

# 基于EVI指数的DMSP/OLS夜间灯光数据 去饱和方法

卓 莉<sup>1</sup>, 张晓帆<sup>1</sup>, 郑 璟<sup>2</sup>, 陶海燕<sup>1</sup>, 郭宇伯<sup>1</sup>

(1. 中山大学地理科学与规划学院 广东省城市化与地理环境空间模拟重点实验室/  
综合地理信息研究中心, 广州 510275; 2. 广东省气候中心, 广州 510080)

**摘要:** DMSP/OLS夜间灯光数据被广泛应用于表征人类活动强度及其生态环境影响的诸多研究中,但因OLS传感器设计的局限,在用电强度较高的城市中心,灯光信号存在明显的饱和,这一不足可能影响到一些基于夜间灯光数据研究成果的可靠性。针对这一问题,NOAA-NGDC研发了辐射定标算法,但因缺乏星上定标系统,算法较为复杂,且受较多条件限制等原因,目前只有部分时期的辐射定标数据产品(RCNTL)。近期有学者提出一种基于植被指数NDVI构建的城市灯光指数VANUI,为灯光数据去饱和研究提供了一个操作简单且结果良好的方法,但该方法在一些城市效果不佳。基于此,本文综合利用夜间灯光与EVI指数信息,通过对VANUI指数构建方法进行改进,建立了一个新的缓解夜间灯光强度饱和的EANTLI指数。为了评价指数的效果,将EANTLI与VANUI从三个方面进行比较:① 区分、识别饱和和区内地物的能力;② 与RCNTL的拟合程度;③ 对用电量估算的效果。结果表明:EANTLI在三个方面均表现出优势,在潜在饱和和区内对特征地物具有更高的可区分性,与RCNTL的线性相关程度更高,与用电量的相关性相比于NTL、VANUI亦明显提高。因此可以认为EANTLI在指数的设计上较为合理,不仅易于计算,而且能达到较好的缓解灯光强度饱和、凸现城市内部差异的目的,在用于反演城市发展指标时能获得更为准确的结果,因此具有较高的应用价值。

**关键词:** DMSP/OLS;夜间灯光;EANTLI;饱和;EVI指数

DOI: 10.11821/dlxb201508012

## 1 引言

不同于LANDSAT/TM、SPOT/HRV和NOAA/AVHRR等主要利用地物反射辐射特征进行地表监测的传感器,DMSP(Defense Meteorological Satellite Program)/OLS(Operational Linescan System)传感器具有独特的低光成像能力,能够探测到地表夜间在可见光—近红外波段的发射辐射,如城市灯光,甚至居民地、车流等发出的低强度灯光<sup>[1]</sup>,而且每天都能获取夜间的成像数据。由于夜间灯光(Nighttime light, NTL)能够直观地反映人类活动强度,因此在全球城市、全球变化等研究中均具有很大的潜力。基于此,美国海洋暨大气总署(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)的国家地理数据中心(National Geophysical Data Center, NGDC)于1994年积极发起了一个基

收稿日期: 2014-10-27; 修订日期: 2015-01-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(41371499); 中山大学柳林教授千人计划科研启动项目 [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41371499; The startup fund for Prof. Liu Lin from the One Thousand Talents Program of Sun Yat-sen University]

作者简介: 卓莉,女,副教授,主要从事城市与资源环境遥感、地理模拟、优化算法及灾害风险管理研究。

E-mail: zhuoli@mail.sysu.edu.cn

通讯作者: 陶海燕,女,副教授,主要从事多智能体地理模拟、时空数据挖掘及资源环境遥感等研究。

E-mail: taohaiyan@mail.sysu.edu.cn

于OLS数据绘制全球夜间灯光的计划,并开发了稳定灯光产品的时间序列。稳定灯光数据产品去除了极光、野火等不稳定光源,以及月光、云的干扰,因此最后的数据值为无云图幅稳定光的年均灰度(DN)值,目前第4版稳定灯光产品已包含1992-2012年的长时间序列,为人类活动的探测提供了独一无二的全球视角。国内外许多学者已将这一数据应用于城市化过程及其与环境的相互作用等诸多研究之中<sup>[2]</sup>,如城市化水平估计<sup>[1-3]</sup>、人口估算<sup>[4-16]</sup>、GDP估算<sup>[10, 17-23]</sup>、能源消耗估算<sup>[10-12, 16, 24-27]</sup>、城市扩张对生态系统<sup>[28-30]</sup>的影响等。在这些研究中,DN值是进行建模分析的关键指标,但由于OLS传感器本身的缺陷,夜间灯光数据在灯光强度较高的城市中心会出现灯光饱和现象,即DN值增大到一定程度不再随着地面灯光强度的增加而继续增大的现象。

灯光饱和问题不仅降低了夜间灯光数据在城市中心区的DN值,而且掩盖了饱和区内部实际存在的灯光强度差异,进而不可避免地影响到基于灯光强度的人口、经济等指标估算模型的精度,因此如何消除、缓解饱和问题现象成为近年来夜间灯光数据研究的热点之一。学者们先后提出了辐射定标和非辐射定标两大类方法来改进饱和问题<sup>[31-35]</sup>。其中,辐射定标方法在理论上比较完善,结果精度较高,但由于OLS可见光波段没有星上定标系统,定标算法比较复杂,需要大量的数据作为支撑,目前只有NGDC开发了一些特定时段的辐射定标数据产品。为了弥补这一不足,Letu等人<sup>[33]</sup>提出了一种非辐射定标方法,即基于统计回归来恢复行政单元尺度的灯光强度,其不足之处在于难以体现饱和区内部灯光强度的差异;随后,Letu<sup>[34]</sup>等改进了这一不足,利用1999年稳定灯光数据与1996-1997年辐射定标灯光数据的非饱和部分,通过线性回归的方法对1999年夜间灯光数据进行了纠正,最终恢复了饱和区像元尺度的灯光强度。但是,该方法假设饱和像元的实际DN值在1996-1999年间几乎不发生变化,这一假设在城市化水平较高、发展平稳的地方(如美国、英国、日本等)或许适用,但对城市化进展较快的国家(如中国、印度等)而言,难以得到保证。此外,论文中关于稳定灯光数据的提取方法稍显复杂,不太容易推广。

