

基于长时序 MODIS 的陕西省近 20 年生态质量 时空变化及其驱动力研究

张斯源，樊逸飞，颜礼，肖星竹，李豪

(四川农业大学资源学院,成都 611130)

摘要：人口激增和随之带来的气候变化对区域生态环境产生胁迫，生态环境质量的动态定量评估可为地区生态环境保护战略部署和区域生态文明建设提供研究支撑。陕西省现有生态质量评价的研究多基于区县尺度的统计数据，但普遍存在时间跨度小且难以揭示其内在驱动力的问题。基于 2001—2018 年 MODIS 数据计算陕西省生长季遥感生态指数(RSEI)，运用趋势分析法、Hurst 指数法、偏相关分析法于像元尺度探究陕西省 2001—2018 年生态质量时空演变规律及其对气候和人类活动的响应。结果表明：(1)陕西省近 20 年来生态质量持续改善，RSEI 值以 0.34%/a 的速率增长，生态质量极好的区域不断增加。(2)RSEI 变化趋势较为显著且以明显改善趋势为主，总体呈“南高北低”的空间分布格局，通过 M—K 检验的像元占 77.89% ($p<0.05$)，明显改善的像元占 66.75%，主要分布在陕北地区的延安市和榆林市，而显著退化的像元占 11.08%，主要分布在关中平原和秦巴山区等地。Hurst 指数表明，RSEI 未来变化趋势以反持续性为主，46.04% 的像元将由改善转为未来退化，29.33% 的像元将持续改善。(3)RSEI 与气温和降水均呈正相关关系，且降水的影响大于气温；与人类活动呈现负相关的区域集中在西安城市群及陕北中心城市区域，且显著相关 ($p<0.05$)；像元占比中，夜间灯光指数(36.83%)>降水(18.38%)>气温(7.65%)。各土地利用转化类型中退耕还林还草区 RSEI 增长速率最大，达到 0.84%/a，耕地转建设用地 RSEI 持续下降，达到 0.23%/a，体现人类活动对生态环境质量影响的正负相关性。研究结果填补了陕西省长时序生态环境动态监测的空白，为黄河流域生态治理与绿色发展提供依据。

关键词：遥感生态指数；MODIS；驱动力；时空变化；Hurst 指数；陕西省

中图分类号：X822 **文献标识码：**A **文章编号：**1009-2242(2023)02-0111-09

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.02.014

Temporal and Spatial Variation and Driving Forces of Eco-Environmental Quality in Shaanxi Province in Recent 20 Years Based on Long Time Series MODIS Data

ZHANG Siyuan, FAN Yifei, YAN Li, XIAO Xingzhu, LI Hao

(College of Resources, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130)

Abstract: The population surge and climate change have stressed regional ecological environment. The dynamic quantitative assessment of ecological environment quality can provide research support for the strategy development about regional ecological environment protection and civilization construction. The existing ecological quality assessment studies in Shaanxi Province are mostly based on the statistical data at the district and county scale, but there are generally problems such as small time span and difficulties to reveal the internal driving forces. MODIS data from 2001 to 2018 were used to calculate the remote sensing ecological index (RSEI) during the growing season in Shaanxi Province. Trend analysis, Hurst index method and partial correlation analysis were used to explore the spatio-temporal evolution of ecological quality and its response to climate and human activities in Shaanxi province from 2001 to 2018 at pixel scale. The results showed that: (1) The ecological quality of shaanxi province has been continuously improved in the past 20 years. The RSEI value increased at a rate of 0.34%/a, and the area with excellent ecological quality increased

收稿日期:2022-07-19

资助项目:国家自然科学基金项目(41501291);四川天府新区乡村振兴研究院“揭榜挂帅”项目(XZY1-14)

第一作者:张斯源(2001—),女,四川眉山人,本科生,主要从事 3S 技术及其应用研究。E-mail: zhangsiyuan0226@163.com

通信作者:李豪(1980—),男,广西梧州人,博士,讲师,主要从事 3S 技术及其应用研究。E-mail: lihao@sicau.edu.cn

continuously. (2) The variation trend of RSEI was significant and the trend of obvious improvement is dominant. The overall spatial distribution pattern of RSEI is ‘high in the south and low in the north’, and the MK test ($p < 0.05$) pixels accounted for 77.89%, 66.75% of the pixels significantly improved, and mainly distributed in Yan ‘an City and Yulin City in northern Shaanxi Province, while significantly degraded pixels accounted for 11.08%, mainly distributed in Guanzhong Plain, Qinba Mountain and other places. Hurst index showed that the future trend of RSEI was mainly anti-persistence, 46.04% of pixels would change from improvement to future degradation, and 29.33% of pixels would continue to improve. (3) RSEI was positively correlated with both air temperature and precipitation, and the influence of precipitation was greater than that of air temperature. The regions with negative correlation with human activities were concentrated in Xi ‘an urban agglomeration and central urban region of northern Shaanxi, and the correlations was significant ($p < 0.05$), among the pixels, night light index (36.83%) > Precipitation (18.38%) > Temperature (7.65%). Among all land use conversion types, RSEI increased at the highest rate (0.84%/a) in the area of returning farmland to forest or grassland, while RSEI continued to decrease (0.23%/a) in the area of converting farmland to construction, reflecting the positive and negative correlation of human activities on ecological environment quality. The results fill the gap of long-term ecological environment dynamic monitoring in Shaanxi Province, and provide the basis for ecological governance and green development of the Yellow River basin.

Keywords: remote sensing ecological index; MODIS; driving forces; spatial-temporal variations; Hurst index; Shaanxi Province

生态环境作为人类社会生存与发展的基本条件,是社会经济高质量发展的重要保障,在生态文明建设、经济可持续发展、社会稳定等多方面具有“兜底性”作用。进入工业化时代以来,随着城市化进程的推进和人口的急剧扩张,活跃的人类活动和随之带来的气候变化给地球生态带来剧烈的冲击及一系列的生态环境问题,如水土流失、全球气候变暖、生物多样性锐减等^[1]。对生态环境质量等相关内容的动态监测研究目前已成为学者们关注的热点。

陕西省位于我国中原内陆地区,东南季风对其气候条件的影响效应显著,黄土高原、秦巴山脉和黄河各重要支流分布于此,农田、草地、裸地、水体和城镇建成区等土地覆被类型性质差异巨大。陕西省作为气候变化敏感区和生态环境脆弱区对其生态环境质量的评价和动态监测工作由来已久。从研究方法上来看,研究以生态足迹模型^[2]、模糊评价法^[3]、生态环境状况指数^[4]为主,但这些研究方法往往存在数据获取困难,指标选取及权重确定主观性强,评价结果准确性和精度不高的问题。从研究尺度上来看,对陕西省生态环境质量的研究主要集中在区县级尺度^[5]、重点自然生态区域尺度^[6],缺乏对于陕西省全境多个生态因子的综合评价和研究,难以全面反映陕西省复杂脆弱的生态环境变化情况。

2013 年,徐涵秋^[7]集成绿度、湿度、热度、干度 4 个与生态环境密切相关的生态因子,提出能快速评价和监测区域生态环境的遥感生态指数(remote sens-

ing ecological index, RSEI)模型,该模型以其数据可得性、权重客观性、成果可视性和时空动态监测等优势在生态环境质量动态监测等多个领域^[8-9]得到广泛应用。陕西省作为“一带一路”建设的重要节点,承担着中国(陕西)自由贸易试验区、丝绸之路经济带重要通道等重大任务,但运用 RSEI 对陕西省全境生态环境质量状况进行评价及其归因的研究仍较为缺乏。

