

窟野河流域景观格局演变与生态盈余的关联性

宁佳俊^{1,2}, 郭建英¹, 杨振奇¹, 赵俊娜^{1,2}, 左合君²

(1. 中国水利水电科学研究院 内蒙古阴山北麓草原生态水文国家野外科学观测研究站, 北京 100038; 2. 内蒙古农业大学沙漠治理学院, 呼和浩特 010018)

摘要: [目的] 深入探究窟野河流域景观格局与生态盈余的时空演变特征及耦合关系, 为该区域生态修复与可持续发展提供指导意见。[方法] 以窟野河流域为研究对象, 基于2000—2024年6期Landsat遥感影像, 采用支持向量机分类与目视解译获取土地利用数据, 提取多尺度景观格局指数; 结合2000年、2010年、2024年统计年鉴数据, 基于生态足迹与生态承载力模型核算生态盈余, 并通过Spearman秩相关分析量化景观格局与生态盈余的关联关系。[结果] 1) 2000—2010年受高强度工矿开发与土地利用扩张影响, 流域景观破碎化显著加剧, 斑块密度(PD)和分割度(DIVISION)明显升高; 2010年后, 在退耕还林(草)与矿区生态修复等政策驱动下, 聚集度(CONTAG)和连通度(COHESION)呈上升趋势, 景观格局由破碎化向整体优化转变。2) 生态盈余变化主要受能源足迹快速增长驱动, 其中化石能源用地生态赤字由2000年 $1.3761 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 扩大至2024年的 $9.28 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 占总生态赤字的绝对主导地位, 成为导致流域生态承载力下降的关键因素。3) 景观格局指数与生态盈余关联显著, CONTAG与COHESION与生态盈余呈极显著正相关($p < 0.01$), 斑块密度(PD)、分裂度(DIVISION)及Shannon多样性指数(SHDI)呈显著负相关, 工矿干扰背景下的“破碎化与干扰型多样性”对生态盈余具有明显抑制效应。[结论] 窟野河流域景观格局破碎化程度是调控生态盈余的核心因子, 2010年的演变转折与区域工矿整治政策直接关联; 通过降低景观破碎化、提升生态用地连接度的修复措施, 可有效推动流域生态盈余稳步回升, 研究成果可为砒砂岩区工矿流域的生态修复规划提供量化参考。

关键词: 景观格局; 生态足迹; 生态承载力; 生态盈余; 可持续发展; 窟野河流域

中图分类号: S154.3 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2026)04-0477-12

Correlation between Landscape Pattern Evolution and Ecological Surplus in Kuye River Basin

Ning Jiajun^{1,2}, Guo Jianying¹, Yang Zhenqi¹, Zhao Junna^{1,2}, Zuo Hejun²

(1. National Field Scientific Observation and Research Station of Inner Mongolia, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. College of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

Abstract: [Objective] This study aims to investigate the spatiotemporal evolution characteristics and coupling relationship between landscape patterns and ecological surplus in the Kuye River basin, thereby providing guidance for ecological restoration and sustainable development in this region. [Methods] Taking the Kuye River basin as the study area, land use data were obtained based on six periods of Landsat remote sensing images from 2000 to 2024 using support vector machine classification and visual interpretation, and multiscale landscape pattern indices were extracted. Using statistical yearbook data from 2000, 2010, and 2024, ecological surplus was calculated based on ecological footprint and ecological carrying capacity models, and the relationship between landscape

收稿日期: 2025-11-02

修回日期: 2026-02-09

录用日期: 2026-03-16

网络首发日期(www.cnki.net): 2026-03-24

资助项目: 国家重点研发计划项目(2023YFF1305104); 内蒙古自治区“英才兴蒙”工程青年拔尖人才专项培养计划项目; 内蒙古自治区“科技兴蒙”行动重点专项(2022EEDSKJXM003); 鄂尔多斯市水利科技项目(MK22205031, MK20220515)

第一作者: 宁佳俊(2001—), 男, 硕士研究生, 主要从事水土保持研究。E-mail: 2224009676@qq.com

通信作者: 杨振奇(1993—), 男, 水利高级工程师, 博士, 主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: 843296578@qq.com

http://stbcbx.alljournal.com.cn

patterns and ecological surplus was quantified using Spearman rank correlation analysis. [Results] 1) From 2000 to 2010, under the influence of high-intensity industrial and mining development and land use expansion, landscape fragmentation in the river basin significantly intensified, with patch density (PD) and division index (DIVISION) increasing markedly. After 2010, driven by policies such as the Grain for Green Program and mine ecological restoration, contagion (CONTAG) and cohesion (COHESION) exhibited increasing trends, indicating a transition of landscape patterns from fragmentation towards overall structural optimization. 2) Changes in ecological surplus were mainly driven by the rapid growth of the energy footprint. Specifically, the ecological deficit of fossil energy land expanded from $1.376 \times 10^6 \text{ hm}^2$ in 2000 to $9.28 \times 10^7 \text{ hm}^2$ in 2024, accounting for an overwhelming proportion of the total ecological deficit and becoming the key factor constraining the decline of ecological carrying capacity in the river basin. 3) Significant correlations were observed between landscape pattern indices and ecological surplus. CONTAG and COHESION showed extremely significant positive correlations with ecological surplus ($p < 0.01$), while patch density (PD), diversity index (DIVISION), and Shannon's diversity index (SHDI) exhibited significant negative correlations. The "fragmentation and disturbance-driven diversity" under industrial and mining disturbance exerted a significant inhibitory effect on ecological surplus. [Conclusion] Landscape fragmentation is the core factor regulating ecological surplus in the Kuye River Basin, and the turning point in 2010 is directly associated with regional industrial and mining regulation policies. Restoration measures that reduce landscape fragmentation and enhance the connectivity of ecological land can effectively promote the steady recovery of ecological surplus in the river basin. The findings can provide a quantitative reference for ecological restoration planning in industrial and mining-affected river basins of the Pisha sandstone region.

Keywords: landscape pattern; ecological footprint; ecological carrying capacity; ecological surplus; sustainable development; Kuye River basin

Received: 2025-11-02

Revised: 2026-02-09

Accepted: 2026-03-16

Online(www.cnki.net): 2026-03-24

黄土高原地区是我国水土流失最为集中、生态环境高度脆弱的区域之一,长期受风力侵蚀、水力侵蚀及其复合侵蚀作用的共同影响^[1]。近年来,随着能源资源开发强度的持续提升,部分流域在原有自然侵蚀背景下叠加高强度人类扰动,土地利用结构发生快速转化,地表景观破碎化显著加剧,区域生态系统承载能力与人类需求间的矛盾日益突出^[2]。尤其在以煤炭开采为主导的工矿型流域中,建设用地与采矿用地持续扩张,占用并割裂生态用地空间,使水土流失风险与生态退化问题呈现出明显的结构性与阶段性特征。在黄河流域生态保护和高质量发展国家战略背景下,如何在资源开发与生态保护之间实现空间层面的协调,已成为流域水土保持与生态修复研究亟须解决的重要科学问题。

景观格局反映土地利用类型在空间上的组合方式与配置特征,是刻画人类活动干扰与自然过程耦合效应的重要空间表征^[3]。有研究^[4-6]表明,景观破碎化、连通性及多样性等格局特征可通过影响能量流动、物质循环与生境完整性等方式,进而调控生态系统结构与功能。生态盈余/赤字基于生态足迹与生态

承载力的对比关系,从综合角度表征区域自然系统对人类活动需求的支撑能力,已被广泛应用于区域可持续性评价^[7]。从理论上讲,景观格局变化通过改变生态斑块的空间组织方式与功能完整性,进而影响生态系统服务供给能力,是生态盈余演变的重要空间驱动因素^[8]。然而,在高强度工矿扰动背景下,“景观格局-生态盈余”关联关系的具体表现及其阶段性特征仍缺乏系统性揭示。