考虑到植被与人类活动具有负相关的趋势(即城中中心区人类非农活动强度高,植被覆盖一般相应较少;而在乡村,人类非农活动强度较低,植被覆盖较多)<sup>[36-39]</sup>,Zhang<sup>[35]</sup>等人提出了基于NDVI修正灯光饱和的城市灯光指标VANUI(Vegetation Adjusted NTL Urban Index)。VANUI虽未实现绝对定标,但易于计算,在历史悠久、发展速度较为平缓、发展模式较为稳定的城市区域(如旧金山、纽约、开普敦、东京等),可以较好地凸显城市中心区灯光强度的空间差异,为缓解灯光强度的饱和提供了一个较好的研究思路。但这一方法也存在一些不足,例如将VANUI应用于城市化进程较快的城市(如印度的钦奈和班加罗尔等)时饱和区内灯光强度的空间差异表现不够明显。造成这一结果的原因可能在于这些城市的潜在饱和区内,植被覆盖的差异不显著,因此简单地用1-NDVI这一系数进行调整,难以缓解OLS传感器灯光强度的饱和、凸显夜间灯光强度值的空间差异。

基于上述分析,考虑到EVI指数可减弱土壤背景、大气对植被指数的影响,并且可在一定程度上克服NDVI易饱和的不足<sup>[40]</sup>,相对NDVI而言具有较多的优势。本文将充分利用EVI与夜间灯光在空间分布上的变化特征,采用一种新的思路来构建缓解灯光强度饱和的指数。目的是在不增加计算复杂度的情况下,更能有效地缓解灯光强度的饱和、区分饱和区内的地物、以及估算城市电能消耗。

## 2 基于EVI修正的灯光指数EANTLI

灯光强度NTL值从城市中心区向郊外逐渐减小,而植被指数EVI则呈现近乎相反的

变化趋势, 将NTL归一化后,  $NTL_{\text{norm}} - \text{EVI}$  ( $NTL_{\text{norm}}$ 为归一化后的灯光强度值)的差值也呈现出从中心区向郊外逐步递减的趋势, 即在潜在饱和区差值较大, 向郊区、乡村方向逐渐变小, 并且从正值变为负值。基于这一变化特征, 并考虑到 $NTL_{\text{norm}}$ 与EVI相等时一般不存在饱和现象(灯光饱和现象多出现在中心城区, 此时 $NTL_{\text{norm}}$ 为最大值1, 而中心城区EVI值不可能为1, 因而 $NTL_{\text{norm}}$ 与EVI相等的情况最有可能出现在城乡过渡带), 因此以 $NTL_{\text{norm}}$ 与EVI相等时作为基准, 设置此时NTL的调整系数为1。而 $NTL_{\text{norm}}$ 大于EVI时, 越靠近城市中心, 发生饱和的概率越大, 饱和的程度也越大, 为了在一定程度上恢复OLS传感器对高强度灯光的响应, 达到减缓饱和, 增强NTL在潜在饱和区内的空间差异的目的, 设此时NTL的调整系数大于1; 而当 $NTL_{\text{norm}}$ 小于EVI时, 为了增强郊区和乡村与中心城区灯光强度的差异, 设NTL的调整系数小于1。基于这一思路, 构建式(1)所示的缓解饱和的灯光指数:

$$EANTLI = \frac{1 + (nNTL - \text{EVI})}{1 - (nNTL - \text{EVI})} \times NTL \quad (1)$$

式中: EANTLI为改进型的灯光指数;  $NTL_{\text{norm}}$ 为归一化NTL。

为了进一步分析EANTLI的合理性, 下面对式(1)进行一些变换: 用 $D$ 表示 $NTL_{\text{norm}} - \text{EVI}$ , 则式(1)可以变为:

$$EANTLI = \left( \frac{2}{1-D} - 1 \right) \times NTL \quad (2)$$

令

$$K = \left( \frac{2}{1-D} - 1 \right) \quad (3)$$

则

$$EANTLI = K \times NTL \quad (4)$$

式中:  $K$ 为调整系数。理论上, 在灯光饱和区域( $NTL_{\text{norm}}$ 等于1), 当EVI等于0时 $D$ 值为1, 此时 $K$ 为无穷大, 显然与实际不符。为了避免出现这类异常值, 在分析过程中将EVI小于0.01的像元(主要为水体及水体边缘的混合像元)通过掩模的方式排除。因此 $D$ 的值域范围为 $[-1, 0.99]$ 。

通过单调分析可知,  $K$ 值在区间 $(-\infty, 1) \cup (1, +\infty)$ 单调递增, 而 $D$ 的取值范围属于增区间的子区间, 因此,  $K$ 值将随着 $D$ 值的增加而增加。当 $D$ 取值为 $[0, 0.99]$ 时, 一般位于城市中心区域, 而且越靠近市中心,  $D$ 值越大, 与之相对应, 调整系数 $K$ 也越来越大, 而且大于1; 当进入潜在饱和区时(将灯光值达到最大的区域称为潜在饱和区), NTL取值为1, 因此, EANTLI等于 $(2/\text{EVI} - 1)$ , 即EANTLI的差异反应在EVI的变化中, 这在一定程度上缓解了灯光强度的饱和; 在郊区或者乡村地区,  $D$ 的范围为 $[-1, 0]$ , 而且越远离市中心,  $D$ 越小, 与之相应,  $K$ 值也越来越小, 且小于1。当 $D$ 等于-1时,  $K$ 取值为0, 此时EVI等于1, 对应像元为高植被覆盖区, 鲜有夜间人类活动, 而NTL取值为0。

通过上述分析可以发现, EANTLI可以在一定程度上恢复潜在饱和区内的灯光强度, 从而缓解城市中心区域灯光强度的饱和, 增强灯光强度的空间差异。

### 3 EANTLI指数的分析与评价

EANTLI指数构建的目的是可以快速地、较好地改善DMSP/OLS稳定灯光数据产品的灰度值饱和问题、区分饱和区内地物、估计人类活动如城市电能消耗。下文将详细描述对EANTLI指数进行分析与评价的方法。

### 3.1 数据及来源

本文所使用的数据包括: 2006年DMSP/OLS辐射定标夜间灯光数据产品以及稳定灯光数据产品(来源于NOAA网站<http://ngdc.noaa.gov/eog/download.html>), 2006年的EVI数据(来源于<http://modis.gsfc.nasa.gov/网站>), 以及2010各地级市用电总量数据(来源于各省官方统计网站)。

