

引用格式: 胡云锋, 赵冠华, 张千力. 基于夜间灯光与LUC数据的川渝地区人口空间化研究[J]. 地球信息科学学报, 2018, 20(1): 68-78. [Hu Y F, Zhao G H, Zhang Q L. Spatial distribution of population data based on nighttime light and LUC data in the Sichuan-Chongqing Region [J]. Journal of Geo-information Science, 2018, 20(1): 68-78. ] DOI:10.12082/dqxxkx.2018.170224

# 基于夜间灯光与LUC数据的川渝地区人口空间化研究

胡云锋<sup>1\*</sup>, 赵冠华<sup>1,2</sup>, 张千力<sup>1,2</sup>

1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049

## Spatial Distribution of Population Data Based on Nighttime Light and LUC Data in the Sichuan-Chongqing Region

HU Yunfeng<sup>1\*</sup>, ZHAO Guanhua<sup>1,2</sup>, Zhang Qianli<sup>1,2</sup>

1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** Spatial distribution data of the population with high-precision is the important data to study the law of the variation of population activity at small-scale. Remote sensing images of nighttime light have the unique ability of reflecting human social activities. Thus, they were widely used in spatial data mining of the socio-economic field. In this study, DMSP/OLS nighttime light data, NPP/VIIRS nighttime light data, resident population data and land use data were used as data sources. Then, we used these data to build the stepwise regression at county scale. The spatial distribution data of population in Sichuan and Chongqing area were established based on the stepwise regression model. Finally, we took the resident demographic data of the randomly selected 500 townships as the practical data to assess the accuracy of spatial distribution data of the population. The analysis shows that: (1) both of the two nighttime light data have high correlation with the population. The correlation coefficients are both above 0.76. The correlation of NPP / VIIRS night light data and population is higher than DMSP / OLS. The fitting model does not change the results. (2) There are many types of land use that are highly relevant to population. Farmland and woodland can also affect the spatial distribution of population. Thus, built area should not be considered as the only type of land use for building the population distribution model. (3) When the two nighttime lights were combined with LUC (Land Use/ Land Cover), the complex correlation coefficient ( $R^2$ ) of the stepwise regression model using DMSP / OLS nighttime light data and NPP / VIIRS night light data is 0.796 and 0.817 respectively, and the model fitting rate is higher. Compared with the results based on DMSP/OLS (1 km), the spatial resolution of population based on NPP/VIIRS nighttime light data increases to 500 m. The change of population density is more natural from the central city to the surrounding urban area, and the population distribution is more real. (4) When combined with LUC data, the results obtained with NPP / VIIRS

收稿日期 2017-04-30; 修回日期: 2017-08-25.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB0501502、2016YFC0503701); 高分专项(00-Y30B14-9001-14/16)。[ **Foundation items:** National Key Research and Development Program of China, No.2016YFB0501502, 2016YFC0503701; Key Project of High Resolution Earth Observation System, No.00-Y30B14-9001-14/16. ]

\*作者简介: 胡云锋(1974-), 男, 江西赣州人, 博士, 副研究员, 主要从事遥感监测与区域可持续发展评价研究。

E-mail: huyf@lreis.ac.cn

nighttime light data were more accurate than DMSP / OLS nighttime light data, indicating that NPP / VIIRS nighttime light data is more suitable for the research of spatial distribution of population than DMSP / OLS.

**Key words:** DMSP/OLS; NPP/VIIRS; population simulation; stepwise Regression; LUC

**\*Corresponding author:** HU Yunfeng, E-mail: huyf@lreis.ac.cn

**摘要:** 高精度的人口空间分布数据是开展小尺度人口活动变化规律研究的关键数据。夜间遥感影像对于反映人类社会活动具有独特的能力,因而被广泛的应用于社会经济领域的空间数据挖掘。本研究以DMSP/OLS夜间灯光数据、NPP/VIIRS夜间灯光数据、常住人口统计数据、土地利用数据为数据源,在县级尺度上建立逐步回归模型,构建川渝地区人口空间分布数据;并随机抽取研究区内500个乡镇,以常住人口统计数据为真实数据,对人口空间化结果进行精度检验。结果表明:①2种夜间灯光数据与人口均有较高的相关性,相关系数均在0.76以上,NPP/VIIRS夜间灯光数据与人口的相关性要高于DMSP/OLS,且受拟合模型的影响不大。②与人口相关性较高的土地利用类型有多种,耕地、林地对人口空间分布也有影响,在建模时不应只考虑建成区。③在2种夜间灯光数据分别与土地利用与土地覆被数据(Land Use/ Land Cover, LUC)结合时,使用DMSP/OLS夜间灯光数据和NPP/VIIRS夜间灯光数据得到的逐步回归模型的复相关系数 $R^2$ 分别为0.796、0.817,模型拟合率较高,而基于NPP/VIIRS夜间灯光数据得到的人口空间化结果分辨率(500 m)相比DMSP/OLS提高了一倍(1 km),中心城区与周边城区人口密度变化更加自然,更符合实际人口分布情况。④与LUC数据结合时,使用NPP/VIIRS夜间灯光数据得到的人口空间化结果精度要高于DMSP/OLS夜间灯光数据,表明NPP/VIIRS夜间灯光数据相比DMSP/OLS更适用于人口数据空间化研究。

**关键词:** DMSP/OLS; NPP/VIIRS; 人口模拟; 逐步回归; LUC

## 1 引言

人口问题是影响当今世界可持续发展的重大问题之一<sup>[1]</sup>。人口的增长加大了全球资源和环境的承载压力<sup>[2]</sup>,资源、环境、人口之间的矛盾随之也变得十分突出<sup>[3]</sup>。掌握人口信息,研究人口空间分布及其变化可以为区域可持续发展研究、规划等工作提供科学支撑。人口调查是当前各国实现人口信息统计和分析的主要渠道,具体方式包括抽样调查和全体普查2种形式。虽然人口调查和统计有严谨的统计学理论和方法作为支撑,具有权威、系统、规范等优势<sup>[4]</sup>,但仍存在时间分辨率低、更新周期长、精度低、不利于可视化和空间分析操作等问题,难以满足人口分布规律研究<sup>[5]</sup>。实时、可靠的人口空间分布信息对于研究和解释人类对社会、经济和环境的影响有重要作用<sup>[2,6-7]</sup>。

人口空间分布信息可以由人口数据空间化或人口密度格网化技术获取得到。近年来,人口空间化研究发展较快,其中夜间灯光作为综合指示因子来进行社会经济数据空间化模拟得到越来越多的应用<sup>[8-11]</sup>。早期研究大多使用美国国防气象卫星(Defense Meteorological Satellite Program, DMSP)搭载的业务线扫描系统传感器(Operational Line Scan System, OLS)获取的夜间灯光数据,由于该数据空间分辨率较低(约为1 km),因此在大、中尺度(国家、省、州)上的相关研究较为适用<sup>[12-14]</sup>,小尺度的

