

DOI: 10.11766/trxb201807030219

南方红壤区崩岗侵蚀及其防治研究进展*

廖义善^{1, 2} 唐常源^{2, 3} 袁再健¹ 卓慕宁¹ 黄斌¹ 聂小东¹ 谢真越¹
李定强^{1†}

(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, 广州 510650)

(2 中山大学地理科学与规划学院, 广州 510275)

(3 日本千叶大学园艺学部, 松户 271-8510)

摘要 崩岗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。文章首先简要回顾了崩岗侵蚀的研究历程, 介绍了崩岗的组成要素。随后重点从崩岗侵蚀类型、崩岗空间分布特征、崩岗发育阶段及形态特征、崩岗侵蚀驱动因素、崩岗侵蚀防治措施等方面总结了崩岗侵蚀及防治的研究现状与进展, 探讨了当前崩岗研究的薄弱之处。并在此基础上, 提出了崩岗水力重力侵蚀的耦合机理、崩岗发育与区域地貌发育的关系、崩岗产生及发育指标的建立、崩岗防治机理及其评价标准的建立等有待深入研究的问题。

关键词 崩岗; 侵蚀类型; 发育阶段; 驱动因素; 防治措施

中图分类号 S157.1 **文献标识码** A

崩岗侵蚀是我国南方热带及亚热带地区侵蚀强度最大, 危害最为严重的一种侵蚀类型, 被喻为“生态溃疡”。“崩岗”一词源于广东省梅州地区, 当地客家人将“丘陵山地冲沟源头汇水区围椅状崩塌崖壁地貌”称为崩岗^[1]。崩岗的“崩”是指以崩塌为主的侵蚀方式, “岗”则指经常发生这种侵蚀类型的原始地貌形态^[2], 其较贴切地描述了崩岗的侵蚀方式及地貌形态, 为当地老百姓所口头流传。早期相关文献资料中, 有学者将崩岗称为切沟^[3]。直至1958年, 曾昭璇在其《韩江上游地形略论》中首次以研究论文形式提及“崩岗地形”, 其后1960年在其《地形学原理》^①一书中首

次将“崩岗”一词引入地貌学研究, 此后崩岗作为专用名词而被广泛使用。

在崩岗研究早期(1990年之前), 姚庆元和钟五常^[4]从崩岗岩土特性、发育阶段、形态特征及治理措施等方面发表了国内第一篇系统研究崩岗的论文, 期间的研究多侧重于崩岗治理, 且相关学者较少, 发表研究性论文总量不足30篇。1990—2004年期间, 开始侧重研究崩岗发育机理, 其中Xu^[5]探讨了崩岗发育的影响因素, 并首次将崩岗研究成果推向国际, 该阶段崩岗研究的单位及其人员有所增加, 科研论文的发表量新增60余篇。2005年及之后, 随着我国南方崩岗侵蚀现状调查工

* 国家重点研发计划课题(2017YFC0505404)、广东省自然科学基金研究团队项目(S2012030006144)和广东省科学院引进高层次人才领军人才专项资金项目(2016GDASRC—0103)资助 Supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFC0505404), the Guangdong Natural Science Foundation of partnership Program for Creative Research Teams (No. S2012030006144) and the High-level Leading Talent Introduction Program of GDAS (No. 2016GDASRC—0103)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: dqli@soil.gd.cn

作者简介: 廖义善(1980—), 男, 广西桂林人, 博士研究生, 助理研究员, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: yishan_liao@163.com

收稿日期: 2018-07-03; 收到修改稿日期: 2018-08-24; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2018-08-30

^①曾昭璇. 地形学原理: 第一册. 华南师范学院内部刊印, 1960: 64-67

作的完成,已基本明确了崩岗发育的典型区域、数量及其形态特征^[6],进一步认识了其侵蚀特点及危害性^[7]。特别是2009年《南方崩岗防治规划》的正式批复及2011年新版《水土保持法》的颁布,体现了国家对崩岗研究、治理的迫切需求,使得崩岗侵蚀研究逐步成为土壤、地貌、防灾减灾等领域所关注的热点^[8],其中仅2014年即发表崩岗相关科研论文近40篇。相关学者从崩岗内部土体特性、裂隙发育、节理构造,崩岗外部降雨、干湿循环条件及治理措施等方面开展了广泛而富有成果的研究。但由于崩岗侵蚀的随机性、崩岗发育的长期性以及崩岗影响因素的复杂性^[9],当前崩岗侵蚀的发生、发育及其防治机理仍有待进一步揭示。为此,笔者从崩岗侵蚀、发育特点及其防治措施等方面对当前崩岗的相关研究成果进行了总结,并据此提出了今后崩岗研究的重点方向。以期抛砖引玉,为相关崩岗研究提供参考。

1 崩岗组成要素

崩岗地貌是我国特有的地貌形态,主要发育于华南和东南热带和亚热带湿润季风气候区^[10]。国外亦有一些类似的侵蚀地貌形态,如马达加斯加lavakas地貌^[11]、巴西的vocorocas地貌^[12]以及日本的“崩坏”地貌^[13],但相较崩岗而言,lavakas地貌的坡度偏小,所处海拔偏大;vocorocas地貌一般发育于地势较低,坡度小于30%的缓坡地带,且单体规模较大;“崩坏”地貌一般发育于早白垩纪地层之上,发育的密度较小,且多以单体出现。而崩岗多发育于坡度较大的丘陵坡面,其要素组成、侵蚀、发育特点均与上述地貌存在一定差异。发育于花岗岩风化壳之上的崩岗,其岩土颜色、结构及风化程度均呈现一定纵向层次性规律^[14]。张淑光和钟朝章^[15]将其按自上而下划分为表土层、红土层、砂土层(风化层)、碎屑层(半风化层)和球状风化层。刘希林等^[16]将花岗岩风化壳垂直剖面自上而下依次分为表土层、红土层、砂土层、碎屑层和裂隙风化层。邓羽松等^[17]通过崩岗土壤剖面颜色和植被根系的差异,将其自上而下分为表土层、红土层、过渡层、砂土层和碎屑层。笔者对广东、福建、江西等典型崩岗区的实地调查发现,典型崩岗侵蚀沟一般很难到达球状风化层(裂隙风化层),砂土层与碎屑层间的过渡层亦不多见,倾

向于将崩岗纵向剖面自上而下划分为表土层、红土层、砂土层、碎屑层^[10]。

如表1所示,风化壳自上而下黏粒、有机质含量减少,粗砂及砾石含量增加,表土层至碎屑层土体抗蚀性减弱。当地表植被遭到破坏,部分表土层,甚至红土层在水力侵蚀的作用下消失殆尽之后,其砂土层、碎屑层抗蚀、抗冲能力差,有利于侵蚀沟的发育,乃至崩岗的产生。曾昭璇^[18]将花岗岩不同层次出露作为侵蚀程度划分标准,红土层尚存时土壤侵蚀程度一般较轻^[19],而其出露的层次越接近底层,则表明其侵蚀强度越大。与之相应,不同出露层次的主要侵蚀类型亦有所差异,表土层与红土层出露时以面蚀为主,砂土层出露前期以沟蚀为主,砂土层出露后期及碎屑层出露以崩岗侵蚀为主^[20]。此外,牛德奎^[21]、周红艺和李辉霞^[22]发现,砂粒含量、MgO、K₂O、CaO、Na₂O、孔隙度等对崩岗土体的崩解速度有显著正相关影响,而黏粒、Fe₂O₃、Al₂O₃、TiO₂、SiO₂、粉粒、有机质等为有显著负相关影响的理化因子。不同层次土体的物质组成差异,将影响其崩解速度,例如Al₂O₃、Fe₂O₃等土体胶结物从表土层往下含量逐渐减少^[23-24],其土体黏聚力、内摩擦角^[25]及其稳定性^[26]也随之发生改变,土体崩解速度逐渐加快^[22]。风化壳中Ti、Zr、Y等元素的地球化学性质相对稳定,依据其变化特征可揭示崩岗侵蚀过程^[27]。林金石等^[28]通过Ti、Zr等指纹因子,初步探明了崩岗产沙的来源,该成果为崩岗产沙溯源研究提供了借鉴。当前研究表明,在崩岗纵向各岩土层,其物质组成及抗蚀抗冲能力均存在一定层次性特征。可依据崩岗风化壳不同层次的出露,表征其侵蚀强度及侵蚀类型。但对不同岩土层出露与崩岗侵蚀强度、发育阶段及下垫面植被状况的关系,以及各岩土层厚度与崩岗发育规模的关系还有待进一步研究。

依据崩岗各水平部位间的侵蚀、产沙功能和特征差异,可将其划分为多个组分。曾昭璇^[30]认为崩岗由集水盆(含崩壁)、冲沟、扇形地三部分组成,集水盆(含崩壁)是侵蚀发源地,冲沟是搬运区,扇形地为堆积区。而吴志峰等^[31]认为,集水盆和冲沟在一些崩岗并不存在,所有崩岗均为崩壁、崩积体和洪(冲)积扇三部分的组合,只是规模和形态各异而已。丁光敏^[32]基于崩岗物质的运移过程,认为崩岗系统由集水坡面、沟壁、崩积

表1 崩岗纵向层次特征^[15,29]Table 1 Vertical layers characteristic of Benggang^[15,29]

