

DOI: 10.5846/stxb201706051026

乔旭宁, 顾羊羊, 邹长新, 黄贤峰, 胡涛. 基于夜间灯光数据的太湖流域城镇扩张对净初级生产力的影响. 生态学报, 2018, 38(16): - .
Qiao X N, Gu Y Y, Zou C X, Huang X F, Hu T. The impact of urban expansion on net primary productivity in the Taihu Lake basin based on nighttime light images. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(16): - .

基于夜间灯光数据的太湖流域城镇扩张对净初级生产力的影响

乔旭宁¹, 顾羊羊^{2,*}, 邹长新², 黄贤峰³, 胡涛⁴

1 河南理工大学 测绘与国土信息工程学院, 焦作 454003

2 环境保护部南京环境科学研究所, 南京 210042

3 贵州省环境科学研究设计院, 贵阳 550018

4 中国环境科学研究院, 北京 100012

摘要: 理解人类活动变化对生态环境的影响, 识别生态环境变化区域及其成因, 对制定差异化的区域生态保护政策具有重要意义。基于 MODIS17A3 和 DMSP/OLS 稳定夜间灯光数据, 结合 RS 与 GIS 技术, 构建城镇开发程度指数, 采用一元线性趋势分析法对城镇开发程度进行分区, 利用 Pearson 相关系数计算城镇开发程度与 NPP 的作用关系, 并运用热点分析模型探讨土地利用转型对 NPP 变化的影响。结果表明: (1) 2000—2010 年, 太湖流域年均 NPP 变化范围是 388.79—452.54 gC m⁻² a⁻¹, NPP 变化呈波动下降趋势; (2) 城镇开发程度缓慢增加区对 NPP 变化影响较小, 增加区与快速增加区对 NPP 变化影响较大; (3) 太湖流域土地转型主要发生在耕地转建设用地、林地转建设用地和水域转建设用地, 建设用地面积的快速扩张及由此导致的城镇开发程度的增加, 是流域 NPP 降低的主要原因。

关键词: 城镇扩张; 夜间灯光数据; NPP; 热点分析; 太湖流域

The impact of urban expansion on net primary productivity in the Taihu Lake basin based on nighttime light images

QIAO Xuning¹, GU Yangyang^{2,*}, ZOU Changxin², HUANG Xianfeng³, HU Tao⁴

1 School of Surveying and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China

2 Nanjing Institute of Environmental Science, Ministry of Environmental Protection, Nanjing 210042, China

3 Guizhou Institute of Environmental Sciences Research and Design, Guiyang 550018, China

4 Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

Abstract: Understanding the relationship between human activities and ecological environment and identifying the changing areas of the ecological environment and their causes is of great significance to the formation of ecological protection policies for differentiated regions. The Taihu Lake basin is the core of the Yangtze River Delta, which has experienced rapid economic growth (GDP +15.7%/year), population growth (+3.0%/year on average), urbanization (+9.2%/year on average) from 1985 to 2010. Rapid industrialization and urbanization have significantly changed the pattern of land use, which has posed a threat to the region's ecological security and sustainable development. Based on the MODIS 17A3 and DMSP/OLS nighttime light images, we determined the urban development level index, and a linear trend analysis was used to partition the urban development levels. We used the Pearson correlation coefficient to calculate the relationship between

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0506606, 2016YFC0502106); 国家社会科学基金(14BJY021); 河南省高校哲学社会科学优秀学者计划(2018-YXXZ-07); 河南省高校青年骨干教师计划(2014GGJS-044); 河南省高校哲学社会科学创新团队支持计划(2016-CXTD-04)

收稿日期: 2017-06-05; 网络出版日期: 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: guyangyanghp@163.com

the urban development level and net primary productivity (NPP). Finally, a spatial correlation model was used to analyze the impact of urban expansion on the NPP in the Taihu Lake basin, combined with geographic information system (GIS) and remote sensing (RS) techniques. The results showed that the average NPP in the Taihu Lake basin varied from $388.79 \text{ gC m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ to $452.54 \text{ gC m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ from 2000 to 2010. The average NPP over 11 years was $422.65 \text{ gC m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$. The changes in average annual NPP were fluctuating and declining. The urban development level slow-increased zone had little effect on the change in NPP, while the increased zone and rapid-increased zone had great influence on the NPP. Along with the increase in the urban development level, land transformation mainly occurred from farmland to construction, forest to construction, and water to construction. The rapid expansion of urban areas has led to increase in construction land and the urban development level, which are the main reasons for the decrease in NPP.

Key Words: urban expansion; Nighttime light image; NPP; hotspots analysis; Taihu Lake basin

生态环境是人类生存依赖的物质基础和必不可少的空间条件^[1]。MA 报告^[2]指出,在评估的 24 项全球生态系统服务功能中,有 15 项(占总数 60%以上)正在退化,生态系统服务功能不断下降,生态环境逐渐降低。TEEB 研究成果^[3]揭示全球生态环境正遭受威胁。Costanza 等^[4]研究结果表明近年来土地利用方式的改变造成全球生态环境质量下降。刘爱琳等^[5]研究发现中国近 15 年来城市和工矿用地扩张对 NPP 降低具有显著影响。生态环境质量的降低,将会直接威胁区域乃至全球生态安全^[2,6]。植被净初级生产力(Net primary productivity, NPP)是指绿色植物在单位时间单位面积通过光合作用产生有机物质总量扣除自养呼吸后剩余部分^[7],是陆地生态系统重要组成之一,在生态环境研究中运用广泛^[1,8]。NPP 作为生态系统服务功能重要指标,能够有效反应城镇化带来的生态环境问题^[5,9]。目前常见的 NPP 估算模型主要有气候生产潜力模型(统计模型)、光能利用率模型(参数模型)、生态系统过程模型(机理模型)^[10]。MOD17A3-NPP 产品,参考 BIOME-BGC 模型与光能利用率模型拟合得到的陆地生态系统 NPP^[11],被国内外学者运用在不同区域植被生长状况、生物量估算、生态环境变化等方面^[11]。

城镇扩张是一个涉及经济、人口、地域空间等诸多方面复杂过程,城镇开发程度能够有效反应城镇扩张现象^[12]。目前常用城镇开发程度测算方法包括主要指标法和复合指标法,人口概念的差异性、单一指标的片面性、复合指标的地域性以及统计数据的滞后性等因素使得计算指标在适用性、可比性、及时性等方面存在不足。因此,构建能够综合反映城镇发展特征,在快速获取数据同时具有较高可比性的城镇开发程度指标成为目前急需解决的问题。近些年遥感技术的快速发展为解决该问题提供了技术支持。

