

DOI: 10.11766/trxb202312120526

CSTR: 32215.14.trxb202312120526

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 Yusong, CAI Chongfa. Progress of Survey and Monitoring and Control Technology of Benggang Erosion in Red Soil Hilly Area[J]. Acta Pedologica Sinica, 2025, 62 (2): 322–333.

红壤丘陵区崩岗侵蚀调查与监测防治技术进展^{*}

邓羽松¹, 蔡崇法^{2†}

(1. 广西大学林学院, 南宁 530004; 2. 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070)

摘 要: 崩岗是我国南方红壤丘陵区特有的土壤侵蚀地貌, 由水力和重力共同作用形成。崩岗侵蚀破坏土地资源, 影响农业生产, 严重阻碍社会经济的可持续发展。崩岗侵蚀调查旨在明确区域水土流失现状, 掌握崩岗的基本信息, 有利于科学制定南方红壤丘陵区水土保持措施。本文聚焦崩岗调查方法, 从发生区域、组成要素介绍崩岗调查的方法, 并结合崩岗侵蚀的影响因素阐述调查内容, 在此基础上梳理崩岗监测技术、风险评估方法及防治措施。探明崩岗侵蚀研究方法和技术对土壤侵蚀防治具有重要意义, 也可类似侵蚀地貌的研究提供样本和理论依据。

关键词: 崩岗侵蚀; 调查方法; 监测技术; 治理措施

中图分类号: S157.1 文献标志码: A

Progress of Survey, Monitoring, and Control Technology of Benggang Erosion in Red Soil Hilly Area

DENG Yusong¹, CAI Chongfa^{2†}

(1. Forestry College of Guangxi University, Nanning 530004, China; 2. College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: Benggang is a unique type of soil erosion in the south of China, which refers to the erosion phenomenon of collapse and scouring of the hillside damaged by the combined action of hydraulic force and gravity. Benggang erosion is an advanced stage of gully development and is a permanent gully that cannot be filled in by farming practices. Benggang mainly occurs in the southern granite hill region which is mostly agricultural production, and its harmful effects are serious, destroying land resources, affecting agricultural production, and seriously impeding the coordinated and sustainable socio-economic development. Due to the complexity of the factors involved in the formation of Benggang, the knowledge of the mechanism and the management measures are still being explored. The objective of this study was to identify the current status of soil erosion in the region by outlining the survey methods of Benggang erosion, to obtain basic information on Benggang erosion, and to provide a scientific and theoretical basis for the development of soil and water conservation measures. Specifically, this study detailed the methodology, content, and purpose of individual Benggang surveys, and through this process grasped the basic characteristics of

^{*} 国家自然科学基金项目 (42007055) 和广西自然科学基金项目 (2021GXNSFBA075017) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 42007055) and the Guangxi Natural Science Foundation Project (No. 2021GXNSFBA075017)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: cfcai@mail.hzau.edu.cn

作者简介: 邓羽松 (1988-), 男, 广西桂林人, 副教授, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀与修复生态研究。E-mail: denny2018@gxu.edu.cn

收稿日期: 2023–12–12; 收到修改稿日期: 2024–03–21; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2024–05–13

Benggang erosion. Subsequently, the methodology of investigating the regional influencing factors of the Benggang was introduced, which mainly includes the main influencing factors of the Benggang, such as geological geomorphology, climatic conditions, soil parent material, vegetation, and anthropogenic activities. Based on the investigation, this study also compiles the monitoring techniques of the Benggang used in recent years, combining the traditional manual methods with emerging technologies to truly and efficiently grasp the distribution characteristics, influencing factors and erosion development trend. Then, the research progress on the risk assessment and prediction methods of Benggang was reviewed to objectively assess the losses or impacts caused by Benggang disasters and to explore preventive and control measures. Finally, existing measures and models for the prevention and control of Benggang are discussed based on the survey of basic information on Benggang, field monitoring methods and risk assessment and prediction studies. Our investigation shed light on the current situation of erosion and the prediction of the development trend of Benggang, which is of great significance to the prevention and control of erosion in the Benggang region in China. The contents of the review in this study also assist in providing a basis for methods of investigation in the same erosion types, which can be generalized to the research of soil erosion in regions with similar geomorphology.

Key words: Benggang erosion; Survey methods; Monitoring techniques; Management measures

南方红壤丘陵区气候高温多雨、农业活动频繁、土壤侵蚀类型复杂,是我国水土流失严重的区域之一^[1]。崩岗是红壤区一种特殊的土壤侵蚀地貌,是指在水力和重力共同作用下,山坡土体受破坏而崩塌和冲刷的侵蚀现象^[2-3](图1),可由一定流域面积的沟谷侵蚀发育至高级阶段形成^[4]。完整的崩岗系统组成包括上方的集水区、后缘的崩壁、中部的崩积堆、下部的沟道和沉积区五个基本单元^[5-7],但针对崩岗发生区域的自然地理要素和人为干扰不同,其组成部分或残存的地貌有所差异。崩岗侵蚀多发生于农业生产区,影响耕地面积高达 38.04 万 hm^2 ,导致区域粮食产量显著减少,土壤退化严重,农田恢复和整理的费用高达 5.5 亿元。崩岗侵蚀模数高达 $3\sim 5\text{ 万 t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,远超过南方 $500\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 的容许土壤流失量,严重阻碍生态文明建设和社会经济可持续发展,被形象地称为“生态溃疡”,引起了社

会各界的高度重视^[8-10]。2009 年,我国制定《水土保持综合治理技术规范-崩岗治理技术》的统一标准,重点介绍崩岗的防治技术;2023 年,中共中央办公厅国务院办公厅印发《关于加强新时代水土保持工作的意见》提到“积极推进南方丘陵山地带崩岗综合治理,保护和合理利用水土资源。”系列文件突出崩岗侵蚀的潜在危害及治理紧迫性,但由于崩岗形成因素错综复杂,对崩岗侵蚀的机理认知和防治措施仍在不断探索。

崩岗侵蚀历史久远,迫于农业生产,群众自发组织治理崩岗。继 1960 年曾昭璇^[2]提出“崩岗”、姚庆元和钟五常^[11]1966 年发表关于崩岗治理的学术论文后,崩岗研究开始得到相关领域学者的关注。Xu^[6]探讨了崩岗发育的影响因素,首次将崩岗研究成果推向国际。目前大部分报道聚焦于崩岗分布特征、侵蚀机理、崩积体二次侵蚀和治理技术等方面



注：左图拍摄于广东梅州市，右图拍摄于广西梧州市（图片来源：邓羽松 摄）。Note: The left photo was taken in Meizhou City, Guangdong, and the right picture was taken in Wuzhou City, Guangxi Province (Photo source: Deng Yusong)。

