

doi: 10.6046/zrzyyg.2023159

引用格式: 牛振生, 杨鑫, 陈超, 等. 结合夜光遥感的成渝城市群城市经济发展特征变化分析[J]. 自然资源遥感, 2024, 36(4): 272-281. (Niu Z S, Yang X, Chen C, et al. Analysis of changes in the economic development characteristics of the Chengdu-Chongqing urban agglomeration using remote sensing data on nighttime light[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2024, 36(4): 272-281.)

结合夜光遥感的成渝城市群城市经济发展特征变化分析

牛振生^{1,2,3}, 杨鑫^{1,2}, 陈超³, 廖祥¹, 张小轩¹

(1. 成都理工大学地球科学学院, 成都 610059; 2. 成都理工大学地球勘探与信息技术教育部重点实验室, 成都 610059; 3. 河南工程学院土木工程学院, 郑州 451191)

摘要: 为解决传统经济数据缺乏空间信息、难以反映区域经济发展的空间差异性 & 动态变化特征等问题, 利用夜间灯光数据结合土地利用数据、社会经济数据, 构建成渝地区国内生产总值 (gross domestic product, GDP) 空间化模型, 使用趋势分析、修正引力模型等方法, 在像元尺度和经济关联性上对成渝地区经济发展特征进行分析。结果表明: 基于多源数据所构建的 GDP 空间化模型精度较高, 其误差均不超过 1.1%; 成渝地区 GDP 密度快速增长的区域主要位于成都市和重庆市主城区周围, 其占比约为 73.9%, 且经济集聚特征较明显的地区仍主要分布于该区域; 成渝地区城市间的经济关联强度不断加深, 城市综合发展质量稳步提升, 成都市与其周边城市的经济联系最为密切。综合来看, 成渝地区区域内经济呈现出“双核驱动发展”的空间特征, 经济关联强度逐渐增强。研究可为成渝城市群经济高质量发展提供数据支持和方法依据。

关键词: NPP/VIIRS 夜间灯光数据; GDP 空间化; 成渝城市群; 修正引力模型; 经济发展

中图法分类号: TP 79; P 237 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2024)04-0272-10

0 引言

国内生产总值 (gross domestic product, GDP) 是衡量一个国家或地区区域发展状况和经济发展水平的重要指标之一^[1]。以往的 GDP 都是以行政单元统计的宏观数据, 其缺乏空间信息且发布周期长, 难以反映区域发展的空间差异及动态变化特征。因此, 将社会经济数据空间化, 在宏观和微观尺度上探究地区经济发展水平及空间联系变得极为重要^[2]。

夜间灯光与城市经济联系紧密, 近年来, 众多学者将夜间灯光数据与 GDP 相结合进行研究^[3-7], 做出了大量卓有成效的工作。早在 1997 年, Elvidge 等^[8]利用美国国防气象卫星项目 (defense meteorological satellite program, DMSP) 的线性扫描系统 (operational linescan system, OLS), 以 21 个国家为研究对象, 发现了夜间灯光强度与 GDP 存在高度的相关性。近年来, 随着具有更高空间分辨率和更宽辐射范围等优点的新一代夜间灯光数据 NPP/VIIRS (national polar-orbiting partnership's visible infrared

imaging radiometer suite) 的发布, 也使得 GDP 空间化的精度进一步提高。Li 等^[9]对比了 2 种灯光数据与 GDP 之间的关系, 发现 NPP/VIIRS 数据和 GDP 的相关性显著强于 DMSP/OLS 数据。

探索城市群经济高质量发展的空间联系, 对于识别城市群内部城市间经济高质量发展的空间导向, 促进城市群的高水平一体化发展具有重要意义。朱永明等^[10]运用熵值法并构建修正引力模型对中原城市群的经济高质量发展水平及其空间联系进行分析; 王莎等^[11]在综合利用城市职能强度模型、引力模型和城市流模型的基础上, 描述了京津冀城市群内部的经济空间联系特征。目前相关研究对研究城市群经济间的空间联系已有一定成果, 但多使用的是传统调查数据, 结合夜间灯光探究其空间联系方面的研究甚少, 且大多认为两城市间的经济关联是对等的, 忽略了双方城市发展的差异性。

近年来, 受西部大开发等一系列国家政策的加持, 成渝城市群已成为我国西部地区发展水平较高、经济实力较强的地区之一^[12], 其经济结构及一体化发展程度也备受关注。基于此, 本研究以 2014 年、

收稿日期: 2023-06-02; 修订日期: 2023-10-16

基金项目: 国家自然科学基金项目“风沙区超大工作面岩土体协同形变特征与机理研究”(编号: 42007424)资助。

第一作者: 牛振生 (1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向为夜光遥感理论及应用。Email: 276140764@qq.com。

通信作者: 杨鑫 (1984-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为“3S”技术在地学中的应用。Email: yangxin2012@cdut.edu.cn。

2017 年、2020 年为研究时间截面,使用夜间灯光数据,结合土地利用数据、社会经济数据构建 GDP 空间化模型,应用趋势分析,在像元层次分析成渝地区经济分布及发展状况;改进城市综合发展质量测评方法,将夜间灯光指数引入城市综合质量中,再将其作为修正引力模型的质量变量,在宏观层次分析成渝地区城市间的经济网络结构特征,提升对城市发展系统的综合认识,为促进成渝双城经济圈建设及成渝地区高质量发展提供决策依据,也为成渝地区后续政策制定提供理论参考。

1 研究区概况及数据源

1.1 研究区概况

成渝城市群位于我国西南部地区,介于 N27°40'~33°3',E101°55'~109°40'之间,以亚热带季风气候为主,是长江经济带与丝绸之路经济带的结合地带,也是西部人口密度最高、产业基础最为雄厚的地区。依据国家发改委颁布的《成渝城市群发展规划》,成渝城市群包括重庆市 27 个区(县)和四川省 15 个地市,总面积为 18.5 万 km²。本研究将四川省 15 个地级市与重庆市所包含的所有区(县)作为研究区域(图 1)。

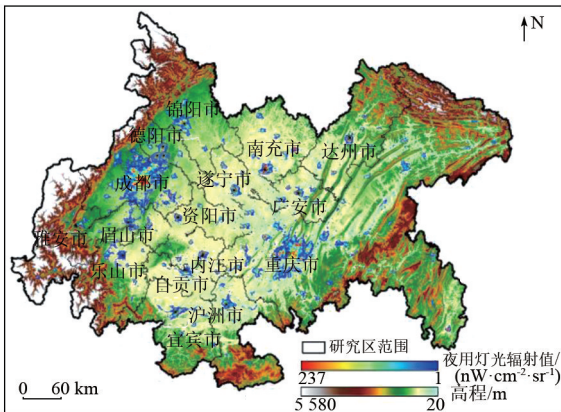


图 1 研究区 2020 年夜间灯光辐射值及地形分布

Fig.1 Night light radiation value and terrain distribution in the study area in 2020

