引文格式:刘志洋,尹慧杰,李明渊,等.利用多源遥感数据的中国三大经济带代表区域经济发展分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2026,51(3):531-543.DOI:10.13203/j.whugis20240233

Citation:LIU Zhiyang,YIN Huijie,LI Mingyuan,et al.Analysis of Economic Development in Representative Regions of China's Three Major Economic Belts Using Multi-source Remote Sensing Data[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2026,51(3):531-543.DOI:10.13203/j.whugis20240233

利用多源遥感数据的中国三大经济带代表区域经济发展分析

刘志洋[1] 尹慧杰[2] 李明渊[2] 宗 福[2] 董燕妮[1]

1 武汉大学资源与环境科学学院,湖北 武汉,430079

2 中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院,湖北 武汉,430074

摘 要:对中国三大经济带的经济发展状况进行综合性分析,对于了解不同经济带间的经济发展差异、进行政策评估与制定、提升人民生活水平等有着重要意义。遥感影像可以从宏观尺度上提取区域内的土地利用、城市建设、发展活跃度等数据及空间分布信息,在区域经济研究中有着不可替代的作用。将多源遥感数据应用于三大经济带发展研究能够有效利用区域宏观特征,从不同方面探索整体发展特点。使用哨兵2号卫星数据、美国Suomi国家极轨伙伴卫星搭载的可见光红外成像辐射计获取的夜光数据及人口、国民生产总值数据,提取了能够反映区域经济发展状况的特征,并通过构建基于层次分析法的区域经济评分体系综合分析三大经济带中代表省份的经济发展状况,为了解三大经济带发展现状与差异提供有力的数据支撑。结果表明,3个研究时段内江苏省区域经济得分分别为0.660 5、0.706 1、0.767 1,湖北省得分分别为0.519 9、0.530 7、0.573 4,宁夏回族自治区得分分别为0.294 3、0.321 2、0.360 1。同时,综合其他数据发现,江苏省与湖北省经济发展基础扎实且整体持续向好,而以宁夏回族自治区为代表的西部经济带的经济发展状况仍旧落后于其他地区,但发展增速持续提升。将多源遥感数据和社会经济调查数据进行有效结合并应用于区域经济研究,能够为研究区域经济发展状况提供科学的方法参考。

关键词:区域经济;多源遥感数据;层次分析法;区域经济评分体系

中图分类号:P237 **文献标识码**:A **收稿日期**:2024-12-07

DOI:10.13203/j.whugis20240233 **文章编号**:1671-8860(2026)03-0531-13

Analysis of Economic Development in Representative Regions of China's Three Major Economic Belts Using Multi-source Remote Sensing Data

LIU Zhiyang[1] *YIN Huijie*[2] *LI Mingyuan*[2] *ZONG Fu*[2] *DONG Yanni*[1]

1 School of Resources and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 School of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China

Abstract: **Objectives**: China has formed three major economic belts according to regional resource condition, economic foundation, and development orientation, namely the eastern, central, and western economic belts. A comprehensive analysis of economic development across China's three major economic belts is essential. It helps reveal regional disparities, supports policy evaluation and formulation, and contributes to improvements in living standards. Traditional regional economic research mainly relies on socio-economic statistical data. Although effective, such data lack spatial continuity and fine-scale spatial representation. Remote sensing imagery can extract data and spatial distribution information on land use, urban construction, and development activity from a macroscopic perspective, playing an important role in regional economic research. However, current research still primarily uses the single data source, such as night-time light data, for economic development studies. The integration of multi-source remote sensing data with advanced feature extrac-

基金项目:国家自然科学基金(U2541203,62222116);应急管理部重点科技计划(2024EMST070706)。

第一作者:刘志洋,硕士生,主要从事遥感图像处理与智能解译等方面的研究。liuzhiyangreal@whu.edu.cn

通信作者:董燕妮,博士,教授。dongyanni@whu.edu.cn

tion methods provides new opportunities for comprehensive regional economic assessment. **Methods:** In response to the current lack of studies utilizing multi-source remote sensing data for regional economic analysis, a comprehensive evaluation and analysis method is proposed. This method employs Sentinel-2 data, NPP-VIIRS night-time light data, as well as population and gross domestic product (GDP) data, extracting features that reflect regional economic development from different perspectives. A vision transformer (ViT)-based semantic segmentation model is applied to Sentinel-2 imagery to generate detailed land use classification maps. The threshold method is also applied to extract built-up areas from night-time light data. Nine evaluation indicators are constructed by combining the results of multi-source remote sensing image extraction with GDP and population data. By constructing a regional economic scoring system based on the analytic hierarchy process, the method provides a comprehensive analysis of the economic development status of representative regions within economic belts. This approach offers strong data support for understanding the current state and disparities among the three major economic belts. **Results:** The results indicate that the regional economic scores for Jiangsu Province are 0.660 5, 0.706 1, and 0.767 1 across the three study periods, followed by Hubei Province with scores of 0.519 9, 0.530 7, and 0.573 4, and the Ningxia Hui Autonomous Region with scores of 0.294 3, 0.321 2, and 0.360 1, respectively. All three regions show consistent upward trends, reflecting overall improvement in regional development levels. Jiangsu Province maintains the highest score throughout the study period, showing strong economic vitality and a solid development foundation. Hubei Province demonstrates steady growth and structural stability, although a temporary slowdown is observed from 2020 to 2021, corresponding to the impact of the pandemic. However, subsequent data also show that Hubei Province recovers relatively quickly after the pandemic. In contrast, the Ningxia Hui Autonomous Region remains at a comparatively lower development level. Nevertheless, its economic score increases steadily, and its average growth rate ranks highest among the three regions, indicating strengthening development momentum within the western economic belt despite persistent structural disparities. **Conclusions:** The integration of multi-source remote sensing data and socio-economic indicators enhances the accuracy and spatial explicitness of regional economic evaluation. The combination of ViT-based land use classification, night-time light analysis, and a regional economic scoring system enables multi-temporal assessment of development disparities among economic belts. The results reflect structural differences consistent with regional development patterns and recent policy influences. This framework provides a scalable and data-driven reference for monitoring regional economic dynamics and supporting coordinated development planning.

Key words: regional economy; multi-source remote sensing data; analytic hierarchy process; regional economic scoring system

中国根据各地区的资源条件、经济基础、发展水平等划分出具有不同发展方式与方向的三大经济带,即东部经济带、中部经济带与西部经济带。由于三大经济带之间经济发展的起步时间、经济发展基础等不尽相同,因此研究区域经济发展状况对于了解不同地区之间的发展进程差异、提高国家与地方的经济实力、改善人民生活水平和制定更合理的区域发展策略等有着重要意义[1]。

传统的区域经济研究方法主要集中于使用社会与经济调查的统计数据进行不同方法的综合性分析,文献[2]以国内生产总值(gross domestic product, GDP)为评价指标,运用空间统计分析方法对2002—2008年成渝经济区经济发展结构的集聚状态进行了相关性分析;文献[3]使用辽宁省平均人口、固定资产投资、GDP等经济变量,运用收敛模型对辽宁省区域经济收敛过程进行检验;文献[4]选取社会行政、经济、地理区位和政策4个方面的15个影响因素,通过计算基尼系数、泰尔系数等对重庆市区域经济差异演变进行综合性分析。然而,仅使用调查统计数据的研究方法缺少宏观尺度上多源数据的介入与空间信息的考虑,难以充分揭示社会经济现象的空间差异性[5]。因此,结合使用各类遥感数据可以更全面地分析区域经济发展的空间格局和影响因素等,为政府决策和规划提供更科学的依据。

