

陈新佳, 付金霞, 吴楚瑜, 等. 基于 UAV 数据的黄河中游多沙粗沙区小流域水土保持措施空间优化配置及减沙潜力研究[J]. 水土保持研究, 2026, 33(2): 24-34.

Chen Xinjia, Fu Jinxia, Wu Chuyu, et al. Spatial optimization of soil and water conservation measures and sediment reduction potential in small watersheds of rich and coarse sediment area in middle reaches of Yellow River based on UAV data[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2026, 33(2): 24-34.

基于 UAV 数据的黄河中游多沙粗沙区小流域水土保持措施空间优化配置及减沙潜力研究

陈新佳, 付金霞, 吴楚瑜, 韩颖, 王文静, 杨芷茵

(西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的] 研究高精度数据下黄河中游多沙粗沙区小流域的土壤侵蚀状况, 提出水土保持措施空间优化配置方案, 为小流域综合治理提供理论参考。[方法] 以黄河中游多沙粗沙区 3 个典型小流域(海勒斯太沟、六道沟、杨家沟)为研究区, 基于小流域 2023 年无人机正射影像、多光谱数据、DSM 数据以及土壤野外采样数据等, 利用 RUSLE 模型、最优参数地理探测器和 GIS 技术分析 3 个小流域土壤侵蚀空间变异特征及其驱动因素; 提出植被覆盖度(FVC)在可持续阈值内($<65\%$)提升 $10\% \sim 35\%$ 以及梯田、淤地坝空间优化配置方案, 进而评估单一水土保持措施和多措施组合配置情景下的减沙潜力。[结果] (1) 3 个小流域 2023 年土壤侵蚀均以微度和轻度侵蚀为主, 但强烈及以上侵蚀面积占比在 $11.69\% \sim 15.65\%$, 水土保持率介于 $45.83\% \sim 65.32\%$ 。(2) 坡度、土地利用和植被覆盖度是土壤侵蚀空间变异的主导因素, 且坡度与土地利用交互作用的非线性增强效果最为显著。(3) 小流域水土保持措施配置的减沙效益排序为 FVC 提升+梯田+淤地坝 $>$ FVC 提升+梯田 $>$ FVC 提升+淤地坝 $>$ FVC 提升 $>$ 单一工程措施。在可持续阈值区内 FVC 提升 35% 时, 3 个小流域减沙潜力为 $23.74\% \sim 30.97\%$; 在 FVC 提升 35% + 梯田 + 淤地坝配置情景下, 3 个小流域减沙潜力为 $26.37\% \sim 35.71\%$ 。[结论] UAV 数据提升了土壤侵蚀强度识别和水土保持措施空间优化配置的精度, 3 个小流域的谷坡和裸地区是侵蚀防控的关键区。流域多措施优化配置具有显著减沙效应, 但应以植被恢复为核心, 工程措施为补充。

关键词: UAV 数据; RUSLE 模型; 土壤侵蚀; 驱动因素探测; 水土保持措施优化配置; 减沙潜力

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)02-0024-11

Spatial optimization of soil and water conservation measures and sediment reduction potential in small watersheds of rich and coarse sediment area in middle reaches of Yellow River based on UAV data

Chen Xinjia, Fu Jinxia, Wu Chuyu, Han Ying, Wang Wenjing, Yang Zhiyin

(College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] This study aims to investigate the soil erosion conditions in small watersheds of rich and coarse sediment area in the middle reaches of the Yellow River using high-precision data, and to propose a spatial optimization scheme for soil and water conservation measures, providing theoretical references for the comprehensive management of small watersheds. [Methods] Three typical small watersheds (Hailesitaigou, Liudaogou, and Yangjiagou) in the rich and coarse sediment area of the middle reaches of the Yellow River were selected as the study area. Based on 2023 UAV orthophotos, multispectral data, DSM data, and field soil

收稿日期: 2025-10-24

修回日期: 2025-11-23

接受日期: 2025-12-01

资助项目: 国家重点研发计划项目课题(2022YFF1300805); 国家自然科学基金黄河水科学研究联合基金(U2243210)

第一作者: 陈新佳(1999—), 男, 广东汕头人, 硕士研究生, 研究方向为生态水文。E-mail: zhchenxinjia@nwfau.edu.cn

通信作者: 付金霞(1978—), 女, 甘肃靖远人, 博士, 副教授, 主要从事气候变化、土地利用覆被变化与土壤侵蚀研究。E-mail: fujinxia405@nwsuaf.edu.cn

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

sampling data of the small watersheds, the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) model, optimal parameters-based geodetector, and GIS techniques were used to analyze the spatial variation characteristics of soil erosion and its key driving factors in the three small watersheds. Schemes for the improvement of fractional vegetation cover (FVC) by 10%~35% within a sustainable threshold ($< 65\%$) and for the spatial optimization of terraces and check dams were proposed. Subsequently, sediment reduction potential under scenarios of single and multiple soil and water conservation measures was evaluated. [Results] (1) In 2023, soil erosion in the three small watersheds was predominantly very slight and slight erosion, while the proportion of areas with intense or higher erosion reached 11.69%~15.65%. The soil and water conservation rate ranged from 45.83% to 65.32%. (2) Slope, land use, and FVC were the dominant drivers of the spatial variation of soil erosion, and the nonlinear enhancement effect of the interaction between slope and land use was the most significant. (3) The soil and water conservation measures in the small watersheds ranked in terms of sediment reduction benefits as follows: FVC increase + terraces + check dams $>$ FVC increase + terraces $>$ FVC increase + check dams $>$ FVC increase $>$ single engineering measures. When FVC was increased by 35% within the sustainable threshold, the sediment reduction potential of the three small watersheds was 23.74%~30.97%. Under the scenario of 35% FVC increase + terraces + check dams, the sediment reduction potential in the three small watersheds was 26.37%~35.71%. [Conclusion] UAV data significantly enhance the accuracy of soil erosion intensity identification and the spatial optimization of soil and water conservation measures. The valley slopes and bare land areas in the three small watersheds are the key areas for erosion control. The optimization of multiple measures in the watersheds demonstrates significant sediment reduction effects, but vegetation restoration should be taken as the core, with engineering measures serving as a supplement.

Keywords: UAV data; RUSLE model; soil erosion; detection of driving factors; optimization of soil and water conservation measures; sediment reduction potential

黄河中游多沙粗沙区是我国水土流失最严重、生态最脆弱的区域之一,其面积约 7.86 万 km^2 ,仅占黄土高原总面积的 11.8%,却贡献了入黄河泥沙量的 73.9%,其中多年平均粗泥沙(粒径 $\geq 0.05 \text{ mm}$)输沙量达 3.19 亿 $\text{t}^{[1]}$,成为黄河下游“地上悬河”淤积的主要物源地。自 20 世纪 70 年代起,区域通过实施退耕还林还草、封禁保育、修建梯田和淤地坝等一系列措施^[2],水土流失强度持续下降,生态系统质量稳步提升。然而,《黄河流域水土保持公报(2023 年)》数据显示,该区域强烈及以上侵蚀面积仍占水土流失总面积的 23.46%,水土保持率为 48.47%^[3],这与中共中央办公厅、国务院办公厅印发《关于加强新时代水土保持工作的意见》中提出的 2035 年全国水土保持率提高至 75% 的目标相比仍存在一定差距^[4]。要弥补这一差距并如期实现战略目标,全域统筹、优化配置和精准布局各项水土保持措施,已成为推动区域水土流失治理迈上新台阶的重要途径。

小流域综合治理是黄土高原长期实践形成的有效治理模式,通过“因地制宜、分区施策、生物与工程措施结合、生态与生产统筹”的策略,实现了从塬面、梁峁、坡面到沟道的系统防护体系^[5]。但目前,黄河中游多沙粗沙区小流域水土保持措施配置仍存在以

