

引用格式: 王旭,吴吉东,王海,等.基于夜间灯光和人口密度数据的京津冀GDP空间化对比[J].地球信息科学学报,2016,18(7):969-976. [Wang X, Wu J D, Wang H, *et al.* 2016. Comparison of GDP spatialization in Beijing-Tianjin-Hebei based on night light and population density data. *Journal of Geo-information Science*, 18(7):969-976.] DOI:10.3724/SP.J.1047.2016.00969

基于夜间灯光和人口密度数据的京津冀 GDP 空间化对比

王 旭,吴吉东*,王 海,李 宁

1. 北京师范大学 环境演变与自然灾害教育部重点实验室,北京 100875; 2. 北京师范大学 地表过程与资源生态国家重点实验室,北京 100875; 3. 北京师范大学 民政部教育部减灾与应急管理研究院,北京 100875

Comparison of GDP Spatialization in Beijing-Tianjin-Hebei Based on Night Light and Population Density Data

WANG Xu, WU Jidong*, WANG Hai and LI Ning

1. Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, MOE, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;
2. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;
3. Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, MOE & MCA, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: As an important indicator in measuring the economic development level of a region, GDP spatialization is of great significance to study the socio-economic heterogeneity. The ancillary spatial density data selection is the key technique in controlling the GDP spatialization's accuracy. In this paper, the prefectural GDP statistics is distributed to grid cells according to the spatial distribution information of GDP such as the population density (LandScan, AsiaPop) and night light data in Beijing-Tianjin-Hebei. Moreover, the absolute errors and relative errors of the GDP disaggregation at county-level are both calculated in order to compare the errors among the three different ancillary data as mentioned above. These results can provide a reasonable reference to ancillary spatial density data selection in GDP disaggregation. The results show that, the spatial distributions of the three types of ancillary spatial density data for GDP have revealed their own advantages and disadvantages. Comparing with both of the night light and the LandScan data, the AsiaPop simulation generally has the smallest error, especially in the suburban districts and rural areas of Beijing where the GDP tends to be overestimated, while the GDP is often underestimated in the economically developed city centers. For the LandScan simulation, six counties have presented a relative error of more than 200%, as the LandScan data are concentrated in Beijing and Tianjin, while the suburban districts and counties have also been overestimated. The AsiaPop simulation has only three counties (which locate in Tianjin) presenting a relative error being more than 200%. Because of the spatial heterogeneity of the economic activities, the GDP disaggregation error will increase with respect to the refinement of the administrative units, therefore, using the single-generation data to reasonably reflect the spatial distribution of economic activities is difficult, we need to take advantage of the distribution data such as the night light, roads, housing distribution and cell phone signals to improve the GDP disaggregation's accuracy in future, and to reflects the GDP distribution characteristics in a more detailed manner. High-quality exposure data not only provide the basic data for the study of spatial analysis of natural disaster risk, but also provide a reference for other multidisciplinary research fields; meanwhile, the comprehensive application of using both the multi-source remote sensing data

收稿日期:2015-12-04;修回日期:2016-03-31.

基金项目:国家重大科学研究计划项目(2012CB955402);国家自然科学基金项目(41571492);教育部-国家外国专家局高等学校创新引智计划(B08008)。

作者简介:王 旭(1992-),男,硕士生,研究方向为自然灾害经济损失评估。E-mail: wangxu2015@mail.bnu.edu.cn

*通讯作者:吴吉东(1981-),男,副教授,研究方向为自然灾害综合评价。E-mail: wujidong@bnu.edu.cn

and the statistics data is the trend for socio-economic data spatialization.

Key words: GDP spatialization; Beijing-Tianjin-Hebei; night light; population density

***Corresponding author:** WU Jidong, E-mail: wujidong@bnu.edu.cn

摘要:国内生产总值(GDP)是衡量地区经济发展水平的重要指标,GDP的空间化可以为灾害风险分析等多学科交叉研究提供基础数据。空间化代用数据的选择是社会经济统计数据空间化的关键,本文以京津冀地区作为研究区,将夜间灯光、全球人口密度(LandScan)和亚洲人口密度(AsiaPop)空间分布信息作为代用数据,将市级GDP统计数据空间展布到栅格单元,以绝对误差、相对误差和均方根误差为指标,利用县级统计数据对展布结果进行误差分析,并对比3种数据对GDP空间模拟的表达效果。结果表明:相对于夜间灯光和LandScan数据,AsiaPop模拟得到的综合误差最小;基于夜间灯光和LandScan的GDP空间展布误差格局比较接近,即存在经济较发达的市辖区GDP值被低估、市郊区县GDP被高估的误差“两极区”倾向,而基于AsiaPop的GDP空间展布误差格局与经济发展水平关系不密切。因此,利用单一代用数据很难合理地反映经济活动的空间分布,综合夜间灯光、人口密度、道路和建筑物等多源空间数据是提高GDP空间展布精度的发展趋势。

