

元谋干热河谷区侵蚀沟内部泥沙连通性空间分异

李清桃^{1,2}, 白雷超^{1,2}, 罗明良^{1,2}, 曹雪^{1,2}, 杨海青^{1,2}

(1. 西华师范大学地理科学学院, 四川南充 637009; 2. 干热河谷土壤侵蚀监测与控制

四川省工程研究中心, 四川南充 637009)

摘要: [目的] 侵蚀沟发育过程的定量刻画是土壤侵蚀研究的重要内容, 传统地貌形态指标虽然能划分沟道演化阶段, 却难以揭示其内部泥沙输移过程的差异性。为解析同一发育阶段侵蚀沟在泥沙连通性上的空间分异特征, 探究其内部演化机制与空间格局。[方法] 以元谋干热河谷为研究区, 提取90条侵蚀沟并基于面积高程积分(hypsometric integral, HI)划分其发育阶段, 并选择其中18条典型侵蚀沟, 在HI划分发育阶段的基础上, 引入泥沙连通性指数(index of connectivity, IC)并结合景观格局指数[香农多样性指数(SHDI)、蔓延度指数(CONTAG)、聚集度指数(AI)、斑块密度(PD)和最大斑块指数(LPD)]进行聚类分析, 识别不同类型侵蚀沟的泥沙连通性空间格局, 并结合野外调查的地形、植被等要素探讨其影响机制。[结果] 1) 90条侵蚀沟的HI为0.35~0.68, 其中, $HI \geq 0.60$ 、 $0.35 < HI < 0.60$ 、 $HI \leq 0.35$ 侵蚀沟数量分别为8(8.89%)、82(91.11%)、0, 研究区的侵蚀沟发育阶段主要处于壮年期。2) 基于IC空间分布特征与景观格局指数聚类结果, 可将18条典型侵蚀沟分为3类: 斑块型IC值呈斑块状并集中于沟坡区域, 与地形起伏和植被覆盖差异密切相关; 点状型IC值表现为点状分散分布、空间破碎度高, 主要受土地地貌的影响; 递减型IC值呈现沿沟道纵向梯度递减的趋势并且IC高值集中于沟口及沟底位置, 主要与沟道形态及植被覆盖相关。3) 3种类型在景观聚集度(AI)、斑块密度(PD)等景观格局指数上存在显著差异, 反映侵蚀沟内部泥沙“源-汇”格局与输移动态的空间分异, 且地形因子(坡度、裂点等)与植被覆盖显著影响IC空间格局。[结论] 基于泥沙连通性指数的空间分异特征, 可识别不同侵蚀沟集水区内部泥沙输移潜力的空间格局, 弥补单一形态指标(HI)在刻画元谋干热河谷地区侵蚀沟动态演化过程中的不足。研究结果为干热河谷区侵蚀沟发育空间分异特征研究提供新的视角。

关键词: 侵蚀沟; 空间分异; 泥沙连通性; 面积高程积分; 景观格局指数; 干热河谷

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)05-0035-12

Spatial Variation of Sediment Connectivity within Gullies in the Yuanmou Dry-Hot Valley Region

Li Qingtao^{1,2}, Bai Leichao^{1,2}, Luo Mingliang^{1,2}, Cao Xue^{1,2}, Yang Haiqing^{1,2}

(1. School of Geographical Sciences, China West Normal University, Nanchong, Sichuan 637009, China;

2. Sichuan Provincial Engineering Laboratory of Monitoring and Control for Soil Erosion in Dry Valleys,

China West Normal University, Nanchong, Sichuan 637009, China)

Abstract: [Objective] Quantitative characterization of the development process of erosion gullies is a key aspect of soil erosion research. While traditional landform indices can classify the evolutionary stages of gullies, they struggle to reveal the differences in internal sediment transport processes. To analyze the spatial variation in sediment connectivity among erosion gullies at the same developmental stage and to investigate their internal evolutionary mechanisms and spatial patterns. [Methods] Taking the Yuanmou dry-hot valley as the study area,

收稿日期: 2026-04-02

修回日期: 2026-04-27

录用日期: 2026-05-06

网络首发日期(www.cnki.net): 2026-05-21

资助项目: 西华师范大学博士启动基金项目(22kE001); 西华师范大学自然科学类创新探索项目(23kc002); 国家自然科学基金项目(41871324); 四川省科技计划项目(2026YFHZ0107)

第一作者: 李清桃(2002—), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: liqingtao540@163.com

通信作者: 白雷超(1990—), 男, 博士, 讲师, 主要从事流域侵蚀产沙及数字地形地貌研究。E-mail: beleit@163.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

90 erosion gullies were selected and their developmental stages were classified based on the hypsometric integral (HI). Eighteen typical erosion gullies were further selected. Building upon the HI-based classification of developmental stages, the sediment connectivity index (IC) was introduced and combined with landscape pattern indices including Shannon diversity index (SHDI), contagion index (CONTAG), aggregation index (AI), patch density (PD), and largest patch index (LPI) to conduct cluster analysis, aiming to identify the spatial patterns of sediment connectivity for different types of erosion gullies. The influencing mechanisms were explored in combination with topographic and vegetation factors acquired from field surveys. [Results] 1) The HI values of the 90 erosion gullies ranged from 0.35 to 0.68. Specifically, the number of gullies with $HI \geq 0.60$, $0.35 < HI < 0.60$, and $HI \leq 0.35$ was 8 (8.89%), 82 (91.11%), and 0, respectively. The development stages of erosion gullies in the study area were primarily in the mature stage. 2) Based on the spatial distribution characteristics of IC and the clustering results of landscape pattern indices, the 18 typical erosion gullies can be classified into three categories: Patch-type: IC values exhibit a patch pattern and are concentrated in gully slope areas, closely related to topographic undulations and variations in vegetation cover. The point-type exhibits IC values distributed in a scattered, point-like pattern with high spatial fragmentation, primarily influenced by the topography of soil forest; The decreasing-type shows a trend of IC values decreasing along a longitudinal gradient within the gully, with high IC values concentrated at the gully mouth and bottom, primarily related to gully morphology and vegetation cover. 3) Significant differences exist among the three types in landscape pattern indices such as landscape aggregation (AI) and patch density (PD), reflecting the spatial differentiation of sediment "source-sink" patterns and transport dynamics within erosion gullies. Furthermore, topographic factors (slope, knickpoint) and vegetation cover significantly influence the spatial pattern of the IC. [Conclusion] Based on the spatial variation characteristics of the sediment connectivity index, it is possible to identify the spatial patterns of sediment transport potential within the catchment areas of different erosion gullies, which compensates for the limitations of a single morphological indicator (HI) in characterizing the dynamic evolution of gullies in the Yuanmou dry-hot valley region. This study provides a new perspective for research on the spatial differentiation characteristics of erosion gully development in the dry-hot valley region.

Keywords: gully; spatial differentiation; sediment connectivity; hypsometric integral; landscape pattern indices; dry-hot valley

Received: 2026-04-02

Revised: 2026-04-27

Accepted: 2026-05-06

Online (www.cnki.net): 2026-05-21

土壤侵蚀对生态环境造成严重的影响和破坏,制约着粮食生产及土地利用的可持续发展,是全球面临的重大环境问题之一^[1]。沟蚀作为土壤侵蚀的主要形式之一^[2],其发育可引起土地质量的退化、耕地资源丧失和生态系统功能下降等问题。目前,针对侵蚀沟的研究主要集中在概念、形态特征、影响因素及发育阶段等方面^[3]。其中,由于侵蚀沟的发育对国土空间格局演变具有重要的驱动作用,因此侵蚀沟发育及演化过程的研究受到广泛关注^[4],能够为精准治理侵蚀沟、保障区域生态安全提供理论依据和实践支撑。

侵蚀沟发育阶段划分是土壤侵蚀研究的核心问题之一,其划分标准呈现多元化特征,既可以基于侵蚀沟体积、面积及纵横剖面等外形指标进行划分^[5],也可以通过数字地形技术提取形态特征来划分^[6]。为定

