

夜间灯光遥感数据应用综述和展望

陈颖彪^{1,2}, 郑子豪^{1,3*}, 吴志峰^{1,2}, 千庆兰¹

(1. 广州大学地理科学学院, 广州 510006; 2. 广东省地理国情监测与综合分析工程技术研究中心, 广州 510006;
3. 帕多瓦大学土地环境农林学部, 意大利 帕多瓦 35020)

摘要:在遥感应用研究中,夜间灯光遥感作为发展活跃的一个重要分支,近年来受到越来越多来自自然科学领域和社会经济领域的关注。与传统的光学遥感卫星获取地物辐射信息不同,夜间灯光遥感是获取夜间无云条件下地表发射的可见光-近红外电磁波信息。相比于普通的遥感卫星影像,夜间灯光遥感所使用的夜间灯光影像记录的地表灯光强度信息更直接反映人类活动差异,因而被广泛应用于城市化进程研究、不透水面提取、社会经济指标空间化估算、重大事件评估、生态环境评估等领域。目前,虽然基于夜间灯光数据的应用研究成果正在不断积累,但对成果的系统性总结、整理的研究目前存在着覆盖面不全、时效性不强等不足。基于此,论文通过对近几十年来有关夜间灯光数据的研究成果的详细梳理,从数据处理与技术方法、应用研究等方面进行归纳总结。最后,文章从多源数据融合、应用领域拓展和短周期地表灯光监测3个方面指出了未来的研究热点。

关键词:夜间灯光;DMSP/OLS;NPP/VIIRS;遥感;综述

1834年第一台电动机的诞生正式拉开了电力革命的序幕。电力的广泛应用推动了社会经济的发展,也改变了人类“日出而作,日落而息”的生活习惯。电力革命推动着人类社会的电器化进程,加快了夜间照明设备的普及,使人类活动不再被夜晚黑暗所限制。人造光源在满足人类夜间生产、生活照明需求的同时,也改变了夜间地球表面亮度分布。为了详细掌握人类夜间活动所引起的地球表面亮度分布状况,20世纪70年代美国启动了国防气象卫星计划(Defense Meteorological Satellite Program, DMSP)。该计划的部分卫星搭载了线性扫描业务系统(Operational Linescan System, OLS),用于捕获夜间地表微弱的灯光辐射,并生产出一系列年度无云的夜间灯光影像(李德仁等, 2015)。正是得益于夜间灯光遥感影像在大尺度、长时间序列对地观测的能力,其开放性的数据成果能够有效支撑地

表人类活动及城市化进程研究。可以说DMSP/OLS夜间灯光数据的产生并投入应用研究,揭开了夜间灯光遥感的新篇章。

近年来随着灯光遥感数据产品的不断丰富,特别是新一代夜间灯光数据NPP/VIIRS(National Polar-Orbiting Partnership's Visible Infrared Imaging Radiometer Suite)的出现有效地弥补了DMSP/OLS夜间灯光数据在空间分辨率、时间分辨率和辐射分辨率等方面的短板,极大地拓展了夜间灯光数据的研究方向和应用领域。国内外学者从灯光数据处理、不透水面提取、城市建成区提取、人口分布空间化、经济参数空间化等方面展开了广泛的研究,取得了一系列丰硕的成果。1965—2018年,在“Web of Science数据库”中以“Nighttime Light Data”为关键词的论文数量和被引频次均保持了较快的增长,尤其是近10年间增速显著(图1)。随着研究成果的

收稿日期:2018-04-08;修订日期:2018-09-20。

基金项目:广东省自然科学基金项目(2016A030313551);国家自然科学基金项目(41671430)。[Foundation: Natural Science Foundation of Guangdong Province, No. 2016A030313551; National Natural Science Foundation of China, No. 41671430.]

第一作者简介:陈颖彪(1969—),男,吉林长春人,博士,教授,主要研究方向为GIS与RS的应用技术。

E-mail: gzhuchenyb@126.com

*通信作者简介:郑子豪(1992—),男,安徽宣城人,博士生,主要研究方向为城市与夜间灯光遥感。E-mail: zhengzh@email.com

引用格式:陈颖彪, 郑子豪, 吴志峰, 等. 2019. 夜间灯光遥感数据应用综述和展望 [J]. 地理科学进展, 38(2): 205-223. [Chen Y B, Zheng Z H, Wu Z F, et al. 2019. Review and prospect of application of nighttime light remote sensing data. Progress in Geography, 38(2): 205-223.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2019.02.005

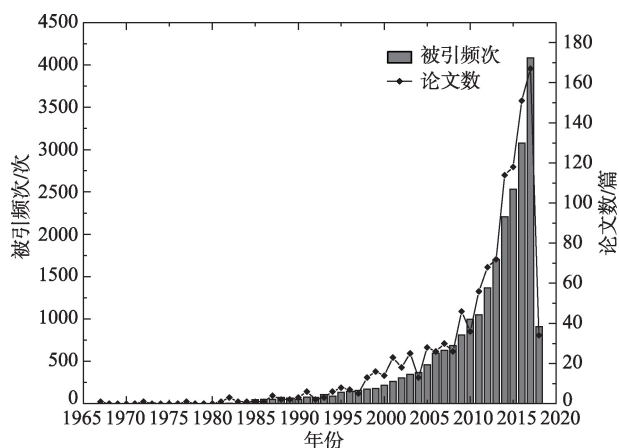


图1 1965—2018年夜间灯光数据研究论文数
及被引频次分布

Fig.1 The number of published articles on nighttime light
data and citation frequency, 1965–2018

不断积累,针对夜间灯光数据研究领域的总结归纳文献的重要性不断凸显。现有关于夜间灯光数据研究的综述性论文存在着时效性不强、覆盖面不广等不足(杨眉等, 2011; 王鹤饶等, 2012; 赵敏等, 2015)。基于此,本文重新梳理了国内外夜间灯光的研究文献,从夜间灯光遥感数据处理、数据应用等方面进行归纳总结,对研究热点展开探索展望,以期为将来的夜间灯光研究提供参考。

1 夜间灯光遥感数据处理技术与方法进展

1.1 DMSP/OLS 影像的饱和校正

在利用DMSP/OLS夜间灯光数据进行应用研究中,应用最广泛的数据就是其中的稳定灯光数据(Stable Lights)。该数据包含来自城市、城镇和其他具有持续照明的场所的灯光(包括气体照明弹),而短暂的灯光事件,例如火灾、太阳眩光、极光等已经被排除,背景噪声以零值替代,像元的数据值(Digital Number, DN)为1~63 (https://ngdc.noaa.gov/eog/gcv4_readme.txt [2018-04-05])。而随着城市的快速发展,导致城市中心区的实际夜间灯光强度已经远远超过了DMSP/OLS上搭载的光电倍增管(Photo Multiplier Tube, PMT)所能记录的上限值,并进而引发了DMSP/OLS影像的饱和问题。目前,针对DMSP/OLS灯光数据的饱和问题,国内外学者们相继提出了一系列非辐射定标的方法,本文将按照去饱和方法提出的时间顺序对几种典型的去饱和方

法进行梳理。

(1) 基于灯光像元DN值频率分布的去饱和方法
作为最早提出的用于缓解夜间灯光DMSP/OLS饱和问题的方法,基于灯光像元的DN值频率分布去饱和模型由Hara等(2010)提出。该方法通过假设饱和区的夜间灯光DN值与非饱和区的灯光DN值的变化规律、分布趋势具有一致性。通过统计任意区域内灯光DN值的分布,绘制“像元数量—DN值”二维曲线图,利用“Deltaic Model”实现对饱和像元的校正(图2a)。紧接着,Letu等(2010)在“Deltaic Model”的基础上,通过对非饱和区灯光DN值与像元数量分布的拟合,采用三次回归方程构建全域的灯光DN值的频率分布以校正灯光影像的饱和问题(图2b)。基于灯光影像DN值频率分布去饱和模型利用区域灯光的总体分布特征来替代饱和灯光分布是区域尺度上的去饱和方法。

(2) 基于不变目标的去饱和方法

基于不变目标的去饱和方法假设(寻找)某一区域内的灯光强度在某一段时间内能够保持相对稳定,通过不变目标区的灯光DN值与辐射定标(Radiance Calibrated Nighttime Lights, RCNTL)影像DN值之间的对应关系实现对夜间灯光影像的饱和修正。Letu等(2012)假设研究区内1996—1999年间灯光强度并未发生显著变化,通过构建1999年未饱和区的灯光DN值与1996—1997年辐射定标影像DN值之间的函数关系来解算1999年饱和区实际灯光DN值。Wu等(2013)选取了全球分布的若干个不变目标区,利用2006年辐射定标灯光影像构建幂数方程实现对饱和灯光影像的校正。曹子阳等(2015)选定鹤岗市市辖区作为不变目标区,以2006年辐射定标灯光影像为参考建立幂数方程,校正了时间序列的DMSP/OLS灯光数据。

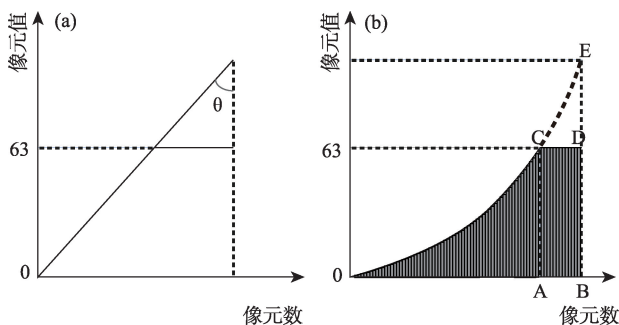


图2 灯光DN值的频率分布的模型

Fig.2 Frequency distribution of the digital number (DN)
value of the nighttime light (NTL) data

(3) 基于辅助参数的去饱和方法

① 植被指数

城市化进程的发展和人类活动的增强,使得原本的自然景观逐渐被不透水面所替代,水泥地面、高大建筑等成为了城市的代表性景观。针对城市不透水面和植被覆盖范围的相关研究就明确指出植被覆盖程度和不透水面有较强的负相关性,即不透水面覆盖度越高的地区其植被覆盖度越低(Small, 2001; Weng et al, 2004; Pozzi et al, 2005; Weng et al, 2006)。

最先尝试利用植被指数来消除 DMSP/OLS 夜间灯光饱和问题的是 Lu 等(2008)在利用多源遥感数据提取中国东南部的人类集聚区时,将 DMSP/OLS 夜间灯光数据和 Terra MODIS 的归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)数据整合,并在此基础上提出了人类居住指数 HSI(Human Settlement Index):

$$HSI = \frac{(1 - NDVI_{\max}) + OLS_{\text{nor}}}{(1 - OLS_{\text{nor}}) + NDVI_{\max} + OLS_{\text{nor}} \times NDVI_{\max}} \quad (1)$$

$$OLS_{\text{nor}} = \frac{OLS - OLS_{\min}}{OLS_{\max} - OLS_{\min}} \quad (2)$$

$$NDVI_{\max} = \max(NDVI_1, NDVI_2, NDVI_3, \dots, NDVI_n) \quad (3)$$

式中: $NDVI_1, NDVI_2, NDVI_3, \dots, NDVI_n$ 代表多时相 MODIS NDVI 影像; $NDVI_{\max}$ 为研究时间区间内 NDVI 的最大值; OLS_{nor} 和 OLS 分别代表归一化的 DMSP/OLS DN 值和原始 DN 值; OLS_{\max} 和 OLS_{\min} 则分别代表 DMSP/OLS 的最大 DN 值和最小 DN 值,一般情况最大值取 63,最小值取 0。

该指数通过归一化处理夜间灯光数据并与归一化差异植被指数 NDVI 相匹配,利用 NDVI 在饱和区的分异差异来消除该地区的夜间灯光饱和问题。但由于该指数提出的前提是假设夜间灯光强度和 NDVI 遵循着显著的负相关,Zhang 等(2013)指出在灯光饱和的地区,由于 OLS_{nor} 将处于最大值 1,而此时 NDVI 将接近 0,这将导致 HSI 呈指数级增长,进而引发该地区的过度校正问题。因此,Zhang 等(2013)在总结 HSI 的成果的基础上,基于建立一个简单、有效的光谱指数的出发点提出了基于 NDVI 修正的城市夜间灯光指数 VANUI(Vegetation Adjusted NTL Urban Index):

$$VANUI = (1 - NDVI) \times NTL \quad (4)$$

式中: NTL(Nighttime Light)为 DMSP/OLS 的获取的夜间灯光影像; NDVI 为研究区年均合成的归一化植被指数。VANUI 采用年度平均 NDVI 来降低

