

基于NPP-VIIRS夜间灯光数据的青海省GDP空间化研究

浦春林

云南师范大学地理学部, 云南 昆明

收稿日期: 2023年12月21日; 录用日期: 2024年2月23日; 发布日期: 2024年2月29日

摘要

国内生产总值(GDP)是国民经济核算的重要指标, 用于衡量一个国家或地区的经济状况。传统的GDP统计数据提供了地区宏观经济状况的数值信息, 但无法反映地区内部的空间差异。为了更好地理解地区经济差异和经济状况, 本文利用NPP-VIIRS夜间灯光数据, 采用相关和回归分析, 建立了综合灯光指数(CNLI)与青海省GDP之间的关系模型。通过该模型, 对青海省GDP的空间分布进行了初步模拟, 并采用线性调整的方法对各像元的GDP模拟值进行了修正, 最终生成了青海省2016~2020年的GDP空间密度图。结果表明, 该模型在对青海省各市级行政区的GDP进行模拟时表现出较高的准确度, 有力地展现了青海省的经济分布和增长状况。夜间灯光数据与青海省各地区的经济活动水平呈现显著关联, 展现出一定的空间分布规律。具体而言, 在空间分布上, 五年间青海省的GDP密度分布格局为东部高于西部, 西南部最低, 并以西宁市和海东市为聚集中心, 向四周逐渐呈放射状递减。尤其是西宁市表现出市区经济占主导地位的特点, 其主城区的经济发展水平明显高于其他区域。研究结果可为青海省未来的区域发展规划和政策制定提供重要参考。

关键词

夜间灯光, NPP-VIIRS, 青海省, GDP空间化

Spatialization of GDP in Qinghai Province Based on NPP-VIIRS Nighttime Light Data

Chunlin Pu

Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming Yunnan

Received: Dec. 21st, 2023; accepted: Feb. 23rd, 2024; published: Feb. 29th, 2024

Abstract

Gross Domestic Product (GDP) is an important indicator used to measure the economic conditions of a country or region. Traditional GDP statistics provide numerical information on the macroeconomic situation of regions, but they fail to reflect internal spatial variations. To better understand regional economic disparities and conditions, this study utilized NPP-VIIRS nighttime light data and employed correlation and regression analysis to establish a relationship model between the Composite Nighttime Light Index (CNLI) and GDP in Qinghai Province. Through this model, the spatial distribution of GDP in Qinghai Province was preliminarily simulated, and linear adjustments were made to the simulated GDP values of each pixel. This resulted in the generation of a spatial density map of GDP for the years 2016~2020 in Qinghai Province. The results demonstrated that the model exhibited a high level of accuracy in simulating the GDP of various municipal-level administrative regions in Qinghai Province, effectively depicting the economic distribution and growth. Nighttime light data showed a significant correlation with the level of economic activity in different regions of Qinghai Province, revealing certain spatial distribution patterns. Specifically, in terms of spatial distribution, the density of GDP in Qinghai Province over the five years was higher in the eastern region compared to the western region, with the southwestern part being the lowest. Xining City and Haidong City emerged as the focal points of economic concentration, with a gradual radial decrease in GDP density towards the surrounding areas. Particularly, Xining City displayed the characteristic of the dominance of the urban area's economy, with significantly higher levels of economic development compared to other regions. The research findings can provide important references for future regional development planning and policy formulation in Qinghai Province.

Keywords

Nighttime Light, NPP-VIIRS, Qinghai Province, Spatialization of GDP

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

国内生产总值(GDP)作为衡量一个国家或地区在特定时期内生产活动最终结果的指标,常用于评估其经济实力和状况[1]。然而,传统的 GDP 统计数据以行政单元为基础,无法提供有效且准确的空间信息[2]。这样的统计结果更多地强调了不同行政区之间的 GDP 差异,而无法清晰呈现行政区内部 GDP 的具体空间分布情况,从而限制了进一步分析各个地区经济发展状况的可能性。遥感数据为描述 GDP 的空间分布提供了一种稳定的技术方法,其中夜间灯光数据作为典型的遥感数据,具有剔除自然干扰因素的优势,可用于表征地表经济活动的强度[2]。夜间灯光数据以其空间指向性强、获取方便以及时效性高等特点[3],受到了广泛关注。因此,许多国内外学者纷纷运用这类数据展开研究,涉及城市扩张、贫困程度、土地规划、人口密度和经济格局等多个领域[4]。尽管传统的以行政区划为单位的 GDP 统计数据缺乏详细的空间分布,但夜间灯光数据则提供了新的视角,为 GDP 空间分布提供了更多信息。

夜间灯光遥感的起源可以追溯到 20 世纪 70 年代,最初是通过美国国防气象卫星计划的卫星(DMSP)上搭载的 OLS 传感器获取的夜间灯光数据。除此之外,近年来发布的 Suomi-NPPVIIRS、SAC-C、SAC-D、

