

夜光遥感视角下俄乌冲突态势分析与经济影响评估

林 怡, 高 忱, 张婷慧, 周灏文, 宇 洁, 厉 朗

(同济大学 测绘与地理信息学院, 上海 200092)

摘要: 利用月度时序夜光遥感数据, 选取乌克兰全境为研究区域, 在国家、州和城市等不同空间尺度下分析了俄乌冲突的态势进展和热点区域。通过结合年度夜间灯光分布, 生成了国民生产总值(GDP)时空变化图, 进一步分析俄乌冲突对经济的影响。结果显示, 冲突爆发初期, 乌克兰全境灯光强度明显减弱; 随着乌克兰进行反攻行动, 灯光强度开始回升, 这一变化的时间节点与冲突中重大事件发生的时间相符。在冲突期间, 首都和俄占区的灯光减弱不明显, 而那些距离俄罗斯较近、发生冲突较频繁的州灯光损失较为严重。空间自相关分析结果显示, 灯光分布在冲突期间呈现显著的正相关性, 但在冲突不同阶段, 灯光的聚类分布和冷热点位置存在差异。基于夜间灯光的 GDP 空间化分布结果表明, 俄乌冲突导致了除首都、沿海城市和俄占区之外的其他地区经济大幅下滑; 灯光损失严重的区域与乌克兰主要农作物产区较为一致, 这将导致农作物产量下降, 从而影响整体经济。

关键词: 夜光遥感; 俄乌冲突; 夜间灯光指数; 空间自相关; 经济影响

中图分类号: P237

文献标志码: A

stage, with the timing of the light changes being consistent with major events in the conflict. The capital city and Russian-occupied areas did not show a significant decrease in light during the conflict, whereas the states where conflict occurs were more frequently significantly affected. Light distributions showed significant positive correlations throughout the conflict. However, there were differences in clustering distributions and hot and cold spot locations at different stages of the conflict. The spatial distribution of GDP shows that the Russia-Ukraine conflict has caused a sharp economic decline in other regions except the capital, port cities and Russian-occupied areas. Areas with heavy light losses were more consistent with the main crop production areas in Ukraine, which will lead to a decrease in crop yields and thus affect the economy.

Key words: night-time light remote sensing; Russian-Ukrainian conflict; night light index; spatial autocorrelation; economic impact

Analysis of Russia-Ukraine Conflicts Situation and Its Economic Impact Using Night-Time Light Remote Sensing

LIN Yi, GAO Chen, ZHANG Tinghui, ZHOU Haowen, YU Jie, LI Lang

(College of Surveying and Geo-Informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: This paper analyzed the situation and course of the Russian-Ukrainian conflict based on time-series night-time light remote sensing data, and further investigated the economic impact of the Russian-Ukrainian conflict in relation to the spatial and temporal variations in gross domestic product (GDP). There was a significant reduction in light intensity at the beginning of the conflict and a recovery in light intensity at a later

过去三年在新冠疫情危机背景下, 东欧、中东和印巴等多个地区冲突不断升级, 世界更加动荡和危险。地区冲突已经引发了一系列深度互联的全球风险, 日益成为国内外研究的热点^[1]。传统的冲突分析和影响评估多依赖统计数据^[2], 统计数据却普遍存在丰富度和真实性不高、及时性较弱等问题^[3]。卫星遥感和社交媒体等新型数据源能够获取地区冲突的时空信息, 补充传统统计数据的不足^[4]。具有成本低、效率高、覆盖广等优势遥感影像, 能识别冲突区域的难民营地、军事武器和障碍物的空间分布, 已成为准确评估正在发生的地区冲突的主要手段^[5-6]。目前, 国外很多政府机构已经在全球多起地区冲突中采用高分辨率遥感影像进行损失评估, 而国际法庭也广泛使用其评估结果作为审判依据。

收稿日期: 2023-09-19

基金项目: 国家自然科学基金(41171449)

第一作者: 林 怡, 研究员, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为摄影测量、遥感影像解译与分析。

E-mail: linyi@tongji.edu.cn

通信作者: 厉 朗, 博士生, 主要研究方向为 RS 和 GIS 技术应用。E-mail: lilang@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

夜光遥感影像能够从夜间灯光的角度反映人类社会经济活动,已成为宏观反映地区冲突态势的重要工具^[7]。已有研究通过夜光影像监测了俄罗斯和格鲁吉亚的高加索地区冲突影响^[8]。当地区冲突发生期间,经济参数会发生变动,夜光遥感影像可用于估算这些参数。据此,夜光影像还可以判别区域的社会稳定和经济发展程度,应用于地区冲突的影响评估^[9]。例如,有学者已经利用时空一体化的聚类分析方法研究了叙利亚内战对社会经济造成的影响^[10]。总体而言,夜光遥感可以为反映地区冲突的爆发、演进和冲突后重建提供宏观视角,促进信息公开和透明度,同时为人道主义救援提供支持^[11]。

2022年爆发的俄乌冲突成为了全球地缘政治领域的重要事件,不仅对乌克兰的经济发展、基础设施建设与人口流动造成了严重威胁,还将对未来全球地缘政治格局产生深远影响。有学者提取自俄乌冲突爆发后 36 d 内的每日乌克兰灯光分布,分析了乌克兰全境及各州的灯光变化^[12]。有学者构建乌克兰夜间灯光的日尺度遥感数据集,监测并分析了乌克兰在冲突期间的灯光变化^[13]。已有基于日级夜光影像监测乌克兰受影响人口的研究成果^[14]。然而,现有的俄乌冲突态势分析和影响评估多采用单一日尺度的遥感数据源,在空间尺度分析方面也不够精细,且在研究俄乌冲突态势演变及其长期影响方面存在一定局限性。

针对上述问题,本文利用不同时间尺度的夜光遥感数据,结合社会统计数据 and 社交媒体信息,分析冲突在国家、州和城市等三个不同空间尺度下的演变规律。同时根据年度夜间灯光时空变化结果,制作了国民生产总值(GDP)时空分布图,结合农业统计数据,评估俄乌冲突对乌克兰经济影响的时空差异。这一研究为地区冲突的深入理解提供了新的方法支持,并为我国外交决策提供了更科学的依据。

