

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2023.01.003

<https://xuebao.xaut.edu.cn>

引文格式:郭力宇,孙悦悦,王涛.黄土高原水土保持功能区生态环境质量遥感监测与评价[J].西安理工大学学报,2023,39(1):21-31.

GUO Liyu, SUN Yueyue, WANG Tao. Dynamic monitoring and evaluation of eco-environmental quality of the soil and water conservation functional area in the Loess Plateau by remote sensing[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2023, 39(1):21-31.

# 黄土高原水土保持功能区生态环境质量遥感监测与评价

郭力宇, 孙悦悦, 王涛

(西安科技大学 测绘科学与技术学院, 陕西 西安 710054)

**摘要:**黄土高原水土保持功能区是全国生态功能区划定的重要功能区之一。过去以来黄土高原区内水土流失严重,生态环境脆弱,严重地制约着当地的社会经济发展,21世纪以来西部大开发战略和生态工程建设对该区生态系统服务功能改善发挥重要作用。由此,黄土高原水土保持功能区生态环境质量监测评价对于认识国家生态保护政策带来的影响具有重要的科学意义。本研究利用2000—2020年MODIS数据构建遥感生态指数(RSEI),结合年降水量和年平均气温数据,对黄土高原水土保持功能区生态环境质量进行监测与分析。研究表明,2000—2020年研究区以生态用地为主,面积占比57.31%。以半生态用地转入生态用地为主,占变化总面积的51.74%,生态用地的转入改善了区域生态环境质量。2000—2020年研究区RSEI均值由2000年的0.39增至2020年的0.57,生态环境质量明显改善。生态环境质量等级以中等为主,平均面积占比为45.61%,优、良等级面积共增加38.08%,极差、差等级面积减少60.79%。中部区域RSEI增加速率较快,显著增加区域占总面积的11.59%。研究区热量充足,水分是限制植被生长的主要因子,RSEI与年降水量整体呈正相关关系,显著正相关面积占比25.30%。退耕还林核心区的RSEI值增长明显,说明生态恢复工程是区域生态环境质量改善的重要原因。

**关键词:** 遥感生态指数; 生态空间; 生态环境质量; 黄土高原

中图分类号: X87

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2023)01-0021-11

## Dynamic monitoring and evaluation of eco-environmental quality of the soil and water conservation functional area in the Loess Plateau by remote sensing

GUO Liyu, SUN Yueyue, WANG Tao

(College of Geomatics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** The soil and water conservation functional area in the Loess Plateau is one of the important functional areas in China's ecological function regionalization. The Loess Plateau has been a special region with severe soil erosion and brittle ecosystem in the past. The development of local society and economy is seriously restricted. Since the 21st century, the Western Development Strategy and ecological engineering construction have played important roles in improving ecosystem service function. Therefore, eco-environmental quality monitoring and evaluation of the soil and water conservation functional area in the Loess Plateau is of scientific significance to know the effects of the national ecological protection policy. Based on the MODIS data, this research used the remote sensing ecological index (RSEI) method to monitor and analyse the eco-environmental

收稿日期: 2022-05-06; 网络首发日期: 2022-09-14

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.n.20220913.1503.004.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41907409)

第一作者: 郭力宇,男,副教授,研究方向为资源环境。E-mail:332781731@qq.com

通信作者: 孙悦悦,女,硕士生,研究方向为资源环境评价。E-mail:1584475691@qq.com

quality of study area from 2000 to 2020. The impact of human activities and climatic factors on the eco-environmental quality are explored by a combination of land use data, the annual precipitation and annual average air temperature data. Findings are as follows. The main ecological space type in the study area is ecological land, accounting for 57.31% of the study area. The transition from semi-ecological land to ecological land appeared obviously, accounting for 51.74% of change area. The increase of ecological land has improved the eco-environmental quality of the study area. In the past 21 years, the eco-environmental quality of the study area has been improved obviously. The average RSEI index increased from 0.39 in 2000 to 0.57 in 2020. The study area of RSEI grade is mainly moderate, at approximately 45.61%. The area proportion with high grade increased by 38.08%, and the area proportion with high grade decreased by 60.79%. Growth in the average RSEI index of middle regions of study area is relatively fast. The significant improvement of eco-environmental quality accounted for 11.59% of the total area of the study. The study area is full of heat and moisture is the main factor limiting vegetation growth. There is a positive correlation between RSEI and the annual precipitation. The average RSEI index for the core area of returning farmland to forest increased significantly, indicating that the ecological restoration project is an important reason for the improvement of eco-environmental quality in the region.

**Key words:** RSEI; ecological space; eco-environmental quality; Loess Plateau

黄土高原地处我国半湿润与半干旱的过渡区域,生态环境脆弱,受到自然因素和人类活动的双重干扰,是我国水土流失最为严重的区域之一<sup>[1]</sup>。2015 年国家环境保护部门印发《全国生态功能区划(修编版)》,将黄土高原部分水土流失严重的区域划为国家重点生态功能区,其主要的生态服务功能为水土保持。该区由于过度人类生产开发活动,导致植被覆盖度低和水土保持功能弱等生态问题,严重威胁区域生态安全,制约当地经济可持续发展。针对黄土高原水土保持功能区进行生态环境质量评价可以有效监测区域生态环境质量动态变化,已成为目前研究的热点问题。

遥感技术具有快速、实时、易于获取等优点<sup>[2]</sup>,已成为生态环境质量评价的重要手段。以往研究大多基于单一指标对生态环境质量进行评估,如 Song 等<sup>[3]</sup>利用土地利用数据分析黄土高原生态环境质量变化,Xu 等<sup>[4]</sup>利用植被净初级生产力评估京津冀地区生态系统质量,Coutts 等<sup>[5]</sup>利用地表热度评估城市热岛效应。生态环境变化是由多种因素共同作用的,基于单一指标的评价虽能在特定区域内反映部分生态效应,但难以解释生态环境中多种因素的共同作用。2013 年,徐涵秋<sup>[6-7]</sup>提出遥感生态指数(remote sensing ecological index, RSEI),将 4 个与生态环境密切相关的指标,即绿度(normalized difference vegetation index, NDVI)、湿度(WET)、干度(normalized difference built-up and soil index, NDBSI)和热度(land surface temperature, LST),通过主成分分析进行耦合,得到可以量化的生态质量指数,为生态环境质量评价开拓了新方向。耦合 RSEI 的 4 个指标均提取自遥感影像,获取容易,避免了人为确定权重的主观性,兼具

