

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2015.09.020

降水-滴水的 $\delta^{18}\text{O}/\delta\text{D}$ 年季变化及与大气环流的关系

——以重庆芙蓉洞地区为例^①

袁娜^{1,2,3}, 李廷勇^{1,2,3}, 王海波^{1,2}, 李俊云^{1,2},
南素兰⁴, 韩立银^{1,2}, 黄春霞^{1,2}, 赵鑫^{1,2}, 张涛涛^{1,2}

1. 国土资源部/广西岩溶动力学重点实验室(中国地质科学院岩溶地质研究所), 广西 桂林 541004;
2. 西南大学地理科学学院, 重庆 400715; 3. 国土资源部岩溶生态环境-重庆南川野外基地, 重庆 408435;
4. 中国气象科学研究院, 北京 100081

摘要: 通过对 2011 年 4 月至 2012 年 12 月期间重庆市芙蓉洞外大气降水氢氧稳定同位素、降水量、温度和洞穴滴水、池中 δD , $\delta^{18}\text{O}$ 的连续监测, 分析了芙蓉洞地区降水中 δD , $\delta^{18}\text{O}$ 的变化特征及其与 ENSO 事件和季风指数的关系。当地大气降水线方程的截距和斜率均大于全球大气降水线, 大气降水中 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值与大气温度成负相关关系, $\delta^{18}\text{O}$ 与温度的相关系数为 $r = -0.693 (n = 20)$; 与降水量的相关系数为 $r = -0.121 (n = 20)$; 过量氘(d)也体现出夏季低冬季高的特点。不同季节的水汽源地差异是导致该地区大气降水中 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值出现季节差异的主要原因。芙蓉洞所在的中国南方季风区大气降水中氢氧稳定同位素组成与 ENSO 有密切联系。当厄尔尼诺发生时, 西太平洋副热带高压势力强盛, 西北太平洋季风指数高, 导致中国南方地区大气降水中氢氧稳定同位素值偏重; 拉尼娜发生时, 东南信风强, 印度洋季风指数高, 降水稳定同位素偏轻。

关键词: 季风区; 大气降水; δD ; $\delta^{18}\text{O}$; ENSO; 季风指数

中图分类号: P426.6

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2015)09-0133-07

大气降水作为全球水循环的重要组成部分和中间过程, 同时也是众多气候环境信息的携带者, 历来受到研究者们的重视^[1]。郑淑慧等研究发现新疆乌鲁木齐地区降水稳定同位素表现出很好的温度效应, 而中纬度大陆地区表现出明显的降水量效应^[2]。大气降水作为石笋记录环境信息的最初载体, 已成为国内外学者研究的重点和热点。大气降水中氢氧稳定同位素作为研究水循环的示踪元素, 在不同的水体中存在差异, 并受到纬度、海拔、距海远近、季节、温度和降水量等因子的影响^[3-5]。对大气降水氢氧稳定同位素的组成及比率大小的分析有利于判别不同区域的水汽来源^[6], 其值的大小还取决于水汽的输送过程以及水汽源区的初始状态^[7]。因此可以通过研究降水中氢氧稳定同位素变化规律追踪降水水汽源区或反演大气运动过程^[5-6]。

长期以来, 普遍的观点认为中国季风区的石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 变化可能更多指示的是夏季风强度的变化^[8]。Burns 等通过研究 Qunf 洞和 Moomi 洞发现石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 和印度洋季风成反相关关系^[9]。汪永进等人在讨论葫芦洞石笋记录的论文中阐述了中国季风区石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 的环境意义, 根据现代不同季节雨水同位素的观测结果分析, 认为其主要随着夏季和冬季降水量比率的变化而变化, 而“温度效应”和“雨量效应”的影响则很小^[8]。谭明通过分析中国南方季风区大气降水中氢氧稳定同位素数据与大气环流格局, 发现在东南季风和

^① 收稿日期: 2014-03-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41172165, 41030103, 41302138); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(XDJK2013A012, XDJK2009B016, XDJK2014C010); 黄土与第四纪地质国家重点实验室开放基金资助项目(SKLLQG1310)。

作者简介: 袁娜(1988-), 女, 山东滨州人, 硕士研究生, 主要从事第四纪地质学专业方面的研究。

通信作者: 李廷勇, 副研究员, 硕士研究生导师。

西南季风影响下带来的夏季风降水中氢氧稳定同位素会有所不同:东南季风和西北太平洋副热带高压相一致,由此控制下的大气降水的水汽来源较近,其氢氧稳定同位素偏重;而在西南季风影响下来自印度洋的大气降水的水汽来源较远,经过多次降水,其氢氧稳定同位素偏轻,由此提出了“环流效应”对中国南方季风区大气降水中稳定同位素的影响^[10-11]. 综上,中国南方季风区大气降水和石笋中的氧同位素主要反映了温度变化、降水量变化、冬夏季风降水比率的变化、夏季风强度的变化以及水汽来源的远近. 本文基于对芙蓉洞外大气降水和洞穴滴水氢氧稳定同位素的监测,结合大气环流格局,特别是 ENSO 强度和季风指数,进一步论证环流效应对中国南方季风区大气降水稳定同位素的影响. 由于石笋氧同位素的主要来源是大气降水中的氧同位素,因此研究大气降水中氧同位素的年季变化及其与大气环流的关系,有助于明确石笋中氧同位素的气候意义和主要影响因素.

