第 34 卷 第 5 期	中 国 岩 溶	Vol. 34 No. 5
2015 年 10 月	CARSOLOGICA SINICA	Oct. 2015

刘梦娇,王勇,张耀华,等.中国西南季风区不同水体稳定同位素特征分析[J].中国岩溶,2015,34(5):486-494. DOI:10.11932/karst20150509

中国西南季风区不同水体稳定同位素特征分析

刘梦娇,王勇,张耀华,李果 (西南大学地理科学学院,重庆 400715)

摘 要:通过对重庆市北碚区大气降水和马鞍溪上游龙滩子水库水的氢氧同位素进行的一个水文年(2014年)的样品采集监测,研究了降水与水库的水的氢氧同位素之间的变化特征和规律。结果表明:(1)北碚区大气降水线方程为 $\delta D=8.82\delta^{18}$ O+18.97,r=0.99,n=101,P<0.01, δD 、 δ^{18} O 相关性极为显著,该区大气降水 线斜率和截距大于全球大气降水线和中国大气降水线,表明研究区主要受西南季风和东南季风双重影响所 致;(2)大气降水中 δD 、 δ^{18} O 具有明显的季节变化,夏半年偏负,冬半年偏正;(3)大气降水中的 δD 、 δ^{18} O 与降 水量及温度呈现负相关关系,降水量效应显著,并且该效应远远掩盖了温度效应;(4)水库中水的 δD 、 δ^{18} O 具 有极好的相关性,其 δD 、 δ^{18} O 样点落于全球大气降水线和区域大气降水线附近,并且水库中水 d 的变化趋势 与降水 d 基本一致,表明前者主要补给来源是降水,而水库中水的 δD 、 δ^{18} O 和 d 的变化幅度远远小于降水, 表明前者不仅受降水补给,还受土壤水和地下水的补给。

关键词:降水;不同水体;氢氧稳定同位素;过量氘;重庆北碚区

文献标识码:A **文章编号:**1001-4810(2015)05-0486-09

0 引 言

中图分类号:P426.612

氢氧稳定同位素作为水汽交换的指示器^[1]是探 索水文循环的重要手段之一,不同地区水体的氢氧同 位素不同。影响降水稳定同位素改变的因素有两个: 一是形成降水的大气中本身的同位素组成,包括水汽 来源和输送过程;另一个是与降水地点的局地因素有 关,包括气温、降水量、气压、相对湿度、纬度及海拔 等^[2-4]。国外许多学者对大气降水同位素进行了研 究^[5-7],Yoshimura等^[8]采用瑞利同位素循环模型定 量分析短期降水中 δ¹⁸O的特征变化及其与每次降水 事件的水汽输送之间的关系。Lisa等^[9]利用 HYS-PLIT 模式中的后向轨迹法(Backwards Trajectory) 后推分析气流的来源和传输路径,研究了不同水汽来 源对大气降水中稳定同位素变化的影响。我国也有 许多学者对降水氢氧同位素进行了细致的研 究^[10-12],王永森等^[13]对西安的大气降水同位素进行 了研究,发现不同的气候因子对降水同位素的影响存 在着差异,夏季降水多,降水同位素偏负,降雨量效应 明显;冬季降水少,温度低,造成降水同位素偏正,体 现了温度效应;而在4月份,研究区处于少雨季节,空 气湿度小于夏季,而温度高于冬季,蒸发作用强,因此 降水同位素值偏正。涂林玲等^[14]对桂林的大气降水 研究表明,桂林地区夏季风期间降水的δ值偏低,冬 季风期间降水的δ值偏高,降雨量效应显著,并且掩 盖了温度效应。降水的氢、氧同位素值反映了季风气 候或夏季台风对其影响显著。

同一地区,不同水体的稳定同位素也存在差异。 就水库而言,水库对局地小气候具有一定的调节作 用。水库是较长时间大气降水形成的地表水流的综 合,水体具有一定的滞留性。近几年来,许多学者对

收稿日期:2015-05-05

基金项目:中央高校基本科研业务费专项(XDJK2013C050);重庆市自然科学基金(CSTC2011BB0017)

