

2000—2020 年漳河上游生态环境质量 动态监测及驱动因素分析

辛会超¹, 王贺封^{1,2}, 张安兵³, 庞吉玉¹, 刘粉粉⁴

(1.河北工程大学 矿业与测绘工程学院, 河北 邯郸 056038; 2.河北省水生态文明及社会治理研究中心, 河北 邯郸 056038; 3.邯郸职业技术学院, 河北 邯郸 056001; 4.河北工程大学 地球科学与工程学院, 河北 邯郸 056038)

摘要: [目的] 探究漳河上游生态环境质量时空变化特征及其驱动因素, 为该区域生态环境建设与治理提供科学依据。[方法] 优化重构 2000—2020 年漳河上游 Landsat 影像, 基于遥感生态指数(RSEI), 引入坡度(slope)、归一化山地植被指数(NDMVI)、颗粒物浓度(DI)3 项指标, 构建考虑地形和颗粒物影响的改进型遥感生态指数(advanced RSEI, ARSEI)模型, 辅以多种空间分析和统计方法对研究区生态环境质量进行定量评价。[结果] ①ARSEI 具有较好适用性, 能够准确地表征漳河上游生态环境质量状况。NDMVI 对 ARSEI 影响最大, DI 最小。②研究区生态环境质量整体呈“西南差、东北优”的空间格局, 等级以较差和中等为主; 研究期内, 35.94% 的区域表现为改善, 并以改善 1 个等级为主, 其中 2010—2020 年改善最为显著, 变化格局呈“整体稳定, 局部改变”的特点。③不同类型因子的影响力排序为: 模型因子>地形因子>气象因子>社会因子>经济因子; 所有影响因子均表现为协同增强作用, NDSI, NDMVI 和 slope 的共同作用下对 ARSEI 空间异质性的影响最大。[结论] 漳河上游 2000—2020 年 ARSEI 均值整体呈上升趋势, 生态环境质量得到改善, 其变化主要驱动因素为绿度和坡度。

关键词: 改进型遥感生态指数; 生态环境质量; 时空变化; 驱动因素; 漳河上游

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)01-0092-12

中图分类号: X821, X87

文献参数: 辛会超, 王贺封, 张安兵, 等. 2000—2020 年漳河上游生态环境质量动态监测及驱动因素分析 [J]. 水土保持通报, 2023, 43(1): 92-103. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20230111.002; Xin Huichao, Wang Hefeng, Zhang Anbing, et al. Dynamic monitoring of ecological environment quality and analysis on its driving factors in upper reaches of Zhanghe River basin during 2000—2020 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(1): 92-103.

Dynamic Monitoring of Ecological Environment Quality and Analysis on Its Driving Factors in Upper Reaches of Zhanghe River Basin During 2000—2020

Xin Huichao¹, Wang Hefeng^{1,2}, Zhang Anbing³, Pang Jiyu¹, Liu Fenfen⁴

(1.School of Mining and Geomatics Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China; 2.Research Center of Water Ecological Civilization and Social Governance of Hebei Province, Handan, Hebei 056038, China; 3.Handan Polytechnic College, Handan, Hebei 056001, China; 4.School of Earth Science and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China)

Abstract: [Objective] The spatiotemporal variation characteristics of ecological environment quality and its driving factors in the upper reaches of Zhanghe River basin were analyzed in order to provide a scientific basis for ecological environment construction and management of the region. [Methods] The Landsat images of the upper reaches of Zhanghe River basin from 2000 to 2020 was optimized and reconstructed. Based on remote sensing ecological index (RSEI), three indicators of slope, normalized difference mountain vegetation index (NDMVI) and difference index (DI) were introduced to construct the advanced remote sensing ecological index (ARSEI) model considering the impact of topography and particulate matter. Spatial analysis and

收稿日期: 2022-05-31

修回日期: 2022-07-11

资助项目: 国家自然科学基金项目“农业干旱时滞效应及时空分布干旱监测模型研究”(42071246); 教育部人文社科青年基金项目(19YJCZH155); 河北省自然科学基金项目(E2020402006); 河北省自然基金委重点项目(D2021402007)

第一作者: 辛会超(1995—), 男(汉族), 河北省邯郸市人, 硕士研究生, 研究方向为流域生态遥感。Email: 1793547749@qq.com。

通信作者: 王贺封(1980—), 男(汉族), 江西省抚州市人, 博士, 副教授, 主要从事 GIS 与 RS 应用、城市地理数据挖掘方面的研究。Email: wanghefeng@hebeu.edu.cn。

statistical methods were used to quantitatively evaluate the ecological environment quality of the study area. [Results] ① ARSEI has good applicability, and can accurately indicate the ecological environment quality in the upper reaches of Zhanghe River basin. NDMVI had the greatest influence on ARSEI, and DI was the least. ② The overall ecological environment quality showed a spatial pattern of “poor in southwest and excellent in northeast”, and the grades were mainly poor or moderate. During the study period, 35.94% of the regions showed improvement, mainly by one grade, of which the improvement from 2010 to 2020 was the most significant, and the change pattern was characterized by “overall stability and local change”. ③ The influence order of different types of factors was model factor > topography factor > meteorological factor > social factor > economic factor. All of the influence factors showed synergistic enhancement, and the interaction of NDSI, NDMVI and slope had the greatest influence on the spatial heterogeneity of ARSEI. [Conclusion] The average value of ARSEI in the upper reaches of Zhanghe River basin showed an overall increasing trend during 2000—2020, and the ecological environment quality was improved. The main driving factors for the change were NDMVI and slope.

Keywords: advanced remote sensing ecological index; ecological environment quality; spatiotemporal variation; driving factors; upper reaches of Zhanghe River basin

生态环境是人类赖以生存和发展的基础,是社会经济可持续发展的保障。近年来,随着气候变化和人类活动影响的不断加剧,水土流失、土地退化、环境污染和生物多样性锐减等区域性和全球性生态环境问题日益突出^[1-2],严重威胁到人们的生活和生产。生态环境质量反映了区域生态环境的优劣程度,是生态系统要素、结构和功能的表征^[3],实时、快速和准确地监测生态环境质量状况对区域生态安全和生态文明建设具有重要意义。

早期生态环境质量监测研究的数据来源相对单一,主要为统计和调查资料。近年来,随着遥感技术的快速发展,遥感数据凭借易于获取、实时性强和覆盖范围广等特点,已被广泛应用于生态环境评价方面,如利用植被指数监测城市绿地空间的变化^[4],利用地表温度监测城市热岛效应等^[5],但生态系统受多种影响因素的综合作用,单一指标往往难以准确、全面地表征生态环境质量状况。为此,徐涵秋^[6]于 2013 年提出了耦合绿度、湿度、热度和干度的遥感生态指数(remote sensing ecological index, RSEI),该指数以客观、全面等优点被应用于区域生态环境质量评价中^[7-10];同时,一些学者在考虑特定区域生态系统服务功能的基础上,对 RSEI 的指标进行了改进^[11-14]。另外,在 RSEI 的应用中还存在一些数据质量的问题,如遥感影像易受云量的影响,直接去云会导致数据缺失;同一地区的不同景遥感影像获取时间差异,导致拼接后的影像信息提取质量不高,可比性较差^[15];为避免以上问题,部分学者往往选取云量较少的区域或采用邻近年份代替的方法开展研究^[16-18]。近年来,随着遥感云计算平台的快速发展,为海量遥

感数据的处理和分析提供了可能^[19],其中谷歌地球引擎(google earth engine, GEE)的应用最为广泛,基于该平台的图像处理技术能够有效的改善遥感影像的多云、色差和时间不一致等问题^[20-22]。为此,如何获取大范围、低云量和长时序的遥感影像以及建立基于遥感数据的有效指标体系是区域生态环境质量监测与评价的关键所在。

