

引用格式: 杜培培, 侯西勇. 基于多源数据的中国海岸带地区人口空间化模拟[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(2): 207-217. [Du P P, Hou X Y. Spatial simulation of population in China's coastal zone based on multi-source data[J]. Journal of Geo-information Science, 2020, 22(2): 207-217.] DOI: 10.12082/dqxxkx.2020.190192

基于多源数据的中国海岸带地区人口空间化模拟

杜培培^{1,2,3,4}, 侯西勇^{1,3,4*}

1. 中国科学院烟台海岸带研究所, 烟台 264003; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国科学院海岸带环境过程与生态修复重点实验室, 烟台 264003; 4. 中国科学院海洋大科学研究中心, 青岛 266071

Spatial Simulation of Population in China's Coastal Zone based on Multi-source Data

DU Peipei^{1,2,3,4}, HOU Xiyong^{1,3,4*}

1. Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory of Coastal Environmental Processes and Ecological Remediation, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China; 4. Center for Ocean Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China

Abstract: Coastal zone is not only the hotspot of population aggregation and rapid economic growth, but also eco- environmentally sensitive, vulnerable to natural disasters. Detailed spatial distribution information of population is of great significance for solving resource allocation and disaster risk management in the coastal zone. This paper took the coastal cities in China as the study area. We combined the NPP - VIIRS data and NDVI data to construct Human Settlements Index (HSI), and selected the proportion of residential area per unit grid as a parameter to enhance the inter-demographic difference. Then, we used the dynamic partitioning samples and model to obtain the 1000 m grid population distribution data in the coastal zone of China (POP). To show the advantages of our proposed modeling approach, the published Chinese 1000 m grid population data (TPOP) and world population data with 100 m resolution (WorldPOP) were used to compare with our simulated POP data. For the comparison, three indicators were chosen: the macroscopic distribution characteristics, difference between urban and rural area, and population distribution within city. Results show that all the three data can reflect the macroscopic distribution characteristics of population in China's coastal zone, while POP has the best performance of depicting urban and rural differences in population distribution and the most detailed features of population distribution within city. According to the census and POP data, due to the influence of the coastal terrain and regional to national economic development strategies, the population distribution in China's coastal zone has obvious regional characteristics: (1) Topographically, the population density of montane and tidal flats areas is generally low (below 5 person/hm²), while that of plain and estuary delta areas is generally high (over 10 person/hm²). (2) At macroscopic scale, areas with high population density (over 25 person/hm²) are mainly concentrated in coastal plain areas such as the Circum Bohai Sea region, the Yangtze River delta and the Pearl

收稿日期: 2019-04-24; 修回日期: 2019-09-16.

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA19060205); 国家自然科学基金项目(31461143032)。[**Foundation items:** Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences, No.XDA19060205; National Natural Science Foundation of China, No.31461143032.]

作者简介: 杜培培(1989—), 女, 河南开封人, 博士生, 主要从事中国沿海城市扩张研究。E-mail: ppdu@yic.ac.cn

*通讯作者: 侯西勇(1975—), 男, 山东泰安人, 博士, 研究员, 主要从事海岸带土地利用变化与海岸线变化遥感监测、海岸带脆弱性评价、海岸带综合管理等方面的研究。E-mail: xyhou@yic.ac.cn

River delta; the population distribution in the north of the Yangtze River has the pattern of large dispersion and small concentration, especially in the provinces of Shandong and Jiangsu, the population distribution in the south of the Yangtze River is relatively concentrated, mainly in the coastal lowlands and plains in Zhejiang, Fujian, and Guangdong. (3) Regarding the urban and rural differences, the higher the urban level is, the more significant the gradient characteristics of population distribution will be; meanwhile, there is a huge difference in population density among urban, suburbs and exurban areas.

Key words: population; threshold; dynamic partitioning; spatialization; human settlements index; coastal zone; China

***Corresponding author:** HOU Xiyong, E-mail: xyhou@yic.ac.cn

摘要: 海岸带人口聚集、经济增长迅速、生态环境脆弱,容易受到自然灾害的影响,细致的人口空间分布信息对解决海岸带地区资源配置、灾害风险管理等有重要意义。本文以中国沿海城市为研究区,基于NPP-VIIRS和NDVI数据构建人居指数HSI,并加入居住地面积比例系数反映人口内部差异,利用样本动态分区及建模方法,得到2015年中国海岸带1000 m 格网人口分布数据(POP),并将其与已公布的相同年份的中国公里格网人口数据(TPOP)和100 m 全球人口数据(WorldPOP)进行对比分析。研究表明,3种数据均能反映中国海岸带地区人口的宏观分布特征,但是对于人口分布城乡差异特征以及城市内部人口分布细节特征的刻画,则是以POP数据最为理想。由县域统计值和POP数据可知,主要受沿海地貌、国家及区域经济发展战略等的影响,中国海岸带地区人口分布具有明显的空间差异,具体来说:① 地形差异,山地和滩涂区域的人口密度普遍较低(小于5人/hm²),而平原和河口三角洲区域的人口密度则普遍较高(大于10人/hm²);② 宏观区域差异,环渤海、长江三角洲和珠江三角洲是人口分布最密集的区域(大于25人/hm²);长江以北地区人口分布多层级重心离散分布的特征较为显著,尤其以山东和江苏最为明显,长江以南地区人口分布相对比较集中,主要集中在沿海低地和平原,如浙江—福建—广东一带;③ 城乡差异,由各级城镇向乡村区域递减的趋势非常明显,城市等级越高,人口分布的梯度特征越显著,中心城区、城市近郊、城市远郊之间相比人口密度差异巨大。

关键词: 人口; 阈值; 动态分区; 空间化; 人居指数; 海岸带; 中国

1 引言

人口、资源和环境关系密切,丰富的资源和适宜的环境是人口聚集的重要影响因素,但是,随着经济和社会的发展,人口与资源、环境之间的矛盾日益突出,因此,深入研究人口的分布特征对于资源利用、环境保护、灾害评估以及经济社会可持续发展等方面具有重要意义。现有的人口数据主要来源于统计部门发布的普查数据,但人口普查数据多以行政区为统计单元,无法反映统计单元内部的人口分布特征。人口分布受多种因素^[1-2]的影响,具有非常显著的空间差异性和动态变化特征,因此,不管是多学科的科学研究,还是各级政府相关职能部门的管理工作,都对更为详尽的人口分布信息提出了迫切的需求,在这种背景下,人口空间化方法与技术的发展以及数据产品的积累成为近年来学术研究的热点和前沿之一。

