

刘宏,郑明存,段洪伍,等.北京石花洞结构特征及发育演化过程研究[J].中国岩溶,2015,34(1):27—34.

DOI:10.11932/karst20150104

北京石花洞结构特征及发育演化过程研究

刘宏¹,郑明存²,段洪伍²,陈海舰²,王芳^{3,4},蔡炳贵³

(1. 云南大学资源环境与地球科学学院, 云南 昆明 650091; 2. 北京市石花洞风景名胜区管理处, 北京 102416;

3. 福建师范大学地理科学学院, 福建 福州 350007; 4. 国家地质实验测试中心, 北京 100037)

摘要:北京石花洞是中国北方已探明洞穴中次生碳酸盐沉积规模最大、种类最丰富的洞穴;石花洞的景观美学价值和科学价值,在我国北方岩溶洞穴中占有重要地位。2013年7月,为了获取石花洞发育规模、空间结构等基本数据,采用国际通用洞穴测量方法,运用激光测距仪、罗盘和倾角仪,辅以 Onstation 洞穴绘图软件和 ArcMap10 软件对石花洞洞穴开展了全面的调查和测绘。结果显示:(1) 石花洞洞穴系统整体呈北西西—南东东向展布,长度为 5 639 m,洞底投影面积为 37 096 m²,洞底高差为 172 m,洞内最高点海拔约为 265 m,最低点海拔约为 93 m。洞穴系统的发育演化主要受地层产状与北东向和北西向两组断层控制;(2) 石花洞洞穴系统分为五层,自上而下,各层洞道平均海拔依次为 249 m, 211 m, 154 m, 111 m 和 95 m;(3) 最底第五层季节性地下河洞道长 1 638 m,自西北向东南方向贯穿整个洞穴系统,依干湿季水文条件的差别,地下水以季节性涨落为主要特征,有多段有水通道;地下河道下游末端为叉状河道,崩塌明显,洞壁上无明显流纹发育;(4) 综合石花洞地下河走向和流向、洞穴发育控制因素和区域地层产状特征、石花洞与周边洞穴的空间位置关系,推测孔水洞是石花洞洪水期的排泄口。

关键词:石花洞;地下河;洞穴分层;洞穴发育

中图分类号:P931.5 **文献标识码:**A **文章编号:**1001—4810(2015)01—0027—08

0 引言

石花洞是中国北方已探明洞穴中次生碳酸盐沉积规模最大、沉积种类最丰富的洞穴;作为北京房山世界地质公园的重要组成部分,石花洞的旅游开发已有二十余年,吸引了大量的国内外游客,被国内外洞穴研究专家誉为紫禁城外的地下宫殿。

石花洞的科学研究在中国全球气候变化研究中起到重要的作用。1997年,刘东生等在石花洞首次发现具有年层的石笋^[1]。石花洞石笋纹层具有中国北方型石笋纹层的典型特征,即双重光性显微沉积旋回^[2],谭明等利用北京器测气象资料进行校准,发现石花洞一支石笋的厚度变化与夏季5—8月的温度具

有显著相关,从而重建了北京地区2 650年来5—8月的温度^[3-4]。围绕石笋古气候研究,学者们对石花洞石笋和洞穴滴水现代沉积过程做了大量的观测与研究^[5-12]。石花洞独具特色的洞穴结构和次生碳酸盐沉积不仅是洞穴科学和全球变化研究的重要材料,而且是区域地质和中国北方喀斯特水文地质研究不可多得的研究对象,例如,石花洞的多层洞穴结构及其与区域地质构造的关系^[13-15],石花洞石笋的形成机制^[16]等。有关石花洞洞穴分层问题,目前尚未形成统一的认识,王秉钧等认为分成7层^[13],吕金波将之分成8层^[15],但是,这些说法都缺少石花洞测量证据。由于还未开展过石花洞系统的洞穴调查工作,缺少完整的洞穴平面图和剖面图等基本资料,人们对石

基金项目:国家自然科学基金“中国北方石笋记录的高分辨率全新世气候变化研究(编号:41272197)”、“喀斯特包气带渗透过程及其水文地质含义研究(编号:41371040)”项目共同资助

第一作者简介:刘宏(1963—),男,副研究员,主要从事喀斯特水文地质与洞穴研究。E-mail:hongliu@ynu.edu.cn。

通讯作者:蔡炳贵,男,副研究员,主要从事岩溶洞穴沉积与全球变化研究。E-mail:bingguicai@qq.com。

收稿日期:2014—04—17

花洞最底部的地下河洞道也知之甚少。

基于上述原因,我们对石花洞开展了系统的洞穴调查和测绘,获得了第一手洞穴基础数据,对石花洞的结构、地下河洞道的基本地理要素及其与周边岩溶洞穴的关系等问题进行了探讨,探究成果将为石花洞未来的旅游规划、科普教育和科学研究提供基本参考。