1 研究区概况及研究方法

1.1 研究区概况

芙蓉洞(29°13′44″ N, 107°54′13″ E)位于重庆市武隆县江口镇芙蓉江东岸,距离芙蓉江与乌江汇合口约 4 km^[12];所在地区属大娄山与武陵山褶皱带的岩溶地区,河谷深切,山顶至河面落差大约 1 000 m. 芙蓉洞所在地质层为中寒武统灰岩和白云岩,洞口海拔约 480 m,高出河水面约 260 m,主洞长约 2 700 m,宽 2~30 m,高多数在 30~50 m^[13]. 该区属中亚热带季风性湿润气候,冬暖夏热,四季分明. 在监测的 2011—2012 年期间,年均降水量为 913 mm,年均气温 17.4 °C,5—10 月降水量约 679 mm,11—4 月降水量约 234 mm. 在洞穴深部年均温 16.7 °C,年平均湿度 94%,季节变化平稳.

1.2 取样与分析

本研究监测时段为 2011 年 4 月至 2012 年 12 月,跨度为 2 个水文年. 芙蓉洞外月平均气温和月降水量数据由安放在屋顶上的小型气象站获得,温度所用仪器为 Onset 公司生产的 U12-011(美国),测量范围是 -20~70 °C,每 2 h 计数 1 次,温度测试误差为 ±0.4 °C,降水量仪器是 Onset 公司生产的 RG3-M(美国)自动雨量记录仪,其监测原理为漏斗中的倾斜槽每倾斜 1 次代表 1 个 event,1 个 event 等于 0.2 mm 降水量,每 2 min 计数 1 次,精度是 ±1.0%. 每月现场用 HOBO 软件下载数据,然后计算月平均温度和月降水量.

此外,参照国际原子能委员会全球同位素监测网(GNIP)大气降水稳定同位素样品收集规范,在芙蓉洞外放置了大气降水收集装置——带漏斗的塑料桶,桶内添加约 1 cm 厚的液体石蜡,避免大气降水样品的蒸发,桶外用锡纸包装,减少太阳辐射对雨水化学成分的影响. 同时,漏斗中放入 1 个洁净的乒乓球,防止杂物进入收集装置^[14],收集到的雨水水样放入冰箱中 5 °C 保存. 在芙蓉洞内设置 6 个滴水点(MP1, MP2, MP3, MP4, MP5, DW#1)和 2 个池水点(PW#2, PW#4)^[15],每月定期现场采集水样. 取 1 瓶 5 mL 的水样用于氢氧稳定同位素测试. 大气降水和洞穴滴水、池水所有水样的氢氧稳定同位素均在中国科学院地质与地球物理研究所测试完成,测试仪器为美国 Picarro 公司生产的波长扫描光腔衰荡光谱仪,测试精度为 $\delta^{18}\text{O} \leq 0.08\text{‰}$, $\delta\text{D} \leq 0.4\text{‰}$. 所有水样的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值均相对于 V-SMOW 标准给出.

2 讨论与结果

2.1 区域大气降水线(LMWL)

大气降水中 δD 与 $\delta^{18}\text{O}$ 之间的关系被称为大气降水线(MWL)^[4]. Craig 测定了世界各地的河水、湖水、雨水和雪水,发现了 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 间的线性关系($\delta\text{D} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$),即全球大气降水线(GMWL),全球降水中的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 主要落在全球大气降水线附近^[4]. 芙蓉洞外收集的 2011 年 4 月至 2012 年 12 月期间大气降水样品的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 变化范围分别是 -87.01~19.31‰、-12.4~-0.16‰, δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的最偏重值出现在 2012 年 2 月的大气降水中,最偏轻值出现在 2011 年 9 月的大气降水中. 将芙蓉洞外大气降水的氢氧稳定同位素值进行相关性分析,得到芙蓉洞所在地区的区域大气降水线(LMWL),其方程为 $\delta\text{D} = 9.2466 \delta^{18}\text{O} + 22.529$, $r = 0.993$, $p < 0.01$ (图 1a).