文中使用的是V4版本DMSP/OLS稳定灯光数据产品, OLS传感器的可见光—近红外波段可记录地表夜间 $10^{-10} \sim 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 范围间辐射, 数据的DN值范围为0~63, 当地表的可见光—近红外辐射高于 $10^{-8} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 时, DN值保持为63, 不随辐射值的增大而继续增加, 即产生饱和现象<sup>[31]</sup>。辐射定标数据产品是NGDC为了克服稳定灯光数据产品容易在灯光强度较高的城市中心产生饱和而研发, 该数据通过将有限的低月光照度低增益下的数据与正常运行状态下的高增益数据集进行合成, 在一定程度上抑制了饱和, 但目前只有少数几年的数据产品<sup>[32]</sup>。

EVI数据属于MODIS MOD13A3数据产品, 包含1 km分辨率的月均植被指数。月合成植被指数主要是根据输入数据的质量, 按照以下序列判别条件, 选择合适的方法进行合成: ① 如果在16天内符合质量要求的数据超过30%, 则采用BRDF合成, 即根据双向反射分布函数(BRDF)把不同视角换算为星下点反射值, 分别计算植被指数, 然后采用限定视角内最大值原理合成(BRDF/CV-MVC)。② 如果合成期内, 晴天观测值少于30%, 且多于2天, 则采用有限视角内的最大值合成(CV-MVC), 即选其中视角最小的2个计算植被指数, 取二者中最大值。③ 如果只有1天无云, 则采用直接计算植被指数方法, 即直接使用这天的数据计算植被指数。④ 如果所有观测全部有云, 则采用最大值合成(MVC), 则取合成期所有植被指数的最大值<sup>[41]</sup>。

之所以采用2006年DMSP/OLS稳定灯光数据产品与EVI数据是为了计算2006年的EANTLI指数; 2006年的辐射定标数据是为了分析2006年EANTLI指数缓解灯光强度饱和的效果; 2010年的地级市用电量数据是为了评估EANTLI指数估算用电量的能力。由于未收集到较全的2006年的用电量数据, 同时也出于希望验证EANTLI指数用于其他年份效果的目的, 本研究采用2010的用电量数据进行评估。

### 3.2 EANTLI指数计算

EANTLI指数的主要计算流程包括: ① 统一投影及配准。将所有的影像数据都统一为兰伯特等角圆锥投影, 北京1954坐标系。② 计算EVI均值。根据公式 $\sum_{i=1}^{12} EVI_i / 12$ ,  $i$ 为月份, 利用12个月EVI原始月均值数据计算得到2006年EVI年均值。文中使用EVI年均值而非最大值, 是因均值比较稳定, 可在一定程度上降低EANTLI对EVI的敏感性。③ 剔除EVI小于0.01的像元(主要为水体及水体边缘的混合像元)通过掩模的方式剔除。④ 灯光强度归一化。为了便于运算与对比, 采用公式 $\frac{DN - \min}{\max - \min}$ 将2006年原始灯光图像NTL进行归一化, 归一化后值域范围为[0, 1]。⑤ 计算EANTLI指数。利用步骤②和步骤④计算获得的EVI及 $NTL_{\text{norm}}$ , 基于公式(1)进行运算, 得到EANTLI指数图像。

### 3.3 对EANTLI指数进行分析与评价的方法

**3.3.1 比较EANTLI、VANUI对潜在饱和区内部灯光强度差异的可区分性** 为了分析EANTLI对城市潜在饱和区内灯光强度差异的区分效果, 选择了中国夜间灯光强度饱和最为严重的三个城市——北京、上海、广州进行分析。首先, 按照Zhang<sup>[35]</sup>提出的方法计算2006年中国区域的VANUI, 按照文中3.2给出的方法计算2006年中国区域的EANTLI, 并进行归一化处理使其与VANUI值域范围一致, 以便于比较; 然后将中国



NTL图、VANUI图、EANTLI图统一投影方式,使其具有相同的投影、栅格大小以及图幅大小,在此基础上分别截取出三大城市的2006年的NTL图、VANUI图、EANTLI图;再用NTL图提取潜在饱和区的矢量图,将其叠置于NTL图、VANUI图、EANTLI图上;最后利用相同年份的高分辨率影像作为参考,比较分析EANTLI指数与VANUI指数对于饱和区内灯光强度差异的增强效果,结果如图1~图3所示。

**3.3.2 EANTLI指数、VANUI指数与辐射定标数据的相似性分析** 由于辐射定标数据RCNTL是学界比较认可的可以较好地去除了饱和的数据,为了评价EANTLI指数修正饱和的能力,采用与辐射定标数据进行相关分析的方法,并与VANUI-RCNTL相关分析的结果进行对比。考虑进行相关分析的样本点最好包含饱和区与非饱和区,且具有一定的代表性和可靠性,在三个城市群(京津唐城市群;长三角城市群;珠三角城市群,包括广州,深圳,佛山)内任选了30条穿过潜在饱和区的横截线,依次编号为1~30,顺次读取每一条横断线上各像元的EANTLI值、VANUI值和RCNTL值,分别将VANUI、EANTLI与RCNTL进行回归分析,计算判定系数 $R^2$ 。最后,从30条横截线中任选出三条分别跨越三大城市群潜在饱和区的横断线,将横截线上VANUI、EANTLI与RCNTL的回归结果绘制于图4,将判定系数随样本的变化关系绘制于图5中。

