

金华北山洞穴滴水氢氧稳定同位素的特征及气候意义

王学烨^a, 王天阳^a, 叶玮^a, 应瑶^a, 余海员^a, 单宇飞^b, 杨秋彬^a

(浙江师范大学 a. 地理系; b. 国贸系, 浙江 金华 321004)

摘要: 为揭示洞穴滴水氢氧同位素特征及气候意义,对金华北山双龙洞和二仙洞的大气降水、洞穴滴水、岩石裂隙水、地下河水、洞外泉水进行了7~9个月的连续监测和分析。结果表明:①地表水的氧同位素变化幅度大于洞穴水,说明其对外界环境的响应比洞穴水更敏感。②洞穴滴水的氢氧同位素值并没有与大气降水线完全吻合,大部分投影在雨水线下,这反映了地表的蒸发作用以及包气带含水层对滴水存在着显著的调蓄作用。③滴水的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 具有干湿季变化特征,旱季偏正,雨季偏负,但滴水 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 值滞后2~3个月。本研究结果可为重建金衢盆地的古环境提供依据。

关键词: 氢氧同位素; 洞穴滴水; 气候意义; 金华北山洞穴

中图分类号: X32

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2014)04-0180-06

Characteristics and palaeoclimatic significance of hydrogen and oxygen isotopes of drip water in Beishan cave of Jinhua

WANG Xueye^a, WANG Tianyang^a, YE Wei^a, YING Yao^a, YU Haiyuan^a,
SHAN Yufei^b, YANG Qiubin^a

(a. Department of Geography; b. Department of International Economy and Trade,
Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China)

Abstract: In order to reveal the characteristics and palaeoclimatic significance of hydrogen and oxygen isotopes of cave drip water, the paper analyzed and measured the atmosphere precipitation, cave drip water, rock fissure water, river ground water and spring water in both Double Dragon Cave and Erxian Cave for 7~9 consecutive months. The results showed that: ① the variation of $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$ and $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ of surface water is greater than that of cave water, which responses to external environment more sensitively. ② the $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$ and $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ values of drip water is not completely coincided with MWL. Most of the projects are below MWL which indicates that the evaporation of land surface and the aquifer of storage water have obvious regulation function on drip water performed. ③ the $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ value of drip water possesses the characteristics of temporal variability of dry and wet seasons. It is lower in summer rainy season, while it is higher in winter dry season, but the lag time is about 2 to 3 months. This results can provide the basis for reconstructing paleoenvironment in Jinhua - Quzhou basin.

Key words: hydrogen and oxygen isotopes; cave drip water; palaeoclimatic significance; cave in Beishan of Jinhua

1 研究背景

岩溶洞穴次生沉积物已成为记录岩溶地区古环境变化的重要载体^[1-2]。稳定性碳氧同位素指标、

微量元素及其比值、石笋微层记录等多样性指标的应用体现了岩溶次生沉积物在研究过去环境变化中的显著作用。特别是判断石笋沉积平衡分馏两个准则提出,用 $\delta^{18}\text{O}$ 测定古大洋海温,以及运用无机实

收稿日期:2014-03-19; 修回日期:2014-05-23

基金项目:国家级大学生创新创业训练计划项目(201210345020)

作者简介:王学烨(1992-),女,浙江绍兴人,在读本科生,专业方向:地理科学。

通讯作者:王天阳(1977-),女,吉林长春人,博士,硕士生导师,主要从事环境变化研究。

验计算石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度之间的数学关系式等研究的开展为石笋重建古气候奠定了理论基础^[3-4]。近年来,在我国南方地区,利用石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 替代指标反映古气候变化的研究也获得了重要进展^[5-10]。然而,对洞穴石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 的气候性意义的解译目前仍存在较大差别,如以色列 Soreq Cave 石笋氧同位素主要记录的是古环境中降水量的变化^[11];法国石笋碳酸盐岩变化氧同位素却主要记录了西欧古环境中温度的变化^[12];而在季风影响强烈的地区,石笋氧同位素又常作为古季风强弱的指标^[13]。因此, $\delta^{18}\text{O}$ 古气候意义多解性主要取决于 $\delta^{18}\text{O}$ 与气温、降水的具体关系。

