

# 夜间灯光遥感与城市问题研究： 数据、方法、应用和展望

余柏蒗<sup>1,2</sup>, 王丛笑<sup>1,2</sup>, 宫文康<sup>1,2</sup>, 陈佐旗<sup>3,4</sup>, 施开放<sup>5</sup>, 吴宾<sup>1,2</sup>,  
洪宇辰<sup>1,2</sup>, 李乔玄<sup>1,2</sup>, 吴健平<sup>1,2</sup>

1. 华东师范大学 地理信息科学教育部重点实验室, 上海 200241;
2. 华东师范大学 地理科学学院, 上海 200241;
3. 福州大学 数字中国研究院(福建), 福州 350116;
4. 福州大学 空间数据挖掘与信息共享教育部重点实验室, 福州 350116;
5. 西南大学 地理科学学院, 重庆 400715

**摘要:** 夜间灯光遥感是能够探测夜间微光的光学遥感技术, 可获取白天遥感无法获取的信息。由于城市区域的人造光源是夜间稳定亮光的主要来源, 夜间灯光遥感影像已被证明可以更直观地反映夜间人类活动差异, 同时具有覆盖范围大、时效快和易获取等优势, 可广泛应用于多尺度长时序的城市问题研究。目前, 基于夜间灯光遥感数据的应用研究成果较为丰富, 不少学者对夜间灯光遥感数据的数据预处理以及应用潜力等方面进行了归纳。但基于夜间灯光遥感与城市问题研究的整理和总结还有待进一步加强。基于此, 本文通过对近几十年来有关夜间灯光遥感数据的研究成果进行了详细梳理, 从多尺度城市空间结构分析、城市社会经济指标估算以及城市公共安全领域研究3方面入手, 系统梳理夜间灯光遥感数据的应用能力。进一步根据数据应用过程中出现的问题, 从夜间灯光遥感日数据应用、长时间序列数据集生产以及定量验证等角度探讨了夜间灯光遥感所面临的新挑战与前景。

**关键词:** 夜间灯光, 遥感, 城市研究, 多尺度, 综述

**引用格式:** 余柏蒗, 王丛笑, 宫文康, 陈佐旗, 施开放, 吴宾, 洪宇辰, 李乔玄, 吴健平. 2021. 夜间灯光遥感与城市问题研究: 数据、方法、应用和展望. 遥感学报, 25(1): 342–364

Yu B L, Wang C X, Gong W K, Chen Z Q, Shi K F, Wu B, Hong Y C, Li Q X and Wu J P. 2021. Nighttime light remote sensing and urban studies: Data, methods, applications, and prospects. National Remote Sensing Bulletin, 25(1): 342–364 [DOI: 10.11834/jrs.20211018]

## 1 引言

全球城市化程度越来越高, 地球逐渐成为一颗城市星球 (Wigginton 等, 2016)。自 2018 年以来, 全球约有 55% 人口生活在城市中, 预计到 2050 年这一比例将提高至 68% (UN-DESA, United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2019)。快速城市化导致越来越多的城市问题, 如城市无节制的扩张、区域发展不均衡、空气污染加剧、城市基础设施和服务不足等 (Foley 等, 2005; Duh 等, 2008;

Bai 等, 2014; Huang 等, 2014)。针对日益复杂的城市问题, 传统的遥感监测方法可提取土地覆盖/土地利用类型等数据, 分析城市空间结构在水平或垂直方向上的动态变化, 但对大尺度城市系统及其空间结构分析能力较弱; 同时, 传统遥感数据在城市社会经济特征的监测中尚无有效的直接监测手段, 存在估算准确率不高且估算结果分辨率较低等问题。

夜间灯光遥感是能够探测夜间微光的光学遥感技术, 可获取白天遥感无法获取的信息。因夜间稳定的亮光绝大多数来自于城市区域的人造光

源, 夜间灯光遥感影像已被证明可以更直观地反映夜间人类活动差异, 具有覆盖范围大、时效快和易获取等优势, 可广泛应用于多尺度长时序的城市问题研究。已有多个卫星搭载的传感器可以获取夜间灯光遥感影像, 例如DMSP-OLS、NPP-VIIRS、EROS-B、“珞珈一号”01星和“吉林一号”等 (Baugh等, 2013; Elvidge等, 1997a, 1999, 2013a, 2013b; Imhoff等, 1997; Jiang等, 2018; Levin等, 2014; Shi等, 2014a; Zheng等, 2018)。这些夜间灯光遥感影像的空间分辨率覆盖从3000—0.7 m不等, 光谱信息也从单波段灰度图像发展到多波段的彩色影像, 为夜间灯光遥感应用提供了更多的可能性。

已有研究表明, 夜间灯光遥感影像不仅可以用于分析多尺度城市空间结构及演化规律, 包括

城市要素及内部空间结构、城市区域、城市体系等级结构及城市群, 还可以从多尺度估算多类社会经济发展指标, 包括人口、GDP、电力消耗、碳排放、货运总量、城市住房空置率等 (Lo, 2002; Doll等, 2000; Elvidge等, 2012; Chen等, 2017; Shi等, 2014a, 2016a, 2016b; Zhou等, 2014, 2015)。除此之外, 还有研究将夜间灯光遥感影像应用于城市化进程综合监测和城市公共安全领域, 包括自然灾害、疫情、节日、战争、环境、健康等 (Zhao等, 2018; Witmer和O'Loughlin, 2011; Li等, 2013a; Elvidge等, 2020)。基于此, 本文梳理了国内外夜间灯光遥感的研究文献, 从夜间灯光遥感与城市问题视角 (图1), 对相关数据、方法、应用和挑战进行了归纳总结, 以期为夜间灯光遥感研究提供有益的参考。

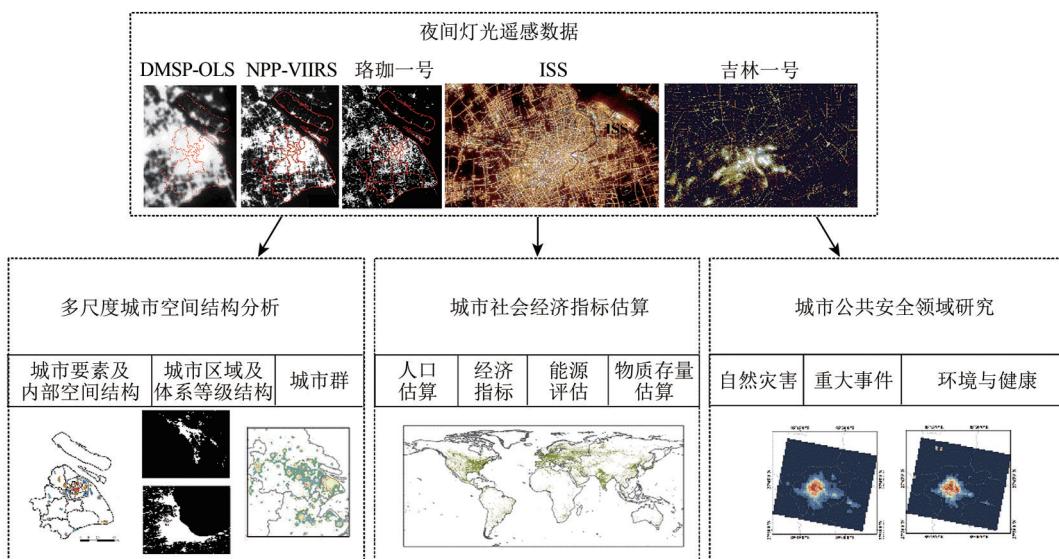


图1 夜间灯光遥感与相关城市问题研究(来源:(Chen等,2017;Shi等,2016a;Zhao等,2018))

Fig.1 Remote sensing of nighttime light and related studies of urban issues (Chen et al., 2017; Shi et al., 2016a; Zhao et al., 2018)

## 2 常见的夜间灯光遥感传感器及数据集

目前, 常用的夜间灯光遥感数据主要集中于DMSP-OLS稳定夜间灯光遥感数据和NPP-VIIRS夜间灯光遥感数据。自2017年以来, 中国陆续发射了具有夜间灯光探测能力的“吉林一号”视频3星以及专业夜间灯光卫星“珞珈一号”01星, 进一步拓展了夜间灯光遥感的数据来源。此外, 还有一些卫星虽具有夜间灯光探测能力, 但因为数据不开放、获取时间不规则等原因未得到广泛应用, 例如SAC系列卫星等。表1介绍了目前能够探

测地表夜间灯光信息的传感器及其基本参数。

### 2.1 DMSP-OLS

始于20世纪70年代的美国国防气象卫星计划DMSP (Defense Meteorological Satellite Program) 搭载的线性扫描业务系统 OLS (Operational Line-Scan System), 本用于捕捉夜间云层反射的微弱月光并获取夜间云层分布, 却被意外发现可以捕捉城镇地表夜间发出的灯光, 开启了夜间灯光遥感影像应用的时代 (Elvidge等, 1997a, 1999; Imhoff等, 1997), 在与城市相关的各个领域都得到了广泛的应用。美国国家海洋和大气管理局

(NOAA) 发布了 1992 年—2013 年, 空间分辨率 1 km 左右的年合成稳定夜间灯光数据 (Stable Light) (Elvidge 等, 1997a), 至今仍是应用最广泛的夜间灯光遥感数据之一。尽管有着敏锐的夜光识别能力, 但是 DMSP-OLS 稳定夜间灯光遥感数据也存在 3 个明显的缺陷: 首先, 受制于传感器较低的辐射分辨率, 城市中心亮度较高的区域的辐射信息无法被完整记录, 导致灯光亮度的最大

值限制在 63, 此现象被称为“过饱和”现象 (Elvidge 等, 1997a); 其次, 由于缺乏在轨辐射定标, 导致不同卫星间以及不同年份间的数据不具有可比性, 给长时序分析带来困难; 最后, 该传感器获取到的夜间灯光遥感数据在灯光边缘区会出现“溢出效应” (Small 等, 2005)。上述问题在一定程度上限制了 DMSP-OLS 数据的有效应用。

表 1 夜间灯光遥感数据传感器及基本参数

Table 1 Sensors and basic parameters of nighttime light remote sensing data

遥感平台	开始生产 数据时间	空间 分辨率/m	时间 分辨率	辐射 分辨率	数据产品	光谱通道	来源/参考文献
DMSP-OLS	1992	~1000	1 a	6 bit	年合成稳定灯光数据(1992年—2013年) 辐射校正数据(个别年份)	全色 400—1100 nm	Elvidge 等, 1997b; Doll, 2008; Elvidge 等, 2009a
SAC-C HSTC	2000.11	300	不规则	8 bit	原始数据	全色 450—850 nm	Colomb 等, 2003
国际空间站(ISS) 宇航员照片	2003	5—200	不规则	8—14 bit	空间站宇航员照片	RGB	Levin 和 Duke, 2012; Kyba 等, 2015
SAC-D HSTC	2011.6	200—300	不规则	10 bit	原始数据	全色 450—900 nm	Sen 等, 2006
NPP-VIIRS/DNB	2011.10	~500 ~750	1 a 1月 1 d	14 bit	年合成数据(2015年、2016年) 月合成数据(2012-04至今) 逐日原始数据(2012-01-19至今)	全色 505—890 nm	Miller 等, 2012; Elvidge 等, 2013a, 2013c
EROS-B	2013	0.7	订购	10 bit	原始数据	全色 500—900 nm	Levin 等, 2014; Katz 和 Levin, 2016
Aerocube 4	2014	500	不规则	10 bit	原始数据	RGB	Pack 等, 2017
Aerocube 5	2015	124	不规则	10 bit	原始数据	RGB	Pack 等, 2017
“吉林一号”03B	2017.01	0.92	订购	8 bit	原始数据	蓝色 410—500 nm 绿色 500—580 nm 红色 580—690 nm	Zheng 等, 2018; Cheng 等, 2020
“吉林一号”04-08B	2018.01	0.92	订购	12 bit	原始数据	蓝色 460—520 nm 绿色 510—580 nm 红色 630—690 nm	Zhao 等, 2019a
“珞珈一号”01	2018.06	~130	15 d	15 bit	原始数据	全色 460—980 nm	Li 等, 2018a, 2019a; Wang 等, 2020a
CUMULOS	2018	150	不规则	14 bit	原始数据	全色 900—1700 nm	Ardila 和 Pack, 2016

## 2.2 NPP-VIIRS

2012 年, 美国国家极轨业务环境卫星系统 NPP (National Polar-Orbiting Partnership) 搭载的可见光红外成像辐射仪 VIIRS (Visible Infrared

Imaging Radiometer Suite) 提供了新一代夜间灯光遥感数据, 该数据的出现相对于 DMSP-OLS 数据在空间、时间和辐射分辨率等方面得到了提升, 进一步扩展了夜间灯光遥感的研究方向和应用领

域 (Baugh 等, 2013; Elvidge 等, 2013a, 2013b; Shi 等, 2014b)。NPP-VIIRS 的日夜波段 DNB (Day/Night Band) 主要用于探测夜间灯光强度, 为全色波段, 空间分辨率约为 750 m, 与 DMSP-OLS 夜间灯光遥感数据相比有着更高的空间分辨率。DNB 波段的光谱分辨率更高且进行了在轨辐射定标, 因此数据不存在“过饱和”现象且数据在不同时相间具有可比性。但是, 由于较高探测灵敏性, 往往会捕捉到冰雪、戈壁等反射光, 导致数据中存在大量的背景噪声和异常值, 需进行数据预处理 (Shi 等, 2014b; Yu 等, 2018a)。目前, NPP-VIIRS 夜间灯光遥感数据提供逐日原始数据 (下文简称“日数据”)、月合成数据 (2012–04 至今) 和部分年份 (2015 年、2016 年) 的年合成数据。由于 NPP-VIIRS 夜间灯光遥感数据克服了 DMSP-OLS 夜间灯光遥感数据存在的主要缺陷 (Li 等, 2013b), 使得夜间灯光遥感数据可以在更精细的空间尺度下研究城市问题 (Yu 等, 2015)。

### 2.3 国产卫星数据

“吉林一号”视频 3 星 (JL1-3B) 于 2017-01 成功发射, 是中国自主研制、发射和运营的具有夜间灯光探测能力的卫星, 其携带的传感器可以机动灵活地获取夜间灯光遥感数据, 支持单次成像过程中多次机动, 一次成像可以基本覆盖一个中型城市的空间范围。与 DMSP-OLS、NPP-VIIRS 夜间灯光遥感数据相比, “吉林一号”视频 3 星夜间灯光遥感数据的优势在于具有较高的空间分辨率 (0.92 m), 而且其成像仪具有红 (580—723 nm)、绿 (489—585 nm)、蓝 (437—512 nm) 3 个可见光波段, 具有通过光谱曲线分辨地表光源类型的能力 (Cheng 等, 2020)。

2018-06, 武汉大学主导发射的“珞珈一号”01 星 (LJ-01) 是全球首颗专业夜间灯光遥感卫星, 其空间分辨率约 130 m, 远优于现在广泛应用的 DMSP-OLS 和 NPP-VIIRS 夜间灯光遥感数据 (Zhang 等, 2018; Wang 等, 2020a)。“珞珈一号”01 星在理想情况下 15 d 即可完成全球夜间灯光遥感数据的采集。

“吉林一号”视频 3 星和“珞珈一号”01 星的先后发射, 标志着中国的夜间灯光卫星研究进入了快速发展阶段, 其较高空间分辨率的夜间灯光遥感影像为城市发展研究带来了新的契机。

