

DOI:10.13870/j.cnki.stbcb.2026.03.038 CSTR:32310.14.stbcb.2026.03.038

姚眸,王梦宇,李一凡,等.水力侵蚀对崩岗形成的驱动机制研究进展及防控启示[J].水土保持学报,2026,40(3):1-12.

YAO Mou, WANG Mengyu, LI Yifan, et al. Research progress on driving mechanisms of Benggang formation induced by hydraulic erosion and implications for prevention and control[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(3):1-12.

水力侵蚀对崩岗形成的驱动机制研究进展及防控启示

姚眸^{1,2}, 王梦宇^{1,2}, 李一凡^{1,2}, 倪世民^{1,2}, 王军光³

(1.河南大学地理科学与工程学部,郑州 450046; 2.河南大别山森林生态系统国家野外科学
观测研究站,郑州 450046; 3.华中农业大学水土保持研究中心,武汉 430070)

摘要: [目的] 崩岗侵蚀通常遵循“坡面侵蚀-切沟侵蚀-崩岗雏形-大型崩岗”的阶段性演变规律。研究旨在厘清水力侵蚀在崩岗形成关键阶段的驱动作用及核心路径,为区域侵蚀防控提供科学依据。[方法] 通过系统梳理国内外相关研究,基于坡面侵蚀发展链条,归纳构建崩岗形成阶段的机制框架。[结果] 在崩岗形成阶段,水力侵蚀起主导作用,显著增大沟壁高差,削弱土体稳定性并诱发重力侵蚀;重力侵蚀则在发展阶段逐渐成为驱动崩岗快速扩张的主导动力,二者通过“掏蚀-崩塌-再侵蚀”的正反馈作用维持崩岗的高强度侵蚀状态。此外,植被破坏、工程开挖等人为扰动是触发崩岗加速形成的关键诱因。[结论] 崩岗防控需以阻断坡面水力侵蚀链为核心,严格管控人为扰动并分阶段实施差异化治理策略。未来研究应开展水力与重力侵蚀的时空贡献量化研究,完善崩岗演变的监测预警体系,为崩岗生态修复与水土保持工程决策提供科学支撑。

关键词: 水力侵蚀过程; 崩岗; 沟蚀; 沟蚀形态; 花岗岩残积土

中图分类号: S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2026)03-0001-12

Research Progress on Driving Mechanisms of Benggang Formation Induced by Hydraulic Erosion and Implications for Prevention and Control

YAO Mou^{1,2}, WANG Mengyu^{1,2}, LI Yifan^{1,2}, NI Shimin^{1,2}, WANG Junguang³

(1.Faculty of Geographical Science and Engineering, Henan University, Zhengzhou 450046, China; 2.Henan Dabie Mountain National Field Observation and Research Station of Forest Ecosystem, Henan University, Zhengzhou 450046, China; 3.Soil and Water Conservation Research Center, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: [Objective] Benggang erosion generally follows a staged evolutionary pattern slope erosion-gully erosion-incipient Benggang-large-scale Benggang. This study aims to clarify the driving role and core pathways of hydraulic erosion in the key stages of Benggang formation, providing a scientific basis for regional erosion prevention and control. [Methods] By systematically reviewing relevant domestic and international studies, and based on the slope erosion development chain, a mechanism framework for the Benggang formation stage is summarized and constructed. [Results] During the Benggang formation stage, hydraulic erosion plays a dominant role, significantly increasing the height difference of gully walls, weakening soil stability, and inducing gravity erosion. During the development stage, gravity erosion gradually becomes the dominant driving force for the rapid expansion of Benggang, and the two maintain a high-intensity erosion state of Benggang through the positive feedback cycle of undercutting-collapse-re-erosion. In addition, human disturbances such as vegetation destruction and engineering excavation are key factors triggering the accelerated formation of Benggang. [Conclusion] Benggang prevention and control should take blocking the slope hydraulic erosion chain as the core, strictly regulate human disturbances, and implement differentiated management strategies in stages. Future research should focus on quantitative studies

收稿日期:2026-02-28 修回日期:2026-03-31 录用日期:2026-04-06 网络首发日期(www.cnki.net):2026-04-27

资助项目:国家自然科学基金项目(42307448);河南省科技攻关计划项目(252102320243)

第一作者:姚眸(2002—),女,硕士研究生,主要从事土壤侵蚀与生态修复研究。E-mail:ttdqt2333@163.com

通信作者:倪世民(1992—),男,博士,讲师,硕士生导师,主要从事土壤侵蚀与生态修复研究。E-mail:nishimin1016@henu.edu.cn

<http://stbcb.alljournal.com.cn>

of the spatiotemporal contributions of hydraulic and gravity erosion, improve the monitoring and early warning system for Benggang evolution, and provide scientific support for Benggang ecological restoration and decision-making in soil and water conservation engineering.

Keywords: hydraulic erosion process; Benggang; gully erosion; gully morphology; granite residual soil

Received: 2026-02-28

Revised: 2026-03-31

Accepted: 2026-04-06

Online(www.cnki.net): 2026-04-27

土壤侵蚀是诱发土地退化的核心驱动因素之一^[1]。其中,崩岗侵蚀是华南花岗岩残积土区特有的高强度水力-重力复合侵蚀类型,因其极强的破坏力,对区域生态安全构成严峻威胁^[2-3]。因此,系统揭示崩岗发生机制与演变过程,既能完善土壤侵蚀理论,也可作为华南水蚀区生态修复与水土保持提供科学依据^[4-5]。从地貌形态演变视角分析,当前研究普遍将崩岗视为一种特殊的切沟侵蚀类型(permanent gully)^[6]。切沟侵蚀通常遵循“面蚀-浅沟侵蚀-切沟侵蚀”的侵蚀链演变序列,并在特定地形与土体条件下可进一步演变为崩岗^[7-9]。但野外调查^[10-12]结果表明,并非所有切沟最终都能发展为崩岗,其核心在于崩岗的形成受到土壤性质、地形地貌、水动力过程及人类活动等多重因素的共同调控。

水力侵蚀是驱动崩岗形成与演变的核心动力^[13]。近年来,相关学者借助模拟试验,在探究水力侵蚀与崩岗形成的内在关联方面取得了阶段性进展。NI等^[14]基于模拟降雨试验,系统探讨了花岗岩残积土坡面细沟侵蚀的动力过程、形态演变特征及其对后续侵蚀的驱动效应;GAO等^[15]和LIN等^[16]通过冲刷试验,揭示水力侵蚀作用下崩岗易发区浅沟发育的时空规律。然而,现有研究多独立地分析坡面水力侵蚀或崩岗重力侵蚀机制,对水力驱动坡面

侵蚀向崩岗转化的过程尚缺乏系统梳理,亟需总结相关理论框架。

基于此,本文系统梳理国内外崩岗侵蚀相关研究进展,结合土壤侵蚀动力学、地貌学等多学科理论,深入剖析我国南方花岗岩残积土区坡面水力侵蚀与崩岗形成的内在联系,明确水力侵蚀在崩岗形成过程中的驱动作用,构建水力驱动崩岗形成的机制框架。本研究结果有利于弥补现有研究对侵蚀过程耦合关系梳理不足的短板,可为区域崩岗侵蚀的精准防控与生态修复实践提供系统性的理论参考。

