

洞穴石笋沉积特征研究 ——以贵州荔波董歌洞4号石笋为例

林玉石¹⁾ 袁道先¹⁾ 张美良¹⁾ 覃嘉铭¹⁾ 程海⁴⁾ 王兆荣²⁾ 冉景丞³⁾

1) 国土资源部岩溶地质研究所 岩溶动力学开放研究实验室, 广西 桂林, 541004;

2) 国家级茂兰喀斯特森林自然保护区, 贵州 荔波, 558400 3) 中国科技大学, 安徽 合肥, 230026;

4) 美国明尼苏达大学地质与地球物理系同位素室, 美国, MN55455

摘 要 在综合研究南方 20 多个大型石笋纵剖面的基础上, 以董歌洞 4 号石笋为代表, 论述石笋沉积特征与气候演化的对应性。4 号石笋从距今 147.838 ± 2.6 ka 开始沉积以来, 形成了 53 个沉积纹(壳)层组, 组成 24 个亚旋回, 构成 9 个旋回, 呈现韵律式旋回性沉积特征。石笋纹(壳)层组分、结构、叠复构造呈多级次旋回性很突出, 其中沉积间断具普遍性、沉积速率具多变化, 间断和速率变化级次亦明显。以系统测试和测年引证沉积特征的同时揭示: ①~⑨旋回间沉积间断时间累积达 75.804 ka, 占石笋形成时间的 51.21%, ①~⑨旋回实际沉积时间仅 72.222 ka, 占形成时间的 48.79%; ④旋回之前, 沉积速率很小, 最小仅 0.36 mm/100a, 比最大速率小 22~24 倍, 自⑤旋回起, 沉积速率很大, 最大达 39.03 mm/100a, 是最小速率的 3.8 倍。石笋沉积特征与气候环境演化的成生关系表明, 石笋沉积多旋回性的纹(壳)层组、亚旋回、旋回与气候演化的气候期、阶段和旋回彼此对应, 石笋沉积的多级次旋回及其变化就是气候演化的级次及旋回性(跃)变时间, 彼此同时显示。论证了石笋沉积的多旋回性与气候演化的不稳定性, 及其彼此协调的宏观、微观综合表现特征。

关键词 石笋 沉积特征 气候演化 多旋回性 不稳定性

Sedimentary Characteristics of Cave Stalagmite :

A Case Study of No.4 Stalagmite in the Dongge Cave of Libo , Guizhou Province

LIN Yushi¹⁾ YUAN Daoxian¹⁾ ZHANG Meiliang¹⁾ QIN Jiaming¹⁾

CHANG Hai⁴⁾ WANG Zhaoying²⁾ RAN Jingcheng³⁾

1) Karst Dynamics Laboratory , Institute of Karst Geology , CAGS , Guilin , Guangxi , 541004 2) The Management of Maolan Nature Reserve ,

Libo , Guizhou , 558400 3) China University of Science and Technology , Hefei , Anhui , 230026 ;

4) Geographics Department Minnesota University , MN 55455 , USA

Abstract The sedimentary characteristics of stalagmite parallel with the process of climate evolution are discussed according to a synthetic study of over 20 large stalagmite vertical profiles , with No.4 stalagmite in the Dongge cave as an example. The No.4 stalagmite formed at 147.838 ka B.P. consists of 9 sedimentary cycles comprising 24 sedimentary sub-cycles or 53 lamina groups , with the 9 sedimentary cycles assuming the deposition characteristics of rhythm cycles. The components , structure or fabric and fold combination of laminae or crust layers show obvious multi-class cyclicality. The sedimentation interruption of stalagmites is very common , and the growth rate of stalagmite is varied. The sequence order of sedimentation interruption and the variation of the deposition rate are very clear too. The above results can be proved by a lot of analytical data and age data. The accumulation time of sedimentation interruption from Cycle 1 to Cycle 9 is about 75.804 ka , which accounts for 51.21% of the total growing time of stalagmite. This means that the actual growth time of stalagmite from Cycle 1 to Cycle 9 is only 72.222 ka , which accounts for 48.79% of the total growing time of stalagmite. The growth rate of stalagmite before the fourth sedimentary cycle is very small , and the smallest growth rate is only 0.36 mm every 100 years , which is 22 or 24 times smaller than the largest one. The growth rate of stalagmite after the fifth se-

本文由中国科学技术部“中国洞穴石笋样品保护库的建造”项目(编号 2003DEB6J069)和国家自然科学基金项目(批准号 40231008)资助。

改回日期 2002-7-9, 责任编辑 宫月萱。

第一作者 林玉石, 1935 年生, 研究员, 长期从事区域地质、岩溶地质与古环境研究。

dimentary cycle is very fast. The largest growth rate is 39.0 mm every 100 years, being 3.8 times that of the smallest one. The relationship between the sedimentary characteristics of stalagmite and the evolution of climate environment has revealed that the cycles, sub-cycles and multi-sequence lamina groups of stalagmite deposition are parallel with the climate period, stage and sedimentary cycles respectively and in accord with the time. The multi-class sequence cycles and changes of stalagmite deposition are actually the time span changed by the multi-class sequence cycles of climate evolution, and they are consistent with each other in time. The above studies have proved the instability of the climate evolution, which has controlled the multi-sequence lamina groups of stalagmite deposition. The process of the climate evolution affects the instability of the sedimentary environment, the multi-sequence variation and the time span or interval, and also serves as the time limit of the multi-class sequence cyclicity and variation for the formation of stalagmite.

