

毛庆亚, 王建力, 王家录, 等. 贵州纳朵洞洞穴滴水、现代沉积物 $\delta^{18}\text{O}$ 特征及其环境意义[J]. 中国岩溶, 2018, 37(2): 265-271.
DOI: 10. 11932/karst20180213

贵州纳朵洞洞穴滴水、现代沉积物 $\delta^{18}\text{O}$ 特征及其环境意义

毛庆亚¹, 王建力^{1,3}, 王家录^{1,2}, 李文⁴

(1. 西南大学地理科学学院, 重庆 400715; 2. 安顺学院资源与环境工程学院, 贵州 安顺 561000;
3. 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715; 4. 安顺市气象局, 贵州 安顺 561000)

摘 要: 为了研究洞穴滴水及其对应的现代沉积物氧同位素的变化特征和对外界气候环境的指示意义, 文章对贵州纳朵洞洞外大气降水、洞穴池水、6 处滴水点及其对应的现代沉积物氧同位素进行了近 2 年的监测。结果显示纳朵洞外大气降水和洞穴池水 $\delta^{18}\text{O}$ 值均呈现旱季偏重, 雨季偏轻的季节特征, 基本能反映洞穴所在区域的气候变化。而滴水沉积物 $\delta^{18}\text{O}$ 值和滴水 $\delta^{18}\text{O}$ 值自身存在协调同步的季节特征, 但二者 $\delta^{18}\text{O}$ 值与大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值却呈现反向的季节变化, 这可能是区域地形、岩溶表层带的调节和大气环流共同作用的结果。

关键词: 大气降水; 洞穴滴水; 现代沉积物; $\delta^{18}\text{O}$; 纳朵洞

中图分类号: P641. 3

文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2018)02-0265-07

0 引 言

岩溶地区与黄土高原、沙漠边缘等并列为生态环境脆弱地区^[1]。对岩溶地区现代生态环境的研究及古气候环境的重建已经成为第四纪全球变化研究的热点。岩溶地区因其特殊的环境特点, 在演变过程中记录着自然条件变化以及人类活动的影响^[2]。因此, 对岩溶地区生态环境的研究不仅包括地表环境的监测, 更应当结合地下岩溶洞穴系统进行全面的研究。从 O'Neil^[3] 首次利用洞穴沉积碳酸盐中氧同位素重建古气候以来, 国内外学者在对洞穴沉积物研究中取得了一系列研究成果^[4-8]。洞穴次生沉积物主要来源于洞穴滴水, 而洞穴滴水继承了大气降水、土壤水等所携带的气候与生态环境信号, 成为科学工作者的研究对象。然而, 有研究发现^[9-12], 由于上覆岩层及土壤层的厚度、洞顶植被、基岩类型、岩溶含水层及岩溶水运移路径和时间、滴水的脱气程度、洞穴通风性

等都会导致: (1) 同一洞穴不同滴水点对洞外大气降水的响应存在时间差异; (2) 洞穴滴水及次生沉积物所携带的外界气候、生态信息被不同程度的掩盖; (3) 洞穴滴水与次生沉积物中稳定同位素对气候信息的记录存在多解性。由此可见, 洞穴次生沉积物虽然携带丰富的气候信息, 但却受多种限制因子的影响。为了更科学、更深入地研究洞穴滴水所携带的气候信号, 对贵州纳朵洞多个滴水点进行了近 2 年的监测 (2014 年 2 月—2015 年 12 月), 收集了丰富的数据, 分析了洞穴滴水及现代次生沉积物的稳定同位素特征, 以及它们对外界环境变化的响应机制, 以期建立一个完善的洞穴监测系统, 为此类生态脆弱区古环境的重建提供基础资料。

1 研究区概况

纳朵洞 (105°35' E, 25°49' N) 位于贵州中部偏西

基金项目: 贵州省科技厅联合基金项目 (黔科合 J 字 LKA[2012]18 号, 黔科合 J 字 LKA[2012]09 号; 黔科合 LH 字[2014]7498); 贵州省科技计划院士工作站项目 (黔科合平台人才[2016]5602); 国家重点研发计划 (2016YFC0502600)

第一作者简介: 毛庆亚 (1990—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为资源与环境变化。E-mail: mqytina@163.com。

