

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.04.025.

李慧, 张少伟, 赵阳. 黄河流域黄土高原生态质量时空演变格局及其驱动因素[J]. 水土保持研究, 2024, 31(4): 233-240.

Li Hui, Zhang Shaowei, Zhao Yang. Spatiotemporal Evolution Pattern of Ecological Quality of the Loess Plateau and Its Driving Factors [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(4): 233-240.

黄河流域黄土高原生态质量时空演变格局及其驱动因素

李 慧¹, 张少伟², 赵 阳³

(1. 中国林业科学研究院 林业科技信息研究所, 北京 100091;

2. 河南开放大学 乡村振兴学院, 郑州 450046; 3. 中国林业科学研究院 经济林研究所, 郑州 450003)

摘 要: [目的] 量化分析自然与社会经济因素对黄河流域黄土高原生态质量格局演变的影响, 为进一步提升黄河流域生态质量, 促进区域生态可持续发展提供理论支撑。[方法] 基于 DPSIR 模型框架, 从社会经济状况、自然环境与生态治理方面选取 14 项指标, 构建生态质量综合评价指标体系, 采用层次分析法确定指标权重, 采用加权平均法计算生态质量综合评价指数; 构建岭回归模型, 分析了其变化的驱动因子。[结果] 黄河流域黄土高原生态质量具有明显时空异质性; 生态质量较高区域集中分布在中游地区, 较低区域集中分布在上游地区, 整体呈“东南高、西北低”的空间格局; 生态质量评估为中及以上水平区域面积占比由 2000 年的 40.56% 上升至 2020 年的 70.36%; 20 年间生态质量提升的区域面积占研究区总面积的 94.44%, 提升的区县数量占总区县数的 91.57%; 岭回归模型可以解释生态质量 99.4% 的变异, 植被覆盖度和年降水量对生态质量变化的相对贡献率较高。[结论] 黄河流域黄土高原生态质量呈提升趋势, 其时空分布格局主要受植被覆盖度和年降水量的驱动。建议在科学、合理增加植被覆盖度的基础上, 进一步优化生态系统空间格局。

关键词: 生态质量; 时空演变; 驱动力; 岭回归; 黄河流域黄土高原

中图分类号: X821

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)04-0233-08

Spatiotemporal Evolution Pattern of Ecological Quality of the Loess Plateau and Its Driving Factors

Li Hui¹, Zhang Shaowei², Zhao Yang³

(1. Research Institute of Forestry Policy and Information, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;

2. College of Rural Revitalization, Henan Open University, Zhengzhou 450046, China;

3. Research Institute of Non-Timber Forestry, Chinese Academy of Forestry, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: [Objective] This research aims to explore the temporal and spatial status of the ecological quality evolution and the main driving factors of its evolution in the Loess Plateau, and to provide the theoretical basis for the improvement of regional ecological quality and sustainable development in the Yellow River Basin. [Methods] Based on the ‘Driving Force-Pressure-State-Impact-Response’ (DPSIR) model, 14 indexes reflecting the social and economic situations, natural environment and ecological governance were selected to build the comprehensive evaluation index system. The weight of each index was defined by the analytical hierarchy process (AHP), and the comprehensive evaluation indexes were calculated by the weighted average. The Ridge Regression Model was used to quantitatively assess the driving factors of the ecological quality evolution. [Results] The ecological quality of the Loess Plateau in the Yellow River Basin exhibited a distinctive spatiotemporal heterogeneity, with the high-quality areas concentrating in the midstream and low-

收稿日期: 2023-11-02

修回日期: 2023-11-24

资助项目: 中国林业科学研究院基本科研业务费专项资金资助“黄河滩区农田转经济林地的生态补偿标准研究: 以河南段为例” (CAFYBB2020MC005)

第一作者: 李慧 (1991—), 女, 河南郑州人, 硕士, 助理研究员, 主要从事生态系统服务研究。E-mail: lihui09610@163.com

通信作者: 赵阳 (1987—), 男, 河南周口人, 博士, 副研究员, 主要从事区域生态学研究。E-mail: zhaoyang301@caf.ac.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

quality areas in the upstream, showing the unique spatial pattern of ‘high-quality in the southeast and low-quality in the northwest’. The medium-quality areas and above increased from 40.56% in 2000 to 70.36% in 2020. The ecologically improved areas in the past 2 decades took up 94.44% of the total research area, and the ecologically improved counties accounted for 91.57% of the total counties. The Ridge Regression Model explained 99.4% of the ecological evolution, demonstrating the relatively higher contributions from the vegetative cover and the annual precipitation to such evolution. [Conclusion] The ecological quality in the Loess Plateau was improved, and the spatiotemporal evolution of ecological quality was mainly driven by vegetative cover and annual precipitation. It is recommended that the spatial pattern of ecosystems is further optimized on the basis of a scientific and rational increase in vegetation cover.

