

南方崩岗侵蚀区崩壁龛穴发育特征与稳定性初探

何玲, 邓羽松

(广西大学林学院, 南宁 530004)

摘要: 南方花岗岩崩岗侵蚀区崩壁常见形似内凹洞的特殊地貌(龛穴), 该地貌的发育可引起崩壁失稳并扩大崩岗侵蚀范围。通过刻画龛穴形态演变过程, 研究龛穴发生的物质条件与驱动因素, 并结合力矩分析方法构建力学模型评价崩壁及龛穴稳定性。研究表明: 龛穴形态演变经历“雏形—发育—形成”3个过程, 剖面土层异质性是龛穴发育的基础条件, 水力与重力作为外部因素共同作用驱动龛穴发育。龛穴稳定性随其高度增加、角度减小而降低。龛穴的发育可能是崩岗溯源侵蚀启动的标志, 遏制龛穴形成有利于提高崩壁稳定性, 研究结果为崩岗侵蚀治理提供理论依据。

关键词: 崩岗侵蚀; 崩壁; 龛穴; 土体稳定性

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2023)03-0060-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2023.03.008

Preliminary Study of the Development and Stability of Niches in Collapsing Wall in Benggang Erosion Areas of Southern China

HE Ling, DENG Yusong

(College of Forestry, Guangxi University, Nanning 530004)

Abstract: Special features resembling internal hollows (niches-like ephemeral gully head) are common in the collapsing walls of granite Benggang erosion in southern China. This study investigated the material conditions and drivers of niches occurrence by describing the morphological evolution of the niches, and combined with moment analysis methods to construct mechanical models to evaluate the stability of collapsing walls and niches. Studies have shown that niches morphology evolves through three stages of “embryonic-development-formation”. Soil heterogeneity in the profile is the underlying condition for niche development, with hydrodynamics and gravity acting together as external factors to drive niche development. The stability of the niche decreases as its height increases and its angle decreases. The development of niches may be a sign of the initiation of headcut erosion of the Benggang, and the containment of niche formation is conducive to improving the stability of the collapsing wall. The results of the study provide a theoretical basis for Benggang erosion management.

Keywords: Benggang erosion; collapsing wall; niche; soil stability

沟蚀加速土壤退化过程^[1], 改变地貌演变与景观格局, 探究沟蚀机理对生态环境修复具有重要意义^[2-3]。崩岗是发生在南方红壤区一种严重的土壤侵蚀现象, 属于特殊的沟蚀类型^[4]。崩岗侵蚀集中分布于花岗岩丘陵区, 其突发性极强, 毁坏农田, 对当地土地资源和生态环境造成严重威胁^[5-6]。崩壁是山坡土体在水力与重力共同作用下崩塌而形成近似垂直的陡壁, 是崩岗系统中最活跃的部位^[7]。崩壁土层因花岗岩风化程度不同而呈现出纵向异质性规

律^[8]。为探究崩岗侵蚀的影响因素, 围绕水力作用与土力作用对崩壁进行持续研究并取得丰富的成果。在水力方面, 相关学者^[9-11]研究土壤水分运动、持水特性及径流冲刷过程等; 在土力方面, 针对崩壁土体的抗剪强度、无侧限抗压强度、崩解过程和收缩特性等进行研究^[12-13], 研究结果均表明, 崩岗形成受到水力和土力的双重作用。近年来, 围绕崩岗侵蚀机理开展研究, 通过野外实地考察发现, 崩壁常见向内凹进的浅洞(龛穴)。

收稿日期: 2022-11-01

资助项目: 国家自然科学基金项目(42007055); 广西自然科学基金项目(2021GXNSFBA075017)

第一作者: 何玲(1999—), 女, 广西桂林人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: hl147111@126.com

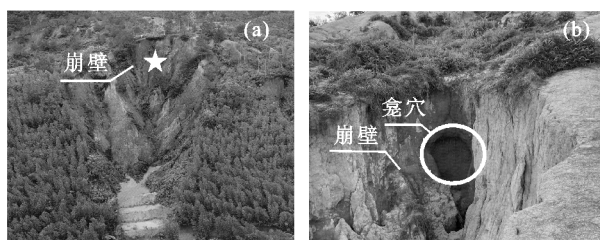
通信作者: 邓羽松(1988—), 男, 广西桂林人, 副教授, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀机理与水土保持研究。E-mail: denny2018@gxu.edu.cn

