

2000—2020年渭河流域生态环境质量 时空变化及其驱动因素

余欢¹, 李鹏^{1,2}, 王孝康³, 肖列^{1,2}, 王周³, 杨秀玲⁴, 宁静⁴, 张泽宇^{1,2}

(1.西安理工大学 西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048;

2.旱区生态水文与灾害防治国家林业和草原局重点实验室, 陕西 西安 710048;

3.国家林业和草原局西北林业调查规划院, 陕西 西安 710001; 4.青海省林业和草原局, 青海 西宁 810008)

摘要: [目的] 分析2000—2020年渭河流域生态环境质量时空特征及其驱动因素, 为该流域实现可持续发展和生态文明建设提供理论参考。[方法] 基于GEE平台构建遥感生态指数(RSEI)从而动态评估2000—2020年渭河流域生态环境质量的变化, 并基于最优参数地理探测器模型探究气候、植被、地形、土壤和社会经济因子对于生态环境质量的影响。[结果] ①2000—2020年渭河流域生态环境质量不断提升, 区域内生态环境质量差异性加大; 生态环境质量等级以差和较差为主, 占总面积的60%以上。20 a间生态环境质量等级面积增加较多的为中、良和优。②生态环境质量等级呈“南高北低, 东高西低”的空间分布格局, 较差等级生态环境区面积最大, 渭河流域73.43%的区域处于生态环境质量增加区, 增加区面积达 $1.21 \times 10^5 \text{ km}^2$; 研究期间生态环境质量增加的区域面积不断增大, 减少的区域面积不断减少, 研究区整体生态环境质量在往好的方向发展。优生态环境质量区域总体仍沿东南—西北方向倾斜分布。[结论] 降雨量、高程、土壤有机碳含量是影响渭河流域生态环境质量的主要影响因素; 在进行渭河流域生态环境质量提升的过程中, 应充分考虑坡度的分布规律优化治理方案。

关键词: 生态环境质量; 遥感生态指数; 最优参数地理探测器; 驱动因素; 渭河流域

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)01-0317-10

中图分类号: S157.1

文献参数: 余欢, 李鹏, 王孝康, 等. 2000—2020年渭河流域生态环境质量时空变化及其驱动因素[J]. 水土保持通报, 2025, 45(1): 317-326. She Huan, Li Peng, Wang Xiaokang, et al. Spatial and temporal changes and its driving factors of ecological environment quality in Weihe River basin from 2000 to 2020 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(1): 317-326. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.01.033; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.01.033.

Spatial and temporal changes and its driving factors of ecological environment quality in Weihe River basin from 2000 to 2020

She Huan¹, Li Peng^{1,2}, Wang Xiaokang³, Xiao Lie^{1,2},

Wang Zhou³, Yang Xiuling⁴, Ning Jing⁴, Zhang Zeyu^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Ecological Water Conservancy in Northwest Dry Region,

Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China; 2. Key Laboratory of Ecological

Hydrology and Disaster Prevention in Arid Region, State Forestry and Grassland Administration, Xi'an,

Shaanxi 710048, China; 3. Northwest Forestry Survey and Planning Institute of State Forestry and Grassland Administration,

Xi'an, Shaanxi 710001, China; 4. Forestry and Grassland Bureau of Qinghai Province, Xining, Qinghai 810008, China)

Abstract: [Objective] The spatial and temporal characteristics of ecological environment quality and its driving factors in the Weihe River basin from 2000 to 2020 was analyzed in order to provide theoretical reference for the sustainable development and ecological civilization construction in the basin. [Methods] The remote sensing ecological index (RSEI) was built based on Google Earth Engine platform to dynamically evaluate the change of ecological environment quality in the Weihe River basin from 2000 to 2020 and the impact of climate, vegetation, terrain, soil and social-economic factors on ecological environment quality was

收稿日期: 2024-09-03

修回日期: 2024-11-03

采用日期: 2024-11-06

资助项目: 陕西省2023年重点研发计划项目“陕西典型地貌单元植被—土壤—水体固碳能力评估与监测关键技术研究”(2023-ZDLSF-65)

第一作者: 余欢(1999—), 男(汉族), 甘肃省天水市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持措施优化配置。Email: 17743406126@163.com。

通信作者: 李鹏(1974—), 男(汉族), 山东省烟台市人, 博士, 教授, 主要从事水土资源与环境方面的研究。Email: lipeng74@163.com。

explored based on the optimal parameter geographic detector model. [Results] ① From 2000 to 2020, the quality of the Weihe River basin ecological environment continuously improved and the difference in ecological environment quality within the region increased. The ecological environment quality grade was mainly poor and relatively poor, accounting for more than 60% of the total area. In 20 years, the area of ecological environment quality grade increased for medium, good, and excellent. ② The quality grade of the ecological environment had a spatial distribution pattern of “higher in the south and lower in the north, higher and lower in the east and the west”. The area of poor grade ecological environment was the largest, and 73.43% of the Weihe River basin was in the area of ecological environment quality increase, with an increase area of $1.21 \times 10^5 \text{ km}^2$. During the study period, the area where the ecological environment quality increases was increasing and the reduced area was decreasing, and the overall ecological environment quality of the research area was positively developing. The area with excellent ecological environment quality distributed along the southeast-northwest direction. [Conclusion] Rainfall, elevation, and soil organic carbon content were the main factors affecting the ecological environment quality of the Weihe River Basin. In the process of improving the ecological environment quality of the Weihe River Basin, the distribution law of slope should be fully considered to optimize the governance scheme.

