DOI: 10.5846/stxb202012083131

杨泽康,田佳,李万源,苏文瑞,郭睿妍,刘文娟.黄河流域生态环境质量时空格局与演变趋势.生态学报,2021,41(19):7627-7636. Yang Z K, Tian J, Li W Y, Su W R, Guo R Y, Liu W J.Spatio-temporal pattern and evolution trend of ecological environment quality in the Yellow River Basin.Acta Ecologica Sinica,2021,41(19):7627-7636.

黄河流域生态环境质量时空格局与演变趋势

杨泽康,田 佳*,李万源,苏文瑞,郭睿妍,刘文娟

宁夏大学农学院,银川 750021

摘要:黄河流域是我国重要的生态功能区,在我国经济社会发展和生态安全方面的作用举足轻重。如何及时、准确的获取黄河流域生态环境质量的时空格局与演变趋势,对黄河流域生态环境保护和建设具有重要意义。利用 Google Earth Engine(GEE)平台,筛选目标年份及其前后各1年的夏季(6—9月)Landsat 遥感影像,去除有云像元,掩膜水体信息,采取中值合成提取绿度、湿度、热度和干度4个生态指标,通过主成分分析快速构建遥感生态指数(RSEI)。结果表明:(1)绿度(NDVI)、湿度(Wet)、热度(LST)和干度(NDSI)4个指标在第1主成分(PC1)上的平均贡献率为89.60%,依据 PC1构建遥感生态指数(RSEI)在黄河流域是可行的。(2)1990—2019年,黄河流域 RSEI 总体呈现出"快速变好→缓慢转好"2个阶段,1990—2000年增长趋势平均为0.005/a,增长率为11.69%,生态环境质量等级由差转为较差(10.18万km²)、较差转为中等(5.69万km²)、中等转为良(7.08万km²)贡献较大;2000—2019年增长趋势平均为0.001/a,增长率仅为3.86%,生态环境质量等级由较差转为差(6.10万km²)、良转为中等(4.09万km²)贡献较大。(3)1990—2019年,黄河流域生态环境质量提升的面积占黄河流域总面积的76.38%,其中显著提升的面积占26.14%;生态环境质量降低的面积占黄河流域总面积23.62%,其中显著降低的面积位占1.46%。30年来黄河流域生态环境质量整体向好,实施生态工程的黄河上中游地区生态环境质量提升最快,而一些国家重点经济开发区生态环境质量有所恶化,使用 GEE 平台可以及时、准确的获取黄河流域生态环境质量的时空格局与演变趋势。 关键词:黄河流域;遥感生态指数;生态环境质量;Google Earth Engine

Spatio-temporal pattern and evolution trend of ecological environment quality in the Yellow River Basin

YANG Zekang, TIAN Jia^{*}, LI Wanyuan, SU Wenrui, GUO Ruiyan, LIU Wenjuan School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

Abstract: The Yellow River Basin is an important ecological function area in China and plays an important role in the economic and social development and the ecological security of our country. How to obtain the temporal and spatial pattern and evolution trend of ecological environment quality in the Yellow River Basin in time and accurately is of great significance to the protection and construction of ecological environment in the Yellow River Basin. In this paper, Google Earth Engine (GEE) platform was used to filter the Landsat remote sensing images of the summer (June—September) from the target year and before–after the target year. The greenness (NDVI), wetness (Wet), heat (LST) and dryness (NDSI) were calculated by removing the cloud pixels, masking the water body information, and taking the median composites. Based on this, the remote sensing based ecological index (RSEI) was established quickly through Principal Component Analysis (PCA). The results showed that: (1) the average contribution rate of NDVI, Wet, LST and NDSI on the first principal component (PC1) was 89.60%, and it was feasible to construct RSEI based on PC1 in the Yellow River Basin. (2) From 1990 to 2019, the RSEI presented two stages as a whole: rapid improvement and slow improvement. But from

收稿日期:2020-12-08; 网络出版日期:2021-07-01

基金项目:国家自然科学基金(31960330);宁夏自然科学基金(2020AAC03112)

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: yuhudie63@qq.com

1990 to 2000, the average growth trend was 0.005/a, with a growth rate of 11.69%, because the contribution from very poor to poor (101800 km^2), poor to medium (56900 km^2) and medium to good (70800 km^2) of ecological environmental quality levels was greater. From 2000 to 2019, the average growth trend was 0.001/a, with a growth rate of 3.86% only, because the contribution from poor to very poor (61000 km^2) and good to medium (40900 km^2) of ecological environmental quality levels was greater. (3) From 1990 to 2019, the improvement of ecological environment quality accounted for 76.38% of the total area of the Yellow River Basin, among which the significant improvement accounted for 26.14%; the reduction of ecological environment quality accounted for 23.62% of the total area of the Yellow River Basin, among which the significant reduction accounted for 1.46% only. In the past 30 years, the ecological environment quality of the Yellow River Basin has improved as a whole. The ecological environment quality of the upper and middle reaches of the Yellow River Basin has improved the fastest, where the ecological projects have been carried out by our country. While the ecological environment quality of some national key economic development zones has deteriorated. By using the GEE platform, the temporal and spatial pattern and evolution trend of ecological environment quality in the Yellow River Basin can be obtained in time and accurately.

