

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2017.02.018

贵州安顺与重庆北碚大气降水中 δD 和 $\delta^{18}O$ 特征分析^①

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. 西南大学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: 根据贵州安顺和重庆北碚 2014 年 6 月—11 月大气降水中稳定同位素和气象资料, 分析了两地降水中稳定同位素特征, 结果表明: 蒸发作用导致两地大气降水线方程的斜率和截距均偏大, 重庆北碚因温度特异导致其偏离程度更大; 贵州安顺地区降水中 $\delta^{18}O$ 的高程效应显著, 但降水量效应较弱, 而重庆北碚降水中 $\delta^{18}O$ 的大陆效应不明显, 但降水量效应显著. d 值是 δD 和 $\delta^{18}O$ 的因变量, 而 δD 和 $\delta^{18}O$ 一定程度上受局地地形和气候影响, 所以 d 值也受局地地形和气候影响, 而非由水汽来源地单一因素决定.

关键词: 大气降水; 氢氧同位素; 特征分析; 贵州安顺; 重庆北碚

中图分类号: P426.6

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2017)02-0114-07

水循环是联系岩石圈、生物圈、大气圈等地表圈层的纽带和核心, 大气降水是陆地水源的根本来源, 是描述气候变化的关键指标^[1]. 大气降水中的稳定同位素氘(D)和氧-18(^{18}O)是自然水体的重要组成, 其分馏现象发生在地球水循环的每个环节, 敏感地响应环境变化, 记录水循环演化信息^[2-4]. 氘(D)和氧-18(^{18}O)会随着时间和空间的变化而变化, 因此可根据其变化来反演大气过程或示踪水汽来源^[5]. 我国于 1988 年组建成立了 CERN (Chinese Ecosystem Research Network), 系统监测中国生态与环境变化^[1], 并在 2004 年, 依托 CERN 的野外站台, 开始建立中国大气降水同位素网络(CHNIP-Chinese Network Isotopes in Precipitation), 系统地观测 δD 和 $\delta^{18}O$ 进行观测^[6]. 许多专家利用观测所得数据, 研究大气降水中同位素组成及其与各气象因子间的关系, 取得了丰硕成果. 如我国学者对青藏高原地区^[7]、西北内陆地区^[8]、东部季风区^[9]、西南季风区^[10]、沿海域区^[11]和局地区域^[12-14]的降水稳定同位素均进行了研究, 发现降水中稳定同位素比率大小不仅与水汽源初始状态、大气输送方式相关, 还和降雨产生时局地地形、温度、海拔、降水量等参数相联系^[15].

上述研究大多着眼于较大的地理单元, 且大多采用加权平均后的大气降水数据, 可能会掩盖一些由局地地形或短期天气引起的同位素特征, 而对 2 个类似区域降水同位素组成差异的分析比较少. 贵州和重庆同处西南地区, 季风类型相同, 气候相似, 水汽来源与水汽输送路径基本相同, 但贵州地处云贵高原且喀斯特地貌发育, 而重庆素有“山城”、“火炉”之称, 两地地貌差异较大, 局地小气候突出. 因此, 本研究通过

① 收稿日期: 2016-01-26

基金项目: 贵州省科技厅联合基金项目(黔科合 J 字 LKA[2012]09 号, 黔科合 J 字 LKA[2012]18 号); 国家自然科学基金项目(41201565).

作者简介: 毛庆亚(1990-), 女, 四川邛崃人, 硕士研究生, 主要从事资源与环境演变的研究.

通信作者: 王建力, 教授, 博士研究生导师.

对比贵州安顺和重庆北碚 2014 年 6 月—11 月场降水 δD 、 $\delta^{18}O$ 以及气温、降水量等相关气象数据,分析 2 个研究区降水同位素的特征,探讨二者之间的差异;同时探讨局地地形和局地小气候等区域差异可能对降水同位素组成产生的影响.其目的是:①分析和对比相似区域的大气降水同位素数据,为中国各地理单元、全国,甚至全球的降水同位素研究工作提供最新的基础资料;②以往对降水同位素的研究,大多是分析较大地理单元的宏观因素,从而得出其整体特征;而本研究从局地地形及局地小气候等微观因素入手,对比分析两个较小地域的降水同位素特征,旨在能从中获得降水同位素研究的新启发.

