

DMSP/OLS 夜间灯光影像中国区域的校正及应用

曹子阳^{1,2}, 吴志峰^{3*}, 匡耀求¹, 黄宁生¹

(1. 中国科学院广州地球化学研究所 边缘海地质重点实验室, 广州 510640; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 广州大学地理科学学院, 广州 510006)

摘要 美国国防气象卫星搭载的业务型线扫描传感器(DMSP/OLS)获取的夜间灯光影像,可客观地反映人类开发建设活动强度,其广泛应用于城市遥感的多个领域。但该数据缺少星上的辐射校正,下载的原始影像数据集不能直接用于研究,需进行区域校正。长时间序列的DMSP/OLS夜间灯光影像数据集主要存在2个问题需在校正过程中解决:(1)原始影像数据集中的影像是非连续性的;(2)数据集中的每一期影像都存在着像元DN值饱和的现象。针对这2个问题,本文提出了一种不变目标区域法的影像校正方法,对提取出来的每一期中国区域的夜间灯光影像进行了校正,该校正方法包括相互校正、饱和校正和影像间的连续性校正。最后,为了检验校正方法的合理性与可靠性,本文将校正前后中国夜间灯光影像与GDP和电力消耗值,分别进行回归分析评价表明,校正后的影像更客观合理地反映区域经济发展的差异。

关键词 DMSP/OLS;夜间灯光影像;中国;校正方法;GDP

DOI:10.3724/SP.J.1047.2015.01092

1 引言

美国国防气象卫星(Defense Meteorological Satellite Program, DMSP)搭载的业务型线扫描传感器(Operational Linescan System, OLS)最初主要为气象监测而设计,用于探测月光照射下的云,后来由于其独特的光电放大能力使其能在夜间探测到地表微弱的近红外辐射^[1],因此,该传感器获取的夜间灯光影像被越来越多的用来研究人类活动。由于长时间序列的DMSP/OLS夜间灯光影像数据集兼具时效性和经济性^[2],且具有较高的时间跨度和空间覆盖范围,近些年广泛应用于城镇扩张^[3-5]、经济活动评价^[6-8]、人口密度估算^[9-11]、电力消耗和碳排放^[12-14]、光污染^[15]以及灾害评价^[16]等。但是该数据集仍存在一些问題:多传感器获取的不同年度的影像间不连续和影像中表征灯光强度的像元DN值存在

饱和现象。该数据集包括由多个DMSP卫星传感器获取的自1992-2012年共33期影像,其中存在由不同的传感器获取的同一年度的影像。因为卫星传感器在获取地表数据的过程受到多种因素的影响(如大气层的吸收和散射、太阳高度角、地形起伏度、传感器校准等^[17]),所以,不同传感器获取的同一年度的影像之间是有差异的,主要表现为影像中的亮值像元的DN值总和不相等,以及影像间相同位置的亮值像元的DN值不同。同时,不同的OLS传感器在获取影像时并没有进行星上辐射校正^[18],造成了同一个卫星传感器获取的连续不同年度的影像间相同位置的亮值像元DN值之间的异常波动。长时间序列的DMSP/OLS夜间灯光影像数据集存在的这些问题导致多传感器获取的不同年度的影像间没有连续性,因此,该数据集在长时间尺度的应用研究时,必须进行相互校正。每一个OLS

收稿日期 2014-12-08;修回日期:2015-01-04.

基金项目 国家自然科学基金项目“环珠江口区域城市扩张及其环境生态效应分析与模拟”(41171446);广州市属高校“羊城学者”科研项目“城市不透水面扩张及其环境效应遥感监测”(12A002G)。

作者简介 曹子阳(1988-),男,博士生,研究方向为区域可持续发展与城市遥感。E-mail: eationcao@163.com

*通讯作者:吴志峰(1969-),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为景观生态、城市与人居环境、环境遥感与GIS应用。
E-mail: gzuwzf@163.com

传感器上都有2个通道:可见光-近红外(VNIR)通道,光谱分辨率6 bit, DN值范围0-63;热红外(TIR)通道,光谱分辨率8 bit, DN值范围0-255。可见光-近红外通道可探测到城市和乡镇的灯光、其他的持久光源以及云、光火及油气燃烧等短暂光源,热通道则可探测到夜间的云、光火及油气燃烧等光源^[1]。因此,利用这2种通道的特性,OLS传感器可获取来自城市、乡镇及其他有持久光源的场所,且去除了云、光火及油气燃烧等偶然噪声影响的稳定夜间灯光影像。该影像也是长时间序列的DMSP/OLS夜间灯光影像数据集中被应用最多的影像,其中表征灯光强度的像元DN值的范围是0-63。由于该影像由2个通道共同作用而生成,其理论上的光谱分辨率应该为8 bit, DN值范围应该为0-255,但影像中像元DN值的最大值为63,且许多城市核心区域出现了大量DN值为63的像元聚集的情况,因此可推断影像中的像元DN值出现了饱和现象^[18]。像元DN值饱和会导致影像所表示的某一区域的灯光强度值低于其真实值,进而在应用到灯光强度指标的相关研究中会产生误差,影响研究的准确性,所以影像需进行饱和校正。

对DMSP/OLS夜间灯光影像数据集存在的问题,很多学者都提出过相应的解决方法。Elvidge等^[18]提出了一种不变目标区域法的全球范围的相互校正方法,选择意大利西西里岛作为不变目标区域,F121999的夜间灯光频数影像作为参考影像,再用其他的夜间灯光频数影像分别对参考影像做回归分析得到相对应的二次校对方程。在此基础上,Liu等^[19]利用相似的方法提出了一种中国区域的相互校正方法,然后利用校正后的影像提取城镇用地。这些研究的重点都只集中在影像的相互校正方面,而忽略了饱和校正,并没有解决像元DN值饱和的问题。Letu等^[20]利用电力消耗和夜间灯光强度值之间的关系,实现了日本1999年的夜间灯光影像的饱和校正。Raupach等^[21]对2003年全球范围的夜间灯光影像进行了饱和校正,并利用校正后的影像与GDP、能源消耗和CO₂排放量进行了线性回归分析,且取得了较理想的结果。虽然这些研究实现了对影像进行饱和校正的目的,但他们都只考虑了某一个区域单一时相的影像饱和校正,而缺少多时相的饱和校正分析。为了同时实现长时间序列DMSP/OLS夜间灯光影像数据集的相互校正和饱和校正,Wu等^[22]提出了一种不变目标区域法的校正方法,

