

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2026.01.015; CSTR:32311.14.rswc.2026.01.015.

宁佳俊, 杨振奇, 郭建英. 窟野河流域植被覆盖及水土保持功能的时空演变及其驱动机制[J]. 水土保持研究, 2026, 33(1):90-100, 110.

Ning Jiajun, Yang Zhenqi, Guo Jianying. Spatiotemporal evolution of vegetation cover and soil and water conservation function in Kuye River Basin and its driving mechanisms[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2026, 33(1):90-100, 110.

窟野河流域植被覆盖及水土保持功能的 时空演变及其驱动机制

宁佳俊^{1,2}, 杨振奇¹, 郭建英¹

(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 100381; 2. 内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 呼和浩特 010018)

摘要: [目的] 明确窟野河流域植被覆盖的空间格局、变化特征及与水土保持服务的关联, 揭示地形和气候因子的核心驱动作用及自然与社会因子的交互效应, 确定关键适宜性区间, 为该流域植被覆盖与水土保持服务关系及驱动机制的探究提供依据。[方法] 综合运用1990—2020年Landsat影像, 通过像元二分模型反演植被覆盖度(FVC), 结合InVEST模型量化水土保持服务, 并借助地理探测器揭示驱动机制。[结果] 流域FVC呈“西北低、东南高”格局, 近30年整体改善显著, 改善面积占比25.35%, 退化面积占比10.63%, 且植被改善区域土壤保持量提升超30%, 高植被覆盖区(FVC>0.7)土壤保持量达50 t/(hm²·a)以上, 地形因子(坡度、地形起伏度)和气候因子(降水、日照)是水土保持服务的核心驱动因素, 其中坡度解释力最强($q=0.449$), 自然与社会因子交互作用显著, 同时识别出植被—水土保持服务的关键适宜性区间。[结论] 窟野河流域植被覆盖度与水土保持服务呈显著正相关, 坡度、地形起伏度及降水是水土保持服务的核心驱动因素, 并识别出(如坡度7.69°~12.53°、降水540~584 mm)等最适宜范围。

关键词: 植被覆盖变化; 窟野河流域; InVEST模型; 地理探测器; 水土保持服务; 阈值识别

中图分类号: X171.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)01-0090-11

Spatiotemporal evolution of vegetation cover and soil and water conservation function in Kuye River Basin and its driving mechanisms

Ning Jiajun^{1,2}, Yang Zhenqi¹, Guo Jianying¹

(1. National Field Scientific Observation and Research Station of Grassland Eco-hydrology on Northern Foot of Yinshan Mountain, Inner Mongolia, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100381, China;

2. College of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

Abstract: [Objective] This study aims to clarify the spatial patterns and variation characteristics of vegetation cover in the Kuye River Basin, and its correlation with soil and water conservation services, reveal the core driving roles of topographic and climatic factors and the interaction effects of natural and social factors, and determine key suitability intervals, thereby providing a basis for investigating the relationship between vegetation cover and soil and water conservation services and its driving mechanisms in the river basin. [Methods] Based on the Landsat images from 1990 to 2020, the fractional vegetation cover (FVC) was inverted by the pixel dichotomy model, the soil and water conservation services were quantified using the InVEST model, and the driving mechanisms were revealed using the geodetector. [Results] The FVC in the river basin showed a spatial pattern of “low in the northwest and high in the southeast”. Over the past three decades, the overall improvement was significant, with

收稿日期: 2025-04-02

修回日期: 2025-04-20

接受日期: 2025-05-10

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“重点水土流失区生态系统(西黑岱流域)水土保持综合整治技术集成效益评估项目”(MK22205031); 鄂尔多斯市水利科技项目“水土保持对十大孔兑河流健康影响”(MK20220515)

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

通信作者: 杨振奇(1993—), 男, 内蒙古赤峰人, 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://stbcyj.paperonice.org>

improved areas accounting for 25.35% and degraded areas for 10.63%. Areas with vegetation improvement saw an increase of over 30% in soil retention rates, while areas with high vegetation cover ($FVC > 0.7$) achieved soil retention rates exceeding $50 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$. Topographic factors (slope, terrain relief) and climatic factors (precipitation, sunshine) were the core driving factors of soil and water conservation services, with slope having the strongest explanatory power ($q=0.449$). Significant interactions between natural and social factors were observed, and key suitability intervals of vegetation and soil and water conservation services were identified. [Conclusion] Vegetation cover in the Kuye River Basin is significantly positively correlated with soil and water conservation services. Slope, terrain relief, and precipitation are the core driving factors of soil and water conservation services, with optimal ranges (such as slope $7.69^\circ \sim 12.53^\circ$, precipitation $540 \sim 584 \text{ mm}$) identified.

Keywords: vegetation cover change; Kuye River Basin; InVEST model; geodetector; soil and water conservation services; threshold identification

植被覆盖度(Fractional Vegetation Cover, FVC)是表征地表植被动态的核心指标,直接影响水土保持、水源涵养等关键生态服务功能,对区域生态安全与可持续发展具有重要科学意义^[1-2]。在黄河流域生态保护和高质量发展国家战略背景下,窟野河流域作为黄河中游粗泥沙的集中来源区,生态环境极其脆弱^[3]。近年来,尽管一系列生态工程(如退耕还林、小流域综合治理)显著提升了流域植被覆盖度,但流域内仍存在植被恢复不稳定、土壤侵蚀风险高等问题^[4]。因此,明确植被变化对水土保持服务的影响,并揭示自然与社会因子的协同驱动机制,成为该区域生态修复亟待解决的关键科学问题^[5-6]。

国内外学者围绕流域植被覆盖及水土保持功能开展了大量研究。早期阶段,研究主要集中在单一尺度下植被覆盖度的变化监测方面。学者们利用遥感影像提取不同时期植被覆盖信息,如王蓉等^[7]利用高分辨率影像提取天然林与人工林植被盖度,温小乐等^[8]基于TM影像对福州市长乐区的植被覆盖度变化进行研究并得到长乐区2006—2009年的植被盖度变化情况,王静等^[9]基于landsat影像对天津市西青区植被覆盖度变化进行研究并得到2014—2017年的植被变化情况。随着对植被覆盖研究的不断深入,部分学者开始关注到对水土保持功能的影响,并尝试构建综合模型去评估水土保持效益,如胡胜等^[10]以黄河一级支流无定河(营盘山库区)为研究区,采用生态系统服务和交易的综合评估模型评估流域土壤保持功能。然而,传统的研究存在一定局限性。在植被覆盖度方面,多数研究聚焦于单一或少数几个影响因子对植被覆盖的影响,缺乏对地形、气候、人类活动等多尺度、多因素综合驱动机制的系统剖析。在模型应用上,对复杂地形和生态条件下模型的适用性及参数优化研究不足,难以精准量化植被—水土保持功能的时空演变特征^[11-12]。

