

中巴经济走廊 DMSP/OLS 与 NPP/VIIRS 夜光数据 辐射一致性校正

梁丽^{1,2}, 边金虎², 李爱农², 冯文兰¹, 雷光斌², 张正健², 左家旗³

1. 成都信息工程大学 资源环境学院, 成都 610225;

2. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041;

3. 西南石油大学 土木工程与建筑学院, 成都 610500

摘要: 由美国国防气象卫星搭载的可见光成像线性扫描业务系统 (DMSP/OLS) 和国家极轨卫星搭载的可见光近红外成像辐射仪 (NPP/VIIRS) 获取的夜间灯光影像是监测人类社会经济活动和自然现象 (如林火、油气燃烧等) 的主要数据源。然而, 现有的夜间灯光数据存在缺乏星上的辐射定标、像元饱和、时间尺度不连续、多源夜间灯光影像辐射不一致等问题。基于此, 本文以中巴经济走廊区域为研究区, 提出了一种基于线性拟合提取不变目标区域的方法, 实现了 DMSP/OLS 影像间、DMSP/OLS 与 NPP/VIIRS 两种数据间的相互校正。然后对中巴经济走廊的校正结果在不同空间尺度上选用区域灰度总量、标准化差异指数以及标准化差异指数和作为评价指标进行检验。结果表明: 两种校正模型的拟合优度均在 0.78 以上, 校正后的 DMSP/OLS 影像灰度总量与 GDP 和人口数据的相关性显著提高 (GDP: $R^2=0.7689$; 人口: $R^2=0.9033$), 且标准化差异指数明显降低; NPP/VIIRS 影像经过与 DMSP/OLS 互校正后在辐射亮度、时空分布上与 DMSP/OLS 更加一致, 空间细节信息更加突出, 从而增强了多源夜间灯光影像的一致性, 更加适用于长时间序列社会经济要素发展趋势的分析。

关键词: 遥感, DMSP/OLS, NPP/VIIRS, 夜间灯光, 不变目标, 相互校正, 中巴经济走廊

引用格式: 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

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(Chinese), 24(2): 149-160[DOI:10.11834/jrs.20208241]

1 引言

在遥感空间信息获取中, 夜间灯光遥感是遥感领域发展活跃的一个分支 (李德仁和李熙, 2015)。夜间灯光遥感是利用对地观测传感器获取地球夜间在无云条件下地表发射的可见光—近红外电磁波信息 (江威等, 2017)。相比于普通光学遥感影像, 夜间灯光遥感影像更能反映人类活动及社会发展规律, 被广泛应用于社会经济参数估算 (Amaral 等, 2005, 2006; Anderson 等, 2010; 曹丽琴等, 2009)、城市化进程的动态监测 (陈晋等,

2003; Elvidge 等, 1997; Huang 等, 2016; Li 等, 2016)、渔业监测 (Waluda 等, 2004)、能源应用与环境评估 (Cao 等, 2014; 李润亚, 2015; 苏泳娴等, 2013; 赵笑然等, 2017) 等方面, 成为监测人类社会经济活动和自然现象的主要数据源。

20 世纪 90 年代, 美国国防气象卫星 DMSP (Defense Meteorological Satellite Program's) 搭载的可见光成像线性扫描业务系统 OLS (Operational Linescan System) (以下简称 DMSP/OLS) 成为全球首颗能够获取夜间灯光数据的卫星。2013 年, 随着 DMSP/OLS 的衰减和失效, 美国国家极轨卫星

收稿日期: 2018-06-07; 预印本: 2018-07-22

基金项目: 国家重点研发计划 (编号: 2016YFC0600201-06); 中国科学院战略性先导专项 (编号: XDA19030303); 国家自然科学基金 (编号: 41701432, 41631180); 中国科学院成都山地所“一三五”重要方向性项目 (编号: SDS-135-1708); 中国科学院“西部之光”青年学者项目、中科院成都山地所特色所青年培养计划联合资助 (编号: SDS-QN-1902)

第一作者简介: 梁丽, 1992 年生, 女, 硕士研究生, 研究方向为资源环境遥感。E-mail: hsrliangli@gmail.com

通信作者简介: 边金虎, 1984 年生, 男, 助理研究员, 研究方向为山地遥感。E-mail: bianjinhu@imde.ac.cn

Suomi-NPP (Suomi national Polar Orbiting Partnership) 搭载的可见光近红外成像辐射仪 VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) (以下简称 NPP/VIIRS) 夜间灯光波段 DNB (Day/Night Band) 成为 DMSP/OLS 的继任者。与 DMSP/OLS 相比, NPP/VIIRS 的星下空间分辨率更高, 对夜间灯光的探测能力更强。夜间灯光遥感数据在时间序列上的一致性是使用夜间灯光遥感监测国家和地区经济发展的重要前提。自夜间灯光遥感提出以来, 很多学者致力于夜间灯光数据的辐射定标研究以提高夜间灯光遥感数据在时间序列上的一致性 (Elvidge 等, 2009; Li 等, 2012; Shao 等, 2014)。20 世纪末, Elvidge 等 (1999) 提出了通过设置 OLS 传感器上的光学倍增管的增益校正方法以增强城市中心的光亮像元变化细节信息, 该方法不仅可以对原始影像进行辐射定标, 同时减少了偶然噪声。郑子豪等 (2018) 根据单元路网长度 (UNL) 提出了基于 UNLI 指数的 DMSP/OLS 影像去饱和方法, 充分发挥 EVI、UNL 各自的优势, 具有最优的拟合效果 ($R^2=0.873$)。20 世纪 90 年代, Hall 等 (1991) 和 Lenney 等 (1996) 提出了多时相的遥感影像间存在不变目标区域 (即影像间存在特定的转换关系), 通过这种转换关系可以实现多源遥感影像间的尺度转换。基于不变目标区域理论, Wu 等 (2013) 提出了不变目标区域模型对夜间灯光影像进行校正, 并结合 GDP 统计数据对校正结果进行验证, 结果表明校正后的影像有效地增强了夜间灯光数据与 GDP 的相关性。Zhang 等 (2016) 通过生成待校正影像与参考影像间的密度图, 选择分布密集部分的点作为校正点建立校正模型, 该模型很好的增强了年份间数据的一致性。Li 等 (2012) 提出了一种基于多时相夜间灯光数据提取不变像元的自动化算法, 并在此基础上建立中国北京地区 1992 年—2012 年 DMSP/OLS 影像长时序列的相互校正模型, 研究表明采用该方法校正后的影像与国内生产总值 GDP ($R^2=0.8734$) 及城市人口数据 ($R^2=0.9269$) 的相关性大大提高。在对 DMSP/OLS 以及 NPP/VIIRS 两种数据源进行相互校正方面, Li 等 (2017) 采用幂指数模型建立 DMSP/OLS 与 NPP/VIIRS 两种数据源之间的相互校正模型, 进而对 2011 年—2017 年叙利亚地区在内战期间的主要人口居住区的城市灯光进行动态评估。然而, 一方面, 以上校正方法都是选择整个