NTL 的饱和度并增加 NTL 夜间亮度城市间的变异性,在城市开发较早、发展速度平稳的发达国家的城市可以有效凸显城市核心区的灯光强度差异。但是,近年来随着发展中国家,特别是东亚地区的中国和印度,快速的城市化进程导致 VANUI 在该地区应用过程中无法有效凸显饱和地区的夜间灯光强度差异。考虑到增强型植被指数(Enhanced Vegetation Index, EVI)相较于归一化植被指数 NDVI 在抑制土壤背景干扰及克服自身饱和方面的优势(Li et al, 2010),卓莉等(2015)利用 EVI 与夜间灯光的空间分异性特征,将 EVI 作为修正的参数,纳入修正饱和模型中,在不增加模型复杂度的前提下提出了基于 EVI 修正的灯光指数 EANTLI(EVI Adjusted NTL Index):

$$EANTLI = \left[\frac{2}{1 - (NTL_{\text{norm}} - EVI)} - 1 \right] \times NTL \quad (5)$$

式中: NTL 和 NTL_{norm} 分别是原始和归一化处理的 DMSP/OLS 夜间灯光影像; EVI 则代表的是年均处理后的增强型植被指数。利用年均 EVI 以修正饱和的 EANTLI 相较 HSI 与 VANUI 能够降低土壤背景的干扰,克服 NDVI 本身易饱和的问题,在饱和问题突出的城市中心区能较好地增强灯光强度差异,消除原始 NTL 的饱和现象。

② 地表温度及植被指数

由于上述单一的植被指数作为修正参数仅仅考虑了植被这一自然因子的空间分布差异而忽略了人为因素对城市内部结构演化的影响,导致植被覆盖程度与灯光强度之间负相关的绝对稳定性将会对修正饱和效果产生影响(Ma, 2014)。陆地表面温度(Land Surface Temperature, LST)是地球表面能量平衡和温室效应的一个指标,它是区域和全球尺度地球物理过程中的一个关键因子,可以反映“土壤-植被-大气”系统的能量流动与物质交换,在气候、水文、生态和生物地球化学等许多领域的研究中非常必要(何月等, 2009)。搭载在美国对地观测系统(Earth Observation System, EOS)系列卫星上的中分辨率成像光谱仪(Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS)传感器有 36 个离散光谱波段,能够有效监测地球表面的辐射能量变化,进而反演出陆地表面温度数据产品。由于 LST 在反演城市热岛、城市结构、人类活动等方面的优势, Liu 等(2017)将 MOD11A2 中 8 d 合成的 1 km 分辨率 LST 数据与 MOD13A3 中月度合成的 1 km 分辨率 EVI 数据相结合,共同引入 NTL 的去饱和模型中,

并提出了LST联合EVI修正城市夜间灯光指数LERNCI(LST and EVI Regulated NTL City Index):

$$\text{LERNCI} = \text{norm} \left[\left(\frac{\text{LST}}{\text{LST}_{\text{AVG}_s}} + \frac{\text{EVI}_{\text{AVG}_s}}{\text{EVI}} \right) \times \text{NTL} \right] \quad (6)$$

式中: $\text{LST}_{\text{AVG}_s}$ 和 $\text{EVI}_{\text{AVG}_s}$ 分别代表了研究区内存在饱和现象的像元所对应的LST和EVI的均值。LERNCI首次将城市热环境因素纳入原始NTL的去饱和研究中,基于LST和EVI双重调控下的LERNCI能够较好地改善由单一植被指数修正所造成的差异性不够显著的问题。

③ GDP 格网数据

HSI、VANUI、EANTLI和LERNCI等指数均是通过引入自然因子作为辅助参数对城市中心区的饱和和夜间灯光进行校正。国内生产总值GDP(Gross Domestic Product)指一个国家(或地区)所有常住单位在一定时期内生产的全部最终产品和服务价值的总和,作为国民经济核算的核心指标,能够有效衡量国家(或地区)的经济发展状况。由于GDP在反映城市发展活力方面的特性,景欣等(2017)构建了对应时间的GDP格网数据与未饱和区灯光DN值之间的线性函数关系,并利用该函数方程反算饱和区的灯光DN值以消除该区域的饱和现象。

④ 矢量数据

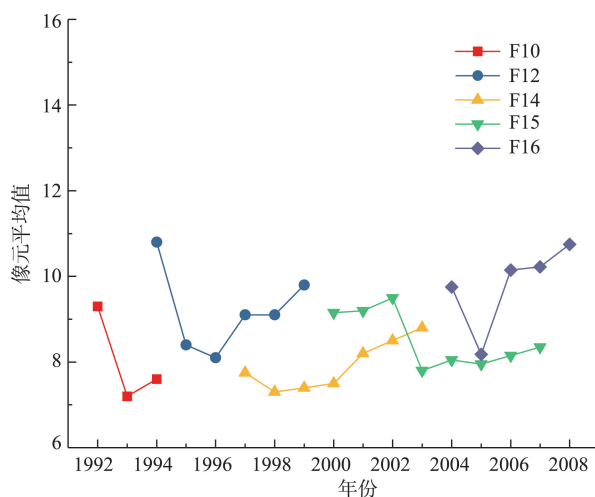
地理空间大数据的爆发式增长,使矢量数据作为辅助参数参与DMSP/OLS夜间灯光数据去饱和过程成为了可能。郑子豪等(2018)利用多源路网数据创建可变尺度的单元路网长度网格,使用地理探测器验证了单元路网长度在解释灯光强度分异的优越性,并通过划分饱和区和潜在饱和区构建了分段式的饱和修正模型。基于矢量数据的去饱和方法充分利用矢量数据在空间分辨率方面的独特优势,能够在城市中心区突破分辨率的限制(DMSP/OLS的分辨率一般重采样为1 km),获取更优分辨率的修正饱和灯光数据产品。

1.2 DMSP/OLS 影像的连续性校正

DMSP/OLS夜间灯光影像在广泛应用过程中另外一个值得关注的问题就是时间序列下的灯光强度连续性。由美国国家地球物理数据中心(National Geophysical Data Center, NGDC)在线发布的“Version 4 DMSP/OLS Nighttime Lights Time Series”提供了1992—2013年间的稳定灯光数据集。

这些稳定灯光数据集分别由6个传感器所提供,包括:F10(1992—1994年)、F12(1994—1999年)、F14(1997—2003年)、F15(2000—2007年)、F16(2004—2009年)和F18(2010—2013年)。由于传感器在获取夜间地表灯光辐射过程中会受到多种因素的影响,导致在使用长时间序列的DMSP/OLS稳定灯光数据集时会出现不同传感器获取的不同时间段的灯光影像不连续(图3)和同一年份不同传感器获取的灯光影像存在差异的问题(曹子阳等, 2015)。

20世纪90年代,有学者在连续多时相遥感影像的研究中发现,在某些地表特征基本保持不变的地区,其像元值之间存在的对应关系可以被用于多时相遥感影像的校正(Hall et al, 1991; Lenney et al, 1996)。为削弱DMSP/OLS时间序列的稳定灯光数据彼此间的不连续性,Elvidge等(2009)在参考上述思路的基础上提出了一种基于不变目标区域的DMSP/OLS稳定夜间灯光的连续性校正方法。该方法的核心思想是通过寻找整个时间序列中灯光强度变化最不显著的地区作为不变目标区域,并选定该区域内某一时间点的稳定灯光影像作为标准参考。以不变目标区在整个时间序列内的灯光数据DN值不发生变化为假设,构建待校正影像与参考标准影像的校正方程实现连续性校正。后续学者提出的连续性校正方法大多基于不变目标区域这一原理。Pandey等(2017)分别采用系统最小误差和社会经济指标关联度对当下几种基于不变目标



注: 来自 Liu et al, 2012

图3 1992—2008年间中国地区稳定灯光数据平均DN值
Fig.3 Average digital number (DN) values of nighttime light (NTL) data for China, 1992—2008

区域提出的连续性校正方法(表1)进行了全面评估。

1.3 NPP/VIIRS 噪声去除

新一代夜间灯光数据 NPP/VIIRS 的上线给城市化研究提供了另外一种强有力的数据支撑。NPP/VIIRS 夜间灯光数据相较于 DMSP/OLS 夜间灯光数据无论是在灯光捕获敏感度、灯光记录值域还是空间分辨率上都有了显著的提高。其中 DNB

(Day Night Band)数据产品由于未进行去光处理,导致 VIIRS 夜间灯光影像中存在背景噪声,一定程度上限制了该数据的应用。目前针对 NPP/VIIRS 噪声的方法主要有2类(表2):一类是借助 DMSP/OLS 夜间灯光影像不存在背景噪声和不稳定光源的特征,使用 DMSP/OLS 夜间灯光影像对 VIIRS 夜间灯光影像进行噪声剔除(Li X, Xu H M et al, 2013; 柴子

表1 主要的连续性校正方法对比

Tab.1 Differences in the methodological details of existing calibration methods

校正方法	应用范围	不变目标区	参考标准影像	校正方程
Elvidge et al, 2009	全球	西西里(意大利)	F12 1999	二阶多项式
Wu et al, 2013	全球	波多黎各、毛里求斯和冲绳	RCNTL 2006	幂函数
Zhang et al, 2016	全球	无(使用全局一致的偏差)	F15 2000	二阶多项式
Hsu et al, 2015	全球	洛杉矶	RCNTL 2006	线性函数
Li, Chen, et al, 2013	北京	无(使用全局一致的偏差)	F15 2001	线性函数
Bennie et al, 2014	欧洲	英格兰西南部	F12/F14 2004	六阶多项式
Pandey et al, 2013	印度	勒克瑙地区	F16 2007	二阶多项式
Liu et al, 2012	中国	鸡西市	F16 2007	二阶多项式

表2 夜间灯光遥感数据处理方法总结

Tab.2 A summary of nighttime light data processing methods

数据	问题	方法	代表文献
DMSP/OLS	饱和问题	基于像元DN值频率分布去饱和方法	Letu(2010)等通过对非饱和区灯光DN值与像元数量分布的拟合,采用三次回归方程构建全域的灯光DN值的频率分布以校正灯光影像的饱和问题
		基于不变目标的去饱和方法	曹子阳等(2015)选定鹤岗市市辖区作为不变目标区,以2006年辐射定标灯光影像为参考建立幂数方程,校正了时间序列的DMSP/OLS灯光数据
		基于辅助参数去饱和方法	
		植被指数	卓莉等(2015)将EVI作为修正的参数,在不增加模型复杂度的前提下提出了基于EVI修正的灯光指数EANTLI
		地表温度及植被指数	Liu等(2017)将LST数据与EVI数据相结合,提出了LST联合EVI修正城市夜间灯光指数LERNCI
		GDP格网数据	景欣等(2017)构建了对应时间的GDP格网数据与未饱和区灯光DN值之间的线性函数关系,并利用该函数方程消除该区域的饱和现象
		矢量数据	郑子豪等(2018)利用多源路网数据创建可变尺度的单元路网长度网格,并通过划分饱和区和潜在饱和区构建了分段式的饱和修正模型
	连续性问题	不变目标区域连续性校正法	Wu等(2013)在全球范围内分别选取了波多黎各、毛里求斯和冲绳等区域作为不变目标区,并以2006年的RCNTL作为参考影像,基于幂函数对全球范围内的DMSP/OLS影像进行校正
NPP/VIIRS	背景噪声问题	基于DMSP/OLS夜间灯光影像的去噪法	柴子为等(2015)提取DMSP-OLS中DN为非0的像元,生成掩膜,将NPP-VIIRS数据中掩膜外数据归为0,即将掩膜外的数据视为非稳定夜间灯光
		基于先验知识的去噪法	李峰等(2016)在Google Earth影像中,从各地级市行政区划内选择湖泊、水库等面积较大的水域中的采样点,在对应VIIRS夜间灯光数据寻找对应的地理位置并记录该位置的灯光像元值,计算它们的平均像元值并作为最小灯光阈值,依据在内陆大面积水域灯光夜间为零的原则,小于最小灯光阈值的像元赋值为零

