

引用格式: 曹子阳, 吴志峰, 米素娟, 等. DMSP/OLS 稳定夜间灯光影像在中国的分类校正方法[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(2): 246-257. [Cao Z Y, Wu Z F, Mi S J, et al. A method for classified correction of stable DMSP/OLS nighttime light imagery across China[J]. Journal of Geo-information Science, 2020, 22(2): 246-257.] DOI:10.12082/dqxxkx.2020.190253

DMSP/OLS 稳定夜间灯光影像在中国的分类校正方法

曹子阳^{1,2,3}, 吴志峰⁴, 米素娟^{1,2}, 阳 柯¹

1. 中国交通通信信息中心 交通运输遥感中心, 北京 100011; 2. 北京国交信通科技发展有限公司, 北京 100000;
3. 长安大学地质工程与测绘学院, 西安 710061; 4. 广州大学地理科学学院, 广州 510006

A Method for Classified Correction of Stable DMSP/OLS Nighttime Light Imagery Across China

CAO Ziyang^{1,2,3*}, WU Zhifeng⁴, MI Sujuan^{1,2}, YANG Ke¹

1. China Transport Telecommunications & Information Center, Beijing 100011, China; 2. China Transport Infocom Technologies Co., Ltd., Beijing 100000, China; 3. School of Geological and Surveying Engineering of Chang'an University, Xi'an 710061, China; 4. School of Geographical Sciences of Guangzhou University, Guangzhou 510006, China

Abstract: Long-time series stable DMSP/OLS nighttime light data lack comparability and include a lot of saturated pixels in the bright cores of urban areas. The two problems have limited applications of the dataset in spatial analysis and temporal comparison. To help address the two problems, this article developed a classified correction method for Stable Nighttime Light (SNL) imagery across China by using invariant regions for calibration. The SNL images are divided into saturated pixels and unsaturated pixels. For saturated pixels, five cities such as Beijing were selected as the invariant regions, and the radiance calibrated nighttime light images (RCNTL) without saturated pixels were selected as the reference. Based on the assumption that the correlation between unsaturated pixels of the invariant regions could also be applied to saturated pixels, the reference images were used to correct saturated pixels of the SNL images. Meanwhile, the saturation corrected saturated pixels were calibrated based on the intercalibration relationship between the different RCNTL images. For unsaturated pixels, 13 cities including Changsha were selected as the invariant regions. According to the overall time change trend of the sum of the unsaturated pixel values, the 13 SNL images were determined as the references, and other SNL images were intercalibrated based on the correlation between unsaturated pixels in the invariant regions. To validate the accuracy of the calibration results, a variety of intercalibration and saturation correction methods were adopted for comparison. The classified correction method proposed in this paper was found better for the calibration of F10, F12 and F14 satellite imagery than the other two intercalibration methods. The other two methods had better calibration results for F15 and F16 satellite imagery. The three methods generally achieve intercalibration of the dataset imagery and make the intercalibrated images comparable. Compared with the Vegetation Adjusted NTL Urban Index (VANUI), the saturation correction result of the classified correction method solves the problem that the saturated pixels concentrate in the central area of cities.

收稿日期: 2019-05-24; 修回日期: 2019-11-02.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC1405004); 国家重点研发计划项目(2017YFB0503804)。[**Foundation items:** National Key Research and Development Program of China, No.2017YFC1405004; National Key Research and Development Program of China, No.2017YFB0503804.]

作者简介: 曹子阳(1988—), 男, 山东济宁人, 博士, 工程师, 主要从事城市遥感、交通遥感应用研究。E-mail: caoziyang@cttic.cn

The result reduces the saturation of the pixels and is a closer fit to the RCNTL images. Besides, the corrected SNL images have relatively good correlations with GDP and power consumption values, and can reflect regional economic development differences more objectively.

Key words: DMSP/OLS; nighttime light; classified correction; saturation correction; intercalibration

***Corresponding author:** CAO Ziyang, E-mail: caoziyang@cttic.cn

摘要:长时间序列 DMSP/OLS 夜间稳定灯光影像数据集存在饱和像元大量积聚在城市中心区域及影像之间缺少可比性的问题,导致数据集在进行空间分析及时间对比研究时会受到限制。为解决上述 2 个问题,本文在现有研究的基础上提出了一种基于不变目标区域的中国稳定灯光影像分类校正方法。该方法对数据集中每一期中国区域稳定灯光影像进行了饱和及非饱和像元的分类。对饱和像元,选择北京等 5 个城市作为不变目标区域,选择不存在饱和像元的辐射校准的灯光影像作为参考,基于不变目标区域的非饱和像元之间的相关关系也同样适用于饱和像元的假设,对饱和像元进行了校正;同时,基于多期辐射校准的灯光影像之间存在的相互校准关系,对饱和校正后的饱和像元进行了相互校准。对于非饱和像元,选择了长沙等 13 个城市作为不变目标区域;根据稳定灯光影像中非饱和像元 DN 值总和随时间变化的总体趋势,确定了 13 期稳定灯光影像作为参考,其他多期影像基于不变目标区域中非饱和像元之间的相关关系进行了相互校准。为验证校正结果的准确性,多种相互校准和饱和校正方法被引入进行比较。本文提出的分类校正方法与另外 2 种相互校准方法相比对 F10、F12 和 F14 卫星影像校准效果更好,另外 2 种方法对 F15 和 F16 卫星影像的校准结果更好,3 种方法总体上都实现了对数据集影像的相互校准且使校正后的影像具有了可比性。与经过植被指数校准后的城市夜间灯光指数(The Vegetation Adjusted NTL Urban Index, VANUI)相比,分类校正方法解决了饱和像元聚集于城市中心区域的问题,减弱了像元饱和程度,校正结果更接近辐射校准的灯光影像。此外,在中国城市水平上,分类校正的稳定灯光影像与 GDP 和电力消耗值的相关关系与其他 2 种相互校准方法相比也是相对较好的,能更客观合理地反映区域经济发展的差异。

关键词:DMSP/OLS;夜间灯光;分类校正;饱和校正;相互校准

1 引言

国内外学者对夜间灯光影像的研究自 20 世纪 90 年代起大量出现。截至目前,夜间灯光影像的处理方法已逐渐完善,在不同领域中的应用也趋于成熟。总体上夜间灯光遥感的研究主要集中在城镇化监测与评估^[1-3]、人口密度估算^[4-6]、电力与能源消耗^[7-9]、疾病与灾害评估^[10-12]、经济活动评估^[13-15]等方面。但是,DMSP/OLS 稳定灯光影像之间缺少可比性^[1]以及影像中存在像元饱和现象的问题^[16]限制了影像应用的准确性。

由于稳定灯光影像在获取时缺少星上校准,造成同一卫星获取的不同年份影像及不同卫星获取的相同年份影像的像元 DN 值随时间变化的趋势不一致且波动很大,因此影像在进行长时间轴研究时无法进行相互比较^[17-18]。针对上述问题很多学者提出了不同的解决方案,如 Elvidge 等^[16]提出了一种基于不变目标区域的全球影像相互校准方法,选取意大利西西里岛被作不变目标区域,选取 F12 卫星传感器获取的 1999 年 DMSP/OLS 稳定灯光影像作参考影像,利用不变目标区域之间的相关关系建立二次校正方程对 1994—2008 年的 DMSP/OLS 稳定灯

