引文格式：王振兴,刘东,王敏,等. 基于多源数据的沿海城市扩张及生态环境效应研究[J]. 地理空间信息, 2024, 22(4): 49-53. doi:10. 3969/j. issn. 1672-4623.2024.04.012

基于多源数据的沿海城市扩张及生态环境效应研究

王振兴[1]，刘　东[1*]，王　敏[1]，于依萍[1]
（1. 中国科学院大学 资源与环境学院，北京 100049）

摘　要：探究沿海城市扩张特征及其生态影响，以青岛市为例，利用多源数据（DMSP/OLS、NPP/VIIRS、MODIS和统计数据），分析了2000—2019年青岛市城市扩张过程及时空演化特征。通过计算植被指数和热岛强度指数，揭示了城市扩张中的生态效应。结果表明近20 a青岛城市建设由沿海向内陆扩展，表现为“核心市区不断扩大，周边乡镇快速兴起”的点面结合发展特征。建成区植被指数整体呈上升趋势，上升区集中于市辖区，下降区主要分布在城市边缘和新兴城镇。城市热岛强度呈增加趋势，强热岛分布在建成区内部，空间范围逐渐增大。灯光指数与热岛效应具有正相关性，城市建成区更加明显，而灯光指数与植被指数没有明显相关性。研究可为青岛市及其他沿海城市的发展提供政策依据。

关键词：多源数据；城市扩张；生态效应；夜光影像；青岛市
中图分类号：P208　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）04-0049-05

Coastal Urban Expansion and Its Eco-environmental Effects Using Multi-source Data

WANG Zhenxing[1], LIU Dong[1], WANG Min[1], YU Yiping[1]
(1. College of Resources and Environmental, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Taking Qingdao for example, we used DMSP/OLS, NPP/VIIRS, MODIS and statistical data from 2000 to 2019 to analyze the urban expansion process and spatio-temporal evolution characteristics, and revealed the ecological effects in the process of urban expansion by calculating the vegetation indexes and heat island intensity. The results showed that during the past 20 years, the built-up area of Qingdao City expanded from the coastal area to the inland area, showing the development characteristics of “the core urban area expanding, and the surrounding towns rapidly rising”. The vegetation indexes of built-up area showed an upward trend, with the increasing area concentrated in the municipal district and the decreasing area mainly distributed in the urban edge and emerging towns. The urban heat island intensity showed an increasing trend and was in the weak heat island state from 2000 to 2019. The strong heat island was distributed in the built-up area with a gradually increase trend. There was a positive correlation between nighttime light index and heat island effect, especially in urban built-up area. There was no significant correlation between nighttime light index and vegetation index. This study can provide policy basis for the development of Qingdao and other coastal cities.

Key words: multi-source data, urban expansion, ecological effect, nighttime light image, Qingdao City

沿海城市是我国经济发展的重要引擎，具有独特的扩张特征与生态优势。目前针对沿海城市扩张研究相对较少，探讨沿海城市扩张及其生态环境效应有助于理解沿海城市扩张规律及其与生态要素之间的关系。青岛市是我国东部滨海度假旅游城市，近几十年来经济社会快速发展，成为区域的重要发展极。本文以青岛市为研究区，融合多源夜间灯光影像（DMSP/OLS 和 NPP/VIIRS）提取城市建成区，分析近 20 a（2000—2019 年）青岛城市扩张的时空特征；利用 MODIS 数据，提取植被覆盖、热岛强度，通过相关性分析，揭示城市扩张过程对生态环境的影响，以期为城市的规划与生态环境的保护提供政策建议和参考。

1　研究区与数据源

1.1　研究区简介

青岛市（119°30’~121°00’E，35°35’~7°09’N）地处我国山东半岛东南部，濒临黄海，是山东省重要中心城市和国家计划单列城市，也是“一带一路”新亚欧大陆桥经济走廊建设和海上合作中主要节点城市。青岛市包含 7 个市辖区和 3 个县级市，总面积约 11 293 km^2。地形以海滨丘陵为主，属于温带季风气候，夏季无酷暑，冬季少严寒，降水充沛，四季分明。2019 年底，全市常住总人口为 949.98 万，生产总