通信作者: 王建力 (1969—), 男, 教授、博士生导师。E-mail: wangjl@swu.edu.cn。

收稿日期: 2017-02-11

南的安顺市关岭布依族苗族自治县花江镇境内。安顺地区地处云贵高原向东部丘陵过渡的梯级状斜坡地带,受河流的强烈切割,把完整的地形构造单元与含水岩组分割得支离破碎,形成许多小的水文地质单元,进行独立循环—补给、径流、排泄。关岭县境内地势自西北向东南倾斜,海拔在1 000~1 400 m之间。地形地貌以高原丘陵、山地为主,境内碳酸盐岩广布,岩溶地貌广泛发育。纳朵洞出露地层主要为三叠纪永宁组灰岩或白云岩夹泥沙岩,上覆岩层厚度约30~85 m,天然洞口西北朝向,海拔1 191 m。洞顶上覆土壤为黄壤,且土层分布不连续;植被以小灌木丛和草被为主。该地区是典型的中亚热带季风性湿润气候区,气候温和湿润,四季分明,年均温为16.2℃,年均降水量约1 200 mm。该地区同时受到印度季风和东亚季风的强烈影响,季节差异明显,季风降水从5月到10月,降水量约占全年降水量的80%^[13-14]。

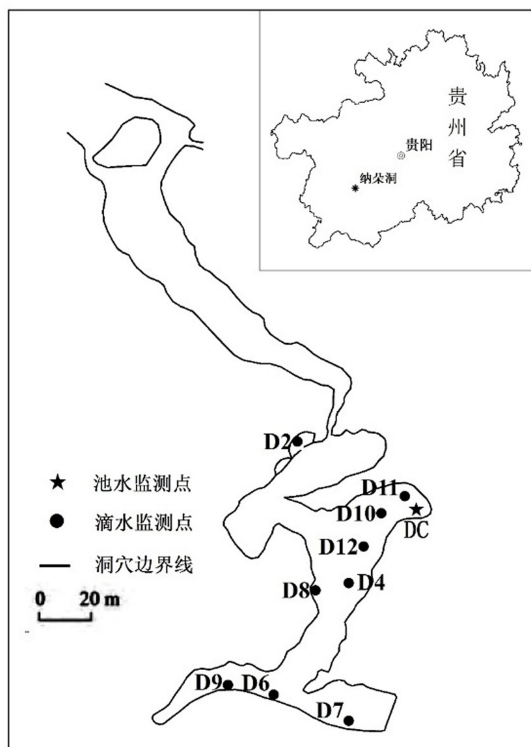


图1 贵州纳朵洞地理位置及洞穴平面图

Fig.1 Location and the plane map of Naduo cave, Guizhou

2 样品与方法

2.1 样品的采集与保存

自2014年2月—2015年12月近2个水文年期间,对纳朵洞进行了连续监测。从监测的9个滴水点

中选取离洞口较远,封闭条件较好,滴水连续性较高的6处滴水(D2、D4、D7、D8、D10、D11)和1处池水(DC)以及洞外大气降水(NDR)的数据进行研究。每月现场测试滴水滴速、滴水温度、电导率、PH值、 HCO_3^- 浓度,洞穴气温、洞内二氧化碳浓度等指标。其中水温、电导率和pH值3项指标使用的是德国WTW公司生产的Multi3430便携式多参数水质分析仪,测试精度分别为0.1℃、 $1\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 和0.001;水体中的 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 浓度采用德国Merck公司生产的硬度计和碱度计滴定,测试精度分别为 $2\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.1\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。现场采集大气降水、洞内滴水、池水各15 mL,大气降水采集点为距洞口约500 m的居民楼顶,收集装置为带漏斗的塑料集雨桶,为防止降水蒸发,将桶身用锡纸包裹并在桶内添加1 cm厚的液态石蜡,每月定期更换集雨桶^[15];洞穴滴水 and 池水现场采集后,用洗净干燥的棕色玻璃瓶密封带回,用于氢氧稳定同位素分析。将表面皿放在对应滴水点正在生长的石笋顶部,保证完全接受洞穴滴水,每月定时刮取现代沉积物带回,进行碳氧稳定同位素分析。

2.2 样品的测试

样品测试均在西南大学地球化学与同位素分析实验室完成。所有水样的分析采用美国Los Gatos Research公司研发的液态水同位素分析仪(Liquid Water Isotope Analyzer),结果以相对于国际原子能委员会平均海洋水标准(V-SMOW)给出,测试精度为 $\delta\text{D}<0.5\text{‰}$ 、 $\delta^{18}\text{O}<0.1\text{‰}$ 。所有洞穴现代沉积物样品经烘干后,利用Delta V Plus气体质谱仪完成测试,前处理设备为KIEL IV碳酸盐自动进样装置^[15]。结果相对于Vienna Pee Dee Belemnite(V-PDB)标准值给出,碳氧稳定同位素的测试精度分别为 $<0.06\text{‰}$ 和 $<0.1\text{‰}$ 。月均温度和月降水量数据由安顺市气象局提供。

3 结果与讨论

3.1 洞穴水系氢氧同位素特征

3.1.1 区域大气降水与洞穴水 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 的关系

Craig^[16]利用全球大气降水同位素资料,率先提出全球大气降水线GMWL(Global Meteoric Water Line),并建立了全球大气降水线方程: $\delta\text{D}=8\delta^{18}\text{O}+10$ 。随后,郑淑惠等^[17]在1983年提出中国大气降水线方程为 $\delta\text{D}=7.9\delta^{18}\text{O}+8.2$,为我国其他地区大气降水同位素组成提供了参照标准。图2中,纳朵洞所