1 研究区域概况

安顺市($25^{\circ}20'N-27^{\circ}21'N$, $105^{\circ}14'E-107^{\circ}17'E$)位于贵州省中部,地处长江水系乌江流域和珠江水系北盘江流域的分水岭地带,是典型的喀斯特地貌集中地区.全市地形狭长,地势西高东低,南北两端分别向北盘江及乌江倾斜,一般海拔 1 200~1 400 m,最高处达 1 850 m.安顺地区气候季风性显著,加之处于云贵高原,故气候属高原型亚热带季风湿润气候,冬夏季风交替明显,冬无严寒,夏无酷暑.年均温 $13.2\sim 15^{\circ}C$,年均降水量 1 200~1 300 mm,雨量充沛,空气湿润,干湿季明显.由于区内地貌差异较大,太阳辐射不一,季风环流影响程度不同,因而地域间气候差异明显,局部小气候突出^[16].

重庆市北碚区($29^{\circ}39'N-30^{\circ}4'N$, $106^{\circ}18'E-106^{\circ}57'E$)位于重庆市区的西北面,面积 755 km².全区海拔 200~1 000 m,地貌类型复杂,属于典型的亚热带季风气候,年平均气温 $17.7^{\circ}C$,年均降水量 1 200 mm,每年 5 月—10 月份降水量占全年降水量的 70%~80%.

2 样品收集与测试

2.1 样品及数据采集

贵州安顺降水样品采集地点为贵州安顺学院第一教学楼顶楼($26^{\circ}16'N$, $105^{\circ}55'E$, 海拔 1 424 m),重庆降水样品则来自北碚区西南大学地理科学学院顶楼($29^{\circ}49'N$, $106^{\circ}25'E$, 海拔 252 m).为避免地面扬尘及周围建筑污染样品,两地露天雨水采集器距离地面约 25 m,距顶楼地面约 2 m.降水收集器为上端直径 15 cm,下端细管直径 15 mm 的倒三角塑料漏斗,保证足够集水面积的同时有效防止蒸发.单次降水结束后,及时将降水装入 25 mL 的聚乙烯塑料取样瓶中密封冷藏.

研究期内分别在贵州安顺地区采集到 40 件降水样品,在重庆北碚采集到 54 件降水样,两地降水样品均由课题组专人负责采集.本研究分析研究的数据包括:降水样品的氘、氧稳定同位素组成(δD , $\delta^{18}O$),单场降水的降水量以及降水当天的日均温.研究时段内安顺地区的降水量和温度数据均由安顺市气象局提供,重庆北碚的降水量和温度数据则下载自中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>).

2.2 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,水样采用美国 Los Gatos Research 公司(以下简称 LGR 公司)研发的液态水同位素分析仪(Liquid Water Isotope Analyzer)进行氢、氧稳定同位素的测定,结果用相对于维也纳标准平均海洋水(V-SMOW)的千分差表示:

$$\delta^{18}O(\text{或 } \delta D)(\text{‰}) = (R_s/R_{V-SMOW} - 1) \times 1\,000 \quad (1)$$

式中: R_s 和 R_{V-SMOW} 分别为水样中和维也纳标准平均海洋水中的氧(或氢)稳定同位素比率($^{18}O/^{16}O$ 或 D/H),测量精度: $\delta^{18}O$ 为 $\pm 0.15\text{‰}$, δD 为 $\pm 0.5\text{‰}$.工作标样与测试样品均装于 2 mL 玻璃检测瓶中,测试样品量约 1.5 mL.所有样品均用 0.45 μm 滤膜过滤后直接装入检测瓶中,不添加其余试剂,每个样品单次测试时间约为 2 min,测试 6 次.为消除记忆效应,系统将自动去除前 2 次测试值,取后 4 次的平均值作为样品最终测试值.测试 3 个样品后返回测试标样,9 个样品为一组轮回,每一条标准曲线由该组 3 个标样的测试值组成,建立动态标准.

通常标准样品应遵循与研究区同位素组成比率相近的原则,因此本研究选择 LGR 公司生产的工作标样 LGR3A, LGR4A, LGR5A 作为西南地区降水中稳定同位素测量的参考标样(表 1).