可视化表达,能有效反映区域生态环境质量状况,可对区域进行长时间序列的生态环境质量动态监测。因此被广泛应用于城市<sup>[8-9]</sup>、矿区<sup>[10-11]</sup>、流域<sup>[12-13]</sup>等区域的生态环境质量评价研究。

遥感生态指数在生态环境质量评价研究中具有客观、便捷和快速等优点。但在实际应用中还存在一些问题,例如云遮挡区域的数据缺失,影像获取时间不一致,拼接较为困难。因此在实际的研究中通常筛选出云量少的小尺度区域的几个特征时间点的数据进行研究,缺乏大尺度区域的长时序研究。Google Earth Engine(GEE)平台可以在线处理大范围长时序的遥感数据,能有效规避上述问题,将研究者从繁复的数据处理工作中解脱出来,极大地提高了工作效率。

黄土高原水土保持功能区作为黄土高原的核心区域,生态问题突出,尤其是退耕还林还草工程实施以来的生态环境质量变化受到广泛重视,目前利用 RSEI 对其生态环境质量进行长时间、大范围的监测评价研究较少。因此,黄土高原水土保持功能区生态环境质量监测评价对于认识国家生态保护政策带来的影响具有重要的科学意义。

本文以黄土高原水土保持功能区作为研究对象,借助 GEE 平台,利用 2000—2020 年 MODIS 数据构建遥感生态指数(RSEI),2000 年和 2020 年两期土地利用数据,结合年降水量和年平均气温数据,利用趋势分析、相关分析等方法分析研究区遥感生态指数的时空变化,探讨人类活动和气候因子对区域生态环境质量的影响,对该地区生态环境质量状况进行动态监测与评价。

## 1 材料与研究方法

### 1.1 研究区概况

黄土高原水土保持生态功能区是《全国生态功能区划》划定的土壤保持重要区,位于黄土高原腹地(见图1),地理坐标为 $103^{\circ}56' \sim 111^{\circ}46' E$ , $34^{\circ}28' \sim 39^{\circ}10' N$ ,行政区划涉及山西省(忻州、吕梁、临汾),陕西省(榆林、延安),甘肃省(兰州、白银、天水、庆阳、定西、平凉),和宁夏回族自治区(固原、中卫),总面积约为 $13.3 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。主要地貌类型为黄土丘陵沟壑<sup>[14]</sup>,整体地势西部高、东部低。该区域为半湿润-半干旱季风气候,多年平均气温约 $9^{\circ} C$ ,多年平均降水量为 $430 \sim 550 \text{ mm}$ ,年内降水分配不均,多集中在7、8月份。主要植被类型为森林草原和草原。

### 1.2 实验数据

本研究使用数据包括:2000—2020年MODIS(Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer)

数据产品,分别为MOD13A1植被指数产品、MYD091A1地表反射率产品和MYD11A2地表反射率/发射率产品,2000年、2020年土地利用栅格数据,2000—2020年逐年降水量、平均气温数据,DEM数据、矢量边界数据。数据详细介绍见表1。

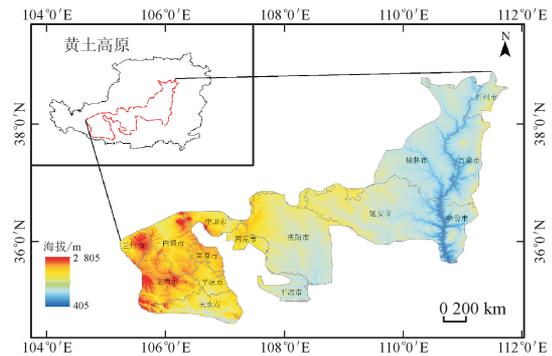


图1 研究区位置图

Fig.1 Study area

注:此图基于国家自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2019)1822的标准地图制作,底图无修改。

表1 数据来源

Tab.1 Data sources

数据	数据来源	数据时间	时间分辨率/d	空间分辨率/m	数据说明
MOD13A1 植被指数产品			16	500	
MYD091A1 地表反射率产品	Google Earth Engine (GEE)平台	2000—2020年	8	500	用于计算 RSEI, 其中 NDVI、WET、NDBSI 采用最大值合成, LST 采用均值合成。
MYD11A2 地表反射率/发射率产品			8	1 000	
土地利用数据	中国科学院资源与环境数据中心 ( <a href="http://www.resdc.cn">http://www.resdc.cn</a> )	2000年、2020年	—	1 000	用于划分生态用地(林地、草地、水体、未利用地)、半生态用地(耕地)和弱生态用地(建设用地)。
SRTM DEM 数据		—	—	90	—
矢量边界数据	—	—	—	—	—
降水量和气温数据集	国家科技基础条件平台——国家地球系统科学数据中心 ( <a href="http://www.geodata.cn">http://www.geodata.cn</a> )	2000—2020年	月数据	1 000	利用月数据提取得到逐年降水、气温数据。

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 遥感生态指数构建

遥感生态指数(RSEI)借助绿度(NDVI)、热度(LST)、湿度(WET)和干度(NDBSI)4个生态指标,通过主成分分析进行耦合得到,公式如下:

$$RESI = f(NDVI, LST, WET, NDBSI) \quad (1)$$

##### 1) 绿度指标

归一化植被指数与植被覆盖度、叶面积指数和植物生物量密切相关,是目前应用最为广泛的植被指数。公式如下:

$$NDVI = (b_{NIR} - b_{RED}) / (b_{NIR} + b_{RED}) \quad (2)$$

式中: $b_{NIR}$ 和 $b_{RED}$ 分别为近红外、红光波段。

##### 2) 热度指标

地表温度利用GEE平台通过白天地表温度数据转换而来,公式如下:

$$LST = 0.02DN - 273.15 \quad (3)$$

式中:DN为陆地地表温度灰度值。

##### 3) 湿度指标

湿度指标采用缨帽变换后得到,公式如下:

$$WET = 0.1147b_1 + 0.2489b_2 + 0.2408b_3 + 0.3132b_4 - 0.3122b_5 - 0.6416b_6 - 0.508b_7 \quad (4)$$