本文基于芙蓉洞外大气降水中 20 组氢氧同位素数据,建立了当地的区域大气降水线(LMWL),相关系数 $r = 0.993$,在 $p < 0.01$ 的置信水平上有很好的相关性,说明有一定的可靠性,主要代表的是重庆芙蓉洞地区的大气降水状况. 相比 Craig^[4]提出的全球大气降水线($\delta\text{D} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$)和郑淑惠等^[2]提出中国大气降水线($\delta\text{D} = 7.9\delta^{18}\text{O} + 8.2$),芙蓉洞所在地区的 LMWL 具有更大的斜率和截距,造成这一现象的共同原因是由于分子质

量数的差异,氢同位素比氧同位素的分馏速率要大,因此在其他条件相同的情况下,由经历过多次分馏过程的水汽所形成的降水 δD 相对偏重,导致基于此类雨水所建立的区域大气降水线的斜率和截距偏大^[15].芙蓉洞地区雨季时水汽主要来自低纬度海洋(印度洋),旱季时主要受大陆性气团的影响,以及西风带输送和内陆再蒸发水汽的补给,造成该地区斜率和截距偏大.芙蓉洞内滴水 and 池水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化幅度远小于洞外大气降水中氢氧稳定同位素值的变化范围(图 1a,1b);芙蓉洞洞穴滴水和池水的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 没有体现出明显的季节变化,说明大气降水在到达洞内的过程中,在岩溶含水层中经历了充分的混合作用^[12, 16].

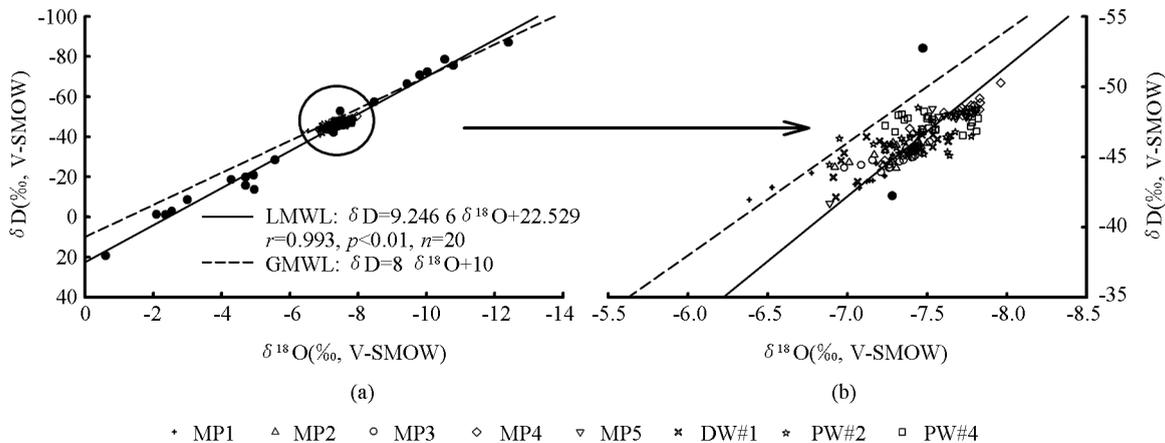


图 1 重庆武隆大气降水线及洞穴水 δD , $\delta^{18}\text{O}$ 分布特征

2.2 $\delta^{18}\text{O}$ 值与温度和降水量之间的关系

芙蓉洞外大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值与气温(T)变化有很好的相关性, $\delta^{18}\text{O} = -0.3032T - 0.4258$,相关系数 $r = -0.693$, $p < 0.01$.虽然只有20组数据,但是从氢氧同位素与温度的变化趋势上明显呈现出:温度与 $\delta^{18}\text{O}$ 成负相关(图2).主要是由于在中国南方季风区的冬季和夏季,大气降水的水汽来源有明显差异,导致其形成的大气降水氢氧同位素组成也有很大差异,这种差异掩盖了大气温度对 $\delta^{18}\text{O}$ 分馏的影响(温度效应),使得该区域表现出了反温度效应^[17].

