

文章编号:1671-4229(2023)06-0049-08

五大城市群城市化与生态环境协调性分析

康颖欣, 崔海山*

(广州大学 地理科学与遥感学院, 广东 广州 510006)

摘要: 文章基于 GEE 遥感数据集计算出增强型夜间灯光指数(ENUI)和遥感生态指数(RSEI),利用耦合协调度模型分析五大城市群20年以来城市化和生态环境之间的耦合协调度。结果表明:①五大城市群的城市化指数总体呈现上升趋势,珠三角城市群 ENUI 指数水平最高且增量最大,长三角城市群次之;②五大城市群 RSEI 值分布在 0.4~0.8,京津冀、长三角和珠三角城市群 RSEI 为先升后降的发展过程,而长江中游和成渝城市群则是一个持续上升的过程;③五大城市群的协调度指数总体在 0~0.2 浮动,均保持上升趋势,长三角和珠三角城市群的协调度值高于其余城市群,城市群间协调度差异显著。

关键词: 城市化指数; 遥感生态指数; 耦合协调度; 五大城市群

中图分类号: K909 文献标志码: A

The coordination between urbanization and ecological environment of five major urban agglomerations

KANG Ying-xin, CUI Hai-shan*

(School of Geography and Remote Sensing, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: This study uses remote sensing data to calculate enhanced nighttime light urban index (ENUI) and remote sensing ecological index (RSEI). Secondly, the coupling coordination degree (CCD) between ENUI and RSEI is analyzed by using the coupling coordination degree model (CCDM), expecting to provide reference for the sustainable development of urban agglomeration. The results show that: ①The ENUI of the five major urban agglomerations generally shows an upward trend. The ENUI of the Pearl River Delta is the highest and has the fastest growth rate, followed by the Yangtze River Delta urban agglomerations; ②The RSEI values of the five major urban agglomerations are distributed in the range of 0.4~0.8, and the RSEI values of the three major urban agglomerations of Beijing Tianjin Hebei, Yangtze River Delta and Pearl River Delta rise first and then fall; However, the middle reaches of the Yangtze River and the Chengdu Chongqing urban agglomeration are a continuously rising process; ③The overall coordination index fluctuates between 0 and 0.2, and both keep an upward trend. The coordination degree of urban agglomerations in Yangtze River Delta and Pearl River Delta is higher than that of the other three urban agglomerations, and there are significant differences in coordination between urban agglomerations.

Key words: ENUI; RSEI; CCD; five major urban agglomerations

收稿日期: 2022-09-07; 修回日期: 2023-03-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41876204); 广东省海洋专项资助项目(粤自然资合[2020]013)

作者简介: 康颖欣(1997—),女,硕士研究生. E-mail:kangyingxin2022@163.com

* 通信作者. E-mail:cuihaishan@126.com

引文格式: 康颖欣, 崔海山. 五大城市群城市化与生态环境协调性分析[J]. 广州大学学报(自然科学版), 2023, 22(6): 49-56.

自改革开放以来,中国城市化高速发展,2019年中国的城镇化率超过 60%^[1],珠三角、长三角等沿海特大城市群成形。城市群是社会经济增长极,但在发展过程中面临着日益严重的资源与生态环境的压力,影响着地区乃至全国可持续发展。

城市化是一个涉及人口、经济、社会和空间的复杂过程,对城市化概念的不同理解会产生不同的评价方法。基于行政单元的指标统计法所需数据耗费人力物力,数据时效性差,更新周期长,且常受到行政单元的限制,难以反映细尺度的城市化水平特征^[2-3]。随着遥感技术的发展和遥感数据的丰富,使用遥感手段监测城市化水平已成为一种快速、便捷的方式。由于夜间灯光的可用性和准确性,已成为社会经济活动的有效代用指标,有大量研究证明,夜间灯光与城市化有密切关系^[4-5],且其在揭示区域和全球尺度的城市化进程方面具有巨大潜力。但由于夜间灯光过饱和效应,其在刻画城市核心区夜间灯光变化能力有限,有学者考虑利用植被信号,构建一个更加稳健的植被修正的城市夜间灯光指数(Vegetation Adjusted NTL Urban Index, VANUI),以降低夜间灯光的饱和度^[6],但其难以缓解经济发达地区灯光强度的饱和问题。夜间灯光数据融合 NDVI、NDWI 和 NDBI,构建增强型夜间灯光指数(ENUI),增强了城市核心区夜间灯光变异,且充分缓解水体和植被区夜间灯光亮度的过饱和效应,能够准确有效地实现监测全球城市群的时相城市信息^[7]。