层次 Soil layers	厚度 Thickness/m	主要特征 Main characteristic
表土层	0.1 ~ 0.3	包括土壤剖面的A、B层，根系集中层，有机质含量较大（20 ~ 50 g·kg ⁻¹ ），土体多为团粒结构，黏粒含量较大（30% ~ 60%），抗冲性（0.5 ~ 0.7）与抗蚀性较强
红土层	1 ~ 2	红棕色，块状结构，有机质含量不高（<10 g·kg ⁻¹ ），黏粒含量较大（40% ~ 70%），透水性较差，抗冲性（0.7 ~ 1.0）较强
砂土层	5 ~ 10	灰白或粉红带棕色，散粒状结构，疏松，有机质含量较低（2.5 ~ 4 g·kg ⁻¹ ），黏粒含量较少（11% ~ 20%），透水性好，抗冲（0.22）、抗蚀性差
碎屑层	10 ~ 15	保持花岗岩原生构造，以棱角状或角砾状岩核、碎屑为主，有机质含量较差（<3 g·kg ⁻¹ ），黏粒含量较少（11% ~ 20%），透水性好，抗冲（0.22）、抗蚀性差

体、崩岗沟底（包括通道）和冲积扇等五个子系统组成。阮伏水^[33]认为崩岗在地貌形态上主要包括沟头、沟壁、沟头崩积体、沟床（沟道）以及出口处的洪积扇（冲积扇）等要素。当前对崩岗扇形沉积区的命名，常采用冲积扇^[34]和洪积扇^[35]两种，其中冲积扇位于河流出口处，以山麓谷口为顶点向开阔低地展布而形成的扇状堆积地貌，洪积扇为干旱、半干旱地区暂时性山地水流出山口堆积形成的扇形地貌^[36]。而崩岗扇形沉积区地处热带和亚热带湿润季风气候区，且并非发育于河流出口处，故将其称为“洪积锥”更为恰当。以上学者对崩岗组成要素的划分虽有所差异，但均认同崩壁

（沟壁）、崩积体、洪积锥（冲积扇）为崩岗的组成要素。而崩岗上方汇水区的存在及其面积大小直接决定了崩岗发育的驱动力大小，其对崩岗的侵蚀、发育均具有重要影响，因而也应纳入崩岗组成要素。此外，除弧形崩岗崩积体坡面为输沙通道外，其他类型的崩岗，特别是条形崩岗，其输沙通道面积所占比重较大，不容忽视。因而可认为完整的崩岗应由上方汇水区、崩壁、崩积体、输沙通道和洪积锥等要素组成，上方汇水区/输沙通道等要素可在崩岗的不同发育阶段消失/出现（图1）。

崩岗各部位的侵蚀类型有所侧重，其上方汇水区以水力侵蚀为主，其输入崩壁的含沙径流可促

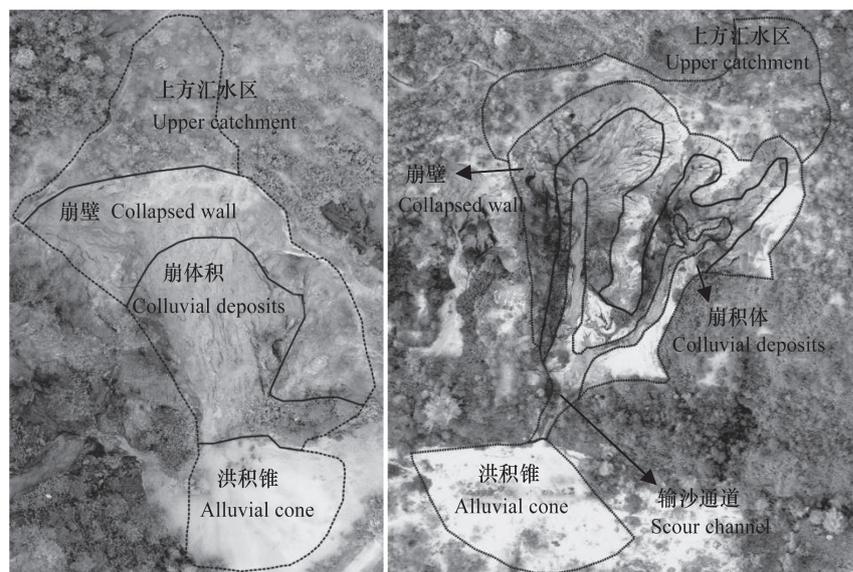


图1 崩岗组成要素

Fig. 1 Constituent elements of typical Benggang

进崩壁及崩积体的侵蚀。崩壁以重力崩塌为主，是崩岗的主要侵蚀源地。崩积体以水力再侵蚀产沙为主，为崩岗的主要产沙源地。输沙通道除供水流输沙外，该部位的沉积或侵蚀情况因其崩岗谷坊治理措施的有、无而异。洪积锥为输出崩口泥沙的沉积区域，总体以沉积为主。当前研究虽然明确了崩岗水力、重力侵蚀的主要发生部位，但未能阐明诸如上游汇水区等崩岗各组分之间的相互作用及其与崩岗水力、重力侵蚀之间的定量关系。此外，崩积体因其土质疏松、粗颗粒含量高、坡度大、易侵蚀，为当前崩岗研究中最关注的崩岗部位，相关学者从降雨^[37]、径流^[38]、坡度^[39]及坡面糙度^[40]等方面对崩积体侵蚀产沙进行了较为深入的研究，但多基于人工模拟降雨试验，自然降雨条件下的野外原位观测试验还较少开展。

2 崩岗侵蚀类型

崩岗的侵蚀类型较为复杂，史德明^[29]虽然认为崩岗属于水力侵蚀的范畴，但已认识到崩岗是在径流和重力共同作用下形成的，二者互相联系又互相促进。张淑光和钟朝章^[15]认为崩岗属于重力侵蚀的范畴，其是在径流冲刷、崩塌和滑坡、水蚀和重力侵蚀相互作用下形成的。牛德奎^[21]在综合前人研究的基础上，认为崩岗是在水力、重力综合作用下发生的，以坡面土状物质整体崩塌为主并形成破碎地貌形态的侵蚀现象。对于水力、重力复合侵蚀，相关学者^[41-42]已在黄土高原开展了沟坡水力侵蚀和重力侵蚀的交互作用研究，认为气候因素和地形因素是重力侵蚀的主导因素。而崩岗侵蚀与黄土高原沟坡侵蚀的发生部位、区域环境特点及岩土性质均有所不同，崩岗侵蚀机理更为复杂。

崩岗的水力、重力侵蚀既有差异，又有联系。二者在侵蚀方向上有所差异，前者主要受地表径流的影响，其侵蚀方向与地表径流的方向一致，为纵向下切、侧向横淘和向上溯源。而后者发生需要一定高差的崩壁存在，其侵蚀多发生于沟床之上的崩壁，而不像水力侵蚀可沿沟道底部纵向下切。同时，水力侵蚀和重力侵蚀又相互联系，水力侵蚀通过径流的下切作用，可增大崩壁落差和不稳定性。并在流水侵蚀的作用下，破坏风化壳节理，加大风化壳裂隙的长、宽^[29]，诱发或促进重力侵蚀发

生^[43]。而重力侵蚀所产生的崩积体，土质疏松，是崩岗水力侵蚀的主要沙源地。重力侵蚀为水力侵蚀提供了有利的侵蚀条件和被侵蚀物质，部分径流可在重力侵蚀土体上进行二次侵蚀，进而产沙。

此外，水力侵蚀和重力侵蚀在崩岗发育过程中的出现时间存在一个时序性。现一般认为崩岗多由坡面侵蚀沟发育而来，水力侵蚀是产生崩岗的诱因。水力侵蚀先于重力侵蚀发生，在水力侵蚀的作用下，当具有一定落差的沟壁出现之后，沟壁的重力侵蚀随之发生，而后崩岗在水力、重力侵蚀的共同作用下发育。但亦有植被覆盖较好、水力侵蚀强度较小的坡面在降雨或其它外力作用下诱发坡面重力滑塌，此时重力侵蚀成为崩岗产生的诱因，水力侵蚀强度在滑塌面出现之后才加剧，进而在水力、重力侵蚀的共同作用下发育崩岗。可见，崩岗是在水力和重力的耦合作用下发育，由于水力侵蚀和重力侵蚀在同一空间内发生，传统方法尚难定量界定二者的侵蚀过程。由于水力侵蚀和重力侵蚀的持续时间及发生频次有所差异：水蚀虽仅发生于降雨时段，但在一定雨强条件下，水蚀可贯穿整个降雨过程；而重力侵蚀虽在降雨及无雨时段皆可能发生，但随机性大、持续时段短、发生频次少。因而通过对高时空分辨率的崩岗地貌形态数据进行前后对比分析，可在较大程度上区分水力侵蚀和重力侵蚀。随着三维激光扫描技术的发展，使得高时空分辨率崩岗地貌形态数据的获取成为可能，为研究崩岗侵蚀过程提供了有效的工具^[44]。有关研究者已运用三维激光扫描对崩岗崩积体侵蚀过程中的侵蚀方式演变进行了初步探讨^[40]。

综上所述，崩岗侵蚀是一种水力、重力相互作用的复合侵蚀类型，其不同部位的侵蚀特点有所差异。当崩岗形成后，重力主要作用于崩壁，主要影响侵蚀量的大小，而水力主要作用于崩积体，主要影响产沙量的大小。二者在崩岗发育过程中发挥的作用有所侧重，即重力侵蚀、水力产沙。区分重力侵蚀与水力侵蚀的关键作用时段及其主要贡献，将有助于认识水力、重力侵蚀在崩岗发生、发育过程中的作用。利用三维激光扫描等技术定量分析重力、水力侵蚀强度，阐明二者之间的耦合关系，是揭示崩岗侵蚀发育机理的关键，也是崩岗侵蚀研究的重要方向之一。此外，通过无人机技术，提取崩岗各组成要素的面积及形态，将有望阐明崩岗各组成部分与崩岗侵蚀类型之间的关系。