Keywords: ecological environment quality; remote sensing ecological index; optimal parameter geographic detector; drivers; Weihe River basin

生态环境是人与自然共同作用下的复杂系统,不仅是人类生存和发展的基础,更是推动区域社会经济可持续发展的重要保障^[1-2]。由于经济发展和社会进步,人类活动对环境施加的压力愈来愈大,不合理的人类活动已经威胁到区域生态平衡,生态保护与经济矛盾的矛盾日益尖锐^[3]。因此,及时有效地评估生态环境状况,明晰其生态环境变化趋势,对区域生态环境的管控、保护以及社会经济的可持续发展具有重大影响。

生态环境质量评价是一项复杂而具有挑战性的任务,对于生态环境质量的评价,不同学者提出各自的方法,包括人工神经网络评价方法^[4]、生态足迹法^[5]、综合指数评价法^[6]、遥感指数法^[7-9]以及生态指数(EI)等^[10]。但上述生态环境质量评价方法也有一定的不足,如:人工神经网络评价方法虽然可以简单地预测并求出生态环境质量与其评价指标的函数关系,但格网化评价难以实现^[11];生态足迹模型具备客观综合性和操作性^[12]且重点关注自然资源开发利用对区域可持续发展的作用^[13],然而,它忽略了各地区和各类土地之间的独特性,导致计算数据与实际状况不一致;综合指数评价法具有全面性和灵活性,能更全面地反映生态环境状况,但其权重确定的主观性和数据获取的难度较大。遥感指数法大多局限于研究某个特定主题,如干旱条件指数(SDCI)、叶面积指数(LAI)、归一化植被指数(NDVI),不能综合评价区域生态环境质量的变化;生态指数(EI)面临指数提取困难、数据分辨率低以及数据更新速度慢等问题。针对以上问题,徐涵秋^[14]在 2013 年利用遥感技术提出了遥感生态指数(RSEI),以评估区域生态环境状况,

它不仅计算速度快、易获取,而且能够客观合理地反映空间格局特征^[14-15]。

对于 RSEI 传统的计算面临着海量数据和复杂处理过程的挑战,而谷歌云计算的 Google Earth Engine(GEE)平台强大的运算功能可以快速高效地处理遥感数据^[16],并得到了广泛的运用^[17-19]。对于生态环境质量的评价日渐成熟,有学者开始关注生态环境质量的驱动因素研究。如罗逸臻等^[20]基于地理探测器模型探究了自然环境和人类活动等 10 个驱动因子对关中平原城市群生态环境质量时空分布的影响;岳奕帆等^[21]基于结构方程模型明确了影响宁夏荒漠草原带生态环境质量的主要驱动因素;徐永浩等^[22]使用结构方程模型量化了太行山区自然环境和人类活动对生态环境质量的直接影响和间接影响。地理探测器模型是一组统计学方法^[23],可用于揭示空间差异成因及驱动因素。而传统地理探测器对连续变量进行离散化处理时需要人为设定,存在主观性问题,而最优参数地理探测器通过优化数据离散化过程和空间尺度来确定参数的最佳组合,从而提高模型空间分析的准确性和有效性,因此本研究选取最优参数地理探测器^[24]。

黄河流域是社会经济发展和生态文明安全构建的重要区域,渭河流域作为其最大支流,流域内土质大部分为深厚的黄土,质地疏松,易被水侵蚀。由于历史上长期乱砍滥伐,流域内植被遭受严重破坏,水土流失严重。鉴于此,本研究基于 MODIS (moderate-resolution imaging spectroradiometer)为主要数据源,借助 Google Earth Engine(GEE)平台,分析 2000—2020 年渭河流域生态环境质量时空特征,使

用最优参数地理探测器模型分析渭河流域生态环境质量的驱动力因子,旨在为该区域生态环境保护及可持续发展提供数据支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

渭河源头位于甘肃省渭源县鸟鼠山北边,渭河流域穿越甘肃省东部、宁夏回族自治区中南部和陕西省西部,总里程约 813 km,地形呈现西部高于东部的特点,流域总面积 $1.35 \times 10^5 \text{ km}^2$,涵盖黄土丘陵地带、黄土高原地带以及关中平原地区,地处大陆季风气候

区域,是连接干旱与半湿润气候的过渡区域,年均温 $9.8 \text{ }^\circ\text{C}$,年降水量 $373 \sim 1\,138 \text{ mm}$ 。渭河流域位置特殊,此区域的生态环境状况对我国多个北方省份的社会、经济发展都会产生不同程度影响。总体上看此区域自然条件脆弱,很容易受到外部因素干扰,而生态环境问题影响着黄河的生态安全,长期限制区域经济社会的可持续发展。

1.2 数据来源

本文选取 2000—2020 年为研究时间段,数据来源与预处理如表 1 所示。所有数据地理参考统一为 WGS_1984_UTM_Zone_49N。

表 1 数据来源与预处理
Table 1 Data source and preprocessing

数据类型	数据来源	精度/m	数据预处理
MOD13A1-归一化植被指数	美国国家航空航天局(https://modis.gsfc.nasa.gov/)	500	水体掩膜,去云;重采样至 1 000 m
MOD11A2-地表温度	美国国家航空航天局(https://modis.gsfc.nasa.gov/)	1 000	水体掩膜,去云
MOD09A1-地表反射率	美国国家航空航天局(https://modis.gsfc.nasa.gov/)	500	水体掩膜,去云,重采样至 1 000 m
气象数据(气温、降水)	国家系统科学数据中心(http://www.geodata.cn/data/)	1 000	掩膜提取
DEM	地理空间数据云(https://www.gscloud.cn/)	90	掩膜提取;重采样至 1 000 m
坡度	地理空间数据云(https://www.gscloud.cn/)	90	DEM 提取坡度
土壤有机碳	国家冰川冻土沙漠科学数据中心(http://www.ncdc.ac.cn/portal/metadata)	1 000	掩膜提取
人口、GDP	资源环境科学数据平台(https://www.resdc.cn/DOI/DOl.aspx?DOlid=32)	1 000	掩膜提取

1.3 研究方法

1.3.1 遥感生态指数构建 本研究基于 GEE 平台计算 2000—2020 年遥感生态指数(RSEI)。RSEI 由 4 项指标耦合而成,分别为绿度(NDVI)、湿度(WET)、热度(LST)和干度(NDBSI),该指标是人类直观感受生态条件优劣的最重要指标,能够合理代表区域生态环境质量,因此常用于生态环境质量评价^[17-19]。4 项指标计算公式分别为:

(1) 绿度指标。

$$\text{NDVI} = (a_2 - a_1) / (a_2 + a_1) \quad (1)$$

式中: a_1 为红外波段的反射率; a_2 为近红外波段的反射率。

(2) 湿度指标。

$$\text{WET} = 0.114 7a_1 + 0.248 9a_2 + 0.240 8a_3 + 0.313 2a_4 - 0.312 2a_5 - 0.641 6a_6 - 0.508 7a_7 \quad (2)$$

式中: a_3 为蓝波段的反射率; a_4 为绿波段的反射率; a_5 为近红外 2 波段的反射率; a_6 为短波红外 1 波段的反射率; a_7 为短波红外 2 波段的反射率。

