

文章编号:1001-4810(2011)01-0105-08

重庆芙蓉洞崩塌作用及其环境效应

黄保健

(中国地质科学院岩溶地质研究所, 广西 桂林 541004)

摘要:利用洞穴调查和各类次生化学沉积物同位素测年技术等方法,对芙蓉洞内崩塌物进行研究。结果表明芙蓉洞内崩塌物规模巨大,为多期次崩塌作用的产物,分别形成于大于35万年、35~20万年间、10~2.6万年间、2.5万年后及旅游开放后的1995、2000、2003、2008年,既有洞顶围岩的规模性崩塌,也有洞顶石钟乳的崩落和洞底石笋、石柱的倒塌,分别起因于地壳抬升背景下洞内水流下切使原先浮力消失引起洞顶围岩地应力失衡、洞顶石钟乳不断联合使重量超过联合体—洞顶围岩接触面的临界结合力和洞底石笋、石柱受崩落的钟乳石砸中或强地震引发。崩塌作用引起了洞腔的规模性扩大、钟乳石景观和旅游设施的破坏、被迫改变游览线路等环境效应。针对芙蓉洞崩塌特点,提出了洞穴旅游开发的一些建议。

关键词:芙蓉洞;次生化学沉积;崩塌作用;同位素测年;重庆市武隆县

中图分类号:P931.5

文献标识码:A

0 引言

重庆武隆县芙蓉洞是世界自然遗产中国南方喀斯特武隆喀斯特的重要组成部分,洞体宏大、沉积物类型多样,尤其是次生化学沉积物景观壮丽、珍稀、奇特,自1993年被发现、1994年建成景区对外开放以来,吸引了累计近千万人次的游客,取得了良好的经济、社会效益,成为“开发一个洞,搞活一个县”的典范,是我国重要的旅游洞穴。

芙蓉洞内另一特色的堆积物是洞底遍布的崩塌物。这一特点已为规划设计者所关注并在洞穴地质条件分析基础上对稳定性作出定性推断,提出了钟乳石坠落的发生阶段,但未进行更详细的研究^[1]。关于洞穴崩塌作用,前人认为它是规模性洞穴形成过程必不可少的造洞作用^[2],也是天窗、天坑形成发育阶段中重要的造坑作用^[3,4],更是岩溶地区一种特殊的造貌作用^[5,6]①;但是,鲜见就某一洞穴的崩塌作用及

演化史展开详尽研究的文献。本文综合相关调查资料与测年数据,试图对芙蓉洞内发生的崩塌作用及其发生年代作初步研究,探讨洞穴崩塌效应及其演化史,为自然遗产的保护和旅游事业的可持续发展提供科学依据。

1 芙蓉洞概况

芙蓉洞位于渝黔边界芙蓉江入汇乌江的汇合处以南4km的芙蓉江右(东)岸岸坡上,处于上部为山原(最低山原面高程1100m)、下部为芙蓉江(江底高程约200m)峡谷的立体地貌环境中。坐标为N29°13',E103°16'~103°29',洞口高程485m。洞体宏大,长2393m,宽高多在30~50m以上,平面上大致呈S形,由前段、中段的下层洞(游览洞)和后段高层洞与末端的竖井(深229m)组成。洞穴主要发育在中寒武统平井组 and 上寒武统后坝组的厚层、中厚层状白云

基金项目:芙蓉洞稳定性调查评价项目(2003)、岩溶所基本科研业务费项目(2010016)资助

第一作者简介:黄保健(1964—),男,副研究员,主要从事岩溶景观与洞穴的资源与环境调查研究、地质遗迹与地质公园开发与保护研究, E-mail: hbj306@163.com。

①黄保健. 洞穴崩塌造貌效应综述 2004。

收稿日期:2010-11-20

(1) 围岩碎块的岩性同洞穴围岩, 绝大部分为平井组灰黑色薄层状含泥质白云质灰岩、白云岩和浅灰色、灰黄色含泥质白云岩, 少数为厚层、中厚层状白云岩、白云质灰岩, 夹有极薄层泥岩或钙质页岩(“隐山”处最为明显)。岩块呈明显棱角状, 无磨圆, 无分选, 大小混杂, 块径大多为 0.1~1m, 最大可达 $12 \times 10 \times 5(\text{m}^3)$ (在“巨幕山”西北端), 最小的约 $1 \times 1 \times 0.5(\text{cm}^3)$ 的小角砾。堆积点上方洞顶可见崩塌面痕迹。以上特征表明它们是洞顶围岩崩塌的产物, 而非经过水、冰川、风等介质搬运而形成的堆积物。