关键词:GDP空间化;京津冀;夜间灯光;人口密度

1 引言

国内生产总值(GDP)指按市场价格计算的一个国家(或地区)所有常住单位在一定时期内生产活动的最终成果,基于行政单元的GDP统计数据与基于自然地理单元的植被、自然灾害分布进行叠加分析时存在数据空间单元不一致的问题^[1],迫切需要将GDP统计数据展布到一个高分辨率的基础地理单元上^[2-3],以满足多学科交叉研究的需要。对灾害学研究来说,致灾因子强度(如地震烈度)与承灾体暴露性(如GDP分布)的空间叠加分析是自然灾害风险评估的关键步骤^[4],而承灾体暴露性数据的质量直接关系到灾害风险评估的准确性^[5]。

社会经济统计数据空间化研究主要包括人口空间化和经济数据(如GDP)空间化。其中,人口空间化研究较多,多基于土地利用类型、夜间灯光、道路分布及坡度等数据,使用面插值^[6-9]、回归分析等方法,将人口统计数据较好地展布到空间单元上^[10-11];不同于人口数据,GDP不存在实体,空间分布情况较抽象,只能在一定分辨率内表达,最早使用面插值的方法来进行GDP的空间分配^[8-9],随着遥感技术的发展,学者们逐步开始利用土地利用遥感数据结合面积权重法、反距离加权法、距离衰减加幂指数模型等分产业建模,并建立了中国1 km 格网GDP数据集^[3,12-13]。近些年,夜间灯光数据在社会经济问题分析中得到广泛应用,何春阳等利用夜间灯光数据讨论了研究区的城市化过程^[14];王鹤饶归纳总结了现有夜间灯光数据的研究进展及应用前景,分析了灯光强度数据和社会经济发展水平之间的关系^[15];为了弥补夜间灯光数据的灯光溢出现象,韩向娣等利

用夜间灯光数据与各产业的对数线性关系,分产业进行建模,结果显示土地利用数据对于工业生产总值有较好的表达效果^[16]。近几年,夜间灯光数据在估计GDP的空间分布、人类居住模式以及城市化进程研究中都有很好的应用^[17-20],吴建生等发现人均光消费与GDP的倒U型关系^[21],周玉科等研究了GDP与人口数据之间的关系,但只基于国家和省级区域尺度^[22]。

综上所述,目前GDP空间化主要使用的代用数据是夜间灯光和土地利用类型数据,而人口、道路网等数据应用较少,学者一般选择其中一种或几种代用数据分区(或分产业)建立代用数据与GDP统计数据之间的统计回归模型,估计GDP的空间分布。利用回归模型获得的零误差GDP密度分布能作为GDP宏观分析的依据,但不能保证更精细化空间尺度的空间模拟精度,不能满足精细化灾害风险评估等对基础数据的需求。如何选择合理的代用数据作为GDP空间分布密度信息进行空间展布是GDP空间化的关键,但对不同代用数据进行GDP模拟效果的对比研究尚少。GDP的产生与人口分布关系密切,而夜间灯光也反映了社会经济活动的强度及空间分布。因此,本文以京津冀地区为例,讨论人口密度分布和夜间灯光对GDP的空间表达效果,旨在对比不同代用数据在GDP空间化方面的表达效果,以为社会经济统计数据空间化代用数据的合理选择提供借鉴。

2 数据来源与方法

在对基础地理信息数据归并等处理的基础上,

首先,利用夜间灯光数据、不同分辨率的人口密度分布数据作为代用数据,将研究区市级GDP统计数据空间展布到栅格单元上;其次,利用县级GDP统计数据进行分析,比较代用数据对GDP空间分布的表达效果。具体的空间化技术流程如图1所示。