下突出问题:水土保持措施的空间布局与结构失衡或不完善、与关键环境要素(如地形特征、土壤侵蚀强度、水资源承载力、水文连通性等)的适配性较低等^[6-7]。因此,开展典型小流域水土保持措施的空间优化和精准配置及其减沙效益研究,已成为提升区域水土流失治理效益的迫切需求。而这一研究的核心前提是获取高分辨率或高精度的流域下垫面信息。以往研究采用的数据源多依赖遥感卫星影像^[8],但其在小流域环境特征及水土保持措施空间格局的精细刻画方面有所欠缺,难以为小流域水土保持措施的精准布局与效益评估提供高精度数据支撑。而无人机技术能够获取厘米级高分辨率数据,并实现多角度、多光谱的立体观测,为小流域环境本底特征刻画、土壤侵蚀精细模拟、水土保持措施空间优化配置及效益评估提供了更详实和精准的数据基础^[9]。

因此,本研究以黄河中游多沙粗沙区的 3 个典型小流域(海勒斯太沟、六道沟、杨家沟)为研究区,基于小流域 2023 年无人机正射影像、多光谱数据、DSM 数据以及土壤野外采样数据等,在明确 3 个小流域侵蚀环境特征的基础上,利用 RUSLE 模型、最优参数地理探测器和 GIS 技术分析 3 个小流域土壤侵蚀空间变异特征及其驱动因素。在此基础上,提

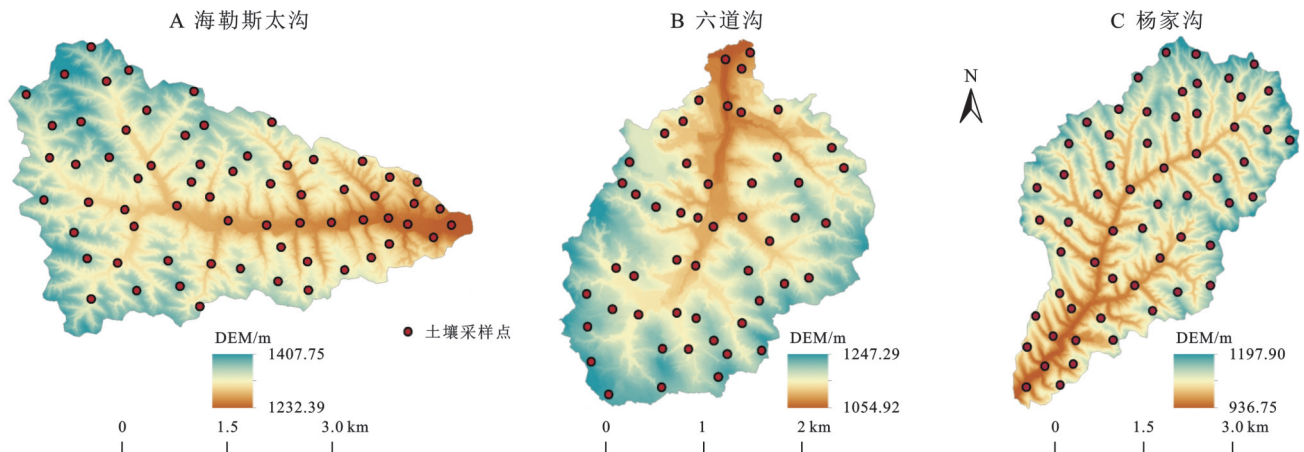
出植被覆盖度在可持续阈值内提升10%~35%以及梯田、淤地坝空间优化配置方案,进而评估单一水土保持措施和多措施组合配置情景下的减沙潜力,以期为黄河中游多沙粗沙区水土保持措施优化布局和精准配置提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究选取黄河中游多沙粗沙区的3个典型小流域为研究区,从北到南依次为内蒙古准格尔旗的海勒斯太沟流域、陕西省神木市的六道沟流域和陕西省米脂县的杨家沟流域(图1)。海勒斯太沟流域(110°27′—110°31′E,39°39′—39°41′N)是黄河一级支流窟野河水系的二级支沟,位于窟野河上游,流域面积15.95 km²;海拔1 232.39~1 407.75 m,平均坡度17.81°,地势西高东低。六道沟流域(110°21′—110°23′E,38°46′—38°51′N)同为窟野河的二级支沟,

位于窟野河下游,流域面积7.08 km²;海拔1 054.92~1 247.29 m,平均坡度17.11°,地势南高北低。杨家沟流域(110°19′—110°22′E,37°44′—37°47′N)为黄河一级支流无定河水系的支沟,流域面积17.09 km²。海拔936.75~1 197.90 m,平均坡度25.97°,地势北高南低。3个流域在空间上经度相近,相邻流域纬度约差1°,均位于黄土丘陵沟壑区,地形破碎,沟壑纵横,土质疏松。气候同属温带半干旱大陆性季风气候,夏秋季节降雨集中且多为暴雨,极易诱发强烈的土壤侵蚀。3个流域土地利用类型均以草地、林地和裸地为主,但人为干扰程度存在差异。最北部的海勒斯太沟人烟稀少,以自然植被为主,人为扰动程度较低;而六道沟、杨家沟受人类活动影响较大,除植被措施外,配置有一定的水土保持工程措施。3个小流域“同背景、异条件”的空间格局,既能够全面反映和代表黄河中游多沙粗沙区的环境特征,又构成了天然的试验对比序列。



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。

图1 研究流域的地理位置

Fig. 1 Geographical locations of study watersheds

1.2 数据来源与处理

本研究数据源包括3个流域的无人机正射影像、多光谱数据、数字地表模型(Digital Surface Model, DSM)、日降雨数据和土壤野外采样数据。2023年利用大疆Mavic3 M多光谱无人机获得3个流域的无人机正射影像、多光谱数据和DSM数据,空间分辨率约为0.1 m。基于无人机正射影像,利用ENVI5.6软件并结合监督分类和非监督分类解译方法,得到流域土地利用现状图。基于无人机多光谱数据,利用大疆智图软件得到流域归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)。基于无人机DSM数据,经Global Mapper 24.0软件处理得到流域数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)数据。2011—2023年黄河中游多沙粗沙区及周边地区28个气象站点的逐日降雨数据来源于中国气象

数据网(<http://data.cma.cn>),在计算各站点降雨侵蚀力并经克里金插值后,获得流域2023年降雨侵蚀力空间分布图。通过野外采样分别获取海勒斯太沟、六道沟和杨家沟土壤样品65,51,59个(图1),基于土壤样品测试数据计算土壤可蚀性并经克里金插值后,获得流域土壤可蚀性空间分布图。所有数据最终统一坐标系为Xian_1980_GK_CM_111 E,空间分辨率为0.5 m。

1.3 研究方法

1.3.1 RUSLE模型 本研究采用修正通用土壤流失方程(Revised Universal Soil Loss Equation, RUSLE)计算流域土壤侵蚀模数,具体公式如下:

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \quad (1)$$

式中:A为单位面积年均土壤侵蚀模数[t/(hm²·a)];R为降雨侵蚀力因子[MJ·mm/(hm²·h·a)];K为土

壤可蚀性因子 $[t \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h}/(\text{hm}^2 \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm})]$; LS 为坡长坡度因子(无量纲); C 为植被覆盖与管理因子(无量纲); P 为水土保持措施因子(无量纲)。

(1) 降雨侵蚀力因子(R)。本研究基于逐日降雨数据,采用章文波等^[10]提出的模型估算降雨侵蚀力:

$$R_i = \alpha \sum_{k=1}^m (P_k)^\beta \quad (k=1, 2, \dots, m) \quad (2)$$

$$\alpha = 21.586\beta^{-7.1891} \quad (3)$$

$$\beta = 0.8363 + \left(\frac{18.144}{P_{d12}} \right) + \left(\frac{24.455}{P_{y12}} \right) \quad (4)$$

式中: R_i 为第*i*个半月的降雨侵蚀力; P_k 为该半月内第*k*天的侵蚀性降雨量(mm),侵蚀性降雨标准为日雨量 ≥ 12 mm; α 与 β 为模型参数; P_{d12} 为某年侵蚀性日雨量的平均值(mm); P_{y12} 为侵蚀性日雨量的多年平均值(mm)。