式中: $b_i (i=1, 2, 3, \dots, 7)$ 分别代表各地表反射波段。

## 4) 干度指标

干度指标选用裸土指数 SI 和建筑指数 IBI 合成而来,公式如下:

$$NDBSI = (SI + IBI) / 2 \quad (5)$$

$$SI = [(b_s + b_{RED}) - (b_{BLUE} + b_{NIR})] / [(b_s + b_{RED}) + (b_{BLUE} + b_{NIR})] \quad (6)$$

$$IBI = \{2b_s / (b_s + b_{NIR}) - [b_{NIR} / (b_{NIR} + b_{RED}) + b_{GREEN} / (b_{GREEN} + b_s)]\} / \{2b_s / (b_s + b_{NIR}) + [b_{NIR} / (b_{NIR} + b_{RED}) + b_{GREEN} / (b_{GREEN} + b_s)]\} \quad (7)$$

式中: $b_s$ 、 $b_{RED}$ 、 $b_{NIR}$ 、 $b_{BLUE}$ 和 $b_{GREEN}$ 分别为短波红外、红光、近红外、蓝光和绿光波段。

为了避免 4 个指标量纲不统一导致权重失衡问题,在主成分变换前,需对各指标进行归一化处理,公式如下:

$$NI_i = (I_i - I_{min}) / (I_{max} - I_{min}) \quad (8)$$

式中: $NI_i$ 为 4 个生态指标归一化的结果; $I_i$ 为生态指标在第  $i$  个像元处的值; $I_{max}$ 为最大值; $I_{min}$ 为最小值。

将归一化后的 4 个指标进行主成分转换,得到第一主成分结果(PC1),为了便于分析,对 PC1 进行正负置换,公式如下。

$$RSEI_0 = 1 - PC1 \quad (9)$$

式中  $RSEI_0$  为正负置换后的结果。为了便于后续研究,将置换后的  $RSEI_0$  值以 0.2 为间隔划分为 5 个等级:极差(0, 0.2]、差(0.2, 0.4]、中等(0.4, 0.6]、良(0.6, 0.8]、优(0.8, 1.0]。

## 1.3.2 趋势分析

本研究采用一元线性回归模型对研究区 2000—2020 年 RSEI、年降水量和平均气温进行趋势分析,计算公式如下:

$$y = ax + b \quad (10)$$

$$a = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - (\sum_{i=1}^n x_i)(\sum_{i=1}^n y_i)}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad (11)$$

$$b = \bar{y} - a \bar{x} \quad (12)$$

式中: $a$ 为斜率; $b$ 为常数; $y$ 代表 2000—2020 年的 RSEI; $x$ 代表年份,取值为 1~ $n$ ; $\bar{y}$ 为 RSEI 平均值; $\bar{x}$ 为年份平均值。斜率  $a$  为正表示 RSEI 上升,为负表示下降。

对计算得到的一元线性方程进行显著性检验,具体公式如下:

$$F = \frac{U}{Q / (n - 2)} \quad (13)$$

$$U = b^2 \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (14)$$

$$Q = \sum_{i=1}^n (y_i - y')^2 \quad (15)$$

式中: $F$ 为统计量; $U$ 为回归平方和; $Q$ 为误差平方和; $y'$ 为利用线性方程得到的  $y$  的拟合值。

计算出  $F$  值后,在分布表中查找  $\alpha = 0.05$ ,  $n = 21$  时,  $F$  的临界值为 4.38,若  $F > 4.38$  则回归方程是显著的,反之,则不显著。

## 1.3.3 相关分析

利用相关系数分析 2000—2020 年 RSEI 与年降水量、年平均气温之间的相关关系,公式如下:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (16)$$

式中: $r_{xy}$ 为相关系数,反映 RSEI 与年降水量、年平均气温之间的相关程度,取值范围为  $[-1, 1]$ ,绝对值越接近 1,表示关系越密切,反之,越不密切; $\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 为样本平均值。计算得到相关系数后,在分布表中查找  $\alpha = 0.05$ ,  $n = 21$  时,临界值为 0.432 9,若绝对值大于 0.432 9,相关关系显著,反之不显著。

## 2 结果分析

## 2.1 生态空间变化特征

土地利用空间格局的变化与国家高质量发展和生态文明建设战略息息相关<sup>[15]</sup>,为了更好地解释黄土高原水土保持功能区生态环境质量变化特征与土地利用变化格局之间的关系,本研究参考殷嘉迪等<sup>[16]</sup>的研究,将 6 类土地利用类型划分为 3 类生态空间,即生态用地、半生态用地和弱生态用地。生态用地包括林地、草地、水域和未利用地,生态功能强;半生态用地指耕地,具有一定的生态功能;弱生态用地为建设用地,生态功能极弱。

2000 年和 2020 年黄土高原水土保持功能区以生态用地为主(见图 2),平均面积占比为 57.31%。2000—2020 年研究以生态用地增加和半生态用地减少为主要特征,其中生态用地增加了 4 428 km<sup>2</sup>,主要表现为草地和林地的增加,分别增加了 2 901 km<sup>2</sup>和 1 532 km<sup>2</sup>;半生态用地减少了 5 807 km<sup>2</sup>,表现为耕地的减少;研究时段内弱生态用地表现为增加过程,共增加 1 123 km<sup>2</sup>,主要为耕地向建设用地的转移。

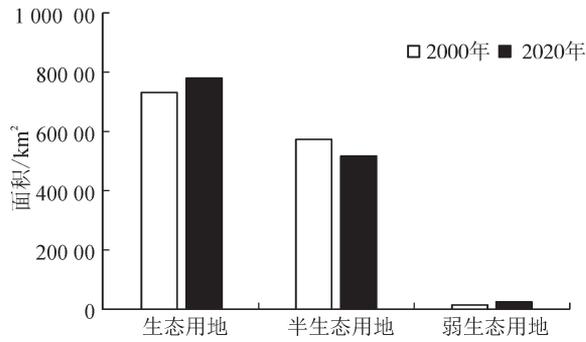


图2 生态空间面积变化统计

Fig. 2 Statistics of ecological space area change

## 2.2 生态环境质量变化特征

### 2.2.1 各指标主成分分析结果

对2000年、2005年、2010年、2015年和2020年NDVI、WET、NDBSI和LST进行主成分分析(见表2),可知第一主成分(PC1)贡献率分别为95.55%、96.70%、94.33%、91.22%和92.22%,均超过90%,表明第一主成分能够反映4个生态指标的大部分特征。4个指标在PC1上贡献率相对稳定,其中NDVI和WET为正值,表明绿度和湿度对生态环境起积极作用,NDBSI和LST为负值,表明干度和热度对生态环境起消极作用。

