

# 2006~2008 年重庆大气降水 $\delta D$ 和 $\delta^{18}O$ 特征初步分析

李廷勇<sup>1,2,3</sup>, 李红春<sup>1,4</sup>, 沈川洲<sup>5</sup>, 杨朝秀<sup>1</sup>, 李俊云<sup>1</sup>, 衣成城<sup>1</sup>,  
袁道先<sup>1,3,6</sup>, 王建力<sup>1,3</sup>, 谢世友<sup>1,3</sup>

(1. 西南大学地理科学学院, 重庆 400715; 2. 中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室, 陕西 西安 710075; 3. 三峡库区生态环境教育部重点实验室 (重庆大学 & 西南大学), 重庆 400715; 4. 成功大学地球科学系, 台湾 台南 70101; 5. 台湾大学地质科学系, 台湾 台北 10617; 6. 国土资源部岩溶动力学重点实验室, 广西 桂林 541004)

**摘要:** 大气降水稳定同位素组成受到温度、蒸发、水汽源地等多种因素的复杂影响, 在不同时间和不同地区具有很大差异。通过分析 2006~2008 年间重庆雨水样品的  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$ , 初步建立了当地的大气降水线方程。当地的大气降水稳定同位素组成在不同季节变化明显: 夏季降水中的稳定同位素值普遍偏轻, 而冬季降水中稳定同位素值普遍偏重。水汽来源是控制当地大气降水稳定同位素组成的最重要原因, 而蒸发作用等是控制短期次降水事件中雨水稳定同位素组成的重要影响因素。

**关键词:** 重庆; 夏季风; 大气降水;  $\delta D$ ;  $\delta^{18}O$ ; 水汽源地

**中图分类号:** P426.61 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2010)06-0757-08

自 Craig<sup>[1]</sup> 建立全球大气降水线 (Global Meteoric Water Line, GMWL), 揭示了大气降水中  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  的内在联系 ( $\delta D = 8\delta^{18}O + 10$ ) 以来, GMWL 已广泛应用于水文学、海洋学、水文气象学、地球水循环、气候变化等领域。全球大气降水稳定同位素监测网 (Global Network of Isotopes in Precipitation, GNIP) 的数据证实了大气降水中  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  的关系, 同时显示了“纬度效应”、“高程效应”、“降水量效应”、“温度效应”、“水汽来源”等因素对降水稳定同位素的影响<sup>[2-4]</sup>。在 20 世纪 90 年代发现了季风地区降水的氢氧同位素比值同气温的关系与其它地区存在明显不同<sup>[4]</sup>。国内外学者对中国青藏高原地区、西北地区以及南方季风区的大气降水稳定同位素变化特征和水汽来源等进行了比较深入的探讨<sup>[5-10]</sup>。上述工作积累的数据为研究中国大气降水的同位素分布和特征提供了重要的基础数据<sup>[11-12]</sup>。过去对大气降水稳定同位素的研究多数是采用加权平均降水的分析, 有可能丢失一些短期的大气降水同位素特征。孟玉川等针对单个降水事件的同位素分析, 揭示了云下二次蒸发作用对大气降水中重同位素的富集作用<sup>[13]</sup>。此外, 中国面积广大, 气候类型复杂多样, 要详细了解中国大气降水稳定同位素的特征, 还需要多区域原始资料的积累。本文利用基于 29 个月中单个降水场次的雨水稳定同位素分析, 旨在了解重庆地区大气降水稳定同位素在月、季节尺度上的变化特征, 同时探讨短期天气状况对雨水同位素的可能影响。

**收稿日期:** 2010-01-02

**基金项目:** 国土资源部岩溶动力学重点实验室开放基金资助项目 (桂科能 0842008 & kd2008-08); 国家自然科学基金资助项目 (40802035, 40971122); 黄土与第四纪地质国家重点实验室开放基金资助项目 (SKLLQG0907); 西南大学基本科研业务费专项资金重点资助项目 (XDJK2009B016, XDJK2009C106); “十一五”国家科技支撑计划资助项目 (2006BAC01A16)

**作者简介:** 李廷勇 (1978-), 男, 四川成都人, 博士, 副教授, 硕士研究生导师, 主要从事第四纪地质、地球化学等方面的研究工作。E-mail: cdlty@swu.edu.cn

**通信作者:** 李红春, E-mail: hl@usc.edu

## 1 研究区概况

采集大气降水的地点位于重庆市北碚区西南大学校园内地球化学与同位素实验室的室外空地 (29°49'N, 106°25'E, 海拔 252 m), 与本文气象数据来源的地理科学学院气象站直线距离约 500 m, 海拔高差 7 m。北碚区位于重庆市主城区西北部约 40 km (图 1), 年平均气温 17.7°C, 降雨量约 1200 mm。该地区属于典型的亚热带季风气候, 每年 5~10 月为雨季, 降水占年平均降水量的 70%~80% (图 2)。然而由于夏季经常受到副热带高压的控制, 导致某些年份夏季降水减少, 出现严重的伏旱天气。例如在本文数据采集的 2006 年夏季和 2007 年夏季, 重庆地区分别遭受了 100 年一遇的特大干旱和 100 年一遇的特大暴雨。