### 2.4 其他数据

阿根廷于 2000 年和 2011 年发射的 SAC 系列卫星 (SAC-C、D) (Colomb 等, 2003), 也具有一定的夜间灯光探测能力, 但数据并未对普通用户开放, 限制了该数据的广泛应用。另外, 国际空间站 ISS (International Space Station) 宇航员手持相机拍摄的地球夜间灯光影像数据集, 其能够快速响应自然灾害等动态事件的优势也为夜间灯光研究起到了一定的促进作用 (Kyba 等, 2015; Levin 和 Duke, 2012)。此外, 以色列 EROS-B 卫星可生产的高分辨率 (0.7 m) 夜间灯光遥感影像。从 2012 年起, 美国航空航天公司 Aerospace 的 Aerocene4、5 等小型立方体卫星 (CubeSat) 也开始获取地表的夜间灯光影像, 这些小卫星的成本较低且获取数据比较灵活, 可以对感兴趣区域进行重点观测 (Pack 等, 2017)。随后, NASA 主导研究的立方体卫星系统 CUMULOS (Ardila 和 Pack, 2016) 也可以观察夜间地球发生的人类活动和自然现象, 而且其成像性能要优于 VIIRS 传感器, 这显示了立方体卫星进行环境监测的巨大潜力。虽然有着较高的分辨率和灵活性, 但是其数据获取比较零散, 大空间范围下的监测能力明显不足, 除此之外, 这些立方体卫星一般在轨运行的时间都相对较短 (几个月), 目前主要是用来验证传感器性能以及执行临时任务等。

## 3 多尺度城市空间结构分析

城市空间结构是城市中物质环境、功能活动和文化价值等组成要素之间关系的表现形式 (周春山和叶昌东, 2013)。城市空间结构受到城市化进程的影响不断发生着变化, 包括城市要素及内部空间结构、城市区域及体系等级结构和城市群等的改变。夜间灯光遥感影像能够探测到城市灯光甚至小规模居民地、车流等发出的低强度灯光, 使之明显区别于黑暗的非城市背景, 在准确提取和分析城市空间结构中发挥着重要的作用。

### 3.1 城市要素及内部空间结构

夜间灯光亮度变化可以反映人类活动强度的变化, 包括人类活动的均衡性和差异性, 进一步反映城市的空间和等级结构。分析当前城市内部空间结构的状态能够对当前城市总体规划执行状况进行评估, 也能为今后城市规划提供可靠的反

馈信息。

城市内部空间结构的首要变化就是由单中心结构向多中心结构的转移, 即从传统的单中心同心环模型和扇形模型发展成多核心模型(Anas等, 1998)。Chen等(2017)提出了夜间灯光地形类比的框架, 将城市中心(副中心)识别转化为在NPP-VIIRS夜间灯光遥感数据中寻找“山峰”的过程, 利用局部等值线树算法提取城市内部灯光亮度显著高于周边的区域, 实现对城市多中心的识别。多个研究将夜间灯光遥感数据与多源数据(例如感兴趣点、社交媒体数据和路网等)融合, 进一步证实了夜间灯光遥感数据所识别的城市中心结果的可靠性和准确性(刘源和李月臣, 2019; 罗庆和李小建, 2019; 毛帅永等, 2019; Cai等, 2017)。Li等(2018c)和Yue等(2019)分别分析了单中心—多中心城市结构与经济绩效和城市热环境的关系, 进一步拓展了夜间灯光遥感数据在城市结构分析的应用范围。部分高分辨率的夜间灯光遥感影像具备城市内部要素提取的能力。Zheng等(2018)和Cheng等(2020)通过结合“吉林一号”的夜间灯光遥感影像提供的光谱信息和形态特征, 提取路灯位置并区分高压钠灯和发光二极管灯。

### 3.2 城市区域及体系等级结构

城市区域是表征城市化进程的一个重要因素。基于地表物理特征判定的城市区域称为不透水层, 而基于土地利用性质判定的城市区域(人类活动范围)则称为城市建成区(Rashed和Jürgens, 2010)。夜间灯光遥感数据既能够通过融合其他夜间遥感数据获取地表覆盖信息以提取不透水层, 又能够依托自身特殊的信息采集能力分析人类活动范围。因此, 夜间灯光遥感数据的城市区域提取研究得到了越来越多的关注。下文为了行文统一, 将用城市区域指代不透水层与城市建成区。

DMSP-OLS和NPP-VIIRS数据, 已被广泛用于提取城市区域的范围及变化, 主要方法包括: 阈值法(Liu等, 2012; Imhoff等, 1997; Henderson等, 2003; 陈晋等, 2003; 舒松等, 2011; Xie和Weng, 2016; Shi等, 2014a; Zhou等, 2014, 2015; 何春阳等, 2006; Wei等, 2014; Zhao等, 2020b)、机器学习算法(Jing等, 2015; Cao等, 2009; He等, 2019; Liu等,

2019a, 2019c; Huang等, 2018; Chen等, 2019)以及多源数据指数分析方法(Sharma等, 2016; Guo等, 2015, 2018)等。阈值法的基本假设是夜间灯光亮度越大的区域成为城市区域的概率越大。此方法操作容易, 可用于大范围长时序的城市区域提取, 常采用辅助数据(何春阳等, 2006; Shi等, 2014a)、突变检验(Imhoff等, 1997)以及结合其他方法来确定阈值。机器学习算法提取城市区域的基本思想是利用先验知识在遥感数据上选取城市区域和非城市区域的训练样本, 通过机器学习的方式, 训练得到城市区域的识别模型, 并提取城市区域范围(Cao等, 2009; He等, 2019), 方法包括支持向量机、分类和回归树、k邻近、卷积网络以及随机森林等(Jing等, 2015; Cao等, 2009; He等, 2019; Liu等, 2019a, 2019c; Huang等, 2018; Chen等, 2019)。一些学者基于夜间灯光遥感数据提出城市化指数, 例如增强型城市建筑指数(Enhanced Urban Built-up Index)、大范围不透水层指数(Large-scale Impervious Surface Index)和改进不透水表面指数(Improved impervious surface index), 通过对指数设定某种阈值来提取城市建成区(或不透水层)范围(Sharma等, 2016; Guo等, 2015, 2018)。

除了DMSP-OLS和NPP-VIIRS夜间灯光遥感数据外, “珞珈一号”01星数据也已用于提取城市区域范围(Yin等, 2019; Li等, 2018a; Ou等, 2019; 钟亮和刘小生, 2019; 刘权毅等, 2019; 厉飞等, 2019; 李翔等, 2019; 张雨欣等, 2020)。Li等(2018a)将居民地指数(Human Settlement Index)、简单阈值分割(Simple Thresholding Segmentation)以及支持向量机(Support Vector Machine)3种方法应用于“珞珈一号”01星和NPP-VIIRS夜间灯光遥感数据, 证实了“珞珈一号”01星由于具有更高的空间分辨率和更丰富的空间信息, 可以提高城市建成区提取的精度。Ou等(2019)采用动态阈值分割方法进一步证实了“珞珈一号”01星数据相比于NPP-VIIRS数据可以产生更精确的不透水表面的空间范围。

夜间灯光遥感数据与各类城市规模评估指标存在显著相关, 可作为形式简洁却内涵丰富的城市体系等级结构及空间格局评估指标(Small和Elvidge, 2013; Small, 2019)。吴健生等(2014)

基于 DMSP-OLS 夜间灯光指数构建城市引力模型及作用潜力模型测度城市之间的相互关系, 使用二阶段聚类法综合分析中国城市体系等级结构与空间格局。Wu 等 (2019) 引入地形骨架网络 (Surface Network), 利用 NPP-VIIRS 年合成数据提取了中国典型城市的夜间灯光的地形骨架网络 (仅包括山峰点和山脊线)、特征点和特征线及城市间的结构相似度, 并划分城市等级。Zhao 等 (2020c) 基于“珞珈一号”01 星夜间灯光遥感数据提取城市连通区域, 构建树形结构从横向和纵向两个维度分析节点属性, 对河南省 18 个城市进行了分级。

### 3.3 城市群

城市群是由单个或者若干个特大型城市为核心, 包含周边多个不同级别的中小城市, 通过资源相互流动, 相互连接而成的城市空间形态 (Fang, 2015; Fang 和 Yu, 2017; Gottmann, 1957)。夜间灯光遥感数据为多尺度多时相的城市群时空演化模式与识别提供了一种极佳的数据选择。

城市群长时序时空演化模式分析主要集中在城市群边界内部城市区域的扩张分析 (Zou 等, 2017; Zhang 和 Su, 2016; Ma 等, 2012; Lu 等, 2018; Hu 等, 2017c; 王利伟和冯长春, 2016; 何春阳 等, 2005; Jia 等, 2017; Chen 等, 2020)。Jia 等 (2017) 使用 DMSP-OLS 夜间灯光遥感数据, 从水平和垂直强度两个方面对中国大陆主要城市群的扩张模式进行了研究, 发现较大城市群的扩张速度呈下降趋势, 中等或小型城市群的扩张水平往往高于大型城市群。Lu 等 (2018) 基于 DMSP-OLS 夜间灯光遥感数据从扩张率、扩张空间格局和扩张评估等角度对长三角城市群的扩张特征进行了分析, 发现受全球金融危机的影响, 2007 年之后长三角的城市扩张速度相较于之前有所下降。王利伟和冯长春 (2016) 以京津冀城市群为例, 使用 DMSP-OLS 夜间灯光遥感数据采取扩展强度指数、空间关联模型、多维驱动力分析模型定量揭示了城市群时空扩展路径及其动力机制, 发现中心城市为核心的圈层扩展特征明显, 城市群空间集聚扩展呈现出“先增强、后减弱”的态势。

由于城市群是一个复杂、开放的巨系统, 具

有边界模糊性和城市辐射范围阶段性与模糊性等典型特征 (方创琳, 2009; 顾朝林, 2011), 对于城市群空间范围的识别和界定较为困难。夜间灯光遥感数据为定量识别城市群的空间范围及演化提供了新的视角 (Lo, 2002; Peng 等, 2020; 金梦 等, 2017; 周亮 等, 2019; 梁泽 等, 2020; 李佳, 2020; Yu 等, 2014)。Lo (2002) 首次提出了夜间灯光遥感数据可用于识别城市群的观点, 通过目视判读的方法, 识别出 1997 年中国大陆最大的 10 个城市群, 包括北京—天津、太原、石家庄—安阳、济南—淄博、青岛、上海—常州、沈阳—营口、泉州、珠江三角洲和乌鲁木齐等。Yu 等 (2014) 使用 DMSP-OLS 数据, 以最小生成树抽象表达和概括城市对象之间的空间邻近性, 基于完形原则对最小生成树进行切割聚类, 对中国城市群进行了自动化识别。Peng 等 (2020) 使用阈值法和空间引力模型, 将 DMSP-OLS 数据用于长时间序列城市群范围识别, 共有 14 个城市群达到了次区域层面以上, 其中长江三角洲和珠江三角洲两个城市群已经达到了世界发达水平。梁泽 等 (2020) 以经济地理学中的“点—轴”理论为基础, 基于 NPP-VIIRS 夜间灯光遥感影像、电子地图兴趣点和社会经济统计数据等, 识别出的中国 14 个城市群, 其中 8 个与规划范围较为接近, 分析了识别结果与规划范围不接近的原因包括: 核心城市间交通跨度过大或实际社会经济联系不足、受行政区划限制等。

## 4 城市社会经济指标估算

社会经济指标是一个国家和地区社会经济发展状况综合、定量的描述。夜间灯光遥感数据已经被众多研究证明与国民生产总值 (GDP)、贫困度、碳排放、电力消耗、城市人口、住房空置率、货运总量等社会经济指标具有较强的相关性, 可以弥补传统统计数据存在的统计口径不一致、数据缺失、更新频率低等不足 (Chen 和 Nordhaus, 2011; Henderson 等, 2012), 为不同经济指标的空间化分布研究提供了数据来源, 并且为不同空间尺度上精细评估城市经济活动水平提供了可能 (Doll 等, 2000)。本文将城市社会经济指标划分为“人口—经济—能源—物质”4 个维度以及“国家—省市—区县—格网”4 个尺度, 逐一探讨夜间灯光遥感数据在不同维度不同尺度下的应用能力。

## 4.1 人口估算

人口估算在研究区域经济、灾害等问题的重要基础数据，快速获得准实时且精细的人口动态分布显得尤为重要。Elvidge 等 (1997a) 提出利用 DMSP-OLS 夜间灯光遥感数据对城市人口进行估算，Sutton 等 (1997) 建立了 DMSP-OLS 数据与人口密度的定量关系，进一步证明了夜间灯光遥感数据在人口估算领域的研究潜力。Amaral 等 (2006) 评估了 DMSP-OLS 数据在居民点灯光面积相对较少的亚马逊地区的人口估算能力，实现了在统计数据缺失地区的人口估算。此外，DMSP-OLS 稳定夜间灯光遥感数据在人口动态估算方面也表现出了一定潜力 (Tripathy 等, 2017)。

国内学者也利用了 DMSP-OLS 夜间灯光遥感数据估算中国不同空间尺度下的人口分布 (曹丽琴等, 2009; Yang 等, 2013; Zeng 等, 2011; 卓莉等, 2005; Zhuo 等, 2009)。例如，卓莉等 (2005) 利用 DMSP-OLS 稳定夜间灯光遥感数据，并引入遥感植被数据、统计数据等，估算了 1998 年中国 1 km 空间分辨率的人口空间分布；曹丽琴等 (2009) 利用 BP 神经网络算法建立了 DMSP-OLS 稳定夜间灯光遥感数据与湖北省人口的相关性模型，估算了 2002 年湖北各县市的人口数量。

DMSP-OLS 稳定夜间灯光遥感数据在人口估算和人口空间化分析研究中有较广泛的应用，但要在更精细的空间分辨率下估算人口空间分布，则需要更高质量的灯光数据和其他辅助数据。例如，Yu 等 (2018b) 利用 NPP-VIIRS 数据，结合出租车轨迹数据，估算了上海市 500 m 空间分辨率的人口分布。Wang 等 (2020b) 利用高分辨的“珞珈一号”01 星数据和 POI 等辅助数据，模拟了浙江省 100 m 空间分辨率下的人口分布。

## 4.2 经济指标

夜间灯光强度反映了一个国家或地区的经济繁荣程度，已有大量研究表明夜间灯光亮度与国民生产总值 (GDP)、地区生产总值 (GRP) 等经济指标有较强的相关性，而夜间灯光遥感数据的空间特性为社会经济研究领域带来了新的契机。

Elvidge 等 (1997a) 利用 DMSP-OLS 稳定夜间灯光数据，通过建立美洲地区 21 个国家的灯光面积与其 GDP 等的相关性，发现灯光照明面积与 GDP 有高度的相关性 ( $R^2$  为 0.85—0.97)。此研究

作为一项开创性工作，激发了学者们利用夜间灯光遥感数据评估经济指标的灵感。陆续有学者利用夜间灯光遥感数据从国家尺度 (Elvidge 等, 2001; Chen 和 Nordhaus, 2011; Keola 等, 2015)、省市尺度 (Ghosh 等, 2009; Shi 等, 2014b; 李黔湘等, 2020; Chen 和 Nordhaus, 2019)、格网尺度 (Sutton 等, 1997; Doll 等, 2006; Sutton 和 Costanza, 2002; Chen 等, 2015) 下对 GDP 进行了估算。与人口空间估算类似，基于夜间灯光遥感数据的经济指标估算，可以提高统计系统不完善地区的社会经济数据的质量。例如，Chen 和 Nordhaus (2011) 通过分析地区尺度下 GDP 与 DMSP-OLS 稳定夜间灯光强度的关系，发现可以在一定程度上弥补发展中国家经济数据缺失等问题。