Key Words: Yellow River Basin; remote sensing based ecological index; ecological environment quality; Google Earth Engine

黄河流域在我国经济社会发展和生态安全方面的作用举足轻重,是我国重要的生态功能区,也是党和政府关注的重点区域。习近平总书记在"9·18"重要讲话中,将黄河流域生态保护和高质量发展确定为重大国家战略^[1]。但是黄河流域也是我国生态环境最为脆弱、水土流失最为严重的地区之一^[2],为此我国从 1978年开始在黄河流域陆续实施了"三北防护林工程"、"退耕还林还草工程"等一系列重大林业生态工程,使得该地区生态环境得到极大改善^[3]。虽然黄河流域生态环境整体向好,但是也有局部地区由于人类生产活动的影响,导致生态环境恶化^[4]。随着新时代黄河流域社会经济发展由高增速转向高质量,区域生态环境质量的长时序遥感监测,成为定量评价生态环境优劣和演变趋势的重要手段,也是制定黄河流域生态环境质量的长时序遥感监测,成为定量评价生态环境优劣和演变趋势的重要手段,也是制定黄河流域生态环境质量的难、研究尺度小、数据更新慢等问题^[6]。因此,如何及时、准确的获取黄河流域生态环境质量的时空格局与演变趋势?是黄河流域生态环境保护和建设必须要解决的问题。

由于卫星遥感具有快速、实时、尺度大等优点^[7-8],目前已成为国内外评价区域生态环境质量的主要手 段^[9]。但大多数研究都是利用遥感信息提取单一指标对生态环境质量进行评估,如 Ivits 等^[10]根据归一化植 被指数(NDVI)评价农田鸟类栖息地的适宜性,Coutts 等^[11]利用地表热度(LST)评估城市热岛效应,郭文杰 等^[12]利用水体指数(NDWI)提取水体信息等。但生态环境是多因素结合体,单一指标的评价虽有一定的效 果,却难以解释生态环境中的多因素综合作用。2013年由徐涵秋^[13]提出的基于 Landsat 的新型遥感生态指 数(Remote Sensing Based Ecological Index,RSEI),为生态环境质量评价提供了新方向。由于 RSEI 综合了绿度 (NDVI)、湿度(Wet)、热度(LST)和干度(NDSI)4个生态指标,且指标容易获取,无需人为权重设定(用主成 分分析确定权重),所以 RSEI 能够全面、快速、客观的反映区域生态环境质量水平。目前,RSEI 在区域生态环 境质量评价中已得到广泛应用^[14-17],但是如果将其应用于大区域尺度,如整个黄河流域,面临的困难是庞大 的数据量、以及由此产生的繁杂的数据预处理和指数计算工作^[18]。为了解决这个问题,王渊等^[6]和陈炜等^[9] 基于 Google Earth Engine(GEE)遥感云平台,结合 RSEI 评价了粤港澳大湾区城市群生态环境质量和开展了三 江源地区生态环境质量动态监测与分析。结果表明,GEE 作为大区域范围的生态环境质量评价与监测的遥 感计算平台,可以较好的改善遥感数据缺失、色差和时间不一致的问题^[19];可以免去繁杂的数据预处理工作 如辐射校正、大气校正、正射校正等^[20];可以快速实现影像去云、镶嵌,指标计算、统计,动态变化趋势分析等 处理^[21]。 因此,该文将借助 GEE 平台,以整个黄河流域为研究区域,采用 Landsat 遥感影像为数据源,在 GEE 云端 进行影像的预处理和合成及遥感生态指数(RSEI)的计算。利用计算结果对黄河流域生态环境质量的时空格 局与演变趋势进行大尺度、长时序的综合分析评价,研究结果可为黄河流域的生态环境保护和高质量发展提 供理论依据和技术支撑。

1 研究区域概况

黄河流域位于我国中北部(E:95°53′—119°05′,N:32°10′—41°50′),流域横跨青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南及山东9省(图1),总面积约80万km^{2[4]}。流域自西向东呈干旱、半干旱、半湿润及湿润气候,多年平均温度在7℃左右,平均降水在440mm左右^[22],降水和气温空间分布均呈现自东向西,自南向北减少或降低的特征。流域地势西高东低,从西到东横跨青藏高原,内蒙古高原,黄土高原和淮海平原4个地貌单元。由于气候差异大、地貌单元复杂,黄河流域成为我国生态环境最脆弱的地区之一,主要表现在径流量逐步减少、水体污染严重、土壤侵蚀加剧、土地荒漠化、植被退化等^[23]。