现有研究^[9]中,关于景观格局的分析多聚焦于破碎化过程、斑块结构特征及其时空演变规律,相关成果主要集中于农业流域、城市化区域及自然保护地等类型区域。生态足迹与生态盈余研究则主要用于评估区域可持续发展水平,研究重点多集中于人口增长、经济结构及消费模式等社会经济驱动因素^[10-13]。近年来,尽管已有研究^[14]尝试将景观格局引入生态系统服务或生态安全评价,但将景观格局演变与生态盈余变化进行定量关联分析仍较为有限,且多忽视工矿开发的强扰动背景下景观破碎化的负效应。针对政策干预前后景观格局与生态盈余响应差异的阶段性研究仍显不足,限制相关结论在同类流域生态修复与空间调控中

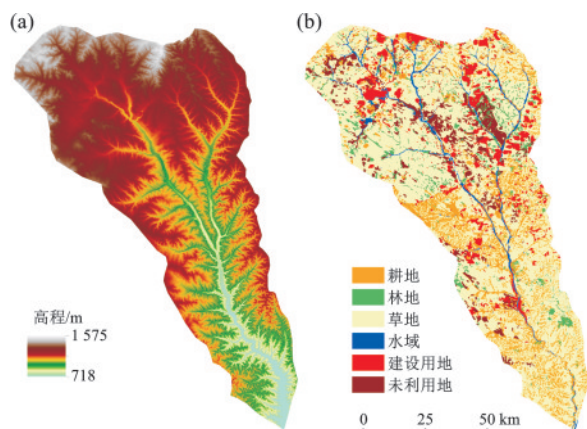
的应用价值。因此,在高强度工矿扰动背景下,从景观格局演变视角系统揭示生态盈余变化特征及其关联机制,仍是当前相关研究中亟须深化的问题。

基于上述研究背景,以黄土高原典型工矿干扰流域-窟野河流域为研究对象。该流域能源开发强度高、生态问题集中,且在近20 a内经历退耕还林(草)与矿区生态修复等多项政策干预,具有较强的代表性。基于2000—2024年多期遥感影像与统计数据,分析窟野河流域景观格局的演变特征,核算关键阶段生态盈余变化,并探讨景观格局指数与生态盈余之间的关联关系,旨在揭示工矿型流域景观格局演变对生态盈余的空间调控作用,为黄土高原类似流域的水土保持与生态修复提供科学依据并刻画2000—2024年窟野河流域景观格局的时空演变特征,核算不同阶段生态盈余变化特征,分析景观格局指数与生态盈余之间的关联关系。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

窟野河流域($38^{\circ}22'26''\sim 39^{\circ}51'18''\text{N}$, $109^{\circ}25'56''\sim 110^{\circ}48'49''\text{E}$)位于陕西省和内蒙古的交界处,发源于内蒙古自治区东胜市巴定沟,流经伊金霍洛旗和陕西省府谷县。地势西北高、东南低,高程为718~1 575 m(图1a),土地类型主要以林草地为主(图1b)。全流域约有34万人口,由于流域以煤炭产业为主导,生态脆弱性加剧,整体承载能力较差^[15]。24 a期间流域第二产业发展尤为迅速,产值由70.77亿元增加到6 378.57亿元,其主要得益于流域丰富的矿产资源;第一产业产值由2000年仅有的9.17亿元增加到2024年的85.49亿元,第三产业产值由43.33亿元增加到1 707.46亿元。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号GS(2024)0650号的标准地图制作,底图未做修改。下同。

图1 窟野河区位示意

Fig.1 Location map of Kuye River

1.2 数据来源与预处理

鉴于其时间覆盖范围广、数据连续性好且空间分辨率适宜,Landsat系列遥感影像已被广泛应用于流域尺度景观格局演变研究中^[16-18]。因此,选取Landsat系列多期遥感影像作为基础数据,影像均下载自地理空间数据云平台(<https://www.gscloud.cn>),选取6—10月植被生长期、云量均 $<3\%$ 的影像,以降低季节差异和云覆盖对解译结果的影响。其中,2000年、2005年和2010年采用Landsat 4~5 TM影像,2015年和2020年采用Landsat 8 OLI影像,2024年采用Landsat 8-9 OLI/TIRS C2 L2影像。所有影像空间分辨率均为30 m,并统一投影至WGS_1984_UTM_Zone_49N坐标系。

1.2.1 遥感影像预处理及精度验证 为保证多期影像的可比性和解译精度,对所有影像进行统一预处理,包括辐射校准、大气校正和几何精度校正。首先,基于Landsat官方(<https://www.usgs.gov/landsat-missions>)定标参数,将DN值转换为表观反射率,以消除传感器差异带来的系统误差;其次,采用FLAASH模型进行大气校正,选用中纬度夏季大气模式和大陆型气溶胶模型,修正大气散射与吸收效应;最后,以1:5万DEM数据为参考进行几何精校正,采用二次多项式变换方法,控制均方根误差(RMSE) <0.5 个像元,确保影像空间定位误差 <15 m,满足景观格局指数计算精度要求。

1.2.2 LULC分类与精度验证 结合研究区土地利用结构特征及研究目标,参考中国科学院土地利用分类体系构建窟野河流域的LULC分类体系^[19],共划分为6类一级地类并将“工矿用地”从建设用地上单独划分,以更准确刻画煤炭资源开发活动对景观格局演变的影响。

土地利用解译采用“监督分类(支持向量机,SVM)+人工目视修正”的方法,在ENVI软件中为各类地物选取约500个训练样本进行分类。针对分类结果中面积 <0.01 km²的细碎斑块,按照“邻近斑块优先归并”原则在ArcGIS进行后处理。

精度验证采用分层随机抽样方法,结合2024年实地调查数据与高分辨率Google Earth影像(约0.5 m)进行评估。结果表明,2000—2024年多期LULC数据总体分类精度平均值为88.36%,Kappa系数为0.83~0.90,满足流域尺度景观格局分析与生态盈余核算的精度要求。基于解译结果绘制研究区土地利用现状图(图2)。

