

贵州绥阳阴河洞洞穴壶穴的演化过程

曹明达^{1,2}, 周忠发^{1,2}, 张 结^{1,2}, 殷 超^{1,2}, 潘艳喜^{1,2}, 闫利会^{1,3}, 陈 全^{1,2}

(1. 贵州师范大学喀斯特研究院, 贵阳 550001; 2. 贵州省喀斯特山地生态环境国家重点实验室培育基地, 贵阳 550001; 3. 国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心, 贵阳 550001)

摘要: 通过对贵州绥阳寒武系中上统娄山关组中发育洞穴之阴河洞地下河河床基岩面上49个壶穴进行详细测量和统计学定量分析, 对其形态特征及空间分布进行描述, 并探讨其形成演化过程和影响因素。主要结论为: 阴河洞壶穴的整体形态以极浅的倒“Ω”型和“锅”型壶穴为主, 并且壶穴发育相对较年轻; 壶穴长短轴具有一定的相关性, 但平均口径与深度的相关性较差, 说明壶穴在发育的过程在洪水期以口径增大为主, 枯水期以溶蚀深度加深为主, 且表现为地下河河床下切的形式之一; 从发育阶段看, 阴河洞壶穴的形成演化主要分为3个阶段: “碟型”壶穴形成阶段; 倒“Ω”型壶穴发育阶段; “锅”型壶穴发育阶段, 其形成主要受水动力条件、构造条件、推移质、基岩性质和溶蚀作用等因素耦合的作用; 洞穴壶穴主要是流水的侵—溶蚀作用形成的, 并非冰川作用的结果, 与“冰臼”的发育存在本质上的区别。

关键词: 绥阳阴河洞; 演化过程; 定量分析; 洞穴壶穴; 贵州

DOI: 10.11821/dlxb201611011

壶穴是在环境演变过程中记录了大量信息的微型地貌, 是研究古地貌、古气候、古环境演变的良好载体^[1], 关于壶穴的定义目前在学术界没有统一术语, 有壶穴、锅穴、冰臼、岩臼等, 其概念相对模糊。而针对“Pothole”, 吕洪波等建议将其译为壶穴, 并对壶穴做了定义, 即流水对基岩表面侵蚀而形成的凹坑, 主要是由涡流或水流携带砾石或粗沉积物研磨基岩河床形成的, 在强急流或瀑布前方容易形成^[2]。目前关于壶穴的研究已从当初的定性分析阶段^[3-6], 发展到现在的定量研究阶段^[7-10]。在壶穴形态方面, 主要通过研究壶穴的形态参数^[10-12]、几何模型^[13], 分析壶穴形态与水动力条件、地质地貌、岩性、风化作用等多种因素的关系^[9, 12], 探讨壶穴的空间分布特征^[10]; 通过测量壶穴深度, 长短轴长, 对壶穴发育过程中长轴与短轴、深度与口径间的关系进行分析^[11]; 且通过研究壶穴深度、宽度, 长轴长度、内凹程度与方向, 建立了壶穴的三维空间演化模式^[7]。

综上所述, 对于壶穴方面的研究虽已取得了很大的进展, 但仍有几处不足: 一从岩性看, 对花岗岩、砂页岩、粉砂岩、泥岩等岩性区壶穴的研究较多, 而对喀斯特区域(白云岩)的壶穴研究较少, 仅有吴忱等^[14]对井陉挂云山灰岩“冰臼群”做过相关研究; 二从地形地貌上看, 对低山、丘陵、河流、风成等地表壶穴研究较多, 而对喀斯特地貌研究, 尤其是白云岩洞穴壶穴的研究极少; 三是从区域分布来看, 北方等地壶穴、坑穴

收稿日期: 2016-07-19; 修订日期: 2016-10-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(41361081); 贵州省科技计划([2014]4004-2); 贵州省重大应用基础研究项目([2014]200201) [Foundation: National Natural Science Foundation, No.41361081; Guizhou Science and Technology Plan, No.[2014]4004-2; Guizhou Major Application of Basic Research Project, No.[2014]200201]

作者简介: 曹明达(1992-), 男, 安徽滁州人, 硕士生, 研究方向为喀斯特地貌与洞穴。E-mail: cmd965621@sina.com

通讯作者: 周忠发(1969-), 男, 贵州遵义人, 教授, 博士生导师, 研究方向为喀斯特资源环境、GIS与遥感。

E-mail: fa6897@163.com

研究较多,而对贵州地区壶穴的研究成果相对偏少。从贵州绥阳阴河洞洞穴壶穴形成类型看,主要是响水洞地下河流水对基岩表面侵蚀、溶蚀而形成的凹坑,属地下河河成壶穴。文章以贵州绥阳双河洞系统中阴河洞洞穴壶穴为研究对象,对响水洞洞穴地下河河成壶穴进行细致的监测和统计分析。以期揭示喀斯特洞穴壶穴的规模和形态规律,探索其形态形成和演化机理及其环境意义。

