

湖北清江和尚洞石笋的高分辨率碳氧同位素及古气候研究

黄俊华 胡超涌 周群峰

(中国地质大学测试中心, 武汉 430074)

摘要: 通过对湖北清江和尚洞 HS-2 号石笋的沉积特征及碳、氧同位素特征分析, 利用 U 系法定年, 获取了湖北地区 19.0~6.9 ka 的古气候、古环境信息(平均分辨率为 17 a, 局部分辨率达到 7 a), 得出如下结论: (1) 19.0~16.6 ka, C, O 同位素偏轻, 气候冷湿; (2) 16.6~11.1 ka, C, O 同位素偏重, 气候干热; (3) 11.1~10.3 ka 干热时期中的突然回冷事件对应于新仙女木事件; (4) 10.3~6.9 ka 气候温和, 雨量较丰, 后期逐渐变冷, 反映了历史时期湿冷、干热、温暖交替变化的气候趋势, 得出了千年级和百年级的一些气候变化趋势。

关键词: C, O 同位素; 洞穴石笋; 古气候; 古植被; 和尚洞; 湖北。

中图分类号: P641.3; P461 **文献标识码:** A

文章编号: 1000-2383(2000)05-0505-05

作者简介: 黄俊华, 男, 工程师, 1964 年生, 1989 年毕业于中国地质大学水工系, 主要从事环境同位素地质分析与研究。

岩溶洞穴沉积物(石笋)是古气候信息的有效载体。自 O'Neil 等^[1]和 Hendy^[2]提出利用洞穴沉积物重建古气候的方法以来, 在各国相继开展了此项研究。特别是近十多年来, 随着各种测试技术及研究手段的迅速发展, 利用洞穴沉积物进行古气候研究取得了许多有意义的成果。如 Dorale 等^[3]研究了美国 Cold Water 洞全新世以来的气候变化, Talma 等^[4]对南非 Cango 洞 2.7 m 长的石笋的古气候信息进行了分析, Holmgren 等^[5]对博茨瓦纳 35 cm 长的石笋的研究, Bar-Matthews 等^[6]对以色列 Soreg 洞的两个小型石笋和钟乳石的研究等都取得了令人满意的成果; 在国内袁道先等^[7]对桂林多个洞穴的石笋从沉积特征到 C, O 同位素等进行了研究, 获得了桂林地区 200 ka 来古气候变化, 谭明等^[8]、李红春等^[9]分别对北京石花洞的石笋的微层理及 C, O 同位素进行了研究, 并对古气候指示意义进行了探讨。本次研究试图通过对湖北清江和尚洞石笋的高分辨率同位素特征研究, 获取分辨率达到 10 a 级的湖北近 20 ka 来古气候变化, 并寻找新仙女木事件在石笋中的记录。

1 自然地理背景及地质概况

本次样品采集地点位于鄂西南清江流域, 地处中亚热带, 属于季风性的山地湿润气候, 总的特征是冬季严寒, 夏季酷热, 雾多湿重, 雨量充沛。鄂西清江流域是湖北省几个主要暴雨中心之一, 多年平均降雨量为 1 400 mm^[10]。HS-2 号石笋采自清江半峡段的南岸, 洞口高程 205 m, 长度大于 250 m, 宽 10~30 m, 发育于寒武系三游洞群^[11]。洞内各种化学沉积物石笋、石钟乳、石幔等广布, 供本次研究的 HS-2 号石笋取自距洞口约 120 m 处, 其长约 62 cm, 呈锥状, 底部直径 24 cm, 外表为灰白色。

2 分析样品的采集及石笋的沉积特征

2.1 样品加工与采集

对整个石笋沿中轴剖开, 可见色泽沉积纹层。根据沉积特征, 共取 4 个轴系定年样。为提高分辨率, 对 C, O 同位素分析样采用刻刀沿生长中轴方向连续采样, 在 61.7 cm 的长度上, 共采集 705 个样, 平均 11 个样/cm, 同时采集微量元素分析样 33 个。C, O 同位素分析采用磷酸法, 将样品 10~15 mg, 110

