

基于Google Earth Engine的粤港澳大湾区生态质量与城市化耦合协调度分析

邱琳^{1,2,3}, 郑华健^{1,2,3*}

¹广东省国土资源测绘院, 广东 广州

²自然资源部华南热带亚热带自然资源重点实验室, 广东 广州

³广东省自然资源科技协同创新中心, 广东 广州

收稿日期: 2022年9月18日; 录用日期: 2022年10月18日; 发布日期: 2022年10月27日

摘要

研究快速城市化背景下如何平衡生态环境和城市化发展对促进城市群可持续发展具有重要意义。本文立足遥感视角, 结合日间光学遥感和夜间灯光遥感数据, 基于Google Earth Engine云平台对2000~2020年粤港澳大湾区城市群生态环境状况、城市化强度以及二者耦合协调度进行分析。结果表明: 1) 粤港澳大湾区城市群在2000~2020年间RSEI均值稳定上升, 生态环境呈现出好转的态势, 但地区间的差异依旧显著; 2) 经过20年的城市化发展, 粤港澳大湾区城市群形成了以环珠江口的城市向四周逐步推进的城市化格局; 3) 20年间粤港澳大湾区城市群的生态环境与城市化的协调程度空间分异较为明显, 总体有所改善。研究结果可以为粤港澳大湾区城市群可持续发展提供数据支撑和科学参考。

关键词

Google Earth Engine, 粤港澳大湾区, 生态环境, 城市化, 夜间灯光

Analysis of Coupling Coordination Degree of Ecological Quality and Urbanization of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area Based on Google Earth Engine

Lin Qiu^{1,2,3}, Huajian Zheng^{1,2,3*}

¹Surveying and Mapping Institute Lands and Resource Department, Guangzhou Guangdong

²Key Laboratory of Tropical Subtropical Natural Resources in South China, Ministry of Natural Resources, Guangzhou Guangdong

³Guangdong Natural Resources Science and Technology Collaborative Innovation Center, Guangzhou Guangdong

*通讯作者。

文章引用: 邱琳, 郑华健. 基于 Google Earth Engine 的粤港澳大湾区生态质量与城市化耦合协调度分析[J]. 测绘科学技术, 2022, 10(4): 240-252. DOI: 10.12677/gst.2022.104025

Abstract

It is of great significance to study how to balance the ecological environment and urbanization development under the background of rapid urbanization to promote the sustainable development of urban agglomerations. Based on the perspective of remote sensing, this paper combines the data of daytime optical remote sensing and nighttime light remote sensing, and based on the Google Earth Engine cloud platform to analyze the ecological environment, urbanization intensity and coupling coordination degree of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area urban agglomeration from 2000 to 2020. The results show that: 1) the average RSEI of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area urban agglomeration increased steadily from 2000 to 2020, and the ecological environment showed a trend of improvement, but the differences between regions were still significant; 2) after 20 years of urbanization development, The urban agglomeration of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area has formed an urbanization pattern with cities surrounding the Pearl River Estuary gradually advancing to the surrounding areas; 3) in the past 20 years, the degree of coordination between the ecological environment and urbanization of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area urban agglomeration has been significantly different in space, and the overall level has improved. The research results can provide data support and scientific reference for the sustainable development of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area urban agglomeration.

Keywords

Google Earth Engine, Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, Ecological Environment, Urbanization, Nighttime Light

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

城市化是一个国家或地区发展到一定程度的必然结果,同时也是推进区域发展的重要动力。随着全球城市化的持续推进,呈现出城市化高级进程中的空间社会性过程,即逐步形成由多城市组成的有重要影响与发展活力的“城市群”[1]。城市群的城市化水平较高,区位优势独特,交通网络和通信基础设施发达,形成的产业集群具有经济辐射效应,带动周边城市经济增长,提升经济竞争力。然而,随着城市群经济高速发展、城市化持续推进,地区人类活动强度不断上升,会对生态环境造成现实的破坏和潜在的威胁,如人地矛盾突出、海岸带生态安全面临威胁、流域生态系统破碎化等,而生态环境的恶化反过来又会制约城市化和可持续发展[2]。

随着城市化与生态质量之间的相互影响愈发明显,其耦合关系也引起了诸多学者的关注。陈悦[3]基于面板数据对长江中游城市群的城市化与生态质量关系进行研究,发现二者协调发展水平不断改善且存在空间异质性。李雪铭等[4]学者利用地理探测器与熵值法,分析了辽宁省人居环境的系统耦合协调度及驱动因素。任亚文等[5]以“人-地耦合”为视角,基于社会经济统计数据构建指标体系,定量分析了长江经济带城镇化与生态环境的耦合过程与演化趋势。总体上,上述城市化和生态环境的耦合协调分析多

基于面板统计数据, 这类数据大多是省市县等较大尺度数据, 难以获取更小尺度数据, 同时缺乏详细的空间信息, 在一定程度上限制了有关问题的研究。

近年来, 遥感技术快速发展为区域生态环境与城市化的监测、评估提供技术支撑。遥感技术具有覆盖面广、时空尺度多样、光谱信息丰富和快速获取数据等优势, 可以弥补统计数据缺乏空间信息、难以栅格化等局限性, 目前已逐渐成为地理环境监测[6][7]和城市化分析[8][9]等领域研究的重要手段。然而, 如何提高处理、分析海量遥感数据的效率也成为研究的难点[10], 传统处理软件和方法处理遥感数据费时又费力, 无法满足大区域时序变化研究的需求。Google Earth Engine (GEE)遥感大数据云平台的出现为科学研究带来了全新的思路和挑战, 该平台可以提供多源共享遥感数据, 并具有强大的计算能力, 为解决更大尺度、更长周期的现实问题提供了全新的视角[11]。