由于各项遥感技术的观测原理与技术路径存在差异,因此不同遥感数据在空间分辨率、光谱特征及信息表达能力等方面各具优势。目前,

遥感数据的获取技术已经向着多平台、多传感器、高时空分辨率等方向不断发展与成熟[6],且遥感数据具有覆盖范围大、现势性强、获取成本低廉、包含信息丰富等优势[7],因此能够为区域经济分析应用与研究提供有力的数据保障。

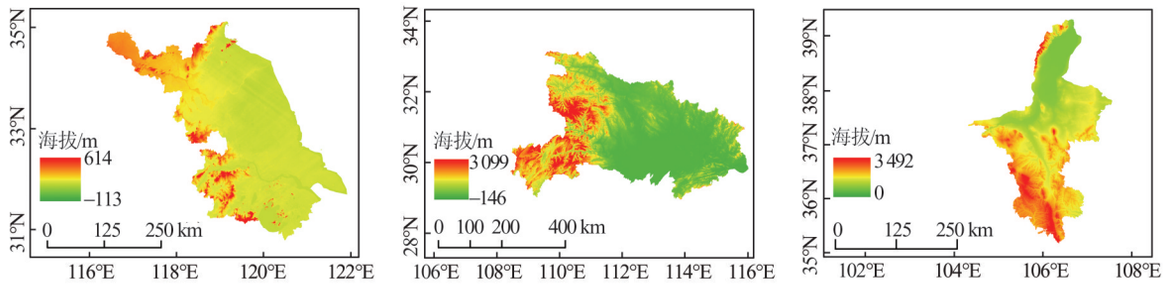
大量的研究表明,夜间灯光强度与地区生产总值等经济活动高度相关[8-10],因而目前区域经济发展的研究主要基于夜间灯光数据,并结合其他辅助数据进行分析。文献[11]使用年度月光校正后的美国航空航天局“黑大理石”夜间灯光产品VNP46A4和中国对中亚地区的援助信息数据建立计量经济模型来评估援助效果;文献[12]基于中国省级行政单元的夜间灯光亮度值与GDP数据建立了估算模型,并基于区域灯光总亮度分析了中国省级尺度上的经济发展水平;文献[13]使用美国Suomi国家极轨伙伴卫星(national polar-orbiting partnership, NPP)搭载的可见光红外成像辐射计(visible infrared imaging radiometer suite, VIIRS)获取的夜光数据(简称为NPP-VIIRS夜光数据)、兴趣点数据、社会经济统计数据等构建了综合夜间经济评价指数体系,有效地表征了城市夜间的经济活动水平。虽然上述研究改善了传统数据缺乏空间信息的弊端,但其数据源较为单一,缺乏对区域经济研究的精细化分析[14],没有充分发挥其他遥感数据所提取的特征(如土地利用面积等)在反映区域经济发展现状方面的优势[15-16]。在遥感数据来源增加与应用深入的过程中,多源遥感数据已被频繁应用于各领域的研究中。文献[17]利用陆地卫星多谱段扫描仪影像、Landsat 5卫星搭载的专题成像仪影像、灾害监测星座数据和“北京一号”小卫星数据进行土地利用分类,对1973—2005年北京市建成区变化情况进行了多方面监测与分析;文献[18]基于气象、土壤数据和中分辨率成像光谱仪多源遥感数据构建了适用于淮河流域的多源综合遥感干旱监测模型,研究了淮河流域干旱的时空规律。然而目前研究仍较少直接应用多源遥感数据提取的特征信息进行区域经济分析,因此,本文以三大经济带的东部经济带代表省份江苏省、中部经济带代表省份湖北省、西部经济带代表省份宁夏回族自治区为研究区,选取了2018—2019年、2020—2021年、2022—2023年3个时段,基于哨兵2号(Sentinel-2)数据、NPP-VIIRS夜光数据、人口数据和GDP数据,使用基于视觉转换器(vision transformer, ViT)[19]的图像语义分割模型提取研究区土地利用分类结果,并通过阈值法提取出建成区的空间分布范围,结合能够反映区域经济发展不同方面的特征信息,构建了基于层次分析法的区域经济评分体系,综合分析了三大经济带代表省份的经济发展状况。同时,本文将多源遥感数据和社会经济调查数据进行有效结合,并应用于区域经济发展研究,能够为研究中国三大经济带及其他区域的经济发展状况提供更科学、更全面的数据支撑和方法参考。

1　研究区概况与数据源

1.1　研究区概况

中国的三大经济带,即东部经济带、中部经济带和西部经济带,分别代表了中国不同区域的经济发展水平和特点。这三大经济带在基础设施、自然资源和产业结构等方面各具特色,但随着中国经济转型程度不断加深,三大经济带发展不平衡的问题面临着新的挑战[20]。为了研究三大经济带区域经济的发展状况,本文在每个经济带选取了一个代表地区进行研究,分别是东部经济带的江苏省、中部经济带的湖北省和西部经济带的宁夏回族自治区,研究区概况如图1所示。这3个地区分别代表了各自经济带的经济发展特点和趋势,通过分析它们的经济发展状况,可以更加深入地了解三大经济带的整体经济发展情况。

以江苏省为代表的东部经济带有着温和的气候条件和便利的外贸条件,其传统工业基础雄厚,工业结构不断优化升级,同时也在积极发展并推广高新技术产业。这里不仅是中国经济最发达的地区,也是人口密度较大、资源消耗较大的区域。以湖北省为代表的中部经济带有着丰富的矿产资源和便利的交通条件,整体经济呈现过渡性,既有传统工业的基础,也在积极发展新兴产业和现代服务业,是推动中国经济重心向西转移的重要枢纽。然而,这里也面临着产业结构不合理、创新能力不足以及资源利用效率不高等问题。以宁夏回族自治区为代表的西部经济带,有着辽阔的地域和丰富的自然资源,然而由于交通条件不够完善、人口密度较低等因素的限制,西部经济带发展相对滞后。但该地区积极因地制宜开发矿产、发展能源及加工工业,同时大力发展边境和对外贸易,具有深厚的发展潜力。总之,江苏省、湖北省和宁夏回族自治区作为各自经济带的代表地区,分别体现了中国不同区域的地区背景、经济特点和发展趋势。选取的3个地区在研究时段内(2018—2023年)的GDP与人口变化情况如图2所示。