(2) 倒塌、碎裂的钟乳石类大多可恢复整体形状。钟乳石大碎块附近可见坠落点痕迹和坠落弹跳的小碎块, 大小碎块基本上可以还原成整体, 上方洞顶见色调较新鲜的接合面; 石柱、石笋碎块有的保留有上方坠落物砸损的痕迹, 有的碎裂但裂距不大或分离不远, 基本上仍可恢复整体。以“辉煌大厅”和“巨幕山”处的最为典型。这些特征揭示出它们是钟乳石类就地坠落、倒塌、破碎与分离的结果。

2.3 洞底积物堆积成山, 体量巨大, 与洞顶崩塌痕迹吻合

芙蓉洞底部, 除入口段, 自“松柏会仙”开始, 几乎每一段都堆积有崩塌的围岩块或钟乳石类, 以围岩块(岩性同洞穴围岩)为主, 崩塌物堆积占洞底总面积近 95%。最为显著的是形成了五座“山”(盾山、景山、巨幕山、珊瑚山、隐山), 以“巨幕山”和“隐山”规模最大, 其平面投影面积分别为 $6\,300$ 、 $9\,140\text{m}^2$, 高分别为 73 、 40m , 堆积物容积分别为 29.4 万、 21 万 m^3 。崩塌物由白云岩、白云质灰岩、钟乳石类(石钟乳、石笋、石柱)断块组成。经估算, 除竖井大厅吊箩厅(底部也堆积了大量的崩塌岩块)未计外, 全洞围岩塌块总容积约 45 万 m^3 , 占洞腔总容积 $1/4$ 强。

洞底堆积的钟乳石碎块主要以大型石钟乳为主, 少量石笋。它们集中分布于“葡萄园”至“万箭挂壁”之间、“巨幕山”和“珊瑚山”等处, 以后两者最典型。它们具有如下特征: ①呈断节、断块状; ②大、小混杂,

以大块(节)为主。特别是断面崭新、晶面闪亮, 洁白如雪; 在“珊瑚山”出现数处规模巨大的钟乳石和石笋断块, 它们大小相近。最大的断块直径达 10.6m , 长 11m (图 2)。③分布排列大多无序。钟乳石碎块主要分布于空间宽阔的洞穴厅堂底部, 堆积于崩塌岩块上, 少数与围岩块混杂, 大多无方向性, 因为钟乳石大都从高处坠落, 且都是体积庞大的复合体, 故坠至洞底后往往裂开或分离成若干块段, 在洞底可依稀辨别出坠落点、二次弹跳块体, 而洞底原先生长的石笋、石柱则被砸成数段, 倒塌于附近, 部分呈架空状无序叠置, 那些中等大小的石笋或石柱则总体上卧于崩塌岩块堆上, 断成数节但节间断距不大。



图 2 坠落钟乳石联合体(直径 10.6m , 长 11m)

Fig. 2 The biggest fallen stalactite with 10.6m in diameter and 11m in length

直径最大的被砸毁石笋是“霸王巨盔”景观, 其原先为高达 13m 、直径为 7.8m 的巨型石笋, 被洞顶巨大的钟乳石砸毁, 分离成核部、中层和外层(顶部)三个主要部分(图 3)和其它碎块, 其中外层(顶部)从后面观看外形酷似一巨大的头盔(图 3 右), “霸王巨盔”景观上方洞顶可以观察到坠落钟乳石与岩层接合面的痕迹。被砸毁的巨型石笋已分离的主要部分中, 中层和外层的上面重新生长有小石笋群, 通过其生成年代的测定, 可以判断崩塌发生年代的上限。



图 3 被坠落钟乳石砸碎成三部分的大石笋及在其上新生的小石笋

Fig. 3 The small stalagmite that grows on a big stalagmite that has been hit into three pieces by fallen stalactite