3 崩岗空间分布特征

虽然在砾岩、页岩、泥岩等发育的风化壳之上亦有少量崩岗发育^[45]，但崩岗主要集中发育于花岗岩之上^[5]。其主要源于花岗岩发育的风化壳更为疏松深厚^[46]，可为崩岗的发生提供充足的物质基础。此外，花岗岩风化壳具有丰富的裂隙面和节理面，亦为风化壳重力侵蚀的发生提供了有利的内在条件。其中中粗粒黑云母花岗岩风化壳，具有粗细混杂，砾、砂（粒）含量较多、粘粒含量较少，矿物晶体之间的胶结力较弱等特点，更易于发生崩岗侵蚀^[47-48]。可见，风化壳物质基础影响崩岗的发育几率和程度。

除岩性外，海拔可在一定程度上影响风化壳的厚度。随着海拔的降低，花岗岩风化壳厚度呈现逐渐增加的垂直地带性分布规律^[48]。在海拔800 m以上山地，多属碎屑型风化壳，厚度一般在2 m以下，至相对高度为50~100 m时，其风化壳厚度一般可达10~70 m。其原因有二，其一低海拔湿热条件较好，更利于花岗岩的风化；其二，相对高度较小，表明其地壳抬升幅度较小，利于花岗岩风化物的蓄存^[49]。使得崩岗多分布于海拔50~250 m的低丘陵地带，海拔250~500 m的高丘发育相对较少，海拔500 m以上的山地则极少见^[21]。

崩岗的分布除受海拔地带性影响外，亦受纬度地带性影响。使得我国崩岗侵蚀主要分布在年

平均气温约 $>16^{\circ}\text{C}$ ， $\geq 10^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 的年积温约5 000 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 以上，以及年均降雨量1000 mm以上的亚热带湿润地区^[50]。高温湿润的气候特点有助于母岩风化，进而形成该区域深厚的风化壳。花岗岩厚度由北向南大致呈递增趋势^[51]，安徽黄山为10 m，湖南西南部为20~30 m，江西东、南部为40~70 m，福建晋江、长汀、安溪等区域为15~70 m，广西桂东、南流河等区域为20~30 m，广东五华、德庆、陆丰等区域为20~80 m。与之相应，崩岗数量亦呈现一定的纬度地带性特点：据南方7省(自治区)的普查数据，崩岗总面积约1 220 km²，总数为23.91万个，其中广东省、江西省、广西壮族自治区、福建省、湖南省、湖北省和安徽省的崩岗数量所占崩岗总数的比重分别为45.1%、20.1%、11.6%、10.9%、10.8%、1%和0.5%^[52]。如图2所示，典型崩岗侵蚀区呈现斑块状分布，其崩岗数量占崩岗总数量的75%以上^[53]，其中广东省主要分布在韩江上游，梅州市的梅县、五华，东江上游的龙川和西江中下游的德庆、云浮、罗定一带^[54]；在江西省崩岗主要分布于南岭山地北麓和雩山以南的红壤丘陵区^[21]；而福建省的安溪官桥和龙门、长汀河田、诏安官陂、永春达埔等为崩岗侵蚀较为严重的区域^[46]；湖南的典型崩岗主要分布于中部和东南部；广西的崩岗集中分布于两广交界处的苍梧地区，典型崩岗的北缘为湖北省通城县，安徽省一般已无典型崩岗发育。

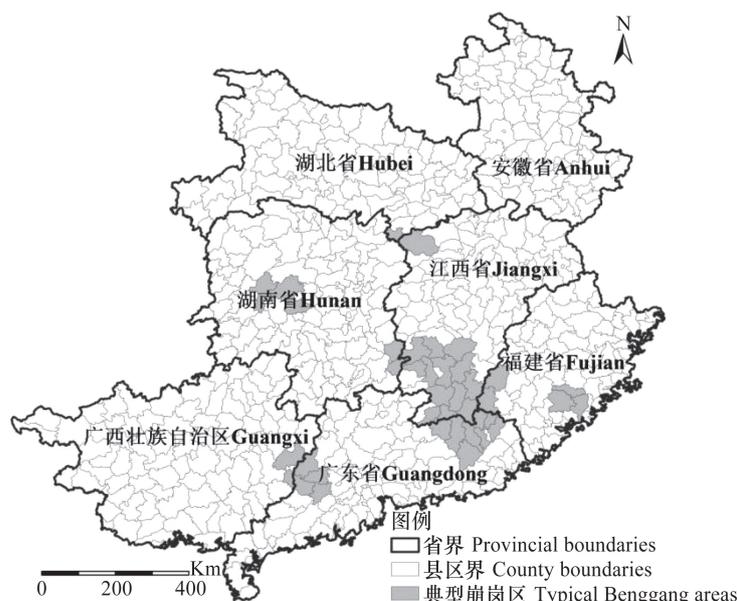


图2 南方七省典型崩岗发育区^[21, 46, 53-54]

Fig. 2 Typical Benggang development area in seven provinces of Southern China^[21, 46, 53-54]

综上所述,对于崩岗空间集中发育的原因,现有研究多侧重于物质基础及其地带性分布因素。但华南花岗岩地区众多,且适于花岗岩风化的湿热条件区域亦不在少数,为什么崩岗仅在有限的区域及特定的海拔区间内集中发育?当前研究多着眼于崩岗的侵蚀现状,较少考虑崩岗区域的地貌发育阶段,并对崩岗侵蚀的历史、现状和趋势加以区分。人类关注和记录崩岗的历史较短,现今具备崩岗发育物质及气候条件,而未发生崩岗侵蚀的区域,并不代表历史上未发生过,亦不能表明其将来不可能发生。在区域尺度上,基于地形图、地质图、流域水系图,运用侵蚀循环理论定量分析流域地貌的发育现状,阐明当前崩岗典型发育区与其地貌发育阶段的对应关系,将有助于揭示当前崩岗集中发育的原因。

4 崩岗发育阶段及形态特征

常规崩岗的发育,通常是随着坡面细沟、浅沟、切沟的相继产生,进而形成崩岗的雏形^[15],并在水力和重力的交互作用下继续发育。当前多依据水力侵蚀、重力侵蚀在崩岗不同发育阶段的变化情况,对崩岗的发育阶段进行划分。史德明^[29]将崩岗的发育划分为三个阶段,其初期阶段以径流下切作用为主,重力崩塌较少;中期阶段崩岗发育最为活跃,径流下切和崩塌作用相互促进;末期阶段上方来水减少,径流的下切和边坡切割作用基本停止,主要以重力侵蚀为主,且崩岗面积仍在逐步扩大。吴克刚等^[55]亦将崩岗发育划分为三个阶段:深切期、崩塌期和夷平期,其划分阶段与史德明近似,但其认为在夷平期大规模的崩塌基本停止,以水蚀作用为主。牛德奎^[56]根据崩岗形成的特点,将崩岗的发育过程划分为网状细沟阶段、阶梯沟阶段、深沟阶段和崩岗扩展等四个阶段。其中网状细沟阶段、阶梯沟阶段、深沟阶段对应于史德明、吴克刚等划分的崩岗发育第一阶段(初期或深切期)。其崩岗的扩展阶段与崩岗发育的中期或崩塌期近似,且涵盖了崩岗发育的末期或夷平期。但牛德奎认为崩岗扩展阶段的崩岗发育仍是重力和水力侵蚀共同作用的结果,强调只要有渗透水流及径流因素作用,崩塌仍会以小规模的方式持续一定时期,直至形成稳定的沟道边坡,崩塌才会停止。以

上研究均认为水力侵蚀是崩岗发育初期的主要诱因,但对水力、重力侵蚀在崩岗发育后期作用的认识有所不同,史德明认为以重力侵蚀为主,吴克刚等认为以水蚀为主,而牛德奎则认为水力、重力作用同时存在。

此外,亦有学者通过崩岗沟头位置判断崩岗所处的发育阶段。阮伏水^[46]将浅沟和切沟阶段归为崩岗的幼年期;沟头位于坡面中下部,且沟头溯源和沟床下切速度较快,而沟壁重力侵蚀较弱的阶段划分为青年期;沟头溯源至分水岭,上坡集水面积减小阶段为发育的壮年期;把从沟头超过分水岭至临空面重力坍塌停止这一阶段称为晚年期。丁光敏^[32]亦根据沟头位置将崩岗的发育分成初期、中期和晚期三个阶段,其沟头对应的位置为:坡面的中下位、坡面的中上位、切过分水岭。由于崩岗沟头所处的位置可指示沟头上方汇水面积的大小,亦是一种有效衡量崩岗发育阶段的方法。但该方法假设崩岗侵蚀沟发育的初始点为坡底,但自然界中侵蚀沟并非都是从坡底开始发育。此外,当前研究认为崩岗沟头到达崩岗坡面分水岭后,由于上游汇水面积减小,其崩岗趋于稳定。但上游汇水面积的变化是相对于崩岗沟头部位而言,若相对于崩岗沟道出口,其上游汇水面积变化并不大。且若崩岗沟头与沟口间存在较大落差时,即使沟头已抵达分水岭,但随着沟道径流的下切,侵蚀基准面的下降,其崩岗侵蚀仍将持续。

