

doi: 10.6046/zrzyyg.2020423

引用格式: 孟丹,刘玲童,宫辉力,等. 京杭大运河沿线地区城市化与生态环境耦合协调关系研究[J]. 自然资源遥感,2021,33(4):162–172. (Meng D,Liu L T,Gong H L,et al. Coupling and coordination relationships between urbanization and ecological environment along the Beijing – Hangzhou Grand Canal[J]. Remote Sensing for Natural Resources,2021,33(4):162–172.)

京杭大运河沿线地区城市化与生态环境耦合协调关系研究

孟丹^{1,2,3}, 刘玲童^{1,2,3}, 宫辉力^{1,2,3}, 李小娟^{1,2,3}, 蒋博武^{1,2,3}

(1. 首都师范大学资源环境与旅游学院,北京 100048; 2. 北京市城市环境过程与数字模拟国家重点实验室培育基地,北京 100048; 3. 水资源安全北京实验室,北京 100048)

摘要:以京杭大运河沿线地区城市为研究对象,运用夜间灯光数据和 Landsat 数据分别建立表征城市化水平的夜间灯光指数和表征生态环境质量的遥感生态指数,研究京杭大运河沿线地区城市 1992—2018 年的城市化及生态环境变迁;运用耦合协调度模型及其分类原则判定两者协同发展格局,为京杭大运河沿线地区城市与生态环境协调发展提供科学依据和决策支持。结果表明:①京杭大运河沿线地区城市发展水平具有空间不平衡性,呈现出南北高,中部低的空间格局,1992—2018 年京杭大运河沿线地区高城市化水平的城市逐年增多,1992—2002 年为城市化缓慢发展阶段,2002—2013 年为城市化进程加速阶段,2013—2018 年为城市化稳步提升阶段;②1992—2018 年京杭大运河沿线地区遥感生态指数均大于 0.4,表明京杭大运河沿线地区生态环境均较好,1992—2002 年京杭大运河沿线地区生态环境状况相对稳定,2002—2007 年生态环境质量提升,2007—2018 年生态环境质量有所下降;③1992—2018 年京杭大运河沿线地区城市化与生态环境系统耦合协调度先上升后下降,协同发展类型整体上逐渐由城市化滞后演变为生态环境滞后,生态环境质量需要进一步提高。大运河沿线地区在发展经济的同时,也应加大对生态环境的保护。

关键词: 京杭大运河; 城市化; 生态环境; 耦合协调

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097–034X(2021)04–0162–11

0 引言

城市化在给人类带来发达的物质文明的同时,也带来了一系列不同程度的环境破坏与环境威胁,城市化与生态环境的关系研究成为人们关注的焦点。城市化与生态环境之间存在复杂的交互耦合胁迫机制,体现在城市化在发展过程会对生态环境产生一定的破坏与城市化发展需要依托生态环境 2 个方面^[1]。因此,在当前城市化不断推进过程中,如何协调两者之间的关系,实现经济与生态环境可持续发展,具有现实意义。从国内外关于城市化与生态环境的相关研究来看,研究重点主要涉及城市化与生态环境耦合协调的理论研究,生态环境对城市化的响应关系研究,城市化、经济和生态环境耦合协调关系研究^[2–7]。方创琳等^[8]学者构建了“多要素–多尺度–多情景–多模块–多智能体”集成的时

空耦合动力学模型的理论框架。目前关于城市化与生态环境关系研究多是基于社会经济统计数据来构建两个系统的指标体系^[9–11],而基于遥感数据像元尺度的研究较少。遥感技术的发展为二者的研究提供了新的途经,廖李红等^[12]基于 DMSP/OLS 和 Landsat 数据分析了晋江市城市化与生态环境耦合协调关系;Wang 等^[13]利用 DMSP/OLS 和 MODIS 地表温度数据,讨论了中国城市扩张的时空特征及其与城市热岛强度的关系。

夜间灯光遥感影像以其独特的夜间低光探测能力,在表征人类活动方面显示出巨大的优势。近年来,夜间灯光遥感数据被广泛的应用于描述人类活动、城市发展等方面^[14–19]。城市化是人口、经济水平、产业结构、城市建成区等方面的综合体现,众多的研究显示,夜间灯光遥感数据与城市化影响指标有着较强的关联度^[20–21]。生态环境受到多种生态因子的共同作用与影响,利用遥感技术充分挖掘遥

感影像中包含的生态环境信息,对生态环境综合评价有着非常重要现实意义。徐涵秋^[22]基于遥感技术提出了一种新型遥感生态指数(remote sensing based ecological index, RSEI)。它完全基于遥感信息,集成了最直观反映生态环境的多重指标,可以对区域生态环境进行快速地监测和评价,已用于雄安新区、阜新市、渭南市、长白山自然保护区等地区的生态质量评估^[23-25]。

2019 年 2 月,中共中央办公厅、国务院办公厅印发了《大运河文化保护传承利用规划纲要》,要求各地区各部门要严格遵循纲要规定,结合当地的实际情况认真贯彻落实。目前京杭大运河存在生态环境及人文环境关注度不足等问题^[26]。南水北调东线工程的实施和中国大运河申遗成功,为京杭大运河生态环境的保护和城市发展提供了新的机遇和挑战^[27]。开展京杭大运河沿线城市化及生态环境耦合协调关系研究,对京杭大运河沿线地区城市的经济可持续发展、生态环境保护等具有现实意义。因此本文基于遥感数据对 1992 年、1997 年、2002 年、2007 年、2013 年及 2018 年京杭大运河沿线地区城市化水平、生态环境状况进行长时间评价研究,运用耦合协调度模型对城市化与生态环境状况进行耦合协调度分析,旨在为京杭大运河沿线地区的经济可持续发展和生态文明建设提供决策支持。

1 研究区概况及数据源

1.1 研究区概况

京杭大运河始建于春秋时期,完成于隋朝,繁荣于唐宋,取直于元代,疏通于明清。京杭大运河在中国历史上发挥了政治、经济、军事、文化交流等重要作用,至今山东济宁以南 1 100 多 km 的航道仍在被利用^[28-29]。京杭大运河位于我国中东部腹地,途径北京、河北、天津、山东、江苏和浙江等省市,沟通了海河、黄河、淮河、长江和钱塘江 5 大水系,连接太湖、洪泽湖、骆马湖等一系列湖泊。地理位置介于 E116°~120°,N39°~30°之间。京杭大运河沿线是我国人口分布集中区域,也是最具发展潜力的经济发展带,经济发展速度快,城市化水平较高。本文选取京杭大运河沿线的 20 个城市作为研究区,如图 1 所示。将运河沿线地区从北至南依次划分为京津冀段、山东段、江苏段、浙江段。京津冀段包括北京、天津、廊坊、沧州;山东段包括德州、聊城、济南、泰安、济宁、枣庄;江苏段包括徐州、宿迁、淮安、扬州、镇江、常州、无锡、

