

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2020071302

王家录, 李维杰, 李廷勇. 贵州纳朵洞滴水 $\delta^{18}\text{O}/\delta\text{D}$ 的年际变化特征及其对 ENSO 的响应[J]. 环境化学, 2020, 39(12): 3462-3470.

WANG Jialu, LI Weijie, LI Tingyong. Interannual variations of drip water $\delta^{18}\text{O}$ to δD Ratios in Naduo Cave of Guizhou and response to ENSO activities[J]. Environmental Chemistry, 2020, 39(12): 3462-3470.

贵州纳朵洞滴水 $\delta^{18}\text{O}/\delta\text{D}$ 的年际变化特征 及其对 ENSO 的响应*

王家录^{1,2**} 李维杰¹ 李廷勇^{3**}

(1. 西南大学地理科学学院/岩溶环境重庆市重点实验室, 重庆, 400715; 2. 安顺学院资源与环境工程学院, 安顺, 561000;
 3. 云南省高原地理过程与环境变化重点实验室, 云南师范大学地理学部, 昆明, 650500)

摘 要 于 2013 年 1 月至 2016 年 12 月期间, 对贵州纳朵洞洞内 4 处滴水和洞外降水的氢、氧稳定同位素 ($\delta^{18}\text{O}$, δD) 进行了 4 年的监测, 发现滴水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 都均匀地分布在当地大气降水线 (LMWL) 附近, 说明大气降水是洞穴滴水的主要来源, 且滴水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 继承了当地大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 的信号. 结合大气环流格局的分析, 研究区大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 在监测时段内较好地响应了从 El Niño 向 La Niña 的转换. 由于岩溶地下水的混合作用和包气带水的蒸发分馏, 纳朵洞 4 处洞穴滴水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 在雨季偏正, 旱季偏负, 与大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 旱季偏正, 雨季偏负的特征相反; 同时, 滴水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 在监测时段内对 ENSO 的响应, 总体表现为在 La Niña 期间偏正, El Niño 期间偏负, 与大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 对 La Niña 和 El Niño 的响应情况也相反. 因此, 利用纳朵洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录研究古气候高分辨率的季节和年际变化, 要充分考虑以上情况.

关键词 洞穴滴水, $\delta^{18}\text{O}$, δD , ENSO, 贵州纳朵洞.

Interannual variations of drip water $\delta^{18}\text{O}$ to δD Ratios in Naduo Cave of Guizhou and response to ENSO activities

WANG Jialu^{1,2**} LI Weijie¹ LI Tingyong^{3**}

(1. School of Geographical Sciences, Chongqing Key Laboratory of Karst Environment, Southwest University, Chongqing, 400715, China;
 2. School of Resources and Environmental Engineering, Anshun University, Anshun, 561000, China;
 3. Yunnan Key Laboratory of Plateau Geographical Processes & Environmental Changes, Faculty of Geography,
 Yunnan Normal University, Kunming, 650500, China)

Abstract: From January 2013 to December 2016, the dynamic observations of oxygen and hydrogen stable isotopes of meteoric precipitation and cave drip water had been performed in Naduo Cave, Guizhou Province. In the study, it was found that the δD and $\delta^{18}\text{O}$ of drip water were uniformly distributed near the Local Meteoric Water Line (LMWL). Most of the data were distributed in the lower right of the LMWL. This suggested that atmospheric precipitation was the main source of cave drip water, and $\delta^{18}\text{O}$ and δD in the drip water had inherited the average level of $\delta^{18}\text{O}$ and δD in the local precipitation, and that evaporation had a certain influence on the isotopic composition of the drip water in the cave. Combined with the analysis of atmospheric circulation pattern, the atmospheric precipitation $\delta^{18}\text{O}$ and δD in the study area responded well to the transition from El Niño

2020 年 7 月 13 日收稿 (Received: July 13, 2020).

* 贵州省科技合作计划项目 (黔科合 LH 字 [2016] 7282 号, 黔科合 LH 字 [2017] 7059 号) 和贵州省科技计划院士工作站项目 (黔科合平台人才 [2016] 5602) 资助.

Supported by the Science and Technology Cooperation Project (LH [2016] 7282, LH [2017] 7059) and the Academician Workstation of Science and Technology Plan (S&T Cooperation Platform Talents [2016] 5602).

** 通讯联系人, E-mail: lu226@163.com; cdlity@163.com

Corresponding author, E-mail: lu226@163.com; cdlity@163.com

to La Niña during the monitoring period. Due to the mixing effect of karst groundwater and the partial evaporation of vadose water, the $\delta^{18}\text{O}$ and δD of drip water in Naduo Cave were relatively higher in the rainy seasons and lower in the dry seasons, contrary to the $\delta^{18}\text{O}$ and δD of atmospheric precipitation. The drip water $\delta^{18}\text{O}$ and δD were generally positive during La Niña and negative during El Niño, contrary to the responses of atmospheric precipitation $\delta^{18}\text{O}$ and δD to ENSO activities. Therefore, careful attention should be paid to high-resolution reconstruction of paleoclimate using stalagmites from this cave.

Keywords: Cave drip water, $\delta^{18}\text{O}$, δD , ENSO, Naduo Cave of Guizhou.