1 崩岗的侵蚀类型与形态特征

1.1 崩岗侵蚀类型划分

从侵蚀动力机制来看,崩岗属于水力-重力复合侵蚀类型,以土体大规模崩塌、地貌破碎化为主要特征^[13,17-18]。水力与重力2种侵蚀营力的作用强度,随发育阶段、空间位置变化呈动态分异特征,二者通过多营力耦合与互馈,共同驱动崩岗形成与发展^[19]。从侵蚀形态来看,多数学者^[20-21]将崩岗视为一种特殊的切沟侵蚀,但其重力侵蚀作用相比切沟更显著(表1)。受花岗岩风化壳原生节理影响,崩岗崩壁的崩塌速率远高于切沟,导致其侧向侵蚀与溯源侵蚀比值更大^[6,22-25]。

表1 坡面水力侵蚀、沟蚀及崩岗侵蚀的典型特征

Table 1 Typical characteristics of slope hydraulic erosion, gully erosion, and Benggang erosion

侵蚀发展阶段	细沟侵蚀	浅沟侵蚀	切沟侵蚀	崩岗侵蚀
侵蚀动力	水力侵蚀	水力侵蚀	水力-重力复合侵蚀	水力-重力复合侵蚀
沟道尺度	宽度与深度均 <20 cm	宽度和深度 >20~50 cm	宽度与深度均 >50 cm	宽度与深度均达数米
常规耕作措施恢复	能	否	否	否
沟道形态	线形、网状分布	叠瓦状分布	线形或枝杈状	弧形、线形、爪形、勺形及复合型
断面形态	“V”形或“U”形	宽浅“U”形	“V”形、“U”形或阶梯状	“V”形、“U”形或直接出露的崩壁
暴露土壤层次	淋溶层(A)	淀积层(B)	过渡层(BC) 母质层(C)	过渡层(BC) 母质层(C)
初始发生位置	集水区或坡上部	坡上或坡中部	坡中或坡下部	坡中或坡下部
危害程度	小尺度/ 轻度危害	坡面尺度/ 中度危害	整个山丘/ 严重危害	整个山丘/ 严重危害

1.2 崩岗的组成与形态

典型的崩岗系统通常由集水区、崩壁、崩积体、冲刷沟道及洪积扇等部分构成(图1)。受发育阶段、侵蚀营力强度及空间规模的综合影响,崩岗可呈现出弧形、线形、勺(瓢)形、爪形及复合型等多种形态^[26-27]。从全球尺度来看,与崩岗相似的沟谷型侵蚀地貌在全球范围内分布广泛,如加拿大与地中海地区的BATTAGLIA等^[28]、ROSSI等^[29]、马达加斯加的VOARINTSOA等^[30]、巴西的POESSEN等^[31]及意大利的CARABALLO等^[32]、MORETTI等^[33]。尽管上述地貌与崩岗同属高强度沟谷侵蚀范畴,但在

发育基础与核心侵蚀机制上存在本质差异^[29]。其中,地中海地区Badland与崩岗虽气候背景相近,但成土母质与土体结构差异显著^[34]。Badland下部为致密弱透水基岩,上覆土层浅薄,以暴雨径流持续冲刷为主要侵蚀动力^[34];而崩岗主要发育于花岗岩残积土区,该地区的风化壳深厚、黏粒少、胶结弱、结构疏松,土体内聚力差、抗蚀能力低,易失稳,是崩岗发育的关键物质基础^[18,35]。马达加斯加Lavaka地貌多分布于高海拔陡坡地带,其发育受地震活动的显著影响;而崩岗则集中分布在海拔500 m以下的低山丘陵区,其发育与地震无直接关联^[36-37]。



图1 华南地区典型崩岗的组成与形态特征

Fig.1 Composition and morphological characteristics of typical Benggang in south China

2 崩岗演变的阶段特征与侵蚀动力

2.1 崩岗演变阶段划分

崩岗演变具有间歇性、长期性的特征,在完整发育周期内呈现显著的阶段性分异规律^[38]。自然状态下,崩岗的发育周期长达数十年,而人类活动干扰可将这一进程缩短至3~5 a^[17]。但受区域土壤、地形等环境条件的影响,不同区域崩岗的发育进程存在明显差异,因此,建立统一的阶段划分体系,是开展崩岗跨区域对比与侵蚀过程机制解析的重要前提。在实践中,学者多基于坡面侵蚀与沟蚀分布特征、崩岗地貌参数反演其完整发育过程,结合沟头位置、侵蚀强度等指标划分崩岗发育阶段(表2)。已有研究^[8,19]表明,细沟与浅沟阶段虽不能作为崩岗进入形成阶段的识别依据,但坡面水力侵蚀驱动的沟蚀发育过程是崩岗形成不可或缺的关键环节^[39]。基于地貌形态、主导侵蚀营力及侵蚀速率的显著差

异,张大林等^[13]提出更为简洁的2个阶段划分方案,明确崩岗演变过程可划分为形成阶段与发展阶段。形成阶段对应坡面侵蚀向沟蚀演变的过渡期,即无崩岗特征的坡面地貌逐步转化为崩岗雏形的过程;发展阶段则涵盖崩岗雏形的扩张、成熟崩岗的形成,直至侵蚀停滞、地貌趋于稳定的全过程。该划分方案清晰界定水力侵蚀与重力侵蚀在崩岗演变中的主导阶段,也为本文梳理水力侵蚀的驱动机制提供核心框架。

2.2 崩岗侵蚀不同阶段侵蚀动力的协同作用

水力侵蚀与重力侵蚀的作用强度与持续时间,随崩岗发育阶段及空间位置的变化呈显著分异特征^[48]。水力侵蚀通常先于重力侵蚀发生,以溯源、下切及侧向侵蚀为主要形式^[19],通过增大沟头与沟壁纵向高差,削弱风化壳的土体稳定性^[49]。当侵蚀沟的沟壁高度与坡度突破临界阈值后,将直接触发或

加速边坡土体的重力侵蚀^[48,50]。在此过程中,水力侵蚀一方面通过塑造陡峭地形为重力侵蚀创造先决条件;另一方面,将崩塌产生的松散堆积物搬运出沟道。二者互馈促进、协同驱动,共同加速侵蚀沟向崩岗转化的进程^[51]。

但“水力先行-重力响应”并非崩岗发育的唯一模式,重力侵蚀在特定扰动条件下也可先于水力侵蚀发生。例如,植被良好、水蚀较弱的边坡,经过持续的降雨入渗作用仍可能出现土体滑坡或坍塌^[19];此时重力侵蚀成为崩岗形成的直接诱因,而新生的滑坡面与坍塌壁会创造径流冲刷界面,进而显著增强

后续水力侵蚀。此外,2种侵蚀动力的作用时段也存在明显差异。水力侵蚀虽集中发生于降雨过程中,但入渗水分可长期影响土体抗剪强度^[52];重力侵蚀则更具间歇性与随机性,雨中和雨后均可发生,单次崩塌过程持续时间较短^[53]。

近年来,崩岗水力-重力侵蚀协同作用相关研究,正逐步聚焦微观过程与宏观崩塌频率的关联研究。从微观水文信号、土体结构演化、土壤构型调控等维度,揭示崩岗崩塌的诱发机理与关键过程,但崩塌概率的量化研究,仍需更系统的长期原位观测和控制试验支撑^[21,49,54]。

