

全球视野下崩岗侵蚀地貌及其研究进展

刘希林^{1,2}

(1. 中山大学地理科学与规划学院, 广州 510275; 2. 广东省城市化与地理环境空间模拟重点实验室, 广州 510275)

摘要:典型的崩岗具有“圆形露天剧场”般的沟头,发育在深厚的红色花岗岩风化壳上,通常包括集水坡面、崩壁、崩积体、沟道、洪积扇5个地貌组成部分;崩壁自上而下可分为表土层、风化红粘土层(红土层)、风化砂质红粘土层(砂土层)、风化粗碎屑层(碎屑层)。中国的崩岗与马达加斯加的lavaka属于同类地貌,两者具有地貌学上的可比性。崩岗群是劣地的表现形式之一,但与欧洲的badland有不同的侵蚀过程,也不同于意大利和巴西的两种沟谷侵蚀地貌calanchi和voco-roca。崩岗主要发育在华南和东南热带和亚热带湿润季风气候区中等偏缓的丘陵坡地上,由沟谷侵蚀发展而成,是沟谷侵蚀的高级阶段。崩岗沟道侵蚀产沙量占崩岗沟谷流域侵蚀产沙量的一半以上,其中沟道沟壁崩塌侵蚀产沙量与沟床下切侵蚀产沙量又各占崩岗沟道侵蚀产沙量的一半左右。野外人工模拟降雨试验是研究崩岗流域侵蚀、产流和产沙过程的有效手段。崩岗流域侵蚀产沙量可以通过崩岗沟谷和洪积扇地形测量加以估算。

关键词:崩岗流域;地形测量分析;模拟降雨;坡面径流;沟蚀过程;产沙量

1 引言

地表侵蚀以其各种形式毁坏耕地,造成土地退化、肥力下降。据估计,全世界每年约有10万km²的土地由于侵蚀作用而丧失(Luffman et al, 2015)。沟谷侵蚀是地表侵蚀的主要表现。崩岗侵蚀并列为中国最为严重的4大类侵蚀沟(黄土高原的沟壑、黑土区的大沟、西南地区的泥石流沟、南方红壤区的崩岗沟)。根据南方7省(区)的普查资料统计,该区共有大、中、小型崩岗23.91万处(冯明汉等, 2009)。因此,崩岗侵蚀已成为华南地表侵蚀泥沙的主要来源,也是中国最为严重的地貌灾害之一。

崩岗沟谷流域是一个完整的地貌系统且具有复杂的地貌响应。然而目前对崩岗沟谷流域地貌系统侵蚀过程的理解仍然十分有限。因此,不断增进对崩岗侵蚀过程的了解,认知其发生和发展机理,是华南水土流失防治和生态环境改善的重要课题。

2 崩岗及国外类似侵蚀地貌

崩岗是中国特色的地貌学名词,由我国著名地貌学家曾昭璇于1960年命名(吴志峰等, 1997)。Benggang这一中国特色的英文名词,最早由中国地貌学家许炯心在国际学术期刊Catena上发表(Xu, 1996),他以广东五华县崩岗为例,首次向世界展示了中国崩岗侵蚀的发育特征及其影响因素,并将崩岗归属于小型侵蚀地貌,认为是水力和重力共同侵蚀的结果。时隔22年后,中国学者再次以Benggang为标题词,在重要国际学术期刊Journal of Soils and Sediments发表了野外模拟降雨条件下广东五华县莲塘岗崩岗崩积体坡面径流与土壤水分含量的最新试验研究成果(Liu et al, 2018)。

早期的崩岗定义,来源于广东梅州五华县当地客家人所称的“丘陵山地冲沟源头汇水区围椅状崩塌崖壁地貌”,也即崩塌的山岗,在地貌分类中属于花岗岩丘陵地貌(中国科学院《中国自然地理》编辑

收稿日期:2017-08-22;修订日期:2017-12-21。

基金项目:国家自然科学基金项目(41071186)[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41071186]。

作者简介:刘希林(1963-),男,湖南新邵人,博士,教授,博士生导师,主要从事地貌灾害过程及评估和预测研究,E-mail: liuxilin@mail.sysu.edu.cn。

引用格式:刘希林. 2018. 全球视野下崩岗侵蚀地貌及其研究进展[J]. 地理科学进展, 37(3): 342-351. [Liu X L. 2018. Benggang erosion landform and research progress in a global perspective[J]. Progress in Geography, 37(3): 342-351.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2018.03.005

委员会, 1980)。后来, 中国地貌学家吴正(1999)将崩岗定义为发育在侵蚀沟头的集水盆, 由于崩岗的发生发展与流水作用形成的沟谷地貌密切相关, 将其归属于暴雨地貌。虽然暴雨地貌这一名称目前已很少使用, 但崩岗这一地貌学命名却被保留下来(张大林等, 2014)。所以, 换言之, 崩岗是指沟头呈“倒泪珠”状的具有一定流域面积的侵蚀沟。鉴于此, 完整的崩岗流域包括集水坡面、崩壁、崩积体(坡水堆积物)、沟道、洪积扇(俗称沙渍地)5个地貌组成部分(图1)。

