

引文格式: LI Deren, LI Xi. An Overview on Data Mining of Nighttime Light Remote Sensing[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2015, 44(6): 591-601. (李德仁, 李熙. 论夜光遥感数据挖掘[J]. 测绘学报, 2015, 44(6): 591-601.) DOI: 10.11947/j. AGCS. 2015.20150149

论夜光遥感数据挖掘

李德仁^{1,2}, 李熙^{1,2}

1. 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430079; 2. 地球空间信息技术协同创新中心, 湖北 武汉 430079

An Overview on Data Mining of Nighttime Light Remote Sensing

LI Deren^{1, 2}, LI Xi^{1, 2}

1. State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 2. Collaborative Innovation Center of Geospatial Technology, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: When observing the Earth from above at night, it is clear that the human settlement and major economic regions emit glorious light. At cloud-free nights, some remote sensing satellites can record visible radiance source, including city light, fishing boat light and fire, and these nighttime cloud-free images are remotely sensed nighttime light images. Different from daytime remote sensing, nighttime light remote sensing provides a unique perspective on human social activities, thus it has been widely used for spatial data mining of socioeconomic domains. Historically, researches on nighttime light remote sensing mostly focus on urban land cover and urban expansion mapping using DMSP/OLS imagery, but the nighttime light images are not the unique remote sensing source to do these works. Through decades of development of nighttime light product, the nighttime light remote sensing application has been extended to numerous interesting and scientific study domains such as econometrics, poverty estimation, light pollution, fishery and armed conflict. Among the application cases, it is surprising to see the Gross Domestic Production (GDP) data can be corrected using the nighttime light data, and it is interesting to see mechanism of several diseases can be revealed by nighttime light images, while nighttime light are the unique remote sensing source to do the above works. As the nighttime light remote sensing has numerous applications, it is important to summarize the application of nighttime light remote sensing and its data mining fields. This paper introduced major satellite platform and sensors for observing nighttime light at first. Consequently, the paper summarized the progress of nighttime light remote sensing data mining in socioeconomic parameter estimation, urbanization monitoring, important event evaluation, environmental and healthy effects, fishery dynamic mapping, epidemiological research and natural gas flaring monitoring. Finally, future trends of nighttime light remote sensing and its data mining have been proposed from four aspects including new data source, knowledge discovery, in-situ observation, and national/global geographic conditions monitoring.

Key words: nighttime light; remote sensing; data mining

摘 要: 如果从地球上空观测夜间的地球, 可以发现人类聚居区和经济带发出夺目的光芒。当夜间的天空无云时, 遥感卫星能够捕捉到城镇灯光、渔船灯光、火点等可见光辐射源, 这些夜间无云条件下获取的地球可见光的影像即夜光遥感影像。与日间遥感不同, 夜光遥感对于反映人类社会活动具有独特的能力, 因此被广泛应用于社会经济领域的空间数据挖掘。本文首先介绍能够观测夜间灯光的卫星遥观测平台和传感器, 然后从社会经济参数估算、城市化监测与评估、重大事件评估、环境及健康效应研究、渔业信息提取、流行病研究、油气田监测等方面总结了夜光遥感数据挖掘的现状和特点。最后, 文章从

新型数据源、知识发现、地面观测和地理国情—世情监测 4 个方面提出了夜光遥感及其数据挖掘的未来发展趋势。

关键词:夜间灯光;遥感;数据挖掘

中图分类号:TP79文献标识码:A文章编号:1001-1595(2015)06-0591-11

1 引言

随着经济社会发展,夜间照明设施逐渐普及,人类已经逐步摆脱了黑暗的夜间生活。如果从太空观测夜间无云时的地球,可以发现人类聚居区和经济带发出夺目的光芒。鉴于夜光遥感影像的独特魅力,著名的谷歌地球软件(Google Earth)已经将夜光影像作为影像层之一。公众可以欣赏不同经济带的夜景来比较不同区域的发展水平,而科学工作者可以对这些影像进行数据挖掘从而发现社会和自然规律。相比于普通的遥感卫星影像,夜光遥感影像更多地反映人类活动,因此它在

社会科学领域得到了广泛的应用。

始于 20 世纪 70 年代的美国军事气象卫星计划(defense meteorological satellite program, DMSP)的线性扫描业务系统(operational linescan system, OLS)的设计初衷是捕捉夜间云层反射的微弱月光,从而获取夜间云层分布信息,然而科学家们意外的发现 DMSP/OLS 可以捕捉到无云情况下的夜间城镇等发光,这就是夜光遥感的起源^[1]。至今,已经有包括 DMSP/OLS、国际空间站(ISS)等对地观测传感器可以获取地球夜间的可见光和近红外波段的影像,表 1 列出了能够观测夜光的观测平台和传感器以及基本属性。

表 1 不同夜光遥感对地观测平台的基本参数

Tab.1 Basic parameters for observation platforms of the nighttime light remote sensing

观测平台	传感器	空间分辨率/m	所在国	已有存档影像的年份	数据可获取性
defense meteorological satellite program (DMSP) 系列卫星	operational linescan system (OLS)	2700	美国	1992 年至今	数据极为丰富(年平均影像可以免费下载,月平均和每日影像需要订购)
suomi national polar-orbiting partnership (NPP)卫星	visible infrared imaging radiometer suite (VIIRS)	740	美国	2011 年至今	数据极为丰富(部分月平均影像可以免费下载,每日影像可以免费下载)
satélite de aplicaciones científicas-C (SAC-C)卫星	high sensitivity technological camera (HSTC)	200~300	阿根廷	2001 年至今	数据贫乏(数据不对普通用户开放)
satélite de aplicaciones científicas-D (SAC-D)卫星	high sensitivity camera (HSC)	200	阿根廷	2012 年至今	数据贫乏(数据不对普通用户开放)
earth remote observation system-B (EROS-B)卫星	全色波段传感器	0.7	以色列	2013 年至今	未知(需要商业订购)
国际空间站(international space station)	数码相机(由宇航员拍摄)	30~50	美国、俄罗斯等国	2000 年至今	数据较为贫乏(已有的影像可以免费下载)

夜光影像不仅可以反映夜间城镇灯光,还可以捕捉到夜间渔船、天然气燃烧、森林火灾的发光等,因此广泛地应用于社会经济参数估算、区域发展研究、重大事件评估、渔业监测等诸多研究领域。下面将对这些研究领域分别进行介绍和归纳。值得注意的是,虽然夜光遥感影像的来源已经由传统的 DMSP/OLS 影像拓展到多源夜光影像,但 DMSP/OLS 影像具有历史存档数据丰富、空间覆盖范围广等优势,因此大多数夜光遥感的研究仍然是基于这类影像开展的。

