

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2024.04.004

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. 土壤, 2024, 56(4): 718–725.

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^①

韦江杏, 邓羽松*

(广西大学林学院, 南宁 530004)

摘要: 崩岗侵蚀与切沟侵蚀威胁区域生态安全, 是当前土壤侵蚀研究领域所关注的热点和难点, 二者存在着共性和个性, 但能否将切沟侵蚀防治方法应用于崩岗侵蚀区尚不明确。本文从气候、母质和土壤、地形、植被方面对比了影响崩岗侵蚀和切沟侵蚀的环境因素。结合崩岗侵蚀与切沟侵蚀外观形态的表现形式, 阐述二者发育过程和侵蚀发生的动力机制。通过综合分析, 崩岗的侵蚀物质和侵蚀形式具有独特性, 在防控措施的布设方面需考虑更多因素的相互作用。在此基础上, 提出崩岗发育机制、防治措施及构建侵蚀模型等有待深入研究的问题。

关键词: 崩岗侵蚀; 切沟侵蚀; 侵蚀动力; 发育过程

中图分类号: S157.1 **文献标志码:** A

Analysis of Similarities and Differences Between Benggang Erosion in Granitic Red Soil Hilly Area and Typical Gully Erosion

WEI Jiangxing, DENG Yusong*

(College of Forestry, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: The Benggang erosion and gully erosion threaten the regional ecological security, which are the hot and difficult points in the field of soil erosion research, however, it is not clear whether the control methods of gully erosion can be applied to Benggang erosion area. In this paper, the environmental factors affecting gully erosion and Benggang erosion were compared from the aspects of climate, parent material, soil, topography and vegetation. Combined with the appearance forms of Benggang erosion and gully erosion, the development process and the dynamic mechanism of erosion were expounded. Through comprehensive analysis, the erosive substance and erosive form of Benggang erosion are unique, and the interplay of more factors should be considered in the layout of control measures. On this basis, the development mechanism of Benggang erosion, the prevention and control measures and the establishment of erosion model are put forward.

Key words: Benggang erosion; Gully erosion; Erosion dynamics; Developmental processes

切沟侵蚀是严重的土壤侵蚀类型, 是小流域侵蚀泥沙的主要来源^[1-2]。典型切沟在全球范围广泛分布。目前国内切沟侵蚀文献报道较多的主要在东北黑土区、黄土高原地区及干热河谷等地区; 国外切沟侵蚀现象在马达加斯加、巴西、意大利及地中海等地区广泛出现^[3]。我国热带和亚热带地区常见一种由花岗岩风化壳发育的永久性沟壑, 当地人称之为“崩岗”^[4-5]。“崩岗”一词最早由曾昭璇先生^[6]1960年提出, 并定义为水力和重力作用下山坡土体受破坏而崩塌和冲刷的侵蚀现象。1996年, 许炯心^[7]将崩岗侵蚀现象发表在 *Catena* 杂志上, 引起了国际同行的广泛热议。

崩岗是我国南方特殊的土壤侵蚀类型, 由于其复杂的土壤侵蚀过程难以调查和预测, 长期以来被人们所忽视。然而, 近几十年来, 崩岗侵蚀与切沟侵蚀被认为是引起土地退化的重要因素, 影响了区域农业生产和当地居民的生活, 受到了社会的广泛关注。

崩岗侵蚀与切沟侵蚀在发展过程中均可在地表上形成宽而深的沟(图1), 进而发展为永久性沟壑, 并且不能被普通耕作措施消除。崩岗侵蚀与切沟侵蚀有何不同, 能否将崩岗视为特殊的切沟, 进而推动崩岗侵蚀的研究, 目前仍然需要进一步厘清两者的异同点。以往关于切沟侵蚀的研究多聚焦于切沟