收稿日期：2022-11-08。
第一作者简介：王振兴（1998—），硕士研究生，研究方向为土地遥感监测、农作物遥感识别，E-mail：wangzhenxing20@mails.ucas.ac.cn。
通信作者：刘东（1982—），博士，副教授，主要从事资源环境遥感与区域发展相关工作，E-mail：lldking@ucas.ac.cn。

值达11 741.31亿元[1]。

1.2 数据来源

研究数据包括夜光遥感影像（DMSP/OLS和NPP/VIIRS）、Landsat TM影像、MODIS数据（MOD11A2和MOD13A2）、行政区划数据及统计年鉴数据。DMSP/OLS来源于美国国家地球物理数据中心（https://www.ngdc.noaa.gov/）发布的第四版稳定的年合成影像数据，分别选取F14卫星（2000年），F15卫星（2000年、2004年），F16卫星（2004、2008年）和F18卫星（2012年）等6幅影像。DMSP/OLS影像空间分辨率约1 km×1 km，图像灰度范围在0~63。因缺乏辐射定标，数据间不具备一致性。NPP/VIIRS来源于科罗拉多矿业大学（https://eogdata.mines.edu/products/vnl/）提供的NPP月合成数据，空间分辨率约500 m×500 m，已完成星上辐射定标。本文选取2012、2016、2019年等多幅月产品，进行平均值运算得到年合成数据。

Landsat TM来源于美国地质勘探局（https://www.usgs.gov/），空间分辨率30 m×30 m，选取与夜光影像相同年份影像（2000、2004、2008、2012、2016年和2019年），用于各年份城市建成区提取的空间验证。

MOD11A2为8日合成陆地温度产品，MOD13A2为16 d合成植被指数产品，分辨率为1 km×1 km，来源于美国航空航天局官方网站（https://www.nasa.gov）。6–8月份是植被生长旺盛和气温最高时期，但影像易受云、雨等天气影响。通过质量控制波段剔除受云等因素影响的低质量像元，统计研究年份6－8月各日期青岛市内可用像元数和地表温度（LST）与植被指数（NDVI）的均值（图1）。可用像元数表现为先下降后升高趋势，7月份达到谷值，8月份逐渐恢复，可见6、7月份受云雨天气影响比较严重。LST和NDVI则均先升高后下降，分别在7月3日和8月12日达到峰值，随后逐渐减小。综合来看，MOD11A2数据的6月份影像可用像元数可基本覆盖全域，同时LST达到峰值，利于分析热岛效应；MOD13A2数据的8月份影像可用像元数达到最大，且NDVI在峰值附近，利于分析植被覆被变化。因此，本文分别选取2000、2004、2008、2012、2016年和2019年6月份MOD11A2数据和8月份的MOD13A2数据分析热岛强度和植被覆盖度。

行政区划边界来源于国家基础地理信息中心（https://www.webmap.cn/）。建成区统计数据来源于《中国城市建设统计年鉴》。所有遥感影像经过预处理，将影像镶嵌、裁剪为研究区域；坐标系转换为WGS-84 UTM投影坐标系，像元分辨率通过最近邻法重采样至1 km×1 km。

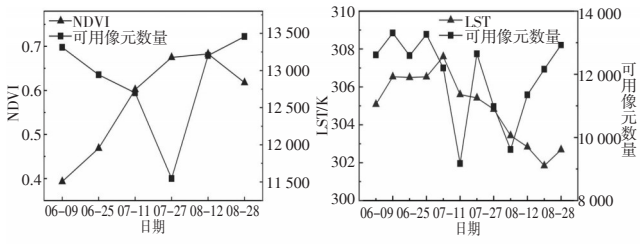


图1 6–8月MODIS可用像元数和NDVI、LST均值

2 研究方法

2.1 长时间序列夜光影像构建

DMSP/OLS夜光影像由多个DMSP卫星搭载着不同的OLS传感器获得，受传感器辐射探测差异、器件老化等影响，存在相同位置下同一传感器获取的连续不同年份像元值之间存在异常，不同传感器获取的同一年份的数据之间差异明显等数据未定标的问题[2-3]。本文选用不变区域目标法对影像进行辐射校正，以城市发展相对平稳的黑龙江鸡西市为不变区域，选择F15–2004年影像为参考影像，利用二次多项式模型进行相对辐射校正（公式1）。

$$DN_{cal} = aDN^2 + bDN + c \quad (1)$$

式中，DN_{cal}为校正后影像DN值；DN为校正前影像DN值；a、b为回归系数；c为常数项。每幅待校正影像与参考影像的校正系数与拟合R^2见表1。每幅影像校正完成后，将同一年份不同传感器的影像取平均值，获得该年份的合成产品，得到一致的DMSP/OLS序列数据。