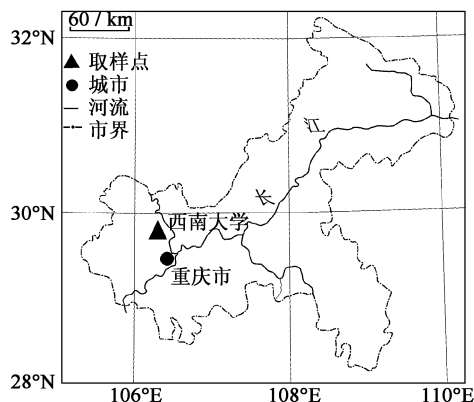


图 1 西南大学地理位置示意图

Fig. 1 Location of Southwest University, Chongqing, China

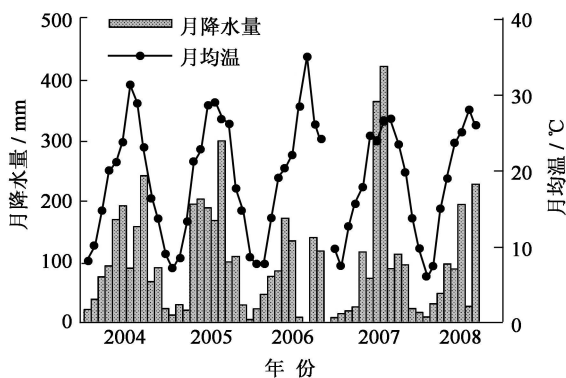


图 2 重庆 2004~2008 年月平均气温与月降水量  
(测于西南大学, 2006 年 11 月缺数据)

Fig. 2 Monthly mean air temperature and precipitation in Southwest University, Chongqing from 2004-2008

## 2 研究方法

### 2.1 数据收集

所用日平均气温和日降水量数据取自西南大学地理科学学院在校内建立的气象站, 该气象站采用仪器自动记录与人工记录相结合的方式采集数据。2006 年 11 月因故无观测数据, 2008 年的观测数据截止到 8 月 31 日。

### 2.2 样品采集

在降水发生时放置洁净干燥的容器于露天环境, 收集大气降水。除了部分样品是为了研究连续降水过程中同位素变化特征而采集的同一次降水过程中不同时段样品外, 大部分样品均为一次完整降水过程的雨水样品。每次降水结束半小时以内, 及时将收集到的雨水装入干燥洁净的取样瓶中, 并放入冰箱冷藏, 以防止蒸发作用引起的同位素分馏。对于集水容器收集到的雨水样品大于 50 mL 的降水事件, 采集 50 mL 雨水样品做分析测试用; 对于收集到的雨水样品小于 50 mL 的降水事件, 则采集所有雨水样品做分析测试用。收集样品时记录当时的气温和最近的天气情况。

### 2.3 样品测试

所有样品测试均在西南大学地球化学与同位素实验室完成, 仪器为 Gas Bench 连接 Delta V Plus 气体稳定同位素质谱仪。氧同位素测试, 是将水样与标准 CO<sub>2</sub> 参考气 (高纯 He + 0.2% 高纯 CO<sub>2</sub>) 在室温下平衡 18~20 h, 氢同位素则在室温下将水样与标准 H<sub>2</sub> 参考气 (高纯 He + 0.2% 高纯 H<sub>2</sub>) 平衡 40 min 后测试。样品的同位素值由同批次测量的标准样所得的工作曲线计算获得 (包括多种国际标样如 V-SMOW, GISP, SLAP 等和

本实验室工作标样, 各标准样品的同位素比值已经标定; 标准样占样品数量的 1/3 间隔插入在样品测试序列中)。分析误差对  $\delta D < 2 \times 10^{-3}$ , 对  $\delta^{18}O < 0.2 \times 10^{-3}$ , 所有结果均相对于 V-SMOW 标准。由于实验室搬迁等原因, 2007 年 5 月及以后的样品未进行  $\delta D$  测试, 只测试了  $\delta^{18}O$ 。