在地区的大气降水线 (Local Meteoric Water Line: LMWL) 为 $\delta\text{D}=9.10\delta^{18}\text{O}+21.91$ ($r=0.995$, $n=28$, $p<0.001$), 斜率和截距均偏大, 且在监测时段内, 纳朵洞 6 个滴水点和 1 个池水点 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值并未均匀分布在当地大气降水线附近, 而是绝大部分投影在降水线下方, 可能的原因是: (1) 由于氢原子的分子质量小, 氢同位素的分馏速率较大, 则在其他条件相同时, 水汽经过多次分馏而形成的降水 δD 相对偏重, 导致由此类降水建立的大气降水线截距与斜率均偏大; (2) LMWL 的建立是综合了雨、旱两季的降水同位素, 而研究区旱季时降水来源主要是西风带输送和内陆再蒸发水汽, 因此该地区降水线方程斜率和截

距偏大^[18-19]。

纳朵洞洞穴滴水 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化范围分别是一 $72.86\text{‰}\sim-49.18\text{‰}$, $-10.31\text{‰}\sim-7.50\text{‰}$, 池水点 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化范围分别是一 $69.33\text{‰}\sim-45.81\text{‰}$, $-10.24\text{‰}\sim-7.04\text{‰}$, 远小于洞外大气降水中 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ (分别为 $-91.78\text{‰}\sim 24.99\text{‰}$, $-12.56\text{‰}\sim 0.44\text{‰}$) 的变化范围。各滴水点 $\delta^{18}\text{O}$ 的平均值为 -8.94‰ , 比大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的平均值 -7.44‰ , 偏轻 1.5‰ 。洞穴内各类水样 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值的波动明显, 有显著的季节效应 (详见 3.1.2), 敏感地响应外界环境变化。

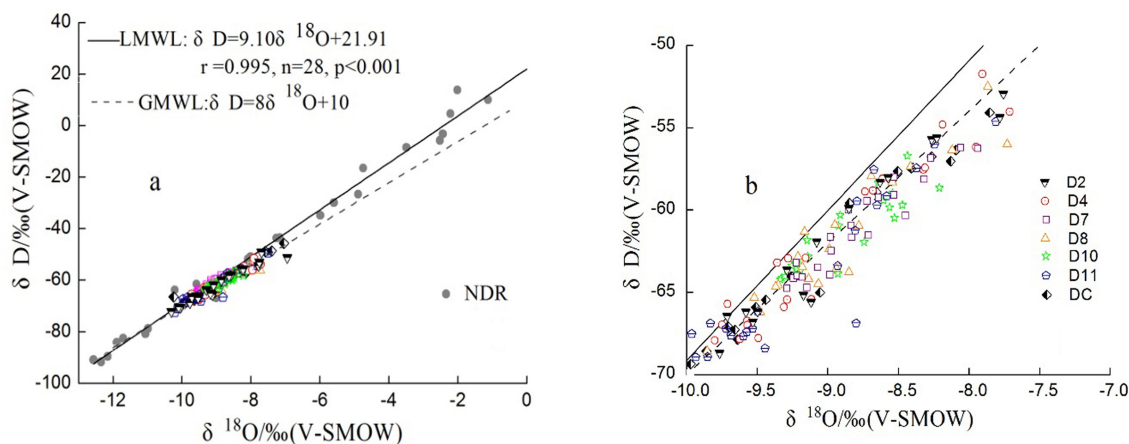


图 2 洞外大气降水线 (a) 及洞穴滴水 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 分布特征 (b)

(注: a 中 LMWL 是研究区 2013.1—2015.12 三个水文年自主收集的降水数据拟合所得)

Fig. 2 LMWL and the distribution of δD and $\delta^{18}\text{O}$ values for the cave drip water

3.1.2 大气降水、滴水及池水 $\delta^{18}\text{O}$ 的季节变化特征

图 3 中, 大气降水、池水点及各个滴水点 $\delta^{18}\text{O}$ 均出现明显的季节变化。大气降水和池水氧同位素低值、高值基本对应研究区雨季和旱季的时间段, 大气降水雨季的均值为 -9.90‰ , 而旱季的平均值为 -4.70‰ , 说明纳朵洞洞外大气降水的季节特征大致为: 旱季偏重, 雨季偏轻。各个滴水点 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化与大气降水雨季、旱季的 $\delta^{18}\text{O}$ 值呈现反向对应关系, 如, 2014 年 11 月至 2015 年 4 月期间, NDR 与 DC 皆表现出 $\delta^{18}\text{O}$ 偏高的特征, 但同时期洞穴滴水监测点却全部持续保持低值; 2015 年 5 月至 7 月期间, NDR 的 $\delta^{18}\text{O}$ 值开始逐渐偏低的同时, 各滴水点却再次出现偏高的反季节趋势。说明洞穴滴水未能及时、同步的继承大气降水的季节规律 (分析详见 3.1.3)。

