

陈芳森,黄慧萍,杨光,等.基于遥感生态指数的黄河流域生态环境质量变化及影响因素分析[J].中国沙漠,2023,43(4):252-262.

# 基于遥感生态指数的黄河流域生态环境质量变化及影响因素分析

陈芳森<sup>1</sup>,黄慧萍<sup>1,2</sup>,杨光<sup>1</sup>,李旭<sup>1</sup>

(1.中国科学院空天信息创新研究院 国家遥感应用工程技术研究中心,北京 100094; 2.中国科学院大学,北京 100049)

**摘要:**黄河流域在中国社会经济发展和生态安全格局构建方面具有十分重要的地位,同时面临着生态系统退化、水土流失、湿地萎缩等一系列生态问题。掌握黄河流域生态环境质量状况及其时空变化特征,是推进黄河流域生态保护和高质量发展的基础保障。基于长时间序列的遥感生态指数(RSEI)对黄河流域近20年生态环境质量进行动态监测和时空特征分析,并从自然因素、政策措施因素和社会经济因素3个方面对流域生态环境变化的影响因素进行分析。结果表明:黄河流域生态环境质量处于中等水平,2001—2019年RSEI平均值为0.497,增长0.04,呈现整体改善、局部轻微波动的趋势。复杂的自然因素给流域生态保护工作带来困难;而相应的生态保护政策和修复措施则起到积极作用;另外社会经济因素,如人口总数量和夜间灯光总值的大幅增长对生态环境变化产生了区域性扰动。

**关键词:** RSEI; 黄河流域; 生态环境; 动态变化; 影响因素

**文章编号:** 1000-694X(2023)04-252-11

**DOI:** 10.7522/j.issn.1000-694X.2023.00017

**中图分类号:** X171.1

**文献标志码:** A

## 0 引言

黄河流域是中国重要的生态屏障和经济地带,在国家经济社会发展和生态安全方面具有十分重要的战略地位<sup>[1]</sup>。黄河流域范围广阔,地貌和气候类型多样,长期受到人口增长、经济发展以及城市化进程的影响,流域生态环境整体脆弱。2019年9月黄河流域生态保护和高质量发展上升为重大国家战略<sup>[2]</sup>。2021年底,国家通过了《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》,黄河治理工作成为国家宏观生态长期规划的内容。处理好黄河流域生态保护与高质量发展的关系,形成新的发展格局和模式,具有重要的战略意义<sup>[3]</sup>。

推进黄河流域高质量发展需要对黄河流域的生态环境现状和影响因素有清晰且全面的认识,遥感技术具有实时、快速进行大范围周期性观测的优势,已成为区域生态环境质量评估的重要手段<sup>[4]</sup>。基于遥感数据开展生态环境监测工作,通常采用各

类遥感指数对区域生态环境质量进行监测与评估<sup>[5]</sup>。常用的遥感指数如NDVI<sup>[6-7]</sup>、水体指数<sup>[8-9]</sup>、地表温度<sup>[10-11]</sup>等,并结合降水、气候等驱动因子对区域生态环境进行动态监测。单一指标不能完全反映区域生态环境的综合情况,因此基于多个遥感指标的遥感生态指数(Remote Sensing Ecological Index, RSEI)在区域生态环境质量评价方面得到了广泛应用<sup>[12]</sup>,彭丽媛等<sup>[13]</sup>基于1993—2016年RSEI数据对玛纳斯河流域自然生态环境进行评价,农兰萍等<sup>[14]</sup>基于RSEI模型对昆明市生态环境进行动态监测。RSEI指数综合反映了生态环境状况的重要指标,具有客观性、可视化效果好等优势,适合对区域尺度范围内开展环境变化监测。当前,针对黄河流域高质量发展的研究很多,不同学者从生态空间时空格局演化<sup>[15]</sup>、重大工程改善生态环境<sup>[16]</sup>、生态环境与社会经济可持续性发展模拟<sup>[17]</sup>、新型城镇化与生态环境耦合<sup>[18]</sup>、绿色发展水平时空演变<sup>[19]</sup>、综合评价体系<sup>[20]</sup>等多个方面对黄河流域发展的关键问题进

收稿日期:2022-04-07; 改回日期:2023-03-07

资助项目:高分辨率对地观测系统重大专项(00-Y30B01-9001-22/23)

作者简介:陈芳森(1983—),女,北京人,博士,助理研究员,主要从事城市规划与遥感监测研究。E-mail: chenfm@aircas.ac.cn

通信作者:黄慧萍(E-mail: huanghp@aircas.ac.cn)

行了研究探讨。当前,全面实现对黄河流域生态环境长期动态监测,分析其变化特征和主要影响因素,对于有效推进黄河流域生态保护和修复治理工作有重要意义,符合当前国家战略需求。

目前基于遥感生态指数的动态监测研究主要以城市尺度或者小流域范围作为研究对象。基于该指数分析,对于2000年后整个黄河流域大尺度、长时间序列的生态质量变化的研究还未有报道。为此,本研究充分发挥 *RSEI* 指数优势,对2001—2019年黄河流域生态环境质量进行动态变化特征分析,并融合同时间序列的夜间灯光数据、人口格网数据,从自然因素、政策措施因素和社会经济发展因素3个方面综合分析黄河流域生态环境的变化成因,为推进黄河流域生态保护和高质量发展提供

技术基础。

## 1 研究区概况

黄河发源于中国青海省巴颜喀拉山脉,在山东东营市垦利区注入渤海,流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南、山东9个省区,流域面积80万 km<sup>2</sup>。为便于研究,本文根据通常以河口与桃花峪作为黄河上、中、下游划分地点为标准,将流域内青海、四川、甘肃、宁夏与内蒙古境内区域视作黄河上游;山西、陕西以及桃花峪所在郑州市(含)以西河南地区视为中游,以东范围视为下游;同时将黄河流域全境划分为4个水系流域:黄河干流水系、汾河水系、渭河水系和鄂尔多斯内流区(图1)。