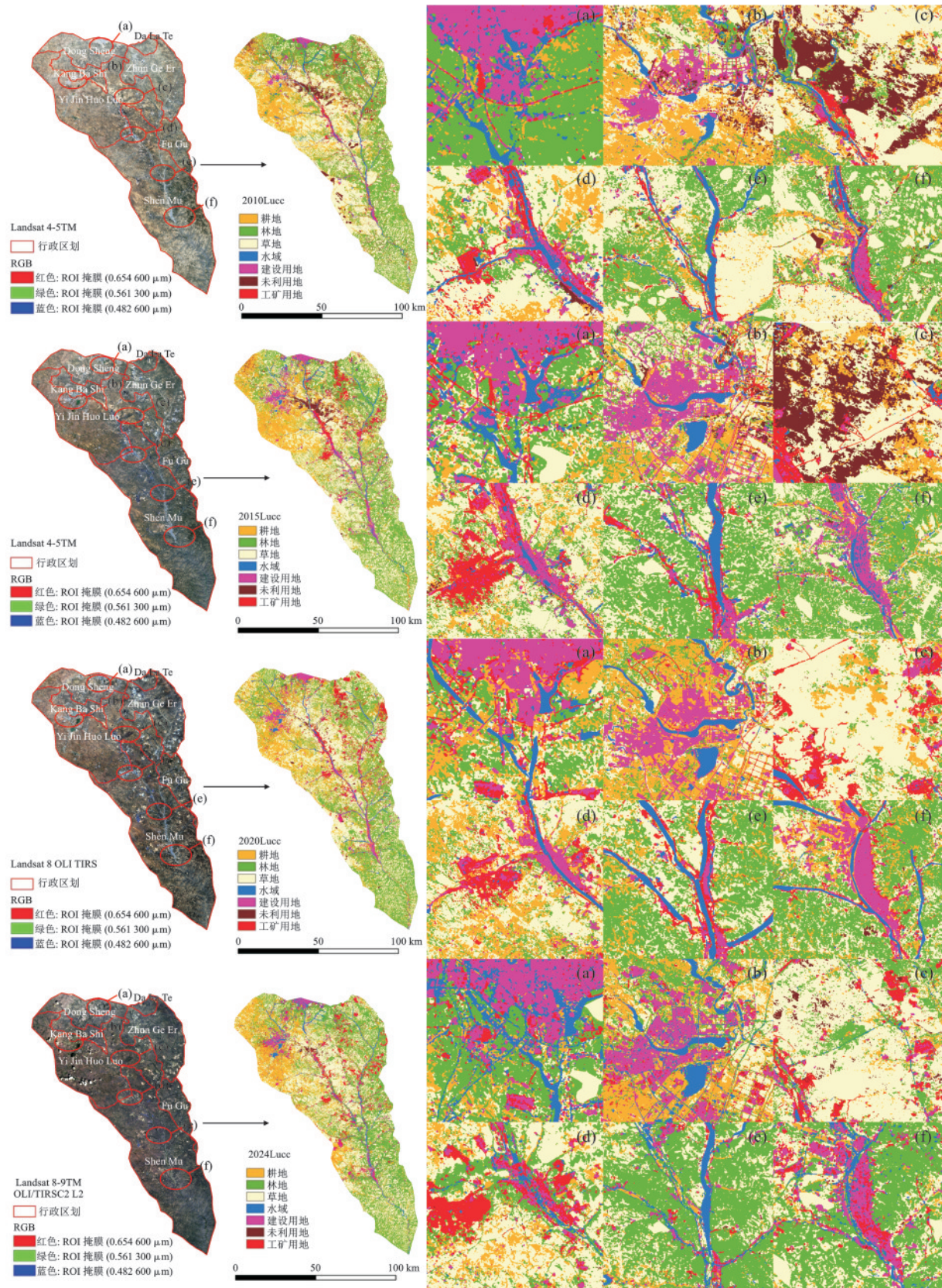


图2 土地利用现状

Fig.2 Current land use

1.2.3 统计数据来源与预处理 生态足迹与生态承载力核算所需的社会经济数据主要来源于《鄂尔多斯市统计年鉴》^[20]和《榆林市统计年鉴》^[21]。其中,生物资源消

费数据根据产量+进口+出口原则修正为实际消费量;能源消费数据统一折算为标准煤量,以保证不同能源类型之间的可比性。折算过程中采用国家通用折标系数,

其中原煤为 0.714 3 tce/t,焦炭为 0.971 4 tce/t,从而确保统计数据在时间尺度和计量单位上的一致性。

1.3 研究方法

为实现上述研究目标,本研究基于 LULC 数据,从类型水平(单地类)-景观水平(全域)双尺度提取景观格局指数,解析格局演变特征,结合统计数据,采用生态足迹模型核算生态需求(EF),生态承载力模型核算生态供给(EC),通过 EC-EF 计算生态盈余,量化供需平衡状态,最后通过 Spearman 秩相关分析

量化景观格局指数-生态盈余关联,基于关联规律核算生态补偿系数,提出景观优化策略^[22]。

1.3.1 景观指标 考虑到窟野河流域受工矿开发强烈干扰的特殊性,本研究从景观破碎度、连通性、异质性及聚集程度 4 个维度选取指标。其中,NP 与 PD 用以表征工矿点状扩张导致的基质破碎化;LPI 与 COHESION 反映核心生态斑块的主导地位与空间连通性;CONTAG 与 SHDI 用于刻画工矿-农业-生态景观交织下的整体格局异质性(表 1)。

表 1 景观格局指数及生态学意义
Table 1 Landscape pattern indices and their ecological significance

序号	缩写	指标名称	生态学意义及解释
1	NP	斑块个数	景观中某一斑块类型的总个数
2	PD	斑块密度	斑块类型的破碎度,可反映出景观整体的异质性与破碎度,反映景观单位面积上的异质性
3	LPI	最大斑块指数	景观范围内占主导地位的斑块,该指数值的大小可以帮助确定景观中的优势斑块类型
4	LSI	景观形状指数	反映在景观中各斑块的形状复杂程度
5	IJI	散布与并列指数	在类型级别上计算各个斑块类型间的总体散布情况
6	COHESION	景观连通度	是对景观空间结构单元相互之间连续性的度量
7	AI	聚集度指数	量化景观中同类斑块的空间聚集程度
8	CONTAG	蔓延度指数	反映景观中不同斑块间的聚集程度与分散程度
9	DIVISION	景观分离度	用于衡量单一景观类型(斑块)的空间连续性和完整性
10	SHDI	Shannon 多样性指数	用于景观中斑块类型的丰富度与分布均匀度
11	SPLIT	分裂度指数	反映同一类型斑块的空间分离程度

1.3.2 生态足迹计算方法 生态足迹用于表征区域人类生产和生活活动对自然资源与生态环境的需求,主要包括生物资源生态足迹与能源生态足迹两部分^[23]。由于不同资源类型的消耗方式及其对应的生态承载功能存在差异,分别对生物资源(表 2)和能源资源的生态足迹进行核算。

1) 生物资源的生态足迹

$$EF_{\text{总}} = N \times ef = N \times \sum r_i \times (c_i/p_i) \quad (1)$$

式中:EF_总为总生态足迹,hm²;ef为人均生态足迹,hm²/人;N为常住人口;i为生产性土地对应的产品;p_i为第 i 个消费项目的平均生产能力,kg/hm²;c_i为第 i 种产品的人均产量或人均消耗量,kg/人;r_i为均衡因子。均衡因子基于学者^[24]的研究结果,耕地、森林、草地、水域、建设用地分别为 1.74、1.41、0.44、0.35、1.41。

表 2 不同土地类型的消费项目划分
Table 2 Division of consumption items for different land types

土地类型	生产能力	消费项目
耕地	提供农产品	稻谷、小麦、玉米、大豆、油料作物、块茎作物蔬菜、猪肉、禽蛋
林地	提供林产品	水果
草地	提供畜产品	牛肉、羊肉、牛奶
水域	提供水产品	水产品

2) 能源生态足迹 能源生态足迹主要反映区域能源消费对生态系统吸收二氧化碳能力的占用情况^[25]。将化石能源用地和建设用地统一纳入能源生态足迹核算范围。依据《鄂尔多斯能源统计年鉴》^[20]和《榆林能源统计年鉴》^[21],选取原煤、洗煤、焦炭、汽油、柴油、电力和热力为主要能源消费项目。能源生态足迹计算公式为:

$$EF_{\text{总}} = N \times ef = N \times \sum_i (t_i \times r_i/E) \quad (2)$$

式中:EF_总为总生态足迹,hm²;ef为人均生态足迹,hm²;t_i为区域的能源使用量;r_i为能量转换系数;E为全球平均能源足迹,GJ/hm²。

1.3.3 生态承载力计算 环境供给能力即生态承载力。能提供资源的土地类型有耕地、森林、草原、水域和建设用地^[26]。同时,由于土地资源的缺乏,人类并没有预留特定的土地面积来吸收二氧化碳,因此,化石能源用地的面积和生态承载能力均为 0。生态承载力计算公式为:

$$EC_{\text{总}} = N \times ec = N \times \sum_j (a_j \times y_j \times r_j) \quad (3)$$

式中:EC_总为总体生态承载力,hm²;N为常住人口;ec为人均生态承载力,hm²;y_j为产率系数;r_j为均衡因子;a_j为人均土地面积,hm²。产量因子参考前人^[27-32]

研究,其中耕地、森林、草地、水域、建设用地分别为 1.02、0.95、1.68、1.68、1.02。依据生态保护原则,在计算过程中预留 12% 的生物多样性保护面积,最终生态承载力取 $0.88 \times EC_{\text{总}}^{[33]}$ 。

1.3.4 生态补偿的核算 生态盈余用于衡量区域生态系统对人类活动的剩余支撑能力,其计算公式为:

$$ES = EC_{\text{总}} - EF_{\text{总}} \quad (4)$$

式中:ES 为生态盈余, hm^2 ; $EC_{\text{总}}$ 为总生态承载力; $EF_{\text{总}}$ 为总生态足迹。当 $ES > 0$ 时,区域处于生态盈余状态;当 $ES < 0$ 时,表明区域处于生态赤字状态,生态压力较大。

