

细沟溯源侵蚀过程研究进展

王建羽^{1,2}, 邢军会^{1,2}, 钟海秀^{1,2}

(1. 黑龙江省科学院 自然与生态研究所, 黑龙江 哈尔滨 150040;
2. 湿地与生态保育国家地方联合工程实验室, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要: [目的] 聚焦于细沟溯源侵蚀过程, 对其研究热点、发育过程和机制、影响因素以及侵蚀预测模型的研究进展进行总结和展望, 为细沟溯源侵蚀过程研究提供科学参考。[方法] 系统检索中国知网(CNKI)和 Web of Science(WoS)核心合集数据库中 1997—2025 年 8 月的文献数据, 利用 CiteSpace 和 VOSviewer 软件对关键词及发文国家(地区)进行可视化分析。[结果] 当前细沟侵蚀研究多聚焦于径流调控与泥沙运移, 而针对细沟溯源侵蚀单一过程的定量研究不足。径流冲刷过程中, 细沟首先产生在流路上, 跌坎沿流路间隔出现, 侵蚀力较大的跌水逐渐下切, 形成溯源侵蚀现象。沟头高度是径流冲刷过程中坡面侵蚀强度大小的主要影响因素, 溯源侵蚀量的大小取决于气候、土壤质地以及地形等因素。现有土壤侵蚀预测模型多针对于细沟侵蚀复合过程, 而对细沟溯源侵蚀过程预测模型的参数选择和测量指标缺乏关注。[结论] 提出加强细沟溯源侵蚀定量研究、发育过程的动态监测以及构建溯源侵蚀过程预测模型等后续研究方向。

关键词: 细沟侵蚀; 溯源侵蚀; 发育过程; 可视化分析

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2026)01-0414-11

中图分类号: S157.1

文献参数: 王建羽, 邢军会, 钟海秀. 细沟溯源侵蚀过程研究进展[J]. 水土保持通报, 2026, 46(1): 414-424. Wang Jianyu, Xing Junhui, Zhong Haixiu. Research progress on rill headcut erosion process [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(1): 414-424.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2026.01.037

CSTR: 32312.14.stbctb.2026.01.037

Research progress on rill headcut erosion process

Wang Jianyu^{1,2}, Xing Junhui^{1,2}, Zhong Haixiu^{1,2}

(1. Institute of Natural Resources and Ecology, Heilongjiang Academy of Sciences, Harbin, Heilongjiang 150040, China; 2. National and Provincial Joint Engineering Laboratory of Wetlands and Ecological Conservation, Harbin, Heilongjiang 150040, China)

Abstract: [Objective] Focusing on the headward erosion process of rills, the research progress in research hotspots, development processes and mechanisms, influencing factors, and erosion prediction models of rill headward erosion were summarized and prospected, in order to provide scientific references for the study of rill headward erosion processes. [Methods] The relevant publications were retrieved from the China National Knowledge Infrastructure (CNKI) and the Web of Science (WoS) Core Collection, covering the period from 1997 to August 2025. Visual analyses of keywords and contributing countries/regions were performed using CiteSpace and VOSviewer. [Results] Current researches on rill erosion primarily focus on runoff regulation and sediment transport, whereas quantitative studies on the single process of rill headcut erosion remain insufficient. During runoff scouring, rills first develop along flow paths, and step-pools form at intervals along these paths. These step-pools, with greater erosive force, gradually incise, resulting in headcut erosion. Headcut height is the main factor affecting slope erosion intensity during runoff scouring, while the magnitude of headcut erosion is influenced by factors such as climate, soil texture, and topography. Most existing soil erosion prediction models focus on the combined processes of rill erosion, while parameter selection and measurement indicators for rill headcut erosion prediction models receive little attention. [Conclusion] Future research directions are proposed,

收稿日期: 2025-08-22

修回日期: 2025-10-25

采用日期: 2025-10-27

资助项目: 黑龙江省科学院院长基金项目“eCO₂背景下湿地植物多样性—生产力关系的时间效应”(YZ2023ZR01); 黑龙江省省属科研院所科研业务费项目“湿地碳氮耦合对 eCO₂ 响应及增汇关键技术”(CZKYF2021-2-A005)

第一作者: 王建羽(2000—), 男(汉族), 黑龙江省绥化市人, 硕士, 研究实习员, 主要从事恢复生态学方面的研究。Email: dzxy_wjy@163.com。

通信作者: 钟海秀(1979—), 女(汉族), 黑龙江省同江市人, 博士, 研究员, 主要从事全球变化生态学方面的研究。Email: zhx971030@163.com。

including strengthening quantitative research on rill headcut erosion, enhancing dynamic monitoring of its development processes, and constructing prediction models for headcut erosion processes.

Keywords: rill erosion; headcut erosion; development process; visual analysis

细沟溯源侵蚀是指在径流冲刷过程中,片流逐渐汇集为股流,冲刷坡面形成跌坎,跌坎逐渐贯通使沟道延长,沟头前进的过程^[1-2]。坡面上小跌坎的形成,是细沟起源的标志。山地丘陵区的细沟侵蚀,是坡面上常见的微地形变化。细沟流与坡面径流相比,具有流深大,速度快,侵蚀能力强等特点,是坡面土壤侵蚀的重要组成部分^[1]。溯源侵蚀作为一个紊乱性较强的三维土壤侵蚀系统,是坡面上细沟侵蚀的初始阶段,在土壤侵蚀产沙过程中具有重要的作用^[2]。侵蚀系统沟头到沟床几乎垂直下降,沟头上部的物质运动与沟头下部的水力侵蚀形成一个循环,共同驱动沟头后退。溯源侵蚀是沟壑扩张的主要过程^[3-4]。相关研究^[5]表明,沟头土壤流失量是上游地区的2.7倍。在全球尺度上,线性沟头后退的速率在0.01~135 m/a之间变化^[6]。沟头后退长度呈“稳定—突然增加—稳定”周期性地随着时间推移,并以类似的阶跃函数形式增加,产沙率随时间变化的波动性较大^[7-8]。Zheng Fenli^[9]研究发现,径流冲刷过程中,坡面流逐渐汇集成股流,细沟首先产生在流路上,跌坎沿流路间隔出现,侵蚀力较大的跌水逐渐下切,形成溯源侵蚀现象。细沟侵蚀具有流深浅,沟道下切的基准面不断发育变化,流速和含沙浓度均较大等特点。目前相关研究多集中于细沟侵蚀这一复合过程,而针对细沟溯源侵蚀过程仍缺乏关注,对于不同环境下沟头后退速率间差异的驱动机制缺乏量化研究,细沟溯源侵蚀过程的水沙关系仍需进一步探究。不同环境条件下细沟溯源侵蚀动态与发育过程的系统讨论对于防治坡面侵蚀具有重要的作用。

细沟溯源侵蚀发育过程的影响因素主要包括外部的侵蚀力以及土体内部的阻力两个方面。外部的侵蚀力包含气候变化、地貌和土地生产方式等^[10]。暴雨径流是坡面侵蚀的主要动力^[11]。在短历时的强降雨和径流量较大条件下,容易导致坡面侵蚀沟道较快的产生和发育^[12]。预计到2050年,欧盟和英国因暴雨径流而造成的土壤侵蚀将增加13%~22.5%^[13]。坡面侵蚀体系中,降雨及其产生的集中径流与土壤的交互影响,是坡面能量传递与转化的过程,结果主要是泥沙的搬运以及径流水动力的变化。坡度越大,坡面的稳定性越弱,越容易被径流侵蚀,产生更多的泥沙^[14-15]。沟头高度对溯源侵蚀量具有显著影响,沟头高度越大,坡面射流的角度越大,溯

