

引用格式: Ji Yang, Jiang Jinbao. Remote Sensing Analysis of Environmental Change in Urban Expansion area of Yangtze River Delta Urban Agglomeration[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2021, 36(5): 1131-1146.
[季杨, 蒋金豹. 长三角城市群城市扩张区环境质量变化遥感评价[J]. 遥感技术与应用, 2021, 36(5): 1131-1146.]
DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2021.5.1131

长三角城市群城市扩张区环境质量变化遥感评价

季 杨, 蒋金豹

(中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083)

摘要: 加强城市动态扩张与环境质量变化监测对促进长三角城市群高质量一体化协同发展具有重要意义。基于DMSP/OLS夜间灯光数据、多源环境遥感数据等, 运用趋势线分析、综合评价指数(Comprehensive Evaluation Index, CEI)构建等方法, 对长三角城市群2001~2013年的城市扩张模式、扩张区内环境质量变化特征及二者的协调性情况进行分析。结果表明: ①46.24%的城市显著扩张, 上海—苏锡常城市化水平和一体化程度最高, 其次为环杭州湾城市群和沿江发展带, 此外未形成多区域规模化的城市高速扩张模式, 经济总量、对外开放程度和用电水平是长三角城市高速扩张的主要驱动因素; ②46.35%的显著扩张区环境逐步恶化, 集中在江苏省和安徽省, 环境恶化型集聚在合肥主城区周围, 浙江省城市环境最优, 上海市基本未变, 多数城市环境变化主要由PM_{2.5}增长所致; ③城市扩张与环境变化叠加结果可反映区域城市发展与生态环境建设的协调程度。上海市嘉定区、浦东新区和崇明岛, 苏锡常及沿江地区协调性较弱, 浙江省城市的“渐变”分布模式体现其高协调性, 合肥市城区表现为环境质量远落后于城市化进程的双系统非协调发展状态。谷歌影像定位结果表明结合DMSP/OLS与CEI可有效检测出区域内由人类活动所产生的环境破坏型地表覆盖类型变化情况。该研究成果可揭示区域可持续发展状况, 对长三角双系统动态发展协调性的空间转移研究具有指示作用。

关键词: 长三角城市群; 城市扩张; 环境变化; 协调可持续; 高质量发展

中图分类号: P237; TP79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2021)05-1131-16

1 引言

长三角城市群是我国城镇集聚度最高、经济最发达的地区之一, 在国家现代化建设大局和开放格局中拥有重要的战略地位^[1]。2019年12月1日, 中共中央、国务院印发《长江三角洲区域一体化发展规划纲要》(下文简称“规划纲要”), 对一体化背景下打造更高质量的长三角世界级城市群作出重要部署, 明确提出了针对城市发展、生态保护等方面的高水平要求。然而, 对照高质量发展目标, 该区域城市发展过程中出现的不合理的生产建设活动依旧突出, 粗放式经济发展导致的生态环境质量和

人居环境安全下降是制约高质量发展的重要瓶颈^[2]。因此, 在长三角城市群逐步推进城镇化建设的过程中, 做好城市扩张和环境演变动态监测, 对于协调城市化建设、经济发展与环境保护之间的矛盾, 推动该区域可持续发展具有重要意义^[3]。

长三角城市群生态环境变化是目前研究中的重要领域, 相关工作包括环境景观格局变化特征分析^[4-5]、生态环境评价体系构建^[6-7]、绿色发展体制机制研究^[2,8]等。遥感技术能在不接触地物的情况下, 及时、有效地获取大范围被测目标的空间信息, 对理解由人类活动而引起的地表环境变化具有重要

收稿日期: 2020-06-01; 修订日期: 2021-07-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(41871341)。

作者简介: 季 杨(1995—), 女, 江苏泰州人, 硕士研究生, 主要从事遥感与GIS应用研究。E-mail: yangol_cumtb@163.com

通讯作者: 蒋金豹(1978—), 男, 安徽砀山人, 教授, 博士生导师, 主要从事微波遥感、高光谱遥感研究。E-mail: jjb@cumtb.edu.cn

作用^[9],目前在长三角城市群生态环境研究中扮演着重要角色。韩春萌^[10]利用多源遥感数据反演长三角城市群“热岛效应”分布特征,提取出沿长江北岸、南岸和沿海岸线的3条高温走廊;王静^[11]利用MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)气溶胶光学厚度数据分析长三角城市群PM_{2.5}变化特征及主要原因,得出冬季PM_{2.5}较大且波动大,夏季较小,城市的不同气象要素左右着PM_{2.5}变化及区域差异;刘焱焱等^[12]通过植被覆盖度(FVC)获取长三角生态绿色一体化发展示范区的植被覆盖时空变化特征,得出3个植被覆盖转变阶段,同时证明了该区域人类活动因子对植被覆盖的影响远大于自然因子;Shen等^[13]利用遥感影像分类结果分析长三角地区城市化进程中的土地利用类型变化,发现建筑用地的主要扩张区为上海、南京、无锡和苏州,农用地大幅减少,森林景观的破碎度和复杂度上升。以上研究大多针对长三角城市群生态环境的某一个或几个方面进行独立分析,而综合性的、适用于城市群区域的环境质量变化评价工作较少。长三角城市群生态环境问题主要来自城市的无序开发和人口聚集^[2],若仅从单个方面进行评价无法全面反映人类活动对区域生态环境可持续性造成的压力。此外,现有研究的对象多为整个长三角城市群或监测期内扩张了的的城市用地,但就目前长三角城市群城镇化建设水平与社会治理能力的地域差异仍较大,此研究对象无法用于反映城市化进程与生态环境建设双系统的动态变化协调性状况。基于上述分析,实验选择适合城市群区域的环境变化综合评价指标,并将不同强度等级的城市扩张区作为研究对象,在不同的城市化水平下开展长三角城市群环境评价工作。

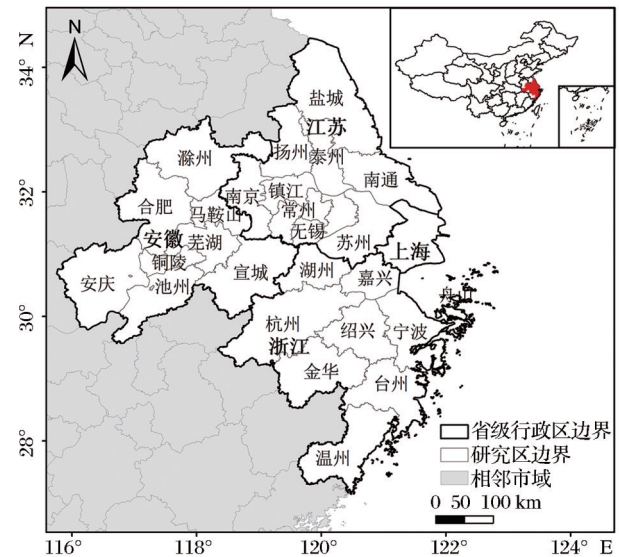
美国军事气象卫星DMSP/OLS(Defense Meteorological Satellite Program Operational Linescan System)夜间灯光数据通过探测城市、农村及其他地点发出的稳定性灯光,能够客观地反映区域内社会经济情况,目前被广泛应用于城市空间演变分析^[14-15]、社会经济参数反演^[16]等领域。He等^[17]利用PM_{2.5}浓度数据、地表温度数据(Land Surface Temperature, LST)和植被指数数据(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)构建环境质量变化综合评价指标(CEI),该指标与城市生态足迹(Ecological Footprint, EF)、城市自然资源消耗量、城市废弃物排放量等可持续发展指标和参量之间

具有高度相关性,被证明是评价城市群区域环境质量变化的有效手段。实验结合DMSP/OLS变化趋势结果及CEI,探讨2001~2013年长三角城市群城市扩张、扩张区内的环境质量变化特征以及二者动态变化协调性分布情况,并针对分析结果提出长三角城市—环境高质量协同发展建议。

2 研究区与研究数据

2.1 研究区概况

2016年5月11日,国务院常务会议通过《长江三角洲城市群发展规划》,规划包含上海市、江苏省、浙江省和安徽省26个中心城市。2019年印发的“规划纲要”将长三角城市群范围扩大为上海市,江苏省、浙江省和安徽省全域。实验选取其中的27个中心城市作为研究对象^[18],包括上海市,江苏省9市:南京、无锡、常州、苏州、南通、盐城、扬州、镇江、泰州,浙江省9市:杭州、宁波、温州、绍兴、湖州、嘉兴、金华、台州、舟山和安徽省8市:合肥、芜湖、马鞍山、铜陵、安庆、滁州、宣城、池州,总面积约22.5万km²,约占中国国土面积的2.3%(图1)。



审图号:GS(2016)2556

图1 研究区域

Fig.1 Study area

长三角城市群位于长江下游地区,地处江海交汇地,水系发达,港口众多,水运交通便利。陆上已形成以上海为中心,苏锡常、南京、杭州、宁波、合肥为次中心的公路铁路综合交通网络体系^[19]。自然条件优越,年均温14℃~18℃,降水充沛,土壤肥沃。地形以平原为主,地势整体呈现西高东低、南高北低的态势。经济实力雄厚,2020年,GDP总量

约24.5万亿元,约占全国的24.12%。人口密集,是最大的外来人口聚集地,2019年,人口约1.63亿人,约占全国的11.66%^[19]。

2.2 数据来源

2.2.1 DMSP/OLS夜间稳定灯光数据

研究选取2001~2013年DMSP/OLS夜间稳定灯光数据表征长三角城市群城市扩张(表1),所含影像包括F15 2001~2007、F16 2008~2009和F18 2010~2013卫星产品^[9]。该数据集去除了云、火光、油气燃烧等噪声干扰,数值大小代表平均灯光强度,范围为0~63。由于逐年夜光数据来自不同传感器,影像间存在灰度值异常现象,同时像元饱和问题突出,原始影像不具备可比性^[20]。参考Zhu等^[21-22]的研究,首先利用公式(1)和(2)对影像数据进行相互校正和饱和校正,然后利用公式(3)进行影像间连续性校正。相关公式如下:

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

其中: $DN_{calibrated}$ 表示校正后影像像元值; DN 表示原始影像像元值; a 和 b 表示回归系数^[21]。

$$DN_{(n,i)} = \begin{cases} 0 & DN_{(n,i)}^a = 0 \text{ 或 } DN_{(n,i)}^b = 0 \\ \frac{(DN_{(n,i)}^a + DN_{(n,i)}^b)}{2} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