1.3.5 景观格局与生态盈余关联 为探究景观格局变化对生态盈余的影响关系,采用 Spearman 秩相关分析方法,利用 SPSS 26 软件对景观格局指数与生态盈余间的相关性进行分析。分析中,以总生态盈余及不同地类生态盈余(如林地生态盈余、工矿用地生态盈余等)为因变量,以类型水平和景观水平景观格局指数为自变量。相关性显著性采用双尾检验, $p < 0.05$ 表示显著相关, $p < 0.01$ 表示极显著相关。根据相关系数绝对值($|r|$)大小判定关联强度: $|r| > 0.8$ 为强相关, $0.5 < |r| \leq 0.8$ 为中等相关, $|r| \leq 0.5$ 为弱相关。

2 结果与分析

2.1 景观格局时空变化

窟野河流域类型水平景观格局(图 3)演变以 2010 年为关键转折点,2000—2010 年干扰主导,2010—2024 年修复主导。生态用地(林地、草地)方面,2000—2010 年林地斑块密度(PD)从 4.9 个/ km^2 下降至 2.6 个/ km^2 ,草地斑块数量(NP)从 26 599 个增加至 34 948 个,破碎化加剧;2024 年林地 PD 上升至 3.36 个/ km^2 ,草地 NP 降至 29 585 个,破碎化缓解。林地 AI 从 83.19 升至 86.42,林地连通性指数(COHESION)稳定在 99 以上,草地 COHESION 稳定在 99.3 以上。干扰用地中,工矿用地 PD 从 0.01 个/ km^2 提升至 1.73 个/ km^2 (2024 年),NP 从 87 个增加至 14 993 个,LPI 从 0.01 跃升至 0.16,景观形状指数(LSI)从 12.24 提升至 130.84,AI、COHESION 均超 90,呈集中连片扩张;建设用地 AI 从 75.66 提升至 82.53,COHESION 从 92.57 提升至 95.56。耕地 PD 从 2.96 个/ km^2 提升至 4.85 个/ km^2 (2010 年)后回落,LPI 从 0.63 升至 3.98(2010 年)后开始回落,COHESION 从 96.77 提升至 99.00 以上。未利用地 PD 从 1.38 个/ km^2 降至 0.32 个/ km^2 ,NP 从 12 005 个下降至 2 757 个,LPI 从 0.26 下降至 0.06,AI 从 84.96 下降至 78.60,COHESION 从 94.72 下降至 90.21。

为分析 2000—2024 年景观层面的景观格局(图

4),选取 split、Contag、Cohesion 和 Pd 等 4 个指标。对于 split 指数,从时间角度分析,2000—2010 年分裂度指数较大,空间上零散分布在整个流域,流域内各地类斑块破碎度较高,2010 年之后,split 指数高值区明显减少,破碎度明显降低;2000—2024 年 Contag 指数变化趋于稳定,空间上看流域中部、南部及西北部低值区变少,优势斑块的连通性和蔓延度变大;Cohesion 指数从 2000 年在北部、中西部地带低值区变化明显,到 2024 年低值区明显变好。PD 指数方面,时间上呈先下降后回升趋势,空间上主要是中部、中南部地带斑块密度变化较大。总体而言,2000—2024 年,该地区景观格局在斑块分散、聚集与破碎特征方面呈现出动态调整过程,而主导斑块格局整体保持相对稳定。

2.2 生态足迹及承载力变化

2.2.1 生态足迹分析 总生态足迹表征人类对生物生产性土地的总需求,由生物资源足迹与能源足迹构成,整体呈“能源驱动增长、结构失衡加剧”的演变特征,且与景观格局动态高度耦合,窟野河流域生态足迹见图 5。2000—2024 年生物资源足迹呈持续上升趋势,2000 年为 $11.21 \times 10^5 \text{ } hm^2$,2010 年增至 $13.84 \times 10^5 \text{ } hm^2$,2024 年上升至 $38.75 \times 10^5 \text{ } hm^2$ 。耕地为生物资源足迹的核心贡献地类,2024 年达 $26.35 \times 10^5 \text{ } hm^2$,占比 68%,对应耕地最大斑块指数(LPI)从 0.72 升至 4.92 的扩张及后期连通性指数(COHESION)从 96.17 升至 99.2 的集中化过程;草地足迹 2024 年为 $12.19 \times 10^5 \text{ } hm^2$,随肉类消费增长呈上升趋势;林地足迹始终低于 $0.98 \times 10^4 \text{ } hm^2$,受保护政策限制增长幅度较小。能源足迹呈指数型增长,2000 年为 $13.84 \times 10^5 \text{ } hm^2$,2024 年激增至 $92.79 \times 10^6 \text{ } hm^2$,其中化石能源用地足迹为绝对主导,与工矿用地 LPI 从 0.01 升至 0.06,原煤产量从 $0.8 \times 10^8 \text{ t}$ 增至 $1.5 \times 10^8 \text{ t}$ 的扩张过程完全同步;建设用地足迹 2024 年为 $27.76 \times 10^4 \text{ } hm^2$,因设施集中布局(聚集度指数 AI 从 75.66 升至 95.56),增速平缓。整体而言,总生态足迹呈双失衡特征。组分结构上,能源足迹占比从 55.3% 升至 99.9%,地类贡献上,2024 年化石能源足迹($92.33 \times 10^6 \text{ } hm^2$)为耕地生物资源足迹($26.35 \times 10^5 \text{ } hm^2$)的 35 倍,凸显“煤炭依赖型”发展模式下能源开发对生态系统的核心压力。

2.2.2 生态承载力分析 为探究窟野河流域的生态承载力变化,首先要参考研究方法中的前人^[34-35]研究成果确定均衡因子和产量因子,并根据统计年鉴数据中的各旗县不同地类面积,以中国科学院发布的 LUCC 数据集为参考统计不同年份的各地类面积,具体参考因子和不同地类面积情况见表 3。