洞穴滴水是石笋等洞穴次生沉积物形成的物质基础^[14-15],因此洞穴滴水的地球化学指标研究,对进一步探索洞穴沉积物的生长机理及解译各种指标对古气候信息的记录等方面具有重要意义。本文通过对金华北山双龙洞和二仙洞的洞穴滴水、地下河、洞外泉水和大气降水的氧同位素近一年的观测与分析,探讨地处亚热带的金华北山洞穴系统中 $\delta^{18}\text{O}$ 的时间变化规律及其对环境的指示意义,用将今论古的方法,为科学地对该区域洞穴沉积-石笋记录进行有效的破译、为重建金衢盆地的古环境提供依据。

2 研究区概况

金华双龙溶洞群(29°12′19″N,119°37′10″E)位于浙西中山丘陵和浙中丘陵盆地的交接部北山山地上,以栖霞组燧石灰岩夹粉砂岩、船山组厚层纯灰岩和页岩为物质基础^[16],属于龙门山脉。该地处于我国东南季风区,年均温约 17℃,1 月平均气温为 4.8℃,7 月平均气温为 29℃;多年平均降水量 1414.3 mm^[17],多集中于 6 月至 7 月初的梅雨期及 8、9 月的台汛期。由于地处亚热带,该地区植物物种丰富,具典型的中亚热带植被景观^[18]。

双龙洞是金华北山开发较早的水平型溶洞之一,由内外两大厅及龙耳支洞组成,其洞口向内朝东 95°,向外朝西 275°,洞口高程达 375 m。外洞较宽敞,洞顶似穹窿,洞底较平坦,面积约 1 200 m²。内外两大厅相距 5 m,且由狭窄的地下河连通。地下河长约 15 m,宽约 3 m,其水面到地下河顶灰岩仅留 0.10~0.20 m 的间隙。内大厅比外大厅低矮,呈不规则扁椭圆形,南北向宽约 20~32m,东西向长约 70 m,面积约 2 000~2 200 m²。二仙洞洞口高程约 395 m,由 3 个大厅和 1 小厅组成,为长廊型溶洞,总面积约 2 000 m²。该溶洞内的沉积物主要为一些滴

石、流石,形态规模均较小,许多还在生长中,且洞顶和灰岩岩壁上生长有少量鹅管和卷曲石花。

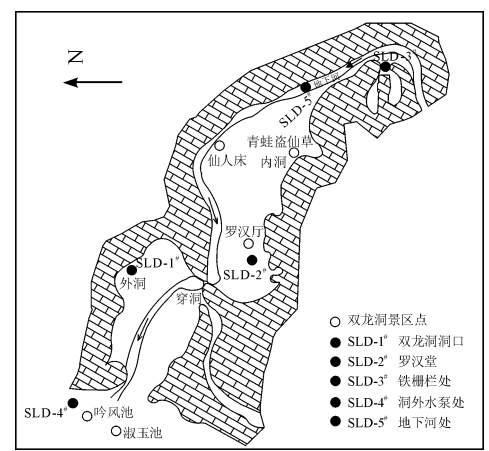


图1 双龙洞平面图

3 样品采集与分析方法

从 2012 年 12 月到 2013 年 7 月对双龙洞和二仙洞的 8 个观测点进行 8 个月的连续采样,其中滴水点是从 2013 年 1 月开始观测,地下河水从 2012 年 12 月开始观测,另外,大气降水总共采样 3 次,洞外泉水观测 3 次。取样前将新开的纯净水瓶(约 600 mL)用蒸馏水润洗 3 次,取样时将整个瓶子装满,不留气泡,贴上标签。

采集样品的 $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$ 、 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 由国家海洋局第三海洋研究所稳定同位素质谱实验室测定,分析仪器为液态水稳定同位素分析仪(LMIA-24d, Los Gatos Research, USA)。氢氧稳定同位素的测试结果均采用平均海水 V-SMOW 进行标准化,通过计算获得 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 数据精度分别为 $\pm 0.6\text{‰}$ 和 $\pm 0.2\text{‰}$ 。