夜间灯光能够反映一个地区的经济发展水平，也应具有评估区域贫困度的能力。Elvidge 等 (2009b) 基于 DMSP-OLS 数据，计算了 2006 年全球各国的贫困指数，其 22 亿人的结果略低于世界发展指标 WDI (World Development Indicators) 估算的 26 亿人，该研究为利用夜间灯光遥感数据进行贫困度估算开创了先河。Jean 等 (2016) 利用 DMSP-OLS 夜间灯光遥感影像辅助训练了机器学习模型，得到了非洲地区 5 个国家的贫困度指数。利用夜间灯光遥感数据进行贫困度估算的工作也被延伸至省市尺度 (Wang 等, 2012)、区县尺度 (Yu 等, 2015; Shi 等, 2020)、格网尺度 (Zhao 等, 2019b)。基于夜间灯光遥感数据的贫困评估，一定程度上克服了传统的贫困测量方法主要依赖于统计数据和调查数据，以及贫困数据往往以行政区划为单位，无法进一步分析贫困人口的空间分布特征等问题。

货运总量一定程度上代表区域的经济发展水平，随着 NPP-VIIRS 夜间灯光遥感数据的稳定获取，Shi 等 (2015) 尝试利用 NPP-VIIRS 夜间灯光遥感数据估算了中国的货运总量，并在省级尺度上生成了中国货运总量的空间分布图，并通过验证发现 NPP-VIIRS 数据比 DMSP-OLS 数据更适合于中国地货运总量的估算。

在住房空置率方面，Yao 和 Li (2011) 首先利用房屋价格和 DMSP-OLS 稳定夜间灯光遥感数据的比值，对中国 50 个城市的住房空置率进行了评估，但该研究无法量化得到具体的住房空置率

信息。Chen 等 (2015) 通过结合夜间灯光遥感数据和土地覆盖数据评估了美国 15 个都会区的房屋空置率情况，并揭示了房屋空置率的空间分布差异。Tan 等 (2020) 使用了“珞珈一号”01 星夜间灯光数据，辅以城市建筑物数据，成功估算和分析了中国 46 座城市的住房空置率及其空间分布情况。

### 4.3 能源评估

夜间灯光影像信号源主要来自于地表电灯等照明设备发射和反射的电磁波，因此能够一定程度上反映一个地区的能源和电力消耗。早在 20 世纪 80 年代，Welch (1980) 通过建立美国东部城市电力消耗与夜间灯光遥感数据的线性模型，证明了夜间灯光影像记录的灯光强度与电力消耗在省市级尺度下存在显著关系。Letu 等 (2010) 计算了日本部分城市 DMSP-OLS 夜间灯光数据与电力消耗的相关关系，进而推广到中国、印度在内的 10 个亚洲国家的城市尺度下电力消耗的估算，其结果进一步确认了稳定夜间灯光可以很好地估算电力消耗。对中国而言，在改革开放后经济快速增长的背景下，电力消耗也稳步上升，从不同空间尺度上及时、准确获取电力消耗的时空动态便显得尤为重要，国内学者从多空间尺度（省市、区县、格网）下估算和分析了中国电力消耗的时空动态及变化趋势 (He 等, 2014; Shi 等, 2016a, 2016b, 2018)。

在能源消耗相关碳排放的估算方面，Doll 等 (2000) 发现中国、美国、澳大利亚等 46 个国家的 DMSP-OLS 夜间灯光面积与能源消耗相关碳排放量存在较强的相关性，回归系数达到 0.84，此后更多的学者利用夜间灯光数据从不同空间范围和尺度下对与能源消耗相关的碳排放进行估算 (陈志建等, 2018; Liu 等, 2018; Ou 等, 2016; Shi 等, 2014a; 苏泳娴等, 2013)。例如，Ou 等 (2016) 以 DMSP-OLS 夜间灯光遥感数据和人口密度、交通网络数据为解释变量，利用线性回归模型建立了 2010 年全球能源消耗相关碳排放空间数据库。Liu 等 (2018) 借助植被指数 (EVI) 减轻 DMSP-OLS 稳定夜间灯光遥感数据的过饱和现象，拓展了夜间灯光在非亮区的碳排放估算能力。Shi 等 (2014a) 通过对比中国省市尺度下的 DMSP-

OLS 数据和 NPP-VIIRS 数据与碳排放的线性回归结果，表明了利用 NPP-VIIRS 月合成数据可以更准确地估算省市尺度下能源消耗相关碳排放。

### 4.4 物质存量估算

城市化进程的发展加剧了对城市物质资源的依赖。物质存量与住房空置率分别反映了城市建设消耗的物质资源与城市建筑的使用情况。两者与城市发展水平息息相关，亦是表征城市发展水平的重要指标。由于这两个指标往往未被纳入部门国家或地区的统计年鉴中，存在数据缺失。因此，利用夜间灯光遥感数据开展物质存量与住房空置率的研究引起诸多学者的关注。

Hsu 等 (2013) 率先利用 DMSP-OLS 夜间灯光遥感数据估算了 2006 年 102 个国家或地区的钢铁存量，但未进行时间序列上的变化分析。Hattori 等 (2014) 通过结合 LandScan 人口数据，优化了 Hsu 等 (2013) 的算法，实现了对 2006 年—2010 年土木工程和建筑工程的钢铁存量评估。研究结果发现，相比使用单一的灯光数据，多源数据的融合能够得到更好的估算结果。Yu 等 (2018c) 利用 DMSP-OLS 稳定夜间灯光数据生产了 1992 年—2008 年全球 1 km 空间分辨率的钢铁存量、混凝土存量与铝存量数据集，进一步延伸了物质存量估算的能力，并揭示了物质存量的空间分异情况。

### 4.5 多尺度城市社会经济指标估算对比

夜间灯光遥感数据已被广泛应用于不同尺度下的城市社会经济指标估算 (表 2)。夜间灯光遥感数据应用于城市社会经济指标估算的研究主要集中在国家尺度、省市尺度和格网尺度；而在区县尺度下，由于训练样本和验证数据相对缺乏，导致相关应用研究相对较少。

人口估算研究作为夜间灯光遥感数据最典型的应用之一，在上述 4 种尺度下均有相关研究。因此，以人口估算研究为例，探讨夜间灯光遥感数据用于不同尺度下社会经济指标估算的能力。人口估算研究最初是在国家尺度展开，随后延伸至省市和区县尺度。总体而言，在这 3 种尺度下，大部分人口估算研究仅考虑了夜间灯光遥感数据，未融合其他数据信息，估算精度也相对较优，大多在 0.85 以上。最佳估算结果出现在省市尺度， $R^2$  达到 0.96 (Tripathy 等, 2017)。在格网尺度下，

人口估算研究方法主要分成两类,一是在区县或省市尺度上构建灯光亮度与人口数量的关系模型,再将该模型应用于人口格网化(卓莉等,2005;高义等,2013);二是融合夜间灯光遥感数据与地理空间大数据(出租车数据、感兴趣点数据等),利用机器学习等算法,开展格网尺度下的人口估

算研究(Yu等,2018b;Wang等,2020b)。从精度上来看,格网尺度下的估算精度相对较低。需要强调的是,目前在格网尺度下的人口估算验证工作大多是将估算结果汇总至区县或省市尺度后进行的。除了人口指标外,大部分城市社会经济指标估算也存在相似的情况(表2)。

表2 不同空间尺度下各社会经济指标估算精度对比

Table 2 Comparison of estimation precision of socio-economic indicators at different spatial scales

空间尺度	社会经济指标	精度指标( $R^2$ )	参考文献
国家尺度	人口	0.85,—	Elvidge等,1997b,2001
	GDP	0.97,—,0.87,	Elvidge等,1997b,2001;Chen和Nordhaus,2011
	贫困度	0.72,0.75	Elvidge等,2009b;Jean等,2016
	农业产值	0.73	Keola等,2015
	电力消耗	0.96,—	Elvidge等,1997b,2001
	碳排放	0.84,—,[0,64,0,69]	Doll等,2000;Elvidge等,2001;Shi等,2018
省市尺度	钢铁储量	[0,71,0,99],[0,87,0,95]	Hsu等,2013;Hattori等,2014
	人口	[0,82,0,90],0.74	Amaral等,2006;Tripathy等,2017
	GDP	0.879,0.82,0.73,0.887	Chen和Nordhaus,2019;李黔湘等,2020;Shi等,2014b;Ghosh等,2009
	贫困度	0.85	Wang等,2012
	电力消耗	0.89,[0,75,0,95],0.54	Welch,1980;Letu等,2010;Shi等,2014b
	碳排放	0.82,[0,62,0,94]	苏泳娴等,2013;陈志建等,2018
区县尺度	住房空置率	—	Yao和Li,2011
	人口	0.92,0.96	曹丽琴等,2009;吴健生等,2015
	贫困度	0.85,0.93,0.88	Yu等,2015;Shi等,2020;Li等,2020a
	碳排放	0.83	赵金彩等,2017
	人口	0.82,0.79,[0,58,0,72],[0,58,0,75]	卓莉等,2005;高义等,2013;Yu等,2018b;Wang等,2020b
	GDP	0.92,0.86,[0,275,0,598]	Doll等,2006;Sutton和Costanza,2002;Chen等,2015
格网尺度	贫困度	0.64,[0,61,0,70]	Elvidge等,2012;Zhao等,2019b
	货运总量	0.81	Shi等,2015
	电力消耗	0.99	Shi等,2016b
	碳排放	0.84,[0,66,0,74],0.817,0.88	Doll等,2000;Shi等,2016a;Ou等,2016;Liu等,2018
	物质存量	0.90	Yu等,2018c
	住房空置率	0.73	Chen等,2015

注:“—”表示原文未提供精度验证结果; “[A, B]” 表示精度区间为 A—B。

综上,夜间灯光遥感数据在国家尺度、省市尺度和区县尺度下进行社会经济指标估算均具有理想的精度。但在格网尺度下,大部分估算精度均有所降低,且由于缺少合适的验证数据,往往需要将估算结果汇总至行政区划内再进行精度验证,使得精度验证结果存在不确定性。在方法上,格网尺度的指标估算大多需要融合其他数据源,以弥补夜间灯光遥感数据中低空间分辨率所带来的

不足,从而导致了估算模型会更加复杂。

## 5 城市公共安全领域研究

城市公共安全是影响城市化进程的重要因素,其衍生出的一系列问题也是城市问题研究的重要方向。在城市公共安全领域,夜间灯光遥感数据已被多项研究证实了其可用于分析和评估自然灾害、重大事件(战争、节日等)、环境与健康等城市公共安全问题(表3)。

**表3 多源夜间灯光遥感数据在不同城市安全领域的应用**  
**Table 3 Applications of multi-source nighttime light data in urban public security**

领域	数据	代表文献
自然灾害	DMSP-OLS 夜间灯光遥感日数据和年合成数据	地震灾后灾损评估 (Kohiyama 等, 2004; Hayashi 等, 2000; 张宝军, 2018; Li 等, 2018b)、飓风过后社区恢复力探究 (Qiang 等, 2020)、海啸过后社区恢复力探究 (Gillespie 等, 2014)、自然灾害风险制图 (Wu 等, 2018)
	NPP-VIIRS 夜间灯光遥感日数据 DNB (Day-night band)	飓风过后停电区域识别及灾害损失评估 (Cole 等, 2017)、风暴和暴雨事件灾后停电情况探测 (Wang 等, 2018; Molthan 等, 2013; Cao 等, 2013)、多灾种自然灾害灾情评估 (地震、飓风、热带气旋和暴雨) (Zhao 等, 2018)、台风事件受影响人群分析 (Zheng 等, 2019b)
重大事件	DMSP-OLS 夜间灯光遥感年合成和月合成数据	夜间灯光在武装冲突中的应用潜力和影响评估 (Li 等, 2013a; Witmer 和 O'Loughlin, 2011; Coscieme 等, 2017; Li 和 Li, 2014)
	NPP-VIIRS 夜间灯光遥感日数据和月合成数据	也门战争影响评估 (Jiang 等, 2017)、节假日人类活动变化探究 (Liu 等, 2019b; Román 和 Stokes, 2015)
环境与健康	DMSP-OLS 夜间灯光遥感年合成数据	热环境健康评估 (Hu 等, 2017b)、高温热浪人群健康风险评价 (陈倩 等, 2017)、人为热估算 (Dong 等, 2017)、乳腺癌发病率评估 (Bauer 等, 2013)、PM <sub>2.5</sub> 浓度估算 (Li 等, 2017b)、光污染 (Han 等, 2014)
	NPP-VIIRS 夜间灯光遥感日数据和月合成数据	逐日 PM <sub>2.5</sub> 估算 (Wang 等, 2016)、光污染 (Falchi 等, 2016)、人为热排放 (Hu 等, 2017a)、COVID-19 疫情前后灯光探测及复工复产情况监测 (Elvidge 等, 2020; Liu 等, 2020)
	“珞珈一号”01 星夜间灯光遥感数据	逐月 PM <sub>2.5</sub> 估算 (Zhang 等, 2020)、光污染 (Jiang 等, 2018)

## 5.1 自然灾害

地震和飓风等自然灾害的发生, 通常伴随着灾区光源载体的破坏及重建, 因此夜间灯光变化在一定程度上能够反映灾害对灾区社会经济的影响。

DMSP-OLS 夜间灯光日数据和年合成数据已被用于地震发生前后灾损评估 (Kohiyama 等, 2004; Hayashi 等, 2000) 和地震、飓风、海啸等灾后损失及恢复力评估 (张宝军, 2018; Li 等, 2018b; Qiang 等, 2020; Gillespie 等, 2014)。Li 等 (2018b) 使用 DMSP-OLS 夜间灯光年合成数据分析了 2008 年汶川地震前后受影响区域的灯光亮度变化情况以及灾后 3 年内受影响区域的重建和恢复情况。Gillespie 等 (2014) 分析了 2004 年印尼海啸后, 307 个社区的 DMSP-OLS 夜间灯光亮度、受影响区域以及入户调查的社会经济指标, 发现海啸影响区域的灯光亮度值直到 2006 年才逐步恢复正常。

NPP-VIIRS 夜间灯光遥感日数据由于时间分辨率高, 且空间分辨率优于 DMSP-OLS 夜间灯光遥感数据, 在短期自然灾害事件的动态分析中表现出了更优秀应用潜力。目前, 相关研究主要

集中在飓风、暴雨、热带气旋等事件 (Molthan 和 Jedlovec, 2013; Cole 等, 2017; Wang 等, 2018; Zhao 等, 2018; Zheng 等, 2019b; Cao 等, 2013)。Molthan 和 Jedlovec (2013) 和 Cole 等 (2017) 通过分析 NPP-VIIRS 夜间灯光日数据的辐亮度值, 发现其可以有效监测 2012 年桑迪飓风后的停电情况。Zhao 等 (2018) 发现 NPP-VIIRS 夜间灯光日数据可以直接反映地震受损区域中人类活动强度变化造成的灯光变化, 如停电、建筑损毁、救援灯等, 但是无法区分灯光变化的原因。

## 5.2 重大事件

除了自然灾害以外, 夜间灯光遥感数据也被应用于监测战争或节假日期间的城市状况 (Coscieme 等, 2017; Li 等, 2013a; Li 和 Li, 2014; Jiang 等, 2017; Witmer 和 O'Loughlin, 2011)。Witmer 和 O'Loughlin (2011) 发现 DMSP-OLS 年合成数据的夜间灯光变化能够明显反映长期的油田火灾以及难民迁入, 即便在难民迁移规模并不高的地区也可以明显探测。Li 和 Li (2014) 使用 DMSP-OLS 月合成数据, 分析了叙利亚内战前后当地灯光亮度的变化, 发现自 2011-03 份内战爆发后, 当地灯光亮度剧烈变少, 大部分省份的夜间