第一作者简介:刘梦娇(1990-),女,硕士研究生,第四纪地质学专业。E-mail:liumengjiao681@163.com。

通讯作者:王勇(1975-),男,副教授,硕士研究生导师,第四纪地质学专业。E-mail:wyong@swu.edu.cn。

重庆大气候环境的探究多以岩溶水及地下水的氢氧 同位素研究为主^[15-16],而对大气降水的氢氧同位素 的研究很少,对水库水体的氢氧同位素的研究更少。 李廷勇^[17]等以北碚区为例对重庆市 2006-2008 年 的大气降水 ôD、ô¹⁸ O 特征进行了初步分析,发现重 庆大气降水中的稳定同位素存在着明显的季节变化, 大气降水同位素体现了降雨量效应,而没有体现温度 效应。本文以北碚区为研究对象,不仅研究北碚区大 气降水中氢氧同位素的季节变化,并且对龙滩子水库 中水的氢氧同位素进行示踪探究,旨在研究大气降水 的来源、水库的水与降水的关系以及水库的水的补给 特征,为西南地区区域水循环的研究提供科学依据。

1 研究区概况

重庆市北碚区位于 106°18′14″E-106°56′53″E, 29°39′10″N-30°3′53″N,海拔 252 m,北碚区位于在 重庆市西北部,全区幅员面积 755 km²。区内多山地 丘陵,嘉陵江由北向南纵贯全境。该区属于亚热带湿 润季风气候,气温高,热量丰富,年平均气温 17.7 ℃, 降雨量充沛,年平均降水量约 1 203 mm;每年 5-10 月为雨季,降水占年平均降水量的 70%~80%^[17]。

龙滩子水库位于重庆市北碚区,始建于1974年, 是一座以农业灌溉为主,兼有防洪、发电功能的小型 水库。总库容163万m³,坝顶高程238.84m,最大 断面坝高35.05m,修建在嘉陵江水系马鞍溪支流 上。

2 样品收集与分析

2.1 样品收集

自 2014 年 1 月开始,在重庆市北碚区西南大学 地理科学学院楼顶利用雨水收集器采集降水,在重庆 市北碚区马鞍溪上游龙滩子水库采集水样,图 1 为采 样点示意图。气象数据来源于中央气象台气象数据。

取样品之前,将塑料瓶放入7N的HNO3浸泡24 小时,然后用超纯水清洗3次,并放入烘箱烘干,保证 取样工具的洁净与干燥。采取样品时,尽量将水样装 满瓶子,这是因为考虑到液态水分子之间存在着范德 华力,它会使水分子的运动速度远远小于气态情形, 这样可以降低蒸发时的分馏作用^[18]。

降水样采集:降水点以场降水为单位,每场降水 过后及时收取降水,将雨量筒中的降水装入 50 mL 塑料瓶中,现场记录日期并编号,用封口膜将瓶口封 住,以免分馏。将装好的样品带回实验室冷藏保存至 分析。每次取完样品之后都将雨量筒带回实验室用 超纯水反复清洗多次,以免影响下一次降水的测试。 截止到 2014 年 12 月,一个水文年共取降水样品 101 个(2014 年 1 月下旬样品缺失)。



图 1 样品采集点位置图 Fig. 1 Location of study area

水库水样采集:自2014年1月开始,每月中旬和 月底于重庆市北碚区马鞍溪上游龙滩子水库采取水 库水样,每月取2个样品,两个样品的取样位置和深 度几乎没有变化。每次将所取的水库水样装入50 mL塑料瓶中,现场记录日期并编号,用封口膜将瓶 口封住,以免分馏。将装好的样品带回实验室冷藏保 存至分析。截止到2014年12月,一个水文年共取样 品22个(2014年1月底与2014年12月底样品缺 失)。

2.2 样品处理及分析

所有样品在测量之前用 1 mL 一次性注射器和 0.45 μ m 滤头进行过滤,完成过滤的样品在西南大学 地理科学学院同位素实验室进行分析。采用激光液 态水稳定同位素分析仪(型号:IWA-35d-EP;精度 $\delta D < 0.5\%, \delta^{18} O < 0.1\%;$ 美国 Los Gatos Research 公司生产)对样品进行测定分析,最后的结果以 V-SMOW 表示。

