

洞穴沉积物的环境记录研究进展

汪福顺 万国江 黄荣贵

(中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室 贵阳 550002)

摘要 云贵高原有着独特的地理环境,其气候变迁应与青藏高原这一特殊的高海拔、低纬度的隆升地块有重要关系。洞穴化学沉积物是响应环境变化的地质记录档案,通过对它蕴藏的古气候信息的解译,可以反演过去的气候变化。本文侧重介绍了洞穴次生化学沉积物研究近年来取得的最新成果及其研究现状,并利用其在古环境研究中的优点,来讨论青藏高原的抬升对西南地区环境变化产生的屏蔽效应的可能性。

关键词 云贵高原 洞穴沉积物 稳定同位素 微层理 气候变化 环境记录

第一作者简介 汪福顺 男 1976年出生 硕士研究生 从事环境地球化学研究

环境变化是影响人类生存环境质量的重要因素。近三百年来的工业发展究竟为近百年来的全球环境质量变差贡献多少,抑或是自然演变占主导,这仍将是今后一段时间内的争论不休的话题。不论如何,总要对质量变差的环境进行修补,以保证人类的生活更加完美。只有在对环境变化的基本规律作深刻了解的基础上,才能实施环保方案。选择具有高精度古环境记录的地质材料来探索地球的演化历史,则是一个关键性问题。

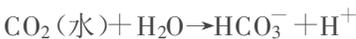
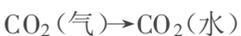
岩溶洞穴沉积物是千百年来在地质演化过程中逐步形成的,它蕴含了丰富的环境信息,并具有时间跨度长(多则几万至十几万年,少则几千、几百年)、数据精度高的特点,是研究古气候的良好材料。

1 碳酸盐岩及其洞穴沉积物响应环境变化

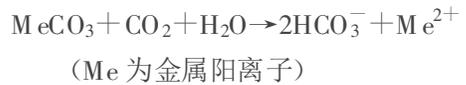
世界上最主要的碳库,毫无疑问应是全球广泛分布的碳酸盐岩。碳酸盐岩的溶蚀、沉积等作用直接影响到大气中的CO₂含量,因为这些作用一方面吸收CO₂,另一方面释放CO₂,因此碳酸盐岩与全球温室效应有着密不可分的联系^[1]。在地质历史上,碳酸盐岩一直是环境变化的重要信息载体。

下述的简单的反应控制着碳酸盐岩的演化过程:

(1) 大气CO₂的溶解



(2) 碳酸盐的化学侵蚀反应



(3) 碳酸盐的沉积反应



这些反应受特定的物理化学条件(p, t)的影响:首先是各反应的平衡受影响;其次是同位素分馏系数(α)要受温度的影响(表1)。

表1 封闭体系中,各碳物种间的同位素分馏及其与温度的关系*

Table 1. The fractionation among carbon species and its relationship with temperature

碳物种	α(‰ PDB)		α与t的关系式
	5℃	25℃	
CO ₂ (水) - CO ₂ (气)	-1.29	-1.19	α _{水-气} = [(0.0049 ± 0.0015) t(°C) - (1.31 ± 0.05)] ‰
HCO ₃ ⁻ - CO ₂ (气)	10.2	7.90	α _{HCO₃⁻-气} = [- (0.1141 ± 0.0028) t(°C) + (110.78 ± 0.04)] ‰
CO ₃ ²⁻ - CO ₂ (气)	7.0	6.0	α _{CO₃²⁻-气} = [(0.052 ± 0.021) t(°C) + (7.22 ± 0.38)] ‰

* 本表资料据陈毅凤, 泸沽湖沉积物纤维素的提取及稳定碳同位素研究(中国科学院地球化学研究所硕士学位论文, 1997。 α_{A-B} = (δ¹³C_B - δ¹³C_A) / (1 + δ¹³C_A / 1000), 式中A, B分别为碳的不同的物种。

由此可以看出,在碳酸盐溶蚀、迁移及随后在洞穴中沉积的垂直输送过程中,已将上部的环境

信息用同位素分馏的方式存储在洞穴次生化学沉积物中,作为碳酸盐岩响应气候环境变迁的重要衍生物的洞穴次生化学沉积物,于是成为揭示和反演古气候古环境的不可多得的研究材料。尤其是近十几年来,随着一系列围绕着对石笋、钟乳石等研究的新事例新发现的报道,特别是关于石笋微层理的研究报道,使关于洞穴沉积物的研究备受世人的关注。

