

# 崩岗治理技术措施研究进展与展望

黄斌<sup>1</sup>, 李定强<sup>1</sup>, 袁再健<sup>1</sup>, 廖义善<sup>1</sup>, 聂小东<sup>1</sup>, 马东方<sup>1,2</sup>

(1. 广东省生态环境技术研究所, 广东省农业环境综合治理重点实验室, 广东广州 510650; 2. 广东工业大学 环境科学与工程学院, 广东广州 510056)

**摘要:** [目的] 总结分析当前崩岗治理技术措施研究现状, 为制定更为合理的崩岗防治策略提供参考。[方法] 通过文献查阅, 根据崩岗的空间结构特征, 分别从集水坡面、崩壁、崩积堆、沟谷和冲积扇等方面系统性地总结了针对不同部位的崩岗治理技术措施。[结果] 总结探讨了不同技术的特点、适用性以及存在的问题, 对崩岗的不同治理模式进行了归纳, 并对未来崩岗治理技术的研究方向进行了展望。[结论] 工程与生物技术相结合的修复方式是目前采用最广泛的治理措施。今后的崩岗治理工作的开展应注重修复效果评价指标体系构建、水土保持作用机制、创新修复技术应用、修复技术与农业生产相结合以及预防措施等方面的研究。

**关键词:** 崩岗; 生态治理技术; 土壤侵蚀; 红壤丘陵区

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2018)06-0248-06

**中图分类号:** S157.1

**文献参数:** 黄斌, 李定强, 袁再健, 等. 崩岗治理技术措施研究进展与展望[J]. 水土保持通报, 2018, 38(6):248-253. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2018.06.038. Huang Bin, Li Dingqiang, Yuan Zaijian, et al. Progress and prospect of research on collapsing gully control techniques[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(6):248-253.

## Progress and Prospect of Research on Collapsing Gully Control Techniques

HUANG Bin<sup>1</sup>, LI Dingqiang<sup>1</sup>, YUAN Zaijian<sup>1</sup>, LIAO Yishan<sup>1</sup>, NIE Xiaodong<sup>1</sup>, MA Dongfang<sup>1,2</sup>

(1. *Guangdong Key Laboratory of Agricultural Environmental Pollution Integrated Control, Guangdong Institute of Eco-environmental Science & Technology, Guangzhou, Guangdong 510650, China*; 2. *School of Environmental Science and Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510006, China*)

**Abstract:** [Objective] This paper aimed to review existed collapsing gully control techniques in order to provide some theoretic references for making more reasonable collapsing gully restoration strategy. [Methods] By reviewing related literatures, and based on the spatial structure characteristics of collapsing gully, this paper reviewed the presently practiced collapsing gully control techniques, systematically summarized the control techniques for different parts of collapsing gully from the aspects of catchment slope, collapsing gully wall, collapsing gully pile, flow channel and alluvial, as well. [Results] The characteristics, applicability as well as the problems of these techniques were discussed. In addition, treatment models of collapsing gully were also summarized. The prospects of some directions for future collapsing gully control technique research were also pointed out. [Conclusion] The combination of engineering and biological technologies is the most widely used treatment measure. Future researches on collapsing gully control technique should focus on establishing assessment indicators system, exploring soil and water conservation mechanism, combining restoration technology and agricultural production, developing innovative restoration technology, and prevention treatments, etc.

**Keywords:** collapsing gully; ecological restoration technique; soil erosion; hilly area of Southern China

收稿日期: 2018-06-09

修回日期: 2018-07-04

资助项目: 国家重点研发计划项目“南方红壤低山丘陵区水土流失治理”(2017YFC0505404); 广东省科学院引进高层次领军人才专项(2016GDASRC-0103); 国家自然科学基金项目(41701320); 广东省科学院创新驱动发展能力建设专项(2017GDASCX-0830)

第一作者: 黄斌(1986—), 男(汉族), 江西省南昌市人, 博士, 助理研究员, 主要从事面源污染与水土保持等方面的研究。E-mail: bhuang@soil.gd.cn.

通讯作者: 袁再健(1976—), 男(汉族), 湖南省武冈市人, 博士, 研究员, 主要从事水土保持与生态水文等方面研究。E-mail: zjyuan@soil.gd.cn.