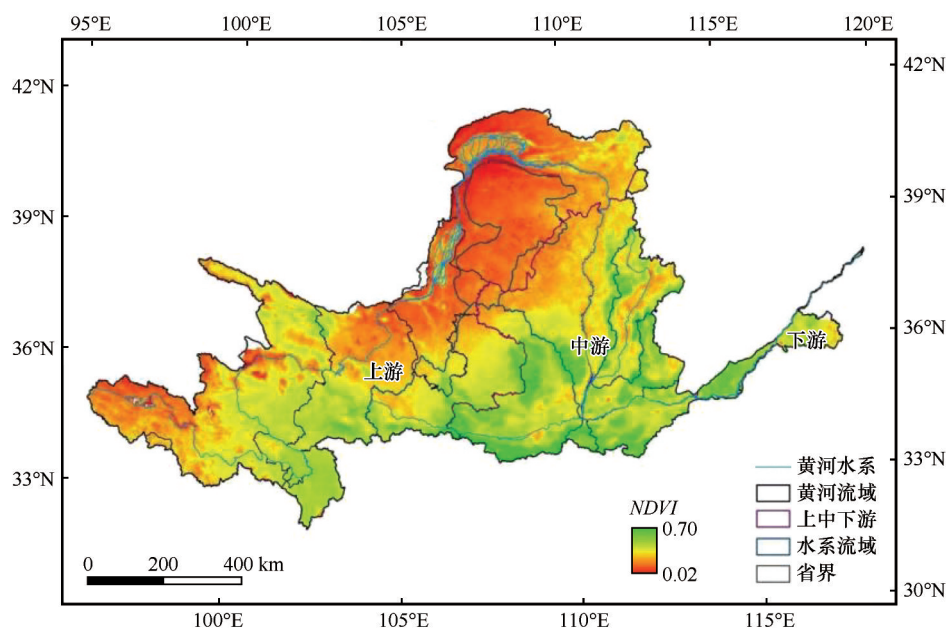


图1 研究区域

Fig.1 The location of research area

黄河流域大部分区域位于中国中西部生态脆弱地区,是自然资源与历史文化资源丰富的区域,具有重要的生态安全与社会经济地位。根据人口普查数据,2020年底黄河流经的九省区共有人口32 184.25万,占全国的22.30%<sup>[21]</sup>。2021年,黄河流域水资源量占全国的2%,承担了全国12%的人口、17%的耕地以及50多座大中城市的供水任务<sup>[22]</sup>。基于黄河流域的战略性和生态脆弱性考虑,迫切需要以生态保护为前提,摸清黄河流域内生态家底实时状况,为黄河重点生态区的生态保护治理、黄河滩区综合治理与管护提供决策支持。

## 2 数据与方法

### 2.1 长时间序列遥感生态指数(*RSEI*)

#### 2.1.1 数据来源

本研究采用的长时间序列 *RSEI* 来自中国高分辨率生态环境质量数据集(China's High-resolution Eco-Environmental Quality, CHEQ)<sup>[23]</sup>。该数据集提供2001—2019年千米格网数据的历史生态环境质量,并以TIFF格式进行存储,数据介于0~1。数据集时间分辨率为年度,空间范围覆盖了整个中国大陆,向全球所有用户公开发布,数据免费开放。验

证结果表明,CHEQ数据集与中国生态环境部提供的环境指数(*EI*)高度一致。本研究选取了CHEQ数据集2001—2019年*RSEI*数据,用黄河流域矢量界线进行裁剪。

### 2.1.2 *RSEI*的计算方法

*RSEI*选用绿度(Normalized Difference Vegetation Index, *NDVI*)、湿度(*Wet*)、热度(Land Surface Temperature, *LST*)、干度(Normalized Difference Soil Index, *NDSI*)4个指标来综合反映区域的生态环境质量,作为生态环境质量状况动态变化的评价指标。

绿度指标通过归一化植被指数(*NDVI*)<sup>[24]</sup>表示,可以对植被长势进行估算。

$$NDVI = (\rho_{NIR} - \rho_{Red}) / (\rho_{NIR} + \rho_{Red}) \quad (1)$$

式中: $\rho_{NIR}$ 与 $\rho_{Red}$ 分别代表近红外波段、红外波段反射率。

湿度(*Wet*)采用缨帽变换提取分量<sup>[25]</sup>,用以指示土壤和植被的水分信息。不同来源影像对应变换公式不同,Landsat TM、Landsat ETM、Landsat OLI的算式<sup>[26]</sup>分别为:

$$0.0315\rho_{Blue} + 0.2021\rho_{Green} + 0.3102\rho_{Red} + 0.1594\rho_{NIR} - 0.6806\rho_{SWIR1} - 0.6109\rho_{SWIR2} \quad (2)$$

$$0.2626\rho_{Blue} + 0.2141\rho_{Green} + 0.0926\rho_{Red} + 0.0656\rho_{NIR} - 0.7629\rho_{SWIR1} - 0.5388\rho_{SWIR2} \quad (3)$$

$$0.1511\rho_{Blue} + 0.1973\rho_{Green} + 0.3283\rho_{Red} + 0.3407\rho_{NIR} - 0.7117\rho_{SWIR1} - 0.4559\rho_{SWIR2} \quad (4)$$

式中: $\rho_{Blue}$ 、 $\rho_{Green}$ 、 $\rho_{Red}$ 、 $\rho_{NIR}$ 、 $\rho_{SWIR1}$ 、 $\rho_{SWIR2}$ 分别为各波段的反射率。

热度指标用地表温度(*LST*)代表,可采用Landsat TM影像大气校正法进行反演<sup>[27]</sup>。

$$L_\lambda = [\varepsilon B(LST) + (1 - \varepsilon)L_\downarrow] / \tau + L_\uparrow \quad (5)$$

$$B(LST) = [L_\lambda - L_\uparrow - \tau(1 - \varepsilon)L_\downarrow] / \tau\varepsilon \quad (6)$$

$$LST = K_2 / \ln(K_1 / B(LST) + 1) \quad (7)$$

式中: $L_\lambda$ 为热红外辐射亮度值; $\varepsilon$ 为地表比辐射率; $LST$ 为真实地表温度; $B(LST)$ 为黑体热辐射亮度; $\tau$ 为透过率; $L_\uparrow$ 和 $L_\downarrow$ 分别为大气向上、向下辐射亮度。Landsat TM:  $K_1=607.76 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ ,  $K_2=1260.56 \text{ K}$ ; Landsat OLI:  $K_1=774.89 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ ,  $K_2=1321.08 \text{ K}$ 。