估算适用性较低。2011年10月,美国新一代极轨运行环境卫星系统预备项目卫星(National Polar-orbiting Operational Environmental Satellite System Preparatory Project, NPP)发射成功,NPP携带的可见光红外线成像辐射仪(Visible Infrared Imaging Radiometer Suite, VIIRS)可得到接收22个波段的影像数据,其中白天/夜间波段(Day/Night Band, DNB)能够识别微弱灯光源。相较于DMSP/OLS夜间灯光数据,VIIRS传感器采用星上定标,可以得到更高精度的数据<sup>[15]</sup>,新型夜间灯光数据空间分辨率的提高(500 m)也为小尺度级别的数据空间化研究提供了技术支持。目前有关NPP/VIIRS夜间灯光的研究主要集中在模拟GDP<sup>[8,16-17]</sup>、电力消耗估算<sup>[18]</sup>、油气平台识别<sup>[19]</sup>等经济领域,而在人口空间化方面应用的较少。高义等<sup>[20]</sup>对比分析了2种夜间灯光数据在我国沿海地区人口空间化结果,研究表明,NPP/VIIRS夜间灯光数据反演人口的精度要高于DMSP/OLS夜间灯光数据,但是得到的结果精度并不是很高。因此,如何有效地借助NPP/VIIRS夜间灯光数据得到更高精度的人口空间化结果还需进一步研究。

综上所述,本研究在对比了2种不同的夜间灯光数据(DMSP/OLS、NPP/VIIRS)与人口统计数据相关性的基础上,引入土地利用数据,以川渝地区为研究区,与县级常住人口统计数据进行逐步回归建模,并且使用乡镇级统计人口对人口空间化结果进行精度评价,期望建立更有效的人口空间化数据。

## 2 研究区概况与数据源

### 2.1 研究区概况

川渝地区地处青藏高原与长江中下游平原的过渡地带,位于东经 $97^{\circ}22'$ ~ $110^{\circ}12'$ 、北纬 $26^{\circ}02'$ ~ $34^{\circ}18'$ 之间,总面积为56.74万 $\text{km}^2$ ,平均海拔2500 m左右,地势西高东低,区域地貌主要有高原、盆地、山地、丘陵、平原等。受地貌和季风环流的影响,川渝地区气候主要表现为西部的高原大陆性气候和东部的亚热带湿润季风气候。2013年,川渝地区常住人口为1.11亿,辖区包括18个地级市、3个自治州,共计218个县级行政区。川渝地区的地理位置及行政区划如图1所示。

川渝地区是我国西部经济发展的增长极,同时也是丝绸之路经济带与长江经济带的交汇点,具有联动东西、带动南北的区位优势,在国家“一带一路”和长江经济带发展战略中扮演重要角色<sup>[21]</sup>。作为中国西部人口重要聚居地之一,川渝地区也是洪涝、冰雹、泥石流、山体滑坡等自然灾害的多发区<sup>[22]</sup>。再加上该地区复杂的地形地貌条件,造成该地区人地关系矛盾突出,因此研究川渝地区的人口分布,可以为该地区经济协调稳定发展以及灾害风险评估与救援提供技术支持。

### 2.2 数据源

(1)DMSP/OLS 数据:本研究使用的DMSP/OLS夜间灯光数据来自于美国国家地球物理数据中心(NGDC)发布的2013年夜间非辐射定标平均

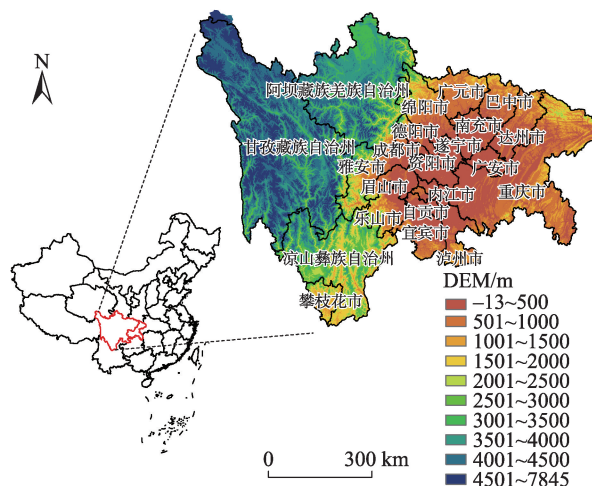


图1 川渝地区位置及其高程分布图

Fig. 1 Location and elevation distribution of Sichuan-Chongqing region

稳态数据(stable\_light.avg\_vis data)(图2(a)),该数据经过了去云处理,并且消除了背景噪声及短时光数据(火山气体、森林火灾、极光等)。像元灰度值介于0~63之间。数据下载地址 <https://www.ngdc.noaa.gov/eog/dmsp/downloadV4composites.html>。

(2)NPP/VIIRS 数据:美国新一代极轨运行卫星系统预备项目(National Polar-orbiting Operational Environmental Satellite System Preparatory Project, NPP)卫星携带的VIIRS传感器共有22个波段,其中白天/夜间波段(Day/Night Band, DNB)星下地面分辨率为375 m,灰度区间(16 bit)大于DMSP/OLS(6 bit),可以识别微弱的灯光源,对地表照明分

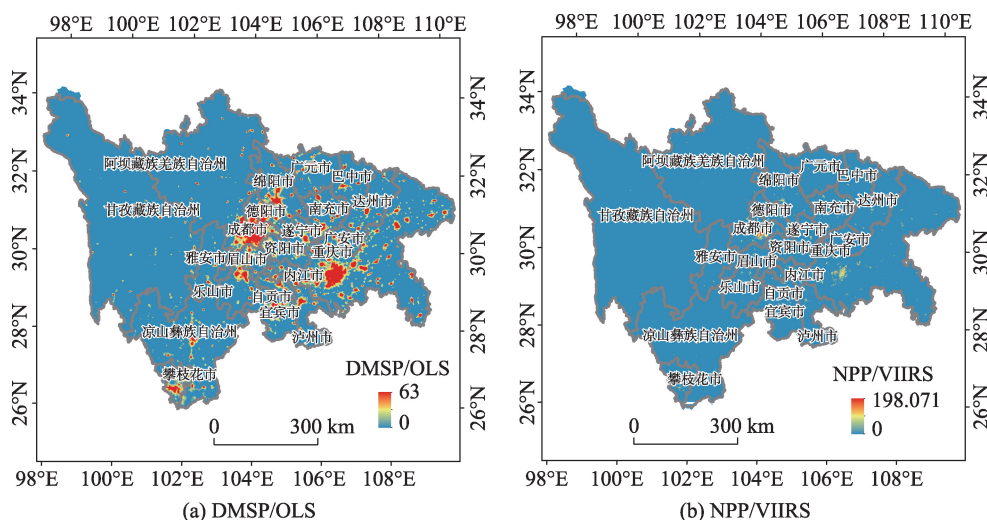


图2 2013年川渝地区DMSP/OLS夜间灯光和NPP/VIIRS夜间灯光修正数据

Fig. 2 DMSP/OLS and NPP/VIIRS nighttime light data of Sichuan-Chongqing region in 2013



