

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.01.024.

薛桦, 刘萍. 基于 RSEI 的黄河中游地区生态环境质量时空演化特征及驱动因素[J]. 水土保持研究, 2024, 31(1): 373-384.

Xue Hua, Liu Ping. Spatiotemporal Variation of Ecological Environmental Quality and Its Response to Different Driving Factors in the Section of Yellow River Basin in Recent 31 Years[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(1): 373-384.

基于 RSEI 的黄河中游地区生态环境质量 时空演化特征及驱动因素

—以延安市为例

薛桦, 刘萍

(山西水利职业技术学院, 山西 运城 044000)

摘要: [目的] 生态环境质量评价是开展黄河中游地区生态环境保护和生态文明建设的重要基础, 探究其生态环境质量动态及不同主导因子对其影响, 可为生态环境保护战略与经济发展战略的协调发展提供理论依据。[方法] 基于遥感生态指数 (remote sensing ecological index, RSEI) 并辅以 Sen 趋势分析、Manna-Kendall 突变点检验、变异系数、Hurst 法对黄河中游地区延安市 1990—2020 年的生态环境过去和未来演化特征进行了分析, 并利用随机森林和结构方程模型探究了不同阶段 RSEI 对不同驱动因素的敏感性。[结果] (1) 延安市近 31 年生态环境质量整体呈变好趋势。其中, 绿度和湿度指标均呈增加趋势, 热度指标和干度指标均呈减小趋势, 各指标共同促进了延安市的生态环境质量变化。(2) 1995 年前 RSEI 为上升趋势, 1995—2001 年 RSEI 为下降趋势, 2001 年后 RSEI 呈增加趋势。(3) 1990—1995 年 RSEI 变化属于较高波动变化, 1996—2001 年以高波动变化为主, 2002—2020 年属于较低波动变化。RSEI 在未来一段时间内会出现大面积的下降趋势。(4) 1990—1995 年 RSEI 受到日最低气温极低值的正影响最大, 受到日最高气温的极高值、日最高气温的极低值和干旱的负影响较大; 1996—2001 年土地利用对 RSEI 的正影响最大, 日最高气温的极低值、干旱和日最低气温的极低值对 RSEI 为负影响最大; 2002—2020 年连续 5 日最大降雨量对 RSEI 的负影响最大, 日最高气温的极低值、日最高气温的极高值和日最低气温的极低值对 RSEI 为负影响较小, 但其均对连续 5 日最大降雨量产生影响从而间接对 RSEI 产生较大影响。[结论] 近 31 年来延安市生态环境质量整体呈增加趋势, 但气候变化对导致的生态退化现象需要引起政府重视, 尽快提出一系列生态修复措施, 防止其生态环境进一步恶化。

关键词: 生态环境质量; 人类活动; 地形; 气候; 黄河中游地区; 延安市

中图分类号: TP79, X87; X826

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)01-0373-12

Spatiotemporal Variation of Ecological Environmental Quality and Its Response to Different Driving Factors in the Section of Yellow River Basin in Recent 31 Years —Taking Yan'an City as an Example

Xue Hua, Liu Ping

(Shanxi Conservancy Technical Institute, Yuncheng, Shanxi 044000, China)

Abstract: [Objective] Ecological environment quality assessment is an important basis for ecological environment protection and ecological civilization construction in the middle reaches of the Yellow River. Exploring the dynamic of ecological environment quality and the influence of different leading factors on it can provide a theoretical basis for the coordinated development of ecological environment protection strategy and economic

收稿日期: 2023-02-13

修回日期: 2023-02-26

资助项目: 山西省重点研发计划项目“山西省黄河流域生态保护大数据应用研究”(202202020101007)

第一作者: 薛桦(1976—), 女, 山西运城人, 硕士, 副教授, 主要从事遥感生态研究。E-mail: xuehua_123456@126.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

development strategy. [Methods] Based on remote sensing ecological index, Sen trend analysis, Manna-Kendall mutation point test, coefficient of variation and Hurst method were used to analyze the past and future evolution characteristics of ecological environment of Yan'an City in the middle reaches of the Yellow River from 1990 to 2020. The sensitivity of RSEI to different driving factors at different stages was investigated by using random forest and structural equation model. [Results] (1) In recent 31 years, the ecological environment quality of Yan'an City showed a good trend. Among them, the indexes of greenness and humidity were increasing, and the indexes of heat and dryness were decreasing, which jointly promoted the change of ecological environment quality in Yan'an City. (2) RSEI showed an upward trend before 1995, a downward trend during 1995—2001, and an increasing trend after 2001. (3) The RSEI changes from 1990 to 1995 belonged to high volatility changes, the RSEI changes from 1996 to 2001 were mainly high volatility changes, and the RSEI changes from 2002 to 2020 belonged to low volatility changes. RSEI will show a large area of decline in the coming period of time. (4) During 1990—1995, RSEI was positively affected by extremely low daily minimum temperature, and negatively affected by extremely high daily maximum temperature, extremely low daily maximum temperature and drought. The positive effect of land use on RSEI was the greatest during 1996—2001, and the very low daily maximum temperature, drought and the very low daily minimum temperature had the greatest negative effect on RSEI. From 2002 to 2020, the 5-day maximum rainfall had the greatest negative impact on RSEI, and the very low daily maximum temperature, the very high daily maximum temperature and the very low daily minimum temperature had little negative impact on RSEI, but they all had an impact on the 5-day maximum rainfall and thus had a greater indirect impact on RSEI. This study can provide practical reference and theoretical support for the assessment and improvement of ecological environment quality in Yan'an City. [Conclusion] In recent 31 years, the ecological environment quality of Yan'an City had shown an overall increasing trend, but the ecological degradation caused by climate change needs to attract the attention of the government, and put forward a series of ecological restoration measures as soon as possible to prevent the further deterioration of its ecological environment.

Keywords: ecological environmental quality; land use; topographic; climate; Yellow River Basin; Yan'an City

生态环境质量是人类活动与自然环境共同作用的结果,与人类生存和社会经济发展密切相关^[1]。虽然城镇化、工业化的发展给人类带来了许多福祉,但与此同时也出现了各种各样的生态环境问题(如城市区域大气污染、水污染等环境污染,乡村地区的水土流失、土地盐碱化等)^[2-3]。据政府间气候变化专门委员会(IPCC)报告显示世界将在21世纪继续变暖且到2100年估计将至少增高4℃,热浪、干旱等极端天气气候的发生和频率将迅速增加^[4-5],这一趋势势必会对我国生态环境脆弱的区域的自然和社会生态系统的可持续发展和稳定性产生重要影响(如植被退化、生物多样性丧失以及干旱加剧)。2021年联合国环境规划署指出生态环境的退化已经影响到约32亿人的福祉(占世界总人口的40%)^[5]。近年来,生态文明建设及提升生态环境质量已经成为我国工作重点^[6-7],通过监测地域生态环境质量演化、驱动因素及未来可能的持续状态对指导当前生态文明建设工作具有重要作用。

黄河中游地区作为世界上土壤侵蚀和环境退化

最严重区域,我国为了减少黄河中游地区水土流失和土壤侵蚀,于1999年实施了一系列生态恢复工程(如退耕还林还草)改善该区域生态环境质量^[4]。但有研究发现黄河中段由于前期生态恢复工程缺乏科学指导(如在限水区种植树木而消耗大量土壤和地下水造成的“小树龄”、新种植的植被使净初级生产力和蒸散发量(ET)增加导致土壤水分减少从而造成土壤表层干旱化等),导致该区域土壤水分缺失、径流减少、生物多样性减少和生态系统退化,严重影响了该区域生态环境质量^[8-9]。因此,厘清黄河流域中游地区生态环境质量时空演变及其主要驱动因子已成为评估该地区植被重建计划可持续性的一个紧迫科学问题,特别是最近的一项研究报告称黄河流域部分地区植被密度已经接近该区域的最大阈值^[9-10]。然而,目前常用于黄河流域中年段生态环境质量监测的大多数评估模型使用单一生态因子,如叶面积指数(LAI)^[11]、植被覆盖度^[12]、土地利用变化^[13]、干旱指数^[14]、水分利用效率等^[15]与生态环境相关的因子。如Qin等^[11]基于LAI指数研究发