图 1 黄河流域位置 Fig.1 Location of the Yellow River Basin

2 数据与方法

2.1 数据源与预处理

遥感影像直接来源于 GEE 平台数据库提供的 T1 级别(质量最高)的 Landsat 5(TM)和 Landsat 8(OLI)地 表反射率数据产品(Surface Reflectance, SR),该数据产品已经过几何校正、辐射校正和大气校正,空间分辨率 30m,时间分辨率 16d;基于 GEE 编程(JavaScript),筛选成像时间为目标年份及其前后各 1 年的夏季(6—9 月)遥感影像。在 GEE 平台上使用官方提供的 Landsat 云掩膜算法,对输入的符合时间和空间范围的影像数 据集去除有云像元,以无云像元中值合成目标年份夏季最小云量影像。另外,为使湿度指标能够真正代表地 面的湿度条件,避免大片的水域影响主成分的荷载分布,采用 MNDWI 水体指数掩膜掉水体信息^[13]。

2.2 遥感生态指数(RSEI)的计算

选用绿度(NDVI)、湿度(Wet)、热度(LST)、干度(NDSI)4个指标(计算公式见表 1),构建遥感生态指数 (RSEI)来综合反映区域的生态环境质量。由于4个指标的量纲不统一,在主成分分析(PCA)前先对这些指标进行正向归一化处理(MMS),将它们的数值映射到[0,1]区间内,见式(1)。

$$MMS = (I - I_{min}) / (I_{max} - I_{min})$$

$$\tag{1}$$

式中,I为指标值, I_{max} 为目标年份该指标的最大值, I_{min} 为目标年份该指标的最小值。经过 MMS 处理后,将 4 个指标合成新影像,通过在 GEE 中编写主成分分析脚本(PCA JavaScript)计算初始 RSEI₀(未归一化),见式(2)。

(2)

(3)

RSEI₀ = PC1[f (Wet, NDVI, NDSI, LST)]

式中,PC1为第1主成分,f为对4个指标进行正向归一化处理(MMS),同样利用式(1)对 RSEI₀进行 MMS 处理,得到最终的 RSEI 值,见式(3)。其值介于[0,1]之间,RSEI 值越接近于1,表示生态环境质量越好。

RSEI = $(\text{RESI}_0 - \text{RSEI}_{0\min}) / (\text{RESI}_{0\max} - \text{RSEI}_{0\min})$

式中,RSEI_{0min}和 RESI_{0max}分别为目标年份的 RESI₀最小值和最大值,RSEI 为最终的遥感生态指数。将 RSEI 以 0.2 为间隔分为 I (0—0.2)、Ⅱ (0.2—0.4)、Ⅲ (0.4—0.6)、Ⅳ (0.6—0.8)、Ⅴ (0.8—1.0)5 级,分别代表生态环 境质量差、较差、中等、良、优 5 个等级,该文技术路线如图 2 所示。

表1 指标计算方法

Table 1 Calculation methods of indicators					
指标	计算方法				
Indicators	Calculation methods				
绿度 NDVI	NDVI= $(\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{red}})/(\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{red}})$				
湿度 Wet	$\begin{split} & \text{Wet}_{\text{TM}} = 0.0315 \rho_{\text{blue}} + 0.2021 \rho_{\text{green}} + 0.3102 \rho_{\text{red}} + 0.1594 \rho_{\text{NIR}} - 0.6806 \rho_{\text{SWIR1}} - 0.6109 \rho_{\text{SWIR2}} \\ & \text{Wet}_{\text{OLI}} = 0.1511 \rho_{\text{blue}} + 0.1973 \rho_{\text{green}} + 0.3283 \rho_{\text{red}} + 0.3407 \rho_{\text{NIR}} - 0.7117 \rho_{\text{SWIR1}} - 0.4559 \rho_{\text{SWIR2}} \end{split}$				
热度 LST	$LST = T / [1 + (\lambda T / \rho) \ln \varepsilon] - 273.15$				
干度 NDSI	$\begin{split} &\text{NDSI} = (\text{SI}+\text{IBI})/2\\ &\text{IBI} = \text{IBI}_1/\text{IBI}_2\\ &\text{IBI} = 2\rho_{\text{SWIR2}}/(\rho_{\text{SWIR1}} + \rho_{\text{NIR}}) - \left[(\rho_{\text{NIR}}/(\rho_{\text{red}} + \rho_{\text{NIR}}) + \rho_{\text{green}}/(\rho_{\text{SWIR1}} + \rho_{\text{green}})\right]\\ &\text{IBI}_2 = 2\rho_{\text{SWIR2}}/(\rho_{\text{SWIR1}} + \rho_{\text{NIR}}) + \left[(\rho_{\text{NIR}}/(\rho_{\text{red}} + \rho_{\text{NIR}}) + \rho_{\text{green}}/(\rho_{\text{SWIR1}} + \rho_{\text{green}})\right]\\ &\text{SI} = \left[(\rho_{\text{SWIR1}} + \rho_{\text{red}}) - (\rho_{\text{blue}} + \rho_{\text{NIR}})\right]/\left[(\rho_{\text{SWIR1}} + \rho_{\text{red}}) + (\rho_{\text{blue}} + \rho_{\text{NIR}})\right] \end{split}$				