(a) 江苏省 (b) 湖北省 (c) 宁夏回族自治区

注:地图底图来源于天地图,行政界线无修改。

图1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the Study Area

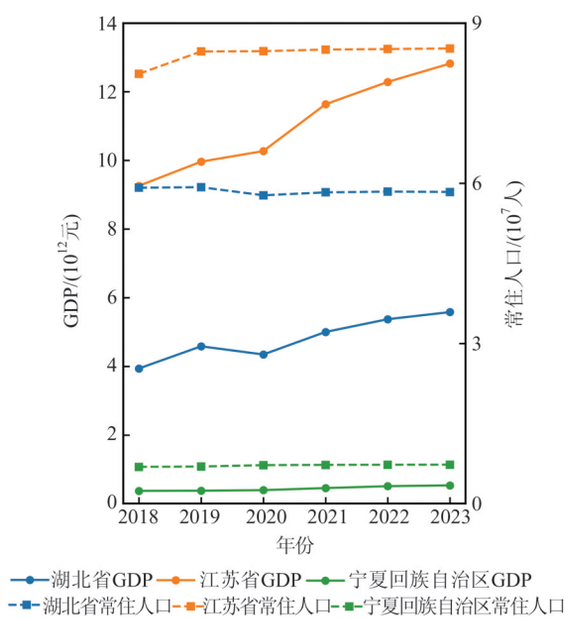


图2 研究区GDP与常住人口数对比

Fig. 2 Comparison of GDP and Permanent Resident Population in the Study Area

1.2 数据源

本文通过谷歌地球引擎平台获取研究区2018—2019年、2020—2021年及2022—2023年3个时段经过去云等处理的协调化Sentinel-2多光谱成像仪(multispectral instrument, MSI)2A级数据,以及经过校正和消除了人造光源杂散光干扰的VIIRS昼夜波段杂散光校正夜间合成数据。在此基础上,结合各年度的GDP和人口数据进行多源、多时相的区域经济分析研究。Sentinel-2 MSI数据提供了高分辨率的地表影像,有助于监测土地覆盖和土地利用变化,而夜间灯光数据则反映了人类活动强度和城市化水平。综合这些数据能够全面分析研究区内的经济发展状况,为研究区域经济发展提供科学依据。

1)Sentinel-2 MSI数据

Sentinel-2卫星是欧洲空间局的哥白尼计划中的关键组成部分,它携带的MSI能够捕捉13个波段的高分辨率影像,覆盖290 km的幅宽并具备5 d的重访周期。这些特点使得Sentinel-2在陆地监测方面发挥着重要作用,能够提供有关植被、土壤和水覆盖的详细信息,同时在内陆水系及海岸区域的影像监测上也具备显著优势,因此能够为农业监测、森林资源管理、土地覆盖变化监测、灾害评估等提供丰富的数据支持,也可为生态环境保护和资源管理提供科学依据。

2)NPP-VIIRS夜间灯光数据

NPP-VIIRS夜间灯光数据可直观反映人类活动的空间分布及活动强度,因此在分析城市发展、评估生态环境以及预测各类空间参数等多个领域中发挥着关键作用。本文所使用的夜间灯光数据来源于Suomi NPP,该卫星作为新一代地球观测平台,自2011年起在轨运行并装备了VIIRS。VIIRS所获取数据的日/夜波段具有750 m的地面分辨率,并且以月为单位进行合成,能够精确地映射夜间光照辐射水平。同时,NPP-VIIRS的白夜波段由于在低光条件下具有很高的灵敏度,因而可以更好地监测夜间现象和人为光源的量级和特征[21],这些数据在评估城市扩展、区域活跃度等方面具有重要意义。

3)GDP与人口数据

社会经济调查统计数据对于政府决策、科学研究等具有重要价值[22],而GDP和人口数据是评估一个地区经济和社会发展状况的重要指标,因此本文选取GDP和人口数据作为辅助数据,用于构建基于层次分析法的区域经济评分体系。本文所用GDP与人口数据均来源于国家统计局公布的各城市不同年份的统计年鉴,这些数据不仅能够反映经济发展的现状和变化趋势,还能帮助理解区域发展的不均衡性和潜在问题,从而为制定区域经济政策提供科学依据。

1.3　实验数据集

为了使图像语义分割模型更好地适用于不同区域,分别对江苏省、湖北省、宁夏回族自治区制作3个初始数据集,其中每个数据集都包含3个时段的标注影像和原始影像。由于模型输入为224×224×3的PNG图片,因此需要对初始数据集中的影像进行分割处理,最终得到包含10 000张标注图与10 000张原始影像的数据集。

2　研究方法

区域经济状况的反映不是依赖于单一的指标,而是受多种因素的共同影响,这些因素包括但不限于GDP、人口数、工业产值、建成区面积、生态环境质量等。由于这些因素的多样性和复杂性,单一的数据源往往无法全面反映区域经济发展的全貌。因此,本文提出了一种利用多源遥感数据评估与分析区域经济发展状况的研究方法,具体流程如图3所示。该方法首先对获取的多源遥感数据、GDP数据和人口数据进行预处理;其次,分别使用阈值法和基于ViT的语义分割模型从不同方面提取反映区域经济发展状况的特征信息;然后,综合特征信息计算土地利用动态度,并构建基于层次分析法的区域经济评分体系,从而得到评分结果;最后,结合各区域不同时段的区域经济得分、土地利用动态度及建成区与土地利用分布,综合评估与分析三大经济带代表省份的经济发展现状。

2.1　基于ViT的语义分割模型

本文所使用的图像语义分割模型的主干网络为谷歌团队提出的用于图像分类的ViT模型。传统的ViT模型主要由3个部分组成,分别是图像嵌入层、Transformer编码器和多层感知机(multi-layer perceptron, MLP)分类头。首先,输入图片$X\in\mathbf{R}^{H\times W\times C}$会在图像嵌入层中进行分块处理,得到$\frac{H}{h}\times\frac{W}{w}\times C$个$\mathbf{R}^{h\times w}$的小块,其中$H$、$W$、$C$分别为输入图片的高度、宽度和通道数,$h$、$w$分别为小块的高度和宽度。每个小块会被展平成一维向量,并通过线性映射转换为标记,同时为了保留位置信息和表示图像整体的类别,需要为标记加上位置编码和类别标记。然后,标记序列被传入Transformer编码器,逐层处理以提取图像特征。最终,只有包含类别信息的类别标记会被送入MLP分类头,将提取出的图像特征转换为最终的输出类别向量。

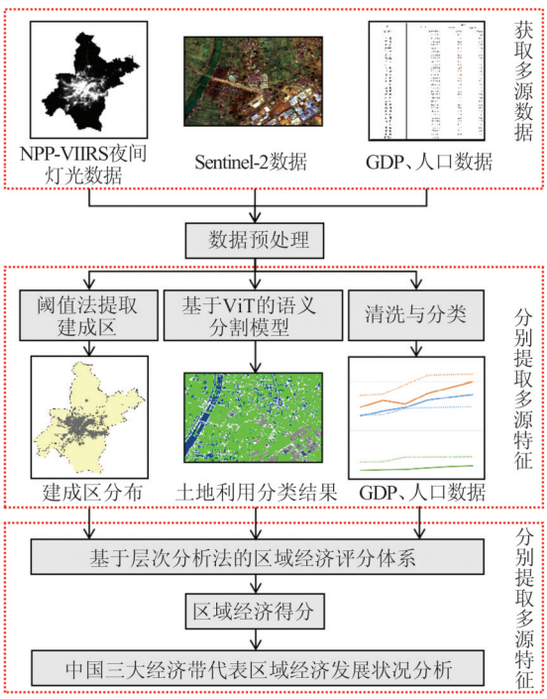


图3　基于多源遥感数据的区域经济发展状况分析流程

Fig. 3　Flowchart of Regional Economic Development Analysis Based on Multi-source Remote Sensing Data

由于ViT模型是被设计用于解决图像分类任务的,因此单纯地使用ViT模型无法进行像素级的遥感影像语义分割。但由于输入的原始影像在经过ViT模型中的图像嵌入层和Transformer编码器后会被提取为影像的特征向量,根据文献[23]的研究,在Transformer编码器后添加一个输出特征向量的函数,并将该函数的输出作为图像语义分割模型的输入,在经过一系列卷积、上采样、归一化操作后即可得到一个与输入图像大小相同的分割结果,且每个像素都被赋予一个类别标签,通过对不同类别的像素进行可视化即可得到分类结果,具体的模型架构如图4所示。本文将研究区各时段内的遥感影像分块作为模型输入,设定类别为人工建设区、水体和其他地类,经过模型处理可以输出对应的土地利用分类结果。