表2 主成分分析结果

Tab. 2 Principal component and analysis results

年份	指标	PC1	PC2	PC3	PC4
2000	NDVI	0.531	0.855	0.365	-0.239
	WET	0.511	0.434	-0.139	-0.222
	NDBSI	-0.520	0.770	-0.336	0.445
	LST	-0.437	0.119	-0.388	-0.352
	特征值	0.343 3	0.140 4	0.001 9	0.000 3
	特征值贡献率/%	95.55	4.69	2.14	0.88
2005	NDVI	0.510	0.564	0.621	0.135
	WET	0.674	0.272	-0.600	-0.268
	NDBSI	-0.519	-0.493	0.381	-0.540
	LST	-0.388	0.556	-0.466	-0.297
	特征值	0.316 6	0.284 0	0.009 9	0.000 2
	特征值贡献率/%	96.70	4.70	2.70	0.18
2010	NDVI	0.445	0.778	0.164	-0.314
	WET	0.561	-0.303	-0.694	-0.056
	NDBSI	-0.566	0.109	0.578	-0.633
	LST	-0.420	-0.788	0.247	0.192
	特征值	0.300 2	0.010 2	0.009 9	0.001 9
	特征值贡献率/%	94.33	5.55	3.48	1.14
2015	NDVI	0.540	-0.434	0.311	0.297
	WET	0.414	0.849	0.274	0.434
	NDBSI	-0.268	0.184	-0.659	-0.389
	LST	-0.426	-0.162	0.800	-0.447
	特征值	0.285 5	0.121 1	0.005 1	0.001 2
	特征值贡献率/%	91.22	4.36	2.21	1.14
2020	NDVI	0.434	0.035	0.915	-0.471
	WET	0.531	0.622	-0.628	0.777
	NDBSI	-0.624	-0.594	0.531	0.529
	LST	-0.371	0.682	0.150	0.261
	特征值	0.237 7	0.013 6	0.005 5	0.000 7
	特征值贡献率/%	92.22	7.89	3.96	0.93

### 2.2.2 生态环境质量等级变化

2000—2020 年研究区生态环境质量整体呈增加趋势(见图 3)。RSEI 均值由 2000 年的 0.39 增至 2020 年的 0.57,增加率为 43.15%。研究时段内 RSEI 均值表现为“上升-下降-上升-下降-上升”的波动上升过程,其中 RSEI 最低值出现在 2000 年,为 0.39,峰值出现在 2018 年,为 0.59。以 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年 5 个特征年份为例(见图 4),对研究区生态环境质量等级时空变化进行分析。空间格局上,2000—2020 年,研究区生态环境质量等级以中等为主(见图 5),多年平均占比约为 45.61%。生态环境质量等级为优、良的区域主要分布在南部,包括延安、临汾、庆阳、天水及平凉等区域。

生态环境等级为中的区域主要分布北部和西部,包括榆林、庆阳及定西等区域。生态环境质量等级为差的区域主要分布在北部和西北部,包括榆林

市西部、中卫南部、固原北部和庆阳西北部等区域。变化趋势上,优、良等级面积明显增加,由 2000 年的 4.38% 增至 2020 年的 42.46%,空间变化表现为由南向北逐年扩张。极差、差等级面积占比明显下降,由 2000 年 73.42% 降至 2020 年的 12.63%,降幅达 60.79%,反映出研究区生态环境质量呈明显改善过程。