随着测年技术和同位素分析技术的不断进步,基于石笋氧同位素的古气候重建^[1-5],以及洞穴石笋沉积机理的研究工作取得显著进展^[6-9].大气降水作为全球水循环的重要环节,携带着众多的气候信息;石笋中的氧主要来自于大气降水,其氧同位素成为记录气候信息的重要指标之一,受到研究者的重视.大气降水中氢氧稳定同位素受到距海远近、海拔高度、纬度、季节、温度和降水量等诸多因子的影响^[10-11],其比率大小可以示踪水汽来源、水汽输送过程以及水汽源区的远近^[12-15].为了探究滴水沉积物 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的气候环境意义,一些学者已做了大量的洞穴滴水监测研究.李彬等^[16]对广西桂林盘龙洞洞穴滴水与现代碳酸盐沉积物 $\delta^{18}\text{O}$ 的研究,发现沉积物的 $\delta^{18}\text{O}$ 值与年均气温之间并不存在简单的一一对应关系.罗维均等^[17]对贵州荔波凉风洞的监测结果表明洞穴滴水 $\delta^{18}\text{O}$ 和大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 存在大致协调同步的季节变化规律,表现为雨季偏轻,旱季偏重,地表蒸发作用导致滴水 $\delta^{18}\text{O}$ 年算术平均值偏重于大气降水.王海波等^[18]对重庆金佛山羊口洞洞穴滴水 $\delta^{18}\text{O}$ 的研究表明,洞穴滴水 $\delta^{18}\text{O}$ 季节变化不够明显,利用羊口洞石笋进行季节分辨率的古气候重建可能性较低.张美良等^[19]对广西桂林七星岩 15 号支洞和白晓等^[20]对甘肃武都万象洞的研究表明,洞穴滴水 $\delta^{18}\text{O}$ 明显受控于降水的 $\delta^{18}\text{O}$,且万象洞洞穴滴水、石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 信号在年代际尺度上可以很好地指示区域内大气降水的同位素变化特征.程海等^[21]认为在短时间尺度上石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 可以反映一些特定区域的水文气候变化.但随着洞穴滴水监测的不断深入,洞穴石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 所包含的水文气候意义仍存在争议,一系列新的问题需要进一步探讨.这些都说明对喀斯特洞穴系统中 $\delta^{18}\text{O}$ 的气候解译存在复杂性和多样性,需要深入开展洞穴观测工作来进一步阐释洞穴石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的气候环境意义.

本文对纳朵洞进行了 4 个水文年的观测,以揭示纳朵洞内滴水对大气降水中氢氧稳定同位素组成的响应,并结合大气环流格局变化,探讨大气降水氢氧稳定同位素组成与 ENSO(厄尔尼诺与南方涛动)的联系,为利用石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录研究古气候变化提供依据.

1 实验部分(Environmental section)

1.1 研究区概况

纳朵洞(25°49'N, 105°35'E)位于云贵高原东部,贵州省安顺市关岭县响锣村境内,距县城 13 km.洞体所在地层为三叠系永宁镇组,主要为灰岩或白云岩夹泥砂岩,上覆基岩厚度约 30—85 m,洞口海拔 1191 m.洞穴上覆土壤为黄壤,植被以草被和灌丛为主^[22].监测洞厅位于从洞口向洞内的第三洞厅,从第二洞厅进入第三洞厅经过约 5 m 长的狭窄通道,不利于洞穴深部与外界的物质和能量交换,导致监测洞厅保持常年稳定的微环境(图 1).该地区是典型的中亚热带季风性湿润气候区,雨热同期,干湿季分明;多年平均降水量为 1268 mm,多年平均气温为 16.2 °C;5—10 月为雨季,降水量占全年的 80% 以上,11 月至次年 4 月为旱季,降水稀少^[23].

1.2 样品采集和保存

2013 年 1 月至 2016 年 12 月期间,对纳朵洞洞内 4 处滴水点(D4、D7、D8、D9)和洞外大气降水(NDR)的水文水化学特征及氢氧稳定同位素组成进行观测.每月月底采样 1 次,每次采样前准备好约 1000 mL 塑料盆和 15 mL 棕色玻璃瓶,塑料盆用于收集滴水,滴水收集够用后,用滴水润洗 3 次对应的采样瓶,然后倒入采样瓶中,每个瓶中装满样品,盖实瓶盖后用封口膜将瓶口密封,以防止蒸发引起的同位素分馏^[24].大气降水是在距洞口约 300 m 的农户家平房房顶收集,也是每月月底采样 1 次.每次

采集降水样品前,在采样瓶中加入 1 cm 厚的液体石蜡,防止样品收集期间水样发生蒸发.采集到的水样及时带回实验室放入冰箱内约 5 ℃ 避光条件下冷藏,以待测试.

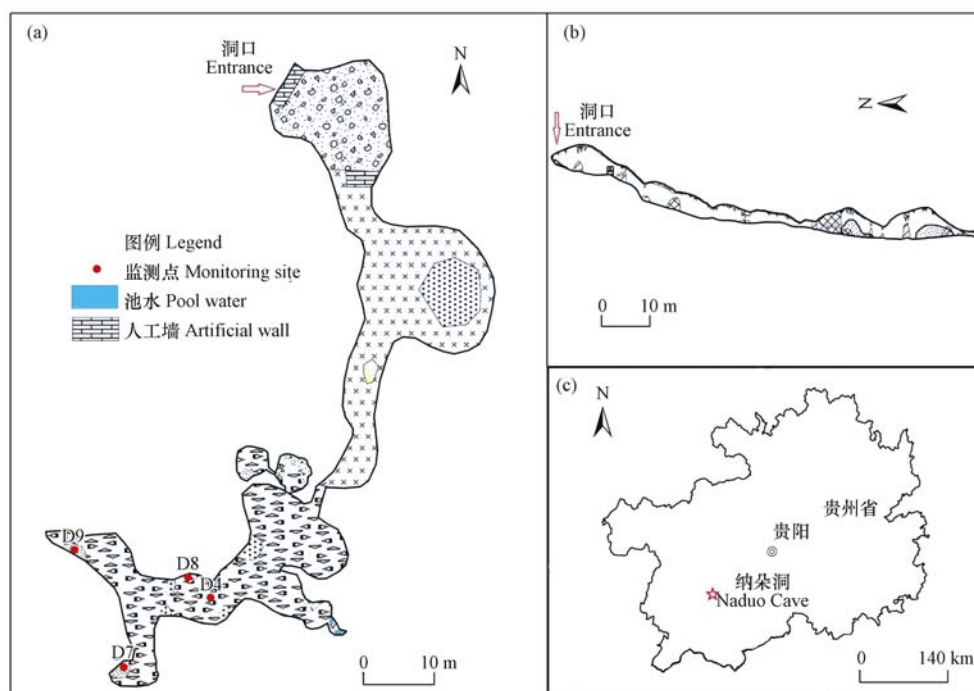


图 1 贵州纳朵洞洞穴平面图(a)、剖面图(b)和地理位置图(c)

Fig.1 Plan (a), profile (b) and geographical location (c) of Naduo Cave in Guizhou

1.3 分析测试

利用美国 LGR(Los Gatos Research) 的液态水同位素分析仪(DLT-100, 908-0008) 进行水样氢氧稳定同位素测定,测试原理是利用红外激光技术测定光腔内水汽中 H_2^{18}O 与 HD^{16}O 分子的浓度,最终通过标准样品校准得到 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 与 $\text{D}/^1\text{H}$ 的比值,测试精度为 $\delta^{18}\text{O} \leq 0.1\text{‰}$, $\delta\text{D} \leq 0.5\text{‰}$.具体操作见温艳茹等^[25]和王家录等^[22]文章中的分析测试.最终结果以相对于标准平均海水(V-SMOW, Vienna-Standard Mean Ocean Water) 的千分差表示(‰).

