

文章编号: 1000-0550(2002)03-0442-05

长江中游和尚洞石笋的高分辨率 同位素、微量元素记录及古气候研究^①

黄俊华 胡超涌 周群峰 杨桂芳

(中国地质大学测试中心 武汉 430074)

摘要 通过对长江中游和尚洞 HS-2 号石笋的沉积特征及 C、O 同位素 Mg、Sr 微量元素相结合分析,利用 U 系法定年,获取了长江中游 19.0ka~6.9ka 的古气候、古环境信息(平均分辨率为 17a,局部分辨率达到 7a)。得出如下结论(1)19.0~16.6ka C、O 同位素偏轻,气候冷湿(2)16.6~11.1ka C、O 同位素偏重,气温上升,降水偏少(3)11.1~10.3ka 干热时期中的突然回冷事件对应于新仙女木事件(Younger Dryas Event)(4)10.3~6.9 ka B. P $\delta^{18}\text{O}$ 及 $\delta^{13}\text{C}$ 值逐渐变轻,而 Mg/Sr 比继续增大,表现为气温上升,降雨量较大。反映了历史时期湿冷、干热、温暖交替变化的气候趋势,得出了长江中游千年级和百年级的一些气候变化趋势,特别是发现了新仙女木事件在长江中游洞穴石笋中完整的记录,说明新仙女木事件是全球性气候突变与环境灾变事件。

关键词 C、O 同位素 微量元素 洞穴石笋 古气候 新仙女木事件 长江中游 和尚洞

第一作者简介 黄俊华 男 1964 年出生 高级工程师 第四纪与环境

中图分类号 P534.63 **文献标识码** A

1 引言

岩溶洞穴沉积物(石笋)是古气候信息的有效载体。自 O'Neil^[1]和 Hendy^[2]提出利用洞穴沉积物重建古气候的方法以来,各国学者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 Dovalé^[3]研究了美国 Cold water 洞全新世以来的气候变化,Talma^[4]等对南非 Cango 洞 2.7 m 长的石笋的古气候信息进行了分析,Holmgren^[5]等对博次瓦纳 35 cm 长的石笋的研究,Bar-Matthenws 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,国内袁道先^[7]对桂林多个洞穴石笋的沉积特征及 C、O 同位素研究,获得了桂林地区 20 万年来古气候变化,谭明^[8]、李红春^[9]等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。本次试图通过对长江中游和尚洞石笋的高分辨率同位素及 Sr、Ma 微量元素特征研究,获取分辨率达 10a 级,长江中游近 19 ka 来古气候变化,并寻找新仙女木事件在石笋中的记录。

2 方法与材料

本次样品采集地点位于长江中游的湖北清江流

域,地处中亚热带,属季风性的山地湿润气候,总的特征是冬少严寒,夏天酷热,雾多湿重,雨量充沛,多年平均降雨量为 1 400 mm,年均气温 16~17℃,雨量多集中于 6~9 月^[10]。HS-2 号石笋采自清江半峡段南岸的和尚洞,洞口高程 205 m,洞长大于 250 m,宽 10~30 m,发育于寒武系三游洞群^[11]。HS-2 号石笋生长于距洞口约 120 m 处,石笋长约 62 cm,底部直径 24 cm,呈锥状,外表为灰白色。

对整个石笋沿中轴剖开,可见色泽不同的沉积纹层,根据沉积特征,共取铀系定年样 4 个,¹⁴C 测年样 5 个,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 11~12 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,100℃烘干,与 100% H₃PO₄ 在 25℃水浴中平衡反应,收集 CO₂ 在 Finnigan MAT-251 质谱计上测定,分析精度 < 0.1‰, $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 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 系定年样,采用美国 EG&G ORPEC 公司生产的 Octete PLUS α 能谱仪,由桂林岩溶地质研究所测定,微量元素由国土资源部壳幔体系组成、交换及动力学开放研究实验室测定,所用仪器为 Thermo Jerrell Ash 公司的 POEMS 3 测定,其分析精度平均 RSD

① 国家自然科学基金项目(批准号:49772171 及 40172060)资助(2001 年沉积大会优秀论文)。

表1 和尚洞SH-2石笋沉积特征

Table 1 Sedimentary characteristics of stalagmite in Heshang cave

沉积阶段	特征描述	沉积厚度/mm	沉积时间/ka. B. P	沉积速率/(mm/a)	水热条件
V	灰白、黑、肉红色相间,少量泥质夹层,纹层(laminae)细密	80	6.9~10.3	0.024	湿热多雨
IV	灰白色,结晶(crystals)颗粒较小,纹层细密,无泥质夹层	70	10.3~11.1	0.088	湿冷多雨
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	0.07	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