生态环境质量监测主要可分为以下两类:①完全基于统计数据的生态环境质量评价。其主要通过统计公报,构建各种评价指标体系对生态环境质量进行综合性评价^[8],但统计数据需耗费大量人力物力,受到行政区划边界限制,不适用于多尺度或小尺度生态质量评价。②完全基于遥感技术的生态环境质量评价。徐涵秋^[9-10]选取了绿色、湿度、热度和干度等完全基于遥感的指标,利用主成分分析法构建了遥感生态指数(Remote Sensing based Ecological Index, RSEI),发现 RSEI 在环境评价上与环境指数具有可比性,该指数在生态环境评价中得到了广泛应用^[11-12]。基于 RSEI 的生态评价具有指标易获得的优势,避免了评价指标体系的权重设定,且 RSEI 易于可视化,能够快速、定量、客观地评价区域生态环境。随着

云计算平台兴起,谷歌地球引擎(Google Earth Engine, GEE)凭借海量计算能力受到广大研究者的喜爱,广泛用于生态环境质量监测^[13-14]。在城市化与生态环境质量互动耦合机制的研究中,更多使用统计数据作为模型的输入参数,导致研究结果的空间分辨率较粗糙,不能反映像素级的空间信息^[15-17],且研究区多聚焦在单个城市群^[16-17],缺乏城市群间协调度的比较分析,尤其是在中国快速城镇化发展背景下生态环境受到压力的特大城市群的比较研究。因此,基于 GEE 云平台的强大计算能力,本文采用改进型夜间灯光城市指数(ENUI)和遥感生态指数(RSEI)探讨 2001—2020 年中国五大城市群城市化与生态环境的协调性。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究区概况

依托自然地理优势,5 个特大城市群经济快速发展,人口数量也不断攀升,涵盖了中国 4 个直辖市和 9 个省份的 83 个地级市(图 1)。2020 年,5 个特大城市群生产总值达 57.36 万亿元,常住人口约 5.6 亿人,以占全国 10% 的陆地面积承载了 39% 的常住人口所创造的 57% 的生产总值,在经济发展和人口集聚方面起到举足轻重的作用。

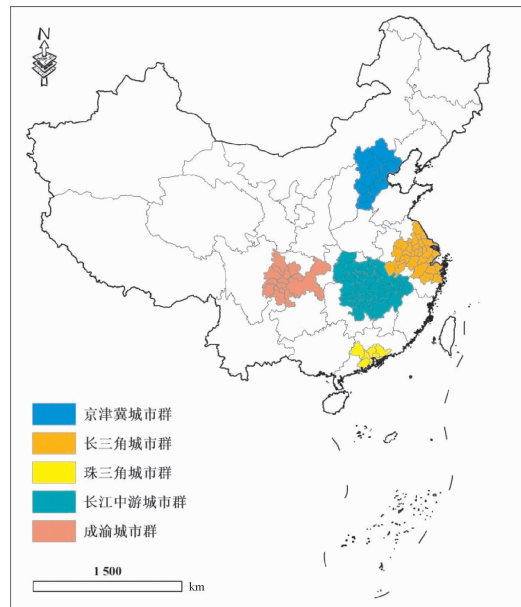


图 1 研究区区位图

Fig. 1 The locations map of study area

注:基于自然资源部标准地图服务系统审图号为 GS(2020)4619 号的标准地图制作,底图无修改。

1.2 数据来源

本研究使用的遥感数据集和其他数据如表1所示,首先是GEE内提供的陆地卫星地表反射率(Landsat_SR),该数据集已对所有波段进行了准确的大气校正,选择其作为RSEI的主要数据源,剔除云量大于80%的影像,而MODIS数据作为RSEI缺失像素的填充。为了排除物候效应,数据采集周期为2000、2005、2010、2015和2020年5年的6月1日—8月31日,因为研究发现RSEI的年变化趋势与夏季的平均RSEI值相似^[18-19]。以上数据处理与计算均在GEE云平台完成。夜间灯光数据使用类NPP-VIIRS数据,通过新的交叉传感器标定方法产生,能在时序一致性基础上,反映不同尺度下的人口、灯光亮度变化和有效测度城市经济活动^[20-21]。

表1 数据来源
Table 1 Data sources

数据名称	时间分辨率	空间分辨率/m	功能
Landsat TM	16/d	30	计算 RSEI
Landsat OLI	16/d	30	计算 RSEI
MOD09A1	8/d	500	填补缺失像素
MOD11A2	8/d	1 000	填补缺失像素
NPP-VIIRS-like night-time light data	1/a	500	计算 ENUI