4 结果与讨论

4.1 洞穴水系 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 特征

如表 1 所示,用于金华北山洞穴系统氢氧同位素分析的样品可以分为两大类:洞穴水和地表水。洞穴水包括洞穴滴水(SLD-1#、SLD-2#、EXD-3#、EXD-4#)、岩石裂隙水(SLD-3#)和地下河(SLD-5#),地表水主要是洞外泉水(SLD-4#)。从空间上分析,洞穴水(滴水、岩石裂隙水和地下河水)氢氧同位素值的标准偏差均偏大,表明洞穴内各种水样的 $\delta^{18}\text{O}$ 变化幅度大,对外界环境的变化较敏感。其中,地下河水的 $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$ 、 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 在各种洞穴水中是变化幅度最大的。此外,地表水对外界环境的变化更

加敏感,因此氧同位素变化幅度要大于洞穴水。

在滴水环境的监测中发现,洞穴岩层厚度及裂隙的差异等会导致滴水对降水的响应不同,使滴水氢氧同位素变化存在多样性。SLD-1[#]滴水点位于双龙洞的洞口,洞顶岩层相对较薄,δD_{V-SMOW}、δ¹⁸O_{V-SMOW}的变化范围分别为-69.51%~-22.25‰和-8.40‰~-4.38‰,平均值分别为-37.44‰和-5.65‰,表明该点对外界气候的响应较灵敏。而EXD-4[#]点位于二仙洞水晶宫殿处,δD_{V-SMOW}、δ¹⁸O_{V-SMOW}变化范围分别为-55.37%~-29.22‰和-7.74‰~-5.18‰,平均值分别为-42.67‰和-6.35‰,较其他滴水点值变化幅度小,说明该点对外界气候的响应不灵敏。另外,对比洞穴水中的洞穴滴水、岩石裂隙水、地下河水的δD_{V-SMOW}、δ¹⁸O_{V-SMOW}发现,地下河水的δD_{V-SMOW}、δ¹⁸O_{V-SMOW}平均值均要大于洞穴滴水,而岩石裂隙水的δ¹⁸O_{V-SMOW}平均值最小。SLD-4[#]为洞外泉水点,属于地表水,其氧同位素变化范围均要大于洞穴内洞穴滴水、岩石裂隙水、地下河水,但与洞内各水样的δ¹⁸O_{V-SMOW}平均值均在-6.00‰~-7.00‰,表明洞内水是洞外大气降水的平均状态。

洞穴滴水的δ¹⁸O_{V-SMOW}值在季节上还存在一定的变化,但总体上的变化趋势是雨季偏轻,旱季偏重。从表1看出,δ¹⁸O_{V-SMOW}在不同的月份值有所差异。以SLD-1[#]为例,1月份的δ¹⁸O_{V-SMOW}值为-8.40‰,而2-3月δ¹⁸O_{V-SMOW}值逐渐偏正,到3月达到了-6.09‰,但3-5月δ¹⁸O_{V-SMOW}值先是偏负后又偏正,直到6月又开始偏负。因此可以看出,洞穴滴水δ¹⁸O_{V-SMOW}的季节变化是比较复杂的,气象因素、水汽来源和自然地理因素(例如温度、降水量、土壤、植被、地形、纬度等)的变化都会影响洞穴水中的δ¹⁸O_{V-SMOW}值。

4.2 大气降水与滴水的关系

Craig通过对水循环过程中的δD和δ¹⁸O变化特点及规律的研究,统计出了全球大气降水线(Meteoric Water Line, MWL),建立了全球大气降水方程:δD=8δ¹⁸O+10。为收集全球范围内的月降水(³H、δD、δ¹⁸O)数据,世界气象组织与国际原子能机构在全球建立了880余个监测站点,中国有31个观测站点。由于金华本地没有监测点,将金华北山在季节交替月3次大气降水的δD_{V-SMOW}和δ¹⁸O_{V-SMOW}与中国31个监测站点的大气降水线进行对比发现,金华与桂林地区的大气降水线极为相似,因此采用