现黄河中游地区植被 LAI 呈增加趋势,且干旱和水分利用效率是影响该区域 LAI 变化的主要驱动因子;Tian 等^[16]基于植被覆盖度指数研究发现自 21 世纪以来在气候和人类活动的协同作用下黄河流域 94% 以上的地区植被呈变绿趋势;韩磊等^[17]基于植被覆盖度指数研究也指出黄河流域中游植被呈改善趋势,但东部退化明显。但以上研究均基于单一因子对黄河中游地区生态环境质量进行评估,虽然可以在一定程度上反映黄河流域中游生态环境质量情况,但很难评估地形复杂的地区的生态环境质量的变化,且黄河中游地区生态系统是一个复杂的系统,其生态环境质量会受到多因素的影响,使用综合指标能更全面地反映了该地区的生态状况。近年来,有很多学者计算多种指数均值或以面积权重法构建综合模型,也有基于变异系数法、层次分析法等构建综合模型,但这些模型构建过程往往因人为主观因素使结果存在质疑^[18]。因此,徐涵秋于 2013 年基于遥感数据将绿度、湿度、干度和热度 4 个指数通过主成分分析法(PCA)将 4 种指标耦合提出了新型的遥感生态指数(RSEI),集成了反映生态环境最为直观的多重指标,可实现综合、客观地定量评价区域生态环境质量状态^[19]。如宋慧敏等^[20]基于 RSEI 对 1995 年、2015 年渭南市生态环境质量监测;王丽霞等^[21]基于 RSEI 对 1998—2016 年延河流域生态环境质量进行了监测和预估;杨悦等^[22]也基于 RSEI 对乡村振兴背景下陕西省生态环境质量进行了评估。以上研究均表明 RSEI 指数在生态环境监测和评价方面具有很好的适用性,并已被广泛应用于城市、湿地、岛屿、盆地等地区的生态环境质量监测。延安市地处黄河流域,境内沟壑纵横、地表支离破碎,干旱少雨、植被稀少,曾是黄河中上游地区水土流失最为严重、生态环境最为脆弱的地区之一^[13,23]。但目前基于综合指标监测延安市的生态环境质量及其驱动因子的研究较少。

因此,本文以延安市为研究区,基于 RSEI 综合评估延安市生态环境质量及其对气候、人口、干旱和人类活动等因素的敏感性,旨在回答以下问题:自 1990 年以来延安市生态环境质量时空分布、演化状态及未来可能的持续状态是怎样的?极端气候、平均气候、干旱和人类活动变化对延安市生态环境质量的影响程度如何?主要影响因素对延安市生态环境质量变化是抑制还是驱使?

1 材料与方法

1.1 研究区

延安市地处黄河中段的陕西黄土高原丘陵沟壑

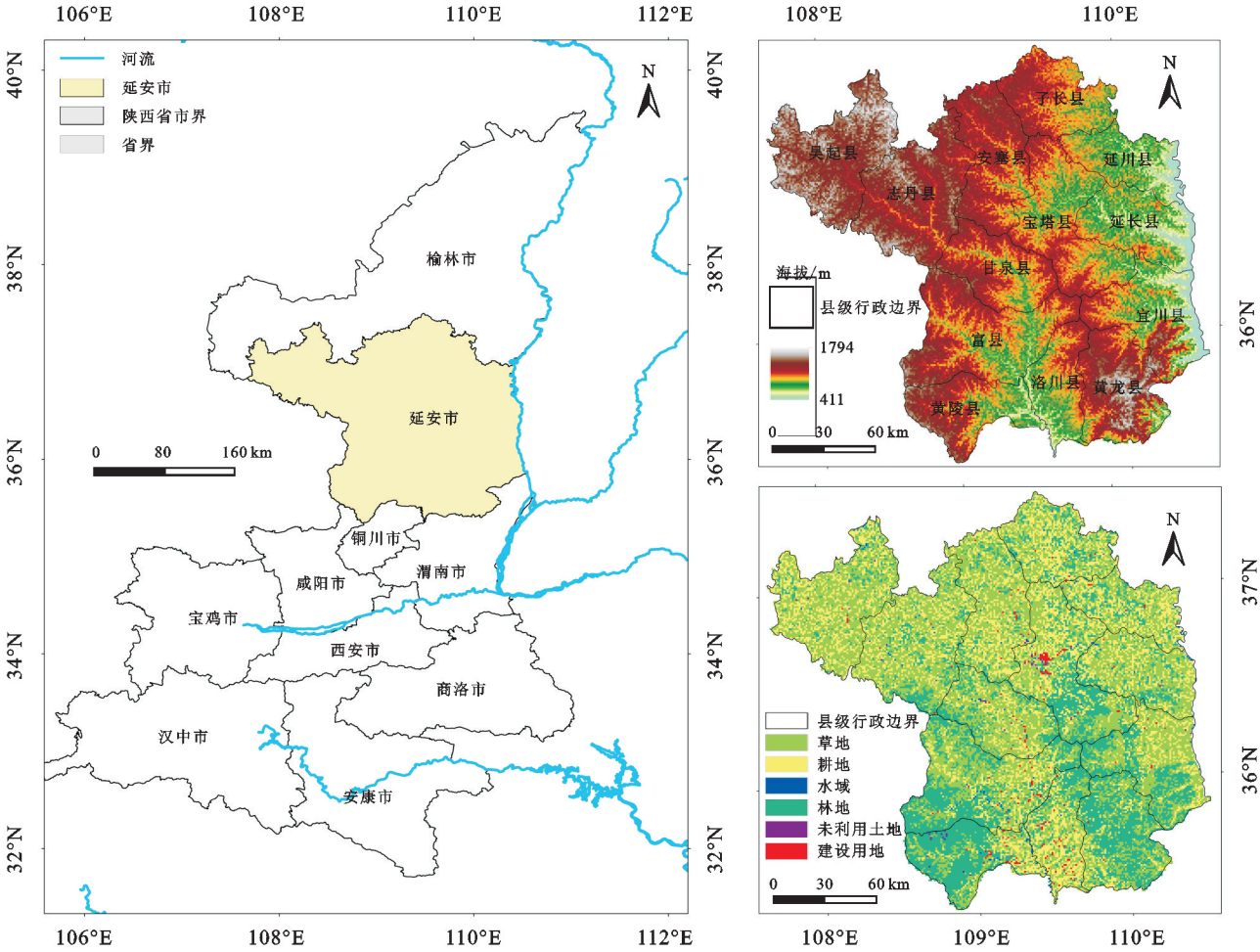
区($35^{\circ}21'—37^{\circ}31'N$, $107^{\circ}41'—110^{\circ}31'E$),北连榆林,南接关中 3 市、东隔黄河与山西临汾、吕梁县相望,西临甘肃庆阳。平均海拔 1 200 m,地形复杂,呈西北高东南低的态势,地貌以高原、丘陵为主,沟壑纵横、梁峁起伏。延安市气候属于暖温带半湿润易旱气候区,全年气候变化受制于季风环流,春季干燥少雨,气温回升迅速,多大风、扬沙天气,降雨集中于夏季,呈东南高、东北低的趋势,且多强度较大的暴雨。北部为半干旱区,南部为半湿润区,夏季温热多雨,冬季寒冷干燥。植被类型主要为林地和草地,自 1999 年之后,延安市实施退耕还林(还草)政策后,森林覆盖率提升到 52.5%,植被覆盖度提高至 81.3%,生态恢复得到很大提升^[10,13,23](图 1)。

1.2 数据源及预处理

本文的研究数据包括 Landsat 遥感数据、气候数据(平均气候、极端气候、干旱)、土地利用和地形数据。

(1) Landsat 遥感数据源于 Google Earth Engine (GEE)平台上提供的已经过了辐射定标、大气校正等预处理的 30 m 空间分辨率的陆地卫星 TM 和 OLI/TIRS 数据的地表反射率数据,反射率数据用于构建本文 RSEI 指数需要的归一化差异植被指数(NDVI)、湿度指数(WET)、归一化差异不透水表面指数(NDBSI)和地表温度(LST)。本文通过多次对比试验选择每年的 4—10 月份的遥感反射率作为 RSEI 计算的基础数据,因为该阶段能更好地体现 RSEI 指数的特性。NDVI, NDBSI, WET 和 LST 的计算公式见文章“1.3.1 遥感生态指数(RSEI)计算方法”章节。