EROS-D 和国际空间站等卫星也提供了夜间灯光数据[5]。在夜间灯光数据的应用研究中,主要集中在使 用 DMSP-OLS 和 NPP-VIIRS 两种数据。2011 年,美国发射了 Suomi NPP 卫星,该卫星携带 5 个 VIIRS 传感器,包括 22 个波段,其中 5 个为 375 m 的波段和一个 DNB 波段,分辨率为 500 m。相比于 DMSP/OLS, NPP 卫星的 DNB 波段灰度期间更优,因此也更适用于人类活动研究。新一代的 NPP-VIIRS 数据有效弥补了 DMSP-OLS 数据在空间分辨率、时间分辨率和辐射分辨率方面的不足,极大地扩展了研究方向和应用领域[6]。

近几十年来,学者们利用夜间灯光数据进行了多方面的研究,形成了一个相对完善的研究体系。Elvidge 等[7]发现夜间灯光面积与 GDP 之间存在显著的线性关系。李峰等[8]基于 NPP-VIIRS 数据结合 Landsat 8 土地利用数据,对北京市的 GDP 进行了空间化估算。Chen 等[9]证实了 NPP-VIIRS 灯光数据在人为热量流空间分布研究中的有效性,研究结果表明京津冀区域的人为热流量与经济发展水平、相关人口密度密切相关。江威等[10]挖掘了灯光数据在防洪方面的应用,发现在防洪能力低的地区,人类居住区被洪水破坏后会远离河流重新定居;相反,在防洪能力高的地区,人类与河流的关系没有显著变化。许玲丽等[11]利用 NPP-VIIRS 数据、POI 数据和 Landsat 8 数据,对南京市进行了人口模拟研究。这些研究结果表明,夜间灯光数据不仅能表征夜间灯光强度,还能捕捉到火光、渔船和火灾等现象,因此在社会经济参数估算、城市化监测与评估、人口发展与估算、重大事件评估等领域具有广泛的应用前景。

本文主要通过美国国家极轨合作仪件-可见红外成像辐射计套件(NPP-VIIRS)夜间灯光数据建立其与青海省 GDP 统计数据间的回归模型,生成青海省 2016-2020 年的 GDP 空间密度图,从而反映出青海省各市级行政区内部 GDP 的空间分布及增长情况,为未来青海省经济社会发展政策的制定提供辅助信息,以便实现精准施策的目标。此外,本研究探讨了夜间灯光数据在区域经济研究中的应用潜力,并提出了一些未来进一步深入研究的可能方向,以期为基于遥感数据的区域经济分析提供参考和指导。

2. 研究区概况与数据来源

2.1. 研究区概况

青海省,简称“青”,是中华人民共和国省级行政区,省会西宁。位于中国西北内陆,青海介于北纬 31°36'~39°19',东经 89°35'~103°04'之间,北部和东部同甘肃相接,西北部与新疆相邻,南部和西南部与西藏毗连,东南部与四川接壤,位于四大地理区划的青藏地区。青海省地形地貌多样,包括高原、山地、丘陵、盆地等地貌类型。这里的地势高低不平,是中国的天然水塔,蕴藏着丰富的水资源。气候类型多样,以高原季风气候为主,有高寒缺氧、寒冷干燥的特点。夏季短而凉爽,冬季漫长而寒冷,是典型的高寒气候区域。

青海省总面积 72.23 万平方公里,辖 2 个地级市、6 个自治州,青海省行政区划图如图 1 所示。2021 年全年全省完成生产总值 3346.63 亿元,比上年同期增长 5.7%,两年平均增长 3.6%。其中,第一产业增加值 352.65 亿元,同比增长 4.5%,两年平均增长 4.5%;第二产业增加值 1332.61 亿元,同比增长 6.5%,两年平均增长 4.5%;第三产业增加值 1661.37 亿元,同比增长 5.4%,两年平均增长 2.7%。截至 2021 年末,常住人口 594 万人,比上年末增加 1 万人。按城乡分,城镇常住人口 362.5 万人,增加 6.2 万人,占常住人口的比重(常住人口城镇化率)为 61.02%,提高 0.94 个百分点。

2.2. 数据来源

夜间灯光数据来源于 NPP-VIIRS 数据集 (https://www.ngdc.noaa.gov/eog/viirs/download_dnb_composites.html)。NPP-VIIRS 传感器数据集来源于美国国家极轨道伙伴卫星(National Polar-orbiting Partnership Satellite)上的 Visible Infrared Imaging Radiome-

ter Suite (可见光红外成像辐射计套件)。该传感器是由美国国家航空航天局(NASA)和国家海洋和大气管理局(NOAA)联合开发和运营的。青海省各市级行政区的 GDP 统计数据来源于青海省统计局各年度的《青海省统计年鉴》(<http://tjj.qinghai.gov.cn/tjData/qhtjnj/>)。青海省市界以及区市行政区划数据来源于中科院地理所《资源环境与数据中心》网站(<https://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=284>)。