光影像进行相互校准,进而利用校准后的影像研究评估了全球范围内的天然气燃烧量;Liu 等^[19]利用相似方法提出了一种中国区域 DMSP/OLS 稳定灯光影像相互校准方法,利用校正后的稳定灯光影像进行了城镇用地的时空动态研究。之后,又有很多学者对常用的基于不变目标区域的相互校准方法进行了改进,如 Zhang 等^[20]提出利用影像之间像元 DN 值对应关系中山脊线上的数值相关性建立校准模型以解决全球稳定灯光影像数据集的时间趋势不一致;Li 等^[21]建立了一种分步校正方法来获取在时间趋势上更加一致的稳定灯光影像数据集。

稳定灯光影像像元 DN 值是 6-bit 量化,直接决定了 DN 值范围是 0~63,造成了影像中很多区域特别是城市中心区域 DN 值到达 63 以后就不再上升达到饱和状态^[1]。为了缓解像元饱和对影像应用的限制,很多学者提出不同的解决方案。Letu 等^[22]利用不存在饱和像元的辐射校准的灯光影像对稳定灯光影像进行了饱和校正。Zhang 等^[23]和 Zhuo 等^[24]根据稳定灯光影像与不同植被指数之间的负相关关系分别提出了 Vegetation Adjusted NTL Urban Index (VANUI) 和 Enhanced Vegetation Index (EVI)-Adjusted NTL Index (EANTLI) 并以此来改善

DMSP/OLS 夜间灯光影像中的像元饱和问题并突出展现更多城市内部细节特征。此外,考虑到城市结构特征与由多种类型的路网数据和 POI(Point of Interest)数据组成的矢量数据集之间存在正相关关系,Zhen 等^[25]提出用矢量数据集作为辅助参数来校正稳定灯光影像的饱和像元。

上述各种方法,无论是相互校准方法还是饱和校正方法,多数是为了单独解决稳定灯光影像间缺少可比性问题或者单独解决稳定灯光影像像元饱和问题,能够同时实现长时间序列 DMSP/OLS 稳定灯光影像数据集影像间相互校准和影像饱和校正的方法较少。近年来,Wu 等^[26]提出了一种基于归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)的稳定灯光影像数据集影像饱和校正新方法,确定了不同年份多期稳定灯光影像作为基准,利用其他影像与基准影像之间的相关关系进行相互校准,再利用 NDVI 数据建立 NDVI 足迹指数(Trace of NDVI, TNDVI)对相互校准后的稳定灯光影像进行饱和校正。虽然上述方法解决了影像数据集中影像之间不可比问题,且削弱了影像像元 DN 值饱和程度,但是这种方法的饱和校正完全依赖 NDVI 数据,NDVI 数据准确性及不同时间 NDVI 数据之间是否可比的问题会直接影响稳定灯光影像的校正结果。因此为了避免辅助数据的影响,本文提出一种稳定灯光影像分类校正方法,利用不存在像元饱和问题的辐射校准的灯光影像对提取出来的每一期中国区域稳定灯光影像的饱和像元进行饱和校正和相互校准,利用稳定灯光影像中非饱和像元之间的相关关系进行非饱和像元的相互校准。本方法可以有效解决 DMSP/OLS 稳定灯光影像之间不可比和影像像元饱和的问题。

2 数据来源

2.1 夜间灯光影像

DMSP/OLS 夜间灯光影像是由美国国家海洋与大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)所属的美国国家地球物理数据中心(National Geophysical Data Center, NGDC)发布。所有影像都是基于一个卫星年内所有无云覆盖且平滑后的每日观测得到影像数据复合而成。如果同一年中有 2 个卫星同时收集数据,就会分别生成同一年份的 2 期复合影像。影像产品空间分辨

率为 30 弧秒(在赤道道附近约为 1 km,北纬 40°处约为 0.8 km)。影像覆盖范围为经度 $-180^{\circ}\sim 180^{\circ}$,纬度 $-65^{\circ}\sim 75^{\circ}$ (基本覆盖了全球存在人类活动的所有区域)。

DMSP/OLS 夜间灯光影像产品主要有 2 种:第四版 DNSP/OLS 夜间灯光时间序列产品(Version 4 DMSP/OLS Nighttime Lights Time Series)和全球辐射校准的夜间灯光产品(Global Radiance Calibrated Nighttime Lights)。本文选用了由 6 个不同 DMSP 卫星获取的自 1992—2013 年共 22 年 34 期夜间灯光时间序列产品中的稳定灯光影像及全部 8 期全球辐射校准的夜间灯光产品影像,与稳定灯光影像相比辐射校准的夜间灯光影像不存在像元 DN 值饱和问题。

对所选用的 DMSP/OLS 灯光影像(包括稳定灯光影像和辐射校准的灯光影像)进行中国区域的提取,同时为避免影像网格形变带来的影响以及便于计算影像中灯光像元面积,将所有影像的投影坐标系都转换为兰伯特等面积投影坐标系并重采样为 1 km² 网格。

2.2 其他数据

本文所选用的归一化差分植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)影像是 Terra MODIS 16 d 复合的 1 km 分辨率 MOD13A2 数据产品,该影像获取自美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)所属的戈达德航天中心(Goddard Space Flight Center, GSFC)网站。本文选用了 2006 年的 NDVI 数据。

本文使用的中国县级和地市级行政区划矢量数据来自国家基础地理信息中心的全国 1:400 万数据库。GDP、电力消耗值等社会经济统计数据均来源于中国国家统计局发布的 1992—2013 年的《中国统计年鉴》^[27]、《中国城市统计年鉴》^[28]和 2000—2013 年的《中国区域经济统计年鉴》^[29]。

3 校正方法

早在 20 世纪 90 年代,Hall 等^[30]和 Lenney 等^[31]在研究中就提出连续多时相遥感影像中存在相对稳定的像元,这些像元可提取作为不变目标区域(其在多时相遥感影像之间存在一种特定的转换关系)。Elvidge 等^[10]的研究证实了基于不变目标区域

的研究方法可以进行长时间序列 DMSP/OLS 稳定灯光数据集中影像间的相互校准。稳定灯光影像中的饱和像元是对实际灯光强度的低估,不变目标区域中若存在饱和像元,在与辐射校准的灯光影像建立相关关系时会造成低估,影响校正精度。本文提出一种基于不变目标区域的稳定灯光影像分类校正方法,将稳定灯光影像分成饱和像元和非饱和像元 2 类后再进行校正,避免了饱和像元影响非饱和像元相互校准精度的问题。分类校正方法共有 4 步:① 饱和像元和非饱和像元分类;② 选择饱和及非饱和像元的不变目标区域;③ 饱和像元的饱和校正和相互校准;④ 非饱和像元的相互校准。

3.1 稳定灯光影像的饱和及非饱和像元分类

2017 年 Wang 等^[32]研究比较了 F162006 稳定灯光影像和 F162006 辐射校准的灯光影像中不同 DN 值的像元按照数量分布的总体趋势。稳定灯光影像中,当像元 DN 值大于 50,尤其是达到 55 以上时,与整体下降趋势相反,像元数量开始急速上升;而辐射校准的灯光影像中像元值的大小和数量显示出良好的负相关关系。最后确定,当像元 DN 值大于 55 时,稳定灯光影像像元处在严重饱和状态。本研究采纳了 Wang 等^[32]的研究结果,选择像元 DN 值等于 55 作为区分稳定灯光影像饱和及非饱和像元的阈值。