1.3 研究方法

1.3.1 生态环境质量计算

遥感生态指数运用绿度、湿度、热度和干度等4个能直观反映生态条件优劣的指标来评价生态系统状况,由归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)、湿度(WET)、归一化建筑裸土指数(Normalized Building-Bare-Soil Index, NDBSI)和地表温度(Land Surface Temperature, LST)这4个分量指标组成^[9-10]。公式(1)~公式(5)分别获取2001、2005、2010、2015和2020年的RSEI^[20-21],主要计算公式如下:

$$RSEI = PC1(NDVI, WET, LST, NDBSI), \quad (1)$$

其中,PC1代表主成分分析(PCA)的第一个分量,NDVI、WET、LST和NDBSI分别为标准化后的绿度、湿度、热度和干度。

1.3.2 城市化计算

ENUI指数融合了夜间灯光数据集(Nighttime

Light, NLT)、NDVI、归一化建筑指数(Normalized Difference Built-up Index, NDBI)和归一化水体指数(Normalized Difference Water Index, NDWI),以实现高精度长时序城市群的城市化监测与评估。考虑到RSEI指数已计算NDBSI,剔除ENUI中的NDBI和ENUI^[7]计算如下:

$$ENUI = NTL \times (1 - NDVI) \times (1 - NDWI_B), \quad (2)$$

其中,NLT为NPP-VIIRS-like nighttime light数据,取值范围在-1到1之间;NDVI取值范围在-1和1之间;NDWI取值范围在-1和1之间,大于0认为是水体,小于0则认为是非水体区域,大于0提取赋值为1,小于等于0提取赋值为0,即对NDWI进行二值化处理得到NDWI_B,达到去除水体的效果。

1.3.3 耦合度计算

城市化与生态环境之间的协调程度影响着城市群的可持续发展。借鉴物理学中的容量耦合系数模型,利用耦合度模型分析五大城市群城市化与生态环境的协调度^[22-23]:

$$C = \left\{ \frac{U \times E}{[(U + E)/2]^2} \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

其中,C为城市化与生态环境质量的耦合程度,取值0~1;U为城市化指数ENUI;E为遥感生态指数RSEI。为避免U、E均低,而C很高的“假协调”现象,对耦合度模型进行改进:

$$D = \sqrt{C \times T}, \quad (4)$$

$$T = \alpha U + \beta E, \quad (5)$$

其中,D为耦合度,取值范围为0到1,D值高表示城市化与生态环境质量之间的协调程度高;T为U和E的综合评价指标值;α和β分别为U和E的权重,α+β=1。结合专家建议及相关研究结果,由于城市化与生态环境具有交互作用且同等重要,将α和β分别设为0.5^[24-26]。

2 结果

2.1 城市化的时空变化

统计了2001—2020年五大城市群整体的ENUI指数,如图2(a)所示,五大城市群的ENUI指数总体呈现上升趋势,城市群之间指数差异显著。20年来,珠三角和长三角城市群的ENUI指数分别从0.0039增长至0.0154和0.0014增长至0.0091,增长率分别为298.4%和582.4%,城