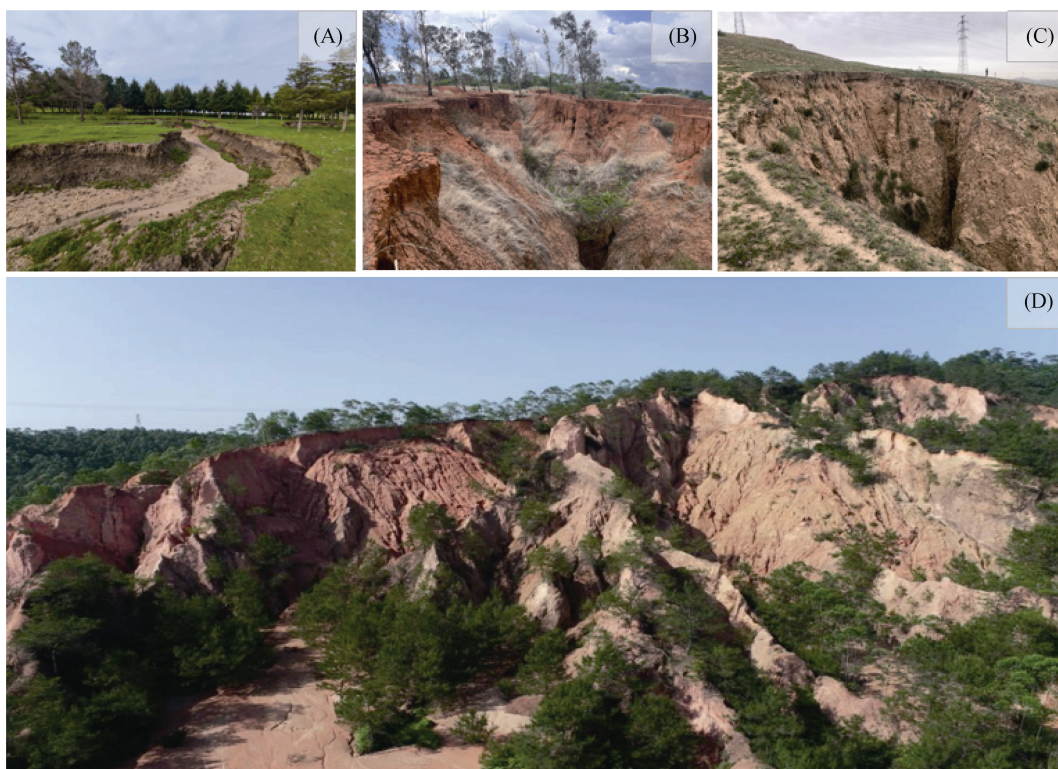
①基金项目: 国家自然科学基金项目(42007055)资助。

* 通讯作者(denny2018@gxu.edu.cn)

作者简介: 韦江杏(2000—), 女, 广西河池人, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤侵蚀与水土保持。E-mail: wjx001117@163.com

发育影响因素、侵蚀预报模型、监测治理和恢复等方面^[8-10]。就崩岗侵蚀而言,大多数学者对崩岗侵蚀的形成条件、侵蚀规律和治理措施等进行了研究^[11-13]。但由于崩岗发生的随机性、崩岗发育的长期性以及崩岗影响因素的复杂性,崩岗侵蚀机制及其防治措施有待进一步探索。在侵蚀研究领域,崩岗侵蚀与切沟侵蚀都是危害极大、治理难度极高

的土壤侵蚀类型,切沟侵蚀研究已有较为成熟和广泛的研究基础,采用坡改梯、截排水和封禁等措施可以有效防治切沟侵蚀的发展^[14]。但这些措施能否直接应用于崩岗侵蚀的防治,其效果是否显著,目前尚不清楚。因此,探析崩岗侵蚀与典型切沟侵蚀之间的异同点,有助于丰富拓宽相关理论,进一步认识崩岗发育过程及侵蚀机理。



(A: 黑土区典型切沟侵蚀(邓羽松 摄); B: 干热河谷地区典型切沟侵蚀(张宝军 摄);
C: 黄土高原典型切沟侵蚀(曾奕 摄); D: 广东德庆县崩岗侵蚀(邓羽松 摄))

图1 典型切沟侵蚀与崩岗侵蚀

Fig.1 Typical gully erosion and Bengang erosion

本文通过分析崩岗与典型切沟在气候、母质和土壤、地形、植被方面的异同点,探讨崩岗侵蚀与切沟侵蚀形态特征及侵蚀机制的区别,目的在于推动崩岗侵蚀与切沟侵蚀的成因机理研究,辩证借鉴切沟成熟的防治技术,为崩岗侵蚀治理提供更为高效的途径。

1 影响因素

1.1 气候特征

崩岗侵蚀主要发生在我国亚热带季风气候区。广东地区崩岗分布数量最多,该区暴雨频繁,年均降雨量在1 500~2 000 mm,一年中除1月无暴雨外其余各月均出现。牛德奎等^[15]将崩岗空间分布与区域降雨分布特征联系,指出崩岗侵蚀主要发生于1 400~2 000 mm等雨量线区域内。同时,崩岗侵蚀区暖热

湿润,区域年平均气温可达20℃以上,年平均最低气温出现在1月,年平均最高气温出现在7月,年无霜期超过300 d;大多雨热同季,暖湿气候促进了花岗岩的风化,有利于深厚风化壳的形成^[16-17]。

国内切沟地貌在黄土高原、东北黑土区及干热河谷地区报道较多。黄土高原属暖温带半湿润至半干旱气候,冬季较寒冷干燥,夏季温暖湿润;受大陆性季风气候的影响,黄土高原雨量稀少,年降雨量200~700 mm,其中超65%的降雨集中于7—9月,且暴雨占整年降雨量的30%。Zhang等^[18]研究发现切沟的形成与发育和暴雨密切相关,在降雨量为252.3 mm的特大暴雨下,黄土高原大量切沟发育。东北黑土区属中温带、寒温带半湿润大陆季风性气候,冬季严寒,春秋季节多风干旱,年平均气温为-7~11℃,年降

雨量为 300 ~ 1 000 mm, 80% 集中在 6—9 月, 多暴雨; 黑土区昼夜间、年季温差较大, 春季解冻期冻融频繁交替^[19]。干热河谷区属亚热带季风气候, 常年干旱少雨, 年平均降雨量为 613.8 mm, 年平均蒸发量 3 640.5 mm, 年蒸发量远大于降雨量; 旱季为当年 11 月至次年 5 月, 降雨主要在 6—10 月, 即具有降雨集中、干湿季分明的独特气候条件^[20]。与国内切沟相对湿润的环境对比, 国外切沟侵蚀多发生于干燥的气候环境中, 如美国中部、欧洲中部、马达加斯加中部、阿根廷北部、澳大利亚东南部等地区^[21]。这些地区通常具有明显的干湿季节变化, 夏季降雨丰富, 冬季相对干燥, 且气温较高, 阳光充足; 但是由于降水量较少或降水分配的不规律性, 普遍存在干旱的风险。

由此, 崩岗侵蚀与切沟侵蚀的发生与降雨及温度关系密切。崩岗侵蚀与切沟侵蚀均受到极端降雨的影响, 丰沛的降雨, 加剧了侵蚀的强度。然而, 崩岗侵蚀发生区为高温湿润地区, 其降雨及温度普遍高于典型切沟分布区; 且极端降雨和连续降雨较典型切沟发生区更为频繁。典型切沟除受降雨及热量影响外, 还可能受冻融交替、冻融径流汇集及干湿交替作用的影响, 导致土体裂隙发育, 加剧切沟侵蚀。

