

文章编号: 1008-2786-(2016)6-698-09

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000176

喀斯特地区洞穴壶穴形态的形成与发育

周忠发^{1 2} 张绍云^{1 2} 曹明达^{1 2} 张 强^{1 2} 谢雅婷^{1 2}

(1. 贵州师范大学喀斯特研究院, 贵州 贵阳 550001; 2. 国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心, 贵州 贵阳 550001)

摘 要: 喀斯特洞穴河床壶穴是记录洞穴微地貌演化、洞道走向、水流与地下河床边界条件相互作用的关键性证据之一。通过对贵州绥阳双河洞穴系统, 属娄山关组白云岩地下河段 108 处洞穴壶穴的形态及分布特征进行实地仔细观察和分析发现: 该区地下河河床壶穴分为两种形式即跌水壶穴(plunge holes)和旋转流壶穴(eddy holes)。它的规模、形态及分布特征规律性较地表河床壶穴强, 主要受水动力、洞道走向控制。由于洞内气候环境长期稳定, 洞穴河床壶穴的形成与演化主要是水动力条件、洞道走向、岩性、洪冲积物综合作用的结果。本研究结果将丰富与完善壶穴不同地貌部位、不同岩性特征及成因, 为洞穴河床壶穴形态的形成与发育提供科学论证, 为洞穴微地貌演化过程及洞穴水动力研究发展提供科学依据。

关键词: 洞穴壶穴; 白云岩; 形态; 成因; 阴河洞; 双河洞系; 喀斯特

中图分类号: P931.1

文献标志码: A

中国近年来关于大冰盖理论相关的冰臼引起的争论, 才直接或间接地导致较多专门研究壶穴的文献出现^[1-10]。而国外最早关于壶穴研究的相关文献可追溯到 19 世纪中叶, 并在上世纪初也出现过类似的争论^[11-12]。其争论焦点主要是由于壶穴类型较多, 有河水侵蚀穴、风蚀穴、浪蚀穴、冰水侵蚀穴、风化穴、冰融水滴蚀穴、冰压刻穴等^[14]。同时壶穴(Pothole)成因多样, 有受地质、地貌、流水、水蚀、温度、辐射系数、洪冲积物、降水、湿度、生物、风等诸多因素影响^[2-4, 8, 14], 所以存在较多争论。

中国现有记载的壶穴主要分布在广东、黄山、黄河壶口、香港、台湾花莲、野柳以及河北、内蒙古、四川等地^[1-4, 7-8, 11, 13-17]。目前已对不同壶穴部位基岩河床谷底、海蚀平台、岬角及基岩平台、山脊及山顶等^[3, 10, 14, 17]进行了大量分析, 但对位于中国西南喀斯特区内发育大量壶穴, 研究相对较少; 关于白云

岩上发育大量壶穴微地貌至今为止也少有记载, 而对其它岩石发育的壶穴研究较多^[18-26]。其研究不仅有其地貌学意义, 背后的环境学意义更具价值。

本文以贵州双河国家地质公园阴河洞洞穴内地下河河床上发育的壶穴为研究对象; 基底岩石为白云岩; 洞穴环境长期稳定, 其影响因素较地表壶穴少, 能更好的揭示壶穴形态的形成与发育及其演化特征; 经过实地仔细观察和分析研究发现, 阴河洞洞穴内河流及河床上发育的壶穴为流水形成而非 CAVITATION 成因。对其形态特征进行详细的测量并进行定量分析, 同时对其形态、分布特征、演化机制及成因进行探讨, 进一步丰富与完善不同地貌部位、不同岩性特征及成因下洞穴内河流及河床上壶穴的形成与发育, 为洞穴微地貌演化过程及洞穴水动力研究发展提供科学依据。

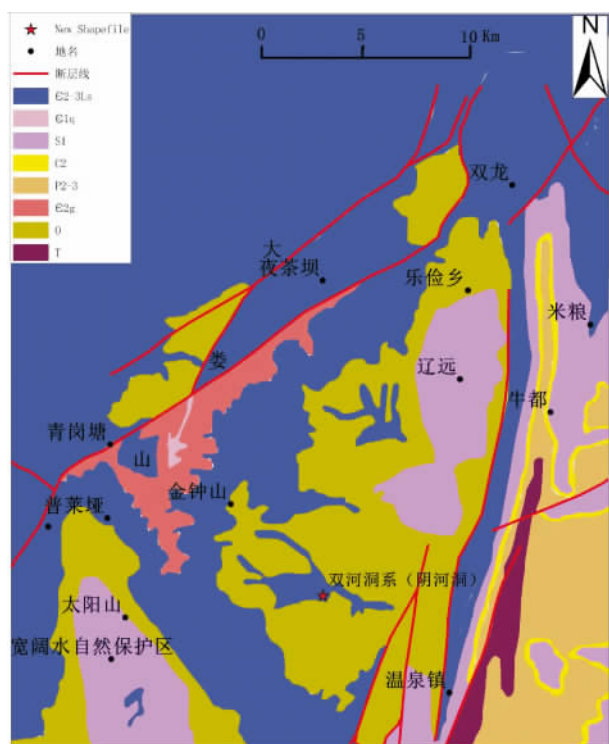
收稿日期(Received date): 2015-12-02; 修回日期(Accepted): 2016-05-31。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金地区项目(41361081); 贵州师范大学研究生创新基金资助(201533); 贵州省科技计划(黔科合 G 字[2014]4004-2 号); 贵州省重大应用基础研究项目(黔科合 JZ 字[2014]200201) [National Natural Science Foundation (41361081); Guizhou Normal University Graduate Innovation Fund(201533); Guizhou Science and Technology Plan(Qian Ke he G [2014] 4004-2); Guizhou Major Application of Basic Research Project(Qian Ke he JZ [2014]200201)]