1.2 数据源及其预处理

1.2.1 GDP 统计数据

本文所使用的 2014 年、2017 年、2020 年的社会经济数据均来源于《四川省统计年鉴》和《重庆市统计年鉴》以及各市、县、区统计年鉴和统计公报等。将其按年份和地区进行统计。

1.2.2 NPP/VIIRS 夜间灯光数据

NPP/VIIRS 夜间灯光数据来源于美国国家海洋与大气管理局 (<https://www.ngdc.noaa.gov/eog>)

发布的 2014 年、2017 年、2020 年的年均影像,该影像由 Suomi-NPP 卫星的可见光红外成像仪 VIIRS 传感器获取,空间分辨率约为 500 m。该卫星采用广角辐射探测仪,消除了 DMSP/OLS 影像灯光过饱和的现象,增强了探测的灵敏性,更易探测到乡村微弱灯光以及城市中心过亮灯光^[13]。由于其原始数据未经处理,因此需对数据进行异常值消除、连续性纠正等操作^[14-15];最后将 NPP/VIIRS 数据转换至 Lambert 投影坐标系,并重采样至 500 m,依据成渝地区矢量数据裁剪至所需范围。

1.2.3 土地利用数据

本文使用的土地利用数据来源于 Yang 等^[16]使用 Landsat 影像基于随机森林方法构建的 1985—2020 年的年度土地覆盖产品,空间分辨率为 30 m。将数据裁剪至研究区范围,转换投影后,按县(市/区)提取各土地利用类型面积。

1.2.4 人口数据

人口数据源自 WorldPop 官网 (<https://hub.worldpop.org/>),空间分辨率为 100 m,具有较高的空间分辨率和人口拟合精度。在 ArcGIS 软件中根据成渝地区行政区域进行提取。

2 研究方法

2.1 GDP 空间化模型构建

近年来,随着夜间灯光数据的广泛应用,基于夜间灯光数据进行 GDP 空间化的方法已日渐成熟,夜间灯光数据结合其他数据^[17]进行 GDP 空间化也已成为研究的新方向。研究表明^[18],结合土地利用数据分产业进行社会经济空间化建模能够较好地提高其建模精度。因此,本文采用分产业建模方法开展成渝地区 GDP 空间化,以土地利用数据进行第一产业产值(GDP_1)空间化;以夜间灯光数据为基础,通过选择最佳灯光指数,进行第二、三产业产值(GDP_{23})的空间化。

2.1.1 第一产业产值空间化模型构建

已有研究表明,第一产业与夜间灯光数据的相关性不高^[19],不适宜用夜间灯光数据进行空间化,其主要依赖于农、林、牧、渔业,对应于土地利用类型中的耕地、林地、草地和水域。通过对成渝地区土地利用类型进行分析,可知该地区主要以耕地和林地为主,其二者之和占上述 4 种土地利用类型的 98% 以上,因此本文选取耕地和林地来对 GDP_1 进行建模。然而并非所有林地都能对第一产业产值做出贡献,本文依据李峰等^[20]的研究并结合实际情况,对坡向在 90°~270°、坡度小于 20°的林地利用地理信

息系统叠加分析并提取,将其作为经济林地(下文统称林地)纳入研究。

以 2020 年为例,将耕地和林地面积与 GDP_1 进行多元线性回归分析,二者对应的回归系数 a 和 b 分别为 0.006 和 0.05, R^2 为 0.971 0。将耕地与林地面积之和与 GDP_1 进行相关性分析,发现其 R^2 为 0.980 7,表现出了较好的相关性,表明将耕地和林地面积之和与 GDP_1 进行建模也是可行的。同时,将

2014 年、2017 年耕地和林地面积之和与 GDP_1 进行回归分析,其回归关系如图 2 所示,也表现出了较好的拟合关系。因此,对 GDP_1 产值进行建模的公式为:

$$GDP_{1n} = a S_c \quad , \quad (1)$$

式中: GDP_{1n} 为第 n 年第一产业产值; S_c 为耕地与林地面积之和; a 为回归模型的系数。

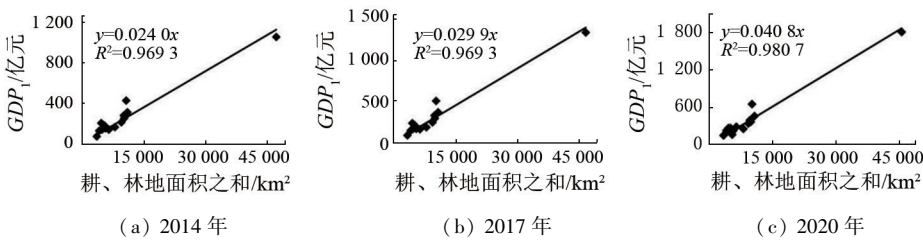


图 2 耕地与林地面积之和与 GDP_1 的回归分析拟合结果

Fig.2 Regression analysis fitting results between the sum of cultivated land and forest land area and GDP_1

2.1.2 第二、三产业产值空间化模型构建

由于第二、三产业在城市灯光亮度方面差别不大,将第二、三产业整合作为一个变量进行相关性分析是可行的。

目前,常用以下 3 种灯光指数来反映某地区社会经济发展水平^[21]: 夜间灯光总强度 (total nighttime light, TNL)、区域平均灯光强度 (average light intensity, ALI)、综合灯光指数 (compounded night light index, CNLI)。公式分别为:

$$TNL = \sum_{i=0.3}^{DN_{\max}} (DN_i n_i) \quad , \quad (2)$$

$$ALI = TNL / (DN_{\max} N) \quad , \quad (3)$$

$$S = A_N / A \quad , \quad (4)$$

$$CNLI = ALI \cdot S \quad , \quad (5)$$

式中: DN_i 和 n_i 分别为行政单元内第 i 级灰度像元值和像元数; $DN_{\max}$ 为行政单元内最大的像元值; N 为区域内灯光值位于 $[0.3, DN_{\max}]$ 区间的像元总数; S 为灯光面积比; A_N 和 A 分别为行政单元内在 $[0.3, DN_{\max}]$ 区间的像元所占据的面积和行政单元面积。

分别计算成渝地区 16 个地市 2014 年、2017 年、2020 年间的夜间灯光指数 TNL, ALI 和 CNLI, 将其与 GDP_{23} 进行回归分析,进而选出最佳灯光指数,具体模型公式为:

$$GDP_{23n} = P_0 + b Q_i \quad , \quad (6)$$

式中: GDP_{23n} 为第 n 年的第二、三产业产值; P_0 为常数; b 为回归模型的系数; Q_i 为上述 3 种灯光指数。

分别计算出各年间的夜间灯光指数,并将其与 GDP_{23} 进行相关性分析(表 1)。结果显示, GDP_{23} 与 TNL 的相关性最强,相关系数分别达到 0.972, 0.989 和 0.985,而与 ALI 的相关性最弱,只有 0.018, 0.152 和 0.189。