鉴于此,本研究以窟野河流域为对象,旨在解决上述科学问题。通过整合多源遥感数据、气象数据及社会经济数据,运用像元二分模型、InVEST模型和地理探测器等方法,综合探究流域植被覆盖及水土保持功能的时空演变规律及其驱动机制。具体内容包括:(1)基于长时间序列遥感影像,反演植被覆盖度,分析其时空变化特征;(2)利用InVEST模型量化水土保持服务功能,评估其动态变化;(3)运用地理探测器揭示地形、气候、土地利用等多因子对植被—水土保持功能的驱动作用及交互效应;(4)识别影响植被—水土保持功能的适宜性区间,为流域生态保护与修复提供科学依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

窟野河流域(图1)($38^\circ 22' 26'' \sim 39^\circ 51' 18'' \text{N}$, $109^\circ 25' 56'' \sim 110^\circ 48' 49'' \text{E}$)位于陕蒙交界,总面积 8706 km^2 ,是黄土高原向毛乌素沙地过渡的生态脆弱区^[13]。流域北接内蒙古高原,南抵黄土丘陵沟壑区,地势由西北向东南倾斜,海拔 $718 \sim 1575 \text{ m}$,地形起伏度达 255 m ^[14]。气候属于旱半干旱温带大陆性气候,年均气温 $6.33 \sim 10.84 \text{ }^\circ\text{C}$,年均降水量 358.2 mm (1990—2020年)。流域地类主要以草地为主,草地面积达 5237.84 km^2 ,占流域面积 60.55% ,广泛分布于流域内的风沙区和黄土丘陵区,是当地畜牧业发展的重要基础。在经济产能方面,流域煤炭产业在地区生产总值中占比较高,但长期以来,过度依赖煤炭资源开发带来了一系列环境问题,如地表塌陷、植被破坏、水土流失加剧等,制约了区域经济的可持续发展。

作为黄河粗泥沙集中来源区,流域生态系统极为脆弱^[15]。2000年后,随着退耕还林(草)、京津风沙源治理等国家生态工程的实施,流域植被覆盖度显著提升,但仍存在植被结构单一、生态服务功能不稳

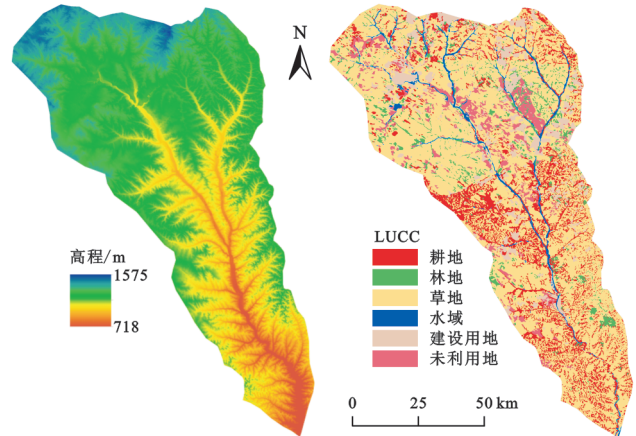
定等问题^[16]。流域内煤炭资源开发与生态保护的矛盾突出且周边植被退化率较高,同时研究区的过渡带特征与人类活动干扰,使其成为探讨生态脆弱区植被—土壤系统协同调控的典型区域。

1.2 数据来源及预处理

本研究以“植被变化—生态服务—驱动机制”为逻辑主线,整合多源数据与模型方法,解析窟野河流域植被覆盖动态变化对水土保持服务的影响及其驱动机制。

植被变化基于1990—2020年的Landsat影像,在经过ENVI 5.3预处理后提取NDVI并反演植被覆盖度(FVC)。生态服务评估是基于中国逐日降水数据通过计算得到降雨侵蚀力因子(R),地形与土壤数据是从地理空间数据云平台获取来生成坡度、坡长因子(LS)和土壤可蚀性因子(K)。驱动机制的最优范围结合自然因子(年均降水、日照时间、气温、地形起

伏度、高程)和社会因子(GDP、人口密度、土地利用类型)进行解析。具体驱动数据来源见表1。



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,下图同。

图1 窟野河区位示意图

Fig. 1 Location map of Kuye River

表1 驱动因子对照表

Table 1 Comparison table of driving factors

驱动因子	指标	单位	分辨率	来源
X_1	坡度	(°)	30 m	
X_2	地形起伏度		30 m	地理空间数据云(https://www.gscloud.cn/search)
X_3	高程	m	30 m	
X_4	年均日照时间	h	1 km	国家地球系统科学数据中心(http://www.geodata.cn)
X_5	GDP	万元/ km^2	1 km	中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn/)
X_6	人口密度	人/ km^2	1 km	
X_7	年降水	mm	1 km	国家地球系统科学数据中心(http://www.geodata.cn)
X_8	土壤类型		1 km	中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn/)
X_9	年均温度	°C	1 km	国家青藏高原科学数据中心(https://data.tpdc.ac.cn/)
X_{10}	年均蒸发	mm	1 km	国家地球系统科学数据中心(http://www.geodata.cn)
X_{11}	土地利用类型		30 m	中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn/)

2 研究方法

本研究采用基于像元二分模型反演1990—2020年植被覆盖度(FVC),结合一元线性回归揭示时空演变规律;运用InVEST模型耦合RUSLE方程量化土壤保持量;借助地理探测器从单因子探测、交互作用分析及最优区间识别三方面解析驱动机制。

2.1 植被变化分析

2.1.1 植被覆盖度反演 像元二分模型FVC假设一个像元的地表由有植被覆盖部分地表与无植被覆盖部分地表组成,计算流域植被覆盖情况,并将获取到的高清影像与基于像元二分模型反演得到的FVC结果进行对比分析,计算得到总体分类精度为92%。Kappa系数达到0.88。计算FVC的公式如下:

$$FVC = \frac{NDVI - NDVI_{soil}}{NDVI_{veg} - NDVI_{soil}} \quad (1)$$

式中:FVC为植被覆盖度;NDVI为归一化植被指数;NDVI_{soil}为完全无植被归一化植被指数;NDVI_{veg}为近乎完全覆盖区域的归一化植被指数;通过5%的置信度截取NDVI的上下两个阈值,并对NDVI中数值最大和最小的5%区域进行平均值处理,从而得到NDVI_{soil}和NDVI_{veg}。

为了直观地观测流域FVC空间格局变化,借鉴前人对FVC的分级标准^[17],将窟野河流域1990—2020年FVC分为5个等级(表2)并对不同等级的面积占比情况进行统计。为了有效判别植被变化的显著特征,本文选取1990—2020年以5a为间隔7期的FVC结果进行植被覆盖度演变分析。

2.1.2 时空变化趋势分析 通过一元线性回归模型统计出各像元植被覆盖的多年变化趋势并拟合 FVC 变化趋势及方向^[18],反映窟野河植被的变化规律,具体表达式如下:

$$\theta_{\text{slope}} = \frac{n \sum_{k=1}^j j \cdot \text{FVC}_k - \sum_{k=1}^j j \sum_{k=1}^j \text{FVC}_k}{\sum_{k=1}^j j^2 - (\sum_{k=1}^j j \sum_{k=1}^j j)^2} \quad (2)$$

