

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2025.05.012

CSTR:32310.14.stbxb.2025.05.012

罗舒玉,何玲,林哲,等.桂东南崩岗侵蚀区崩壁龛穴的形态及空间分布特征[J].水土保持学报,2025,39(5):63-70,79.

LUO Shuyu, HE Ling, LIN Zhe, et al. Morphological and spatial distribution characteristics of niches in collapsing walls in southeastern Guangxi benggang erosion area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(5): 63-70, 79.

桂东南崩岗侵蚀区崩壁龛穴的形态及空间分布特征

罗舒玉¹, 何玲¹, 林哲¹, 王建羽¹, 段晓倩², 邓羽松¹

(1. 广西大学林学院, 南宁 530004; 2. 广西大学农学院, 南宁 530004)

摘要: [目的] 崩壁龛穴的形成与发育加剧崩岗溯源侵蚀, 威胁土地资源与生态环境。[方法] 通过调查典型崩岗侵蚀区龛穴的空间分布与形态特征, 探明其分布规律和演化过程。[结果] 1) 龛穴主要赋存于崩壁下部, 占 45.83%, 90.28% 发育在砂土层, 角度以 30°~50° 为主 (50.69%)。2) 龛穴形态参数变异性强, 90.97% 的龛穴扁率 > 0.1, 主要表现为椭圆形与极椭圆形, 70.80% 的龛穴长深比与短深比同步 > 1, 22.20% 的长深比 > 1 且短深比 < 1, 反映其平面形态以垂向延展为主, 演化阶段受水平拓宽影响。3) 龛穴长轴、短轴与内凹深度三者之间呈极显著正相关 ($p < 0.01$), 且长深比与短深比可相互间接影响, 共同驱动龛穴的形态发育。[结论] 研究结果揭示了崩壁龛穴的发育特点及空间分布特征, 为崩岗侵蚀防治提供理论依据。

关键词: 龛穴; 空间分布; 形态特征; 崩岗侵蚀

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)05-0063-08

Morphological and Spatial Distribution Characteristics of Niches in Collapsing Walls in Southeastern Guangxi Benggang Erosion Area

LUO Shuyu¹, HE Ling¹, LIN Zhe¹, WANG Jianyu¹, DUAN Xiaoqian², DENG Yusong¹

(1. College of Forestry, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2. College of Agriculture, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: [Objective] The formation and development of niches in collapsing walls intensify the erosion of benggang and threaten land resources and the ecological environment. [Methods] The spatial distribution and morphological characteristics of niches in typical benggang erosion areas were investigated to explore their distribution patterns and evolutionary process. [Results] 1) Niches were mainly found in the lower part of collapsing walls, accounting for 45.83%, with 90.28% developed in the sandy layer, and the angles mainly ranged from 30° to 50° (50.69%). 2) Niches showed strong variability in morphological parameters, with 90.97% of the niches having a flattening ratio greater than 0.1, primarily presenting as elliptical and extremely elliptical. 70.80% of the niches had both length-to-depth and short-to-depth ratios greater than 1, and 22.20% had a length-to-depth ratio greater than 1 and a short-to-depth ratio less than 1, reflecting that their plane morphology primarily extended vertically, and their evolutionary stage was influenced by horizontal expansion. 3) There was a highly significant positive correlation among the long axis, short axis and concavity depth of the niche ($p < 0.01$), and the length-to-depth ratio and the short-to-depth ratio could indirectly influence each other and jointly drive the morphological development of the niche. [Conclusion] The study reveals the developmental characteristics and spatial distribution of niches in collapsing walls, providing a theoretical basis for the prevention and control of benggang erosion.

Keywords: niches; spatial distribution; morphological characteristics; benggang erosion

Received: 2024-12-30

Revised: 2025-02-28

Accepted: 2025-03-17

Online(www.cnki.net): 2025-06-10

收稿日期: 2024-12-30

修回日期: 2025-02-28

录用日期: 2025-03-17

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-06-10

资助项目: 国家自然科学基金项目(42477350, 42467041, 42107350)

第一作者: 罗舒玉(2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: shuyuLuosy@163.com

通信作者: 邓羽松(1988—), 男, 副教授, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。Email: denny2018@gxu.edu.cn

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

崩岗是指在重力和水力共同作用下,山坡土体受破坏而发生崩塌和冲刷的侵蚀现象^[1],属于南方红壤区一种特殊的土壤侵蚀类型^[2]。崩壁是崩岗的核心组成单元,龛穴是崩壁上内凹形成的特殊地貌^[3]。龛穴发育影响崩壁力学稳定性,触发其上部土体崩塌,进而导致崩壁失稳并逐渐后退,驱动溯源侵蚀过程,扩大崩岗侵蚀范围,引起严重的水土流失^[4-5]。目前,崩岗研究主要集中在其形成机制、物质组成、演化过程及防治技术等方面^[1,6],而对龛穴引发的侵蚀现象关注较少。有研究^[3]表明,龛穴演化分为雏形、发育和形成3个关键阶段,各阶段形态和空间分布特征存在差异,对崩岗侵蚀的危害程度也不同。沟蚀地区普遍存在类似的特殊“龛穴”侵蚀现象^[7],常形成于沟头陡壁或边坡,其发育导致沟头崩塌,诱发溯源侵蚀^[8-10]。国内如黄土高原地下水的潜蚀和地表径流的冲刷共同作用形成的“潜蚀洞”^[11-12]、元谋干热河谷的水凼窝^[13-16]、东北黑土区沟头处的内凹洞^[17]等;国外如巴西的“退化壁龛”^[18]、美国爱荷华州的“壁龛”^[19]及新西兰的“渗蚀空洞”等^[20]。“龛穴”发育是沟头溯源侵蚀的重要环节,其形态演化决定侵蚀过程。针对不同发育阶段实施防治措施,是减少沟头溯源侵蚀危害的关键^[10,13,21]。现有研究主要通过类似地貌的周长、面积及扁率等参数进行统计分析^[13-14,22],缺乏对空间位置和形态参数间的耦合关系解析,且相关研究多集中在干热河谷和黄土高原地区,南方红壤崩岗侵蚀区龛穴形态的研究关注较少。因此,开展龛穴空间分布与形态特征的定量研究,分析其形态演化和侵蚀方向,可为龛穴发育引发的崩岗侵蚀机理提供科学依据,对南方红壤丘陵区水土流失治理具有重要意义。