2.4 崩塌堆积物具有多期次叠加的特征

在空间分布上,发现芙蓉洞内崩塌堆积物具有明显的叠置现象,显示出崩塌作用有多期次叠加的特征。

(1)风化度不同、表面新鲜度有显著差异的围岩崩塌块叠置堆积。如“巨幕山”崩塌堆上的围岩块至少可以分出三种类型——①表面覆盖有风化白云岩粉(厚1cm许)者、②表面未覆盖有风化白云岩粉但

断面陈旧者和③未受明显风化与四周断面极为新鲜的岩块,且有③覆盖在②上、②叠置①上或③直接叠置在①上的空间分布关系(图4);在“隐山”上的围岩崩塌块依断面新鲜度的差异分为两种,它们均未见明显的风化迹象,但断面陈旧程度明显不同且有较新鲜者叠置在相对陈旧者之上的现象。

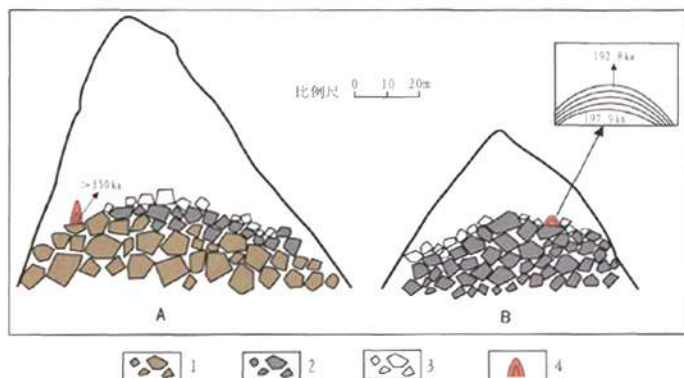


图4 芙蓉洞两处大厅典型崩塌堆积物剖面

Fig. 4 Typical cross-section showing rock collapse piles in the Furong Cave

A. 巨幕大厅后段横截面, B. 崩塌大厅横截面

1. 表面覆有白云岩粉的白云岩块; 2. 表面陈旧的白云岩块; 3. 表面新鲜的白云岩块; 4. 崩塌堆上生长的石笋

(2)早期坠落的石钟乳碎块又被后期石笋碎块覆盖。这一特点在“巨幕山”、“珊瑚山”、“隐山”三处最大规模的钟乳石类倒塌的地方表现得最为明显。

(3)崩塌堆上生长的石笋被后期崩塌、坠落的围岩块或砸毁。这种现象同样也是以“巨幕山”、“珊瑚山”、“隐山”等处尤为显著。这些被砸石笋为研究崩塌发生年代(上限)提供了良好的测年材料。

崩塌物空间分布上述特征表明了芙蓉洞内发生

的崩塌作用有多期性的特点,这为相关钟乳石类同位素年龄分析结果所证实。

2.5 旅游开发后发生的崩塌作用规模较小

以上所述的崩塌规模都比较大,芙蓉洞旅游开发后所发生的几次崩塌的体量、范围均较小(表1),但会砸烂游道或砸毁栏杆,影响到旅游活动的进行,被迫封闭某些地段或迁移游道。

表1 芙蓉洞开放后几次小规模崩塌事件

Tab. 1 Some small-scale collapse events occurred after the tourism exploitation of the Furong Cave