### 3 结果及讨论

本文所采用的数据是每次降水的同位素数据, 为研究当地大气降水中稳定同位素的详细变化提供了条件。图 3 为从 2006 年 5 月至 2008 年 9 月期间, 每次降水过程的稳定同位素分布图, 在此期间该地区大气降水中  $\delta^{18}O$  变化幅度约为  $20 \times 10^{-3}$ , 最大值为  $4.56 \times 10^{-3}$ , 最小值为  $-15.82 \times 10^{-3}$ 。绝大部分时间内大气降水中  $\delta^{18}O$  为负值,  $\delta^{18}O$  为正值的情况只出现过 5 次, 可能是由于这些雨水样品的水汽来源或雨滴在下降过程中经历过强烈的蒸发过程, 导致重同位素的富集<sup>[13-14]</sup>。在获得  $\delta D$  测试数据的 2006 年 5 月至 2007 年 4 月期间,  $\delta D$  最小值为  $-112.27 \times 10^{-3}$  (2006 年 7 月 7 日), 最大值为  $25.04 \times 10^{-3}$  (2007 年 3 月 16 日) (图 3)。重庆大气降水中  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  的分布范围与周边 GNIP 站点的成都、长沙、遵义、贵阳等具有可比性: 都体现出夏季降水中  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  偏轻、冬季降水中偏重的特征<sup>[4]</sup>; 与降水时气温成负相关关系, 季节规律显著。

#### 3.1 地区大气降水线

利用 2006 年 5 月至 2007 年 4 月期间的  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  数据, 建立了当地大气降水线方程 (IMWL):  $\delta D = 8.73\delta^{18}O + 15.73$ , 相关系数  $r = 0.97$  (图 4); 与基于 GNIP 数据得到的长沙地区的大气降水线方程接近 ( $\delta D = 8.47\delta^{18}O + 15.46$ )。该 IMWL 的斜率和截距不论是与 Craig<sup>[1]</sup>和 Yurtsever<sup>[15]</sup>各自提出的全球大气降水线方程 GMWL 相比较 (分别是:  $\delta D = 8\delta^{18}O + 10$  和  $\delta D = 8.17\delta^{18}O + 10.56$ ), 还是与郑淑慧等<sup>[16]</sup>提出的中国大气降水线方程  $\delta D = 7.9\delta^{18}O + 8.2$  相比较, 均有所偏大。GMWL 和中国大气降水线方程是分别根据世界各地以及中国南北各地区的观测数据而得到的, 是综合了干旱地区与湿润地区的降水数据而得到的相对均一化的结果。

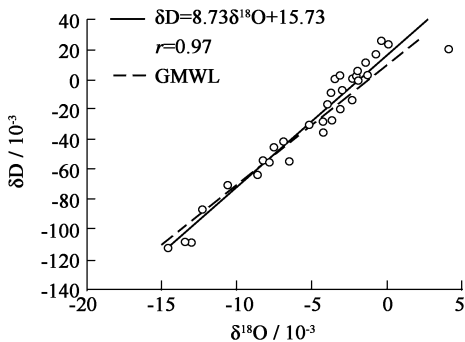


图 4 重庆大气降水线方程 (虚线为全球大气降水线 GMWL)

Fig. 4 IMWL of Chongqing

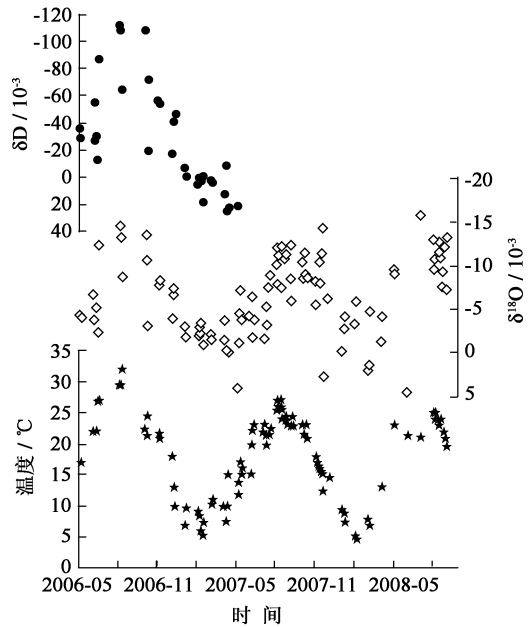


图 3 重庆大气降水中  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  以及降水时气温变化图

Fig. 3 Variation of  $\delta D$  &  $\delta^{18}O$  values of rainwater and simultaneous air temperature over Chongqing