苏州;浙江段包括嘉兴和杭州。

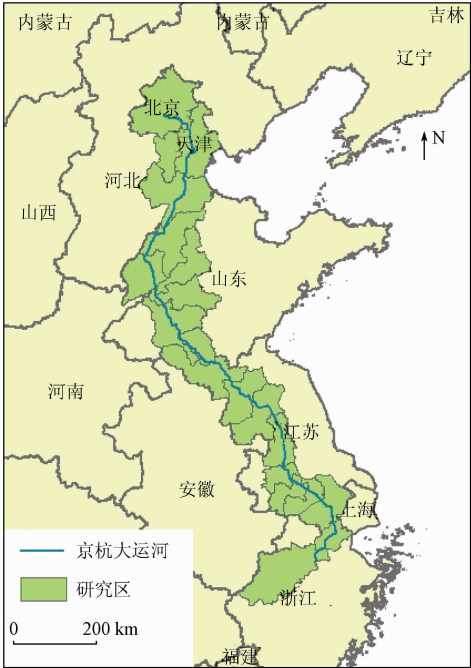


图 1 研究区域和范围示意图

Fig.1 Sketch map of study area and scope

1.2 研究数据及预处理

论文主要数据源包括 Landsat 数据、夜间灯光数据、建成区矢量数据、统计数据等,具体如表 1 所示。

表 1 研究数据列表

Tab.1 List of the research data

数据	时间	获取途径
Landsat TM	1992 年、1997 年、2002 年、2007 年	地理空间数据云 http://www.gscloud.cn/
Landsat OLI	2013 年、2018 年	
DMSP/OLS	1992 年、1997 年、2002 年、2007 年、2012 年、2013 年	美国国家海洋和大气管理局 https://www.ngdc.noaa.gov
NPP/VIIRS	2012 年、2013 年、2018 年	中国城市基本土地利用类别测绘 http://data.ess.tsinghua.edu.cn/
建成区数据	2018 年	
统计数据	2018 年	2018 年沿线城市统计年鉴

Landsat 数据包括 TM 和 OLI 两种数据,共采用 120 幅 Landsat 遥感影像。遥感影像数据成像时间多为 5—10 月份。Landsat 数据预处理主要包括辐射定标、大气校正,用于消除大气、光照等因素对地物反射的影响。

夜间灯光数据包括 DMSP/OLS 和 NPP/VIIRS 2 种。DMSP/OLS 影像可以记录到城市和乡村等的稳定灯光,影像分辨率达到了 30″(约 1 km)。研究采用稳定灯光年度影像,影像剔除掉偶然灯光的背

景噪声。NPP/VIIRS 夜晚灯光数据影像分辨率达到了 15"(约 450 m),直接记录灯光的辐射亮度,提高了探测敏感度,消除了灯光过饱和现象,但是 NPP/VIIRS 数据存在一些背景噪声。由于可获取的 DMSP/OLS 数据时间段是 1992—2013 年,故研究选用 1992 年、1997 年、2002 年、2007 年和 2013 年 5 期 DMSP/OLS 稳定夜间灯光数据,和 2018 年 9 月份 NPP/VIIRS 数据用于研究区长时间序列的城市化水平分析。由于 2 种夜间灯光数据空间分辨率、光谱响应方式等方面存在差异,因此在计算夜间灯光指数之前,需对 2 种夜间灯光数据进行整合^[30-31],选取 2012 年、2013 年 2 种夜间灯光数据用于数据的建模与验证。

建成区矢量数据采用宫鹏团队制作的中国城市基本土地利用类别测绘(EULUC - China - 2018)。该数据对建成区进行了分类(<http://data.ess.tsinghua.edu.cn/>)。本研究利用该数据计算建成区面积占市域面积比例。

统计数据来源于京杭大运河沿线 2018 年各城市的统计年鉴,研究选取指标主要包括非农人口比例、第二三产业占国内生产总值(gross domestic product,GDP)比重,构建城市化综合指数,用于验证夜间灯光指数是否能够确切地反映城市化水平。

2 研究方法

2.1 夜间灯光指数

利用夜间灯光数据构建表征城市化水平的夜间灯光指数。夜间灯光指数以京杭大运河沿线城市 2018 年建成区为界,计算建成区范围内各年份的灯光斑块的相对灯光强度作为夜间灯光指数(I),公式为:

$$I = \sum_{i=1}^{63} DN_i \frac{n_i}{63N} \quad (1)$$

式中: DN_i 为建成区内 i 级的灰度值; n_i 为建成区内第 i 灰度等级的像元总数; N 为建成区内灯光的像元总数。

参考陈晋等的研究,选取非农业人口比例、建成区面积比例、第二三产业占 GDP 比例这 3 项指标分别表达人口、空间、经济的城市化指标(权重分别定为 0.4、0.2 和 0.4),构建城市化综合指数^[32],用于验证夜间灯光指数是否能够确切的反映城市化水平。

参考梁龙武等的研究,划分城市化水平类型。将当年夜间灯光指数均值的 1 倍、1.2 倍设定为划

分标准^[5]。城市化水平类型区分别为高城市化区(>1.2 倍)、中城市化区(1~1.2 倍)、低城市化区(<1 倍)3 种类型。

2.2 RSEI 指数

RSEI^[22] 是利用遥感影像,整合多个自然因子,对生态状况进行快速监测与评价的新型遥感生态指数。该指数集成了植被指数、湿度分量、地表温度和建筑指数 4 个评价指标,分别代表绿度、湿度、热度和干度 4 大生态要素,然后进行主成分分析。把 4 个指标中的主要的信息集中到第一主成分 PC1 上。对主成分分析后的 PC1 进行归一化处理后即为所建的 RSEI,其值介于[0,1]之间。RSEI 值越接近 1,生态越好,反之生态越差。将各年份的生态环境指数以 0.2 为间隔分为 5 级,依次为生态环境差、较差、一般、良好、优秀等级。

2.3 城市化与生态环境耦合协调模型

城市化与生态环境耦合度模型由耦合度模型与耦合协调度模型两部分组成^[5]。

1)城市化与生态环境耦合度模型。耦合度是一个物理学概念,是指两个(或两个以上的)系统通过各种相互作用,而彼此影响的现象。耦合被广泛地应用到研究城市化与生态环境交互胁迫关系之中,表示式为:

$$C = \left[\frac{F(x)G(y)}{\left(\frac{F(x) + G(y)}{2} \right)^2} \right]^{1/k} \quad (2)$$