表 2 已发表文献中崩岗发育阶段的分类

Table 2 Classification of Benggang development stages in published literature

学者	崩岗的演变阶段	参考标准
史德明 ^[40]	初期阶段、中期阶段、末期阶段	主导侵蚀营力
吴克刚等 ^[41]	深切期、崩塌期、夷平期	主导侵蚀营力
牛德奎 ^[17,42]	网状细沟阶段、阶梯沟阶段、深沟阶段、崩岗扩展阶段	发展阶段特征
张淑光等 ^[43]	深切期、崩塌期、平衡期	主导侵蚀过程
钟继洪等 ^[44]	幼年期、青壮年期、老年期	活动强度
阮伏水 ^[45]	幼年期、青年期、壮年期、老年期	沟头位置
吴志峰等 ^[46]	突破阶段、扩张阶段、稳定阶段、系统演化分化阶段	地貌形态与侵蚀速率
丁光敏 ^[47]	初期、中期、晚期	沟头位置
张大林等 ^[13]	幼年期、壮年期、老年期	地貌形态与侵蚀速率

3 坡面水力侵蚀过程对崩岗形成的驱动机制

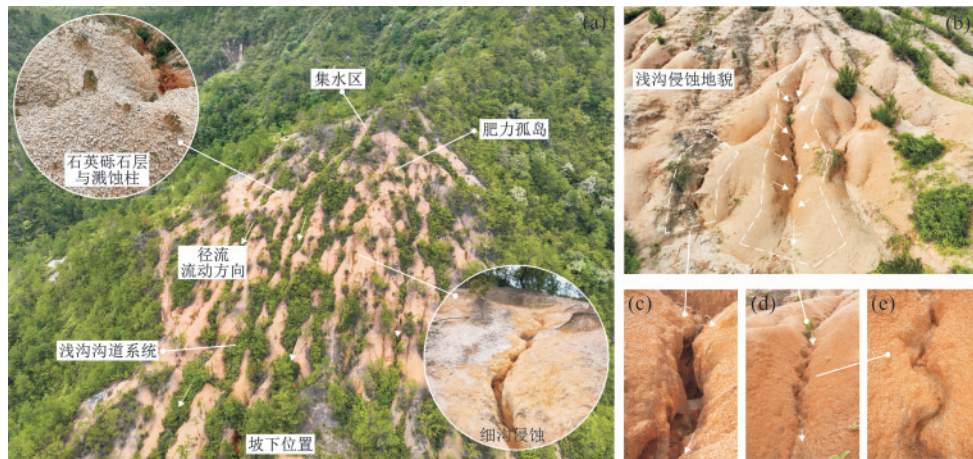
3.1 花岗岩残积土坡面典型水力侵蚀特征

在花岗岩残积土区,坡面水力侵蚀过程的形式与强度在空间尺度与崩岗发育阶段上均存在显著差异。坡顶经长期溅蚀与片蚀作用,逐渐形成浑圆状穹顶形态;集水区与坡上位置受径流选择性搬运的影响,土壤细颗粒大量流失,难以搬运的石英砾石残留并富集在地表,形成砾漠化侵蚀景观^[8,55](图 2a)。地表砾石覆盖层是该区坡面侵蚀的典型特征^[56]。其可通过维持土壤结构、抑制地表结皮削弱雨滴溅蚀,并在坡面形成与砾石拦截效应相关的“溅蚀柱”微地貌^[31,57-58]。但随着坡面汇流能量增强,砾石的调控作用逐渐降低:细沟侵蚀阶段的集中水流即可搬运大量砾石;而浅沟侵蚀阶段沟底砾石多被径流快速搬运,未搬运的砾石主要富集在沟侧的汇水区域^[8](图 2b)。相关研究^[21,54,59]表明,沟底滞留的石英砾石阻碍沟道下切侵蚀,加剧侧向侵蚀;进入切沟侵蚀阶段后,砾石则通过影响土体稳定性,间接促进沟壁崩塌,推动沟蚀发展。上述多尺度水力侵蚀共同塑造坡面由面蚀向沟蚀逐级强化的空间格局,裸露坡面呈现明显的土壤退化与斑块化特征。集水区是溅蚀

与面蚀的强烈作用区,其下方沿侵蚀链自上而下传递、由浅沟向切沟传递与演变^[60]。水力侵蚀的持续作用导致坡面土层退化、结构劣化、肥力衰减,仅局部区域残留零星的“生态岛”(图 2a)。

3.2 沟蚀过程的发展与演变

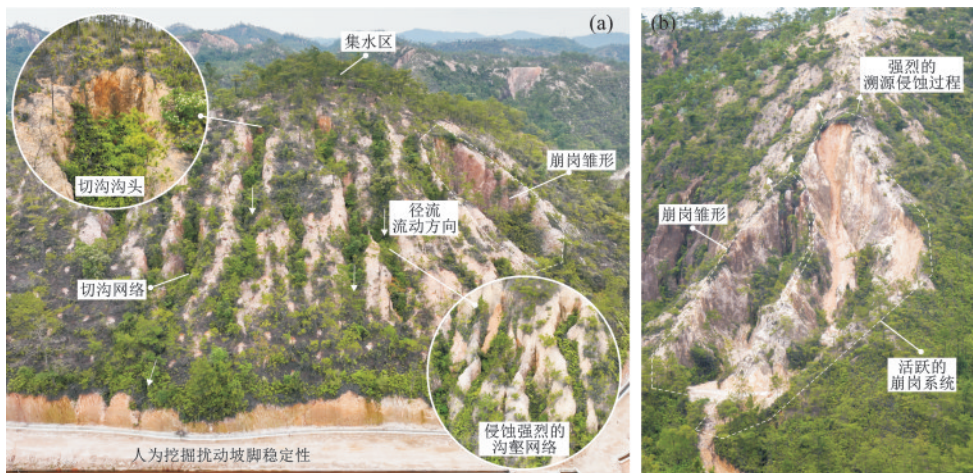
在沟蚀阶段,坡面上普遍发育的阶梯沟是驱动侵蚀过程发生质变的关键^[17,60](图 2c)。阶梯沟深多为 30~50 cm,各级台阶分别对应独立的溯源侵蚀点,形成多级跌水侵蚀系统。阶梯沟的形成与陡坡段高水力梯度密切相关,其形态演变与细沟跌水侵蚀高度相似^[61]。坡面径流经阶梯边缘会转变为瀑流、贴壁流,对临空面产生强烈溯源冲刷与下切侵蚀,并形成跌水坑^[15,62](图 2c)。此阶段侵蚀沟的扩张主要通过 3 个过程:一是跌水坑内涡流持续冲刷沟底与岸坡,推动跌水坑不断加深扩大,同时塑造出沟岸凹凸交替的“S”形地貌(图 2d~图 2e);二是瀑流与贴壁流长期冲刷临空面陡壁形成龛穴,诱发陡壁内部空洞与悬空土体形成^[63];悬空土体吸水后自重增加、抗剪强度下降,加之裂隙发育进一步加剧失稳,最终发生坍塌,推动相邻阶梯沟逐步贯通;三是阶梯沟持续溯源侵蚀并相互连通,沟头向集水区退缩、落差增大,最终坡面演变为切沟侵蚀系统^[64](图 3a)。



注:图 a、图 b 为花岗岩残积土坡面上溅蚀、面蚀和浅沟侵蚀系统;图 c~图 e 为阶梯沟形态特征。

图 2 花岗岩残积土坡面上溅蚀、面蚀和浅沟侵蚀系统及阶梯沟形态特征

Fig.2 Splash erosion, sheet erosion, and shallow gully erosion systems and morphological characteristics of stepped gullies on granite residual soil slopes



注:图 a 为切沟侵蚀系统;图 b 为发展活跃的崩岗系统。

图 3 花岗岩残积土坡面上的典型切沟侵蚀系统与发展活跃的崩岗系统

Fig.3 Typical gully erosion system and actively developing Benggang system on granite residual soil slopes