对NPP/VIIRS进行降噪，以0.3为下限阈值，去除影像中的微弱灯光，同时将影像中的负值修改为0；以同年份北京、上海、广州3个城市中亮度均值与一倍标准差之和的最大值为上限阈值，剔除研究区内极高亮度的异常像元，一定程度上缩小NPP/VIIRS影像的值域范围，实现DMSP/OLS高亮度饱和的效果[4]。NPP/VIIRS与DMSP/OLS数据量纲并不相同，为统一2种类型的数据，利用两者共有的2012年影像，利用公式（1）得到拟合方程与相关系数（表1）。参考Zhao[5]等研究，基于拟合方程生成2016、2019年类DMSP/OLS影像，最终得到2000—2019年一致稳定的长时间序列夜光遥感影像。

2.2 城市扩展监测分析

2.2.1 建成区提取与精度验证

建成区指行政区域内用于建设发展的非农业

表1　NPP/VIIRS与DMSP/OLS一致性校正系数与精度

传感器	年份	a	b	c	R^2
F14	2000	−0.000 1	1.074 5	−0.012 6	0.961 5
F15	2000	0.002 4	0.892 4	0.140 9	0.952 8
F15	2004	0.000 0	1.000 0	0.000 0	1.000 0
F16	2004	0.004 6	0.672 1	−0.041 0	0.982 2
F16	2008	0.005 8	0.661 1	−0.052 4	0.967 9
F18	2012	0.009	0.336 3	0.113	0.957 2
NPP–>DMSP	2012	−0.211 1	7.189 2	2.906 6	0.806 1

土地。本文利用动态阈值法提取建成区，根据统计年鉴中青岛市各年份的建成区面积，动态地调整夜光影像中非建成区与建成区的阈值，当提取建成区面积与统计年鉴中数据的绝对差值最小时，即为最佳阈值。大于等于该阈值的像元是建成区，小于该阈值的像元被认为是非建成区。

建成区精度验证包括数量精度验证与空间精度验证，数量精度在动态阈值选择过程中已经确定，空间精度由Landsat TM/OLI影像随机选择样本点计算总体分类精度加以评判，具体结果见表2。

2.2.2　标准差椭圆

标准差椭圆是一种能够直观反映出点要素密集程度、方向性以及空间分布特征的空间统计方法[6]。标准差椭圆由3个要素确定：重心、方位角和X、Y轴长度。其中，重心是指城市建成区的重心位置，可反映城市建设重心的移动趋势；方位角是椭圆长轴按顺时针旋转与正北方向的夹角，表征城市分布的主趋势方向。X、Y轴由所在轴的标准差决定，长轴和短轴的长度分别表征城市分布方向和分布范围。长短轴与半轴的差距越大（扁率越大），表示城市布局的方向性越明显。

2.2.3　灯光指数

综合夜间灯光指数（CNLI）与中国城市化水平复合指标之间显著相关，可以概括出地区的城市化水平[7]。CNLI为某地区灯光面积比例（LAP）与平均灯光强度（MLI）的乘积。

$$\mathrm{CNLI}=\mathrm{LAP}\times\mathrm{MLI} \tag{2}$$

$$\mathrm{LAP}=\frac{\mathrm{Area}_{\mathrm{light}}}{\mathrm{Area}} \tag{3}$$

$$\mathrm{MLI}=\frac{\sum_{i=1}^{DN_{\max}} C_i\times DN_i}{\sum_{i=1}^{DN_{\max}} C_i\times DN_{\max}} \tag{4}$$

式中，$\mathrm{Area}_{\mathrm{light}}$为灯光区域面积；Area为地区的总面积；$DN_i$为灯光像元的亮度值；$C_i$为像元值是$DN_i$的像元数量；$DN_{\max}$为像元亮度最大值。

