

基于 GEE 和 RSEI 的京津冀地区生态环境质量时序动态评估

辛会超¹, 郭 玮², 王贺封^{1*}

(1. 河北工程大学 矿业与测绘工程学院, 河北 邯郸 056038; 2. 河北省第二测绘院, 河北 石家庄 050033)

摘 要:探究京津冀地区生态环境质量时空变化特征及其驱动因素,为该地区可持续协调、高质量一体化发展提供依据。基于 MODIS 数据,借助 Google Earth Engine(GEE)平台构建遥感生态指数(RSEI)模型,辅以多种空间分析和统计方法对京津冀地区及其 4 大功能区生态环境质量进行评价和变化监测。结果表明,1)京津冀地区 RSEI 均值由 2001 年的 0.512 增至 2020 年的 0.575,增幅达 12.30%,多年均值为 0.499,总体处于中等水平。2)生态环境质量整体呈现“西北优、东南差”的空间格局,35.87%的区域变好,以变好 1 个等级为主。3)各功能区生态环境质量均得到了改善,其中南部功能拓展区、中部核心功能区的改善最为显著,改善区域占比分别为 49.66%、45.79%。4)各因子对生态环境质量的影响不同,自然因素中的降水以及人为因素中的人口和土地利用为主导因素。总的来说,京津冀地区 2001—2020 年生态环境质量向好,但未来仍需加强人工干预,持续扩大生态优良区。

关键词:遥感生态指数;生态环境质量;谷歌地球引擎;时空变化;京津冀

中图分类号:S771.8

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2024)02-0106-09

Time Series Dynamic Assessment of Ecological Environment Quality in Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on GEE and RSEI

XIN Hui-chao¹, GUO Wei², WANG He-feng^{1*}

(1. School of Mining and Geomatics Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, Hebei, China;

2. Hebei Second Surveying and Mapping Institute, Shijiazhuang 050033, Hebei, China)

Abstract: The spatiotemporal variation characteristics of eco-environment quality (EQ) and its driving factors in Beijing-Tianjin-Hebei region were analyzed in order to provide a basis for the sustainable, coordinated and high-quality integrated development of the region. Based on MODIS data, remote sensing ecological index (RSEI) was constructed by using the Google Earth Engine (GEE) platform. Spatial analysis and statistical methods were used to evaluate the EQ and monitor its change in the region and its four functional zones. The results showed that 1) the average RSEI in the region increased from 0.512 in 2001 to 0.575 in 2020, increased by 12.30%, and the multi-year average RSEI was 0.499, which was at a middle level. 2) The EQ showed a spatial pattern of "excellent in the northwest and poor in the southeast", 35.87% of the region had become better, dominated by those improved one grade. 3) The EQ of various functional zones was improved, especially in the south functional development zone and the central core functional zone, with the improved area accounting for 49.66% and 45.79%, respectively. 4) The factors had different influences on EQ. Precipitation in natural factors and population and land use in human factors were the dominant factors. Overall, the EQ of Beijing-Tianjin-Hebei region had become better from 2001 to 2020. But in the future, it still needs to strengthen the human intervention, and continue to expand the ecological

收稿日期:2023-01-11 修回日期:2023-04-10

基金项目:河北省高等学校科学技术研究重点项目(ZD2020312)。

第一作者:辛会超。研究方向:城市生态遥感。E-mail:1793547749@qq.com

* 通信作者:王贺封,副教授。研究方向:GIS 与 RS 应用,城市生态环境。E-mail:wanghefeng@hebeu.edu.cn

excellent area.

Key words: remote sensing ecological index; ecological environment quality; Google Earth Engine; spatio-temporal variation; Beijing-Tianjin-Hebei region

良好的生态环境对人类的生存和发展十分重要。随着气候变化和人类活动的加剧,水土流失、环境污染和生物多样性锐减等区域性和全球性生态环境问题日益突出^[1],削弱了生态系统承载力,降低了人类生存质量。在联合国可持续发展目标(SDGs)和区域高质量发展的背景下,及时、准确地监测区域生态环境质量状况,探究其变化过程及明晰该变化的驱动机制,对于生态安全和生态文明建设具有重要意义。

遥感技术兼具时效性高、周期性强和覆盖面广等特点,已广泛应用于生态环境评价领域。目前主要分为两类:一类是利用单一指标分析^[2-3],但生态系统受多种因子综合作用,该类方法难以有效表征区域生态环境质量状况。另一类是耦合多个指标综合分析,最具代表性的为遥感生态指数(remote sensing ecological index, RSEI)^[4],该指数以客观、全面等优点被应用于不同行政尺度的生态环境评价^[5-6];一些学者在RSEI应用中考虑到Landsat数据时间序列的问题,选取5~10 a步长进行研究^[7-8],无法呈现不同年份间细微变化。MODIS数据空间跨度大、时间序列完整,常被用来构建RSEI开展省级、国家级等大范围区域的生态环境评价^[9-10],但同时往往需要面临庞大遥感数据的下载、处理和分析等问题。谷歌地球引擎(Google Earth Engine, GEE)具有强大的数据储存和计算能力,在大范围、长时序的遥感应用研究中优势明显,已有学者依托于该平台开展了不同尺度的生态环境评价研究^[11-13]。

京津冀地区为中国第三大城市群,为中国北方重要的社会经济核心区。随着近年来工业化步伐逐步加快和城镇化水平不断提升,该地区生态环境受到一定程度破坏^[14],其社会经济发展与生态环境保护之间的矛盾日益突出。《京津冀协同规划纲要》中明确提出将京津冀划分为发展目标和战略定位不同的4个功能区。目前,虽已有学者对京津冀地区生态环境质量开展了研究^[15],但多为等间隔的非时序研究,且往往将京津冀地区作为整体进行分析,缺乏不同功能区之间的对比分析。为此,本研究借助GEE平台计算京津冀地区逐年RSEI,探究近20 a来该地区及其4大功能区生态环境质量时空变化并进行归因分析,以期京津冀地区可持续协调、高质量一体化发展提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