**3.3.3 比较EANTLI、VANUI估算电能消耗的效果** 根据Elvidge<sup>[31]</sup>的研究结果:“辐射定

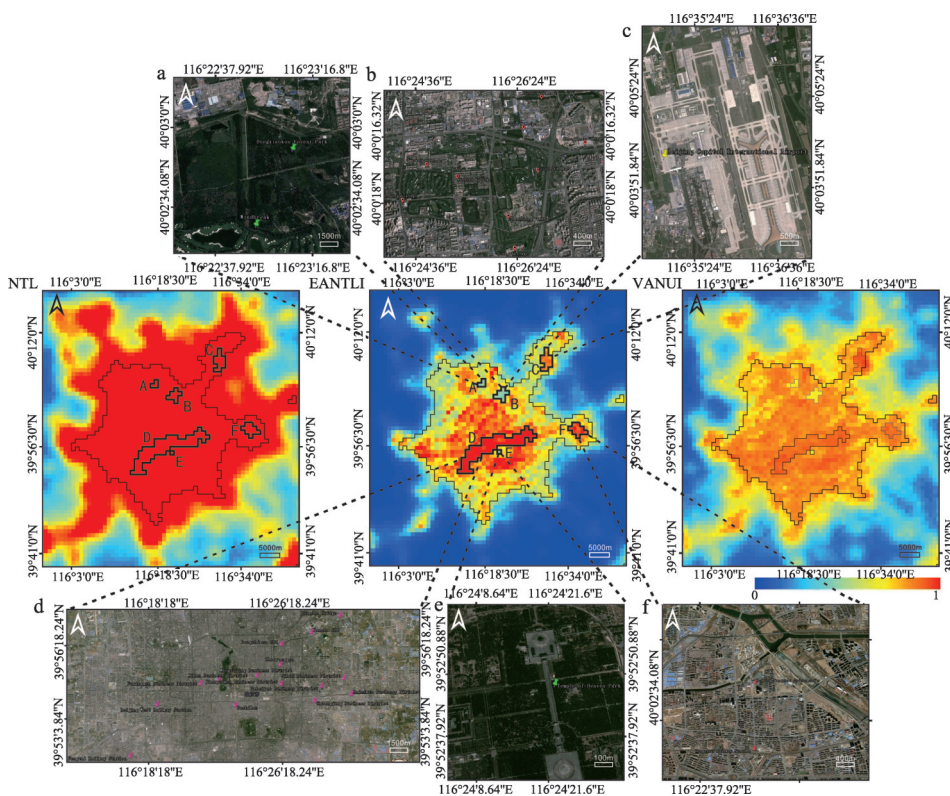


图1 北京地区归一化NTL图、VANUI图、EANTLI图

(图中最大的多边形矢量为潜在饱和区,潜在饱和区内各地块分别为:a.东小口森林公园,b.城中村聚落,c.首都国际机场,d.经济中心区域,e.天坛公园,f.通州区中心城区)

Fig. 1 Comparison of normalized NTL, EANTLI and VANUI for Beijing

(Land features inside the PSA include the Dongxiaokou Forest Park (a), urban villages (b), Beijing Capital International Airport (c), Economic center (d), Tiantan Park (e) and the central urban area of Tongzhou District (f))

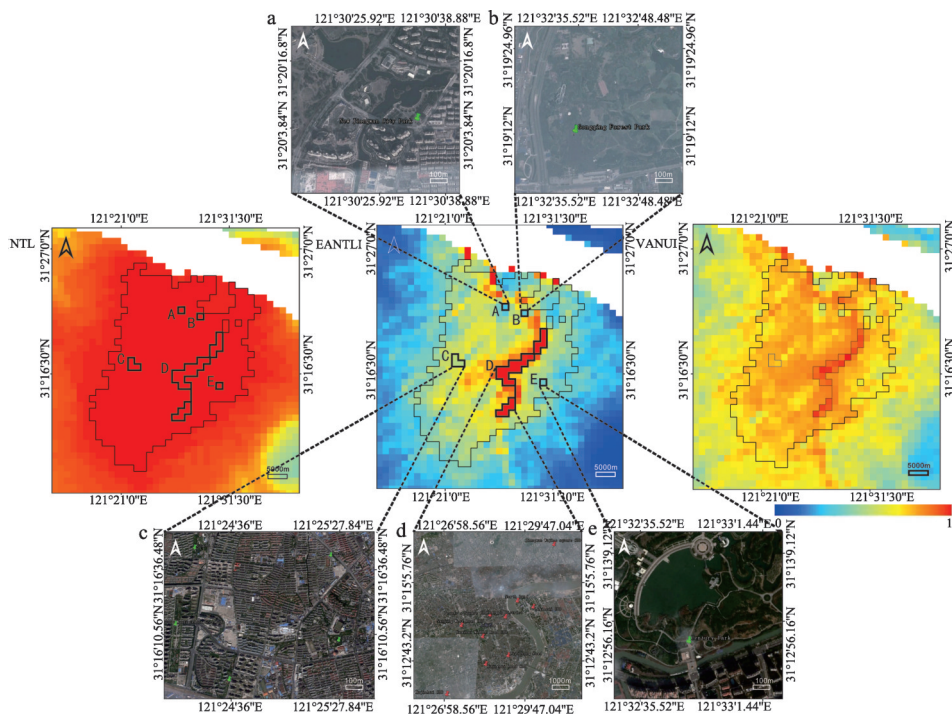


图2 上海地区归一化NTL图、VANUI图、EANTLI图  
(图中最大的多边形矢量为潜在饱和区, 潜在饱和区内各地块分别为: a. 新江湾城公园, b. 共青森林公园, c. 大华二村, d. 经济中心区域, e. 世纪公园)

Fig. 2 Comparison of normalized NTL, EANTLI and VANUI for Shanghai  
(Land features inside the PSA include the New Jiangwan City Park (a), the Gongqing Forest Park (b), Dahua Village (c), Economic center (d) and the Century Park (e))

标后的灯光值能更准确的估计电能消耗”, 基于此, 分别对2010年地级市的EANTLI、VANUI值与用电总量进行回归分析来评价EANTLI指数缓解饱和现象的能力。由于不同的经济发展阶段, 用电模式不一, 因此将168个地级市划分为东部、中部和西部三个组分别进行回归分析。2010年东部、中部和西部各地级市NTL总和、VANUI总和与用电总量之间的回归结果见图6。

## 4 结果与分析

### 4.1 EANTLI、VANUI对饱和区内灯光强度差异的增强结果与分析

在城市内部区域尺度, 从图1~图3可以看出, 潜在饱和区在NTL图像(左)中呈现均一的红色“斑块”, 无法辨别出内部任何区域; 在VANUI图(中)中内部差异有所显现, 但不同地块间对比不够鲜明, 较难识别出一些典型区域; 在EANTLI指数图(右)中, 一些地块得到凸显, 从而比较容易被识别。

如图1中的东小口森林公园, 城中村聚落(芦井村、六王村、辛店村、新生村、顾家庄、崔家村、姜庄、张家洼子等), 首都国际机场, 北京图幅范围内经济中心(主要分布有丰台火车站、西关火车站、复兴门商业区、西单商业区、大栅栏商业街、王府井商业区、东直门、朝阳门、建国门、燕莎购物中心、大北窑、双井、酒仙桥、四惠、百子湾), 天坛公园等, 这些在NTL图中无法识别, 在VANUI图中难以识别, 但在EANTLI