芙蓉洞外大气降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值与降水量并没有体现出明显的相关性,相关系数为 $r = -0.121$, $n = 20$,这一现象与经典同位素理论中提到的降水量效应在内陆区通常不显著的结论一致^[18].降水量并非是导致氢氧稳定同位素偏负的唯一原因,降水中氢氧稳定同位素的变化与大气环流^[19]以及水汽源地的变化^[6]也有密切关系.同时还取决于水汽在运移过程中的分馏过程,如果水汽离源地后经历了多次凝结分馏过程,那么残留水汽形成的后期降水中氢氧稳定同位素将比前期降水中的氢氧稳定同位素偏负^[15].在2011年4月至2012年12月期间,芙蓉洞外大气降水量在2011年10月为191 mm,其 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 -4.71‰ ;而7月份夏季风期间的降水为102 mm,其 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 -7.47‰ .2012年4月和5月的降水量分别为24 mm和236 mm, $\delta^{18}\text{O}$ 值分别为 -2.09‰ 和 -5.57‰ ;6-9月夏季风降水分别为123, 181, 34, 29 mm, $\delta^{18}\text{O}$ 值分别为 -9.43‰ , -10.03‰ , -9.8‰ , -10.79‰ .因此即使夏季风影响期间降水量不大,但是其 $\delta^{18}\text{O}$ 值比非季风影响期间的降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值仍显著偏负(图2),说明水汽源地的不同是影响大气降水中氢氧稳定同位素组成的重要因素.

2.3 过量氘

Dansgaard首先定义了过量氘(d): $d = \delta\text{D} - 8\delta^{18}\text{O}$,表示水汽蒸发过程中因同位素的动力分馏过程而偏离平衡分馏的程度或局地降水稳定同位素偏离GMWL的程度,全球降水的平均 d 约为10^[5]. d 反映了上空水汽团的同位素组成特征,并取决于水汽蒸发源地的状况,如空气相对湿度、海表温度、盐度及风速等^[20-22],且同一水汽团在输送、冷凝过程中 d 会保持不变^[5, 17],因此 d 常常被用来研究追踪水汽源地^[22].

芙蓉洞外大气降水的 d 值与降水量和气温的变化均有明显季节差异, d 与气温(T)有很好的相关性: $d = -1.1942T + 36.899$, $r = -0.875$, $p < 0.01$, $n = 20$,气温升高, d 值变小;气温降低, d 值增大.由于降水量(P)的月际变率很大,因此 d 与降水量的关系不如与气温的关系显著: $d = -0.0293P + 17.181$, $r = -0.355$, $n = 20$.整体而言,降水量多的月份 d 的值偏小,降水量少的月份 d 的值偏大(图3).在芙蓉洞所处的中国西南地区,在雨季时水汽主要来自低纬度海洋(印度洋),空气湿度大,因水汽源地较远,降水中稳定同位素偏负, d 偏小;而在非夏季风降水的季节,主要受大陆性气团的影响,以及西风带输

送和内陆再蒸发水汽的补给,湿度比较小,降水中的稳定同位素偏正, d 偏大^[23].因此,芙蓉洞外大气降水中 d 的季节性变化,体现的是夏季风降水与非夏季风降水水汽源地的差异.