龛穴^[14]与黄土地区“潜蚀”现象、“内凹洞”^[15-16]、西南干热河谷的“水凼窝”^[17]及国外沟头出现的浅洞在形态方面较为相似。崩岗集中发生在南方花岗岩丘陵区,作为典型残积母质发育的红壤,区别于黄土、燥红土、变性土等类型土壤发育特征,目前,缺乏相似形态形成条件与机制的相关研究。众多学者^[18]对崩岗侵蚀规律等进行研究,并提出相应治理措施,而针对龛穴这一特殊地貌缺乏关注。龛穴形成后的崩塌临界条件、对崩岗溯源侵蚀的影响,均有必要深入探索。

本研究拟对花岗岩崩岗侵蚀区典型龛穴进行研究,旨在明确龛穴形态演变特征与驱动因素,并基于力矩分析方法,构建稳定性模型评价龛穴土体稳定性,研究结果有利于进一步揭示崩岗发生机制,为沟蚀防治提供科学依据。

1 龛穴形态演变过程

龛穴平面形态呈现半球形凹坑,类似于“Ω”或水滴状,其垂直剖面形态为向内凹陷的浅洞穴(图1)。龛穴发育过程可分为雏形—发育—形成3个阶段,崩壁初期在受到集水坡面的径流冲刷时,水力作用主要为冲蚀,加速龛穴周围物质的搬运,龛穴发育位置的上覆土体形成部分悬空,下层土体因泥沙流失呈现向下倾斜状态,龛穴雏形逐渐形成,其内壁逐渐出露。随着水力与重力的持续作用,下层土体泥沙流失量不断增加,该部位逐渐被掏蚀,形成向内凹陷的浅洞穴,该阶段为龛穴发育剧烈阶段。随着侵蚀时间增加,水力与重力不断交互作用,内凹洞穴持续扩大,当扩大至暂时性的稳定阶段则形成龛穴。径流作用及水分入渗浸湿龛穴内部土体并使土体软化,水力作用持续增加,使得龛穴所受的力达到阈值则瞬间崩塌。因此,龛穴是可引起水土流失和地质灾害的一种特殊地貌,其崩塌会导致崩壁失稳并逐渐后退,引发溯源侵蚀,扩大崩岗侵蚀范围。



注:图a、b分别为典型崩岗和龛穴形态。

图1 野外崩岗、崩壁赋存的龛穴形态

龛穴的发育方向与水流方向有着良好的对应关系,受局部的微地形影响较大,是促使沟道侵蚀发育的因素之一。龛穴促进沟道发育,沟道输沙也为龛穴提供空间条件促进龛穴发育。一方面,龛穴在形成过程中或形成后发生的变形破坏,引起沟道、边坡发生破坏;另一方面,龛穴并非长期维持现状,随着壤中流

或地表水的侵蚀与自身土力作用,进一步加剧对崩壁的局部破坏,崩塌后的崩积物通过沟道输送至沉积区,逐渐形成崩岗地貌。崩壁发生破坏后,又再次形成有利于龛穴发育的条件,在降雨作用下,新形成的龛穴进一步降低崩壁稳定性,加速崩岗溯源侵蚀,增加对环境造成的危害。

2 龛穴形成条件

2.1 土壤条件

崩岗集中分布在花岗岩丘陵区,花岗岩残积母质发育的土壤具有深厚的风化壳,风化程度由底部向表层呈上升趋势,其垂直剖面也呈现颜色、性质的非均质性^[19]。崩壁土壤有机质、胶结物质及氧化物含量随土层加深而呈现降低的趋势。颗粒组成随着风化程度的加强,黏粒含量逐渐增多,砂粒含量降低,即上层土体的黏粒含量明显高于下层土体^[20]。因此,崩壁垂直剖面土壤性质呈现出“上黏下砂”的状态,即上层土体风化程度高,土壤颗粒形成良好的团聚结构,而下层土体松散,土壤胶结物质含量较低,颗粒间缺乏团聚作用。在水平方向上,下层土体外部因易受到侵蚀而被剥蚀,内部土体逐渐暴露于外界,土体经历干湿交替的过程,崩壁发育大量裂隙,促使龛穴形成。黄土高原“潜蚀”现象、“内凹洞”土壤类型均为黄壤,多发生于汇聚地形和凹形坡,该地形极易汇聚水流,加速该地形的形成与崩塌^[21]。西南干热河谷“水凼窝”土壤类型以燥红土和变性土为主,主要分布于发育稳定的冲沟内部^[22]。此外,西班牙东南部地区的切沟沟头存在相似的地貌,主要发育在泥灰岩土壤上^[23];美国爱荷华州西部地区沟壑形成过程中也出现内凹洞,促使沟头崩塌后退引起溯源侵蚀,其土壤类型为黄壤^[24]。国外相似地形、“潜蚀”现象、“内凹洞”与“水凼窝”的土壤性质均区别于花岗岩丘陵区崩壁龛穴的“上黏下砂”。因此,花岗岩残积母质发育的土壤异质性是龛穴发育形成的物质基础,是龛穴发生于崩壁上的特殊性。