DMSP/OLS 夜间灯光影像是美国军事气象卫星(Defense Meteorological Satellite Program, DMSP)搭载的 OLS 传感器(Operational Linescan System)获取的数据,能探测到城市夜间灯光,是监测人类活动良好的数据源^[13-14]。DMSP/OLS 夜间灯光数据已经成功地被国内外学者运用于城市发展研究^[15],经济发展水平研究^[16-17],电力能源消费量研究^[14]以及城市化对生态环境影响研究^[18]等领域。目前,根据植被覆盖变化^[19]、土地利用变化^[20]、潜在 NPP 变化^[8,21]等指标分析人类活动变化对生态环境影响研究较多,使用夜间灯光数据量化城镇开发程度表征人类活动研究较少^[18]。以往研究区主要集中在区域^[8,20]、省^[1]、市行政区划^[18],研究单元很少涉及县域或更小尺度。本文在像元尺度探讨城镇开发程度与 NPP 关系,可以精确表征城镇开发程度及 NPP 动态变化,准确反映两者时空关联特征,有效分析城镇开发程度变化对 NPP 影响,对制定差异化的区域生态保护政策具有重要意义。

本文基于 MODIS17A3 数据和 DMSP/OLS 稳定夜间灯光数据,构建城镇开发程度指数,采用一元线性趋势分析法对城镇开发程度进行分区,分析太湖流域城镇开发程度与 NPP 相关系数的动态变化规律,并运用热点分析模型研究土地利用转型对 NPP 变化影响,为区域生态可持续发展提供参考依据。

1 研究区与数据来源

1.1 研究区概况

太湖流域位于长江三角洲核心区域(119°11'—121°51'E, 30°28'—32°15'N),北抵长江,东临东海,南滨钱塘江,西以天目山,茅山为界(图 1)。行政区划包括江苏省苏南地区,浙江的嘉兴、湖州以及杭州市一部分,上海的大部分区域,流域面积 3.69 万 km²。流域地势呈西高东低,地貌主要包括丘林山地及平原两类,其中丘林山地位于流域西南部,而平原区主要分布在流域北、东和南部,占流域面积的 80%。地处亚热带季风气候,年降雨量 1010—1400 mm,全年平均气温 15.6℃。根据《中国统计年鉴 2011》可知,太湖流域以占全国 0.38%的国土面积、占全国 4.8%人口,并产生全国 11.6%的 GDP,生态环境承载压力大^[22]。

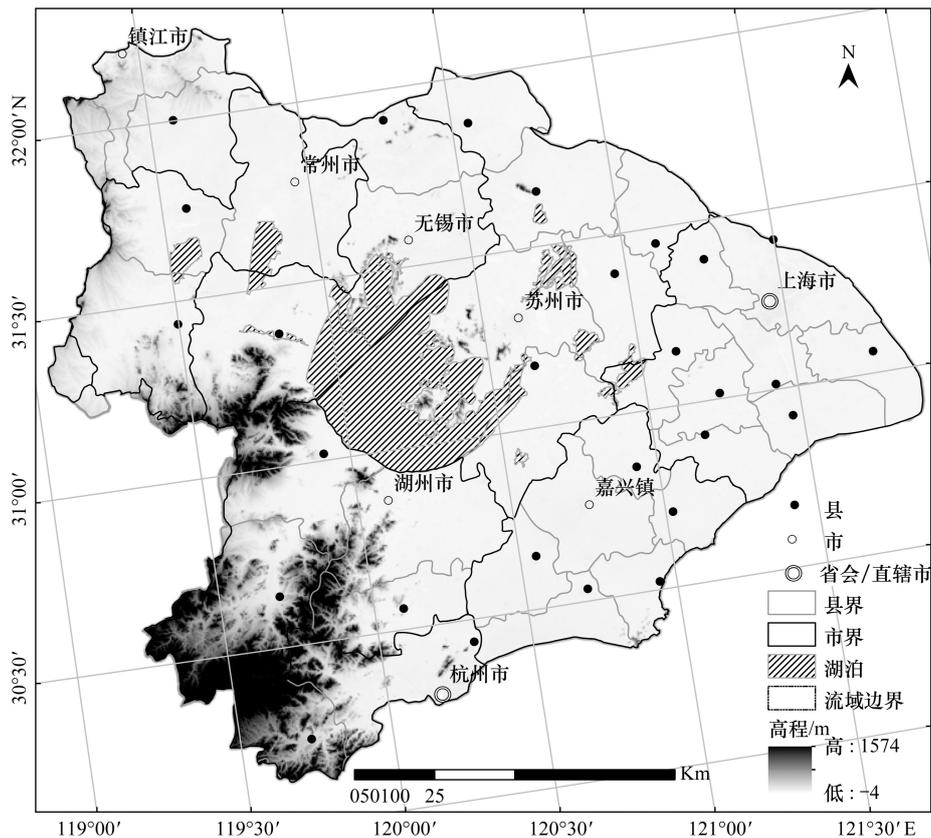


图 1 太湖流域区位图

Fig.1 Location of the Taihu Lake basin

1.2 数据来源及预处理

(1) 土地利用数据 太湖流域 2000 和 2010 年 2 期土地利用数据由中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊—流域科学数据中心提供(<http://lake.geodata.cn/>)。结合太湖流域土地利用现状,将土地利用类型分为耕地、林地、水域、建设用地和未利用地五大类。

(2) NPP 植被净初级生产力数据 数据来源于美国国家航空航天局网站(<https://modis.gsfc.nasa.gov/>),本文使用太湖流域 MOD17A3 NPP 数据,空间分辨率 1km,单位为 $\text{gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$ 。获得 2000—2010 年共 11 年 MOD17A3_h28v05 区域影像数据,通过 ENVI 5.1 对数据进行裁剪、重采样等预处理。MOD17A3 产品有效值为 0—65500,超出该数值范围均为无效数值。

(3) DMSP/OLS 夜间灯光数据 数据来源于美国国家地理数据中心网站(<http://ngdc.noaa.gov/eog/dmsp>)。夜间灯光数据包含 3 种全年平均产品:无云观测频数、平均灯光数据、稳定灯光数据。稳定灯光数据

涉及城市、乡镇及其他光源区域,去除天然气燃烧、火光等偶然噪声,对全年 VRIN 通道灰度值平均化处理,灰度值范围 0—63,灯光亮度值越高的区域灰度值越大^[14]。基于全球 F152000-F182010 稳定夜间灯光数据,采用 Envi 5.1 裁剪出太湖流域夜间灯光数据,将 WGS-84 原始地理坐标投影转化为 Lambert 等积方位投影,重采样生成 1 km×1 km 网格栅格。