2.3　城市植被覆盖监测

归一化植被指数（NDVI）是监测区域内植被状态的有效指示因子。本文利用NDVI数据计算建成区、非建成区以及全市NDVI平均值，观察其变化趋势，反映青岛市植被覆盖的时空变化[8]。变化趋势分析通过计算趋势斜率slope，得出NDVI随时间的变化趋势。正值表示植被覆盖呈增加趋势，负值表示减少趋势（公式5）。

$$\mathrm{slope}=\frac{n\times(i\times\mathrm{NDVI})-\sum_{i}^{n} i\sum_{i}^{n}\mathrm{NDVI}_i}{n\times\sum_{i=1}^{n} i^2-(\sum_{i=1}^{n} i)^2} \tag{5}$$

式中，n为年数，NDVI_i、NDVI为第i年NDVI和多年平均值。

2.4　城市热岛监测

城市热岛效应是指城区地表温度高于周围郊区的现象。本文通过构建热岛强度指数来描绘青岛市热岛效应的时空变化[9]。借助ArcGIS在建成区创建10 km缓冲区代表郊区，用建成区温度与郊区平均温度的差值作为热岛强度指数。

$$I_i=T_i-\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} T_j \tag{6}$$

式中，I_i为影像中第i个像元的热岛强度指数；T_i为第i个建成区像元的温度值；n为郊区有效像元数量；T_j为郊区第j个像元的温度值。为反映城市热岛效应等级分布，根据热岛强度指数的范围，本文将青岛市划分为强负热岛（$[-\infty,-5.0)$）、弱负热岛（$[-5.0,-1.0)$）、无热岛（$[-1.0,1.0]$）、弱热岛（$(1.0,5.0]$）和强热岛（$[5.0,+\infty)$）等5个等级。

2.5　相关性分析

利用Pearson线性相关的方法，计算灯光指数与植被指数和热岛强度指数之间的相关性，反映城市扩张过程对生态环境的影响（公式7）。显著性由t检验决定，采用$p<0.05$和$p<0.01$分别定义统计显著和极显著水平。

$$r=\frac{\sum_{i=1}^{n}(x-\bar{x})(y-\bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x-\bar{x})^2\sum_{i=1}^{n}(y-\bar{y})^2}} \tag{7}$$

式中，r为相关系数；x和y分别为统计变量；$\bar{x}$和$\bar{y}$分别为统计变量平均值；n为样本数。

3 结果与分析

3.1 提取精度验证与城市扩展监测分析

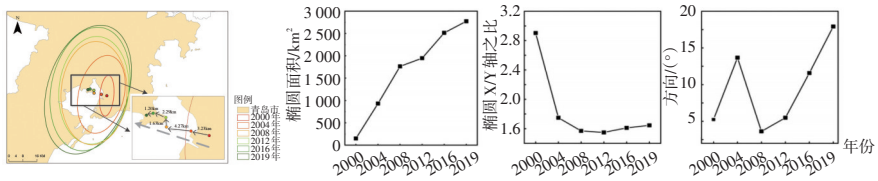
表2为青岛市建成区提取数量精度和空间精度。各年份建成区提取的数量精度均超过91%，空间精度均大于82%（2016年稍低，为79%），结果满足研究需求。

表2 2000–2019年青岛市建成区提取精度评价

年份	提取面积/km²	数量精度/%	空间精度/%	扩张速率/(km²/a)
2000	199.0	93.6	83.0	–
2004	305.0	91.5	82.5	26.5
2008	502.0	95.3	82.2	49.3
2012	578.0	95.8	89.1	19.0
2016	794.0	97.9	79.0	54.0
2019	934.0	99.6	82.5	46.7

近20 a青岛市建成区范围逐步扩大，从2000年的199 km²增长到2019年的934 km²，面积增加约735 km²，年均增长38.7 km²。2008—2012年增长最慢，年均增长率仅19.0 km²；2012—2016年增长最快，年均增长达54.0 km²；2004—2008年和2016—2019年增长相对较快，年均增长接近50 km²。大体上，青岛市建成区扩张速率经历了“上升–下降–再上升–再下降”的波动式上升趋势（表2）。空间上，东南部沿海区变化最为明显，形成了以市南区、市北区、李沧区、城阳区和黄岛区为主体的环胶州湾市辖区；部分内陆地区（如平度市、胶州市）等则以县城为中心向外围发散扩张。总体上看，2012年以来青岛市建成区扩张明显加快，在原城区周围出现了大量零散城镇，城市建设整体呈现出由沿海向内陆扩展，表现为“核心市区不断扩大，周边乡镇快速兴起”的点面结合的城市发展特征。