1.2 母质及土壤

花岗岩在原位经过强烈的生物化学作用形成的残积母质被广泛认为是崩岗侵蚀的主要物质基础^[22]。崩岗侵蚀主要分布于我国南方的花岗岩红壤区, 该区主要矿物为粗晶粒的石英、长石和黑云母, 在温暖湿润的气候条件下, 岩石遭受强烈生物化学作用, 长石等铝硅酸盐多生成高岭石等黏土矿物, 红黏土与石英等粗颗粒物混合形成了深厚疏松的花岗岩风化壳, 风化壳厚度可达 70 m 以上^[23]。同时, 原生节理及原基岩风化后产生的风化节理和卸荷节理等发育, 横、纵节理交叉形成节理网络, 可加快岩体沿节理的球状风化速度, 各方位出现不同程度的风化裂隙, 共同在风化壳内部形成潜在的结构破坏面^[15]。且花岗岩风化壳垂直剖面自上而下粗颗粒含量增加, 该粗粒结构会使土体内聚力减小, 抗剪性降低, 进而促使崩塌的发生^[24]。

切沟侵蚀多发生在运积母质发育而来的土壤上, 且风成沉积是全球黄土带最易形成切沟的原因^[25-26]。由于气候及构造运动的影响, 黄土堆积深厚, 土质疏松, 大孔隙发育, 垂直节理发育, 有利于接纳大量降水, 从而促进渗流的形成, 加剧切沟侵蚀^[27]。同时, 黄土带及其他干旱和半干旱区的土壤物理结皮形成会增大表层土壤黏结力, 土壤入渗速率下降, 诱发切沟侵蚀。东北黑土区土壤多发育在第四系中更新世黄土性冲-湖积

物上及白垩系的泥页岩风化物上^[28]。由于不合理垦殖, 导致土层变薄, 土层松散, 下层土壤质地黏重、透水性差, 暴雨条件下坡面径流迅速汇集, 为切沟的形成创造条件^[29-30]。干热河谷区为第四纪河湖相沉积物, 土壤以燥红土和变性土为主, 结构松散, 土壤风化程度较低, 且变性土在较大温差下易膨胀收缩形成裂隙^[31]。

由上述分析可知, 二者的发生都有深厚的物质作为基础。然而崩岗发育在花岗岩残积母质上, 土壤颗粒分布具有较为明显的层次性, 表现为自上而下砂粒含量增加。切沟形成主要受黄土、泥灰岩以及其他沉积物的影响, 切沟发育的黄土为风成堆积物、黑土和干热河谷地区土壤多为冲-湖相堆积物, 均属于运积母质发育而来的土壤。

1.3 地形

地形因素对崩岗发育的影响, 主要表现在海拔、坡向、相对高差、坡度和坡形这几个方面。崩岗主要分布在 500 m 海拔以下的低山丘陵区^[32]。在坡向的选择上, 阳坡所接受的热量和风量大于阴坡, 阳坡蒸发量大, 水量少, 植被生长较差, 因此, 阳坡发生崩岗的概率比阴坡大。斜坡的相对高差是影响斜坡稳定性的重要因素, 斜坡相对高差越大其重力势能越大, 崩岗发生的可能性也越大。相关研究显示, 崩岗大多分布在相对高差为 20 ~ 100 m 的丘陵山区^[33]。同时, 坡长和坡度也是影响崩岗侵蚀的重要因子, 在坡度为 10° ~ 35°、坡长为 50 ~ 150 m 的中坡上, 崩岗发育旺盛; 地形起伏较大的山坡有利于崩岗的发育, 不同坡形的山坡发育的崩岗形态也不同。

典型切沟主要发育在地形破碎的山区或丘陵地区, 不同地区临界坡度不同, 发生切沟侵蚀的概率也不同。李斌兵等^[34]通过研究黄土高原丘陵区切沟侵蚀临界模型发现, 切沟侵蚀主要分布在大于 35° 的坡地上。切沟发育需要足够的径流量, 径流的横向集中有限, 只有坡长增加才能达到所需条件。伍永秋等^[2]通过在航片上量测, 发现陕北丘陵区目前不发生切沟的平均坡长为 74.4 m, 且凸凹形坡与凹形坡比直形坡更易发生侵蚀。而在东北黑土区, 该区坡度一般在 3° ~ 7°, 坡长多为 1 000 m 以上, 有些长达几十公里, 汇水面积较大, 遇到大雨或暴雨时, 切沟发育频繁。同时, 研究发现海拔在 250 ~ 275 m 时最易发生切沟侵蚀^[35]。部分地区受积雪消融的影响, 阳坡的切沟发育明显大于阴坡。Bruno 等^[36]研究控制地中海切沟分布特征的地理环境因素发现, 该区切沟多集中在海拔高度为 277 ~ 522 m, 坡度 > 20° 的南坡上, 但 7° 和 > 30° 的斜坡上也可形成切沟。

因此,崩岗侵蚀与切沟侵蚀的发生均需要一定的坡度条件,地形起伏较大的山坡更有利于崩岗及切沟的发育。崩岗更多分布在小于 500 m 的低山丘陵区,坡短坡陡的向阳坡上崩岗发育旺盛,不同坡形发育的崩岗形态也不同。切沟侵蚀既可以在陡坡上发生也可以在缓坡上发生;发生切沟侵蚀的山坡坡长有的可达数千米,汇水面积大,易形成径流,进而促进切沟侵蚀的发展。