表 1 实验室标准水样氢氧稳定同位素值

标样名称	$\delta D(V-SMOW)/\text{‰}$	精度/ $\pm\text{‰}$	$\delta^{18}O(V-SMOW)/\text{‰}$	精度/ $\pm\text{‰}$
LGR3A	-96.4	0.5	-13.10	0.15
LGR4A	-51.0	0.5	-7.69	0.15
LGR5A	-9.5	0.5	-2.8	0.15

3 结果及讨论

贵州安顺大气降水 δD 变化范围从 -144.51‰ 到 1.62‰ , 平均值为 -68.44‰ ; $\delta^{18}O$ 从 -19.17‰ 到 -1.88‰ , 平均值为 -9.83‰ . 重庆大气降水 δD 变化范围从 -122.05‰ 到 12.96‰ , 平均值为 -42.66‰ ; $\delta^{18}O$ 从 -16.65‰ 到 -0.55‰ , 平均值为 -6.93‰ . 两地大气降水中的 $\delta^{18}O$ 均为负值, 研究时段内只有重庆北碚的大气降水在 2014 年 6 月出现过 4 次 δD 为正值的情况, 可能是雨水样品的水汽来源或者雨滴在降落过程中有强烈的蒸发, 从而导致重同位素富集^[17]. 贵州安顺大气降水中 δD 和 $\delta^{18}O$ 的平均值都低于重庆北碚, 应归因于贵州地处云贵高原, 海拔较高, 水汽团向高海拔区域运移途中经历多次降雨过程, 高程效应使得贵州安顺地区降水中 δD 和 $\delta^{18}O$ 偏轻. 同时有研究曾指出^[18], 在面积广大的内陆地区, 大陆效应微弱, 因此两地距水汽源地的距离差异不是引起两地降水同位素组成差异的主要原因.

3.1 区域大气降水线

大气降水中 δD 和 $\delta^{18}O$ 的关系对于研究水循环过程中稳定同位素变化有重要意义. 本研究根据 2014 年 6 月—11 月场降水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 实测数据, 建立了安顺大气降水线方程: $\delta D = 8.34\delta^{18}O + 13.49$ ($r = 0.99$, $n = 59$, $p < 0.001$) (图 1). 该方程相较于 Craig^[19] 提出的全球降水线方程 $\delta D = 8\delta^{18}O + 10$, 及郑淑惠^[20] 等提出的中国大气降水线方程 $\delta D = 7.9\delta^{18}O + 8.2$, 斜率和截距均偏大. 同样, 建立重庆大气降水线方程为: $\delta D = 8.62\delta^{18}O + 17.13$ ($r = 0.99$, $n = 54$, $p < 0.001$), 其斜率和截距也偏大.

大气降水线方程反映的是同位素分馏类型, 若斜率偏离 8, 则表明降水时产生了不同程度的非平衡分馏. 但研究区域周边地区中基于 GNIP 数据建立的大气降水线方程与本研究研究结果有类似的斜率和截距均偏大的现象, 如: 长沙降水线方程 $\delta D = 8.50\delta^{18}O + 18.37$ ^[15], 湖北宜昌降水线方程 $\delta D = 8.4\delta^{18}O + 15$ ^[21], 贵阳降水线方程 $\delta D = 8.83\delta^{18}O + 22.15$ ^[22] 以及桂林降水线方程 $\delta D = 8.42\delta^{18}O + 16.48$ ^[13] 等.

