

NPP/VIIRS 微光图像融合中国中东部城市灯光算法

余越¹, 胡秀清^{2,3*}, 闵敏^{2,3}, 许廷发¹, 何玉青¹, 陈林^{2,3}, 徐榕烺²¹北京理工大学光电学院光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081;²中国气象局国家卫星气象中心, 北京 100081;³中国气象局中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室, 北京 100081

摘要 美国新一代环境气象卫星 NPP/联合极轨卫星系统(JPSS)增加了可见光红外成像辐射仪(VIIRS)白天/夜间波段(DNB)的微光昼夜成像通道,继承了国防气象卫星计划(DMSP)线性扫描业务系统(OLS)收集全球微光成像数据的能力,并在性能上有大幅提升,利用 VIIRS DNB 数据可以进行夜间城市灯光探测。针对中国中东部经济快速发展区域城市灯光产品的迫切需求,综合考虑云层、月光、太阳照射、闪电、火灾等因素的影响,对低质量数据和非灯光特征数据进行识别和剔除,采用 VIIRS DNB 多天夜间数据进行融合,将多天无月光的有效灯光辐亮度数据进行平均,生成中国中东部地区夜间城市灯光的月合成产品。将本算法生成的产品与美国国家海洋和大气管理局(NOAA)业务城市灯光产品的辐射亮度值进行对比验证后发现,两者具有可比性。所开发的城市灯光融合产品算法为后端的衍生应用及其他夜间微光遥感产品的反演奠定了技术基础。

关键词 遥感; 微光; 城市灯光; 多时相融合; 辐射亮度

中图分类号 O432 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.102804

NPP/Visible Infrared Image Radiometer Suite Low-Light Image Fusion Algorithm for City Lights in Mid-Eastern China

Yu Yue¹, Hu Xiuqing^{2,3*}, Min Min^{2,3}, Xu Tingfa¹, He Yuqing¹, Chen Lin^{2,3}, Xu Ronghan²

¹Key Laboratory of Photoelectric Imaging Technology and System of Ministry of Education, School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

²National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;

³Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

Abstract As part of the next-generation American environmental meteorological satellites, the NPP/Joint Polar Satellite System (JPSS) has introduced the Visible Infrared Image Radiometer Suite (VIIRS) Day and Night Band (DNB) low-light day/night imaging band. DNB employs the ability of defense meteorological satellite program (DMSP)/Operational Linescan System (OLS) to collect global low-light imaging data, which has resulted in a considerably optimized performance. The nighttime city lights can be detected using the VIIRS DNB data. Because of the urgent requirement for city lights in the rapidly developing regions that are located in mid-eastern China, this study comprehensively considers the influence of various important factors, including clouds, moonlight, sunlight, lightning, and fire, while identifying and rejecting low-quality data and non-light characteristic data in addition to adopting VIIRS DNB multi-day nighttime data fusion. The average of multi-day non-moonlit effective radiance data is used to generate monthly nighttime city lights in mid-eastern China. The results that are obtained by analyzing the radiance value of the product are comparable with those obtained by analyzing the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) city lights business product. The city lights fusion product algorithm, which is developed in this study, provides the technical foundation to develop the back-end generative application and for the inversion of the remaining low-light remote-sensing nighttime products.

收稿日期: 2018-03-16; 修回日期: 2018-04-27; 录用日期: 2018-05-06

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB0504902)、国家自然科学基金(41471302)、国家高技术研究发展计划(863 计划)(2015AA123704)、公益气象行业专项(GYHY201506074)

* E-mail: huxq@cma.gov.cn

Key words remote sensing; low-light; city lights; multi-temporal fusion; radiance

OCIS codes 040.3780; 280.4788; 350.5610

1 引言

地球上能够观测到的月光、星光和大气辉光等微弱的“可见”光统称为微光,利用微光成像技术可以在夜间低照度条件下获取可见光图像^[1]。夜间城市灯光探测是星载微光探测技术的重要应用之一,基于城市灯光的强度和分布范围可以进行城市经济活动、城市人口估计、城市建筑密度估算等方面的研究^[2-5]。因此,利用星载夜间微光通道数据合成的城市灯光产品具有重要意义和价值。

2011年10月28日,美国联合极轨卫星系统(JPSS)的试验星 Suomi NPP (S-NPP)卫星搭载着5个重要载荷成功发射,其中包含可见光红外成像辐射仪(VIIRS)^[6-7]。VIIRS在22个探测波段中包含一个白天/夜间波段(DNB),DNB继承并发展了美国国防气象卫星计划(DMSP)线性扫描业务系统(OLS)的微光探测能力,且在性能上大幅提升:空间分辨率显著提高;因采用多元时间延迟积分技术(TDI)而大大提高了微光探测灵敏度;因采用多增益技术和星上定标技术而大幅提高了辐射定标精度^[8-10]。