崩塌时间	类型	地点	特征描述
1995/06	A	火树银花西侧	崩塌岩块分布面积约38m ² , 塌块最大者2×1.3×1.2m ³ , 大多块径为0.7~1m许, 其外圈见地质历史时期崩塌的巨形石柱(石笋)断块。塌块总容积约50m ³ , 均堆积在早期崩塌堆积物上。崩塌物砸碎了游道, 迫使放弃“崩塌大厅”西端“银雨树”至“火树银花”的游道, 将“火树银花”北侧的游道下移至南侧。
2000/02	A、B	生命之源观景台	仅见一块大小40×30×15cm ³ 的围岩塌落, 砸在观景台不锈钢栏杆上, 栏杆出现一凹痕。同时坠落有一小钟乳石块体, 堆积在早期崩塌堆积物上。这一崩塌迫使改变游道(上移)。
2003/01/26	A、B	生命之源附近	江口水电站水库蓄水发生里氏3.5级的地震, 在“生命之源”北东侧约10m处发现新塌落的围岩块, 有三块较大, 大小分别为40×30×10、30×25×10、30×20×10(cm ³)及一些碎块, 散落在表面有风化白云岩粉的早期崩塌岩块堆上, 其上生长的小石笋顶部(¹⁴ C年龄为1200年许)被砸碎。同时, 在“莲花池”、“艺术走廊”、“芙蓉大佛”、“巨幕飞瀑”、“生命之源”、“石田珍珠”等处, 有小的尖部或风化外壳坠落, 体量甚小, 均堆积在早期崩塌堆积物上。这次崩塌导致封闭“崩塌大厅”的游览。
2008/05/12	C、A	银雨树、莲花池、九五之尊	银雨树景观(三棵高大的棕榈状石笋)倒塌断成数节, 砸烂游道和栏杆; 莲花池、九五之尊一带洞顶的围岩和钟乳石崩塌, 砸毁莲花池汀步墩和九五之尊附近的电能控制柜。崩塌物均堆积在早期崩塌堆积物上或洞底平坦地面上。崩塌导致封闭“崩塌大厅”的游览, 莲花池附近游道的迁移。

注: 崩塌类型中, A为洞顶围岩崩塌, B为小钟乳石坠落, C为大石笋倒塌。

3 芙蓉洞崩塌历史分析

通过采取围岩崩塌堆上生长的石笋、塌落的钟乳

石类及被砸的石笋等样品进行不平衡铀系法或¹⁴C 法测年(表 2),同时结合崩塌体的空间位置及其相互关系进行分析,发现芙蓉洞内崩塌大致形成于五个阶段。

表 2 芙蓉洞与崩塌有关的代表性钟乳石类年龄测定结果
Tab. 2 Age-dating results of some speleothems related to collapses

编号	名称	取样位置	年龄/ka	资料来源
1	石笋	巨幕山较老崩塌岩块上石笋底部(图 4)	> 350	文献 ^[8]
2	石笋	辉煌大厅崩塌岩块上石笋底部	> 350	文献 ^[8]
3	石笋	辉煌大厅崩塌岩块上石笋核心层	> 350	文献 ^[8]
4	石笋	隐山崩积堆上生长的饼状石笋之顶部(图 4)	192.8±24.7	文献 ^[8]
5	石笋	隐山崩积堆上生长的饼状石笋之底部(图 4)	197.9±14.6	文献 ^[8]
6	石笋	巨幕山西侧较老崩塌岩块上生长石笋之底部	163.3±16.0	文献 ^[8]
7	钟乳石	辉煌大厅坠落钟乳石之底座(图 2 左)	149±16.1	文献 ^[7]
8	钟乳石	辉煌大厅坠落钟乳石之末端(图 2 右)	60.3±2.8	文献 ^[7]
9	石笋	霸王巨盔受砸碎巨型石笋外层上生长小石笋之顶部(图 3 右)	89.5±9.5	文献 ^[8]
10	石笋	霸王巨盔受砸碎巨型石笋外层上生长小石笋	81.3±8.1	文献 ^[7]
11	石笋	霸王巨盔受砸碎巨型石笋外层上生长小石笋之底部(图 3 右)	97.5±13.0	文献 ^[8]
12	石笋	霸王巨盔中层上生长的小石笋(图 3 左)	99.2±5.2	文献 ^[7]
13	石笋	辉煌大厅受崩落钟乳石砸损的石笋顶部	25.4±1.5	文献 ^[7]
14	石笋	辉煌大厅崩落钟乳石块上生长的小石笋	25.3±1.8	文献 ^[8]
15	石葡萄	一夫当关旱池(石柱断节围成的池子表面)	26.0±1.3(¹⁴ C 法)	文献 ^[7]
16	石笋	巨幕山中心 2003 年崩塌石砸损石笋	1.1±0.1	文献 ^[8]