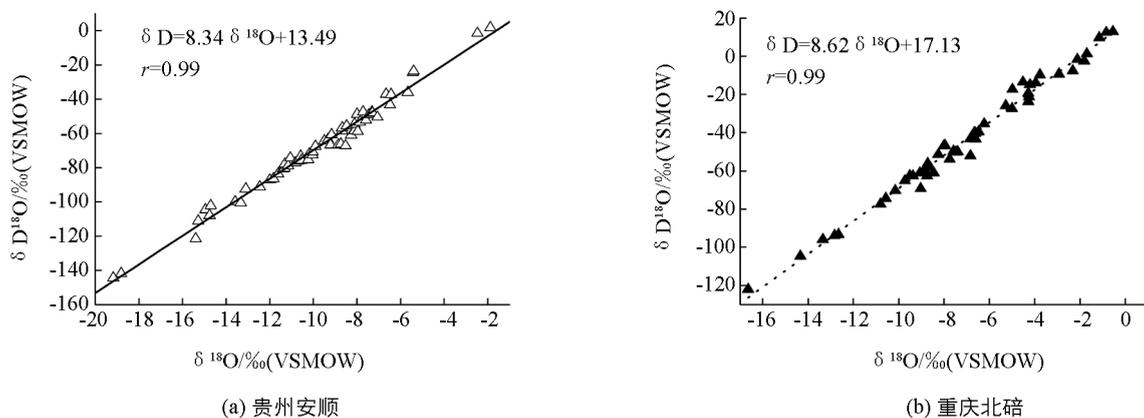


图 1 贵州安顺和重庆北碚的大气降水线方程

不同环境条件下, 大气降水中稳定同位素存在不同程度的分馏, 不同地区降水同位素组成存在差异. 全球降水线方程和中国大气降水线方程是综合各区域降水数据而得出的相对均一化结果, 本研究所取的样品是场降水数据, 与上述两者采用月平均降水数据不同. 基于场降水的雨水稳定同位素更容易受到水汽运输、蒸发作用和降雨时自然条件等因素的影响. 此外, 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, 氢同位素分馏速率更大, 即在其它条件相同时, 经历过多次蒸发作用的水汽所形成的降水中 δD 将相对偏重, 导致基于此类雨水建立的大气降水线方程的斜率和截距偏大^[23]. 这也部分解释了为何重庆北碚大气降水线方程的斜率和截距都大于贵州安顺(图 1).

3.2 降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度的关系

有研究表明^[24], 地面温度与上空降水云团的冷凝温度存在一定的对应关系, 而上空降水云团的冷凝温度与降水中的 δ 值有直接关系. 根据瑞利方程原理, 二者间存在的对应关系为: 气温越低, 降水中同位素的分馏系数 α 越大, 降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 越低^[25]. 这种温度与同位素 δ 值的正相关关系被称为“温度效应”, 大量研究表明, 温度效应主要集在中、高纬地区, 在两极地区表现尤为显著; 同时在大陆内陆地区, 这种正相关关系也相当密切^[2, 5].

安顺大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度存在一定的相关性: $\delta^{18}\text{O} = -0.34T - 2.9$ ($r = -0.36$, $n = 40$, $p < 0.02$) (图 2(a)), 呈现一种较明显的“反温度效应”^[10, 13]. 我国西北地区以及青藏高原北部地区大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 体现出明显的温度效应, 而我国南方季风区等低纬度地区都显示出与气温的负相关关系^[7, 10]. 可能因为贵州地处低纬季风区, 喀斯特地貌发育, 地表湿度较大而夏季温度较高. 地表蒸发的水汽混入大气云团中增加了降水量, 在一定程度上干扰了温度效应, 致使温度与降水 $\delta^{18}\text{O}$ 表现出负相关关系.

重庆北碚大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度的回归方程为: $\delta^{18}\text{O} = -0.17T - 3.16$ ($r = -0.14$, $n = 54$, $p > 0.1$) (图 2(b)), 未通过相关性系数显著性检验, 即重庆降水没有体现出与温度的稳定规律, 无相关性.