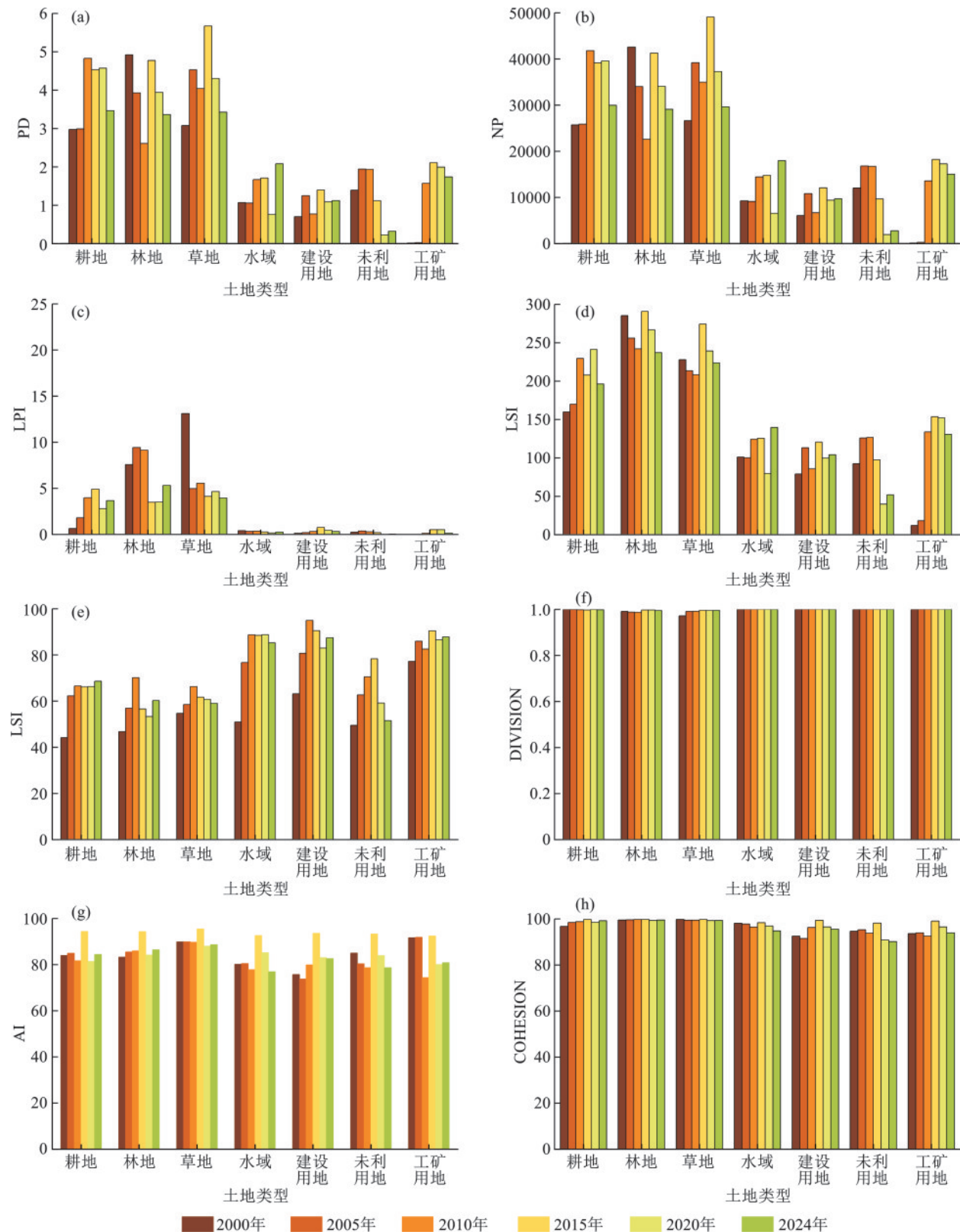


图3 类型水平景观格局
Fig.3 Type-level landscape patterns

2000—2024年窟野河流域总生态承载力呈波动恢复趋势(图6)。2000年总EC为 $354.52 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 2010年降至 $324.70 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 2024年回升至 $355.87 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。从地类贡献看, 草地为EC核心贡献地类,

2000年贡献 $150.73 \times 10^4 \text{ hm}^2$; 2024年为 $142.74 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。耕地2000年EC为 $149.46 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 2010年升至 $160.72 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 2024年回落至 $149.46 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。林地EC稳定, 2000—2024年保持在 $14.37 \sim 16.85 \times$

10⁴ hm²左右。化石能源用地 EC 始终为 0。空间分布上,高 EC 区集中于南部神木市高植被覆盖区,2024 年贡献全流域 62.3% 的 EC;低 EC 区位于鄂尔多斯市伊金霍洛旗和准格尔旗矿区富集区。

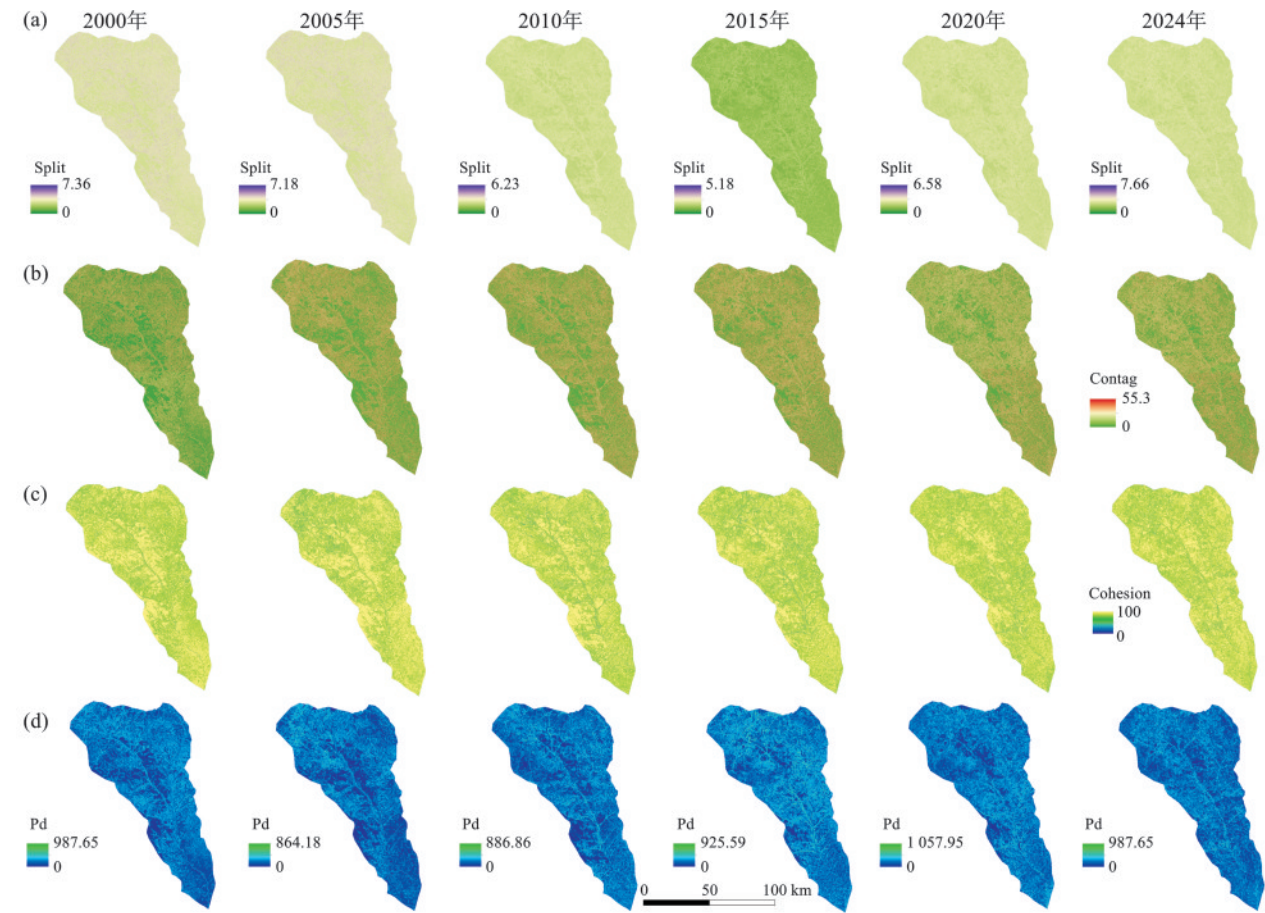


图 4 窟野河 2000—2024 年景观格局

Fig.4 Landscape patterns of Kuye River (2000—2024)

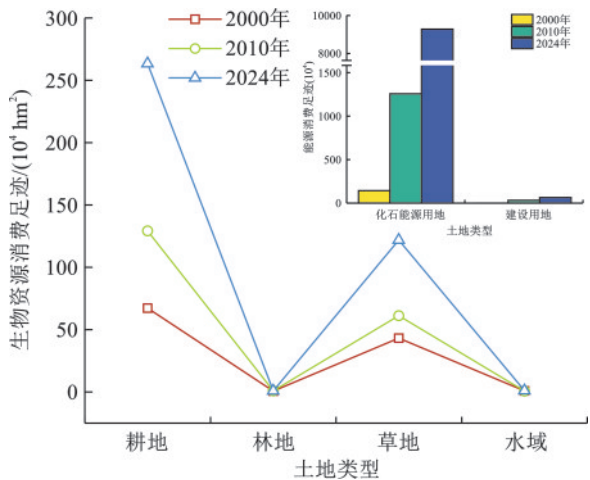


图 5 窟野河生态足迹变化

Fig.5 Changes in ecological footprint of Kuye River

2.2.3 生态盈余/赤字分析 2000 年,流域整体呈生态盈余状态(图 7)。其中,耕地、林地、草地、水域、建设用地盈余分别为 177.313×10⁴、15.589×10⁴、123.497×10⁴、3.151×10⁴、13.921×10⁴ hm²;化石能源用地呈生态赤字,为 137.610×10⁴ hm²。2010 年,流域首次转为生态赤字。耕地、林地、草地、水域、建