式中: C 为城市化与生态环境系统的耦合度,且 $0 \leq C \leq 1$; $F(x)$ 为城市化系统综合评价值; $G(y)$ 为生态环境系统综合评价值; k 为调节系数,且 $k \geq 2$,常取 $k = 2$ 。

2)城市化与生态环境协调度模型。利用协调度模型,判断两个系统之间的协调发展程度。计算公式如下:

$$T = \alpha F(x) + \beta G(y) \quad (3)$$

$$D = \sqrt{CT} \quad (4)$$

式中: D 为协调度; T 为城市化与生态环境系统综合发展指数; α, β 为设定权重。因为城市化发展与生态环境保护,两个系统的重要性是相同的,所以取 $\alpha = \beta = 0.5$ 。

3)协调度划分。根据协调度 D 及城市化系统 $F(x)$ 和生态环境系统 $G(y)$ 的大小,对城市化与生态环境耦合协调类型进行划分,分类原则如表 2 所示。

表 2 城市化与生态环境耦合协调类型划分原则

Tab.2 Classification principles of coupling and coordination types between urbanization and eco – environment

综合类别	协调度水平	亚类别	系统指数值对比	子类别	类型
协调发展	0.8 < D ≤ 1	高度协调	$G(y) - F(x) > 0.1$	城市化滞后	V1
			$ G(y) - F(x) \leq 0.1$	系统均衡发展	V2
			$G(y) - F(x) < -0.1$	生态环境滞后	V3
转型发展	0.6 < D ≤ 0.8	中度协调	$G(y) - F(x) > 0.1$	城市化滞后	IV1
			$ G(y) - F(x) \leq 0.1$	系统均衡发展	IV2
			$G(y) - F(x) < -0.1$	生态环境滞后	IV3
	0.4 < D ≤ 0.6	濒临失调	$G(y) - F(x) > 0.1$	城市化滞后	III1
			$ G(y) - F(x) \leq 0.1$	系统均衡发展	III2
			$G(y) - F(x) < -0.1$	生态环境滞后	III3
不协调发展	0.2 < D ≤ 0.4	中度失调	$G(y) - F(x) > 0.1$	城市化滞后	II1
			$ G(y) - F(x) \leq 0.1$	系统均衡发展	II2
			$G(y) - F(x) < -0.1$	生态环境滞后	II3
	0 < D ≤ 0.2	严重失调	$G(y) - F(x) > 0.1$	城市化滞后	I1
			$ G(y) - F(x) \leq 0.1$	系统均衡发展	I2
			$G(y) - F(x) < -0.1$	生态环境滞后	I3

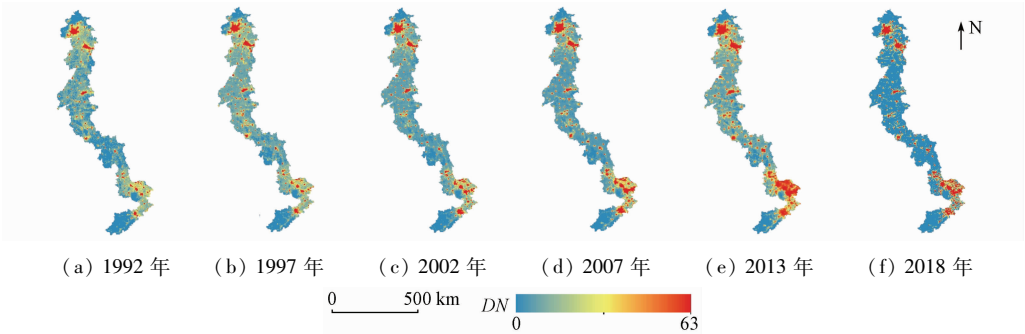


图 2 1992—2018 年夜间灯光强度图

Fig.2 Map of night light intensity from 1992 to 2018

利用夜间灯光数据,计算各城市 1992—2018 年夜间灯光指数。以 2018 年为例,将根据统计数据计算得出城市化综合指数与 2018 年夜间灯光指数(表 3)进行拟合,得出夜间灯光指数和城市化综合指数之间为正相关性,两者的皮尔逊相关系数达到 0.92,表明夜间灯光指数能够准确地表征城市化水平。本研究同样计算整个市辖区的夜间灯光指数,分析其与统计数据计算的城市化综

合指数的相关性相关系数仅为 0.85。结合图 2 也可以看出像杭州这样迅速发展的城市,城市化水平很高,但是由于市辖区范围较大,若计算市辖区范围的灯光指数,导致城市化水平低估。所以本研究采用建成区范围内计算的夜间灯光指数代表城市化水平,进行京杭大运河沿线地区 1992—2018 年城市化水平研究。

表 3 2018 年各城市城市化综合指数表

Tab.3 Comprehensive urbanization index of each city in 2018

城市	非农人口比例	第二三产业占 GDP 比重	建成区比重	城市化综合指数	建成区灯光指数
	0.4	0.4	0.2		
北京	0.86	0.99	0.24	0.79	0.86
天津	0.83	0.99	0.26	0.78	0.81
廊坊	0.59	0.90	0.26	0.65	0.60
沧州	0.52	0.92	0.2	0.62	0.41
德州	0.56	0.91	0.13	0.61	0.53
聊城	0.60	0.90	0.16	0.63	0.42
济南	0.72	0.96	0.21	0.71	0.70
泰安	0.61	0.92	0.11	0.63	0.59
济宁	0.59	0.90	0.11	0.62	0.63
枣庄	0.6	0.93	0.13	0.64	0.61
徐州	0.65	0.90	0.14	0.65	0.59
宿迁	0.60	0.89	0.13	0.62	0.58
淮安	0.63	0.90	0.12	0.64	0.63
扬州	0.67	0.95	0.17	0.68	0.76
镇江	0.71	0.97	0.22	0.72	0.79
常州	0.89	0.98	0.36	0.82	0.85
无锡	0.76	0.99	0.47	0.79	0.90
苏州	0.76	0.99	0.42	0.78	0.92
嘉兴	0.59	0.97	0.39	0.70	0.76
杭州	0.78	0.98	0.11	0.73	0.87

统计每个城市夜间灯光指数均值,将 1992—2018 年的城市化水平进行可视化分析,以此分析城市化水平的发展过程,见图 3。由图 3 可以看出京杭大运河沿线地区城市发展水平具有空间不平衡性,呈现出南北高,中部低的空间格局,中部城市区位优势及发展动力不足,仍以传统农业与工业为主,因此经济发展速度较慢,经济水平较低。北京、天津、无锡、苏州、杭州城市化水平明显高于其他城市。从研究时段来看,1997—2002 年间,苏州、杭州由中城市化水平转变为高城市化水平,扬州、镇江由低城市化水平转变为中城市化水平;2002—2007 年间,嘉兴由低城市化水平转变为中城市化水平,其余城市发展水平变化不大。总体而言京津冀段的城市化水平较高。北京是我国重要的政治、文化、经济中心,有着良好的经济基础,城市化水平较高。天津有着良好的经济基础与区位优势,是北方的重要经济中心。山东段的城市化水平总体相对较低,作为省会城市的济南经济发展较好,处于中城市化水平;其余城市均处于低城市化水平。京杭大运河的通航河段主要分布在黄河以南的济宁以南地区,山东段内建有济宁港、枣庄港等。江苏是一个南北发展差