2 结果与讨论(Results and Discussion)

2.1 区域大气降水线以及洞穴滴水 $\delta^{18}\text{O}/\delta\text{D}$ 分布特征

大气降水 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 之间的线性关系被定义为大气降水线(MWL).大气降水线的斜率反映了水汽蒸发与凝聚过程中稳定同位素 D 对 H 和 ^{18}O 对 ^{16}O 相对固定的动力学分馏关系.Craig^[26]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, Global Meteoric Water Line).2013 年 1 月至 2016 年 12 月期间在纳朵洞外收集了 44 个大气降水样品(部分样品被鸟粪污染,未取样),其 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 变化范围分别是 -91.8‰ — -0.9‰ 、 -12.6‰ — -1.2‰ .利用最小二乘法对降水的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 进行回归拟合,得出研究区的大气降水线方程(图 2): $\delta\text{D} = 8.9\delta^{18}\text{O} + 20.2$ ($R^2 = 0.97$),这与全球大气降水线相

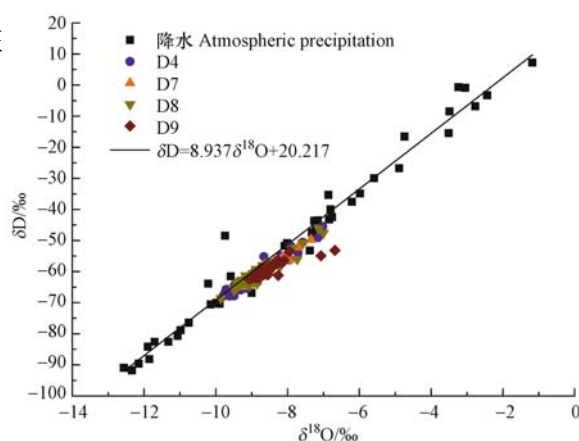


图 2 纳朵洞外区域大气降水线以及洞穴滴水 $\delta^{18}\text{O}/\delta\text{D}$ 分布特征

Fig.2 The Local Meteoric Water Line and the $\delta^{18}\text{O}/\delta\text{D}$ characteristics of drip water in Naduo Cave

比, 具有较大的斜率和截距. 但与贵阳 $\delta\text{D} = 8.8\delta^{18}\text{O} + 22.1$ ($R^2 = 0.98$)^[27]、重庆 $\delta\text{D} = 8.7\delta^{18}\text{O} + 15.7$ ^[28] 的大气降水线方程非常接近, 可能说明这几个地区的大气降水水汽来源和性质基本相同. 研究区大气降水线之所以有较大的斜率和截距, 造成这一现象的原因是可能由于分子质量数的差异, 氢同位素比氧同位素的动力分馏速率常数要大, 经历过多次分馏过程的水汽所形成的降水 D 相对偏重^[23].

观测期间纳朵洞 4 处滴水 (D4、D7、D8、D9) 的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 都均匀地分布在当地大气降水线 (LMWL: Local Meteoric Water Line) 附近. 大部分数据点分布于 LMWL 右下方, 一方面说明大气降水是洞穴滴水的主要来源, 且滴水中的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 继承了当地大气降水的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的特征; 另一方面说明蒸发作用对洞穴滴水的同位素组成具有一定影响. 4 处滴水 (D4、D7、D8、D9) 在监测时段期间 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 变化范围分别是 -67.9‰ — -45.5‰ 和 -9.8‰ — -7.0‰ 、 -64.7‰ — -49.7‰ 和 -9.3‰ — -7.4‰ 、 -68.6‰ — -47.6‰ 和 -9.9‰ — -7.0‰ 、 -62.5‰ — -53.2‰ 和 -9.1‰ — -7.1‰ ; 相比于大气降水, 纳朵洞滴水 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 变化范围较小^[15]. 由于上覆土壤和岩层对降水的滞留和调蓄作用, 促使洞穴滴水源自不同的降水事件以及不同月份的降水^[16]. 总体而言, 纳朵洞滴水体现了当地大气降水稳定同位素组成的平均状态^[29].

2.2 洞穴滴水 $\delta^{18}\text{O}/\delta\text{D}$ 年季变化特征

在 2013—2016 年期间, 每年雨季 (5 月—10 月) 大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 的算术平均值分别为 -8.8‰ 和 -59.5‰ 、 -10.1‰ 和 -69.8‰ 、 -9.6‰ 和 -66.8‰ 、 -8.6‰ 和 -58.2‰ , 旱季 (11 月—4 月) 大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 的算术平均值分别为 -7.1‰ 和 -43.2‰ 、 -8.2‰ 和 -50.5‰ 、 -6.4‰ 和 -36.7‰ 、 -4.1‰ 和 -17.4‰ ; 大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 表现出“雨季偏负, 旱季偏正”的整体特征.

如图 3 所示, 纳朵洞内 4 处滴水的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 变化趋势一致, 但由于 2013 干旱和地下水混合作用, 导致滴水与降水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 的变化曲线在不同年份存在差异.