设用地盈余分别为 75.550×10⁴、15.433×10⁴、110.020×10⁴、2.885×10⁴、7.244×10⁴ hm²;化石能源用地赤字扩大至 1 207.400×10⁴ hm²。2024 年,生态赤字急剧扩大。耕地、林地、建设用地赤字分别为 93.618×10⁴、18.163×10⁴、35.536×10⁴ hm²,草地、水域盈余分别为 40.283×10⁴、2.746×10⁴ hm²,赤字化石能源用地赤字激增至 92.767×10⁶ hm²。

表 3 窟野河流域参考因子及不同地类面积

Table 3 Reference factors and areas of different land types in Kuye River basin

土地类型	均衡因子	产量因子	2000 年 地类面积/ hm ²	2010 年 地类面积/ hm ²	2024 年 地类面积/ hm ²
耕地	2.8	1.02	646 312	639 564	594 518
林地	1.1	0.95	156 246	156 087	183 620
草地	0.5	1.68	1 984 667	2 039 412	1 931 145
水域	0.2	1.68	119 640	109 164	115 924
建设用地	2.8	1.02	51 843	64 402	59 408
化石能源用地	1.1	0	2 588	28 652	110 863

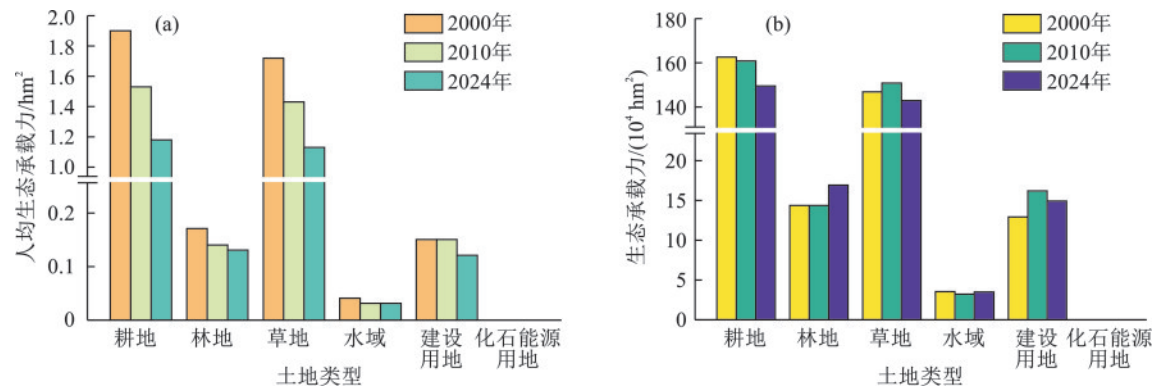


图 6 窟野河生态承载力
Fig.6 Ecological carrying capacity of Kuye River

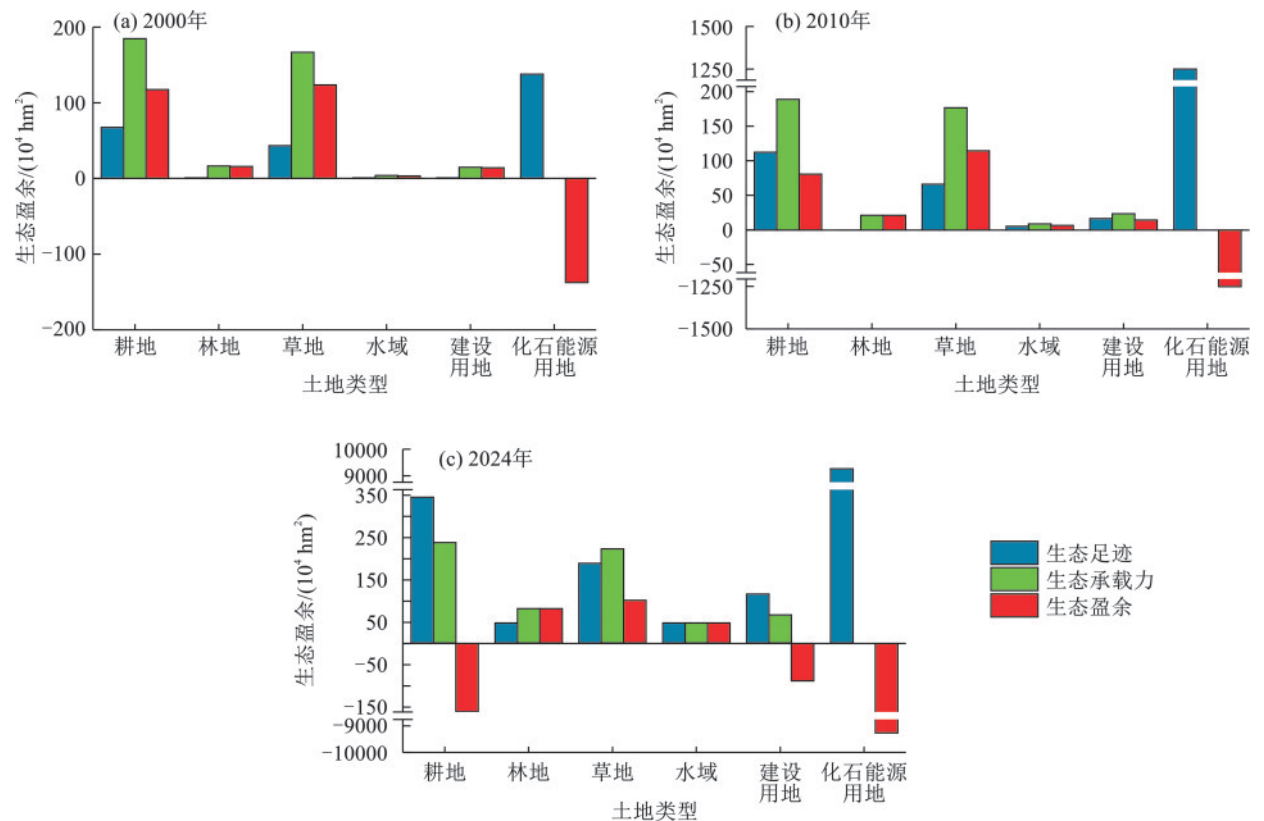


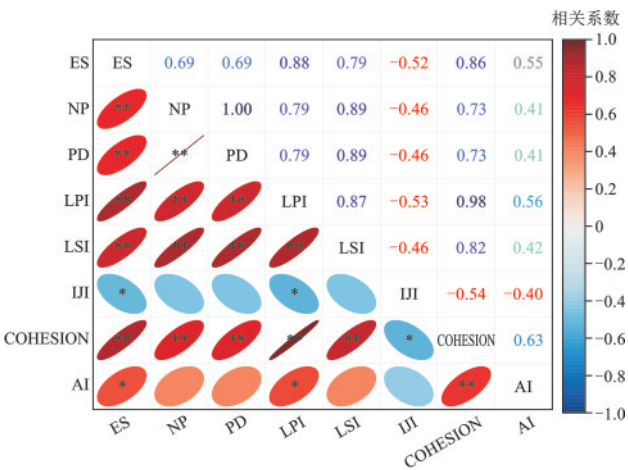
图 7 窟野河流域生态盈余状况
Fig.7 Ecological surplus of Kuye River Basin

2.3 景观格局指数与生态盈余关联性

生态盈余作为区域生态系统供需平衡状态的综合表征,不仅受土地利用规模变化的影响,还与景观空间结构配置特征密切相关。基于景观格局演变特征与生态盈余动态数据,结合分阶段对比揭示格局-盈余耦合机制^[36-38]。结果表明,窟野河流域生态盈余与多项类型景观格局指数间存在显著统计关联,但不同类型指标的关联强度与方向存在明显差异(图8)。生态盈余与LPI、LSI、COHESION呈强正相关,与NP、PD和AI呈中等正相关,与IJI呈中等负相关。生态盈余的变化并非由单一景观指数驱动,而是依赖于生态用地(林地、草地)景观

结构的“协同优化”,既需通过LPI提升强化核心生态斑块的主导作用,通过COHESION、AI优化保障斑块的连通性与聚集度,也需通过控制IJI减少干扰斑块的混杂影响。