Key words stalagmite deposition or growth climate evolution cyclicity Libo

石笋的沉积(生长)速度受控于滴水量及洞道(水)冰文地质条件,其动态变化取决于洞外气候因素,特别是降水动态及地表、地下水汇集径流的环境和地质条件。笔者综合研究了滇、黔、湘、桂近20个大型石笋的纵切笋心剖面,择时限为147.3~0.128 ka B P的贵州董歌洞4号石笋的沉积特征(图1,表1)为例,阐述其主要表现特征的形成与气候和环境演变、水动力条件等的成生关系。

1 石笋沉积组成具韵律式旋回性

4号石笋高304 cm,笋径5~23 cm,其沉积组成、组构类型、色率、速率都明显呈旋回性差异,变化频率和强度不一。

1.1 石笋沉积纹(壳)层及其指“相”意义

石笋的最小沉积单位为纹(壳)层,形成时受洞穴(道)空间、地质条件、气候、环境、滴-流水水文地质条件、动态和性质、特别是滴流水形成的薄膜水或微-薄层水中CO₂的逸出度等综合控制,也受滴水落点、石笋基座、洞穴顶板的地质构造及其稳定性制约。纹(壳)层呈锥状、钟状、倒锅状。纹(壳)层厚度由石笋中心向周缘渐薄,自笋肩向下快速变薄或消失,因此,以“纹”后加“壳”字,表示立体状层面形态,区别于海、湖、河常态水下沉积的近水平纹层。石笋沉积的必要条件是有滴水,滴水量取决于降水(雨、雪)量及其地表地下匹配供给动态。因此,石笋纹(壳)层的形成、变化主要受降水动态控制下的滴水制约。通常滴水量大、滴落快、饱和度大的滴水,在滴水着落处形成薄膜(层)水,随CO₂不断逸出,水中Ca²⁺离子达到饱和,沉淀了方解石微晶,组成纹(壳)层,厚度大,反之,纹(壳)层厚度小。纹(壳)层厚度大小相间叠复,或大中小依序叠复,显示滴水量大小相间或大中小滴水量依序滴落。纹(壳)层依成分、结构、构造变化规律有序叠复,组成纹(壳)层组。纹(壳)层组依沉积韵律叠复,组成亚旋回或旋回,显

示滴水量变化亦依一定韵律在相应时段,连续滴落或重复滴落。因此,石笋沉积纹(壳)层组、亚旋回、旋回,成为气候演化周期、阶段、旋回的踪迹,即纹(壳)层是滴水的象征,其韵律性变化是气候环境演化过程的标志(林玉石等,2001,2002;张美良等,2001)。董歌洞4号石笋沉积纹(壳)层依其韵律性形成53个纹(壳)层组,组成24个亚旋回,9个旋回。纹(壳)层组厚度0.6~22.6 cm,旋回厚度11.8~24.6 cm,以最大厚度74.6 cm的⑤旋回底为界,①~④旋回厚度均大于26 cm,为千年级、万年级旋回沉积时间,⑥~⑧旋回厚度35.4 cm逐级降至11.8 cm,沉积时间都是千年级,⑨旋回虽是百年级,但还在沉积。石笋沉积纹(壳)层韵律性变化形成的叠复构造,是石笋形成过程的综合显示,若石笋中心(轴)线(简称笋心线)转变标志明显,则指“相”意义明确:当中心(轴)线偏转,指示滴水点、滴水着落点有位移。即纹(壳)层组、亚旋回、旋回叠复组成的石笋中心(轴)线,由下而上呈斜线,指示滴水着落点由石笋中心渐向石笋边缘位移,表征滴、落水点逐渐偏离石笋中心移至笋缘,甚至离开笋体,造成停止沉积。石笋沉积(生长)过程,滴、落水点发生位移或停滴或滴、停相间,是普遍现象,位移者更普遍,如旋回中下部、③旋回中部、⑤和⑥旋回间、⑦和⑧旋回顶部等。滴、落水点离开笋体者,石笋中心(轴)线上段呈折线,如②旋回顶端,叠复构造层面不协调,面间有夹角,中心(轴)线呈弧形弯转,甚至呈“S”型,如③与④旋回间和⑦旋回中部,表明滴、落水点有位移,而且滴水量③旋回早期较大,中期滴水减少,晚期明显减少,而④旋回早期滴水量突然增大,⑦旋回中期滴水量明显减少,至中晚期又恢复至中早期的滴水量,叠复构造面呈角度不整合或形态不协调,中心(轴)线弯转,如④旋回顶部和⑤旋回中部,反映④旋回中晚期滴水量逐渐减少,末期水量最少,且浓度大,滴落水点分散。⑤旋回早期滴水量较稳定,中期