城市或地区作为不变目标区域, 而这些地区可能包含了存在随机误差的点, 从而影响相互校正的精度。另一方面, 以往时间序列一致性校正研究主要集中在单一传感器, DMSP/OLS 与 VIIRS 传感器间的辐射一致性互校正研究较少, 一定程度上制约了长时间序列多源夜间灯光数据的综合应用分析。

针对以上问题, 本文选择中巴经济走廊为研究区, 进行了 1992 年—2017 年的夜间灯光数据辐射一致性校正研究。本文首先优化了获取不变目标区域的方法, 通过对研究区范围内 1992 年—2013 年 DMSP/OLS 影像进行线性拟合, 选择拟合斜率较小值作为不变目标区域。在此基础上, 分别建立 DMSP/OLS 影像间、DMSP/OLS 与 NPP/VIIRS 两种数据源的相互校正模型, 最终得到 1992 年—2017 年连续一致的夜间灯光影像数据集。

2 研究区概况

本文选择一带一路旗舰项目中巴经济走廊作为研究区。该区全长 3000 km, 起点在中国新疆喀什, 终点在巴基斯坦瓜达尔港, 空间范围包括中国新疆喀什地区和巴基斯坦全境。中巴经济走廊是贯通南北丝路的关键枢纽, 是一条包括公路、铁路、油气和光缆通道在内的贸易走廊, 也是“一带一路”的重要组成部分。研究区范围如图 1 所示。

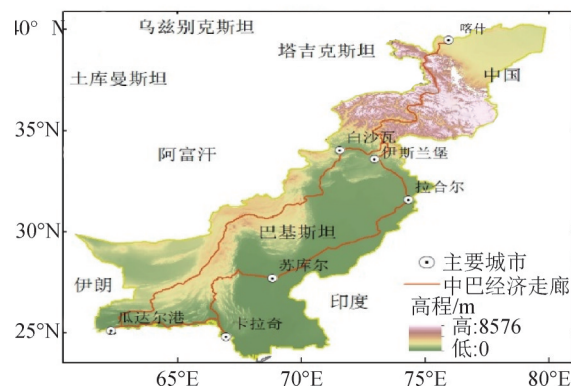


图 1 研究区范围

Fig.1 Research area

研究区地形地貌复杂, 东部为印度河平原, 北部为塔里木盆地, 西部和西南部为俾路支高原。由于受地形气候影响, 研究区降水稀少且时空分布不均, 气候干燥。研究涉及的行政范围及其人

口规模、气候特征如表1所示。研究区大部分地区属于热带干旱或者半干旱气候类型, 干旱是研究区气候的重要特征, 常表现出“春旱夏洪”的状

态(丁思洋等, 2017), 局部地区还存在霜冻、雪灾、飓风等自然灾害。

表1 中巴经济走廊各地区气候人文特征

Table 1 The characteristics of climate and humanities in the China-Pakistan Economic Corridor

地区名称	面积/km ²	人口总数/人	年均温/°C	年降水量/mm
开伯尔—普赫图赫瓦省	74415.40443	30523371	13.95	1789.98
联邦直辖部落区	26851.73439	5001676	19.36	1912.8
旁遮普省	205342.558	110012442	24.95	1513.57
信德省	141101.9809	47886051	27.09	598.58
俾路支省	346637.791	12344408	22.94	745.28
联邦首都区	897.82825	2006572	21.51	2399.65
喀什地区	137230.6501	4488200	5.01	349.82

3 研究方法

3.1 数据源

20世纪末美国国家地球物理数据中心 NGDC (National Geophysical Data Center) 发布了DMSP/OLS夜间灯光数据, 主要包括6个不同的卫星传感器(F10-F18)的1992年—2013年共21年34期年合成影像(表2)。影像的空间分辨率为30 arcsec, 在赤道附近约为1 km, 40° N处约为0.8 km, 空间覆盖范围为-180° E—180° E, -65° N—75° N, 基本包括了全球存在人类活动的所有区域。影像的像元DN值范围为0—63, 代表平均灯光强度(曹子阳等, 2015), 像元DN值为0的区域是无灯光区域, 影像中的像元DN值越大表示该区域的灯光强度越大。

Suomi-NPP是一颗极轨对地观测卫星, 它是由美国国家航空航天局 NASA (National Aeronautics and Space Administration) 和美国国家海洋和大气管理局 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) 等机构共同合作建造并于2011年底发射, 其VIIRS传感器的夜间灯光波段可以搜集晚间地球表面的低光图像数据, 空间分辨率高达742 m, 光辐射亮度的检测下限从 5×10^{-10} W/(cm²×sr)提升到 2×10^{-11} W/(cm²×sr)。VIIRS传感器能够在更微弱的光线下提供精细的灯光数据, 同时新增飞行校正功能, 可直接在飞行平台上进行数据校正, 并使每像素可有效接收各种光源, 放大低频信号, 防止灯光明亮部分过饱和(Elvidge等, 2013; 郭永德等, 2016)。

为了研究中巴经济走廊1992年—2017年长时间序列的夜间灯光亮度值变化趋势, 单一数据源不能满足我们的需求, 因此本文使用的夜间灯光数据是1992年—2013年DMSP/OLS (Version4)和2012年—2017年NPP/VIIRS DNB (Day/Night Band)月合成产品数据集。在对DMSP/OLS数据集进行相互校正的基础上, 完成两种不同数据源的夜间灯光影像集的相互校正, 一方面使得夜间灯光数据集完整统一; 另一方面可以得到更长时间序列的夜间灯光影像以便分析中巴经济走廊夜间灯光在1992年—2017年长时间的变化趋势。

为了定性分析不变目标区域选择的正确性和可行性, 本文选择研究区1992年—2013年人口统计数据 and GDP国内生产总值数据两种辅助数据, 其中巴基斯坦全境数据源自世界银行 (<https://data.worldbank.org/cn/country> [2018-06-07]), 中国喀什地区统计数据来源于国家统计局统计年鉴 (<http://www.stats.gov.cn/> [2018-06-07])。

3.2 数据预处理

由于DMSP/OLS影像空间分辨率为30 arcsec, 每个栅格单元的大小随着纬度增加而减小, 为了减弱这种影响, 首先将每期的影像投影为兰伯特等面积投影, 并将其空间分辨率参照已有方法重采样为1 km×1 km(曹子阳等, 2015)。由于NPP/VIIRS数据为月合成数据, 因此对其进行平均值合成得到年度影像, 并采用与DMSP/OLS同样的方法进行重采样处理得到空间分辨率一致的夜间灯光数据集。

