

黄河流域景观格局与生境质量时空演变及其相关性

李发明, 杨凯婷, 孙天明, 邵钰铭, 霍艳虹

(天津城建大学 建筑学院, 天津 300384)

摘要: [目的] 定量揭示1980—2023年黄河流域景观格局与生境质量的动态关联特征, 为区域生态安全屏障构建提供科学依据。[方法] 基于多期土地利用数据, 计算区域景观格局指数并评估生境质量, 结合Spearman秩相关与线性回归解析统计关联, 并运用双变量空间自相关揭示空间关联特征。[结果] (1) 1980—2023年景观格局呈阶段性演变, 1980—1995年趋向规整化与连通性增强, 1995—2023年转向异质化与破碎化, 空间呈现“中东高破碎, 西部低干扰”特征。(2) 生境质量均值呈阶梯式下降, 整体小幅降低且空间分异显著, 表现为“西高东低”格局, 低质区扩至3.76%而高质区缩至22.45%。(3) 景观格局与生境质量存在显著相关性, 生境质量与CONTAG, LPI呈显著正相关, 与PD, LSI, SHEI呈强负相关; 空间自相关揭示西部“高连通—高质量”与东部“高破碎—低质量”。[结论] 黄河流域整体生境质量持续退化, 遏制中东部景观破碎化, 提升核心斑块连通性是改善黄河流域生境质量的关键路径。

关键词: 黄河流域; 景观格局; 生境质量; InVEST模型; 相关性分析

中图分类号: X321

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)03-0386-10

Spatiotemporal evolution and correlation of landscape pattern and habitat quality in Yellow River Basin

Li Faming, Yang Kaiting, Sun Tianming, Shao Yuming, Huo Yanhong

(School of Architecture, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China)

Abstract: [Objective] This study aims to quantitatively reveal the dynamic correlation characteristics between landscape pattern and habitat quality in the Yellow River Basin from 1980 to 2023, thereby providing a scientific basis for constructing a regional ecological security barrier. [Methods] Based on multi-period land use data, regional landscape pattern indices were calculated and habitat quality was evaluated. The statistical relationships were analyzed using Spearman's rank correlation and linear regression, and the spatial correlation characteristics were revealed using bivariate spatial autocorrelation. [Results] (1) The landscape pattern showed a phased evolution from 1980 to 2023. From 1980 to 1995, it tended towards regularization and enhanced connectivity, while from 1995 to 2023, it shifted towards heterogeneity and fragmentation. Spatially, it presented a spatial pattern of “high fragmentation in the central and eastern parts, and low disturbance in the west”. (2) The average value of habitat quality showed a stepwise decline, with a slight overall decrease and significant spatial heterogeneity, showing a pattern of “high in the west and low in the east”. The area of low-quality habitats expanded to 3.76%, while that of high-quality habitats shrank to 22.45%. (3) A significant correlation was observed between landscape pattern and habitat quality. Habitat quality showed a significant positive correlation with CONTAG and LPI, and a strong negative correlation with PD, LSI, and SHEI. Spatial autocorrelation

收稿日期: 2025-06-22

修回日期: 2025-07-15

接受日期: 2025-07-26

资助项目: 教育部人文社会科学研究一般项目“数字人文视域下大运河文化基因智能解析与景观规划协同机制研究”(25YJAZH069)

第一作者: 李发明(1985—), 男, 辽宁辽阳人, 博士, 讲师, 硕士研究生导师, 研究方向: 景观数字技术及其应用、文旅景观规划设计。E-mail: lifaming_laphd@tju.edu.cn

通信作者: 霍艳虹(1980—), 女, 河北唐山人, 博士, 副教授, 硕士研究生导师, 研究方向: 文化景观遗产保护。E-mail: huor2000@126.com

<https://stbcjy.publish.founderss.cn>

revealed a pattern of “high connectivity-high quality” in the west and “high fragmentation-low quality” in the east. [Conclusion] The overall habitat quality in the Yellow River Basin has been continuously degrading. Controlling landscape fragmentation in the central and eastern regions and enhancing the connectivity of core patches are key pathways for improving habitat quality in the Yellow River Basin.

Keywords: Yellow River Basin; landscape pattern; habitat quality; InVEST model; correlation analysis

随着国家“黄河流域生态保护与高质量发展”战略的深入推进,强化重点生态功能区环境保护刚性约束,已成为筑牢区域生态安全屏障的核心命题^[1]。然而,我国在快速城市化进程中,湿地萎缩、生物栖息地破碎化等问题日益凸显,导致自然景观基底呈现破碎化发展趋势,这种空间异质性演变不仅削弱了生态连通性,更对生物栖息环境的完整性构成了系统性风险^[2-3]。在此背景下,深入探究景观格局与生境质量之间的定量关系,不仅是理解区域生态环境演变机制的关键,更是提升生态环境质量、支撑科学决策的迫切需求。景观格局是景观中各类要素的空间排列与组合形式,既是自然与人为作用的结果,也是影响生态过程和生物多样性的关键。当前研究主要通过量化景观指数,分析研究区域不同时期的变化,为土地利用规划和生态修复提供重要的科学依据和决策支持^[4-5]。

生境质量体现生态系统支撑生物生存的适宜性水平,是维系生物多样性存续的核心要素。随着空间信息技术的发展,以InVEST模型为核心的评价体系通过整合遥感反演数据与GIS空间分析技术^[6],在提升多源数据兼容性、量化生境退化程度以及增强结果空间可视化方面展现出显著优势,现已成为流域尺度生境质量评估的主流范式^[7-8]。现有研究表明^[9-10],景观格局变化对生境质量有显著影响。作为生境质量的物质空间载体,景观格局的空间异质性可通过破碎度、分离度及多样性等指数实现定量表征,进而揭示区域生态环境质量演变规律。然而,当前多数研究侧重于静态格局描述或特定时点的单一分析,缺乏从长时间序列维度系统揭示二者空间关联特征的动态演变规律;研究多聚焦于黄河流域局部典型区域^[11],对全流域尺度景观格局与生境质量协同演变规律及其内在关联的整体性解析不足。

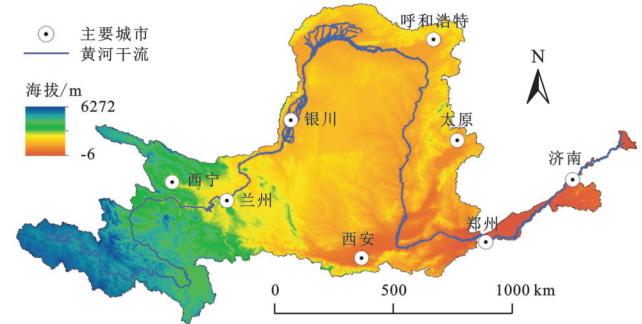
黄河流域作为我国重要的生态屏障与经济发展带,由于人类活动的过度干扰,导致黄河流域的植被破坏严重,该地区的生态环境受到巨大挑战^[12]。本研究以黄河流域整体为对象,旨在构建融合时空维度的分析框架,系统解析1980—2023年流域景观格局与生境质量的时空变化趋势及其相关性。研究综合运用景观格局指数、InVEST模型、Spearman秩相