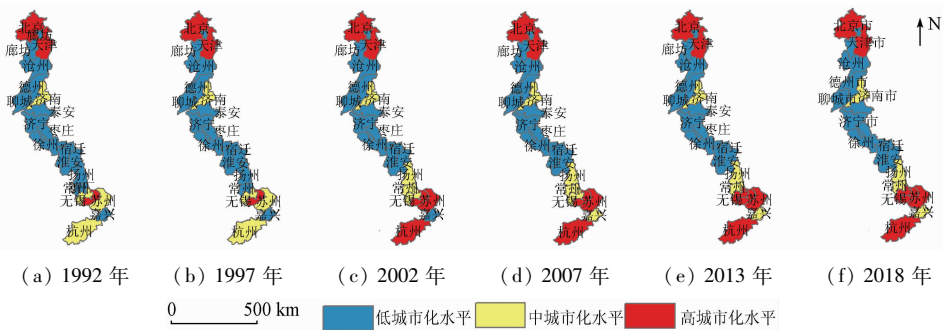


图 3 1992—2018 年城市化水平空间演变图

Fig.3 The spatial distribution of urbanization levels from 1992 to 2018

异非常显著的省份,1993 年苏南、苏中、苏北的人均 GDP 是 4.4:2.1:1,1997 年有所缩小,但仍达 3.9:1.9:1^[33]。为转变这一极化发展的格局,20 世纪 90 年代以来江苏省大力实施了区域共同发展战略,其中苏锡常都市圈发展迅速。苏锡常都市圈位于长江三角洲,2016 年国家规划的《长江三角洲城市群发展规划》要求苏锡常都市圈全面强化与上海的功能对接与互动,加快推进沪苏通、锡常泰跨江融合发展。其中,苏州是江苏省内的第一经济强市,除了早期是运河重要的城市之外,由于距离上海近,堪称是上海周边地区经济的第二城,再配合以运河等交通设施的辅助,苏州城市发展很有潜力。但是纵贯江苏南北腹部的新宜城镇聚合轴(基本上是江北沿大运河地带)却一直没有得到明确的产业战略

与政策支持。扬州、淮安等城市,在古代大运河刚刚开通的时候,这些城市也随之兴起,成为当时我国发展最有潜力的城市,但是当大运河的地位没有那么重要的时候,这些城市的经济发展就逐渐落后了。浙江段城市化水平较高,杭州是大运河的终点,是受大运河影响最大的城市。自从大运河开通以后,我国南方城市的经济发展逐渐有了起色,大运河带动了杭州的经济发展,现如今,杭州在教科文卫、旅游产业、高端产业、信息文创等新兴产业上做得很出色,使得杭州成为我国发展最快的城市。南水北调东线“一期”工程通水后,工程沿线扬州至泰安 7 个地级市的 GDP 总和从 2013 年的 2.004 4 万亿元迅速增长到 2018 年的 2.955 7 万亿元。工程通水后对泰安市、济宁市经济发展无明显影响,抑制了枣庄

市经济发展,促进了徐州市、宿迁市、淮安市、扬州市等 4 市的经济发展^[34],但是城市化水平仍较低。

为探究城市化水平的空间不平衡性的主要原因,本文搜集整理了研究时段内的非农人口比例、建成区比重、第二三产业占 GDP 比重这 3 项指标。从统计资料中可以看出,在研究初期京津冀段的第二三产业占 GDP 比重最高,浙江段、江苏段次之,山东段最低,2013 年浙江段超过京津冀段,第二三产业占 GDP 比重最大。2002 年之前,建成区比重指标

排序从大到小依次为京津冀段、浙江段、江苏段、山东段,此后浙江段、江苏段、山东段开展了大规模的城市化建设,建成区比重均超过京津冀段。非农人口比例逐年增加,但是排序没有变化,从大到小依次为京津冀段、江苏段、浙江段、山东段。

3.2 RSEI 计算结果

利用 Landsat 影像,基于遥感生态指数计算方法,计算得出 1992—2018 年京杭大运河沿线地区 RSEI,见图 4。

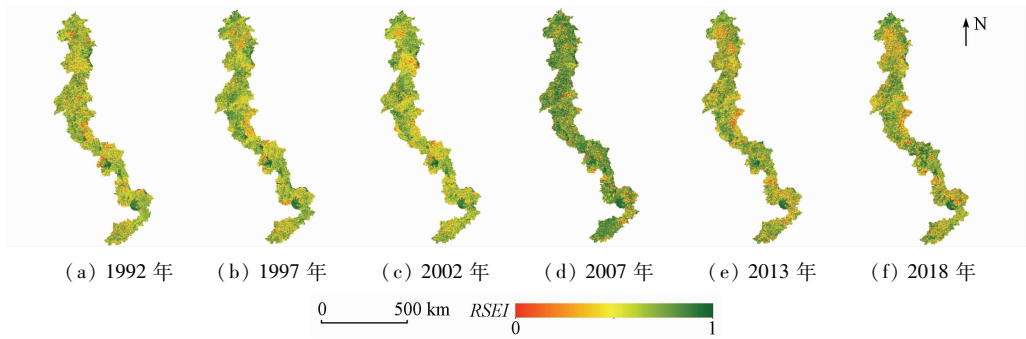


图 4 1992—2018 年 RSEI 图
Fig. 4 Map of RSEI from 1992 to 2018

首先对该区域的生态环境状况进行总体评价。统计 1992—2018 年 6 期 RSEI 的总体均值和标准差,统计结果见表 4。

表 4 1992—2018 年研究区整体生态环境评价结果
Tab. 4 Overall eco - environment evaluation results of the study area from 1992 to 2018

指标	1992 年	1997 年	2002 年	2007 年	2013 年	2018 年
平均值	0.62	0.59	0.60	0.73	0.63	0.63
标准差	0.24	0.32	0.24	0.25	0.29	0.29

由表 4 可以看出,1992—2018 年间,该研究区的生态环境变化不大,1997 年京杭大运河沿线地区生态环境相对较差,这与 1997 年我国发生了严重的干旱灾害有关,2007 年京杭大运河沿线地区生态环境状况相对较好。1992—1997 年京杭大运河沿线地区生态环境质量呈现下降状态,RSEI 平均值从 0.62 下降至 0.59。1997—2007 年京杭大运河沿线