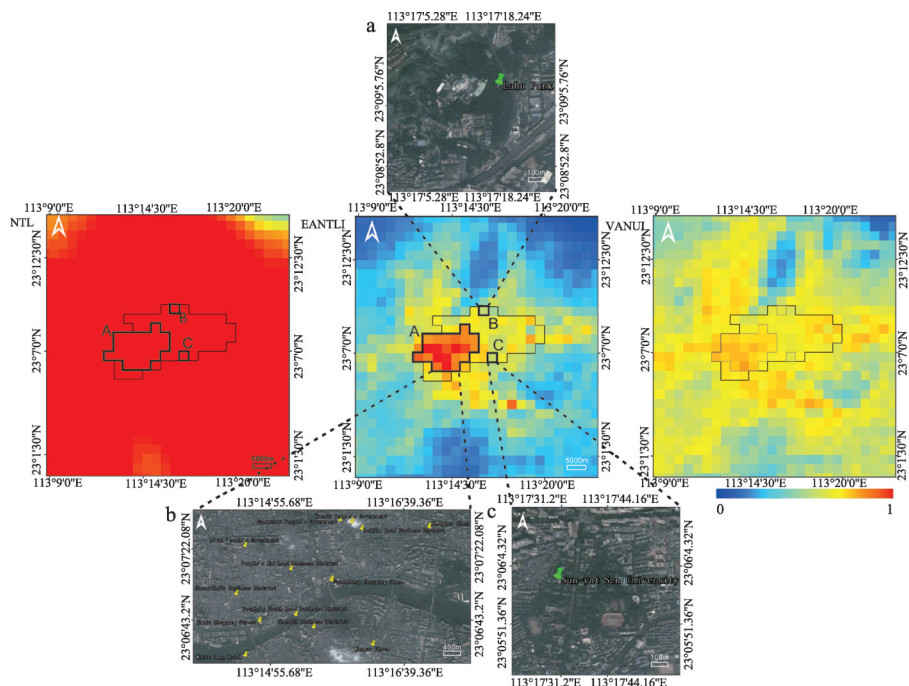


图3 广州地区归一化NTL图、VANUI图、EANTLI图

(图中最大的多边形矢量为潜在饱和区, 潜在饱和区内各地块分别为: a. 经济中心区域, b. 麓湖公园, c. 中山大学)

Fig. 3 Comparison of normalized NTL, EANTLI and VANUI for Guangzhou

(Land features inside the PSA include the Economic center (a), Luhu Park (b) and Sun Yat-sen University (c))

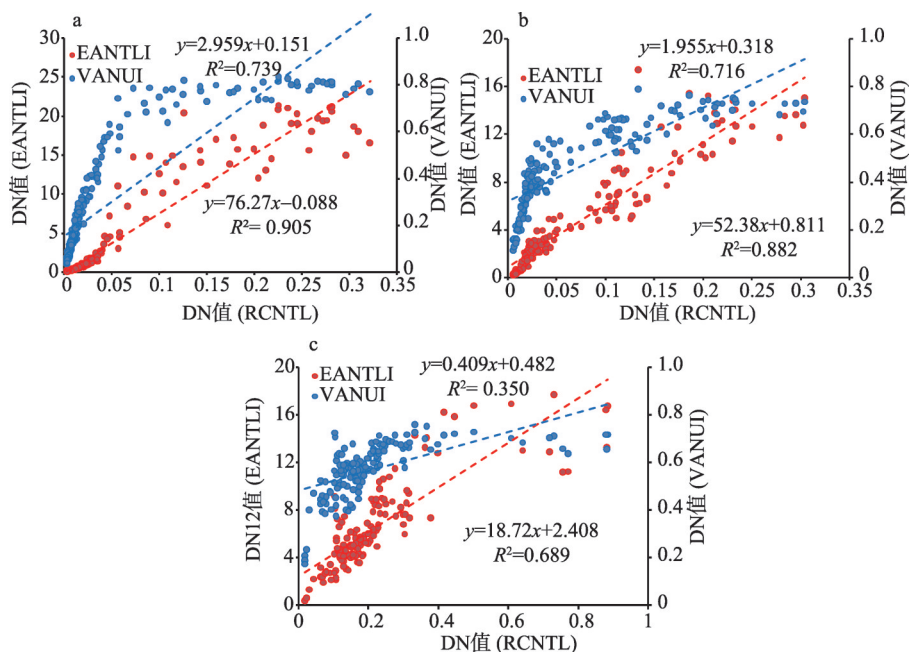


图4 京津唐(a)、长三角(b)、珠三角(c)城市群某一横截线上VANUI、EANTLI与RCNTL的回归分析

Fig. 4 Relationship between VANUI, EANTLI and RCNTL along latitudinal transects of Beijing-Tianjin-Tangshan (a), Yangtze River Delta (b) and Pearl River Delta (c) urban agglomerations



图中可被清楚地辨识出。

与图1类似,图2较好地识别出了:新江湾城公园、共青森林公园、上海市图幅范围内经济中心(主要分布有江湾五角广场,北滩CBD,陆家嘴CBD,人民广场CBD,南京路CBD,淮海路CBD,陆家浜路,徐家汇路,徐家汇CBD),以及世纪公园等;图3较好的识别出了:广州市图幅范围内经济中心(主要分布有荔湾区人民政府,上下九商业区,第十甫商业街,白天鹅宾馆,人民中路商业区,友谊购物广场,人民南路商业区,长堤商业区,广州市人民政府,越秀区人民政府,北京路商业街,万国广场,中华广场),麓湖公园,中山大学等。

上述分析说明,EANTLI指数可以很好地凸显出潜在饱和区内部的差异,识别一些典型地块。

4.2 EANTLI 指数、VANUI 指数与 RCNTL 的回归结果与分析

图4中显示出,对于三大城市群内跨越潜在饱和区的某一条横截线而言,EANTLI与RCNTL的线性拟合度整体优于VANUI与RCNTL(EANTLI与RCNTL的判定系数 $R^2$ 皆高于VANUI与RCNTL)。此外,在RCNTL值较大的部分,EANTLI与RCNTL依旧呈现出较强

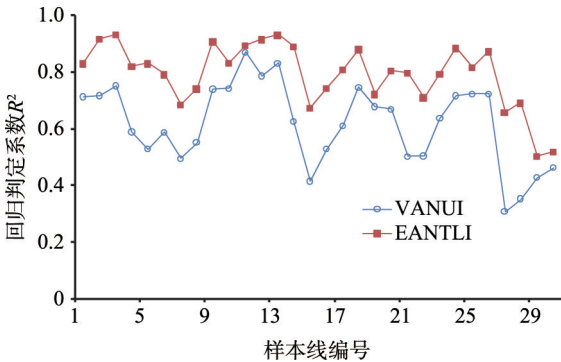


图5 30条样本线上EANTLI、VANUI与RCNTL的回归判定系数 $R^2$

Fig. 5 Coefficient of determination  $R^2$  of VANUI and EANTLI against RCNTL along the 30 latitudinal transects

