

doi: 10.7522/j.issn.1000-0240.2013.0030

Liang Youjia, Xu Zhongmin. Modeling the spatial distribution of GDP based on night light radiation: A case study in Ganzhou District, Zhan-
gye Municipality [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(1): 249–254. [梁友嘉, 徐中民. 基于夜间灯光辐射数据的张掖市甘
州区 GDP 空间分布建模[J]. 冰川冻土, 2013, 35(1): 249–254.]

基于夜间灯光辐射数据的张掖市甘州区 GDP 空间分布建模

梁友嘉, 徐中民

(中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所 内陆河流域生态水文重点试验室, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 尽管近年来统计数据的生成技术有了很大提高, 但可用的详细 GDP 空间分布数据始终难以得到满足。以夜间灯光辐射数据、官方统计数据 and 已有空间化人口分布数据构建了一种 GDP 空间化建模方法, 得到张掖市甘州区 2000 年的 GDP 空间分布。首先, 分析基于乡镇单元的 GDP 与对应的夜间灯光辐射数据 DN 值之间的关系, 得到 GDP 模拟模型; 然后结合人口空间分布数据和三次产业的比例, 得到基于 500 m×500 m 栅格的 GDP 空间分布图。各乡镇的 GDP 平均值为 372×10^4 元, 标准差为 34×10^4 元。

关键词: DMSP/OLS; 人口分布; GDP; 空间建模

中图分类号: C922 **文献标识码:** A

0 引言

国内生产总值 (Gross Domestic Product, GDP) 是反映国家或地区全部生产活动最终成果的重要指标, 从生产角度讲, 等于各部门 (包括第一、第二和第三产业) 增加值之和。为了科学的认知社会经济条件和其对自然环境的影响, 需集成社会经济数据与自然环境数据。然而, 自然环境数据 (如土地利用, 高程, 气候, 土壤以及植被等) 一般都是栅格数据, 因此, 有必要开发针对社会经济数据的空间化建模方法, 增强人地系统中人文因素作用的研究, 使得栅格化的经济活动数据与自然环境数据可以实现集成分析^[1-4]。

目前, 获取高精度 GDP 数据时还存在一些困难, 包括收入的计算方法、数据收集方法的标准性、调查效率、调查者响应程度以及地区间不同政治经济条件的差异等都影响到 GDP 数据的精度。此外, 在很多地区, 非正规经济已经成为经济总量中的重要组成部分, 而在统计过程中往往被忽略。

好的统计量可以表征非正规经济对经济活动总量的贡献, 也能使决策者更好地认识其与贫困等其他社会问题之间的关系^[5-6]。

遥感影像可以提供相对均一、连续以及独立的估计经济活动的数据库^[7-8]。通过一些大尺度研究发现, 夜间灯光分布与经济活动之间存在着显著的相关性^[9]。Doll 等^[10]开发了全球尺度的第一幅 GDP 空间分布图, 但该研究未给出降尺度后的结果。Sutton 等^[11]利用 1996–1997 年全球辐射验证数据估计了基于各国的全球 GDP 空间分布情况。上述研究都假设只有灯光区存在经济活动, 这种假设可能忽略了农业占主要成分的地区经济活动。近年来, 国内也有关于 GDP 空间化的相关研究, 大致有两类: 一是利用遥感数据 (如 Landsat 影像) 与特定研究尺度的 GDP 建立相关性; 二是通过分析研究区不同的影响因素, 利用多元回归的方法建立 GDP 预测模型^[12-16]。但简单的相关性分析一般误差较大, 且因子选取的随机性和主观因素影响也较大。

本文以张掖市甘州区为例, 利用夜间灯光辐射

收稿日期: 2012-09-19; 修订日期: 2012-12-13

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划项目 (91125019) 资助

作者简介: 梁友嘉 (1985—), 男, 甘肃镇原人, 2012 年在中国科学院寒区旱区环境与工程研究所获硕士学位, 现为在读博士研究生, 主要从事生态经济与空间建模研究。E-mail: liangyj05@163.com