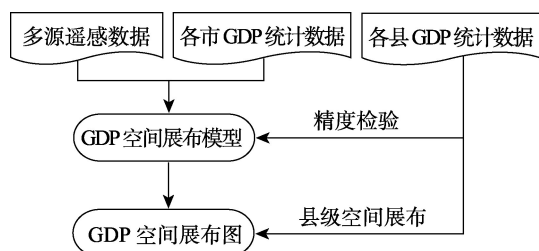


图1 GDP空间化技术流程图

Fig.1 Flow chart of GDP spatialization

2.1 数据来源

本文的人口数据为2010年AsiaPop和LandScan数据,夜间灯光数据为2012年数据(表1)。AsiaPop主要遵循史蒂芬等提供的随机森林回归树为基础的映射方法,集合出100 m×100 m栅格单元人口密度分布图,与以土地覆盖为基础的方法比较,其输出精度明显改善^[23]。

全球人口动态统计分析数据库(LandScan)是美国能源部橡树岭国家实验室(ORNL)运用地理信息系统和遥感等方法,基于土地利用类型、夜间灯光、道路坡度、城市密度等多种地理因子建立模型后开发的被认为是具有最佳分辨率、最为准确、最可靠的全球1 km分辨率人口分布商业数据集^[24]。

夜间灯光数据来自美国国家海洋和大气管理局(NOAA)中的极轨卫星计划(DMSP)中的线性扫描业务系统(OLS),夜间灯光灰度值范围在0~63,能较好地反映交通道路、工业、居民地分布等社会因素,所以被广泛地应用于社会经济数据的定量化研究中^[15-16]。

京津冀地区2010年13个市级、179个县级行政区划底图矢量数据来自国家基础地理信息中心;

2013年京津冀市、县级GDP统计数据来源于国家统计局^[25]。由于跨区经济活动等原因,北京市分县(区)加和GDP小于地市GDP,为了进行误差分析,本文以市级GDP统计值为准,将县级GDP统计值等比例扩大,保证县级GDP加和值等于地市GDP统计值。

2.2 GDP空间化方法

人口分布和夜间灯光反映了社会经济活动的空间分布,因此,本文利用夜间灯光和人口密度数据作为GDP空间分布密度信息,以市为单位将GDP空间展布到栅格单元上,如式(1)所示。

$$GDP_{ij} = GDP \times \left(\frac{NV_{ij}}{SNV} \right) \quad (1)$$

式中: GDP_{ij} 为空间展布后的栅格单元值; GDP 为该栅格单元所在市级行政单元的GDP统计值; NV_{ij} 为所使用的代用数据在该栅格的单元值; SNV 为该市代用数据栅格单元值之和。

为了对空间化效果进行检验,本文使用绝对误差的中位数、相对误差的均值、相对误差的方差、平均绝对偏差、均方根误差等指标分析空间展布后的 n 个县级模拟值 GDP' 与实际统计的 GDP 差异。其中,相对误差 E 和均方根误差 $RMSE$ 的计算公式如式(2)、(3)所示。

$$E = \frac{(GDP' - GDP)}{GDP} \times 100\% \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (GDP - GDP')^2}{n}} \quad (3)$$

3 GDP空间化模拟及分析

3.1 空间化代用数据与GDP的相关性分析

利用SPSS软件在县级行政单元尺度对空间化代用数据与GDP做皮尔逊相关性分析可知,GDP与夜间灯光、LandScan和AsiaPop数据的相关系数

表1 本文使用的数据信息表

Tab.1 Introduction of the data used in this study

数据名称	数据类型	空间分辨率	年份	基础数据依据	数据来源
AsiaPop	栅格	0.00083333°(赤道约100 m)	2010	人口调查数据、卫星遥感数据、手机网络信号等	www.worldpop.org.uk ^[23]
LandScan	栅格	0.0083333°(赤道约1 km)	2010	土地利用类型、夜间灯光、道路、坡度等	ORNL ^[24]
夜间灯光	栅格	0.0083333°(赤道约1 km)	2012	夜间灯光灰度值	NOAA
GDP/人均GDP	统计	市级、县级	2013	—	国家统计局 ^[25]
行政区底图	矢量	市级、县级	2010	—	国家基础地理信息中心

分别为0.630、0.662和0.767,在0.01水平(双侧)上都显著相关,说明在县级行政单元上代用数据和GDP的空间分布密切相关。

3.2 GDP空间化模拟结果

基于相关性分析结果,根据上述空间化方法以代用数据空间密度分布为依据,利用ArcGIS 10.2平台将上述3种代用数据的市级GDP空间展布到栅格单元上,得到基于不同代用数据的京津冀地区市级GDP空间分布栅格图(图2)。由于代用数据生成所依据的原始信息差异以及表现出来的空间分布特征,相对于LandScan的GDP空间化结果,夜间灯光和AsiaPop空间化的空间格局更加接近,特别是在河北北部一些县区GDP主要集中在市辖区及周边,GDP零值呈大片分布,相反LandScan的GDP零值仅有零星分布。