通过对石笋微层理进行放射性记年研究,以及通过沉积学原理来论证,基本上可以确定石笋微层理具有年旋回意义。这说明石笋的生长过程的确能够反映自然环境过程的变化。首先,在不遭受地表径流的影响下,石笋的形成与降水有着密切的关系,当降水停止后,洞内滴水也就相应停止了,从而石笋停止生长,来年又发生降水后,则生长又重新开始。这就明显地形成了一个沉积间隔,尤其在干湿季节明显的地区显得更加突出,于是形成了区分年与年的标志。同位素的分馏是温度的函数,因而,年层的同位素组成也能反映环境温度的变化,这主要体现在大时间尺度上的全球气温变化^[3]。其次,洞穴次生沉积物中的年层内的微量元素的变化也可以指示出沉积环境的各种条件的改变,例如,镁离子在碳酸盐岩表面与钙离子的交换就受到环境温度的影响。反过来,也可以用镁在其上的分配来反推沉积期间的平均温度。总之,洞穴沉积物记录着过去的信息。全球变化研究的一个重要方面就是揭示过去,找出其变化规律,并预测未来。这正是洞穴沉积物所能做到的。

2 洞穴化学沉积物的研究动态及发展趋势

洞穴化学沉积物的年层内部记录着丰富的环境信息,准确地揭示出这些信息有着极其重要的研究意义。在漫长的生长过程中,洞穴化学沉积物发育了无数的微生长层。由于对洞穴化学沉积物的研究起步较晚,始兴于七八十年代,故迄今为止,对它的研究还仅限于微层灰度、厚度、同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 、微量元素及古地磁等几个方面,并

配合其它项目的研究,共同反演过去,揭示气候历史及发展趋势。

2.1 石笋微生长层灰度及发光微层的研究

石笋内部发育着大量微层,区分这些微层的标志是层内及层间的颜色、亮度的变化。秦小光等(1998)^[3]的研究发现,北京石花洞的石笋微层是由明暗相间的层纹构成的,其中多数为年层。年层亮度存在层间及层内变化,且主要是由一些暗色有机质促使灰度产生各种变化。层内的有机质可能是由滴水带来或石笋表面原地生长的。他们把暗色有机质归纳出几种类型,其中浸染状颗粒可作为地表生物量的替代性指标^[3]。在终年降雨频繁的地区、地表径流影响地区以及常年干旱地区,由于石笋不能形成有规律的沉积间隔,故对洞穴沉积的研究没有太大的环境意义。目前,围绕石笋微层灰度的研究的目的在于:①了解正常生长反映的过去环境条件的渐变过程;②查明偶发事件产生的多年层所反映的可能原因,诸如气候原因、地质活动因素以及可能的人类活动的影响。这些方面工作亟待深入。

发光微层是许多洞穴沉积物中普遍存在的现象,即用荧光照射样品而出现的亮线,许多学者认为它是有机质存在的证据,并把它作为区分年层的标志。

2.2 石笋微厚度的研究

洞穴沉积物的生长速率在各个不同地区、不同条件下是不同的。然而,就某一地区而言,其生长速率在短时间尺度下是几近一致的。由于石笋记录了大尺度的古环境信息,据此可查明历史上可能发生气候转型的情况。降水量是决定石笋生长的最重要因素,在降水特别丰沛的年份或时期,石笋发育就快,体现在其微层厚度上就比较厚。同时,由于洞穴本身物理化学条件比较稳定,这一方面以云贵高原洞穴条件更好,因其长期地质构造稳定,历史上少有重大地质事件发生,故用微层厚度就可以描述古代降水的变化趋势^[4]。洞穴中可以存在几种不同的石笋生长类型(表2)。

由表2可知,在使用石笋层厚指示降水趋势时,选用何种类型的石笋是比较重要的。

表 2 石笋的生长类型
Table 2. The growth types of stalagmite

A 型	B 型	C 型
受降水影响特别强烈(即只在降水发生后才有岩溶滴水)	受降水影响不太强烈(即降水后洞内滴水速率加快, 停止降水后, 滴水速率减缓)	受降水影响很微弱的(即滴水速率在湿季长期恒定, 只在干季才发生减缓乃至停止)