式中: θ_{slope} 为斜率值; j 为观测年份值; FVC_k 为第 k 年的 FVC, $\theta_{\text{slope}} < 0$ 时该像元处的植被减少 $\theta_{\text{slope}} > 0$ 时植被增加, $\theta_{\text{slope}} = 0$ 则说明植被状况未改变。

表 2 植被分级
Table 2 Vegetation classification

等级	FVC 范围	植被状况
1	0~0.1	裸土地
2	0.1~0.3	低植被覆盖
3	0.3~0.5	中植被覆盖
4	0.5~0.7	中高植被覆盖
5	0.7~1	高植被覆盖

表 3 各驱动因子分级对照

Table 3 Comparison of classification of driving factors

驱动因子	1	2	3	4	5	6
X_1 坡度/(°)	0~3.95	3.95~7.69	7.69~12.53	12.53~19.78	19.78~56.06	
X_2 地形起伏度/m	0~28	28~47	47~70	70~101	101~255	
X_3 高程/m	718~1041	1041~1169	1169~1272	1272~1376	1376~1575	
X_4 a 均日照时间/h	3078~3079	3079~3084	3084~3121	3121~3189	3189~3204	
X_5 GDP/(万元·km ₂)	412~1340	1340~1915	1915~2835	2835~5528	5528~11627	
X_6 人口密度/(人·km ₂)	43~44	44~52	52~63	63~124	124~294	
X_7 年降水/mm	421~457	457~480	480~506	506~540	540~584	
X_8 土壤类型	黄绵土	栗钙土	淡栗钙土	棕钙土	流动风沙土	半固定风沙土
X_9 年均温度/°C	6.33~7.26	7.26~7.94	7.94~8.58	8.58~9.16	9.16~10.84	
X_{10} 年均蒸发/mm	974~1023	1023~1053	1053~1081	1081~1106	1106~1156	
X_{11} 土地利用类型	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地

2.3.1 单因子探测 计算各驱动因子对 FVC 和沉积物保留量的解释力(q 值)^[20],公式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (5)$$

式中: N_h 和 σ_h^2 为因子分层的样本数与方差; N 和 σ^2 为全局样本数与方差。

2.3.2 交互作用探测 分析自然因子(如降水、坡度)与社会因子(如 GDP、采矿强度)的交互类型(双因子增强/非线性增强),揭示其对“植被—水土保持”系统的协同驱动机制^[21]。

2.3.3 最优适宜区间识别 基于风险探测器,确定植被覆盖与水土保持服务的最适区间(如 FVC > 0.5 时沉积物保留量提升 $\geq 30\%$),为生态修复提供量化依据^[22]。

2.2 生态服务评估(InVEST 模型)

采用 INVEST 水土保持模块基于修订的通用土壤流失方程(Revised Universal Soil Loss Equation, RUSLE)量化植被覆盖变化对土壤侵蚀的抑制作用^[19]:

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (3)$$

$$C = 0.65 \text{FVC}^{-0.8} \quad (4)$$

式中: A 为土壤侵蚀量[t/(hm²·a)]; R 为降雨侵蚀力因子; K 为土壤可蚀性因子; LS 为地形因子(坡度坡长); C 为植被覆盖与管理因子; P 为水土保持措施因子。

其中通过分析植被覆盖度(FVC)与 RUSLE 方程中植被覆盖与管理因子(C 因子)的关系,建立基于 FVC 的 C 因子估算模型。

2.3 驱动机制解析(地理探测器)

为探究窟野河流域植被变化及其对水土保持服务影响的过程。本研究运用地理探测器探究单因子作用、双因子交互作用及最优区间识别,将各驱动因子按照自然断点法分为 5 个等级,其中土地类型和土壤类型按照标准分类体系分为 6 类,具体分类见表 3。

3 结果与分析

3.1 植被覆盖的时空演变规律及演变趋势

在探究窟野河流域植被变化,先通过目视解译得到窟野河流域 1990—2020 年每 5 a 为间隔的植被覆盖图,明确窟野河流域植被覆盖时空格局变化,进而通过 MATLAB 软件运用趋势分析法分析流域植被变化趋势,为揭示水土保持功能演变奠定基础。

3.1.1 植被覆盖的时空演变规律 从空间分布(图 2)来看,近 30 a 内窟野河流域植被覆盖呈现出明显的空间差异。1990—2020 年期间,窟野河流域植被覆盖度在空间上呈现出“西北低、东南高”的分布格局。高植被覆盖区(FVC > 0.7)在 1990 年时在流域东南

部仅有小范围的分布。此后,随着一系列生态工程的实施,其面积逐步扩大,尽管在 2005 年出现了短暂下降,但之后又显著增加,至 2020 年已在东南部的神木市、准格尔旗等地形成了更为广泛的区域。中高植被覆盖区(FVC 0.5~0.7)主要分布于流域东南部与中部的过渡地带。近 30 年该区域的空间范围变化呈现出先小幅度波动的态势,在 2015 年左右达到较大范围。中低植被覆盖区(FVC 0.1~0.5)在 1990 年时广泛分布于流域西北部的东胜区、达拉特旗等地。

1990—2005 年受自然环境及人类活动等因素影响,其面积或有增加,分布范围变化不大。2005 年后随着生态保护工作的推进,部分区域植被覆盖度提升,该区域范围向西北方向收缩,靠近东南部的一些区域逐渐转变为中高植被覆盖区。裸地(FVC<0.1)在 1990 年主要集中于北部毛乌素沙地边缘,面积占比较大。从 1990—2020 年裸地面积持续减少,特别是 1995—2015 年减少幅度较为明显,到 2020 年,裸地面积进一步缩小。

