

北京石花洞第四纪钟乳石剖面的年代学研究

吕金波¹ 赵树森² 李铁英¹ 汪训一³ 李红春⁴

(1. 北京市地质调查研究院, 北京 102206; 2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029;
3. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 广西 桂林 541004; 4. 美国南加州大学地质科学系, CA90089)

摘要:北京石花洞位于房山花岗岩体边缘向形带的东北扬起端,与北京猿人遗址南北相望。地层为 460 Ma 前形成的中奥陶统马家沟组石灰岩,洞穴大形态从 25 Ma 前的上新世开始形成,洞内钟乳石从 0.37 Ma 前的中更新世开始形成。在中国岩溶洞穴中,北京石花洞的层数最多,洞穴钟乳石种类齐全,裂隙渗透水沉积的石盾多、体积大,滴水沉积的石笋叠置关系明显,池水沉积的月奶石发育好,全新世石笋微层理发育清晰。该洞的大形态反映了北京西山新构造运动的期次,可以同华北地文期和永定河阶地对比,洞内钟乳石记录了中更新世以来北京西山古环境的变化,可以建立第四纪剖面,与周口店洞穴群碎屑沉积物剖面进行对比。钙板的铀系年龄为 334.99~366.74 ka,可定名钙板组。粗犷石笋的铀系年龄为 169~235 ka,粗犷石笋的电子自旋共振年龄为 130~518 ka,为中更新世沉积,可定名云水洞组。杆状石笋的铀系年龄为 14.9±2.1~100.3±11.1 ka,为晚更新世沉积,可定名石花洞组。在全新世石笋中,微层与微层之间存在厚约 1 μm 的条带状纹线,是划分微层层数的标志,具有微层理的石笋 ¹⁴C 年龄为 0.58~2.50 ka,AMS¹⁴C 年龄为 130±100~670±130 a,可定名守备支洞组。

关键词:第四纪钟乳石剖面;石笋微层理;石笋叠置关系;洞穴大形态;北京石花洞

中图分类号:P534.63,P597^{+.3} **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2007)06-0993-10

石花洞位于北京市房山区大石河南岸的南车营村,距北京市区约 50 km(图 1)。

石花洞周边地质剖面典型。洞穴大形态(层数)反映了北京西山的新构造运动期次。洞内钟乳石种类齐全,石盾多、大,首次发现更新世月奶石^[1]和全新世石笋微层理^[2]。石笋叠置关系明显,测年数据较多,为首次建立第四纪钟乳石剖面奠定了基础^[3]。钙板为中更新世沉积(可定名钙板组),粗犷石笋为中更新世沉积(可定名云水洞组),杆状石笋为晚更新世沉积(可定名石花洞组),微层理石笋为全新世沉积(可定名守备支洞组)。

1 区域地质背景

从区域上看,石花洞位于房山花岗岩体的北侧,发育在北岭向斜东北扬起端的奥陶系马家沟组顶部。地层南倾,走向近东西,倾角 30°左右(图 2)。

石花洞所在的沟谷北低南高,自溶洞区到南山顶为一条古生界—中生界地质剖面。依次发育奥陶系马家沟组,石炭系太原组,石炭—二叠系山西组,二叠系石盒子组,二叠—三

叠系双泉组,侏罗系南大岭组、窑坡组和龙门组。是一部地质教科书,石花洞就产生在剖面底部奥陶系马家沟组顶部。

马家沟组厚 51.70 m,以青灰色纹带灰岩为主,有白云岩夹层,基本不含硅质团块,岩性单一。岩石中含 Ca 较高,含 K、Na 值较低。其元素含量的变化与下伏冶里组明显不同,前者以石灰岩为主,后者以白云岩为主,加之覆盖地层为石炭系砂页岩,这就使得马家沟组与上下地层相比有极强的溶蚀能力,发育溶洞。马家沟组地层剖面如下:

上覆地层:石炭系太原组硬绿泥石红柱石蓝晶石片岩	
.....平行不整合.....	
5.黄白色中厚层条带状石灰岩	2.00 m
4.灰白色中厚层纹带状石灰岩与白云岩互层	7.96 m
3.薄层石灰岩与白云岩互层	15.96 m
2.灰白色中厚层白云质灰岩	10.34 m
1.灰色薄层状白云岩与石灰岩互层	15.44 m
—————整合—————	
下伏地层:奥陶系亮甲山组白云岩	

收稿日期:2007-04-15;改回日期:2007-10-09
基金项目:北京市科学技术委员会项目(855600400)与中国地质调查局地质大调查项目(20001300005031)共同资助。
作者简介:吕金波,男,1956 生,博士,教授级高级工程师,从事北京岩溶地质研究;E-mail:ljb5610@sohu.com。

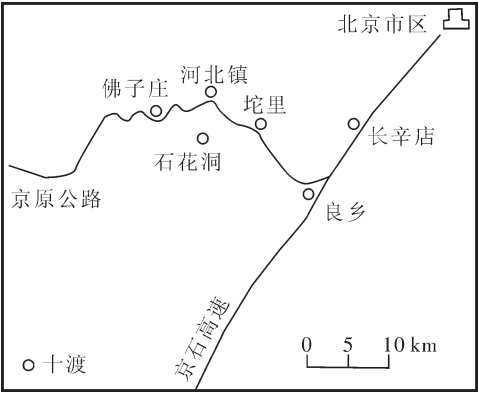


图 1 石花洞交通位置
Fig.1 Location map of the Shihua cave

2 洞穴溶蚀形态

形成石花洞的石灰岩层产状 $180^{\circ}\angle 30^{\circ}$ 左右,岩溶大形态的洞穴通道沿着地层走向延伸,其顶、底板的纵剖面坡降很小,1~4 层和 5~6 层洞穴横断面为锁孔形,应该为潜水带洞;4 层和 7 层以下洞穴横断面为锁孔形,应该为渗流带洞,地壳抬升速度加快(表 1)。