广西是我国崩岗侵蚀分布的典型区域,共有崩岗 27 767 个,崩岗侵蚀模数极高,达 30 000~500 00 t/(km²·a),是南方丘陵山区容许土壤流失量的 60~100 倍,龛穴广泛赋存于崩壁,对生态环境和水土资源造成极大破坏^[23-24]。深入研究龛穴的空间分布及形态特征,解析其演化阶段和侵蚀特点,有助于深化对崩岗侵蚀的理解。因此,本研究以广西梧州市龙圩区花岗岩崩岗侵蚀区为对象,分析龛穴的形态特征、活动状态及空间分布规律,探讨形态参数间的相互关系及其对发育的影响,以期深化对龛穴发育机制的认识,为崩岗侵蚀防治提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于广西梧州市龙圩区(22°58′10″~

23°27′24″N,110°06′42″~111°22′52″E)(图 1),属亚热带季风气候区,年平均气温 21.2℃,年无霜期 323 d,年平均降水量 1 506.9 mm,气候温和,四季分明,雨量充沛,光照充足,无霜期长。龙圩区属低山丘陵地貌,海拔 400~600 m。总体地势呈南高北低倾斜状,山岭连绵,丘陵起伏,山谷相间。样区植被乔木以马尾松(*Pinus massoniana*)为主;灌木以桃金娘(*Rhodomyrtus tomentosa*)、岗松(*Baeckea frutescens*)、欆木(*Loropetalum chinense*)为主;禾本科植物主要为五节芒(*Miscanthus floridulus*)和箬竹(*Indocalamus tessellatus*)等;铁芒萁(*Dicranopteris linearis*)为主要的蕨类植物。

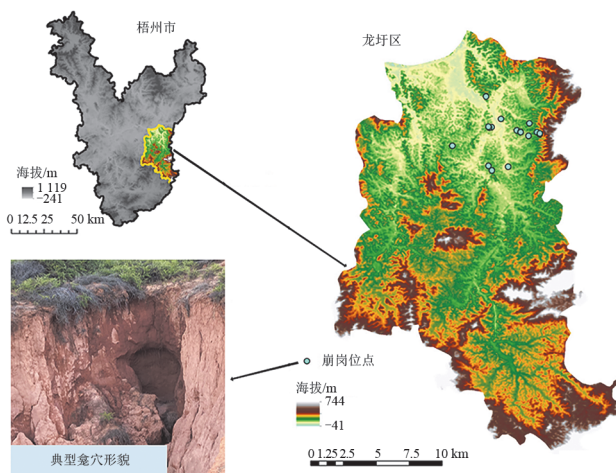


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

1.2 试验方法

于 2023 年 5—6 月对样区典型崩岗的龛穴所赋存崩壁位置及赋存形态进行调查。调查典型崩岗发育的 144 个龛穴,崩岗的经纬度通过 GPS 测定。调查内容为龛穴的空间位置、活动状态和形态参数。研究将龛穴赋存的崩壁分为上部、中部、下部,其中上部接近于沟头集水坡面处,中部为崩壁发育最为剧烈的部分,下部为崩壁接近于崩积堆的部分。空间分布主要调查发育土层、分布位置和距沟沿线距离。龛穴调查的形态参数包括长轴(L)、短轴(W)、内凹深度(D)(图 2)和角度。长轴为龛穴上覆土体边缘至下部土体边缘的距离;短轴为龛穴左侧土体边缘至右侧土体边缘的距离;内凹深度为龛穴的垂直深度;角度是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。龛穴角度为 0~20°时定义为龛穴“雏形”状态;龛穴角度为 20°~40°时定义为龛穴“发育”状态;龛穴角度为 >40°时定义为龛穴“形成”状态。各指标均通过激光测距仪与卷尺(0.01 cm)测量所得。

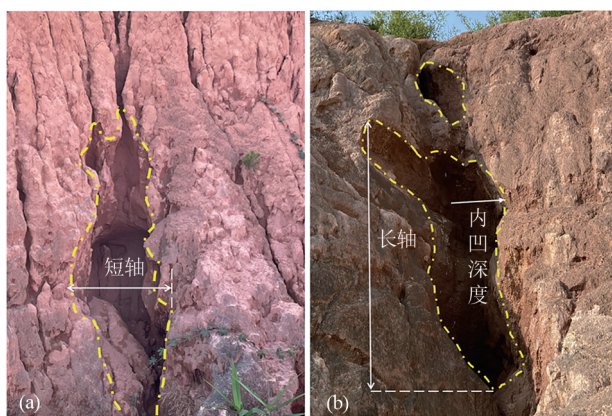


图2 野外龛穴长轴、短轴和内凹深度

Fig. 2 Diagram of long axis, short axis, and concavity depth of field niches

1.3 形态参数

1) 选取长轴、短轴与内凹深度的长深比 (length-to-depth ratio, LDR)、短深比 (short-to-depth ratio, SDR) 等衍生参数^[13]及龛穴扁率(α)^[12,22]表征龛穴的形态特征,计算公式为:

$$\text{LDR} = \frac{L}{D} \quad (1)$$

$$\text{SDR} = \frac{W}{D} \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{L - W}{W} \quad (3)$$