3.2 选择的饱和及非饱和像元的不变目标区域

分类校正方法把稳定灯光影像分为饱和及非饱和像元 2 类,2 类像元的表征意义各不同。非饱和像元可以反映正常的夜间灯光强度,只需要进行影像之间的相互校准解决影像间不可以相互比较的问题即可。饱和像元大量集中在城市中心区域,低估了真实的夜间灯光强度,需要先进行饱和校正解决像元饱和问题,再对饱和校正后的饱和像元进行相互校准。2 类像元的校正方法不同,因此选择不不变目标区域的标准也不同。

非饱和像元的不变目标区域选择。对 1992—2013 年共 34 期稳定灯光影像进行不同空间尺度上的回归分析,发现在城市、省区、国家尺度上,非饱和像元 DN 值总和都呈现出时间变化趋势且符合指数模型。在城市层面,首先选出拟合关系相对较好(相关系统 $R^2 > 0.9$)的多个城市(表 1)作为备选;然后以保证每一期不变目标区域的像元值范围尽量大为原则,对表 1 中的城市进行筛选,将所有 34 期影像中像元 DN 值最大值小于 55 的多于 5 期且像元 DN 值最大值小于 50 的多于 1 期的城市剔除;最后确定湖南省长沙市、四川省成都市、新疆维吾尔自治区石河子市、青海省西宁市、浙江省杭州市和宁波市、山东省威海市、宁夏回族自治区银川市、广东省惠州市、甘肃省嘉峪关市和酒泉市、福建省厦门市、江苏省苏州市成为一个整体作为非饱和像元的不变目标区域。

饱和像元的不变目标区域选择。对于饱和像

表 1 中国稳定灯光影像非饱和像元的 DN 值总和与年份的指数相关系数大于 0.9 的城市

Tab. 1 Chinese cities with the index correlation coefficient between the total DN value of unsaturated pixels in the SNL images and years over 0.9

城市	R^2	城市	R^2	城市	R^2	城市	R^2
拉萨市	0.9673	德宏州	0.9347	宁波市	0.9185	台州市	0.9103
延安市	0.9580	黄山市	0.9335	迪庆州	0.9178	梧州市	0.9091
克孜州	0.9541	甘南州	0.9309	威海市	0.9176	苏州市	0.9089
凉山州	0.9538	临沧市	0.9300	绍兴市	0.9171	普洱市	0.9088
怒江州	0.9503	遂宁市	0.9298	重庆市	0.9169	贺州市	0.9080
舟山市	0.9469	海南州	0.9280	银川市	0.9162	南充市	0.9078
金华市	0.9434	杭州市	0.9279	资阳市	0.9157	抚州市	0.9071
长沙市	0.9422	和田地区	0.9271	固原市	0.9147	上饶市	0.9068
喀什地区	0.9422	保山市	0.9261	中卫市	0.9141	西双版纳州	0.9068
成都市	0.9392	博尔塔拉州	0.9246	铜仁地区	0.9124	赣州市	0.9060
文山州	0.9385	昌都地区	0.9242	惠州市	0.9119	嘉兴市	0.9043
石河子市	0.9371	丽水市	0.9220	嘉峪关市	0.9113	河源市	0.9017
西宁市	0.9349	锡林郭勒盟	0.9194	永州市	0.9111	桂林市	0.9016
甘孜州	0.9348	丽江市	0.9190	厦门市	0.9109	酒泉市	0.9010

元,北京市、上海市、天津市、广州市和深圳市被选为不变目标区域。选择原因有2个:①在每期稳定灯光影像中,这5个城市中心都包含很多饱和像元,是中国饱和区域的代表,同时这些城市也是过去30年来中国最发达地区的代表;②这5个城市每一期辐射校准的影灯光像不仅具有很高的像元DN值,而且还可以提供从城市中心高DN值到郊区低DN值的很大的DN值范围。

3.3 饱和像元的饱和校正和相互校准

本研究选择了所有8期辐射校准的灯光影像作为参考影像。每期辐射校准的灯光影像在获取时都混合了稳定灯光影像^[33]。如果辐射校准的灯光影像混合的稳定灯光影像和待校正稳定灯光影像是获取自同一卫星,则确定为这些待校正稳定灯光影像的参考影像。综上,可以确定每期待校正稳定灯光影像的参考影像(表2)。

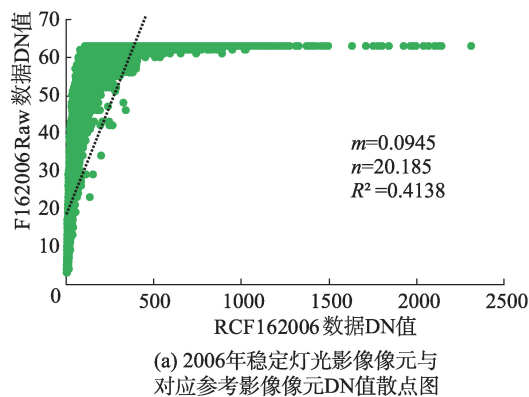
本研究选择饱和像元不变目标区域的F162006

表2 稳定灯光影像对应的参考影像

Tab. 2 Representative reference images for raw SNL images

辐射校准的灯光影像	混合的稳定灯光影像	待校正稳定灯光影像
F12_1996	F12_1997	F10_1992-1994, F12_1994-1999
F12_1999	F14_1999	F14_1997-2003
F12-F15_2000	F15_2000	
F14-F15_2003	F15_2003	F15_2000-2007 ^a
F14_2004	F15_2004	
F16_2006	F16_2006	F16_2004-2009
F16_2010	F18_2010	F18_2010-2013 ^b
F16_2010-2011	F18_2010	

注:^a表示F15卫星获取的稳定灯光影像对应的参考影像有3期;^b表示F18卫星获取的稳定灯光影像对应的参考影像有2期。



稳定灯光影像和F16_2006辐射校的灯光影像来分析2种灯光影像像元DN值之间的相关关系(图1)。在图1(a)中,稳定灯光影像的像元DN值达到63后就不再变化,而对应的辐射校准的灯光影像中像元DN值仍然逐渐增加,说明2种灯光影像像元DN值之间在整体上并不存在相关关系。图1(b)是稳定灯光影像剔除了饱和像元(DN值大于55)后与剔除了对应像元的辐射校准的灯光影像之间的像元DN值散点图,看图中数据点的分布趋势可以判断两者之间是存在某种相关关系的。假设这种相关关系同样适用于稳定灯光影像饱和像元及其对应辐射校准后的灯光影像像元,就可以利用这种相关关系及辐射校准的灯光影像像元DN值反向校正稳定灯光影像饱和像元。