2 研究方法

2.1 城镇开发程度估算

已有研究表明,DMSP/OLS 稳定夜间灯光数据能够有效识别城镇范围和监测城市动态变化^[23-24]。Zhou 等^[23]通过夜间灯光数据分析南亚城镇扩张时空格局变化。Ma 等^[24]提出夜间灯光数据的明亮梯度算法研究城镇变化特征。由于原始影像数据的不连续性以及饱和现象的存在^[15],以 F16_20051128-20061224_rad_v4 影像作为辐射定标依据,采用不变目标法对太湖流域夜间灯光数据进行饱和校正^[25],并对影像进行连续性校正^[26]。使得不同影像间具有连续性以及可比性,并减少像元的饱和效应。

本文借鉴土地利用程度概念^[20],构建城镇开发程度指数(Urban development level, UDL),用来表征人类活动。其公式为:

$$U = 100 \times \sum_{i=1}^n D_i \times P_i$$

$$\Delta U_{b-a} = U_b - U_a = \left\{ \left(\sum_{i=1}^n D_i \times P_{ib} \right) - \left(\sum_{i=1}^n D_i \times P_{ia} \right) \right\} \times 100$$

式中: U 为研究区域的城镇开发程度综合指数; D_i 为第*i*级夜间灯光像元值(校正前像元值范围为 0-63); P_i 为第*i*等级的夜间灯光像元值面积百分比; ΔU_{b-a} 为城镇开发程度综合变化指数,如果 ΔU_{b-a} 为正数,则表明该区域*b*时间城镇开发程度指数大于*a*时间城镇开发程度指数;否则相反。 U_a 、 U_b 为时间*a*和时间*b*对应第*i*等级城镇开发程度面积百分比。

2.2 变化趋势分析

采用一元线性回归分析方法模拟区域 2000—2010 年每个像元栅格的变化趋势^[18]。其中回归方程 $y = a + bx$ 中斜率 b 可以表示自变量的变化趋势。本文设置时间为自变量,因变量为 1 km 像元的城镇开发程度指数,根据最小二乘算法,计算变化趋势斜率。其公式为:

$$b = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times S_i) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n S_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i \right)^2} \times 100$$

式中: b 为趋势斜率; n 为时间点数量; i 为时间; S_i 为各像元统计量。

2.3 相关系数分析

采用 Pearson 相关系数法计算太湖流域 NPP 与 UDL 在时空尺度上相关系数的变化趋势。相关系数(R_{xy})计算公式如下:

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_{ij} - \bar{x}_j)(y_{ij} - \bar{y}_j)]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2 \sum_{i=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_j)^2}}$$

式中: n 为年份序号; x_{ij} 为 NPP 在第*i*年第*j*个像元的值, \bar{x}_j 为 2000—2010 年 11 年间 NPP 第*j*个像元的平均值。同理, y_{ij} 为 UDL 第*i*年第*j*个像元的值, \bar{y}_j 为 2000—2010 年 11 年间 UDL 第*j*个像元的平均值。

2.4 热点分析

Getis-Ord G_i^* 指数用于识别不同的空间位置上的高值簇和低值簇,即热点区(hot spots)与冷点区(cold

spots)的空间分布^[27]。引入 Getis-Ord G_i^* 指数,定量研究太湖流域 NPP 变化的空间格局分布特征。使用 ArcGIS 10.1 中空间分析工具热点分析(Getis-Ord G_i^*),得到结果 P 值和 Z 得分。 P 值表示概率, Z 得分是标准差的倍数。0.01,0.05 和 0.1 是典型概率, Z 得分对应的典型置信区间 90%,95%和 99%的值分别在 <-1.65 或 >1.65 , <-1.96 或 >1.96 和 <-2.58 或 >2.58 。如果 Z 得分为正,且显著,表明位置 i 周围的 NPP 值相对较高(高于均值),属 NPP 高值空间集聚(热点区);反之,如果 Z 得分为负,且显著,则表明位置 i 周围的 NPP 值相对较低(低于均值),属 NPP 低值空间集聚(冷点区)。

3 结果与分析

3.1 NPP 时空变化特征

从图 2 可知,2000—2010 年太湖流域年均 NPP 总体呈现波动下降趋势,11 年平均值为 $422.65 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。2001 年年均 NPP 最大值为 $452.54 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,而 2005 年年均 NPP 值最小为 $388.79 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。多年平均 NPP 主要集中在 $400—600 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 之间,占流域总面积的 31.26%—48.37%,该等级 2000 年占流域总面积比例最高。其次是年均 NPP $<200 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 等级,该等级占流域总面积变化趋势较小,稳定在 27.75%—27.95%之间。年均 NPP 在 $200—400 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 等级占流域总面积最小,变化范围为 1.47%—6.54%。

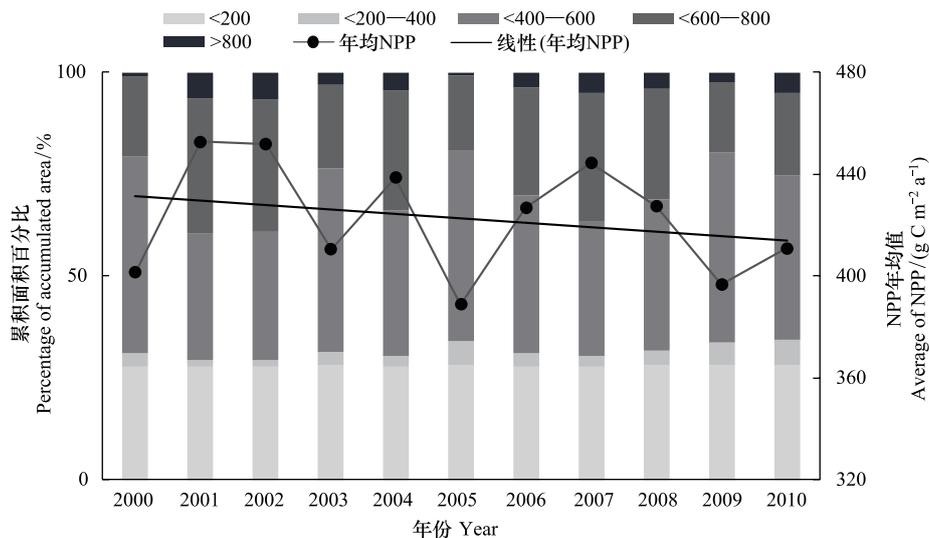


图 2 2000—2010 年太湖流域年均 NPP 组成特征

Fig.2 The makeup of annual NPP in the Taihu Lake basin from 2000 to 2010

2000—2010 年太湖流域年均 NPP 空间分布如图 3 所示。流域西南部植被净初级生产力保持高值状态,生态环境较好。高值区主要分布在天目山脉以南,涉及临安市、安吉县、湖州市、德清县和杭州交界处,长兴县与宜兴市交界处。该区域属于森林禁伐区,人类活动较少,植物资源丰富。流域东北部的常熟市、太仓市以及流域东南部杭嘉湖平原涉及的平湖市和嘉兴市地形平坦、土壤肥沃、气候条件优越,耕地生产力高,同样具有较高的植被净初级生产力。太湖流域西北部句容、金坛、溧阳受地形起伏以及粮食生产本底限制,植被净初级生产力不高。城市建设用地周围植被净初级生产力保持低值状态。