为等, 2015); 另一类是通过先验知识选定特殊区域的像元进行统计, 在此基础上确定研究区的最大(CBD)和最小灯光阈值(内陆大面积水域), 并用该阈值剔除背景噪声(李峰等, 2016; 唐梁博等, 2017)。

2 夜间灯光遥感数据的应用研究

2.1 城市扩张及城市化研究

2.1.1 不透水面的提取

不透水面(Impervious Surface Area, ISA)又称非渗透性表面, 是指由各种不透水建筑材料(如水泥、沥青、瓷砖等)所覆盖的表面(Arnold et al, 1996)。随着城市化进程的加剧, 城市地表中渗透性表面(如植被、土壤等)越来越多地被不透水面所替代, 并引发了一系列生态、环境问题(Moscip et al, 1997; Brabec et al, 2002; Gillies et al, 2003; Yuan et al, 2007)。由于不透水面在区域水热循环方面的重要影响, 如何准确、快速地提取不透水面引起了诸多学者的思考(王浩等, 2013)。夜间灯光数据所反映的地表灯光强度的分布特征跟不透水面覆盖密切相关, 近年来也逐渐被用于不透水面提取。美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)下属的 NGDC 基于 DMSP/OLS 灯光数据于 2007 年首次发布了全球 1 km 分辨率的地表不透水面数据, 并指出中国虽然具有最大的不透水面面积, 但人均 ISA 远低于美国(Elvidge et al, 2007)。Lu 等(2008)则利用上文提及的 HSI 指数结合 MODIS NDVI 数据和 DMSP/OLS 数据对中国华南地区的不透水面进行了有效提取。为了获取小尺域的高精度不透水面信息, 匡文慧等(2011)将 NGDC 提出的不透水面指数嵌入高精度人工解译的 LUCC(Land-Use and Land-Cover Change)以实现动态更新的城乡建设用地信息提取, 提取的不透水面比例误差幅度在 15% 以内。为了实现大尺度、高精度的不透水面分布制图, 郭伟(2015)利用高分辨率的 NDVI 分别与 DMSP/OLS、NPP/VIIRS 灯光影像创建融合变量, 并提出了归一化不透水面指数 NISI 和大尺度不透水面指数 LISI。该方法克服了以往与阈值法提取不透水面过程中无法保留小面积不透水面的缺陷, 具有较大的潜力。随着遥感技术的发展, 多源遥感数据的综合利用自动提取不透水面的方法逐渐完善。程熙等(2017)集成了夜间灯光遥感和多光谱遥感数据

(Landsat TM 影像), 通过图像分区的方式在像元级别实现了 ISA 的自动提取。

2.1.2 城镇建设用地的提取

不同于 Landsat 系列、SPOT 系列等传感器对地表太阳辐射的探测, DMSP/OLS 及 NPP/VIIRS 为代表的传感器能够捕获城市、居民地、渔船等在夜间发出的微弱灯光信号并与黑暗的乡村、山林地区区分开来, 进而实现城市边界、城镇建筑用地的信息提取(He et al, 2006)。Croft(1978)首次阐述了利用 DMSP/OLS 提取城市建成区的可行性后, 国内外学者针对夜间灯光数据提取建成区、城市范围、提取算法等方向展开深入的研究。总体来说, 目前国内外学者在利用夜间灯光数据提取城市区的研究从提取方法上大致可以分为以下几类:

(1) 阈值分割法。该方法是最常见的一种图像分割方法之一, 由于其提取算法相对简单、效率较高, 在图像分割的研究中被广泛运用。作为一种灰度图像, 夜间灯光影像在阈值分割算法下的目标区域提取同样受到了诸多学者的关注。根据划定阈值的方法、动机的不同, 阈值分割法又可以细分为经验阈值、突变检测及参考比较法 3 个系列。经验阈值通过有关先验知识人为设定特定的阈值进行城市区的提取(Sutton, 1997; Sutton et al, 2001)。由于该方法设定的阈值过程中受个人主观因素影响, 其结果缺乏足够的科学依据及稳定性, Zhou 等(2014)在此基础上提出了一种基于聚类分割的最优阈值分割算法, 并有效地运用于不同发展水平的国家及地区。突变检测法是由 Imhoff 等(1997)在利用 DMSP/OLS 提取美国建成区的研究中所提出, 该方法假设城市建成区由完整的斑块组成, 随着阈值的调整, 建成区斑块开始缩小, 而斑块出现破碎时的阈值则为提取城市区的最优阈值(黄璐等, 2018)。相较于经验阈值法和突变检测, 参考比较法可以根据研究区的不同选择不同的辅助参考数据, 因而在提取精度及科学性上有较大的优势。根据辅助参考数据的类型, 该方法又可划分为统计数据参考提取和遥感影像参考提取 2 种。统计数据参考提取的核心要点是以政府发布的各地市的建成区面积统计数据为参考, 通过设定初始阈值来初步分割城市与非城市, 并对比城市区面积与统计数据之间的差值, 不断迭代阈值直到提取的城区面积与统计数据相一致(Milesi et al, 2003; He et al, 2006; Shi, Huang et al, 2014; 董晨炜等, 2017; 杨任飞等, 2017)。遥感

影像参考提取则利用高分辨率的多光谱遥感数据或者土地利用数据作为辅助数据实现城市建成区信息提取(Henderson et al, 2003; Liu et al, 2012; 杨洋, 黄庆旭等, 2015; 杨洋, 马学广等, 2015; 唐梁博等, 2017)。

(2) 多时相图像融合法。DMSP/OLS夜间灯光影像之所以被国内外学者广泛地运用于城市化的研究,其中最重要的一个原因在于DMSP/OLS夜间灯光具有较长的时间序列(DMSP/OLS: 1992—2013年; NPP/VIIRS: 2012年至今),能够提供一个独特的“空中”视角窥探全球、地区的城市化进程。在利用时间序列的夜间灯光影像进行城市化进程的研究中, Small等(2005)率先将不同时间序列经过处理的灯光观测频率影像进行了RGB合成,通过图像颜色的变化实现城市扩张及城市发展方向、趋势的探测。Zhang等(2011)则通过采用迭代的非监督分类方法对多时相融合的NTL组合影像(Multi-temporal DMSP/OLS Data)进行了城市化分析。

(3) 支持向量机法。支持向量机(Support Vector Machine, SVM)是一种基于统计学习理论的无参数图像识别、分类方法(Vapnik, 2000)。SVM作为一种监督学习模型其最大的优势是可以通过较少的训练样本达到较优的分类效果(Mantero et al, 2005)。为了避免经验阈值法在灯光影像城市区提取中可能出现的主观性干扰, Cao等(2009)在传统SVM的基础上提出了支持向量机区域增长算法,半自动地实现城市区的提取。Xiao等(2014)、高亚红等(2017)在多尺度、多时相的城市区提取中进一步拓展了该方法的应用场景。

国内外学者在提取方法领域的深入探讨,也激发部分学者开展了基于夜间灯光影像的城区提取精度的评价研究(舒松等, 2011; 唐敏, 2017)。研究通过选定特定研究区域,运用多种基于灯光影像的城区提取方法实现城市区范围提取,并参照标准数据进行精度评价。

2.1.3 城市发展模式及空间结构分析

城市作为一个由多种要素组合的复杂有机体,在城市化进程中其发展模式和空间结构也处于动态的演变之中。随着夜间灯光数据在不透水面提取、城市建成区提取等方面的广泛应用,不少国内外学者开始不满足于单纯的斑块提取并尝试开展城市发展模式及城市空间结构的相关研究。廖兵等(2012)和范俊甫等(2013)将景观生态学中的景观指数分析方法引入城市灯光斑块的研究中,探索城

市发展空间格局变化特征。还有部分学者根据像元层级的灯光辐射亮度与亮度梯度之间的关系,将城市灯光进行多级划分,动态地研究不同类别之间的占比及变化特征以揭示城市发展的规律(Wu et al, 2014; Ma et al, 2015)。Yu等(2014)则开创性地利用改进型无穷距离扩展算法定量地表示城市间的空间邻近性以进行城市聚类分析,识别出城市群。考虑到夜间灯光数据跟地形数据(尤其是数字高程模型DEM)的相似性,也有学者将地形分析中的“波峰”“坡度”等概念思想推广到夜间灯光影像的分析之中,综合利用多种地形分析模型来研究城市的空间结构、扩张轨迹(Yi et al, 2014; 赵敏等, 2015; 张志刚等, 2016; 陈佐旗, 2017)。

2.2 参数空间化应用研究

2.2.1 人口的空间化及估算

城市人口数据是研究城市发展、制定相应政策的重要支撑数据。传统的人口数据多基于行政单元统计,单元区内人口分布状况被忽略,单元间的人口数据产生突变,无法满足精细尺度的城市发展研究需求。精确掌握人口的数量和分布特征,实现人口数据空间化将有助于信息化城市、智慧城市的建设,为区域可持续发展研究提供数据支持。20世纪70年代,就有资料显示灯光城区面积与人口点分布之间存在显著关系。1997年, Sutton(1997)和 Sutton等(1997)就以美国为例,使用DMSP/OLS夜间灯光数据与人口密度数据进行相关性分析,定量地明确了DMSP/OLS夜间灯光数据在分析、估算人口分布领域的潜力。随后,国内学者Lo(2001)以多年份中国地区DMSP/OLS夜间灯光数据为基础,采用灯光面积、灯光体积、像素平均值和灯光密度为独立变量,建立人口估算模型,在多级行政单元尺度上估算了中国的平均人口密度。卓莉等(2005)和 Zhuo等(2009)通过对行政单元内灯光斑块面积与居住面积的占比将行政单元进行归类,分类建立灯光强度与人口之间的回归模型以实现大尺度的人口密度快速估算。曹丽琴等(2009)利用多时相灯光遥感数据和社会统计数据建立线性模型估算地级市和直辖市人口,并利用BP神经网络估算县级市、城镇人口。

近年来,随着多遥感数据的丰富,学者们一方面开始将土地利用信息与DMSP/OLS夜间灯光数据相结合进行更精准的人口空间化研究(梁友嘉等, 2012; 陈晴等, 2014; 陈晴等, 2015; 黄杰等, 2015; 马钰琪等, 2015; 王珂靖等, 2015; 高倩等,

2017)。另一方面,由于NPP/VIIRS夜间灯光数据产品的面世,利用NPP/VIIRS夜间灯光数据进行不同尺度的人口空间化研究(黄益修, 2016; 李翔等, 2017)以及DMSP/OLS与NPP/VIIRS夜间灯光数据人口空间化精准度对比的研究也越来越多(高义等, 2013; 胡云锋等, 2018)。此外,张志杰(2016)将夜间灯光估算人口的研究进一步延伸到灾后评估,利用人口统计数据与灯光强度之间的定量关系模型,对汶川地震的灾区面积及受灾区域人口进行估算分析,有力支援了地震灾害的应急决策。

2.2.2 GDP参数的空间化及估算

长期以来,GDP指标的核算都是建立在各种统计资料、统计报表之上,并以行政单元为基础,缺乏有效、准确的空间位置信息。如何快速有效地将传统GDP统计数据跟地理坐标关联,实现GDP指标的空间化以更好地开展更加精细的区域发展研究成为了值得关注的问题。由于夜间灯光在刻画地表人类活动及城市夜间活力方面的特性,使利用夜间灯光数据进行GDP参数的空间化估算成为了可能。早在1997年,Elvidge等(1997)就以美国等21个国家为研究区,利用DMSP/OLS夜间灯光数据分析了区域灯光灰度值与GDP、耗电量等指标的相关性,并在随后的研究中进一步拓展了研究区范围,通过建模明确了灯光数据在GDP空间化估算方面的实际意义(Elvidge, Imhoff et al, 2001)。Sutton等(2002)认为某一国家的GDP与该国的发射灯光能量(Light Energy, LE)有关,并首次绘制了全球1 km分辨率的经济活动地图。基于灯光辐射亮度值与GDP及GRP(Gross Regional Product)的高相关性,Doll等(2006)绘制了欧洲11个国家及地区5 km分辨率的GDP格网地图。在地区尺度上,近年来国内学者也逐步开展了基于DMSP/OLS夜间灯光数据的GDP空间格网化研究(Chen et al, 2011; 王琪等, 2013; Yue et al, 2014; Cao et al, 2016)。随着夜间灯光遥感数据在GDP空间化领域应用日渐成熟,韩向娣等(2012)、梁友嘉等(2013)和李宗光等(2016)开始分产业定量的探讨夜间灯光数据与统计型社会经济数据的空间关系。随着新一代的夜间灯光数据的上线,基于NPP/VIIRS夜间灯光数据的GDP空间化研究也逐步展开并取得了一系列成果(郭永德等, 2016; 李峰, 米晓楠等, 2016; 李峰, 卫爱霞等, 2016)。为了对比DMSP/OLS夜间灯光数据与NPP/VIIRS夜间灯光数据在参与GDP空间化及估算过程中的精度差异,部分学者选取了多个灯光指标与

