

DOI:10.13718/j.cnki.sxxb.2018.12.011

大方县观音洞波状流痕发育特征及形成机理研究^①

罗书文¹, 杨桃², 覃星铭^{1,3}, 邓亚东¹

1. 中国地质科学院岩溶地质研究所/国土资源部广西壮自冶区岩溶动力重点实验室, 广西 桂林 541004;
2. 贵阳十二中学, 贵阳 550002; 3. 西南大学 资源与环境学院, 重庆 400715

摘要: 为探讨岩溶洞穴波状流痕(舌状流痕)的分布特征及形成原因, 对观音洞内的波状流痕的形态特征参数进行测量, 统计它在纵、横方向上的展布特征, 分析洞道形态结构与波状流痕的展布关系; 同时, 根据地下河水运移规律, 探讨波状流痕的形成原因. 结果显示: ①洞底波状流痕较均一, 形态差异小于洞壁; ②洞壁波状流痕在距洞底高 1.0~1.2 m 范围内的流痕深度, 较 1.2~1.4 m 和 1.4~1.7 m 这 2 个高度范围内的深度变化大; ③洞壁波状流痕的形态特征变化与洞道形态结构有密切联系; ④岩溶洞穴波状流痕是地下径流过程产生的内波(V_I)与梯度流(V_T)共同作用的结果. 认为地下径流是岩溶洞穴波状流痕的直接动力, 洞道结构形态对径流过程产生的内波(V_I)与梯度流(V_T)的叠加作用的影响, 导致波状流痕在洞内的展布特征.

关键词: 岩溶洞穴; 地下河; 波状流痕; 发育特征; 形成机理

中图分类号: P931.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5471(2018)12-0051-08

水是大自然的刻刀, 在岩溶区地球表面塑造了各种各样地貌形态^[1], 如峡谷、洼地、峰丛等地貌形态, 而且在洞内将岩溶溶蚀成各种各样的窝穴景观. 洞穴内的溶蚀窝穴形态一般分为指向流痕类、窝穴类、沟槽类、井管类和洞壁突出物类五大基本类^[2], 而洞内窝穴的形成是多种多样的, 按水的作用类型可将洞内窝穴分为 4 种, 即溶蚀和混合溶蚀类、流水侵蚀类、磨蚀类和滴水侵蚀类. 在洞穴景观开发、洞穴形成机理和洞穴古水文研究中^[3], 洞内窝穴也是讨论的热点和难点之一, 国内外对洞内窝穴的研究既有定性描述^[2], 又有定量研究^[4-5], 且取得了丰富的成果. 如, 关于洞内窝穴成因, 有学者^[6-7]认为是由洞内来自不同水源的水流混合在静水条件下溶蚀形成, 也有学者^[8]认为是由流水侵蚀作用而形成. 洞穴流痕是地下水或洞内水流在运动过程中, 对洞壁侵蚀、溶蚀作用遗留下来的痕迹, 因此对古水文的指示具有重要意义^[2]. 从目前的研究成果来看, 洞穴水是如何作用于洞壁而形成流痕方面报道较少. 因此, 本文以贵州省大方县观音洞内波状流痕的观测数据为基础, 分析波状流痕在洞内的发育特征, 从地下河水运移特征探讨其形成过程, 为化石型洞穴古水文研究和洞穴旅游科学普及提供参考.

1 材料与方法

1.1 区域自然地理地质概况

观音洞位于贵州省大方县正北方、距离县城 43 km 的瓢儿井镇中洞村, 距 321 国道 500 m, 坐标为

① 收稿日期: 2018-04-03
基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(41502257); 中国地质科学院院长基金项目(YYWF201638); 中国地质大调查(DD20160285、DD20179313、DD20160061); 毕节鸡鸣三省·贵州地质公园申报(200000002371620005).
作者简介: 罗书文(1978-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事岩溶水文地貌、洞穴等地质遗迹和岩溶环境的研究.