崩岗是一种是在水力和重力相互作用下,土体受破坏而产生崩塌与冲刷的特殊侵蚀地貌类型<sup>[1]</sup>,广泛分布于中国南方热带、亚热带花岗岩地区。调查表明广东、广西、福建、江西、安徽、湖南、湖北省等7个省的崩岗分布区总面积为48.34 km<sup>2</sup>,崩岗个数总计达23.91万个,其中以广东省数量最多,占崩岗总数的45.14%<sup>[2]</sup>。崩岗不仅导致土壤结构破坏,而且由水力冲刷产生的泥沙迁移会造成下游农田埋没、沟渠与河道淤塞等现象,并进一步引发一系列严重的生态环境问题<sup>[3]</sup>。崩岗的发育机制十分复杂,与土体自身性质、地形特征、气候条件、人为活动影响等因素密切相关。深厚的花岗岩风化壳和高温多雨的气候环境,加之植被的人为破坏被认为是南方红壤丘陵区崩岗侵蚀形成的基础条件<sup>[4-6]</sup>。崩岗侵蚀量大、破坏严重、突发性强,其发生和分布都具有显著的不确定性特征。近几十年来,崩岗侵蚀正引起越来越多的关注,有关学者针对崩岗的分布特征、发育机理、侵蚀规律和治理模式与技术措施等几个方面开展了广泛的研究<sup>[2,5,7-14]</sup>。在崩岗的治理技术措施探索方面,已从进行单一工程或生物治理措施发展到目前主要采用的“上拦、下堵、中削,内外绿化”的综合技术模式。然而,纵观这些治理技术措施研究,多是针对单个崩岗的小范围考察,未充分考虑到相关技术的适用性和可推广性,缺乏对不同技术类型的比较与深入分析,因此,有必要对崩岗治理技术进行系统的梳理。

## 1 崩岗的成因和类型

崩岗在空间结构上一般由集水坡面、崩壁、崩积堆、沟道、冲积扇等基本单元组成。崩岗的形成包括水力和重力侵蚀两个方面的作用过程,降雨为主要驱动力引发的物质能量传递是崩岗特殊地貌特征形成的内在机制<sup>[15-16]</sup>。崩岗侵蚀发生的3个基本条件是疏松深厚的基岩风化物、水力和重力作用以及地表植被的破坏<sup>[5]</sup>。调查表明绝大多数的崩岗发育在花岗岩上,且发育程度与风化物厚度密切相关<sup>[2]</sup>。花岗岩风化形成的表层红土易膨胀、吸水能力强,而表土以下的砂土层和碎屑层风化程度低、结构松散、抗冲抗蚀能力差<sup>[17]</sup>,这些物理化学特征使得表土层在遭到侵蚀时崩岗易于发育。降水是崩岗发育的诱发和驱动因素<sup>[6]</sup>,一方面通过地表径流冲刷对坡面形成下切侵蚀,另一方面在渗入土壤后增加土体自重,降低其抗剪强度<sup>[18-19]</sup>。研究<sup>[16,20-21]</sup>表明雨强、雨量和土体前期含水量对崩岗的形成具有非常重要的影响。中国华南地区降水量较大,暴雨次数多且较集中,为崩岗的发育和形成提供了十分有利的外部条件。植被覆

盖的类型、覆盖率、多样性特征等都会对崩岗的形成产生直接的影响<sup>[22-24]</sup>。崩岗发育最开始通常源于植被条件较差的土壤坡面的面蚀和沟蚀,不合理的人为活动导致的毁林开荒加剧了植被的破坏和水土流失,对崩岗的形成起到诱发和促进作用。此外,坡度、坡向、海拔等因素对崩岗的形成也具有一定的影响<sup>[22]</sup>。总之,我国南方热带、亚热带花岗岩地区特殊的基岩特性和气候以及人为活动影响造就了崩岗在该区域内的广泛发育。

按照不同的发育程度、规模大小、形态特征等可将崩岗划分成不同的类型。依据沟头位置可将崩岗的发育过程划分为初期、中期、晚期3个阶段,并依活跃程度划分为活动型和稳定性崩岗;依据面积大小可划分为:大(>3 000 m<sup>2</sup>)、中(1 000~300 m<sup>2</sup>)、小(60~1 000 m<sup>2</sup>)型崩岗;依据形态可划分为弧形、瓢形、条形、爪形以及混合型等类型的崩岗<sup>[25]</sup>。基于崩岗发生的过程机制,并根据其结构上的系统性特征,在实际治理活动中通常需同时对集水坡面、崩壁、崩积堆等部位采取对应的治理技术措施,以达到稳固土体、减少水土流失和改善侵蚀区生态环境的目的。此外,在实施具体的生态技术方面往往结合社会经济因素,注重治理与开发利用相结合,从而实现崩岗侵蚀修复过程中的生态、经济和社会效益相统一。综合长期以来的对崩岗的治理实践,目前采取的策略可总结为“上拦、下堵、中削,内外绿化”<sup>[26]</sup>,具体治理技术因崩岗实际情况所采取的形式较为多样化。