3.2 城镇开发程度分析

相关研究表明夜间灯光数据与国内生产总值 GDP、建成区面积、非农人口、非农人口比例具有较好的相关性。统计太湖流域各市县 2000—2010 年 GDP 总值(百亿元)、建成区面积(km^2)、非农人口数(万人)、年末总人口(万人),对比城镇开发程度总值 UDL_{sum} 与 GDP 总值、建成区面积、非农人口和非农人口比例数据情况。如图 4 所示,流域 GDP 总值、建成区面积、非农人口和非农人口比例逐年增加,城镇开发程度指数的总值也呈现增加趋势。2000—2010 年城镇开发程度总值 UDL_{sum} 与 GDP、建成区面积、非农人口和非农人口比例四

组关系的 R 都高于 0.9, R^2 都高于 0.83, 且 F 值较大, F 检验的显著性概率 Sig 值小于 0.01, 4 组数据均通过显著性检验, 相关性较好。基于夜间灯光数据构建的城镇开发程度指数能够综合反映经济水平、城镇边界扩张、非农人口比例等城镇发展特征, 有效表征城镇扩张现象。

2000—2010 年太湖流域城镇开发程度空间分布如图 5 所示。2000 年太湖流域开发程度高值区主要分布在上海市、苏州市、无锡市、常州市等地市中心, 而宜兴市、溧阳市、海宁市等地城镇开发程度指数偏低, 但这些地区已经初具规模, 并在空间形成集聚效应。2000 年流域城镇开发程度低值区广泛分布, 人类对流域开发处于较低水平。2010 年太湖流域城镇开发程度高值区分布在流域东部、北部以及东南部, 而流域西南部和西部的城镇, 比如安吉县和长兴县, 城镇开发程度相对较低。2000—2010 年, 太湖流域城镇开发程度主要围绕 2000 年各地市中心城区往四周扩散增加, 流域北部、东部以及东南部平坦的地形、便捷的交通, 人类活动剧烈, 城镇开发程度快速增加。流域西南部以及西部地区受地形等自然因素影响, 城镇开发程度增加缓慢。

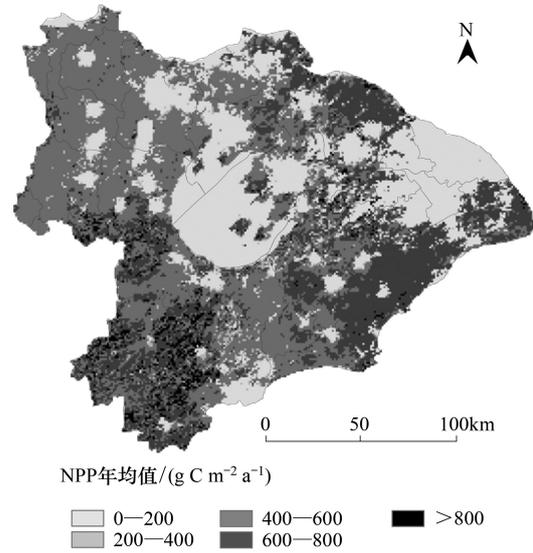


图 3 2000—2010 年太湖流域年均 NPP 空间分布

Fig.3 The distribution of annual NPP in the Taihu Lake basin from 2000 to 2010

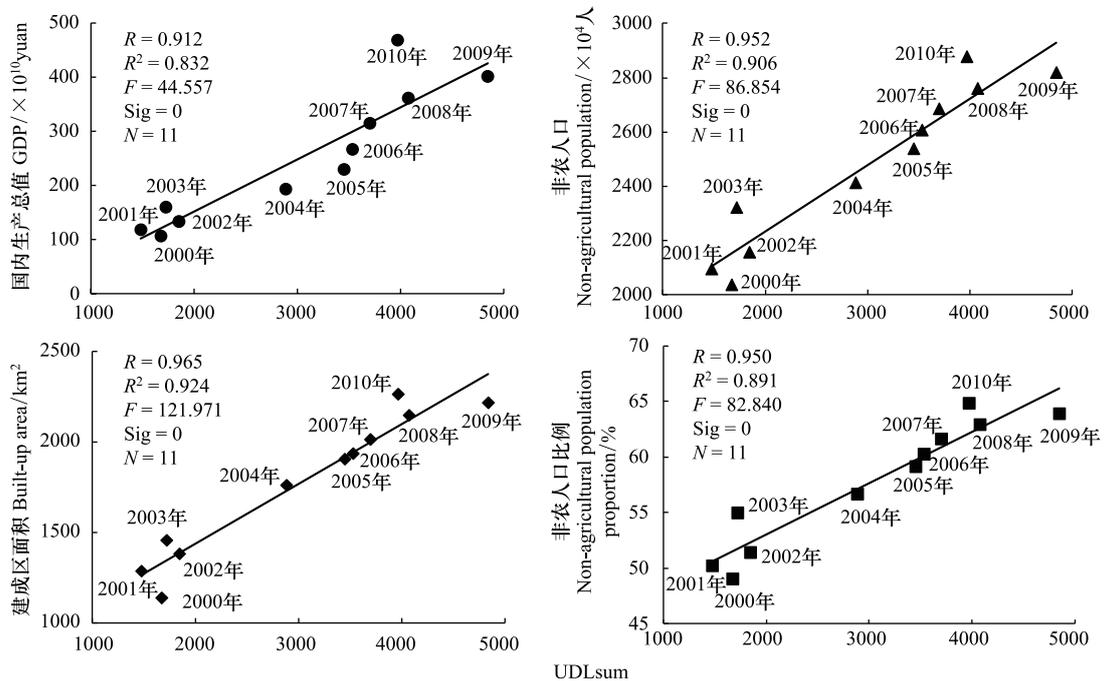


图 4 2000—2010 年太湖流域城镇开发程度总值与 GDP、建成区面积、非农人口、非农人口比例变化趋势

Fig.4 Comparison of the trend between UDLsum and GDP, UDLsum and Built-up area, UDLsum and non-agricultural population, UDLsum and non-agricultural population proportion in the Taihu Lake basin from 2000 to 2010