3.1 洞内大规模围岩崩塌主要发生在早于 35 万年和 20~35 万年两个阶段

洞底分布面积达 90% 以上的面积为未经搬运的棱角状岩块、碎石所堆积,形成了洞内波状起伏的堆积地貌,特别是五座堆积“山”均对应于洞顶的阶梯状痕迹,表明了洞穴曾发生过大规模围岩崩塌。由围岩崩积堆上(巨幕山、辉煌大厅)生长的石笋之底部年龄大于 35 万年(表 2),推测大规模围岩崩塌时间应该早于石笋生长年代,即远大于 35 万年,这一阶段崩塌岩块表面常覆有一层厚约 0.5~1cm 的灰黑色粘泥状白云岩粉;但是,“巨幕山”上还有相当数量的、表面陈旧的白云岩块堆积在上述崩塌块石之上,而且在局部地方还发现有少量更为新鲜的岩块堆积于表面陈旧的白云岩块石上面;在“崩塌大厅”下的“隐山”上,大量塌石(白云岩、白云质灰岩)外表陈旧但无白云岩粉,说明继大规模围岩崩塌后,在“巨幕山”大厅、“崩塌大厅”处又发生一次较大规模的围岩崩塌,结果造

成了“巨幕山”大厅的扩大和“巨幕山”的增高、形成了“崩塌大厅”及其堆积的“隐山”,铀系测年资料也从侧面证实了这个推论——其上生长的石笋底部年龄为 19.5 万年左右,故断定其崩塌大约发生于 20 多万年前;此后又发生了若干次小规模围岩崩塌,如洞穴开放后的 1995 年 6 月、2000 年 2 月、2003 年 1 月及 2008 年 5 月均均发生了零星的围岩小崩塌(表 1)。

3.2 洞内钟乳石坠落倒塌发生在 10 万年以后的多个时期

据目前所观察到的现象与测年资料,洞内大规模的钟乳石崩塌始于“霸王巨盔”附近的崩塌,原先的巨型石笋被洞顶上坠落的巨大石钟乳联合体所砸毁,其上重新生长的小石笋测年结果为 9.95~8.13 万年(表 2、图 3),说明巨型石笋被巨大石钟乳联合体击倒的时间早于 9.95 万年,有可能是 10 万年(结合前期芙蓉洞钟乳石类系统测年的资料^[7]推测)。10 万年以来发生过多次钟乳石类坠落与倒塌。最新的坠落

发生于2008年5月12日,主要发生在“辉煌大厅”、“巨幕山大厅”内,表现为在早期的围岩崩塌块石堆上面叠积了众多的坠落钟乳石碎块,“辉煌大厅”坠落的最大钟乳石乳尖形成年龄6.03万年,表明6.03万年后才坠落;“一夫当关”处的旱池中的石柱断节和洞壁围成的池子表面分布的石葡萄形成年龄为2.6万年,表明断石柱至少也在2.6万年以前就倒塌了;此外,在“珊瑚山”塌石堆上一石笋顶部被坠落的钟乳石砸去一半,其顶部生成年龄为2.54万年许,表明2.54万年后又发生一次钟乳石崩塌事件。再就是,洞穴开放后的2000年2月、2003年1月发生的零星小规模钟乳石坠落现象。而2008年5月28日汶川大地震则造成了辉煌大厅下“九五之尊”—琼花池一带大型钟乳石崩落、破碎,在“银雨树”处洞顶大型钟乳石崩落、破碎并导致几棵“银雨树”——高大的棕榈状石笋群倒塌并断成若干段。因此,洞内钟乳石类崩塌、坠落历史大致为10~2.6万年间、2.54万年后及洞穴旅游开放后的1995、2000、2003、2008年。

由上可知,根据目前资料,芙蓉洞内崩塌大致形成于大于35万年前、35~20万年间、10~2.6万年间、2.54万年后及旅游开放后(1995、2000、2003、2008年)五个阶段。

4 芙蓉洞崩塌形成机理浅析

任何地质作用的发生都有其形成的内部条件和外部影响因素。芙蓉洞崩塌形成的内部条件是被节理裂隙切割形成的围岩块体、悬挂的石钟乳联合体及其下的石笋、石柱,在崩塌发生前,它们是处于应力平衡状态,当该平衡状态受严重破坏时便发生崩塌作用。外部影响因素则是地壳抬升、地震作用、洞穴内剧变的水位及包气带内具溶蚀性的渗透水流。