为此,本文以陕西省为研究区域,选用 2001—2018 年的 MODIS 影像作为数据源构建遥感生态指数,对陕西省多年生态环境质量时空格局演化进行综合分析,结合 Sen 斜率分析和 Hurst 指数研究生态环境质量演进趋势,并引入气象(气温、降水)和人类活动(夜间灯光)数据,基于像元尺度采用偏相关分析等方法探究生态环境质量对气候变化和人类活动的响应,以期明晰陕西省 RSEI 变化与气候和人类活动变化之间的内在关系,在弥补现有研究空缺的同时,为定量掌握陕西省高质量发展背景下的生态环境质量状况、加强地区生态文明建设和实现可持续发展提供理论支撑和案例参考。

1 研究区域与数据来源

1.1 研究区概况

陕西省位于我国内陆腹地,地处黄河中游(31°42′—39°35′N, 105°29′—111°15′ E),辖区面积 20.56 万 km²^[10](图 1)。辖区内黄土高原、关中平原、秦巴山区三大自然单元造就其南北高、中部低的地形特征,最大高差

达 3 600 m,地形起伏巨大。受地形影响,陕西省自南向北跨越北亚热带季风气候、暖温带季风气候、中温带季风气候三大气候带,气候差异显著,年均气温 7~16℃,年降水量 500~700 mm^[10],降水年内分配不均,多集中在 7—10 月。辖区内分布有延河、渭河等大小河流 583 条,分属长江、黄河水系,河网密布。受地质条件影响,陕西省拥有煤炭、石油等众多矿产资源,已查明矿产资源储量潜在价值居全国第一。

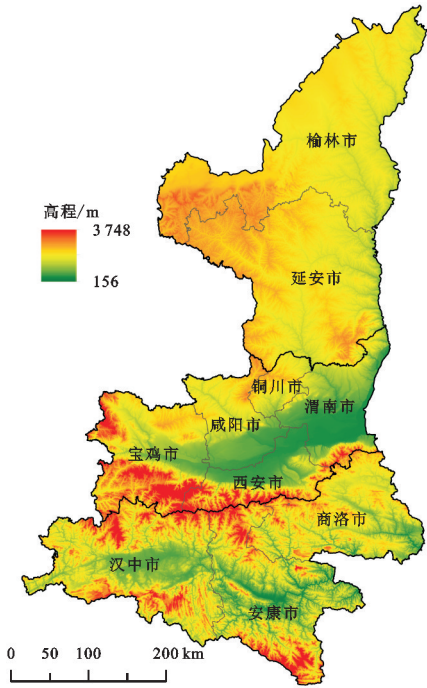


图 1 研究区概况

1.2 数据来源与处理

从表 1 可以看出,本文所用数据包括 MODIS09A1、MODIS11A2 数据,行政区划数据、气象数据、夜间灯光数据、土地利用遥感监测数据和相关统计数据。数据处

理包括 MODIS 数据的批量裁剪、投影、拼接、重采样、合成年尺度波段值,月尺度气温合成年平均气温、月尺度降雨量合成年累积降雨等工作。陕西省河流较多,为避免地表水体对湿度指标和主成分载荷产生影响,提取土地利用数据中的永久水体进行掩膜处理。

2 研究方法

2.1 遥感生态指数 (RSEI) 模型构建

RSEI 基于生长季绿度 (normalized difference vegetation index, NDVI)、湿度 (WET)、干度 (normalized difference bare soil index, NDBSI)、热度 (land surface temperature, LST) 4 个指标构建,这 4 个分量与人类生活紧密相关,完全基于遥感数据易于获取,且已广泛应用于生态评价的研究中^[13-14]。其中,NDVI、WET、NDBSI 3 个分量通过 MOD09A1 影像的 $\rho_1 \sim \rho_7$ 波段计算得到^[15-16],LST 由 MOD11A2 影像提取得到^[15]。通过主成分分析 (principal component analysis, PCA) 耦合 4 个分量合成 RSEI 值,该方法可以消除人为主观因素对权重设置的偏差,使其完全由数据本身性质决定^[17],计算公式为:

$$RSEI_0 = 1 - \{PC1 [f(NDVI, WET, LST, NDBSI)]\}$$
 (1)

$$RSEI = \frac{RSEI_0 - RSEI_{0min}}{RSEI_{0max} - RSEI_{0min}}$$
 (2)

由于 4 个分量的量纲不统一,在进行 PCA 前需对 4 个分量进行归一化处理^[16];同时为确保得到的 RSEI 指数具有生态学意义且便于度量和比较,需先检查 4 个分量的特征向量后进行“1-PC1”还原^[18]得到 RSEI₀,而后对 RSEI₀ 值进行归一化处理。得到最终的 RSEI 值的范围介于[0,1],越接近于 1 表示生态越好。

表 1 数据源说明

数据名	空间分辨率	时间分辨率	时间范围	来源
MODIS09A1	500 m	8 d	2001—2018 年生长季(5—10 月)	美国航空航天宇航局(https://lpdaac.usgs.gov)
MODIS11A2	1000 m	8 d	2001—2018 年生长季(5—10 月)	
行政区划	1:100 万	—	2019 年	全国地理信息资源目录服务系统(https://www.webmap.cn/)
气象(气温、降水)	1000 m	月	2001—2018 年生长季(5—10 月)	国家地球系统科学数据中心(http://www.geodata.cn/)
夜间灯光	1000 m	年	2001—2018 年生长季(5—10 月)	全球统一夜间灯光数据集 ^[11-12]
土地利用遥感监测数据	1000 m	年	2001—2018 年	中国科学院地理科学与资源研究所(https://www.resdc.cn/)
统计数据	—	—	2001—2018 年	陕西省统计年鉴、陕西省生态环境公报

2.2 Sen+Mann Kendall 趋势分析法

本文运用 Sen+Mann Kendall 趋势分析法估算 RSEI、气温、降水、夜间灯光四要素 2001—2018 年的变化趋势。Theil—Sen 斜率估算结合 Mann-Kendall 显著性检验可以有效检验趋势变化的显著性,规避异常值造成结果偏差的能力较强^[19],在长时间序列分析领域得到广泛使用。Theil—Sen 斜率估算将斜率中值作为时间序列变化的总体趋势^[20],计算方法为:

$$\beta = \text{Median}(\frac{X_j - X_i}{j - i}), \forall j > i$$
 (3)

式中:β 为所有数据对斜率的中值,当 β>0 时,表示 RSEI 呈现上升态势;当 β<0 时,表示 RSEI 呈现下降态势。X_j、X_i表示 RSEI 时间序列中第 j 年和第 i 年的值。

Mann-Kendall 检验作为 Theil—Sen 斜率估算的补充^[19],对估算结果进行显著性检验。计算方法为:

其中,

$$S=\sum_{i=1}^n\sum_{j=i+1}^n\operatorname{sgn}(x_j-x_i)$$

(4)

$$\operatorname{sgn}(x_j-x_i)=\begin{cases}1&x_j-x_i>0\\0&x_j-x_i=0\\-1&x_j-x_i<0\end{cases}$$