作者简介(Biography): 周忠发(1969-), 男, 贵州遵义人, 博士生导师, 喀斯特地貌与洞穴 [Zhou Zhongfa (1969-), male, born in Zunyi Guizhou, professor, research on Karst landform and cave] E-mail: fa6897@163.com

1 研究区地理位置及地质背景

双河洞国家地质公园位于贵州省北部遵义市绥阳县境内,地理位置为 $107^{\circ}02'30'' \sim 107^{\circ}25'00''$ E, $28^{\circ}08'00'' \sim 28^{\circ}20'00''$ N。地层走向主要为北北东向,地层倾角变化较大,在东部较陡,倾角为 $25^{\circ} \sim 45^{\circ}$,中部和西部较平缓,倾角为 $5^{\circ} \sim 10^{\circ}$ 。公园内出露地层为:寒武系中、上统,奥陶系,志留系中、下统,二叠系中、上统,三叠系下统以及第四系,岩性主要以白云岩碳酸盐岩为主。公园喀斯特相当发育,双河洞系统及其他喀斯特洞穴主要发育于寒武系和奥陶系白云岩地层中;碎屑岩在园区西南部的太阳山、金林山等区域广泛出露,是形成园内侵蚀地貌的基础(图1)。喜马拉雅构造运动及其第四纪以来,研究区地壳受到多次间歇性抬升。地球外营力作用以河流下蚀作用为主,加大地形差异;间歇时期,河流以侧蚀作用为主,地形差异减小。



T 为三叠系; P₂₋₃ 为中、上二叠统; C₂ 为上石炭统; S₁ 为下志留统; O 为奥陶系; $\mathbf{E}_{2-3}\text{Ls}$ 为中上寒武统娄山关群; \mathbf{E}_{2g} 中上寒武统高台组; \mathbf{E}_{1q} 为下寒武统清虚洞组 [T - triassic period; P₂₋₃ - middle and upper permian; C₂ - upper carboniferous system; S₁ - lower siluric; O - Ordovician; $\mathbf{E}_{2-3}\text{Ls}$ - the upper Cambrian Loushanguan group; \mathbf{E}_{2g} - Upper-middle Cambrian Gaotai group; \mathbf{E}_{1q} - lower cambrian Qingxu cave group]

图 1 研究区位置与地质分布图

Fig. 1 Location of study area and geological map

受公坪“入”字型走向断层影响,地质公园东北及北西的“X”型节理发育,节理密度为 1.7~8 条/m,两组节理多呈“X”交叉,以北西向最为发育,控制着洞穴的发育程度和发育方向。所以公园内 90% 以上的洞穴都发育于金钟山南麓,而此区域的地层为连续分布、连续沉积的中上寒武统娄山关组和下奥陶统的白云岩和白云质灰岩,因此,公园内的绝大多数都发育在中上寒武统娄山关组合下奥陶统的白云岩和白云质灰岩中。

在山盆第二期和峡谷期,较长的洞穴一般发育在岩层平缓的地层中,洞道展布方向追踪岩层中的“X”节理方向发育。金钟山南麓的地层平缓,倾向与坡向一致,而且无较大的断裂构造,基本保持了岩体的完整性和层面的延续性,不但有利于洞穴,特别是长洞、大洞的发育,还可维持已形成洞穴的稳定性,洞穴不会因重力崩塌而消亡。同时,发育的节理为水流的入渗提供了有利条件。

阴河洞位于双河洞穴系统内,洞口海拔 700 m,洞道走向为南北向,位于寒武系中上统娄山关组,碳酸盐类型为白云岩,喀斯特强烈发育,形态为溶洞以喀斯特管道水为主,裂隙水为辅,岩层含水较均一。暗河流量 9.5 ~ 600 L/s,水质为 $\text{HCO}_3^- - \text{Ca} \cdot \text{Mg}$ 型水,矿化度 0.11 ~ 0.39 g/L。地下径流模数 6.7 ~ 12.5 L/(s · Km²),白云岩层厚度为 725 ~ 790 m。通过野外监测所得:洞穴年平均气温在 18.3 °C 左右;水温保持在 14.1 °C 左右;风速在 1.6 ~ 2.7 m/s;湿度为 90.8 %;气压为 920.5 hPa;水中电导率 337 μS/cm; Ca^{2+} 离子浓度为 62 mg/L; HCO_3^- 离子浓度 195.2 mg/L。阴河洞地下河袭夺山王洞地下河后成为一季节性地下河,主要原因是由于原皮硝洞上层地下河水经下层并入红罩子洞地下河,目前水源主要来自母猪塘盲谷中的季节性河流,由南向北于阴河洞口流出地表,干流长 0.84 km。

由图 2 可知,该区壶穴成集聚发育,主要集中在 B 和 C 之间。在壶穴群下游和上游区域以及在大壶穴内(图 3)都发现砾石存在。另外在大量壶穴内发现有少量土壤,无砾石存在。该区壶穴发育在河流流向北北东 105° 右侧,现今地下河流水河床上无壶穴发育。