别对观音洞内 2 侧壁和洞底发育的波状流痕进行实地观察与测量,观察其形态与径流方向,测量流痕深度(h)、短半轴(a)、长半轴长度(b)、宽度(c)及发育高度等参数数值,共测量洞壁流痕 321 个和洞底 159 个.按统计学方法对数据进行对比和相关分析,通过对参数进行计算,分析其形态和空间特征,数据处理主要运用 Excel 和 SPSS 软件.

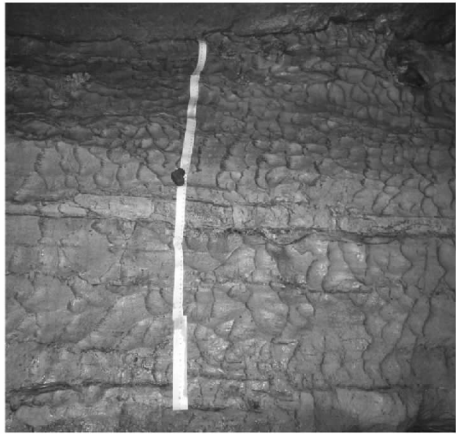
2 结果与讨论

2.1 波状流痕规模与形态结构

观音洞穴为季节性河流,系溶蚀型洞穴,在洞穴中部发育大量的波状流痕.洞底大量的卵石和细砂堆积,基岩虽少有出露但窝穴较为发育,面积 10 余平方米(图 3),2 处出露基岩发育的窝穴密度达 352 个/ m^2 ,洞壁窝穴发育密度达 446.3 个/ m^2 .



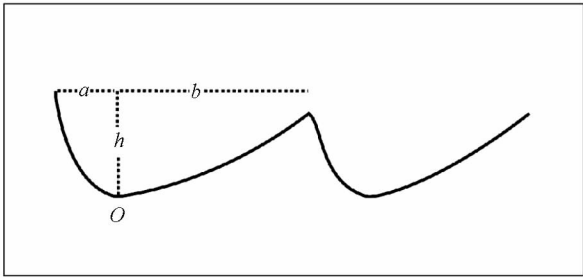
(A) 洞底波状流痕



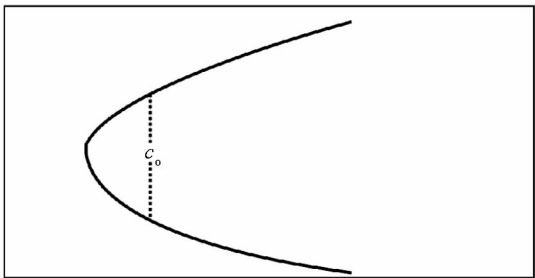
(B) 洞壁波状流痕

图 3 洞穴波状流痕照片

岩溶洞穴内波状流痕属于洞穴窝穴的一种,其形态类为舌形,平面图形为抛物线型,纵向上,由后缘向开口方向迅速下降到最深后慢慢变浅,无论是平面图边缘线,还是纵剖面结构线都具有较好的流线形特征(图 4).



(C) 波状流痕纵剖面图



(D) 波状流痕平面图

O. 表示流痕最低点; a. 表示短半轴; b. 表示长半轴; c. 表示波痕宽; h. 表示波痕深

图 4 波状流痕结构示意图

2.2 分布特征

观音洞高 2.3~42 m,对于洞顶窝穴发育特征难以观测,所以,以观音洞壁和洞底发育的波状流痕作为研究对象.岩溶区地下河水位具有暴涨暴跌特性,很难确定某个时期的地下水位,因此,研究洞壁波状流痕在横向上(同一水平高度沿径流方向)的展布特征时,以选取区间段内发育的流痕进行探讨(1.0~1.2 m,1.2~1.4 m,1.4~1.7 m 距离洞底的 3 个高度),其分析结果如表 1、表 2 所示,由表可以看出观音

洞内波状流痕空间展布特征.