(5)

然后计算方差 V 以及 Z 统计量:

$$V=n(n-1)(2n+5)/18$$

(6)

$$Z=\begin{cases}\frac{S-1}{\sqrt{V}}&S>0\\0&S=0\\\frac{S+1}{\sqrt{V}}&S<0\end{cases}$$

(7)

对数据进行双边检验。本文在显著水平 $\alpha=0.05$ 下判断 RSEI 变化的显著性,当 $|Z|>1.96$ 时变化显著, $|Z|\leq 1.96$ 时变化不显著。

2.3 Hurst 指数

Hurst 指数是定量描述时间序列长程依赖性的有效方法,在水文学、经济学、气候学、地质学等领域有着广泛应用,而最新研究^[20-21]将其应用于 RSEI 可持续性分析之中。其基本原理:给定时间序列 $\{RSEI_{(t)}\}, t=1,2,3,\cdots,n$ 。对于给定的任意正整数 $\tau\geq 1$,定义该时间 RSEI 均值序列:

$$RSEI_{\tau}=\frac{1}{\tau}\sum_{t=1}^{\tau}RSEI_{(t)}(\tau=1,2,\cdots,n)$$

(8)

定义极差 $R_{(\tau)}$ 与标准差 $S_{(\tau)}$ ^[22],若存在 H ,使得 $R_{(\tau)}/S_{(\tau)}\propto\tau^H$ 成立,则表明时间序列 $\{RSEI_{(t)}\}$ 存在 Hurst 现象,其中 H 代表 Hurst 指数,可用于判断时间序列数据的可持续性。当 $H=0.5$ 时,表示时间序列

为随机变化或变化趋势不显著;当 $0<H<0.5$ 且愈接近 0 时,表明时间序列反映为反持续性且发生不一致趋势的概率愈大;当 $0.5<H<1$ 且愈接近 1 时,表明时间序列反映为持续性且维持原有趋势的概率愈大。

2.4 偏相关分析

本研究基于像元尺度分析 RSEI 与气候因子(气温、降水)和人类活动(夜间灯光)之间的相关关系,在计算简单相关系数的基础上,通过固定某一变量,计算得到偏相关系数。计算方法^[23]为:

$$R_{xy}=\frac{\sum_{i=1}^n[(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n(x_i-\bar{x})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^n(y_i-\bar{y})^2}}$$

(9)

式中: R_{xy} 为两变量的简单相关系数; $\bar{x},\bar{y}$ 分别表示两变量 n 年平均值; n 表示样本数。

$$R_{xy,z}=\frac{R_{xy}-R_{xz}R_{yz}}{\sqrt{(1-R_{xy}^2)}\sqrt{(1-R_{yz}^2)}}$$

(10)

3 结果与分析

3.1 综合指标的构建

PCA 分析结果表明,第 1 主成分(PC1)的特征值贡献率最高可达 93.49%(2001 年),最低为 86.57%(2010 年),多年平均贡献度为 90.89%,说明 PC1 已最大限度集合 4 个指标的信息。在 PC1 中,绿色 NDVI 和湿度 WET 均呈负值,热度 LST 和干度 NDBSI 均呈正值。之所以出现上述情况,是由于数据集性质差异和不同软件计算结果不同^[18],因此本研究已采用“1-PC1”进行还原。表 2 为 2001 年、2009 年、2018 年 LST、NDBSI、NDVI、WET 4 个指标的特征向量、特征值和特征值贡献率。

表 2 2001 年、2009 年、2018 年主成分分析结果

指标	2001 年				2009 年				2018 年			
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC1	PC2	PC3	PC4	PC1	PC2	PC3	PC4
地表温度(LST)	0.461	-0.860	-0.106	-0.192	0.503	-0.736	0.409	-0.195	0.486	-0.832	0.264	0.037
建筑-裸土指数(NDBSI)	0.649	0.187	-0.027	0.737	0.689	0.091	-0.397	0.600	0.712	0.287	-0.467	0.440
植被指数(NDVI)	-0.489	-0.285	-0.672	0.478	-0.414	-0.663	-0.597	0.181	-0.387	-0.472	-0.786	0.100
湿度(WET)	-0.357	-0.380	0.732	0.438	-0.318	-0.104	0.565	0.754	-0.328	-0.054	0.308	0.892
特征值	0.155	0.006	0.004	0.001	0.127	0.006	0.004	0.002	0.098	0.009	0.005	0.002
特征贡献率/%	93.490	3.530	2.170	0.800	91.520	4.520	2.850	1.110	86.620	7.800	4.240	1.340

3.2 生态环境质量时空格局

3.2.1 生态环境质量时间变化 陕西省 RSEI 多年平均值变化(图 2)表明,2001—2018 年间 RSEI 由 0.56 增长至 0.62,多年平均值为 0.60,其中高峰值出现在 2012 年,为 0.63,低谷值为 0.60,出现在 2003 年;该地区生态环境状况较好,近 18 年总体呈现波动上升趋势($p<0.05$),增长速率为 0.34%/a,表明生态环境质量持续变好。

为了更好地研究陕西省生态环境质量的时间变

化情况,进一步将各年 RSEI 以 0.2 为分隔值,划分成 5 个等级^[7](图 3):极差(0~0.2)、差(0.2~0.4)、中等(0.4~0.6)、好(0.6~0.8)、极好(0.8~1.0)。由表 3 可知,2001—2018 年间,陕西省极差和差的面积呈现减少趋势,其中差等级面积减少最多,达 1.45 万 km^2 ,中等、好和极好区域面积占比较大,且呈现不断增加趋势,其中极好等级面积增加最显著,达 1.73 万 km^2 ,由此可知,近 20 年陕西省生态环境质量得到明显改善。

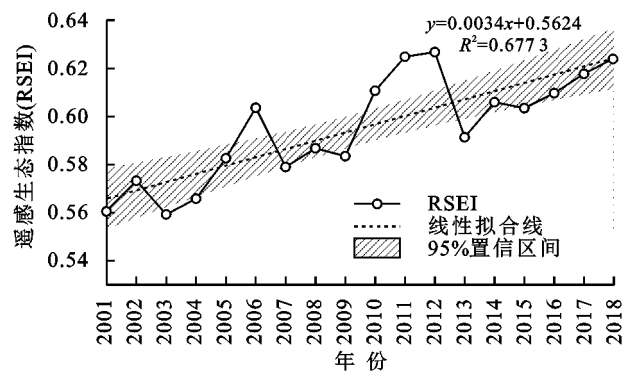


图 2 2001—2018 年 RSEI 年际变化

3.2.2 生态环境质量空间演进 由多年 RSEI 均值空间分布可知,陕西省 RSEI 具有显著的空间差异性,总体呈现南部高、北部低的空间格局,生态环境状况良

好的区域主要分布于秦岭山脉、大巴山附近以及延安市与铜川市,而西安市城市群、渭南市、榆林市等人口密集或环境恶劣地区生态环境相对较差。在此基础上,将 Sen 斜率结合 M—K 突变检验结果划分为 5 个等级^[20](表 4)。通过 M—K 检验像元的面积为 15.94 万 km²,占研究区面积的 77.89%,说明总体变化趋势较为显著($p<0.05$)。由图 4 可知,过去 18 年内陕西省 RSEI 变化趋势以显著改善为主,其面积达 13.66 万 km²,占总面积的 66.75%,主要分布于黄土高原以及榆林市等长期进行生态环境改善与植被保护的地带,人类活动展现为修复力占主导,生态环境质量向好。显著退化面积为 2.27 万 km²,占比 11.08%,主要分布在关中平原和秦巴山区等地。