灯光损失超过 60%。Román 和 Stokes (2015) 分析了 2012 年—2014 年间, 圣诞节、新年以及斋月 3 个节日前后的 NPP-VIIRS 夜间灯光日数据的灯光亮度情况, 发现美国南部和墨西哥北部大部分城市在圣诞节和新年的灯光亮度大于非节日期间的灯光亮度, 多数穆斯林国家的城市在斋月期间达到灯光亮度峰值。Jiang 等 (2017) 使用 NPP-VIIRS 夜间灯光月合成数据, 分析了也门战争期间的该国不同地区时间序列灯光亮度总值, 发现从 2015-02—2015-06, 也门的总灯光亮度值下降了 71.60%。Liu 等 (2019b) 分析了墨西哥的坎昆市和普埃布拉市在狂欢节和瓜达卢佩圣母节期间 NPP-VIIRS 夜间灯光月合成数据的灯光变化情况。

### 5.3 环境与健康

夜间灯光数据在环境领域同样得到多方面的应用, 包括 PM<sub>2.5</sub> 浓度估算、光污染分布、高温热浪风险评估、人为热排放估算等 (Falchi 等, 2016; Jiang 等, 2018; Zhang 等, 2020; Dong 等, 2017)。

Wang 等 (2016) 基于 NPP-VIIRS 月合成数据及地面 PM<sub>2.5</sub> 监测数据, 论证了利用夜间灯光遥感数据反演夜间 PM<sub>2.5</sub> 浓度的潜力。Zhang 等 (2020) 基于多源数据使用地理加权回归模型对京津冀地区的 PM<sub>2.5</sub> 浓度进行估算, 发现模型中添加“珞珈一号”01 星夜间灯光信息可以提高 PM<sub>2.5</sub> 预测模型的性能。与 NPP-VIIRS 夜间灯光遥感数据相比, “珞珈一号”01 星夜间灯光数据揭示了更多细节并提高了预测和分析 PM<sub>2.5</sub> 的准确性, 可以作为补充数据源之一用于估算 PM<sub>2.5</sub> 浓度及分析其影响因素。

在光污染研究方面, Han 等 (2014) 利用 DMSP-OLS 夜间灯光遥感年合成数据对中国光污染的空间格局进行了建模, 并监测了 1992 年—2012 年中国光污染的变化趋势, 结果表明在研究期内中国的光污染呈现出明显的增加趋势; Falchi 等 (2016) 利用 NPP-VIIRS 夜间灯光遥感月合成数据量化了全球范围内的光污染水平, 同时发现全球 80% 以上的人口暴露处于受光污染影响的环境中; Jiang 等 (2018) 评估了使用“珞珈一号”01 星夜间灯光遥感数据研究光污染的潜力, 并刻画了四个城市的光污染模式, 其结果表明“珞珈一号”01 星夜间灯光遥感数据可有效地用于光污染的研究。

人类活动所释放的热量, 也可通过夜间灯光

遥感数据进行量化。Dong 等 (2017) 通过自上而下的方法, 结合 DMSP-OLS 夜间灯光数据及多源数据, 构建了具有高空间分辨率的人为热排放全球数据库; Hu 等 (2017a) 基于 NPP-VIIRS 夜间灯光遥感月合成数据、归一化植被指数数据以及统计数据, 对京津冀地区的人为热排放进行了估算, 证明了 NPP-VIIRS 夜间灯光遥感月合成数据可用于空间化大范围的人为热排放。

在健康领域, 夜间灯光数据也被应用于乳腺癌发病率估算、高温热浪风险评估以及疫情前后的复工复产监测等 (Bauer 等, 2013; Hu 等, 2017b; Liu 等, 2020; Elvidge 等, 2020)。Bauer 等 (2013) 分析了美国佐治亚州 2005 年到 2009 年乳腺癌发病率空间分布, 发现 DMSP-OLS 夜间灯光强度与乳腺癌总体发病率显著相关。Hu 等 (2017b) 和陈倩等 (2017) 融合 DMSP-OLS 夜间灯光遥感数据与多源空间数据, 对高温人口暴露进行空间化分析, 以探究高温热浪人群健康风险空间格局。2019 年新型冠状病毒肺炎 (COVID-19) 疫情 (新冠疫情) 爆发引发全球关注, 多国采用停工停产的措施减小新冠疫情的影响, 全球因疫情造成的经济损失空前。已有研究使用夜间灯光数据探究疫情下停工停产以及疫情发展后期复工复产的情况。Elvidge 等 (2020) 发现相对于 2018-12, 2019-03 中国有 62% 的人口生活的城市灯光亮度增加; 这种情况在 2020-02 发生了逆转, 82% 的人口生活的城市灯光亮度减弱。Liu 等 (2020) 发现新冠疫情爆发阶段, 中国不同土地利用下 NPP-VIIRS 夜间灯光影像的灯光亮度变化具有显著差异, 居民区灯光亮度显著增加, 商业中心有所减少。

## 6 问题与挑战

### 6.1 夜间灯光遥感日数据的应用

作为目前主流的夜间灯光遥感数据之一, NPP-VIIRS 夜间灯光遥感数据除了质量显著提升外, 还能够对公众提供逐日的全球夜间灯光数据, 使精细时间粒度的夜间灯光遥感数据应用成为可能, 并已有若干应用 (Cao 等, 2013; Román 和 Stokes, 2015; Zhao 等, 2018)。在实际应用 NPP-VIIRS 夜间灯光日数据时, 需考虑以下 4 个问题:

(1) 云层遮蔽。作为光学遥感影像, NPP-

VIIRS夜间灯光遥感数据往往包含大量的云污染像元, 尤其在热带地区, 云层的存在会遮挡其下方的城市灯光并模糊周围的灯光 (Zhao等, 2018)。Baugh等 (2013) 基于DMSP-OLS夜间灯光遥感数据的云掩膜算法, 结合全球预报模型 (GFS) 及NPP-VIIRS长波红外数据为NPP-VIIRS夜间灯光遥感日数据开发了相应的云掩膜产品, 但云污染像元去除后的数据空缺依然限制了数据在精细时间粒度下的应用。

(2) 月光污染。由于NPP-VIIRS夜间灯光遥感传感器被设计为具有探测全日照场景到二分之一月球照明场景辐射的能力 (Liao等, 2013), 使得NPP-VIIRS日数据同时记录了地表反射的月光与地表发射光 (Hillger等, 2014), 在使用日数据进行定量估算前需对受月光污染的像元进行校正。Miller和Turner (2009) 提出了MT2009月球光谱辐照度模型可用于NPP-VIIRS日数据的月光污染去除, 但该模型模拟结果依然存在7%—12%的误差 (Cao等, 2013), 导致校正后的NPP-VIIRS夜间灯光辐亮度出现异常。

(3) 大气效应。精细时间粒度内, 大气条件的改变会使地表发射光经历不同程度的吸收与散射过程, 导致NPP-VIIRS夜间灯光遥感日数据记录的辐射能量发生变化, 增加了日数据的不确定性。Cao和Bai (2014) 通过对NPP-VIIRS夜间灯光遥感数据中不同类型点源光的时间序列监测, 发现气溶胶对NPP-VIIRS夜间灯光遥感数据具有显著影响; Wang等 (2020c) 发现当气溶胶光学深度增加一个单位时, 灯光辐亮度降幅约 $10\text{ nW/cm}^2/\text{sr}$ 。这意味着在照明水平较低区域的灯光辐亮度的下降, 可能远大于地表灯光的实际变化。因此, 将大气校正引入到NPP-VIIRS夜间灯光日数据预处理环节是提高日数据精度的关键。

(4) 其他因素的影响。除上述因素的影响外, 杂散光、积雪的存在以及观测角度的变化同样影响着日数据的质量。在夏季北半球及春季南半球的高纬度地区, NPP卫星过境时会受日光照射的影响, 导致该区域内的夜间灯光数据出现季节性的杂散光 (Lee和Cao, 2016; Zhao等, 2017), 照明水平较低地区的短期灯光变化将被杂散光掩盖; 在低纬度地区同样存在不具有明显周期性的杂散光影响, 形成原因尚未可知 (Lee和Cao, 2016)。Mills等 (2013) 通过引入太阳入射角的

多项式函数对杂散光进行了拟合及校正, 提升了NPP-VIIRS夜间灯光日数据的定量化应用能力。Cinzano等 (2000) 量化了积雪对地表上行灯光亮度的影响, 表明积雪会使太空观测到的夜间灯光亮度增幅高达50%以上, 此现象也出现在NPP-VIIRS数据中且尚无较好的方法能够进行校正 (Elvidge等, 2020)。此外, Li等 (2019b) 证明了卫星观测角度是导致NPP-VIIRS夜间灯光日数据辐亮度变化的重要因素, 并通过统计模型量化了卫星观测角度与夜间灯光辐亮度间的关系。

综上, 对于短时间间隔的夜间灯光数据应用, 数据的可获得性与质量决定了应用的可行性和其结果的准确性。目前, 虽已有研究分析了影响夜间灯光日数据质量的因素, 并提出了相应校正模型及方法 (Miller和Turner, 2009; Baugh等, 2013; Lee和Cao, 2016; Li等, 2019b), 但尚未有综合性、系统性的探讨与分析。因此, 进一步分析探索夜间灯光遥感日数据质量的影响因素, 梳理不同因素对夜间灯光遥感日数据质量的交互影响, 并耦合不同校正模型及方法得到更优质的夜间灯光遥感日数据产品, 在精细时间粒度的夜间灯光遥感定量化应用需求日渐提高的当下具有重要意义。

## 6.2 长时间序列夜间灯光遥感数据集的生产

城市长时序演化过程对剖析城市发展状况具有重要的作用。然而, 由于DMSP-OLS夜间灯光遥感数据和NPP-VIIRS夜间灯光遥感数据在传感器参数、数据质量、时间跨度等方面均存在差异, 使得两种最为常用的夜间灯光遥感数据无法同时直接应用于长时序的城市问题研究中, 限制了基于夜间灯光遥感数据的城市问题研究时间跨度。

已有学者提出了一系列跨传感器的校正方案, 用于获得时间跨度更长的夜间灯光遥感数据集。Shao等 (2014) 首次提出了针对夜间灯光遥感数据的辐射校正方法, 其在特殊事件下, 利用NPP-VIIRS夜间灯光遥感逐日数据和月球辐照度模型获取了一系列辐射、大气、月相参数, 提出了一套针对DMSP-OLS夜间灯光遥感数据的辐射校正模型。由于该方法所需要的参数往往较难获取, 因此并不适用于大尺度长时序的夜间灯光辐射校正。为了进一步简化夜间灯光遥感数据校正效率, Zhu等 (2017)、Li等 (2017a) 和梁丽等 (2020) 均

提出了基于幂函数的跨传感器夜间灯光遥感数据相互校正方案，得到一套类似于DMSP-OLS的长时序夜间灯光遥感数据集。除了幂函数之外，地理加权回归（Zheng等，2019a）、Sigmoid函数（Zhao等，2020a）以及Biphasic Dose Response模型（Ma等，2020）同样被应用于夜间灯光遥感数据校正。Li等（2020b）提出了采用夜间灯光数据核密度匹配的方法，将NPP-VIIRS夜间灯光遥感数据转换成类似于DMSP-OLS夜间灯光遥感数据，并结合基于逐步校正法得到的DMSP-OLS夜间灯光遥感数据得到了1992年—2018年的准DMSP-OLS夜间灯光遥感数据集。

综上，已有方法大多是以降低NPP-VIIRS夜间灯光遥感数据质量为代价，将NPP-VIIRS夜间灯光遥感数据转换成类似于DMSP-OLS夜间灯光遥感数据，并与原有DMSP-OLS夜间灯光数据组合形成长时序夜间灯光数据集。然而，为了能够更好的利用夜间灯光遥感数据开展城市问题研究，不仅要求要有长时序的夜间灯光遥感数据集，更要求该数据集能够具备更佳的数据质量（空间分辨率更高、辐射分辨率更精细等）。因此，如何构建高质量的长时序夜间灯光遥感数据集（类似于NPP-VIIRS夜间灯光遥感数据）仍旧是一项严峻挑战。

### 6.3 夜间灯光遥感数据定标

遥感数据辐射定标是定量遥感的一个重要过程，用于纠正传感器在轨辐射性能的衰减和恢复影像的真实辐射信息（Chander等，2009）。传统夜间灯光遥感辐射定标工作可分为绝对辐射定标和相对辐射定标两种。由于传统DMSP-OLS传感器老化等原因，使得目前无法对DMSP-OLS夜间灯光遥感数据进行绝对辐射定标。现有研究中更多的是利用发射前的实验室定标数据或数据获取后相对辐射定标的方法来提高DMSP-OLS数据在时间序列上的一致性（Hsu等，2015；Kumar等，2019），包括参照不变区域（Elvidge等，2009c）、伪不变区域（Wei等，2014）、指数法（郑子豪等，2018）等。NPP-VIIRS夜间灯光数据和“珞珈一号”01星夜间灯光数据执行的是星上绝对辐射定标，即将太阳和月球等作为标准辐射源，在可见光波段建立传感器入瞳处的光谱辐射亮度值与影像数字量化值之间的定量关系（Elvidge，

2013b；Zhang等，2018）。由于夜间灯光遥感的成像时间是在夜晚，现有的辐射定标工作大多采取的思路都是“利用白天成像影像进行定标模型求解，再将白天定标的低增益系数转换至夜间的高增益系数，从而对夜光影像进行补偿校正”（李德仁等，2019）。

除星上定标外，已有学者采用场地定标的方式进行夜间辐射定标，例如人为建设的定标场（Liao等，2013）、选择灯光相对稳定的南极冰穹C区域（Chen等，2016）、在沙漠架设探照灯（Hu等，2018）等。然而，无论是星上定标还是场地定标都受限于处理算法的复杂程度和定标场所的限制，难以阐述影像对不同地表光源的响应能力。

此外，由于夜间灯光遥感数据记录的是地表光源亮度的信息，是对人观测系统的重要组成部分。为了获取更为准确的对人观测信息，夜间灯光遥感数据的定标工作不仅要包括传统的辐射定标，更需要开展对人（经济）的定标工作，真正厘清逐格网灯光亮度与人类活动强度之间的关系。

## 7 结语

近年来，随着夜间灯光卫星空间、时间、光谱分辨率的不断提升，围绕夜间灯光遥感数据的城市问题研究进入快速发展阶段，对解决城市化进程中多尺度长时序的城市问题研究具有重要意义。在城市空间结构识别方面，这些研究除了传统城市区域识别以外，已经扩展到城市内部空间结构及要素识别和城市群边界识别等多个方面。在城市社会经济指标估算方面，从国家尺度，逐步发展到省市县尺度以及格网尺度，为精细化社会经济表达提供有力的数据支撑。除此之外，夜间灯光数据已经应用于自然灾害、战争、环境健康以及疫情等城市公共安全领域。结果表明，夜间灯光遥感能够在城市空间结构、城市社会经济指标估算以及城市公共安全等领域发挥重要作用，可为评估城市可持续发展提供了重要的数据支撑。

针对当前城市研究中面临的问题与挑战，夜间灯光遥感今后的发展趋势主要包括以下3点：（1）针对VIIRS/DNB数据质量问题，通过耦合不同校正模型及方法生产优质的夜间灯光日数据产品，拓展短时间间隔的夜间灯光数据的应用方向，例如：监测疫情下逐日人类活动差异及复工复产情况。

情况。(2) 构建长时序、可对比、高数据质量的夜间灯光数据集。例如: 提升 DMSP-OLS 数据质量, 与 NPP-VIIRS 夜间灯光数据拼接, 在不降低 NPP-VIIRS 空间数据分辨率的情况下, 生产长时序的类 NPP-VIIRS 夜间灯光数据集, 为长时间序列的城市问题研究提供数据支撑。(3) 建立地面实际光照度量值与夜间灯光遥感影像辐射值的有效响应关系, 同时构建人类活动或经济活动与灯光亮度间的响应关系, 不仅从机理角度探究灯光辐射值的实际意义, 更要实现对人(经济)的定标。