2.2　基于层次分析法的区域经济评分体系

层次分析法是一种多准则决策方法,首先将问题分解为多个层次和标准,然后通过定量和定性的方式对这些标准进行比较,最终得出一个权重排序,用于帮助做出决策,其主要步骤包括:(1)将复杂系统分解成逐层结构模型;(2)对同一层次的因素进行两两比较评分以确定相对重要性,并建立判断矩阵以获取各因素的权重;(3)综合各层次因素的权重以计算出相对于总目标的重要程度。

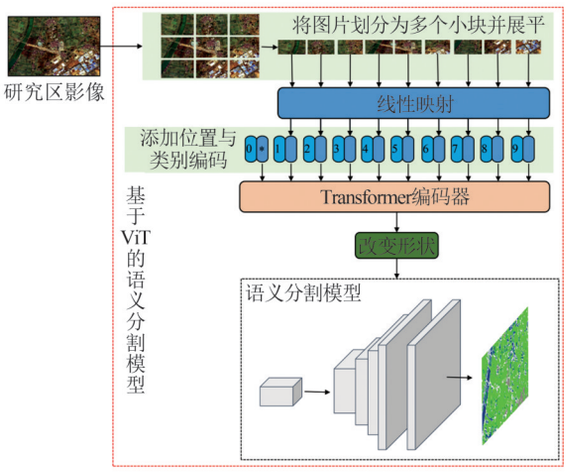


图4 基于ViT的语义分割模型

Fig. 4 Semantic Segmentation Model Based on the ViT

由于区域经济评价指标体系的构建需要遵循系统性、全面性、层次性及可行性原则,因此通过查阅相关文献与研究[24-26],本文确定将土地利用情况、土地利用结构和人口经济作为准则层的关键因素,选取人工建设区使用效率、建成区密度、人工建设区覆盖率、人工建设区占比、水体面积占比、其他面积占比、人均居住用地面积、区域经济密度和人口增长率作为执行层的评价指标,如表1所示。本文所选指标均可由多源遥感数据处理得到的土地利用分类结果、建成区提取结果和其他统计数据计算得到,涵盖了区域经济发展的关键方面,为建立综合的经济评分体系奠定了基础。

表1 区域经济评价指标体系的构建及各项指标含义

Table 1 Construction of the Regional Economic Evaluation Index System and the Meaning of Each Index

目标层	准则层	执行层	指标含义
区域经济发展A	土地利用情况B_1	人工建设区使用效率X_{11}	建成区面积与人工建设区面积的比例,反映建设用地利用的效率和城市建设的紧凑程度
		建成区密度X_{12}	建成区面积占总面积的比例,反映区域的开发程度和城市化水平
		人工建设区覆盖率X_{13}	人工建设区面积与地面总面积的比值,反映区域建设程度与发展水平
	土地利用结构B_2	人工建设区占比X_{21}	人工建设区占总面积的比例,反映土地利用结构的合理性
		水体面积占比X_{22}	水体面积占总面积的比例,反映城市的生态健康
		其他面积占比X_{23}	其他面积占总面积的比例,反映城市可持续发展意识
	人口经济B_3	人均居住用地面积X_{31}	建成区面积与人口数量的比例,反映区域建设规模和人口密度
		区域经济密度X_{32}	GDP数据与建成区面积的比例,反映单位面积的经济产出能力
		人口增长率X_{33}	根据两个时间点的人口数据计算人口增长率,反映城市人口增长速度

根据重要性分值表(见表2)为同一层次内的各项指标赋予重要性分值,由此建立起判断矩阵并进行权重的计算和一致性检验。

表2 重要性分值表

Table 2 Importance Scores

定义(a_{ij})	标准分值
i元素比j元素绝对重要	9
i元素比j元素重要得多	7
i元素比j元素重要	5
i元素比j元素稍微重要	3
i元素比j元素一样重要	1
i元素比j元素的重要性介于上述两个相邻之间	2,4,6,8

一致性检验是指对矩阵确定不一致的允许范围,检验权重分配的合理性[27]。为了对q阶判断矩阵$\boldsymbol{A}=(a_{i,j})_{q\times q}$进行一致性检验,可以采用特征值法求解最大特征值$\lambda_{\max}$及其对应的特征向量$\bar{\boldsymbol{w}}=[\bar{w}_1\quad\bar{w}_2\quad\cdots\quad\bar{w}_i]^{\mathrm{T}}$,其中,$\bar{w}_i$为特征向量$\bar{\boldsymbol{w}}$的分量,$i=1,2,\cdots,q$,计算公式为:

$$\boldsymbol{A}\bar{\boldsymbol{w}}=\lambda_{\max}\bar{\boldsymbol{w}} \tag{1}$$

再通过归一化处理得到评估权重w_i,计算公式为:

$$w_i=\frac{\bar{w}_i}{\sum_{i=1}^{q}\bar{w}_i} \tag{2}$$

在得到$\lambda_{\max}$及权重w_i后,可计算一致性指标(consistency index, CI)Z_{CI}进行一致性检验,计算公式为:

$$Z_{\mathrm{CI}}=\frac{\lambda_{\max}-q}{q-1} \tag{3}$$

平均随机一致性指标(average random consistency index, RI)Z_{RI}如表3所示。由表3查找RI,可计算一致性比率(consistency ratio, CR)Z_{CR},计算公式为:

$$Z_{\mathrm{CR}}=\frac{Z_{\mathrm{CI}}}{Z_{\mathrm{RI}}} \tag{4}$$

当$Z_{\mathrm{CR}}<0.1$时,判断矩阵的一致性达到了要求,否则重新进行判断,写出新的判断矩阵。

为获得层次目标中每一指标或评价方案的相对权重,必须进行各层次的综合计算。对某一

表 3　RI

Table 3　RI

阶数	RI	阶数	RI	阶数	RI
1	0.00	4	0.90	7	1.32
2	0.00	5	1.12	8	1.41
3	0.58	6	1.24	9	1.45

评价方案的某一评价指标而言,设各层次评价的相对权重分别为 W_1、W_2、W_3、W_4,则该评价指标的相对权重为 $W(i)=W_1\times W_2\times W_3\times W_4$。

在得到各指标权重值后,将区域经济评价指标按积分细则转化为评分体系,能够为进一步量化区域经济发展状况提供客观的数据支撑[28]。

2.3　土地利用动态度

土地利用动态度能够体现出某区域某一时段内土地利用状况的变化与发展趋势,客观分析该区域土地资源利用方式、土地利用结构与环境、经济等方面的相互作用。土地利用动态度可以分为单一土地利用动态度和综合土地利用动态度,前者可用于反映特定地类变化对区域经济发展等方面的影响,后者通过综合度量一定时期内人类活动对土地开发利用程度的影响,定量评估土地利用结构的变化[29],并结合当地实际发展状况辅助分析当地发展方向与趋势。单一土地利用动态度和综合土地利用动态度的计算公式分别为:

$$K=\frac{U_{i,t_0}-U_{i,t_1}}{U_{i,t_0}}\times\frac{1}{t_1-t_0}\times 100\% \tag{5}$$

$$L=\frac{\sum_{i=1}^{n}|U_{i,t_0}-U_{i,t_1}|}{\sum_{i=1}^{n}U_{i,t_0}}\times\frac{1}{t_1-t_0}\times 100\% \tag{6}$$