(2) 土壤可蚀性因子(K)。本研究结合 EPIC 模型中 K 因子计算公式^[11]和张科利等^[12]提出的修正方法,进行土壤可蚀性因子计算,具体公式为:

$$K_{\text{EPIC}} = \left\{ 0.2 + 0.3 \exp \left[-0.0256 \times \text{Sa} \times \left(1 - \frac{\text{Si}}{100} \right) \right] \right\} \times \left(\frac{\text{Si}}{\text{Cl} + \text{Si}} \right)^{0.3} \times \left[1 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95C)} \right] \times \left[1 - \frac{0.7\text{Sn}}{\text{Sn} + \exp(-5.51 + 22.9\text{Sn})} \right] \times 0.1317 \quad (5)$$

$$\text{Sn} = 1 - \frac{\text{Sa}}{100} \quad (6)$$

$$K = -0.01383 + 0.51575K_{\text{EPIC}} \quad (7)$$

式中: Sa 为砂粒(2~0.05 mm)含量(%); Si 为粉粒(0.05~0.002 mm)含量(%); Cl 为黏粒(< 0.002 mm)含量(%); C 为有机碳含量(%);0.1317是将计算所得的 K 因子由美国制转为国际制单位的转换系数。

(3) 坡长坡度因子(LS)。本研究使用 Liu 等^[13-14]提出的坡长坡度计算公式,具体公式如下:

$$L = (\lambda/22.1)^m \quad m = \begin{cases} 0.2 & \theta < 1^\circ \\ 0.3 & 1^\circ \leq \theta < 3^\circ \\ 0.4 & 3^\circ \leq \theta < 5^\circ \\ 0.5 & \theta \geq 5^\circ \end{cases} \quad (8)$$

$$S = \begin{cases} 10.8\sin\theta + 0.036 & \theta < 5^\circ \\ 16.8\sin\theta - 0.5 & 5^\circ \leq \theta < 10^\circ \\ 21.9\sin\theta - 0.96 & \theta \geq 10^\circ \end{cases} \quad (9)$$

式中: L 为坡长因子, S 为坡度因子; λ 为坡面长度(m); m 为坡长指数; θ 为坡度($^\circ$);22.1为标准地块的坡长。

(4) 植被覆盖与管理因子(C)。本研究采用蔡崇法等^[15]提出的基于植被覆盖度的公式计算 C 值。

$$\text{FVC} = \frac{\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\min}}{\text{NDVI}_{\max} - \text{NDVI}_{\min}} \quad (10)$$

$$C = \begin{cases} 1 & \text{FVC} = 0 \\ 0.6508 - 0.3436 \lg \text{FVC} & 0 < \text{FVC} \leq 78.3\% \\ 0 & \text{FVC} > 78.3\% \end{cases} \quad (11)$$

式中: C 为植被覆盖与管理因子; FVC 为植被覆盖度(%); NDVI 为归一化植被指数; NDVI_{\min} 取累计百分比为5%时的 NDVI 值, NDVI_{\max} 取累计百分比为95%时的 NDVI 值。

(5) 水土保持措施因子(P)。本研究基于前人研究成果^[16]和流域土地利用现状,对各土地利用类型赋值如下:耕地0.35,梯田0.22,林地0.1,低覆盖度草地0.45,中覆盖度草地0.24,高覆盖度草地0.15,淤地坝0.12,建设用地0.9,裸地1,水域1。

根据《土壤侵蚀分类分级标准(SL190-2007)》,对模型计算得到的土壤侵蚀模数进行强度分级:微度侵蚀[0~1 000 t/(km²·a)]、轻度侵蚀[1 000~2 500 t/(km²·a)]、中度侵蚀[2 500~5 000 t/(km²·a)]、强烈侵蚀[5 000~8 000 t/(km²·a)]、极强烈侵蚀[8 000~15 000 t/(km²·a)]、剧烈侵蚀[$> 15 000$ t/(km²·a)]。

1.3.2 最优参数地理探测器 地理探测器是一种基于空间分异理论设计的统计学方法,依据自变量与因变量的空间相似性,分析自变量对因变量的影响程度^[17]。最优参数地理探测器在传统地理探测器的基础上进行改进,使该探测器能够选取出不同离散化方法和间断参数中 q 值最大的情况,进而提升了探测结果的科学性^[18]。该探测器通常以 q 值表示解释力大小, q 取值范围为0~1。 q 值越接近1,则表示该驱动因子的解释力越大。 q 计算公式如下:

$$q = 1 - \left(\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 \right) / N \sigma^2 = 1 - \frac{\text{SSW}}{\text{SST}} \quad (12)$$

式中: L 为驱动因子的类别; h 为驱动因子的分层, $h=1, \dots, L$; N_h 和 N 分别为层 h 和全区的单元数; σ_h^2 和 σ^2 分别为层 h 和全区因变量的方差; SSW 和 SST 则分别为层内方差之和与全区总方差。

本研究利用 ArcGIS 渔网功能创建 12.5 m × 12.5 m 的渔网,剔除空值后,在海勒斯太沟、六道沟、杨家沟分别生成 102 117, 45 342, 109 281 个采样点。将各流域采样点数据输入最优参数地理探测器,选择最优离散化方法和分类数量后进行单因子探测和双因子交互探测。

1.3.3 水土保持措施空间优化配置情景

(1) 根据 Chen 等^[19]的研究,黄土高原植被覆盖度可持续阈值上限为65%,在此阈值之下的区域仍有植

被覆盖度提升潜力。在流域 FVC 小于 65% 区域、非水域、非建设用地的交集区域内,以流域 FVC 栅格数据为基准,利用 ArcGIS 软件栅格计算器分别设置 FVC 提升 10%, 15%, 20%, 25%, 30% 和 35% 的植被情景,情景代码分别为 1-1, 1-2, 1-3, 1-4, 1-5, 1-6。利用 ArcGIS 软件选择流域中度及以上侵蚀强度区、坡度 $5^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 的耕地/裸地/低覆盖草地的交集区域,结合流域现状梯田、道路、居民区的分布位置,最终确定流域梯田的空间配置情景。基于 ArcGIS 软件和高分辨率 DEM 获取流域地形湿度指数和干支流交汇的沟道系统,利用 ArcGIS 软件选择流域中度及以上侵蚀强度区、地形湿度指数 ≥ 8 区、干支流交汇沟道的交集区域布设淤地坝,再结合现有淤地坝分布位置,最终确定淤地坝的空间配置情景。在单一水土保持措施空间配置情景的基础上,本研究遵循生态效益与经济成本兼顾的原则,设置不同 FVC 提升与工程措施(梯田、淤地坝、梯田+淤地坝)相结合的多措施空间配置情景。

(2) 基于不同植被覆盖度提升情景下的流域 FVC 空间数据以及梯田、淤地坝空间优化配置情景下的流域土地利用数据,结合 1.3.1 中 RUSLE 模型 C 因子计算方法和 P 的赋值,获得不同情景下的 C, P 因子,进而计算不同情景下的土壤侵蚀模数。

2 结果与分析

2.1 2023 年小流域 RUSLE 模型因子的空间变异

海勒斯太沟、六道沟、杨家沟的降雨侵蚀力 R 均值分别为 2 398.04, 3 018.99, 3 719.76 MJ · mm / ($\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a}$), 地理位置越偏南的流域,其降雨侵蚀力越大。受限于流域面积较小原因,3 个流域内部降雨侵蚀力空间变异较小(图 2)。在 0.5 m 空间分辨率下,海勒斯太沟、六道沟与杨家沟的坡度均值分别为 17.81° , 17.11° 和 25.97° 。海勒斯太沟坡度主要集中在 $5^{\circ} \sim 15^{\circ}$ (40.85%) 和 $> 25^{\circ}$ 区间 (24.64%), 六道沟坡度主要集中在 $5^{\circ} \sim 15^{\circ}$ (31.52%) 和 $0^{\circ} \sim 5^{\circ}$ 区间 (28.34%), 杨家沟坡度主要集中在 $> 25^{\circ}$ (45.32%) 和 $5^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 区间 (21.26%)。海勒斯太沟、六道沟和杨家沟 LS 因子均值分别为 1.003, 0.977, 1.616; LS 因子空间分布与坡度分布具有相似性,高值主要分布在沟壑谷坡,而低值主要分布在沟道(图 2)。海勒斯太沟、六道沟和杨家沟的 K 因子均值分别为 0.022, 0.021, 0.024 $\text{t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h} / (\text{hm}^2 \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm})$; 海勒斯太沟 K 值呈中游高、上下游低的分布特征,六道沟 K 值呈东高、西低的分布特征,而杨家沟 K 值在主沟和中下游区高(图 2)。