从标准差椭圆分布看，椭圆的面积、方位角、重心等参数都发生了明显变化（图2）。标准差椭圆面积连年增大，说明城市建成区分布范围持续向外扩张，以2000—2008年变化最大，随后逐渐平稳（图2a、2b）。椭圆方位角从2000年由5°增长至2019年的17°，总体略微向东北方向偏移（图2d）。X、Y轴之比2000—2004年骤然下降，随后稳定在1.6左右，表明城市前期扩张的方向性明显，后期基本稳定不变（图2c）。椭圆重心表现为由东南向西北移动的趋势，反映了建成区逐渐向西、北方向扩展。重心移动过程以2000—2008年最为明显，移动了7.5 km，2012年后移动变化趋于缓和（图2a）。



a 标准差椭圆及重心 b 椭圆面积 c 椭圆X/Y值 d 椭圆方位角

图2 2000–2019年青岛市标准差椭圆及参数

近20 a青岛市平均灯光指数呈平稳上升趋势，指数由0.14增长到0.26，年均增长率约0.006（图3）。指数幅度和增长率较低，表明青岛市城市建设进程持续向前，但整体程度不高。不同县区灯光指数均有不同程度增长，但差异明显。其中，市南区、市北区和李沧区始终最高（大于0.8），市北区接近1；莱西市和平度市始终最低（不足0.2）。

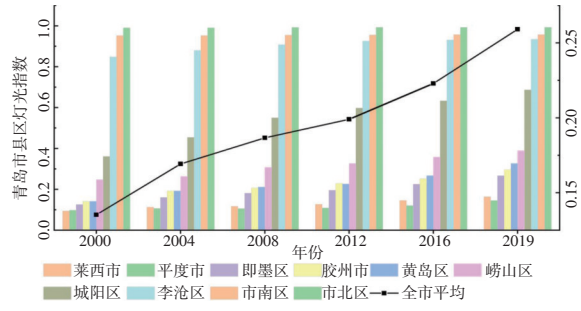
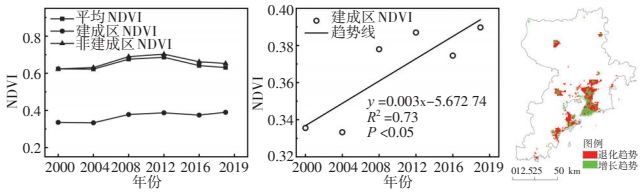


图3 2000–2019年青岛市不同区县灯光指数

3.2 植被指数与热岛强度分析

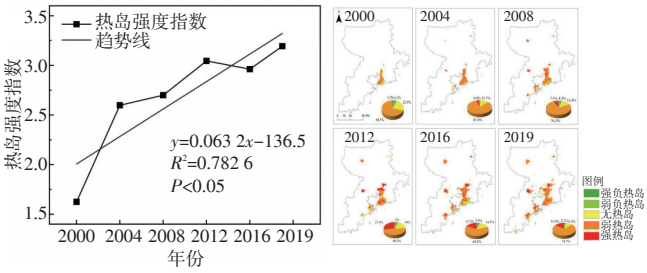
近20 a青岛市建成区平均NDVI呈持续上升趋势，年均增长率约0.002 2。非建成区平均NDVI经历了先上升（2000—2008年）再下降（2008—2019年）的变化过程；全市平均NDVI整体变化与非建成区一致（图4a）。近年来青岛市整体植被覆盖表现出建成区内部增加，外部减少的空间态势，反映了建成区在向外扩张过程中其他土地类型（如林地、耕地等）向建设用地转化，降低了植被覆盖程度；城市建成区植被覆盖指数连年增加（图4b），增加区域集中在建成区内，下降区域分布在市辖区边缘及新兴城镇附近（图4c），建成区植被覆盖上升主要由老城区内部植被覆盖增加所致，一方面说明城市绿化水平不断提高，生态呈向好趋势；另一方面说明城市边缘及新兴城镇面临着植被退化的问题。



