

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2025.04.038

CSTR:32310.14.stbxb.2025.04.038

张锦鑫,付航,傅宇钟,等.基于 InVEST 模型的西柳沟流域生境质量现状[J].水土保持学报,2025,39(4):331-341.

ZHANG Jinxin, FU Hang, FU Yuzhong, et al. Current status of habitat quality in Xiliugou basin based on InVEST model[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(4):331-341.

基于 InVEST 模型的西柳沟流域生境质量现状

张锦鑫¹, 付航^{2,3}, 傅宇钟¹, 许德禄¹, 陈文超^{2,3},

康宾⁴, 马波^{2,3}, 王智^{1,2,3}

(1. 西北农林科技大学草业与草原学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学水土保持与荒漠化整治全国重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 3. 西北农林科技大学水土保持科学与工程学院, 陕西 杨凌 712100; 4. 内蒙古自治区鄂尔多斯市水利事业发展中心, 内蒙古 鄂尔多斯 017001)

摘要: [目的] 综合评估西柳沟流域长时间序列下景观格局指数及生境质量现状变化, 为合理制定生态修复方案, 促进流域生态经济的可持续发展提供理论依据。 [方法] 选取 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年 5 个时段, 基于 Fragstats、InVEST 模型和地理探测器对西柳沟流域景观格局指数、生境质量现状及其驱动力因素进行分析。 [结果] 1) 2000—2020 年研究区景观呈明显的聚集化与同质化的变化趋势, 主要表现为草地扩张、景观破碎度降低、边缘复杂度下降和多样性减少。2015 年出现的短暂破碎化波动反映人类活动的阶段性干扰。2) 研究区以较高生境质量区为主 (占比约 60%), 2000—2020 年生境质量改善区与退化区的面积差距逐渐缩小, 2010 年后退化趋势加剧。空间上, 较高生境质量区主要分布在流域下游, 较低质量区主要分布在流域北部中游的库布齐沙漠, 中质量区在上游呈破碎化分布。3) 土地利用类型是生境质量空间分异的主导因子, 与高程、植被覆盖度及气候因子 (如年平均气温) 的交互作用进一步强化其影响; 人为-自然因子协同作用显著增强生境质量空间分异的解释力。 [结论] 通过对西柳沟流域生态环境质量现状及其驱动因素的系统分析, 明确流域生境质量的空间分布格局, 揭示驱动该流域生态环境质量变化的关键因素, 为流域生态修复优先区的确定与修复策略的制定提供理论支撑。

关键词: 景观格局; InVEST 模型; 生境质量; 地理探测器; 西柳沟流域

中图分类号: X171.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)04-0331-11

Current Status of Habitat Quality in Xiliugou Basin Based on InVEST Model

ZHANG Jinxin¹, FU Hang^{2,3}, FU Yuzhong¹, XU Delu¹, CHEN Wenchao^{2,3},

KANG Bin⁴, MA Bo^{2,3}, WANG Zhi^{1,2,3}

(1. College of Grassland Agriculture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100; 2. State Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Control, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100; 3. College of Soil and Water Conservation Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100; 4. Water Resources Development Center of Ordos, Inner Mongolia Autonomous Region, Ordos, Inner Mongolia 017001)

Abstract: [Objective] A comprehensive evaluation is carried out on the long-term variations in landscape pattern indices and changes in current habitat quality in the Xiliugou basin, aiming to provide a theoretical basis for formulating effective ecological restoration strategies and promoting the sustainable development of the basin's ecological economy. [Methods] Five time points (2000, 2005, 2010, 2015 and 2020) were selected to analyze the landscape pattern indices, current habitat quality, and their driving factors in the Xiliugou Basin using Fragstats, the InVEST model, and the geodetector. [Results] 1) From 2000 to 2020, the landscape in the study area demonstrated a clear trend of aggregation and homogenization. This was primarily reflected in the expansion

收稿日期: 2025-04-07

修回日期: 2025-05-09

录用日期: 2025-05-26

网络首发日期 (www.cnki.net): 2025-06-03

资助项目: 内蒙古自治区鄂尔多斯市科技计划项目 (2022YY012); 国家自然科学基金项目 (42277342)

第一作者: 张锦鑫 (1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事水土保持与草地生态建设研究。E-mail: 15847754369@nwfau.edu.cn

通信作者: 王智 (1985—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事草地生态与荒漠化防治研究。E-mail: wangzhi712@nwfau.edu.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

of grasslands, a reduction in fragmentation, lower edge complexity, and decreased diversity. A temporary increase in fragmentation in 2015 reflected phased human disturbance. 2) The study area was dominated by regions with relatively high habitat quality, accounting for approximately 60% of the total area. From 2000 to 2020, the difference in area between habitat quality improvement zones and degradation zones gradually decreased, with degradation trends intensifying after 2010. Spatially, higher-quality habitats were primarily located in the downstream region, while lower-quality zones were concentrated in the northern midstream region, namely the Kubuqi Desert. Medium-quality habitats were distributed in a fragmented pattern in the upstream region. 3) Land use type was the dominant factor influencing the spatial differences in habitat quality. Its influence was strengthened by interactions with elevation, vegetation cover, and climatic factors such as annual mean temperature. A significant enhancement in the explanatory power for spatial differentiation was observed when both natural and human factors acted jointly. [Conclusion] A systematic analysis of the current status of the ecological environment and its driving factors in the Xiliugou basin clarified the spatial distribution of habitat quality and identified the key factors driving changes in ecological quality. This provides a theoretical basis for identifying priority areas and developing strategies for ecological restoration in the basin.

Keywords: landscape pattern; InVEST model; habitat quality; geodetector; Xiliugou basin

Received: 2025-04-07

Revised: 2025-05-09

Accepted: 2025-05-26

Online(www.cnki.net): 2025-06-03

景观格局指景观中不同土地覆盖类型在空间上的分布与组织方式,反映生态系统单元的构成、配置及形态特征,能有效揭示土地覆盖变化与人类活动对景观结构的影响^[1]。景观格局特征,即空间异质性,代表生物或环境因子在景观中的不均匀分布,是景观生态学研究的核心概念之一。当前,景观格局常采用斑块大小、边缘密度、聚集度和形状指数等指标进行量化,为土地利用规划与生态修复提供重要的科学依据和决策支持。近年来,许多研究都考虑景观格局的变化。例如,ZHENG等^[2]通过景观格局指数对黄淮海平原的时空格局进行研究;YUAN等^[3]探讨四川盆地农田景观格局的变化特征。然而,针对西柳沟流域景观格局指数演变的系统研究仍较为有限,有待深入开展。此外,对该区域景观格局指数的动态分析,有助于揭示生境质量变化的内在驱动机制。