其中: $DN_{(n,i)}$ 表示校正后第 n 年影像上像元 i 的像元值; $DN_{(n,i)}^a$ 和 $DN_{(n,i)}^b$ 表示经公式(1)校正后第 n 年2个不同传感器所获影像上像元 i 的像元值。

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

其中: $DN_{(n-1,i)}$ 、 $DN_{(n,i)}$ 、 $DN_{(n+1,i)}$ 表示经公式(2)校正后第 $n-1$ 年、 n 年和 $n+1$ 年影像上像元 i 的像元值。

2.2.2 环境质量指示数据

用于反映环境状况的数据为卫星遥感获取的PM2.5浓度数据、LST和NDVI(表1)。PM2.5浓度数据是根据MODIS数据、多角度成像光谱辐射计(Multi-angle Imaging Spectroradiometer, MISR)和海洋观测宽视场传感器(Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor, Sea WIFS)观测,并由哥达德地球观测系统化学传输模型(Goddard Earth Observing System Chemical Transport Model, GEOS-Chem)计算所得的年均PM2.5浓度分布^[17]。通过计算3 a滑动平均值^[17],将所得2001、2013年结果作为实验所用的年均PM2.5浓度值,以减少数据误差对实验结果的影响。

LST来自美国国家航天太空总署(National Aeronautics and Space Administration, NASA)提供的地表温度/发射率8 d合成L3产品(MOD11A2),实验仅选取夜间地表温度产品^[17]并计算其年均值。

NDVI来源于美国国家航天太空总署的MOD13A3 Terra Vegetation Indices(V6)产品,为全球植被指数月产品数据,目前被广泛应用于中国地区的植被动态监测^[22]。采用最大值合成法^[23](Maximum Value Composites, MVC)进行处理并计算归一化值,公式如下:

$$VC_i = (NDVI_i - NDVI_{min}) / (NDVI_{max} - NDVI_{min}) \quad (4)$$

其中: VC_i 表示像元 i 处NDVI的归一化结果,其值可反映由气候和人为因素所导致的植被变化特征^[23]; $NDVI_i$ 表示像元 i 处的NDVI值; $NDVI_{min}$ 和 $NDVI_{max}$ 表示区域内NDVI的最小值和最大值。实验研究所有地图数据均重采样至1 km。由于所下载影像边界不统一,本文所有数据均以最小范围边界的数据为基础进行裁剪,以统一数据范围。

表1 数据源

Table 1 Data sources

| 数据 | 空间分辨率/km | 时间 | 下载地址 |
|------------------|----------|------------|---|
| DMSP/OLS夜间灯光数据 | 1 | 2001~2013年 | https://www.ngdc.noaa.gov/eog/dmsp/downloadV4composites.html |
| PM2.5浓度数据 | 1 | 2000~2014年 | http://fizz.phys.dal.ca/~atmos/martin/ |
| 地表温度数据MOD11A2 | 1 | 2001、2013年 | https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/ |
| 归一化植被指数数据MOD13A3 | 1 | 2001、2013年 | https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/ |

2.2.3 社会经济参量

由于夜光数据与社会经济参量间存在密切联系,为探究监测期内引起灯光值变化的驱动因素,参考江威等^[16],从2013年《中国城市统计年鉴》中选取代表经济、人口、用电量和交通的10个社会经济

参量,分析其与夜光数据的关联程度。代表经济参量的有:全市生产总值(Gross Regional Product of Total City, GRPTC)、市辖区生产总值(Gross Regional Product of Districts under City, GRPDC)、第三产业比重(Proportion of Tertiary Industry in

Gross Regional Product, PTIGRP)和实际使用外资金额 (Actual Utilized Foreign Direct Investment, AUFDI);代表人口参量的有:全市年平均人口 (Annual Average Population of Total City, AAPTC)和市辖区年平均人口 (Annual Average Population of Districts under City, AAPDC);代表用电参量的有:全社会用电总量 (Annual Electricity Consumption, AEC)、工业用电量 (Electricity Consumption for Industrial, ECI)和城乡居民用电量 (Household Electricity Consumption for Urban and Rural Residential, HECURR);代表交通参量的有:城市道路面积 (Area of City Paved Road, ACPR)和客运总量 (Total Passenger Traffic, TPT)。

3 研究方法

3.1 夜光数据变化趋势及驱动因素分析

3.1.1 Slope趋势线分析及变化趋势显著性检验

采用Slope趋势线分析法对灯光值在监测期内的变化趋势进行分析以指示城市扩张过程^[24]。其公式为:

$$\text{Slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times M_{D_i} - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n M_{D_i}}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (5)$$

其中: Slope表示趋势线斜率; n 表示监测年数; M_{D_i} 表示第 i 年灯光值的最大值。Slope >0 表示灯光“变亮”,城市处于扩张态势,城市化水平上升; Slope <0 表示灯光值下降,城市化水平下降或出现逆城市化现象; Slope $=0$ 表示灯光值未变,未出现城市扩张态势。

为判断夜光数据时间序列变化的显著性,进一步对变化趋势结果采用非参数检验法MK(Mann-Kendall)进行显著性检验。参考胡顺石等^[24],将MK检验所得的3个变量即差值序列 S 、 S 变化趋势统计量 Z 、对 Z 进行双边显著性检验结果 p -value,与Slope结果值相结合,对灯光值变化趋势进行如下判别:当Slope >0 且 $Z>0$, p -value <0.05 时,表示灯光值显著上升,城市扩张强度高;当Slope <0 且 $Z<0$, p -value <0.05 时,表示灯光值显著降低,城市化水平下降程度高。根据Slope均值 \bar{x} 和标准差 δ ,进一步对灯光值显著性上升区域划分3种变化类型:低速增长、中速增长和高速增长^[25](表2)。

3.1.2 相关性分析

夜光数据被证明是社会经济参量空间模拟的

表2 夜间灯光值增长趋势划分标准

Table 2 Growth trend division standard of night time

| light data | | | |
|------------|-------------------------|--|-------------------------|
| | 低速增长 | 中速增长 | 高速增长 |
| 划分标准 | $< \bar{x} - 0.5\delta$ | $\bar{x} - 0.5\delta \sim \bar{x} + 0.5\delta$ | $> \bar{x} + 0.5\delta$ |
| Slope | <18.51 | $18.51 \sim 65.65$ | >65.65 |

重要数据源之一^[16]。在回归模型中,线性回归模型、指数拟合回归模型等常被用于评价二者的相关关系^[26]。根据本文数据特点,统一采用指数拟合回归模型,分析灯光值高速增长型占比与社会经济参量之间的相关性,探究城市高强度扩张的驱动因素,公式如下:

$$y = ae^{bx} \quad (6)$$

其中: y 表示社会经济参量; x 表示灯光值高速增长型面积占比; a 和 b 表示回归系数。

3.2 环境质量变化综合评价指标构建

3.2.1 评价指标构建

参考He等^[17]提出的环境质量综合评价指标,该指标以联合国可持续发展委员会(United Nations Commission on Sustainable Development, UNCS D)提出的环境主题导向框架为基础进行构建,该框架从多角度考虑区域内的环境状况,是评估环境质量最常用的框架之一。所用公式如下:

$$\text{CEI}_i = \sqrt[3]{(\Delta \text{PM}_i + 1) \times (\Delta \text{VC}_i + 1) \times (\Delta \text{LST}_i + 1)} \quad (7)$$

其中:CEI _{i} 表示像元 i 处的环境质量变化值,值越大,环境退化越严重; ΔPM_i 、 ΔVC_i 和 ΔLST_i 分别表示2001~2013年像元 i 处PM2.5浓度、VC和LST变化量的归一化值,公式如下:

$$\begin{cases} \Delta \text{PM}_i = \frac{(\text{PM}_i^{2013} - \text{PM}_i^{2001}) - \min_{\text{PM}}}{\max_{\text{PM}} - \min_{\text{PM}}} \times 100 \\ \Delta \text{VC}_i = \frac{\max_{\text{VC}} - (\text{VC}_i^{2013} - \text{VC}_i^{2001})}{\max_{\text{VC}} - \min_{\text{VC}}} \times 100 \\ \Delta \text{LST}_i = \frac{(\text{LST}_i^{2013} - \text{LST}_i^{2001}) - \min_{\text{LST}}}{\max_{\text{LST}} - \min_{\text{LST}}} \times 100 \end{cases} \quad (8)$$

其中: PM_i^{2013} 和 PM_i^{2001} 表示2013和2001年像元 i 处的PM2.5浓度值; \max_{PM} 和 \min_{PM} 表示2001~2013年 ΔPM_i 的最大值和最小值; VC_i^{2013} 和 VC_i^{2001} 表示2013年和2001年像元 i 处的VC值; \max_{VC} 、 \min_{VC} 表示2001~2013年 ΔVC 的最大值和最小值; LST_i^{2013} 和 LST_i^{2001} 表示2013年和2001年像元 i 处的LST值; \max_{LST} 和 \min_{LST} 表示2001~2013年 ΔLST 的最大值和最小值。 ΔPM_i 、 ΔVC_i 或 ΔLST_i 越大,代表环境质量下降越严重。

进一步根据CEI均值和标准差将环境质量变

化趋势划分为5种类型:改善、逐步改善、未变、逐步恶化和恶化(表3)。

表3 CEI划分标准

Table 3 Division standard of CEI

| | 改善 | 逐步改善 | 未变 | 逐步恶化 | 恶化 |
|------|-------------------------|--|--|--|-------------------------|
| 划分标准 | $< \bar{x} - 1.5\delta$ | $\bar{x} - 1.5\delta \sim \bar{x} - 0.5\delta$ | $\bar{x} - 0.5\delta \sim \bar{x} + 0.5\delta$ | $\bar{x} + 0.5\delta \sim \bar{x} + 1.5\delta$ | $> \bar{x} + 1.5\delta$ |
| CEI | < 37.43 | $37.43 \sim 48.64$ | $48.64 \sim 59.85$ | $59.85 \sim 71.06$ | > 71.06 |

3.2.2 相关性分析

对不同城市的CEI与3个变量之间的相关关系进行分析,探究各区域引起环境质量变化的主要原因。皮尔逊相关系数法能够准确度量两个变量关系的密切程度,其数值代表线性相关度强弱^[27]。对于变量 $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ 和 $Y = [y_1, y_2, \dots, y_n]^T$, 皮尔逊相关系数计算公式为:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (9)$$

其中: r 表示相关系数,取值范围为 $(-1, 1)$; \bar{x} 为 X 均值; \bar{y} 为 Y 均值。一般情况下,视 $|r| \geq 0.8$ 时为高度相关, $0.5 \leq |r| < 0.8$ 为中度相关, $0.3 \leq |r| < 0.5$ 为低度相关, $|r| < 0.3$ 为非线性相关。