粤港澳大湾区作为国内湾区实践的先行者、经济最活跃、开放程度最高的地区之一, 在区域全方位开放和经济发展中起引领作用。2018年, 《粤港澳大湾区发展规划纲要》明确提出粤港澳大湾区要“建设富有活力和国际竞争力的一流湾区和世界级城市群”[12]。在国家政策和区位优势加持下, 粤港澳大湾区的综合实力和国际竞争力不断提高, 但随着城市化进程不断加速, 地区生态环境状况面临的压力也日益严峻, 一定程度上限制了大湾区的可持续发展。因此, 适时地监测粤港澳大湾区生态环境与城市化的发展特征, 分析二者之间耦合协调程度, 有助于更好掌握粤港澳大湾区生态环境与城市化的发展轨迹, 推动城市化与生态环境的协调可持续发展。本文以粤港澳大湾区城市群为研究对象, 利用 MODIS 数据和夜间灯光数据, 基于 Google Earth Engine 平台分别建立生态环境指数和城市群灯光指数, 分析 2000~2020 年粤港澳大湾区生态环境与城市化的变化特征, 并运用耦合协调度模型评价生态环境与城市化之间的耦合协调水平, 为相关政府部门科学、合理地制定区域协调发展战略决策提供科学依据, 为促进粤港澳大湾区城市群可持续发展提供数据支撑和理论建议。

2. 研究区概况

粤港澳大湾区(Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, GBA)是世界四大湾区之一, 位于华南地区(21.33°~24.23°N, 111.219°~115.25°E), 具有“9+2”的区域格局, 包括香港特别行政区、澳门特别行政区和广东省广州市、深圳市、珠海市、佛山市、惠州市、东莞市、中山市、江门市、肇庆市, 总面积 5.6 万平方公里。2019 年常住人口为 7264.92 万人, 根据城市规模划分标准, 区域内有超大城市 2 个(城区常住人口数 ≥ 1000 万人)、特大城市 2 个(城区常住人口数 500~1000 万人)和大城市 7 个(城区常住人口数 100~500 万人), 2018 年 GDP 为 10.696 万亿元。粤港澳大湾区是我国开放程度最高、经济活力最强的区域之一, 在区域全方位开放和经济发展中起引领作用, 肩负建设国际科技创新中心、打造世界级城市群、支撑“一带一路”建设的重要任务。

3. 数据来源

3.1. MODIS 数据

中分辨率成像光谱仪(Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS)是美国国家航空航天局研制的搭载在 Terra (1999 年发射)和 Aqua (2002 年发射)卫星上的传感器, 其成像扫描幅宽 2330 km, 具有 36 个中等分辨率水平(0.25~1 μm)的光谱波段。MODIS 产品类型包括一级数据产品、大气标准产品、陆地标准产品和海洋标准产品, 由于其覆盖范围广、回访周期短等优点, 目前被广泛应用于植被动态监测以及植被生理生态的多种产品遥感反演、地表温度相关产品遥感和光学气溶胶厚度反演等相关研究。本文选用的 MODIS 数据包括 MOD09A1、MOD11A2 和 MOD13A1 产品, 各产品参数配置见表 1。

Table 1. Research indicators and their data products**表 1.** 研究指标及其数据产品

指标	产品	时间分辨率(天)	空间分辨率(m)	等级
绿度	MOD13A1	16	500	L3
地表温度	MOD11A2	8	1000	L3
地表湿度	MOD09A1	8	500	L3
地表干度	MOD09A1	8	500	L3

3.2. 夜间灯光数据

夜间灯光数据能够反映人类夜间灯光在地球表面的分布情况, 与人类表面社会活动高度相关, 因此被广泛地应用于城市化、人口分布和能源消耗[13][14][15]等人类社会活动的研究中。DMSP-OLS 数据来源于美国国防气象卫星计划(Defense Meteorological Satellite Program, DMSP)搭载的可见光成像线性扫描业务系统(Operational Linescan System, OLS)传感器, 是广泛应用于人类活动监测的第一代夜间灯光数据, 时间跨度为 1992~2013 年, 空间分辨率为 1 km, 像元灰度值(Digital Number, DN)为 0~63, 在灯光强度较高的城市中心会出现过饱和问题[16]。NPP-VIIRS 夜间灯光数据来源于 Suomi 国家极地轨道合作伙伴卫星(Suomi National Polar-Orbiting Partnership, NPP)搭载的可见光红外成像辐射仪(Visible Infrared Imaging Radiometer, VIIRS), 数据于 2012 年 4 月发布, 空间分辨率 750 m, NPP-VIIRS 影像可探测到更微弱的光源, 不同时期的数据可比性和连续性更强, 解决了城市中心灯光饱和问题。本文选取了 2000 年、2005 年和 2010 年 DMSP/OLS 的 Stable Light (STL)数据和 2015 和 2019 年 NPP 的 VIIRS Cloud Mask (VCM)数据共计 5 年的夜间灯光数据来研究城市化与生态环境的关系。

4. 研究方法

4.1. RSEI 构建

遥感生态指数(Remote Sensing Based Ecological Index, RSEI)由徐涵秋[17]学者提出的完全基于遥感信息的生态环境指数, 该指数由绿度、湿度、热度和干度 4 个分量组成, 通常用于生态质量评估[17][18][19]。RSEI 可用以下函数表示:

$$RSEI = f(\text{Greenness, Wetness, Heat, Dryness}) \quad (1)$$

式中, Greenness、Wetness、Heat 和 Dryness 分别为绿度分量、热度分量、湿度分量和干度分量。

首先本文基于 MODIS 数据计算得到 4 个生态分量, 分别采用 EVI 指数表征绿度分量、日间地表温度数据(Daytime Land Surface Temperature, DLST)表征热度分量、缨帽变换后的第三分量表征湿度分量、归一化土壤差分指数(Normalized Difference Built-up and Soil Index, NDBSI)表征干度分量。然后利用主成分分析(Principal Components Analysis, PCA)方法实现客观、自动确定指标权重, 在避免人为主观因素造成的偏差下进行多指标的合成[17]。

由于以上 4 个分量的量纲不统一, 需要将上述指标进行标准化处理再进行 PCA 运算, 并以第一主成分(PC1)来构建 RSEI, 此外, 再次将 PC1 值进行标准化处理, 从而实现研究期内的 RSEI 横向比较和分析。