表 1 荔波董哥洞 4 号石笋沉积特征表

Table 1 Depositional characteristics of NO.4 stalagmite from Dongge cave

年龄* /ka	沉积厚度/cm		沉积速率 /mm·(100a) ⁻¹	纹(壳)层特征	纹(壳)层组构
	剖面	纹层组			
0.128		2	30.03	雪白、白色间夹白、灰白色,微-细粒方解石组成纹(壳)层,厚 0.1~1 mm,轴部残余纹层明显	269 a 间沉积 4 个纹(壳)层组,平凹间平顶状-平凹状-拱隆状纹(壳)层,叠复成叠锥笋体,轴部粒间孔 Φ0.5~3 mm
0.349		3.1			
0.420		3.1	10.72	灰色间暗灰浅灰色,细-微粒方解石组成纹(壳)层,厚 0.1~0.2 mm,旋回-亚旋回,纹层组顶部暗灰色纹层增多	1212 a 间沉积 3 个纹层组构成旋回,呈平顶微凹状-平顶脑纹状-平隆状叠复锥柱状笋体,轴线呈“S”型,晶间孔 Φ0.5~2 mm
1.539		3.6			
2.39		3.1	10.28	灰白色,中上段为灰白间暗灰色,微-细粒方解石组成纹(壳)层,厚 0.1~0.2 mm,上段以 0.1 mm 为主	2205 a 间沉积 8 个纹(壳)层组,构成 3 个亚旋回。斜歪对称-斜歪不对称-水平脑纹状-拱隆状叠锥叠柱笋体,轴线呈“S”型,轴部粒间孔 Φ0.5~1.5 mm
2.288		5.2			
3.991		6			
4.136		3	1035	灰白色间浅灰色、暗灰色,微-细粒方解石组成纹(壳)层,轴部呈细-中粒,有残余纹层,边部纹层明显,厚 0.1~0.2 mm,底、顶部分别有 0.5 mm 厚、0.1~0.2 mm 厚暗色纹(壳)层	1569 a 间沉积 5 个纹层组,构成 2 个亚旋回。斜歪不对称拱隆状-平顶间平凹-平顶状纹(壳)层,叠复成锥柱状-柱状-柱锥状笋体,轴线呈“S”型。轴部粒间孔 Φ1~3 mm,个别 0.5×1.5 cm
5.298		1.6			
6.263		0.6	27.44	白、灰白间浅色、白色,微-细粒方解石组成纹(壳)层,轴部呈中-粗晶,纹层残余不明显,笋边纹层很明显,纹(壳)层厚 0.1~1 mm	2793 a 间沉积 10 个纹(壳)层组,构成 5 个亚旋回。凹顶-平顶拱隆间平凹顶-微拱平顶拱纹(壳)层,叠复成柱(锥)、锥(柱)笋体,轴线呈“S”型。轴部粒间孔大而多,Φ(2~5)×30 mm
6.703		1.2			
7.432		1	25.06	暗灰色间浅灰色,顶部浅灰间暗灰色偶夹灰黄色,微粒方解石组成纹(壳)层,厚(重结晶前)0.1~0.2 mm,轴部纹层较明显	6585 a 间沉积 10 个纹层组,构成 3 个亚旋回。微拱平顶-拱顶间拱平顶-微拱平不对称纹(壳)层,叠复成柱(锥)笋体,轴线呈垂线。轴部粒间孔 Φ0.5~1.5 mm,个别 3×5 mm,分布均匀
8.31		1.6			
9.023		12.4	1.11	灰白间白色偶夹浅灰色,微-细粒方解石或具残余纹层的巨晶方解石组成纹(壳)层,厚(重结晶前)0.1~0.5 mm,轴部纹层残余较明显	23390 a 间沉积 6 个纹(壳)层组,构成 3 个亚旋回。拱隆-平顶间拱隆-拱平顶纹(壳)层,叠复成对称叠锥(柱)笋体,轴线呈“S”型。晶(粒)间孔,Φ1~5 mm,中段大面多
9.363		6.3			
11.578		3.4	800	灰白夹灰黄,雪白夹浅灰色,微-细粒方解石组成纹(壳)层,轴部偶有残余纹层,边部和亚旋回顶部纹层明显,厚 0.5~1 mm	15258 a 间沉积 6 个纹(壳)层组,构成 3 个亚旋回,其顶部分别向一侧偏转,组成顶略不对称叠复柱锥状笋体,轴线呈“S”型,重晶粒大,粒间孔 Φ1~5 mm
13.418		4.6			
15.473		9.4	2.69	暗灰夹灰色,中上部灰白间夹灰色,亚旋回顶呈暗灰色,微-细粒方解石组成纹(壳)层,厚 0.1~0.2 mm,个别 2 mm,中下段轴部具残余纹层	18947 a 间沉积 6 个纹(壳)层组,构成 3 个亚旋回,其顶分别向一侧偏转,组成基本对称的叠复锥柱状笋体,轴线呈“S”型。轴部重晶,粒晶孔多而大,下旋回则少而小,Φ1~5 mm,个别 0.3~1 cm。亚旋回顶部纹层明显
43.300		8.4			
47.800		4.1	2.69	暗灰夹灰色,中上部灰白间夹灰色,亚旋回顶呈暗灰色,微-细粒方解石组成纹(壳)层,厚 0.1~0.2 mm,个别 2 mm,中下段轴部具残余纹层	18947 a 间沉积 6 个纹(壳)层组,构成 3 个亚旋回,其顶分别向一侧偏转,组成基本对称的叠复锥柱状笋体,轴线呈“S”型。轴部重晶,粒晶孔多而大,下旋回则少而小,Φ1~5 mm,个别 0.3~1 cm。亚旋回顶部纹层明显
59.100	9				
64.700	0.6	1.74	暗灰夹灰色,中上部灰白间夹灰色,亚旋回顶呈暗灰色,微-细粒方解石组成纹(壳)层,厚 0.1~0.2 mm,个别 2 mm,中下段轴部具残余纹层	18947 a 间沉积 6 个纹(壳)层组,构成 3 个亚旋回,其顶分别向一侧偏转,组成基本对称的叠复锥柱状笋体,轴线呈“S”型。轴部重晶,粒晶孔多而大,下旋回则少而小,Φ1~5 mm,个别 0.3~1 cm。亚旋回顶部纹层明显	
113.380	7.5				
124.700	2.6	0.36	暗灰夹灰色,中上部灰白间夹灰色,亚旋回顶呈暗灰色,微-细粒方解石组成纹(壳)层,厚 0.1~0.2 mm,个别 2 mm,中下段轴部具残余纹层	18947 a 间沉积 6 个纹(壳)层组,构成 3 个亚旋回,其顶分别向一侧偏转,组成基本对称的叠复锥柱状笋体,轴线呈“S”型。轴部重晶,粒晶孔多而大,下旋回则少而小,Φ1~5 mm,个别 0.3~1 cm。亚旋回顶部纹层明显	
126.900	9.8				
128.500	1.4	5.45	暗灰夹灰色,中上部灰白间夹灰色,亚旋回顶呈暗灰色,微-细粒方解石组成纹(壳)层,厚 0.1~0.2 mm,个别 2 mm,中下段轴部具残余纹层	18947 a 间沉积 6 个纹(壳)层组,构成 3 个亚旋回,其顶分别向一侧偏转,组成基本对称的叠复锥柱状笋体,轴线呈“S”型。轴部重晶,粒晶孔多而大,下旋回则少而小,Φ1~5 mm,个别 0.3~1 cm。亚旋回顶部纹层明显	
129.300	12				
131.900	19	8	暗灰夹灰色,中上部灰白间夹灰色,亚旋回顶呈暗灰色,微-细粒方解石组成纹(壳)层,厚 0.1~0.2 mm,个别 2 mm,中下段轴部具残余纹层	18947 a 间沉积 6 个纹(壳)层组,构成 3 个亚旋回,其顶分别向一侧偏转,组成基本对称的叠复锥柱状笋体,轴线呈“S”型。轴部重晶,粒晶孔多而大,下旋回则少而小,Φ1~5 mm,个别 0.3~1 cm。亚旋回顶部纹层明显	
138.100	8.6				
146.200	12	8	暗灰夹灰色,中上部灰白间夹灰色,亚旋回顶呈暗灰色,微-细粒方解石组成纹(壳)层,厚 0.1~0.2 mm,个别 2 mm,中下段轴部具残余纹层	18947 a 间沉积 6 个纹(壳)层组,构成 3 个亚旋回,其顶分别向一侧偏转,组成基本对称的叠复锥柱状笋体,轴线呈“S”型。轴部重晶,粒晶孔多而大,下旋回则少而小,Φ1~5 mm,个别 0.3~1 cm。亚旋回顶部纹层明显	
147.60	19				