石花洞大形态可与华北地文期和永定河阶地进行区域对比(表 2)。华北地文期是指随着华北地台的上升,形成的一系列夷平面地貌形式。永定河为石花洞北部贯穿北京西山的唯一河流,从新近纪—全新世共发育 8 级阶地^[4]。

石花洞溶蚀大形态原分 7 层。1996 年 4 月 16 日吕金波、李铁英、姚留增、王秋来等对石花洞进行了全面探测,发现了地下悬河和大量新的冲积物—黄色中粗砂,认为石花洞共发育 8 层洞道(图 3)。

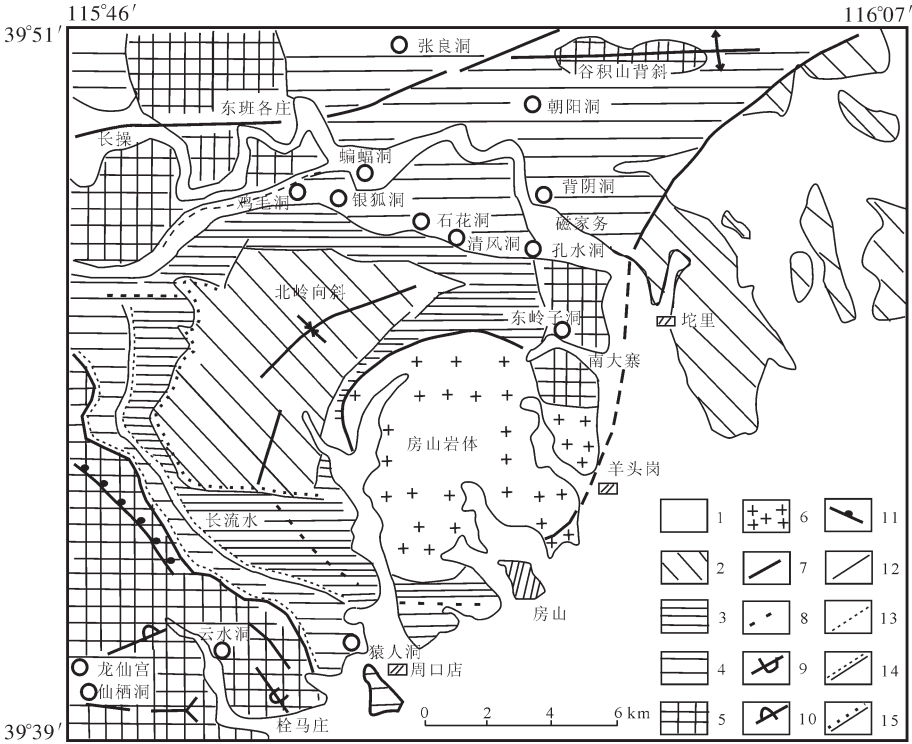


图 2 北京石花洞—周口店地区构造纲要图

1—新生代构造层;2—中生代构造层;3—晚古生代构造层(包括三叠系);4—早古生代构造层;5—中、新元古代构造层;
6—燕山期花岗岩闪长岩;7—背斜;8—向斜;9—倒转背斜(箭头指轴面倾向);10—倒转向斜;11—穹隆及穹状背斜;12—断层;
13—推测断层;14—平行不整合;15—角度不整合

Fig.2 Tectonic outline map from the Shihua cave to Zhokoudian, Beijing.

1—Cenozoic structural layer;2—Mesozoic structural layer;3—Upper Paleozoic structural layer (including the Triassic);
4—Lower Paleozoic structural layer;5—Meso- and Neoproterozoic structural layer;6—Yanshanian granodiorite;7—Anticline;8—Syncline;
9—Overturned anticline (the arrow points to the dip of the axial plane);10—Overturned syncline;11—Dome and domal anticline;
12—Fault;13—Inferred fault; 14—Disconformity; 15—Angular unconformity

表 1 石花洞溶蚀大形态 Table 1 Taball large forms of the Shihua cave					
层数	底板高程/m	洞体 长度/m	洞底 面积/m ²	容积/m ³	横断面 形态
1	264.20	78.00	800	3900	椭圆形
2	250.00	264.00	2380	13200	椭圆形
3	215.00~218.00	287.00	1753	14350	椭圆形
4	161.25~206.20	488.00	4127	24400	锁孔形
5	157.39	450.00	2200	22500	椭圆形
6	150.00	150.00	1200	9600	椭圆形
7	140.00	500.00	2500	15000	锁孔形
8	130.00				

注:表中数据由李铁英等测量。

石花洞内钟乳石沉积形态齐全,可分为4种基本类型,即非重力水沉积,重力水沉积,协同沉积和叠置沉积(表3)。前3类之间存在着密切的系统成因联系,叠置沉积是不同阶

段沉积的叠合。叠置沉积关系明显为建立钟乳石剖面奠定了基础。

3 第四纪钟乳石剖面的年代测试

1981年,北京市地质局杨贞福等^①对石花洞进行了岩溶地质初步调查,李铁英等^②测量了洞内底板 1:200 地形图。1984年,卢耀如^④对首次发现的月奶石进行了¹⁴C 测年,1985—1995 年赵树森对洞内石笋进行了铀系测年,刑如莲、原思训等进行了电子自旋共振 ESR 测年。1996 年以来,李铁英^③、赵树森^⑤、李红春^⑥、谭明^⑦、刘东生^⑧、吕金波^⑨、秦小光^⑦等利用吕金波等选取的南北大走廊两端石笋(9512 和 9514 号样)进行了全新世微层理研究。

1999 年吕金波等^⑨对石花洞的岩溶地质特征进行了总结。初步提出:钙华板和粗犷石笋为中更新世沉积,杆状石笋为晚更新世沉积,月奶石为新仙女木事件(Younger Dryas Event)在岩溶洞穴中的产物,具有碳酸钙微层理的浅黄色半透明石笋为全新世沉积。