GDP进行相关性分析,结果表明NPP/VIIRS夜间灯光数据在GDP空间化过程中具有更高的准确性(Shi, Yu et al, 2014; 柴子为等, 2014; 曹子阳, 2016)。

2.2.3 电力消耗量、碳排放量的估算

城市化进程的加剧、国民经济的快速增长,推动了居民生活水平的快速提升,加剧了城市电力能源消耗量与碳排放量。电力消耗量能直观地反映地区的电力消费状况、衡量地区社会发展水平。由于目前的电力消耗量和碳排放量的统计单元还处于行政单元级别,缺乏空间分异信息,无法揭示地区电力消耗与碳排放的地区差异,限制了统计数据的有效应用。连续高分辨率夜间灯光数据可以清楚探测到人类足迹,引起诸多学者开展电力消耗量、碳排放量的估算研究。

利用夜间灯光数据进行能源消耗量估算的研究起源于20世纪80年代(Welch, 1980; Foster, 1983)。Welch(1980)率先选取美国东部的城市为研究区,结合夜间灯光影像建立起电力消耗量和灯光亮度之间的回归模型,验证了夜间灯光数据进行电力消耗量估算的可行性。Elvidge等(1997)和Elvidge, Imhoff等(2001)先后在国家尺度利用DMSP/OLS夜间灯光数据的区域灯光灰度值与地区电力能源消耗量之间的相关性构建了对数模型。Amaral等(2005)以亚马逊河流域为研究区,在区域尺度量化了DMSP/OLS夜间灯光数据和电力能量消耗间的相关性。Letu等(2009)对亚洲十几个国家的电力消费与夜间灯光强度之间的相关性分析也进一步验证了夜间灯光影像在估算电力消耗量的可行性。Chand等(2009)基于DMSP/OLS夜间灯光数据对印度开展了长时间序列的电力消耗量时空变化特征研究。Min等(2013)则聚焦非洲的农村地区,通过相关性分析验证了使用夜间灯光监测电力普及率的合理性。2010年来,国内学者在电力消耗量估算方面则侧重于利用时间序列的夜间灯光影像来构建精确的电力消耗量反演模型进行能源消费时空动态分析(李通等, 2011; Zhao et al, 2012; He et al, 2014; 吴健生等, 2014; 曹子阳等, 2015; 李俊峰, 2015; 朱林富, 2015; 潘竞虎等, 2016)。Shi等(2018)最新的研究将研究区视角聚焦到“一带一路”国家,基于DMSP/OLS夜间灯光数据从多个角度研究“一带一路”国家中EPC(Electric Power Consumption)的时空模式。

根据有关统计资料显示,2000年以来中国CO₂排放量增长迅速,截至2008年年度碳排放量已经超

过美国成为了世界第一碳排放国(刘占成等, 2010)。面对着前所未有的节能减排国际压力, 如何能够准确、有效、及时地掌握不同尺度的碳排放时空特征显得尤为迫切。目前, 国内的碳排放数据多为国家统计局及下属部门发布的统计数据, 缺乏有效的空间信息, 且不同层级的部门之间也存在着统计口径不一致问题。

近年来, 随着夜间灯光数据在人类社会活动、城市化进程方面的研究深入和拓展, 国内外学者们开始将夜间灯光数据参与碳排放的空间化分析过程。国外学者在利用夜间灯光数据进行碳排放研究起步较早, Doll等(2000)选取了全球不同发展阶段的多个国家, 分析了DMSP/OLS灯光面积和CO₂排放量的相关性, 并成功绘制了1995年的全球1°格网的CO₂分布图。Raupach等(2010)选择了美国、中国、日本等国家, 按照经济发展水平分为多个区域进行单位灯光面积与碳排放量之间的相关性分析。Ghosh等(2010)则综合利用DMSP/OLS夜间灯光数据和人口分布数据, 分别对CO₂排放量进行模拟, 并将模拟的结果相结合生存了全球1 km分辨率的CO₂排放量空间分布图。发展中国家CO₂排放量快速增长, 却缺乏能源数据, 国内学者Meng等(2014)基于夜间灯光数据提出了一种自上而下的方法来估算城市规模的CO₂排放量。苏泳娴等(2013)、Su等(2014)和苏泳娴(2015)针对目前各地区碳排放统计口径不一致、数据严重缺失的现状, 基于DMSP/OLS夜间灯光数据, 构建了一套快速准确监测地级市能源碳排放的定量测算方法。

2.2.4 空气污染物评估

近年来, 频繁出现的雾霾天气严重影响了城市居民的身心健康和生存质量。2014年1月4日, 国家减灾办、民政部首次将危害健康的雾霾天气纳入2013年自然灾情进行通报。雾霾天气是一种大气污染状态, 雾霾是对大气中各种悬浮颗粒物含量超标的笼统表述, 尤其是PM_{2.5}(空气动力学当量直径小于等于2.5 μm的颗粒物)被认为是造成雾霾天气的“元凶”。随着雾霾问题逐渐被公众关注和了解, 如何持续有效地监测雾霾状况成为了研究热点之一。特别是NPP/VIIRS的发射成功实现了全球夜间灯光的连续性监测, 从而也促使了学者开展利用夜间灯光数据进行空气污染物的监测研究。李伟等(2015)收集了北京市VIIRS夜间灯光数据和部分地面空气质量监测站点PM_{2.5}浓度数据, 并基于GIS空间插值分析提出一种新的持续监测城市雾霾天

气的方法。李润亚(2015)则基于日均NTL数据建立了BP神经网络模型用于反演地表PM_{2.5}浓度。Wang等(2016)选取VIIRS的DNB数据集对比分析了美国亚特兰大地区夜间灯光辐射强度和PM_{2.5}浓度之间的关系, 结果表明DNB图像能够反映城市规模的空气质量变化, 并能够表征PM_{2.5}的变化特征。赵笑然等(2017)以北京市作为研究区, 基于DNB微光辐射数据和PM_{2.5}监测站点数据及支持向量机方法, 建立了夜间城市PM_{2.5}质量浓度反演模型。尽管目前基于DMSP/OLS(曹子阳, 2016)和NPP/VIIRS夜间灯光影像的PM_{2.5}反演及相关性研究取得了一定的成果, 但在研究过程中依然存在着研究区过于限定、其他环境变量被忽略、缺乏理论分析认证等不足。如何进一步丰富夜间灯光影像与空气污染物分布间的理论关联, 定量反演更大尺度、时间序列的污染物分布是未来研究的重点。

2.3 其他研究与应用

除了上述的城市化研究和参数空间化应用外, 夜间灯光数据还在灾害评估、重大事件评估、渔业研究等方面也起到了重要的数据支撑作用。在灾害评估方面, 学者们将夜间灯光数据分别应用于地震灾害评估(Hayashi et al, 2000; Kohiyama et al, 2004; 刘双庆, 2012; 张宝军, 2018)、台风灾害评估(李钢, 2014)、森林草原火灾(Elvidge, Hobson et al, 2001; Chand et al, 2007; 乌云德吉, 2014)等并取得了一系列成果。针对重大事件评估的研究则主要涉及能源(De Souza Filho et al, 2001; Cao et al, 2013)、经济(Li, Ge et al, 2013)、战争(Agnew et al, 2008; Witmer et al, 2011; Li, Chen, et al, 2013; Li et al, 2014)等方面。利用夜间灯光数据的渔业研究开始于20世纪90年代(Cho et al, 1999), 并逐渐延伸到渔船定位(Kiyofuji et al, 2004; Waluda et al, 2004; 郭刚刚等, 2017)、渔业强度(Waluda et al, 2008; 张思宇, 2017)、海洋环境评估(Aubrecht et al, 2008; Cho et al, 2010)、油气平台识别(成王玉, 2015; 李强等, 2017)等方面。

通过对以上夜间灯光遥感数据的应用研究进行梳理(表3), 不难发现, 当下给予夜间灯光遥感数据的应用研究正在从传统的人口、GDP、能源消耗等领域开始不断拓展, 朝着更多、更广的交叉领域延伸, 并取得了诸多富有意义的成果。同时, 随着中国首颗夜间灯光遥感卫星“珞珈一号”的成功发射与运作, 夜间灯光遥感的研究也将迎来新的契机。

3 总结与展望

自美国国家地球物理中心 NGDC 下属的对比观测小组 EOG 向大众发布夜间灯光影像数据开始,

围绕夜间灯光数据的图像处理、信息提取、数据挖掘等研究如雨后春笋般接踵而至,夜间灯光数据的出现为研究人类活动及城市化进程提供了一种独特的视角和稳定便捷的途径。目前基于夜间灯光

表3 夜间灯光遥感数据的应用研究总结
Tab.3 A summary of application research of nighttime light data

应用领域		主要方法	代表研究
城市化研究	不透水面提取	融合 HSI 和 NDVI	Lu 等(2008)基于 HIS、NDVI 和 DMSP/OLS 数据对中国华南地区的不透水面进行了有效提取
		融合 LUCC	匡文慧等(2011)将人工解译的 LUCC 融入不透水面指数提取中,实现动态更新的城乡建设用地信息提取
		融合 Landsat TM	程熙等(2017)集成了夜间灯光遥感和 Landsat TM 影像,实现了 ISA 的自动提取
	建设用地提取	阈值分割法	Zhou 等(2014)在提出了一种基于聚类分割的最优阈值分割算法,并有效地运用于不同发展水平的国家及地区
		多时相图像融合法	Small 等(2005)将不同时间序列的经过处理的灯光观测频率影像进行了 RGB 合成,通过图像颜色的变化实现城市扩张及城市发展方向、趋势的探测
		支持向量机法	Cao 等(2009)在传统 SVM 的基础上提出了支持向量机区域增长算法,半自动地实现城市区的提取
		景观指数分析法	廖兵等(2012)和范俊甫等(2013)将景观生态学中的景观指数分析方法引入城市灯光斑块的研究中,探索城市发展空间格局变化特征
	城市发展模式识别	多级划分法	Wu 等(2014)根据像元层级的灯光辐射亮度与亮度梯度之间的关系,将城市灯光进行多级划分,动态的研究不同类别之间的占比及变化特征以揭示城市发展的规律
		改进型无穷距离扩展算法	Yu 等(2014)开创性地利用改进型无穷距离扩展算法定量表示城市间的空间邻近性以进行城市聚类分析,识别出城市群
		地形分析法	张志刚等(2016)构建灯光亮度和灯光亮度起伏度特征组合值模型,分析灯光亮度和灯光亮度起伏度组合特征,并对城乡结合部进行空间识别
参数空间化	人口	多元灯光指标估算模型	Lo(2001)以多年份中国地区 DMSP/OLS 夜间灯光数据为基础,采用灯光面积、灯光体积、像素平均值和灯光密度为独立变量,建立人口估算模型,在多级行政单元尺度上估算了中国的平均人口密度
		结合社会统计数据的估算模型	曹丽琴等(2009)利用多时相灯光遥感数据和社会统计数据建立线性模型估算地级市和直辖市人口
		结合 LUCC 数据的估算模型	梁友嘉等(2012)基于夜间灯光辐射数据和 LUCC 在像元栅格水平上构建张掖市甘州区人口空间分布
	GDP	全球尺度 GDP 估算模型	Sutton 等(2002)首次绘制了全球 1 km 分辨率的经济活动地图
		区域尺度 GDP 总体估算模型	Doll 等(2006)绘制了欧洲 11 个国家及地区 5 km 分辨率的 GDP 格网地图
		分产业 GDP 估算模型	韩向娣等(2012)分产业定量地探讨夜间灯光数据与统计型的社会经济数据的空间关系,并绘制出了全国 GDP 密度图
	电力能源消耗	单时相电力能源消耗估算模型	Amaral 等(2005)以亚马逊河流域为研究区,在区域尺度量化了 DMSP/OLS 夜间灯光数据和电力能量消耗间的相关性
		时间序列电力消耗估算模型	Chand 等(2009)基于 DMSP/OLS 夜间灯光数据对印度开展了长时间序列的电力消耗量时空变化特征研究
	空气污染物	空间插值法	李伟等(2015)基于 GIS 空间插值分析提出一种新的持续监测城市雾霾天气的方法,并对北京市的 PM _{2.5} 浓度进行了反演
		BP 神经网络模型	李润亚(2015)则基于日均 NTL 数据建立了 BP 神经网络模型用于反演地表 PM _{2.5} 浓度
		支持向量机方法	赵笑然等(2017)以北京市作为研究区,基于支持向量机方法建立了夜间城市 PM _{2.5} 质量浓度反演模型
		相关性分析	张宝军(2018)基于夜间灯光遥感数据,分析汶川地震极重灾区夜间灯光分布范围和强度的年际变化特点,探索分析夜间灯光变化与灾害损失的相关关系
渔业研究	渔船定位识别	阈值分割峰值检测算法	郭刚刚等(2017)基于最大熵法阈值分割以及局部峰值检测法,对西北太平洋公海灯光围网渔船船只进行了识别