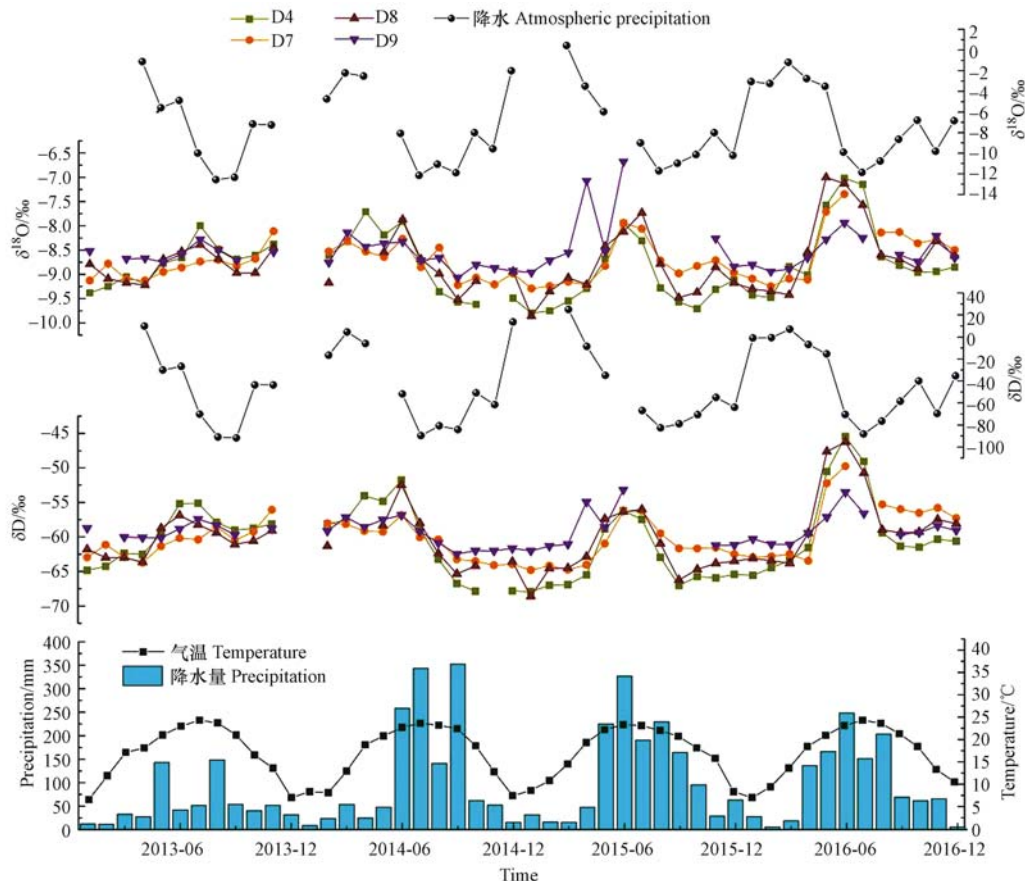


图 3 纳朵洞滴水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 年际变化特征

Fig.3 Annual and monthly variations of drip water $\delta^{18}\text{O}$ and δD value from Naduo Cave

2013 年整体干旱, 全年降水量 644 mm, 约为研究区多年平均降水量的 50%, 滴水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 整体偏正, 其雨季偏正曲线成扁平型峰. 2014 年降水总量为 1382 mm, 略高于多年平均降水量, 集中分布于 6 月到 9 月, 6 月有 3 场暴雨. 在 2013 年全年—2014 年春季持续的干旱后, 滴水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 的偏正曲线在 2014 年 6 月降雨陡增的雨季形成拖尾型峰. 在 2015 年和 2016 年研究区降水量接近正常年份的雨季, 纳朵洞滴水的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值分别呈现塔型峰. 峰与峰之间, 滴水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 曲线接近水平, 体现了降水渗流经过洞顶岩溶化的基岩通道与“老水”混合后均一化的平均状态^[30-33]. 由于上覆土壤和岩层对于降水的调蓄作用, 使得大气降水在土壤和基岩中混合较充分, 平滑了大气降水中氢氧稳定同位素的季节变化幅度^[18]. 纳朵洞滴水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 表现出“雨季偏正、旱季偏轻”, 可能原因一是由于岩层的滞后效应, 导致雨季滴水表达的是上一个旱季的大气降水同位素特征, 而旱季滴水表达的是之前的雨季降水的同位素特征; 二是夏季连续高温, 导致包气带内的水蒸发分馏^[9].

2.3 洞穴滴水 $\delta^{18}\text{O}$ 与气温、降水关系

纳朵洞 4 处滴水 (D4、D7、D8、D9) 中 $\delta^{18}\text{O}$ 与气温之间的相关系数分别为 0.152、0.045、0.197、0.013 (图 4a), 纳朵洞滴水 $\delta^{18}\text{O}$ 整体上同气温表现出正相关关系. 降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与气温的相关性为 $\delta^{18}\text{O} = -0.194T - 4.536$, 相关系数为 -0.168 (图 4c), 即呈现负相关效应^[34]. 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, 这种差异掩盖了大气温度的对同位素分馏的影响^[28,35].