表1 双龙洞2012-12-2013-07月洞穴水及地表水

δD _{V-SMOW} 和δ ¹⁸ O _{V-SMOW} 值		‰		
δD _{V-SMOW}	δ ¹⁸ O _{V-SMOW}	样品类型	采样月份	采样位置
-69.51	-8.40	滴水	1	双龙洞入口处
-41.34	-5.95	滴水	2	
-40.72	-6.09	滴水	3	
-26.75	-4.93	滴水	4	
-22.25	-4.38	滴水	5	
-29.67	-4.81	滴水	6	
-31.82	-5.03	滴水	7	
-56.60	-7.53	滴水	1	双龙洞罗汉堂
-54.97	-7.49	滴水	2	
-56.78	-7.29	滴水	3	
-31.22	-5.47	滴水	4	
-31.30	-5.43	滴水	5	
-39.33	-5.70	滴水	6	
-28.16	-4.59	滴水	7	
-54.92	-7.33	岩石裂隙水	1	双龙洞铁栅栏处
-31.45	-5.73	岩石裂隙水	4	
-24.21	-4.87	岩石裂隙水	7	
-52.85	-8.51	岩石裂隙水	1	洞外上方泉水处
-17.87	-2.93	岩石裂隙水	4	
-33.97	-6.03	岩石裂隙水	7	
-75.20	-9.62	地下河水	12	双龙洞地下河处
-56.87	-7.93	地下河水	2	
-68.25	-9.02	地下河水	3	
-35.68	-6.00	地下河水	4	
-36.71	-6.07	地下河水	5	
-43.08	-6.40	地下河水	6	
-27.35	-4.50	地下河水	7	
-53.51	-7.40	滴水	1	二仙洞石笋聚集处
-46.29	-6.59	滴水	2	
-54.20	-6.77	滴水	3	
-22.23	-4.40	滴水	4	
-29.43	-5.21	滴水	5	
-35.48	-5.47	滴水	6	
-27.40	-4.50	滴水	7	
-55.37	-7.74	滴水	1	二仙洞水晶宫殿
-51.56	-7.24	滴水	2	
-55.87	-7.30	滴水	3	
-29.68	-5.28	滴水	4	
-29.22	-5.18	滴水	5	
-38.75	-5.89	滴水	6	
-38.24	-5.79	滴水	7	

了桂林地区的大气降水线δD=8.42δ¹⁸O+16.28。将4个洞穴滴水点的δD_{V-SMOW}和δ¹⁸O_{V-SMOW}值投影到桂林地区的大气降水线上发现,洞穴滴水的δD_{V-SMOW}和δ¹⁸O_{V-SMOW}值并没有与大气降水线完全

吻合,而是大部分投影在雨水线下(图 2),这可能反映了蒸发作用的影响,包括降雨落在地表时的蒸发和表层岩溶带内的蒸发。有研究者认为,这种偏离是由于洞穴次生沉积物在形成过程中,基岩中 CaCO_3 溶解和 CO_2 水化和逃逸的氧质量数与水中的氧同位素的影响相比是非常少的,因此基岩和 CO_2 对沉积物滴水的影响可以忽略,而滴水主要来源于大气降水,故滴水相对于大气降水的偏重是由地表蒸发所致^[3]。另外,有些滴水点在某些月份出现了偏离了雨水线的现象,这些现象通常是在季节交替时发生,如 2013 年 2-4 月,在这期间,伴随着降雨量的增多,含水层持水度发生由不饱和到饱和的变化,在水动力过程中由于洞穴顶板内存在着较老的水源,在大气降水进入的过程中以活塞作用的方式将储存在孔隙中的老水推入滴水的运移路径,稀释作用使老水与新的大气雨水混合,从而影响了滴水的化学特性,故滴水中的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 不能直接反映当前大气降水的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$,因此滴水 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 偏离降水线。尽管存在偏离,但整体而言,滴水氧同位素值更加接近大气降水氧同位素值,表明雨季降水对滴水的贡献是主要的,但洞穴系统包气带含水层对滴水存在着显著的调蓄作用以及地表的蒸发作用使滴水 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 偏离降水线, $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 值存在滞后的现象。此外,将这些偏离雨水线的滴水和大气降水的氢氧同位素进行对比时发现,滴水的氢氧同位素与 2-3 月前的大气降水中的氢氧同位素含量极其吻合,因此推断出滴水对大气降水的滞后时间约 2-3 月。