3 结果与分析

3.1 北碚区大气降水同位素特征

3.1.1 区域大气降水线

中国南方地区,尤其是西南地区,主要受东南季 风和印度季风的双重影响^[19]。夏季,太平洋和印度 洋的水汽均可以给西南地区带来降水,由于水汽来源 和输送过程远近的不同,加之局地气象要素如降水 量、温度、湿度、气压等的差异,降水中的氢氧同位素 的组成以及降水线的斜率和截距都会有所不同^[20]。 大气降水线的斜率反映稳定同位素 δD、δ¹⁸ O 间分馏 效应的对比关系。截距由海洋表面水蒸发时的动力 同位素效应引起,反映氘对于平衡状态的偏离程 度^[2,21]。

由于形成降水的水汽源地、输送过程以及局地因素的影响,稳定同位素分馏存在着差异,所以各地的大气降水线不同,被定义为区域大气水线(LMWL),它能反映的是水汽来源及之后的二次混合和再蒸发过程^[18]。1961年 Craig 首次提出了全球大气水线(Global meteoric water line:GMWL),发现 δD 、 δ^{18} O 之间的线性关系为 $\delta D = 8 \delta^{18}$ O + 10,即 Craig 方程^[22]。

根据重庆市北碚区 2014 年 1 月至 2014 年 12 月 一个水文年 101 个降水样品(δ D, δ ¹⁸ O)的实际检测值 分析,大气降水中 δ D 值介于+19.01%~-105.81% 之间,变化幅度为 124.82; δ ¹⁸ O 值介于+0.09%~ -14.34%之间,变化幅度为 14.43。全球雨水平均 同位素组成 δ D 介于+50%~-350%之间, δ ¹⁸ O 介 于+10%~-50%之间^[23]。郑淑蕙等^[24]报道了中 国大气降水 δ D 介于+20%~-190%之间, δ ¹⁸ O 介 于+2%~-24%之间。由此可见,重庆市北碚区大 气降水氢氧同位素的含量变化均在全球雨水和中国 雨水的变化范围之内。

图 2 为北碚区 1 个水文年的 101 个场降水数据 构成的大气降水线图,区域大气降水线方程为 δ D= 8.82 δ ¹⁸O+18.97,r=0.99,n=101,P<0.01。该降 水量线与全球大气降水线(δ D=8 δ ¹⁸O+10)和郑淑 蕙^[25]提出的中国大气降水线(δ D=7.9 δ ¹⁸O+8.2) 相比,斜率与截距均偏大。而与我国南方其他地区如 重庆市北碚区(δ D=8.73 δ ¹⁸O+15.73)^[17]、贵阳市 (δ D=8.82 δ ¹⁸O+22.1)、桂林市(δ D=8.44 δ ¹⁸O+ 16.28)^[14],南京市(δ D=8.43 δ ¹⁸O+17.46)^[25],武汉 市(δ D=8.97 δ ¹⁸O+15.99)^[26],宜昌市(δ D=8.45 δ ¹⁸O+11.55)^[27],腾冲市(δ D=8.71 δ ¹⁸O+19.7)^[28] 等地的大气降水线的斜率和截距非常相近。一般情 况,来自海洋的暖湿气流形成的降水不稳定,因对流 性强、云下蒸发较弱,区域降水的斜率则会偏高;而内 陆地区,由蒸发水汽所形成的降水,平流性强、蒸发较 强,区域降水线的斜率则偏低^[29]。重庆地区夏季受 双向季风的影响,其大气降水线的斜率和截距都比较 高。在冬季风影响时期,由于重庆的纬度较低以及其 特殊的地貌特征,某些月份也会出现较高的温度,而 这一时期来自西北内陆的冷空气南下,与该地区的暖 气团交汇,容易形成锋面雨^[17]。重庆地区冬季多云 雾天气,蒸发较弱,降水中的δ值比其他地区较低,该 区域大气降水线的斜率较高。



图 2 北碚区大气降水线及大气降水 ôD、ô¹⁸ O 分布特征 Fig. 2 LMWL and the distribution of ôD and ô¹⁸ O values for the precipitation in Beibei District