经过比较分析,利用两2种灯光影像像元DN值间的幂函数相关关系建立了稳定灯光影像饱和像元的饱和校正方程(式(1))。每一期待校正稳定灯光影像的校正参数见表3。

$$DN_c = d \times DN_{RC}^e \quad (1)$$

式中: DN_c 表示的是校正后稳定灯光影像的像元DN值; DN_{RC} 表示作为参考影像的辐射校准的灯光影像的像元DN值; d 、 e 是不同的回归参数。

由于辐射校准的影像之间同样缺乏可比性,饱和校正后的稳定灯光影像饱和像元仍然无法相互比较,需要进一步进行饱和校正后的饱和像元的相互校准。8期辐射校准的灯光影像之间的相互校准系数可以从NGDC网站获得。在确定为参考影像的F162006辐射校正的灯光像与其他影像之间建立线性方程(式(2))。线性模型的系数列于表4中。

$$DN_{ICSC} = C_1 \times DN_{RC} + C_0 \quad (2)$$

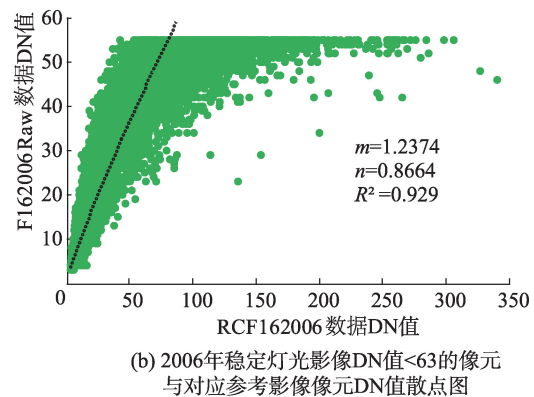


图1 2006年稳定灯光影像和参考影像像元DN值散点分布对比

Fig. 1 Comparison of scatter distribution of DN values between SNL images and reference images in 2006

表3 每一期稳定灯光影像饱和像元的校正模型参数

Tab. 3 Calibration model coefficients for saturated pixels of each stable nighttime light image

稳定灯光影像	d	e	R^2	稳定灯光影像	d	e	R^2
F101992	1.6058	0.7209	0.8261	F152001	1.7151	0.6638	0.8790
F101993	1.4223	0.7706	0.8892	F152002	1.6428	0.7099	0.8848
F101994	1.2326	0.8284	0.8861	F152003	0.9146	0.8068	0.9204
F121994	1.5814	0.8405	0.8629	F152004	0.8386	0.8766	0.9392
F121995	1.3788	0.8840	0.9129	F152005	0.9129	0.8569	0.9092
F121996	1.2844	0.8915	0.9372	F152006	0.9378	0.8610	0.9028
F121997	1.2981	0.9312	0.9462	F152007	1.1294	0.8048	0.8898
F121998	1.4016	0.9209	0.9180	F162004	1.2520	0.8496	0.9036
F121999	1.3058	0.9414	0.8496	F162005	1.1273	0.8424	0.9204
F141997	1.2187	0.7903	0.8974	F162006	1.2374	0.8664	0.9290
F141998	1.2622	0.7917	0.9084	F162007	1.3602	0.8881	0.9109
F141999	1.0184	0.8740	0.9254	F162008	1.3228	0.8969	0.8708
F142000	1.1412	0.8477	0.9055	F162009	1.8805	0.7539	0.8342
F142001	1.3947	0.8358	0.8642	F182010	1.9359	0.8480	0.8960
F142002	1.1143	0.9249	0.8493	F182011	1.3247	0.9173	0.8207
F142003	1.1901	0.9357	0.8088	F182012	1.9522	0.8100	0.8483
F152000	1.7378	0.6493	0.8707	F182013	1.8153	0.8430	0.7392

表4 辐射校准的灯光影像之间的相互校准参数

Tab. 4 Coefficients adopted for intercalibration of RC

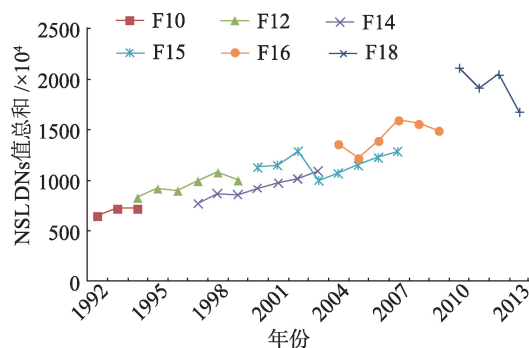
NTL dataset			
辐射校准的灯光影像	C_0	C_1	R^2
F12_1996	4.336	0.915	0.971
F12_1999	1.423	0.780	0.980
F12-F15_2000	3.658	0.710	0.980
F14-F15_2002	3.736	0.797	0.980
F14_2004	1.062	0.761	0.984
F16_2006	0.000	1.000	1.000
F16_2010	2.196	1.195	0.981
F16_2010-2011	-1.987	1.246	0.981

式中: DN_{rc} 是相互校准后的辐射校准的灯光影像像元 DN 值; DN_{rc} 是辐射校准的灯光影像像元 DN 值; C_0 和 C_1 是模型参数。

辐射校准的灯光影像之间的线性关系也可应用于饱和和校正后的稳定灯光影像。基于表4中的相互校准系数, 可以对饱和和校正后的稳定灯光影像饱和像元进行相互校准。

3.4 非饱和像元的相互校准

图2展示了DMSP/OLS稳定灯光数据集中不同卫星获取影像DN值 ≤ 55 的像元DN值总和, 总体上DN值总和随着时间的推移而增加。在所有

图2 不同卫星稳定灯光影像中的DN值 ≤ 55 的亮像元DN值总和Fig. 2 Sum of the DN values of bright pixels with DN value ≤ 55 in SNL images obtained from different satellites

34期影像中, 有13期与整体增长趋势一致, 分别是F101992、F101993、F121994、F121995、F121997、F121998、F152000、F152001、F152002、F162004、F162007、F182011和F182012稳定灯光影像。因此, 选择这13期影像作为非饱和像元相互校准的参考。基于参考影像, 本研究提出了一种改进的相互校准方法, 包括: 同一卫星获取的不连续影像相互校准以及卫星影像被整体低估的相互校准。

同一卫星获取的不连续影像相互校准。如果同一卫星获取的影像中某一年影像DN值总和大于

后一年影像DN值总和或小于前一年影像DN总和,就被定义为不连续影像。按照上述定义, F101994、F121996、F121999、F141998、F162005、F162008、F162009、F182010和F182013稳定灯光影像确定为不连续影像。另外,尽管F162006稳定灯光影像不符合不连续影像的定义,但其DN值总和与参考影像F162004的DN值总和基本相同,并且没有显示出明显的增长趋势,因此在本研究中将F162006影像也归类为不连续影像(不符合定义又被归类为不连续影像的只有F162006稳定灯光影像)。每一期不连续影像都选择相邻年份参考影像作为相互校准参考,如果前一年和后一年影像都是参考影像,则选择前一年影像作参考。利用不连续影像和参考影像中不变目标区域非饱和像元DN值之间的相关关系建立二阶回归模型(式(3))。表5列出模型的相关系数。

$$DNc = a \times DN^2 + b \times DN + c \quad (3)$$

式中: DN 表示待校正稳定灯光影像像元 DN 值; DNc 表示校正后的稳定灯光影像像元 DN 值; a 、 b 、 c 表示不同的回归参数。为保证稳定灯光影像中的无灯光值区域(DN 值=0)在校正前后保持一致, DN 值等于0的像元不代入式(3)计算。

卫星影像被整体低估的相互校准。图3显示F14卫星获取的所有影像和F15卫星获取的2003—2007年的影像像元DN值总和因系统性原因被整体低估。这些影像的像元DN值总和明显小于其他卫星获取的同一年影像像元DN值总和。F14和