表 2 石花洞层与华北地文期和永定河阶地之间的对比 Table 2 Correlation of strata of the Shihua cave in Beijing with strata of the North China physiographic stage and terraces of the Yongding River									
石花洞层	华 北 地文期	永 定 河 阶 地							时代
		级数	官厅	幽州	向阳口	付家台	王平村	丁家滩	
8	近代	I				堆积	堆积	堆积	Q ₄
7	板桥	II			堆积		堆积		Q ₃ ²
6	马兰	III				基座		基座	Q ₃ ¹
5	清河	IV	基座		基座	基座	堆积		Q ₂
4	三门	V	基座	基座	嵌入	基座		基座	Q ₁ ²
3	汾河	VI		基座	嵌入	基座	基座		Q ₁ ¹
2		VII		嵌入			侵蚀	侵蚀	N ₂ ²
1	唐县期	VIII				基座			N ₂ ¹

表 3 石花洞内的钟乳石种类									
Table 3 Types of speleothems in the Shihua cave									
非重力水沉积	毛细渗透	石毛 石针 石花 石枝 枝状石笋 石瘤							
	裂隙渗透	石盾 石条带							
	淋滤渗透	石皮壳							
	雾滴飞溅水沉积	石珊瑚 石葡萄							
重力水沉积	滴水沉积	鹅管	石钟乳	石笋	石柱	笋乳倒接			
		天流石		格状石钟乳		石带	石旗	石幔	
	流水沉积	壁流石		石幕		石瀑布	石鳞		
		底流石		层状钙华（钙华板）				石丘	
			钙膜	边石	边石坝	石梯田	水下石葡萄	晶花	
	池水沉积		月奶石	月奶石—石莲	穴珠				
协同沉积	滴水-飞溅水-流水	大型石柱 棕榈状石笋							
	裂隙渗透水-流水	穴帐（圆顶蚊帐）							
叠置沉积	粗细石笋 多管石盾 串珠石笋 石烛台								

①杨贞福,等.北京市石花洞(潜真洞)岩溶地质勘察报告,1984.
②李铁英,吕金波,张蔷,等.北京石花洞地区洞穴资源开发与环境保护研究,1998.
③赵树森,等.“北京石花洞地区洞穴资源开发与环境保护研究”报告中的“北京石花洞洞穴碳酸钙年代学与古气候环境研究”章节,1998.

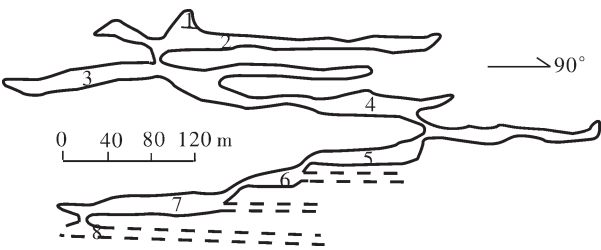


图 3 石花洞纵剖面示意图
1~7—代表洞穴层号
Fig.3 Schematic longitudinal section of the Shihua cave
1-7 represent layer Nos. of the cave



图 4 中更新世粗犷石笋(擎天鸳鸯柱)
Fig.4 Wide stalagmite deposited by dripping water
in the middle Pleistocene

滴水沉积成因叠置关系最明显的景观为龙宫中高 12.60 m 的擎天鸳鸯柱(图 4),粗犷的石柱为中更新世周口店期沉积物,细杆状石笋(如金箍棒)为晚更新世马兰期沉积物,具有微层理的黄色半透明石笋为全新世沉积物。石笋叠置关系明显这一地质特征有着重要的科学意义,为在岩溶洞穴中首次建立钟乳石剖面奠定了基础。

根据 1995 年统计,已经积累了石花洞钟乳石沉积年代数据 44 个,包括 U 系 18 个,ESR 年龄 9 个和 ¹⁴C 年龄 17 个。首次进行了洞穴碳酸钙的 ²¹⁰Pb 及加速器质谱法(AMS) ¹⁴C 测年。

1995 年 11—12 月,北京市科学技术委员会 855600400 号《北京石花洞地区洞穴资源开发与环境保护》^[9]项目对石花洞 4 层的 3 个石笋(9510、9512 和 9514 号样)进行年代系统测定。共完成 ²¹⁰Pb 测量 8 个,¹⁴C 年代 13 个(包括 AMS ¹⁴C 2 个),²³⁰Th/²³⁴U 年代 13 个(表 4)。

3.1 中更新世最老的钙板沉积(钙板组)

赵树森等^[9]1981 年利用铀系测量了石花洞 2 层钙板年

龄,样品为钙板流石,分别测得编号 8117 的钙板年龄为 334.99 ka,编号 8118 的钙板年龄为 366.74 ka。

根据国际地层表规定,126~781 ka 为更新世中期,钙板年龄均在此范围。

3.2 中更新世粗犷石笋沉积(云水洞组)

该石笋以云水洞的“塔倒三截”为代表,1981 年测得 6 个

表 4 石花洞内的钟乳石样品
Table 4 Samples of speleothems in the Shihua cave

序号	样品号	样品名称	采样位置与样品特征	样品特征
9	9510 (S310)	石笋	4 层水帘洞对面,位于崩塌岩块上覆钙华之上。 石笋长 116cm,直径为 8~11cm	标本剖面有照片,铀系年代测定 6 组
10	9512 (S312) 谭明、刘东生、秦小光等编为 TS9501	石笋	4 层守备支洞路边。位于钙华之上沉积。石笋长约 21cm,直径为 9~11cm,顶部有未饱和水	标本剖面有照片。进行年代测定(铅和碳) 14 组;氧和碳稳定同位素测定 121 组。纹层结构研究
11	9514 (S314) 谭明、刘东生、秦小光等编为 TS9502	石笋	4 层大戏台对面,龟石的尾部,崩塌岩块上覆钙华的上部沉积。石笋长约 35cm,直径为 7~9cm,根部斜断	标本剖面有照片。铀系年代测定 7 组
12	9515 (S315)	鹅管	为麦杆状钟乳石沉积。样品采于石花洞出口长廊中部,顶部垂挂下,长 6~9cm,直径约为 0.6cm	铅同位素