数据的研究主要是 DMSP/OLS 和 NPP/VIIRS 两种夜间灯光影像。研究的热点主要集中在城市扩张、建成区提取、人口社会经济指标的空间化和电力消耗估算等领域。

虽然,近年来基于夜间灯光的研究和应用无论从深度还是广度而言均取得了诸多成果,但还存在一定不足,包括:①数据本身的缺陷极大地阻碍和削弱了夜间灯光数据在定量分析中的准确性。具体而言,DMSP/OLS 夜间灯光数据虽然具有较长的时间跨度,但是却存在着辐射饱和、空间分辨率较低和多传感器数据不连续等缺陷。此外,由于区域间社会经济水平、发展程度差异导致在运用 DMSP/OLS 灯光数据时需要分区进行参数设计(具有黑箱性、非机理性),在一定程度上限制了灯光数据的精细化应用。而 NPP/VIIRS 夜间灯光数据在辐射饱和、空间分辨率问题上有了显著的提升,但是却存在背景噪声、数据时间跨度较短等不足。学者们针对这些问题也积极开展了多方面的努力,在一定程度上弥补了数据质量缺陷带来的干扰,但还是不可避免地会削弱定量分析的准确性和结论可靠性。②基于夜间灯光数据的城市化研究大部分还停留在城区范围识别、区域经济、人口相关性分析等区域尺度,而在城市内部尺度的灯光概率分布、城市内部发展特征的研究相对不足。③目前利用夜间灯光数据开展的社会经济研究中,夜间灯光影像充当的是一种辅助数据,研究中缺乏对区域灯光差异的地表真实情况的对比分析。

通过对现有研究成果和存在的不足进行总结,本文认为夜间灯光数据的应用研究还将会持续深入拓展,今后的研究热点将会从以下几个方向开展:①多源数据的融合。目前已经有部分学者开始开展了多光谱遥感数据和夜间灯光数据的融合,相较于单一的灯光数据,融合后的数据可以发挥多源遥感数据各自的优势,拓展数据的应用场景。值得关注的是,多源数据不仅仅包括栅格影像数据,还包括矢量数据。当下是大数据的时代,矢量数据(POI、路网数据等)作为大数据的重要组成部分也应当被纳入多源数据融合的范畴中,充分发挥矢量数据在空间分辨率方面的优势。②夜间灯光数据应用领域的拓展。一方面,当下的夜间灯光数据的研究领域多集中在城市发展、社会经济等方面,基于自然变化、环境保护等方面的研究薄弱,亟需开拓新的研究领域,加强知识发现;另一方面,基于夜间

灯光的研究目前还局限于全球、地区、城市尺度,城市内部小尺度研究应用,特别是针对工程实施和局地尺度的管理尚处于空缺阶段,迫切需要开创新的发掘新型夜间灯光遥感数据的潜力以拓展新尺度的应用实践。③短周期的灯光监测研究。NPP/VIIRS 夜间灯光数据提供了自 2012 年 2 月以来的逐月灯光影像,如何有效利用月度的 VIIRS 夜间灯光影像进行短周期的地表灯光变化监测将是地理国情监测的一个新尝试。

参考文献(References)

- 曹丽琴,李平湘,张良培. 2009. 基于 DMSP/OLS 夜间灯光数据的城市人口估算:以湖北省各县市为例[J]. 遥感信息, (1): 83-87. [Cao L Q, Li P X, Zhang L P. 2009. Urban population estimation based on the DMSP/OLS nighttime satellite data: A case of Hubei Province. Remote Sensing Information, (1): 83-87.]
- 曹子阳. 2016. 基于夜间灯光影像的 GDP 空间分布模拟研究及其与 PM_{2.5} 浓度的相关分析[D]. 北京: 中国科学院大学. [Cao Z Y. 2016. Estimating the spatial distribution of GDP based on nighttime light image and analysis of correlation between it and PM_{2.5} concentration. Beijing, China: University of Chinese Academy of Sciences.]
- 曹子阳,吴志峰,匡耀求,等. 2015. DMSP/OLS 夜间灯光影像中国区域的校正及应用[J]. 地球信息科学学报, 17(9): 1092-1102. [Cao Z Y, Wu Z F, Kuang Y Q, et al. 2015. Correction of DMSP/OLS night-time light images and its application in China. Journal of Geo-information Science, 17(9): 1092-1102.]
- 柴子为,王帅磊,乔纪纲. 2015. 基于夜间灯光数据的珠三角地区镇级 GDP 估算[J]. 热带地理, 35(3): 379-385. [Chai Z W, Wang S L, Qiao J G. 2015. Township GDP estimation of the Pearl River Delta based on the NPP/VIIRS night-time satellite data. Tropical Geography, 35(3): 379-385.]
- 陈晴,侯西勇. 2015. 集成土地利用数据和夜间灯光数据优化人口空间化模型[J]. 地球信息科学学报, 17(11): 1370-1377. [Chen Q, Hou X Y. 2015. An improved population spatialization model by combining land use data and DMSP/OLS data. Journal of Geo-information Science, 17(11): 1370-1377.]
- 陈晴,侯西勇,吴莉. 2014. 基于土地利用数据和夜间灯光数据的人口空间化模型对比分析:以黄河三角洲高效生态经济区为例[J]. 人文地理, 29(5): 94-100. [Chen Q, Hou X Y, Wu L. 2014. Comparing of population spatialization models based on land use data and DMSP/OLS data respectively: A case study in the efficient ecological econom-

- ic zone of the Yellow River Delta. *Human Geography*, 29 (5): 94-100.]
- 陈佐旗. 2017. 基于多源夜间灯光遥感影像的多尺度城市空间形态结构分析 [D]. 上海: 华东师范大学. [Chen Z Q. 2017. A multiscale analysis on urban area and spatial structure based on nighttime light data. Shanghai, China: East China Normal University.]
- 成王玉. 2015. 南海油气钻井平台遥感提取研究 [D]. 南京: 南京大学. [Cheng W Y. 2015. Research on extraction of oil and gas drilling platforms with remote sensing in the South China Sea. Nanjing, China: Nanjing University.]
- 程熙, 吴炜, 夏列钢, 等. 2017. 集成夜间灯光数据与 Landsat-TM 影像的不透水面自动提取方法研究 [J]. 地球信息科学学报, 19(10): 1364-1374. [Cheng X, Wu W, Xia L G, et al. 2017. Automatic extraction method for impervious surface area by integrating nighttime light data and Landsat TM images. *Journal of Geo-information Science*, 19(10): 1364-1374.]
- 董晨炜, 曹宇, 谭永忠. 2017. 基于夜间灯光数据的环杭州湾城市扩张及植被变化 [J]. 应用生态学报, 28(1): 231-238. [Dong C W, Cao Y, Tan Y Z. 2017. Urban expansion and vegetation changes in Hangzhou Bay area using Nightlight data. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 28(1): 231-238.]
- 范俊甫, 马廷, 周成虎, 等. 2013. 1992-2010 年基于 DMSP-OLS 图像的环渤海城市群空间格局变化分析 [J]. 地球信息科学学报, 15(2): 280-288. [Fan J F, Ma T, Zhou C H, et al. 2013. Changes in spatial patterns of urban landscape in Bohai Rim from 1992 to 2010 using DMSP/OLS data. *Journal of Geo-information Science*, 15(2): 280-288.]
- 高倩, 阿里木江·卡斯木. 2017. 基于 DMSP/OLS 夜间灯光数据的天山北坡城市群人口分布空间模拟 [J]. 西北人口, 38(3): 113-120. [Gao Q, Alimujiang K. 2017. Modeling the population spatial distribution of Tianshan north-slope urban agglomeration based on DMSP/OLS night lighting data. *Northwest Population*, 38(3): 113-120.]
- 高亚红, 顾羊羊, 乔旭宁, 等. 2017. 基于夜间灯光数据的南京城镇用地提取 [J]. 测绘科学, 42(6): 93-98. [Gao Y H, Gu Y Y, Qiao X N, et al. 2017. Study on extracting urban area in Nanjing based on DMSP/OLS nighttime light data. *Science of Surveying and Mapping*, 42(6): 93-98.]
- 高义, 王辉, 王培涛, 等. 2013. 基于人口普查与多源夜间灯光数据的海岸带人口空间化分析 [J]. 资源科学, 35(12): 2517-2523. [Gao Y, Wang H, Wang P T, et al. 2013. Population spatial processing for Chinese coastal zones based on census and multiple night light data. *Resources Science*, 35(12): 2517-2523.]
- 郭刚刚, 樊伟, 薛嘉伦, 等. 2017. 基于 NPP/VIIIRS 夜光遥感影像的作业灯光围网渔船识别 [J]. 农业工程学报, 33 (10): 245-251. [Guo G G, Fan W, Xue J L, et al. 2017. Identification for operating pelagic light-fishing vessels based on NPP/VIIIRS low light imaging data. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 33 (10): 245-251.]
- 郭伟. 2015. 夜间灯光数据和 MODIS 数据用于大尺度不透水面制图研究 [D]. 武汉: 武汉大学. [Guo W. 2015. Using nighttime light data and MODIS data for large-scale impervious surface mapping research. Wuhan, China: Wuhan University.]
- 郭永德, 高金环, 马洪兵. 2016. Suomi-NPP 夜间灯光数据与 GDP 的空间关系分析 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 56(10): 1122-1130. [Guo Y D, Gao J H, Ma H B. 2016. Spatial correlation analysis of Suomi-NPP nighttime light data and GDP data. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 56(10): 1122-1130.]
- 韩向娣, 周艺, 王世新, 等. 2012. 夜间灯光遥感数据的 GDP 空间化处理方法 [J]. 地球信息科学学报, 14(1): 128-136. [Han X D, Zhou Y, Wang S X, et al. 2012. GDP spatialization in China based on nighttime imagery. *Journal of Geo-information Science*, 14(1): 128-136.]
- 何月, 蔡菊珍, 张小伟, 等. 2009. 基于 MODIS 数据的浙江省地表温度空间分布研究 [C]// 第六届长三角气象科技论坛论文集. 浙江省气象学会, 江苏省气象学会, 上海市气象学会. [He Y, Cai J Z, Zhang X W. 2009. Spatial distribution of land surface temperature in Zhejiang Province based on MODIS // Proceedings of 6th Yangtze river delta meteorological technology BBS. Zhejiang Meteorological Society, Jiangsu Meteorological Society, Shanghai Meteorological Society.]
- 胡云锋, 赵冠华, 张千力. 2018. 基于夜间灯光与 LUC 数据的川渝地区人口空间化研究 [J]. 地球信息科学学报, 20 (1): 68-78. [Hu Y F, Zhao G H, Zhang Q L. 2018. Spatial distribution of population data based on nighttime light and LUC data in the Sichuan Chongqing Region. *Journal of Geo-information Science*, 20(1): 68-78.]
- 黄璐, 杨英宝, 朱琴. 2018. 基于 DMSP/OLS 数据的南京市建成区扩展研究 [J]. 地理空间信息, 16(1): 94-97. [Huang L, Yang Y B, Zhu Q. 2018. Expansion research on the build up area in Nanjing City based on DMSP/OLS data. *Geospatial Information*, 16(1): 94-97.]
- 黄杰, 闫庆武, 刘永伟. 2015. 基于 DMSP/OLS 与土地利用的江苏省人口数据空间化研究 [J]. 长江流域资源与环境, 24(5): 735-741. [Huang J, Yan Q W, Liu Y W. 2015. Modeling the population density of Jiangsu Province based on DMSP/OLS satellite imagery and land use data. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 24(5): 735-741.]