2 社会经济参数估算

社会经济参数对于政府决策、科学研究具有重要价值,由于受到传统统计调查方式的局限,社会经济参数的获取往往存在误差较大以及缺乏空间信息等缺点。夜光遥感影像和人类活动存在较高的相关性,且具备时空连续、独立客观等优势,因此夜光遥感影像能够为国民生产总值、人口、电力消费、温室气体排放、贫困指数、基尼系数等社会经济参数的估算提供重要依据。

2.1 国民生产总值估算

照明设施的密度和使用能够反映该区域的繁荣程度,大量的统计研究表明夜间灯光与国民生产总值(GDP)或区域生产总值(GRP)存在较高的相关性。此方面研究始于1997年,文献[2]利用DMSP/OLS夜光影像对美洲21个国家的夜间发光面积和GDP进行回归分析,发现回归的决定系数达到0.97。此后,类似的研究在欧盟^[3]、中国^[4]、美国^[5]等国分别展开,分析发现夜光总量与GDP/GRP的回归决定系数在这些区域达到0.8~0.9之间。

上述研究表明,夜光遥感用来估算GDP或GRP在理论上是可行的。对于多数发达国家而言,因为统计系统较为完善、经济统计数据较为充分和准确,所以在统计单元层次上,夜间灯光难以作为经济数据提供更多的信息。然而,对于统计系统较为薄弱的部分发展中国家而言,统计数据误差较大甚至缺失,因此夜间灯光可为这些国家的GDP或GRP的估算提供依据。2011年,美国权威经济学杂志《美国经济评论》刊登了布朗大学的研究成果,依据不同国家经济统计数据的可信度,利用夜光遥感数据修正各国国民生产总值增长率,例如:缅甸1992—2005年的GDP年均增长率的官方值为10.02%,而通过夜光数据修正后的年均增长率为6.48%^[6]。在此研究的基础上,文献[7]提出利用1992—2008年的夜光遥感数据修正全球GDP格网产品,并发现夜光数据对统计数据缺失国家的GDP估算能够发挥十分显著的作用。文献[8]认为农业部门产值难以用夜光来度量,提出利用遥感土地覆盖产品和夜光影像分别来度量农业和非农业部门产值,得到了中南半岛各国的亚国家区域(sub-national region)的经济增长率数据。文献[9]开展了一项有趣的研究,将美国的夜光-国民收入的回归模型应用到墨西哥,得到墨西哥的非正式经济产值比官方公布的国民收入高出150%的惊人结论。

考虑到夜间灯光在不同尺度上与人口、经济等均存在较高的相关性,因此夜间灯光为社会经济指标的空间化提供了新的途径。文献[10]研究了人口、GDP和温室气体排放与夜光影像中发光面积的线性关系,基于这种关系将上述参量分配到 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 分辨率的空间格网上,从而获得了全球人口、GDP和温室气体排放的空间格网数据;基于类似的原理,对欧盟各国GDP进行了空间

化,生成了欧盟区域 $5\text{ km} \times 5\text{ km}$ 的GDP格网数据。考虑到夜光和GDP在不同区域的关系存在一定差异,文献[11]通过夜光影像、人口密度、土地覆盖等地理信息数据,建立了一套更加精确的GDP空间分配模型,从而获得全球 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 的GDP格网图。

2.2 人口估算

人口数据的空间化能够为区域经济、灾害、全球变化等研究提供关键参数,因此人口数据的空间化极为重要。文献[12]研究发现美国陆地的夜光亮度和人口密度分布图的具有较好的相关性,线性回归的决定系数达到0.63,这为利用夜光影像研究人口密度提供了经验基础。文献[13]利用中国1997年的DMSP/OLS夜光影像的点亮面积、夜光总量、平均发光强度、夜光比例等多个指标与人口、非农业人口在县级和城市单元上进行回归分析,发现夜光数据能够较好地在县级尺度上模拟非农业人口,证明了夜光影像对于人口建模具有很好的潜力。

尽管夜光和人口密度存在较好的相关性,但仅利用其相关性不足以对人口数据展开较高精度的空间化。因此实际应用中,需要结合夜光数据和辅助数据来开展人口数据空间化。基于夜光和人口分布的关系,文献[14]利用夜间灯光影像、遥感植被指数产品、人口统计数据将中国的县级行政单元划分为3类,针对每类单元建立不同的人口空间分配模型,从而得到 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 的人口密度分布。此后,大量的研究在不同地理信息和遥感产品的辅助支持下,基于不同的空间分配模型,通过夜光影像进行了巴西^[15]、欧盟^[16]、中国^[17-18]及子区域的人口空间化,而最新的研究成果利用了新型夜光影像Suomi NPP/VIIIRS生成了中国海岸带 $500\text{ m} \times 500\text{ m}$ 空间格网的人口密度图^[19]。

2.3 电力消费估算

夜光影像能够反映照明设施的密度和使用程度,因此也能够为电力消费空间化提供依据。文献[20]提出利用夜光数据测算电力消费,发现在日本、中国、印度等数十个亚洲国家中,电力消费和夜光总量之间线性回归的决定系数高于0.6,初步证明了夜光用来估算电力消费的合理性。文献[21]基于多源DMSP/OLS夜光影像研究了塞纳加尔和马里的农村电力普及率和DMSP/OLS夜光的关系,通过大量的地面调查发现,通电的村庄

的夜光明显高于未通电的村庄,证明了夜光影像可以用来检测全球的电力普及率。文献[22]利用中国 1997 年的 DMSP/OLS 夜光影像的夜光总量等指标与电力消费等指标进行回归分析发现,发现夜光影像可以在省级和县级尺度上与电力消费存在较好的相关性。文献[23]分析了中国的 NPP/VIIRS 夜光数据与 GDP、电力消费进行回归,发现夜光总量能够较好地省级单元上模拟 GDP 和电力消费数据,其精度高于 DMSP/OLS 夜光数据的建模结果。

文献[24]借助 DMSP/OLS 夜光影像得到的人居指数,模拟得到了 2010 年浙江省 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 的电力消费空间分布图。文献[25]利用遥感植被指数产品来修正 DMSP/OLS 夜光影像的饱和数据,通过建立省级电力消费和夜光总量的关系,反演得到我国 2000—2008 年电力消费的空间格网数据。