1.4 植被

植被对防止土壤侵蚀起着重要的作用,植被生长截留降水,提升土壤入渗性能,减小地表径流过水断面,降低径流侵蚀动力^[37]。崩岗侵蚀发生区地带性植被主要是亚热带常绿阔叶林和热带季雨林群落。由于人们对森林的破坏、顺坡种植农作物、挖山取土等,原地带性植被群落面积急剧缩小,逐步由次生林及人工林取代。植被一旦遭到破坏,便容易发生水土流失现象,引发崩岗侵蚀。植被的生长发育可以显著提升土壤侵蚀阻力,因此花岗岩区植被的恢复可以显著降低崩岗的发生风险。但有研究表明,即使部分植被恢复较好的坡面仍能发生崩塌并进一步发展为崩岗,且植被自身的重力作用是崩塌的诱因之一^[38]。华南高温湿润的气候环境可加速花岗岩的风化,良好的植被盖度有利于风化物的积累,当风化壳达到一定厚度后,甚至自然条件下崩塌形成崩岗。

切沟侵蚀的发生与植被的生长发育状况密切相关。植被遭到破坏,坡面在降雨及径流的作用下,产生溅蚀、面蚀,进一步发展为切沟侵蚀。研究显示,新西兰北岛东部海岸地区,在新发育的切沟上种植植被阻控侵蚀的效果最佳,到 2050 年可减少该区 50% 的泥沙^[39]。De Baets 等^[40]研究发现,植被恢复能减少侵蚀产沙量,对防护沟头侵蚀有明显作用。同时,植物的根系能够增加土壤的凝聚力与固持作用,提高土壤团聚体含量,从而增强土壤的抗蚀性^[41],降低径流冲刷动力,抑制切沟形成与发育。因此,植被恢复可以显著影响切沟侵蚀及其发育过程,植被盖度增大,可有效控制切沟发育。

由此可知,植被盖度的减少会造成崩岗侵蚀与切沟侵蚀的发生。切沟侵蚀区植被恢复后,切沟的发生

基本得到有效的遏制,但崩岗区植被恢复后,即使植被生长旺盛,崩岗溯源侵蚀仍可以发生。

2 形态特征的异同点

崩岗是华南花岗岩风化壳坡地上发育的深切山坡的崩陷凹地形,其纵剖面多呈 L 形,四周以陡直的崖壁嵌入风化壳中,该地形外观形态上大多为围椅状^[16]。崩岗的深度与宽度较大,通常崩岗宽度在 20 ~ 40 m,深度在 6 ~ 25 m^[42]。在空间形态上可将崩岗分为瓢形、条形、弧形、爪形、混合型(图 2)。瓢形崩岗常分布于凹形坡上,其显著特征是上大下小,形似葫芦瓢状,有一条长而窄、两壁陡直的沟道。条形崩岗常发育于直形或凸型坡上,其平面为长条状,长大于宽 3 倍以上,沟床较窄且受坡面径流及崩坍作用的影响,沟头部分有时会呈半圆形扩张。弧形崩岗沿沟线似弯弓,其弧度小于 180°,径流不断冲刷,坡脚常出现内凹的空腔。爪形崩岗在坡面上有多个汇水点,不同方向汇入的坡流导致土体崩塌的方向也不同,故众多不同崩坍方向的侵蚀沟在坡面上分布似“鸡爪”状^[23]。混合型崩岗由具有以上两种或两种以上类型崩岗的特征,其形态破碎复杂。典型而完整的崩岗地貌系统自上而下由 5 个基本单元组成:集水坡面、崩壁、崩积堆、沟道及洪积扇(图 3)。但是,每个崩岗所处的自然地理要素和人为干扰(利用和治理)不同,其组成部分或残存各有不同。弧形崩岗当多个来水单元汇集,水流量大且流速快时,坡脚受到深掏而造成土体剧烈坍塌,泥沙就地掩埋,沟道将消失。

典型切沟具有一定的外观形状,沟头、沟床、沟道是典型切沟的重要组成部分。典型切沟形态特征具有显著的时空动态变化特征,处在活跃期的切沟形态不稳定,切沟长度、深度和宽度会迅速增大;而处在稳定期的切沟相对比较稳定,切沟底部可能存在局部泥沙沉积,沟岸扩张缓慢。活跃期较为短暂,仅占生命周期的 5% 左右,但 ≥90% 的切沟长度、60% 的切沟面积和 35% 的切沟体积均在活跃期形成^[43]。尽管由径流主导着典型切沟形态不一,但多以“细长型”为主,即切沟长度显著大于宽度。