简言之,人口空间化是指在地理背景下,将人口统计数据按照一定原则分配到规则格网上,以反映特定时空背景下的人口分布和人地关系特征^[3-4]。

目前,该领域的研究已经取得了长足的进展。① 在人口空间化模型方面,主要有空间插值模型^[5]、多元回归模型^[6-9]、多因素融合模型^[10]及智能体模型等^[11]。空间插值模型容易忽略地理要素对人口分布的影响,适用于精细尺度;多元回归模型着重考虑人口与土地利用、夜间灯光之间的相关关系,适用于大中尺度研究;多因素融合模型综合道路、地形、土地利用类型、灯光等多种因子,着重分析不同因子对人口分布的影响,因子选择和权重判定受研究尺度影响;智能体模型借助公共服务设施、建筑物等信息自下而上的模拟人口分布,适用于城市地区精细尺度,模型精度易受算法和参数影响。② 在所需数据的获取方面,随着遥感和GIS技术的发展,数据获取的便利程度和空间分析能力得到了极大的提高。基于土地利用数据或夜间灯光数据构建多元回归模型模拟人口分布成为人口空间化研究的主要趋势。例如,廖一兰等^[11]、江东等^[12]、杨小唤等^[13]利用人口与土地利用之间的强相关性模拟大中尺度的人口分布;赵宇等^[7]、吴安坤等^[14]利用人口与夜间灯光之间的强相关性模拟区域尺度的人口分布;

高义等^[15]对比了2种夜间灯光数据DMSP和NPP_VIIRS反演海岸带人口空间分布的精度,指出NPP-VIIRS的模拟精度上要优于DMSP;此外,有学者认为植被指数如NDVI、EVI与城市建成区有较高的相关性^[14,16-19],并将植被指数作为模拟人口空间分布的控制因素来提高模拟精度。③分区建模思路逐渐得到重视。为提高多元回归模型的模拟精度,研究学者多采用分区域、细化居住地信息、优化数据选择^[15]、多源数据融合^[20]等措施进行建模。分区域建模主要利用地形、经济、交通线、农业化程度等因素分析区域的人口分布特征,将人口分布特征较为接近的地区划分为一类进行建模,如江东等^[12]的以县分区、田永忠等^[21]的全国12个农业生态区,杨小唤等^[9]的全国人口8大区、王珂靖等^[22]采用主成分分析将长江中游4省划分为5大区域。细化居住信息主要通过对居住用地类型的再分类来提高人口分布的空间差异,如董南等^[23]引入城市公共设施要素、杨小唤等^[13]的农村居民点重分类、王珂靖等^[22]的城镇居民用地再分类。陈晴等^[20]融合土地利用数据和夜间灯光数据,利用基于阈值的样本动态分区将人口空间特征相似的地区进行归类模拟中国沿海地区人口空间分布,取得了较好的效果。

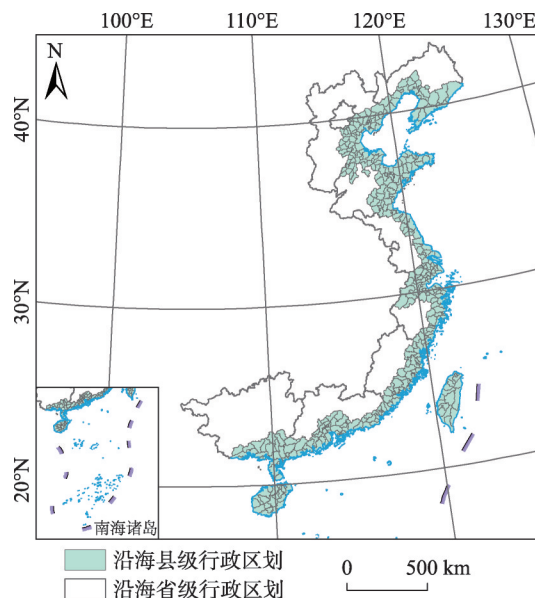
作为中国经济发展重心地带的海岸带区域,处于中国东部,南北跨度大,地形、气候、植被及经济社会等的差异均较明显^[24],具有独特的资源分布和生态环境特征,易受到自然灾害和人类活动的影响^[25]。中国海岸带区域人口分布的宏观区域差异和中观的城乡差异均非常显著^[26-27],研究海岸带地区的人口空间分布特征对该区域的资源利用、灾害风险管理、经济社会发展决策等有重要意义。目前已有多个国家或机构发布了能够覆盖中国海岸带区域的人口空间分布数据,如中分辨率的中国1 km格网人口分布数据、高分辨率的WorldPOP100 m数据等,这些数据以整个中国或更大的区域为研究对象,虽然在一定程度上揭示了中国人口的宏观分布特征,但还不能准确细致地描述中国海岸带地区特殊的地理位置^[24]和经济社会发展特征^[26-27]影响下的人口空间分布的细节特征。本文借鉴Lu^[19]、吴安坤^[14]等的研究,探索利用NPP-VIIRS夜间灯光数据来计算人居指数HSI,同时加入居住地面积比例修正人居指数改善人口分布差异^[13],构造人居指数与人口统计值的线性回归方程,并利用陈晴等^[20]提出的样本动态分区和建模的方法,在1000 m分辨率水平模拟中国海岸

带的人口空间化分布,以期能在宏观区域、城乡之间以及城市内部3种尺度上均能取得较好的模拟效果。

2 研究区概况与数据源

2.1 研究区概况

我国幅员辽阔,海岸带的南北及东西跨度均较大。大陆海岸线北起鸭绿江口,南抵北仑河口,大陆岸线长达18 000 km,北部岸线向陆内凹,东南段岸线向海外凸,呈现为S型弧线;海岸带区域跨辽宁、河北、天津、山东、江苏、上海、浙江、福建、广东、香港、澳门、台湾、广西和海南等省、市、区。本文参考陈晴^[20]模拟海岸带社会经济要素所针对的中国沿海城市,并增加海南、台湾2个省区,共计438个人口统计单元(图1)。