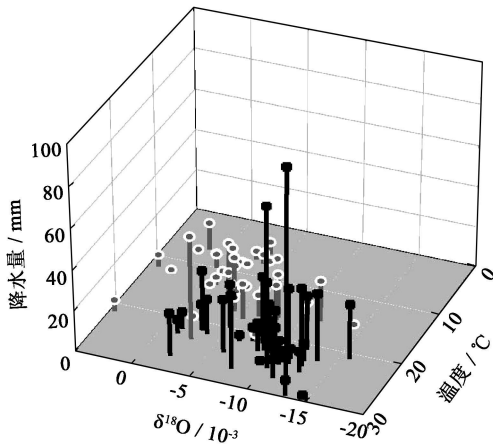
本文研究所取样品为次降水数据, 不同于 GNIP 的月平均降水数据; 基于次降水事件的雨水稳定同位素更容易受到蒸发、温度等因素的影响。当形成降水的水汽经历过多次蒸发过程时, 由于分子质量数的差异, 氢同位素比氧同位素的分馏速率要大, 因此在其它条件相同的情况下, 由经历过多次蒸发作用的水汽所形成的降水中  $\delta D$  将相对偏重, 导致基于此类雨水所建立的局地大气降水线的斜率和截距偏大。

#### 3.2 $\delta^{18}O$ 变化特征

图 3 显示出重庆大气降水中  $\delta^{18}O$  具有以下主要特征:

(1) 夏季降水中  $\delta^{18}\text{O}$  明显比冬季降水中偏轻。作为该地区雨季的 5~10 月, 降水中  $\delta^{18}\text{O}$  值大多小于  $-4 \times 10^{-3}$ ; 最轻可达到  $-15.82 \times 10^{-3}$ , 加权平均值为  $-8.67 \times 10^{-3}$ 。特别是在当地受夏季风影响强烈、降水最集中的 6~9 月期间雨水  $\delta^{18}\text{O}$  值大多在  $-10 \times 10^{-3}$  左右, 甚至偏轻达  $-13 \times 10^{-3} \sim -15 \times 10^{-3}$ ; 整个 6~9 月期间降水中  $\delta^{18}\text{O}$  的加权平均值为  $-9.42 \times 10^{-3}$ 。与此形成鲜明对比的是 11~4 月期间绝大多数降水中  $\delta^{18}\text{O}$  分布在  $0 \sim -4 \times 10^{-3}$ , 加权平均值为  $-2.12 \times 10^{-3}$ ; 特别是冬季风盛行的 12~2 月期间, 当地大气降水的加权平均值为  $-1.36 \times 10^{-3}$ 。

(2)  $\delta^{18}\text{O}$  最大值出现在夏季风来临前的 4 月或 5 月, 而不是当地气温最低、降水最少的 1 月。季风降水到来之前的持续较高气温会引起当地地表蒸发旺盛, 而且空气相对湿度较低说明大气干燥, 这些条件都有利于同位素的分馏, 造成大气水蒸汽中同位素偏重。



(黑色方头条柱代表当地主要受夏季风影响的 6~9 月降水, 白色圆头灰色条柱代表 10~5 月降水。)

图 5 重庆各季节降水中  $\delta^{18}\text{O}$  与温度和降水量关系

Fig 5 Relationship among the  $\delta^{18}\text{O}$  of rainwater, air temperature and rainfall over different seasons in Chongqing

(3) 夏季风影响期间大气降水稳定同位素的多样性。虽然重庆每年 6~9 月为夏季风显著影响的时期, 但是西太平洋副热带高压的位置和强度对重庆夏季降水有深刻影响。因此季风区内各地区的降水量与季风强度并不是简单的正相关关系。当地夏季大气水汽中的同位素组成是局地蒸发水汽、北方内陆水汽以及夏季风携带的海洋水汽的混合; 3 种不同来源的水汽, 其同位素组成差异明显, 由其形成的夏季降水中  $\delta^{18}\text{O}$  的分布也表现出多样性, 形成的降水量也有显著差别 (图 5)。

(4) 锋面降水的稳定同位素组成。在每年 4 月、5 月、10 月, 重庆地表空气温度经常会出现  $30^\circ\text{C}$  甚至以上的高温; 这一时期又经常受到北方冷空气南下的影响, 不同性质的气团频繁交汇, 容易形成锋面降水。虽然这几个月并不是夏季风影响的季节, 仍然会有 100~200mm 的月降水量 (图 2)。不同水汽来源的降水导致这几个月份中降水中  $\delta^{18}\text{O}$  变化范围很大。 $\delta^{18}\text{O}$  既可能偏轻达  $-8 \times 10^{-3}$ , 也可能偏重达  $0 \times 10^{-3}$  左右。