1 石花洞概况

石花洞 (N39°47', E115°56') 位于北京房山区河北镇南车营村,距北京城约 50 km(图 1),大石河自西北经佛子庄、河北庄、磁家务向东蜿蜒绕过本区,石花洞地处大石河南岸,区内岩溶洞穴和岩溶泉众多,西有银狐洞地下河,北有大石河佛子庄河段的消溢洞、黑龙关、河南庄岩溶泉,东有孔水洞岩溶泉出露(图 2)。

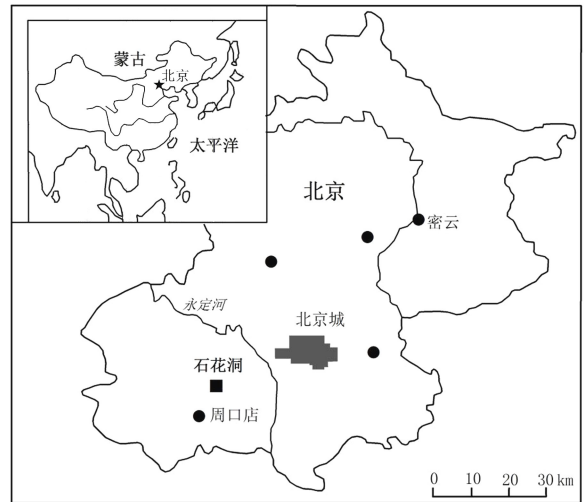


图 1 北京石花洞地理位置图

Fig. 1 Sketch map showing location of the Shihua Cave in Beijing (after Hou et al. , 2003)

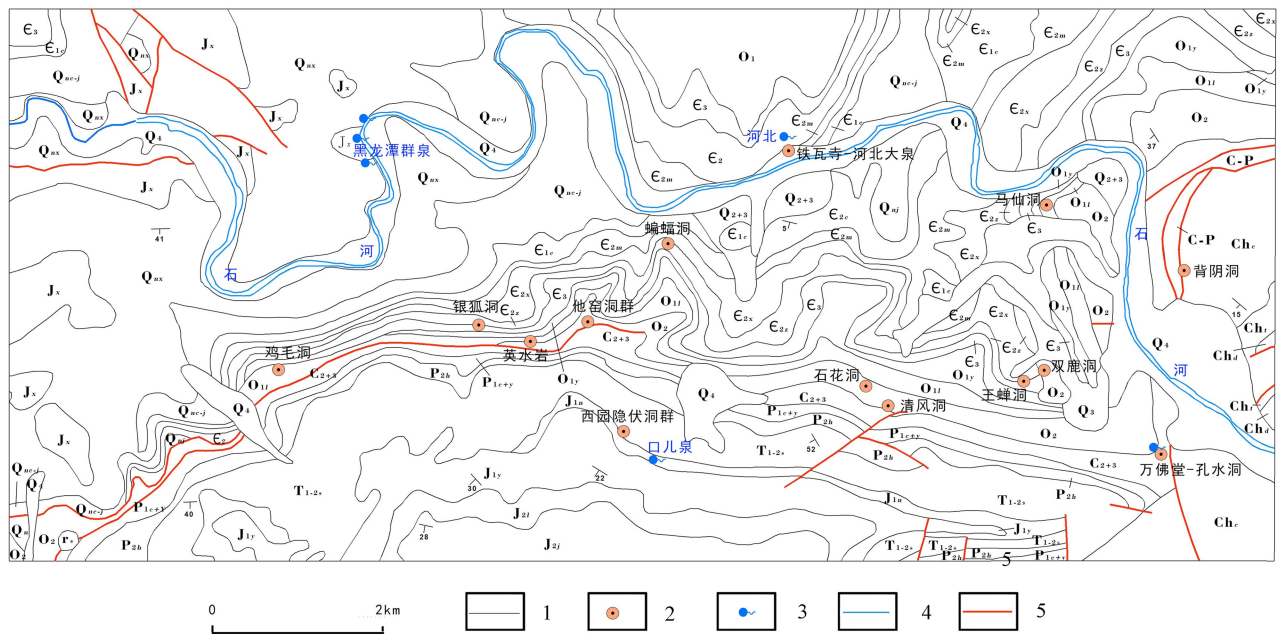


图 2 北京石花洞地区地质图与洞穴分布图

Fig. 2 Geology and cave distribution in the Shihua Cave area

Q₄—第四系全新统 Q₃—第四系更新统 J_{2j}—中侏罗九龙山组 J_{2l}—中侏罗龙门组 J_{1y}—下侏罗窑坡组 J_{1n}—下侏罗南大岭组 T_{1-2s}—下—中三叠系 P_{2h}—上二叠红庙组 P_{1c+y}—下二叠山西组 C₂₊₃—上—中石炭组 C—P—石炭—二叠系 O₂—中奥陶 O_{1l}—下奥陶亮甲山组 O_{1y}—下奥陶冶里组 E₃—上寒武 E_{2z}—中寒武张夏组 E_{2x}—中寒武徐庄组 E_{2m}—中寒武毛庄组 E_{1c}—下寒武昌平组 Q_n—青白口系 Q_{nj}—青白口系景儿峪组 Q_{nc-j}—青白口系长龙山组 Q_{nx}—青白口系下马岭组 J_x—蓟县系 Chd—长城系大红峪组 Cht—长城系团山子组 Chc—长城系串岭沟组 γ₅—燕山期花岗岩 1—地层界线 2—洞穴入口位置 3—泉或泉群 4—河流 5—断层