注:该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2019)1831号的标准地图制作,底图无修改。

图1 研究所涉及的中国海岸带地区范围

Fig. 1 The concerned coastal area of China in this study

2.2 数据源

本研究涉及的主要数据源见表1。数据来源不同,数据的投影方式和精度不同,为建立数据间的联系,将所有空间数据的投影坐标系统一为Krasovsky_1940_Albers类型,其中,栅格数据的分辨率统一为1000 m。针对土地利用类型数据,在1000 m规则格网水平统计各类型的分布面积,从而转换获得1000 m分辨率的土地利用类型面积结构数据集^[28-30];进而,提取土地利用数据中的居住地范围

表1 数据源列表
Tab. 1 List of the data sources

数据类别	数据格式	数据年份	数据来源	比例尺或分辨率
人口统计数据	属性数据	2015	各省、市、县统计年鉴	—
土地利用类型数据	矢量数据	2015	中国沿海土地利用矢量数据 ^[30]	1:10万
夜间灯光数据 ^[31]	栅格数据	2015	美国国家地理数据中心	0.15弧度
NDVI数据 ^[32]	栅格数据	2015	中国科学院资源环境科学数据中心	1000 m

以及计算居住地面积比例,以居住地范围信息作为控制图层提取夜间灯光数据和NDVI数据的范围,并用居住地面积比例信息刻画人居区域的空间差异特征。

3 研究方法

3.1 技术流程

根据陈晴等^[20]提出的样本动态分区和建模的方法,以人居指数HSI代替原有夜间灯光数据,构造线性回归方程,模拟中国海岸带地区人口空间分布;在此基础上,从县域统计单元人口总量、多尺度空间人口分布特征等角度出发,分别与高分辨率的WorldPOP数据^[33]和同分辨率的中国1 km格网人口数据^[34](TPOP)进行对比,来评估本文模拟结果的精度。具体流程如图2所示。

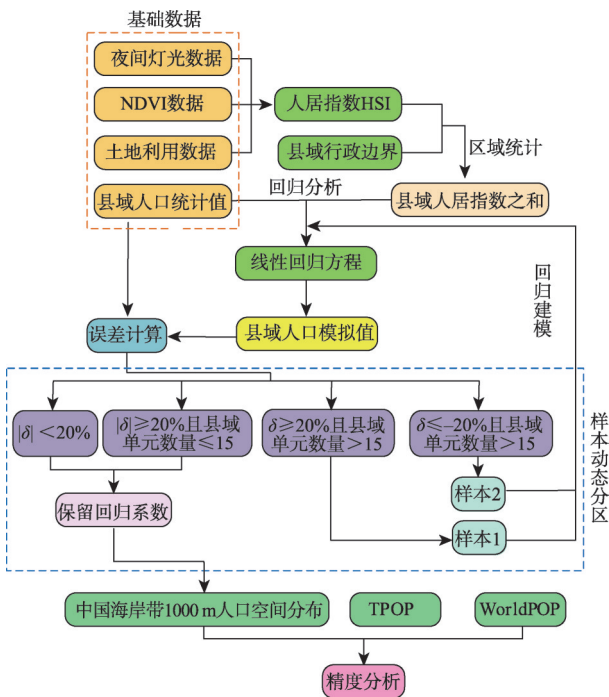


图2 人口空间化模拟过程

Fig. 2 Simulation flowchart of population spatialization

3.2 基于阈值的样本动态分区

考虑到中国海岸带地区人口分布存在突出的空间差异性,陈晴等^[20]利用夜间灯光数据作为人口分布指标来模拟人口空间分布,并提出基于阈值的样本动态分区方法,将海岸带县域划分为多个子区域单独建模,每个子区域对应一个回归方程,即人口分布模型。具体分区过程如下:

(1)在县级尺度上,建立人口分布指标总和与人口统计值的线性回归模型:

$$POP_j = k_j \times \sum HI_{ij} + b \quad (1)$$

式中: POP_j 为第 j 个县域的统计人口数; k_j 为回归系数; $\sum HI_{ij}$ 为第 j 个县域上人口分布指标之和, b 为常量。

(2)设定模拟值与统计值相对误差的阈值,未超出阈值的样本县域保留其首次模拟所得的回归方程,而超出阈值的县域则再次进行建模,直至获得符合阈值要求的回归模型,或着多次分区和建模之后剩余样本太少而不足以继续回归建模为止。具体步骤如下:① 根据式(1)提供的线性回归方程计算研究区县域初次回归系数 k 、县域人口模拟值;② 利用式(2)计算县域尺度相对误差,误差绝对值处于20%之内的样本县域保留所得的回归模型;③ 剩余样本县域按照误差值小于等于-20%和大于等于20%,分成2组分别建立新的线性回归方程,重复步骤②,获得符合阈值要求的样本县域及其对应的回归模型;④ 重复步骤③,当 $|\delta| \geq 20\%$ 的县域数量低于样本总数的10%时(本研究设定县域数量小于15个),结束样本动态分区及建模。如上所述,经动态分区和多次回归,最终大部分县域都能得到相对误差 $|\delta| < 20\%$ 的模拟结果和回归方程,而且所有样本整体的 R^2 也在不断提高。

$$\delta = \frac{POP_m - POP_t}{POP_t} \times 100\% \quad (2)$$

式中: POP_m 为县域人口模拟值; POP_t 为县域人口统计值。

3.3 人居区域精确提取

相较于夜间灯光数据,加入了居住地面积比例的人居指数,不仅在值域上有所改变,而且减少了人居区域混合像元对人口空间模拟的影响,可实现海岸带地区人居区域精确提取,具体计算过程如下:

人居指数 HSI_{ρ} 为:

$$HSI_{\rho} = \rho \times \frac{(1 - NDVI_{\max}) + OLS'}{(1 - OLS') + NDVI_{\max} + OLS' \times NDVI_{\max}} \quad (3)$$