受局部地形、地质、上方汇水面积及崩岗所处发育阶段的差异影响,崩岗会呈现出不同形态特征。冯明汉等^[52]在史德明^[29]、张淑光和钟朝章^[15]的基础上,将崩岗划分为瓢形、条形、爪形、弧形、混合形等5种形态类型(如图3)。其中不同形态崩岗的数量从多到少依次为条形(25.76%)、混合形(23.71%)、瓢形(21.71%)、弧形(20.54%)、爪形(8.28%),除爪形崩岗外,各种形态崩岗的数量差异不大。此外,崩岗的发育规模依据面积可分为3个级别,其中60~1 000 m²为小型崩岗、1 000~3 000 m²为中型崩岗、大于3 000 m²为大型崩岗^[52]。单个崩岗的平均发育规模从大到小依次为混合形、爪形、瓢形、条形、弧形。当前研究多侧重于不同形态崩岗的数量及规模差异。而在不同形态崩岗的侵蚀强度及趋势特征、崩岗发育过程中

部分简单形态（瓢形、条形、弧形）崩岗向复杂形态（混合形、爪形）崩岗的演化规律、以及崩岗形

态演化过程中侵蚀量的变化趋势等方面还有待进一步研究。

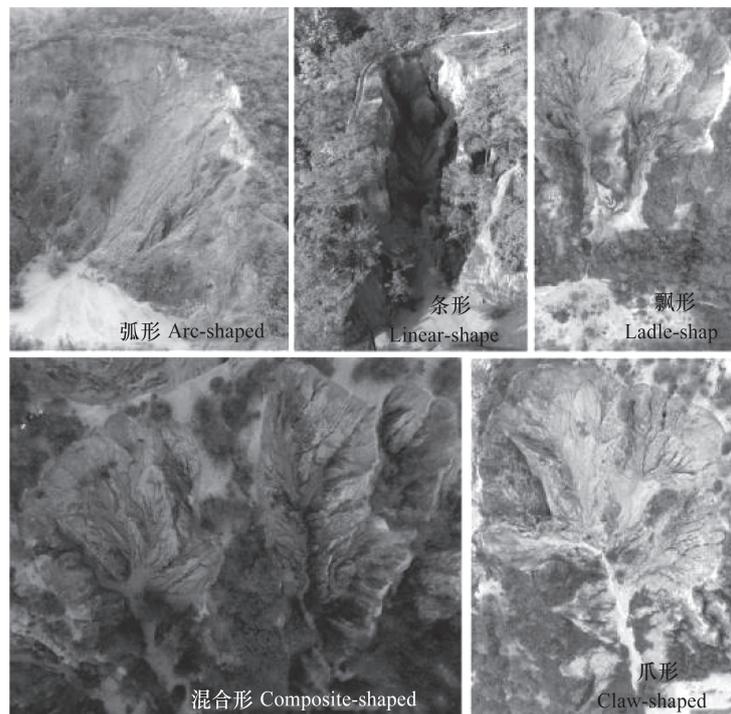


图3 崩岗形态照片

Fig. 3 A typical form of Benggang in Wuhua County

综上所述，当前研究依据崩岗的主导侵蚀类型或崩岗沟头所处坡面部位，对崩岗发育阶段进行划分。但对崩岗发育阶段与崩岗侵蚀强度及变化趋势的关系还缺乏定量研究。特别是将细沟、浅沟阶段视为崩岗的初期或幼年期，还有待商榷。因为并非所有细沟、浅沟均能发育成崩岗，崩岗的初期或幼年期，应为崩岗形成之后的阶段。此外，崩岗形态、面积与其所处的发育阶段、地形部位、集水区面积、风化壳厚度的关系，以及崩岗形态演化对崩岗侵蚀强度影响等方面还有待进一步研究。

5 崩岗侵蚀驱动因素

由于崩岗可由坡面侵蚀沟发育而来，而坡面植被可通过改变下垫面微观格局^[57]，增加土壤中水稳性大团聚体的含量^[58]，提高土壤的抗蚀和抗冲能力，同时降低地面径流量和流速^[59]，抑制坡面侵蚀沟及崩岗发育。可见，下垫面植被是影响崩岗侵蚀的重要因素。南方红壤区由于具备较好的水、

热、肥及光照条件，在无人为干扰条件下，自然植被长势较好。但当原有植被遭到人为破坏后，在强降雨作用下，坡面可发育侵蚀沟，乃至崩岗。因而有学者认为，人为改变地表状态是崩岗侵蚀发生的主导因素^[29]。

但有研究表明，崩岗亦可在滑塌坡面的基础上发育而成^[47]。在强降雨条件下，部分自然植被较好的坡面依然能发生滑塌，且此时植被自身的重力作用也是滑坡的诱因之一^[60]。风化壳临空面高度超过4.5 m条件下，即可不断引发重力崩塌^[46]。而华南的区域湿热条件加速了岩石的风化，良好的植被覆盖度又有利于风化物的蓄积，深厚的风化壳为崩岗的发生提供了有利的物质基础。当风化物质积蓄到一定程度后，即使没有人为干扰，其亦可通过滑坡等方式发育成崩岗。如1986年07号台风雨致使五华县产生新的崩岗滑坡达10 430处^[61]，其中不乏植被条件较好的区域。可见，削高填低是自然界的必然，人为因素可能只是加速或延缓崩岗的产生。此外，现在的典型崩岗区往往是历史上植被

较好、水土流失较少的区域,其有利于风化物的蓄积。因而植被对土壤侵蚀的影响还应放在一个更大的时间尺度加以审视,其区域土壤流失量应与其成土速率相适。

在众多崩岗侵蚀影响因素中,降雨及其地表径流可通过溅蚀、片蚀、沟蚀及促发沟蚀等作用,直接驱动崩岗的产生和发育^[62]。牛德奎等^[63]将崩岗侵蚀区图与降雨分布特征图进行叠加分析,发现华南崩岗侵蚀主要发生在年降雨量1 400~1 600 mm等雨线的区域内,高强度降雨显著影响侵蚀过程。但由于崩岗重力侵蚀的随机性较大,降雨量与崩岗侵蚀量间的定量关系尚难揭示。现阶段,降雨对崩岗侵蚀的影响研究,多集中于降雨对崩岗崩积体侵蚀产沙的研究。Liu等^[37]通过崩积体野外人工模拟降雨试验,发现降雨强度与崩积体坡面产流时间关系密切。蒋芳市等^[64]在持续3次降雨条件下,研究了崩积体坡面的细沟发育情况,研究结果表明,随着降雨场次的增加,细沟侵蚀不断加强。此外,也有研究者发现持续长时间的崩积体坡面水蚀,可致使崩积体坡面粗化,使得崩积体产沙量随降雨场次呈现幂函数减小趋势^[65]。近年来,鉴于崩壁的重要性,有关学者亦开始关注崩壁的侵蚀状况。王秋霞等^[66]运用室内人工模拟降雨试验,分析花岗岩崩岗区崩壁各层次土体的产流状况及泥沙各粒径的流失规律。梁双双等^[67]通过室内人工模拟降雨,研究崩壁不同土层的溅蚀特征。可见,降雨量、降雨历时及雨滴大小,均为影响崩岗侵蚀的重要驱动力指标。

同时,土壤水分也是影响崩岗土体稳定性的潜在因素^[68],崩壁土体胶结物质遇水可发生强烈的物理和化学作用^[69],土壤水分亦可作为崩岗土力学性质的重要指标^[70]。有研究表明崩壁水分条件可通过影响崩岗裂隙发育^[15, 71]、改变土体抗剪强度^[72]和收缩特性^[73]、土壤黏聚力和内摩擦角^[74]、崩壁的临界高度^[2]等方面对崩壁稳定性产生影响。鉴于崩岗土体水分对崩岗侵蚀的影响,有关学者通过探讨了不同层次崩岗剖面的土壤水分特征及其方程拟合过程^[75],及布设不同深度的土壤剖面ECH₂O土壤含水量监测系统^[76],对崩岗发生的水分运动机理进行了研究。

以上研究表明,崩岗侵蚀受自然和人为双重作用影响,自然因素是崩岗发育的先决条件,人为

因素可加速或延缓崩岗的产生。降雨及其径流直接驱动崩岗的产生和发育,其中土体含水量可通过影响崩壁裂隙发育、抗剪切强度及物质组成,进而影响崩壁的稳定性。但当前研究多基于室内试验,室内人工模拟降雨试验土槽的坡长一般较野外偏短,而降雨强度一般较野外偏大,且室内试验一般降雨历时较短,忽略了长时间坡面水蚀对坡面糙度的影响。加强崩岗野外原位观测,将有助于进一步评估降雨、径流及其土壤水分对崩岗侵蚀的驱动作用。

6 崩岗侵蚀防治措施

鉴于崩岗侵蚀的危害性,我国学者自1954年以来,相继开展了崩岗治理措施相关研究^[77]。当前崩岗治理措施已从早期单一的工程、生物治理措施发展为以“三位一体”^[29](上拦、下堵、中削,内外绿化)和“五位一体”^[78](集水坡面、崩壁、崩积体、沟道和洪积锥系统治理措施)为代表的综合治理模式。