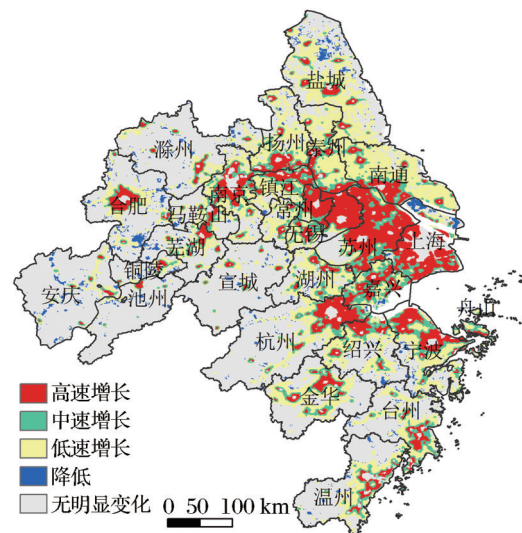
4 结果与分析

4.1 长三角城市群夜间灯光值变化分析

4.1.1 灯光值变化趋势分析

计算2001~2013年夜光数据时间序列的Slope值并进行显著性检验,对灯光值显著变化区进行类型划分,得到灯光值变化空间分布(图2)和各类型占比统计(图3)。结果显示,13 a间长三角城市群灯光显著变化区占总面积的46.24%,其中,高速增长型分布最广,约为显著变化区的50.81%,中速和低速增长型分别为29.11%和20.08%。从空间分布特征看,大致表现为以主城区为中心呈环状发散式分布,距主城区越远,“变亮”程度越低。高速增长型在上海及其西北方向上的苏锡常地区分布最集中,呈大范围面状连接分布,说明该地区城市化水平和一体化建设程度最高,上海市往该方向周边城市的辐射力度最强^[24, 28]。此类型一直延伸至沿江发展带的镇江、扬州、南京、马鞍山和芜湖局部地区,呈带状连接式分布,主要得益于沿江交通运输走廊的贯穿,使得沿江工业、企业和制造业分布密集,加速了建设用地的扩张。但沿江发展带西段高速增长型聚集性不高且范围局限,城市化进程强度

相比于东段滞后,区域协同水平相比于东段落后。在上海的西南方向,高速增长型聚集程度较西北方向低,呈松散的带状式分布,直至杭州市主城区周围才出现较大范围面状式分布,其与东南方向的绍兴、宁波沿海主城区形成带状连接分布,形成发展水平较高、城市联系较为密切的环杭州湾城市群地区。中速增长型贴合高速增长型外围,在各市中分布较少。低速增长型则呈发散式分布,在盐城、扬州、泰州、南通等地区分布广泛。灯光值未发生明显变化的为各城市主城区,灯光值已趋于饱和,城市发展潜力受限,除此之外,还分布于距东部发达区偏远的安徽和浙江省内陆地区。灯光显著下降区有3处显著聚集地,分别为合肥南部、上海崇明岛和盐城北部,这与地区人口大量迁出有关。



审图号:GS(2016)2556

图2 2001~2013年长三角城市群夜间灯光值变化趋势空间分布

Fig.2 Spatial distribution of night time light change trends in Yangtze River Delta Urban Agglomeration (YRD) from 2000 to 2013

从各类型占比上看,上海13 a间的高速增长型面积占比在所有城市中最高,达到69.53%,印证了其作为区域发展龙头的战略定位。苏州、无锡、常州其次,分别为69.23%、61.32%、43.44%。中速增

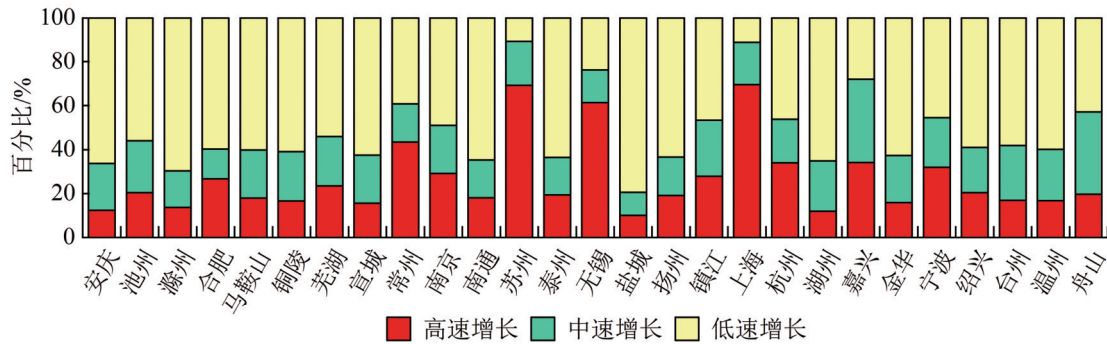


图3 灯光值变化类型分布统计

Fig.3 Distribution statistics of night time light change types

长型所占比例在各市相差不大,为20%左右。大部分城市的低速增长型超过40%,其中,盐城达到79.40%,南通、泰州、扬州、湖州、金华、滁州、安庆、宣城、马鞍山、铜陵均超60%。

结果表明,长三角城市群中东部地区城市扩张最显著,城镇化建设的核心区域为苏锡常—上海—环杭州湾所构成的“Z”字型地区。对比苏锡常,上海与浙北城市一体化建设程度较弱,城市间联系不够密切,反映了上海往西南方向周边城市的辐射力度较弱。苏锡常、杭州和宁波都市圈内部联系趋

紧,圈带协同作用较优,但合肥和南京则较弱。长三角城市群其余大部分地区均未形成规模化的城市高速发展态势。

4.1.2 灯光值变化驱动因素分析

对高速增长型占比和社会经济参量作回归分析,获取灯光值高速增长的驱动因素,结果如图4所示。结果显示,高速增长型占比与经济参量AUFDI、GRPTC和GRPDC的回归结果均通过0.01水平的显著性检验,与AUFDI的 R^2 最高,为0.79,与GRPTC和GRPDC分别为0.73和0.6,PTI-

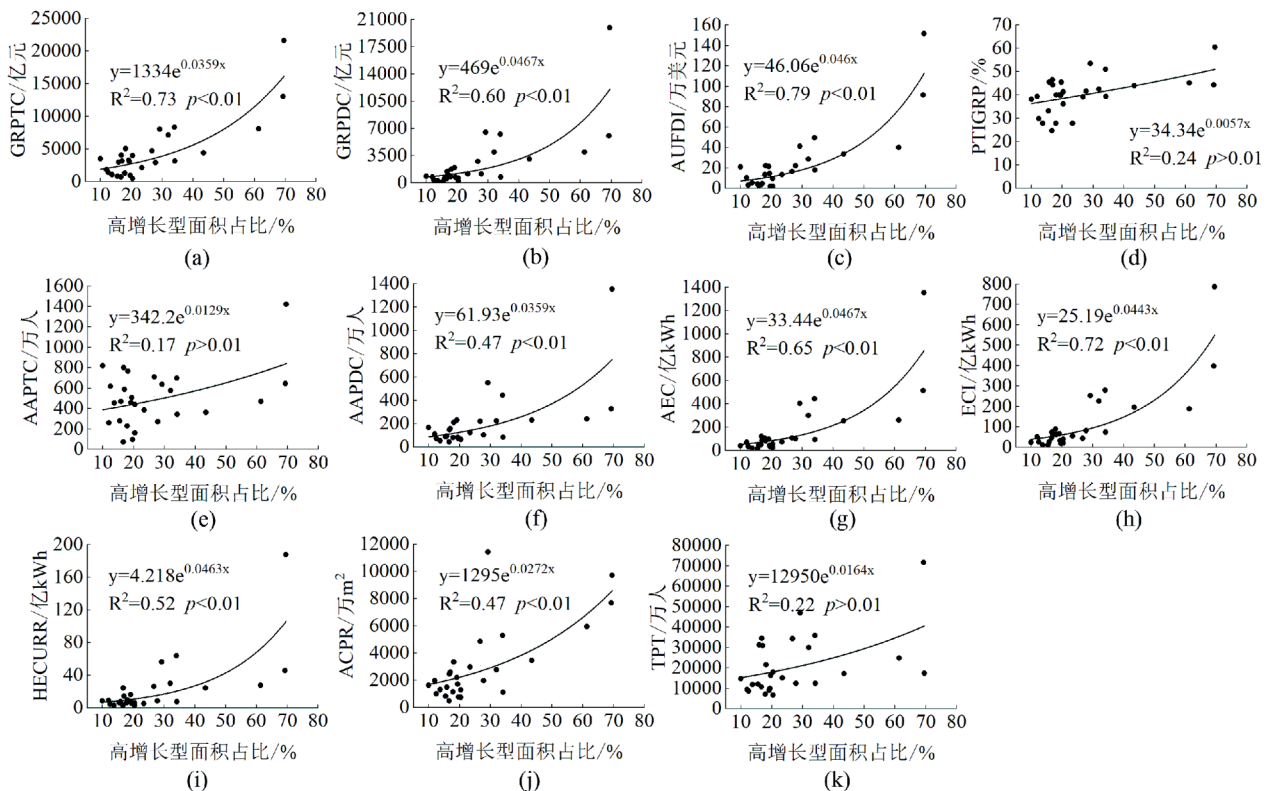


图4 灯光值高速增长型占比与社会经济参量指数拟合回归结果

Fig.4 Results of the fitting regression of the proportion of high-speed growth type of night time light and social economic parameters

GRP未通过显著性检验。说明经济发展水平、对外开放程度是长三角城市高速扩张的重要驱动因素,第三产业无驱动作用,这主要是由于尽管上海、苏南地区、杭州等城市第三产业发展迅猛,但其余城市,尤其是长三角西部城市,自身的工业尤其是制造业在国民经济中仍占很大比重,再加上所承接的东部地区产业转入^[29],致使第三产业目前未对城市化提升发挥动能。高速增长型占比与用电参量的回归结果均通过显著性检验,与ECI的 R^2 为0.72,略高于AEC和HECURRE。高速增长型占比与人口参量AAPDC的回归结果通过显著性检验,但 R^2 相比于经济参量和用电参量偏小,仅为0.47,对灯光值高速增长的影响弱,反映出长三角城镇化和人口城镇化的协调水平不高^[29]。AAPTC则未通过显著性检验。交通参量ACPR对灯光值高速增长影响小, R^2 为0.47,TPT未通过显著性检验,说明交通建设未成为激活长三角城市群经济高速发展的重要区域政策手段,尤其是对于偏远地区的交通深入还不够,导致其在融入长三角一体化建设时遭遇阻碍,可见长三角交通网布设的任务依旧艰巨。