量划分侵蚀沟,可引入面积高程积分(hypsometric integral, HI)^[7]和地貌信息熵(HI)^[8]等参数,为侵蚀沟发育阶段量化划分提供支撑。其中,HI作为衡量流域地貌发育阶段与演化特征的核心方法及关键指标^[7],已被广泛应用于表征地貌演化过程与动力机制、指示区域构造活动性等研究^[9]。但HI仍存在不足:1)不同区域背景下HI的特征规律及其控制影响因素缺乏统一的认知^[10];2)HI仅能表征地形静态发育特征,无法反映地貌系统中的物质迁移过程及发育阶段的动态不确定性^[11]。因此,HI应用于地貌发育阶段划分尤其是侵蚀沟发育过程研究时存在一定局限性:其仅能定量表征侵蚀沟所在集水区整体上的发育阶段,而无法对集水区内部不同部位(坡面、沟底、坡沟系统)的发育发展情况(泥沙源-汇确定及其动态转换、侵蚀热点识别等)进行细致刻画。

连通性是用于描述物质、能量、生物体及水文要素在系统内不同组分间相互转移的指标^[12],可细分为水文连通性、景观连通性和泥沙连通性。从功能与结构角度出发可进一步划分为功能连通性与结构连通性^[13]。泥沙连通性刻画流域内不同地貌单元与景观之间泥沙输移的连续性及其关联强度,不仅能够清晰揭示泥沙源区与汇区之间的具体迁移路径,还可表征泥沙向流域外部迁移的难易程度^[14]。目前,泥沙连通性的表征方法有野外调查法、图论法、指标法和模型模拟法等,其中指数法的应用最为广泛,是泥沙连通性定量研究的主要方法,尤其以 Borselli 等^[15]提出的连通性指数(index of connectivity, IC)应用最为广泛。近年来,由于泥沙连通性指标的不断发展和 IC 越来越多地应用于分析土地利用变化和不同水土保持措施的影响。除此之外,在一些特定研究场景,如河流网络和山体滑坡中,通过开发特定的 IC 改进模型可识别关键泥沙源区对河流泥沙的贡献^[1]。

侵蚀沟是流域泥沙的重要来源。一方面,侵蚀沟的发育过程为坡面水沙的汇集与快速输移提供高效通道,可显著提升流域泥沙连通性;随着侵蚀沟发育进程的持续推进,坡面与沟道系统间的连通性可进一步增强,显著提升侵蚀产沙量^[16]。已有研究^[17]证实,泥沙连通性随侵蚀沟发育程度的加深而增强,二者呈显著正相关;另一方面,高连通性区域通常更易发生侵蚀,其对全流域的泥沙贡献率极高,在流域关键产沙源区中发挥主导作用^[18]。因此,侵蚀沟发育过程与泥沙连通性之间存在紧密的耦合关系。泥沙连通性不仅能够表征侵蚀沟发育过程中泥沙输移的潜在连通程度及其动态变化过程,还可反映侵蚀沟发育过程中的侵蚀响应特征^[19]。由此可见,泥沙连通性指数在侵蚀沟发育阶段的研究中已展现出一定应用潜力,但该指数能否有效用于定量表征侵蚀沟的空间发育差异,仍需开展进一步深入研究。

云南省元谋县干热河谷是中国西南典型的干热河谷地貌单元,区域内水土流失问题突出。明确侵蚀沟内部的泥沙连通空间分异规律对区域水土流失精准治理具有重要作用。因此,本研究选取元谋干热河谷6个典型区域的侵蚀沟集水区作为研究对象:1)通过计算侵蚀沟的HI,对研究区侵蚀沟的发育阶段进行划分;2)尝试利用IC对侵蚀沟集水区内部的泥沙连通空间分异规律进行深入探究。研究旨在探究HI在干旱河谷区侵蚀沟发育阶段划分中的适用性,明确IC用于表征不同侵蚀沟集水区内部空间发育差异的可行性及其科学性,进而为元谋干热河谷地区水土流失精准治理提供理论支撑与科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于元谋干热河谷,隶属于云南省楚雄彝族自治州(25°23′~26°06′N,101°35′~102°06′E)。气候类型属于亚热带季风气候,年平均气温21.9℃,年平均降水量657.5 mm,年蒸发量3 627 mm,降水主要集中在雨季(5—10月),占全年85%以上,且多短时强降雨;旱季(11月至翌年4月)漫长干燥,水热平衡严重失调。土壤以燥红土、变性土为主^[20],抗侵蚀能力弱。植被以稀树灌木草丛为主,灌木稀少,植被稀疏。因其独特的地理环境,该区域侵蚀沟发育呈空间规模大、沟壁陡立、沟谷深壑的特点^[21]。由于过度放牧、滥砍滥伐等人为活动的影响,该区域水土流失严重。

本文参考前人^[22]研究结果,基于野外实际调查并根据研究区侵蚀沟发育特点,选取河尾(hw)、新华(xh)、沙地村(sdc)、秃秃脊(ttj)、平田士林(pttl)、下马吼(xmh)6个区域作为研究区(图1)。

1.2 数据来源

本研究中的数据由飞马D2000多旋翼无人机搭载索尼a6000相机及D-OP3000倾斜模块测量获得。空中三角测量的结果采用Context Capture软件计算,当检测结果出现无明显交叉或分层的情况时,则通过生成超高密度的三维点云,将噪声点去除,最后通过创建不规则三角网,生成分辨率为0.1 m的DEM。

1.3 研究方法

1.3.1 面积高程积分 HI是用于衡量流域地貌发育阶段及其特征的指标^[7]。计算面积高程积分的方法包括积分曲线法、体积比例法和起伏比法,其中起伏比法是最为便捷的方法^[23],计算公式为:

$$HI = \frac{H_{\text{mean}} - H_{\text{min}}}{H_{\text{max}} - H_{\text{min}}} \quad (1)$$

式中: H_{mean} 为流域的平均高程,m; H_{min} 为流域内的最低高程,m; H_{max} 为流域内的最高高程,m。

用提取的所有侵蚀沟数据计算HI,计算出面积-高程积分值与地貌发育阶段的关系见表1。

1.3.2 典型侵蚀沟的选取 相关研究^[24-25]表明,HI和IC受流域面积的影响。其中,HI与流域面积呈负相关,且随流域面积的增大而逐渐减小。随着流域面积的增加,径流量增大,增加水流剪切应力和携带运输泥沙的能力,从而影响泥沙连通性。因此,为确保试验结果的可靠性,并深入分析研究区侵蚀沟的HI及IC,本研究在6个研究区共提取90条侵蚀沟。在此基础上,结合侵蚀沟的面积统计与野外调查情况,设定1 400~1 600、2 200~2 400、2 900~3 100 m²共3组面积区间作为典型侵蚀沟的选取标准,从6个研究样区中基于3组面积区间各选取3条典型侵蚀沟,共计18条典型代表侵蚀沟进行深入探究并计算相关指标。