源侵蚀越强烈,沟头前进速率越快,产沙量显著增加。

揭示细沟溯源侵蚀过程的发生形式和演变规律,对于防治坡面侵蚀,减少水土流失,应对极端降雨事件具有重要的意义。因此,本文系统综述了细沟溯源侵蚀的发育过程、机制与影响因素及预测模型的研究进展,以期为后续细沟溯源侵蚀研究提供科学参考。

1 细沟侵蚀的研究热点

水力侵蚀是全球关注的主要环境问题之一,它造成的严重水土流失是制约区域农业生产力提高的主要因素^[16]。坡面对于径流和土壤流失过程较为敏感,在强径流冲刷下,坡面水流集中、变窄,径流深度增加,坡面侵蚀可以迅速从溅蚀或片蚀演变为细沟侵蚀^[16-18]。降雨及坡面薄层水流通过土体泥沙和径流能量的转换,共同促进沟道形态的发展和坡面土壤侵蚀的发生^[19]。

基于文献计量学的可视化方法,有助于梳理坡面细沟溯源侵蚀过程的研究热点及其与水力侵蚀和细沟侵蚀的关系。本文以国内和国际主流数据库中国知网(CNKI)和Web of Science(WoS)作为文献检索的平台,检索时间跨度设定为1997—2025年8月,节点类型包括国家和关键词,时间节点设置为1 a,检索条件设置为〔细沟侵蚀(rill erosion)or溯源侵蚀(headcut erosion)]and坡面侵蚀(slope erosion)。采用CiteSpace和VOSviewer对文献的关键词和发文国家进行了可视化分析。统计结果如图1所示。1997—2025年细沟侵蚀发文量整体上呈波动上升的趋势,区域坡面水土流失逐渐引起学者们重视。中国和美国发文量最多,中国出现频次为780,高于美国的549;中国的中介中心性为0.1,而美国为0.33,比利时为0.26,英国为0.25,说明细沟侵蚀过程研究在中国逐渐受到重视,然而国内多聚焦本土区域研究,美国、比利时、英国等西方国家在该研究领域起步较早,其研究的影响力也较大。进一步地对细沟侵蚀相关研究的关键词进行词频分析发现,CNKI中细沟形态、土壤侵蚀、黄土坡面、模拟降雨、坡面侵蚀等关键词出现频率最高;WoS中“soil erosion”“rill erosion”“runoff”“overland flow”“water erosion”“sediment transport”等词汇出现频率最高,说明目前研究热点主要集中于黄土地区,对于细沟侵蚀的研

究也多着眼于径流和泥沙运移方面,而对于细沟侵蚀的单一过程——溯源侵蚀鲜有关注,缺乏细致的

量化研究。因此对于细沟溯源侵蚀发育过程的研究进展进行系统梳理和分析具有非常重要的意义。

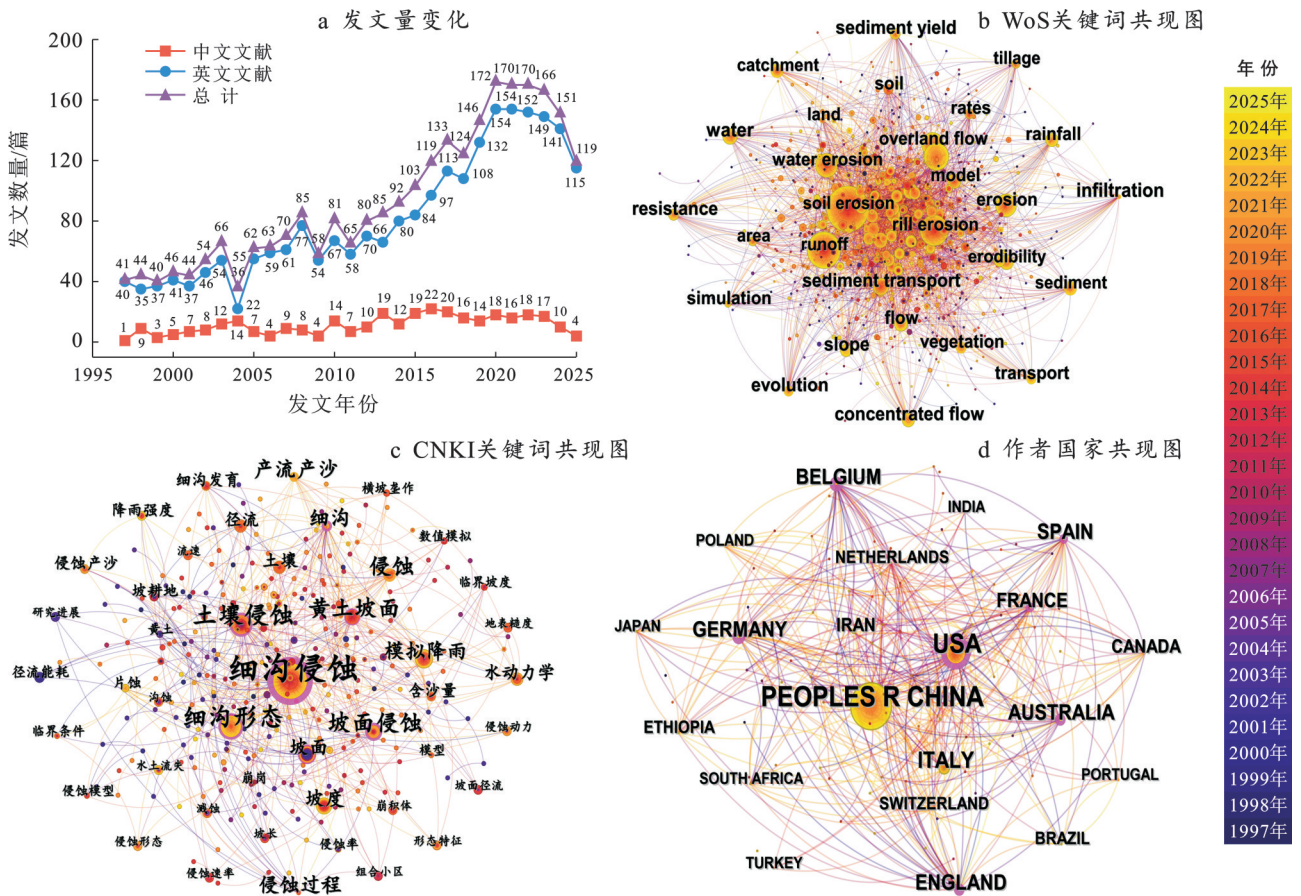


图1 “细沟侵蚀”发文文献统计可视化分析
Fig.1 Visual analysis of literature statistics on “rill erosion”

2 细沟溯源侵蚀发育过程和机制

2.1 细沟侵蚀的基本特征

细沟是坡面侵蚀的主要方式,坡面上细沟一旦形成,坡面径流的流速及流深均不同程度增大,坡面流由细沟间水流汇集成细沟流,导致土壤坡面侵蚀加剧^[20]。在径流冲刷过程中,细沟流不断影响坡面细沟沟道的形态,进而改变坡面径流的水力学特征和土体的抗蚀性,对坡面产沙过程产生影响,促进细沟沟道发育的形态更为复杂^[21]。细沟侵蚀是土体由面蚀向沟蚀转变的过渡阶段(图2),也是大型切沟的初始阶段,是坡面侵蚀的重要形式^[22]。细沟侵蚀通常发生于平整的土壤坡面上,耕作后细沟会被填平,但连续不断的侵蚀会使得坡面土体厚度持续下降^[23]。细沟侵蚀的宽和深通常不超过 20 cm,并且可以通过农业耕作等措施被消除,在同一地方,基本不会再次发生。细沟侵蚀量随坡度增大的速率大于细沟间侵蚀量随坡度的增加速率。在细沟发育过程中,沟深的增加主要是由于径流的下切作用以及二