表 2 不同卫星的DMSP/OLS夜间灯光数据集的时间分布及其编号

Table 2 Time distribution and numbering of DMSP/OLS nighttime light datasets for different satellites

传感器/年	F10	F12	F14	F15	F16	F18
1992	F101992	—	—	—	—	—
1993	F101993	—	—	—	—	—
1994	F101994	F121994	—	—	—	—
1995	—	F121995	—	—	—	—
1996	—	F121996	—	—	—	—
1997	—	F121997	F141997	—	—	—
1998	—	F121998	F141998	—	—	—
1999	—	F121999	F141999	—	—	—
2000	—	—	F142000	F152000	—	—
2001	—	—	F142001	F152001	—	—
2002	—	—	F142002	F152002	—	—
2003	—	—	F142003	F152003	—	—
2004	—	—	—	F152004	F162004	—
2005	—	—	—	F152005	F162005	—
2006	—	—	—	F152006	F162006	—
2007	—	—	—	F152007	F162007	—
2008	—	—	—	—	F162008	—
2009	—	—	—	—	F162009	—
2010	—	—	—	—	—	F182010
2011	—	—	—	—	—	F182011
2012	—	—	—	—	—	F182012
2013	—	—	—	—	—	F182013

3.3 DMSP/OLS数据辐射定标方法

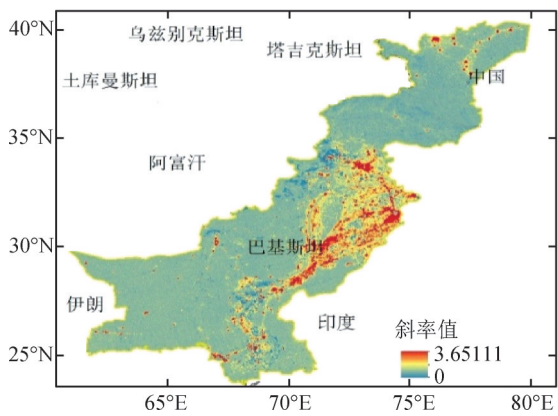
由于DMSP/OLS数据未经过星上的辐射定标,在城市中心区域存在像元饱和现象,且现有的DMSP/OLS夜间影像数据集由6个不同卫星获取,不同卫星传感器衰减程度不同可能使影像间由于系统误差形成较大的波动范围,因此下载的DMSP/OLS数据不能直接用于研究分析,需要对每期影像进行校正。辐射定标能够有效降低像元饱和,同时能减弱系统误差引起的数据波动,但由于辐射定标缺乏星上定标系统,算法较为复杂,加上辐射定标所需参数不易获取,因而绝对辐射定标实现起来非常困难。而不变目标区域法能够很好的进行长时间序列的影像间相互校正,增强影像的一致性,因此,本文基于不变目标区域法,提出了一种采用线性拟合提取不变目标区域的方法。该方法主要包括以下步骤:(1)在1992年—2013年的DMSP/OLS影像中选择夜间灯光相对不变区域作为不变目标区;(2)选择校正的基准年份影像;

(3)建立基准年份影像与每期待校正影像在不变目标区域的回归关系,运用得到的回归方程对待校正影像进行计算,进而实现对长时间序列的夜间灯光影像数据集进行影像间相互校正。

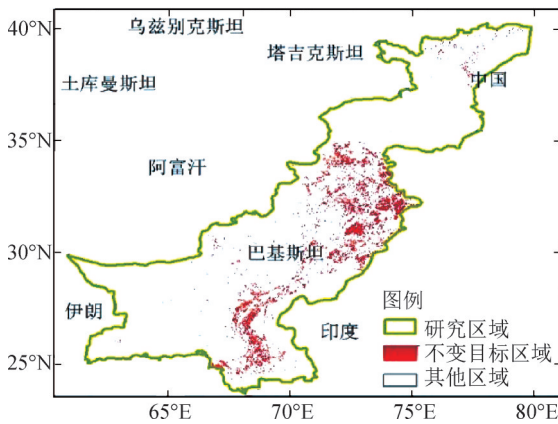
3.3.1 DMSP/OLS影像间辐射相互校正

提取不变目标区域是利用不变目标区域法对长时间序列的DMSP/OLS影像数据集进行相互校正的关键之一。中巴经济走廊研究区域内有三分之二区域属于灯光低值区域。已有研究指出,影像DN<6的区域大部分为随机噪声或者无灯光区域(卓莉等,2005),随机噪声主要表现为短暂光源等不稳定的辐射亮度值。因此,本文首先选择1992年—2013年每期影像DN>0的区域,然后对34期影像中均有辐射亮度值的像元(即稳定像元)进行统计,将稳定像元中最小DN值作为阈值,从而去除随机噪声的影响。经统计最终计算的阈值为6,与已有研究相吻合。因此,首先提取影像

DN值大于6的区域。在此基础上,对1992年—2013年DMSP/OLS数据集进行逐像元的线性拟合(图2(a)),计算各像元线性拟合斜率,并以0.005为步长做直方图统计。由于研究区拟合斜率主要集中于0.5以下,斜率大于0.5的像元较少,因此本文绘制的是拟合斜率在[0,0.5]范围的统计直方图(图3),从统计特征中得出,在0.025前有个显著峰值,而0.025后直方图频数开始下降。理论上,研究区中不变像元占全部像元的比例较小且变化率较低,因此不变像元斜率值应集中在低值附近并形成峰值。因此,本研究选择斜率绝对值低于0.025的像元区域作为不变目标区域(图2(b)),从而实现了不变目标区域的提取。



(a) 线性拟合斜率
(a) Linear fitting slope



(b) 不变目标区域
(b) Constant target area

图2 研究区线性拟合斜率及不变目标区域

Fig. 2 Linear fitting slope and invariant region in the study area

选择用于相互校正的参考影像是影像校正的另一关键。参考影像的选择依据主要有以下3点:(1)该期影像存在饱和像元,以期减弱城市中心像

元饱和造成的影响;(2)影像DN值分布于0—63之间,确保校正像素具有完整的值域范围;(3)参考影像与其他待校正影像间差异较小,从而在确定不变目标区域的基础上最大可能地减弱数据的异常波动,增强数据的连续性(Pandey等,2017)。参考以上因素,本文选择F121999作为校正参考影像,分别用一元一次式、一元二次式和对数函数对每期待校正影像与参考影像进行线性拟合,其拟合相关系数 R^2 如图4所示。从拟合结果来看,一元二次方程对每期影像拟合系数最高,一元一次式次之,指数函数最低。本文选择拟合系数最高的一元二次线性回归方法,利用参考影像对待校正影像进行拟合(式(1)),实现DMSP/OLS数据集的影像间相互校正。

$$Y_n = a \times X_n^2 + bX_n + c \quad (1)$$

式中, Y_n 为校正后影像DN值, X_n 为校正前影像DN值, a 、 b 、 c 为参考影像与待校正影像建立的一元二次线性回归关系的参数。从各期待校正影像与参考影像的拟合优度 R^2 (图4)可以看出,各期待校正影像与参考影像拟合的相关系数均在0.9附近波动,说明该拟合方程能够较好的反映待校正影像与参考影像的数值对应关系。

