

甘肃武都万象洞滴水与现代石笋同位素的环境意义

张平中^① 陈一萌^① K. R. Johnson^② 陈发虎^① L. Ingram^②

张欣利^③ 张成君^① 王苏民^④ 庞福顺^⑤ 龙路德^⑤

(①兰州大学中德干旱环境联合研究中心与西部资源环境教育部重点实验室, 兰州 730000; ② Department of Earth and Planetary Sciences, University of California, Berkeley, CA, USA; ③ 中国科学院资源环境科学信息中心, 兰州 730000; ④中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008; ⑤ 甘肃武都万象洞管理所, 武都 746000. E-mail: pzzhang@lzu.edu.cn)

摘要 初步研究了青藏高原与黄土高原过渡带的甘肃武都万象洞中滴水的氢氧同位素和洞穴现代石笋碳酸钙的氧同位素组成, 发现万象洞内滴水的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{dw}}$ 和 $\delta\text{D}_{\text{dw}}$ 位于全球降水同位素网数据建立的地方性大气降水线范围之内, 说明滴水 $\delta^{18}\text{O}_{\text{dw}}$ 与降水 $\delta^{18}\text{O}$ 有密切关系. 利用 $\delta^{18}\text{O}_{\text{dw}}$ 和洞内中部到距洞口较远处的现代管状钟乳石下部的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{mc}}$ 数据和碳酸盐古温度等式计算的温度范围在 $8.9\sim 12.4^\circ\text{C}$ 之间, 平均值为 10.7°C , 其中计算出距洞口较远处 8 个位置的温度在 $10.1\sim 12.4^\circ\text{C}$ 的范围之内, 平均值为 11.5°C , 这个值与洞穴内的观测值(10.99°C)一致, 略低于当地年平均气温(14.4°C), 说明现代石笋形成在同位素平衡条件下, 它们的同位素组成可以近似地反映其洞外大气年均温度.

关键词 洞穴滴水 氢氧同位素 石笋 甘肃 青藏高原与黄土高原

目前, 洞穴堆积物在过去气候变化研究方面已显示出巨大的潜力, 如石笋记录对 D-O 气候旋回的精确定年^[1]、季风强度变化^[2, 3]、季风与太阳辐射变化的关系^[4]等. 但是不同地区石笋碳酸钙氧同位素的指示意义同时也存在多解性, 如法国石笋^[5]碳酸钙氧同位素代表温度; 而以色列石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度负相关^[5]代表降雨量; 在强烈季风影响区, 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值的解释更复杂化^[2-4], 它应是季风强度的指示. 因此, 要更好地理解石笋形成过程中的同位素机理及其环境意义, 必须详细研究石笋形成的洞穴内现代碳酸盐-水体系的同位素组成特点^[6]. 在平衡条件下, 方解石的 $\delta^{18}\text{O}$ 是 $\delta^{18}\text{O}_{\text{dw}}$ (滴水)和温度的函数^[7]; 如果方解石和滴水的 $\delta^{18}\text{O}$ 能被测定, 将能获得洞穴温度^[8], 而洞穴温度近似于洞外的年平均温度^[9]. 一般地, 洞穴滴水的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{dw}}$ 值比洞穴上面降水略微富集 ^{18}O , 可是洞穴滴水的同位素组成在季节或较长时间尺度上可显示出复杂的变化, 往往与年降水量、补给速率、暴风雨/雪轨迹和洞穴上覆岩层或土壤表面的蒸发有关^[10]. 用化石洞穴堆积物(如钟乳石)中的 $\delta^{18}\text{O}$ 变化重建过去的气候变化, 必须假定: (1)现代石笋的 $\delta^{18}\text{O}$ 反映现代滴水, 因此反映现代降水的 $\delta^{18}\text{O}$; (2)石笋方解石形成在与水平衡的同位素条件下. 为此, 本文分析了甘肃武都万象洞内洞穴滴水的氢氧同位

素及现代管状钟乳石下部方解石的氧同位素组成, 研究它们之间的相互关系, 为过去长时间尺度上洞穴堆积物中记录的环境信息的获取提供理论依据.

1 样品与实验

1.1 研究区地理特色及位置

研究区处于典型季风系统交互作用的青藏高原与黄土高原过渡带(青藏高原东部边缘和黄土高原的西南边缘), 接近现代夏季风的边缘(图 1), 对季风的变化十分敏感, 因此, 该地区洞穴堆积物与气候环境的关系研究将显得非常重要.