漳河上游位于海河流域西南部,地跨山西、河北、河南 3 省,所处地理位置重要,具有调节气候、净化环境和供给淡水等生态服务功能,对当地及其周边范围内人民的生产和生活作用不可替代。近年来,漳河上游受气候变化、农业生产、资源开发以及生态环境保护意识薄弱等因素的影响,水土流失、空气污染等生态环境问题日益突出,严重影响该区域的可持续发展。目前,关于该区域的生态环境质量监测研究较少。鉴于此,本研究以漳河上游为例,基于 GEE 平台提供的地表反射率数据集,重构研究区 2000—2020 年最小云量遥感影像,利用构建的改进型遥感生态指数(advanced RSEI, ARSEI)模型对漳河上游生态环境质量进行动态监测,并借助地理探测器模型对研究区生态环境质量空间异质性进行定量归因探讨,揭示其主导驱动因素,以为漳河上游生态建设相关政策的制定和可持续发展提供科学依据,为地形地貌复杂的流域生态环境质量评价提供参考。

1 研究区概况与数据获取

1.1 研究区概况

漳河上游位于晋、冀、豫 3 省交界处,东经 112°—114°30',北纬 35°30'—38°之间,包括长治市、潞城市和林州市 3 个市区,左权县、屯留县、平顺县等县的全

部地区以及武安市、昔阳县、平遥县等县市的部分地区(图 1),西起太岳山,东邻太行山,中间为长治小盆地,地势西北部高东南部低,海拔落差较大,属于温带大陆性季风气候区。地形地貌类型复杂,主要为石质山区、土石山区、黄土丘陵区 and 河谷平川区。植被分布呈现出明显的地带差异性,流域内水系众多,分为清漳河和浊漳河两条支流,建有的大型水库承担着为附近地区提供生活和工、农业用水的重要角色。

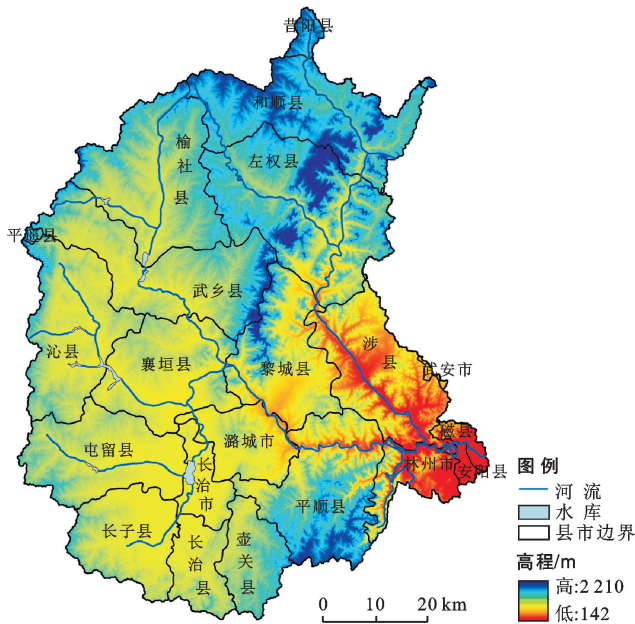


图 1 漳河上游地形

Fig.1 Topography of the upper reaches of Zhanghe River basin

1.2 数据来源及处理

遥感影像来源于 GEE 平台提供的 Landsat 5/8 地表反射率数据集(surface reflectance, SR),该数据集已经过几何校正、辐射校正和大气校正等处理,空间分辨率为 30 m,时间分辨率为 16 d。利用 JavaScript API 调取目标年份(2000,2010,2020 年)及其前后 1 a 的 6—9 月影像,通过云掩膜算法去除有云像元,将得到的无云影像中值合成研究区最小云量影像。气象数据选取中国气象数据网(<https://data.cma.cn/>)提供的 2000—2020 年漳河上游及其周边 9 个气象站点的月均气温、月降水量数据,利用反距离加权法(inverse distance weighted, IDW)将其插值为空间分辨率为 30 m 的栅格数据。DEM 数据为地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)提供的 SRTM 30 m 数据,坡度和坡向数据通过高程数据计算得到。人口和 GDP 数据来源于 2000—2020 年山西省、河北省和河南省统计年鉴,利用空间分析工具将其转换为空间分辨率为 30 m 的栅格数据并分级赋值。土地利用数据选取 2000,2010,2020 年 3 期 30 m 全球地理信

息公共产品 Globeland 30,下载地址为 <http://www.globallandcover.com/>,根据产品数据说明,将其重分类为耕地、林地、草地、水域、建设用地 5 类。其中,上述数据的处理以及后续的统计分析工作是在 ArcGIS,ENVI 等软件中进行。

2 研究方法

2.1 改进型遥感生态指数模型

2.1.1 指标计算 考虑地形和颗粒物浓度对生态环境的影响,构建包含绿度、湿度、热度、干度、地形和颗粒物浓度指标的漳河上游生态环境质量评价指标体系。其中,由于研究区地形地貌复杂,使得遥感影像存在一定的山体阴影,对植被信息的提取造成影响,而已有研究表明归一化差值山地植被指数(normalized difference mountain vegetation index, NDMVI)可减弱地形效应^[23],因此绿度指标采用 NDMVI 表示;湿度指标由缨帽变换的湿度分量(Wet)表示;热度指标由地表温度(land surface temperature, LST)表示;干度指标(normalized difference soil index, NDSI)由裸土指数(soil index, SI)和建筑指数(index-based build-up index, IBI)取平均得到;地形往往通过控制水热和土壤条件影响植被空间分布格局,间接对区域生态系统产生影响,坡度(slope)通过改变土壤稳定性和渗透能力影响植被的生长状况^[12],因此地形指标由 slope 表示;已有研究表明颗粒物差值指数(difference index, DI)可表征 PM_{2.5} 浓度的变化^[24],因此颗粒物浓度指标由差值指数 DI 表示,上述指标的具体计算方法见表 1。另外,为规避水体对主成分载荷分布的影响,采用 MNDWI 水体指数对水体掩膜^[25]。

2.1.2 ARSEI 模型构建 为减小不同指标极值以及其量纲不同所带来的误差,需对以上指标进行标准化处理,计算公式如下:

$$I_N = \frac{I - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}} \quad (1)$$

式中: I_N 为标准化后的指标值; I 为指标值; I_{\max} 为指标最大值; I_{\min} 为指标最小值。

将已标准化的指标耦合后进行主成分分析(principal component analysis, PCA),可得到各主成分分量,以 PC_1 和 PC_2 的贡献率作为权重构建 ARSEI 模型,其计算公式如下:

$$PC_i = f(\text{NDMVI}, \text{WET}, \text{LST}, \text{NDSI}, \text{slope}, \text{DI}) \quad (2)$$

$$\text{ARSEI} = \sum_{i=1}^2 W_i PC_i \quad (3)$$

式中: PC_i 为第 i 主成分分量; f 为主成分分析; W_i 为第 i 主成分的贡献率。

表 1 漳河上游生态环境质量各指标计算方法

Table 1 Calculation methods of various indicators of ecological environment quality in the upper reaches of Zhanghe River basin