2.2 水力条件

降雨是土壤侵蚀发生初始阶段的主要驱动力,在崩岗发生过程中起关键作用^[25]。一方面,由强降雨引起的径流冲刷对崩壁土体产生强烈的侵蚀作用,分别包括贴壁流和下方跌穴的冲蚀。冲刷试验证实,下层土体剥蚀率最大,土体在冲刷过程中下层土体先被冲刷而崩塌^[10]。土壤水分特征曲线表明,上层土体水分持水能力强,下层土体持水能力较弱,因此,当降雨发生时,下层土体受水分的影响较大^[26]。暴雨季节极易造成强烈的水力侵蚀,径流经过崩壁形成瀑流,下方形成跌水池。上层土壤水分的侧向迁移速率低,在水平方向上稳定性较高,因此,产生的贴壁流对

上层土体影响较小^[27],可能造成下层土体破坏面软化崩塌,促使龛穴形成;另一方面,在降雨量较小时,崩岗集水坡面的水分入渗到崩壁各土层中,土壤接触水分后其内部受到不均匀力可能引起崩塌。同时,壤中流作为土壤中的水分运动,因土层异质性在不同土层的运动速度不同,从而引起土壤含水量差异而导致土体自重增加;再之,其水动力作用于内部土壤颗粒,可能存在运输细颗粒的动力,造成崩壁土壤结构改变,降低稳定性^[28]。综上,径流是引起龛穴的主要水动力,壤中流则为间接动力因素。

2.3 土力条件

崩壁土壤物质组成的异质性造成力学性质的差异,水分含量差异也引起土力学参数的变化。表征土力学性质的主要指标包括抗剪强度、无侧限抗压强度、崩解特性、抗拉强度等。土壤在外力作用下,易发生变形而崩塌。由于花岗岩风化过程中物质组成的异质性,崩壁上层土体在垂直方向上的抗剪强度最大,由上往下逐渐变小,并且下层土体的水平方向抗剪强度明显大于垂直方向^[27],说明在崩岗发育过程中崩壁土体受到外力条件时,下层土体易发生崩塌,但因水平方向抗剪强度大于垂直方向,下层土体并未完全崩塌,整个剖面在崩壁上呈现向内凹的形态。此外,崩壁的无侧限抗压强度和崩解特性均表现出随着土层的加深而稳定性逐渐降低的趋势,说明上层土体稳定性高于下层土体是龛穴形成的必要条件^[29-30]。同时,在自然环境中,土壤经历降雨—蒸发的干湿循环过程,崩岗土体会发生膨胀收缩现象并且产生大量裂隙^[31]。相邻土层的裂隙率差异性会影响整个边坡的稳定性,已有研究^[32]表明,崩壁相邻的土体表面裂隙率差值较大,这些差异性会改变崩壁土壤水文状况,引起土体稳定性降低。加之崩壁土体垂直层次的抗拉特性差异也会导致拉张裂隙互相切割穿透,相邻土体的抗拉强度差异最大,极易造成土体发生塌陷^[31]。