观察散点与拟合曲线的分布位置,可发现社会经济发展水平在各城市存在较大差别,如上海市的社会经济参量值大多远高于其余城市;南京的城市道路面积(ACPR)超过上海且远高于其余城市,客运总量(TPT)仅次于上海,说明南京的交通建设进程发达,随着城市的发展,交通网布设稳步推进。然而,通过图3发现,其高速增长型占比却不突出,又反映了南京市高水平的交通建设并未给城市发展注入有效动能。

4.2 长三角城市群环境质量变化分析

4.2.1 环境质量变化空间格局

获取2001~2013年间长三角城市群 $\Delta PM_{2.5}$ 、 ΔLST 及 $\Delta NDVI$ 的均值、均值变化率、最小值和最大值以反映生态环境变化情况,结果如图5和表4所示。13年间,长三角地区空气污染加重,所有城市 $PM_{2.5}$ 浓度均呈增加趋势,增长率多在30%以上,大致表现为由南向北增长幅度上升。浙江省城市上升幅度最小,安徽省城市上升幅度较大,其中5市增长率超50%,铜陵市和合肥市分别达到62.67%和60.67%,合肥市的增长均值为 $23.16 \mu g/m^3$,最大增长值为 $26.53 \mu g/m^3$,在所有城市中最高。

此外,江苏省的南京、扬州、盐城、南通超过40%,结合图3发现,这些城市的灯光值以低速增长为主,说明空气质量的保持工作与城市化建设不相协调,可能是内部依然存在较多高污染、低效益的产业,经济转型升级、城市治理任务艰巨;约53.69%的地区植被覆盖度下降,以上海、苏锡常、沿江地区和环杭州湾地区最为显著。常州市 $NDVI$ 的下降率最高,为9.02%,南京、镇江超过5%,可见这些地区的城市建设对植被生态系统的影响大。对比而言,同区位的苏州虽然局部出现高达1.04的下降值,但均值增长率较高,为9.05%,这主要是得益于太湖周围的高值聚集区分布。上海市主城区 $NDVI$ 抬升显著,这可能和城市化达到一定程度以后,上海市开始着重关注城市植被生态系统,开展了一系列重点绿化工程、推行大型绿地建设,从而使得城市绿化覆盖率上升有关。合肥市局部出现0.99的 $NDVI$ 下降值,但整体变化率为6.06%,远超其余城市,主要由于距离主城区较远的城市边缘地植被保有度较

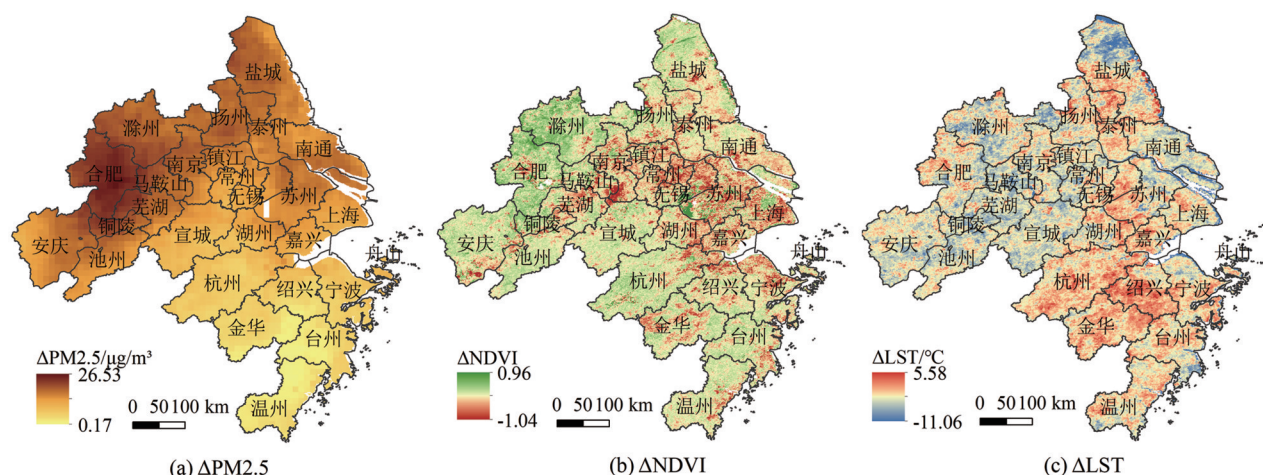


图5 $PM_{2.5}$ 、 $NDVI$ 及 LST 变化分布

审图号:GS(2016)2556

Fig.5 Distribution of $PM_{2.5}$ 、 $NDVI$ and LST change

表 4 ΔPM2.5、ΔNDVI 及 ΔLST 统计分析

Table 4 Statistical analysis of ΔPM2.5、ΔNDVI and ΔLST

| 城市 | ΔPM2.5/μg/m ³ | | | | ΔNDVI | | | | ΔLST/℃ | | | |
|-----|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|--------|-------|--------|------|
| | 均值 | 变化率/% | 最小值 | 最大值 | 均值 | 变化率/% | 最小值 | 最大值 | 均值 | 变化率/% | 最小值 | 最大值 |
| 安庆 | 15.71 | 51.93 | 8.63 | 22.73 | 0.00 | 0.04 | -1.01 | 0.58 | 0.76 | 6.38 | -1.72 | 2.61 |
| 池州 | 15.07 | 54.73 | 10.67 | 21.67 | 0.00 | 0.36 | -0.48 | 0.56 | 0.67 | 5.75 | -1.35 | 2.38 |
| 滁州 | 18.91 | 47.96 | 16.03 | 23.33 | 0.04 | 7.18 | -0.42 | 0.78 | 0.66 | 6.41 | -1.64 | 3.32 |
| 合肥 | 23.16 | 60.67 | 18.70 | 26.53 | 0.04 | 6.06 | -0.99 | 0.82 | 0.95 | 8.23 | -1.59 | 4.90 |
| 马鞍山 | 19.05 | 49.03 | 15.87 | 23.47 | -0.03 | -4.62 | -0.73 | 0.41 | 0.46 | 3.74 | -2.53 | 2.91 |
| 铜陵 | 20.37 | 62.67 | 15.47 | 24.03 | 0.00 | 0.62 | -0.54 | 0.45 | 0.55 | 4.35 | -1.06 | 2.77 |
| 芜湖 | 18.55 | 51.18 | 11.30 | 24.30 | -0.03 | -4.43 | -0.43 | 0.51 | 0.60 | 4.87 | -0.99 | 3.81 |
| 宣城 | 10.18 | 29.77 | 6.43 | 17.70 | -0.01 | -0.29 | -0.41 | 0.67 | 0.68 | 5.91 | -1.08 | 3.21 |
| 常州 | 12.41 | 27.87 | 8.07 | 15.27 | -0.08 | -9.02 | -0.82 | 0.84 | 0.76 | 6.39 | -1.54 | 2.48 |
| 南京 | 17.22 | 43.35 | 12.20 | 20.70 | -0.06 | -6.45 | -0.88 | 0.56 | 0.86 | 7.54 | -1.60 | 2.59 |
| 南通 | 15.39 | 43.73 | 12.00 | 18.40 | -0.04 | -4.34 | -0.51 | 0.43 | 0.73 | 7.20 | -8.22 | 3.57 |
| 苏州 | 15.54 | 39.39 | 12.20 | 19.07 | -0.05 | 9.05 | -1.04 | 0.96 | 1.01 | 8.11 | -3.02 | 4.24 |
| 泰州 | 16.53 | 38.99 | 13.07 | 18.60 | -0.04 | -4.13 | -0.47 | 0.54 | 1.32 | 12.25 | -2.46 | 3.55 |
| 无锡 | 13.75 | 30.85 | 9.47 | 18.97 | -0.05 | 0.32 | -0.99 | 0.90 | 1.20 | 9.97 | -2.51 | 3.09 |
| 盐城 | 17.00 | 46.38 | 12.47 | 21.70 | 0.00 | 0.70 | -0.50 | 0.81 | 0.70 | 7.42 | -11.06 | 4.87 |
| 扬州 | 18.11 | 46.51 | 15.83 | 20.57 | -0.01 | 4.13 | -0.66 | 0.92 | 1.11 | 10.14 | -1.10 | 5.09 |
| 镇江 | 15.51 | 37.70 | 12.37 | 18.77 | -0.06 | -5.92 | -0.53 | 0.40 | 0.80 | 7.05 | -1.72 | 2.41 |
| 上海 | 12.94 | 37.95 | 5.40 | 18.60 | -0.06 | -5.52 | -0.60 | 0.67 | 0.79 | 7.26 | -9.60 | 2.89 |
| 杭州 | 6.78 | 19.36 | 4.07 | 14.63 | 0.00 | -0.39 | -0.68 | 0.82 | 1.39 | 12.10 | -7.82 | 4.30 |
| 湖州 | 10.74 | 26.95 | 6.07 | 15.70 | -0.04 | -4.72 | -0.41 | 0.21 | 1.16 | 10.01 | -1.39 | 3.39 |
| 嘉兴 | 11.71 | 27.81 | 9.27 | 14.90 | -0.07 | -6.96 | -0.45 | 0.36 | 1.34 | 11.85 | -2.38 | 3.36 |
| 金华 | 3.76 | 10.61 | 0.80 | 6.53 | -0.02 | -2.50 | -0.41 | 0.25 | 1.47 | 12.64 | -0.56 | 3.29 |
| 宁波 | 6.47 | 21.09 | 3.17 | 10.20 | -0.05 | -4.82 | -0.52 | 0.50 | 1.10 | 9.70 | -5.67 | 3.42 |
| 绍兴 | 5.16 | 13.90 | 0.80 | 11.83 | -0.02 | -2.53 | -0.50 | 0.35 | 1.73 | 15.37 | -0.91 | 3.53 |
| 台州 | 2.98 | 11.43 | 0.17 | 6.17 | -0.01 | -0.87 | -0.39 | 0.56 | 1.09 | 9.68 | -6.54 | 3.09 |
| 温州 | 2.33 | 9.73 | 0.20 | 5.80 | -0.01 | -1.18 | -0.47 | 0.29 | 1.07 | 9.10 | -6.75 | 3.35 |
| 舟山 | 8.59 | 38.32 | 5.93 | 9.90 | -0.02 | -1.17 | -0.33 | 0.36 | -0.22 | 1.07 | -9.30 | 2.20 |