Keywords: ecological quality; spatiotemporal evolution; driving forces; ridge regression; Loess Plateau of the Yellow River Basin

黄河流域重点生态区黄土高原不仅是中国“两屏三带”生态安全战略格局的重要组成部分,还是重要的能源化工基地和农业生产基地^[1],在中国区域经济发展中占据重要战略地位。受自然条件限制、频繁人类活动和全球气候变化等的多重影响,该区域已成为中国陆地生态系统最为脆弱敏感的区域之一^[2]。改善黄土高原生态质量、加快推进黄土高原生态综合治理,对于维系黄河安澜、促进黄河流域生态保护和高质量发展具有重要意义。

自 20 世纪 50 年代起,中国相继实施了“黄土高原综合治理”、退耕还林(草)和退牧还草等一系列重点生态建设项目工程,使得该区域生态质量得到明显改善^[3]。定量评价生态质量优劣及时空演变特征,既可有效评估生态治理的成果,还可为合理利用和配置生态要素,进一步促进区域生态质量提升和可持续发展提供重要参考。前人对此已开展了一些相关研究,主要集中于植被恢复生态效应^[4]、土地利用^[5]和水土流失^[6]单个生态要素的时空变化方面。也有部分学者构建了包括气候、植被和土壤等要素的综合评价体系^[7-9]对生态质量进行评价,但或缺乏对社会经济条件的考量,或仅针对流域局部生态区进行分析^[10-11],综合评价流域整体生态质量和变化趋势的研究仍然较少,对生态质量变化驱动因子的量化分析研究更是鲜见。为此,本研究以县级行政区为基本评价单元,基于驱动力-压力-状态-影响-响应(DPSIR)模型框架,筛选人口密度、植被覆盖度和工程实施面积占比等 14 个表征社会经济状况、自然环境与生态治理的指标建立生态质量综合评价体系,对 2000—2020 年黄河流域黄土高原生态质量演变特征进行分析,并借助岭回归模型,识别影响生态质量的驱动因素,以期为黄河流域关键生态区黄土高原的生态保护和高质量发展提供决策参考。

1 数据来源与研究方法

1.1 研究区概况

根据黄河流域县级行政区划数据和黄土高原地区综合治理规划大纲(2010—2030 年)确定的黄河流域黄土高原范围,研究区位于 100°51′54″—114°7′55″E, 33°34′8″—41°49′55″N,总面积 61.56 万 km²,占黄土高原地区总面积的 94.90%,占黄河流域地区总面积的 46.79%,包括青海、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西和河南 7 个省(自治区)45 个市(州)315 个县(区、旗)。该区域整体呈西北高、东南低,海拔 87~5 206 m。

该区域位于中国半湿润区向半干旱区过渡地带,由东南向西北跨越温带半湿润区、暖温带半干旱区和中温带半干旱区。水资源匮乏,且降水分布不平衡。年降水量 150~750 mm。大陆性季风气候,冬春季寒冷干燥多风沙,夏秋季炎热多暴雨。全年平均气温 3.6~14.3℃,≥10℃的积温 2 300~4 500℃,无霜期 120~250 d,日照时长 1 900~3 200 h。

1.2 基于 DPSIR 模型的生态质量评价指标体系构建

1.2.1 DPSIR 模型 DPSIR 模型是在驱动力-状态-响应模型(DSR)^[12]和压力-状态-响应模型(PSR)^[13]组合和拓展而得。该模型可有效捕捉社会经济、资源、环境和人类活动信息,并反映系统的因果关系,从而实现对区域生态质量的综合评价。

1.2.2 评价指标体系构建 综合考虑科学性、可靠性、整体性和综合性等原则,以及研究区生态特征,最终选取人口密度、人均 GDP、城镇化率、年降水量、年均气温、总用水量、单位面积存栏量、标准化降水蒸散指数、植被覆盖度、净初级生产力、自然保护地比率、水土保持功能、水源涵养功能和工程实施面积占比 14 个指标,分别编号 x_1, x_2, \dots, x_{14} ,并针对指标特征确定为正向指标(+)和逆向指标(-),构建黄河流域黄土高原生态质量评价指标体系(表 1)。

采用层次分析法确定权重。邀请 70 名相关研究领域的测试者,包括科研人员(25 名)、研究生(35 名)、政府工作人员(10 名),通过两两比较各评价指标对每一层相对于上一层的相对重要性以及各层因素之间的相对重要性,建立判断矩阵。采用迈实 AHP 层次分析软件(<https://www.meshcade.com/docs/AHPDownload/>)对回收的判断矩阵进行一致性检验^[14]与优化^[15]。

表 1 黄河流域黄土高原生态质量评价指标体系
Table 1 Ecological quality assessment index system of loess plateau in Yellow River Basin

目标层	准则层	指标层	指标性质	指标说明	权重
黄河流域 黄土高原 生态质量	驱动力	人口密度(x_1)	—	反映生态系统的人口压力	0.0434
		人均 GDP(x_2)	—	反映人民生活水平	0.0578
		城镇化率(x_3)	—	反映社会经济发展水平	0.0374
		年降水量(x_4)	+	由全年 12 个月的月降水量累加而得	0.1051
		年均气温(x_5)	+	全年各日的日平均气温的算术平均值	0.0873
	压力	总用水量(x_6)	—	反映人类对生态资源的压力	0.0540
		单位面积存栏量(x_7)	—	单位面积的家畜数量	0.0408
		标准化降水蒸散指数(x_8)	+	反映一个地区干湿状况偏离常年的程度	0.0289
	状态	植被覆盖度(x_9)	+	植被在地面的垂直投影面积占统计区总面积的百分比	0.1214
		净初级生产力(x_{10})	+	反映植被群落在自然环境下的生产力	0.0905
	影响	自然保护地比率(x_{11})	+	自然保护地占国土面积的比例	0.0609
		水土保持功能(x_{12})	+	削减雨水侵蚀能量,增加土壤抗蚀性,减少土壤流失的功能	0.0933
		水源涵养功能(x_{13})	+	通过对降水的截留、渗透和蓄积,并通过蒸散实现对水流、水循环的调控	0.0758
	响应	工程实施面积占比(x_{14})	+	反映对改善区域生态环境做出的努力	0.1034