在利用DNB数据生成城市灯光融合产品方面,Baugh等^[11]针对DNB数据图像质量进行标识,考虑到太阳照射、月光、杂散光、边缘噪声、云层等因素的影响,将满足高质量无云特征的数据投影到空间分辨率为15"的地理网格中,利用多天数据平均,生成城市灯光产品。之后,Elvidge等^[12]对城市灯光融合算法进行进一步改进,增加了闪电和异常值的去除,同时确定了背景区域。目前,美国国家海洋和大气管理局(NOAA)/美国国家地球物理数据中心(NGDC)的地球观测组织(EOG)已经利用相关算法生成了全球夜间城市灯光的月合成和年合成产品。

考虑到中国中东部经济区对于夜间城市灯光产品的迫切需求,本文提出了利用NPP/VIIRS微光数据融合中国中东部城市灯光的算法。与上述算法不同,所提算法增加了气溶胶透过率订正,并在云检测算法上采用灯光模糊理论,同时在火点去除算法中采用统计学思想。另外,针对中国中东部的灯光特点设定了特定的灯光阈值判据。在进行多天夜间数据融合前考虑云层、月光、太阳照射、闪电、火灾等因素的影响,对低质量数据和非灯光特征数据进行识别和剔除,利用多天高质量灯光辐射亮度数据平

均生成夜间城市灯光的月合成产品。通过与NOAA国外业务产品进行对比,验证了所提城市灯光融合算法的可靠性。

2 研究数据和融合方法

2.1 研究数据

研究区域为中国中东部地区,包含京津冀、长江三角洲、珠江三角洲经济区。数据空间范围为 $107^{\circ}\text{E}\sim 122.8^{\circ}\text{E}$, $21.5^{\circ}\text{N}\sim 42.5^{\circ}\text{N}$ 。考虑到城市灯光分布可能存在季节性差异,合成月份夜间城市灯光产品时选择2016年1月、4月、7月、10月夜间NPP/VIIRS DNB通道数据。

本研究所用数据由NOAA和NGDC发布。在NOAA网站上选择数据经纬度范围、起止日期和时间、数据通道类型,即可下载获得本研究所需数据。数据格式为HDF5,该格式由美国国家超级计算应用中心(NCSA)开发,数据包含辐射亮度数据及与辐射数据对应的地理定位数据。

2.2 数据质量检测

对DNB数据进行属性特征检测是多时相数据融合的第一步。主要对下述4个特征进行检测和筛选:1)无月光照射数据;2)不在边缘噪声区域的数据;3)不受太阳照射影响的数据;4)非闪电数据。满足上述4个特征的数据才会用于下一步的灯光融合处理。

在满月情况下,DNB图像的云层、雾、积雪、烟尘和地表特征清晰可见,同时地面光源(例如城市灯光、闪电、火灾、渔船灯光)也可以被探测到;在无月光照射情况下,对于那些需要在一定的照明条件才能观测到的目标很难进行探测,因此云层、雾、积雪、烟尘和地表特征的轮廓比较模糊^[12-13]。探测对象为城市灯光,选择无月光照射数据对于提升灯光探测质量十分必要。月相角和月球天顶角是影响月球辐射亮度的关键因素。月相角反映地球上看到的月球是圆还是缺。在月相周期中,月相角从 180° (新月)向 0° (满月)变化,月相角越大,月球辐射亮度越小。月球天顶角反映月球对地的入射角度。月球天顶角越大,月球辐射亮度越小。由于一个轨道NPP/VIIRS数据无法完全覆盖研究区域,因此需要多个轨道数据进行拼接。综合考虑月球天顶角和月相角的影响,无月光照射数据是指该天的月相角和各个

轨道数据的平均月球天顶角均为大于 90° 的数据。图 1 为 2016 年 7 月每个轨道数据月球天顶角和月

相角随农历日期的变化,可见,本月农历 27 至次月初八的观测数据才满足融合条件。

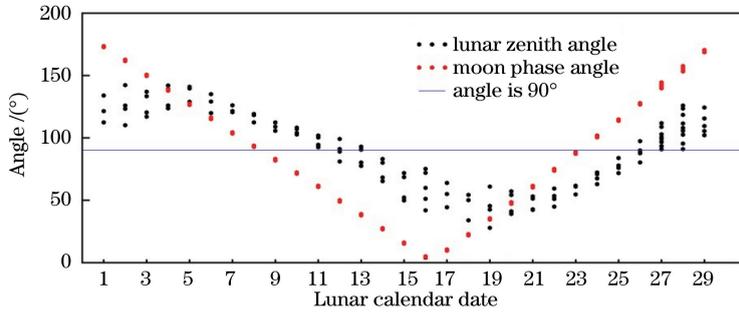


图 1 2016 年 7 月月球天顶角和月相角随农历日期的变化

Fig. 1 Lunar zenith angle and moon phase angle versus the lunar calendar in July 2016