NDVI:归一化植被指数 Normalized difference vegetation index; LST:地表温度 Land surface temperature; NDSI:归一化土壤指数 Normalized difference soil index; IBI:建筑用地指数 Index-based built-up index; SI:裸土指数 Soil index; ρ_i :为各对应波段的地表反射率, T:为传感器处热度值, λ :为热红外波段中心波长, ρ :为常数, ε :地表比辐射率。所有参数取值参考文献^[24]



图 2 技术路线

Fig.2 Methodological workflow

GEE:谷歌地球引擎 Google earth engine; NDVI: 归一化植被指数 Normalized difference vegetation index; LST: 地表温度 Land surface temperature; NDSI: 归一化土壤指数 Normalized difference soil index; RSEI: 遥感生态指数 Remote sensing based ecological index

3 结果与分析

3.1 RSEI 模型检验

由表 2 可知,4 个指标中绿度(NDVI)和湿度(Wet)的荷载呈正值,且绿度平均荷载(0.6805)大于湿度(0.4058),说明绿度对 RSEI的贡献要高于湿度,且是正效应;热度(LST)和干度(NDSI)的荷载呈负值,且热度平均荷载的绝对值(0.2258)小于干度(0.5540),说明热度对 RSEI的贡献要低于干度,且是负效应,这与实际情况相符。另外,4 个指标在第1主成分(PC1)上的贡献率最高达到 93.87%(2000 年),最低也有 87.43%

(1990年),平均89.60%。可见PC1上集中了85%以上的各指标特征信息,表明依据PC1构建RSEI在黄河流域是可行的。进一步采用平均相关度模型检验RSEI的可行性,计算方法见式(4)。

$$\overline{C_p} = \frac{\mid C_q \mid + \mid C_r \mid + \dots \mid C_s \mid}{n-1}$$
(4)

式中, \overline{C} 为平均相关度,p,q,r,s是进行相关分析的指标,n为相关分析的指标个数, C_p,C_q,C_r,C_s 为各指标间相 关系数(Spearman 相关系数),结果见表 3。可知 RSEI 平均相关度最大,为 0.526;再依次是 NDSI(0.483), NDVI(0.336),LST(0.247),Wet(0.229)。

	Table 2 Contrib	outions/loadings of four	indexes to first principa	al component (PCI)		
年心		第一主成分 PC1				
Year	绿度	湿度	热度	干度	Contribution	
	NDVI	Wet	LST	NDSI		
1990	0.6490	0.4121	-0.2754	-0.5772	87.43	
1995	0.6544	0.4959	-0.1590	-0.5482	87.79	
2000	0.7487	0.4021	-0.0197	-0.5267	93.87	
2005	0.6846	0.3623	-0.2572	-0.5779	88.59	
2010	0.7248	0.3276	-0.3278	-0.5079	88.57	
2015	0.6255	0.4167	-0.2802	-0.5971	90.60	
2019	0.6763	0.4240	-0.2614	-0.5427	90.32	
平均值 Mean	0.6805	0.4058	-0.2258	-0.5540	89.60	

表 2 4 个指标在第 1 主成分上的荷载和贡献率

表 3 各指标相关性矩阵(Spearman 相关系数)

		Table 3 Corr	elation matrix of in	ndexes (Spearman)		
年份	指标	绿度	湿度	热度	干度	遥感生态指数
Year	Indicator	NDVI	Wet	LST	NDSI	RSEI
1990—2019	NDVI	1	-0.248	-0.220	-0.540	0.640
	Wet	-0.248	1	0.025	-0.413	0.124
	LST	-0.220	0.025	1	0.495	-0.545
	NDSI	-0.540	-0.413	0.495	1	-0.795
	Ē 平均相关度	0.336	0.229	0.247	0.483	0.526

3.2 黄河流域生态环境质量时空格局

图 3 统计了 1990—2019 年 7 个年份的 RSEI 均值及分布,结果表明,黄河流域生态环境质量整体向好, RSEI 均值从 1990 年的 0.4278 增长到 2019 年的 0.5070,增长趋势平均为 0.002/a,30a 增长率为 14.03%,2000 年 RSEI 均值出现峰值(0.5183),最低值出现在 1990 年(0.4278)。同时,由图 4 可知,1990—2000 年期间黄河 流域生态环境质量增长较快,增长趋势平均为 0.005/a,增长率为 11.69%;而 2000—2019 年期间,黄河流域生 态环境质量变化呈现"下降→上升→下降→上升"的波动,但整体呈现缓慢增长状态,增长趋势平均为 0.001/ a,增长率仅为 3.86%。因此,可将黄河流域生态环境质量变化分为 2 个阶段研究,即 2000 年以前(1990— 2000 年)和 2000 年以后(2000—2019 年)。