表 1 3 种灯光指数与 GDP_{23} 的拟合关系
Tab.1 Fitting relationship between 3 light indexes and GDP_{23}

年份	相关系数			拟合精度		
	TNL	ALI	CNLI	TNL	ALI	CNLI
2014 年	0.972	0.018	0.420	0.945	0.003	0.176
2017 年	0.989	0.152	0.459	0.979	0.023	0.210
2020 年	0.985	0.189	0.455	0.970	0.036	0.207

经上述验证,选取相关性最大的灯光指数 TNL, 建立其与 GDP_{23} 的回归模型,散点图如图 3 所示。

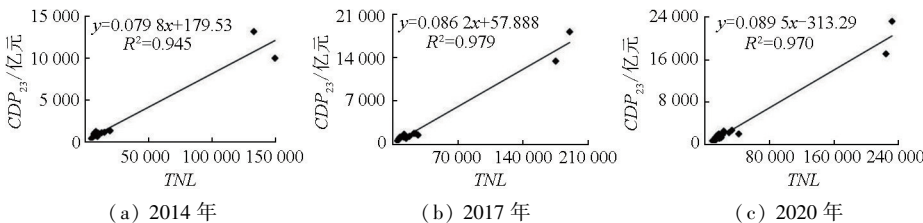


图 3 夜间灯光指数 TNL 与 GDP_{23} 的回归分析拟合结果

Fig.3 Fitting results of regression analysis between night light index TNL and GDP_{23}

2.1.3 GDP 线性纠正

由于结合灯光数据和土地利用数据模拟计算得到的 GDP 误差较大,在保证各区县实际统计的 GDP 总量不变的条件下,进行逐像元纠正,其公式为:

$$GDP_T = GDP_j (GDP_i / GDP_{all}) \quad (7)$$

式中: GDP_T 为经逐像元纠正后的 GDP 模拟值; GDP_j 为每个像元的初步模拟值; GDP_i 为各县(区) GDP 的实际统计值; GDP_{all} 为各县(区)的 GDP 模拟值。

为了验证纠正后的 GDP 拟合结果与原统计结果之间的差异,采用相对误差(relative error, RE)和平均相对误差(mean relative error, MRE)来对经像元纠正后的 GDP 进行精度验证。公式分别为:

$$RE = \left(\left| \frac{GDP_s - GDP_A}{GDP_A} \right| \right) \times 100\% \quad (8)$$

$$MRE = \frac{1}{m} RE \quad (9)$$

式中: GDP_s 为 GDP 的模拟值; GDP_A 为 GDP 的实际统计值; m 为地市个数。

2.2 趋势分析

趋势分析能够测算某一变量随时间变化在像元级别的增减变化情况,能够有效地反映某一变量的变化趋势^[22]。公式为:

$$\theta_{slope} = \frac{t \sum_{i=1}^t (i GDP_i) - \sum_{i=1}^t i \sum_{i=1}^t GDP_i}{t \sum_{i=1}^t i^2 - (\sum_{i=1}^t i)^2} \quad (10)$$

式中: θ_{slope} 为该像元在相应时间段内 GDP 逐年变化的一元线性回归方程的变化斜率; t 为检测时间年跨度; GDP_i 为第 i 年的 GDP 值。

2.3 修正引力模型

引力模型以万有引力定律和距离衰减原理构建而成。借鉴相关研究^[23-24]对引力模型参数做出改进。受城市间彼此综合实力的影响,城市经济发展类型可能表现出溢出型和吸收型,会干扰彼此城市间的经济联系强度,构建以城市综合质量占 2 个城市综合质量总和的比值来对引力常数进行修正;其次,在城市群内部联通日益紧密、基础设施不断完善背景下,以时间距离来表达城市间的空间距离更加合理^[25],成渝地区高速公路网发达,利用百度 API(application programming interface)对两两城市间最短高速公路距离进行检索,并以 100 km/h 作为通行速度;Elvidge 等^[26]构建的夜间灯光发展指数(night light development index, NLDI)能够反映城市

内部经济社会发展的均衡程度,NLDI 的取值范围为 $[0,1]$,越接近 0 代表区域内夜光与人口的分配越均衡,越接近 1 代表分配越不均衡。利用各地市的 GDP 与 NLDI 的倒数作为城市综合发展质量的衡量标准,更能体现城市发展的均衡程度,提升对城市发展系统的综合认识。计算公式分别为:

$$R_{ij} = k_{ij} \frac{V M_i M_j}{D_{ij}^r} \quad (11)$$

$$M_i = \sqrt{GDP_i / NLDI_i} \quad (12)$$

$$k_{ij} = \frac{M_i}{M_i + M_j} \quad (13)$$

式中: R_{ij} 为城市 i 和城市 j 间的经济关联水平; M_i 和 M_j 为 2 个城市的综合发展质量; k_{ij} 为修正引力系数; D_{ij} 为城市 i 和城市 j 间最短高速公路距离; V 为研究区高速公路通行速度; r 为摩擦系数,根据顾朝林等^[27]对中国城市体系空间联系研究并结合本研究区概况,取 $r = 2$ 符合实际情况; GDP_i 为城市 i 的模拟 GDP; $NLDI_i$ 为城市 i 的夜间灯光发展指数,参考谢金龙等^[28]的方法进行计算。

3 结果与分析

3.1 成渝地区 GDP 空间化结果与误差分析

在模拟 GDP_1 和 GDP_{23} 时分别采用了 30 m 和 500 m 空间分辨率的影像。根据李月娇等^[29]的研究表明,省市级以 100~1 000 m 之间为最佳研究尺度。因此,为统一标准,本研究选用 500 m 格网尺度。为防止重采样导致的精度误差,提取土地利用数据中耕地及林地类型,将其空间位置映射至 500 m 格网内,并统计各格网内二者面积之和,利用式(1)计算出各格网的 GDP_1 ,同时根据式(6)计算出每个格网的 GDP_{23} ,将二者叠加并经式(7)进行逐像元纠正后的 GDP 预测值重新分配至每个像元,得到 2014 年、2017 年、2020 年 500 m 空间分辨率的 GDP 密度图,并用 ArcGIS 软件将其分为 7 个等级。

图 4 反映的是成渝城市群像元级的 GDP 空间化密度,其提供了 GDP 的空间信息,能够更直观细致地反映区域发展的空间差异及动态变化特征。GDP 空间密度值的大小和范围是衡量一个地区发展最直观的方法,面积越大,亮度越高,所在地经济发展形势越好。从图 4 中可以看出,成渝城市群 2014—2020 年经济发展状况稳步提升,GDP 密度呈持续增长的趋势。早期该地区 GDP 密度值高的地方较少,只存在于少量城市的中心地带,总体经济发