## 2 崩岗治理技术措施研究进展

### 2.1 集水坡面治理

坡面是崩岗产生和发展的源头,对集水坡面的治理主要目的是减少地面径流的冲刷,削弱崩岗沟头跌水强度,从根本上控制崩岗发展的动力来源<sup>[27]</sup>。目前采取的主要措施包括设置截流排水沟和植被恢复。设置截流排水沟是最为常用的崩岗集水区坡面治理措施,一方面减少了降雨径流对崩壁的冲刷动能,另一方面减少了崩壁顶部土体水分的入渗量,从而降低了崩壁因重力势能增加而崩塌的可能。截流排水沟一般布设在崩岗顶部或边缘3~6 m处,其数量可依据集水坡面的面积和地区降雨量大小来设置,在必要的情况下还可通过设置沟埂或种植牧草等植物对排水沟进行保护<sup>[22]</sup>。除设置截流排水沟外,根据立地条件配合不同的生物修复措施也是集水坡面治理的必要手段,其主要目的是增加一定程度的入渗,减少径流形成。如果坡面土壤较为贫瘠,在进行治理时宜选择一些根系发达、适应性强的植物,如芒草、马唐、

鹧鸪草、胡枝子、马尾松、杉树等,建立水土保持林或乔—灌—草—藤多层次的高强度绿化防护体系。对于立地条件较好的集水坡面,可种植经济性作物如果树、茶树、麻竹等<sup>[28-29]</sup>。在治理过程中必须注意不能将树木种植到过于靠近崩岗沟缘的位置,应保留一定的距离(4~6 m),以避免树木的自重和根系生长对土体的破坏引起的沟头崩塌。

集水坡面的治理是发育初中期崩岗治理的关键,而对发育晚期的崩岗,沟头可能越过分水岭,集水坡面已经不存在,因而无需进行坡面治理。对于侵蚀十分严重,沟头和崩壁外围接近分水线的崩岗,其顶部呈支离破碎的地形情况,可采取整成台地向天池的形式,再采取适当的工程和生物治理措施进行治理<sup>[30-31]</sup>。总的来说,对于集水坡面的治理主要遵循“上拦”的原则,通过对雨水的拦截和疏导从源头上减少水分及能量的输入,以维持崩岗系统的相对稳定性。沟头地形、位置与立地条件是集水坡面治理过程中需考虑的主要因素,实际修复过程中应依据不同的因素条件制定对应的修复措施,避免或遏制崩岗的进一步发育。

## 2.2 崩壁防护技术

崩壁是土体崩塌形成的裸露面,高达数米至数十米,其特点是坡度较大、极不稳定、立地条件差<sup>[32-33]</sup>,被认为是整个崩岗系统中治理难度最大的部位。通常采用的方法是依据实际地形、发育阶段和稳定程度等因素,在对崩壁进行削坡开梯等降坡稳坡工程措施后进行一定的植物覆盖。削坡整地的作用在于降低了降雨径流冲击壁面的动能,并且能够为坡面生物修复创造了适宜的地形条件。同时,在削坡后的台阶上适当修建蓄水和排水设施,起到疏导台面径流和提供植物生长所需水分的作用,以降低崩壁二次崩塌的风险。

崩壁土壤的养分通常十分匮乏,不利于植物的生长,在进行植被修复时可选择抗干旱耐贫瘠的藤蔓型植物如葛藤、大翼豆、虻蜞菊等,并可通过增加覆盖的方式保护台阶坡面,促进植物生长。崩壁削坡后如果立地条件太差、土壤贫乏,可采取就近更换客土、施基肥和营养杯育苗等措施,以保证林木生长。选择种植的植物包括对立地要求低,耐旱和瘦脊的大叶相思、油桐等速生植物,并可辅种草藤植物,实现多层次的植被覆盖,提高生态系统的稳定性<sup>[29]</sup>。对于相对稳定型的崩岗,由于崩壁坡面形态变化较小,可只在沟底或沟岸边缘种植葛藤、爬山虎等藤本植物保护崩壁,在崩壁坡面喷洒畜粪、泥浆和磷肥混合草籽,以达到壁面植被的快速恢复<sup>[34-36]</sup>。张汉松等<sup>[37]</sup>探讨了配

置不同类型的植物篱对崩岗进行快速整治的效果,发现崩壁采取种植猪屎豆、芒、葛藤、爬山虎等多种植物的修复方式可明显改善土壤理化性质,快速提高崩壁植被覆盖度和生物多样性,显著减少水土流失,并可节省崩岗治理的投资成本。金平伟等<sup>[38]</sup>采用不同草灌复合模式对南方崩岗崩壁进行了复绿效果对比研究,结果表明崩壁复绿可明显提高崩壁的稳定性系数,草灌复绿模式对侵蚀模数的降低效果显著高于单纯草灌复绿模式。黄俊等<sup>[39]</sup>采用崩壁人工径流小区定位观察对比并评价了 9 种不同组合措施的修复效果,发现三维网喷播植草(灌)的方式为最优组合。可见,在崩壁生态修复过程中,应当注重草、灌等不同植被之间的合理搭配,其效果往往好于单一模式的植被修复,同时结合适宜的工程措施,以达到最佳的修复效果。目前,崩壁治理技术的相关研究并不多,主要针对有限地区的崩壁进行径流小区观测试验和修复效果评价,需进一步对不同地区不同类型崩岗进行崩壁生物修复治理技术与筛选,并同时注重一些新技术的应用<sup>[40]</sup>。