Figure 1. Administrative divisions of Qinghai Province
图 1. 青海省行政区划图

3. 研究方法过程

3.1. 研究思路与技术路线

在青海省 GDP 空间化过程中，首先需要将对各年的 NPP-VIIRS 夜间灯光数据进行预处理操作，包括年度数据合成、连续性校正等步骤，以确保数据的准确性和一致性。然后利用夜间灯光数据、GDP 统计数据以及其他辅助数据，模拟生成青海省的 GDP 空间化密度图。最后，基于获得的 GDP 密度图，结合其他数据进行青海省 GDP 的特征分析。青海省 GDP 空间化技术路线如图 2 所示。

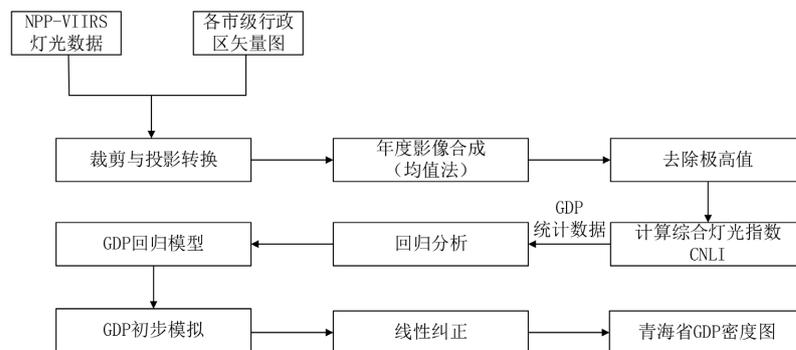


Figure 2. Technical roadmap for specialization of GDP in Qinghai Province
图 2. 青海省 GDP 空间化技术路线图

3.2. 数据预处理

研究考虑到 NPP-VIIRS 夜间灯光影像在原始坐标系下存在纬度增大影像网格缩小的问题[12], 为了避免影响, 将影像数据重新投影为 Asia Lambert Conformal Conic 投影。目的是保持影像在研究范围内的网格尺寸和形状的稳定, 避免变形引发的数据误差。先前的研究指出, 针对国家和全球网格尺度, 1 km 或 5 km 为常见选择, 而对于省市级区域, 100~1000 m 之间的网格尺度更为合适[13]。根据青海省的实际情况, 为了兼顾空间细节与全局信息, 本次研究选择了 500 米网格尺度作为空间分析的基本单元。为了保持数据的一致性, 采用了最近邻方法对影像进行重采样, 将原始影像的像元分辨率统一为 500 米。接下来, 利用下载的青海省行政区划矢量图进行裁剪, 获得了研究区域内各月度影像数据。这一处理方式有助于保持数据准确性, 同时充分考虑了青海省的空间尺度和 GDP 分布的特点, 为后续的分析与研究提供了可靠的数据基础。

为了去除影像中的负值和极高值的影响, 并合成研究区域各年的年度影像数据, 本研究采用了阈值法和均值法[14]。首先, 根据公式(1), 将各月度影像中 DN 值小于 0 的像元赋值为 0, 在确保数据符合实际情况的基础上, 消除负值对后续分析的干扰, 提高了数据的质量和准确性。然后利用均值法合成了研究区各年的年度影像数据。均值法通过计算一年内各个月份影像数据的平均值, 得到年度影像。这种方法能够整合不同月份的数据, 得到更全面和稳定的年度影像数据, 从而提供准确的信息用于后续的分析研究。

$$DN_i = \begin{cases} 0, & DN_i < 0 \\ DN_i, & DN_i \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

为了消除合成年度影像中极高值的影响, 通常会将经济发展最为显著的区域作为参考。在本研究中, 选定了青海省经济发展相对较好的西宁市, 利用该地区夜间灯光数据中的最高值作为最大灯光阈值 (DN_M), 将合成后的年度影像中高于该阈值的灯光值判定为极高值, 并采用该阈值进行替代处理。利用 ArcGIS 栅格计算器, 按照公式(2)对图像数据进行处理, 以有效消除合成年度影像中潜在的极高值对研究结果的影响。

$$DN_i = \begin{cases} DN_i, & x \leq DN_M \\ DN_M, & x > DN_M \end{cases} \quad (2)$$

上述公式中 DN_i 表示各市州行政区域内第 i 级像元灰度值; DN_M 为最大灰度阈值。通过上述处理后即可得到青海省各年度 NPP-VIIRS 夜间灯光影像。