区域地质上,石花洞位于房山花岗岩体的北侧,地质上属于房山穹隆边缘向形带凤凰山向斜北翼。石花洞发育地层为奥陶系马家沟组灰岩,该组地层上部为浅灰白色的白云质灰岩,下部为青灰色纯灰岩,

有白云岩夹层,基本不含硅质团块,厚 200~300 m。地层走向近东西,倾向南,倾角 30°左右^[14]。石花洞区域发育石炭系、二叠系、侏罗—白垩系多层煤系地层,因此石花洞上覆表层或亚表层有煤层侵入,但分

布不均匀^①。

该地区属东亚季风气候,据 1951—2000 年仪器记录(国家气象局气候中心),年均温为 12℃,多年平均降雨量为 616 mm,降雨主要集中在夏季(6—8 月),占全年降水量的 70% 以上。现洞内温度介于 13~17℃,略高于大气年均温^[10]。

2 研究方法

2013 年 6—7 月,对石花洞所有洞道,包括目前尚未探测但人可进入的洞段进行探测制图,洞穴测绘工作采用国际通用洞穴测量方法,按照英国洞穴研究学会 5C 精度等级标准进行,运用激光测距仪、罗盘和倾角仪,辅助以 Onstation 洞穴测量软件和 Arc-Map10 软件,成果图包含洞穴三相图(洞穴平面、纵剖面 and 横断面)。

为了弄清石花洞地下河洞道各水潭之间,及其与周围地下水系之间可能存在的关联,分别于石花洞地下河洞道的水潭,银狐洞地下河岩溶泉和泄水河段,

佛子庄黑龙关岩溶泉,半壁店井水,以及孔水洞岩溶泉采集水样,供氦、氧同位素分析。水样使用 8 mL 棕色玻璃瓶装满,密封保存,每个点采集两瓶,后置于实验室冰箱冷藏保存直至上机测试。氦同位素使用 MAT253 质谱仪与 TC—EA 联机测试,分析误差小于 1‰,氧同位素采用 MAT253 质谱仪与 GAS—Bench 联机,CO₂平衡法测试,分析误差小于 0.1‰,本文报道数据均相对于 V—SMOW 标准。

3 结果与讨论

本次洞穴调查与测绘,完成 402 个测点,包括旅游洞道中的重复路线,总测量长度为 5 963.3 m,水平长度为 5 770.6 m。根据测绘结果统计,石花洞目前探明的洞穴长度约为 5 639 m,投影长度为 5 448 m,总面积约为 3.7×10⁴ m²,洞内最高点高于洞口约 14 m,最低点低于洞口 158 m,高差约为 172 m,依洞口海拔 251 m 计算,洞内最高点海拔为 265 m,最低点海拔 93 m(表 1)。

表 1 石花洞洞穴系统基本参数统计表
Table 1 Statistics of parameters of the Shihua Cave system

	水平面积 /m ²	长度 /m	水平长度 /m	层内高差 /m	水平洞道相对于 洞口高差/m * *	水平洞道平均 海拔 * /m
第一层	2 133	487	462	24	—2	249
第二层	5 609	835	802	77	—40	211
第三层	5 779	1 098	1 046	52	—97	154
第四层	12 859	1 582	1 522	70	—140	111
第五层	10 716	1 638	1 616	28	—156	95
总计	37 096	5 639	5 448			

注: * 依洞口海拔 251 m 计算; * * 负值指低于洞口。

3.1 洞穴系统垂直分布特征与洞层划分

多年来,石花洞洞穴系统的层状结构一直受到学者们关注,因为洞穴发育与区域构造和水文系统演化密切相关。一般来说,洞穴水平层发育代表该地区的侵蚀基准面保持相对稳定的状态,当区域构造抬升,导致区域侵蚀基准面下降,形成下层洞道^[17—18]。因此,不同海拔高度的水平洞道,反映了多次构造抬升对石花洞发育演化的影响。

有关石花洞洞穴系统分层,1996 年,王秉钧等在《北京石花洞》一书中将石花洞分成 7 层,但是没有明

确给出 7 层洞道的划分方法和标准,也没有指出各层的分布高度^[13]。后来,吕金波等根据区域地质调查的永定河河流阶地记录,认为北京房山地区存在 8 级河流阶地,并认为这 8 级阶地与石花洞的洞穴系统发育对应,据此,将石花洞洞穴系统分成 8 层,并将之与华北地文期建立对应关系,但并没有给出石花洞各层的具体资料与参数^[15]。

关于洞穴水平发育层与阶地的对比,上世纪 80—90 年代曾开展过广泛地讨论^[19],尽管都与区域构造运动有关,但二者并不一定具有一一对应关系,

①煤炭部地质局主编,中国主要煤矿资源,1983.