地区生态环境质量呈现上升状态,RSEI 平均值从 0.59 上升至 0.73。2007—2018 年生态环境质量变差,RSEI 平均值从 0.73 下降至 0.63。

为分析 1992—2018 年 26 a 间京杭大运河沿线地区各城市生态环境水平变化过程与变化规律,对各城市 RSEI 的均值进行空间制图,见图 5。可以看出,京杭大运河沿线地区的生态环境状况普遍较好,各城市的 RSEI 均大于 0.4,包括一般生态环境区和良好生态环境区。1992 年沧州、济南、枣庄、宿迁、镇江、常州等城市生态环境一般;1997 年济南、泰安、枣庄的生态环境状况一般;2002 年沧州、济南、泰安、枣庄、宿迁、镇江的生态环境为一般;2007 年京杭大运河沿线地区生态环境均为良好;2013 年泰安、枣庄、扬州、常州的生态环境为一般;2018 年廊坊、聊城、泰安、枣庄、济南的生态环境状况一般;其余均为良好生态环境区。由于本文构建的 RSEI 是

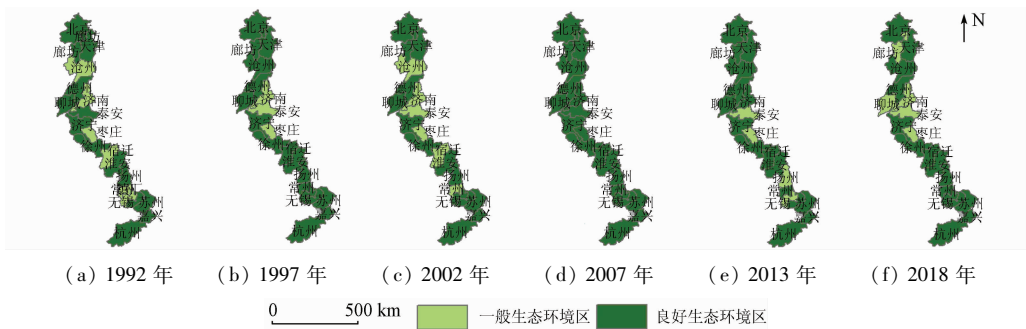


图 5 1992—2018 年研究区城市尺度生态环境质量空间演变图
Fig. 5 Spatial evolution map of city - scale eco - environment quality from 1992 to 2018

基于植被指数、湿度分量、地表温度和建筑指数这 4 个评价指标,把 4 个指标中的主要的信息集中到第一主成分上。针对以上 4 个指标对研究区生态环境状况及变迁因素进行分析。依据《中国森林资源报告(2014—2018)》,京津冀段、山东段、江苏段、浙江段的森林覆盖率依次为 27.25%、17.51%、15.20% 和 59.43%。生长季的作物、城市绿化植物同样可增加区域植被指数。地表温度与地表覆盖、人为热排放、气象条件等多种因素有关,且随着时间变化较快,由于城市热岛现象的存在,中心城区的地表温度普遍高于郊区。城市建筑用地的增多对区域气候环境造成重要影响,研究表明城市建筑指数越高的地区,城市的地表温度越高,热岛效应就越明显。研究区从北向南,降水量逐渐增多,使得湿度增加,并有利于植被生长,且南方地区河网密集,湿度普遍高于北方,导致南方的城市生态环境总体状况优于北方的城市。北京市生态环境普遍较好,分析原因,北京山区约占全市总面积的 62%,横跨北部燕山山脉和西部太行山山脉,山区的植被覆盖度较高,2016 年北京森林覆盖率为 43.77%,且呈现出增加的趋势^[35]。天津地区生长季植被覆盖度一般在 0.55 ~ 0.65 之间波动^[36],天津市河网密集,增加湿度的同时,又可以缓解城市热岛效应。总体而言京津冀段、江苏段、浙江段的生态环境较好;而山东段的泰安、济南、枣庄等中部城市的生态环境相对较差,其他城市的生态环境相对较好。可以看出 1992—2018 年间,沧州植被指数有所增加,生态环境质量有所提升,这与沧州市紧紧围绕创建国家生态园林城市宏伟蓝图,积极加快城镇园林绿化、村庄绿化和绿道体系建设关系密切。

基于每个城市植被指数、湿度分量、地表温度和建筑指数这 4 个评价指标对第一主成分的贡献分析,植被指数、湿度分量对第一主成分为正贡献,地表温度和建筑指数对第一主成分为负贡献。各城市每个指标的贡献率各异,总体而言,京津冀段以建筑

指数的负贡献为主;山东段以地表温度的负贡献为主;江苏段以建筑指数的负贡献为主;浙江段以植被指数的正贡献为主。

3.3 城市化与生态环境耦合协调度结果

根据耦合协调模型,利用各城市遥感生态环境指数均值与和夜间灯光指数的平均值,计算得出 1992—2018 年生态环境与城市化的耦合协调度(图 6),根据耦合协调分类原则,划分耦合协调类型,并将耦合协调分类结果进行空间制图(图 7、图 8)。由图 6、图 7 可以看出,1992 年京杭大运河沿线地区杭州为濒临失调,其余城市为中度协调,1992—1997 年北京由中度协调转变为高度协调,杭州由濒临失调转变为中度协调,1997—2002 年天津、苏州由中度协调转变为高度协调,2007 年京杭大运河沿线城市以高度协调为主导,说明 1992—2007 年间京杭运河沿线地区城市化与生态环境系统耦合协调度呈上升趋势;2013 年、2018 年再次转变为中度协调为主导。结合图 8,协调度变化主要是因为 1992—2002 年期间,沿线城市的城市化水平较生态环境低,城市化与生态环境系统处于中度

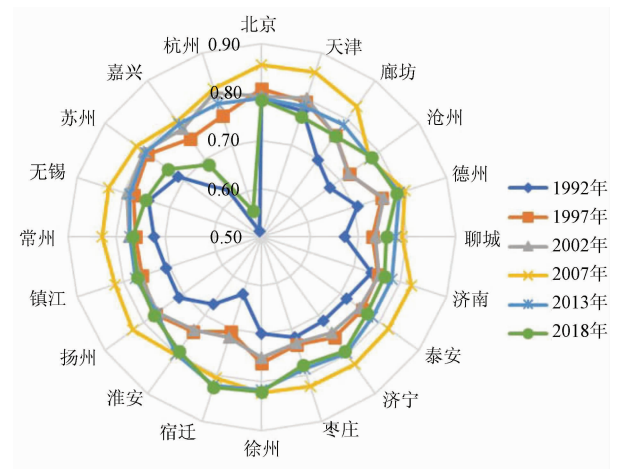


图 6 1992—2018 年各城市城市化与生态环境协调度图
Fig. 6 Coordination between urbanization and eco - environment of various cities from 1992 to 2018