市化水平在五大城市群中保持较高水平,一直处于高强度的城市化。而位于内陆的成渝城市群和

长江中游城市群 $ENUI$ 指数增量分别为 0.001 和 0.003,城市化发展较慢。

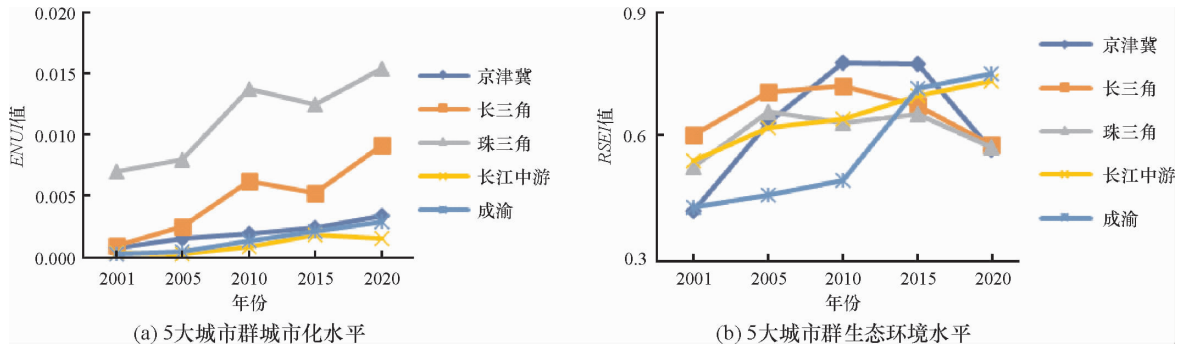


图 2 五大城市群 $ENUI$ 和 $RSEI$ 均值变化

Fig. 2 Changes of $ENUI$ and $RSEI$ in the five major urban agglomerations

2.2 生态环境质量的时空变化

2001—2020 年五大城市群的 $RSEI$ 指数,如图 2(b) 所示,五大城市群的 $RSEI$ 值分布在 0.4 ~ 0.8,京津冀、长三角和珠三角城市群的 $RSEI$ 呈现先升后降的趋势,而长江中游和成渝城市群则是一个持续上升的过程。在 2001 年,长三角城市群的 $RSEI$ 值最高,达 0.6;而在 2020 年,成渝为 $RSEI$ 值最高的城市群,达 0.75。京津冀和长三角城市群的 $RSEI$ 发展呈“倒 U”型,表现出先下降后上升的过程:京津冀城市群的 $RSEI$ 自 2001 年开始持续上升,2010 年开始持续下降;长三角城市群的 $RSEI$ 值在 2005—2015 年较高,而在 2001 年仅达 0.42,2010 年开始持续下降。珠三角城市群的 $RSEI$ 值呈现“M”形态发展, $RSEI$ 值在 0.5 ~ 0.7 浮动,波动较小,生态环境质量较稳定。成渝城市群的 $RSEI$ 值呈“S”形态发展,持续上升,2001—2010 年,其 $RSEI$ 值低于 0.5,在五大城市群的 $RSEI$ 中处于最低水平,而在 2010—2015 年其 $RSEI$ 值大幅提升,且 2020 年成为城市群 $RSEI$ 值最高的地区,说明该地区生态环境质量持续改善。长江中游城市群的 $RSEI$ 值保持在 0.5 以上且稳定上升,生态环境状况较好且持续改善。

图 3 为 20 年来五大城市群 $RSEI$ 指数的空间分布及变化情况。京津冀城市群 $RSEI$ 逐渐提高,北部生态环境质量总体优于南部; $RSEI$ 高值区分布在承德和秦皇岛, $RSEI$ 低值区分布在张家口西北翼。2001 年,长三角城市群 $RSEI$ 整体较低;2010 年, $RSEI$ 明显提升,南部生态质量优于北部, $RSEI$ 高值区主要分布在浙江省内城市,如杭州、金

华和绍兴等城市;2020 年,城市群 $RSEI$ 整体显著提升,生态环境质量明显改善,维持城市群南部优于北部市群的格局。珠三角城市群呈现肇庆 $RSEI$ 值高于周边地市,经过 20 年的发展, $RSEI$ 整体明显改善,城市间的 $RSEI$ 差距缩小。2001 年及 2010 年,长江中游城市群 $RSEI$ 空间分布相似,整体水平较低;2020 年,整体 $RSEI$ 值较高,城市群 $RSEI$ 低值区主要分布在武汉、长沙和南昌,呈现省会城市生态质量差的空间格局。2001 年,成渝城市群的 $RSEI$ 高值区主要出现在城市群中部地区;2010 年, $RSEI$ 高值区向西移动,绵阳、德阳等城市 $RSEI$ 高于周边城市;2020 年,重庆大部、泸州、广安和南充等并入 $RSEI$ 高值区,而 $RSEI$ 低值区主要分布在重庆市西部和成都市中部。总得来说,20 年来,五大城市群的 $RSEI$ 不断提高,生态环境质量不断改善;从空间分布而言,逐渐呈现省会城市为 $RSEI$ 低值中心的空间格局。

2.3 协调度的时空变化

以各城市群 2010 年的 CCD 值为参考,将五大城市群 CCD 分为 5 类。图 4 为 20 年来五大城市群在城市尺度上 CCD 值的空间分布及变化情况,揭示了城市群间和城市间的生态环境质量的协调度差异。从 CCD 数值等级来看,长三角、珠三角 CCD 的数值整体较高,京津冀城市群次之,成渝和长江中游城市群较低。从空间分布看来,五大城市群的 CCD 指数不断提升,珠三角、长三角高值区扩展面积大,而长江中游 CCD 值高区面积小且发展缓慢。20 年来,京津冀城市群形成北京一个显著高值区和天津、廊坊、唐山、秦皇岛等次高值