(3) 热度指标。

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

式中:DN 为陆地地表温度灰度值。

(4) 干度指标。

$$\text{SI} = \frac{(a_1 + a_6) - (a_2 + a_3)}{(a_1 + a_6) + (a_2 + a_3)} \quad (4)$$

$$\text{IBI} = \frac{2a_6 / (a_2 + a_6) - [a_2 / (a_1 + a_2) + a_4 / (a_4 + a_6)]}{2a_6 / (a_2 + a_6) + [a_2 / (a_1 + a_2) + a_4 / (a_4 + a_6)]} \quad (5)$$

$$\text{NDBSI} = \frac{\text{SI} + \text{IBI}}{2} \quad (6)$$

式中:SI 为裸土指数;IBI 为建筑指数;NDBSI 为干度指标。

(5) RSEI 构建。消除 4 个指标量纲不同及时段影像变化的影响,对指标进行归一化处理(公式 7),再基于主成分分析方法将 4 项指标进行耦合计算 RSEI 指数。其值越接近 1 代表生态环境质量越高,越接近 0 则代表生态环境质量越低。计算公式为:

$$I_{\text{normal}} = (I_i - I_{\text{min}}) / (I_{\text{max}} - I_{\text{min}}) \quad (7)$$

$$\text{RSEI} = f(\text{NDVI}, \text{WET}, \text{LST}, \text{NDBSI}) \quad (8)$$

式中: I_{normal} 为归一化后的指标值; I_i 为某像元的指标值; I_{min} 为该指标的最小值; I_{max} 为该指标的最大值。

1.3.2 马尔科夫转移矩阵 使用马尔科夫转移矩阵来定量的描述渭河流域不同生态环境质量等级的转换关系,反映不同时间段内渭河流域不同生态环境质量等级增加或者减少的面积变化,计算公式^[25]为:

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & \cdots & C_{1j} \\ C_{21} & C_{22} & \cdots & C_{2j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C_{i1} & C_{i2} & \cdots & C_{ij} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中： C_{ij} 为 i 等级与 j 等级相互转换的数值。

1.3.3 标准差椭圆及重心模型 标准差椭圆和重心计算可获取优生态环境质量重心及其时空移动轨迹,可体现其空间形态演变、主要驱动方向及要素空间分布的集散性^[25]。根据重心点分布状况得到重心点中心,以中心为圆心得到重心聚集区,选取 2000,2005,2010,2015 和 2020 年为典型年份构建重心迁移路径,探索优生态环境质量区域的时空变化规律。该区域重心的地理坐标表示为:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n M_i x_i}{\sum_{i=1}^n M_i} \quad (10)$$

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n M_i y_i}{\sum_{i=1}^n M_i} \quad (11)$$

式中： x_i, y_i 分别为第 i 个区域重心坐标的 x, y 轴；

表 2 最优参数地理探测器交互作用类型

Table 2 Geographic detector interaction types of optimal parameters

判据	交互作用
$q(X_1 \cap X_2) < \min[q(X_1), q(X_2)]$	非线性减弱
$\min[q(X_1), q(X_2)] < q(X_1 \cap X_2) < \max[q(X_1), q(X_2)]$	单因子非线性减弱
$q(X_1 \cap X_2) > \max[q(X_1), q(X_2)]$	双因子加强
$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$	独立
$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$	非线性增强

结合渭河流域的自然与社会经济状况,本文选取气候、植被、地形、土壤等自然因素,人口、经济等人为因素,其中,选取年平均气温与年平均降水量来反映气候因素,高程和坡度表征地形因素,植被覆盖度表征植被因素,土壤有机碳含量表征土壤因素;地均 GDP 表征经济因素,人口密度表征人口因素(表 3)。

表 3 渭河流域生态环境质量影响因素

Table 3 Impact factors of ecological environment quality

驱动因素	变量	均值
自然因素	气候因素 X_1 年平均气温/ $^{\circ}\text{C}$	9.13
	X_2 年平均降雨/mm	542.49
	植被因素 X_3 植被覆盖度/%	61.34
	地形因素 X_4 高程/m	1 468.60
	X_5 坡度/ $^{\circ}$	8.58
社会经济因素	土壤因素 X_6 土壤有机碳含量/%	4.45
	经济因素 X_7 地均 GDP/(万元 $\cdot \text{km}^{-2}$)	548.31
	人口因素 X_8 人口密度/(人 $\cdot \text{km}^{-2}$)	165.47

M_i 为该子区域的属性值。

1.3.4 最优参数地理探测器 地理探测器的内核是一种探测和利用空间分异性的工具^[23]。最优参数地理探测器利用 R 4.2.1 语言中地理探测器“GD”包^[24],对连续型因子进行离散化处理,计算每个连续变量在不同分级方式(相等区间、自然区间、分位数区间、几何区间和标准差分类方法)的 q 值, q 值最大的参数组合为该自变量最优离散组合。因子探测旨在研究因变量 Y 的空间差异以及各影响因子 X 的作用,针对 Y 的空间差异性解释力度,以 q 值衡量强度水平, $0 \leq q \leq 1$,且随着 q 值的增大,因子对生态环境质量的解释力增强。计算公式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sum \delta_h^2}{N \sigma^2} \quad (12)$$

式中： h 为因变量 Y 或影响因子 X 的分层($h = 1 \cdots L$),即分类或分区; N_h, N 分别为层 h 和全区的单元数; σ_h^2, σ^2 分别为层 h 和全区的 Y 值的方差。

交互作用探测用于分析多个影响因子共同作用时,是提升还是降低了对因变量 Y 的解释力。交互作用探测判断方法和类型详见表 2。

2 结果与分析

2.1 渭河流域生态环境质量时间变化特征

为了揭示渭河流域生态环境质量空间分布特征,参照已有研究^[26-27]的生态环境质量分级标准,将 RSEI 分为 $[0, 0.2)$, $[0.2, 0.4)$, $[0.4, 0.6)$, $[0.6, 0.8)$ 和 $[0.8, 1]$ 这 5 个值域区间,分别表示生态环境质量的“差”“较差”“中”“良”和“优”这 5 类等级,利用 ArcGIS 10.2 将渭河流域生态环境质量等级面积进行统计(表 4)。生态环境质量等级平均面积比例排序为:较差生态环境质量(65.56%) > 中生态环境质量(20.26%) > 良生态环境质量(12.12%) > 优生态环境质量(1.75%) > 差生态环境质量(0.31%)。2000—2020 年,渭河流域差生态环境质量与较差生态环境质量面积之和均位于 60% 以上,良生态环境质量与优生态环境质量面积之和均小于 16%,说明渭河流域生态环境质量两极化现象长期稳定存在。