展水平低,经济中心分散,GDP 密度值大于 2 亿元的区域占比仅为 0.39%。随着时间的推移,成渝地区 GDP 密度逐渐增加,高值区以城市为中心向四周扩展,大于 2 亿元的区域占比提升至 0.92%,经济中心由“双核独大”向“多点开花”转变。从城市群内部区域来看,一部分是以成都市为中心的西部带状结构经济发展带,该区域沿线 GDP 密度较高,且增

长变化较为明显;另一部分是以重庆市主城区为主的经济发展区,GDP 密度也较高。GDP 密度值较低的区域主要分布在研究区东北及西南部地区。总体而言,基于 TNL 指数得到的 GDP 密度具有较好的时效性和联系性,可用于分析 GDP 变化的关联机制和空间动态特征。

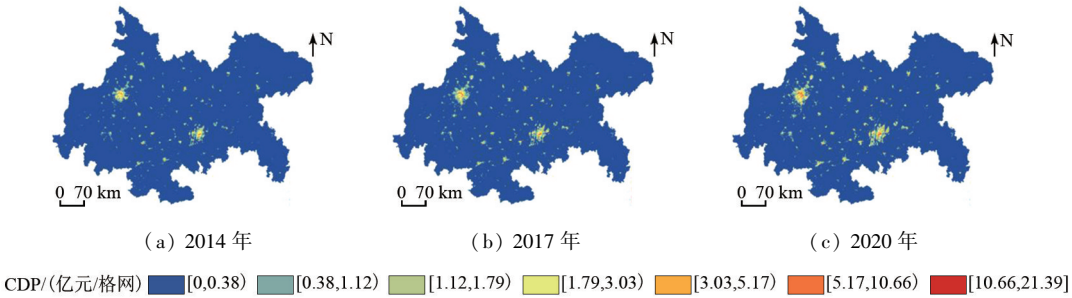


图 4 成渝地区 GDP 密度空间分布

Fig.4 Spatial distribution of GDP density in Chengdu-Chongqing region

将经逐像元纠正后的成渝地区 2014 年、2017 年、2020 年各地市的 GDP 利用式(8)和(9)进行精度验证,其验证结果如图 5 所示。整体上看,基于模型构建所预测的 GDP 对于大多数城市来说精度都较高,其 RE 均小于 3.5%,MRE 均不超过 1.1%。其中,在研究时段内 RE 最大值出现在 2017 年的重庆市,达到 3.3%,此外乐山市、雅安市、眉山市、宜宾市也出现过 2% 以上误差,模拟效果较好的是绵阳市、内江市、成都市、泸州市,其误差都小于 0.4%。尽管总体看来模拟精度较高,然而受数据质量有限、经济发展水平和产业结构等多种因素的影响,仍存在一些问题。例如,本文使用的数据均为 500 m 格网尺度,在进行栅格切割时,对于行政区面积较小且经济实力较强的区县(如重庆市渝中区、大渡口区),必然会造成一定误差。总体来说,虽然出现了部分城市 RE 较高的情况,但整体误差并不大,且 3 个年份

的模拟值与实际值之间的拟合结果均达到了 0.99 以上(图 6)。因此,基于该模型进行 GDP 空间化是可靠的。

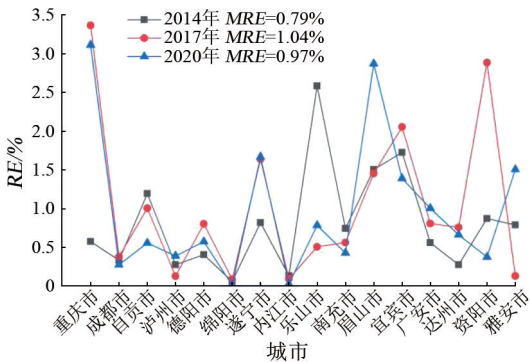


图 5 各市 GDP 预测值与 GDP 实际值的相对误差

Fig.5 Relative error between the predicted GDP and the actual GDP of each city

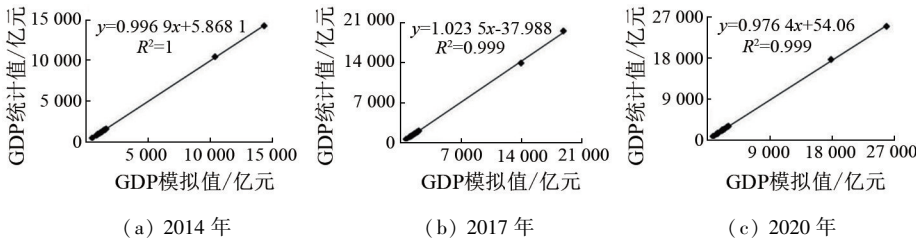


图 6 GDP 预测值与 GDP 实际值拟合情况

Fig.6 Matching between predicted GDP value and actual GDP value

3.2 成渝地区 GDP 变化趋势分析

利用趋势分析法得到成渝地区 2014—2020 年 GDP 密度的变化趋势,并将其增长状况分为 5 类(图 7),划分标准及各部分占比如表 2 所示。从图 7

中可以看出,成渝地区 GDP 增长趋势较为显著的区域大致分布在以成都市为中心的西部地区和以重庆市为中心的东部地区,显示出该地区经济增长态势以抱团发展、双核驱动模式为主。从增长范围来看,

无增长的区域占整个研究区的 88.9%；出现经济增长的区域占比为 11.3%，其中，缓慢增长的区域占比为 7.3%，中速增长的区域占比为 3.0%，较快增长的区域占比仅有 0.6%，仅在成都市主城区、重庆市主城区以及绵阳市有少量分布，而快速增长的区域占比仅为 0.2%，且分布主要以成都市和重庆市的主城

区为主(主要分布在成都市的天府新区、青羊区、锦江区和重庆市的渝中区、江北区以及部分地市的核心理区域),约占该类别的 73.9%。除上述地区以外的区域由于远离成渝城市群城市发展核心区,城市群发展联动效应较弱,增长趋势较为缓慢。