关性分析、线性拟合分析以及双变量空间自相关分析等方法。研究成果不仅对深化流域生态演变机理认知、优化生态安全格局具有重要理论价值,更能为黄河流域生物多样性保护、生态环境质量提升及国土空间精细化治理提供科学依据和决策支持。

1 研究区域及方法

1.1 研究区概况

黄河是中国第二大河流,位于 32° — 42° N, 96° — 119° E(图1),其流域面积约79.5万 km^2 ,地理范围广阔,地形地貌复杂多样,自西向东依次跨越青藏高原、黄土高原和华北平原三大地貌阶梯^[12]。这种显著的地形梯度和复杂的地貌结构,不仅塑造了流域内异质性极强的景观格局,也为多样化的生态系统和生境提供了基础物理框架。黄河流域作为国家重大战略区域,其生态屏障功能至关重要。然而,该区域内高强度的人类活动,导致天然植被斑块破碎化、湿地萎缩等显著变化,这些景观格局的负面演变趋势直接威胁着区域生境质量。



注:基于标准地图服务系统下载的标准图号GS(2016)2935号的标准地图制作,底图未做修改,下图同。

图1 研究区示意图

Fig. 1 Schematic diagram of study area

1.2 数据来源

文中1980—2023年土地利用数据选取自中国多时期土地利用遥感监测数据集(China National Land Use/Cover Change, CNLUCC),数据来源于资源环境科学数据注册与出版系统(<https://www.resdc.cn>),空间分辨率为1 km,根据研究需要及具体分类标准将其整合为耕地、林地、草地、水域、建设用地及未利用土地6类。研究区域的边界数据来源于黄河

数据中心(<https://www.huanghe.ac.cn/>)。将上述数据坐标统一为Krasovsky_1940_Albers。

1.3 研究方法

1.3.1 景观格局指数选取及计算 结合研究区的实际景观特征进行分析^[13-15],本研究选取斑块密度(Patch Density, PD)、最大斑块指数(Largest Patch Index, LPI)、景观形状指数(Landscape Shape Index, LSI)、蔓延度指数(Contagion Index, CONTAG)和香农均匀度指数(Shannon Evenness Index, SHEI)作为区域景观格局的表征指标基于ArcGIS 10.8与Fragstats 4.2软件平台,得出不同年份的各景观格局指数以及空间分布图。

1.3.2 生境质量评估 本研究使用InVEST 3.2.0软件的生境质量(Habitat Quality,后文中简称为HQ)模块评估区域生境质量,具体计算公式如下:

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

$$D_{xj} = \sum_{r=1}^R \sum_{y=1}^{Y_r} \left(\frac{W_r}{\sum_{r=1}^R W_r} \right) r_y i_{rxy} \beta_x S_{jr} \quad (2)$$

$$i_{rxy} = 1 - \left(\frac{d_{xy}}{d_{rmax}} \right) \quad (\text{线性衰减}) \quad (3)$$

$$i_{rxy} = \exp\left(\frac{-2.99d_{xy}}{d_{rmax}}\right) \quad (\text{指数衰减}) \quad (4)$$

式中:Q_{xj}为土地利用j中栅格x的生境质量指数;H_j为生境类型j的生境适宜度,取值范围0~1;k为半饱

和常数,一般为生境退化度最大值的一半;z为归一化常量,通常设置为2.5;D_{xj}为土地利用j中栅格单元x的生境退化度;R为威胁源总数;Y_r为威胁源r的栅格单元总和;W_r为威胁源r的权重;r_y为威胁源r在栅格y上的强度;β_x为栅格单元x的可达性水平;S_{jr}为土地利用j对威胁源r的相对敏感性;i_{rxy}为栅格相对于威胁源r从栅格单元y到目标栅格单元x的距离衰减效应;d_{xy}为威胁源栅格y到目标栅格x的直线距离;d_{rmax}为威胁源r的最大影响距离。

研究表明^[16-19],区域生态系统受人类干扰程度与土地利用类型存在显著相关性。高强度开发区域对周边生物多样性的负面效应呈现空间扩散特征,其中人工建成环境普遍缺乏自然栖息地维持功能,降低周边生境质量;而林地草地等自然覆被区则呈现正向生态调节能力。本研究选取耕地、城镇用地、农村居民点、其他建设用地、未利用地为生境威胁因子,确定威胁因子、最大影响距离、权重、衰减类型,以及地类生境适宜性和威胁因子敏感性,如表1,2所示。

表 1 生境威胁因子的影响范围及其权重
Table 1 Influence ranges and weights of habitat threat factors

威胁因子	影响范围	权重	距离衰减方式
耕地	6	0.6	线性
城镇用地	10	1	指数
农村居民点	8	0.8	指数
其他建设用地	9	0.9	指数
未利用地	4	0.4	线性

表 2 生境适宜度及其对不同威胁因子的相对敏感程度

Table 2 Habitat suitability and its relative sensitivity to different threat factors

地类	生境适宜度	耕地	城镇用地	农村居民点	其他建设用地	未利用地
耕地	0.3	0	0.8	0.6	0.7	0.4
林地	1	0.6	0.8	0.7	0.7	0.3
草地	0.8	0.5	0.7	0.5	0.6	0.4
水域	0.9	0.4	0.7	0.6	0.7	0.2
建设用地	0	0	0	0	0	0
未利用地	0.3	0.4	0.6	0.5	0.6	0

1.3.3 统计分析 Spearman秩相关分析原理是将两个变量的原始观测值分别独立地按大小升序排列,赋予每个观测值相应的秩次,然后进行计算这两个秩次变量之间的相关系数。本研究采用Origin 2021对景观格局指数与生境质量平均值进行相关性分析,绘图并计算Spearman秩相关系数r_s,计算公式如下:

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (5)$$

式中:r_s为斯皮尔曼秩相关系数,-1≤r_s≤1;n为样本

数量;i为随机取的第i个值,1≤i≤n;d_i为第i对观测值在两个变量上的秩次之差。

线性拟合分析基于最小二乘法原理,给定一组观测数据点(x, y),该方法旨在寻找一条形式为y=ax+b的直线,使得所有数据点的残差平方和最小化,通过该优化过程确定的参数a和b分别代表拟合直线的斜率和截距。本研究采用Origin 2021对景观格局指数与生境质量平均值进行线性拟合分析,量化景观格局指数对生境质量平均值的影响。