图1 红壤丘陵区典型崩岗地貌

Fig. 1 Typical landform of Benggang in the red soil hilly area

的研究^[6-7, 9, 12-13], 有关崩岗调查方法的报道较少。崩岗调查目的在于摸清崩岗的类型、分布现状及侵蚀规律, 是进行崩岗防治的关键环节。1994 年, 牛德奎^[14]最早提出了调查崩岗侵蚀的方法, 重点对崩岗侵蚀的影响因子进行调查。2004 年, 水利部启动了《南方花岗岩地区崩岗防治规划》的编制及调研工作, 对南方粤、赣、桂、闽、湘、鄂、皖 7 省(区)崩岗侵蚀分布现状进行全面摸底调查, 为科学编制崩岗防治规划提供了数据支撑。然而, 由于普查过程任务量较大, 缺乏崩岗个体与区域环境因素的详查, 导致对崩岗发育过程与演变规律了解不足。

近年来, 新技术逐渐被应用于崩岗调查, 例如遥感、无人机、激光扫描等技术, 为获取大范围、高精度的崩岗信息提供了保障^[15-17]。传统人工调查与新技术调查相结合, 可精确、高效掌握崩岗侵蚀的分布特征、影响因素及侵蚀发展趋势。本文在提出崩岗调查方法的基础上, 对其监测技术和防治措施进行系统梳理, 有助于进一步认识崩岗分布规律、影响因素及发育过程, 为制定崩岗的防治规划提供科学依据。

1 个体崩岗详查

1.1 基本情况调查

崩岗基本情况调查是为了掌握某地区崩岗分布的空间位置、数量面积、侵蚀体积、土壤类型、分布规模、外观形态和活动类型等信息。空间位置采用 GPS 进行测量, 并记录崩岗发生的行政地界, 如市县、乡镇、村落等; 数量面积采用影像及野外实测的方法确定(面积小于 60 m² 的崩岗可不计入); 侵蚀体积即崩岗土壤侵蚀量, 传统的方法包括断面量测法, 选择崩岗体有代表性的位置, 设置量测断面, 通过测距仪或皮尺测量断面深度和宽度估算侵蚀体积, 近年随着立体摄影测量与无人机技术发展, 数字航空摄影测量(DAP)^[18]和三维激光扫描^[19]已被广泛应用于生成多时相数字高程模型(DEM), 并建立相应的算法来模拟崩岗侵蚀过程^[15, 20-21], 结合野外实地详查植被情况, 对获取影像进行对比加之人工处理获取精确的样地崩岗分布信息, 体积信息获取更高效; 土壤类型按照国家统一分类标准划分, 采用现场勘测或底图叠加的方法调查; 崩岗外观形态划分

为 5 种类型: 瓢形崩岗、条形崩岗、弧形崩岗、爪形崩岗和混合型崩岗, 可通过现场识别, 其中混合型崩岗是指由其他两种或两种以上类型复合而成(图 2); 崩岗活动类型可划分为 2 种: 活动型崩岗与相对稳定型崩岗。活动型崩岗崩塌仍在继续, 崩岗处于活跃状态, 新土出露; 而稳定型崩岗崩壁和崩积堆植被覆盖率较高, 崩岗处于相对稳定状态, 较少新土出露^[8, 22-23]。

1.2 崩岗组成单元调查

(1) 集水坡面。集水坡面汇流是崩岗侵蚀的水动力来源^[24-25], 调查集水坡面特征有利于评估崩岗的活动状态与侵蚀程度, 调查内容可为减少地面径流冲刷, 削弱崩岗沟头跌水强度的防治措施制定提供依据。调查内容包括: 面积、坡度、坡长、坡形、坡向、侵蚀类型、植被种类及覆盖度、土壤裂隙。集水坡面面积反映降雨后的汇水量和潜在侵蚀量, 采用野外高精度 RTK-GPS 或无人机获取高清影像均可精确测量其信息; 坡度、坡长、坡形则反映集水坡面侵蚀动力特征, 相关信息可通过坡度仪、拉皮尺、激光测距仪等现场勘测的方法测定, 也可借助影像通过计算机解析获取; 阴面和阳面的坡向可判断水热条件, 阳面干湿循环频率、热量交换高于阴坡, 可改变土壤胀缩、孔隙特征, 进而决定集水坡面的土壤侵蚀强度, 野外采用地质罗盘仪或通过影像解析获取坡向; 集水坡面的侵蚀类型可通过现场记录和判断, 并通过观测溅蚀、面蚀和沟蚀等侵蚀类型反映集水坡面的侵蚀规模; 植被种类和覆盖度在一定程度上阻控集水坡面水土流失, 植被种类通过设定样方采样或现场判断, 植被覆盖度借助遥感影像获取; 土壤裂隙贯穿于土体内部, 破坏土壤结构, 可加速土壤优先流发生, 降低土壤抗剪强度, 调查裂隙大小和长度可明确土体胀缩特性, 可用 CT 扫描或数字摄影结合图像分析技术获取裂隙参数。

(2) 崩壁。崩壁是崩岗发育最活跃的部位, 崩壁出露的剖面反映母岩风化壳的土层特性, 对崩壁的详查重点在于评估崩岗溯源侵蚀的易发性, 调查内容包括: 高度、宽度、后沿线距分水岭距离、倾角、植被种类和覆盖度、土体构型、龛穴数量和面积、裂隙、新鲜崩塌断面等。崩壁高度和宽度分别指崩岗后缘纵向深度和横向侵蚀距离, 表征侵蚀强度, 高度为重力侵蚀提供势能, 后沿线距分水