F15卫星具有部分相同年份(2000、2001、2002和2003年)影像,并且F152000、F152001和F152002稳定灯光影像是参考影像。因此,利用F14和F15中重叠年份影像非饱和像元DN值之间的二阶回归关系(图3(a))建立F14卫星的相互准模型。为了修正F15影像中像元DN值总和的整体被低估,利用F152002和F152003稳定灯光影像不变目标区域非饱和像元DN值之间的相关关系建立校准F15卫星影像整体被低估的二阶回归模型(图3(b))。

最后,把原始稳定灯光影像饱和及非饱和像元分别替换为饱和校正和相互校准后的饱和像元以及相互校准后的非饱和像元就得到分类校正后的稳定灯光影像。

表5 不连续稳定灯光影像的非饱和像元相互校准系数

Tab. 5 Coefficients adopted for intercalibration of unsaturated pixels in discontinuous images

不连续稳定 灯光影像	a	b	c	R^2
F101994	0.000 10	0.9158	0.7429	0.9456
F121996	-0.002 40	1.1846	-0.6158	0.9481
F121999	-0.000 10	0.8944	0.8090	0.9299
F141998	-0.000 60	0.9030	0.5025	0.9026
F162005	-0.003 50	1.1887	0.0175	0.9198
F162006	-0.005 20	1.3614	-1.1588	0.9671
F162008	-0.000 08	0.9654	0.3562	0.9698
F162009	-0.006 60	1.3758	-1.7220	0.8883
F182010	-0.000 09	0.9353	-0.4345	0.8884
F182013	-0.006 40	1.1823	-0.0691	0.8417

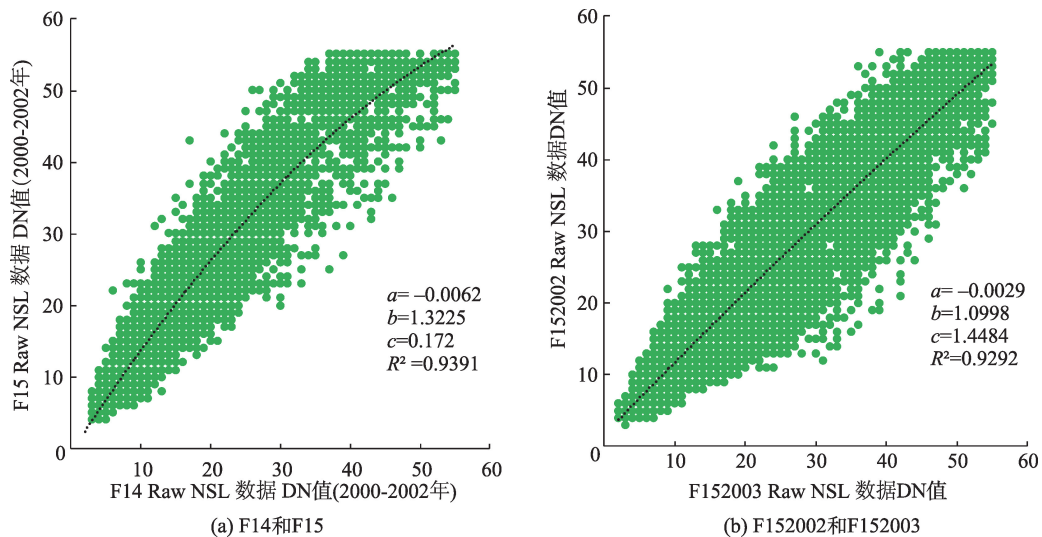


图3 稳定灯光影像非饱和像元之间的相关关系

Fig. 3 Relationship (and coefficients) of unsaturated pixel DN values between NSL images

4 结果与讨论

因为分类校正方法中饱和和非饱和像元进行相互校准的参考影像之间都是可以相互比较的,所以分类校正后的稳定灯光影像具有了可比性。为进一步检验分类校正方法的相互校准和饱和校正效果,本研究引入其他相互校准和饱和校正方法对比分析,同时利用社会经济数据(GDP和电力消耗)与灯光数据之间的相关关系对校正结果进行分析评价。

4.1 稳定灯光影像的相互校准结果评价

相互校准可以有效减少不同卫星传感器获取同一年份稳定灯光影像之间的差异并且可以使相同传感器获取影像之间的变化更稳定。为了检验分类校正方法的相互校准效果,本文借鉴 Wu 等^[34]提出的归一化差异灯光指数(Normalized Difference Light Index, NDLI)来评价不同卫星传感器获取同一年稳定灯光影像像元 DN 值总和的差异水平,进而可以检验和评价相互校准效果。NDLI 的计算公式如式(4):

$$NDLI = |TDN_1 - TDN_2| / |TDN_1 + TDN_2| \quad (4)$$

式中: TDN_1 和 TDN_2 分别表示不同卫星传感器获取 2 期同一年份稳定灯光影像像元 DN 值总和。NDLI 值越小, 2 期稳定灯光影像差异越小, 相互校准效果越好。

利用式(4)计算出校正前后每一期稳定灯光影像的 TDN 以及校正前后不同卫星传感器获取同一年份稳定灯光影像的 NDLI(图 4)。

从图 4 可知, 除 1994 年和 2003 年外, 分类校正的不同卫星传感器获取同一年稳定灯光影像的 NDLI 值都较校正前小, 说明稳定灯光影像经过校正以后, 绝大多数同一年的两期稳定灯光影像像元

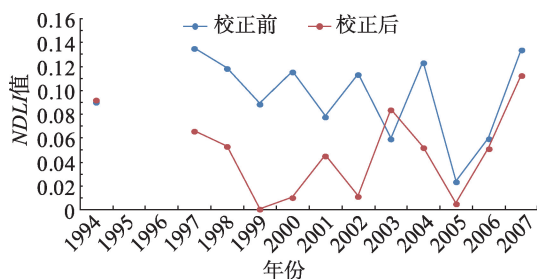


图 4 分类校正前后的不同卫星传感器获取的同一年份的稳定灯光影像的 NDLI 值

Fig. 4 NDLI values of the stable nighttime light image of the same year obtained by different satellites before and after the classified correction

DN 值总和的差异都缩小了, 进而可以说明本文提出的分类校正方法的相互校准效果除了对 1994 年和 2003 年不理想外, 其他年份均取得了比较好的校准效果。综上可以认为分类校正方法对稳定灯光影像的相互校准是有效的。

为进一步评价分类校正的稳定灯光影像数据集相互校准结果, 引入 Elvidge 等^[35]和 Zhang 等^[20]研究结果进行像元 DN 值时间变化趋势比较分析(图 5)。

综合分析图 5 中的 4 幅图像, 本研究的分类校正结果和其他学者提出的 2 种相互校准方法的校准结果的像元 DN 值总和和时间变化趋势都比原始稳定灯光影像更稳定且上升趋势更明显。分类校正方法对 F10、F12 和 F14 卫星获取影像具有更好的相互校准结果。另外 2 种方法在 F15 和 F16 卫星获取影像的相互校准方面具有更好的结果。这 3 种方法对于 F18 卫星获取影像的相互校准都不理想, 对于分类校正方法, 原因是相互校准结果受饱和像元的饱和校正准确性的影响; 对于其他 2 个方法, 使用一个特定年份稳定灯光影像对其他影像进行相互校准, 二者间相隔年份越长, 校准结果误差就越大。