对影像数据集在全球范围进行了校正,校正结果检验也比较理想。这种方法虽然解决了长时间序列DMSP/OLS夜间灯光影像数据集中影像间不可比的问题,且削弱了影像中像元DN值的饱和程度,但数据集中的影像间的不连续性问题并没有解决。为此,本文提出一种不变目标区域法的影像校正方法,对提取出来的每一期中国区域的夜间灯光影像进行校正,并对影像校正的结果进行了检验。

2 DMSP/OLS 夜间灯光影像数据分析

DMSP/OLS (Version4)非辐射定标的夜间灯光影像数据集,由美国国家海洋与大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)下属的美国国家地球物理数据中心(National Geophysical Data Center, NGDC)发布。现有的影像数据集包括由6个不同的DMSP卫星F10(1992-1994)、F12(1994-1999)、F14(1997-2003)、F15(2000-2007)、F16(2004-2009)、F18(2010-2012)获取的自1992-2012年共21年的33期影像,所有影像均可在NGDC的网站(<http://ngdc.noaa.gov/eog/dmsp/downloadV4composites.html>)下载。每期的DMSP/OLS (Version4)非辐射定标的夜间灯光影像包括3种全年平均影像:无云观测频数影像、平均灯光影像和稳定灯光影像。稳定灯光影像是标定夜间平均灯光强度的年度栅格影像,该影像包括城市、乡镇的灯光及其他场所的持久光源且去除了月光云、光火及油气燃烧等偶然噪声的影响。影像的参考系为WGS-84坐标系,获取幅宽为3000 km,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)。影像的覆盖范围为经度-180°~180°,纬度-65°~75°(基本覆盖了全球存在人类活动的所有区域)。影像的像元DN值代表平均灯光强度,其范围为0-63。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值越大。本文选择了33期稳定的灯光影像进行分析。

此外,美国国家地球物理数据中心(NGDC)(http://ngdc.noaa.gov/eog/dmsp/download_radcal.html)还发布了8期辐射定标的夜间灯光影像。与稳定灯光影像相比辐射定标的夜间灯光影像解决了像元DN值饱和的问题,因此该影像可作为研究中理想的参考影像。在8期的辐射定标的夜间灯光影

像中,本文选择了F16卫星传感器获取的2006年的影像。

本文使用的中国县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来自中国国家统计局发布的《中国统计年鉴》和《中国城市统计年鉴》。

3 DMSP/OLS 数据校正方法

本文所选用的DMSP/OLS夜间灯光影像都是一幅全年合成的覆盖全球的灯光影像,此外,再无更多的夜间灯光影像对每一期的影像进行辐射校正,因此,只能在现有的34期DMSP/OLS夜间灯光影像之间进行相互校正。应用不变目标区域法可实现长时间序列的DMSP/OLS夜间灯光影像数据集的相互校正。早在20世纪90年代,Hall等^[23]和Lenney等^[24]在研究中提出在连续的多时相的遥感影像中存在相对稳定的像元,而其可提取作为不变的目标区域(其在多时相的遥感影像之间存在一种特定的转换关系)。后来,Elvidge等^[18]在应用夜间灯光影像进行全球范围内的天然气燃烧量评估时,证实了利用不变目标区域法,对长时间序列的DMSP/OLS夜间灯光影像数据集进行相互校正可行的。

本文提出的长时间序列DMSP/OLS夜间灯光影像数据集的校正方法和校正结果检验的操作流程如图1所示。

3.1 数据预处理

本文提取中国区域的影像进行研究。所有的夜间灯光影像的坐标系均是WGS-84坐标系且空间分辨率为30弧秒,影像网格会随着纬度的增大而减小^[18]。为避免影像网格形变带来的影响及便于计算影像中亮值像元的面积,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将影像中的网格重采样为1 km²。

对1992-2012年间中国主要城市市辖区的部分社会经济统计数据(GDP、城镇人口、城镇建成区面积等)的分析^[9],选择了黑龙江省鹤岗市市辖区作为不变目标区域:(1)鹤岗市市辖区的主要社会经济统计数据在21 a间的变化相对较小,说明该市一直都处在一个相对稳定的发展过程中;(2)鹤岗市市辖区的稳定夜间灯光影像中包含从低到高且范围很广的DN值范围,保证了相互校正模型的精确