图 2 5 种不同形态崩岗图

Fig.2 Realistic images of 5 different forms of Benggang

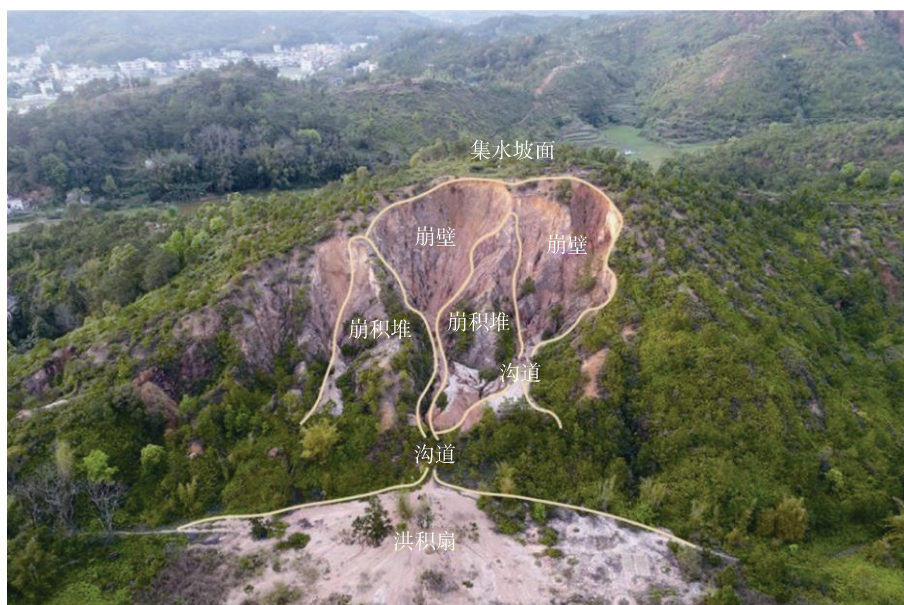


图 3 典型崩岗基本组成单元(邓羽松 摄)

Fig.3 Basic component unit of typical Benggang

典型切沟与崩岗,在多数情况下均存在着集水区和沟道,径流从集水区开始进入侵蚀沟或崩岗系统,侵蚀产生的大量泥沙通过沟道向外输移。崩岗多呈围椅状崩塌地貌,部分崩岗形态可呈现由简单形态(瓢形、条形、弧形)到复杂形态(混合形、爪形)的演化,典型切沟也可由简单的坡面侵蚀发展而来。典型切沟形态以细长型为主,即切沟长度较大、宽度相对较小,而崩岗的深度和宽度均较大,不同类型的崩岗形态特征显著。

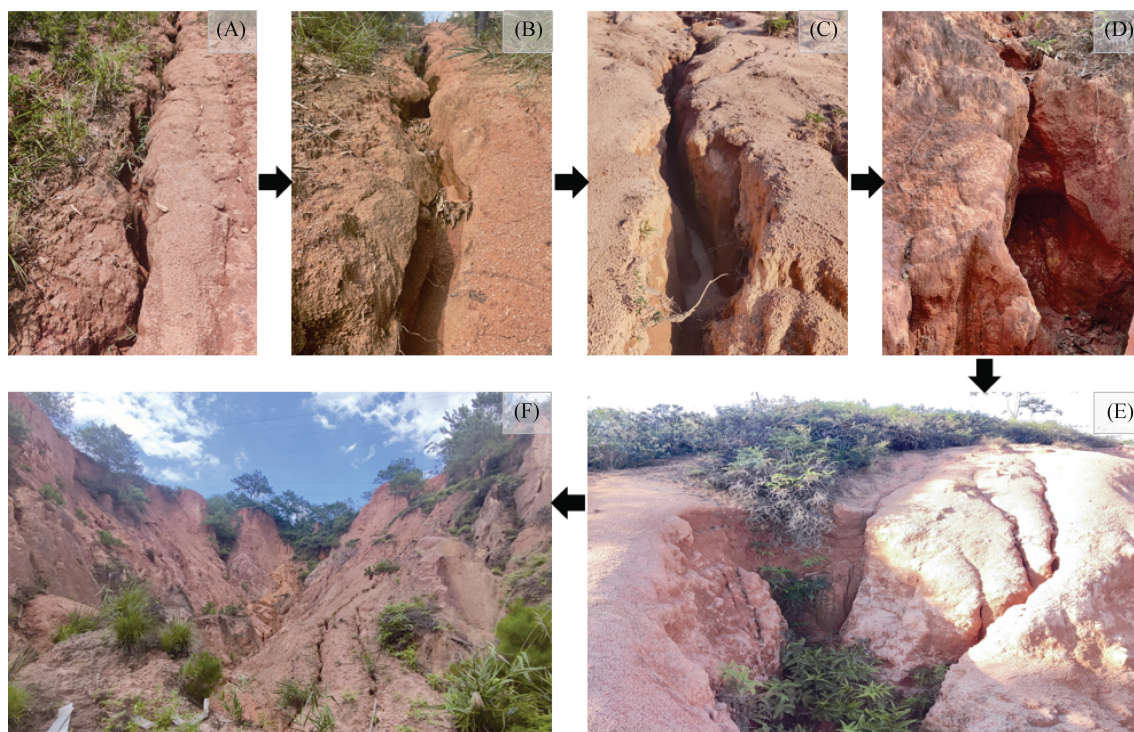
3 侵蚀机制的异同点

3.1 发育过程

典型的花岗岩风化壳自上而下可以划分为表土层、红土层、砂土层、碎屑层和球状风化壳层^[24]。花岗岩红壤丘陵区植被遭到破坏后,形成了有利于集流的微地形。在暴雨径流的作用下,红土层侵蚀流失,片流形成的凹地会迅速演化为侵蚀沟。侵蚀沟继续发展,深宽比逐渐增大,下切侵蚀比侧蚀速度快,侵蚀沟下切到一定深度后形成陡壁,剖面出露砂土层。斜坡上的径流在陡壁处转化为瀑流,在砂土层中形成溅蚀坑,溅蚀坑的不断扩大,逐步发展成为窠穴^[44]。窠穴上部的土体吸水饱和,自重增加,土体发生崩塌,形成锥形崩岗。崩塌的产物随径流流出,砂土层再次暴露出来,再在径流和瀑流的影响下形成新的窠穴,再次发生崩塌,如此反复,形成崩岗(图 4)。然而,部分规模较大的崩岗,不需要经历面蚀与沟蚀的发育过程。由于花岗岩风化壳完整地保留了原岩的裂隙、