生境质量是衡量生态系统健康状况和生物多样性保护成效的重要指标。高质量的生境能够为生物提供适宜的生存环境,维持生态系统的结构和功能,从而保障生态系统的稳定性和持续性^[4]。当前,生境质量研究已融合野外调查、遥感技术和模型模拟(如InVEST模型)等多学科方法,成为生态系统评估的重要手段。其中,模型评价法因其量化和空间显示特征,被广泛应用于生态系统功能评估,已成为重要的研究工具。目前,常用的模型包括InVEST、ARIES、MIMES、TESSA和SoIVES等,其中InVEST模型的发展已达到较为成熟的阶段,在同类模型中表现尤为突出^[5]。InVEST模型通过集成土地利用类型^[6]、人类干扰程度和生态系统适

宜性等数据,能够模拟不同场景下生境质量的空间格局及动态变化^[7-8],生成直观的生境质量分布图。近年来,InVEST模型已被广泛应用于区域生境质量评估。朱啟莲等^[9]通过InVEST模型分析乌江流域的生境质量现状,明确气候变化和人为干扰对生境质量的影响;杜世勋等^[10]基于InVEST模型的生境质量模块对山西省的生境质量评估表明,在道路、城镇和工业用地等威胁因子周边生境质量较低,生境环境质量存在明显的退化趋势。总体来看,InVEST模型具有良好的可重复性与灵活性,其通过参数调整,可提升评估结果的精度与可靠性,为生态保护提供重要参考。

西柳沟流域作为黄河内蒙古段的重要生态屏障,近年来,在气候变化和人类活动加剧的双重驱动下,面临生态系统退化和生态安全受威胁的严峻形势^[11]。煤矿开发等不合理土地利用进一步加重生态压力,使流域生态功能持续下降^[12]。自2000年以来,鄂尔多斯市在十大孔兑地区大规模实施拦沙换水等水土保持和生态修复措施,有效缓解黄河内蒙古段泥沙淤积问题^[13]。然而,现有治理多聚焦于水土保持工程效益,对生态系统服务,尤其是生境质量改善效果缺乏系统评估,制约流域生态治理的精准化提升。目前,西柳沟流域在土地利用方式调整、气候变化压力增强的背景下,其景观格局演变对生境质量的时空响应机制尚不明确,驱动生境质量变化的核心因素有待进一步探究。本研究以西柳沟流域为对象,综合运用景观格局指数、InVEST模型和地理探测器方法,系统分析2000—2020年流域景观格局变化特征,探明生境质量变化规律与空间分

布特征,剖析景观格局与生境质量的耦合关系,解析土地利用、气候变化与人类活动的交互效应,明确驱动生境质量变化的关键因素,揭示流域生境质量的演变机制。研究成果旨在为西柳沟流域乃至黄河内蒙古段生态修复与水土保持政策优化提供科学依据,提升生态治理的精准性和有效性。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

西柳沟流域(39°46′~40°28′N,109°24′~109°52′E)是黄河内蒙古河段南侧的重要一级支流,其源头位于鄂尔多斯,最终汇入黄河干流,是“十大孔兑”中的第4条,西柳沟流域总面积达1 356.30 km²,干流河道全长106.50 km(图 1)。整体地势呈南高北低,高差约为500 m,流域上游为丘陵区,地形破碎;中游为库布齐沙漠,下游为冲积平原,地势平缓。该地区气候属于典型的大陆季风性气候,年平均降雨量约为268 mm,平均气温约为6.2℃,蒸散量为2 200 mm。虽然年降雨量总量不大,但主要集中在6—9月。并且大风天气可达30 d以上,主要集中于3—6月。该流域水土流失严重,生态环境脆弱^[14],受人类活动影响程度较大,是十大孔兑地区实施生态恢复综合治理措施的重点区域。

1.2 数据来源

本研究采用30 m分辨率的中国土地利用/覆被CLCD数据集提取全流域的土地利用类型。由于该数据采用Albert投影坐标系,因此,在后续景观格局分析中,将其转换为WGS-1984地理坐标系,并投影至WGS-1984 UTM Zone 49 N坐标系。根据土地利用分类标准和研究目的,土地利用类型被划分为林地、草地、耕地、裸地和硬化地表5类,并在此基础上计算景观格局指数和生境质量。采用相关数据获取环境因子信息,NDVI数据来自于NOAA物理科学实验室

(<https://psl.noaa.gov>),通过数据合成和掩膜处理提取研究区域数据;NPP数据来自MOD17A3HGF Version 6.0(<https://lpdaac.usgs.gov>);高程、降雨、气温数据、人口密度数据来自地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn/>)及国家青藏高原科学数据中心(<https://data.tpdc.ac.cn/>)。

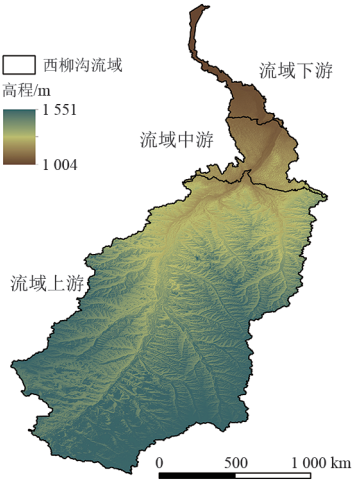


图 1 研究区概况

Fig.1 Overview of the study area

1.3 研究方法

本研究首先依据研究区土地利用状况,选取11个景观格局指数,分析西柳沟流域景观格局的变化情况;其次,通过InVEST模型中的Habitat Quality模块计算研究区生境质量,探究区生境质量的现状与变化特征;最后,使用地理探测器中的因子探测和交互作用探测功能探明影响生境质量的驱动力因素。

1.3.1 景观格局指数 景观格局指数可反映景观尺度、类型尺度下的分布信息^[15],定量表达区域景观类型的组成和结构特征^[16],本文通过Fragstats 4.2软件进行景观格局指数的计算,选取11个景观格局指数,其基本信息及定义见表1。

表 1 景观格局指数定义

Table 1 Definition of landscape pattern indices			
格局指数	简写	单位	定义
斑块类型面积	CA	hm ²	不同类型下斑块面积
最大斑块指数	LPI	%	最大类型斑块占比
斑块数量	NP	个	某一景观类型(如森林、草地、水域等)的斑块总数
斑块密度	PD	个/hm ²	单位面积内各类型景观斑块的数量
斑块所占景观面积比例	PLAND	%	某一景观类型的斑块面积占总景观面积的比例
边缘密度	ED	m/hm ²	单位面积内不同景观类型斑块的边缘总长度
景观形状指数	LSI	%	景观斑块的形状复杂度
蔓延度指数	CONTG	%	景观斑块在空间上扩展的程度和连续性
散布与并列指数	IJI	%	景观斑块在空间上的分散程度和斑块之间的接近程度
景观聚集度指数	AI	%	景观中同一类型的斑块在空间上的聚集程度
香农多样性指数	SHIDI	-	景观中不同类型的多样性程度