式中,K为某地类i单一土地利用动态度;L为研究区的综合土地利用动态度;U_{i,t_0}为地类i的初期面积;U_{i,t_1}为地类i的末期面积;t_0为研究的初期时间;t_1为研究的末期时间;n为土地利用类型的数量。

3　区域经济发展评分实验与分析

3.1　土地利用分类与建成区提取

3.1.1　实验环境

该实验模型的架构为PyTorch,CUDA的版本为12.2,所用图形处理单元为NVIDIA GeForce RTX 3090,内存为25 GB,模型训练次数为8 000次。

3.1.2　模型性能评价指标

采用Dice系数和交叉熵作为遥感影像语义分割结果的评价指标。Dice系数常用于医学领域的影像分割评价,定义为预测区域与真实区域重叠程度的比值,能够衡量样本之间的相似度。Dice系数的取值为[0,1],系数越靠近1,表示分割效果越好[30],其计算公式为:

$$X_{\text{Dice}}=\frac{2\times|T_{\text{predict}}\cap T_{\text{true}}|}{|T_{\text{predict}}|+|T_{\text{true}}|} \tag{7}$$

式中,T_{predict}表示分割结果的像素集合;T_{true}表示真实标注的像素集合;$|\ |$表示集合的基数,即集合中像素的数量。在实际的语义分割任务中,一般将分割结果表示为矩阵,则$|T_{\text{predict}}\cap T_{\text{true}}|$可以近似地通过计算两个矩阵的点积得到。

交叉熵在深度学习模型中常用于衡量模型输出的概率分布与真实标签之间的差异,计算公式为:

$$H(P,Q)=-\sum_{x}P(x)\lg Q(x) \tag{8}$$

式中,$P(x)$为真实值的概率分布;$Q(x)$为预测值的概率分布。交叉熵越小,表示两个概率分布越接近,即模型的预测结果与真实结果之间的差异越小。

3.1.3　土地利用分类与建成区提取结果

将宁夏回族自治区数据集中的一幅遥感影像分割成224×224×3的子图作为测试集,使用基于ViT的图像语义分割模型提取人工建设区(包括各类人工建筑物及道路)、水体和其他地类(如耕地、植被、荒地等),在8 000次的训练中该模型的性能如表4所示。

表 4　不同训练次数下的模型性能

Table 4　Model Performance at Different Training Iterations

训练次数/次	损失值	Dice系数
1 000	0.149 0	0.783 6
2 000	0.093 3	0.871 5
3 000	0.058 7	0.842 8
4 000	0.045 9	0.887 7
5 000	0.029 1	0.875 2
6 000	0.049 0	0.875 1
7 000	0.029 1	0.883 9
8 000	0.021 9	0.882 4

根据表4综合考虑损失值和Dice系数,本文选择使用训练8 000次的模型对输入进行分割。由于模型分割时会将输入划分为多个224×224×3的子图,在分割结束后需要再次拼接回原图大小。

基于ViT的图像语义分割模型所提取到的人工建设区分布涵盖了各种人类工程活动,涉及较广,而建成区是城市内已实现开发建设的城市化发展较为成熟的区域,因此获取到建成区面积与分布状况不仅可以验证模型分类结果的真实

性,也可以结合人工建设区分布情况分析研究区的城市化演变进程。由于夜间灯光数据能够反映区域内人类活动的生产、生活活跃度,可以基于夜间灯光数据提取研究区内的建成区分布。目前,基于夜间灯光数据的建成区提取方法主要可以分为目视解译法和阈值法,前者需要具备相关经验的专家根据夜光数据及其他参考对建成区进行人工提取,后者可以通过设定灯光亮度阈值来快速、精确地提取建成区分布。因此,本文在收集到研究区当地发布的建成区面积统计数据后,针对不同研究区不同时段设置灯光亮度阈值来提取研究区内的建成区分布状况。

将土地利用分类数据与建成区分布数据叠加可以直观反映研究区域内建成区在人工建设区内的空间分布特点,同时由于夜间灯光数据包含着人口、交通等活跃程度及经济发展信息[31],因此建成区也可以表示为夜间活跃程度较高的区域,能够反映研究区内的经济分布。将土地利用分类结果与建成区提取结果进行叠加可得到建成区分布图,如图5所示。

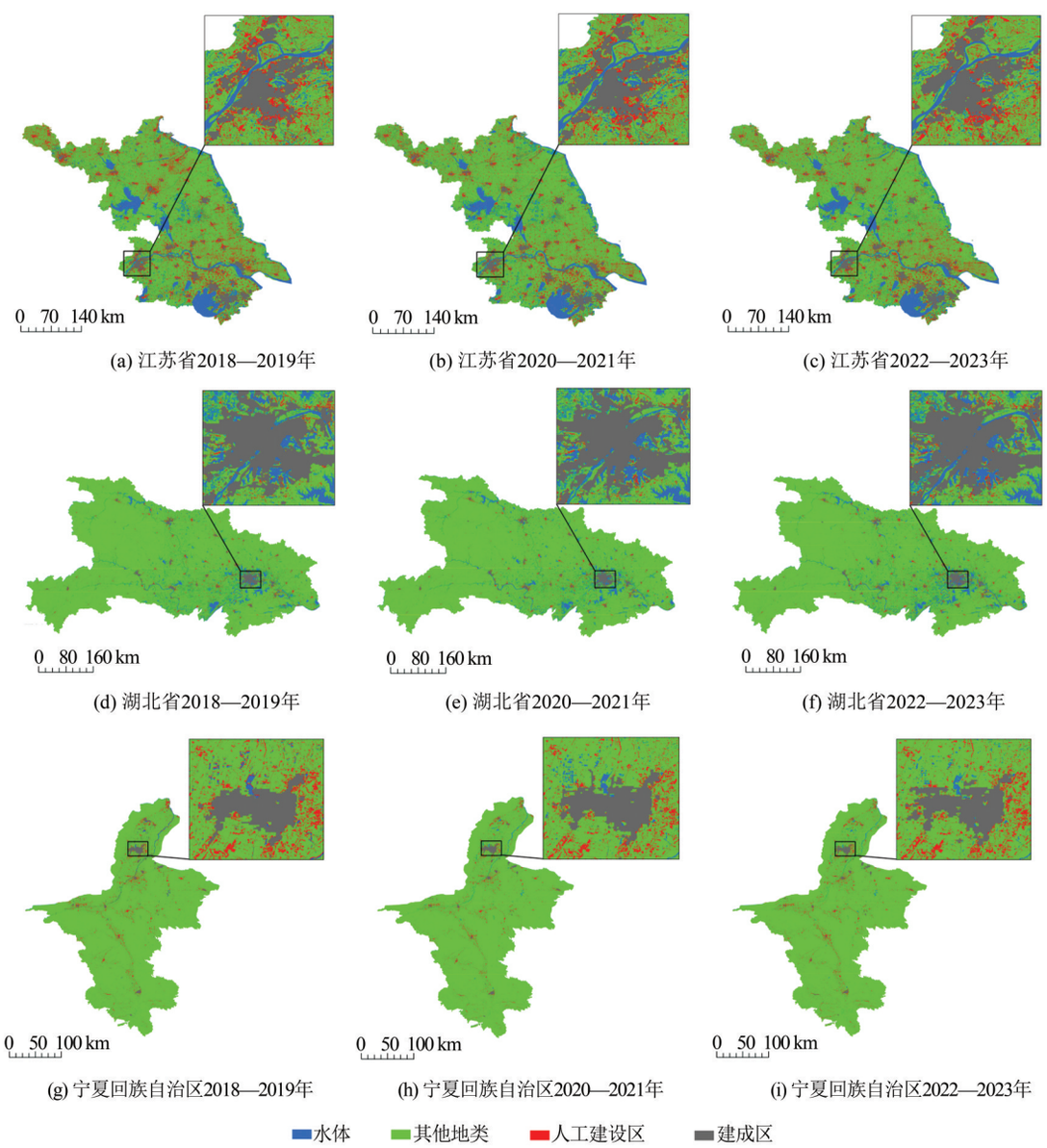


图5 研究区建成区分布

Fig. 5 Distribution of Built-up Areas in the Study Area

由图5可知,研究区内建成区基本分布在人工建设区大面积分布的中心区域,这较好地符合了建成区的定义,也能反映出人工建设区向建成区转变的城市发展轨迹。可以发现,由于长江是中国重要的水道之一,江苏省和湖北省建成区多集中在长江两岸,在充分发挥航运优势的同时,