为了保证 DNB 数据在任何扫描角沿轨道方向和扫描方向的空间分辨率基本恒定, VIIRS 传感器采用合并采样点的方式来避免空间分辨率随着扫描角的增加而增大,因此 DNB 数据卫星星下点向两侧分别按 3、2、1 个采用点进行合并,在轨道的两侧,每个像素未进行多采样点合并,因此图像的信噪比就会降低^[14]。从图 2 可以明显看出,边缘数据噪声明显增加,因此两侧(聚合区编号 29~32)数据在本研究中不被用于灯光产品的合成。

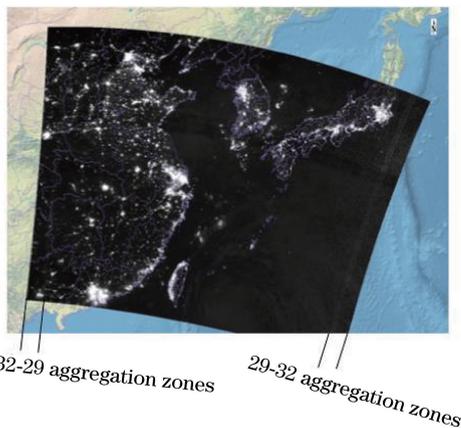


图 2 VIIRS DNB 数据

Fig. 2 VIIRS DNB data

为了避免太阳光照的影响,只有 DNB 夜间数据才可以实现灯光产品的融合。太阳天顶角是表示太阳位置的一种方式,当太阳天顶角小于 96° 时,此时是白天数据;当太阳天顶角为 $96^\circ \sim 101^\circ$ 时,此时正处于白天与夜间的过渡时期,数据质量较低;当太阳天顶角大于 101° 后,太阳完全处于地平线以下,此时数据完全不受太阳光照的影响^[11]。灯光融合算法选取太阳天顶角大于 101° 的数据参与融合。

闪电的强烈放电现象会导致卫星观测地球的辐射亮度值明显增加。根据 Elvidge 等^[15]的研究,闪

电在 DNB 图像上呈水平条带状分布,这是由于 VIIRS DNB 沿轨道方向具有 16 个 CCD 探测器,一次闪电会照亮单次扫描 16 行数据,因此 DNB 图像上闪电的特征为具有 16 行的扫描宽度。可以利用闪电的这种空间特征对其进行识别。设每次扫描首行扫描线上一个像素点的辐射亮度值为 L_u ,该像素点对应尾行扫描线上像素点的辐射亮度值为 L_d ,相邻扫描尾行扫描线上像素点的辐射亮度值为 L_a ,如图 3 所示。如果 L_u 和 L_d 均大于下限阈值 $1 \text{ nW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$,则对 L_u 与 L_a 的差异进行判断;如果 L_u 与 L_a 存在较大差异或者相邻扫描尾行扫描线上像素点已经标记为闪电,则进行下一步的判断。若在扫描线上有连续 24 个像素点满足上述条件,则较高辐射侧标记为闪电。该算法对于识别相邻两次扫描均为闪电的情况也是有效的。图 4(a)为一天 VIIRS DNB 数据,图 4(b)给出了利用闪电的空间特征识别的结果。

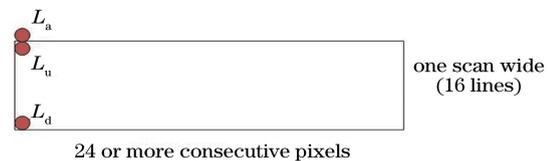


图 3 闪电识别示意图

Fig. 3 Lightning identification schematic

2.3 数据校正与投影

气溶胶粒子的散射和吸收作用会影响大气的辐射传输过程^[16-17]。根据 Johnson 等^[18]在 2013 年的研究,卫星观测辐射 I_{sat} 可以表示为

$$I_{\text{sat}} = I_s \exp(-d/\cos \theta) + I_a + I_p, \quad (1)$$

式中: d 为大气总光学厚度; θ 为卫星天顶角; I_a 为额外散射辐射; I_p 为路径辐射; I_s 为地表光源向上辐射。考虑到大气气溶胶的影响,需要对气溶胶透

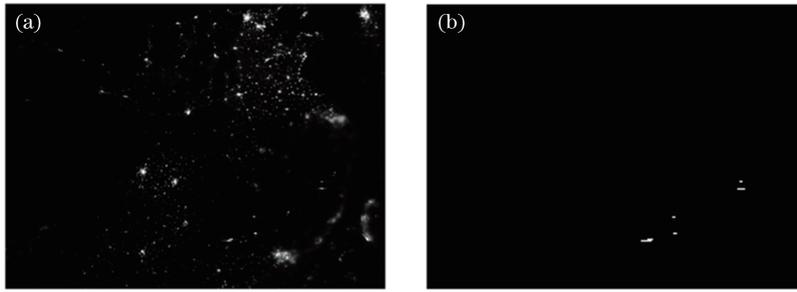


图 4 (a) 2016 年 4 月 3 日 VIIRS DNB 数据;(b)利用闪电的空间特征识别的结果

Fig. 4 (a) VIIRS DNB data obtained on April 3, 2016; (b) the recognition result of lightning using spatial feature