以上所选指标涵盖斑块规模、形状复杂度、空间分布与景观多样性等维度,具体包括面积与数量类指数,斑块类型面积(CA)、最大斑块指数(LPI)、斑块数量(NP)、斑块密度(PD)和斑块所占景观面积比例(PLAND),用于刻画景观中不同土地利用类型的规模和破碎化水平;形状与边界类指数包括边缘密度(ED)和景观形状指数(LSI),反映景观斑块边界复杂度和整体形状特征;聚集与分布类指数包括蔓延度指数(CONTAG)、散布与并列指数(IJI)和景观聚集度指数(AI),用于评价斑块在空间上的聚集与扩散格局;多样性类指数选用香农多样性指数(SHIDI),衡量景观类型的丰富度与均匀度,表征景观空间异质性水平。

1.3.2 InVEST 模型 通过使用 InVEST 模型中的 Habitat Quality 模块,分析土地利用类型对胁迫因子的敏感程度,以此来计算生境质量。其评估结果能反映生物多样性丰度与生态系统稳定性,模型通过不同景观类别的敏感性和外界威胁因素的强度对生境质量进行评估,计算公式为^[17]:

$$D_{xj} = \sum_{r=1}^R \sum_{y=1}^{Y_r} \left\{ \frac{w_r}{\sum_{r=1}^R w_r} \right\} r_y I_{ryx} \beta_x S_{jr} \quad (1)$$

式中: D_{xj} 为生境质量退化指数; R 为胁迫因子; y 为胁迫因子 r 图层的栅格数量; Y_r 为胁迫因子所占栅格数量; w_r 为胁迫因子权重; r_y 为栅格 y 胁迫因子值; β_x 为栅格 x 可达性水平; S_{jr} 为生境类型 j 对胁迫因子 r 的敏感程度; I_{ryx} 为栅格 y 的胁迫因子值 r_y 对生境栅格 x 的胁迫水平。

$$Q_{xj} = H_j \left[1 - \left\{ \frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + k^z} \right\} \right] \quad (2)$$

式中: Q_{xj} 为类型 j 中栅格 x 的生境质量指数; k 为半饱和参数; H_j 为类型 j 的生境适宜性; z 为归一化常量; D_{xj} 为类型 j 中栅格 x 的生境退化度(其中 j 为土地利用类型)。

$$I_{ryx} = 1 - \left[\frac{d_{xy}}{d_{rmax}} \right] \quad (3)$$

$$I_{rxy} = \exp \left[\frac{-2.99d_{xy}}{d_{rmax}} \right] \quad (4)$$

式中: d_{xy} 为目标值与胁迫因素的最短距离; d_{rmax} 为胁迫因子 r 的最大影响距离。

根据 InVEST 模型指导手册^[18]与研究区现有研究成果^[19],对生态胁迫因子和不同生境类型对胁迫因子的敏感度进行参数设定(表 2、表 3)。胁迫因子反映特定土地利用类型对周围生境的影响程度;权重值则代表该土地利用类型对生境破坏的相对程

度,取值为 $[0,1]$,数值越大表示破坏性越强。敏感度值取值为 $[0,1]$,表示不同土地利用类型对周边生态胁迫因子的响应程度,敏感度越高,数值越接近 1^[20]。

表 2 生态胁迫因子

Table 2 Ecological threat factors

威胁因子	权重	最大影响距离	距离衰减方式
硬化地表	0.8	7	指数
耕地	0.4	4	线性
裸地	0.5	6	线性

表 3 胁迫因子敏感系数

Table 3 Sensitivity coefficient of threat factors

土地利用类型	生境适宜度	耕地	裸地	硬化地表
耕地	0.4	0.3	0.4	0.3
草地	0.8	0.5	0.6	0.5
林地	1.0	0	0.4	0
裸地	0.3	0.4	0	0.4
硬化地表	0	0	0.1	0

1.3.3 自然断点法 为提升数据分类的科学性和可视化效果,在景观格局指数和生境质量分级处理中采用自然断点法。该方法依据数据自身分布特征,通过最小化类内方差、最大化类间方差,实现最优分割,能有效反映数值型生态数据的自然分组和结构差异,优于等距法和分位数法等传统分类方法,广泛应用于土地利用变化、生态环境评价及景观格局研究中。具体操作中,利用 ArcGIS 10.6 软件对景观格局指数和生境质量栅格数据实施自然断点分级,将连续型数值划分为“低等(0~0.2)、较低等(0.2~0.4)、中等(0.4~0.6)、较高等(0.6~0.8)和高等(0.8~1.0)”5个等级^[18-19],为流域景观演变分析和空间异质性评价提供分层依据。

1.3.4 地理探测器 地理探测器是一种基于空间分异性理论的地理统计分析工具,用于揭示地理要素的空间分异规律及其驱动机制。本研究主要使用分异及因子探测器以及交互作用探测器^[21],选取高程、坡度、坡向、年平均降雨量、年平均气温、NPP、人口密度、土地利用类型、NDVI 9 个因子作为空间异质性驱动因素进行分析,分异及因子可探测因变量 Y 的空间分异性,并探测某个自变量 X 对 Y 分异状况的解释度,用 q 表示,计算公式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{z=1}^L N_z \delta_z^2}{N \delta^2} = 1 - \frac{SSW}{SST} \quad (5)$$

$$SSW = \sum_{z=1}^L N_z \delta_z^2; SST = N \delta^2$$

式中: $z=1,2,3,\dots,L$ 为自变量 X 的分层(Strata),即

该因素的分类个数; N_z 为层 z 的单元数, N 为全区的单元数; σ_h^2 为 z 层内 Y 的方差, σ^2 为全区的方差。 q 的取值为 $[0,1]$, q 值越大,表明 X 对因变量 Y 空间异性的解释程度越大。

交互作用探测用于识别多个自变量间的交互作用,判断多个自变量。交互类型共分为 5 类, $q(X1 \cap X2) < \min[q(X1), q(X2)]$ 非线性减弱; $\min[q(X1), q(X2)] < q(X1 \cap X2) < \max[q(X1), q(X2)]$ 代表单因子非线性减弱; $q(X1 \cap X2) > \max[q(X1), q(X2)]$ 代表双因子增强; $q(X1 \cap X2) = q(X1) + q(X2)$ 代表双因子独立; $q(X1 \cap X2) > q(X1) + q(X2)$ 代表非线性增强。

以上指标除 FVC 需要使用 NDVI 数据进一步计算,其他指标均可下载后直接使用。因此,对 FVC 计算方法进行补充说明,计算公式为:

$$FVC = \frac{NDVI - NDVI_{裸地}}{NDVI_{绿地} - NDVI_{裸地}}$$

(6)

式中:FVC 为植被覆盖度;NDVI_{裸地}为研究区裸地对应的 NDVI 值;NDVI_{绿地}为植被覆盖对应的 NDVI 值。

表 4 2000—2020 年研究区土地利用类型的景观格局指数

Table 4 Landscape pattern indices of land use types in study area from 2000 to 2020