3 龛穴形成过程稳定性分析

极限平衡方法是土坡处于静力平衡状态时根据力平衡、力矩平衡和摩尔—库伦屈服准则等关系所得的解,对应土坡处于稳定或恰好失稳的状态。根据经典的土力学理论,土体的稳定系数为土体抗剪切强度与沿破坏截面下滑的剪切力的比值。通过分析在临近破坏状况下,土体外力与内部强度所提供抗力之间的平衡,计算土体在自身和外荷左右下的土坡稳定性程度,通常以边坡稳定系数表示:

$$P = \frac{\tau}{\tau'} \quad (1)$$

式中: P 为土壤的稳定系数; τ 为土体所提供的抗剪切力(N); τ' 为沿破坏截面下滑的剪切力(N)。

土质边坡的滑动面一般为曲线,但因崩岗发生的特殊性,其多为垂直向下崩塌,在此计算过程中,将崩壁上各土层的滑动面假设为直线滑动面。因此,根据摩尔—库伦屈服准则:

$$\tau = C + \sigma \tan \theta \quad (2)$$

式中: C 为土体自身的黏聚力(N); σ 为法向力(N); θ 为土壤内摩擦角(°)。则土壤稳定系数计算公式为:

$$P = \frac{Ch + \tan \theta \int_0^1 \sigma dh}{\int_0^1 \tau' dh} = \frac{Ch + G \cos \beta \tan \theta}{G \sin \beta} \quad (3)$$

$$G = \frac{1}{2} \rho (1+w) h^2 g \left(\frac{1}{\cos \beta} - \frac{1}{\cos \alpha} \right) \quad (4)$$

将公式(4)代入(3)中得

$$P = \frac{\frac{Ch}{\sin \beta} + \left[\frac{1}{2} \rho (1+w) h^2 g \left(\frac{1}{\cos \beta} - \frac{1}{\cos \alpha} \right) \right] \cos \beta \tan \theta}{\frac{1}{2} \rho (1+w) h^2 g \left(\frac{1}{\cos \beta} - \frac{1}{\cos \alpha} \right) \sin \beta} \quad (5)$$

式中: C 为土体自身的黏聚力(N); h 为各土层高度(m); ρ 为土壤容重(g/cm³); w 为土壤含水率(g/g); α 为崩壁角度(°); β 为滑裂面角度(°),为 $45 + \frac{\alpha}{2}$; θ 为土壤内摩擦角(°); g 为重力加速度(m/s²)。

由公式(5)可知,各个土层的稳定性受土壤自身黏聚力、土壤容重、含水率、内摩擦力的影响。当 $P=1$ 时,说明土体的抗崩塌力与崩塌力相等,此时土体处于极限平衡状态,也可通过该等式计算崩壁土体崩塌的临界高度、临界含水率等数值;当 $P>1$ 时,土体处于稳定状态;当 $P<1$ 时,土体处于失稳状态。 P 值越大,说明其所受的抗崩塌力越大,则土体越稳定。而当上层土体的 P 值大于下层土体,且 $P>1$,下层土体 P 小于上层,且 $P<1$,此时,上层土体处于稳定状态,而下层土体逐渐崩塌,可能出现龛穴的雏形,随着径流冲刷与水分的入渗,下层的崩塌力越大,龛穴慢慢加深扩大,到达上层土体的崩塌临界值,整个龛穴则会崩塌。

崩壁角度为 90°, h 取各土层厚度,各土层参数见表 1。基于参数值,计算出 A 层的 P 值最大,为 2.67; B 层次之,为 1.33;再之为 BC 层,为 0.98;而 C 层的 P 值最小为 0.89,说明在此条件下,上层土体处于稳定状态,而下层土体已失稳,并且从 BC、C 层的 P 值大小可知,首先崩塌的是 C 层,随之 BC 层土壤慢慢崩塌,可形成锥形龛穴。随着径流冲刷与土力的持续作用,BC 层土体逐渐全部崩塌,则下层土体形成空腔,上层土体仍处于稳定状态,可能形成龛穴。