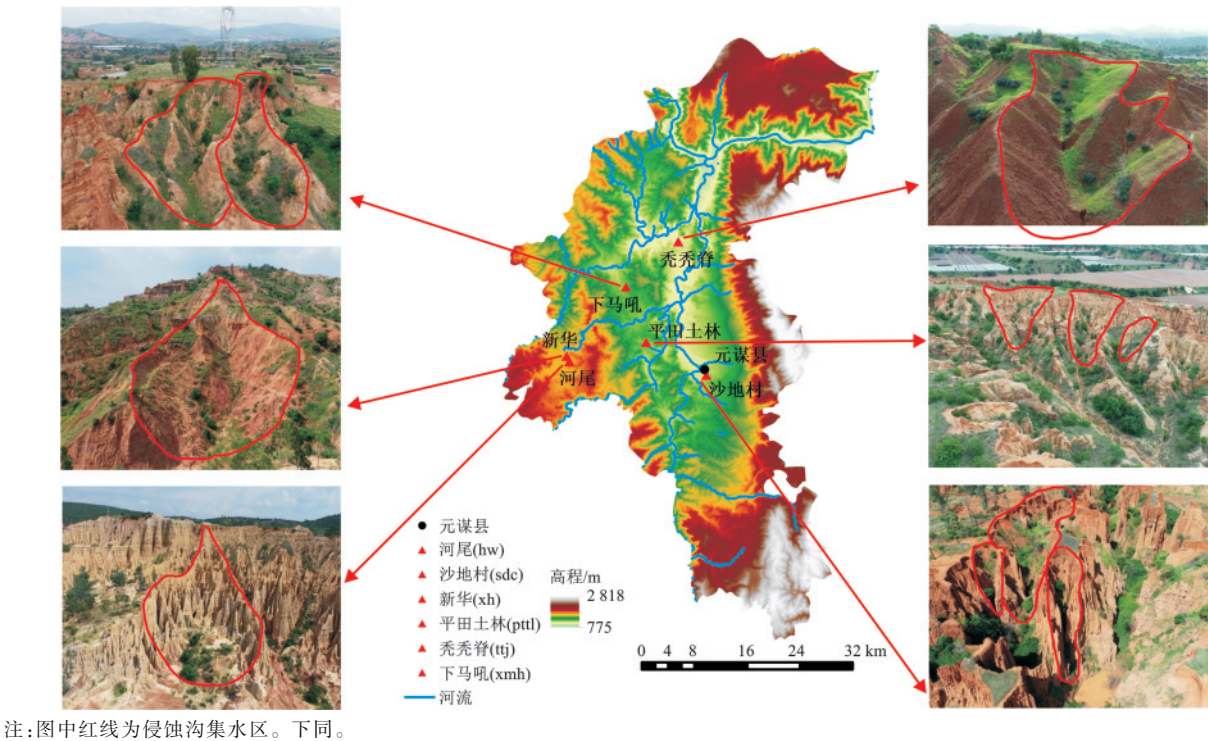


图 1 研究区概况及侵蚀沟分布
Fig.1 Overview of study area and distribution of erosion gullies

表 1 面积-高程积分值与地貌演化阶段关系
Table 1 Relationship between hypsometric integral (HI) values and geomorphic evolution stages

面积-高程积分值	地貌发育阶段	地貌发育特征
$HI \leq 0.35$	老年期	沟头前进与沟底下切基本停止,侧蚀微弱,横断面呈宽浅“U”形,沟底平缓
$0.35 < HI < 0.60$	壮年期	侵蚀方式以侧蚀为主,横断面由“V”形向“U”形过渡,侵蚀速率减缓
$HI \geq 0.60$	幼年期	以溯源侵蚀、下蚀为主,横剖面呈“V”形,沟壁陡峭

1.3.3 泥沙连通性指数 泥沙连通性指数(IC)由 Borselli等^[15]提出,主要探究泥沙分离与输移之间的关系,直观反映泥沙输移的潜在连通程度。
计算公式为:

$$IC = \lg \left(\frac{D_{up}}{D_{dn}} \right) = \lg \left(\frac{\bar{W} \bar{S} \sqrt{A}}{\sum_i \frac{d_i}{W_i S_i}} \right) \quad (2)$$

式中: D_{up} 为集水区泥沙向下输移的潜力; D_{dn} 为泥沙被输移至最近泥沙汇的潜力; $\bar{W}$ 为集水区的平均权重因子; $\bar{S}$ 为集水区的平均坡度,m/m; A 为集水区面积, m^2 ; W_i 、 S_i 分别为第*i*个单元的权重因子和坡度; d_i 为从目标单元到上游每个贡献单元*i*的流动路径长度,m。在计算IC时,粗糙度指数(RI)作为权重因子(W)替代原始公式中植被管理与覆盖因子(C)^[26]。RI的计算首先通过对原始DEM进行局部均值平滑,得到代表宏观地形趋势的平滑表面;随后通过原始DEM与平滑表面的差值运算,生成残差地形层;在此基础

上,以移动窗口计算残差地形层的局部标准差,所得结果即为RI。最后按照公式(3)进行标准化处理。

$$W = 1 - \frac{RI}{RI_{max}} \quad (3)$$

式中: W 为权重因子;RI为当前栅格单元的粗糙度指数; RI_{max} 为研究区内RI的最大值。
汇水面积的计算采用多流向算法取代 Borselli等^[15]使用的单一流向算法,以便更好地表示在上坡发生分流的水流的路径。

为对比各个典型区域泥沙连通性差异,对典型侵蚀沟集水区IC值进行归一化处理^[17]。计算公式为:

$$IC' = \left(\frac{IC - IC_{min}}{IC_{max} - IC_{min}} \right) \quad (4)$$

式中: IC_{max} 、 IC_{min} 分别为泥沙连通性的最大值和最小值。
为进一步量化归一化后的连通性程度,参考相关研究^[27],将归一化后的IC基于自然断点法重分类为5个级别:极弱连通(级别1)、弱连通(级别2)、中等连通(级别3)、高连通(级别4)和极高连通(级别5)。

1.3.4 景观格局指数 为定量刻画泥沙连通性的空间分异特征,将典型侵蚀沟集水区的IC重分类结果视为特殊的“连通性景观”。在该景观中,每个IC重分类等级即代表一种“斑块类型”。为了对该连通性景观进行评价分析,基于前人^[28]的研究在景观水平上选取香农多样性指数(SHDI)、蔓延度指数(CONTAG)、聚集度指数(AI)、斑块密度(PD)和最大斑块指数(LPI)。SHDI衡量不同连通等级的多样性与面积分配均匀度;CONTAG反映优势连通等级在空间上的连续延展性;AI表征同一连通等级斑块的空间聚集状况,可识别高/低连通区的聚集分布;PD为单位面积斑块数,反映连通性空间格局的破碎化程度;LPI为最大斑块面积占比,揭示主导连通类型。所有指数计算均通过景观格局分析软件Fragstats 4.2软件完成。

1.3.5 K-means聚类 为客观识别研究区侵蚀沟泥沙连通性的空间分异特征,对18个典型侵蚀沟集水区进行聚类分析。本研究采用K-means聚类算法,对重分类后的IC值进行聚类分析,以计算得到的每条侵蚀沟的景观格局指数数据集(包括AI、CONTAG、PD、LPI、SHDI)作为输入特征变量。在分析前,对所有指数进行Z-score标准化处理以消除量纲影响。最优聚类数(K值)通过肘法^[29]确定,即通过评估不同聚类数下簇内误差平方和(SSE)的下降幅度来确定最优K值。计算公式为:

$$SSE = \sum_{i=1}^k \sum_{p \in C_i} |p - m_i|^2 \quad (5)$$

式中: k 为聚类簇的数量; C_i 为第 i 个簇; p 为簇 C_i 中的样本点; m_i 为簇 C_i 的质心(即簇内所有样本的平均值)。

当K值较小时,增加K值会显著降低SSE;随着K值不断增大,SSE的下降趋势逐渐趋于平缓,其下降速率发生突变的拐点处对应的K值即为最佳聚类数。本研究中,以标准化后的AI、CONTAG、PD、LPI、SHDI 5个景观格局指数为特征变量,对18条侵蚀沟依次计算 $K=1\sim 9$ 的SSE值,结果表明当 $K=3$ 时为最佳聚类数。

2 结果与分析

2.1 基于面积高程积分的侵蚀沟发育阶段划分

对计算的HI结果分析发现,90条侵蚀沟的HI为0.35~0.68,其中, $HI \geq 0.60$ 、 $0.35 < HI < 0.60$ 、 $HI \leq 0.35$ 侵蚀沟数量分别为8(8.89%)、82(91.11%)、0,表明研究区的侵蚀沟发育阶段主要处于壮年期。由表2可知,18条典型代表侵蚀沟的HI全部为0.35~0.60,说明均处于壮年期,但通过野外调查(图1)发现,18条侵蚀沟形态特征具有显著差异。

除根据HI值将壮年期的侵蚀沟进一步细分外,实际上HI并不能完全体现侵蚀沟集水区内部的差异,需要新的分析方法对侵蚀沟的内部差异深入探究。因此,本文引入泥沙连通性指数概念,尝试对HI计算出的同一发育阶段的侵蚀沟进行比较分析,以期表征侵蚀沟集水区内部更加细微的发育演化特征。

表2 典型侵蚀沟面积及HI
Table 2 Area of typical erosion gullies and HI

侵蚀沟	面积/m ²	HI	侵蚀沟	面积/m ²	HI	侵蚀沟	面积/m ²	HI
hw1	1 558	0.41	xh1	1 620	0.43	pttl1	1 488	0.47
hw2	2 965	0.50	xh2	2 885	0.36	pttl2	2 938	0.46
hw3	2 214	0.45	xh3	2 295	0.44	pttl3	2 265	0.50
ttj1	1 520	0.51	sdc1	1 420	0.53	xmh1	1 563	0.48
ttj2	2 965	0.48	sdc2	2 915	0.55	xmh2	3 091	0.38
ttj3	2 275	0.50	sdc3	2 269	0.58	xmh3	2 373	0.57