京津冀地区为中国的首都经济圈,位于华北平原北部,113°27′—119°50′E,36°05′—42°40′N,包括北京、天津2个直辖市及河北省的11个地级市,地势由西北向东南倾斜,东临渤海,西靠太行山脉,北倚燕山山脉,属于温带大陆性季风气候。据统计,2020年地区生产总值为86 393.20亿元,常住人口为11 036.90万人,城镇化水平为68.60%。京津冀地区各功能分区见图1。

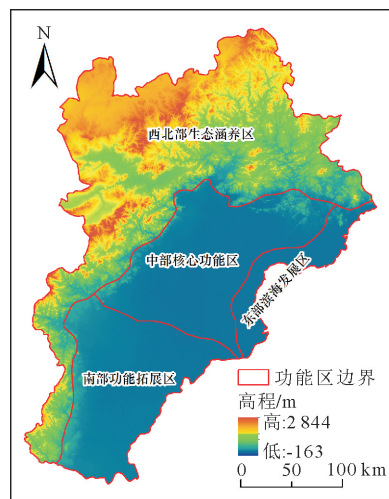


图1 京津冀地区功能分区

Fig. 1 Functional zoning map of Beijing-Tianjin-Hebei region

1.2 数据来源及处理

遥感数据来源于GEE平台提供的2001—2020年MODIS产品数据,时间范围为6—9月,具体说明见表1。气象数据为国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn/>)提供的2001—2020年年均气温和年降水量数据,空间分辨率为1 km。人口和GDP数据来源于河北省、北京市和天津市统计年鉴,时间跨度为2001—2020年,利用空间分析工具将其转为空间分辨率为1 km的栅格数据。DEM数据为地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)提供的SRTM 30 m数据,为保证像元大小相同,将其重采样为1 km。土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>),根据分类标准将其整合为耕地、林地、草地、水域、建设用地及未利用土地6类。此外,为避免水体对主成分载荷的干扰,采用MNDWI^[16]水体指数对

水体进行剔除。

1.3 研究方法

1.3.1 指标选择及计算 绿度指标由归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)表示,其可表征植被生长状况;湿度指标由改进的缨帽变换^[17]湿度分量(WET)表示,其可表征植

被及土壤含水量;热度指标由地表温度(land surface temperature, LST)表示;干度指标(normalized difference soil index, NDSI)由裸土指数(soil index, SI)和建筑指数(index-based build-up index, IBI)取平均得到,其可表征城镇扩张和土地干化,各指标的计算方法见表2。

表1 数据产品说明

Table 1 Description of data product

数据产品	数据层	空间分辨率/m	时间分辨率/d	影像数量/景	用途
MOD13A1 V6	植被指数 NDVI	500	16	640	绿度指标
MOD11A2 V6	地表温度 DLST	1 000	8	1 280	热度指标
MOD09A1 V6	波段 1~7 的地表反射率	500	8	1 280	湿度和干度指标

表2 指标计算方法

Table 2 Calculation methods of indicators

指标	计算方法
绿度 NDVI	MOD13A1 提取得到
湿度 WET	$W_{ET} = 0.1147\rho_{Red} + 0.2489\rho_{NIR1} + 0.2408\rho_{Blue} + 0.3132\rho_{Green} - 0.3122\rho_{NIR2} - 0.6416\rho_{SWIR1} - 0.5087\rho_{SWIR2}$
热度 LST	$L_{ST} = 0.02 \times D_N - 273.15$
干度 NDSI	$N_{DSI} = (S_1 + I_{BI}) / 2$ $S_1 = [(\rho_{SWIR1} + \rho_{Red}) - (\rho_{Blue} + \rho_{NIR})] / [(\rho_{SWIR1} + \rho_{Red}) + (\rho_{Blue} + \rho_{NIR})]$ $I_{BI} = \frac{2\rho_{SWIR1}/(\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR}) - [\rho_{NIR}/(\rho_{NIR} + \rho_{Red}) + \rho_{Green}/(\rho_{Green} + \rho_{SWIR1})]}{2\rho_{SWIR1}/(\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR}) + [\rho_{NIR}/(\rho_{NIR} + \rho_{Red}) + \rho_{Green}/(\rho_{Green} + \rho_{SWIR1})]}$

注: ρ_i : 对应波段地表反射率; D_N : MOD11A2 影像灰度值。

1.3.2 RSEI 模型构建 为减小各指标极值及量纲不同的影响,需将其正规化,计算公式如下

$$I_N = \frac{I - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}} \quad (1)$$

式中: I_N 为正规化后的指标值; I 为指标值; I_{\max} 为指标最大值; I_{\min} 为指标最小值。

将已正规化的指标耦合后进行主成分分析(principal component analysis, PCA),得到各主成分分量,以 PC1 作为 RSEI₀,对 RSEI₀ 正规化得到 RSEI,计算公式如下

$$R_{SEI0} = P_{C1} [f(NDVI, WET, LST, NDSI)] \quad (2)$$

$$R_{SEI} = \frac{R_{SEI0} - R_{SEI0_min}}{R_{SEI0_max} - R_{SEI0_min}} \quad (3)$$

式中: R_{SEI0} 为初始遥感生态指数; P_{C1} 为第一主成分; f 为主成分分析。

为了便于各时段间相互比较,需将 RSEI 正规化,使其位于 0~1,值越大表明生态环境质量越好。此外,为了更好分析生态环境质量,以 0.2 为步长,将 RSEI 划分为差(0~0.2)、较差(0.2~0.4)、中等(0.4~0.6)、良(0.6~0.8)、优(0.8~1)5 个等级^[15]。