1.3 数据来源

数据来源主要分为两类,一类是基于各类年鉴和统计资料直接获取的县级行政区数据,具体为:人口密度(x_1)、人均 GDP(x_2)和城镇化率(x_3),来源于 2001 年、2006 年、2011 年、2016 年和 2021《中国统计年鉴》,研究区相关省、市级统计年鉴;总用水量(x_6),来源于相关省、市级水资源公报;单位面积存栏量(x_7)为研究区内存栏量与区域面积的比值,存栏量数据来源于相关省、市级统计年鉴及畜牧业年鉴;自然保护地比例(x_{11})为自然保护区面积和行政区面积的比值,自然保护区数据来源于生态环境部于 2017 年公布《全国自然保护区名录》;工程实施面积占比(x_{14})为研究区域内退耕还林和三北防护林工程实施的面积占区域面积的比值。另一类是基于栅格数据和矢量边界获取的县级行政区的均值数据,具体为:年降水量(x_4)和年均气温(x_5),来源于国家气象数据网(<http://data.cma.cn/>)的研究区相关气象站点实测数据,经逐日平均至月、逐月平均至年后,采用空间插值法^[16]得到年均气温和年降水量的栅格数据;标准化降水蒸散指数(x_8)根据年均气温和降水量数据计算得出;植被覆盖度(x_9)采用 MODIS 的 NDVI 算法公式〔公式(1)〕进行计算^[11],MODIS NDVI 来源于 MOD13A1 500 m 分辨率植被指数 16 d 合成产品(<https://www.earthdata.nasa.gov>);植被净初级生产力(x_{10})来源于 MODIS MOD17A3 数据产品(<https://www.earthdata.nasa.gov>);参考公式

(2)计算水土保持功能(x_{12}),地形数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>),土壤数据来源于世界土壤数据库(Harmonized World Soil Database version 1.1)(HWSD);参考公式(3)计算水源涵养服务能力指数,表征水源涵养功能(x_{13})。

$$F_{vc} = \frac{NDVI - NDVI_{soil}}{NDVI_{veg} - NDVI_{soil}} \tag{1}$$

式中: F_{vc} 为植被覆盖度; $NDVI_{soil}$ 为完全是裸土或无植被覆盖区域的 NDVI 值; $NDVI_{veg}$ 为完全被植被所覆盖的像元的 NDVI 值,即纯植被像元的 NDVI 值。

$$S_{pro} = NPP \times (1 - K) \times (1 - F_{slo}) \tag{2}$$

式中: S_{pro} 为水土保持功能; NPP 为植被净初级生产力; F_{slo} 为坡度因子; K 为土壤可蚀性因子。

$$WR = NPP \times F_{sic} \times F_{pre} (1 - F_{slo}) \tag{3}$$

式中:WR 为水源涵养功能; F_{sic} 根据土壤质地类型由黏土到沙土分别在 0~1 均等赋值得到; F_{pre} 由降水量数据插值并归一化到 0~1。

1.4 指标数据的标准化

采用极差标准法^[17]对数据标准化处理,消除数据类型和量纲的差异。公式如下:

$$X_{ij} = \frac{[x_{ij} - \min(x_{1j}, \dots, x_{nj})]}{[\max(x_{1j}, \dots, x_{nj}) - \min(x_{1j}, \dots, x_{nj})]} \tag{4}$$

$$Y_{ij} = \frac{[\max(y_{1j}, \dots, y_{nj}) - x_{ij}]}{[\max(y_{1j}, \dots, y_{nj}) - \min(y_{1j}, \dots, y_{nj})]} \tag{5}$$

式中: X_{ij} 和 Y_{ij} 分别为正向指标和负向指标第 i 年第 j 个指标的标准化值; x_{ij} 和 y_{ij} 分别为正向指标和负向指标第 i 年的第 j 项指标值; $\max(x_{1j}, \dots, x_{nj})$, $\max(y_{1j}, \dots, y_{nj})$, $\min(x_{1j}, \dots, x_{nj})$, $\min(y_{1j}, \dots, y_{nj})$ 为各个指标的最大值和最小值。

1.5 生态质量综合评价指数

采用加权平均法,以县级行政区为基本评价单元,计算黄河流域黄土高原生态质量综合评价指数,计算公式如下:

$$EQI = \sum_{i=1}^n W_i \times P_i \quad (6)$$

式中: EQI 为生态质量综合评价指数; W_i 为第 i 个指标的权重值; P_i 为第 i 个指标标准化之后的值。

为了分析局部地区生态质量的差异,本研究参考李婷婷等^[18]的方法对生态质量指数进行分级。分级标准见表 2。

表 2 生态质量分级标准

Table 2 Classification criterion of ecological quality

等级	生态质量指数	分级标准
1	<0.2	差
2	$0.2 \sim 0.4$	较差
3	$0.4 \sim 0.6$	中
4	$0.6 \sim 0.8$	良
5	>0.8	优