级沟头的形成。细沟深度增加主要包括沟头溯源和沟底下切两种方式^[24]。随着细沟的发展,坡面上的径流逐渐汇集,沟道输沙能力增强,进一步加速坡面细沟的发育,影响侵蚀产流和产沙过程,加剧坡面土壤侵蚀^[25]。细沟溯源侵蚀是坡面侵蚀的重要方式,其为细沟侵蚀及细沟间侵蚀产沙的运移提供了途径。在坡耕地上,细沟侵蚀引起的水土流失可达土壤侵蚀的 50%~70%^[26]。Ni Shimin 等^[27]对花岗岩红壤区表土层的研究表明,当细沟侵蚀发育至成熟阶段时,其最大侵蚀速率是片蚀的 1.69 倍。林祚顶等^[28]对山东临朐特大暴雨后土壤侵蚀量的调查表明细沟侵蚀模数可达 4 500~20 000 t/km²。王睿等^[8]研究表明,西北黄土区坡面土壤侵蚀的形式主要为细沟,细沟侵蚀量可以占到土壤侵蚀总量的 90% 以上。

2.2 细沟溯源侵蚀的驱动机制

侵蚀沟的发育具有三向性,包括溯源侵蚀、沟底的垂向下切以及沟坡的侧向侵蚀。其中,在细沟侵蚀的发育阶段,主要以溯源侵蚀以及沟道的下切这两个子过程为主要形式,而当细沟发育成熟时则以

沟壁扩张为主要形式^[24]。由于坡度的存在,径流冲刷初期时会形成较多不连贯的跌坎,这些跌坎是侵蚀最活跃的部分(图 3)。当细沟溯源至坡面顶部时,溯源侵蚀转变为以细沟的下切及沟道拓宽为主,因此细沟发育至成熟阶段时沟深逐渐增大,特别是二级沟头的形成显著增加了细沟侵蚀的沟深^[12]。细沟内的二级沟头通常呈阶梯状,随着径流冲刷的进行逐渐后退,促进沟道的下切。溯源侵蚀是一个复杂的土壤侵蚀过程,既包括水力侵蚀也包括重力侵蚀。水力侵蚀可以分为地下水力侵蚀和地表径流水力侵

蚀^[5]。地表径流冲刷是溯源侵蚀重要的驱动因子。溯源侵蚀的主要启动方式包括:地表的径流冲刷、地下壤中流导致形成陷穴以及滑坡等形式^[29]。成玉祥等^[30]对黄土高原的研究表明,溯源侵蚀引发的拉裂-倾倒型坍塌是溯源侵蚀重要的影响因素,而张力裂隙中的水压、斜坡几何特征和土体物理力学参数是主要影响因素。在溯源侵蚀开始阶段,主要以沟道的下切和沟壁拓宽为主,坍塌次数较少。随着沟道形态的发展,受到细沟流的冲刷,细沟沟壁,开始从两侧向内部坍塌^[31]。

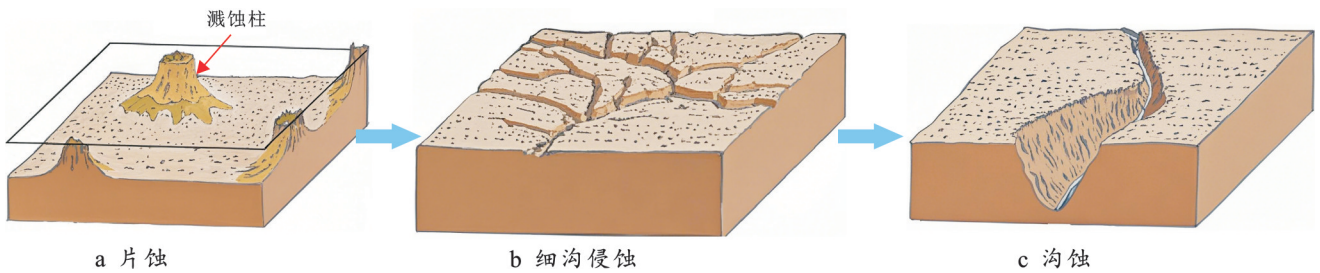


图 2 土壤水蚀发育过程

Fig.2 Development process of soil water erosion



图 3 典型细沟溯源侵蚀

Fig.3 Typical rill headcut erosion

细沟沟道长宽深发育的主要形式为,沟头的溯源、沟底的下切和沟壁的扩张侵蚀^[32]。在水力侵蚀下,沟道形成后,张力裂隙发育、土壤潜蚀、溅蚀、跌穴侵蚀和沟道侧向崩塌等过程会在不同程度上导致沟道扩张,促进溯源侵蚀的发生^[6]。覃超等^[33]研究表明,上游径流的切割、沟头侵蚀和跌水侵蚀是裸地上溯源侵蚀的主要驱动过程。当坡面径流到达溯源侵蚀的沟头部位时,一部分会转变为贴壁流沿沟壁流动,冲刷裸露的沟头;另一部分形成射流,对沟床进行跌水侵蚀的同时击溅沟头底部^[34]。径流形成的跌水对沟床和沟壁底部直接冲蚀,导致了沟床跌穴的发育,随着冲刷的持续进行,跌穴的深度和宽度不断增加,进一步促进溯源侵蚀的发育^[35]。由于坡面径流形成股流的不均一性和不稳定性,土壤存在异质性等因素,导致在溯源侵蚀发生过程中,沟头形态变

化不均衡,并逐渐形成跌水落差。当细沟流到达跌坎(沟头)这一地形变化明显的位置时,径流的重力势能逐渐转变为冲刷坡面的径流动能,显著地增加了径流对土体的冲刷能力。随着沟头高度的不断变化,径流动能和射流剪切力不断增加,加速了沟床跌穴的发育^[36]。在射流的剧烈冲击下,沟头下方沟床土表快速形成跌穴,其深度和宽度主要受土壤质地和径流量的影响,与射流的流速、剪切力及沟头高度等关系较大,跌穴的形成促进了沟头立壁趾部的掏蚀。沟床跌穴的存在和拓展会影响沟头土体的稳定性,造成初始沟头土体的崩塌,导致溯源沟头继续前进。冲刷过程中,沟头后退的主要驱动力为贴壁流,细沟沟头后退是一个水力侵蚀过程,沟壁崩塌是在水力和重力作用下,将严重不稳定的状态恢复到相对稳定的状态。细沟溯源侵蚀的水力-重力耦合机

制共同促进了沟道的延长^[37-38]。值得注意的是,由于细沟溯源侵蚀过程常与沟壁扩张和沟底下切等过程伴随进行,且细沟侵蚀基准面不断变化。因此,现阶段关于溯源侵蚀过程的研究与认识多基于浅沟、切沟等沟蚀过程,而对坡面侵蚀阶段的溯源过程缺乏细致的量化研究,这可能导致现有溯源侵蚀成果应用于细沟时存在一定的差异。