1 研究区域与数据

1.1 研究区概况

乌克兰位于欧洲东部,其总面积 603 700 km²,是欧洲国土面积第二大国家,如图 1 所示,全国分为 24 个州,1 个自治共和国(克里米亚共和国),2 个直辖市(首都基辅和塞瓦斯托波尔市)。在 2014 年之前,乌克兰的经济一直保持增长状态。2020 年,受新冠疫情影响,GDP 同比下降 4 %,2021 年经济情况有所好转,GDP 同比增长 3.2 %。但随着政治危机和军事冲突的爆发,乌克兰的经济遭受了致命的打击,各种社会问题也随之涌现^[12]。俄乌冲突的不断加剧必将对中国与“一带一路”沿线国家的经济产生持续性冲击,给“中欧班列”运输以及中欧经贸合作带来挑战。因此,对长期化趋势下俄乌冲突的演变分析和其对乌克兰经济的影响研究具有重要意义。

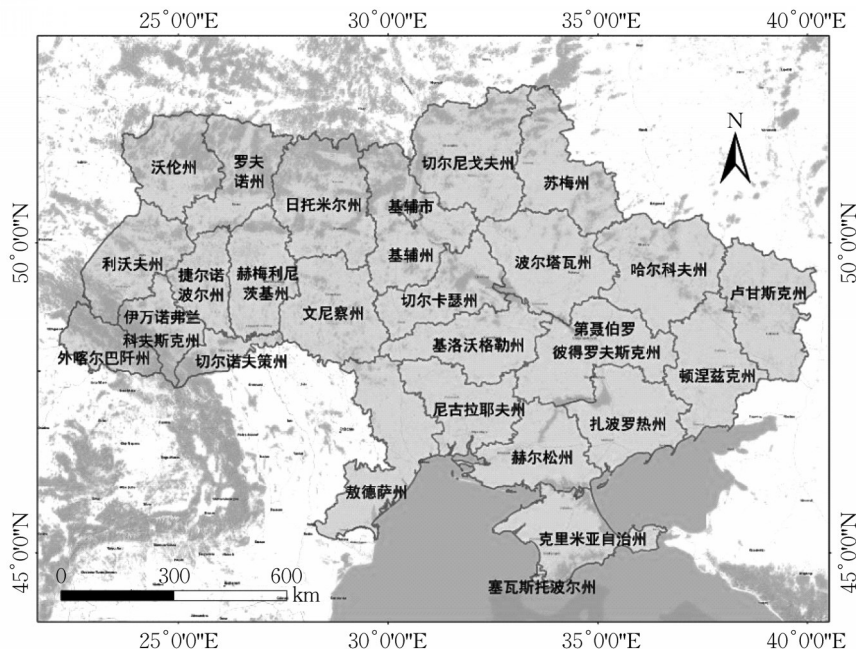


图 1 研究区位置

Fig. 1 Location of study area

1.2 研究数据

本文采用的研究数据主要包括夜光遥感数据、矢量地理数据以及统计数据。所用的夜光遥感数据包括月度数据和年度数据。月度数据为NPP/VIIRS (National Polar-orbiting Partnership/the Visible Infrared Imaging Radiometer Suite)数据,来源为美国科罗拉多矿业大学地球观测组织EOG小组官网(<https://eogdata.mines.edu/products/vnl/>)。由于本文研究内容以体现冲突前后差异性为主,因此选取了乌克兰冲突发生前和冲突期间的夜间灯光数据。采用的冲突前夜间灯光数据时间范围为2021年12月(共计1个月),采用的冲突期间夜间灯光数据时间范围为2022年1月—2023年2月(共计14个月)。月度数据用于构建夜间灯光指数,反映冲突态势以及受冲突影响的区域。年度数据采用Chen等^[15]生成的2015—2022年的乌克兰年度NPP-like数据(<https://dataverse.harvard.edu/dataset.xhtml?persistentId=doi:10.7910/DVN/YGIVCD>),用于分析俄乌冲突对乌克兰的经济影响的时空差异。

本文采用的矢量数据为乌克兰的行政边界数据,来源于全球行政区划数据库(<https://gadm.org/>);统计数据包括乌克兰的GDP统计数据、难民统计数据、农业统计数据。其中,2015—2022年的

GDP统计数据由世界银行官网(<https://data.worldbank.org.cn/>)提供,是验证夜间灯光指数和经济之间的相关性和生成GDP的空间可视化结果的辅助数据;冲突期间乌克兰的难民统计数据来源于联合国卫生组织的报告;农业统计数据来源于美国农业部(USDA)对乌克兰各州农业数据调研报告。

2 研究路线与方法

2.1 研究路线

本文利用不同时间尺度的夜间灯光数据,在综合考虑国家、州和城市等不同空间尺度的基础上,分析俄乌冲突态势并评估冲突对乌克兰的经济影响。首先对夜光遥感影像进行空间匹配、背景像元校正和异常像元校正等预处理;利用预处理后的数据构建夜间灯光指数,结合空间自相关方法分析长时序灯光数据的时空演变,以反映冲突态势;在此基础上,进一步绘制GDP的时空分布图,并结合农业统计数据,综合评估俄乌冲突对乌克兰经济影响的时空差异。具体路线如图2所示。图中,GIS表示地理信息系统。

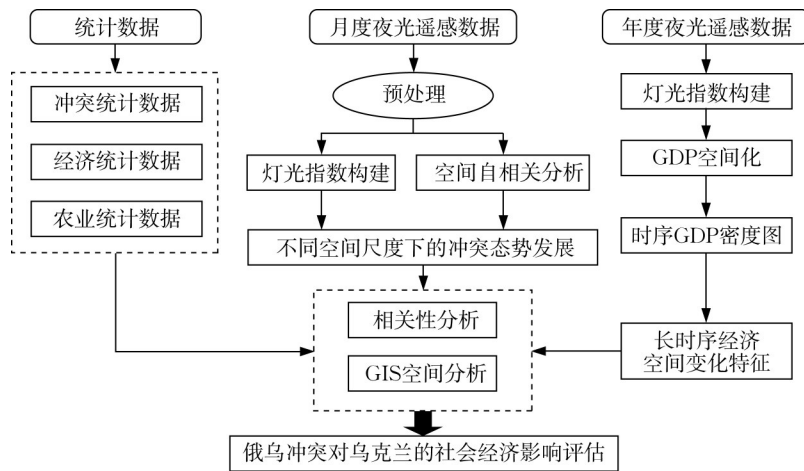


图2 技术路线

Fig. 2 Technology route

2.2 研究方法

2.2.1 夜光遥感数据预处理

月度夜光遥感数据为已去除受杂散光影响的VIIRS云掩膜数据。但由于VIIRS数据并没有剔除火光、火山爆发等短暂性灯光以及背景噪声,辐射值会出现负值和异常值。另外,原始数据裁剪以后像元网格还会随纬度增加变小。本文对夜光遥感数据的预处理包括^[16]:

(1)重投影与重采样:将影像数据投影坐标系转换

成WGS_1984_UTM_Zone_35N,其中,重采样采用适合离散数据的最临近法处理,空间分辨率为500 m。

(2)阈值化:选取影像辐射值的阈值为 $1 \text{ nW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$,即辐射值大于1均为夜间灯光像元,其余赋值为0,作为背景值。

(3)异常值剔除:以基辅城市中心的最大灯光亮度值作为阈值来调整异常像元,当NPP/VIIRS的亮度值高于该阈值时,该像元值将被最大亮度值替换,

以消除异常值。

2.2.2 夜间灯光指数构建

本文利用夜间灯光数据构建夜间灯光指数,共构建了总夜间灯光强度值(total night-time light, TNL)、平均夜间灯光强度(average night-time light, ANL)、夜间灯光影响指数(night-time light impact index, NLII)等三个指标,对冲突前后乌克兰全境、各州和各城市的受影响程度和恢复程度进行评估。其中, J_{TNL} 为夜间灯光像元辐射亮度值之和, J_{ANL} 为TNL与区域面积的比值。 R_{NLII} 为冲突爆发后的TNL与冲突爆发前的TNL的比值,比值越小,其损失的灯光强度越大。以上各指数计算公式为^[17]

$$\begin{cases} J_{\text{TNL}} = \sum_{i=1}^n H_{\text{DN}i} \\ J_{\text{ANL}} = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n H_{\text{DN}i} \\ R_{\text{NLII}} = \frac{J_{\text{TNL pre}}}{J_{\text{ANL past}}} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $H_{\text{DN}i}$ 表示某一像元的灰度值; A 表示区域面积。

2.2.3 俄乌冲突态势分析与经济影响评估

(1) 灯光空间格局演变分析

本文采用全局空间自相关方法分析灯光的全局分布模式,即选择全局莫兰指数(global Moran's I)衡量灯光空间分布呈现的模式是聚集、随机还是离散。为了检验这一指数的显著性,将 P 值与 z 得分作为辅助检验依据。全局莫兰指数可表示如下:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

式中: n 代表样本总数; x_i 为空间位置 i 处的夜间灯光值; W_{ij} 为空间权重矩阵。

考虑到冲突的集聚和扩散效应,本文引入局部空间自相关分析方法研究不同城市之间灯光的空间相关性,利用灯光在局部区域范围内的空间集聚程度,揭示冲突不同阶段灯光分布的空间异质性。局部空间集聚图包括5种类别:不显著表示聚类特征不显著;高-高聚类表示本身灯光值较高,邻近区域的灯光值也相应较高;高-低聚类表示本身的灯光值较高,邻近区域的灯光值较低;低-高聚类表示本身的灯光值较低,邻近区域的灯光值较高;低-低聚类表示本身灯光值较低,邻近区域的灯光值也相应较低。

冷热点分析是研究局部空间聚类分布的有效方法,能够将灯光空间分布的集聚程度区分为冷点和热点,这里采用Getis-Ord G_i^* (Getis系数)反映局部

空间的冷热点分布。

(2) 夜间灯光与经济的相关性分析

早期多项研究表明夜间灯光与经济存在相关性。为验证夜间灯光能否评估冲突的经济影响,可利用相关性分析来量化夜间灯光指数与乌克兰GDP之间的关系。相关系数能用来检测两个独立变量之间的关联程度,测量它们之间是否存在关系以及关系的强度,可表示如下:

$$\rho_{A,B} = \frac{\text{Cov}(A,B)}{\sigma_A \cdot \sigma_B} \quad (3)$$

式中: $\text{Cov}(A,B)$ 为变量 A 和 B 的协方差; σ_A 为变量 A 的标准差; σ_B 为变量 B 的标准差。在本研究中,变量 A 为夜间灯光指数,变量 B 为乌克兰GDP统计数据。

(3) GDP空间化表达

传统上,构建GDP空间化模型主要依赖于经典统计方法和地理信息系统(GIS)的空间计算技术。这种方法通过分析夜间灯光数据与GDP统计数据之间的关系,来实现GDP的空间化表达。具体而言,早期的研究通过将各类灯光指标与乌克兰的GDP统计数据进行分析、回归分析以及误差验证,以探索二者之间的内在联系^[18]。在这一过程中,TNL被选定为最佳的灯光指标,其与GDP之间的相关性为后续研究提供了重要的参考。本文使用2015—2022年的NPP-like年度数据,对每个像元的像元亮度值(digital number, DN)进行重新计算并赋值。像元点GDP值分配原则由式(4)给出:

$$E_{\text{GDP}} = \frac{I_{\text{GDP Uk}}}{J_{\text{TNL Uk}}} \cdot H_{\text{DN}i} \quad (4)$$

式中: $I_{\text{GDP Uk}}$ 和 $J_{\text{TNL Uk}}$ 分别表示乌克兰GDP统计值和总夜间灯光强度值。通过这种方法,不仅能够生成反映经济活动分布的空间图,还能够进一步分析和理解经济发展的空间差异和特征。

3 结果与分析

3.1 国家尺度的夜间灯光时空演变分析

分别选取乌克兰2021年12月、2022年2月、4月、8月和11月,以及2023年2月的夜间灯光空间分布进行显示(图3)。2021年12月为冲突爆发之前,乌克兰全境夜间灯光强度稳定。2022年2月冲突爆发,处于冲突时期的天数并不多,但冲突初期也造成了乌克兰全境的夜间灯光辐射范围缩小。这一时期夜间灯光强度减弱基本上可以归因于政府的管制措施、民众在收看新闻后自发停止夜间活动等,并非是