1 研究区简介

双河洞位于贵州省绥阳县境内($107^{\circ}02'30''\text{E}\sim 107^{\circ}25'00''\text{E}$, $28^{\circ}08'00''\text{N}\sim 28^{\circ}20'00''\text{N}$),是一座多层洞穴系统,属芙蓉江支流池武溪地下河系。在地质构造上位于扬子准地台的凤冈NNE向构造变形区西侧,岩层产状微偏东倾斜,倾角 $5^{\circ}\sim 7^{\circ}$ 。尤其在娄山关组地层中喀斯特极度发育,地貌类型丰富,为洞穴主要发育层位,双河洞洞穴系统就发育在该地层中。岩性主要以白云岩、白云质灰岩为主。洞系处于宽阔平缓箱状背斜翼部,因受不同方向构造应力作用,形成NE、NW及SN向褶皱断裂带,将洞区围成三角形地块。因受多次间歇性的构造抬升运动,洞区断层、节理较为发育,节理方向为NS和NW,节理密度为1.7~8条/m。背斜两侧的下奥陶系砂页岩及碎屑夹层地势较高,形成地表分水岭,使洞区的碳酸盐岩地块成为一个相对独立的汇水单元,故洞区地下河较为发育。区内地下水类型主要为碳酸盐岩裂隙洞穴水,碳酸盐岩夹碎屑岩裂隙洞穴水及碎屑岩裂隙水。主要含水层有寒武系中、上统娄山关组白云质灰岩、砂质白云岩。洞区属中亚热带季风气候。1月均温 1.6°C ,7月均温 22.5°C ,年均温 15.5°C ;年均降水量1210 mm,大多集中于5-10月,且降水强度大。阴河洞,洞口呈峡谷型,海拔700 m,洞内地下河通过两个10 m高的竖井与其他洞穴相连。阴河洞地下河为一季节性地下河,水源主要来自母猪塘盲谷中的季节性河流,由南向北于阴河洞洞口流出地表,干流长0.84 km。因其为双河洞系统中的一条支洞,故其基本继承了双河洞系统的大部分特征^[15]。

2 数据处理与研究方法

为了解各壶穴特征,测量时依次对每个壶穴进行编号记录测量数据,并记录每个壶穴的垂直剖面形态(图1,图2),共测量标准壶穴49个。其中用卷尺,激光测距仪分别对壶穴规模、形态(平面形态和垂直形态)等进行测量,主要指标包括长轴长、短轴长、深度、长轴所对应的走向及洞道走向,同时记录壶穴的形态。其中激光测距仪精确度为 1° 。数据处理按标准统计方法计算各指标的统计参数、分布特征等;对有关数据进行相关分析和回归分析,并按标准统计方法对各种计算结果进行统计检验^[16]。数据处理软件主要为Origin与SPSS软件。

3 壶穴的规模、形态及其分布特征

洞穴壶穴位于距洞口150 m处的第三级陡坎上的白云岩基岩上,壶穴主要分布在第三级陡坎的左侧,其后部(往洞外方向)有一面积为 64.5 m^2 的大水潭,其长轴走向为 357° ,而壶穴右侧为一条水源来自大水潭的常年水流,该处没有壶穴分布,壶穴分布区与常年水流中间相对凸起,将壶穴和水流隔开,另外大水潭后有两级陡坎,高度分别为4.35 m和14.08 m,均有水流流出。