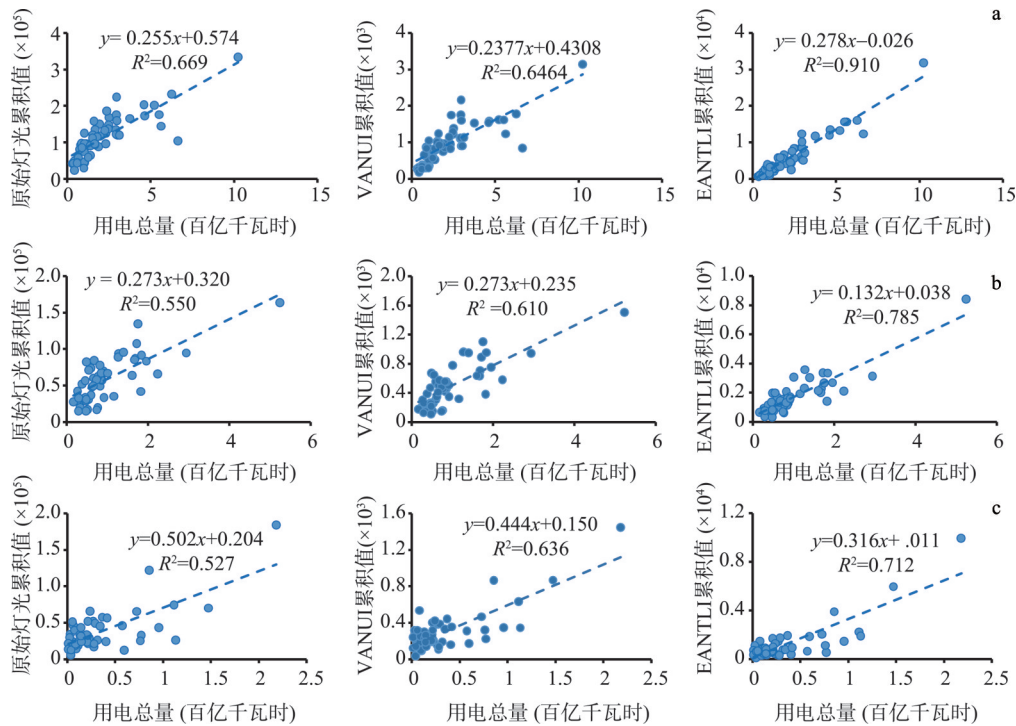


图6 中国东部(a)、中部(b)、西部(c)地区地级市NTL、VANUI、EANTLI与用电总量回归结果  
Fig. 6 Electric power consumption estimation of Chinese prefecture-level cities in eastern (row a), middle (row b) and western (row c) groups based on cumulative NTL (left column), VANUI (middle column) and EANTLI (right column)



的线性关系, 而VANUI与RCNTL则出现较大的偏离。

由图5可看出, 在任取的30个样本(其中1到17对应京津唐样本; 18到26对应长三角样本; 27到30对应珠三角样本)中, EANTLI与RCNTL的回归判定系数 $R^2$ (30个验证样本的均值判定系数为0.79)皆在不同程度上高于VANUI与RCNTL的 $R^2$ (30个样本的均值为0.62), 说明与VANUI相比, 经过EANTLI修正的灯光值更接近于辐射定标后的灯光值。并且, EANTLI与RCNTL的回归判定系数 $R^2$ 在京津唐与长三角地区整体高于珠三角地区。这可能是因为珠三角地区地处亚热带季风气候, 植被茂盛, 常年绿色, 植被覆盖度整体高于京津唐、长三角, 同时由于MODIS、夜间灯光数据分辨率较低, 这些因素共同造成珠三角城市中心区域对应像元的均值EVI并未呈现很低的情况, 或者越靠近市中心EVI值越低的趋势不十分明显, 使得市中心区域内外的D值差异性并未得以较明显的体现, 从而影响到EANTLI与RCNTL的相关性。

#### 4.3 EANTLI、VANUI对区域用电量的估算结果与分析

从图6地级市尺度上的NTL、VANUI、EANTLI与用电总量的回归结果中可明显看出, 不管在东部、中部还是西部城市, 经过饱和纠正处理后, 地级市的EANTLI比NTL与用电总量的相关性显著增加, 亦高于VANUI与用电总量的相关性, 尤其是东部城市, 相关性可达0.91, 也就是说, EANTLI指数为估计电能消耗提供了一种更好的指标。

## 5 结论与讨论

### 5.1 结论

本文利用夜间灯光强度值从城市中心区向郊区方向逐渐减弱, 而植被覆盖则呈现逐渐增多的反方向变化趋势, 并考虑了EVI比NDVI具有较好的抗大气干扰, 以及在高植被覆盖区不易饱和的优势, 构建了一种缓解夜间灯光强度饱和的改进型指数灯光指数EANTLI。并且分别用高空间分辨率数据、辐射定标数据和用电量数据对EANTLI与VANUI在凸显城市内部地物差异、缓解饱和现象、以及估算电能消耗三方面的性能进行了评估。分析发现, 相比于VANUI, EANTLI在三方面均呈现优势, 得出以下结论:

(1) EANTLI指标的构建方法具有合理性。在指标构建上, 考虑到快速发展城市区域内植被覆盖差异不够显著, 采用 $I-NDVI$ 或者 $I-EVI$ 这样简单的调整系数难以达到增强饱和和区内部差异的目的, 因此在设计调整系数 $K$ 时, 充分利用了NTL与EVI的空间变化规律, 采用 $NTL_{norm}$ 与EVI的差值来构建调整系数 $K$ , 当 $NTL_{norm}$ 大于EVI时,  $K$ 大于1, 可在一定程度上恢复OLS传感器对高强度灯光的响应, 减缓饱和, 增强NTL在潜在饱和区内的空间差异; 在 $NTL_{norm}$ 小于EVI时,  $K$ 小于1, 可以增强郊区和乡村与中心城区灯光强度的差异。这样设计可以使得EANTLI能较好地凸显城市内部区域的空间差异。