在景观整体结构相关指标中(表4),最大斑块指数(LPI)、景观连通性指数(COHESION)和聚集度指数(AI)均与生态盈余呈显著正相关,表明当景观中优势斑块占比提高、空间连通性增强、同类斑块趋于聚集时,区域生态盈余水平相应较高。该特征在不同分析尺度下均表现一致,表现为生态盈余对景观整体组织特征变化具有较为稳定的统计响应。



注:*表示 $p\leq 0.05$; **表示 $p\leq 0.01$ 。

图8 窟野河流域生态盈余与景观格局指数相关性

Fig.8 Correlation between ecological surplus and landscape pattern indices in Kuye River basin

表4 景观水平与生态盈余相关性

Table 4 Correlation between landscape level and ecological surplus

景观指数	相关系数(r)	显著性(p)	关联强度
斑块密度(PD)	-0.5	>0.05	中等负相关 (不显著)
蔓延度指数 (CONTAG)	1.0	<0.01	极强正相关
连通性指数 (COHESION)	1.0	<0.01	极强正相关
分裂度指数 (DIVISION)	-1.0	<0.01	极强负相关
Shannon多样性 指数(SHDI)	-1.0	<0.01	极强负相关

3 讨论

3.1 工矿扰动背景下景观整体结构对生态盈余的主导作用

本研究结果表明,窟野河流域生态盈余与反映景观整体结构状态的指标CONTAG、COHESION、DIVISION间存在显著且稳定的统计关联,而与斑块数量类和局部配置类指标的关联性相对较弱。表明在流域尺度上,生态盈余并非对局部景观变化作出线性响应,而更依赖于土地利用整体组织方式及生态斑块空间结构的协同状态。结合2000—2024年景观演变特征,工矿用地与建设用地的持续扩张并未仅表现为斑块数量增加,而是通过改变生态用地的空间连通性和整体蔓延格局,重塑流域景观结构。尤其在2010年前后,工矿开发强度的集中释放叠加景观破碎化加剧,使生态系统空间承载能力显著下降,从而放大生态盈余对整体结构指标的敏感性。

3.2 景观结构变化与生态盈余转折的机制

2010年是窟野河流域生态盈余由盈余转为赤

字的关键节点,其形成机制并非单一土地利用变化所致,而是景观结构调整与生态足迹结构失衡的共同结果。一方面,能源足迹在研究期内呈指数型增长,化石能源用地成为生态赤字的绝对主导来源;另一方面,工矿扰动通过割裂和压缩生态斑块空间,削弱林地和草地等生态用地的连通性与整体功能发挥能力。2010年后,尽管退耕还林(草)与矿区修复政策推动部分生态用地恢复,但生态用地面积的增加并未完全转化为生态承载能力的同步提升,其关键限制因素在于景观整体结构尚未恢复到高效组织状态。解释了为何在生态修复背景下,生态盈余下降趋势有所缓解但未实现根本性逆转。

3.3 破碎化与干扰型多样性对生态供给能力的抑制效应

斑块密度(PD)、分裂度(DIVISION)及Shannon多样性指数(SHDI)与生态盈余呈显著负相关,表明景观多样性的增加并未提升生态系统供给能力。该现象并非否定景观多样性本身的生态价值,而是反映工矿扰动背景下干扰型多样性的负效应。在窟野河流域,景观多样性的提升主要来源于工矿用地和建设用地的嵌入式扩张,该种以干扰斑块为主导的多样化过程加剧生态斑块的空间割裂,削弱能量流动和物质循环的连续性,从而对生态盈余形成抑制作用。因此,在工矿型流域的生态管理中,仅关注用地类型多样性或生态用地面积恢复难以有效改善生态盈余状况,更需要通过优化生态斑块空间组织和提升整体连通性来增强生态系统承载能力。

4 结论

1)2000—2010年流域土地利用变化以资源开发扰动为主导,景观破碎化程度整体上升;2010年以后,在生态修复与管控政策作用下,生态用地空间结构逐步趋于稳定,景观整体连通性和聚集程度得到一定改善,流域景观格局由“扰动主导”向“修复调控”转变。

2)基于生态足迹与生态承载力模型的核算表明,研究期内窟野河流域生态盈余总体呈波动变化特征,其演变过程与土地利用结构调整及资源开发强度变化具有较强的一致性,反映流域生态系统对人类活动压力的综合响应。

3)相关性分析显示,反映景观整体结构特征的指数与生态盈余间具有较为稳定的统计关联,而类型水平和局部空间配置指标的关联性相对较弱。表明在流域尺度上,生态盈余更易受景观整体组织方式和空间结构变化的影响,该结论可为资源型流域土地利用结构优化与水土保持空间调控提供参考。

参考文献:

- [1] 傅伯杰. 黄土高原土地利用变化的生态环境效应[J]. 科学通报, 2022, 67(32): 3769-3779.
Fu Bojie. Ecological and environmental effects of land-use changes in the Loess Plateau of China [J]. Chinese Science Bulletin, 2022, 67(32): 3769-3779.
- [2] Liu Yuhan, Wu Caiyan, Wu Jiong, et al. Urban planning scenarios significantly shape future urban growth and landscape patterns in China's megacity, Shanghai [J]. Earth Systems and Environment, 2025: e8826.
- [3] Zhang Huixia, Wang Ziyi, Zhang Na, et al. Impact of landscape pattern changes on ecosystem service values in the Fenhe River basin in China [J]. Ecohydrology and Hydrobiology, 2025, 25(3): 533-543.
- [4] 刘海, 殷杰, 林苗, 等. 基于GIS的鄱阳湖流域生态系统服务价值结构变化研究[J]. 生态学报, 2017, 37(8): 2575-2587.
Liu Hai, Yin Jie, Lin Miao, et al. Sustainable development evaluation of the Poyang Lake basin based on ecological service value and structure analysis [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(8): 2575-2587.
- [5] Jiang Simin, Feng Fei, Zhang Xinna, et al. Driving factors of fragmentation in urban landscapes: Local contributions, spatial relationships, and causal effects [J]. Ecological Indicators, 2025, 174: e113454.
- [6] 张任菲, 肖萌, 刘志成. 京津冀地区景观破碎化的时空异质性及其驱动因素研究[J]. 生态环境学报, 2025, 34(3): 461-473.
Zhang Renfei, Xiao Meng, Liu Zhicheng. Spatio-temporal heterogeneity and driving factors of landscape fragmentation in Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2025, 34(3): 461-473.
- [7] Yang Wenjie, Gong Qianwen, Zhang Xueyan. Surplus or deficit Quantifying the total ecological compensation of Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. Journal of Geographical Sciences, 2020, 30(4): 621-641.
- [8] 吕宏宇, 周敏. 东北农牧交错带生态盈亏对土地利用变化的响应[J]. 水土保持学报, 2025, 39(2): 155-166.
Lü Hongyu, Zhou Min. Response of ecological profit and loss to land use change in the agro-pastoral ecotone in Northeast China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(2): 155-166.
- [9] Duarte G T, Santos P M, Cornelissen T G, et al. The effects of landscape patterns on ecosystem services: Meta-analyses of landscape services [J]. Landscape Ecology, 2018, 33(8): 1247-1257.
- [10] Zheng Xiaozheng, Yang Shuo, Huai Jianjun. Integrating ecological footprint into regional ecological well-being evaluation: A case study of the Guanzhong Plain urban agglomeration, China [J]. Land, 2025, 14(4): e688.
- [11] 刘红光, 陈敏, 唐志鹏. 基于灰水足迹的长江经济带水资源生态补偿标准研究[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(11): 2553-2563.
Liu Hongguang, Chen Min, Tang Zhipeng. Study on ecological compensation standards of water resources based on grey water footprint: A case of the Yangtze River economic belt [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(11): 2553-2563.
- [12] Georgescu I, Nica I, Kinnunen J. Towards sustainability: Understanding Norway's ecological footprint through the framework of the environmental kuznets curve [J]. Energies, 2024, 17(23): e6074.
- [13] 田玲玲, 罗静, 董莹, 等. 湖北省生态足迹和生态承载力时空动态研究[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(2): 316-325.
Tian Lingling, Luo Jing, Dong Ying, et al. Temporal and spatial dynamic research of the ecological footprint and ecological carrying capacity of Hubei Province [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2016, 25(2): 316-325.
- [14] 房子钰, 丁宁, 冯恒栋, 等. 景观格局对生态系统服务空间分异特征的影响: 以东营市为例[J]. 东北林业大学学报, 2025, 53(2): 86-96.
Fang Ziyu, Ding Ning, Feng Hengdong, et al. The impact of landscape patterns on the spatial differentiation characteristics of ecosystem services: A case study of Dongying City [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2025, 53(2): 86-96.
- [15] 高海燕, 王鑫, 杨振奇, 等. 黄河中游窟野河流域土壤侵蚀与生态修复研究进展[J]. 内蒙古大学学报(自然科学版), 2024, 55(3): 329-336.
Gao Haiyan, Wang Xin, Yang Zhenqi, et al. Research progress on soil erosion and ecological restoration in Kuye River basin of the middle Yellow River [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Neimongol, 2024, 55(3): 329-336.
- [16] Giambelluca A L, Hermosilla T, Álvarez-Mozos J, et al. Identifying forest harvesting practices: Clear-cutting and thinning in diverse tree species using dense Landsat time series [J]. Forest Ecology and Management, 2025, 578: e122442.
- [17] 张若琪, 张琼锐, 王晨茜, 等. 珠三角景观格局变化对生境及碳储量的影响[J]. 生态科学, 2025, 44(1): 221-231.
Zhang Ruoqi, Zhang Qiongrui, Wang Chenxi, et al. Effects of landscape pattern changes in the Pearl River Delta on habitat quality and carbon storage [J]. Ecological Science, 2025, 44(1): 221-231.
- [18] Chen Miaomiao, Xiao Fei, Wang Zhou, et al. Monitoring water clarity of lakes in the middle-lower Yangtze Plain using Landsat observations (1984—2023) [J]. Ecological Indicators, 2024, 169: e112825.
- [19] 张景华, 封志明, 姜鲁光. 土地利用/土地覆被分类系统研究进展[J]. 资源科学, 2011, 33(6): 1195-1203.