指标	计算方法
绿度(NDMVI)	$NDMVI = \frac{[(\rho_{NIR} - \rho_{Red}) + (R_{min} - NIR_{min})]}{[(\rho_{NIR} + \rho_{Red}) - (R_{min} + NIR_{min})]}$
湿度(WET)	$WET_{TM} = 0.031 5\rho_{Blue} + 0.202 1\rho_{Green} + 0.310 2\rho_{Red} + 0.159 4\rho_{NIR} - 0.680 6\rho_{SWIR1} - 0.610 9\rho_{SWIR2}$ $WET_{OLI} = 0.151 1\rho_{Blue} + 0.197 3\rho_{Green} + 0.328 3\rho_{Red} + 0.340 7\rho_{NIR} - 0.711 7\rho_{SWIR1} - 0.455 9\rho_{SWIR2}$
热度(LST)	$LST = T / [1 + (\lambda T / \xi) \cdot \ln \epsilon] - 273.15$ $NDSI = (SI + IBI) / 2$
干度(NDSI)	$SI = \frac{[(\rho_{SWIR1} + \rho_{Red}) - (\rho_{Blue} + \rho_{NIR})]}{[(\rho_{SWIR1} + \rho_{Red}) + (\rho_{Blue} + \rho_{NIR})]}$ $IBI = \frac{2\rho_{SWIR1} / (\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR}) - [\rho_{NIR} / (\rho_{NIR} + \rho_{Red}) + \rho_{Green} / (\rho_{Green} + \rho_{SWIR1})]}{2\rho_{SWIR1} / (\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR}) + [\rho_{NIR} / (\rho_{NIR} + \rho_{Red}) + \rho_{Green} / (\rho_{Green} + \rho_{SWIR1})]}$
坡度(slope)	高程数据计算得到
颗粒物浓度(DI)	$DI = \rho_{Red} - \rho_{NIR}$

注:NDMVI 为归一化山地植被指数;LST 为地表温度;NDSI 为归一化裸土指数;IBI 为建筑指数;SI 为裸土指数;DI 为差值指数; ρ_i 为对应波段的地表反射率; R_{min} 和 NIR_{min} 分别为红、近红外波段反射率最小值; T 为传感器处热度值; λ 为中心波长; ξ 为常数; ϵ 为地表比辐射率。下同。

为了更好的对比不同研究时段生态环境质量的差异,需将 ARSEI 标准化,使其位于[0,1]之间,越接近 1,表明研究区生态环境质量越好。同时为了直观、定量地分析研究区生态环境质量,以 0.2 为间隔,将 ARSEI 分为差(0~0.2),较差(0.2~0.4),中等(0.4~0.6),良(0.6~0.8)和优(0.8~1)5 个等级。

2.2 动态变化分析方法

为了研究不同时期生态环境质量的变化情况,利用空间分析方法将不同时期 ARSEI 的分级结果进行叠加分析,提取生态环境质量年际变化和整体变化图斑^[26],其计算公式如下:

$$Code_{ij} = 10 \times Code_i + Code_j \tag{4}$$

$$Code_{OCP} = 100 \times Code_{2000} + 10 \times Code_{2010} + Code_{2020} \tag{5}$$

式中:Code_{ij} 为生态环境质量等级年际变化类型代码,Code_i 和 Code_j 分别为研究时段内前期和后期的生态环境质量等级值(1—5),其中 1—5 分别代表差、较差、中等、良和优。Code_{OCP} 为 2000—2020 年生态环境质量等级整体变化类型代码,Code₂₀₀₀, Code₂₀₁₀, Code₂₀₂₀ 分别为 2000, 2010, 和 2020 年的生态环境质量等级值。根据计算结果,将整体变化类型划分为 6 种,具体分类标准见表 2。

表 2 2000—2020 年漳河上游生态环境质量整体变化类型分类

Table 2 Classification of overall change types of ecological environment quality in the upper reaches of Zhanghe River basin from 2000 to 2020

变化类型	代码	说明
持续稳定型	111,222,333,444,555	等级值一直未变
波动稳定型	121,151,212,323,434 等	首尾等级值未变,中间可增可减,但不可不变
持续改善型	123,124,125,134,135,145,234,235,245,345	等级值持续增加
波动改善型	122,213,225,314,415 等	首等级值低于尾,中间可增可减,亦可不变
持续退化型	543,542,541,532,531,521,432,431,421,321	等级值持续减少
波动退化型	221,342,441,512,534 等	首等级值高于尾,中间可增可减,亦可不变

2.3 地理探测器

地理探测器是一种探测变量空间分异性以及揭示其背后驱动因子的统计学方法^[27],其可定量刻画自变量对因变量的影响力以及多个变量间的相互作用,已被广泛应用于生态环境评价领域^[28-30]。本研究采用因子探测器和交互探测器对漳河上游生态环境质量进行驱动因素分析。

(1) 因子探测器。通过 q 值的大小来衡量不同

因子对漳河上游生态环境质量空间分异性的影响力,计算公式如下:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \tag{6}$$

式中: h 为因子的层数; N_h 和 N 分别为层 h 和漳河上游全域的样本数; σ_h 和 σ 分别为层 h 和漳河上游全域 ARSEI 的方差; q 的值域为[0,1], q 值越大,表示该因子对 ARSEI 的影响越大。

(2) 交互探测器。探测因子的交互作用对 ARSEI 的影响是起增强还是减弱作用,或相互独立,共分为 5 种情况:若 $q(X_1 \cap X_2) < \min[q(X_1), q(X_2)]$,则为非线性减弱;若 $\min[q(X_1), q(X_2)] < q(X_1 \cap X_2) < \max[q(X_1), q(X_2)]$,则为单因子非线性减弱;若 $q(X_1 \cap X_2) > \max[q(X_1), q(X_2)]$,则为双因子增强;若 $q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$,则为相互独立;若 $q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$,则为非线性增强。

2.4 影响因子选取与信息提取

已有研究表明,自然因子如气温降水、地形地貌等以及社会经济因子如 GDP、人口等均在一定程度上影响着区域生态环境质量^[31-32]。鉴于此,本文以统计资料和遥感数据为基础,考虑到指标选取的代表性、科学性和系统性等原则,选取涵盖气象、社会、经济、地形和模型 5 个方面共 12 种影响因子(表 3),探测其对漳河上游生态环境质量的影响。利用创建渔网工具生成研究区 17 756 个 1 km×1 km 网格,将其中心点作为采样点提取对应数据的信息。同时采用自然断点法将年均气温、年降水量、人口、GDP 及高程分为 7 个等级,将坡向分为 10 个等级,将 NDMVI, NDSI, LST, WET, slope 及 DI 分为 5 个等级。

3 结果与分析

3.1 ARSEI 模型的适用性分析

为了验证构建的 ARSEI 模型适用性,采用主成

分分析、相关性分析和建模分析等方法分别探讨不同年份各指标与 ARSEI 的关系。

表 3 漳河上游生态环境质量影响因子

Table 3 Influence factors of ecological environment quality in the upper reaches of Zhanghe River basin

类型	因子	指标	类型	因子	指标
气象	X_1	年均气温/℃	模型	X_7	NDMVI
	X_2	年降水量/mm		X_8	WET
社会	X_3	人口/ 10^4 人		X_9	LST
经济	X_4	GDP/ 10^8 元		X_{10}	NDSI
地形	X_5	高程/m		X_{11}	slope
	X_6	坡向		X_{12}	DI

3.1.1 主成分分析 根据主成分分析结果(表 4)可知,2000, 2010, 2020 年 PC_1 的贡献率分别为 64.12%, 64.70% 和 64.21%, PC_1, PC_2 的贡献率之和分别为 81.24%, 81.17% 和 82.58%, 表明前两个主成分包含了 6 个指标的大部分信息。此外,在 ARSEI 所选的 6 个指标中,绿度指标(NDMVI)、湿度指标(WET)和地形指标(slope)在 PC_1, PC_2 中载荷值均为正值,说明该 3 个指标对生态有益;热度指标(LST)、干度指标(NDSI)和颗粒物浓度指标(DI)在 PC_1, PC_2 中载荷值均为负值,说明该 3 个指标对生态不利。总的来说, PC_1, PC_2 包含了所选指标的大部分信息,且载荷值符号基本一致,具有明确的生态含义。因此,利用前两个主成分并根据其贡献率作为权重构建 ARSEI 模型,能够合理地表征生态环境质量状况。

表 4 2000—2020 年漳河上游生态环境质量各指标主成分分析结果

Table 4 Principal component analysis results of various indicators of ecological environment quality in the upper reaches of Zhanghe River basin from 2000 to 2020