崩岗侵蚀主要发育在华南和东南热带和亚热带湿润季风气候区。崩岗可发育在砂页岩(邱世钧, 1999)、砂砾岩、泥质岩、碳酸盐岩乃至第四纪红土上(赵辉等, 2006), 但大多数崩岗主要发育在华南和东南花岗岩厚层风化壳上, 因此, 花岗岩风化壳及其风化土体是崩岗发育的主要物质基础(刘希林等, 2013)。国外虽无“崩岗侵蚀”之说法, 但国外有类似的侵蚀地貌可与之相比较。在马达加斯加, 有一种称之为lavaka的侵蚀沟谷, 这种具有“圆形露天剧场”般沟头的沟谷, 发育在深厚的红色花岗岩风化壳上, 沟谷切穿顶部表土层, 出露新鲜的“伤口”般的地貌景观(Wells et al, 1991)。lavaka上部为坚实的风化红粘土层(简称红土层)(0.5~2 m), 下部为几m至十几m厚的风化砂质红粘土层(简称砂土层)。易碎的砂土层含有大量的粗粒物质, 相比红土层, 砂土层具有更高的透水性(Voarintsoa et al, 2012)。砂土层下部为厚度20~50 m的花岗岩风化粗碎屑层(简称碎屑层)。在活跃的lavaka沟口部位, 分布有泥石流扇形地, 局部长有植被(图2)(Cox

et al, 2010)。中国崩岗土体的垂直剖面自上而下通常分为: 表土层、红土层、砂土层、碎屑层。由此看来, lavaka的物质组成、剖面结构和土体特性, 与中国崩岗基本相同, 具有地貌学上的可比性(图3)。

在巴西东南部的热带湿润地区, 有一种广泛分布的令人惊奇的侵蚀沟谷, 当地称之为voco-roca(图4)(Bacellar et al, 2005)。这种沟谷沟长400~500 m, 沟宽约150 m, 沟深可达50 m, 通常发育在15°~20°的缓坡地带。上部为抗蚀能力强、有机质含量高的坡积物, 下部为厚度可达50 m的花岗岩风化残积物。Bacellar等(2005)认为, 在其“圆形露天剧场”般的沟头, 因含有承压地下水并处于亚稳定状态, 容易产生泥流。泥流的切割, 使风化残积物在重力作用下发生坍塌, 导致沟壁后退、沟床拓宽。从有限的文献资料看, vocoroca类似于benggang和lavaka, 但是否属于同类地貌, 还需做进一步对比研究。

在地中海气候的意大利中部, 有一种奇特的侵蚀地貌称之为calanchi, 也即意大利以外学者所称的badland(Caraballo-Arias et al, 2014; Neugirg et al, 2016)。Moretti等(2000)认为, calanchi是沟谷流水侵蚀与重力块体运动复合作用的结果, calanchi是badland景观的一部分, 但有其特点, 它发育在上部为黏土和泥灰土、下部为沙黏土和砂土的亚平宁山麓地带。典型的calanchi被描述为: 一个马蹄形山谷, 被众多的支沟切割成刀刃状的脊峰, 沟床底部有泥流(图5)。Moretti等(2000)在论述calanchi时注意到, 浅表层的土体蠕动可使地表水直接下渗至滑动面, 由此导致表土层快速液化并转化为泥流。因此calanchi与benggang和lavaka相似, 但它们的地貌学意义并不完全相同。



图1 广东德庆县典型崩岗侵蚀地貌

Fig.1 Typical benggang landform in Deqin County of Guangdong Province



图2 马达加斯加典型lavaka侵蚀地貌(Jungers摄)

Fig. 2 Lavaka landform in Madagascar (photo by Jungers)

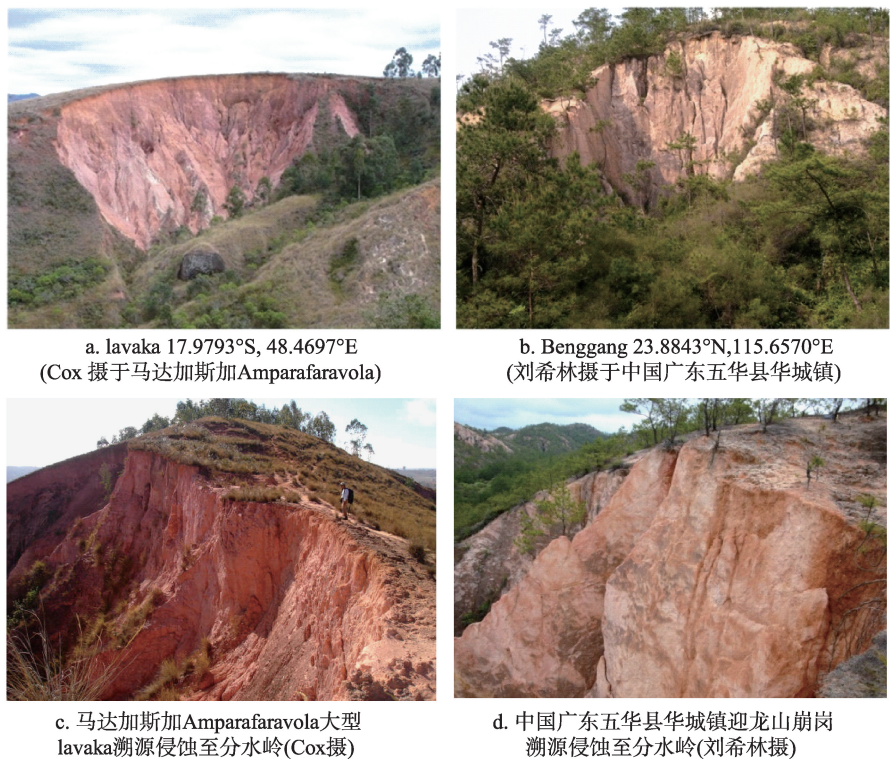


图3 马达加斯加lavaka与中国benggang地貌形态对比

Fig. 3 Morphometric comparison of lavaka in Madagascar and benggang in China



图4 巴西东南部A、B两条沟谷向中部分水岭溯源侵蚀,类似于中国的条形崩岗(授权引自 Bacellar et al, 2005)