2.4 碳排放估算

由于碳排放和人类经济活动密切相关,而经济活动与夜光有较强的相关性,因此夜光能够用来反映碳排放的空间分布并对碳排放进行空间化。文献[26]发现世界各国的碳排放量与夜间点亮面积对数值的回归决定系数达到 0.84,在此基础上直接利用线性分配模型生成了 1995 年全球碳排放的 $1^\circ \times 1^\circ$ 分辨率格网图。在上述研究基础上,文献[27]提出利用夜光数据在夜间点亮区域分配碳排放数据,而在非点亮区域利用人口数据分配碳排放数据,生成了全球 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 分辨率的全球碳排放格网图,结果表明该方法比单纯利用夜光数据生成的碳排放格网图的精度更高。文献[28]利用夜光和碳排放统计数据的关系,在 Landsat 遥感影像的辅助下,得到了我国 1992—2010 年地级市的碳排放数据,并揭示了我国这一期间碳排放的时空特征。

2.5 贫困和基尼系数估算

鉴于夜光影像能够表征区域内的经济发展水平,因此它能够用来测度区域的贫困程度以及发展不平衡性。文献[29]提出了利用夜光分布和人口分布的差异性来度量全球各国内部发展不平衡性(即空间基尼指数),研究发现新加坡、波多黎各以及美国的空间基尼系数最小,而基里巴斯、巴布亚新几内亚和所罗门群岛的空间基尼系数最大。文献[30]利用夜光和人口数据的比值作为度量贫困人口的指标,并将该指标聚合到国家尺度上,从

而生成全球格网以及行政区划的贫困指数,通过该指数估测 2006 年全球贫困人口为 22 亿,接近世界银行估算的 26 亿。文献[31]结合 DMSP/OLS 夜光数据和全球人口分布图,发现穷国和富国的边界导致了明显的社会经济属性的突变,并提出了财产私有制度是导致这一突变的原因。文献[32]用夜光分布表征公共资源的分布,通过对废除种族主义后的南非夜光数据进行分析,发现了种族主义的废除明显有利于公共资源的公平分配,但执政党(非洲人国民大会)的主要支持区较其他区域获得了更多公共资源。

3 城市化监测与评估

城市化是发展中国家经济发展的重要推动力之一,同时城市化也深刻影响了全球和区域气候变化。因此,对城市化进行监测和评估有利于理解全球社会经济发展和气候变化。由于城镇在夜间发出灯光,因此夜光影像可以用来准确提取和分析建成区范围和空间聚集现象(城市群),对于理解全球和区域城市化进程可以发挥重要作用。

3.1 城市化监测

建成区范围是城市化的重要参量,研究表明夜光影像能够有效地提取建成区范围及变化。经验研究表明,对夜光影像进行图像分割,将较亮区域视为建成区^[33-39]。为了从夜光影像中提取建成区,另一类思路是利用其他遥感产品(主要是植被指数产品)和夜光影像共同构造特征空间,从而准确提取建成区范围,这类方法在中国^[40-42]、印度^[43]等国的建成区提取获得了成功。因为夜光影像可以用来反映建成区范围,时间序列夜光影像则可以反映城市化的动态信息。基于 DMSP/OLS 夜光影像对全球城市化制图的能力^[44],该类影像可以用来分析近 20 年来中国城市化的时空动态信息^[45]。基于高分辨率遥感数据的实证研究表明,DMSP/OLS 夜光影像对于检测发达国家的城市化进程能够取得较好的效果,而在发展中国家的应用效果则略为逊色^[46]。夜光影像不仅能够反映区域发展中的建成区扩张,同时也能够反映电力消费等参量的变化。文献[47—48]评估了 1994—2009 年 DMSP/OLS 夜光影像反映中国各地级市城市化的能力,发现中国夜光与人口、电力消费、建成区面积等在时间维度上的关系显著(回归决定系数一般大于 0.8),证明了 DMSP/OLS 夜光影像能够很好地反映中国城市

化的动态。相似的研究在哈萨克斯坦、中国展开,均证明了时间序列夜光影像能够较好地反映城市化参数的动态变化。

3.2 城市群和城市体系演化分析

夜光影像不仅能够用来监测城市化,还能发掘城市群的时空演化模式。文献[49]通过对DMSP/OLS夜光影像进行空间聚类分析,得到了中国主要城市群的分布,其中规模最大的5个城市群分别是上海、郑州、广州、北京和沈阳城市群。文献[50]提出利用伪不变区域的方法对DMSP/OLS夜光影像进行时间序列分析,得到了中国辽宁省中部城市群的时空演化特征。文献[51]利用DMSP/OLS夜光影像研究了我国东北地区1992—2010年的城市化进程,通过单位圆分析方法发现沈阳、长春、哈尔滨、大连、大庆和鞍山的城市化进程最快。文献[52]基于DMSP/OLS夜光影像研究了1994—2009年江西省城镇空间格局分布,发现了江西城镇的相互联系增大、破碎度减小、发展无序度增大等特点。文献[53]利用1992—2010年的DMSP/OLS夜光影像研究了我国环渤海城市群的空间格局变化,发现了该区域中小城市的相对扩张速率大于大城市,核心城市与卫星城市连通度增加等规律。文献[54]利用1998、2003和2008年的DMSP/OLS夜光影像分析了长三角城市群的扩张特征,发现了该区域的3种城市扩张模式,得出了该区域内部城市发展的不平衡性在逐渐减小等结论。

相比于夜光遥感在城市群的应用,夜光遥感在城市体系的研究也逐步开展。城市体系是指以中心城市为核心,由不同等级规模、不同职能分工、相互密切联系的城镇组成的系统,城市体系研究是城市进入高级发展阶段后的产物。由于夜光影像能够提供城市的规模以及空间关联信息,因此夜光影像能够有力地支撑城市体系的研究。文献[55]利用1992—2009年的DMSP/OLS夜光影像研究了亚洲东部的城市化,发现了该区域城市化伴随着城市网络的不断连通,并证明了该区域的城市体系完全符合著名的齐夫定律。文献[56]利用DMSP/OLS夜光影像定量分析了中国城市体系结构,将中国体系划分为北方城市体系和南方城市体系以及8个区域城市体系,并计算得到了中国各节点城市及地位。

4 重大事件评估

由于夜光能表征社会经济参数,当社会经济

系统发生重大变化时,城镇夜光往往也会发生急剧变化,从而为评估这些事件提供一定的依据。

文献[57]利用了DMSP/OLS夜光影像研究了2001年巴西能源危机,这一时期巴西用电量减少了20%,夜光亮度也相应减少约20%,证明了夜光影像能够监测能源危机。文献[58]提出利用DMSP/OLS时间序列夜光影像评估自然灾害的影响,以2001年西印度地震为研究对象,发现夜光影像监测到的损失与实地调查情况高度吻合。文献[59]利用NPP/VIIRS夜光影像评估了发生在美国两次极端天气事件导致的停电事件,不仅发现通过夜光影像得到的停电范围和调查报告得到的结果极为接近,还估算了调查报告未涉及区域的停电数据。

