,其分布格局呈现片状分布的态势。

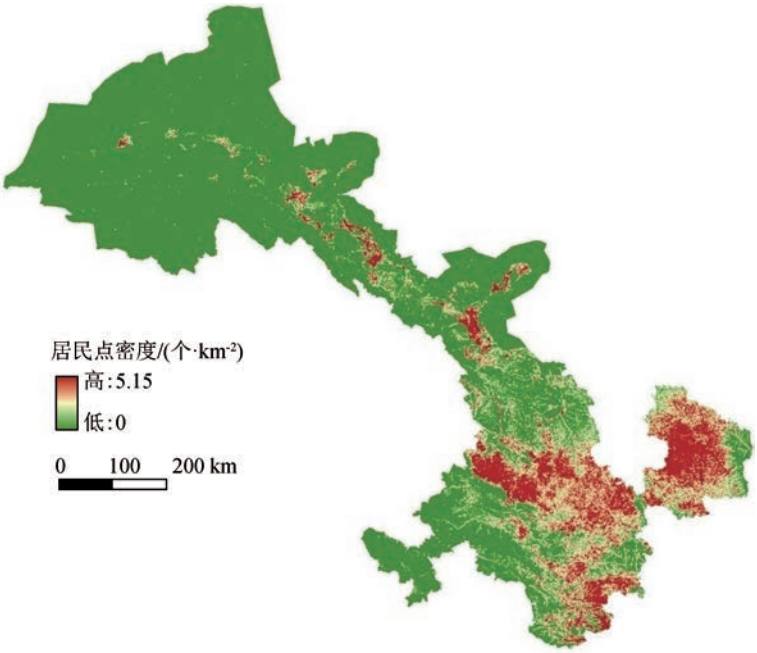

图 1 甘肃省村级居民点分布密度

为了进行人口数据空间化,首先对基于居民点密度的人口密度空间化作理性分析。假设一个区域总人口为 P,该区域某级居民点总数为 N 个,如果某个网格 i 对应的居民点密度为 φ_i,则该网格的人口密度 $POPden_i$ 计算公式为:

$$POPden_i = P/N \times \varphi_i \tag{3}$$

分别统计甘肃省 1 351 个乡镇的村级(包括行政村、自然村)居民点并导入数据库,计算各个乡镇内平均每个村级居民点的人口规模,即式(3)中的 P/N;对甘肃省 1 351 个乡镇的村级人口数据作格网化处理(格网大小为 1 000 m×1 000 m),然后采用 Raster calculator 对村级人口格网数据和居民点密度进行运算,得到甘肃省人口密度图(图 2)。从图中可见,人口密度自东南向西北递减,最大为 102 104 人/km²,地级市城市周围都有一个或多个人口密度热点区域,酒泉大部分地区和甘南部分地区是人口密度为 0 的无人区,这一结果基本反映了甘肃省人口的分布状况。

2 精度验证

为检验人口数据空间化结果的精度,采用甘肃省 86 个区县人口数据对人口数据空间化的结果进行验证。利用 ArcGIS 空间分析中的 Zonal Statistics as Table 功能统计各区县人口,通过格网人口统计值与区县实际人口数据进行误差计算和回归分析。

误差计算方法:

$$E = \frac{\text{统计数据} - \text{区县数据}}{\text{区县数据}} \times 100\% \tag{4}$$

通过计算得到误差范围为:[－10.92%,33.91%],误差平均值为 1.97%,误差绝对值平均值为 3.68%。误差为负值表示人口密度值被低估,误差为正值表示人口密度值被高估,相对误差大部分分布在－10%～10%间,其所占比例为 88.37%。相关和回归分析结果表明(图 3),空间化人口数据统计值和区县人口数据相关系数为 0.985,线性拟合斜率接近 1。检验结果表明本研究的人口数据空间化结果达到了较高的精度。