3.3. GDP 空间化方法

3.3.1. 灯光指数计算

本文选用 2016~2020 年连续 5 年夜间灯光数据参与青海省的 GDP 空间化模拟, 连续年份的分析结果便于比较数据之间的差异性。夜间灯光指数可以反映区域的经济程度和城市化进展, 是对城市综合经济发展状况的数值表现形式。已有研究表明, 综合夜间灯光指数 CNLI (Compounded Night Light Index) 与 GDP 间具有显著的相关性[15]。为此, 本文通过对 CNLI 和青海省 GDP 统计数据进行相关性和回归分析, 建立 CNLI 与 GDP 间的回归模型, 随后根据得到的回归模型进行青海省 GDP 空间化。计算 CNLI 的公式如下:

$$CNLI = I \times S \quad (3)$$

其中:

$$I = \frac{1}{N_L \times DN_M} \times \sum_{i=1}^{DN_M} (DN_i \times n_i) \tag{4}$$

$$S = \frac{Area_N}{Area} \tag{5}$$

上述公式中， DN_i 和 n_i 分别表示各市级行政区域内第 i 级像元灰度值及该灰度级像元个数； DN_M 为最大灰度值阈值； N_L 、 $Area_N$ 分别为各市级行政区内 DN 值位于 1 至 DN_M 之间的像元总数和所占的面积； $Area$ 为各市级行政区的总面积。

3.3.2. GDP 空间化建模

计算得到青海省 2016~2020 年间各年度的 CNLI 值，并利用 SPSS 软件对该值与各市级行政区的 GDP 统计数据进行了相关和回归分析。通过分析结果得到了青海省各年度 GDP 与 CNLI 的回归模型(详见表 1)。研究结果显示，NPP-VIIRS 夜间灯光影像与 GDP 之间呈现出较好的指数回归关系，表明夜间灯光影像与 GDP 之间存在着较高的相关性。

Table 1. Regression model of GDP and CNLI in Qinghai Province based on NPP-VIIRS images

表 1. 基于 NPP-VIIRS 影像的青海省 GDP 与 CNLI 回归模型

年份	回归方程	R ²
2016	$y = 80.901e^{2E-06x}$	R ² = 0.8604
2017	$y = 100.12e^{2E-06x}$	R ² = 0.7097
2018	$y = 81.295e^{2E-06x}$	R ² = 0.8005
2019	$y = 90.829e^{2E-06x}$	R ² = 0.7902
2020	$y = 94.12e^{2E-06x}$	R ² = 0.8323

3.3.3. GDP 线性纠正

为了纠正模拟的 GDP 空间分布的误差，我们可以利用公式(6)进行线性纠正，在纠正过程中，将预测值和实际统计值相结合，对研究区内各像元模拟的 GDP 值进行调整，从而更准确地反映每个像元的 GDP 情况，并提高模拟结果的准确性与真实性。纠正公式如下：

$$GDP_T = GDP_j (GDP_i / GDP_{all}) \tag{6}$$

式中， GDP_T 为线性纠正过的 GDP 值； GDP_j 为单个像元 j 预测出的 GDP 值； GDP_i 为统计数据的 GDP 值； GDP_{all} 为整体区域预测的 GDP 值。

3.4. 空间化结果

将纠正后的 GDP 值直接求和即可得到该地区的 GDP 总值，生成的 2016~2020 年青海省 GDP 密度图如图 3~7 所示。从时间维度上看，2016~2020 年青海省 GDP 空间化成果中的像元值总体呈上升态势，但经济增长量趋势缓慢；从空间分布上看，五年间青海省的 GDP 密度呈现出东部高于西部的趋势，而西南部地区的 GDP 密度最低。特别是在西宁市和海东市这两个地区，经济活动明显聚集，且以这两个地方为中心，向周边地区逐渐减少。经济相对发达的西宁市、海东市、海西州的夜间灯光值最高，其中 GDP 密度最高的是西宁市，它是青海省的省会和经济中心，具有较大的经济规模，包括商业、金融、服务业、制造业等。其次是海东市，该市具有较好的地理位置和交通优势，有利于经济发展和贸易往来。