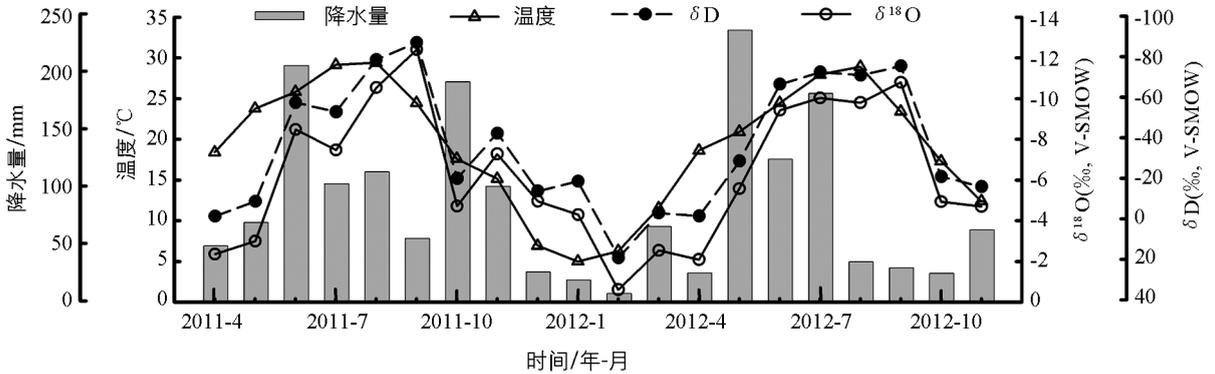


图 2 芙蓉洞外大气降水中氢氧稳定同位素与温度和降水量关系

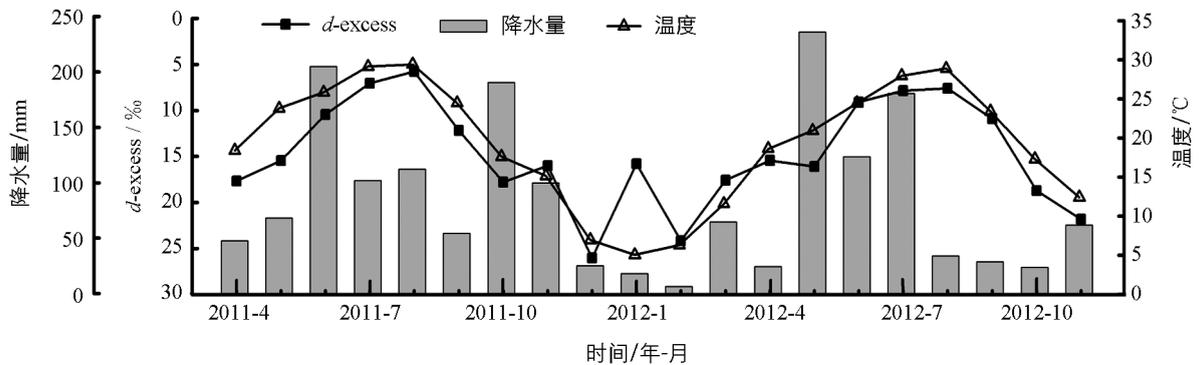


图 3 芙蓉洞外大气降水中过量氘与降水量和温度变化

2.4 ENSO 对芙蓉洞外降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的影响

ENSO 是厄尔尼诺/拉尼娜和南方涛动的总称,是发生在赤道中、东太平洋上的大尺度海气相互作用事件,周期变化于 2~7a 之间^[24],许多地方的降水和气温等气候要素的异常与 ENSO 具有密切关系^[25].通常在分析 ENSO 时常用指标是 Nino 3.4 区($5^{\circ}\text{N}-5^{\circ}\text{S}$, $170^{\circ}\text{W}-120^{\circ}\text{W}$)的海表温度异常(SSTA)^[24-25],和美国气候预测中心发布的南方涛动指数(SOI)序列^[26],通常 SSTA 与 SOI 具有很高的负相关性^[24],SOI 的负值代表有发生厄尔尼诺的可能,SOI 的正值代表有发生拉尼娜的可能^[27],SOI 的值持续低于-8 预示着厄尔尼诺的发生,持续高于+8 则可能会发生拉尼娜.2011 年 SOI 长期为正值,2011 年为拉尼娜年;而 2012 年 SOI 出现负值的月份占到全年的 1/2,虽然 2012 年不属于典型的厄尔尼诺年,但是 SSTA 也表明 2012 年东太平洋赤道海域水温正异常(图 4).

ENSO 引起大规模的海气异常,通过对大气环流的影响,进而影响中国南方季风区大气降水中的氢氧稳定同位素组成^[28].ENSO 对北半球大气环流特别是对西太平洋副热带高压系统(副高)位置和强度的影响将对我国南方地区的降水产生重要影响^[29].如 2012 年 8 月,北半球极涡呈单极型分布,中心略偏于东半球,强度较常年偏强;北半球高纬度环流呈 5 波型分布;西太平洋副热带高压较常年偏北偏西^[30],重庆武隆地区降水量为 44 mm,较同期偏少 6 成左右.SSTA 达到了两年来的最大值,SOI 表现为负值,东赤道太平洋海水表面温度正异常,重庆地区降水偏少,但是降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 较同期变化不大(图 4).原因可能是组成降水的大部分水汽还是来自距离较远的印度洋,所以尽管降水比同期少,但是降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 却相差不大.此外,降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与 SOI 和 SSTA 存在相位差(图 4),大约是降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 滞后于 SOI 和 SSTA 2~3 个月,可能是因为海洋水汽输送到重庆地区有一个时间过程,因此降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 比 SOI 的峰值以及 SSTA 的谷值滞后.

芙蓉洞外 2011 和 2012 年 5 月至 9 月大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的加权平均值($\delta^{18}\text{O}_w$)分别为 -8.42% , -8.18% ,2011 年 5-9 月的 $\delta^{18}\text{O}_w$ 比 2012 年 5-9 月的 $\delta^{18}\text{O}_w$ 偏轻. ENSO 冷阶段对应于强东南信风阶段,此时西南季风增强,南海和西太平洋水汽向北方输送减少,印度洋水汽由西南向东北输送增加^[10].针对中国南方地区,印度洋水汽相对于太平洋水汽输送距离更远,因此印度洋水汽所带来的降水中 $\delta^{18}\text{O}_w$ 偏

负. ENSO 暖阶段对应于强副高阶段, 副高强导致其势力更加向西推进, 东南季风增强, 输送到中国南方的水汽中来自太平洋的水汽居多, 因距离较近, 所以降水中的 $\delta^{18}\text{O}_w$ 偏正^[10].