4 龛穴稳定性及影响因素分析

4.1 龛穴稳定性分析

因花岗岩土壤性质的特殊性,各土层稳定性不一

致,在野外降雨的情况下,崩壁上的各土层因其应力—基质吸力的差异而产生龛穴。图 2 为龛穴的平面破坏图,为方便探究龛穴的稳定性,将龛穴的上半部分及其上覆崩壁土体的平面图近似地画为梯形状。Flores-Cerrantes 等^[33]和 Istanbuluoglu 等^[34]通过对沟头的稳定性分析表明,沟头的稳定性是由土壤自身产生的抗剪强度与由土壤自重重力和水分在土壤中形成的静水压力以及孔隙压力的比较进行评估。根据摩尔—库伦方程公式表达为:

$$\tau = C + \sigma \tan \theta \tag{6}$$

式中: C 为单位面积土的黏聚力(N); θ 为土壤的内摩擦角($^{\circ}$); σ 为法向应力(N)。

表 1 崩壁土壤基本性质

土层	$C /$ kPa	$\theta /$ ($^{\circ}$)	$\rho /$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	$w /$ ($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	P
A	45	45	1.25	0.25	2.67
B	39	43	1.32	0.28	1.33
BC	22	42	1.42	0.26	0.98
C	16	39	1.39	0.22	0.89

注:土层从上至下分别命名为 A、B、BC、C 层; C 为土壤黏聚力(kPa); θ 为内摩擦角($^{\circ}$); ρ 为土壤容重(g/cm^3); w 为土壤含水率(g/g); P 为稳定系数。

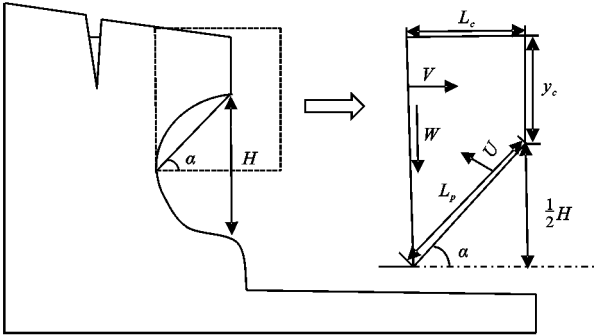


图 2 崩壁龛穴平面破坏示意

注: α 、 H 、 L_c 、 y_c 、 L_p 分别为龛穴角度、龛穴高度、龛穴向内凹陷的水平长度、龛穴距离崩壁后缘距离、破坏面长度; V 、 W 、 U 分别为静水压力、重力、孔隙压力。

土壤是多孔介质,孔隙中充满水或空气,在外力作用下,孔隙中的水或空气也会产生应力,称为孔隙压力。土壤在自然环境中降雨—蒸发的交替变化下,崩岗土体产生不可逆的裂缝,水分会通过裂缝迅速地渗入土体中而产生的力,称为静水压力。因此,龛穴受到自重向下的重力、沿土壤破坏面内部垂直的孔隙压力、裂缝内水分入渗产生的静水压力,在摩尔—库伦中的法向应力为:

$$\sigma = W - U - V \tag{7}$$

式中: W 为重力(N); U 为孔隙压力(N); V 为静水压力(N)。

龛穴受到向下滑动的力为土壤自重的重力与静水压力,将公式(6)~公式(7)结合,土壤的稳定系数计算公

式为:

$$FS = \frac{C + (W - U - V) \tan \theta}{W + V} \tag{8}$$

力矩表示力对物体作用时所产生的转动效应的物理量,为力乘以力转动方向上的力臂。在龛穴中,力的作用点在龛穴的中心部位,因此,转化成为力矩时各式都要乘上 1/2。将上述各个力转化为力矩形式为:

$$FS = \frac{CL_p + (W \cos \partial - U - V \sin \partial) \tan \theta}{W \sin \partial + V \cos \partial} \tag{9}$$

$$W = \frac{1}{2} (y_c + y_c + 0.5H) \times L_c \times \rho_s \times g \tag{10}$$

式中: y_c 为龛穴距离崩壁后缘的距离(m); H 为龛穴的高度(m),范围为 0.1~3; L_c 龛穴向内凹陷的水平长度(m); ρ_s 为土壤含水率为 s 时的土壤容重(g/cm^3); g 为重力加速度(m/s^2); α 为龛穴中心与顶部的夹角($^{\circ}$)。

$$U = \frac{1}{2} \rho_w \times g \times h_w \times L_p \tag{11}$$

式中: ρ_w 为水密度(kg/m^3); h_w 为裂缝发育高度(m); L_p 为破坏面长度(m)。

$$V = \frac{1}{2} \rho_w \times g \times h_w^2 \tag{12}$$

$$L_p = \frac{H}{2 \sin \partial} \tag{13}$$

$$L_c = \frac{H}{2 \tan \partial} \tag{14}$$

将式(10)~(14)代入式(9)中得:

$$FS = \frac{\frac{CH}{2 \sin \partial} + [(y_c + \frac{H}{4})(\frac{H}{2 \tan \partial}) \rho_s g \cos \partial - \frac{1}{2} \rho_w g h_w (\frac{H}{2 \sin \partial} + h_w \sin \partial)] \tan \theta}{(y_c + \frac{H}{4})(\frac{H}{2 \tan \partial}) \rho_s g \sin \partial + \frac{1}{2} \rho_w g h_w^2 \cos \partial} \tag{15}$$