(2) 气候数据:气温(TEM)、降水(PER)和风速(WIN)数据源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/data/cdcdetail/dataCode>)提供的 1990—2020 年的月尺度的气温、降水和风速数据。极端气候数据源于 HadEX3 数据产品(www.climdex.org),该数据是采用综合观测资源来量化昼夜温度和降水变化,由 29 个气候极端指数组成,这些指数是通过世界温度及降水站数据计算而来的,数据涵盖了 1901—2020 年的极端天气事件,综合反映了极端温度和降水事件的频率和强度,该数据被应用于极端天气事件研究中^[11]。根据延安市温度和降水的实际情况,本文选择了最低气温最小值(TNN)、日最低气温最大值(TNX)、日最高气温最小值(TXN)、日最高气温最大值(TXX)、最大 1 d 降雨量(RX1day)、最大 5 d 降雨量(RX5day)作为本文的极端气候指标。气候数据均使用 ANUSPLINE 方法插值得到每月分辨率为 30 m 的空间尺度数据。



注:该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2016)1549 号的标准地图制作,底图无修改。

图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview map of the research area

(3) 地形数据:30 m 的 DEM 数据源于 GEE 平台提供的 SRTM DEM 产品。坡度数据(SLOPE)和坡向数据(Aspect)均是基于 DEM 数据使用 ArcGIS 软件提供的 Slope 和 Aspect 工具计算得到。

(4) 1990—2020 年的土地利用数据(LUCC)来源于中国科学院资源环境科学数据平台(<http://www.resdc.cn>)。土地利用数据包括草地、林地、耕地、建设用地、水域和未利用地。

(5) 干旱数据:本文采用的干旱指标是标准化降水蒸散发指数(Standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI),SPEI 作为一种站点特有的干旱指标,特别适合于检测、监测和探索全球变暖对干旱状况的影响^[14]。SPEI 指数基于降水、气温、湿度等资料计算蒸散量,得到每月水平衡,对降水量和蒸散量之间的差值序列累积概率值进行正态标准化,用降水量和蒸散量之间的差值与其平均状态的偏离程度来揭示区域的干旱特征^[14]。本文利用中国气象数据共享服务系统提供的 1990—2020 年月平均气温和月总降水数据计算不同尺度下的 SPEI,用最接

近序列的线性回归估计替代了某些特定站点的缺失数据。通过 SPEI 计算器计算了 3 个月尺度和 12 个月尺度的 SPEI 值,3 个月尺度的 SPEI 可以用来反映干旱的季节性变化特征。具体计算公式参见文献^[14]。最后基于 ANUSPLIN 软件插值为 30 m 的网格数据。

1.3 研究方法

1.3.1 遥感生态指数 遥感生态指数(RSEI)从反映生态质量的众多自然因素中选择与人类生存相关的 4 个因素作为生态评价因素^[21],该指数利用主成分分析耦合了表示地表植被覆盖和生长情况的绿色指数(NDVI)、表示土壤的湿度状况的湿度(WET)指数、表示地表干旱程度的干燥度指数(NDBSI)和反映地表热度情况的热量指数(LST)。其中,NDVI 和 NDBSI 指标可以反映人类活动引起的土地覆盖变化的生态响应,LST 和 WET 揭示了生态质量对气候变化的响应,4 个生态指标综合起来能够直观地反映区域生态环境恶劣情况^[19]。4 个指标的计算如下:

(1) 绿度指标 NDVI。归一化差异植被指数

(NDVI)是应用最广泛的植被指数之一,许多生态学研究均证明了其有用性^[12-13]。因此,本文选择 NDVI 作为绿度指数,计算公式为(1):

$$\text{NDVI} = (\rho_{\text{nir}} - \rho_{\text{red}}) / (\rho_{\text{nir}} + \rho_{\text{red}}) \quad (1)$$

式中: ρ_{nir} 为遥感图像的近红外波段; ρ_{red} 为红光波段。

(2) 热度指标 LST。热度指标由地表温度 (LST)表示。虽然 Landsat 8 TIRS 传感器中有两个热红外波段,但由于波段 11 的辐射校准问题,本文仅选择了波段 10 来反演 LST^[18]。当然,对于 TM,我们仍然得到了基于波段 6 的 LST^[19]。将数字(DN)值转换为传感器孔径处的光谱辐射亮度,表示为 LST 的计算公式见(2):

$$L_{\lambda} = G_{\text{rescale}} \times Q_{\text{cal}} + B_{\text{rescale}} \quad (2)$$

式中: G_{rescale} 是特定于频带的重新缩放增益因子; Q_{cal} 是量化的校准像素值(DN); B_{rescale} 是不同于频带的重新缩放偏置因子。传感器处光谱辐射亮度可使用公式(3)转换为传感器亮度温度下的有效辐射亮度:

$$T_{\lambda} = K_2 / \ln \left[\frac{K_1}{L_{\lambda}} + 1 \right] \quad (3)$$

式中; T_{λ} 是传感器亮度温度下的有效值; K_1 (TM 波段 6 为 607.76 W/(m² · sr · μm);TIR 波段 10 为 774.89 W/(m² · sr · μm)和 K_2 (TM 波段 4 为 260.56 K,TIR 波段 10 为 1 321.08 K)分别是校准常数 1,2。最后,使用 T_{λ} 获得 LST,公式表示见(4):

$$\text{LST} = T_{\lambda} / \left[1 + \left(\frac{\lambda T}{\rho} \right) \ln \epsilon \right] \quad (4)$$

式中: λ 是发射辐射的波长(TM 波段 6 为 11.435 μm,TIR 波段 10 为 10.9 μm); ρ 为常数(1.438 × 10⁻² mK); ϵ 是表面发射率,可通过使用 Sobrino 模型的 NDVI 估算^[20]。

(3) 湿度指标 WET。对地表湿度信息较为敏感的缨帽变换湿度分量(TCW)已被证明对植被、水和土壤湿度条件较为敏感^[14]。因此,本文选择 TCW 作为湿度指数(WET),并且可以分别使用方程(5)和(6)来估计 Landsat TM 和 Landsat 8 的湿度指数^[23]:

$$\text{WET}_{\text{tm}} = 0.0315\rho_1 + 0.2012\rho_2 + 0.3102\rho_3 + 0.1594\rho_4 - 0.6806\rho_5 - 0.6109\rho_6 \quad (5)$$

$$\text{WET}_{\text{ol}} = 0.1511\rho_1 + 0.1973\rho_2 + 0.3283\rho_3 + 0.3407\rho_4 - 0.7117\rho_5 - 0.4559\rho_6 \quad (6)$$

式中: ρ_i ($i=1,2,3,\dots,6$)分别为 TM 和 OLI 传感器对应的蓝光波动、绿光波段、红光波段、近红外波段、短波红外波段 1 和短波红外波段 2。

(4) 干度指标 NDBSI。由于建设用地和裸露土壤会对区域生态环境造成严重危害。因此,本文选择了归一化差异不透水表面指数(NDBSI)结合基于指

数的建成指数(ABI)和土壤指数(BSI)表征研究区干燥度,其计算公式见(7—9)。

$$\text{NDBSI} = (\text{BSI} + \text{ABI})^2 \quad (7)$$

$$\text{BSI} = \left[\frac{(S_1 + \rho_{\text{red}}) - (\rho_{\text{blue}} + \rho_{\text{nir}})}{(S_1 + \rho_{\text{red}}) + (\rho_{\text{blue}} + \rho_{\text{nir}})} \right] \quad (8)$$

$$\text{ABI} = \left\{ \frac{2S_1}{S_1 + \rho_{\text{nir}}} - \left[\frac{\rho_{\text{nir}}}{\rho_{\text{nir}} + \rho_{\text{red}}} + \frac{\rho_{\text{green}}}{\rho_{\text{green}} + S_1} \right] \right\} / \frac{22_1}{S_1 + \rho_{\text{nir}}} - \left[\frac{\rho_{\text{nir}}}{\rho_{\text{nir}} + \rho_{\text{red}}} + \rho_{\text{green}} / (\rho_{\text{green}} + S_1) \right] \quad (9)$$