式中:LDR为长深比;SDR为短深比; α 为龛穴扁率; L 为龛穴长轴,cm; W 为龛穴短轴,cm; D 为内凹深度,cm。

2) 容积和横截面积是衡量龛穴平面和三维形态的重要指标。龛穴形态多样,相似地貌采用椭圆球计算容积^[16]和梯形计算横截面积^[9]。本研究借鉴利用基础指标计算最大容积(V)和最大横截面积(A)来定量评估龛穴形态,计算公式为:

$$A = \frac{L \times W}{10\,000} \quad (4)$$

$$V = \frac{L \times W \times D}{1\,000\,000} \quad (5)$$

式中: A 为最大横截面积, m^2 ; V 为最大容积, m^3 ; L 为龛穴长轴,cm; W 为龛穴短轴,cm; D 为内凹深度,cm。

3) 变异系数(coefficient of variation, CV)是衡量数据离散程度的一个重要统计量,计算公式为:

$$\text{CV} = \frac{\sigma}{\mu} \times 100\% \quad (6)$$

式中: σ 为数据的标准差; μ 为数据的平均值。变异系数的单位为百分比(%),能够消除量纲的影响,适用于不同单位或不同量纲的数据比较。当CV值较高时,表示数据分布的离散性较强;反之CV值较低则表示数据较为集中。

4) 偏度(skewness)和峰度(kurtosis)用来衡量数据分布形态的统计量。偏度衡量数据分布的对称性,峰度衡量数据分布的尖锐程度,计算公式分别为:

$$\text{Skewness} = \frac{n}{(n-1)(n-2)} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \mu}{\sigma} \right)^3 \quad (7)$$

$$\text{Kurtosis} = \frac{n(n+1)}{(n-1)(n-2)(n-3)} \times \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \mu}{\sigma} \right)^4 - \frac{3(n-1)^2}{(n-2)(n-3)} \quad (8)$$

式中: n 为样本的个数; x_i 为第*i*个数据点; μ 为样本的平均值; σ 为样本的标准差。

1.4 数据处理

采用Microsoft Excel 2020软件对试验数据进行初步统计与计算,采用SPSS 26.0软件对数据进行描述性统计、通径分析,用Pearson相关系数法评价不同形态因子的相关关系。运用Origin 2021与R 4.4.1软件进行线性与非线性回归分析及图像绘制。

2 结果与分析

2.1 龛穴空间分布特征与发育状态

龛穴空间位置调查结果(图3)可知,龛穴主要赋存于崩壁的下半部分,占比为45.83%,其次是发育接近沟头处上部的龛穴,占比为29.86%,发育在崩壁中部的占比最小,为24.31%。

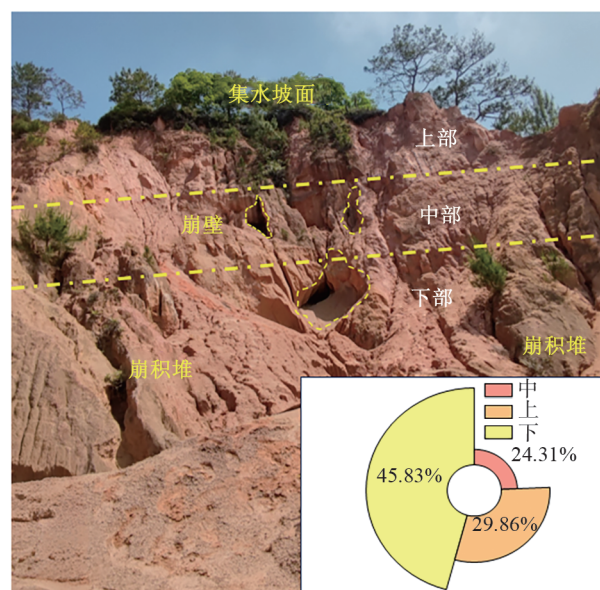


图3 龛穴空间位置分布

Fig. 3 Spatial distribution of niches

从图4可以看出,龛穴角度的分布中,龛穴“锥形”状态最少,仅占10.42%,其中,“锥形”状态中,龛穴角度为0~10°的最少,为0.69%;发育状态的龛穴占比最高,为50.69%,其中以30°~40°的龛穴角度最多,为31.25%。龛穴的形成状态占比依次发育状态,为38.89%,野外龛穴角度以30°~50°为主。

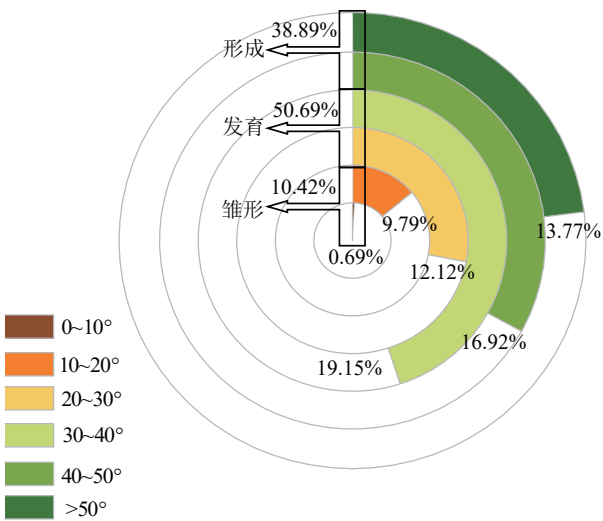
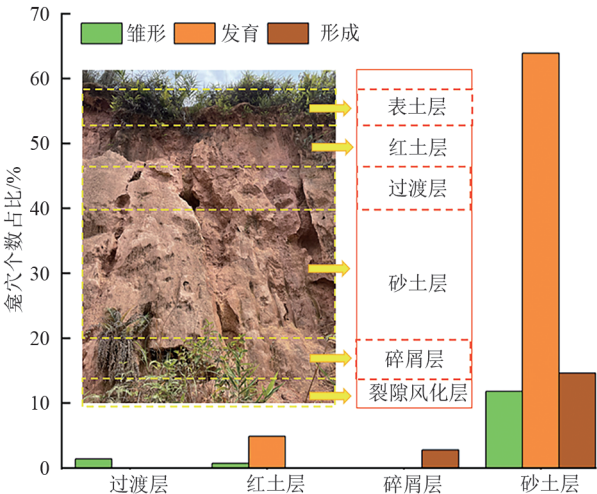