上述过程既揭示侵蚀沟从坡面单元向规模化沟道系统演变的关键机制,也为沟蚀发育阶段判定提供关键形态学依据。当前,已有研究^[65-66]尝试采用坡度、坡降、集水区面积等指标构建沟蚀发育阶段的判别体系。但受崩岗侵蚀过程复杂性、区域环境异质性的影响,学界仍缺乏能够精确界定“切沟向崩岗转化”的定量判据,相关判定仍以沟道侵蚀形态、动力机制、侵蚀速率等指标的经验性综合评估为主^[67]。例如, LIAO 等^[10]基于广东五华县的野外调查指出,当切沟沟宽超过 10 m 且沟壁高差 > 5.5 m 时,重力崩塌事件的发生频率会显著提升。崩壁高度可直观反映重力侵蚀的活跃程度,而沟头位置则与集水区面积及径流量密切相关^[47]。例如,在阮伏水^[45]的划分体系中,幼年期对应浅沟与切沟的发育阶段,沟头位于坡中下部位;青年期等其余阶段则涵盖沟头向集水区溯源扩展的全过程。但该划分方法隐含“崩岗发育必然以坡面

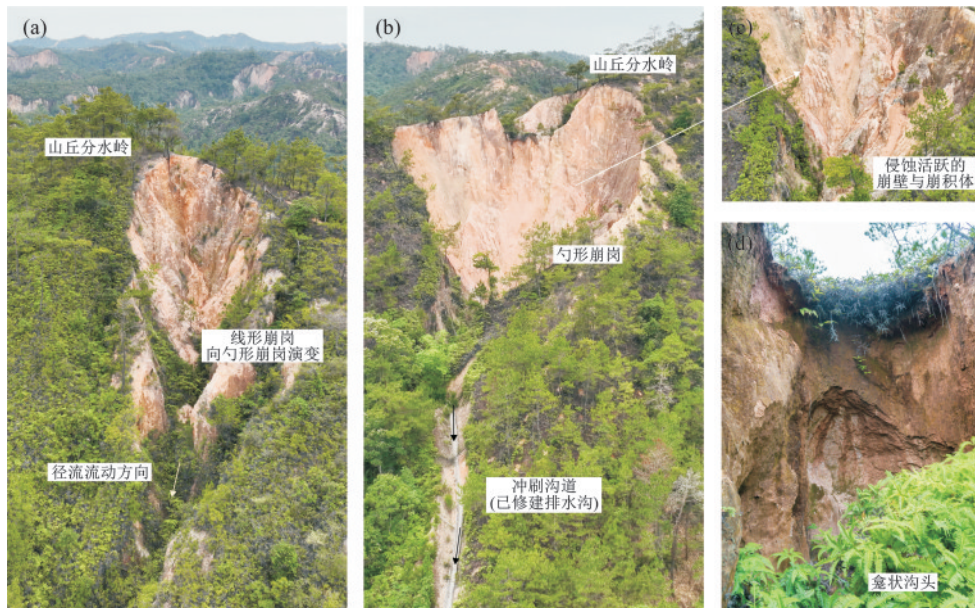
侵蚀为起点”的前提假设,与部分区域崩岗的实际形成过程可能存在偏差。近年来,高精度测量技术为获取崩岗侵蚀高分辨率动态数据、实现发育阶段定量划分提供了新思路,但其推广应用高度依赖长期原位监测数据的积累,这使得构建标准化的崩岗发育阶段判定标准仍面临诸多挑战^[65,68]。

3.3 崩岗形成阶段

沟蚀持续发展是孕育崩岗的前提,但将沟蚀阶段直接等同于崩岗形成阶段存在明显认知局限,因为并非所有浅沟、切沟都能演变为崩岗^[10]。已有研究^[5,53]证实,切沟向崩岗的转化受一系列关键条件制约,其中集水区面积、风化壳厚度等是核心控制因素。例如, LIAO 等^[10]基于广东五华县野外调查发现,海拔 150~250 m、坡度 17°~41°、坡长 30~120 m、集水区面积超 200 m²且花岗岩风化壳厚度 > 10 m 的区域,切沟向崩岗转化的概率显著提升。这些环境参

数可通过调控坡面径流侵蚀强度、改变土体结构稳定性,影响崩岗的启动与发育进程。从地貌形态来看,尽管崩岗初期与切沟在集水区特征、地貌形态及主导侵蚀动力方面存在相似性,但二者的差异性随崩岗的持续发育愈发显著。具体而言,切沟以径流驱动的下切侵蚀与溯源侵蚀为核心动力,沟道形态多呈线形或

条形^[69](图 3a、图 3b);初期崩岗的沟槽虽也呈线形,下切与溯源侵蚀速率高于侧向扩展速率,但当沟壁高度与坡度突破临界阈值后,重力侵蚀作用急剧增强(图 4c),由此引发的沟岸侧向掏蚀与崩塌,可使崩岗侧向扩展速率反超溯源侵蚀,最终推动沟道由线形向勺形或弧形转变^[24](图 4a、图 4b)。



注:图 a 为线形;图 b 为勺形;图 c 为崩岗以及活跃的崩壁;图 d 为龕状沟头。

图 4 花岗岩残积土坡面上线形、勺形崩岗以及活跃的崩壁与龕状沟头

Fig.4 Linear and spoon-shaped Benggang, active collapse walls, and niche-shaped gully heads on granite residual soil slopes

当切沟突破关键阈值并发育为崩岗雏形后,侵蚀过程进入加速发展的正反馈阶段,发育迟缓的切沟常被快速扩张的崩岗系统袭夺,被动卷入崩岗发育进程(图 3b)。此外,华南深厚且疏松的风化壳为崩岗发育提供充足的物质基础,使得崩岗即便在径流量减少,甚至短时断流条件下,仍可依靠重力侵蚀持续扩张,甚至突破山丘分水岭实现跨坡面发育(图 4b)。因此,随着崩岗发育进程推进,其对集水区面积与水力侵蚀的依赖性逐步降低,转而凸显对地形高差及重力作用的高度敏感性^[27,70]。GAO 等^[15]、WANG 等^[71]研究提出,将龕沟界定为崩岗形成的初始地貌形态之一(图 4d)。该类地貌多形成于暴雨条件下,坡面径流切穿表土后强烈侵蚀临空面,塑造出上窄下宽的瓶状横截面^[72],经周期性沟壁掏蚀与重力崩塌交替作用,具备逐步演变为崩岗的潜在可能^[71]。

3.4 基于水力侵蚀的崩岗形成路径

本研究基于水力侵蚀作用过程,结合地形、土体性质及人类活动等关键影响因素,归纳总结崩岗形成的典型路径。

1) 人为扰动驱动路径(图 5a)

人类活动肆意破坏植被,是加剧坡面侵蚀、诱发

“土壤退化-侵蚀强化”恶性循环的关键诱因。植被覆盖度下降直接削弱坡面抗蚀能力,加速表土细颗粒与养分流失。当表土被侵蚀至临界厚度,集中径流可切穿表土层,直接冲刷下伏易蚀土体,形成的侵蚀沟经溯源、下切及侧向侵蚀的协同作用持续扩张,为崩岗形成创造必要地形条件。

2) 边坡失稳诱导路径(图 5b)

