

文章编号: 1000-0550(2002)01-0124-05

云南宣威 4.6 万年以来洞穴 石笋古气候变化记录^①

张美良 袁道先 林玉石 覃嘉铭

(中国地质科学院岩溶地质研究所, 岩溶动力学开放研究实验室 广西桂林 541004)

摘要 石笋是高分辨地记录古气候环境变化的主要信息载体之一。本文通过对宣威下水龙洞 1 号石笋进行 α 能谱铀系测年及碳、氧同位素分析, 获得了距今 46.1 ka 至 2.75 ka 高分辨率的古气候演变信息。其年龄与 $\delta^{18}\text{O}$ 值的记录在纵向上的变化具有明显的韵律性特征, 可与深海岩芯 V_{28-238} 同位素记录所揭示的第 3 阶段、2 阶段和 1 阶段进行对比。反映 46.1 ka 以来宣威地区的气候波动与全球的气候变化具有明显的一致性。但是, 区内是气候变化的敏感区, 是东亚季风与印度洋季风交互作用的特殊区域, 存在有明显的地区性气候变化特征, 在整个末次冰期时段 (46.1~8.1 ka) 气候总体偏温暖, 10.25 ka 为新仙女木冷事件的最冷终止点。在全新世大暖期时段的 7.1~3.7 ka 间显示气候温暖湿润, 而在 3.7~2.75 ka 间伴随太阳辐射和印度洋西南季风强度的减弱, 气候有明显的降温趋势。

此外, 石笋的碳、氧同位素显示的气候冷暖变化是, 主沉积旋回以万年级、千年级和百年级为周期性变化; 亚旋回以千年级和百年级为周期性变化。

关键词 洞穴石笋 古气候变化 宣威下水龙洞

第一作者简介 张美良 男 1956 年出生 高级工程师 区域岩溶或古环境研究

中图分类号 X141 **文献标识码** A

下水龙洞洞穴系统位于宣威城北约 40 km 的铺田村, 地处滇东高原东北部, 与贵州接壤, 属中亚热带高原岩溶峰丛洼地(谷)槽谷地区, 为由南向北和由北向南两股地表水的汇集与排泄区, 岩溶洞穴极为发育。峰体标高 2 201~2 320 m, 最高达 2 600 m。区内年均气温 13.3℃, 1 月平均为 5.0℃, 7 月平均为 19.4℃; 年均降水量 997.7 mm, 年均蒸发量为 2 370.6 mm, 属湿度不足带, 最大的特点是常盛行西南季风, 年均风速达 3.6 m/s。

铺田村下水龙洞洞穴系统由高、中、低三层洞穴组成, 在垂向上构成层楼式洞穴系统。洞穴系统位于宣威红石岩向斜的东翼, 红石岩—明德—雪麻箐 N60E/SE \angle 35~55°方向的压扭性断裂带中, 产于下二叠统栖霞和茅口组灰岩中, 洞穴系统明显受 NEE 向及 NW(W) 向断裂控制, 洞道主要沿北东及北北向次级断裂、裂隙发育。下水龙洞为低层洞穴, 洞口标高 2 040 m, 主洞道由沿 NEE 及 NWW 向断裂、裂隙发育, 由廊道状干洞道及地下河道组成, 干洞道长 980 m, 宽 2~8 m, 高 3~10 m, 总体呈 EW~NWW 向展布, 地下河支洞呈 N(N)W 及 NEE 向展布。中层洞为拦猪洞, 洞口标高 2 090 m, 主洞道沿 NEE 向次级断裂裂隙发育, 支洞沿近 SN 向和 NNW 向裂隙发育, 主洞长

300 m, 宽 1~6 m, 高 0.5~10 m, 在断裂、裂隙交汇处形成小洞厅, 洞内竖井可与下层洞连通。高层洞为凤巢洞, 为一倾斜洞, 洞口标高约 2 120 m, 洞底标高 2 090 m, 主洞道主要沿北东向断裂、裂隙发育, 局部沿北西向断裂、裂隙发育, 主洞道长 1 160 m, 宽 1~8 m, 高 1.5~15 m, 总体呈 NE 向展布, 在断裂、裂隙交汇处形成小洞厅或局部转折。