3.3 GDP空间化模拟结果误差对比分析

通过比较表2中3种代用数据的GDP空间化模拟相对误差的方差和均值发现,人口密度数据得到的误差值普遍比灯光数据的结果小,特别是AsiaPop数据对GDP的展布相对误差的方差只有0.4,说明AsiaPop数据对GDP的表达上相对误差的差异更小。比较均方根误差和平均绝对偏差也得到同样的结论,即基于AsiaPop数据对京津冀地区GDP进行空间展布比其他2种数据有更好地表达效果。

表3从极值统计角度分别列出了不同代用数据下的正、负相对误差最大的前10个县区,根据行政区划分为市辖区和市郊区县。从表3可看出:(1)夜间灯光数据相对误差大于300%的5个县区都集中在北京市,相对误差最大的延庆县GDP模拟值甚至

达到实际值的6倍多,而经济比较发达(人均GDP相对较高)的市辖区GDP往往被低估,比如北京市西城区和东城区;(2)LandScan数据相对误差大于200%的6个县区集中在北京市和天津市,市郊区县GDP也往往被高估,同时市辖区也存在GDP高估的问题,低估极值区县主要为经济比较发达的市辖区、新区(如滨海新区)或县级市(如武安市和沙河市);(3)AsiaPop数据高估GDP误差最大的10个区县中前4个来自天津市,后4个来自河北省市郊区县,而低估最大的前10个县区主要为河北省市郊区县。进一步分析县级GDP的空间展布相对误差空间分布(图3),可以看出基于夜间灯光和LandScan的GDP空间展布误差格局比较接近。

正如很多学者提及的统计数据空间化时存在格网尺度效应,数据在不同尺度上的应用也存在不确定性^[27]。夜间灯光数据利用OLS传感器探测城镇灯光等产生的电磁波,能够反映居民点、公路分布以及人类夜间活动的范围^[28],以及城市规模扩展和经济繁荣状况等多种潜在信息,与GDP分布紧密相关。但受夜间灯光数据像元过饱和与像元溢出效应影响,往往使市辖区(像元饱和区)的GDP像元估计值无显著空间异质性,对于灯光密集(饱和)区(如北京主城区)并不能有效地区分社会经济差异^[28-30],同时造成市辖区像元GDP值被低估、市郊区县GDP被高估的误差“两极区”倾向。

利用格网化的人口密度代用数据在表达GDP时,以待展布行政单元内人均GDP相同为前提假设,一方面,这种假设要求代用数据有较高的分辨率^[31],然而基于不同数据源不同方法得到的格网化人口密度数据精度还存在问题^[32-33]。同样是人口密

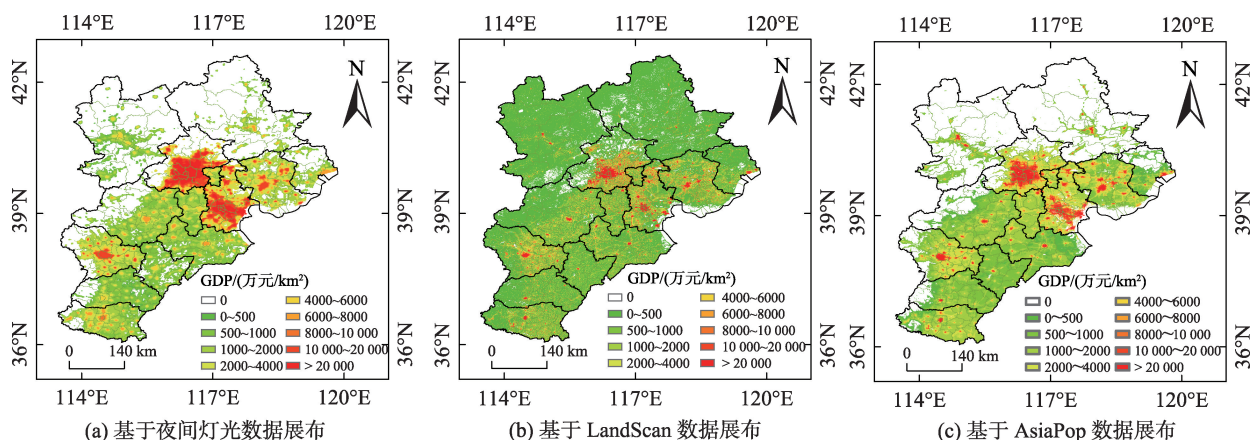


图2 基于不同代用数据的2013年京津冀地区GDP空间化结果

Fig.2 GDP spatialization results of the Beijing-Tianjin-Hebei region based on different ancillary data in 2013