由于俄乌冲突的直接影响。而乌克兰境内除了夜间灯光辐射范围的大范围缩减以外,基辅等地出现灯光值上升情况,因为这些区域是乌克兰主要的军队

驻扎地,位于2022年2月到3月的战线周围。距离战线较远的最西部并没有出现夜间灯光强度值上升情况。表明这一现象和军事力量的调动有关。

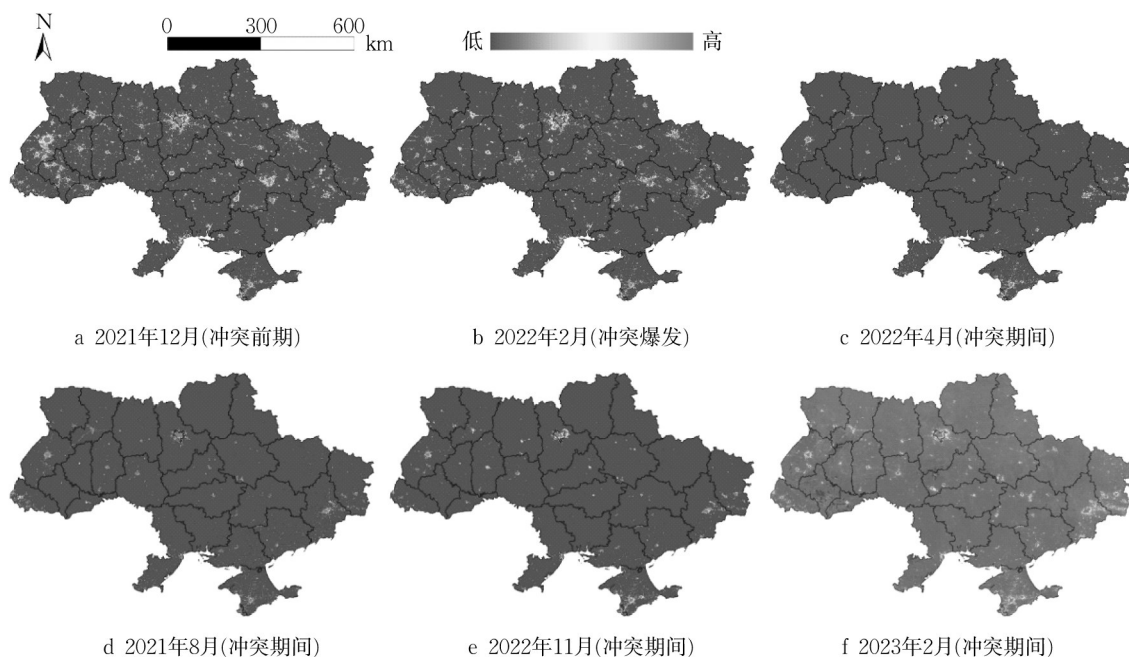


图3 乌克兰全境在冲突不同阶段的夜间灯光变化

Fig. 3 Night-time lighting changes in Ukraine at different stages of the conflict

随着时间推移,2022年4月的夜间灯光辐射范围和强度均出现明显的缩小与减弱,但基辅州、利沃夫州和顿涅兹克州等区域仍保留较高的夜间灯光强度。2022年4月到2023年8月,夜间灯光空间分布较离散,灯光强度也没有明显恢复,说明地区照明的基础设施可能在冲突期间被损坏。但在2022年8月后,乌克兰收到国际援助后有反攻行动。2022年11月和2023年2月的夜间灯光分布显示,这一阶段乌克兰夜间灯光亮度出现了整体回升的情况。

基于夜间灯光的空间分布变化,统计了乌克兰2021年12月—2023年2月期间每个月的TNL和ANL,并分析灯光指数的空间分布变化及其与平民死亡数之间的关系。图4a表明,从2022年2月份冲突爆发开始,乌克兰的TNL呈现出“L”型的快速下跌趋势。总体上看,TNL在冲突爆发早期的下降趋势十分迅速,在冲突后期趋于平缓,在2023年开始呈现出上升趋势。ANL和TNL的变化趋势大致相同。图4b显示,冲突期间TNL和统计的平民死亡数回归之间存在相对良好的相关性。这种关系的形成,可归因于俄乌冲突所导致的平民死亡事件会在乌克兰造成较大的社会反响,从而影响了平民留在乌克兰境内的意愿,进而影响到夜间灯光的变化。

此外,据统计结果显示,乌克兰的平民在这一时期很少直接因陆军冲突丧生,而是主要受到远程空袭的影响。这表明,夜间灯光变化和平民死亡事件之间存在共同的影响因素,因此二者之间显示出较高的相关性。

3.2 州尺度的夜间灯光损失程度分析

表1为乌克兰各州在冲突爆发后与冲突爆发前的TNL的比值,比值越小,表示该州损失的灯光强度越大。2022年4月的NLII显示,苏梅州、捷尔诺波尔州、日托米尔州、梅科拉厄夫州、第聂伯罗州、基辅市、切尔诺夫策州、切尔尼戈夫州和切尔卡瑟州等9个州在这一阶段的夜间灯光损失较大,NLII均在0.1以下。2022年8月,梅科拉厄夫的NLII升高到0.11,而其他8个州的NLII仍小于0.1,同时,哈尔科夫州的夜间灯光在这一阶段损失较大,NLII为0.06。2022年11月,基辅市的NLII指数升高到0.30,表明基辅市的夜间灯光与前几个月相比已经开始恢复;梅科拉厄夫州的NLII又降低到0.1以下,而在这一时期,罗夫诺州和基洛夫格勒州的NLII也降低到了0.1以下。从表1可以看出,所有州在冲突发生的一年后的NLII均大于1,这表明各州在2023年2月的TNL高于2021年12月。其中,卢甘斯克州和赫尔松州的NLII最高,因此这两个州恢复

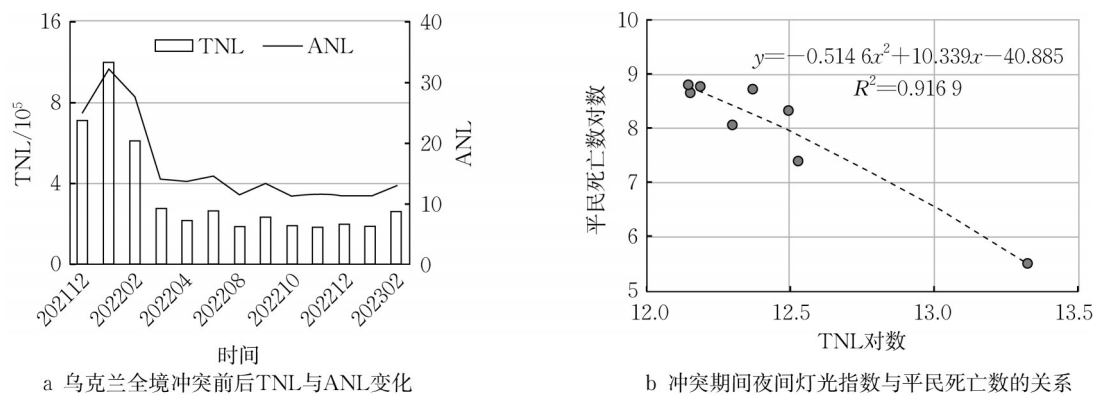


图4 乌克兰的夜间灯光指数变化及其与平民死亡数的关系

Fig. 4 Changes in night-time light index and its correlation with civilian deaths in Ukraine