### 3.3 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度和降水量的关系

“温度效应”指温度与同位素的正相关关系<sup>[16]</sup>。中国西北地区以及青藏高原北部地区降水中  $\delta^{18}\text{O}$  体现出明显的温度效应: 夏季降水中  $\delta^{18}\text{O}$  明显偏重, 而冬季降水中  $\delta^{18}\text{O}$  明显偏轻<sup>[17]</sup>。重庆大气降水中  $\delta^{18}\text{O}$  也与温度有一定的相关性:  $\delta^{18}\text{O} = -0.46T + 1.69$ , 相关系数  $r = -0.65$  (图 6)。但是重庆降水中  $\delta^{18}\text{O}$  与温度是一种负相关关系, 并不代表物理意义上的“温度效应”, 这与中国南方季风区很多研究结果是一致的。

图 7 表明在年际尺度上重庆大气降水中  $\delta^{18}\text{O}$  与降水量有一定的相关性:  $\delta^{18}\text{O} = -0.0885P - 5.2$ , 相关系数  $r = -0.30$  体现出较弱的“降水量效应”。但是这种相关性并不如中国南方其它地区基于月降水量与  $\delta^{18}\text{O}$  分析得出的“降水量效应”显著<sup>[18]</sup>。本文数据是基于历次降水事件所得的观测数据, 因此降水中的  $\delta^{18}\text{O}$  以及大气降水量更容易受到风速、大气稳定度、湿度以及水汽来源等短期天气因素的影响, 因此表现为  $\delta^{18}\text{O}$  离散程度较大, 与 Zhang 等<sup>[18]</sup>对云南地区季风降水的研究结果相似。

“降水量效应”实质上可以理解为是一种“淋滤”效应。同一水汽团经过多次降雨过程后, 即使后期降水量比前期降水量小, 后期雨水中的  $\delta^{18}\text{O}$  也会相对前期降水偏轻。所以“降水量效应”并不直接指某地区绝对降水量的多少而导致的降水中稳定同位素比值的偏轻; 而是指同一来源水汽团经过多次降水过程, 同位素分馏作用引起残余水汽中同位素比值持续偏轻, 导致后期降水中同位素比值相对前期降水偏轻的效应。这可以解释该地区夏季风影响期间为什么降水量小的时候, 雨水中  $\delta^{18}\text{O}$  同样会很偏轻。

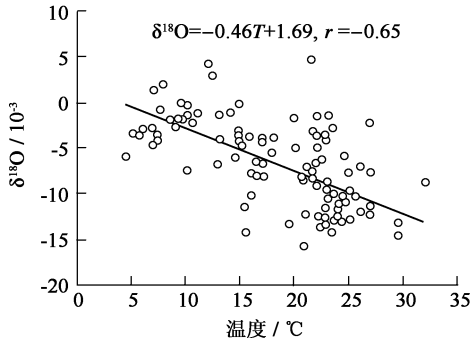


图 6 重庆大气降水中  $\delta^{18}O$  与气温关系

Fig. 6 Relationship between the  $\delta^{18}O$  of meteoric precipitation and air temperature over Chongqing

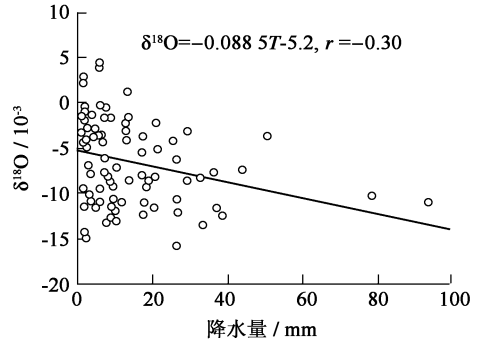


图 7 重庆大气降水中  $\delta^{18}O$  与降水量关系

Fig. 7 Relationship between the  $\delta^{18}O$  of meteoric precipitation and rainfall over Chongqing

### 3.4 单场降水过程 $\delta^{18}O$ 变化特征

大气降水稳定同位素组成不仅受大范围 and 季节尺度的环流系统、水汽来源、温度、大气干湿状况等影响, 还在天气尺度上受到多种因素的影响。然而过去的工作中较少涉及对某一降水天气过程中雨水  $\delta^{18}O$  变化规律的研究。利用 2007 年 4~8 月 11 次降水过程的连续取样分析, 可以探讨 1 年中夏季风爆发前以及夏季风极盛期重庆大气降水过程中  $\delta^{18}O$  的变化规律。根据不同天气过程降水时间以及降水量的差异, 对这些降水过程的连续取样次数从 2 次到 14 次不等 (图 8)。

从图 8 可以概括出以下几点特征:

(1) 夏季风影响期间降水中  $\delta^{18}O$  显著偏轻, 在此期间的 5 次降水过程连续取样表明其  $\delta^{18}O$  变化范围约为  $-10 \times 10^{-3} \sim -14.5 \times 10^{-3}$  (只有 7 月 16 日的雨水中  $\delta^{18}O$  变化范围约为  $-7 \times 10^{-3} \sim -8 \times 10^{-3}$ ), 而非夏季风影响季节的降水中  $\delta^{18}O$  变化范围约为  $-3 \times 10^{-3} \sim -8 \times 10^{-3}$ 。