布的刻画更为准确(图2(b))。但该数据没有经过处理,还存在森林火灾、极光、火山等短时光数据和山顶积雪、干涸床等背景噪声。数据下载地址 [https://www.ngdc.noaa.gov/eog/viirs/download\\_monthly.html](https://www.ngdc.noaa.gov/eog/viirs/download_monthly.html)。

(3)土地利用与土地覆被数据(LUC数据):本次研究使用的LUC数据来自于中国科学院地理科学与资源研究所刘纪远团队<sup>[23]</sup>,时间为2013年,该数据集将土地利用/覆被分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用6个一级类和有林地、灌木林、疏林地、其他林地以及高、中、低覆盖草地等22个二级类型(图3(a))。

(4)人口统计数据:本次研究使用的人口数据是

常住人口统计数据,主要来自《2014年四川省统计年鉴》、《2014年重庆市统计年鉴》(图3(b))。常住人口是指本行政区域内以下4部分人口:居住在本行政区域,户口在本行政区域或户口在外县(市),离开户口登记地半年以上的人口;户口在本行政区域,居住在外县(市),离开户口登记地不到半年的人口;户口在本行政区域,居住在港澳台或国外的人口。

(5)行政区划边界数据:本次研究所使用的边界包括省、市、县、乡镇四级行政区划,数据来自于国家基础地理信息中心2012年发布的1:25万的行政区划边界(表1)。

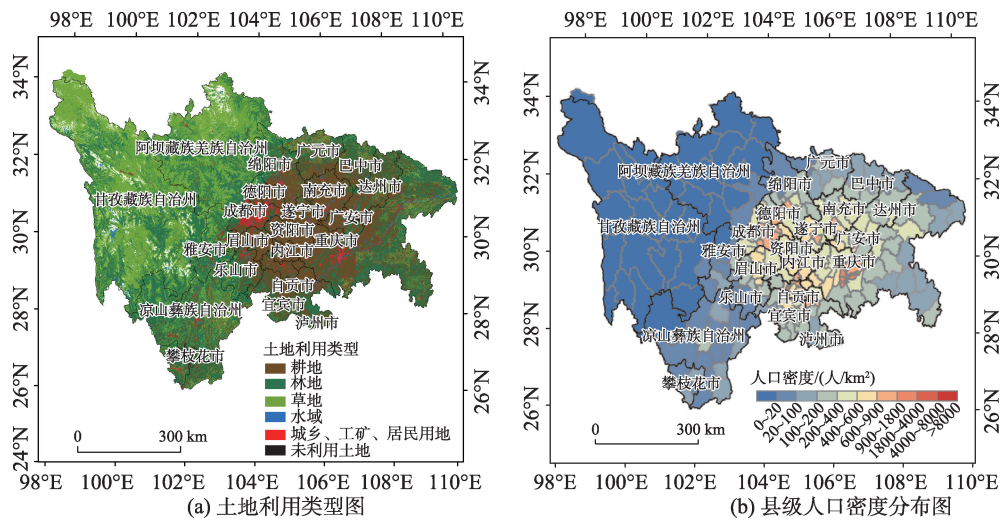


图3 川渝地区土地利用类型图与县级人口密度分布图

Fig. 3 LUC and population density at county level of Sichuan-Chongqing region

表1 数据来源表

Tab. 1 Data sources

数据类型	年份	数据来源	比例尺/分辨率
行政区划边界	2012	国家基础地理信息中心	1:25万
人口统计资料	2013	统计年鉴以各地区统计公报	县、乡镇
LUC	2013	中科院资源环境科学数据中心	1:10万/1 km
DMSP/OLS	2013	美国国家地球物理数据中心	1 km (采样后)
NPP/VIIRS	2013	美国国家地球物理数据中心	0.5 km (采样后)

## 2.3 数据预处理

首先对原始夜间灯光影像进行剪切、投影、重采样处理,采用双线性插值法分别将DMSP/OLS和NPP/VIIRS夜间灯光数据的空间分辨率重采样为1 km和500 m,2种夜间灯光数据均转换为Albers

等积圆锥投影(大地基准为WGS-84,中央经线为105°E,双标准纬线分别为25°N和47°N,起始原点为0°)。

NPP/VIIRS年数据合成:为消除偶然误差采用平均值法求得年平均夜间灯光数据。具体计算公式如下:

$$A\_R = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{12} R_i \quad (1)$$

式中: $A\_R$ 为夜间灯光反射率平均值; $R_i$ 为*i*月夜间灯光反射率。由于6月的夜间灯光数据缺失非常严重,因此不参与计算,其中: $i \neq 6, n=11$ 。

NPP/VIIRS背景噪声去除:合成后的年平均数据存在大量的背景噪声,本研究结合前人已有的研究<sup>[17-18]</sup>,首先提取2013年的DMSP/OLS夜间灯光数据像元值非零区域作为掩膜,将掩膜区域以外的区



域作为噪声部分,提取NPP/VIIRS夜间灯光数据;然后针对此数据,选择重庆市和成都市夜间灯光强度最高值作为有效灯光强度阈值,采用八领域算法<sup>[18]</sup>对夜间灯光数据进行平滑处理,最终得到川渝地区NPP/VIIRS夜间灯光修正数据。

### 3 分析方法

#### 3.1 人口空间化方法

在SPSS软件下,以各区县常住人口统计数据作为因变量,各区县内不同土地利用类型下的夜间灯光亮元数、暗元数及灯光总亮度为自变量(影像中亮度值为0的像元作为暗元,亮度不为0的像元作为亮元),进行逐步回归分析,得到模型自变量及回归系数,最后根据建立的模型对人口进行空间化。考虑到分别提取掩膜进行计算过程较为复杂,为方便计算,本研究采用格网计算的方法,对LUC数据和夜间灯光数据进行叠加,具体方法为:首先分别建立川渝地区500 m和1000 m的格网矢量数据,以此来统计各格网上的对应的土地利用类型、亮元数、暗元数、灯光总亮度;然后与县级行政区划边界进行叠加分析,得到各县各土地利用类型上的灯光亮元数、暗元数、灯光总亮度。人口空间化流程如图4所示。