积极响应了国家长江经济带发展政策。同时,江苏省全域内人工建设区分布最为为广泛,建成区中心遍布全省,表现出更为综合、全面与先进的城市发展现状。宁夏回族自治区的建成区主要分布在黄河北岸,结合当地实际环境状况分析出黄河两侧,尤其是北岸附近的自然环境更加适宜城市的建设与发展。在研究时段内,各区域建成区稳定地从城市中心扩张,且总体上分布在水体附近。

使用 ArcGIS 软件对各研究区 3 个时段各地类面积及提取得到的建成区面积进行统计,结果如表 5 所示。

表 5　研究区地类面积统计/km^2

Table 5　Statistic of Land Cover Area in the Study Area/km^2

研究区	时段	人工建设区	水体	其他地类	建成区
江苏省	2018—2019 年	21 555.68	13 525.49	72 118.83	4 603.39
	2020—2021 年	19 799.19	14 151.37	73 249.43	4 822.21
	2022—2023 年	20 409.57	13 412.21	73 378.22	4 916.17
湖北省	2018—2019 年	10 847.02	9 571.30	165 481.68	2 585.36
	2020—2021 年	10 104.58	9 513.56	166 281.85	2 772.35
	2022—2023 年	11 531.48	10 103.88	164 264.64	2 866.18
宁夏回族自治区	2018—2019 年	3 499.70	581.63	62 318.67	485.52
	2020—2021 年	3 165.11	571.58	62 663.31	494.78
	2022—2023 年	3 692.31	521.62	62 186.08	485.66

由表 5 可知,江苏省和湖北省的建成区面积都呈上升趋势且增加显著,说明两省城市化和建设发展较快;而宁夏回族自治区的建成区面积则在 2022—2023 年下降且总体变化不大,这可能受当地经济发展和地区环境等的影响。同时,3 个地区人工建设区面积均在 2020—2021 年下降,后在 2022—2023 年上升,这可能是因为 2019 年底大量在建或已建建筑被拆除成为未利用的荒地,这在其他地类面积中也有所体现。

3.2　区域经济评分体系结果

各层次结构的判断矩阵和指标权重计算结果见表 6～表 9。

表 6　*A*-*B* 判断矩阵

Table 6　*A*-*B* Judgment Matrix

A 中指标	B_1	B_2	B_3	评估权重
B_1	1	3	5	0.627
B_2	1/3	1	4	0.280
B_3	1/5	1/4	1	0.094

由式(1)～式(4)可分别计算出表 6 的 λ_{max} 约为 3.086,$Z_{CR}\approx0.074<0.1$;表 7 的 λ_{max} 约为 3.009,$Z_{CR}\approx0.008<0.1$;表 8 的 λ_{max} 约为 3.086,$Z_{CR}\approx0.074<0.1$;表 9 的 λ_{max} 约为 3.086,$Z_{CR}\approx0.074<0.1$,均通过一次性检验。

表 7　B_1-X 判断矩阵

Table 7　B_1-X Judgment Matrix

B_1 中指标	X_{11}	X_{12}	X_{13}	评估权重
X_{11}	1	3	2	0.540
X_{12}	1/3	1	1/2	0.163
X_{13}	1/2	2	1	0.297

表 8　B_2-X 判断矩阵

Table 8　B_2-X Judgment Matrix

B_2 中指标	X_{21}	X_{22}	X_{23}	评估权重
X_{21}	1	3	5	0.627
X_{22}	1/3	1	4	0.280
X_{23}	1/5	1/4	1	0.094

表 9　B_3-X 判断矩阵

Table 9　B_3-X Judgment Matrix

B_3 中指标	X_{31}	X_{32}	X_{33}	评估权重
X_{31}	1	4	5	0.674
X_{32}	1/4	1	3	0.226
X_{33}	1/5	1/3	1	0.101

将执行层指标权重与所属准则层权重相乘得到各指标权重值,最终得到区域经济评价体系 Z,计算公式为:

$$Z=0.338\,58X_{11}+0.102\,20X_{12}+0.186\,22X_{13}+0.175\,56X_{21}+0.078\,40X_{22}+0.026\,32X_{23}+0.063\,36X_{31}+0.021\,24X_{32}+0.009\,50X_{33} \tag{9}$$

根据实验结果数据和各地政府年鉴数据可以计算出各研究区各时段的得分,结果如表 10 所示。

根据区域经济评分体系,研究区某时段得分越高,说明其在该时段内经济发展状况越好。由表 10 可知,总体上江苏省得分最高,平均得分可达 0.711 2,湖北省得分略低于江苏省,而宁夏

表10 研究区各时段得分

Table 10 Scores of the Study Area in Each Period

研究区	时段	得分	2018—2019年至2020—2021年得分增长率/%	2020—2021年至2022—2023年得分增长率/%	平均得分
江苏省	2018—2019年	0.660 5	6.903 9	8.639 0	0.711 2
	2020—2021年	0.706 1			
	2022—2023年	0.767 1			
湖北省	2018—2019年	0.519 9	2.077 3	8.046 0	0.541 3
	2020—2021年	0.530 7			
	2022—2023年	0.573 4			
宁夏回族自治区	2018—2019年	0.294 3	9.140 3	12.110 8	0.325 2
	2020—2021年	0.321 2			
	2022—2023年	0.360 1			

回族自治区得分最低,仅0.325 2,这反映出江苏省和湖北省所在的东部经济带与中部经济带由于具有先进的科技、发达的交通、密集的人口等优势而在经济发展状况方面较大幅度地超过宁夏回族自治区所在的西部地区。通过3个研究区不同时段的纵向对比可以看出,3个研究区的经济发展状况都是逐年向好的,其中宁夏回族自治区得分平均增长率最高,达到了约10.63%,这也表明了宁夏回族自治区在国家西部大开发的战略支持下,近年来迅速崛起,迎来了快速发展的黄金期。同时,湖北省2018—2019年至2020—2021年的得分增长率相对于2020—2021年至2022—2023年的得分增长率降低了约5.97%,可能是因为2019年底的突发公共卫生事件对武汉市及周边的各产业影响巨大,因此造成了一段时间的经济发展暂时放缓。