年份	ED	LPI	NP	CONTG	PD	IJI	AI	SHIDI	LSI
2000	48.61	73.26	9 228	69.40	7.60	38.40	93.41	0.73	45.12
2005	36.09	77.61	6 937	73.76	5.72	38.64	95.08	0.64	34.22
2010	31.30	80.24	6 233	76.04	5.14	40.27	95.72	0.59	30.05
2015	33.82	80.53	6 779	78.17	5.59	33.68	95.38	0.59	32.24
2020	30.59	81.42	6 102	78.84	5.03	37.68	95.81	0.58	29.43

2.2 生境质量分析

2.2.1 生境质量现状分布 基于自然断点法,对计算后的生境质量分为 5 个等级。随后,分析研究区生境质量现状(表 5、图 2)发现,研究区以较高生境质量区为主,5 个时期中其面积占比均保持在 60%,其次为中质量区。从时间变化来看,低生境质量区面积虽缓慢增加,但整体占比始终未超过 1%,对整体生境格局影响较小。较低生境质量区在 2000—2020 年呈持续下降趋势,占比由 2000 年的 23.66% 降至 2020 年的 15.26%,反映出生境质量在一定程度上得到改善。中等生境质量区则呈先降后升的波动变化趋势,面积占比从 2000 年的 20.54% 下降至 2005 年的 19.38%,随后回升至 2020 年的 21.59%。较高生境质量区整体呈上升趋势,占比由 2000 年的 55.60% 上升至 2020 年的 62.42%,尽管在 2010—2020 年有所波动,但总体变化幅度不大。高生境质量区于 2015 年首次出现,至 2020 年占比仅为 0.008%,但高生境质量区的出现反映研究

2 结果与分析

2.1 景观格局指数变化分析

采用 Fragstats 软件对研究区不同时期的土地利用类型进行景观格局分析(表 4)发现,LPI 指数呈持续上升趋势。ED、NP 和 PD 指数整体呈下降趋势,仅在 2015 年较 2010 年出现轻微上升,说明土地利用类型的斑块数量逐渐减少,边缘形态趋于简单化。CONTAG 指数总体上升,平均值约为 71.20%,表明土地利用格局的异质性逐渐降低,但仍维持在较高水平。IJI 指数波动较大,2000—2010 年呈上升趋势,但在 2015 年从 40.26% 下降至 33.68%,随后回升至 37.68%,反映出 2015 年不同土地利用类型间的相邻边界显著缩短,之后有所恢复。LSI 指数整体呈下降趋势,但在 2015 年略有上升,表明该年土地利用斑块的破碎程度有所增加。AI 指数平均值为 93.81%,处于较高水平,显示土地利用斑块的离散程度较低,同类土地利用结构较为紧凑,并且整体呈上升趋势。SHIDI 指数呈持续下降趋势,表明流域内土地利用类型的分布多样性逐渐减少。景观格局的转变必定影响研究区生境质量的改变,但其变化趋势及影响因素 S 还需进一步分析。

区生态环境质量的持续改善趋势,说明生态系统结构与功能正逐步向良性方向恢复。

从空间分布来看,2000—2020 年,流域上游区域主要以较高和中等生境质量区为主;其中,中等生境质量区在上游呈破碎状分布,并与较高生境质量区相互交织,构成互补格局,形成较为复杂的空间结构;在主沟沟道附近及流域下游南部区域,零星分布有小面积的较低生境质量区。流域中游区域主要分布于库布齐沙漠,该区域以较低生境质量区为主;2010 年开始,中等生境质量区的占比明显上升,且在此后的时间段内持续扩展;至 2020 年,中生境质量区面积显著增加,表明研究区荒漠化的生态治理措施取得一定成效,推动中游地区生境质量的持续改善。流域下游地区的生境质量分布整体呈显著退化;2000—2010 年,该区域以中等及较高生境质量区为主,分布较为集中,生态状况整体较好;自 2010—2020 年,流域下游生境质量明显退化,区域内较低生境质量区成为主要类型,而中等生境

质量区呈零星分布。此变化可能受到土地利用强度增加或生态压力加剧等因素影响,反映出下游生态系统稳定性有所下降。

表 5 2000—2020 年不同生境质量区域比例

Table 5 Proportions of areas with different habitat quality levels from 2000 to 2020					
等级	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年
低质量区	0.197	0.347	0.555	0.634	0.723
较低质量区	23.660	19.286	16.556	16.401	15.256
中质量区	20.539	19.378	19.723	21.283	21.590
较高质量区	55.604	60.980	63.166	61.677	62.422
高质量区	0	0	0	0.006	0.008

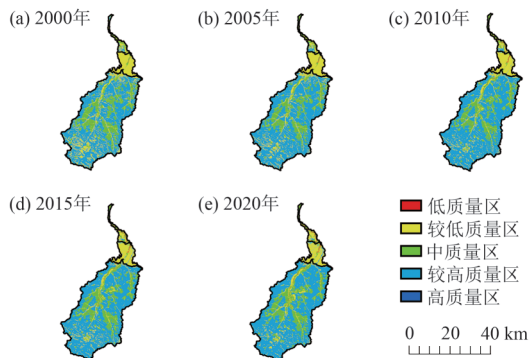


图 2 研究区生境质量现状

Fig. 2 Current habitat quality status of study area

2.2.2 生境质量现状转移情况分析 生境质量转移矩阵表明(表 6),自 2015 年起,新出现的高质量区主要由较低质量区转变而来。根据生境质量等级的变化,可将其划分为改善区(低等级区转为高等级区)、退化区(高等级区转为低等级区)和无变化区(生境质量保持不变)3 类。分析各时期的生境质量变化趋势可知,2000—2005 年,改善区、退化区和无变化区面积分别为 124.835、31.856、1 057.625 km²,改善区面积约为退化区的 4 倍,表明生态恢复效果显著;2005—2010 年,改善区、退化区和无变化区面积分别为 64.45、39.194、1 113.665 km²,改善区面积减少,退化区增加,但生态改善效应仍占主导;2010—2015 年,改善区、退化区和无变化区面积分别为 45.158、66.512、1 102.647 km²,退化区面积首次超过改善区,表明生境质量整体退化加剧;2015—2020 年,改善区、退化区和无变化区面积分别为 54.689、46.786、1 112.842 km²,改善区和退化区面积趋于平衡。整体来看,2000—2020 年,生境质量改善区和退化区的面积差距逐渐缩小。尽管早期改善区面积较大,但呈减少趋势,而退化区面积缓慢增加,反映出生态环境压力加大,恢复效应减弱,可能与人类活动加剧和气候变化等因素密切相关。