Fig.4 Gullies A and B in southeastern Brazil retreated by erosion toward the middle ridge, similar to the strip-type benggangs in China (from Bacellar et al, 2005)

美国学者(Cox et al, 2010)、巴西学者(Bacellar et al, 2005)和意大利学者(Moretti et al, 2000)在研究 lavaka、voco-roca 和 calanchi 侵蚀地貌时都提到有泥石流/泥流存在,但未有详细的研究。中国学者在对广东五华县莲塘岗崩岗进行全方位、多视角、长达4年的研究发现,崩岗流域一旦遭遇降雨,即可在沟谷中产生一种特殊的固、液两相流,由此提出了崩岗泥砂流的概念,并认为泥砂流是介于高含沙水流与稀性泥石流之间的中间类型,建议将其定义为泥石流的一个亚类(张大林等, 2014)。已有初步成果表明,泥砂流是崩岗沟谷侵蚀的主要外营力,是沟

谷泥沙输移的主要载体。深刻认识泥砂流在崩岗沟谷侵蚀及流域产沙中的独特作用,具有重要的科学价值。

Xu(1996)认为,当多个崩岗发育在同一山坡形成崩岗群时,就可以称之为“劣地”,也即 badland。他的这一观点,最早将中国的 benggang 与国际上的 badland 联系起来。广义上“崩岗”属于“劣地”的一种类型,但就其地貌发育过程而言, benggang 并不完全等同于 badland,两者在侵蚀类型和机理过程上是有所区别的(图6)。尽管如此,国际上有关 badland 侵蚀的研究方法,对中国 benggang 侵蚀的研究



图5 意大利西西里岛典型 calanchi 侵蚀地貌
(Caraballo-Arias et al, 2014)

Fig.5 Typical calanchi landform in Sicily of Italy
(Caraballo-Arias et al, 2014)

仍然具有借鉴意义。近30年来, badland 研究文献中有关侵蚀产沙量和侵蚀速率的研究一直呈上升趋势(Gallart et al, 2013)。包括中国南方红壤区的沟谷侵蚀(即 benggang 侵蚀)、马达加斯加的 lavaka 侵蚀和地中海地区的 badland 侵蚀,都已列为国际地表侵蚀科学研究的热点(Boardman, 2006)。由此可见,中国崩岗侵蚀的研究,处于世界同类研究的前沿,研究成果具有世界可比性,是能引起国际同行广泛关注和浓厚兴趣的研究领域。

3 崩岗沟谷侵蚀产流产沙与野外人工模拟降雨试验

崩岗主要发育在中等偏缓的丘陵坡地上。在福建永春县,崩岗发育的山坡大多为 $20^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 的中等坡度(Xu, 1996)。在马达加斯加, lavaka 主要发育

在 $10^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 的缓坡上(Voarintsoa et al., 2012)。崩岗侵蚀由沟谷侵蚀发展而来(阮伏水, 1996),崩岗侵蚀是沟谷侵蚀的高级阶段(Bocco, 1991; diCenzo et al, 1997; Luk et al, 1997)。

沟谷是流水地貌的一种。沟谷侵蚀的早期研究,对重力块体运动重视不够(Bocco, 1991)。近年来,中国学者在广东五华县莲塘岗崩岗的研究表明,崩岗沟道侵蚀产沙量占崩岗沟谷流域侵蚀产沙总量的53.6%;崩塌侵蚀产沙量占崩岗沟谷流域侵蚀产沙总量的46.4%。在崩岗沟道侵蚀产沙量中,流水下切沟床产沙量占46.6%;沟壁重力坍塌产沙量占53.4%(刘希林等, 2016)。Martínez-Casanovas等(2009)研究也表明,沟壁重力坍塌的产沙量约占沟道侵蚀产沙量的一半左右。

侵蚀测量通常有两种方式:仪器设备的直接测量和模型评估的间接测量。在侵蚀的原因和结果的研究中,许多学者力图在侵蚀变量之间寻找相互关系并建立侵蚀模型,这样就可以通过已知侵蚀变量来推求未知侵蚀参数,从而达到间接测量侵蚀结果的目的(Stroosnijder, 2005)。侵蚀模型的建立,需要大量的测量数据来支撑。因此,只有通过更多的侵蚀数据的测量(包括实体测量和试验测量),才能更好地建立和验证侵蚀模型。

实验室试验测量的优点是可对因变量的范围进行较好的控制,使得测量结果可以重复。不少学者用室内模型试验测量沟谷横断面变化。Bocco (1991)曾提到有学者用面积坡度值(流域面积与沟床坡度的乘积,代表沟谷水流功率)与沟谷宽度进行回归分析,建立沟谷宽度的计算模型;Wells等(2013)在研究沟床坡度和径流量对沟谷横断面的影响时,设计了3组坡度、3组流量、共9个组合的实验室小规模水流冲刷试验,通过摄像记录和图像解



图6 西班牙东南部典型 badland 地貌及其坡面细沟侵蚀(Solé-Benet et al, 1997; Bouma et al, 2000)

Fig. 6 Typical badland in southeastern Spain (Solé-Benet et al, 1997; Bouma et al, 2000)