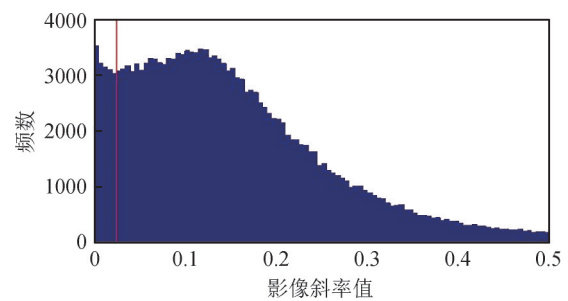
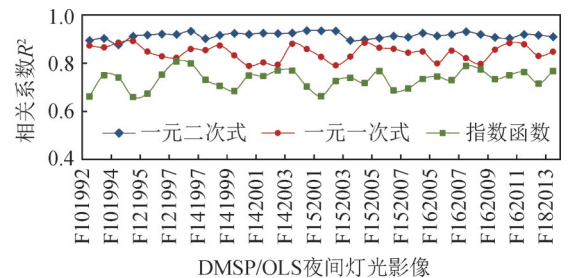


图3 研究区线性拟合斜率直方图分布

Fig. 3 The histogram distribution of the linear fitting slope in the study area



DMSP/OLS夜间灯光影像

图4 待校正影像与参考影像各拟合函数相关系数

Fig. 4 Calibration coefficient of each fitting function between the image to be corrected and the reference image

3.3.2 DMSP/OLS 影像校正结果检验方法

采用定性分析和定量检验结合的方法验证校正方法的可行性和正确性。除目视对比外，本文定性分析还结合了人口统计数据 and GDP 国内生产总值数据两种辅助数据，对比分析校正前后灰度总量与两种数据的相关性。定量检验包括 3 个指标：灰度总量 (TSOL)、标准化差异指数 (NDI)、标准化差异指数和 (SNDI)。灰度总量即区域内夜间灯光辐射亮度总和 (式 (2))，是衡量地区经济发展总体趋势的重要指标；标准化差异指数是评估两期影像在相邻年份的 DN 值差异的指标 (式 (3))，其绝对值越大，说明灯光亮度年际差异越大，数据异常波动的可能性越大；标准化差异指数和是标准化差异指数在所有时间尺度上的总和 (式 (4))，反映了不同年份的灯光辐射亮度差异值在一定时间范围内总的变化趋势。

$$TSOL = \sum_{i=1}^n DN_i \quad (2)$$

$$NDI = \begin{cases} \frac{|TSOL_{t_1} - TSOL_{t_2}|}{(TSOL_{t_1} + TSOL_{t_2})}, & TSOL_{t_1} + TSOL_{t_2} > 0 \\ 0, & TSOL_{t_1} + TSOL_{t_2} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

表 3 2013 年 DMSP/OLS 与 NPP/VIIRS 各拟合结果及对应参数值

Table 3 Fitting results and corresponding parameter values of DMSP/OLS and NPP/VIIRS in 2013

拟合函数	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>R</i> ²	RMSE
$y = a \times x^2 + b \times x + c$	-0.0867	4.1210	26.7000	—	0.6226	11.2700
$y = a \times \lg(b \times x)$	33.3200	6.6510	—	—	0.7618	8.9500
$y = a \times e^{b \times x} + c \times e^{d \times x}$	61.5700	0.0014	-57.6600	-0.4607	0.7937	8.3300
$y = a \times x^b + c$	-64.0700	-0.3226	91.1200	—	0.7854	8.9800

一元二次方程拟合系数最低 (表 3)，说明该方程不适用于 DMSP/OLS 与 VIIRS 两种数据源的转换关系，因此不考虑将其作为拟合方程。然而幂指数和对数回归的相关系数差异不大，因此本文选择城市发达的拉合尔地区进行校正前后对比分析，并绘制该地区校正前后影像 DN 值散点图 (图 5 (a)、5 (b))，可以看到该地区的散点均匀分布在 1:1 线两旁，且对数拟合的结果在低值部分差异更小，在中值或高值部分与幂指数函数拟合结果相当。因此，本文选择对数模型进行 DMSP/OLS 与 VIIRS 两种数据源的相互校正 (式 (5))，最终得到 1992 年—2017 年 DMSP/OLS 尺度基准的长时间序列的一致的夜间灯光影像集。

$$SNDI = \sum_{i=1}^p NDI_p \quad (4)$$

式中， DN_i 为影像像元 DN 值， n 为像元总数， $TSOL_{t_1}$ 、 $TSOL_{t_2}$ 分别为 t_1 和 t_2 年度的灰度总量值， p 为年度总数。

3.4 DMSP/OLS 与 NPP/VIIRS 相互校正方法

DMSP/OLS 夜间灯光影像是非辐射定标的稳定灯光影像，其像元 DN 值未经过星上的辐射定标，是相对亮度辐射值，且时间覆盖范围为 1992 年—2013 年；而 NPP/VIIRS 影像像元 DN 值是经过辐射定标后的值，单位为 $nW \times cm^{-2} \times sr^{-1}$ ，时间覆盖范围为 2012 年至今。由于这两种数据在长时间序列上不具有一致性和可比性，难以直接应用于多源夜间灯光影像集的相关研究。因此本文提出了基于 DMSP/OLS 与 NPP/VIIRS 两种数据源的相互校正方法，该方法首先建立 2013 年 DMSP/OLS 与 NPP/VIIRS 两种数据源的回归关系，再利用所建立的回归方程对 2014 年—2017 年 VIIRS 数据进行校正。2013 年两种数据源拟合的各项参数及相关系数如表 3 所示。

$$Y = a \times \lg(b \times X) \quad (5)$$

式中， Y 为 VIIRS 数据经过尺度转换至 DMSP 尺度上的像元 DN 值， X 为 VIIRS 数据像元 DN 值， a ， b ， c 为对数回归得到的校正参数。

4 结果与分析

4.1 不变目标区域提取结果分析

不变区域的确定是整个方法的基础和关键。本文在采用线性拟合方法提取不变目标区域的基础上，分别绘制不变目标区 DMSP/OLS 参考影像 (F121999) 直方图 (图 6 (a)) 及其与时间跨度较长的 F182010 散点分布图 (图 6 (b)) 进行评估与分析。首先，提取的不变目标区域的影像 DN 值