1.6 生态质量变化驱动因素分析

岭回归分析可以消除在一般回归分析中由自变量之间多重共线性导致的回归精度和稳定性降低问题,提高模型的可靠性^[19]。本研究选择评价体系中的 14 项指标作为影响生态质量(因变量)的直接或间接影响因素(自变量),利用标准化之后的数据,参考 Xie 等^[20]的方法建立岭回归分析模型,参考林楠等^[21]的方法计算各因素对生态质量的相对贡献率,分析生态质量时空变化的驱动因素。

2 结果与分析

2.1 黄河流域黄土高原生态质量空间分布格局

从空间分布上看,该区域生态质量评估结果为良的县区多位于中游地区,上游的内蒙古自治区境内县区和宁夏回族自治区境内县区的生态质量较低。生态质量评估为中的区县也主要集中在中游地区,上游地区仅有少量分布,如青海省的同仁县、湟源县,甘肃的临夏县和和政县等县区。从面积统计上看,2000—2020 年生态质量评估结果为较差的区域面积占比整体呈下降趋势(由 2000 年的 59.43% 降至 2020 年的 29.63%),而生态质量评估结果为中和良的区域面积占比整体呈上升趋势(评估结果为中区域面积占比由 2000 年的

37.54% 升至 2020 年的 66.01%,评估结果为良的区域面积占比由 2000 年的 3.02% 升至 4.35%) (图 1)。

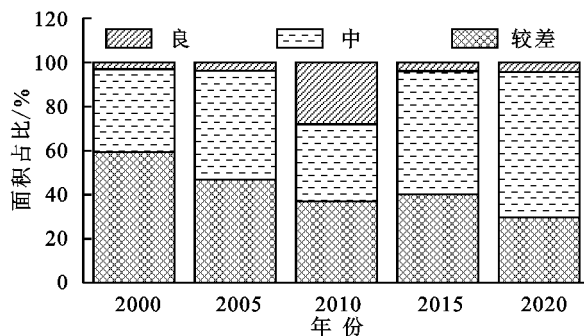


图 1 研究区域生态质量空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of ecological quality assessment

2.2 黄河流域黄土高原生态质量时间演变格局

将 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年 5 期生态质量相邻两期以及 2000—2020 年生态质量作减法运算,按表 3 进行分级。从图 2 可以看出,不同区域生态质量变化表现出明显的时间异质性。

表 3 生态环境质量演变评价分级标准

Table 3 Classification criterion of ecological quality evolution assessment

等级	生态质量指数	分级标准
1	<-0.05	明显下降
2	$-0.05 \sim -0.001$	轻微下降
3	$-0.001 \sim 0.001$	基本不变
4	$0.001 \sim 0.05$	轻微提升
5	$0.05 \sim 0.1$	明显提升
6	$0.1 \sim 0.15$	显著提升
7	>0.15	极大提升

2000—2020 年,生态质量明显下降的区县面积占比 0.24%,轻微下降的面积占比 4.29%,基本不变的面积占比 0.02%,轻微提升的面积占比 42.59%,明显提升的面积占比 37.13%,显著提升的面积占比 15.72%。其中,洛阳市的吉利区和西安的长安区生态质量下降明显;洛阳市的嵩县、洛龙区和郑州市的荥阳市等 23 个县区的生态质量轻微下降,占区县总数的 7.3%。其余县区的生态质量均有不同程度的提升,具体为:银川市的贺兰县、西安市的雁塔区和碑林区等 121 个县区的生态质量轻微提升,占区县总数的 38.41%;晋中市的平遥县、天水市的秦州区和三门峡市的湖滨区等 127 个县区的生态质量明显提升,占区县总数的 40.32%;庆阳市的华池县、平凉市的庄浪县和崆峒县等 41 个县区的生态质量显著提升,占区县总数的 13.02%。整体看来,2000—2020 年,生态质量提升的区县占比 91.75%,其中提升程度明显及以上水平区县占比 53.33%,轻微或显著下降的区县仅占比不足 8%。这些均表明,该区域生态质量整体呈逐渐向好趋势。