4.1 地壳抬升、洞顶岩层应力失衡是洞顶围岩崩塌的主因

芙蓉洞位于芙蓉江紧密背斜轴部区,又属于其西侧的芙蓉江冲断层影响带内,节理发育,洞顶又多为薄层岩层,因此节理裂隙密集地切割了这种薄层岩,造成其物理力学强度低,为崩塌的发生奠定了物质基础。当地壳隆升,深处洞穴的水流下切,浮力消失,岩层应力失衡,洞穴围岩块体容易产生崩塌作用(特别是有地震等较大的外力作用时),造成了远在35万年前全洞大部地段发生了大规模的围岩崩塌,对原先形成于潜流带的洞穴通道进行大规模的改造,使洞腔

空间最终成型。在“崩塌大厅”上方的薄层岩层中夹有数层薄层泥岩,位于包气带的渗透水流长期浸泡软化或带走了软弱层,加速了崩塌作用,因此在20~35万年间发生了规模性围岩崩塌,造就了“崩塌大厅”及其下的“隐山”。

当然,地下河水位快速涨落产生的水—气压力(包括真空吸蚀)也可能会引起洞顶围岩的崩塌。

4.2 洞顶悬挂的石钟乳联合体超重引起钟乳石崩落、倒塌

石钟乳的形成大多是由于含有碳酸钙溶质的渗透水流沿着洞顶围岩内的裂隙进入洞腔表面时因温度压力的改变形成鹅管且不断增长的结果。石钟乳的悬挂是借助于洞顶渗水析出的次生碳酸钙与其接触洞体围岩表面间的胶结力来维持其稳定性,接触界面的孔隙度高,胶结能力有限,其结合力较低,因此容易导致石钟乳的崩落。特别是一些年代久远、洞顶滴水量和溶解的碳酸钙物质含量多的洞穴,在洞顶生成的石钟乳个体生长速率大,其快速地向下降生长和横向联合,最终长成超级石钟乳,使得重量越来越大,当总重量超过其与洞顶围岩接合面的临界结合力时,引发崩落,并砸击下面分布的石笋、石柱,造成它们倒塌、破碎的连锁反应。

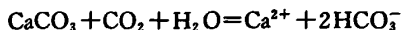
4.3 地震因素是围岩崩塌和钟乳石坠落、倒塌的诱发主因

地震波的纵波使岩石介质体积的胀缩,导致介质发生上下振动;横波是剪切波,它使岩石介质发生水平(前后、左右)抖动、变形,破坏性较强;面波是由纵波与横波在地表相遇后激发产生的混合波,其波长长、振幅强,只沿地表面传播,是造成建筑物强烈破坏的主要因素^[10]。因此,地震会对洞穴围岩、洞顶石钟乳、洞底的石笋、石柱产生冲击作用。体波(纵波、横波)都会使洞顶原本已受构造裂隙切割破碎的岩石产生振动、剪切作用,造成崩塌;同时也导致钟乳石晃动并破坏其与洞顶围岩接触面的胶结,导致坠落和击倒、砸碎底下的钟乳石类;地震波还导致崩塌堆失稳,引发其上的钟乳石类上下颤动和左右摇晃,从而倒塌、断裂与破碎,形成了芙蓉洞内众多崩塌物。最明显的是2008年5月12日四川汶川大地震波及本洞后,造成了“银雨树”景点处生长于围岩崩积堆上的三根高达十几米的棕榈状石笋倒塌、碎裂,“银雨树”不复存在;同时这次地震也使得“九五之尊”附近的洞顶围岩和钟乳石崩塌、坠落,破坏了“琼花池”景观、附近的电器设备和游道。当然,地震引起的崩塌强度与

地震的震级、烈度有关,小规模的地震很可能不产生或只造成体量不大的崩塌,如2003年1月26日江口水电站水库蓄水后引发里氏3.5级地震,导致洞内多处规模甚小的钟乳石尖部坠落或钟乳石表面风化层剥落现象的发生。另一重要的相关现象是一些站立式滴石类(石笋、石柱)产生开裂。