万象洞($33^\circ 19'\text{N}$, $105^\circ 00'\text{E}$, 1200 m a.s.l.) (图 1)位于甘肃省武都县境内, 发育在志留纪灰岩中; 洞内现代次生化学沉积物比较发育, 是中国北方最大的洞穴之一. 洞穴外部的上覆土壤, 主要以黄土为母质, 因此它具有研究现代及过去气候的理想条件和优越的地理位置.

1.2 样品采集和观测

洞穴滴水在 1999 年 10 月从洞口到洞尾系统收集; 同时从洞口开始收集洞穴顶板下垂的、微小的、正在滴水的、尚未固结或未结晶的、正在沉积的管状钟乳石样品, 并在现代滴水处放置了一些玻璃片以接受现代沉积的碳酸钙. 同时在洞内距洞口最远处安装了连续检测仪.

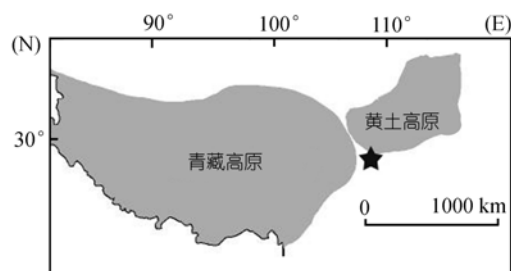


图1 研究区和万象洞(★)的地理位置图

1.3 分析方法

所有样品的同位素组成都在美国加州大学伯克利分校同位素地球化学中心完成,以 δ 表示氢氧同位素数据, $\delta = [(R_{\text{sample}}/R_{\text{std}}) - 1] \times 1000$, 其中 R 分别为 D/H , $^{18}O/^{16}O$.

其中洞穴滴水的 $\delta^{18}O$ 采用 CO_2 与水的平衡方法;用VG Prism II同位素质谱计分析 $\delta^{18}O$ 值, δD 用与Delta Plus质谱计相连的MAT氢装置测定, $\delta^{18}O$ 和 δD 值相对于V-SMOW标准, $\delta^{18}O$ 精度为 $\pm 0.01\text{‰}$,而 δD 的精度为 $\pm 0.1\text{‰}$.碳酸盐的 $\delta^{18}O$ 分析是把管状钟乳石下部的方解石沿管边缘用刀片轻轻刮下约0.1 mm厚度,放入与质谱计相连的碳酸盐同位素制备装置中,与100%磷酸反应,生成的 CO_2 用VG Optima质谱计测定,结果相对于VPDB标准,分析的精度是 $\pm 0.1\text{‰}$ ($\delta^{18}O$).

2 结果与讨论

2.1 地方性大气雨水线的建立

为了表征现代的大气降水,从全球降水同位素数据库(GNIP)获得围绕万象洞最邻近3个城市:西安($34^\circ N$, $109^\circ E$, 397 m a.s.l.)、成都($31^\circ N$, $104^\circ E$, 506 m a.s.l.)和兰州($36^\circ N$, $104^\circ E$, 1517 m a.s.l.)的最近15年的氢氧同位素数据^[11]建立地方性的大气雨水线(图2),其中西安降水的年平均 $\delta^{18}O$ 值为 -7.2‰ 、成都为 -5.7‰ 和兰州为 -7.1‰ .当地的 δD - $\delta^{18}O$ 关系稍微不同于Craig^[12]提出的全球雨水线和中国大气雨水线^[13],它的斜率接近,而截距相差较大.同时,1999年10月采集的洞穴滴水的 δD_{dw} 和 $\delta^{18}O_{\text{dw}}$ 值也标绘在图2中.万象洞洞穴滴水样品直接落在地方性大气雨水线上,表明洞穴上覆岩层或土壤表面的蒸发过程没有对洞穴滴水产生重要的影响^[14].因此,这种结果表明滴水同位素组成反映了洞穴上部降水的同位素组成.可

是,从洞尾到洞口洞穴滴水的 δD_{dw} 和 $\delta^{18}O_{\text{dw}}$ 存在略微逐渐变重的趋势.其中,34个洞穴滴水 $\delta^{18}O_{\text{dw}}$ 值的范围为 $-8.6\text{‰} \sim -9.5\text{‰}$ (平均值为 -9‰),而20个洞穴滴水样品 δD_{dw} 范围为 $-52\text{‰} \sim -74.2\text{‰}$ (平均值为 62‰).