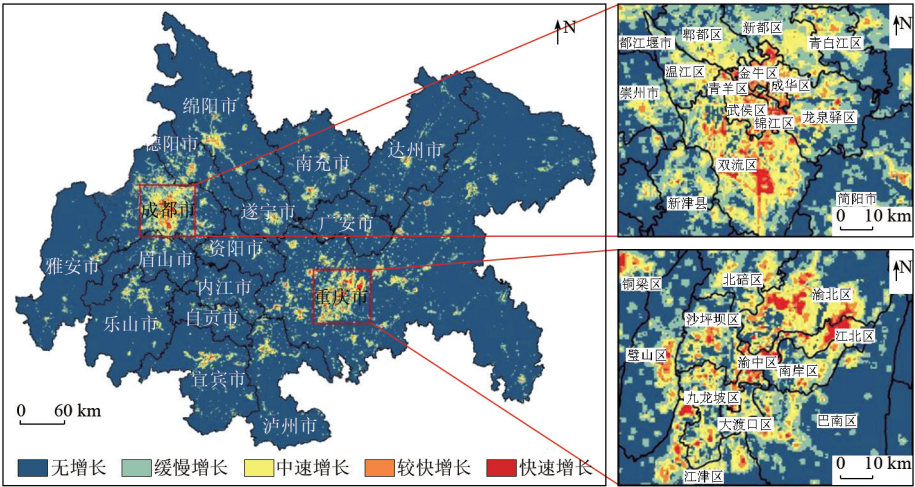


图 7 2014—2020 年 GDP 分布演变趋势
Fig.7 Evolution trend of GDP distribution from 2014 to 2020

表 2 Slope 等级划分标准及各部分占比 Tab.2 Slope classification standard and proportion of each part		
类型	划分标准	各部分占比/%
无增长	$\theta \leq 0$	88.9
缓慢增长	$0 < \theta \leq 0.1s$ ①	7.3
中速增长	$0.1s < \theta \leq 0.5s$	3.0
较快增长	$0.5s < \theta \leq 1.5s$	0.6
快速增长	$\theta > 1.5s$	0.2

①s 为研究区的标准差。

3.3 成渝地区城市经济关联强度分析

图 8 为研究时段成渝地区各市的 NLDI 计算结果,整体来看,2014—2020 年间超一半的城市 NLDI 处于下降趋势,表明多数城市的夜间灯光和人口分配水平差距不断弥合,城市内部发展日趋平衡。通过式 (12) 将 NLDI 引入城市综合发展质量计算公式中,计算得到 2014 年、2017 年、2020 年成渝地区各城市的城市综合发展质量 M_i ,结果如图 9 所示。

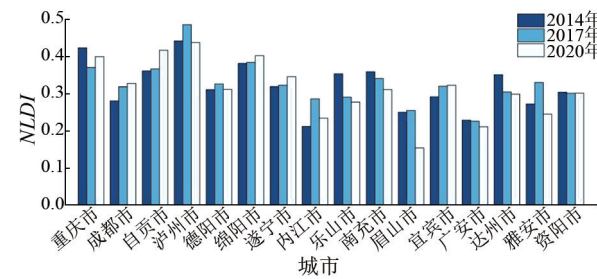


图 8 成渝地区 2014 年、2017 年、2020 年各市 NLDI 结果
Fig.8 NLDI results for each city in the Chengdu-Chongqing region in 2014, 2017 and 2020

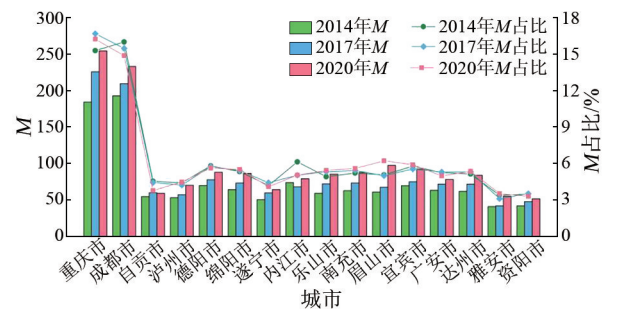


图 9 2014—2020 年成渝城市群 M 及其占比
Fig.9 M and its proportion in the Chengdu-Chongqing urban agglomeration from 2014 to 2020

相较于传统的综合发展质量指数常以人口和 GDP 来表征,新构建的指数结合了夜间灯光指标,克服了当前城市质量指标选取主观性强、解释性差等弊端,能更清晰地反映出城市间发展的均衡程度。从图 9 来看,成渝地区各城市的综合发展质量均表现出稳步提升的态势。成都市和重庆市作为成渝城市群的领头羊,其二者的综合发展质量占比之和在 3 个时段间均超 30%,其余各城市的占比稳定在 3%~7%之间。位于成都市周边的德阳市、绵阳市、眉山市 M 增幅分别高达 25.95%,34.45%和 59.88%,体现了成渝城市群中以成都市为代表的成都圈层有着较高的影响力和吸引力。总体来看,地区城市综合发展质量总体呈现出以成都市和重庆市为龙头,“双核驱动发展”的空间特征。

计算得到成渝地区各城市间的经济关联强度如

图 10 所示。传统引力模型认为 2 个城市间的关联情况是对等的,但在城市发展过程中,其二者的关联情况实际是有差别的。利用城市综合发展质量界定的修正引力系数,明确了当前研究常忽略的城市双向引力差异,相较于城市间单向的经济关联强度,双向的经济联系强度更能反映彼此间经济交流的活跃程度。例如在双向引力中,能明显看出成都市对各市的经济联系强度是大于各市对成都市的经济联系强度的,也体现出成都较好的经济活跃状态,而在单向引力模型中难以反映出此特点。总体来看,在双向引力模型中,成渝地区各城市间经济关联强度处于稳步提升状态,城市间关联强度关系变化不大。经济关联总强度值由 2014 年的 261 968 提升至 2020 年的 433 795,空间关联网络逐渐复杂。分城市来看,成都市对眉山市的经济关联强度最高,关联强度从 2014 年的 17 018 增长至 2020 年的 30 532,

增长超 79.4%,其次是德阳市与绵阳市,其关联强度分别从 2014 年的 8 408 和 7 731 增长至 2020 年的 13 792 和 13 537,与成都市关联强度最弱的是达州市,2020 年的关联强度只有 232。重庆市与广安市的关联强度最高,其由 2014 年的 5 975 增长至 2020 年的 10 468,其次是南充市、遂宁市,2020 年空间关联强度也达到了 5 340 和 5 099。除上述 2 个城市之外,成渝地区内部一些城市的关联强度也较高,例如自贡市和内江市、绵阳市和德阳市、乐山市和眉山市等城市的关联强度自 2014 年以来一直较高且处于稳步提升的状态。综合来看,成渝地区内部城市之间的经济关联程度不断加深,成都市对其附近城市的带动作用最为明显。然而受制于基础设施、地理环境等因素的影响,不同城市间的经济关联强度差异显著,部分城市间的关联强度仍处于较低状态。