崩岗侵蚀防治措施依据其作用分为减蚀、拦沙两类。其中减蚀措施包括坡面防护措施(植被措施、鱼鳞坑、水平沟),沟头防护措施(截水沟、跌水等),崩壁稳定措施(削坡开梯、崩壁小台阶、崩壁绿化);拦沙措施包括沟道防护措施(谷坊等),洪积锥防护措施(生物固沙、拦砂坝等)。此外,崩岗防治措施亦可按类型分为植物措施和工程措施两类(见表2)。植物措施可减少坡面水蚀强度,进而降低坡面沟蚀乃至崩岗侵蚀发生的几率^[79]。削坡开级等工程措施可改善坡面状况并消减坡面径流的能量。截水沟等工程措施能减少上方径流、泥沙的汇入,可有效减少崩岗的进一步发育及新的崩岗崩塌面的产生^[43]。此外,谷坊、拦沙坝等工程措施能拦蓄泥沙,提高崩岗侵蚀基准面,有利于崩壁的稳固^[80]。

由于崩岗分布面积广,治理成本高、难度大,因而可视崩岗的危害程度,有区别地开展崩岗治理。以广东省五华县乌陂河流域的一级支流源坑水小流域为例,其崩岗集中分布于流域中上游,该区域无人口居住,仅有零星农用地分布。流域内崩岗侵蚀对周边人民生产、生活影响均较小。此时,崩岗治理可不必追求每个崩岗均不发生侵蚀,只需在下游修建拦沙坝,减少崩岗侵蚀对下游的危害即

表2 崩岗植物、工程措施概括 [19, 32, 45, 62, 68, 77-78]

Table 2 A general introduction of Benggang control measures [19, 32, 45, 62, 68, 77-78]

部位 Position	植物措施 Vegetation measures	工程措施 Engineering measures	防治要点 Main points of control techniques
集水坡面	选用马尾松、木荷、枫香、胡枝子、芒草、马唐、鹧鸪草等根系发达、适应性强的乔灌草植物；在立地条件较好的坡面，亦可考虑果树、茶树等经济作物	截流排水沟、蓄水池、鱼鳞坑、水平沟	控制坡面水蚀；减少水沙进入崩岗体，抑制崩岗溯源侵蚀。实施措施时不能过于靠近、扰动崩岗沟缘
崩壁	选用蜈蚣菊、葛藤、大翼豆、爬山虎等植株、根系小，但覆盖度高、抗干旱耐贫瘠的藤蔓型植物	打穴、削坡开梯、修筑崩壁小台阶等	降低陡壁土块剥落和土壤泻溜；减缓雨滴溅击、径流冲刷及阳光直射而引发的土体热胀冷缩。实施措施时应避免较大扰动及过度增加崩壁承重
崩积体	对于活跃性崩岗的堆积体，可选用香根草、麻竹、藤枝竹等根系发达、抗掩埋的植物。而在相对稳定崩岗的堆积体还可选用芒萁、鹧鸪草、野古草、小叶冬青、酸味子、野牡丹等灌草植物	大型堆积体可实施削坡或整地处理；小型崩积体可实施堆边夯实，修整台阶	改变坡面地形条件，增加坡面植被覆盖，减缓雨滴溅击、径流冲刷，稳固崩积体
沟道	对于活跃性崩岗的沟道，可选用香根草、麻竹、藤枝竹根系发达、抗掩埋的植物；而在相对稳定崩岗的沟道，还可选用茶树、桉树和竹类等耐阴植物	谷坊、拦沙坝	围封崩口，蓄洪拦沙，抬高侵蚀基准面，进而稳定沟床、崩积体、崩壁
洪积锥	可选用香根草、麻竹、藤枝竹、南方泡桐、宽叶雀稗、巨菌草、蜜糖草、象草、胡枝子以及果树等乔灌草植物	拦沙坝、挡墙和排水设施	固持泥沙，减少洪积锥泥沙向外输移，防止掩埋农田或淤塞河道

可。岩土因重力发生崩塌是恒古不变的自然现象，无需“谈崩色变”，且淤积于拦沙坝内的砂及其形成的土地亦具有一定的经济价值。当地居民采集河砂作为建筑材料，近年来通过河道改造，已将原河道的部分淤积区域，开垦为耕地。因而在崩岗治理过程中可不局限于崩岗崩不崩，而应看崩岗侵蚀对周边，乃至下游的危害程度。如果崩岗侵蚀对周边生态环境影响较小，可不必局限于一时一地的水土流失，可采用末端拦截泥沙的方法，减少其对下游的危害即可，以此减少治理成本。如果单看治理效果，将崩岗推平是一劳永逸的治理方法。但在考虑崩岗治理生态效益的同时，亦要考虑投入与产出比，使得该崩岗治理措施易于被当地百姓所接受，具备推广前景。因此崩岗治理措施可因地制宜，选取农业开放型、生态开发型、农粮开发型及工业开发型的治理模式^[81]。

此外，在不同时空条件下，应辩证地评价各防治措施的防治效果。譬如崩壁上方的植被措施，植物根系可加大地表径流入渗，促进崩壁裂隙的发

育并增加崩壁土体的自重。削坡开级、截水沟及排水沟的修建，均会对地表有所扰动(如图4a)，当崩岗红土层被破坏后，其下层土体的入渗、崩解性能将会加强，可能诱发新的崩岗侵蚀。地下水是崩岗处于亚稳定状态的影响因素之一^[12]，而谷坊内拦蓄的降雨径流加大了对地下水的补给，亦在一定程度上影响了崩岗的稳定性。且谷坊随着泥沙的淤高，年久失修损毁后，其淤积的泥沙将再次流失，这种情况在崩岗区十分普遍(图4b、图4c)。其中图4c的拦沙坝内已长有较好的植被，但当拦沙坝损毁后，侵蚀沟所到之处，树木皆连根倒下。总体而言，当前的崩岗治理措施在一段时间内能对崩岗局部具有一定的防治效果，但长期来看，由于区域水土流失演变机制不清^[82]，缺乏不同崩岗防治模式下的技术体系和行业标准规范^[83]，其总体治理效果不甚理想^[32]，其防治机理及其综合评价研究还有待加强。相关崩岗防治措施可通过改变崩岗地形(包括改变侵蚀基准面)、水分条件影响崩岗发育，或通过拦截泥沙，减少崩岗侵蚀对下游的影

响。但当前崩岗治理措施对土壤含水、降雨径流、地下水及其泥沙的影响尚不清楚。元素示踪技术已成功应用于“老水”、“新水”^[84]以及泥沙来源^[85]的识别,而CT(Computed Tomography)扫描技术^[86],可获取崩岗土体横断面不同直径的孔

隙数量及分布信息,这些技术为研究崩岗泥沙及土壤水分的来源及运移提供了有效的手段。运用元素示踪及CT扫描技术,探讨崩岗防治措施对崩岗水、沙来源及运移的影响,对阐明崩岗防治措施的防治机理具有重要意义。

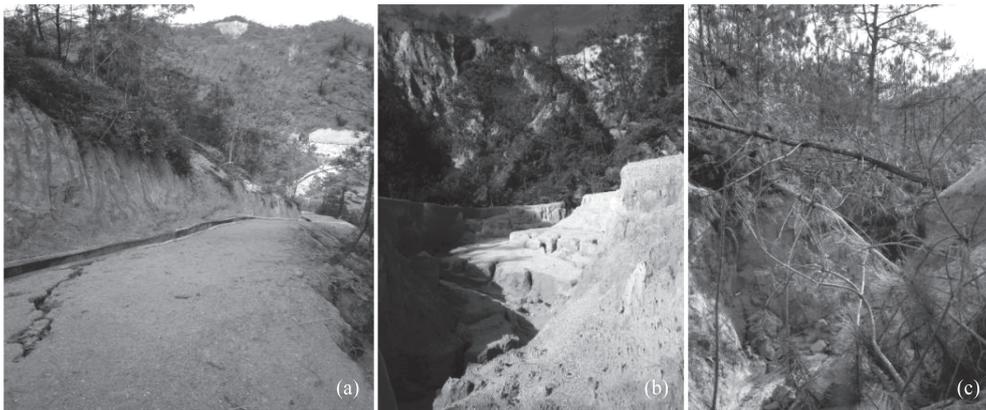


图4 崩岗治理措施存在的问题

Fig. 4 The problems in control measures of Benggang

7 结论与展望

崩岗侵蚀是南方红壤区侵蚀强度最大的一种侵蚀类型,相关学者对其进行了大量而富有成效的研究,但鉴于其侵蚀机理的复杂性,相关问题尚有待进一步深入研究。笔者认为以下问题是今后崩岗研究的重点研究内容之一:

(1) 如何区分水力、重力侵蚀对崩岗侵蚀的贡献,是当前崩岗研究的技术难点。针对崩岗体发生水力侵蚀和重力侵蚀的时间差异,综合运用三维激光扫描及无人机航拍等技术获取高时空分辨率的崩岗侵蚀动态数据,辅以降雨时段崩岗侵蚀区的影像信息,探讨重力侵蚀与水力侵蚀的关键作用时段、部位及其耦合关系,厘定影响崩岗重力侵蚀的关键因素,夯实崩岗侵蚀预测、预报的基础,是今后崩岗研究的重要内容之一。

(2) 崩岗在我国南方七省的部分区域集中发育,其区域分布原因有待探求。在今后的研究过程中,基于区域地貌发育特点,明确区域崩岗侵蚀历史、现状及趋势,定量分析流域地貌发育阶段与崩岗发育的关系,将有助于揭示崩岗集中发育机制及其区域分布特点。并回答崩岗是自然地貌发育的必然,还是人为影响的选择性发育结果。

(3) 崩岗的侵蚀量及侵蚀趋势受崩岗发育阶段影响。依据崩岗的发育部位、组成要素、侵蚀强度、形态规模等,建立崩岗的发生、发育指标,将有助于崩岗侵蚀量及其侵蚀趋势间的横向、纵向比较。

(4) 运用示踪及CT扫描等技术,明确崩岗防治措施对崩岗水分、泥沙来源及运移的影响,揭示崩岗防治措施的作用机理。并建立不同崩岗防治模式下的技术体系及其评价标准,是今后崩岗防治研究的当务之急。

致谢 本文在撰写过程中承蒙中国科学院地理科学与资源研究所蔡强国先生审阅,在此深表感谢!