4.3 洞穴水的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 与温度的相关关系

洞穴石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 对温度的指示意义目前主要存在两种不同的解释:第一种观点是 $\delta^{18}\text{O}$ 与古温度呈正相关,另一种观点是 $\delta^{18}\text{O}$ 与古温度呈负相关。因洞穴滴水即石笋母液的 $\delta^{18}\text{O}$ 基本继承了大气降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 变化,也有研究者尝试从现代降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的角度研究其与气温的关系。Dansgaard 根据瑞利模型总结出了包括温度效应、降水量效应、纬度效应、

高程效应、季节效应在内的大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的同位素效应,这些效应均和温度的变化关系密切;并根据北大西洋沿岸降水稳定同位素的数据总结出,不管是温带地区还是寒带地区,该地区内降水稳定同位素值与温度之间都存在着较好的正相关关系^[19]。但覃嘉铭、李彬等^[20-21] 分别对桂林盘龙洞石笋氧同位素、洞穴滴水、大气降水等多种因素的系统分析表明,该地区石笋的氧同位素与全球气温变化存在负相关关系。因此, $\delta^{18}\text{O}$ 气候性指示意义在地区间还是存在很大差异。图 3 为洞穴水的 $\delta\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 与外界气温的相关线图。

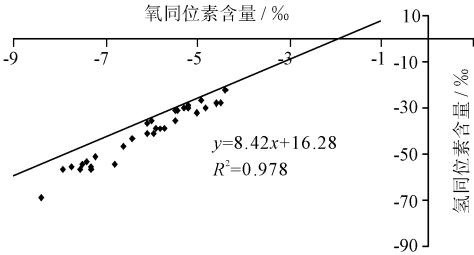


图 2 桂林大气雨水线及金华北山滴水氧同位素投影图

从图 3 可以看出,金华北山洞穴滴水的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 与外界气温有较好的正相关性。将位于双龙洞的 1# 和 2# 与月均温进行回归,回归方程分别为 $y = 0.1165x - 7.4658$ 和 $y = 0.114x - 7.9866$,判定系数 R^2 分别为 0.7033 和 0.8697。位于二仙洞滴水点 3# 和 4# 点与月均温进行回归,获得的回归方程为 $y = 0.1026x - 7.3585$ 和 $y = 0.0882x - 7.7161$, $R^2 = 0.7359$ 和 0.6701,取 $n = 7$,查表得 $r_{0.1} = 0.5822$,即得出 $R^2 > r_{0.1}^2$ 。因此得出,在显著性水平 $\alpha = 0.1$ 上,金华北山洞穴滴水的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 与外界气温有较好的正相关性。也就是说,在金华北山洞穴中滴水的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 越大,反映了外界气温越高。分析其原因,主要是气温与降水云团的冷凝温度有着一定的对应关系,而降水云团的冷凝温度与降水的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 值又有着直接关系^[19,22],所以当气温越低时,降水中同位素的分馏系数 α 也越大,则降水中 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 也越低。