3 细沟溯源侵蚀过程的影响因素

3.1 降雨和径流

水力作为外营力导致的土壤侵蚀是山地丘陵区分布最为广泛的侵蚀类型,水力侵蚀对社会造成的危害也最为严重^[39]。降雨是坡面水力侵蚀的重要影响因素,主要通过破坏土壤的孔隙结构,运移坡面泥沙等降低土壤抵抗侵蚀的能力,最终导致坡面侵蚀的发育^[40]。短历时的强降雨及其产生的冲刷径流是坡面侵蚀沟发生和发育的主要诱因。坡面水蚀主要包括径流侵蚀和径流搬运过程,涉及坡面土壤的剥蚀、搬运和沉积等。相关研究表明,控制上方来水的径流量将显著减小坡面的侵蚀产沙量^[23]。Morteza等^[41]认为,土壤坡面在受到降雨侵蚀时,不仅受到雨滴对土壤表面的破坏作用,还受到降雨产生的径流对土壤颗粒搬运作用的影响。侵蚀沟的发育空间、沟道形状以及规模等均受到径流冲刷量的影响。在短坡长的条件下,放水流量是坡面侵蚀产沙的主要影响因素,坡面侵蚀量与放水流量呈线性相关^[42]。溯源侵蚀的启动条件,包括径流对土体的掏蚀、下切及冲刷,同时也包含沟壁裂隙的发生、发展和底部掏蚀造成的土体失稳等^[6, 43]。降雨及坡面流并非单独影响坡面溯源侵蚀,降雨产生坡面流后,一方面持续时间较长的降雨会对径流的形成起促进作用,另一方面径流会减小坡面土壤直接受雨滴击打的力度。张攀等^[44]对黄土坡面的研究表明,降雨强度对坡面细沟的长度、宽度和深度都有较大影响,不同雨强和降雨历时下坡面细沟发育形态分异规律显著。白玉洁等^[45]研究发现,坡面径流的深度受到降雨强度和坡度的影响,降雨强度越大径流越深。坡面径流作为土体冲刷的主要动力来源,其水动力学机制一直是相关研究的热点^[46]。相关研究^[47-48]表明,剪切应力和径流功率是描述冲刷条件下土壤侵蚀的最佳水动力参数,比其他参数更准确地表征细沟侵蚀的动力机制。土壤侵蚀速率与能量参数存在较强的相关性^[11]。已有研究^[15]表明,径流动能是溯源侵蚀的主要驱动机制,可用于预测溯源侵蚀的侵蚀量。

3.2 土壤性质

坡面侵蚀主要受到径流冲刷和坡面土壤可蚀性的影响,而坡面土壤可蚀性主要由土壤的固有性质所决定^[49]。土壤作为坡面侵蚀沟发育的重要载体,其抗蚀性、稳定性等是决定坡面沟道的发育及溯源侵蚀的主要内在因素之一。土壤的粒度、矿物成分和化学性质等均会影响溯源侵蚀的过程^[50]。黏质土壤的团聚体稳定性较强,土粒间具有较大的黏聚力,易在表层形成结皮,因此不易被剥蚀,但其侵蚀泥沙却易被径流运移;粗质土则表现出相反的特征,易被剥蚀而难于运移^[49]。Babazadeh等^[51]对不同黏粒和粉粒占比的黏性土发生溯源侵蚀的研究表明,黏粒占比增大,沟头溯源时,始终维持着沟头立壁垂直状态,黏粒占比对于溯源侵蚀过程的作用,远大于径流的速度及沟头的高度。不同土体结构抵抗外界侵蚀力的强度大小不同,具体表现为土体抗侵蚀性的差别,其对于沟头发育的形态和溯源侵蚀的程度具有决定性作用^[52]。在径流冲刷过程中,石英颗粒的覆盖能够增加坡面细颗粒的悬移,促进径流泥沙细颗粒的富集。土壤的黏粒含量与可蚀性呈负相关,花岗岩红壤区的土体可蚀性随土层深度而增加^[19]。Mike^[53]研究发现,土壤中砾石、砂粒等粒径较大物质增加,其抗蚀性反而减弱,导致溯源侵蚀过程中沟头前进的速率和侵蚀产沙量增加。非均质土体各层次的土壤矿物成分、结构、风化程度均存在明显的差异,其抗蚀性、抗冲性以及土体稳定性随土壤层次的加深而逐渐降低。Gordon等^[54]对土壤特性的研究表明,各层次土壤的性质不同程度的影响溯源侵蚀过程中沟头的发育和向前溯源,当径流下切至非侵蚀层时会终止下切。对于花岗岩红壤细沟溯源侵蚀的相关研究表明,黏质土壤层细沟发育表现为径流导致坡面形成微跌坎,跌坎不断向前推进和连接形成初始细沟,之后随着坡面径流在细沟内集中导致细沟的沟底下切和沟壁扩张,形成深度较大但宽度有限的侵蚀沟道,细沟横断面形态呈“V”形或“U”形。而砂质土壤层由于抗蚀性较差,次生沟头上游具有明显的细沟和陡峭的沟壁,下游具有宽而深的沟床,横截面呈梯形,底部较宽而顶部较窄,具有明显的次生沟头^[38, 55],这与黄土和黑土等均质土区溯源侵蚀沟头形态存在明显区别。Jiang Chengcheng等^[56]对黄土沟壑区溯源侵蚀过程的试验表明,溯源侵蚀不仅受坡度、坡长的影响,还受到土壤含水量等的影响。Qi Jiarui等^[10]在对东北黑土的研究认为土壤性质对于沟头土壤剥蚀率和土壤可蚀性的影响大于土壤根系特征,单纯利用

植被控制溯源侵蚀是不可靠的,建议从防止径流冲刷土壤和提高沟头土壤抗侵蚀能力入手。

3.3 坡面地形

坡面地形是溯源侵蚀过程的主要影响因素之一,沟头高度和坡面的形态、位置、长度等都会对溯源侵蚀产生影响^[23]。坡面侵蚀产流的机理主要涉及径流冲刷和地表条件等因素。坡度对溯源侵蚀主要有两方面的影响,一是影响坡面的受雨量和受雨面积,二是影响坡面射流的角度。坡度对于坡面侵蚀的影响主要体现在径流的流速,土体的入渗和稳定性等方面。坡度在一定程度上决定了径流的剥蚀和运移能力。坡度越大,坡面的稳定性越弱,越容易被径流侵蚀,产生更多的泥沙,当坡度增大至临界值后,集水面积逐渐减小,径流侵蚀强度逐渐减弱,即坡度 S 与集水区面积 A 之间存在反比例函数的关系,用公式 $S=aA^b$ 表示,研究区不同 a 和 b 的取值存在一定的差异^[14-15]。坡上径流的含沙量大小直接对下坡径流挟沙能力产生影响,进而对坡面侵蚀方式产生影响。坡面地形部位不同(集水坡面和沟床)对于坡下产沙能力的影响也不一致^[23]。Bouchnak 等^[57]对突尼斯 8 个流域沟谷侵蚀情况的研究表明,缓坡的侵蚀量远小于陡坡,溯源侵蚀在侵蚀量中的比例分别为 22.20% 和 18.50%,相差不大。沟头高度对溯源侵蚀产沙量存在较大的影响,沟头的高度越大,溯源侵蚀越强烈,沟头向前溯源的越快,产沙量显著增加^[36, 58]。Zhang Baojun 等^[35]在元谋干热河谷地区基于原位冲刷试验的研究表明,径流经过沟壁跌坎这一特殊地形时,径流含沙量明显增加,沟头高度是径流冲刷力和侵蚀产沙的主要影响因素。王睿等^[8]研究黄土地区不同沟头高度和不同土质下的细沟溯源侵蚀特征,结果表明随着沟头高度的增加,土壤产沙率逐渐增大,土壤侵蚀越严重。综上所述,初始沟头高度是径流冲刷过程中坡面侵蚀强度大小的主要影响因素,溯源侵蚀量的大小取决于气候、土壤质地以及地形等因素。土体性质、坡度、冲刷的流量可直接作用于溯源侵蚀的产流及侵蚀产沙(图 4),但这些因素如何影响细沟侵蚀过程中的溯源侵蚀沟头的发育过程,其对于细沟溯源侵蚀发育过程侵蚀产沙量等的影响,尚不得而知,需要进一步细致的量化研究。