注: * 为 176Lu 数据系测年参考, λ₂₃₀ = 9.15 × 10⁻⁶ a⁻¹, λ₂₃₄ = 2.8263 × 10⁻⁶ a⁻¹, λ₂₃₈ = 1.55125 × 10⁻¹⁰ a⁻¹, ²³⁰Th 测量误差为 2σ。

滴水量剧减,浓度极大,且滴水点快速转(飘)移,随即水量增大,浓度减小,沉积过程灰-暗色纹(壳)层增多,一般出现在纹(壳)层组、亚旋回、旋回的中—中上部,偶见于下部。凡笋段暗色夹层很密集,深色增多,呈暗色者均在纹(壳)层组顶部,甚至以灰黑色(壳)层为主,如①旋回的上、下部,②旋回上部,③、④旋回的中、上部。这些灰-暗色纹(壳)层是石笋冷期沉积的特征性纹层,经综合研究,有的含粘土矿物、硅、铝化学成分较多,有的富含有机碳、铁、锰,有的甚至富含Cu、Zn、Pb、Cr或其中的1~2个元素含量增多,特征性纹(壳)层的碳氧同位素组成偏重,成为旋回或纹(壳)层组的明显跃(转)变值(表1),甚至是极大(重)值。表2是全新世与晚更新世、晚更新世与中更新世两断代分界,也是旋回间的界线。 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 同步偏重成为断代的综合地质依据之一,但极值有时不同步,如①旋回碳偏重,极值为 -1.28% PDB,出现在301 cm处,是①旋回的起始, $\delta^{18}\text{O}$ 极值为 -4.67% PDB,出现在268 cm处,是二亚旋回的转变点。④旋回碳偏重极值为 -3.39% PDB,在182 cm处,是一亚旋回的转变点, $\delta^{18}\text{O}$ 极值为 -6.52% PDB,在176 cm处,是二亚旋回-纹(壳)层组的转变点。此后,自⑤~⑨旋回 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 均明显偏轻,同步显示冰后期温暖潮湿气候特征。

表2 董哥洞4号石笋沉积旋回同位素值
Table 2 Isotope value of depositional cycle from
No. 4 stalagmite of Dongge cave in Libo

时代	年龄、同位素 样距笋顶 /cm	旋回及其 顶、底年龄 /ka ^a	同位素组成/ $\%PDB^b$	
			$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{18}\text{O}$
全新世	8.9(38) ^c	⑤	$-6.29(38)\%$	$-8.96(38)\%$
	162	9.023 ^a	—	—
	-9.3^c	162.7	(9.051)	-6.3^c
晚更新世	163	(9.141)	-3.9^c	-8.6^c
	164	9.363 ^a	$-4.09(59)\%$	$-7.88(59)\%$
	190	④	—	—
	235	②	$-5.31(53)\%$	$-7.46(53)\%$
	259	128.5 ^a	—	—
	260	(128.82)	-4.7^c	-7.7^c
中更新世末期	260.5	(128.891)	—	—
	261	129.3 ^a	-3.6^c	-6.2^c
	262	—	—	—
	304	①	$-4.42(31)\%$	$-5.94(31)\%$

注:①沉积旋回及其序号;^a各旋回实测年龄及其所在位置,括弧内为推算年龄;^b各旋回碳、氧同位素平均值,括弧内为样品数;^c所在旋回底、顶同位素值,即旋回间同位素转(跃)变值;*全笋325样平均分别是 $\delta^{18}\text{O}$ 为 -7.37% PDB, $\delta^{13}\text{C}$ 为 -4.95% PDB,全文均用原始数据。