- Zhang Jinghua, Feng Zhiming, Jiang Luguang. Progress on studies of land use/land cover classification systems [J]. *Resources Science*, 2011, 33(6): 1195-1203.
- [20] 刘雅楠. 鄂尔多斯市产业结构调整对碳排放的影响研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2023.
- Liu Yanan. Study on the influence of industrial structure adjustment on carbon emission in Ordos City [D]. Hohhot: Inner Mongolia Normal University, 2023.
- [21] 张倩. 鄂尔多斯市县域新型城镇化水平测度及发展对策研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2023.
- Zhang Qian. Reserch on new urbanization level measurement and development countermeasuers of Ordos County [D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2023.
- [22] 马耀东. 黑龙江省水土资源生态盈亏的时空变化及影响因素分析 [D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2023.
- Ma Yaodong. Spatial-temporal changes and influencing factors of ecological profit and loss of water and land resources in Heilongjiang Province [D]. Harbin: Helongjiang University, 2023.
- [23] 张华新, 贺亚伟. 绿色技术进步的水资源生态足迹收缩效应及作用机制 [J]. *资源科学*, 2025, 47(3): 526-542.
- Zhang Huaxin, He Yawei. Effect of green technological progress on reducing the ecological footprint of water resources and mechanism [J]. *Resources Science*, 2025, 47(3): 526-542.
- [24] Yin Weibo, Hu Qingfeng, Liu Jinping, et al. Assessing climate and land-use change scenarios on future desertification in northeast Iran: A data mining and google earth engine-based approach [J]. *Land*, 2024, 13(11): e1802.
- [25] 杨筠慧, 史文娇, 周伟奇, 等. 城市景观格局演变驱动因子及其特征研究综述 [J]. *生态学报*, 2024, 44(22): 10486-10498.
- Yang Junhui, Shi Wenjiao, Zhou Weiqi, et al. A review on the driving factors and their characteristics in urban landscape pattern changes [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(22): 10486-10498.
- [26] Wang Hao, Wang Jian, Zhang Guanghui. Impact of landscape positions on soil erodibility indices in typical vegetation-restored slope-gully systems on the Loess Plateau of China [J]. *Catena*, 2021, 201: e105235.
- [27] Yang Liu, Wen Xueru, Huang Zhaohuan, et al. Spatiotemporal evolution of water resource sustainability and carrying capacity based on water resource ecological footprint: A case study of Henan Province, China [J]. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2025, 31(3/4): 332-347.
- [28] 郭慧, 董士伟, 吴迪, 等. 基于生态系统服务价值的生态足迹模型均衡因子及产量因子测算 [J]. *生态学报*, 2020, 40(4): 1405-1412.
- Guo Hui, Dong Shiwei, Wu Di, et al. Calculation and analysis of equivalence factor and yield factor of ecological footprint based on ecosystem services value [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(4): 1405-1412.
- [29] Bucak Ç, Önder A Ö, Çatık A N. Spatial effects of renewable and fossil energy consumption on the ecological footprint for the EU Countries [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2024, 31(43): 55204-55221.
- [30] 刘淼, 胡远满, 李月辉, 等. 生态足迹方法及研究进展 [J]. *生态学杂志*, 2006, 25(3): 334-339.
- Liu Miao, Hu Yuanman, Li Yuehui, et al. Ecological footprint model and its research advances [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(3): 334-339.
- [31] Zhang Song, Luo Ya, Xiong Kangning, et al. Research progress on ecological carrying capacity and ecological security, and its inspiration on the forest ecosystem in the karst desertification control [J]. *Forests*, 2024, 15(9): e1632.
- [32] 王书华, 毛汉英, 王忠静. 生态足迹研究的国内外近期进展 [J]. *自然资源学报*, 2002, 17(6): 776-782.
- Wang Shuhua, Mao Hanying, Wang Zhongjing. Progress in research of ecological footprint all over the world [J]. *Journal of Natural Resources*, 2002, 17(6): 776-782.
- [33] 徐中民, 张志强, 程国栋. 甘肃省1998年生态足迹计算与分析 [J]. *地理学报*, 2000, 55(5): 607-616.
- Xu Zhongmin, Zhang Zhiqiang, Cheng Guodong. The calculation and analysis of ecological footprints of Gansu Province [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(5): 607-616.
- [34] 王亚坤. 基于生态系统服务价值和生态足迹模型的黄河流域生态补偿标准测度研究 [D]. 济南: 山东财经大学, 2024.
- Wang Yakun. Study on the measurement of ecological compensation standards in the Yellow River basin based on ecosystem service value and ecological footprint models [D]. Jinan: Shandong University of Finance and Economics, 2024.
- [35] 赵景峰, 李妍. 黄河流域城市群综合承载力评价及时空分异演进 [J]. *生态经济*, 2022, 38(2): 75-83.
- Zhao Jingfeng, Li Yan. Comprehensive carrying capacity evaluation and spatiotemporal differentiation evolution of urban agglomeration in the Yellow River basin [J]. *Ecological Economy*, 2022, 38(2): 75-83.
- [36] 田萍萍. 基于生态足迹分析的陕西关中地区生态安全与生态补偿研究 [D]. 西安: 西北大学, 2006.
- Tian Pingping. Study on regional ecological security and compensation based on the analysis of ecological footprint in Guanzhong Region, Shaanxi Province [D]. Xi'an: Northwest University, 2006.
- [37] Senbel M, McDaniels T, Dowlatabadi H. The ecological footprint: A non-monetary metric of human consumption applied to North America [J]. *Global Environmental Change*, 2003, 13(2): 83-100.
- [38] Yu Limin, Pu Lijie. Landscape and ecosystem health dynamics in response to terrain in southwest China's karst mountains: A study with evidence since 1980 [J]. *Environmental and Sustainability Indicators*, 2025, 28: e100923.