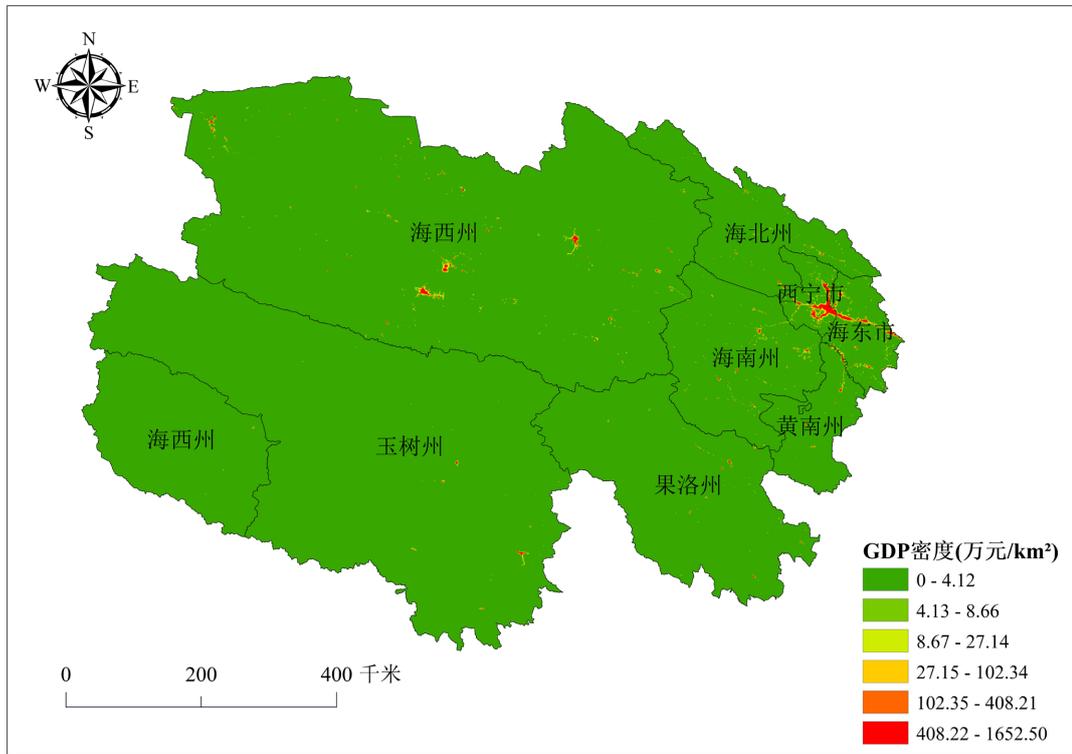


Figure 3. Spatial density map of GDP in Qinghai Province, 2016
图 3. 2016 年青海省 GDP 空间密度图

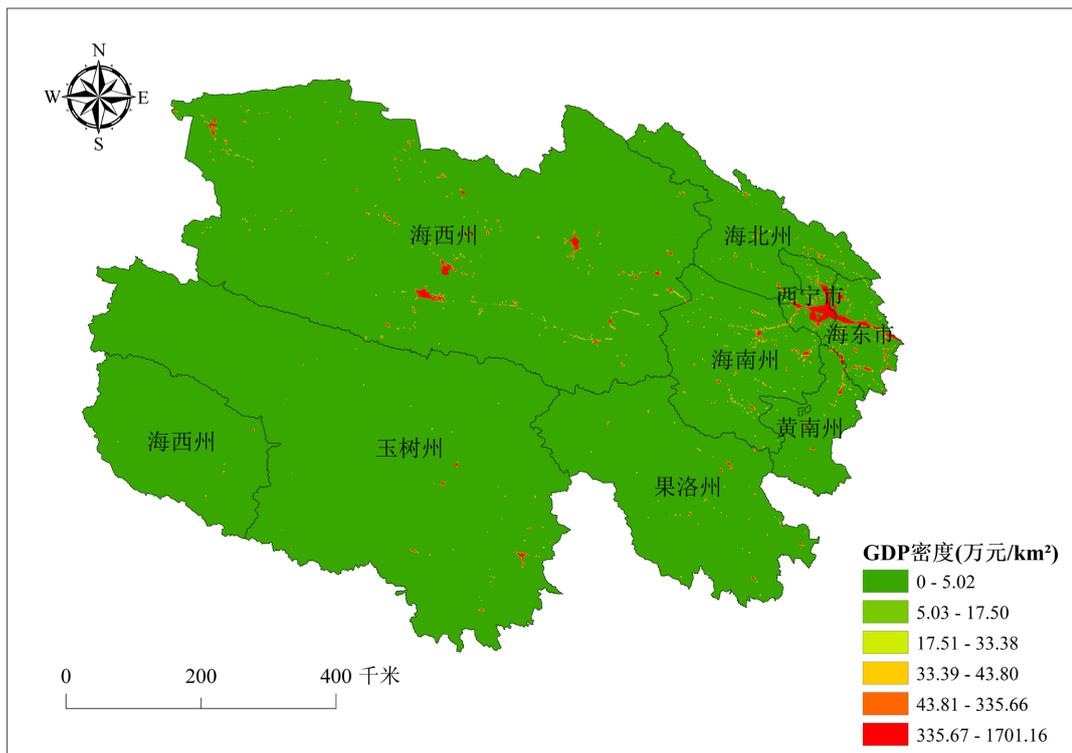


Figure 4. Spatial density map of GDP in Qinghai Province, 2017
图 4. 2017 年青海省 GDP 空间密度图