1.2 石笋沉积组成具多级次旋回性

4号石笋纹(壳)层的组成,由下而上叠复成9个旋回,其组成为:灰白、雪白色相间夹灰、灰黑色方解石纹(壳)层,呈韵律式叠复,纹(壳)层色率变化有序。①旋回下段暗灰色夹层多而密集,②旋回较多,但较稀疏,③旋回夹层呈灰黑色,且上下段增多,中段稀疏,④旋回灰黑色夹层多,分配较均匀,⑤~⑨旋回极少暗色夹层,仅其中部和顶部以及⑥、⑦旋回顶底均有1~2层灰黄色夹层,而⑦旋回顶和⑧、⑨旋回顶底均有1~2层灰黑色夹层。这些暗色纹(壳)层都是冷气候沉积的象征;微-细粒方解石间夹、互夹叠复,结构构造变化和重晶均微弱而有序。①~⑨旋回以灰白、雪白方解石为主,间夹暗色层或细粒层,变化有序,④旋回以下仅①、③旋回中段和②旋回少夹细粒层,轴部重晶弱,晶(粒)间孔较少,但⑤~⑨旋回特别是⑤、⑥旋回中段较多细粒层,⑤旋回以上石笋轴部重晶明显,晶(粒)间孔较多,纹(壳)层组合具韵律(旋回)性。以薄层与厚层互层或互为夹层组合为主,由下而上叠复,纹(壳)层曲度均由下而上渐大,层面依序重合呈韵律性叠复,组成纹(壳)层组、亚旋回、旋回,其间彼此呈渐变或突(跃)变式转变。纹(壳)层组间以结构、组分转(突)变为依据,确定地质、气候事件,若其间还有特征性标志层,当作为亚旋回或旋回转(突)变依据,若标志层较多或间断沉积标志明显,则为旋回转变依据。综上所述,4号石笋由下而上分为①~⑨旋回(表1)。宏观上石笋的沉积特征具多级旋回性、有序性而协调显示①~④旋回是冰期气候的沉积特征,⑤~⑨旋回为间冰(冰后)期温暖潮湿气候的沉积特征;石笋沉积厚度及相应的沉积时间差异极大,但变化基本有序。①~④旋回沉积厚度为24.6~40.2 cm,有3个万年级、一个千年级沉积时段(间),⑤~⑨旋回沉积厚度为11.8~74.6 cm,有4个千年级、1个百年级时段(间);石笋沉积速率差异更大(林玉石等,2001),规律性仍明显。若以旋回计算沉积速率,现在仍在沉积的⑨旋回最大,达43.87 mm/100a,③旋回最小,仅1.71 mm/100a。以纹(壳)层组或部分亚旋回计速,差异更大,①旋回底部第二纹层组沉积速率仅0.36 mm/100a,⑨旋回速率最大,为39.03 mm/100a。这两组数字和①~⑨旋回沉积速率表明,④旋回以下速率小,仅4.51~1.71 mm/100a,或

① TIMS-U系测年由美国明尼苏达州海博博士完成,测试仪器为FinniganMAT262-RPQ质谱仪,年龄误差为 $<1\%$ 。

② 岩溶地质研究所同位素室完成,仪器为MM-903E。

0.36~8.0 mm/100a,而⑤旋回以上速率大,达10.28~43.87 mm/100a。总之,①~⑨旋回这些数字和前述碳、氧同位素组成的差异,从微观上证实石笋沉积具多级次旋回性,①~④旋回沉积厚度小、时间长、速率小是冰期寒冷气候的沉积特征,而⑤~⑨旋回则相反,是冰后期温暖气候的沉积特征。

1.3 石笋沉积韵律级次与气候演变期次

石笋沉积纹(壳)层的叠复组合,依级次有纹(壳)层组、亚旋回、旋回笋(时)段,分别表示短、中、长3个成笋时期,显示相应的气候期、阶段、旋回的气候环境演变(化)特征(张美良等,1998,2001;覃嘉铭等,1997,2001)。例①旋回由3个亚旋回的6个纹(壳)层组构成,暗色纹(壳)层夹层变化是,一亚旋回的1、2纹(壳)层组多,二亚旋回3、4纹(壳)层组稀少,三亚旋回5、6纹(壳)层组渐多,顶端为暗色层,滴水量依序变化为,1、2纹(壳)层组由较大至最小,3、4纹(壳)层组由较大至最小,5、6纹(壳)层组由较大至最小,2、6纹(壳)层组末,均有短期停滴,沉积速率亦依序变小,二、三亚旋回分别为较小至最小、大至小、较小至小。综合显示①气候旋回早(138.1±1.2 ka),晚(128.5±0.8 ka至131.9±0.9 ka)阶段严寒,131.9±0.9 ka和129.3±0.9 ka前后最冷,草被为主,碳同位素偏重,分别出现极值, $\delta^{13}\text{C}$ 为-1.3‰PDB, $\delta^{18}\text{O}$ 为-5.2‰PDB,同步偏重,次极值 $\delta^{13}\text{C}$ 为-3.2‰PDB, $\delta^{18}\text{O}$ 为-5.2‰PDB,同步偏重,但氧非极值,说明氧同位素组成主要反映气候特征,碳同位素组成既反映气候,也反映生态环境适生(应)性特征,中段(131.9±0.9 ka至138.1±1.2 ka间)气候冷湿,滴水量较大,沉积较快。②~⑨旋回沉积特征与气候环境演变关系的级次类同,但⑤旋回起,是全新世间冰(冰后)期温暖潮湿气候,⑤旋回由5个亚旋回10个纹(壳)层组构成,正处于大暖期,从四旋回末第八纹(壳)层组起有转冷迹象,随后冷事件变频。

2 石笋纹(壳)层组合类型与时限

石笋由最小沉积单位,即纹(壳)层叠复而成,组成笋体的基本单元是纹(壳)层组,其组合构造叠复类型,以石笋叠复中心(轴)线组成为依据,分为垂线、斜线、折线、“S”线型和旋转、附着、弯曲等特殊型叠复构造类型。为引证各类型的代表性、普遍性和更形象地显示4号石笋的中心(轴)线型(图版1)。垂线型石笋,表明滴、落水点均固定,笋座稳定,如①~⑨的多数笋段和图版I-a、d,若呈锥状,如④、