图 5 反映了黄河流域 RSEI 值的空间分布(1990—2019 年)。整体上看,生态环境质量等级为差(I)、较差(II)的区域集中分布在黄河上中游,包括:陕北、陇中黄土丘陵,宁夏中部干旱带,毛乌素沙地、库布齐沙漠等地区。生态环境质量等级为中等(III)、良(IV)的区域集中分布在黄河源头及下游,包括:甘南、祁连山、豫北、鲁西北以及引黄灌区(如河套平原)、湿地(如乌梁素海)及森林周边等地区。生态环境质量等级为优(V)的区域集中分布在秦岭北麓、六盘山、子午岭、吕梁山等国家自然保护区。根据图 5 还可知,1990—2000年,黄河流域生态环境质量等级以较差和中等为主,面积占比超过 60%;2000—2019年,则以中等和良等级为主,面积占比超过 56%,可见 1990—2019年黄河流域生态环境质量呈现出持续向好的趋势。



图 3 1990—2019 年黄河流域 RSEI 的均值及分布

年份 Year

Fig. 3 Average and distribution of RSEI in the Yellow River Basin, 1990–2019



图 4 1990-2019 年黄河流域 RSEI 均值年际变化

Fig.4 Cross-annual mean variation of RSEI in the Yellow River Basin, 1990–2019



图 5 1990-2019 年黄河流域生态环境质量等级分布

Fig.5 Distribution of ecological environmental quality levels in the Yellow River Basin, 1990-2019

3.3 黄河流域生态环境质量演变趋势

3.3.1 生态环境质量等级演变

依据上文的分析,分2个时期(1990—2000年、2000—2019年)研究黄河流域生态环境质量的等级演变。 由表4、表5可知,黄河流域地区生态环境质量从1990—2019年总体呈现出"快速变好→缓慢转好"的演变趋 势。具体分析如下:

由表 4 可见,1990—2000 年期间,生态环境质量等级提高的面积为 25.74 万 km²,占黄河流域总面积的 32.04%,而生态环境质量等级退化的面积为 3.29 万 km²,仅占黄河流域总面积的 4.10%。提高的面积比退化 的面积多出 27.94%,可见这一时期生态环境质量快速变好。由表 4 还可知,生态环境质量快速变好的原因, 主要是由于差转为较差(10.18 万 km²)、较差转为中等(5.69 万 km²)、中等转为良(7.08 万 km²)贡献较大。

由表 5 可见,2000—2019 年期间,生态环境质量等级提高的面积为 16.81 万 km²,占黄河流域总面积的 20.94%,而生态环境质量等级退化的面积为 14.23 万 km²,占黄河流域总面积的 17.73%。提高的面积比退化 的面积仅多出 3.21%,可见这一时期生态环境质量是缓慢转好。由表 5 还可知,生态环境质量提高缓慢的原 因,主要是由于较差转为差(6.10 万 km²)、良转为中等(4.09 万 km²)贡献较大。

表 4 1990-2000 年黄河流域生态环境质量等级转移矩阵/km² Table 4 Transition matrix of ecological environmental quality levels in the Yellow River Basin, 1990-2000 2000 生态环境质量等级 Ecological environmental 差(I) 较差(II) 中等(III) 良(IV) 优(V) quality levels 1990 差(I) 31135(不变) 101846(提高) 492(提高) 30(提高) 较差(II) 232(退化) 187745(不变) 56922(提高) 1543(提高) 22(提高) 中等(III) 9(退化) 11766(退化) 146659(不变) 70846(提高) 1424(提高) 良(IV) 66(退化) 14110(退化) 114290(不变) 24285(提高)

表 5 2000—2019 年黄河流域生态环境质量等级转移矩阵/km²

57(退化)

6709(退化)

33328(不变)

	Table 5 Transition matrix of ecological environmental quality levels in the Yellow River Basin, 2000–2019					
生态环境质量等级 Ecological environmental quality levels		2019				
		差(I)	较差(II)	中等(III)	良(IV)	优(V)
2000	差(I)	28193(不变)	2937(提高)	184(提高)	12(提高)	
	较差(II)	61032(退化)	149517(不变)	86893(提高)	3697(提高)	18(提高)
	中等(III)	34(退化)	14332(退化)	140739(不变)	62359(提高)	384(提高)
	良(IV)	5(退化)	1489(退化)	40915(退化)	139359(不变)	11583(提高)
	优(V)		46(退化)	742(退化)	23737(退化)	34523(不变)

3.3.2 生态环境质量变化趋势

优(V)

采用 GEE 官方提供的岭回归函数(Ridge regression) 拟合黄河流域 1990—2019 年期间的 RSEI 变化趋势 以及获得相应的显著性(P值)。图6可见,宁夏沿黄经济区、关中—天水经济区、呼包鄂榆经济区、中原经济 区等国家重点开发区,生态环境质量恶化较快;而水土流失最为严重的黄河中游地区(如陕西榆林、延安等地 区)和宁夏固原、甘肃平凉等山地丘陵地区,生态环境质量恢复较快。

由图 7 所示,将生态环境质量变化趋势划分为显著提升(P<0.05)、提升但不显著(P>0.05)、显著降低(P<0.05)、降低但不显著(P>0.05)4 个等级,结果表明,黄河流域生态环境质量变化存在明显的空间异质性。 经统计(图 7),生态环境质量提升的面积占黄河流域总面积的 76.38%,其中显著提升的面积占 26.14%。生态环境质量降低的面积占黄河流域总面积 23.62%,其中显著降低的面积仅占 1.46%。对比来看,黄河流域生态环境质量提升的面积比降低的面积多出 52.76%,整体上呈提升趋势。