①李铁英,吕金波,张蔷,等.北京石花洞地区洞穴资源开发与环境保护研究,1998。
②赵树森,等.“北京石花洞地区洞穴资源开发与环境保护研究”报告中的“北京石花洞洞穴碳酸钙年代学与古气候环境研究”章节,1998。

铀系数据,郭映忠测得石笋边 290 ka^[9],张寿越距心 67cm 测年 300ka^[9],赵树森从心到边测年依次为 330 ka^[9]、319.49 ka、298.92 ka、287.50 ka^[9],故可定名为云水洞组。

中更新统粗犷石笋沉积(图 4),包括石花洞的蟠龙玉柱、擎天鸳鸯柱和迎门玉柱。其中擎天鸳鸯柱旁边有倒塌的粗犷石笋,靠近顶部中心的铀系年龄为 169 ka,断柱中间中心的铀系年龄为 235 ka,相当于周口店期。1981 年 1 月,赵树森等^[9]最早在 2 层水帘洞东侧坎上测量的石笋,编号 8116,铀系年龄为 160.46 ka。

1989 年邢如连^[9]等对石花洞西支洞内残断的石笋(石笋-I、石笋-II)进行了国内首次 ESR 测年与铀系测年对比研究,测得石笋-I 年龄值为 130 ka、179 ka、235 ka、石笋-II 年龄值为 245 ka、267 ka、316 ka、472 ka、518 ka^[10]。

根据国际地层表规定,126~781 ka 为更新世中期,上述年龄均在此范围。

3.3 晚更新世杆状石笋沉积(石花洞组)

该类石笋石花洞最多,测年资料和方法也最多,故可定名石花洞组。

样品号 9510 采于 4 层锁孔状断面南侧崩塌块钙华之上,石笋长 116 cm,直径 8~11 cm(图 5),为晚更新统杆状石笋沉积。通过 ²³⁰Th/²³⁴U 年代测定,获得年龄为 42.9±2.0~100.3±11.1 ka(表 5),相当于马兰期。图 9 中碗口粗,长 3.2 m 的石笋(金箍棒)也是这个时期的产物,碳酸钙沉积速率为 0.012~0.04 mm/a。

²³⁰Th/²³⁴U 法测年,决定 ²³⁰Th 半衰期 75.2 ka,其特效测年范围通常以 5 个半衰期计,所以 ²³⁰Th/²³⁴U 法测年范围是 350 ka 以内。

样品 9514 号石笋(图 6),谭明^[6]、刘东生^[1]、秦小光^[7]编为 TS9502,由表 6 看出,样品号 9514 石笋距顶部 9.5 cm 以下的年代,从根部至顶部年代距今为 98.8~14.9 ka。此石笋体积远小于样品号 9510,但沉积年代延续较长,约 90 ka 多年。与样品号 9510 对比,样品号 9514 在距今 98.8~78.5 ka,沉积约 9 cm,比样品号 9510 少。其他时间段的沉积量也比样品号



图 5 晚更新世杆状石笋(样品 9510,直径 8~11cm)
Fig.5 Rod-like stalagmite deposited by dripping water in the upper Pleistocene (sample 9510, diameter 8~11 cm)

9510 少。这反映洞内滴水作用的不均匀性。
根据国际地层表规定,11.5~126 ka 为更新世晚期,本区测年结果(表 5~6)均在此范围。
²³⁰Th/²³⁴U 年代及其地质意义。石花洞内崩塌岩块反映一定地质作用和古气候环境。在这些岩块上多为钙华沉积。两个石笋均采自钙华沉积之上。石笋的根部年代,反映洞内崩

表 5 石花洞样品号 9510 石笋 ²³⁰Th/²³⁴U 年代测定结果
Table 5 ²³⁰Th/²³⁴U dating of stalagmite sample No. 9510 from the Shihua cave

序号	样品号	样品名称	取样部位 (距顶)/cm	U/10 ⁻⁶	²³⁴ U/ ²³⁸ U	²³⁰ Th/ ²³⁴ U	²³⁰ Th/ ²³⁴ U 年代/ka
1	9510-2	石笋	0	0.086±0.002	2.41±0.07	0.34±0.01	42.9±2.0
2	9510-4		30	0.147±0.003	1.59±0.04	0.38±0.01	50.4±2.7
3	9510-6		50	0.372±0.009	1.39±0.04	0.39±0.01	51.8±3.4
4	9510-8		70	0.212±0.005	1.63±0.04	0.46±0.01	64.6±3.6
5	9510-10		90	0.197±0.003	1.40±0.03	0.54±0.01	81.5±3.7
6	9510-12		110	0.100±0.003	1.54±0.05	0.63±0.04	100.3±11.1

注:样品由中国科学院地质研究所铀系实验室赵树森和美国南加州大学地质科学系李红春等共同测定,1995。



图 6 晚更新世石笋(样品号 9514 或 TS9502)
Fig.6 Stalagmite deposited by dripping water in the upper
Pleistocene (sample 9514 or TS9502)

塌后的年代。根据样品号 9510 和 9514 石笋根部年代分别为 100.3 ka 和 98.8 ka 的分析结果,可以推知,石花洞地区在距今 100 ka 多年以前(约 120 ka 左右)有一次古地震,造成洞

内基岩崩塌以及一些老的钟乳石沉积物倒塌。
由表 5 可见,样品号 9510 石笋从根部至顶部年代为距今 100.3~42.9 ka。可分为 3 个时间段,其中在距今 100.3~81.5 ka,沉积约 23 cm;距今 81.5~64.6 ka,沉积约 22 cm,沉积速率为 0.012 mm/a;在距今 51.8~42.9 ka 的 9 ka 中沉积约 42 cm,比上 2 个时间段沉积速率快。以样品号 9510 为代表的杆状石笋发育,说明石花洞距今 100~40 ka 钟乳石沉积较为发育。