过率进行订正。假设完全晴空条件下的大气总光学厚度为 0.1, 由于 I_a 和 I_p 对卫星观测辐射的精度影响较小, 几乎可以忽略, 因此利用(1)式可以得到气溶胶透过率订正公式:

$$I_s = I_{\text{sat}} / \exp(-0.1 / \cos \theta). \quad (2)$$

VIIRS DNB 一个轨道数据的扫描时间约为 5 min, 一个轨道数据无法完全覆盖研究区域。为了实现同一天不同轨道数据的拼接和多天数据的融合, 需要对校正后的有效辐射数据(辐射亮度值大于零的数据)进行投影变换。为了保证产品的质量, 只对满足上述 4 个特征的数据进行该操作。首先, 只对一个月中无月光照射日期的数据进行投影变换操作; 其次, 对于每个数据, 只有在其满足不在边缘噪声区域、不受太阳照射、非闪电数据、有效数据这几个特征条件后才进行投影变换。提高空间分辨率会增加灯光图像的细节, 但数据覆盖率会降低。综合考虑空间分辨率和数据覆盖率, 建立 0.01° 空间分辨率的等经纬度地理网格, 将每天满足上述特征的数据利用最邻近内插法投影到地理网格中的相应位置。

2.4 云检测

在无月光照射的情况下, 云层没有反射辐射, 但是有些云层较薄, 城市灯光能透过云层而被探测到。在无月光照射的情况下, 云层会影响城市灯光图像的质量, 它会降低灯光的强度, 使灯光特征的细节变得模糊; 较厚的云层会完全掩盖灯光; 而较薄的云层则会使灯光弥散模糊, 导致灯光比在无云情况下显得更大更暗。因此, 在合成灯光产品前对投影网格中的云层进行检测和剔除是十分必要的。在云层覆盖的区域, 模糊的灯光图像会导致灯光辐射亮度值的空间标准偏差减小。变异系数可以反映辐射亮度值的这种标准差, 它是数据标准差与平均值的比值。对每个数据点建立 3×3 的窗口模板, 通过对窗口中 9 个数据的变异系数设定阈值进行云检测。在不考虑背景是否有云层覆盖的情况下, 为提高灯光融合

产品的数据覆盖率, 仅对辐射亮度值大于 $1 \text{ nW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ 的数据进行云检测。

为了验证利用变异系数进行云检测的准确性, 对采用所提算法得到的云检测结果与 VIIRS 云检测中间产品(IICMO)进行比较。由于存在不精确的测量, IICMO 云层覆盖信息包括 4 个等级, 分别为完全晴空、可能晴空、可能有云、完全有云。质量信息包括很好、中等、不好、很差 4 个等级, 其中“很好”表示执行所有的云检测测试; “中等”表示执行大于 50% 的测试; “不好”表示执行小于 50% 的测试; “很差”表示没有执行云检测测试。图 5(b) 和图 6 分别为所提算法和 IICMO 的云检测结果。对 IICMO 云层覆盖信息为完全有云、质量信息为很好的像素点进行云检测算法可靠性验证, 结果表明, 所提算法的识别率为 83.23%。

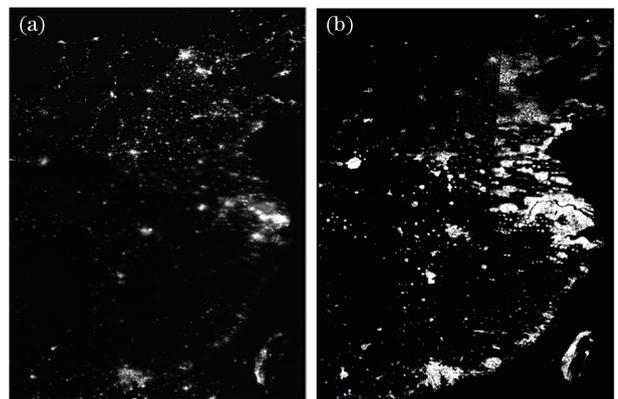


图 5 (a) VIIRS DNB 一天投影图像; (b) 变异系数识别的云层(白色代表云层覆盖区域)

Fig. 5 (a) A single-day projected image of VIIRS DNB; (b) clouds that are identified based on the coefficient of variation(white represents the cloud coverage area)