2.3 稳定同位素的研究

在对洞穴沉积物开展的研究项目中, 稳定同位素法是最为准确的, 但难度也是最大的。目前主要利用的是 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 等。应用好稳定同位素法的关键在于: 保证所用的洞穴沉积物内存在由年沉积间断造成的微层理, 同时要求微层理内的碳、氧同位素达到了分馏平衡。确定达到同位素分馏平衡的标志是: 同一微层内的碳、氧同位素之间没有线性关系和同一微层中的氧同位素具有相同或相近的值。研究结果证明, 某一地区降水汽团的 $\delta^{18}\text{O}$ 值是该汽团从源地迁移距离的函数。根据同位素分馏原理, 轻同位素趋向于汽相中富集, 重同位素则趋向于液相中富集。因此, 降水汽团运移的时间、距离越大, 汽团凝聚次数越多, 则造成其 $\delta^{18}\text{O}$ 偏轻。总结李红春^[5-6]、秦小光^[3]、李彬^[8]、谭明^[2] 等的研究成果, 得出: ①物理化学条件稳定的洞穴沉积物中的稳定同位素记录了过去的环境演化历史; ②季风条件下的洞穴沉积物的氧同位素主要反映了降水中的氧同位素, 继而反映了季风的变化情况; 碳同位素反映了土壤有机环境的变化, 同时反映了人类活动的痕迹; ③降水量越大, $\delta^{18}\text{O}$ 值就越小, 其中长时间尺度的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录主要反映气温的变化, 短尺度的 $\delta^{18}\text{O}$ 则主要指示降水量的变化。这可以用瑞利分馏公式^[6]来描述:

$$\delta^{18}\text{O}_V = (\delta^{18}\text{O}_0 + 1000)f^{(\alpha-1)} - 1000 \quad (1)$$

$$\text{又 } \alpha = (\delta^{18}\text{O}_P + 1000) / (\delta^{18}\text{O}_V + 1000) =$$

$$1.0112 - 0.0001t(^\circ\text{C}) + 2.589 \times 10^{-7}t^2 \quad (2)$$

$$\text{则 } \delta^{18}\text{O}_P = (1.0112 - 8.2678 \times 10^{-5}t)$$

$$(\delta^{18}\text{O}_0 + 1000)f^{(0.0112 - 8.2678 \times 10^{-5}t)} - 1000 \quad (3)$$

式中, α 为水汽间氧同位素分馏系数; $\delta^{18}\text{O}_0$ 为初始水蒸汽的 $\delta^{18}\text{O}$ 值; $\delta^{18}\text{O}_V$ 为分馏后残余水蒸气的 $\delta^{18}\text{O}$ 值; $\delta^{18}\text{O}_P$ 为降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值; f 为残余水蒸

气的百分比; t 为温度; ④ $\delta^{13}\text{C}$ 同样可以反映区域降水变化, 也只限于在小时间尺度上, 同时由于影响 $\delta^{13}\text{C}$ 的因素很多, 如空气中的浓度及其 $\delta^{13}\text{C}$ 值、洞穴上覆土层中的 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值、地区的植被密度和岩溶滴水在石笋表面的 CaCO_3 沉积速率等, 故只用它作为辅助手段来重建古气候^[5-8]。

2.4 对洞穴沉积物古地磁性的研究

目前这项研究还开展较少, 主要是利用石笋的微生长层对第四纪沉积物进行磁性对比, 给微生长层以更加精细的划分, 同时, 还可使岩溶洞穴沉积物的年代学研究增加一个高精度的手段^[9]。

2.5 石笋纹层中的微量元素的变化

石笋纹层中的微量元素的变化可以反映洞穴上覆顶板的水化学过程。镁在水-碳酸盐界面上的分配与温度有关, 且 Mg/Ca 比值的变化与季节性温度变化有很大关系。Roberts 等(1998)^[10] 曾沿石笋生长轴, 以 $2\mu\text{m}$ 的间隔取样并进行微量元素分析, 结果显示, 其 Mg/Ca 、 Sr/Ca 和 Ba/Ca 比值的变化在年际内形成峰值, 即每年对应一个峰值; 同时得出结论: 温度的季节性变化、水源补给和地下水滞留时间对石笋微量元素的分布起了控制作用。他们还指出, 对石笋中微量元素的变化研究有助于获得用来恢复陆上古气候的信息。

总的来说, 洞穴沉积物的研究正在逐步走向深入, 从目前的研究现状看来, 有必要开展以下几方面的研究工作:

(1) 提高石笋微层研究中稳定同位素分辨率, 并且使采样、分析手段进一步精细化, 以便对 $\delta^{13}\text{C}$ 中记录的环境信息作进一步剖析, 从而获得更多准确的古环境信息。