⑥旋回中上段和图版I-a的中部,若呈柱状,如②中上段和⑤中下段的构造,则滴水量由大至小,或滴水量稳定但滴落水飘散着落。斜线型石笋,表明滴、落水点向一侧缓慢移动,如②旋回顶部、③旋回底部和⑤~⑧旋回顶部,或石笋基底向一侧缓慢倾斜或陷落,若呈对称叠锥构造,表明滴水量由大至小,而不对称叠锥构造则水量大,但向周缘漫流不均,滴、流水量仍由大至小,分别如图版I-b下一上笋段。对称或不对称叠柱构造,则滴水量稳定,飘散着落点较固定或向一侧聚集,如图版I-a中上部或其中下段。“S”线型石笋,表明滴落水点向一侧缓慢转向位移或向一侧阶段性反向缓慢位移,呈对称叠锥(柱)构造,如①~④旋回或图版I-c的⑨旋回,表明滴水量小且缓慢减少。不对称叠锥(柱)构造,则滴水量较大或向一侧飘落。各类石笋中心(轴)线类型与滴、流水动态(林玉石等,2001,2003)、气候环境的关系,有其共性(林玉石等,2001,2003;张美良等,2001):纹(壳)层组、亚旋回、旋回或叠复构造类型的各类中心(轴)线类型,呈对称或不对称叠锥(柱)构造,无论滴水过程如何重叠变化,滴水量均由大渐小,终端最小或停滴,均有不同级次间断。滴、落水点固定者为对称构造,不固定和向一侧位移飘落者为不对称,各类笋心线转接点均展示气候转(跃)变形式,转接点重合呈直线者,气候渐变,停滴间断短,呈折线者,则气候突(跃)变,停滴时间较长。两笋心线头尾不重合,两点相距越远,突变越明显,甚至成风化(壳)测年资料表明,各类型笋心线越长、转接级次越多、连接点变化越大,显示成笋时间越长,气候演化级次复杂,转(跃)变越多,间断时间越长或级次多。

3 石笋沉积间断的普遍性与沉积速率的多变性

石笋沉积特征呈多级次旋回性,其中包含着多级次沉积间断、多变的沉积速率,用TIMS U系高精度测年方法,可获得纹(壳)层组至旋回的沉积时间,也可获得纹(壳)层组、亚旋回、旋回彼此间的沉积间断时段和纹(壳)层组、亚旋回、旋回内的不同沉积速率。4号石笋的测年结果(表1)证实,石笋沉积间断具普遍性和多级时段性(林玉石等,2003),间断时段差异大,一般是旋回间的间断时间大于亚旋回间大于纹(壳)层组间的间断时间。寒冷期沉积间断频率大、时间较长,温暖期间断发生在亚旋回或旋回间,间断时间偏短。沉积间断标志明显者间断时间长,不明显者间断时间短,如②与③旋回间暗色标志

层明显, 间断界面上下纹(壳)层叠复构造不协调具交切现象, 笋心线首尾不连接, 呈折断现象, 间断时间达 48.222 ka。③与④旋回间, 黑色标志层、笋心线转折等, 沉积间断现象很明显, 间断时间达 26.224 ka。其他以暗色或暗化纹层为标志者, 间断时间均在 100a 级上下, ⑥与⑦旋回间暗色标志层明显些, 间断时间达 705 a, 而⑧与⑨旋回间笋心线呈折线标志, 间断时间仅 23 a。总之 4 号石笋的沉积间断时间从 10 年级至万年级, 而亚旋回和纹(壳)层组间的间断时间应以百年级以下为主, 甚至是年际间断, 呈现普遍性和多级时段性。沉积间断的时间记录, 据统计 4 号石笋旋回间沉积间断累积达 75.804 ka, 占石笋形成时间的 51.21%, 而①~⑨旋回的沉积时间仅 72.222 ka, 占成笋时间的 48.79%, 间断沉积的普遍性和多级次时(笋)段, 不仅符合石笋宏观和微观的沉积特征, 也有观测依据。现在的洞穴一般都有滴水, 多数滴落在石笋上, 有的滴水点较多, 水量亦大, 呈线状、片(筛)状、簇状、点状分布, 如董歌洞、盘龙洞等, 据观测, 这些滴水点从春初到盛夏, 逐渐滴落水点增多, 水量增大, 夏至末初秋很快减少, 水量变小, 甚至无水而停滴, 晚秋至寒冬多数停滴, 少数虽不停滴, 但滴速很慢或极慢, 水量小。石笋沉积速率变化的多级次, 显示气候演化期次具不稳定性。系统测年表明, 沉积纹(壳)组的不同时段沉积速率不同, 变化频度和变幅均大。4 号笋底 300.3~299 cm, 是①旋回 1 纹(壳)层组的底至顶, 沉积年龄从 $(147.838 \pm 2.6) \sim (146.62 \pm 1.3)$ ka BP, 沉积速率为 $5.45 \sim 0.36$ mm/100a, 笋顶 0.5~11 cm, 是⑨旋回, 沉积年龄由 $(0.397 \pm 0.012) \sim (0.128 \pm 0.044)$ ka BP, 沉积速率达 39.03 mm/100a。旋回以下的 290 cm 笋段, 还有近 50 个纹(壳)组, 已测 25 个沉积速率, 从 $0.39 \sim 27.44$ mm/100a, $10.35 \sim 25.25$ mm/100a 者在⑤旋回以上, 而 $1.11 \sim 8.75$ mm/100a 者在④旋回以下。全笋的沉积速率差异虽大, 但变化有序, ④旋回以下沉积速率很小, 但变化频繁, 差异小, 最大速率是小速率的 3~4 倍。

综上所述, 石笋沉积组合的多级次旋回性、纹(壳)层组呈叠复构造的级次性、叠复构造类型和特征性纹(壳)层的“相”意义、沉积间断的普遍性和沉积速率的多变性及其彼此呈级次性。这些沉积特征是气候环境演化的综合显示, 表现出石笋沉积与气候演化二者呈协调对应, 并以多级次时段(间)记录为据, 确定气候演化过程及其旋回性、冷暖度、转变(换)频率和速度等的不稳定性, 控制石笋沉积(生