## 2.3 崩积堆稳固化技术

由坡面沟头和沟壁崩塌下来的土体在崩壁下方堆积形成崩积堆,其特点是坡度大、土质疏松、结构性差、抗侵蚀能力弱<sup>[41]</sup>,因此,在高强度降雨的冲刷下,容易形成沟谷和冲积扇地形,成为崩岗的二次侵蚀源头。对崩积堆的治理主要采取“固定”的策略,以工程措施和生物方法修复技术相结合为主。小型的崩岗通过适当的植被覆盖即可达到稳定崩积堆的作用,一些发育到后期的崩岗虽然崩塌面积较大,但坡度已较平缓,具备开发性治理条件的地方在进行适当的土地整理后可种植麻竹、绿竹等经济作物。而对于坡度和面积均较大的崩积体区域需要先进行土地整理,并在区域内设置必要的小型蓄排工程,填平侵蚀沟,将崩积体坡面修整成坡度较小的坡面或者台地、梯田,以为植被修复提供地形条件<sup>[34]</sup>。崩积堆由于其特殊的土体特性,抗侵蚀能力差,在进行生态修复时,一般需要进行快速的植被恢复,选择根系发达抗土壤侵蚀的能力较强的植物(如香根草等)<sup>[42]</sup>。另外,在植被恢复过程中崩积堆上方的崩壁有可能继续崩塌,此时可选择在此类情况下对生长影响较小的竹类植物(如藤枝竹等)<sup>[22]</sup>。也有研究者建议,针对崩积区域面积较大的情况,可依据距离崩壁的距离来分区治理,如上游的崩积区立地条件差,可采用水土保持先锋林、草种进行生态恢复;而堆积区下游、水肥条件尚可,可综合利用,治理同时发展水土保持经济林果<sup>[43]</sup>。通常在坡面得到有效治理的情况下,崩积体能够保持相对

的稳定性,实施生物和必要的工程措施的目的在于提高崩积体的抗侵蚀能力。地形条件、适合的植被选择是治理崩积堆时所需考虑的关键因素。

近年来,研究人员开始尝试采用一些成本低廉、施工方便、环境负荷小的人工材料作为固化剂来辅助崩积体的固定。张兆福等<sup>[44]</sup>通过野外人工模拟降雨试验研究了不同浓度、分子量、水解度条件下的聚丙烯酰胺(PAM)添加对崩积体土壤侵蚀和颗粒流失的影响,发现施用 PAM 后崩积体中粉粒和黏粒的流失量显著减少,并且崩积体土壤施用 PAM 减少产沙量的效果并不是单纯随着 PAM 施用量的增加而上升。祝亚云等<sup>[45]</sup>研究了亲水性聚氨酯(W-OH)材料对崩积体土壤分离速率的影响,发现这种材料能有效增加土壤颗粒之间的黏结力,抑制侵蚀的发生,可用于崩岗崩积体的治理。此外,朱高立等<sup>[46-47]</sup>通过室内模拟降雨试验研究了雨强、秸秆覆盖度、坡度对崩积体坡面侵蚀的影响,指出秸秆覆盖能够在一定程度上减少坡面产沙量。这些研究结果对于崩积堆的治理有很好的借鉴意义,然而目前关于通过添加固化剂等措施加强崩积体稳定化的研究并不多,相关研究工作有待进一步开展。同时,固化剂的稳定效果的长期性、成本及对土壤理化性质的影响方面也是需要注意的问题。

## 2.4 沟谷和冲积扇防护

沟谷是崩积体土壤流失的通道,同时存在着径流的下切和泥沙的淤积。为阻止崩积堆土壤进一步向

下游移动,一般采用修筑谷坊的方式拦蓄泥沙,以提高侵蚀基准面。谷坊的设置数量和位置依据地形和崩岗侵蚀规模来确定。由于谷坊的修筑成本通常较高,因而在实际治理时须注意谷坊修建的个数和拦截作用效率。在谷坊建成后,可在对拦蓄的泥沙进行适当土地整理后依立地情况种植香根草、藤枝竹等根系发达、耐冲刷和掩埋的植物,也可在对土壤状况改善的基础上(覆盖客土、施肥等措施)种植经济作物,如麻竹、茶树、果树等<sup>[48]</sup>。

冲积扇是崩岗侵蚀土壤在下游平坦开阔地的堆积,部分汇入或掩埋周边河溪,其主要成分为石英砂<sup>[49]</sup>。冲积扇立地条件较差,但水分条件通常较好,治理措施以植物修复为主,工程措施为辅,可选择种植的作物有香根草、牧草、蜜糖草、胡枝子、竹类等。小流域内可修筑拦沙坝控制冲积扇的进一步扩散,立地条件好的区域可采用灌草相结合的种植办法进行生物修复或者开发性种植麻竹、绿竹和果树等<sup>[29,50]</sup>。