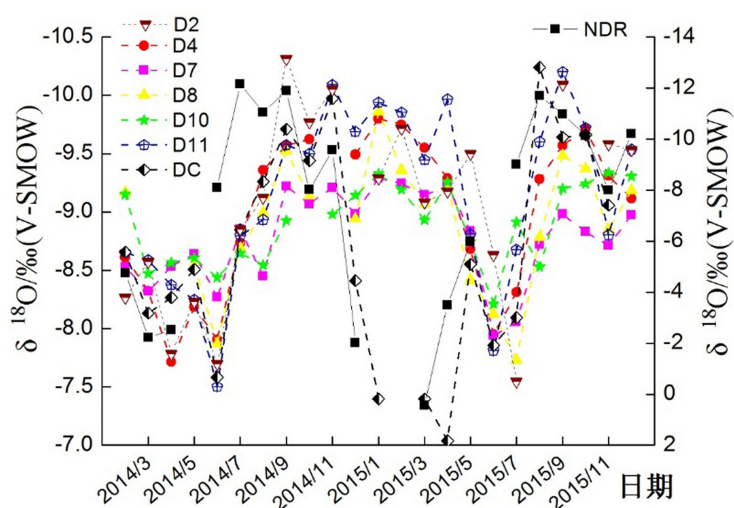
整体上纳朵洞洞穴滴水的 $\delta^{18}\text{O}$ 变化幅度达 2.81‰ , 且不同滴水点的 $\delta^{18}\text{O}$ 波动差异明显。分析各滴水点 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化规律, D11 变化幅度最大, 可初

步判定 D11 对外界环境响应最快、最敏感。可能是由于 D11 监测点靠近池水取样点 DC, D11 的滴水下渗通道或方式一定程度上与池水 DC 相同, 雨水能够快速渗入补给该处滴水, 且这部分水很可能受岩溶表层带的调蓄作用影响较小, 因此对降水变化的响应最为迅速。而 D7 在洞穴最深处, 受外界环境影响小, 滴率也较小, 对外界大气降水响应很慢。

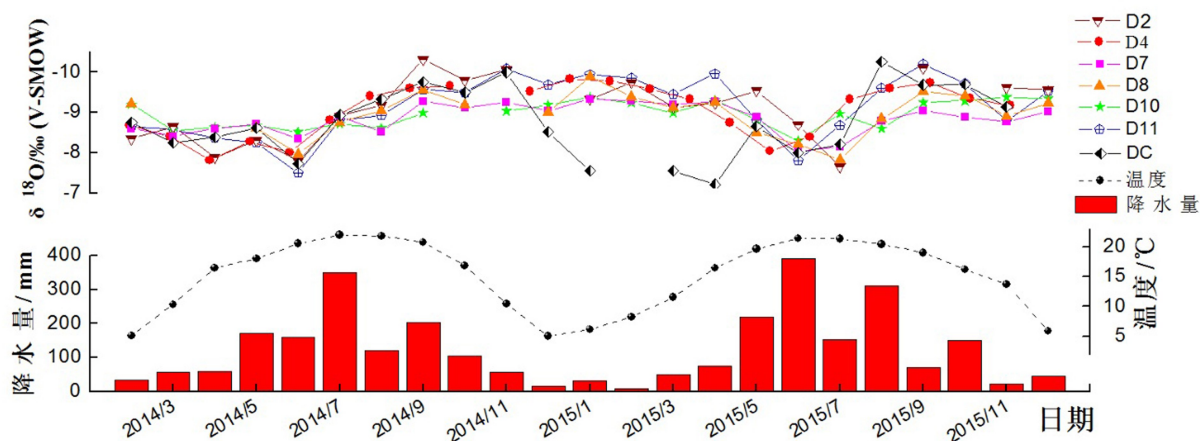
3.1.3 滴水 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度和降水量的关系

2014 年 11 月至 2015 年 4 月, 随着降水量的减少, 大气降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏正 (图 4); 2015 年 6 月至 8 月, 随着夏季风的到来, 降水增多, 纳朵洞洞外大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值开始逐渐偏低, 洞外大气降水表现出了较好的“降水量效应”。而对于洞穴滴水未能继承这一效应, 可能是因为:

(1) 纳朵洞洞穴所在山体坡度较大, 土被不连续, 大气降水不能长时间停滞, 而是快速流失或者下渗。而研究区 2014 年 11 月至 2015 年 4 月属于旱季, 降

图3 洞穴滴水及洞外降水 $\delta^{18}\text{O}$ 季节变化图

(注: D2 表示滴水点编号, DC 表示洞穴池水, NDR 表示洞外大气降水(下同))