表2 基于不同代用数据的 GDP 空间化模拟结果误差对比

Tab.2 Comparison of the GDP spatialization errors based on different ancillary data

数据展布	绝对误差的中位数	E 的均值[最值]	E 的方差	平均绝对偏差	RMSE
夜间灯光	228 510	0.42 [-0.95, 5.44]	0.80	0.59	6 165 793
LandScan	260 094	0.41 [-0.73, 5.75]	0.61	0.52	5 331 930
AsiaPop	214 947	0.27 [-0.98, 3.48]	0.40	0.46	4 623 166

表3 基于不同代用数据的 GDP 空间化模拟误差极值统计

Tab.3 Extreme-value statistics of the GDP spatialization errors based on different ancillary data

误差项	夜间灯光数据			LandScan 数据			AsiaPop 数据		
	县区名	E	人均 GDP/万元	县区名	E	人均 GDP/万元	县区名	E	人均 GDP/万元
GDP 被高估的前 10 个县区	延庆县	5.44	2.92	红桥区*	5.75	2.72	红桥区*	3.48	2.72
	通州区	3.36	3.77	河东区*	3.68	2.94	河东区*	3.05	2.94
	大兴区	3.29	2.86	蓟县	3.21	3.49	河北区*	2.05	3.94
	平谷区	3.21	4.00	延庆县	2.86	2.92	蓟县	1.83	3.49
	密云县	3.15	4.10	河北区*	2.36	3.94	大兴区	1.79	2.86
	门头沟区	2.90	4.10	平谷区	2.03	4.00	昌平区	1.72	2.95
	昌平区	2.57	2.95	门头沟区	1.86	4.10	曲阳县	1.66	1.00
	房山区	2.53	4.77	密云县	1.84	4.10	威县	1.25	0.88
	怀柔区	2.51	5.25	海兴县	1.74	1.46	魏县	1.22	1.24
	静海县	2.34	6.71	曲阳县	1.48	1.00	唐县	1.19	1.06
GDP 被低估的前 10 个县区	和平区*	-0.95	18.87	滨海新区	-0.73	28.78	康保县	-0.98	1.52
	西城区*	-0.94	21.69	保定市辖区*	-0.69	5.76	赤城县	-0.90	2.38
	东城区*	-0.92	17.28	沧州市辖区*	-0.66	15.52	沽源县	-0.88	1.72
	河西区*	-0.81	6.77	西城区*	-0.65	21.69	尚义县	-0.81	1.66
	南开区*	-0.79	5.21	宽城满族自治县	-0.61	8.56	崇礼县	-0.73	3.07
	保定市辖区*	-0.76	5.76	衡水市辖区*	-0.57	5.40	丰宁满族自治县	-0.69	2.15
	沧州市辖区*	-0.75	15.52	津南区*	-0.57	8.83	保定市辖区*	-0.67	5.76
	河北区*	-0.74	3.94	武安市	-0.56	7.34	宽城满族自治县	-0.63	8.56
	邢台市辖区*	-0.74	5.61	沙河市	-0.52	5.00	滨海新区	-0.62	28.78
	海淀区*	-0.66	10.72	邢台市辖区*	-0.51	5.61	张北县	-0.61	2.11