图 4 龕穴角度占比与发育状态
Fig. 4 Proportion of niche angles and developmental status

对龕穴在崩壁上的分布土层进行记录并统计个数(图 5),可知砂土层发育龕穴数量最多,占总数量的 90.28%;红土层、碎屑层及过渡层发育龕穴数量占总体的 9.72%,分别为 5.55%、2.78%、1.39%。砂土层中处于发育状态的龕穴最多,占总数的 63.89%,形成状态次之,为 14.58%,雏形状态最少为 11.81%。红土层中有发育和雏形 2 种状态,占比分别为 4.86%、0.69%。碎屑层中,只有形成状态的龕穴,占比 2.78%,过渡层中只有雏形状态的龕穴,占比 1.39%。



注: $n=144$ 。
图 5 不同土层发育的龕穴个数占比及其发育状态
Fig. 5 Proportions of niches developed in different soil layers and in their developmental status

2.2 龕穴形态发育特征

通常变异系数 $CV \leq 0.1$ 、 $0.1 < CV \leq 1.0$ 、 $CV > 1.0$ 分别表示弱变异、中等变异、高强度变异^[12]。由表 1 可知,龕穴形态参数呈显著异质性。短轴(7.40~352.10 cm, $CV=101.86\%$)、长轴(8.60~412.50 cm, $CV=90.84\%$)及内凹深度(5.20~212.90 cm, $CV=72.64\%$)均属中高强度变异,其中短轴偏度(3.34)与峰度(13.10)表明其集中于较小值且分布尖锐,而龕穴角度 $CV=33.78\%$ 的中等变异表明角度参数相对稳定。

表 1 龕穴形态参数描述性统计

Table 1 Descriptive statistics of niche morphological parameters

指标	极小值	极大值	平均值	方差	偏度	峰度	CV/%
长轴/cm	8.60	412.50	77.80	4 995.03	2.34	6.71	90.84
短轴/cm	7.40	352.10	53.39	2 957.44	3.34	13.10	101.86
内凹深度/cm	5.20	212.90	34.36	622.72	3.14	17.89	72.64
角度/(°)	9.46	69.50	36.72	153.74	0.19	-0.37	33.78
长深比	0.68	8.49	2.30	1.93	1.93	4.95	56.96
短深比	0.41	7.34	1.63	2.93	2.93	10.53	69.93
扁率	0.03	0.81	0.37	0.04	0.15	-0.84	54.05
最大横截面积/m ²	0.01	11.40	0.55	1.77	5.34	34.80	181.81
最大容积/m ³	0.001	17.76	0.48	3.14	7.54	66.62	368.75

注: $n=144$ 。

通过龕穴长深比、短深比、扁率可对龕穴水平与垂直方向的形态变化进行分析。长深比($CV=56.96\%$)、短深比($CV=69.93\%$)、扁率($CV=54.05\%$)呈中等强度变异,三者平均值分别为 2.30、1.63、0.37,前 2 项的正偏分布显示数据倾向较小值;空间度量方面,最大横截面积($CV>100\%$)与最大容积($CV=368.75\%$)呈异质性,后者偏度 7.54 与峰度 66.62 的极端值反映显著的非均匀分布特征,表明龕

穴形态参数的显著差异。

龕穴平面形态可依据扁率(α)进行定量分类定义其扁平程度: $\alpha=0$ 时表征正圆形, $0<\alpha\leq 0.1$ 对应近圆形, $0.1<\alpha\leq 0.5$ 界定为椭圆形, $\alpha>0.5$ 则判定为极椭圆形^[25]。随着扁率值增大,平面形态由圆心对称逐渐发展为轴向拉长的几何特征。龕穴扁率数据显示,扁率为 0~0.1、0.1~0.2、0.2~0.3、0.3~0.4、0.4~0.5、 >0.5 占比依次为 9.03%、14.58%、17.36%、16.67%、

19.44%、22.92%。龛穴扁率分布具有显著结构特征,最优势区间为椭圆形($0.1 \leq \alpha \leq 0.5$, 占比68.05%),且其中高扁率段($0.4 \sim 0.5$, 19.44%)与极椭圆形($\alpha > 0.5$, 22.92%)共同构成崩岗区主要形态类型。近圆形龛穴($0 < \alpha \leq 0.1$)仅占9.03%,而 $\alpha = 0$ 的正圆形个体在调查中未调查到,崩岗区龛穴平面形态以垂向延展特征为主,主要以椭圆和极椭圆存在,累计占比90.97%。

龛穴发育方向可通过基础指标形态的比率参数进行解析。长深比表征龛穴垂向侵蚀强度,该值升高,则垂向侵蚀强度大于水平侵蚀,并与极椭圆形形态发育呈正向关联;短深比揭示平面展宽趋势,表征龛穴的水平或侧向侵蚀^[13]。本研究可通过2项比值的分析判定侵蚀主轴方向。由图6可知,长深比为1~3占据主导地位(1~2为41.67%, 2~3为34.03%),短深比以1~2(54.17%)和0~1(26.39%)为主,而长深比0~1仅占6.25%。因此,长深比普遍高于短深比,龛穴垂向侵蚀发育强度显著超过侧向侵蚀。70.80%的龛穴长深比与短深比同步>1,表明垂蚀-侧蚀复合系统中垂向侵蚀为优势驱动力,其产生的平面扩张效应构成龛穴演化主要模式;22.20%的长深比>1且短深比<1反映向下延伸趋势。从侵蚀机制解析,双比率均<1时(占比3.50%)表征水平侵蚀主导,双比率均>1时表明垂向侵蚀,后者的高占比(70.80%)表明,崩岗发育遵循“垂向切入-侧壁扩张”的过程,不断驱动上覆土体向完全崩塌阶段演进。