#### 3.2 逐步回归建模

提取的模型自变量包括: $NU$ 是暗元数,代表一种土地利用类型下无灯光区面积; $NL$ 是亮元数,为同种土地利用类型下有灯光区面积; $LE$ 代表该种土地利用类型下灯光总辐射亮度值。模型的构建采用逐步回归法,各自变量进入方程的置信水平为0.05,剔除方程的置信水平为0.1。回归方程的常量为正。初次建立的模型可能会出现某些自变量系数为负的情况,主要原因是各变量之间存在共线性的问题,使模型估算出来的人口可能会出现负值,与实际情况不符合。在本研究中,直接剔除系数为负的变量,然后将剩余变量再次引入模型,最终进入模型的自变量的系数全为正,且常量为正。模型表达式为:

$$P_i = P_0 + \sum_{j=1}^M (a_j \times NU_{ij} + b_j \times NL_{ij} + c_j \times LE_{ij}) \quad (2)$$

式中: $P_i$ 为第*i*个县级统计人口; $P_0$ 为常数; $M$ 为土地利用类型数; $NU_{ij}$ 、 $NL_{ij}$ 、 $LE_{ij}$ 分别为第*i*个县第*j*种土地利用类型上的亮元数、暗元数和总亮度指数; $a_j$ 、 $b_j$ 、 $c_j$

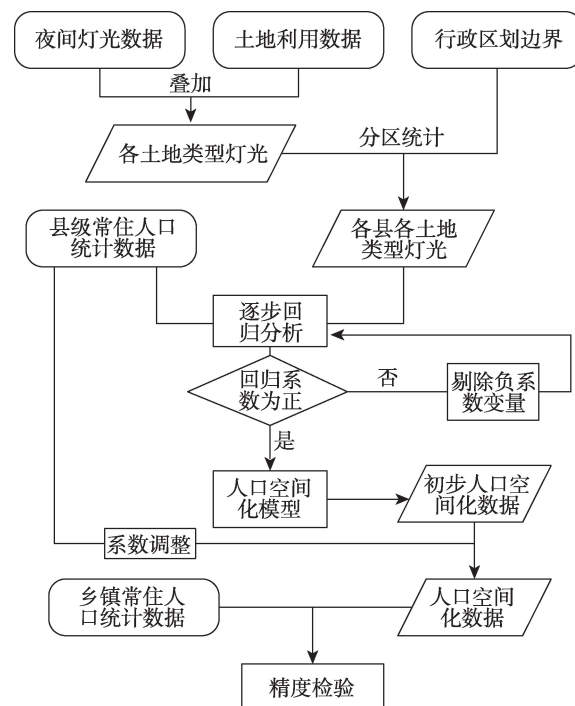


图4 基于夜间灯光数据和土地利用数据的人口空间化流程图

Fig. 4 Spatial distribution of population based on nighttime light data and LUC

为回归系数,利用上述结果得到像元尺度人口:

$$P_{ijk} = P_0 / N_i + \sum_{j=1}^M (a_j \times NU_{ijk} + b_j \times NL_{ijk} + c_j \times LE_{ijk}) \quad (3)$$

式中: $P_{ijk}$ 为第*i*个县内第*j*种土地利用类型上第*k*个像元上的人口数; $N_i$ 为第*i*个县内像元个数; $M$ 为土地利用类型数; $a_j$ 、 $b_j$ 、 $c_j$ 为回归系数; $NU_{ijk}$ 、 $NL_{ijk}$ 、 $LE_{ijk}$ 分别为第*i*个县第*j*种土地利用类型第*k*个像元上的亮元数、暗元数和灯光总亮度。

$$P'_{ijk} = P_{ijk} \times \frac{\bar{P}_i}{P_i} \quad (4)$$

式中: $P'_{ijk}$ 为最终栅格人口; $\bar{P}_i$ 为第*i*县统计人口; $P_i$ 为第*i*县所有像元值之和。

式(2)是县域单元上人口-各类型土地灯光强度关系的表达式,通过该公式,将可以反推得到相关变量(各类型土地暗元数、亮元数、灯光强度)的回归系数;式(3)是将式(2)在县域单元上得到的各变量回归系数纳入到计算公式中,开展像元尺度上的人口估算;式(4)是利用县域单元上的人口普查统计数据与基于式(3)得到的县域单元上全部像元上的人口空间统计数进行对比,从而对各像元上的人口进行微调,从而确保县域尺度上汇总的人口空间分布模拟数据与实际的统计数据保持一致。

### 3.3 精度评价

对于模拟得到的人口需要进行精度评价和误差分析,本研究选取了相关系数(R)、均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)、平均绝对误差(Mean Absolute Error, MAE)、平均相对误差(Mean relative Error, MRE)来进行评价。具体公式如下:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})(PE_i - \overline{PE})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (PE_i - \overline{PE})^2}} \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (PE_i - P_i)^2}{n}} \quad (6)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |PE_i - P_i| \quad (7)$$

$$MRE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|PE_i - P_i|}{P_i} \quad (8)$$

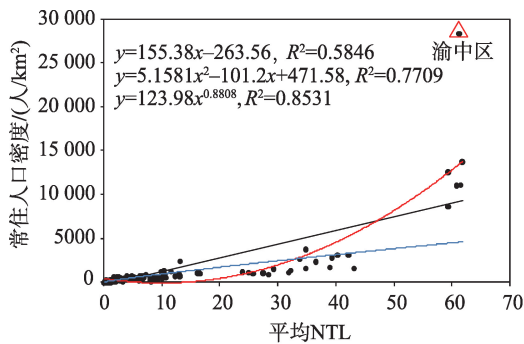
$$RE_i = \frac{PE_i - P_i}{P_i} \quad (9)$$

式中: $P_i$ 代表*i*行政单元内统计人口数; $PE_i$ 表示*i*行政单元内人口的估计数; $n$ 代表行政单元的个数; $\bar{P}$ 代表统计人口数平均值; $\overline{PE}$ 表示人口的估计数平均值。