2023 年海勒斯太沟、六道沟、杨家沟的 FVC 均值分别为 39.93%, 44.08% 和 47.62%; 地理位置越偏

南的流域,其 FVC 越高。就流域 FVC ($\leq 30\%$ 低覆盖、 $30\% \sim 45\%$ 中低覆盖、 $45\% \sim 60\%$ 中覆盖、 $60\% \sim 80\%$ 中高覆盖、 $> 80\%$ 高覆盖)的面积占比而言,海勒斯太沟、六道沟、杨家沟的中低以下覆盖度面积占比分别为 64.73%, 49.75% 和 44.62%, 中覆盖度面积占比分别为 15.54%, 19.41% 和 18.68%, 中高以上覆盖度面积占比分别为 19.74%, 30.84% 和 36.70%。海勒斯太沟的低、中低覆盖度面积较大,六道沟的低、中覆盖度面积较大,而杨家沟的低、高覆盖度面积较大。空间上,海勒斯太沟上游西北部的 FVC 较高,六道沟中游的 FVC 较高,而杨家沟各级别 FVC 分布较为均衡(图 3)。海勒斯太沟、六道沟、杨家沟的 C 因子均值分别为 0.74, 0.71, 0.68, C 因子高值主要分布在 3 个流域的沟壑区和低植被覆盖度区(图 3)。

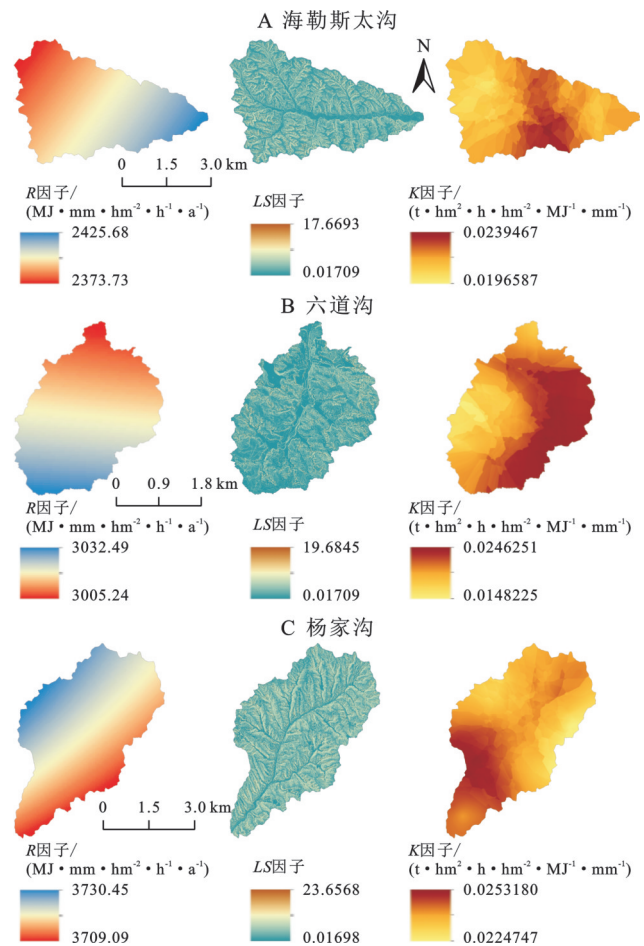


图 2 3 个研究流域 R, LS, K 因子空间分布
Fig. 2 Spatial distribution patterns of R, LS, and K factors in three study watersheds

3 个流域中海勒斯太沟人为扰动程度最低,而六道沟、杨家沟受人类活动影响较大。海勒斯太沟主要土地利用类型为草地 (46.85%)、林地 (27.37%) 和裸地 (25.25%), 空间分布较均匀; 其他地类面积均非常小, 无淤地坝。六道沟主要土地利用类型为草地 (34.79%)、裸地 (30.63%) 和林地 (18.73%), 其中林草

主要分布在东部和西部,裸地集中在北部;梯田、耕地、建设用地、淤地坝面积占比分别为10.08%,1.48%,2.93%和1.20%。杨家沟主要土地利用类型为草地(45.88%)、林地(25.36%)和裸地(15.70%),梯田、耕地、建设用地、淤地坝面积占比分别为8.34%,1.15%,2.15%和1.39%,各地类分布较为分散。海勒斯太沟、六道沟、杨家沟的 P 因子均值分别为0.40,0.45,0.32。海勒斯太沟 P 因子高值主要分布在流域沟壑的裸露坡面上,六道沟 P 因子高值主要集中在流域北部的裸地区和沟道区,杨家沟 P 因子高值主要分布在流域中部干沟区(图3)。

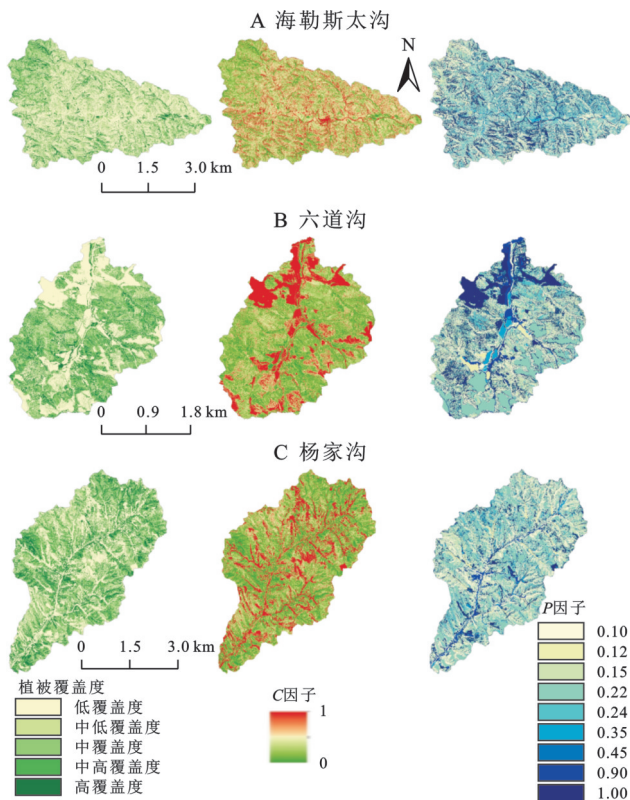


图3 3个研究流域植被覆盖度、C、P因子空间分布

Fig. 3 Spatial distribution patterns of fractional vegetation cover, C and P factors in three study watersheds

2.2 2023年小流域土壤侵蚀强度及空间格局

2023年海勒斯太沟、六道沟、杨家沟的土壤侵蚀模数平均值分别为2 095.31, 2 129.28, 3 017.55 t/($\text{km}^2 \cdot \text{a}$)。就流域各侵蚀强度面积占比而言(图4),海勒斯太沟、六道沟、杨家沟的轻度及以下侵蚀面积占比分别为79.87%,80.46%和69.18%,中度侵蚀面积占比分别为7.09%,7.85%和15.17%,强烈及以上侵蚀面积占比分别为13.04%,11.69%和15.65%。可见,3个研究流域土壤侵蚀强度均以微度和轻度侵蚀为主。根据曹文洪等^[20]提出的水土保持率定义(非水土流失面积占国土面积的比例),2023年海勒斯太沟、六道沟和杨家沟水土保持率分别为65.32%,63.66%和45.83%。