3 基于人口数据空间化的地震受灾人口估算

在以往的震害快速评估中,地震受灾人口的估算主要以普查数据为数据源,根据不同地震烈度范围占行政单元的面积比例来确定,这与人口在区域

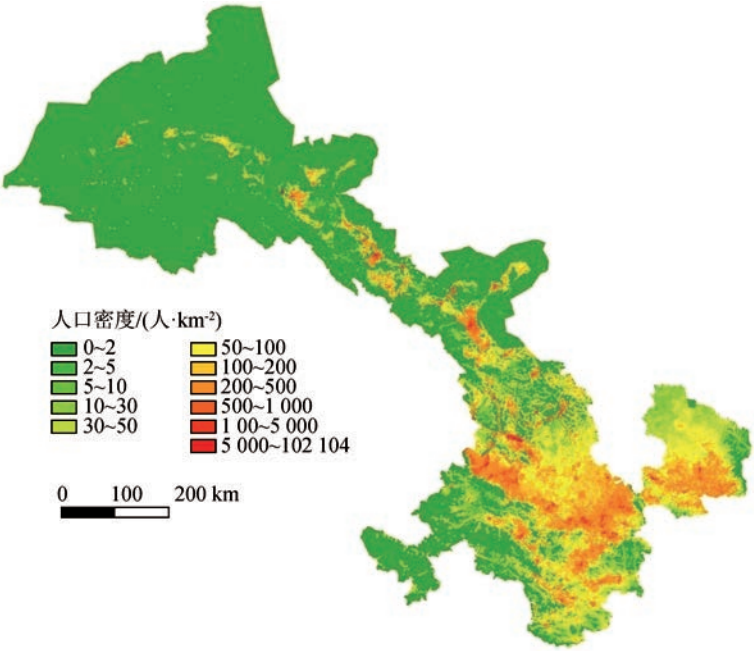

图 2　甘肃省公里格网人口密度分布图

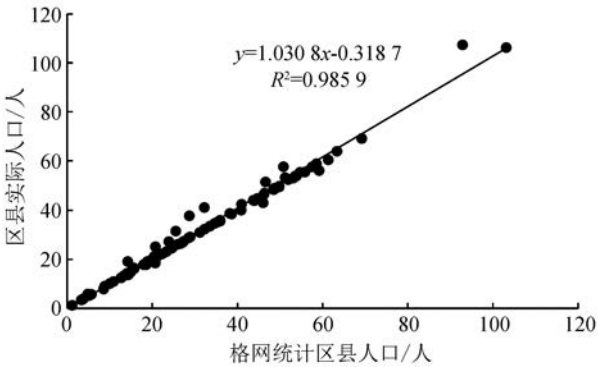

图 3　区县实际人口与格网统计区县人口关系图

中的实际分布相去甚远，因此这种方法的可靠性差，达不到地震灾情评估的精度要求。

本文在完成人口数据空间化的基础上，以 2017 年 8 月 8 日四川省九寨沟 7.0 级地震Ⅵ度区甘肃地区为例，对行政单元统计人口和格网人口进行对比分析。此次地震的最大烈度为Ⅸ度，等震线长轴总体呈 NNW 走向，Ⅵ度区及以上总面积为 18 295 km^2，共造成四川省、甘肃省 8 个县受灾。甘肃省受灾范围全部分布在Ⅵ度区，主要涉及陇南市文县、甘南藏族自治州舟曲县及迭部县，共计 27 个乡镇单元。应用 ArcGIS 统计各乡镇基于公里格网人口数据的受灾人口，并与基于统计单元平均人口密度的受灾人口估算结果进行对比(图 3)。

基于统计单元人口和公里格网人口得出Ⅵ度区受灾人口分别为 118 570 人和 111 058 人，中寨镇、石鸡坝乡、博峪乡、大峪乡、阿夏乡和多儿乡全部包含于烈度圈内，统计单元人口和公里格网人口差别不大。本文以估算结果差异较大的几个乡镇(丹堡镇、桑坝乡、电尕镇、城关镇、曲告纳乡和拱坝乡)为例进行分析。由于缺乏详实的现场调查数据，根据地震烈度、公里格网人口数据、居民地、居民点进行空间叠加对两种估算结果进行定性评价(图 4)。文县丹堡乡根据统计单元面积比例占比计算结果为 2 909 人，公里格网统计结果为 547 人，从叠加结果可以看出，丹堡乡位于甘肃省境内Ⅵ度区最下方，Ⅵ度区内其大约占 1/3 面积，且居民点多分布于低海拔的Ⅵ度区之外，因此基于网格人口密度的估算结果与实际情况较为符合；迭部县卡坝乡总人口 2 600 人，大约有 10.9%的面积落入Ⅵ度区内，因此统计单元估算结果为 283 人，但利用公里格网估算结果为1 027人，相差较大，从图上可以看出卡坝乡有约 40%的居民地或居民点落入Ⅵ度区，因此基于网格人口密度的估算结果更为贴近实际。此外，对于其他估算结果相差较大的乡镇也得出了相似的结论，说明传统的基于统计单元平均人口进行受灾人口估算的结果不能客观反映地震灾情，基于公里格网的受灾人口估算方法避免了行政区划分割造成的数据分配错误，能够合理反映行政单元内部的人口分布，从而保证了灾情快速评估结果的有效性。