3.4 全新统具有微层理石笋沉积(守备支洞组)

样品号 9512(或 TS9501)(图 7),是 1995 年 11 月 4 日傍晚吕金波等在南北大走廊南端(守备支洞)泥池中采得的,石笋长 21 cm,直径为 9~11 cm,顶部有未饱和水。石笋剖面中首次发现透光微层理,是世界上连续生长年代最长的微层理样品,李铁英^①、赵树森^②、李红春^③、刘东生^④、谭明^⑤、秦小光^⑥、吕金波^⑦等对其进行了详细的研究(图 8)。

该样品首次在美国南加州大学进行了 ²¹⁰Pb 方法测年,距

表 6 石花洞样品号 9510 石笋 ²³⁰Th/²³⁴U 年代测定结果
Table 6 ²³⁰Th/²³⁴U dating of stalagmite sample No. 9514 from the Shihua cave

序号	样品号	样品名称	取样部位 (距顶)cm	U/10 ⁻⁶	²³⁰ Th/ ²³⁴ U	²³⁰ Th/ ²³⁴ U	²³⁰ Th/ ²³⁴ U 年代/ka
8	9514-4	石笋	9.5	0.091±0.002	2.11±0.09	0.13±0.01	14.9±2.1
9	9514-5		13.3	0.156±0.004	1.85±0.05	0.37±0.005	47.5±2.4
10	9514-6		17.0	0.136±0.003	1.89±0.04	0.41±0.01	54.7±2.7
11	9514-7		21.5	0.119±0.005	1.84±0.07	0.47±0.01	65.5±4.0
12	9514-8		26.5	0.095±0.003	1.83±0.07	0.54±0.02	78.5±4.6
13	9514-9		34.0	0.021±0.002	3.18±0.33	0.65±0.04	98.8±11.0

注:样品由中国科学院地质研究所铀系实验室赵树森和美国南加州大学地质科学系李红春等共同测定,1995。

表 7 石花洞样品号 9512(或 TS9501)石笋 ¹⁴C 年代测定结果
Table 7 ¹⁴C dating of stalagmite sample No. 9512(or TS9501) from the Shihua cave

序号	样分析号	取样深度 (距石笋顶) /mm	It/cpm · g ⁻¹	lnIt/cpm · g ⁻¹	常规法校正年龄/a	AMS 法 ¹⁴ C 年龄/a	常规法 ¹⁴ C 年龄/a
1	9512A ₁	4				130±100	
2	9512A ₂	23				670±130	
3	9512A- ₀₉	24	7.11±0.03	1.96±0.008	630±35		580
4	9512A- ₁₀	32	8.34±0.03	2.12±0.007	800±115		770
5	9512A-11	40	6.62±0.05	1.89±0.015	1210±40		960
6	9512A-12	48	7.35±0.03	1.99±0.008	1330±90		1160
7	9512A-13	56	7.68±0.04	2.04±0.012	1460±65		1350
8	9512A-14	64	6.29±0.05	1.84±0.014	1620±55		1540
9	9512A-15	72	7.28±0.04	1.99±0.011	1890±75		1735
10	9512A-16	80	7.18±0.03	1.97±0.008	2000±80		1930
11	9512A-17	88	6.40±0.05	1.86±0.014	2200±70		2120
12	9512A-18	96	5.55±0.05	1.71±0.017	2625±20		2310
13	9512A-19	104	6.74±0.05	1.91±0.014	2510±70		2500

注:AMS 法 ¹⁴C 由北京大学考古系鲁向阳等测定,常规法 ¹⁴C 由中国地震局地质研究所尹金辉等测定,1995。

①李铁英,吕金波,张蔷,李振声,等.北京石花洞地区洞穴资源开发与环境保护研究,1998.
②赵树森,等.“北京石花洞地区洞穴资源开发与环境保护研究”报告中的“北京石花洞洞穴碳酸钙年代学与古气候环境研究”章节,1998.

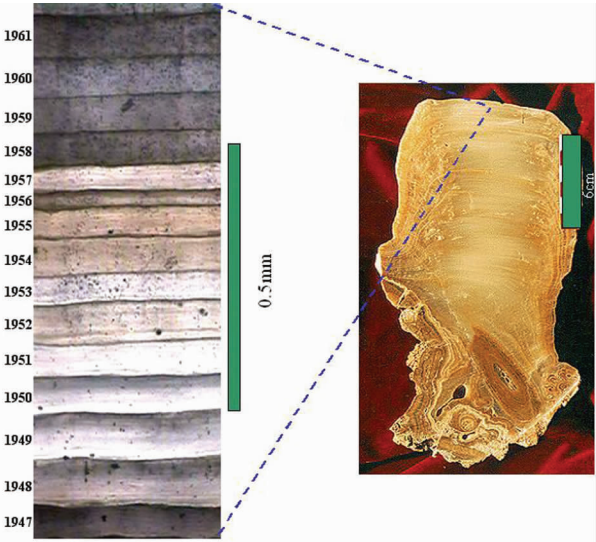


图 8 石花洞全新世石笋(样品号 9512 或 TS9501)微层理
Fig.8 Holocene stalagmite in the Shihua cave
(sample No. 9512 or TS9501)

年代学的研究方法很多,每种放射性同位素测年范围均限于核素半衰期,所以每种测年方法有其特效测年范围。 ^{210}Pb 是铀系衰变系列的核素。 ^{210}Pb 的母核是 ^{226}Ra (半衰期为 1.62 ka), ^{210}Pb 衰变成气体 ^{222}Rn (半衰期为 3.8 d),即由 ^{222}Rn 很快衰变成 ^{210}Pb 。 ^{210}Pb 的半衰期是 22.4 a,所以应用 ^{210}Pb 可精确测定近 100 a 以来的样品年代。