式中: $S_1, \rho_{\text{red}}, \rho_{\text{green}}, \rho_{\text{nir}}, \rho_{\text{blue}}$ 分别表示 TM 和 OLI 对应的短波红外、红光、绿光、近红外和蓝光波段

(5) 遥感生态指数构建 RSEI。通过主成分变化(PCA)对以上 4 个指标进行集成,并使用第一个主成分(PC1)构建 RSEI,其最大优点是综合指标的权重不是人为确定的,而是根据每个指标对 PC1 的贡献自动客观地确定。因此,在计算中避免了由于权重设置而导致的可能的偏差,该权重设置因个人和方法而异,这大大提高了结果的客观性和可信度。在预处理后需要对 4 个指标进行归一化以实现单位统一,然后采用 PCA 方法将 NDVI, LST, WET, NDBSI 的信息集中到第一主成分上。

指标归一化公式见(10):

$$\text{NI}_i = (I_i - I_{\min}) / (I_{\max} - I_{\min}) \quad (10)$$

式中: NI_i 为各指标归一化结果; I_i 为各指标在第 i 像元的值; I_{\min} 和 I_{\max} 分别为各指标最小值和最大值。

RSEI 计算公式见(11)、(12):

$$\text{RESI}_0 = 1 - \text{PC1}[f(\text{NDVI}, \text{WET}, \text{LST}, \text{NDBSI})] \quad (11)$$

$$\text{RSEI} = (\text{RSEI}_0 - \text{RSEI}_{0\min}) / (\text{RSEI}_{0\max} - \text{RSEI}_{0\min}) \quad (12)$$

式中:PC1 为 4 个指标归一化后指标通过第一主成分分析的结果,为了方便分析,对其进行正负值转置。 RSEI_0 为转置后结果,4 个指标分别参与徐涵秋等^[19]的研究成果,具体计算公式见文献^[19]。 $\text{RSEI}_{0\max}$, $\text{RSEI}_{0\min}$ 分别为 RSEI_0 最大值和最小值。

本文基于文献^[19]将 RSEI 划分为 $\text{RSEI} < 0.2$ (差), $0.2 \leq \text{RSEI} < 0.4$ (较差), $0.4 \leq \text{RSEI} < 0.6$ (中等), $0.6 \leq \text{RSEI} < 0.8$ (良好)和 $\text{RSEI} \geq 0.8$ (优)5 个等级。

1.3.2 Mann-Kendall 突变点检验 本文采用 Mann-Kendall 方法对 1990—2020 年延安市生态环境质量突变检验。用每年的 RSEI 构造一个 X 序列记为 S_k ,在时间序列为随机的假设下^[14],定义统计量:

$$\text{UF}_K = \frac{[s_k - E(s_k)]}{\sqrt{\text{var}(s_k)}} \quad (13)$$

式中; $E(s_k)$ 和 $\text{var}(s_k)$ 分别是 S_k 的均值和方差。

UF_K 形成 UF 的特征曲线,再通过可信度检验来判断是否有明显的变化趋势。UF>0,表示序列呈上升趋势,反之,呈下降趋势。RSEI 突变点为 UF 与 UB 曲线相交点^[23]。

1.3.3 RSEI 变化趋势分析 采用 Sen 趋势法探究 1990—2020 年延安市 RSEI 变化趋势和变化速率。Sen 斜率的计算公式见(14)^[11]：

$$\beta = \text{Median} \left(\frac{x_j - x_i}{j - i} \right), \forall j > i \quad (14)$$

式中： β 为 RSEI 变化趋势；Median 为取中值函数；当 $\beta > 0$ 时，RSEI 呈增加趋势； $\beta < 0$ 时，RSEI 呈减小趋势。

1.3.4 变异系数法 利用变异系数(C_v)来反映延安市生态环境质量变化相对波动程度,数值越大表明生态环境质量受干扰强度越大,越不稳定;数值越小说明生态环境质量状态相对稳定^[11]。计算公式如下：

$$C_v = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (RSEI_i - RSEI_{\text{mean}})^2 / RSEI_{\text{mean}}} \quad (15)$$

式中： C_v 为 RSEI 变异系数； $RSEI_i$ 表示第 i 年对应的 RSEI 值； $RSEI_{\text{mean}}$ 为基于 1990—2020 年的 RSEI 数据获得的多年 RSEI 均值。

1.3.5 Hurst 法 Hurst 指数是根据每年 RSEI 时间序列数据预测未来 RSEI 可能的变化趋势,是一种定量表述时间序列信息长期依赖性的有效方法^[11]。Hurst 指数分为 3 种情况：若 $0 \leq \text{Hurst} < 0.5$,说明 RSEI 时序数据具有长期的相关性,将来的总体趋势和过去的趋势相反,时间序列表现出反持续性;所 $\text{Hurst} = 0.5$,表明 RSEI 时序数据互相独立且没有依赖性,现在不会影响未来; $0.5 < \text{Hurst} \leq 1$,表明未来的 RSEI 时序数据总体趋势与过去的总体趋势相同,过程具有持续性,越接近 1,持续性越强^[11]。

1.3.6 随机森林模型 利用随机森林回归模型变量的重要性对驱动因素对延安市 RSEI 的影响进行排序,该模型使用均方误差的百分比增长(%Inc MSE)来评估每个自变量对因变量的影响程度^[11]。首先构造 ntree 决策树模型和计算随机替换的 OBB 均方误差(未取样的样品组成的 ntree out-of-bag 数据),构造如下矩阵：

$$\begin{bmatrix} \text{MSE}_{11} & \text{MSE}_{12} & \cdots & \text{MSE}_{1\text{ntree}} \\ \text{MSE}_{21} & \text{MSE}_{22} & \cdots & \text{MSE}_{2\text{ntree}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \text{MSE}_{m1} & \text{MSE}_{m2} & \cdots & \text{MSE}_{m\text{ntree}} \end{bmatrix}$$

其次计算重要性得分,如下公式：

$$\text{score}X_j = S_E^{-1} \frac{\sum_{r=1}^{n_{\text{tree}}} \text{MSE}_r - \text{MSE}_{pr}}{n_{\text{tree}}} \quad (16)$$

式中： n 为原始数据样本的数量； m 为变量的数量。

1.3.7 结构方程模型 采用 AMOS 23 软件构建结构方程模型(SEM, Structural Equation Model),该模型基于研究者的先验知识预先设定各因素之间的依赖关系,以此判断各因素之间关系强弱,可获得自变量对因变量影响的直接效果、间接效果和总效果,并能够拟合和判断整体模型,可更全面地了解研究系统。本文使用 SEM 模型中极大似然估计来研究延安市不同时间段 RSEI 与主要驱动因子之间的直接影响和间接影响,后根据整体模型拟合检验(卡方)以及个别参数检验(p 值)来评估整体模型^[11]。

2 结果与分析

2.1 延安市生态环境质量总体分析

本文通过对 1990 年、2000 年、2010 年、2020 年的 4 个指标进行主成分分析(表 1),发现四年各指标的第一主成分贡献率分别为 88.262%,92.957%,93.342%和 95.294%,表明第一主成分包含了 4 个指标的大部分信息,可以使用第一主成分构建 RSEI 指数。本文后续研究将采用第一主成分的结果构建延安市的 RSEI 模型。

图 2 为 1990—2020 年 4 种指标、RSEI 均值变化和突变点情况,可以发现 RSEI 从 0.598(1990 年)增加至 0.707(2020 年),线性变化倾斜率为 0.003 3/a,说明延安市近 31 年生态环境质量整体呈变好趋势。从单一指标来看可以促进生态环境质量的绿度和湿度指标均为增加趋势,其增加速率分别为 0.005 2/a 和 0.001 1/a,而与生态环境质量呈负关系的热度指标和干度指标均表现为减小趋势,其减小速率分别为 0.002 4/a 和 0.003 6/a。从各曲线来看,RSEI 的变化曲线走向没有与任何一个指标相一致,因此可以发现是各指标的综合影响共同促进了延安市的生态环境变化。从 RSEI 的突变的检验图可以发现由 UF 曲线可以看出 1995 年之前 RSEI 为上升趋势,1995—2001 年 RSEI 为下降趋势,2001 年之后延安市 RSEI 一直呈增加趋势,且 RSEI 的增加速率在逐渐上升。在 2008 年之前的年份 UF 和 UB 曲线相交年份较多,结合 RSEI 曲线可以 2001—2008 年之间 RSEI 突变情况较为明显,后基本呈稳定的上升趋势,但 2008 年之后的年份 UF 和 UB 曲线无相交情况,因此可以说明 2001 年是延安市 RSEI 出现突变的年份。