工程开挖、重力滑坡、侵蚀基准面下降等因素,在坡面形成临空面。在瀑流冲刷下,临空面极易形成龕状沟头(图 4d)。同时,下伏土层优先流引发的潜蚀作用会进一步削弱土体稳定性,土壤含水率升高则会诱发悬空土体崩塌。龕状沟头通过“溯源侵蚀-土体崩塌-再侵蚀”的循环过程持续向坡顶推进,并与汇流路径上的侵蚀沟贯通连接,最终形成崩岗雏形。径流侧向侵蚀也会推动龕沟横向扩展,与相邻沟道合并形成大型沟道系统。该路径受土体性质垂直分异的影响,在花岗岩残积土区表现尤为突出。另外,工程开挖等人类活动通过改变坡面微地形,可加速径流汇流与沟蚀发展,诱导崩岗形成(图 5d)。

3) 自然演变驱动路径(图 5c)

在无显著人为扰动的条件下,水力侵蚀可遵循

土壤侵蚀链发展的自然递进过程,在特定环境条件下形成崩岗。但该自然路径发生概率较低,原因在于华南高温多雨的气候虽促进花岗岩深厚风化壳形成,但也利于常绿阔叶林、灌草植被自然繁衍;健康植被可通过截留降雨、削减径流侵蚀能量,有效抑制坡面侵蚀、维持生态稳定。通常仅在森林火灾、极端暴雨等突发性扰动事件破坏地表植被后,才可能触发高强度侵蚀过程,启动崩岗的自然发育进程。

崩岗由自然因素与人类活动共同形成,崩岗形成的人为扰动、边坡失稳、自然演变 3 条路径多交织发生。人类活动作为关键触发与主导因素,通过土地利用、人口条件、经济发展、政策支持 4 类因素产生“促进-抑制”作用,且其强度与崩岗空间分布高度相关^[73]。本研究虽梳理了上述 3 条崩岗形成的典型路径,但未量化人类活动的影响,后续需结合历史人文与社会经济特征揭示其耦合驱动机制。



图 5 基于水力侵蚀的崩岗典型形成路径

Fig.5 Typical formation pathways of Benggang based on hydraulic erosion

4 崩岗发展阶段的水力侵蚀作用机制

在崩岗形成初期,水力侵蚀仍是驱动地貌演变的核心动力:一方面通过持续的沟道下切提升沟壁相对高差,加剧沟壁土体失稳;另一方面,径流冲刷与入渗推动风化壳原生节理扩张、新生裂隙发育,削弱土体结构完整性,为重力侵蚀创造发生条件^[60,74]。同时,水力侵蚀承担着崩塌物质再侵蚀与输移的关键功能^[26,75]。沟道径流可及时搬运沟道内松散崩积物,既削弱崩积体对沟壁的支撑作用,又进一步增大沟壁落差,持续推动重力侵蚀发展^[75]。

在水力-重力复合侵蚀阶段,干湿交替与水分入渗能通过双重机制破坏土体稳定性。一方面,干湿交替促使陡壁土体反复收缩-膨胀,形成密集破坏性裂隙,导致土体稳定性显著下降^[22,76-77];另一方面,水分入渗降低土壤颗粒间的内摩擦力与抗剪强度,

同时地下径流的潜蚀作用进一步软化土体,为土体变形、滑动与崩塌的发生创造有利条件^[54,78]。这种“干燥-吸水-膨胀-崩塌”的循环过程,持续推动崩岗规模扩大^[79]。

随着崩岗持续发育,集水区面积逐步缩小,沟头不断向山丘分水岭溯源后退,最终可切穿分水岭,与背坡崩岗相互贯通。在此阶段,重力侵蚀取代水力侵蚀成为主导动力,边坡失稳引发的频繁崩塌,使沟道侧向侵蚀速率反超溯源侵蚀,沟壁崩塌物成为沟道泥沙的主要来源^[80-81]。山丘分水岭处与崩岗内部留存的土墙、土柱地貌,是崩岗合并贯通的直接形态证据^[82-83]。需要注意的是,华南花岗岩残积土区以深厚(通常>10 m)、疏松、抗蚀能力低的风化壳为物质基础。因此,与其他侵蚀区不同,尽管崩岗在发育后期集水区缩小导致径流冲刷作用有所减弱,但只要沟头与沟口仍存在足够的纵向高差,径流下切作用

就持续发生;仅当沟底坡度趋缓、径流侵蚀能量不足时,水力侵蚀强度才显著减弱^[65,82]。野外观测发现,长期稳定的崩壁常因地衣、苔藓等低等植物附着而呈深褐色,这可作为崩岗发育减缓或进入稳定阶段的生态标志。当自然植被逐步稳固边坡、沟道植被大面积恢复时,区域生态趋于良性循环,崩岗发育进入准稳态(老年期)。若能在崩岗发生前或发育早期实施人工干预措施,打破侵蚀正反馈过程,可推动崩岗提前趋于稳定,大幅降低其生态危害^[4,60,84]。

5 崩岗防控启示与建议

坡面水力侵蚀通过剥蚀土壤、削弱土体稳定性等途径,显著提升崩岗发生风险^[8]。因此,崩岗防控工作应因地制宜,强化坡面水力侵蚀阶段的精准防控,从而降低崩岗发生概率,减轻侵蚀危害。

5.1 坡面水力侵蚀的源头防控

对未发生严重侵蚀的坡面,通过划定生态保护红线、限制过度开垦与工程扰动,减少对坡面土体的破坏。可借鉴地中海Badland区的网状截水沟、微型集雨设施等径流分散技术,在崩岗形成阶段构建“植被拦截-工程蓄排”的多层次防护体系^[28]。对已出现明显侵蚀的区域,统筹推进林草植被重建与工程措施布设,构建“植被拦截-工程蓄排”的多层次水土保持体系。崩岗易发区需严格规范山体开挖、坡脚扰动等人类活动,对工程建设形成的裸露开挖面,及时采取回填夯实与加固防护措施。

5.2 沟蚀向崩岗转化的阻断措施

崩岗形成受特定地形与环境条件制约,当前切沟向崩岗转化的阈值多为区域性数据,相关评价成果普适性不足,应用受限^[10]。后续应借鉴风险管理理念,结合现代信息技术构建因子评价体系,通过易发性与危险性评价明确防控重点^[85];针对不同区域侵蚀动力、地貌形态差异实施差异化治理,对已发生沟蚀的坡面以早期干预为核心,通过引水沟、谷坊等工程拦截径流,稳定沟床,阻断沟蚀向崩岗转化。

5.3 崩岗发育阶段的综合治理

单纯阻断地表径流通常难以有效控制崩岗发育,需协同管控水力与重力侵蚀。对重力侵蚀活跃的崩岗,可通过崩壁梯田化改造、种植适生固土植被增强边坡稳定性,结合拦砂坝、排水系统布设与崩积物植被覆盖,降低地形起伏度、减少泥沙输出。同时,应加快构建“空-天-地”一体化动态监测体系,融合多源监测技术手段,构建崩岗发育过程预测模型,为崩岗精准防控提供科学支撑^[86]。

5.4 流域尺度的可持续管控与模式借鉴

崩岗治理需立足流域尺度,结合区域资源禀赋

开展可持续开发利用,规范河道采砂、拦砂坝库区及坝后开垦等活动,维护流域生态平衡。部分地区已探索形成“农业发展-生态修复-产业提升”的综合治理模式,实现崩岗治理与区域发展的有机结合,其成功经验可为华南花岗岩红壤区及同类区域的崩岗防治提供实践借鉴^[60,87]。