样品中的 ^{210}Pb 可分为两部分:一部分来自水中 ^{226}Ra 的衰变(成为支持 ^{210}Pb),这部分的 ^{210}Pb 与 ^{226}Ra 很快达到放射性平衡。另一部分 ^{210}Pb 来自水中溶解的气体 ^{222}Rn 以及洞穴大气中的 ^{222}Rn 衰变(成为过剩 ^{210}Pb)。过剩的 ^{210}Pb 由于 CaCO_3 (如钟乳石类洞穴沉积)沉淀时, Rn 气逸出, ^{210}Pb 则由于 CaCO_3 沉淀中按其衰变规律自然衰变。所以样品中的 ^{210}Pb 强度随样品深度呈指数衰减(假设 ^{226}Ra 强度为相对恒定条件),则表明样品存在过剩 ^{210}Pb ,据此可测定这种小于 100 a 的样品年代。

应用 ^{210}Pb 法测定近百年来洞穴碳酸钙年代,在国内是首次尝试,笔者采集石笋顶部样品做了 ^{210}Pb 测定(表 8)。

1995 年 11 月 4 日,吕金波、赵树森、王星等在南北大走廊南端平型关转弯处采得石笋(图 7),1995 年 11 月 6 日处理照相,样品号为 9512(或 TS9501),从中发现了微层理(图 8),沉积旋回基本上是连续的,平均生长速率为 0.042 mm/a,年龄范围从现今至 3000 a B.P. 将石笋沿生长轴剖开用牙钻每 1 mm(约 25 a B. P.)取一个样品。对样品数出了 1131 个透光微层,是 20 世纪世界上连续生长年代最长的微层序列,通过年代测定、气候事件控制分析,初步提出了石笋微层的年层时标含义及层厚变化主要响应降水变化的气候意义。试

图 7 全新世浅黄色半透明石笋(9512 或 TS9501)
Fig.7 Translucent light yellow stalagmite deposited by dripping water in the Holocene(sample No. 9512 or TS9501)

表 8 石花洞样品号 9512(或 TS9501)石笋 ^{210}Pb 年代测定结果
Table 8 ^{210}Pb dating of stalagmite sample No. 9512
(or TS9501) from the Shihua cave

序号	样品号	样品名称	采样部位 (距石笋顶)/mm	^{210}Pb /dpm · g ⁻¹	年代资料
1	9512-1		1.85	9.98	
2	9512-3		9.25	3.21	
3	9512-4		12.95	2.89	距石笋顶部,
4	9512-5		16.65	2.11	4 mm 处测得
5	9512-6	石笋	20.35	0.43	年代为 130a,
6	9512-7		24.05	1.23	(AMS ¹⁴ C 法)
7	9512-8		27.75	1.24	

注:样品由美国南加州大学地质科学系李红春等测定,1995。

石笋顶 4 mm,年龄小于 100 a。AMS ^{14}C 测年,距石笋顶 4 mm 处为 130 ± 100 a,距石笋顶 23 mm 处为 670 ± 130 a。常规 ^{14}C 测年,距石笋顶 24 mm 处为 580 a,距石笋顶 104 mm 处为 2500 a。碳酸钙沉积速率为 0.04 mm/a,生长微层理代表年层。根据国际地层表规定,<11.5 ka 为全新世,本区测年结果(表 7)均在此范围。

表 9 石花洞钟乳石 ^{210}Pb 、 ^{14}C 、 $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ 、ESR 年代测定结果/ka
Table 9 ^{210}Pb , ^{14}C , $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ and ESR dating of speleothems in the Shihua cave (ka)

	中更新世	晚更新世	全新世
^{210}Pb			国内首次测量 9512 号样品, <0.10
^{14}C	常规方法	11.72、13.78、31.05	0.63、1.21、2.51、3.31、5.01、7.43、9.66
	AMS 法		0.13、0.80
$^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$	169.0、178.0、183.0、235.0、 240.0、241.0、>350.0	14.9、42.9、47.5、50.4、51.8、 54.7、64.6、65.5、69.5、78.5、 81.5、98.8、10.0	5.7、8.9、8.1
ESR	130、179、235、245、267、 316、472、518	14.0	

注: $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ 由中国科学院地质与地球物理研究所铀系实验室赵树森测定, 1981—1995; ^{210}Pb 由美国南加州大学地质科学系李红春测定, 1995; ESR 由中国科学院生物物理研究所邢如连等测定, 1989; AMS ^{14}C 法由北京大学考古系鲁向阳等测定, 1995; 常规 ^{14}C 法由中国地震局地质研究所尹金辉等测定, 1995。

图利用微层层厚-降水响应关系, 重建北京地区 1130 a 来干湿变化的年分辨率趋势, 通过功率谱分析发现 136 a、50 a、16~18 a、11 a、5.8 a 的降水周期变化^[1]。

在溶洞中生长的石笋, 发育大量的纹层, 有的可以直接用肉眼识别, 而有的只能在显微镜下观测; 一些纹层时间跨度大, 为多年层; 一些纹层时间跨度小, 为年层。样品号 9512 石笋的微层属于时间跨度小的显微纹层。样品是 9512 由 3 块上下衔接的薄片组成, 剖面长度约 15 cm, 显微微层理与方解石晶体生长方向(即晶体长轴方向)垂直, 是方解石晶体的生长线(生长纹), 代表了石笋当时的外表面, 一般微层层厚在 $15\times10^{-6}\sim150\times10^{-6}$ m, 在透射显微镜下表现为由亮带与暗带构成的亮暗相间变化, 基本上 1 个亮带与 1 个暗带组成 1 个微层理, 每 1 个微层理不仅厚度不同, 亮度也存在变化。微层理主要根据纹线划分, 在纹线被暗色有机物掩盖时常会出现一个突然的亮暗变化界面, 可以作为微层的分界。微层面一般平直稳定, 局部会出现弯曲现象。对于石笋 9512 样品剖面, 微层的厚度、灰度都比较均匀, 层与层之间的边界十分一致, 条带状纹线的厚度稳定, 因此各微层空间上可以由条带状纹线确定, 时间上主要应该为年层^[7]。