长)过程及其旋回性、沉积间断、沉积速率的多变性及其彼此对应的多级次性。随着高分辨提取古气候环境信息的深入研究(覃嘉铭等, 2001a, 2001b, 2004; 张美良等, 2004, 2003), 国内外对石笋纹(壳)层研究的不断探索深化(袁道先等, 1999, 2002, 2003; 刘东升等, 1997; 谭明等, 1999; 秦小光等, 1997), 若能更精确地定年和年、季际物质沉积标志的研究难点能有所突破, 对石笋沉积研究将是重大贡献。

4 结论

4 号石笋由 9 个沉积旋回、24 个亚旋回、53 个纹(壳)层组与相应的气候旋回、阶段、气候期彼此对应, 成笋时间自 $(147.838 \pm 2.6) \sim (0.128 \pm 0.044)$ ka。

石笋中心(轴)线呈垂线、斜线、折线、“S”线型和若干特殊型等基本叠复构造类型, 组成复合“S”型笋心线, 展示滴水-流水动态变化过程、时间级序、气候演化过程及时间级序, 显示石笋沉积的全过程。沉积时间达 72.222 ka, 占成石笋形成时间的 48.79%。石笋中—上段沉积速度快, 是全新世冰后期温暖气候期的沉积, 最大沉积速率达 39.03 mm/100a, 中—下段是中、晚更新世大理冰期寒冷气候的沉积, 最小沉积速率仅 0.36 mm/100a。 9.363 ± 0.040 ka 之前的冰期气候沉积笋段, 最大速率 8.75 mm/100a, 是最小速率的 22~24 倍, 之后的冰后期成笋段, 最大沉积速率为 39.03 mm/100a, 是最小速率的 3.8 倍。

4 号石笋沉积间断时间累计长达 75.804 ka, 占石笋形成时间的 51.21%。石笋中—上段沉积间断频率小, 间断时间短, 最长为 0.705 ka, 短的是年级或更短, 中—下段沉积间断频繁, 间断时间长, 最长长达 48.222 ka, 总之, 石笋沉积厚度、时间、速率、间断、韵律、旋回等都具多变性, 而沉积间断和纹(壳)层韵律性组合或叠复又有普遍性, 使石笋沉积的基本特征具多级次旋回性, 呈现基本有序。

气候、地质、环境、水文地质、洞穴环境等的协调作用和演化综合控制了石笋的沉积特征。气候冷、暖和降水量、冷暖转(跃)变频率或速度、演变过程和级序的不稳定性, 与石笋沉积的纹(壳)层组成和组合呈多级次旋回性沉积特征、过程、特征变化及其级序等, 其过程和级次彼此对应, 时限(间)同步。气候演化影响洞内外的成笋环境, 控制成笋过程和沉积特征(林玉石等, 2003)。

参考文献

林玉石, 张美良, 覃嘉铭. 2001. 洞穴石笋纹(壳)层构造类型研究. 中

国岩溶, 20(1):5~10.

- 林玉石, 张美良, 覃嘉铭. 2001. 洞穴石笋沉积速率研究中值得注意的几个问题. 中国岩溶, 20(2):131~136.
- 林玉石, 张美良, 覃嘉铭. 2002. 洞穴石笋沉积(生长)间类型研究. 地质学报, 76(1):138~144.
- 林玉石, 张美良, 程海等. 2003. 贵州荔波第四纪 近期石笋地质年表与气候事件. 地学前缘, 10(2):341~350.
- 刘东升, 谭明, 秦小光等. 1997. 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. 第四纪研究(1):41~49.
- 覃嘉铭. 1997. 古气候变化的石笋同位素记录研究——以盘龙洞为例. 地球学报, 18(3):255~260.
- 覃嘉铭, 袁道先, 林玉石等. 2001a. 我国南方黔桂地区最近 16 万年高分辨率石笋记录的气候事件. 地学前缘, 8(1):99~105.
- 覃嘉铭, 袁道先, 林玉石等. 2001b. 末次冰期短尺度气候突变事件: 西南地区石笋记录的证据. 矿物岩石地球化学报, 20(4):391~393.
- 覃嘉铭, 袁道先, 程海等. 2004. 新仙女木及全新世早中期气候突变事件: 贵州茂兰石笋氧同位素记录. 中国科学 D 辑, 34(1):69~74.
- 秦小光, 刘东升, 梁汉东等. 1997. 石笋微层物质的二次离子质谱分析及其气候意义. 第四纪研究(1):59~64.
- 谭明, 秦小光, 沈瀛梅等. 1999. 中国洞穴碳酸盐双重光性显微旋回及其意义. 科学通报, 44(6):646~648.
- 袁道先, 覃嘉铭, 林玉石等. 1999. 桂林 20 万年石笋高分辨率古环境重建. 桂林: 广西师范大学出版社, 17~30.
- 袁道先, 刘再华, 林玉石等. 2002. 中国岩溶动力系统. 北京: 地质出版社, 162~177.
- 袁道先, 刘再华, 蒋忠诚等. 2003. 碳循环与岩溶地质环境. 北京: 科学出版社, 95~175.
- 张美良, 袁道先, 林玉石等. 1998. 广西灌阳响水洞石笋的同位素年龄及古气候意义. 中国岩溶, 17(4):311~318.
- 张美良, 林玉石, 覃嘉铭等. 2001. 洞穴石笋沉积纹层的形态组合及其滴水的水动力条件. 西南师范大学学报(4):466~470.
- 张美良, 林玉石, 覃嘉铭等. 贵州荔波董哥洞 3 号石笋的同位素年龄及古气候信息. 沉积学报(3):426~432.
- 张美良, 袁道先, 程海等. 2003. 黔南洞穴石笋古气候变化记录及终止点 II 的确定. 中国科学(D 辑), 33(11):942~950.
- 张美良, 程海, 林玉石等. 2004. 贵州荔波 15 万年以来石笋高分辨率古气候记录. 地球化学, 33(1):65~74.