注:表中标红字体为排名前五位的城市,标蓝字体为排名倒数五位的城市

高;约 92.88% 的地区 2013 年夜间地表温度较 2001 年有所上升,以浙江省城市、上海西北部、无锡、苏州南部、泰州、扬州中部、盐城中部和合肥主城区附近分布最为显著。

4.2.2 城市扩张区环境质量变化分析

图 6~图 7 所示为利用 CEI 获取的 2001~2013 年长三角城市群显著扩张区内环境质量变化情况。结果显示,约 49.34% 的地区出现了不同程度的环境恶化现象,其中环境逐步恶化型分布最广,约占扩张总用地的 46.35%,恶化、未变、逐步改善和改善型分别为 0.70%,29.23%,17.77% 和 5.95%。环境质量改善型主要分布在温州和台州的中部城市扩张区,占比分别达到 72.36% 和 48.25%。台州、绍兴、宁波和金华城市扩张区的环境质量以逐步改善型为主,占比超 50%,综合图 5 和表 4 发现,这些城

市的 PM2.5 增长率为 9%~22%,在所有城市中较小,NDVI 下降率小,LST 的增长率在 10% 左右,总体来说,扩张区的环境状况为整个长三角城市群的最优处,主要是得益于沿海靠山的优越区位直接使得其拥有较高的生态环境水平。杭州市主城区周围、嘉兴、舟山和湖州的环境质量基本未变,但在湖州东北部、嘉兴中部有少量的逐步恶化型聚集分布。上海市 71.32% 的城市扩张区环境质量未发生变化,嘉定区、浦东新区中部和崇明岛共有 27.38% 的环境逐步恶化型分布,结合图 5 和表 4 发现,3 个区域分别出现了地表温度上升显著、植被覆盖度下降显著和 PM2.5 上升显著现象。无锡南部、常州西部和南通北部城市扩张区环境以未变型为主,江苏省其余地区呈现大范围的环境逐步恶化态势。安徽省城市扩张区环境以逐步恶化型为主,合肥市主

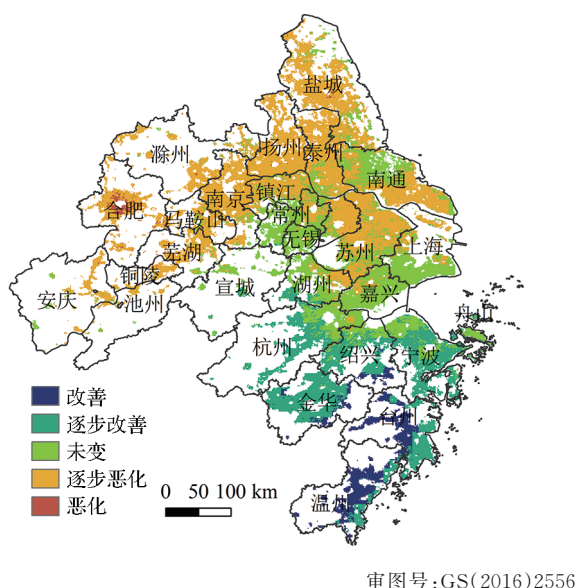


图6 城市扩张区环境质量变化空间分布

Fig.6 Spatial distribution of environmental change in urban expansion area

城区周围出现约17.17%的环境恶化型集聚分布,在所有城市中最高,图2、图5和表4显示,合肥市13 a间城市扩展较具规模,但PM_{2.5}增加量、NDVI下降值及LST增加量在所有城市中均较高,表明合肥市城市化进程对生态环境造成了较大压力。此外,环境恶化型在盐城主城区东南部、滁州东南部、合肥东南部、芜湖中西部、扬州南部等地也存在少量集聚分布。

4.2.3 城市扩张区环境质量变化主导因素分析

分别对城市扩张区的 Δ PM_{2.5}、 Δ LST、 Δ VCI与CEI进行相关性分析,探究2001~2013年间各城市扩张区环境质量变化产生的主要原因,结果如图8所示,发现浙江省城市扩张区环境质量变化大多由 Δ PM_{2.5}决定,相关性多在0.8以上,与其余二者相关性较弱,均低于0.6,舟山则主要取决于 Δ LST,相关性达0.91,受 Δ PM_{2.5}影响较弱,相关性为0.47。上海环境质量变化的主要原因为PM_{2.5}增加,相关性为0.75,与其余二者的相关性为0.4左右。江苏

省镇江、扬州、苏州、南京的环境变化主要取决于 Δ VCI,尤其在苏州,相关性达0.84,盐城、无锡、泰州、南通、常州则取决于 Δ PM_{2.5},相关性在0.7以上。安徽省宣城、池州、安庆、马鞍山、铜陵、芜湖受 Δ PM_{2.5}影响较大,相关性在0.7以上,滁州、合肥则主要取决于 Δ VCI,尤其在合肥,相关性达到0.84。总的来说,不同城市扩张区内部环境要素对整体环境质量的影响程度存在差别,需对症下药、因地制宜进行环境治理。

4.3 城市扩张与环境质量变化的协调性分析

将4.1.1节所得灯光值变化类型(增速从高到低对应A~C)和4.2.2节所得城市扩张区环境质量变化类型(质量从优到劣对应A~E)进行叠加分析,结果如图9和图10所示。其中,灯光值低速增长、环境逐步恶化型(CD)占比最高,为24.77%,大多分布在苏北、苏中地区和安徽省城市,这些地区城市化进程活力较弱,城市治理水平有限,重工业集聚、土地的无序开发等不合理的建设活动易对环境产生较大危害,需综合治理高投入、高能耗和低产出的经济发展模式。AD、CC、CB型占比为10%~20%,AA、AE、BE、CE型低于1%。上海市以灯光值高速增长而环境质量未变型(AC)分布为主,其优越的自然地理条件和较强的经济基础,使得上海市的生态环境控制在有限的变化范围之内,城市与环境双系统能够形成有序发展模式,使其能够成为城市高质量发展的引领地区。整体上看,上海城市发展与环境建设相协调,但浦东新区、嘉定区和崇明岛仍存在少量AD型集聚分布,需警惕环境逐步恶化状态未来可能存在的扩散或加重趋势;苏锡常和镇江、扬州、南京、马鞍山、芜湖沿江城市地区,呈大范围面状和线状连接式的灯光值高速增长而环境逐步恶化型(AD)分布,究其原因,苏锡常地区人口聚集度持续上升,承接上海市各类产业转移力度加大,城市高强度建设对自然环境的干扰程度大。长

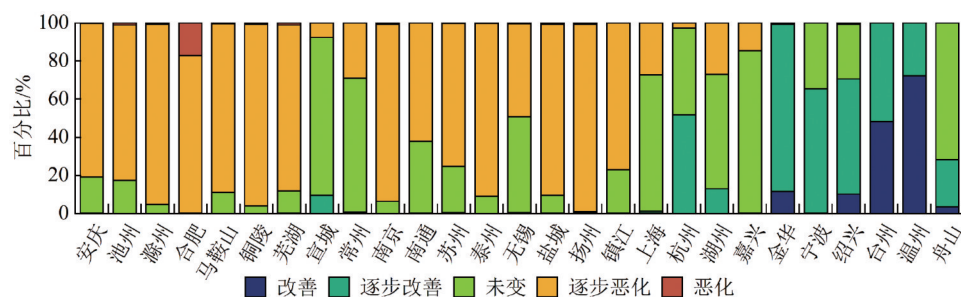
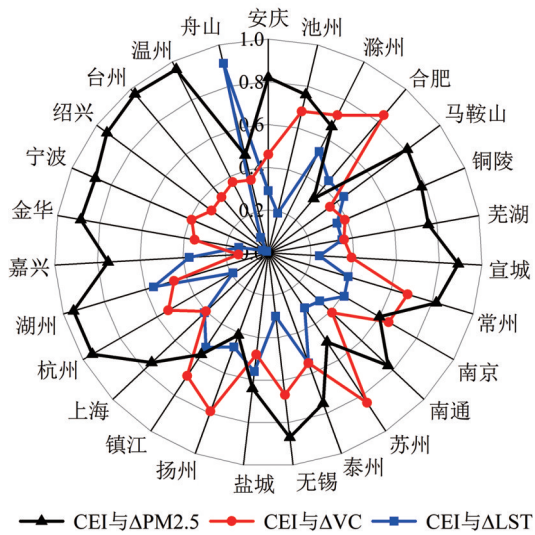
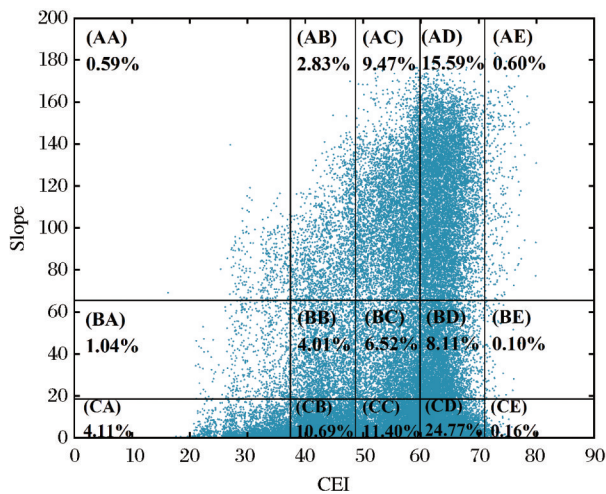
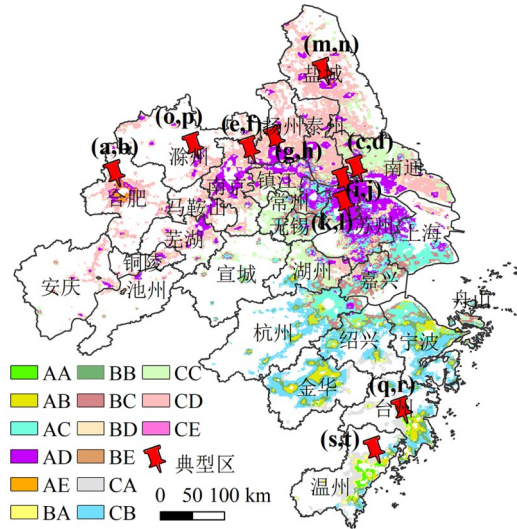


图7 城市扩张区环境质量变化类型分布统计

Fig.7 Distribution statistics of environmental change types in urban expansion area