数据、官方统计数据 and 已有的人口空间分布数据开发了一个小区域尺度的 GDP 空间建模方法。该方法所需数据较少, 技术相对简单, 具有较强的可移植性, 对其他人文因素空间化研究具有一定的借鉴意义。

1 研究区与方法

1.1 研究区概况

研究区地处黑河流域中游, 属于河西走廊中段, 东临山丹县, 西到临泽县、南靠民乐县、肃南裕固族自治县、北依合黎山, 与内蒙古自治区阿拉善右旗接壤。介于 $100^{\circ}6' \sim 100^{\circ}52' E$, $38^{\circ}39' \sim 39^{\circ}24' N$ 之间, 是张掖市政治、经济、文化的中心, 也是古代丝绸之路上的重镇之一。境内地势平坦, 平均海拔 1 474 m, 黑河、酥油口河、大磁窑河、山丹河等河流贯穿全境, 是典型的西北内陆河流域绿洲农业区^[17]。该区属温带大陆性气候, 干燥少雨, 年均降水量 113~312 mm, 蒸发量 2 047 mm, 年日照时数 3 085 h, 昼夜温差大, 年平均无霜期 150 d, 年均气温 $7.1^{\circ}C$, $\geq 10^{\circ}C$ 的年均积温 1 837~2 810 $^{\circ}C$ 。

1.2 遥感数据

灯光辐射数据源于美国国防气象卫星计划 (Defense Meteorological Satellite Program, DMSP), 本文选择基于 F-15 传感器的 2000 年 DMSP 夜间非辐射定标平均稳态数据。该数据清除了云层影响, 很好的反映了城市、城镇以及永久性光源所在地, 并剔除了产生光源污染的像元, 数据 DN 值介于 1~63。数据预处理方法详见 Small 等^[18]的工作。处理后的数据不需要对放大增益进行人为控制, 已成为反演社会经济、监测生态环境的良好数据源之一^[19]。但数据本身会引入道路灯光和建筑物灯光装饰等无效灯光区, 要利用土地利用数据校正。各乡镇的人口、面积、灯光辐射数据校正和最终的人口空间分布研究详见文献^[20]。

1.3 GDP 数据

GDP 数据来源于张掖市甘州区 2000—2001 年统计年鉴数据。特别是第一产业在城市化程度较低的区域通常占有较大比例, 但在灯光辐射数据中往往位于“背景区”。因此, 需通过人口空间分布数据对 GDP 数据进行纠正。

1.4 方法

主要分两部分完成 GDP 空间化。首先, 分析基于乡镇单元的 GDP 与对应的夜间灯光辐射数据 DN 值之间的关系。给出不同研究单元 DN 值与对

应 GDP 的线性关系, 并按相关性程度分组, 获取每组中各行政单元的唯一相关系数 β_i' 。同时, 假设灯光辐射总和为 0 的区域 GDP 也为 0。求算各乡镇单元 GDP 的模型表示如下:

$$\beta_i' \times SL_i = GDPI_i \quad (1)$$

式中: SL_i 为行政单元 i 对应的灯光辐射总值; β_i' 为行政单元 i 估计的相关系数; $GDPI_i$ 为对应行政单元经济活动产生的 GDP 估计值。