1 下水龙洞 1 号石笋的沉积特征

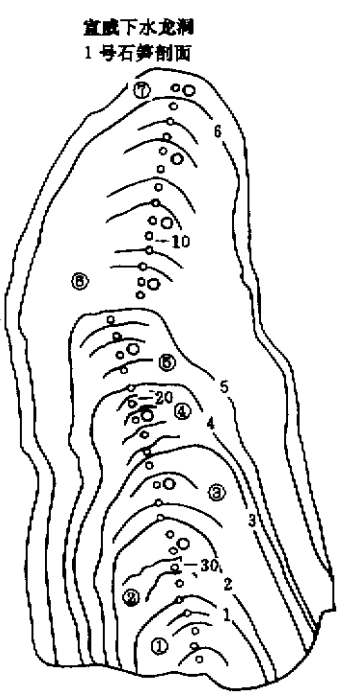
下水龙洞 1 号石笋位于 960 m 处的壁流石上, 笋高 37.7 cm, 笋底直径 20~22 cm, 笋顶直径 5 cm。石笋剖面研究表明(表 1), 有 7 个沉积旋回, 1 至 3 旋回示滴水向右侧移, 4 至 5 旋回示滴水向左侧移, 6 至 7 旋回示滴水向右侧移, 其内有 6 个间断沉积纹层, 以 5、6 两次沉积间断较长, 构成沉积旋回不整合的顶底, 是地质事件和气候环境多变或突变时期, 形成土黄、桔黄色和暗灰—褐色风化壳层或沉积间断面。

①沉积旋回, 具 3 个亚旋回, 由灰黄、黄白色方解石纹层组成, 厚 5.2 cm。方解石具重结晶, 呈中—粗晶粒状, 沉积纹层厚 >5 mm, 呈微弱波纹状, 且微细晶尖孔发育; 其间的波纹状或缓拱的纹层组构成平顶叠复的柱状叠锥, 示滴水略有偏移, 水量不大, 流速较慢。

① IGCP-448 国际对比项目、科技部攀登特别资助项目(编号 2000-026)资助

表 1 云南宣威下水龙洞 1 号石笋纵剖面及年龄

Table 1 Vertical profile and ages of NO.1 stalagmite from Xiashuilong cave of Xuanwei, Yunnan

宣威下水龙洞 1 号石笋剖面	厚度 /cm	沉积 旋回	沉积速率 /(mm/100a)	年龄/ka B. P.	气候 特征
	2	⑦	2.0	2.75 ± 0.35 * 2.85 ± 0.35	全大 新暖 世期
	14.5	⑥	30	3.3 ± 0.25 4.2 ± 0.3 7.1 ± 0.4	
	19.0	⑤	0.615	8.1 ± 0.5 * 11.4 ± 0.6	末 次 冰 期
	23.5	④		11.6 ± 0.6 *	
	27.7	③		12.0 ± 0.6 * 12.2 ± 0.75	
	32.6	②		26.55 ± 0.35 * 29.25 ± 0.75 *	
	37.7	①	30.45 ± 0.75 * 46.10 ± 0.35		
* 为插入年龄值					

② 沉积旋回,具 2 个亚旋回,由黄白色方解石组成,厚 4.7 cm。方解石具重结晶,呈中—细晶粒状,沉积纹层厚 >5 mm,呈微弱波纹状,微细晶尖孔发育;其间的微波纹层组叠复呈平顶的柱状叠锥,示滴水量小,流速较慢而稳定。与下伏呈平行不整合接触。

③ 沉积旋回,具 2 个亚旋回,由黄白色、暗灰色方解石纹层组成,厚 4.2 cm。方解石具重结晶,呈细—微粒状、微放射状或针状。沉积纹层厚 0.5~1.5 mm,黄白色与暗灰色纹层交替产出,具韵律纹层,叠复呈柱状叠锥,示滴水量小而稳定。与下伏呈平行不整合接触。

④ 沉积旋回,具 4 个亚旋回,由棕黄色、暗灰色方解石韵律纹层组成,厚 4.5 cm。方解石具微晶化,呈细粒状、放射状。沉积纹层厚 0.2~1.5 mm,具波纹状,叠复呈锥柱状,示滴水交替频繁,滴水减少,微向左侧偏移。与下伏呈不整合接触。