1.3.4 双变量空间自相关 双变量空间自相关分析

用于探测两个地理要素在空间上的关联模式。本研究基于 12 km×12 km 网格单元构建空间权重矩阵,采用 GeoDA 软件进行该分析,旨在揭示景观格局指数与生境质量之间的空间相关性及其集聚特征。具体计算公式如下:

$$\text{Global Moran's } I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} \sum_{i=1}^n (\bar{x}_i - x)^2} \quad (6)$$

$$\text{Local Moran's } I = Z_i \sum_{i \neq j} W_{ij} Z_j \quad (7)$$

式中: n 为空间单元总数; I 为双变量全局 Moran's I 指数; W_{ij} 为空间单元 i, j 的空间权重矩阵; x_i, x_j 为空间单元 i, j 的观测值; Z_i 和 Z_j 均为标准形式的检验统计量。全局 Moran's I 值域为 $[-1, 1]$,正值指示空间集聚,负值指示空间离散,零值指示空间随机分布。局部分析通过 Z 检验生成 LISA 集聚图。其中“高一高”型反映景观指数优势区与生境优质区的空间协同,

“低—低”型表征双低值区的空间聚集,“高一低”和“低—高”型则揭示了要素间的空间梯度分异规律^[20]。

2 结果与分析

2.1 景观格局时空演变特征

如图 2 所示,1980—2023 年整体上,PD 上升 6.29%,LPI 下降 3.34%,LSI 上升 2.37%,SHEI 上升 2.69%,CONTAG 下降 6.07%。并且景观格局指数随时间变化可分为两个阶段。1980—1995 年 PD, LSI 和 SHEI 均呈下降趋势,而 LPI 和 CONTAG 则有所上升,景观趋于规整、优势斑块地位增强,同时人类活动干扰造成的景观破碎化与形状复杂化程度相对较低。1995—2023 年则相反,受加速推进的城镇化、工业化进程驱动,建设用地快速扩张并呈现分散化、边缘化侵占特征,PD, LSI, SHEI 转为持续上升,LPI 和 CONTAG 则持续下降,景观形状的复杂性与斑块类型的空间分布均匀性提升,致使景观整体趋向于异质化和破碎化。

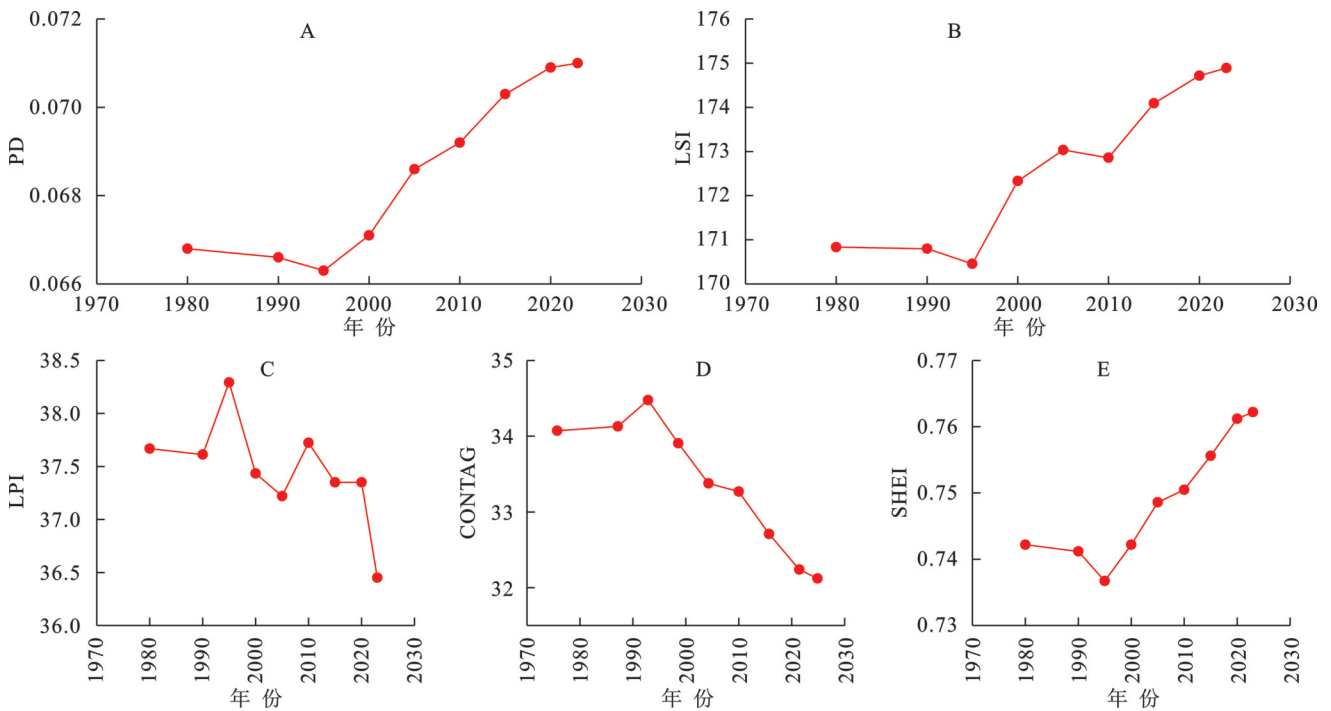


图 2 1980—2023 年研究黄河流域景观格局指数变化

Fig. 2 Changes in landscape pattern indices in Yellow River Basin (1980—2023)

如图 3 所示(选取部分年份展示),在空间上 PD 表现为“西部低、中部东部高”,特别是在内蒙古巴彦淖尔市南部、陕西省北部、山东省济南市等地形成高值集聚区,反映出该区域景观破碎化程度高、人类活动密集;LPI 与 PD 呈现互补格局空间,在青海省、内蒙古鄂尔多斯市、山西省南部、陕西省南部维持较高值,表明景观相对连续、受干扰较小。LSI 和 SHEI,两者空间格局相似,均表现为“中部高、四周低”。LSI 和

SHEI 的高值核心区集中于陕西北部、甘肃南部等地,显示斑块形态复杂、类型多样、受干扰影响大;其低值区则多位于黄河流域西部和北部,如青海省、甘肃省兰州市白银市、宁夏中卫市吴忠市、内蒙古鄂尔多斯市、山西省南部,表明景观形态规则、边界简单,优势用地类型单一,生态稳定性较高。CONTAG 高值区主要分布在甘肃省中部、宁夏中部、陕西省和山西省南部的汾渭平原,反映景观连通性好、斑块聚集度高;