的灯光强度也相对较高。表1还显示,卢甘斯克州和克里米亚等区域作为俄占区,在冲突爆发的一年间,灯

表1 冲突期间乌克兰各州的夜间灯光影响指数

Tab. 1 Night-time light impact index in Ukrainian oblasts during the conflict

时间	沃伦州	苏梅州	文尼察州	外喀尔巴阡州	捷尔诺波尔州	日托米尔州	基辅州
2022/04	0.16	0.01	0.26	0.64	0.01	0.02	0.40
2022/08	0.19	0.02	0.22	0.60	0.02	0.04	0.38
2022/11	0.17	0.01	0.24	0.23	0.03	0.06	0.34
2023/02	3.42	3.68	2.82	2.00	1.87	2.81	0.41
时间	罗夫诺州	波尔塔瓦州	梅科拉厄夫州	第聂伯罗州	卢甘斯克州	基洛夫格勒州	赫尔松州
2022/04	0.18	0.22	0.02	0.07	1.78	0.13	0.76
2022/08	0.19	0.23	0.11	0.04	1.24	0.12	1.06
2022/11	0.09	0.12	0.01	0.05	1.22	0.07	0.42
2023/02	2.21	2.35	3.89	1.05	11.38	4.42	6.68
时间	基辅	哈尔科夫州	扎波罗热州	赫梅利尼茨基州	塞瓦斯托波尔	顿涅茨克州	敖德萨州
2022/04	0.10	0.14	0.41	0.24	1.29	0.71	0.47
2022/08	0.08	0.06	0.62	0.26	0.96	0.70	0.41
2022/11	0.30	0.01	0.24	0.14	1.10	0.48	0.31
2023/02	1.00	2.05	3.26	2.65	1.09	2.99	2.04
时间	克里米亚	利沃夫州	切尔尼戈夫州	切尔诺夫策州	切尔卡瑟州	伊万诺-弗兰科夫斯克	
2022/04	1.21	0.16	0.04	0.04	0.07		0.64
2022/08	0.83	0.16	0.05	0.05	0.07		0.60
2022/11	1.12	0.19	0.05	0.05	0.13		0.23
2023/02	2.37	0.68	1.30	1.30	1.50		2.00

为了进一步反映俄乌冲突对乌克兰各州夜间灯光影响的空间异质性,结合表1所得到的结论,选取在冲突不同阶段的代表城市,分析其灯光在连续时间内的空间变化。冲突第一阶段从2022年2月24日开始,俄罗斯首先围绕乌克兰首都基辅展开攻防战。图5分别显示了基辅州在2021年12月和2022年2月—4月的灯光分布。冲突爆发前,基辅市中心和基辅州郊区的夜间灯光强度都较高;2022年2月,俄罗斯军队开始向基辅市推进,郊区的夜间灯光强度明显降低;2022年3月—4月,郊区夜间灯光强度损失十分明显,基辅市中心的夜间灯光强度降低,但降幅比郊区小。这表明与其他区域相比,基辅市作

为乌克兰的首都,受到乌克兰军队和防控系统保护,没有受到大规模陆军攻击或者空袭破坏。

从2022年9月开始,乌克兰军队由防御转为反攻,接连收复哈尔科夫州等地区。图6分别显示了哈尔科夫州在2021年12月和2022年9月—11月的夜间灯光分布。与冲突爆发前相比,2022年9月,哈尔科夫州的夜间灯光降幅明显,只有极少区域还保留较高的灯光强度。而在2022年10月—11月,哈尔科夫州夜间灯光强度损失仍十分严重。这表明哈尔科夫州作为这一阶段冲突推进速度较快、交火规模较大的区域,其灯光并没有随着被乌克兰军队重新掌控而恢复。