⑤ 沉积旋回,有 5 个亚旋回,由灰色、灰白—白色方解石纹层组成,厚 4.5 cm。方解石具重结晶,呈细—微粒状、微放射状或针状。沉积纹层厚 0.2~1 mm,具波状、缓拱波纹状,叠复呈平凹顶的柱状叠锥,示滴水减小,微向左侧偏移。与下伏呈不整合接触,后期在其顶部发生较长时间的停滴,在表面形成间断不整合面或风化壳层。

⑥ 沉积旋回,由土黄色—棕黄色、灰黄白色、灰白色方解石韵律纹层组成,厚 12.8 cm。方解石具重结晶,呈中—细粒状、微粒状—针状或柱状。沉积纹层厚 0.1~1 mm,具明显微波纹状、缓拱波纹状的韵律纹层,叠复呈柱状叠锥,示滴水微向右侧偏移,滴水量大而固定。与下伏间断面呈不整合接触,后期在其顶部发生较长时间的停滴,在表面形成间断不整合面或风化壳层,含较多的泥质成分,是地质时期的主要突变阶段^[1,2]。

⑦ 沉积旋回由灰白色方解石韵律纹层组成,厚 1.7 cm,边部厚 0.3~0.8 mm。方解石具微晶化,呈细—微粒状,含微细晶尖孔。沉积纹层厚 0.1~0.5 mm,由平行微粒状、缓拱波纹状的韵律纹层,叠复呈柱状叠锥,示滴水量小而固定,其后发生停滴,结束沉积。与下伏间断面呈不整合接触。

2 宣威龙洞 1 号石笋的形成年龄及沉积速率

年代测定主要采用 α 能谱铀系法(即用 α 计数 $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ 测年,仪器系统为美国 EG&GORTEC 公司的 α 谱仪、探头、920-8 谱控制器及 Compaq 486 微机组成。空白本底 24 小时 < 24 个记数,FWHM ~ 19KeV。分析结果与国际(BGW-04412)的发布值均在

误差范围内,由地质科学院岩溶所测试室测试,每件碳酸盐样品重40~60 g。年龄样品的选择,主要是根据石笋剖面的沉积速率变化,特别是根据石笋沉积间断面的上下以及气候变化特征加以确定。主要沿石笋轴部采取样品(见表1),经石笋的铀系测年确定,下水龙洞1号石笋形成年龄在46.10~2.75 ka之间,经历了43.35 ka的沉积或生长时间。测年证实,石笋生长较慢,沉积间断频繁,平均沉积速率为0.853 mm/100年。由表1可以看出,石笋①~⑤沉积旋回的沉积速率较慢,在38.25 ka间沉积厚度为23.5 cm,沉积速率为0.615 mm/100a;自第⑥沉积旋回开始沉积速率加快,在3.95 ka中就生长了12 cm,沉积速率30 mm/100a,是7.85 ka以前的30倍,这说明自第⑥沉积旋回开始,洞顶滴水较均匀、稳定,滴水点低而快。其后,在约3.15 ka间滴水发生短暂间断,间滴时约0.3 ka。从2.85 ka又开始了短暂的沉积,到约2.75 ka结束最后的沉积。

3 石笋的碳、氧同位素

稳定同位素检测由地质科学院岩溶所同位素室完成,其中碳、氧同位素的碳酸盐样品与100%磷酸盐反应生成CO₂,纯化后于MM-903E(英国VG公司)进行质谱分析, $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值为相对PDB标准,系统误差<0.1‰。水样的氧采用H₂O—CO₂平衡法,氢采用锌还原法, δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值为相对于SMOW标准,系统误差 $\delta\text{D}<1\text{‰}$ 、 $\delta^{18}\text{O}<0.1\text{‰}$ 。宣威下水龙洞1号石笋