图8 CEI与 $\Delta PM_{2.5}$ 、 ΔVC 、 ΔLST 的相关性分析Fig.8 Correlation analysis between $\Delta PM_{2.5}$, ΔVC , ΔLST and CEI图9 城市扩张区灯光值显著增长和环境质量变化叠加统计
Fig.9 Statistics of overlap of night time light change types and environmental change types in urban expansion area

江两岸高密度、多类型的企业、工业,高强度航运业和养殖业迅速发展,使得该地区生态状况维持困难加大。浙江省的叠加结果表现为由主城区向外依次为AB/AC、BB/BC、CA/CB的“渐变”式分布模式,即城市中心协调性高,越往城市外围,环境所受影响越小,表明其城市化推进与生态环境维持与提升工作具有高同步性。但城市外围存在的较为广泛的CA、CB型也说明这些地区的城市化进程相对滞后,同样属于双系统不相协调的结果,需着力依托生态优势发展经济导向型产业;合肥主城区向外的分布模式为AE/AD、BE/BD、CE/CD,表明中心城区的生态环境水平落后于城市化进程,且环境恶



审图号:GS(2016)2556

图10 城市扩张区灯光值显著增长和环境质量变化叠加结果

Fig.10 The overlapping regions of night time light change types and environmental change types in urban expansion area

化区的影响范围广程度深,应当格外注重中心城区的经济转型升级。

为探究像元范围内造成上述不同类型的地物覆盖类型及其13 a间的转移情况,以灯光值高速增长而环境质量恶化型(AE)为关注点,该类型反映了城市高速发展过程中出现了较严峻的生态环境问题,参考Leng等^[26]的研究,查看2001、2013年前后高分辨率的谷歌历史影像,选取8个具有代表性的AE型所在地和2个用于对比的AA型所在地(图10),分别对应图11(a)~图11(p)以及图11(q)~图11(t)影像,每景覆盖范围约1.4 km²。结果显示,图11(b)、图11(d)、图11(f)像元范围内均出现重工业用地类型转移,图11(g)、图11(h)范围内为煤矿开采区,工业建设用地两期内范围扩大。图11(j)、图11(l)、图11(n)中大面积的农用地转变为高密度的建设用地,图11(p)中除建设用地转移外,有较大范围的农用地转变为裸地和待建地。对比AA型的像元图11(r)和图11(t),所转移的建设用地密度低、集约性高,同时两期间保有较大范围的自然用地未发生转移。以上结果证明,将灯光值变化趋势和环境质量变化趋势相叠加,可有效定位检测出区域内引起生态环境破坏的地物覆盖类型及其转移情况。工业区的选址、极高密度或极高强度的建筑用地和交通网的转移、煤炭开采等人类活动均会对生态环境系统造成较大干扰。但若人类活动用地范围有限,

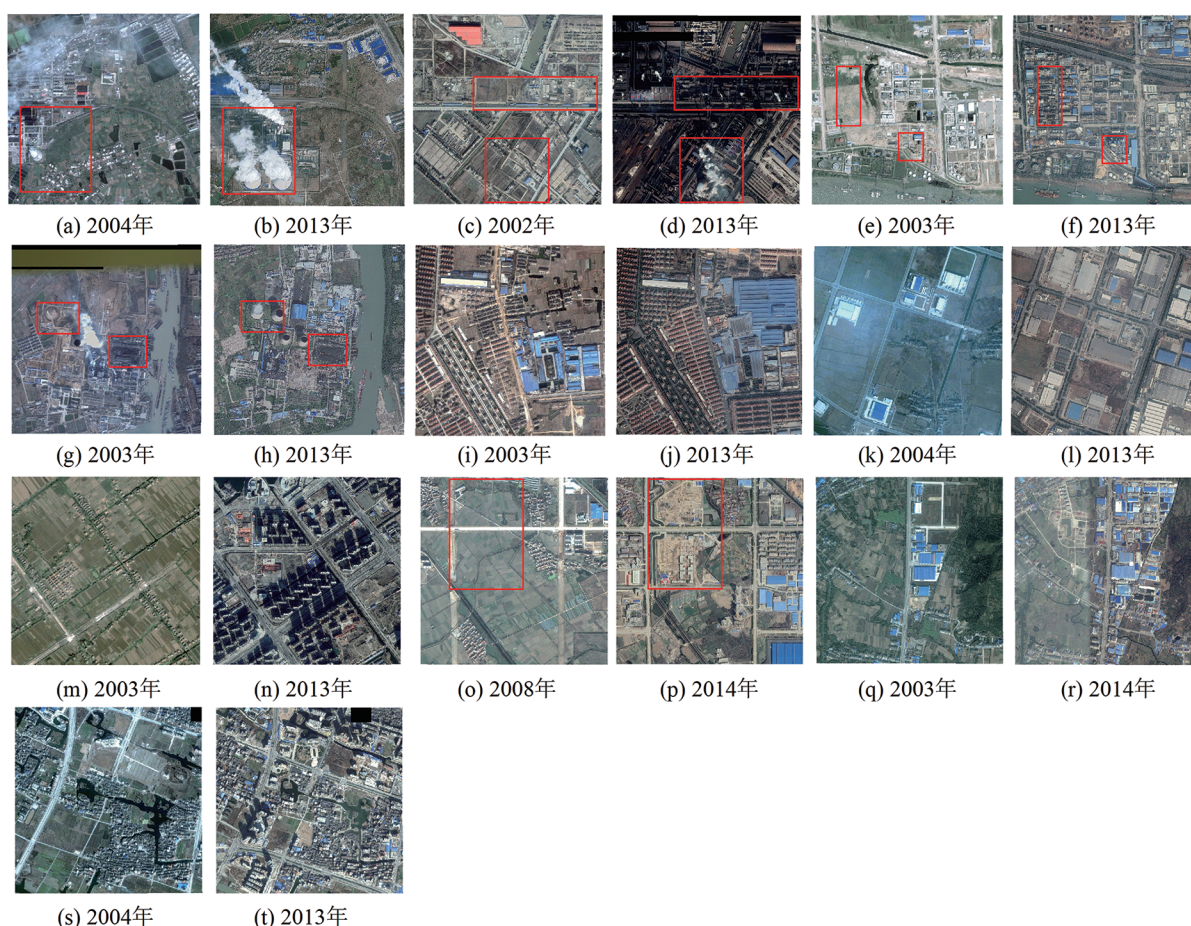


图11 叠加结果两期影像对比((a)~(p)为AE型所在区域,(q)~(t)为AA型所在区域)

Fig.11 Comparison of the overlapping results in two phases of high-resolution satellite images

((a)~(p) is the area of AE type, (q)~(t) is the area of AA type)

发展过程中仍保留着原有的重要生态系统不发生转移,环境质量所受影响则是有限的,甚至是改善的,和城市发展能够相得益彰。

5 长三角城市化与环境保护高质量协同发展建议

依据“规划纲要”及本文所得分析结果,对长三角地区城市化与环境保护高质量协同发展提出以下建议:

(1)灯光值未发生明显变化的地区分布较广,成规模的城市高速扩张模式仍局限在上海—苏锡常地区,反映了长三角城市群长时间内存在的发展不平衡、大城市对中小城市的虹吸效应等城市发展问题^[30]。上海市拥有最高的灯光值高速增长型占比,印证了其作为区域发展龙头的战略定位,在其发挥辐射带动作用方面,应进一步加强往西南方向上的辐射力度,推动相关产业、技术、人才等向该方向适宜地区转移,扩展除苏锡常以外的长三角核心

功能区范围。此外,上海市的辐射作用需持续向安徽和浙江省内陆、苏北等相对落后的边缘地区深入,通过发展引导、合作共建、对口帮扶等手段^[30]帮助承接产业转移,加速经济发展,以缩小长三角城市群城市化水平差异。南京和合肥都市圈的圈带联动作用未充分发挥,应通过学习上海都市圈、杭州都市圈经验,在区域内拓宽辐射效应,加强资源要素流动,协调分工合作,以优化协同发展模式。从社会经济参量对灯光值变化的驱动作用来看,需继续通过提高对外开放程度促进经济高速发展;通过政策机制吸引高新技术人才输入,同时加大对劳动者的专业技能培训,激发人才活力,为区域经济发展输入有效动能;打造长三角新兴产业、现代服务业共同体,发挥第三产业对经济发展的重要推动力;依托长三角城市群综合一体化交通体系建设背景,提升区域运输能力和水平,加快生产要素流动,使交通要素为高水平城市建设提供有效动力。

(2)针对城市扩张与环境变化叠加结果所反映

的突出问题,提出3点建议。其一,沿江产业密集导致大范围AD型分布,加之航道货运密度高、农业面源污染严重等问题,容易进一步加大对长江等重点水域生态系统的破坏力度。应着力在重点生态功能区范围内,通过设置生态保护红线、建立联防联控机制等,加大跨域环境治理力度;调整优化产业布局,促进产业集聚;大力发展清洁生产、循环经济,构建经济—环境双赢的新型工业体系^[31];完善污染产业准入负面清单,将经济活动限制在环境承载能力之内。其二,上海市、杭州市等以AC、AB型分布为主的地区,应与经济发达但生态治理欠发达(AD、AE型)和二者均欠发达(CD、CE型)地区分享绿色发展模式与社会治理经验,推动城市建设规划、城市与环境协调发展规划的整合与对接,帮助实现经济转型。其三,从环境变化的主要原因来看,空气污染仍是区域环境与城市化协同发展的主要制约点。应加快发展金融、商贸、物流等现代服务业,加大对高新技术产业的扶持力度,推动旧工业区、传统产业转型;调整优化能源利用结构,发展绿色可持续型经济。此外,各城市发展模式、自然要素等不同,导致环境变化的原因不同,城市与环境发展协调效果的地域差异较大,应推动构建基于GIS等技术的一体化监测平台,加大城市间数据开放和信息共享,通过评估城市发展模式和生态环境制约因素,帮助研制“绿色经济”发展规划,走出适合本地区的高质量发展路径。

(3)叠加结果在高分辨率影像上所对应的地物覆盖类型转移情况,除重工业类型转移以外,发现城市化进程中出现的高密度建设用地易对生态环境造成压力。应规范建设用地规模,不断优化城市功能布局及空间结构;提升基础设施利用效率,集约利用资源,倡导低碳化生活方式,大力向生态宜居型现代化城市发展。

6 结论与讨论

6.1 结 论

实验利用DMSP/OLS夜间灯光数据和环境质量变化评价指标(CEI)分析了2001~2013年长三角城市群地区城市扩张模式及城市扩张区范围内的环境质量变化情况,并探讨了二者动态变化协调程度的空间分布差异,得出以下主要结论:

(1)2001~2013年长三角城市群约一半的地区灯光值显著增长,城市扩张强度整体较高,但区域

间存在较大差异。仅在上海—苏锡常地区有大范围的高速扩张态势,一体化建设和城市化水平最高,环杭州湾城市群地区一体化建设效果其次。沿江两岸城市的线状连接式高速扩张态势反映其向南北蔓延程度弱,越向西程度越弱,西部地区的城市协同发展力度较东部弱。长三角其余地区均未形成规模化的高速扩张模式,西部都市圈的圈带联系作用有待加强。经济、人口、交通和用电量是驱动城市扩张的重要因素。

(2)PM_{2.5}浓度由南向北增长幅度抬升,在合肥市达到最高,其次为苏中地区。约一半的地区NDVI下降,几个突出区域为上海、苏南地区、沿江地带和环杭州湾城市群。92.88%的地区LST上升,浙江省城市上升显著。

(3)长三角城市群城市扩张区环境质量以逐步退化状态为主。浙江省城市扩张区环境最优,以逐步改善和改善型分布为主。上海市的环境维持效果较好。江苏省和安徽省城市以逐步退化态势为主,合肥市主城区周围有较大范围的环境恶化型集聚分布,结合其城市蔓延模式,初步界定该地区城市建设与生态建设协调性最弱。多数城市扩张区环境质量变化受 $\Delta PM_{2.5}$ 的影响较大,其次为 ΔVC 。

(4)灯光值增长趋势与环境质量变化趋势叠加结果表明,上海市以AC和BC型为主,城市高强度建设过程中环境保持效果较好,但浦东新区、嘉定区和崇明岛存在少量的AD型集聚分布,协调性偏低。苏锡常及沿江城市有大范围AD型分布,需警惕此类型对长江生态系统的持续性破坏。浙江省城市的“渐变”式类型分布体现城市化建设与生态环境建设协调性高。合肥市的分布模式显示出典型的生态环境水平落后于城市化水平的非协调发展状态。通过谷歌影像上地表覆盖类型在两期内的转移情况,证明将夜光值增长趋势和环境质量变化指数相结合,可监测区域内由人类活动所产生的高环境破坏型地表动态变化情况。

6.2 讨 论

(1)实验将城市发展和环境质量动态变化结果相叠加,以定性的评价手段确定了长三角城市群城市化与环境双系统协调性发展的地域差异,对判断区域内的可持续发展状况具有一定的指示作用。对于城市化与环境之间的关系研究是学术界普遍关注的重要课题,从双系统的交互作用机理等概念^[32-33]发展至诸多模型的提出,并在不同地区得到

了广泛运用^[34-36],相关工作契合了国际社会公认的人与自然需协调可持续发展的理念。近两年开始出现将遥感数据引入关系模型的相关研究^[37-38],不仅能够定量地评判双系统的作用关系,还弥补了此前关系模型结果无法提供空间信息的缺点。对长三角地区城市进行高质量发展评价时,将城市演进与环境变化的协调关系纳入其中,能够帮助厘清城市发展与生态环境之间的共生关系,从而使得治理工作更为科学和精准。因此,需继续将本研究所得监测期内的双系统动态变化结果与关系模型相结合,获取具有空间信息的、具备量化结果的多系统动态发展协调关系。

(2)自2010年国务院常务会议通过《长江三角洲地区区域规划》以后,长三角在城市高水平建设、社会经济一体化发展、产业结构调整、创新引领、市场开放以及生态环境保护等诸多方面取得了一系列阶段性的成果,尤其是在2012年后,伴随着十八大的召开,“绿水青山就是金山银山”的理念得到行动上的落实,生态环境日益向好的趋势不可逆转。因此,在不同阶段下,长三角城市群城市化和生态环境双系统定会发生阶段性的协调性转移,例如东部核心城市在经济发展到一定水平后开始注重城市生态系统建设,双系统有序发展而走向协调^[36],但部分城市粗放式发展模式仍然突出,高污染、低效益的产业比重逐渐加大,导致其出现逐步失调的不可持续型发展走向。然而,由于DMSP/OLS数据年份的限制,本实验仅获取至2013年的结果,同时时间跨度大,未对不同阶段下的协调性转移情况进行细致的分析对比。因此,需进一步结合NPP/VIIRS夜间灯光数据,同DMSP/OLS整合形成长时间序列的夜光产品^[39],分阶段获取城市动态发展模式,结合环境质量变化指数,在时段内、时段间、空间上对比长三角地区城市化进程与生态环境变化的共生互动关系。

(3)由于不同城市的生态环境易受到气候、地形、政策等多因素的影响,将继续综合考虑更多因素,充分利用GIS、遥感等手段,构建长三角城市群城市治理能力评价体系,为长三角城市群探索城市发展与环境保护协调共进的高质量发展路径提供更为全面的数据支持。

参考文献(References):

- [1] Hu Kaixuan. Spillover effects of changed open economy in Yangtze River Delta Metropolitan from the view of institutional change[D]. Shanghai: East China Normal University, 2017. [胡凯旋. 长三角都市圈开放经济的空间溢出效应[D]. 上海: 华东师范大学, 2017.]
- [2] Wang Weiguang, Tang Xiaolan. Thoughts and suggestions on the integration development of Yangtze River Delta Urban Agglomeration[J]. China Collective Economy, 2019(19): 25-26. [王伟光, 唐晓岚. 关于长三角城市群一体化协同发展的思考与建议[J]. 中国集体经济, 2019(19): 25-26.]
- [3] Song Shixiong, Liu Zhifeng, He Chunyang, *et al.* Research progress on assessing the impacts of urban expansion on natural habitats[J]. Advances in Earth Science, 2018, 33(10): 1094-1104. [宋世雄, 刘志锋, 何春阳, 等. 城市扩展过程对自然生境影响评价的研究进展[J]. 地球科学进展, 2018, 33(10): 1094-1104.]
- [4] Zhang Guojun, Wang Yuhuan, Wu Kunjin, *et al.* Spatial-temporal characteristics and influencing factors of coordination between economic and environmental development of three major urban agglomerations in China[J]. Geographical Research, 2020, 39(2): 272-288. [张国俊, 王珏晗, 吴坤津, 等. 中国三大城市群经济与环境协调度时空特征及影响因素[J]. 地理研究, 2020, 39(2): 272-288.]
- [5] Lu D B, Mao W L, Yang D Y, *et al.* Effects of land use and landscape pattern on PM_{2.5} in Yangtze River Delta, China[J]. Atmospheric Pollution Research, 2018, 9(4): 705-713. DOI: 10.1016/j.apr.2018.01.012.
- [6] Xü Liting, Yao Shimou, Chen Shuang, *et al.* Evaluation of eco-city under the concept of high-quality development: a case study of the Yangtze River Delta Urban Agglomeration[J]. Scientia Geographica Sinica, 2019, 39(8): 1228-1237. [徐丽婷, 姚士谋, 陈爽, 等. 高质量发展下的生态城市评价——以长江三角洲城市群为例[J]. 地理科学, 2019, 39(8): 1228-1237.]
- [7] Chen Bing, Zeng Gang, Cao Xianzhong, *et al.* Coupling coordination development between ecological civilization construction and urbanization in Yangtze River Delta Urban Agglomerations[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(3): 530-541. [陈炳, 曾刚, 曹贤忠, 等. 长三角城市群生态文明建设与城市化耦合协调发展研究[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(3): 530-541.]
- [8] Liu Xinyü, Hu Jing, Shen Aiping. Research on the ecological management mechanism of the Yangtze River Delta eco-green integration development demonstration plot[J]. China Development, 2019, 19(6): 1-5. [刘新宇, 胡静, 沈爱萍. 长三角生态

- 绿色一体化发展示范区生态环境管理机制研究[J]. 中国发展, 2019, 19(6): 1-5.]
- [9] Du Peijun, Bai Xüyü, Luo Jieqiong, *et al.* Advances of urban remote sensing[J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology (Natural Science Edition), 2018, 10(1): 16-29. [杜培军, 白旭宇, 罗洁琼, 等. 城市遥感研究进展[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2018, 10(1): 16-29.]
- [10] Han Chunmeng. The research of the regional urbanization impact on the heat island based on the RS[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2014. [韩春萌. 基于RS的区域城市化对热岛效应的影响机制研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014.]
- [11] Wang Jing. Estimating PM_{2.5} of main cities in Yangtze River Delta based on remote sensing[D]. Shanghai: East China Normal University, 2016. [王静. 基于卫星遥感的长三角主要城市PM_{2.5}估算[D]. 上海: 华东师范大学, 2016.]
- [12] Liu Yaoyi, Zeng Peng, Zhang Ran, *et al.* Vegetation coverage change of the demonstration area of ecologically friendly development in the Yangtze River Delta, China based on GEE and BRT during 1984~2019[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(3): 1033-1044. [刘垚懿, 曾鹏, 张然, 等. 基于GEE和BRT的1984~2019年长三角生态绿色一体化发展示范区植被覆盖度变化[J]. 应用生态学报, 2021, 32(3): 1033-1044.]
- [13] Shen S G, Pei Y, Fan C J. Quantitative assessment of land use dynamic variation using remote sensing data and landscape pattern in the Yangtze River Delta, China[J]. Sustainable Computing: Informatics and Systems, 2019, 23. DOI: 10.1016/j.suscom.2019.07.006.
- [14] Zhang Kai, Xue Liang. Study on urban expansion in Shaanxi province from 2000 to 2015 based on multi-source remote sensing data[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2018, 33(6): 1170-1177. [张楷, 薛亮. 基于多源遥感数据的陕西2000~2015年城市扩展研究[J]. 遥感技术与应用, 2018, 33(6): 1170-1177.]
- [15] Yang Renfei, Luo Hongxia, Zhou Sheng, *et al.* Restoring and analyzing the space forming process of Chengdu-Chongqing urban agglomeration by using DMSP/OLS night-time light data[J]. Journal of Geo-Information Science, 2017, 19(5): 653-661. [杨任飞, 罗红霞, 周盛, 等. 夜间灯光数据驱动的成渝城市群空间形成过程重建及分析[J]. 地球信息科学学报, 2017, 19(5): 653-661.]
- [16] Jiang Wei, He Guojin, Liu Huichan, *et al.* Modelling China economic parameters based on DMSP/OLS nighttime light imagery[J]. Remote Sensing Information, 2018, 33(1): 29-35. [江威, 何国金, 刘慧婵, 等. 利用DMSP/OLS夜间灯光影像模拟中国经济参量[J]. 遥感信息, 2018, 33(1): 29-35.]
- [17] He C Y, Gao B, Huang Q X, *et al.* Environmental degradation in the urban areas of China: evidence from multi-source remote sensing data[J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 193. DOI: 10.1016/j.rse.2017.02.027.
- [18] Liu Yayuan, Zhang Xueliang. Transformation and generalization of the concept of "Yangtze River Delta": research of modern regional economy[J]. Journal of Finance and Economics, 2020, 46(4): 94-108. [刘雅媛, 张学良. "长江三角洲"概念的演化与泛化——基于近代以来区域经济格局的研究[J]. 财经研究, 2020, 46(4): 94-108.]
- [19] Guo Zheng, Yao Shimou, Chen Shuang, *et al.* Spatial-temporal evolution of the livability levels in the Yangtze River Delta Urban Agglomerations and its influencing factors[J]. Economic Geography, 2020, 40(2): 79-88. [郭政, 姚士谋, 陈爽, 等. 长三角城市群城市宜居水平时空演化及影响因素[J]. 经济地理, 2020, 40(2): 79-88.]
- [20] Cao Ziyang, Wu Zhifeng, Kuang Yaoquan, *et al.* Correction of DMSP/OLS night-time light images and its application in China[J]. Journal of Geo-Information Science, 2015, 17(9): 1092-1102. [曹子阳, 吴志峰, 匡耀求, 等. DMSP/OLS夜间灯光影像中国区域的校正及应用[J]. 地球信息科学学报, 2015, 17(9): 1092-1102.]
- [21] Zhu X B, Ma M G, Yang H, *et al.* Modeling the spatiotemporal dynamics of gross domestic product in China using extended temporal coverage nighttime light data[J]. Remote Sensing, 2017, 9(6): 626-645. DOI: 10.3390/rs9060626.
- [22] Zhu Yixuan, Zhang Yangjian, Zu Jiangxing, *et al.* Performance evaluation of GIMMS NDVI based on MODIS NDVI and SPOT NDVI Data[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(2): 536-544. [朱艺璇, 张扬建, 俎佳星, 等. 基于MODIS NDVI、SPOT NDVI数据的GIMMS NDVI性能评价[J]. 应用生态学报, 2019, 30(2): 536-544.]
- [23] Jiang Youyan, Du Wentao, Huangjin, *et al.* Analysis of vegetation changes in the Qilian Mountains during 2000~2015[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(5): 1130-1136. [蒋友严, 杜文涛, 黄进, 等. 2000~2015年祁连山植被变化分析[J]. 冰川冻土, 2017, 39(5): 1130-1136.]
- [24] Hu Shunshi, Peng Yulong, Qin Jianxin, *et al.* Research on the vegetation index dynamic changes and the impact of urban expansion on it for Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Urban Agglomeration[J]. Economic Geography, 2019, 39(12): 178-186. [胡