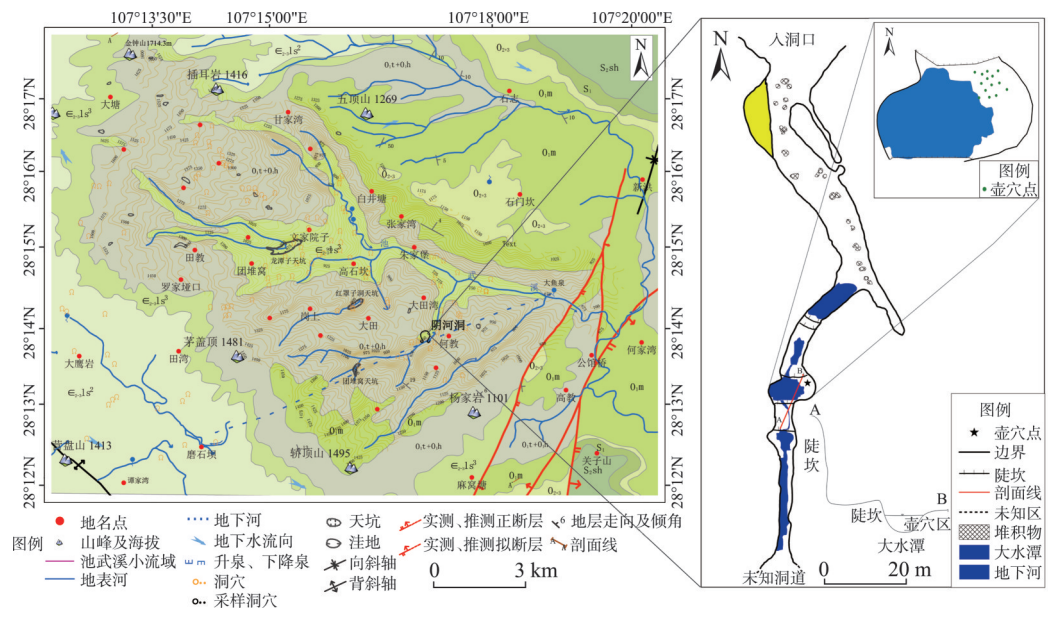


图1 阴河洞洞道特征及其壶穴的分布位置

Fig. 1 The characteristics of Yinhe Cave tunnel and distribution of potholes

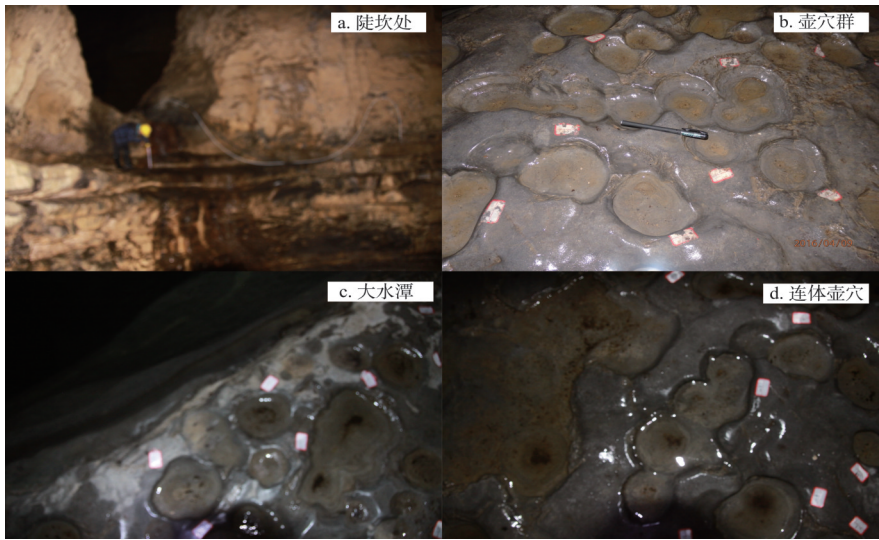


图2 阴河洞壶穴照片

Fig. 2 Photos of potholes in Yinhe Cave

3.1 壶穴数量和规模

壶穴主要分布在面积约为280 m²的基岩面上,有148个壶穴,数量众多,且成群出现,另外还有许多壶穴相互贯通,出现串珠状壶穴,有些甚至出现5~6个壶穴贯通的情况(图2b、2d)。壶穴的规模及其数量主要受洞道宽度、白云岩颗粒及粒间空隙大小、节理裂隙发育程度、降水、风和温湿度等因素的控制。如洞宽仅为10 m,同时洞体面积较小,因而不可能发育巨型壶穴,但是节理和裂隙较发育,共有47条。由于该处壶穴是多种因素耦合的结果,因而壶穴发育的形态相对多样,但规模相对偏小,且相差不大。

3.2 洞穴壶穴形态

研究区壶穴规模基本以小型壶穴为主, 最大者长轴为 24 cm, 短轴为 15 cm, 深为 10 cm, 一般长轴在 11~14 cm 之间, 短轴在 6~10 之间, 深在 1~4 cm 之间, 最小者长轴、短轴和深度仅为 6 cm、4.5 cm 和 0.5 cm (表 1)。深度的平均值离散系数最大, 分布较为分散, 而长短轴长度离散程度较小, 最大值和最小值相差不是很大。在形态上, 阴河洞洞穴壶穴大体上以口大肚小底圆的“锅状”壶穴为其典型特征。穴底呈水平或锅型下凹, 同时穴底还部分发育有次生穴, 穴底有薄层沉积物或积水, 穴壁较光滑, 穴壁有直立的、中下部向内凹进的, 或四周均有凹进的, 凹进深度均为几厘米甚至几毫米, 且壶穴壁有凹进的占多。从平面形态看, 穴口以椭圆壶穴 ($0.1 < e \leq 0.5$) 为主, 大约占总体壶穴数量的 73.5%, 其次是近圆形壶穴 ($0 < e \leq 0.1$) 约为 12.2%, 圆形 ($e = 0$) 和极椭圆形 ($0.5 < e \leq 1$) 最少 (图 3a)。另外还有少数马蹄形、三角形和长条形壶穴。由于壶穴发育位置在洞道的转弯处, 同时在大水潭之后存在一陡坎, 在洪水时, 上部来自洞顶上部大量的渗流水进入洞穴, 在经过两级陡坎, 水流方向变化复杂, 因而长轴走向相对比较分散, 主要分 3 部分: $305^{\circ} \sim 314^{\circ}$ (NNW)、 3° 和 23° (NNE) (图 4a), 同时基岩优势节理方向主要有 357° (NNW) 和 4° (NNE) 两组 (图 4b), 由此可知节理、裂隙只是洞穴壶穴形成的局部控制因素, 并不是主控因素。另外洞道走向为 26° 主要对 NNE 方向控制。且通过野外观测, 壶穴的垂直剖面形态主要以倒“Ω”型和“碟”型壶穴为主, 分别占 43.39% 和 33.07%, “锅”型壶穴所占比例较少, 仅为 22.64% (图 3c)。

表 1 壶穴的基本参数(cm)

Tab. 1 The basic parameters of the cave potholes

	均值	标准差	中值	极小值	极大值	离散系数
长轴长	13.84	3.86	13.00	6.00	24.00	0.28
短轴长	9.66	2.66	9.50	4.50	15.00	0.28
深	3.16	1.68	3.00	0.50	10.00	0.53