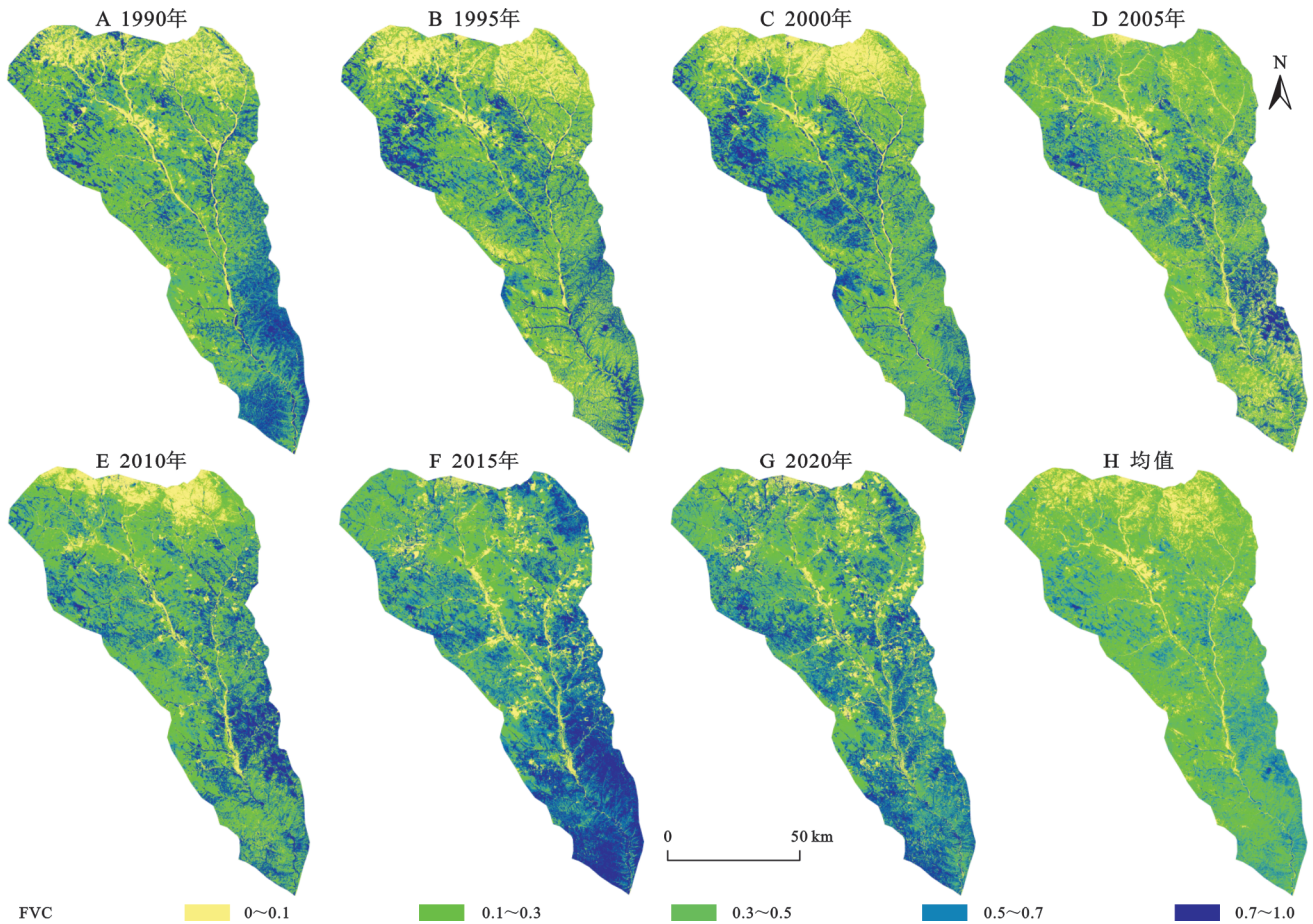


图 2 窟野河流域不同 FVC 等级分布

Fig. 2 Distribution of different FVC levels in Kuye River Basin

从不同年份各等级植被覆盖面积变化(图 3)来看,1990—2020 年期间存在明显波动。1990 年、2005 年和 2015 年为近 30 年的 3 个关键时间点。裸地主要分布在窟野河流域北部地带,1995 年裸地面积占比最大,达到 16.29%,此后呈下降趋势,到 2015 年,裸地面积占比降至 7.11%,这表明随着时间推移和生态工程的实施,裸地面积得到了有效控制。低植被覆盖在 2005 年面积占比升至 33.80%,之后因生态工程作用,面积占比有所变化。中植被覆盖面积在 2005 年前出现拐点,由之前的下降趋势在 2005 年开始转向增加,2005 年占比为 27.50%,2020 年进一步增加到 35.91%,体现出该等级植被覆盖在后期得到了较好

的改善。中高植被盖度在 2015 年达到最值,占比 24.26%,高植被盖度在 2005 年降至 13.18%,随后开始增加,在 2015 年后显著增加至 24.23%,说明高植被覆盖区域在生态工程等因素影响下逐渐扩大。

3.1.2 植被覆盖的演变趋势 基于植被覆盖度(FVC)数据,采用一元线性回归模型分析流域植被覆盖的时序变化特征^[23](图 4),并通过显著性检验划分植被变化趋势等级(表 4)。结果表明,近 30 年间窟野河流域 FVC 呈现“整体改善、局部退化”的显著特征,其中改善区域总面积占比 25.35%,退化区域面积占比 10.63%,64.02% 的区域 FVC 基本保持稳定。植被改善表现为两个阶段:1990—2005 年以中低覆盖

区扩张为主,2005年后高覆盖区显著增加。明显改善区(5.60%)集中于东南部准格尔旗,轻微改善区(19.75%)分布于西南部;退化区域(10.63%)主要沿河道两岸及伊金霍洛旗矿区呈带状分布,其中明显退

化区占比 3.05%(表 4)。窟野河流域 FVC 时间变化受自然因素与人类活动的双重作用,生态工程的推进对植被恢复影响较大,但人类活动对植被造成的退化问题仍需通过针对性的综合治理措施加以解决。