4 侵蚀预测模型

土壤侵蚀产沙的预测模型是对溯源侵蚀产沙过程等进行量化研究的主要途径^[18]。Allen 等^[59]将侵蚀的预测模型分为经验模型及机理模型两类。目前,大多数的坡面侵蚀产沙预测经验模型都具备独

立的细沟侵蚀模块,也有部分模型将坡面侵蚀视为研究整体,并未区分单独的片蚀、细沟侵蚀及沟蚀过程。根据建模的原理不同,可以将土壤侵蚀产沙预测模型分为经验模型及数理模型两种,随着技术的发展,近年来也有综合经验和数理原理,利用机器学习或深度学习所构建的“黑箱”预测模型^[55]。经验模型主要包括,土壤流失方程(universal soil loss equation, revised universal soil loss equation, modified universal soil loss equation 等)以及土壤和水资源评估工具(soil and water assessment tool)等,其主要特点在于输出的侵蚀量与影响因子直接关联,便于识别关键控蚀因子。

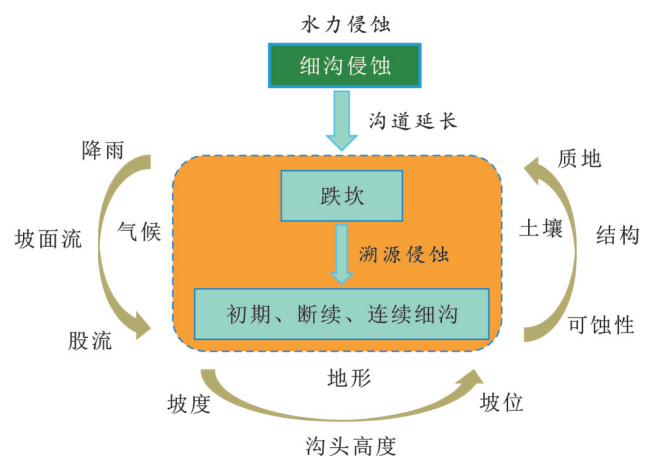


图 4 细沟溯源侵蚀的影响因素

Fig.4 Influencing factors of rill headcut erosion

SWAT 模型属于半分布式参数模型,通过将流域划分为子流域和水文响应单元,能够精细刻画不同土壤类型、土地利用和地形条件下的水文过程差异。然而,由于地形条件及沟头溯源侵蚀特点等条件的不同,美国农业部农业研究院建立的基于缓坡的 USLE 模型以及后续修正的 RUSLE 和 MUSLE 模型较难应用于地形复杂多变的中国等其他溯源侵蚀地区。由于经验模型缺乏物理机制作为支撑,且依赖较高的数据质量,存在动态性较差等问题,学者们针对本地区分别开发了新的数理模型或对已有的数理模型进行优化(表 1)。数理模型是指,利用数学和物理的手段对侵蚀沟头的能量规律进行系统研究,进而预测坡面的侵蚀量或沟头前进的速率等。Renger 等^[60]研究构建了基于沟头坍塌、侵蚀产沙的运移和沟床跌水池参数的溯源侵蚀模型,对坡面侵蚀量进行计算。Allen 等^[59]将土壤的可蚀性、沟头高度及根系影响下的沟头土壤抗蚀性、日流量作为参数构建模型,并与 SWAT 模型相结合,对于沟头的前进速率进行预测。幂函数和线性回归函数模型是常

见的数理模型所涉及的函数形式。WEPP(water erosion prediction project)预测模型将坡面侵蚀划分为细沟侵蚀和细沟间侵蚀模型进行计算,通过拟合坡面或细沟的宽度,构建方程预测坡面的侵蚀量,但其存在忽略降雨对细沟和径流对细沟间侵蚀的影响,且并未细致区分细沟溯源侵蚀过程的相关参数等问题。覃超等^[33]基于模拟试验构建了细沟溯源侵蚀过程产沙率的预测模型,通过将沟头高度、初级沟头的溯源速率以及二级沟头数进行拟合预测细沟溯源侵蚀单一过程的产沙率,但由于其建模数据量较小且仅以黄土为背景,对于其他类型土壤的适用性还有待进一步探究。

坡面侵蚀过程中,细沟侵蚀—浅沟侵蚀—切沟侵蚀是一个连续的整体,其发育过程均包括沟头溯源、沟底下切和沟壁扩张。因此,在不同尺度上的坡面侵蚀预测模型存在一定的相通之处。陶婷婷^[61]在紫色土坡面细沟侵蚀模拟试验中,利用水动力参数进行拟合构建了坡面产沙速率的预测模型。Lin Zhe等^[18]在对浅沟溯源侵蚀的研究中,建立坡面形态参数与土壤侵蚀量的经验模型。Kang Hongliang等^[34]构建的模型表明沟头的张力裂隙发育及其后的悬垂体崩塌循环过程对草地沟头溯源侵蚀起主导作用。Elliot等^[62]考虑细沟侵蚀中沟头溯源、沟壁扩张和沟底下切等子过程,开发了基于物理过程的细沟侵蚀预测模型。

表 1 部分细沟侵蚀数理预测模型

Table 1 Partial mathematical prediction models on rill erosion

著者	供试样品	预测指标	公式	发表年份	相关指标
Elliot等 ^[62]	WEPP模型使用的10种典型土壤	分散土壤颗粒的能力	$D_c = S + H + S_s + S_c$	1993	D_c 为清水分散土壤的能力 $[(g/(m^2 \cdot s))]$; S, S_s, S_c 分别为沟脚淘淘、溯源侵蚀和土壤由于吸水饱和所产生的分散土壤颗粒的能力
覃超等 ^[33]	黄土	产沙率	$SL' = \frac{100 \ 0SL}{\rho V_0 A}$ $H' = \frac{10H}{H_0}$ $V' = \frac{100V}{V_0}$ $SL' = 0.085H^{1.288} + 0.085V^{2.638} + N$	2018	SL 为产沙率 (g/min) ; V_0 为使沟头恰好发生溯源侵蚀的临界流速取 105.8 cm/min ; A 为土槽有效的试验面积取 $3 \ 000 \text{ cm}^2$; H 为沟头最大可下切的深度; H', V', SL' 分别为无量纲的相应指标
Lin Zhe等 ^[18]	花岗岩红壤	侵蚀量	$Y_L = -0.246 \ 14 + 1.2892 \ 1X_1 - 1.9542 \ 3X_2 - 0.512 \ 62X_3 + 0.002 \ 47X_4 + 0.015 \ 1X_5 - 0.011 \ 58X_6$ $Y_S = -0.001 \ 24 + 0.019 \ 15X_1 + 0.223 \ 35X_2 + 1.667 \ 4X_3 + 0.005 \ 2X_4 - 0.004 \ 35X_5 - 0.008 \ 87X_6$	2023	Y_L, Y_S 分别为红土层和砂土层的溯源侵蚀量 (m^3) ; X_1 为沟头后退的距离 (m) ; X_2 为沟头的横截面积 (m^2) ; X_3 为沟床跌穴的横截面积 (m^2) ; X_4, X_5, X_6 分别为上、中、下坡沟道的宽深比
陶婷婷 ^[61]	紫色土	产沙速率	$D_r = 0.198(V - 0.242)$ $D_r = 0.252E - 2(\tau - 11.396)$ $D_r = 0.625E - 2(\omega - 2.890)$	2024	E 为单位能量; V 为水流速度 (m/s) ; τ 为径流剪切力 (Pa) ; ω 为径流功率 (W/m^2)