指标	2000 年			2010 年			2020 年		
	PC_1	PC_2	PC_3	PC_1	PC_2	PC_3	PC_1	PC_2	PC_3
NDMVI	0.507	0.044	0.223	0.487	0.076	-0.176	0.456	0.018	0.230
WET	0.401	0.175	-0.594	0.406	0.205	0.671	0.459	0.254	-0.408
LST	-0.371	-0.122	0.185	-0.400	-0.269	0.330	-0.415	-0.052	0.285
NDSI	-0.525	-0.239	0.134	-0.503	-0.164	-0.240	-0.508	-0.181	0.110
slope	0.213	0.925	0.026	0.249	0.923	0.121	0.245	0.934	0.026
DI	-0.351	-0.199	-0.738	-0.352	-0.017	0.581	-0.302	-0.165	-0.828
特征值	0.211	0.056	0.031	0.213	0.054	0.030	0.195	0.056	0.030
贡献率/%	64.12	17.12	9.27	64.70	16.47	9.04	64.21	18.37	9.80

3.1.2 相关性分析 ARSEI 的代表性可通过其与各指标间的皮尔逊相关性来表征,在得到各指标和 ARSEI 的相关系数(均通过了 1% 的显著性检验)矩阵的基础上,通过计算其平均相关度来检验模型的适用性(表 5)。不同指标在 3 个年份中,NDMVI 的平均相关度均最大,且在 2010 年达到最大值,为 0.667;

ARSEI 与 6 个指标的平均相关度均在 0.7 以上,3 a 均值为 0.736,比单个指标中平均相关度最大的 NDMVI 高 10.34%,比 6 个指标 3 a 的平均相关度均值(0.458)高 60.70%。由此可见,ARSEI 包含了 6 个指标的信息,且强于单个指标的代表性,能够全面、客观和准确地表征漳河上游生态环境质量状况。

表 5 2000—2020 年漳河上游不同年份 ARSEI 与各指标的平均相关度

Table 5 Average correlation between ARSEI and various indicators in the upper reaches of Zhanghe River basin from 2000 to 2020

年份	NDMVI	WET	LST	NDSI	Slope	DI	ARSEI
2000	0.574	0.421	0.363	0.560	0.131	0.360	0.705
2010	0.667	0.512	0.440	0.638	0.209	0.509	0.759
2020	0.653	0.536	0.498	0.638	0.155	0.382	0.745
均值	0.631	0.490	0.434	0.612	0.165	0.417	0.736

3.1.3 建模分析 为了分析 3 个年份不同指标与 ARSEI 的关系,取最小间距为 1 km,在研究区内随机生成 17 756 个采样点,对不同年份各指标和

ARSEI 进行贯穿整个影像的随机采样。以 ARSEI 为因变量,6 个指标为自变量,构建漳河上游 3 个年份的多元逐步回归模型,结果如下:

$$ARSEI_{2000} = 0.209NDMVI + 0.139WET + 0.201slope - 0.181NDSI - 0.164LST - 0.116DI + 0.461 \quad (R^2 = 1)$$

$$ARSEI_{2010} = 0.204NDMVI + 0.142WET + 0.195slope - 0.186NDSI - 0.134LST - 0.144DI + 0.463 \quad (R^2 = 1)$$

$$ARSEI_{2020} = 0.207NDMVI + 0.154WET + 0.205slope - 0.183NDSI - 0.172LST - 0.102DI + 0.456 \quad (R^2 = 1)$$

从 3 个年份逐步回归模型中可看出,所选 6 个指标均为评价漳河上游生态环境质量的关键性指标。其中,NDMVI, WEI 和 slope 的系数为正,表明对 ARSEI 有正向影响;NDSI, LST 和 DI 的系数为负,表明对 ARSEI 有负向影响,这与主成分分析结果一致。

年为例,建立各指标分量与 ARSEI 的三维散点图(图 2), ARSEI 高值主要集中于 NDMVI, WET 和 slope 的高值区,表明植被覆盖度高、水分充足且坡度较高的区域生态环境质量优; ARSEI 低值主要集中于 NDSI, LST 和 DI 的高值区,表明不透水表面覆盖高、地表温度高且颗粒物浓度高的区域生态环境质量差,该结果与上述回归模型结果相一致。

为进一步分析各指标与 ARSEI 的关系,以 2020

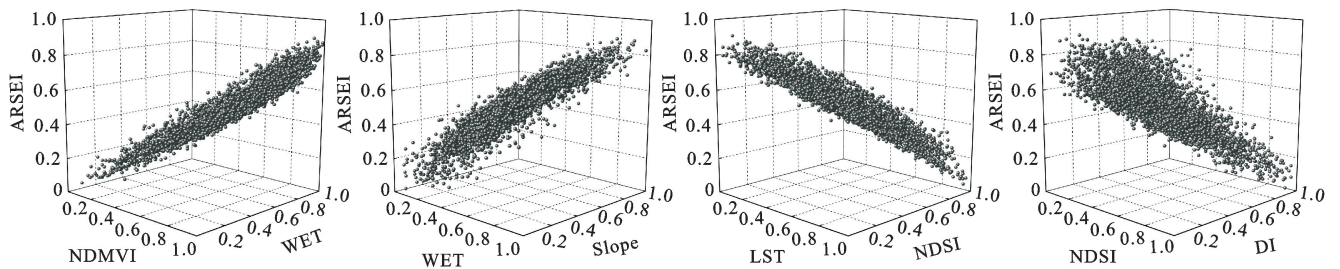


图 2 漳河上游生态环境质量三维关系

Fig.2 3D relationship of ecological environment quality in the upper reaches of Zhanghe River basin

综合主成分分析、相关性分析以及建模分析结果表明,耦合 6 项指标并以 PC₁, PC₂ 贡献率作为权重构建的改进型遥感生态指数(ARSEI)模型能有效反映指标的大部分信息,具有较好的代表性,符合生态学规律,表现出较好的适用性,可用来全面、客观和较准确地表征漳河上游生态环境质量状况。

3.2 漳河上游生态环境质量评价结果与分析

3.2.1 整体情况分析 通过 3 个年份不同指标和 ARSEI 的统计值(表 6)可以看出:2000—2020 年期间,漳河上游生态环境质量整体上呈现变好趋势。从不同年份来看, ARSEI 均值表现为持续增加,在 2020 年达到最大值,为 0.522,比 2000 年的 0.467 上升了 11.78%。

表 6 2000—2020 年漳河上游生态环境质量各评价指标和 ARSEI 的统计值

Table 6 Statistics of various evaluation indicators and ARSEI of ecological environment quality in the upper reaches of Zhanghe River basin from 2000 to 2020

年份	参量	NDMVI	WET	LST	NDSI	slope	DI	ARSEI
2000	均值	0.512	0.532	0.519	0.547	0.343	0.517	0.467
	标准差	0.038	0.025	0.127	0.044	0.148	0.024	0.178
2010	均值	0.580	0.534	0.472	0.554	0.343	0.516	0.484
	标准差	0.035	0.026	0.143	0.045	0.148	0.017	0.188
2020	均值	0.684	0.585	0.520	0.474	0.343	0.448	0.522
	标准差	0.014	0.031	0.121	0.034	0.148	0.012	0.179

从不同指标来看,NDMVI,WET 均值表现为持续增加,NDSI 均值表现为先增后减,LST 均值表现为先减后增,DI 均值表现为持续下降,表明研究区在过去 21 a 间,植被覆盖度在逐步提高,而在高植被覆盖度区域土壤含水量高,进而导致湿度增加;同时受城市扩张的影响,不透水表面面积增加,NDSI 增大,但随着近些年城市绿化等工程的实施,其下垫面生态质量整体得到有效改善,NDSI 减小,这与生态学规律及实际情况相符合。

3.2.2 分级统计分析 为了明确漳河上游 2000—2020 年不同地区生态环境质量情况,对 ARSEI 进行等级划分,并统计不同等级的比例(图 3),3 个年份漳