4 讨论

4.1 RSEI 模型的优势

生态环境质量的影响因素是复杂多样的。单一指标的评价虽有一定的效果,却难以解释生态环境中的多

因素综合作用^[10-12]。RSEI 由绿度、湿度、热度和干度 4 个指标构建,解决了单一指标在生态环境质量评价中的片面性问题。由表 2 可知,4 个指标在第 1 主成分(PC1)的平均贡献率达到 89.60%,表明 PC1 集中了 4 个指标的大部分特征,因此基于 PC1 构建的 RSEI 比单一指标更具代表性。从表 3 的结果看,RSEI 平均相关度最大(0.526),也说明了 RSEI 比单一指标更适用于对生态环境质量的评价。因此,RSEI 指数与其它指数相比,具有全面、客观、高效的获取生态环境质量变化状态以及便于进行可视化、时空分析、建模和预测的优势^[13,25-27]。RSEI 虽然不可能完全反映流域生态环境质量,但已是现有生态指数中考虑最为全面的一个,所以目前应用也最为广泛。



4.2 GEE 平台构建 RSEI 模型的优势

与传统 RSEI 建模利用本地计算机下载、处理以及分析数据相比,GEE 平台无需影像下载即可直接调用 1984 年以来的全球 Landsat 地表反射数据,不仅实现了影像实时更新,而且免去了庞杂的遥感影像前期处理 工作^[28]。同时,利用 Google 的强大服务器可以快速在线处理和分析大尺度区域的海量遥感数据^[29]。GEE 平 台的这些优势,保证了可以及时获取黄河流域任何区域的 RSEI。从该文的建模结果来看,采用 GEE 平台提 取的各指标荷载,不仅与实际情况相符(绿度和湿度是正效应、热度和干度是负效应),且各指标在第1主成 分上的贡献率均超过 85%(表 2),这说明由 GEE 平台构建的 RSEI 可以准确反映黄河流域的生态环境质量, 也为准确分析生态环境质量的时空格局和演化趋势奠定了基础。

相比传统 RSEI 建模,使用 GEE 平台让科研工作者能更加专注于研究目的本身,而不是一些重复的技术 性工作^[30]。GEE 平台提供很多内置代码和函数,且调用十分方便,如云掩膜代码、影像合成代码、主成分分析 代码、岭回归函数、线性回归函数等^[31],这些内置代码和函数保证了研究者可以及时、准确的获取区域 RSEI 的变化,并对区域未来生态环境质量进行预测。在该文中,主成分分析不再借助其它软件如 MATLAB、SPSS 等,而是利用 GEE 平台直接编码,极大的增加了研究的效率;另外,该文采用岭回归来计算 RSEI 变化趋势和 获得相应的显著性,相比传统采用一元线性回归和 F 检验明显高效^[9,30]。因此,与传统 RSEI 建模相比,GEE 平台更适合作为大区域范围的生态环境质量监测与评价的计算平台,GEE 平台在我国黄河流域生态环境保 护和高质量发展战略实施中有着广阔的应用前景。

4.3 黄河流域生态环境质量时空演变的原因探讨

随着人类活动和气候变化等影响,黄河流域生态环境愈发受到人们关注。近几十年,围绕黄河流域众多 学者对气候变化^[32]、土地利用格局演变^[33]、水域面积变化^[34]、空气质量^[35]和水质污染^[36]等方面进行了深入 研究。但大部分都是针对单一要素或黄河上、中、下游等部分区域进行研究,并不能全面、整体的代表整个黄 河流域的生态环境质量状况。该文通过 GEE 平台构建的 RSEI 模型,客观、全面的分析了近 30 年来黄河流域 生态环境质量的变化趋势和空间差异,研究具有代表性和参考价值。

通过该文的分析,黄河流域生态环境质量等级为差(Ⅰ)、较差(Ⅱ)的区域集中分布在黄河上中游(图

41 卷

5),其主要原因是该区域自然环境条件本身较差和长期不合理的人为活动^[4]。因此,该区域是我国生态环境 脆弱、水土流失严重的地区之一^[37]。但是,黄河上中游也是我国近 30 年来(1990—2019 年),生态环境质量 提升最快的区域(图6、图7)。这得益于国家在该区域长期积极实施退耕还林还草、水土流失治理等生态工 程,促使黄河上中游生态环境恢复效果明显^[3,38]。生态环境的恢复非一日之功,应当在完善生态政策的同时, 继续保持或增加对该地区的生态环境保护的投入力度。黄河流域下游生态环境质量相对稳定,以中等(Ⅲ)、 良(Ⅳ)为主(图5),部分地区出现生态环境质量下降趋势(图6),主要是由于人口增加,社会经济发展,导致 城市扩张造成。既要"金山银山",又要"绿水青山",是黄河流域下游未来经济发展不可忽视的重点与难点。