低值区则位于区域西部、北部及山西省、陕西省中部, 表明斑块分布分散, 缺乏主导性连续斑块。

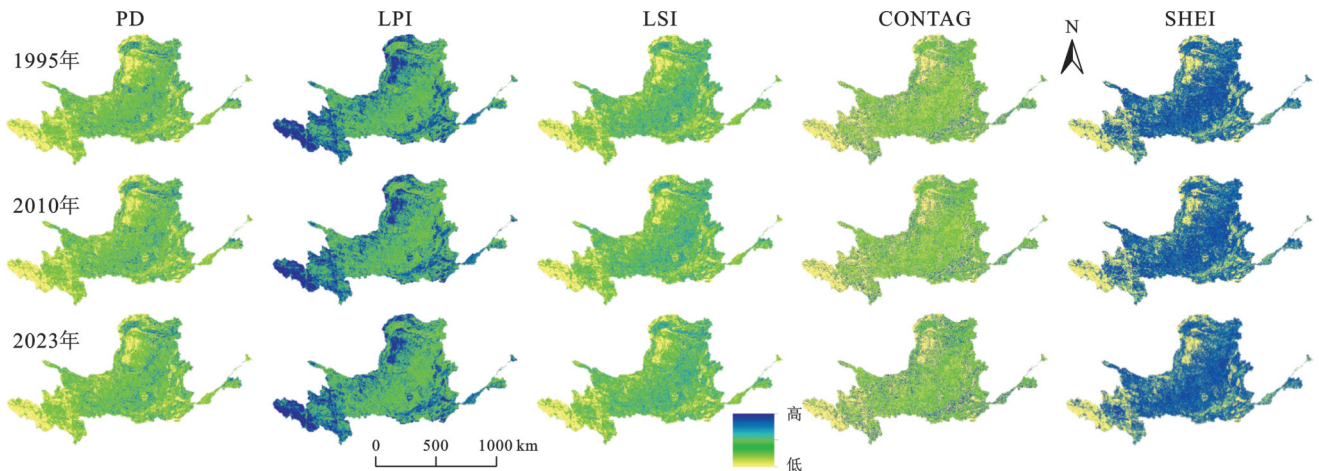


图 3 1980—2023年黄河流域景观格局空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of landscape pattern in Yellow River Basin (1980—2023)

2.2 黄河流域生境质量时空演变特征

研究结果显示如图 4 所示, 各时期空间分布格局具有显著一致性, 生境质量平均值呈现小幅下降趋势, 1980—2023 年未发生剧烈突变, 说明近 30 年黄河流域生境质量整体趋势较为稳定。流域生境质量呈现典型的三阶段阶梯式下降态势, 初期 1980—2000 年下降, 中期 2000—2010 年趋于平稳, 后期 2010—2023 年再次下降。

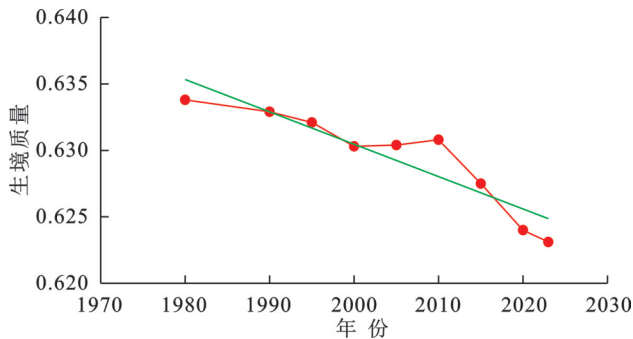


图 4 1980—2023 年黄河流域生境质量平均值

Fig. 4 Average habitat quality in Yellow River Basin (1980—2023)

基于 1980—2023 年的生境质量数据, 对黄河流域进行空间制图分析(图 5)。参考已有研究的分级标准, 将生境质量指数(0~1)划分为 5 个等级: 低(0~0.2)、较低(0.2~0.4)、中(0.4~0.6)、较高(0.6~0.8)和高(0.8~1)。从空间分布上看, 黄河流域空间分异特征表现为显著的东西梯度差异。其中西部优势区主要以较高(0.6~0.8)和高值(0.8~1)为主, 主要分布在黄河源区、秦岭、太行山区等地区, 以林草植被为主且人类活动强度较低; 中部过渡带其生境质量呈环状分布特征, 中心区为低至中等值(0.2~0.6), 外围以低值(0~0.2)为主; 东部低值区域作为主要农耕区, 集中分布于黄河中下游平原, 建设用地占

高, 人类活动干扰显著。

通过生境质量平均值和各质量等级生境在不同年份所占的比例发现(表 3), 较高及高等级生境质量区面积占比持续超过流域总面积的 50%, 表明该流域整体生境质量保持较高水平。各质量等级生境在不同年份所占的比例表现为“低质扩张—中带收缩—高质微降”的演变模式, 低质量区占比从 2.12% 显著增至 3.76%, 高质量区占比由 23.12% 降至 22.75%, 而中间过渡等级区域占比由 74.76% 降至 73.79%。

2.3 景观格局与生境质量统计相关性分析

基于 1980—2023 年数据, 综合 Spearman 秩相关分析和线性回归分析结果, 系统揭示了景观格局指数与生境质量的关联特征(图 6—7)。两项分析结论一致, 生境质量与 PD, LSI, SHEI 均呈显著负相关, 而与 CONTAG 呈显著正相关; LPI 与生境质量呈现中度正相关。

PD 与生境质量呈强负相关($\rho = -0.867, p = 0.002$), 线性回归拟合度达 79% ($R^2 = 0.79$), 表明斑块数量增加显著削弱生境质量。LSI 呈现强负相关($\rho = -0.883, p = 0.002$)和高解释力度($R^2 = 0.84$), 证实景观边界复杂性升高抑制生境质量。CONTAG 与生境质量呈强正相关($\rho = 0.867, p = 0.002$), 其线性模型拟合度最高($R^2 = 0.86$), 凸显景观连通性对生境维持的核心作用。SHEI 的显著负相关($\rho = -0.828, p = 0.006, R^2 = 0.83$)反映斑块类型均匀化不利于生境保育。LPI 显示中度正相关($\rho = 0.750, p = 0.020$), 但拟合度呈中等水平($R^2 = 0.48$), 提示优势斑块规模扩大的促进效应较弱。