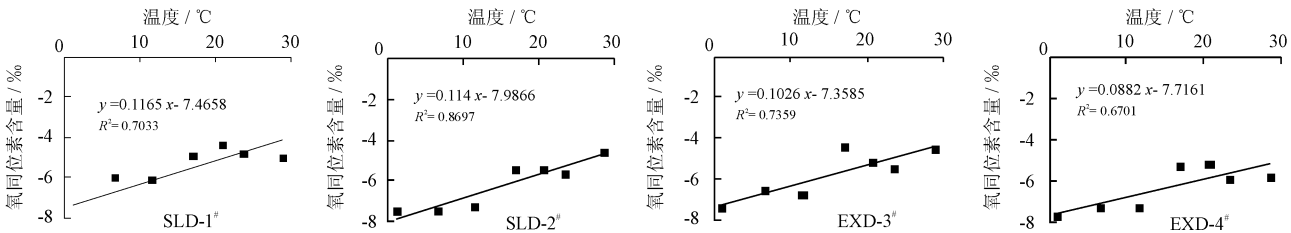


图 3 滴水 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 与外界气温的相关性分析

根据金华北山的气象资料,从 1 月份开始到 7 月份,金华北山的气温一直处于上升状态,从 1 月的 0℃左右升高到 7 月的 30℃左右,降水水中同位素的分馏系数 α 也越来越小,因此对应的洞穴滴水的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 的总体趋势是偏正。

4.4 洞穴滴水 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 与降雨量的相关关系

从图 4 可以看出,金华北山洞穴滴水的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 与大气降水相关性并不显著。将位于双龙洞的 SLD-1[#]和 SLD-2[#]与月降水量进行回归,方程分别为 $y = 0.0138x - 7.6806$ 和 $y = 0.0025x - 0.5823$,

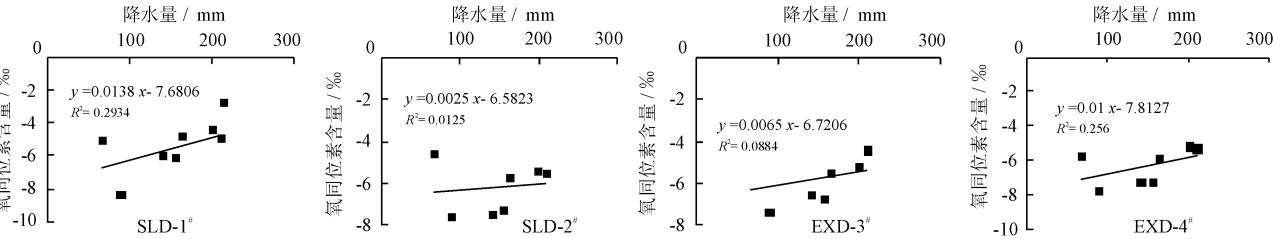


图 4 滴水 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 与外界降水量的相关性分析

图 5 为 $\delta^{18}\text{O}$ 与降水量和气温的关系图。图 5 表明, SLD-1[#]、SLD-2[#]、EXD-3[#]、EXD-4[#]、SLD-5[#] 五个观测点 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 的季节变化基本趋于一致,其中地下河水 (SLD-5[#]) $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 值季节变化幅度较其他四个滴水点的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 值大。以 SLD-1[#] 观测点为例,1-2 月, $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 加权平均值从 -8.40‰ 到 -5.95‰, $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 偏正,反映了 2012 年 10 月底-12 月初降水量的变化,从 72.9 mm 增加到了 121.6 mm。2-3 月 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 加权平均值从 -5.95‰ ~ -6.09‰, $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 偏负,反映了该年 11-12 月降水量的变化。 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 偏负的原因主要是 2012 年金华地区冬季的大气降水异常增多,12 月的降水量为 174.4 mm,比 11 月增加了 50 mm 左右,而大气水汽中的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 的变化主要受到同位素分馏的影响,当降雨量较大时,水气团在来途中发生多次降雨,到达目的地时, $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 经分馏已经很低了,所以大气降水中的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 偏负,而大气降水 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 的季节变化信号被大致同步地传递到了洞穴滴水[23],因此滴水中的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 在 2-3 月偏轻。2 月底到 4 月初, $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 加权平均值偏正,其反映的是 12-1 月冬季雨的特点,由于冬季西伯利亚受冷高压控制,强冷空气活动频繁,冬季风盛行,降水较少,所以研究区 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 在 12-1 月偏正。到 4-6 月份,滴水中的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 偏负,对应的是金华地区 2-4 月降水量的增多。降水量增多的原因一方面是春季气温渐渐回升,冷、暖空气较为活跃,研究区内易形成锋面雨。另