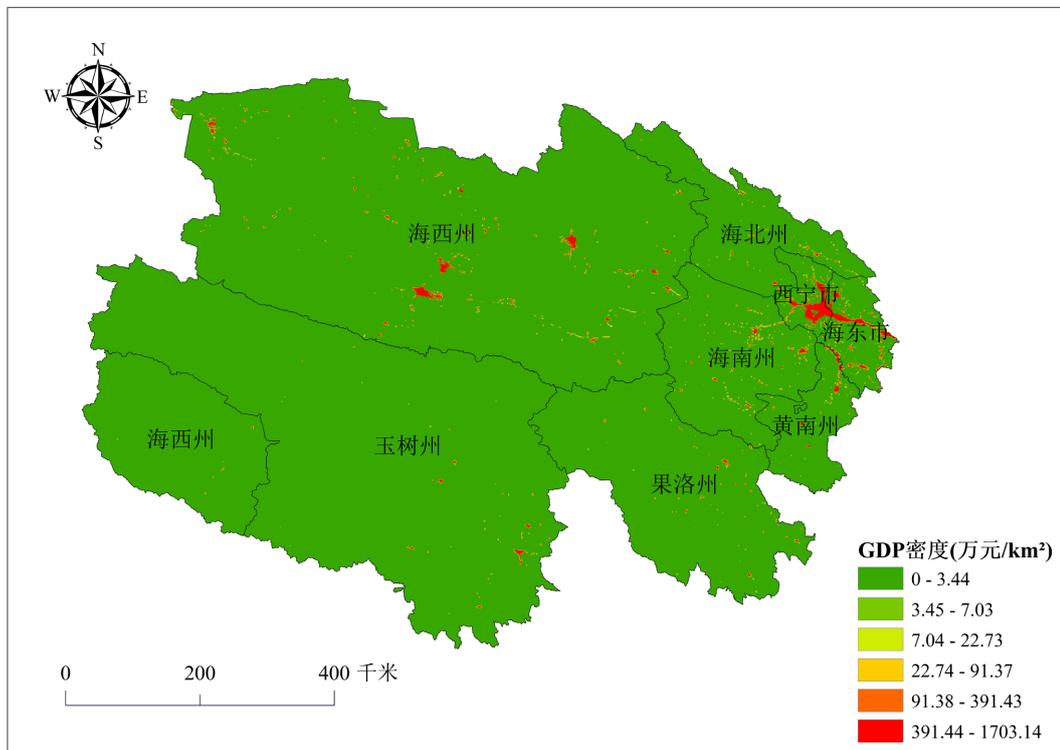


Figure 5. Spatial density map of GDP in Qinghai Province, 2018
图 5. 2018 年青海省 GDP 空间密度图