表 1 Ⅵ度区乡镇受灾人口估算表

区县	乡镇	总人口/人	面积比例/%	统计单元人口/人	公里格网人口/人
文县	中寨镇	32 383	100	32 383	31 736
	铁楼藏族乡	9 312	96.76	9 010	8 965
	丹堡乡	7 231	40.23	2 909	547
	堡子坝乡	13 248	27.67	3 665	1 421
	石坊乡	9 071	68.13	6 180	6 413
	石鸡坝乡	12 749	100	12 749	12 569
舟曲县	城关镇	40 477	5.05	2 045	462
	峰迭镇	10 113	58.58	5 924	4 450
	立节镇	4 526	53.23	2 409	3 394
	曲瓦乡	3 688	97.81	3 607	3 620
	巴藏乡	4 602	24.39	1 122	1 843
	大峪乡	4 543	100	4 543	4 754
	憨班乡	4 431	14.70	651	791
	武坪乡	5 034	91.49	4 606	5 058
	插岗乡	2 884	87.42	2 521	2 141
	拱坝乡	5 090	10.65	542	6
	曲告纳乡	11 132	5.81	647	0
	博峪乡	4 023	100	4 022	3 927
迭部县	电尕镇	16 454	7.34	1 208	527
	卡坝乡	2 600	10.90	283	1 027
	达拉乡	2 516	84.70	2131	2 512
	桑坝乡	4 069	1.44	59	40
	尼傲乡	2 723	34.90	950	967
	旺藏乡	7 371	89.30	6 582	6 843
	阿夏乡	1 498	100	1 498	1 501
	多儿乡	4 340	100	4 340	4 312
	洛大乡	6 109	32.47	1 984	1 232