参考文献

- [1] 张大林,刘希林.崩岗泥沙流粒度特性及流体类型分析—以广东五华县莲塘崩岗为例.地球科学进展,2014,29(7):810—818
Zhang D L, Liu X L. Analysis of the grain size properties and flow body classes of the mud sand flow: An example of Liantang collapsing hill and gully in Wuhua County of Guangdong (In Chinese). Advances in Earth Science, 2014, 29(7): 810—

- 818
- [2] 李思平. 广东省崩岗侵蚀规律和防治的研究. 自然灾害学报, 1992, 1 (3) : 68—74
- Li S P. Study on erosion law and control of slope disintegration in Guangdong Province (In Chinese) . Journal of Natural Disasters, 1992, 1 (3) : 68—74
- [3] 张木甸. 一年来河田土壤保肥试验工作. 福建水土保持, 1990 (3) : 54—58
- Zhang M T. Experimental study of nutrient conserving in the Hetian town for the past year (In Chinese) . Fujian Soil and Water Conservation, 1990 (3) : 54—58
- [4] 姚庆元, 钟五常. 江西赣南花岗岩地区的崩岗及其防治. 江西师范学院学报, 1966 (1) : 61—77
- Yao Q Y, Zhong W C. Benggang in granite area and its control in southern Jiangxi (In Chinese) . Journal of Jiangxi Normal University, 1966 (1) : 61—77
- [5] Xu J X. Benggang erosion: The influencing factor. Catena, 1996, 27: 249—263
- [6] Wang C C, Zhang Y Q, Xu Y C, et al. Is the “ecological and economic approach for the restoration of Collapsed Gullies” in Southern China really economic? Sustainability, 2015, 7: 10308—10323
- [7] 蒋芳市, 黄炎和, 林金石, 等. 坡度和雨强对崩岗崩积体侵蚀泥沙颗粒特征的影响. 土壤学报, 2014, 51 (5) : 974—982
- Jiang F S, Huang Y H, Lin J S, et al. Effects of slope gradient and rainfall intensity on particle size composition of erosion sediment from colluvial deposits of Benggang (In Chinese) . Acta Pedologica Sinica, 2014, 51 (5) : 974—982
- [8] 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. Natural Hazards, 2015, 79: 455—478
- [9] 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. Solid Earth, 2017, 8: 499—513
- [10] 刘希林. 全球视野下崩岗侵蚀地貌及其研究进展. 地理科学进展, 2018, 37 (3) : 342—351
- Liu X L. Benggang erosion landform and research progress in a global perspective (In Chinese) . Progress in Geography, 2018, 37 (3) : 342—351
- [11] Voarintsoa N R G, Cox R, Razanatseho M O M, et al. Relation between bedrock geology, topography and lavaka distribution in Madagascar. South African Journal of Geology, 2012, 115 (2) : 225—250
- [12] Bacellar L de A P, Coelho Netto A L, Lacerda W A. Controlling factors of gullying in the Maracujá catchment, southeastern Brazil. Earth Surface Processes and Landforms, 2005, 30 (11) : 1369—1385
- [13] 林拙郎. 保全砂防学入门: 土砂災害の予知と防災. 日本: 创荣图书印刷株式会社, 2008: 1—293
- Lin Z L. Introduction to preservation sand: Prediction and prevention of soil disaster (In Japanese) . Chuangrong Book Printing Co, 2008: 1—293
- [14] 熊平生, 袁航. 花岗岩风化壳崩岗侵蚀剖面风化强度和粒度分布特征. 水土保持研究, 2018, 25 (2) : 157—161
- Xiong P S, Yuan H. Characteristics of grain size and weathering intensity of collapsing erosion profile in granite weathering crust (In Chinese) . Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25 (2) : 157—161
- [15] 张淑光, 钟朝章. 广东省崩岗形成机理与类型. 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 (In Chinese) . Bulletin of Soil and Water Conservation, 1990, 10 (3) : 8—16
- [16] 刘希林, 张大林, 贾瑶瑶. 崩岗地貌发育的土体物理性质及其土壤侵蚀意义: 以广东五华县莲塘岗崩岗为例. 地球科学进展, 2013, 28 (7) : 802—811
- Liu X L, Zhang D L, Jia Y Y. Soil physical properties of collapsing hill and gully and their indications for soil erosion: An example of Liantanggang collapsing hill and gully in Wuhua County of Guangdong (In Chinese) . Advances in Earth Science, 2013, 28 (7) : 802—811
- [17] 邓羽松, 夏栋, 蔡崇法, 等. 基于分形理论模拟花岗岩崩岗剖面土壤水分特征曲线. 中国水土保持科学, 2016, 14 (2) : 1—8
- Deng Y S, Xia D, Cai C F, et al. Simulation of water characteristic curve in the soil profile of the collapsing gully on granite area of South China based on the fractal theory (In Chinese) . Science of Soil and Water Conservation, 2016, 14 (2) : 1—8
- [18] 曾昭璇. 我国南部红土区的水土流失问题. 第四纪研究, 1991 (1) : 9—17
- Zeng Z X. Soil erosion on the red soil region in South China (In Chinese) . Quaternary Sciences, 1991 (1) : 9—17
- [19] 万勇善, 席承藩, 史德明. 南方花岗岩区不同侵蚀土壤治理效果的研究. 土壤学报, 1992, 29 (4) : 419—426

- Wan Y S, Xi C F, Shi D M. Study on soil conservation effect for different eroded soils in granite region of south China (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1992, 29 (4): 419—426
- [20] 王学强, 蔡强国, 和继军, 等. 花岗岩风化壳的层次特性对土壤侵蚀及其防治措施的影响. *亚热带水土保持*, 2008, 20 (2): 20—24
- Wang X Q, Cai Q G, He J J, et al. Influence of the level characteristics of granite weathering crust on soil erosion and control measures (In Chinese). *Subtropical Soil and Water Conservation*, 2008, 20 (2): 20—24
- [21] 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. 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 (In Chinese). Nanjing: Nanjing Forestry University, 2009
- [22] 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. *水土保持学报*, 2017, 31 (1): 74—79
- Zhou H Y, Li H X. The study on soil disintegration characteristics and its influence factors of collapsing wall in the collapsing hill erosion region of Southern China (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31 (1): 74—79
- [23] 张运英. 广东省花岗岩区侵蚀土壤类型及其防治对策. *山地学报*, 2009, 27 (1): 49—53
- Zhang Y Y. Eroding soil types and their management counter measures of granite regions in Guangdong Province, China (In Chinese). *Journal of Mountain Science*, 2009, 27 (1): 49—53
- [24] 吴澄宇, 黄典豪. 江西龙南地区花岗岩风化壳中稀土元素的地球化学研究. *地质学报*, 1989, 63 (4): 349—362
- Wu C Y, Huang D H. REE geochemistry in the weathering process of granites in Longnan County, Jiangxi Province (In Chinese). *Acta Geologica Sinica*, 1989, 63 (4): 349—362
- [25] Chen J L, Zhou M, Lin J S, et al. Comparison of soil physicochemical properties and mineralogical compositions between noncollapsible soils and collapsed gullies. *Geoderma*, 2018, 317: 56—66
- [26] 王秋霞, 丁树文, 赵欣, 等. 花岗岩风化土不同土层抗蚀性差异分析. *水土保持研究*, 2015, 22 (3): 6—9
- Wang Q X, Ding S W, Zhao X, et al. Studies on the variation of soil antierodibility of collapse horizons of weathered earth in granite region (In Chinese). *Research of Soil and Water Conservation*, 2015, 22 (3): 6—9
- [27] 任天婧, 陈志彪, 陈志强, 等. 红壤侵蚀区崩岗土壤Ti-Zr-Y分布特征及其影响因素. *稀土*, 2018, 39 (1): 57—66
- Ren T J, Chen Z B, Chen Z Q, et al. The distribution characteristics of Ti-Zr-Y and their influence factors in the collapsing hills and gullies of red soil in Southern China (In Chinese). *Chinese Rare Earths*, 2018, 39 (1): 57—66
- [28] 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. *水土保持学报*, 2012, 26 (3): 53—57
- 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 (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26 (3): 53—57
- [29] 史德明. 我国热带、亚热带地区崩岗侵蚀剖析. *水土保持通报*, 1984 (3): 32—37
- Shi D M. A anatomy of collapsed gully erosion in the tropical and subtropical of China (In Chinese). *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1984 (3): 32—37
- [30] 曾昭璇. 从暴雨地貌看崩岗发育及其整治. *福建水土保持*, 1992 (2): 18—23
- Zeng Z X. Landfall development and its control in view of violent rainoff's landform (In Chinese). *Fujian Soil and Water Conservation*, 1992 (2): 18—23
- [31] 吴志峰, 邓南荣, 王继增. 崩岗侵蚀地貌与侵蚀过程. *中国水土保持*, 1999 (4): 10—13
- Wu Z F, Deng N R, Wang J Z. Erosion geomorphology and process in avalanching hill areas (In Chinese). *Soil and Water Conservation in China*, 1999 (4): 10—13
- [32] 丁光敏. 福建省崩岗侵蚀成因及治理模式研究. *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 (In Chinese). *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2001, 21 (5): 10—15
- [33] 阮伏水. 福建省花岗岩坡地沟谷侵蚀试验研究初报. *中国水土保持科学*, 2003, 1 (1): 25—29
- Ruan F S. Study on gully erosion of the granite slope in Fujian Province (In Chinese). *Science of soil and water conservation*, 2003, 1 (1): 25—29
- [34] 曾昭璇. 华南红土区水土流失问题. *人民珠江*, 1992 (6): 15—20
- Zeng Z X. Soil erosion on the red soil regions in south