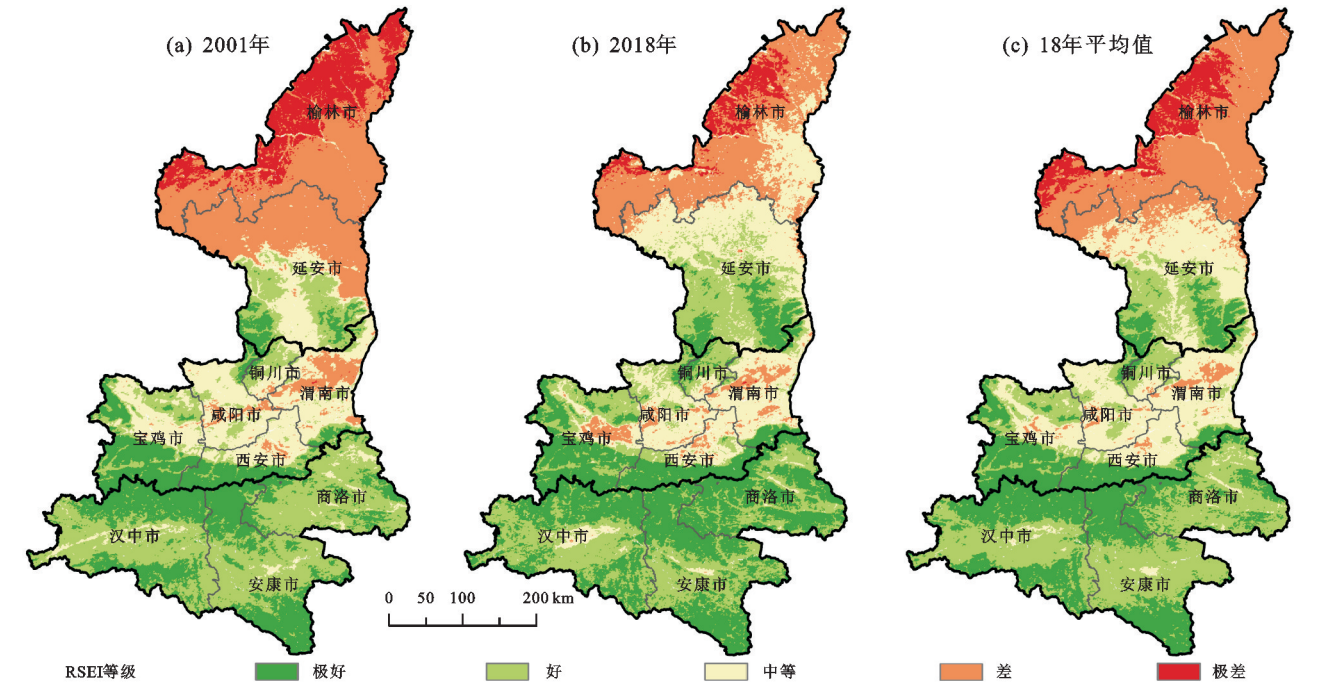


图 3 2001—2018 年陕西省生态环境质量等级分布

表 3 2001—2018 年 RSEI 各等级面积及占比变化

等级	2001 年		2018 年		2001—2018 年面积 变化/10 ⁴ km ²	2001—2018 年 面积占比变化/%
	面积/10 ⁴ km ²	占比/%	面积/10 ⁴ km ²	占比/%		
极差	1.70	8.33	0.59	2.90	−1.11	−5.43
差	4.93	24.11	3.48	17.02	−1.45	−7.09
中等	3.51	17.17	4.63	22.64	1.12	5.47
好	5.96	29.12	5.67	27.73	−0.28	−1.39
极好	4.35	21.26	6.08	29.70	1.73	8.44

3.3 RSEI 变化可持续性分析

由图 5a 可知,过去 18 年陕西省 RSEI 的 Hurst 指数平均值为 0.47,且以反持续性为主。Hurst 指数 >0.5 的面积为 7.87 万 km²,占研究区面积的 38.47%,表现为持续性,即未来变化趋势与近 20 年演变规律一致,主要分布在关中平原、陕西南部盆地及陕西北部;Hurst 指数 <0.5 的面积为 12.59 万 km²,占比为 61.52%,表现为反持续性,即未来变化趋势与近 20 年演变规律相反。

Hurst 指数与 Sen 趋势结合得到未来变化趋势,并对陕西省未来生态质量变化做出预测(图 5b)。表 5 表明,由退化变为未来改善面积为 2.08 万 km²,占比 10.15%,主要分布在秦巴山区;持续性改善面积为 6.00 万 km²,占比 29.33%,分布在榆林市西北部、延安市中东关中平原与黄土高原和秦巴山区交界处等地;未来持续不变面积 0.52 万 km²,占比 2.56%,分布数量较少;由改善变为未来退化面积 9.42 万 km²,占比 46.04%,广泛分布在陕西全域范围;持续性退化

面积 1.35 万 km², 占比 6.58%, 主要分布在关中平原; 未来随机变化面积 1.09 万 km², 占比 5.34%, 主要分布在过去改善—未来退化和过去退化—未来改善 2 种反持续性变化分布的交界地带。总体来看, 由改善变为未来退化区域面积占比较大, 约占陕西省全域国土面积的 1/2, 后续研究仍需关注该区域变化趋势的显著程度及其影响因素。

表 4 2001—2018 年 RSEI 变化趋势分级				
Sen 斜率	Z 得分	RSEI 变化趋势	面积/ 10 ⁴ km ²	面积 占比/%
≥0.0005	>1.96	显著改善	13.66	66.75
≥0.0005	-1.96~1.96	不显著改善	1.77	8.66
-0.0005~0.0005	-1.96~1.96	无显著变化	1.60	7.84
≤-0.0005	-1.96~1.96	不显著退化	1.16	5.67
≤-0.0005	<-1.96	显著退化	2.27	11.08