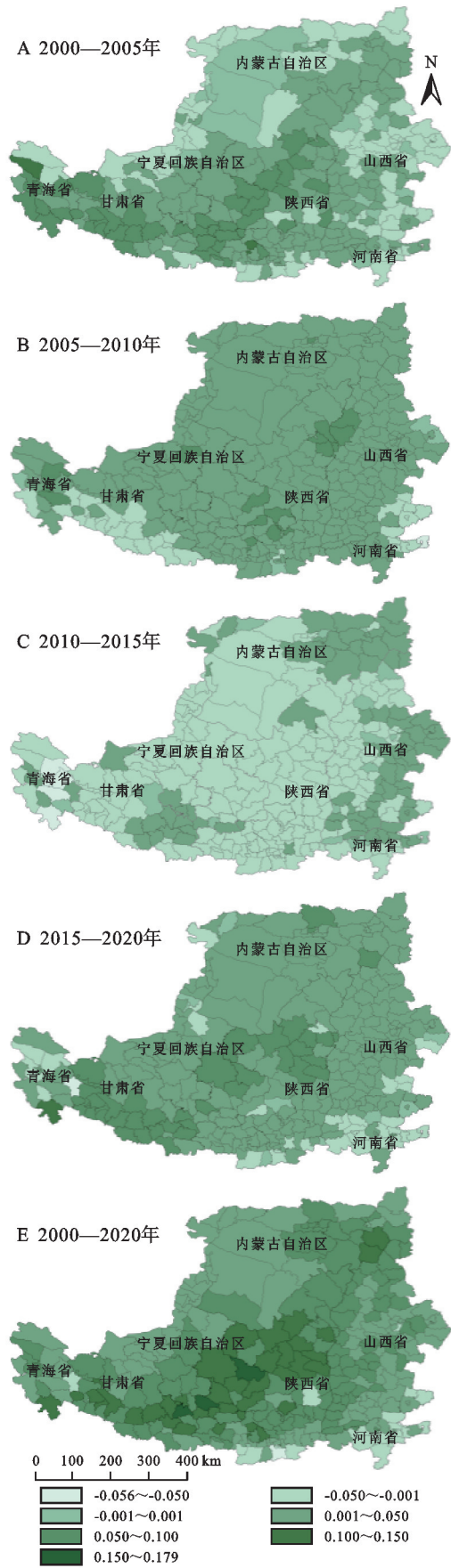


图 2 2000—2020 年生态质量变化趋势空间分布
Fig. 2 Spatial distribution map of ecological quality variation trend from 2000 to 2020

2.3 基于岭回归模型计算相对贡献率

选取评价体系中的 14 项指标作为岭回归模型的输入端 X_i ,以生态质量作为输出端 Y_i ,构建训练样本集 (X_i,Y_i) 。根据岭迹图(图 3),选取 $K=0.166$ 作为岭参数,建立黄河流域黄土高原生态质量回归模型。

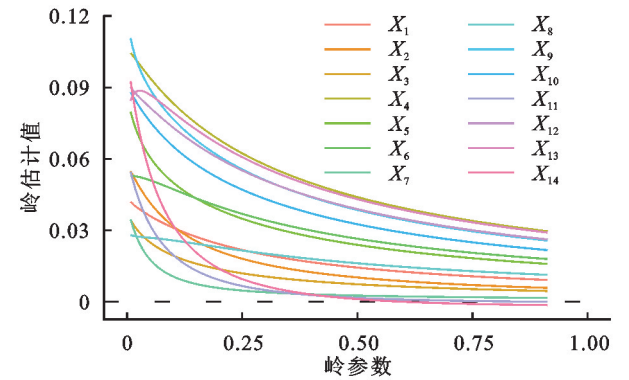


图 3 岭回归路径
Fig. 3 Ridge regression trace

对岭回归模型进行 F 检验 ($F=943.666, p<0.000$),模型决定系数 $R^2=0.994$,说明人口密度等 14 个因素均对生态质量产生影响,模型能够解释生态质量 99.4% 的变异,并且所有因素均通过显著性检验(表 4)。对各驱动因子对生态质量的相对贡献率进行统计分析,按相对贡献率大小排序:植被覆盖度>年降水量>工程实施面积>水土保持功能>植被净初级生产力>水源涵养功能>年均气温>人均 GDP>自然保护地比例>总用水量>人口密度>单位面积存栏量>城镇化率>标准化蒸散指数(图 4)。其中植被覆盖度、年降水量相对贡献率较高,占比均超过 10%;其次为工程实施面积占比、水土保持功能、植被净初级生产力、水源涵养功能和平均气温,占比 8.39%~9.73%;人口密度、单位面积存栏量、城镇化率和标准化蒸散指数贡献率较低。

3 讨论

本研究发现,在流域尺度上,黄河流域黄土高原生态质量评估为中及以上水平的县区集中分布在中游,上游县区的生态质量普遍为较差及以下水平,与前人的研究结果基本一致^[8,22]。从面积上看,2000—2020 年,生态质量评估为中等及以上水平的县区面积占比整体呈上升的趋势,说明近年来国家推进的各项生态治理措施取得了积极成效,生态环境质量明显改善^[3,10]。但同时也发现局部区域生态质量存在先提升后降低的现象,原因可能是丘陵地区多地理位置偏远、交通不便,监管部门难以对生态工程实施的质量进行有效监督,导致取得的成效不可持续,应特别关注。