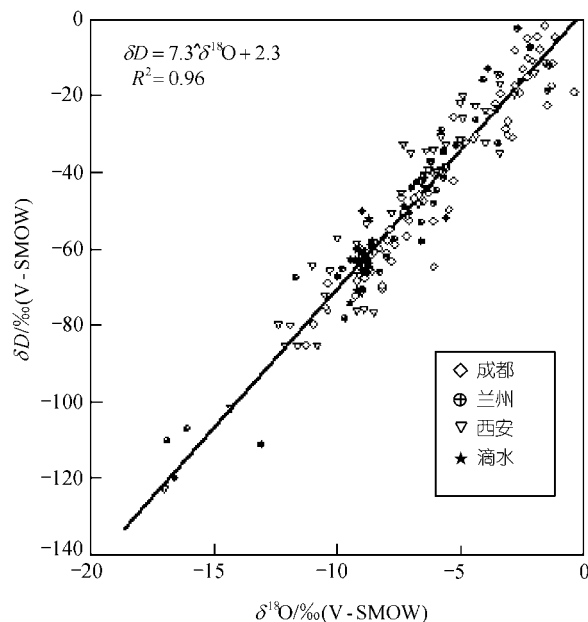


图2 甘肃武都万象洞地区大气雨水线

洞穴滴水 $\delta^{18}O_{\text{dw}}$ 值与西安降水和兰州降水 $\delta^{18}O_{\text{dw}}$ 值相差较小(约2‰),相对亏损 ^{18}O ,可能反映了地形造成的滴水组成的季节偏移或当地降水的亏损,或这两个因素的复合;而洞穴滴水 $\delta^{18}O_{\text{dw}}$ 值与成都降水有较大的偏移(达3.3‰),除了与季节和当地降水的亏损外,可能还与高度效应,即随着海拔高度的增加,大气降水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值下降^[15].

2.2 洞穴内现代沉积的管状钟乳石同位素与滴水的关系

万象洞内,现代未结晶的管状钟乳石下部的 $\delta^{18}O_{\text{mc}}$ 值的变化范围在 $-6.4\text{‰} \sim -8.4\text{‰}$ (PDB)之间;而且洞口附近的 $\delta^{18}O_{\text{mc}}$ 值最富集 ^{18}O ,这种富集趋势与洞穴内滴水的 $\delta^{18}O_{\text{dw}}$ 变化趋势相一致,反映了洞口附近的蒸发作用.由于洞穴滴水与当地降水的密切关系,所以我们将洞穴中部到距洞口较远处的28个现代碳酸钙的 $\delta^{18}O_{\text{mc}}$ 值及其对应的 $\delta^{18}O_{\text{dw}}$ 值用碳酸盐-温度等式^[7,8]算出温度范围在 $8.9 \sim 12.4^\circ C$ 之间,平均值为 $10.7^\circ C$,其中洞穴内距洞口较远处8个位置的温度在 $10.1 \sim 12.4^\circ C$ 范围之内,平均值为 $11.5^\circ C$;

同时在 2001 年 9 月至 2002 年 5 月期间放置的两个玻璃片上已接受的现代沉积碳酸钙的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{mc}}$ 值分别为 -6.9 和 -7.6‰ (PDB), 也处在现代未结晶管状钟乳石下部 $\delta^{18}\text{O}_{\text{mc}}$ 值的变化范围之内, 说明万象洞内现代滴水处于过饱和状态, 而且温度和湿度连续检测仪显示, 在 2001 年 8 月至 2003 年 1 月的温度恒定在 10.99°C , 相对湿度保持在 100%, 从另一个侧面支持了以上结果. 从该洞内化石石笋热电离质谱 U-Th 定年(未出版数据)的结果得知, 在末次间冰期内已结晶的石笋显示了非常高的沉积速率(平均值为 0.045 mm/a), 据此推算我们分析的现代未结晶管状钟乳石下部部分 0.1 mm 厚的碳酸钙 $\delta^{18}\text{O}_{\text{mc}}$ 值, 代表了现代在 2.2 年内沉积的碳酸钙的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{mc}}$ 值的平均值. 因此, 我们的结果是万象洞内现代水-碳酸盐同位素体系的准确反映.