(2) 同一次降水天气过程, 雨水中  $\delta^{18}O$  变化幅度一般约为  $2 \times 10^{-3}$ 。在监测到的 11 次降水天气过程中, 除了 7 月 17 日和 8 月 31 日雨水中  $\delta^{18}O$  变化幅度约为  $4 \times 10^{-3}$ , 其它场次的降水中  $\delta^{18}O$  变化幅度均在  $2 \times 10^{-3}$  左右。

(3) 绝大多数降水过程中,  $\delta^{18}O$  大致表现出整体由重变轻的趋势。这是由于随着降水过程的进行, 含有重同位素的雨水先行降落, 导致后期降落的雨水中稳定同位素比值偏轻。对于个别场次降水过程中出现的雨水中  $\delta^{18}O$  先变轻, 再变重的现象 (例如 2007 年 7 月 17 日), 则可能是受到其它含有较重同位素组成的气团水汽的混入。

### 3.5 过量氘

全球各地自然条件差异性显著, 水在蒸发过程中的动力分馏作用使得氢同位素以及氧同位素的平衡分馏遭到破坏, 大气降水中  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  出现一个差值, 被定义为过量氘 (Excess Deuterium)  $d = \delta D - 8\delta^{18}O$  [2]。d 主要取决于水汽源区的相对湿度, 并与之成负相关关系 [3]。利用大气降水中的 d 变化特征, 可以追踪地区降水的水汽来源并探讨水汽蒸发状况 [19]。

重庆西南大学大气降水中 d 季节变化明显: 11 月至 4 月降水中 d 高达  $15 \times 10^{-3} \sim 30 \times 10^{-3}$ , 而 5 月至 10 月降水中 d 变化范围大致在  $-3 \times 10^{-3} \sim 15 \times 10^{-3}$  (图 9)。这与乌鲁木齐大气降水中 d 的季节变化刚好相

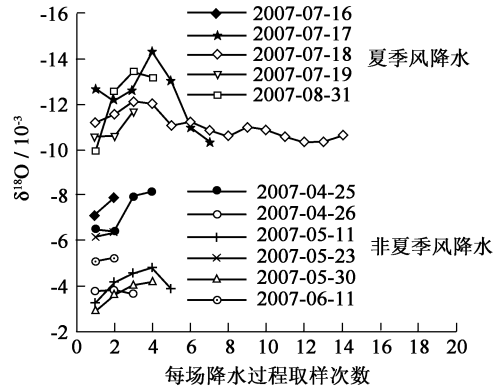


图 8 重庆不同降水过程中  $\delta^{18}O$  变化图

Fig. 8 Variation of rainwater  $\delta^{18}O$  during different precipitation processes over Chongqing

反<sup>[17]</sup>, 而与不同季节当地大气降水的水汽来源不同是一致的。重庆每年 11 月至第 2 年 4 月主要以锋面降水为主, 西风气流以及偏北气流带来的亚洲内陆地区的水汽来源于干旱半干旱地区, 风速大, 蒸发比较旺盛, 因此同位素偏重, 这在  $\delta^{18}\text{O}$  和  $d$  中均有体现。而在 5~10 月期间, 偏南气流的影响显著; 特别是在夏季风影响深刻的 6~9 月期间, 来自于热带和副热带大洋的温暖潮湿气团给当地带来大量降水, 使得降水中的过量氘  $d$  值减小。

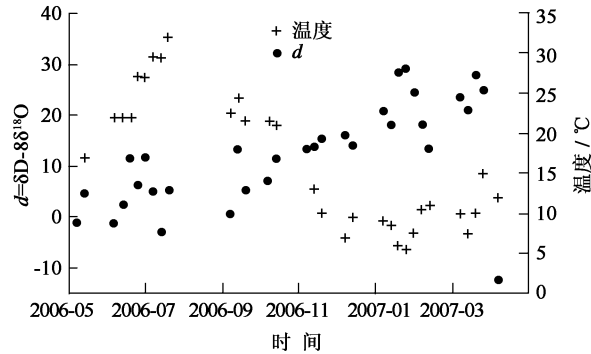


图 9 重庆降水中过量氘季节变化图

Fig. 9 Seasonal variation of excess deuterium ( $d$ ) in the precipitation of Chongqing