干度指数通过计算裸土指数(*SI*)<sup>[28]</sup>和建筑指数(*IBI*)<sup>[29]</sup>来反映干旱半干旱地区地表裸露以及社区建筑用地造成的土地干化与退化状态,从而表示干度指数。其公式为:

$$NDSI = (SI + IBI) / 2 \quad (8)$$

其中

$$SI = [(\rho_{SWIR1} + \rho_{Red}) - (\rho_{Blue} + \rho_{NIR})] / [(\rho_{SWIR1} + \rho_{Red}) + (\rho_{Blue} + \rho_{NIR})]$$

$$IBI = \{2\rho_{SWIR1} / (\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR}) - [(\rho_{NIR} / (\rho_{NIR} + \rho_{Red}) + \rho_{Green} / (\rho_{Green} + \rho_{SWIR1}))] / \{2\rho_{SWIR1} / (\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR}) + [(\rho_{NIR} / (\rho_{NIR} + \rho_{Red}) + \rho_{Green} / (\rho_{Green} + \rho_{SWIR1}))]\} \} \quad (9)$$

最后,利用公式(10)对上述指数进行归一化处理,归一化后各指标的数值范围应在 $[0, 1]$ 。利用*ENVI*中的主成分分析模块可以得到的第1主成分PC1,并得到初始生态指数,进而通过公式(11)获得像元的*RSEI*<sup>[12,30]</sup>。

$$NI_i = (I_i - I_{\min}) / (I_{\max} - I_{\min}) \quad (10)$$

$$RSEI = (PC1 - PC1_{\min}) / (PC1_{\max} - PC1_{\min}) \quad (11)$$

## 2.2 夜间灯光数据和千米网格人口数据

本研究选取了2001年和2019年夜间灯光数据、千米网格人口数据,用黄河流域矢量界线进行裁剪,作为研究生态环境质量变化影响因素的数据基础。本研究基于ArcGIS系统处理得到2001年和2019年人口和千米网格人口数据,并将结果按照“减少”、“基本不变”和“增加”进行三级分类显示灯光和人口变化分布。

## 2.3 Hurst指数计算

在分析*RSEI*变化趋势时,本研究利用Hurst指数(*H*)<sup>[31-34]</sup>检测一个时间序列的波动范围如何随时间跨度进行变化。

$$E \left[ \frac{R(n)}{s(n)} \right] = A_n^H as \quad n \rightarrow \infty \quad (12)$$

式中: $n$ 是时间序列观测点的个数,代表时间跨度大小; $R(n)$ 是这 $n$ 个观测点的变化范围; $s(n)$ 是这些点的标准差。使用 $s(n)$ 对 $R(n)$ 进行标准化,得到 $S(n)/R(n)$ ,它是以标准差重新标度过的范围,称为重标极差(Rescaled range); $A$ 是常数; $H$ 就是Hurst指数。 $H=(0, 1)$ ,当 $H=0.5$ 时,序列没有自相关性; $H>0.5$ 时,序列具有正相关性;当 $H<0.5$ 时,序列有负相关性。

## 3 结果与分析

### 3.1 黄河流域*RSEI*总体分析

黄河流域2001—2019年*RSEI*平均值为0.497,



流域范围内的9个省(区)山西、内蒙古、山东、河南、四川、陕西、甘肃、青海和宁夏的  $RSEI$  均值分别为 0.523、0.437、0.402、0.495、0.570、0.532、0.494、0.534、0.446(图2)。根据  $RSEI$  对生态环境质量等级划分原则<sup>[30]</sup>, 将  $RSEI$  结果值从低到高以 0.2 为间隔进行划分, 黄河流域生态环境质量分为 5 个等级, 分别代表生态环境质量差[0, 0.2]、较差[0.2, 0.4]、中等[0.4, 0.6]、良好[0.6, 0.8]和优[0.8, 1.0]的 5 个等级。黄河流域近 20 年  $RSEI$  均值为 0.497, 因此该区域生态环境质量平均保持中等水平。9 个省(区)中, 山西、陕西、四川和青海的  $RSEI$  均值超过 0.5, 除四川省部分地区, 青海省  $RSEI$  均值最高(由于四川省北部仅有小面积处于黄河流域, 因此不做重点

讨论)。甘肃、山东和内蒙古  $RSEI$  均值低于黄河流域, 其中山东省  $RSEI$  均值为最低。

从全流域看, 黄河流域生态环境质量基本保持稳定, 处于中等水平, 呈现轻微波动性变化, 各省(区)趋势相似。2019 年, 黄河流域  $RSEI$  为 0.499, 与 2001 年相比增长了 0.04, 生态环境质量整体略有改善。从各省(区)情况看, 2019 年除山东省生态环境质量处于较差级别, 其余各地区仍处于中等水平。山西、河南、四川、陕西和宁夏 5 个省(区)  $RSEI$  波动在 -0.003 和 +0.003 之间(包含), 变化轻微。此外内蒙古和甘肃生态环境质量整体增加了 0.007; 而青海  $RSEI$  则持续处于最高水平, 并且增幅最大, 为 3.18%; 山东一直处于生态环境质量最低水平,  $RSEI$  降幅最大, 为 1.86%。