可以看出崩岗不同部位具有明显的特点差异,针对不同部位所采取的治理措施也有所不同(表 1)。然而崩岗内部各子系统之间存在着紧密的物质和能量传递,在实际治理过程中,应视崩岗为一个整体生态系统来进行修复<sup>[29]</sup>。对集水坡面、崩壁、崩积堆等的治理措施进行有机的组合,工程与生物措施并举是治理崩岗的有效手段,但目前对于不同修复措施关键技术参数和配比技术的研究仍较缺乏。

表 1 崩岗不同部位治理技术措施比较

崩岗部位	特点	主要治理措施	治理目的
集水坡面	侵蚀严重、土层裸露	截流排水沟与乔—灌—草—藤等植被措施结合	减少降雨冲刷与入渗量
崩壁	坡度大、不稳定、立地条件差	削坡整地、林草植被覆盖	稳定崩壁、防止进一步崩塌
崩积堆	土质疏松、抗侵蚀能力弱	土地整理、快速植被恢复	固定崩积堆,提高抗侵蚀能力
沟谷和冲积扇	立地条件差、具有一定水分条件	修筑谷坊、谷坊内种植草木	阻止泥沙扩散

## 3 崩岗治理模式

不同的崩岗在发育状况、侵蚀程度、地形、规模等方面有所不同,并且由于所处区域的自然条件、社会发展状况存在差异,因而在进行治理时必须综合考虑地理、环境、经济和社会等因素,依据不同模式来开展治理。

按照崩岗的活动情况(或发育程度)进行治理:①活动剧烈的崩岗进行工程与植物措施并举的强化治理模式,针对集水坡面、崩壁、崩积堆等各个部分实施排水沟、谷坊、挡土墙等工程措施,防治侵蚀泥沙向下游流失,同时配置水土保持林、果木林、经济林等植物措施控制崩岗的继续发展;②半稳定型崩岗以植

物措施为主,工程措施为辅;③稳定型崩岗由于发育活动基本停止,治理主要以预防性为主,多采取禁封、补植补种措施,做到不进行过多人为干扰,发挥生态系统自我修复功能<sup>[34,51-52]</sup>。

按照崩岗形态进行治理:①瓢型崩岗利用其肚大口小的特点,在出口处设置谷坊,并在集水坡和谷底实施适当的工程措施和植物恢复,形成对崩岗的植物围封;②条形崩岗根据其呈长条形特点,采用“上截、下堵”模式,中间开多级护坡或修建多级谷坊的方式,减少侵蚀,逐步稳定崩岗;③弧形崩岗以重力侵蚀为主,需修建护岸固脚工程防止水流冲刷和地下水的淘蚀,在集水坡和崩积堆上营建植被,并对崩壁进行快速绿化;④爪形崩岗一般坡度较为缓和,通常以

植被修复为主或采取封禁结合补植套种等生物修复措施的方式进行治理;⑤混合型崩岗包括 2 种及以上不同类型的崩岗,地形较为破碎,侵蚀量大,在治理过程中需考虑崩岗的整体性,结合工程与生物措施对崩岗各部位进行治理,如在集水坡面建立水土保持林,利用抗干旱、耐贫瘠的草本植物对崩壁进行快速覆盖,对崩积体进行削坡和植物种植,而沟谷和冲积扇则以生物治理为主<sup>[35,45]</sup>。

按崩岗的规模大小进行分别治理:①小型崩岗通常处于发育初期,面积较小且危害性不大,主要采取生物措施为主工程措施为辅的方式,如封禁+小规模治理等生态恢复模式,以防止崩岗规模的进一步扩大;②中型和大型崩岗的发育活动较为剧烈,需以整体性为原则,综合考虑工程和生物措施对崩岗进行治理,在条件允许的情况下可进行一定的开发利用<sup>[53,54]</sup>。

按崩岗的开发类型进行治理:①变崩岗侵蚀区为水保生态区。多针对距离城镇较远,交通不便地区的崩岗治理,通过工程和生物措施形成良好的园区生态环境,并可因地制宜配重珍贵树种,与生态旅游相结合,形成生态旅游园区<sup>[24]</sup>;②变崩岗侵蚀区为经济作物区。对土地形进行削坡整理,种植果树、茶树或其他经济作物。目前,在南方红壤丘陵区崩岗治理过程中常用的经济作物有麻竹<sup>[28,49,55]</sup>、茶叶<sup>[54]</sup>、脐橙<sup>[56]</sup>等,不少地区已实现良好的经济效益,该模式适用于崩岗侵蚀较为集中区;③变崩岗侵蚀区为工业园区。对交通较为便利,位于城镇周边的崩岗集中分布区,对侵蚀区进行机械整平,并配置一定排水、拦沙和道路设施,整理成为工业用地,能够有效解决土地资源紧缺问题<sup>[57]</sup>;④其他开发途径。包括与鱼类养殖等配合形成多种农业复合生产经营区、土地推平后用于农村住宅建设等<sup>[48,58-59]</sup>。