2 野外记录及计算方法

阴河洞洞穴壶穴平面形态多样,有圆形、近圆

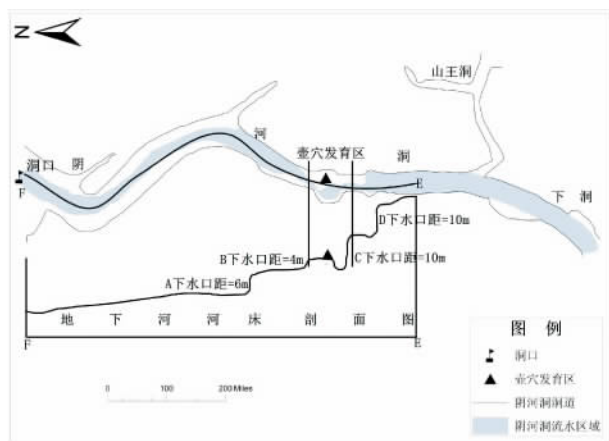


图2 阴河洞洞道平面与剖面图

Fig. 2 Tunnel plan and profile of Yinghe cave

形、椭圆形、马蹄形、连壶、磨损壶穴(图3)。本次测量采用米尺、罗盘对洞穴壶穴长、短轴、深度及长轴走向测量,共测量壶穴108个(于2015-07-12—18监测完成,后于2015-10-18进行野外再次补充)。由于阴河洞内壶穴发育较为集中,且发育处于初期阶段,野外壶穴记录其深度,长短轴长度和相应的长轴走向(短轴走向按与长轴走向正交计算),口径大小按长短轴之和的平均值计算,其中长短轴比超过平均值2个标准差作为槽型壶穴,其他作一般壶穴。记录连壶(图3g1-g2)短轴时采用最小宽度和最大宽度记录。

按标准统计方法计算各指标的统计参数(扁率、壶穴口径深宽比、长短轴比、垂直剖面组合、平均值等)、分布特征等^[17]。

3 分析与结果

3.1 洞穴壶穴规模及分布特征

阴河洞壶穴规模大小不一,有近百个壶穴发育。其中两个较大壶穴均位于B和C下水口处(图3c),其余直径、深度均为几厘米。壶穴长轴长度范围在(5~1150 cm),短轴长范围在(4~310 cm);壶穴数量众多,成群出现在B和C之间(图2)。壶穴发育区边长:6.77 m、7.25 m、18.26 m,发育面积为54 m²。壶穴发育无水区域宽6.77 m,有水区域宽2.32 m、长6.77 m(图6)。同时测得壶穴发育处洞道走向为105°至下一层下水口为356.5°,说明洞道弯曲度较大。

研究区内壶穴成群分布在洞道围岩弧度较大且成桶壁形斜上方,具有一定的规律性,与河流走向呈

平行分布(如图6)。按壶穴发育程度可以分为:一区为现今地下河流水河床上无壶穴发育;二区为无流水区域,壶穴成“V”型分布;三区以口小、肚大、底平、内有水平纹理特征状的倒“Ω”型分布。由图2洞道横向剖面图可知,依据下水口,可分为5层,每层都有一定的间隔距离,在壶穴发育层(B~C)之间与C下水口距为10 m,洞腔成椭圆形柱状且上下层下水口开口都较小,说明为已破坏壶穴,由于受到地壳间歇性抬升,河流下切,促使被破坏。在B和C之间处保留了一个长槽型(极椭圆形)壶穴和大量小型壶穴,在A和B之间保留了一个跌水壶穴。在A下游区、C上游区现无壶穴存在的一个原因主要是有大量砾石存在,C上游区砾石磨圆度较好,A下游区有磨圆度较好的砾石及磨圆度较差石块存在。

3.2 洞穴壶穴形态特征

快速旋转水流是促使其壶穴形成的重要因素之一。阴河洞壶穴发育处洞道走向为北北东105°。从表1可以看出,阴河洞洞穴河床上壶穴按扁率划分为:圆形占7.41%、近圆形占25%、椭圆形50.93%、极椭圆形占16.67%。按壶穴口径深宽比划分为:极浅形占95.37%、浅型占3.7%、深型占0.93%。按壶穴垂直剖面组合划分为:倒“Ω”型占4.63%、“U”型占0%、“V”型占95.37%。长短轴比频数主要分布在1~2 cm,壶穴深度频数主要分布在2~4 cm(图4)。说明阴河洞壶穴以椭圆形、极浅型为主,在垂直剖面形态上以“V”型、倒“Ω”型两种为主。

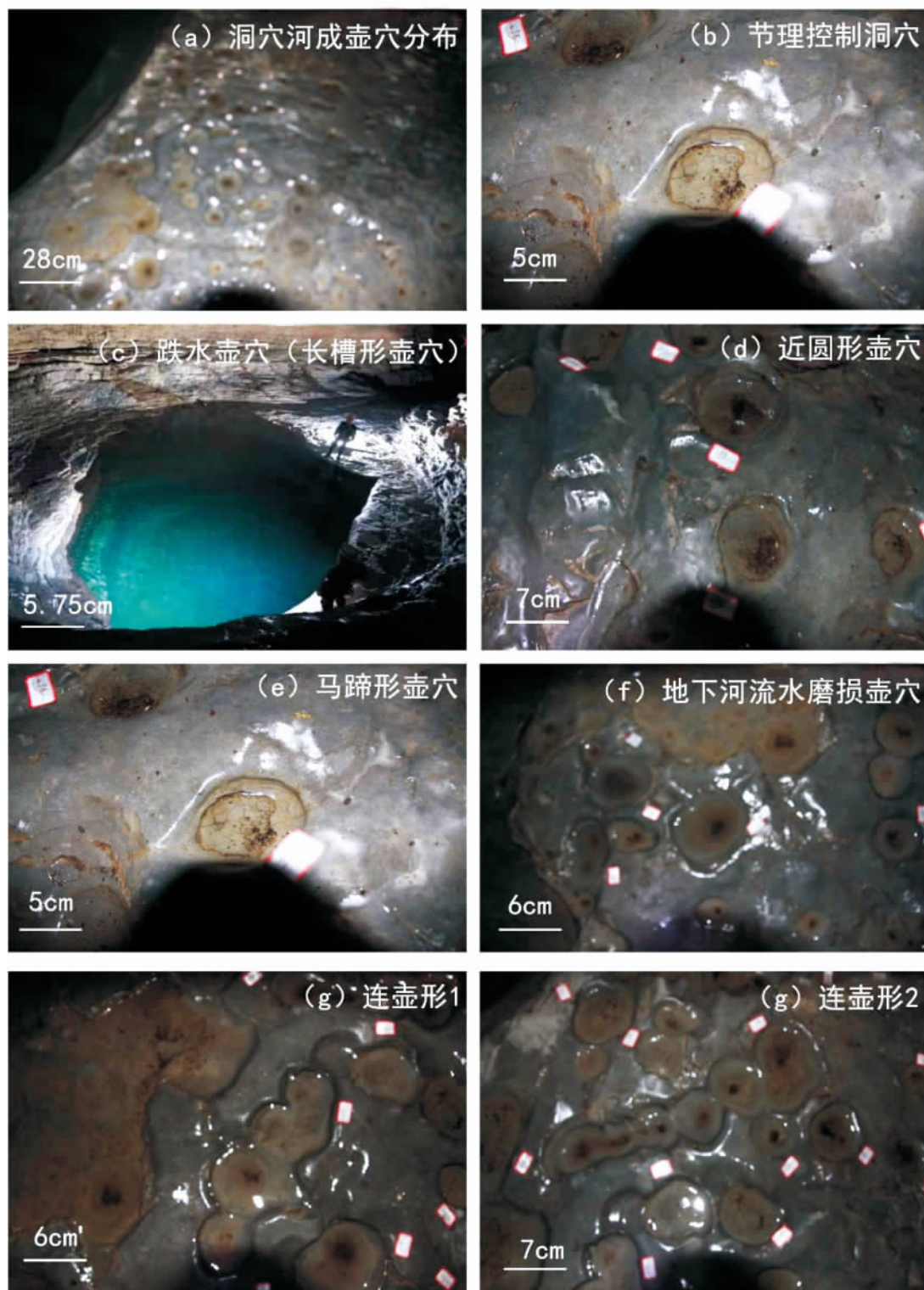
由图5壶穴长轴走向可知,该区壶穴长轴走向大部分在60°~120°之间,仅一小部分在150°左右。在洞穴内仅有几个壶穴内有节理(图3b),大部分都为平滑的白云岩表面。说明阴河洞壶穴发育不受节理的控制。