特别是有堆积阶地发育的情况下。因此,依据阶地级数推测洞穴发育层数具有较大不确定性。

从洞穴纵剖面图看(图 3),石花洞可以划分为五层,也可以划分为六层。本研究依据洞穴发育特征,将石花洞洞穴系统划分为五层,自上而下顺序编号(表 1,图 3)。第一至第五层层内高差分别为 24 m、

77 m、52 m、70 m 和 28 m。相对于洞口海拔高度,各层水平洞道的平均高度分别低于洞口 2 m、40 m、97 m、140 m 和 156 m,依照洞口海拔 251 m 计算,第一至第五层水平洞道平均海拔高度分别为 249 m、211 m、154 m、111 m、95 m。

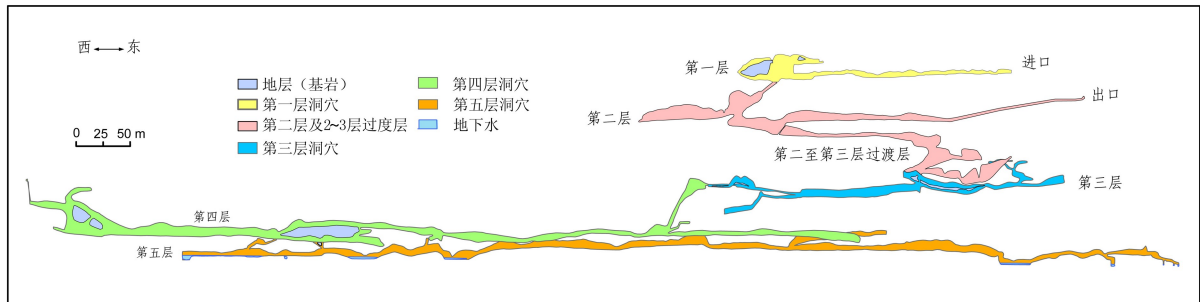


图 3 石花洞洞穴系统剖面图

Fig. 3 Cross section of the Shihua Cave system

除了第二层至第三层间的过渡层外,其他几层洞道的分层特征非常清晰。这里,之所以将第二层与第三层的洞道作为过渡层归入第二层,主要基于以下几点考量:

(1)过渡层中水平延伸的洞道长度仅 100 余米,不及洞穴系统水平延伸的十分之一,相对于与之相邻的第二层和第三层,也不过三分之一;

(2)过渡层总体上呈向下倾斜延伸的趋势,呈现出过渡性质。从洞穴发育演化上看,其形成与第二层的发育有关。在第二层发育的中后期,经历了构造运动缓慢抬升过程,地下水在第二层中段出现新的落水点[图 3 中第二层后半段(东段)与过渡层连接处的最低点],之后,地下水从过渡层流过,原先的下游洞道(第二层东半段)逐渐脱离地下水面,而第二层上半段

(西段)表现为倾斜洞穴。因此,总体上第二层与过渡层在发育上具有一定的连续性,不宜将它们划分为二层。

第五层的地下河洞道,从理论上一般可细分为两层,即地下河层与季节性河道。但从考察情况看,石花洞地下河洞道明暗相间出现,明水段由各种不同尺度的水塘呈串珠状出露,其水位已接近地下水位,它们之间并不是由管道,而是由一些溶蚀裂隙连接。雨季时,地下水位上升,原来的旱洞成为季节性水道。因此,二者不宜细分为两层。