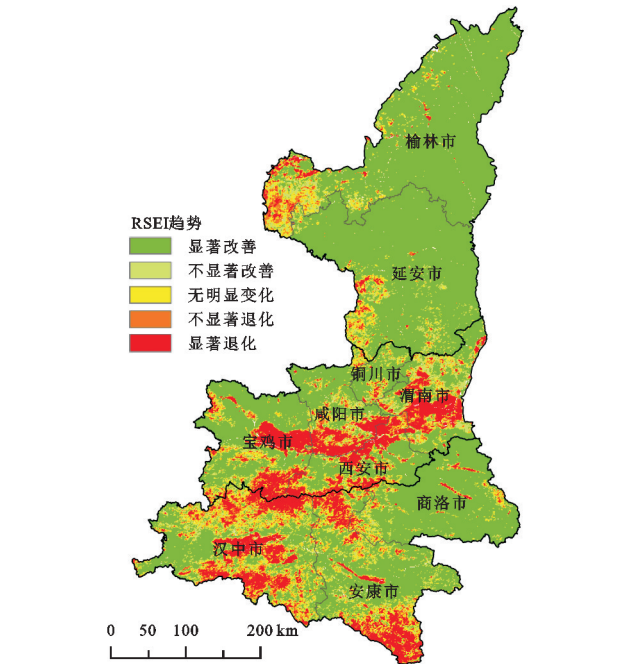


图 4 2001—2018 年 RSEI 变化趋势分布

(a) Hurst 指数 (b) RSEI 指数未来变化趋势

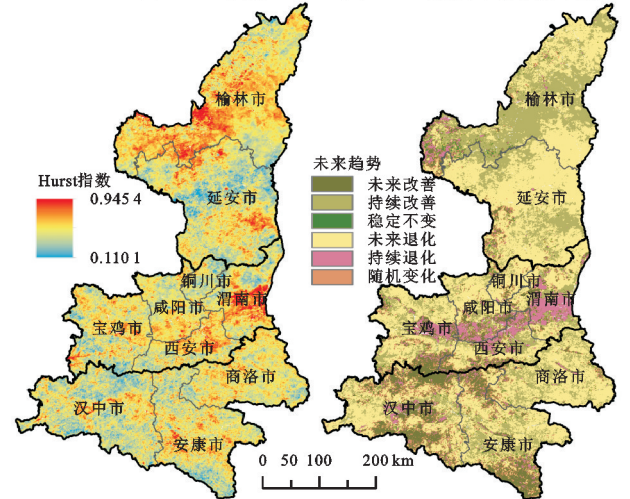


图 5 陕西省 RSEI 未来演化趋势

表 5 陕西省 RSEI 变化持续性分级				
Sen 斜率	Hurst 指数	RSEI 变化 持续性	面积/ 10 ⁴ km ²	面积 占比/%
≤-0.0005	0~0.5	由退化变为未来改善	2.08	10.15
≥0.0005	0.5~1	持续改善	6.00	29.33
-0.0005~0.0005	0.5~1	未来持续不变	0.52	2.56
≥0.0005	0~0.5	由改善变为未来退化	9.42	46.04
≤-0.0005	0.5~1	持续退化	1.35	6.58
-0.0005~0.0005	0~0.5	随机变化	1.09	5.34

3.4 RSEI 变化驱动力分析

3.4.1 气候和人类活动时空变化趋势特征 图 6 为 2001—2018 年陕西省气温、降水和夜间灯光数据的空间变化趋势。由图 6a 可知, 陕西省温度变化趋势南北差异明显, 总体呈现中部气温下降、四周上升的趋势, 中部的延安市和咸阳市气温下降态势最为明显。从图 6b 可以看出, 陕西省近 20 年降雨量变化总体呈增长趋势, 主要分布于东部, 受东南季风直接影响及南部暖湿气流遇到秦巴山脉阻挡被迫抬升, 从而形成地形雨的区域。由图 6c 可以看出, 西安市城市规模扩张最为明显, 建成区周边夜间灯光指数显著增加。此外, 渭南市、汉中市、安康市、宝鸡市、延安市、榆林市等经济增长迅速的中心城区也呈现明显增加趋势。

由图 7a 可知, 过去 18 年内, 陕西省生长季年平均气温以 0.27%/a 的速率缓慢上升, 而年累积降雨量波动较大, 最低值为 441.72 mm(2015 年), 最高值为 724.06 mm(2003 年), 2001—2018 年平均年降雨量为 558.57 mm, 平均增速为 0.22%/a。由图 7b 可知, 陕西省夜间灯光平均值以 0.34/a 的速率波动上升, 说明近 20 年陕西省人类活动剧烈。

3.4.2 RSEI 与气候和人类活动的偏相关分析 根据公式(9)~(10), 基于分辨率为 1 km 的像元尺度计算得出 RSEI 与气温、降水和夜间灯光的偏相关系数, 其平均值分别为 0.43, 0.46 和 0.44, 结果表明: (1) 由图 8a 可知, RSEI 与气温偏相关系数通过显著性检验的面积为 1.57 万 km², 占研究区面积 7.65%, 且主要为显著正相关($p<0.05$), 面积占比为 93.63%; (2) 由图 8b 可知, RSEI 与降水偏相关系数通过显著性检验的面积高于气温, 为 3.60 万 km², 占比 18.38%, 其中以显著正相关为主($p<0.05$), 占显著相关区域的 87.14%, 主要分布在陕北地区的榆林市中西部和东北部、关中平原的渭河流域以及陕南汉中平原、安康盆地; (3) 由图 8c 可知, RSEI 与夜间灯光在人类活动较为剧烈的地区呈现显著相关($p<0.05$), 面积为 7.54 万 km², 占比 36.83%, 远高于气候因子。其中, 在关中平原城市群(主要为西安市、宝鸡市、咸阳市、铜川市、渭南市和杨凌农业高新技术产业示范区)、汉中市和安康市 RSEI 与人类活动为显著负相关,

面积为 0.97 万 km², 占比 12.85%, 说明随着建设用地的扩张生态质量在不断退化。而在延安市、榆林市等地人类活动与 RSEI 呈现显著正相关 ($p < 0.05$), 面积为 6.57 万 km², 占比 87.15%。