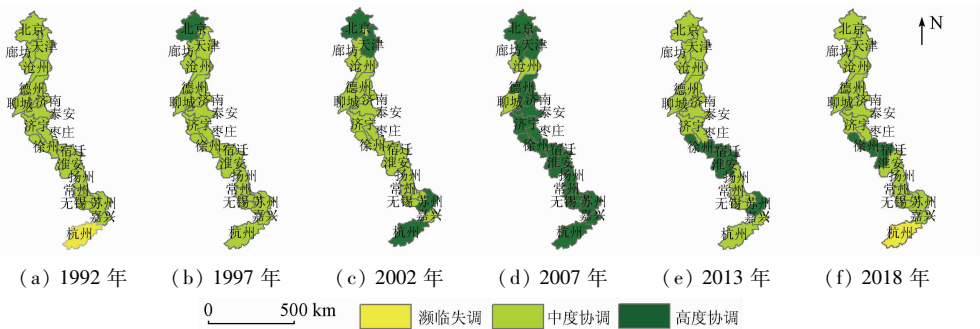


图 7 1992—2018 年城市化与生态环境耦合协调类型演变图

Fig.7 Evolution of the type of coupling and coordination between urbanization and eco - environment from 1992 to 2108

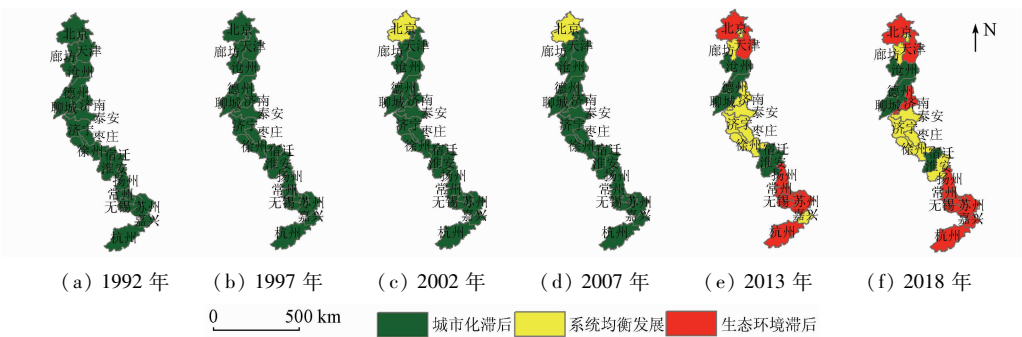


图 8 1992—2018 年城市化与生态环境耦合协调子类型演变图
Fig. 8 Evolution of the subtypes of coupling and coordination between urbanization and eco - environment from 1992 to 2108

协调为主,随着城市化水平的提高,到 2007 年达到高度协调为主,此后城市化发展水平超过了生态环境发展状况,因此 2013 年、2018 年再次转变为中度协调为主。总体而言,研究区城市化与生态环境系统耦合协调度处于较高的水平,仅杭州在 1992 年因生态环境发展状况超前于城市化发展水平,协调度为濒临失调,随着杭州城市的快速发展,协调度达到高度协调,2018 年生态环境发展状况相较于城市化发展水平相对滞后,协调度的状况再次变为濒临失调。

图 8 表明 1992—2018 年京杭大运河沿线地区城市化与生态环境协同效应子类型逐渐由城市化滞后为主转变为生态环境滞后、系统均衡发展、城市化滞后多种类型并存。2007—2013 年,廊坊、济南、泰安、济宁、徐州等城市由城市化滞后演变为系统均衡发展。北京、天津、杭州、嘉兴、苏州、无锡等城市在 2013 年以后发展为生态环境滞后。表明近年来京杭大运河沿线地区在城市化进程不断加快时,生态环境的发展相对滞后。各级政府在发展经济的同时,需要注重对生态环境的保护。

4 结论与展望

本文以京杭大运河沿线城市为研究区,采用 DMSP/OLS,NPP/VIIRS 夜间灯光数据和 Landsat 影像,构建夜间灯光指数和遥感生态指数,并利用耦合协调度模型分析 1992—2018 年京杭大运河沿线地区城市化与生态环境耦合协调关系。虽然当前不乏大运河重要河段及沿线典型城市的城市化及生态环境评价的研究,但对于大运河沿线整体的城市化与生态环境耦合协调分析的研究较少。本文主要结论如下。

1)本文以 DMSP/OLS 夜间灯光为基准,利用 NPP/VIIRS 数据模拟 DMSP/OLS 数据,实现数据整合,从而构建建成区的夜间灯光指数表征城市化水平。夜间灯光指数和统计数据计算得出的城市化综

合指数的皮尔逊相关系数为 0.92,表明夜间灯光指数能够准确地表征城市化水平。研究表明 1992—2018 年京杭大运河沿线地区高城市化水平的城市逐年增多,中城市化水平城市和低城市化水平城市的数量减少。京杭大运河沿线地区城市发展水平具有空间不平衡性,呈现出南北高,中部低的格局。1992—1997 年,城市化发展速度较为缓慢,1997—2013 年为城市化水平迅猛发展时期,2013—2018 年,城市化水平稳步提升。

2)1992—2018 年京杭大运河沿线地区 RSEI 均大于 0.4,表明京杭大运河沿线地区生态环境状况均较好。泰安、济南、枣庄等中部城市的生态环境相对较差,其他城市的生态环境相对较好。总体来看,1997 年京杭大运河沿线地区生态环境相对较差,而 2007 年生态环境状况相对较好。

3)1992 年、1997 年及 2002 年京杭大运河沿线地区城市化与生态环境协调类型以中度协调为主,2007 年以高度协调为主,2013 年、2018 年转变为中度协调占主导地位。协调度变化的原因为系统协同发展子类型整体上逐渐由城市化滞后演变为生态环境滞后。

在研究中仍存在一些值得讨论,本文选用的遥感生态指数,仅能反映部分生态环境状况,并不能反映如河流生态环境、空气质量、水土流失、生物多样性等生态环境指标;遥感数据选择方面,本文多选用 5—10 月份的 Landsat 遥感影像,由于遥感生态指数计算结果受影像质量与成像时间影响较大,在后续的研究中应该处理更多的遥感影像,提高数据精度。此外本文仅对京杭大运河沿线地区城市化水平与生态环境状况及两者耦合协调关系进行了计算与分析,后续还可以深入分析城市化水平、生态环境状况以及两者耦合协调变化的影响因素,以期京杭大运河沿线地区城市发展及生态保护提供更多的数据支撑。