3.2.1 形态特征

1. 阴河洞壶穴与地表河成壶穴一样,具有如下典型特征:口小、肚大、底平。阴河洞壶穴的开口一般呈近圆型或椭圆型,开口直径小的一般在几厘米,大的可达几米。阴河洞壶穴的深度一般小于其直径,大部分为直径的1/2或1/3或更小,如下水口壶穴深为3.4 m是直径的3倍之多(图3c),图3e中的壶穴深度为3 cm是直径的1/4倍。

3.2.2 表面特征

洞穴壶穴大部分呈近圆型或椭圆型。洞穴壶穴呈两个或多个壶穴组合形状(图3g1-g2),即两个



a. 洞穴河成壶穴分布; b. 节理控制壶穴, 这类壶穴在发育区较少, 几乎没有; c. 跌水壶穴, 主要发育于下水口处, 附近为壶穴群分布区; d. 近圆形壶穴; e. 马蹄形壶穴; f. 地下河流水磨损壶穴; g1-2: 连壶形壶穴发育(串珠形壶穴) [a. cave River into the pothole distribution; b. joint control potholes, potholes in less developed area; c. drop potholes, mainly developed in the water, for the group near the mouth distribution area; d. near circular pothole; e. horseshoe potholes; f. The underground river wear f.; g1-2. development of connected pothole(catenuliform pothole)]

图3 壶穴形态特征分布

Fig.3 Morphological characteristics of distribution

近圆形及椭圆形的组合特征。一般来说,洞穴壶穴分布在山体内部位置,其所在的白云岩岩体顶面大体呈水平状态或略有倾斜。当然,洞穴壶穴所在的白云岩面不可能是绝对严格的水平面。因此,洞穴壶穴口沿一般也不是严格的水平状态,在比较低的口沿就有一出水口(图 3e),位置一般位于岩石顶面比较低的位置上,如岩面有些倾斜的话,出水口一般朝向岩面的倾向。但阴河洞壶穴出水口倾向为向流水区方向。阴河洞所有壶穴常年有水,经过仔细观察壶内底部存在少许的沉积物主要为河流输入的沉积物(图 3e-g2)。

3.2.3 内壁纹理特征

洞穴壶穴内壁上有很多纹理,这些纹理和底面平行即也是水平的(图 3d、3e),水平纹理属于碳酸盐岩原有的沉积层理,它不属于水蚀的痕迹线。尽管壶壁凹凸的不同,这些凹凸的程度在同一水平面上与碳酸盐岩原有的沉积层理基本呈平行或吻合状,即在同一水平面上洞穴壶穴四周的凹凸程度相等。当洞穴壶穴是圆形时,在图 3d 这些纹理如果投影到平面上的话,这些水平纹理表现为同心圆,当洞穴壶穴为椭圆或其他形状的话,则这些纹理在水平面的投影上表现为平行的封闭曲线。

4 讨论

4.1 洞穴成因及演化探讨

阴河洞受新构造运动的间歇性抬升是其多层洞穴形成和演变的主要内动力。随着地壳的抬升,地

下河的侵蚀作用及洞顶、洞壁的崩塌作用使胸腔不断地扩大,潜水面下降,从而形成新的下层洞道上、下两层洞之间通常发育有斜洞或竖井。从图 2 可知,阴河洞经过 4 次大的抬升。在地壳相对稳定时期,地下河以侧蚀为主,洞穴向水平二维方向发育,其壶穴就发育在 C 下水口(竖井距 10 m)下;地壳的抬升时期,阴河洞地下河以下蚀作用为主,洞穴系统向纵深发育,通过一些竖井与上层洞沟通,多次的间歇性抬升,形成多层洞穴。