(2) EANTLI能较好的缓解灯光饱和, 且计算简单, 易于推广。在缓解饱和和能力方面, 从增强饱和和区内部差异性以及与RCNTL的相关性两方面进行了分析, 发现在NTL图中无法区分、VANUI图中较难区分的地块, 在本文提出的EANTLI图中能得以明显区分; 而且, 相比于VANUI, EANTLI与RCNTL的相关性更好。EANTLI与2006年辐射定标灯光强度的线性回归判定系数平均可达0.79, 高于VANUI与定标后灯光强度的平均判定系数0.62。这两方面的结果可在较大的程度上说明本文提出的EANTLI能较好地缓解灯光强度的饱和。

(3) 为电能的估算提供了较好的估算指标。在估算电能消耗方面, 通过比较VANUI, EANTLI与用电量的相关性, 发现EANTLI与用电量的相关性很高, 尤其对东部城市而言, 相关性达到0.91。为电能消耗估算提供了一个较好的估算因子。

(4) 相比辐射定标数据, EANTLI指数可以充分利用现有的稳定灯光数据产品, 获得任何一年的缓解了饱和的城市灯光指数, 弥补了辐射定标数据不能涵盖所有年份的不足。

## 5.2 讨论

尽管从本研究的结果来看, EANTLI具有较多的优势, 但仍存在一些需要深入研究和探讨的问题。

首先, 在灯光饱和区内当EVI值较低时可能出现EANTLI指数值异常偏高, 特别是水体与陆地交界地带的混合像元, 其EVI值非负, 但接近0; 此外, 由于在计算过程中剔除了水体像元, 城市边缘或内部陆地与水体交界地区灯光存在过渡不自然的问题, 需要在算法上进一步改进。其次, 本研究仅针对一年的计算结果进行了分析, 但由于EVI本身也存在一定的年际变化, 因此EANTLI是否适合构建长时间序列数据还需要进一步分析; 再次, 本文使用的EVI产品空间分辨率为1 km, 基于500 m或者250 m分辨率的EVI产品构建EANTLI是否能有效提高空间分辨率也需要进一步的探讨。最后, 现有的稳定灯光时间序列产品在计算建成区面积时往往结果偏大, 基于EANTLI是否能提取得到更为准确的建成区面积或是城市边界还需要更深入的工作。

## 参考文献(References)

- [1] Chen Jin, Zhuo Li, Shi Peijun, et al. 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*, 2003, 7(3): 168-175, 241. [陈晋, 卓莉, 史培军, 等. 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*, 2003, 7(3): 168-175, 241.]
- [2] Zhuo Li, Shi Peijun, Chen Jin, et al. Application of compound night light index derived from DMSP/OLS data to urbanization analysis in China in the 1990s. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(6): 893-902. [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. *地理学报*, 2003, 58(6): 893-902.]
- [3] Zhang Qingling, Seto K C. Mapping urbanization dynamics at regional and global scales using multi-temporal DMSP/OLS nighttime light data. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(9): 2320-2329.
- [4] Lo C P, Welch R. Chinese urban population estimates. *Annals of the Association of American Geographers*, 1977, 67(2): 246-253.
- [5] Lo C P. Modeling the population of China using DMSP operational linescan system nighttime data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2001, 67(9): 1037-1047.
- [6] Lo C P. Urban indicators of China from radiance-calibrated digital DMSP-OLS nighttime images. *Annals of the Association of American Geographers*, 2002, 92(2): 225-240.
- [7] Sutton P C, Roberts D, Elvidge C D, et al. Census from heaven: An estimate of the global human population using nighttime satellite imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 2001, 22(16): 3061-3076.
- [8] Sutton P C. A scale-adjusted measure of "Urban sprawl" using nighttime satellite imagery. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 86(3): 353-369.
- [9] Zhuo Li, Chen Jin, Shi Peijun, et al. Modeling population density of China in 1998 based on DMSP/OLS nighttime light image. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(2): 266-276. [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. *地理学报*, 2005, 60(2): 266-276.]
- [10] 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. *International Journal of Remote Sensing*, 1997, 18(6): 1373-1379.
- [11] Amaral S, Câmara G, Monteiro A M V, et al. Estimating population and energy consumption in Brazilian Amazonia using DMSP night-time satellite data. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2005, 29(2): 179-195.
- [12] Welch R. Monitoring urban population and energy utilization patterns from satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 1980, 9(1): 1-9.
- [13] Cheng Liyu, Zhou Yi, Wang Litao, et al. An estimate of the city population in China using DMSP night-time satellite imagery. *IGARSS 2007*, 2007: 691-694.
- [14] Sutton P C, Taylor M J, Elvidge C D. Using DMSP OLS imagery to characterize urban populations in developed and developing countries. *Remote Sensing of Urban and Suburban Areas*, 2010: 329-348.