6 结论与展望

本文系统梳理华南花岗岩残积土区坡面水力侵蚀向崩岗演变的过程,厘清水力侵蚀在崩岗形成与发展不同阶段的作用机制,明确水力-重力侵蚀的耦合关系及人为扰动的驱动效应,归纳总结崩岗形成的典型路径。研究表明,水力侵蚀是崩岗形成阶段的关键驱动力量,其通过土壤侵蚀链为崩岗形成与发展提供必要的地形基础;进入崩岗发展阶段后,重力侵蚀逐渐占据主导地位,通过“掏蚀-崩塌-再侵蚀”的正反馈循环推动崩岗扩张,水力侵蚀则转变为崩塌物质搬运的关键动力。在3条形成路径中,人为扰动驱动路径是华南崩岗发生的主导路径,不合理的人类活动大幅缩短崩岗形成周期,规范人为扰动是从源头降低崩岗发生风险的核心举措。

基于上述结论,未来崩岗侵蚀研究需重点开展的方向为:1)在多时空尺度量化水力侵蚀与重力侵蚀的贡献占比及转化阈值研究;2)构建“空-天-地”一体化崩岗动态监测体系;3)基于土壤侵蚀链演变规律与形成路径关键阈值,完善崩岗侵蚀发生风险的物理预测模型;4)量化人类活动与崩岗侵蚀的耦合关系,明确不同人为扰动的影响权重与驱动机制。

参考文献:

- [1] YANG Q S, PENG J, NI S M, et al. Soil erosion-induced decline in aggregate stability and soil organic carbon reduces aggregate-associated microbial diversity and multifunctionality of agricultural slope in the mollisol region[J]. Land Degradation and Development, 2024, 35(11):3714-3726.
- [2] 冯明汉,廖纯艳,李双喜,等.我国南方崩岗侵蚀现状调查[J].人民长江,2009,40(8):66-68.
FENG M H, LIAO C Y, LI S X, et al. Investigation on status of hill collapsing and soil erosion in southern China [J]. Yangtze River, 2009, 40(8):66-68.
- [3] BORRELLI P, PANAGOS P, ALEWELL C, et al. Policy implications of multiple concurrent soil erosion processes in European farmland [J]. Nature Sustainability, 2023, 6(1):103-112.
- [4] ZHU X C, GAO L, WEI X R, et al. Progress and prospect of studies of Benggang erosion in southern China [J].

- Geoderma, 2023, 438: e116656.
- [5] 刘希林. 全球视野下崩岗侵蚀地貌及其研究进展[J]. 地理科学进展, 2018, 37(3): 342-351.
LIU X L. Benggang erosion landform and research progress in a global perspective [J]. Progress in Geography, 2018, 37(3): 342-351.
- [6] 韦江杏, 邓羽松. 花岗岩红壤丘陵区崩岗侵蚀与典型切沟侵蚀的异同点探析[J]. 土壤, 2024, 56(4): 718-725.
WEI J X, DENG Y S. Analysis of similarities and differences between Benggang erosion in granitic red soil hilly area and typical gully erosion[J]. Soils, 2024, 56(4): 718-725.
- [7] LIU W P, SONG X Q, LUO J, et al. The processes and mechanisms of collapsing erosion for granite residual soil in southern China[J]. Journal of Soils and Sediments, 2020, 20(2): 992-1002.
- [8] NI S M, PENG J, WANG J G, et al. Impacts of slope morphological evolution on subsequent erosion for a coarse-textured soil[J]. Geoderma, 2023, 430: e116320.
- [9] DABNEY S M, VIEIRA D A N, YODER D C, et al. Spatially distributed sheet, rill, and ephemeral gully erosion[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2015, 20(6): eC4014009.
- [10] LIAO Y S, YUAN Z J, LI D Q, et al. What kind of gully can develop into Benggang [J]. Catena, 2023, 225: e107024.
- [11] DENG Y S, DUAN X Q, DING S W, et al. Suction stress characteristics in granite red soils and their relationship with the collapsing gully in South China[J]. Catena, 2018, 171: 505-522.
- [12] CHEN J L, ZHOU M, LIN J S, et al. Comparison of soil physicochemical properties and mineralogical compositions between noncollapsible soils and collapsed gullies [J]. Geoderma, 2018, 317: 56-66.
- [13] 张大林, 刘希林. 崩岗侵蚀地貌的演变过程及阶段划分[J]. 亚热带资源与环境学报, 2011, 6(2): 23-28.
ZHANG D L, LIU X L. Evolution and phases division of collapsed gully erosion landform [J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2011, 6(2): 23-28.
- [14] NI S M, WEN H, WILSON G V, et al. A simulated study of surface morphological evolution on coarse-textured soils under intermittent rainfall events [J]. Catena, 2022, 208: e105767.
- [15] GAO Y H, LIU C X, ZOU Z Q, et al. Effects of sediment yield fluctuations on the niche-like ephemeral gully formation in granite red soil [J]. Catena, 2022, 219: e106624.
- [16] LIN Z, HUANG W X, LIAO D L, et al. Sediment production process and hydraulic characteristics of ephemeral gully erosion in granite hilly area [J]. Catena, 2024, 239: e107946.
- [17] 牛德奎. 华南红壤丘陵区崩岗发育的环境背景与侵蚀机理研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2009.
NIU D K. Research on the environmental factors and erosive mechanism of collapsing hill in South China [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2009.
- [18] 徐俊康, 陈新, 王建勋, 等. 崩岗侵蚀区花岗岩土壤孔隙的定量表征及渗流模拟[J]. 华中农业大学学报, 2026, 45(2): 122-136.
XU J K, CHEN X, WANG J X, et al. Quantitative characterization and seepage simulation of porosity in granite soils of gully erosion areas [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2026, 45(2): 122-136.
- [19] 廖义善, 唐常源, 袁再健, 等. 南方红壤区崩岗侵蚀及其防治研究进展[J]. 土壤学报, 2018, 55(6): 1297-1312.
LIAO Y S, TANG C Y, YUAN Z J, et al. Research progress on Benggang erosion and its prevention measure in red soil region of southern China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, 55(6): 1297-1312.
- [20] WEI Y J, LIU Z, ZHANG Y, et al. Analysis of gully erosion susceptibility and spatial modelling using a GIS-based approach [J]. Geoderma, 2022, 420: e115869.
- [21] TAO Y, ZOU Z Q, GUO L, et al. Linking soil macropores, subsurface flow and its hydrodynamic characteristics to the development of Benggang erosion [J]. Journal of Hydrology, 2020, 586: e124829.
- [22] LIU X Y, ZHANG X W, GAO H D, et al. How climate-induced wetting-drying cycles contribute to gully erosion: A case study from southern China [J]. Catena, 2023, 232: e107444.
- [23] COLOMBI T, KIRCHGESSNER N, ISESKOG D, et al. A time-lapse imaging platform for quantification of soil crack development due to simulated root water uptake [J]. Soil and Tillage Research, 2021, 205: e104769.
- [24] LIU Z, SHEN X, WEI Y J, et al. Soil depth mapping and its linkage to gully erosion rate prediction in granite areas of southern China [J]. Soil and Tillage Research, 2023, 231: e105711.
- [25] LI J H, DENG Y S, DUAN X Q, et al. Does joint structure promote the development of gully erosion [J]. Catena, 2022, 214: e106233.
- [26] LIN J S, HUANG Y H, ZHAO G, et al. Flow-driven soil erosion processes and the size selectivity of eroded sediment on steep slopes using colluvial deposits in a permanent gully [J]. Catena, 2017, 157: 47-57.
- [27] LIAO Y S, YUAN Z J, ZHENG M G, et al. The spatial distribution of Benggang and the factors that influence it [J]. Land Degradation and Development, 2019, 30(18): 2323-2335.