表 4 黄河流域上游岭回归分析结果

Table 4 Ridge regression analysis results of upper Yellow River basin

项目	非标准化系数		标准化系数		<i>t</i>	<i>p</i>	<i>R</i> ²	调整 <i>R</i> ²	<i>F</i>
	<i>B</i>	标准误差	Beta						
常数	−0.202	0.059	—	−3.443	0.001***				
<i>X</i> ₁	0.090	0.016	0.042	5.489	0.000***				
<i>X</i> ₂	0.259	0.056	0.055	4.589	0.000***				
<i>X</i> ₃	0.031	0.002	0.034	14.572	0.000***				
<i>X</i> ₄	0.073	0.003	0.104	21.551	0.000***				
<i>X</i> ₅	0.054	0.005	0.080	11.870	0.000***				
<i>X</i> ₆	0.042	0.003	0.053	15.079	0.000***				
<i>X</i> ₇	0.040	0.006	0.034	6.531	0.000***	0.994	0.993	943.666(0.000***)	
<i>X</i> ₈	0.029	0.007	0.028	3.923	0.000***				
<i>X</i> ₉	0.093	0.003	0.111	28.290	0.000***				
<i>X</i> ₁₀	0.111	0.006	0.088	18.523	0.000***				
<i>X</i> ₁₁	0.039	0.004	0.054	9.441	0.000***				
<i>X</i> ₁₂	0.078	0.006	0.090	14.160	0.000***				
<i>X</i> ₁₃	0.130	0.005	0.084	26.165	0.000***				
<i>X</i> ₁₄	0.089	0.004	0.093	20.493	0.000***				

注：*** 代表 1% 的显著性水平，*K* = 0.166，“—”代表未发现。

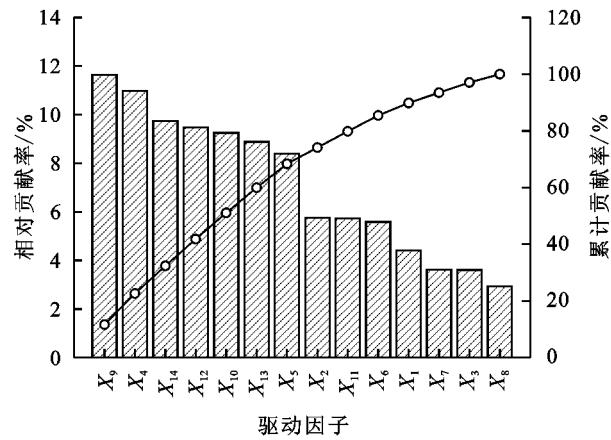


图 4 驱动因子贡献率

Fig. 4 Statistical chart of the contribution rate of driving factors

植被覆盖度和年降水量是影响生态质量变化的关键因素，该结果与前人研究结果一致^[9]。气候变化和人类活动是植被覆盖度与降水量变化的主要驱动力^[16]。大量证据表明，在气候暖湿化背景下，人类活动主导的生态治理措施通过增加植被覆盖度提高生物多样性、增加降水、促进生态系统的良性循环，有效改善了生态质量^[23-26]。但需要注意的是，植被覆盖度、降水量与生态质量并非简单的线性关系，植被覆盖度的增加短期内会带来一定的生态效益，但植被的生长也势必会消耗掉大量的水分，盲目增加植被盖度，可能会造成植被退化甚至缺水死亡，从而带来水土流失加剧和生态质量恶化的风险。有研究表明，8年生小叶杨(*Populus simonii*)人工林蒸腾量比同期降水量高 9.45%，为了维持生长，其必须通过利用深层土壤中的水分来弥补亏缺^[27]。随着地下水位持续

下降，小叶杨也将逐渐无水可用直至缺水死亡，而依赖地表水分的浅根植被可能早已因缺水无法存活。已有研究证实，2000—2019 年，黄土高原部分区域新增的植被已开始退化，植被恢复不可持续，生态环境依然脆弱^[28]，生态质量的提升正面临新的挑战。此外，由于树种结构单一或引进的树种不适当当地的立地条件而产生的成活率低、自我更新能力差、群落结构不稳定的人工植被，生态保护修复效率普遍不高^[29-31]。因此，在林业生态修复工程的实施过程中，不仅要统筹考虑植被种类与种植总量，还要平衡不同区域植被与降水量的关系^[9]。

本研究探索了黄河流域生态敏感区黄土高原的生态质量时空演变特征，定量识别了生态质量变化的潜在驱动因素，研究结果可为制定区域生态质量提升对策和推动区域高质量发展提供参考。本研究也存在一些有待完善之处，例如，现有的气温和降水量数据是利用 ArcGIS 空间插值法计算得到，插值结果与真实值相比可能存在一定误差^[32]。黄河流域黄土高原生态系统具有高度复杂性，准确全面掌握流域生态质量状况和变化趋势仍需要更长时间序列和更详细的调查数据。在未来研究中，或可将遥感监测、无人机调查、系统定位观测及典型区实地调查结合起来^[33]，进一步丰富生态质量评价基础资料数据库。

4 结论

(1) 2000—2020 年，黄河流域黄土高原生态质量较高的区域集中分布在黄河流域的中游地区，生态质量整体呈东南高、西北低的分布特征；从面积分布上看，生态

质量评估为中及以上水平的区域面积占比呈上升趋势,由2000年的40.56%上升至2020年的70.36%。

(2) 2000—2020年,不同区域生态质量变化表现出明显的时间异质性。从面积上看,生态质量提升的面积占区域总面积的94.44%;从区县数量上看,生态质量提升的区县有290个,占区域区县总数的91.57%;黄河流域黄土高原生态质量整体呈逐渐向好的趋势。