4.2. CNLI 构建

根据先前学者指出 DMSP/OLS 的灯光数据存在异常, 因此本文使用了一种基于像素本身波动特征伪

不变目标校准模型来校准灯光数据[20], 并获取研究区的 2000, 2005 和 2010 年的校准灯光数据。由于 2015 和 2020 年的灯光数据来源于 VIIRS VCM 数据集, 与前三年灯光数据在时间维度上存在着不一致性和不可比性, 无法直接应用于本文的研究, 因此本文使用了 Li 等[21]提出的校准模型和低通高斯滤波函数, 将研究区的 VCM 数据合成为与 STL 相一致的模拟灯光数据, 实现 VCM 数据和 STL 数据的匹配。基于校准匹配后的夜间灯光影像, 本文构建了综合夜间灯光指数(CNLI)来反映地区城市化水平和地表人类活动强度, 该指数在前人研究中被证实与中国的城市化复合指标之间存在显著的相关性, 能够在较大区域上实现多年的城市化信息提取[22]。CNLI 被定义为某一地区灯光面积占比(LAP)和平均灯光强度(MLI)的乘积, 其公式为:

$$\text{CNLI} = \text{LAP} \times \text{MLI} \quad (2)$$

$$\text{LAP} = \frac{\text{Area}_{light}}{\text{Area}} \quad (3)$$

$$\text{MLI} = \frac{\sum_{i=1}^{63} C_i \times DN_i}{\sum_{i=1}^{63} C_i \times 63} \quad (4)$$

式中, Area_{light} 代表灯光区域的面积, Area 则为区域的总面积; DN_i 是灯光像元的灰度值, C_i 是灯光值为 DN_i 的像元数量。

4.3. 耦合协调度距离模型

为了定量评估粤港澳大湾区城市群内部生态环境与城市化水平的耦合协调性, 本文以城市 CNLI 为横坐标、RSEI 为纵坐标构建“城市化 - 环境”二维平面耦合度模型, 将耦合协调性距离 D 定义为“城市化 - 环境”坐标点与对角线和极限点的距离之和, 当耦合协调性距离 D 越小, 表明当城市的城市化水平和生态环境协调耦合程度越高[23], 公式为:

$$D_i = \frac{|x_i - y_i|}{\sqrt{2}} + \sqrt{(x_i - 1)^2 + (y_i - 1)^2} \quad (5)$$

式中, x_i , y_i 分别为“城市化 - 环境”坐标点的横、纵坐标, 即归一化后的 CNLI 指数和 RSEI 指数; D_i 为城市 i 的耦合协调距离。

4.4. Google Earth Engine 平台

Google Earth Engine (GEE)是一个集成了海量数据, 并可以用于地理空间数据可视化及分析的免费云计算平台, 其上存储的数据包括 Landsat、Sentinel、MODIS 等系列遥感影像, 以及地表覆盖、夜间灯光等各类数据。依托 Google 公司在全球的百万台服务器, GEE 具有强大的运算能力, 摆脱了时间、空间的限制, 可以实现大数据、多任务的并行运算[24]。因此, 本文利用 GEE 平台实现数据筛选、预处理、指标计算等全流程处理, 能够快速的对海量数据实现计算分析处理。

5. 结果分析

5.1. 生态质量分析

根据 4.1 中 RSEI 的计算公式, 本文以 5 年为间隔, 对 2000 年至 2020 年粤港澳大湾区的 RSEI 进行了计算, 并统计了不同城市 RSEI 平均值, 如表 2 所示, 可以看出, 研究区各市以及特别行政区的 RSEI

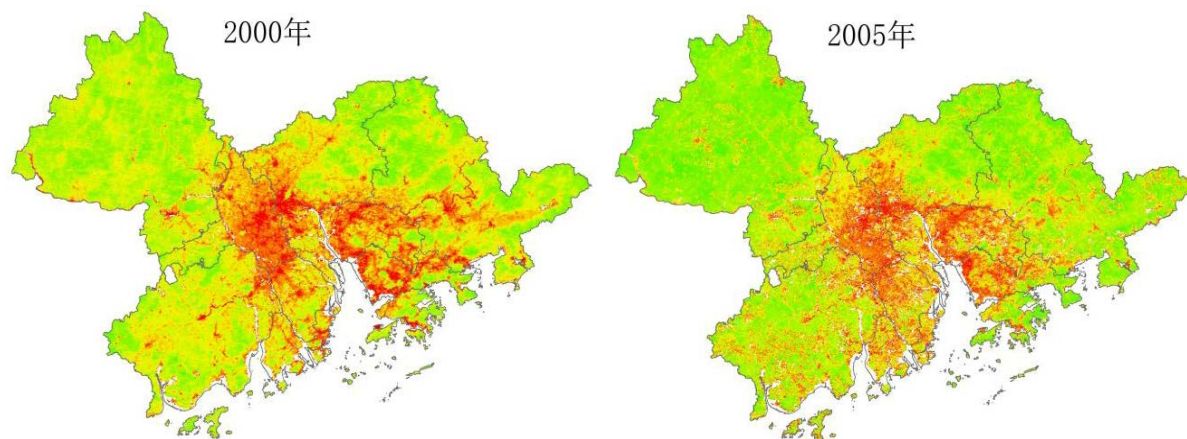
均值都呈现上升趋势。2000年至2020年期间，RSEI均值较高区域有肇庆市和惠州市，其中肇庆的生态质量最好，较低的有澳门、东莞市、佛山和中山市，其中澳门的生态质量最差。从各个地区来看，各地区RSEI均值变化存在一定的差异性，其中江门市、珠海市、深圳市和澳门RSEI均值变化波动比较明显，在2000至2005年呈现下降趋势，在2005年至2010年涨幅较为明显，总体呈现“先降后升”的特征。广州市、珠海市和香港RSEI均值则相对稳定。

Table 2. The RSEI urban agglomerations in the GBA during 2000 to 2020

表 2. 2000~2020 年粤港澳大湾区城市群 RSEI 均值

城市	年份	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年
肇庆市		0.74	0.77	0.74	0.74	0.8
广州市		0.63	0.64	0.62	0.64	0.65
深圳市		0.53	0.52	0.56	0.54	0.58
佛山市		0.52	0.5	0.49	0.48	0.51
惠州市		0.7	0.73	0.73	0.73	0.76
中山市		0.57	0.47	0.51	0.47	0.5
东莞市		0.5	0.45	0.47	0.45	0.48
江门市		0.67	0.65	0.74	0.69	0.73
珠海市		0.58	0.52	0.6	0.56	0.58
香港特别行政区		0.65	0.68	0.69	0.7	0.71
澳门特别行政区		0.43	0.42	0.49	0.42	0.47