注: *表示该区为所属地市的市辖区(人均 GDP 较高,经济相对较发达),其他为市郊区县;人均 GDP 为 2013 年统计值

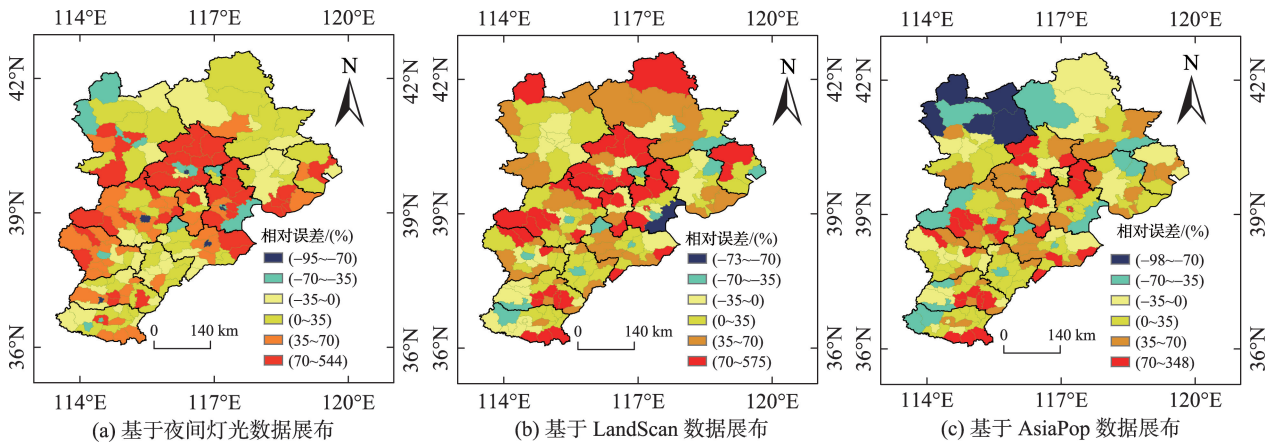


图3 基于不同代用数据的京津冀 GDP 空间展布相对误差分布图

Fig.3 Relative error distribution of the GDP spatialization based on different ancillary data in Beijing-Tianjin-Hebei

度分布数据, LandScan 和 AsiaPop 这 2 种代用数据的 GDP 空间化模拟误差空间格局存在较大差异: AsiaPop 数据利用了手机网络信号数据和随机森林回归法生成人口密度数据, 但是手机网络信号在偏远地区较稀疏, 可能低估了人口分布, 进而低估 GDP 的分布, 如河北北部康保县 AsiaPop 模拟相对误差为-97.8%, 而 LandScan 模拟相对误差为 71.9%。另一方面, 京津冀区域经济分布主要集中在北京、天津和唐山为核心的中心区域, 河北省主要集中在石家庄、张家口、保定等几个城市, 这些城市经济发展水平较高, 城乡(或城郊)经济发展不平衡^[34], 人均 GDP 的空间异质性普遍存在, 受 GDP 行政统计空间单元精度所限, 难免使 GDP 误差极值出现在经济最发达和经济最不发达地区。

4 结论与讨论

GDP 作为表征经济活动强度的关键指标, GDP 空间化是满足自然因子与人文因子叠加分析的前提, 而代用数据的合理选择是 GDP 空间化精度的保证。为了比较夜间灯光、LandScan 和 AsiaPop 人口密度作为 GDP 空间密度分布的代用数据对 GDP 的空间表达效果, 本文以京津冀地区为例, 比较利用 3 种数据进行 GDP 空间化模拟的误差, 以期为社会经济统计数据空间化代用数据选择提供借鉴。结果表明: 3 种数据对于 GDP 的空间分布都有一定的宏观表达效果, 其中, 将 GDP 由地区展布到县级尺度时利用 AsiaPop 作为代用数据的综合误差最小; 基于夜间灯光和 LandScan 的 GDP 空间展布误差格局比较接近, 即存在经济较发达的市辖区 GDP 值被低估、市郊区县 GDP 值被高估的误差“两极区”倾向, 而基于 AsiaPop 的 GDP 空间展布误差格局与经济发展水平关系不够密切。因此, 利用单一代用数据很难合理地反映经济活动的空间分布, 而综合夜间灯光、人口密度、道路和建筑物等多源空间数据是提高 GDP 展布精度的发展趋势。

本文尚存在以下不足: (1) 仅基于京津冀地区进行代用数据空间化精度对比, 由于区域间经济发展差异, 上述代用数据在其他地区的模拟精度有待考证; (2) 仅对比不同代用数据对 GDP 的模拟结果, 不考虑采用不同空间化模拟方法的 GDP 表达效果; (3) 夜间灯光数据更新快、易获取, LandScan 人口密度数据虽然每年更新但价格昂贵, 而 AsiaPop 数据

仅有主要年份, 受数据所限, 本文选择 2010 年人口数据和 2012 年夜间灯光数据来模拟 2013 年 GDP 空间分布, 虽然数据整体可以反映 GDP 空间分布差异, 但是代用数据与统计数据年代的不匹配一定程度上会影响模拟误差; (4) 代用数据空间分辨率的选择依赖于研究问题的空间尺度要求, AsiaPop 数据相对于 LandScan 和夜间灯光数据的空间分辨率有所提升, 是否更适用于县(市)等较小尺度的经济数据空间化还有待进一步研究。