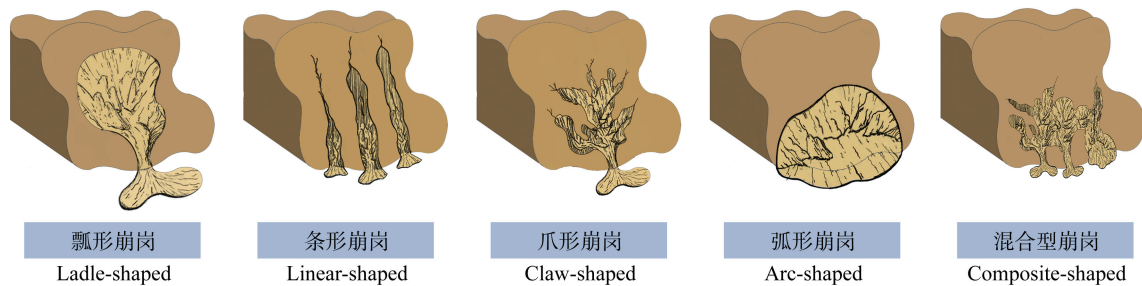


图2 红壤丘陵区不同形态的崩岗侵蚀地貌

Fig. 2 Different forms of Benggang erosion landforms in the red soil hilly area

岭距离表征崩岗发展的潜力和速率，三个指标均可采用测距仪、皮尺等现场测量或借助数字地形提取；崩壁倾角受到土体构型和岩体裂隙面的影响，壤中水动力和重力崩塌形成不同的角度，一般为 $60^{\circ} \sim 90^{\circ}$ ，有时可能 $>90^{\circ}$ ，崩壁高度增加时，倾角越大，岩土稳定性越低，倾角可通过坡度仪或罗盘仪直接测量；活动型崩岗的崩壁干湿交替频繁，缺乏水肥，鲜有植被覆盖，封禁恢复过程或出现芒萁、芒草等植被生长，可直接调查记录相关信息；崩壁出露的土体表明表层土的侵蚀程度和纵向的侵蚀深度，完整土体构型为“表土层-红土层-砂土层”，常见的还包括缺表土层、缺表土和红土层的构型，可目视可判断；龛穴是崩壁出现的内凹的现象，笔者认为龛穴小地形可诱发崩壁失稳和崩塌^[26-27]，可以用龛穴长、宽、深定量表达其发育程度，数量越多，面积越大，岩土稳定性越低；崩壁表面普遍发育裂隙，扩张和拉张裂缝直接导致边坡失稳，降雨过程加速优先流的形成和发育，是崩壁调查的重要指标^[28-29]；新鲜崩塌断面痕迹明显，可通过观察判断崩岗活跃程度。

(3) 崩积堆。崩积堆由崩壁崩塌的岩土体和原始坡面冲刷的侵蚀物质堆积形成，崩积物结构疏松，易遭受雨滴击溅、地表流水冲刷及泻溜作用发生二次侵蚀^[30]。崩积堆的详查可评估崩岗发育阶段和侵蚀泥沙输移潜力。调查内容包括：堆体数量、堆体高度、堆体坡度、堆体长度、堆体顶部距沟沿线距离、新旧土、植被种类及覆盖度、侵蚀类型和数量等。堆体高度、坡度和距沟沿线距离一方面说明崩积体的边坡稳定性，另一方面反映其依附崩壁的位置，某种程度上降低了崩壁侵蚀基准面，堆体高度可由长度和坡度通过三角函数计算获取。新旧土出露和植被覆盖度可表征崩壁是否正在发育，如堆积

体表面逐渐形成生物结皮，植被覆盖度增加，表明崩积堆逐渐趋于稳定，输沙过程逐渐减弱。侵蚀类型和数量直接体现崩积堆的输沙能力，崩积堆普遍具有二次侵蚀，侵蚀类型包括溅蚀、细沟侵蚀、浅沟侵蚀，甚至切沟侵蚀，挟沙能力逐渐增加，通过崩积堆现场详查，结合无人机、相机等方式，解译面蚀和沟蚀面积和数量，可评估崩岗对下游的影响和危害性。

(4) 沟道。沟道是崩岗侵蚀过程泥沙输移的流通段，由于自然因素和人为干扰，并非所有崩岗均具有典型沟道，如弧形崩岗沟道常因岩土体剧烈崩塌被掩埋。沟道的详查可表征侵蚀物质输移的速率和崩岗的活跃程度^[22]。调查内容包括：主沟长度、沟口宽度、主沟平均深度、主沟走向、支沟数量、支沟长度、支沟宽度、支沟深度、支沟走向、沟道泥沙状况、粒径分布、植被种类及覆盖度等。主沟和支沟的长、宽、深均可反映崩岗侵蚀强度，沟道走向表征了崩岗的溯源侵蚀方向和水热条件，均可通过现场测量，或数字地形的提取获得信息；沟道泥沙状况和粒径分布可间接表明崩岗的发育程度，细颗粒含量较高说明崩岗侵蚀处于活跃阶段，粗颗粒含量较高则表征崩岗侵蚀趋于稳定^[14]；沟道若覆盖大量植被，表明沟道水分和肥力状况处于恢复的过程，可进行土地利用规划。

(5) 沉积区。沉积区是崩岗系统的边缘部位，又被称为洪（冲）积扇，未经干扰的沉积区为扇形地貌，弧形崩岗或经过人为干扰的沉积区没有明显地貌特征。下游洪积物造成的具有突发性的环境破坏是崩岗的主要危害，洪积物冲毁建筑设施，冲压农林生产用地，淤积河床，严重影响社会生活、农业生产、江河库塘功能。沉积区调查内容包括：面积、形态、粒径分布、沙化状况、土地利用、植被

种类及覆盖度、洪积扇土壤剖面等。沉积区面积详查可评估崩岗侵蚀对下游农业的影响程度,通过现场调查勾画沉积轮廓明确其形态;对比沉积区不同部位土壤性质,可评估沉积区沙化程度;通过对沉积区耕地、林地或其他土地利用方式调查,可为沉积区的治理提供理论依据;沉积区的植被状况可表明水热、养分与恢复现状,调查方法与上述一致;洪积扇沉积大量侵蚀物质,其剖面特征可反映不同时期的沉积过程,有助于建立侵蚀产沙与时间序列、降雨过程的响应关系,调查过程中可利用卷尺测量结合相机记录不同层次特征。

2 区域影响因素调查

2.1 气候

气候是崩岗侵蚀发生和发育的直接驱动力,降雨和温度是最主要的气候因子^[31-32]。降雨形成的径流和壤中流是崩岗侵蚀的外营力,暴雨可使崩岗的表土水分达到饱和状态,且短时间内水分无法向深处渗透,导致崩岗土体的稠度、强度发生巨变,坡面失稳^[33-34];土体经雨水入渗后,自身重量增加,黏结力、土体的抗剪强度降低,入渗的水还会发生化学溶蚀导致裂隙面扩张,土层结构因土体中细土颗粒受潜蚀作用而受损,导致上部的土体失稳,加速崩岗的发育^[35-36]。温度则影响岩土母质的风化过程,水分和温度交互作用形成干湿交替,作用于土壤,加速母质的风化和裂隙的产生,为重力侵蚀提供基础。因此,选择典型崩岗侵蚀区,详查气候因子,有利于进一步认识两者之间的密切联系。调查内容包括:年平均降雨量、月平均降雨量、最大连续降雨量、年平均气温、最高气温持续时长、月最高气温和最低气温等。调查方法可通过收集统计资料、图册获取历史数据,近年气象材料可通过网上数据平台下载,综合叠加分析,明确气候与崩岗参数的量化关系,有利于科学精准布设防控措施。

2.2 地质地貌

地壳运动形成丘陵和山地是崩岗侵蚀发生的内营力,与崩岗广泛发育有密切联系^[37-38]。地质地貌的调查内容包括:大地构造运动作用、岩石类型与分布、构造节理的走向、倾向和倾角、地貌类型及海拔、坡长、坡形、坡度、坡向、相对高差等地形