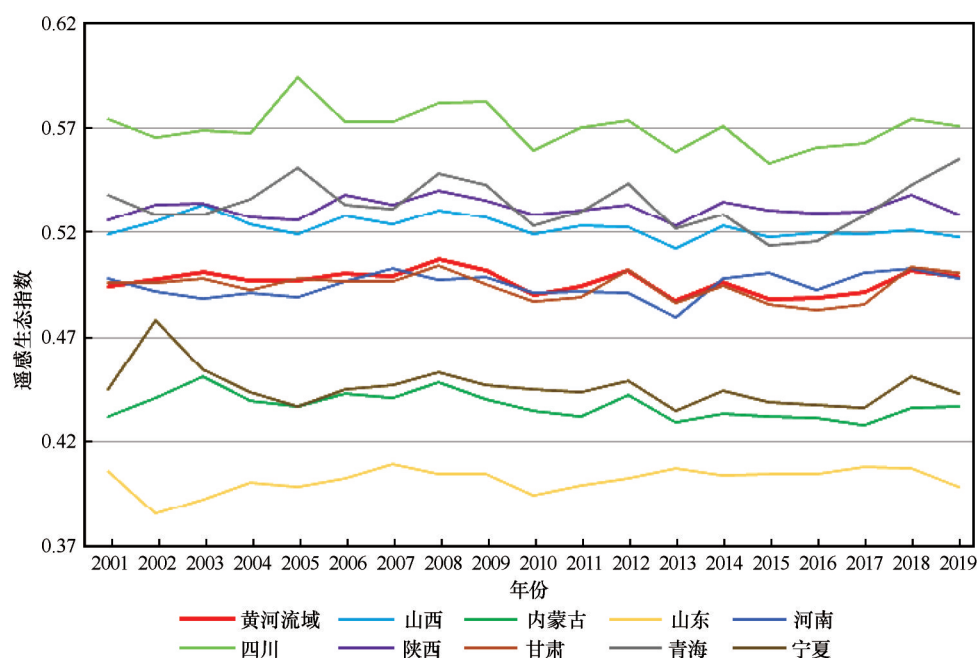


图2 2001—2019年黄河流域遥感生态指数

Fig.2  $RSEI$  of the Yellow River Basin from 2001 to 2019

对 2001—2019 年黄河流域 9 个省(区)的  $RSEI$  进行 Hurst 指数计算(表 1), 来体现  $RSEI$  在时间序列上的自相关性, 反映其变化稳定性和序列中隐藏的长期趋势。黄河流域的  $H=0.63$ , 其中内蒙古、山东省、河南、四川、甘肃和青海  $H \geq 0.55$ , 均具有弱正相关性, 表明区域生态环境发展可找到一定的持续性变化规律, 即体现出黄河流域整体保持了改善的趋势, 内蒙古、甘肃、四川和青海趋势相同; 山东与河南生态环境质量则略微存在持续变差的发展性。其他地区  $H \approx 0.5$ , 数据相关性不大, 可视为没有明显变化规律。此外, 也可推断黄河流域生态环境仍存

在继续改善的可能。

### 3.2 黄河流域 $RSEI$ 阶段性变化

选取 2001、2005、2010、2015、2019 年对黄河流域  $RSEI$  进行分析(图 3)。2001—2019 年的 5 个代表年份  $RSEI$  分布变化不大, 生态差的区域集中在黄河流域北部内蒙古、宁夏黄河干流上游沿岸地区, 生态较差区域则多分布在黄河流域中、下游以及渭河水系内甘肃、陕西、山西和山东境内部分地区。

表 2 列出不同年份 5 个等级对应面积与所占比例。2001—2019 年, 处于中等及以上生态环境质量

表 1 2001—2019 年黄河流域及各省(区) *RSEI* 变化  
Hurst 指数  
Table 1 The Hurst exponent of *RSEI* in the Yellow River  
Basin from 2001 to 2019

区域	Hurst 指数
黄河流域	0.63
山西	0.49
内蒙古	0.65
山东	0.55
河南	0.55
四川	0.58
陕西	0.49
甘肃	0.64
青海	0.60
宁夏	0.49

等级的土地面积始终占据主导地位,占比在 85% 左

右,并且呈波动性微减少的趋势,其中处于中等水平的面积最多。具体分析发现:处于最差级别的面积占比最少,并且从 2001 年的 2.04% 减少到 2019 年的 1.36%;处于较差级别的面积占比增加,处于中等以下的面积整体增加。同时,处于良好和优等质量的面积总体增加,其中优等质量面积逐年稳步增长,20 年增加了 6 938.73 km<sup>2</sup>;同期,处于生态良好等级的面积波动性增加,2005 年达到一个高位,之后有所减少,2019 年又逐步升至最高点,此趋势与区域生态指数变化相符。可见,流域生态环境在整体微改善的同时,近 5 年变好较快。

为了更好了解黄河流域生态环境的变化特征,本研究以遥感生态指数等级图为基础对相邻各年份的遥感生态指数进行差值计算,将得到的结果按区间分为 5 个等级进行变化检测,包括明显恶化-2: (-0.4, -0.2]、轻度恶化-1: (-0.2, -0.05]、不变 0:

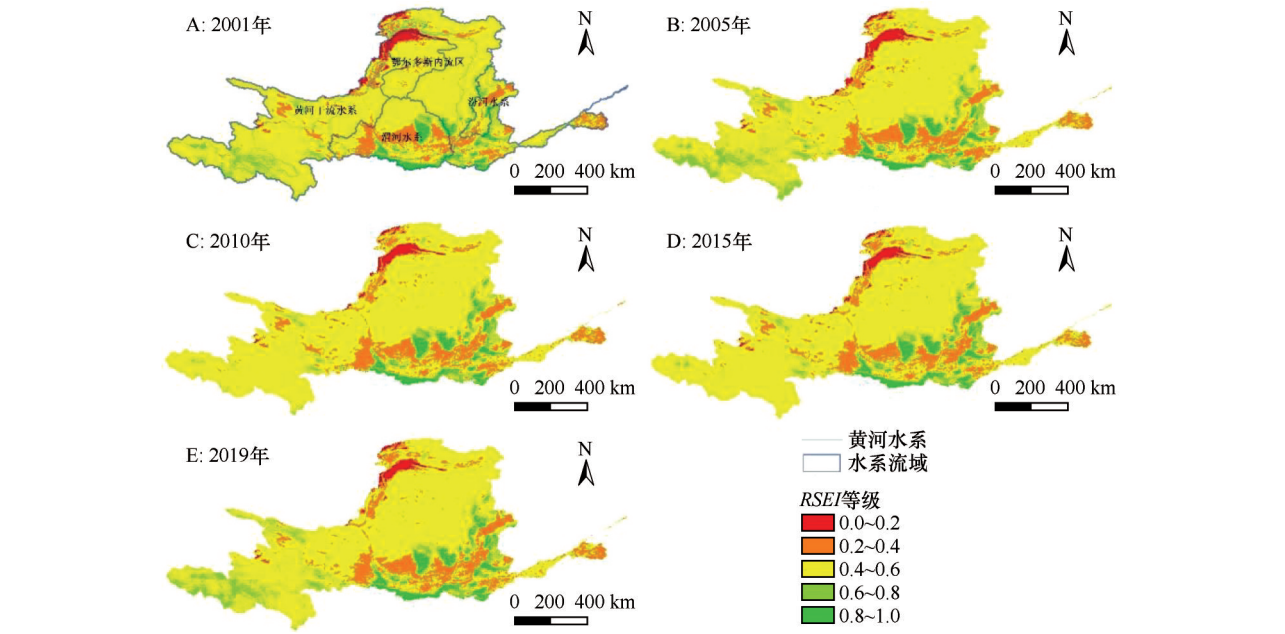


图 3 2001—2019 年黄河流域 *RSEI* 等级分布  
Fig.3 *RSEI* distribution of the Yellow River Basin in 2001–2019