然后, 基于乡镇单元模拟所得的 GDP 进行空间化, 通过加入灯光辐射数据和人口空间分布数据实现。整个流程具体见图 1。

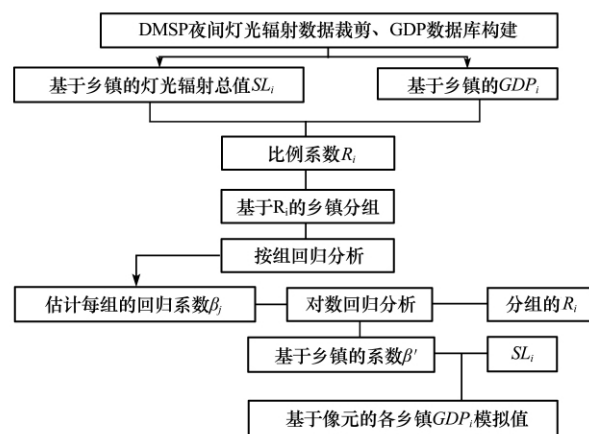


图 1 GDP 空间化的技术流程

Fig. 1 The modeling process of spatial distribution of GDP

2 结果与分析

2.1 基于乡镇单元的 GDP 模拟

首先, 计算基于乡镇单元的 2000 年夜间灯光辐射 DN 值的总和 SL_i , 并与各乡镇 GDP_i 进行回归分析, $R^2=0.755$, 结果见图 2。梁家墩在特定的灯光辐射总和下具有较高的 GDP 值, 主要原因是其处在城市区, 面积相对较小, 但 DN 值等级间隔不明显, 导致灯光值总和反映 GDP 时出现了偏小

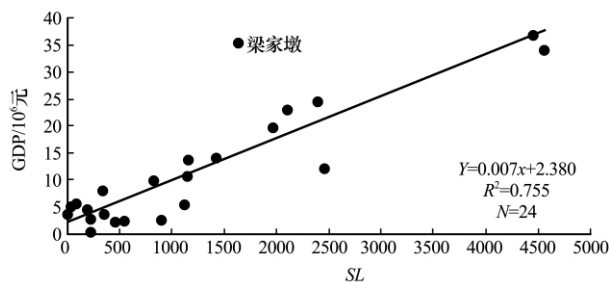


图 2 基于乡镇单元的 SL_i 与 GDP 相关性

Fig. 2 The correlation between SL_i and GDP in the study area

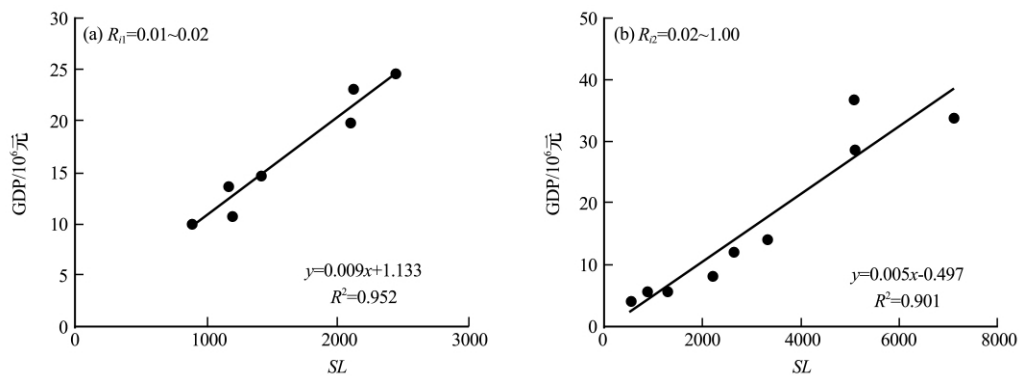


图 3 分组的 SL_i 与 GDP 相关性

Fig. 3 The correlation between SL_i and GDP of the two groups

的情况. 其余点大体均匀地分布在回归线两侧, 说明基于乡镇尺度的 GDP 和对应 DN 值总和的相关性较好.

如果基于乡镇的 SL_i 与 GDP 具有较强相关性, 则可定义一个比例因子 R_i , 依据 R_i 的相似性对不同乡镇进行聚类 and 分组. 计算公式为:

$$R_i = SL_i / GDP_i \quad (2)$$

R_i 值越大, 说明与 i 乡镇 GDP 对应的灯光辐射亮度越高; 反之, 说明亮度越低, 图像上显得越暗. 根据不同的 R_i 值, 将其分为 3 组: 第 1 组 R_{i1} 为 $0.01 \sim 0.02$, GDP 所占百分比为 49.47% ; 第 2 组 R_{i2} 为 $0.02 \sim 1.00$, GDP 所占百分比为 46.17% ; 第 3 组 R_{i3} 为 $1.00 \sim 8.55$, GDP 所占百分比仅为 4.36% . 其中, 公用地、乌江、明永、沙井、西洞和平山湖的面积大、人口少, 灯光辐射亮度的误差得到了累加, 导致 SL_i 总值与 GDP 相关程度低, 故采用整体相关性结果代替. 前两组的相关性分布见图 3.