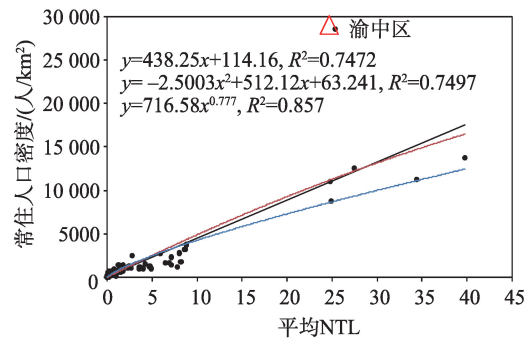
## 4 结果与讨论

### 4.1 人口与夜间灯光的相关性

由图5可以看出,川渝地区3种模型拟合人口密度和DMSP/OLS夜间灯光数据按绝对系数大小的模型顺序为:幂函数模型、多项式模型、线性模型,绝对系数( $R^2$ )分别为0.85、0.77、0.58,相关系数( $R$ )分别为:0.924、0.878、0.765;对于NPP/VIIRS夜间灯光数据来说,3种模型拟合结果与DMSP/OLS夜间灯光数据一致,绝对系数( $R^2$ )分别为0.86、0.75、0.75,相关系数( $R$ )分别为0.926、0.866、0.864。通过对比可以看出,NPP夜间灯光数据拟合人口的能力要优于DMSP/OLS夜间灯光数据,而且拟合结果受模型的影响不大。



(a) 常住人口密度与DMSP/OLS平均夜间灯光指数的关系



(b) 常住人口密度与经过修正的NPP/VIIRS平均夜间灯光指

注:黑线是线性回归模型;红线是多项式回归模型;蓝线是幂函数模型

图5 川渝地区区县常住人口密度与平均夜间灯光指数相关关系

Fig. 5 Correlation between population density at county level and mean nighttime light data

### 4.2 人口与LUC的相关性

图6可以看出,川渝地区主要土地利用类型为林地(20.1万km²)、草地(17.2万km²)和耕地(15.6万km²)3类,其分布与地形密切相关。由图3可以看出,耕地主要分布在中东部的盆地地区,草地主要分布在西北高海拔地区,林地主要分布在西南和东部中低海拔地区。城乡、工矿、建设用地面积为0.71万km²,主要集中在成都市和重庆市及其周围区县。进一步,通过统计川渝地区各土地利用类型面积,并在SPSS中分别计算各区县常住人口与各土地利用类型覆被面积的相关性,分析结果表

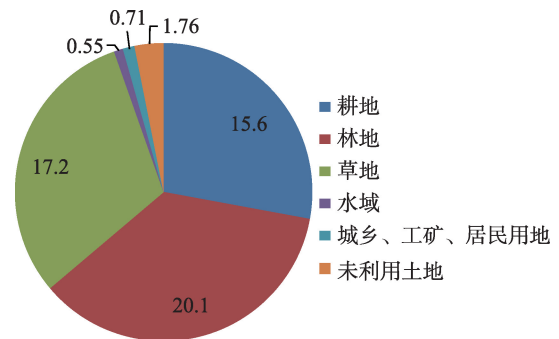


图6 2013年川渝地区土地利用面积图(10⁴km²)  
Fig. 6 Land use area of Sichuan-Chongqing region in 2013 (10⁴km²)

明土地利用分布与人类活动关系密切。由表2可以看出,各类型土地利用数据与人口的相关性强弱依次为耕地、城乡工矿居民用地、草地、林地、未利用土地、水域,相关系数分别为0.62、0.57、-0.45、-0.44、-0.3、0.08。其中,耕地和城乡工矿居民用地与人口呈现显著( $P=0.01$ )正相关关系,林地、草地、未利用土地与人口呈现显著( $P=0.01$ )负相关关系。在使用土地利用数据参与人口空间化研究过程中,考虑人口分布的实际情况,水域和未利用土地类型不参与人口空间化计算。

表 2 川渝地区各土地利用与人口的相关性分析  
Tab. 2 Correlation analysis between land use and population in Sichuan-Chongqing region

	耕地	林地	草地	水域	城乡、工矿、居民用地	未利用土地
相关性(R)	0.62**	-0.44**	-0.45**	0.08	0.57**	-0.30**

注:\*\*表示在0.01置信水平上显著

4.3 人口空间化结果

4.3.1 模型参数

由表3可以看出,2种夜间灯光数据和土地利用叠加后最终进入模型的变量相同,包括耕地亮元数、耕地暗元数、林地灯光总亮度、城镇及建设用灯光总亮度,且都通过了显著性检验( $p=0.01$ )。在实际情况中,人口只分布于城镇及建设用地上,本文建模过程中,考虑了耕地和林地是由于基于卫星遥感解译的土地利用产品精度问题、图斑上图标准问题,在耕地、林地、草地、甚至荒漠、水域中,都有可能存在零星分布农村居民点、农牧民独立房屋、船舍、帐篷、蒙古包、毡房等设施。上述微小、零星分布、但数量众多的居住设施在本研究所使用的1:10万LUC数据中是无法体现,但又确实存在的,因此本研究对上述土地类型中的人口分布可能性赋予了一定的权重。据了解,中国科学院地理科学与资源研究所其他相关课题组、国家发改委宏观院等相关

表 3 模型回归系数表  
Tab. 3 Regression coefficients of the model

土地利用类型	DMSP/OLS			NPP/VIIRS	
		系数	Sig.	系数	Sig.
耕地	NU	392.399	0.000	95.736	0.000
	NL	442.249	0.000	163.979	0.000
林地	LE	29.270	0.024	85.934	0.028
城镇及建设用	LE	106.833	0.000	71.042	0.000
常数	Con	39 848.898	0.050	45 683.36	0.017
	R <sup>2</sup>	0.796		0.817	

机构在制作同类地图时,也有同类型的考虑<sup>[24]</sup>。基于DMSP/OLS夜间灯光数据和LUC建立的模型的复相关系数为0.796,而基于NPP/VIIRS夜间灯光数据和LUC建立的模型的复相关系数为0.817。

4.3.2 川渝地区人口空间化结果

图7(a)、(b)显示了基于2种夜间灯光数据和LUC数据的川渝地区人口空间化结果。为方便直观地对比2种空间化结果,本文对500 m人口空间化结果的单位进行了换算,将基于NPP/VIIRS 500 m分辨率影像所得人口空间密度估算成果的单位转化为人/km<sup>2</sup>,可以看出,得到的人口空间分布情况大致相同,人口主要集中在居民地和城镇建设用地上,各区县的人口密度高值区主要集中在县城所在地,其中重庆市和成都市人口最集中,密度最高。川渝地区的常住人口分布是以重庆市和成都市为2个中心分布,重庆市是自治区,经济发展较快,成都市是四川省的省会城市,城市化进程明显,人口大量聚集,人口密度极高。