- China (In Chinese). Pearl River, 1992 (6): 15-20
- [35] 邓羽松, 丁树文, 邱欣珍, 等. 赣县崩岗洪积扇土壤肥力的空间分异规律. 中国水土保持科学, 2015, 13 (1): 47—53
- Deng Y S, Ding S W, Qiu X Z, et al. Spatial distribution of collapsing alluvial soil fertility in Ganxian County, Jiangxi Province (In Chinese). Science of Soil and Water Conservation, 2015, 13 (1): 47—53
- [36] 地质部地质辞典办公室. 地质辞典(一)普通地质、构造地质分册(上册). 北京: 地质出版社, 1983
- Office of the Geological Department Geology Dictionary Vol1, General Geology, Structure Geology (In Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 1983
- [37] Liu X L, Qiu J A, Zhang D L. Characteristics of slope runoff and soil water content in benggang colluvium under simulated rainfall. Journal of Soils and Sediments, 2018, 18 (1): 39—48
- [38] 蒋芳市, 黄炎和, 林金石, 等. 坡面水流分离崩岗崩积体土壤的动力学特征. 水土保持学报, 2013, 27 (1): 86—89
- Jiang F S, Huang Y H, Lin J S, et al. The dynamic characteristics of soil detachment of slumping deposit by surface runoff in Benggang (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27 (1): 86—89
- [39] Jiang F S, Huang Y H, Wang M K, et al. Effects of rainfall intensity and slope gradient on steep colluvial deposit erosion in Southeast China. Soil Science Society of America Journal, 2014, 78: 1741—1752
- [40] 廖义善, 卓慕宁, 唐常源, 等. 崩岗崩积体坡面糙度及其侵蚀方式的耦合影响研究. 农业机械学报, 2017, 48 (11): 300—306
- Liao Y S, Zhuo M N, Tang C Y, et al. Coupling effects of slope roughness and erosion pattern on colluvial deposits of Benggang (In Chinese). Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48 (11): 300—306
- [41] Xu X Z, Liu Z Y, Xiao P Q, et al. Gravity erosion on the steep loess slope: Behavior, trigger and sensitivity. Catena, 2015, 135: 231—239
- [42] 赵超, 王书芳, 徐向舟, 等. 重力侵蚀黄土沟壑区沟坡产沙特性. 农业工程学报, 2012, 28 (12): 140—145
- Zhao C, Wang S F, Xu X Z, et al. Effect of gravity erosion on process of soil loss from gully in Loess Ravine Region (In Chinese). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28 (12): 140—145
- [43] Xu J X, Zeng G H. Benggang erosion in subtropical granite crust geoecosystems: An example from Guangdong Province// Walling D E, et al. ed. Erosion, debris flows and environment in mountain regions. IAHS Publication No. 209: 455—463
- [44] Heritage G, Hetherington D. Towards a protocol for laser scanning in fluvial geomorphology. Earth Surface Processes and Landforms, 2007, 32: 66—74
- [45] 赵辉, 罗建民. 湖南崩岗侵蚀成因及综合防治体系探讨. 中国水土保持, 2006 (5): 1—3
- Zhao H, Luo J M. Analysis on genesis erosion of dilapidated granite and approach to integrated system of prevention and control in Hunan (In Chinese). Soil and Water Conservation in China, 2006 (5): 1—3
- [46] 阮伏水. 福建崩岗沟侵蚀机理探讨. 福建师范大学学报(自然科学版), 1996, 12 (增刊): 24—31
- Ruan F S. Study on erosion mechanism of collapse gully in Fujian (In Chinese). Journal of Fujian Normal University (Natural Science), 1996, 12 (Sup.): 24—31
- [47] 李思平. 崩岗形成的岩土特性及其防治对策的研究. 水土保持学报, 1992, 6 (3): 29—35
- Li S P. A study on characteristics of rock-soil and countermeasures of the collapsed mound formation (In Chinese). Journal of Soil Water Conservation, 1992, 6 (3): 29—35
- [48] 阮伏水, 周伏建, 聂碧娟, 等. 花岗岩风化壳抗侵蚀特征研究 I: 花岗岩风化壳物理特征. 福建水土保持, 1995 (4): 37—42
- Ruan F S, Zhou F J, Nie B J, et al. Research on the characteristics of the granite crust to resistant erosion I: Geophysical characteristics of weathering granite (In Chinese). Fujian soil and water conservation, 1995 (4): 37—42
- [49] 崔之久, 杨建强, 陈艺鑫. 中国花岗岩地貌的类型特征与演化. 地理学报, 2007, 62 (7): 675—690
- Cui Z J, Yang J Q, Chen Y X. The type and evolution of the granite landforms in China (In Chinese). Acta Geographica Sinica, 2007, 62 (7): 675—690
- [50] 陈晓安, 杨洁, 肖胜生, 等. 崩岗侵蚀分布特征及其成因. 山地学报, 2013, 31 (6): 716—722
- Chen X A, Yang J, Xiao S S, et al. Distribution characteristics and causes of collapse erosion (In Chinese). Journal of Mountain Science, 2013, 31 (6): 716—722
- [51] 曾昭璇, 黄少敏. 中国东南部花岗岩地貌与水土流失问题. 广东师院学报(自然科学版), 1977 (2): 47—59

- Zeng Z X, Huang S M. The granite landscapes and problem of soil erosion in the Southeast of China (In Chinese). *Journal of Guangdong normal university (Natural Science)*, 1977 (2): 47—59
- [52] 冯明汉, 廖纯艳, 李双喜, 等. 我国南方崩岗侵蚀现状. *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 (In Chinese). *Yangtze River*, 2009, 40 (8): 66—68
- [53] 李双喜, 桂惠中, 丁树文. 中国南方崩岗空间分布特征. *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 (In Chinese). *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2013, 32 (1): 83—86
- [54] 沈灿荣. 广东亚热带花岗岩崩岗和水沙流失预报模型. *中山大学学报论丛*, 1993 (2): 12—19
Shen C S. The study of the breach-down-hill of Granite area and the water and sand loss forecast mathematic model (In Chinese). *Supplement to the Journal of Sun Yatsen University*, 1993 (2): 12—19
- [55] 吴克刚, Clarke D, Diczenco P. 华南花岗岩风化壳的崩岗地形与土壤侵蚀. *中国水土保持*, 1989 (2): 2—6
Wu K G, Clarke D, Diczenco P. On the landform subject to benggang (gully-slope collapse) relative to soil erosion in efflorescent shell of granite in Southern China (In Chinese). *Soil and Water Conservation in China*, 1989 (2): 2—6
- [56] 牛德奎. 赣南山地丘陵区崩岗侵蚀阶段发育的研究. *江西农业大学学报*, 1990, 12 (1): 29—36
Niu D K. Study on the development process of the collapse in hill area in Southern Jiangxi Province (In Chinese). *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 1990, 12 (1): 29—36
- [57] 卫伟, 贾福岩, 陈利顶, 等. 黄土丘陵区坡面水蚀对降雨和下垫面微观格局的响应. *环境科学*, 2012, 33 (8): 2674—2679
Wei W, Jia F Y, Chen L D, et al. Response of sloping water erosion to rainfall and micro-earth pattern in the Loess hilly area (In Chinese). *Environmental Science*, 2012, 33 (8): 2674—2679
- [58] 黄欢, 何丙辉, 鲍玉海, 等. 不同模式地埂植物篱对土壤颗粒组成特征参数的影响. *水土保持学报*, 2014, 28 (6): 256—261
Huang H, He B H, Bao Y H, et al. Effects of different terrance hedgerow patterns on the characteristic parameters of soil particle size distribution (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28 (6): 256—261
- [59] Schönbrodt S, Saumer P, Behrens T, et al. Assessing the USLE crop and management factor C for soil erosion modeling in a large mountainous watershed in Central China. *Journal of Earth Science*, 2010, 21 (6): 835—845
- [60] 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. *气象与减灾研究*, 2006, 9 (1): 29—33
Wei L, Shan J S, Zhu X Q. Preliminary analysis of the impact of forest cover on landslide triggered by torrential rainfall (In Chinese). *Meteorology and Disaster Reduction Research*, 2006, 9 (1): 29—33
- [61] 曾国华, 谢金波, 李宾彝, 等. 南方花岗岩区各种崩岗的整治途径. *中国水土保持*, 2008 (1): 16—18
Zeng G H, Xie J B, Li B L, et al. Approach of Benggang control in the granite region of Southern China (In Chinese). *Soil and Water Conservation in China*, 2008 (1): 16—18
- [62] 江金波. 再论崩岗侵蚀的成因与防治——以德庆、五华两地为例. *中国水土保持*, 1995 (1): 19—22
Jiang J B. Further discussion on the genesis of Benggang and its prevention and control (In Chinese). *Soil and Water Conservation in China*, 1995 (1): 19—22
- [63] 牛德奎, 郭晓敏, 左长青, 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. *江西农业大学学报*, 2000, 22 (2): 204—208
Niu D K, Guo X M, Zuo C Q, et al. Analysis of the distribution and environmental surroundings of collapsed hills land of red soil in South of China (In Chinese). *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2000, 22 (2): 204—208
- [64] 蒋芳市, 黄炎和, 林金石, 等. 多场次降雨对崩岗崩积体细沟侵蚀的影响. *中国水土保持科学*, 2014, 12 (6): 1—7
Jiang F S, Huang Y H, Lin J S, et al. Effects of repetitive rainfalls on rill erosion of coluvial deposit in granite slope collapse (In Chinese). *Science of Soil and Water Conservation*, 2014, 12 (6): 1—7
- [65] 廖义善, 卓慕宁, 谢真越, 等. 崩岗崩积体坡面产沙与坡面形态的耦合影响. *水土保持学报*, 2017, 31 (6): 66—72
Liao Y S, Zhuo M N, Xie Z Y, et al. Coupling effects of sediment yield with the erosion slope morphology of the colluvial deposits of Benggang (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31 (6): 66—72
- [66] 王秋霞, 丁树文, 邓羽松, 等. 人工模拟降雨下花岗岩崩岗区不同层次土体产流产沙特征. *水土保持学报*,