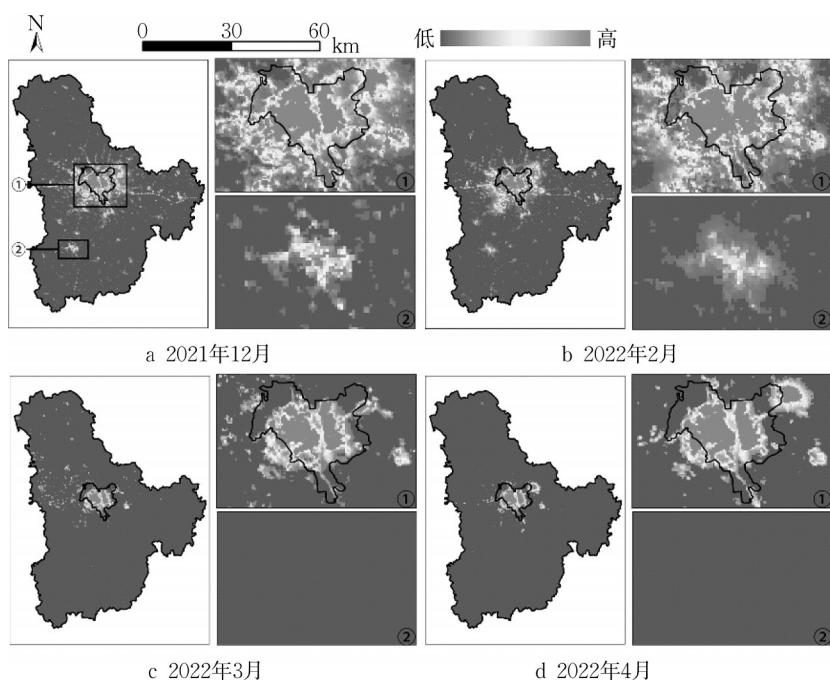


图5 基辅的夜间灯光变化

Fig. 5 Night-time light changes in Kiev

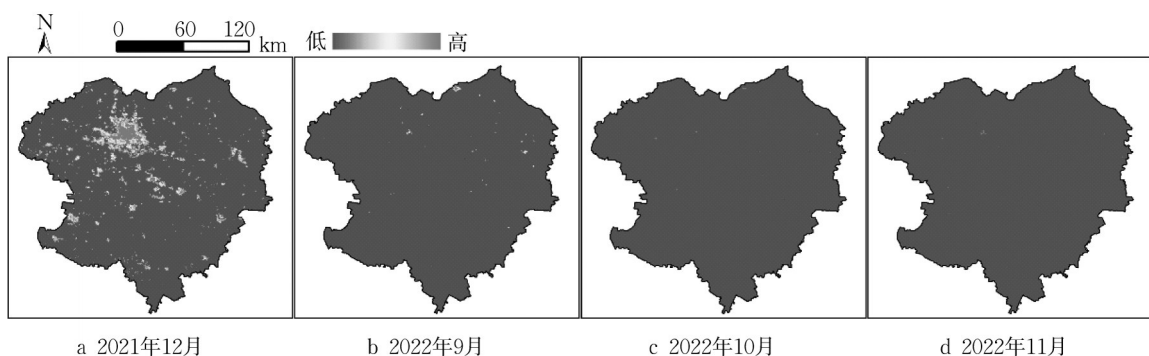


图6 哈尔科夫州的夜间灯光变化

Fig. 6 Night-time light changes in Kharkov

3.3 基于城市尺度的夜间灯光空间格局分析

采用空间自相关方法研究夜间灯光分布在城市尺度下的空间关联类型和关联程度。全局自相关能够反映冲突期间灯光空间分布呈现的模式是聚集、随机还是离散。表2显示,2021年12月、2022年4月和2022年11月夜间灯光的Moran's I均通过了显著性检验,并且这三个时间点的灯光在空间上呈现较强的相关性。这表明灯光强度较高的区域在空间上更接近。2021年12月到2022年4月,Moran's I呈上升趋势,由0.3629增加到0.4407,说明冲突爆发后灯光在空间分布上呈现更显著的集聚特征。这是由于冲突刚爆发,乌克兰的大多数地区的夜间灯光已经开始剧烈减少甚至消失,只剩下基辅州、利沃夫州和顿涅兹克州等区域仍保留夜间灯光。而到2022

年11月,Moran's I降低到0.1604,表明灯光在空间分布上变得离散。

表2 冲突期间乌克兰灯光空间分布自相关

Tab. 2 Spatial autocorrelation of night-time lights in Ukraine during the conflict

时间	Moran's I	Z得分	P值
2021年12月	0.3629	17.8690	0
2022年4月	0.4407	21.7568	0
2022年11月	0.1604	7.8491	0

图7显示的是冲突爆发前、冲突期间和冲突爆发一年后乌克兰夜间灯光的聚类分布与热点位置。2021年12月夜间灯光分布格局的显著类型包括高-高聚类,其中,高-高聚类主要分布在基辅州、利沃夫州、敖德萨州和克里米亚等地。这一时期的夜间

灯光热点分布在基辅州和利沃夫州,冷点聚集在乌克兰东部的几个州。2022年4月,克里米亚的高-高聚类区域呈外延扩张,面积增大,表明这些地区的灯光受到冲突影响的程度较低。乌克兰北部几个州的灯光呈现高-高聚类,而卢甘斯克州和顿涅兹克州同时出现了高-高聚类、高-低聚类和低-低聚类分布。这一时期的灯光热点分布在基辅州、利沃夫州、克里米亚和敖德萨州,

与冲突前相比,顿涅兹克州由夜间灯光分布的冷点转变为热点。冲突爆发一年后,夜间灯光分布格局的显著类型为高-高聚类,比起前两个时间节点,高-高聚类区域面积缩小,位于克里米亚的高-高聚类区较多。2023年2月,乌克兰夜间灯光呈现出冷点和热点相间分布的现象,热点主要分布在乌克兰北部、东部和南部,冷点主要分布在乌克兰西部、中部和东部。

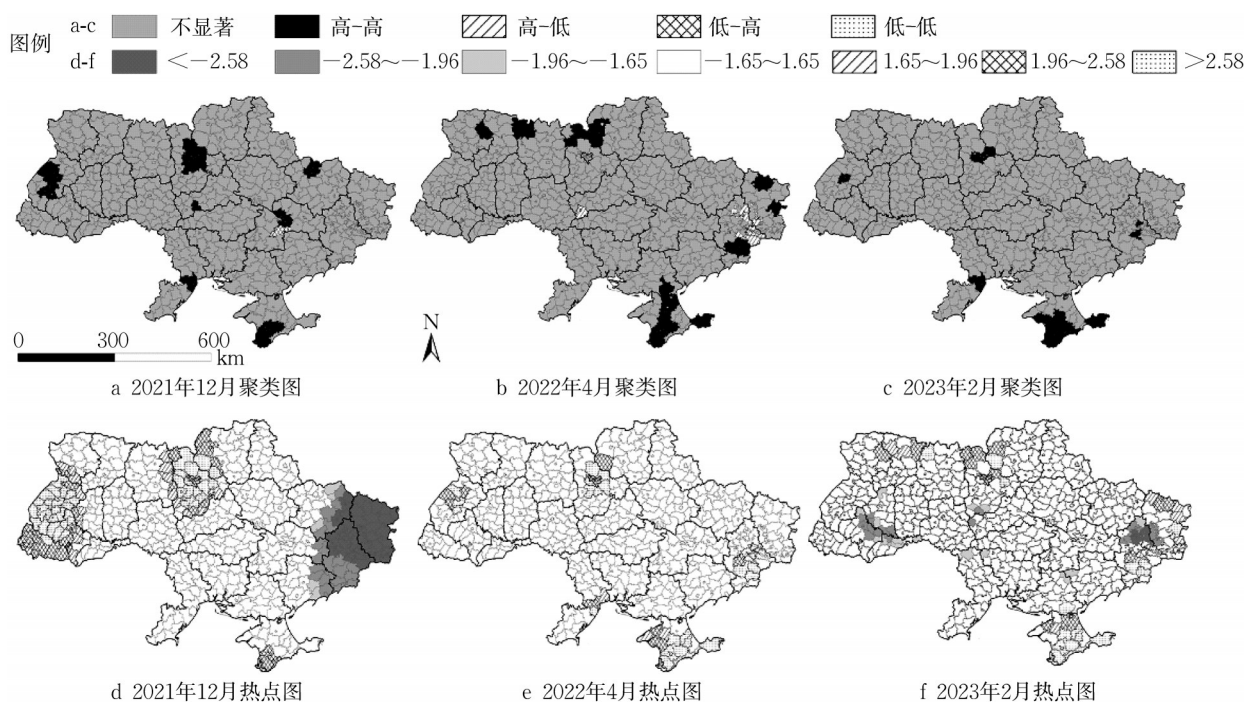


图7 冲突期间乌克兰灯光的聚类图与热点图

Fig. 7 Cluster and hotspot maps of night-time lights in Ukraine during the conflict

3.4 俄乌冲突对乌克兰的社会经济影响评估

综上分析结果可以看出,乌克兰夜间灯光随冲突态势发展而变化。为进一步研究冲突的社会经济影响,对年度乌克兰总 TNL 和 GDP 统计数据进行相关性分析,分析结果显示,皮尔逊相关系数值为 0.845,这表明可以根据夜间灯光变化来反映俄乌冲突对乌克兰经济的影响。