表 2 2001—2019 年各期黄河流域生态环境质量分级统计 Table 2 Statistics of grading of the eco-environment quality from 2001 to 2019										
<i>RSEI</i> 等级	2001 年		2005 年		2010 年		2015 年		2019 年	
	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%
差(0.0~1.2)	16 190.43	2.04	15 317.42	1.93	12 777.75	1.61	11 984.10	1.51	10 793.62	1.36
较差(0.2~0.4)	96 666.42	12.18	105 634.65	13.31	111 904.48	14.10	107 698.14	13.57	110 237.81	13.89
中等(0.4~0.6)	611 823.84	77.09	583 728.67	73.55	606 347.66	76.40	60 859.88	76.68	575 871.55	72.56
良好(0.6~0.8)	51 269.71	6.46	68 571.25	8.64	40 793.55	5.14	40 634.82	5.12	72 222.04	9.10
优(0.8~1.0)	17 698.37	2.23	20 396.77	2.57	21 825.34	2.75	24 761.84	3.12	24 523.75	3.09

(-0.05, 0.05)、轻度改善1:[0.05, 0.2)、明显改善2:[0.2, 0.4)(图4)。与此同时,利用五期生态指数等级图转化矢量数据,计算阶段性统计各变化级别的

面积和生态等级变化矩阵。最终根据上述数据结果分析黄河流域生态环境质量的时空变化特征(表3)。

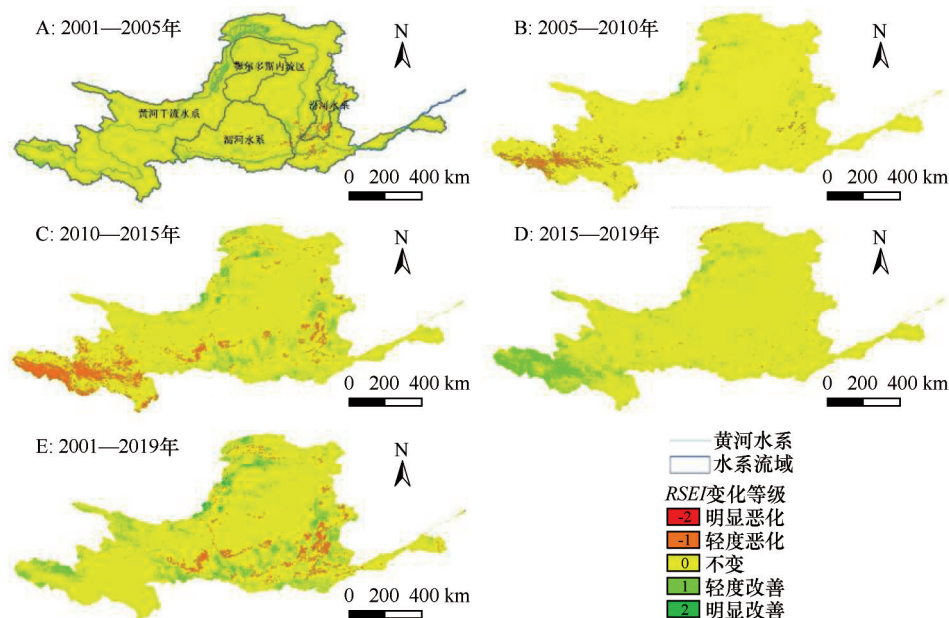


图4 2001—2019年分阶段黄河流域遥感生态指数变化分级

Fig.4 The grades of RSEI change in the Yellow River Basin from 2001 to 2019

2001—2019年,黄河流域超过85.57%的区域生态环境质量无明显变化,基本保持稳定状态。整体有9.3%的土地生态环境变好,其中有0.43%的区域环境明显改善;另有5.14%的区域环境恶化,近0.01%的地区是明显恶化。明显改善和明显恶化的土地整体占比很低,特别是明显恶化的土地基本可忽略不计。其中,由较差变差的面积为0.003万 $\text{km}^2$ ,中等变较差和差的面积分别为3.6万 $\text{km}^2$ 和0.0008万 $\text{km}^2$ ,由良好变中等的面积为0.41万 $\text{km}^2$ ,由优变良好的为0.094万 $\text{km}^2$ 。同时,由差变较差和中等的分别为0.43万 $\text{km}^2$ 和0.1万 $\text{km}^2$ ,较差变成中等和良好的分别为2.64万 $\text{km}^2$ 和0.002万 $\text{km}^2$ ,由中等变成良好和优的分别为3.20万 $\text{km}^2$ 和0.006万 $\text{km}^2$ ,由良好变优的为0.79万 $\text{km}^2$ 。从图4可见,生态环境质量改善明显区域主要分布在内蒙古和宁夏境内黄河干流上游沿岸部分地区,变差区域多分布在渭河水系甘肃省境内和黄河中下游汾河水系山西省部分地区,而上游青海省境内以及黄河腹地鄂尔多斯内流区生态环境变化不大。总体看生态环境改善区域面积大于变差区域。

分阶段看,2001—2005年,明显改善和轻度改善的土地面积共占比2.12%,轻度恶化和明显恶化

的土地则占比1.47%,生态环境改善的区域略高于恶化的区域,改善的部分主要是较差的变成中等和中等变成良好,分别为1.12万 $\text{km}^2$ 和2.43万 $\text{km}^2$ 。2005—2010年和2010—2015年,变好的土地面积占比分别为2.09%和4.05%,处于增长状态。轻度恶化的土地面积占比分别为5.2%和9.49%,增长较快。其中,2005—2010年良好变为中等和中等变为较差的土地面积最多,分别为3.14万 $\text{km}^2$ 和1.82万 $\text{km}^2$ ;2010—2015年,较差变为中等的土地面积最多,为1.79万 $\text{km}^2$ 。这两个时期黄河流域生态环境恶化的面积区域在不断增多,主要在青海省黄河上游地区。2015—2019年,生态环境变好的土地面积占比接近8%,而变差的土地占比仅为0.5%左右,较差变为中等和中等变为良好的面积分别为1.46万 $\text{km}^2$ 和3.42万 $\text{km}^2$ ,变好的区域主要分布在青海省黄河源头地区,之前恶化的地区在迅速恢复。

总体来说,黄河流域生态环境质量“不变”的区域始终处于主导地位,环境改善的区域明显多于恶化的区域。分阶段看,在进入21世纪初期生态环境略有改善,2005—2015年,生态环境略有波动性变差,特别是2010—2015年,变差区域相对较大。2015年之后,生态环境质量改善,生态环境变好的区域

表 3 2001—2019 年黄河流域生态等级变化矩阵(km<sup>2</sup>)  
Table 3 Transition matrix of the environment quality of Yellow River Basin during 2001–2019 (km<sup>2</sup>)