注:编号为研究区内18条典型侵蚀沟的编码,字母代表6个不同的采样区域,数字1~3表示同一区域3条不同的侵蚀沟。下同。

2.2 侵蚀沟泥沙连通性内部空间分布特征

2.2.1 基于景观格局指数的侵蚀沟泥沙连通性聚类及其特征分析 18条典型侵蚀沟的IC见表3。IC值的变化范围较大,整体为-3.46~6.59,表明不同侵蚀沟在泥沙输移能力方面存在显著差异。尽管各沟道的极值差异不大(最小值为-3.46~-2.43,最大值为5.77~6.59),但从图2可以看出,不同侵蚀沟内部IC值空间分布格局具有明显差异。

为定量刻画侵蚀沟泥沙连通性的空间分异,将归一化后的IC栅格进行重分类后转化为“连通性

景观”,并计算景观格局指数。基于景观格局指数并通过K-means聚类分析将18条侵蚀沟划分为3类具有显著统计差异的空间格局分类。其中,类别I包含侵蚀沟ttj1、ttj2、ttj3、xmh1、xmh2、xmh3、sdc1、sdc2,共8条;类别II包含hw1、hw2、hw3、xh2、sdc3、pttl1、pttl2、pttl3,共8条;类别III仅包含xh1和xh3,共2条。为方便对比3类侵蚀沟景观格局指数的差异,将景观格局指数进行归一化处理并绘制热力图(图3),计算每个类别景观格局指数的平均值(表4)。

表 3 典型侵蚀沟泥沙连通性指数
Table 3 Sediment connectivity index of typical erosion gullies

侵蚀沟	最大值	最小值	侵蚀沟	最大值	最小值	侵蚀沟	最大值	最小值
hw1	5.94	—2.43	xh1	6.14	—3.01	pttl1	5.91	—2.52
hw2	5.95	—3.04	xh2	5.97	—3.20	pttl2	6.12	—2.65
hw3	5.84	—3.39	xh3	6.14	—3.46	pttl3	6.19	—2.81
ttj1	6.18	—2.92	sdc1	5.77	—2.85	xmh1	6.02	—3.14
ttj2	5.97	—2.82	sdc2	5.88	—2.86	xmh2	6.23	—2.97
ttj3	6.25	—3.10	sdc3	6.59	—2.70	xmh3	6.38	—3.46

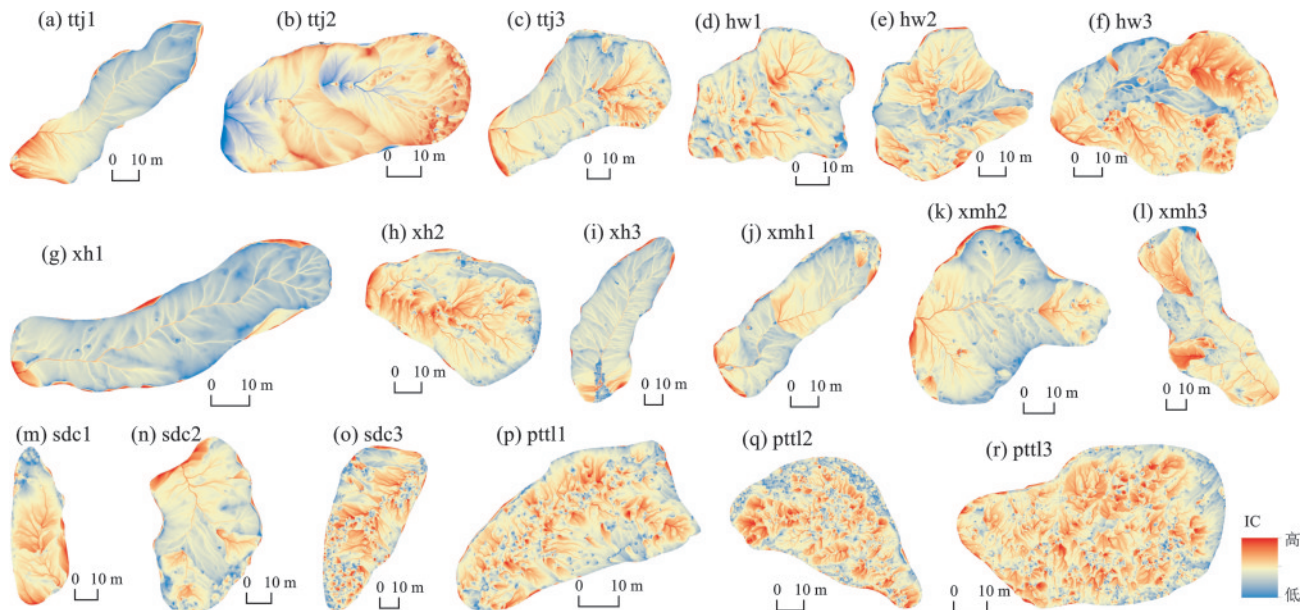


图 2 典型侵蚀沟泥沙连通性指数

Fig.2 Sediment connectivity index of typical erosion gullies

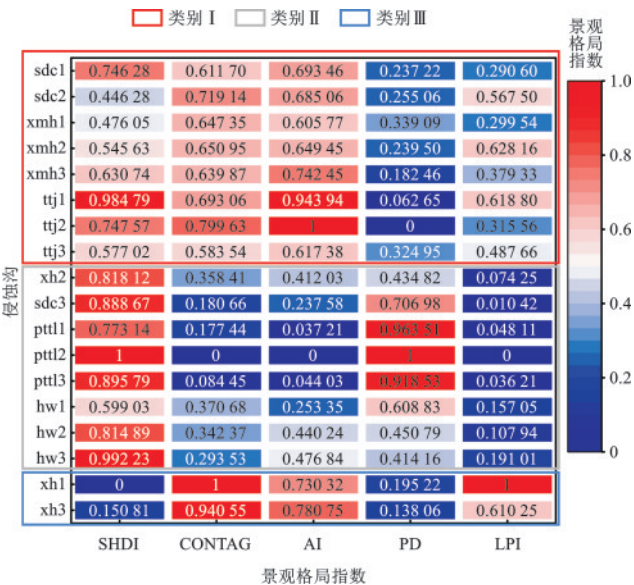


图 3 典型侵蚀沟景观格局指数热力图

Fig.3 Heatmap of landscape pattern indices of typical erosion gullies

类别 I : 侵蚀沟在 3 个类别中具有较高的景观聚集度($AI_{mean}=64.06$)和较低的斑块密度($PD_{mean}=13\ 573\ 152$)。高 AI 值表明,沟内相似的泥沙连通性

等级斑块在空间上高度邻接、团聚成片;较低的 PD 值则说明景观整体完整,破碎化程度低。结合中等的蔓延度($CONTAG_{mean}=27.86$),表明景观中存在优势斑块类型能够形成有效的连接和延展。

表 4 各类别景观格局指数的平均值
Table 4 Average values of various types of landscape pattern indices

类别	SHDI _{mean}	CONTAG _{mean}	AI _{mean}	PD _{mean}	LPI _{mean}
I	1.386	27.86	64.06	13 573 152	21.97
II	1.452	16.08	47.06	26 183 245	6.38
III	1.212	34.76	64.10	11 877 334	36.57

类别 II : 侵蚀沟表现出与类别 I 几乎相反的景观格局指数特征,在 3 种类别中景观聚集度最低($AI_{mean}=47.06$),斑块密度最高($PD_{mean}=26\ 183\ 245$),同时蔓延度指数也最低($CONTAG_{mean}=16.08$)。极低的 AI 值与极高的 PD 值表明,不同连通性等级的斑块呈现破碎分布。最低的 CONTAG 值进一步证实,景观中无任何优势斑块类型能够形成有效连接和延展,反映泥沙连通性内部极强的空间异质性。

类别Ⅲ:侵蚀沟的核心特征在于最高的蔓延指数($\text{CONTAG}_{\text{mean}}=34.76$)与最大斑块指数($\text{LPI}_{\text{mean}}=36.57$),同时具有最低的香农多样性指数($\text{SHDI}_{\text{mean}}=1.212$)。极高的CONTAG和LPI值表明,景观中某种连通性等级的斑块面积占比大,而且在空间上连接成片、蔓延广泛。最低的SHDI值说明,每种连通性等级面积占比极不均匀。这种格局指示侵蚀沟内大部分区域被同一种强度的连通性等级所控制。

2.2.2 侵蚀沟集水区泥沙连通性空间格局特征 为进一步探究不同侵蚀沟泥沙连通性的空间格局特征,基于前述聚类结果,结合每个类别泥沙连通性指数(图4),可以更直观地揭示3类泥沙连通性格局在空间结构上的差异。