Spearman 分析进一步显示景观指数间的系统性联动, PD 与 LSI, SHEI 高度正相关, 而与 CONTAG

强负相关;CONTAG 与 LSI, SHEI 呈强负相关;LSI 与 SHEI 强正相关。这表明斑块密度增加会同步引

发景观形状复杂化和类型分布均匀化,同时削弱景观聚集度与核心生境规模。

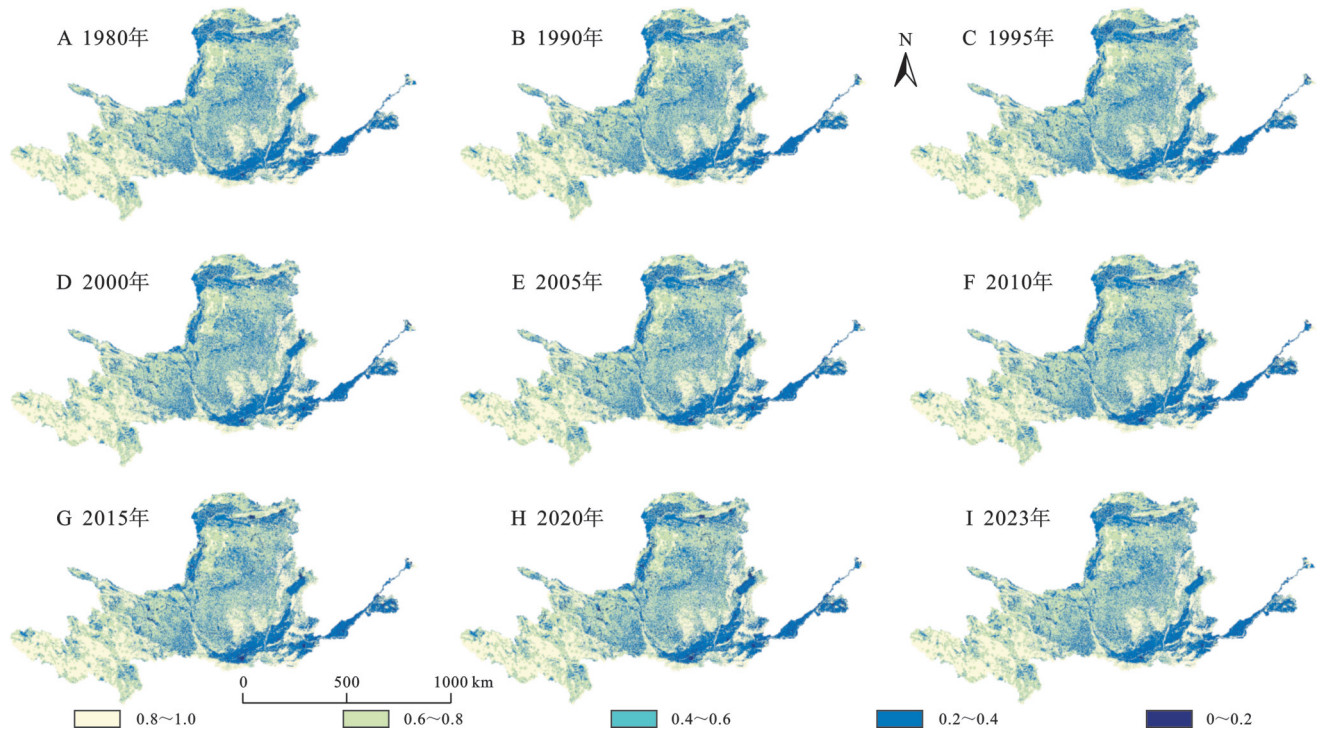


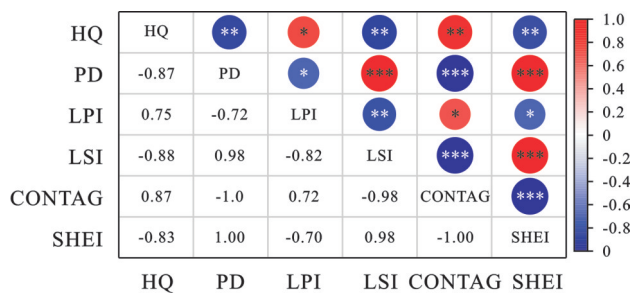
图 5 1980—2023 年黄河流域生境质量空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of habitat quality in Yellow River Basin (1980—2023)

表 3 各质量等级生境在不同年份所占的比例

Table 3 Proportions of habitats of different quality grades in different years

等级	生境质量指数	1980年	1990年	1995年	2000年	2005年	2010年	2015年	2020年	2023年
低	0.0~0.2	2.12	2.19	2.31	2.36	2.53	2.72	3.15	3.62	3.76
较低	0.2~0.4	33.94	33.99	33.83	34.13	33.89	33.43	33.08	32.77	32.64
中等	0.4~0.6	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.05	0.06	0.07
较高	0.6~0.8	40.81	40.78	40.92	40.68	40.60	40.79	40.78	40.83	41.08
高	0.8~1.0	23.12	23.03	22.93	22.81	22.96	23.03	22.94	22.72	22.45



注:右上区域为气泡图,气泡越大越相关。颜色越红越正相关,颜色越蓝越负相关。气泡上的*号是显著性标签,*($p < 0.05$),**($p < 0.01$),***($p < 0.001$)表示显著差异。左下角的区域为相关性(ρ)的大小。

图 6 景观格局指数与生境质量平均值的 Spearman 秩相关分析

Fig. 6 Spearman's rank correlation analysis between landscape pattern indices and average value of habitat quality

2.4 景观格局与生境质量空间关联分析

2.4.1 景观格局与生境质量空间相关性分析 如图 8 所示,研究区内景观格局指数与生境质量存在显著

的空间关联。LPI 与生境质量的 Moran's I 值为正,说明 LPI 与生境质量为正相关;而 PD, LSI, SHEI 和 CONTAG 与生境质量的 Moran's I 值均为负,表明 PD, LSI, SHEI 与生境质量为负相关。各景观指数与生境质量 Moran's I 绝对值的平均关联强度存在差异。其中,CONTAG 的相关性最为显著,其次是 PD, SHEI 和 LPI,而 LSI 的相关性最弱。从时间跨度看,1980—2023 年各景观格局指数与生境质量的相关性整体保持稳定。

2.4.2 景观格局与生境质量空间聚类分析 由图 9 可知(选取部分年份展示),黄河流域四周景观格局指数与生境质量具有显著的空间聚集特征,研究区域中部地区无显著相关性。高 PD、低 LPI、高 LSI、高 CONTAG、高 SHEI 以及高生境质量的聚集区主要分布在果洛藏族自治州玛沁县,甘肃省甘南藏族自治州合作市、陕西省延安市南部,土地用

地类型多为林地和草地;低 PD、高 LPI、低 LSI、低 CONTAG、低 SHEI 以及低生境质量的聚集区主要分布在河南省新乡市、陕西省西安市、山西省运城市 and 河南省新乡市附近,土地用地类型多为耕地和建设用地;低 PD、高 LPI、低 LSI、低 CONTAG、低 SHEI 以及高生境质量的聚集区主要分布在青海省

东南部,土地用地类型多为草地;高 PD、低 LPI、高 LSI、高 CONTAG、高 SHEI 以及低生境质量的聚集区主要分布在内蒙古巴彦淖尔市南部,陕西省榆林市,甘肃省天水市、陕西省西安市、山西省运城市以及黄河流域东部城市群,土地用地类型多为耕地和建设用地。