河上游生态环境质量等级表现为差和较差的面积比例分别为 37.51%,34.18%和 22.75%,呈现减少趋势;良和优等级的面积比例分别为 22.58%,27.19%和 32.80%,呈现增加趋势。这进一步表明研究区生态环境质量趋于改善。此外,2000—2010 年和 2010—2020 年生态环境质量表现为差和较差等级的占比分别减少 3.33%,11.43%,良和优等级的比例分别增加 4.61%,5.61%,说明 2010—2020 年生态环境质量表现为差和较差等级比例的减少量高于 2000—2010 年,良和优等级比例的增加量高于 2000—2010 年。由此可见,近 10 a 间漳河上游生态环境质量的改善较为明显。

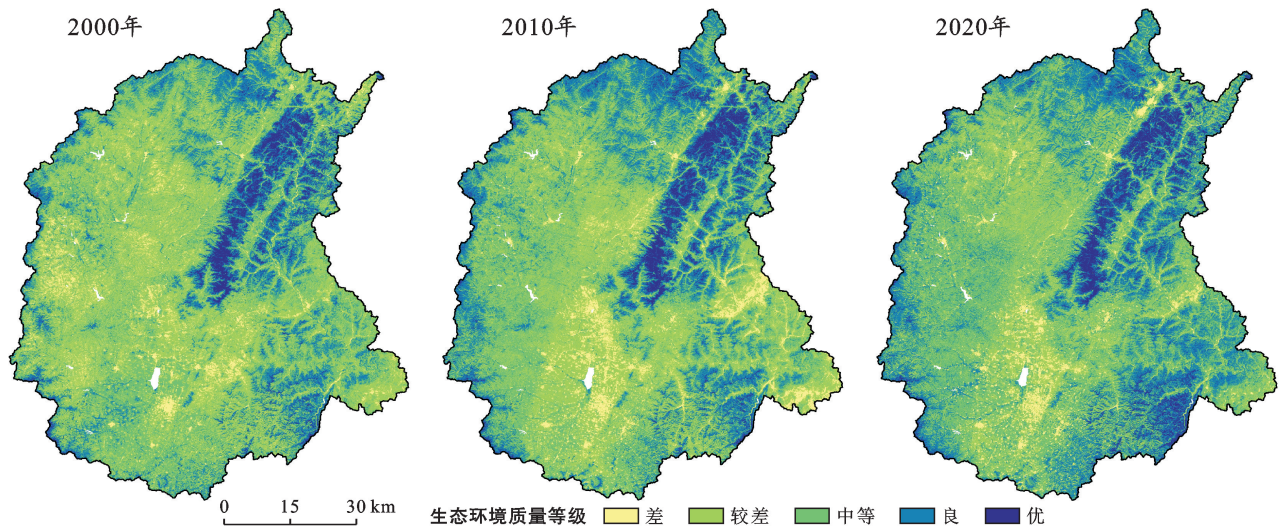


图 3 2000—2020 年漳河上游生态环境质量等级空间分布

Fig.3 Spatial distribution of ecological environment quality grades in the upper reaches of Zhanghe River basin from 2000 to 2020

从空间分布来看(图 3),漳河上游东部地区的生态环境质量优于中部、西部地区,呈现出西南差、东北优的空间分布格局。3 个年份生态环境质量等级为良和优的区域主要分布于研究区东部,地区地势相对较高,植被类型以林地为主,绿度和湿度指标较高,如左权县、黎城县以及平顺县的东部;生态环境质量等级为差和较差的区域主要分布于研究区中西部,这些区域大部分为城区和城镇建成区,土地利用类型多为建设用地,植被覆盖度较低,如长治市、潞城市、襄垣县等地区。

3.3 漳河上游生态环境质量动态变化分析

3.3.1 整体变化分析 根据研究期内生态环境质量整体变化类型的空间分布特征及不同变化类型的面积比例情况(图 4)可知,漳河上游生态环境质量整体变化类型以持续稳定型为主,即在近 21 a 间生态环境质量类型未发生改变,面积比例为 39.41%,主要分

布于左权县、黎城县、榆社县及武乡县等地区,少量分布于研究区西南部和东南部。波动改善型为生态环境质量呈上升趋势的主要整体变化类型,面积比例为 33.67%,主要分布于沁县、襄垣县和屯留县等地区。波动退化型为生态环境质量呈下降趋势的主要整体变化类型,面积占比为 10.28%,主要分布于长治市、长子县和长治县等地区。

具体而言,2000—2020 年期间,生态环境质量退化和改善的面积比例分别为 10.77%,35.94%,说明整体上漳河上游生态环境质量以改善为主,且得到了显著提升。结合漳河上游土地利用状况(图 5),生态环境质量退化区域主要分布于用地类型以耕地和建设用地为主的地区,易受人类活动的影响,在近 21 a 间,耕地减少 2.37%,建设用地增加 2.68%,存在生态环境质量退化的风险,未来漳河上游生态建设工作应重点关注该地区。

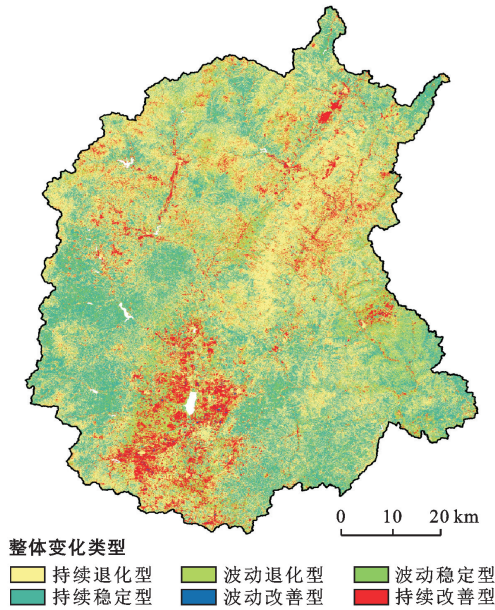


图 4 2000—2020 年漳河上游生态环境质量整体变化

Fig.4 Overall changes of ecological environment quality in the upper reaches of Zhanghe River Basin from 2000 to 2020

3.3.2 年际变化分析 利用桑基图(图 6)直观地动态分析漳河上游生态环境质量在相邻时段(2000—2010,2010—2020 年)的变化情况。在此基础上,根据不同等级值的升降程度,将变化类型分为明显变差

(-2,-3,-4)、变差(-1)、不变(0)、变好(+1)和明显变好(+2,+3,+4)5 类,并统计不同变化类型所占比例(图 7)。2000—2010 年期间,生态环境质量不变的比例为 58.52%,退化和改善的比例分别为 16.42%,25.06%,说明该时段研究区生态环境质量有所改善。2010—2020 年期间,生态环境质量不变的面积为 62.07%,退化和改善的分别为 10.11%,27.82%,且差距较大,说明该时段研究区生态环境质量明显改善。

从转换方式来看(图 6),两个时段均表现为:退化以“良—中等”“中等—较差”和“较差—差”为主要类型,局部为“优—中等”“良—差”;改善均以“中等—良”“较差—中等”和“差—较差”为主要类型,局部为“中等—优”“差—良”。从空间分布来看(图 7),2000—2010 年期间,漳河上游生态环境质量退化区域主要分布于长治市西北部、屯留县东部和长子县东北部等地区;改善区域主要分布于屯留县中西部、沁县中部等地区,少量分布于研究区北部。2010—2020 年期间,生态环境质量退化区域主要分布于左权县西北部、榆社县东部等地区;改善区域主要分布于涉县中东部、林州市南部和平顺县南部等地区,少量分布于研究区中部。