碳、氧同位素记录曲线记录表明(图1),两者的总体变化趋势大体一致,特别是在7.1~46.1 ka间两曲线最吻合, $\delta^{18}\text{O}$ 值最显著的突变发生在⑤与⑥沉积旋回间,在7.85 ka与7.1 ka间的分界点, $\delta^{18}\text{O}$ 值由-7.85‰突变为-13.61‰, $\delta^{13}\text{C}$ 值由-4.29‰突变为-6.42‰,是新仙女木冰期与全新世的分界点。其它几个阶段的 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 值与总平均值大体一致,波动性不大。①沉积旋回46.1~30.45 ka间平均 $\delta^{18}\text{O}$ 值为-10.99‰,平均 $\delta^{13}\text{C}$ 值为-6.75‰;②沉积旋回29.70~22.6 ka间平均 $\delta^{18}\text{O}$ 值为-11.088‰,平均 $\delta^{13}\text{C}$ 值为-5.86‰;③沉积旋回12.5~12.1 ka间平均 $\delta^{18}\text{O}$ 值为-10.88‰,平均 $\delta^{13}\text{C}$ 值为-7.31‰(相当H2);④沉积旋回12.0~11.6 ka间平均 $\delta^{18}\text{O}$ 值为-10.18‰,平均 $\delta^{13}\text{C}$ 值为-6.35‰(相当H1);⑤沉积旋回11.4~7.85 ka间平均 $\delta^{18}\text{O}$ 值为-9.22‰,平均 $\delta^{13}\text{C}$ 值为-5.27‰,为新仙女木冷阶段,自7.85 ka以来结束末次冰期进入全新世。⑥沉积旋回7.1~3.15 ka间平均 $\delta^{18}\text{O}$ 值为-12.352‰,平均 $\delta^{13}\text{C}$ 值为-5.17‰, $\delta^{18}\text{O}$ 突变负、 $\delta^{13}\text{C}$ 值突然增大,表明此阶段乔木森林和灌木植被恢复有滞后作用,仍以C4植物为主,反映为温暖湿热的气候环境。⑦沉积旋回2.85~2.75 ka间 $\delta^{18}\text{O}$ 值为-10.98‰, $\delta^{13}\text{C}$ 值为-6.17‰,至此石笋结束沉积。

4 古气候变化信息

据石笋碳、氧同位素记录的信息,宣威地区自7.85 ka B.P.结束末次冰期而进入全新世。测试结果表明,7.85 ka B.P.至7.1 ka B.P.前后为冷转暖的过渡性冷阶段。区内46.1 ka以来,大致有7次冷暖变化阶段,其中⑤、⑥沉积旋回是新仙女木冰期向全新世温暖期的跃变点(表1)。石笋纹层的碳、氧同位素显示,石笋的冷暖变化,主沉积旋回以万年级、千年级和百年级为周期性变化;亚旋回以千年级和百年级为周期性变化^[3]。

晚更新世46.1 ka以来氧同位素($\delta^{18}\text{O}$)总平均值为-11.1‰,可作为冷暖分界点。其中,碳同位素($\delta^{13}\text{C}$)总平均值为-5.85‰。①沉积旋回46.1~30.45 ka间的 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值为-10.99‰、 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值为-6.75‰,以C3植物为主,表现为温偏凉的湿润阶段,相当于V₂₈₋₂₃₈深海岩芯氧同位素第三阶段晚期;②沉积旋回29.70~22.6 ka间的 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值为-11.088‰、 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值为-5.86‰,以C4植物为主,表现为温凉湿润阶段,相当于V₂₈₋₂₃₈深海岩芯氧同位素第二阶段弱温期的早期;③~④沉积旋回12.5 ka~11.6 ka间的 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值为-10.088‰~-10.18‰,

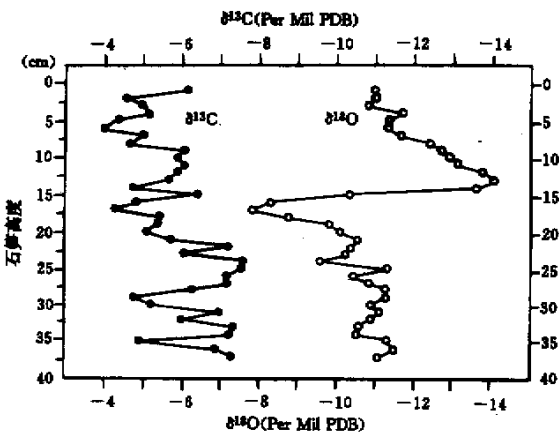


图1 云南宣威县铺田村下水龙洞1号石笋碳、氧同位素曲线图
Fig. 1 The records of carbon and oxygen isotopic compositions No. 1 stalagmite from Xiashuilong cave of Xuanwei, Yunnan