条件。相关调查采用野外测量和文献分析相结合的方法。研究大地构造运动可有效分析构造断裂等作用对崩岗地势走向的影响,通过查阅地质志和文献收集地质构造及岩石特征等基本资料,来判断风化壳的出露时期。节理要素采用罗盘仪进行测量。丘陵山地的相对高差影响地下的垂直循环活动,相对高差越大,重力侵蚀发生的可能越大。海拔采用定位系统测量,坡度和坡向采用坡度仪结合罗盘仪测量,坡长采用激光测距仪测量,相对高差根据坡长和坡度通过三角函数计算获得。丘陵区风化壳厚度较大,是开垦和采伐的重点区域,坡向朝南具有利于崩岗发育的水热条件,更容易发生侵蚀,局部小地形条件能影响崩岗的空间分布。崩岗分布格局以及岩石结构能反映对崩岗区风化壳特性的影响,节理构造能影响岩土体稳定性,也在一定程度上影响着崩岗发育强度。而海拔、坡长、坡度及坡向等局部小地形条件能影响崩岗的空间分布^[1]。调查崩岗侵蚀区分布格局的关系以及对崩岗侵蚀发育的影响,有利于揭示崩岗分布的地域性规律和发育过程的内在机制。

2.3 土壤和母质

崩岗侵蚀与岩土力学性质有着密切的联系,土壤入渗特性和颗粒组成影响着土壤岩土力学性质和物理性质,是决定崩岗发育的根本性物质因素^[39]。因此,探明成土母质和土壤特性对崩岗的研究和防治具有重要意义。在热带和亚热带气候条件下,母岩经风化剥蚀形成的土层疏松深厚,为崩岗侵蚀和水土流失的发生提供基础条件。尤其在南方红壤丘陵区,地表物质的主要成分是经风化的花岗岩类物质,主要由石英、长石、云母组成,风化后砂质含量高,抗蚀性弱,风化壳疏松深厚,是崩岗侵蚀在该区域泛滥的物质基础和内在原因^[40-41],即崩岗土体的状态、厚度、内部结构、物理性质及化学成分等特性及差异,直接影响了花岗岩在侵蚀和抗侵蚀过程中的作用。此外,红层沉积物、第四纪冲积物等多种母质区域也存在崩岗侵蚀。因此,调查内容包括:成土母岩、土体状态和粒径组成、物理化学特性以及土力学性质等。调查通过较大范围的野外考察和室内试验测试分析进行,必要时,需钻孔观测风化壳厚度和风化状况,并通过测斜仪观测潜在崩塌风险。相关调查有助于宏观尺度上了解崩岗侵蚀的岩土类型与分布规律,通过典型试验区土壤物

理特性的测试分析结果,能较全面地认识崩岗侵蚀作用对象的基本特征。

2.4 植被

植被在防治水土流失方面发挥至关重要的作用,崩岗区的植被遭到扰动后,加速面蚀和沟蚀的形成^[6]。因此,植被不仅能够保护土壤免受降雨的击溅作用,还能有效地遏止坡面径流的发生和扩大。植被的落叶、枯枝等凋落物质不仅为土壤提供了有机物质,还可提高土壤的抗侵蚀能力。崩岗侵蚀区大多集中在人类活动的聚居地,坡面植被稀少,崩岗发育强烈。崩岗侵蚀的治理及控制,在很大程度上有赖于植被的恢复。调查采用野外识别植物种类和样方调查相结合的方法。调查内容主要包括:植被种类和数量、植被覆盖度、植被退化情况、优势植被、植被在不同坡向的发育情况、不同植物种的组合规律等。该部分调查能判断崩岗的发育阶段,确定崩岗的侵蚀状况和程度,认识崩岗侵蚀区植被种类及其组合特性,以便为今后防治措施的草种筛选提供参考。

2.5 水系和地下水

水系的发育状况是导致各级水系崩岗发育程度不同的内在因素,崩岗发育的部位与发育程度受水系溯源侵蚀的发育过程和地下水潜蚀、流沙、管涌的影响^[42]。地下水是引发地质灾害最为活跃、最为普遍的因素,是各类地质灾害发生的关键^[43]。地下水系复杂多变的区域,其崩岗侵蚀程度也越严重^[44]。土体含水量受水系和地下水潜蚀影响,降雨之前土体中的含水量决定着当前降雨的湿润前锋深度是否到达土体失稳的临界深度。因此,调查崩岗多发区的水系和地下水情况对崩岗的溯源侵蚀以及防治具有重要意义。调查内容为水系分布以及分级、地下水分布等。常用遥感获取水系分布并根据水系大小对其进行分级;地下水分布情况则利用“浅层地温测量”方法^[45]获取,即利用流动地下水脉对正常地层温度的影响而在地层中引起的异常温度场,通过在勘察区分布一定深度、密度的浅层钻孔,采用高精度的温度计测量该深度处各点的地温,绘制等温线图,从而反演出流动地下水脉的路径分布^[46]。该方法简单高效、受地形影响小。

2.6 人为活动

人为活动是崩岗侵蚀启动和发育的关键因素^[41],村庄稠密、人口集中、交通便利的盆(谷)地边缘的低山丘陵中多分布崩岗,而人烟稀少、交通闭塞

的边远山区则相反。人类乱砍滥伐破坏了原有的植被致使地表大量裸露、径流加剧、切沟加深,使崩岗的数量和面积日益增大,加之生产实践中开发建设、顺坡耕作、采沙取土等生产活动缺乏水土保持措施,导致地面径流长期冲刷与下切导致崩岗侵蚀泛滥。对山坡土体的扰动和破坏是人类活动促进崩岗侵蚀发生的表现,可划分为坡面扰动和坡脚扰动两种形式。坡面扰动的主要方式包括森林砍伐、地表草地破坏和土地开发不当等,导致崩岗坡体的植被覆盖率降低,土壤抗侵蚀能力下降,在降雨条件下径流作用更加强烈,从而增加崩岗侵蚀发育的可能;坡脚扰动的形式包括土石资源的开采、交通与工业建设和不合理的土地利用方式等,不合理的土地利用会导致土壤质量下降、促进土壤侵蚀,造成生态系统服务功能和土地生产力下降等不良影响^[47]。对人为活动的调查内容可包括:对崩岗不同部位的影响、坡面坡脚土地的利用方式类型,如农业用地、林地、湿地、草地及其受到崩岗侵蚀的影响程度等。人为活动通过收集各崩岗样区的历史资料和文献资料整理进行分析,坡脚的人为土地利用方式基于花岗岩红壤崩岗侵蚀区多期土地利用数据,结合遥感、航片等技术进行野外调查。人为活动调查有助于探清崩岗发生和发育的因素,为崩岗相关问题提出初步的解决方案,有利于规划农林牧等产业用地,为防治崩岗侵蚀、改良崩岗劣地提供理论依据。