℃条件下烘干,与 100%磷酸在 25 ℃水浴中平衡反应,收集 CO₂ 在 MAT-251 质谱计上测定,分析精度 $< 0.1 \times 10^{-3}$, $\delta(^{13}\text{C})$, $\delta(^{18}\text{O})$ 数据均为相对于 PDB 标准值,由中国地质大学测试中心同位素室完成。4 个 U 系测年样,采用美国 EG&G ORPEC 公司生产的 Octete PLUS ALPHA 谱仪,由桂林岩溶地质研究所测定,微量元素由地矿部壳幔开放实验室测定,所用仪器为 VG 公司的 PQ3ICP-MS。

2.2 沉积特征分析

石笋沉积特征见表 1。

表 1 和尚洞 SH-2-1 石笋沉积特征

Table 1 Sedimentary characteristics of stalagmite in Heshangdong cave

阶段	特征描述	沉积厚度/mm	沉积时间/ka	沉积速率/(mm·a ⁻¹)	气候条件
V	灰白、黑、肉红色相间,少量泥质夹层,纹层细密	80	6.9~10.3	0.024	干热与干湿交替
IV	灰白色,结晶颗粒较小纹层细密,无泥质夹层	70	10.3~11.1	0.088	干冷少雨
III	黑白相间,夹泥质间断层,纹层细密	70	11.1~15.7	0.015	旱涝交替,温度较高
II	暗灰色,结晶致密,无泥质夹层,纹层细密	60	15.7~16.6	0.070	干热少雨
I	灰白色、肉红色,结晶颗粒较大,纹层较厚,无泥质夹层	340	16.6~19.0	0.142	湿冷多雨

3 分析结果

3.1 平衡判别

利用同位素手段提取洞穴沉积碳酸盐古气候记录,除对样品对象直接测定其形成年代和 C、O 同位素组成外,对样品自身还有两条很重要的要求:一是样品自形成以来要求保持同位素封闭体系;另一是碳酸盐沉积与介质水间必须达到同位素平衡^[2]。

关于封闭体系问题,可以通过洞穴石笋的环境背景及石笋碳酸盐的岩石、矿物学研究加以鉴别;而同位素沉积平衡问题,则可通过现今滴水与相应沉积物的鉴别以及过去年轮纹层的平衡检验来解决。

在石笋的纵向切面上,分别随意选取一个年轮纹层,沿纹层自轴心向两侧按一定间距取 5 件样品进行 C、O 同位素分析,并按纹层分别统计 $\delta(^{18}\text{O})$ 的平均值与 $\delta(^{13}\text{C})$ 之间的相关程度,结果列于表 2。

表 2 和尚洞石笋同位素反应的平衡数据

Table 2 Evidence of isotopic equilibrium reaction in stalagmite in Heshangdong cave

样号	P-1	P-2	P-3	P-4	P-5
$\delta(^{13}\text{C})/10^{-3}$	-9.64	-9.45	-9.37	-9.66	-9.79
	-8.23	-7.94	-8.13	-7.57	-7.49
$\delta(^{18}\text{O})/10^{-3}$	平均值: -7.87				
	标准偏差(S): 0.11				
$\delta(^{13}\text{C})$ 与 $\delta(^{18}\text{O})$ 的相关系数	$r=0.15$				

表 3 石笋铀系年龄数据

Table 3 ²³⁰Th-U ages data of stalagmite

样号	位置距顶/cm	$w(\text{U})/10^{-6}$	$w(^{234}\text{U})/ w(^{238}\text{U})$	$w(^{230}\text{Th})/ w(^{234}\text{U})$	年龄/ka
HS-2-1	顶部	2.34	1.565	0.065	6.9±0.4
HS-2-3	22	0.52	1.590	0.138	15.7±0.6
HS-2-5	28	0.39	1.571	0.145	16.6±0.8
HS-2-7	61	0.38	1.567	0.165	19.0±1.2

石笋在沉积过程中如果存在动力分馏(非平衡沉积),则 C、O 的轻同位素就会首先快速地从溶液中失去,沉积的碳酸盐纹层则自轴心向两侧重同位素随之增加,且 C、O 同位素之间显示出简单相关关系。