基于分组结果, 求第 j 组回归系数 β_j , 以人口数据为权重, 对 SL_{ij} 进行分组校正, 并和 R_i 进行曲线拟合分析. 变换后的方程消除了回归分析中常数项的干扰, 利用构造的变量 R_i 得到了基于乡镇单元

的回归系数 β_i' (式 (3)), $R^2 = 0.886$, 样本数 $N = 24$. 至此, 可以得到基于乡镇的各区域唯一回归系数 β_i' , 再利用式 (1) 计算基于乡镇单元的 GDP 模拟数据, 结果为 GDP 空间化提供数据源:

$$\beta_i' = 1.939 - 2.17 \ln(R_i) \quad (3)$$

2.2 GDP 空间化

通过基于乡镇单元的 GDP 模拟得到了每个乡镇的 GDP 总值, 还须将其分解到栅格单元上, 可通过分解第一产业和第二/三产业实现空间化. 遥感影像灯光区可以认为主要是第二/三产业对 GDP 的贡献, 而第一产业与人口关系密切, 相对第二/三产业而言, 灯光辐射亮度很低, 故对经济活动的贡献用空间化的人口分布数据表示, 然后按一定比例进行像元级的加总. 由年鉴知, 甘州区 2000 年的第一产业占 GDP 总量为 28% ; 第二、三产业所占比例为 72% , 说明这种象元级的加总方法可以很好的反映人口稀疏区域以第一产业为主的 GDP 空间分布. 假设某一乡镇的 GDP 总量为 $100\,000$ 元, 则第一产业为 $28\,000$ 元, 第二/三产业为 $72\,000$ 元, 具体栅格化分解过程见图 4.

利用上述方法最终得到 GDP 空间分布图. 图 5

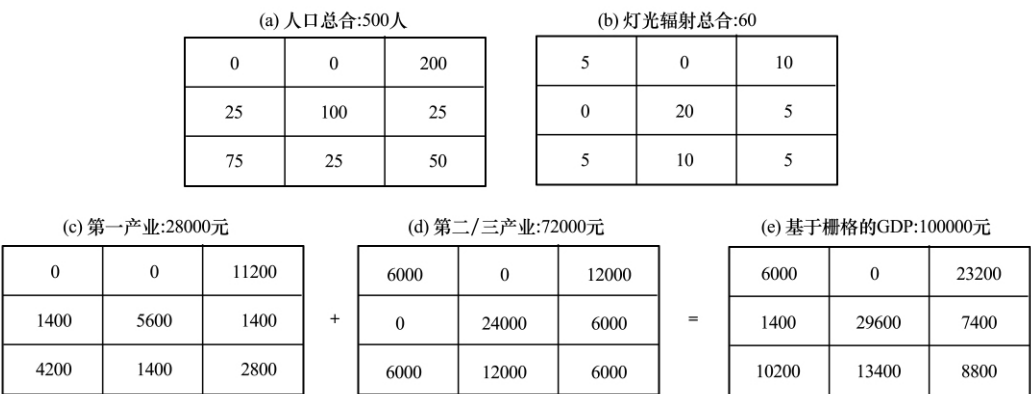


图 4 基于栅格的 GDP 分解过程

Fig. 4 The decomposition process of GDP based on the grid

为基于栅格($500\text{ m} \times 500\text{ m}$)单元的 2000 年 GDP 估计值,高值区分布在以城关镇为几何中心的若干乡镇中,主要包括城关镇和梁家墩、还包括新敦、甘浚、上秦和长安的一部分区域,每个栅格单元均超过 95×10^4 元。对比土地利用图可发现,无值或低值区主要分布在山地、荒漠、水域及其他较难靠近的区域。由于验证数据精度受限,故仅基于乡镇尺度进行验证,总体的平均值 $E = 372 \times 10^4$ 元,标准差 $SD = 34 \times 10^4$ 元,并对比模拟结果与统计值(图 6)。