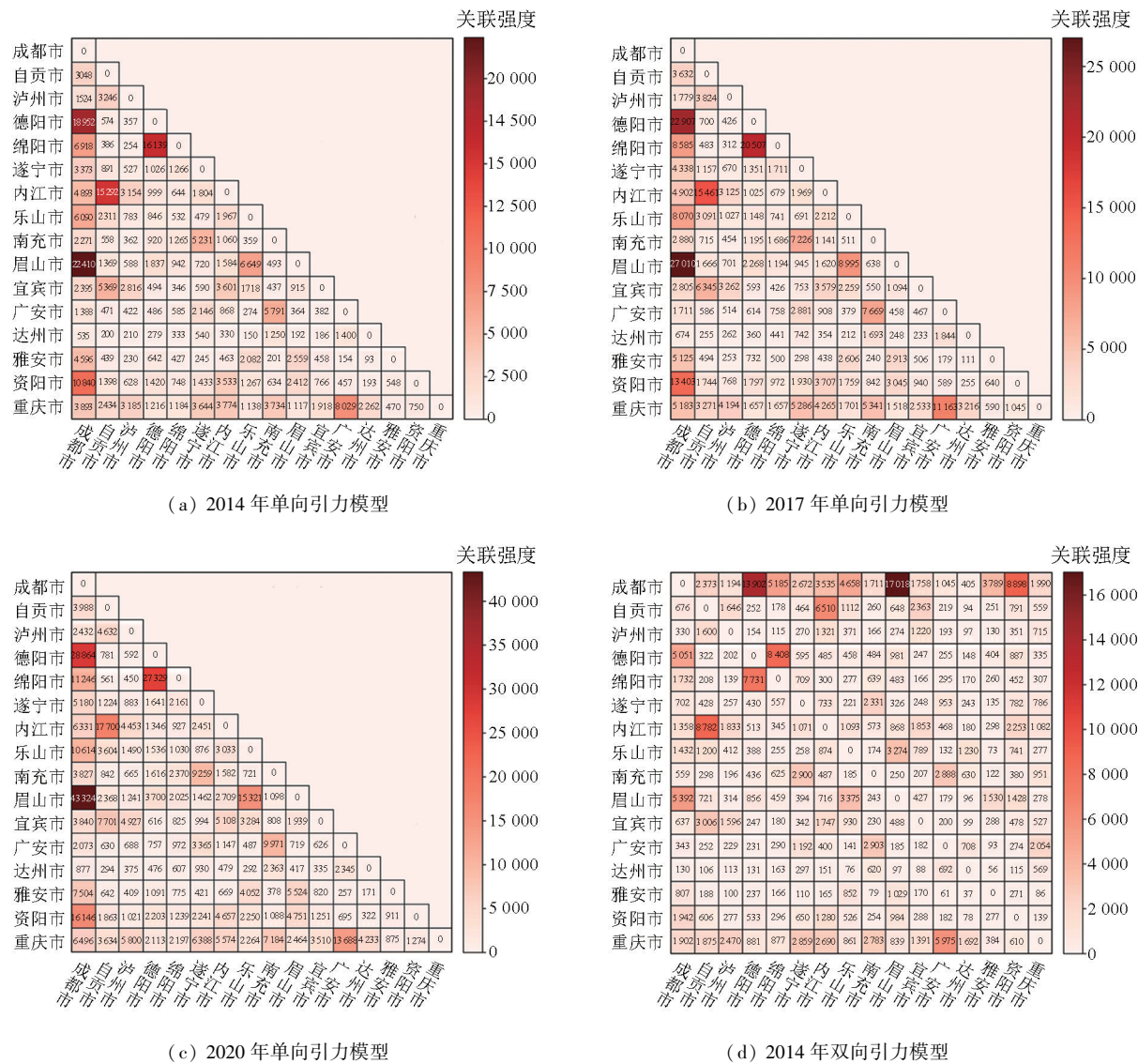


图 10-1 成渝地区城市经济关联强度

Fig.10-1 Urban economic correlation intensity in Chengdu Chongqing region

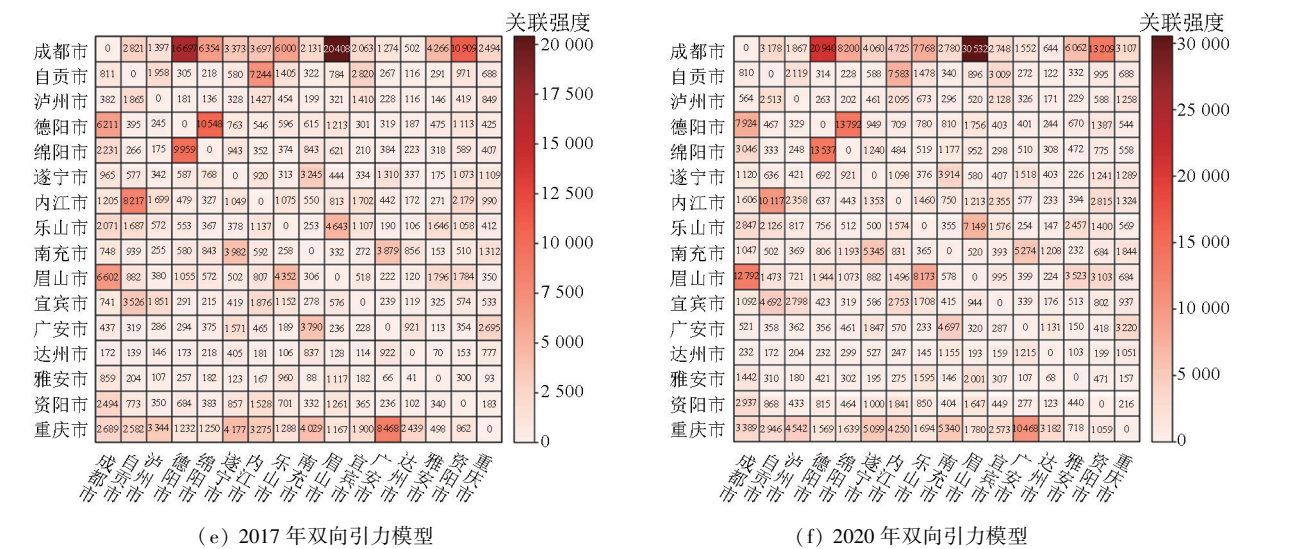


图 10-2 成渝地区城市经济关联强度
Fig.10-2 Urban economic correlation intensity in Chengdu Chongqing region

4 结论与讨论

本文利用夜间灯光数据、土地利用数据和社会经济数据对成渝地区 2014 年、2017 年、2020 年 GDP 进行空间化,使用趋势分析,结合夜间灯光指数改进修正引力模型,在像元尺度和经济关联性上对成渝城市群经济发展特征进行分析。主要结论如下:

1) 基于夜间灯光数据和土地利用数据构建的 GDP 空间化模型较为精确,其平均相对误差在 1% 左右。GDP₁ 的产值与土地利用数据具有很强的相关性,利用夜间灯光构建的 TNL 与 GDP₂₃ 的产值的相关性最强,二者综合构建的 GDP 空间化模型精度较高,能够反映像元级别的 GDP 分布情况。