均匀分布于6—63之间, 以DN值小于40为主, 同时, 不变目标区也包含了部分城市中心的饱和像元, 表明本文选择的不变目标区具有较好的代表性图6(a)。其次, 不变目标区在F121999与F182010之间的DN值均匀分布在1:1线两旁, 表明

两期影像在不变目标区的DN值差异较小图6(b)。因此, 本文提取的不变目标区域在值域上能够代表研究区的像元特征和变化趋势, 符合选择不目标区域的基本要求。

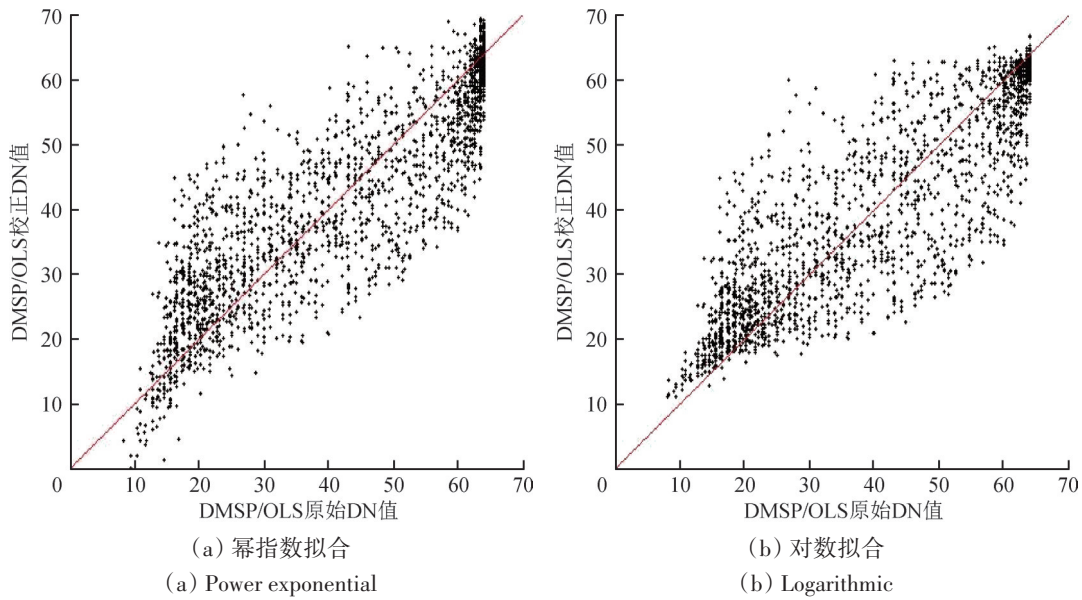


图5 DMSP/OLS校正值与原始值的散点分布

Fig. 5 Scatter distribution of simulated and real values of DMSP/OLS

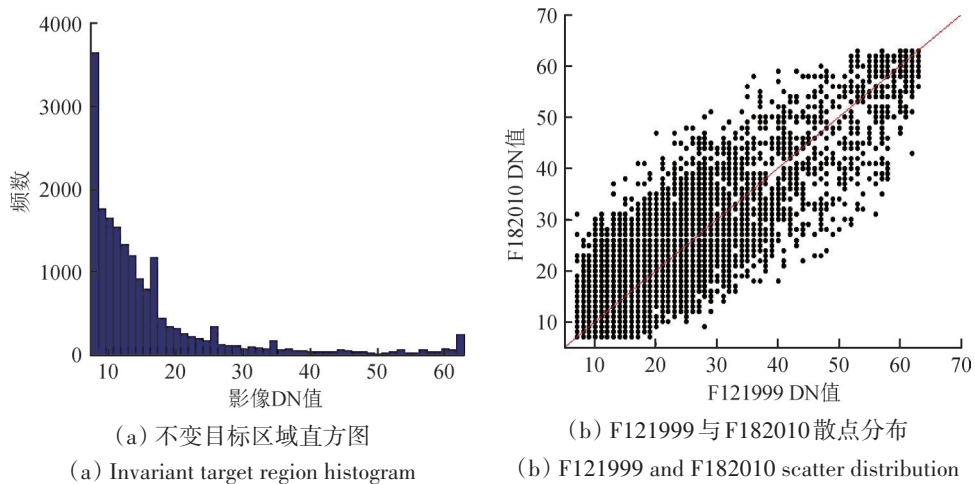


图6 不变目标区域直方图及散点分布图

Fig. 6 Histogram and scatter distribution of invariant target region

4.2 DMSP/OLS数据校正结果定性分析

为了评价DMSP/OLS数据校正效果, 图7给出了研究区校正前后灰度总量(TSOL)的年度变化。可以看出, 灰度总量在校正前存在明显波动, 尤其在1997年、2005年、2008年和2011年, 都出现了显著降低现象。由于该地区在这些年份并无突

发重大自然灾害、战争等导致夜晚灯光消失的因素, 说明在这些年份存在辐射亮度值不稳定增长现象, 这不符合经济发展的规律, 可视为异常波动的像元。校正之后的灰度总量在1992年—2013年呈稳定增长趋势, 显著降低了数据的年际波动, 更与经济发展规律相契合。

本文将搜集获取的1992年—2013年巴基斯坦和喀什地区的GDP和人口统计数据分别进行累加,得到中巴经济走廊GDP和人口统计数据,并对DMSP/OLS校正结果进行相关分析(图8)。从校正前后研究区灰度总量与人口统计数据、GDP数据的拟合结果来看,校正后的TSOL与人口、GDP两种数据的拟合系数相较于校正之前有明显提高,其中TSOL与人口数据的拟合系数从校正前的0.6811上升至0.9033,TSOL与GDP的拟合系数也

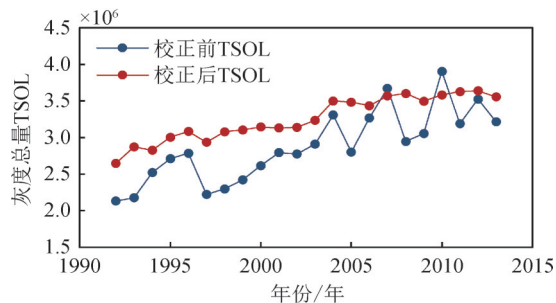


图7 中巴经济走廊DMSP/OLS校正前后TSOL对比
Fig.7 TSOL comparison before and after calibration the DMSP/OLS corrections in the China-Pakistan Economic Corridor