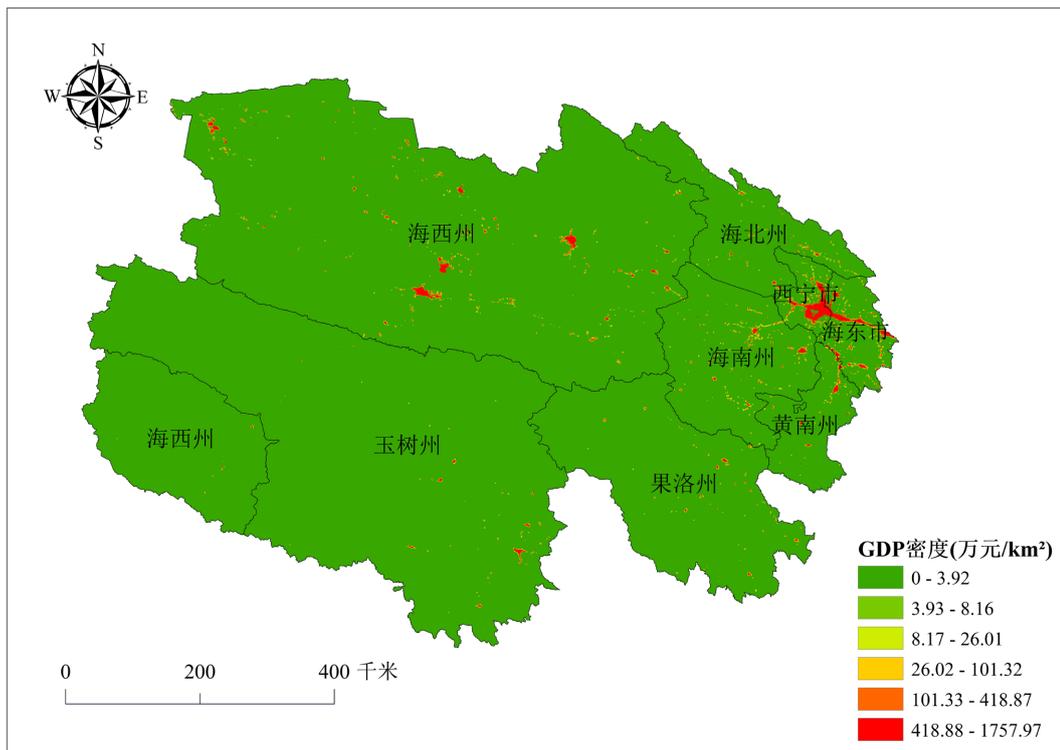


Figure 6. Spatial density map of GDP in Qinghai Province, 2019
图 6. 2019 年青海省 GDP 空间密度图

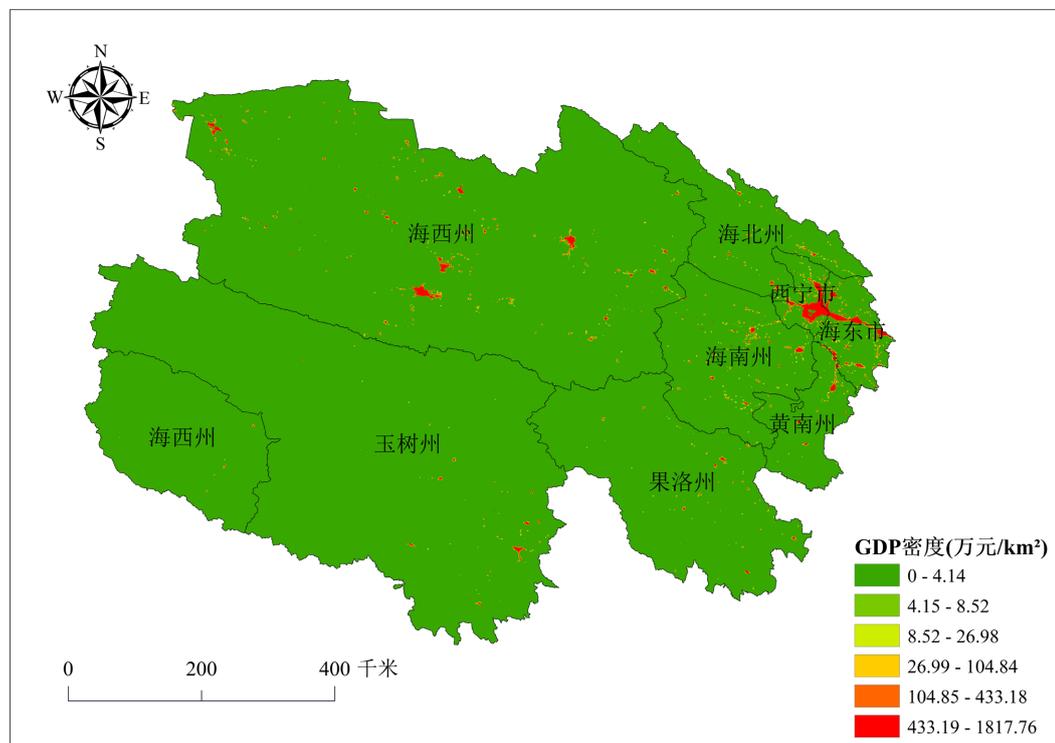


Figure 7. Spatial density map of GDP in Qinghai Province, 2020

图 7. 2020 年青海省 GDP 空间密度图

4. 结论与讨论

4.1. 结论

本研究基于 NPP-VIIRS 夜间灯光数据与青海省 2016~2020 年的 GDP 统计数据综合分析，构建了 GDP 空间化模型，揭示了青海省在这五年间 GDP 密度的空间分布情况。该模型在各市级行政区对 GDP 的模拟上准确度较高，有力地展示了青海省的经济分布和增长情况。青海省 GDP 空间化的像元值总体呈现上升趋势，尽管经济增长的速度相对缓慢，但该趋势仍反映了青海省经济的整体发展态势。从空间分布上看，青海省的 GDP 密度呈现出东部高于西部的趋势，而西南部地区的 GDP 密度相对较低。特别是西宁市和海东市这两个地区，经济活动明显集中，并以这两个地区为中心向周边地区逐渐呈放射状递减。西宁市作为青海省的省会和经济中心，具有较大的经济规模，其主城区的经济发展水平显著高于其他区域，这表明西宁市在青海省的经济中起着主导作用。这项研究结果为了解青海省经济格局的空间演变和各区域经济增长趋势提供了强有力的支持，对于未来的区域发展规划和政策制定具有重要参考价值。