译,得出估算沟谷宽度的经验公式。然而,Poesen等(2003)认为,沟谷长度是决定沟谷侵蚀产沙的关键因素,若要推算沟谷的侵蚀产沙量,正确估算沟谷长度要比估算沟谷宽度和沟谷深度重要得多。

尽管实验室人工模拟降雨试验已改进了对“降雨—径流—产沙”过程的解释和描述,但试验设计的不同降雨强度在其降雨过程中仍是恒定的,土壤也是非原状的。实验室人工模拟降雨强度通常较高,一般都是暴雨和大暴雨量级(Aksoy et al, 2012; Jiang et al, 2014; Newesely et al, 2015)。Luffman等(2015)认为,实验室人工模拟降雨试验虽然可以控制降雨强度和降雨历时,但不能完全模拟野外自然降雨条件下土壤侵蚀的真实变化。按一定比例放大的实验室试验测得的侵蚀速率,有可能导致野外尺度下土壤侵蚀速率被低估。因此,野外现场人工模拟降雨试验研究,以及自然降雨条件下的野外现场实证研究,可以更好地接近研究结果的真实性和真实性。

野外人工模拟降雨试验的优点还在于可选择适合的空间尺度,并在真实的土壤和植被条件下进行(Martínez-Murillo et al, 2013)。在badland的有关研究中,已有使用野外人工模拟降雨探讨坡度与土壤侵蚀速率以及径流量与土壤稳定渗透率之间的关系(Cerdà et al, 1997);用恒定降雨强度来评估不同场地的产流、产沙和土壤渗透率以及与植被覆盖度之间的关系(Solé-Benet et al, 1997);通过野外人工模拟降雨,建立土壤含水量与径流含沙量之间的关系,并用其解释土壤侵蚀过程和机理(Bouma et al, 2000);近年来,国内学者在广东五华县莲塘岗崩岗开展了人工模拟降雨试验条件下崩积体坡面产流过程的研究(图7)(刘希林等, 2015)。总之,研究降雨驱动下的崩岗侵蚀及其产流产沙过程,野外人工模拟降雨试验是必不可少的,也是实验室人工模拟降雨试验的重要补充。

人工模拟降雨是常用的试验测量手段。人工



图7 模拟降雨条件下崩积体坡面侵蚀产流试验

Fig.7 Slope runoff experiment in benggang colluvium under simulated rainfall

模拟降雨目前尚无统一的标准或方法的规范,也不存在标准化的模拟降雨器的设计(Wildhaber et al, 2012; Iserloh et al, 2013)。在各类人工组装的小型可移动式野外模拟降雨器中,世界各地使用的人工模拟降雨高度和降雨面积也各不相同(表1)。尽管如此,学者们普遍认为,模拟降雨器仍是研究降雨对地表侵蚀及其产流产沙过程十分有效而强有力的创新工具(Aksoy et al, 2012; Wildhaber et al, 2012; Iserloh et al, 2013; Newesely et al, 2015)。

在人工模拟降雨和自然降雨条件下,影响坡面侵蚀和沟谷侵蚀产流产沙的降雨因子包括:降雨总量、前期雨量、降雨历时、平均雨强、最大雨强。Sirvent等(1997)认为,高强度降雨与高侵蚀产沙呈正相关;但Luffman等(2015)认为,在热带和亚热带湿润地区,降雨总量和降雨历时对产流产沙的作用更为明显。降雨初期由于渗透充分,很难产生地表径流,随着降雨继续和累计雨量增加,土体水分逐渐饱和,渗透率趋于稳定,此时的降雨才能产生地表径流并导致侵蚀作用的发生。因此,在人工模拟降

表1 部分野外模拟降雨器主要性能及其应用

Tab.1 Key properties of some field rainfall simulators and applications

国别	使用者	年份	降雨高度/m	降雨面积/m ²	应用实例
荷兰	Blijenberg et al	1996	1.5	1×1	坡面泥石流启动
瑞士	Wildhaber et al	2012	1.5	1×1	坡面侵蚀与产流产沙
中国	Huang J et al	2013	1.2	1.5×1	降雨强度和坡度对渗透的影响
中国	Ni H Y	2015	4.5	2.5×1.2	沟谷泥石流启动
中国	Cao et al	2015	3.0	1×1	水土流失
中国	刘希林等	2015	2.0	2×1	崩积体坡面产流

雨试验研究崩岗侵蚀时,对降雨总量和降雨历时应予以特别关注。

4 崩岗沟谷侵蚀产流输沙与沟谷流域侵蚀产沙量

Poesen等(2003)曾提出沟谷侵蚀需要解决的若干问题,其中包括:在特定气候条件和土地利用条件下,沟道侵蚀产沙量在沟谷流域侵蚀产沙量中的比重有多大?能找到沟道侵蚀发生的地貌临界值吗?是否存在能推算和预测沟谷流域侵蚀产沙量的物理模型?这些问题通过十余年来的研究,已经取得了很大的进展,但崩岗侵蚀作为沟谷侵蚀的一种特殊类型,其水力—重力复合侵蚀机理目前还不是很清楚。