图 1 是粤港澳大湾区不同年份的 RSEI 空间分布图，可以发现，2000~2020 年粤港澳大湾区 RSEI 的变化特征可以总结为：1) 粤港澳大湾区 RSEI 总体呈上升趋势；2) 大湾区中心区域的低值 RSEI 像素呈扩张趋势。这一变化特征与粤港澳大湾区近年来在高速城市化进程的发展背景下不断推进的生态文明建设和绿色发展道路密切相关。



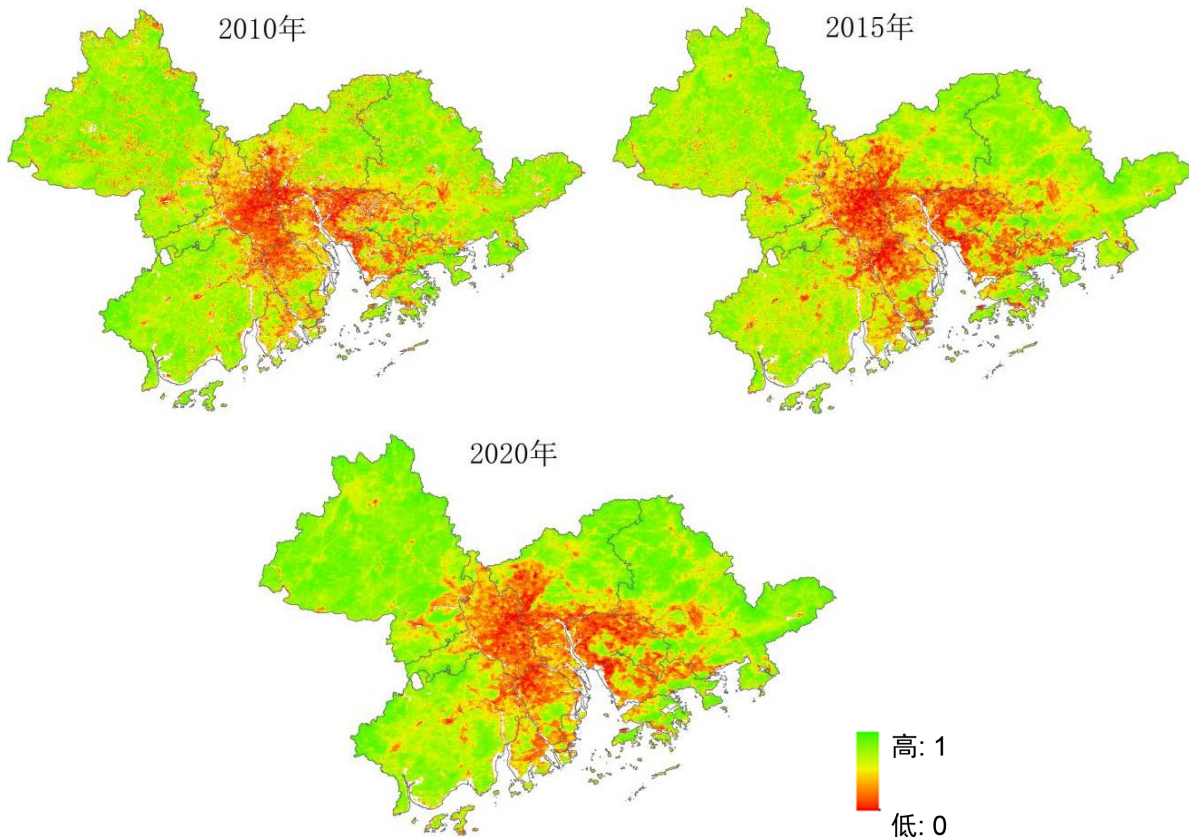


Figure 1. Spatial distribution of RSEI in the GBA during 2000 to 2020
 图 1. 2000~2020 年粤港澳大湾区 RSEI 空间分布

5.2. 城市化分析

根据 4.2 中 CNLI 的计算公式, 本文以 5 年为间隔, 对 2000 年至 2020 年粤港澳大湾区的 CNLI 进行了计算, 并统计了不同城市 CNLI 平均值, 如图 2 所示, 可以看出, 经过 20 年的城市快速发展, 粤港澳大湾区城市群各城市的 CNLI 都有所增加, 澳门 CNLI 始终为最高值; 惠州、江门和肇庆市的 CNLI 较低,

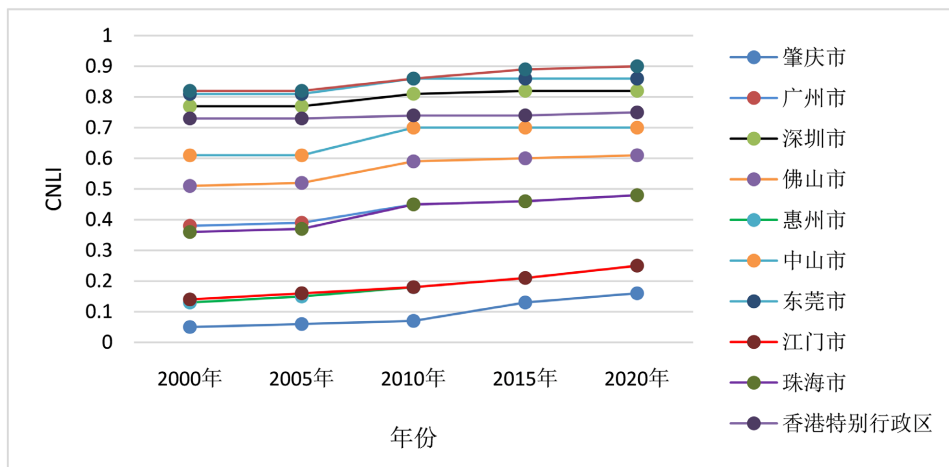


Figure 2. Changes of CNLI under the urban agglomeration in the GBA
 图 2. 粤港澳大湾区城市群 CNLI 的均值变化

且持续稳定上升, 惠州和江门 CNLI 增长一倍, 尽管肇庆市 CNLI 最低, 但其增长了约 2.2 倍, 从 2000 年的 0.05 上升至 2020 年的 0.16; 在 2005 年至 2010 年期间, 大部分地区 CNLI 变化最为显著, 其中涨幅大于 10% 的区域有珠海市(21%)、广州(15%)、中山(14.8%)和佛山(13.46%)。