- [28] BATTAGLIA S, LEONI L, RAPETTI F, et al. Dynamic evolution of badlands in the Roglio basin (Tuscany, Italy)[J]. *Catena*, 2011, 86(1):14-23.
- [29] ROSSI M, TORRI D, DE GEETER S, et al. Topographic thresholds for gully head formation in badlands [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2022, 47(15):3558-3587.
- [30] VOARINTSOA N R G, COX R, RAZANATSEHENOM M O M, et al. Relation between bedrock geology, topography and lavaka distribution in Madagascar [J]. *South African Journal of Geology*, 2012, 115(2):225-250.
- [31] POESEN J, NACHTERGAELE J, VERSTRAETEN G, et al. Gully erosion and environmental change: Importance and research needs [J]. *Catena*, 2003, 50(2):91-133.
- [32] CARABALLO-ARIAS N A, CONOSCENTI C, DI STEFANO C, et al. Testing GIS-morphometric analysis of some Sicilian badlands[J]. *Catena*, 2014, 113:370-376.
- [33] MORETTI S, RODOLFI G. A typical "calanchi" landscape on the Eastern Apennine margin (Atri, Central Italy): Geomorphological features and evolution [J]. *Catena*, 2000, 40(2):217-228.
- [34] 张婉璐,袁再健,李定强,等.“崩岗”概念及其英文译法探析[J]. *中国水土保持科学*, 2020, 18(5):136-143.
ZHANG W L, YUAN Z J, LI D Q, et al. Discussion of the "Benggang" concept and its English translation[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2020, 18(5):136-143.
- [35] 张萍,查轩.崩岗侵蚀研究进展[J]. *水土保持研究*, 2007, 14(1):170-172.
ZHANG P, ZHA X. The research progress on collapsed gully erosion [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2007, 14(1):170-172.
- [36] COX R, ZENTNER D B, RAKOTONDRAZAFY A F M, et al. Shakedown in Madagascar: Occurrence of lavakas (erosional gullies) associated with seismic activity [J]. *Geology*, 2010, 38(2):179-182.
- [37] 李双喜,桂惠中,丁树文.中国南方崩岗空间分布特征[J]. *华中农业大学学报*, 2013, 32(1):83-86.
LI S X, GUI H Z, DING S W. Features of special layout of hill collapse in South China [J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2013, 32(1):83-86.
- [38] XU J X. Benggang erosion: The influencing factors [J]. *Catena*, 1996, 27(3/4):249-263.
- [39] 丘世钧.红土坡地崩岗侵蚀过程与机理[J]. *水土保持通报*, 1994, 14(6):31-40.
QIU S J. The process and mechanism of red earth slope disintegration erosion [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1994, 14(6):31-40.
- [40] 史德明.我国热带、亚热带地区崩岗侵蚀的剖析[J]. *水土保持通报*, 1984, 4(3):32-37.
SHI D M. Analysis of collapse erosion in tropical and subtropical areas of China [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1984, 4(3):32-37.
- [41] 吴克刚, CLARKE D, DICENZO P. 华南花岗岩风化壳的崩岗地形与土壤侵蚀[J]. *中国水土保持*, 1989(2):2-5.
WU K G, CLARKE D, DICENZO P. On landforms susceptible to Benggang (gully-slope collapse) in relation to soil erosion in granite weathering crusts in South China [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 1989(2):2-5.
- [42] 牛德奎.赣南山地丘陵区崩岗侵蚀阶段发育的研究[J]. *江西农业大学学报*, 1990(1):29-36.
NIU D K. Study on the development process of the collapse in hill area in southern Jiangxi Province [J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 1990(1):29-36.
- [43] 张淑光,钟朝章.广东省崩岗形成机理与类型[J]. *水土保持通报*, 1990, 10(3):8-16.
ZHANG S G, ZHONG C Z. The mechanism and types of the hillock collapsing forming in Guangdong Province [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1990, 10(3):8-16.
- [44] 钟继洪,唐淑英,谭军.南方山区花岗岩风化壳崩岗侵蚀及其防治对策:以广东省五华县新一村为例[J]. *水土保持通报*, 1991, 11(4):25-28.
ZHONG J H, TANG S Y, TAN J. Landfall erosion of granite weathering crust in mountain areas in South China and its controlling measures: With Xinyi Village, Wuhua County, Guangdong Province as an example [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1991, 11(4):25-28.
- [45] 阮伏水.福建崩岗沟侵蚀机理探讨[J]. *福建师范大学学报(自然科学版)*, 1996, 12(增刊1):24-31.
RUAN F S. Study on erosion mechanism of collapse gully in Fujian [J]. *Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition)*, 1996, 12(S1):24-31.
- [46] 吴志峰,李定强,丘世钧.华南水土流失区崩岗侵蚀地貌系统分析[J]. *水土保持通报*, 1999, 19(5):24-26.
WU Z F, LI D Q, QIU S J. Systematic analysis of slope disintegration erosion landform in South China [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1999, 19(5):24-26.
- [47] 丁光敏.福建省崩岗侵蚀成因及治理模式研究[J]. *水土保持通报*, 2001, 21(5):10-15.
DING G M. Causes and control patterns of collapse gully erosion in Fujian Province [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2001, 21(5):10-15.
- [48] 张昊,邹自强,李文凯,等.崩岗坡面土壤水分时空分异及崩壁崩塌阈值[J]. *水土保持学报*, 2026, 40(3):1-11.
ZHANG H, ZOU Z Q, LI W K, et al. Spatiotemporal