3.2 洞穴系统平面分布特征及其发育与演化历史

平面上,石花洞洞穴系统总体走向为近东西向,分布于东西长约 1 500 m,南北宽约 480 m 的区域内(图 4)。

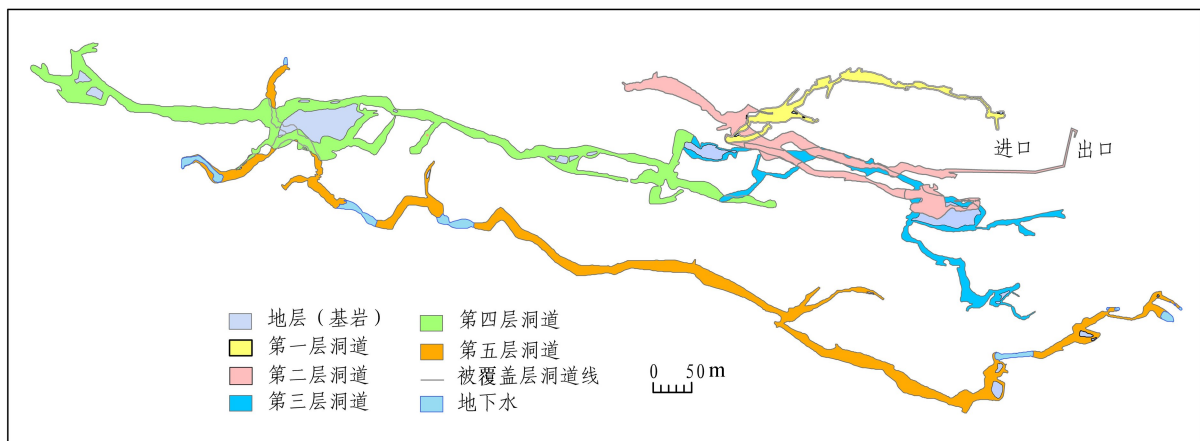


图 4 石花洞洞穴系统平面图

Fig. 4 Plane map of the Shihua Cave system

自北往南,洞穴走向从第一层的近东西向逐渐转变为北西西—南东东展布,不同高程的洞道在平面上局部叠加。洞体多呈廊道状,局部呈厅堂状,在上下洞道交汇处形成大厅,如第二层的大厅和第四层通往第五层的大厅。

不同海拔高度的洞道分布很有规律,最早期发育的第一层基本上呈东西向延伸,位于洞穴系统的东北面,二至五层逐步向西北方向过渡,二至三层位于第一层的南部,底部的四至五层呈西北—东南走向贯穿于洞穴系统的最南面区域。

石花洞的发育演化明显受奥陶纪马家沟组碳酸盐岩地层分布和构造特征的影响。石花洞发育于凤凰山向斜北翼奥陶纪马家沟组碳酸盐岩地层中,地层总体走向近东西,在石花洞入口西部逐渐变为北西西—南东东,倾向南或南西向,倾角约 30° 。清风洞附近呈北东—南西向、北西—南东向的断裂发育为石花洞系统的发育提供了良好条件(图2)。首先,断裂构造使马家沟组碳酸盐岩地层发生顺层错动,为地下水的流动与洞穴发育创造了条件^[17];其次,在断裂过程中,也产生了多组北东向与北西向张扭性断裂,对洞穴的发育演化起到控制作用。石花洞上部洞层发育于北部偏东区域,下层洞穴逐步向西南方向过渡(图4),这种上(早)北、下(晚)南的空间分布格局,表明其发育与演化受到基岩地层产状的影响,而洞穴系统中,北东向和北西向洞道的存在,说明北东向与北西向两组断层在洞道发育中起到调控的作用。

石花洞洞穴系统中五层不同海拔高度的近水平洞道表明,洞穴发育经历过5次较长时间的侵蚀基准面稳定期(构造稳定期)和4次显著的抬升过程。这4次构造抬升幅度和过程不尽相同,自上而下(从老到新)分别为38 m、57 m、42 m和17 m。最后一次抬升的幅度最小。第二次构造抬升的幅度最大而且过程复杂,根据洞道发育特征大致可分成两个阶段,第一阶段相对缓慢,形成2—3层间过渡层中的近水平洞道(平缓向下倾斜),第二阶段抬升速度较快,形成陡峭洞道(图3)。

结合石花洞的平面和纵剖面图(图3、图4),可以清晰地识别出第三层发育时期地下水的流动方向与其余的四层有明显的变化。第三层发育时地下水流动方向是自东流向西的,与目前的水流方向,不论是地下水还是地表河流方向相反。从图4平面分布情况看,至少存在两个地下水补给点。从它们的位置和

方向上判断,应该与洞穴东部季节性溪沟中发育的几个落水洞有关系。

由于洞穴发育与区域构造活动关系紧密而复杂,构造活动必然影响洞穴的发育与演化,但是,并不是每次构造活动都能从洞穴中找到证据,利用洞穴结构反演该地区的构造演化历史,还需要对整个流域范围内所有洞穴的系统调查与研究,以及深入的河流阶地调查研究。本文仅基于石花洞洞穴系统的结构对石花洞的发育演化做一些初步探讨,有关本地区的新生代构造演化的问题有待进一步的深入工作和探讨。

3.3 地下河洞道基本特征及其与周边洞穴和岩溶泉的空间关系

石花洞最底层(第五层)的地下河洞道全长1 638 m,水平长度1 616 m,走向北西—南东,西北高,东南低,洞道宽大,呈廊道状。最西段为一水潭,地下水经过虹吸管道在此处进入第五层洞穴(图3和4)。野外调查期间(2013年6月30日—7月10日)正值北京地区雨季开始,出水口形成一个水潭,水位有不断上涨的迹象。第五层为季节性地下河道,旱季时多为旱道,河道见有砾石、粗砂堆积,局部剖面可见层理发育,在河道较宽的地段,见有大量细沙—粉砂覆盖在砾石层之上,呈河漫滩沉积特征。地下河有三段相对低洼河道,整个洞道充满水,自西往东,可称之为第一水潭、第二水潭和第三水潭,水体呈蓝色,清澈见底,无扰动。