表 6 研究区 2000—2020 年生境质量转移矩阵

Table 6 Habitat quality transition matrix of study area from 2000 to 2020						
年份	生境等级	低质量区	较低质量区	中质量区	较高质量区	高质量区
2000—2005	低质量区	1.941	0.005	0	0	0
	较低质量区	1.062	211.956	20.289	69.264	0
	中质量区	1.178	7.356	35.278	207.674	0
	较高质量区	0.038	14.879	636.053	7.344	0
	高质量区	0	0	0	0	0
2005—2010	低质量区	4.204	0.015	0	0	0
	较低质量区	0.812	184.452	11.482	37.449	0
	中质量区	1.643	7.215	15.512	210.936	0
	较高质量区	0.079	9.365	714.073	17.079	0
	高质量区	0	0	0	0	0
2010—2015	低质量区	6.737	0.001	0	0	0
	较低质量区	0.311	163.137	11.663	25.868	0.068
	中质量区	0.561	14.132	217.247	7.558	0
	较高质量区	0.087	21.893	29.528	715.526	0
	高质量区	0	0	0	0	0
2015—2020	低质量区	7.696	0.001	0	0	0
	较低质量区	0.305	158.615	13.960	26.247	0.035
	中质量区	0.704	14.131	229.158	14.445	0
	较高质量区	0.077	12.503	19.057	717.314	0.002
	高质量区	0	0.009	0	0	0.059

从生境质量转移分布(图 3)可见,研究区的大部分面积为较高质量不变区,而中质量不变区呈“树状”分布穿插其中。从流域区域分布来看,流域上游区域始终以较高质量不变区和中等质量不变区为主,整体生态稳定性较强。然而,在上游北部靠近库布齐沙漠地区及南部区域,仍存在一定面积的较低质量不变区;2000—2005 年(图 3a),2 个区域的较低质量不变区分布集中,面积较大,生态状况较为薄弱;随着时间推移,2015—2020 年(图 3d),上游北部区域的较低质量不变区面积明显缩小,并逐步转变为较高质量不变区。同时,上游南部区域的较低质量不变区则演变为零星分布,面积显著减少。此变化表明,上游北部和南部地区在该阶段生境质量明显提升。流域中游区域为库布齐沙漠,该区域在 4 个变化时期内始终以较低质量不变区为主,生境质量整体较差;随着时间的推移,中游区域生态状况逐步改善。2010—2015 年(图 3c),库布齐沙漠区域出现零星由较低质量转变为较高质量的区域;在 2015—2020 年(图 3d),该区域逐渐演变为较高质量不变区,且在图中分布更为明显。同时,周边地区由较低质量转变为较高质量的趋势仍在持续,尽管变化速度较为缓慢,但整体呈现出积极发展态势;流域下游区域在 4 个变化时期中生境质量发生明显的变化。2000—2010 年(图 3a、图 3b),该区域主要以较低质量不变区和较高质量不变区为主;进入 2010—2015 年(图 3c),较低质量不变区仍占主导,同时出现较高质量向较低质量转变的区域,反映出部分区域生境质量出现退化现象;2015—2020 年(图 3d),流域下游区域则几乎由较低质量区占据,且面积持续扩大。此趋势显示该区域生态系统退化加剧,生境质量持续下降。

表 7 研究区 2000—2020 年生境质量驱动因子解释力

Table 7 Explanatory power of habitat quality driving factors in study area from 2000 to 2020)										
年份	指标	高程	坡度	坡向	年平均降水	年平均气温	净初级生产力	人口密度	土地利用	植被覆盖度
2000	<i>q</i>	0.178	0.026	0.023	0.064	0.099	0.152	0.008	0.763	0.235
	<i>p</i>	0	0.999	0.550	0.036	0	0	1.000	0	0
2005	<i>q</i>	0.227	0.033	0.028	0.082	0.141	0.149	0.030	0.714	0.214
	<i>p</i>	0	0.999	0.467	0.011	0	0	1.000	0	0
2010	<i>q</i>	0.272	0.037	0.032	0.164	0.193	0.192	0.038	0.687	0.300
	<i>p</i>	0	0.999	0.403	0	0	0	1.000	0	0
2015	<i>q</i>	0.176	0.034	0.027	0.103	0.148	0.089	0.045	0.677	0.175
	<i>p</i>	0	0.999	0.566	0.002	0	0.004	1.000	0	0
2020	<i>q</i>	0.198	0.036	0.021	0.144	0.232	0.080	0.052	0.656	0.144
	<i>p</i>	0	1.000	0.857	0	0	0.009	1.000	0	0

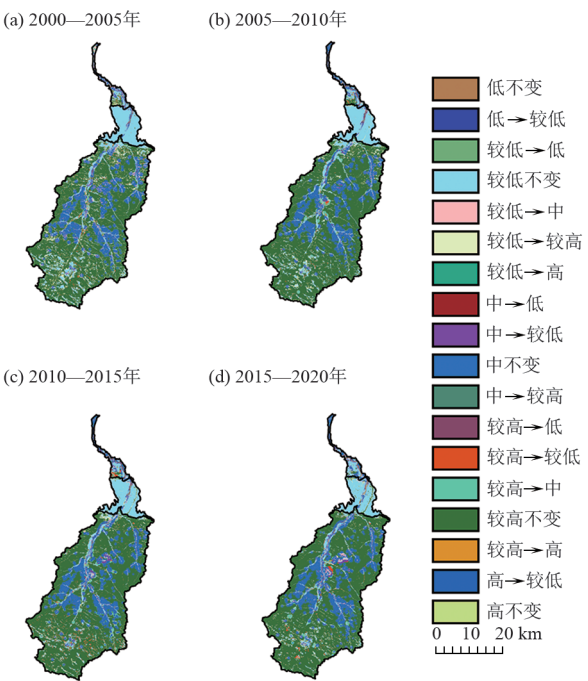


图 3 研究区生境质量转移情况的分布特征

Fig. 3 Spatial distribution characteristics of habitat quality transitions in study area

2.3 生境质量驱动因素及其时序演变特征分析

通过单因子探测的结果(表 7)可以看出,除坡度、坡向、人口密度外,其余因子均通过 $p<0.01$ 的显著性检验,其中解释程度最强的因子是土地利用类型(CLCD),年平均值为 0.7。高程和植被覆盖度(FVC)对生境质量也具有较强的解释力,二者解释程度的年平均值均为 0.21。年平均降雨、年平均气温、净初级生产力的解释程度相对较弱,分别为 0.11、0.16、0.13,而年均气温的解释力在逐年增强,从 2000 年的 0.099 上升到 0.232。

在双因子交互作用下(图4),土地利用类型与其他各因子的交互作用显著增强对生境质量空间分异的解释力。除2020年有所降低外,其余年份各因子与土地利用类型的交互作用解释力均 >0.700 。除土地利用外,其余因子的相互交互作用对生境质

量空间分异的解释力均 <0.500 ,虽然单因子解释力较低,但在与其他因子进行交互作用时,对生境质量空间分异的贡献显著增强,特别是在自然因素与人为因素协同作用下,该空间分异的解释力进一步提升。