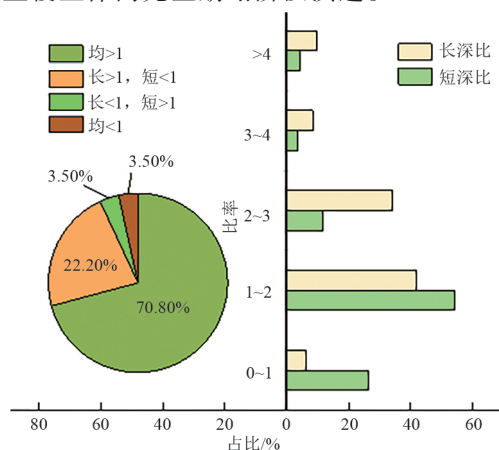


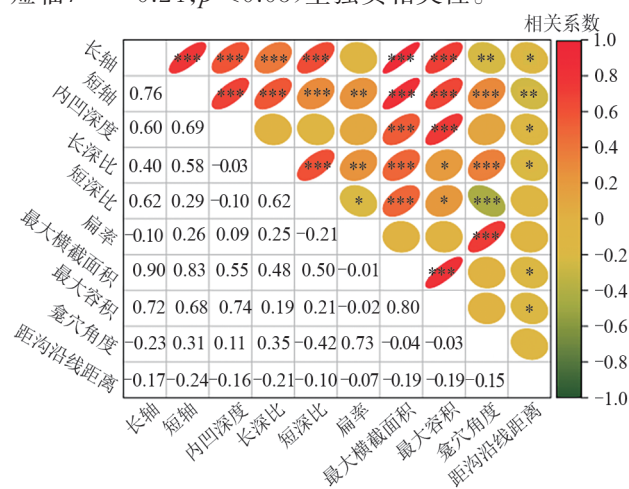
图6 龛穴不同长深比、短深比占比

Fig. 6 Proportions of niches with different length-to-depth and short-to-depth ratios

2.3 龛穴形态参数相关性分析

龛穴形态参数相关性分析(图7)表明,长轴、短轴与内凹深度间均呈显著正相关(r 分别为0.60、0.69, $p < 0.001$),表明三者演变具有协同效应和交互作用。短轴、长轴与最大横截面积、最大容积均存在强烈正相关($p < 0.001$),短轴相关系数分别为0.83、0.68,而长轴相关系数分别为0.90、0.72。即随着龛穴容量扩

展,龛穴平面形态由椭圆向极椭圆演化。短轴表现对多种形态特征产生影响,其与内凹深度($r = 0.69$)、长深比($r = 0.58$)、扁率($r = 0.26$)等参数的极显著正相关($p < 0.01$),表明水平扩张同步加剧深度发育并改变形态特征。短轴可导致扁率和龛穴角度上升。龛穴角度与扁率呈高强度正相关($r = 0.73$, $p < 0.001$),但与长轴($r = -0.23$)、短深比($r = -0.42$)呈显著负相关,反映垂向侵蚀减小角度而水平侵蚀增大角度。距沟沿线的距离与各几何形态指标(长轴 $r = -0.17$ 、短轴 $r = -0.24$, $p < 0.05$)呈强负相关性。



注: *表示 $p \leq 0.05$; **表示 $p \leq 0.01$; ***表示 $p \leq 0.001$ 。下同。

图7 龛穴形态参数相关性分析

Fig. 7 Correlation analysis of niche morphological parameters

2.4 龛穴形态参数回归分析

龛穴内凹深度作为侵蚀发育阶段的形态基准,通过角度的几何传导效应实现侵蚀动力与坡体稳定性的双重表征机制^[13]。由图8可知,长轴、短轴、最大横截面积与内凹深度呈二次函数关系,且各自的关系强度不同。在侵蚀初期,内凹深度与长轴、短轴、最大容积的增加呈协同增长,当内凹深度超过约30 cm时,呈非线性正相关。短轴与内凹深度的关系最为显著($R^2 = 0.500$),表明短轴的增长速度最大,是内凹深度增加的主要补偿途径。最大容积与内凹深度的加速递增($R^2 = 0.320$),表明容积扩展与凹深变化存在密切联系,而长轴和最大横截面积的变化较为缓慢。同时,当内凹深度突破临界值时,短轴的扩展速率与长轴的扩展速率相当。

2.5 龛穴形态参数通径分析

基于多变量通径分析揭示龛穴最大横截面积、最大容积与形态参数的相互作用机制(图9),龛穴长深比与短深比对最大横截面积的直接通径系数分别为0.280、0.326,短深比和龛穴距沟沿线距离对最大容积的直接通径系数分别为0.194、0.166,说明长轴、短轴可直接影响横截面积大小,具有促进作用,短深

比与龛穴距沟沿线的距离也可直接影响最大容积的大小,且短深比与龛穴距沟沿线的距离对最大容积的影响小于长、短轴对最大横截面积的影响。长深比对短深比的间接通径系数为 0.201,短深比对长深比的间接通径系数为 0.173,说明长深比与短深比可相互间接影响,从而对横截面积产生影响。长深比与短深比与横截面积呈极显著相关($p < 0.01$),相关系数分别为 0.481 和 0.499,说明二者对

最大横截面积大小的影响相近。龛穴距沟沿线距离与最大横截面积呈显著负相关($p < 0.05$),相关系数为 0.19,说明龛穴距沟沿线距离越大,其横截面积越小。长深比和短深比与龛穴最大容积呈显著正相关($p < 0.05$),相关系数分别为 0.195 和 0.211,而龛穴距沟沿线距离与龛穴最大容积呈显著负相关($p < 0.05$),相关系数为 0.185,说明龛穴距离沟沿线越远,其容积越小。