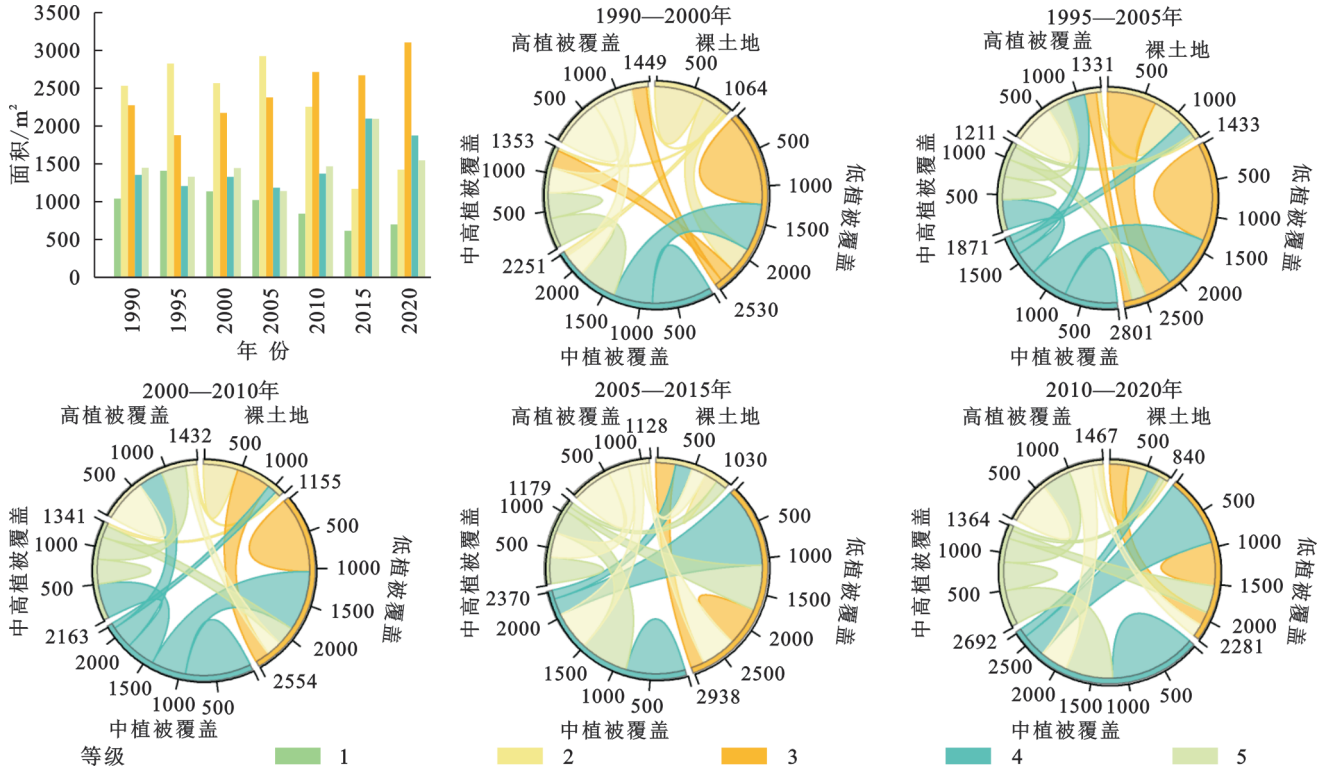


图 3 窟野河流域不同年份 FVC 面积占比及转移情况

Fig. 3 Proportion and transfer of FVC areas in different years in Kuye River Basin

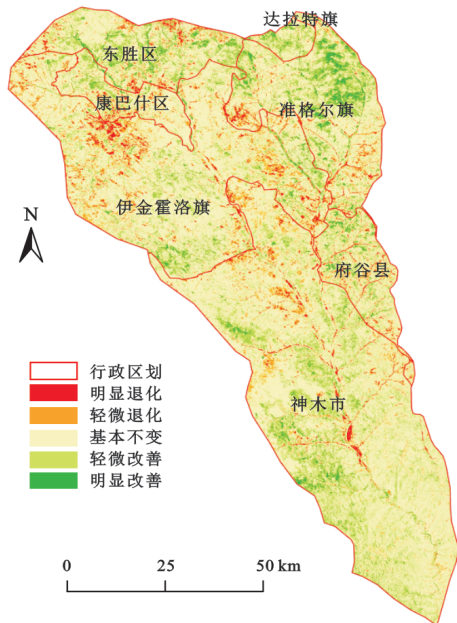


图 4 窟野河流域植被覆盖变化趋势空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of vegetation cover change trends in Kuye River Basin

3.2 水土保持功能时空演变

基于 InVEST 模型耦合 RUSLE 方程的测算结果,窟野河流域土壤保持量呈现显著的“东南高、西

北低”空间分异,与植被覆盖度(FVC)呈现显著正相关,根据窟野河流域侵蚀严重的特点将流域土壤保持量分为 3 个不同的等级[0~10, 10~50, >50 t/(hm²·a)]。窟野河流域土壤保持量空间分异特征显著,呈现“东南高一西北低”的梯度格局(图 5)。高值区[>50 t/(hm²·a)]集中分布于流域东南部神木市及准格尔旗,中保持量区[10~50 t/(hm²·a)]集中分布在中部过渡地带,2005年后随退耕还林工程推进,面积也显著扩张。低值核心区[<10 t/(hm²·a)]主要分布在西北部达拉特旗及东胜区植被稀疏化(FVC 均值 0.21)地区,该区地表抗蚀力不足,暴雨条件下侵蚀模数可达 8 500 t/km²[24]。

表 4 植被变化趋势面积比例统计

Table 4 Statistics of area proportion of vegetation change trends

趋势等级	趋势值范围	面积比例/%
明显退化	<-0.1	3.05
轻微退化	-0.1~0.05	7.58
基本稳定	-0.05~0.05	64.02
轻微改善	0.05~0.1	19.75
明显改善	>0.1	5.60