1) 洞底流痕的特征参数变异系数明显小于洞壁,也就是说洞底流痕较洞壁发育均一. 洞底流痕的特征参数平均值分别为深度 0.18 m、宽 0.60 m、长半轴 0.40 m、短半轴 0.12 m; 洞壁流痕的特征参数平均值分别为深度 0.07 m、宽 0.40 m、长半轴 0.38 m、短半轴 0.12 m, 由此看出洞底发育的流痕深度远比洞壁发育的大. 由表 1 可知, 洞底流痕的各项特征参数变异系数小, 主要是洞底基本处于同一水平高程, 受到相同的水压力、流速和作用时间, 波痕各部分接受河水溶蚀、侵蚀能力基本一致. 因此, 洞底波状流痕的各特征参数变异不大, 其中的差异主要由河水携带不同运移质磨蚀作用而产生.

表 1 流痕在不同位置流痕各特征参数变异系数

流痕特征参数	洞 壁				洞 底
	纵向	横向上			
		1. 0~1. 2 m	1. 2~1. 4 m	1. 4~1. 7 m	
CV_a	0. 217	0. 284	0. 257	0. 355	0. 216
CV_b	0. 389	0. 345	0. 366	0. 343	0. 247
CV_c	0. 253	0. 289	0. 425	0. 352	0. 135
CV_h	0. 404	0. 460	0. 384	0. 391	0. 253

表 2 流痕特征参数与发育高度的相关系数

相关系数	a	b	c	h
H	$R^2=0.003$	$R^2=0.085$	$R^2=0.102$	$R^2=0.002$

2) 高度在 1.0~1.2 m 中发育的流痕, 在横向上(径流方向)流痕深度变化较 1.2~1.4 m 和 1.4~1.7 m 上发育的流痕深度变化大. 该高度上的波状流痕, 内壁与 1.2~1.4 m 和 1.4~1.7 m 高度范围内的波状流痕也有差异, 1.0~1.2 m 范围内壁较为干净, 而在其他两个高度上的波状流痕陡降侧吸附有大量尘埃. 说明 1.0~1.2 m 高度上的波状流痕, 在丰水期还经常受到流水作用, 而其他两个高程范围内波状流痕几乎不受到流水作用. 那么其变化是否与现代地下河水的此涨彼伏有关呢? 如果与此有关, 那么 1.2~1.4 m 和 1.4~1.7 m 高度范围内的波状流痕为什么变化小呢? 因为在过去的时间尺度内也曾受到过同样的作用力, 所以, 本研究认为地下河时高时低地作用于洞壁, 不是造成 1.0~1.2 m 范围内波状流痕深度变化的主要原因, 研究比较分析认为, 波状流痕在径流方向上的变化受到河道宽窄变化的影响, 如图 5 所示 1.0~1.2 m 高度范围上的洞道在径流方向洞道宽度变化要大于 1.2~1.4 m 和 1.4~1.7 m 高度范围内洞道的变化, 因为在同时期内水量一致, 如洞道结构均一条件下对洞壁作用也相对均一, 形成的流痕差异不大; 如果洞道结构多变导致水力作用于洞壁也多变, 形成的流痕差异就较大. 所以, 在 1.0~1.2 m 中的流痕深度变化, 较 1.2~1.4 m 和 1.4~1.7 m 高度范围内波状流痕深度变化大.

3) 波状流痕的各个特征参数的变化与高程无关(表 2), 与洞道形态变化具有密切联系(图 5、表 1). 由图 6 可以看出洞道横截面宽度随着高度增加其基本没变. 按照水流的压强、流速等要素从水面到洞底的分布不一, 应该所产生的波状流痕也不一致, 但通过研究发现在纵向上却没根本性的改变, 认为这与岩溶洞穴地下水暴涨暴跌的水文特征有关, 这一特性, 使得河水对洞壁作用也是反复无常的, 与没有稳定水位持续作用具有直接联系, 因此流痕发育方向不具有一致性.