地下河道下游末端,为北东向叉状地下河道,末端均为水潭,通过虹吸管道向下游伸延(图4)。洞道因受地下水位季节性涨落的影响,崩塌作用明显,崩塌物于原地堆积,说明地下河水动力微弱。

整个地下河洞道次生碳酸盐沉积少见,仅在一些悬空的小支洞和较高的河漫滩上,见有少量石笋和石钟乳沉积,由于河漫滩为活动沙滩,生长于其上的石笋自然倒伏现象明显。有些石笋长在自然倒伏的石笋之上。

北京石花洞周边分布有众多的岩溶洞穴和岩溶泉,是否存在一条地下暗河,连接这一地区最大的两个洞穴,石花洞和银狐洞,乃至下游的孔水洞?吕金波等^[15]已将其视为一个洞穴系统。从石花洞洞穴系统平面图与银狐洞和孔水洞投影平面图(图5)看,银狐洞和孔水洞落在石花洞测量洞道向西和向东延长线上,三者似乎可能存在连通性。

从石花洞地下河、银狐洞、半壁店地下水(机井

水)和黑龙关岩溶泉的氢氧同位素分析结果(图 6)来看,这些水样的氢氧同位素大致落在一条回归线上,说明它们的水源可能处于同一体系。石花洞地下河的结果与银狐洞较为相似,氧同位素稳定同位素相差约 0.1‰,氘同位素值则相差约 1‰,考虑到测试误差和银狐洞水样地下河为旅游洞道,可以认为这两个洞的地下水氢氧同位素特征大致相同,但是,石花洞和银狐洞的值与黑龙关岩溶泉以及半壁店机井水的结

果相差较大,特别是黑龙关岩溶泉的氢氧同位素值,较石花洞地下河水的值分别偏正了约 3.5‰ 和 0.7‰。由于黑龙关岩溶泉泉眼位于大石河河底,所取样品难免混合了开放体系的河水,这一差异的解释尚存较大的不确定性,其结果仅供参考。

从区域地质、水质和水动力方面看,石花洞和银狐洞以及下游的孔水洞连通存在很大不确定性。首先,从区域地质上看(图 2),石花洞与银狐洞之间地

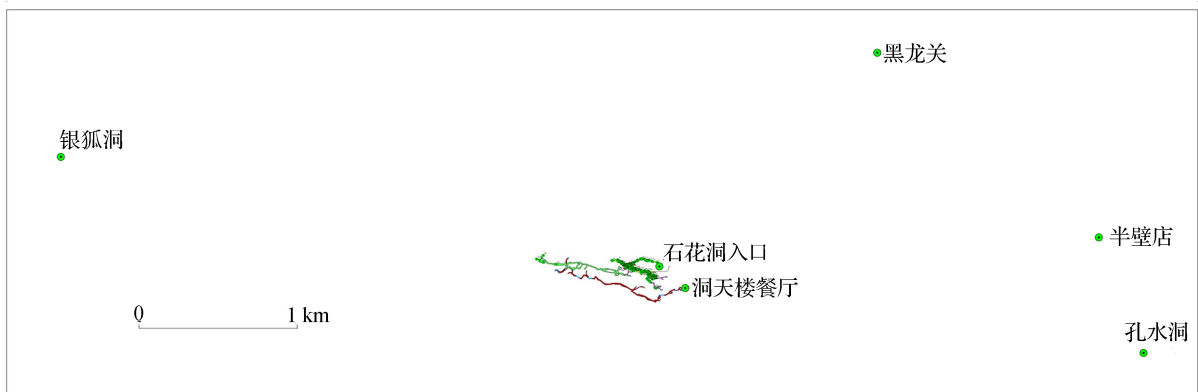


图 5 石花洞洞穴系统与周边岩溶泉空间位置平面简图

Fig. 5 Simplified map showing the cave system of Shihua Cave and surrounding karst springs

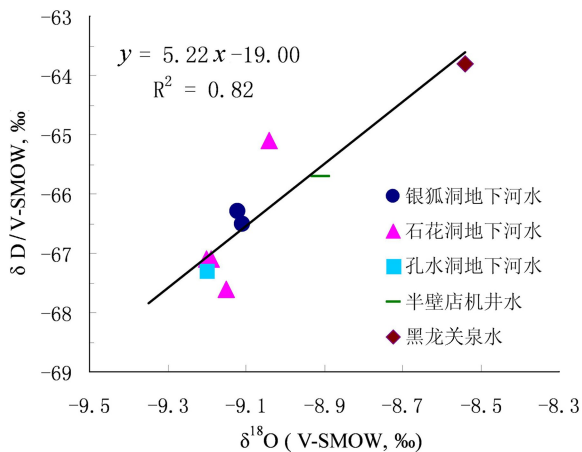


图 6 石花洞、银狐洞、黑龙关、半壁店和孔水洞地下水氢氧同位素关系图

Fig. 6 Relationship between δD & $\delta^{18}O$ of underground water in the study area