从上表可知: $\delta(^{18}\text{O})$ 标准偏差为 0.11, $\delta(^{13}\text{C})$ 与 $\delta(^{18}\text{O})$ 不具相关性,符合 Hendy 的两个判别原则^[2],故可认为:该石笋的碳酸盐基本上不存在动力分馏,而是处于与滴水同位素平衡的条件下形成的,可以作为古气候信息的载体。

3.2 年代数据及沉积速率

由表 3 年龄数据可得出,石笋的平均生长速率约为 0.05 mm/a,但据沉积特征及年龄数据分布,石笋生长不是匀速的,在 HS-2-7~HS-2-5,2.4 ka 时段内生长了约 340 mm,生长速率为 0.142 mm/a,HS-2-5~HS-2-3,900 a 的时段内生长了 60 mm,生长速率约为 0.07 mm/a;HS-2-3~HS-2-1,需分 3 段,其中在距顶 80~150 mm 之间的沉积特征与 HS-2-7~HS-2-5 段类似,沉积速率为 0.088 mm/a,而其余带有泥化间断层的,平均生长速率约为 0.015~0.024 mm/a。

3.3 C、O 同位素特征

由图 1 可见 C、O 同位素变化明显,二者基本同步,整条曲线共有 13 个变化旋回,其基本特征可大体分为 5 个阶段。(1)19.0~16.6 ka: $\delta(^{18}\text{O})$ 值为 $-7 \times 10^{-3} \sim -9 \times 10^{-3}$,主要集中于 -8×10^{-3} 左右, $\delta(^{13}\text{C})$ 值位于 $-9 \times 10^{-3} \sim -10 \times 10^{-3}$ 之间,其

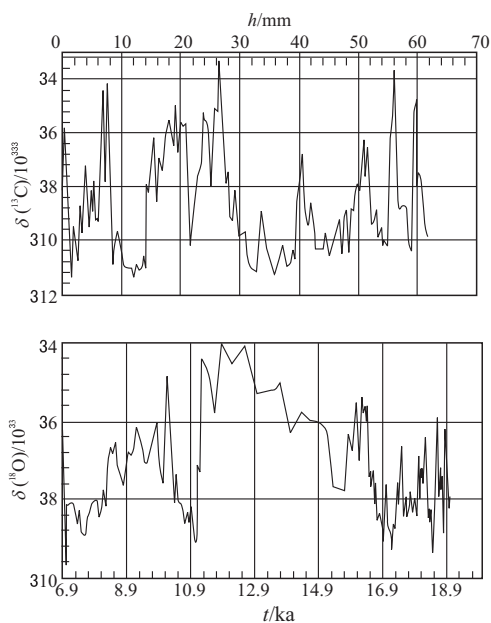


图 1 和尚洞石笋 $\delta(^{18}\text{O})$, $\delta(^{13}\text{C})$ 变化曲线

Fig. 1 Variation curves of $\delta(^{18}\text{O})$, $\delta(^{13}\text{C})$ records from stalagmite in Heshangdong cave

中在 19.0~18.2 ka 变化较大, 18.2~16.6 ka 期间有小幅振荡. (2) 16.6~11.1 ka: C, O 同位素逐步升高, $\delta(^{13}\text{C})$, $\delta(^{18}\text{O})$ 值由 -7×10^{-3} 上升到 -5×10^{-3} 左右, 中间数据变化较大. (3) 11.1~10.3 ka: C, O 同位素突然快速降低, $\delta(^{18}\text{O})$ 值由 -5×10^{-3} 下降到 -8.5×10^{-3} , 然后在 -8×10^{-3} 左右振荡上升, 直到 10.3 ka 左右又逐步上升到 -5×10^{-3} 左右, 中间有 3 次小幅波动. (4) 10.3~8.3 ka: $\delta(^{18}\text{O})$ 值主要集中于 $-6 \times 10^{-3} \sim -7.5 \times 10^{-3}$ 之间, 并有 4 次振荡变化. (5) 8.3~6.9 ka: C, O 同位素振荡缓慢下降, $\delta(^{18}\text{O})$ 值主要在 $-8 \times 10^{-3} \sim -9 \times 10^{-3}$ 之间波动, $\delta(^{13}\text{C})$ 在 $-8 \times 10^{-3} \sim -10 \times 10^{-3}$ 之间波动.