时期	生态等级	差	较差	中等	良好	优
2001—2005 年	差	14 209.43	1 200.04	24.58	0	0
	较差	388.58	84 916.09	11 203.92	0	0
	中等	0	19 688.99	567 961.91	24 259.59	0.02
	良好	0	0	4 117.97	44 557.44	3 148.87
	优	0	0	0	401.26	17 570.12
2005—2010 年	生态等级	差	较差	中等	良好	优
	差	11 892.95	2 461.84	227.70	0	0
	较差	252.63	91 353.69	14 221.52	0	0
	中等	0	18 215.82	560 531.70	4 557.84	0
	良好	0	0	31 369.48	35 229.84	2 621.56
	优	0	0	0	1 186.95	19 525.52
2010—2015 年	生态等级	差	较差	中等	良好	优
	差	10 951.09	1 170.59	17.28	0	0
	较差	447.96	93 665.28	17 911.84	0	0
	中等	0.05	12 695.18	587 846.21	5 831.89	0
	良好	0	0	2 953.21	34 212.21	3 796.73
	优	0	0	0	743.30	21 406.21
2015—2019 年	生态等级	差	较差	中等	良好	优
	差	9 859.42	1 485.90	56.26	0	0
	较差	428.81	92 552.13	14 566.67	10.74	0
	中等	0.07	16 272.63	558 220.00	34 193.03	0
	良好	0	0	2 465.98	36 681.19	1 645.22
	优	0	0	0	1 912.39	23 298.58
2001—2019 年	生态等级	差	较差	中等	良好	优
	差	10 024.77	4 349.70	1 043.72	0	0
	较差	254.43	69 928.60	26 350.44	21.51	0
	中等	8.44	36 049.29	543 791.21	31 978.42	57.83
	良好	0	0	4 109.16	39 861.21	7 858.76
	优	0	0	0	941.34	17 020.12

明显高于生态环境恶化区域,趋向于“变好”的方向发展。

3.3 生态环境质量变化影响因素

20 年间该区域大部地区整体保持生态环境稳定状态,同时存在一定波动性变化和地域性特征。本研究从自然因素、政策措施因素和社会经济因素 3 个方面分析黄河流域生态环境变化的原因。

3.3.1 自然因素

黄河流域地域辽阔,山脉众多,东西高差悬殊,上中下游地貌差异大,地形、地貌复杂,各个地区具备自己的自然条件特征导致其生态环境脆弱性强。同时,由于流域由东向西横跨整个中国北方地区中纬度地带,范围广阔,受大气环流和季风环流影响,气候条件复杂。流域内温差悬殊大,降雨分布不均,整体呈现冬干春旱、夏秋多雨的特点,并且冰



雹、沙尘暴和扬沙多,环境灾害频繁,导致流域生态环境易受气候条件和灾害天气扰动。加之整体气候变暖,干旱、季风交互作用,促使各类土壤侵蚀和土地荒漠化情况加剧。上游局部地区生态系统退化、水源涵养功能降低;中游水土流失严重,汾河等支流被污染;下游生态流量偏低、一些地方河口湿地萎缩等。复杂的地理条件和气候特征,导致流域内生态环境问题复杂,治理困难,成为干扰生态环境变化的天然影响因素。

### 3.3.2 政策措施因素

基于黄河流域的重大战略地位,国家一直在营造积极的治黄政策环境。改革开放以来,国家秉承“维持黄河健康生命”的治黄理念。进入21世纪,国家对黄河治理更加重视。自2006年开始,随着西部大开发每五年规划的逐级提出,黄河上游地区成为生态保护与建设的重点区域。2019年国家首次将“黄河流域生态保护和高质量发展”纳入区域协调国家级战略。与此同时,国家切实贯彻生态保护政策与理念,重视大江大河流域的生态保护工作,在黄河流域推出了“天保工程”、退耕还林(草)工程、三江源建设和保护工程等一系列生态修复与保护

工程措施,并取得显著成效。2000—2020年,黄河流域森林面积净增64 314 km<sup>2</sup>,其中青海省造林效果突出,工程区林地覆盖率增长6%<sup>[35]</sup>。2000—2015年,黄土高原全区林草植被面积在不断扩大,有1 499.32 km<sup>2</sup>的农田转为草地,1 842.91 km<sup>2</sup>的草地转为落叶阔叶林和常绿针叶林<sup>[36]</sup>。2013—2020年流域平均水资源总量比1956—2000年增加了22.19%。青海省黄河源头地区受到重点保护,近5年地表水出境水量增加一倍<sup>[37]</sup>。可见,良好的政策导向和全面的植被保护措施对黄河流域,特别是上游源头地区生态环境起到积极影响。

### 3.3.3 社会经济因素

对2001—2009年黄河流域夜间灯光数据和人口总数量变化分布进行分析,黄河流域大部分区域以上两项指标处于基本不变状态,主要分布于上中游农村地区。同时,人口与灯光增加区域则集中在黄河上游干流沿岸内蒙古和宁夏部分大城市,如呼和浩特、包头;中游汾河水系和渭河水系沿岸大部分地区,特别是陕西省西安、咸阳市和山西省太原、晋中市,以及中、下游河南省和山东平原地区。这与生态环境质量较差及变化相对强烈区域大部分吻合(图5)。

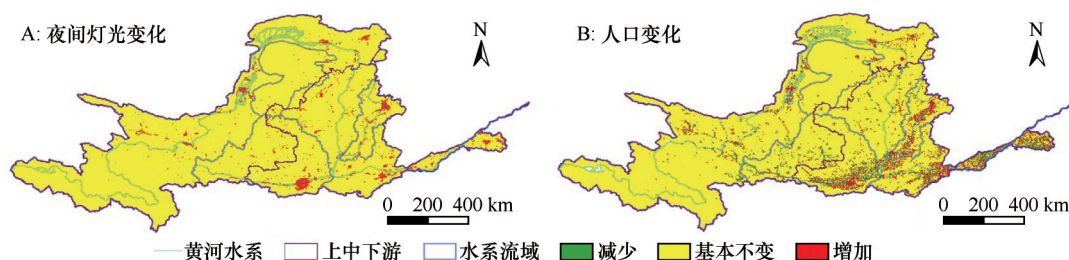


图5 2001—2019年黄河流域夜间灯光和人口变化分布

Fig.5 The change of population and nightlight distribution in the Yellow River Basin from 2001 to 2019