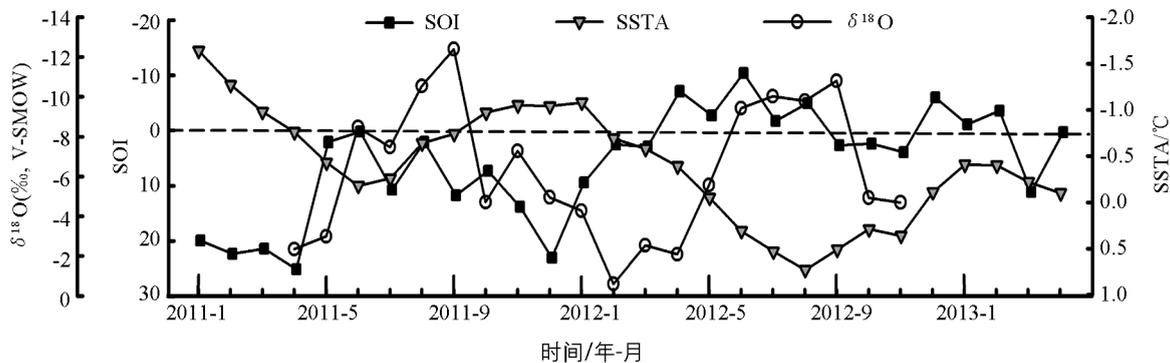


图4 2011—2013年 SSTA, SOI 与芙蓉洞外大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化

2.5 季风指数与降水 $\delta^{18}\text{O}_w$ 的关系

季风指数是指某一地区季风现象明显程度的量值, 是描述季风活动的物理量; 季风指数愈大, 表示季风现象愈明显. 季风指数大于零, 表示季风增强; 季风指数小于零, 表示季风强度减弱^[31]. 本文参考的印度夏季风指数 (ISMI) 和西北太平洋季风指数 (WNPMI) 来自全球季风监测网. ISMI 和 WNPMI 在 2000—2012 年有显著变化, 特别是在 2008—2012 年期间变化剧烈, 其中在 2011—2012 年的 WNPMI 为正值, ISMI 为负值; 在 2012 年两者相差更大, ISMI 突然降低, WNPMI 升高. 2012 年夏秋季节东太平洋海水表面温度偏高, 发生类似厄尔尼诺现象, 相对更多从太平洋输送来的水汽进入中国南方地区形成降水(图 5), 由于这些源自太平洋的水汽距离中国南方地区比印度洋水汽的距离更近, 导致其形成的大气降水中 $\delta^{18}\text{O}_w$ 偏重. 相对于 2011 年而言, 2012 年时 WNPMI 和 ISMI 差别较大, 且 ISMI 更偏负, WNPMI 更偏正, 以西北太平洋季风为主, 因距离中国南方较近, 导致 2012 年降水中的 $\delta^{18}\text{O}_w$ 偏重, 2011 年则相对偏轻. 不过由于 2012 年东赤道太平洋表层海水温度正异常幅度偏小, 导致与 2011 年的对比不是太显著, 本文的结果还需要更长时间尺度监测资料的进一步证实.