3 崩岗监测技术与评价

3.1 崩岗监测技术

崩岗侵蚀加剧水土流失,破坏农业生产,引发系列社会问题。因此,崩岗侵蚀监测已经成为当前水土保持工作的重要任务^[48]。通过监测,可了解崩岗的侵蚀现状,明确崩岗侵蚀的影响因素,为崩岗侵蚀的机理研究和防治措施提供科学依据。传统的崩岗监测方法主要采用人工监测,如观测崩壁后退量的插签法(侵蚀针法)、计算土壤流失量的卡口站法,这些方法观测周期长,耗费大量的人力、物力和财力,且只能针对小范围或单个崩岗进行监测,对大范围的崩岗进行定时定量监测较为困难^[49]。

近年来,为了避免传统监测方法的繁琐步骤,相关学者基于崩岗复杂的地形,对崩岗监测技术开

展研究。林金石等^[50]利用组合指纹法研究了崩岗侵蚀产沙来源。谢颂华等^[51]运用 GPS RTD 技术对江西省崩岗侵蚀现状进行调查,获取区域内不同类型、不同规模崩岗的分布情况,同时包括各崩岗的空间位置,相比于传统的 GPS 精度,该方法的精度更高。张大林和刘希林^[52]应用三维激光扫描仪,对崩岗进行侵蚀监测,获取崩岗的侵蚀量、形态等详细信息,该方法精准度较高。沈盛或等^[16]和江学顶等^[17]尝试采用小型无人机对典型崩岗进行调查,通过室内生成 DOM、DSM 和三维模型,以及结合虚拟三维模型和人机交互判读的方法完成崩岗调查工作。该方法时效性高、操作安全方便、成本低、野外工作强度较小。然而,无人机难以识别植被遮挡的崩岗。张铁洋等^[53]采用 CORS-RTK 动态测量的方法对典型崩岗分布的小流域进行全面调查,分别沿崩岗内壁、环绕崩壁和集水区采集数据,获得崩岗形状信息,再通过整个流域的基本状况进行测量,得到的高精度变化数据导入 ArcGIS 得到崩岗面积变化值及崩壁后退量等参数,但工作强度太大。此外,黄于同等^[54]提出的崩岗信息咨询系统将崩岗信息与 Web GIS 技术进行结合,能在崩岗治理中为水土保持技术人员提供咨询服务,促进了崩岗知识的普及。

根据目前的监测技术,对于单个崩岗的监测,人工监测可满足基本信息的获取,针对获取地形信息及数字信息,可使用 RTK (Real-time kinematic) 测量法或三维激光扫描仪法,但对于区域性崩岗的调查及信息的获取而言,目前的方法存在局限性,人力、物力、时间、资金成本等均较高,且获取的数据有限。利用遥感、无人机等方法调查结合人工实地调查法,无论是针对单个崩岗还是大范围崩岗,理论上均具有适用性。

3.2 崩岗风险评价

广义的崩岗侵蚀风险指某一特定区域和时段发生崩岗侵蚀及造成危害的可能性,包括发生风险和危害风险^[55]。崩岗风险评估可以客观地评估崩岗灾害带来的损失或影响,对于减轻崩岗危害、保护土地资源,探寻防治措施具有重要意义^[56]。崩岗风险评价即在调查的基础上界定各调查要素的临界数值,并赋予权重和建立数学模型,以此为界限预测崩岗侵蚀的发生和进一步发育的可能性。

近年来,相关学者基于地质地貌、气候、土壤母质、植被和人类活动等主要影响因素,借助土壤侵蚀模型、从统计分析角度及运用 GIS 数据提取与空间叠加等方法对崩岗危害性开展风险评估工作。相关研究根据影响因子的重要程度,通过赋予因子不同权重,根据因子加权或加权平均风险值大小来判断区域侵蚀风险,提出土壤侵蚀危险性评价的可行性模型^[57]。风险评估均建立在调查之上,包括风险评估的主要因子确定及调查方法,如通过 ArcGIS 的空间叠加分析及 SPSS 数据处理等调查方法提取侵蚀区域地形地貌、水系、降雨等评价因子,分析评价因子与崩岗侵蚀的空间分布关系,最后利用崩岗与这些因子的分布特征关系,对崩岗空间分布进行模拟预测^[58]。利用调查的各影响因子的关联,结合科技和数学知识建立信息模型也是风险评价常用的方式,如以河网缓冲距离、海拔、相对高差、坡度、坡向、土壤类型、植被覆盖度以及土地利用类型作为崩岗的主要影响因子,借助信息量模型构建^[59]崩岗风险评估体系或基于崩岗侵蚀发生的风险理念,对信息量法和 Logistic 回归分析法两种评估方法进行对比分析,比较它们在具体指标计算的应用,以及采用不同环境因子联接方法对崩岗侵蚀易发性进行评价^[60-61]。此外,还可参照生态环境、地质灾害等风险评估流程,拟定了崩岗侵蚀风险评估方法,提出了崩岗侵蚀风险评估指标体系和程序,程冬兵^[55]采用双变量熵信息法论证了该崩岗评估方法在区域尺度上适用性、实用性及可操作性。其次,也可将评价生态系统稳定性的指标结合调查的影响因素进行风险评价,如基于生态位适宜度模型,对崩岗发生敏感性进行评价,实现对崩岗发生敏感性的评估和分级^[62]。

4 崩岗治理措施

崩岗调查与监测,最终目标服务于崩岗侵蚀预防和治理。近年来,崩岗侵蚀区的水土保持工作受到广泛关注,学者们针对崩岗治理措施开展研究并取得一定的成效^[63-68]。目前,崩岗治理措施已经发展为以“上截、中削、下堵、内外绿化”为原则和“五位一体”为治理体系的综合治理模式,《南方红壤丘陵区水土流失综合治理技术标准》中提出崩岗防治

应采取预防保护与综合治理并重的方针。

崩岗系统的五个部分之间保持能量和物质流动,联系密切。崩岗侵蚀的治理中,应将崩岗作为一个整体系统,通过结合生物措施和工程措施,针对每个部位的特点进行治理,切断崩岗各个要素之间的联系,即可达到综合治理崩岗的效果^[65]。对于集水坡面,可种植乔、灌、草水土保持林,修建截水沟、鱼鳞坑、水平沟等措施,能有效减短径流流程、拦截坡面径流,减缓崩岗发育;对于崩壁,可适当种植沟边防护林,采取打穴、坡改梯、崩壁小台阶等坡面治理工程,达到降坡稳坡的目的,防止崩壁的重力崩塌。崩积堆的治理应与崩壁治理相结合,可依据当地情况修筑成台地或开挖山边沟,为生物措施的布设提供条件。对于沟道,可采取谷坊、拦沙坝等工程措施,或种植竹类植物,视情况开发用地,抬高侵蚀基准面,拦蓄侵蚀泥沙,为植被恢复提供条件。对于沉积区,可采取固沙工程,拦蓄崩岗群排出的泥沙,阻止泥沙流出崩岗系统。然而,崩岗侵蚀目前仍然发育,二次侵蚀并发,已有治理措施需要进一步完善。