GDP 空间化模拟尚有诸多改进途径: (1) 代用数据本身质量的改进有利于 GDP 展布精度的提高, 针对夜间灯光像元过饱和问题, 卓莉等利用植被覆盖与灯光强度在城郊之间反相关的关系, 基于植被指数构建的城市灯光指数较好地缓解了夜间灯光强度饱和问题, 凸显了城市内部差异^[35], 夜间灯光数据过饱和问题的解决有利于利用该数据更加准确地反演 GDP 的空间分布; (2) 针对上述单一代用数据很难全面、准确地表达 GDP 密度分布的空间异质性, 除了改进空间化算法, 结合土地利用类型、夜间灯光、人口密度及交通路网分布等多源数据, 分产业(或部门)构建 GDP 与代用数据之间的关系, 是提高 GDP 空间精度的重要途径, 而综合多源遥感数据和统计数据也是进行社会经济统计数据空间化的趋势。

参考文献(References):

- [1] 马静, 焦文献. 我国社会统计数据空间化研究综述[J]. 未来与发展, 2008(3): 25-28. [Ma J, Jiao W X. A review on pixelizing of social statistical data[J]. Future and Development, 2008, 3: 25-28.]
- [2] 史培军. 制定国家综合减灾战略提高巨灾风险防范能力[J]. 自然灾害学报, 2008, 17(1): 1-8. [Shi P J. Establishing national integrated disaster reduction strategy and improving catastrophe risk governance capacity[J]. Journal of Natural Disasters, 2008, 17(1): 1-8.]
- [3] 刘红辉, 江东, 杨小唤, 等. 基于遥感的全国 GDP 1 km 格网的空间化表达[J]. 地球信息科学, 2005, 7(2): 120-123. [Liu H H, Jiang D, Yang X H, et al. Spatialization approach to 1 km grid GDP supported by remote sensing[J]. Geo-Information Science, 2005, 7(2): 120-123.]
- [4] 史培军. 中国自然灾害风险地图集[M]. 北京: 科学出版社, 2011. [Shi P J. Atlas of natural disaster risk of China [M]. Beijing: Science Press, 2011.]
- [5] 史培军. 五论灾害系统研究的理论与实践[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(5): 1-9. [Shi P J. Theory and practice on disas-