## 4 结 论

(1) 初步建立了重庆大气降水线方程:  $\delta\text{D} = 8.73\delta^{18}\text{O} + 15.73$

(2) 重庆雨水中的稳定同位素值在年内具有明显的季节变化, 夏季降水中稳定同位素值比冬季降水中明显偏轻。夏季海洋性的水汽来源以及水汽由海洋到陆地运移过程中的多次凝结降水是导致这一现象的主要原因。稳定同位素值最偏重的降水事件出现在春末夏初, 表明了由温度、湿度等控制的蒸发作用对重同位素的富集效应。

(3) 当地大气降水稳定同位素组成没有体现出温度效应, 但体现出一定的降水量效应。

(4) 重庆春季和秋季的降水量占全年降水量的比例可达 30% 左右, 这些非夏季风影响时期的大气降水及其稳定同位素组成对当地全年大气降水稳定同位素的加权平均值有重要影响。特别是在当夏季出现伏旱天气而导致降水显著减少的年份。

影响大气降水稳定同位素组成的因素非常复杂, 尚需要多区域、长期的监测工作积累原始资料, 以便进行更深入的研究。

**致谢:** 本研究工作参考的部分气象数据由西南大学地理科学学院负责气象站监测工作的老师和同学收集, 在此对他们长期的辛勤劳动表示感谢。感谢刘子琦博士在水样测试中给予的巨大帮助。

## 参考文献:

- [1] CRAIG H. Isotopic variations in meteoric waters[J]. Science, 1961, 133: 1702-1703.
- [2] DANSGAARD W. Stable isotopes in precipitation[J]. Tellus, 1964, 16 (4): 436-468.
- [3] 张应华, 仵彦卿, 温小虎, 等. 环境同位素在水循环研究中的应用[J]. 水科学进展, 2006, 17 (5): 738-747. (ZHANG Ying-hua, WU Yan-qing, WEN Xiao-hu, et al. Application of environmental isotopes in water cycle [J]. Advances in Water Science, 2006, 17 (5): 738-747. (in Chinese))
- [4] ROZANSKI I K, ARAGUAS-ARAGUAS L, GONFIANTINI R. Isotopic patterns in modern global precipitation [C] // SWART P K, LOHMANN K C, MCKENZIE J et al. Climate change in continental isotopic records. Geophysical Monograph. Washington, D C: American Geophysical Union, 1993: 1-36.