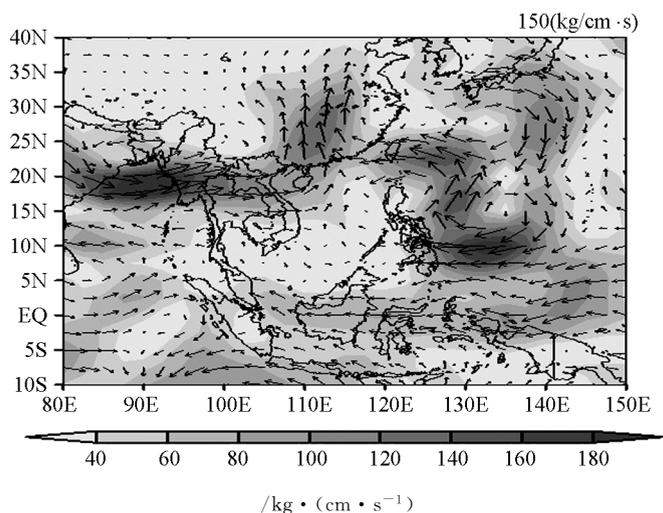


图5 2012年减去2011年的地表到300 hPa水汽输送通量

3 结论

通过对中国南方季风区重庆芙蓉洞外大气降水氢氧稳定同位素的连续监测, 建立了区域大气降水线 (LMWL), $\delta\text{D}=9.246\ 6\delta^{18}\text{O}+22.529$, $r=0.993$, $p<0.01$. 洞外大气降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 年内变化幅度为 $-0.61\text{‰}\sim-12.40\text{‰}$, 夏季降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 偏轻而冬季降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 偏重. 由于上覆岩层的混合作用, 洞穴内滴水 and 池水的 $\delta^{18}\text{O}$ 季节变化不显著, 年内变化幅度也显著小于洞外大气降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 变化幅度, 为 $-6.38\text{‰}\sim-7.82\text{‰}$. 洞穴滴水和池水的氢氧稳定同位素落在区域大气降水线上, 表明洞穴水继承了洞外大气降水的同位素信息. 过量氘 (d) 的分析也表明不同季节水汽源地的差异是导致当地大气降水中氢氧稳定同位素组成出现明显季节差异的主要原因. 此外, 芙蓉洞所在的中国南方季风区大气降水中氢氧稳定同位素组成与 ENSO 表现为正相关关系. 当厄尔尼诺发生时, 西太平洋副热带高压势力强盛, 西北太平洋季风指数高, 导致中国南方地区大气降水中氢氧稳定同位素值偏重, 拉尼娜发生时, 东南信风强, 印度洋季风指数高, 降水稳定同位素偏轻.

致谢:感谢中国重庆市武隆县风景名胜区管理局、重庆市武隆喀斯特旅游(集团)有限公司、芙蓉洞风景名胜区管理处等单位在芙蓉洞野外监测工作中给予的大力支持和帮助!感谢武隆县气象局提供了武隆地区的气温和降水量数据。

参考文献:

- [1] DANSGAARD W. The Abundance of $\delta^{18}\text{O}$ in Atmospheric Water and Watervapor [J]. *Tellus*, 1953, 5(4): 461—469.
- [2] 郑淑慧, 侯发高, 倪葆龄, 等. 我国大气降水的氢氧稳定同位素的研究 [J]. *科学通报*, 1983, 28(13): 801—806.
- [3] FRIEDMAN I. Deuterium Content of Natural Waters and other Substances [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1953, 4(1—2): 89—103.
- [4] CRAIG H. Isotopic Variation in Meteoric Waters [J]. *Science*, 1961, 133(3456): 1702—1703.
- [5] DANSGAARD W. Stable Isotopes in Precipitation [J]. *Tellus*, 1964, 16(4): 436—468.
- [6] ARAGUÁS L, FROELICH K, ROZANSKI K, et al. Stable Isotope Composition of Precipitation over Southeast Asia [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(D22): 28721—28742.
- [7] ROZANSKI K, ARAGUÁS L, GONFIANTINI R, et al. Relation Between Long Term Trends of Oxygen-18 Isotope Composition of Precipitation and Climate [J]. *Science*, 1992, 258(5084): 981—985.
- [8] WANG Yong-jin, CHENG Hai, 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.
- [9] BURNS S J, FLEITMANN D, MATTER A, et al. Indian Ocean Climate and an Absolute Chronology over Dansgaard/Oeschger Events 9 to 13 [J]. *Science*, 2003, 301(5638): 1365—1367.
- [10] TAN Ming. Circulation Effect: Response of Precipitation $\delta^{18}\text{O}$ to the ENSO Cycle in Monsoon Regions of China [J]. *Climate Dynamics*, 2014, 42(3—4): 1067—1077.
- [11] 谭明. 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.
- [12] 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.
- [13] 朱学稳. 芙蓉洞的次生化学沉积物 [J]. *中国岩溶*, 1994, 13(4): 357—368.
- [14] 陈虹利, 李廷勇, 周福莉, 等. 基于场降雨数据的大气降水化学特征分析——以重庆市北碚区西南大学为例 [J]. *西南大学学报: 自然科学版*, 2012, 34(2): 105—113.
- [15] 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.
- [16] LI Ting-yong, SHEN Chuan-chou, LI Hong-chun, et al. Oxygen and Carbon Isotopic Systematics of Aragonite Speleothems and Water in Furong Cave, Chongqing, China [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2011, 75(15): 4140—4156.
- [17] 吴夏, 朱晓燕, 张美良, 等. 大气降水中稳定同位素组成的高分辨率记录——以桂林地区为例 [J]. *长江流域资源与环境*, 2013, 22(2): 182—188.
- [18] GAT J R, GONFIANTINI R. Stable Isotope Hydrology: Deuterium and Oxygen-18 in the Water Cycle [J]. International Atomic Energy Agency, Vienna, 1981, 103—142.
- [19] POSMENTIER E S, FENG Xia-hong, ZHAO Mei-xun, et al. Seasonal Variations of Precipitation $\delta^{18}\text{O}$ in Eastern Asia [J]. *J Geophys Res*, 2004, 109(D23).
- [20] MERLIVAT J, JOUZEL J. Global Climatic Interpretation of the Deuterium-Oxygen-18 Relationship for Precipitation [J]. *J Geophys Res*, 1979, 84(C8): 5029—5033.
- [21] GAT J R. Some Classical Concepts of Isotope Hydrology [M] // AGGARWAL P, et al. *Isotopes in the Water Cycle: Past Present and Future of a Developing Science*. Springer Netherlands, IAEA, 2005: 127—137.
- [22] MOOK W G. Environmental Isotopes in the Hydrological Cycle: Principles and Applications [J]. *Atmospheric Water*, 2001, 39(2): 63—67.
- [23] 章新平, 刘晶淼, 谢自楚, 等. 我国西南地区降水中过量氙指示水汽来源 [J]. *冰川冻土*, 2009, 31(4): 613—619.
- [24] 王绍武, 朱锦红, 蔡静宁, 等. ENSO 变率的不规则性 [J]. *北京大学学报: 自然科学版*, 2003, 39(增刊): 125—133.
- [25] 龚道溢, 王绍武. 近百年 ENSO 事件对全球陆地和中国降水的影响 [J]. *科学通报*, 1999, 44(3): 315—320.
- [26] ROPELEWSKI C F, JONES P D. An Extension of the Tahiti-Darw in Southern Oscillation Index [J]. *Mon Wea Rev*, 1987, 115(9): 2161—2165.
- [27] 薛积彬, 钟巍, 赵引娟, 等. 珠江三角洲地区降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化特征及与 ENSO 的关系 [J]. *地理科学*, 2007, 27(6): 825—830.