3.3 NPP 与城镇开发程度格局

一元线性回归分析可在一定程度上消除异常天气对夜间灯光的影响, 能够有效分析城镇开发程度时间变化规律。选取 0 值与趋势变化平均值为阈值, 由于 UDL 变化趋势均值为正值, 故将 UDL 变化趋势小于 0 值归

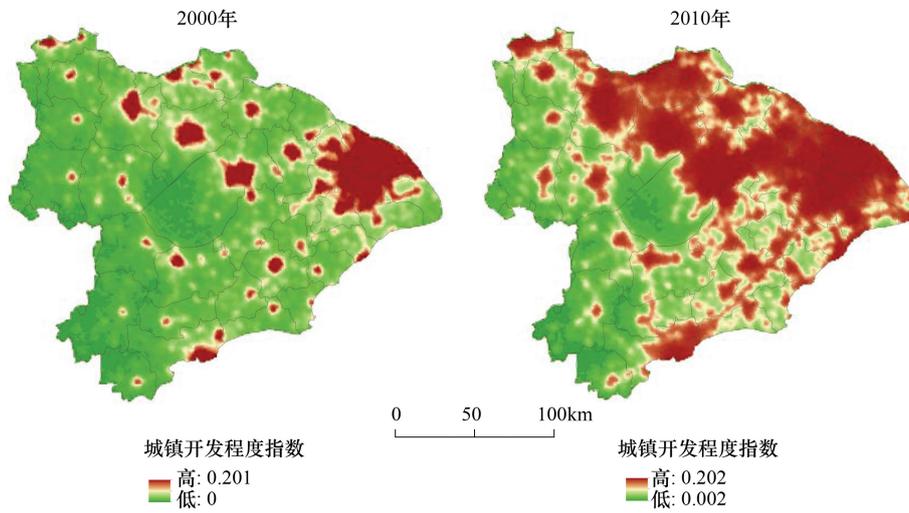


图5 2000—2010年太湖流域城镇开发程度变化

Fig.5 The changes of UDL in the Taihu Lake basin from 2000 to 2010

为降低区, $0 - UDL_{mean}$ 归为缓慢增加区, $UDL_{mean} - 2UDL_{mean}$ 归为增加区, 大于 $2UDL_{mean}$ 归为快速增加区。

3.3.1 UDL 指数变化趋势

2000—2010年太湖流域城镇开发程度指数(UDL)变化斜率为正值,流域城镇开发程度总体呈现增加趋势(图6)。UDL快速增加区域主要分布在流域北部中心城区外围,中心城区快速扩张,侵占周围耕地和水域,城镇开发程度较高。UDL增加区域主要分布在流域各市县中心城区,流域北部UDL快速增加区带动周边发展,城镇开发程度增加区域扩大。上海市和杭州市具有良好的社会经济基础以及丰富的劳动力资源,导致该区域城镇开发程度增加。流域东南部平湖市、嘉兴市、桐乡市等地,受上海与杭州两地辐射带动发展,城镇开发程度逐年增加。宜兴市东南部龙背山森林公园以及安吉县与德清县交界莫干山脉等地城镇开发程度降低。

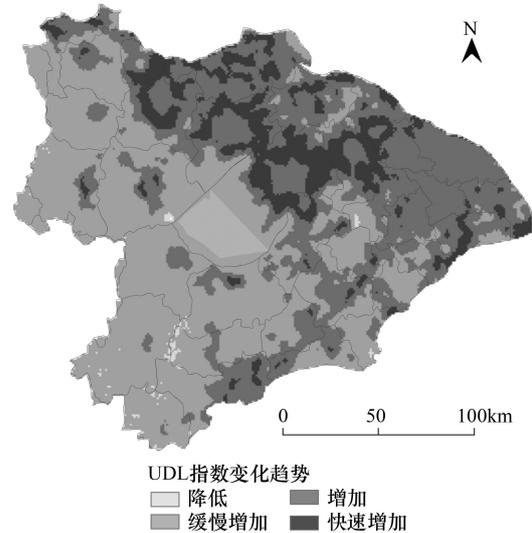


图6 2000—2010年太湖流域UDL指数变化趋势

Fig.6 The changing tendency of UDL in the Taihu Lake basin from 2000 to 2010

3.3.2 NPP 与 UDL 时间变化趋势

在 ArcGIS 10.1 软件中使用 Spatial Analyst tools 工具里面 Band Collection bands 功能统计 11 年不同分区内 NPP 与 UDL 的相关系数。从图 7 可以看出,城镇开发程度增加区 UDL 与 NPP 保持较高的负相关关系,相关系数最大值为 -0.570 ,最小值为 -0.697 ,标准差为 0.035 ,波动幅度较小且离散程度小,表现出一定的递增趋势;快速增加区 UDL 与 NPP 保持负相关,相关系数最大值为 -0.166 ,最小值为 -0.354 ,标准差为 0.054 ,相关系数波动较大且离散程度较高,呈现出增加趋势;降低区 UDL 与 NPP 同样保持负相关,相关系数最大值为 -0.036 ,最小值为 -0.202 ,UDL 与 NPP 相关系数先增加后减少,波动幅度和离散程度远高于其他 3 个区域,缓慢增加区 URL 与 NPP 在 $y=0$ 水平轴上下波动,标准差与离散度均最小,波动较小。城镇开发程度缓慢增加区对 NPP 影响较小,而增加区与快速增加区对 NPP 变化影响较大。