夜光影像不仅能监测停电事件和自然灾害,还能监测到大规模的人道主义灾难。文献[60]提出利用时间序列DMSP/OLS夜光影像评估2000—2008年津巴布韦经济崩溃的空间分布信息,研究发现该国的矿业和农业受到的损失最大,而服务业和贸易受到的损失相对较小。文献[61]根据DMSP/OLS夜光影像评估了美国政府2007年对伊拉克增兵的效果,研究表明巴格达的夜光在增兵行动后发生减少,据此认为巴格达的治安发生恶化,从而质疑了增兵行动的实际效果。文献[62]利用时间序列DMSP/OLS夜光影像评估了1999年车臣战争和2008年的俄罗斯-格鲁吉亚战争,发现区域夜光整体随着武装冲突而减少,并发现夜光变化能够反映冲突中的人口迁移以及油田火灾。在此研究基础上,文献[63]基于武装冲突数据库和时间序列DMSP/OLS夜光影像在全球范围内分析了夜光变化和武装冲突的关系,发现了武装冲突发生的国家的夜光波动较大,并且指出全球的夜光波动和当年的武装冲突数量存在较好的线性关系。文献[64]利用了时间序列DMSP/OLS夜光影像评估了2011至今的叙利亚内战,发现叙利亚的夜光损失了74%,夜光的减少与难民迁徙存在较高的相关性,而夜光的时空变化模式被国境线分割,证明了夜光影像可以用来评估叙利亚内战中的人道主义危机。

5 生态环境和健康效应研究

夜光遥感影像可以用来研究生态环境和健康问题。一方面,城市扩张带来了土壤侵蚀等一系列生态环境问题,利用夜光影像可以作为重要数

据源之一用来评估这些问题。另一方面,城镇夜光不仅是经济繁荣的象征,同时也是光污染的来源,因此利用夜光影像可以用来监测光污染及其健康效应。

5.1 城镇扩张的环境效应分析

夜间灯光不仅能够直接反映城市化进程,也可以评估城市化导致的生态和环境问题。文献[65—66]利用1994—1995年的DMSP/OLS夜光影像和生态数据分析了城市化的生态效应,发现城市化蚕食了大量的优质土壤,并且削弱了植被初级生产力。文献[67]利用了1996年和2000年两期的DMSP/OLS和AVHRR净初级生产力(NPP)产品,来计算这一时期中国GDP和NPP的变化,发现了GDP增长较大的区域里NPP的损失也较大,而GDP不发生变化的区域里NPP以减少为主。文献[68]利用了1992—2000年的DMSP/OLS夜光影像分析了美国科罗拉多州森林火灾易发区域的城镇扩张,发现了Grand县在火灾易发区域的城镇扩张面积最大,而Teller县的扩张比例最大,证明了夜光影像可以评估城镇扩张的火灾风险。文献[69]利用时间序列DMSP/OLS夜光影像、遥感植被指数产品、陆表温度产品、动物栖息地分布图,在多尺度空间下分析了我国1992—2012年动物栖息地由于城市扩张的损失,发现了长三角、珠三角、北京城市圈以及长沙—株洲—湘潭城市圈的栖息地由于城市扩张导致的损失均超过10%,特别是珠三角25%的栖息地被侵蚀,而该区域42%的湿地被转变为其他用途。

5.2 光污染及效应分析

自然界的各种生物在长期的进化过程中,已经适应了黑暗的夜间生活方式。夜间灯光的出现,在给人类带来便利的同时,也给动植物和人类的健康带来了负面影响,特别是夜间灯光的过度使用导致了光污染。长期以来,光污染研究主要利用局部地面观测以及实验室研究来开展,但难以在较大空间范围的开展。随着夜光遥感技术的逐渐发展,部分光污染研究开始基于夜光遥感影像进行,使得光污染研究得以在较大空间范围内开展。利用遥感技术调查光污染的分布是一项基础的工作。文献[70]利用航拍的高分辨率夜间灯光影像获取了德国柏林市的光污染的空间分布和来源,发现街道照明、工业、服务业等对光污染的贡献最大。文献[71]利用DMSP/OLS夜光影像

分析了欧洲近15年来的光污染的时空变化,发现了欧洲在这段时期的光污染明显增加,但乌克兰、斯洛伐克等东欧国家的光污染发生了减少,而部分发达西欧(英国、比利时等)和北欧国家(瑞典、芬兰等)的光污染在局部区域也在减少。

遥感技术不仅用来调查夜光的分布,同时也用来揭示夜光的健康与生态效应。文献[72]利用医学样本数据和DMSP/OLS夜光影像,分析了以色列女性乳腺癌、肺癌发病率与夜光强度的关系,研究表明光污染强度与乳腺癌的发病率有显著相关,而与肺癌发病率没有显著相关,表明了夜光强度与乳腺癌的发病可能存在因果关系。文献[73]利用样本数据和DMSP/OLS夜光影像,研究了美国佐治亚州的女性乳腺癌发病率与光污染强度的关系,研究表明乳腺癌的发病率与光污染强度存在显著相关,但这种关系在不同人种间存在差异:对于白人女性而言,这种相关性显著;而对于黑人女性而言,则相关性并不显著。文献[74]利用医学调查数据和DMSP/OLS夜光影像,分析了全球男性前列腺癌、肺癌、结直肠癌的发病率与光污染强度的关系,发现前列腺癌的发病率和光污染强度有显著相关,而其他两种癌症的发病率与光污染没有显著相关。文献[75]基于夜光遥感影像和调查问卷的方式研究了德国青少年的夜晚型人格(eveningness)和夜间灯光的关系,发现了居住在夜晚明亮城区青少年的夜晚型人格比率明显高于居住在夜晚黑暗区域的青少年。

夜间光污染不仅影响了人类的健康,同时也对动植物的生活习性构成了影响。文献[76]利用SAC-C卫星、国际空间站获取的夜光影像和动物调查数据,研究了以色列地中海沿岸的海龟筑巢行为,发现了海龟更容易在黑暗的区域筑巢,说明了夜光能够改变海龟的筑巢行为。文献[77]基于DMSP/OLS夜光影像和问卷调查数据研究了葡萄牙亚速尔群岛的夜光对海鸥飞行的影响,发现了部分海鸥的飞行路线明显被夜光干扰。文献[78]基于鸟类调查数据和DMSP/OLS夜光影像,研究苏格兰福斯河口的红脚鹬(一种鸟类)的夜晚行为与夜间灯光的关系,发现了夜间灯光能够显著性的提升红脚鹬的夜间觅食和喂食的能力。