- 黄益修. 2016. 基于夜间灯光遥感影像和社会感知数据的人口空间化研究 [D]. 上海: 华东师范大学. [Huang Y X. 2016. Spatialization of population using nighttime light remote sensing images and social sensing data. Shanghai, China: East China Normal University.]
- 景欣, 晏艺真, 晏磊, 等. 2017. 基于 GDP 格网的中国大陆城市 DMSP/OLS 稳定灯光数据饱和标定方法 [J]. 地理与地理信息科学, 33(1): 35-39. [Jing X, Yan Y Z, Yan L, et al. 2017. A novel method for saturation effect calibration of DMSP/OLS stable light product based on GDP grid data in China mainland at city level. *Geography and Geo-Information Science*, 33(1): 35-39.]
- 匡文慧, 刘纪远, 陆灯盛. 2011. 京津唐城市群不透水地表增长格局以及水环境效应 [J]. 地理学报, 66(11): 1486-1496. [Kuang W H, Liu J Y, Lu D S. 2011. Pattern of impervious surface change and its effect on water environment in the Beijing-Tianjin-Tangshan metropolitan area. *Acta Geographica Sinica*, 66(11): 1486-1496.]
- 李德仁, 李熙. 2015. 论夜光遥感数据挖掘 [J]. 测绘学报, 44(6): 591-601. [Li D R, Li X. 2015. An overview on data mining of nighttime light remote sensing. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 44(6): 591-601.]
- 李峰, 米晓楠, 刘军, 等. 2016. 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, 28(3): 19-24. [Li F, Mi X N, Liu J, et al. 2016. Spatialization of GDP in Beijing using NPP/VIIRS data. *Remote Sensing for Land and Resources*, 28(3): 19-24.]
- 李峰, 卫爱霞, 米晓楠, 等. 2016. 基于 NPP-VIIRS 夜间灯光数据的河北省 GDP 空间化方法 [J]. 信阳师范学院学报 (自然科学版), 29(1): 152-156. [Li F, Wei A X, Mi X N, et al. 2016. An approach of GDP spatialization in Hebei Province using NPP/VIIRS nighttime light data. *Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition)*, 29(1): 152-156.]
- 李钢. 2014. GIS 支持下的浙江省台风灾害直接经济损失评估 [D]. 南京: 南京信息工程大学. [Li G. 2014. GIS assisted on assessment of direct economic losses from typhoon in Zhejiang Province. Nanjing, China: Nanjing University of Information Science & Technology.]
- 李俊峰. 2015. 基于 DMSP/OLS 数据的中国电力消耗量估算及时空动态研究 [D]. 兰州: 西北师范大学. [Li J F. 2015. Estimate and spatiotemporal dynamics of electricity consumption in China based on DMSP/OLS. Lanzhou, China: Northwest Normal University.]
- 李强, 苏奋振, 王雯玥. 2017. 基于 VIIRS 数据的油气平台提取技术研究 [J]. 地球信息科学学报, 19(3): 398-406. [Li Q, Su F Z, Wang W Y. 2017. Research on oil and gas platform extraction technology based on VIIRS data. *Journal of Geo-information Science*, 19(3): 398-406.]
- 李润亚. 2015. 夜间灯光数据反演大气细颗粒物浓度方法研究 [D]. 北京: 中国地质大学(北京). [Li R Y. 2015. Study on the methodology of using nighttime light data to retrieve atmospheric fine particle's concentration. Beijing, China: China University of Geosciences (Beijing).]
- 李通, 何春阳, 杨洋, 等. 2011. 1995-2008 年中国大陆电力消费量时空动态 [J]. 地理学报, 66(10): 1403-1412. [Li T, He C Y, Yang Y, et al. 2011. Understanding electricity consumption changes in Chinese mainland from 1995 to 2008 by using DMSP/OLS stable nighttime light time series data. *Acta Geographica Sinica*, 66(10): 1403-1412.]
- 李伟, 郑新奇. 2015. 结合 VIIRS 和监测数据插值的北京雾霾监测方法 [J]. 测绘学报, 44(b12): 123-128. [Li W, Zheng X Q. 2015. A haze monitoring method combined VIIRS images with real-time observation data interpolation in Beijing. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 44(b12): 123-128.]
- 李翔, 陈振杰, 吴洁璇, 等. 2017. 数据和空间回归模型的城市常住人口格网化方法研究 [J]. 地球信息科学学报, 19(10): 1298-1305. [Li X, Chen Z J, Wu J X, et al. 2017. Gridding methods of city permanent population based on night light data and spatial regression models. *Journal of Geo-information Science*, 19(10): 1298-1305.]
- 李宗光, 胡德勇, 李吉贺, 等. 2016. 基于夜间灯光数据的连片特困区 GDP 估算及其空间化 [J]. 国土资源遥感, 28(2): 168-174. [Li Z G, Hu D Y, Li J H, et al. 2016. Simulation and spatialization of GDP in poverty areas based on night light imagery. *Remote Sensing for Land and Resources*, 28(2): 168-174.]
- 梁友嘉, 徐中民. 2012. 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, 34(4): 999-1006. [Liang Y J, Xu Z M. 2012. Modeling the spatial distribution of population based on night light radiation and LUCC: A case study in Ganzhou District, Zhangye Municipality. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 34(4): 999-1006.]
- 梁友嘉, 徐中民. 2013. 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, 35(1): 249-254. [Liang Y J, Xu Z M. 2013. Modeling the spatial distribution of GDP based on night light radiation: A case study in Ganzhou, Zhangye Municipality. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 35(1): 249-254.]
- 廖兵, 魏康霞, 宋巍巍. 2012. DMSP/OLS 夜间灯光数据在城镇体系空间格局研究中的应用与评价: 以近 16 年江西省间城镇空间格局为例 [J]. 长江流域资源与环境, 21(11): 1295-1300. [Liao B, Wei K X, Song W W. 2012. Assessment and application of DMSP/OLS nighttime light data

- in the spatial structure of urban system: A case of Jiangxi Province in nearly 16 years. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 21(11): 1295-1300.]
- 刘双庆. 2012. 引入一种新型震害快速评估基础数据的尝试: DMSP/OLS 卫星夜光数据的使用 [J]. 防灾科技学院学报, 14(3): 70-75. [Liu S Q. 2012. A try to import a new basic data for fast evaluation of earthquake hazards: Utilizing the DMSP/OLS satellite nighttime light data. *Journal of Institute of Disaster Prevention*, 14(3): 70-75.]
- 刘占成, 王安建, 于汶加, 等. 2010. 中国区域碳排放研究 [J]. 地球学报, 31(5): 727-732. [Liu Z C, Wang A J, Yu W J, et al. 2010. Research on regional carbon emissions in China. *Acta Geoscientica Sinica*, 31(5): 727-732.]
- 马钰琪, 朱秀芳, 刘宪锋, 等. 2015. 基于夜间灯光数据和多地理因子数据的人口空间化方法: 以辽宁省为例 [J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 51(S1): 57-61. [Ma Y Q, Zhu X F, Liu X F, et al. 2015. A population spatialization method based on DMSP/OLS nighttime light data and weight multi-geographic factors: The example of Liaoning Province. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 51(S1): 57-61.]
- 潘竞虎, 李俊峰. 2016. 基于夜间灯光影像的中国电力消耗量估算及时空动态 [J]. 地理研究, 35(4): 627-638. [Pan J H, Li J F. 2016. Estimate and spatio-temporal dynamics of electricity consumption in China based on DMSP/OLS images. *Geographical Research*, 35(4): 627-638.]
- 舒松, 余柏菡, 吴健平, 等. 2011. 基于夜间灯光数据的城市建成区提取方法评价与应用 [J]. 遥感技术与应用, 26(2): 169-176. [Shu S, Yu B L, Wu J P, et al. 2011. Method for deriving urban built-up area using night-light data: Assessment and application. *Remote Sensing Technology and Application*, 26(2): 169-176.]
- 苏泳娴. 2015. 基于DMSP/OLS夜间灯光数据的中国能源消费碳排放研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院. [Su Y X. 2015. Study on the carbon emissions from energy consumption in China using DMSP/OLS night light imageries. Beijing, China: University of Chinese Academy of Sciences.]
- 苏泳娴, 陈修治, 叶玉瑶, 等. 2013. 基于夜间灯光数据的中国能源消费碳排放特征及机理 [J]. 地理学报, 68(11): 1513-1526. [Su Y X, Chen X Z, Ye Y Y, et al. 2013. The characteristics and mechanisms of carbon emissions from energy consumption in China using DMSP/OLS night light imageries. *Acta Geographica Sinica*, 68(11): 1513-1526.]
- 唐梁博, 崔海山. 2017. 基于NPP-VIIRS夜间灯光数据和Landsat-8数据的城镇建筑用地提取方法改进: 以广州市为例 [J]. 测绘与空间地理信息, 40(9): 69-73. [Tang L B, Cui H S. 2017. Improvement of urban construction land extraction method based on NPP/VIIRS nighttime light data and Landsat-8 data: A case study of Guangzhou City. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 40(9): 69-73.]
- 唐敏. 2017. 基于对数变换的NPP-VIIRS夜间灯光遥感影像在城市建成区提取中的应用 [D]. 上海: 华东师范大学. [Tang M. 2017. Urban built-up area extraction from logarithm transformed NPP/VIIRS nighttime light composite data. Shanghai, China: East China Normal University.]
- 王浩, 卢善龙, 吴炳方, 等. 2013. 不透水面遥感提取及应用研究进展 [J]. 地球科学进展, 28(3): 327-336. [Wang H, Lu S L, Wu B F, et al. 2013. Advances in remote sensing of impervious surfaces extraction and its application. *Advances in Earth Science*, 28(3): 327-336.]
- 王鹤饶, 袁涛. 2012. DMSP/OLS数据应用研究综述 [J]. 地理科学进展, 10(1): 11-18. [Wang H R, Yuan T. 2012. Overview of researches based on DMSP/OLS nighttime light data. *Progress in Geography*, 10(1): 11-18.]
- 王珂靖, 蔡红艳, 杨小唤, 等. 2015. 基于城镇居民用地再分类的人口数据空间化方法研究: 以长江中游4省为例 [J]. 遥感技术与应用, 30(5): 987-995. [Wang K J, Cai H Y, Yang X H, et al. 2015. Spatialization method for census data based on reclassifying residential land use in urban areas: A case study in the middle reaches of the Yangtze River Watershed. *Remote Sensing Technology and Application*, 30(5): 987-995.]
- 王琪, 袁涛, 郑新奇. 2013. 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, 20(7): 44-48. [Wang Q, Yuan T, Zheng X Q. 2013. GDP gross analysis at province-level in China based on night-time lightsatellite imagery. *Urban Development Studies*, 20(7): 44-48.]
- 吴健生, 牛妍, 彭建, 等. 2014. 基于DMSP/OLS夜间灯光数据的1995-2009年中国地级市能源消费动态 [J]. 地理研究, 33(4): 625-634. [Wu J S, Niu Y, Peng J, et al. 2014. Research on energy consumption dynamic among prefecture-level cities in China based on DMSP/OLS nighttime light. *Geographical Research*, 33(4): 625-634.]
- 乌云德吉. 2014. 基于GIS的草原火遥感监测与火险评估 [D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学. [Wuyundeji. 2014. Remote sensing monitoring of grassland fire and fire risk assessment based on GIS. Huhhot, China: Inner Mongolia Normal University.]
- 杨眉, 王世新, 周艺, 等. 2011. DMSP/OLS夜间灯光数据应用研究综述 [J]. 遥感技术与应用, 26(1): 45-51. [Yang M, Wang S X, Zhou Y. 2011. Review on applications of DMSP/OLS night-time emissions data. *Remote Sensing Technology and Application*, 26(1): 45-51.]
- 杨任飞, 罗红霞, 周盛, 等. 2017. 夜间灯光数据驱动的成渝