表 4 渭河流域 2000—2020 年生态环境质量参数等级统计

Table 4 Indexes of each ecological environment quality grade in Weihe River basin from 2000 to 2020

年份	参数	生态环境质量等级				
		差	较差	中	良	优
2000	面积/km ²	0.00	9.44	2.43	1.49	0.14
	面积比例/%	0.00	70.07	18.06	10.81	1.06
	平均值			0.392 9		
	标准差			0.139 6		
2005	面积/km ²	0.09	9.06	2.52	1.60	0.18
	面积比例/%	0.68	67.29	18.74	11.91	1.37
	平均值			0.395 5		
	标准差			0.149 4		
2010	面积/km ²	0.00	9.01	2.63	1.74	0.09
	面积比例/%	0.00	66.90	19.51	12.93	0.65
	平均值			0.401 1		
	标准差			0.144 1		
2015	面积/km ²	0.08	8.36	3.05	1.55	0.43
	面积比例/%	0.62	62.05	22.64	11.54	3.16
	平均值			0.415 0		
	标准差			0.156 2		
2020	面积/km ²	0.03	8.28	3.01	1.81	0.34
	面积比例/%	0.23	61.50	22.35	13.41	2.52
	平均值			0.423 1		
	标准差			0.156 1		

从各等级面积变化来看(图 1),近 20 a 间除较差生态环境质量面积整体上下降之外(面积下降了 $1.16 \times 10^4 \text{ km}^2$, 面积比例下降了 8.56%),其余各生态环境质量等级面积整体上均有所增加。其中,面积整体上增加较多的为中、良和优生态环境质量,3 者面积比例共增加 43.13%,增加面积达 $1.13 \times 10^4 \text{ km}^2$,说明近 20 a 间渭河流域生态环境质量显著提高。

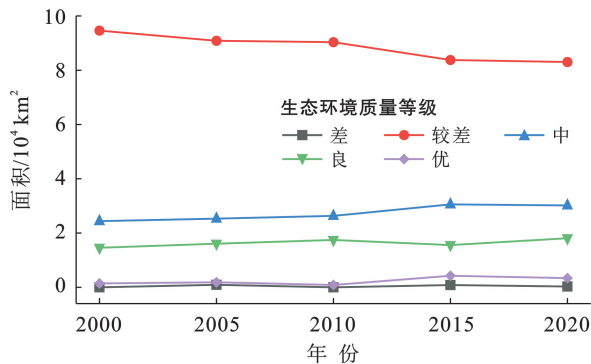


图 1 渭河流域 2000—2020 年各生态环境质量等级面积统计
Fig.1 Area of each ecological environment quality grade in Weihe River basin from 2000 to 2020

从生态环境质量平均值来看,渭河流域 2000, 2005, 2010, 2015 和 2020 年生态环境质量平均值分别为 0.392 9, 0.395 5, 0.401 1, 0.415 0 和 0.423 1

(表 4),生态环境质量总体上升 0.030 2。从生态环境质量标准差来看,近 20 a 间渭河流域生态环境质量标准差总体由 2000 年的 0.139 6 上升至 2020 年的 0.156 1,表明区域内生态环境质量差异性增大。

2.2 渭河流域生态环境质量空间变化特征

2.2.1 生态环境质量空间分布特征 从 2000—2020 年渭河流域生态环境质量等级空间分布(图 2)来看,近 20 a 渭河流域生态环境质量等级总体空间分布变化不大,各生态环境质量等级呈“南高北低,东高西低”的空间分布格局。具体来看,较差等生态环境区面积最大,分布最广,集中分布于渭河流域北部的盐池县、定边县和靖边县等区域,西部的会宁县、西吉县和原州区等区域以及东部黄龙县、洛川县及黄陵县等区域;面积其次为中生态环境质量区,位于中南部的大部分区域,包括灵台县、淳化县和彬州市等;面积排名为第 3 和第 4 的生态环境质量等级为良和优,位于南部的渭滨区、眉县和周至县等区域;面积最小的为差生态环境质量区,零散分布于盐池县、定边县和环县区域。

2.2.2 生态环境质量空间变化特征 为了更清楚地反映 2000—2020 年渭河流域年生态环境质量空间变化情况,本文借用 ArcGIS 10.2 软件的栅格计算器工具计算生境指数变化值,并将生态环境质量空间分布

变化分为 3 类(图 3):增加(变化值 >0)、不变(变化值 $=0$)和减少(变化值 <0)。由图 4 可以看出,2000—2020 年,渭河流域 73.43% 的区域处于生态环境质量增加区,增加区面积达 $1.21 \times 10^5 \text{ km}^2$,其中,2000—2010 年增加的面积为 $2.26 \times 10^5 \text{ km}^2$,主要集中于流域北部的盐池县、定边县和环县等区域;2010—2015 年增加的面积为 $1.12 \times 10^5 \text{ km}^2$,主要集中于渭源县、陇西县和通渭县等流域的中西部区域;2015—2020 年 $1.03 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。生态环境质量减少的区域面积为 $4.37 \times 10^4 \text{ km}^2$,占流域总面积的 26.56%,且在流

域北部、西部和南部均有分布,如盐池县、定边县和环县等,值得一提的是,2000—2020 年生态环境质量减少的区域面积呈减少趋势,2000—2005 年为 $8.46 \times 10^4 \text{ km}^2$,到 2015—2020 年时面积减少为 $6.13 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。近 20 a 仅有 28 km^2 的区域生态环境质量处于不变的状态,占流域面积不足 1%。综上,2000—2020 年生态环境质量增加的区域面积不断增大,减少的区域面积不断减少,说明渭河流域整体生态环境质量在往好的方向发展,进一步说明流域近 20 a 采取的退耕还林、梯田和淤地坝等工程取得了显著的成就。