4.2 洞穴壶穴成因探讨

阴河洞洞穴空气、水化学显示:气温 18.3℃;水温 14.1℃;CO₂ 浓度 450 ppm;风速 1.6~2.7 m/s 之间;湿度 90.8%;气压 920.5 hPa;水中电导率 337 μS/cm;Ca²⁺ 离子浓度 62 mg/L;HCO₃⁻ 离子浓度 195.2 mg/L;pH 为 8.43;SO₄²⁻ 为 28.43。计算得出 Ca²⁺/HCO₃⁻ 为 0.3176,HCO₃⁻/SO₄²⁻ 为 6.89。说明洞穴内河流及河床上发育的壶穴水具有侵蚀性,壶穴的形成以机械侵蚀和化学溶解同时进行,可推断在雨季以机械侵蚀为主,旱季以化学溶蚀为主。阴河洞洞穴壶穴在形态特征上和地表壶穴一样,但在成因上较地表壶穴更加明显。洞穴内河流及河床上发育的凹坑也是壶穴的一种存在形式,属于洞穴微地貌形态,是记录洞穴演化证据之一。是水动力条件、洞道走向、岩性、洪冲积物等因素耦合作用的结果。

由图 6 可知,洞道走向及弧度对壶穴的形成至关重要。当汛期大量水流(A 线)进入弯曲度较大的洞道时,受到洞道弧度的影响,使水流旋回(B 线)。

表 1 壶穴形态特征

Tab. 1 Morphological characteristics

%

地点	岩性	壶穴扁率			
		正圆形壶穴	近圆形壶穴	椭圆形壶穴	极椭圆形
		(e=0)	(0<e≤0.1)	(0.1<e≤0.4)	(0.4<e≤1)
		7.41	25	50.93	16.67
		壶穴口径深宽比(r)			
		极浅形	浅型	深型	极深型
		(0<r≤0.5)	(0.5<r≤1)	(1<r≤1.5)	(r≥1.5)
阴	白	95.37	3.7	0.93	0
河	云	壶穴垂直剖面组合			
洞	岩	倒“Ω”型	“U”型	“V”型	
		(Lm>Ln<Lb/Lm≈Ln<Lb)	(Lm≈Ln≈Lb)	(Lm>Ln>Lb/Ln≈Lb)	
		4.63	0	95.37	

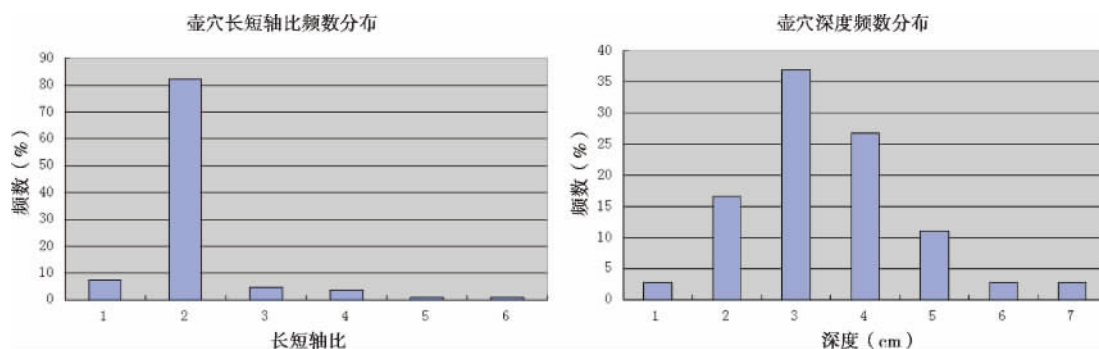


图4 壶穴长短轴比、深度频数分布

Fig.4 The axial ratio, depth distribution of potholes

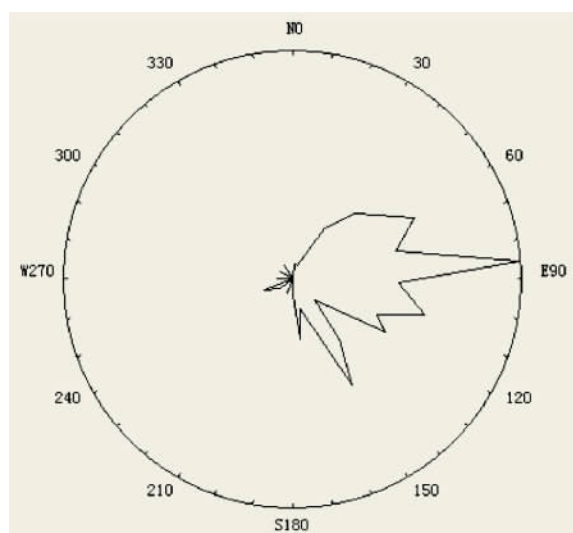


图5 壶穴长轴走向

Fig.5 The long axis direction of potholes

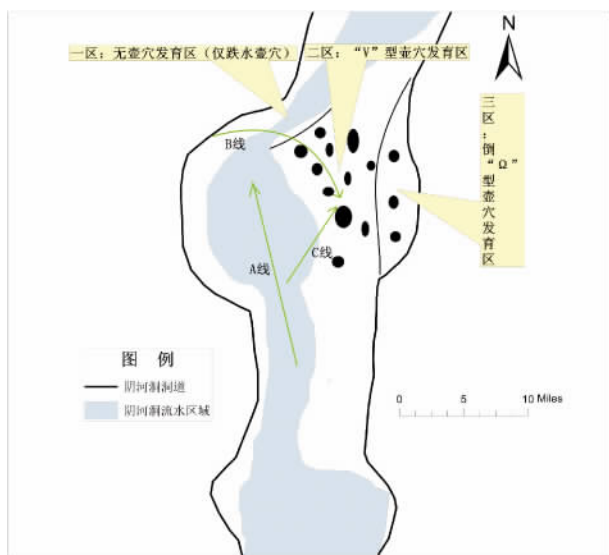


图6 阴河洞壶穴形成与分布平面示意图

Fig.6 Schematic diagram of pothole formation and distribution of Yinghe cave

同时地下河上游的水流(C线)向下流动,当两者相遇时(B、C线),水就形成快速旋转的水流,速度由流量决定。快速旋转的水流不断的对地下河床侵蚀,同时携带一部分砾石进行磨蚀。在阴河洞壶穴内无砾石存在,由于洞穴存在汛期,促使冲积物在进行磨蚀后被带走。地下河是不断的向下游流动,在随着地下河流量不断下降的同时,旋转的流水也不断的向下移动,所以导致壶穴分布区特征明显。由于现今流水区域较壶穴发育区低,所以旋转的水流在向下移动的同时又不断的向现今地下河流水位置靠近,促使洞穴壶穴的长轴走向都为北东向在 $60^{\circ} \sim 120^{\circ}$ 之间。连壶的长轴走向能更好的说明水动力变化对其的影响。