1.3.3 动态变化分析方法 为了探究京津冀地区生态环境质量变化情况,将各时期 RSEI 分级结果进行叠加分析,提取生态环境质量变化图斑^[18],计

算公式如下

$$C_{odeij} = 10 \times C_{odei} + C_{odej} \quad (4)$$

式中: C_{odeij} 为变化类型代码; C_{odei} 和 C_{odej} 分别为前一期和后一期 RSEI 等级值。

1.3.4 地理探测器 地理探测器是一种探测空间分异性及揭示其驱动因素的统计学方法^[19],在生态环境评价中应用广泛^[20]。本研究应用因子探测器来定量分析各因子对京津冀地区生态环境质量的影响,计算公式如下

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (5)$$

式中: h 为因子层数; N_h 和 N 分别为层 h 和京津冀地区的样本数; σ 和 σ_h 分别为层 h 和京津冀地区 RSEI 的方差; $q \in [0, 1]$,值越大,表示该因子对 RSEI 的影响越大。

2 结果与分析

2.1 主成分分析

根据主成分分析结果(表3)可知,各年份 PC1 的贡献率均 > 72%,多年均值为 75.87%,表明 PC1 包含了 4 个指标大部分信息。此外,在各生态指标中,NDVI、WET 在 PC1 中载荷值为正值,说明其对生态有益;LST、NDSI 在 PC1 中载荷值为负值,说明其对生态不利,这与生态学客观规律相符合。总

表 3 主成分分析结果(PC1)
Table 3 Results of principal component analysis

年份	绿度	湿度	热度	干度	贡献率(%)	年份	绿度	湿度	热度	干度	贡献率(%)
2001	0.479	0.311	-0.453	-0.243	76.75	2011	0.475	0.265	-0.452	-0.247	73.46
2002	0.411	0.269	-0.463	-0.235	78.02	2012	0.525	0.273	-0.533	-0.221	76.53
2003	0.468	0.256	-0.482	-0.273	74.06	2013	0.476	0.326	-0.516	-0.235	78.03
2004	0.556	0.329	-0.552	-0.285	73.35	2014	0.471	0.274	-0.459	-0.232	72.47
2005	0.475	0.297	-0.505	-0.239	75.93	2015	0.425	0.262	-0.481	-0.282	72.02
2006	0.523	0.271	-0.476	-0.287	72.72	2016	0.518	0.331	-0.489	-0.223	79.93
2007	0.549	0.268	-0.491	-0.316	75.65	2017	0.532	0.281	-0.455	-0.227	79.99
2008	0.585	0.321	-0.531	-0.319	76.26	2018	0.428	0.297	-0.421	-0.241	78.35
2009	0.486	0.319	-0.467	-0.277	74.48	2019	0.488	0.333	-0.473	-0.246	76.28
2010	0.557	0.312	-0.538	-0.251	73.45	2020	0.445	0.274	-0.485	-0.253	79.63

的来说,PC1 包含了各指标的大部分信息,载荷值符号基本一致,生态含义明确。因此,利用 PC1 构建 RSEI 模型,能够合理反映京津冀地区生态环境质量状况。

2.2 京津冀地区生态环境质量评价结果分析

2.2.1 整体情况分析 通过京津冀地区 RSEI 和各指标时序变化(图 2),可以看出,2001—2020 年,京津冀地区生态环境质量整体变好。从不同年份来看,RSEI 均值呈“减—增—减—增”的变化趋势,在

2020 年达到最大值,为 0.575,比 2001 年的 0.512 上升了 12.30%。从不同指标来看,NDVI、WET、LST 和 NDSI 均值总体上均增加,表明在过去 20 a 间,植被覆盖度在逐步提高,而在高植被覆盖区土壤含水量较高,进而使得 WET 增加;同时受城市扩张影响,不透水表面面积增加,NDSI 增大,这与全球变暖及变绿等情况相符合。结合对 RSEI 有正向、负向影响指标的增速可知,各指标对京津冀地区 RSEI 的整体影响为上升,这与 RSEI 整体变化相一致。

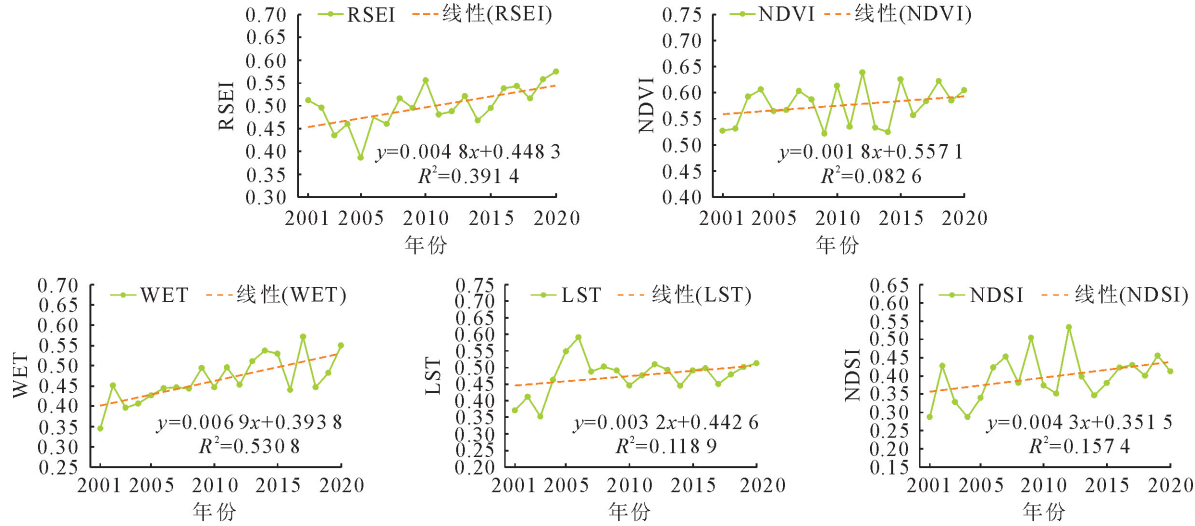


图 2 2001—2020 年京津冀地区 RSEI 和各指标时序变化

Fig. 2 Time series change of RSEI and various indicators in Beijing-Tianjin-Hebei region from 2001 to 2020