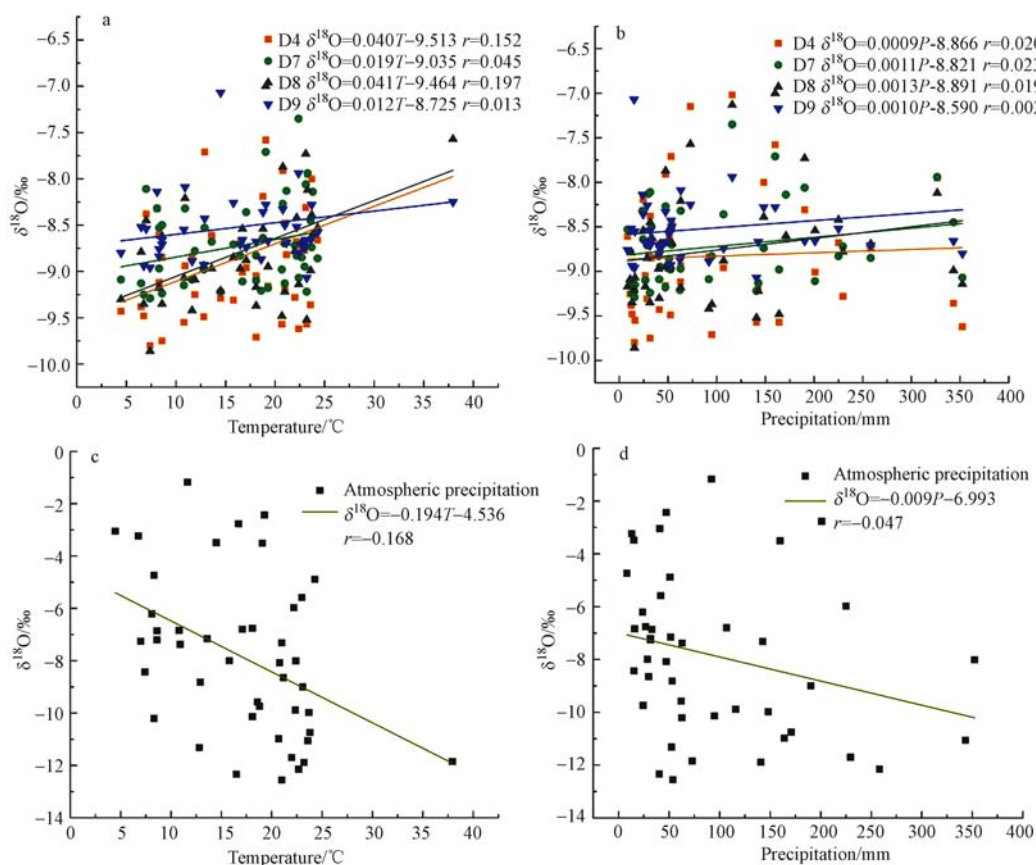


图 4 纳朵洞滴水 $\delta^{18}\text{O}$ /降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与气象要素的相关分析

- (a) 滴水 $\delta^{18}\text{O}$ 与气温 (T) 相关分析; (b) 滴水 $\delta^{18}\text{O}$ 与降水量 (P) 相关分析;
 (c) 降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与气温 (T) 相关分析; (d) 降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与降水量 (P) 相关分析

Fig.4 Correlations between meteorological factors and atmospheric precipitation $\delta^{18}\text{O}$ /drip water $\delta^{18}\text{O}$ from Naduo Cave

纳朵洞洞穴滴水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与降水量之间并没有显著的相关关系, 4 处滴水 (D4、D7、D8、D9) 中 $\delta^{18}\text{O}$ 与降水量之间的相关性系数分别为 0.02、0.023、0.019、0.002 (图 4b). 而降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与降水量之间总体上体现出的负相关关系^[29,36], 即“降水量效应”, 二者之间的回归方程为 $\delta^{18}\text{O} = -0.009P - 6.993$, 相关系数为 -0.047 (图 4d), 滴水 $\delta^{18}\text{O}$ 与降水量之间并没有很好地继承大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与降水量之间的关系. 在

2013 年 6 月—9 月期间, 降水量为 295 mm, 4 处滴水 $\delta^{18}\text{O}$ 变化范围为 -9.0‰ — -8.0‰ . 2014 年 6 月—9 月期间, 降水量为 1095 mm, 相比于 2013 年, 降水量增加了 4 倍; 而滴水 $\delta^{18}\text{O}$ 变化范围为 -9.6‰ — -8.5‰ , 说明降水量大小不是导致滴水 $\delta^{18}\text{O}$ 变化的主要原因.

2.4 降水和滴水的 $\delta^{18}\text{O}/\delta\text{D}$ 与 ENSO 的关系

2.4.1 降水的 $\delta^{18}\text{O}/\delta\text{D}$ 与 ENSO 的关系

ENSO 是 El Niño 和 Southern Oscillation(南方涛动)的总称, 是发生在赤道中太平洋和东太平洋上的大尺度海气相互作用事件, 它以 2—7 a 的周期不断循环发生. El Niño 常用的定量分析指标为 Nino3.4 区 (5°N — 5°S , 170°W — 120°W) 的 SSTA(海平面温度异常)和美国气候预测中心发布的 SOI(南方涛动指数)序列, 一般情况下 El Niño 发生时 SOI 为负值, La Niña 发生时 SOI 为正值, SST 与 SOI 具有很高的负相关性^[37]. 根据美国国家海洋和大气管理局(NOAA)标准: 以 Nino3.4 区 SSTA 的 3 个月滑动平均值连续 5 个月 $\geq 0.5^{\circ}\text{C}$ ($\leq -0.5^{\circ}\text{C}$) 定义为一次 El Niño(La Niña)事件^[38].

结合 SOI 与 Nino3.4 区 SSTA 数据(图 5), 2013 年 1 月—2014 年 6 月, SOI 大部分处于正值, 为 La Niña 时期, 降水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 算术平均值分别为 -7.8‰ 和 -50.1‰ . 2014 年 7 月—2016 年 4 月大部分月份 SOI 处于负值, 该期间处于 El Niño 时期, 降水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 算术平均值分别为 -7.7‰ 和 -45.5‰ ; 2016 年 5 月—12 月, 大部分月份 SOI 处于正值, 此时进入 La Niña 时期, 降水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 算术平均值分别为 -8.2‰ 和 -54.7‰ (表 1). 说明研究区降水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 较好地响应了 El Niño 向 La Niña 的转换.