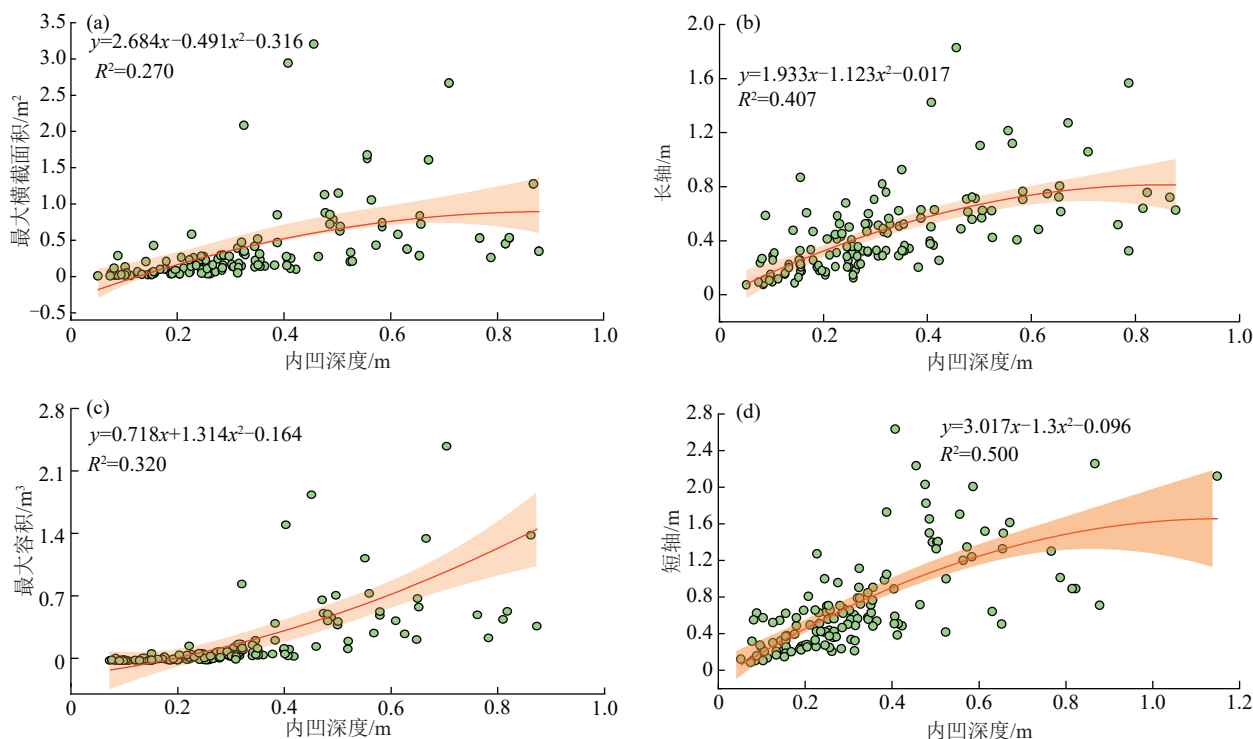


图 8 龛穴内凹深度与形态参数回归分析

Fig. 8 Regression analysis of concavity depth and morphological parameters

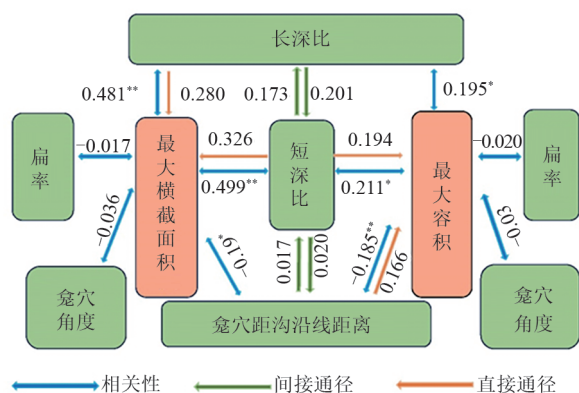


图 9 龛穴形态参数对最大横截面积、最大容积通径分析与相关性分析

Fig. 9 Analysis of maximum cross-sectional area, maximum volume diameter of niche morphological parameters, and correlation analysis

3 讨论

崩岗侵蚀区龛穴主要赋存于崩壁下部,大部分龛穴主要源于砂土层。陷穴主要发育于沟道中上游

及支沟沟头,与黄土体较为均一的物质组成和其湿陷性相关^[12,26]。而崩岗崩壁土体构型呈上黏下砂^[27],其下部属于砂土层,土壤结构松散,孔隙度高,透水性较强,对水流冲刷和重力崩塌较为敏感^[28]。在强降雨冲刷下,崩壁受集水坡面径流影响,下部土体因泥沙流失而下倾,其上部红土层具有较高的抗蚀能力^[29],导致上覆土体悬空,形成龛穴雏形。此阶段迅速过渡,因此野外雏形龛穴占比最少(10.42%)。随着水力与重力的持续作用,下部土体泥沙流失量不断增加,该部位逐渐被掏蚀,形成较大的内凹浅洞穴,标志着龛穴发育阶段的开始。调查结果显示,50.69%龛穴属于该阶段,因此,在此阶段进行干预抑制龛穴侵蚀具有重要作用。随着内凹洞穴扩张,龛穴进入形成阶段,内壁暴露加速崩壁侵蚀,流水和壤中流作用使土体软化,促进崩塌,引发重力侵蚀^[10],完成龛穴的发育-演化过程。龛穴的侵蚀方向对其后续研究至关重要。调查结果显示,短轴、长轴、内凹

深度及其衍生参数呈高强度变异,最大横截面积与最大容积呈现极端异质性,龛穴大小形态偏差较大。90.97%的龛穴主要表现为椭圆形与极椭圆形,二者构成崩岗区主要形态类型,其平面形态以垂轴延展为主。是由于龛穴赋存在崩壁上,受崩壁径流的冲刷作用,其垂直向下扩大龛穴或者垂直向上溯源至集水坡面,而水平方向的变化不显著,因此,垂直方向发育程度大于水平方向,促使其向椭圆形发育^[30-31]。长深比普遍高于短深比也表明,龛穴垂向侵蚀发育强度显著超过水平方向侵蚀。该研究结果与徐婷等^[15]对于热河谷沟头陷穴发育的研究存在差异^[21],可归因于龛穴发育于崩壁,崩壁为高陡立状态,其崩塌主要受重力侵蚀^[32]。