Fig. 3 Seasonal variation of $\delta^{18}\text{O}$ in the cave drip water and atmospheric precipitation图4 洞穴滴水 $\delta^{18}\text{O}$ 与气温、降水量的关系图Fig. 4 Relationship of $\delta^{18}\text{O}$ in cave drip water with temperature and precipitation

水量少(图4),雨水一部分快速流失,另一部分被蒸发,极少甚至没有雨水下渗补给洞穴滴水,因此旱季收集到的滴水依旧是岩溶表层带保留的雨季降水,从而使滴水 $\delta^{18}\text{O}$ 的值持续偏低^[20-22]。

(2)从2014年6月开始,至2015年12月,美国气候预测中心发布的南方涛动指数(SOI)序列全为负值,属于典型的厄尔尼诺现象^[23-24]。西太平洋副热带高压较常年偏西偏北,导致中国的雨带提前“北跳”,使西南地区6、7月出现高温干旱的天气(图4);同时,纳朵洞处于苗岭分水岭地带的盆地中,地下水赋存运移于岩溶裂隙和管道空间,地下水埋藏浅,运动缓慢^[13]。遇到伏旱天气,表层岩溶带中的保留雨水被强烈蒸发,因此滴水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 值明显偏高。随后,7、8月份,西南季风带来的印度洋水汽到达西南

地区,降水量增加,单场降水量大时,岩溶含水层的持水度发生突变,活塞作用增强,可快速推动滴水下渗。印度洋水汽属于远洋水汽,所以滴水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 值开始出现低值。

也有研究提出,滴水与降水变化规律不同步是由于上覆岩层的调蓄和滞后作用引起的^[19,21]。由于观测时间有限,不能对各滴水点 $\delta^{18}\text{O}$ 进行多个不同水文年之间的对比分析,所以,对滴水 $\delta^{18}\text{O}$ 变化的详细影响因素还有待进一步研究。

3.2 现代沉积物 $\delta^{18}\text{O}$ 特征及意义

洞穴次生碳酸盐代用指标非常丰富,如石笋年纹层(厚度、灰度、有机质荧光)、微量元素、包裹体成分、分子化石、硫及硫同位素和氧碳同位素等指标,利用洞穴沉积物的替代指标来恢复古气候的研究在全球

取得了高度重视,在古环境重建方面已上升为一个极高的位置^[25]。其中氧碳同位素最受人们的关注。早于 20 世纪 60 年代,洞穴次生碳酸盐稳定同位素重建古气候的研究就已经开展起来,早期的研究多利用洞穴次生碳酸盐恢复古温度的变化^[26-27]。近年来,许多新技术的应用,使得洞穴次生碳酸盐稳定同位素高分辨率的古气候重建研究取得了一系列重大成果。

在同位素平衡分馏的情况下,洞穴次生现代沉积物 $\delta^{18}\text{O}$ 主要受控于滴水 $\delta^{18}\text{O}$ 和洞穴温度的变化^[28]。研究表明,典型的季风控制区,大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 主要受降雨量、降水气团来源以及洞穴温度变化的共同影响^[29-31],因此,季风控制区现代沉积物 $\delta^{18}\text{O}$ 可作为反映短时间内大气环流状况及洞穴温度变化和季风降水量变化的代用指标。

本文在近 2 个水文年期间,共收集到现代碳酸钙沉积物 42 个, $\delta^{18}\text{O}$ 变化范围是: $-10.80\text{‰} \sim -7.88\text{‰}$,平均值为 -9.68‰ 。而大量研究显示,中国南方地区洞穴现代次生沉积物的 $\delta^{18}\text{O}$ 范围大致在 $-4\text{‰} \sim -8\text{‰}$ 之间,均值约在 $-6\text{‰} \sim -7\text{‰}$ 之间^[12,15,20,32]。可见,纳朵洞现代沉积物 $\delta^{18}\text{O}$ 均值明显低于南方其他研究区,可能的原因是:

(1)安顺市在乌江上游至南、北盘江间,处于苗岭南坡迎风面上,由于地形突起,到对气流的抬升作用明显,是贵州省内的多雨区^[13],且多为地形雨。气流不断的上升凝结降雨过程会贫化降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 值,因此安顺地区降水 $\delta^{18}\text{O}$ 均值较省内某些洞穴的降水 $\delta^{18}\text{O}$ 均值偏小^[32-33],从而使继承至大气降水的洞穴滴水 $\delta^{18}\text{O}$ 值减小。

(2)纳朵洞是小型天然洞穴,洞内空间远不如芙蓉洞、织金洞等大型洞穴,低矮、封闭的空间使得滴水在石钟乳尖端形成到滴落的时间段内基本没有蒸发过程,因此沉积物 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏低。