2.2 延安市生态环境质量空间分布特征

从延安市 RSEI 的空间分布来看(图 3),1990 年延安市 RSEI 值总体表现为从北向南逐渐减小的趋势,即从北向南生态环境质量逐渐变差,其中的吴起

县、志丹县和延川县的生态环境质量较其他地区较弱,区域内大部分面积的 RSEI 值在 0.4 以下,属于较差及以下等级,该区域土地类型为生态环境较为脆弱的草地覆盖区域。但在南部的大部分区域 RSEI 值基本在 0.6 以上,属于中等及以上等级,生态环境质量较北部好。1995 年生态环境质量较 1990 年北部有所改善,但是南部生态环境质量变差,尤其是南部的黄陵县和富县。2000 年生态环境质量进一步改善吴起县、志丹县和延川县生态环境质量改善最为明显,从较差及以下等级改善为良好及以上等级,但南部生态环境质量较 1995 年并未发生较大变化。2005 年除宜川县和延川县

部分地区的生态环境质量较 2000 年有所变差,其他区域生态环境质量等级并未发生较大变化。2010 年较 2005 年来看,宜川县、吴起县和志丹县 RSEI 指数有所下降,但在延安市的南部大部分地区的生态环境质量得到很大提升。2015 年较 2010 年生态环境质量总体表现为变差趋势,在延安市北部地区表现较为明显。2020 年延安市整个区域的生态环境质量均较好,整个区域基本均为优等及以上等级。

总体来看,从 1990—2020 年延安市生态环境质量大区域表现为改善趋势,在延安市北部地区改善最明显。

表 1 各指标主成分及贡献率
Table 1 Principal components and contribution rate of each indicator

年份	参数	第一主成分	第二主成分	第三主成分	第四主成分
1990	NDVI	0.525	0.270	0.776	0.222
	LST	−0.617	0.516	−0.510	−0.305
	NDBSI	−0.292	−0.208	−0.370	0.857
	WET	0.508	−0.786	0.030	−0.351
	特征值	1.044	0.127	0.008	0.004
	特征值贡献率/%	88.262	10.754	0.682	0.303
2000	NDVI	0.599	0.197	0.671	0.390
	LST	−0.563	0.585	−0.489	−0.318
	NDBSI	−0.026	0.005	−0.520	0.854
	WET	0.569	−0.786	−0.199	−0.134
	特征值	1.029	0.067	0.008	0.003
	特征值贡献率/%	92.957	6.032	0.718	0.293
2010	NDVI	0.552	0.265	0.701	0.365
	LST	−0.545	0.550	−0.369	−0.514
	NDBSI	−0.506	−0.353	−0.555	0.557
	WET	0.377	−0.709	0.252	−0.541
	特征值	1.388	0.093	0.004	0.002
	特征值贡献率/%	93.342	6.264	0.237	0.157
2020	NDVI	0.415	0.464	−0.032	0.782
	LST	−0.658	0.366	−0.312	−0.579
	NDBSI	−0.464	−0.227	0.853	−0.076
	WET	0.424	−0.774	−0.417	0.217
	特征值	1.411	0.062	0.005	0.003
	特征值贡献率/%	95.294	4.183	0.347	0.176

2.3 延安市生态环境质量演化分布特征

本文根据 M-K 突变点检验结果,将本文的研究时段(1990—2020 年)分为 3 个阶段(1990—1995 年、1996—2001 年、2002—2020 年),并基于 Sen 斜率法探究了不同阶段延安市生态环境质量变化趋势特征(图 4)。我们发现 1990—1995 年延安市 38.34% 的区域的生态环境质量为上升趋势,主要集中在北部的吴起县、安塞县、子长县、宝塔县、延长县、延长

县和宜川县,尤其在吴起县部分地区的生态环境质量改善呈显著趋势;32.35% 的区域的生态环境质量变化不明显,集中分布在延安市中部地区;39.32% 的区域表现下降趋势,尤其在黄陵县和富县西北部地区下降趋势最明显。1996—2001 年延安市生态环境质量总体以上升趋势为主(占总区域的 90.8%);呈下降趋势的区域占总区域的 3.17%,零散分布在安塞县北部和宝塔县北部地区;呈保持不变趋势的占 6.03,

集中分布在延安市北部的延川县、延长县地区。2002—2020 年延安市生态环境质量总体以不显著上升趋势为主(占研究区总面积的 60.32),12.04% 的区域表现为增加趋势,集中在延安东北部的子长县、安塞区延川县和宝塔县;27.65 的区域的生态环境质量变化不大。

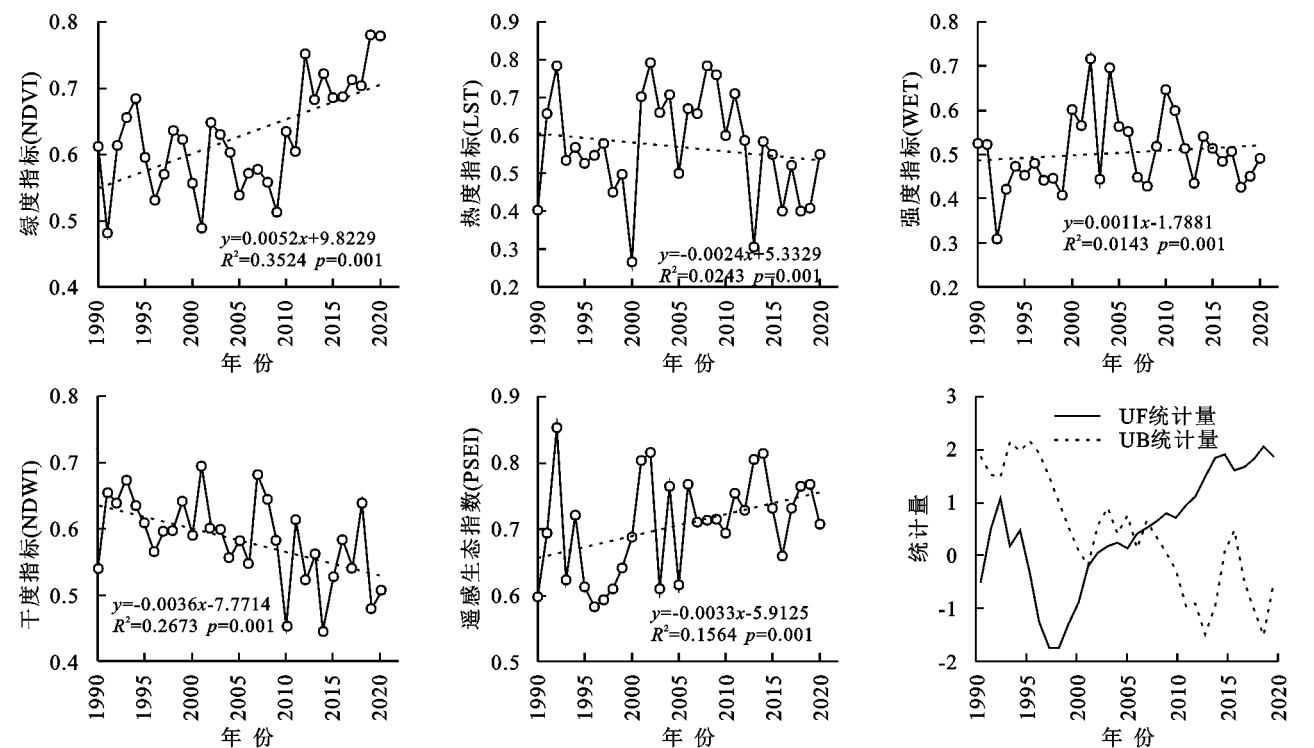


图 2 4 个指标和 RSEI 时序曲线及 RSEI 的 Mann-Kendall(M-K) 检验

Fig. 2 Four indicators and RSEI time series curve, as well as Mann Kendall (M-K) test curve of RSEI