4.2 稳定灯光影像的饱和校正结果评价

为了检验分类校正方法饱和校正效果, 本研究将 2006 年的分类校正结果与同一年原始稳定灯光影像、VANUI 指数和辐射校准的灯光影像进行了直接比较(图 6)。VANUI 指数是 Zhang 等^[23]基于 NDVI 指数和灯光强度间的负相关关系提出城市灯光指数, 具体计算公式见式(5)。从图 6 可看出, 原始稳定灯光影像城市中心区域聚集了大量饱和像元, VANUI 指数有效的展示出城市内部结构差异但并没有解决城市中心像元的饱和问题, 分类校正的稳定灯光影像像元饱和现象得到了明显改善, 并且与辐射校准的灯光影像的城市内部结构最为匹配。因此, 可以认为本文提出的分类校正方法可以缓解原始稳定灯光影像像元饱和程度。

$$VANUI = (1 - NDVI) \times DN_{NSL} \quad (5)$$

式中: VANUI 是经过植被指数校准后的城市夜间灯光指数; NDVI 是归一化植被指数; DN_{NSL} 是稳定灯光影像的像元 DN 值。

为了进一步检验分类校正方法的饱和校正效果, 本研究随机选择了京津塘地区一条纬度横断面进行原始稳定灯光影像、分类校正的稳定灯光影像、VANUI 指数和辐射校准的灯光影像的数值比较。为了方便相互比较, 利用纬度横断面上每个影像

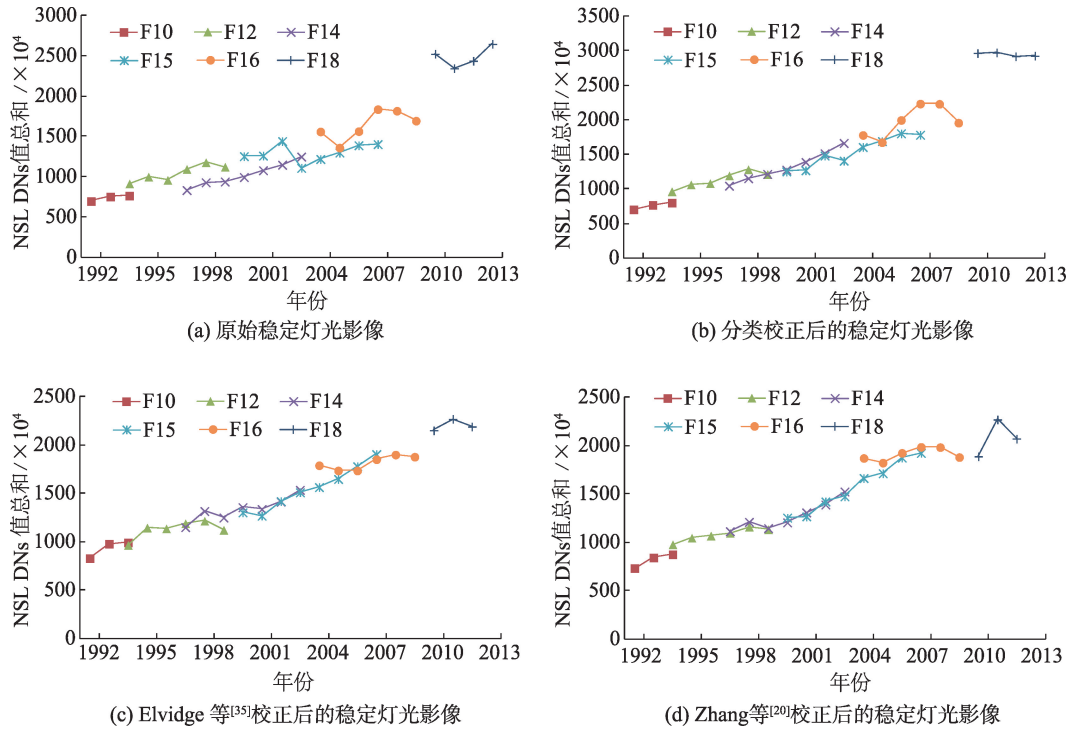


图5 不同方法校正后的不同卫星获取的稳定灯光影像像元DN值总和

Fig. 5 Sum of bright pixel values obtained from different satellites after correction by different methods

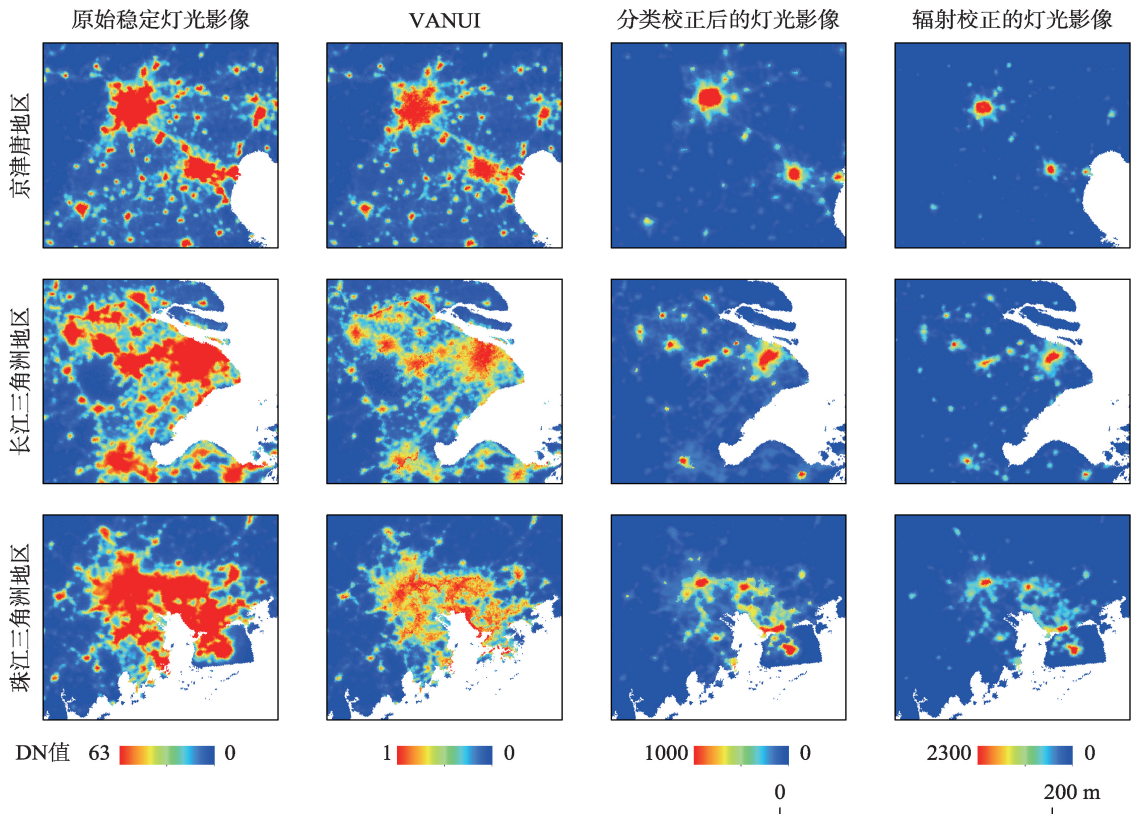


图6 2006年多个中国城市群地区的不同灯光影像对比

Fig. 6 Comparison of different types of NTL images for some Chinese urban agglomerations in 2006