2.3 观音洞径流方向与波状流痕形态关系

洞穴波状流痕是地下水或洞穴水流在运动过程中, 对洞壁侵蚀和溶蚀作用遗留下来的痕迹, 所以其形态结构能映射出水流方向. 观察观音洞地下河径流方向与痕特征, 发现波状流痕平面图的(图 4-D)开口方向与径流方向具有一致, 为了能更好的说明观音洞波状流痕形态与径流方向的关系, 通过统计波状流痕背流面和迎水面几何特征进行比较, 其几何特征参数如图 4 所示, 通过对 2 轴长度(a, b)分别与流痕深度(h)的比, 将比值作为 2 方向的相对比降, 分别用直线拟合(图 7、图 8), 2 拟合直线的斜率分别为 0.329 和

0.069 8. 由此可以看出短半轴的比降远远大于长半轴的比降, 因此流痕背流面要比迎水面陡, 即观音地下河径流从流痕比降陡的一端流向比降缓的一端.

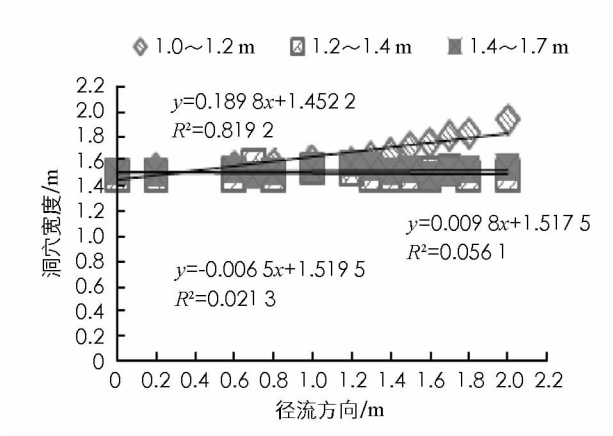


图 5 洞道宽度在径流方向上变化特征

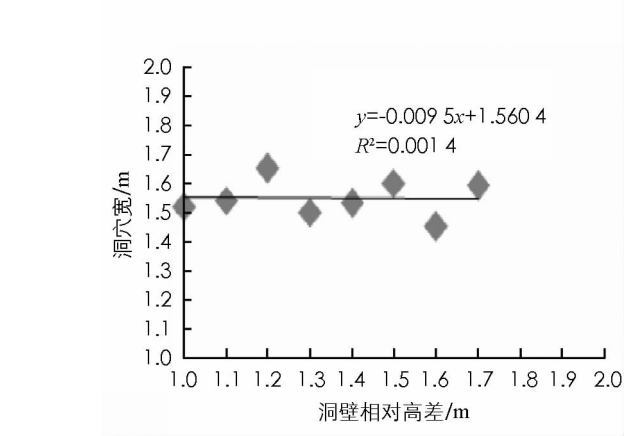


图 6 洞道宽度在纵向上变化特征

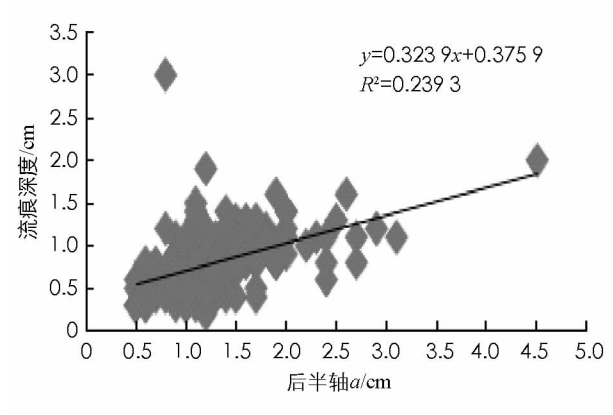


图 7 后半轴方向比降图

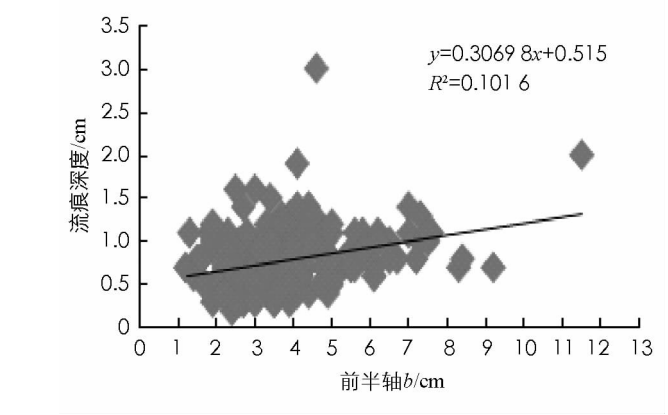


图 8 前半轴方向比降图

2.4 波状流痕形成机理

2.4.1 波状流痕形成的动力分析

学界对于波痕在岩石沉积环境方面的研究较多^[9-17], 也更为深入, 认为波痕是风、水流或波浪等介质的运动在沉积物表面所形成的一种波状起伏的层面构造^[17]. 也有学者^[13]认为, 波痕是复合流产生的, 这种复合流发育较为广泛. 如, 湖泊、海滩、河口湾、三角洲前缘、陆棚及大洋盆地等区域. 其复合类型主要有由风暴引起的波浪和地转流叠加^[14-15]、波浪与潮汐叠加^[6]和波浪与浊流(超重流)叠加^[13]等 3 种. 由此可见, 水流在运动过程中不只是某种单一的流体在作用.