在崩岗治理过程中,经济成本往往是制约修复活动开展的关键因素,结合崩岗的实际情况,以预防为主或开发型的修复方式往往能够较好地降低治理成本,甚至达到良好的经济效益。在治理模式的选择方面应注重因地制宜,追求生态效益和经济效益相统一。总体而言,现有的崩岗治理仍局限于针对特定区域采取相应治理措施,与生产协调发展仍是难点,探索二者相耦合的区域治理模式将是未来相关研究工作的重点<sup>[60]</sup>。

## 4 崩岗治理技术措施存在的问题与展望

### 4.1 存在的问题

目前,人们在崩岗治理方面开展了大量的研究工

作,取得了良好的治理效果,但由于崩岗形成机理的特殊性,现有的崩岗治理技术措施还存在不少问题。本文系统地总结和分析了当前已有的崩岗治理技术措施,认为在以下几个方面有不足之处:①对于不同部位修复措施关键技术参数和组合技术的研究仍较缺乏,相应的水土保持作用机制研究不足;②崩岗治理的新技术应用不足,如新型保水剂等材料的修复效果研究往往单独开展,且未与生物措施有效结合;③现有治理技术多偏重于已成型崩岗的治理,对于可能出现崩岗的区域的预防措施研究和实施较少;④崩岗治理与区域生产发展结合不足,在生态服务功能和经济效益的贡献方面所发挥的作用较为有限。

### 4.2 展望

针对当前崩岗治理过程中存在的不足之处,建议未来的相关工作在如下方面需予重视:①建立崩岗治理效益评价指标体系,对崩岗的修复目标、计划措施和修复效果评价及监管提出具体的要求和原则;②加强低成本、快速、高效的崩岗创新修复技术与应用;③加强崩岗治理技术水土保持作用机理方面的研究,深入研究不同部位修复技术组合以及崩岗发育阶段、侵蚀程度、土壤、地形地貌等因素对修复效果的影响机制;④针对崩岗的侵蚀程度提出适宜的治理体系,并注重构建水土流失治理与农业生产相结合的技术体系;⑤加强崩岗预防措施的研究,结合崩岗发育趋势判断来开展预防治理工作,提高崩岗治理工作的效率。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 曾昭璇,黄少敏. 中国东南部花岗岩地貌与水土流失问题[J]. 广东师院学报:自然科学版,1977(2):46-61.
- [2] 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.
- [3] 龙莉,丁树文,蔡崇法,等. 花岗岩红壤丘陵区崩岗侵蚀对农田的危害及治理[J]. 中国水土保持,2013(12):24-25,26.
- [4] 吴志峰,邓南荣,王继增. 崩岗侵蚀地貌与侵蚀过程[J]. 中国水土保持,1999(4):10-12.
- [5] 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.
- [6] 李万能,金平伟,李岚斌,等. 南方红壤丘陵区崩岗成因机理的研究进展[J]. 亚热带水土保持,2014(3):30-33.
- [7] Chen Jialin, Zhou Man, Lin Jinshi, et al. Comparison of soil physicochemical properties and mineralogical compositions between noncollapsible soils and collapsed gullies [J]. Geoderma,2018,317:56-66.
- [8] Liu Xilin. Characteristics of slope runoff and soil water content in Banggang colluvium under simulated rainfall