龛穴长轴、短轴与内凹深度三者演变具有协同效应和交互作用,与金珊等^[12]对黄土地区切沟陷穴的形态发育特征结果一致。长轴对龛穴最大容积和最大横截面积的影响相较短轴更大,进一步说明龛穴的侵蚀以垂轴侵蚀为主,与对龛穴扁率、长深比、短深比的分析相一致。短轴对各形态参数均产生影响,水平扩张同步加剧深度发育并改变形态特征,可导致扁率、龛穴角度上升,水平侵蚀增大龛穴角度,而长轴与之负相关,垂向侵蚀减小角度。因此,龛穴的演化阶段受其横向拓宽影响,可能是垂向侵蚀属于主要侵蚀方式,变化显著,当水平侵蚀导致横向拓宽发生显著变化时,即表明龛穴发育向下一个阶段演化。内凹深度是侵蚀发育阶段的形态基准,当内凹深度超过30 cm时,短轴与之非线性正相关,表明横向扩展是凹深增加的主要形态补偿途径,与短轴的相关性分析结果契合。当内凹深度突破临界值时,短轴的扩展速率与长轴的拓展速率相当,即此阶段水平侵蚀主导形态发展,也是龛穴从上一阶段过渡至下一阶段,使形态参数呈现与之前不同的增长速度。龛穴的横截面积与容积可反映其平面和三维形态,较大的横截面积和容积意味着龛穴侵蚀面积增大,壤中流、出射流和贴壁流出现的概率增多^[33]。龛穴的最大横截面积与最大容积的多变量通径分析表明,长深比和短深比对龛穴最大横截面积有显著的直接影 响,长深比和短深比也直接影响龛穴最大容积,但影响程度小于其对横截面积的影响。说明长深比、短深比可表示龛穴的平面发育形状。

4 结 论

1)崩壁龛穴以雏形-发育-形成过程演化,具有特殊的地貌特征。龛穴雏形阶段在野外占比为10.42%,发育阶段占50.69%,形成阶段占38.89%。龛穴在崩壁上、中、下部分布的比例为29.86%、

24.31%、45.83%,以下部为主要发育部位,90.28%的龛穴赋存于砂土层。

2)龛穴大小差异较大,90.97%的龛穴主要表现为椭圆形和极椭圆形。龛穴平面形态以垂轴延展为主,而演化阶段受水平拓宽影响。

3)长轴、短轴与内凹深度对龛穴发育存在不同程度的直接/间接促进效应,三者演变存在协同效应,交互作用明显;长轴与短轴改变水平侵蚀模式,内凹深度决定龛穴发育上限。未来研究可关注崩壁龛穴演化的内在机制,辨析关键驱动因素,精准防控龛穴引发的崩岗侵蚀。

参考文献:

- [1] 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.
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.
- [2] 程冬兵,张晶鑫,郭飞,等.南方崩岗调查内容与方法探讨[J].中国水利,2024(6):68-72.
CHENG D B, ZHANG J X, GUO F, et al. Discussion on the content and method of investigation of collapse in southern China[J].China Water Resources,2024(6):68-72.
- [3] 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.
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.
- [4] GAO Y H, LIU C X, ZOU Z Q, et al. Effects of sediment yield fluctuations on the niche-like ephemeral gully formation in granite red soil[J].Catena,2022,219:e106624.
- [5] 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.
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.
- [6] JIANG F S, CHEN P S, ZHANG L T, et al. Modeling the sediment transport capacity of rill flow using a soil-rock mixture on steep slopes[J].Journal of Hydrology: Regional Studies,2023,49:e101512.
- [7] LIN Z, LIAO D L, HE L, et al. The study on morphological evolution process of gully headcut erosion in granite red soil hilly area based on an *in situ* scouring experiment[J].Geomorphology,2023,441:e108900.