- ter system research in a fifth time[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2009,18(5):1-9.]
- [6] 吕安民,李成名,林宗坚.面积内插方法及其在GIS中应用[J].*地球信息科学*,2001,5(4):25-29. [Lv A M, Li C M, Lin Z J. Area interpolation and its application in GIS[J]. *Geo-Information Science*, 2001,5(4):25-29.]
- [7] Fisher P F, Langford M. Modelling the errors in areal interpolation between zonal systems by Monte Carlo simulation[J]. *Environment and Planning A*, 1995,27(2):211-224.
- [8] Goodchild M F, Anselin L, Deichmann U. A framework for the areal interpolation of socioeconomic data[J]. *Environment and Planning A*, 1993,25(3):383-397.
- [9] Eicher C L, Brewer C A. Dasymetric mapping and areal interpolation: implementation and evaluation[J]. *Cartography and Geographic Information Science*, 2001,28(2):125-138.
- [10] 江东,王乃斌,刘红辉.人口数据空间化的处理方法[J].*地理学报*,2002,57(B12):70-75. [Yang X H, Jiang D, Wang N B, *et al.* Method of pixelizing population data[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2002,57(B12):70-75.]
- [11] 叶宇,刘高焕,冯险峰.人口数据空间化表达与应用[J].*地球信息科学学报*,2006,8(2):59-65. [Ye Y, Liu G H, Feng X F. Presentation of spatial distribution of population and its application[J]. *Geo-Information Science*, 2006,8(2):59-65.]
- [12] 钟凯文,黎景良,张晓东.土地可持续利用评价中GDP数据空间化方法的研究[J].*测绘信息与工程*,2007,32(3):10-12. [Zhong K W, Li J L, Zhang X D. GDP spatialization in land sustainable use assessment[J]. *Journal of Geomatics*, 2007,32(3):10-12.]
- [13] 黄莹,包安明,陈曦,等.新疆天山北坡干旱区GDP时空模拟[J].*地理科学进展*,2009,28(4):494-502. [Huang Y, Bao A M, Chen Xi, *et al.* GIS based space-time simulation of GDP in arid regions: taking the northern slope of Tianshan mountains as an example[J]. *Progress in Geography*, 2009,28(4):494-502.]
- [14] 何春阳,李景刚,陈晋,等.基于夜间灯光数据的环渤海地区城市化过程[J].*地理学报*,2005,60(3):409-417. [He C Y, Li J G, Chen J, *et al.* The urbanization model and process in Bohai Sea surrounding area in the 1990s by using DMSP/OLS data[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2005,60(3):409-417.]
- [15] 王鹤饶,郑新奇,袁涛.DMSP/OLS数据应用研究综述[J].*地理科学进展*,2012,31(1):11-19. [Wang H R, Zheng X Q, Yuan T. Overview of researches based on DMSP/OLS nighttime light data[J]. *Progress in Geography*, 2012,31(1):11-19.]
- [16] 韩向娣,周艺,王世新,等.基于夜间灯光和土地利用数据的GDP空间化[J].*遥感技术与应用*,2012,27(3):396-405. [Han X D, Zhou Y, Wang S X, *et al.* GDP spatialization in China based on DMSP/OLS data and land use data[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2012,27(3):396-405.]
- [17] 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.
- [18] Cauwels P, Pestalozzi N, Sornette D. Dynamics and spatial distribution of global nighttime lights[J]. *EPJ Data Science*, 2014,3(1):1-26.
- [19] Ma Q, He C, Wu J, *et al.* Quantifying spatiotemporal patterns of urban impervious surfaces in China: an improved assessment using nighttime light data[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2014,130:36-49.
- [20] Fan J, Ma T, Zhou C, *et al.* Comparative estimation of urban development in China's cities using socioeconomic and DMSP/OLS night light data[J]. *Remote Sensing*, 2014,6(8):7840-7856.
- [21] Wu J, Wang Z, Li W, *et al.* Exploring factors affecting the relationship between light consumption and GDP based on DMSP/OLS nighttime satellite imagery[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013,134:111-119.
- [22] Zhou Y, Ma T, Zhou C, *et al.* Nighttime light derived assessment of regional inequality of socioeconomic development in China[J]. *Remote Sensing*, 2015,7(2):1242-1262.
- [23] 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):e0107042.
- [24] Bhaduri B, Bright E, Coleman P, *et al.* LandScan USA: a high resolution geospatial and temporal modeling approach for population distribution and dynamics[J]. *Geo-Journal*, 2007, 69:103-117.
- [25] 国家统计局.中国统计年鉴2014[M].北京:中国统计出版社,2014. [National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. *China statistical yearbook 2014*[M]. Beijing: China Statistics Press, 2014.]
- [26] 叶靖,杨小唤,江东.乡镇级人口统计数据空间化的格网尺度效应分析[J].*地球信息科学*,2010,12(1):40-47. [Ye J, Yang X H, Jiang D. The grid scale effect analysis on town leveled population statistical data spatialization[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2010,12(1):40-47.]
- [27] 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.]
- [28] 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.]
- [29] 卓莉,史培军,陈晋. 20世纪90年代中国城市时空变化特征——基于灯光指数CNLI方法的探讨[J].*地理学报*, 2003,58(6):893-902. [Zhuo L, Shi P J, Chen J. Application of compound night light index derived from DMSP/OLS data to urbanization analysis in China in the 1990s [J]. *Journal of Geography*, 2003,58(6):893-902.]
- [30] 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] *Journal of Geography*, 2005,60(2):266-276.]
- [31] 吕安民,李成名,林宗坚,等.人口密度的空间连续分布模型[J].*测绘学报*,2003,32(4):344-348. [Lv A M, Li C M, Lin Z J. *et al.* Spatial continuous surface model of population density[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2003,32(4):344-348.]
- [32] 廖顺宝,李泽辉.基于人口分布与土地利用关系的人口数据空间化研究[J].*自然资源学报*,2003,18(6):659-665. [Liao S P, Li Z H. Study on spatialization of population census data based on relationship between population distribution and land use[J]. *Journal of Natural Resources*, 2003,18(6):659-665.]
- [33] 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 Geographic*, 2013,32(11):1692-1702.]
- [34] 董冠鹏,郭腾云,马静.空间依赖,空间异质与京津冀都市地区经济收敛[J].*地理科学*,2010,30(5):679-685. [Dong G P, Guo T Y, Ma J. Spatial dependence, heterogeneity and economic convergence of the Beijing-Tianjin-Hebei metropolitan region[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2010,30(5):679-685.]
- [35] 卓莉,张晓帆,郑璟,等.基于EVI指数的DMSP/OLS夜间灯光数据去饱和方法[J].*地理学报*,2015,70(8):1339-1350. [Zhuo L, Zhang X F, Zheng J, *et al.* An EVI-based method to reduce saturation of DMSP/OLS nighttime light data [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015,70(8):1339-1350.]