根据该文的综合分析结果,1990—2019年黄河流域整体生态环境质量有明显改善(图3),但是改善并不 是成直线上升的,而是明显的分为快速变好(1990—2000年)和缓慢转好(2000—2019年)2个阶段(图4)。 其主要原因还是由于从90年代开始,国家对黄河流域的生态环境治理加大了投入,同时自然保护区的数量也 明显增加^[39-41],导致黄河流域原来生态质量较差的区域快速变好(表4)。但从2000年以后,黄河流域生态环 境质量提升变缓,其主要原因是,虽然30年来整个黄河流域生态环境质量整体向好,但是部分地区,主要是一 些大的国家级经济开发区的生态环境却出现了恶化趋势(图6、图7)。恶化的主要原因是由于2000年以后, 这些区域人类经济活动频繁,对生态环境的干扰较大,导致黄河流域原来生态质量较好的区域出现退化(表 5)。经济要发展,生态环境也要保护,因此,国家及黄河流域各省市应当重视经济发展与生态环境保护相协 调,这也是实现黄河流域生态保护和高质量发展的必然要求。

5 结论

(1)使用 Google Earth Engine(GEE)平台进行遥感生态指数(RSEI)的建模及分析,可以及时、准确的获取 黄河流域生态环境质量的时空格局与演变趋势,在实施黄河流域生态环境保护和高质量发展战略过程中有着 广阔的应用前景。

(2)黄河流域生态环境质量较差的区域集中分布在黄河上中游,但却是黄河流域 1990—2019 年期间,生态环境质量提升最快的区域,我国生态工程在该地区的实施效果最为明显,应当继续保持或增加该地区生态环境保护的投入力度。

(3)30年来我国黄河流域生态环境质量整体向好,可分为快速变好(1990—2000年)和缓慢转好(2000—2019年)2个时期,但是一些国家重点经济开发区生态环境质量有所恶化,国家及黄河流域各省市应当高度重视经济开发区的生态环境保护和高质量发展。

参考文献(References):

- [1] 习近平. 在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上的讲话. 奋斗, 2019, (20): 4-10.
- [2] 韩鹏,王艺璇,李岱峰.黄河中游河龙区间河川基流时空变化及其对水土保持响应.应用基础与工程科学学报,2020,28(3):505-521.
- [3] 赵安周, 刘宪锋, 朱秀芳, 潘耀忠, 陈抒晨. 2000—2014 年黄土高原植被覆盖时空变化特征及其归因. 中国环境科学, 2016, 36(5): 1568-1578.
- [4] 黄金亭,曹艳萍,秦奋.基于土地利用/覆盖变化模拟的黄河流域生态环境质量分析.河南大学学报:自然科学版,2020,50(2): 127-138.
- [5] 方创琳. 中国新型城镇化高质量发展的规律性与重点方向. 地理研究, 2019, 38(1): 13-22.
- [6] 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. 生态学报, 2020, 40(23): 8461-8473.
- [7] Mateo-García G, Gómez-Chova L, Amorós-López J, Muñoz-Marí J, Camps-Valls G. Multitemporal cloud masking in the Google earth engine. Remote Sensing, 2018, 10(7): 1079.
- [8] Rai P K. Forest and land use mapping using Remote Sensing and Geographical Information System: a case study on model system. Environmental Skeptics and Critics, 2013, 2(3): 97-107.
- [9] 陈炜,黄慧萍,田亦陈,杜云艳.基于 Google Earth Engine 平台的三江源地区生态环境质量动态监测与分析.地球信息科学学报, 2019,

21(9): 1382-1391.