- [28] 章新平, 杨大庆, 刘晶森, 等. 北美洲降水中稳定同位素的时空分布以及与 ENSO 的关系 [J]. 冰川冻土, 2006, 2(1): 29—36.
- [29] 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.
- [30] 陶亦为. 2012年8月大气环流和天气分析 [J]. 气象, 2012, 38(11): 1429—1435.
- [31] 祝从文, 何金海, 吴国雄, 等. 东亚季风指数及其与大尺度热力环流年际变化关系 [J]. 气象学报, 2000, 58(4): 391—402.

Annual and Monthly Variations of δD and $\delta^{18}\text{O}$ Values in Precipitation and Drip Water and Their Relationship with Atmospheric Circulation ——A Case Study in Furong Cave Area

YUAN Na^{1,2,3}, LI Ting-yong^{1,2,3}, WANG Hai-bo^{1,2},
LI Jun-yun^{1,2}, NAN Su-lan⁴, HAN Li-yin^{1,2},
HUANG Chun-xia^{1,2}, ZHAO Xin^{1,2}, ZHANG Tao-tao^{1,2}

1. Karst Dynamics Laboratory, MLR and GZAR, (Institute of Karst Geology, CAGS) Guilin, 541004, China;
2. School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China;
3. Field Scientific Observation & Research Base of Karst Eco-Environments at Nanchuan in Chongqing, Ministry of Land and Resources of China, Chongqing 408435, China;
4. Chinese Academy of Meteorological Sciences (CAMS), Beijing 100081, China

Abstract: Continuous monitoring was made over the hydrogen and oxygen stable isotopes, precipitation, temperature and δD and $\delta^{18}\text{O}$ in the drip water and pool water in Furong cave, Chongqing, China from April 2011 to December 2012, and the characteristics of δD and $\delta^{18}\text{O}$ variation in precipitation and the correlation with atmospheric circulations, such as ENSO and monsoon index, were investigated in this study. An equation of local meteoric water line (LMWL) was established, which indicated that both its intercept and slope were significantly greater than those of global meteoric water line (GMWL). In addition, a negative correlation was detected between the δD and $\delta^{18}\text{O}$ values of local precipitation and the air temperature. The correlation coefficient between $\delta^{18}\text{O}$ values and temperature was $r = -0.693$ ($n = 20$), while the correlation coefficient between $\delta^{18}\text{O}$ values and rainfall was $r = -0.121$ ($n = 20$). The seasonal change in deuterium excess (d) values also showed the characteristics of being high in summer and low in winter. All the seasonal changes in d , δD and $\delta^{18}\text{O}$ values of precipitation could be attributed to the difference in moisture sources in different months. The hydrogen and oxygen stable isotope compositions in precipitation out of Furong cave, a typical site in Southern China monsoon area, were closely associated with the atmospheric circulation in tropical Pacific Ocean, such as the ENSO. When El Nino occurred, the west Pacific subtropical high (WPSH) became stronger, and the northwest Pacific monsoon index was high, leading to an increase in stable isotope values in precipitation in southern China. On the other hand, when La Nina happened, the southeast trade wind was strengthened and Indian monsoon index was also high, resulting in a decrease in stable isotope values in precipitation.

Key words: monsoon zone; meteoric precipitation; δD ; $\delta^{18}\text{O}$; ENSO; monsoon index