表2 石笋铀系及¹⁴C年龄数据Table 2 ²³⁰Th-²³⁸U and ¹⁴C age data of stalagmite

样号	位置 (距顶/cm)	铀含量 ($\mu\text{g/g}$)	比值		年龄/kaBP
			²³⁴ U/ ²³⁸ U	²³⁰ Th/ ²³⁴ U	
HS-2-1	顶部	2.34	1.565	0.065	6.9±0.4
HS-2-C-1*	8				10.3±0.15
HS-2-C-2*	15				11.1±0.20
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} _{-0.9}
HS-2-7	61	0.38	1.567	0.165	19.0 ^{+1.1} _{-1.2}

* 为¹⁴C年龄

为1%~2%。

3 结果

3.1 沉积特征及年龄数据

石笋沉积特征描述见表1。

由年龄数据(表2)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-2-5,2.4ka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年的时段内生长了60 mm,生长速率约为0.07 mm/a;HS-2-3~HS-2-1,需分三段,HS-2-C-2~HS-2-C-1,即在距顶80~150 mm之间的沉积特征与HS-2-7~HS-2-5段相类似,沉积速率0.088 mm/a,而其余带有泥化间断层平均生长速率约为0.015~0.024 mm/a。

3.2 同位素平衡分析

利用同位素手段提取洞穴沉积碳酸盐古气候记

录,前提是碳酸盐沉积过程中要保持同位素平衡^[2]。可通过年轮纹层的平衡检验来解决。

在石笋的纵向切面上,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件样品进行碳、氧同位素分析,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3。

表3 石笋同位素平衡反应判据

Table 3 Evidence of the isotopic equilibrium reaction in stalagmite

样号	P-1	P-2	P-3	P-4	P-5
$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	-9.64	-9.45	-9.37	-9.66	-9.79
	-8.23	-7.94	-8.13	-7.57	-7.49
$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	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	$r = 0.15$				

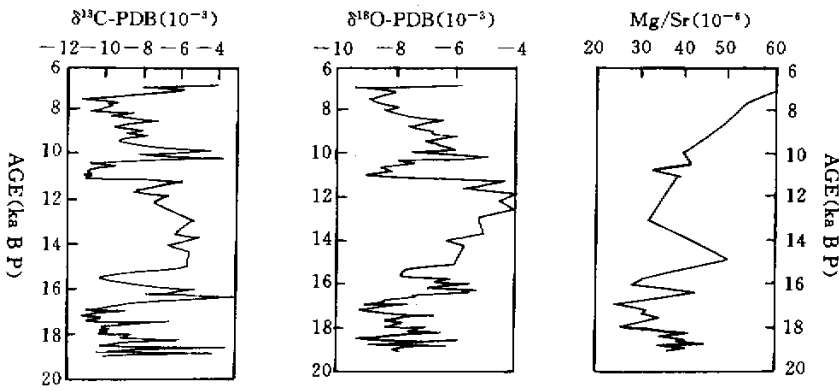


图1 和尚洞石笋的C、O同位素、微量元素变化曲线

Fig. 1 Variation curves of $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$ and trace element records in the Heshang cave stalagmite

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 C H 的判别原则^[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。

3.3 C、O同位素及 Mg/Sr 元素记录

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五个阶段。

(1) 19.0ka ~ 16.6ka: $\delta^{18}\text{O}$ (PDB) 值为 -7‰ ~ -9‰ 主要集中于 -8‰ 左右, $\delta^{13}\text{C}$ (PDB) 值位于 -9‰ ~ -10‰ 之间, 其中在 19 ~ 18.2ka 变化较大, 18.2 ~ 16.6ka 期间有小幅振荡。

(2) 16.6 ~ 11.1ka: C、O同位素逐步升高, $\delta^{13}\text{C}$ (PDB), $\delta^{18}\text{O}$ (PDB) 值由 -7‰ 上升到 -5‰ 左右, 中间数据振幅较大。

(3) 11.1 ~ 10.3ka: C、O同位素突然快速降低, $\delta^{18}\text{O}$ (PDB) 值由 -5‰ 下降到 -8.5‰ , 然后在 -8‰ 左右振荡上升, 直到 10.3ka 左右又逐步上升到 -5‰ 左右, 中间有 3 次小幅波动。

(4) 10.3 ~ 8.3ka: $\delta^{18}\text{O}$ (PDB) 值主要集中于 -6‰ ~ -7.5‰ 之间, 并有 4 次振荡变化。

(5) 8.3 ~ 6.9ka: C、O同位素振荡下降, $\delta^{18}\text{O}$ (PDB) 值主要在 -8‰ ~ -9‰ 之间波动, $\delta^{13}\text{C}$ 在 -8‰ ~ -10‰ 之间波动。