3.1.2 北碚区大气降水中稳定同位素的季节变化

由图 3 中可以看出,北碚区大气降水中的 ôD、 δ¹⁸O随着温度和降雨量的变化而变化,并且 δD 和 δ¹⁸O的变化具有同步性,图 2 中大气降水 δD、δ¹⁸O 也 显示出极高的相关性,原因是来自大气中的水汽在凝 结并形成降雨的过程中,同位素分馏使得二者之间存 在一定的相关性[18]。由图 3 可以看出,在夏半年(5 一10月),降水量和温度偏高,相应的 δD、δ¹⁸O 则偏 负;在冬半年(4-11月),降水量和温度偏低,相应的 δD、δ¹⁸O则偏正。分析原因认为,重庆地处于我国西 南部,夏季受西南季风和东南季风的双重影响,由海 洋带来的暖湿气流为该区提供了大量的水汽,降水 多,湿度大,蒸发弱,使得降水中的δ较低;而冬季受 西北内陆大陆性气团的控制,降水少,湿度小,蒸发 强,从而使得降水中的δ较高[30-31]。另外,由图3中 可以看出,冬半年中,有的月份中 bD 值大于零,原因 可能是由于分子质量数的差异,δD要比 δ¹⁸O的分馏 速率要大,因此在同等条件下,经历过多次分馏的水 汽所形成的降水 δD 相对偏重^[17]。





Fig. 3 Seasonal variations of δD and $\delta^{18}O$ values for the precipitation in Beibei District

3.1.3 降水量效应

降水量效应是指降水中的 δ D 和 δ^{18} O 的值与降 水量(P)呈反相关关系^[32]。图 4 为月平均降水量与 月均氢氧同位素的关系图, δ D 和 δ^{18} O 与降水量(P) 之间存在着显著的负相关性,由图 4a 显示出 δ D 与 降雨量(P)之间的相关性为 δ D=-3.37P+7.03, r=-0.78, n=12, P<0.01;图 4b 显示 δ^{18} O 与降水 量(P)之间的相关性为 δ^{18} O=-0.35P-1.71, r= -0.75, n=12, P<0.01。其中降水 δ^{18} O 与降水量



的负相关关系同王海波^[33]对重庆金佛山的研究结果 相似,与章新平^[34]对云南三个站点研究的结果非常 接近,表明该研究区的降水量效应非常明显。但是由 图 3 可以看出,δD 和 δ¹⁸O 的最大值出现在 5 月份, 即雨季刚刚到来之时,而并不是出现在降雨量最少的 2 月份。由此推断,降水量并不是影响降雨量效应的 唯一原因,可能还与水汽源地、水汽输送过程以及局 地环流有关^[35]。



图 4 北碚区大气降水 ôD 和 ô¹⁸ O 与降水量相关性分析

Fig. 4 $\;$ Relationships between the δD and $\delta^{18}O$ of precipitation and rainfall in Beibei District

3.1.4 温度效应

一般情况下,温度(T)是在影响降水同位素的诸

多因素中最被关注的一个。温度效应表现为气温越低,降水中同位素的分馏系数 α 越大,使得降水中 δD

也越低^[32]。通常,温度效应在中、高纬度地区体现的 比较明显,尤其两极地区^[2,36],并且越深入大陆内部, 其正相关性越明显^[25]。主要是因为温度越低,蒸发 越弱,使得降水中的δ较低。图5为北碚区大气降水 δD和δ¹⁸O与温度相关性分析图。



图 5 北碚区大气降水 ôD 和 ô¹⁸ O 与温度相关性分析

Fig. 5 Relationships between the δD and $\delta^{18} O$ of precipitation and air temperature in Beibei District

由图 5a 为 δD 和温度(T)的相关性: $\delta D = -3.46$ T+32.60, r=-0.74, n=12, P<0.01;图 5b 为 δ^{18} O 和温度(T)的相关性: $\delta^{18}O = -3.40T + 0.61, r = -$ 0.67,n=12,P<0.05,温度(T)与δ呈现明显的负相 关性。该研究区降水中氢氧同位素与温度表现出的 负相关性与其他学者研究得出的中国南方区域大气 降水中稳定同位素与温度的负相关性一致(反温度效 应)^[37]。因为暖湿汽团的冷凝过程不仅取决于汽团 的初始温度、冷凝温度,更取决于残留湿汽团的份额 (Fv)。在凝结过程中,只有当水汽中 δD、δ¹⁸ O 保持 基本稳定时,降水中的 δD、δ¹⁸O 值与气温之间才可 能表现出明显的正相关关系, 而受夏季风影响地区 的 Fv 通常相对于水汽来源地要小很多^[28,38]。重庆 市处于我国低纬度的西南地区,夏季受东南季风和西 南季风的影响,降雨量效应远远掩盖了温度效应,因 此降水中 δD 和 δ¹⁸ O 的温度效应不明显也应是合理 的。