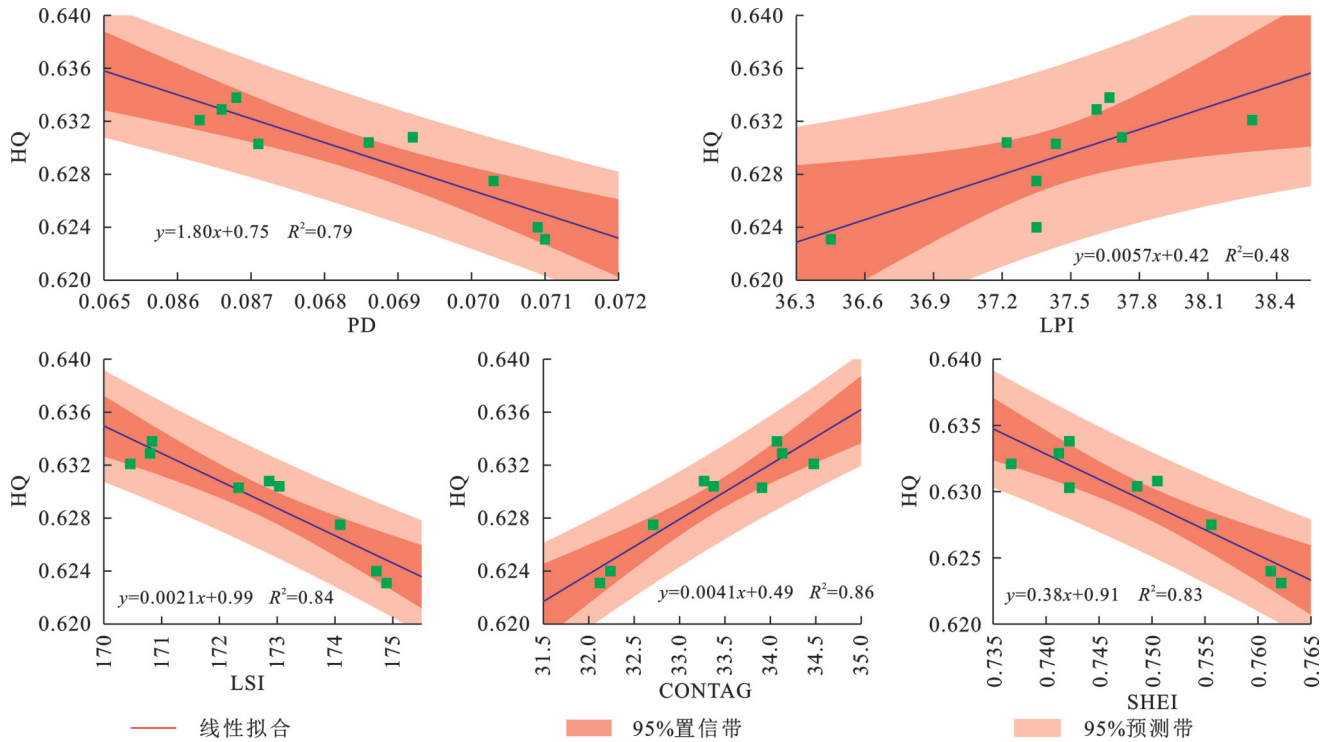


图 7 景观格局指数与生境质量平均值的线性关系

Fig. 7 Linear relationship between landscape pattern indices and average value of habitat quality

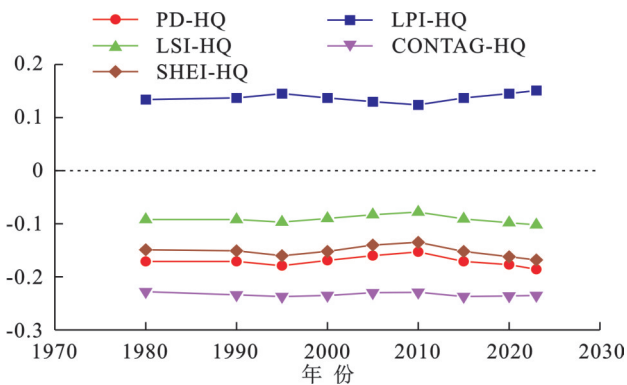


图 8 1980—2023 年黄河流域景观格局与生境质量的 Moran's I

Fig. 8 Moran's I of landscape pattern and habitat quality in Yellow River Basin (1980—2023)

3 讨论

3.1 黄河流域景观格局时空变化分析

近 40 年黄河流域景观格局呈现波动性演变特征,其时空变化可划分为两个差异化阶段。1980—1995 年景观单一化趋势显著,表现为 PD, LSI 与 SHEI 降低, LPI 和 CONTAG 上升,表明该阶段景观

趋向均质化和连通性增强。这与黄河流域景观格局研究结论基本一致^[21]。此变化主要受农业政策驱动以及大规模防护林工程建设影响,导致耕地规整化、大型植被斑块扩展,从而降低了景观破碎度与形状复杂度,提升了优势斑块的控制力和整体连接性。1995—2023 年则转向破碎化与多样化并存格局, PD, LSI, SHEI 持续上升而 LPI, CONTAG 下降,反映出景观破碎化加剧、斑块形状趋于复杂、类型分布更趋均匀,同时优势斑块控制力减弱且景观连通性下降。这一阶段的变化主要源于经济快速发展驱动下的高强度土地利用,2019 年“黄河流域生态保护与高质量发展”战略的提出,一定程度上维持了景观格局的稳定,但城市群的扩张破坏区域景观连贯性仍加剧了景观格局的破碎化。

3.2 黄河流域生境质量时空变化分析

1980—2023 年黄河流域生境质量较好,但整体呈小幅下降的趋势,呈现西高东低空间特征。这与前人研究结论基本一致^[22-24]。研究区域生境质量变化可分为 1980—2010 年,2010—2023 年两个主要下

降阶段,1980—2000年持续平缓下降,2000—2010年未出现明显波动,2010—2023年重现下降现象。这

一变化与不同阶段的国家政策导向、生态治理力度及土地利用模式密切相关。

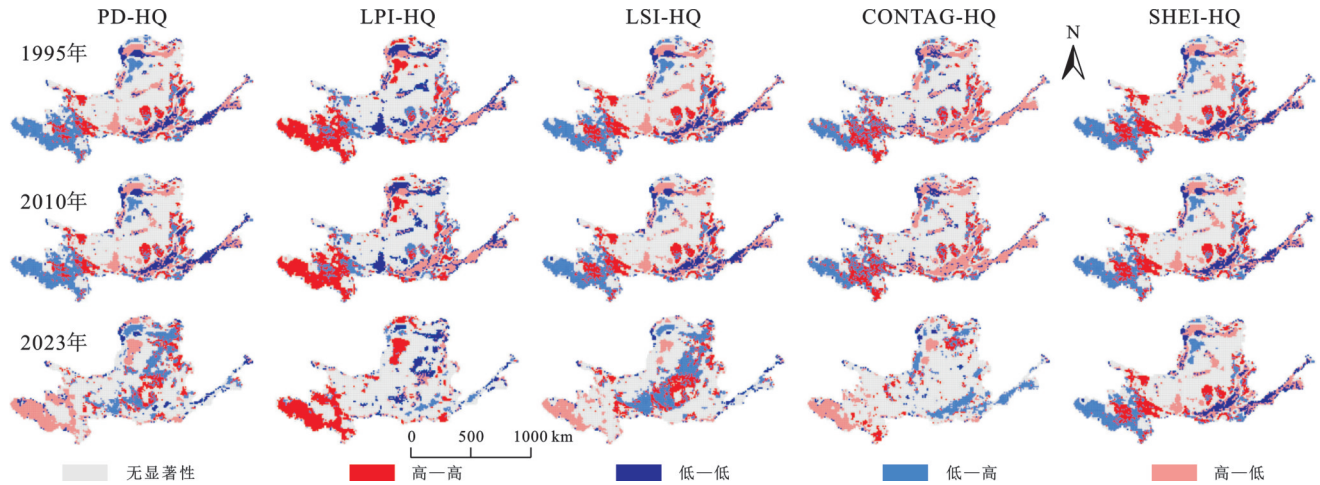


图9 1980—2023年黄河流域景观格局与生境质量LISA图

Fig. 9 LISA maps of landscape pattern and habitat quality in Yellow River Basin (1980—2023)