层分布复杂,奥陶纪马家沟组碳酸盐岩地层在银狐洞附近地层变薄,且并不呈东西向延伸。如果银狐洞地下河东西向发育与石花洞相通,必然需要“穿过”一些非碳酸盐岩或不纯的碳酸盐岩地层;其次,需要明确石花洞和银狐洞之间分布的第四纪沉积与洞穴系统发育的关系,是否有水源同时补给石花洞和银狐洞?

第三,需要系统的对银狐洞进行测量;第四,银狐洞地下河水经北京市地质矿产勘查开发局多次取样化验为含 Sr 元素的矿泉水^[15],而石花洞地下水并无 Sr 富集。如果两个洞穴相通,石花洞地下水也应该为含 Sr 的矿泉水或至少富含 Sr;第五,银狐洞与大石河的水平距离不远,从水动力学角度看,地下水放弃直接流到区域排泄基准的大石河,而是通过地下更加曲折的管道,从银狐洞经石花洞流动到孔水洞再进入大石河不是很合理。从目前的研究结果看,石花洞与孔水洞之间连通的可能性更大,后者是前者地下水洪水期间的排泄口,但仍需要深入研究加以确定。因此,石花洞与周边洞穴系统之间的关系,有待于今后开展进一步的区域洞穴、地质与水文地质调查研究。

4 结 论

综上所述,可以得到以下几点认识:

(1) 石花洞洞穴系统整体呈北西西—南东东展布,长度为 5 639.1 m,平面总面积为 37 096 m²,洞内最高点高于洞口 14 m,最低点低于洞口 158 m,高差为 172 m,洞内最高点海拔为 265 m,最低点海拔

93 m。洞体的发育演化主要受中下奥陶纪地层产状与北东向和北西向断层两组断层控制。

(2) 石花洞洞穴系统可以分成五层,自上而下,平均海拔依次约为 249 m, 211 m, 154 m, 111 m 和 95 m。洞穴发育经历过 5 次较长时间的侵蚀基准面稳定期(构造稳定期)和 4 次显著的垂直下切时段(构造抬升期)。4 次构造隆升中,第二次相对缓慢和复杂,形成 2~3 层间的过渡层,其余三次相对较快速。

(3) 第五层的地下河全长 1 638 m,自西北向东南方向贯穿整个洞穴系统,为季节性河道,有三段水道,次生碳酸盐沉积较少,地下河道下游末端,为叉状河道,受季节性水位涨落作用,崩塌明显,水动力微弱。

(4) 从区域地质、水质和水动力方面看,石花洞和银狐洞以及下游孔水洞连通存在很大不确定性。石花洞与周边洞穴系统之间的关系,有待于今后开展进一步的区域洞穴、地质与水文地质调查研究。从目前的研究结果看,石花洞与孔水洞之间连通的可能性更大,后者可能是前者地下水洪水期间的排泄口,但仍需要深入研究加以确定。

致谢:野外调查期间获得石花洞管理处众多员工的协助,河海大学水同位素实验室苏治国博士协助完成水同位素分析,匿名审稿人提出许多建设性修改意见,在此一并致谢!