- 2016, 30 (6): 7—12
- Wang Q X, Ding S W, Deng Y S, et al. Characteristics of runoff and sediment of different soil layers in granite collapse region under artificial rainfall simulation condition (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30 (6): 7—12
- [67] 梁双双, 林金石, 黄炎和, 等. 模拟雨滴条件下崩壁不同土层的溅蚀特征. *水土保持研究*, 2017, 24 (1): 43—48
- Liang S S, Lin J S, Huang Y H, et al. Splash erosion characteristics of different soil layers on the collapsing wall under simulated raindrop (In Chinese). *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, 24 (1): 43—48
- [68] 梁音, 宁堆虎, 潘贤章, 等. 南方红壤区崩岗侵蚀的特点与治理. *中国水土保持*, 2009 (1): 31—34
- Liang Y, Ning D H, Pan X Z, et al. The features and way of governance of Benggang in red soil region of Southern China (In Chinese). *Soil and Water Conservation in China*, 2009 (1): 31—34
- [69] 丘世钧. 红土坡地崩岗侵蚀过程与机理. *水土保持通报*, 1994, 14 (6): 31—40
- Qiu S J. The process and mechanism of red earth slope disintegration erosion (In Chinese). *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1994, 14 (6): 31—40
- [70] 刘昌鑫, 潘健, 邓羽松, 等. 干湿循环对崩岗土体稳定性的影响. *水土保持学报*, 2016, 30 (6): 253—258
- Liu C X, Pan J, Deng Y S, et al. The influence of wet-dry cycles on Collapsing gully soil stability (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30 (6): 253—258
- [71] 周红艺, 李辉霞, 叶奇, 等. 华南活动崩岗崩壁土体裂隙发育规律试验研究. *水土保持研究*, 2016, 23 (1): 338—342
- Zhou H Y, Li H X, Ye Q, et al. Simulation of morphological development of soil cracks in the collapsing hill region of Southern China (In Chinese). *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, 23 (1): 338—342
- [72] 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. *水利学报*, 2013, 44 (10): 1175—1181
- Chen X A, Yang J, Xiong Y, et al. Research on the soil characteristics and factors of collapsing erosion in the red soil zone (In Chinese). *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, 44 (10): 1175—1181
- [73] 魏玉杰, 吴新亮, 蔡崇法. 崩岗体剖面土壤收缩特性的空间变异性. *农业机械学报*, 2015, 46 (6): 154—159
- Wei Y J, Wu X L, Cai C F. Spatial variability of soil shrinkage characteristics in profile of slope disintegration body (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46 (6): 154—159
- [74] 张晓明, 丁树文, 蔡崇法. 干湿效应下崩岗区岩土抗剪强度衰减非线性分析. *农业工程学报*, 2012, 28 (5): 241—245
- Zhang X M, Ding S W, Cai C F. Effects of drying and wetting on nonlinear decay of soil shear strength in slope disintegration erosion area (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Engineering*, 2012, 28 (5): 241—245
- [75] 邓羽松, 丁树文, 蔡崇法, 等. 鄂东南崩岗剖面土壤水分特征曲线及模拟. *土壤学报*, 2016, 53 (2): 355—364
- Deng Y S, Ding S W, Cai C F, et al. Characteristic curves and model analysis of soil moisture in collapse mound profile in Southeast Hubei (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53 (2): 355—364
- [76] 陶 Y, 何 Y B, 段 X Q, 等. 崩岗“五位一体”系统性治理措施探讨. *中国水土保持*, 2016 (4): 65—68
- Tao Y, He Y B, Duan X Q, et al. Preferential flows and soil moistures on a Benggang slope: Determined by the water and temperature co-monitoring. *Journal of Hydrology*, 2017, 553: 678—690
- [77] 张淑光, 姚少雄, 梁坚大, 等. 崩岗和人工土质陡壁快速绿化的研究. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1999, 5 (5): 67—71
- Zhang S G, Yao S X, Liang J D, et al. Research for rapidly afforesting collapse mound and man-made earth cliff (In Chinese). *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1999, 5 (5): 67—71
- [78] 马媛, 丁树文, 何溢钧, 等. 崩岗“五位一体”系统性治理措施探讨. *中国水土保持*, 2016 (4): 65—68
- Ma Y, Ding S W, He Y J, et al. Discussion on the “five -in-one” integrated control model of Benggang (In Chinese). *Soil and Water Conservation in China*, 2016 (4): 65—68
- [79] 廖建文. 广东省崩岗侵蚀现状与防治措施探讨. *人民珠江*, 2006 (1): 35—37
- Li M, Yao W Y, Ding W F, et al. Effect of grass coverage on sediment yield in the hillslope-gully side erosion system. *Journal of Geographic Science*, 2009, 19 (3): 321—330
- [80] 廖建文. 广东省崩岗侵蚀现状与防治措施探讨. *人民珠江*, 2006 (1): 35—37
- Liao J W. Study on the current situation and control measures of the Benggang in Guangdong Province (In Chinese). *Pearl River*, 2006 (1): 35—37
- [81] 李小林. 赣南崩岗治理模式探讨. *江西水利科技*, 2012, 38 (3): 166—168

- Li X L. The control paterns of collapse gully erosion in southern Jiangxi Province (In Chinese). *Jiangxi Hydraulic Science & Technology*, 2012, 38 (3) : 166—168
- [82] 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. *水土保持学报*, 2018, 32 (1) : 6—9
- Shi Z H, Yang J, Li Z W, et al. Soil conservation in the hilly red soil region of Southern China (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32 (1) : 6—9
- [83] 肖胜生, 杨洁, 方少文, 等. 南方红壤丘陵崩岗不同防治模式探讨. *长江科学院院报*, 2014, 31 (4) : 18—22
- Xiao S S, Yang J, Fang S W, et al. Different control measures for Collapsed gully erosion in hilly red region of South China (In Chinese). *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2014, 31 (4) : 18—22
- [84] Huth A K, Leydecker A, Sichman J O, et al. A two-component hydrograph separation for three high-elevation catchments in the Sierra Nevada, California. *Hydrological Processes*, 2004, 18: 1721—1733
- [85] Walling D E, Owens P N, Leeks G J L. Fingerprinting suspended sediment sources in the catchment of the River Ouse, Yorkshire, UK. *Hydrological Processes*, 1999, 13 (7) : 955—975
- [86] Rezanezhad F, Quinton W L, Price J S, et al. Examining the effect of pore size distribution and shape on flow through unsaturated peat using computed tomography. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2009, 13 (10) : 1993—2002

Research Progress on Benggang Erosion and Its Prevention Measure in Red Soil Region of Southern China

LIAO Yishan^{1,2} TANG Changyuan^{2,3} YUAN Zaijian¹ ZHUO Muning¹ HUANG Bing¹ NIE Xiaodong¹
XIE Zhenyue¹ LI Dingqiang^{1†}

(1 *Guangdong Key Laboratory of Agricultural Environment Pollution Integrated Control, Guangdong Institute of Eco-Environmental Science & Technology, Guangzhou 510650, China*)

(2 *School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China*)

(3 *Graduate School of Horticulture, Chiba University, Matsudo 271-8510, Japan*)

Abstract The benggang is a typical type of severe erosional morphology with a very high intensity of sediment transfer. This erosional morphology is widely distributed in the granitic red clay soil regions in the seven provinces of southern China. Benggang erosion seriously threatens regional ecological security and has been a key and hot spot in the soil erosion community. This paper aims to review the existing benggang research progresses and provide some insight for strategies of the benggang restoration. The paper first reviewed the research process of Benggang erosion and made an introduction of the constituent elements of Benggang. Then, the research status and progresses of Benggang erosion and control technologies were summarized from five aspects: erosion types, zonal distribution characteristics, developmental stage and morphological characteristics, driving factors, and control techniques. The weakness of the current research was also discussed. Finally, the paper put forwards some scientific issues that should receive more attention, including the coupling mechanism of Benggang hydraulic erosion and gravity erosion, the relationship between Benggang development and regional geomorphic development, the establishment of index for Benggang formation and development, the mechanism of Benggang prevention and control.

Key words Benggang; Erosion types; Developmental stages; Driving factors; Prevention measure

(责任编辑: 檀满枝)