探讨龛穴形成后其土体稳定性时,采取计算稳定系数的方法,将土体的抗崩塌力与崩塌力进行比较。当计算得式(15)中的 $FS > 1$ 时,则表示此时该结构在相应的参数下处于稳定状态,暂时不会崩塌;当 $FS = 1$ 时,表示此时该结构处于极限平衡状态,即土体已处于濒临破坏失稳状态;当 $FS < 1$ 时,则表示该结构处于失稳状态。

由于龛穴赋存位置的特殊性,目前,缺乏对崩壁龛穴的形成与演变进行实时动态监测相关研究,无法获取其崩塌的临界条件。崩壁经历野外强降雨后最易生成龛穴,其稳定因素存在许多不确定性。由公式(15)可知,除去土壤本身的性质影响龛穴外,龛穴长度、角度等一些龛穴的形态参数均会对龛穴的稳定性造成影响。通过控制变量法,分析某单一因素对龛穴稳定性的影响。因龛穴形成后,为便于量化,按照典型崩岗区崩壁上层土壤性质进行计算。根据野外采

样测定土壤基本性质及抗剪强度,土壤容重取 1.25 g/cm^3 ,黏聚力取 40 kPa ,内摩擦角取 30° ,重力加速度取 9.8 m/s^2 ,根据野外调查,裂隙高度取龛穴长度的 $1/3$ 。将土壤基本性质设为恒定值,龛穴的形态参数则根据控制变量法进行逐一分析。

4.2 龛穴高度对龛穴稳定性的影响

根据野外调查龛穴深度、宽度、高度等参数,通过三角函数计算出龛穴角度,为便于计算,将龛穴角度设置为 60° ,龛穴距离崩壁后缘的距离设定为 4 m 。龛穴稳定性参数随龛穴高度的变化趋势见图 3。结果表明,龛穴的稳定性随着龛穴高度增加而下降,当 $FS=1$,龛穴处于极限平衡状态。在所取的各项参数状态下,由图 3 可知,当龛穴高度为 $2.5 \sim 3 \text{ m}$ 时,龛穴处于失稳状态,当龛穴高度 $< 2.5 \text{ m}$ 时,龛穴处于较稳定的状态,野外降雨发生后,龛穴受水力和土力作用而延长扩大,当达到阈值高度则会瞬间崩塌。而当龛穴高度 $> 3 \text{ m}$, $FS < 1$ 时,其抗崩塌力小于崩塌力,基于参数设计,此时龛穴已崩塌。龛穴高度作为龛穴的主要形态参数之一,决定龛穴在垂直方向上发育,可代表龛穴发育活跃程度。龛穴高度越高,说明龛穴的下层土体崩塌流失得越严重,则龛穴的悬空面越大,支撑上覆土体的力则越来越小。龛穴的高度决定龛穴的赋存时间,高度越高,龛穴所受自身重力势能越大越容易崩塌。同时,龛穴的高度也代表崩壁后退的距离,即当龛穴崩塌时,崩壁出现缺面的高度为龛穴高度加上覆土体崩塌高度。