选取 2015—2022 年的年度夜光遥感影像进行 GDP 空间化,由于逐年变化不明显,图 8 选择 2015 年、2017 年、2019 年、2021 年和 2022 年的 GDP 密度图进行显示。2015 到 2019 年,除了基辅等大都市的 GDP 始终保持较高水平外,乌俄边境的顿涅兹克州与沿海的克里米亚、赫尔松州也有 GDP 值较高的区域,其范围也在不断扩大。而到了 2022 年,只有首都基辅、卢甘斯克州、顿涅兹克州、克罗地亚和利沃夫州有高 GDP 值区域,而其他州的 GDP 都普遍较低,表明俄乌冲突对乌克兰 2022 年的经济发展造成了较大的损失。

乌克兰作为一个农业大国,主要生产玉米、小麦和葵花籽等农产品。通过各区域灯光损失来判断冲突对乌克兰农业造成的损失,从而评估其经济影响。本文根据 USDA 统计的乌克兰各州在 2010—2020 年玉米、小麦和葵花籽产量分布,定性分析俄乌冲突对农业造成的影响。

据 USDA 统计,乌克兰过去 10 年间的玉米产出主要分布在切尔尼戈夫州、苏梅州、文尼察州和波尔塔瓦州;小麦产出主要分布在哈尔科夫州、第聂伯罗州、扎波罗热州和文尼察州;葵花籽产出主要分布在哈尔科夫州、第聂伯罗州和基洛沃格州。根据 3.1 节图 3 中乌克兰全境灯光空间变化和表 1 中各州夜间灯光损失程度显示,乌克兰的多个州已经成为灯光损失较多、受俄乌冲突影响最严重的区域,尤其是苏梅州、哈尔科夫州和切尔尼戈夫州。这些区域农田被毁,农业用地被占用,生态环境被污染,将导致农用设施和从事农业生产的人受到影响,无法继续

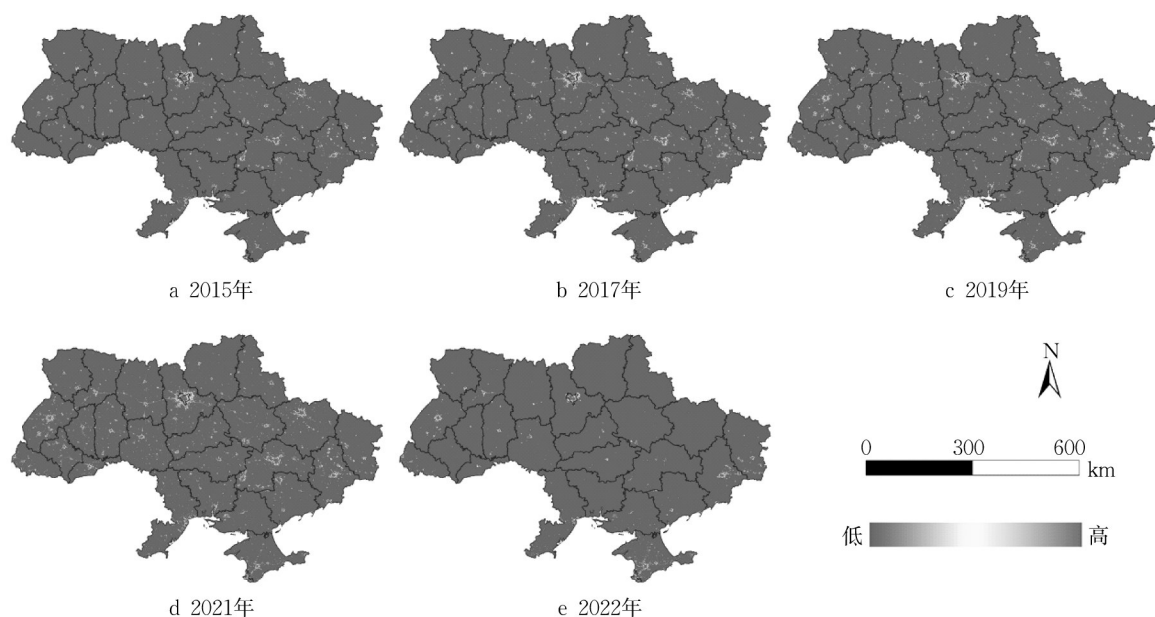


图8 乌克兰2015—2022年的GDP空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of GDP in Ukraine from 2015 to 2022

工作。这表明俄乌冲突对乌克兰的农产品产量影响较为显著,也将会进一步对乌克兰的社会经济造成严重影响。

4 结论

分析地区冲突事件的发展态势,评估其对社会经济的影响程度,能够为地区冲突研究提供数据支撑和科学分析,为国家安全与国际事务决策提供坚实依据。针对21世纪以来爆发的最大地区冲突——俄乌冲突,本文基于乌克兰2021年12月至2023年2月的月度夜光遥感影像,以及2015—2022年的年度夜光遥感影像,从国家、州和城市等三个不同空间尺度分析夜间灯光变化,反映俄乌冲突态势,并评估了其经济影响。

从国家尺度看,在冲突爆发的2个月内,乌克兰全境的夜间灯光辐射范围缩小,强度降低;后期乌克兰开始进行反攻行动,整体夜间灯光亮度开始回升。冲突期间,灯光指数变化的时间节点与冲突中的重大事件发生的时间节点较一致。以上结论与早期文献得出的“在俄乌冲突爆发之后,乌克兰全国夜间灯光急剧下降”结论一致^[12]。从州尺度看,不同州的灯光受冲突影响程度有较大差异。基辅作为首都,是早期展开攻防战的区域,灯光有损失但保留程度较高;而哈尔科夫州等距离俄罗斯较近、发生冲突较频繁的州灯光损失较严重^[13]。基于城市尺度的空间自相关研究结果显示,冲突不同阶段,夜间灯光的全局

分布模式均呈现出显著的正相关性,但夜间灯光的各聚类区域和冷热点的分布有差异。

对俄乌冲突的经济影响评估结果显示,2022年的GDP空间分布与前几年相比,各地区的GDP都明显的降低,值得注意的是,首都基辅、乌俄边境和沿海地区的GDP较高。这一点与其他地区形成了鲜明对比。此外,通过对农业统计数据的深入分析,进一步探讨了俄乌冲突对乌克兰农业的具体影响。结果显示,乌克兰玉米、小麦和葵花籽等主要农作物产地的夜间灯光在冲突期间损失较大,这会导致这些区域农作物产量受到一定影响,进而影响乌克兰的社会经济。