数据的最大值对4种数据进行了归一化处理(图7)。从图7可看出,原始稳定灯光影像中心城区存在大量饱和像元,分类校正的稳定灯光影像和VANUI指数均降低了城市区域的像元饱和程度。但是相比较而言,VANUI指数仍然高估了城市中心区外围的灯光强度,对这些区域的饱和校正效果不理想,而分类校正的稳定灯光影像对城市中心区外围区域的饱和校正效果明显更好。此外,在同一纬度截面上,分类校正的稳定灯光影像像元DN值曲线形状与不存在饱和像元的辐射校准的灯光影像像元DN值曲线形状高度相似。因此,可以认为本文提出的分类校正方法能够有效缓解原始稳定灯光影

像中城市中心及中心外围区域的像元饱和程度。

4.3 灯光影像与社会经济数据的拟合关系比较

夜间灯光影像能够直观地反映区域社会发展水平,本研究在中国城市水平上进行了灯光影像与社会经济数据(GDP和电力消耗)线性相关关系(R^2)的对比分析,因城市电力消耗只能获取1999年后的数据,电力消耗值与灯光影像的对比分析以1999年为起始时间点。原始稳定灯光影像、Zhang等^[20]及Elvidge等^[35]的稳定灯光影像校正结果被引入进行比较分析(图8)。从图8中看出,无论是GDP还是电力消耗值,分类校正的稳定灯光数据集

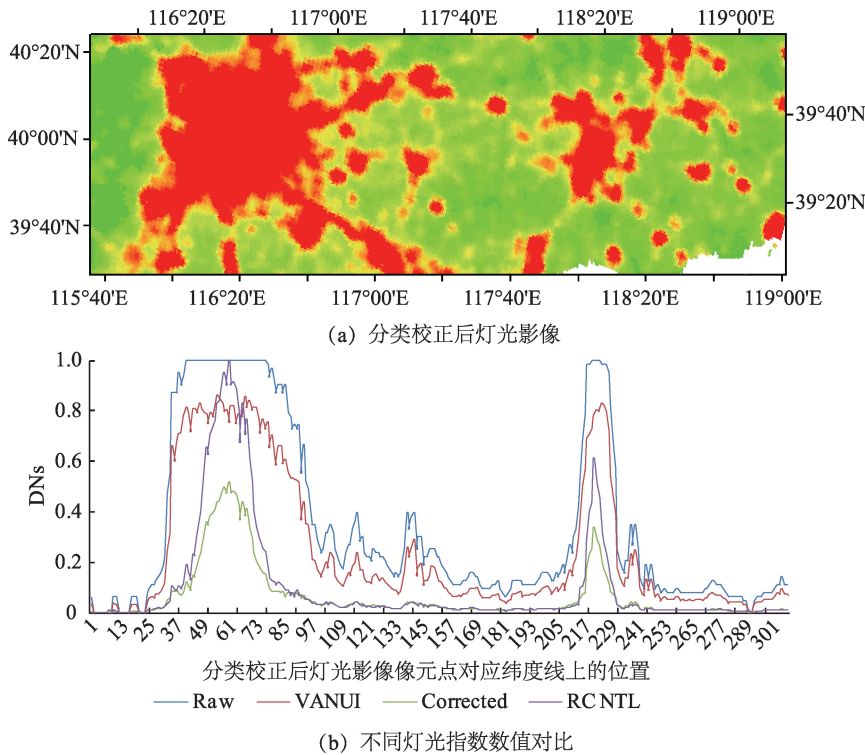


图7 2006年京津唐区域某一纬度截面上的不同灯光指数数值

Fig. 7 Latitudinal transects of different types of NTL index for Jing-Jin-Tang urban agglomerations in 2006

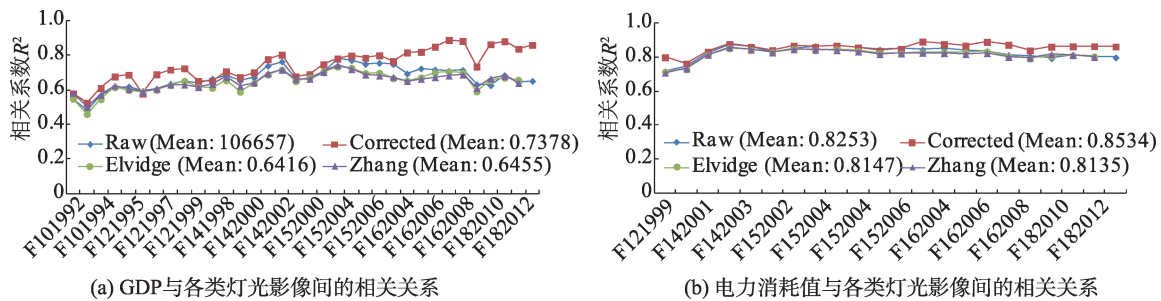


图8 1999—2013年中国城市水平的4种灯光影像分别与GDP和电力消耗值的相关关系

Fig. 8 Correlation of GDP and electricity consumption with 4 types of NTL images for Chinese cities from 1999 to 2013

与这2种社会经济指标的相关系数相对其他3种灯光数据是最高的。分类校正的稳定灯光影像数据集与GDP的平均相关系数(R^2)为0.7378,高于Zhang等^[20](平均 $R^2=0.6455$)和Elvidge等^[35](平均 $R^2=0.6416$)(图8(a));与电力消耗值的相关关系,分类校正结果和Zhang等^[20]、Elvidge等^[35]结果的平均相关系数 R^2 分别为0.8534、0.8135和0.8147,分类校正结果也是三者中最高的(图8(b))。综合上述分析可以说明本文提出的分类校正方法可以为研究社会经济活动做出更多贡献。

5 结论

为了解决稳定灯光影像中存在饱和像元以及影像之间缺乏可比性的问题,本文提出了一种基于不变目标区域的稳定灯光影像分类校正方法,将稳定灯光影像分成饱和像元和非饱和像元2类并分别进行了校正。

(1)分类校正方法主要包括稳定灯光影像饱和及非饱和像元分类、确定参考影像及选择不不变目标区域,稳定灯光影像非饱和像元相互校准以及稳定灯光影像饱和像元的饱和校正及相互校准。稳定灯光影像饱和像元的饱和校正基于稳定灯光影像非饱和像元及对应的辐射校准的灯光影像像元之间的相关关系进行的,相互校准是基于辐射校准的灯光影像之间的相关关系进行的,稳定灯光影像中的非饱和像元的相互校准采用了一种分步骤进行的方法,对不连续影像和整体被低估影像进行了相互校准。对两类像元分别进行校正以后进行合并就实现了对稳定灯光影像的分类校正。

(2)为了评估分类校正方法的相互校准效果,本文采用了建立归一化差异灯光指数、引入了其他学者的研究结果等方式进行了结果分析。分类校正实现了长时间序列稳定灯光影像数据集的相互校准,影像之间具有了可比性。与Elvidge等^[35]和Zhang等^[20]的研究结果相比,数据集影像像元DN总和随时间的变化都比原始数据集展现出更好的增长趋势,分类校正方法对F10、F12和F14卫星获取影像具有更好的相互校准结果。另外,2种方法在F15和F16卫星获取影像的相互校准方面具有更好的结果。

(3)在饱和校正方面,分类校正的稳定灯光影像有效地缓解了稳定灯光影像的像元饱和程度。另外,通过直观的目视比较分类校正的影像、VANUI指数与辐射校准的灯光影像,分类校正的稳定灯光影像对城市中心区外围区域的饱和校正效