(3) 岭回归模型有效解释了各驱动因子与生态质量的关系($R^2=0.994$)。植被覆盖度和年降水量是影响黄河流域黄土高原生态质量变化的主控因子,工程实施面积占比、水土保持功能、植被净初级生产力、水源涵养功能和平均气温对生态质量也有较大影响;人口密度、单位面积存栏量、城镇化率和标准化蒸散指数影响较低。

参考文献(References):

- [1] Fu B J, 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 and Planetary Sciences*, 2017, 45: 223-243.
- [2] 董锁成, 吴玉萍, 王海英. 黄土高原生态脆弱贫困区生态经济发展模式研究: 以甘肃省定西地区为例[J]. *地理研究*, 2003, 22(5): 590-600.
Dong S C, Wu Y P, Wang H Y. A study on the eco-economic development model in the ecoenvironmental vulnerable and needy region on Loess Plateau: The case of Dingxi Prefecture in Gansu Province[J]. *Geographical Research*, 2003, 22(5): 590-600.
- [3] 杨泽康, 田佳, 李万源, 等. 黄河流域生态环境质量时空格局与演变趋势[J]. *生态学报*, 2021, 41(19): 7627-7636.
Yang Z K, Tian J, Li W Y, et al. Spatio-temporal pattern and evolution trend of ecological environment quality in the Yellow River Basin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(19): 7627-7636.
- [4] 张笑培. 黄土高原丘陵沟壑区植被恢复生态效应研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2008.
Zhang X P. Research on the Ecological Effects of Vegetation Restoration in Hilly and Gully Regions of Loess Plateau [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2008.
- [5] 张伯发, 苗长虹. 黄河流域土地利用时空格局演变及驱动力[J]. *资源科学*, 2020, 42(3): 460-473.
Zhang B F, Miao C H. Spatiotemporal changes and driving forces of land use in the Yellow River Basin[J]. *Resources Science*, 2020, 42(3): 460-473.
- [6] 信忠保, 许炯心, 余新晓. 近50年黄土高原水土流失的时空变化[J]. *生态学报*, 2009, 29(3): 1129-1139.
Xin Z B, Xu J X, Yu X X. Temporal and spatial variability of sediment yield on the Loess Plateau in the past 50 years [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(3): 1129-1139.
- [7] 李元征, 冯智志, 李立, 等. 基于GIS的黄河流域陆地生态系统生态敏感性评价[J]. *环境科学与技术*, 2021, 44(4): 219-225.
Li Y Z, Feng Z Z, Li L, et al. Assessment of ecological sensitivity of terrestrial ecosystem in the Yellow River Basin based on GIS[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 44(4): 219-225.
- [8] 杨雯娜, 周亮, 孙东琪. 基于分区-集成的黄河流域生态脆弱性评价[J]. *自然资源遥感*, 2021, 33(3): 211-218.
Yang W N, Zhou L, Sun D Q. Ecological vulnerability assessment of the Yellow River basin based on partition-integration concept [J]. *Remote Sensing for Natural Resources*, 2021, 33(3): 211-218.
- [9] 李帆, 贾夏, 赵永华, 等. 基于DPSIR模型的黄土高原生态敏感性演变格局及驱动力分析[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(9): 241-251, 303.
Li F, Jia X, Zhao Y H, et al. Evolutionary pattern and driving forces of ecological sensitivity in the Loess Plateau using DPSIR model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(9): 241-251, 303.
- [10] 王芳, 李文慧, 林妍敏, 等. 1990—2020年黄河流域典型生态区生态环境质量时空格局及驱动力分析[J]. *环境科学*, 2023, 44(5): 2518-2527.
Wang F, Li W H, Lin Y M, et al. Spatiotemporal pattern and driving force analysis of ecological environmental quality in typical ecological areas of the Yellow River Basin from 1990 to 2020[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(5): 2518-2527.
- [11] 刘畅, 王冬梦, 冯艳, 等. 基于DPSIR模型的郑州市黄河南岸生态安全时序评价[J]. *河南农业大学学报*, 2021, 55(5): 945-953.
Liu C, Wang D M, Feng Y, et al. A time-series evaluation of ecological safety of the south bank of the Yellow River in Zhengzhou based on the DPSIR model [J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2021, 55(5): 945-953.
- [12] Wang Q S, Yuan X L, Zhang J, et al. Key evaluation framework for the impacts of urbanization on air environment: A case study [J]. *Ecological Indicators*, 2013, 24: 266-272.
- [13] Levrel H, Kerbirou C, Couvet D, et al. OECD pressure-state-response indicators for managing biodiversity: A realistic perspective for a French biosphere reserve[J]. *Biodiversity and Conservation*, 2009, 18(7): 1719-1732.
- [14] 肖书文, 詹晨, 王梦桥, 等. 国家公园资源利用体系优化策略: 以海南热带雨林国家公园霸王岭片区为例[J]. *北京林业大学学报: 社会科学版*, 2021, 20(2): 35-43.
Xiao S W, Zhan C, Wang M Q, et al. The optimization strategy of resources utilization system of national parks: Taking the Bawangling zone of the Hainan tropical rainforest national park as an example [J]. *Journal of Beijing Forestry University: Social Sciences*, 2021, 20(2): 35-43.