空间分布上(图4),海勒斯太沟的坡顶较为平坦,且常有林草植被覆盖,故侵蚀强度以轻度和中度为主;而在谷坡较陡、土质疏松、植被稀少的区域,尤其是砒砂岩裸露坡面,则是强烈及以上侵蚀的主要分布区。六道沟的陡坡区及西北部裸地区域,侵蚀强度以强烈及以上为主;流域中部则以微度侵蚀为主。杨家沟的强烈及以上侵蚀区广泛分布于流域沟壑谷坡上。综合而言,3个流域轻度及以下侵蚀主要分布在流域坡度 $<15^\circ$ 区、林地、草地区以及高植被覆盖度区,而强烈及以上侵蚀则集中分布在流域坡度 $>25^\circ$ 区、裸地和低植被覆盖度区,这与黄土高原相关研究^[16]的结论一致,因此,坡度较陡且低覆盖度的谷坡区、裸地区是今后流域水土流失治理的关键区域。

2.3 小流域土壤侵蚀空间变异的主导因素探测

2.3.1 单因子探测 最优参数地理探测器单因子探测结果表明(表1),在降雨侵蚀力(X_1)、植被覆盖度(X_2)、海拔(X_3)、坡度(X_4)和土地利用(X_5)5个因子中,坡度、土地利用和植被覆盖度均为3个小流域土壤侵蚀空间变异的主导因子。但因流域环境差异,各因子解释力排序在不同流域有所差异。海勒斯太沟坡度、土地利用、植被覆盖度解释力分别为0.445,0.352,0.213,六道沟坡度、土地利用、植被覆盖度解释力分别为0.350,0.185,0.077,杨家沟土地利用、坡度、植被覆盖度解释力分别为0.266,0.201,0.146。由于流域面积较小,流域内降雨侵蚀力和海拔差异不显著,导致它们的解释力均较低。

2.3.2 双因子交互探测 交互探测结果表明(图5),双因子协同作用对流域土壤侵蚀空间变异的解释力均增强,表现为双因子增强或非线性增强。坡度(X_4)与土地利用(X_5)协同作用的影响最为凸显,海勒斯太沟、六道沟和杨家沟的 q 值分别为0.901,0.813,0.882。植被覆盖度(X_2)与坡度(X_4)的协同作用排在第二位,海勒斯太沟、六道沟和杨家沟的 q 值分别为0.758,0.687,0.683。此外,在单因子探测结果中居于末尾的海拔(X_3)因子,与各流域 X_4 和 X_5 交互作用下 q 值均大于0.2。

2.4 小流域水土保持措施空间优化配置情景的减沙潜力

2.4.1 植被覆盖度提升情景的减沙潜力 当FVC提升10%(情景1-1),15%(情景1-2),20%(情景1-3),25%(情景1-4),30%(情景1-5)和35%(情景1-6)时,海勒斯太沟FVC均值分别为48.25%,52.42%,56.60%,60.75%,64.92%和69.09%,六道沟FVC均值分别为51.19%,54.75%,58.32%,61.86%,65.43%和68.99%,杨家沟FVC均值分别为54.32%,57.68%,61.04%,64.39%,67.75%和71.11%。流域植被覆盖

结构也同步优化(图 6),低覆盖度面积不断减少,而中高以上覆盖度面积逐步增加。相应地,海勒斯太沟减沙潜力为 5.44%~23.74%,水土保持率提升 1.14%~6.81%;六道沟减沙潜力为 4.86%~30.97%,水土保持率提升 1.04%~12.11%;杨家沟减沙潜力

为 5.02%~29.19%,水土保持率提升 0.54%~18.03%。可见,提升植被覆盖度具有显著的侵蚀防控效果。随着植被覆盖度的提升,流域减沙潜力和水土保持率持续增大,其中六道沟的减沙潜力响应最敏感,杨家沟水土保持率提升最为显著。

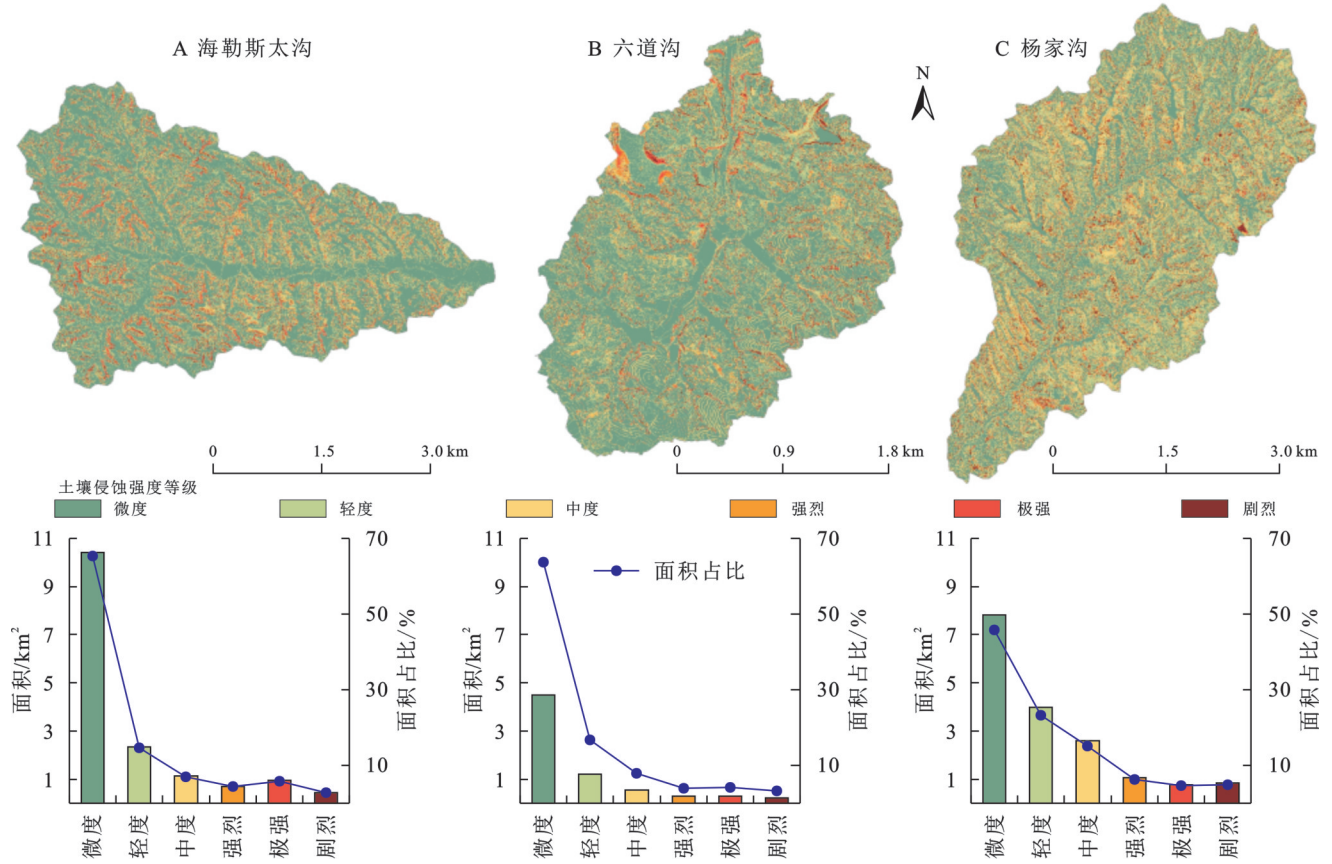


图 4 3 个研究流域土壤侵蚀强度空间分布与面积统计

Fig. 4 Spatial distribution patterns and area statistics of soil erosion intensity in three study watersheds

表 1 3 个研究流域单因子探测结果

Table 1 Results of single-factor detection in three study watersheds

流域	降雨侵蚀力(X_1)	FVC(X_2)	海拔(X_3)	坡度(X_4)	土地利用(X_5)
海勒斯太沟	0.006	0.213	0.019	0.445	0.352
六道沟	0.012	0.077	0.008	0.350	0.185
杨家沟	0.002	0.146	0.002	0.201	0.266