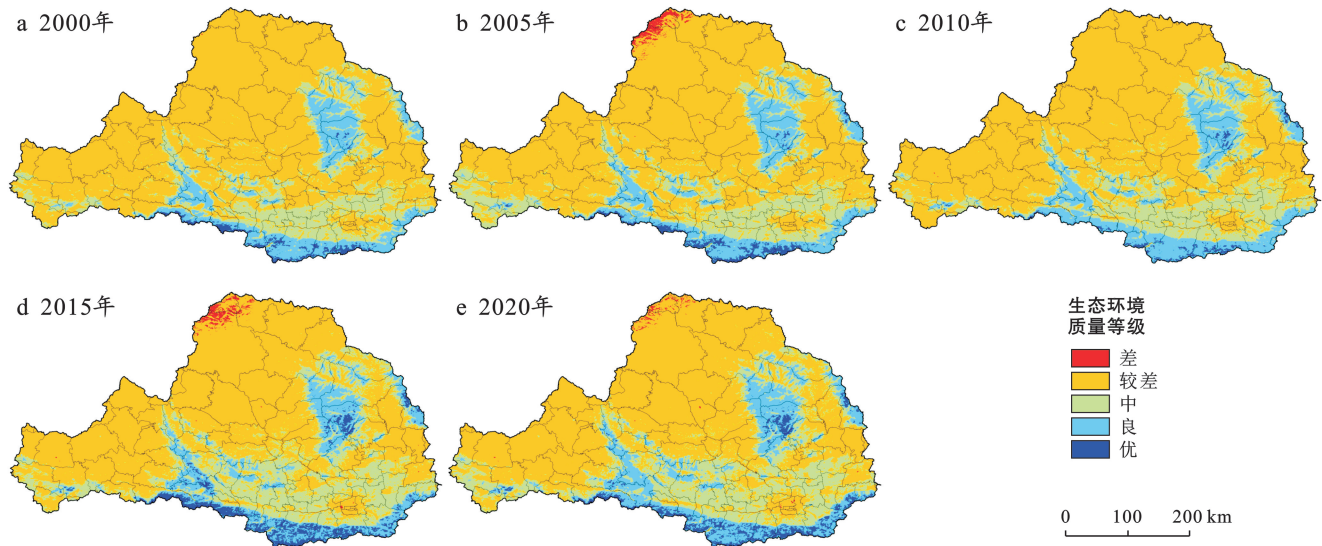


图 2 渭河流域 2000—2020 年生态环境质量等级空间分布

Fig.2 Spatial distribution of ecological environment quality grades in Weihe River basin from 2000 to 2020

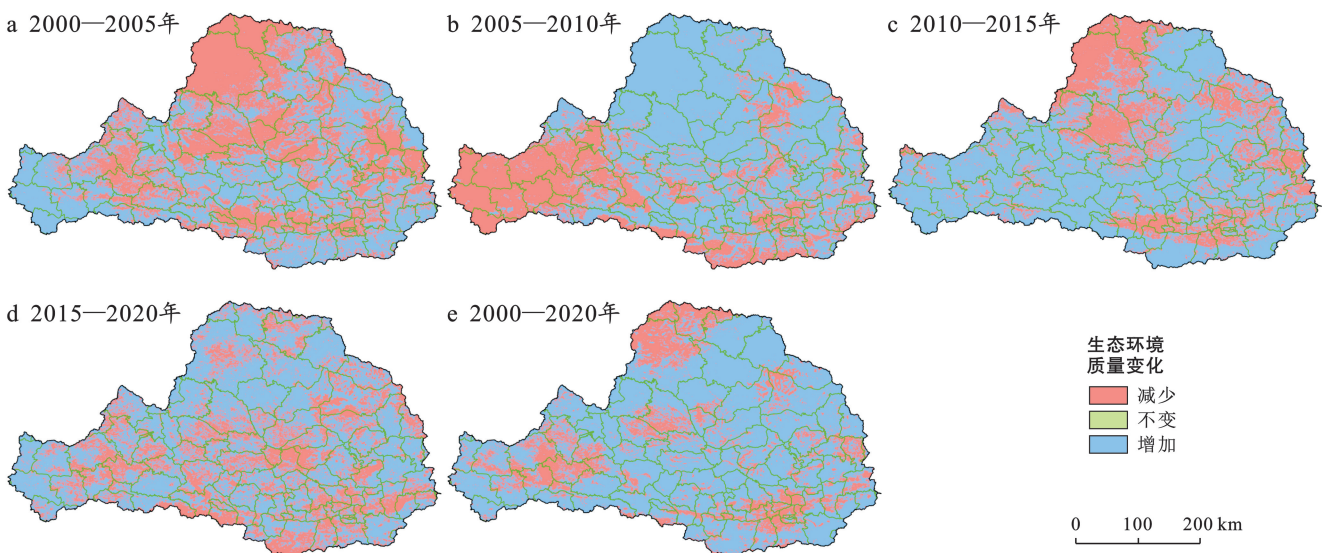


图 3 渭河流域 2000—2020 年生态环境质量空间变化类型

Fig.3 Spatial change types of ecological environment quality in Weihe River basin from 2000 to 2020

基于马尔科夫模型制作了 2000—2020 年渭河流域生态环境质量等级转移矩阵(图 4)。2000—

2020 年生态环境质量等级保持不变的区域面积为 $1.10 \times 10^5 \text{ km}^2$,所占比例为 66.24%,转换面积前

3 位是较差转为中,中转为良,中转为较差,面积分别为 $1.40 \times 10^4 \text{ km}^2$, $5\ 400 \text{ km}^2$, $3\ 000 \text{ km}^2$ 。差、较差生态环境质量转化为中、良和优的面积较多,占到总转化面积的 44.73%。总体而言,渭河流域近 20 a 来生态环境质量转化趋势主要是差、较差生态环境质量向中、良和优转化为主,直观体现渭河流域生态环境质量的改善。

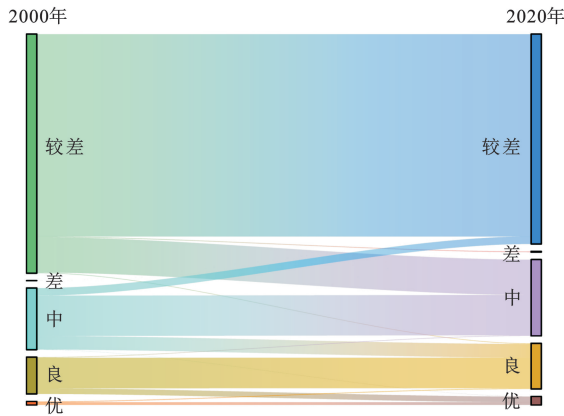


图 4 渭河流域 2000—2020 年生态环境质量等级面积转移特征

Fig.4 Area transfer characteristics of ecological environment quality grade in Weihe River basin from 2000 to 2020