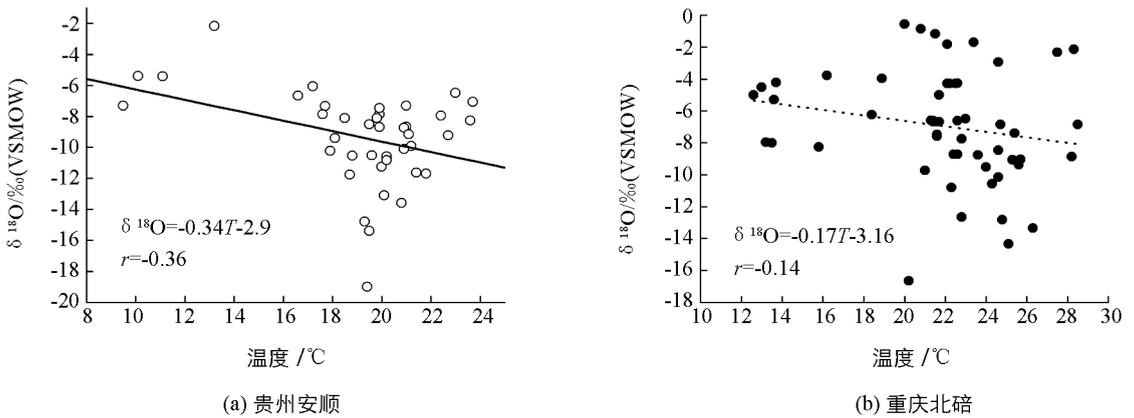


图 2 贵州安顺和重庆北碚大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度的关系

3.3 降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 与降水量的关系

“降水量效应”是指降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值与降水量大小呈反相关关系. 将贵州安顺大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与降水量 P 进行计算, 得到的回归方程为 $\delta^{18}\text{O} = -0.06P - 8.44$ ($r = -0.34$, $n = 36$, $p < 0.05$) (图 3(a)), 体现出较弱的“降水量效应”, 不如中国某些南方季风区显著. 可能是因为单次降水更容易受到风速、湿度、水汽来源等短期天气因素的影响, 导致降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的离散程度高, 二者相关性减弱. 不过这一现象符合前人总结的“中低纬海岸和海岛地区降水量效应显著, 而在内陆区通常不显著”这一结论^[2].

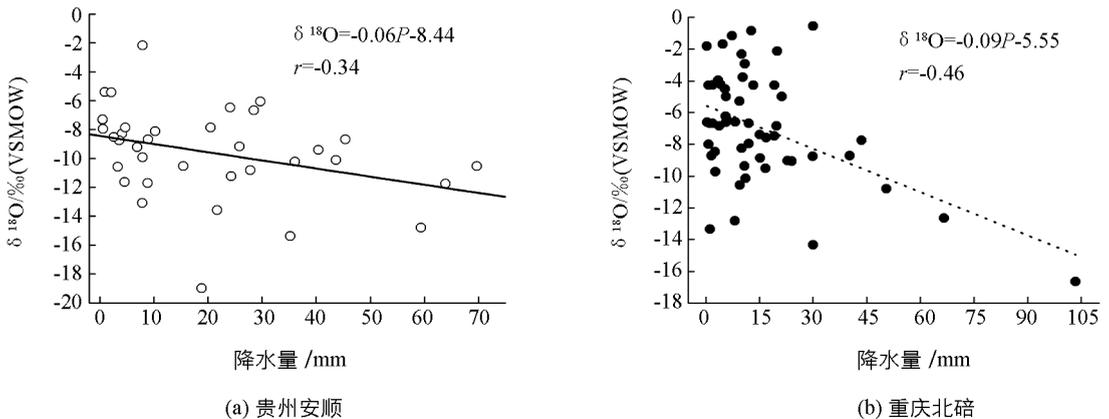


图 3 贵州安顺和重庆北碚大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与降水量的关系

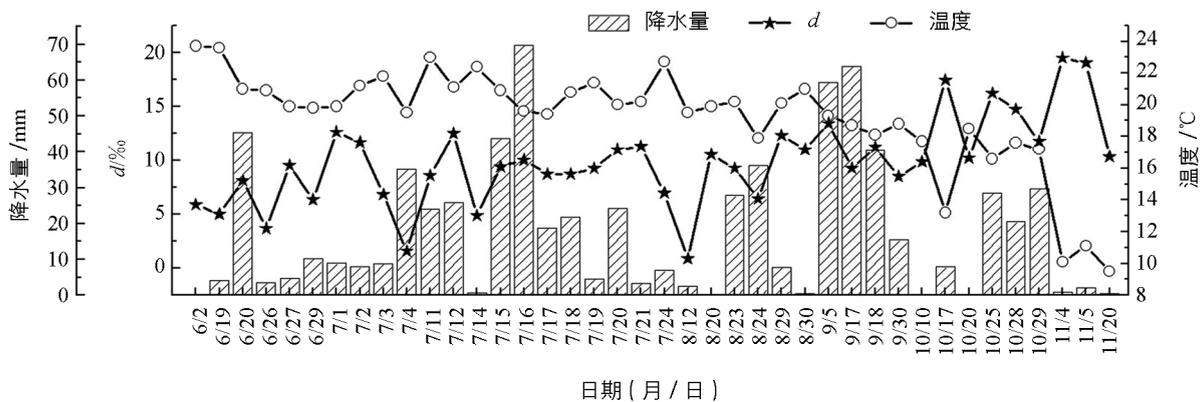
重庆北碚大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与降水量的关系为: $\delta^{18}\text{O} = -0.09P - 5.55$ ($r = -0.46$, $n = 54$, $p < 0.001$) (图 3(b)), 相较于贵州安顺地区, “降水量效应”非常显著. 安顺大气降水的降水量效应不明显, 可能是因