与 C、O同位素变化对应的 19 ~ 18ka 时段, Mg/Sr 比值振荡下降, 数值在 31 ~ 45 之间, 平均 38.4; 18 ~ 15.7ka, Mg/Sr 比值较低, 在 25 ~ 35 之间; 从 15.7 ~ 6.9ka, Mg/Sr 比值基本上成线性上升, 仅在 11ka 左右有一个明显的突降后快速回升。

4 讨论

4.1 C、O同位素及 Mg/Sr 比值的环境指示意义

石笋的 C、O同位素, 能够反映温度、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。李红春、顾德隆^[9]等通过对北京石花洞石笋的 C、O同位素分析, 得出石笋中 ^{18}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的气候变化, 降雨量增加 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏低。在分辨率 10 ~ 50a 的时间尺度上, 反映了雨量与温度两者综合气候变化。 $\delta^{18}\text{O}$ 值变低, 指示为气候湿冷, $\delta^{18}\text{O}$ 值变高, 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‰ ~ -32‰ , 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‰ ~ -14‰ 左右^[13], 所以当气候干热, C_4 植物增加, $\delta^{13}\text{C}$ 值偏高; 气候湿冷时, C_3 植物比例增大, $\delta^{13}\text{C}$ 值偏低。

Mg 在水和方解石中的含量分配依赖于温度, 温度上升 Mg 元素含量升高, 反之含量较低, 而 Sr 元素进入方解石时与温度无关^[14, 15], 所以可利用 Sr 含量来校正 Mg 在初始溶液中的变化, 这样 Mg/Sr 的比值即反映了碳酸钙沉淀时的变化, Mg/Sr 比值升高, 指示温度升高, 反之指示温度降低。

因此, 利用 C、O同位素和 Mg/Sr 微量元素结合分析, 可获取温度、湿度、古植被等古气候、古环境信息。

4.2 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。

①19.0~16.6ka:总体有较低的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值, $\delta^{18}\text{O}$ (PDB)从 -7.2‰ ~ -9.4‰ , $\delta^{13}\text{C}$ (PDB)从 -8.5‰ ~ -10.5‰ ,主要集中于 -9‰ ~ -10‰ 之间, $\delta^{18}\text{O}$ 记录分辨率约为7a,Mg/Sr比值从19ka振荡下降,主要数值在21~40之间(见图1),主要反映了降雨量较充沛,温度较低,植被发育, C_3/C_4 比值较大。与18ka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18.8,18.5,18.2,17.5ka左右,有四次明显的变重,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(见图1)。

②16.6~11.1ka:从16.6ka开始,C、O同位素值快速上升变重,在11.8ka时, $\delta^{18}\text{O}$ 值达到最大,为 -4.05‰ ,而Mg/Sr比值逐渐升高,数值在36~50之间,表现气候特征是降雨量较小,气温逐步回升, C_4 植物较发育, C_3/C_4 比值小,在干旱年代石笋甚至停止生长。在16.1、15.7、14.0ka左右 $\delta^{18}\text{O}$ 值有3次较大的变低过程,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。

③11.1~10.3ka:C、O同位素突然快速变轻,但在约800年的时间后,又快速变重,中间数据稳定, $\delta^{18}\text{O}$ 值都集中在 -8‰ 左右,仅有3个较小的波动,Mg/Sr比也有一个低向的突变,比值由40变到31左右,然后又回到42,表现为气候的突然回冷,可能是对应于新仙女木事件(Younger Dryas Event),时代上比GRIP^[16]冰芯记录稍晚,说明新仙女木事件是一个全球性的气候突变事件。

④10.3~8.3ka, $\delta^{18}\text{O}$ 值集中于 -6‰ ~ -7.5‰ 之间,中间有4个变化旋回,Mg/Sr比值上升,总体表现为气候温和,雨量适中的气候特征, C_3/C_4 植物均衡发展。

⑤8.3~6.9ka: $\delta^{18}\text{O}$ 及 $\delta^{13}\text{C}$ 值逐渐变低,而Mg/Sr比继续增大,温度升高,O同位素变轻,说明降水量增大。

5 结论

利用C、O同位素结合Mg/Sr微量元素分析,可很好地反映古降水及古温度的相关变化,通过本次研究,可获得长江中游19ka以来的古气候变化信息,从19~6.9ka分为三种特征变化,13个气候变化旋回,得出如下结论:

(1)19.0~16.6ka,11.1~10.3ka,C、O同位素及Mg/Sr比,数据均偏小,气候冷湿,降水丰富,其中11.1~10.3ka可能对应于新仙女木事件(Younger

Dryas Event);

(2)16.6~11.1ka,C、O同位素值较重,Mg/Sr比较大,气候干热, C_4 植物发育;