- 城市群空间形成过程重建及分析[J]. 地球信息科学学报, 19(5): 653-661. [Yang R F, Luo H X, Zhou S, et al. 2017. Restoring and analyzing the space forming process of Chengdu- Chongqing urban agglomeration by using DMSP/OLS night-time light data. *Journal of Geo-information Science*, 19(5): 653-661.]
- 杨洋, 黄庆旭, 章立玲. 2015. 基于DMSP/OLS夜间灯光数据的土地城镇化水平时空测度研究: 以环渤海地区为例[J]. 经济地理, 35(2): 141-148. [Yang Y, Huang Q X, Zhang L L. 2015. The spatial-temporal measurement on the land urbanization level using DMSP/OLS nighttime light data: A case study of Bohai Rim. *Economic Geography*, 35(2): 141-148.]
- 杨洋, 马学广, 王晨. 2015. 基于夜间灯光数据的中国土地城镇化水平时空动态[J]. 人文地理, (5): 91-98. [Yang Y, Ma X G, Wang C. 2015. The spatial-temporal dynamics of the land urbanization level in China based on nighttime light data. *Human Geography*, (5): 91-98.]
- 张宝军. 2018. 2003-2013年汶川地震极重灾区夜间灯光年际变化分析[J]. 灾害学, 33(1): 12-18. [Zhang B J. 2018. Analysis of the inter-annual variation of nighttime lights in the most affected area of Wenchuan earthquake from 2003 to 2013. *Journal of Catastrophology*, 33(1): 12-18, 22.]
- 张思宇. 2017. 基于夜间灯光数据的南海渔业捕捞动态变化研究[D]. 南京: 南京大学. [Zhang S Y. 2017. Research on fishing dynamic changes in the South China Sea using nighttime light data. Nanjing, China: Nanjing University.]
- 张志刚, 张安明, 郭欢欢. 2016. 基于DMSP/OLS夜间灯光数据的城乡结合部空间识别研究: 以重庆市主城区为例[J]. 地理与地理信息科学, 32(6): 37-42. [Zhang Z G, Zhang A M, Guo H H. 2016. Spatial recognition of the urban-rural fringe based on DMSP/OLS nighttime light data: A case study of the main urban areas of Chongqing. *Geography and Geo-information Science*, 32(6): 37-42.]
- 张志杰. 2016. 基于夜间灯光影像的地震受灾区域和人口评估研究[D]. 焦作: 河南理工大学. [Zhang Z J. 2016. Assessment of damaged areas and affected population in earthquake disasters based on nighttime imageries. Jiaozuo, China: Henan Polytechnic University.]
- 赵敏, 程维明. 2015. 基于DMSP/OLS夜间灯光数据的城市空间扩展研究综述[J]. 测绘与空间地理信息, 38(3): 64-68. [Zhao M, Cheng W M. 2015. Overview of researches based on urban expansion via DMSP/OLS nighttime light data. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 38(3): 64-68.]
- 赵笑然, 石汉青, 杨平吕, 等. 2017. NPP卫星VIIRS微光资料反演夜间PM_{2.5}质量浓度[J]. 遥感学报, 21(2): 291-299. [Zhao X R, Shi H Q, Yang P L, et al. 2017. Inversion algorithm of PM_{2.5} air quality based on nighttime light data from NPP/VIIRS. *Journal of Remote Sensing*, 21(2): 291-299.]
- 郑子豪, 陈颖彪, 吴志峰, 等. 2018. 单元路网长度的DMSP/OLS夜间灯光数据去饱和方法[J]. 遥感学报, 22(1): 161-173. [Zheng Z H, Chen Y B, Wu Z F, et al. 2018. Method to reduce saturation of DMSP/OLS nighttime light data based on UNL. *Journal of Remote Sensing*, 22(1): 161-173.]
- 朱林富. 2015. 基于夜间灯光数据的重庆电力消费时空动态与影响因素分析[D]. 重庆: 重庆师范大学. [Zhu L F. 2015. Studying the electricity consumption changes in Chongqing by using DMSP/OLS stable nighttime light data. Chongqing, China: Chongqing Normal University.]
- 卓莉, 陈晋, 史培军, 等. 2005. 基于夜间灯光数据的中国人口密度模拟[J]. 地理学报, 60(2): 266-276. [Zhuo L, Chen J, Shi P J, et al. 2005. Modeling population density of China in 1998 based on DMSP/OLS nighttime light image. *Acta Geographica Sinica*, 60(2): 266-276.]
- 卓莉, 张晓帆, 郑璟, 等. 2015. 基于EVI指数的DMSP/OLS夜间灯光数据去饱和方法[J]. 地理学报, 70(8): 1339-1350. [Zhuo L, Zhang X F, Zheng J, et al. 2015. An EVI-based method to reduce saturation of DMSP/OLS nighttime light data. *Acta Geographica Sinica*, 70(8): 1339-1350.]
- Agnew J, Gillespie T W, Gonzalez J, et al. 2008. Baghdad nights: Evaluating the US military "Surge" using nighttime light signatures[J]. *Environment & Planning A*, 40(10): 2285-2295.
- Amaral S, Câmara G, Monteiro A M V, et al. 2005. Estimating population and energy consumption in Brazilian Amazonia using DMSP night-time satellite data[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 29(2): 179-195.
- Arnold Jr C L, Gibbons C J. 1996. Impervious surface coverage: The emergence of a key environmental indicator[J]. *Journal of the American Planning Association*, 62(2): 243-258.
- Aubrecht C, Elvidge C D, Longcore T, et al. 2008. A global inventory of coral reef stressors based on satellite observed nighttime lights[J]. *Geocarto International*, 23(6): 467-479.
- Bennie J, Davies T W, Duffy J P, et al. 2014. Contrasting trends in light pollution across Europe based on satellite observed night time lights[J]. *Scientific Reports*, 4(3): 3789.
- Brabec E, Schulte S, Richards P L. 2002. Impervious surfaces and water quality: A review of current literature and its implications for watershed planning[J]. *Journal of Planning Literature*, 16(4): 499-514.

- Cao C Y, Shao X, Uprety S. 2013. Detecting light outages after severe storms using the S-NPP/VIIRS Day/Night Band radiances [J]. *IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters*, 10(6): 1582-1586.
- Cao X, Chen J, Imura H, et al. 2009. A SVM-based method to extract urban areas from DMSP/OLS and SPOT VGT data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 113(10): 2205-2209.
- Cao Z Y, Wu Z F, Kuang Y, et al. 2016. Coupling an intercalibration of radiance-calibrated nighttime light images and land use/cover data for modeling and analyzing the distribution of GDP in Guangdong, China [J]. *Sustainability*, 8(2): 108.
- Chand T R K, Badarinath K V S, Elvidge C D, et al. 2009. Spatial characterization of electrical power consumption patterns over India using temporal DMSP-OLS night-time satellite data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 30(3): 647-661.
- Chand T R K, Badarinath K V S, Murthy M S R, et al. 2007. Active forest fire monitoring in Uttaranchal State, India using multi-temporal DMSP-OLS and MODIS data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 28(10): 2123-2132.
- Chen X, Nordhaus W D. 2011. Using luminosity data as a proxy for economic statistics [J]. *PNAS*, 108(21): 8589-8594.
- Cho K, Ito R, Shimoda H, et al. 1999. Technical note and cover fishing fleet lights and sea surface temperature distribution observed by DMSP/OLS sensor [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 20(1): 3-9.
- Cho K, Ito R, Shimoda H, et al. 2010. Fishing fleet lights and sea surface temperature distribution observed by DMSP/OLS sensor [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 20(1): 3-9.
- Croft T A. 1978. Nighttime images of the earth from space [J]. *Scientific American*, 239(1): 86-98.
- De Souza Filho C R, Zullo Jr J, Elvidge C. 2004. Brazil's 2001 energy crisis monitored from space [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 25(12): 2475-2482.
- Doll C N H, Muller J P, Elvidge C D. 2000. Night-time imagery as a tool for global mapping of socioeconomic parameters and greenhouse gas emissions [J]. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 29(3): 157-162.
- Doll C N H, Muller J P, Morley J G. 2006. Mapping regional economic activity from night-time light satellite imagery [J]. *Ecological Economics*, 57(1): 75-92.
- Elvidge C D, Baugh K E, Kihn E A, et al. 1997. Relation between satellite observed visible- near infrared emissions, population, economic activity and electric power consumption [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 18(6): 1373-1379.
- Elvidge C D, Hobson V R, Baugh K E, et al. 2001. DMSP/OLS estimation of tropical forest area impacted by surface fires in Roraima, Brazil: 1995 versus 1998 [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 22(14): 2661-2673.
- Elvidge C D, Imhoff M L, Baugh K E, et al. 2001. Night-time lights of the world: 1994-1995 [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 56(2): 81-99.
- Elvidge C D, Tuttle B T, Sutton P C, et al. 2007. Global distribution and density of constructed impervious surfaces [J]. *Sensors*, 7(9): 1962-1979.
- Elvidge C D, Ziskin D, Baugh K E, et al. 2009. A fifteen year record of global natural gas flaring derived from satellite data [J]. *Energies*, 2(3): 595-622.
- Foster A J L. 1983. Observations of the earth using nighttime visible imagery [J]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 414(6): 187.
- Ghosh T, Elvidge C D, Sutton P C, et al. 2010. Creating a global grid of distributed fossil fuel CO₂ emissions from nighttime satellite imagery [J]. *Energies*, 3(12): 1895-1913.
- Gillies R R, Box J B, Symanzik J, et al. 2003. Effects of urbanization on the aquatic fauna of the Line Creek Watershed, Atlanta: A satellite perspective [J]. *Remote Sensing of Environment*, 86(3): 411-422.
- Hall F G, Strebel D E, Nickeson J E, et al. 1991. Radiometric rectification: Toward a common radiometric response among multirate, multi-sensor images [J]. *Remote Sensing of Environment*, 35(1): 11-27.
- Hara M, Okada S, Yagi H, et al. 2010. Progress for stable artificial lights distribution extraction accuracy and estimation of electric power consumption by means of DMSP/OLS nighttime imagery [J]. *International Journal of Remote Sensing & Earth Sciences*, 1(1): 31-42.
- Hayashi H, Hashitera S, Kohiyama M, et al. 2000. International collaboration for the early damaged area estimation system using DMSP/OLS nighttime images [C]// *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2000. Proceedings. IGARSS 2000. IEEE 2000 International. IEEE*, 6: 2697-2699.
- He C Y, Ma Q, Liu Z F, et al. 2014. Modeling the spatiotemporal dynamics of electric power consumption in Mainland China using saturation- corrected DMSP/OLS nighttime stable light data [J]. *International Journal of Digital Earth*, 7(12): 993-1014.
- He C Y, Shi P J, Li J G, et al. 2006. Restoring urbanization process in China in the 1990s by using non-radiance-calibrated DMSP/OLS nighttime light imagery and statistical data [J]. *Chinese Science Bulletin*, 51(13): 1614-1620.