石花洞的年代学研究开始于 20 世纪 80 年代^[8]。至今已经对洞穴钟乳石沉积进行了铀系法测年、电子自旋共振(ESR)法测年^[10]和 ^{14}C 测年^[9]。建立了可信的洞穴沉积测年方法, 并初步提供了石花洞洞穴沉积距今 350 ka 至 540 a 的沉积年序(表 9)。

距今 170~180 ka 的中更新世, 钟乳石多为钙华和顶部沉积, 距今 180~240 ka 为粗犷石笋沉积阶段, 高度>7 m, 直径 1.5 m。

距今 40~100 ka 的晚更新世, 杆状沉积的石笋非常发育, 体积不等, 最高达 110~320 cm 以上, 直径约 10cm, 沉积速率为 0.012~0.004 mm/a。其中距今 70 ka 仅测个别数据。距今 120~160 ka 尚未有分析数据。

距今 3 ka 以来的全新世, 洞穴化学沉积发育, 质较纯, 具有透光微层和荧光微层, 有的石笋至今仍在生长。石笋类沉积普遍, 但体积不太大, 多为高约 20 cm, 直径 7 cm 以下大小。沉积速率为 0.04 mm/a 左右。

3.6 月奶石沉积(月奶石组)

国内首次发现为典型代表的月奶石(图 9)。在较寒冷的气候条件下沉积的月奶石, 其成分为 CaCO_3 和 MgCO_3 , 通常呈浆糊状、粉末状和海绵状, ^{14}C 年龄为 22 ka 和 32 ka^[4]。

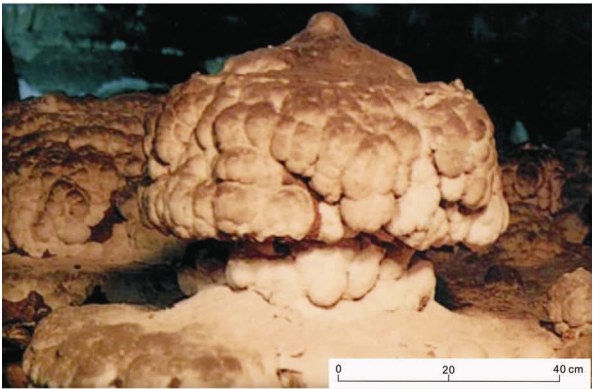


图 9 池水沉积的典型代表为月奶石
Fig.9 Moonmilk deposited by pool water

4 石花洞钟乳石剖面与周口店洞穴群第四系剖面的对比

房山穹隆边缘向形带展布于房山花岗岩体的北、西、南侧, 平面上呈弯月形。石花洞和周口店猿人洞群分别位于穹

表 10 石花洞内钟乳石与周口店洞穴群碎屑沉积物剖面对比

Table 10 Correlation between speleothems in the Shihua cave and sediments in the Zhoukoudian caves

阶段	石花洞 年代/ka	石花洞内 钟乳石剖面（建组）	周口店洞穴群内碎屑 沉积物剖面	猿人洞 层号	厚度 /m	周口店洞穴群沉 积物年代/ka
Q ₄	0.01 <0.10 (²¹⁰ Pb) 2.51 (¹⁴ C) 9.66 (¹⁴ C)	人工洞穴顶部鹅管 守备支洞组（微层理石笋）： 各层中的鹅管、石花、卷曲石、滴水的小石笋	洞口封死，沉积结束			
Q ₃	22~3.2 (¹⁴ C) 55.5 (U) 815~988 (U)	月奶石组： 产于 2、3、4、5 层水池中，中心大厅钙华丘的表层（1~3cm）之下 石花洞组（杆状石笋）： ①生长在钙华板之上 ②生长在崩塌块之上 ③生长在石柱、石笋之上	山顶洞： 灰色砂质土夹大量石灰岩角砾，有晚更新世人类化石。 东岭子洞： 棕红色亚粘土层，含钟乳石碎块，大者 70~120cm 新洞： 黄色砂土与石钟乳板互层		>1.6 2.2	上室 18.0 (¹⁴ C) 下室 49.0 (TL) 上限 114.7 (U) 顶部 75.0 底部 195.0 (U)
Q ₂	204.0 (U) 69.5 241 (U) 33499 ~ 36674 (U)	崩塌块组： 各层中的崩塌块 云水洞组（粗犷石笋）： 2、3、4 层洞中粗壮形态的石钟乳、石柱、石笋、石幔和石瀑布 钙板组： 1、2 层中的层状钙板	猿人洞坍塌，洞口封死 角砾层、钙质胶结 角砾夹钙板层 灰岩角砾、钙质胶结 灰白色风化灰岩角砾层，顶部有钙板夹层 灰白色风化角砾层、次生溶蚀少	1 2 3 8 9	2.0 1.7 >3.0 2.0~5.5 0.9~4.4	201 (U) 230 (U) 256 (U) 260 (U) >350 (U)

注：(U)为铀系法年龄，(²¹⁰Pb)为铅-210 法年龄，(TL)为热释光法年龄，(¹⁴C)为碳-14 法年龄。

月形大向斜的北南两个扬起端部位(图 2)。

周口店洞穴群碎屑沉积物剖面与石花洞钟乳石剖面的对比(表 10)。两洞古构造背景一致,岩石层位相同,大形态产生的时间相同,洞内沉积物对比是有意义的,今后应加强两洞对比的研究。

参考文献(References):

[1] 刘东生, 谭明, 吕金波, 等. 洞穴碳酸钙微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(1):41-51.

Liu Tungsheng, Tan Ming, Lü Jinbo, et al. Discovery of microbendding in speleothems in China and its significance in the study of global change [J]. Quaternary Sciences,1997,(1):41-51(in Chinese with English abstract).