这个过程中河床岩性是壶穴发育的一个必要因素。岩石的硬度决定其所受到流水侵蚀、冲蚀的最大承受量,当超过其承受力时,壶穴产生;同时在一块岩石上,壶穴的软硬度是不一样的,所以在不同部位出现壶穴的大小、形状也就不一样。阴河洞内壶穴的发育大小与距水口远近存在一定相关性。在阴河洞洞穴壶穴形成过程中,洪冲积物主要是加速壶穴的发育。当流水经过河床,遇到遮挡物及洞道弧度较大区域时,流水就会形成漩涡,在漩涡的作用下,带动所携带砾石旋转,当旋转速度达到一定时,就会对旋转的地方出现一个口大、较浅,圆形或椭圆形的初始蝶形壶穴。

4.3 洞穴壶穴演化探讨

根据洞穴壶穴的特点及不同发育阶段壶穴的特征,据图6推理其发育过程如下:

雏形期,受地质构造运动抬升,新的洞道发育,洞道走向的变化、流水的物理侵蚀,在洞穴河床表面就会产生快速旋转的流水,同时带动其所携带的砾石沉积物,不断地对河床表面进行旋转成为一个个

小坑,壶穴就在这小坑内开始发育。阴河洞壶穴发育于水流湍急的跌水附近,激流在岩性、节理薄弱处进行掏蚀冲刷而形成。

幼年期,白云岩岩石结构不均一性以及流水的作用力在一定距离内是有限的,所以小坑的发育速度就存在不一样。在白云岩结构较弱区域,发育速度较快,同时携带的砾石加快其发育速度,其砾石在水流作用下不断向下旋转。流水退去后,在小坑内常年有水存在且距水口距约 1 cm 左右,在枯水期导致水不断的对白云岩进行溶蚀作用,这样便形成小的洞穴壶穴,即形成幼年期的洞穴壶穴,这种小壶穴分布很多,见图 3a。由于壶穴发育成型需要一定的尺度,这一时期的壶穴其形状特征还基本保持原始小坑的形状,不是很典型,看上去还不太像壶穴(图 3a-g2),为流水发育中的幼年期的壶穴。

成熟期,洞穴壶穴进一步发展,达到一定规模时,洞穴壶穴壶壁内水的溶蚀始终发生,只是不同的年份由于洞穴内汛期的不同,壶壁内的水位高低不同,水在不同的部位发生溶蚀。此时洞穴壶穴具有一定的深度,壶底的溶蚀低于壶壁很多,洞穴壶穴就处于横向发展阶段,形成肚大、口小、底平的典型形态特征,即洞穴壶穴发育成熟。

消亡期,当洞穴壶穴的壶壁扩展到白云岩的边界或遇到其它洞穴壶穴时,发生侧漏,则按新的出水口水位继续发生侵蚀、溶蚀,洞穴壶穴继续发展,在阴河洞内可以看到几个壶穴(图 3g1-g2)连在一起;如侧漏的出水口不高于洞穴壶穴底部(图 3f),则洞穴壶穴破坏,即洞穴壶穴消亡。当然,有的破坏后又在其下部继续发育新的壶穴。

4.4 洞穴壶穴类型与岩性探讨

壶穴可以在各种类型的岩石发育,文献记载的有花岗岩、玄武岩、安山岩、凝灰岩、片岩、砂岩、页岩、石灰岩、珊瑚礁等^[18-26]。白云岩上发育大量壶穴微地貌至今为止还很少有记载。岩石的硬度、矿物成分以及易风化溶解性不同,将影响壶穴口径、深度的大小,形成的难易程度和保存程度^[18]。玄武岩石上壶穴深宽比和单位面积壶穴密度都要小于火山凝灰岩和海滩岩^[26]。研究区以白云岩为主,硬度为 3.4~4,而玄武岩硬度为 5~7。相对于玄武岩,白云岩壶穴保存程度较低。

阴河洞壶穴群发育区 B 和 C 之间下水口垂直距离 10 m,槽型壶穴受垂直水流冲刷打击形成跌水壶穴。同时,洞穴四周围岩及洞道走向为桶壁形,所

以有旋转水流的存在,即形成旋转流壶穴。这与 Alexandra^[12]根据形成壶穴的水流特征将壶穴分为三类:1) 旋转流壶穴(eddy holes),由旋转轴垂直的旋转水流冲刷形成的壶穴;2) 半圆凿壶穴(gouge holes),纵向水流从壶穴上游向下游冲刷形成的壶穴,gouge holes 的长轴有时可以几倍于短轴;3) 跌水壶穴(plunge holes),由垂直水流冲刷打击形成的壶穴。根据 Alexandra 的实验,当有桶壁形成时才能形成旋转水流,旋转水流对壶穴边缘的冲刷使壶穴趋向圆形,深度变大后,垂直剖面呈圆柱形一样。旋转流壶穴、跌水壶穴与笔者在阴河洞发现壶穴所得结果一样。