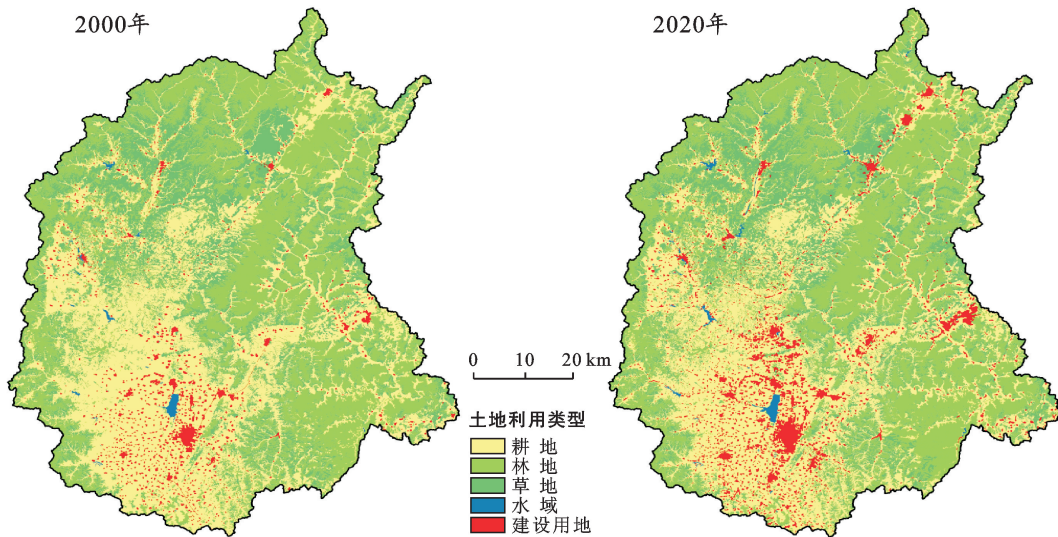


图 5 2000—2020 年漳河上游土地利用类型变化

Fig.5 Changes of land use types in the upper reaches of Zhanghe River basin from 2000 to 2020

3.4 各县市生态环境质量变化分析

通过各县市生态环境质量等级比例(图 8)及其变化情况(图 9)来评价漳河上游不同县市生态环境质量状况。

由图 8 可知,3 个年份生态环境质量表现为优良

等级比例均值最高的为和顺县,为 54.09%,左权县次之,为 49.84%,表明上述两个县生态环境质量较好,主要因为该区域地势相对较高,受人类活动影响较小,且植被类型多为林地和草地,植被覆盖度高;差、较差等级占比均值最高的为长治市,为 67.43%,潞城

市次之,为 63.35%,表明上述两个市生态环境质量较差,主要在于该区域为城市空间,受建设用地扩张等人类活动影响较大。进一步分析各个县市生态环境质量变化情况(图 9)发现,2000—2020 年期间除长治市、长治县和长子县外,漳河上游所有县市的生态环境质量均得到了改善。

其中,沁县、平顺县的改善情况最为显著,比例分别为 53.92%,52.82%;长治市、长治县的退化情况最为显著,比例分别为 28.83%,33.63%。结合漳河上游土地利用状况(图 5)总体分析,漳河上游各县市生态环境质量多与用地类型有关系,因此未来该地区的生态环境保护工作可结合国土空间规划科学地制定相关政策与措施。

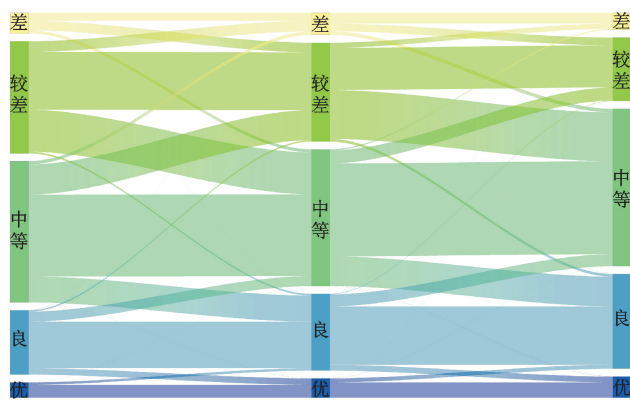


图 6 2000—2020 年漳河上游生态环境质量等级转移桑基图
Fig.6 Sankey diagram of ecological environment quality grades transfer in the upper reaches of Zhanghe River basin from 2000 to 2020

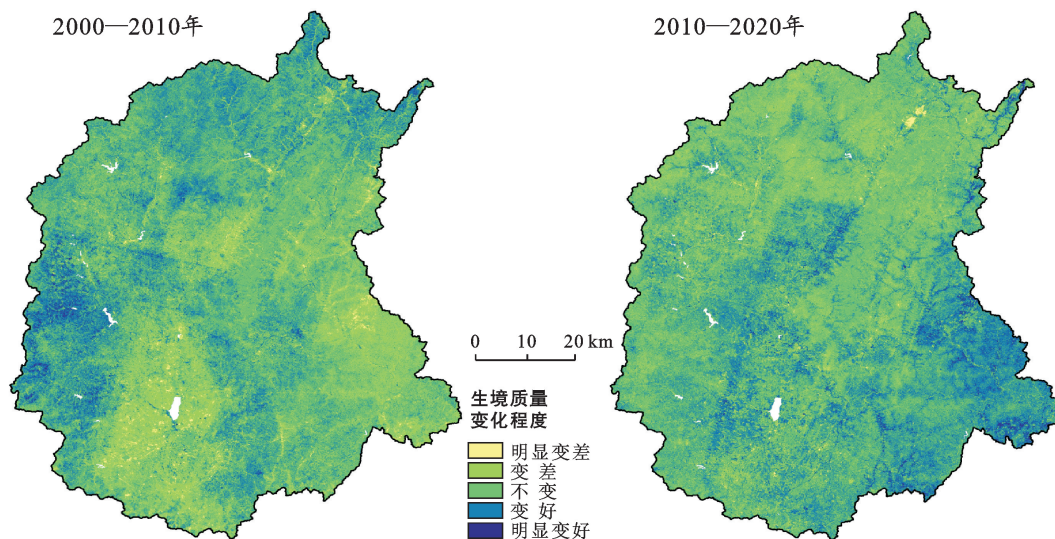


图 7 2000—2020 年漳河上游生态环境质量变化

Fig.7 The change of ecological environment quality in the upper reaches of Zhanghe River basin from 2000 to 2020

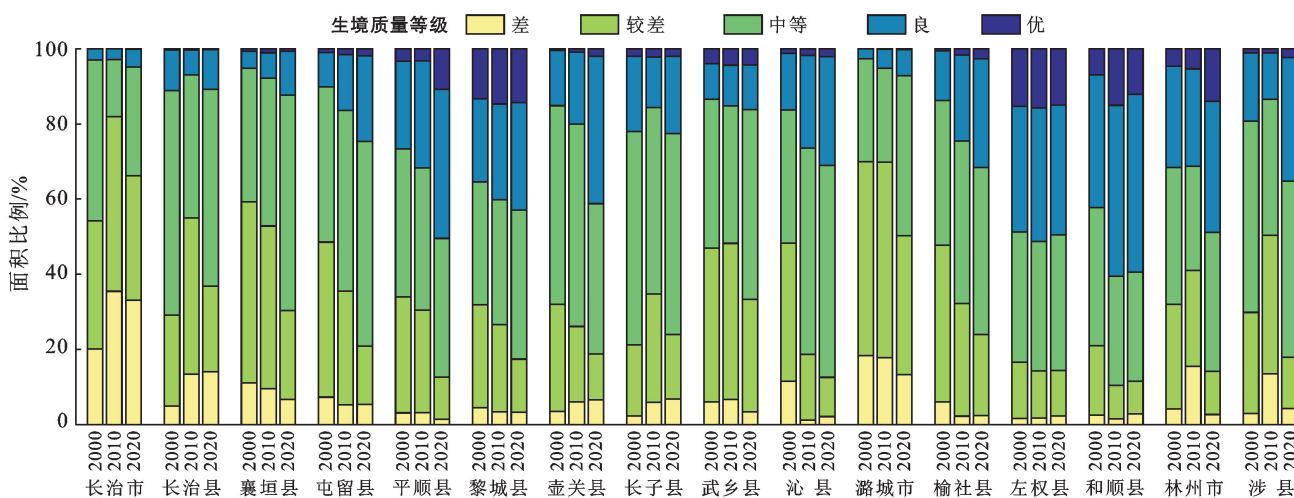


图 8 2000—2020 年漳河上游县级生态环境质量等级比例

Fig.8 Proportion of county-level ecological environment quality grades in the upper reaches of Zhanghe River basin from 2000 to 2020