4 讨论

4.1 C, O 同位素的环境指示意义

在洞穴碳酸盐沉积处于平衡状态下, 沉积碳酸钙的 O 同位素主要受滴水湿度及滴水的 O 同位素组成控制, 而滴水的 O 同位素组成则主要受地表湿度、降雨量、降水气团来源(即季风)等多因素综合影响. 近年来研究表明^[9~12], 洞内滴水可以灵敏地反应地表水的同位素组成, 因此碳酸盐的氧同位素特征可反映古气候、古降水量及季风等古气候信息.

洞穴碳酸钙的 $\delta(^{13}\text{C})$ 则取决于地表土壤 CO_2

和大气 CO_2 的碳同位素组成, 以及洞穴上层包气带水溶解围岩 CaCO_3 的能力, 土壤 CO_2 的 $\delta(^{13}\text{C})$ 值则取决于植物种类, 大气 CO_2 则随气候变化, 植被发育及人类活动的影响而变化; 所以石笋碳酸钙的 $\delta(^{13}\text{C})$ 值在一定程度上可以反映古植被、古气候的变化.

石笋的 C, O 同位素, 能够反映湿度、降雨量、季风强弱及古植被的变化, 但各种因素对同位素值的影响不尽相同, 甚至相反. 如何区分各种因素的影响强度, 对古环境的解释至关重要. 近几年国内的李红春等^[9]通过对北京石花洞石笋的 C, O 同位素分析, 得出石笋中 $\delta(^{18}\text{O})$ 的记录在分辨率 $< 10 \text{ a}$ 的时间尺度上, 主要反映了降雨量为主要的气候变化, 降雨量增加, $\delta(^{18}\text{O})$ 值偏轻. 在分辨率 10~50 a 的时间尺度上, 反映了雨量与湿度两者综合气候变化. $\delta(^{18}\text{O})$ 值变轻, 指示气候湿冷; $\delta(^{18}\text{O})$ 值变重, 指示气候干热. 石笋中 $\delta(^{13}\text{C})$ 值主要取决于 C_3 和 C_4 植物比值, C_3 植物主要由树木、大多数灌木和冷季生长的草, 这类植物的 $\delta(^{13}\text{C})$ 值为 $-25 \times 10^{-3} \sim -32 \times 10^{-3}$, C_4 植物主要为喜热草本植物等, 这类植物较 C_3 植物受雨水条件控制弱, 其 $\delta(^{13}\text{C})$ 值通常在 $-10 \times 10^{-3} \sim 14 \times 10^{-3}$ 左右^[13]. 所以当气候干热, C_4 植物增加, $\delta(^{13}\text{C})$ 值偏重; 气候湿冷时, C_3 植物比例增大, $\delta(^{13}\text{C})$ 值偏轻.

4.2 和尚洞 HS-2 石笋的古气候信息

根据和尚洞 HS-2 号石笋的沉积特征及 C, O 同位素特征, 可分为以下几个时段进行气候信息讨论.

(1) 19.0~16.6 ka. 总体有较轻的 $\delta(^{13}\text{C})$ 和 $\delta(^{18}\text{O})$ 值, $\delta(^{18}\text{O})$ 从 $-7.2 \times 10^{-3} \sim -9.4 \times 10^{-3}$, $\delta(^{13}\text{C})$ 从 $-8.5 \times 10^{-3} \sim -10.5 \times 10^{-3}$, 主要集中于 $-9 \times 10^{-3} \sim -10 \times 10^{-3}$ 之间. 沉积物主要为亮灰色, 结晶颗粒较大, 无泥化土层及沉积间断, 沉积速率较高. $\delta(^{18}\text{O})$ 记录分辨率约为 7 a, 主要反映了降雨量较充沛, 温度较低, 植被发育, $w(\text{C}_3)/w(\text{C}_4)$ 比值较大. 该期与 18 ka 左右的全球末次冰期相对应, 但在这个时段内 C, O 同位素分别在 18.8 ka, 18.5 ka, 18.2 ka, 17.5 ka 左右, 有 4 次明显的变重, 反映了即使在冰盛期也可能存在较明显的百年级的湿—冷干热气候变化旋回.