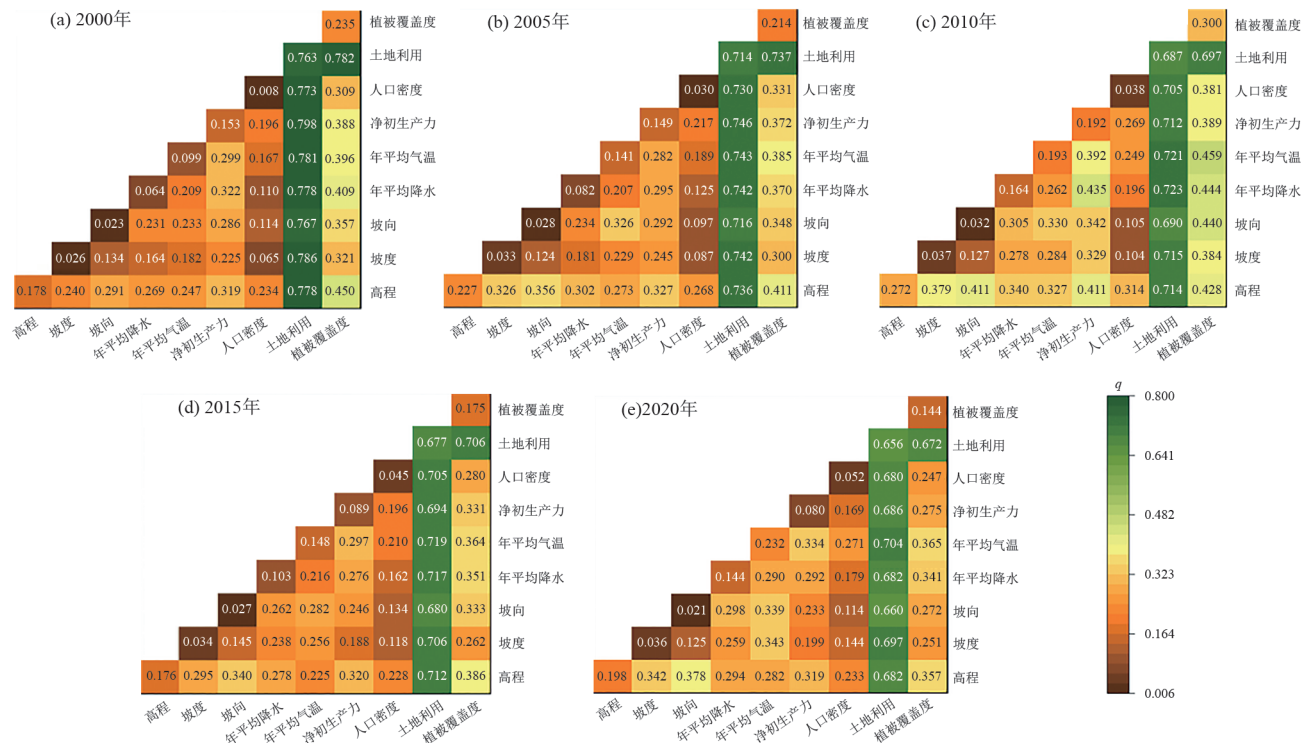


图4 2000—2020年各驱动因子交互探测解释力

Fig.4 Explanatory power of interaction detection among driving factors from 2000 to 2020

3 讨论

西柳沟流域是典型的生态脆弱区,土壤侵蚀严重。在推动黄河流域生态保护和高质量发展的国家战略背景下,十大孔兑的综合治理已被列为生态治理的重要工程之一。因此,研究西柳沟流域的生境质量现状、主要驱动因素对优化区域生态修复和水土保持措施具有重要意义,也将为黄河流域生态治理提供科学支撑,助力区域生态系统的稳定与可持续发展。

本研究表明,2000—2015年西柳沟流域土地利用景观格局呈现出显著的聚集化与同质化趋势,草地斑块的持续扩张有效提升景观的连通性(LPI、AI、CONTAG上升),在一定程度上有利于水土保持功能的强化和生态过程的连续性。此过程导致景观破碎度(NP、PD)和边缘复杂度(ED)的降低,斑块间的耦合性增强,表明流域在该阶段整体生态格局趋于整合和稳定。与同期实施的退耕还草、水土保持等生态工程措施密切相关,说明政策导向在景观重构中发挥积极作用^[22]。然而,值得关注的是,聚集化过程也伴随着景观多样性和异质性的下降(SHIDI下

降),可能对局地物种多样性和生态系统的复合功能供给构成潜在威胁。尤其是2015年景观形状指数(LSI)的下降和散布与并列指数(IJI)的波动,反映出人类活动的阶段性扰动对景观结构的影响逐渐显现,导致斑块形态不规则性上升、景观结构稳定性下降。因此,当前和未来流域生态治理应在巩固草地连片优势、保障生态过程完整性的同时,注重增加景观类型多样性、优化斑块形态和空间配置,以提升流域生境质量和生态系统的抗干扰能力。

其次,2000—2020年,西柳沟流域上游地区的生境质量显著提升,较高生境质量区呈逐渐扩展趋势,而较低质量区则持续减少。值得注意的是,该区域为鄂尔多斯市在西柳沟流域推进拦沙换水工程的重点实施区,因此,生境质量的改善很可能与该工程的持续推进密切相关。从侧面可验证,拦沙换水等生态治理措施在提升区域生态系统质量方面的积极作用;在上游与中游的交界处,较低生境质量区逐渐消失,较高生境质量区取而代之,表现出“绿进沙退”的趋势;中游地区较低质量区呈“破碎化”减少趋势,而高质量区以“散点状”嵌入其中,结合当地实地考

察情况,表明光伏治沙工程及荒漠化综合治理措施在生态修复方面取得明显成效^[23];然而,随着相关建设工程的推进,中游及下游地区陆续开展公路铺设工程,带来明显的人为干扰,导致低生境质量区逐渐显现。尤其是在下游区域,生境质量受建设活动影响尤为显著,局部生态环境承受较大压力。该现象表明,在交通基础设施建设的同时,应同步加强防沙治沙等生态保护措施的实施,以减缓人为活动对区域生态系统的负面影响,实现生态保护与工程建设的协调发展。从2000—2005年,研究区生境质量改善区面积约为退化区的4倍,此阶段研究区开始实施退耕还林还草和拦沙换水等生态恢复工程^[24]的实施,使得研究区生境质量恢复效果明显,而该原因一方面可能是由于研究区面积尺度不一致造成的差异;另一方面,可能是威胁因子权重的设置不同所导致的^[25]。从2005—2010年,研究区生境质量改善区面积依然优于退化区面积,生态改善效应仍占据主导地位,但二者间的面积差距大大缩小。从2010—2015年,退化区面积首次超过改善区,但二者变化区域面积较为接近,说明研究区生境质量出现小幅度的退化趋势,此阶段研究区耕地利用程度加大,矿产资源开采频繁,城镇化建设加快,并且拦沙换水工程在该阶段进入主要的施工时段,大量的植被面积被破坏,人类活动干扰使得研究区生境质量出现小幅度的下降,结果与其他学者^[26-27]的研究也保持一致。2015—2020年,研究区生境质量改善区的面积重新超过退化区,尽管二者面积相近,但该变化表明,在生产建设工程推进的同时,流域内也同步实施积极的生态修复措施。生境质量在经历扰动后得以较快恢复,说明生态恢复工作力度有所加强,人为干扰因素在一定程度上得到有效控制,为流域生态系统的稳定和可持续发展奠定基础。