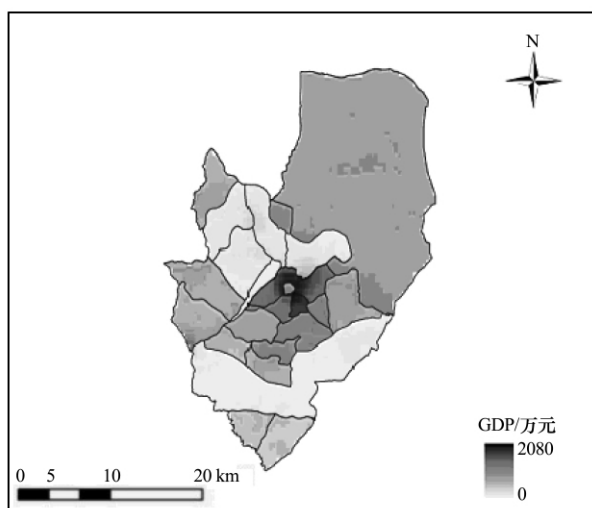


图 5 研究区 GDP 空间分布

Fig. 5 The spatial distribution of GDP in the study area, 2000

由图 6 可知,相较统计值而言,高估的乡镇有 17 个,低估的乡镇有 7 个。高估乡镇中,梁家墩、沙井和西洞误差超过 10%,梁家墩所在的灯光辐射区的灯光差异性小, SL_i 整体偏高,导致估计偏高;而沙井和西洞研究区面积相对较大, SL_i 被低估。由式(2)和(3)知 β_i' 变大,导致最终高估, SL_i 和 β_i' 的变化对 GDP 变化趋势的影响效应各不相同。

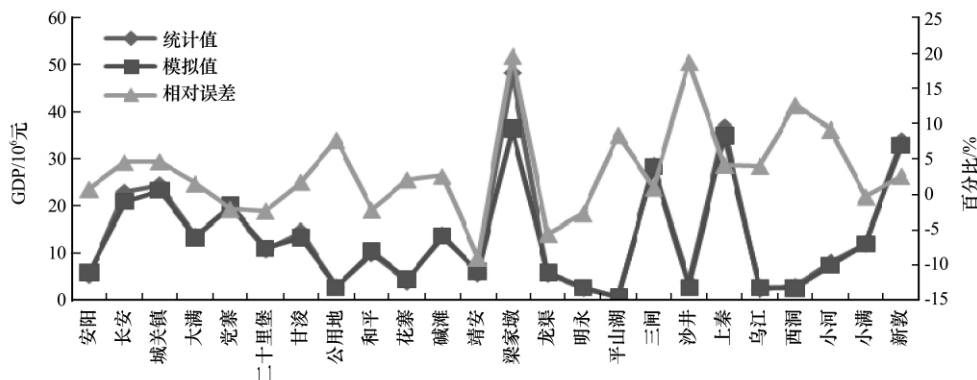


图 6 研究区 2000 年 GDP 模拟结果与统计结果对比

Fig. 6 Simulated and statistical GDP in the study area, 2000

另外的可能是,通过灯光辐射数据反映出了一些隐性的非正规经济活动,而这部分经济活动对 GDP 的贡献在统计年鉴中是被忽略的,因此造成估计值大于统计值。今后的研究中要注重分析这种非正规经济活动对 GDP 的贡献,精确和全面的数据源对建模精度的提高具有重要作用。

3 讨论

本文利用夜间灯光辐射数据和人口空间分布数据生成空间分辨率为 $500\text{ m} \times 500\text{ m}$ 的 GDP 空间分布图,建模方法相对简单,易于推广。该方法还可用于生成不同尺度的 GDP 空间分布;同时,由于灯光辐射数据实时更新,可做时序分析;在应用层面上, GDP 空间化研究可服务于决策和管理;可对不同监测单元进行有针对性的经济发展调控。空间化的 GDP 作为一种重要的人文因素,在环境、自然或社会经济研究中有广泛的应用需求,可集成到不同的生态、自然或社会单元中,进行区域集成研究。