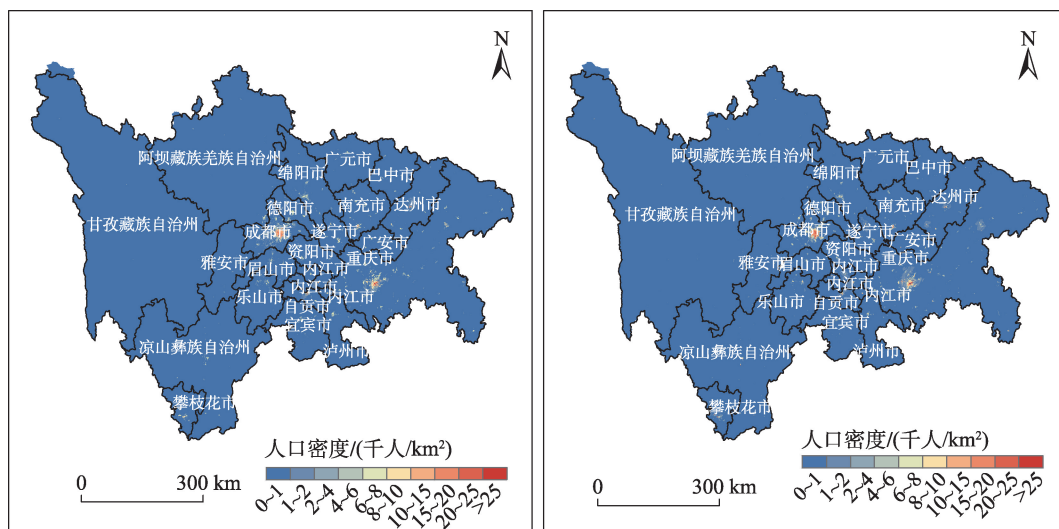
对比重庆市人口空间化结果(图7(c)、(e))可以发现,2种模拟结果大致空间分布格局相同,即人口密度呈现中心城区高,四周低的分布情况。人口密度最高的区域为渝中区,1 km<sup>2</sup>人口超过25 000人,与实际情况(28 515.2人/km<sup>2</sup>)相符。对于成都市(图7(d)、(f))来说,可以看出高密度人口区域主要集中在金牛、青羊、武侯、成华、锦江5个区,周围人口密度较低,同样的基于NPP/VIIRS夜间灯光数据得到的人口空间化结果分辨率比基于DMSP/OLS夜间灯光数据得到的结果高,能反映出同一区县内人口分布的变化情况。同时,中心城区与周边城区人口密度变化更加自然,更符合实际人口分布情况。

4.4 精度检验

随机选取500个乡镇级别的2013年常住人口统计数据作为真实人口数据,利用这500个乡镇区划统计模拟的2种人口空间化结果作为估计值;分别计算整体的平均绝对误差(MAE)、平均相对误差(MRE)、均方根误差(RMSE),另外计算各个乡镇的人口估计相对误差(RE),并分级统计分析。

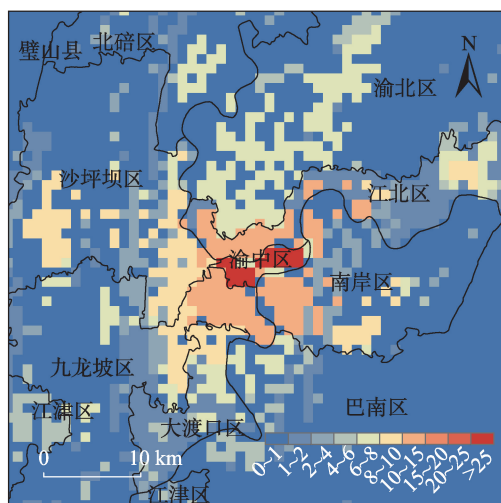
表4表示的是基于2种夜间灯光数据和LUC数据模拟得到的空间分布人口的3种误差指标:MAE、MRE、RMSE。由表4可以看出,基于NPP/VIIRS夜间灯光数据得到的人口空间误差在3种误差上都要小于DMSP/OLS夜间灯光数据,具体表现为:①在MAE方面,基于DMSP/OLS夜间灯光数