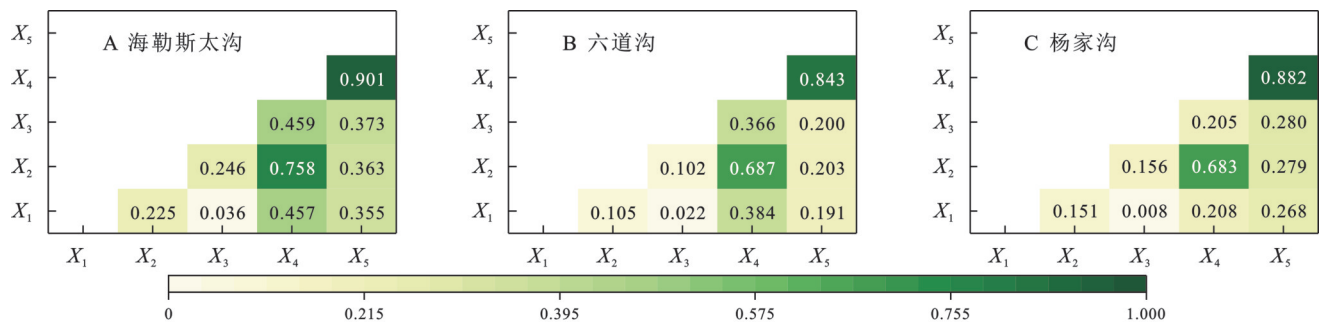


图 5 3 个研究流域双因子交互探测结果

Fig. 5 Results of two-factor interactive detection in three study watersheds

2.4.2 单一梯田与淤地坝措施情景的减沙潜力与已有梯田相比,海勒斯太沟、六道沟、杨家沟的梯田面

积分别增加 0.18 km², 0.16 km², 0.19 km², 减沙潜力分别为 1.82%, 3.91% 和 2.11%。布设之后,海勒斯太沟

梯田主要分布在流域中部干沟两侧、邻近建设用地且道路通达性较高,六道沟梯田主要集中在流域东部和南部,杨家沟梯田分布较均匀且邻近道路(图 7)。与

已有淤地坝相比,在淤地坝布设情景下,海勒斯太沟、六道沟、杨家沟的淤地坝面积分别增加 0.36, 0.12, 0.06 km², 减沙潜力分别为 1.49%, 2.18% 和 0.51%。

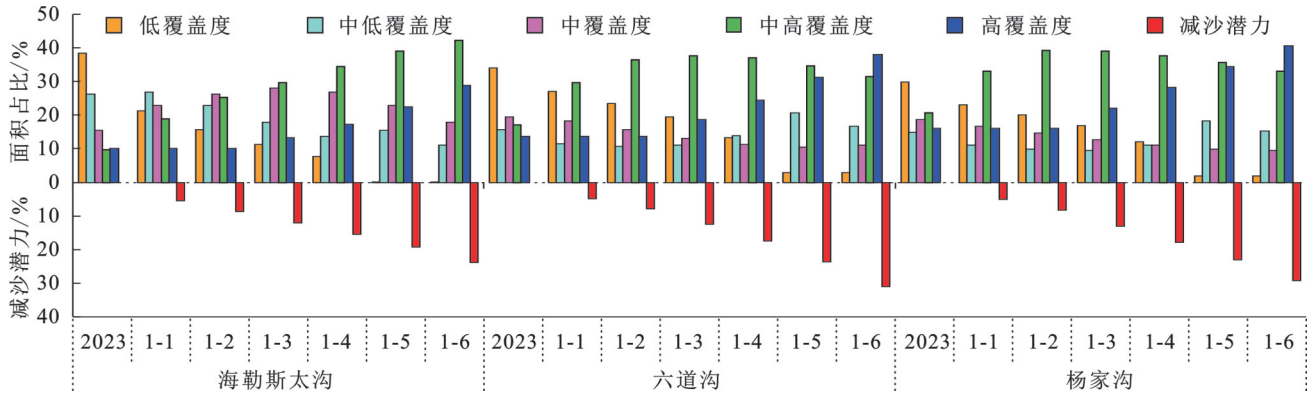


图 6 FVC 提升情景下 3 个研究流域的植被覆盖度面积变化及减沙潜力

Fig. 6 Changes in fractional vegetation cover area and sediment reduction potential in three study watersheds under FVC improvement scenarios

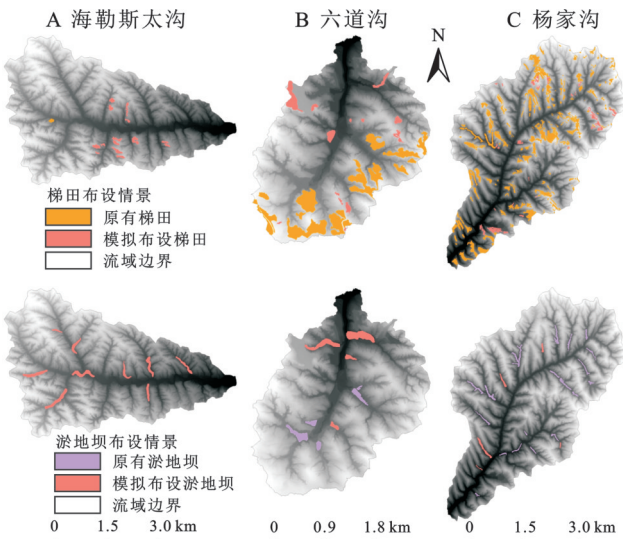


图 7 3 个研究流域梯田和淤地坝布设的空间分布

Fig. 7 Spatial distribution patterns of terraces and check dams in three study watersheds

2.4.3 多措施组合空间配置情景的减沙潜力 FVC 提升与工程措施(梯田、淤地坝)的协同作用显著增强流域土壤侵蚀防控效果。在 FVC 分别提升 10%~35% 与梯田组合配置情景下,海勒斯太沟、六道沟、杨家沟减沙潜力分别介于 7.16%~25.19%, 8.58%~34.01% 和 7.00%~30.87%, 水土保持率分别提升 1.50%~7.21%, 1.92%~12.98% 和 0.81%~18.32%。在 FVC 提升 10%~35% 与淤地坝组合配置情景下,海勒斯太沟、六道沟、杨家沟减沙潜力分别介于 6.86%~24.92%, 6.92%~32.68% 和 5.50%~29.60%, 水土保持率分别提升 1.50%~7.14%, 1.61%~12.55% 和 0.69%~18.17%。在 FVC 提升 10%~35% 与梯田+淤地坝组合配置情景下,海勒斯太沟、六道沟、杨家沟减沙潜力分别介于 8.58%~26.37%, 10.64%~

35.71% 和 7.48%~31.28%, 水土保持率分别提升 1.86%~7.54%, 2.50%~13.43% 和 0.96%~18.46%。综合而言,水土保持措施配置的减沙效益排序为植被提升+梯田+淤地坝 > 植被提升+梯田 > 植被提升+淤地坝 > 植被提升 > 单一工程措施,凸显了以植被恢复为核心、工程措施为补充协同治理的必要性。

3 讨论

3.1 流域侵蚀空间变异及其主要驱动因素

本研究发现黄河中游多沙粗沙区 3 个小流域 2023 年土壤侵蚀强度均以微度和轻度为主,但强烈及以上侵蚀面积占比为 11.69%~15.65%,杨家沟侵蚀模数最大。通过与黄婷婷^[21]、张卓佩^[22]、王森^[23]等的研究中空间相重叠区域对比,该结论得到了支持。本研究表明,坡度、土地利用和植被覆盖度是 3 个小流域土壤侵蚀空间变异的主导因素。3 个小流域均位于黄土丘陵沟壑区,地形破碎、沟壑纵横。坡度是海勒斯太沟、六道沟土壤侵蚀空间变异的第一因素,也是杨家沟土壤侵蚀空间变异的第二因素。从水动力学角度分析,坡度是径流能量转化的关键地形因子,直接控制地表汇流速度与冲刷能力,其陡峭程度往往与径流剪切力和侵蚀搬运功率呈指数级关联^[24]。3 个流域中,人类活动对杨家沟下垫面的干扰范围最广,因此土地利用类型的解释力超过坡度,成为杨家沟土壤侵蚀空间变异的第一因素。不同土地利用类型及其空间结构通过改变地表覆盖度、糙度、土壤入渗特性及抗蚀性,深刻调节着径流形成过程与能量耗散途径^[25],进而对土壤侵蚀强度及其空间格局产生显著影响。3 个流域林草面积均大于 50%, 植被覆盖度因子均为第三主导因素。植被通过冠层截留、枯落