灯光辐射数据获取相对容易,时间分辨率高于统计数据,且数据本身包含了人类活动的信息,如距离道路的远近,居民点规模以及人类活动强度等潜在信息。结合迅速发展的 GIS 技术,利用诸如 DMSP 卫星数据,进一步挖掘影像潜在信息,开展多种人文因素的空间化研究具有广阔的前景,如人口、GDP、文化类型、社会资本乃至制度等。另外, DMSP 数据集本身也有一些缺点,如验证数据不足。所幸这种缺点可通过美国国家极轨业务环境卫星系统计划弥补,其第 1 颗卫星已于 2010 年发射,可见光红外成像辐射仪 (Visible Infrared Imaging Radiometer, VIIR) 是该卫星计划的主要载荷,该仪器继承、发展和集成了现有 DMSP 中 3 颗卫星的主要功能,时空分辨率高,可为人文因素空间化提

供稳定、廉价的数据源。

Doll 等^[21]已经注意到在估算经济活动总量时需要考虑农业活动的贡献。而农业活动本身就是一个空间化的过程, 不仅要考虑农业活动聚居区对 GDP 的贡献, 而且要考虑无人农作区的贡献。本文利用人口空间分布数据表征农业活动, 但一些无值区或灯光辐射低值区域很难完全准确的反映到 GDP 估算中, 该问题仍待深入研究。一种可能的解决方法是: 可通过制作高精度的农业区划图, 发展适合研究区的作物生长模型, 同时辅以精确的农作物价格统计结果等来修正估算结果, 单独获取农业 GDP 空间分布。这也说明 GDP 空间化研究需要自然和人文研究方法的集成, 具有跨学科研究的特色, 考虑到研究区农业活动比例为 28%, 相对较高, 故目前的估算值仍然可能偏低。

4 结论

通过 GDP 空间化研究可以了解区域财富分配的空间规律, 并进行适度的政策调整和管理。本文基于 DMSP 夜间灯光辐射数据、GDP 统计数据和人口空间分布数据进行 GDP 空间化建模, 该建模方法精度较好, 可移植性强, 数据源更新也较快, 便于时序分析。可用于历史时期经济活动空间演替规律研究或趋势预测。

参考文献 (References):

- [1] United Nations. The Millennium Development Goals Report 2009[R]. New York: United Nations, 2009. http://www.un.org/millenniumgoals/pdf/MDG_Report_2009_ENG.pdf.
- [2] Sachs J. The End of Poverty: Economic Possibilities for Our Time [M]. New York: The Penguin Press, 2005.
- [3] Xu Zhongmin, Cheng Guodong. Framework to address human factors in a human-earth system [J]. Science & Technology Review, 2008, 26(3): 86—92. [徐中民, 程国栋. 人地系统中人文因素作用的分析框架探讨[J]. 科技导报, 2008, 26(3): 86—92.]
- [4] Xu Zhongmin, Cheng Guodong. Holistic viewpoint in the ecological economics [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(3): 668—675. [徐中民, 程国栋. 生态经济研究中的整体性视角[J]. 冰川冻土, 2011, 33(3): 668—675.]
- [5] Elvidge C D, Sutton P C, Ghosh T, *et al.* A global poverty map derived from satellite data [J]. Computers & Geosciences, 2009, 35(8): 1652—1660.
- [6] Zhong Fanglei, Xu Zhongmin, Cheng Huaiwen, *et al.* The history of water resources utilization and management in the middle reaches of Heihe River [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(3): 692—701. [钟方雷, 徐中民, 程怀文, 等. 黑河中游水资源开发利用与管理的历史演变[J]. 冰川冻土, 2011, 33(3): 692—701.]