判定系数 R^2 分别为 0.2934 和 0.0125。位于二仙洞滴水点 EXD-3[#]和 EXD-4[#]点与月降水量进行回归,获得的回归方程为 $y = 0.0065x - 6.7206$ 和 $y = 0.01x - 7.8127$, $R^2 = 0.0884$ 和 0.256,取 $n = 7$,查表得 $r_{0.1} = 0.5822$,即得出 $R^2 < r_{0.1}^2$ 。因此,在显著性水平 $\alpha = 0.1$ 上,滴水的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 与当前的外界大气降水相关性并不明显,即金华北山洞穴中滴水的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 并不能反映当季的降水量,这可能与滴水的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 反映大气降水的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 的滞后性有关。

一方面,从我国的季风演变来看,2 月中旬到 4 月中旬是冬季风减弱的时期,空气逐渐变暖、湿,因此降水量增多。6-7 月份, $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 偏正,反映了 4-5 月降水有所减少。综上所述,北山洞穴滴水的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 还是呈现出了降水量效应。

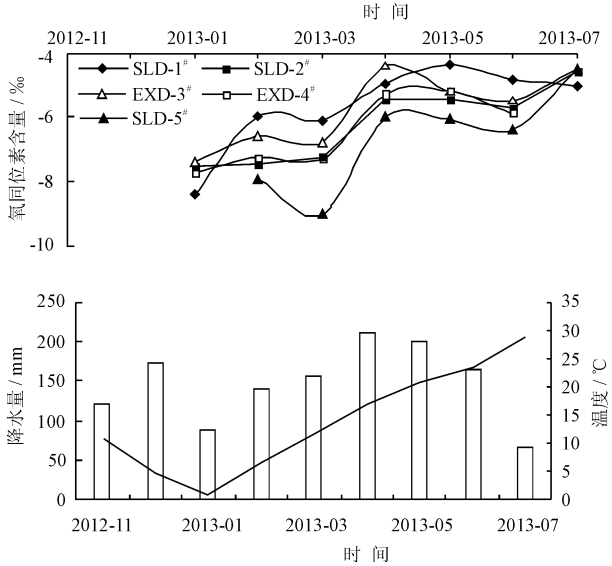


图 5 $\delta^{18}\text{O}$ 与降水量和气温的关系

5 结 语

通过对双龙洞和二仙洞 2012-12-2013-07 各种水体氢氧同位素监测分析,初步得出如下结论:
(1)北山洞穴滴水的氧同位素值接近大气降水氧同位素值,表明雨季降水对滴水的贡献是主要的,

但洞穴系统包气带含水层对滴水存在着显著的调蓄作用(活塞效应和稀释效应)以及地表的蒸发作用使滴水 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 偏离降水线。

(2)在洞穴水(滴水、岩石裂隙水和地下河水)氧同位素值的季节变化幅度较大,说明其对外界环境的变化较敏感,但各水样的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 加权平均值基本保持在 $-6\text{‰} \sim -7\text{‰}$ 左右。此外,地表水(洞外泉水)的氧同位素变化幅度均要大于洞穴水的变化幅度,说明其对外界环境的变化范围比洞穴水更敏感。

(3)北山洞滴水对外界气候有一定的响应。其中,洞穴滴水的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 与外界气温有较好的正相关性。从1月份开始,金华北山的气温不断升高,对应的洞穴滴水的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 的总体趋势是偏正。此外,洞穴滴水的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 具有干湿季变化特征,旱季降水少, $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 偏正;春季开始至夏季,受东亚季风影响,降水增多, $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 偏负,但滴水对降水的响应有一定的滞后, $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 滞后2~3个月。

本项目对金华北山洞滴水理化特征的初步研究表明,地处中亚热带地区的洞穴滴水对环境有较好的指示意义,可以为该区域古环境的研究提供参考。

参考文献:

- [1] Fleishmann D, Burns S J, Modeless M, et al. Holocene forcing of the Indian monsoon recorded in a stalagmite from southern Oman[J]. *Science*, 2003, 300(5626): 1737-1739.
- [2] McDermott F, Matter D P, Hawke worth C. Centennial-scale Holocene climate variability revealed by a high-resolution selectmen $\delta^{18}\text{O}$ record from saw Ireland[J]. *Science*, 2001, 294: 1328-1331.
- [3] 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.
- [4] 王建明, 王健力, 李廷勇. 洞穴石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 与 $\delta^{13}\text{C}$ 气候意义研究[J]. *热带地理*, 2008, 28(5): 395-399.
- [5] 蔡演军, 彭子成, 安芷生, 等. 贵州七星洞全新世石笋的氧同位素记录及其指示的季风气候变化[J]. *科学通报*, 2001, 46(16): 1398-1402.
- [6] Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, et al. A high-resolution absolute dated late Pleistocene monsoon record from Hulu Cave, China[J]. *Science*, 2001, 294(5550): 2345-2348.
- [7] Yuan D X, Cheng H, Edwards R L, et al. Timing, duration, and transition of the last interglacial Asian Monsoon[J]. *Science*, 2004, 304(5670): 575-578.
- [8] Zhang M, Yuan D X, Lin Y, et al. A 6000-year high-resolution climatic record from a stalagmite in Xiangshui cave, Guilin, China[J]. *Holocene*, 2004, 14(5): 697-702.

- [9] 张美良, 林玉石, 覃嘉铭, 等. 黔南洞穴石笋古气候变化记录及终止点II的确定[J]. *中国科学D辑, 地球科学*, 2002, 32(11): 942-950.
- [10] Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, et al. The Holocene Asia monsoon: Links to solar changes and North Atlantic climate [J]. *Science*, 2005, 308(5723): 854-857.
- [11] Frumkin A, Ford D C, Schwarcz H P, et al. Continental oxygen isotope of the last 170 000 years in Jerusalem[J]. *Quaternary Research*, 1999, 51: 317-327.
- [12] Genty D, Blamart D, Ouahdi R, et al. Precise dating of Dansgaard—Oeschger climate oscillations in western Europe from stalagmite data[J]. *Nature*, 2003, 421(6925): 833-837.
- [13] 张平中, 陈一萌, 陈发虎, 等. 甘肃武都万象洞滴水与现代石笋同位素的环境意义[J]. *科学通报*, 2004, 49(15): 1529-1531.
- [14] 周运超, 王世杰. 贵州凉风洞滴水水文水化学过程分析[J]. *第四纪研究*, 2005, 25(2): 208-215.
- [15] 王新中, 班凤梅, 潘根兴. 洞穴滴水地球化学的空间和时间变化及其控制因素—以北京石花洞为例[J]. *第四纪研究*, 2005, 25(2): 258-264.
- [16] 王建, 赵梅, 白世彪, 等. 黄海南部海门近岸牡蛎礁发育的物质基础与环境背景[J]. *地理研究*, 2009, 28(5): 1170-1178.
- [17] 刘学华, 韩兴, 梁亮. 金华市汛期降水特征分析及年际年代际差异[J]. *科技通报*, 2008, 24(6): 762-767.
- [18] 郑伟忠, 叶玮, 朱丽东, 等. 金华市民植物园设计构思[J]. *安徽农业科学*, 2008, 36(28): 12206-12207+12213.
- [19] 罗维均, 王世杰, 刘秀明. 中国大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 区域特征及其对古气候研究的意义[J]. *地球与环境*, 2008, 36(1): 47-55.
- [20] 覃嘉铭, 袁道先, 林玉石, 等. 桂林44ka B. P. 石笋同位素记录及其环境解译[J]. *地球学报*, 2000, 21(4): 407-416.
- [21] Li Bin, Yuan Daoxian, Qin Jiaming, 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*, 2000, 43(3): 277-285.
- [22] Hoffmann G, Jouzel J, Masson V. Stable water isotopes in atmospheric general circulation models [J]. *Hydrol Process*, 2000, 14(8): 1385-1406.
- [23] 李建平, 曾庆存. 一个新的季风指数及其年际变化和与雨量的关系[J]. *气候与环境研究*, 2005, 10(3): 351-365.