## 参考文献(References)

- Amaral S, Monteiro A M V, Camara G and Quintanilha J A. 2006. DMSP/OLS night-time light imagery for urban population estimates in the Brazilian Amazon. *International Journal of Remote Sensing*, 27(5): 855-870 [DOI: 10.1080/01431160500181861]
- Anas A, Arnott R and Small K A. 1998. Urban spatial structure. *Journal of Economic Literature*, 36(3): 1426-1464
- Ardila D and Pack D. 2016. The cubesat multispectral observation system (CUMULOS)/Proceedings of Conference on Characterization and Radiometric Calibration for Remote Sensing. [s.l.]: [s.n.]
- Bai X M, Shi P J and Liu Y S. 2014. Society: realizing China's urban dream. *Nature*, 509(7499): 158-160 [DOI: 10.1038/509158a]
- Bauer S E, Wagner S E, Burch J, Bayakly R and Vena J E. 2013. A case-referent study: light at night and breast cancer risk in Georgia. *International Journal of Health Geographics*, 12: 23 [DOI: 10.1186/1476-072X-12-23]
- Baugh K, Hsu F C, Elvidge C D and Zhizhin M. 2013. Nighttime lights compositing using the VIIRS day-night band: preliminary results. *Proceedings of the Asia-Pacific Advanced Network*, 35: 70-86 [DOI: 10.7125/apan.35.8]
- Cai J X, Huang B and Song Y M. 2017. Using multi-source geospatial big data to identify the structure of polycentric cities. *Remote Sensing of Environment*, 202: 210-221 [DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.039]
- Cao C Y and Bai Y. 2014. Quantitative analysis of VIIRS DNB night-light point source for light power estimation and stability monitoring. *Remote Sensing*, 6(12): 11915-11935 [DOI: 10.3390/rs61211915]
- Cao C Y, Shao X and Upadhyay S. 2013. Detecting light outages after severe storms using the S-NPP/VIIRS day/night band radiances. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 10(6): 1582-1586 [DOI: 10.1109/LGRS.2013.2262258]
- Cao L Q, Li P X and Zhang L P. 2009. Urban population estimation based on the DMSP/OLS night-time Satellite Data——A case of Hubei province. *Remote Sensing Information*, (1): 83-87 (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. 遥感信息, (1): 83-87) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-3177.2009.01.016]
- Cao X, Chen J, Imura H and Higashi O. 2009. A SVM-based method to extract urban areas from DMSP-OLS and SPOT VGT data. *Remote Sensing of Environment*, 113(10): 2205-2209 [DOI: 10.1016/j.rse.2009.06.001]
- Chander G, Markham B L and Helder D L. 2009. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*, 113(5): 893-903 [DOI: 10.1016/j.rse.2009.01.007]
- Chen J, Zhuo L, Shi P J and Ichinose T. 2003. The study on urbanization process in China based on DMSP/OLS data: development of a light index for urbanization level estimation. *Journal of Remote Sensing*, 7(3): 168-175 (陈晋, 卓莉, 史培军, 一之濑俊明. 2003. 基于 DMSP/OLS 数据的中国城市化过程研究——反映区域城市化水平的灯光指数的构建. 遥感学报, 7(3): 168-175) [DOI: 10.3321/j.issn:1007-4619.2003.03.002]
- Chen J Q, Wei H, Li N, Chen S Q, Qu W Q and Zhang Y. 2020. Exploring the spatial-temporal dynamics of the Yangtze River delta urban agglomeration based on night-time light remote sensing technology. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 13: 5369-5383 [DOI: 10.1109/JSTARS.2020.3022178]
- Chen Q, Ding M J, Yang X C and Hu K J. 2017. Spatially explicit assessment of heat health risks using multi-source data: a case study of the Yangtze River delta region, China. *Journal of Geo-Information Science*, 19(11): 1475-1484 (陈倩, 丁明军, 杨续超, 胡可嘉. 2017. 长江三角洲地区高温热浪人群健康风险评价. 地球信息科学学报, 19(11): 1475-1484) [DOI: 10.3724/SP.J.1047.2017.01475]
- Chen X and Nordhaus W D. 2011. Using luminosity data as a proxy for economic statistics. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108(21): 8589-8594 [DOI: 10.1073/pnas.1017031108]
- Chen X and Nordhaus W D. 2019. VIIRS nighttime lights in the estimation of cross-sectional and time-series GDP. *Remote Sensing*, 11(9): 1057 [DOI: 10.3390/rs11091057]
- Chen X X, Wu A S, Xiong X X, Lei N and Chiang K. 2016. Using ground targets to validate S-NPP VIIRS day-night band calibration. *Remote Sensing*, 8(12): 984 [DOI: 10.3390/rs8120984]
- Chen Z J, Liu Y M, Liu X and Kong F B. 2018. Research on carbon emission peak in Yangtze River economic zone with steady economic growth: based on data of global night-time light. *Journal of Natural Resources*, 33(12): 2213-2222 (陈志建, 刘月梅, 刘晓, 孔凡斌. 2018. 经济平稳增长下长江经济带碳排放峰值研究——基于全球夜间灯光数据的视角. 自然资源学报, 33(12): 2213-2222) [DOI: 10.31497/zrzyxb.20171145]
- Chen Z Q, Yu B L, Hu Y J, Huang C, Shi K F and Wu J P. 2015. Estimating house vacancy rate in metropolitan areas using NPP-VIIRS nighttime light composite data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 8(5): 2188-2197 [DOI: 10.1109/JSTARS.2015.2418201]

- Chen Z Q, Yu B L, Song W, Liu H X, Wu Q S, Shi K F and Wu J P. 2017. A new approach for detecting urban centers and their spatial structure with nighttime light remote sensing. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55(11): 6305-6319 [DOI: 10.1109/TGRS.2017.2725917]
- Chen Z Q, Yu B L, Zhou Y Y, Liu H X, Yang C S, Shi K F and Wu J P. 2019. Mapping global urban areas from 2000 to 2012 using time-series nighttime light data and MODIS products. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 12(4): 1143-1153 [DOI: 10.1109/JSTARS.2019.2900457]
- Cheng B, Chen Z Q, Yu B L, Li Q X, Wang C X, Li B B, Wu B, Li Y and Wu J P. 2020. Automated extraction of street lights from JL1-3B nighttime light data and assessment of their solar energy potential. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 13: 675-684 [DOI: 10.1109/JSTARS.2020.2971266]
- Cinzano P, Falchi F, Elvidge C D and Baugh K E. 2000. The artificial night sky brightness mapped from DMSP satellite operational Linescan system measurements. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 318(3): 641-657 [DOI: 10.1046/j.1365-8711.2000.03562.x]
- Cole T A, Wanik D W, Molthan A L, Román M O and Griffin R E. 2017. Synergistic use of nighttime satellite data, electric utility infrastructure, and ambient population to improve power outage detections in urban areas. *Remote Sensing*, 9(3): 286 [DOI: 10.3390/rs9030286]
- Colomb R, Alonso C and Nollmann I. 2003. SAC-C mission and the international am constellation for earth observation. *Acta Astronautica*, 52(9/12): 995-1005 [DOI: 10.1016/S0094-5765(03)00082-1]
- Coscieme L, Sutton P C, Anderson S, Liu Q and Elvidge C D. 2017. Dark times: nighttime satellite imagery as a detector of regional disparity and the geography of conflict. *GIScience and Remote Sensing*, 54(1): 118-139 [DOI: 10.1080/15481603.2016.1260676]
- Doll C N H. 2008. CIESIN thematic guide to night-time light remote sensing and its applications. Center for International Earth Science Information Network, Columbia University
- Doll C N H, Muller J P and Elvidge C D. 2000. Night-time imagery as a tool for global mapping of socioeconomic parameters and greenhouse gas emissions. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 29(3): 157-162 [DOI: 10.1579/0044-7447-29.3.157]
- Doll C N H, Muller J P and Morley J G. 2006. Mapping regional economic activity from night-time light satellite imagery. *Ecological Economics*, 57(1): 75-92 [DOI: 10.1016/j.ecolecon.2005.03.007]
- Dong Y, Varquez A C G and Kanda M. 2017. Global anthropogenic heat flux database with high spatial resolution. *Atmospheric Environment*, 150: 276-294 [DOI: 10.1016/j.atmosenv.2016.11.040]
- Duh J D, Shandas V, Chang H and George L A. 2008. Rates of urbanisation and the resiliency of air and water quality. *Science of the Total Environment*, 400(1/3): 238-256 [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2008.05.002]
- Elvidge C D, Baugh K E, Kihn E A, Kroehl H W and Davis E R. 1997a. Mapping city lights with nighttime data from the DMSP operational Linescan system. *Photogrammetry and Remote Sensing*, 63(6): 727-734
- Elvidge C D, Baugh K E, Kihn E A, Kroehl H W, Davis E R and Davis C W. 1997b. Relation between satellite observed visible-near infrared emissions, population, economic activity and electric power consumption. *International Journal of Remote Sensing*, 18(6): 1373-1379 [DOI: 10.1080/014311697218485]
- Elvidge C D, Baugh K E, Dietz J B, Bland T, Sutton P C and Kroehl H W. 1999. Radiance calibration of DMSP-OLS low-light imaging data of human settlements. *Remote Sensing of Environment*, 68 (1): 77-88 [DOI: 10.1016/S0034-4257(98)00098-4]
- Elvidge C D, Baugh K E, Anderson S J, Sutton P C and Ghosh T. 2012. The night light development Index (NLDI): a spatially explicit measure of human development from satellite data. *Social Geography*, 7(1): 23-35 [DOI: 10.5194/sg-7-23-2012]
- Elvidge C D, Baugh K E, Zhizhin M and Hsu F C. 2013b. Why VIIRS data are superior to DMSP for mapping nighttime lights. *Proceedings of the Asia-Pacific Advanced Network*, 35: 62-69 [DOI: 10.7125/apan.35.7]
- Elvidge C D, Erwin E H, Baugh K E, Ziskin D, Tuttle B T, Ghosh T and Sutton P C. 2009a. Overview of DMSP nighttime lights and future possibilities//Proceedings of 2009 Joint Urban Remote Sensing Event. Shanghai, China: IEEE: 1-5 [DOI: 10.1109/URS.2009.5137749]
- Elvidge C D, Ghosh T, Hsu F C, Zhizhin M and Bazilian M. 2020. The dimming of lights in China during the COVID-19 pandemic. *Remote Sensing*, 12(17): 2851 [DOI: 10.3390/rs12172851]
- Elvidge C D, Imhoff M L, Baugh K E, Hobson V R, Nelson I, Safran J, Dietz J B and Tuttle B T. 2001. Night-time lights of the world: 1994-1995. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 56(2): 81-99 [DOI: 10.1016/S0924-2716(01)00040-5]
- Elvidge C D, Sutton P C, Ghosh T, Tuttle B T, Baugh K E, Bhaduri B and Bright E. 2009b. A global poverty map derived from satellite data. *Computers and Geosciences*, 35(8): 1652-1660 [DOI: 10.1016/j.cageo.2009.01.009]
- Elvidge C D, Zhizhin M, Hsu F C and Baugh K. 2013a. What is so great about nighttime VIIRS data for the detection and characterization of combustion sources? *Proceedings of the Asia-Pacific Advanced Network*, 35: 33-48 [DOI: 10.7125/APAN.35.5]
- Elvidge C D, Zhizhin M, Hsu F C and Baugh K E. 2013c. VIIRS night fire: satellite pyrometry at night. *Remote Sensing*, 5(9): 4423-4449 [DOI: 10.3390/rs5094423]
- Elvidge C D, Ziskin D, Baugh K E, Tuttle B T, Ghosh T, Pack D W, Erwin E H and Zhizhin M. 2009c. A fifteen year record of global natural gas flaring derived from satellite data. *Energies*, 2(3): 595-622 [DOI: 10.3390/en20300595]
- Falchi F, Cinzano P, Duriscoe D, Kyba C C M, Elvidge C D, Baugh K, Portnov B A, Rybnikova N A and Furgoni R. 2016. The new world atlas of artificial night sky brightness. *Science Advances*, 2 (6): e1600377 [DOI: 10.1126/sciadv.1600377]
- Fang C L. 2009. Research progress and general definition about identi-

- fication standards of urban agglomeration space. *Urban Planning Forum*, (4): 1-6 (方创琳. 2009. 城市群空间范围识别标准的研究进展与基本判断. *城市规划学刊*, (4): 1-6) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-3363.2009.04.001]
- Fang C L. 2015. Important progress and future direction of studies on China's urban agglomerations. *Journal of Geographical Sciences*, 25(8): 1003-1024 [DOI: 10.1007/s11442-015-1216-5]
- Fang C L and Yu D L. 2017. Urban agglomeration: an evolving concept of an emerging phenomenon. *Landscape and Urban Planning*, 162: 126-136 [DOI: 10.1016/j.landurbplan.2017.02.014]
- Foley J A, DeFries R, Asner G P, Barford C, Bonan G, Carpenter S R, Chapin F S, Coe M T, Daily G C, Gibbs H K, Helkowski J H, Holloway T, Howard E A, Kucharik C J, Monfreda C, Patz J A, Prentice I C, Ramankutty N and Snyder P K. 2005. Global consequences of land use. *Science*, 309(5734): 570-574 [DOI: 10.1126/science.1111772]
- Gao Y, Wang H, Wang P T, Sun X Y and Lv T T. 2013. Population spatial processing for Chinese coastal zones based on census and multiple night light data. *Resources Science*, 35(12): 2517-2523 (高义, 王辉, 王培涛, 孙晓宇, 吕婷婷. 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. *资源科学*, 35(12): 2517-2523)
- Ghosh T, Anderson S, Powell R L, Sutton P C and Elvidge C D. 2009. Estimation of Mexico's informal economy and remittances using nighttime imagery. *Remote Sensing*, 1(3): 418-444 [DOI: 10.3390/rs1030418]
- Gillespie T W, Frankenberg E, Chum K F and Thomas D. 2014. Nighttime lights time series of tsunami damage, recovery, and economic metrics in Sumatra, Indonesia. *Remote Sensing Letters*, 5(3): 286-294 [DOI: 10.1080/2150704X.2014.900205]
- Gottmann J. 1957. Megalopolis or the urbanization of the northeastern seaboard. *Economic Geography*, 33(3): 189-200 [DOI: 10.2307/142307]
- Gu C L. 2011. Study on urban agglomeration: progress and prospects. *Geographical Research*, 30(5): 771-784 (顾朝林. 2011. 城市群研究进展与展望. *地理研究*, 30(5): 771-784) [DOI: 10.11821/yj2011050001]
- Guo W, Lu D S, Wu Y L and Zhang J X. 2015. Mapping impervious surface distribution with integration of SNNP VIIRS-DNB and MODIS NDVI data. *Remote Sensing*, 7(9): 12459-12477 [DOI: 10.3390/rs70912459]
- Guo W, Zhang Y H and Gao L. 2018. Using VIIRS-DNB and Landsat data for impervious surface area mapping in an arid/semiarid region. *Remote Sensing Letters*, 9(6): 587-596 [DOI: 10.1080/2150704X.2018.1455234]
- Han P P, Huang J L, Li R D, Wang L H, Hu Y X, Wang J L and Huang W. 2014. Monitoring trends in light pollution in China based on nighttime satellite imagery. *Remote Sensing*, 6(6): 5541-5558 [DOI: 10.3390/rs6065541]
- Hattori R, Horie S, Hsu F C, Elvidge C D and Matsuno Y. 2014. Estimation of in-use steel stock for civil engineering and building using nighttime light images. *Resources, Conservation and Recycling*, 83: 1-5 [DOI: 10.1016/j.resconrec.2013.11.007]
- Hayashi H, Hashitera S, Kohiyama M, Matsuoka M, Maki N, Fujita H and Elvidge C D. 2000. International collaboration for the early damaged area estimation system using DMSP/OLS nighttime images//Proceedings of IEEE 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Taking the Pulse of the Planet: The Role of Remote Sensing in Managing the Environment. Proceedings. Honolulu, HI, USA, USA: IEEE, 6: 2697-2699 [DOI: 10.1109/IGARSS.2000.859685]
- He C Y, Li J G, Chen J, Shi P J, Pan Y Z, Li J, Zhuo L and Ichinose T. 2005. The urbanization model and process in Bohai Sea surrounding area in the 1990s by using DMSP/OLS data. *Acta Geographica Sinica*, 60(3): 409-417 (何春阳, 李景刚, 陈晋, 史培军, 潘耀忠, 李京, 卓莉, 一之濑俊明. 2005. 基于夜间灯光数据的环渤海地区城市化过程. *地理学报*, 60(3): 409-417) [DOI: 10.11821/xb200503007]
- He C Y, Liu Z F, Gou S Y, Zhang Q F, Zhang J S and Xu L L. 2019. Detecting global urban expansion over the last three decades using a fully convolutional network. *Environmental Research Letters*, 14(3): 034008 [DOI: 10.1088/1748-9326/aaf936]
- He C Y, Ma Q, Liu Z F and Zhang Q F. 2014. Modeling the spatiotemporal dynamics of electric power consumption in mainland China using saturation-corrected DMSP/OLS nighttime stable light data. *International Journal of Digital Earth*, 7(12): 993-1014 [DOI: 10.1080/17538947.2013.822026]
- He C Y, Shi P J, Li J G, Chen J, Pan Y Z, Li J, Zhuo L and Ichinose T. 2006. Restoring urbanization process in China in the 1990s by using non-radiance-calibrated DMSP/OLS nighttime light imagery and statistical data. *Chinese Science Bulletin*, 51(7): 1614-1620 (何春阳, 史培军, 李景刚, 陈晋, 潘耀忠, 李京, 卓莉, 一之濑俊明. 2006. 基于DMSP/OLS夜间灯光数据和统计数据的中国大陆20世纪90年代城市化空间过程重建研究. *科学通报*, 51(7): 856-861) [DOI: 10.3321/j.issn:0023-074X.2006.07.017]
- Henderson J V, Storeygard A and Weil D N. 2012. Measuring economic growth from outer space. *American Economic Review*, 102(2): 994-1028 [DOI: 10.1257/aer.102.2.994]
- Henderson M, Yeh E T, Gong P, Elvidge C and Baugh K. 2003. Validation of urban boundaries derived from global night-time satellite imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 24(3): 595-609 [DOI: 10.1080/01431160304982]
- Hillger D, Seaman C, Liang C, Miller S, Lindsey D and Kopp T. 2014. Suomi NPP VIIRS imagery evaluation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(11): 6440-6455 [DOI: 10.1002/2013jd021170]
- Hsu F C, Baugh K E, Ghosh T, Zhizhin M and Elvidge C D. 2015. DMSP-OLS radiance calibrated nighttime lights time series with intercalibration. *Remote Sensing*, 7(2): 1855-1876 [DOI: 10.3390/rs70201855]
- Hsu F C, Elvidge C D and Matsuno Y. 2013. Exploring and estimating in-use steel stocks in civil engineering and buildings from nighttime lights. *International Journal of Remote Sensing*, 34(2): 490-504 [DOI: 10.1080/01431161.2012.712232]