- [7] Lam N S. Spatial interpolation methods: A review [J]. The American Cartographer, 1983, 10(2): 129—149.
- [8] Ebener S, Murray C, Tandon A, *et al.* From wealth to health: modelling the distribution of income per capita at the sub-national level using night-time light imagery [J]. International Journal of Health Geographics, 2005, 4, DOI: 10.1186/1476-072X-4-5.
- [9] Sutton P C. An empirical environmental sustainability index derived solely from nighttime satellite imagery and ecosystem service valuation [J]. Population and Environment, 2003, 24(4): 293—311.
- [10] Doll C N H, Muller J P, Morley J G. Mapping regional economic activity from night-time light satellite imagery [J]. Ecological Economics, 2006, 57(1): 75—92.
- [11] Sutton P C, Costanza R. Global estimates of market and non-market values derived from nighttime satellite imagery, land cover, and ecosystem service valuation [J]. Ecological Economics, 2002, 41(3): 509—527.
- [12] Yang Xiaohuan, Jiang Dong, Wang Naibin, *et al.* Method of pixelizing population data [J]. Acta Geographica Sinica, 2002, 57(Suppl.): 70—75. [杨小唤, 江东, 王乃斌, 等. 人口数据空间化处理方法[J]. 地理学报, 2002, 57(增): 70—75.]
- [13] Liao Shunbao, Sun Jiulin. GIS based spatialization of population census data in Qinghai-Tibet Plateau [J]. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(1): 25—33. [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): 25—33.]
- [14] Liu Honghui, Jiang Dong, Yang Xiaohuan, *et al.* Spatialization approach to 1 km grid GDP supported by remote sensing [J]. Geo-Information Science, 2005, 7(2): 120—123. [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.]
- [15] Yi Ling, Xiong Liya, Yang Xiaohuan. Method of pixelizing GDP data based on the GIS [J]. Journal of Gansu Sciences, 2006, 18(2): 54—58. [易玲, 熊利亚, 杨小唤. 基于 GIS 技术的 GDP 空间化处理方法[J]. 甘肃科学学报, 2006, 18(2): 54—58.]
- [16] Huang Ying, Bao Anming, Chen Xi, *et al.* Studying the GDP in 1 km square grid-cells based on oasis land use [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2009, 31(1): 158—165. [黄莹, 包安明, 陈曦, 等. 基于绿洲土地利用的区域 GDP 公里格网化研究[J]. 冰川冻土, 2009, 31(1): 158—165.]
- [17] Cheng Guodong, Xu Zhongmin, Zhong Fanglei. Happiness oriented water resources management strategic planning in Zhangye Municipality [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(6): 1193—1202. [程国栋, 徐中民, 钟方雷. 张掖市面向幸福的水资源管理战略规划[J]. 冰川冻土, 2011, 33(6): 1193—1202.]
- [18] 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.
- [19] Zhuo Li, Shi Peijun, Chen Jin, *et al.* Application of compound night light index derived from DMSP/OLS data to urbanization analysis in China in the 1990s [J]. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(6): 893—902. [卓莉, 史培军, 陈晋, 等. 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.]
- [20] Liang Youjia, Xu Zhongmin. Modeling the spatial distribution of population based on night light radiation and LUCC: A case study in Ganzhou District, Zhangye Municipality [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, **34**(4): 999—1006. [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.]
- [21] Doll C N H, Muller J P, Elvidge C D. Night-time imagery as a tool for global mapping of socioeconomic parameters and greenhouse gas emissions[J]. AMBIO: A Journal of the Human Environment, 2000, **29**(3): 157—162.

Modeling the Spatial Distribution of GDP Based on Night Light Radiation : A Case Study in Ganzhou District, Zhangye Municipality

LIANG You-jia, XU Zhong-min

(Key Laboratory of Ecohydrology of Inland River Basin, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou Gansu 730000, China)

Abstract: Spatial and temporal distributions of both physical and socioeconomic phenomena can be approximated by functions depended on location in a multi-dimensional space as multivariate scalar, vector or tensor fields. Collection of spatial GDP data is problematic, because of various shortcomings in the data collection process. A model is developed for creating a disaggregated map of estimated GDP for towns and then a distribution map of GDP is got.

Firstly, a regression model is developed to calibrate the official GDP at township level in the

study area with the sum of light emissions, and subsequently unique coefficients are derived.

The spatial population grid and nighttime light satellite imagery are used to represent primary industry and other industries. Multiplying the unique coefficients with the sum of light emissions provides an estimate of total economic activity, from which a spatially disaggregated GDP map of total economic activity may generate based on the grid of 500 m×500 m. The average GDP value of a township is 3.72 million Yuan, with a Standard Deviation of 0.34 million Yuan.

Key words: DMSP/OLS; spatial distribution of population; GDP; spatial modeling