2.2.3 生态环境质量重心迁移 借助重心模型与标准差椭圆描述各期生态环境质量重心时空移动轨迹(图 5)。2000—2020 年渭河流域重心位于流域中南部的麟游县、永寿县和彬州市,整体向东北方向移动,其中,2000—2005 年由麟游县移动至彬州市,2005—2010 年由彬州市移动至永寿县,2010—2015 年由永寿县移动至彬州市,2015—2020 年在彬州市内向东移动。近 20 a 间实施生态保护工程期间,研究区南部整体生态环境质量优于北部,标准差椭圆面积自 2000 年的 $1.23 \times 10^4 \text{ km}^2$ 减少至 2020 年的 $9\ 800 \text{ km}^2$,表明优生态环境质量区域逐渐集中,重心向东北方向减少且,工程实施效果显著。标准差椭圆扁率变化明显,由 2000 年的 0.32 减少为 0.14,优生态环境质量区域总体仍沿东南—西北方向倾斜分布,表明东北部的区县生态环境质量提升较快。

2.3 生态环境质量驱动因素分析

2.3.1 单因子探测 生态环境极为复杂,既受气候、植被、地形、土壤等自然因素的影响,又受人类经济活动影响,各因素相互交织,复杂互动,共同塑造。本文选取渭河流域气候、植被、地形、土壤、人口、经济、高程和坡度、植被覆盖度、土壤有机碳含量、地均 GDP、人口密度 8 项影响因子为自变量 X ,生态环境质量为因变量 Y 输入到最优参数地理探测器模型, q 值越大,说明因子影响生态环境质量的解释力越强。各因

子的 q 值从大到小分别为年降雨量(0.73)、高程(0.56)、土壤有机碳含量(0.52)、植被覆盖度(0.25)、年均气温(0.13)、坡度(0.09)、人口密度(0.08)、地均 GDP(0.05)。可以看出,年降雨量是影响渭河流域生态环境质量的主导因子。

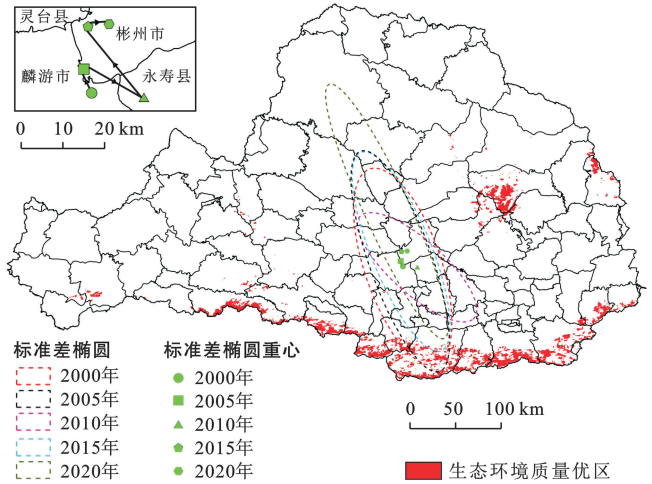


图 5 渭河流域 2000—2020 年生态环境质量等优区标准差椭圆重心迁移轨迹

Fig.5 Migration trajectory of standard deviation elliptical gravity centers at ecological environment quality excellent area in Weihe River basin from 2000 to 2020

2.3.2 交互因子探测 为了进一步揭示因子交互作用对生态环境质量的影响,使用地理探测器中的交互探测确定 8 个因子之间的交互作用,地理探测器中的交互探测可以评估 2 种因子共同作用时对研究区生态环境质量的影响是增强还是削弱。由图 6 可知,各因子交互作用呈现为双因子增强和非线性增强 2 种类型,说明渭河流域各因子交互作用比单个因子更能解释对生态环境质量的影响。

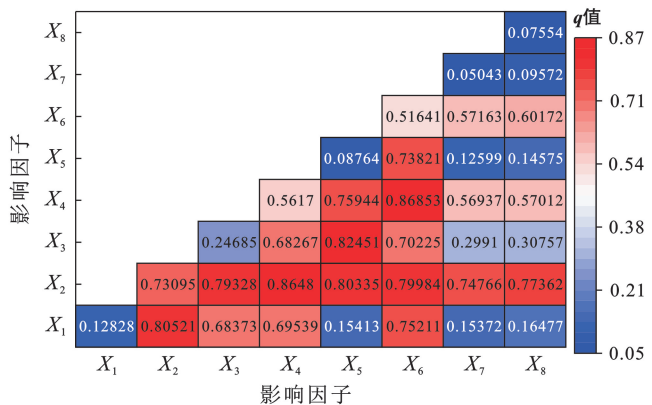


图 6 渭河流域生态环境质量不同影响因素的交互因子探测结果
Fig.6 Interactor detection results of different factors affecting ecological environment quality in Weihe River basin

其中,年均温 \cap 年降雨量、年均温 \cap 坡度、年均温 \cap 地均 GDP 等为双因子增强,年均温 \cap 植被覆盖度、

年均温 \cap 高程、年均温 \cap 有机碳含量等之间的交互作用均为非线性增强。从 q 值大小来看,高程 \cap 土壤有机碳含量的交互作用 q 值为0.87,对研究区生态环境质量的影响最大,其次,年降雨与其他因子进行交互作用时, q 值均在0.7以上;其余因子的交互作用 q 值均在0.1以上,对比单因子 q 值提升较多,尤其是与坡度因子产生交互作用时,各因子 q 值均有8倍以上的增加,这表明在进行流域生态环境质量提升时,要充分考虑坡度的分布规律优化治理方案,并注意流域降雨对生态环境质量的影响,从而优化生态环境治理架构与提升治理效能。

3 讨论

3.1 生态环境质量时空变化格局

2000—2020年渭河流域遥感生态指数呈逐年增长趋势,说明研究区生态环境质量在研究期间持续变好。渭河流域位于黄土高原南部地区,该区域生态环境脆弱,水土流失严重,植被覆盖度低,生态环境质量较差。随着近年来国家对生态环境越来越重视,政府实施的退耕还林草和天然林资源保护等生态工程使得生态环境质量逐步好转。华池县、华庭市和清水县等区域生态环境质量提升较为显著,该区域是国家退耕还林还草工程重点实施区域,植被覆盖情况变化显著;未央区、长安区和高陵区等西安及附近区域生态环境质量下降明显,土地利用类型大量由耕地向建设用地转变,导致植被覆盖度下降,西部大开发战略及西咸一体化战略的实施加速了西安市的城市化发展进程,但城市化进程的加快严重影响了区域生态环境质量,这与任堃等^[26]的研究结果相一致,因此以西安为中心的区域在注重区域经济发展的同时要坚持对生态环境的保护。侯亚鹏等^[27]基于GEE试验平台,针对甘肃段渭河流域进行研究,基于RSEI模型评估研究区的生态环境状况,并运用趋势考查及关联性探究,结果表明,2000—2021年,生态环境质量实现显著提升,RSEI平均值从2000年的0.301增至2021年的0.495,与本文计算结果基本一致。