- [J]. *Journal of Soils & Sediments*, 2018,18(1):39-48.
- [9] 俞慎,许敬华.南方红壤区崩岗侵蚀治理综合效益评价[J].福建农林大学学报:自然科学版,2016,45(4):361-370.
- [10] 刘洪光,段剑,肖胜生."三位一体"崩岗综合防治模式及其生态效益评价[J].中国水土保持,2018(1):27-30.
- [11] 岳辉,曾河水,陈志彪.河田侵蚀区崩岗的生物治理研究[J].亚热带水土保持,2005,17(1):13-14,28.
- [12] 陈晓安,杨洁,肖胜生,等.崩岗侵蚀分布特征及其成因[J].山地学报,2013,31(6):716-722.
- [13] 熊传祥.降雨作用下崩岗形成细观机理模拟[J].山地学报,2013,31(6):710-715.
- [14] 廖义善,卓慕宁,唐常源,等.崩岗崩积体坡面糙度及其与侵蚀方式的耦合影响研究[J].农业机械学报,2017,48(11):300-306,270.
- [15] 王学强,蔡强国.崩岗及其治理措施的系统分析[J].中国水土保持,2007(7):29-31.
- [16] 王彦华,谢先德,王春云.风化花岗岩崩岗灾害的成因机理[J].山地学报,2000,18(6):496-501.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 林金石,庄雅婷,黄炎和,等.不同剪切方式下崩岗红土层抗剪特征随水分变化规律[J].农业工程学报,2015,31(24):106-110.
- [20] 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.
- [21] 严桥.多种降雨条件下沟坡重力侵蚀过程模型试验[D].辽宁大连:大连理工大学,2013.
- [22] 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.
- [23] 蔡丽平,刘明新,侯晓龙,等.长汀县崩岗侵蚀区不同治理模式植物多样性的比较[J].福建农林大学学报:自然科学版,2012,41(4):524-528.
- [24] 蔡卓杰.基于RS/GIS崩岗调查与评价研究[D].广西南宁:广西师范学院,2016.
- [25] 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.
- [26] 林敬兰,郑锦文.南方红壤区崩岗侵蚀治理研究进展[J].亚热带水土保持,2014(3):34-37.
- [27] 陈晓安.崩岗侵蚀区土壤物理性质分层差异及其对崩岗发育的影响[J].中国水土保持,2015(12):71-72.
- [28] 吴海彪.种植麻竹治理崩岗侵蚀的主要技术措施[J].亚热带水土保持,2001,13(3):24-26.
- [29] 马媛,丁树文,何溢钧,等.崩岗"五位一体"系统性治理措施探讨[J].中国水土保持,2016(4):65-68.
- [30] 李小林.赣南崩岗治理实践与思考[J].中国水土保持,2013(2):32-33.
- [31] 陈志彪,朱鹤健,刘强,等.根溪河小流域的崩岗特征及其治理措施[J].自然灾害学报,2006,15(5):83-88.
- [32] 周红艺,李辉霞.华南活动型崩岗崩壁土体的崩解特性及其影响因素[J].水土保持学报,2017,31(1):74-79.
- [33] 夏栋.南方花岗岩区崩岗崩壁稳定性研究[D].湖北武汉:华中农业大学,2015.
- [34] 陈志明,许永明,李翠玲,等.安溪县崩岗治理模式及实施效果[J].中国水土保持,2007(3):15-17.
- [35] 曾国华,谢金波,李彬彝,等.南方花岗岩区各种崩岗的整治途径[J].中国水土保持,2008(1):16-18.
- [36] 涂樵艳,邓万程,邹文书.崩岗的危害及其综合治理[J].现代农业科技,2014(19):276-277.
- [37] 张汉松,钟鸣辉.南方红壤区不同类型植物篱治理崩岗效益研究[J].湖北水力发电,2013(4):75-78.
- [38] 金平伟,黄俊,李岚斌,等.不同复绿技术模式对崩岗崩壁稳定性影响研究[J].人民珠江,2014(6):26-30.
- [39] 黄俊,金平伟,李岚斌,等.崩壁治理中几种稳定复绿技术对比研究[J].水土保持学报,2016,30(2):175-180.
- [40] 陈锦芬,黄炎和,林金石,等.聚丙烯酰胺在侵蚀崩壁不同层次土壤的吸附特征[J].水土保持学报,2016,30(3):268-272,278.
- [41] 李学增,黄炎和,林金石,等.不同宽度冲刷槽对崩岗崩积体产流产沙的影响[J].农业工程学报,2016,32(9):136-141.
- [42] 程洪,张新全.草本植物根系网固土原理的力学试验探究[J].水土保持通报,2002,22(5):20-23.
- [43] 赵辉,秦百顺,罗建民,等.湖南衡东雨神庙崩岗群的形成规律与生态修复研究[C].贵州贵阳:第二届全国水土保持生态修复学术研讨会论文集,2010.
- [44] 张兆福,黄炎和,林金石,等.PAM特性对花岗岩崩岗崩积体径流及产沙的影响[J].水土保持研究,2014,21(3):1-5.
- [45] 祝亚云,曹龙熹,吴智仁,等.新型W-OH材料对崩积体土壤分离速率的影响[J].土壤学报,2017,54(1):73-80.
- [46] 朱高立,王雪琪,李发志,等.秸秆覆盖对崩积体坡面产流产沙影响的模拟试验[J].土壤,2017,49(3):601-607.
- [47] 朱高立,文博,李静,等.不同雨强和覆盖度条件下崩积体侵蚀泥沙颗粒特征[J].土壤学报,2016,53(6):1371-1379.
- [48] 陈志明.安溪县崩岗侵蚀现状分析与治理研究[D].福建福州:福建农林大学,2007.
- [49] 肖龙,宋月君.崩岗崩积体土壤侵蚀规律研究进展[J].水土保持应用技术,2017(2):38-41.
- [50] 李丽萍.建设麻竹基地治理崩岗技术[J].福建农业,2010(2):36-37.