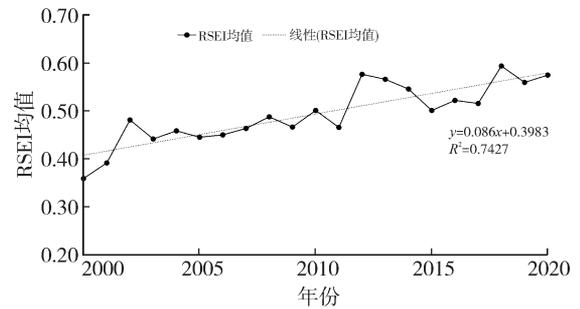


图 3 2000—2020 年 RSEI 均值变化过程

Fig. 3 The change process of RSEI from 2000 to 2020

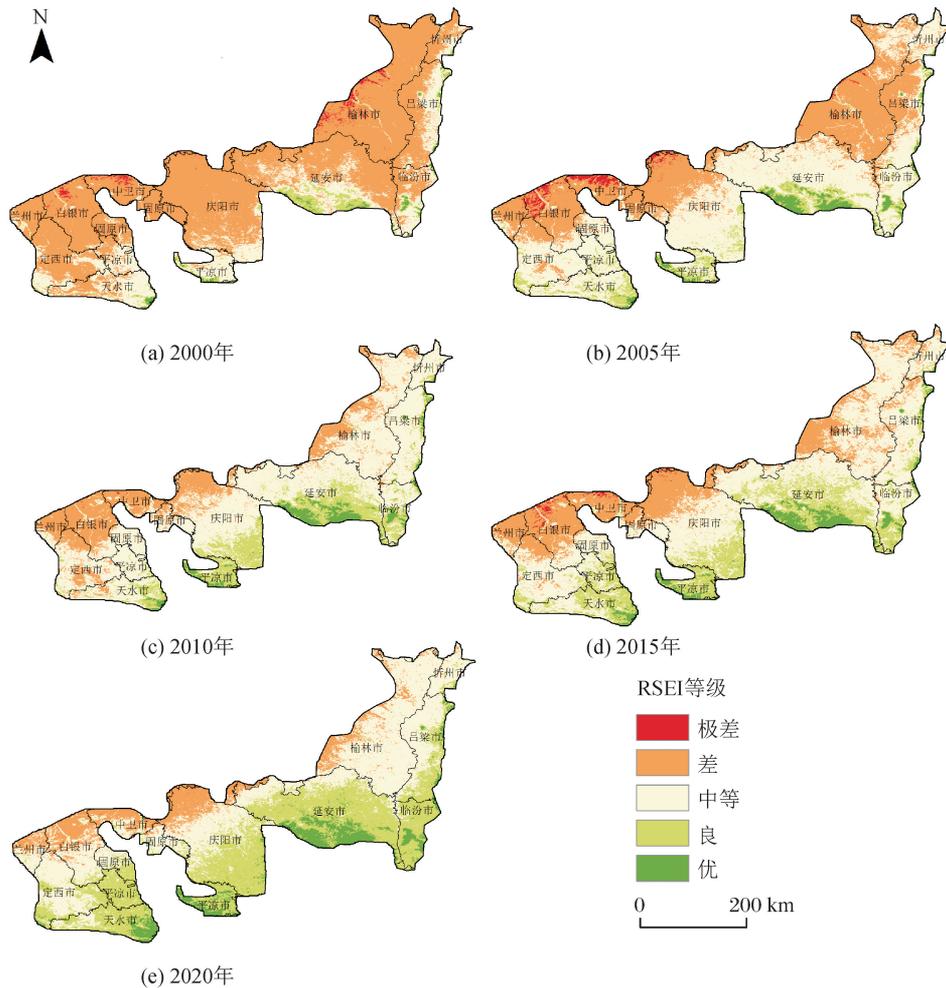


图 4 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年生态环境质量等级空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of ecological environmental quality levels in 2000, 2005, 2010, 2015 and 2020  
注:此图基于国家自然资源部标准地图服务网站审图号为 GS(2019)1822 的标准地图制作,底图无修改。

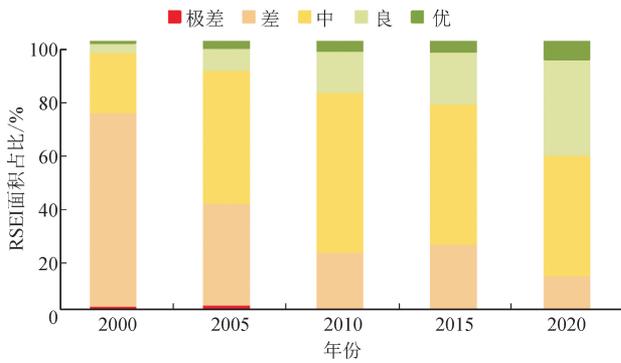
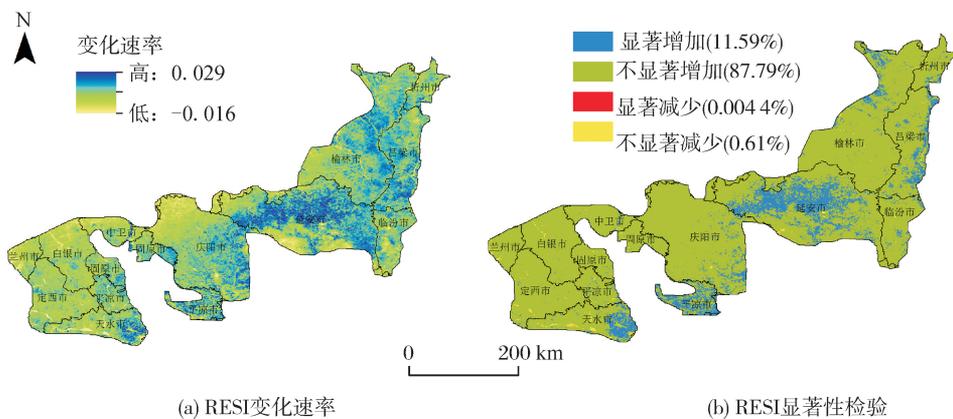


图5 2000—2020年RSEI各等级面积占比

Fig. 5 The area proportion of RSEI in different type during 2000—2020



(a) RESI变化速率

(b) RESI显著性检验

图6 2000—2020年RSEI结果空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of RSEI during 2000—2020

注:此图基于国家自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2019)1822的标准地图制作,底图无修改。

### 2.3 不同生态空间类型的RSEI变化

2000—2020年黄土高原水土保持功能区生态用地、半生态用地和弱生态用地RSEI多年平均值分别为0.50、0.48和0.49,生态环境质量整体为中等。2000—2020年3类生态用地的RSEI均呈增加过程(见图7)。以2008年为界,之前,生态用地和半生态用地区域的RSEI值低于弱生态用地,之后,高于弱生态用地。

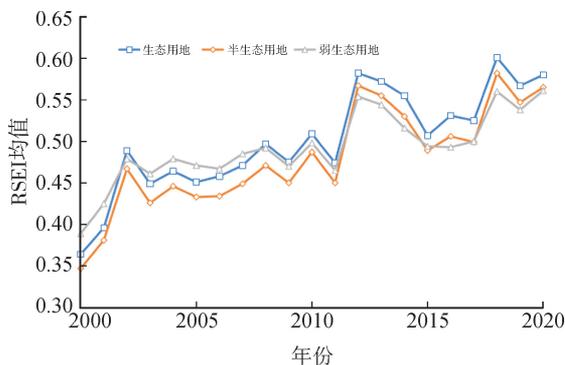


图7 不同生态空间类型RSEI变化过程

Fig. 7 The change of RSEI in different ecological space type

### 2.2.3 生态环境质量变化趋势分析

RSEI增加速率较快的地区集中在研究区中部,包括延安、榆林、吕梁部分区域(见图6(a))。基于显著性检验结果将变化趋势划分为4个类型分别为显著增加、不显著增加、显著减少和不显著减少。2000—2020年RSEI显著增加区域面积占比为11.59%,主要分布在延安、吕梁、平凉和天水部分地区;RSEI显著减少和不显著减少分布范围较小,零星分布在各地市的主城区及其附近区域,反映出城市扩张对生态环境质量具有负向作用(见图6(b))。

用各类生态空间转移区域的RSEI均值减去保持不变区域的RSEI均值,得到发生转移后各类生态空间RSEI差值变化情况(见图8),差值为负表示发生转移后,生态环境质量比保持不变区域退化,差值为正表示发生转移后,生态环境质量比保持不变区域改善。

生态用地转为半生态用地或弱生态用地导致生态环境质量下降。以2008年为界,之前生态用地转为弱生态用地的区域,生态环境质量优于转为半生态用地的区域;之后生态用地转为弱生态用地的区域,生态环境质量较转为半生态用地区域差(图8(a))。半生态用地转为生态用地可以提高生态环境质量,但转为弱生态用地导致生态环境质量持续下降(图8(b))。弱生态用地转为生态用地和半生态用地均引起生态环境质量的提高,并且弱生态用地转为半生态用地对生态环境质量的改善明显优于转为生态用地(图8(c))。黄土高原水土保持功能区生态环境脆弱,植被覆盖水平较低,生态用地、半生态用地和弱生态用地相互转变引起的生态环境质量