综上所述,细沟侵蚀预测模型的本质主要是从现象关联到机理、从静态估算到动态模拟的过程。经验模型是以因子的乘积作为核心结构,通过回归分析将细沟侵蚀量与环境等影响因子建立关联,如USLE及RUSLE等模型,其本质主要是关注“输入—输出”的宏观关联,因此并未涉及细沟发育的动态过程。数理模型是以“过程分解—方程耦合”为主要的构建逻辑,将细沟侵蚀拆解为径流分离、泥沙输移、沟头溯源等子过程,每个子过程均基于物理学规律进行构建。如WEPP模型通过Green-Ampt入渗方程模拟产流,利用水流剪切力与土壤临界抗剪应

力的差值计算侵蚀率,细致地区分了细沟间与细沟内侵蚀的贡献。经验模型主要适配宏观尺度的区域普查,但无法识别单条细沟的形态特征。而数理模型能精准计算单条细沟的侵蚀量分配,但在流域尺度应用时,因参数空间化成本过高导致精度下降。同时,基于本土条件构建的细沟侵蚀预测模型应用于其他地区时需要提前验证,且往往精度不高。在细沟侵蚀方面,预测模型已经取得了较好的成果。但值得注意的是,现有土壤侵蚀预测模型多集中于美国、黄土高原等均质土地地区,对于土石混合界面、典型的非均质土区侵蚀预测模型构建缺乏关注,且已有模型

多针对于细沟侵蚀复合过程,而对细沟溯源侵蚀过程的预测模型参数选择和测量指标缺乏关注。当前细沟侵蚀模型正朝着“机理深化+数据融合+尺度衔接”的方向演进,构建精确度高,适用性强的细沟溯源侵蚀过程侵蚀量预测模型,以揭示其内在侵蚀机制,对于坡面侵蚀实现有效防治具有重要意义。

5 总结与展望

细沟溯源侵蚀作为一个紊乱性较强的三维土壤侵蚀系统,是坡面上细沟侵蚀的初始阶段,在土壤侵蚀沙过程中具有重要的作用。侵蚀量的大小主要取决于气候、土壤质地以及地形因素等;土体性质、坡度、冲刷的流量可直接作用于溯源侵蚀的产流及侵蚀产沙。现有研究描述了细沟溯源侵蚀发育过程,揭示了其与细沟侵蚀发育的关系,为深入揭示坡面侵蚀机理提供了重要参考。然而,以下几方面存在的问题亟待加强:①对于细沟溯源侵蚀过程相关指标的定量研究不足,特别是缺乏对于溯源过程水沙关系的量化。当前研究多关注细沟侵蚀这一复合过程,对于不同环境下沟头后退速率间差异鲜有关注,传统参数主要包括细沟的沟长、密度、沟宽、沟深等指标,今后可进一步开发与细沟溯源侵蚀过程相关的参数,例如,“沟头后退速率”“瞬时侵蚀量”“纵断面形态指数”等,同时,可引入目前较为前沿的机器学习和深度学习算法,对气候、土壤、水力等多源数据进行综合分析,量化不同环境下沟头后退速率的差异阈值,解决当前单因子分析为主、多因子交互效应不明的问题;②加强对不同质地土壤细沟溯源侵蚀发育过程的动态监测和量化。当前对于细沟溯源侵蚀过程的研究多着眼于对均质土体雨后最终形成的细沟进行量化,而非均质土体细沟溯源侵蚀以及溯源过程的动态监测和量化指标关注有限,对系统了解坡面侵蚀的关键过程造成了限制,可利用三维激光扫描仪、高分辨率相机等,并引入遥感数据融合技术,将无人机遥感(搭载RGB+多光谱相机)获取的坡面DEM数据、植被覆盖信息,与地面监测的径流泥沙数据、土壤水分数据融合,实现对非均质土体细沟溯源过程的高频次、多维度动态追踪,量化界面处的溯源侵蚀速率与均质土体的差异,明确“土层界面抗蚀性阈值”“界面处跌穴发育临界径流量”等特有参数,填补非均质土壤溯源侵蚀的量化空白;③完善传统细沟侵蚀模型,结合野外监测和正交试验数据构建适用性较强的细沟溯源侵蚀预测模型。径流冲刷塑造了细沟沟头的形态,细沟沟头的形态反过来又会对细沟侵蚀过程产生影响,针对细沟溯

源侵蚀发育过程,建立科学的细沟溯源过程形态指标体系,应用深度学习的数据整合和分析能力,进一步构建考虑土壤异质性的过程式模型,深入揭示其内在侵蚀机制。

参考文献(References)

- [1] Wang Rui, Li Peng, Li Zhanbin, et al. Effects of gully head height and soil texture on gully headcut erosion in the Loess Plateau of China [J]. *Catena*, 2021,207:105674.
- [2] Liao Yishan, Yuan Zaijian, Li Dingqiang, et al. What kind of gully can develop into Benggang? [J]. *Catena*, 2023,225:107024.
- [3] Dong Yifan, Xiong Donghong, Su Zhengang, et al. The influences of mass failure on the erosion and hydraulic processes of gully headcuts based on an in situ scouring experiment in dry-hot valley of China [J]. *Catena*, 2019, 176:14-25.
- [4] Gao Chendi, Li Pengfei, Yang Xin, et al. 3D investigation of gully headcut processes: A slicing segmentation based on filed scouring experiments and laser scanning [J]. *Journal of Hydrology*, 2024,638:131497.
- [5] Shi Qianhua, Wang Wenlong, Guo Mingming, et al. The impact of flow discharge on the hydraulic characteristics of headcut erosion processes in the gully region of the Loess Plateau [J]. *Hydrological Processes*, 2020,34(3): 718-729.
- [6] Vanmaercke M, Poesen J, Van M B, et al. How fast do gully headcuts retreat? [J]. *Earth-Science Reviews*, 2016,154:336-355.
- [7] Kang Hongliang, Wang Wenlong, Li Liangna, et al. Morphology evolution of vegetation-covered loess gully heads induced by hydraulic and gravitational erosion [J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2025,13(2):447-462.
- [8] 王睿,李鹏,韩建纯,等.沟头高度和土壤质地对细沟溯源侵蚀特征和形态发育的影响[J].*农业工程学报*, 2021,37(10):91-99.
Wang Rui, Li Peng, Han Jianchun, et al. Effects of gully head height and soil texture on headward erosion characteristics and topography evolution [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021,37 (10):91-99.
- [9] Zheng Fenli. Effect of vegetation changes on soil erosion on the Loess Plateau [J]. *Pedosphere*, 2006, 16 (4) : 420-427.
- [10] Qi Jiarui, Guo Mingming, Zhou Pengchong, et al. Soil erosion resistance factors in different types of gully heads developed in four main land-uses in the Mollisols region of northeast China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2023,230:105697.