5 结 论

1. 洞穴壶穴的形成与发育在一定程度上和河成壶穴相同,都是由高速旋转的水流携带砂砾石旋转磨蚀河床形成的流水侵蚀地貌。研究区为旋转流壶穴、跌水壶穴,但在成因及壶穴形态、走向上,洞穴壶穴主要受水动力条件和洞道走向的影响。

2. 洞穴壶穴的形成与演化表明:随着时间的推移,在流水、洞道、岩性、洪冲积物综合作用下,洞穴壶穴最终走向消亡,同时为洞腔的扩大提供了新的空间。但岩石的硬度、水动力条件在一定程度上减缓了洞穴壶穴的消亡。

3. 地下洞穴温度、二氧化碳、湿度、风、水文、电导、 Ca^{2+} 离子含量、 HCO_3^- 含量、pH、 SO_4^{2-} 含量常年基本都保持稳定状态。所以洞穴壶穴的形成与发育影响因子相对于地表河成壶穴影响因子较少,与地表河成壶穴相比,更有利于对洞穴壶穴的形成与发育探讨。

4. 洞穴壶穴作为壶穴一种新的存在方式,对其形成、演化机制探讨和形成因子分析,具有重要意义。有利于完善壶穴不同地貌形态及区域代表性,为喀斯特洞穴发育演化过程及机制增添新的证据,为喀斯特洞穴水动力学的发展提供新的研究机制,为自大冰盖理论相关的冰臼引起的争论提供新的参考。

致谢:贵州省双河洞国家地质公园管理局为我们研究开展提供基础支撑。

参考文献(References)

- [1] 钟建华,倪晋仁,沈晓华. 黄河下游壶穴的研究. 地质学报, 2002, 76(2): 280-286 [Zhong Jianhua, Ni Jinren, Shen Xiao-

- hua. Study of potholes in the lower reaches of the Yello River. *Acta Geologica Sinica*, 2002, 76(2): 280–260]
- [2] 朱照宇. 广东揭西河谷地貌与风化层特征初步观察. *热带地理*, 2000, 20(4): 331–336 [Zhu Zhaoyu. A preliminary investigation on landform and weathered horizon in river valley in Jiexi County, Guangdong Province. *Tropical Geography*, 2000, 20(4): 331–336]
- [3] 李洪江, 崔之久, 赵亮. 内蒙、河北山区壶穴的成因探讨: 兼论壶穴成因分类. *地理学报*, 2001, 56(2): 223–231 [Li Hongjiang, Cui Zhijiu, Zhao Liang. Origin of pots in Inner Mongolia and northern Hebei: Also about the classification of pots. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 56(2): 223–231]
- [4] 崔之久, 李洪江, 南凌 等. 内蒙、河北巨型壶穴与赤峰风道的发现. *科学通报*, 1999, 44(13): 1429–1434 [Cui Zhijiu, Li Hongjiang, Nan Ling et al. Discovery and environmental significance of huge pots of Hebei Province and Inner Mongolia and Chifeng wind route. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(7): 1429–1434]
- [5] 热带地理编辑部. 中国科学院院士施雅风谈“冰臼”与“壶穴”. *热带地理*, 2002, 22(1): 1–2 [Editorial Department of Tropical Geography. A talk with fluvial and glacial potholes by Shi Yafeng, Academician of Chinese Academy of Sciences. *Tropical Geography*, 2002, 22(1): 1–2]
- [6] 周尚哲. 锅穴一定是第四纪冰川的标志吗. *第四纪研究*, 2006, 26(1): 117–125 [Zhou Shangzhe. Are all potholes markers of Quaternary glaciations. *Quaternary Sciences*, 2006, 26(1): 117–125]
- [7] 韩同林, 劳雄, 郭克毅. 关于南国冰臼群成因的商榷之二. *热带地理*, 2001, 21(2): 189–194 [Han Tonglin, Lao Xiong, Guo Keyi. A discussion on the origin of moulins in South China (2): Discussion on the origin of moulins in South China (2). *Tropical Geography*, 2001, 21(2): 189–194]
- [8] 赵国龙, 朱洪森, 李泊洋, 等. 论内蒙古第四纪冰川和冰臼群的成因. *中国区域地质*, 2001, 20(2): 200–206 [Zhao Guolong, Zhu Hongsen, Li Boyang et al. Quaternary glacial geology and origin of glacial pothole swarm in Inner Mongolia. *Regional Geology of China*, 2001, 20(2): 200–206]
- [9] 刘尚仁, 覃朝锋, 彭华. 关于广东有无冰川发育条件的讨论. *地理科学*, 2000, 20(4): 376–380 [Liu Shangren, Qin Chaofeng, Peng Ghua. The discussion on the condition for glacier whether developed in Guangdong. *Scientia Geographica Sinica*, 2000, 20(4): 376–380]
- [10] 王为, 黄山, 梁明珠. 广东大峡谷河床壶穴形态的形成与发育. *地理学报*, 2007, 62(7): 691–697 [Wang Wei, Huang Shan, Liang Mingzhu. Formation and development of the potholes formed in a gorge river in Guangdong. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(7): 691–697]
- [11] Hsi – Lin Tschang. An annotated bibliography of pothole forms. *Chung Chi Journal*, 1974, 12(1/2): 15–53
- [12] Alexander H S. Pothole erosion. *Journal of Geology*, 1935, 40(4): 305–337
- [13] 吕洪波, 章雨旭. 壶穴、锅穴、冰臼、岩臼等术语的辨析与使用建议[J]. *地质通报*, 2008, 06: 917–922 [Lü H B, Zhang Y X. Discrimination and analysis of terms such as “pothole”, “kettle” and “glacial pothole” and suggestions about their usage. *Geological Bulletin of China*, 2008, 27(6): 917–922]
- [14] 王为, 许刘兵, 吴正, 等. 深圳海岸壶穴的形态及空间分布特征[J]. *地理学报*, 2010, 65(3): 320–330 [Wang Wei, Xu Liubing, Wu Zheng et al. The morphology and spatial distribution characteristics of Shenzhen coastal potholes [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(3): 320–330]
- [15] 曾昭璇. 韩江上游地形略论. *华南师范学院学报*, 1958, (3): 121–165 [Zeng Zhaoxuan. A preliminary study on landform in the upper reaches of the Hanjiang River. *Journal of South China Normal University*, 1958, (3): 121–165]
- [16] 李大通, 罗雁. 中国碳酸盐岩分布面积测量[J]. *中国岩溶*, 1983, 2(2): 61–64 [Li Dotan, Luo Yang. Measurement of carbonate rocks distribution area in China [J]. *Carsologica Sinica*, 1983, 2(2): 61–64]
- [17] 刘晓娇, 徐娟, 张斌, 等. 川中丘陵区河成壶穴的形态对比及成因[J]. *山地学报*, 2013, 31(6): 723–730 [Liu Xiaojiao, Xu Jian, Zhang Bing et al. In the hilly area of central Sichuan river into a form of contrast and causes the potholes [J]. *Mountain Research* 2013, 31(6): 723–730]
- [18] Tschang Hsi – Lin. Marine potholes of Hong Kong. *Chung Chi Journal*, 1966, 6(1): 50–58
- [19] Swinnerton A C. Observations on some details of wave erosion: wave furrows and shore potholes. *Journal of Geology*, 1927, 35(2): 171–179
- [20] Wentworth C K. Potholes, pits, and pans: Subaerial and marine. *Journal of Geology*, 1944, 52(2): 117–130
- [21] Mii H. Some ancient shore features. *Science Reports, Tokoku University, Sendai Japan, 2nd Ser. (Geol.)*, Spec. 5: 1962, 361–371
- [22] Abbott A T, Pottratz S W. Marine pothole erosion, Oahu, Hawaii. *Pacific Science*, 1969, 23(3): 276–290
- [23] Bird E C F. Shore potholes at Diamond Bay, Victoria, Australia. *Victorian Naturalist*, 1970, 87(11): 312–318
- [24] Sunamura T. *Geomorphology of Rocky Coasts*. Chichester: John Wiley & Sons, 1992, 196–200
- [25] Ito R. New examples of pothole erosion at the seashore of Inbo, Tiba Prefecture, and in valley of the Hida-gawa, Geogr. Rev. Japan, 1940, 16: 73–93. (in Japanese with English abstract)
- [26] Abbott A T, Pottratz S W. Marine pothole erosion, Oahu, Hawaii [J]. *Pacific Science*, 1969, 23(3): 276–290