为贵州地处云贵高原,海拔较高,同一来源的水汽团在往高原内部地区输送途中经历了多次降水过程,对于水汽量有限的某一水汽团而言,越往内陆高原地区攀升,降水量相对减少,而同位素分馏作用会使残余水汽中同位素比值持续偏轻,使得到达贵州高原的水汽团中 $\delta^{18}O$ 下降,所以实际上往往会出现即使雨量减小,雨水中的 $\delta^{18}O$ 也同样偏轻的现象^[23].

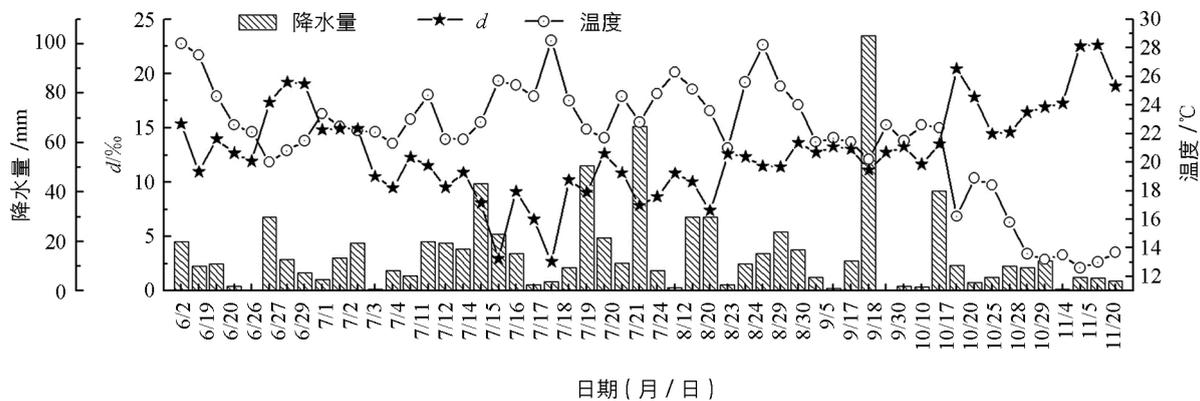
3.4 过量氘

Dansgaard^[2]认为因水汽在蒸发过程中的动力分馏作用使得其氢、氧同位素平衡分馏被破坏,导致降水中 δD 和 $\delta^{18}O$ 出现一个差值,并将其定义为过量氘(d): $d = \delta D - 8\delta^{18}O$. d 能反映降水形成时的气候条件和地理环境,更重要的是能反映上空水汽团形成时的热力条件和水汽平衡条件,因为同一水汽团在输送和冷凝过程中 d 值保持不变,所以 d 是追踪水汽来源地的良好指标.

安顺大气降水中 d 值变化范围为 $0.88\% \sim 19.48\%$,平均值为 10.20% ,非常接近世界平均值(约 10%),说明研究时段内安顺地区大气降水云团主要是来自海洋.而重庆北碚降水数据变化范围是 $2.67\% \sim 22.64\%$,平均值为 12.80% ,高于安顺地区,可能是因为重庆北碚夏季温度高,蒸发作用强烈,又因D的富集程度大于 ^{18}O ,从而引起 d 值较高(图4).



(a) 贵州安顺



(b) 重庆北碚

图4 贵州安顺及重庆大气降水中过量氘与温度和降水量变化

安顺地区 d 值与温度(T)的回归方程为: $d = -0.78T + 24.8 (r = -0.61, n = 40, p < 0.001)$,表明 d 值与温度有较好的负相关关系,即:温度升高, d 值减小,温度降低, d 值增大.并且安顺地区夏季6月—8月的 d 值小于秋季9月—11月的 d 值,数据所表现出的趋势也符合受季风影响地区,冬季风期间 d 值普遍高于夏季风影响时期这一结论^[24-25].安顺地区 d 值与降水量(P)的回归方程为: $d = -0.01P + 9.5 (r = -0.06, n = 36, p > 0.1)$,未通过相关性系数显著性检验,即降水中 d 值与降水量之间没有明显可循的规律,没有相关性(图4(a)).