图 3 是粤港澳大湾区城市群不同年份的 CNLI 等级空间分布图, 可以发现, 大湾区 11 个城市中共有 6 个城市的 CNLI 等级有所提升, 并且分为两个时间段, 体现了大湾区城市化发展进程的重要特征: 1) 2000~2010 年间, 深圳、珠海和广州的 CNLI 等级全部提升一个等级, 地理优势和改革开放的政策使其成为经济水平快速发展的地区, 城市化进程的加速和不透水表面的扩张导致了 CNLI 的上升; 2) 2010~2020 年间, 惠州、江门和佛山的 CNLI 等级全部提升一个等级, 大湾区城市化发展进程在由区域中心城市逐渐向边缘扩展, 这一特征与粤港澳大湾区不断推进区域一体化建设、增强发展整体性的政策紧密相关。

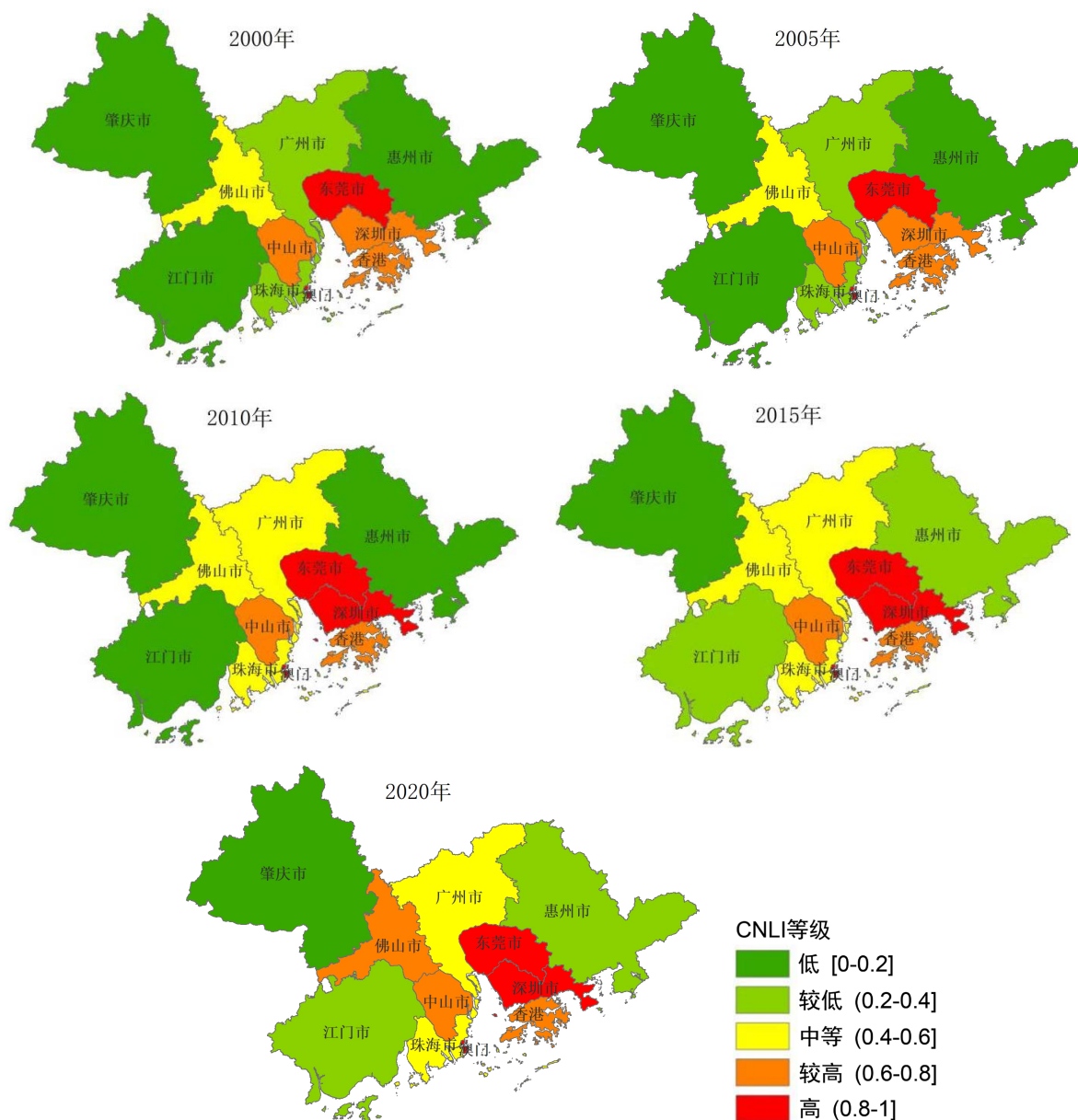


Figure 3. Spatial distribution of CNLI degree in the GBA during 2000 to 2020
图 3. 2000~2020 年粤港澳大湾区 CNLI 等级空间分布

5.3. 耦合协调度分析

本文依据各城市的 RSEI 和 CNLI 计算粤港澳大湾区耦合协调距离结果, 如图 4 所示。总体而言, 2000 年至 2020 年, RSEI 和 CNLI 之间的耦合协调距离大体呈现下降趋势, 这说明粤港澳大湾区的生态环境和地区城市化的耦合协调发展总体有所改善。具体来说, 20 年间各地区耦合协调发展变化特征可以分为三个类型: 1) 稳定下降: 肇庆、惠州、江门、广州、珠海和香港耦合协调距离具有稳定下降趋势; 2) 波动比较明显: 澳门呈现波动幅度较大的特征, 尤其在 2010 年达到最小值; 3) 变化相对稳定: 中山、佛山、深圳和东莞变化相对平稳, 但是东莞和中山的耦合协调距离有微微上升趋势。