此外,崩岗治理模式不断发展和创新,从单一的治理变成“1+1”或“1+多”的经济综合治理模式,从聚焦侵蚀劣地和经济生产转变为重视生态、经济和社会效益;从以地块治理为主转变为以区域预防为主;从强调现状治理转变为关注可持续发展,并提升至生态文明建设的层面。冯舒悦等^[66]根据崩岗发育的初期、盛期到稳定期,分别针对性地提出了生态防护型、产业经济型、修复完善型三种综合治理模式。综合治理模式在水土保持领域取得显著成效,能有效提高土地利用率和产出率,增加工业用地面积,带来显著的生态、经济以及社会效益,推进南方红壤区的生态保护与修复^[67-68]。在崩岗的治理中,应综合评估防治工程的效益,需要根据崩岗的发育阶段、侵蚀程度、具体的立地环境等条件合理安排综合防治措施,选择较好、较优的治理模式,以便在有共性的崩岗侵蚀中推广应用。

5 结 语

崩岗调查是监测和防治的初步手段和关键过程。本文从崩岗调查方法入手,从崩岗的基本情况、组成要素介绍崩岗个体调查的内容、目的和方法,

并从崩岗的气候条件、地质地貌、土壤母质、植被、人为活动等主要影响因素介绍了崩岗区域调查的内容,便于了解崩岗侵蚀现状并预测崩岗的发展趋势。通过综述近年来崩岗的监测技术、风险评估方法以及防治措施,为更有针对性治理崩岗提供思路,对具有类似地貌的土壤侵蚀防治有重要意义。

参考文献 (References)

- [1] Shi Z H, Yan F L, Li L, et al. Interrill erosion from disturbed and undisturbed samples in relation to topsoil aggregate stability in red soils from subtropical China[J]. *Catena*, 2010, 81 (3): 240—248.
- [2] Zeng Z X. Principles of Topography (Vol.1) [M]. Guangzhou: South China Normal University, 1960. [曾昭璇. 地形学原理(第一册) [M]. 广州: 华南师范学院, 1960.]
- [3] 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. [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.]
- [4] Ruan F S. Study on slump gully erosion and its control in Fujian Province[J]. *Journal of Mountain Research*, 2003, 21 (6): 675—680. [阮伏水. 福建省崩岗侵蚀与治理模式探讨[J]. *山地学报*, 2003, 21 (6): 675—680.]
- [5] Xia D, Deng Y S, Wang S L, et al. Fractal features of soil particle-size distribution of different weathering profiles of the collapsing gullies in the hilly granitic region, South China[J]. *Natural Hazards*, 2015, 79 (1): 455—478.
- [6] Xu J X. Benggang erosion: The influencing factors[J]. *Catena*, 1996, 27 (3/4): 249—263.
- [7] 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.
- [8] 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, 75. [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.]
- [9] 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. [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.]
- [10] 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.

- [11] Yao Q Y, Zhong W C. Collapse of granite area in southern Jiangxi Province and its management [J]. *Journal of Jiangxi Normal University (Natural Science Edition)*, 1966 (1): 61—77. [姚庆元, 钟五常. 江西赣南花岗岩地区的崩岗及其治理[J]. *江西师范学院学报 (自然科学版)*, 1966 (1): 61—77.]
- [12] Lin J S, Zhuang Y T, Huang Y H, et al. Shear strengths of collapsing hill in red soil as affected by soil moisture under different experimental methods[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31 (24): 106—110. [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.]
- [13] Huang B, Li D Q, Yuan Z J, et al. Progress and prospect of research on collapsing gully control techniques[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2018, 38 (6): 248—253, 262. [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, 262.]
- [14] Niu D K. Approach to the methods of surveying collapsing hill erosion [J]. *Jiangxi Hydraulic Science & Technology*, 1994, 20 (1): 42—47. [牛德奎. 崩岗侵蚀调查方法的探讨[J]. *江西水利科技*, 1994, 20 (1): 42—47.]
- [15] Liu X L, Zhang D L. Temporal-spatial analyses of collapsed gully erosion based on three-dimensional laser scanning[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31 (4): 204—211. [刘希林, 张大林. 基于三维激光扫描的崩岗侵蚀的时空分析[J]. *农业工程学报*, 2015, 31 (4): 204—211.]
- [16] Shen S Y, Zhao Y L, Cheng D B, et al. An efficient method of investigating slope collapse by unmanned aerial vehicle remote sensing[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2018, 35 (4): 43—47, 53. [沈盛戔, 赵元凌, 程冬兵, 等. 基于无人机遥感技术的崩岗快速调查方法[J]. *长江科学院院报*, 2018, 35 (4): 43—47, 53.]
- [17] Jiang X D, Liang Z X, Zhou H Y, et al. Dynamic change monitoring of collapse based on UAV oblique photograph technique[J]. *Tropical Geography*, 2019, 39 (4): 597—603. [江学顶, 梁钊雄, 周红艺, 等. 基于无人机倾斜摄影技术的崩岗动态变化监测[J]. *热带地理*, 2019, 39 (4): 597—603.]
- [18] Staley D M, Waskiewicz T A, Kean J W. Characterizing the primary material sources and dominant erosional processes for post-fire debris-flow initiation in a headwater basin using multi-temporal terrestrial laser scanning data[J]. *Geomorphology*, 2014, 214: 324—338.
- [19] Lato M, Hutchinson J, Diederichs M, et al. Engineering monitoring of rockfall hazards along transportation corridors: Using mobile terrestrial LiDAR[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2009, 9 (3): 935—946.
- [20] Wheaton J M, Brasington J, Darby S E, et al. Accounting for uncertainty in DEMs from repeat topographic surveys: Improved sediment budgets[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2010, 35 (2): 136—156.
- [21] Daehne A, Corsini A. Kinematics of active earthflows revealed by digital image correlation and DEM subtraction techniques applied to multi-temporal LiDAR data[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2013, 38 (6): 640—654.
- [22] 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. [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.]
- [23] Xia J W. Laboratory model and numerical simulation of instability on collapsing wall induced by rainfall infiltration[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2021. [夏金文. 降雨诱发崩壁失稳室内试验及数值模拟研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2021.]
- [24] 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.
- [25] Duan X Q. Heterogeneity of granite soil and hydrological process on Benggang slope[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020. [段晓倩. 花岗岩土体异质性与崩岗坡面土壤水文过程[D]. 武汉: 华中农业大学, 2020.]
- [26] Ma P F, Xu W N, Xia D, et al. A study on formation conditions of collapse for collapsed walls in consideration of stability of red clay weathering soil layers and depth of concave cavities[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019, 39 (5): 316—328. [马鹏飞, 许文年, 夏栋, 等. 基于龛深及其上覆土层稳定性的崩壁崩坍形成条件研究[J]. *水土保持通报*, 2019, 39 (5): 316—328.]
- [27] He L, Deng Y S. Preliminary study of the development and stability of niches in collapsing wall in Benggang erosion areas of southern China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37 (3): 60—65. [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.]