4.4 洞穴环境的严重改变也会引起钟乳石的变化,成为崩塌的潜在诱因

洞穴环境中一个重要的化学反应便是 CaCO_3 在含 CO_2 的水溶液中的溶解反应:



这是岩溶作用最本质的一个可逆反应,其正向反应使 CaCO_3 (石灰岩、白云岩及钟乳石类)被溶解,只要水中不断有 CO_2 溶入,含量超过平衡时的浓度, CaCO_3 溶解过程就不会停止。逆向反应生成洞穴内大量次生化学沉积物(钟乳石类)。

芙蓉洞开放后,“恒温带”内气温曾经比开放前升高了 $1\sim 2^\circ\text{C}$ (现已降至 1°C 以内),加上大量游人进入洞中使 CO_2 浓度增大,均有利于上述的正向反应,即钟乳石类被溶解,特别是钟乳石与洞顶围岩结合处的碳酸钙一旦被溶解、其结合力将会降低,导致钟乳石发生坠落,还可能砸损石笋、石柱。但是,目前关于洞穴气候环境的改变对钟乳石坠落的影响还没有见有专题研究,洞穴气候环境(温、湿度、 CO_2 、滴水部位和滴水量等)的改变程度、主导因素及影响时间等的定量关系尚不清楚,有待深入研究。

5 结论与建议

5.1 结论

芙蓉洞内的崩塌作用及效应十分显著,遗迹明显,规模巨大,崩塌堆积遍布洞底,既有空间上清晰的分布规律又有时间上先后生成的序列可寻,堪称洞穴崩塌天然实验室。因此,芙蓉洞不仅是研究洞穴次生化学沉积物的形成、演化的宝贵场所,同时也成为研究洞穴崩塌作用的发生、发展与演化的基地。

(1)芙蓉洞内崩塌包括洞顶围岩崩落、钟乳石坠落和石柱、石笋倒塌三种,形成了不同的环境效应——造洞作用、钟乳石景观破坏、旅游设施的损毁和游览线路的改道。

(2)芙蓉洞崩塌历史悠久,延续至今,大致发生于大于35万年前、35~20万年间、10~2.6万年间、2.54万年后及旅游开放后(1995、2000、2003、2008

年)五个阶段。

(3)崩塌成因多元化。早期规模性的围岩崩塌乃在地壳抬升背景下芙蓉洞排水因水浮力消失后洞顶岩石地应力失衡而引起;晚期规模性的围岩崩塌是因为包气带中裂隙水浸软洞顶围岩中的泥岩夹层引起岩层强度锐减而产生;较大的钟乳石类崩塌则是由于石钟乳联合体重量超过其基部—洞顶围岩接合面的临界结合力而导致坠落(或有地震的影响)。原“银雨树”石笋群倒塌及附近的坠落则是2008年汶川地震等引起石笋群下的崩积堆失稳,石钟乳的坠落则是接合面临界结合力小于石钟乳自重,并砸碎下方的石笋、石柱。

(4)对那些古老、高大的旅游洞穴而言,游道、观景台的设置必须避开洞顶诸如分布有大型石钟乳联合体和灰岩中分布有薄层泥岩等软弱夹层等有安全隐患的地方,以确保游客人身安全及避免游览设施受破坏。

5.2 建议

(1)虽然芙蓉洞在经历了至少几十万年漫长的岩石应力调整期后,应力已基本处于平衡状态,再发生大规模围岩崩塌的可能性较小,但由于崩塌大厅周围洞顶的岩层有利于崩塌,诱发因素一出现就有可能引发新的崩塌,建议禁止游客进入崩塌大厅和石膏花支洞,以确保游客安全,同时也有利于保护“犬牙晶花”、石膏沉积等珍稀景观。鉴于芙蓉洞内崩塌现象与成因多元化,崩塌在某种程度上说是不可预测的,因此应加强地质灾害监测工作,建立安全巡查制度并封闭部分危险地段,制定应变措施和安全预案,为防灾减灾赢得主动。