6 渔业研究

城镇灯光是陆地夜光的主要来源,而渔船则

是海洋夜光的主要来源。在许多国家,渔民利用一些海洋生物的夜间趋光性特点,在渔船上装载巨大功率的照明灯泡,从而高效地开展渔业活动,这为利用夜光遥感影像获取渔业信息提供了可能性。文献[79]利用 DMSP/OLS 夜光影像获取了秘鲁海岸的捕鲑鱼船队的时空分布信息,通过与定位系统获取的船队信息进行对比,发现两者高度一致。在上述研究基础上,文献[80]利用 DMSP/OLS 夜光影像分析了大西洋西南部的捕鲑鱼业的时空规律,发现了捕捞范围和捕捞量呈正相关等渔业规律。文献[81]利用 DMSP/OLS 夜光影像探测了 1994—1999 年期间日本捕鲑鱼船队的时空分布规律,通过船队的时空动态信息将日本海划分成为 7 个捕捞区域并且推测了该海域鲑鱼群的迁徙路线。文献[82]利用 DMSP/OLS 夜光影像获得了日本海及周边的渔船分布信息,并通过 DMSP/OLS 的热红外影像获得了该区域的海水温度信息,发现了渔船的分布与水温存在密切关系,特别是大量的渔船分布在冷暖流交界处的冷流一侧。鉴于夜光能够较好地表征渔业、经济活动等人类活动信息,文献[83]利用 DMSP/OLS 夜光影像评估了全球珊瑚礁受到人类活动压力的状况,发现泰国湾的珊瑚礁受到渔业活动的压力最大,而波多黎各、红海以及波斯湾的珊瑚礁受到城镇发展的压力最大。

7 其他研究

除了上述研究之外,夜光遥感在流行病研究、油气田监测、森林火灾监测等研究领域均发挥了作用。2011 年《科学》杂志上发表了题为“Explaining Seasonal Fluctuations of Measles in Niger Using Nighttime Lights Imagery”的研究论文,作者利用城市夜光的季节性变化来表征城市人口的动态变化,发现非洲尼日尔的麻疹传染可以用夜光的变化很好地解释,首次揭示了该疾病的爆发来自于人口聚集效应,证明了夜光遥感可以用于公共卫生领域的研究^[84]。文献[85]利用 1994—2008 年的时间序列夜光影像分析了油气井燃烧的状况,发现了夜光和油气井气体燃烧量存在良好的线性相关,估算了这一期间内全球主要产油国油气井燃烧的天然气量:以 2008 年为例,油气井燃烧掉的天然气价值约为 680 亿美元。

8 总结与展望

由于夜间灯光直接反映了人类活动的规律,

夜光遥感在社会经济空间数据挖掘展示了独特的魅力。近年来,随着夜光遥感数据可得性的逐渐增强,特别是美国国家地球物理数据中心(NGDC)公布了近 20 年来的 DMSP/OLS 夜光影像,围绕该数据进行空间数据挖掘的研究进入了快速发展阶段。这些研究由传统的城市范围制图已经逐渐扩展到社会经济参数估算、区域发展、重大事件评估、健康和生态研究等多个领域。对于社会经济参数估算和区域发展研究而言,已经由夜光遥感-社会经济参数的关系研究升华到基于夜光数据的社会经济参数估算。随着夜光遥感的深入发展,夜光遥感由社会科学领域渗透到了医学、生态等自然科学领域。

虽然,夜光遥感在近年来得到了长足的发展,但其研究仍然存在一定的局限性,具体可以分为以下几点:① DMSP/OLS 影像是历史存档时期最长的夜光影像,因此也是夜光遥感的主要数据源,但该数据源一直存在辐射质量不足、空间分辨率较低的缺陷,并且在高纬度地区存在部分数据缺失的情况,因此利用该类影像进行应用研究时,往往存在定量化程度不高、变化检测误差较大的问题,一定程度阻碍了夜光遥感在地学分析上的应用;② 夜光遥感数据不具有“时空连续”性,即夜光遥感对不同消费生活习惯、不同的国家具有尺度差异,因此在夜光-社会经济模型在不同区域存在显著差异,例如:政局稳定国家的夜光增加一般表征城市扩张,而政局动荡国家的夜光增加一般表征难民回归,发达国家的建成区扩张一般导致夜间点亮面积的增加,而部分发展中国家由于电力供应能力有限,建成区扩张有时不能导致夜间点亮面积的增加,在使用夜光遥感进行地学、社会经济知识发现时应当采取较为谨慎的态度,需要一定程度考虑研究区域的社会、经济、文化甚至宗教背景,而选择合适的空间尺度对于夜光遥感研究也十分重要;③ 针对夜光遥感的地面调查鲜见,使得夜光遥感用于社会经济研究的科学机理不明确。

笔者认为,夜光遥感今后的发展趋势可以分为如下几点:① 夜光遥感的数据源将由单一的 DMSP/OLS 影像发展到更高空间、时间和辐射分辨率的多种数据源,新型 NPP/VIIRS 夜光影像就是一个典型代表^[86-87],而空间分辨率为 1 m 的 EROS-B 夜光影像则将会衍生更多的夜光遥感应用^[88],多源夜光遥感数据的联合应用也将成

为趋势;②夜光遥感应用领域将更加侧重于知识发现,而非对已有知识的重新论证,特别是对于社会经济参数估算和健康—生态研究而言,夜光遥感将具有其他数据源不可替代的优势;③夜光遥感对应的夜光地面观测将从无到有的发展,夜光遥感将逐渐走向量化,地面观测与卫星数据相结合的方式将能够更加准确地反映夜光的时空变化信息^[89];④夜光遥感数据与各类社会经济统计数据集成的数据挖掘,能够有助于在全国乃至全球范围快速获得社会经济信息,将是地理国情和世情监测的一种有效方法。

参考文献:

- [1] CROFT T A. Nighttime Images of the Earth from Space [J]. *Scientific American*, 1978, 239(1): 86-98.
- [2] ELVIDGE C D, BAUGH K E, KINH 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.
- [3] DOLL C N H, MULLER J P, MORLEY J G. Mapping Regional Economic Activity from Night-time Light Satellite Imagery[J]. *Ecological Economics*, 2006, 57(1): 75-92.
- [4] LI X, XU H M, CHEN X L, et al. Potential of NPP-VIIRS Nighttime Light Imagery for Modeling the Regional Economy of China[J]. *Remote Sensing*, 2013, 5(6): 3057-3081.
- [5] 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.
- [6] HENDERSON J V, STOREYGARD A, Weil D N. Measuring Economic Growth from Outer Space [J]. *American Economic Review*, 2012, 102(2): 994-1028.
- [7] CHEN X, NORDHAUS W D. Using Luminosity Data as a Proxy for Economic Statistics [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108(21): 8589-8594.
- [8] KEOLA S, ANDERSSON M, HALL O. Monitoring Economic Development from Space: Using Nighttime Light and Land Cover Data to Measure Economic Growth[J]. *World Development*, 2015, 66: 322-334.
- [9] GHOSH T, ANDERSON S, POWELL R L, et al. Estimation of Mexico's Informal Economy and Remittances Using Nighttime Imagery [J]. *Remote Sensing*, 2009, 1(3): 418-444.
- [10] DOLL C N H, MULLER J P, ELVIDGE C D. Night-time Imagery as a Tool for Global Mapping of Socioeconomic Parameters and Greenhouse Gas Emissions[J]. *Ambio*, 2000, 29(3): 157-162.
- [11] GHOSH T, POWELL R L, ELVIDGE C D, et al. Shedding Light on the Global Distribution of Economic Activity[J]. *The Open Geography Journal*, 2010, 3(1): 148-161.
- [12] SUTTON P, ROBERTS D, ELVIDGE C, et al. A Comparison of Nighttime Satellite Imagery and Population Density for the Continental United States [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1997, 63(11): 1303-1313.
- [13] LO C P. Modeling the Population of China Using DMSP Operational Lines Cans System Nighttime Data [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2001, 67(9): 1037-1047.
- [14] ZHUO Li, CHEN Jin, SHI Peijun, et al. Modeling Population Density of China in 1998 Based on DMSP/OLS Nighttime Light Image[J]. *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 [J]. *地理学报*, 2005, 60(2): 266-276.)
- [15] AMARAL S, MONTEIRO A M V, CAMARA G, et al. DMSP/OLS Night-time Light Imagery for Urban Population Estimates in the Brazilian Amazon[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, 27(5-6): 855-870.
- [16] BRIGGS D J, GULLIVER J, FECHT D, et al. Dasymetric Modelling of Small-area Population Distribution Using Land Cover and Light Emissions Data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 108(4): 451-466.
- [17] ZENG C Q, ZHOU Y, WANG S X, et al. Population Spatialization in China Based on Night-time Imagery and Land Use Data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2011, 32(24): 9599-9620.
- [18] YANG X C, YUE W Z, GAO D W. Spatial Improvement of Human Population Distribution Based on Multi-sensor Remote-sensing Data: An Input for Exposure Assessment [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, 34(15): 5569-5583.
- [19] GAO Yi, WANG Hui, WANG Peitao, et al. Population Spatial Processing for Chinese Coastal Zones Based on Census and Multiple Night Light Data [J]. *Resources Science*, 2013, 35(12): 2517-2523.(高义, 王辉, 王培涛, 等. 基于人口普查与多源夜间灯光数据的海岸带人口空间化分析[J]. *资源科学*, 2013, 35(12): 2517-2523.)
- [20] LETU H, HARA M, YAGI H, et al. Estimating Energy Consumption from Night-time DMPS/OLS Imagery after Correcting for Saturation Effects[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2010, 31(16): 4443-4458.
- [21] MIN B, GABA K M, SARR O F, et al. Detection of Rural Electrification in Africa Using DMSP-OLS Night Lights Imagery [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, 34(22): 8118-8141.
- [22] 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.
- [23] SHI K, HUANG C, YU B, et al. Evaluation of NPP-VIIRS Night-time Light Composite Data for Extracting Built-up

- Urban Areas[J]. *Remote Sensing Letters*, 2014, 5(4): 358-366.
- [24] YANG Xuchao, KANG Lili, ZHANG Bin, et al. Electricity Consumption Estimation Using Multi-sensor Remote Sensing Data: A Case Study of Zhejiang Province[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2013, 33(6): 718-723.(杨续超, 康丽莉, 张斌, 等. 基于多源遥感信息的电力消费量估算与影响因素分析: 以浙江省为例[J]. *地理科学*, 2013, 33(6): 718-723.)
- [25] HE C Y, MA Q, LIU Z F, et al. Modeling the Spatiotemporal Dynamics of Electric Power Consumption in Mainland China Using Saturation-corrected DMSP/OLS Nighttime Stable Light Data[J]. *International Journal of Digital Earth*, 2014, 7(12): 993-1014.
- [26] DOLL C N H, MULLER J P, ELVIDGE C D. Night-time Imagery as a Tool for Global Mapping of Socioeconomic Parameters and Greenhouse Gas Emissions[J]. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 2000, 29(3): 157-162.
- [27] GHOSH T, ELVIDGE C D, SUTTON P C, et al. Creating a Global Grid of Distributed Fossil Fuel CO₂ Emissions from Nighttime Satellite Imagery[J]. *Energies*, 2010, 3(12): 1895-1913.
- [28] SU Yongxian, CHEN Xiuzhi, YE Yuyao, et al. The Characteristics and Mechanisms of Carbon Emissions from Energy Consumption in China Using DMSP/OLS Night Light Imageries[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(11): 1513-1526.(苏泳娴, 陈修治, 叶玉瑶, 等. 基于夜间灯光数据的中国能源消费碳排放特征及机理[J]. *地理学报*, 2013, 68(11): 1513-1526.)
- [29] 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[J]. *Social Geography*, 2012, 7(1): 23-35.
- [30] ELVIDGE C D, SUTTON P C, GHOSH T, et al. A Global Poverty Map Derived from Satellite Data[J]. *Computers & Geosciences*, 2009, 35(8): 1652-1660.
- [31] PINKOVSKIY M L. Economic Discontinuities at Borders: Evidence from Satellite Data on Lights at Night[J/OL]. [2013-03]. <http://economics.mit.edu/files/7271>.
- [32] KROTH V, LARCINESE V, WEHNER J. A Better Life for All? Democratization and Electrification in Post-apartheid South Africa[J/OL]. [2014-01]. <http://personal.lse.ac.uk/LARCINES/electrification%202014%20working%20paper.pdf>.
- [33] HENDERSON M, YEH E T, GONG P, et al. Validation of Urban Boundaries Derived from Global Night-time Satellite Imagery[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24(3): 595-609.
- [34] SMALL C, POZZI F, ELVIDGE C D. Spatial Analysis of Global Urban Extent from DMSP-OLS Night Lights[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 96(3-4): 277-291.
- [35] SMALL C, ELVIDGE C D, BALK D, et al. Spatial Scaling of Stable Night Lights[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(2): 269-280.
- [36] YANG Yang, HE Chunyang, ZHAO Yuanyuan, et al. Research on the Layered Threshold Method for Extracting Urban Land Using the DMSP/OLS Stable Nighttime Light Data[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2011, 16(4): 666-673.(杨洋, 何春阳, 赵媛媛, 等. 利用 DMSP/OLS 稳定夜间灯光数据提取城镇用地信息的分层阈值法研究[J]. *中国图象图形学报*, 2011, 16(4): 666-673.)
- [37] ZHOU Y Y, SMITH S J, ELVIDGE C D, et al. A Cluster-based Method to Map Urban Area from DMSP/OLS Nightlights[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 147(5): 173-185.
- [38] HE C Y, SHI P J, LI J G, et al. Restoring Urbanization Process in China in the 1990s by Using Non-radiance-calibrated DMSP/OLS Nighttime Light Imagery and Statistical Data[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(13): 1614-1620.
- [39] SHI K F, YU B L, HUANG Y X, et al. Evaluating the Ability of NPP-VIIRS Nighttime Light Data to Estimate the Gross Domestic Product and the Electric Power Consumption of China at Multiple Scales: A Comparison with DMSP-OLS Data[J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(2): 1705-1724.
- [40] CAO X, CHEN J, IMURA H, et al. A SVM-based Method to Extract Urban Areas from DMSP-OLS and SPOT VGT Data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(10): 2205-2209.
- [41] LU D S, TIAN H Q, ZHOU G M, et al. Regional Mapping of Human Settlements in Southeastern China with Multisensor Remotely Sensed Data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(9): 3668-3679.
- [42] YANG Y, HE C Y, ZHANG Q F, et al. Timely and Accurate National-scale Mapping of Urban Land in China Using Defense Meteorological Satellite Program's Operational Linescan System Nighttime Stable Light Data[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2013, 7(1): 73-86.
- [43] PANDEY B, JOSHI P K, SETO K C. Monitoring Urbanization Dynamics in India Using DMSP/OLS Night Time Lights and SPOT-VGT Data[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2013, 23: 49-61.
- [44] ZHANG Q L, 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(9): 2320-2329.
- [45] LIU Z F, HE C Y, ZHANG Q F, 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.
- [46] ZHANG Q, SETO K C. Can Night-time Light Data Identify