2.5 异常值及背景阈值确定

城市灯光产品融合采用辐射亮度值按时间范围进行算术平均的方式, 但在对数据进行平均值处理前需要剔除火点等异常值。对多时相数据按数值大

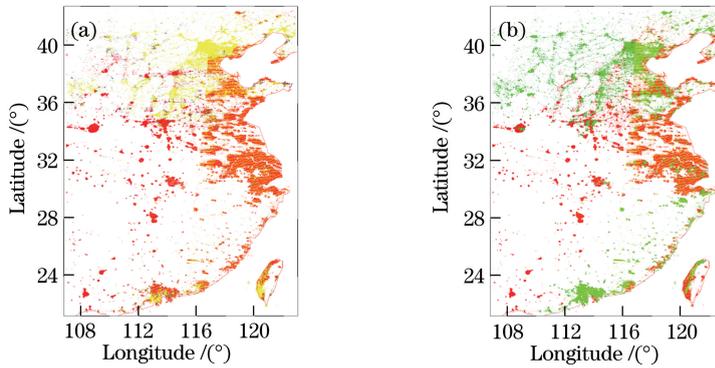


图6 IICMO云检测结果。(a)云层覆盖信息(红色表示完全有云,绿色表示可能有云,蓝色表示可能晴空,黄色表示完全晴空,白色表示未进行云检测);(b)质量信息(红色表示很好,绿色表示中等,蓝色表示不好,黄色表示很差,白色表示未进行云检测)

Fig. 6 IICMO cloud detection results. (a) The cloud cover information (red represents completely cloudy sky, green represents probably cloudy sky, blue represents probably clear sky, yellow represents completely clear sky, white represents no cloud detection); (b) quality information (red represents good, green represents medium, blue represents bad, yellow represents poor, white represents no cloud detection)

小进行排序,如果数据中存在火点,则说明该数据值明显高于其他数据值。采用狄克松检验法判别并剔除异常值,以减小偶然因素对灯光融合结果的影响^[19]。

背景是缺乏可探测到表面照明的区域,它的辐射亮度较小,确定灯光和背景的辐射亮度阈值是绘制灯光图像的关键一步。首先利用土地分类信息对海洋数据进行掩模处理,之后统计数据概率密度函数

(PDF),其中区间长度为 $0.1 \text{ nW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ 。从图7(a)可以看出,背景地物具有中间辐射亮度概率大于两侧的特点,灯光具有概率随辐射亮度增加而减小的特点。图7(b)给出了相邻区间概率变化绝对值随辐射亮度变化的曲线,背景地物相邻区间概率变化的绝对值较大,灯光相邻区间概率变化的绝对值较小。因此,将相邻区间概率变化绝对值趋近于零点的辐射亮度值设定为灯光和背景的阈值。

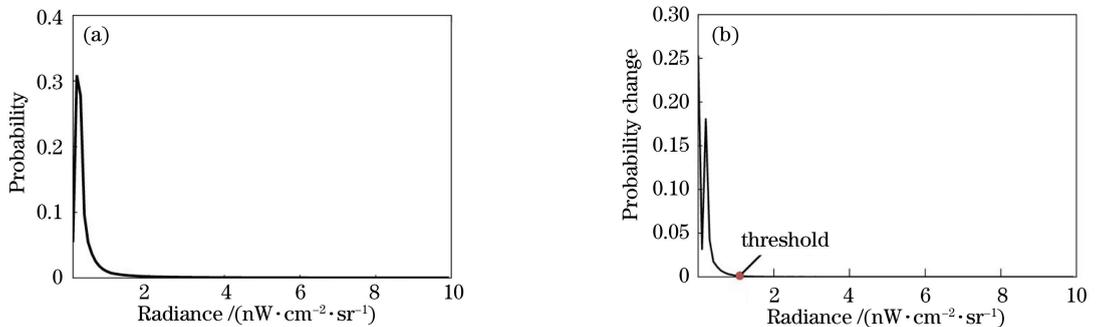


图7 (a) 2016年4月融合数据概率密度函数;(b) 2016年4月融合数据相邻区间概率变化(区间长度为 $0.1 \text{ nW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$)

Fig. 7 (a) Fusion data probability density function obtained in April 2016; (b) fusion data adjacent interval probability change in April 2016 (the interval length is $0.1 \text{ nW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$)

3 融合结果与验证

针对灯光数据概率密度函数分布的特点,对归一化后的辐射亮度进行对数变换,扩展低辐射亮度值,压缩高辐射亮度值。对数变换表示为

$$L_2 = c \cdot \log_{1+v}(1 + v \cdot L_1), \quad (3)$$

式中: L_1 为归一化后的辐射亮度值; L_2 为对数变换后的辐射亮度值; c 和 v 为实数。(3)式中添加

常数1,目的是保证对数变换后的辐射亮度值为正数,通过设定 c 和 v 的参数值,对较暗灯光的细节进行增强。将对数变换后的辐射亮度值分别赋予相应的R、G、B数值。图8给出了对海洋数据进行掩模处理后的中国中东部地区城市灯光的月合成图像。