- [15] 王彬屹, 许大为. 基于城市道路的游憩型绿道选线适宜性评价: 以吉首市老城区为例[J]. 吉首大学学报: 自然科学版, 2020, 41(3): 90-96.
- Wang B Y, Xu D W. Evaluation of the suitability of recreational greenway selection based on urban road: Case study of Jishou old city[J]. Journal of Jishou University: Natural Sciences Edition, 2020, 41(3): 90-96.
- [16] 汲玉河, 周广胜, 王树东, 等. 2000—2019年秦岭地区植被生态质量演变特征及驱动力分析[J]. 植物生态学报, 2021, 45(6): 617-625.
- Ji Y H, Zhou G S, Wang S D, et al. Evolution characteristics and its driving forces analysis of vegetation ecological quality in Qinling Mountains region from 2000 to 2019[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2021, 45(6): 617-625.
- [17] 王旭熙, 彭立, 苏春江, 等. 泸县低丘缓坡区域土地利用景观生态质量评价[J]. 四川农业大学学报, 2015, 33(4): 399-407.
- Wang X X, Peng L, Su C J, et al. Evaluation of landscape ecological quality of land use of gentle hillside in Lu County[J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2015, 33(4): 399-407.
- [18] 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.
- Li T T, Ma C, Guo Z C. Ecological quality evaluation and influencing factors analysis of Helan Mountain based on RSEI[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(4): 1154-1165.
- [19] 杨天垚, 邱建秀, 肖国安. 华北农业干旱监测与冬小麦估产研究[J]. 生态学报, 2023, 43(5): 1936-1947.
- Yang T Y, Qiu J X, Xiao G A. Agricultural drought monitoring and winter wheat yield estimation in North China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(5): 1936-1947.
- [20] Xie S D, Mo X G, Hu S, et al. Contributions of climate change, elevated atmospheric CO₂ and human activities to ET and GPP trends in the Three-North Region of China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2020, 295: 108183.
- [21] 林楠, 姜然哲, 刘强, 等. 近20年三江平原地表蒸散发时空特征及驱动因素分析[J]. 中国地质, 2021, 48(5): 1392-1407.
- Lin N, Jiang R Z, Liu Q, et al. Spatiotemporal characteristics and driving factors of surface evapotranspiration in Sanjiang Plain in recent 20 years[J]. Geology in China, 2021, 48(5): 1392-1407.
- [22] 谭克龙, 任志远, 王全九. 黄河中上游流域生态综合评价研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(4): 173-176.
- Tan K L, Ren Z Y, Wang Q J. Synthetical evaluation research of ecological environment in middle and upper reach of Yellow River drainage basin[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2007, 21(4): 173-176.
- [23] Fu B J, Liu Y, Lü Y H, et al. Assessing the soil erosion control service of ecosystems change in the Loess Plateau of China[J]. Ecological Complexity, 2011, 8(4): 284-293.
- [24] Luo Y, Lü Y H, Fu B J, et al. Half century change of interactions among ecosystem services driven by ecological restoration: Quantification and policy implications at a watershed scale in the Chinese Loess Plateau[J]. The Science of the Total Environment, 2019, 651: 2546-2557.
- [25] Liu Y, Li L H, Chen X, et al. Temporal-spatial variations and influencing factors of vegetation cover in Xinjiang from 1982 to 2013 based on GIMMS-NDVI_{3g}[J]. Global and Planetary Change, 2018, 169: 145-155.
- [26] Yin H, Pflugmacher D, Li A, et al. Land use and land cover change in Inner Mongolia-understanding the effects of China's re-vegetation programs[J]. Remote Sensing of Environment, 2018, 204: 918-930.
- [27] 王彦辉, 熊伟, 于澎涛, 等. 干旱缺水地区森林植被蒸散耗水研究[J]. 中国水土保持科学, 2006, 4(4): 19-25, 32.
- Wang Y H, Xiong W, Yu P T, et al. Study on the evapotranspiration of forest and vegetation in dryland[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2006, 4(4): 19-25, 32.
- [28] He J, Shi X Y, Fu Y J. Identifying vegetation restoration effectiveness and driving factors on different micro-topographic types of hilly Loess Plateau: From the perspective of ecological resilience[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 289: 112562.
- [29] Zhang J J, Gao G Y, Fu B J, et al. Investigation of the relationship between precipitation extremes and sediment discharge production under extensive land cover change in the Chinese Loess Plateau[J]. Geomorphology, 2020, 361: 107176.
- [30] Brandt M, Hiernaux P, Rasmussen K, et al. Assessing woody vegetation trends in Sahelian drylands using MODIS based seasonal metrics[J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 183: 215-225.
- [31] Shen Q, Gao G Y, Han F, et al. Quantifying the effects of human activities and climate variability on vegetation cover change in a hyper-arid endorheic basin[J]. Land Degradation & Development, 2018, 29(10): 3294-3304.
- [32] Bier V A, de Souza E G. Interpolation selection index for delineation of thematic maps[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 136: 202-209.
- [33] 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 W, Liu H J, Gao J X, et al. Spatial-temporal variations of ecological quality in the Yellow River Basin[J]. Research of Environmental Sciences, 2021, 34(7): 1700-1709.