1980—2000年缓慢下降期,反映政策以经济优先发展为基调,黄河流域资源开发强度显著增加。上游青藏高原的过度放牧和矿产开采导致草地退化,中游黄土高原水土流失治理政策缺失而沟壑扩张,下游华北平原的城市无序扩张与农业灌溉则挤占湿地、加剧土壤盐碱化。2000—2010年平稳期,生态保护意识增强,退耕还林还草工程在中游黄土高原推广,植被覆盖率提升,入黄泥沙量减少,局部生态有所恢复。2010—2023年下降期,尽管“黄河流域生态保护与高质量发展”于2019年上升为国家战略,但流域内工业化、城市化与生态保护的矛盾进一步激化。上游因草场沙化、湿地萎缩等过度开发导致生态脆弱性加剧;中游面临水土流失、工业与农业面源污染及城镇化扩张引发的生态破碎化;下游则因城市扩张水资源过度利用导致湿地萎缩与生态流量不足。全流域普遍存在跨区域协同不足、人类活动与生态承载力矛盾、生态基础研究薄弱等问题。

3.3 黄河流域景观格局与生境质量的相关性分析

黄河流域生境质量与景观格局存在显著相关性^[7-8],黄河流域1980—2023年两类要素的空间关联强度呈弱化趋势。流域西部主要为高LPI、低PD、高CONTAG、低LSI、低SHEI、高生境质量的聚集特征,西部以高原、山地为主,地形复杂,开发难度大,人类活动干扰较少,保留了连续的自然植被,形成大面积自然斑块。流域东部主要为低PD、高LPI、高CONTAG、低LSI、低SHEI、低生境质量的聚集特征,东部为平原人口密集区,城市化、农业开发导致自然生境被单一化人工景观替代,形成连片的大斑块,生物多样性丧失,生境质量下降。

4 结论

(1) 景观格局呈现阶段性演变,1980—1995年景观趋向规整化与连通性增强,PD, LSI, SHEI下降, LPI, CONTAG上升;1995—2023年景观整体趋向于异质化和破碎化,PD, LSI, SHEI持续上升, LPI, CONTAG下降,空间上呈现“中东部高破碎,西部低干扰”的分异特征。

(2) 生境质量平均值呈阶梯式下降,1980—2023年整体小幅下降,分三个阶段演变,1980—2000年缓慢下降1.37%,2000—2010年趋稳,2010—2023年再次下降1.30%。生境质量空间分异显著,表现为“西高东低”的梯度格局,低质生境区扩张至总面积的3.76%,高质区缩减至总面积的22.45%。

(3) 景观格局与生境质量存在强相关性。生境质量与CONTAG, LPI呈显著正相关,与PD, LSI, SHEI呈强负相关。双变量空间自相关揭示西部主要形成“高LPI-高生境质量”协同集聚区;东部平原城市群呈现“高PD-低生境质量”退化单元,反映自然连通性与人类干扰的拮抗效应。

参考文献(References):

- [1] 致公党中央环境与可持续发展委员会,高吉喜,冯朝阳.关于“建设内蒙古北方生态安全屏障,保障国家生态安全”的调研报告[J].中国发展,2024,24(1):65-70. Environment Sustainable Development Committee of China Zhigong Party, Gao J X, Feng Z Y. Investigation report on “the construction of northern ecological SecurityBarrier in Inner Mongolia to ensure national ecological security”[J]. China Development, 2024,24(1):65-70.
- [2] 陆大道,孙东琪.黄河流域的综合治理与可持续发展

- [J]. 地理学报, 2019, 74(12): 2431-2436.
- Lu D D, Sun D Q. Development and management tasks of the Yellow River Basin: a preliminary understanding and suggestion [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(12): 2431-2436.
- [3] 吴岚, 周忠发, 张露, 等. 喀斯特地区景观格局变化对生境质量的响应[J]. *环境科学与技术*, 2023, 46(9): 206-217.
- Wu L, Zhou Z F, Zhang L, et al. Response of landscape pattern change to habitat quality in karst area [J]. *Environmental Science & Technology*, 2023, 46(9): 206-217.
- [4] 李彤辉, 韩素波, 李强, 等. 京津冀县域景观格局演进对国土空间生态效率的影响研究[J]. *地理与地理信息科学*, 2025, 41(04): 35-43.
- Li T H, Han S B, Li Q, et al. Impact of county-level landscape pattern evolution on ecological efficiency of land space in the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2025, 41(04): 35-43.
- [5] 罗赵慧, 王一超, 朱璐平, 等. 粤港澳大湾区景观格局演变及其对生态系统服务价值影响[J]. *生态科学*, 2025, 44(03): 40-50.
- Luo Z H, Wang Y C, Zhu L P, et al. Spatiotemporal variation of landscape pattern and the impacts on ecosystem service in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. *Ecological Science*, 2025, 44(03): 40-50.
- [6] Berta Aneseyee A, Noszczyk T, Soromessa T, et al. The InVEST habitat quality model associated with land use/cover changes: a qualitative case study of the winike watershed in the omo-gibe basin, southwest Ethiopia [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(7): 1103.
- [7] 刘永婷, 杨钊, 徐光来, 等. 基于MGWR模型的皖江城市带生境质量对城镇化的响应研究[J]. *地理科学*, 2023, 43(2): 280-290.
- Liu Y T, Yang Z, Xu G L, et al. Impacts of urbanization on habitat quality using MGWR models in Wanjiang City Belt [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2023, 43(2): 280-290.
- [8] 王彤, 易桂花, 张廷斌, 等. 西南三江流域生境质量时空格局及其地形梯度效应[J]. *水土保持研究*, 2023, 30(5): 306-314.
- Wang T, Yi G H, Zhang T B, et al. Spatial and temporal pattern of habitat quality and its topographic gradient effect in the three-river basin of southwest China [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(5): 306-314.
- [9] 刘书雅, 张安兵, 王贺封, 等. 华北平原生境质量与景观格局时空演变及预测[J]. *西北林学院学报*, 2025, 40(2): 236-250.
- Liu S Y, Zhang A B, Wang H F, et al. Spatio-temporal evolution and prediction of habitat quality and landscape pattern in the North China Plain [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2025, 40(2): 236-250.
- [10] 胡露瑶, 代俊峰, 郑文俊, 等. 基于InVEST模型的漓江流域景观格局及生境质量时空演变分析[J]. *广西科*
- 学, 2024, 31(6): 1156-1167.
- Hu L Y, Dai J F, Zheng W J, et al. Spatiotemporal evolution analysis of landscape pattern and habitat quality in the Lijiang River Basin based on the InVEST model [J]. *Guangxi Sciences*, 2024, 31(6): 1156-1167.
- [11] 张莹莹, 马紫嫣, 余楠, 等. 黄河流域(河南段)生境质量时空演变特征及驱动力研究[J]. *灌溉排水学报*, 2025, 44(6): 89-98.
- Zhang Y Y, Ma Z Y, Yu N, et al. Spatiotemporal variations in habitat quality and their determinants in the Henan Section of the Yellow River Basin [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2025, 44(6): 89-98.
- [12] 李曼, 吴东丽, 何昊, 等. 1990—2020年黄河流域碳储量时空演变及驱动因素研究[J]. *生态环境学报*, 2025, 34(3): 333-344.
- Li M, Wu D L, He H, et al. Spatio-temporal evolution and driving factors of carbon storage in the Yellow River Basin from 1990 to 2020 [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2025, 34(3): 333-344.
- [13] Hu C Y, Wu W, Zhou X 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: 110211.
- [14] Hu J Y, Zhang J X, Li Y Q. Exploring the spatial and temporal driving mechanisms of landscape patterns on habitat quality in a city undergoing rapid urbanization based on GTWR and MGWR: the case of Nanjing, China [J]. *Ecological Indicators*, 2022, 143: 109333.
- [15] Medeiros A, Fernandes C, Gonçalves J F, et al. A diagnostic framework for assessing land-use change impacts on landscape pattern and character: a case-study from the Douro region, Portugal [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2022, 228: 104580.
- [16] 赵建吉, 刘岩, 朱亚坤, 等. 黄河流域新型城镇化与生态环境耦合的时空格局及影响因素[J]. *资源科学*, 2020, 42(1): 159-171.
- Zhao J J, Liu Y, Zhu Y K, et al. Spatiotemporal differentiation and influencing factors of the coupling and coordinated development of new urbanization and ecological environment in the Yellow River Basin [J]. *Resources Science*, 2020, 42(1): 159-171.
- [17] 褚琳, 张欣然, 王天巍, 等. 基于CA-Markov和InVEST模型的城市景观格局与生境质量时空演变及预测[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(12): 4106-4118.
- Chu L, Zhang X R, Wang T W, et al. Spatial-temporal evolution and prediction of urban landscape pattern and habitat quality based on CA-Markov and InVEST model [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(12): 4106-4118.
- [18] 潘耀, 尹云鹤, 侯文娟, 等. 基于土地利用及植被覆盖变化的黄河源区生境质量时空变化特征[J]. *生态学报*,