类别Ⅰ斑块型:空间结构表现为有序的网络或枝状形态(图4a)。高连通性区域在空间上聚集形成类似斑块状结构,中、低值区域则与其相邻。这种结构证明其极高的景观聚集度与较低的破碎度,表明系统内相似的连通性等级倾向于在空间上紧密邻接,成片出现。

类别Ⅱ点状型:侵蚀沟空间格局呈现高度复杂、破碎化和点状结构(图4b)。不同等级的连通性斑块细小破碎且交错分布,高值区与低值区密集混合在一起,缺乏连续成片的连通性区域。与景观格局指数所反映的极低聚集度和极高破碎度一致,其内部有着极强的空间异质性。

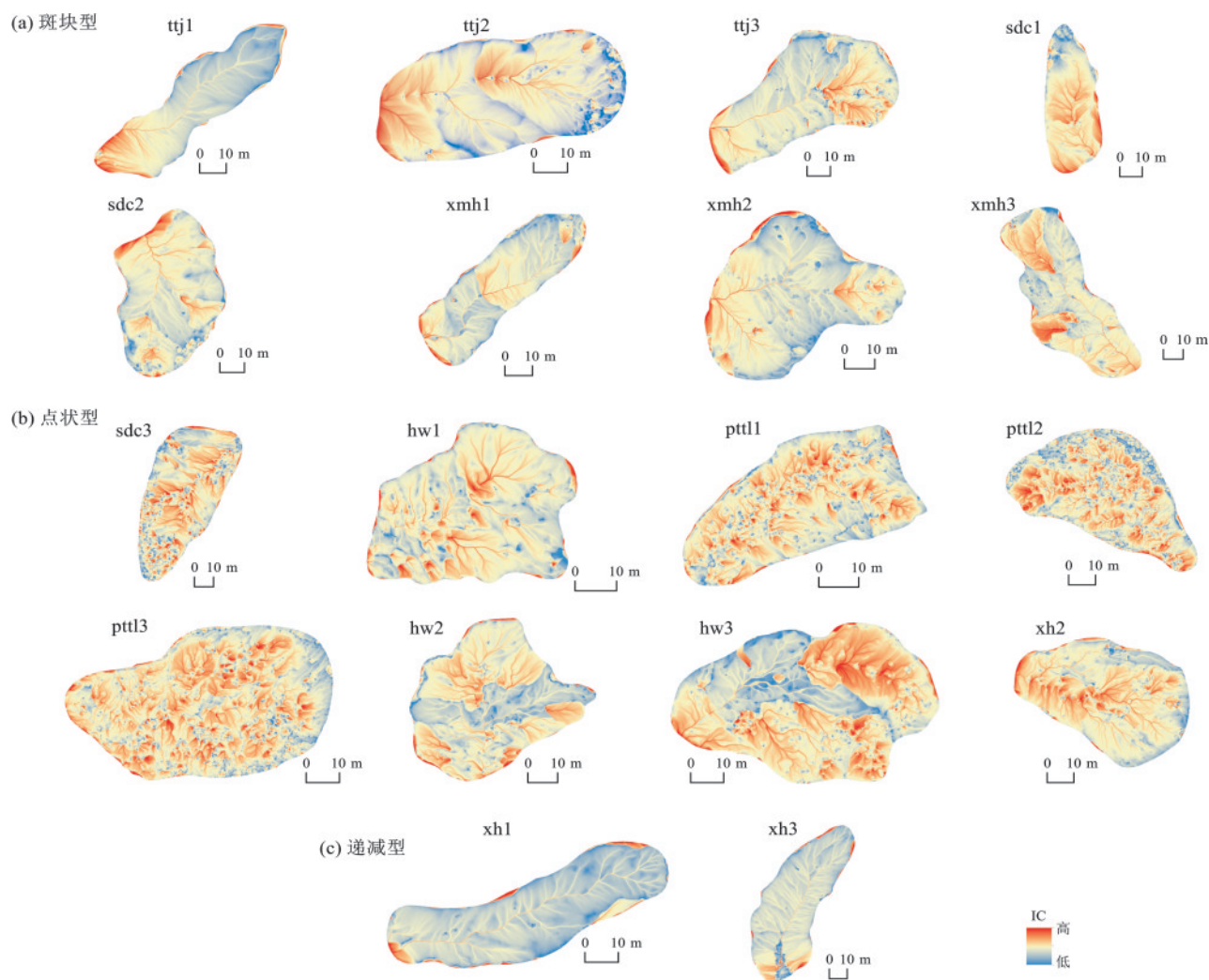


图4 3类侵蚀沟泥沙连通性指数的空间分布格局

Fig.4 Spatial distribution patterns of sediment connectivity index in three types of erosion gullies

类别Ⅲ递减型:侵蚀沟的弱连通性面积占比均 $>40\%$ (图5),在面积和连接度上占据绝对主导地位,形成大片连续的区域(图4c),与极高的蔓延度和最大斑块指数所指示的“单一优势类型广泛蔓延”完全吻合。在空间上,其内部IC值由下游到上游、由沟

底到坡顶呈逐渐递减趋势,且IC高值区集中于沟口及沟底区域,而中上游除主沟道IC值较高外,坡面区域IC值普遍较低。其IC值表现为一种递减的形态,而非前2类的斑块或点状结构,在高和极高连通性中的占比均 $<10\%$ 。

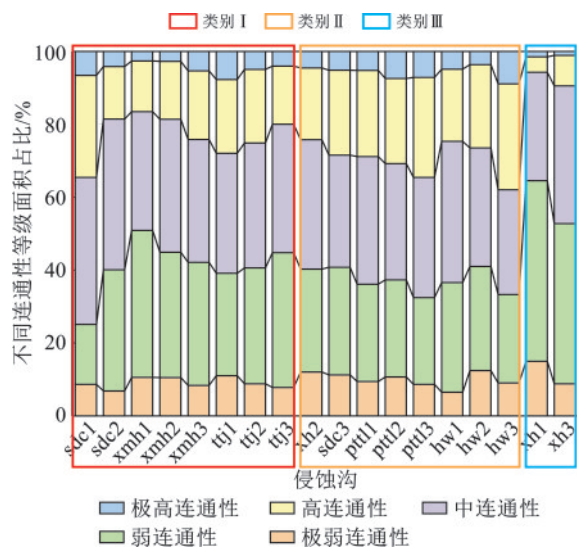


图 5 典型侵蚀沟不同类别 IC 值面积占比

Fig.5 Area proportions of different types of IC values in typical erosion gullies

综上所述,景观格局指数从空间聚集性、连接性、破碎度和优势度等多个维度,揭示侵蚀沟泥沙连通性在空间组织上的差异。而通过泥沙连通性空间布局进一步深化对泥沙连通性在空间上的分异认识,展现斑块型、复杂破碎的点状型及递减型在空间上的布局结构,此 3 类格局分别代表不同的泥沙输移潜在空间结构,为理解不同侵蚀沟之间的差异提供“连通性”的视角。

3 讨论

3.1 侵蚀沟集水区内部泥沙输移潜力空间格局特征

HI 被广泛用于流域地貌发育阶段的划分,其理论基础建立在侵蚀循环模型之上,强调地貌演化的

时间序列和形态特征^[8]。然而,本研究发现,基于单一形态测量的 HI 指标在描述侵蚀沟动态演化过程方面存在内部局限性,难以捕捉侵蚀沟内部复杂的泥沙输移和能量转换过程。

近年来,地貌学研究特别在水土保持领域侵蚀沟的研究正经历从“形态描述”转向聚焦“过程响应”^[30]。IC 的引入正是这一转变的体现。IC 反映泥沙从源到汇的输移效率,直接关联侵蚀产沙和泥沙输移的核心过程,因此能够为识别流域内物质迁移的“热点区域”和关键路径提供强有力的空间诊断工具^[31]。因此,从泥沙连通性的视角去阐明侵蚀沟泥沙的动态过程十分重要。

本研究基于 IC 空间分布特征,识别出 3 种典型沟道泥沙连通性类型:斑块型、点状型和递减型,与 Marzolf 等^[32]研究结果类似,人类活动及不同土地利用类型影响下的连通性模式反映侵蚀沟发育过程中的不同主导机制。这种基于连通性空间格局的分类,有效地将宏观上同属“壮年期”的侵蚀沟在微观结构上区分开来,揭示其在内部泥沙输移动态方面的差异。