[2] 吕金波, 李铁英, 孙永华, 等. 北京石花洞的岩溶地质特征 [J]. 中国区域地质, 1999, 18(4):373-378

Lü Jinbo, Li Tieying, Sun Yonghua, et al. Karst geology of the

Shihua Cave, Beijing [J]. Regional Geology of China, 1999, 18(4): 373-378(in Chinese with English abstract).

[3] 吕金波. 北京西山新生代古地理环境的演变 [J]. 河北地质学院学报, 1994, 17(3):228-235.

Lü Jinbo. Paleogeographical environmental evolution in the Western Hills Beijing During the Cenozoic [J]. Journal of Hebei college of geology, 1994, 17(3):228-235.

[4] 卢耀如. 中国岩溶[M]. 北京:地质出版社, 1986:94-95.

Lu Yaoru. Karst of China[M]. Beijing:Geological Publishing House, 1986:94-95(in Chinese).

[5] 李红春, 赵树森, 李铁英, 等. 洞穴石笋的 ¹⁴C 年代学研究——石花洞研究系列之二[J]. 地震地质, 1996, 18(4):329-338.

Li Hongchun, Zhao Shusen, Li Tieying, et al. Isotope studies of Shihua cave, Beijing (Ⅱ):Radiocarbon dating and age correction of stalagmite[J]. Seismology and Geology, 1996,18(4):329-338.

[6] 谭明, 刘东生, 吕金波, 等. 北京石花洞全新世石笋微生长层与稳定同位素气候意义初步研究[J]. 中国岩溶, 1997, 16(1):1-10.

- Tan Ming, Liu Dongsheng, Lü Jinbo, et al. Preliminary study on the data from microbanding and stable isotopes of stalagmites of Beijing Shihua cave [J]. *Carsologica Sinica*, 1997, 16 (1):1–10 (in Chinese with English abstract).
- [7] 秦小光, 刘东生, 吕金波, 等. 北京石花洞石笋微层灰度变化特征及其气候意义——I. 微层显微特征[J]. *中国科学(D 辑)*, 1998, 28 (1): 91–96.
- Qin Xiaoguang, Liu Tungsheng, Lü Jinbo, et al. Grey characteristics of microbanding of stalagmite in Shihua Cave, Beijing and its climatic signification (1) —the study of the microstructure of microbanding[J]. *Science in China (Series D)*, 1998,28(1):91–96(in Chinese).
- [8] 赵树森, 刘明林, 乔广生. 中国东部喀斯特洞穴沉积物铀系年代[J]. *中国岩溶*, 1990, 9(3):279–288.
- Zhao Shuwen, Liu Minglin, Qiao Guangsheng. The U-series ages of speleothem of karst caves in the east of China [J]. *Carsologica Sinica*, 1990, 9(3):279–288(in Chinese with English abstract).
- [9] 邢如连, 原思训, 等. ESR 法测定石笋类碳酸盐年代的研究[J]. *中国岩溶*, 1989, 8(2):89–99
- Xing Rulian, Yuan Sixun, et al. Study on ESR dating of stalagmites [J]. *Carsologica Sinica*, 1989, 8 (2):89–99 (in Chinese with English abstract).

Chronology of a section of Quaternary speleothems in the Shihua cave, Beijing

LÜ Jin-bo¹, ZHAO Shu-sen², LI Tie-ying¹, WANG Xun-yi³, LI Hong-chun⁴

(1. *Beijing Institute of Geological Survey, Beijing 102206, Beijing China;*

2. *Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;*

3. *Institute of Karst geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 541004, Guangxi, China;*

4. *Department of Earth Sciences, University of Southern California, Los Angeles, CA90089, USA)*

Abstract: The Shihua cave is located at the northeastern end of the synformal belt at the edge of the Fangshan granite intrusion in Beijing and faces the Peking Man (*Homo erectus pekinensis*) site. The strata are composed of limestone of the Middle Ordovician Majiagou Formation formed 460 Ma ago. The basic form of the cave began to form in the Pliocene at 25 Ma BP and the speleothems in the cave began to form in the middle Pleistocene at 0.37 Ma BP. Among Chinese karst caves, the Shihua cave has the largest number of layers and a complete range of speleothems in the caves. There are many large cave stone shields deposited by fissure infiltration water, the superimposed relationship of stalagmites deposited by dripping water is evident, moonmilk deposited by pool water is well developed, and the micro-layering of Holocene stalagmites is clear. The basic form of the cave reflects the history of the neotectonic movement in the Western Hills, Beijing, which may be correlated with the physiographic stage of North China and terraces of the Yongding River; the speleothems in the cave recorded the paleoenvironmental change in the Western Hills, Beijing, since the middle Pleistocene, which may be used to set up a Quaternary section for a correlation with the section of clastic sediments in the Zhoukoudian caves. The calcareous plate has U-series ages of 334.99–366.74 ka, thus named the Gaiban Formation. The wide stalagmites have U-series ages of 169–235 ka and ESR ages of 130–518 ka, which are middle Pleistocene deposits and may be named the Yunshuidong Formation. The rod-shaped stalagmites have U-series ages of 14.9 ± 2.1 – 100.3 ± 11.1 ka, which are upper Pleistocene deposits, named the Shihuadong Formation. In Holocene stalagmites, there is usually a $\sim 1 \mu\text{m}$ thick, dark streak between two micro-layers, which serves as a mark for determining the number of micro-layers. Stalagmites with micro-layering have ^{14}C ages of 0.58–2.50 ka and AMS ^{14}C ages of 130 ± 100 – 670 ± 130 a, named the Shoubeizhidong Formation.

Key words: section of Quaternary speleothems; stalagmite microbanding; superimposed relationship of stalagmite; large forms of cave; the Shihua cave; Beijing

About the first author: LÜ Jin-bo, male, born in 1956, Ph.D. and professor, mainly engages in the study of karst geology, regional geology and hydrogeology of Beijing; E-mail: ljb5610@sohu.com.