早期,黄河流域中、上游内陆地区城市化率低、城市建设规模薄弱。进入21世纪,伴随西部大开发工程推进,流域内特别是水系丰富的平原地区城市化速度稳步提升,社会经济发展迅速。2001—2019年,黄河流域内常住人口总数量和夜间灯光总值呈大幅增长态势(图6),区域内常住人口从8 445.36万人增至9 664.75万人;同期,区域内夜间灯光值从2 203.90万单位增至13 870.94万单位,增长了5.29倍。

当前,中国整体经济主体向南推移,黄河流域经济发展区域差异性明显,且工业化也逐步滞后于

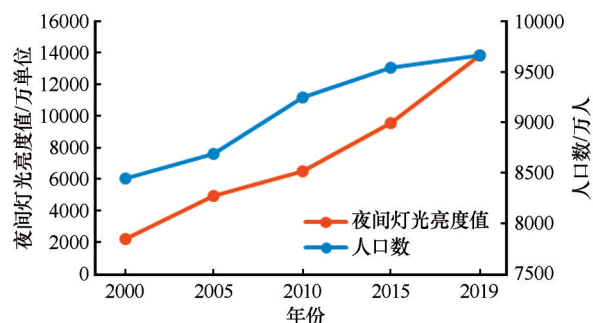


图6 2001—2019年黄河流域灯光和人口变化

Fig.6 The change of population and nightlight in the Yellow River Basin from 2001 to 2019



城镇化进程<sup>[38]</sup>,这也造成生态环境变化存在区域性分布特征。2018年,黄河流域内(9省区)生产总值(GDP)总量为19.4万亿元,占全国GDP总量的比重为21.55%,上、中、下游地区占流域GDP的比重分别为14.54%、21.27%和64.19%<sup>[2]</sup>。2019年,位于上游的甘肃省人均GDP全国倒数第一;而位于下游的山东省经济实力雄厚,GDP总量和人均GDP一直处于全国的前列<sup>[39]</sup>。流域内经济发展不均衡。上、中游地区地处内陆,与东部地区科技、信息水平存在梯度差异,专业化部门主要在高污高耗低技术的资源能源和重化工行业,大量分布于内蒙古、甘肃、山西、陕西与山东等地。甘肃省化工、食品、酿造、石油产品加工、炼焦、造纸等产业污染较重。而山东省作为沿海工业重地,则长期对下游环境和资源造成持续压力。目前,黄河流域整体经济逐渐滞后的局面加之中上游生态敏感区域相对粗放低效高破坏的生产方式,难以支撑区域生态环境的可持续发展,区域内的经济结构是影响生态环境变化特征的重要原因。

## 4 结论

黄河流域2000—2019年生态环境一直保持中等水平,呈现轻微波动性,整体略有改善。根据Hurst指数计算结果,黄河流域大部分地区保持了一定的改善趋势,且推断流域生态环境会有继续改善的可能。对每5年生态环境质量变化进行分析发现,在进入21世纪初期生态环境略有改善,2005—2015年,生态环境略微变差。2015年之后,生态环境质量大幅改善,生态环境变好的区域明显高于生态环境恶化区域,整体向“变好”的方向发展。其中,黄河上游青海省整体环境较好,中游汾河与渭河水系以及下游山东省境内部分地区生态环境相对较差。

黄河流域自然条件复杂,生态环境较脆弱。进入21世纪,西部大开发工程促进中国中西部地区社会经济迅速发展。黄河流域社会经济发展,特别是中、下游河流沿岸地区的城市人口增长和城镇化进程是区域生态环境质量波动的重要影响因素。从时间序列看,2005年西部大开发标志性工程基本完工,在区域整体人口增长和经济发展的基础上,中上游粗放式经济开发进入加速期,生态环境受到一定程度负面影响。

国家政策与措施在维持黄河流域生态稳定上

产生积极作用。21世纪初期,黄河上游地区西部大开发工程和生态恢复措施齐头并进,植树造林工程不断推进和前期基础建设工程并行,使2000—2005年生态有所好转。2015年后,国家陆续调整政策和加强生态保护措施为黄河流域生态恢复做出贡献。经过几期植被恢复工程,人工林地生态效益开始显露,近年流域生态环境质量有所提升。

从区域尺度看,黄河流域内社会经济发展的不均衡性导致生态环境变化存在区域化分布特征。位于黄河上游的青海省,虽然经济相对落后,但由于其特殊的地理位置,作为黄河发源地成为国家重点保护区域,生态环境质量保持较高水平。而中、下游特别是渭河与汾河水系境内以及山东沿海地区经济发展相对迅速,区域内城镇化与人口增长以及重工业发展对生态环境扰动大,生态环境质量较差。

总之,黄河流域自然条件脆弱性强,社会经济的发展不断扰动生态环境可持续发展的进程。黄河上游地区属于西部大开发战略覆盖区域,一定时期内的经济快速发展会成为加剧资源环境矛盾的重要原因。国家生态保护政策与生态修复措施一直以来积极对抗着自然与人为因素破坏的必然大趋势,在社会经济发展过程中积极维系着生态环境的整体稳定性。未来应贯彻落实《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》,认清黄河流域的生态、经济和人文战略地位,识别黄河流域不同地域的生态环境特征,坚持“生态优先、绿色发展”“量水而行、节水优先”“因地制宜、分类施策”和“统筹谋划、协同推进”的4个基本原则,针对不同地域特征提出适应性的治理对策,逐步改善人水关系,形成生态共治、环境共保、城乡区域协调联动发展的格局,实现黄河流域生态环境的全面改善与生态系统的健康稳定。

## 参考文献:

- [1] 王胜鹏,乔花芳,冯娟,等.黄河流域旅游生态效率时空演化及其与旅游经济互动响应[J].经济地理,2020,40(5):81-89.
- [2] 徐勇,王传胜.黄河流域生态保护和高质量发展:框架、路径与对策[J].中国科学院院刊,2020,35(7):875-883.
- [3] 金凤君.黄河流域生态保护与高质量发展的协调推进策略[J].改革,2019(11):33-39.
- [4] Gupta K, Kumar P, Pathan S K, et al. Urban neighborhood green index: a measure of green spaces in urban areas[J]. Landscape and Urban Planning, 2012, 105(3): 325.
- [5] 王勇,王世东.基于RSEI的生态质量动态变化分析:以丹江流