斑块型景观格局指数以较高景观聚集度(AI)和较低的斑块密度(PD)为主要特征。此类泥沙连通性空间格局中,高 IC 值以斑块状集中分布于沟坡的一些区域。结合图 6,沟坡区域由于坡度较大或局部地形起伏(如裂点)的影响,坡面径流在汇入沟道前经沟坡段的集中与加速,坡面侵蚀产生的泥沙在此获得高效输移,形成连续的“源-汇”路径。而植被覆盖度的空间差异进一步强化此格局,即沟坡植被覆盖相对较低,为泥沙输移创造有利条件。因此,斑块型的分布特征体现地形与植被对泥沙连通性的共同作用影响。

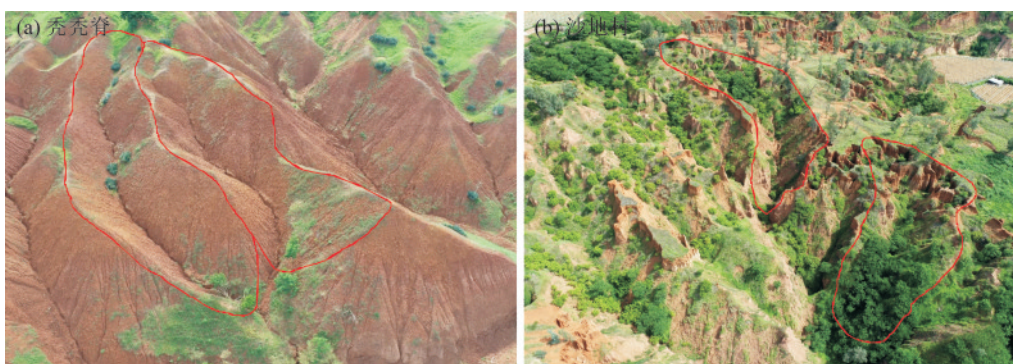


图 6 斑块型侵蚀沟形态特征

Fig.6 Morphological characteristics of patch-type erosion gullies

点状型泥沙连通性空间格局表现为极低的空间聚集度(AI)与极高的破碎度(PD),IC 值呈点状分散分布,空间异质性极高。野外观察(图 7)表明,此类格局与土地地貌的发育密切相关,高大、密集的土柱将侵蚀沟分割、包围,导致沟道网络极度破碎。凸起的土柱作为泥沙输移的屏障,迫使径流在土柱间绕

行,泥沙输移路径被迫延长且复杂化,连通性因而呈现破碎化特征。土柱本身是侵蚀残余地貌,其存在恰恰反映局部抗蚀性差异对侵蚀过程的反馈,即抗蚀性较强的土体得以保留,从而影响泥沙输移路径。所以点状型体现了残余地貌控制下地形起伏导致的泥沙连通性空间异质化。

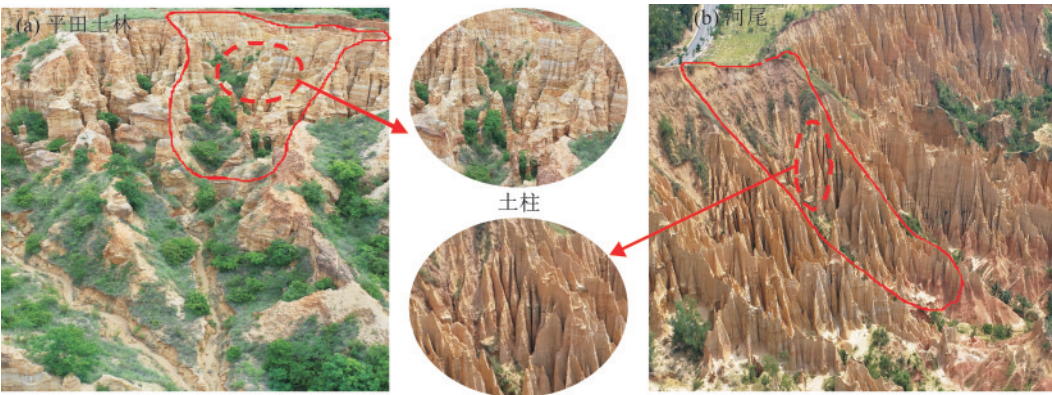
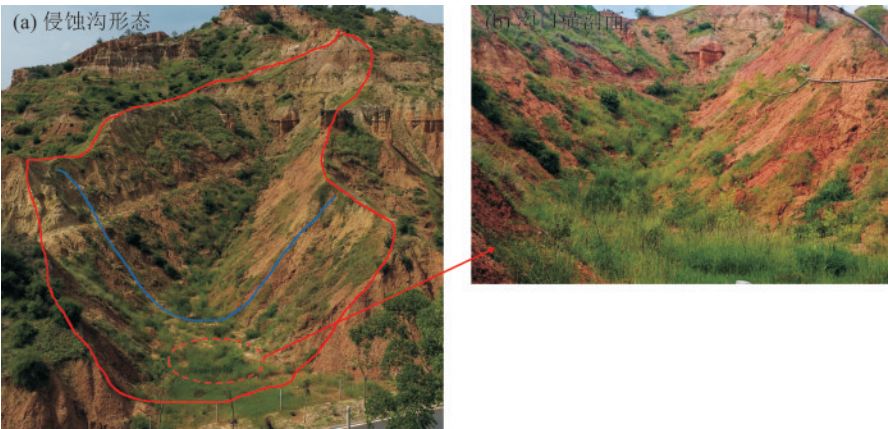


图 7 点状型侵蚀沟残余土柱形态
Fig.7 Morphology of residual soil pillars in point-type erosion gullies

递减型泥沙连通性空间格局中,蔓延度指数(CONTAG)与最大斑块指数(LPI)最高,而香农多样性指数(SHDI)最低。大部分区域以弱连通性和极弱连通性为主,IC 高值区集中于沟口坡面及上游沟底区域。其核心表现为泥沙连通性沿沟道纵向呈现梯度递减的趋势。此格局的形成与沟道几何形态密切相关。

由图 8 可知,该类侵蚀沟的沟道横剖面呈宽浅的“U”形,沟底平缓开阔,沟道网络结构简单,分支不发达。宽浅沟道水流分散,易发生淤积,从而导致泥沙输移效率降低。图 8 中可见沟底植被覆盖较好,泥沙在此发生沉积,从而形成连通性沿程递减的总体趋势,体现沟道形态及植被对泥沙连通性空间分异的影响。



注:蓝线为侵蚀沟横剖面线。下同。

图 8 递减型侵蚀沟形态及沟口横剖面
Fig.8 Morphology of decreasing-type erosion gullies and cross-section at gully outlet

本研究基于 AI、CONTAG、SHDI、LPI 和 PD 等景观格局指数,主要从空间聚集性、优势度和破碎度等核心维度,将典型侵蚀沟的泥沙连通空间分布格局划分为 3 种类型。量化了典型侵蚀沟泥沙连通性在“源-汇构型”“破碎度”与“空间主导性”上的核心特征。

值得注意的是,景观格局指数体系是多元的。若引入其他指数进行分类会得出不同的结果。但二者并不矛盾,因为每个指数的侧重点不同,如斑块结合度(COHESION)可进一步判别连通性斑块的物理连接效力;边缘密度(ED)和景观形状指数(LSI)则能定量刻画源汇交互界面的复杂性与曲折度。这些不同维度的指数,进一步深化了对侵蚀沟泥沙连通性空间格局的认识,而本研究的分类方案是针对“从整体空间组织模式理解侵蚀产沙差异”这一具体科学问题而构建的有效框架。因此,未来需要引入更多指数

来进一步研究侵蚀沟内部泥沙连通性空间分异。

综上所述,泥沙连通性的空间分异特征系统地揭示 HI 指数所无法捕捉的不同侵蚀沟集水区内部差异。它不仅刻画泥沙输移潜力的空间分异,更间接反映侵蚀沟的内部泥沙源-汇格局以及潜在的土壤侵蚀,并且反映不同因素影响下侵蚀沟内部潜在的侵蚀产沙活动,为理解侵蚀沟的演化过程与机理提供超越宏观形态的“连通性视角”。

3.2 地形与植被对 IC 的影响

由于泥沙连通性表征的是某一系统内部泥沙输移的连通程度及产沙的潜力,所以与侵蚀产沙、泥沙输淤过程相关的地形条件、植被、气候及人为因素等均影响沉积物连通性的大小和分布^[1]。根据研究区的地形地貌情况,本文主要针对地形与植被 2 种要素进行分析。