- [8] COLLISON A J C. The cycle of instability: Stress release and fissure flow as controls on gully head retreat[J]. *Hydrological Processes*, 2001, 15(1): 3-12.
- [9] 高钰淇, 陈家宙, 邹自强, 等. 龛沟是崩岗早期发育的形态标志[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(4): 105-111.
GAO Y H, CHEN J Z, ZOU Z Q, et al. Niche-like ephemeral gully if a morphological symbol of the early development of benggang[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(4): 105-111.
- [10] 任兵芳, 丁树文, 吴大国, 等. 鄂东南崩岗崩壁溯源侵蚀特征研究[J]. *人民长江*, 2015, 46(7): 76-79.
REN F B, DING S W, WU D G, et al. Study of headward erosion characteristics of collapsed downland in granite region in southeast Hubei Province [J]. *Yangtze River*, 2015, 46(7): 76-79.
- [11] 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.
ZHENG W S, GENG H P, GU G Q, et al. The study of the distribution characteristics and erosion threshold of loess cave at Yujia Mountain in Dingxi[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(4): 112-117.
- [12] 金珊, 贾玉华, 郭成久, 等. 陕北黄土区切沟内陷穴发育特征研究[J]. *土壤通报*, 2017, 48(4): 948-954.
JIN S, JIA Y H, GUO C J, et al. Development characteristics of sink holes in gullies on the northern Loess Plateau [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2017, 48(4): 948-954.
- [13] DENG Q C, QIN F C, ZHANG B, et al. Characterizing the morphology of gully cross-sections based on PCA: A case of Yuanmou dry-hot valley [J]. *Geomorphology*, 2015, 228: 703-713.
- [14] ZHANG B J, ZHAO X, DONG Y F, et al. Morphological characteristics and influencing factors of gully head-wall scour holes in Yuanmou dry-hot valley region, southwestern China[J]. *Catena*, 2025, 249: e108721.
- [15] 徐婷, 杨丹, 舒成强, 等. 干热河谷陷穴形态特征及成因分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2023, 37(2): 142-149.
XU T, YANG D, SHU C Q, et al. Analysis of morphological characteristics and causes of the sink holes in dry-hot valley [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2023, 37(2): 142-149.
- [16] PENG J B, SUN P, IGWE O, et al. Loess caves, a special kind of geo-hazard on Loess Plateau, northwestern China[J]. *Engineering Geology*, 2018, 236: 79-88.
- [17] QI J R, GUO M M, ZHOU P C, et al. Soil erosion resistance factors in different types of gully heads developed in four main land-uses in the mollisols region of northeast China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2023, 230: e105697.
- [18] RÖMKENS M J M, PRASAD S N, GERITS J J P. Soil erosion modes of sealing soils: A phenomenological study[J]. *Soil Technology*, 1997, 11(1): 31-41.
- [19] BRADFORD J M, PIEST R F, SPOMER R G. Failure sequence of gully headwalls in western Iowa [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1978, 42(2): 323-328.
- [20] WANG C, CAI C F, DENG Y S. Tiny niche terrain induces gully headcut retreat [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2024, 49(7): 2260-2277.
- [21] 张宝军, 熊东红, 杨丹, 等. 跌水高度对元谋干热河谷冲沟沟头侵蚀产沙特征的影响初探[J]. *土壤学报*, 2017, 54(1): 48-59.
ZHANG B J, XIONG D H, YANG D, et al. Preliminary study on effects of headcut height on soil erosion and sediment yield at gully heads in Yuanmou dry-hot valley region [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(1): 48-59.
- [22] 舒成强, 张斌, 蒋良群, 等. 元谋干热河谷强侵蚀区陷穴发育特征与演化过程[J]. *热带地理*, 2014, 34(2): 141-147.
SHU C Q, ZHANG B, JIANG L Q, et al. Development characteristics and evolution process of the sink holes in Yuanmou dry-hot valley [J]. *Tropical Geography*, 2014, 34(2): 141-147.
- [23] 谢福倩, 梁志鑫, 邓羽松, 等. 广西不同形态崩岗空间分布特征与治理措施研究[J]. *中国水土保持*, 2020(7): 53-57.
XIE F Q, LIANG Z X, DENG X S, et al. Spatial distribution characteristics and control measures of different forms of collapsing slopes in Guangxi [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2020(7): 53-57.
- [24] 黄艳霞. 广西崩岗侵蚀的现状、成因及治理模式[J]. *中国水土保持*, 2007(2): 3-4.
HUANG Y X. Present situation, causes and treatment mode of collapse erosion in Guangxi [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2007(2): 3-4.
- [25] 曹明达, 周忠发, 张结, 等. 贵州绥阳阴河洞洞穴壶穴的演化过程[J]. *地理学报*, 2016, 71(11): 2010-2019.
CAO M D, ZHOU Z F, ZHANG J, et al. The evolution of the cavernous potholes in Yinhe Cave, Suiyang County, Guizhou Province [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(11): 2010-2019.
- [26] 李喜安, 彭建兵, 马润勇, 等. 黄土洞穴危害及其形成演化机制[J]. *西安科技大学学报*, 2009, 29(6): 737-741.
LIX A, PENG J B, MA R Y, et al. On the hazards and evolution processes of loess tunnels [J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2009, 29(6): 737-741.
- [27] 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.
- [28] 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.

(下转第 79 页)

- [21] 单蓓蓓,郑西来,乔振基,等.人工回灌过程中含水介质物理堵塞的试验研究[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2013,43(10):97-101.
SHAN B B, ZHENG X L, QIAO Z J, et al. Experimental study of aquifer physical clogging during artificial recharge process [J]. Periodical of Ocean University of China, 2013, 43(10): 97-101.
- [22] 唐凯,郭丹,沈才华,等.细颗粒含量对极细砂渗透性的影响规律和细观机理[J].水利水电科技进展, 2021, 41(6):46-51.
TANG K, GUO D, SHEN C H, et al. Influence rule of fine particle content on sand permeability and its mesoscopic mechanism [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(6): 46-51.
- [23] GUTIÉRREZ J P, VAN HALEM D, UIJTTEWAAL W S J, et al. Natural recovery of infiltration capacity in simulated bank filtration of highly turbid waters [J]. Water Research, 2018, 147: 299-310.
- [24] STUYFZAND P J, JUHÁSZ-HOLTERMAN M H A, DE LANGE W J. Riverbank filtration in the Netherlands: Well fields, clogging and geochemical reactions [C]// Riverbank Filtration Hydrology. Dordrecht: Springer Netherlands, 2006: 119-153.
- [25] 宋林辉,黄强,闫迪,等.水力梯度对黏土渗透性影响的试验研究[J].岩土工程学报, 2018, 40(9): 1635-1641.
SONG L H, HUANG Q, YAN D, et al. Experimental study on effect of hydraulic gradient on permeability of clay [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(9): 1635-1641.
- [26] 姚弘毅,李九发,戴志军,等.长江河口北港河道泥沙特性及河床沙再悬浮研究[J].泥沙研究, 2013, 38(3): 6-13.
YAO H Y, LI J F, DAI Z J, et al. Sediment character and bed load resuspension in north channel of Changjiang estuary [J]. Journal of Sediment Research, 2013, 38(3): 6-13.
- [27] 魏家兴,费良军,梁爽,等.泥沙颗粒级配组成对浑水波涌灌间歇入渗特性的影响研究[J].灌溉排水学报, 2023, 42(10): 57-62.
WEI J X, FEI L J, LIANG S, et al. Influence of sediment particle size distribution on intermittent infiltration of water under surge irrigation [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(10): 57-62.
- [28] 党发宁,刘云贺,陈军强,等.浑水渗流理论及其工程应用[J].中国科学E辑:技术科学, 2006, 36(9): 1029-1036.
DANG F N, LIU Y H, CHEN J Q, et al. Muddy water seepage theory and its engineering application [J]. Science in China, Series E (Information Sciences), 2006, 36(9): 1029-1036.
- (上接第70页)
- [29] 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.
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.
- [30] 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.
WEI Y J, WU X L, CAI C F. Spatial variability of soil shrinkage characteristics in profile of slope disintegration body [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(6): 153-159.
- [31] 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.
- [32] CHEN A Q, ZHANG D, YAN B G, et al. Main types of soil mass failure and characteristics of their impact factors in the Yuanmou Valley, China [J]. Catena, 2015, 125: 82-90.
- [33] 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.