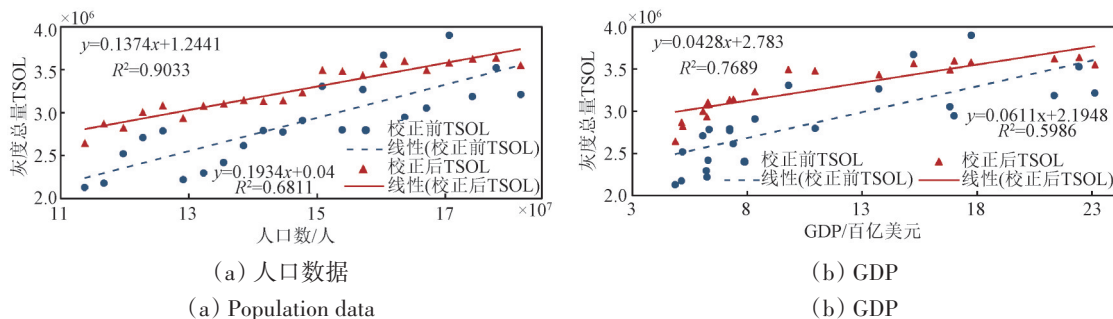


图8 中巴经济走廊DMSP/OLS校正前后TSOL与人口、GDP的关系对比

Fig.8 Comparison of the relationship between TSOL and population and GDP before and after DMSP/OLS correction in China-Pakistan Economic Corridor

由校正前的0.5986升至0.7689,显著增强了TSOL与两种数据之间的相关性。

4.3 DMSP/OLS数据校正结果定量分析

本文从国家级和省级两种不同空间尺度,将灰度总量、标准化差异指数、标准化差异指数和作为评价指标对DMSP/OLS校正结果进行定量评价。对于中巴经济走廊整个研究区相互校正之前,DMSP/OLS 6个传感器在同一年份灰度总量(TOSL)的波动较大,不具有连续性和可比性,且同一传感器在不同年份的差异也较大,尤其是F15、F16和F18传感器,其年际波动振幅甚至达到了F14传感器6年变化总值(图9(a))。在校正结果图9(b)中,不同传感器同一年份的TOSL波动大大减小,同一传感器不同年份的数据连续性也得到了很大程度改善。对比图9(c)、图9(d)可以看出,各地区校正之后的标准化差异指数(NDI)均降至0.05以下。从省级尺度来看,旁遮普省和联邦首都区校正后数据年际波动得到了有效的改善,且标准化差异指数也明显降低,总体变化趋势和中巴经济走廊整个研究区大致相同;由于喀什地区校正之前的数据本身年际波动较小且连续性较好,因此校正前后变化不明显。

图10展示了中巴经济走廊各地区1992年—2013年校正前后标准化差异指数和(SNDI)的变

化,可以看出:相互校正之前各地区SNDI均为3左右,其中联邦直辖区高达5左右;相互校正之后,大部分区域SNDI显著降低至2以内。然而可以看出喀什和联邦直辖区校正之后SNDI仍然大于2,这是因为联邦直辖区校正之前的SNDI值最大,说明在该区域存在大量的像元异常波动,相互校正有效的减弱了数据的年际波动。喀什地区由于数据在校正前波动不明显,因此相互校正后的SNDI值变化幅度总体小于其他地区。

4.4 DMSP/OLS与NPP/VIIRS相互校正结果

图11对比了2013年相互校正前后VIIRS影像的变化,并选用同年DMSP/OLS影像作为参考分析。由图11(a)和图11(c)可以看出,DMSP/OLS影像DN值高值区相对于VIIRS影像而言空间范围有明显扩大,由于DMSP/OLS影像在临近像元的DN值接近,在细节上不会表现出明显差异;而VIIRS影像在中低值区域其周围临近像元DN值的差异较大,因此经过相互校正拉伸后的VIIRS影像在小区域内更能体现空间细节特征。总体来说,相互校正之后的影像在空间上呈现了VIIRS原始影像的空间分布特征,尤其是影像高值区,同时对原始VIIRS影像DN中低值有所拉伸,从而在空间上表现出DMSP/OLS相对于VIIRS的空间扩大部分。从长时间尺度来看,NPP/VIIRS的互校正结果