区;城市群 *CCD* 值整体不高,但各城市 *CCD* 均有提升,北京市 *CCD* 值增量较大,而承德市 *CCD* 值较低。在长三角城市群中,上海 *CCD* 值最高,苏州、无锡次之;2020年,城市群东部形成 *CCD* 高值片区,安徽省的安庆、宣城和池州等形成 *CCD* 低值区。珠三角城市群的 *CCD* 值整体较高,2001年的 *CCD* 高值区分布在深圳和东莞;2020年,肇庆维持 *CCD* 低值区,江门和惠州居于次低区,其余城市 *CCD* 值均高于 0.2;珠三角城市群的 *CCD* 高

值呈现以城市群中部为核心发展的态势。20年来,长江中游城市群 *CCD* 值较低,均低于 0.1。2001年,武汉为显著的 *CCD* 高值区;2020年,长沙和南昌亦出现 *CCD* 高值区,与武汉形成三足鼎立的格局,*CCD* 呈现北高南低的格局;2001—2005年成渝城市群范围内无显著高值区;2010年,成渝城市群出现 *CCD* 高值区——成都;2020年,成都北部的德阳、南部的眉山并入 *CCD* 高值区。

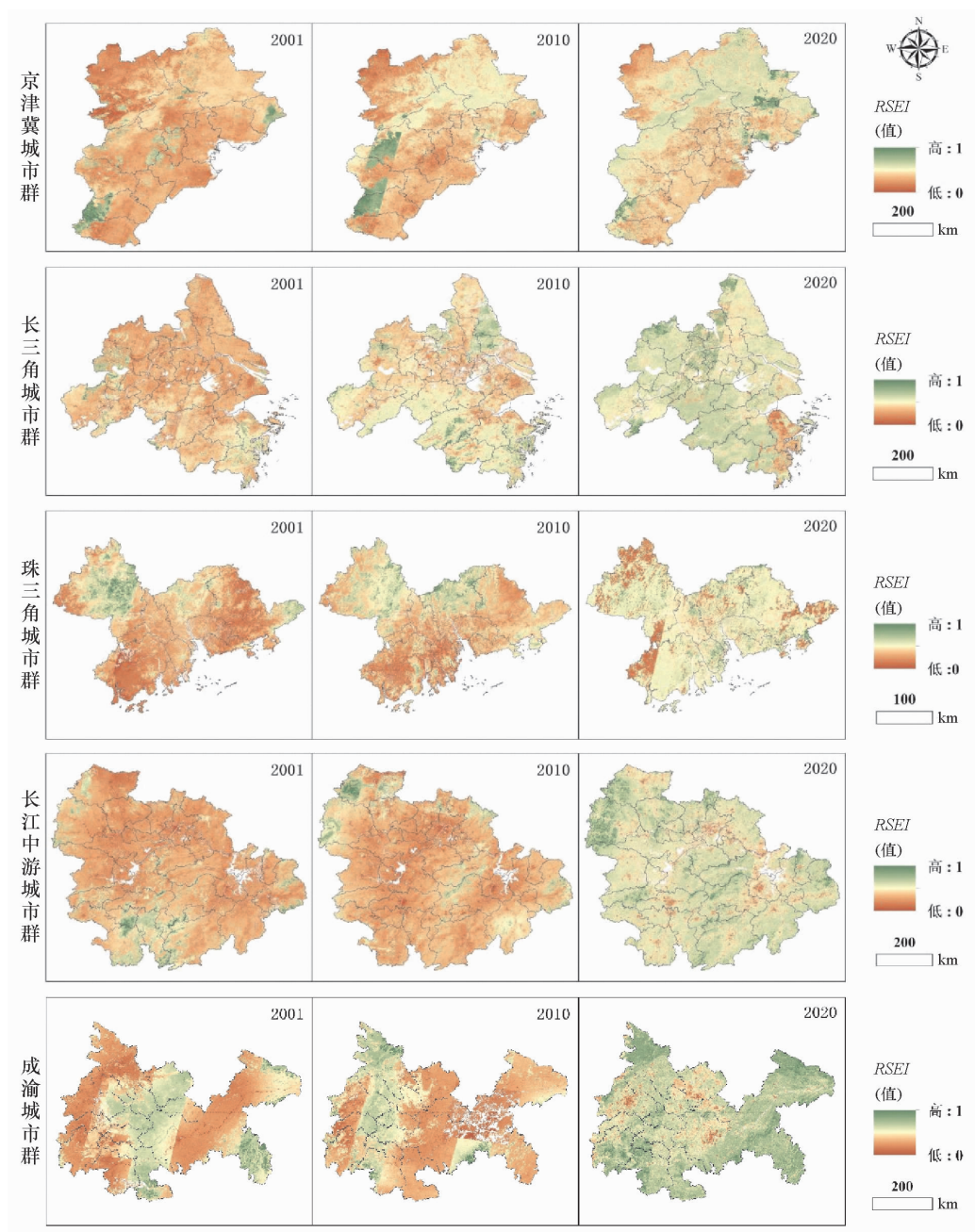


图3 五大城市群 *RSEI* 值空间分布及变化

Fig. 3 Spatial distribution and change of *RSEI* values in the five major urban agglomerations