- [11] Lou Yibao, Wang Wenlong, Guo Mingming, et al. Vegetation affects gully headcut erosion processes by regulating runoff hydrodynamics in the loess tableland region [J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 616:128769.
- [12] Ni S M, Zhang D Q, Cai C F, et al. Exploring rainfall kinetic energy induced erosion behavior and sediment sorting for a coarse-textured granite derived soil of South China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 208: 104915.
- [13] Smith P, Poch R M, Lobb D A, et al. Status of the world's soils [J]. *Annual Review of Environment and Resources*, 2024, 49:73-104.
- [14] Jiang Fangshi, Gao Pengyu, Si Xiaojing, et al. Modeling the sediment transport capacity of flows in steep nonerodible rills [J]. *Hydrological Processes*, 2018, 32 (26):3852-3865.
- [15] Su Zhengan, Xiong Donghong, Dong Yifan, et al. Hydraulic properties of concentrated flow of a bank gully in the dry-hot valley region of southwest China [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2015, 40(10): 1351-1363.
- [16] Deng Yusong, Duan Xiaoqian, Ding Shuwen, et al. Effect of joint structure and slope direction on the development of collapsing gully in tuffaceous sandstone area in south China [J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2020, 8(2):131-140.
- [17] Fang Haiyan, Sun Liying, Tang Zhenghong. Effects of rainfall and slope on runoff, soil erosion and rill development: An experimental study using two loess soils [J]. *Hydrological Processes*, 2015, 29(11):2649-2658.
- [18] Lin Zhe, Liao Dalan, He Ling, et al. The study on morphological evolution process of gully headcut erosion in granite red soil hilly area based on an in situ scouring experiment [J]. *Geomorphology*, 2023, 441:108900.
- [19] Ni Shimin, Peng Jue, Wang Junguang, et al. Impacts of slope morphological evolution on subsequent erosion for a coarse-textured soil [J]. *Geoderma*, 2023, 430: 116320.
- [20] 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.
- [21] 张攀,姚文艺,唐洪武,等.模拟降雨条件下坡面细沟形态演变与量化方法[J].*水科学进展*, 2015, 26(1):51-58.
Zhang Pan, Yao Wenyi, Tang Hongwu, et al. Evolution and quantization methods of rill morphology on the slope under rainfall simulation [J]. *Advances in Water Science*, 2015, 26(1):51-58.
- [22] 董敬兵,时鹏,李占斌,等.植被和梯田措施对坡沟系统细沟侵蚀调控作用[J].*农业工程学报*, 2022, 38(20): 96-104.
Dong Jingbing, Shi Peng, Li Zhanbin, et al. Effects of the role of vegetation and terraced measures on the rill erosion in slope-gully system [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38 (20):96-104.
- [23] 郑粉莉,徐锡蒙,覃超.沟蚀过程研究进展[J].*农业机械学报*, 2016, 47(8):48-59.
Zheng Fenli, Xu Ximeng, Qin Chao. A review of gully erosion process research [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(8): 48-59.
- [24] Qin Chao, Zheng Fenli, Zhang Xunchang John, et al. A simulation of rill bed incision processes in upland concentrated flows [J]. *Catena*, 2018, 165:310-319.
- [25] Shi Zhihua, Fang Nufang, Wu F Z, et al. Soil erosion processes and sediment sorting associated with transport mechanisms on steep slopes [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 454/455:123-130.
- [26] He Jijun, Li Xiaojuan, Jia Lijuan, et al. Experimental study of rill evolution processes and relationships between runoff and erosion on clay loam and loess [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2014, 78(5): 1716-1725.
- [27] Ni Shimin, Zhang Zhiwei, Wang Junguang, et al. Linking rill development characteristics to sediment production on different coarse-textured granite topsoils [J]. *Catena*, 2022, 214:106295.
- [28] 林祚顶,刘宝元,丛佩娟,等.山东临朐2019年“8·10”特大暴雨水土保持调查[J].*水土保持学报*, 2021, 35 (1):149-153.
Lin Zuoding, Liu Baoyuan, Cong Peijuan, et al. Soil and water conservation survey after a heavy storm on 10th August, 2019 in Linqu, Shandong Province [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(1): 149-153.
- [29] Daggupati P, Sheshukov A Y, Douglas-Mankin K R. Evaluating ephemeral gullies with a process-based topographic index model [J]. *Catena*, 2014, 113:177-186.
- [30] 成玉祥,张卜平,唐亚明.溯源侵蚀引发的拉裂-倾倒型黄土崩塌形成机制[J].*中国地质灾害与防治学报*, 2021, 32(5):86-91.
Cheng Yuxiang, Zhang Buping, Tang Yaming. The mechanism of bending-toppling loess collapse caused by headward erosion [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(5):86-91.
- [31] 史倩华,王文龙,郭明明,等.董志塬沟头溯源侵蚀过程及崩塌中孔隙水压力变化[J].*农业工程学报*, 2019, 35 (18):110-117.