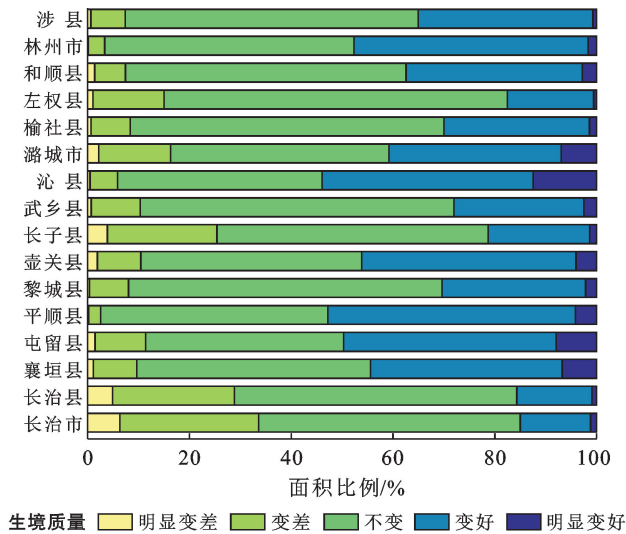


图 9 2000—2020 年漳河上游县级生态环境质量变化

Fig.9 The change of ecological environment quality monitoring at county-level in the upper reaches of Zhanghe River basin from 2000 to 2020

3.5 生态环境质量影响因子地理探测

3.5.1 单因子影响力探测 根据因子探测结果(表 7)可知,不同影响因子对 ARSEI 的空间分布均有显著影响($p < 0.001$),且影响力存在一定差异。除模型因子对 ARSEI 的空间分布具有较强的影响力外,2000 年的影响力排序依次为:高程>年均气温>坡向>人口>GDP>年降水量,其中高程和年均气温的 q 值高于该年均值(0.093),为该年份主要影响因子;2010 年的影响力排序依次为:高程>GDP>人口>年均气温>年降水量>坡向,高程和 GDP 的 q 值高于该年均值(0.124),为该年份主要影响因子。2020 年的影响力排序依次为:高程>年均气温>人口>坡向>GDP>年降水量,高程和年均气温的 q 值高于该年均值(0.091),为该年份主要影响因子,由此得出,2000—2020 年期间,除模型因子外,高程为 ARSEI 空间分布的主要影响因子。从影响因子类型来看,3 个年份对 ARSEI 空间分布的影响力整体上排序依次为:地形因子>气象因子>社会因子>经济因子。

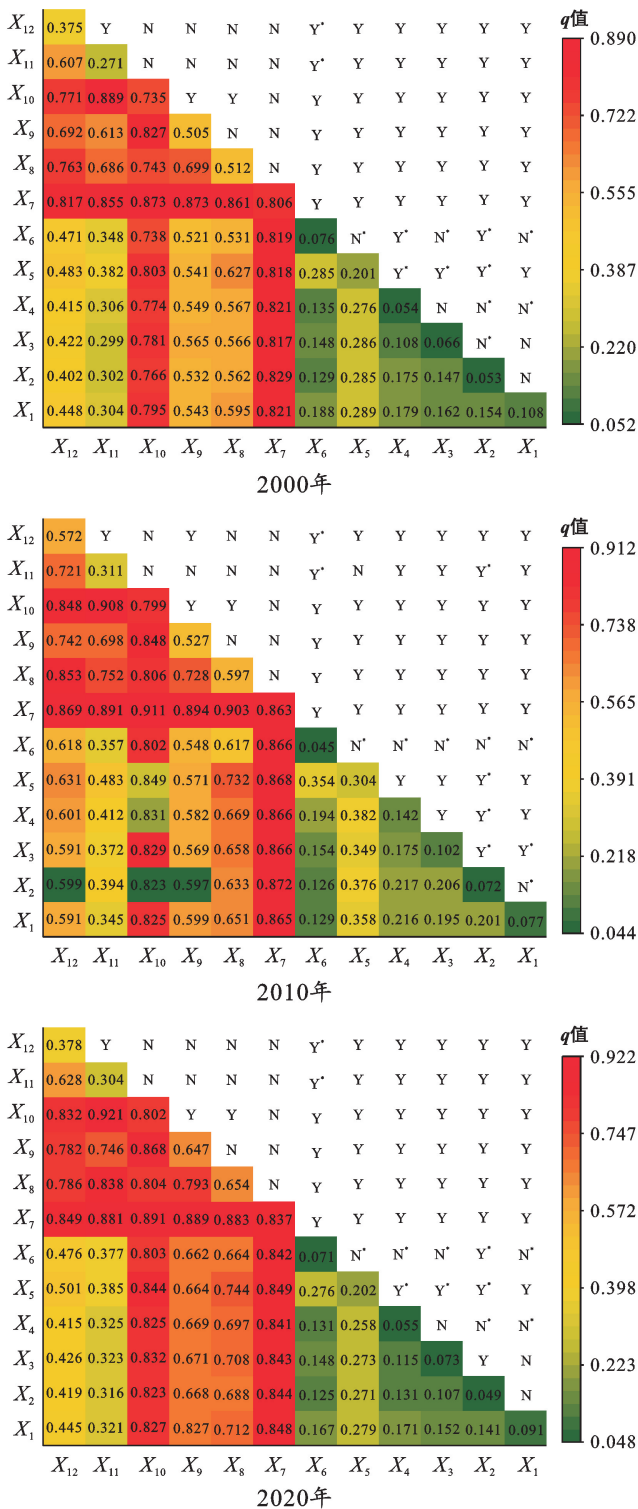
表 7 2000—2020 年漳河上游生态环境质量单因子影响力探测结果

Table 7 Influence detection results of single factor of ecological environment quality in the upper reaches of Zhanghe River basin from 2000 to 2020

因子	指标	2000 年			2010 年			2020 年		
		q 值	p 值	排序	q 值	p 值	排序	q 值	p 值	排序
X_1	年均气温	0.108	0	8	0.077	0	10	0.093	0	8
X_2	年降水量	0.053	0	12	0.072	0	11	0.049	0	12
X_3	人口	0.066	0	10	0.102	0	9	0.073	0	9
X_4	GDP	0.054	0	11	0.142	0	8	0.055	0	11
X_5	高程	0.201	0	7	0.304	0	7	0.202	0	7
X_6	坡向	0.076	0	9	0.045	0	12	0.071	0	10
X_7	NDMVI	0.806	0	1	0.861	0	1	0.837	0	1
X_8	WET	0.512	0	3	0.597	0	3	0.654	0	3
X_9	LST	0.505	0	4	0.527	0	5	0.647	0	4
X_{10}	NDSI	0.735	0	2	0.799	0	2	0.802	0	2
X_{11}	slope	0.271	0	6	0.311	0	6	0.304	0	6
X_{12}	DI	0.375	0	5	0.572	0	4	0.378	0	5

3.5.2 多因子交互作用探测 利用交互探测器进行因子交互作用探测,结果如图 10 所示。影响因子交互作用后的 q 值均高于单因子的 q 值,表明不同因子对 ARSEI 空间分布的影响为协同增强,且非独立存在。其中,2000 年和 2010 年非线性增强出现 13 次,双因子增强出现 53 次,2020 年非线性增强出现 12 次,双因子增强出现 54 次。从不同年份因子的影响力来看,2000,2010,2020 年对 ARSEI 最大影响力分别为 $NDSI \cap slope$ ($q = 0.889$), $NDSI \cap NDMVI$ ($q = 0.911$), $NDSI \cap slope$ ($q = 0.921$) 的交互作用。值得注意的是,在单因子中,2000 年 slope 的 q 值 <