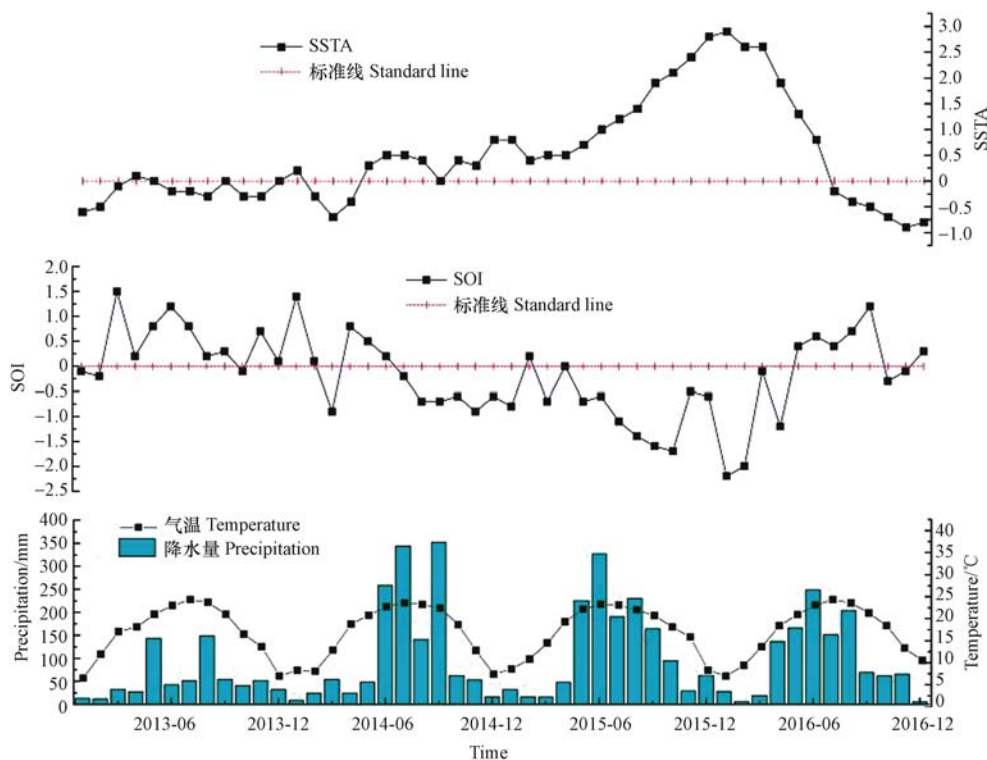


图 5 2013—2016 年期间 SOI 和 SSTA(Nino3.4 区)变化特征

Fig.5 The change characteristics of the SOI and SSTA(in the Nino3.4 Zone)from 2013 to 2016

参考温艳茹等^[25]的研究方法, 利用美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction)的 NCEP/NCAR 逐月再分析格点资料, 空间分辨率为水平 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 网格点, 分别计算了 2013 年—2016 年夏季(6 月—8 月)水汽输送场及其水汽输送散度, 以此来推断水汽来源(图 6). 2016 年夏季水汽输送场变化趋势与 2013 年相似(图 6a, 6d), 西太平洋副高势力逐渐减弱, 东亚大陆水汽团退缩, 西南地区水汽来源逐渐向印度洋倾斜, 中南半岛成为水汽团中心, 长距离的水汽输送导致 ^{18}O 和 D 沿途不断被“淋洗”, 研究区降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值偏负. 2014 年夏季和 2015 年夏季, 中、东太平洋的海温异常偏高, 西太平洋副高势力逐渐增强, 并引导其南缘水汽到达东亚大陆, 研究区来自于太平洋水汽份额增大, 水汽来源地较近(图 6b, 6c), 降水中 ^{18}O 和 D 富集, $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值偏正^[39].

表 1 纳朵洞滴水与当地降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 在 La Niña 和 El Niño 时期的变化特征

Table 1 The changes in the $\delta^{18}\text{O}$ and δD values of the drip water in Naduo Cave and local precipitation in the sinario of La Niña and El Niño

水样类型及稳定同位素值 Water sample types and stable isotopic value	La Niña 时期 (2013 年 1 月—2014 年 6 月)	El Niño 时期 (2014 年 7 月—2016 年 4 月)	La Niña 时期 (2016 年 5 月—12 月)
降水 Meteoric precipitation ($\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 算术均值)	-7.8‰和-50.1‰	-7.7‰和-45.5‰	-8.2‰和-54.7‰
滴水 Drip water ($\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 算术均值)	-8.3‰和-57.2‰	-8.76‰和-61.0‰	-8.3‰和-56.3‰

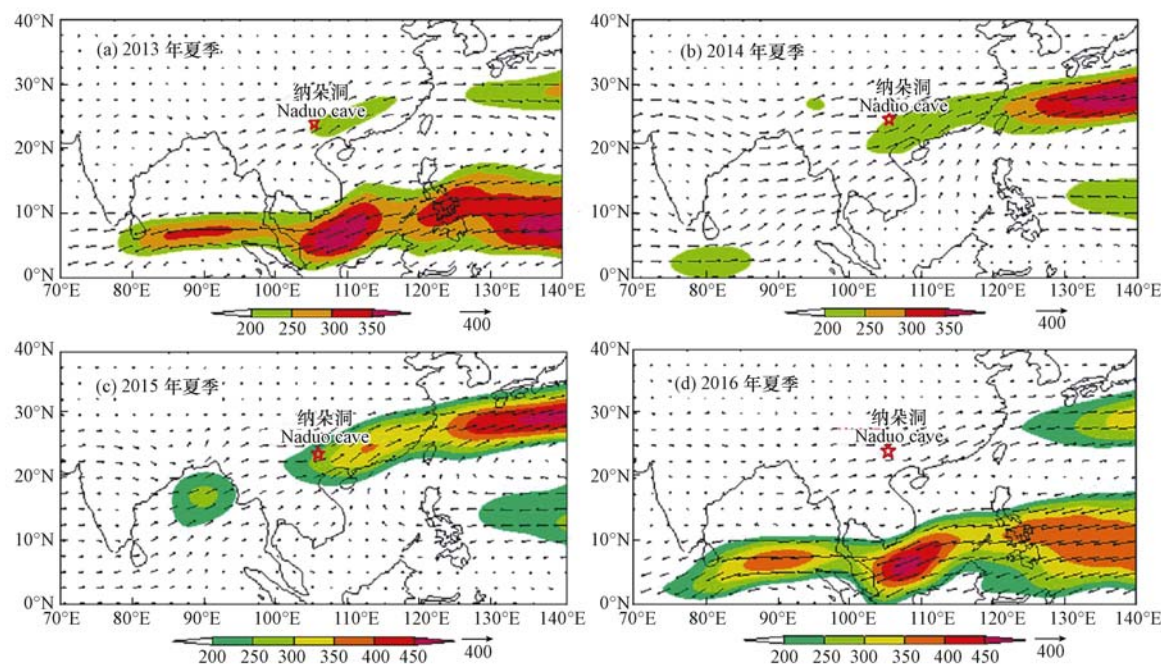


图 6 2013—2016 年夏季整层大气平均水汽通量以及水汽通量散度
矢量单位: $\text{g}\cdot(\text{m}\cdot\text{s})^{-1}$, 阴影单位: $10^{-3}\text{g}\cdot(\text{m}\cdot\text{s})^{-1}$