## [ 参 考 文 献 ]

- [1] 聂弯,于法稳. 农业生态效率研究进展分析[J]. 中国生态农业学报,2017,25(9):1371-1380.
- [2] 崔晓,张屹山. 中国农业环境效率与环境全要素生产率分析[J]. 中国农村经济,2014(8):4-16.
- [3] 吴小庆,徐阳春,陆根法. 农业生态效率评价:以盆栽水稻实验为例[J]. 生态学报,2009,29(5):2481-2488.
- [4] 税伟,陈毅萍,苏正安,等. 基于能值的专业化茶叶种植农业生态系统分析:以福建省安溪县为例[J]. 中国生态农业学报,2016,24(12):1703-1713.
- [5] 钟方雷,杨肖,郭爱君. 基于 LCA 和 DEA 法相结合的干旱区绿洲农业生态经济效率研究:以张掖市制种玉米为例[J]. 生态经济,2017,33(11):122-127.
- [6] 潘丹,应瑞瑶. 中国农业生态效率评价方法与实证:基于非期望产出的 SBM 模型分析[J]. 生态学报,2013,33(12):3837-3845.
- [7] 王迪,王明新,钱中平,等. 基于超效率 SBM 和 BRT 的农业生态文明建设效率分析[J]. 中国农业资源与区划,2017,38(11):94-101.
- [8] 黄娟,刘玥. 三峡库区农业生态效率测度及其影响因素分析[J]. 统计与决策,2018(7):123-127.
- [9] 张子龙,鹿晨昱,陈兴鹏,等. 陇东黄土高原农业生态效率的时空演变分析:以庆阳市为例[J]. 地理科学,2014,34(4):472-478.
- [10] 吴小庆,王亚平,何丽梅,等. 基于 AHP 和 DEA 模型的农业生态效率评价:以无锡市为例[J]. 长江流域资源与环境,2012,21(6):714-719.
- [11] 胡卫卫,于水,马智源,等. 基于 DEA-Malmquist 模型的江苏省农业生态效率时空差异分析[J]. 水土保持通报,2018,38(2):297-302.
- [12] 程翠云,任景明,王如松. 我国农业生态效率的时空差异[J]. 生态学报,2014,34(1):142-148.
- [13] 王宝义,张卫国. 中国农业生态效率测度及时空差异研究[J]. 中国人口·资源与环境,2016,26(6):11-19.
- [14] 郑德凤,郝帅,孙才志. 基于 DEA-ESDA 的农业生态效率评价及时空分异研究[J]. 地理科学,2018,38(3):419-427.
- [15] 洪开荣,陈诚,丰超,等. 农业生态效率的时空差异及影响因素[J]. 华南农业大学学报:社会科学版,2016,15(2):31-41.
- [16] 王宝义,张卫国. 中国农业生态效率的省际差异和影响因素:基于 1996—2015 年 31 个省份的面板数据分析[J]. 中国农村经济,2018(1):46-62.
- [17] Anderson D. Energy efficiency and the economists: The case for a policy based on economic principles[J]. Annual Review of Energy and the Environment, 1995, 20(1):495-511.
- [18] Getis A, Ord J K. The analysis of spatial association by use of distance statistics[J]. Geographical Analysis, 1992,24(3):189-206.
- [19] 刘贤赵,张安定,李嘉竹. 地理学数学方法[M]. 北京:科学出版社,2009.
- [20] 范建刚. 1983—2004 年陕西粮食产量与主要投入要素的灰色关联分析[J]. 干旱地区农业研究,2007,25(3):209-212.
- [51] 黄艳霞. 广西崩岗侵蚀的现、成因及治理模式[J]. 中国水土保持,2007(2):3-4.
- [52] 谢炎敏. 福建省长汀县崩岗生物治理模式的生态环境效应分析[J]. 亚热带水土保持,2017,29(2):13-15,34.
- [53] 李旭义,查轩,刘先尧. 南方红壤区崩岗侵蚀治理模式探讨[J]. 太原师范学院学报:自然科学版,2008,7(3):106-110.
- [54] 肖胜生,杨洁,方少文,等. 南方红壤丘陵区崩岗不同防治模式探讨[J]. 长江科学院院报,2014,31(1):18-22.
- [55] 黄生裕,刘星塔. 麻竹治理崩岗(沟)的栽培技术[J]. 中国水土保持,1995(12):22-23.
- [56] 白俞,熊平生,谢世友. 赣南红壤崩岗侵蚀区生态退化及其修复研究[J]. 热带地理,1997,17(4):405-411.
- [57] 吕联合. 福建省泉州市崩岗侵蚀现状及防治成效[J]. 亚热带水土保持,2011,23(4):47-49.
- [58] 吴菲,李典云,夏栋,等. 中国南方花岗岩崩岗综合治理模式研究[J]. 湖北农业科学,2016(16):4081-4084,4106.
- [59] 陈志彪,陈志强,杨满根. 南方红壤水土流失治理技术示范[J]. 中国科技成果,2016(20):80-81.
- [60] 史志华,杨洁,李忠武,等. 南方红壤低山丘陵区水土流失综合治理[J]. 水土保持学报,2018,32(1):6-9.

(上接第 253 页)