变化情况复杂。总体来看,生态用地的转出导致区域生态环境质量的下降,并且半生态用地的转为弱生态用地导致生态环境持续下降,而弱生态用地的转出导致区域生态环境质量的改善。这一结果表明

黄土高原水土保持功能区退耕还林还草工程实施引起的林地、草地等生态用地增加,明显提高了生态环境质量,而城市扩张等人类活动导致了区域生态环境质量下降。

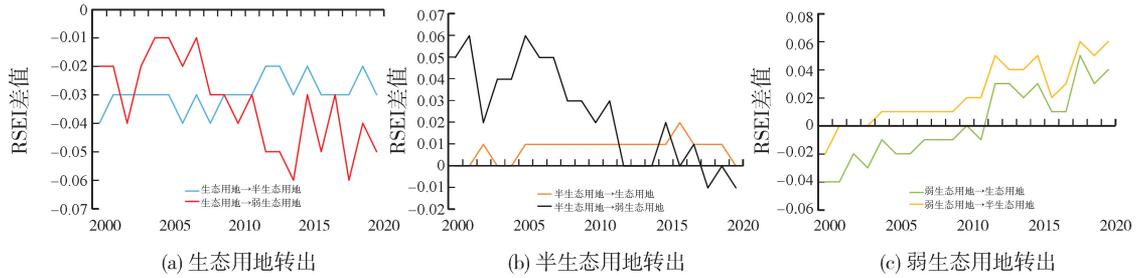


图 8 不同生态空间转移区域 RSEI 变化过程

Fig. 8 The change process of RSEI in different ecological space transfer areas

### 2.4 气候因素对生态环境质量影响

见图 9,2000—2020 年研究区年降水量呈增加过程,显著增加占比为 27.02%,主要分布在区域东部和西部。RSEI 与年降水量主要呈正相关关系,显著正相关面积占 25.30%,主要分布在榆林、忻州

和吕梁部分地区,西部中卫、白银、兰州等也有少量分布。2000—2020 年研究区年平均气温显著增加区域占比为 13.78%,分散在吕梁山区和研究区西部区域。RSEI 与年平均气温显著负相关区域零星分布在忻州、延安、庆阳、天水 and 定西。

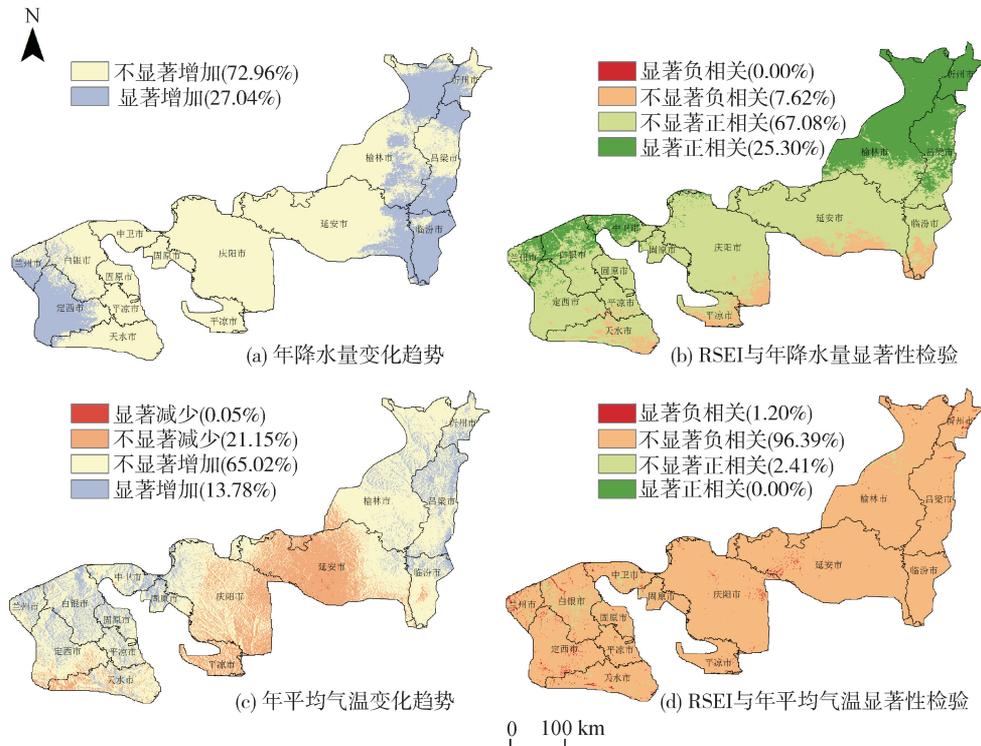


图 9 2000—2020 年研究区 RSEI 对气候因子的响应

Fig. 9 Response of RSEI to climatic factors in the study areaduring 2000—2020

注:此图基于国家自然资源部标准地图服务网站审图号为 GS(2019)1822 的标准地图制作,底图无修改。

### 3 讨论

已有关于黄土高原生态质量评价研究多以塬区<sup>[17]</sup>或县域<sup>[18]</sup>为研究范围,监测范围小,不能反映大尺度黄土高原生态环境质量动态变化情况。本文

基于 2000—2020 年 MODIS 数据,以黄土高原水土保持功能区为研究对象,监测其生态环境质量动态变化状况,空间尺度大、时间序列连续,对于科学认识黄土高原水土保持功能区生态环境变化具有一定的参考价值。

研究区生态环境质量整体呈改善过程,空间分布由东南向西北依次为优、良、中、差,与计伟等<sup>[19]</sup>利用生态公报得出的研究结果一致。相比之下,遥感生态指数(RSEI)数据更易获取,不受行政区划限制。1999年退耕还林还草工程实施以来,黄土高原水土保持功能区作为工程重点实施区域,耕地面积减少5 807 km<sup>2</sup>,林地、草地面积增加。据已有研究<sup>[20-22]</sup>,2000年以来,延安部分地区、山西吕梁山区和甘肃东南部区域植被覆盖情况明显改善,与本研究认为的研究区自南而北生态环境质量改善结果一致。