裂点是指河床纵剖面上缓坡段与陡坡段的截然转折处,是河谷纵剖面上坡度转折点。图 9 中裂点位于侵蚀沟沟底的中下部附近,IC 值分布图显示连通性受裂点影响由高突然向低转变。裂点相当于一个动态调节阀。在低流量条件下,裂点处形成的陡坡能够有效拦截上游来沙,使上下游的泥沙连通性产生突然的变化;而在高流量或极端暴雨事件中,水流

能量急剧增加,会越过或切穿裂点,暂时恢复上下游的泥沙输移联系,表现出事件驱动型的连通性响应特征。这种“连通-不连通”的转换机制,使得裂点发育区域的泥沙输移过程呈现显著的阈值效应。因此,在裂点发育区由于坡度突变和泥沙局部沉积过程,单纯依靠地形参数难以准确刻画实际的泥沙输移路径^[33]。

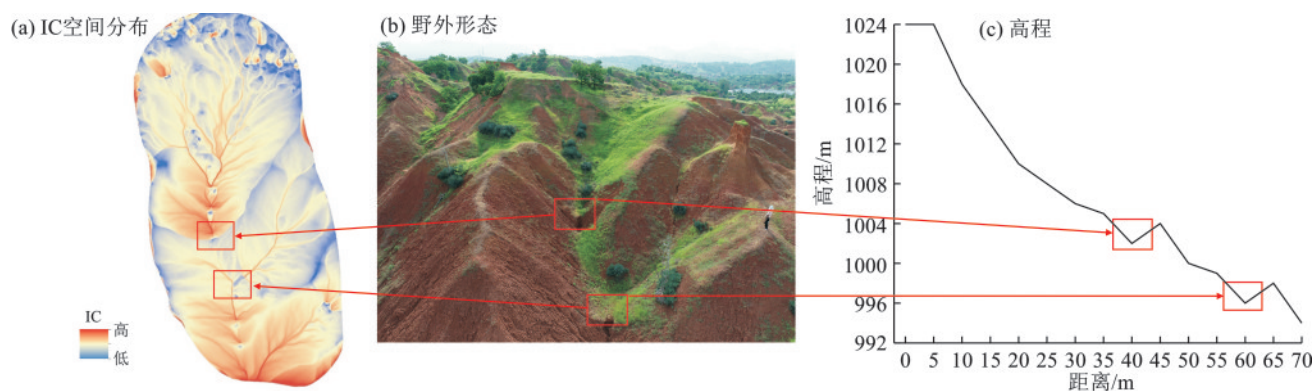


图 9 裂点发育侵蚀沟的 IC 空间分布、野外形态与高程纵剖面

Fig.9 Spatial distribution of IC, field morphology, and longitudinal elevation profile of knickpoint-developed erosion gullies

植被通过多种生态水文过程对坡面泥沙连通性产生重要影响^[16]。植被能够有效截留降雨,减缓地表径流,并增加土壤抗侵蚀能力,从而影响泥沙连通性,如 ttj1 和 xh3 侵蚀沟。从泥沙连通性(图 2)可以看出,二者的高连通性主要集中于沟口区域,然而 ttj1 在高连通性面积占比显著高于 xh3。

由图 10 可知, xh3 的植被覆盖度明显高于 ttj1, 导致泥沙连通性降低。除此之外, ttj1 呈现典型的窄深“V”形沟道, 沟缘线清晰, 沟道完整, 坡长较短, 沟道狭窄, 泥沙能够被快速输移; 相比之下, xh3 呈现宽浅的“U”形沟道形态, 沟底平缓开阔, 坡长较长, 水流易分散。这种地形与植被的协同作用及沟道形态特征造成 ttj1 与 xh3 的泥沙连通性空间差异。此对比表明, 植被与地形对泥沙连通性的影响并非独立作用, 而是存在显著的耦合效应, 侵蚀沟的发育及

植被覆盖度的降低对泥沙连通性具有正向作用, 但这种作用受到地形的影响^[16]。未来研究应进一步量化不同坡度条件下植被对泥沙连通性的影响, 并定量区分地形与植被对该区域泥沙连通性的贡献率, 以及其他因素(如沟道形态特征)对泥沙连通性的影响。

除下垫面影响之外, 本研究在 IC 计算中, 采用粗糙度指数(RI)替代原始公式的植被覆盖因子(C), 虽然可以反映元谋干热河谷的植被稀疏和地形复杂特征, 但 RI 更能反映土林和沟坡起伏的粗糙度影响; 然而缺乏不同参数方案(如 C 因子、曼宁系数 n 或不同权重组合)的对比验证, 以及不同参数方案如何影响 IC 对侵蚀沟集水区内部差异的判别效果。同时, IC 指数本身是基于简化假设的静态指数, 其对复杂侵蚀过程的表征能力有限。

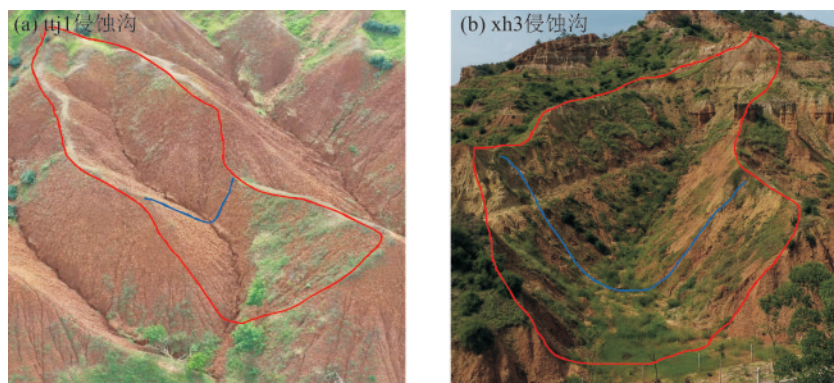


图 10 植被覆盖与沟道形态差异下的侵蚀沟对比

Fig.10 Comparison of erosion gullies under different vegetation cover and channel morphology conditions

近期研究^[34]表明,在多因素耦合的复杂流域,引入网络分析或考虑因子间非线性交互作用,能够优化IC模型并提高其预测精度。在黄土高原、东北黑土区等水热条件、侵蚀类型及植被格局迥异的其他侵蚀环境,IC是否能够适用于不同侵蚀沟之间差异的对比,仍有待进一步的野外试验和跨区域对比研究加以验证。

4 结论

1)元谋干热河谷侵蚀沟利用HI划分发育阶段以壮年期为主,HI在对元谋干热河谷地区侵蚀沟发育阶段的划分上存在不足,与实际地貌发育存在差异。泥沙连通性能够有效揭示侵蚀沟集水区内部的空间异质性。

2)基于泥沙连通性指数(IC)空间分布特征划分的3种类型(斑块型、点状型和递减型),3种类型不仅能刻画泥沙输移潜力的空间分异,更间接反映侵蚀沟内部潜在的侵蚀产沙风险。

3)本研究仅使用IC探究元谋干热河谷地区的侵蚀沟,IC适用的条件范围及地貌类型在未来还需要进一步探究。并且尚未明确影响IC的各因子在揭示侵蚀沟系统内部发育差异中的具体作用,未来还需量化各因子的贡献率,揭示其作用机制。

参考文献:

- [1] Shi Chenyu, Liang Yue, Qin Wei, et al. Review of sediment connectivity: Conceptual connotations, characterization indicators, and their relationships with soil erosion and sediment yield[J]. *Earth-Science Reviews*, 2025, 264: e105091.
- [2] 朱显谟.黄土区土壤侵蚀的分类[J]. *土壤学报*, 1956(2): 99-115. Zhu Xianmo. Classification on the soil erosion in the loess region[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1956(2): 99-115.
- [3] 廖琪华, 杨丹, 余宇首, 等. 元谋干热河谷区切沟形态特征及土壤理化性质分析[J]. *四川农业大学学报*, 2025, 43(2): 418-426. Liao Qihua, Yang Dan, Yu Yushou, et al. Analysis of the morphological characteristics and soil physicochemical properties of gullies in dry-hot valleys[J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2025, 43(2): 418-426.
- [4] 郭明明, 王迪晨, 徐金忠, 等. 东北黑土区沟蚀研究进展与展望[J/OL]. *中国水土保持科学(中英文)*, 1-28 [2026-05-11]. <https://link.cnki.net/urlid/10.1449.S.20251014.1625.002>. Guo Mingming, Wang Dichen, Xu Jingzhong, et al. Research progress and prospects of gully erosion in the black soil region of Northeast China[J/OL]. *Science of Soil and Water Conservation*, 1-28 [2026-05-11]. <https://link.cnki.net/urlid/10.1449.S.20251014.1625.002>.
- [5] 张楠, 张岩, 王佳希, 等. 黄土丘陵沟壑区小流域侵蚀沟数量及形态特征[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(3): 109-115. Zhang Nan, Zhang Yan, Wang Jiayi, et al. Quantity and morphological parameters of gullies in small watersheds in the hilly-gully Loess Plateau[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(3): 109-115.
- [6] Jiang Yanmin, Shi Haijing, Wen Zhongming, et al. The dynamic process of slope rill erosion analyzed with a digital close range photogrammetry observation system under laboratory conditions[J]. *Geomorphology*, 2020, 350: e106893.
- [7] Strahler A N. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1952, 63(11): e1117.
- [8] 艾南山. 侵蚀流域系统的信息熵[J]. *水土保持学报*, 1987, 1(2): 1-8. Ai Nanshan. Comentropy in erosional-drainage-system[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1987, 1(2): 1-8.
- [9] 李圣, 常玉巧, 卿元华, 等. 滇中龙川江流域地貌特征及其对构造活动的指示[J]. *地震研究*, 2025, 48(3): 391-400. Li Sheng, Chang Yuqiao, Qing Yuanhua, et al. Geomorphologic features of the Longchuan River basin in central Yunnan and their indication of tectonic activity[J]. *Journal of Seismological Research*, 2025, 48(3): 391-400.
- [10] 丁智强, 王平, 孟耀, 等. 兰坪盆地面积-高程积分特征及控制因素[J]. *地理科学*, 2025, 45(4): 919-930. Ding Zhiqiang, Wang Ping, Meng Yao, et al. Characteristics and controlling factors of hypsometric index in the Lanping basin[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2025, 45(4): 919-930.
- [11] 陆中臣, 陈劭锋, 陈浩. 黄土高原侵蚀产沙的地貌临界[J]. *水土保持研究*, 2006, 13(1): 1-3. Lu Zhongchen, Chen Shaofeng, Chen Hao. The geomorphic thresholds of erosional sediment in the Loess Plateau[J]. *Research on Soil and Water Conservation*, 2006, 13(1): 1-3.
- [12] Keesstra S, Nunes J P, Saco P, et al. The way forward: Can connectivity be useful to design better measuring and modelling schemes for water and sediment dynamics?[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 644: 1557-1572.
- [13] 张光辉. 从土壤侵蚀角度诠释泥沙连通性[J]. *水科学进展*, 2021, 32(2): 295-308. Zhang Guanghui. Understanding sediment connectivity from soil erosion perspective?[J]. *Advances in Water Science*, 2021, 32(2): 295-308.
- [14] 张意奉, 焦菊英, 陈一先, 等. 陕北安塞坊塌小流域的沟道形态及其泥沙连通性[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(3): 11-15. Zhang Yifeng, Jiao Juying, Chen Yixian, et al. Channel morphology and sediment connectivity of Fangta watershed in Ansai County of northern Shaanxi Province[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26(3): 11-15.
- [15] Borselli L, Cassi P, Torri D. Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: A GIS and field numerical assessment[J]. *Catena*, 2008, 75(3): 268-277.

- [16] Wang Chengshu, Zhang Guanghui, Zhu Pingzong, et al. Sediment connectivity of small watershed affected by gully development and vegetation restoration on the Loess Plateau[J]. *Geoderma*, 2022, 410: e115663.
- [17] Heckmann T, Cavalli M, Cerdan O, et al. Indices of sediment connectivity: Opportunities, challenges and limitations [J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, 187: 77-108.
- [18] Li Jiaxin, Wu Lei, Liu Shuai, et al. High connectivity region dominates the critical source area of sediment yield in the Loess Plateau watershed[J]. *Catena*, 2025, 258: e109260.
- [19] Hao R, Huang X, Cai Z W, et al. Incorporating sediment connectivity index into MUSLE model to explore soil erosion and sediment yield relationships at event scale [J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 614: e128579.
- [20] 文孝丽, 董一帆, 杨己, 等. 元谋干热河谷冲沟发育区植被恢复对土壤碳氮的影响[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(4): 282-288.
- Wen Xiaoli, Dong Yifan, Yang Ji, et al. Effects of vegetation restoration on soil carbon and nitrogen in gully development area of Yuanmou dry-hot valley [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(4): 282-288.
- [21] 杨丹, 熊东红, 翟娟, 等. 元谋干热河谷冲沟形态特征及其成因[J]. *中国水土保持科学*, 2012, 10(1): 38-45.
- Yang Dan, Xiong Donghong, Zhai Juan, et al. Morphological characteristics and causes of gullies in Yuanmou dry-hot valley region[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2012, 10(1): 38-45.
- [22] Lin Haimei, Bai Leichao, Luo Mingliang, et al. A multi-criteria framework for identification of gully developmental stages based on UAV data: A case study in Yuanmou County, Yunnan Province, SW China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(13): e8202.
- [23] 常直杨, 王建, 白世彪, 等. 面积高程积分值计算方法的比较[J]. *干旱区资源与环境*, 2015, 29(3): 171-175.
- Chang Zhiyang, Wang Jian, Bai Shibiao, et al. Comparison of hypsometric integral methods [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2015, 29(3): 171-175.
- [24] 赵洪壮, 李有利, 杨景春, 等. 面积高度积分的面积依赖与空间分布特征[J]. *地理研究*, 2010, 29(2): 271-282.
- Zhao Hongzhuang, Li Youli, Yang Jingchun, et al. Influence of area and space dependence for hypsometric integral and its geological implications [J]. *Geographical Research*, 2010, 29(2): 271-282.
- [25] Bhattacharya R K, Das Chatterjee N, Das K. Modelling of soil erosion susceptibility incorporating sediment connectivity and export at landscape scale using integrated machine learning, InVEST-SDR and Fragstats [J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 353: e120164.
- [26] Cavalli M, Trevisani S, Comiti F, et al. Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments [J]. *Geomorphology*, 2013, 188: 31-41.
- [27] Das A, Remesan R, Chakraborty S, et al. Investigation of human-induced land use dynamics in a representative catchment on the Chota Nagpur Plateau, India: A spatio-temporal application of soil erosion modeling with connectivity index studies [J]. *Catena*, 2022, 217: e106524.
- [28] Yan Xiqin, Jiao Juying, Tang Bingzhe, et al. Assessing sediment connectivity and its spatial response on land use using two flow direction algorithms in the catchment on the Chinese Loess Plateau [J]. *Journal of Mountain Science*, 2022, 19(4): 1119-1138.
- [29] Ikotun A M, Ezugwu A E, Abualigah L, et al. K-means clustering algorithms: A comprehensive review, variants analysis, and advances in the era of big data [J]. *Information Sciences*, 2023, 622: 178-210.
- [30] 史志华, 刘前进, 张含玉, 等. 近十年土壤侵蚀与水土保持研究进展与展望[J]. *土壤学报*, 2020, 57(5): 1117-1127.
- Shi Zhihua, Liu Qianjin, Zhang Hanyu, et al. Study on soil erosion and conservation in the past 10 years: Progress and prospects [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(5): 1117-1127.
- [31] 万赐航, 周慧平, 王强, 等. 植被覆盖度和降雨侵蚀力变化对小流域泥沙连通性的影响[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(12): 127-134.
- Wan Cihang, Zhou Huiping, Wang Qiang, et al. Effects of vegetation coverage and rainfall erosivity changes on sediment connectivity in small watersheds [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(12): 127-134.
- [32] Marzolf I, Ries J B, Poesen J. Short-term versus medium-term monitoring for detecting gully-erosion variability in a Mediterranean environment [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2011, 36(12): 1604-1623.
- [33] Hergarten S. The influence of sediment transport on stationary and mobile knickpoints in river profiles [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2021, 126(12): e2021JF006218.
- [34] Cai Feiyang, Li Rui, Yu Benjin, et al. Development of a new surface sediment connectivity model based on network analysis and application to the Yeji River watershed in the karst region of southern China [J]. *Journal of Hydrology*, 2026, 664: e134505.