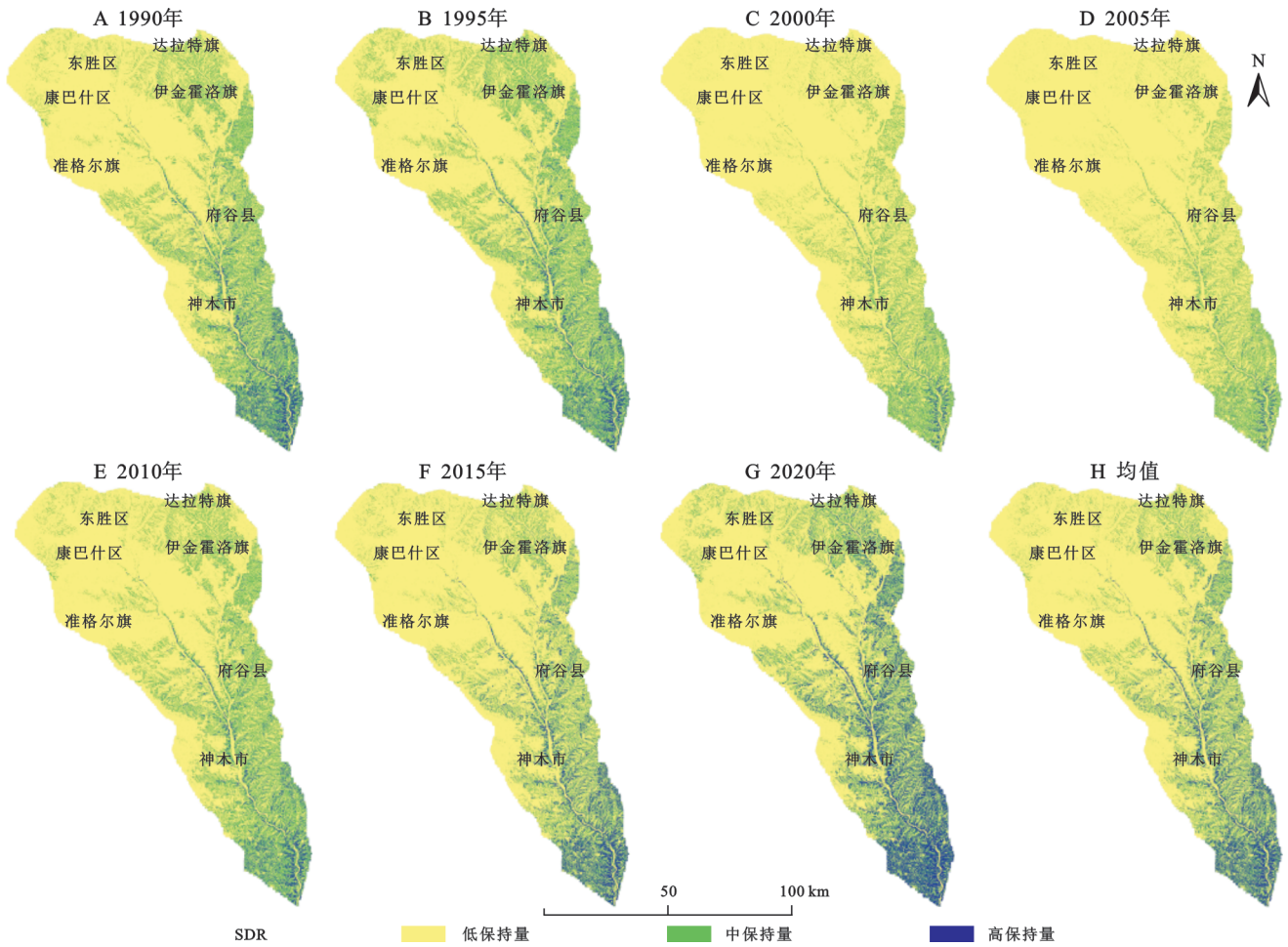


图 5 窟野河流域土壤保持量分布
Fig. 5 Distribution of soil retention in Kuye River Basin

在时间序列上,1990—2020年期间窟野河流域土壤保持量呈现出动态变化,这与该流域植被覆盖度(FVC)的变化密切相关。基于土壤保持量等级[0~10, 10~50, >50 t/(hm²·a)]的面积变化分析(图6),窟野河流域土壤保持能力在1990—2020年呈现阶段性波动特征。

1990—2005年低保持量[0~10 t/(hm²·a)]面积总体呈现扩张趋势,从1990年的5 982.38 km²(占流域70%)扩至2005年的7 335.92 km²(85.96%),中保持量[10~50 t/(hm²·a)]和高保持量[>50 t/(hm²·a)]总体呈现下降趋势,中保持量从1990年2 121.68 km²(24.86%)下降到1 098.29 km²(12.87%),高保持量从430.37 km²下降到100.66 km²。2005年后退耕还林与京津风沙源治理工程全面铺开,东南部神木市及准格尔旗人工林草覆盖率大幅提升(2015年高覆盖区占比24.23%),东南部神木市等高植被覆盖(FVC>0.7)成为土壤保持核心区。使流域2005—2020年低保持量面积呈现下降趋势,到2020年低保持量面积降为5 669.92 km²(66.44%),中、高保持量分别增加到2 314.87 km²(27.12%)和549.34 km²(6.44%)。

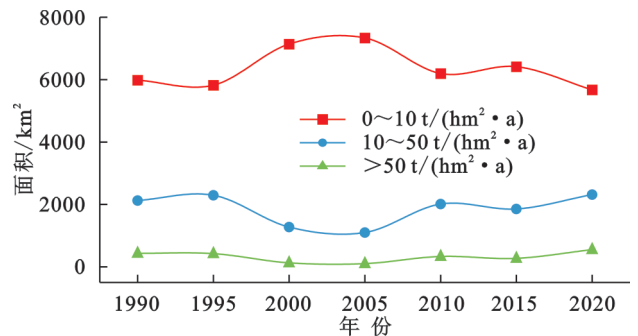


图 6 土壤保持量等级面积变化分析
Fig. 6 Analysis of area changes in different soil conservation levels

3.3 植被—水土保持功能驱动机制解析

在探究窟野河流域植被变化及其对水土保持服务影响的过程中,深入剖析驱动机制至关重要^[25]。本研究运用地理探测器,各驱动因子分类情况由表3可知,从单因子探测、交互作用探测以及最优区间识别3个方面展开分析,全面揭示影响该流域“植被—水土保持”系统的驱动因素。

3.3.1 单因子驱动效应 通过地理探测器分析各驱动因子对窟野河流域土壤保持量的单因子探测(表

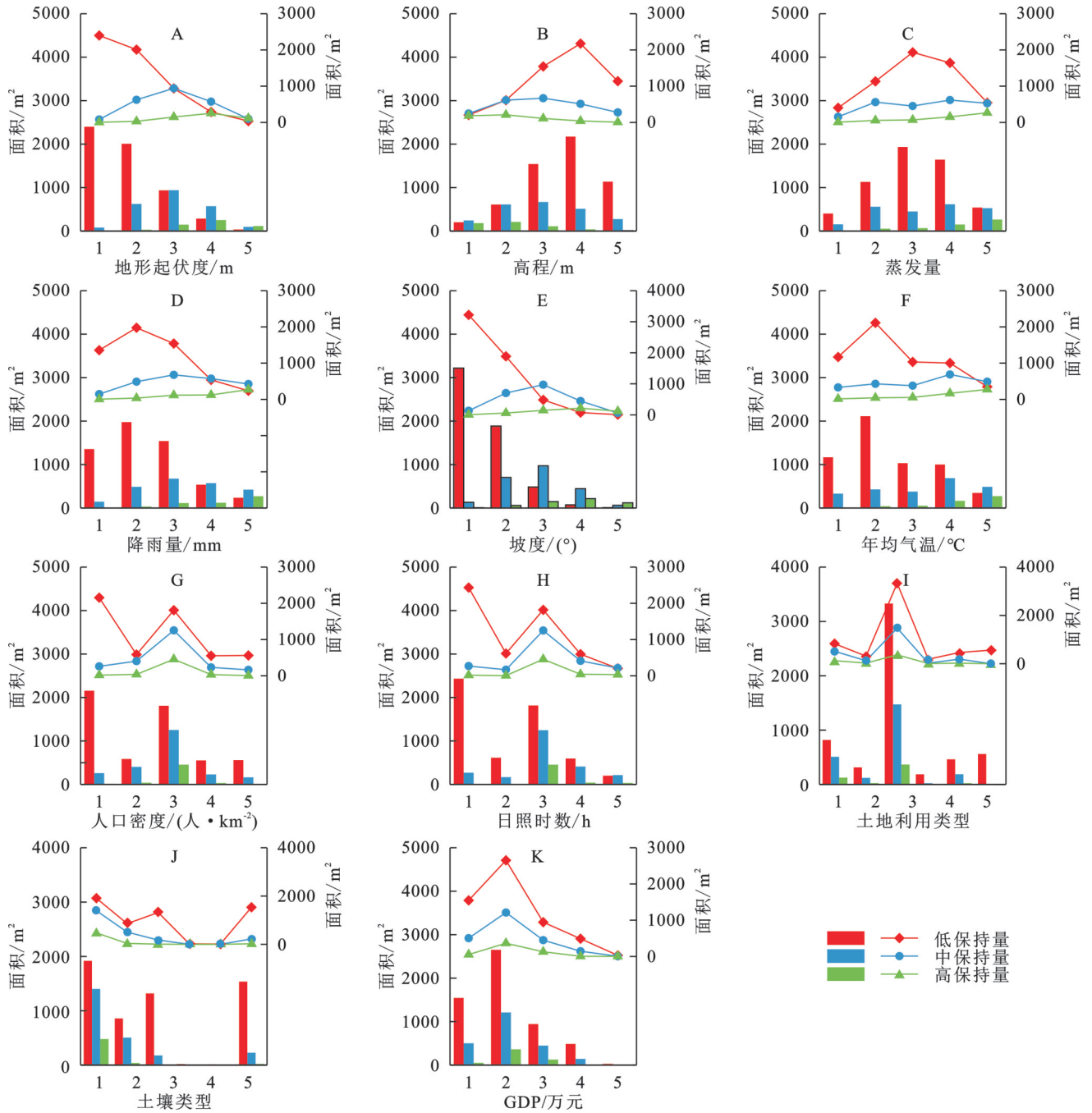


图 8 不同影响因子各层次 SDR 的统计结果

Fig. 8 Statistical results of SDR at different levels of different influencing factors