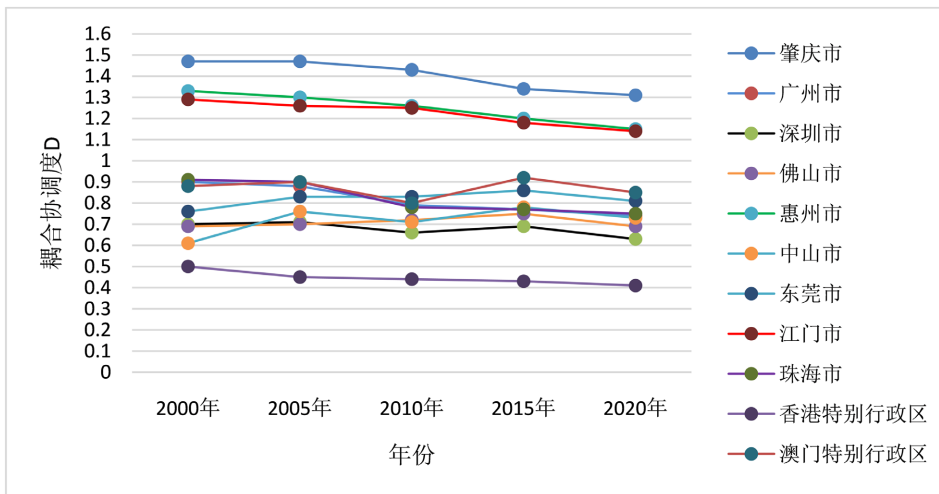


Figure 4. Changes of coordination degree between eco-environment and urbanization in the GBA during 2000 to 2020
图 4. 2000~2020 年粤港澳大湾区生态环境与城市化耦合协调距离的变化

为了便于分析城市生态环境与城市化耦合协调特征, 本文根据研究区耦合协调实际情况, 将研究区耦合协调类型分为两大等级和七个类型, 其具体耦合协调度分类及判别标准见表 3。在此基础上, 结合 RSEI 和 CNLI 的差值, 将耦合协调类型分为三种差异类型(表 4), 以揭示生态环境质量与城市化之间的具体差异。

Table 3. The classification criteria of coordination degree between eco-environment and urbanization
表 3. 生态环境与城市化耦合协调度分类划分标准

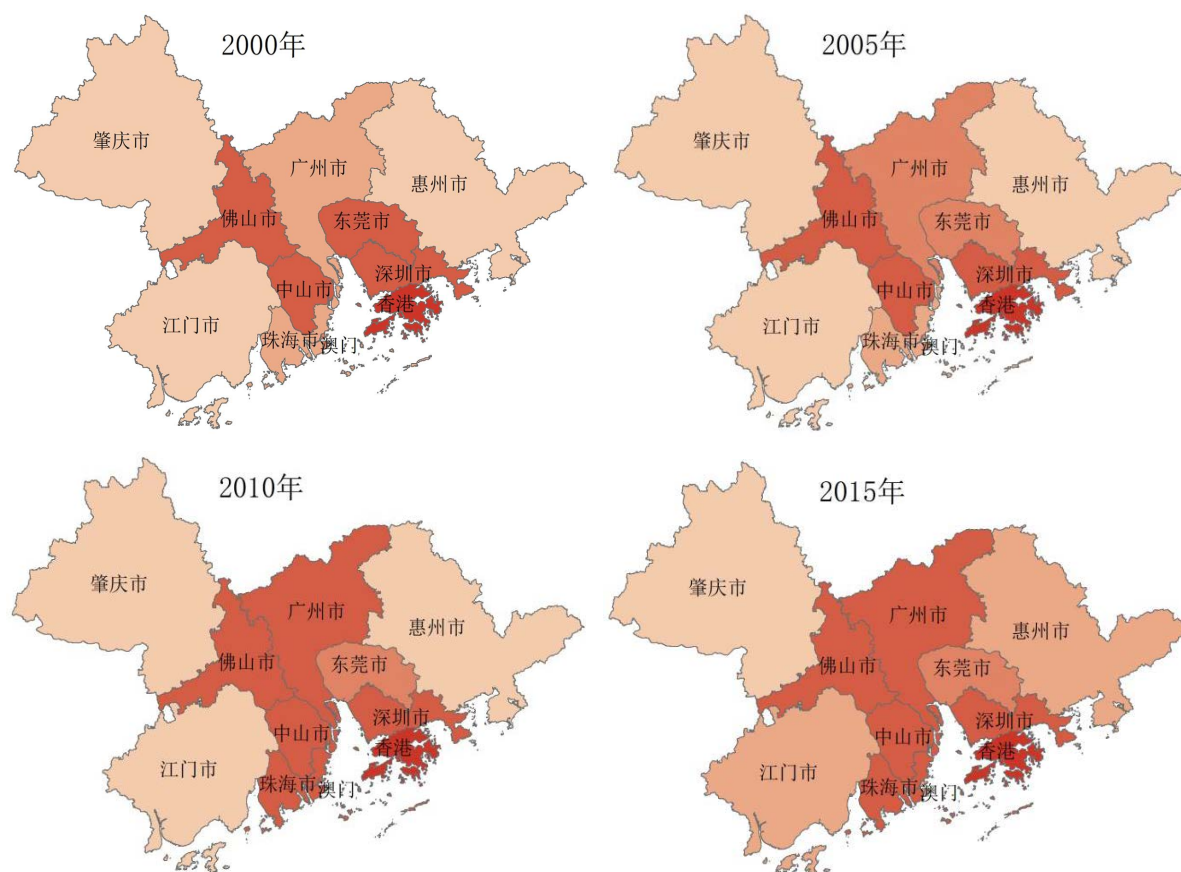
耦合协调距离范围	耦合协调类型	耦合协调等级
$1.5 \leq D \leq 1.7$	严重失调	失调发展
$1.2 < D \leq 1.5$	中度失调	
$0.9 < D \leq 1.2$	轻度失调	
$0.8 < D \leq 0.9$	勉强协调	协调发展
$0.5 < D \leq 0.8$	中度协调	
$0.2 < D \leq 0.5$	良好协调	
$0 \leq D \leq 0.2$	优质协调	

Table 4. The classification criteria of difference types between eco-environment and urbanization
表 4. 生态环境与城市化耦合协调度差异类型划分标准

分类依据	耦合协调差异类型
$0 \leq RSEI-CNLI \leq 0.1$	同步型
$RSEI-CNLI > 0.1$	城市化滞后型
$CNLI-RSEI > 0.1$	生态质量滞后型

图 5 和图 6 为 2000~2020 年粤港澳大湾区生态环境与城市化协调等级和差异类型空间分布图, 总体上, 失调等级区域主要分布在边缘城市, 而协调等级区域主要集中在大湾区中心的经济发展水平较高的城市。