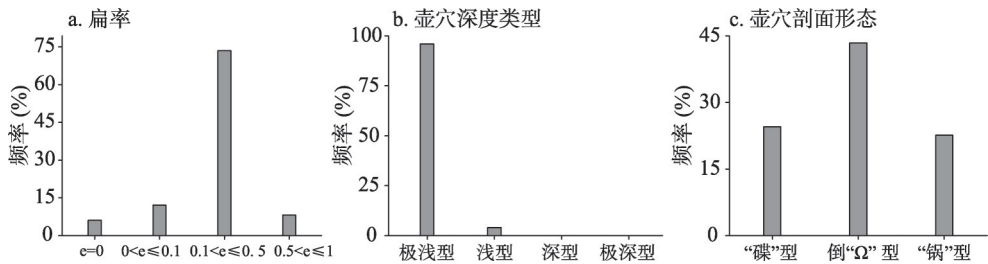


图 3 壶穴的平面形态和垂直形态特征

Fig. 3 The morphology and morphological characteristics of the vertical plane of the cave potholes

宽深比绝大多数以极浅型壶穴为主, 大约为 95.9%, 而浅型、深型和极深型壶穴所占比例极小 (图 3b)。综上可以推断阴河洞壶穴发育相对比较年轻。

穴边基本有缺口, 有的甚至相互贯通, 形成串珠状壶穴, 缺口主要受水流方向、节理走向和地形的控制, 向低处开口, 同时还受洞内外温度差形成的气流差异, 夏季气流方向与流水的方向

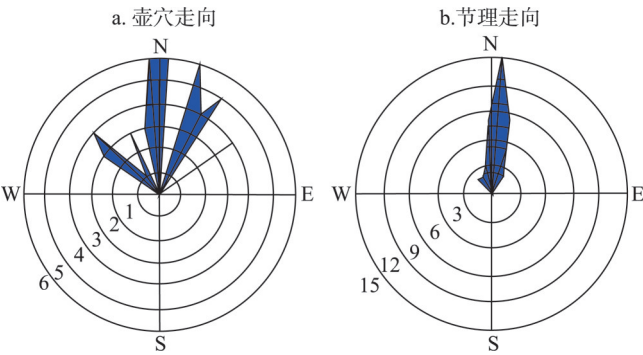


图 4 壶穴的长轴走向和基岩节理走向

Fig. 4 The long axis direction and rock joint strike of cave potholes

一致, 且风速达 1.6~2.3 m/s, 这加速了缺口的增大。另外由于大量壶穴发育的距离较近, 因而在流水和风的共同作用下相互连通形成“连体壶穴群”(图 2b、2d), 但这类壶穴一般规模较小, 长轴和深度基本为几厘米, 说明其发育明显受水流的影响。同时在壶穴内还有部分的水、泥土或砂砾, 说明在流水作用的同时还有砂砾对壶穴的旋转磨蚀作用。此外壶穴内壁和口沿均较光滑, 尤其是许多壶穴底部呈“锅状”, 同时壶穴位于白云岩基岩面上, 因而流水对壶穴的溶蚀也伴随着流水的侵蚀作用同时进行。

3.3 洞穴壶穴的形态差异与其形成过程的关系

洞穴壶穴的形态差异反映了流水对基岩不同部位的侵-溶蚀差异(图 5a)。壶穴长短轴变化的回归分析表明, 壶穴长轴增长比短轴增长要略微快一些, 所以从发育的角度看, 壶穴的平面形态主要以椭圆($0.1 < e \leq 0.5$)为主, 这说明无节理影响, 旋转流水可使壶穴形态趋向圆形。同时壶穴长短轴有一定的相关性, 但是相关性程度不高仅为 $R = 0.65$, 说明壶穴长短轴的变化并不完全受单一要素的绝对控制, 这也从壶穴的长轴走向的分散上得到印证。且平均口径与深度的相关性仅为 0.04(图 5b), 说明壶穴在扩大的过程中, 其深度并不一定会变深, 可能是由于水流主要是涡流并且水流方向分散且与节理方向并不一致, 因而使壶穴扩大的速度远快于下蚀的速度, 但整体上随着壶穴口径的增大, 深度亦有增加, 这说明壶穴的生成和发育是地下河床下切的形式之一^[17-18]。此形成过程导致壶穴宽深比不同, 即壶穴主要以宽深比较小的极浅型、浅型壶穴为主。