本文选取其中连续性较好、数据保存较为完善且与之前滴水对应的 3 个点 D11、D10 和 D2 进行重点分析。D11、D10 和 D2 现代碳酸钙沉积物的 $\delta^{18}\text{O}$ 均值分别为 -10.10‰ 、 -9.59‰ 和 -9.91‰ (表 1)。

此外,如果介质水和现代沉积碳酸盐中的氧同位素是平衡分馏的,那么根据 O'Neil 等^[3]的研究则有如下关系式^[15]:

$$\delta^{18}\text{O}_c - \delta^{18}\text{O}_w = 3.945 - 0.232 \times t \quad (1)$$

式中: $\delta^{18}\text{O}_c$ 表示平衡分馏状态下碳酸盐中 $\delta^{18}\text{O}$ 的理论值 (V-PDB); $\delta^{18}\text{O}_w$ 表示洞穴滴水的 $\delta^{18}\text{O}$ 实测值 (V-SMOW); t 则为监测时的洞穴空气温度 ($^{\circ}\text{C}$)。

表 1 纳朵洞洞穴中部分沉积物的 $\delta^{18}\text{O}$ 值Table 1 $\delta^{18}\text{O}$ values in the deposits in Naduo cave

采样点	放置时间	取回时间	$\delta^{18}\text{O}$	沉积重量(g)
D11	2013/10	2014/02	-8.26	0.0586
D11	2014/02	2014/04	-9.34	0.0254
D11	2014/04	2014/08	-10.16	0.023
D11	2014/08	2014/09	-10.69	0.0228
D11	2014/09	2014/10	-10.51	0.0594
D11	2014/10	2014/11	-10.78	0.0971
D11	2014/11	2014/12	-10.45	0.0496
D11	2014/12	2015/01	-10.80	0.0291
D11	2015/01	2015/03	-10.38	0.0925
D11	2015/05	2015/06	-8.12	0.0455
D11	2015/06	2015/09	-10.03	0.1404
D11	2015/09	2015/11	-10.07	0.5381
D11	2015/11	2015/12	-9.94	0.0597
D10	2014/02	2014/04	-9.42	0.0282
D10	2014/04	2014/08	-9.67	0.007
D10	2014/08	2014/11	-9.11	0.0308
D10	2014/11	2014/12	-9.78	0.0344
D10	2014/12	2015/01	-10.02	0.0131
D10	2015/01	2015/03	-9.79	0.035
D10	2015/03	2015/05	-9.51	0.0173
D10	2015/05	2015/11	-9.44	0.2187
D2	2014/08	2014/10	-10.52	0.0152
D2	2014/10	2014/11	-10.57	0.0131
D2	2014/11	2015/03	-8.84	0.1318
D2	2015/03	2015/05	-9.76	0.0281
D2	2015/05	2015/09	-9.75	0.0298
D2	2015/09	2015/11	-10.00	0.0286

利用方程(1)可计算得出一组平衡分馏下的沉积碳酸盐理论值 $\delta^{18}\text{O}_c$ 。纳朵洞洞穴实测温度在 $15.3 \sim 20.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间波动,均值为 $17.79\text{ }^{\circ}\text{C}$,冬夏季节差异较大。研究时段内,D11、D10 和 D2 三个滴水点共有 27 个沉积样品数据,对比实测值与理论值,发现二者之间存在平均 0.41‰ 的波动,波动较大,说明纳朵洞在现代条件下沉积的碳酸钙与洞穴滴水的氧同位素平衡分馏状态不好(图 5)。可能是由于洞穴温度的波动造成了沉积物不平衡分馏,然而造成这种不平衡分馏的具体原因还有待进一步研究。