同样地,将同一时间段内重庆北碚大气降水也进行上述2种回归分析,得到的回归方程为: $d =$

$-0.73T + 28.75$ ($r = -0.69$, $n = 54$, $p < 0.001$) 和 $d = -0.06P + 13.67$ ($r = -0.21$, $n = 54$, $p > 0.1$)。重庆北碚大气降水 d 值与气温的相关性不如安顺地区, 并且其 d 值与降水量的相关性系数同样未通过显著性检验, 没有相关性(图 4(b))。

贵州安顺和重庆北碚大气降水水汽来源地基本相同, 而 2 个研究区 d 值与降水量均无显著相关性, 本研究运用数学推理方式得出以下推论(以贵州安顺为例):

$$\delta D = 8.34\delta^{18}O + 13.49 \quad (2)$$

$$d = \delta D - 8\delta^{18}O \quad (3)$$

将(2)式代入(3)式得:

$$d = 0.34\delta^{18}O + 13.49 \quad (4)$$

将(4)式中的 d 作为安顺地区过量氘的另一种表达方式, 这种表达方式可以更为直观地反映 d 值与 $\delta^{18}O$ 之间的关系。而 $\delta^{18}O$ 与降水量又存在负相关关系, 所以, 理论上降水量(P)越大, $\delta^{18}O$ 越小(降水量效应), d 值应该越小(公式 4)。有研究揭示^[23]降水量与 $\delta^{18}O$ 并不是绝对数值上的负相关关系; 同时, 地形降水使降水量增加也会对 $\delta^{18}O$ 以及 d 值产生影响。安顺市地理位置在贵州省夏季风的迎风坡上, 偏南气流和偏东南暖湿性气团在向内陆地区运移的过程中, 受到贵州西部高原前缘较高山地(安顺市西北面)的阻挡, 被迫迅速抬升冷却, 会在安顺市区内短时间产生大量降水, 这样的短时性强降水, 很可能因为来不及分馏而导致 $\delta^{18}O$ 也大, 从而引起 d 偏大(公式 4), 扰乱了降水量与 d 值之间理论上的负相关关系, 因此二者间没有表现出明显相关性。

总之, 水汽来源不同可能是决定降水中稳定同位素组成的重要因素, 但降水是蒸发、运移、混合、凝结降落的综合过程, 局地气候、地形等因素对其组成必然产生影响, 此项研究仍需多区域的长期监测。

4 结 论

1) 建立了贵州安顺和重庆北碚的大气降水线方程, 其中安顺为 $\delta D = 8.34\delta^{18}O + 13.49$ ($r = 0.99$, $n = 59$, $p < 0.001$), 重庆北碚为 $\delta D = 8.62\delta^{18}O + 17.13$ ($r = 0.99$, $n = 54$, $p < 0.001$); 它们的斜率和截距均大于全球降水线方程。

2) 重庆北碚降水的温度效应不明显, 而降水量效应显著; 贵州安顺降水存在较弱的反温度效应和降水量效应。研究表明, 除水汽来源、水汽输送路径等因素影响外, 区域性的地形条件等通过影响降水量的变化和氢氧稳定同位素分馏过程, 最终影响大气降水中氢氧稳定同位素比值以及 d 值。

参考文献:

- [1] 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, 7(22): 738-745.
- [2] DANSGAARD W. Stable Isotopes in Precipitation [J]. Tellus, 1964, 16(4): 436-468.
- [3] ARAGUÁS L, FROEHLICH K, ROZANSKI K, et al. Stable Isotope Composition of Precipitation Over Southeast Asia [J]. Journal of Geophysical Research, 1998, 103(28): 721-742.
- [4] 章新平, 刘晶森, 田立德, 等. 亚洲降水中 $\delta^{18}O$ 沿不同水汽输送路径的变化 [J]. 地理学报, 2004, 59(5): 699-708.
- [5] 章新平, 姚檀栋. 我国降水中 $\delta^{18}O$ 的分布特点 [J]. 地理学报, 1998, 53(4): 356-364.
- [6] 李亚举, 张明军, 王圣杰, 等. 我国大气降水中稳定同位素研究进展 [J]. 冰川冻土, 2011, 33(3): 624-633.
- [7] 田立德, 姚檀栋, Numaguti A. 青藏高原南部季风降水中稳定同位素波动与水汽输送过程 [J]. 中国科学(D辑), 2001, 31(增刊): 215-220.
- [8] 高志发. 西北地区大气降水、地表水及地下水同位素组成特征探讨 [J]. 甘肃地质学报, 1993, 2(2): 95-103.
- [9] 柳鉴容, 宋献方, 袁国富, 等. 中国东部季风区大气降水的特征及水汽来源 [J]. 科学通报, 2009, 54(22): 3521-3531.
- [10] 章新平, 刘晶森, 孙维贞, 等. 中国西南地区降水中氧稳定同位素比率与相关气象要素之间关系的研究 [J]. 中国科学(D辑), 2006, 35(9): 850-859.
- [11] 蔡明刚, 黄奕普, 陈敏, 等. 厦门大气降水的氢氧同位素研究 [J]. 台湾海峡, 2000, 19(4): 450-451.
- [12] 卫克勤, 林瑞芬, 王志祥. 北京地区降水中的氘、氧-18、氟含量 [J]. 中国科学(B), 1982, 8: 754-757.

- [13] 涂林玲,王 华,冯玉梅. 桂林地区大气降水的D和 ^{18}O 同位素的研究[J]. 中国岩溶, 2004, 23(4): 304-309.
- [14] 李 晖,周宏飞. 乌鲁木齐地区大气降水中 δD 和 $\delta^{18}O$ 的变化特征[J]. 干旱区资源与环境, 2007, 21(9): 47-51.
- [15] 黄一民,章新平,孙 霞,等. 长沙大气水汽、降水中稳定同位素季节变化及水汽输送关系[J]. 地理科学, 2015, 35(4): 498-506.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] MICHAEL R ROSEN, JEFFREY V TURNER, LEE COSHELL, et al. The Effects of Water Temperature, Stratification, and Biological Activity on the Stable Isotopic [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59(5): 979-990.
- [19] CRAIG H. Isotopic Variations in Meteoric Waters [J]. *Science*, 1961, 133: 1702-1703.
- [20] 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.
- [21] 赵家成,魏宝华,肖尚斌. 湖北宜昌地区大气降水中的稳定同位素特征[J]. 热带地理, 2009, 29(6): 527-531.
- [22] 章新平,孙维贞,刘晶森. 西南水汽通道上昆明站降水中的稳定同位素[J]. 长江流域资源与环境, 2005, 14(5): 665-669.
- [23] 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): 754-763.
- [24] 卫克勤,林瑞芬. 论季风气候对我国雨水同位素组成的影响[J]. 地球化学, 1994(1): 33-46.
- [25] JOCHENHOEFS. 稳定同位素地球化学[M]. 刘季花,等. 译. 海洋出版社, 2002: 9-12.

Analysis of the Characteristics of δD and $\delta^{18}O$ in the Meteoric Precipitation in Anshun, Guizhou Province and Beibei Chongqing

MAO Qing-ya¹, WANG Jian-li^{1,3}, WANG Jia-lu^{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, Ministry of Education, Southwest University, Chongqing 400715, China;

4. Meteorological Bureau of Anshun City, Anshun Guizhou 561000, China

Abstract: The characteristics of stable isotopes of precipitation in Anshun, Guizhou and Beibei Chongqing were analyzed by the rainfall and meteorological data collected from June to November in 2014. The results show that evaporation cause bigger slope and intercept of two Local Meteoric Water Line (LMWL) equation, and the Chongqing area has a greater degree of deviation because of its positive temperature anomaly. The $\delta^{18}O$ of precipitation in Anshun has a remarkable altitude effect but weak precipitation effect. In contrary, the $\delta^{18}O$ of precipitation in Chongqing has weak continental effect but very significant precipitation effect. The d-excess is the dependent variable of δD and $\delta^{18}O$, which are influenced by local topography and climate condition in a certain extent. So, d-excess is influenced by not only the water vapor source but also the local terrain and climate.

Key words: meteoric precipitation; hydrogen and oxygen stable isotopes; characteristic analysis; Anshun Guizhou; Beibei Chongqing