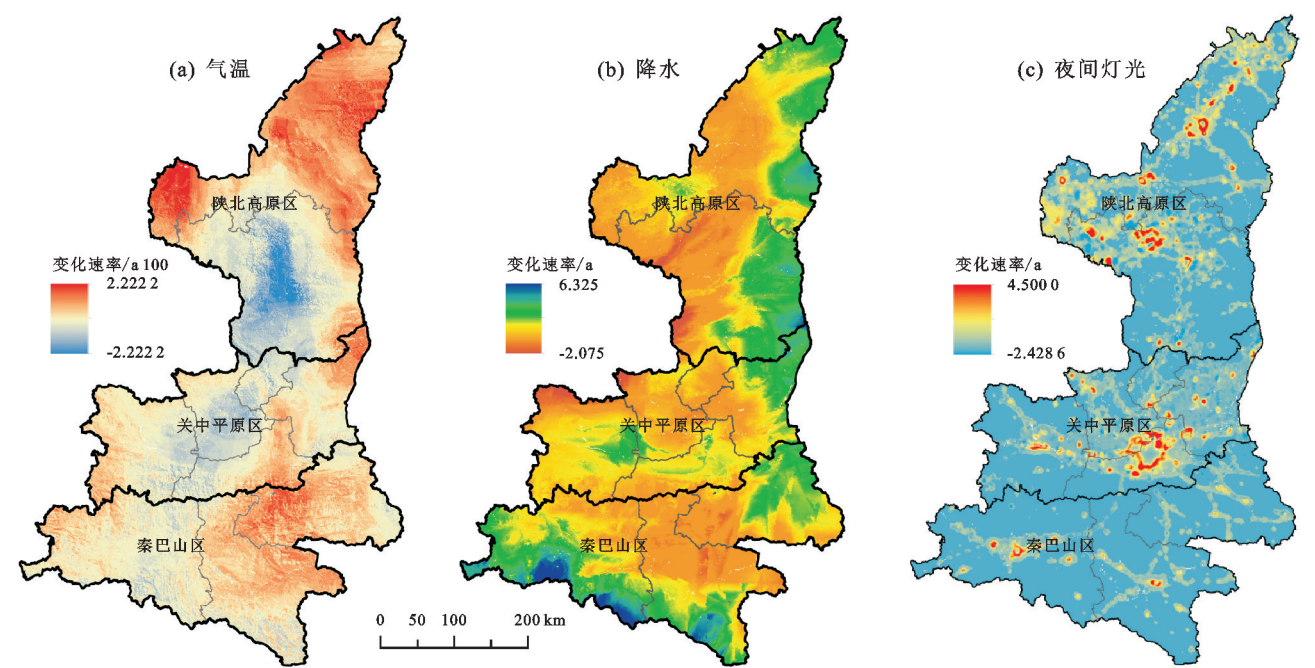


图 6 2001—2018 年陕西省气候因子和人类活动空间变化趋势

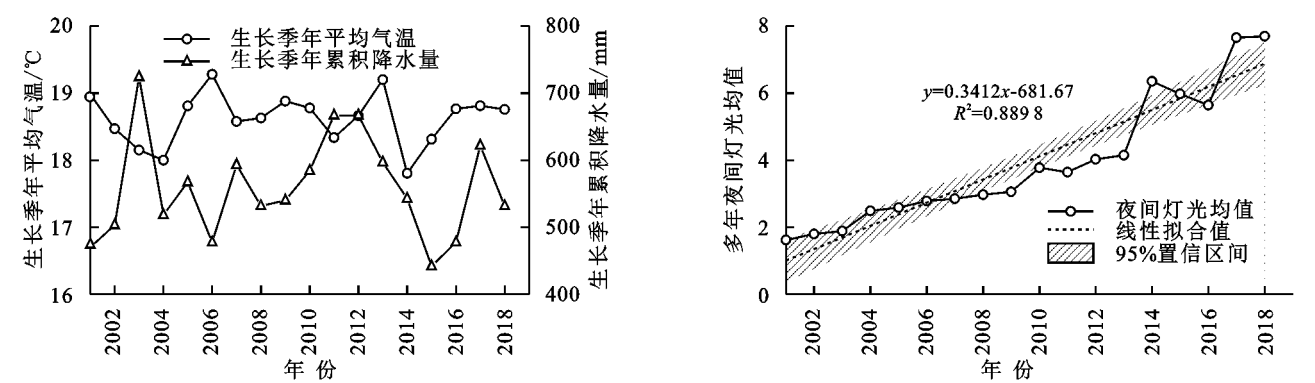


图 7 2001—2018 年陕西省气候因子和人类活动年际时间变化趋势

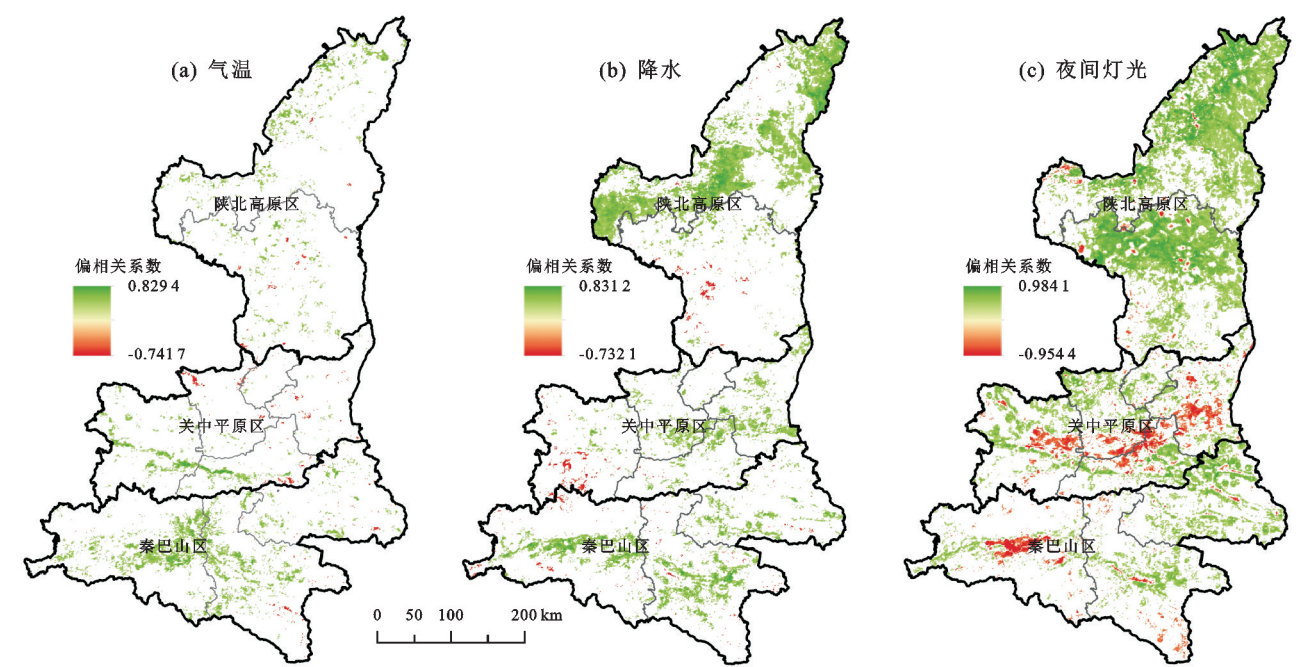


图 8 2001—2018 年陕西省 RSEI 和气温、降水与夜间灯光的偏相关系数

3.4.3 RSEI 变化对气候变化的响应 RSEI 与 FVC (fractional vegetation cover, 植被覆盖度) 存在空间相关关系, 且二者空间分布高度吻合^[24], 气候变化主要通过改变 FVC 进而影响生态质量, 尤其对林地等植被较为茂密地区的 RSEI 变化影响更加显著^[25-26]。RSEI 与气温和降水呈现显著正相关的像元中, RSEI 平均变化速率分别为 0.32%/a 和 0.37%/a; 在 RSEI 与气温和降水呈现显著负相关的像元中, RSEI 的变化速率分别为 0.28%/a 和 0.11%/a。因此可以看出, 气候因子对 RSEI 正向影响区域的生态质量改善趋势更加显著, 且气温的相关性明显低于降水, 这是由于陕西省多年平均气温的变化趋势较为微弱, 且作用规律较为复杂, 存在滞后性^[27-28], RSEI 与气温呈现显著相关的区域集中在陕南秦巴山区。由于陕西省位于湿润气候区与干旱气候区之间的过渡地带, 以半干旱气候为主^[29], 因此生态质量变化对降水的响应较为敏感, 尤其是陕南秦巴山区的北亚热带区和陕北高原的中温带区。以往研究^[30]表明, 黄土高原半干旱地区降水能够有效促进植被生长并改善生态质量, 秦岭、大巴山以南地区 RSEI 与降水呈显著正相关^[15], 均与本文得到结论一致。