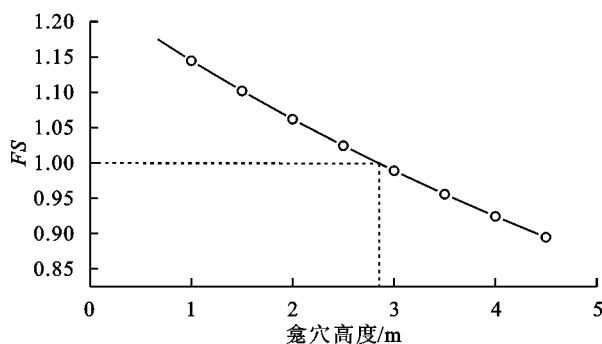


图 3 龛穴高度对龛穴稳定性的影响

4.3 龛穴角度对龛穴稳定性的影响

将龛穴内侧中心与龛穴外部顶点连接,与龛穴内侧中心水平向外形成的角度称为龛穴角度。龛穴角度决定龛穴向内凹的深度,在一定程度上也可代表龛穴发育程度,当龛穴的角度较大时,说明该状态为龛穴发育前期,随着角度变小,其向内凹的距离越来越大,此时,龛穴在水平方向上的发育越来越活跃。将龛穴高度设置为 1 m ,其他参数保持不变,探究龛穴角度对龛穴稳定性的影响。由图 4 可知,随着龛穴角度增大,其稳定性逐渐增大。当龛穴角度 $> 70^\circ$ 时,下层土体逐渐崩塌,而上层土体处于稳定状态。当龛穴

角度 $< 70^\circ$ 时,龛穴逐渐发育,在水平方向上向内凹进的深度越来越大,其稳定性越来越低,因为此时支撑上层土体的力随着凹洞的扩大而减小。再之,当野外发生降雨时,贴壁流的冲刷作用使龛穴角度增大,说明会有越多的水分停留在凹洞内,且停留的时间较长,并逐渐下渗到下层土体,使其软化崩塌,增加龛穴高度,当达到一定程度,整个龛穴则会崩塌,龛穴崩塌促使崩壁受到破坏。

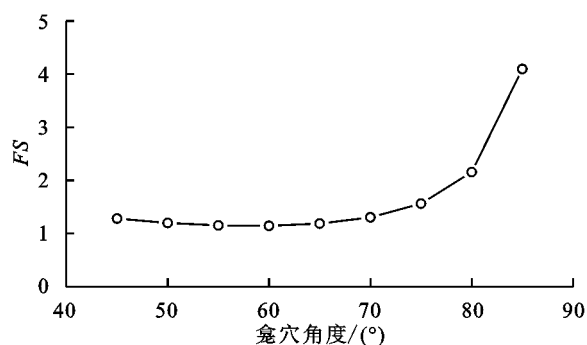


图 4 龛穴角度对龛穴稳定性的影响

5 结论

(1) 龛穴是南方花岗岩崩岗区的一种特殊侵蚀地貌,是发生在崩壁上向内凹陷的浅洞穴,大多呈现“Ω”状或水滴状。崩壁可因龛穴失稳而崩塌并且向集水坡面方向后退,从而引发溯源侵蚀,扩大崩岗侵蚀范围。

(2) 龛穴的发生过程经历“雏形—发育—形成”3个阶段,崩壁土层的异质性是龛穴发育的基础条件,野外降雨条件下,崩壁的径流与各土层力学性质差异是龛穴发育的驱动因素。

(3) 龛穴稳定性随其高度增加而呈现线性函数降低。龛穴稳定性随其角度增加呈指数函数增加。龛穴发育可能是崩岗溯源侵蚀启动的标志,遏止龛穴发生可有效提高崩壁稳定性。

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研究员以及华中农业大学蔡崇法教授、陈家宙教授、丁树文副教授指导和审阅,在此深表感谢!

参考文献:

- [1] 蔡强国,陆兆熊,王贵平,黄土丘陵沟壑区典型小流域侵蚀产沙过程模型[J].地理学报,1996,51(2):108-117.
- [2] 郑粉莉,徐锡蒙,覃超.沟蚀过程研究进展[J].农业机械学报,2016,47(8):48-59,116.
- [3] 张光辉,杨扬,符素华,等.切沟侵蚀预报研究进展与展望[J].地球科学进展,2022,37(6):551-562.
- [4] 梁音,宁堆虎,潘贤章,等.南方红壤区崩岗侵蚀的特点与治理[J].中国水土保持,2009(1):31-34.
- [5] Wei Y J, Liu Z, Wu X L, et al. Can Benggang be regarded as gully erosion? [J].Catena,2021,207:e105648.