3.2 生态环境质量影响因素分析

降雨量、高程、土壤有机碳含量是影响渭河流域生态环境质量的主要影响因素。降雨量会直接影响土地植被的生长,适当的降雨量可以为植物提供足够的水分,这样能够促进植物的生长和繁殖,同时还能够保持土壤的湿度,为其他生物提供适宜的生存环境。盐池县、环县和定边县等区域年降雨量较少,仅300 mm左右,这些区域应该善于利用和保护雨水资源,以更好地提升生态环境质量。高程较低的区域人

类活动和农业活动强度大,导致部分区域土壤质量受损、肥力减弱以及侵蚀现象加重。人类活动对该区域生态环境的影响已超过其自身修复及外部治理的限度,从而间接导致生态环境质量较低。土壤有机碳(SOC)可以促进植物的生长和发育,是土壤肥沃程度的重要指标。黄土高原土壤较为贫瘠,根据第二次土壤普查结果统计发现西北黄土区土壤有机质含量平均不足1%,黄土高原土壤碳储量低,而肥沃土壤有机质含量可达3%~8%,表明研究区在固碳方面有很大的潜力,植被恢复进程是植物和土壤之间相互影响与作用的过程,植被的存在提高了有机质的输入,增加了土壤有机碳库的积累量,自退耕还林(草)等生态修复工程实施以来,大量耕地逐步转变为草地或人工林地,黄土高原的植被类型和盖度发生了显著变化,由39%提高到71%,从而促进了流域生态环境质量的提高。程静等^[28]依据2000—2020年三期土地利用数据,综合应用InVEST模型、地形位指数、地理探测器及空间统计分析等方法,对渭河流域生境质量空间分布特征及其地形梯度效应与影响因素进行综合分析结果表明:自然因素对生境质量的影响程度大于社会经济因素,而且任意2个因子间的交互作用均高于单个因子的单独作用,结论与本文保持一致。

3.3 不足与展望

GEE平台凭借庞大数据库资源与快捷的处理过程成为目前世界上使用频率最高的云计算平台,基于此平台进行数据的预处理,计算遥感生态指数(RSEI),可以很好地解释区域生态环境质量状况。本文用归一化植被指数、湿度、干度、热度这4个生态指标通过主成分变化得到的第一主成分来表示生态环境质量,在今后的研究中,可以结合渭河流域的具体情况,加入符合地区特点的评价指标开展进一步研究。由于数据受限,并未研究具体的生态修复工程(如退耕还林工程、淤地坝和梯田工程)对于研究区生态环境质量的影响,未来可以基于双变量空间自相关模型探究生态修复工程对于生态环境质量的提升作用。此外,影响生态环境质量的因素较多,对于土地利用类型、土壤类型以及人类活动强度等均可能对生态环境质量产生较大影响,后续应进行深入探讨。

4 结论

(1)近20 a来渭河流域生态环境质量不断提升,区域内生态环境质量差异性加大;生态环境质量等级以差和较差为主,占总面积的60%以上;生态环境质量等级面积增加较多的为中、良和优。

(2)生态环境质量等级呈“南高北低,东高西低”

的空间分布格局,较差等级生态环境区面积最大,渭河流域 73.43% 的区域处于生态环境质量增加区,增加区面积达 $1.21 \times 10^5 \text{ km}^2$;研究期间生态环境质量增加的区域面积不断增大,减少的区域面积不断减少,研究区整体生态环境质量在往好的方向发展。优生态环境质量区域总体仍沿东南—西北方向倾斜分布。

(3) 降雨量、高程、土壤有机碳含量是影响渭河流域生态环境质量的主要影响因素;在进行渭河流域生态环境质量提升的过程中,应充分考虑坡度的分布规律,优化治理方案。

参考文献 (References)