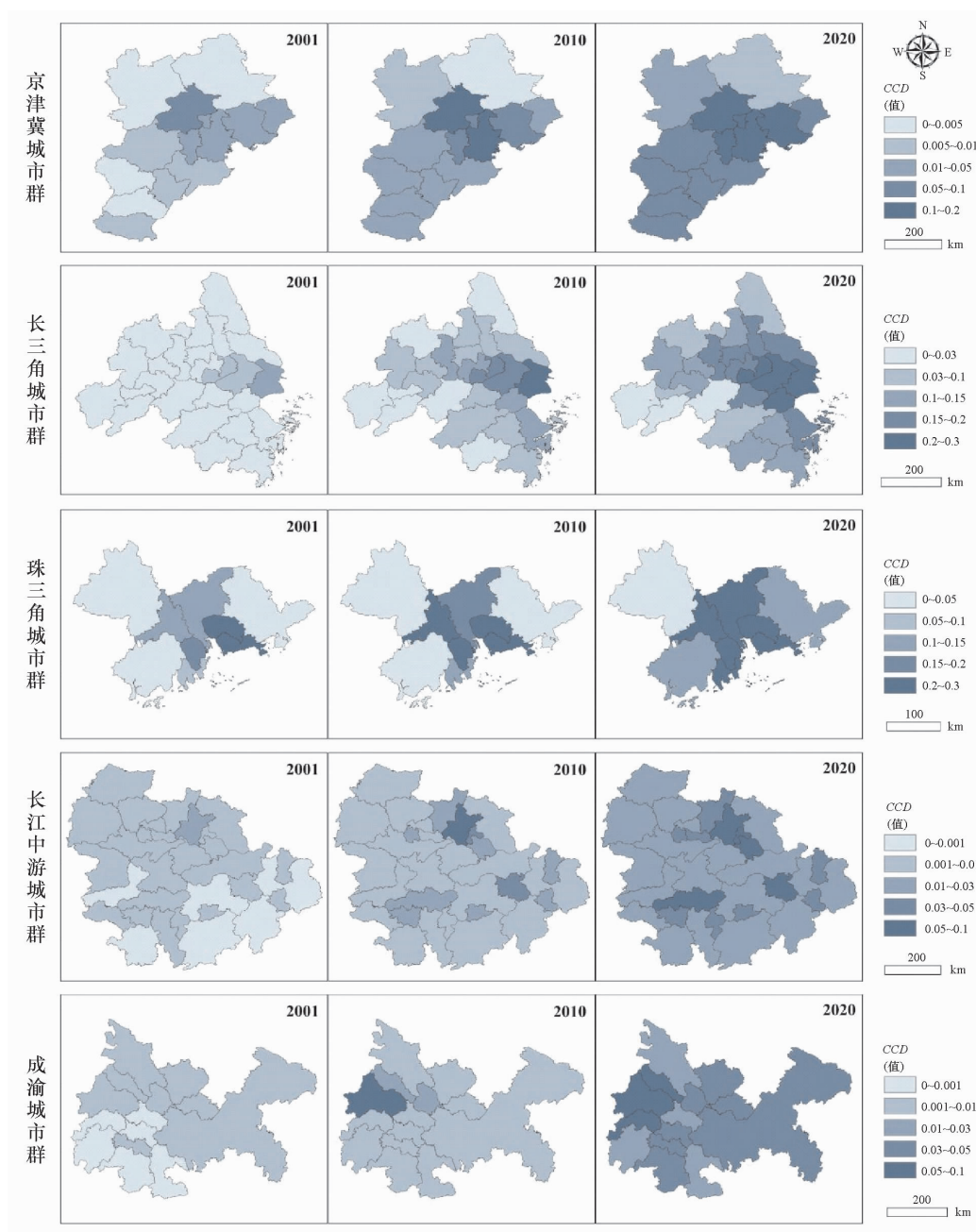


图 4 五大城市群 CCD 值空间分布及变化

Fig. 4 Spatial distribution and change of CCD values in the five major urban agglomerations