2.2.2 变化期的划分 为了确保时间节点划分的科学性和准确性,采用一元线性回归的方式对 RSEI 均值进行线性拟合。根据各散点到拟合曲线的距离来识别生态环境质量发生较大变化的年份,由图 3 可知,2005、2010、2014 年 RSEI 均值到拟合曲线的距离最大。因此,以 2001、2005、2010、2014 年和 2020 年为时间节点,将研究期划分为 4 个变化期,分别为 2001—2005、2005—2010、2010—2014 年和 2014—2020 年,用于后续的京津冀地区及其 4 大功

能区生态环境质量评价和变化分析。
2.2.3 分级统计分析 为了明晰不同区域的生态环境质量状况,对 RSEI 进行等级划分,统计各等级面积占比(图 4)。各年份京津冀地区生态环境质量为差和较差等级的占比分别为 24.95%、59.90%、14.48%、32.60 和 14.06%,呈现“增—减—增—减”趋势;良和优等级占比分别为 32.24%、3.67%、33.83%、15.82%和 40.63%,呈现“减—增—减—增”趋势。此外,2005—2010、2014—2020 年差和较

差等级占比分别减少 45.42%、18.54%，良和优等级占比分别增加 30.16%、24.81%，因此 2005—2010 年的改善情况较为明显。

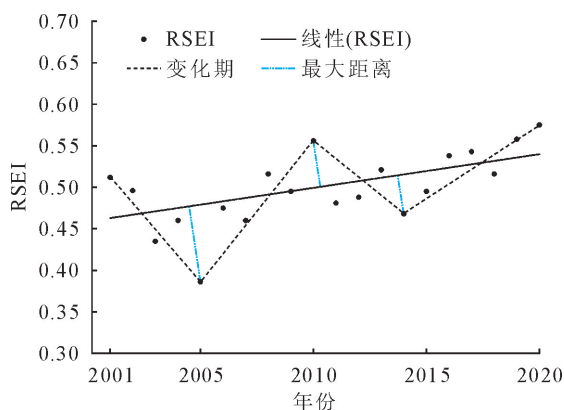


图3 京津冀地区生态环境质量变化期划分

Fig. 3 Division of change periods of ecological environment quality in Beijing-Tianjin-Hebei region

从空间分布来看,京津冀地区生态环境质量整

体呈“西北优、东南差”的空间格局。生态环境质量优良区主要分布于西北部生态涵养区,尤其是北部燕山及西北太行山沿线,地势相对较高,植被类型以林地为主,绿度和湿度指标较高;生态环境质量不好区主要分布于南部功能拓展区,用地类型多为耕地,易受人类活动影响,存在生态环境退化风险,未来生态建设工作应重点关注该地区。

2.3 京津冀地区生态环境质量动态变化分析

根据等级值的升降程度,将变化类型分为明显变差(−2、−3、−4)、变差(−1)、不变(0)、变好(+1)和明显变好(+2、+3、+4)5类,并统计其占比(图6)。从不同变化期来看,2001—2005年的退化程度大于2010—2014年,2005—2010年的改善程度大于2014—2020年。整体来看,2001—2020年生态环境质量不变的占比为48.78%,退化和改善的占比分别为15.35%、35.87%,说明京津冀地区生态环境质量明显改善。

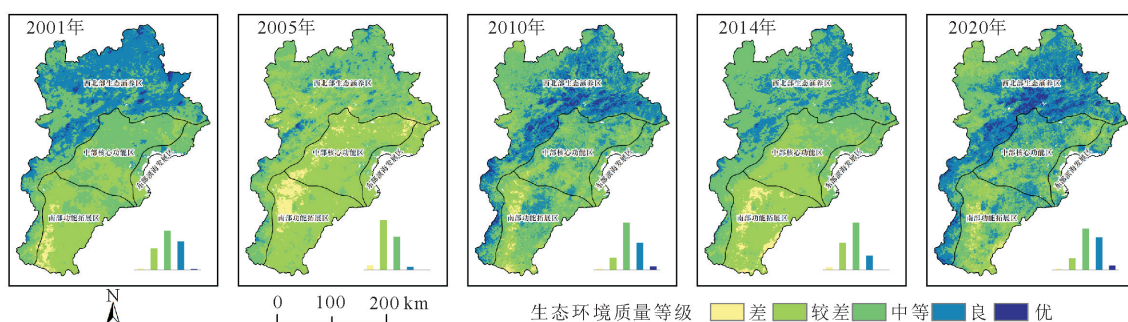


图4 2001—2020年京津冀地区生态环境质量等级空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of ecological environment quality grades in Beijing-Tianjin-Hebei region from 2001 to 2020

从变化轨迹来看(图5),生态环境质量变化程度主要为1个等级,其中退化类型以“良→中等”“中等→较差”和“较差→差”为主,改善类型以“中等→良”“较差→中等”和“差→较差”为主。从空间分布来看(图6),2001—2005年退化区域分布较为广泛,改善区域主要位于南部地区;2005—2010年改善区

域主要位于中北部地区,退化区域较小;2010—2014年退化区域主要位于中南部地区,改善区域分布较为零散;2014—2020年改善区域主要位于中东部和西南部地区,退化区域较小。整体来看,2001—2020年改善区域主要位于中东部和西南部地区,退化区域主要位于西北部地区。