3.3.3 NPP 与 UDL 空间变化趋势

本文通过计算 2000—2010 年太湖流域 NPP 与 UDL 的相关系数分析空间差异性。以 1km^2 的像元数据为

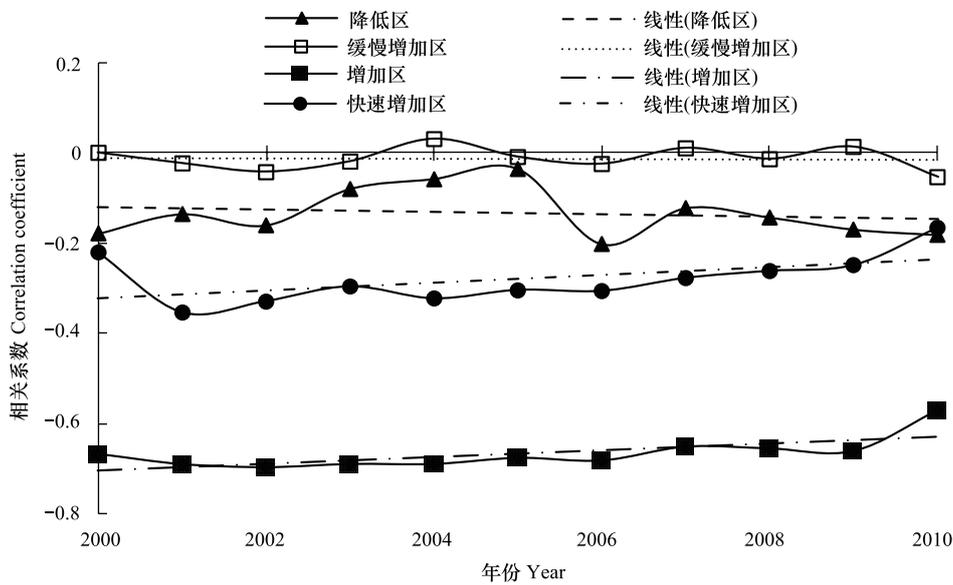


图7 2000—2010年太湖流域UDL与NPP相关系数的动态变化

Fig.7 The dynamic change of correlation coefficient between UDL and NPP in the Taihu Lake basin from 2000 to 2010

基本单元,将11年NPP栅格数据与UDL栅格数据导入matlab中,计算两者空间上的相关系数,如图8所示。其中太湖流域11年间UDL指数降低区域仅占流域总面积的0.54%,故可只考虑UDL指数为正值情况。经统计,NPP与UDL在空间上呈现负相关占流域总面积的46.57%,流域各地处于社会经济快速发展阶段,城镇开发程度增加,NPP年均值减少成为流域主要趋势。从遥感影像上无法有效判断城镇开发程度的增强是流域植被净初级生产力减少的主要因素,因为流域植被净初级生产力与城镇开发程度同步增加也占流域总面积的29.47%。NPP与UDL指数在空间上表现不相关也占流域总面积23.96%。

按照城镇开发程度分区统计,涉及较小面积的城镇降低区相关系数均值为-0.07,占流域总面积51.29%的城镇缓慢增加区相关系数均值为-0.04。城镇降低区与城镇缓慢增加区的NPP与UDL相关系数较小,表明该区域内城镇开发建设对NPP变化影响不大。占流域总面积36.55%和11.62%的城镇增加区与城镇快速增加区相关系数均值分别为-0.1和-0.21,该区域NPP受城镇开发程度影响较大。在太湖流域城镇开发过程中,通过有序引导城镇缓慢扩张,实现区域空间城镇化、人口城镇化与经济城镇化协调发展,可以有效降低城镇扩张对生态环境影响。

3.4 土地利用转型对NPP的影响

土地利用转型是反映城镇开发程度的重要因素,在ArcGIS 10.1中使用热点分析工具(Getis-Ord G_i^*)识别2000—2010年NPP变化趋势的高值(热点)以及低值(冷点)在空间上的显著集聚,分析土地利用转型对NPP变化的影响。图9显示NPP变化趋势的冷热点空间分布信息。当 $p < 0.01$ 时,NPP变化热点区域主要分布在流域西南部、西部以及上海南部,冷点区域主要集中在流域东南部、上海的东部以及流域北部主城区外

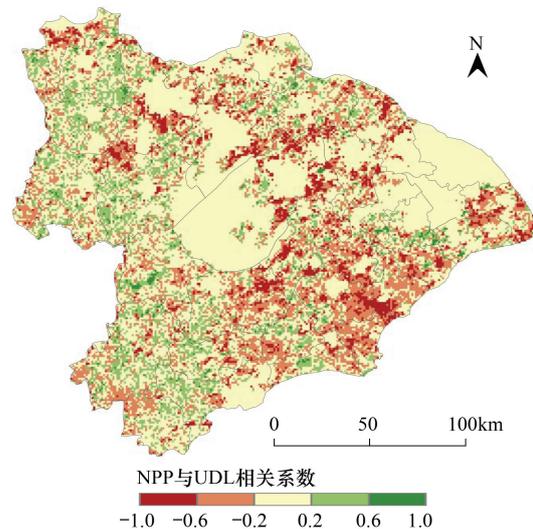


图8 NPP与UDL相关系数

Fig.8 The correlation coefficient of NPP and UDL

围。2000—2010 年热点区未发生土地转型的耕地和林地面积为 355 km²和 357 km²,NPP 分别增加 32.85×10⁶ gC 和 47.09×10⁶gC。热点区土地利用类型转型主要发生在耕地转林地,2000 年 41km²耕地在 2010 年转变为林地,NPP 相应增加 4.39×10⁶gC(见表 1 和表 2)。11 年间冷点未发生土地利用转型的建设用地面积为 591km²,NPP 减少 63.94×10⁶gC,建设用地开发强度的增加致使该区域 NPP 快速降低。冷点区土地利用转型主要发生在耕地转建设用地、林地转建设用地以及水域转建设用地之间。2000 年 677 km²的耕地在 2010 年转变为建设用地,NPP 减少 76.08×10⁶gC。同时 32 km²的林地以及 47 km²的水域转为建设用地,NPP 分布相应减少 3.26×10⁶gC 和 4.75×10⁶gC。随着太湖流域城镇开发程度增加,2010 年 NPP 总值变化冷点区涉及的建设用地总共减少 148.03×10⁶gC,占流域 NPP 总值变化冷点区的 44.87%。太湖流域建设用地面积的快速扩张以及由此所导致的城镇开发程度的增加,是流域 NPP 降低的主要原因。