a 青岛市整体　　b 建成区　　c 建成区NDVI变化趋势

图4　2000–2019年青岛市和城市建成区植被变化

从平均热岛强度看，近20 a青岛市始终处在弱热岛区，但呈增加趋势。2000—2012年增幅较大，2012—2019年增幅变缓，期间总增加约1.5℃，年增长率约0.069 2℃（图5a）。无热岛类型呈下降趋势，弱热岛和强负热岛波动变化；强热岛类型表现为先增加后下降，2000—2012年间急剧增加，面积从1.7%增至27.5%，2012年后开始逐渐下降。从空间分布来看（图5b），青岛市以弱热岛类型为主，分布范围最广泛，强热岛、无热岛和弱负热岛所比例较少，缺少强负热岛。强热岛主要分布在市辖区，无热岛和弱负热岛区集中在靠近海岸或崂山区域。综合来看，随着建成区生产、生活强度日益增加，市区与郊区的温度差异扩大，热岛效应日益明显。



a 热岛强度指数　　b 热岛强度空间分布

图5　2000–2019年青岛市热岛强度指数和空间分布

3.3　城市扩张的生态环境效应分析

全市和市辖区灯光指数与热岛强度指数呈显著正相关，全市相关性最强（r=0.888 8，p<0.05），建成区稍弱（r=0.864 5，p<0.05）。县级市灯光指数与热岛强度指数相关性极弱且不显著（r=0.189 7，p>0.05）（表3）。总体看，城市灯光指数与热岛效应具有明显正相关性，相对于县级市，城市建成区热岛效应更加明显。

表3　2000–2019年青岛市灯光指数与植被指数和热岛强度相关性

变量	全市		市辖区		县级市	
	相关系数 r	p 值	相关系数 r	p 值	相关系数 r	p 值
灯光指数–热岛强度	0.888 8*	0.02	0.864 5*	0.03	0.189 7	0.76
灯光指数–植被指数	0.134 5	0.79	−0.074 4	0.88	0.238 3	0.65

注：*表示0.05水平下显著。

4　结　语

本文以快速发展的沿海城市—青岛市为例，基于多源数据（遥感影像、统计数据等），分析了2000年以来青岛城市扩张过程及时空演化特征，揭示了城市扩张对生态环境的影响。主要结论有：

1）利用灯光影像可实现城市扩张的连续监测。青岛市建成区由沿海向内陆扩展不断扩张。

2）全市平均NDVI呈先上升后下降趋势，建成区NDVI一直增长，升高区集中于市辖区，下降区多分布在城市边缘和新兴城镇附近。热岛强度呈增强趋势，但整体始终处于弱热岛态，强热岛分布在建成区内部，空间范围逐渐增大。

3）不同区域的灯光指数与植被指数和热岛强度指数的相关性不同。城市灯光指数与热岛效应具有明显正相关性，城市建成区热岛效应更加明显；而城市灯光指数与植被指数没有明显相关性。随着城市建成区的扩张，热岛效应逐渐增强。

参考文献

[1] 青岛市统计局和国家统计局青岛调查队. 青岛统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社,2020

[2] 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):1 161-1 174

[3] 林中立,徐涵秋,黄绍霖. 基于DMSP/OLS夜间灯光影像的中国东部沿海地区城市扩展动态监测[J]. 地球信息科学学报,2019,21(7):1 074-1 085

[4] 李雪萍,贡璐. DMSP/OLS和VIIRS/DNB夜间灯光影像的校正及拟合[J]. 测绘通报,2019(7):138-146

[5] Zhao M,Zhou Y Y,Li X C,et al. Building a Series of Consistent Night-time Light Data (1992-2018) in Southeast Asia by Integrating DMSP-OLS and NPP-VIIRS [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2020,58(3):1 843-1 856

[6] 郭恒梅,马晓冬. 基于夜间灯光数据的淮海经济区经济空间格局演化及中心性测度[J]. 地理与地理信息科学,2020,36(2):34-40

[7] 陈晋,卓莉,史培军,等. 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(3):168-175

[8] 赵安周,裴韬,曹森,等. 京津冀城市扩张对植被和地表城市热岛的影响[J]. 中国环境科学,2020,40(4):1 825-1 833

[9] 邓玉娇,杜尧东,王捷纯,等. 粤港澳大湾区城市热岛时空特征及驱动因素[J]. 生态学杂志,2020,39(8):2 671-2 677