(3)10.3~6.9ka, $\delta^{18}\text{O}$ 集中于 -6‰ ~ -7.5‰ 之间,与长江中游现代沉积碳酸钙的 $\delta^{18}\text{O}$ 值 -6.5‰ 接近,Mg/Sr比进一步增大。气候温和,雨量丰沛, C_3 、 C_4 植物均衡发展。

但我们也发现,不管是在气候冷湿还是干热期,也有百年级的冷热干湿变化,进一步深入研究这些变化,对我们认识气候的世纪变化规律具有重大的意义。

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。

致谢: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(References)

- O'Neil J R, Clayton R N, Mayeda T K. Oxygen isotope fractionation in divalent metal carbonates[J]. *Journal of Chemical Physics*, 1969, 51: 5 547~5 558
- 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 indicator[J]. *Geochim et Cosmochim Acta*, 1971, 35: 801~824
- Dorale J A, Gonzalez L A, Reagan M K, Pickett D A, Murrell M T, and Baker R G. A high resolution record of Holocene climate change in speleothem calcite from Cold Water cave, Northeast Iowa[J]. *Science*, 1992, 258: 1 626~1 630
- 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
- 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
- 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
- Yuan Daoxian, Qin Jiaoming, Lin Yushi, et al. High resolution paleoenvironmental reconstruction up to 200kaB.P. with speleothems from Guilin(in Chinese)[M]. Guilin Guangxi: Guangxi Normal University Press, 1999. 1~2
- Tan Ming, Liu Dongsheng, Qin Xiaoguang, et al. Preliminary study on the data from microbanding and stable isotopes of stalagmites of Beijing Shihua cave[J]. *Carsologica Sinica*(in Chinese), 1997, 16(1): 1~7

- 9 Li Hongchun, Gu Delong, Chen Wenji, *et al.* Application of high-resolution carbon isotope record of a stalagmite from the Shihua cave, Beijing [J]. *Geologica Sinica* (in Chinese) 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 [Jiang Delong. Climate of the Yangtse Rive at middle of rivd[M]. Beijing: Meteorological Publishing House, 1991. 3-5]
- 11 Wang Junwei, Shen Jifang, Chao Nianying. The characteristics of Karst cave development and tourism resources in Banxia area of the Qingjiang river [J]. *Carsologica Sinica* (in Chinese), 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 [Li Bin, Yuan Daoxiao, Qin Jianing, *et al.* Oxygen and carbon isotopic characteristics of rainwater, drip water and present speleothems in a cave in Guilin area and their environmental meanings [J]. *Science in China* (Series D) 2000, 43(3): 277-285]
- 13 Cerling T E. The stable isotopic composition of soil carbonate and its relationship to climate [J]. *Earth Parth. Sci. Lett.*, 1984, 71: 229-240
- 14 Mucci A, Morse J W. Chemistry of low-temperature abioc calcites: experimental studies on coprecipitation. Stability and Fractionation [J]. *Rev. Aq. Sci.* 1990, 3: 217-254
- 15 Banner J L. Application of the trace element and isotope geochemistry of strontium to studies of carbonate diagenesis [J]. *Sedimentol.*, 1995, 42: 805-824
- 16 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

Study on High-Resolution Carbon, Oxygen Isotope and Trace Element Records and Paleoclimate from Heshang Cave, the Middle Reach of the Yangtse River

HUANG Jun-hua HU Chao-yong ZHOU Qun-feng YANG Gui-fang

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

Abstract Through a combined analysis of sedimentary characteristics, C and O isotopes, Mg and Sr trace elements of a stalagmite from Heshang Cave, Hubei, with uranium-series dating, the palaeoclimatic and palaeoenvironmental information from 19.0ka to 6.9ka in the Hubei area is obtained. The average resolution is 17a, and the local resolution is 7a. The following results are obtained: (1) from 19.0~16.6ka B.P.: C and O isotopes were lighter, the climate was cold and wet; (2) 16.6~11.1ka B.P.: C, O isotopes were a little heavy, temperature rose, rainfall was inclined to be little; (3) 11.1~10.3ka B.P.: an excursion during dry and hot period responded to the Younger Dryas Event; (4) 10.3~6.9 ka B.P.: C, O isotopes were lighter, but Mg/Sr value was bigger, showing temperature was continuously rising and rainfall was greater. These reflect the variation tends from humid-cold climate, to dry-hot climate, and to humid, warm climate in history, and some climatic variation trends of thousand years and hundred years cycles are gained. In particular the authors found out the integrated record of the Younger Dryas Event which means the Younger Dryas Event is a globally climatic sudden change and environmental calamity.

Key words carbon and oxygen isotopes, trace element, stalagmite, paleoclimate, Younger Dryas Event, the middle reach of the Yangtse River, Heshang Cave