3 结论与讨论

3.1 讨论

遥感生态指标 *RSEI* 具有指标易获取、便于可视化等优点,但从综合测度生态环境质量指标来看,其仍有许多因素未纳入考虑,如空气质量、水体质量和土壤质量等。使用 Landsat 作为 *RSEI* 指数计算的遥感源数据多见于流域、盆地等中小尺

度^[27-28]研究,而在中尺度或大尺度研究中,*RSEI* 指数计算更多地还是使用 MODIS 数据^[29-30]。但本研究涵盖了 5 个城市群, Landsat 作为主要数据源,而 MODIS 作为缺失像素填充数据,发现两者融合效果欠佳, *RSEI* 年际波动强,需要考虑进行滤波处理^[31]。此外,地区亦存在差异性,如城市化发展阶段、生态状况特点等,可考虑根据研究区域的特点设置不同的指标,如城市动态分级,使其更贴近研究区域,获得更准确的评价结果^[32]。

3.2 结论

本文通过 *ENUI* 和 *RSEI* 测度城市化水平和生态环境质量,进而计算出五大城市群发展协调性,得出以下结论:

(1)五大城市群的 *ENUI* 指数呈现波动上升,珠三角城市群 *ENUI* 指数水平最高且增量最大,长三角城市群次之。东部沿海的3个特大城市群 *ENUI* 初始值较高且增量较大,尤其是珠三角和长三角城市群20年来一直处于高强度的城市化;而位于内陆的成渝城市群和长江中游城市群 *ENUI* 指数较低且增量小,城市化发展较慢。

(2)五大城市群的 *RSEI* 值分布在 0.4~0.8,京津冀、长三角和珠三角三大城市群的 *RSEI* 为先升后降的发展过程;而长江中游和成渝城市群则呈现持续上升的趋势。京津冀城市群北部生态环境质量总体优于南部;长三角城市群总体南部生态质量优于北部;珠三角城市群由东西两翼生态环境质量较好转为城市群整体分布较为均衡,无明显的 *RSEI* 高低值区域。长江中游城市群生态

环境质量持续改善,省会城市相对生态质量较差。成渝城市群 *RSEI* 高值区由中部地区扩展到城市群整体,呈现城市群大部生态改善。五大城市群 *RSEI* 均有所提升,经济发达地区生态环境较差,而城市化强度低的城市相对生态质量较好。

(3)五大城市群的 *CCD* 指数从空间分布看来,长三角、珠三角和京津冀城市群协调度优于长江中游和成渝城市群,且珠三角、长三角城市群高值区域面积提升较大,而长江中游城市群 *CCD* 高值区面积小且发展缓慢。京津冀城市群的 *CCD* 高值区呈现以北京为核心的发展格局;长三角城市群则是由以上海为 *CCD* 高值区;珠三角城市群呈现以城市中部为核心,高值区向四周扩张的格局;长江中游城市群 *CCD* 高值区由武汉单核心扩张到武汉、长沙和南昌3个核心的空间格局;成渝城市群则形成以成都为 *CCD* 高值区的空间格局。协调度水平受城市化影响明显,呈现经济发达、城市化强度高的城市协调度较好。

参考文献:

- [1] 陈睿山,赵志强,徐迪,等. 城市和城市群可持续发展指数研究进展[J]. 地理科学进展, 2021,40(1):61-72.
- [2] 陈明星,陆大道,张华. 中国城市化水平的综合测度及其动力因子分析[J]. 地理学报, 2009,64(4):387-398.
- [3] 薛俊菲,陈雯,张蕾. 中国市域综合城市化水平测度与空间格局研究[J]. 经济地理, 2010,30(12):2005-2010.
- [4] Bennett M M, Smith L C. Advances in using multitemporal night-time lights satellite imagery to detect, estimate, and monitor socioeconomic dynamics[J]. Remote Sensing of Environment, 2017,192:176-197.
- [5] 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.
- [6] Zhang Q, Schaaf C, Seto K C. The vegetation adjusted NTL urban index: A new approach to reduce saturation and increase variation in nighttime luminosity[J]. Remote Sensing of Environment, 2013,129(2):32-41.
- [7] Zheng Y, Tang L, Wang H. An improved approach for monitoring urban built-up areas by combining NPP-VIIRS nighttime light, NDVI, NDWI, and NDBI[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 328:129488.
- [8] 孙东琪,张京祥,朱传耿,等. 中国生态环境质量变化态势及其空间分异分析[J]. 地理学报, 2012,67(12):1599-1610.
- [9] 徐涵秋. 城市遥感生态指数的创建及其应用[J]. 生态学报, 2013,33(24):7853-7862.
- [10] 徐涵秋. 区域生态环境变化的遥感评价指数[J]. 中国环境科学, 2013,33(5):889-897.
- [11] Shan W, Jin X, Ren J, et al. Ecological environment quality assessment based on remote sensing data for land consolidation [J]. Journal of Cleaner Production, 2019,239:118126.
- [12] Ji J W, Wang S X, Zhou Y, et al. Spatiotemporal change and landscape pattern variation of eco-environmental quality in Jing-Jin-Ji Urban Agglomeration from 2001 to 2015[J]. IEEE Access, 2020,8:125534-125548.
- [13] Jia H W, Yan C Z, Xing X G. Evaluation of eco-environmental quality in Qaidam Basin based on the ecological index (MRSEI) and GEE[J]. Remote Sensing, 2021,13(22):4543.
- [14] 郑子豪,吴志峰,陈颖彪,等. 基于 Google Earth Engine 的长三角城市群生态环境变化与城市化特征分析[J]. 生态学报, 2021,41(2):717-729.