通过驱动力分析表明,土地利用类型是主导西柳沟流域生境质量空间分布的关键因素,其单因子解释力显著高于其他自然和人为因子。同时,土地利用与高程、植被覆盖度及气候因子的交互作用,进一步增强对生境质量空间异质性的解释力。与祁迷等^[28]在黄土丘陵区的研究一致,说明土地利用格局变化在流域生态系统结构调整和生境质量演变中发挥着核心驱动作用。此外,交互效应的显著提升,揭示土地利用变化与自然地理背景及气候波动间存在耦合放大机制。表明未来生态修复与管理策略,需在强化土地利用结构优化的基础上,统筹考虑自然环境承载力与气候变化适应性,以提升流域生境质量的稳定性和恢复力^[29]。

总体来看,流域的生境质量呈现出整体稳定、局部波动的特征。较高生境质量区域面积长期占据主导地位,并随着时间的推移,尤其是到2015年,出现高生境质量区域。表明整体生境质量在不断改善,反映出生态恢复措施逐渐取得成效,流域生态环境得到部分修复和优化。然而,2010—2015年存在轻微的退化趋势,与内蒙古黄河流域的生境质量变化趋势^[30]相似,呈先下降后小幅回升的变化趋势。该发现不仅凸显研究区域生境质量的改善,也验证InVEST模型在该地区应用的可行性。

4 结论

1)2000—2015年,西柳沟流域草地斑块持续扩张,带动景观连通性提升,破碎度和边缘复杂度降低,整体格局趋于整合稳定。该变化与退耕还草和水土保持工程密切相关,有利于水土保持和生态过程连续性。但同时,景观多样性和异质性下降,2015年斑块形态不规则性增加、结构波动加剧,反映出人类活动扰动加深,对生态系统稳定性带来潜在影响。因此,后续生态治理应在保持斑块连通性的同时,注重提升景观多样性和异质性,以增强生境质量和生态系统的抗干扰能力,为流域生态修复和土地利用优化提供科学指导。

2)2000—2020年生境质量呈“整体稳定、局部波动”的演变特征,较高等级生境质量区长期占主导(约60%),其中,2000—2010年生境质量呈升高趋势。然而,2010年之后,改善区与退化区的面积差距逐渐缩小,退化趋势加剧,反映人类活动造成的负面影响正在削弱生态恢复效果,需加强重点区域的保护与修复。

3)生境质量空间分异的主导驱动因子为土地利用类型(CLCD),其单因子解释力最强($q=0.7$),且与其他因子的交互作用呈现显著非线性增强效应(交互 q 值 >0.7)。高程和植被覆盖度(FVC)为次要自然驱动因子($q=0.21$),而年平均气温的解释力持续增强,由2000年的0.099增长到2020年的0.232,表明气候变化影响日益凸显。表明未来生态管理中需统筹土地利用调控与气候适应策略,以有效提升流域生态系统的稳定性和适应性。

参考文献:

- [1] 宋慧仙,角媛梅,周伟奇,等.近七十年云南省气候景观的时空异质性特征研究[J].生态学报,2025,45(13):1-13.
SONG H X, JIAO Y M, ZHOU W Q, et al. Spatial and temporal heterogeneity of climate landscape in Yunnan Province in recent 70 years[J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(13): 1-13.

- [2] ZHENG Y, LONG H, CHEN K. Spatio-temporal patterns and driving mechanism of farmland fragmentation in the Huang-Huai-Hai plain [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2022, 32(6): 1020-1038.
- [3] YUAN X, ZHANG S, DENG W, et al. Landscape patterns and drivers of farmland evolution in basin margin mountainous areas: A case study of Sichuan basin, China [J]. *Land Degradation and Development*, 2025, 36(6): 1787-1805.
- [4] 郝子萱, 马佳凯, 王傲, 等. 基于 InVEST-MGWR 模型的黄河流域山西段生境质量变化及其影响因素[J]. *应用生态学报*, 2025: 1-12.
- HAO Z X, MA J K, WANG A, et al. Changes of habitat quality and its influencing factor in Shanxi section of the Yellow River basin based on InVEST-MGWR model [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2025: 1-12.
- [5] 张继, 杨世琦, 赵磊, 等. 基于 InVEST 模型的重庆市“一带三屏”生境质量时空演变特征分析[J]. *生态环境学报*, 2025, 34(2): 167-180.
- ZHANG J, YANG S Q, ZHAO L, et al. Spatiotemporal evolution characteristics of habitat quality in the One Belt and Three Barriers region of Chongqing City based on the InVEST model [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2025, 34(2): 167-180.
- [6] CHEN X, LE Y, DU Z, et al. Distribution of ecological restoration projects associated with land use and land cover change in China and their ecological impacts [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 825(15): e153938.
- [7] 王语馨, 郑颖, 高永, 等. 鄂尔多斯市典型生态系统服务时空演变特征及权衡/协同关系[J/OL]. *应用生态学报*, 2025: 1-12.
- WANG Y X, ZHENG Y, GAO Y, et al. Spatio-temporal evolution characteristics and trade-offs/synergies of typical ecosystem services in Ordos City [J/OL]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2025: 1-12.
- [8] WANG B, CHENG W. Effects of land use/cover on regional habitat quality under different geomorphic types based on InVEST model [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(5): e34.
- [9] 朱啟莲, 方发永, 余万洋, 等. 基于 InVEST 模型的乌江流域生境质量时空演变及其驱动因素分析[J]. *水土保持学报*, 2025, 39(3): 371-380.
- ZHU Q L, FANG F Y, YU W Y, et al. Analysis of Spatial-temporal evolution of habitat quality and its driving factors in Wujiang River basin based on the InVEST model [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2025, 39(3): 371-380.
- [10] 杜世勋, 荣月静. 山西省生态安全格局空间识别研究[J]. *水土保持研究*, 2017, 24(6): 147-153.
- DU S X, RONG Y J. Study on spatial identification of ecological security pattern in Shanxi Province [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, 24(6): 147-153.
- [11] 冯琰玮, 甄江红. 黄河流域内蒙古段生态安全格局优化研究[J]. *中国农业资源与区划*, 2022, 43(10): 129-138.
- FENG Y W, ZHEN J H. Eco-spatial security optimization in watershed of the Yellow River in Inner Mongolia [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2022, 43(10): 129-138.
- [12] 姜雅琼, 王添, 李占斌, 等. 西柳沟流域土壤风蚀时空变化及其对景观格局的响应[J]. *水土保持研究*, 2025, 32(2): 14-23.
- JIANG Y Q, WANG T, LI Z B, et al. Spatiotemporal changes of soil wind erosion and its response to landscape pattern in Xiliugou watershed [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2025, 32(2): 14-23.
- [13] 王丽云, 马振刚, 高云飞, 等. 近 10 a 来十大孔兑现状淤地坝拦沙作用分析[J]. *人民黄河*, 2018, 40(9): 89-92.
- WANG L Y, MA Z G, GAO Y F, et al. Quantity of sediment intercepted by warping dams in the ten tributaries over the past ten years [J]. *Yellow River*, 2018, 40(9): 89-92.
- [14] 谢梦瑶, 任宗萍, 李占斌, 等. 砒砂岩区小流域场次洪水产流产沙特征[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(5): 45-49.
- XIE M Y, REN Z P, LI Z B, et al. Characteristics of runoff and sediment yield during flood events in a small watershed of the pisha sandstone area [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, 27(5): 45-49.
- [15] HU C, WU W, ZHOU X, et al. Spatiotemporal changes in landscape patterns in karst mountainous regions based on the optimal landscape scale: A case study of Guiyang City in Guizhou Province, China [J]. *Ecological Indicators*, 2023, 150(14): e110211.
- [16] 陈利顶, 刘洋, 吕一河, 等. 景观生态学中的格局分析: 现状、困境与未来[J]. *生态学报*, 2008, 28(11): 5521-5531.
- CHEN L D, LIU Y, LU Y H, et al. Landscape pattern analysis in landscape ecology: Current, challenges and future [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(11): 5521-5531.
- [17] 陈乐, 卫伟. 西北旱区典型流域土地利用与生境质量的时空演变特征[J]. *生态环境学报*, 2022, 31(9): 1909-1918.
- CHEN L, WEI W. Spatiotemporal changes in land use and habitat quality in a typical dryland watershed of north-west China [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022, 31(9): 1909-1918.
- [18] 景晓玮. 基于 InVEST 模型的贵州省生态系统服务计量及价值评估研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2021.
- JING X W. Research on the measurement and valuation of ecosystem services in Guizhou Province based on InVEST model [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2021.
- [19] 齐松, 董春, 卫东, 等. 基于 InVEST 模型的黄河干流沿岸生境质量时空变化研究[J]. *测绘科学*, 2022, 47(8): 114-122.
- QI S, DONG C, WEI D, et al. Temporal and spatial