- [5] 宋献方, 柳鉴容, 孙晓敏, 等. 基于 CERN 的中国大气降水同位素观测网络 [J]. 地球科学进展, 2007, 22(7): 738-747. (SONG Xianfang, LIU Jianrong, SUN Xiaomin, et al. Establishment of Chinese network of isotopes in precipitation (CHNIP) based on CERN [J]. Advances in Earth Science, 2007, 22(7): 738-747. (in Chinese))
- [6] 柳鉴容, 宋献方, 袁国富, 等. 我国南部夏季季风降水水汽来源的稳定同位素证据 [J]. 自然资源学报, 2007, 22(6): 1004-1012. (LIU Jianrong, SONG Xianfang, YUAN Guofu, et al. Stable isotope evidence of vapor sources in summer monsoonal precipitation over Southern China [J]. Journal of Natural Resources, 2007, 22(6): 1004-1012. (in Chinese))
- [7] 柳鉴容, 宋献方, 袁国富, 等. 西北地区大气降水  $\delta^{18}O$  的特征及水汽来源 [J]. 地理学报, 2008, 63(1): 12-22. (LIU Jianrong, SONG Xianfang, YUAN Guofu, et al. Characteristics of  $\delta^{18}O$  in precipitation over Northwest China and its water vapor sources [J]. Acta Geographica Sinica, 2008, 63(1): 12-22. (in Chinese))
- [8] 余武生, 田立德, 马耀明, 等. 青藏高原降水中稳定氧同位素研究进展 [J]. 地球科学进展, 2006, 21(12): 1315-1322. (YU Wusheng, TIAN Lidde, MA Yaoming, et al. Advances in the study of stable oxygen isotope in precipitation on the Tibetan Plateau [J]. Advances in Earth Science, 2006, 21(12): 1315-1322. (in Chinese))
- [9] 徐彦伟, 康世昌, 周石研, 等. 青藏高原纳木错流域夏、秋季大气降水中  $\delta^{18}O$  与水汽来源及温度的关系 [J]. 地理科学, 2007, 27(5): 718-723. (XU Yanwei, KANG Shichang, ZHOU Shiran, et al. Variations of  $\delta^{18}O$  in summer and autumn precipitation and their relationships with moisture source and air temperature in Nam Lake Basin, Tibet Plateau [J]. Scientia Geographica Sinica, 2007, 27(5): 718-723. (in Chinese))
- [10] ZHOU Shiran, NAKAWO M, SAKA I A, et al. Water isotope variations in the snow pack and summer precipitation at July 1 Glacier, Qilian Mountains in Northwest China [J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(21): 2963-2972.
- [11] ARAGUA' S-ARAGUA' S L, FROEHLICH K, ROZANSKI K. Stable isotope composition of precipitation over Southeast Asia [J]. Journal of Geophysical Research, 1998, 103: 28721-28742.
- [12] JOHNSON K R, INGRAM B L. Spatial and temporal variability in the stable isotope systematics of modern precipitation in China: Implications for paleoclimate reconstructions [J]. Earth Planetary Science Letters, 2004, 220: 365-377.
- [13] 孟玉川, 刘国东. 长江流域降水稳定同位素的云下二次蒸发效应 [J]. 水科学进展, 2010, 21(3): 46-53. (MENG Yuchuan, LIU Guodong. Effect of below-cloud secondary evaporation on the stable isotopes in precipitation over the Yangtze River basin [J]. Advances in Water Science, 2010, 21(3): 46-53. (in Chinese))
- [14] 包为民, 胡海英, 王涛, 等. 蒸发皿中水面蒸发氢氧同位素分馏的实验研究 [J]. 水科学进展, 2008, 19(6): 780-785. (BAO Weimin, HU Haiying, WANG Tao, et al. Experimental study on the fractionation mechanism of hydrogen and oxygen stable isotopes in evaporation from water surface of evaporation pans [J]. Advances in Water Science, 2008, 19(6): 780-785. (in Chinese))
- [15] YURTSEVER Y. World wide survey of stable isotopes in precipitation [R]. Vienna: IAEA, 1975.
- [16] 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. (ZHENG Shuhui, HOU Fagao, NI Baoling. Study on the hydrogen and oxygen stable isotopes in meteoric precipitation of China [J]. Chinese Science Bulletin, 1983, 13: 801-806. (in Chinese))
- [17] 李晖, 周宏飞. 乌鲁木齐地区大气降水中  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  的变化特征 [J]. 干旱区资源与环境, 2007, 21(9): 46-50. (LI Hui, ZHOU Hongfei. Variation characteristics of  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  stable isotope in the precipitation of Urumqi [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2007, 21(9): 46-50. (in Chinese))
- [18] ZHANG Xiping, LIU Jingmiao, SUN Weizheng, et al. Relations between oxygen stable isotopic ratios in precipitation and relevant meteorological factors in southwest China [J]. Science in China Series D, 2007, 50(4): 571-581.
- [19] PANG Hongxi, HE Yuanqing, ZHANG Zhonglin, et al. The origin of summer monsoon rainfall at New Delhi by deuterium excess [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2004, 8(1): 115-118.

## Study on the $\delta D$ and $\delta^{18}O$ characteristics of meteoric precipitation during 2006–2008 in Chongqing, China\*

LITing-yong<sup>1, 2, 3</sup>, LIHong-chun<sup>1, 4</sup>, SHEN Chuan-zhou<sup>5</sup>, YANG Chao-xiu<sup>1</sup>, LIJun-yun<sup>1</sup>,

YICheng-cheng<sup>1</sup>, YUAN Dao-xian<sup>1, 3, 6</sup>, WANG Jian-li<sup>1, 3</sup>, XIE Shi-you<sup>1, 3</sup>

(1 School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2 State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, CAS, Xi'an 710075, China; 3 Key laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment (Chongqing University, Southwest University), Ministry of Education, Chongqing 400715, China; 4 Department of Earth Sciences, National Cheng-Kung University, Tainan 70101, China; 5 Department of Geosciences, National Taiwan University, Taipei 10617, China; 6 Karst Dynamics Laboratory, Institute of Karst Geology, CAGS, Guilin 541004, China)

**Abstract** The stable isotopic compositions of precipitation exhibit great diversities in different areas and seasons due to influences of multiple factors, such as temperature, evaporation, rainfall amount, moisture source and others. The Local Meteoric Water Line (LMWL) is established for Chongqing, China using precipitation samples collected between April 2006 and September 2008 as the result of a 29-month field campaign on the campus of Southwest University. Both  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  values in rainwater exhibit significant seasonal variations, having higher values in winters and lower one in summers. The result also indicates that the moisture source is the primary factor for determining the isotopic compositions in local precipitation in this monsoonal region. In addition, the evaporation is another important factor in controlling the isotopic compositions of rainwater during short-term rain events.

**Key words** Chongqing; summer monsoon; meteoric precipitation;  $\delta D$ ;  $\delta^{18}O$ ; moisture source

\* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 40802035; No. 40971122) and the National Key Technologies R&D Program of China during the 11th Five-year Plan Period (No. 2006BAC01A16).