节理的结构面,构成了其内部的潜伏破坏面。当土体含水量不断增加时,其内摩擦力和黏聚力减弱;土体达到饱和后,下渗水分在结构面活动,随时都会发生重力崩塌现象。丘世钧^[45]指出一些突发性崩岗如德庆县深涌小流域的崩岗,没有经过面蚀与沟蚀过程,能在较短时间内迅速发育。其崩塌前为完整的丘陵谷坡,坡面上植被茂密,植被覆盖度高达 95%,且崩岗四周均未发现明显的沟蚀形态;崩塌发生后,崩岗出口、壁面及出口外的崩积堆都相当新鲜完整,没有受到任何的自然或人为破坏。还有少部分崩岗是由于人类活动对山坡的直接破坏,如叩石垦壤、切坡、修建公路、修建房屋等造成临空面增加,经过多次的崩塌和后退,发育而形成。

典型切沟一般经溅蚀、面蚀发育而来。坡面面状侵蚀能否向线状侵蚀发展,起决定性因素的是植被^[46]。植被遭到破坏可为线状侵蚀发展提供有利条件,且在径流汇流的凹地形中,地表较薄的片状径流会转变为成束的股状流,从而加大了侵蚀能力。在坡度与降水耦合作用的快速侵蚀过程中,坡面侵蚀向沟蚀发展,进入水流纵向侵蚀阶段。暴雨产生的大量地表径流向凹地汇集,当径流侵蚀动力大于土壤侵蚀阻力时,会形成沟头。在径流的持续冲刷下,沟头下切产生临空面,下方出现跌穴,径流在跌穴内不断旋转、冲刷造成土壤分散,临空面被逐渐掏蚀,沟头底部形成弧形凹陷穴(图 4)。随着径流的持续冲刷和凹陷穴的增大,沟头失稳崩塌,沟头向上溯源^[47]。跌穴外溢的径流向下运动,当径流侵蚀动力大于土壤侵蚀阻力时,形



(A~C: 坡面侵蚀沟的形成与发展(林哲 摄); D: 龛穴形成(林哲 摄); E: 龛穴上部土体坍塌, 形成锥形崩岗(邓羽松 摄); F: 不断发生溯源侵蚀, 形成崩岗地貌(邓羽松 摄))

图4 花岗岩红壤丘陵区典型崩岗发育过程

Fig. 4 Typical Benggang development process in granitic red soil hilly area

成大小不同的跌坎。受径流冲刷影响, 跌坎不断下切, 位置逐渐上移, 最后连通形成小型侵蚀沟^[48]。当侵蚀沟深度加深, 沟壁变陡, 同时在降水入渗、沟壁裂隙发育、土体重量增大等因素的影响下, 沟壁崩塌, 沟岸发生扩张。在暴雨或大暴雨的长期作用下, 沟头溯源、沟底下切及沟岸扩张交替进行, 侵蚀沟不断发展, 最后形成规模巨大且常规耕作措施无法消除的切沟^[44]。由溅蚀、面蚀再到切沟侵蚀的过程, 地面的水流贯穿着侵蚀的各个过程。

崩岗与典型切沟都可以经过溅蚀与面蚀进一步发育而来。水流因素主导着切沟侵蚀过程中沟头的溯源、沟底的下切及沟岸的扩张, 推动着切沟不断发展。崩岗可以由面蚀发育而来, 但并不是所有的面蚀最终都能发展成为崩岗, 必须具备适当的气候、地质、地形等条件, 一些崩岗是由坡面裸露的砂土层受单一重力作用下崩塌而形成的。

3.2 侵蚀动力

崩岗是在水力和重力的共同作用下形成的, 两者既相互联系又相互促进, 推动着崩岗侵蚀的不断发展^[49]。在崩岗形成初期阶段, 花岗岩土壤表土层和红土层遭到破坏后, 在径流冲刷作用下, 坡面低洼处不断受到侵蚀, 逐渐形成侵蚀沟。侵蚀沟受水流下

切作用不断发展, 形成具有一定高度的陡壁。本阶段以径流下切作用为主, 重力崩塌作用未显示, 但侵蚀沟已形成具有一定高度的陡壁, 为重力作用破坏土体的平衡创造条件^[50]。在崩岗形成中期阶段, 随着沟底下切, 陡壁逐渐加高, 其不稳定性增大, 重力崩塌现象开始发生, 其规模也越来越大, 使崩岗扩展和崩岗头部前进速度加快。崩塌后松散的土体极易为径流所挟带, 造成大量的流失。崩塌土体未流失之前, 对陡壁有一定的支撑作用; 当土体流失之后, 随着径流量增加, 下切作用又变得活跃。故本阶段由径流下切和重力崩塌作用主导, 是崩岗发展过程中最活跃的时期, 土壤流失量最大, 危害也最严重。崩岗发育末期, 崩岗上部逐步扩展到集水坡面的上缘和分水岭附近, 集水坡面面积积极度缩小, 使得汇入崩岗区的水流也减小, 径流引起的下切作用基本停止。但重力破坏土体平衡的作用仍然存在, 崩塌现象亦有发生, 崩岗面积逐步扩大。因此, 本阶段内破坏土体平衡的重力作用占主要的地位。综上, 在崩岗发展过程中前期径流的冲刷及下切过程将地面削切出一定高度后, 壁上两侧物质重力势能得到释放, 形成以重力作用为主的水力-重力相伴发生、相互促进的复合侵蚀, 促使崩岗不断发展^[51]。