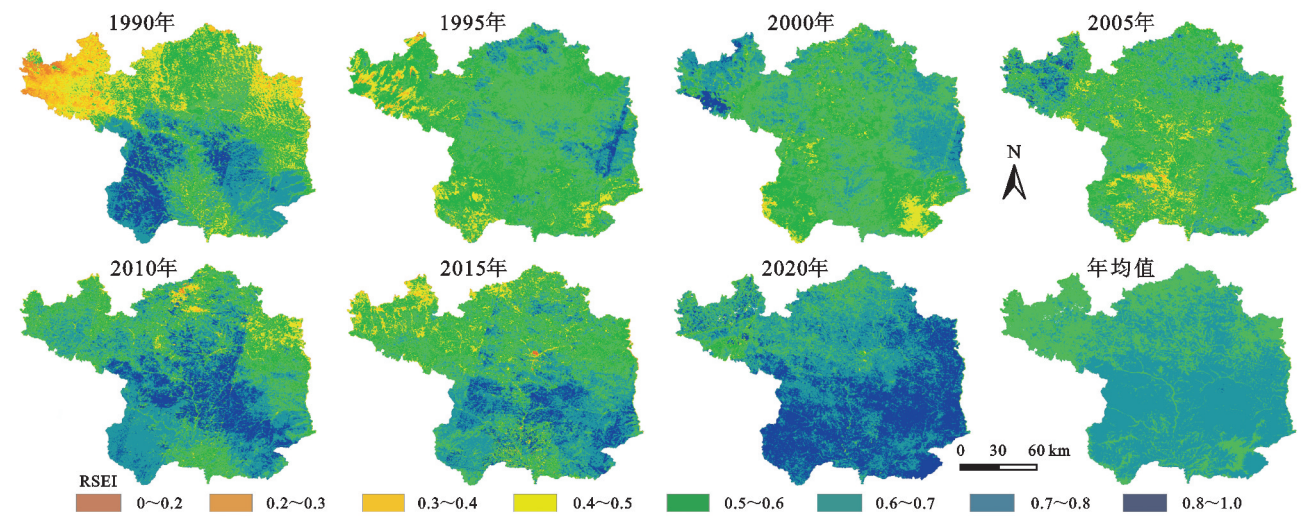


图 3 RSEI 的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution map of RSEI

总体而言,延安市不同阶段的生态环境质量演化呈现较大差异,1995 年以前生态环境质量以下降趋势为主,而 1995 年之后总体以上升趋势为主,这一结果与 RSEI 的均值趋势呈现结果存在差异,因此不能用区域平均值十分准确地展现区域整体的变化情况。

2.4 延安市生态环境质量稳定性的空间格局

本文基于变异系数探究了延安市不同阶段生态环境质量变化稳定性情况,基于延安市不同阶段

RSEI3 变异性计算结果和实际情况将变异划分为 6 个等级(图 5)。我们发现延安市 1990—1995 年的 RSEI 变异系数的平均值为 0.195,变化属于较高波动变化(0.15~0.2),其中属于高波动变化(>0.2)的占整个延安市的 42.03%,集中在吴起县、志丹县、延川县、黄陵县、富县和黄龙县等地区,而在延安市中部地区的生态环境变化较为稳定,尤其在甘泉县和宝塔县以南地区变化属于低波动(0~0.1)。

1996—2001 年延安市 RSEI 变化的稳定性较 1990—1995 年来看,发生较大变化的区域是延安市东部地区的延川县、延长县和宜川县地区和延安市南部的洛川县地区,稳定性从原来的较高变化变成了

高变化,其他区域变化不明显。2002—2020 年延安市生态环境质量总体变化较为稳定,整个区域的生态环境变化稳定性系数平均值为 0.148,属于较低波动变化(0.1~0.15)。

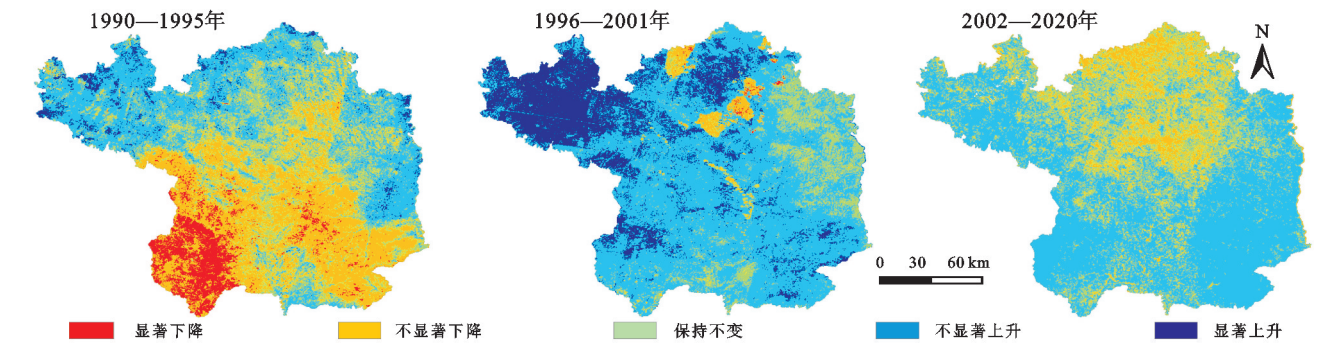


图 4 各阶段 RSEI 的趋势分布

Fig. 4 Trend distribution chart of RSEI in each stage

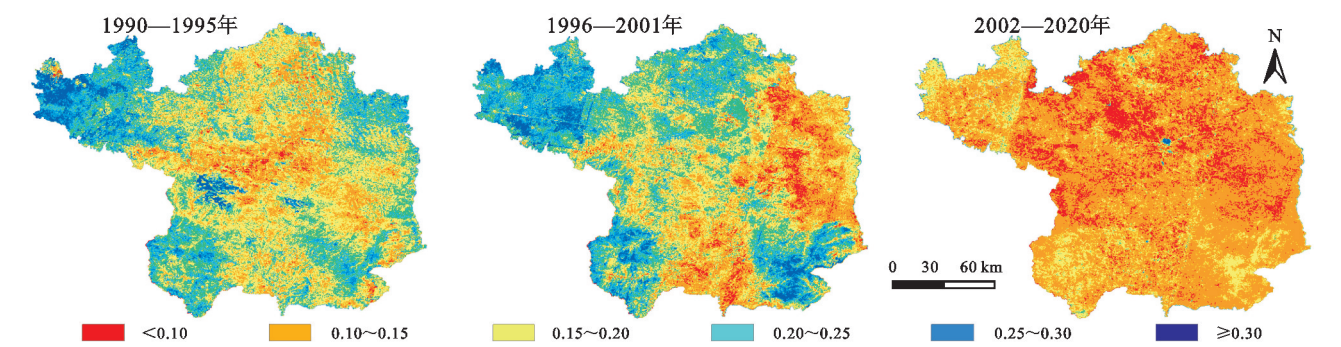


图 5 各阶段 RSEI 的变异系数分布

Fig. 5 Distribution map of coefficient of variation for RSEI in each stage

2.5 延安市生态环境质量未来趋势的空间格局

基于 1990—2020 年延安市的 RSEI 时间序列计算得到 Hurst 指数(H)分布图(图 6),可知延安市 Hurst 指数均值为 0.373,表明未来延安市 RSEI 变化趋势具有 Hurst 现象,即未来一段时期内延安市的 RSEI 的变化趋势与 1990—2020 年的变化趋势整体表现为相反趋势。 H 介于 0~0.5 之间的面积占 97.69%,结合前面的 RSEI 变化趋势发现延安市 RSEI 在未来一段时间内会出现大面积的下降趋势。其中反持续性减少($0 \leq H < 0.4$)占 63.7%,主要集中在延安市中部和南部地区,北部地区零星分布在所有县区。33.99%的区域为反持续性减少不显($0.4 \leq H < 0.5$),零散分布在整个研究区。未来延安市 RSEI 的变化趋势与 1990—2020 年的变化趋势相同的面积($0.5 < H \leq 1$)的仅占延安市总面积的 2.31%,远小于反持续性变化,零星分布在延安市东北部的延川县、宝塔县和安塞县以及延安市南部的洛川县地区。