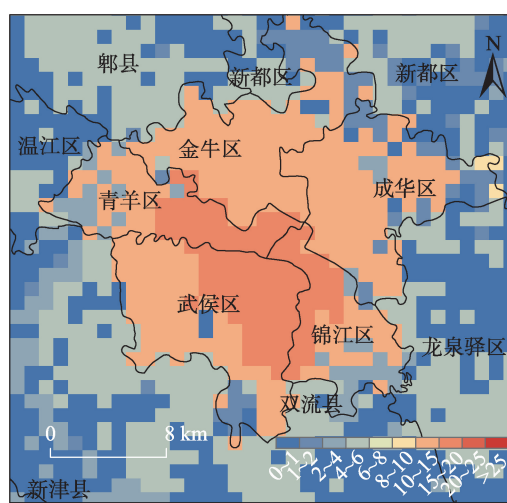


(a) 川渝地区1 km人口空间分布

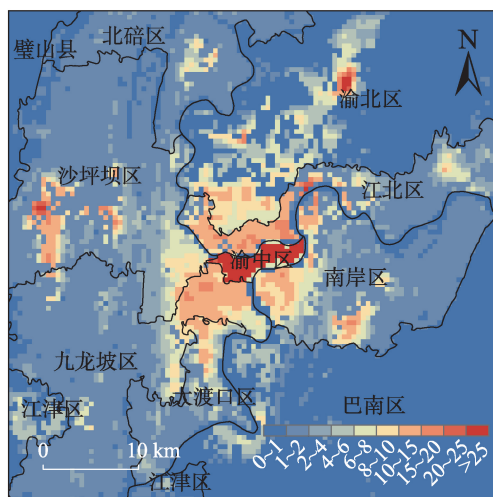
(b) 川渝地区500 m人口空间分布



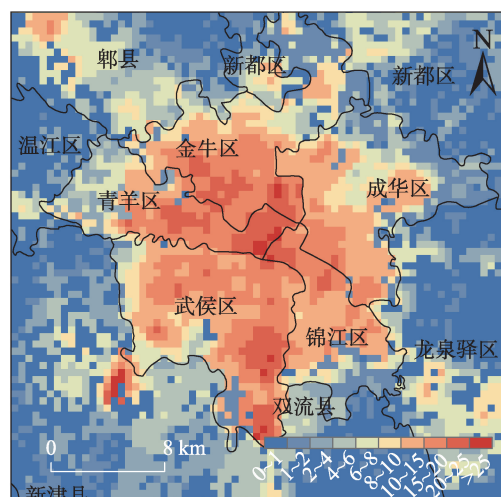
(c) 重庆市1 km人口空间分布



(d) 成都市1 km人口空间分布



(e) 重庆市500 m人口空间分布



(f) 成都市500 m人口空间分布

图7 2013年川渝地区人口空间化结果

Fig. 7 Spatial distribution of population in Sichuan-Chongqing region in 2013

表 4 人口空间化误差统计表

Tab. 4 Statistics of spatial distribution of population errors

误差类型	DMSP/OLS	NPP/VIIRS
MAE	10 851	10 450
MRE/%	46.3	44.62
RMSE	637 518	587 170

据得到的误差为 10 851,而基于 NPP/VIIRS 夜间灯光数据得到的误差为 10 450;② 在 MRE 方面,基于 DMSP/OLS 夜间灯光数据得到的误差为 46.3%,而基于 NPP/VIIRS 夜间灯光数据得到的误差为 44.62%;③ 在 RMSE 方面,基于 DMSP/OLS 夜间灯光数据得到的误差为 637 518,而基于 NPP/VIIRS 夜间灯光数据得到的误差为 587 170。对比发现,基于 NPP/VIIRS 夜间灯光数据得到的人口空间化结果精度要高于 DMSP/OLS 夜间灯光数据。

表 5 是对 500 个乡镇级别的人口的相对误差做分级统计,图 8 表示的是各级别相对误差占比。可以看出基于 NPP/VIIRS 夜间灯光数据得到的人口

空间化精度要高于 DMSP/OLS。具体表现为:基于 NPP/VIIRS 夜间灯光数据得到的人口空间化结果出现严重高估的乡镇个数为 85,占总乡镇数的 17%;基于 DMSP/OLS 夜间灯光数据得到的人口空间化结果出现严重高估的乡镇个数为 76 个,占比为 15%,相比前者少 2%;基于 NPP/VIIRS 夜间灯光数据得到的人口空间化结果一般高估的乡镇个数为 83 个,占比 17%,基于 DMSP/OLS 夜间灯光数据得到的人口空间化结果一般高估的乡镇个数为 94 个,相比 NPP/VIIRS 多 11 个,占比为 19%;在准确估计的乡镇中,基于 NPP/VIIRS 夜间灯光数据得到的人口空间化结果为 188,相比 DMSP/OLS 多 22 个(166),在一般低估的乡镇中,基于 NPP/VIIRS 夜间灯光数据得到的人口空间化误差个数为 116,比 DMSP/OLS 少 13 个,在严重低估的乡镇中,基于 NPP/VIIRS 夜间灯光数据得到的人口结果比 DMSP/OLS 少 7 个。总体来看,基于 NPP/VIIRS 夜间灯光数据得到的人口空间化结果精度要高于 DMSP/OLS。

表 5 相对误差分级统计表

Tab. 5 Statistics of relative error classification

夜间灯光	严重低估	一般低估	较准确估计	一般高估	严重高估
	(-100%,-50%]	(-50%,-20%]	(-20%,20%]	(20%,50%]	(50%,100%]
DMSP/OLS	35	129	166	94	76
NPP/VIIRS	28	116	188	83	85

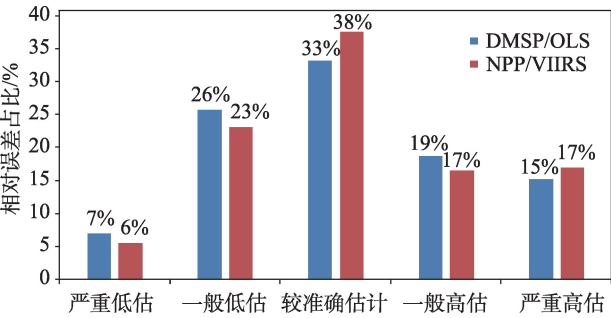


图 8 相对误差占比统计图

Fig. 8 Statistics of relative error ratios

通过与已有的研究对比发现,高义等<sup>[20]</sup>基于 2 种夜间灯光数据得到的空间化人口中能够较准确地估计的乡镇个数占比为 23.75%(DMSP/OLS)和 26.75%(NPP/VIIRS),远低于本研究中的 33%和 38%。这表明在使用夜间灯光数据进行人口空间化时引入土地利用数据可以大大提高人口空间化的精度。此外,分析出现明显高估和明显低估的原因可能与该地区的气候、海拔等其他影响人类分布的因素有

关,而且这些影响因素与人口大多是非线性的关系,因此今后可以从增加与人口分布相关影响因子和改变建模方法这 2 个方面入手以进一步的提高人口空间化的精度。

5 结 论

人口空间分布直观反映了人类活动的范围和强度,是研究和表征人地关系的有效指标和必需数据。夜间灯光数据是人口空间化过程中重要的数据源。本研究对比分析了 2 种夜间灯光数据在模拟人口时的适宜性,同时结合土地利用数据对川渝地区常住人口统计数据进行了空间化,并对人口空间化结果进行了精度验证。本文的主要结论如下:

(1)在拟合人口时,NPP/VIIRS 的效果整体要好于 DMSP/OLS。具体表现在使用不同的模型拟合时,人口与 NPP/VIIRS 的绝对系数均高于 0.75,说明 NPP/VIIRS 拟合人口时受模型的波动较小。

(2)各类型土地利用数据与人口的相关性强弱依次为耕地、城乡工矿居民用地、草地、林地、未利用土地、水域,相关系数分别为0.62、0.57、-0.45、-0.44、-0.3、0.08。建模结果表明除了建设用地,其他类型用地(耕地、林地)对人口分布会有影响,在对人口进行建模时不应该只考虑建成区。

(3)在2种夜间灯光数据分别与LUC结合时,使用DMSP/OLS夜间灯光数据和NPP/VIIRS夜间灯光数据得到的逐步回归模型的复相关系数 $R^2$ 分别为0.796、0.817,且进入模型的变量的回归系数都经过了正数检验和显著性检验。模型拟合率较高,基于DMSP/OLS得到的人口空间化结果分辨率为1 km,基于NPP/VIIRS夜间灯光数据得到的人口空间化结果分辨率为500 m,相比DMSP/OLS夜间灯光数据提高了一倍。

(4)在夜间灯光数据与LUC数据结合得到的川渝地区人口空间化结果中,使用NPP/VIIRS夜间灯光数据得到的结果精度要高于DMSP/OLS夜间灯光数据,具体表现为:①在MAE方面,基于NPP/VIIRS夜间灯光数据得到的结果误差为10 450,基于DMSP/OLS夜间灯光数据得到的结果误差为10 851;②在MRE方面,基于NPP/VIIRS夜间灯光数据得到的结果误差为44.62%,基于DMSP/OLS夜间灯光数据得到的结果误差为46.3%;③在RMSE方面,基于NPP/VIIRS夜间灯光数据得到的结果误差为587 170,基于DMSP/OLS夜间灯光数据得到的结果误差为637 518;④在相对误差方面,基于NPP/VIIRS夜间灯光数据得到的结果较准确估计的乡镇个数(188个)要多于DMSP/OLS(166个),在相对误差较大的等级中,除严重高估的乡镇个数(85个)略高于DMSP/OLS(76个),其余误差较大的乡镇中,NPP/VIIRS夜间灯光数据都要少于DMSP/OLS。