- [10] Ivits E, Buchanan G, Olsvig-Whittaker L, Cherlet M. European farmland bird distribution explained by remotely sensed phenological indices. Environmental Modeling & Assessment, 2011, 16(4): 385.
- [11] Coutts A M, Harris R J, Phan T, Livesley S J, Williams N S G, Tapper N J. Thermal infrared remote sensing of urban heat: hotspots, vegetation, and an assessment of techniques for use in urban planning. Remote Sensing of Environment, 2016, 186: 637-651.
- [12] 郭文浩, 吴俐民, 左小清, 方刚. 基于 TM 影像的淮南市水体信息提取. 工程勘察, 2018, 46(3): 64-67.
- [13] 徐涵秋. 城市遥感生态指数的创建及其应用. 生态学报, 2013, 33(24): 7853-7862.
- [14] Zhu D Y, Chen T, Zhen N, Niu R Q. Monitoring the effects of open-pit mining on the eco-environment using a moving window-based remote sensing ecological index. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(13): 15716-15728.
- [15] Hang X, Li Y C, Luo X C, Xu M, Han X Z. Assessing the ecological quality of Nanjing during its urbanization process by using satellite, meteorological, and socioeconomic data. Journal of Meteorological Research, 2020, 34(2): 280-293.
- [16] 杨江燕,吴田,潘肖燕,杜海童,李金鹿,张利,门明新,陈影.基于遥感生态指数的雄安新区生态质量评估.应用生态学报,2019,30
 (1):277-284.
- [17] 宋慧敏, 薛亮. 基于遥感生态指数模型的渭南市生态环境质量动态监测与分析. 应用生态学报, 2016, 27(12): 3913-3919.
- [18] 贺振,贺俊平.近32年黄河流域植被覆盖时空演化遥感监测.农业机械学报,2017,48(2):179-185.
- [19] Guo B B, Fang Y L, Jin X B, Zhou Y K. Monitoring the effects of land consolidation on the ecological environmental quality based on remote sensing: a case study of Chaohu Lake Basin, China. Land Use Policy, 2020, 95: 104569.
- [20] Shan W, Jin X B, Ren J, Wang Y C, Xu Z G, Fan Y T, Gu Z M, Hong C Q, Lin J H, Zhou Y K. Ecological environment quality assessment based on remote sensing data for land consolidation. Journal of Cleaner Production, 2019, 239: 118126.
- [21] 刘盼,任春颖,王宗明,张柏,陈琳.南瓮河自然保护区生态环境质量遥感评价.应用生态学报,2018,29(10):3347-3356.
- [22] 赵翠平,陈岩,王卫光,郜志云.黄河流域近 50a 极端降水指数的时空变化.人民黄河, 2015, 37(1):18-22.
- [23] 付景保. 黄河流域生态环境多主体协同治理研究. 灌溉排水学报, 2020, 39(10): 130-137.
- [24] 周玲美, 王世航. 内蒙古杭锦旗生态环境时空变化的遥感监测与评价. 应用生态学报, 2020, 31(6): 1999-2006.
- [25] 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. 生态学杂志, 2020, 39(6): 2042-2050.
- [26] 茹克亚・萨吾提,阿不都艾尼・阿不里,李虎,尼加提・卡斯木,李晓航.基于遥感生态指数模型的阜康市生态环境动态变化监测与评价.水土保持研究,2020,27(1):283-289,297-297.
- [27] 刘立冰,熊康宁,任晓冬.基于遥感生态指数的龙溪一虹口国家级自然保护区生态环境状况评估.生态与农村环境学报,2020,36(2): 202-210.
- [28] Gorelick N, Hancher M, Dixon M, Ilyushchenko S, Thau D, Moore R. Google Earth Engine: planetary-scale geospatial analysis for everyone. Remote Sensing of Environment, 2017, 202: 18-27.
- [29] 郝斌飞,韩旭军,马明国,刘一韬,李世卫. Google Earth Engine 在地球科学与环境科学中的应用研究进展. 遥感技术与应用, 2018, 33 (4): 600-611.
- [30] 郭永强, 王乃江, 褚晓升, 李成, 罗晓琦, 冯浩. 基于 Google Earth Engine 分析黄土高原植被覆盖变化及原因. 中国环境科学, 2019, 39 (11): 4804-4811.
- [31] 董金玮,李世卫,曾也鲁,闫凯,付东杰.遥感云计算与科学分析——应用与实践.北京:科学出版社,2020.
- [32] 黄建平,张国龙,于海鹏,王闪闪,管晓丹,任钰.黄河流域近40年气候变化的时空特征.水利学报,2020,51(9):1048-1058.
- [33] 肖东洋,牛海鹏,闫弘轩,樊良新,赵素霞. 1990—2018 年黄河流域(河南段)土地利用格局时空演变. 农业工程学报, 2020, 36(15): 271-281.
- [34] 高吉喜, 王永财, 侯鹏, 万华伟, 张文国. 近 20 年黄河流域陆表水域面积时空变化特征研究. 水利学报, 2020, 51(9): 1157-1164.
- [35] 王敏,冯相昭,杜晓林,赵梦雪,梁启迪.黄河流域空气质量时空分布及影响因素分析.环境保护,2019,47(24):56-61.
- [36] 吕振豫, 穆建新. 黄河流域水质污染时空演变特征研究. 人民黄河, 2017, 39(4): 66-70, 77-77.
- [37] 郭帅, 裴艳茜, 胡胜, 杨冬冬, 邱海军, 曹明明. 黄河流域植被指数对气候变化的响应及其与水沙变化的关系. 水土保持通报, 2020, 40 (3): 1-7, 13-13.
- [38] 王钰, 王爽宇. 中国 20 年退耕还耕还草 5 亿多亩. 中南林业科技大学学报, 2019, 39(10): 2-2.
- [39] 徐文茜,汤茜,丁圣彦.河南新乡黄河湿地鸟类国家级自然保护区景观格局动态分析.湿地科学,2016,14(2):235-241.
- [40] 彭凯锋, 蒋卫国, 侯鹏, 孙晨曦, 赵祥, 肖如林. 三江源国家公园植被时空变化及其影响因子. 生态学杂志, 2020, 39(10): 3388-3396.
- [41] 刘晓娟, 张玉斌, 王煜明, 杨海蓉, 马志兵, 董万涛, 杨巨才, 达布希力特, 乌力吉, 孙学刚. 甘肃盐池湾国家级自然保护区高寒湿地水 环境质量调查与评价. 水土保持通报, 2018, 38(2): 160-165.