$\delta^{13}\text{C}$ 平均值为 $-6.35\text{‰} \sim -7.31\text{‰}$, 以 C3 植物为主, 其中, 在 12.1~12 ka 间发生了短暂间断, 总体表现为凉偏冷的半湿润阶段, 相当于 V_{28-238} 深海岩芯氧同位素第二阶段的晚期; ⑤ 沉积旋回 11.4 ka 至 7.85 ka 间的 $\delta^{18}\text{O}$ 值 -9.22‰ 比总平均值 (-11.1‰) 高 1.88 ‰ , $\delta^{13}\text{C}$ 平均值为 -5.27‰ , 以 C4 植物为主, 是新仙女木冷事件发生阶段, 表现为寒冷干旱, 其中, 10.25 ka 为新仙女木冷事件的最冷终止点, 相当于 V_{28-238} 深海岩芯氧同位素第二阶段; ⑥ 沉积旋回 7.1 ka 至 3.15 ka 为冰后期的全新世大暖期, 氧同位素较负, $\delta^{18}\text{O}$ 值 -12.352‰ 比总平均值负 1.22 ‰ 。由于在此阶段北半球太阳辐射增强引起季风环流 (9~6 ka B.P.) 达到最强盛阶段, 印度洋西南季风加强, 北非、西亚、中亚气候湿润, 湖面扩张; 同期青藏高原湖泊以高湖面为主, 但仍有波动, 洱海在 8.1~5.9 ka 间的湖泊沉积记录显示, 本阶段气候温暖湿润, 湖面较高, 与西南季风加强对应^[4,5]。宣威在 7.1 ka 至 3.15 ka 间气候总体特征是气温偏暖, 早期 7.1~3.7 ka 间由于受太阳辐射和印度洋西南季风加强的影响, 雨带向北东、偏西迁移, 显示气候温暖湿润, 但是此阶段仍以 C4 植物为主, 主要是受新仙女木冷事件的影响, 乔木森林和灌木植被恢复有滞后作用。晚期在 3.7~3.15 ka 间的 $\delta^{18}\text{O}$ 值比早期的 $\delta^{18}\text{O}$ 值高 1.98 ‰ , 伴随太阳辐射和印度洋西南季风强度的减弱, 有效降水由北、西向东、南迁移, 气候有明显的降温趋势。⑦ 旋回在 2.85~2.75 ka 间 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 -10.98‰ , $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -6.17‰ , 以 C3 植物为主, 由于东亚夏季风减弱, 西南季风和东亚冬季风相对加强, 气温稍有下降, 表现温偏凉半湿润环境。

区内洞穴石笋的氧同位素值普遍较广西、贵州 5 万年以来洞穴石笋的氧同位素值较轻或偏负, 分别比广西桂林盘龙洞 1 号石笋偏负 -4.94‰ 、灌阳响水洞 1 号石笋偏负 -5.1‰ ^[1,2,3]、贵州荔波董哥洞 4 号石笋偏负 -3‰ 、衙门洞 1 号石笋偏负 -2.55‰ 、都匀凯西七星洞 4 号石笋偏负达 -5.42‰ ; 但是, 比云南泸沽湖拉 (全新世) 家仙人洞 1 号石笋、狮子山仙人洞 1 号石笋分别偏高 2.45 ‰ 和 3.6 ‰ 。这些现象说明, 区内一方面受高原和高度的影响, 另一方面处于东南季

风与西南季风替影响区的边缘地带, 既受西南季风的影响, 也受东南季风影响, 所以, 洞穴石笋的氧同位素均较低海拔的岩溶斜坡地带或岩溶平原区和靠近东南季风影响区较负, 而较西南季风强影响的云南泸沽湖区高。