- variation of habitat quality along the main stream of the Yellow River based on InVEST model[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2022, 47(8): 114-122.
- [20] 吴楠, 陈红枫, 冯朝阳, 等. 基于土地覆被变化的安徽省生境质量时空演变特征[J]. *长江流域资源与环境*, 2020, 29(5): 1119-1127.
- WU N, CHEN H F, FENG C Y, et al. Spatio-temporal evolution characteristics of habitat quality based on land cover change in Anhui Province[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2020, 29(5): 1119-1127.
- [21] 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 J F, XU C D. Geodetector: Principle and perspective[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116-134.
- [22] 郭晖. 基于水沙置换的水土保持生态补偿研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- GUO H. Ecological compensation for soil and water conservation based on sediment and water replacement[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.
- [23] 郭彩霞, 韩致文, 李爱敏, 等. 库布齐沙漠生态治理与开发利用的典型模式[J]. *西北师范大学学报(自然科学版)*, 2017, 53(1): 112-118.
- GUO C Y, HAN Z W, LI A M, et al. The typical models of ecological management and development and utilization in the Hobq Desert[J]. *Journal of Northwest Normal University(Natural Science)*, 2017, 53(1): 112-118.
- [24] 包美丽, 韩静, 刘菲, 等. 内蒙古自治区退耕还林还草工程建设成效浅析[J]. *内蒙古林业调查设计*, 2023, 46(6): 13-15.
- BAO M L, HAN J, LIU F, et al. Effects of the project of returning farmland to forest and grassland in Inner Mongolia Autonomous Region[J]. *Inner Mongolia Forestry Investigation and Design*, 2023, 46(6): 13-15.
- [25] 雷金睿, 陈毅青, 陈宗铸, 等. 基于InVEST模型的海南岛三大流域生境质量时空演变[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(9): 2511-2520.
- LEI J R, CHEN Y Q, CHEN Z Z, et al. Spatiotemporal evolution of habitat quality in three basins of Hainan Island based on InVEST model[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(9): 2511-2520.
- [26] SONG S, LIU Z, HE C Y, et al. Evaluating the effects of urban expansion on natural habitat quality by coupling localized shared socioeconomic pathways and the land use scenario dynamics-urban model[J]. *Ecological Indicators*, 2020, 112: e106071.
- [27] TERRADO M, SABATER S, CHAPLIN K B, et al. Model development for the assessment of terrestrial and aquatic habitat quality in conservation planning[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 540(1): 63-70.
- [28] 祁迷, 王飞, 滑永春, 等. 基于PLUS与InVEST模型的内蒙古自治区土地利用变化及碳储量评估[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(6): 194-200.
- QI M, WANG F, HUA Y C, et al. Assessment of land use change and carbon storage in Inner Mongolia Autonomous Region based on PLUS and InVEST models[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(6): 194-200.
- [29] 李亚娇, 沈昕昕, 李家科, 等. 丹汉江流域生境质量对景观格局变化响应[J]. *环境科学与技术*, 2022, 45(5): 206-216.
- LI Y J, SHEN B X, LI J K, et al. Evolution and correlation analysis of habitat quality and landscape pattern in Dan-Hanjiang River basin[J]. *Environmental Science and Technology*, 2022, 45(5): 206-216.
- [30] 刘如龙, 赵媛媛, 陈国清, 等. 内蒙古黄河流域1990—2020年生境质量评估[J]. *干旱区研究*, 2024, 41(4): 674-683.
- LIU R L, ZHAO Y Y, CHEN G Q, et al. Assessment of habitat quality in the Yellow River basin in Inner Mongolia from 1990 to 2020[J]. *Arid Zone Research*, 2024, 41(4): 674-683.
- (上接第330页)
- [30] ELDRIDGE D J. Biological soil crusts and water relations in Australian Deserts[M]//*Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2001: 315-325.
- [31] 张慧妮, 王兵, 张宝琦, 等. 黄土丘陵区生物结皮对坡面流水动力特征的影响[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(2): 16-21.
- ZHANG H N, WANG B, ZHANG B Q, et al. Effects of biocrusts on hydrodynamic characteristics of slope flow in hilly regions of Loess Plateau[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(2): 16-21.
- [32] 彭诚, 王春振, 张帅普, 等. 基于判断矩阵和层次分析法的河网连通性评价[J]. *中国农村水利水电*, 2024(9): 38-44.
- PENG C, WANG C Z, ZHANG S P, et al. Evaluation of river network connectivity based on judgment matrix and analytic hierarchy process[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2024(9): 38-44.
- [33] PELLETIER J D. Fluvial and slope-wash erosion of soil-mantled landscapes: Detachment- or transport-limited? [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2012, 37(1): 37-51.