- variation of soil moisture on Benggang slopes and thresholds for Benggang wall collapse [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2026, 40(3):1-11.
- [49] ZOU Z Q, TAO Y, GAO Y H, et al. Soil moisture dynamics near a gully head in relation to the trigger of collapse in granite red soil slope in southern China [J]. *Geomorphology*, 2023, 420: e108493.
- [50] 葛宏力, 黄炎和, 蒋芳市. 福建省崩岗发生的地质和地貌条件分析 [J]. *水土保持通报*, 2007, 27(2): 128-131.
GE H L, HUANG Y H, JIANG F S. Geologic and geomorphologic conditions for slope collapse occurrences in Fujian [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2007, 27(2): 128-131.
- [51] ZHANG S Y, LI C, HUANG B, et al. Flow hydraulic responses to near-soil surface components on vegetated steep red soil colluvial deposits [J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 582: e124527.
- [52] DUAN X Q, DENG Y S, LIU C X, et al. Influence of Benggang slope cracks on soil water regimes: Comparison of model simulation and time-domain reflectometry [J]. *European Journal of Soil Science*, 2022, 73(5): e13302.
- [53] 林敬兰, 黄炎和. 崩岗侵蚀的成因机理研究与问题 [J]. *水土保持研究*, 2010, 17(2): 41-44.
LIN J L, HUANG Y H. Review of study on formation mechanism of slope disintegration erosion and its problems [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2010, 17(2): 41-44.
- [54] DUAN X Q, DENG Y S, TAO Y, et al. The soil configuration on granite residuals affects Benggang erosion by altering the soil water regime on the slope [J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2021, 9(3): 419-432.
- [55] 彭华, 闫罗彬, 陈智, 等. 中国南方湿润区红层荒漠化问题 [J]. *地理学报*, 2015, 70(11): 1699-1707.
PENG H, YAN L B, CHEN Z, et al. A preliminary study of desertification in red beds in the humid region of southern China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(11): 1699-1707.
- [56] EFTHIMIOU N. The new assessment of soil erodibility in Greece [J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, 204: e104720.
- [57] LI L, NEARING M A, POLYAKOV V O, et al. Evolution of rock cover, surface roughness, and its effect on soil erosion under simulated rainfall [J]. *Geoderma*, 2020, 379: e114622.
- [58] NI S M, SHI B B, ZHAO J J, et al. A review of impacts of soil rock fragments on slope erosion: Mechanism and processes [J]. *Land Degradation and Development*, 2024, 35(10): 3226-3243.
- [59] XIA J W, CAI C F, WEI Y J, et al. Granite residual soil properties in collapsing gullies of South China: Spatial variations and effects on collapsing gully erosion [J]. *Catena*, 2019, 174: 469-477.
- [60] 陈国光, 刘红樱, 陈进全, 等. 福建长汀县水土流失的地质影响因素及防治对策 [J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(6): 26-35.
CHEN G G, LIU H Y, CHEN J Q, et al. Geological influence factors of soil erosion in Changting County, Fujian Province and the countermeasures to prevent and control [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2020, 47(6): 26-35.
- [61] DI STEFANO C, NICOSIA A, PALMERI V, et al. Rill flow velocity and resistance law: A review [J]. *Earth-Science Reviews*, 2022, 231: e104092.
- [62] GUO M M, LOU Y B, CHEN Z X, et al. The proportion of jet flow and on-wall flow and its effects on soil loss and plunge pool morphology during gully headcut erosion [J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 598: e126220.
- [63] CHEN A Q, ZHANG D, PENG H, et al. Experimental study on the development of collapse of overhanging layers of gully in Yuanmou valley, China [J]. *Catena*, 2013, 109: 177-185.
- [64] SU Z G, XIONG D H, DONG Y F, et al. Simulated headward erosion of bank gullies in the dry-hot valley region of southwest China [J]. *Geomorphology*, 2014, 204: 532-541.
- [65] VANMAERCKE M, PANAGOS P, VANWALLEGHEM T, et al. Measuring, modelling and managing gully erosion at large scales: A state of the art [J]. *Earth-Science Reviews*, 2021, 218: e103637.
- [66] TORRI D, POESEN J. A review of topographic threshold conditions for gully head development in different environments [J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 130: 73-85.
- [67] 程冬兵, 张晶鑫, 郭飞, 等. 南方崩岗调查内容与方法探讨 [J]. *中国水利*, 2024(6): 68-72.
CHENG D B, ZHANG J X, GUO F, et al. Discussion on the content and method of slope collapse investigation in southern China [J]. *China Water Resources*, 2024(6): 68-72.
- [68] 邓羽松, 蔡崇法. 红壤丘陵区崩岗侵蚀调查与监测防治技术进展 [J]. *土壤学报*, 2025, 62(2): 322-333.
DENG Y S, CAI C F. Progress of survey, monitoring, and control technology of Benggang erosion in red soil hilly area [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2025, 62(2): 322-333.
- [69] CASTILLO C, GÓMEZ J A. A century of gully erosion research: Urgency, complexity and study approaches [J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, 160: 300-319.
- [70] DENG Y S, CAI C F, XIA D, et al. Soil Atterberg

- limits of different weathering profiles of the collapsing gullies in the hilly granitic region of southern China[J].*Solid Earth*,2017,8(2):499-513.
- [71] WANG C, CAI C F, DENG Y S. Tiny niche terrain induces gully headcut retreat[J].*Earth Surface Processes and Landforms*,2024,49(7):2260-2277.
- [72] 罗舒玉,何玲,林哲,等.桂东南崩岗侵蚀区崩壁龛穴的形态及空间分布特征[J].*水土保持学报*,2025,39(5):63-70.
LUO S Y, HE L, LIN Z, et al. Morphological and spatial distribution characteristics of niches in collapsing walls in southeastern Guangxi Benggang erosion area[J].*Journal of Soil and Water Conservation*,2025,39(5):63-70.
- [73] 黄浩丹.影响华南七省崩岗侵蚀的人类活动关键要素分析[D].武汉:华中农业大学,2023.
HUANG H D. The dominate human activity factors affecting Benggang erosion in seven provinces of southern China [D].Wuhan: Huazhong Agricultural University,2023.
- [74] 谢福倩,韦真茜,廖达兰,等.桂东南花岗岩红壤区典型崩岗剖面风化强度对理化特性的影响[J].*水土保持学报*,2024,38(4):122-131.
XIE F Q, WEI Z X, LIAO D L, et al. Effect of weathering intensity on physical and chemical properties of typical Benggang profile in granite red soil area of southeast Guangxi [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024,38(4):122-131.
- [75] JIANG F S, ZHAN Z Z, CHEN J L, et al. Rill erosion processes on a steep colluvial deposit slope under heavy rainfall in flume experiments with artificial rain [J]. *Catena*,2018,169:46-58.
- [76] 韩杰欣,邓芷慧,王旌靡,等.干湿交替条件下花岗岩崩岗区土壤裂隙发育规律[J].*水土保持学报*,2024,38(5):262-271.
HAN J X, DENG Z H, WANG J M, et al. Development of soil cracks in granite Benggang area under wetting-drying cycles[J].*Journal of Soil and Water Conservation*,2024,38(5):262-271.
- [77] PIRES L F, AULER A C, ROQUE W L, et al. X-ray microtomography analysis of soil pore structure dynamics under wetting and drying cycles [J]. *Geoderma*, 2020, 362:e114103.
- [78] ZHOU X Q, HU J, WEI Y J, et al. Estimation of soil detachment capacity on steep slopes in permanent gullies under wetting-drying cycles[J].*Catena*,2021,206:e105450.
- [79] 祝文静,张昊,陈家宙.通城花岗岩崩岗区红壤湿胀特性驱动细沟发育试验研究[J].*水土保持学报*,2026,40(3):1-11.
ZHU W J, ZHANG H, CHEN J Z. Experimental study on rill development driven by moisture swelling characteristics of red soil in Tongcheng granite Benggang area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*,2026,40(3):1-11.
- [80] LUK S H, YAO Q Y, GAO J Q, et al. Environmental analysis of soil erosion in Guangdong Province: A Deqing case study[J].*Catena*,1997,29(2):97-113.
- [81] LUK S H, WOO M K. Soil erosion in South China[J]. *Catena*,1997,29(2):93-95.
- [82] VALENTIN C, POESEN J, LI Y. Gully erosion: Impacts, factors and control[J].*Catena*,2005,63(2/3):132-153.
- [83] 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 F L, XU X M, QIN C. A review of gully erosion process research[J].*Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2016,47(8):48-59.
- [84] 梁音,宁堆虎,潘贤章,等.南方红壤区崩岗侵蚀的特点与治理[J].*中国水土保持*,2009(1):31-34.
LIANG Y, NING D H, PAN X Z, et al. Characteristics and treatment of collapse erosion in red soil area of South China [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2009(1):31-34.
- [85] 郭飞,蒋广辉,黄晓虎,等.环境因子组合和负样本选取策略对花岗岩区崩岗易发性评价的影响[J].*农业工程学报*,2024,40(1):191-200.
GUO F, JIANG G H, HUANG X H, et al. Impact of environmental factor combinations and negative sample selection on Benggang susceptibility assessment in granite areas[J].*Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*,2024,40(1):191-200.
- [86] 谭泽创.基于无人机LiDAR的崩岗侵蚀区点云优化处理与侵蚀量监测研究[D].福州:福建农林大学,2025.
TAN Z C. Optimization of point cloud processing and erosion volume monitoring in Benggang erosion area based on UAV LiDAR [D].Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University,2025.
- [87] WEN H, NI S M, WANG J G, et al. Changes of soil quality induced by different vegetation restoration in the collapsing gully erosion areas of southern China[J].*International Soil and Water Conservation Research*,2021,9(2):195-206.