式中: ρ 为单位栅格(1000 m)居住地面积比例。

对于无灯光的人居区域, HSI_{ρ} 可调整为:

$$HSI_{\rho}^C = \rho \times \frac{1 - NDVI_{\max}}{1 + NDVI_{\max}} \quad (4)$$

归一化植被指数:

$$NDVI_{\max} = \max[NDVI_1, NDVI_2, \dots, NDVI_{12}] \quad (5)$$

式中: $NDVI_1, NDVI_2, \dots, NDVI_{12}$ 分别代表 2015 年 1—12 月的 NDVI。

归一化灯光值:

$$OLS' = \frac{OLS - OLS_{\min}}{OLS_{\max} - OLS_{\min}} \quad (6)$$

式中: $OLS_{\min} = 0$ 。

3.4 海岸带地区人口模拟结果

将人居指数 HSI 作为人口分布指标代入式(1),对 438 个统计单元进行样本动态分区并获得各个子区人口分布回归系数;利用式(7)计算并获得中国海岸带 1000 m 格网人口模拟值;为保证县域尺度上人口模拟值与统计值相一致,构造线性优化方程(式(8))进一步对模拟结果进行优化,最终生成中国海岸带地区 1000 m 人口空间分布数据。

$$POP_{ij} = k_j \times HSI_{ij} \quad (7)$$

式中: POP_{ij} 为第 j 个县域上第 i 个像元的人口模

拟值; k_j 为样本动态分区过程中第 j 个县域对应的回归系数,即人口分布系数; HSI_{ij} 为第 j 个县域上第 i 个像元的人居指数。

$$P'_{1\text{km}} = P_{1\text{km}} \times P / \sum P_{1\text{km}} \quad (8)$$

式中: $P'_{1\text{km}}$ 表示线性优化后的 1 km 分辨率人口空间分布数据; $P_{1\text{km}}$ 表示未进行线性优化的 1 km 分辨率人口空间分布数据; P 表示统计资料中统计单元的指标值(人口总量); $\sum P_{1\text{km}}$ 表示基于优化前的 1 km 分辨率人口空间分布数据统计而得到的统计单元的指标值(人口总量)。

4 结果及分析

4.1 分区及其回归模型

针对初次建模结果,根据县级单元人口模拟值的相对误差 δ ,将 438 个样本划分为 2 类区域:模型保留区($-20\% < \delta < 20\%$)、需重新建模区域($\delta \geq 20\%$ 或 $\delta \leq -20\%$)。由表 2 可知:① 初次建模后共有 124 个县域人口模拟的相对误差介于 $-20\% \sim 20\%$ 之间,直接保留建模所得方程,另外的 314 个县域单元中 $\delta \geq 20\%$ 和 $\delta \leq -20\%$ 分别有 100 个和 214 个,分成 2 组(对应表 2 中的 C 和 A)进一步分别回归建模。② 以 C 组为例,进行第二次建模,并计算相对误差,结果表明,有 75 个样本的 $|\delta| < 20\%$,保留第二次建模所得的方程; $\delta \leq -20\%$ 的样本只有 2 个,不足以再次建模,所以也直接保留第二次建模所得的方程; $\delta \geq 20\%$ 的样本有 23 个,将其归为 C3 分组并进行第三次回归建模。③ 对 C3 分组第三次回归建模,所得结果中 19 个样本的 $|\delta| < 20\%$,剩余 4 个样本的 $\delta \geq 20\%$,但样本数太少不足以再次建模,所

表 2 人口空间化回归系数及分区情况

Tab. 2 Regression coefficients and partition of population spatialization

建模区域	R^2	回归系数 k	保留区域及其县域个数		
			$ \delta < 20\%$	$\delta \leq -20\%$	$\delta \geq 20\%$
全部区域	0.761	16 647.391	124	214(A组)	100(C组)
A	0.855	31 662.685	54	103(A1组)	57(C1组)
A1	0.865	53 309.364	55	37(A11组)	11*
A11	0.964	102721.997	13	6*	18(C111组)
C111	0.995	73 712.440	18	—	—
C1	0.995	24 140.734	57	—	—
C	0.970	11 060.171	75	2*	23(C3组)
C3	0.970	7494.718	19	—	4*

注:“—”表示无此类样本;“*”表示样本数太少(<15个),不足以继续分组和建模。

以23个样本均直接保留第三次建模所得的方程;至此结束C组100个样本的建模。④如上所述进行样本动态分区和建模,共进行了7次分区,对应7个回归模型,最终约94.75%的县域(共415个)的回归模型满足 $|\delta| < 20\%$,统计所有样本模拟值与统计值之间的相似性,整体的 R^2 达到了0.973。

4.2 与其他人口数据产品对比

将按照式(7)计算得到的2015年中国海岸带人口空间分布数据POP与相同年份的中国1 km 格网人口分布数据TPOP^[34]和全球WorldPOP数据^[10,33,35]进行对比,包括统计单元人口总量对比、多尺度空间人口分布特征对比。

4.2.1 统计单元人口总量对比

利用中国沿海县域行政边界统计3种数据在各县域单元上的人口模拟值,并将其与人口统计值进行对比,结果显示:①从人口模拟值来看,3种数据统计得到的县级人口总值非常接近(图3),大部分县域人口模拟值低于200万人,上海、东莞、天津等市辖区人口大于500万人;②通过式(2)计算3种数据的县域模拟值与统计值的相对误差,其中,未经线性优化的POP数据有94.75%的县域 $|\delta| < 20\%$,TPOP数据有76.87%的县域 $|\delta| < 20\%$,而World-

POP仅有12.62%的县域 $|\delta| < 20\%$,这说明POP数据与其他2种数据相比,其模拟的县域人口值更接近县域统计值,符合人口统计特征,能用来表征人口在县级尺度上的差异。

4.2.2 人口空间分布特征对比

中国沿海地区位于我国人口分布“胡焕庸线”的东部,人口数量及分布密度远远大于中西部地区,但在其内部人口分布的宏观区域差异、中观城乡差异以及城市内部差异也都是非常显著的(图4、图5)。

在人口分布的宏观区域差异方面(图4),POP、TPOP及WorldPOP均能刻画出环渤海、山东半岛、长江三角洲、珠江三角洲4个人口聚集区及其相邻的相对稀疏区,但TPOP数据对于宏观尺度人口聚集区域与人口密度较小区域的过渡特征的刻画并不理想,相邻行政区之间数值突变和跳跃的现象太显著,而WorldPOP和POP数据则具有较明显的宏观区域差异,且空间梯度平稳自然,更符合实际的人口宏观分布特征。

在大中城市及其周边人口分布的城乡差异方面(图5),TPOP数据出现大片人口密度相近或相同的连续区域,城乡差异特征几乎难以辨识,有违实际;而POP和WorldPOP数据则以城镇为中心逐渐向周边区域减少,城乡差异及梯度变化特征明显,