3.4.4 RSEI 变化对人类活动的响应 人类活动与 RSEI 的相关关系比气候变化更加显著, 说明陕西省生态质量变化受人类活动主导, 体现出积极与消极两重性。一方面, 随着 21 世纪广泛开展的退耕还林还草政策、“三北”防护林工程等重大生态重建与修复工程的大力推进, 陕西省退耕还林还草面积达到 0.44 万 km², 集中分布在陕北毛乌素沙漠、榆林市、延安市及秦巴山区等实施一系列重大生态工程的地区, 绿地面积展现出显著增长态势。对比不同土地利用转移类型 RSEI 转化速率可知, 耕地转化为林地、草地区域的 RSEI 增长速率达到 0.84%/a, 明显高于未退耕区 (0.35%/a) 和平均水平 (0.34%/a), 说明陕西省退耕还林还草工程对区域生态环境改善具有极大的促进作用; 沙地转化为绿地、耕地区域的 RSEI 增长速率为 0.43%/a, 说明陕北榆林市等地防沙治沙、变沙地为良田、建设“塞上榆林”等举措取得显著成效, 土地沙化得到有效抑制。另一方面, 在过去 18 年间, 有 0.17 万 km² 的耕地转化为建设用地, RSEI 下降速率为 0.23%/a, 说明城镇化建设与资源开发利用等人类活动扰动加剧生态系统的脆弱性, 出现一系列自然生态问题, 对生态环境产生负面影响。

4 讨论

4.1 2001—2018 年陕西省生态环境质量时空动态变化规律

陕西省跨越三大气候带, 复杂多样的气候条件和

自然环境导致生态系统承载力的较大差异^[31], 陕北地区干旱少雨、水土流失严重且大力发展能源化工产业; 关中平原地形平坦, 近 20 年城镇化水平和污染物排放水平均显著提高; 陕南包含山区和谷地, 地势复杂且面临矿产开发带来的环境破坏问题, 但随着生态环境保护措施的扎实推进, 研究^[32]表明, 近 20 年陕西省生态质量持续改善且 RSEI 增速为全国最大的省份之一。因此, 对陕西省生态环境质量开展动态监测和评价势在必行, 是合理评估生态修复工程成效、推进省域生态文明建设、落实“黄河大保护”的必要途径。本研究基于长时间序列、高时间分辨率的 MODIS 数据构建 RSEI 模型并对陕西省生态环境质量进行时空变化与可持续分析, 结果表明, 2001—2018 年陕西省 RSEI 均值为 0.60, 且以 0.34%/a 的速率增长, 生态质量极好的面积不断增加, 这与王同达等^[33]基于压力—状态—响应 (pressure-state-response, PSR) 模型评估得到的 2009—2017 年陕西省土地生态系统健康状况, 以及梅志坤^[34]基于景观生态学计算得到的陕西省黄河流域 2000—2020 年生态状况的演变规律一致。从空间分布上看, RSEI 显著改善的面积占总面积的 66.75%, 主要分布在陕北地区的延安市和榆林市, 同时退耕还林还草区域的 RSEI 增速达到 0.84%/a, 远超平均水平 (0.34%/a), 这说明黄土高原区退耕还林还草政策落实和水土保持治理取得显著成效。可持续分析结果表明, 未来将有 46.04% 的区域由改善转为退化, 较为典型的关中平原城市群将出现持续退化趋势, 未来退化区域总面积将达 52.62%, 这说明陕西省的生态系统依然较为脆弱, 城镇化和人口密度增长过快导致生态胁迫加剧, 使得生态系统超载, 生态系统压力加大。

4.2 2001—2018 年陕西省生态环境质量变化对气候变化和人类活动的双重响应

本研究基于像元尺度分析气候因子 (气温、降水) 和人类活动因子 (夜间灯光指数) 与 RSEI 的相关性, 从显著相关像元占比来看, 夜间灯光指数 (36.83%) > 降水 (18.38%) > 气温 (7.65%), 说明人类活动相较气候因子对 RSEI 的影响更为显著 ($p < 0.05$), 主要是由于人类活动复杂多样且近 20 年城镇化增长趋势较气候变化更为显著, 这与耿甜伟等^[35]基于地理探测器和地理加权回归模型得到的社会和经济因素对陕西省生态服务系统的解释力大于自然因素的结论基本一致。

但本文的驱动机制分析仍然存在不足: 一是只用气候因子表示自然环境的驱动作用, 后续的研究可

以探究地形高程、坡度、坡向、土壤、地质地貌等其他自然因子对生态质量的影响程度,尤其是根据土壤和水分两大限制因子改善水土流失,提高植被覆盖度,进一步提高生态质量;二是仅用夜间灯光指数来反映人类活动强度并不全面,因为人类活动是一个复杂的作用体系,如毁林开荒、不合理土地利用、超载放牧、过度垦殖、采矿污染等人类活动对生态质量造成负面影响,而夜间灯光指数只能一定程度上反映城市化扩张强度,因此后续研究可以增加人口、GDP、垦殖率、牲畜出栏率等指标综合分析人类活动对生态质量变化的驱动机制。

5 结论

(1)2001—2018 年陕西省 RSEI 以 0.34%/a 的速率增长,生态质量极差和差的面积呈现减少趋势,中等、好和极好的面积所占比较大,且不断增加,极差面积下降和极好面积增长显著,说明近 20 年来陕西省生态质量持续改善。

(2)陕西省 RSEI 变化趋势较为显著,通过 M—K 检验的像元超过 75%,其中显著变化的像元以改善趋势为主,占 66.75%,而显著退化的像元占 11.08% ($p < 0.05$);结合 Hurst 指数分析得到 RSEI 未来变化趋势以反持续性为主,46.04% 的像元将由改善转为未来退化,29.33% 的像元将持续改善。

(3)2001—2018 年,陕西省生长季内气温和降水变化趋势空间分布差异明显,且均呈现不显著波动增长趋势,变化速率分别为 0.27%/a 和 0.22%/a。西安城市群、榆林市和延安市夜间灯光增长趋势显著,过去 18 年间陕西省总体城市化水平不断提高,夜间灯光增长速率达到 0.34/a。

(4)过去 18 年 RSEI 与气温、降水主要呈现正相关关系,说明气候变化对陕西省生态质量改善有积极影响,且 RSEI 与降水呈显著相关区域的面积大于气温,降雨的影响更加显著。在人类扰动较为剧烈,经济发展迅速的平原及建设用地密集分布地区夜间灯光与 RSEI 呈现显著负相关关系,而在陕北地区夜间灯光与 RSEI 为正相关,说明经济增长与生态保护协调发展。其中,退耕还林还草和沙地开垦、绿化区域的 RSEI 增长速率远高于平均水平,未退耕区域 RSEI 增长速率低于平均水平,而建设用地占用耕地扩张区域的 RSEI 出现显著下降。

参考文献:

[1] 高世楫,王海芹,王文军,等.协同推进保护生态环境和应对气候变化 加快推动构建人类命运共同体[J].当代中国与世界,2021(3):10-17.

[2] 卞子浩,赵永华,王晓峰,等.陕西省生态足迹及其驱动力[J].生态学杂志,2016,35(5):1316-1322.

[3] 陈南南.基于模糊评价法的秦岭(陕西段)生态环境质量评估[D].西安:长安大学,2021.

[4] 杨楠,王小文,卓悦.陕南地区生态环境状况综合评价及对策[J].水土保持通报,2008,28(2):190-194.

[5] 李粉玲,常庆瑞,申健,等.黄土高原沟壑区生态环境状况遥感动态监测:以陕西省富县为例[J].应用生态学报,2015,26(12):3811-3817.

[6] 安建德,同琦,白剑波.陕西子午岭国家级自然保护区生态环境质量及效益研究[J].陕西林业科技,2016,44(2):58-60.

[7] 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.