Formation and Development of Cavern Potholes in Karst Region

ZHOU Zhongfa^{1 2}, ZHANG Shaoyun^{1 2}, CAO Mingda^{1 2}, ZHANG Qiang^{1 2}, XIE Yating^{1 2}

(1. School of Karst Science, Guizhou Normal University, Guiyang, Guizhou 550001, China

2. State Engineering Technology Institute for Karst Desertification Control, Guiyang, Guizhou 550001, China)

Abstract: Riverbed potholes in karst caves are significant indicators of micro-scale geomorphic evolution as well as underground drainage development. They have been known as convincing evidences of interaction between subsurface flow and cavern riverbed conditions. In this study, in-depth investigation were mobilized to explore the formation and feature of cavern pothole. A number of 108 caves were selected for survey in a section of Loushanguan dolomite underground riverbed of Suiyang Shuanghe cave system, Guizhou province. Results confirmed there are two forms of underground riverbed potholes, plunge pothole and eddy pothole.

Their sizes, shapes, and distribution were controlled by underground hydraulic effects and evolution of subterranean drainage. Riverbed potholes appeared to be a relative regularity in formation as compared with those of potholes growing on ground surface riverbed. It was interpreted a long-term stable cavern environment, a ultimate formation of cavern pothole as well as its ensuing evolution, all of those have derived from a combined function of underground hydrodynamic conditions, cavern drainage system, lithology, and alluvial deposits.

This research will provide scientific proofs and insights for the formation and development of cavern pothole landscape, and it will enrich and refine researches on the characteristics and origins of caves at different geomorphological locations, with varied lithologic properties. Also the research achievements will form solid scientific basis for further investigation on cavern microrelief evolution and do contribute to development of cave hydrodynamics.

Key words: dolomite areas; Shuanghe cave system; Cave potholes; morphology factors; evolutionary mechanisms

封面照片: 丁锡祉先生

丁锡祉(1916~2008)男,汉族,中共党员,浙江吴兴(现湖州市)人,1916年4月生,2008年2月逝世,享年92岁。丁锡祉先生是知名地理学家和地貌学家,我国现代地貌学、沼泽学和冰缘地貌学研究的开拓者和领导者。1938年毕业于清华大学理学院,1942年于浙江大学研究院获硕士学位,1945年晋升为教授。曾任东北师范大学地理系主任、副教务长、校长助理、校党委委员,中国科学院长春地理研究所所长,中国科学院成都地理研究所所长。作为东北地区地理研究的主要领导者和组织者,系统开展了东北西部地区地貌类型和第四纪地层划分研究,首次论证了“白土山组”地层的成因,阐述辽宁省海岸线是复式海岸的学术观点;首次倡导开展沼泽学研究,并建立了我国第一个沼泽研究室;最早在我国成立冰缘地貌研究组织,撰写了我国第一篇冰缘地貌直接服务于生产建设的论文和报告;率先提出“山地学”概念,强调山地研究的综合观点及其主要内容;在长期的教学和科研中,培养了一大批地理学界人才和骨干,推动了东北地理研究和西南山地研究,为学科发展和人才培养做出了重要的贡献。

(摘录自:孙鸿烈. 丁锡祉[M]//钱伟长. 20世纪中国知名科学家学术成就概览:地学卷,地理学分册. 北京:科学出版社,2010:291)

(秦保芳同志拍摄于1985年春)