以2008年为界,之前生态用地和半生态用地的RSEI值低于弱生态用地,之后,优于弱生态用地。这一现象可能与植被类型<sup>[23]</sup>和人类活动有关。研究区的植被类型以草地为主,水土保持能力较弱,地表容易裸露,导致生态用地生态环境质量较低。另一方面,退耕还林初期,人工种植活动对地表土壤的扰动作用可能会导致生态环境质量的轻微退化<sup>[24]</sup>。城镇和耕地则因为城市绿化和人工灌溉,改善了弱生态用地和半生态用地的植被状况和水分条件,因此早期弱生态用地生态环境质量好于生态用地。2014年第二轮退耕还林还草工程实施,研究区内植被覆盖度明显好转,生态用地和半生态用地的RSEI值逐渐优于弱生态用地。以2012年为界,之前转为弱生态用地区域的RSEI值高于转为生态用地或半生态用地的区域(图8(a)、图8(b)),之后低于转为生态用地或半生态用地的区域。城市扩张初期,受城市绿地空间的影响<sup>[25-26]</sup>,弱生态用地生态环境质量较好,随着城镇化程度的提高,工程建设导致城市绿地空间大面积减少,城市地表干化和热岛效应逐渐严重,表现为转入弱生态用地的生态环境质量与转入生态用地或半生态用地的生态环境质量相比,呈退化过程。随着前一轮退耕还林工程试点工作的完成,退耕还林成果被进一步巩固,研究区植被覆盖度明显提升,转为生态用地的生态环境质量开始优于转为弱生态用地。

气候条件对生态环境质量影响具有一定的空间异质性<sup>[27]</sup>,根据PC1分析结果,湿度(WET)对RSEI起正效应,而热度(LST)对RSEI起负效应,表现为RSEI与年降水量呈正相关关系,面积占比超过90%,由南而北相关性显著性逐步增强。热度(LST)对RSEI的贡献率绝对值低于湿度(WET),研究区热量充足,水分是限制植被生长的主要因素,因此RSEI对年平均气温的响应较弱,表现为RSEI与年平均气温呈不显著负相关,占比为96.39%,据

已有研究<sup>[28]</sup>,黄土高原植被覆盖度与年平均气温表现为微弱负相关,这可能是RSEI与年平均气温表现为不显著负相关的原因之一。2000—2020年研究区年降水量呈现增加过程,而年平均气温以不显著增加和不显著减少为主,研究时段内年降水量对RSEI的正效应大于年平均气温的负效应。另一方面,根据杨丹等<sup>[22]</sup>的研究,延安、吕梁等地人类活动对植被的贡献率大于气候因子,结合研究区生态环境质量等级分布现状,延安、吕梁等地生态环境质量明显改善。这些区域也是退耕还林还草核心区域,反映出退耕还林还草工程是研究区生态环境改善的重要原因。

## 4 结 论

本文利用GEE平台构建遥感生态指数,数据获取及时准确、时间序列长、研究范围大,免去了传统RSEI建模过程中,数据下载和预处理等工作步骤,极大的提高了工作效率,且提取的生态指标荷载与实际情况相符,证明利用GEE对黄土高原水土保持功能区的生态环境质量进行动态监测是高效可行的。文章主要结论为如下。

1) 2000—2020年研究区以生态用地为主,平均面积占比为57.31%,以生态用地增加和半生态用地减少为主要特征,生态用地的转入改善了区域生态环境质量。

2) 2000—2020年研究区RSEI均值由2000年的0.39增至2020年的0.57,生态环境质量明显改善。生态环境质量等级以中等为主,多年平均占比为45.61%,优、良等级面积增加38.08%,极差和差等级面积减少60.79%。RSEI显著增加区域占比为11.59%,分布在延安、吕梁等地,即退耕还林核心区。黄土高原水土保持功能区的生态环境质量改善与退耕还林还草工程关系密切。

3) RSEI与年降水量为正相关关系,显著正相关面积占比为25.30%。水分是限制研究区植被生长的主要因素,降水量增加改善了研究区生态环境质量。退耕还林工程在一定程度上弱化了RSEI对气候的响应。

### 参考文献:

- [1] 李宗善,杨磊,王国梁,等. 黄土高原水土流失治理现状,问题及对策[J]. 生态学报,2019,39(20): 7398-7409.  
LI Zongshan, YANG Lei, WANG Guoliang, et al. The management of soil and water conservation in the Loess Plateau of China: present situations, problems, and