同时, 对于河流产生的波痕的研究认为^[11], 河水在运动过程中主要受 2 种水动力条件的改造作用, 一种是河床内水流的改造作用, 另一种是受到河浪(即河流内波浪)的作用. 在这 2 种水动力的作用下, 形成直脊波痕、曲脊波痕、舌形波痕及菱形波痕几种波痕, 从直脊波痕到曲脊波痕以及从曲脊波痕到舌形波痕都是逐渐过渡, 且水流强度逐渐加大. 水流内波的产生主要是水流具有不同密度的水层面, 或具有不同水力梯度的水层界面, 同时也有人^[14]认为扰动源是产生内波的必要条件. 因此, 一些学者认为^[13]波痕与浊流形成的复合流中存在着脉动流与反向流 2 种流体. 脉动流是指当摆动流的轨迹速度小于单向流速度时, 在一个波动周期内, 流文网方向始终保持为同一方向, 只是大小发生周期性变化的流体; 而反向流是指当摆动流的轨迹速度大于单向流速度时, 在一个波动周期内, 流文网方向会发生反转的流体. 复合流前进过程中, 当内波轨迹速度小于浊流速度时($V_I < V_T$), A, B, C 3 点流网方向相同(图 9-a), 可以形成迁移方向与流网方向相同的波痕; 而当内波轨迹速度大于浊流速度($V_I > V_T$)时, 波峰位置(A, C)流网方向与波谷位置

(B)流网方向相反,可以形成迁移方向与波峰径流相反的波痕(图 9-b).

目前关于洞穴内波状流痕形成机理研究认为是径流主流线因惯性脱离边界质,造成不同点压力差产生的漩涡作用于边界,而产生的形态,同时强调是在紊流条件中进行.这对波痕成因解释虽然强调了紊流条件,但在阐明漩涡的形成中,认为惯性起了决定性作用,也没有说明紊流在波痕形成过程中的具体作用与意义.虽然构造波痕主要是研究沉积环境,而溶洞波状流痕是溶蚀、侵蚀环境,但其主要动力是由水的运动过程产生的,因此,两者的动力过程基本一致.所以,本文试探性运用径流内波理论对观音洞波状流痕的成因进行研究分析.

2.4.2 观音洞波状流痕成因

观音洞内发育波痕主要是舌形流痕.河水在洞内运移过程中,主要受径流和扰动流 2 种运动叠加而形成复合流,这种复合流与洞壁相互作用而形成洞内波状流痕.由 2.4.1 分析可知,水流运移过程中其径流运移方向是径流和紊流(或脉冲)2 种力作用结果,如图 9 所示.