俄乌两国都是中国的友好国家,中国与俄罗斯建立了“新时代全面战略协作伙伴关系”,与乌克兰也是“战略伙伴关系”,中国如何拿捏好分寸、掌握好平衡,将对中国外部政治安全环境产生重大影响。本文将遥感、地理信息与国际关系交叉融合,实现对俄乌冲突的时空立体感知与一定深度的知识挖掘,研究结果证明了夜光遥感数据推断冲突动态和反映经济影响的潜力,能够为我国外交决策提供科学数据支持,同时为国家安全与国际事务决策提供坚实依据。后续研究将引入更高空间分辨率的国产夜光遥感影像,并将其与日间多类型的遥感数据、矢量数据、统计数据和社交媒体报告等各类数据和信息进行结合,综合分析将能够实现冲突态势精细化分析和冲突影响的精确估算。在获得冲突态势时空演变特性的基础上,综合考虑多类驱动因子对冲突的影

响,借助深度学习等先进的技术,全面预测冲突潜在风险区域。为中国的外交政策和国际安全决策提供更为科学和精确的依据。

作者贡献声明:

林 怡:学术指导,论文整体构思与修改,项目资助。

高 忱:数据处理,建模分析,论文整体构思与撰写。

张婷慧:数据处理,结果讨论。

周灏文:数据处理,结果讨论。

宇 洁:学术指导,结果讨论,论文修改。

厉 朗:数据处理,结果讨论,论文修改。

参考文献:

- [1] World Economic Forum. The global risks report 2023 [R]. Cologne/Geneva, Switzerland: WEF, 2023.
- [2] 江东,陈帅,付晶莹,等. GIS支持下的全球武装冲突数据体系建设评介[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(4): 784.
JIANG Dong, CHEN Shuai, FU Jingying, *et al.* Review on the construction of global armed conflict data system supported by GIS [J]. Journal of Geo-information Science, 2020, 22(4): 784.
- [3] 李德仁, 李熙. 夜光遥感技术在人道主义灾难评估中的应用[J]. 自然杂志, 2018, 40(3): 169.
LI Deren, LI Xi. Use of night-time light remote sensing in humanitarian disaster evaluation[J]. Chinese Journal of Nature, 2018, 40(3): 169.
- [4] 李德仁, 李熙. 论夜光遥感数据挖掘[J]. 测绘学报, 2015, 44(6): 591.
LI Deren, LI Xi. An overview on data mining of nighttime light remote sensing[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2015, 44(6): 591.
- [5] PANDEY B, ZHANG Q, SETO K C. Comparative evaluation of relative calibration methods for DMSP/OLS nighttime lights[J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 195: 67.
- [6] 刘佳, 辛鑫, 刘斌, 等. 基于DMSP/OLS夜间灯光影像的2000—2013年鄂尔多斯市城市扩张遥感制图与驱动因子分析[J]. 自然资源遥感, 2018, (1): 166.
LIU Jia, XIN Xin, LIU Bin, *et al.* Urban expansion mapping and driving factor analysis of Ordos City during the period of 2000—2013 based on DMSP/OLS nighttime light data [J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2018(1): 166.
- [7] LI X, LI D R, XU H M, *et al.* Intercalibration between DMSP/OLS and VIIRS night-time light images to evaluate city light dynamics of Syria's major human settlement during Syrian Civil War[M] // Remote Sensing of Night-Time Light. [S.l.]: Routledge, 2021: 80-97.
- [8] WITMER F D W, O'LOUGHLIN J. Detecting the effects of wars in the Caucasus regions of Russia and Georgia using radiometrically normalized DMSP-OLS nighttime lights imagery[J]. GIScience & Remote Sensing, 2011, 48(4): 478.
- [9] 朱惠, 张清凌, 张珊. 1992—2017年基于夜光遥感的中亚社会经济发展时空特征分析[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(7): 1449.
ZHU Hui, ZHANG Qingling, ZHANG Shan. Spatial and temporal characteristics of socio-economic development in central Asia based on a series of nighttime light images from 1992 to 2017[J]. Journal of Geo-Information Science, 2020, 22(7): 1449.
- [10] LI X, LI D R. Can night-time light images play a role in evaluating the Syrian Crisis? [J]. International Journal of Remote Sensing, 2014, 35(18): 6648.
- [11] JIANG W, HE G J, LONG T F, *et al.* Ongoing conflict makes Yemen dark: From the perspective of nighttime light [J]. Remote Sensing, 2017, 9(8): 798.
- [12] 梁鹏, 李乐林. 夜间灯光视角下俄乌冲突局势发展多尺度动态分析研究[C] // 第八届高分辨率对地观测学术年会论文集. 北京: [s.n.], 2022: 1-18.
LIANG Peng, LI Lelin. Multi-scale dynamic analysis and research on the development of the conflict situation between Russia and Ukraine from the perspective of night lights [C] // The 8th China High Resolution Earth Observation Conference. Beijing: [s.n.], 2022: 1-18.
- [13] YU Y, LIU S, LI Y, *et al.* Satellite remotely sensed nighttime lights reveal spatiotemporal dynamics of the Ukrainian-Russian conflict [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2023, 20: 1.
- [14] ZHENG Z H, WU Z F, CAO Z, *et al.* Estimates of power shortages and affected populations during the initial period of the Ukrainian-Russian conflict [J]. Remote Sensing, 2022, 14(19): 4793.
- [15] CHEN Z Q, YU B L, YANG C S, *et al.* An extended time series (2000—2018) of global NPP-VIIRS-like nighttime light data from a cross-sensor calibration [J]. Earth System Science Data, 2021, 13(3): 889.
- [16] 李明峰, 蔡炜珩. NPP/VIIRS 多时相夜光遥感影像校正方法[J]. 测绘通报, 2019(7): 122.
LI Mingfeng, CAI Weiheng. Calibration for multi-temporal NPP/VIIRS nighttime light remote sensing images[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2019(7): 122.
- [17] 江泽霖, 邓健, 栾海军, 等. 基于逐日夜间灯光遥感的新冠肺炎疫情变化信息快速提取——以北京市为例[J]. 测绘通报, 2022(7): 43.
JIANG Zelin, DENG Jian, LUAN Haijun, *et al.* Rapid extraction of COVID-19 information based on nighttime light remote sensing: A case study of Beijing [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2022(7): 43.
- [18] LIN Y, ZHANG T H, LIU X Q, *et al.* Dynamic monitoring and modeling of the growth-poverty-inequality trilemma in the Nile River Basin with consistent night-time data (2000—2020) [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2022, 112: 102903.