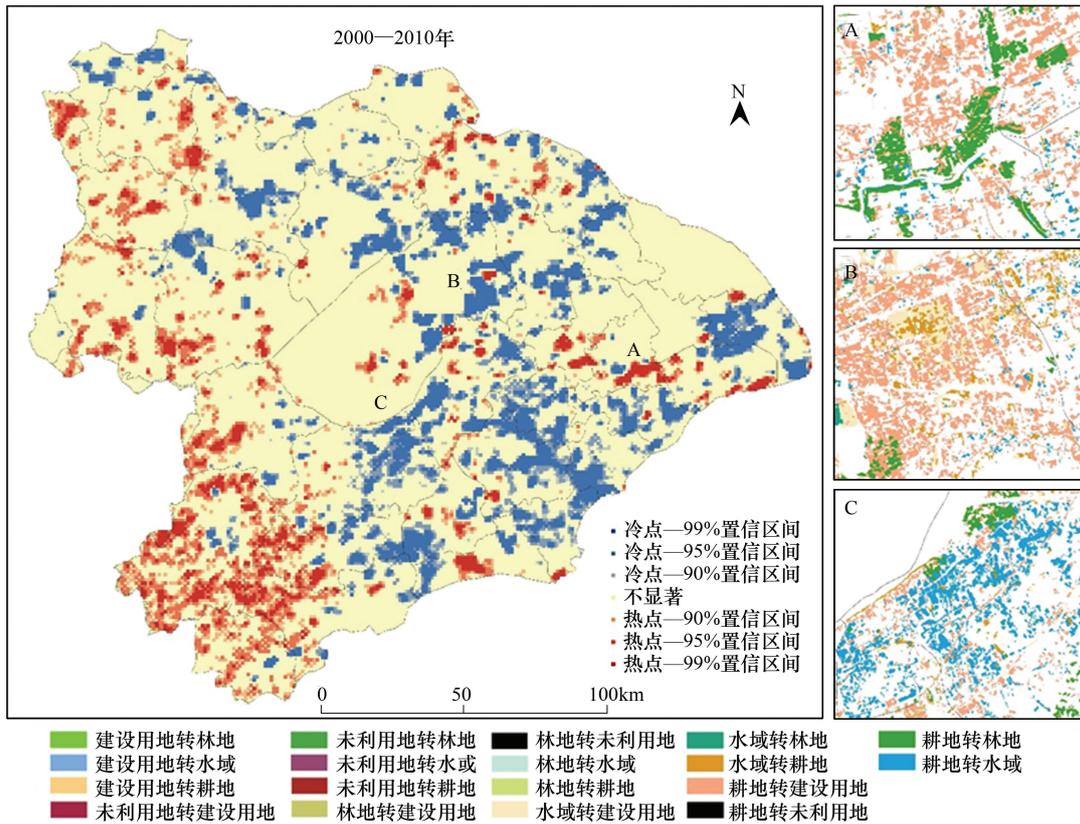


图 9 2000—2010 年太湖流域 NPP 变化的冷热点空间分布

Fig.9 Cold-hot spots spatial distribution of changing NPP in the Taihu Lake basin from 2000 to 2010

表 1 2000—2010 年太湖流域 NPP 变化冷热点 ($P < 0.01$) 区域土地利用变化转移矩阵/km²

Table 1 Land use change transition matrix of NPP's changes where cold-hot spots were in 99% confidence interval between 2000 and 2010 in the Taihu Lake basin

	热点($P < 0.01$) Hot-spots					冷点($P < 0.01$) Cold-spots				
	耕地 Farmland	林地 Forest	建设用地 Construction	水域 Water	总和 Total	耕地 Farmland	林地 Forest	建设用地 Construction	水域 Water	总和 Total
耕地 Farmland	355	41	49	12	457	1162	24	677	74	1937
林地 Forest	6	357	6	0	369	2	187	32	5	226
建设用地 Construction	0	0	56	0	56	1	0	591	0	592
水域 Water	10	12	5	77	104	32	0	47	299	378
总和 Total	371	410	116	89	986	1197	211	1347	378	3133

表 2 2000—2010 年太湖流域 NPP 变化冷热点 ($p < 0.01$) 区域对应 NPP 总值变化Table 2 changes of the total NPP where cold-hot spots were in 99% confidence interval between 2000 and 2010 in the Taihu Lake basin (10^6gC)

	热点 ($P < 0.01$)					冷点 ($P < 0.01$)				
	耕地 Farmland	林地 Forest	建设用地 Construction	水域 Water	总和 Total	耕地 Farmland	林地 Forest	建设用地 Construction	水域 Water	总和 Total
耕地 Farmland	32.85	4.39	4.36	0.72	42.31	-116.94	-2.31	-76.08	-9.17	-204.49
林地 Forest	0.77	47.09	0.74	0.00	48.60	-0.11	-18.99	-3.26	-0.72	-23.08
建设用地 Construction	0.00	0.00	4.94	0.00	4.94	-0.08	0.00	-63.94	0.00	-64.02
水域 Water	0.90	0.86	0.78	7.79	10.32	-3.12	0.00	-4.75	-30.42	-38.29
总和 Total	34.52	52.33	10.82	8.51	106.17	-120.24	-21.30	-148.03	-40.31	-329.88

4 结论与讨论

4.1 结论

本文采用 DMSP/OLS 稳定夜间灯光数据构建城镇开发强度指数,运用多指标验证其表征城镇扩张的合理性,分析太湖流域城镇开发程度与植被净初级生产力时空格局演变特征,并探讨土地利用转型对 NPP 变化的影响。结论如下:

(1) 2000—2010 年,太湖流域年均 NPP 变化范围是 $388.79\text{—}452.54 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, NPP 变化呈现波动下降趋势。年均 NPP 主要集中在 $400\text{—}600 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 占流域总面积 $31.26\%\text{—}48.37\%$ 。NPP 高值区分布在流域西南部及东南部,低值区广泛分布。

(2) 2000—2010 年,太湖流域北部、东部以及东南部的城镇开发程度快速增加,西南部以及西部地区增加缓慢。城镇开发程度缓慢增加区对 NPP 影响较小,而增加区与快速增加区对 NPP 变化影响较大。

(3) 2000—2010 年, NPP 变化热点区土地利用类型转型主要发生在耕地转林地,冷点区主要发生在耕地转建设用地、林地转建设用地以及水域转建设用地之间。太湖流域建设用地面积的快速扩张以及由此导致的城镇开发程度的增加,是流域 NPP 降低的主要原因。

4.2 讨论

(1) 本文基于 MODIS-NPP 产品数据计算的 2000—2010 年太湖流域 NPP 平均值为 $422.65 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 与王琳等^[28]结果 ($506.6 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$) 接近, 高于戴靓等^[29]结果 ($168.8 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)。研究区范围、时间序列长度、数据源、估算模型差异等都是影响测算 NPP 差异的主要原因^[10]。依托一元线性回归分析,计算 11 年流域城镇开发程度 (UDL) 总体变化趋势,可在一定程度上消除异常天气对夜间灯光的影响,能够有效分析城镇开发程度时间变化规律。

(2) 城镇开发程度的增加导致 NPP 减少成为流域主要趋势,部分区域出现 NPP 增加而城镇开发程度降低的格局。近些年宜兴市东南部龙背山森林公园的建设以及上海、苏州等地“四类”公益林和“四旁”林的生产与保护工程实施,改善了区域生态环境。但是大多数城镇开发程度增加区域主要位于建设用地周围,具有较低的 NPP。2010 年 NPP 总值变化冷点区涉及的建设用地总共减少 $148.03 \times 10^6 \text{ gC}$, 占流域 NPP 总值变化冷点区的 44.87% 。因此,太湖流域城镇扩张是流域 NPP 降低的关键因素,与徐昔保等人研究结果一致^[30]。因此要从区域实际情况出发,改善人们对建设用地在生态环境中价值认知,完善城市绿地系统规划,提高城市生态环境价值,构建良好的生态安全格局^[31]。