2.6 延安市生态环境质量未来趋势的空间格局

通常认为人类活动、地形、气候因子(平均气候以及极端降水)、干旱等的会对区域生态环境质量产生显著影响。因此,本文采用随机森林算法对选取的

14 生态环境质量的驱动因子(包括气候因子(风速(WIN)、气温(TEM)、降水(PER)、日最低气温的极低值(TNn)、日最低气温的极高值(TNx)、日最高气温的极低值(TXn)、日最高气温的极高值(TXx)、单日最大降雨量(Rx1day)、连续 5 日最大降雨量(Rx5day)、人类活动[土地利用(LUCC)]、地形(海拔(DEM)、坡度(Slope)、坡向(Aspect))和干旱(SPEI 指数)的敏感性排序,从因子排序的结果发现不同时间段驱动因子对延安市生态环境质量影响的程度存在差异。其中,1990—1995 年,延安市生态环境质量受到 TXx, TNn, TXn 和 SPEI 的影响较大,%incMSE 大于 55,而受到人类活动和地形因子的影响较小(%incMSE 小于 40)。1996—2001 年延安市生态环境质量受到 SPEI, TXn, TNn, LUCC 的影响较大(%incMSE 大于 50),受到地形的影响较小。而 2002—2020 年延安市生态环境质量受到 Rx5day, TXn, TNn 和 TXx 的影响较大,但%incMSE 基本小于 7,较前两个阶段小,因此这些因素在这一阶段对 RSEI 的影响较小。

2.7 延安市生态环境质量与主要驱动因子的通经分析

通过构建不同阶段的主要驱动因子对延安市

RSEI 的结构方程模型得到各个因子和各个因子对 RSEI 的通经系数,反映不同因子对 RSEI 的直接和间接影响。结构方程模型表明不同时间段延安市生态环境质量与不同因子间存在复杂的交互作用。其中,1990—1995 年 TXn 对 RSEI 的正影响系数最大(0.63),而 TXx(-0.77)、SPEI(-0.45)和 TNn(-0.39)对 RSEI 为负影响。此外,在整个相互作用路径中,不同因子之间的相关关系均较显著,由此可知,延安市 RSEI 除了受到 TXn, TXx, SPEI 和 TNn 的直接影响外,还会受到这些因子之间相互作用的间接影响。1996—2001 年 LUCC 对 RSEI 的正影响系数最大(0.24),而 TXn(-0.26)、SPEI(-0.24)和 TNn(-0.03)对 RSEI 为负影响,且 TNn 对 RSEI 的直接影响较小,而是通过对因子的影响从而进一步对 RSEI 产生影响(尤其是对 TXn 的影响最大)。2002—2020 年 Rx5day 对 RSEI 的负影响最大(-0.4),而 TXn(-0.04)、TXx(-0.02)和 TNn(-0.09)对 RSEI 为负影响较小,但其均对 Rx5day 产生了较为显著的影响,通过影响 Rx5day 从而间接对 RSEI 产生影响。

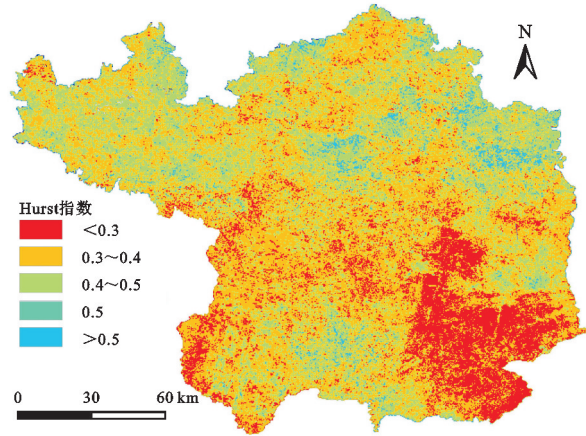


图 6 RSEI 的 Hurst 指数分布

Fig. 6 Hurst Exponential distribution diagram of RSEI

3 讨论与结论

延安市境内地表支离破碎,干旱少雨、是我国生态环境最为脆弱的地区之一。因此我国自 1999 年之后在延安市实施了“退耕还林(还草)”政策,自政策实施以来植被动态和生态环境监测已成为该区域的关注热点,但目前基于综合指标评价延安市“退耕还林(还草)”政策实施前后的生态环境时空动态、未来演化趋势及不同阶段生态环境变化的主要驱动因子^[13-22]。然而延安市生态环境质量对地形地貌、气候变化和人类活动的响应过程是一个复杂的动态过程,不同地貌条件会导致热量和水分的空间差异,进而使

得生态环境质量变化存在明显空间差异,尤其在对气候敏感的干旱、半干旱地区尤为显著^[8-11]。因此,本文基于 GEE 平台提供的 1990—2020 年的 Landsat 数据基于综合评价指数—RSEI 指数并辅以 Sen 趋势分析、Manna-Kendall 突变点检验、变异系数、Hurst 法对延安市生态环境过去和未来演化特征进行了分析,然后基于随机森林和结构方程模型探究了不同阶段 RSEI 对不同驱动因素的敏感性和相关性,揭示了不同阶段生态环境质量对主要驱动因子的响应规律,主要结论如下:

(1) 延安市近 31 年生态环境质量整体呈变好趋势。其中与生态环境质量的绿度和湿度指标均为增加趋势,呈负关系的热度指标和干度指标均表现为减小趋势,综合来看是各指标的综合影响共同促进了延安市的生态环境变化。本文研究结论与杨悦等、张家政等、聂桐等人研究结论相一致,这表明延安市生态环境质量自生态修复工程以来得到了极大的改善。

(2) 延安市生态环境质量从 1990—2020 年大区域表现为改善趋势,在延安市北部地区改善最明显。但从时间趋势上来看,延安市 1995 年之前 RSEI 为上升趋势,1995—2001 年 RSEI 为下降趋势,2001 年之后延安市 RSEI 一直呈增加趋势,2001 年时 RSEI 发生突变的年份。

(3) 延安市 1990—1995 年的 RSEI 变化属于较高波动变化,集中在吴起县、志丹县、延川县、黄陵县、富县和黄龙县等地区,延安市中部地区的生态环境变化较为稳定(变化属于低波动)。1996—2001 年延安市 RSEI 变化的整体以高波动变化为主,2002—2020 年延安市生态环境质量总体变化较为稳定,属于较低波动变化。延安市 RSEI 在未来一段时间内会出现大面积的下降趋势。

(4) 1990—1995 年延安市生态环境质量受到日最低气温的极低值的正影响最大,受到日最高气温的极高值、日最高气温的极低值和干旱的负影响较大;1996—2001 年土地利用对 RSEI 的正影响最大,而日最高气温的极低值、干旱和日最低气温的极低值对 RSEI 为负影响,且日最低气温的极低值对 RSEI 的直接影响较小,而是通过对因子的影响从而进一步对 RSEI 产生影响;2002—2020 年连续 5 日最大降雨量对 RSEI 的负影响最大,而日最高气温的极低值、日最高气温的极高值和日最低气温的极低值对 RSEI 为负影响较小,但其均对连续 5 日最大降雨量产生影响从而间接对 RSEI 产生较大影响。这主要是因为

延安市土质为疏松的黄土层,常年受到风蚀、水蚀的显著影响,土地沙化、温度升高、日照时数增加、太阳辐射增强、风速增加以及极端事件增多均会导致区域生态环境恶化^[8]。其中极端降雨的增多会加剧延安市水土流失,带走地表的有机质,从而对延安市生态环境产生不利影响^[24]。其次,一方面随着全球温度升高和极端温度事件的增加以及伴随的干旱事件的增多,土壤水分和植被冠层水分的蒸散发增加,使延安市部分区域水分利用效率降低,从而影响生态环境质量的变化^[16]。另一方面随着极端温度增大,地表干燥度增加,裸露在外的土壤在强烈的太阳辐射、风和极端降水的侵蚀下,植被根系抓地力下降,从而进一步导致生态环境质量降低^[11]。延安市作为我国水土流失最为严重的黄土高原区域,虽然自1999年以后的一些生态恢复工程(如退耕还林还草),使植被覆盖发生了显著变化^[25]。但有研究发现工程实施之初没有综合考虑到区域气候、水文等因素影响,而大规模造林活动增加的蒸散发使地表干燥化程度增加^[24]。大范围的干旱可能会导致未来植被呈退化趋势,加剧延安市生态环境恶化^[26]。有研究表明全球气候变暖加剧了气候系统的不稳定性,未来极端气候事件出现的频率和强度均呈现明显的增加,其中主要以极端湿润和极端干旱的年份频率增加为主,主要表现为极端干旱和极端湿润交替出现^[11,24]。这些极端事件的发生和交互作用不但会对延安市生态环境产生巨大影响,而且也会伴随一系列的自然灾害。因此,未来延安市生态环境恢复不但要考虑大型生态工程实施的后期是否有片面(或负反馈作用),还亟需关注极端气候导致的自然灾害和植被退化。