Fig.6 Average water vapor flux and water vapor flux divergence for the whole stratum in the summer of from 2013 to 2016

2.4.2 滴水的 $\delta^{18}\text{O}/\delta\text{D}$ 与 ENSO 的关系

如表 1 所示, 纳朵洞滴水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 在 La Niña 期间总体表现为偏正, El Niño 期间偏负, 与降水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 在 La Niña 期间总体表现为偏负和 El Niño 期间偏正的特征相反, 即纳朵洞滴水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 对 La Niña/El Niño 的响应没有同步于降水, 这一点与罗维均等^[17]对贵州凉风洞洞穴滴水的研究结果不同.大气降水是洞穴滴水的主要来源, 而滴水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 主要继承当地大气降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 的信息.由于地下水的混合作用^[8], 降水进入到洞穴内经历了一个延迟过程, 导致纳朵洞洞穴滴水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 在雨季偏正, 旱季偏负, 并表现出在 La Niña 期间偏正于 El Niño 期间.由于监测时间短, 纳朵洞滴水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 在 El Niño 态偏负于 La Niña 态是偶然还是必然, 仍需要长时间的监测资料进一步加以证实.

3 结论(Conclusion)

(1)2013 年—2016 年, 对贵州关岭纳朵洞洞穴滴水 and 大气降水的水文水化学特征及氢氧同位素进行观测, 得出当地大气降水线方程: $\delta\text{D}=8.94\delta^{18}\text{O}+20.22(R^2=0.97)$, 滴水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值都均匀地分布在当地大气降水线(LMWL)附近, 大部分数据点分布于 LMWL 右下方, 一方面说明大气降水是洞穴滴水的主要来源, 且滴水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 继承了当地大气降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 的信号, 与其平均值接近;另

一个方面说明蒸发作用对洞穴滴水的稳定同位素组成也有一定影响.通过与当年美国国家环境预报中心水汽输送散度等资料对比和分析,研究区大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 在监测时段内较好地响应了从 El Niño 向 La Niña 的转换.

(2) 由于地下水的混合作用,纳朵洞滴水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 在雨季偏正,旱季偏负,与大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 在“旱季偏正,雨季偏负”的特征相反.同时,在监测期间纳朵洞滴水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 在 La Niña 期间总体表现为偏正,El Niño 期间偏负,与降水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 在 La Niña 期间总体表现为偏负和 El Niño 期间偏正的特征也相反.

参考文献 (References)

- [1] HENDY C H, WILSON A T. Paleoclimate data from speleothem[J]. *Nature*, 1968, 219(5149): 48-51.
- [2] O'NEIL J R, CLAYTON R N, MAYEDA T K. Oxygen isotope fractionation in divalent metal carbonates[J]. *Journal of Chemical Physics*, 1969, 51(12): 5547-5558.
- [3] GASCOYNE M. Paleoclimate determination from cave calcite deposits[J]. *Quaternary Science Reviews*, 1992, 11: 609-632.
- [4] 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.
- [5] CHENG H, EDWARDS R L, SINHA A, et al. The Asian monsoon over the past 640000 years and ice age terminations[J]. *Nature*, 2016, 534: 640-646.
- [6] HU C, HENDERSON G, HUANG J. et al. Report of a three-year monitoring programme at Heshang Cave, Central China[J]. *International Journal of Speleology*, 2008, 37(3): 143-151.
- [7] BEDDOWS P A, MANDIĆ M, FORD D C, et al. Oxygen and hydrogen isotopic variations between adjacent drips in three caves at increasing elevation in a temperate coastal rainforest, Vancouver Island, Canada[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2016, 172: 370-386.
- [8] ZHANG J, LI T Y. Seasonal and interannual variations of hydrochemical characteristics and stable isotopic compositions of drip waters in Furong Cave, southwest China based on 12 years' monitoring[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 572: 40-50.
- [9] BAKER A, HARTMANN A, DUAN W, et al. Global analysis reveals climatic controls on the oxygen isotope composition of cave drip water[J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 2984.
- [10] FRIEDMAN I. Deuterium content of natural waters and other substances[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1953, 4(1/2): 89.
- [11] 郑淑蕙, 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.
ZHENG S H, HOU F H, NI B L, et al. Study on stable isotopes of hydrogen and oxygen in precipitation in China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1983, 28(13): 801-806 (in Chinese).
- [12] DANSGAARD W. Stable isotopes in precipitation[J]. *Tellus*, 1964, 16(4): 436-468.
- [13] ROZANSKI K, ARAGUAS L, GONFIANTINI R, et al. Relation between long term trends of oxygen-18 isotope composition of precipitation and climate. *Science*, 1992, 258(5084): 981-985.
- [14] ARAGUAS 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.
- [15] CRUZ JR F W, KARMANN I, VIANA JR O, et al. Stable isotope study of cave percolation waters in subtropical Brazil: implications for paleoclimate inferences from speleothems[J]. *Chemical Geology*, 2005, 220(3/4): 245-262.
- [16] 李彬, 袁道先, 林玉石, 等. 桂林地区降水、洞穴滴水及现代洞穴碳酸盐氧碳同位素研究及其环境意义[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2000, 30(1): 81-87.
LI B, YUAN D X, LIN Y S, 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 (Series D)*, 2000, 30(1): 81-87 (in Chinese).
- [17] 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.
LUO W J, WANG S J. $\delta^{18}\text{O}$ signal transmission and its significance of atmospheric precipitation-Soil water-Drip in Liangfeng Cave, Guizhou Province[J]. *Science In China Press*, 2008, 53(17): 2071-2076 (in Chinese).
- [18] 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.
WANG H B, LI T Y, YUAN N, et al. Environmental signification and characteristics of δD and $\delta^{18}\text{O}$ variation in drip water in Yangkou Cave, Chongqing[J]. *Carsologica Sinica*, 2014, 33(2): 146-155 (in Chinese).
- [19] 张美良, 朱晓燕, 吴夏, 等. 桂林洞穴滴水与现代碳酸盐 $\delta^{18}\text{O}$ 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.
ZHANG M L, ZHU X Y, WU X, et al. Environmental significance of $\delta^{18}\text{O}$ record from cave drip water and recent carbonate deposit at No. 15 branching cave of Seven Star Cave in Guilin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2015, 33(4): 697-705 (in Chinese).
- [20] 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.