对灯光融合产品数据覆盖率进行统计,2016年1月、4月、7月、10月的数据覆盖率分别为

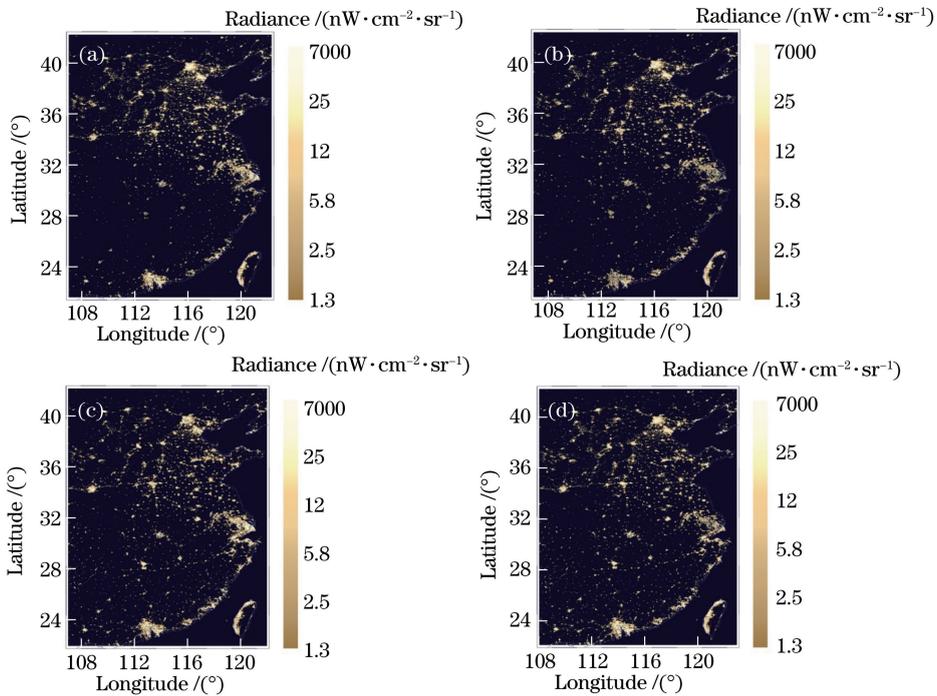


图 8 中国中东部地区城市灯光图像。(a) 2016 年 1 月;(b) 2016 年 4 月;(c) 2016 年 7 月;(d) 2016 年 10 月

Fig. 8 Images of city lights in mid-eastern China. (a) January 2016; (b) April 2016; (c) July 2016; (d) October 2016

99.904%、99.747%、99.942%、99.898%，无数据覆盖的区域在灯光图像上以背景形式表示。通过对 4 个月的覆盖率进行对比分析后可知，2016 年 4 月数据覆盖率比其他月份低。分析认为，导致有些区域无数据覆盖的主要原因是连续阴雨天气使该月的云层覆盖较多，满足融合条件的数据较少。

为了验证灯光产品的可靠性，将得到的灯光融合产品与 NOAA 灯光产品进行对比分析。NOAA 灯光产品辐射亮度值的时间平均是按月份和年度进行的，月合成产品没有去除火灾、渔船异常值，年合成产品去除了异常值和背景(非灯光)值。考虑到灯光分布可能存在季节性差异，采用与月合成产品进行对比验证的方式。由于 NOAA 产品的空间分辨率为 $15''$ ，在验证前要将两个产品进行数据匹配。生成的灯光产品的辐射亮度值与 NOAA 灯光产品辐射亮度值的散点图如图 9 所示，仅对辐射亮度值大于灯光和背景阈值的数据进行验证，由于 DNB 辐射动态范围较大，图 9 仅显示辐射亮度值小于 $50 \text{ nW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ 的数据。从图 9 中可以看出，所提算法得到的灯光辐射亮度值和 NOAA 灯光产品的辐射亮度值存在一定差异。对于经济快速发展的城市聚集区，所提算法得到的辐射亮度值比 NOAA 产品的辐射亮度值偏大。图 10 给出了 2016 年 1 月京津冀城市聚集区灯光的散点图，其中拟合

线的斜率为 1.29085，相关系数为 0.97，两者拟合线斜率较大的主要原因是所提算法利用卫星观测辐射公式对大气气溶胶透过率进行了订正。在辐射亮度值较低的暗灯光区域，此时灯光不属于城市聚集区，呈散点状分布，由于两个产品的空间分辨率不同，此时差异的主要原因是匹配验证误差。此外，两个产品在云层、月光、异常值等灯光融合算法处理上不同，这也是导致辐射亮度值差异的原因。在图 9 中，2016 年 1 月、4 月、7 月、10 月散点图的相关系数分别为 0.85、0.87、0.94、0.90，拟合线的斜率分别为 1.01616、0.893783、1.02170、0.929156。分析认为，两者的差异在一定的误差范围内。可见，所提供的灯光产品与国外业务产品具有可比性，可以验证该灯光融合算法的可靠性。

4 结 论

综合考虑云层、月光、太阳照射、闪电、火灾等因素对夜间城市灯光的影响，建立了一套城市灯光融合产品算法，该算法可对低质量数据和非灯光特征数据进行剔除和识别。基于该算法得到了 2016 年中国中东部地区不同月份城市灯光图像定量产品。将本算法得到的灯光产品与 NOAA 产品进行对比验证后可知，本算法得到的灯光产品与国外业务产品具有可比性，可以初步满足应用需求，为城市经济