4 讨论

4.1 窟野河流域植被变化对水土保持服务的影响

窟野河流域近 30 年植被覆盖度(FVC)的显著改善(改善面积占比 25.35%)与退耕还林、禁牧等政策密切相关。东南部高植被覆盖区(FVC>0.7)土壤保持量达 50 t/(hm²·a)以上,而西北部低覆盖区(FVC<0.3)不足 10 t/(hm²·a),这一空间分异与张宏伟等^[3]在黄河流域的研究结果相同。植被覆盖的空间异质性直接决定水土保持功能的强弱,并且植被改善通过降低 RUSLE 模型中的 C 因子(植被覆盖与管理因子)显

著抑制了土壤侵蚀速率。2015 年东南部人工林草带扩张使中高土壤保持量区面积增加至 27.12%,也就证实了冯强等^[19]提出的“植被恢复对侵蚀控制的非线性增益效应”。局部退化现象(如伊金霍洛旗退化区占比 3.05%)表明,高强度煤炭开采导致的地表扰动可能抵消生态修复效益,与何源等^[15]关于人类活动加剧侵蚀风险的研究相呼应,提示未来需在矿区推行“边开采边修复”模式,以平衡资源开发与生态保护。

4.2 水土保持服务的驱动机制解析

地形因子通过影响植被生长和土壤侵蚀过程,对 FVC 和水土保持服务起着核心驱动作用。植被覆盖

度较高且土壤保持性较好的区域均分布在高程较低、地形起伏度较小的地带。地形起伏度通过改变汇流路径和侵蚀能量分布,加剧局部水土流失。研究显示,在坡度 $7.69^{\circ}\sim 12.53^{\circ}$ 、地形起伏度 $47\sim 70\text{ m}$ 的区域,中高土壤保持量面积占比分别达 39.1% 和 38.04% ,表明适度的地形条件有利于土壤保持。气候因子中,降水呈双重作用: $540\sim 584\text{ mm}$ 区间通过促进植被(FVC峰值)使土壤保持量增幅 49.6% ,但 $> 506\text{ mm}$ 高强度降水可能加剧侵蚀;日照时长在 $3\ 121\sim 3\ 189\text{ h}$ 内通过提升植被生物量间接增强固土能力。社会经济因子则表现间接影响,土地利用类型的转变显著影响水土保持服务。草地和林地通过高植被覆盖($FVC>0.5$)和复杂根系网络,使土壤保持量较耕地有所提升。政策驱动的土地利用调整(如退耕还林)使东南部林草地面积增加 24.23% ,土壤保持量增幅大。GDP和人口密度的影响呈现阈值效应,在GDP($1\ 340\sim 1\ 915$)万元/ km^2 、人口密度 $52\sim 63$ 人/ km^2 范围内,人类活动压力与生态保护投入达到平衡,土壤保持量最优。

4.3 关键驱动因子的最优调控区间

研究识别(如坡度 $7.69^{\circ}\sim 12.53^{\circ}$ 、降水 $540\sim 584\text{ mm}$)等最适宜范围。在坡度适宜区间,植被恢复的边际效益最大,应优先布局人工造林与封禁保育措施;而在陡坡($> 19.78^{\circ}$)或极缓坡($< 3.95^{\circ}$)区域,需结合工程措施(如梯田建设)或自然恢复策略。降水阈值的确定有助于优化水资源管理,在 $540\sim 584\text{ mm}$ 区域推广耐旱植被,而在干旱区($< 457\text{ mm}$)则需限制高强度人类活动以避免植被退化。

此外,社会经济因子的适宜范围(如人口密度 $52\sim 63$ 人/ km^2 、GDP $1\ 340\sim 1\ 915$ 万元/ km^2)表明,适度的人类活动压力与生态保护投入的平衡是维持土壤保持能力的关键。这为制定分区管理政策提供了科学支撑,呼应了引言中关于如何通过阈值调控提升生态修复效能的问题。

5 结论

(1)窟野河流域近30年植被覆盖度(FVC)整体改善显著,改善面积占比 25.35% ,退化面积仅 10.63% ,形成“西北低、东南高”的空间格局;流域高植被覆盖区($FVC>0.7$)土壤保持量达 $50\text{ t}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$ 以上,而低覆盖区不足 $10\text{ t}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$,表明植被覆盖度与水土保持服务呈显著正相关。

(2)坡度($q=0.449$)、地形起伏度($q=0.319$)及降水($q=0.210$)是水土保持服务的核心驱动因素,自然与社会因子的交互作用增大了土壤侵蚀风险。

(3)识别出坡度 $7.69^{\circ}\sim 12.53^{\circ}$ 、降水 $540\sim 584\text{ mm}$ 和GDP($1\ 340\sim 1\ 915$)万元/ km^2 等最优调控区间,为生态修复提供了量化依据,政策驱动的土地利用调整与自然条件协同效应显著。

参考文献(References):