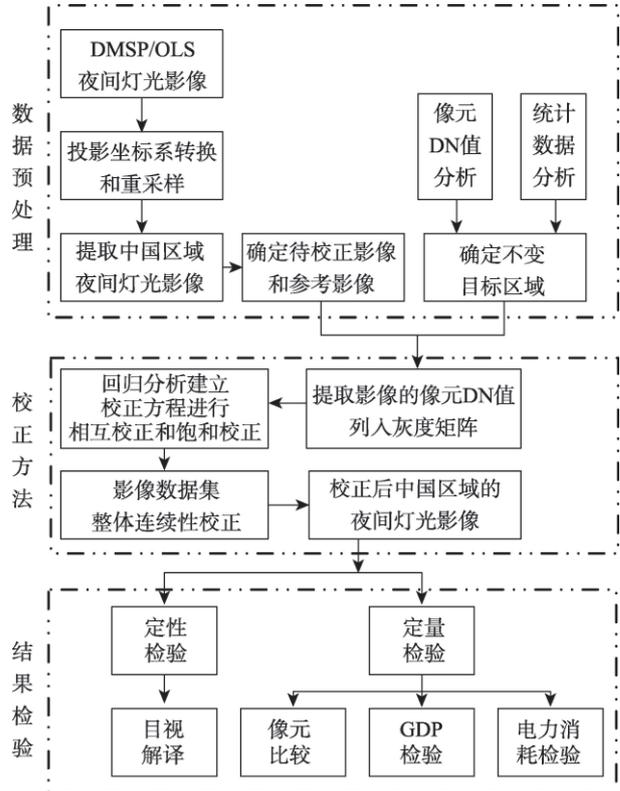


图1 影像校正的流程图

Fig. 1 Flowchart of the images correction

性;(3)鹤岗市F12卫星传感器1992年的夜间灯光影像与F18卫星传感器2012年的夜间灯光影像有很好的线性相关关系(图2),说明鹤岗市在21 a间的夜间灯光强度的变化是相对稳定的。虽然,北京、上海、广州等大型城市更能代表中国现阶段的发展现状,这些城市在近20 a的时间里社会经济各个方面都经历了飞速发展,GDP成倍增长,人口大

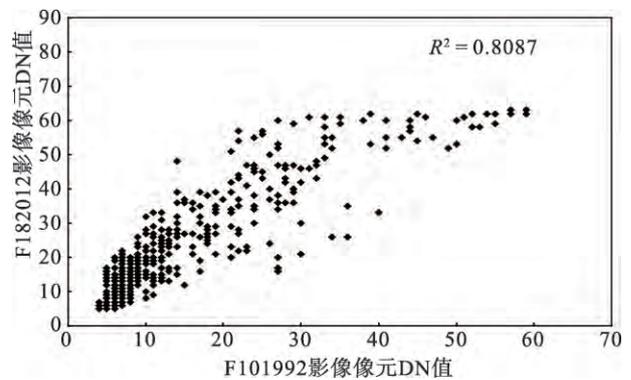


图2 黑龙江省鹤岗市1992-2012年的F10与F18传感器夜间灯光影像像元DN值的线性相关关系

Fig. 2 The linear correlation of DN values between F101992 and F182012 night-time light images for the city of Hegang, in Heilongjiang Province

量集聚,城镇不断向外扩张,但是,也正因为社会经济的迅速发展导致了这些城市的夜间灯光影像在同一时期的变化非常明显,因此,在选择灯光影像相对稳定的不变目标区域时,这些大型城市并不适合。确定了不变目标区域后,提取了33期稳定夜间灯光影像和F162006辐射定标的夜间灯光影像的对应区域分别作为待校正影像和参考影像。

3.2 影像数据校正方法

3.2.1 相互校正和饱和校正

在确定了待校正影像和参考影像后,按照相同的规则提取每一期影像的每一个像元的DN值,并将它们列入同一个灰度矩阵,分别用33期的待校正影像与参考影像进行了指数、线性、对数、二次多项式、幂数5种形式的回归分析,得到5组相关系数 R^2 (图3)。从图3可看出,幂数回归的相关系数在总体上相对最高,说明幂数方程拟合的待校正影像和参考影像的相关性最好,因此,选择幂数方程建立校正模型(式(1))。

$$DN_{cal} = a \times DN^b \quad (1)$$

式中, DN 表示待校正影像中的像元 DN 值; DN_{cal} 表示校正后的像元 DN 值; a 和 b 为幂数回归得到的不同参数。

每一期待校正影像与参考影像的幂回归校正模型的参数值和相关系数估算值在表1中列出,利用对应的幂数方程可对中国区域的每一期影像进行相互校正。

经过相互校正后的长时间序列的DMSP/OLS夜间灯光影像数据集中的影像之间具有可比性,同时每一期影像都消弱了像元DN值饱和的程度。尽管如此,相互校正后的影像数据集的不连续性问题没有解决,主要表现为:不同传感器获取的同一年度的影像依然同时存在,以及多传感器获取的不同年度的影像间相同位置的像元DN值异常波动问题也依然存在。因此,经过相互校正后的影像数据集需进行影像间的连续性校正。

3.2.2 影像间的连续性校正

由于不同的卫星传感器本身就存在差异,且传感器获取影像时会受到各种因素的影响,因此,多传感器获取的同一年度的影像之间存在差异。虽然不变目标区域法的相互校正减小了这种差异,但并没有完全消除^[22]。同一年度的2期影像仍然同时存在。为了充分利用多个传感器独立获取的相同年度的夜间灯光影像,同时解决经相互校正的影像数据集中影像之间的不连续问题,需按照式(2)对相互校正后的影像数据集进行不同传感器获取的相同年度的影像间的校正。

$$DN_{(n,i)} = \begin{cases} 0 & DN_{(n,i)}^a = 0 \text{ 且 } DN_{(n,i)}^b = 0 \\ (DN_{(n,i)}^a + DN_{(n,i)}^b)/2 & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

$(n = 1994, 1997, 1998, \dots, 2007)$

式中, $DN_{(n,i)}^a$, $DN_{(n,i)}^b$ 分别表示第 n 年相互校正后的2个不同传感器获取的夜间灯光影像中的 i 像元的 DN 值; $DN_{(n,i)}$ 表示校正后的第 n 年影像中 i 像元的 DN 值。