- [28] Duan X Q, Ni C, Chen J, et al. Study on the Preferential Flow of Red Soil Erosion in Granite slope collapse with High Frequency Monitoring of Water Content[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30 (5): 82—88. [段晓倩, 倪晨, 陈蛟, 等. 基于含水量高频监测的花岗岩崩岗侵蚀红壤优先流研究[J]. 水土保持学报, 2016, 30 (5): 82—88.]
- [29] Tang Q Y, Duan X Q, He L, et al. Variability and driving factors of the soil saturated hydraulic conductivity along the horizontal and vertical directions in the upper catchment of Benggang[J]. Catena, 2023, 222: 106810.
- [30] 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.
- [31] Zhang Y, Zhao D F, Zheng Q M, et al. Effects of temperature on soil atterberg limit in soil of collapsing gully wall in the hilly granitic region of South China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59 (1): 118—128. [张越, 赵冬峰, 郑勤敏, 等. 花岗岩红壤丘陵区崩岗土体界限含水量的温度效应研究[J]. 土壤学报, 2022, 59 (1): 118—128.]
- [32] Wei Y J, Wu X L, Zeng R B, et al. Spatial variations of aggregate-associated humic substance in heavy-textured soils along a climatic gradient[J]. Soil and Tillage Research, 2020, 197: 104497.
- [33] Li S P. A study on characteristic of rock-soil and countermeasures of the collapse mound formation[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1992, 6 (3): 29—35. [李思平. 崩岗形成的岩土特性及其防治对策的研究[J]. 水土保持学报, 1992, 6 (3): 29—35.]
- [34] Wei Y J, Cai C F, Guo Z L, et al. Linkage between aggregate stability of granitic soils and the permanent gully erosion in subtropical China[J]. Soil and Tillage Research, 2022, 221: 105411.
- [35] Liu W P, Wang S H, Tian S W, et al. Influence of crack characteristics on the morphological development of Benggang and hydrological processes[J]. Journal of Mountain Science, 2023, 20 (7): 1900—1910.
- [36] Huang Y J. Experimental study on disintegration and latent corrosion of granite residual soil[D]. Nanchang: Nanchang University, 2018. [黄莹晶. 花岗岩残积土崩解及潜蚀试验研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2018.]
- [37] 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.
- [38] Ge H L, Lin J L, Huang Y H. Geological factors of formation of weathering mantle of Benggang[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2010, 39 (1): 73—78. [葛宏力, 林敬兰, 黄炎和. 崩岗风化壳形成的地质作用[J]. 福建农林大学学报 (自然科学版), 2010, 39 (1): 73—78.]
- [39] Chen X A, Yang J, Xiong Y, et al. Research on the soil characteristics and factors of collapsing erosion in the red soil zone[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44 (10): 1175—1181. [陈晓安, 杨洁, 熊永, 等. 红壤区崩岗侵蚀的土壤特性与影响因素研究[J]. 水利学报, 2013, 44 (10): 1175—1181.]
- [40] 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.
- [41] Wei Y J, Liu Z, Wu X L, et al. Can Benggang be regarded as gully erosion?[J]. Catena, 2021, 207: 105648.
- [42] Ge H L, Huang Y H, Lin J L, et al. Relationship between regional water system and spatial distribution of slope disintegration[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2011, 40 (2): 187—191. [葛宏力, 黄炎和, 林敬兰, 等. 区域水系与崩岗空间分布的关系[J]. 福建农林大学学报 (自然科学版), 2011, 40 (2): 187—191.]
- [43] Huang R Q, Xu Z M, Xu M. Hazardous effects of underground water and extraordinary water flow-induced geohazards[J]. Earth and Environment, 2005, 33 (3): 1—9. [黄润秋, 徐则民, 许模. 地下水的致灾效应及异常地下水流诱发地质灾害[J]. 地球与环境, 2005, 33 (3): 1—9.]
- [44] Lu D, Hu Y G, Peng S Q, et al. Application of shallow earth temperature survey in investigating the relationships of spatial distribution between the typical weathering slope collapse and groundwater[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2011, 20 (2): 208—216. [卢冬, 胡耀国, 彭四清, 等. 应用浅层地温测量法分析崩岗侵蚀与地下水分布关系[J]. 生态环境学报, 2011, 20 (2): 208—216.]
- [45] Chen X D, Jin X, Yu X W. Study on forward modeling to shallow temperature measurement for groundwater flow investigating [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2008, 38 (S1): 159—161. [陈晓冬, 金旭, 于学武. 调查流动地下水脉的浅层地温测量法正演模拟研究[J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 2008, 38 (S1): 159—161.]
- [46] Chen X D, Yu X W, Jin X. Study on inverse problem to 1 meter temperature measurement for groundwater flow investigating[J]. Hydrogeology & Engineering Geology,