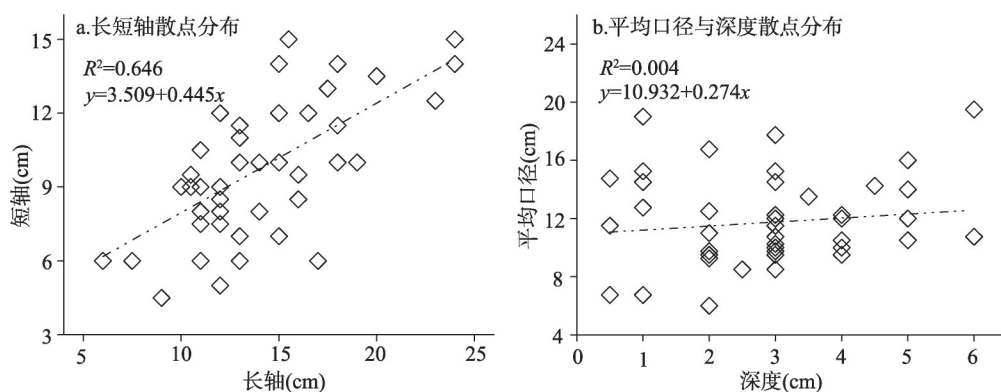


图 5 壶穴长短轴相关性以及宽深的相关性

Fig. 5 The length of the shaft and the wide and deep correlation correlation of cave potholes

3.4 阴河洞壶穴的演化过程

阴河洞壶穴的形成主要分为 3 个阶段: ① 碟型壶穴形成阶段: 主要发育在岩石表面的凹陷处、节理或裂隙处。在季节性洪水的作用下, 从洞内挟带有砂砾和泥土的温度较低的混浊流水, 其粘度较高, 使悬浮物在下沉过程中产生明显的迟滞作用, 并产生较大的剪应力, 同时水流在经过水潭时, 由于障碍物的阻挡, 使水流形成紊流, 并跳跃性前进, 形成冲坑。并在冲坑、凹陷处或裂隙处不断旋转打磨形成碟状壶穴, 但由于水流在洪水期是紊流, 因而方向并不固定, 所以壶穴的分布具有一定的随机性。在平水期或枯水期, 由于白云岩岩床不受流水的侵蚀, 壶穴内部仍存有水分, 因此壶穴内的水分与洞内 CO_2 结合形成碳酸开始对壶穴进行溶蚀, 主要是对壶穴进行微观的修饰; ② 倒“Ω”型壶穴发育阶段: 在碟状壶穴的基础上, 洪水期进入碟状壶穴的水流挟带砾石或带动穴内原有的砾石形成涡流在穴内旋转而研磨穴壁和穴底, 当砾石被磨损或冲出壶穴后, 洞内来水又带来新的砾石继续研磨侵蚀, 如此年复一年, 反复进行, 导致碟状壶穴加大、

加深形成倒“Ω”型;同时在此过程中伴随着溶蚀作用的进行;③“锅”型壶穴发育阶段:在洪水期,由于该处离陡坎相对较远,并且其水流作用相对于跌水能量较小,因而随着壶穴深度和大小的增加,壶穴口部逐渐变得脆弱,很容易被侵蚀,因而壶穴口部开始不断增大;而与此同时,壶穴底部因深度和面积增加,使流水在穴底的扰动力减小,因而底部侵蚀相对于上部减弱。此外壶穴底部水流交换相对较少,并且壶穴底部水比壶穴上部水更容易饱和,甚至出现碳酸钙沉积的现象,而壶穴上部由于水气交换作用较强,溶蚀作用也相对增强,如此周而复始壶穴逐渐形成口大底圆的“锅型”壶穴(图6)。