- Typologies of Urbanization? A Global Assessment of Successes and Failures[J]. *Remote Sensing*, 2013, 5(7): 3476-3494.
- [47] PROPASTIN P, KAPPAS M. Assessing Satellite-observed Nighttime Lights for Monitoring Socioeconomic Parameters in the Republic of Kazakhstan[J]. *GIScience & Remote Sensing*, 2012, 49(4): 538-557.
- [48] LI X, CHEN X L, ZHAO Y S, et al. Automatic Intercalibration of Night-time Light Imagery Using Robust Regression [J]. *Remote Sensing Letters*, 2013, 4(1): 45-54.
- [49] YU B L, SHU S, LIU H X, 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(11): 2328-2355.
- [50] WEI Y, LIU H X, SONG W, et al. Normalization of Time Series DMSP-OLS Nighttime Light Images for Urban Growth Analysis with Pseudo Invariant Features [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 128: 1-13.
- [51] YI K P, TANI H, LI Q, et al. Mapping and Evaluating the Urbanization Process in Northeast China Using DMSP/OLS Nighttime Light Data[J]. *Sensors*, 2014, 14(2): 3207-3226.
- [52] LIAO Bing, WEI Kangxia, SONG Weiwei. Assessment and Application of DMSP/OLS Night-time Light Data in the Spatial Structure of Urban System: A Case of Jiangxi Province in Nearly 16 Years[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2012, 21(11): 1295-1300. (廖兵, 魏康霞, 宋巍巍. DMSP/OLS 夜间灯光数据在城镇体系空间格局研究中的应用与评价: 以近 16 年江西省间城镇空间格局为例[J]. *长江流域资源与环境*, 2012, 21(11): 1295-1300.)
- [53] FAN Junfu, MA Ting, ZHOU Chenghu, et al. Changes in Spatial Patterns of Urban Landscape in Bohai Rim from 1992 to 2010 Using DMSP-OLS Data[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2013, 15(2): 280-288. (范俊甫, 马廷, 周成虎, 等. 1992-2010 年基于 DMSP-OLS 图像的环渤海城市群空间格局变化分析[J]. *地球信息科学学报*, 2013, 15(2): 280-288.)
- [54] XU Mengjie, CHEN Li, LIU Huanjin, et al. Pattern and Process of Urbanization in the Yangtze Delta Based on DMSP/OLS Data [J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2011(3): 106-112. (徐梦洁, 陈黎, 刘焕金, 等. 基于 DMSP/OLS 夜间灯光数据的长江三角洲地区城市化格局与过程研究[J]. *国土资源遥感*, 2011(3): 106-112.)
- [55] SMALL C, ELVIDGE C D. Night on Earth: Mapping Decadal Changes of Anthropogenic Night Light in Asia [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2013, 22: 40-52.
- [56] WU Jiansheng, LIU Hao, PENG Jian, et al. Hierarchical Structure and Spatial Pattern of China's Urban System: Evidence from DMSP/OLS Nightlight Data[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(6): 759-770. (吴健生, 刘浩, 彭建, 等. 中国城市体系等级结构及其空间格局: 基于 DMSP/OLS 夜间灯光数据的实证[J]. *地理学报*, 2014, 69(6): 759-770.)
- [57] DE SOUZA FILHO C R, ZULLO Jr J, ELVIDGE C. Brazil's 2001 Energy Crisis Monitored from Space[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(12): 2475-2482.
- [58] KOHIYAMA M, HAYASHI H, MAKI N, et al. Early Damaged Area Estimation System Using DMSP-OLS Night-time Imagery[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(11): 2015-2036.
- [59] CAO C, SHAO X, UPRETY S, et al. Detecting Light Outages after Severe Storm Using the S-NPP/VIIRS Day/Night Band Radiances[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, 10(6): 1582-1586.
- [60] LI X, GE L L, CHEN X L. Detecting Zimbabwe's Decadal Economic Decline Using Nighttime Light Imagery [J]. *Remote Sensing*, 2013, 5(9): 4551-4570.
- [61] AGNEW J, GILLESPIE T W, GONZALEZ J, et al. Baghdad Nights: Evaluating the US Military 'Surge' Using Nighttime Light Signatures[J]. *Environment and Planning A*, 2008, 40(10): 2285-2295.
- [62] WITMER F D W, O'LOUGHLIN J. Detecting the Effects of Wars in the Caucasus Regions of Russia and Georgia Using Radiometrically Normalized DMSP-OLS Nighttime Lights Imagery[J]. *GIScience & Remote Sensing*, 2011, 48(4): 478-500.
- [63] LI X, CHEN F R, CHEN X L. Satellite-observed Nighttime Light Variation as Evidence for Global Armed Conflicts [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2013, 6(5): 2302-2315.
- [64] LI X, LI D R. Can Night-time Light Images Play a Role in Evaluating the Syrian Crisis? [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2014, 35(18): 6648-6661.
- [65] IMHOFF M L, LAWRENCE W T, ELVIDGE C D, et al. Using Nighttime DMSP/OLS Images of City Lights to Estimate the Impact of Urban Land Use on Soil Resources in the United States[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 59(1): 105-117.
- [66] IMHOFF M L, TUCKER C J, LAWRENCE W T, et al. The Use of Multisource Satellite and Geospatial Data to Study the Effect of Urbanization on Primary Productivity in the United States[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(6): 2549-2556.
- [67] ZHAO N Z, CURRIT N, SAMSON E. Net Primary Production and Gross Domestic Product in China Derived from Satellite Imagery[J]. *Ecological Economics*, 2011, 70(5): 921-928.
- [68] COVA T J, SUTTON P C, THEOBALD D M. Exurban Change Detection in Fire-prone Areas with Nighttime Satellite Imagery[J]. *Photogrammetric Engineering and*