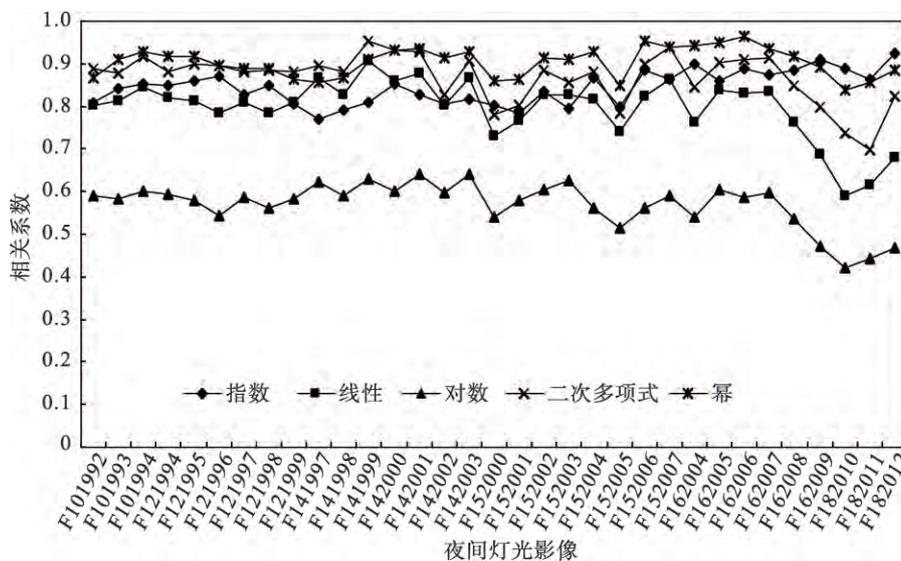


图3 5种回归模型的相关系数

Fig. 3 The correlation coefficients (R^2) for the five regression models

表1 每一期影像的相互校正模型参数

Tab. 1 Intercalibration model coefficients for each image

卫星序号	年份	a	b	R ²
F10	1992	0.6044	1.3244	0.8662
	1993	0.7039	1.3265	0.9112
	1994	0.7654	1.2925	0.9265
F12	1994	0.6443	1.3133	0.9156
	1995	0.8080	1.2227	0.9179
	1996	1.0288	1.1393	0.8972
	1997	0.7561	1.2646	0.8878
	1998	0.6846	1.2333	0.8880
F14	1999	0.7741	1.2315	0.8645
	1997	1.3708	1.1824	0.8579
	1998	0.9664	1.2229	0.8663
	1999	1.0912	1.2263	0.9098
	2000	0.9913	1.1753	0.9308
	2001	0.8686	1.2266	0.9351
	2002	0.9894	1.1583	0.9153
F15	2003	0.9003	1.2019	0.9290
	2000	0.8093	1.1830	0.8592
	2001	0.6655	1.2646	0.8619
	2002	0.5923	1.2795	0.9121
	2003	1.0439	1.1822	0.9111
	2004	1.1450	1.0847	0.9281
	2005	1.3548	1.0228	0.8498
	2006	1.2481	1.0738	0.9545
	2007	1.1421	1.1297	0.9384
	F16	2004	0.7415	1.1576
2005		0.9048	1.1776	0.9485
2006		0.8296	1.1883	0.9647
2007		0.7314	1.2132	0.9369
2008		0.7927	1.1487	0.9186
F18	2009	0.6051	1.1525	0.8923
	2010	0.3427	1.2188	0.8387
	2011	0.7035	1.0872	0.8545
	2012	0.4821	1.1866	0.8849

根据过去20多年中国城市化程度不断加剧的现实情况,可假设在前一年影像中探测为城市斑块的亮值像元在后一年影像中不能消失^[25],同时现有的研究已表明,夜间灯光影像中有更高DN值的亮值像元被提取为城市斑块的可能性更大^[4]。因此,可假设前一年的夜间灯光影像中的亮值像元,在后一年影像中相同位置的像元依然应保持为亮值像元,前一年夜间灯光影像中的亮值像元的DN值,应不大于后一年影像中相同位置的亮值像元DN值^[19]。鉴此,长时间序列的DMSP/OLS夜间灯光影像数据

集中,前一年影像中的亮值像元在后一年影像中的相同位置上,是非亮值像元或前一年影像中的像元DN值,比后一年影像中的相同位置的像元DN值大的现象,可定义为影像数据集中不同年度影像间的像元DN值异常波动现象。由于影像数据集的相互校正和不同传感器获取的相同年度的影像间的校正,均未解决多传感器获取不同年度影像间的像元DN值异常波动的问题,因此,需进行多传感器获取的不同年度影像数据间的校正。校正依据如下:(1)当后一年影像中的像元DN值等于0时,前一年的影像中相同位置的像元DN也应该等于0;(2)当后一年影像中的像元DN值不等于0时,前一年影像中的像元DN值应不大于后一年影像中的相同位置像元DN值。综上可得校正方程,如式(3)所示。

$$DN_{(n,i)} = \begin{cases} 0 & DN_{(n+1,i)} = 0 \\ DN_{(n-1,i)} & DN_{(n+1,i)} > 0 \text{ 且 } DN_{(n-1,i)} > DN_{(n,i)} \\ DN_{(n,i)} & \text{其他} \end{cases} \quad (n = 1992, 1993, \dots, 2012) \quad (3)$$

式中, $DN_{(n-1,i)}$, $DN_{(n,i)}$, $DN_{(n+1,i)}$ 分别表示第 $n-1$ 年、第 n 年和第 $n+1$ 年经相互校正和多传感器获取的同一年度影像之间的校正后的夜间灯光影像的 i 像元的DN值。

3.3 影像校正的结果检验分析

为了验证1992-2012年间夜间灯光影像校正方法的合理性,分别进行了定性和定量检验。定性检验方法即目视解译法,通过比较校正前和校正后相同年度的影像间像元DN值的变化,检验校正后的影像是否解决了校正前存在的问题。这种方法使用简便且直观,但其主观性较强,因此,还要采用定量分析的方法进行校正后影像的检验以使检验方法更客观,检验的结果也更准确可靠。定量检验方法有3种:像元的校正结果定量检验、GDP的校正结果定量检验和电力消耗值的校正结果定量检验。像元的校正结果定量检验是比较校正前和校正后的对应影像的亮值像元DN值总和(Total DN Value, TDN)和亮值像元的总数量(Total Lit Pixel, TLP)随时间变化的趋势,其影像亮值像元DN值总和(TDN)的计算公式为:

$$TDN = \sum_i DN_i \times C_i \quad (4)$$

式中, DN_i 表示影像中的 i 像元的DN值; C_i 表示影像中 i 像元的数量。GDP的校正是基于GDP与

夜间灯光影像之间的关系进行定量检验的。在早期的研究中,GDP与夜间灯光影像之间的关系就已经被提出^[26],随后相关研究^[21,27-28]均得出同一个结论,即在国家及大区域空间尺度上,GDP与夜间灯光影像之间存在线性相关关系。在此基础上,王琪等^[29]研究表明,在中国省级空间尺度上GDP与夜间灯光影像的亮值像元DN值总和存在线性相关关系。因此,本文在中国省级空间尺度上,比较了校正前和校正后对应影像的亮值像元DN值总和与GDP的线性回归分析的相关系数,以此检验影像数据集的校正结果。同时,Cao等^[13]在研究中提出在中国地级市市辖区空间尺度上,单位面积辐射定标的夜间灯光影像的亮值像元DN值总和与单位面积的GDP之间存在显著的线性相关关系,因此,本文利用这种线性相关关系对校正后的影像数据集进行检验。由于Elvidge等^[26]和Silvana等^[30]指出了电力消耗值与夜间灯光影像之间存在着线性相关关系,本文就以此对校正后的影像数据集进行检验。

从校正后的长时间序列DMSP/OLS夜间灯光影像数据集中选择了2012年的影像与校正前的夜间灯光影像进行了比较(图4)。

为校正结果定量检验,分别提取并计算出经校正后的中国1992-2012年间每一年的夜间灯光影像亮值像元DN值总和(TDN)及亮值像元总数量(TLP),与校正前1992-2012年间33期影像的稳定夜间灯光影像TDN及TLP进行比较(图5)。

分别在省级和地市级2个层面进行GDP的校正结果定量检验。在中国省级行政区域层面使用

了1992-2012年间除香港、澳门及台湾地区外的中国大陆31个省及直辖市的GDP,分别与校正前和校正后相对应的夜间灯光影像亮值像元DN值总和进行线性回归分析。1996年以前,重庆市未被设为直辖市,因此,在1996年之前的影像采用四川省和重庆市的亮值像元DN值总和与四川省的GDP做线性回归分析,从而保证了回归分析的准确性。线性回归分析的相关系数见表2。

在中国地市级行政区域层面,由于受统计数据的可得性问题和中国县级行政区划矢量数据的精确性等因素的限制,选择了260个城市市辖区进行检验。在此基础上,分别对校正前和校正后的影像进行单位面积的亮值像元DN值总和与单位面积的GDP的线性回归分析。所选的260个城市市辖区是为了进行线性回归分析而从全国范围内选出的样本,为了尽可能大的保留样本数量来提高回归分析的准确性,本文没有对这些城市进行细化分类。线性回归分析的相关系数见表3。

基于电力消耗的校正结果定量检验在省级层面进行。本文使用了1992-2012年间去除香港、澳门及台湾地区外的中国大陆31个省及直辖市的电力消耗值,分别与校正前和校正后的相对应的夜间灯光影像亮值像元DN值总和进行了线性回归分析。由于统计数据的限制,本文所选的省级电力消耗数据中缺少1992、1993、1994、1996、1997、1998年数据。1996年以前,重庆市还没有被设为直辖市,因此,在1996年之前的影像中采用四川省和重庆市的亮值像元DN值总和与四川省的电力消耗值做线