2) GDP 空间化数据可以直观地反映成渝城市群的经济分布状况。成渝城市群 2014—2020 年经济发展状况稳步提升,区域经济得到不同程度的发展,GDP 密度呈持续增长的趋势。利用趋势分析法得出成渝地区 2014—2020 年间 GDP 像元级的增长趋势,结果显示成渝地区出现经济增长的区域占比为 11.3%,而其中快速增长的区域主要位于成都市和重庆市主城区周围,约占该类别的 73.9%。

3) 在目前已有的引力模型修正思路的基础上,将能表征城市内部经济社会发展均衡程度的夜间灯光指数引入城市综合发展质量中,并将其作为影响性系数对传统的引力模型进行修正,克服了当前城市质量指标选取主观性强、解释性差等弊端。使用经济联系强度表征区域经济交互测度研究,在一定程度上可为研究经济交流的活跃程度提供新思路,为区域经济空间结构的优化研究提供一定的参考。

实例分析表明,成渝地区城市间的经济关联强度正不断加深,城市综合发展质量稳步提升,成渝城市群中心城市成都市作为“树根”城市之一,在城市经济网络中居于核心地位,其供需关系深刻影响着其附近的其他城市。

本研究是利用夜间灯光数据及土地利用数据对成渝城市群区域经济发展特征进行分析,但仍然存在一些问题有待于进一步研究:①研究只选用了 NPP/VIIRS 数据,未来可将 DMSP/OLS 数据纳入研究范畴,构建更长时序的 GDP 空间化模型,更好地反映在较长一段时间内成渝地区发展的动态变化过程;②研究只考虑夜间灯光以及土地利用与 GDP 的关系,然而影响 GDP 的因素众多,在将来的研究中可以引入更多因子,例如人口、POI 等数据,进一步提高 GDP 空间化的精度;③城市间的经济联系是一个复杂的过程,其受众多要素的影响,在探寻了区域经济联系的强度后,结合其他政策、产业、公共服务等因素来了解其背后的驱动因素,是未来突破的方面。区域经济协调发展是一个开放的过程,研究仅限于对成渝地区经济网络的刻画,因此,分析周边地市乃至省份间经济网络联系,对于明确成渝地区的发展潜力及发展方向也是下一步研究的重点。

参考文献 (References):

[1] 王 琪,袁 涛,郑新奇.基于夜间灯光数据的中国省域 GDP 总量分析[J].城市发展研究,2013,20(7):44-48.
Wang Q,Yuan T,Zheng X Q.GDP gross analysis at province-level in China based on night-time lightsatellite imagery[J].Urban Development Studies,2013,20(7):44-48.
[2] 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. Comparison of GDP spatialization in Beijing-Tianjin-Hebei based on night light and population density data[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2016, 18(7): 969-976.
- [3] Zhao Z Z, Tang X J, Wang C, et al. Analysis of the spatial and temporal evolution of the GDP in Henan Province based on nighttime light data[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(3): 716.
- [4] Zhang X, Gibson J. Using multi-source nighttime lights data to proxy for county-level economic activity in China from 2012 to 2019[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(5): 1282.
- [5] 旷开金, 郑开焰, 陈锐, 等. 基于 NPP-VIIRS 夜间灯光数据的福建省县域经济发展时空演化研究[J]. *地域研究与开发*, 2023, 42(4): 29-35.
- Kuang K J, Zheng K Y, Chen R, et al. Spatio-temporal evolution of county economic development in Fujian Province based on NPP-VIIRS nighttime lighting data[J]. *Areal Research and Development*, 2023, 42(4): 29-35.
- [6] 李益敏, 傅星峰, 李媛婷, 等. 基于夜光遥感的东南亚国家经济发展时空特征研究[J]. *南京信息工程大学学报(自然科学版)*, 2023: 1-12.
- Li Y M, Fu X F, Li Y T, et al. Spatio-temporal characteristics of economic development in Southeast Asian countries based on nighttime light remote sensing[J]. *Journal of Nanjing University of Information Science & Technology(Natural Science Edition)*, 2013: 1-12.
- [7] 刘杨, 李宏伟, 杨斌程, 等. 基于遥感数据和 POI 数据的 GDP 空间化研究——以北京市为例[J]. *地域研究与开发*, 2021, 40(2): 27-32, 39.
- Liu Y, Li H W, Yang B C, et al. Spatialization of GDP based on remote sensing data and POI data: A case study of Beijing City[J]. *Areal Research and Development*, 2021, 40(2): 27-32, 39.
- [8] Elvidge C D, Baugh K E, Kihn E A, et al. Relation between satellite observed visible-near infrared emissions, population, economic activity and electric power consumption[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1997, 18(6): 1373-1379.
- [9] 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.
- [10] 朱永明, 贾宗雅. 城市经济高质量发展的空间联系及其特征研究——以中原城市群为例[J]. *生态经济*, 2022, 38(12): 82-88.
- Zhu Y M, Jia Z Y. Research on the spatial connections and characteristics of high-quality economic development of cities: A case study of the central Plains urban agglomeration[J]. *Ecological Economy*, 2022, 38(12): 82-88.
- [11] 王莎, 童磊, 贺玉德. 京津冀城市群经济联系的定量测度[J]. *技术经济*, 2019, 38(10): 74-81.
- Wang S, Tong L, He Y D. Quantitative measurement of economic linkages between Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration[J]. *Technology Economics*, 2019, 38(10): 74-81.
- [12] 张志强, 熊永兰. 成渝地区双城经济圈一体化发展的思考与建议[J]. *中国西部*, 2020(2): 1-12.
- Zhang Z Q, Xiong Y L. Strategic thoughts and suggestions of promoting the integrated development of Chengdu-Chongqing twin cities economic circle[J]. *Western China*, 2020(2): 1-12.
- [13] 伍亿真, 施开放, 余柏藻, 等. 利用 NPP-VIIRS 夜间灯光遥感数据分析城市蔓延对雾霾污染的影响[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2021, 46(5): 777-789.
- Wu Y Z, Shi K F, Yu B L, et al. Analysis of the impact of urban sprawl on haze pollution based on the NPP-VIIRS nighttime light remote sensing data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(5): 777-789.
- [14] 钟亮, 刘小生, 杨鹏. SNPP-VIIRS 夜间灯光影像去噪方法研究[J]. *测绘通报*, 2019(3): 21-26.
- Zhong L, Liu X S, Yang P. Method for SNPP-VIIRS nighttime lights images denoising[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2019(3): 21-26.
- [15] 关靖云, 李东, 王亚菲, 等. 中国区域 DMSP-OLS 与 NPP-VIIRS 夜间灯光影像校正[J]. *测绘通报*, 2021(9): 1-8.
- Guan J Y, Li D, Wang Y F, et al. DMSP-OLS and NPP-VIIRS night light image correction in China[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2021(9): 1-8.
- [16] Yang J, Huang X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. *Earth System Science Data*, 2021, 13(8): 3907-3925.
- [17] 张雪红, 吴雨阳, 王永俊, 等. 基于热红外和夜间灯光遥感的 GDP 空间化研究——以福建省为例[J]. *南京信息工程大学学报(自然科学版)*, 2021, 13(6): 720-729.
- Zhang X H, Wu Y Y, Wang Y J, et al. GDP spatialization based on thermal infrared and night light remote sensing: A case study in Fujian Province[J]. *Journal of Nanjing University of Information Science and Technology(Natural Science Edition)*, 2021, 13(6): 720-729.
- [18] 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.
- [19] 陈军卫, 汪潇, 王秀丽. 基于夜间灯光数据的河南省 GDP 空间化研究[J]. *地域研究与开发*, 2020, 39(1): 28-31, 45.
- Chen J W, Wang X, Wang X L. Spatialization of GDP in Henan Province based on night light index[J]. *Areal Research and Development*, 2020, 39(1): 28-31, 45.
- [20] 李峰, 米晓楠, 刘军, 等. 基于 NPP-VIIRS 夜间灯光数据的北京市 GDP 空间化方法[J]. *国土资源遥感*, 2016, 28(3): 19-24. doi: 10.6046/gtzyyg.2016.03.04.
- Li F, Mi X N, Liu J, et al. Spatialization of GDP in Beijing using NPP-VIIRS data[J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2016, 28(3): 19-24. doi: 10.6046/gtzyyg.2016.03.04.
- [21] 陈晋, 卓莉, 史培军, 等. 基于 DMSP/OLS 数据的中国城市化过程研究——反映区域城市化水平的灯光指数的构建[J]. *遥感学报*, 2003, 7(3): 168-175, 241.
- Chen J, Zhuo L, Shi P J, et al. The study on urbanization process in China based on DMSP/OLS data: Development of a light index for urbanization level estimation[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2003, 7(3): 168-175, 241.
- [22] 王俊华. 基于夜间灯光数据的四川省 GDP 空间化研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2019.
- Wang J H. GDP spatialization research of Sichuan Province based