参考文献 (References) :

[1] Wu G H,Wu P F. Research on the influencing factors of China's

- resources and environment to urbanization based on computer[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1549: 022098.
- [2] 陈晓红, 周宏浩. 城市化与生态环境关系研究热点与前沿的图谱分析[J]. *地理科学进展*, 2018, 37(9): 1171–1185.
- Chen X H, Zhou H H. Research hotspots and prospects of urbanization and ecological environment relationship based on visual knowledge mapping[J]. *Progress in Geography*, 2018, 37(9): 1171–1185.
- [3] 方宁, 张茜, 杨东旭, 等. 湖南省生态文明建设与城镇化时空演变及耦合协调研究[J]. *地域研究与开发*, 2020, 39(6): 59–64.
- Fang N, Zhang Q, Yang D X, et al. Spatial-temporal evolution and coupling coordination between ecological civilization construction and urbanization in Hunan Province[J]. *Areal Research and Development*, 2020, 39(6): 59–64.
- [4] 胡曼. 城市生态环境变化及其驱动因素时间序列分析——以江宁为例[D]. 南京: 南京林业大学, 2017.
- Hu M. Time Series analysis on the changes of suburban eco-environment and its driving factors: A study case of Jiangning[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2017.
- [5] 梁龙武, 王振波, 方创琳, 等. 京津冀城市群城市化与生态环境时空分异及协同发展格局[J]. *生态学报*, 2019, 39(4): 1212–1225.
- Liang L W, Wang Z B, Fang C L, et al. Spatiotemporal differentiation and coordinated development pattern of urbanization and the ecological environment of the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(4): 1212–1225.
- [6] Wang Y F, Geng Q J, Si X H, et al. Coupling and coordination analysis of urbanization, economy and environment of Shandong Province, China[J]. *Environment Development and Sustainability*, 2020(4): 1–19.
- [7] 厉芳婷, 张过, 贾继鹏. 基于地理国情数据的城市扩张和生态格局分析——以武汉市为例[J]. *测绘通报*, 2020(11): 93–98.
- Li F T, Zhang G, Jia J P. Analysis on urban expansion and ecological pattern based on geographical condition data: Taking Wuhan as an example[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2020(11): 93–98.
- [8] 方创琳, 周成虎, 顾朝林, 等. 特大城市群地区城镇化与生态环境交互耦合效应解析的理论框架及技术路径[J]. *地理学报*, 2016, 71(4): 531–550.
- Fang C L, Zhou C H, Gu C L, et al. Theoretical analysis of the interaction coupled between urbanization and eco-environment in mega-city agglomerations[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(4): 531–550.
- [9] 贺清云, 李慧平, 欧阳晓. 长江中游城市群城市化与生态环境耦合协调分析及模拟预测[J]. *生态科学*, 2020, 39(2): 182–190.
- He Q Y, Li H P, Ouyang X. Analyzing and predicting the urbanization and eco-environment coupling and coordination of the middle reaches of Yangtze River urban agglomerations[J]. *Ecological Science*, 2020, 39(2): 182–190.
- [10] 王少剑, 方创琳, 王洋. 京津冀地区城市化与生态环境交互耦合关系定量测度[J]. *生态学报*, 2015, 35(7): 2244–2254.
- Wang S J, Fang C L, Wang Y. Quantitative investigation of the interactive coupling relationship between urbanization and eco-environment[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(7): 2244–2254.
- [11] Li Y F, Li Y, Zhou Y, et al. Investigation of a coupling model of coordination between urbanization and the environment[J]. *Journal of Environmental Management*, 2012, 98: 127–133.
- [12] 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.
- Liao L H, Dai W Y, Huang H F, 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.
- [13] Wang L, Li W J, Wang P F, et al. Spatiotemporal characterization of the urban sprawl and its impacts on urban island in China with DMSP/OLS and MODIS measurements[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2019, 138(1–2): 293–303.
- [14] 郝蕊芳, 于德永, 刘宇鹏, 等. DMSP/OLS 灯光数据在城市化监测中的应用[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2014, 50(4): 407–413.
- Hao R F, Yu D Y, Liu Y P, et al. Use of DMSP/OLS nighttime light data in urbanization monitor[J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science Edition)*, 2014, 50(4): 407–413.
- [15] 金平斌, 徐鹏飞. 基于 DMSP/OLS 夜间灯光数据的城镇化进程及格局研究——以杭州市为例[J]. *国土资源遥感*, 2017, 29(4): 205–213. doi:10.6046/gtzyyg. 2017. 04. 31.
- Jin P B, Xu P F. A study of urbanization progress and spatial pattern using DMSP/OLS nighttime light data: A case study of Hangzhou City[J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2017, 29(4): 205–213. doi:10.6046/gtzyyg. 2017. 04. 31.
- [16] 陈颖彪, 郑子豪, 吴志峰, 等. 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.
- Chen Y B, Zheng Z H, Wu Z F, et al. Review and prospect of application of nighttime light remote sensing data[J]. *Progress In Geography*, 2019, 38(2): 205–223.
- [17] Wu Y, Jiang M, Chang Z, et al. Does China's urban development satisfy Zipf's Law? A multiscale perspective from the NPP-VIIRS nighttime light data[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(4): 1–26.
- [18] Liang H D, Guo Z Y, Wu J P, et al. GDP spatialization in Ningbo City based on NPP/VIIRS night-time light and auxiliary data using random forest regression[J]. *Advance in Space Research*, 2020, 65(1): 481–493.
- [19] Ma T, Yin Z, Li B L, et al. Quantitative estimation of the velocity of urbanization in China using nighttime luminosity data[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(2): 1–13.
- [20] 丛康林, 董超, 薄鑫宇, 等. 基于夜光遥感的山东省城市时空格局演化分析[J]. *测绘地理信息*, 2021, 46(5): 78–82.
- Cong K L, Dong C, Bo X Y, et al. Evolution analysis of urban spatiotemporal patterns in Shandong Province based on nighttime light remote sensing[J]. *Journal of Geomatics*, 2021, 46(5): 78–82.
- [21] 徐梦洁, 陈黎, 刘焕金, 等. 基于 DMSP/OLS 夜间灯光数据的长江三角洲地区城市化格局与过程研究[J]. *国土资源遥感*, 2011(3): 106–112. doi:10.6046/gtzyyg. 2011. 03. 19.

Xu M J, Chen L, Liu H J, et al. Pattern and process of urbanization in the Yangtze Delta based on DMSP/OLS data[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2011(3): 106 – 112. doi:10.6046/gtzyyg. 2011. 03. 19.

[22] 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.