- [15] 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.
- [16] 李聪, 杜霞, 孟彦如, 等. 山东半岛城市群城镇化与生态环境耦合协调发展的时空格局[J]. 生态学报, 2020, 40(16): 5546-5559.
- [17] Li W, Wang Y, Xie S, et al. Coupling coordination analysis and spatiotemporal heterogeneity between urbanization and ecosystem health in Chongqing municipality, China[J]. Science of the Total Environment, 2021, 791: 148311.
- [18] Zhang T, Yang R Q, Yang Y B, et al. Assessing the urban eco-environmental quality by the remote-sensing ecological index: Application to Tianjin, North China[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2021, 10(7): 475.
- [19] Yue H, Liu Y, Li Y, et al. Eco-environmental quality assessment in China's 35 major cities based on remote sensing ecological index[J]. IEEE Access, 2019, 7(1): 51295-51311.
- [20] Chen Z Q, Yu B L, Yang C S, et al. An extended time series (2000—2018) of global NPP-VIIRS-like nighttime light data from a cross-sensor calibration[J]. Earth System Science Data, 2021, 13(3): 889-906.
- [21] Zhao M Q, Tian Y A, Dong N L, et al. Spatial and temporal dynamics of habitat quality in response to socioeconomic and landscape patterns in the context of urbanization: A case in Zhengzhou City, China[J]. Nature Conservation, 2022, 48: 185-212.
- [22] Song Q J, Zhou N, Liu T L, et al. Investigation of a "coupling model" of coordination between low-carbon development and urbanization in China[J]. Energy Policy, 2018, 121: 346-354.
- [23] 刘耀彬, 李仁东, 宋学锋. 中国城市化与生态环境耦合度分析[J]. 自然资源学报, 2005, 20(1): 105-112.
- [24] Xu D, Yang F, Yu L, et al. Quantization of the coupling mechanism between eco-environmental quality and urbanization from multisource remote sensing data[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 321: 128948.
- [25] Liang L, Zhang F, Wu F, et al. Coupling coordination degree spatial analysis and driving factor between socio-economic and eco-environment in Northern China[J]. Ecological Indicators, 2022, 135: 108555.
- [26] Ariken M, Zhang F, Liu K, et al. Coupling coordination analysis of urbanization and eco-environment in Yanqi Basin based on multi-source remote sensing data[J]. Ecological Indicators, 2020, 114: 106331.
- [27] Gao W, Zhang S W, Rao X Y, et al. Landsat TM/OLI-based ecological and environmental quality survey of Yellow River Basin, Inner Mongolia Section[J]. Remote Sensing, 2021, 13(21): 4477.
- [28] Yuan B D, Fu L N, Zou Y A, et al. Spatiotemporal change detection of ecological quality and the associated affecting factors in Dongting Lake Basin, based on RSEI[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 302: 126995.
- [29] Zheng Z H, Wu Z F, Chen Y B, et al. Exploration of eco-environment and urbanization changes in coastal zones: A case study in China over the past 20 years[J]. Ecological Indicators, 2020, 119: 106847.
- [30] Liao W H, Jiang W G. Evaluation of the spatiotemporal variations in the eco-environmental quality in China based on the remote sensing ecological index[J]. Remote Sensing, 2020, 12(15): 2462.
- [31] Chen Y, Cao R Y, Chen J, et al. A practical approach to reconstruct high-quality Landsat NDVI time-series data by gap filling and the Savitzky-Golay filter[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2021, 180: 174-190.
- [32] Huang C, Zhuang Q L, Meng X, et al. An improved nightlight threshold method for revealing the spatiotemporal dynamics and driving forces of urban expansion in China[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 289: 112574.

【责任编辑: 孙向荣】