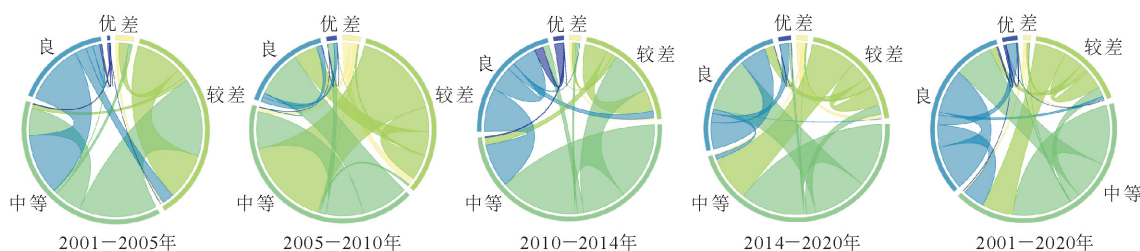


图5 2001—2020年京津冀地区生态环境质量变化轨迹

Fig. 5 Change trajectory of ecological environment quality in Beijing-Tianjin-Hebei region from 2001 to 2020

2.4 各功能区生态环境质量变化分析

根据图7可知,各功能区 RSEI 变化趋势与京津冀地区整体(图2)基本一致,均为波动增长,表明

研究期内各功能区生态环境质量均变好,增速排序为西北部生态涵养区>中部核心功能区>东部滨海发展区>南部功能拓展区。从各等级占比(图8)来

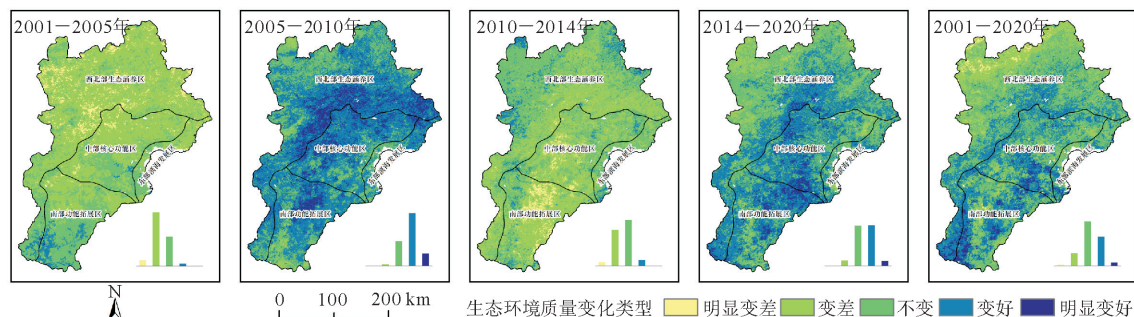


图6 2001—2020年京津冀地区生态环境质量变化监测

Fig. 6 Changes of ecological environment quality in Beijing-Tianjin-Hebei region from 2001 to 2020

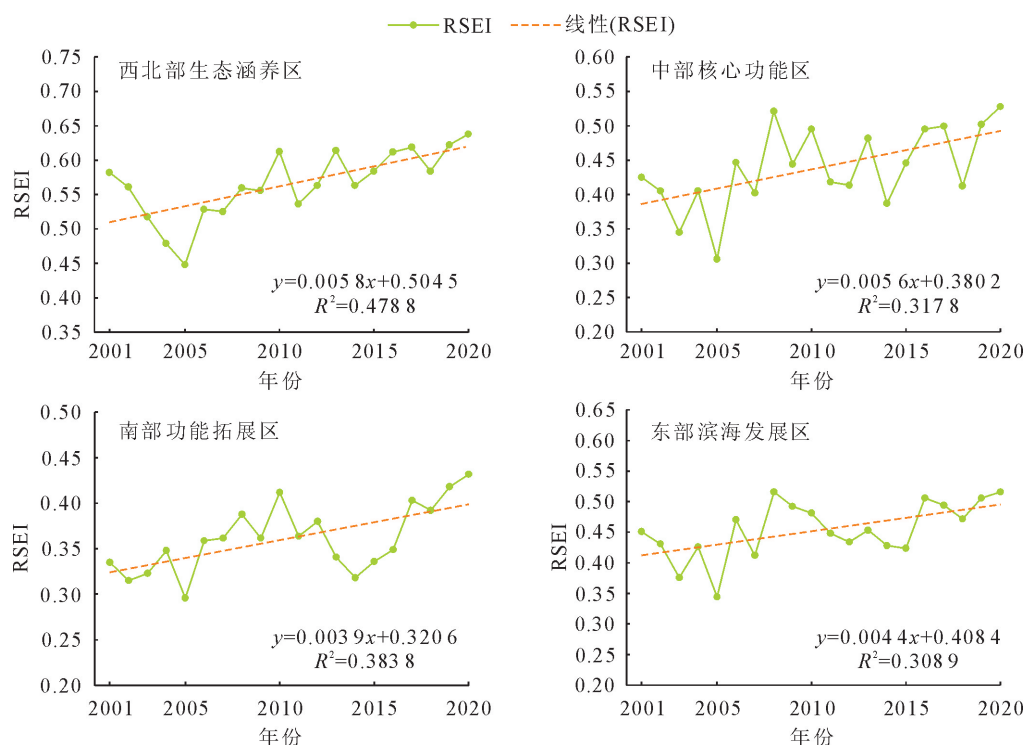


图7 2001—2020年各功能区RSEI时序变化

Fig. 7 Time series change of RSEI in various functional zones from 2001 to 2020

看,西北部生态涵养区优良等级占比最高,为41.42%,生态环境质量较好,主要在于该区域地势相对较高,植被类型多为林地和草地。南部功能拓展区差、较差等级占比最高,为67.68%,生态环境质量较差,主要在于该区域为农业空间,易受耕作方式等人类活动影响。进一步分析变化情况(图9)发现,2001—2020年各功能区生态环境质量均得到了改善,其中南部功能拓展区和中部核心功能区的改善最为显著,面积占比分别为49.66%、45.79%。