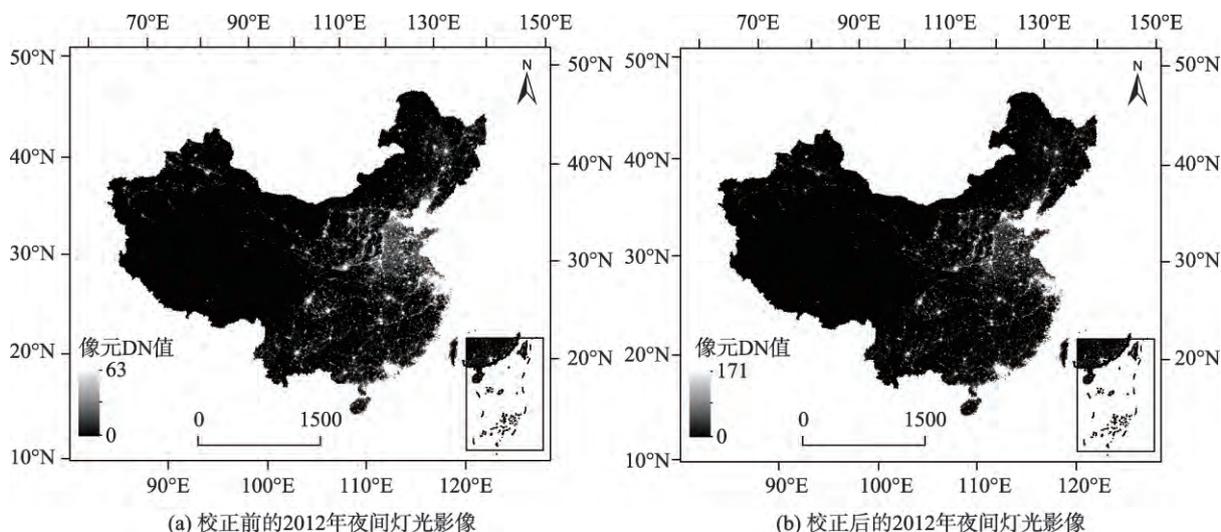


图4 中国区域夜间灯光影像
Fig. 4 The night-time light images of China

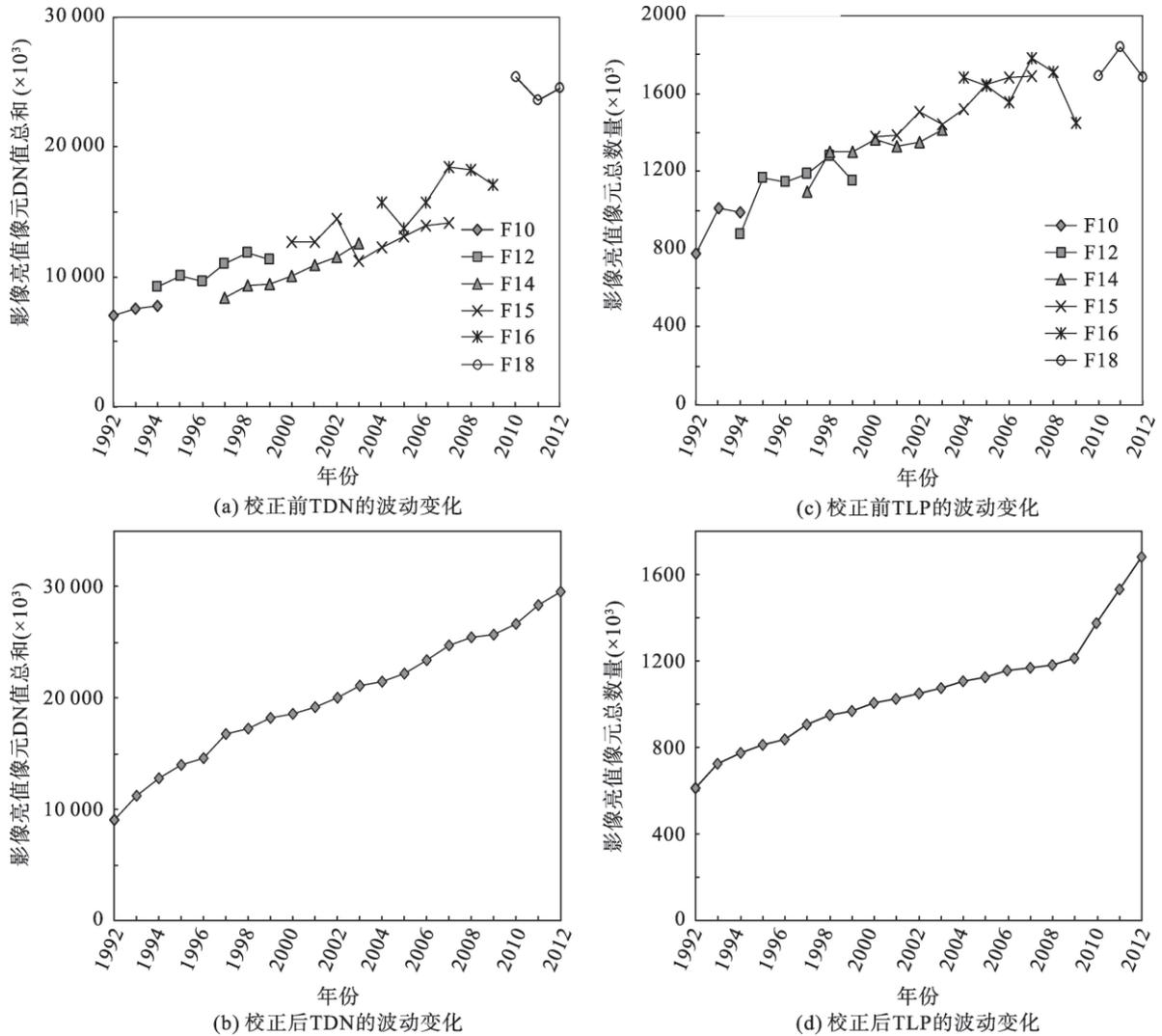


图5 校正前后夜间灯光数据的TDN和TLP

Fig. 5 The TDN and the TLP of the night-time light images before and after correction

性回归分析,从而保证了回归分析的准确性。线性回归分析的相关系数见表4。

4 结论

由图4可知,校正后的2012年中国区域夜间灯光影像的像元DN值范围,由校正前的0-63变为0-171。由于校正前2012年的夜间灯光影像相互校正时的参考影像,为F162006夜间灯光影像(光谱分辨率为32 bit,在中国区域的DN值范围为0-2307),该影像不存在影像像元DN值饱和现象的辐射定标,该影像表征灯光强度值的DN值的大小和范围,比存在影像像元DN值饱和现象的长时序列的夜间灯光影像数据集的影像都要大很多。利用本文所提出的幂回归校正方法,对利用待校正影像和参考

影像(F162006)不变目标区域之间特定的幂数回归关系,以及对未校正的2012年的夜间灯光影像进行校正后,该影像中每一个像元的DN值和总体DN值范围,在数值上都得到了拉伸和放大,因此,可确定校正后的2012年的夜间灯光影像的像元DN值饱和现象得到了校正, DN值范围变为0-171也是可理解的。因为影像数据集中其他校正前的夜间灯光影像与2012年的校正前影像,进行相互校正的参考影像和校正方法都是相同的,所以,可推断长时序列的DMSP/OLS夜间灯光影像数据集,在经过相互校正后每一期影像中的像元DN值饱和现象都得到了校正。由图5可看出,校正前的长时序列DMSP/OLS夜间灯光影像数据集,在整体上每一期影像的亮值像元DN值总和及亮值像元总数量都随着时间的推移存在无序的波动,具体到每一个传

表2 省级尺度上夜间灯光影像TDN与对应的GDP的线性回归的相关系数

Tab. 2 R^2 of linear regression between the TDN and the corresponding GDP data at the provincial level

年份	校正前						校正后
	F10	F12	F14	F15	F16	F18	
1992	0.7096						0.7303
1993	0.5953						0.6944
1994	0.5979	0.6664					0.6546
1995		0.6781					0.6850
1996		0.6903					0.7272
1997		0.7129	0.7201				0.7363
1998		0.7208	0.7265				0.7388
1999		0.7545	0.7641				0.7504
2000			0.7100	0.7469			0.7595
2001			0.7372	0.7373			0.7648
2002			0.8086	0.7806			0.7898
2003			0.8383	0.8482			0.8204
2004				0.8338	0.7822		0.8238
2005				0.7877	0.7636		0.8399
2006				0.8110	0.7869		0.8446
2007				0.8170	0.7908		0.8453
2008					0.7784		0.8480
2009					0.6904		0.8309
2010						0.6964	0.8234
2011						0.7755	0.8160
2012						0.7293	0.7911