结合图 5 和图 6 可以看出, 2000~2020 年, 肇庆、惠州和江门都处于失调等级, 并且全部是城市化滞后类型; 而在所有地区中香港城市化与生态质量的耦合协调度最好, 始终为良好协调, 城市化与生态质量同步发展, 其发展态势均优于其他区域; 珠海市耦合协调关系明显改善, 由轻度失调变为中度协调, 由城市化滞后变为城市化与生态质量同步; 中山虽然中度协调, 但是由同步转变为生态质量滞后型; 广州协调程度逐渐向好, 由轻度失调转变为中度协调, 但是始终是城市化滞后型; 深圳始终保持中度协调和生态质量滞后型; 东莞由中度协调转变为勉强协调, 从生态质量滞后型变为同步型; 澳门始终是生态质量滞后型。



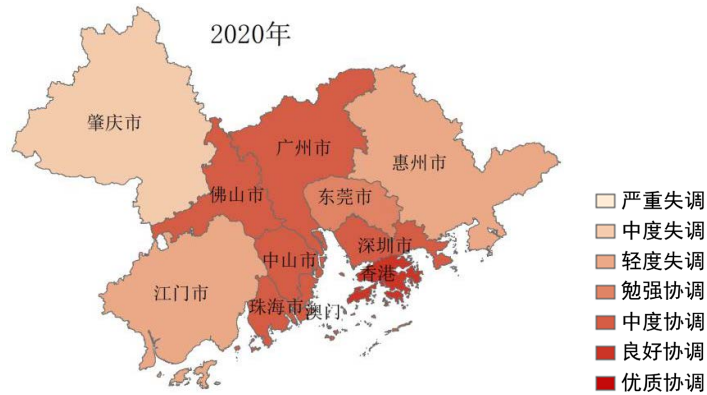


Figure 5. Spatial distribution of coordination degree between eco-environment and urbanization in the GBA during 2000 to 2020
图 5. 2000~2020 年粤港澳大湾区生态环境与城市化协调度等级空间分布

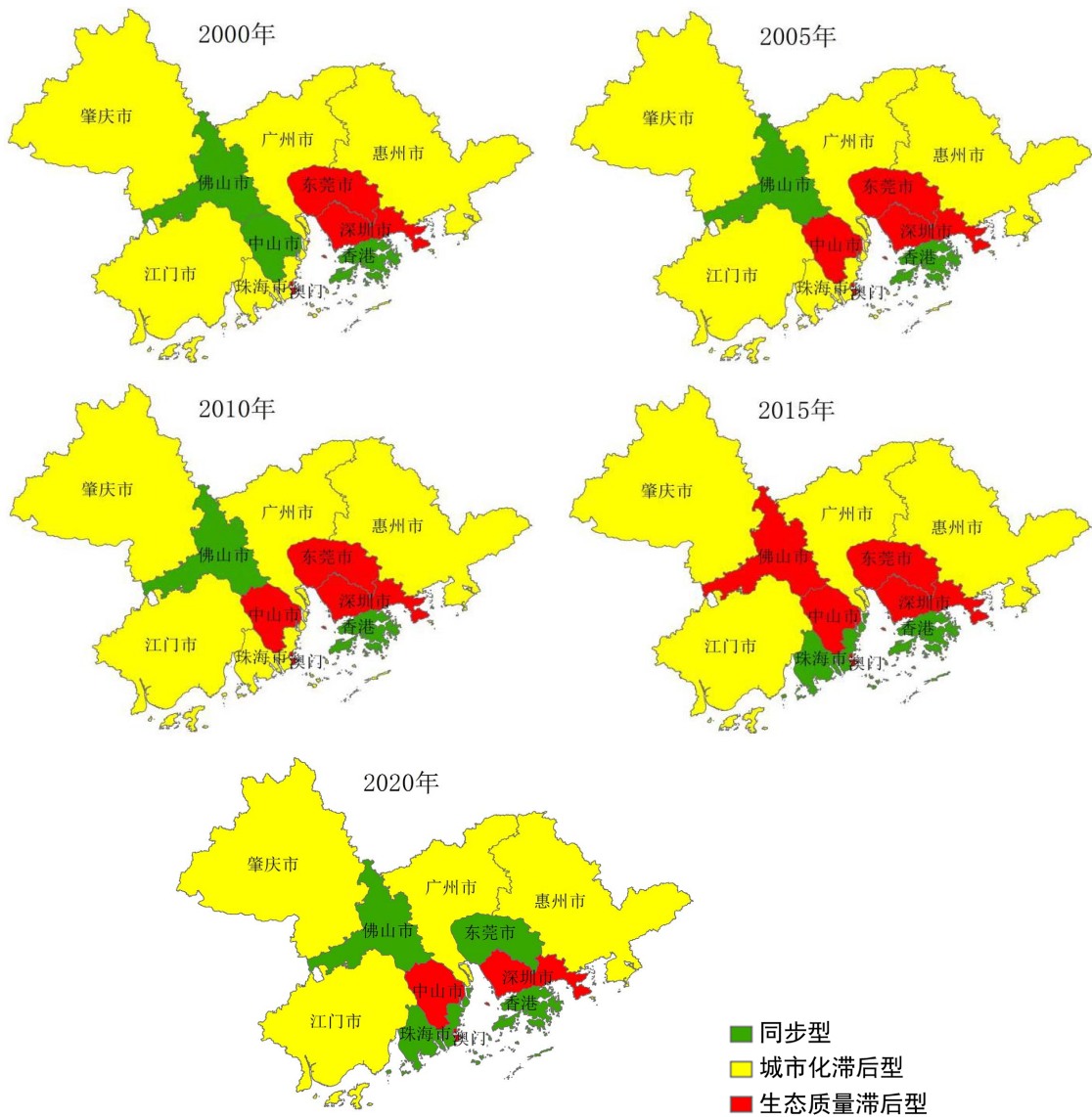


Figure 6. Spatial distribution of difference types between eco-environment and urbanization in the GBA during 2000 to 2020
图 6. 2000~2020 年粤港澳大湾区生态环境与城市化差异类型空间分布