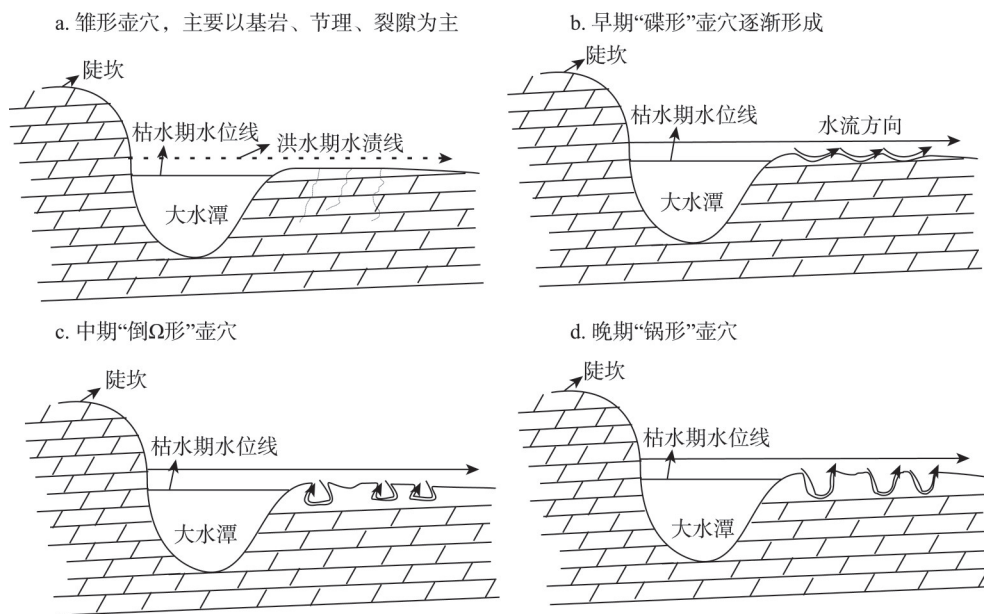


图6 阴河洞壶穴的演变过程

Fig. 6 The evolution process of the Yinhe Cave potholes

4 洞穴壶穴的演化过程及其影响因素

4.1 水动力条件

阴河洞壶穴形成的主要动力就是季节性流水的作用,且其形成和发育与流水的特征有关^[1]。在洪水期,流水挟带大量的砾石沿岩坎的软弱处或凹陷处以及节理裂隙处,使水流容易受阻力影响,导致岩坎浅坑或岩石破碎处水流产生垂直轴漩涡流,从而有利于壶穴的形成与发展。因此水动力对壶穴的形成主要表现在初期剪应力(拖拽力等)对岩石层面的侵蚀和后期垂直于水流方向的向上压力(上举力或扰动力)对穴口的侵蚀^[19]。同时由于水动力条件的不同(即流水速度和方向),壶穴发育的情况也有明显差异。如靠近大水潭处的壶穴发育较好,并出现许多连体壶穴,但是壶穴的发育方向相对分散;而靠近陡坎部分,由于水流在此汇聚,水流方向较一致,因而壶穴的长轴走向也较一致,并且由于流水方向一致,导致大部分壶穴成长槽状。因此水动力条件是壶穴形成的最重要的条件之一。

4.2 构造条件

壶穴倾向于在软弱带(节理、裂隙、层面等)形成,但其形成的具体位置却是不确定的,且由裂隙或节理经过,壶穴长轴走向、长轴长及其扁率均会受到影响,且长轴走

向与节理走向基本一致(图2b)。在阴河洞,由于水流的分散,节理对壶穴长轴走向的控制只是局部性的,主要控制方向在 $1^{\circ}\sim 4^{\circ}$ 。同时由于挟带砾石的水流旋转打磨岩床的过程中,壶穴由于剪应力的作用易沿节理冲切,使长轴变长。长短轴长度的相关系数 R 仅为0.65,说明节理或裂隙对壶穴的控制作用不是很明显,但是存在局部性控制(图5)。

4.3 推移质

流水携带的物质,即为推移质。洞穴壶穴的形成和发育与洞内地下河的推移质有明显的关系,在基岩裸露的凹凸不平的地下河床,推移质在水流的带动下冲击和磨蚀白云岩基岩的软弱部分,形成冲坑即壶穴形成初期时发育在基岩表面的不规则的凹坑,冲坑在携带砂砾流水的带动下旋转磨蚀,逐渐形成壶穴形态。而对阴河洞壶穴的观测发现,穴中既有砂砾和泥土,且分选性较差。而河流壶穴中细颗粒物在河流流水作用的过程中易于被水流带走,故而河流壶穴中碎屑颗粒不含细颗粒,并且颗粒粒径分布集中,分选好。但洞穴地下河与地表河流又存在很大的差异性,其具体表征为在洪水期,地表汇水单元大量汇水并向洞穴地下河系统补给,由于外界雨季降水量大,故土壤层和基岩层没有足够的时间和空间过滤浑浊的地表水,并在洞穴顶板发生强烈的淋滤作用,所以含有大量砂砾杂质的水体进入洞穴,这部分水体在抬高地下河水位的同时对壶穴进行强烈的机械磨蚀冲刷,随着降水量的减少,单位时间通过顶板和管道的水量锐减,洞穴顶板逐步恢复过滤作用,进入地下河的水体愈来愈清澈,此时属于洪水期的末期,较纯净的地下河水将洪水期沉积在壶穴内的大部分砂砾和杂质搬运到下游,随着水位的下降,流水动力逐渐消失,会导致一小部分残余杂质和未饱和的河水留存在壶穴内,此阶段以化学溶蚀—侵蚀为主。所以推移质在洪水期发挥的作用巨大,而在枯水期则由物理机械磨蚀向化学溶蚀转变。

4.4 基岩性质

壶穴的发育、演化和消亡均与岩床基岩岩性有密切的关系,基岩岩性各异会影响壶穴形成和保存,从而影响壶穴的分布。一般情况下,厚层致密、成分、结构均匀的基岩,同时高速旋转水流携带砂砾石磨蚀河床软弱处,其周边不易冲切、破碎,利于壶穴的形成,而河床的抗磨蚀性较好的基岩能使壶穴较好的保存^[20],阴河洞地下河主体发育于寒武系中上统娄山关组(ϵ_{23} Is3),主要以台地相蒸发白云岩和白云质灰岩等碳酸盐岩为主,厚层致密,成分和结构比较均匀,但其物理崩解作用较强,并且具有一定的溶蚀性,因而壶穴扩容速度相对较快,但由于主要是季节性流水,保存相对较好,因而壶穴密度大且不同发育阶段的壶穴同时出现在岩坎上。如在大水潭右侧由于常年性流水的侵蚀-溶蚀作用,基本上呈现出长条形的凹槽,由此可知白云岩区壶穴虽易形成,但由于其岩性特征,保存并不容易。

4.5 溶蚀作用

溶蚀作用与侵蚀作用伴随着壶穴的发育、演变和消亡,侵蚀作用形成壶穴的主体,而溶蚀作用则主要起修饰或催化作用。在阴河洞中,由于洞内湿度较大,同时 CO_2 含量(0.507%)相对洞外较高,洞穴空气中水分对基岩的冷凝腐蚀作用较强,并且坑穴内皆有常年积水,因而其溶蚀作用更强,通过对阴河洞地下河上游河水和壶穴内积水的水化学分析可以看出(表2),流动的河水的方解石饱和度(SI_c)和白云石饱和度(SI_d)均小于0,说明其是不饱和的且具有较强的溶蚀能力,而在洪水期流经壶穴时滞留在壶穴中,则其 SI_c 和 SI_d 迅速升高至0以上,达到过饱和状态,这充分证明了枯水期水化学溶蚀对壶穴发育的影响。