表3 市级尺度上夜间灯光影像单位面积的TDN与对应的单位的面积GDP的线性回归的相关系数

Tab. 3 R^2 of linear regression between the TDN per area and the corresponding GDP data per area at the prefecture level

年份	校正前						校正后
	F10	F12	F14	F15	F16	F18	
1992	0.6588						0.7094
1993	0.6521						0.7069
1994	0.6577	0.6572					0.7046
1995		0.6337					0.6813
1996		0.6266					0.6685
1997		0.6114	0.6543				0.6526
1998		0.6180	0.6632				0.6066
1999		0.5717	0.6081				0.5955
2000			0.6137	0.5877			0.6061
2001			0.5429	0.5396			0.5613
2002			0.4540	0.4235			0.4863
2003			0.4452	0.4683			0.4799
2004				0.4354	0.4076		0.4757
2005				0.3766	0.3729		0.4299
2006				0.3590	0.3393		0.4103
2007				0.3406	0.3130		0.3914
2008					0.3081		0.3866
2009					0.3147		0.3875
2010						0.2657	0.3877
2011						0.2742	0.3846
2012						0.2732	0.3955

表4 省级尺度上夜间灯光影像TDN与对应电力消耗值的线性回归的相关系数

Tab. 4 R^2 of linear regression between the TDN and the corresponding electric power consumption data at the province level

年份	校正前						校正后
	F10	F12	F14	F15	F16	F18	
1992	-						-
1993	-						-
1994	-	-					-
1995		0.7578					0.7476
1996		-					-
1997		-	-				-
1998		-	-				-
1999		0.7858	0.8171				0.8207
2000			0.7823	0.8135			0.8549
2001			0.8231	0.8217			0.8648
2002			0.8447	0.8323			0.8754
2003			0.8608	0.8767			0.8791
2004				0.8681	0.8030		0.8834
2005				0.8272	0.8009		0.8819
2006				0.8512	0.8402		0.8911
2007				0.8577	0.8505		0.8985
2008					0.8427		0.8980
2009					0.7458		0.8902
2010						0.7561	0.8789
2011						0.8424	0.8759
2012						0.8279	0.8704

感器也存在同样的问题。此外,这2项指标在1994、1997和2007年都存在2个数据值。和校正前相比,校正后的影像数据集中的每一期影像的亮值像元DN值总和及亮值像元总数量都是逐年增长的,因此,可说明影像数据集在经校正后得到的每一期影像之间连续且相对稳定。又因为影像数据集在进行相对校正时使用相同的参考影像,所以,影像间的相互校正过程也是所有影像归一化的过程,使校正后的影像数据集中的每一期影像之间具有可比性。从表2可看出,在中国省级行政区空间尺度上的影像亮值像元DN值总和与GDP的线性回归相关系数的比较中,只有1999年和2003年校正后影像的相关系数系数,小于校正前影像的相关系数,1994、2002和2004年的校正后影像的相关系数,处于校正前2个不同传感器获取的相同年度2个影像的相关系数的中间值,其他16年校正后影像的相关系数都比校正前大;从表4可看出,在中国省级行政区空间尺度上的影像亮值像元DN值总和与电力消耗值的线性回归相关系数的比较中,除没有数据的6个年份后的15年中,只有1995年校正后影像的相关系数系数小于校正前,其他14年校正后影

像的相关系数系数都比校正前大。由上述的相关系数比较可知,长时间序列的DMSP/OLS夜间灯光影像数据集中的影像经校正后得到优化。从表3可知,在中国地市级行政区域空间尺度上校正前后的影像中,单位面积的像元DN值总和与单位面积的GDP的线性回归相关系数比较中,只有1998年的校正后影像的相关系数较校正前要小,1997、1999和2000年校正后影像的相关系数,处于校正前的2个不同传感器获取的相同年度2个影像的相关系数的中间值,其他17年的校正后影像的相关系数系数都比校正前大。由此可见,校正后的影像数据集比校正前优化,但是,校正后影像的相关系数 R^2 的最大值为0.7094,最小值仅为0.3846,且随着年份的增加整体上呈现下降的趋势,而Cao等^[13]研究计算得到的中国地市级空间尺度上的单位面积的F162006辐射定标的夜间灯光影像亮值像元DN值总和与对应年度的单位面积的GDP,进行线性回归的相关系数 R^2 等于0.92。相关系数的差异也说明了经校正后的长时间序列DMSP/OLS夜间灯光影像数据集的影像像元DN值饱和现象并没有得到消除,只是得到了一定程度上的削弱。

本方法解决了长时间序列的DMSP/OLS夜间灯光影像数据集中影像之间不稳定、不连续的问题,并在一定程度上削弱了影像数据集中的影像像元DN值饱和。同时,对比较校正前和校正后的影像数据集中影像的亮值像元DN值总和,以及亮值像元的总数量,在中国不同空间尺度上分别对比了校正前和校正后夜间灯光影像与GDP及电力消耗值的线性拟合程度。但是,该方法并没有完全解决影像中像元DN值饱和问题,这将是未来研究的一个重要问题。

参考文献:

- [1] Elvidge C D, Baugh K E, Kihn E A, *et al.* Mapping city lights with nighttime data from the DMSP operational linescan system[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1997,63(6):727-734.
- [2] 邹进贵,陈艳华,田径,等.基于ArcGIS的DMSP/OLS夜间灯光影像校正模型的构建[J].测绘地理信息,2014,39(4):33-37.
- [3] Lo C P. Urban indicators of China from radiance-calibrated digital DMSP-OLS nighttime images[J]. Annals of the Association of American Geographers, 2002,92(2):225-240.
- [4] 卓莉,史培军,陈晋,等.20世纪90年代中国城市时空变化特征——基于灯光指数CNLI方法的探讨[J].地理学报,2003,58(6):893-902.
- [5] Ma T, Zhou C, Pei T, *et al.* Quantitative estimation of urbanization dynamics using time series of DMSP/OLS nighttime light data: A comparative case study from China's cities[J]. Remote Sensing of Environment, 2012,124:99-107.
- [6] Elvidge C D, Suttonb P C, Ghoshc T, *et al.* A global poverty map derived from satellite data[J]. Computers & Geosciences, 2009,35(8):1652-1660.
- [7] Wang W, Cheng H, Zhang L. Poverty assessment using DMSP/OLS night-time light satellite imagery at a provincial scale in China[J]. Advances in Space Research, 2012,49(8):1253-1264.
- [8] Wu J, Wang Z, Li W, *et al.* Exploring factors affecting the relationship between light consumption and GDP based on DMSP/OLS nighttime satellite imagery[J]. Remote Sensing of Environment, 2013,134:111-119.
- [9] Lo C P. Modeling the population of China using DMSP operational linescan system nighttime data[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2001,67(9):1037-1047.
- [10] 卓莉,陈晋,史培军,等.基于夜间灯光数据的中国人口密度模拟[J].地理学报,2005,60(2):266-276.
- [11] Doll C N H, Pachauri S. Estimating rural populations without access to electricity in developing countries through night-time light satellite imagery[J]. Energy Policy, 2010,38(10):5661-5670.
- [12] He C, Ma Q, Li T, *et al.* Spatiotemporal dynamics of electric power consumption in Chinese Mainland from 1995 to 2008 modeled using DMSP/OLS stable nighttime lights data[J]. Journal of Geographical Sciences, 2012,22(1):25-136.
- [13] 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.
- [14] Su Y, Chen X, 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.
- [15] Chalkias C, Petrakis M, Psiloglou B, *et al.* Modelling of light pollution in suburban areas using remotely sensed imagery and GIS[J]. Journal of Environmental Management, 2006,79(1):57-63.
- [16] Elvidge C D, Hobson V R, Baugh K E, *et al.* DMSP-OLS estimation of tropical forest area impacted by surface fires in Roraima, Brazil: 1995 versus 1998[J]. International Journal of Remote Sensing, 2001,22(14):2661-2673.
- [17] 张鹏强,余旭初,刘智,等.多时相遥感图像相对辐射校正[J].遥感学报,2006,10(3):339-344.

- [18] Elvidge C D, Ziskin D, Baugh K E, *et al.* A fifteen year record of global natural gas flaring derived from satellite data[J]. *Energies*, 2009,2(3):595-622.
- [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(1):62-72.
- [20] Letu H, Hara M, Yagi H, *et al.* Estimating the energy consumption with nighttime city light from the DMSP/OLS imagery[J]. *Joint Urban Remote Sensing Event*, 2009(1-3):1364-1370.
- [21] Raupach M R, Rayner P J, Paget M. Regional variations in spatial structure of nightlights, population density and fossil-fuel CO₂ emissions[J]. *Energy Policy*, 2010,38(9): 4756-4764.
- [22] Wu J, He S, Peng J, *et al.* Intercalibration of DMSP-OLS night-time light data by the invariant region method[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2013,34(20): 7356-7368.
- [23] Hall F G, Strelbel D E, Nickeson J E, *et al.* Radiometric rectification—toward a common radiometric response among multirate, multisensor images[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1991,35(1):11-27.
- [24] 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.
- [25] 何春阳,史培军,李景刚,等.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[J].*科学通报*,2006,51(7):856-861.
- [26] Elvidge C D, Baugh K E, Kihn E A, *et al.* Relation between satellite observed visible-near infrared emissions, population, economic activity and electric power consumption[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1997,18(6):1373-1379.
- [27] Elvidge C D, Imhoff M L, Baugh K E, *et al.* Night-time lights of the world: 1994–1995[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2001,56(2):81-99.
- [28] Forbes D J. Multi-scale analysis of the relationship between economic statistics and DMSP-OLS night light images[J]. *Giscience & Remote Sensing*, 2013,50(5): 483-499.
- [29] 王琪,袁涛,郑新奇.基于夜间灯光数据的中国省域GDP总量分析[J].*城市发展研究*,2013,20(7):44-48.
- [30] Silvana A, Gilberto C, Antonio M, *et al.* Estimating population and energy consumption in Brazilian Amazonia using DMSP night-time satellite data[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2005,29:179-195.

Correction of DMSP/OLS Night-time Light Images and Its Application in China

CAO Ziyang^{1,2}, WU Zhifeng^{3*}, KUANG Yaoqiu¹ and HUANG Ningsheng¹

(1. Key Laboratory of Marginal Sea Geology, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. School of Geographical Sciences, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: DMSP/OLS (Defense Meteorological Satellite Program Operational Linescan System) night-time light images can objectively reflect the intensity of human activities; therefore they were widely used in a variety of fields for urban remote sensing. However, the raw night-time dataset cannot be used directly in these researches due to the lack of inflight calibration, thus it needs to be further corrected. There are two problems existed in the long-time series of DMSP/OLS night-time light image dataset that should be addressed in the image correction procedure. First, every image in the raw night-time light image dataset cannot directly compare with each other due to the issue of discontinuity; second, there is a pixel saturation phenomenon existed in every image of the raw night-time light image dataset. In order to solve these problems, a method based on invariant region was proposed. This method included the intercalibration, the saturation correction, and the continuity correction procedures among all the images from the raw images dataset. All the night-time light images of China, which were extracted from the raw images dataset, were corrected using this method. Finally, this

correction method was evaluated by analyzing the relationships between the night-time light images and the corresponding gross domestic product (GDP) data and the corresponding electric power consumption data respectively. Through the analysis toward the evaluated results, two main conclusions were acquired. One was that this method had solved the problem of discontinuity in the raw image dataset; the other one was that this method could reduce the pixel saturation phenomenon that existed in every images of the raw night-time light image dataset. However, this method has not completely solved the problem of pixel saturation. How to perfectly solve this problem is the core issue for future research on night-time light data application.

Key word: DMSP/OLS; night-time light images; China; correction method; GDP

***Corresponding author:** WU Zhifeng, E-mail: gzuwzf@163.com