- 域(河南段)为例[J].中国水土保持科学,2019,17(3):57-65.
- [6] 孟丹,李小娟,宫辉力,等.京津冀地区NDVI变化及气候因子驱动分析[J].地球信息科学学报,2015,17(8):1001.
- [7] 罗敏,古丽·加帕尔,郭浩,等.2000-2013年塔里木河流域生长季NDVI时空变化特征及其影响因素分析[J].自然资源学报,2017,32(1):50.
- [8] 丁小松,单秀娟,陈云龙,等.岛屿海岸线自动化提取及其时空变迁研究:以大连市獐子岛为例[J].海洋科学,2018,42(2):46.
- [9] 王小平,张飞,Abduwasit Ghulam,等.艾比湖流域地表水水质指标与水体指数关系研究[J].环境科学学报,2017,37(3):900.
- [10] 王乐.基于RS的西安市地表温度反演及城市热环境研究[D].西安:长安大学,2015.
- [11] 杨敏,杨贵军,王艳杰,等.北京城市热岛效应时空变化遥感分析[J].国土资源遥感,2018,30(3):213-223.
- [12] 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.
- [13] 彭丽媛,张军民,梁二敏,等.基于RSEI的玛纳斯河流域自然生态环境变化评价[J].石河子大学学报(自然科学版),2017,35(4):506-612.
- [14] 农兰萍,王金亮.基于RSEI模型的昆明市生态环境质量动态监测[J].生态学杂志,2020,39(6):2042-2050.
- [15] 刘小燕,崔耀平,董金玮,等.黄河中下游影响区生态空间和生态指数变化评估[J].生态学报,2021,41(20):8030-8039.
- [16] 迟妍妍,王夏晖,宝明涛,等.重大工程引领的黄河流域生态环境一体化治理战略研究[J].中国工程科学,2022,24(1):1-9.
- [17] 王奕淇,李国平.基于SD模型的黄河流域生态环境与社会经济发展可持续性模拟[J].干旱区地理,2022,45(3):901-911.
- [18] 赵建吉,刘岩,朱亚坤,等.黄河流域新型城镇化与生态环境耦合的时空格局及影响因素[J].资源科学,2020,42(1):159-171.
- [19] 李光勤,方徐兵.黄河流域绿色发展水平时空演变特征[J].中国沙漠,2021,41(4):129-139.
- [20] 周成,张旭红,张倩,等.黄河流域“五位一体”综合评价体系建构与空间差异研究[J].中国沙漠,2021,41(4):1-11.
- [21] 国家统计局.第七次全国人口普查公报[R].国家统计局,2021.
- [22] 光明网.五部门:到2025年黄河流域万元GDP用水量较2020年下降16%[EB/OL].(2021-12-16)[2022-04-05].<https://m.gmw.cn/baijia/2021-12/16/35384508.htm>.
- [23] 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.
- [24] Gowrd S N, Xue Y K, Czajkowskik P. Evaluating land surface moisture conditions from the remotely sensed temperature / vegetation index measurements: an exploration with the simplified simple biosphere model [J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 79(2/3): 225-233.
- [25] Crist E P. A TM Tasseled Cap equivalent transformation for reflectance factor data [J]. Remote Sensing of Environment, 1985, 17(3): 301-310.
- [26] 魏雨涵,钱建平,范伟伟,等.基于RSEI的漓江流域生态环境质量动态监测[J].中国水土保持科学,2021,19(1):122-131.
- [27] 丁凤,徐涵秋. TM热波段图像的地表温度反演算法与实验分析[J].地球信息科学学报,2006,8(3):125-129.
- [28] Rikimaru A, Roy P S, Miyatake S. Tropical forest cover density mapping[J]. Tropical Ecology, 2002, 43(1): 39-47.
- [29] Xu H Q. A new index for delineating built-up land features in satellite imagery [J]. International Journal of Remote Sensing, 2008, 29(14): 4269-4276.
- [30] 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.
- [31] Hurst H E. Long-term storage capacity of reservoirs [J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1951, 116: 770-808.
- [32] Weron R. Estimating long range dependence: finite sample properties and confidence intervals [J]. Physica A, 2002, 312: 285-299.
- [33] Qian B, Rasheed K. Hurst exponent and financial market predictability [D]// IASTED International Conference on Financial Engineering and Applications (FEA 2004). 203-209.
- [34] Feder Jens. Fractals [M]. New York, USA: Plenum Press, 1988.
- [35] 蔡茂,郑云峰,孙永.黄河流域天然林保护建设成效与存在问题研究[J].华东森林经理,2020(34):87-90.
- [36] 刘静.退耕还林后黄土高原植被覆盖变化过程及未来分布预测[D].北京:中国科学院大学,2019.
- [37] 人民日报.三江源重大生态保护和修复工程深入推进[EB/OL].(2021-11-02)[2022-04-05].[http://stzg.china.com.cn/2021-11/12/content\\_41750659.htm](http://stzg.china.com.cn/2021-11/12/content_41750659.htm).
- [38] 瞿杨.经济地位逐年下降,黄河流域高质量发展的出路何在?[EB/OL].(2020-05-16)[2022-04-05].[https://www.sohu.com/a/395568464\\_120179484?scm=1002.590044.0.28b5-4ab?\\_f=index\\_select\\_15](https://www.sohu.com/a/395568464_120179484?scm=1002.590044.0.28b5-4ab?_f=index_select_15).
- [39] 丛昊.山东经济增长对生态环境的影响研究[D].济南:山东财经大学,2019.

## Research on the dynamic change of the ecological environment and its influencing factors in the Yellow River Basin based on Remote Sensing Ecological Index

Chen Fangmiao<sup>1</sup>, Huang Huiping<sup>1,2</sup>, Yang Guang<sup>1</sup>, Li Xu<sup>1</sup>

(1. National Engineering Technology Center for Remote Sensing Applications, Institute of Space Information Innovation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The Yellow River Basin bears an important ecological, economic and cultural strategic position in China, and its ecological environment is a vital foundation for ensuring the high-quality development of the Yellow River Basin. In this study, the long-term sequence of Remote Sensing Ecological Index (*RSEI*) of the Yellow River Basin was used to dynamically monitor and analyze the ecological quality changes in the Yellow River Basin in the past 20 years. The *RSEI* mean value is 0.497 from 2001 to 2019, increasing 0.04, which shows a trend of overall improvement and slight fluctuations. Moreover, its influencing factors were analyzed from three aspects: natural factors, policy measures and socio-economic factors. The complex natural factors bring difficulties to the governance of the Yellow River Basin, and the socio-economic factors such as continuously increasing population and night light data correspondingly disturbed the ecological environment changes, while the ecological protection policies and restoration measures play a positive role.

**Key words:** *RSEI*; Yellow River Basin; ecological environment; dynamic change; influencing factors