3.3 土地利用动态度结果

分别计算3个研究区域的单一土地利用动态度和综合土地利用动态度,结果如表11所示。

表11 研究区各时段的土地利用动态度/%

Table 11 Land Use Dynamic Degree of the Study Area in Each Period/%

研究区	时段	单一土地利用动态度				综合土地利用动态度
		人工建设区	水体	其他地类	建成区	
江苏省	2018—2019年至2020—2021年	−4.44	2.21	0.77	2.27	1.64
	2020—2021年至2022—2023年	1.50	−2.76	0.09	0.96	0.69
湖北省	2018—2019年至2020—2021年	−3.67	−0.30	0.24	3.37	0.43
	2020—2021年至2022—2023年	6.19	2.92	−0.61	1.64	1.09
宁夏回族自治区	2018—2019年至2020—2021年	−5.29	−0.88	0.27	0.94	0.52
	2020—2021年至2022—2023年	7.14	−4.79	−0.38	−0.94	0.79

由表11可知,各研究区2018—2019年至2020—2021年人工建设区的单一土地利用动态度均为负值,这可能是因为2019年底至2022年的突发公共卫生事件使得大量已建或在建建筑闲置、荒废或被拆除,表现为人工建设区面积的减少。宁夏回族自治区水体的单一土地利用动态度始终为负值,这说明了研究区内水体面积的持续减少,可能不利于区域内的可持续发展。

由综合土地利用动态度可知,江苏省的土地结构变化程度最为显著,其综合土地利用动态度最高达到了1.64%。同时可以发现,3个研究区的综合土地利用动态度均为正值,这反映了在城市建设与经济发展的过程中,人类活动对于区域土地结构的显著影响。

3.4 区域经济发展状况综合分析

综合土地利用分类结果、建成区分布、区域经济评分及土地利用动态度可以对研究区进行时序上的纵向对比与各研究区之间的横向对比,从而反映各研究区在过去几年内的经济发展状况及各研究区所代表的不同经济带之间的发展差异。

总体上来说,江苏省建成区面积持续增加,从4 603.39 km^2增加至4 916.17 km^2,人工建设区面积虽然在2020—2021年有所减少,但总体仍保持在3个研究区前列。人工建设区呈现出沿长江两岸逐渐密集发展的趋势,经济发展评分由0.660 5持续上升至0.767 1,城市化进程持续稳步推进,

经济活跃程度不断提升。但江苏省在研究时段内水体面积的小幅减少在一定程度上反映了城市建设过程中对于水资源的利用与改造。同时,江苏省综合土地利用动态度平均值达到1.165%,在3个区域中最高,反映了其城市建设与经济发展对于土地结构的改变程度较高,因此需要结合当地资源状况综合考虑区域发展、产业布局等方面,从而长久性地稳定提高区域经济。

从湖北省近年的各项数据可以发现,作为受2019年底突发公共卫生事件影响的主要省份,其各产业发展与城市建设等较长时间停摆,部分建筑或工地等被拆除或成为荒地,这表现为湖北省在2020—2021年间人工建设区面积减少、区域经济发展增速放缓及城市活跃程度降低。但从整体上来看,湖北省建成区面积在2018—2019年、2020—2021年、2022—2023年3个研究时段内分别为2 585.36 km^2、2 772.35 km^2和2 866.18 km^2,经济评分分别为0.519 9、0.530 7和0.573 4,区域经济发展结构稳固,受影响有限且经济恢复较快,仍旧处于向好的发展趋势。2023年后,湖北省区域建设与经济发展工作逐步恢复常态化推进。

相较于江苏省与湖北省的经济发展状况,宁夏回族自治区在多数指标数据上都表现得不够亮眼,这与其所处西部地区的经济建设条件与基础有关。但近年来国家愈发重视西部地区的发展,结合各项区域经济支撑政策,宁夏回族自治区大力推进产业升级、科技创新等,在拥有较多土地资源的条件下因地制宜大力发展经济,表现为近年持续向好的经济发展状况,经济评分的平均增长率以10.63%位居3个研究区域首位。未来,宁夏回族自治区应当继续发挥自身优势,行驶在经济发展的快车道,积极响应国家经济重心西移的战略要求,促进同国内各区域的协调发展。

本文所选的3个研究区的经济发展状况在一定程度上可以反映其所处的东部经济带、中部经济带及西部经济带的发展状况。具有便利海运、工业基础及早期政策优势的东部经济带经济基础较高,经济评分起点在0.660 5,同时得益于其迅速发展的开放性经济,区域内经济稳健增长,评分增长率保持高位,平均在7.77%左右。中部经济带地处中国的内陆腹地,交通运输便利,资源丰富且开发程度较高,农业和工业等发展水平处于全国前列,整体上经济发展状况与东部经济带基本相近,近年来不断加强与东部、西部地区的交流与运输建设,在持续推进经济发展的同时成为中国经济布局从东向西转移的重要枢纽。西部经济带虽然在经济、城市建设、交通运输等方面有待完善,但随着国家经济发展重心的西移与该区域丰富的自然资源条件等的支持,以宁夏回族自治区为代表的西部经济带不断推进城市化建设,积极发展对外贸易,经济增速持续提高,区域内发展稳步向好。

总而言之,3个研究区作为各自经济带的代表地区,分别体现了中国不同区域的经济特点和发展趋势。在推动中国经济持续健康发展的过程中,需要充分发挥各地区的优势和潜力,加强区域合作与协调发展,共同推动中国经济实现高质量发展。

4　结　语

本文选取了三大经济带的代表地区江苏省、湖北省、宁夏回族自治区作为研究区,通过基于ViT的图像语义分割模型得到了各区域2018—2019年、2020—2021年、2022—2023年的土地利用分类结果,并使用夜间灯光数据提取了建成区分布,通过对所得结果进行有关区域经济发展的分析,构建了基于层次分析法的区域经济评分体系并计算了土地利用动态度,多源、多时相地通过遥感数据和当地经济、人口数据进行综合性的区域经济发展分析。在区域经济评分体系构建过程中,本文基于土地利用分类结果、建成区提取结果以及GDP和人口数据,构建了多项反映区域经济发展水平的指标,并采用层次分析法建立评分模型。研究发现,所选研究区的经济发展状况基本符合三大经济带划分依据,同时结合近年来国家发展战略的规划与突发公共卫生事件的全球影响,全面地分析了各研究区过去6年的经济发展状况及所在经济带之间的发展差异。

考虑到中国各区域经济发展的速度不断提升,通过遥感数据宏观地进行及时、准确的区域经济发展分析意义重大。在未来的工作中,将积极探索评估区域经济发展更有效的方法,为国家整体及局部区域发展的研究提供新思路。

参　考　文　献

[1]　陈斐, 杜道生. 空间统计分析与GIS在区域经济分析中的应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2002, 27(4): 391-396.
CHEN Fei, DU Daosheng. Application of the Integration of Spatial Statistical Analysis with GIS to the

Analysis of Regional Economy[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2002, 27(4): 391-396.

[2] WU Y M, ZHU S, FAN J Q. Spatial-Temporal Statistical Analysis of Chengdu-Chongqing Regional Economic Structure Evolution: Based on Comparative Study with Five Major Economic Regions and Four Major Urban Groups[C]//International Conference on Management Science and Engineering, Rome, Italy, 2011.

[3] WANG H, ZHAO B R, LUAN W X. Convergence Model Application on Regional Economy in Liaoning Province[C]//International Conference on Industrial Control and Electronics Engineering, Xi'an, China, 2012.

[4] 郭源园, 李莉. 西部内陆省区区域经济差异影响因素: 以重庆为例[J]. 地理研究, 2017, 36(5): 926-944.
GUO Yuanyuan, LI Li. Influencing Factors of Regional Economic Inequality in Inland Provinces of Western China: A Case Study of Chongqing[J]. *Geographical Research*, 2017, 36(5): 926-944.