4.2. 讨论

夜间灯光数据在区域经济研究中具有广泛的应用潜力。这些数据源于遥感观测，能够反映地表光照变化，间接呈现人类经济活动的空间分布和密度。以下是夜间灯光数据可能在区域经济研究中的一些应用：

① 经济活动评估：作为人类活动的指标之一，夜间灯光数据能提供区域内经济活动水平的评估。这种数据有助于了解经济活动的分布和密度，帮助评估城市化程度和经济发展情况。

② 城市规划与管理：夜间灯光数据可用于城市规划和资源管理。分析城市区域的灯光强度与分布有

助于确定城市扩张方向、城市规模及发展趋势，指导城市基础设施和资源的合理配置。

③ 区域经济比较分析：夜间灯光数据提供了不同地区经济活动的视觉指标，有利于区域之间的比较分析。比较不同地区的灯光密度和分布能揭示经济发展水平差异，促进区域间的合作和发展。

④ 经济增长趋势分析：夜间灯光数据可用于预测和分析经济增长趋势。通过长期监测灯光变化，可以发现经济增长的周期性和趋势性，为未来发展提供决策支持。

⑤ 灾害影响评估：灾害事件后，夜间灯光数据可以反映受灾区的恢复情况。通过对比前后灯光数据的变化，可评估自然灾害对经济的影响，指导灾后重建和恢复。

尽管夜间灯光数据在区域经济研究中有着巨大的潜力，但该数据仅是区域经济研究的辅助指标之一，还需结合其他经济指标和多种数据源进行综合分析，避免片面性结论或误判。同时，对数据的精确性和解释性也需要谨慎评估，确保研究的可信度和准确性。

参考文献

- [1] 柏茂杨, 唐斌. 基于 NPP-VIIRS 夜间灯光数据的成都市 GDP 空间化研究[J]. 测绘, 2020, 43(4): 147-151.
- [2] 黄莹, 黄友菊, 韦达铭, 等. 基于 NPP-VIIRS 夜间灯光数据的南宁市 GDP 空间化研究[J]. 南方国土资源, 2020(6): 41-44.
- [3] 李鹏, 洪浩霖. 基于 DMSP-OLS 灯光数据的广东省城市人口估算[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2015, 47(2): 102-107.
- [4] 李爽, 赵翠薇. 基于土地利用和 DMSP/OLS 夜间灯光数据的河南省人口空间化研究[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2019, 42(2): 9-15.
- [5] 李德仁, 李熙. 论夜光遥感数据挖掘[J]. 测绘学报, 2015, 44(6): 591-601.
- [6] 陈颖彪, 郑子豪, 吴志峰, 等. 夜间灯光遥感数据应用综述和展望[J]. 地理科学进展, 2019, 38(2): 205-223.
- [7] Elvidge, C.D., Baugh, K.E., Kihn, E.A., Kroehl, H.W., Davis, E.R. and Davis, C.W. (1997) Relation between Satellite Observed Visible-Near Infrared Emissions, Population, Economic Activity and Electric Power Consumption. *International Journal of Remote Sensing*, **18**, 1373-1379. <https://doi.org/10.1080/014311697218485>
- [8] 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.
- [9] Chen, S. and Hu, D. (2017) Parameterizing Anthropogenic Heat Flux with an Energy-Consumption Inventory and Multi-Source Remote Sensing Data. *Remote Sensing*, **9**, Article 1165. <https://doi.org/10.3390/rs9111165>
- [10] 江威, 何国金, 刘慧婵, 等. 利用 DMSP/OLS 夜间灯光影像模拟中国经济参量[J]. 遥感信息, 2018, 33(1): 29-35.
- [11] 许玲丽, 颜梅春. 多源信息多尺度视角的南京市街道级人口模拟研究[J]. 测绘通报, 2019(2): 71-75.
- [12] Elvidge, C.D., Ziskin, D., Baugh, K.E., Tuttle, B.T., Ghosh, T., Pack, D.W., Erwin, E.H. and Zhizhin, M.N. (2009) A Fifteen Year Record of Global Natural Gas Flaring Derived from Satellite Data. *Energies*, **2**, 595-622. <https://doi.org/10.3390/en20300595>
- [13] 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.
- [14] Shi, K., Yu, B., Huang, Y., Hu, Y., Yin, B., Chen, Z., Chen, L. and Wu, J. (2014) 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. *Remote Sensing*, **6**, 1705-1724. <https://doi.org/10.3390/rs6021705>
- [15] 王俊华, 张廷斌, 易桂花, 等. DMSP/OLS 夜间灯光数据的四川省 GDP 空间化分析[J]. 测绘科学, 2019, 44(8): 50-60.