on nighttime light data[D].Chengdu:Chengdu University of Technology, 2019.

[23] 吴燕,李红波.大都市城乡融合区空间演进及内在关联性测度——基于武汉市夜间灯光数据[J].地理科学进展,2020,39(1):13-23.

Wu Y, Li H B.Spatial change and correlations of desakota regions in a metropolitan area using NPP/VIIRS nighttime light data: A case study of Wuhan City[J].Progress in Geography, 2020, 39(1):13-23.

[24] 占玮,陈朝隆,孙武,等.基于多源数据的广佛都市区城市引力结构特征分析[J].热带地理,2021,41(6):1292-1302.

Zhan W, Chen C L, Sun W, et al.Characteristics of the urban gravity structure in the Guangzhou-foshan metropolitan area based on multi-source data[J].Tropical Geography, 2021, 41(6):1292-1302.

[25] 曾佩枫,孙美丽,路娜,等.夜间灯光数据下的青岛市城乡结合区空间扩张与内在关联测度[J].测绘科学技术学报,2021,38(2):213-220.

Zeng P F, Sun M L, Lu N, et al.Spatial expansion and intrinsic correlation measure of Qingdao urban-rural integration area based on night light data[J].Journal of Geomatics Science and Technology, 2021, 38(2):213-220.

[26] Elvidge C D, Baugh K E, Anderson S J, et al.The Night Light Development Index (NLDI): A spatially explicit measure of human development from satellite data[J].Social Geography, 2012, 7(1):23-35.

[27] 顾朝林,庞海峰.基于重力模型的中国城市体系空间联系与层域划分[J].地理研究,2008,27(1):1-12.

Gu C L, Pang H F.Study on spatial relations of Chinese urban system: Gravity Model Approach[J].Geographical Research, 2008, 27(1):1-12.

[28] 谢金龙,李熙,徐慧敏.基于夜光遥感影像的海峡西岸经济区城市发展时空格局演变分析[J].应用科学学报,2021,39(3):456-468.

Xie J L, Li X, Xu H M.Spatial-temporal evolution analysis of urban development in the western Taiwan Straits economic zone using night-time light imagery[J].Journal of Applied Sciences, 2021, 39(3):456-468.

[29] 李月娇,杨小唤,王静.基于景观生态学的人口空间数据适宜格网尺度研究——以山东省为例[J].地理与地理信息科学,2014,30(1):97-100.

Li Y J, Yang X H, Wang J.Grid size suitability of population spatial distribution in Shandong Province based on landscape ecology[J].Geography and Geo-Information Science, 2014, 30(1):97-100.

Analysis of changes in the economic development characteristics of the Chengdu-Chongqing urban agglomeration using remote sensing data on nighttime light

NIU Zhensheng^{1,2,3}, YANG Xin^{1,2}, CHEN Chao³, LIAO Xiang¹, ZHANG Xiaoxuan¹

(1.College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2.Key Lab of Earth Exploration and Information Techniques of Ministry of Education, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 3.School of Civil Engineering, Henan University of Engineering, Zhengzhou 451191, China)

Abstract: To resolve the limitations of traditional economic data such as the lack of spatial information and the difficulty in capturing the spatial disparities and dynamic patterns of regional economic development, this study integrated nighttime light data with land use and socio-economic data to develop a spatialized gross domestic product (GDP) model for the Chengdu-Chongqing region. Using trend analysis and a modified gravity model, this work analyzes the economic development characteristics of the region at the pixel level and in terms of inter-city economic relationships. The results indicate that the spatialized GDP model, constructed from multiple data sources, demonstrated high accuracy, with errors not exceeding 1.1%. The areas with the fastest GDP density growth in the Chengdu-Chongqing region are mainly concentrated around the core urban areas of Chengdu and Chongqing, accounting for approximately 73.9% of the total. These areas also show pronounced economic agglomeration characteristics. The inter-city economic relationships in the Chengdu-Chongqing region are continually strengthening, and the overall quality of urban development is steadily improving. Chengdu, in particular, has the closest economic ties with its neighboring cities. Overall, the Chengdu-Chongqing regional economy exhibits a spatial pattern of “dual-core driven development”, with the intensity of inter-city economic relationships continuing to strengthen. This study will provide valuable data support and methodological insights for promoting the high-quality economic development of the Chengdu-Chongqing urban agglomeration.

Keywords: NPP/VIIRS night light data; GDP spatialization; Chengdu-Chongqing urban agglomeration; modified gravity model; economic development

(责任编辑:陈庆)