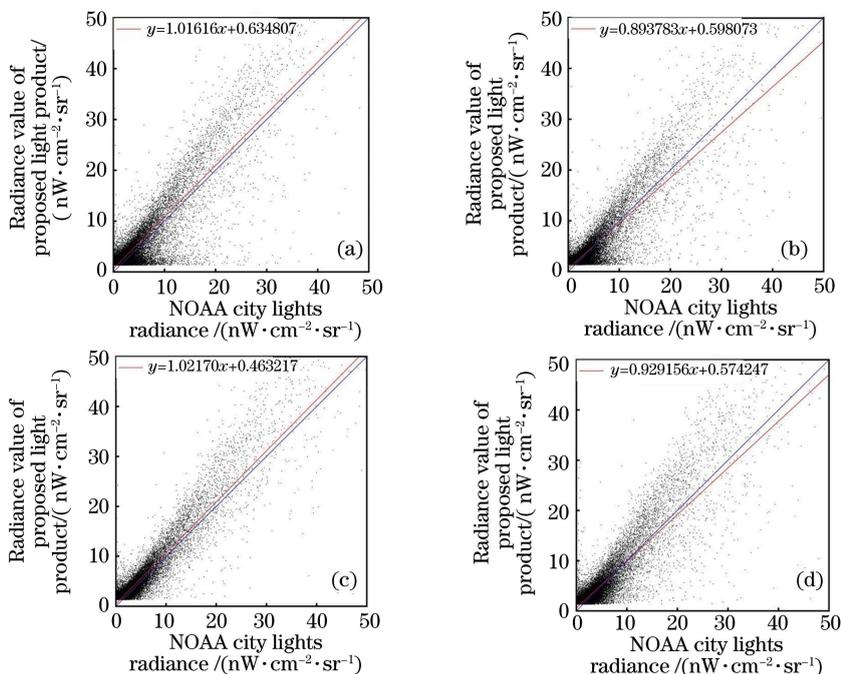


图9 所提灯光产品的辐射亮度值与 NOAA 灯光产品辐射亮度值的散点图(蓝线为 1:1 的线,红线为两者的线性拟合线)。

(a) 2016 年 1 月; (b) 2016 年 4 月; (c) 2016 年 7 月; (d) 2016 年 10 月

Fig. 9 Scatter plots of the radiance value of proposed light product and the NOAA light product (the blue line denotes 1:1 line and the red line denotes the linear fit line). (a) January 2016; (b) April 2016; (c) July 2016; (d) October 2016

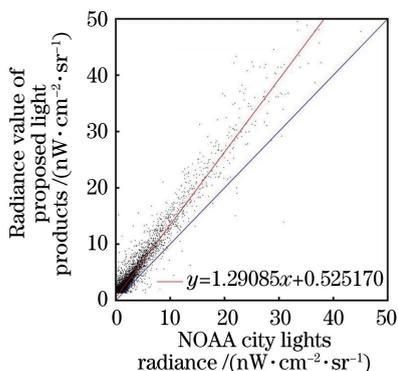


图 10 2016 年 1 月京津冀地区城市灯光散点图

(蓝线为 1:1 的线,红线为两者的线性拟合线)

Fig. 10 Scatter plot of the city lights of the Beijing-Tianjin-Hebei region in January 2016, where the blue line denotes 1:1 line and the red line denotes the linear fit line

分析、气溶胶反演等提供基础产品支持,也可为我国夜光卫星和微光通道的城市灯光算法提供算法可行性预研。该算法的灯光产品具有一定的应用潜力和价值,为发展我国自主合成的全球夜间城市灯光产品奠定了基础。

要特别提出的是,云层是影响城市灯光图像质量的重要因素,本研究没有利用 IICMO 产品,而是结合云层对灯光的影响效果,利用灯光模糊理论进

行云检测,通过将变异系数识别的云层与 IICMO 产品进行对比分析。该方法对于识别城市灯光的云层覆盖是有效可行的。

本研究目前仅得到了中国中东部地区城市灯光图像,后续需对算法进行进一步完善和区域扩充,从而得到更加稳定可靠的城市灯光产品。由结果分析可知:中国中东部的灯光分布存在季节性差异,探讨季节性差异原因也是未来深入研究的方向。

参 考 文 献

- [1] Xiang S M, Fan X W, He N, *et al.* Review on low light level remote sensing imaging technology [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(2): 020009.
向世明, 樊学武, 何娜, 等. 微光遥感成像技术研发动态评述[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(2): 020009.
- [2] Fang X. VIIRS daytime night band data application overview [J]. *Science and Technology Innovation Herald*, 2015(12): 42-43.
方荀. VIIRS 白天/夜晚波段数据应用概况[J]. *科技创新导报*, 2015(12): 42-43.
- [3] Li F, Wei A X, Mi X N, *et al.* An approach of GDP spatialization in Hebei province using NPP-VIIRS nighttime light data [J]. *Journal of Xinyang Normal*