果明显更好,并且同一纬度截面上像元DN值曲线形状与不存在饱和像元的辐射校准的灯光影像像元DN值曲线形状高度相似。

(4)分类校正结果与GDP和电力消耗值的相关关系比原始稳定灯光影像、Elvidge等^[35]和Zhang等^[20]的结果更好,说明校正结果提升了灯光影像在社会经济领域应用的准确性,可以作为研究人口密度模拟,能源消耗和经济活动估计等社会经济活动长期变化的理想数据。

参考文献(References):

- [1] Elvidge C D, Tuttle B T, Sutton P S, et al. Global distribution and density of constructed impervious surfaces[J]. *Sensors*, 2007,7:1962-1979.
- [2] Zhang Q, Seto K C. Mapping urbanization dynamics at regional and global scales using multi-temporal DMSP/OLS nighttime light data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011,115:2320-2329.
- [3] Yu B, Shu S, Liu H, et al. Object-based spatial cluster analysis of urban landscape pattern using nighttime light satellite images: A case study of China[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2014,28:2328-2355.
- [4] Sutton P. Modeling population density with night-time satellite imagery and GIS. *Computers*[J]. *Environment and Urban Systems*, 1997,21:227-244.
- [5] Song G B, Yu M Q, Liu S L, et al. A dynamic model for population mapping: A methodology integrating a Monte Carlo simulation with vegetation-adjusted night-time light images[J]. *International Journal of Remote Sensing* 2015,36:4054-4068.
- [6] Yu B, Lian T, Huang Y, et al. Integration of nighttime light remote sensing images and taxi GPS tracking data for population surface enhancement[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2019,33:687-706.
- [7] Cao X, Wang J, Chen J, et al. Spatialization of electricity consumption of China using saturation-corrected DMSP-OLS data[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2014,28:193-200.
- [8] Su Y X, Chen X Z, Li Y, et al. China's 19-year city-level carbon emissions of energy consumptions, driving forces and regionalized mitigation guidelines[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2014,35:231-243.
- [9] Shi K, Yang Q, Fang G, et al. Evaluating spatiotemporal patterns of urban electricity consumption within different spatial boundaries: A case study of Chongqing, China[J]. *Energy*, 2019,167:641-653.
- [10] Bharti N, Tatem A J, Ferrari M J, et al. Explaining seasonal fluctuations of measles in Niger using nighttime lights

- imagery[J]. *Science*, 2011,334:1424-1427.
- [11] Li X, Li D. Can night-time light images play a role in evaluating the Syrian Crisis[J]? *International Journal of Remote Sensing*, 2014,35:6648-6661.
- [12] Li X, Liu S, Jendryke M, et al. Night-time light dynamics during the Iraqi civil war[J]. *Remote Sensing*, 2018,10:858.
- [13] Chen X, Nordhaus W D. Using luminosity data as a proxy for economic statistics[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2011,108:8589-8594.
- [14] Cao Z, Wu Z, Kuang Y, et al. Coupling an intercalibration of radiance-calibrated nighttime light images and land use/cover data for modeling and analyzing the distribution of GDP in Guangdong, China[J]. *Sustainability*, 2016,8:108.
- [15] Zhao N, Cao G, Zhang W, et al. Tweets or nighttime lights: comparison for preeminence in estimating socioeconomic factors[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2018,146:1-10.
- [16] Elvidge C, Ziskin D, Baugh K, et al. A fifteen year record of global natural gas flaring derived from satellite data[J]. *Energies*, 2009,2:595-622.
- [17] 张鹏强,余旭初,刘智,等.多时相遥感图像相对辐射校准[J].*遥感学报*,2006,10:339-344. [Zhang P Q, Yu X C, Liu Z, et al. A study on relative radiometric correction of multitemporal remote sensing images[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2006,10:339-344.]
- [18] 曹子阳,吴志峰,匡耀求,等. DMSP/OLS 夜间灯光影像中国区域的校正及应用[J].*地球信息科学学报*,2015,17(9): 1092-1102. [Cao Z Y, Wu Z F, Kuang Y Q, et al. Correction of DMSP/OLS night-time light images and its application in China[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2015,17(9):1092-1102.]
- [19] Liu Z, He C, Zhang Q, et al. Extracting the dynamics of urban expansion in China using DMSP-OLS nighttime light data from 1992 to 2008[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2012,106:62-72.
- [20] Zhang Q L, Pandey B, Seto K C. A robust method to generate a consistent time series from DMSP/OLS nighttime light data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016,54:5821-5831.
- [21] Li X, Zhou Y. A stepwise calibration of global DMSP/OLS stable nighttime light data (1992-2013)[J]. *Remote Sensing*, 2017,9:637.
- [22] Letu H, Hara M, Tana G, et al. A saturated light correction method for DMSP/OLS nighttime satellite imagery [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012,50:389-396.
- [23] Zhang Q, Schaaf C, Seto K C. The vegetation adjusted NTL urban index: A new approach to reduce saturation and increase variation in nighttime luminosity[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013,129:32-41.
- [24] Zhuo L, Zheng J, Zhang X, et al. An improved method of night-time light saturation reduction based on EVI[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2015,36:4114-4130.
- [25] Zheng Z, Chen Y, Wu Z, et al. The desaturation method of DMSP/OLS nighttime light data based on vector data: taking the rapidly urbanized China as an example[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2019,33:431-453.
- [26] 吴健生,李双,张曦文.中国 DMSP-OLS 长时间序列夜间灯光遥感数据饱和校正研究[J].*遥感学报*,2018,22(4): 621-632. [Wu J, Li S, Zhang X. Research on saturation correction for long-time series of DMSP-OLS nighttime light dataset in China[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2018,22(4):621-632.]
- [27] 国家统计局.中国统计年鉴[M].北京:中国统计出版社, 1993-2014. [State Statistical Bureau. *China statistical yearbook*[M]. Beijing: China Statistics Press, 1993-2014.]
- [28] 国家统计局.中国城市统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,1993-2014. [State Statistical Bureau. *China city statistical yearbook*[M]. Beijing: China Statistics Press, 1993-2014.]
- [29] 国家统计局.中国区域经济统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2000-2014. [State Statistical Bureau. *China statistical yearbook for regional economy*[M]. Beijing: China Statistics Press, 2000-2014.]
- [30] Hall F G, Strelbel D E, Nickeson J E, et al. Radiometric rectification- toward a common radiometric response among multitemporal, multisensor images[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1991,35(1):11-27.
- [31] Lenney M P, Woodcock C E, Collins J B, et al. The status of agricultural lands in Egypt: The use of multitemporal NDVI features derived from Landsat TM[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1996,56(1):8-20.
- [32] Wang Z, Yao F, Li W F, et al. Saturation correction for nighttime lights data based on the relative NDVI[J]. *Remote Sensing*, 2017,9:759.
- [33] Hsu F C, Baugh K E, Ghosh T, et al. DMSP-OLS radiance calibrated nighttime lights time series with intercalibration[J]. *Remote Sensing*, 2015,7:1855-1876.
- [34] Wu J S, He S B, Peng J, et al. Intercalibration of DMSP-OLS night-time light data by the invariant region method [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013,34(20):7356-7368.
- [35] Elvidge C D, Hsu F C, Baugh K E, et al. Global urban monitoring and assessment through earth observation[M]. UK: CRC Press, 2014.