6. 结论

本文基于 Google Earth Engine 云平台, 通过整合日间光学遥感和夜间灯光遥感等多源卫星数据分析了 2000~2020 年粤港澳大湾区城市群的生态环境状况和城市化进程特征与变化, 并构建了耦合协调距离模型, 进一步对城市化与生态环境耦合协调性进行分析和比较。结果表明: 1) 粤港澳大湾区城市群在 2000~2020 年间 RSEI 均值稳定上升, 生态环境呈现出好转的态势, 但地区间的差异依旧显著; 2) CNLI 指数能够全面和综合的反映出城市群的城市化水平, 研究期间内广州、佛山和珠海的 CNLI 增幅较大, 尽管肇庆市的 CNLI 均值最低, 但其增速比则显著高于其它地区; 3) 经过 20 年的城市化发展, 粤港澳大湾区城市群形成了以环珠江口的城市向四周逐步推进的城市化格局, 其中高强度城市化城市包括广州、深圳、东莞、和港澳等地区, 低强度城市化城市则分布在城市群边缘区域; 4) 20 年间粤港澳大湾区的生态环境和地区城市化的耦合协调发展变化特征有所不同, 空间分异也较为明显, 总体上, 粤港澳大湾区城市群的生态环境与城市化的协调程度有所改善。

基金项目

广东省省级科技计划项目(2018B020207002), 广东省省级科技计划项目(2021B1212100003)。

参考文献

- [1] 林晓晴. 海峡西岸城市群城市化质量与生态环境交互耦合关系定量研究[D]: [硕士学位论文]. 福州: 福建农林大学, 2020.
- [2] 程晨, 张毅, 宁晓静. 城市集聚对城市土地扩张的影响——以长江中游城市群为例[J]. 中国房地产(下旬刊), 2019(3): 29-35.
- [3] 陈悦. 长江中游城市群城镇化与生态环境关系定量研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2019.
- [4] 李雪铭, 郭玉洁, 田深圳, 白芝珍, 刘贺. 辽宁省城市人居环境系统耦合协调度时空格局演变及驱动力研究[J]. 地理科学, 2019, 39(8): 1209-1217.
- [5] 任亚文, 曹卫东, 张宇, 苏鹤放, 王雪微. 长江经济带三大城市群城镇化与生态环境时空耦合特征[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(11): 258-2600.
- [6] Rogan, J. and Chen, D.M. (2004) Remote Sensing Technology for Mapping and Monitoring Land-Cover and Land-Use Change. *Progress in Planning*, **61**, 301-325. [https://doi.org/10.1016/S0305-9006\(03\)00066-7](https://doi.org/10.1016/S0305-9006(03)00066-7)
- [7] 李卓, 孙然好, 张继超, 张翀. 京津冀城市群地区植被覆盖动态变化时空分析[J]. 生态学报, 2017, 37(22): 7418-7426. <https://doi.org/10.5846/stxb201609231919>
- [8] Ji, X.L., Li, X.Z., He, Y.Q. and Liu, X.L. (2019) A Simple Method to Improve Estimates of County-Level Economics in China Using Nighttime Light Data and GDP Growthrate. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, **8**, Article No. 419. <https://doi.org/10.3390/ijgi8090419>
- [9] 卓莉, 陈晋, 史培军, 辜智慧, 范一大, 一之瀨俊明. 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.
- [10] Zhang, B., Chen, Z., Peng, D., Benediktsson, J.A., Liu, B., Zou, L., et al. (2019) Remotely Sensed Big Data: Evolution in Model Development for Information Extraction [Point of View]. *Proceedings of the IEEE*, **107**, 2294-2301. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2019.2948454>
- [11] Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D. and Moore, R. (2017) Google Earth Engine: Planetary-Scale Geospatial Analysis for Everyone. *Remote Sensing of Environment*, **202**, 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- [12] 国务院办公厅. 粤港澳大湾区发展规划纲要[EB/OL]. http://www.gov.cn/gongbao/content/2019/content_5370836.htm, 2021-04-23.
- [13] 周玉科, 高锡章, 倪希亮. 利用夜间灯光数据分析我国社会经济发展的区域不平衡特征[J]. 遥感技术与应用, 2017, 32(6): 1107-1113.
- [14] 张秋媛, 彭明春, 王崇云, 周长威. 基于 DMSP/OLS 夜间灯光数据的贵州省人口分布及影响因子分析[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2019, 41(5): 992-1000.

- [15] 苏泳娴, 陈修治, 叶玉瑶, 吴旗韬, 张虹鸥, 黄宁生, 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.
- [16] 陈颖彪, 郑子豪, 吴志峰, 千庆兰. 夜间灯光遥感数据应用综述和展望[J]. 地理科学进展, 2019, 38(2): 205-223. <https://doi.org/10.18306/dlkxjz.2019.02.005>
- [17] 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.
- [18] 刘智才, 徐涵秋, 李乐, 唐菲, 林中立. 基于遥感生态指数的杭州市城市生态变化[J]. 应用基础与工程科学学报, 2015, 23(4): 728-739.
- [19] Xu, H.Q., Wang, M.Y., Shi, T.T., Guan, H.D., Fang, C.Y. and Lin, Z.L. (2018) Prediction of Ecological Effects of Potential Population and Impervious Surface Increases Using a Remote Sensing Based Ecological Index (RSEI). *Ecological Indicators*, **93**, 730-740. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.05.055>
- [20] Zheng, Z.H., Yang, Z.W., Chen, Y.B., Wu, Z.F. and Marinello, F. (2019) The Interannual Calibration and Global Nighttime Light Fluctuation Assessment Based on Pixel-Level Linear Regression Analysis. *Remote Sensing*, **11**, Article No. 2185. <https://doi.org/10.3390/rs11182185>
- [21] Li, X., Li, D.R., Xu, H.M. and Wu, C.Q. (2017) Intercalibration between DMSP/OLS and VIIRS Night-Time Light Images to Evaluate City Light Dynamics of Syria's Major Human Settlement during Syrian Civil War. *International Journal of Remote Sensing*, **38**, 5934-5951. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1331476>
- [22] 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[J]. 遥感学报, 2003, 7(3): 168-175+241.
- [23] 郑子豪, 吴志峰, 陈颖彪, 杨智威, Francesco, M. 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. <https://doi.org/10.5846/stxb202003250687>
- [24] Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D. and Moore, R. (2017) Google Earth Engine: Planetary-Scale Geospatial Analysis for Everyone. *Remote Sensing of Environment*, **202**, 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>