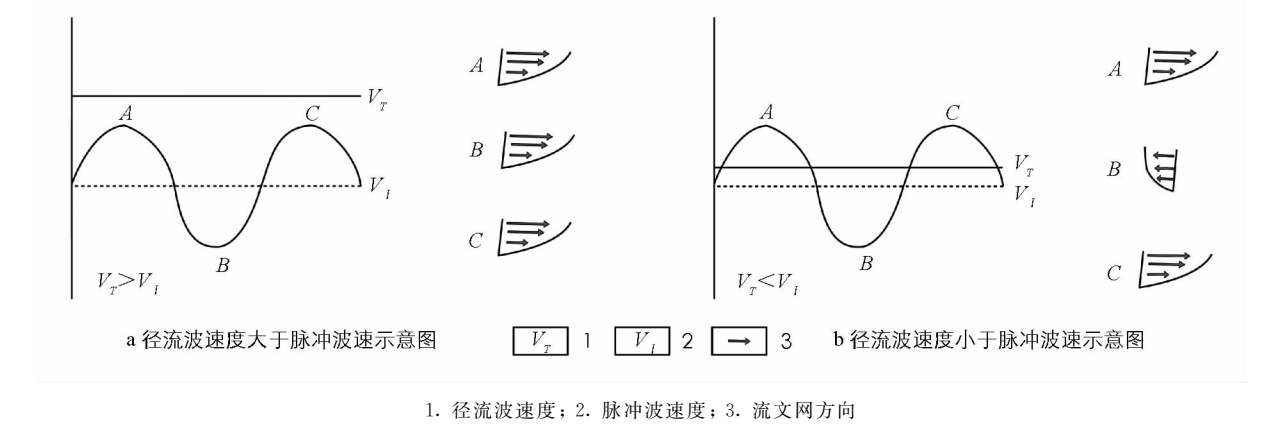
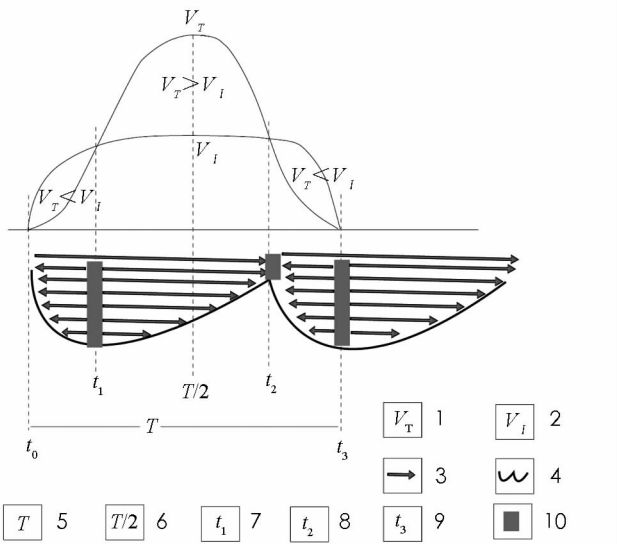


图 9 内波、径流波及流文网方向关系(据 Lamb^[13], 2008)

河水在流动过程中由于洞道变化或洞底物理性质变化等诸多因素,会产生具有一定周期性的内波(脉冲波).这种波由自身运动产生,具有一定的持续性,所以其波峰具有宽缓特征与来自梯度流产生的径流波相互叠加,会产生 3 个不同区域(2 个 $V_I > V_T$ 和一个 $V_I < V_T$)如图 9 所示.根据 Lamb^[13]等人对内波、浊流及流文网方向关系分析,在 $V_I > V_T$ 区内会产生反向径流,在 $V_I < V_T$ 区径流与原径流一致,由 9 图可知,逆向径流区域较正向径流区域狭窄.因此,不同的径流方向上洞壁的溶蚀、侵蚀作用时间也不一致,如图 10 所示 $t_1 - t_0 < t_2 - t_1$,所以在径流方向对洞壁作用强度较大,且范围宽,因此形成了较为宽缓流痕面,反之亦然,在逆向径流区形成较陡的流痕面.在逆流和径流交界区域形成旋转流,如图 9 中 t_1, t_2 和 t_3 处,如果该波作用于洞底,在 t_1, t_3 处容易停留一些运移质,并在旋流作用下,运移质与洞底磨蚀作用容易形成规则或不规则的壶穴等窝穴,而在 t_1