- BAY X, SANG W C, LI F S, et al. Monthly isotopic variations of calcite deposition system in Wanxiang Cave, Wudu county, Gansu[J]. *Geochimica*, 2015, 44(3): 245-253(in Chinese).
- [21] 程海, 张海伟, 赵景耀, 等. 中国石笋古气候研究的回顾与展望[J]. *中国科学: 地球科学*, 2019, 49(10): 1565-1589.
- CHENG H, ZHANG H W, ZHAO J Y, et al. Chinese stalagmite paleoclimate researches: A review and perspective[J]. *Science China Earth Sciences*, 2019, 49(10): 1565-1589 (in Chinese).
- [22] 王家录, 李维杰, 王健力, 等. 贵州纳朵洞洞穴滴水理化特征及其石漠化响应[J]. *人民长江*, 2019, 50(11): 56-63.
- WANG J L, LI W J, WANG J L, et al. Physical and chemical characteristics of dripping water in Naduo Cave of Guizhou and its response to karst desertification[J]. *Yangtze River*, 2019, 50(11): 56-63(in Chinese).
- [23] 沈蔚, 王健力, 王家录, 等. 贵州纳朵洞洞穴水文地球化学变化特征及其环境意义[J]. *环境科学*, 2015, 36(12): 4455-4463.
- SHEN W, WANG J L, WANG J L, et al. Variation characteristics of cave water hydrogeochemistry in Naduo Cave of Guizhou and its implications for environment research[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(12): 4455-4463 (in Chinese).
- [24] 王家录, 王健力, 蒋先淑, 等. 贵州纳朵洞滴水氢氧同位素变化特征及气候意义[J]. *人民长江*, 2016, 47(21): 25-29.
- WANG J L, WANG J L, JIANG X S, et al. Variation characteristics of cave drop water hydrogen and oxygen isotope in Naduo Cave of Guizhou and its climatic implications [J]. *Yangtze River*, 2016, 47(21): 25-29 (in Chinese).
- [25] 温艳茹, 王健力. 重庆市大气场降水中氢氧同位素变化特征及与大气环流的关系[J]. *环境科学*, 2016, 37(7): 2462-2469.
- WEN Y R, WANG J L. Variations of stable isotope in precipitation and its atmospheric circulation effect in Chongqing[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(7): 2462-2469 (in Chinese).
- [26] CRAIG H. Isotopic variation in meteoric waters[J]. *Science*, 1961, 133(3456): 1702-1703.
- [27] 朱磊, 范甦, 郭欢. 西南地区大气降水中氢氧稳定同位素特征与水汽来源[J]. *云南地理环境研究*, 2014, 26(5): 61-68.
- ZHU L, FAN T, GUO H. Sources and stable isotope characteristics of precipitation in southwest of China [J]. *Yunnan Geographic Environment Research*, 2014, 26(5): 61-68 (in Chinese).
- [28] 李廷勇, 李红春, 沈川洲, 等. 2006—2008 年重庆大气降水 δD 和 $\delta^{18}O$ 特征初步分析[J]. *水科学进展*, 2010, 21(6): 757-764.
- LI T Y, LI H C, SHEN C Z, et al. Study on the δD and $\delta^{18}O$ characteristics of meteoric precipitation during 2006—2008 in Chongqing, China [J]. *Advances in Water Science*, 2010, 21(6): 757-764 (in Chinese).
- [29] LI T Y, SHEN C C, LI H C, 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.
- [30] YONGE C J, FORD D C, GRAY J, et al. Stable isotope studies of cave seepage water[J]. *Chemical Geology: Isotope Geoscience Section*, 1985, 58(1/2): 97-105.
- [31] VAN B P, FEBBRORIELLO P. Seasonal isotopic variability of precipitation and cave drip water at Indian Oven Cave, New York[J]. *Hydrological Processes*, 2006, 20(8): 1793-1803.
- [32] GOEDE A, GREEN D C, HARMON R S. Isotopic composition of precipitation, cave drips and actively forming speleothems at three Tasmanian Cave sites[J]. *Helveticite*, 1982, 20(1): 17-29.
- [33] WILLIAMS P W, FOWLER A. Relationship between oxygen isotopes in rainfall, cave percolation waters and speleothem calcite at Waitomo, New Zealand[J]. *Journal of Hydrology*, 2002, 41(1): 53-70.
- [34] 毛庆亚, 王健力, 王家录, 等. 贵州安顺与重庆地区大气降水中 δD 和 $\delta^{18}O$ 特征分析[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2017, 39(2): 114-120.
- MAO Q Y, WANG J L, WANG J L, et al. Analysis of the characteristics and differences of δD and $\delta^{18}O$ in the meteoric precipitation in Anshun, Guizhou province, and Chongqing [J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2017, 39(2): 114-120 (in Chinese).
- [35] 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.
- WU X, ZHU X Y, ZHANG M L, et al. High-resolution stable isotope record of atmospheric precipitation in Guilin[J]. *Resources and Environment in the Yangtze River Basin*, 2013, 22(2): 182-188 (in Chinese).
- [36] 侯典炯, 秦翔, 吴锦奎, 等. 乌鲁木齐大气降水稳定同位素与水汽来源关系研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2011, 25(10): 136-142.
- HOU D J, QIN X, WU J K, et al. Characteristics of stable isotopes in precipitation and the water vapor sources in Urumqi[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2011, 25(10): 136-142 (in Chinese).
- [37] 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.
- WANG S W, ZHU J H, CAI J N, et al. Irregularities in ENSO variability[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2003, 39(supplement): 125-133(in Chinese).
- [38] 任福民, 袁媛, 孙丞虎, 等. 近 30 年 ENSO 研究进展回顾[J]. *气象科技进展*, 2012, 2(3): 17-24.
- REN F M, YUAN Y, SUN C H, et al. Review of progress of ENSO studies in the past three decades[J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2012, 2(3): 17-24 (in Chinese).
- [39] TAN M. Circulation effect: Response of precipitation $\delta^{18}O$ to the ENSO cycle in monsoon regions of China[J]. *Climate Dynamics*, 2014, 42(3/4): 1067-1077.