(2) 分析石笋微层内的微量元素和稀土元素, 以指示溶洞在地质历史上可能发生的地质事件及其对洞穴碳酸盐岩的溶蚀和沉积的影响。这

对构造活动活跃的地区尤为重要。此外,微量元素能够揭示古环境信息,因为它们在洞穴裂隙水中的迁移不仅仅受围岩成分的控制。因此,对共溶解、同沉积作用以及生物活动造成的下渗水酸度的下降等其它环境因素也应该进行系统的研究。

(3) 对洞穴内部的各种物理化学及水文地质条件(如碳酸盐裂隙)进行综合考察,摸清控制岩溶滴水速率、滴水组成等地质因素。

(4) 更加深入地揭示现在正在进行的洞穴碳酸盐岩的沉积过程,即观测在现在的环境条件下的洞穴化学沉积物的沉积过程及其对环境气候的响应,以便更好地认识古环境的变化。这也是我们正在进行的工作。

3 结 语

云贵高原有着独特的地理环境,由于西南季

风受青藏高原隆起的阻碍,因而没有给云贵高原带来很丰沛的降水。青藏高原的缓慢抬升,造成了我国西南地区乃至全球的环境变化。但这究竟是怎样的一个过程呢?很显然,揭示出云贵高原远古及近代的气候变化,对于理解自然演化和人类活动对环境的改造作用具有重要的意义。洞穴沉积物是几千年乃至几万年来形成的含有环境信息记录的档案,具有其它研究材料不可替代的优势。云贵高原均有广泛发育的碳酸盐岩出露,这些地区也广泛地存在着岩溶洞穴及其中的化学沉积物,因此,就有可能利用这些洞穴次生化沉积物分布的广泛性以及洞穴沉积物本身所具有的环境记录特性,来探讨这一地区在一段时期内的环境变迁。随着对洞穴的研究逐渐走向深入,我们相信青藏高原和云贵高原必将成为研究全球变化的一块热土。

参 考 文 献

- [1] 翁金桃, 碳酸盐岩在全球碳循环过程中的作用。地球科学进展, 1995, 3, 10(2): 154~158。
- [2] 谭明等, 石笋记录的年际十年、百年尺度气候变化。中国科学(D辑), 1998, 28(3): 272~277。
- [3] 秦小光等, 北京石花洞石笋微层灰度变化特征及其气候意义——1. 微层显微特征。中国科学(D辑), 1998, 28(1): 91~96。
- [4] 谭明等, 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。中国岩溶, 1997, 16(1): 1~9。
- [5] 李红春等, 北京石花洞 500 年来的 $\delta^{13}\text{C}$ 记录与古气候及大气 CO_2 浓度变化的关系。中国岩溶, 1997, 16(4): 285~294。
- [6] 李红春等, 高分辨率洞穴石笋稳定同位素应用之一——京津地区 5000a 来的气候变化—— $\delta^{18}\text{O}$ 记录。中国科学(D辑), 1998, 28(2): 181~196。
- [7] 黄俊华, 湖北崇阳狮泉洞第四纪石笋的碳氧同位素特征及古气候研究。中国岩溶, 1992, 11(3): 245~249。
- [8] 李彬, 洞穴化学沉积物中 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 对环境变迁的示踪意义。中国岩溶, 1994, 13(1): 17~23。
- [9] 刘育燕, 桂林罗胡子洞穴次生化沉积物(石笋)的古地磁场长期变化研究。中国岩溶, 1991, 10(4): 245~248。
- [10] Roberts M. S. et al., Annual trace element variations in a Holocene speleothem. *Earth and Planetary Science letters*, 1998, 154, 237~246。

PROGRESS IN ENVIRONMENT RECORD FROM CAVE SEDIMENTS

Wang Fushun Wan Guojiang Huang Ronggui

(State Key Lab of Environment Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002)

Abstract

The Yunnan-Guizhou area, a special high-altitude, low-latitude ascending block, whose climate change may have much important relationship with the Qinghai-Xizang Plateau, has a special geographical environment. Cave sediment is a good geological recorder of environment change. In this paper we mainly introduce the latest progresses in cave sediment research, and discuss the possibility to demonstrate the screen effect of the Qinghai-Xizang plateau's uplifting on the environmental change of Southwest China by means of extracting paleo-information from the cave sediments.

Key words: cave sediment; stable isotope; micro-layer; climate change; environment record