表2 阴河洞洞穴水基本参数(mg/L)
Tab. 2 The basic parameters of cave water in Yinhe Cave

时间	采样点	pH	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Sr ²⁺	CL ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	SI _c	SI _d
5月	上游河水	7.80	1.33	3.28	42.00	15.76	0.98	1.41	17.63	140.30	-0.11	-0.55
	壶穴内积水	8.00	2.36	2.05	65.00	14.15	1.32	2.62	24.89	225.70	0.58	0.72
10月	上游河水	8.64	1.38	1.57	45.00	16.85	0.30	1.46	16.14	201.30	-0.06	-0.98
	壶穴内积水	8.45	1.05	1.19	62.00	14.77	1.03	1.35	28.45	195.20	0.90	1.39

注: SI_c、SI_d分别为方解石饱和指数及白云石饱和指数, 无量纲。

由于阴河洞只有在持续的大暴雨情况下, 洞内地下河才能处于半充水状态, 因而在平水期和枯水期壶穴区域接受水流作用的几率较小, 在一年内较长的时间, 壶穴是处于溶蚀状态的, 从壶穴的发育看(图2), 基岩面基本是光滑的, 同时壶穴内部和口沿也基本无棱角, 由此可以看出, 壶穴在形成的过程中溶蚀作用贯穿始终, 并对壶穴的形态有着重要的影响。

4.6 洞穴壶穴形成的环境及意义

阴河洞壶穴发育于距洞口150 m的洞内, 且洞道比较弯曲; 壶穴发育于洞内高洞口低的第三级陡坎上, 比洞口要高出4~5 m; 洞道平均宽、高仅为10 m和15 m; 洞内温度无论冬夏均保持在10~14 ℃, 即使是温度最冷的冰期, 洞穴温度受外界温度的影响较小。因此阴河洞壶穴主要是流水的侵—溶蚀作用形成的, 并非冰臼。通过壶穴分布位置和大小可以判断出在该基岩面上发育的壶穴是在整个洞穴发育的晚期开始形成, 深度较小, 洞穴水成壶穴的发育特征可以整体上反映出洞穴在某个发育阶段的水动力特征。

5 结论

综上所述, 通过对阴河洞洞穴壶穴的监测数据分析和研究, 主要得出以下结论:

(1) 从壶穴的平面形态看, 主要以口大肚小底圆的椭圆形壶穴为其典型特征, 从壶穴的长轴方向和节理走向看, 节理、裂隙只是洞穴壶穴形成的局部控制因素, 并不是主控因素。垂直剖面形态则以极浅型的以倒“Ω”型和碟型壶穴为主, 并且壶穴发育相对较年轻。

(2) 壶穴长短轴具有一定的相关性, 说明壶穴变化并不受单一要素的绝对控制, 平均口径与深度的相关性较差, 说明壶穴在扩大的过程中, 与深度并无关系。且整体上随着壶穴口径的增大, 深度亦有增加, 说明壶穴的生成和发育是地下河床下切的形式之一。

(3) 从发育阶段看, 阴河洞壶穴的形成演化主要分为3个阶段: 碟型壶穴形成阶段; 倒“Ω”型壶穴发育阶段; “锅”型壶穴发育阶段。

(4) 总体上看阴河洞洞穴壶穴的形成是水动力条件、地质构造、推移质(水流携带的物质)、基岩性质和溶蚀作用等因素耦合的结果。

(5) 由洞穴壶穴形成的环境可知, 洞穴壶穴主要是流水的侵-溶蚀作用形成的, 并非冰臼, 并且通过壶穴的发育形态可以推测洞内地下河的古水文状况和洞外气候状况。

参考文献(References)