影响侵蚀产沙量的因素除降雨以外还有坡度,但坡度对侵蚀作用的影响并非想象的那么简单。有研究认为,坡度对侵蚀产沙量和径流量均无显著影响(Govers, 1992);有研究表明,坡度对侵蚀产沙量有正向影响,对径流量没有影响(Cerdà et al, 1997);Solé-Benet(1997)以55 mm/h的恒定降雨强度在0.24 m²径流试验场进行的16次每次30 min的人工模拟降雨试验表明,坡度与径流量呈正相关;雷廷武等(2002)研究表明,坡度对细沟侵蚀产沙能力(细沟水流所携带的最大泥沙含量)的影响存在一个20°的临界坡度,小于此坡度则产沙能力随坡度增大而增大,大于此坡度则产沙能力趋于稳定而与坡度无关;Luffman等(2015)认为,对于侵蚀产沙量而言,独立的坡度因子可能并不是具有可以合理解释的显著性变量。

影响侵蚀产沙量的因素还有土壤可蚀性。Bacceller等(2005)用土壤中粉砂与黏土的比率(Silt-Clay Ratio, SCR)作为土壤可蚀性的测量指标。当SCR低于0.66时土壤可蚀性低;当SCR大于1.44时土壤可蚀性高;当SCR介于两者之间时土壤可蚀性中等。这一方法所采用的依据虽然是定量的,但对土壤可蚀性结果的划分仍然是定性的。Poesen等(2003)认为,土壤抗剪强度代表了土壤抵抗流水侵蚀的能力,可以作为土壤可蚀性的替代指标。

有关沟谷侵蚀物理模型问题,1966年Seginer(1966)认为可能不存在某种物理方程能用于描述沟谷侵蚀的发育;但Bocco(1991)认为,采用统计分析方法研究沟谷侵蚀是可行的。在现有的土壤侵蚀

模型中,1965年美国建立的土壤流失通用方程(USLE)于1997年修订后,在全世界推广应用。USLE模型是一个以降雨、坡长、坡度、土地覆被、土地管理、水土保持6个因子连乘方式来估算土壤侵蚀量的经验模型,主要用于计算坡面流和溅蚀产生的侵蚀量。1995年美国农业部发布的WEPP模型(Water Erosion Prediction Project)是基于质量守恒的连续流方程,主要用于计算细沟侵蚀和细沟间侵蚀产生的侵蚀量(Aksoy et al, 2005)。因为崩岗侵蚀是流水冲刷和重力崩塌构成的复合侵蚀,亦即崩岗沟谷流域侵蚀量是沟谷侵蚀和崩塌侵蚀复合作用的结果,所以美国的USLE模型和WEPP模型不适用于中国崩岗沟谷流域侵蚀量的计算。

一般而言,细沟的最大宽度和最大深度以0.5 m为限,以此作为与切沟的区分界限(Bocco, 1991)。细沟侵蚀的地貌表现即坡面流侵蚀,水流深度通常为厘米量级甚至更浅。因此,与切沟和冲沟侵蚀相比,细沟侵蚀产沙量较小,但却是坡面侵蚀向沟谷侵蚀转化的关键(Poesen et al, 2003)。因此,崩积体坡面细沟侵蚀也是崩岗侵蚀研究的重要内容(蒋芳市等, 2014)。相对而言,由于细沟间侵蚀产沙量仅为细沟侵蚀产沙量的1/40(雷廷武等, 2009),因此,崩积体坡面上细沟与细沟间的侵蚀差异研究的价值相对较小。

近年来,中国有关崩岗侵蚀的研究在上述领域也取得了进展。比如Jiang等(2014)在暴雨和大暴雨量级的降雨强度及陡坡条件下,通过室内人工模拟降雨试验得出了崩积体陡坡渗流与径流、产沙量与含沙量之间的经验公式;黄炎和等(2015)通过不同流量结合不同坡度的室内放水冲刷试验,研究了崩积体坡面侵蚀及其产沙规律,得出了水流流速和流量与坡度的幂函数关系,并将单位水流功率(反映水流侵蚀能力)表达为流速与坡度正弦值的乘积,分析得出产沙率与单位水流功率的线性回归方程;Lin等(2015)采用指纹因子法,识别洪积扇的泥沙来源,定量评估崩岗红土层、砂土层、碎屑层物质对崩岗流域产沙的影响;周红艺等(2016)室内试验研究了广东德庆县崩岗侵蚀区崩壁不同部位土体脱湿作用下裂隙发育及其演变规律,表明崩壁上部土体更容易产生裂隙、且裂隙发育程度比下部土体更为充分。有关中国崩岗侵蚀的研究,近年已有学者采用文献计量法和知识图谱法(陈培波等, 2015;邱锦安等, 2017),对中国30年来崩岗研究的发展历

史、研究主题、研究单位、研究作者、研究进展和研究现状进行了专门综述,本文在此不再赘述。

5 结论与展望

(1) Benggang 与 lavaka 的物质组成、剖面结构和土体特性基本相同,两者具有地貌学上的可比性,可归为同类地貌。广义上崩岗属于劣地的一种类型,但其地貌发育过程并不完全等同于 badland,两者在侵蚀过程和机理上有所区别。中国南方红壤区的 benggang 侵蚀、非洲马达加斯加的 lavaka 侵蚀和欧洲地中海地区的 badland 侵蚀,都已成为国际地表侵蚀科学研究的热点。

(2) 降雨是崩岗流域产流产沙和输沙的主要驱动力。野外人工模拟降雨试验是研究降雨驱动条件下崩岗侵蚀及其产流产沙过程的重要手段和工具,也是实验室人工模拟降雨试验的必要补充和完善。