[5] SHI K F, SHEN J W, WANG L, et al. A Multiscale Analysis of the Effect of Urban Expansion on $PM_{2.5}$ Concentrations in China: Evidence from Multi-source Remote Sensing and Statistical Data[J]. *Building and Environment*, 2020, 174: 106778.

[6] 李德仁. 论21世纪遥感与GIS的发展[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2003, 28(2): 127-131.
LI Deren. Towards the Development of Remote Sensing and GIS in the 21st Century[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2003, 28(2): 127-131.

[7] KHANAL S, KC K, FULTON J P, et al. Remote Sensing in Agriculture: Accomplishments, Limitations, and Opportunities[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(22): 3783.

[8] 李德仁, 余涵若, 李熙. 基于夜光遥感影像的"一带一路"沿线国家城市发展时空格局分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017, 42(6): 711-720.
LI Deren, YU Hanruo, LI Xi. The Spatial-Temporal Pattern Analysis of City Development in Countries Along the Belt and Road Initiative Based on Nighttime Light Data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(6): 711-720.

[9] MELLANDER C, LOBO J, STOLARICK K, et al. Night-Time Light Data: A Good Proxy Measure for Economic Activity?[J]. *PLoS One*, 2015, 10(10): e0139779.

[10] LI X, XU H M, CHEN X L, et al. Potential of NPP-VIIRS Nighttime Light Imagery for Modeling the Regional Economy of China[J]. *Remote Sensing*, 2013, 5(6): 3057-3081.

[11] 李熙, 巩钰, 邵振峰, 等. 夜间灯光遥感视角下的中国对中亚地区援助效果评估[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(12): 1914-1922.
LI Xi, GONG Yu, SHAO Zhenfeng, et al. Evaluation of China's Aid to Central Asia from the Perspective of Night-Time Light Remote Sensing[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(12): 1914-1922.

[12] 何洋, 程辉, 唐亮. 基于DMSP/OLS数据的我国省级经济发展水平研究[J]. 地理空间信息, 2014, 12(2): 79-82.
HE Yang, CHENG Hui, TANG Liang. Economic Development Levels of Provincial Scale in China Based on DMSP/OLS Data[J]. *Geospatial Information*, 2014, 12(2): 79-82.

[13] CUI Y Z, SHI K F, JIANG L, et al. Identifying and Evaluating the Nighttime Economy in China Using Multisource Data[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2021, 18(11): 1906-1910.

[14] 王欣, 任晋圆, 王海涛. 基于多源遥感数据支持下的区域经济空间格局精细化模拟研究: 以济南市为例[J]. 国土与自然资源研究, 2021(5): 64-68.
WANG Xin, REN Jinyuan, WANG Haitao. Refined Simulation of Regional Economic Spatial Pattern Based on Multi-source Remote Sensing Data: A Case Study of Ji'nan City[J]. *Territory & Natural Resources Study*, 2021(5): 64-68.

[15] LU X, CHEN C, FU J Q. Analysis of Regional Economic Development Based on Remote Sensing Images[C]//The 5th International Workshop on Earth Observation and Remote Sensing Applications, Xi'an, China, 2018.

[16] ARIKEN M, ZHANG F, LIU K, et al. Coupling Coordination Analysis of Urbanization and Eco-environment in Yanqi Basin Based on Multi-source Remote Sensing Data[J]. *Ecological Indicators*, 2020, 114: 106331.

[17] 牟凤云, 张增祥, 迟耀斌, 等. 基于多源遥感数据的北京市1973—2005年间城市建成区的动态监测与驱动力分析[J]. 遥感学报, 2007, 11(2): 257-268.
MU Fengyun, ZHANG Zengxiang, CHI Yaobin, et al. Dynamic Monitoring of Built-up Area in Beijing During 1973—2005 Based on Multi-original Remote Sensed Images[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2007, 11(2): 257-268.

[18] 温庆志,孙鹏,张强,等. 基于多源遥感数据的农业干旱监测模型构建及应用[J]. 生态学报,2019,39(20):7757-7770.
WEN Qingzhi, SUN Peng, ZHANG Qiang, et al. An Integrated Agricultural Drought Monitoring Model Based on Multi-source Remote Sensing Data: Model Development and Application[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(20): 7757-7770.

[19] DOSOVITSKIY A, BEYER L, KOLESNIKOV A, et al. An Image Is Worth 16×16 Words: Transformers for Image Recognition at Scale[C]//International Conference on Learning Representations, Vienna, Austria, 2021.

[20] 周娟. 经济新常态下我国三大经济带发展不平衡的对策探究[J]. 济南职业学院学报,2017(3):105-107.
ZHOU Juan. Countermeasures for the Unbalanced Development of China's Three Major Economic Belts Under the New Economic Normal[J]. *Journal of Jinan Vocational College*, 2017(3): 105-107.

[21] HUANG C H, YE Y, JIN Y H, et al. Research Progress, Hotspots, and Evolution of Nighttime Light Pollution: Analysis Based on WOS Database and Remote Sensing Data[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(9): 2305.

[22] 赵佳曼. 基于夜光遥感的长三角一体化区域经济发展时空特征研究[J]. 测绘通报,2021(S1):109-113.
ZHAO Jiaman. Study on Temporal and Spatial Characteristics of Regional Economic Development in Yangtze River Delta Integration Based on Luminous Remote Sensing[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2021(S1): 109-113.

[23] AN X, DENG J, YANG K, et al. Unicom: Universal and Compact Representation Learning for Image Retrieval[C]//International Conference on Learning Representations, Kigali, Rwanda, 2023.

[24] YANG Y Y, GUO H X, CHEN L F, et al. Regional Analysis of the Green Development Level Differences in Chinese Mineral Resource-Based Cities[J]. *Resources Policy*, 2019, 61: 261-272.

[25] SUN X S. Green City and Regional Environmental Economic Evaluation Based on Entropy Method and GIS[J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2021, 23: 101667.

[26] PATRA S, MISHRA P, MAHAPATRA S C. Delineation of Groundwater Potential Zone for Sustainable Development: A Case Study from Ganga Alluvial Plain Covering Hooghly District of India Using Remote Sensing, Geographic Information System and Analytic Hierarchy Process[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 172: 2485-2502.

[27] 盖侨侨,孙倩,张宁,等. 融合时序 InSAR 形变的白银市地质灾害易发性评价[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2024,49(8):1434-1443.
GE Qiaoqiao, SUN Qian, ZHANG Ning, et al. Evaluation of Geological Hazard Susceptibility of Baiyin City Based on Multi-temporal InSAR Deformation Measurements[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(8): 1434-1443.

[28] TAN X. A Method for Calculating the Digital Economy Index Based on Analytic Hierarchy Process[C]//International Conference on Integrated Intelligence and Communication Systems, Kalaburagi, India, 2023.

[29] 刘明皓,王耀兴. 基于"源""汇"理念的土地利用动态变化分析:以重庆市主城区为例[J]. 地理与地理信息科学,2013,29(3):86-91.
LIU Minghao, WANG Yaoxing. Analysis on Land Use Dynamic Change Based on the Concepts of Source and Sink: A Case Study of Main Urban Areas of Chongqing[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2013, 29(3): 86-91.

[30] ATAŞ İ. Performance Evaluation of Jaccard-Dice Coefficient on Building Segmentation from High Resolution Satellite Images[J]. *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2023, 11(1): 100-106.

[31] BENNETT M M, SMITH L C. Advances in Using Multitemporal Night-Time Lights Satellite Imagery to Detect, Estimate, and Monitor Socioeconomic Dynamics[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 192: 176-197.