- 2022,42(19):7978-7988.
- Pan Y, Yin Y H, Hou W J, et al. Spatiotemporal variation of habitat quality in the Source Region of the Yellow River based on land use and vegetation cover changes[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022,42(19):7978-7988.
- [19] 袁文华,范文君,李建春,等.黄河流域典型县域生境质量的时空分异特征及影响因素研究[J].*生态与农村环境学报*,2024,40(5):622-633.
- Yuan W H, Fan W J, Li J C, et al. Research on the spatiotemporal differentiation characteristics and influencing factors of ecological quality in typical counties in the Yellow River Basin [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2024,40(5):622-633.
- [20] 廖凌云,鲁贝,曹越.环武夷山国家公园景观格局与生境质量的时空动态变化及空间关联分析[J].*中国园林*,2023,39(12):21-27.
- Liao L Y, Lu B, Cao Y. Spatial and temporal dynamics and spatial correlation analysis of landscape pattern and habitat quality surrounding Wuyishan National Park [J]. *Chinese Landscape Architecture*, 2023,39(12):21-27.
- [21] 刘希朝,李效顺,蒋冬梅.基于土地利用变化的黄河流域景观格局及生态风险评估[J].*农业工程学报*,2021,37(4):265-274.
- Liu X Z, Li X S, Jiang D M. Landscape pattern identification and ecological risk assessment using land-use change in the Yellow River Basin [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021,37(4):265-274.
- [22] 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.
- [23] 吴艳霞,刘方南,陈宝童.黄河流域下游城市群生境质量时空演变及其驱动因素[J].*水土保持通报*,2023,43(4):396-404.
- Wu Y X, Liu F N, Chen B T. Spatial and temporal evolution and drivers of habitat quality of urban agglomeration in lower Yellow River Basin [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023,43(4):396-404.
- [24] 杨洁,谢保鹏,张德罡.黄河流域生境质量时空演变及其影响因素[J].*中国沙漠*,2021,41(4):12-22.
- Yang J, Xie B P, Zhang D G. Spatial-temporal evolution of habitat quality and its influencing factors in the Yellow River Basin based on InVEST model and GeoDetector [J]. *Journal of Desert Research*, 2021,41(4):12-22.
-
- (上接第385页)
- [20] 郝守宁,董飞,刘晓波,等.西藏尼洋河流域土地景观格局演变的生态风险分析[J].*水土保持研究*,2023,30(2):378-383,430.
- Hao S N, Dong F, Liu X B, et al. Analysis on ecological risk of the evolution of land landscape pattern in the Nyang River Basin [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023,30(2):378-383,430.
- [21] Peng J, Zong M L, Hu Y N, et al. Assessing landscape ecological risk in a mining city: a case study in Liaoyuan City, China [J]. *Sustainability*, 2015,7(7):8312-8334.
- [22] 何钊全,尚雪,张铜会,等.近20年陕北黄土丘陵区景观生态风险时空变化及其冷热点格局[J].*生态学杂志*,2023,42(10):2514-2525.
- He Z Q, Shang X, Zhang T H, et al. Spatiotemporal variations of landscape ecological risk and its cold-hot spot pattern in the Loess Hills of northern Shaanxi over the past 20 years [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2023,42(10):2514-2525.
- [23] Li H, Zhou B, Wu X Y. Characterization of spatial-temporal evolution of landscape ecological risk in the Three-River Source Region [J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2025,16(2):326-339.
- [24] 杨博文,刘凤莲,陈洪敏.怒江流域(云南段)景观生态风险演变格局及驱动力[J].*环境科学*,2025,46(12):7982-7994.
- Yang B W, Liu F L, Chen H M. Evolution pattern and driving forces of landscape ecological risk in Nujiang River Basin (Yunnan section) [J]. *Environmental Science*, 2025,46(12):7982-7994.
- [25] 周玄德,邓祖涛,窦文章,等.三江源国家公园近30年土地利用变化生态风险时空特征[J].*测绘科学*,2024,49(4):208-220.
- Zhou X D, Deng Z T, Dou W Z, et al. The spatiotemporal characteristics of ecological risks of land use change in Sanjiangyuan National Park over the past 30 years [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2024,49(4):208-220.
- [26] 王舒,刘凤莲,杜汶胶,等.滇西北高原湖泊流域景观生态风险时空演变及驱动力识别[J].*环境科学*,2025,46(5):3114-3126.
- Wang S, Liu F L, Du W J, et al. Spatial-temporal evolution of landscape ecological risk and driving forces in the Plateau Lake Basin of northwest Yunnan [J]. *Environmental Science*, 2025,46(5):3114-3126.
- [27] 罗芹芹,刘凤莲.赤水河流域(贵州段)景观生态风险时空演变及驱动力探索[J].*中国生态农业学报(中英文)*,2025,33(3):550-562.
- Luo Q Q, Liu F L. Spatial-temporal evolution and driving forces of landscape ecological risk in the Chishui River Basin (Guizhou section) [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2025,33(3):550-562.