- [1] 张静,杨丽萍,贡恩军,等.基于谷歌地球引擎和改进型遥感生态指数的西安市生态环境质量动态监测[J].生态学报,2023,43(5):2114-2127.
Zhang Jing, Yang Liping, Gong Enjun, et al. Dynamic monitoring of eco-environmental quality in Xi'an based on GEE and adjusted RSEI [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023,43(5):2114-2127.
- [2] 张京新,谷雨鑫,沈佳琦,等.黄河流域生态环境质量时空变化及驱动因素分析[J].环境科学,2024,45(12):1-23.
Zhang Jingxin, Gu Yuxin, Shen Jiaqi, et al. Analysis of the spatial and temporal changes and driving factors of the ecological environment quality in the Yellow River basin [J]. *Environmental Science*, 2024,45(12):1-23.
- [3] 方创琳,王振波,刘海猛.美丽中国建设的理论基础与评估方案探索[J].地理学报,2019,74(4):619-632.
Fang Chuanglin, Wang Zhenbo, Liu Haimeng. Exploration on the theoretical basis and evaluation plan of beautiful China construction [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019,74(4):619-632.
- [4] Adams M D, Kanaroglou P S. Mapping real-time air pollution health risk for environmental management: Combining mobile and stationary air pollution monitoring with neural network models [J]. *Journal of Environmental Management*, 2016,168:133-141.
- [5] Yang Weichao, Xu Kui, Lian Jijian, et al. Multiple flood vulnerability assessment approach based on fuzzy comprehensive evaluation method and coordinated development degree model [J]. *Journal of Environmental Management*, 2018,213:440-450.
- [6] Guo Qian, Wang Jiayang, Yin Hongling, et al. A comprehensive evaluation model of regional atmospheric environment carrying capacity: Model development and a case study in China [J]. *Ecological Indicators*, 2018,91:259-267.
- [7] 胡鹏飞,李净,王丹,等.基于 MODIS 和 TRMM 数据的黄土高原农业干旱监测[J].干旱区地理,2019,42(1):172-179.
Hu Pengfei, Li Jing, Wang Dan, et al. Monitoring agricultural drought in the Loess Plateau using MODIS and TRMM data [J]. *Arid Land Geography*, 2019,42(1):172-179.
- [8] 沈贝贝,张景,李明,等.内蒙古草原叶面积指数时空格局与水热影响[J].遥感技术与应用,2022,37(1):253-261.
Shen Beibei, Zhang Jing, Li Ming, et al. The spatiotemporal pattern of leaf area index and the influence of water and heat in Inner Mongolia grassland [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2022,37(1):253-261.
- [9] 缪利,陆晴,刘根林,等.1999—2019 年青藏高原不同植被类型 NDVI 时空演变特征及其对气候因子的响应[J].水土保持研究,2023,30(1):97-105.
Miao Li, Lu Qing, Liu Genlin, et al. Spatiotemporal evolution characteristics of NDVI of different vegetation types and its response to climate factors on the Qinghai-Tibet Plateau from 1999 to 2019 [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023,30(1):97-105.
- [10] 满卫东,刘明月,李晓燕,等.1990—2015 年三江平原生态功能区生态功能状况评估[J].干旱区资源与环境,2018,32(2):136-141.
Man Weidong, Liu Mingyue, Li Xiaoyan, et al. Assessment on the dynamics of eco-environmental statuses from 1990 to 2015 in the ecological function zone of Sanjiang Plain [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2018,32(2):136-141.
- [11] 康利刚,辛存林,杨羽帆,等.甘肃省生态环境质量遥感评价及其驱动因子定量识别[EJ/OL].环境科学[2024-10-30].<https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202406186>.
Kang Ligang, Xin Cunlin, Yang Yufan, et al. Remote sensing evaluation of ecological environment quality in Gansu Province and its quantitative identification of driver factors [EJ/OL]. *Environmental Sciences* [2024-10-30]. <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202406186>.
- [12] 张文鸽,管新建,杨文丽.宁夏可持续发展定量评价的生态足迹分析法[J].人民黄河,2007,29(2):15-16.
Zhang Wenge, Guan Xinjian, Yang Wenli. Ecological footprinting analysis method for quantitative evaluation of sustainable development in Ningxia [J]. *Yellow River*, 2007,29(2):15-16.
- [13] 刘家旗,茹少峰.基于生态足迹理论的黄河流域可持续发展研究[J].改革,2020(9):139-148.
Liu Jiaqi, Ru Shaofeng. Sustainability evaluation based on ecological footprints theory in Yellow River Basin [J]. *Reform*, 2020(9):139-148.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Yuan Baodong, Fu Lina, Zou Yeai, et al. Spatiotemporal change detection of ecological quality and the associated affecting factors in Dongting Lake Basin, based on RSEI [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 302: 126995.
- [18] Boori M S, Choudhary K, Paringer R, et al. Spatiotemporal ecological vulnerability analysis with statistical correlation based on satellite remote sensing in Samara, Russia [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 285: 112138.
- [19] 吴小波, 范晓雨, 刘晓敬, 等. 基于 Google Earth Engine 云平台的成渝城市群生态环境质量时空变化[J]. *生态学杂志*, 2023, 42(3): 759-768.
- Wu Xiaobo, Fan Xiaoyu, Liu Xiaojing, et al. Temporal and spatial variations of ecological quality of Chengdu-Chongqing Urban Agglomeration based on Google Earth Engine cloud platform [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2023, 42(3): 759-768.
- [20] 罗逸臻, 黄远程, 王涛. 关中平原城市群生态环境质量时空变化特征及其驱动力[J]. *地球科学与环境学报*, 2023, 45(6): 1316-1329.
- Luo Yizhen, Huang Yuancheng, Wang Tao. Spatial-temporal variation characteristics of ecological environment quality and their driving forces in Guanzhong Plain urban agglomeration, China [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2023, 45(6): 1316-1329.
- [21] 岳奕帆, 赵文智, 刘任涛, 等. 宁夏荒漠草原带生态环境质量时空变化及其驱动机制[J]. *生态学报*, 2024, 44(20): 9067-9080.
- Yue Yifan, Zhao Wenzhi, Liu Rentao, et al. Spatiotemporal changes and driving mechanisms of eco-environmental quality in the desert steppe zone of Ningxia [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(20): 9067-9080.
- [22] 徐永浩, 张廷斌, 易桂花, 等. 太行山区生态环境质量时空特征及影响因素分析[EJ/OL]. *环境科学* [2024-10-30]. <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202403076>.
- Xu Yonghao, Zhang Tingbin, Yi Guihua, et al. Spatial and temporal characteristics and influencing factors of ecological environment quality in Taihang Mountain [EJ/OL]. *Environmental Science* [2024-10-30]. <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202403076>.
- [23] 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.
- Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116-134.
- [24] Song Y Z, Wang J F, Ge Y, et al. An optimal parameters-based geographical detector model enhances geographic characteristics of explanatory variables for spatial heterogeneity analysis: Cases with different types of spatial data. *GIScience & Remote Sensing*, 57(5): 593-610.
- [25] 彭大力, 张斌, 吴林蓬, 等. 龙川江流域近 20 年土壤侵蚀时空变化及驱动因素分析[J]. *水土保持学报*, 2024, 38(4): 29-37.
- Peng Dali, Zhang Bin, Wu Linpeng, et al. Analysis of spatial and temporal changes and driving factors of soil erosion in Longchuan River basin in recent 20 years [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(4): 29-37.
- [26] 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(9): 2485-2492.
- Ren Kun, Luo Manyu, Zhao Yonghua, et al. Evaluation of ecological environment and urban development quality in Xi'an City, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(9): 2485-2492.
- [27] 侯亚鹏, 龙斌, 刘高, 等. 渭河流域(甘肃段)生态环境质量时空演变[J]. *环境生态学*, 2024, 6(5): 19-26.
- Hou Yapeng, Long Bin, Liu Gao, et al. Study on the ecological environmental spatio-temporal evolution in the Gansu section of the Weihe River basin [J]. *Environmental Ecology*, 2024, 6(5): 19-26.
- [28] 程静, 王鹏, 陈红翔, 等. 渭河流域生境质量时空演变及其地形梯度效应与影响因素[J]. *干旱区地理*, 2023, 46(3): 481-491.
- Cheng Jing, Wang Peng, Chen Hongxiang, et al. Spatiotemporal evolution of habitat quality in the Weihe River basin and its topographic gradient effects and influencing factors [J]. *Arid Land Geography*, 2023, 46(3): 481-491.