参考文献

- [1] 刘东生, 谭明, 秦小光, 等. 洞穴碳酸盐层理在中国的首次发现及其对全球变化研究的意义[J]. 第四纪研究, 1997, 17(1): 41—51.
- [2] 谭明, 秦小光, 沈凛梅, 等. 中国洞穴碳酸盐双重光性显微旋回及其意义[J]. 科学通报, 1999, 44(6): 646—648.
- [3] Tan Ming, Liu Tungsheng, Hou Juzhi, et al. Cyclic rapid warming on centennial-scale revealed by a 2650-year stalagmite record of warm season temperature [J]. Geophysical Research Letters, 2003, 30(12): 1617. DOI: 10.1029/2003GL017352.
- [4] Tan Ming, Hou Juzhi, Liu Tungsheng. Sun-coupled climate connection between eastern Asia and northern Atlantic [J]. Geophysical Research Letters, 2004, 31(7). DOI: 10.1029/2003GL019085.
- [5] Ban Fengmei, Pan Genxing, Zhu Jian, et al. Temporal and spatial variations in the discharge and dissolved organic carbon of drip waters in Beijing Shihua Cave, China [J]. Hydrological Processes, 2008, 22 (18): 3749—3758. DOI: 10.1002/hyp.6979.
- [6] 班凤梅, 潘根兴, 蔡炳贵, 等. 北京石花洞滴水水中硫酸根浓度的时空变化及其意义[J]. 中国岩溶, 2009, 28(3): 243—248.
- [7] Tan Ming, Liu Tungsheng, Qin Xiaoguang, et al. Signification chrono-climatique de spéléothèmes laminés de Chine du Nord [J]. Karstologia, 1998, 32(2): 1—6.
- [8] Tan Ming, Baker Andy, Genty Dominique, et al. Applications of stalagmite laminae to paleoclimate reconstructions: Comparison with dendrochronology/climatology [J]. Quaternary Science Reviews, 2006, 25(17—18): 2103—2117.
- [9] 朱健, 班凤梅, 蔡炳贵, 等. 北京石花洞降水至滴水下渗时间示踪观测[J]. 第四纪研究, 2008, 28(3): 509—510.
- [10] Cai Binggui, Zhu Jian, Ban Fengmei, et al. Intra-annual variation of the calcite deposition rate of drip water in Shihua Cave, Beijing, China and its implications for palaeoclimatic reconstructions [J]. Boreas, 2011, 40(3): 525—535.
- [11] 贾蓉芬, 蔡炳贵, 班凤梅, 等. 北京石花洞石笋中有机质的赋存状态[J]. 地球化学, 2007, 32(6): 193—199.
- [12] 班凤梅, 蔡炳贵. 北京石花洞空气环境主要因子季节性变化特征研究[J]. 中国岩溶, 2011, 30(2): 132—137.
- [13] 王秉军, 李铁英, 苏宝敦. 北京石花洞[M]. 北京: 中国人事出版社, 1996: 1.
- [14] 吕金波. 北京石花洞的岩溶地质特征[J]. 中国区域地质, 1999, 18(4): 373—378.
- [15] 吕金波, 卢耀如, 郑桂森, 等. 北京西山岩溶洞系的形成及其与新构造运动的关系[J]. 地质通报, 2010, 29(4): 502—509.
- [16] 段武辉, 谭明, 喻学惠, 等. 北京石花洞“石花”的晶体结构、矿物组成及形态发育模拟分析[J]. 中国岩溶, 2008, 27(3): 201—208.
- [17] Philippe Audra. French Apls karsts: study methods and recent advances [C]// Philipp Hauselmann & Michel Monbaron. Cave genesis in the alpine belt: proceedings of the 1st workshop for alpine speleogenesis. Habkern (Switzerland), 2000: 7—28.
- [18] Palmer A N. Cave geology [M]. Ohio USA: Cave Books, 2007: 145.
- [19] 张永信. 广西喀斯特洞穴时代的探讨[M]//中国地理学会地貌专业委员会编. 喀斯特地貌与洞穴. 北京: 科学出版社, 1985: 117—122.

Structure and evolution of the Shihua Cave in Beijing

LIU Hong¹, ZHENG Ming-cun², DUAN Hong-wu², CHEN Hai-jian², WANG Fang^{3,4}, CAI Bing-gui³

(1. School of Resource Environment and Earth Science, Yunnan University, Kunming, Yunnan 650091, China; 2. Beijing

Shihua Dong scenic area management office, Beijing 102416, China;

3. College of Geographical Science, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350007, China;

4. National Research Center for Geoanalysis, Beijing 100037, China)

Abstract: Of the known karst caves in northern China, the Shihua Cave in Beijing has the greatest scale and most kinds of secondary carbonate sediments. It is one of the most important caves in northern China in terms of its landscape sightseeing and scientific values. To determine its size and structure, a complete investigation including survey was conducted in July 2013. This work followed international survey standards and used various instruments including Leica laser rangefinders and Sunnto compasses and clinometers, in conjunction with Onstation and ArcMap 10 software. The results show that the Shihua Cave extends from NWW to SEE along the strike of the Ordovician limestone, indicating that the cave development is primarily controlled by strata. NE and NW-striking faults have influenced cave development to a less extent. The cave has a total length of 5,639 m and a floor projection area of 37,096 m². In the vertical direction, the highest and lowest positions within the cave are 14 m above and 158 m below the entrance, respectively. The cave system consists of five levels of passages, of which the elevation is 249 m, 211 m, 154 m, 111 m and 95 m above sea level, respectively. Each level indicates a period of stable local base level, suggesting that this cave experienced five stages of development. The lowest level of it has a 1,638 m passage, which is characterized by seasonal water flow with three windows into a perennially inundated phreatic level. The seasonal underground river flows southeastward during the summer flood season. The downstream passage forks, one branch terminating in a sump pool while the other consists of chambers with a large amount of breakdown, implying the end of the underground river. The underground river may connect the Shihua Cave with Silver Fox cave to the northwest and the Kongshui Cave to the southeast. Exploration of nearby caves and tracer tests should be conducted to verify this connection in the future.

Key words: Shihua Cave; underground river; cave level; cave development

(编辑 黄晨晖)