层阻流和根系固土等过程,能有效抑制径流产生并提升土壤稳定性,而植被覆盖度及其空间分异特征则制约着径流侵蚀能量的传导与积累过程^[26]。综合而言,3个流域因子解释力的排序变化,实质上揭示了从自然驱动为主向人为调控为主转变的水土流失治理进程,为理解黄河中游多沙粗沙区不同区域侵蚀驱动机制的演变提供了重要的空间序列证据。本研究还表明了坡度与土地利用交互作用的非线性增强效果最为显著。在生态水文过程中,当高侵蚀风险的土地利用类型(如坡耕地、裸地)与陡坡地形叠加时,二者并非简单叠加,而是触发侵蚀临界效应:陡坡为径流提供了强大的动能基础,不合理的人类活动则同时削弱地表抗蚀力并增加可蚀物质供给,导致径流侵蚀能量得以充分释放,从而显著放大侵蚀产沙强度,表现为交互解释力的显著提升。

3.2 UAV 多源数据在小流域水土保持措施空间配置中的作用

厘米级精度的 UAV 多源数据为小流域环境本底特征刻画、土壤侵蚀空间变异精细表达和水土保持措施精准配置提供了重要支撑和可靠依据。在流域环境本底特征刻画方面,UAV 的 DEM 数据和正射影像能够清晰呈现传统遥感影像难以分辨的微地形以及小规模梯田、淤地坝等水土保持措施,其多光谱数据则可敏锐捕捉到流域植被覆盖度的细微空间差异。在土壤侵蚀空间变异精细表达方面,相较于黄婷婷等^[21]基于 30 m 分辨率 Landsat 影像和 1:1 万地形图数据得到的六道沟土壤侵蚀结果,本研究使用的高分辨率地形数据突破了中低分辨率 DEM 对沟沿线、切沟沟头等关键微地形的平滑效应^[27],精准识别出坡面中下部未愈合切沟、陡坎及梯田过渡带等土壤侵蚀热点,这些微单元虽面积占比有限,却是暴雨过程中集中产流输沙的关键部位,其高强度侵蚀贡献在以往研究中因数据精度限制常被低估。在水土保持措施精准配置方面,传统基于较粗分辨率侵蚀环境特征设置的均质化配置方案难以有效遏制此类局部高强度侵蚀源,而本研究依托 UAV 数据支撑获得的精细化土壤侵蚀空间格局,能够指引将梯田、淤地坝等工程措施精准布设于新识别的侵蚀关键点位,从而显著提升资源配置效率与整体减沙效益。借助 UAV 数据分析流域侵蚀环境特征,能够推动小流域水土流失治理从“面状防控”向“精准靶向”的范式转变,为优化黄河中游多沙粗沙区水土保持措施的空间配置提供了新路径。

3.3 水土保持措施优化配置的流域减沙效应

“植被覆盖度提升+梯田+淤地坝”措施组合的

减沙潜力优于任何单一措施或植被+单一梯田/淤地坝组合措施,这一研究结果深刻揭示了水土保持措施的系统协同效应。该措施组合的优越性根植于其对流域泥沙“产生—运移—汇集”全过程的立体阻断与高效调控。具体而言,植被覆盖度提升主要作用于坡面,从源头上削弱雨滴溅蚀和坡面径流的冲刷动力,是实现“减源”的生态基础^[28]。梯田工程则通过改变微地形,将长坡截短、陡坡变缓,有效拦蓄坡面径流、促进泥沙就地淤积,实现了径流与泥沙在“运移”过程的关键调控^[29]。而淤地坝作为流域侵蚀泥沙的最终拦截措施,布设于沟道关键节点,直接拦截由坡面及沟坡下泄的水沙混合物,实现了对泥沙“汇集”的末端控制^[30]。这3种措施在空间上形成了植被坡面保土、梯田途中拦沙、淤地坝沟道固淤的有机协同链条,有效瓦解了泥沙从源区到沟口输送的连续性,使得上一环节未被完全拦截的剩余泥沙能在下一环节被再次捕获,从而产生侵蚀阻控的协同放大效应。因此,以小流域为单元的水土流失综合治理,其核心在于依据水文连通性与泥沙输移路径,进行水土保持措施的空间优化配置和精准布局,构建多层次、全过程的立体防护体系,从而实现减沙效益的最大化与生态韧性的显著提升。

4 结论

(1) 尽管研究流域 2023 年的土壤侵蚀强度以微度和轻度为主,但强烈及以上侵蚀面积占比 11.69%~15.65%,水土保持率相较于 75% 的目标仍有 9.68%~29.17% 的治理差距。在未来侵蚀防控的空间配置上,应遵循因地制宜原则,将有限治理资源优先投向坡度较陡、植被覆盖度低的谷坡与裸地区域,方能有效降低强烈及以上侵蚀的面积占比。

(2) 坡度、土地利用和植被覆盖度是驱动 3 个流域土壤侵蚀空间变异的主导因子,坡度与土地利用交互作用的非线性增强效果最为显著(q 值均大于 0.8)反映了地形与人类活动的耦合效应是塑造侵蚀分布格局的关键机制。在治理实践中,根据不同坡度等级限定其土地利用方式,并配置与之相匹配的生物或工程措施,能够从根本上瓦解导致强烈侵蚀的“危险耦合”。

(3) 措施空间优化配置情景的结果表明,以小流域为单元的水土流失治理应当采取系统配置的思路。单一措施虽有一定效果,但“植被覆盖度提升+梯田+淤地坝”的多措施协同模式能实现最大减沙潜力(可达 26.37%~35.71%)。有效的治理需构建生物措施固本、工程措施辅助的立体防护体系,在措施选择上,以提升植被覆盖度为根本,并在

坡面配置梯田、在沟道合理布设淤地坝,形成坡沟协同的治理链条。

致谢:感谢西北大学城市与环境学院庞国伟老师和杨勤科老师在本研究无人机数据方面给予的大力支持。

参考文献(References):