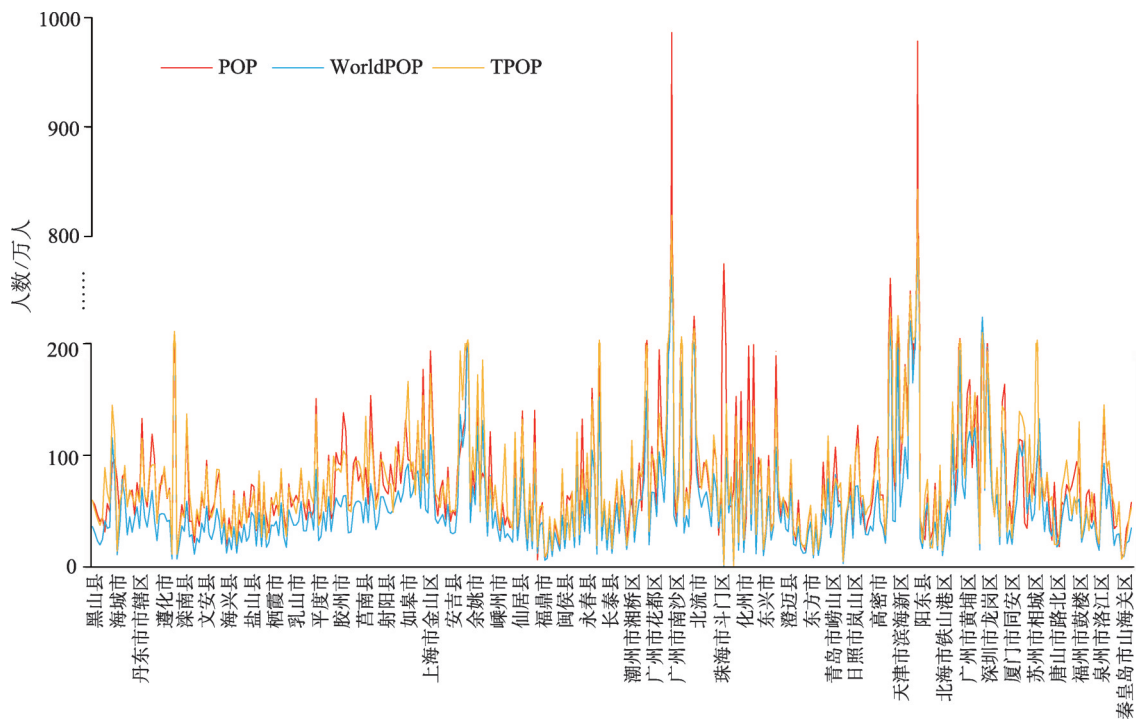
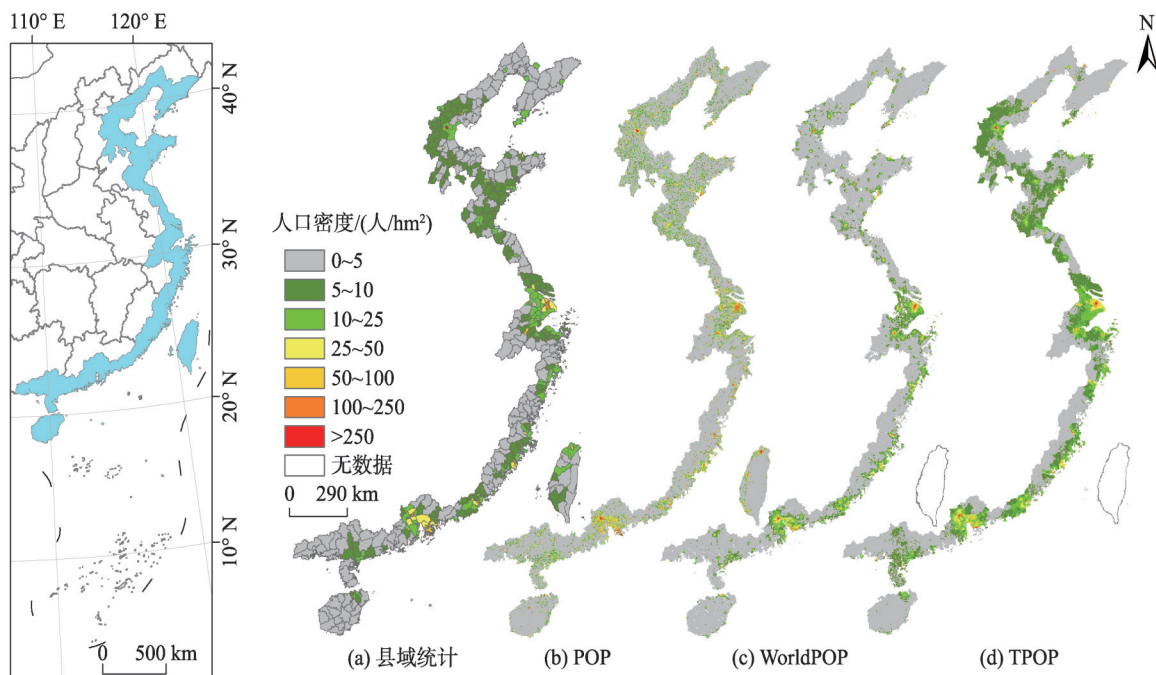


图3 3种人口分布数据县级水平人口数量的对比特征

Fig. 3 Comparison of county-level population among three population distribution products



注:POP为线性调整后的中国海岸带地区人口空间分布数据,POP统计的县级人口总值与统计年鉴公布的人口数据一致;WORLD和TPOP在香港、澳门和台湾地区缺值。该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2019)1831号的标准地图制作,底图无修改。