- [15] Zhuo Li, Ichinose T, Zheng Jing, et al. Modeling the population density of China at the pixel level based on DMSP/OLS non-radiance-calibrated night-time light images. *International Journal of Remote Sensing*, 2009, 30(4): 1003-1018.
- [16] Raupach M R, Rayner P J, Paget M. Regional variations in spatial structure of nightlights, population density and fossil-fuel CO<sub>2</sub> emissions. *Energy Policy*, 2010, 38(9): 4756-4764.
- [17] Sutton P C, Elvidge C D, Ghosh T. Estimation of gross domestic product at sub-national scales using nighttime satellite imagery. *International Journal of Ecological Economics & Statistics*, 2007, 8(7): 5-21.
- [18] Ghosh T, Powell R L, Elvidge C D, et al. Shedding light on the global distribution of economic activity. *The Open Geography Journal*, 2010, 3(1): 148-161.
- [19] Ghosh T, Anderson S, Powell R, et al. Estimation of Mexico's informal economy and remittances using nighttime imagery. *Remote Sensing*, 2009, 1(3): 418-444.
- [20] Han Xiangdi, Zhou Yi, Wang Shixin, et al. GDP spatialization in China based on DMSP/OLS data and land use data. *Remote Sensing Technology and Application*, 2012, 27(3): 396-405. [韩向娣, 周艺, 王世新, 等. 基于夜间灯光和土地利用数据的GDP空间化. *遥感技术与应用*, 2012, 27(3): 396-405.]
- [21] Elvidge C D, Baugh K E, Anderson S J, et al. The Night Light Development Index (NLDI): A spatially explicit measure of human development from satellite data. *Social Geography*, 2012, 7(1): 23-35.
- [22] Chen Xi, Nordhaus W D. Using luminosity data as a proxy for economic statistics. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2011, 108(21): 8589-8594.
- [23] Wang Qi, Yuan Tao, Zheng Xinqi. GDP gross analysis at province-level in China based on nighttime light satellite imagery. *Urban Development Studies*, 2013, 20(7): 44-48. [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. *城市发展研究*, 2013, 20(7): 44-48.]
- [24] Chand T R Kiran, Badarinath K V S, Elvidge C D, et al. Spatial characterization of electrical power consumption patterns over India using temporal DMSP-OLS night-time satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 2009, 30(3): 647-661.
- [25] Chalkias C, Petrakis M, Psiloglou B, et al. Modelling of light pollution in suburban areas using remotely sensed imagery and GIS. *Journal of Environmental Management*, 2006, 79(1): 57-63.
- [26] He Chunyang, Ma Qun, Li Tong, et al. Spatiotemporal dynamics of electric power consumption in Chinese Mainland from 1995 to 2008 modeled using DMSP/OLS stable nighttime lights data. *Journal of Geographical Sciences*, 2012, 22(1): 125-136.
- [27] Doll C H, Muller J, Elvidge C D. Night-time imagery as a tool for global mapping of socioeconomic parameters and greenhouse gas emissions. *AMBIO: a Journal of the Human Environment*, 2000, 29(3): 157-162.
- [28] Li Jinggang, He Chunyang, Shi Peijun, et al. The use of multisource satellite and geospatial data to study the ecological effects of urbanization: A case of the urban agglomerations in Bohai Rim. *Journal of Remote Sensing*, 2007, 11(1): 115-126. [李景刚, 何春阳, 史培军, 等. 基于DMSP/OLS灯光数据的快速城市化过程的生态效应评价研究: 以环渤海城市群地区为例. *遥感学报*, 2007, 11(1): 115-126.]
- [29] Imhoff M L, Tucker L, Compton J, et al. The use of multisource satellite and geospatial data to study the effect of urbanization on primary productivity in the United States. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(6): 2549-2556.
- [30] Imhoff M L, Bounoua L, DeFries R, et al. The consequences of urban land transformation on net primary productivity in the United States. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 89(4): 434-443.
- [31] Elvidge C D, Baugh K, Dietz J B, et al. Radiance calibration of DMSP-OLS low-light imaging data of human settlements. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 68(1): 77-88.
- [32] Ziskin D, Baugh K, Hsu F C. Methods used for the 2006 radiance lights. *Proceedings of the Asia Pacific Advanced Network*, 2010: 131-142.
- [33] Letu H, Hara M, Yagi H, et al. Estimating energy consumption from night-time DMSP/OLS imagery after correcting for saturation effects. *International Journal of Remote Sensing*, 2010, 31(16): 4443-4458.
- [34] Letu H, Hara M, Tana G, et al. A saturated light correction method for DMSP/OLS nighttime satellite imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(2): 389-396.
- [35] Zhang Qingling, Schaaf C, Seto K C. The Vegetation adjusted NTL Urban Index: A new approach to reduce saturation and increase variation in nighttime luminosity. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 129: 32-41.
- [36] Pozzi F, Small C. Analysis of urban land cover and population density in the United States. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2005, 71(6): 719-726.
- [37] Small C. Estimation of urban vegetation abundance by spectral mixture analysis. *International Journal of Remote Sensing*, 2001, 22(7): 1305-1334.



- [38] Weng Qihao, Lu Dengsheng, Liang Bingqing. Urban surface biophysical descriptors and land surface temperature variations. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2006, 72(11): 1275-1286.
- [39] Weng Qihao, Lu Dengsheng, Schubring J. Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 89(4): 467-483.
- [40] Wang Zhengxing, Liu Chuang, Huete Alfredo. From AVHRR-NDVI to MODIS-EVI: Advances in vegetation index research. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(5): 979-987. [王正兴, 刘闯, Huete Alfredo. 植被指数研究进展: 从 AVHRR-NDVI 到 MODIS-EVI. *生态学报*, 2003, 23(5): 979-987.]
- [41] Huete A R, Justice C O, Van Leeuwen W. MODIS vegetation index (MOD 13). Version 3. Algorithm theoretical basis document. Greenbelt MD: NASA, Goddard Space Flight Center, 1999: 44-45.

## An EVI-based method to reduce saturation of DMSP/OLS nighttime light data

ZHUO Li<sup>1</sup>, ZHANG Xiaofan<sup>1</sup>, ZHENG Jing<sup>2</sup>, TAO Haiyan<sup>1</sup>, GUO Yubo<sup>1</sup>

(1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Urbanization and Geo-simulation / Center of Integrated Geographic Information Analysis, School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 2. Guangdong Climate Center, Guangzhou 510080, China)

**Abstract:** DMSP/OLS nighttime light (NTL) data has been widely applied to many studies on anthropogenic activities and their effects on the environment. Due to the limitations of the OLS sensor, NTL data suffers from saturation problem in the core of urban areas, which further influences researches based on nocturnal lights. The radiance calibrated nighttime light (RCNTL) products developed by the National Geophysical Data Center (NGDC) at NOAA partially solved the problem. However, they are only available for a very limited number of years. Recently, a vegetation adjusted NTL urban index (VANUI) has been developed based on the stylized fact that vegetation and urban surfaces are inversely correlated. Despite its simplicity of implementing and effectiveness in increasing variation to NTL data, VANUI does not perform well in some fast growing cities. In this paper, we proposed a new urban index, i. e., the Enhanced Vegetation Index (EVI) adjusted nighttime light index (EANTLI), which combined MODIS EVI with NTL to alleviate the saturation problem of NTL data. In order to evaluate the proposed EANTLI's capability in reducing NTL saturation, we first compared its spatial distributions in potential saturated areas (PSAs) of three metropolitan areas in China with that of the original NTL and VANUI, respectively. Then we randomly selected 30 latitudinal transects across these urban areas to verify EANTLI's similarity to the RCNTL. Finally, we tested EANTLI's effectiveness in assessing electric power consumption of 168 prefecture-level cities in China. Results from these experiments showed that EANTLI significantly increases spatial heterogeneity in the PSAs and effectively alleviates the NTL saturation problem. EANTLI's similarity to RCNTL is consistently higher than that of VANUI in the comparison of latitudinal transects. EANTLI also yields better results in the estimation of electric power consumption. In conclusion, the EANTLI can effectively reduce NTL saturation in urban centers and thus has great potential of wide range applications in the future.

**Keywords:** DMSP/OLS; nighttime light; EANTLI; saturation; EVI