- Hu D Y, Chen S S and Duan F Z. 2017a. Estimation of the anthropogenic heat flux distribution in beijing-tianjin-hebei region based on Suomi-NPP/VIIRS nighttime light image//Proceedings of 2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Fort Worth, TX, USA: IEEE: 4012-4015 [DOI: 10.1109/IGARSS.2017.8127880] [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2017.5.0973]
- Hu K J, Yang X C, Zhong J M, Fei F R and Qi J G. 2017b. Spatially explicit mapping of heat health risk utilizing environmental and socioeconomic data. *Environmental Science and Technology*, 51(3): 1498-1507 [DOI: 10.1021/acs.est.6b04355]
- Hu S S, Ma S, Yan W, Lu W, and Zhao X B. 2018. Feasibility of a specialized ground light source for night-time low-light calibration. *International Journal of Remote Sensing*, 39(8): 2543-2559 [DOI: 10.1080/01431161.2018.1430915]
- Hu Y N, Peng J, Liu Y X, Du Y Y, Li H L and Wu J S. 2017c. Mapping development pattern in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration using DMSP/OLS nighttime light data. *Remote Sensing*, 9(7): 760 [DOI: 10.3390/rs9070760]
- Huang R J, Zhang Y L, Bozzetti C, Ho K F, Cao J J, Han Y M, Daelenbach K R, Slowik J G, Platt S M, Canonaco F, Zotter P, Wolf R, Pieber S M, Bruns E A, Crippa M, Ciarelli G, Piazzalunga A, Schwikowski M, Abbaszade G, Schnelle-Kreis J, Zimmermann R, An Z S, Szidat S, Baltensperger U, Haddad I E and Prévôt A S H. 2014. High secondary aerosol contribution to particulate pollution during haze events in China. *Nature*, 514(7521): 218-222 [DOI: 10.1038/nature13774]
- Huang X, Hu T, Li J Y, Wang Q and Benediktsson J A. 2018. Mapping urban areas in China using multisource data with a novel ensemble SVM method. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 56(8): 4258-4273 [DOI: 10.1109/TGRS.2018.2805829]
- Imhoff M L, Lawrence W T, Stutzer D C and Elvidge C D. 1997. A technique for using composite DMSP/OLS "city lights" satellite data to map urban area. *Remote Sensing of Environment*, 61(3): 361-370 [DOI: 10.1016/S0034-4257(97)00046-1]
- Jean N, Burke M, Xie M, Davis W M, Lobell D B and Ermon S. 2016. Combining satellite imagery and machine learning to predict poverty. *Science*, 353(6301): 790-794 [DOI: 10.1126/science.aaf7894]
- Jia T, Chen K and Wang J Y. 2017. Characterizing the growth patterns of 45 major metropolitans in mainland China using DMSP/OLS data. *Remote Sensing*, 9(6): 571 [DOI: 10.3390/rs9060571]
- Jiang W, He G J, Long T F, Guo H X, Yin R Y, Leng W C, Liu H C and Wang G Z. 2018. Potentiality of using luojia 1-01 nighttime light imagery to investigate artificial light pollution. *Sensors*, 18(9): 2900 [DOI: 10.3390/s18092900]
- Jiang W, He G J, Long T F and Liu H C. 2017. Ongoing conflict makes Yemen dark: from the perspective of nighttime light. *Remote Sensing*, 9(8): 798 [DOI: 10.3390/rs9080798]
- Jin M, Deng S Q, Yang C S, Yu B L and Wu J P. 2017. Multi-scale clustering analysis on Chinese urbans based on nighttime light image. *Remote Sensing Technology and Application*, 32(5): 973-982 (金梦, 邓顺强, 杨成术, 余柏蒗, 吴健平. 2017. 基于夜间灯光遥感数据多尺度城市聚类分析. 遥感技术与应用, 32(5): 973-982)
- Jing W L, Yang Y P, Yue X F and Zhao X D. 2015. Mapping urban areas with integration of DMSP/OLS nighttime light and MODIS data using machine learning techniques. *Remote Sensing*, 7(9): 12419-12439 [DOI: 10.3390/rs70912419]
- Katz Y and Levin N. 2016. Quantifying urban light pollution — A comparison between field measurements and EROS-B imagery. *Remote Sensing of Environment*, 177: 65-77 [DOI: 10.1016/j.rse.2016.02.017]
- Keola S, Andersson M and Hall O. 2015. Monitoring economic development from space: using nighttime light and land cover data to measure economic growth. *World Development*, 66: 322-334 [DOI: 10.1016/j.worlddev.2014.08.017]
- Kohiyama M, Hayashi H, Maki N, Higashida M, Kroehl H W, Elvidge C D and Hobson V R. 2004. Early damaged area estimation system using DMSP-OLS night-time imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 25(11): 2015-2036 [DOI: 10.1080/01431160310001595033]
- Kumar P, Sajjad H, Joshi P K, Elvidge C D, Rehman S, Chaudhary, B S, Tripathy B R, Singh J and Pipal G. 2019. Modeling the luminous intensity of beijing, China using DMSP-OLS night-time lights series data for estimating population density. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 109: 31-39 [DOI: 10.1016/j.pce.2018.06.002]
- Kyba C C M, Garz S, Kuechly H, De Miguel A S, Zamorano J, Fischer J and Hölker F. 2015. High-resolution imagery of earth at night: new sources, opportunities and challenges. *Remote Sensing*, 7(1): 1-23 [DOI: 10.3390/rs7010001]
- Lee S and Cao C Y. 2016. Soumi NPP VIIRS day/night band stray light characterization and correction using calibration view data. *Remote Sensing*, 8(2): 138 [DOI: 10.3390/rs8020138]
- Letu H, Hara M, Yagi H, Naoki K, Tana G, Nishio F and Shuhei O. 2010. Estimating energy consumption from night-time DMPS/OLS imagery after correcting for saturation effects. *International Journal of Remote Sensing*, 31(16): 4443-4458 [DOI: 10.1080/01431160903277464]
- Levin N and Duke Y. 2012. High spatial resolution night-time light images for demographic and socio-economic studies. *Remote Sensing of Environment*, 119: 1-10 [DOI: 10.1016/j.rse.2011.12.005]
- Levin N, Johansen K, Hacker J M and Phinn S. 2014. A new source for high spatial resolution night time images — the EROS-B commercial satellite. *Remote Sensing of Environment*, 149: 1-12 [DOI: 10.1016/j.rse.2014.03.019]
- Li C S, Yang W N, Tang Q L, Tang X L, Lei J J, Wu M Y and Qiu S Y. 2020a. Detection of multidimensional poverty using luojia 1-01 nighttime light imagery. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 48(7): 963-977 [DOI: 10.1007/s12524-020-01126-3]
- Li D R, Zhang G, Shen X, Zhong X, Jiang Y H, Wang T Y, Tu J G and Li Z J. 2019. Design and processing night light remote sensing of LJ-1 01 satellite. *Journal of Remote Sensing*, 23(6): 1011-1022 (李德仁, 张过, 沈欣, 钟兴, 蒋永华, 汪韬阳, 涂建光, 李治江. 2019. 珞珈一号01星夜光遥感设计与处理. 遥感学报, 23(6): 1011-1022)

- 1011-1022) [DOI: 10.11834/jrs.20199327]
- Li F, Yan Q W, Zou Y J and Liu B L. 2019. Improving the accuracy of built-up area extraction based on nighttime light data and poi: a case study of NPP/VIIRS and luojia 1-01 nighttime light images. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 1-14 (厉飞, 袁庆武, 邹雅婧, 刘保丽. 2019. 利用POI提高夜间灯光数据提取建成区的精度研究——以珞珈一号01星和NPP/VIIRS数据为例. 武汉大学学报(信息科学版), 1-14) [DOI: 10.13203/j.whugis20190266]
- Li J. 2020. Spatial scope identification and characteristics analysis of urban agglomeration in mainland China. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 49(3): 401 (李佳. 2020. 中国大陆城市群空间范围识别及其特征分析. 测绘学报, 49(3): 401) [DOI: 10.11947/j.AGCS.2020.20190121]
- Li Q X, Zheng H, Zhang G, Guo X Y and Liu W L. 2020. Analysis of luojia1-01 index based on nighttime light imagery. *Journal of Geomatics*, 45(3): 8-15 (李黔湘, 郑晗, 张过, 郭雪瑶, 刘伟玲. 2020. 基于夜间灯光影像的珞珈一号指数分析. 测绘地理信息, 45(3): 8-15) [DOI: 10.14188/j.2095-6045.2020022]
- Li W, Sun B D, Zhao J C and Zhang T L. 2018c. Economic performance of spatial structure in Chinese prefecture regions: evidence from night-time satellite imagery. *Habitat International*, 76: 29-39 [DOI: 10.1016/j.habitatint.2018.05.006]
- Li X, Chen F R and Chen X L. 2013a. Satellite-observed nighttime light variation as evidence for global armed conflicts. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 6(5): 2302-2315 [DOI: 10.1109/JSTARS.2013.2241021]
- Li X and Li D R. 2014. Can night-time light images play a role in evaluating the Syrian Crisis? *International Journal of Remote Sensing*, 35(18): 6648-6661 [DOI: 10.1080/01431161.2014.971469]
- Li X, Li D R, Xu H M and Wu C Q. 2017a. 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. *International Journal of Remote Sensing*, 38(21): 5934-5951 [DOI: 10.1080/01431161.2017.1331476]
- Li X, Li X Y, Li D R, He X J and Jendryke M. 2019a. A preliminary investigation of Luojia-1 night-time light imagery. *Remote Sensing Letters*, 10(6): 526-535 [DOI: 10.1080/2150704X.2019.1577573]
- Li X, Ma R Q, Zhang Q L, Li D R, Liu S S, He T and Zhao L X. 2019b. Anisotropic characteristic of artificial light at night – systematic investigation with VIIRS DNB multi-temporal observations. *Remote Sensing of Environment*, 233: 111357 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.111357]
- Li X, Xu H M, Chen X L, and Li C. 2013b. Potential of NPP-VIIRS nighttime light imagery for modeling the regional economy of China. *Remote Sensing*, 5(6): 3057-3081 [DOI: 10.3390/rs5063057]
- Li X, Zhan C, Tao J B and Li L. 2018b. Long-term monitoring of the impacts of disaster on human activity using DMSP/OLS nighttime light data: a case study of the 2008 Wenchuan, China earthquake. *Remote Sensing*, 10(4): 588 [DOI: 10.3390/rs10040588]
- Li X, Zhao L X, Li D R and Xu H M. 2018a. Mapping urban extent using luojia 1-01 nighttime light imagery. *Sensors*, 18(11): 3665 [DOI: 10.3390/s18113665]
- Li X, Zhu J, Yin X D, Yao J C, Huang J L and Li M T. 2019. Mapping construction land of Guangzhou based on luojia No. 1 nightlight data. *Journal of Geo-information Science*, 21(11): 1802-1810 (李翔, 朱江, 尹向东, 姚江春, 黄嘉玲, 李密滔. 2019. 基于珞珈一号夜间灯光数据的广州市建设用地识别. 地球信息科学学报, 21(11): 1802-1810) [DOI: 10.12082/dqxxkx.2019.190041]
- Li X C, Zhou Y Y, Zhao M and Zhao X. 2020b. A harmonized global nighttime light dataset 1992-2018. *Scientific Data*, 7(1): 168 [DOI: 10.1038/s41597-020-0510-y]
- Li X K, Zhang C R, Li W D and Liu K. 2017b. Evaluating the use of DMSP/OLS nighttime light imagery in predicting PM<sub>2.5</sub> concentrations in the northeastern united states. *Remote Sensing*, 9(6): 620 [DOI: 10.3390/rs9060620]
- Liang L, Bian J H, Li A N, Feng W L, Lei G B, Zhang Z J and Zuo J Q. 2020. Consistent intercalibration of nighttime light data between DMSP/OLS and NPP/VIIRS in the China-Pakistan economic corridor. *Journal of Remote Sensing*, 24(2): 149-160 (梁丽, 边金虎, 李爱农, 冯文兰, 雷光斌, 张正健, 左家旗. 2020. 中巴经济走廊DMSP/OLS与NPP/VIIRS夜光数据辐射一致性校正. 遥感学报, 24(2): 149-160) [DOI: 10.11834/jrs.20208241]
- Liang Z, Huang J, Wei F L, Shen J S and Li S C. 2020. Identifying the spatial range of urban agglomerations in China based on night light remote sensing and POI data. *Geographical Research*, 39(1): 92-102 (梁泽, 黄姣, 韦飞黎, 申嘉澍, 李双成. 2020. 基于夜光遥感影像与百度POI数据的中国城市群空间范围识别方法. 地理研究, 39(1): 92-102) [DOI: 10.11821/dlyj020181002]
- Liao L B, Weiss S, Mills S and Hauss B. 2013. Suomi NPP VIIRS day-night band on-orbit performance. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(22): 12705-12718 [DOI: 10.1002/2013jd020475]
- Liu C, Yang K, Bennett M M, Guo Z Y, Cheng L and Li M C. 2019a. Automated extraction of built-up areas by fusing VIIRS nighttime lights and landsat-8 data. *Remote Sensing*, 11(13): 1571 [DOI: 10.3390/rs11131571]
- Liu Q, Sha D X, Liu W, Houser P, Zhang L Y, Hou R Z, Lan H, Flynn C, Lu M Y, Hu T and Yang C W. 2020. Spatiotemporal patterns of COVID-19 impact on human activities and environment in mainland China using nighttime light and air quality data. *Remote Sensing*, 12(10): 1576 [DOI: 10.3390/rs12101576]
- Liu Q Y, Zhan Q M, Li J S, Yang C and Liu W. 2019. Extracting built-up areas using luojia 1-01 nighttime light imageries in Wuhan, China. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 1-18 (刘权毅, 詹庆明, 李建松, 杨晨, 刘稳. 2019. 珞珈一号夜间灯光影像在建设用地提取中的应用: 以武汉市为例. 武汉大学学报(信息科学版), 1-18) [DOI: 10.13203/j.whugis20190376]
- Liu S S, Li X, Levin N and Jendryke M. 2019b. Tracing cultural festival patterns using time-series of VIIRS monthly products. *Remote Sensing Letters*, 10(12): 1172-1181 [DOI: 10.1080/2150704X.2019.1666313]
- Liu X, De Sherbinin A and Zhan Y N. 2019c. Mapping urban extent at