图4 中国海岸带区域人口密度

Fig. 4 Population density map of China's coastal area

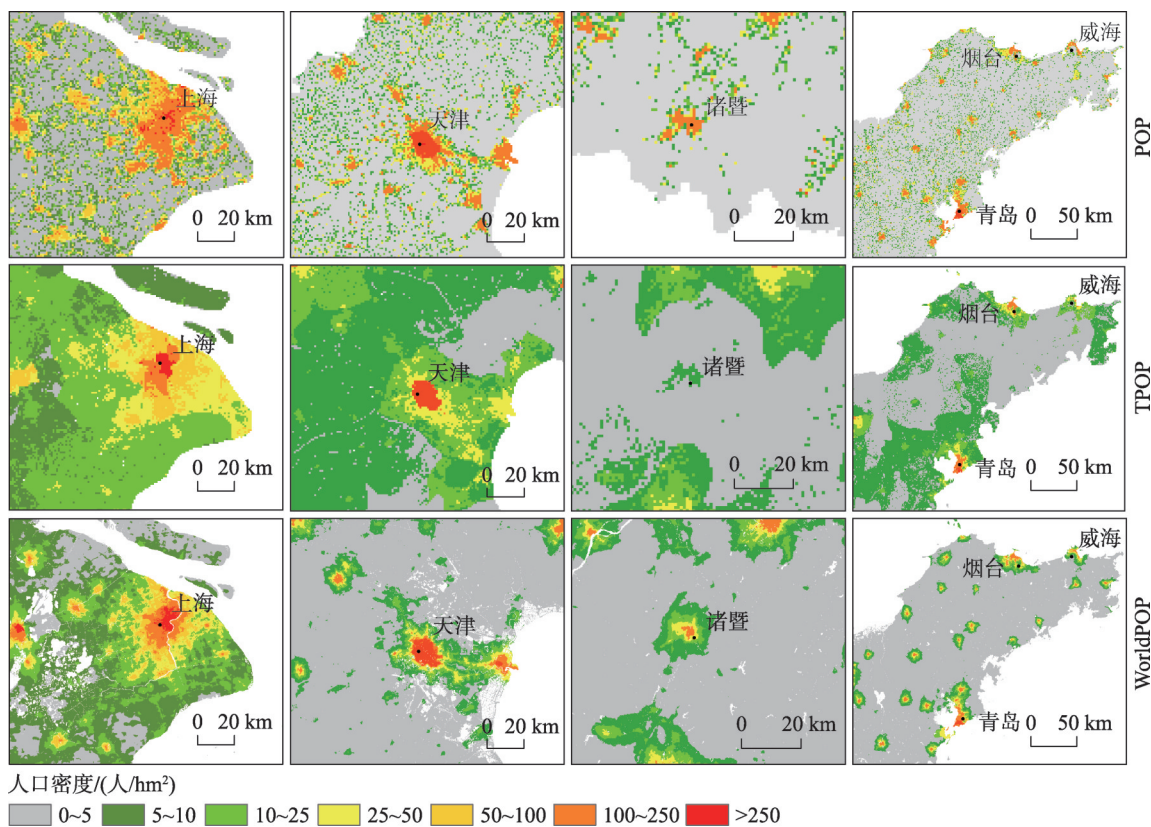


图5 不同人口数据多尺度区域人口分布特征对比

Fig. 5 Comparison of population distribution among different data at regional to local scales

但是, WorldPOP 数据夸大了人口向各级城镇的集中趋势,对大量农村居民点(如华北平原和胶东半岛)的人口分布反映不足,而 POP 数据对城市和农村居民点的人口分布以及城乡之间的过渡特征均能很好地予以刻画,更符合人口分布的特征和规律。

在城市内部的人口分布方面(图5),与 TPOP 和 WorldPOP 数据相比, POP 数据对于大、中、小城市内部区域人口分布细节特征的刻画更加理想,如上海市、天津市、诸暨市和青岛市, POP 数据高低值之间过渡自然,不存在突变现象,对人口空间结构的刻画能力均明显超出 TPOP 和 WorldPOP 数据。

综上所述,本文所得的 POP 数据在中国沿海区域取得了明显高于 TPOP 和 WorldPOP 数据的精度水平。

4.3 中国海岸带地区人口空间分布特征

基于 2015 年县域人口统计值和 POP 模拟值分析中国海岸带地区的人口分布特征。

根据统计年鉴提供的县域人口数据可知,海岸带 438 个统计单元的人口总数约为 3.59 亿人,总面积 56.29 万 km^2 ,平均的人口密度为 6.37 人/ hm^2 。计算县域单元的人口密度,表明:①人口密度为 0~5 人/ hm^2 的县域有 180 个,面积达 3520 万 hm^2 ,占海岸带县域总数的 41.10%以及总面积的 62.53%;②人口密度为 5~10 人/ hm^2 的县域有 121 个,面积为 1411 万 hm^2 ,占海岸带县域总数的 27.63%以及总面积的 25.06%;③人口密度为 10~50 人/ hm^2 的县域有 109 个,面积 653 万 hm^2 ,占海岸带县域总数的 24.89%以及总面积的 11.60%;④人口密度高于 50 人/ hm^2 的区域县域有 28 个,面积为 46 万 hm^2 ,占海岸带县域总数的 6.39%以及总面积的 0.82%。

县域尺度人口密度空间分布特征如图 4(a)所示:人口密度低于 5 人/ hm^2 的县域主要集中在沿海靠陆一侧;环渤海地区除天津、大连外,靠海一侧县域人口密度多处于 0~5 人/ hm^2 之间;山东及长江以北地区除重要港口城市外,靠海一侧县域人口密度多低于 10 人/ hm^2 ;长江以南区域越靠近沿海地带人口密度越高,且高密度地区呈现聚集趋势;人口密度高于 50 人/ hm^2 的县域主要集中在长江三角洲和珠江三角洲,且上海周边区域的县域人口平均密度普遍大于 10 人/ hm^2 。

从图 4(a)、(b)可看出,中国海岸带地区人口空间分布差异显著:①整体上看,受山地和沿海滩涂

空间分布的影响,人口密度低的区域主要有辽宁省的盘锦、鞍山等地,环渤海沿海,浙江—福建靠陆一侧,广西、海南以及台湾东部地区;受经济发展和区位优势等的影响,人口密度高的地区主要集中在处于京津冀城市群的天津、长江三角洲经济区和珠江三角洲等区域;②人口分布南北之间的区域差异显著,长江以北地区平原广布,各级城镇及农村居民点数量多但分布较为离散,导致人口分布大分散、小集中的格局特征,长江以南地区多低山丘陵,人口集中分布于沿海相对狭小的平原、低地和河口三角洲区域,而广大的内陆区域人口分布相对较少;③各级城镇层面,人口密度以城镇建成区某一特定区域为高值区逐渐向城市边缘及乡村区域降低,且高值区人口密度普遍大于 50 人/ hm^2 ;④上海、广州、深圳、香港、澳门部分地区人口密度大于 500 人/ hm^2 ,香港地区高人口密度区域的分布尤为突出;⑤台湾地区深受地形分布的影响,西部沿海一带平地相对较多,城市和人口较为密集,台北、台中、台南、高雄 4 个城市集中了大量的人口。