(2) 16.6~11.1 ka. 从 16.6 ka 开始, C, O 同位素值快速上升变重, 在 11.8 ka, $\delta(^{18}\text{O})$ 值达到最大, 为 -4.05×10^{-3} . 这个时段, 沉积物为暗灰或黑白相

间,中央有明显的泥化间断层,石笋沉积缓慢,表现气候特征是降雨量较小,气温较高, C_4 植物较发育, $w(C_3)/w(C_4)$ 比值小,在干旱年段石笋甚至停止生长。在 16.1 ka,15.7 ka,14.0 ka 左右, $\delta(^{18}O)$ 值有 3 次较大的变轻过程,每次持续时间较短,可能是降雨量突然加大引起的结果,说明在总的干热时期,旱涝灾害总是交替发生的。

(3)11.1~10.3 ka, C, O 同位素突然快速变轻,但在约 800 a 的时间后,又快速变重,中间数据稳定, $\delta(^{18}O)$ 值都集中在 -8×10^{-3} 左右,仅有 3 个较小的波动,其沉积特征及 C, O 同位素数据,都表现为气候的突然回冷,可能是对应于新仙女木事件,时代上比格陵兰 GRIP 冰心^[14]记录稍晚,说明新仙女木事件是一个全球性的气候突变事件。

(4)10.3~8.3 ka. $\delta(^{18}O)$ 值集中于 -6×10^{-3} ~ -7.5×10^{-3} 之间,中间有 4 个变化旋回,总体表现为气候温和、雨量适中的气候特征, $w(C_3)/w(C_4)$ 表明植物均衡发展。

(5)8.3~6.9 ka. $\delta(^{18}O)$ 及 $\delta(^{13}C)$ 值逐渐变轻,气温下降,降水增多, $w(C_3)/w(C_4)$ 比值变大, C_3 植物发育。

另外, Si, P, Al 等元素变化及 Mg/Sr 记录的温度信息与 C, O 同位素提供的气候信息有较好的吻合。关于元素地球化学的特征将另文详细分析。

5 结论

和尚洞 HS-2 号石笋的高分辨率 C, O 同位素分析,提供了湖北地区 19 ka 以来的古气候变化信息,从 19.0~6.9 ka 可区分为 3 种特征变化、13 个气候变化旋回,得出如下结论:(1)19.0~16.6 ka, 11.1~10.3 ka, 8.3~6.9 ka, C, O 同位素数据均偏轻,气候冷湿,降水丰富,森林发育,其中 11.1~10.3 ka 可能对应于新仙女木事件;(2)16.6~11.1 ka, C, O 同位素值较重,气候干热, C_4 植物发育;(3)10.3~8.3 ka, $\delta(^{18}O)$ 值集中于 -6×10^{-3} ~ -7.5×10^{-3} ,与湖北地区现代沉积碳酸钙的 $\delta(^{18}O)$ 值 -6.5×10^{-3} 接近。该期气候温和,雨量适中, C_3, C_4 植物均衡发展。

本次研究表明,洞穴沉积物石笋,作为一个较好的地质历史信息载体,可为我们提供丰富的古气候信息,随着高分辨率测年技术(如加速器质谱技术、TIMS 技术)以及 C, O 同位素的激光探针质谱分析

技术的发展和完善,可望获得更高分辨率更有意义的古气候研究成果。

本次研究的野外样品采集得到中国地质大学(武汉)工程学院万军伟副教授、韩庆之教授及其他有关人员的支持和帮助,在此表示感谢。

参考文献:

- [1] O'Neil J R, Clayton R N, Mayeda T K. Oxygen isotope fractionation in divalent metal carbonates [J]. *Journal of Chemical Physics*, 1969, 51: 5547~5558.
- [2] Hendy C H. The isotopic geochemistry of speleothems — Pt. I. The calculation of the effects of different model of formation on the isotopic composition of speleothems and their applicability as paleoclimate indicators [J]. *Geochim et Cosmochim Acta*, 1971, 35: 801~824.
- [3] Dorale J A, Gonzalez L A, Reagan M K, et al. A high resolution record of Holocene climate change in speleothem calcite from Cold Water cave, Northeast Iowa [J]. *Science*, 1992, 258: 1626~1630.
- [4] Talma A S, Vogel J C. Late Quaternary paleotemperatures derived from a speleothem from Cango caves, Cape Province, South Africa [J]. *Quaternary Research*, 1992, 37: 203~213.
- [5] Holmgren K, Karlen W. Paleoclimatic significance of the stable isotopic composition and petrology of a Late Pleistocene stalagmite from Botswana [J]. *Quaternary Research*, 1995, 43: 320~328.
- [6] Bar-Matthews M, Ayalon A. Late Quaternary paleoclimate in the Eastern Mediterranean region from stable isotope analysis of speleothems at Soreq cave, Israel [J]. *Quaternary Research*, 1997, 47: 155~168.
- [7] 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]. 广西:广西师范大学出版社,1999. 1~2.
- [8] 谭明,刘东生,秦小光,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): 1~7.
- [9] 李红春,顾德隆,陈文奇,等. 高分辨率洞穴石笋中稳定同位素应用[J]. *地质论评*, 1998, 44(5): 457~459.
- [10] 蒋德隆. 长江中下游气候[M]. 北京:气象出版社, 1991. 3~5.
- [11] 万军伟,沈继方,晁念英,等. 清江半峡地区岩溶洞穴发育特征及其旅游资源[J]. *中国岩溶*, 1997, 16(3): 268~269.
- [12] 李彬,袁道先,林玉石,等. 桂林地区降水、洞穴滴水及现代洞穴碳酸盐氧碳同位素研究及其环境意义[J]. 中

国科学, 2000, 30(1): 82~86.

[13] Cerling T E. The stable isotopic composition of soil carbonate and its relationship to climate [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1984, 71: 229~240.

[14] Johnsen S J, Clausen H B, Dansgaard W, et al. Irregular glacial interstadials recorded in a new Greenland ice [J]. *Nature*, 1992, 356: 311~313.

HIGH-RESOLUTION CARBON AND OXYGEN ISOTOPE RECORDS FROM STALAGMITE AND PALAEOCLIMATE IN HESHANGDONG CAVE, QINGJIANG, HUBEI PROVINCE

Huang Junhua Hu Chaoyong Zhou Qunfeng

(*Test Center, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China*)

Abstract: The palaeoclimatic and palaeo-environmental information in Hubei region 19.0 to 6.9 thousand years ago is obtained from the analyses of the sedimentary, carbon and oxygen isotope features of the stalagmite numbered as HS-2 in the Heshangdong cave, Qingjiang, Hubei and with the uranium-series dating method. The following four climate changes can be concluded (with the average resolution 17 a, and the local resolution 7 a): (1) In 19.1~16.6 ka, the smaller values of both $\delta(^{13}\text{C})$ and $\delta(^{18}\text{O})$ suggest a cooler and wetter climate. (2) In 16.6~11.1 ka, the greater values of both $\delta(^{13}\text{C})$ and $\delta(^{18}\text{O})$ suggest a dry and warm climate. (3) In 11.1~10.3 ka, the sudden return of the cold climate in the dry and hot period may have corresponded to the Younger Dryas event. (4) In 10.3~6.9 ka, the change from the warm and rainy climate to the cold climate reflects the alternate changes from humid, cold, dry hot, up to the warm weather, showing some climate change patterns in the order of 100 or 1 000 years.

Key words: carbon and oxygen isotopes; stalagmite; palaeoclimate; palaeovegetation; Heshangdong cave; Hubei Province.