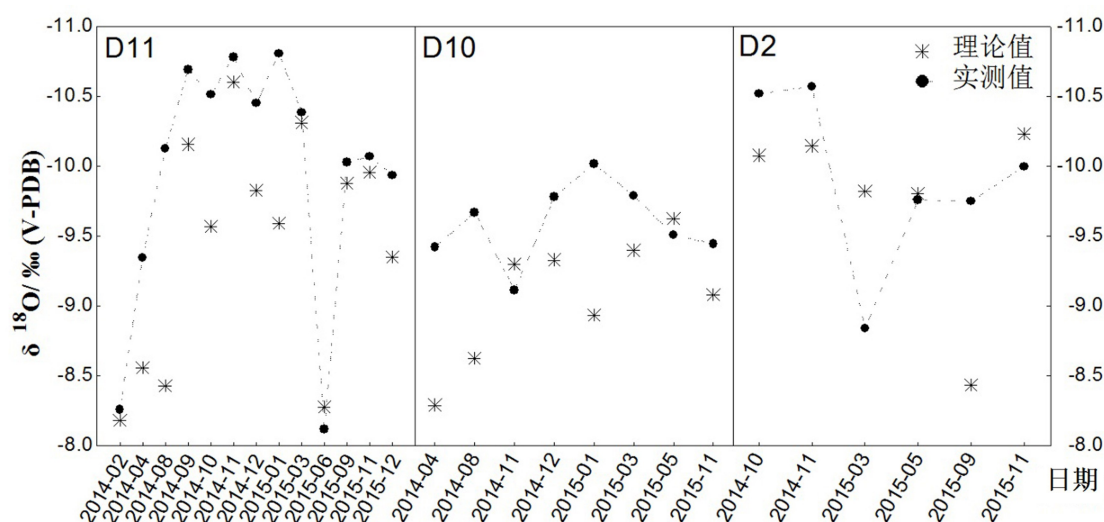


图5 滴水沉积物实测 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}}$ 值与计算所得理论 $\delta^{18}\text{O}_{\text{c}}$ 值对比图

Fig. 5 Comparison diagram of the measured $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}}$ value of the water drip deposits and the theoretical calculated value

4 结 论

(1)建立了纳朵洞所在区域大气降水线(LM-WL), $\delta\text{D}=9.10\delta^{18}\text{O}+21.91$ ($r=0.995$, $n=28$, $p<0.001$)。由于受蒸发作用以及降水云团运移过程中对氧同位素的贫化作用等影响,该降水线方程截距和斜率均偏大。

(2)洞穴各类水体 $\delta^{18}\text{O}$ 变化幅度差异大,其中池水 DC 最为敏感地响应外界降水的变化,可能是因为池水的补给通道较多,补给迅速。同时,各个滴水点自身有明显季节变化,但由于研究区局地气候、地形以及大气环流异常等原因的影响,使得滴水 $\delta^{18}\text{O}$ 的季节规律与降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的相反。

(3)洞穴沉积物氧同位素也存在一定的季节变化规律,且变化趋势与滴水对应关系较好,可见纳朵洞洞穴封闭条件较好,现代沉积物基本继承了洞穴滴水携带的气候信号。然而洞穴沉积物的平衡分馏状态不好,说明不同石漠化地区洞穴现代沉积物同位素分馏存在差异,这方面还需要更深入、全面的研究。

参考文献

- [1] 袁道先. 岩溶石漠化问题的全球视野和我国的治理对策与经验[J]. 草业科学, 2008, 25(9): 19-25.
- [2] 刘子琦, 熊康宁, 吕小溪, 等. 喀斯特洞穴滴水信息对地表环境响应研究进展[J]. 中国岩溶, 2015, 34(1): 43-51.
- [3] O'Neil J R, Clayton R N, Mayeda T K. Oxygen isotope fractionation in divalent metal carbonates [J]. Jour Chem. Physics, 1969, 51(12): 5547-5558.

- [4] Gascoyne M. Paleoclimate determination from cave calcite deposits [J]. Quaternary Science Review, 1992, 11(6): 609-632.
- [5] Coplen T B, Winograd I J, Landwehr J M et al. 5000-year stable carbon isotopic record from Devils Hole, Nevada [J]. Science, 1994, 263: 361-365.
- [6] 谭明, 刘东升, 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[J]. 科学通报, 1997, 42(12): 1302-1306.
- [7] Bar-Matthews M, Ayalon A, Kaufman A. A Late Quaternary paleoclimate in the Eastern Mediterranean Region from stable isotope analysis of speleothems at Soreg Cave, Israel [J]. Quaternary Research, 1997, 47(2): 155-168.
- [8] 谭明. 石笋微层气候学的几个重要问题[J]. 第四纪研究, 2005, 25(2): 164-169.
- [9] ZHOU Yun-chao, WAN Shi-jie, XIE Xing-neng, et al. Significance and dynamics of drip water responding to rainfall in four caves of Guizhou, China [J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(2): 154-161.
- [10] Fairchild I J, Smith C L, Baker A, et al. Modification and preservation of environmental signal in speleothems [J]. Earth-Sci Rev, 2006, 75: 105-153.
- [11] 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 semiarid regions [J]. Geochim Cosmochim Acta, 1996, 60: 337-347.
- [12] 韩军, 杨霄. 桂林洞穴滴水对应 CaCO_3 沉积物的稳定同位素特征与环境意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2008, 28(4): 117-124.
- [13] 贵州省测绘局. 贵州省地图集[M]. 贵阳: 贵州省测绘局, 1985: 9-97.
- [14] 中国自然资源丛书编撰委员会. 中国自然资源丛书—贵州卷[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1995: 442-444.