此外, 根据 Hendy 等人^[16]对洞穴现代正在沉积的碳酸钙与溶液体系之间存在同位素平衡的分馏条件, 表明万象洞内现代石笋的形成同样处在同位素平衡条件下, 而且它们的同位素组成密切地反映了洞穴外部的年平均温度, 略低于武都 1961~1990 年间 30 年的年平均气温(14.4°C)(资料来源于甘肃武都气象站).

3 结论

万象洞滴水的 $\delta\text{D}_{\text{dw}}$ 和 $\delta^{18}\text{O}_{\text{dw}}$ 与当地的降水有密切的成因联系, 它反映了当地降水的同位素组成, 说明了研究区洞穴上覆岩层或土壤表面的蒸发过程对洞穴滴水的影响是相当微弱的. 而且, 万象洞内现代的石笋形成在同位素平衡条件下, 其洞穴滴水的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{dw}}$ 和洞内现代管状钟乳石下部的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{mc}}$ 数据可以近似地反映其洞外大气年均温度.

致谢 K. Trueheart, D. LaRowe, C. Riebe, 张虹, 贺坚, 王永莉和魏令均等协助了采样和分析工作, 在此一并表示感谢. 本工作受中国国家自然科学基金项目(批准号: 40173010)、中国国家自然科学基金杰出青年基金项目(批准号: 40125001)和美国国家自然科学基金及美国国家地理学会的资助.

参 考 文 献

- Genty D, Blamart D, Ouahdi R, et al. Precise dating of Dansgaard-Oeschger climate oscillations in western Europe from stalagmite data. *Nature*, 2003, 421: 833~837[DOI]
- Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, et al. A High-Resolution Ab-

- solute-Dated Late Pleistocene Monsoon Record from Hulu Cave, China. *Science*, 2001, 294: 2345~2348[DOI]
- 谭明, 刘东生, 钟华, 等. 季风条件下全新世洞穴碳酸盐稳定同位素气候信息初步研究. *科学通报*, 1997, 42(12): 1302~1306
- Neff U, Burns S J, Mangini A, et al. Strong coherence between solar variability and the monsoon in Oman between 9 and 6 kyr ago. *Nature*, 2001, 411: 290~293[DOI]
- Bar-Matthews M, Ayalon A, Kaufman A. Late Quaternary paleoclimate in the eastern Mediterranean region from stable isotope analysis of speleothems at Soreq Cave, Israel. *Quaternary Research*, 1997, 47(2): 155~168
- Hendy C H. The isotopic geochemistry of speleothems-I. The calculation of the effects of different model of formation on the isotopic composition of speleothems and their applicability as paleoclimatic indicators. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1971, 35: 801~824
- O'Neil J R, Clayton R N, Mayeda T. Oxygen isotope fractionation in divalent metal carbonates. *Journal of Chemical Physics*, 1969, 51: 5547~5558
- Epstein S, Mayeda T. Variation of ^{18}O content of waters from natural sources. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1953, 4: 213~224
- Wigley T M L, Brown M C. The physics of caves. In: Ford T D, Cullingford C H D, eds. *The Science of Speleology*. London: Academic Press, 1976. 329~358
- Bar-Matthews M, Ayalon A, Matthews A, et al. Carbon and oxygen isotope study of the active water-carbonate system in a karstic Mediterranean cave: implications for paleoclimate research in semi-arid regions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, 60: 337~347[DOI]
- IAEA/WMO. Global Network of Isotopes in Precipitation. The GNIP Database, 2003 (GNIP/isohis.iaea.org)
- Craig H. Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 1961, 133: 1702~1703
- 郑淑蕙, 侯发高, 倪葆龄. 我国大气降水的氢氧稳定同位素研究. *科学通报*, 1983, 28(13): 801~806
- Gat J R. Oxygen and Hydrogen isotopes in the hydrologic cycle. *Annual Reviews of Earth and Planetary Science*, 1996, 24: 225~262[DOI]
- 于津生, 虞福基, 刘得平. 中国东部大气降水氢氧同位素组成. *地球化学*, 1987, 16(1): 22~26
- Hendy C H, Wilson A T. Palaeoclimatic data from speleothem. *Nature*, 1968, 219: 48~51

(2004-02-11 收稿, 2004-03-22 收修改稿)