- [1] Wang B, Jia K, Wei X Q, et al. Generating spatiotemporally consistent fractional vegetation cover at different scales using spatiotemporal fusion and multiresolution tree methods [J]. *Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2020, 167: 214-229.
- [2] Li X T, Luo J R, Zhao Z J, et al. The effect of dynamic changes in vegetation coverage on the mechanism of organic carbon loss in inter-rill erosion [J]. *Journal of Hydrology*, 2024, 642: 131848.
- [3] 张宏伟, 别强, 石莹, 等. 黄河流域上游植被覆盖变化特征及其影响因素[J]. *干旱区研究*, 2024, 41(8): 1385-1394. Zhang H W, Bie Q, Shi Y, et al. Characteristics of vegetation cover changes in the upper reaches of the Yellow River Basin and the influencing factors [J]. *Arid Zone Research*, 2024, 41(8): 1385-1394.
- [4] 王雪雯, 董晓华, 马耀明, 等. 长江中下游降雨侵蚀力时空变化及其与植被覆盖的关系[J]. *生态学报*, 2024, 44(20): 9364-9378. Wang X W, Dong X H, Ma Y M, et al. Spatio-temporal variation of rainfall erosivity and its relationship with vegetation coverage in the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(20): 9364-9378.
- [5] 陆莹, 张敏, 王彦阁. 内蒙古黄河流域生态保护恢复优先区识别 [J]. *干旱区研究*, 2024, 41(11): 1946-1955. Lu Y, Zhang M, Wang Y G. Identification of priority areas for ecological protection and restoration in the Yellow River Basin of Inner Mongolia [J]. *Arid Land Research*, 2024, 41(11): 1946-1955.
- [6] 宁佳俊, 杨振奇, 魏勇, 等. 窟野河流域人工植被格局演变规律及其影响因素研究 [J]. *内蒙古林业调查设计*, 2024, 47(5): 1-5. Ning J J, Yang Z Q, Wei Y, et al. Pattern and driving factors of artificial vegetation changes in the kuye river basin [J]. *Inner Mongolia Forestry Investigation and Design*, 2024, 47(5): 1-5.
- [7] 王荣, 江东, 韩惠, 等. 高分辨率遥感影像天然林与人工林植被覆盖信息提取 [J]. *资源科学*, 2013, 35(4): 868-874. Wang R, Jiang D, Han H, et al. Extracting natural and artificial forest information based on high resolution remote sensing data [J]. *Resources Science*, 2013, 35(4): 868-874.
- [8] 温小乐, 姜兴强, 徐涵秋. 基于TM影像的长春市植被覆盖度变化研究 [J]. *遥感信息*, 2013, 28(6): 56-61. Wen X L, Jiang X Q, Xu H Q. Vegetation coverage

- change of Changle City based on TM image[J]. *Remote Sensing Information*, 2013,28(6):56-61.
- [9] 王静,李根.基于Landsat8TM影像的天津市西青区植被覆盖度变化研究[J].*农业科技与信息*,2019(2):54-56.
Wang J, Li G. Study on vegetation coverage change in Xiqing district of Tianjin based on Landsat8TM image [J]. *Agricultural Science-Technology and Information*, 2019(2):54-56.
- [10] 胡胜,曹明明,刘琪,等.不同视角下InVEST模型的土壤保持功能对比[J].*地理研究*,2014,33(12):2393-2406.
Hu S, Cao M M, Liu Q, et al. Comparative study on the soil conservation function of in VEST model under different perspectives[J]. *Geographical Research*, 2014, 33(12):2393-2406.
- [11] Tian F, Liu L Z, Yang J H, et al. Vegetation greening in more than 94% of the Yellow River Basin (YRB) region in China during the 21st century caused jointly by warming and anthropogenic activities [J]. *Ecological Indicators*, 2021,125:107479.
- [12] 李春晖,杨志峰.黄河流域NDVI时空变化及其与降水/径流关系[J].*地理研究*,2004,23(6):753-759.
Li C H, Yang Z F. Spatio-temporal changes of NDVI and their relations with precipitation and runoff in the Yellow River Basin[J]. *Geographical Research*, 2004, 23(6):753-759.
- [13] 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 H Y, Wang X, Yang Z Q, et al. Research progress on soil erosion and ecological restoration in kuye river basin of the middle Yellow River[J]. *Journal of Inner Mongolia University: Natural Science Edition*, 2024, 55(3):329-336.
- [14] 蒋晓辉,高昊祺,雷宇昕.近40年来窟野河流域土地利用类型变化及驱动因素[J].*南水北调与水利科技(中英文)*,2020,18(4):17-38.
Jiang X H, Gao H Q, Lei Y X. Changes and driving factors of land use types in Kuye River Basin in recent 40 years[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2020,18(4):17-38.
- [15] 何源,陈俞池, TALAT Ahmed Ehab, 等.窟野河流域土壤侵蚀时空特征及趋势预测[J].*水土保持学报*, 2024,38(5):10-19.
He Y, Chen Y C, Ehab T, et al. Spatio-temporal pattern and trend prediction of soil erosion in kuye river basin [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024,38(5):10-19.
- [16] 王钰,李小妹,冯起,等.窟野河流域河岸沙丘地貌格局及变化[J].*中国沙漠*,2019,39(1):52-61.
Wang Y, Li X M, Feng Q, et al. Landscape pattern and variation of riverine sand dunes in the kunye river basin, China[J]. *Journal of Desert Research*, 2019, 39(1):52-61.
- [17] 杨鹏辉,田佳,张楠,等.1990—2022年黄河流域植被时空变化特征及未来趋势预测[J].*生态学报*,2024,44(19):8542-8553.
Yang P H, Tian J, Zhang N, et al. Characteristics of spatio-temporal changes and future trends forecast of vegetation cover in the Yellow River Basin from 1990 to 2022[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024,44(19):8542-8553.
- [18] 吴思源,郝利娜.2001—2021年黄河流域植被覆盖变化及其驱动因素[J].*干旱区研究*,2024,41(8):1373-1384.
Wu S Y, Hao L N. Changes in vegetation cover and driving factors in the Yellow River Basin from 2001 to 2021[J]. *Arid Zone Research*, 2024,41(8):1373-1384.
- [19] 刘宸瑄,王丽群,许行,等.2001—2021年中国植被覆盖对夏季城市热岛效应的影响[J].*生态学报*,2024,44(24):11020-11034.
Liu C X, Wang L Q, Xu H, et al. The impact of vegetation cover on summer urban heat island effect in China from 2001 to 2021 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024,44(24):11020-11034.
- [20] 冯强,赵文武. USLE/RUSLE中植被覆盖与管理因子研究进展[J].*生态学报*,2014,34(16):4461-4472.
Feng Q, Zhao W W. The study on cover-management factor in USLE and RUSLE: a review [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014,34(16):4461-4472.
- [21] 胡雨鑫,王雪梅,陈滢,等.基于地理探测器的我国不同林区林火驱动因素对比分析[J].*生态学报*,2025,45(1):227-238.
Hu Y X, Wang X M, Chen Y, et al. Comparative analysis of forest fire driving in different forest regions of China based on the geographical detector approach [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025,45(1):227-238.
- [22] Ni C, Mao F J, Du H Q, et al. Spatiotemporal evolution and influencing factors of forest carbon storage based on BIOME-BGC model and geographical detector in eight basins of Zhejiang Province in China[J]. *Forests*, 2025,16(2):316.
- [23] Liu X, Yang Z F, Li B, et al. Source apportionment and analysis of potentially toxic element sources in agricultural soils based on the positive matrix factorization and geo-detector models[J]. *Land*, 2025,14(1):146.
- [24] 白婷,范念念,王远见,聂锐华,刘兴年.基于碎屑锆石及水文观测的黄河多沙粗沙区重要支流来沙变化分析[J].*工程科学与技术*,2025,57(01):37-47.
Bai T, Fan N, Wang Y J, et al. Analysis of sediment incoming changes in important tributaries of the Yellow River sandy and coarse sand area based on detrital zircon and hydrological observations [J]. *Engineering Science and Technology*, 2025,57(01):37-47.