- Henderson M, Yeh E T, Gong P, et al. 2003. Validation of urban boundaries derived from global night-time satellite imagery [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 24(3): 595-609.
- Hsu F C, Baugh K E, Ghosh T, et al. 2015. DMSP/OLS radiance calibrated nighttime lights time series with intercalibration [J]. *Remote Sensing*, 7(2): 1855-1876.
- Imhoff M L, Lawrence W T, Elvidge C D, et al. 1997. Using nighttime DMSP/OLS images of city lights to estimate the impact of urban land use on soil resources in the United States [J]. *Remote Sensing of Environment*, 59(1): 105-117.
- Kiyofuji H, Saitoh S I. 2004. Use of nighttime visible images to detect Japanese common squid *Todarodes Pacificus* fishing areas and potential migration routes in the Sea of Japan [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 276: 173-186.
- Kohiyama M, Hayashi H, Maki N, et al. 2004. Early damaged area estimation system using DMSP/OLS night-time imagery [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 25(11): 2015-2036.
- Lenney M P, Woodcock C E, Collins J B, et al. 1996. The status of agricultural lands in Egypt: The use of multitemporal NDVI features derived from Landsat TM [J]. *Remote Sensing of Environment*, 56(1): 8-20.
- Letu H, Hara M, Tana G, et al. 2012. A saturated light correction method for DMSP/OLS nighttime satellite imagery [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 50(2): 389-396.
- Letu H, Hara M, Yagi H, et al. 2009. Estimating the energy consumption with nighttime city light from the DMSP/OLS imagery [C]//Urban Remote Sensing Event, Joint. IEEE: 1-7.
- Letu H, Hara M, Yagi H, et al. 2010. Estimating energy consumption from night-time DMSP/OLS imagery after correcting for saturation effects [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 31(16): 4443-4458.
- Li W M, Qin Z H, Li W J, et al. 2010. Comparison and analysis of MODIS NDVI and MODIS EVI [J]. *Remote Sensing Information*, 6: 73-78.
- Li X, Chen F R, Chen X L. 2013. Satellite-Observed nighttime light variation as evidence for global armed conflicts [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing*, 6(5): 2302-2315.
- Li X, Chen X L, Zhao Y S, et al. 2013. Automatic intercalibration of night-time light imagery using robust regression [J]. *Remote Sensing Letters*, 4(1): 45-54.
- Li X, Ge L L, Chen X L. 2013. Detecting Zimbabwe's decadal economic decline using nighttime light imagery [J]. *Remote Sensing*, 5(9): 4551-4570.
- Li X, Li D R. 2014. Can night-time light images play a role in evaluating the Syrian Crisis? [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 35(18): 6648-6661.
- Li X, Xu H M, Chen X L, et al. 2013. Potential of NPP/VIIRS nighttime light imagery for modeling the regional economy of China [J]. *Remote Sensing*, 5(6): 3057-3081.
- Liu Y X, Yang Y P, Jing W L, et al. 2017. A new urban index for expressing inner-city patterns based on MODIS LST and EVI regulated DMSP/OLS NTL [J]. *Remote Sensing*, 9(8): 777. doi: 10.3390/rs9080777.
- Liu Z F, He C Y, Zhang Q F, et al. 2012. Extracting the dynamics of urban expansion in China using DMSP/OLS nighttime light data from 1992 to 2008 [J]. *Landscape & Urban Planning*, 106(1): 62-72.
- Lo C P. 2001. Modeling the population of China using DMSP operational linescan system nighttime data [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 67(9): 1037-1048.
- Lu D, Tian H, Zhou G, et al. 2008. Regional mapping of human settlements in Southeastern China with multi-sensor remotely sensed data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 112(9): 3668-3679.
- Ma L, Wu J S, Li W F, et al. 2014. Evaluating saturation correction methods for DMSP/OLS nighttime light data: A case study from China's cities [J]. *Remote Sensing*, 6(10): 9853-9872.
- Ma T, Zhou Y K, Zhou C H, et al. 2015. Night-time light derived estimation of spatio-temporal characteristics of urbanization dynamics using DMSP/OLS satellite data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 158: 453-464.
- Mantero P, Moser G, Serpico S B. 2005. Partially supervised classification of remote sensing images through SVM-based probability density estimation [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 43(3): 559-570.
- Meng L, Graus W, Worrell E, et al. 2014. Estimating CO₂, (carbon dioxide) emissions at urban scales by DMSP/OLS (Defense Meteorological Satellite Program's Operational Linescan System) nighttime light imagery: Methodological challenges and a case study for China [J]. *Energy*, 71: 468-478.
- Milesi C, Elvidge C D, Nemani R R, et al. 2003. Assessing the impact of urban land development on net primary productivity in the southeastern United States [J]. *Remote Sensing of Environment*, 86(3): 401-410.
- Min B, Gaba K M, Sarr O F, et al. 2013. Detection of rural electrification in Africa using DMSP-OLS night lights imagery [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 34(22): 8118-8141.
- Moscip A L, Montgomery D R. 1997. Urbanization, flood frequency, and salmon abundance in Puget lowland streams

- [J]. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 33(6): 1289-1297.
- Pandey B, Joshi P K, Seto K C. 2013. Monitoring urbanization dynamics in India using DMSP/OLS night time lights and SPOT-VGT data [J]. International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation, 23(1): 49-61.
- Pandey B, Zhang Q, Seto K C. 2017. Comparative evaluation of relative calibration methods for DMSP/OLS nighttime lights [J]. Remote Sensing of Environment, 195: 67-78.
- Pozzi F, Small C. 2005. Analysis of urban land cover and population density in the united states [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 71(6): 719-726.
- Raupach M R, Rayner P J, Paget M. 2010. Regional variations in spatial structure of nightlights, population density and fossil-fuel CO₂ emissions [J]. Energy Policy, 38(9): 4756-4764.
- Shi K F, Huang C, Yu B L, et al. 2014. Evaluation of NPP/VIIRS night-time light composite data for extracting built-up urban areas [J]. Remote Sensing Letters, 5(4): 358-366.
- Shi K F, Yu B L, Huang C, et al. 2018. Exploring spatiotemporal patterns of electric power consumption in countries along the Belt and Road [J]. Energy, 150: 847-859.
- Shi K F, Yu B L, Huang Y X, et al. 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 [J]. Remote Sensing, 6(2): 1705-1724.
- Small C. 2001. Estimation of urban vegetation abundance by spectral mixture analysis [J]. International Journal of Remote Sensing, 22(7): 1305-1334.
- Small C, Pozzi F, Elvidge C D. 2005. Spatial analysis of global urban extent from DMSP/OLS night lights [J]. Remote Sensing of Environment, 96(3): 277-291.
- Su Y X, Chen X Z, Li Y, et al. 2014. China's 19-year city-level carbon emissions of energy consumptions, driving forces and regionalized mitigation guidelines [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 35(C): 231-243.
- Sutton P. 1997. Modeling population density with night-time satellite imagery and GIS [J]. Computers Environment & Urban Systems, 21(3-4): 227-244.
- Sutton P, Roberts D, Elvidge C, et al. 1997. A Comparison of Nighttime Satellite Imagery and Population Density for the Continental United States [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 63(11): 1303-1313.
- Sutton P, Roberts D, Elvidge C, et al. 2001. Census from heaven: An estimate of the global human population using night-time satellite imagery [J]. International Journal of Remote Sensing, 22(16): 3061-3076.
- Sutton P C, Costanza R. 2002. Global estimates of market and non-market values derived from nighttime satellite imagery, land cover, and ecosystem service valuation [J]. Ecological Economics, 41(3): 509-527.
- Vapnik V. 2000. The nature of statistical learning theory [M]. New York: Springer-Verlag.
- Waluda C M, Griffiths H J, Rodhouse P G. 2008. Remotely sensed spatial dynamics of the illex argentinus fishery, Southwest Atlantic [J]. Fisheries Research, 91(2-3): 196-202.
- Waluda C M, Yamashiro C, Elvidge C D, et al. 2004. Quantifying light-fishing for dosidicus gigas in the eastern Pacific using satellite remote sensing [J]. Remote Sensing of Environment, 91(2): 129-133.
- Wang J, Aegerter C, Xu X, et al. 2016. Potential application of VIIRS Day/Night Band for monitoring nighttime surface PM_{2.5} air quality from space [J]. Atmospheric Environment, 124: 55-63.
- Welch R. 1980. Monitoring urban population and energy utilization patterns from satellite data [J]. Remote Sensing of Environment, 9(1): 1-9.
- Weng Q H, Lu D S, Liang B Q. 2006. Urban surface biophysical descriptors and land surface temperature variations [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 72(11): 1275-1286.
- Weng Q H, Lu D S, Schubring J. 2004. Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies [J]. Remote Sensing of Environment, 89(4): 467-483.
- Witmer F W, O'Loughlin J. 2011. Detecting the effects of wars in the Caucasus regions of Russia and Georgia using radiometrically normalized DMSP/OLS nighttime lights imagery [J]. Mapping Sciences & Remote Sensing, 48(4): 478-500.
- Wu J S, He S B, Peng J, et al. 2013. Intercalibration of DMSP/OLS night-time light data by the invariant region method [J]. International Journal of Remote Sensing, 34(20): 7356-7368.
- Wu J S, Ma L, Li W F, et al. 2014. Dynamics of urban density in China: Estimations based on DMSP/OLS nighttime light data [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing, 7(10): 4266-4275.
- Xiao P, Wang X, Feng X, et al. 2014. Detecting China's urban expansion over the past three decades using nighttime light data [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing, 7(10): 4095-4106.
- Yi K P, Tani H, Li Q, et al. 2014. Mapping and evaluating the urbanization process in Northeast China using DMSP/OLS nighttime light data [J]. Sensors, 14(2): 3207-3226.

- Yu B L, Shu S, Liu H X, et al. 2014. Object-based spatial cluster analysis of urban landscape pattern using nighttime light satellite images: A case study of China [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 28 (11): 2328-2355.
- Yuan F, Bauer M E. 2007. Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in Landsat imagery [J]. *Remote Sensing of Environment*, 106(3): 375-386.
- Yue W, Gao J, Yang X. 2014. Estimation of gross domestic product using multi-sensor remote sensing data: A case study in Zhejiang Province, East China [J]. *Remote Sensing*, 6(8): 7260-7275.
- Zhang Q L, Pandey B, Seto K C. 2016. A robust method to generate a consistent time series from DMSP/OLS nighttime light data [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 54(10): 5821-5831.
- Zhang Q L, Schaaf C, Seto K C. 2013. The vegetation adjusted NTL urban index: A new approach to reduce saturation and increase variation in nighttime luminosity [J]. *Remote Sensing of Environment*, 129(2): 32-41.
- Zhang Q L, Seto K C. 2011. Mapping urbanization dynamics at regional and global scales using multi-temporal DMSP/OLS nighttime light data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 115(9): 2320-2329.
- Zhao N, Ghosh T, Samson E. 2012. Mapping spatio-temporal changes of Chinese electric power consumption using night-time imagery [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 33(20): 6304-6320.
- Zhou Y, Smith S J, Elvidge C D, et al. 2014. A cluster-based method to map urban area from DMSP/OLS nightlights [J]. *Remote Sensing of Environment*, 147(18): 173-185.
- Zhuo L, Zheng J, Zheng J, et al. 2009. Modelling the population density of China at the pixel level based on DMSP/OLS non-radiance-calibrated night-time light images [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 30(4): 1003-1018.

Review and prospect of application of nighttime light remote sensing data

CHEN Yingbiao^{1,2}, ZHENG Zihao^{1,3*}, WU Zhifeng^{1,2}, QIAN Qinglan¹

(1. School of Geographic Sciences, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China; 2. Guangdong Provincial Engineering Technology Research Center for Geographical Condition Monitoring and Comprehensive Analysis, Guangzhou 510006, China; 3. Department of Land, Environment, Agriculture and Forestry (TESAF), University of Padua, 35020 Padova, Italy)

Abstract: In remote sensing research, night light remote sensing as an important branch of active development has attracted increasingly more attention from the fields of natural and social science research in recent decades. Different from traditional daytime optical satellite remote sensing that obtains ground object radiation information, nighttime light remote sensing is the acquisition of visible- near- infrared electromagnetic information transmitted from the Earth's surface under cloud-free conditions at night. Compared to the ordinary satellite remote sensing images, ground light intensity information recorded by the night light images directly reflects the difference of human activity. Therefore, it is widely used in urbanization research, extraction of impervious surfaces, estimation of socioeconomic indicators, major events assessment, ecological environment assessment, and other fields. At present, although research results based on nighttime light data are continuously accumulating, there is a general lack of systematic review of these results and the current reviews suffer from incomplete coverage and poor timeliness. Therefore, this article summarizes the research results of nighttime light data in recent decades and examines them from the aspects of data processing and technical approaches, urbanization application research, and parameterization. Finally, we identify the following three research hotspots: multi-source data fusion, application expansion, and short-period surface light monitoring.

Keywords: nighttime light; DMSP/OLS; NPP-VIIRS; remote sensing; review