- 顺石,彭雨龙,秦建新,等.长株潭城市群植被指数动态变化及城市扩展对其影响分析[J].经济地理,2019,39(12):178-186.]
- [25] Li Tong, He Chunyang, Yang Yang, *et al.* Understanding electricity consumption changes in Chinese mainland from 1995 to 2008 by using DMSP/OLS stable nighttime light time series data[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(10): 1403-1412. [李通,何春阳,杨洋,等.1995~2008年中国大陆电力消费量时空动态[J].地理学报,2011,66(10):1403-1412.]
- [26] Leng W C, He G J, Jiang W. Investigating the spatiotemporal variability and driving factors of artificial lighting in the Beijing-Tianjin-Hebei region using remote sensing imagery and socioeconomic data[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(11): 1611-1950. DOI: 10.3390/ijerph16111950.
- [27] Wang Juan, Wu Xuming, Wang Aifeng. The application of pearson correlation coefficient algorithm in searching for the users with abnormal watt-hour meters [J]. *Power Demand Side Management*, 2014, 16(2): 52-54. [王涓,吴旭鸣,王爱凤.应用皮尔逊相关系数算法查找异常电能表用户[J].电力需求侧管理,2014,16(2):52-54.]
- [28] Chang Ting, Wu Shaohua. Spatial-temporal characteristics of Yangtze River Delta Urban Agglomeration's geographic expansion in recent decades: an empirical study based on DMSP/OLS night light data[J]. *Modern Urban Research*, 2014(7): 67-73. [昌亭,吴绍华.长三角城市群地域扩张的时空特征——基于“近十年来DSMP/OLS夜间灯光数据”的实证分析[J].现代城市研究,2014(7):67-73.]
- [29] Liu Yongjian, Geng Hong, Sun Wenhua, *et al.* Explanation to the driving factors for the construction land expansion's regional difference in the Yangtze River Delta Urban Agglomeration: based on the shapley value decomposition method of the regression equation[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2017, 26(10): 1547-1555. [刘永健,耿弘,孙文华,等.长三角城市群建设用地扩张地区差异的驱动因素解释——基于回归方程的Shapley值分解方法[J].长江流域资源与环境,2017,26(10):1547-1555.]
- [30] Fan Hengshan. Five key points to build a world-class Yangtze River Delta City Group[J]. *Wisdom China*, 2020(Sup.1): 90-91. [范恒山.打造长三角世界级城市群要抓好五个着力点[J].智慧中国,2020(增刊1):90-91.]
- [31] Chang Jiwen. How to coordinate the relationship between ecological environment protection and economic development in the Yangtze River Economic Belt[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, 27(6): 1409-1412. [常纪文.长江经济带如何协调生态环境保护与经济发展的关系[J].长江流域资源与环境,2018,27(6):1409-1412.]
- [32] Crossman G, Krueger A. Economic growth and the environment[J]. *Quarterly Journal of Economics*, 1995, 2(2): 25-30. DOI: 10.3386/w4634.
- [33] Forrester J W, Karnopp D C. Urban dynamics[J]. *Journal of Dynamic Systems Measurement & Control*, 1971, 93(2): 128-128. DOI: 10.1115/1.3426475.
- [34] Liu Yanyan, Wang Shaojian. Coupling coordinative degree and interactive coercing relationship between urbanization and eco-environment in pearl river delta[J]. *Human Geography*, 2015, 30(3): 64-71. [刘艳艳,王少剑.珠三角地区城市化与生态环境的交互胁迫关系及耦合协调度[J].人文地理,2015,30(3):64-71.]
- [35] Zhang Leqin, Zhang Yong. Measurement and analysis on marginal eco-environmental effects of urbanization evolution in Anhui Province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2014, 34(4): 208-214. [张乐勤,张勇.安徽省城镇化演进边际生态环境效应的测度与分析[J].水土保持通报,2014,34(4):208-214.]
- [36] Chen Bing, Zeng Gang, Cao Xianzhong, *et al.* Coupling coordination development between ecological civilization construction and urbanization in Yangtze River Delta Urban Agglomerations[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(3): 530-541. [陈炳,曾刚,曹贤忠,等.长三角城市群生态文明建设与城市化耦合协调发展研究[J].长江流域资源与环境,2019,28(3):530-541.]
- [37] Liao Lihong, Dai Wenyuan, Huang Huaifu, *et al.* Coupling coordination analysis of urbanization and eco-environment system in Jinjiang using Landsat series data and DMSP/OLS nighttime light data[J]. *Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition)*, 2018, 34(6): 94-103. [廖李红,戴文远,黄华富,等.基于DMSP/OLS和Landsat数据的城市化与生态环境耦合协调分析[J].福建师范大学学报(自然科学版),2018,34(6):94-103.]
- [38] Ruzi Tuersunayi, Kasimu Alimujiang, Gao Pengwen, *et al.* Research on coupling and coordinated of urbanization and ecological environment based multi-source data fusion[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2021(2): 1-6. [图尔荪阿依·如孜,阿里木江·卡斯木,高鹏文,等.多源数据融合下的城市化与生态环境耦合协调研究[J].测绘通报,2021(2):1-6.]
- [39] Dong Hesong, Li Renjie, Li Jianming, *et al.* Study on urban spatiotemporal expansion pattern of three first-class urban ag-

glomerations in China derived from integrated DMSP-OLS and NPP-VIIRS nighttime light data[J]. Journal of Geo-information Science, 2020, 22(5): 1161-1174. [董鹤松, 李仁杰, 李

建明, 等. 基于 DMSP-OLS 与 NPP-VIIRS 整合数据的中国三大城市群城市空间扩展时空格局[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(5): 1161-1174.]

Remote Sensing Analysis of Environmental Change in Urban Expansion area of Yangtze River Delta Urban Agglomeration

Ji Yang, Jiang Jinbao

(School of Geosciences & Surveying Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Monitoring urban expansion and environmental change is significant to promote high-quality integrated development in Yangtze River Delta urban agglomeration (YRD). Based on DMSP/OLS night-time light data, multi-source remote sensing environmental indicators, methods of slope trend line analysis, construction of Comprehensive Evaluation Index (CEI) were used to analyze the characteristics of urban expansion, environmental change and their coordination of YRD from 2001 to 2013. The results showed that: (1) 46.24% of the cities expanded significantly, with the highest level of urbanization and urban integrated development in the region of Shanghai-Suzhou-Wuxi-Changzhou, followed by the Hangzhou Bay urban agglomeration and the regions along the Yangtze River. However, the high-speed urban expansion mode was not multi-regional and large-scale in YRD. GDP, the degree of opening to the outside world and electricity consumption were the main driving factors for the high-speed urban expansion. (2) In 46.35% of the significant urban expansion area, the environment gradually degraded, which was concentrated in Jiangsu and Anhui Province. Environment-degradation type was clustered around the downtown of Hefei. Environment quality of Zhejiang Province was the best, while that of Shanghai was almost unchanged. PM_{2.5} growth was an important reason for environmental change in most cities. (3) The superposition of urban expansion and environmental change can reflect the coordination degree of urban development and ecological environmental change. The coordination in Jiading District, Pudong New Area and Chongming Island in Shanghai, Suzhou-Wuxi-Changzhou and cities along Yangtze River was weak. The "gradual" distribution pattern in Zhejiang Province cities reflected high coordination, while that in Hefei city reflected a non-coordination mode that the environmental quality was far behind urbanization process. The results of high-resolution satellite images positioning showed that the combination of DMSP/OLS and CEI can successfully monitor the surface cover and its transfer that cause serious environment damage in the process of urbanization. This work can reveal the status of regional sustainable development, and has an instructive role in the future study of spatial transfer of dynamic development coordination between urbanization and environmental quality in the Yangtze River Delta.

Key words: Yangtze River Delta Urban Agglomeration; Urban expansion; Environmental change; Coordinated sustainability; High-quality development