有效的缩减了与DMSP/OLS的辐射与空间差异, 增强了两种数据的连续性和一致性。

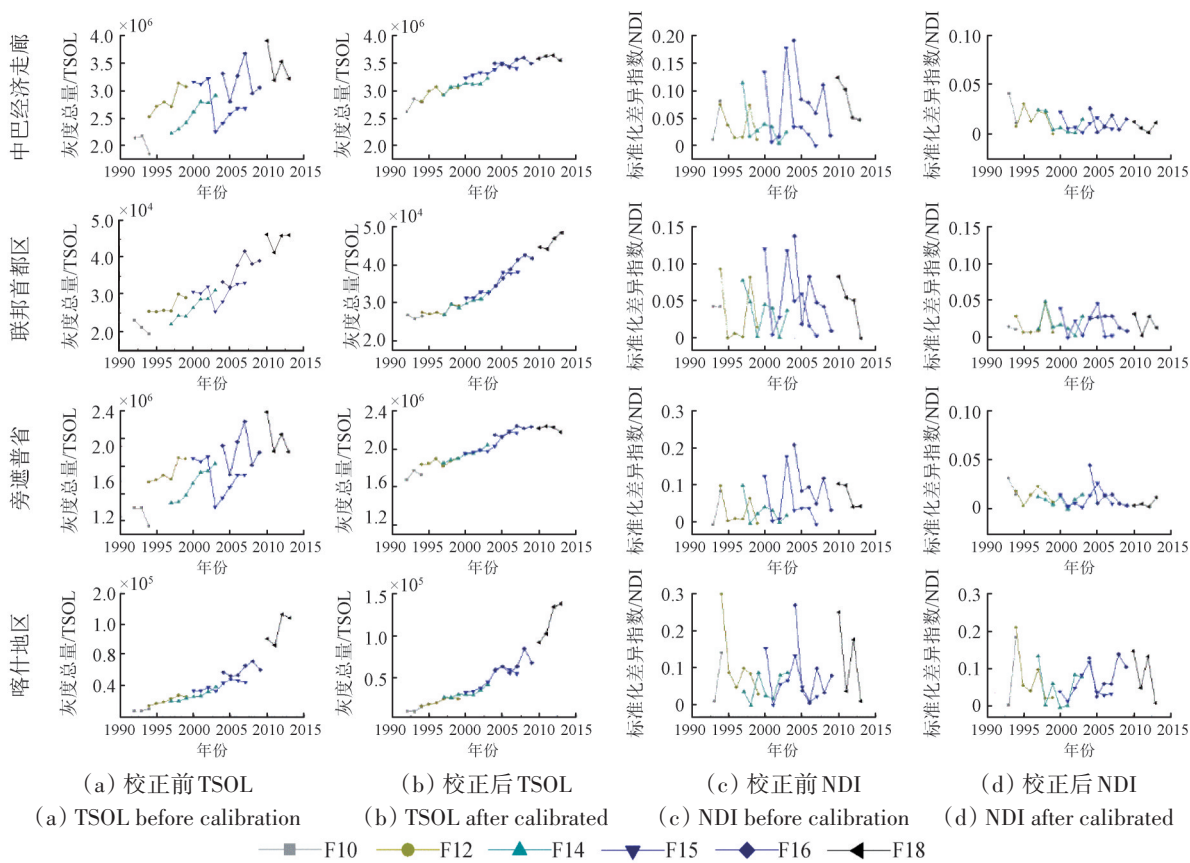


图9 中巴经济走廊各地区校正前后灰度总量和标准化差异指数对比

Fig.9 Comparison of TSOL and NDI before and after calibration in various regions of the Pakistan-Pakistan Economic Corridor

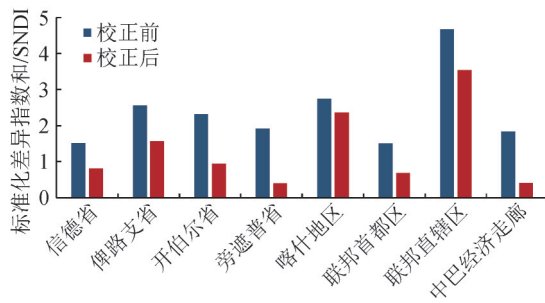


图10 中巴经济走廊各地区校正前后SNDI值

Fig.10 SNDI values before and after calibration in various regions of China-Pakistan Economic Corridor

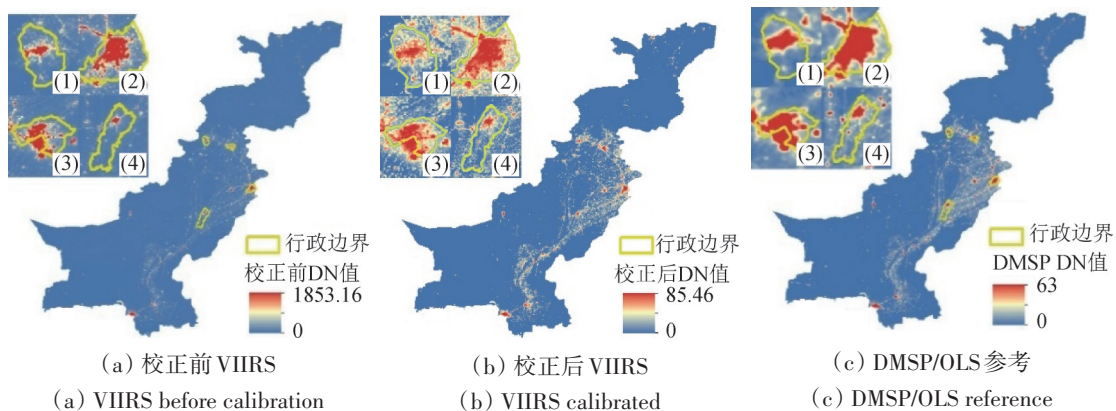


图11 2013年中巴经济走廊相互校正前后数据((1)白沙瓦地区(2)拉合尔地区(3)伊斯兰堡地区(4)木尔坦地区)

Fig.11 Before and after the intercalibration of the China-Pakistan Economic Corridor in 2013((1) Peshawar (2) Lahore (3) Islamabad (4) Multan)

5 结论

本文分别采用一元二次方程和幂函数拟合方法对DMSP/OLS和VIIRS数据集进行了相互校正, 得到1992年—2017年长时间序列的夜间灯光影像集。DMSP/OLS影像经过相互校正和连续性校正后相比于校正前影像, 无论在国家级尺度还是省级尺度上其灰度总量均呈现稳定增长的趋势, 很大程度上减弱了因传感器等因素引起的数据的剧烈波动。同时, 该方法明显降低了标准化差异指数值, 使得长时间序列的夜间灯光影像数据集的年内波动明显减弱, 增强了不同传感器数据在时间上的连续性, 使像元DN值及其变化趋势更符合经济稳步增长的客观规律。校正的DMSP/OLS影像不仅在DN值上与原始的DMSP/OLS影像具有很好的—致性, 在时空分布上也与DMSP/OLS保持一致, 空间细节信息更加突出, 提高了数据的协同性和—致性。校正结果反映出本文提出的方法可以很好地解决DMSP/OLS和VIIRS夜间灯光影像在时间尺度上的不连续和不—致的问题, 这必将有利于提高长时间序列夜间灯光数据在城市发展、GDP研究等方面的应用精度。

像元饱和问题是影响DMSP/OLS影像使用的一个突出问题, 相互校正模型可以在一定程度上减弱因像元饱和带来的数据误差, 但问题没有得到根本性的解决。绝对辐射定标可以从根本上解决像元饱和问题, 但由于其需要更多的参数, 如曲面卫星过境时的反射率、大气能见度、太阳天顶角和卫星传感器校准参数等, 而且这些参数不容易获取, 加上工作成本高(Wu等, 2013)。影像间相互校正是解决像元饱和问题的一个简单有效的途径, 然而, 校正精度依赖于训练样本的选择, 并对样本数量敏感, 因此, 探索一种精确而有效的相互校正模型是夜间灯光数据校正研究的一个重点方向(Li等, 2017)。另一方面, 尽管NPP/VIIRS月合成影像通过选择月内最佳观测像元作为代表, 在一定程度上消除了逐日夜间灯光数据的噪声, 但是其月合成数据仍然存在杂散光、短暂光源等背景噪声, 其不稳定的变化趋势对校正结果将产生一定程度影响, 也是影响校正精度的因素之一。目前主要的方法是设定相应的阈值进行滤波处理, 由于这些噪声大部分属于低值, 其影响将在线性拟合过程中被减弱, 因此本文在校正过程中未对

VIIRS影像进行相应的去噪处理, 在今后的工作中会进一步改进。此外, 由于影像数据正处于DMSP/OLS与NPP/VIIRS数据的过渡时期, 发展一种或多种模型混合的相互校正方法有助于推动长时间序列夜间灯光影像的更广泛应用。

参考文献(References)