- Remote Sensing, 2004, 70(11): 1249-1257.
- [69] HE C Y, LIU Z F, TIAN J, et al. Urban Expansion Dynamics and Natural Habitat Loss in China: A Multiscale Landscape Perspective[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(9): 2886-2902.
- [70] KUECHLY H U, KYBA C C M, RUHTZ T, et al. Aerial Survey and Spatial Analysis of Sources of Light Pollution in Berlin, Germany[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 126: 39-50.
- [71] BENNIE J, DAVIES T W, DUFFY J P, et al. Contrasting Trends in Light Pollution Across Europe Based on Satellite Observed Night Time Lights[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4. doi: 10.1038/srep03789.
- [72] KLOOG I, HAIM A, STEVENS R G, et al. Light at Night Co-distributes with Incident Breast but Not Lung Cancer in the Female Population of Israel[J]. *Chronobiology International*, 2008, 25(1): 65-81.
- [73] BAUER S E, WAGNER S E, BURCH J, et al. A Case-referent Study: Light at Night and Breast Cancer Risk in Georgia[J]. *International Journal of Health Geographies*, 2013, 12(1): 23.
- [74] KLOOG I, HAIM A, STEVENS R G, et al. Global Co-distribution of Light at Night (LAN) and Cancers of Prostate, Colon, and Lung in Men[J]. *Chronobiology International*, 2009, 26(1): 108-125.
- [75] VOLLMER C, MICHEL U, RANDLER C. Outdoor Light at Night (LAN) is Correlated with Eveningness in Adolescents[J]. *Chronobiology International*, 2012, 29(4): 502-508.
- [76] MAZOR T, LEVIN N, POSSINGHAM H P, et al. Can Satellite-based Night Lights Be Used for Conservation? The Case of Nesting Sea Turtles in the Mediterranean[J]. *Biological Conservation*, 2013, 159: 63-72.
- [77] RODRIGUES P, AUBRECHT C, GIL A, et al. Remote Sensing to Map Influence of Light Pollution on Cory's Shearwater in Sao Miguel Island, Azores Archipelago[J]. *European Journal of Wildlife Research*, 2012, 58(1): 147-155.
- [78] DWYER R G, BEARHOP S, CAMPBELL H A, et al. Shedding Light on Light: Benefits of Anthropogenic Illumination to a Nocturnally Foraging Shorebird[J]. *Journal of Animal Ecology*, 2013, 82(2): 478-485.
- [79] WALUDA C M, YAMASHIRO C, ELVIDGE C D, et al. Quantifying Light-fishing for *Dosidicus Gigas* in the Eastern Pacific Using Satellite Remote Sensing[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 91(2): 129-133.
- [80] WALUDA C M, GRIFFITHS H J, RODHOUSE P G. Remotely Sensed Spatial Dynamics of the *Illex Argentinus* Fishery, Southwest Atlantic[J]. *Fisheries Research*, 2008, 91(2-3): 196-202.
- [81] KIYOFUJI H, SAITOH S I. Use of Nighttime Visible Images to Detect Japanese Common Squid *Todarodes Pacificus* Fishing Areas and Potential Migration Routes in the Sea of Japan[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2004, 276: 173-186.
- [82] CHO K, ITO R, SHIMODA H, et al. Technical Note and Cover Fishing Fleet Lights and Sea Surface Temperature Distribution Observed by DMSP/OLS Sensor[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1999, 20(1): 3-9.
- [83] AUBRECHT C, ELVIDGE C D, LONGCORE T, et al. A Global Inventory of Coral Reef Stressors Based on Satellite Observed Nighttime Lights[J]. *Geocarto International*, 2008, 23(6): 467-479.
- [84] 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(6061): 1424-1427.
- [85] 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.
- [86] SCHUELER C F, LEE T F, MILLER S D. VIIRS Constant Spatial-resolution Advantages[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, 34(16): 5761-5777.
- [87] ELVIDGE C, ZHIZHIN M, HSU F C, et al. VIIRS Night Fire: Satellite Pyrometry at Night[J]. *Remote Sensing*, 2013, 5(9): 4423-4449.
- [88] LEVIN N, JOHANSEN K, HACKER J M, et al. A New Source for High Spatial Resolution Night Time Images—The EROS-B Commercial Satellite[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 149: 1-12.
- [89] TUTTLE B T. Aladdin's Magic Lamp: Developing Methods for Calibration and Geolocation Accuracy Assessment of the DMSP OLS[D]. Denver: University of Denver, 2012: 173-186.

(责任编辑:宋启凡)

收稿日期: 2015-03-12

修回日期: 2015-04-14

第一作者简介: 李德仁(1939—),男,博士,教授,博士生导师,中国科学院院士,中国工程院院士,国际欧亚科学院院士,主要研究方向为摄影测量与遥感。

First author: LI Deren (1939—), male, PhD, professor, PhD supervisor, academicians of Chinese Academy of Science(CAS), Chinese Academy of Engineering (CAE) and International Eurasian Academy of Sciences (IEAS), majors in photogrammetry and remote sensing.