5 结语

(1) 宣威下水龙洞 1 号石笋形成于晚更新世晚期至全新世, 是末次冰期以来的沉积物。自 46.1 ka B.P. 至今, 由 1 个万年级、3 个千年级和 3 个百年级等 7 个沉积旋回组成, 其内有 6 次间断沉积, 其中 2 间断面的沉积间断时间最长达上万年, 1 和 5 沉积间断为千年, 其余间断为百年。这些沉积间断面所构成的沉积旋回的顶、底, 是古水文地质突变或剧变的综合显示, 可作为地质时代分界的标志层。

(2) 洞穴石笋的氧同位素记录表明, 区内 46.1 ka B.P. 以来的气候变化, 可以划分为 3 个阶段: 第一阶段为全新世 7.1 ka B.P. 至今, 总体显示气候温暖湿润, 年平均气温变化不大; 其中, 自 3.7 ka B.P. 至今, 气温有缓慢下降趋势, 表现温偏凉半湿润环境。第二阶段为盛冰期 8.1~26.55 ka B.P., 由 3 个百年级和 1 个万年级的冷暖相间的气候期所组成; 第三阶段为 26.55~46.1 ka B.P., 有 2 个冷暖相间的气候期, 但比起盛冰期, 其平均气温的变化要小得多。

(3) 46.1~8.1 ka B.P. 气候变化的总趋势是暖变冷, 温差幅度由小到大。末次冰期最后一次冷事件发生在 10.25 ka B.P. 左右, 是新仙女木冷事件在本区的表现。

参 考 文 献

- 1 张美良, 林玉石, 覃嘉铭等. 桂林水南洞石笋的沉积学特征[J]. 沉积学报, 1999, 17(2): 233~239
- 2 袁道先, 覃嘉铭, 林玉石等. 桂林 20 万年石笋高分辨率古环境重建[M]. 桂林: 广西师范大学出版社, 1999
- 3 张美良, 林玉石, 覃嘉铭等. 广西灌阳县观音阁响水洞的形成环境及 1 号石笋的古气候信息[J]. 地质地球化学, 2000, 28(1): 34~40
- 4 张振克, 吴瑞金, 王苏民等. 全新世大暖期云南洱海环境演化的湖泊沉积[J]. 海洋与湖沼, 2000, 31(2): 210~213
- 5 陈敬安, 万国江, 陈振楼等. 洱海沉积物化学元素与古气候演化[J]. 地球化学, 1999, 28(6): 562~570

The Record of Climatic Change from Stalagmite in Xiashuilong Cave of Xuanwei City Since 46ka

ZHANG Mei-liang YUAN Dao-xian LIN Yu-shi QIN Jia-ming

(Karst Dynamics Laboratory, Institute of Karst Geology, CAGS, Guilin Guangxi 541004)

Abstract Stalagmites in karst caves are the main carrier of paleoclimatic and paleoenvironmental records with the high resolution. The high resolution information on paleoclimatic change from 46.1ka B.P. to 2.75ka B.P. has been obtained through α -counting U-series dating and carbon and oxygen isotopic analysis of No. 1 stalagmite in Xiashuilong cave of Xuanwei city. The record of its ages and $\delta^{18}\text{O}$ value in the change of the vertical section have obvious rhythm characteristics and can be compared with the oxygen isotopic records of deep-sea cores at III, II and I stages. It reflects that the climatic changes in Xuanwei area coincides with the fluctuation of global paleoclimatic change. But here is the sensitive area of the climatic change and also the specific region of the reciprocity between East Asian monsoon and Southwest monsoon, and the feature of the climatic change caused by them was obvious in this region. The overall last glaciation from 46.1ka B.P. to 8.1 ka B.P. show warm climate trend in the mass, and 10.25 ka B.P. is the coldest of the end point of Younger Dryas event. The Holocene Megathermal period during 7.1 ka B.P. and 3.7 ka B.P. are the climate of temperate (warm)-wet. The climate during 3.7 ka B.P. and 2.75 ka B.P. has obvious trend of decreasing temperature to follow the weakness of the sun radiation and the Southwest monsoon intension. Furthermore, the cold and warm change of the climate indicate that the main sediment cycles in stalagmite take the periodicity change as ten thousand years, thousand years and hundred years, and sub-cycles in stalagmite show the periodicity change as thousand years and hundred years.

Key words stalagmite, paleoclimatic change, Xiashuilong cave of Xuanwei city