5 结论与讨论

5.1 结论

本文综合夜间灯光数据和植被指数两类数据在提取城市建成区和人口空间化中的优势,采用样本动态分区和建模的方法,利用人居指数作为人口分布指标,辅以居住地面积比例来改善居住区域人口差异,对中国海岸带 2015 年人口分布进行空间化模拟。通过与已发布的同分辨率的中国 1 km 格网人口数据(TPOP)和高分辨率的全球人口数据(WorldPOP)进行对比,分析本研究所获得的中国海岸带地区 1000 m 格网人口空间分布数据(POP)的精度特征。研究表明:

(1) POP、TPOP 和 WorldPOP 数据均能刻画中国海岸带人口分布的宏观格局特征,但 TPOP 和 WorldPOP 数据对城乡之间人口分布的梯度变化特征表现不力,而且 WorldPOP 数据夸大城市人口的聚集特征而弱化了农村区域的人口分布;POP 数据未发现上述不足,对大中城市内部人口分布细节特征、城乡之间人口分布的递减特征以及乡村区域农村居民点的人口分布特征的刻画都更为理想。

(2) 2015 年中国海岸带地区人口平均密度为 6.37 人/ hm^2 ,大部分县域(242 个)的人口密度低于该

平均值。人口密度低于10人/hm²的县域有301个,对应面积占中国海岸带地区总面积的87.59%,人口密度大于10人/hm²的县域主要集中在环渤海、长江三角洲、珠江三角洲等区域,县域尺度人口数量的空间差异明显。

(3)中国海岸带地区人口空间分布的宏观区域差异、中观城乡差异和城市内部的差异均比较明显;相较于长江三角洲和珠江三角洲,长江以北的海岸带区域人口分布大分散、小集中的特征显著,而长江三角洲和珠江三角洲的人口密度更大,且空间分布的集中趋势更显著;在中观及城市内部尺度,人口密度整体上由城市中心区域逐渐向城市边缘地带以及乡村区域梯度减少。

5.2 讨论

(1)夜间灯光数据可以监测人类夜间活动,是目前常用的人口空间化研究的数据源之一。但夜间灯光数据也有其局限性,包括:①利用夜间灯光数据模拟人口分布容易受到非居住灯光的影响,如商业区、工业区及道路灯光等影响人口分布信息的提取;②在人口稠密的大中城市,夜间灯光数据饱和,无法反映城市内部的人口分布差异,而在人口稀疏的农村、岛屿和山地区域,夜间灯光暗淡,也难以准确表达人口分布情况。本研究利用人居指数HSI提取照明区域,利用居住地面积比例作为控制因子剔除非居住灯光对人口模拟的干扰,同时也提高了相同或相近灯光值的格网间的人口差异。

(2)人口分布存在显著的空间差异特征,相同的用地类型其人口分布也随着地形、气候、交通网络等发生变化。针对大中尺度区域,必须采用分区建模的思想,尽可能地将人口密度差异化,才能实现精准化模拟。为此,国内外学者利用地形、气候、经济要素、交通网络、公共服务设施等因素与人口分布的相关性将研究区域划分为多个子区域分布建模。本文所用的样本动态分区和建模的方法不需要辅助数据和算法的支持,仅依赖于样本间的相似程度,将人口密度相近的区域进行归类,节省了大量的时间,相对于选择影响因子进行分区建模的方法,本文的方法更加简捷,且模型精度更高。

(3)目前可获取的统计数据以年为时间单元,使得基于统计数据模拟的人口空间数据时间分辨率偏低;事实上人口分布具有多时间尺度特征,如南北之间的季节迁徙、重大节假日的人口流动、用工潮与用工荒现象、一天之内的通勤流动等,而且

人口流动具有一定的主观性,在灾害发生时,尤其地震、台风、疫病等突发事件,现有人口分布数据无法提供准确的受灾或受威胁人口信息,在灾害风险管理方面的应用价值仍然较低。同时,大尺度的人口分布数据空间分辨率较低,且常用的人口空间化方法容易造成人口高值区被低估、低值区被高估^[65]。如何从数据源和技术手段上提高人口空间数据的时空分辨率以及模拟精度是未来人口空间化研究的重点和难点。

参考文献(References):

- [1] 刘文红.新疆人口空间分布的影响因素研究[J].农村经济与科技,2018,29(12):17-18. [Liu W H. Study on the influencing factors of population spatial distribution in Xinjiang[J]. Rural Economy and Science-Technology, 2018,29(12):17-18.]
- [2] 陈妍,梅林.东北地区资源型城市人口分布与影响因素的定量分析[J].地理科学,2018,38(3):402-409. [Chen Y, Mei L. Quantitative analysis of population distribution and influencing factors of resource-based cities in northeast China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2018,38(3):402-409.]
- [3] 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.]
- [4] 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.]
- [5] Su M, Lin M, Hsieh H, et al. Multi-layer multi-class dasy-metric mapping to estimate population distribution[J]. Science of the Total Environment, 2010,408(20):4807-4816.
- [6] Silvana Amaral, Gilberto Câmara, Antônio Miguel Vieira Monteiro, et al. Estimating population and energy consumption in Brazilian Amazonia using DMSP night-time satellite data[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2005,29(2):179-195.
- [7] 赵宇,王利,李欣欣,等.基于NPP/VIIRS夜间灯光和土地利用的大连市人口空间化研究[J].资源开发与市场,2018,34(10):1372-1376. [Zhao Y, Wang L, Li Y Y, et al. Dalian population spatial distribution study based on NPP/VIIRS night light and land use[J]. Resource Development & Market, 2018,34(10):1372-1376.]
- [8] 陈晴,侯西勇,吴莉.基于土地利用数据和夜间灯光数据的人口空间化模型对比分析——以黄河三角洲高效生态经济区为例[J].人文地理,2014,29(5):94-100. [Chen