[1] Yang Chaoqun. A review of the controversy over the question of moulin and pothole. Tropical Geography, 2001, 21(1): 86-93. [杨超群. 冰臼与壶穴之争述评. 热带地理, 2001, 21(1): 86-93.]
[2] Lü Hongbo, Zhang Yuxu. 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. [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. *地质通报*, 2008, 27(6): 917-922.]
- [3] 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. [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.]
- [4] Li Menghua, Xie Xiaokang. Argument between "pots" and "glacial potholes". *Tropical Geography*, 1999, 19(4): 381-384. [李孟华, 谢小康. “冰臼”与“壶穴”之争. *热带地理*, 1999, 19(4): 381-384.]
- [5] Liu Shangren, Qin Chaofeng, Peng Hua. The discussion on the condition for glacier whether developed in Guangdong. *Scientia Geographica Sinica*, 2000, 20(4): 376-380. [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.]
- [6] Lü Hongbo, Ren Xiaohui, Xu Min, et al. An argument on the genesis of potholes formed by differential weathering or wind deflation. *Geological Review*, 2008, 54(2): 192-198. [吕洪波, 任晓辉, 许民, 等. 壶穴差异风化或风蚀作用成因质疑. *地质论评*, 2008, 54(2): 192-198.]
- [7] 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(13): 1429-1434. [崔之久, 李洪江, 南陵, 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.]
- [8] Grab S, Svensen H. Rock doughnut and pothole structures of the Clarens Fm. Sandstone in the Karoo Basin, South Africa: Possible links to Lower Jurassic fluid seepage. *Geomorphology*, 2011, 131(1): 14-27.
- [9] Zen E, Prestegard K L. Possible hydraulic significance of two kinds of potholes: Examples from the paleo-Potomac River. *Geology*, 1994, 22(1): 47-50.
- [10] Wang Wei, Xu Liubing, Wu Zheng, et al. Shape and spatial distribution features of marine potholes on the coast of Shenzhen, China. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(3): 320-330. [王为, 许刘兵, 吴正, 等. 深圳海岸壶穴的形态及空间分布特征. *地理学报*, 2010, 65(3): 320-330.]
- [11] 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. [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.]
- [12] 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. [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.]
- [13] Springer G S, Tooth S, Wohl E E. Dynamics of pothole growth as defined by field data and geometrical description. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110(F4): 1-10.
- [14] Wu Chen, Xu Quanhong, Zhao Yanxia, et al. A study on multi-original potholes in north China mountain regions: A discussion on "glacial potholes" and other "glacial landforms" in North China mountain regions. *Geological Review*, 2012, 58(2): 319-328. [吴忱, 徐全洪, 赵艳霞, 等. 华北山地多成因壶穴初步研究: 对华北山地“冰臼”等“冰川地貌”的讨论. *地质论评*, 2012, 58(2): 319-328.]
- [15] Li Po, He Wei, Qian Zhi, et al. Shuanghe Cave Geopark Research. Guiyang: Guizhou People's Publishing House, 2008: 58-101. [李坡, 贺卫, 钱治, 等. 双河洞地质公园研究. 贵阳: 贵州人民出版社, 2008: 58-101.]
- [16] Cheng Guiming, Qi Hongyu, Pan Wei. *Matlab (6.X) for Mathematical Statistics*. Beijing: Science Press, 2002: 424. [陈桂明, 戚红雨, 潘伟. *MATLAB 数理统计(6.X)*. 北京: 科学出版社, 2002: 242.]
- [17] Alexander H S. Pothole erosion. *Journal of Geology*, 1932, 40(4): 305-337.
- [18] Whipple K X, Hancock G S, Anderson R S. River incision into bedrock: Mechanics and relative efficacy of plucking, abrasion, and cavitation. *Geological Society of America Bulletin*, 2000, 112(3): 490-503.
- [19] He Jingyu, Meng Xianghua. *Sedimentary Rock and Sedimentary Facies Model and Its Construction*. Beijing: Geological Publishing House, 1987: 41. [何镜宇, 孟祥化. *沉积岩和沉积相模式及建造*. 北京: 地质出版社, 1987: 41.]
- [20] Liu Xiaojiao, Xu Juan, Zhang Bin, et al. Morphological comparison and cause of river potholes in Sichuan hilly area. *Journal of Mountain Science*, 2013, 31(6): 723-730. [刘晓娟, 徐娟, 张斌, 等. 川中丘陵区河成壶穴的形态对比及成因. *山地学报*, 2013, 31(6): 723-730.]

The evolution of the cavernous potholes in Yinhe Cave, Suiyang county, Guizhou province

CAO Mingda^{1,2}, ZHOU Zhongfa^{1,2}, ZHANG Jie^{1,2}, YIN Chao^{1,2},
PAN Yanxi^{1,2}, YAN Lihui^{1,3}, CHEN Quan^{1,2}

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

2. State Key Laboratory Incubation Base for Karst Mountain Ecology Environment of Guizhou Province,

Guiyang 550001, China; 3. State Engineering Technology Center of Karst Rock

Desertification Rehabilitation, Guiyang 550001, China)

Abstract: This paper measures and conducts a statistical quantitative analysis of 49 potholes on the subterranean river bedrock of Yinhe Cave, a forming cave in Loushanguan Formation of Middle- Upper Cambrian Series, Guizhou province. After a description on morphological characteristics and spatial distribution, the paper discusses the evolutionary process and influencing factors of the formation. It is concluded that the potholes in the Yinhe River are mostly extremely shallow upside-down omega and wok shaped, and are at a relatively early stage of formation; the major axis and minor axis of the potholes are correlated to some extent, but the average diameter and depth are poorly correlated, indicating that the potholes tend to enlarge the diameter during the floor period and deepen the depth of corrosion during the drought period, as one of the riverbed downcutting forms of subterranean rivers; the potholes of Yinhe Cave develop in three stages: saucer shaped stage, upside-down omega shaped stage, and wok shaped stage, under the influence of such factors as hydrodynamic conditions, tectonic conditions, bed load, bed rock properties and corrosion; cavernous potholes are formed by the erosion and corrosion of running water, instead of glacier, which are essentially different from moulins in formation.

Keywords: Yinhe Cave; Suiyang; evolutionary process; quantitative analysis; cavernous potholes; Guizhou