- Amaral S, Câmara G, Monteiro A M V, Quintanilha J A and Elvidge C D. 2005. Estimating population and energy consumption in Brazilian Amazonia using DMSP night-time satellite data. *Computers, Environment and Urban Systems*, 29(2): 179-195 [DOI: 10.1016/j.compenurbysys.2003.09.004]
- Amaral S, Monteiro A M V, Câmara 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]
- Anderson S J, Tuttle B T, Powell R L and Sutton P C. 2010. Characterizing relationships between population density and nighttime imagery for Denver, Colorado: issues of scale and representation. *International Journal of Remote Sensing*, 31(21): 5733-5746 [DOI: 10.1080/01431161.2010.496798]
- 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, Wang J M, Chen J and Shi F. 2014. Spatialization of electricity consumption of China using saturation-corrected DMSP-OLS data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 28: 193-200 [DOI: 10.1016/j.jag.2013.12.004]
- Cao Z Y, Wu Z F, Kuang Y Q and Huang N S. 2015. Correction of DMSP/OLS night-time light images and its application in China. *Journal of Geo-information Science*, 17(9): 1092-1102 (曹子阳, 吴志峰, 匡耀求, 黄宁生. 2015. DMSP/OLS夜间灯光影像中国区域的校正及应用. *地球信息科学学报*, 17(9): 1092-1102) [DOI: 10.3724/SP.J.1047.2015.01092]
- 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, 一之瀬俊明. 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]
- Ding S Y, Zhu W Q, Jiang Y, Dong M Y and Zheng Z T. 2017. Ecological status in the China-Pakistan economic corridor: assessments by RS and GIS. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 53(3): 358-365 (丁思洋, 朱文泉, 江源, 董满宇, 郑周涛. 2017. 基于RS与GIS的中巴经济走廊生态现状评价. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 53(3): 358-365) [DOI: 10.16360/j.

- cnki.jbnuns.2017.03.018]
- 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, Kihn E A, Kroehl H W and Davis E R. 1997. Mapping city lights with nighttime data from the DMSP Operational Linescan System. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 63(6): 727-734
- Elvidge C D, Baugh K E, Zhizhin M and Hsu F C. 2013. 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, Ziskin D, Baugh K E, Tuttle B T, Ghosh T, Pack D W, Erwin E H and Zhizhin M. 2009. A fifteen year record of global natural gas flaring derived from satellite data. *Energies*, 2(3): 595-622 [DOI: 10.3390/en20300595]
- Guo Y D, Gao J H and 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 (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. *清华大学学报(自然科学版)*, 56(10): 1122-1130 [DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2016.22.049]
- Hall F G, Strelbel D E, Nickeson J E and Goetz S J. 1991. Radiometric rectification: toward a common radiometric response among multi-date, multisensor images. *Remote Sensing of Environment*, 35(1): 11-27 [DOI: 10.1016/0034-4257(91)90062-B]
- Huang X, Schneider A and Friedl M A. 2016. Mapping sub-pixel urban expansion in China using MODIS and DMSP/OLS nighttime lights. *Remote Sensing of Environment*, 175: 92-108 [DOI: 10.1016/j.rse.2015.12.042]
- Jiang W, He G J, Peng Y, Wang G Z and Wang M M. 2017. Application potentiality and prospects of nighttime light remote sensing in "the Belt and Road" initiative. *Journal of University of Chinese Academy of Sciences*, 34(3): 296-303 (江威, 何国金, 彭燕, 王桂周, 王猛猛). 2017. 夜光遥感在“一带一路”战略中的应用潜力展望. *中国科学院大学学报*, 34(3): 296-303 [DOI: 10.7523/j.issn.2095-6134.2017.03.004]
- Lenney M P, Woodcock C E, Collins J B and Hamdi H. 1996. The status of agricultural lands in Egypt: the use of multitemporal NDVI features derived from Landsat TM. *Remote Sensing of Environment*, 56(1): 8-20 [DOI: 10.1016/0034-4257(95)00152-2]
- Li D R and Li X. 2015. An overview on data mining of nighttime light remote sensing. *Journal of Geomatics*, 44(6): 591-601 (李德仁, 李熙). 2015. 论夜光遥感数据挖掘. *测绘学报*, 44(6): 591-601 [DOI: 10.11947/j.AGCS.2015.20150149]
- Li Q T, Lu L L, Weng Q H, Xie Y H and Guo H D. 2016. Monitoring urban dynamics in the southeast U.S.A. Using time-series DMSP/OLS nightlight imagery. *Remote Sensing*, 8(7): 578 [DOI: 10.3390/rs8070578]
- Li R Y. 2015. Study on the Methodology of Using Nighttime Light Data to Retrieve Atmospheric Fine Particle's Concentration. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) (李润亚). 2015. 夜间灯光数据反演大气细颗粒物浓度方法研究. 北京: 中国地质大学(北京)
- Li X, Chen X L, Zhao Y S, Xu J, Chen F R and Li H. 2012. Automatic intercalibration of night-time light imagery using robust regression. *Remote Sensing Letters*, 4(1): 45-54 [DOI: 10.1080/2150704X.2012.687471]
- Li X, Li D R, Xu H M and Wu C Q. 2017. 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]
- Pandey B, Zhang Q L and Seto K C. 2017. Comparative evaluation of relative calibration methods for DMSP/OLS nighttime lights. *Remote Sensing of Environment*, 195: 67-78 [DOI: 10.1016/j.rse.2017.04.011]
- 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 9264, Earth Observing Missions and Sensors: Development, Implementation, and Characterization III*. Beijing, China: SPIE: 92640A [DOI: 10.1117/12.2068999]
- Su Y X, Chen X Z, Ye Y Y, Wu Q T, Zhang H O, Huang N S and Kuang Y Q. 2013. Characteristics and mechanism of carbon emission in China's energy consumption based on nighttime lighting data. *Journal of Geographical Science*, 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/dlxb201311007]
- Waluda C M, Yamashiro C, Elvidge C D, Hobson V R and Rodhouse P G. 2004. Quantifying light-fishing for *Dosidicus gigas* in the eastern Pacific using satellite remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 91(2): 129-133 [DOI: 10.1016/j.rse.2004.02.006]
- Wu J, He S, Peng J, Li W and Zhong X. 2013. Intercalibration of DMSP-OLS night-time light data by the invariant region method. *International Journal of Remote Sensing*, 34(20): 7356-7368 [DOI: 10.1080/01431161.2013.820365]
- Zhang Q L, Pandey B and Seto K C. 2016. A robust method to generate a consistent time series from DMSP/OLS nighttime light data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54(10): 5821-5831 [DOI: 10.1109/TGRS.2016.2572724]
- Zhao X R, Shi H Q, Yang P L, Zhang L, Fang X and Liang K. 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 (赵笑然, 石汉青, 杨平吕, 张雷, 方荀, 梁快). 2017. NPP 卫星 VIIRS 微光资料反演夜间 PM_{2.5} 质量浓度. *遥感学报*, 21(2): 291-299 [DOI: 10.11834/jrs.20176162]
- 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]
- 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