- University (Natural Science Edition), 2016, 29(1): 152-156.
- 李峰, 卫爱霞, 米晓楠, 等. 基于 NPP-VIIRS 夜间灯光数据的河北省 GDP 空间化方法[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2016, 29(1): 152-156.
- [4] Zheng H, Zeng Y, Wang Y, *et al.* Urban building density estimation based on the VIIRS night-time satellite data—a case of Nanjing [J]. *Science Technology and Engineering*, 2014, 14(18): 68-75.
- 郑辉, 曾燕, 王勇, 等. 基于 VIIRS 夜间灯光数据的城市建筑密度估算——以南京主城区为例[J]. *科学技术与工程*, 2014, 14(18): 68-75.
- [5] Li X, Chen Z J, Wu J X, *et al.* Gridding methods of city permanent population based on night light data and spatial regression models [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2017, 19(10): 1298-1305.
- 李翔, 陈振杰, 吴洁璇, 等. 基于夜间灯光数据和空间回归模型的城市常住人口格网化方法研究[J]. *地球信息科学学报*, 2017, 19(10): 1298-1305.
- [6] Hu X H, Liu S T, Pan Z D, *et al.* Progress in spaceborne shimmer detector and data application[J]. *Chinese Journal of Optics*, 2015, 8(3): 350-359.
- 胡晓华, 刘松涛, 潘振东, 等. 星载微光探测仪器的发展及其数据应用[J]. *中国光学*, 2015, 8(3): 350-359.
- [7] Chen H L, Chen L, Hu X Q, *et al.* Effect of external stray light on low-light imager loaded in Fengyun-3 day/night orbit meteorological satellite [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(5): 050101.
- 陈海龙, 陈林, 胡秀清, 等. 外部杂散光对风云三号晨昏轨道气象卫星中微光成像仪的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(5): 050101.
- [8] Li H, Li P, Bai H. Principle and application of OLS VIIRS low light imaging[C]. 2009 Jiangsu Provinces and Anhui Province Atmospheric Exploration, Environmental Remote Sensing and Electronic Technology Symposium Album, 2009: 372-376.
- 李昊, 李萍, 白衡. OLS/VIIRS 微光成像原理和应用[C]. 2009 苏皖两省大气探测、环境遥感与电子技术学术研讨会专辑, 2009: 372-376.
- [9] Cao C Y, Shao X, Uprety S. Detecting light outages after severe storms using the S-NPP/VIIRS day/night band radiances[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2013, 10(6): 1582-1586.
- [10] Elvidge C D, Baugh K E, Zhizhin M, *et al.* Why VIIRS data are superior to DMSP for mapping nighttime lights[J]. *Proceedings of the Asia-Pacific Advanced Network*, 2013, 35: 62-69.
- [11] Baugh K, Hsu F C, Elvidge C D, *et al.* Nighttime lights compositing using the VIIRS day-night band: preliminary results [J]. *Proceedings of the Asia-Pacific Advanced Network*, 2013, 35: 70-86.
- [12] Elvidge C D, Baugh K, Zhizhin M, *et al.* VIIRS night-time lights[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2017, 38(21): 5860-5879.
- [13] Lee T E, Miller S D, Turk F J, *et al.* The NPOESS VIIRS day/night visible sensor[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2006, 87(2): 191-199.
- [14] Xia L, Mao K B, Sun Z W, *et al.* Method for detecting cloud at night from VIIRS data based on DNB[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2014, 26(3): 74-79.
- 夏浪, 毛克彪, 孙知文, 等. 基于 DNB 验证的 VIIRS 夜间云检测方法[J]. *国土资源遥感*, 2014, 26(3): 74-79.
- [15] Elvidge C D, Zhizhin M, Baugh K, *et al.* Automatic boat identification system for VIIRS low light imaging data [J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(3): 3020-3036.
- [16] Chen M, Hu S, Gao T C, *et al.* Study on the effect of inhomogeneous aerosol fields on radiative transfer process in near-infrared band[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(1): 0101003.
- 陈鸣, 胡帅, 高太长, 等. 气溶胶空间非均匀性对近红外辐射传输的影响分析[J]. *光学学报*, 2017, 37(1): 0101003.
- [17] Shen J, Cao N W. Inversion of tropospheric aerosol extinction coefficient profile by Mie-Raman scattering lidar[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(6): 0610003.
- 沈吉, 曹念文. 米-拉曼散射激光雷达反演对流层气溶胶消光系数廓线[J]. *中国激光*, 2017, 44(6): 0610003.
- [18] Johnson R S, Zhang J, Hyer E J, *et al.* Preliminary investigations toward nighttime aerosol optical depth retrievals from the VIIRS day/night band [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2013, 6(5): 1245-1255.
- [19] Yang M X. The coarse error eliminating in small sample space [J]. *Metrology and Measurement Technique*, 2005, 32(1): 27-28.
- 杨茂兴. 小样本容量测量数据中粗差的剔除[J]. *计量与测试技术*, 2005, 32(1): 27-28.