Xu H Q. A remote sensing urban ecological index and its application[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(24): 7853 – 7862

[23] 徐涵秋, 施婷婷, 王美雅, 等. 雄安新区地表覆盖变化及其新区规划的生态响应预测[J]. 生态学报, 2017, 37(19): 6289 – 6301.

Xu H Q, Shi T T, Wang M Y, et al. Land cover changes in the Xiong'an New Area and a prediction of ecological response to forthcoming regional planning[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(19): 6289 – 6301.

[24] 王东升, 王小磊, 雷泽勇. 基于遥感生态指数的阜新市生态质量评估[J]. 生态科学, 2020, 39(3): 88 – 94.

Wang D S, Wang X L, Lei Z Y. Ecological change assessment of Fuxin based on remote sensing ecological index[J]. Ecological Science, 2020, 39(3): 88 – 94.

[25] 杨江燕, 吴 田, 潘肖燕, 等. 基于遥感生态指数的雄安新区生态质量评估[J]. 应用生态学报, 2019, 30(1): 277 – 284.

Yang J Y, Wu T, Pan X Y, et al. Ecological quality assessment of Xiongan New Area based on remote sensing ecological index[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(1): 277 – 284.

[26] 杨 静. 京杭大运河生态环境变迁研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2012.

Yang J. Time series analysis on the changes of suburban eco-environment and its driving factors: A study case of Jiangning[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2012.

[27] 张金池. 京杭大运河生态环境变迁[M]. 北京: 科学出版社, 2012.

Zhang J C. Changes of ecological environment along the Beijing – Hangzhou Grand Canal[M]. Beijing: Science Press, 2012.

[28] 黄 杰. 将建设“中国大运河经济带”上升为国家战略的思考[J]. 扬州大学学报(人文社会科学版), 2017(4): 16 – 21.

Huang J. On escalating the construction of “Grand Canal Economic Belt” to national strategy[J]. Journal of Yangzhou University (Humanities and Social Sciences Edition), 2017(4): 16 – 21.

[29] 吴 欣. 中国大运河蓝皮书: 中国大运河发展报告(2018)[R]. 北京: 社会科学文献出版社, 2018.

Wu X. Blue book of China Grand Canal: Annual report on the development of China Grand Canal (2018) [R]. Beijing: Social Sciences Academic Press(CHINA), 2018.

[30] Li X, Li D, Xu H, et al. 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[J]. International Journal of Remote Sensing, 2017, 38(21): 5934 – 5951.

[31] Zheng Q M, Weng Q H, Wang K. Developing a new cross – sensor calibration model for DMSP – OLS and Suomi – NPP VIIRS night – light imageries[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2019, 153: 36 – 47.

[32] 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, 241.

Chen J, Zhuo L, Shi P J, et al. The study on urbanization process in China based on DMSP/OLS data: Development of a light index for urbanization level estimation [J]. Journal of Remote Sensing, 2003(3): 168 – 175, 241.

[33] 张京祥, 刘雨平. 沿京杭大运河地区的空间发展——以京杭大运河扬州段为例[J]. 经济地理, 2008(1): 1 – 5.

Zhang J X, Liu Y P. Research on the spatial development of areas along the Beijing – Hangzhou Grand Canal – with the case study of Yangzhou part of Beijing – Hangzhou Canal[J]. Economic Geography, 2008(1): 1 – 5.

[34] 刘 辉, 狄乾斌. 南水北调东线“一期”工程对京杭大运河沿线城市经济发展的影响分析——基于合成控制法的实证[J]. 资源开发与市场, 2020, 36(11): 1185 – 1191.

Liu H, Di Q B. Analysis on the influence of the first phase of the South – to – North Water Transfer East Route Project on the economic development of cities along the Beijing – Hangzhou Grand Canal evidence based on synthetic control method[J]. Resource Development & Market, 2020, 36(11): 1185 – 1191.

[35] 李晓琴, 孙丹峰, 张凤荣. 基于遥感的北京山区植被覆盖景观格局动态分析[J]. 山地学报, 2003(3): 272 – 280.

Li X Q, Sun D F, Zhang F R. Landscape pattern analysis on change in the fraction of green vegetation based on remotely sensed data in Beijing mountainous area[J]. Journal of Mountain Science, 2003(3): 272 – 280.

[36] 刘子潇, 颜 悦. 天津地区植被覆盖度的遥感估算及其动态变化研究[J]. 城市勘测, 2019(3): 115 – 120.

Liu Z X, Yan Y. Study on vegetation coverage and dynamic changes in Tianjin by remote sensing method[J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying, 2019(3): 115 – 120.

Coupling and coordination relationships between urbanization and ecological environment along the Beijing – Hangzhou Grand Canal

MENG Dan^{1,2,3}, LIU Lingtong^{1,2,3}, GONG Huili^{1,2,3}, LI Xiaojuan^{1,2,3}, JIANG Bowu^{1,2,3}

(1. College of Resources Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 2. Base of the State Key Laboratory of Urban Environmental Process and Digital Modeling, Beijing 100048, China; 3. Beijing Laboratory of Water Resources Security, Beijing 100048, China)

Abstract: This paper aims to study the coupling and coordination relationships between the urbanization and ecological environment in the areas along the Beijing – Hangzhou Grand Canal from 1992 to 2018. To this end, it builds the remote sensing ecological index (RSEI) based on Landsat data to characterize the quality of the

ecological environment and establishes the compounded night light index (CNLI) based on DMSP/OLS and NPP/VIIRS nighttime light (NTL) data to characterize the urbanization level. Meanwhile, it determines the coordinated development pattern between the urbanization and ecological environment in the area by applying a coupling and coordination degree model and its classification principles. The results are as follows. ① The urban development level along the Beijing – Hangzhou Grand Canal is characterized by spatial imbalance. It is high in the southern and northern areas but low in the middle areas. During 1992—2018, the number of cities with a high urbanization level increased year by year. The periods from 1992 to 2002, from 2002 to 2013, and from 2013 to 2018 witnessed the slow development, the accelerated development, and the steady improvement of urbanization, respectively. ② During 1992—2018, the RSEI values were all greater than 0.4, indicating a high – quality ecological environment. The ecological environment in the areas along the canal was relatively stable from 1992 to 2002, improved from 2002 to 2007, and deteriorated from 2007 to 2018 to a certain degree. ③ During 1992—2018, the coupling and coordination degree between urbanization and the ecological environment increased first and then decreased. In terms of the coordinated development type, urbanization lagged behind the ecological environment firstly and then the latter gradually lagged behind the former, indicating that the quality of the ecological environment needs further improving. That is, it is necessary to strengthen the protection of the ecological environment while developing the economy along the Beijing – Hangzhou Grand Canal.

Keywords: Beijing – Hangzhou Grand Canal; urbanization; eco – environment; coupling coordination
(责任编辑: 李 瑜)