(3) 崩积体和沟床物质是崩岗沟谷流域侵蚀产沙和输沙的主要来源,崩积体在崩岗沟谷流域侵蚀产沙来源中的作用或比重,同崩岗沟谷流域崩积体发育规模有关,崩积体越少、流域面积越大,则侵蚀产沙比重越小。在崩岗沟谷侵蚀过程中,泥砂流可将部分悬浮质泥沙带入下游主河;在后期雨水冲刷过程中,洪积扇上沉积的部分细颗粒泥沙亦可被带入下游主河,但带走的泥沙量与洪积扇上沉积的泥沙量相比是很小的,并且这是一个漫长的自然过程。因此,通过对正在活跃发育的、典型的、未被人为强烈干扰和改造的洪积扇地形特征与崩岗流域地貌特征的地形测量学分析,建立两者之间的成因逻辑关系,用地形测量学统计模型进行崩岗流域侵蚀产沙量的定量评估是可行的。

(4) 崩岗沟谷侵蚀是一种地貌临界现象,而这种临界现象只有在降雨、地形、土壤、径流等因子超过某一临界阈值时才会发生。通过对崩岗沟谷流域特征和洪积扇特征的形态测量,采用统计分析和回归模拟,对崩岗沟谷侵蚀及其侵蚀产沙量进行定量评估;基于“降雨产流—侵蚀产沙”的野外模拟试验,以及自然降雨条件下崩岗泥砂流的实证研究,深入研究和探讨崩岗泥砂流的产流输沙过程和崩岗沟谷流域的侵蚀产沙量,可更好地理解 and 认识崩岗侵蚀的过程和机理。

参考文献(References)

- 陈培波, 刘希林. 2015. 中国崩岗研究进展的文献计量分析[J]. 热带地理, 35(6): 895-900. [Chen P B, Liu X L. 2015. Bibliometric analysis of the progress in benggang research in China[J]. Tropical Geography, 35(6): 895-900.]
- 冯明汉, 廖纯艳, 李双喜, 等. 2009. 我国南方崩岗侵蚀现状调查[J]. 人民长江, 40(8): 66-68, 75. [Feng M H, Liao C Y, Li S X, et al. 2009. Investigation on status of hill collapsing and soil erosion in southern China[J]. Yangtze River, 40(8): 66-68, 75.]
- 黄炎和, 赵淦, 蒋芳市, 等. 2015. 崩岗崩积体陡坡侵蚀的水动力学特征[J]. 森林与环境学报, 35(4): 304-309. [Huang Y H, Zhao G, Jiang F S, et al. 2015. Hydrodynamic characteristics in steep colluvial deposits slope[J]. Journal of Forest and Environment, 35(4): 304-309.]
- 蒋芳市, 黄炎和, 林金石, 等. 2014. 多场次降雨对崩岗崩积体细沟侵蚀的影响[J]. 中国水土保持科学, 12(6): 1-7. [Jiang F S, Huang Y H, Lin J S, et al. 2014. Effects of repetitive rainfalls on rill erosion of coluvial deposit in granite slope collapse[J]. Science of Soil and Water Conservation, 12(6): 1-7.]
- 雷廷武, 张晴雯, 闫丽娟. 2009. 细沟侵蚀物理模型[M]. 北京: 科学出版社. [Lei T W, Zhang Q W, Yan L J. 2009. Xigou qinshi wuli moxing[M]. Beijing, China: Science Press.]
- 雷廷武, 张晴雯, 赵军, 等. 2002. 细沟侵蚀动力过程输沙能力试验研究[J]. 土壤学报, 39(4): 476-482. [Lei T W, Zhang Q W, Zhao J, et al. 2002. Laboratory study on sediment transport capacity in the dynamic process of rill erosion[J]. Acta Pedologica Sinica, 39(4): 476-482.]
- 刘希林, 唐川, 张大林. 2015. 野外模拟崩岗崩积体坡面产流过程及水分分布[J]. 农业工程学报, 31(11): 179-185. [Liu X L, Tang C, Zhang D L. 2015. Simulated runoff processes on colluvial deposits of Liantanggang benggang and their water distributions[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 31(11): 179-185.]
- 刘希林, 张大林, 贾瑶瑶. 2013. 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[J]. 地球科学进展, 28(7): 802-811. [Liu X L, Zhang D L, Jia Y Y. 2013. 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[J]. Advances in Earth Science, 28(7): 802-811.]
- 刘希林, 张大林, 唐川. 2016. 基于三维激光扫描的崩岗沟道侵蚀与坡向发育及其侵蚀量计算[J]. 应用基础与工程科