- [6] Liu W P, Song X Q, Luo J, et al. The processes and mechanisms of collapsing erosion for granite residual soil in southern China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, 20(2): 992-1002.
- [7] Liao Y S, Yuan Z J, Zheng M G, et al. The spatial distribution of Benggang and the factors that influence it[J]. *Land Degradation and Development*, 2019, 30(18): 2323-2335.
- [8] Deng Y S, Duan X Q, Ding S W, et al. Suction stress characteristics in granite red soils and their relationship with the collapsing gully in south China[J]. *Catena*, 2018, 171: 505-522.
- [9] 王秋霞, 丁树文, 夏栋, 等. 花岗岩崩岗区不同层次土壤分离速率定量研究[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(3): 65-70.
- [10] 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.
- [11] Liu X L, Qiu J N, Zhang D L. Characteristics of slope runoff and soil water content in benggang colluvium under simulated rainfall[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2018, 18(1): 39-48.
- [12] 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[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(6): 153-159.
- [13] Wang C, Li Z W, Cai B L, et al. Effect of root system of the *Dicranopteris dichotoma* on the soil unconfined compressive strength of collapsing walls in hilly granite area of South[J]. *Catena*, 2022, 216(B): e106411.
- [14] 丁树文, 蔡崇法, 张光远. 鄂东南花岗地区重力侵蚀及崩岗形成规律的研究[J]. *南昌水专学报*, 1995(增刊 1): 50-54.
- [15] Peng J B, Sun P, Ogbonnaya L, et al. Loess caves, a special kind of geo-hazard on loess plateau, northwestern China[J]. *Engineering Geology*, 2018, 236: 79-88.
- [16] 郑炜珊, 耿豪鹏, 顾国强, 等. 定西于家山黄土洞穴的分布特征与侵蚀临界研究[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(4): 112-117, 123.
- [17] 张宝军, 熊东红, 张光辉, 等. 基于力矩法的元谋干热河谷冲沟沟头土体稳定性模拟与验证[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(15): 133-140.
- [18] 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.
- [19] Liao D L, Deng Y S, Duan X Q, et al. Variations in weathering characteristics of soil profiles and response of the Atterberg limits in the granite hilly area of South China[J]. *Catena*, 2022, 215: e106325.
- [20] 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.
- [21] Sheng H, Qiu H J, Wang N L, et al. The influence of loess cave development upon landslides and geomorphologic evolution; A case study from the northwest Loess Plateau, China[J]. *Geomorphology*, 2020, 359: e107167.
- [22] Chen A Q, Zhang D, Peng H, et al. Experimental study on the development of collapse of overhanging layers of gully in Yuanmou Valley, China[J]. *Catena*, 2013, 109: 177-185.
- [23] Collison A J C. The cycle of instability: Stress release and fissure flow as controls on gully head retreat[J]. *Hydrological Process*, 2001, 15: 3-12.
- [24] Addisie M B, Ayele G K, Gessess A A, et al. Gully head retreat in the sub-humid ethiopian highlands: The ene-chilala catchment[J]. *Land Degradation and Development*, 2017, 28: 1579-1588.
- [25] Jiang F S, He K W, Huang M Y, et al. Impacts of near soil surface factors on soil detachment process in benggang alluvial fans[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 590: e125274.
- [26] Liu H H, Qian F, Ding W F, et al. Using 3D scanner to study gully evolution and its hydrological analysis in the deep weathering of southern China[J]. *Catena*, 2019, 183(C): e104218.
- [27] 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.
- [28] 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 comonitoring[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 553: 678-690.
- [29] He L, Deng Y S, Tang Q Y, et al. Effects of the *Dicranopteris linearis* root system and initial moisture content on the soil disintegration characteristics of gully erosion[J]. *Journal of Mountain Science*, 2022, 19(12): 3548-3567.
- [30] Liu X Y, Zhang X W, Kong L W, et al. Formation mechanism of collapsing gully in southern China and the relationship with granite residual soil: A geotechnical perspective[J]. *Catena*, 2022, 210: e105890.
- [31] 冯延云, 张晓明, 朱丽丽, 等. 初始含水率对崩岗土体抗拉特性的影响[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(5): 41-49.
- [32] 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[J]. *水土保持研究*, 2016, 23(1): 338-342.
- [33] Flores-Cervantes J H, Istanbuluoglu E, Bras R L. Development of gullies on the landscape: A model of headcut retreat resulting from plunge pool erosion[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111: e01010.
- [34] Istanbuluoglu E, Bras R L, Homero F C, et al. Implications of bank failures and fluvial erosion for gully development: Field observations and modeling[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110: e01014.