(3) 太湖流域应当走适度扩张的绿色城镇化道路。由于太湖流域城镇开发程度缓慢增加区对 NPP 影响较小,而增加区与快速增加区对 NPP 变化影响较大。因此,应当适当控制流域城镇化速度,适当放缓城镇扩张水平,可有效降低城镇扩张对生态系统的影响程度,促进城镇扩张与生态保护协调的绿色城镇化发展。

参考文献 (References):

- [1] 乔旭宁, 王林峰, 牛海鹏, 杨娅琳, 顾羊羊. 基于 NPP 数据的河南省淮河流域生态经济协调性分析. 经济地理, 2016, 36(7): 173-181,

- 189-189.
- [2] Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Washington, DC: World Resources Institute, 2005.
- [3] Kumar P. *The Economics of Ecosystems and Biodiversity: Ecological and Economic Foundations*. London: Earthscan, 2010.
- [4] Costanza R, de Groot R, Sutton P, van der Ploeg S, Anderson S J, Kubiszewski I, Farber S, Turner R K. Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change*, 2014, 26: 152-158.
- [5] 刘爱琳, 匡文慧, 闫慧敏, 丁方宇, 杨天荣. 2000-2015 年城市和工矿用地扩张对净初级生产力的影响. *干旱区地理*, 2017, 40(4): 805-816.
- [6] 傅伯杰, 张立伟. 土地利用变化与生态系统服务: 概念、方法与进展. *地理科学进展*, 2014, 33(4): 441-446.
- [7] Piao S L, Fang J Y, Ciais P, Peylin P, Huang Y, Sitch S, Wang T. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China. *Nature*, 2009, 458(7241): 1009-1013.
- [8] 潘桂行, 申涛, 马雄德, 乔晓英. 人类活动和自然因素对海流兔河流域生态环境影响分析. *干旱区资源与环境*, 2017, 31(4): 67-72.
- [9] Vitousek P M, Mooney H A, Lubchenco J, Melillo J M. Human domination of Earth's ecosystems. *Science*, 1997, 277(5325): 494-499.
- [10] 潘竞虎, 黄克军, 李真. 2001—2010 年疏勒河流域植被净初级生产力时空变化及其与气候因子的关系. *生态学报*, 2017, 37(6): 1888-1899.
- [11] 蒋蕊竹, 李秀启, 朱永安, 张治国. 基于 MODIS 黄河三角洲湿地 NPP 与 NDVI 相关性的时空变化特征. *生态学报*, 2011, 31(22): 6708-6716.
- [12] 陈晋, 卓莉, 史培军, 一之濑俊明. 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.
- [13] Elvidge C D, Cinzano P, Pettit D R, Arvesen J, Sutton P, Small C, Nemani R, Longcore T, Rich C, Safran J, Weeks J, Ebener S. The Nightsat mission concept. *International Journal of Remote Sensing*, 2007, 28(12): 2645-2670.
- [14] 顾羊羊, 乔旭宁, 樊良新, 关中美, 冯德显, 高亚红. 夜间灯光数据的区域能源消费碳排放空间化. *测绘科学*, 2017, 42(2): 140-146.
- [15] 高亚红, 顾羊羊, 乔旭宁, 宋雪桦, 叶润武, 孙旭. 基于夜间灯光数据的南京城镇用地提取. *测绘科学*, 2017, 42(6): 93-98, 154-154.
- [16] Shi K F, Yu B L, Huang Y X, Hu Y J, Yin B, Chen Z Q, Chen L J, Wu J P. 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. *Remote Sensing*, 2014, 6(2): 1705-1724.
- [17] Jean N, Burke M, Xie M, Davis W M, Lobell D B, Ermon S. Combining satellite imagery and machine learning to predict poverty. *Science*, 2016, 353(6301): 790-794.
- [18] 刘焱序, 吴文恒, 温晓金, 张东海. 晋陕蒙能源区城镇化过程及其对生态环境的影响. *地理研究*, 2013, 32(11): 2009-2020.
- [19] 信忠保, 许炯心, 郑伟. 气候变化和人类活动对黄土高原植被覆盖变化的影响. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2007, 37(11): 1504-1514.
- [20] 吴琳娜, 杨胜天, 刘晓燕, 罗娅, 周旭, 赵海根. 1976 年以来北洛河流域土地利用变化对人类活动程度的响应. *地理学报*, 2014, 69(1): 54-63.
- [21] 毛德华. 定量评价人类活动对东北地区沼泽湿地植被 NPP 的影响[D]. 长春: 中国科学院研究生院(东北地理与农业生态研究所), 2014.
- [22] Xu X B, Yang G S, Tan Y, Zhuang Q L, Li H P, Wan R R, Su W Z, Zhang J. Ecological risk assessment of ecosystem services in the Taihu Lake Basin of China from 1985 to 2020. *Science of the Total Environment*, 2016, 554-555: 7-16.
- [23] Zhou N J, Hubacek K, Roberts M. Analysis of spatial patterns of urban growth across South Asia using DMSP-OLS nighttime lights data[J]. *Applied Geography*, 2015, 63:292-303.
- [24] Ma T, Zhou Y K, Zhou C H, Haynie S, Pei T, Xu T. Night-time light derived estimation of spatio-temporal characteristics of urbanization dynamics using DMSP/OLS satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 158: 453-464.
- [25] Wu J S, He S B, Peng J, Li W F, Zhong X H. Intercalibration of DMSP-OLS night-time light data by the invariant region method. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, 34(20): 7356-7368.
- [26] 曹子阳, 吴志峰, 匡耀求, 黄宁生. DMSP/OLS 夜间灯光影像中国区域的校正及应用. *地球信息科学学报*, 2015, 17(9): 1092-1102.
- [27] 王钊, 杨山. 多中心城市区域城市蔓延冷热点格局及演化——以苏锡常地区为例. *经济地理*, 2015, 35(7): 59-65.
- [28] 王琳, 景元书, 李琨. 江苏省植被 NPP 时空特征及气候因素的影响. *生态环境学报*, 2010, 19(11): 2529-2533.
- [29] 戴靓, 彭慧, 吴绍华, 林晨, 黄丽华. 苏南地区净第一性生产力对土地利用变化的响应. *土壤*, 2013, 45(3): 565-571.
- [30] 徐昔保, 杨桂山, 李恒鹏. 太湖流域土地利用变化对净初级生产力的影响. *资源科学*, 2011, 33(10): 1940-1947.
- [31] 刘永强, 廖柳文, 龙花楼, 秦建新. 土地利用转型的生态系统服务价值效应分析——以湖南省为例. *地理研究*, 2015, 34(4): 691-700.