- 学学报, 24(5): 914-923. [Liu X L, Zhang D L, Tang C. 2016. Erosion volume calculation of benggang gully and their slope development based on 3D laser scanning[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 24(5): 914-923.]
- 邱锦安, 刘希林. 2017. 基于知识图谱的中国崩岗研究现状及综合分析[J]. 中国水土保持科学, 15(3): 139-148. [Qiu J A, Liu X L. 2017. Status and comprehensive analysis of benggang research in China based on knowledge maps [J]. Science of Soil and Water Conservation, 15(3): 139-148.]
- 邱世钧. 1999. 切割下坠: 砂页岩地区崩岗源头墙壁后退方式之一[J]. 水土保持通报, 19(6): 20-22. [Qiu S J. 1999. Cutting-toppling: One of patterns of slop disintegration erosion[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 19(6): 20-22.]
- 阮伏水. 1996. 福建崩岗沟侵蚀机理探讨[J]. 福建师范大学学报: 自然科学版, 12(增刊): 24-31. [Ruan F S. 1996. Study on erosion mechanism of collapse gully in Fujian[J]. Journal of Fujian Teachers University: Natural Science, 12 (S): 24-31.]
- 吴正. 1999. 地貌学导论[M]. 广州: 广东高等教育出版社. [Wu Z. 1999. Dimaoxue daolun[M]. Guangzhou, China: Guangdong Higher Education Press.]
- 吴志峰, 钟伟青. 1997. 崩岗灾害地貌及其环境效应[J]. 生态科学, 16(2): 91-96. [Wu Z F, Zhong W Q. 1997. Gravity gully erosion and it's influence[J]. Ecology Science, 16 (2): 91-96.]
- 张大林, 刘希林. 2014. 崩岗泥砂流粒度特性及流体类型分析: 以广东五华县莲塘崩岗为例[J]. 地球科学进展, 29(7): 810-818. [Zhang D L, Liu X L. 2014. Analysis of the grain size properties and flow body classes of the mud sand flow: An example of Liantanggang collapsing hill and gully in Wuhua county of Guangdong[J]. Advances in Earth Science, 29(7): 810-818.]
- 赵辉, 罗建民. 2006. 湖南崩岗侵蚀成因及综合防治体系探讨[J]. 中国水土保持, (5): 1-3, 20. [Zhao H, Luo J M. 2006. Analysis on genesis erosion of dilapidated granite and approach to integrated system of prevention and control in Hunan[J]. Soil and Water Conservation in China, (5): 1-3, 20.]
- 中国科学院《中国自然地理》编辑委员会. 1980. 中国自然地理: 地貌[M]. 北京: 科学出版社. [China Physical Geography Editorial Committee of Chinese Academy of Sciences. 1980. Zhongguo ziran dili: Dimao[M]. Beijing, China: Science Press.]
- 周红艺, 李辉霞, 叶奇, 等. 2016. 华南活动崩岗崩壁土体裂隙发育规律试验研究[J]. 水土保持研究, 23(1): 338-342. [Zhou H Y, Li H X, Ye Q, et al. 2016. Simulation of morphological development of soil cracks in the collapsing hill region of southern China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 23(1): 338-342.]
- Aksoy H, Kavvas M L. 2005. A review of hillslope and watershed scale erosion and sediment transport models[J]. Catena, 64(2-3): 247-271.
- Aksoy H, Unal N E, Cokgor S, et al. 2012. A rainfall simulator for laboratory-scale assessment of rainfall-runoff-sediment transport processes over a two-dimensional flume[J]. Catena, 98: 63-72.
- Bacellar L de A P, Coelho Netto A L, Lacerda W A. 2005. Controlling factors of gullying in the Maracujá catchment, southeastern Brazil[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 30(11): 1369-1385.
- Blijenberg H M, de Graaf P J, Hendriks M R, et al. 1996. Investigation of infiltration characteristics and debris flow initiation conditions in debris flow source areas using a rainfall simulator[J]. Hydrological Processes, 10(11): 1527-1543.
- Boardman J. 2006. Soil erosion science: Reflections on the limitations of current approaches[J]. Catena, 68(2-3): 73-86.
- Bocco G. 1991. Gully erosion: Processes and models[J]. Progress in Physical Geography, 15(4): 392-406.
- Bouma N A, Imeson A C. 2000. Investigation of relationships between measured field indicators and erosion processes on badland surfaces at Petrer, Spain[J]. Catena, 40(2): 147-171.
- Cao L X, Liang Y, Wang Y, et al. 2015. Runoff and soil loss from Pinus massoniana forest in southern China after simulated rainfall[J]. Catena, 129: 1-8.
- Caraballo-Arias N A, Conoscenti C, Di Stefano C, et al. 2014. Testing GIS-morphometric analysis of some Sicilian badlands[J]. Catena, 113: 370-376.
- Cerdà A, Carcía-Fayos P. 1997. The influence of slope angle on sediment, water and seed losses on badland landscapes [J]. Geomorphology, 18(2): 77-90.
- Cox R, Zentner D B, Rakotondrazafy A F M, et al. 2010. Shakedown in Madagascar: Occurrence of lavakas (erosional gullies) associated with seismic activity[J]. Geology, 38(2): 179-182.
- diCenzo P D, Luk S H. 1997. Gully erosion and sediment transport in a small subtropical catchment, South China[J]. Catena, 29(2): 161-176.