参考文献:

- [1] Zhang T, Peng J, Liang W, et al. Spatial-temporal patterns of water use efficiency and climate controls in China's Loess Plateau during 2000—2010[J]. *Science of the Total Environment*, 2016,565:105-122.
- [2] 郜国明,田世民,曹永涛,等.黄河流域生态保护问题与对策探讨[J].*人民黄河*,2020,421(9):126-130.
Gao G M, Tian S M, Cao Y T, et al. Discussion on the issues and countermeasures of ecological conservation of the Yellow River Basin[J]. *Yellow Rive*, 2020,421(9): 126-130.
- [3] 山仑,徐炳成.新时期延安市林草植被建设若干问题研究[J].*人民黄河*,2022,44(9):6-11.
Shan L, Xu B C. Some issues about afforestation and grassland construction in Yan'an City in the New Era [J]. *Yellow River*, 2022,44(9):6-11.
- [4] Yuan M, Zhao L, Lin A, et al. Impacts of preseason drought on vegetation spring phenology across the northeast China Transect[J]. *Science of the Total Environment*, 2020,738:140297.
- [5] Gerland P, Raftery A E, Sevcikova H, et al. World population stabilization unlikely this century[J]. *Science*, 2014,346:234-237.
- [6] 孙亚荣,白应飞,王亚娟,等.1999—2018年延安市各县退耕还林草实施效果分析[J].*水土保持研究*,2023,30(1):209-215.
Sun Y R, Bai Y F, Wang Y J, et al. Analysis on the implementation effect of returning farmland to forestland and grassland in various districts and counties of Yan'an City from 1999 to 2018[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023,30(1):209-215.
- [7] 周璐红,王盼婷,曹瑞超.2000—2020年延安市土壤侵蚀驱动因素分析及生态安全评价[J].*生态与农村环境学报*,2022,38(4):511-520.
Zhou L H, Wang P T, Cao R C. Soil erosion driving factors and ecological security evaluation for Yan'an City from 2000 to 2020 [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2022,38(4):511-520.
- [8] Feng X, Fu B, Piao S, et al. Revegetation in China's loess plateau is approaching sustainable water resource limits [J]. *Nature Clim Change*, 2016,6:1019-1022.
- [9] Wang S, Fu B, Piao S, et al. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes [J]. *Nature Geoscience*, 2015,9(1):38-41.
- [10] Fu B, Wang S, Liu Y, et al. Hydrogeomorphic ecosystem responses to natural and anthropogenic changes in the Loess Plateau of China[J]. *Annual Review of Earth & Planetary Sciences*, 2016,45(1):223-243.
- [11] Qin G X, Meng Z Y, Fu Y. Drought and water-use efficiency are dominant environmental factors affecting greenness in the Yellow River Basin, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2022,834:155479.
- [12] 张家政,闵志强,王得军,等.基于延安市不同植被类型NDVI对气象因子影响及空间异质性[J].*西北林学院学报*,2021,36(6):55-64.
Zhang J Z, min Z Q, Wang D J, et al. Effects of NDVI on meteorological factors and spatial heterogeneity based on different vegetation types in Yan'an City[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2021, 36(6):55-64.
- [13] 杨致远,刘琪璟,秦立厚,等.延安市退耕还林工程生态效益评价[J].*西北林学院学报*,2022,37(1):259-266.

- Yang Z Y, Liu Q J, Qin L H, et al. Ecological Benefit Assessment of the Grain for Green Project in Yan'an [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022, 37(1):259-266.
- [14] 侯青青, 裴婷婷, 陈英, 等. 1986—2019年黄土高原干旱变化特征及趋势[J]. 应用生态学报, 2021, 32(2):649-660.
- Hou Q Q, Pei T T, Chen Y, et al. Variations of drought and its trend in the Loess Plateau from 1986 to 2019[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(2):649-660.
- [15] 裴婷婷, 李小雁, 吴华武, 等. 黄土高原植被水分利用效率对气候和植被指数的敏感性研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(5):119-125.
- Pei T T, Li X Y, Wu H W, et al. Sensitivity of vegetation water use efficiency to climate and vegetation index in Loess Plateau, China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(5):119-125.
- [16] Tian F, Liu L Z, Yang J H, et al. Vegetation greening in more than 94% of the Yellow River Basin (YRB) region in China during the 21st century caused jointly by warming and anthropogenic activities[J]. Ecological Indicators, 2021, 125:107479.
- [17] 韩磊, 火红, 刘钊, 等. 基于地形梯度的黄河中游地区植被覆盖时空分异特征: 以延安市为例[J]. 应用生态学报, 2021, 32(5):1581-1592.
- Han L, Huo H, Liu Z, et al. Spatial and temporal variations of vegetation coverage in the middle section of Yellow River Basin based on terrain gradient: Taking Yan'an City as an example[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(5):1581-1592.
- [18] Xu H, Wang Y, Guan H, et al. Detecting ecological changes with a remote sensing based ecological index (RSEI) produced time series and change vector analysis [J]. Remote Sens-Basel, 2019, 11(20):2345.
- [19] 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.
- Xu H Q. Remote sensing index for assessment of regional ecological changes[J]. China Environmental Science, 2013, 33(5):889-897.
- [20] 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[J]. 应用生态学报, 2016, 27(12):3913-3919.
- Song H M, Xue L. Dynamic monitoring and analysis of ecological environment in Weinan City, Northwest China based on RSEI model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(12):3913-3919.
- [21] 王丽霞, 赵蕊, 刘招, 等. 基于 RSEI 的延河流域生态环境质量监测与预估[J]. 干旱区研究, 2022, 39(3):943-954.
- Wang L X, Zhao R, Liu Z, et al. Monitoring and prediction of ecological environmental quality in the Yanhe River Basin based on the remote sensing ecological index[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(3):943-954.
- [22] 杨悦, 赵雨, 员学锋, 等. 乡村振兴背景下陕西省生态环境质量影响因素探究[J]. 生态与农村环境学报, 2023, 39(1), doi:10.19741/j.issn.1673-4831.2022.0783.
- Yang Y, Zhao Y, Yuan X F, et al. Study on the factors influencing ecological environment quality in Shaanxi province in the context of rural revitalization [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2023, 39(1), doi:10.19741/j.issn.1673-4831.2022.0783.
- [23] 谢明阳, 焦春萌, 韩小雨, 等. 1990—2020年延安市土壤侵蚀演变及其时空偏移特征[J]. 水土保持通报, 2022, 42(5):187-192.
- Xie M Y, Jiao C M, Han X Y, et al. Evolution and spatial-temporal shift characteristics of soil erosion in Yan'an city during 1990—2020 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(5):187-192.
- [24] Piao S, Yin G, Tan J, et al. Detection and attribution of vegetation greening trend in China over the last 30 years [J]. Global Change Biology, 2015, 21(4):1601-1609.
- [25] 谷佳贺, 薛华柱, 董国涛. 黄河流域 NDVI/土地利用对蒸散发时空变化的影响[J]. 干旱区地理, 2021, 44(11):158-167.
- Gu J H, Xue H Z, Dong G T. Effects of NDVI/land-use on spatiotemporal changes of evapotranspiration in the Yellow River Basin [J]. Arid Land Geography, 2021, 44(11):158-167.
- [26] Zheng H, Lin H, Zhu X, et al. Divergent spatial responses of plant and ecosystem water-use efficiency to climate and vegetation gradients in the Chinese Loess Plateau [J]. Global and Planetary Change, 2019, 181:102995.