2.5 生态环境质量影响因素分析

通过对评价和监测结果分析发现,生态优良区地势较高,下垫面多为林地、草地,气象条件分布有地带性差异;生态脆弱区多为农耕地和城市区,受农业耕作、城市扩张等人类活动的干扰较大。因此,选取气温、降水、高程、人口、GDP及土地利用作为影响因素,用于因子探测,结果见图10。不同因子 q

存在差异,表明各因子对RSEI影响不同。就某一因子 q 与各因子 q 均值关系来说,将影响因子分为主导因素和重要因素2类。其中,京津冀地区主导因素为降水、人口和土地利用,西北部生态涵养区主导因素为高程、土地利用和降水,中部核心功能区主导因素为人口、GDP和降水,南部功能拓展区主导因素为降水、气温和土地利用,东部滨海发展区主导因素为土地利用、人口和GDP。总的来说,4大功能区因发展目标、战略定位不同,生态环境质量主导因素有所差异,未来应根据各功能区的特点,采取一一对应的生态建设和治理措施。

3 结论与讨论

基于MODIS数据,借助GEE平台构建了遥感生态指数(RSEI)模型,对京津冀地区及其4大功能区2001—2020年生态环境质量进行了评估,分析了

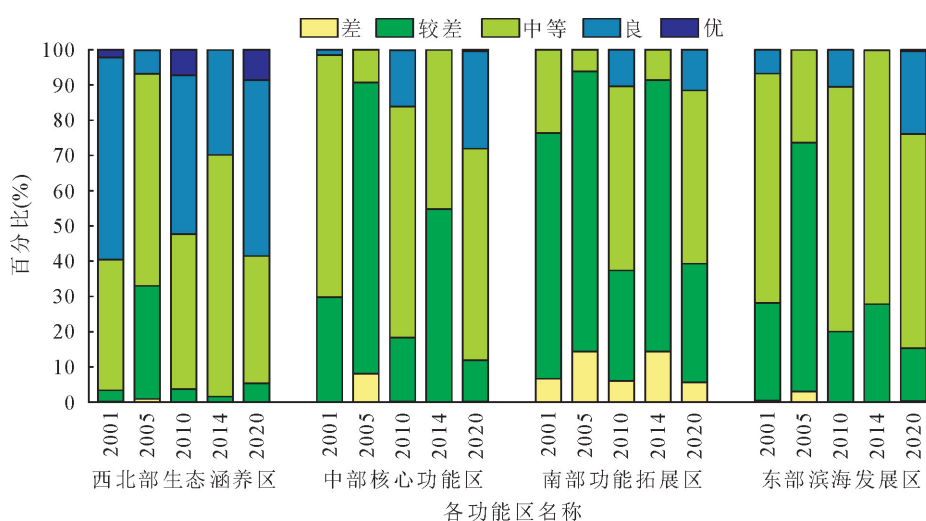


图 8 2001—2020 年各功能区生态环境质量等级所占比重

Fig. 8 Proportion of ecological environment quality grades in various functional zones from 2001 to 2020

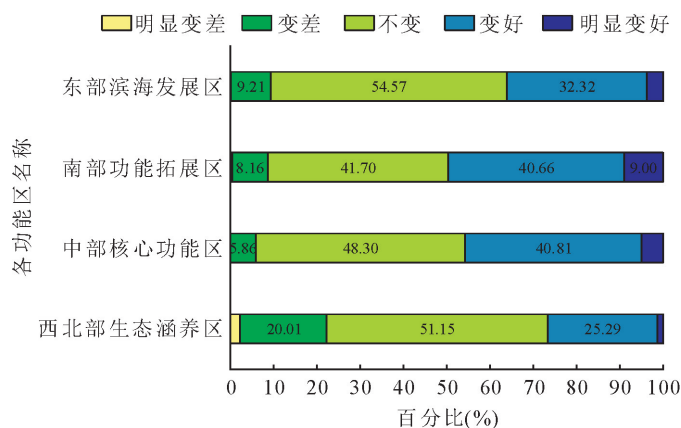


图 9 2001—2020 年各功能区生态环境质量变化监测

Fig. 9 Changes of ecological environment quality in various functional zones from 2001 to 2020

其时空变化特征和影响因素。主要结论包括：

1) 京津冀地区 RSEI 均值由 2001 年的 0.512 增至 2020 年的 0.575, 增幅达 12.30%, 表明生态环境治理成效显著, 生态环境质量整体向好。分阶段来看, 2001—2005 年的退化最为明显, 2005—2010 年的改善最为明显。

2) 京津冀地区生态环境质量整体呈现“西北优、东南差”的分布格局, 35.87% 的区域变好, 以变好 1 个等级为主。生态环境质量波动性明显, 有潜在的变差风险, 未来仍需加强人工干预, 持续扩大生态优良区, 防止反弹和恶化。

3) 各功能区 RSEI 时序变化与京津冀地区整体一致, 均为波动上升。其中, 西北部生态涵养区 RSEI 多年均值最高, 为 0.565, 但张家口市西北部较差, 未来需重点关注; 南部功能拓展区、中部核心功能区的改善最为明显, 面积占比均 >45%。

4) 因子探测结果表明, 京津冀地区生态环境质

量的主导因素为降水、人口和土地利用, 西北部生态涵养区、中部核心功能区、南部功能拓展区和东部滨海发展区影响力最大的因子分别为高程、人口、降水和土地利用。

通过对研究结果分析可知, 区域生态环境变化过程十分复杂, 受自然和人为多重因素的综合驱动。因此, 未来京津冀地区生态建设和治理上, 需统筹兼顾生态效益和经济效益。同时要深入调整产业结构, 优化国土空间发展布局, 划定并严守生态保护红线, 加大生态空间保护与修复力度, 落实并完善京津冀“一核、双城、三轴、四区”协同发展配套政策和法规体系。