References

- Lin Yushi, Zhang Meiliang, Qin Jiaming. 2001. Study on the structure types of stalagmite lamina or lamella in cave. *Carsologica Sinica*, 20(1):5~10(in Chinese with English abstract).
- Lin Yushi, Zhang Meiliang, Qin Jiaming. 2001. A study on the sedimentation rate of stalagmite in cave. *Carsologica Sinica*, 20(2):131~136(in Chinese with English abstract).
- Lin Yushi, Zhang Meiliang, Qin Jiaming. 2002. Study on the sediment disconnected types of stalagmite in cave. *Acta Geologica Sinica*, 76(1):138~144(in Chinese with English abstract).
- Lin Yushi, Zhang Meiliang, Cheng Hai et al. 2003. The geological time scale and climatic events from stalagmites in the late or recent quaternary period in the Libo area, Guizhou, southwest China. *Earth Science Frontiers*, 10(2):341~350(in Chinese with English abstract).
- Liu Dongsheng, Tan Ming, Qin Xiaoguang et al. 1997. Discovery of microbedding in speleothems in China and its significance in the study of global change. *Quaternary Sciences*(1):41~49(in Chinese with English abstract).
- Qin Jiaming, Yuan Daoxian, Lin Yushi et al. 2001. Records of high-resolution climate events from stalagmites since 160 000 a. B. P. in Guangxi and Guizhou Provinces, China. *Earth Science Frontiers* 8

(1):99~105(in Chinese with English abstract).

- Qin Jiaming, Yuan Daoxian, Lin Yushi et al. 2001. Short-term abrupt climatic events of Last glaciation: The evidences from stalagmite records in Southwest China. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 20(4):391~393(in Chinese with English abstract).
- Qin Jiaming. 1997. Studies on stalagmite isotope records of paleoclimatic changes. *Acta Geoscientia Sinica*, 18(3):255~260(in Chinese with English abstract).
- Qin Jiaming, Yuan Daoxian, Cheng Hai et al. 2004. The younger dryas and climate abrupt events in the Early and Middle Holocene: stalagmite oxygen isotope record from Maolan, Guizhou, China. *Science in China(D)*, 34(7):69~74(in Chinese with English abstract).
- Qin Xiaoguang, Liu Dongsheng, Liang Handong et al. 1997. Preliminary analyses by SIMS on trace components of stalagmite microlayers and their climate significance. *Quaternary Sciences*(1):59~64(in Chinese with English abstract).
- Tan Ming, Qin Xiaoguang, Sheng Linmei et al. 1999. The doubling light characteristics of the micro-cycles in speleothems in China and its significance in the study of global change. *Chinese Science Bulletin* 44(6):646~648(in Chinese with English abstract).
- Yuan Daoxian, Qin Jiaming, Lin Yushi et al. 1999. High resolution paleoenvironmental reconstruction up to 200,000 years B. P. with speleothems from Guilin. *Guangxi Teachers University Press*, 17~30(in Chinese with English abstract).
- Yuan Daoxian, Liu Zhaihu, Lin Yushi et al. 2002. Karst dynamic systems of China. Beijing: Geological Publishing House, 162~177(in Chinese with English abstract).
- Yuan Daoxian, Liu Zhaihu, Jiang Zhongcheng et al. 2003. The carbon cycle and karst geological environment. Beijing: Science Press, 95~175(in Chinese with English abstract).
- Zhang Meiliang, Yuan Daoxian, Lin Yushi et al. 1998. Ages and paleoclimatic meanings of a stalagmite from Xiangshui cave at Guanyang county, Guilin. *Carsologica Sinica*, 17(4):311~318(in Chinese with English abstract).
- Zhang Meiliang, Lin Yushi, Qin Jiaming. 2001. The form combinations and dynamic conditions of dropping water of deposition laminae from stalagmites in caves. *Journal of Southwest China Normal University(Natural Science)*, 114(4):466~470(in Chinese with English abstract).
- Zhang Meiliang, Yuan Daoxian, Lin Yushi et al. 2001. Isotopic ages and paleoclimatic implications of No. 3 stalagmite from Dongge cave in Libo. *Acta Sedimentologica Sinica*, 19(3):425~432(in Chinese with English abstract).
- Zhang Meiliang, Yuan Daoxian, Cheng Hai et al. 2003. The record of paleoclimatic change from stalagmites and the determination of termination II in the south of Guizhou Province, China. *Science in China(Ser. D)*, 47(11):1~11(in Chinese with English abstract).
- Zhang Meiliang, Cheng Hai, Lin Yushi et al. 2004. High resolution paleoclimatic environment records from a stalagmite of Dongge cave since 15000 a in Libo, Guizhou Province, China. *Geochimica*, 33(1):65~74(in Chinese with English abstract).

图版说明(Plate explanation)

图版 I Plate 1

- a-Q₂ 贵州七星洞 2 号石笋① 旋回笋心线上段垂线型下段斜线型, 叠柱(锥)构造。
- b-Q₆ 贵州七星洞 6 号石笋各纹(壳)层组笋心线均斜线型, 叠柱(柱)构造。
- c-P₂ 桂林盘龙洞 2 号石笋② 旋回笋心线 S 型, 叠柱(锥)构造, 其他为斜线型, 旋回间均沉积间断。
- d-D₃ 贵州董歌洞 3 号石笋① 旋回笋心线垂线型, 叠柱(柱)构造, ② 旋回为特殊型。