1. 径流波速度; 2. 脉冲波流; 3. 内波轨迹速度大于浊流速度作用点; 4. 径流方向; 5. 洞壁; 6. 作用周期; 7. 半周期; 8. 内波轨迹速度小于浊流速度作用点; 9. 内波轨迹速度大于浊流速度作用点; 10. 紊流区

图 10 流痕形成示意图

处则易形成刀口状脊缘。

因此, 本文认为波状流痕的一个流痕形态并不是由一个径流波作用形成, 而是一个内波和一个径流波部分叠加作用的结果。内波的产生与径流过程产生的内能有着密切联系, 一般来说流量、流速越大, 产生的径流波越强, 内能也越大, 即内波越强。由图 10 所示, 当流量、流速越小, 产生的径流波越弱, 内能也小, 2 波的叠加 $V_I < V_T$ 区也逐渐变宽, 而 $V_I > V_T$ 区逐渐变窄, 导致反向流十分微弱或消失, t_0, t_2 处的脊缘也逐渐弱化或消失, 舌形波转化为直脊波痕; 反之, 内波增强 2 波叠加 $V_I < V_T$ 区逐渐减小, $V_I > V_T$ 区逐渐增大, 2 区域相对平分则形成菱形波痕。所以认为, 观音洞内舌形波是由梯度流和内波流共同作用形成, 观音洞的洞道结构特征影响内波和径流波相互作用进而影响洞穴流痕的分布特征。

3 结 语

- 1) 洞底流痕形态特征相对均一, 变化差异小于洞壁;
- 2) 波痕在距洞底 1.0~1.2 m 中的流痕深度较 1.2~1.4 m 和 1.4~1.7 m 这 2 个高度变化大;
- 3) 洞壁流痕形态特征在水平和垂直方向的变化与洞道结构变化有关。

探讨观音洞内发育流痕的分布特征与洞道结构的关系, 结合岩溶洞穴地下河水文特征, 本文认为, 洞内的舌状流痕形成过程是重力梯度流与内波流共同叠加的结果, 洞道形态结构影响 2 种水流叠加, 而导致流痕在洞道内的发育特征。这为洞内溶蚀形态研究、化石型洞穴古水文研究和洞穴旅游科学普及提供了参考, 并具有重要的现实意义。但利用化石洞内流痕特征, 运用该理论建立数学模型来研究古水文特征, 还有待进一步研究和探讨。

参考文献:

- [1] 罗书文, 杨 桃, 邓亚东, 等. 云贵川鸡鸣三省大峡谷景观特征及形成机理研究 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2018, 43(2): 49—56.
- [2] 朱学稳. 桂林地区灰岩洞穴的溶蚀形态 [J]. 中国岩溶, 1982(2): 93—103.
- [3] 罗书文, 李 伟, 李成展, 等. 螳螂河流域洞穴发育特征及其地学意义研究 [J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2016, 50(2): 297—302.
- [4] SPRINGER G S, TOOTH S, WOHL E E. Dynamics of Pothole Growth as Defined by Field Data and Geometrical Description [J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2005, 110(F4): F04010.
- [5] 张 结, 周忠发, 李 坡, 等. 喀斯特洞穴窝穴的形态对比与成因分析—以贵州省双河洞为例 [J]. 中国岩溶, 2016, 35(4): 432—438.
- [6] FORD D C, WILLIAMS P. Karst Hydrogeology and Geomorphology [M]. Hoboken: John Wiley and Sons Inc., 2007: 249—250.
- [7] ALEXANDER H S. Pothole Erosion [J]. The Journal of Geology, 1932, 40(4): 305—337.
- [8] BOGLI. Karst Hydrology and Physical Speleology [M]. Heidelberg: Springer Verlag, 1978: 160—161.
- [9] 马长信. 凹槽流痕在赣北前寒武纪地层中的发现及意义 [J]. 地质论评, 1995, 41(4): 371—377.
- [10] 高振中, 何幼斌, 罗顺社, 等. 深水牵引流沉积: 内潮汐、内波和等深流沉积研究 [M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [11] 高振中, 何幼斌, 张兴阳, 等. 塔中地区中晚奥陶世内波、内潮汐沉积 [J]. 沉积学报, 2000, 18(3): 400—407.
- [12] 周丽清, 姜在兴, 林承焰, 等. 黄河下游的河浪作用及波痕特征 [J]. 石油大学学报(自然科学版), 1991, 15(6): 22—27.
- [13] LAMB M P, MYROW P M, LUKENS C, et al. Deposits from Wave-Influenced Turbidity Currents: Pennsylvanian Minturn Formation, Colorado, U. S. A [J]. Journal of Sedimentary Research, 2008, 78(7): 480—498.
- [14] DAVIES A G, SOULSBY R L, KING H L. A Numerical Model of the Combined Wave and Current Bottom Boundary-layer [J]. Journal of Geophysical Research, 1988, 93(1): 491—508.
- [15] HILL P R, MEULE S, LONGUEPEE H. Combined-Flow Processes and Sedimentary Structures on the Shoreface of the

- Wave-Dominated Grande-Rivière-De-La-Baleine Delta [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2003, 73(2): 217—226.
- [16] MOLGAT M, ARNOTT R W C. Combined Tide and Wave Influence on Sedimentation Patterns in the Upper Jurassic Swift Formation, south eastern Alberta[J]. *Sedimentology*, 2002, 48(6): 1353—1369.
- [17] 李 华, 何幼斌, 向 东, 等. 宁夏香山群徐家圈组波痕特征及成因分析 [J]. *沉积与特提斯地质*, 2010, 30(1): 18—24.

On Development Characteristics and Formation Mechanism of Wave-like Flow-mark in Guanyin Cave, Dafang County, Guizhou Province

LUO Shu-wen¹, YANG Tao², QIN Xin-ming^{1,3}, DENG Ya-dong¹

1. *Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences/Key Laboratory of Karst Ecosystem and Rocky Desertification Rehabilitation, MLR, Guilin, Guangxi 541004, China;*
2. *NO. 12 Middle School of Guiyang city, Guiyang 550002, China;*
3. *School of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China*

Abstract: This paper discusses the distribution characteristics and causes of wavy flow marks (tongue-shaped flow marks) in karst caves. In this paper, by measuring the morphological characteristic parameters of wavy flow marks in Guanyin Cave, the distribution characteristics of wavy flow marks in the longitudinal and transverse directions are counted, and the relationship between the tunnel morphological structure and the distribution of wavy flow marks is analyzed. At the same time, according to the law of water transport in underground rivers, the reasons for the formation of wavy flow marks are discussed. The results show that, 1) the wavy flow marks at the bottom of the cave are more uniform and the morphological difference is smaller than that of the cave walls; 2) The depth of the wavy flow mark on the wall of the tunnel in the range of 1.0—1.2 m from the bottom of the tunnel is larger than that in the range of 1.2—1.4m and 1.4—1.7m; 3) The morphological characteristics of wavy flow marks on cave walls are closely related to the morphological structure of cave channels. 4) The wavy flow marks in karst caves are the result of the combination of internal waves (V_I) and gradient flows (V_T) generated by the underground runoff process. Therefore, it is believed that the underground runoff is the direct driving force of the wavy flow marks in the karst caves, and the structural form of the tunnels has an impact on the superposition of the internal waves (V_I) and the gradient currents (V_T) generated in the runoff process, resulting in the distribution characteristics of the wavy flow marks in the tunnels.

Key words: Karst cave; underground river; wave flow mark; development characteristics; formation mechanism

责任编辑 胡 杨 崔玉洁