- counter-solutions[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(20):7398-7409.
- [2] MATEO-GARCÍA G, GÓMEZ-CHOVA L, AMORÓS-LÓPEZ J, et al. Multitemporal cloud masking in the google earth engine[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(7): 1079.
- [3] SONG Yongyong, XUE Dongqiang, DAI Lanhai. Land cover change and eco-environmental quality response of different geomorphic units on the Chinese Loess Plateau [J]. *Journal of Arid Land*, 2020, 12(2): 29-43.
- [4] XU Kaipeng, CHI Yanyan, WANG Jingjing, et al. Analysis of the spatial characteristics and driving forces determining ecosystem quality of the Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28: 12555-12565.
- [5] COUTTS A M, HARRIS R J, PHAN T, et al. Thermal infrared remote sensing of urban heat: hotspots, vegetation, and an assessment of techniques for use in urban planning[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 186: 637-651.
- [6] 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 Hanqiu. A remote sensing index for assessment of regional ecological changes [J]. *China Environmental Science*, 2013, 33(5): 889-897.
- [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.  
XU Hanqiu. A remote sensing urban ecological index and its application [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(24):7853-7862.
- [8] 程志峰,何祺胜. 基于RSEI的苏锡常城市群生态环境遥感评价[J]. *遥感技术与应用*, 2019, 34(3):531-539.  
CHENG Zhifeng, HE, Qisheng. Remote sensing evaluation of the ecological environment of Su-Xi-Chang City Group based on remote sensing ecological index(RSEI) [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2019, 34(3): 531-539.
- [9] 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.  
NONG Lanping, WANG Jinliang. Dynamic monitoring of ecological environment quality in Kunming based on RSEI model[J] *Chinese Journal of Ecology* 2020, 39(6):2042-2050
- [10] 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.  
HU Sihan, YAO Yuzeng, FU Jianfei, et al. Evaluation of ecological quality variation in mining area of Northeast China based on RSEI Index; a case study of Gongchangling District, Liaoning Province [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(12): 4053-4060.
- [11] 刘英,朱蓉,岳辉. 典型露天矿区生态环境遥感评价[J]. *西安科技大学学报*, 2021, 41(4):682-691.  
LIU Ying, ZHU Rong, YUE Hui. Remote sensing evaluation of ecological environment in typical open-pit mining areas [J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2021, 41(4): 682-691.
- [12] YANG Xinyue, MENG Fei, FU Pingjie, et al. Spatio-temporal change and driving factors of the Eco-Environment quality in the Yangtze River Basin from 2001 to 2019[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 131:108214.
- [13] XIONG Yuan, XU Weiheng, LU Ning, et al. Assessment of spatial-temporal changes of ecological environment quality based on RSEI and GEE: a case study in Erhai Lake Basin, Yunnan province, China[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 125: 107518.
- [14] 王晓峰,张兴,王怡,等. 黄土高原三生空间演变及驱动力分析[J]. *安徽农业大学学报*, 2022, 49(1): 112-121.  
WANG Xiaofeng, ZHANG Xing, WANG Yi, et al. Spatial evolution and driving force analysis of ecological-production-living spaces on the Loess Plateau[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2022, 49(1): 112-121.
- [15] 匡文慧,张树文,杜国明,等. 2015-2020年中国土地利用变化遥感制图及时空特征分析. *地理学报*, 2022, 77(5): 1056-1071.  
KUANG Wenhui, ZHANG Shuwen, DU Guoming, et al. Remotely sensed mapping and analysis of spatio-temporal patterns of land use change across China in 2015-2020[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(5): 1056-1071.
- [16] 殷嘉迪,董金玮,匡文慧,等. 20世纪90年代以来中国生态空间演化的时空格局和梯度效应[J]. *生态学报*, 2020, 40(17):5904-5914.  
YIN Jiadi, DONG Jinwen, KUANG Wenhui, et al. Pattern and gradient effects of ecological space changes in China since 1990s[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(17): 5904-5914.
- [17] 孙从建,张文强,李新功,等. 基于遥感影像的黄土高原沟壑区生态效应评价[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(12):165-172.  
SUN Congjian, ZHANG Wenqiang, LI Xingong, et al. Evaluation of ecological effect of gully region of loess plateau based on remote sensing image[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(12): 165-172.
- [18] 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.
- LI Fenling, CHANG Qingrui, SHEN Jian, et al. Dynamic monitoring of ecological environment in loess hilly and gully region of Loess Plateau based on remote sensing: a case study on Fuxian County in Shaanxi Province, Northwest China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(12): 3811-3817.
- [19] 计伟, 刘海江, 高吉喜, 等. 黄河流域生态质量时空变化分析[J]. 环境科学研究, 2021, 34(7): 1700-1709.
- JI Wei, LIU Haijiang, GAO Jixi, et al. Spatial-temporal variations of ecological quality in the Yellow River Basin [J]. Research of Environmental Sciences, 2021, 34(7): 1700-1709.
- [20] 李登科, 王钊. 退耕还林后陕西省植被覆盖度变化及其对气候的响应[J]. 生态学杂志, 2020, 39(1): 1-10.
- LI Dengke, WANG Zhao. Changes of fractional vegetation coverage after returning farmland to forests and its response to climate in Shaanxi [J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(1): 1-10.
- [21] 张乐艺, 李霞, 冯京辉, 等. 2000-2018年黄河流域 NDVI 时空变化及其对气候和人类活动的双重响应[J]. 水土保持通报, 2021, 41(5): 276-286.
- ZHANG Leyi, LI Xia, FENG Jinghui, et al. Spatial-temporal changes of NDVI in Yellow River Basin and its dual response to climate change and human activities during 2000-2010 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(5): 276-286.
- [22] 杨丹, 王晓峰. 黄土高原气候和人类活动对植被 NPP 变化的影响[J]. 干旱区研究, 2022, 39(2): 584-593.
- YANG Dan, WANG Xiaofeng. Contribution of climatic change and human activities to changes in net primary productivity in the Loess Plateau [J]. Arid Zone Research, 2022, 39(2): 584-593.
- [23] 田智慧, 张丹丹, 赫晓慧, 等. 2000-2015年黄河流域植被净初级生产力时空变化特征及其驱动因子[J]. 水土保持研究, 2019, 26(2): 255-262.
- TIAN Zhihui, ZHANG Dandan, HAO Xiaohui, et al. Spatiotemporal variations in vegetation net primary productivity and their driving factors in yellow river basin from 2000 to 2015 [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(2): 255-262.
- [24] 许小明, 张晓萍, 何亮, 等. 黄土丘陵区不同恢复植被类型的固碳特征 [J]. 环境科学, 2022, 43(11): 5263-5273.
- XU Xiaoming, ZHANG Xiaoping, HE Liang, et al. Carbon sequestration characteristics of different restored vegetation types in Loess Hilly Region [J]. Environmental Science, 2022, 43(11): 5263-5273.
- [25] 王骊鹞, 赵春雷, 陈霞, 等. 基于遥感的唐山市绿色空间演化及对热岛效应的影响 [J]. 自然资源遥感, 2022, 34(2): 168-175.
- WANG Siyao, ZHAO Chunlei, CHEN Xia, et al. Remote sensing-based green space evolution in Tangshan and its influence on heat island effect [J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2022, 34(2): 168-175.
- [26] 王晓俊, 卫笑, 邹昊. 城市绿地空间格局对热岛效应的影响研究进展 [J]. 生态环境学报, 2020, 29(9): 1904-1911.
- WANG Xiaojun, WEI Xiao, ZOU Hao. Research progress about the impact of urban green space spatial pattern on urban heat island [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020, 29(9): 1904-1911.
- [27] 李晓雅, 赵成章, 曾红霞, 等. 党河源区土地利用变化及其生态环境效应 [J]. 生态学杂志, 2021, 40(9): 2904-2913.
- LI Xiaoya, ZHAO Chengzhang, ZENG Hongxia, et al. Land use change and ecological environment effect of Danghe River source region [J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(9): 2904-2913.
- [28] 刘旻霞, 赵瑞东, 邵鹏, 等. 近 15 a 黄土高原植被覆盖时空变化及驱动力分析 [J]. 干旱区地理, 2018, 41(1): 99-108.
- LIU Minxia, ZHAO Ruidong, SHAO Peng, et al. Temporal and spatial variation of vegetation coverage and its driving forces in the Loess Plateau from 2001 to 2015 [J]. Arid Land Geography, 2018, 41(1): 99-108.

(责任编辑 王绪迪)