- [1] 王敏,刘志刚,张攀,等.黄河中游多沙粗沙区水土流失治理面临的关键问题与发展对策[J].中国水利,2023(10):42-45.
Wang M, Liu Z G, Zhang P, et al. Key issues and development strategies of soil and water loss control in the abundant and coarse sediment area of the middle Yellow River[J]. China Water Resources, 2023(10):42-45.
- [2] 冯家豪,赵广举,穆兴民,等.黄河中游泥沙输移特性及机理研究[J].泥沙研究,2020,45(5):34-41.
Feng J H, Zhao G J, Mu X M, et al. Characteristics and mechanism of sediment transport in the Middle Yellow River[J]. Journal of Sediment Research, 2020, 45(5):34-41.
- [3] 水利部黄河水利委员会.黄河流域水土保持公报(2023年)[EB/OL]. <http://yrcc.gov.cn/gzfw/stbcgb/hhlystbcgb/202505/P020250604343284649208.pdf>, 2024-07-05/2025-10-13.
Yellow River Conservancy Commission of MWR. Soil and water conservation bulletin in Yellow River Basin (2023)[EB/OL]. <http://yrcc.gov.cn/gzfw/stbcgb/hhlystbcgb/202505/P020250604343284649208.pdf>, 2024-07-05/2025-10-13.
- [4] 中共中央办公厅,国务院办公厅.关于加强新时代水土保持工作的意见[EB/OL]. https://www.gov.cn/zhengce/2023-01/03/content_5734869.htm, 2023-01-03/2025-10-13.
Circular of the General Office of the Central Committee of the Communist Party of China, General Office of the State Council. Opinions on Strengthening Soil and Water Conservation Work in the New Era[EB/OL]. https://www.gov.cn/zhengce/2023-01/03/content_5734869.htm, 2023-01-03/2025-10-13.
- [5] 李宗善,杨磊,王国梁,等.黄土高原水土流失治理现状、问题及对策[J].生态学报,2019,39(20):7398-7409.
Li Z S, Yang L, Wang G L, et al. The management of soil and water conservation in the Loess Plateau of China: present situations, problems, and counter-solutions[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019,39(20):7398-7409.
- [6] 张金良.基于新型淤地坝的黄土高原“小流域+”综合治理新模式探讨[J].人民黄河,2022,44(6):1-5,43.
Zhang J L. Study on integrated managements mode of small watersheds+ based on the new warping dams on the Loess Plateau[J]. Yellow River, 2022, 44(6):1-5,43.
- [7] 王聪,张守红,杜自强,等.黄土高原小流域生态系统综合治理与生态系统服务的协同提升[J].生态学报,2025,45(8):4072-4077.
Wang C, Zhang S H, Du Z Q, et al. Collaborative improvement of comprehensive management of small watershed ecosystem and ecosystem services in Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(8):4072-4077.
- [8] 李嘉宁,张红丽,田昌园,等.长冲河小流域土壤侵蚀与水文泥沙连通性分布特征及耦合关系分析[J].水土保持学报,2024,38(6):79-88.
Li J N, Zhang H L, Tian C Y, et al. Distribution characteristics and coupling relationship between soil erosion and hydrologic and sediment connectivity in Changchong River Basin[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(6):79-88.
- [9] 周杨麓,徐勤学,敖利满,等.无人机在土壤侵蚀研究中的应用进展[J].热带地理,2024,44(9):1719-1736.
Zhou Y C, Xu Q X, Ao L M, et al. Progress of UAV application in soil erosion research[J]. Tropical Geography, 2024,44(9):1719-1736.
- [10] 章文波,付金生.不同类型雨量资料估算降雨侵蚀力[J].资源科学,2003,25(1):35-41.
Zhang W B, Fu J S. Rainfall erosivity estimation under different rainfall amount[J]. Resources Science, 2003, 25(1):35-41.
- [11] Williams J R, Renard K G, Dyke P T. EPIC: a new method for assessing erosion's effect on soil productivity[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1983, 38(5):381-383.
- [12] 张科利,彭文英,杨红丽.中国土壤可蚀性值及其估算[J].土壤学报,2007,44(1):7-13.
Zhang K L, Peng W Y, Yang H L. Soil erodibility and its estimation for agricultural soil in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2007,44(1):7-13.
- [13] Liu B Y, Nearing M A, Shi P J, et al. Slope length effects on soil loss for steep slopes[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000,64(5):1759-1763.
- [14] Liu B Y, Nearing M A, Risse L M. Slope gradient effects on soil loss for steep slopes[J]. Transactions of the ASAE, 1994,37(6):1835-1840.
- [15] 蔡崇法,丁树文,史志华,等.应用USLE模型与地理信息系统 IDRISI预测小流域土壤侵蚀量的研究[J].水土保持学报,2000,14(2):19-24.
Cai C F, Ding S W, Shi Z H, et al. Study of applying USLE and geographical information system IDRISI to predict soil erosion in small watershed[J]. Journal of Soil Water Conservation, 2000,14(2):19-24.
- [16] Jin F M, Yang W C, Fu J X, et al. Effects of vegetation and climate on the changes of soil erosion in the

- Loess Plateau of China[J]. *Science of the Total Environment*, 2021,773:145514.
- [17] 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 prospective [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72 (1) : 116-134.
- [18] Song Y Z, Wang J F, Ge Y, et al. An optimal parameters-based geographical detector model enhances geographic characteristics of explanatory variables for spatial heterogeneity analysis: Cases with different types of spatial data[J]. *GIScience & Remote Sensing*, 2020,57(5):593-610.
- [19] Chen Y P, Wang K B, Fu B J, et al. 65% cover is the sustainable vegetation threshold on the Loess Plateau [J]. *Environmental Science and Ecotechnology*, 2024, 22:100442.
- [20] 曹文洪,宁堆虎,秦伟.水土保持率:概念内涵、阈值确定及实践应用[J].*水土保持通报*,2023,43(1):409-416.
Cao W H, Ning D H, Qin W. Soil and water conservation rate: Connotation of concept, threshold determination and practical application [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023,43(1):409-416.
- [21] 黄婷婷,史扬宇,曹琦,等.黄土高原六道沟小流域近30年来土壤侵蚀变化评价[J].*中国水土保持科学*,2020,18(1):8-17.
Huang T T, Shi Y Z, Cao Q, et al. Soil erosion evaluation of Liudaogou catchment in the Loess Plateau during the past 30 years[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2020,18(1):8-17.
- [22] 张卓佩,牛健植,樊登星,等.黄河中游多沙粗沙区土壤水蚀时空变化及动态驱动力分析[J].*水土保持学报*,2024,38(2):85-96.
Zhang Z P, Niu J Z, Fan D X, et al. Analysis of spatial and temporal evolution and dynamic driving force of soil water erosion in the middle reaches of the Yellow River in the rich and coarse sediment area [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024,38(2):85-96.
- [23] 王淼,牛健植,杨涛,等.黄河中游多沙粗沙区土壤侵蚀敏感性变化[J].*中国水土保持科学(中英文)*,2025,23(2):55-65.
Wang M, Niu J Z, Yang T, et al. Variation of soil erosion sensitivity in plentiful and coarse sediment area of the middle Yellow River [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2025,23(2):55-65.
- [24] 陈凯,张祎,王兴,等.宁南山区坡面与覆被特征对侵蚀水动力及产沙过程的耦合影响[J/OL].*干旱区研究*,2025: 1-15. (2025-11-04). [https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx? filename=GHQJ2025110101&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ](https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=GHQJ2025110101&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ).
- Chen K, Zhang Y, Wang X, et al. Coupled effects of slope and vegetation cover characteristics on hydrodynamic erosion forces and sediment yield processes in the southern Ningxia mountainous area [J/OL]. *Arid Zone Research*, 2025: 1-15. (2025-11-04). [https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx? filename=GHQJ20251101001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ](https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=GHQJ20251101001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ).
- [25] 亢晨波,郭汉清,张垚,等.复垦区不同土地利用类型土壤入渗特征及其影响因素[J].*中国水土保持科学(中英文)*,2023,21(5):71-80.
Kang C B, Guo H Q, Zhang Y, et al. Soil infiltration characteristics and influencing factors of different land use types in reclaimed areas [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2023,21(5):71-80.
- [26] 穆兴民,马雪燕,王双银,等.植被恢复下黄土高原沟壑区的产流机制与模式[J].*人民黄河*,2024,46(9):42-49,66.
Mu X M, Ma X Y, Wang S Y, et al. Changes in runoff generation patterns in the hilly-gully region of the Loess Plateau under vegetation restoration [J]. *Yellow River*, 2024,46(9):42-49,66.
- [27] 李思进,代文,熊礼阳,等.DEM分辨率对黄土侵蚀沟形态特征表达的不确定性分析[J].*地球信息科学学报*,2020,22(3):338-350.
Li S J, Dai W, Xiong L Y, et al. Uncertainty of the morphological feature expression of loess erosional gully affected by DEM resolution [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2020,22(3):338-350.
- [28] 陈良,胡砚霞,李振炜,等.基于土壤侵蚀角度的坡面水文连通性研究进展[J].*水文*,2023,43(6):14-19.
Chen L, Hu Y X, Li Z W, et al. Research progress of slope hydrological connectivity based on soil erosion [J]. *Journal of China Hydrology*, 2023,43(6):14-19.
- [29] 杨帆,信忠保.黄土丘陵区小流域侵蚀输沙及泥沙连通性对水土保持响应研究[J/OL].*生态学报*,2025:1-15. (2025-09-16). <https://link.cnki.net/doi/10.20103/j.stxb.202505011069>.
Yang F, Xin Z B. Study on the response of erosion and sediment transport and sediment connectivity to soil and water conservation in small watershed in Loess Hilly Region [J/OL]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025: 1-15. (2025-09-16). <https://link.cnki.net/doi/10.20103/j.stxb.202505011069>.
- [30] 白露璐,时鹏,李占斌,等.黄土高原梯田和淤地坝坡沟治理措施对产流产沙的协同效应[J].*农业工程学报*,2023,39(13):96-104.
Bai L L, Shi P, Li Z B, et al. Synergistic effects of terraces and check dams on runoff and sediment yields in a slope-gully system in Loess Plateau [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(13):96-104.