- Q, Hou X Y, Wu L. Comparing of population spatialization models based on land use data and DMSP/OLS data respectively: A case study in the efficient ecological economic zone of the Yellow River Delta[J]. *Human Geography*, 2014,29(5):94-100.]
- [9] 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(Supplement): 70-75.]
- [10] Stevens F R, Gaughan A E, Linard C, et al. Disaggregating census data for population mapping using random forests with remotely-sensed and ancillary data[J]. *Plos One*, 2015, 10(2): 1-22.
- [11] 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): 1110-1118. [Liao Y L, Wang J F, Meng B, et al. A method of spatialization of statistical population[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(10): 1110-1118.]
- [12] 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. [Jiang D, Yang X H, Wang N B, et al. Study on spatial distribution of population based on remote sensing and GIS[J]. *Advance In Earth Sciences*, 2002, 17(5): 734-738.]
- [13] 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: Re-classifying of rural residential[J]. *Progress in Geography*, 2006, 25(3): 62-69.]
- [14] 吴安坤, 田鹏举, 黄天福, 等. 基于人口/GDP数据空间化的雷电灾害风险评价[J]. *气象科技*, 2018, 46(5): 1026-1031. [Wu A K, Tian P J, Huang T F, et al. Risk assessment of lightning disasters based on spatial population/GDP data [J]. *Meteorological Science and Technology*, 2018, 46(5): 1026-1031.]
- [15] 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. Population spatial processing for Chinese coastal zones based on census and multiple night light data[J]. *Resources Science*, 2013, 35(12): 2517-2523.]
- [16] 杨眉, 王世新, 周艺, 等. DMSP/OLS夜间灯光数据应用研究综述[J]. *遥感技术与应用*, 2011, 26(1): 45-51. [Yang M, Wang S X, Zhou Y, et al. Review on applications of DMSP/OLS night-time emissions data[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2011, 26(1): 45-51.]
- [17] 徐涵秋. 基于谱间特征和归一化指数分析的城市建筑用地信息提取[J]. *地理研究*, 2005, 24(2): 311-320. [Xu H Q. Fast information extraction of urban built-up land based on the analysis of spectral signature and normalized difference index[J]. *Geographical Research*, 2005, 24(2): 311-320.]
- [18] 董磊磊, 潘竟虎, 冯娅娅, 等. 基于夜间灯光的中国房屋空置的空间分异格局[J]. *经济地理*, 2017, 37(9): 62-69. [Dong L L, Pan J H, Feng Y Y, et al. Spatial difference pattern of house vacancy in China from nighttime light view[J]. *Economic Geography*, 2017, 37(9): 62-69.]
- [19] Lu D S, Tian H Q, Zhou G M, et al. Regional mapping of human settlements in southeastern China with multisensory remotely sensed data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112: 3668-3679.
- [20] 陈晴, 侯西勇. 集成土地利用数据和夜间灯光数据优化人口空间化模型[J]. *地球信息科学学报*, 2015, 17(11): 1370-1377. [Chen Q, Hou X Y. An improved population spatialization model by combining land use data and DMSP/OLS data[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2015, 17(11): 1370-1377.]
- [21] 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 X P, Yue T X, et al. Simulation of Chinese population density based on land use[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(2): 283-292.]
- [22] 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.]
- [23] 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.]
- [24] 何起祥, 刘守全, 周永青, 等. 中国海岸带的地质特征与综合治理[C]. *海岸带地质环境与城市发展研讨会*, 2004. [He Q X, Liu S Q, Zhou Y Q, et al. Geological characteristics and comprehensive management of China's coastal zones[C]. *Seminar on coastal geological environment and urban development*, 2004.]
- [25] Frank C, Sven V, Ahmed Z K, et al. Land-use simulation as a supporting tool for flood risk assessment and coastal safety planning: The case of the Belgian coast[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2014, 101: 102-113.
- [26] 李佳沼, 陆大道, 徐成东, 等. 胡焕庸线两侧人口的空间分

- 异性及其变化[J].地理学报,2017,72(1):148-160. [Li J M, Lu D D, Xu C D, et al. Spatial heterogeneity and its changes of population on the two sides of Hu Line[J]. Acta Geographica Sinica, 2017,72(1):148-160.]
- [27] 张国俊,黄婉玲,周春山,等.城市群视角下中国人口分布演变特征[J].地理学报,2018,73(8):1513-1525. [Zhang G J, Huang W L, Zhou C S, et al. Spatio-temporal characteristics of demographic distribution in China from the perspective of urban agglomeration[J]. Acta Geographica Sinica, 2018,73(8):1513-1525.]
- [28] 邸向红,侯西勇,吴莉.中国海岸带土地利用遥感分类系统研究[J].资源科学,2014,36(3):463-472. [Di X H, Hou X Y, Wu L. Land use classification system for China's coastal zone based on remote sensing[J]. Resources Science, 2014,36(3):463-472.]
- [29] Di X H, Hou X Y, Wang Y D, et al. Spatial-temporal characteristics of land use intensity of coastal zone in China during 2000- 2010[J]. Chinese Geographical Science, 2015,25(1):51-61.
- [30] 侯西勇,邸向红,侯婉,等.中国海岸带土地利用遥感制图及精度评价[J].地球信息科学学报,2018,20(10):1478-1488. [Hou X Y, Di X H, Hou W, et al. Accuracy evaluation of land use mapping using remote sensing techniques in coastal zone of China[J]. Journal of Geoinformation Science, 2018,20(10):1478-1488.]
- [31] Elvidge C D, Baugh K E, Zhizhin M, et al. Why VIIRS data are superior to DMSP for mapping nighttime lights [J]. Proceedings of the Asia-Pacific Advanced Network, 2013,35:62-69.
- [32] 徐新良.中国月度植被指数(NDVI)空间分布数据集.中国科学院资源环境科学数据中心数据注册与出版系统 (<http://www.resdc.cn/DOI>),2018.DOI:10.12078/2018060602. [Xu X L. China monthly vegetation index (NDVI) spatial distribution data set. Data registration and publication system of Resource and Environment Data Cloud Platform(<http://www.resdc.cn/DOI>),2018.DOI:10.12078/2018060602.]
- [33] WorldPop (www.worldpop.org). School of Geography and Environmental Science, University of Southampton). 2015. China 100m Population. (<https://www.worldpop.org/doi/10.5258/SOTON/WP00055>).
- [34] 徐新良.中国人口空间分布公里网格数据集.中国科学院资源环境科学数据中心数据注册与出版系统 (<http://www.resdc.cn/DOI>),2017.DOI:10.12078/2017121101. [Xu X L. China population spatial distribution km grid data set. Data registration and publication system of Resource and Environment Data Cloud Platform(<http://www.resdc.cn/DOI>), 2017.DOI:10.12078/2017121101.]
- [35] Deville P, Linard C, Martin S, et al. Dynamic population mapping using mobile phone data[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2014,111(45):15888-15893.