(2)作为天星竖井—芙蓉洞洞穴系统的一部分,芙蓉洞和其它洞穴一起系统反映了新生代以来扬子地台隆升、芙蓉江下切的历史。洞穴崩塌从某种程度上反映了区域地壳抬升的深刻背景,由于样品采集受限,本次研究所划分的崩塌阶段仍显得粗糙,建议申请各级科研基金,开展芙蓉洞崩塌作用的深入研究,不仅可以有助于精细刻划洞穴的形成演化史,而且也可作为洞穴旅游的安全运行提供科学依据。

(3)目前芙蓉洞的游览解说虽然在不断增大科普内容的比重,但主要是围绕钟乳石类的形成方面进行,建议今后增加洞穴崩塌科普内容——崩塌作用除了有负面效应外还有正面效应,让普通游客了解芙蓉洞形成原理和发展历史。

致谢:本文综合中国地质科学院岩溶地质研究所景观与洞穴研究室关于芙蓉洞系列项目工作的成果编写,项目工作中得到了朱学稳、朱德浩、韩道山、陈伟海等同事的协作;英文摘要承蒙 The NSS Bulletin 期刊编辑 Erin Lynch 小姐校核。在此一并致以衷心的感谢!

参考文献

- [1] 朱学稳,张任,张远海,等.武隆县芙蓉洞旅游开发规划设计书[R].桂林中国地质科学院岩溶地质研究所,1993.
- [2] Davies W E. Mechanics of cavern breakdown[J]. NSS Bulletin, 1951,13,36-43.
- [3] 朱学稳,黄保健,朱德浩,等.广西乐业大石围天坑群发现探测定义与研究[M].南宁:广西科学技术出版社,2003:139-153.
- [4] 朱学稳,朱德浩,黄保健,等.喀斯特天坑略论[J].中国岩溶, 2003,22(1),51-65.
- [5] 张英骏.崩塌在喀斯特洞穴和地貌发育中的作用//中国地理学会地貌专业委员会.喀斯特地貌与洞穴.北京:科学出版社, 1985,96-101.
- [6] Klimchouk A. Cave un-roofing as a large-scale geomorphic process[J]. Cave and karst Science, 2005,32(2-3),93-98.
- [7] 朱学稳.芙蓉洞的次生化学沉积物[J].中国岩溶,1994,13(4): 357-368.
- [8] 黄保健,韩道山,陈伟海.重庆武隆芙蓉洞稳定性调查评价报告[R].桂林中国地质科学院岩溶地质研究所,2003.
- [9] White E L and White W B. Processes of cavern breakdown[J]. NSS Bulletin, 1969,31(4),83-96.
- [10] 刘斌.地震学原理与应用[M].合肥:中国科学技术大学出版社, 2009,30-65.

Collapse function of Furong Cave in Chongqing City and its environmental effects

HUANG Bao-jian

(Institute of Karst Geology, CAGS, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract: Collapse of the Furong Cave in Chongqing City is studied by means of in-situ investigation and the U-series and ^{14}C isotopic dating of speleothems. The results show that the enormous collapse piles were formed in different stages: 0.35Ma earlier, 0.2~0.35Ma, 0.026~0.1Ma, and 0.025Ma later BP as well as recent collapses following the exploitation of the cave for tourism (collapses occurred in 1995, 2000, 2003 and 2008). Three collapse phenomena are considered: roof stoping, falling stalactites, and tipping or falling of stalagmites and columns. Upward stoping results from the adjustment of stresses in the parent rock as buoyancy decreases when the groundwater table lowers due to tectonic uplift. This results in upward void migration and enlargement of the Cave passage. Stalactites fall as their weight increases beyond the critical force on the contact plane between the stalactites and parent rock. Stalagmites and/or columns tip and fall occur when the speleothems or parent rock are hit by falling stalactites or shook by earthquakes. The collapse functions are of the environmental effects as enlarge the space of the cave, damage of the stalagmites and tourism facilities, and make the tourism path has to be changed. Therefore, some proposals on cave tourism development are put forward according to the features of the collapses in the Furong Cave.

Key words: the Furong Cave; speleothems; collapse function; isotopic dating; Wulong County in Chongqing City