- Gallart F, Marignani M, Pérez-Gallego N, et al. 2013. Thirty years of studies on badlands, from physical to vegetational approaches: A succinct review[J]. *Catena*, 106: 4-11.
- Govers G. 1992. Relationship between discharge, velocity and flow area for rills eroding loose, non-layered materials[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 17(5): 515-528.
- Huang J, Wu P T, Zhao X N. 2013. Effects of rainfall intensity, underlying surface and slope gradient on soil infiltration under simulated rainfall experiments[J]. *Catena*, 104: 93-102.
- Iserloh T, Ries J B, Arnáez J, et al. 2013. European small portable rainfall simulators: A comparison of rainfall characteristics[J]. *Catena*, 110: 100-112.
- Jiang F S, Huang Y H, Wang M K, et al. 2014. Effects of rainfall intensity and slope gradient on steep colluvial deposit erosion in southeast China[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 78(5): 1741-1752.
- Lin J S, Huang Y H, Wang M K, et al. 2015. Assessing the sources of sediment transported in gully systems using a fingerprinting approach: An example from south-east China [J]. *Catena*, 129: 9-17.
- Liu X L, Qiu J A, Zhang D L. 2018. Characteristics of slope runoff and soil water content in benggang colluvium under simulated rainfall[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 18 (1): 39-48.
- Luffman I E, Nandi A, Spiegel T. 2015. Gully morphology, hillslope erosion, and precipitation characteristics in the Appalachian valley and Ridge province, southeastern USA [J]. *Catena*, 133: 221-232.
- Luk S H, Yao Q Y, Gao J Q, et al. 1997. Environmental analysis of soil erosion in Guangdong province: A Deqing case study[J]. *Catena*, 29(2): 97-113.
- Martínez-Casanovas J A, Ramos M C, García-Hernández D. 2009. Effects of land-use changes in vegetation cover and sidewall erosion in a gully head of the Penedès region (northeast Spain) [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34(14): 1927-1937.
- Martínez-Murillo J F, Nadal-Romero E, Regüés D, et al. 2013. Soil erosion and hydrology of the western Mediterranean badlands throughout rainfall simulation experiments: A review[J]. *Catena*, 106: 101-112.
- Moretti S, Rodolfi G. 2000. A typical "calanchi" landscape on the Eastern Apennine margin (Atri, Central Italy): Geomorphological features and evolution[J]. *Catena*, 40(2): 217-228.
- Neugirg F, Stark M, Kaiser A, et al. 2016. Erosion processes in calanchi in the Upper Orcia Valley, Southern Tuscany, Italy based on multitemporal high-resolution terrestrial LiDAR and UAV surveys[J]. *Catena*, 269: 8-22.
- Newesely C, Leitinger G, Zimmerhofer W, et al. 2015. Rain simulation in patchy landscapes: Insights from a case study in the Central Alps[J]. *Catena*, 127: 1-8.
- Ni H Y. 2015. Experimental study on initiation of gully-type debris flow based on artificial rainfall and channel runoff [J]. *Environmental Earth Sciences*, 73(10): 6213-6227.
- Poesen J, Nachtergaele J, Verstraeten G, et al. 2003. Gully erosion and environmental change: Importance and research needs[J]. *Catena*, 50(2-4): 91-133.
- Seginer I. 1966. Gully development and sediment yield[J]. *Journal of Hydrology*, 4: 236-253.
- Sirvent J, Desir G, Gutierrez M, et al. 1997. Erosion rates in badland areas recorded by collectors, erosion pins and profilometer techniques (Ebro Basin, NE-Spain) [J]. *Geomorphology*, 18(2): 61-75.
- Solé-Benet A, Calvo A, Cerda A, et al. 1997. Influences of micro-relief patterns and plant cover on runoff related processes in badlands from Tabernas (SE Spain)[J]. *Catena*, 31 (1-2): 23-38.
- Stroosnijder L. 2005. Measurement of erosion: Is it possible [J]. *Catena*, 64(2-3): 162-173.
- Voarintsoa N R G, Cox R, Razanatscheno M O M, et al. 2012. Relation between bedrock geology, topography and lavaka distribution in Madagascar[J]. *South African Journal of Geology*, 115(2): 225-250.
- Wells N A, Andriamihaja B, Rakotovololona H F S. 1991. Patterns of development of lavaka, Madagascar's unusual gullies[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 16(3): 189-206.
- Wells R R, Momm H G, Rigby J R, et al. 2013. An empirical investigation of gully widening rates in upland concentrated flows[J]. *Catena*, 101: 114-121.
- Wildhaber Y S, Bänninger D, Burri K, et al. 2012. Evaluation and application of a portable rainfall simulator on subalpine grassland[J]. *Catena*, 91: 56-62.
- Xu J X. 1996. Benggang erosion: The influencing factors[J]. *Catena*, 27(3-4): 249-263.

Benggang erosion landform and research progress in a global perspective

LIU Xilin^{1,2}

(1. School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 2. Guangdong Key Laboratory for Urbanization and Geo-Simulation, Guangzhou 510275, China)

Abstract: The typical benggang has an amphitheater-like gully-head, mainly occurs in the deeply weathered granite area in southern and southeastern China. It usually consists of five parts: water-collection slope, headwall, colluvium, channel, and debris fan. From top to bottom, benggang headwall may be divided into four soil layers: topsoil, red soil, sandy soil, and clastic soil. Benggang in China and lavaka in Madagascar belong to the same type of landform with comparable geomorphologic characteristics. Benggang may be considered as one of the badland landscapes, but it has different erosion process. It is also different from the other two gully erosion landforms in Italy and Brazil: calanchi and vocoroca. Benggang is mainly distributed in moderate hilly region and subtropical maritime climate zone of southern and southeastern China. Usually benggang is also considered to develop from gully erosion, and it is treated as the advanced stage of gully evolution. The sediment yield of benggang channel erosion accounts for more than half of the sediment amount of the whole benggang gully catchment, and likewise the sediment yield of channel-bed accounts for about half of the sediment amount of the whole gully catchment. Simulated rainfall is a powerful tool to study the effects of rainfall on surface processes and erosion. The in situ artificial simulated rainfall is an effective method to study benggang erosion, slope runoff, and sediment transportation in benggang gully catchment. Benggang erosion is a geomorphic critical phenomenon. This critical phenomenon occurs only when the rainfall, topography, soil, and runoff exceed their critical thresholds. Field artificial rainfall experiments based on simulated rainfall-slope runoff-erosion process-sediment production observations may greatly improve the understanding of benggang erosion in southern and southeastern China. The sediment yield of benggang catchment may be estimated by the morphometric analyses on the topographies of benggang gully and debris fan

Key words: benggang catchment; morphometric analysis; simulated rainfall; slope runoff; gully process; sediment yield