典型切沟的侵蚀营力多以水力侵蚀为主。降雨后,雨水在坡面上汇聚形成集中性水流,水流沿坡面向下流动,径流量及流速逐渐增加。同时,由于水流顺着坡道不断分异与兼并导致地表径流的非均匀性和能量也不断增加,加大对土壤团聚体的分散和搬运作用。因此,股流越集中,侵蚀能量越大,下切侵蚀越强烈,导致沟壁发生重力侵蚀、侧向剥蚀和溯源侵蚀的频率也越高;而且切沟的发展方向与水流方向一致,沟头溯源侵蚀的速度远远快于沟壁崩塌速度^[52],难以形成较高的沟壁。

高频高强度的降雨是崩岗侵蚀的外部驱动力,但由于受风化壳原始节理结构的影响,崩岗崩壁的溯源侵蚀速度与发育速度之比小于典型切沟。同时,切沟侵蚀主要侵蚀营力为水力侵蚀,其发展方向受水流方向影响;而崩岗侵蚀前期受水流冲刷作用影响较大,后期以重力侵蚀为主。

4 结论与展望

综上所述,崩岗侵蚀与切沟侵蚀的不同点主要为:崩岗主要是由花岗岩残积母质发育而来,具有深厚的风化壳,风化壳土体为非均质土;典型切沟多发育在运积母质发育的土壤上。在影响因素上崩岗侵蚀区降雨及温度普遍大于切沟侵蚀发生区,典型切沟还受冻融交替、冻融径流汇集及干湿交替作用的影响;植被恢复可以抑制切沟形成与发育,但崩岗区可能发生溯源侵蚀,崩塌仍能发生。在形态特征上,崩岗大多呈围椅状崩塌地貌,其外形特征可以分为弧形、瓢形、爪形、条形和混合型 5 种类型,与典型切沟的细长形态有明显区别。从发育过程分析,典型切沟是经过溅蚀与面蚀的过程发育而来的;崩岗可以由面蚀发育,也可在由单一重力作用崩塌而来。从侵蚀动力方面分析,切沟的侵蚀营力多以水力侵蚀为主;崩岗侵蚀前期受水流冲刷作用影响较大,后期以重力侵蚀为主。鉴于崩岗侵蚀发生机理及侵蚀机制的复杂性,相关问题有待进一步深入研究:

1) 切沟侵蚀治理的关键是控制坡面水流,留出“出口”将坡面水流及其汇集的水流安全快速排出,增加土壤植被覆盖;而崩岗侵蚀则需尽可能减少沟头部分崩塌与陷蚀,也可通过切断各单元组分之间的物质流动与能量转化达到治理与恢复的目的。崩岗各子系统是相互结合的统一整体,在治理过程中,充分考虑各子系统防治措施之间的连贯性和整体性,将有利于提高南方红壤区崩岗侵蚀治理的综合效益。

2) 典型切沟在全球范围内广泛分布,而崩岗集

中发育于我国热带亚热带地区。崩岗侵蚀受气候、地形、土壤和植被等因素的综合作用,基于地貌发育特点,明确崩岗区域分布原因,将有助于揭示崩岗集中发育机制及其区域分布规律。

3) 受对崩岗发育动力过程认知的限制,崩岗侵蚀过程模型研发相对滞后。在加强崩岗侵蚀动力过程与机制研究的同时,可以借鉴切沟相对成熟的侵蚀过程模型,强化崩岗侵蚀过程模型研发,提升崩岗区土壤侵蚀预报模型的预测精度,更好地为崩岗区水土保持规划、设计及水土保持效益评估提供服务。

参考文献:

- [1] 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, 116.
- [2] 伍永秋,刘宝元. 切沟、切沟侵蚀与预报[J]. 应用基础与工程科学学报, 2000, 8(2): 134–142.
- [3] Castillo C, Gómez J. A century of gully erosion research: Urgency, complexity and study approaches[J]. Earth-Science Reviews, 2016, 160: 300–319.
- [4] Huang B F, Qiu M, Lin J S, et al. Correlation between shear strength and soil physicochemical properties of different weathering profiles of the non-eroded and collapsing gully soils in Southern China[J]. Journal of Soils and Sediments, 2019, 19(11): 3832–3846.
- [5] Zhong B L, Peng S Y, Zhang Q, et al. Using an ecological economics approach to support the restoration of collapsing gullies in Southern China[J]. Land Use Policy, 2013, 32: 119–124.
- [6] 曾昭璇. 岩石地形学[M]. 北京: 地质出版社, 1960.
- [7] Xu J X. Benggang erosion: The influencing factors[J]. Catena, 1996, 27(3/4): 249–263.
- [8] 胡刚,伍永秋,刘宝元,等. 东北漫岗黑土区切沟侵蚀发育特征[J]. 地理学报, 2007, 62(11): 1165–1173.
- [9] 张光辉,杨扬,符素华,等. 切沟侵蚀预报研究进展与展望[J]. 地球科学进展, 2022, 37(6): 551–562.
- [10] 秦伟,左长清,范建荣,等. 东北黑土区侵蚀沟治理对策[J]. 中国水利, 2014(20): 37–41.
- [11] 林敬兰,黄炎和,蒋芳市,等. 崩岗土体的渗透性能机理研究[J]. 水土保持学报, 2013, 27(2): 53–56, 144.
- [12] 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.
- [13] 韦江杏,邓羽松,廖达兰,等. 桂东南花岗岩崩岗土壤界限含水率空间变异及影响因素[J]. 土壤学报, 2023, 60(3): 749–761.
- [14] 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.
- [15] 牛德奎,郭晓敏,左长清,等. 我国南方红壤丘陵区崩岗侵蚀的分布及其环境背景分析[J]. 江西农业大学学报, 2000, 22(2): 204–208.

- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Zhang Y, Zhao Y Y, Liu B Y, et al. Rill and gully erosion on unpaved roads under heavy rainfall in agricultural watersheds on China's Loess Plateau[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2019, 284: e106580.
- [19] 范昊明, 王岩松, 樊向国, 等. 东北黑土区典型流域融雪期切沟发育特征研究[J]. 中国水土保持, 2018(5): 64–69.
- [20] 陈安强, 张丹, 范建容, 等. 元谋干热河谷区沟蚀发育阶段与崩塌类型的关系[J]. 中国水土保持科学, 2011, 9(4): 1–6, 22.
- [21] Valentin C, Poesen J, Li Y. Gully erosion: Impacts, factors and control[J]. Catena, 2005, 63(2): 132–153.
- [22] Wei Y J, Liu Z, Wu X L, et al. Can Benggang be regarded as gully erosion?[J]. CATENA, 2021, 207(2): 105648.
- [23] 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: 116656.
- [24] 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(6): 469–477.
- [25] Zaimes G N, Schultz R C. Assessing riparian conservation land management practice impacts on gully erosion in Iowa[J]. Environmental Management, 2012, 49(5): 1009–1021.
- [26] Maignard A, Cordonnier H, Degre A, et al. Uncertainty assessment of ephemeral gully identification, characteristics and topographic threshold when using aerial photographs in agricultural settings[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2014, 39(10): 1319–1330.
- [27] 陈明玉, 邵明安, 李同川, 等. 黄土高原典型切沟土壤水分时空分布特征及其影响因素[J]. 土壤学报, 2021, 58(2): 381–390.
- [28] 崔明, 张旭东, 蔡强国, 等. 东北典型黑土区气候、地貌演化与黑土发育关系[J]. 地理研究, 2008, 27(3): 527–535.
- [29] 黄怡婷, 陈俊熹, 高钰淇, 等. 长期耕作对典型黑土水力性质的影响[J/OL]. 土壤学报, 2024, 61(4).
- [30] 张兴义, 刘晓冰. 东北黑土区沟道侵蚀现状及其防治对策[J]. 农业工程学报, 2021, 37(3): 320–326.
- [31] 张宝军, 吴汉, 熊东红, 等. 干热河谷冲沟沟头跌水消能减蚀措施效益试验初探[J]. 中国水土保持, 2020(7): 32–35, 5.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] 李斌兵, 郑粉莉, 张鹏. 黄土高原丘陵沟壑区小流域浅沟和切沟侵蚀区的界定[J]. 水土保持通报, 2008, 28(5): 16–20.
- [35] 王文娟, 邓荣鑫, 张树文. 东北典型黑土区 40 年来沟蚀空间格局变化及地形分异规律[J]. 地理与地理信息科学, 2012, 28(3): 68–71.
- [36] Bruno M, Catarina P, Adélia N, et al. Geo-environmental factors controlling gully distribution at the local scale in a Mediterranean environment[J]. Catena, 2024, 236: 107712.
- [37] 朱美菲, 程金花. 永定河典型护岸植被土壤水分入渗特征及影响因素[J]. 土壤, 2023, 55(5): 1129–1137.
- [38] 魏丽, 单九生, 朱星球. 植被覆盖对暴雨型滑坡影响的初步分析[J]. 气象与减灾研究, 2006, 29(1): 29–33.
- [39] Herzig A, Dymond J, Marden M. A gully-complex model for assessing gully stabilisation strategies[J]. Geomorphology, 2011, 133(1/2): 23–33.
- [40] De Baets S, Poesen J, Reubens B, et al. Root tensile strength and root distribution of typical Mediterranean plant species and their contribution to soil shear strength[J]. Plant and Soil, 2008, 305(1): 207–226.
- [41] 沙国良, 陈宇轩, 魏天兴, 等. 黄土高原丘陵区典型退耕恢复植被土壤碳分布特征及其影响因素[J]. 土壤, 2022, 54(6): 1265–1272.
- [42] 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, 75.
- [43] 张光辉. 切沟侵蚀研究进展与展望[J]. 水土保持学报, 2020, 34(5): 1–13.
- [44] 何玲, 邓羽松. 南方崩岗侵蚀区崩壁龛穴发育特征与稳定性初探[J]. 水土保持学报, 2023, 37(3): 60–65.
- [45] 丘世钧. 红土地崩岗侵蚀过程与机理[J]. 水土保持通报, 1994, 14(6): 31–40.
- [46] 景可, 王万忠, 郑粉莉. 中国土壤侵蚀与环境[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [47] 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, 2017, 43(7): 202–217.
- [48] Wells R, Momm H, Rigby J, et al. An empirical investigation of gully widening rates in upland concentrated flows[J]. Catena, 2013, 101: 114–121.
- [49] 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.
- [50] 丁树文, 蔡崇法, 张光远. 鄂东南花岗岩地区重力侵蚀及崩岗形成规律的研究[J]. 南昌水专学报, 1995, 14(S1): 50–54.
- [51] 姜超, 陈志彪, 陈志强. 我国崩岗侵蚀与国外劣地侵蚀机制类比[J]. 中国水土保持科学, 2014, 12(6): 116–122.
- [52] Shellberg Jeffrey G. Agricultural development risks increasing gully erosion and cumulative sediment yields from headwater streams in Great Barrier Reef Catchments[J]. Land Degradation & Development, 2020, 32(3): 1555–1569.