利用遥感数据构建遥感生态指数 (RSEI) 模型对京津冀地区生态环境质量进行评价, 能够有效避免单一指标片面性和统计数据滞后性等不利因素的影响。但生态环境存在地域性差异, 因而一些学者在对特定区域分析时对 RSEI 指标进行了适当改

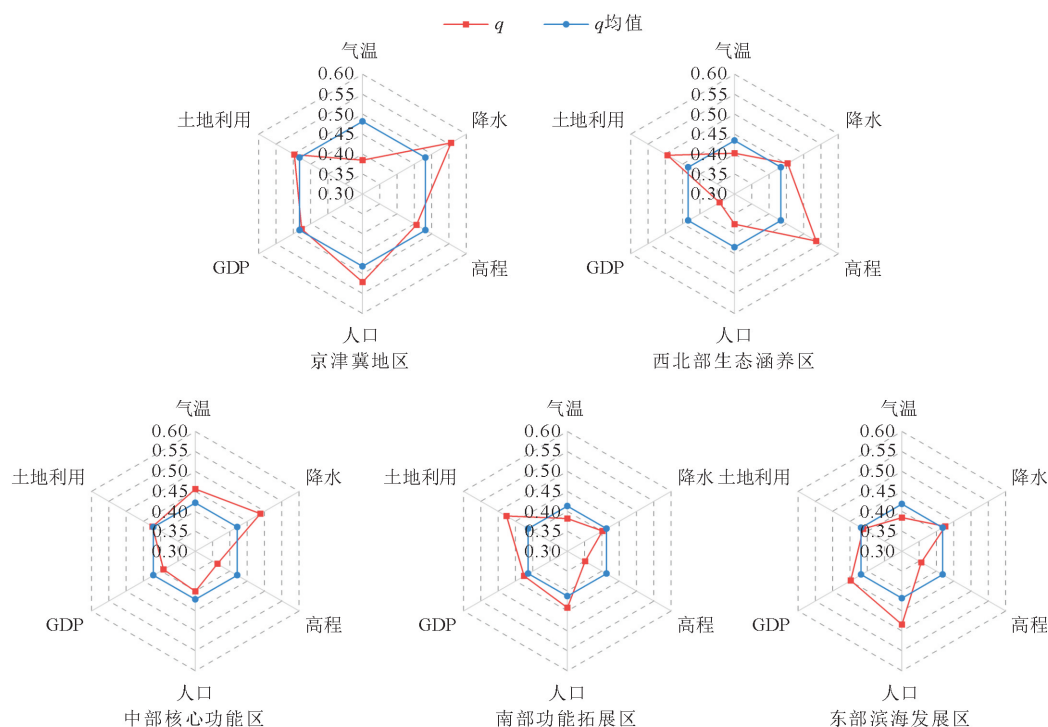


图10 京津冀地区生态环境质量因子探测结果

Fig. 10 Factor detection results of ecological environment quality in Beijing-Tianjin-Hebei region

进。鉴于京津冀地区空气质量、城市扩张等地域特点,未来可引入 $PM_{2.5}$ 、不透水表面等指标,建立适用于该地区的多维度指标体系,对生态环境质量状况作最优评价。

参考文献:

- [1] WANG H, ZHOU S L, LI X B, *et al.* The influence of climate change and human activities on ecosystem service value[J]. *Ecological Engineering*, 2016, 87: 224-239.
- [2] ISLAM A, ISLAM H, SHAHID S, *et al.* Spatiotemporal nexus between vegetation change and extreme climatic indices and their possible causes of change[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 289: 112505.
- [3] COUTTS A M, HARRIS R J, PHAN T, *et al.* Thermal infrared remote sensing of urban heat: hotspots, vegetation, and an assessment of techniques for use in urban planning[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 186: 637-651.
- [4] 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. (in Chinese)
- [5] 胡克宏, 张震. 陕西秦岭山区留坝县生态质量时空特征及影响因素分析[J]. *生态与农村环境学报*, 2021, 37(6): 751-760.
HU K H, ZHANG Z. Spatio-temporal characteristics and driving-factors analysis of ecological quality change in Qinling Mountains of Shaanxi Province: case study in Liuba county, Northwest China[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2021, 37(6): 751-760 (in Chinese)
- [6] 曹辰, 杨国林, 锁旭宏, 等. 基于遥感生态指数的阜新市生态环境变化分析[J]. *西北林学院学报*, 2022, 37(2): 200-207.
- CAO C, YANG G L, SUO X H, *et al.* An analysis of ecological environment change in Fuxin city based on the remote sensing ecological index[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2022, 37(2): 200-207. (in Chinese)
- [7] 张洁, 杨燕琼. 珠江三角洲城市群生态状况变化遥感评价[J]. *西北林学院学报*, 2019, 34(1): 184-191.
ZHANG J, YANG Y Q. Remote sensing evaluation on the change of ecological status of Pearl River Delta Urban Agglomeration[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2019, 34(1): 184-191. (in Chinese)
- [8] ZHANG Y, SHE J Y, LONG X R, *et al.* Spatio-temporal evolution and driving factors of eco-environmental quality based on RSEI in Chang-Zhu-Tan metropolitan circle, central China[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 144: 109436.
- [9] PENG L, WU H W, LI Z H. Spatial-temporal evolutions of ecological environment quality and ecological resilience pattern in the middle and lower reaches of the Yangtze River Economic Belt[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15: 430.
- [10] 吴宜进, 赵行双, 奚悦, 等. 基于 MODIS 的 2006—2016 年西藏生态质量综合评价及其时空变化[J]. *地理学报*, 2019, 74(7): 1438-1449.
WU Y J, ZHAO X S, XI Y *et al.* Comprehensive evaluation and spatial-temporal changes of eco-environmental quality based on MODIS in Tibet during 2006—2016[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(7): 1438-1449. (in Chinese)
- [11] XIA Q Q, CHEN Y N, ZHANG X Q, *et al.* Spatiotemporal changes in ecological quality and its associated driving factors in central Asia[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14: 3500.
- [12] 王渊, 赵宇豪, 吴健生. 基于 Google Earth Engine 云计算的城市群生态质量长时序动态监测——以粤港澳大湾区为例[J].