DI,但在与 NDSI 和 NDMVI 的交互作用下,slope 的影响力大于 DI,表明该年份 slope 在 NDSI 和 NDMVI 的交互作用下呈现出更大的影响力;2010 年与 2000 年情况一样;2020 年 slope 在 NDSI, WET 和 NDMVI 的交互作用下呈现出更大的影响力。另外,2000 年有年均气温 \cap 年均水量、人口 \cap GDP 和 NDMVI \cap WET 等 21 对交互因子为 N,2010 年有高程 \cap 坡向、WET \cap LST 和 NDMVI \cap DI 等 18 对交互因子为 N,2020 年有 GDP \cap 坡向、LST \cap DI 和 slope \cap WET 等 21 对交互因子为 N,表明这些影响因子的组合对 ARSEI 的影响不存在显著性差异。



注：* 表示非线性增强，无标记表示双因子增强；Y 表示显著差异，N 表示无显著差异。

图 10 2000—2020 年漳河上游生态环境质量多因子交互作用探测结果 (q 值)

Fig.10 Interactive detection results (q) of multiple factors of ecological environment quality in the upper reaches of Zhanghe River basin from 2000 to 2020

4 结论

(1) 构建的 ARSEI 模型能够较好地反映漳河上

游生态环境质量状况及其变化。主成分分析和建模分析结果表明,NDMVI,WET 和 slope 对生态环境质量的影响为正向,NDSI,LST 和 DI 对生态环境质量的影响为负向。其中,NDMVI 对 ARSEI 的影响最大,DI 的影响最小。

(2) 2000—2020 年期间,漳河上游生态环境质量持续变好,ARSEI 均值由 0.467 增加至 0.522,改善区域比例为 35.94%,以变好 1 个等级为主,且 2010—2020 年的改善更为显著,整体变化类型以持续稳定型为主,比例为 39.41%;生态环境质量等级以较差和中等为主,比例为 66.83%,呈现西南差、东北优的空间分布格局;县级尺度上,沁县、平顺县的改善情况最为显著,改善面积比例均大于 50%。

(3) 单因子探测结果表明,不同影响因子对 ARSEI 的空间分布均有显著影响且影响力存在差异,除模型因子外,高程为主要影响因素;不同类型因子影响力排序为:模型因子>地形因子>气象因子>社会因子>经济因子。多因子交互作用探测结果表明,所有影响因子均表现为协同增强作用,NDSI 在 NDMVI,slope 的共同作用下对 ARSEI 空间分布的影响力最大。

由于研究区地形复杂,难以获取云量少、质量高的逐年遥感影像,使得研究时段步长相对较长,从而忽略了不同年份之间生态环境质量的细微变化。因此,未来可结合多源遥感数据源进行长时序的生态环境质量研究,以便更好地分析其时空演变规律。

[参 考 文 献]

[1] Liao Weihua, Jiang Weiguo. Evaluation of the spatio-temporal variations in the eco-environmental quality in China based on the remote sensing ecological index [J]. Remote Sensing, 2020,12(15):2462.

[2] 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):4795-4806.

[3] 刘翔位,周启刚,周浪,等.基于 RSEI 的三峡库区重庆段水土保持生态功能区生态环境质量动态监测[J].水土保持研究,2021,28(5):278-286.

[4] Gupta K, Kumar P, Pathan S K, et al. Urban Neighborhood Green Index: A measure of green spaces in urban areas [J]. Landscape and Urban Planning, 2012, 105(3):325-335.

[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.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.
- [7] Hu Xisheng, Xu Hanqiu. A new remote sensing index for assessing the spatial heterogeneity in urban ecological quality: A case from Fuzhou City, China [J]. *Ecological Indicators*, 2018,89:11-21.
- [8] Gao Pengwen, Kasimu A, Zhao Yongyu, et al. Evaluation of the temporal and spatial changes of ecological quality in the Hami oasis based on RSEI [J]. *Sustainability*, 2020,12(18):7716.
- [9] 陈丽红,刘普幸,花亚萍.基于 RSEI 的疏勒河流域生态环境质量综合评价及其成因分析[J].土壤通报,2021,52(1):25-33.
- [10] 刘林甫,盛艳,秦富仓,等.基于 RSEI 模型的砒砂岩区生态环境质量演变研究[J].水土保持通报,2022,42(1):233-239.
- [11] 王杰,马佳丽,解斐斐,等.干旱地区遥感生态指数的改进:以乌兰布和沙漠为例[J].应用生态学报,2020,31(11):3795-3804.
- [12] 付杰,王萍,张清,等.基于改进遥感生态指数的海南岛生态环境质量动态变化[J].农业资源与环境学报,2021,38(6):1102-1111.
- [13] 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.
- [14] 刘英,党超亚,岳辉,等.改进型遥感生态指数与 RSEI 的对比分析[J].遥感学报,2022,26(4):683-697.
- [15] 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[J].生态学报,2020,40(23):8461-8473.
- [16] 魏雨涵,钱建平,范伟伟,等.基于 RSEI 的漓江流域生态环境质量动态监测[J].中国水土保持科学(中英文),2021,19(1):122-131.
- [17] 周萌,刘友存,孟丽红,等.基于遥感生态指数的东江源区 2000—2019 年生态环境质量评价[J].水土保持通报,2021,41(4):231-240.
- [18] Guo Beibei, Fang Yelin, Jin Xiaobin, et al. Monitoring the effects of land consolidation on the ecological environmental quality based on remote sensing: A case study of Chaohu Lake basin, China [J]. *Land Use Policy*, 2020,95:104569.
- [19] 董金玮,李世卫,曾也鲁.遥感云计算与科学分析应用与实践[M].北京:科学出版社,2020.
- [20] Huang Huiping, Chen Wei, Zhang Yuan, et al. Analysis of ecological quality in Lhasa metropolitan area during 1990—2017 based on remote sensing and Google Earth Engine platform [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2021,31(2):265-280.
- [21] 杨坤士,卢远,翁月梅,等.Google Earth Engine 平台支持下的南流江流域生态环境质量动态监测[J].农业资源与环境学报,2021,38(6):1112-1121.
- [22] 张华,宋金岳,李明,等.基于 GEE 的祁连山国家公园生态环境质量评价及成因分析[J].生态学杂志,2021,40(6):1883-1894.
- [23] 吴志杰,何国金,黄绍霖,等.南方丘陵区植被覆盖度遥感估算的地形效应评估[J].遥感学报,2017,21(1):159-167.
- [24] 万虹麟,霍飞,牛玉芬,等.顾及 PM_{2.5} 浓度遥感生态指数模型的沧州市区生态环境质量动态监测分析[J].地球物理学进展,2021,36(3):953-960.
- [25] 徐涵秋.利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究[J].遥感学报,2005,9(5):589-595.
- [26] 郭泽呈.中国北方地区环境干扰度时空演变特征分析[D].甘肃 兰州:西北师范大学,2020.
- [27] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.
- [28] 李妍,张国钦,吝涛,等.乡镇遥感生态指数时空变化及影响因子研究:以天津市蓟州区为例[J].生态学报,2022,42(2):474-486.
- [29] 排日海·合力力,管梅,阿里木江·卡斯木.乌鲁木齐市生态环境遥感评价及驱动因子分析[J].干旱区研究,2021,38(5):1484-1496.
- [30] 高焕霖,张廷龙,樊华焯,等.基于地理探测器的杨凌示范区生态环境质量影响因素定量分析[J].西北林学院学报,2020,35(5):185-194.
- [31] 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.
- [32] 胡克宏,张震.陕西秦岭山区留坝县生态质量时空特征及影响因素分析[J].生态与农村环境学报,2021,37(6):751-760.