- large spatial scales using machine learning methods with VIIRS nighttime light and MODIS daytime NDVI data. *Remote Sensing*, 11(10): 1247 [DOI: 10.3390/rs11101247]
- Liu X P, Ou J P, Wang S J, Li X, Yan Y C, Jiao L M and Liu Y L. 2018. Estimating spatiotemporal variations of city-level energy-related CO<sub>2</sub> emissions: an improved disaggregating model based on vegetation adjusted nighttime light data. *Journal of Cleaner Production*, 177: 101-114 [DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.12.197]
- Liu Y and Li Y C. 2019. Urban centers extraction and analysis using night time light date: a case study of main urban areas of Chongqing. *China Resources Comprehensive Utilization*, 37(3): 160-164 (刘源, 李月臣. 2019. 基于夜间灯光数据的城市中心区域提取与分析——以重庆市主城区为例. 中国资源综合利用, 37(3): 160-164) [DOI: 10.3969/j.issn.1008-9500.2019.03.050]
- Liu Z F, He C Y, Zhang Q F, Huang Q X and Yang Y. 2012. Extracting the dynamics of urban expansion in China using DMSP-OLS nighttime light data from 1992 to 2008. *Landscape and Urban Planning*, 106(1): 62-72 [DOI: 10.1016/j.landurbplan.2012.02.013]
- Lo C P. 2002. Urban indicators of China from radiance-calibrated digital DMSP-OLS nighttime images. *Annals of the Association of American Geographers*, 92(2): 225-240 [DOI: 10.1111/1467-8306.00288]
- Lu H M, Zhang M L, Sun W W and Li W Y. 2018. Expansion analysis of Yangtze River delta urban agglomeration using DMSP/OLS nighttime light imagery for 1993 to 2012. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(2): 52 [DOI: 10.3390/ijgi7020052]
- Luo Q and Li X J. 2019. The spatial differentiation and influencing factors of urban centers in China based on VIIRS night light. *Geographical Research*, 38(1): 155-166 (罗庆, 李小建. 2019. 基于VIIRS夜间灯光的中国城市中心的分异特征及其影响因素. 地理研究, 38(1): 155-166) [DOI: 10.11821/dlyj020180467]
- Ma J J, Guo J Y, Ahmad S, Li Z Q and Hong J. 2020. Constructing a new inter-calibration method for DMSP-OLS and NPP-VIIRS nighttime light. *Remote Sensing*, 12(6): 937. [DOI: 10.3390/rs12060937]
- Ma T, Zhou C H, Pei T, Haynie S and Fan J F. 2012. Quantitative estimation of urbanization dynamics using time series of DMSP/OLS nighttime light data: a comparative case study from China's cities. *Remote Sensing of Environment*, 124: 99-107 [DOI: 10.1016/j.rse.2012.04.018]
- Mao S Y, Jiao L M, Xu G and Li Z H. 2019. Identification of the polycentric spatial structure in Wuhan City based on multisource data. *Progress in Geography*, 38(11): 1675-1683 (毛帅永, 焦利民, 许刚, 李泽慧. 2019. 基于多源数据的武汉市多中心空间结构识别. 地理科学进展, 38(11): 1675-1683) [DOI: 10.18306/dlkxjz.2019.11.003]
- Miller S D, Mills S P, Elvidge C D, Lindsey D T, Lee T F and Hawkins J D. 2012. Suomi satellite brings to light a unique frontier of nighttime environmental sensing capabilities. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109(39): 15706-15711 [DOI: 10.1073/pnas.1207034109]
- Miller S D and Turner R E. 2009. A dynamic lunar spectral irradiance data set for NPOESS/VIIRS Day/Night band nighttime environmental applications. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(7): 2316-2329 [DOI: 10.1109/TGRS.2009.2012696]
- Mills S, Weiss S and Liang C. 2013. VIIRS day/night band (DNB) stray light characterization and correction//Proceedings of SPIE Earth Observing Systems XVIII. San Diego, California, United States: SPIE, 8866: 88661P [DOI: 10.1117/12.2023107]
- Molthan A and Jedlovec G. 2013. Satellite observations monitor outages from superstorm sandy. *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, 94(5): 53-54 [DOI: 10.1002/2013EO050001]
- Ou J P, Liu X P, Li X and Shi X. 2016. Mapping global fossil fuel combustion CO<sub>2</sub> emissions at high resolution by integrating night-light, population density, and traffic network data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 9(4): 1674-1684 [DOI: 10.1109/JSTARS.2015.2476347]
- Ou J P, Liu X P, Liu P H and Liu X J. 2019. Evaluation of luojia 1-01 nighttime light imagery for impervious surface detection: a comparison with NPP-VIIRS nighttime light data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 81: 1-12 [DOI: 10.1016/j.jag.2019.04.017]
- Pack D W, Hardy B S and Longcore T. 2017. Studying the earth at night from CubeSats//Proceedings of the 31st Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites. Logan, Utah, United States: AIAA, USU
- Peng J, Lin H X, Chen Y Q, Blaschke T, Luo L W, Xu Z H, Hu Y N, Zhao M Y and Wu J S. 2020. Spatiotemporal evolution of urban agglomerations in China during 2000-2012: a nighttime light approach. *Landscape Ecology*, 35(2): 421-434 [DOI: 10.1007/s10980-019-00956-y]
- Qiang Y, Huang Q X and Xu J W. 2020. Observing community resilience from space: using nighttime lights to model economic disturbance and recovery pattern in natural disaster. *Sustainable Cities and Society*, 57: 102115 [DOI: 10.1016/j.scs.2020.102115]
- Rashed T and Jürgens C. 2010. *Remote Sensing of Urban and Suburban Areas*. Dordrecht: Springer [DOI: 10.1007/978-1-4020-485-7]
- Román M O and Stokes E C. 2015. Holidays in lights: tracking cultural patterns in demand for energy services. *Earth's Future*, 3(6): 182-205 [DOI: 10.1002/2014ef000285]
- Sen A, Kim Y J, Caruso D, Lagerloef G, Colomb R, Yueh S and Le Vine D. 2006. Aquarius/SAC-D mission overview//Proceedings of SPIE Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites X. Stockholm, Sweden: SPIE, 6361: 63610I [DOI: 10.1117/12.691981]
- Shao X, Cao C Y, Zhang B, Qiu S, Elvidge C and Von Hendy M. 2014. Radiometric calibration of DMSP-OLS sensor using VIIRS day/night band//Proceedings of SPIE Earth Observing Missions and Sensors: Development, Implementation, and Characterization III. Beijing, China: SPIE: 92640A [DOI: 10.1117/12.2068999]
- Sharma R C, Tateishi R, Hara K, Gharechelou S and Iizuka K. 2016.

- Global mapping of urban built-up areas of year 2014 by combining MODIS multispectral data with VIIRS nighttime light data. *International Journal of Digital Earth*, 9(10): 1004-1020 [DOI: 10.1080/17538947.2016.1168879]
- Shi K F, Chang Z J, Chen Z Q, Wu J P and Yu B L. 2020. Identifying and evaluating poverty using multisource remote sensing and point of interest (POI) data: a case study of Chongqing, China. *Journal of Cleaner Production*, 255: 120245 [DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120245]
- Shi K F, Chen Y, Yu B L, Xu T B, Chen Z Q, Liu R, Li L Y and Wu J P. 2016a. Modeling spatiotemporal CO<sub>2</sub> (carbon dioxide) emission dynamics in China from DMSP-OLS nighttime stable light data using panel data analysis. *Applied Energy*, 168: 523-533 [DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.11.055]
- Shi K F, Chen Y, Yu B L, Xu T B, Yang C S, Li L Y, Huang C, Chen Z Q, Liu R and Wu J P. 2016b. Detecting spatiotemporal dynamics of global electric power consumption using DMSP-OLS nighttime stable light data. *Applied Energy*, 184: 450-463 [DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.10.032]
- Shi K F, Huang C, Yu B L, Yin B, Huang Y X and Wu J P. 2014a. Evaluation of NPP-VIIRS night-time light composite data for extracting built-up urban areas. *Remote Sensing Letters*, 5(4): 358-366 [DOI: 10.1080/2150704X.2014.905728]
- Shi K F, Yu B L, Hu Y J, Huang C, Chen Y, Huang Y X, Chen Z Q and Wu J P. 2015. Modeling and mapping total freight traffic in China using NPP-VIIRS nighttime light composite data. *GIScience and Remote Sensing*, 52(3): 274-289 [DOI: 10.1080/15481603.2015.1022420]
- Shi K F, Yu B L, Huang C, Wu J P and Sun X F. 2018. Exploring spatiotemporal patterns of electric power consumption in countries along the belt and road. *Energy*, 150: 847-859 [DOI: 10.1016/j.energy.2018.03.020]
- Shi K F, Yu B L, Huang Y X, Hu Y J, Yin B, Chen Z Q, Chen L J and Wu J P. 2014b. Evaluating the ability of NPP-VIIRS nighttime light data to estimate the gross domestic product and the electric power consumption of China at multiple scales: a comparison with DMSP-OLS data. *Remote Sensing*, 6(2): 1705-1724 [DOI: 10.3390/rs6021705]
- Shu S, Yu B L, Wu J P and Liu H X. 2011. Methods for deriving urban built-up area using night-light data: assessment and application. *Remote Sensing Technology and Application*, 26(2): 169-176 (舒松, 余柏蒗, 吴健平, 刘红星. 2011. 基于夜间灯光数据的城市建成区提取方法评价与应用. 遥感技术与应用, 26(2): 169-176) [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2011.2.169]
- Small C. 2019. Multisensor characterization of urban morphology and network structure. *Remote Sensing*, 11(18): 2162 [DOI: 10.3390/rs11182162]
- Small C and Elvidge C D. 2013. Night on earth: mapping decadal changes of anthropogenic night light in Asia. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 22: 40-52 [DOI: 10.1016/j.jag.2012.02.009]
- Small C, Pozzi F and Elvidge C D. 2005. Spatial analysis of global urban extent from DMSP-OLS night lights. *Remote Sensing of Environment*, 96(3/4): 277-291 [DOI: 10.1016/j.rse.2005.02.002]
- Su Y X, Chen X Z, Ye Y Y, Wu Q T, Zhang H O, Huang N S and Kuang Y Q. 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 (苏泳娴, 陈修治, 叶玉瑶, 吴旗韬, 张虹鸥, 黄宁生, 匡耀求. 2013. 基于夜间灯光数据的中国能源消费碳排放特征及机理. 地理学报, 68(11): 1513-1526) [DOI: 10.11821/dlx20131007]
- Sutton P, Roberts D, Elvidge C and Melj H. 1997. A comparison of nighttime satellite imagery and population density for the continental United States. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 63(11): 1303-1313
- Sutton P C and Costanza R. 2002. Global estimates of market and non-market values derived from nighttime satellite imagery, land cover, and ecosystem service valuation. *Ecological Economics*, 41(3): 509-527 [DOI: 10.1016/S0921-8009(02)00097-6]
- Tan Z R, Wei D L and Yin Z X. 2020. Housing vacancy rate in major cities in China: perspectives from nighttime light data. *Complexity*, 2020: 1-12 [DOI: 10.1155/2020/5104578]
- Tripathy B R, Tiwari V, Pandey V, Elvidge C D, Rawat J S, Sharma M P, Prawasi R and Kumar P. 2017. Estimation of urban population dynamics using DMSP-OLS night-time lights time series sensors data. *IEEE Sensors Journal*, 17(4): 1013-1020 [DOI: 10.1109/JSEN.2016.2640181]
- UN-DESA (United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division). 2019. *World Urbanization Prospects: The 2018 Revision*. New York: United Nations
- Wang C X, Chen Z Q, Yang C S, Li Q X, Wu Q S, Wu J P, Zhang G and Yu B L. 2020a. Analyzing parcel-level relationships between luojia 1-01 nighttime light intensity and artificial surface features across Shanghai, China: a comparison with NPP-VIIRS data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 85: 101989 [DOI: 10.1016/j.jag.2019.101989]
- Wang J, Aegerter C, Xu X G and Szykman J J. 2016. Potential application of VIIRS day/night band for monitoring nighttime surface PM<sub>2.5</sub> air quality from space. *Atmospheric Environment*, 124: 55-63 [DOI: 10.1016/j.atmosenv.2015.11.013]
- Wang L W and Feng C C. 2016. Spatial expansion pattern and its driving dynamics of Beijing-Tianjin-Hebei metropolitan region: based on nighttime light data. *Acta Geographica Sinica*, 71(12): 2155-2169 (王利伟, 冯长春. 2016. 转型期京津冀城市群空间扩展格局及其动力机制——基于夜间灯光数据方法. 地理学报, 71(12): 2155-2169) [DOI: 10.11821/dlx201612007]
- Wang L Y, Fan H and Wang Y K. 2020b. Improving population mapping using luojia 1-01 nighttime light image and location-based social media data. *Science of the Total Environment*, 730: 139148 [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.139148]
- Wang W, Cheng H and Zhang L. 2012. Poverty assessment using DMSP/OLS night-time light satellite imagery at a provincial scale in China. *Advances in Space Research*, 49(8): 1253-1264 [DOI:

- 10.1016/j.asr.2012.01.025]
- Wang X J, Mu X H and Yan G J. 2020c. Quantitative analysis of aerosol influence on Suomi-NPP VIIRS nighttime light in China. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 13: 3557-3568 [DOI: 10.1109/jstars.2020.3003480]
- Wang Z, Román M O, Sun Q, Molthan A L, Schultz L A and Kalb V L. 2018. Monitoring disaster-related power outages using NASA black marble nighttime light product//Proceedings of the International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, ISPRS TC III Mid-term Symposium "Developments, Technologies and Applications in Remote Sensing. Beijing: [s. n.]: 1853-1856 [DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-3-1853-2018]
- Wei Y, Liu H X, Song W, Yu B L and Xiu C L. 2014. Normalization of time series DMSP-OLS nighttime light images for urban growth analysis with pseudo invariant features. *Landscape and Urban Planning*, 128: 1-13 [DOI: 10.1016/j.landurbplan.2014.04.015]
- Welch R. 1980. Monitoring urban population and energy utilization patterns from satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 9 (1): 1-9 [DOI: 10.1016/0034-4257(80)90043-7]
- Wigginton N S, Fahrenkamp-Uppenbrink J, Wible B and Malakoff D. 2016. Cities are the future. *Science*, 352(6288): 904-905 [DOI: 10.1126/science.352.6288.904]
- Witmer F D W and O'Loughlin J. 2011. Detecting the effects of wars in the caucasus regions of russia and georgia using radiometricaly normalized DMSP-OLS nighttime lights imagery. *GIScience and Remote Sensing*, 48(4): 478-500 [DOI: 10.2747/1548-1603.48.4.478]
- Wu B, Yu B L, Yao S J, Wu Q S, Chen Z Q and Wu J P. 2019. A surface network based method for studying urban hierarchies by night time light remote sensing data. *International Journal of Geographical Information Science*, 33(7): 1377-1398 [DOI: 10.1080/13658816.2019.1585540]
- Wu J D, Li Y, Li N and Shi P J. 2018. Development of an asset value map for disaster risk assessment in China by spatial disaggregation using ancillary remote sensing data. *Risk Analysis*, 38(1): 17-30 [DOI: 10.1111/risa.12806]
- Wu J S, Liu H, Peng J and Ma L. 2014. Hierarchical structure and spatial pattern of China's urban system: evidence from DMSP/OLS nightlight data. *Acta Geographica Sinica*, 69(6): 759-770 (吴健生, 刘浩, 彭建, 马琳. 2014. 中国城市体系等级结构及其空间格局——基于DMSP/OLS夜间灯光数据的实证. 地理学报, 69 (6): 759-770) [DOI: 10.11821/dlx201406004]
- Wu J S, Xu D, Xie W D and Peng J. 2015. Spatialization of demographic data at medium scale based on remote sensing images: regarding Beijing-Tianjin-Hebei as an example. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 51(4): 707-717 (吴健生, 许多, 谢舞丹, 彭建. 2015. 基于遥感影像的中尺度人口统计数据空间化——以京津冀地区为例. 北京大学学报(自然科学版), 51(4): 707-717) [DOI: 10.13209/j.0479-8023.2015.100]
- Xie Y H and Weng Q H. 2016. Updating urban extents with nighttime light imagery by using an object-based thresholding method. *Remote Sensing of Environment*, 187: 1-13 [DOI: 10.1016/j.rse.2016.10.002]
- Yang X C, Yue W Z and Gao D W. 2013. Spatial improvement of human population distribution based on multi-sensor remote-sensing data: an input for exposure assessment. *International Journal of Remote Sensing*, 34(15): 5569-5583 [DOI: 10.1080/01431161.2013.792970]
- Yao Y L and Li Y. 2011. House vacancy at urban areas in China with nocturnal light data of DMSP-OLS//Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Spatial Data Mining and Geographical Knowledge Services. Fuzhou, China: IEEE: 457-462 [DOI: 10.1109/ICSDM.2011.5969087]
- Yin Z M, Li X, Tong F, Li Z B and Jendryke M. 2019. Mapping urban expansion using night-time light images from luojia1-01 and international space station. *International Journal of Remote Sensing*, 41(7): 2603-2623 [DOI: 10.1080/01431161.2019.1693661]
- Yu B L, Deng S Q, Liu G, Yang C S, Chen Z Q, Hill C J and Wu J P. 2018c. Nighttime light images reveal spatial-temporal dynamics of global anthropogenic resources accumulation above ground. *Environmental Science and Technology*, 52(20): 11520-11527 [DOI: 10.1021/acs.est.8b02838]
- Yu B L, Lian T, Huang Y X, Yao S J, Ye X Y, Chen Z Q, Yang C S and Wu J P. 2018b. Integration of nighttime light remote sensing images and taxi GPS tracking data for population surface enhancement. *International Journal of Geographical Information Science*, 33(4): 687-706 [DOI: 10.1080/13658816.2018.1555642]
- Yu B L, Shi K F, Hu Y J, Huang C, Chen Z Q and Wu J P. 2015. Poverty evaluation using NPP-VIIRS nighttime light composite data at the county level in China. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 8(3): 1217-1229 [DOI: 10.1109/JSTARS.2015.2399416]
- Yu B L, Shu S, Liu H X, Song W, Wu J P, Wang L and Chen Z Q. 2014. Object-based spatial cluster analysis of urban landscape pattern using nighttime light satellite images: a case study of China. *International Journal of Geographical Information Science*, 28 (11): 2328-2355 [DOI: 10.1080/13658816.2014.922186]
- Yu B L, Tang M, Wu Q S, Yang C S, Deng S Q, Shi K F, Peng C, Wu J P and Chen Z Q. 2018a. Urban built-up area extraction from log-transformed NPP-VIIRS nighttime light composite data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 15(8): 1279-1283 [DOI: 10.1109/lgrs.2018.2830797]
- Yue W Z, Qiu S S, Xu H, Xu L H and Zhang L L. 2019. Polycentric urban development and urban thermal environment: a case of Hangzhou, China. *Landscape and Urban Planning*, 189: 58-70 [DOI: 10.1016/j.landurbplan.2019.04.008]
- Zeng C Q, Zhou Y, Wang S X, Yan F L and Zhao Q. 2011. Population spatialization in China based on night-time imagery and land use data. *International Journal of Remote Sensing*, 32(24): 9599-9620 [DOI: 10.1080/01431161.2011.569581]
- 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 (张宝军. 2018. 2003-2013年汶川地震极重灾区夜间灯光年际变化分析. *灾害学*. 33(1): 12-18, 22) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-811X. 2018.01.003]
- Zhang G, Li L T, Jiang Y H, Shen X and Li D R. 2018. On-orbit relative radiometric calibration of the night-time sensor of the luoJia-01 satellite. *Sensors*, 18(12): 4225 [DOI: 10.3390/s18124225]
- Zhang G, Shi Y R and Xu M Z. 2020. Evaluation of LJ1-01 nighttime light imagery for estimating monthly PM<sub>2.5</sub> concentration: a comparison with NPP-VIIRS nighttime light data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 13: 3618-3632 [DOI: 10.1109/JSTARS.2020.3002671]
- Zhang Q W and Su S L. 2016. Determinants of urban expansion and their relative importance: a comparative analysis of 30 major metropolitans in China. *Habitat International*, 58: 89-107 [DOI: 10.1016/j.habitatint.2016.10.003]
- Zhang Y X, Li X, Song Y and Li C H. 2020. Urban spatial form analysis of GBA based on "LJ1-01" nighttime light remote sensing images. *Journal of Applied Sciences*, 38(3): 466-477 (张雨欣, 李熙, 宋杨, 李长辉. 2020. 基于“珞珈一号”夜光遥感影像的粤港澳大湾区城市空间形态分析. *应用科学学报*, 38(3): 466-477) [DOI: 10.3969/j.issn.0255-8297.2020.03.012]
- Zhao J C, Zhong Z Q, Lu H L, Wu L Y and Chen Y L. 2017. Urban residential CO<sub>2</sub> emissions and its determinants: a case study of central plains economic region. *Journal of Natural Resources*, 32(12): 2100-2114 (赵金彩, 钟章奇, 卢鹤立, 吴乐英, 陈玉龙. 2017. 基于夜间灯光的城市居民直接碳排放及影响因素——以中原经济区为例. *自然资源学报*, 32(12): 2100-2114) [DOI: 10.11849/zrzyxb.20161068]
- Zhao M, Zhou Y Y, Li X C, Cao W T, He C Y, Yu B L, Li X, Elvidge C D, Cheng W M and Zhou C H. 2019a. Applications of satellite remote sensing of nighttime light observations: advances, challenges, and perspectives. *Remote Sensing*, 11(17): 1971 [DOI: 10.3390/rs11171971]
- Zhao M, Zhou Y Y, Li X C, Cheng W M, Zhou C H, Ma T, Li M C and Huang K. 2020b. Mapping urban dynamics (1992-2018) in southeast Asia using consistent nighttime light data from DMSP and VIIRS. *Remote Sensing of Environment*, 248: 111980 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.111980]
- Zhao M, Zhou Y Y, Li X C, Zhou C H, Cheng W M, Li M C and Huang K. 2020a. Building a series of consistent night-time light data (1992-2018) in southeast Asia by integrating DMSP-OLS and NPP-VIIRS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 58(3): 1843-1856 [DOI: 10.1109/TGRS.2019.2949797]
- Zhao N Z, Hsu F C, Cao G F and Samson E L. 2017. Improving accuracy of economic estimations with VIIRS DNB image products. *International Journal of Remote Sensing*, 38(21): 5899-5918 [DOI: 10.1080/01431161.2017.1331060]
- Zhao X Z, Yu B L, Liu Y, Chen Z Q, Li Q X, Wang C X and Wu J P. 2019b. Estimation of poverty using random forest regression with multi-source data: a case study in Bangladesh. *Remote Sensing*, 11(4): 375 [DOI: 10.3390/rs11040375]
- Zhao X Z, Yu B L, Liu Y, Yao S J, Lian T, Chen L J, Yang C S, Chen Z Q and Wu J P. 2018. NPP-VIIRS DNB daily data in natural disaster assessment: evidence from selected case studies. *Remote Sensing*, 10(10): 1526 [DOI: 10.3390/rs10101526]
- Zhao Z Z, Cheng G, Wang C, Wang S T and Wang H T. 2020c. City grade classification based on connectivity analysis by luoJia I nighttime light images in Henan Province, China. *Remote Sensing*, 12(11): 1705 [DOI: 10.3390/rs12111705]
- Zheng Q M, Weng Q H, Huang L Y, Wang K, Deng J S, Jiang R W, Ye Z R and Gan M Y. 2018. A new source of multi-spectral high spatial resolution night-time light imagery—JL1-3B. *Remote Sensing of Environment*, 215: 300-312 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.06.016]
- Zheng Q M, Weng Q H and Wang K. 2019a. Developing a new cross-sensor calibration model for DMSP-OLS and Suomi-NPP VIIRS night-light imageries. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 153: 36-47 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2019.04.019]
- Zheng Y M, Shao G F, Tang L N, He Y R, Wang X R, Wang Y N and Wang H W. 2019b. Rapid assessment of a typhoon disaster based on NPP-VIIRS DNB daily data: the case of an urban agglomeration along Western Taiwan Straits, China. *Remote Sensing*, 11(14): 1709 [DOI: 10.3390/rs11141709]
- Zheng Z H, Chen Y B, Wu Z F and Zhang Q F. 2018. Method to reduce saturation of DMSP/OLS nighttime light data based on UNL. *Journal of Remote Sensing*, 22(1): 161-173 (郑子豪, 陈颖彪, 吴志峰, 张棋斐. 2018. 单元路网长度的DMSP/OLS夜间灯光数据去饱和方法. *遥感学报*, 22(1): 161-173) [DOI: 10.11834/jrs.20186478]
- Zhong L and Liu X S. 2019. Application potential analysis of LJ1-01 new nighttime light data. *Bulletin of Surveying and Mapping*, (7): 132-137 (钟亮, 刘小生. 2019. 珞珈一号新型夜间灯光数据应用潜力分析. *测绘通报*, (7): 132-137) [DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246.2019.0235]
- Zhou C S and Ye C D. 2013. Progress on studies of urban spatial structure in China. *Progress in Geography*, 32(7): 1030-1038 (周春山, 叶昌东. 2013. 中国城市空间结构研究评述. *地理科学进展*, 32(7): 1030-1038) [DOI: 10.11820/dlkxjz.2013.07.006]
- Zhou L, Zhao Q and Yang F. 2019. Identification of urban agglomeration boundary based on POI and NPP/VIIRS night light data. *Progress in Geography*, 38(6): 840-850 (周亮, 赵琪, 杨帆. 2019. 基于POI与NPP/VIIRS灯光数据的城市群边界定量识别. *地理科学进展*, 38(6): 840-850) [DOI: 10.18306/dlkxjz.2019.06.005]
- Zhou Y Y, Smith S J, Elvidge C D, Zhao K G, Thomson A and Imhoff M. 2014. A cluster-based method to map urban area from DMSP/OLS nightlights. *Remote Sensing of Environment*, 147: 173-185 [DOI: 10.1016/j.rse.2014.03.004]
- Zhou Y Y, Smith S J, Zhao K G, Imhoff M, Thomson A, Bond-Lamberty B, Asrar G R, Zhang X S, He C Y and Elvidge C D. 2015. A global map of urban extent from nightlights. *Environmental Research Letters*, 10(5): 054011 [DOI: 10.1088/1748-9326/10/5/054011]
- Zhu X B, Ma M G, Yang H and Ge W. 2017. Modeling the spatiotem-

- poral dynamics of gross domestic product in China using extended temporal coverage nighttime light data. *Remote Sensing*, 9(6): 626 [DOI: 10.3390/rs9060626]
- Zhuo L, Chen J, Shi P J, Gu Z H, Fan Y D and Ichinose T. 2005. Modeling population density of China in 1998 based on DMSP/OLS nighttime light image. *Acta Geographica Sinica*, 60(2): 266-276 (卓莉, 陈晋, 史培军, 姜智慧, 范一大, 一之濑俊明. 2005. 基于夜间灯光数据的中国人口密度模拟. 地理学报, 60(2): 266-276) [DOI: 10.11821/xb200502010]
- Zhuo L, Ichinose T, Zheng J, Chen J, Shi P J and Li X. 2009. Modeling the population density of China at the pixel level based on DMSP/OLS non-radiance-calibrated night-time light images. *International Journal of Remote Sensing*, 30(4): 1003-1018 [DOI: 10.1080/01431160802430693]
- Zou Y H, Peng H Q, Liu G, Yang K D, Xie Y H and Weng Q H. 2017. Monitoring urban clusters expansion in the middle reaches of the Yangtze River, China, using time-series nighttime light images. *Remote Sensing*, 9(10): 1007 [DOI: 10.3390/rs9101007]

## Nighttime light remote sensing and urban studies: Data, methods, applications, and prospects

**YU Bailang<sup>1,2</sup>, WANG Congxiao<sup>1,2</sup>, GONG Wenkang<sup>1,2</sup>, CHEN Zuoqi<sup>3,4</sup>, SHI Kaifang<sup>5</sup>, WU Bin<sup>1,2</sup>,  
HONG Yuchen<sup>1,2</sup>, LI Qiaoxuan<sup>1,2</sup>, WU Jianping<sup>1,2</sup>**

1. Key Laboratory of Geographic Information Science (Ministry of Education), East China Normal University,

Shanghai 200241, China;

2. School of Geographic Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China;

3. Academy of Digital China (Fujian), Fuzhou University, Fuzhou 350116, China;

4. Key Laboratory of Spatial Data Mining and Information Sharing of Ministry of Education, Fuzhou University,  
Fuzhou 350116, China;

5. School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China

**Abstract:** Nighttime light remote sensing is a unique optical remote sensing technology that can record ground object radiation information at night that cannot be obtained by daytime remote sensing. Given that artificial light in urban areas is the main source of stable nighttime light, nighttime light remote sensing images have been proven to reflect the variation in human activities at night. At the same time, they have extensive coverage, are time intensive and readily available, and have widely been a proxy for urban studies on the multi-scale or long-term analysis. The application related to the nighttime light data is growing at present. However, most reviews have focused on the preprocessing and potential application of nighttime light data, and the summary of nighttime light data in urban studies is still limited. In this study, we reviewed nighttime light-related research in three aspects: multi-scale analysis of the urban spatial structure, multi-scale estimation of urban socio-economic indicators, and research in urban public security. Three challenges, namely, the application of nighttime light data with a short time interval, the generation of longer nighttime light time series, and the quantitative validation, are also discussed to explore the potential applications in the future.

**Key words:** nighttime light, remote sensing, urban study, multi-scale, review

**Supported by** National Natural Science Foundation of China (No. 41871331, 41801343, 42001357)