- [15] 李廷勇,李红春,李俊云,等. 重庆芙蓉洞洞穴沉积物 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 特征及意义[J]. 地质论评,2008,54(5):712-720.
- [16] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters [J]. Science, 1961, 133: 1702-1703.
- [17] 郑淑慧,侯发高,倪葆龄. 我国大气降水的氢氧稳定同位素的研究[J]. 科学通报, 1983, 13: 801-806.
- [18] 李廷勇,李红春,沈川洲,等. 2006-2008 年重庆大气降水 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 特征初步分析[J]. 水科学进展,2010,21(6):757-764.
- [19] 王海波,李廷勇,袁娜,等. 重庆金佛山羊口洞滴水 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 变化特征及其环境意义[J]. 中国岩溶,2014,33(2):146-155.
- [20] 张美良,朱晓燕,吴夏,等. 桂林洞穴滴水与现代碳酸钙 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的环境意义:以桂林七星岩 NO. 15 支洞为例[J]. 沉积学报,2015,33(4):697-705.
- [21] 白晓,桑文翠,李丰山,等. 武都万象洞方解石现代沉积体系 $\delta^{18}\text{O}$ 值月变化特征[J]. 地球化学,2015,44(3):245-253.
- [22] 罗维均,王世杰. 贵州凉风洞大气降水—土壤水—滴水的 $\delta^{18}\text{O}$ 信号传递及其意义[J]. 科学通报,2008,53(17): 2071-2076.
- [23] Ropelewski C F, Jones P D. An Extension of the Tahiti-Darwin in Southern Oscillation Index [J]. Mon Wea Rev, 1987, 115 (9): 2161-2065.
- [24] 李永华,青吉铭,李强,等. 西南地区东部夏季旱涝的西太平洋副高特征[J]. 西南大学学报:自然科学版,2013,35(3): 1-12.
- [25] 张美良,朱晓燕,吴夏,等. 洞穴次生化学碳酸盐沉积物—石笋的气候替代指标的意义与不确定性因素[J]. 地球与环境, 2015,13(2):138-148.
- [26] Duplessy J C, Labeyrie J, Mayeda Lalou C, et al. Continental climatic variations between 130000 and 90000 years BP [J]. Nature, 1970, 226:631-633.
- [27] Hendy C H, Wilson A T. Palaeoclimatic data from speleothem [J]. Nature, 1968, 216: 48-51.
- [28] Hendy C H. The isotopic geochemistry of speleothems. The calculation of the effect of different modes of formation on the isotopic composition of speleothems and their applicability as palaeo-climatic indicators [J]. Geochimica et Cosmochimica. Acta, 1971, 35: 801-824.
- [29] Fleitmann D, Burns S J, Mudelsee M, et al. Holocene forcing of the Indian Monsoon recorded in a stalabmite from Southern Oman [J]. Science, 2003, 300: 1737-1739
- [30] 谭明. 环流效应:中国季风区石笋氧同位素短尺度变化的气候意义:古气候记录与现代气候研究的一次对话[J]. 第四纪研究,2009,29 (5): 851-862.
- [31] Yuan D X, Cheng H, Edwards R L, et al. Timing, duration and translation of the last interglacial Asian monsoon [J]. Science, 2004, 304:575-578.
- [32] 刘子琦,李红春,徐晓梅,等. 贵州中西部洞穴水系与碳酸钙的稳定同位素意义[J]. 地质论评,2007,53(2):233-241.
- [33] 刘子琦,李红春,熊康宁,等. 洞穴水系氢氧同位素监测对重建古气候样品选择的指示意义[J]. 中国岩溶,2008,27(2):139-144.

Characteristics and environmental significance of isotopes record from cave drip water and recent deposit in Naduo cave, Guizhou

MAO Qingya¹, WANG Jianli^{1,3}, WANG Jialu^{1,2}, LI Wen⁴

(1. School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. School of Resources and Environmental Engineering, Anshun University, Anshun, Guizhou 561000, China;

3. Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, MOE, Chongqing 400715, China;

4. Anshun Meteorological Bureau, Anshun, Guizhou 561000, China)

Abstract To explore the cave drip water and the variation characteristics of its corresponding oxygen isotopes in modern deposits and their significance to the climatic environment, the atmospheric precipitation outside the Naduo cave in Guizhou, cave pool water, six drip points and their corresponding modern deposits oxygen stable isotopes have been monitored for the past 2 years. The results show that the $\delta^{18}\text{O}$ in atmospheric precipitation, drip water, and deposits of Naduo cave are generally lower than those in most other southern regions. However, the seasonal variation of $\delta^{18}\text{O}$ from all three sources is significant. For example, the $\delta^{18}\text{O}$ in atmospheric precipitation outside Naduo cave and in cave pool water both have seasonal characteristics that are higher in the dry season and lower in the wet season, and can basically reflect the climate change in the area where the cave is located. Though the $\delta^{18}\text{O}$ in deposits and drip water have similar seasonal variation, they show a very different pattern from the $\delta^{18}\text{O}$ in the atmospheric precipitation. This may be the result of the combination of regional topography, karst surface zone regulation, and atmospheric circulation.

Key words atmospheric precipitation, cave drip water, modern deposits, Oxygen stable isotopes, Naduo cave

(编辑 张玲)