- 2010, 37 (1): 50—53. [陈晓冬, 于学武, 金旭. 调查地下水流的 1m 深地温测量反演问题研究[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37 (1): 50—53.]
- [47] He Z W, Zha X, Huang S Y. Study on the causes and ecological restoration measures of erosion and degradation in the red soil hilly area of southern China [J]. Subtropical Soil and Water Conservation, 2015, 27 (4): 44—48. [何钟文, 查轩, 黄少燕. 南方红壤丘陵区侵蚀退化地成因及生态恢复措施研究[J]. 亚热带水土保持, 2015, 27 (4): 44—48.]
- [48] Liu H H, Liu X C, Zhang P C, et al. Characteristics of slope collapse and its monitoring technology in Southern China[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2011, 9 (2): 19—23. [刘洪鹤, 刘宪春, 张平仓, 等. 南方崩岗发育特征及其监测技术探讨[J]. 中国水土保持科学, 2011, 9 (2): 19—23.]
- [49] Du Y, Li S X, Ding S W, et al. Study of CORS-RTK combined with GIS in collapsing gully monitoring of southeast Hubei Province[J]. Yangtze River, 2015, 46 (12): 87—90. [杜赞, 李双喜, 丁树文, 等. 基于 CORS-RTK 结合 GIS 的鄂东南崩岗侵蚀监测[J]. 人民长江, 2015, 46 (12): 87—90.]
- [50] Lin J S, Huang Y H, Zhang X B, et al. Apportioning typical collapsing hill's erosion sediment sources of granite region in southern China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26 (3): 53—57. [林金石, 黄炎和, 张旭斌, 等. 南方花岗岩区典型崩岗侵蚀产沙来源分析[J]. 水土保持学报, 2012, 26 (3): 53—57.]
- [51] Xie S H, Zhang C L, Meng J L. Application of GPS RTD in the investigation of hill collapsing in Jiangxi Province[J]. Journal of Nanchang Institute of Technology, 2007, 26 (4): 54—56. [谢颂华, 张茨林, 孟菁玲. GPS RTD 技术在江西省崩岗侵蚀调查中的应用[J]. 南昌工程学院学报, 2007, 26 (4): 54—56.]
- [52] Zhang D L, Liu X L. Permeability and sectional moisture characteristics of deposits in collapse hill—An example of Liantanggang collapse hill in Wuhua County of Guangdong Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35 (2): 251—256, 262. [张大林, 刘希林. 崩岗堆积土体渗透特性及剖面水分特征——以广东省五华县莲塘崩岗为例[J]. 水土保持通报, 2015, 35 (2): 251—256, 262.]
- [53] Zhang T Y, Chen F Y, Deng Y S, et al. Study on collapsing gully erosion survey method and application based on CORS-RTK and GIS[J]. Soil and Water Conservation in China, 2019 (2): 47—49, 69. [张铁洋, 陈峰云, 邓羽松, 等. 基于 CORS-RTK 结合 GIS 的崩岗侵蚀调查方法及应用[J]. 中国水土保持, 2019 (2): 47—49, 69.]
- [54] Huang Y T, Cai C F, Wang T W. Design and implementation of slump-gully information querying system[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2010, 30 (6): 123—126. [黄于同, 蔡崇法, 王天巍. 崩岗信息咨询系统的设计与实现[J]. 水土保持通报, 2010, 30 (6): 123—126.]
- [55] Cheng D B, Zhang P C. Conception of risk assessment of collapse gully erosion in South China[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016, 36 (4): 346—350. [程冬兵, 张平仓. 南方崩岗侵蚀风险评估构想[J]. 水土保持通报, 2016, 36 (4): 346—350.]
- [56] Guan J L, Huang Y H, Lin J S, et al. Comparisons between Benggang risk assessments based on information model and random forest model[J]. Mountain Research, 2021, 39 (4): 539—551. [管家琳, 黄炎和, 林金石, 等. 基于信息量模型与随机森林模型的崩岗风险对比评估[J]. 山地学报, 2021, 39 (4): 539—551.]
- [57] Chen Z Q, Chen Z B, Chen L H. Assessment of soil erosion risk in watersheds typical of eroded red soil region, South China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2011, 48 (5): 1080—1082. [陈志强, 陈志彪, 陈丽慧. 南方红壤侵蚀区典型流域土壤侵蚀危险性评价[J]. 土壤学报, 2011, 48 (5): 1080—1082.]
- [58] Chen J L. Risk evaluation and simulation of the potential collapsing hills in Fujian typical collapsed area[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2015. [陈嘉林. 福建省典型崩岗区潜在性崩岗风险评估与预测[D]. 福州: 福建农林大学, 2015.]
- [59] Guan J L, Jia X J, Ji X. Risk assessment of collapsing gullies in the Xixi watershed based on information model[J]. Journal of Forest and Environment, 2020, 40 (3): 321—328. [管家琳, 贾秀菊, 季翔. 基于信息量模型的西溪流域崩岗风险评估[J]. 森林与环境学报, 2020, 40 (3): 321—328.]
- [60] Sun K, Cheng D B, He J J, et al. Comparative study on risk assessment methods for collapse gully erosion: A case of Guangdong Province[J]. Soil and Water Conservation in China, 2018 (3): 51—54, 69. [孙昆, 程冬兵, 贺佳杰, 等. 崩岗侵蚀发生风险评估方法的对比研究——以广东省为例[J]. 中国水土保持, 2018 (3): 51—54, 69.]
- [61] Guo F, Lai P, Chen Y, et al. Influence of different environmental factor connection methods on Benggang susceptibility assessment[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42 (5): 123—130. [郭飞, 赖鹏, 陈洋, 等. 不同环境因子联接方法对崩岗易发性评价的影响[J]. 水土保持通报, 2022, 42 (5): 123—130.]

- [62] Ji X, Huang Y H, Lin J S, et al. Sensitivity assessment method of collapsed gully occurrence in granite region of South China based on niche-fitness[J]. Journal of China Agricultural University, 2017, 22 (10): 159—168. [季翔, 黄炎和, 林金石, 等. 基于生态位适宜度的南方花岗岩区崩岗发生敏感性评价方法[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22 (10): 159—168.]
- [63] Wu H B. The main technical measures for planting hemp bamboo to control the erosion of hill collapse [J]. Fujian Soil and Water Conservation, 2001, 13 (3): 24—26. [吴海彪. 种植麻竹治理崩岗侵蚀的主要技术措施[J]. 福建水土保持, 2001, 13 (3): 24—26.]
- [64] Liang Y, Zhang B, Pan X Z, et al. Current status and comprehensive control strategies of soil erosion for hilly region in the Southern China[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2008, 6 (1): 22—27. [梁音, 张斌, 潘贤章, 等. 南方红壤丘陵区水土流失现状与综合治理对策[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6 (1): 22—27.]
- [65] Ma Y, Ding S W, He Y J, et al. Discussion on “the Five-sphere” systematic governance measures for collapse of gangs[J]. Soil and Water Conservation in China, 2016 (4): 65—68. [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.]
- [66] Feng S Y, Wen H, Ni S M, et al. Study on integrated control measure modes of typical collapsing in the south of China[J]. Soil and Water Conservation in China, 2019 (2): 18—22. [冯舒悦, 文慧, 倪世民, 等. 南方典型崩岗综合治理模式研究[J]. 中国水土保持, 2019 (2): 18—22.]
- [67] Mo M H, Xie S H, Nie X F, et al. Research on patterns of soil and water loss comprehensive harness in red soil region of southern china—A case study in Jiangxi Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39 (4): 207—213. [莫明浩, 谢颂华, 聂小飞, 等. 南方红壤区水土流失综合治理模式研究——以江西省为例[J]. 水土保持通报, 2019, 39 (4): 207—213.]
- [68] Cai C F. Soil erosion and spatial differentiation of key geographical factors[M]. Beijing: Science Press, 2022. [蔡崇法. 土壤侵蚀与关键地理要素空间分异[M]. 北京: 科学出版社, 2022.]

(责任编辑: 檀满枝)