[8] 田智慧,尹传鑫,王晓蕾,鄱阳湖流域生态环境动态评估及驱动因子分析[J].环境科学,2022,47(7):1-16.

[9] 任堃,罗漫雅,赵永华,等.西安市生态环境及城市发展质量评估[J].应用生态学报,2022,33(7):1-10.

[10] 四川省统计局.四川统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2021.

[11] Xu Y D, Yu L, Peng D L, et al. Annual 30 m land use/land cover maps of China for 1980—2015 from the integration of AVHRR, MODIS and Landsat data using the BFAST algorithm[J].Science China Earth Sciences,2020,63(9):1390-1407.

[12] Zhao M, Zhou Y Y, Li X C, et al. Applications of satellite remote sensing of nighttime light observations: Advances, challenges, and perspectives [J]. Remote Sensing,2019,11(17):1971-1981.

[13] 胡思汉,姚玉增,付建飞,等.基于 RSEI 指数的东北矿区生态质量变化评价:以辽宁弓长岭区为例[J].生态学杂志,2021,40(12):4053-4060.

[14] 张秦瑞,赵良军,林国军,等.改进遥感生态指数的宜宾市三江汇合区生态环境评价[J].自然资源遥感,2022,34(1):230-237.

[15] 王建,赵牡丹,李健波,等.基于 MODIS 时序数据的秦巴山区生态环境质量动态监测及驱动力分析[J].山地学报,2021,39(6):830-841.

[16] 安敏,李文佳,吴海林,等.三峡库区生态环境质量的时空格局演变及影响因素[J].长江流域资源与环境,2022,31(9):1-16.

[17] 徐涵秋,李春强,林梦婧.RSEI 应使用主成分分析(PCA)或核主成分分析(kPCA)? [J].武汉大学学报(信息科学版),2022,66(9):1-11.

[18] 徐涵秋,邓文慧.MRSEI 指数的合理性分析及其与 RSEI 指数的区别[J].遥感技术与应用,2022,37(1):1-7.

[19] 王巨.基于时序 NDVI 植被变化检测与驱动因素量化方法研究[D].兰州:兰州大学,2020.

[33] Lázaro R, Calvo-Cases A, Lázaro A, et al. Effective run-off flow length over biological soil crusts on silty loam soils in drylands [J]. *Hydrological Processes*, 2014,29(11):e10345.

[34] Chen H, Cai Q G. Impact of hillslope vegetation restoration on gully erosion induced sediment yield[J]. *Science in China: Series D Earth Sciences*, 2006,49(2): 176-192.

[35] Liu J B, Gao G Y, Wang S, et al. The effects of vegetation on runoff and soil loss: Multidimensional structure analysis and scale characteristics[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2018,28(1):59-78.

[36] Salah A M A, Prasse R, Marschner B. Intercropping with native perennial plants protects soil of arable fields in semi-arid lands[J]. *Journal of Arid Environments*, 2016,130:1-13.

[37] Zhang Y H, Niu J Z, Yu X X, et al. Effects of fine root length density and root biomass on soil preferential flow in forest ecosystems [J]. *Forest Systems*, 2015,24(1):1-13.

[38] Li Y Y, Shao M A. Change of soil physical properties under long-term natural vegetation restoration in the Loess Plateau of China[J]. *Journal of Arid Environments*, 2006,64(1):77-96.

[39] Zhao X N, Wu P T, Chen X L, et al. Runoff and sediment yield under simulated rainfall on hillslopes in the Loess Plateau of China[J]. *Soil Research*, 2013,51(1): 50-58.

[40] 陈佳,李忠武,方怒放,等.红壤丘陵区不同植被覆盖阈值小流域时空分布规律[J].*水土保持研究*, 2023,30(2):1-7.

[41] 黄萱,丁继辉,邹钰文,等.黄河中游河龙区间侵蚀产沙对景观特征的非线性响应[J].*水土保持学报*, 2021,35(6):88-94.

[42] 张琨,吕一河,傅伯杰,等.黄土高原植被覆盖变化对生态系统服务影响及其阈值[J].*地理学报*, 2020,75(5): 949-960.

[43] 蒋定生,江忠善,侯喜禄,等.黄土高原丘陵区水土流失规律与水土保持措施优化配置研究[J].*水土保持学报*, 1992,6(3):14-17.

[44] Ina G, Jens O, Leishman M R. Urban stormwater run-off promotes compression of saltmarshes by freshwater plants and mangrove forests[J]. *Science of the Total Environment*, 2018,637/638:137-144.

(上接第 119 页)

[20] 李冠稳,高晓奇,肖能文.基于关键指标的黄河流域近 20 年生态系统质量的时空变化[J].*环境科学研究*, 2021,34(12):2945-2953.

[21] Wu S P, Gao X, Lei J Q, et al. Ecological enviroment quality evaluation of the Sahel region in Africa based on remote sensing ecological index [J]. *Journal of Arid Land*, 2022,14(1):14-33.

[22] 江田汉,邓莲堂. Hurst 指数估计中存在的若干问题: 以在气候变化研究中的应用为例[J]. *地理科学*, 2004(2): 177-182.

[23] 耿静,徐栋,吴御豪,等.海南岛生态环境质量时空变化及其对气候变化与人类活动的响应[J].*生态学报*, 2022,42(12):1-12.

[24] 张文强,孙从建,李新功.晋西南黄土高原区植被覆盖度变化及其生态效应评估[J].*自然资源学报*, 2019,34(8):1748-1758.

[25] 王法漂,何晓宇,方泽兴,等.基于长时间序列遥感数据的阿伯德尔国家公园生态环境质量评价[J].*地球信息科学学报*, 2019,21(9):1479-1489.

[26] 李婷婷,马超,郭增长.基于 RSEI 模型的贺兰山长时序生态质量评价及影响因素分析[J].*生态学杂志*, 2021,40(4):1154-1165.

[27] 张含玉,方怒放,史志华.黄土高原植被覆盖时空变化及其对气候因子的响应[J].*生态学报*, 2016,36(13): 3960-3968.

[28] 贺鹏,毕如田,徐立帅,等.基于地理探测的黄土高原植被生长对气候的响应[J].*应用生态学报*, 2022,33(2): 448-456.

[29] 何艳芬,张晓.陕西省 1980—2006 年气候变化时空特征研究[J].*干旱区资源与环境*, 2011,25(11):59-63.

[30] 高滢,孙虎,徐崑尧,等.陕西省植被覆盖时空变化及其对极端气候的响应[J].*生态学报*, 2022,42(3):1022-1033.

[31] 杨屹,加涛.21 世纪以来陕西生态足迹和承载力变化[J].*生态学报*, 2015,35(24):7987-7997.

[32] 何盈利,尤南山,崔耀平,等.2000 年来中国生态状况时空变化格局[J].*自然资源学报*, 2021,36(5):1176-1185.

[33] 王同达,曹锦雪,赵永华,等.基于 PSR 模型的陕西省土地生态系统健康评价[J].*应用生态学报*, 2021,32(5): 1563-1572.

[34] 梅志坤.陕西黄河流域土地利用变化及其景观生态风险评价[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2022.

[35] 耿甜伟,陈海,张行,等.基于 GWR 的陕西省生态系统服务价值时空演变特征及影响因素分析[J].*自然资源学报*, 2020,35(7):1714-1727.