#### 参考文献 (References):

- [1] 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. A review on spatialization models of census data[J]. Journal of Subtropical Resources and Environmen, 2010,5(4):10-16. ]
- [2] Alahmadi M, Atkinson P, Martin D. Estimating the spatial distribution of the population of Riyadh, Saudi Arabia using remotely sensed built land cover and height data[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2013,41:167-176.
- [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. [ Ye Y, Liu G H, Feng X F. Presentation and application of spatial distribution of the population data[J]. Geo-information Science, 2006,8(2):59-65. ]
- [4] 胡云锋,王倩倩,刘越,等.国家尺度社会经济数据格网化原理和方法[J].地球信息科学学报,2011,13(5):573-578. [ Hu Y F, Wang Q Q, Liu Y, et al. Principles and methods of the social and economic grid database at national scale[J]. Journal of Geo-information Science,2011,13(5):573-578. ]
- [5] 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. ]
- [6] Azar D, Engstrom R, Graesser J, et al. Generation of fine-scale population layers using multi-resolution satellite imagery and geospatial data [J]. Remote Sensing of Environment, 2013,130:219-232.
- [7] Lung T, Lübker T, Ngochoch J K, et al. Human population distribution modelling at regional level using very high resolution satellite imagery[J]. Applied Geography, 2013,41:36-45.
- [8] 柴子为,王帅磊,乔纪纲.基于夜间灯光数据的珠三角地区镇级GDP估算[J].热带地理,2015,35(3):379-385. [ Chai Z W, Wang S L, Qiao J G. Township GDP estimation of the Pearl River Delta based on the NPP-VIIRS night-time satellite data[J]. Tropical Geography, 2015,35(3):379-385. ]
- [9] 韩向娣,周艺,王世新,等.夜间灯光遥感数据的GDP空间化处理方法[J].地球信息科学学报,2012,14(1):128-136. [ Han X D, Zhou Y, Wang S X, et al. GDP spatialization in China based on nighttime imagery[J]. Journal of Geo-information Science, 2012,14(1):128-136. ]
- [10] 杨洋,黄庆旭,章立玲.基于DMSP/OLS夜间灯光数据的土地城镇化水平时空测度研究——以环渤海地区为例[J].经济地理,2015,35(2):141-148,168. [ Yang Y, Huang Q X, Zhang L L. The spatial-temporal measurement on the land urbanization level using DMSP/OLS nighttime light data: A case study of Bohai rim[J]. Economic Geography, 2015,35(2):141-148,168. ]
- [11] Yang X, Yue W, Gao D. Spatial improvement of human population distribution based on multi- sensor remote-sensing data: An input for exposure assessment[J]. International Journal of Remote Sensing, 2013,34(15):5569-5583.
- [12] Small C, Pozzi F, Elvidge C D. Spatial analysis of global urban extent from DMSP- OLS night lights[J]. Remote Sensing of Environment, 2005,96(3-4):277-291.
- [13] Sutton P, Roberts D, Elvidge C, et al. A comparison of nighttime satellite imagery and population density for the Continental United Sates[J]. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 1997,63(11):1303-1313.
- [14] Zhang Q, Seto K C. Mapping urbanization dynamics at regional and global scales using multi- temporal DMSP/



- OLS nighttime light data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011,115(9):2320-2329.
- [15] Baugh K, Hsu F-C, Elvidge C D, et al. Nighttime lights compositing using the VIIRS day-night band: Preliminary results[J]. *Proceedings of the Asia-Pacific Advanced Network*, 2013,35:70-86.
- [16] Dai Z, Hu Y, Zhao G. The suitability of different nighttime light data for GDP estimation at different spatial scales and regional levels[J]. *Sustainability*, 2017,9(2):305-320.
- [17] Li X, Xu H, Chen X, et al. Potential of NPP-VIIRS nighttime light imagery for modeling the regional economy of China[J]. *Remote Sensing*, 2013,5(6):3057-3081.
- [18] Shi K, Yu B, Huang Y, et al. Evaluating the ability of NPP-VIIRS nighttime light data to estimate the gross domestic product and the electric power consumption of China at multiple scales: A comparison with DMSP-OLS data[J]. *Remote Sensing*, 2014,6(2):1705-1724.
- [19] 李强,苏奋振,王雯玥.基于VIIRS数据的油气平台提取技术研究[J].*地球信息科学学报*,2017,19(3):398-406. [ Li Q, Su F Z, Wang W Y. Research on oil and gas platform extraction technology based on VIIRS data[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2017,19(3):398-406. ]
- [20] 高义,王辉,王培涛,等.基于人口普查与多源夜间灯光数据的海岸带人口空间化分析[J].*资源科学*,2013,35(12): 2517-2523. [ Gao Y, Wang H, Wang P T, et al. Analysis on spatial processing of the population for Chinese coastal zones based on census and multiple night light data[J]. *Resources Science*, 2013,35(12):2517-2523. ]
- [21] 杨继瑞,李月起,汪锐.川渝地区:“一带一路”和长江经济带的战略支点[J].*经济体制改革*,2015(4):58-64. [ Yang J R, Li Y Q, Wang R. Sichuan and Chongqing region: Strategic fulcrum of the Belt and Road initiatives and Yangtze River economic zone[J]. *Reform of Economic System*, 2015(4):58-64. ]
- [22] 王炳赞,范广洲,董一平,等.川渝地区气候与物候的变化特征分析[J].*地理科学*,2011(6):674-681. [ Wang B Y, Fan G Z, Dong Y P, et al. Analysis on the variations of climate and phenology in Sichuan and Chongqing region[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2011(6):674-681. ]
- [23] Liu J Y, Kuang W H, Zhang Z X, et al. Spatiotemporal characteristics, patterns, and causes of land-use changes in China since the late 1980s[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2014,24(2):195-210.
- [24] 梁友嘉,徐中民.基于LUCC和夜间灯光辐射数据的张掖市甘州区人口空间分布建模[J].*冰川冻土*,2012,34(4): 999-1006. [ Liang Y J, Xu Z M. Modeling the spatial distribution of population based on night light radiation data and LUCC: A case study in Ganzhou District, Zhangye municipality[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012,34(4):999-1006. ]