- Shi Qianhua, Wang Wenlong, Guo Mingming, et al. Headcut erosion processes and pore water pressure variation on Dongzhi tableland of China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(18):110-117.
- [32] 王建羽,林哲,廖达兰,等.花岗岩红壤坡面沟头高度对沟床跌穴发育过程的影响[J].水土保持学报,2024,38(3):1-11.
- Wang Jianyu, Lin Zhe, Liao Dalan, et al. Influence of headcut height on the developmental processes of gully bed plunge pool on a granite red soil slope [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024,38(3):1-11.
- [33] 覃超,何超,郑粉莉,等.黄土坡面细沟沟头溯源侵蚀的量化研究[J].农业工程学报,2018,34(6):160-167.
- Qin Chao, He Chao, Zheng Fenli, et al. Quantitative research of rill head advancing process on loessial hill-slope [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018,34(6):160-167.
- [34] Kang Hongliang, Wang Wenlong, Guo Mingming, et al. Headwall scour hole erosion and overhanging mass collapse play critical roles in gully head retreat on grassland under surface flow [J]. Geomorphology, 2022, 411:108301.
- [35] Zhang Baojun, Xiong Donghong, Zhang Guanghui, et al. Impacts of headcut height on flow energy, sediment yield and surface landform during bank gully erosion processes in the Yuanmou dry-hot valley region, southwest China [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2018,43(10):2271-2282.
- [36] Lin Zhe, Huang Wanxia, Liao Dalan, et al. Sediment production process and hydraulic characteristics of ephemeral gully erosion in granite hilly area [J]. Catena, 2024,239:107946.
- [37] Zhu Yanan, Wang Wenlong, Guo Mingming, et al. Revegetation-induced changes in vegetation diversity improve soil properties of gully heads [J]. Science of the Total Environment, 2023,889:164214.
- [38] Gao Yuhao, Liu Changxin, Zou Ziqiang, et al. Effects of sediment yield fluctuations on the niche-like ephemeral gully formation in granite red soil [J]. Catena, 2022,219:106624.
- [39] 王伦,郑粉莉,师宏强,等.壤中流和土壤解冻深度对黑土坡面融雪侵蚀的影响[J].应用生态学报,2021,32(12):4177-4185.
- Wang Lun, Zheng Fenli, Shi Hongqiang, et al. Impacts of seepage flow and soil thaw depth on hillslope snowmelt erosion in Chinese Mollisol region [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021,32(12):4177-4185.
- [40] 张光辉,魏玉杰,周小荃,等.干湿循环强度与频度对花岗岩红壤孔隙分布的影响[J].农业工程学报,2022,38(增刊1):106-113.
- Zhang Guanghui, Wei Yujie, Zhou Xiaoquan, et al. Effects of the intensity and time of wetting-drying cycles on the poredistribution of granite red soil [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022,38(Suppl.1):106-113.
- [41] Alavinia M, Saleh F N, Asadi H. Effects of rainfall patterns on runoff and rainfall-induced erosion [J]. International Journal of Sediment Research, 2019, 34 (3) : 270-278.
- [42] 孔亚平,张科利.黄土坡面侵蚀产沙沿程变化的模拟试验研究[J].泥沙研究,2003,28(1):33-38.
- Kong Yaping, Zhang Keli. The distribution of soil loss on the surface of loess slope [J]. Journal of Sediment Research, 2003,28(1):33-38.
- [43] 郭明明,王文龙,康宏亮,等.黄土高原沟壑区植被自然恢复年限对坡面土壤抗冲性的影响[J].农业工程学报,2018,34(22):138-146.
- Guo Mingming, Wang Wenlong, Kang Hongliang, et al. Effect of natural vegetation restoration age on slope soil anti-scourability in gully region of Loess Plateau [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018,34(22):138-146.
- [44] 张攀,姚文艺,唐洪武,等.黄土坡面细沟形态变化及对侵蚀产沙过程的影响[J].农业工程学报,2018,34(5):114-119.
- Zhang Pan, Yao Wenyi, Tang Hongwu, et al. Rill morphology change and its effect on erosion and sediment yield on loess slope [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34 (5) : 114-119.
- [45] 白玉洁,张风宝,杨明义,等.急陡黄土坡面薄层水流水力学参数变化特征[J].土壤学报,2018,55(3):641-649.
- Bai Yujie, Zhang Fengbao, Yang Mingyi, et al. Variation of hydraulic parameters of shallow flow on steep loess slope [J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, 55(3) : 641-649.
- [46] Li Pu, Zhang Kuandi, Wang Jingwen, et al. Response of interrill erosion to flow parameters of sand loess in regions with high and coarse sediment yields [J]. Journal of Hydrology, 2021,592:125786.
- [47] Lou Yongcai, Gao Zhaoliang, Sun Guanfang, et al. Runoff scouring experimental study of rill erosion of spoil tips [J]. Catena, 2022,214:106249.
- [48] Tian Pei, Xu Xinyi, Pan Chengzhong, et al. Impacts of rainfall and inflow on rill formation and erosion processes on steep hillslopes [J]. Journal of Hydrology, 2017,548:24-39.
- [49] Wang L, Shi Z H. Size selectivity of eroded sediment

- associated with soil texture on steep slopes [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2015, 79(3):917-929.
- [50] 郭明明, 王文龙, 史清华, 等. 黄土高原沟壑区退耕地土壤抗冲性及其与影响因素的关系[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(10):129-136.
Guo Mingming, Wang Wenlong, Shi Qianhua, et al. Soil anti-scourability of abandoned land and its relationship with influencing factors in Loess Plateau gully region [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(10):129-136.
- [51] Babazadeh H, Ashourian M, Shafai-Bajestan M. Experimental study of headcut erosion in cohesive soils under different consolidation types and hydraulic parameters [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2017, 76(12):438.
- [52] 朱显谟. 黄土高原水蚀的主要类型及其有关因素[J]. *水土保持通报*, 1982, 2(3):40-44.
Zhu Xianmo. Main types of water erosion and related factors on the Loess Plateau [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1982, 2(3):40-44.
- [53] Kirkby M. Modelling the interactions between soil surface properties and water erosion [J]. *Catena*, 2002, 46(2/3):89-102.
- [54] Gordon L M, Bennett S J, Wells R R, et al. Effect of soil stratification on the development and migration of headcuts in upland concentrated flows [J]. *Water Resources Research*, 2007, 43(7):2006WR005659.
- [55] Wang Jianyu, Lin Zhe, Wei Jiangxing, et al. Influence of initial headcut height on rill headcut erosion mechanisms via runoff hydrodynamics modulation in granite residual soil [J]. *Journal of Hydrology*, 2025, 661:133606.
- [56] Jiang Chengcheng, Fan Wen, Yu Ningyu, et al. A new method to predict gully head erosion in the Loess Plateau of China based on SBAS-InSAR [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(3):421.
- [57] Bouchnak H, Sfar Felfoul M, Boussema M R, et al. Slope and rainfall effects on the volume of sediment yield by gully erosion in the Souar lithologic formation (Tunisia) [J]. *Catena*, 2009, 78(2):170-177.
- [58] Tang Qiuyue, Liao Dalan, Lin Zhe, et al. Dynamics of run-off hydraulic characteristics during gully headcut erosion driven by head height [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2023, 48(15):3395-3413.
- [59] Allen P M, Arnold J G, Auguste L, et al. Application of a simple headcut advance model for gullies [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2018, 43(1):202-217.
- [60] Rengers F K, Tucker G E. The evolution of gully headcut morphology: A case study using terrestrial laser scanning and hydrological monitoring [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2015, 40(10):1304-1317.
- [61] 陶婷婷. 紫色土坡耕地细沟发育过程及侵蚀动力机制研究[D]. 重庆: 西南大学, 2024.
Tao Tingting. Study on the development process and erosion dynamics mechanism of rill in purple soil slope [D]. Chongqing: Southwest University, 2024.
- [62] Elliot W J, Laflen J M. A process-based rill erosion model [J]. *Transactions of the ASAE*, 1993, 36(1):65-72.

(上接第 413 页)

- [24] 张茂省, 黎志恒, 王根龙, 等. 白龙江流域地质灾害特征及勘查思路[J]. *西北地质*, 2011, 44(3):1-9.
Zhang Maosheng, Li Zhiheng, Wang Genlong, et al. The geological hazard characteristics and exploration ideas of the Bailong River basin [J]. *Northwestern Geology*, 2011, 44(3):1-9.
- [25] 周超, 常鸣, 徐璐, 等. 强震区沟道堰塞体失稳模式及其动力学特征[J]. *地球科学*, 2023(8):3115-3126.
Zhou Chao, Chang Ming, Xu Lu, et al. Failure modes and dynamic characteristics of the landslide dams in strong earthquake area [J]. *Earth Science*, 2023(8):3115-3126.
- [26] 殷跃平, 李滨, 张田田, 等. 印度查莫利“2·7”冰岩山崩堵江溃决洪水灾害链研究[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2021, 32(3):1-8.
Yin Yueping, Li Bin, Zhang Tiantian, et al. The February 7 of 2021 glacier-rock avalanche and the outburst flooding disaster chain in Chamoli, India [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(3):1-8.
- [27] 方群生, 唐川, 程霄, 等. 汶川震区泥石流流域内滑坡物源量计算方法探讨[J]. *水利学报*, 2015, 46(11):1298-1304.
Fang Qunsheng, Tang Chuan, Cheng Xiao, et al. An calculation method for predicting landslides volumes of the debris flows in the Wenchuan earthquake area [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, 46(11):1298-1304.
- [28] 谢任之. 溃坝坝址流量计算[J]. *水利水运科学研究*, 1982(1):43-58.
Xie Renzhi. Computation for the discharge from the site of dam-break [J]. *Hydro-Science and Engineering*, 1982(1):43-58.