- 生态学报, 2020, 40(23): 8461-8473.
- WANG Y, ZHAO Y H, WU J S. Dynamic monitoring of long time series of ecological quality in urban agglomerations using Google Earth Engine cloud computing: a case study of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(23): 8461-8473. (in Chinese)
- [13] JIA H W, YAN C Z, XING X G. Evaluation of eco-environmental quality in Qaidam Basin based on the ecological index and GEE[J]. Remote Sensing, 2021, 13: 4543.
- [14] 王振波, 梁龙武, 方创琳, 等. 京津冀特大城市群生态安全格局时空演变特征及其影响因素[J]. 生态学报, 2018, 38(12): 4132-4144.
- WANG Z B, LIANG L W, FANG C L, *et al.* Study of the evolution and factors influencing ecological security of the Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(12): 4132-4144. (in Chinese)
- [15] 左璐, 孙雷刚, 鲁军景, 等. 基于 MODIS 的京津冀地区生态质量综合评价及其时空变化监测[J]. 自然资源遥感, 2022, 34(2): 203-214.
- ZUO L, SUN L G, LU J J, *et al.* MODIS-based comprehensive assessment and spatial-temporal change monitoring of ecological quality in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2022, 34(2): 203-214. (in Chinese)
- [16] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数提取水体信息的研究[J]. 遥感学报, 2005, 9(5): 589-595.
- XU H Q. A study on information extraction of water body with the modified normalized difference water index [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2005, 9(5): 589-595. (in Chinese)
- [17] LOBSEY S E, COHEN W B. MODIS tasseled cap: Land cover characteristics expressed through transformed MODIS data [J]. International Journal of Remote Sensing, 2007, 28(22): 5079-5101.
- [18] 郭泽呈, 魏伟, 庞素菲, 等. 基于 SPCA 和遥感指数的干旱内陆河流域生态脆弱性时空演变及动因分析——以石羊河流域为例[J]. 生态学报, 2019, 39(7): 2558-2572.
- GUO Z C, WEI W, PANG S F, *et al.* Spatio-temporal evolution and motivation analysis of ecological vulnerability in arid inland river basin based on SPCA and remote sensing index: a case study on the Shiyang River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(7): 2558-2572. (in Chinese)
- [19] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
- WANG J F, XU C D. Geodetector: principle and prospective [J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116-134. (in Chinese)
- [20] 高焕霖, 张廷龙, 樊华焯, 等. 基于地理探测器的杨凌示范区生态环境质量影响因素定量分析[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(5): 185-194.
- GAO H L, ZHANG T L, FAN H Y, *et al.* Quantitative analysis of the factors affecting ecological environment quality in Yangling demonstration zone based on geographical detector [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(5): 185-194. (in Chinese)

(上接第 84 页)

- [14] 沈登峰. 不同海拔藏川杨遗传多样性评估及苗期表型关联分析[D]. 北京: 北京林业大学, 2014.
- [15] OOSTERHOUT C V, HUTCHINSON W F, WILLS D P, *et al.* MICRO-CHECKER: software for identifying and correcting genotyping errors in microsatellite data[J]. Molecular Ecology Notes, 2004, 4(3): 535-538.
- [16] PEAKALL R, SMOUSE P E. GenA1Ex 6. 5: genetic analysis in Excel. Population genetic software for teaching and research-an update[J]. Bioinformatics, 2012, 28(19): 2537-2539.
- [17] MANEL S, SCHWARTZ M K, LUIKART G, *et al.* Landscape genetics: combining landscape ecology and population genetics[J]. Trends in Ecology & Evolution, 2003, 8(4): 189-197.
- [18] ROHLF F J. NTSYS-pc: numerical taxonomy and multivariate analysis system-version 2. 1[J]. Applied Biostatistics, 2000.
- [19] PRITCHARD J K, STEPHENS M, DONNELLY P. Inference of population structure using multilocus genotype data[J]. Genetics, 2000, 155(2): 945-959.
- [20] EARL D A, BRIDGETT M. STRUCTURE HARVESTER: a website and program for visualizing STRUCTURE output and implementing the Evanno method[J]. Conservation Genetics Resources, 2012, 4(2): 359-361.
- [21] HAMRICK J L. Isozymes and the analysis of genetic structure in plant populations[J]. Isozymes in Plant Biology, 1989: 87-105.
- [22] 苏晓华, 张绮纹, 张望东, 等. 大青杨及其近缘种的遗传变异和系统关系研究[J]. 林业科学, 1996(2): 118-124.
- SU X H, ZHANG Q W, ZHANG W D, *et al.* The genetic variability and phylogenetic relationship in *Populus ussuriensis* Kom. and its relatives[J]. Scientia Silvae Sinicae, 1996(2): 118-124. (in Chinese)
- [23] ORTEGO J, GUGGER P F, SORK V L, *et al.* Climatically stable landscapes predict patterns of genetic structure and admixture in the Californian canyon live oak[J]. Journal of Biogeography, 2015, 42(2): 328-338.
- [24] TEMUNOVIC M, FRANJIC J, SATOVIC Z, *et al.* Environmental heterogeneity explains the genetic structure of continental and mediterranean populations of *Fraxinus angustifolia* vahl[J]. PLoS One, 2012, 7(8): e42764.
- [25] 吕卓璇. 中国西南地区青杨遗传多样性的 ISSR 研究[D]. 成都: 中国科学院, 2006.