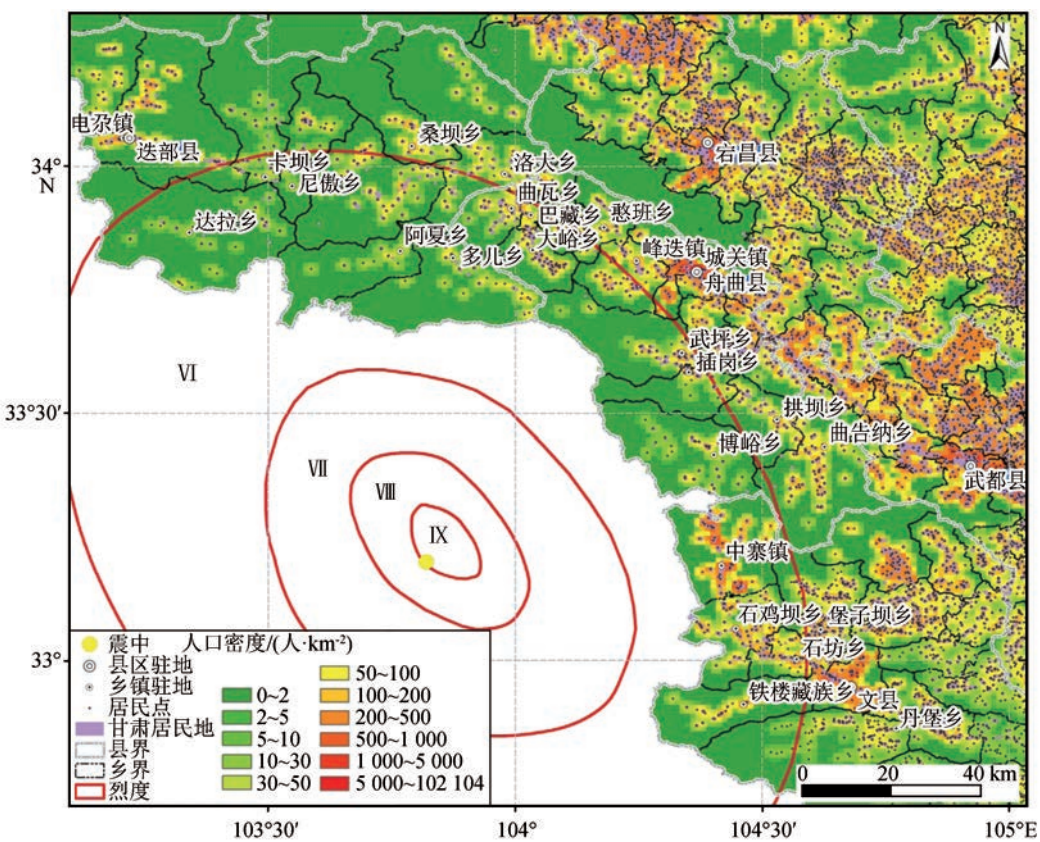

图 4 格网人口数据和居民地、居民点叠加

4 结论

传统的地震灾害预测和评估中人口数据是以统计单元为基础，由于居民点分布的非均衡性，使得以行政区平均密度来表征的人口空间分布信息欠精细，无法反映行政区内部的分布细节，导致地震灾害损失初评估出现偏差。本文以地震应急基础数据库中人口数据为研究对象，以甘肃省为研究区域，展开人口数据格网化的研究工作，采用核密度估计法(Kernel Density Estimation，KDE)计算甘肃省村级居民点密度，实现基于村级居民点密度的甘肃省乡级单元人口的空间化。

(1) 为检验人口数据空间化结果的精度，采用甘肃省 86 个区县人口数据对人口数据空间化的结果进行验证，发现相对误差大部分分布在－10%～10%间，其所占比例为 88.37%。相关和回归分析结果表明，空间化人口数据统计值和区县人口数据相关系数为 0.985，线性拟合斜率接近 1。检验结果表明本研究的人口数据空间化结果达到了较高的精度。

(2) 本文在完成人口数据空间化的基础上，以四川省九寨沟 7.0 级地震Ⅵ度区的甘肃地区为例，对行政单元和格网数据快速估算受灾人口进行对比分析。研究结果表明，基于公里格网的受灾人口估算方法避免了行政区划分割造成的数据分配错误，能够合理反映行政单元内部的人口分布，从而保证了灾情快速评估结果的有效性。

参考文献

[1] 李树桢.地震灾害评估[M].北京：地震出版社，1996.

[2] 韩贞辉，李志强，陈振拓，等.人口、房屋数据空间化及其在震灾快速评估中的应用——以彝良地震为例[J].地震地质，2013，35(4)：894-906.

[3] 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.

[4] 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，(2)：59-65.

[5] YUE T X，WANG Y A，LIU J Y.Surface Modeling of Human Population Distribution in China [J]. Ecological Modeling，2005，181：461-478.

[6] YUE T X，WANG Y A，CHEN S P.Numerical Simulation of Population Distribution in China[J].Population and Environment，2004，25(2)：141-163.

[7] MOONZ K，FARMER F L.Population Density Surface：A New Approach to an Old Problem [J]. Society and Natural Resources，2001，14：39-49.

[8] 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)：5-33.

[9] 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.

[10] 江东，杨小唤，王乃斌，等.基于 RS、GIS 的人口空间分布研究[J].地球科学进展，2002，17(5)：734-738.

[11] TOLBER W R.Smooth Pycnophylactic Interpolation for Geographical Regions [J].Journal of the American Statistical Association，1979，74(367)：519-530.

[12] MARTIN D.Mapping Population Data From Zone Centroid Locations [J].Transactions of the Institute of British Geographers，1989，14(1)：90-97.

[13] FLOWERDEW R.GREEN M.Developments in Areal Interpolation Methods and GIS [J]. The Annals of Regional Science，1992，26(1)：67-78.

[14] LO C P.Modeling the Population of China Using DMSP Operation Lines Can System Night Time Data [J].Annals of the Association of American Geographer，2002，92(2)：224-240.

[15] OGROSKY C E.Population Estimates from Satellite Imagery [J].Photogrammetric Engineering & Remote Sensing，41(6)：707-712.

[16] SUTTON P，ROBEAS D，ELVIDGE C，et al. A Comparison of Nighttime Satellite Imagery and Population Density for the Continental United States[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing，1999(11)：1303-1313.

[17] 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.

[18] 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.

[19] 何英彬，陈佑启，唐俊华，等.中国农村居民点研究进展[J].中国农业通报，2010，26(14)：433-437.

[20] 王春菊，汤小华，吴德文.福建省居民点分布与环境关系的定量研究[J].海南师范学院学报(自然科学版)，2005，18(1)：89-92.

[21] 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.

[22] 闫庆武，卞正富.基于 GIS-SDA 的居民点空间分布研究[J].地理与地理信息科学，2008，24(3)：57-61.

[23] SILVERMAN B W.Density Estimation for Statistics and Data Analysis [M].New York：Chapman & Hall，1986.

[24] 王法辉.基于 GIS 的数量方法与应用[M].北京：商务印书馆，2009.

[25] 张珣.2004—2008 年北京城区商业网点空间分布与集聚特征[J].地理科学进展，2013，32(8)：1207-1215.