3.1.5 过量氘

由于各地大气降水的水汽源地、输送过程以及局 地气象要素的不同,使得稳定同位素分馏存在差异, 这种差异使区域大气降水线和全球大气降水线在斜 率与截距上出现不同程度的偏差^[39]。针对此种差 异,Dansgaard^[2]首先定义了过量氘(deuterium excess):*d*= δD-8δ¹⁸O。假设海水是在平衡条件下进 行蒸发,那么氘盈余值为0,但是事实上,受动力原因 的影响,海水蒸发作用是在不平衡状态下发生的,所 以氘盈余值不可能为 0^[40]。全球雨水平均 d 值约为 10^[2]。d 反应降水中的水汽团同位素组成,包含形成 水汽团发源地的信息^[41],因此,通常将 d 作为追踪水 汽发源地的重要信息源^[4,42]。

从图 6 可以看出北碚区降水中的 d 随着降水量 和温度的变化而变化。夏半年,气温高,降水多,降水 中的 d 值偏低;冬半年,气温低,降水少,降水中的 d 偏高。降水中 d 的这种季节性变化是季风区气候的 特点之一^[43]。图 6a 显示, d 与降水量(P)的相关性 为d = -0.57P + 20.70, r = -0.76, n = 12, P < 0.01;图 6b 显示, d 与气温(T)的相关性为 d = -0.75T+27.68, r=-0.92, n=12, P< 0.01. \oplus 此看出,温度和降水与过量氘值都存在负相关关系。 综合分析,位于中国西南地区的重庆市北碚区,在夏 半年,其降水主要来自东南季风和西南季风带来的海 洋水汽,空气湿度大,距离水汽源地较远,在水汽输送 过程中,降水中的重同位素不断贫化,d偏小;在冬半 年,该研究区主要受大陆气团的控制,降水主要由西 风带及内陆再蒸发的补给,空气湿度小,降水中 ôD、 δ¹⁸O偏正,d偏大^[43]。该分析表明,在暖湿的气候条 件下,降水中的 d 偏低;在干冷的气候条件下,降水 中的 d 偏高,降水中 d 的这种季节性变化,体现了研 究区冬夏季风大气降水水汽发源地的不同。



图 6 北碚区大气降水中 d 与降水量和温度相关性分析

Fig. 6 Relationships between the d-excess of rainfall for the precipitation and air temperature in Beibei District

3.2 龙滩子水库水样氢氧同位素特征

对北碚区龙滩子水库 2014 年 1 月至 2014 年 12 月一个水文年 22 个水库水样进行分析,水库中水的 δD 值介于-22.87%~-64.32%之间,变化幅度为 41.45%; δ^{18} O 值介于-4.36%~-9.36%之间,变 化幅度为 5%,水库中水的 δD , δ^{18} O 值远远小于与降 水的 δD , δ^{18} O 的值。此研究表明水库中水的 δD , δ^{18} O 比降水的 δD , δ^{18} O 更为稳定。原因是降水水汽 主要来自海洋输送和局地蒸发,在这个过程中,存在 着许多不稳定因素,如输送过程不同,局地气候的变 化等,而水库中的水在受大气降水影响的同时,还接 受地下水和土壤水的补给,并且这两种水源对河流的 补给要比降水补给更为稳定^[44-45]。将水库水样的 δD , δ^{18} O 进行线性相关性分析,相关性极其显著,为: δD =8.38 δ^{18} O+13.23(r=0.996,n=22,P<0.01) (如图 7)。

将水库水样标于区域大气降水线和全球降水线 的图上,由图 8 可以看出,其氢氧同位素在全球大气 降水线(dD=8 d¹⁸ O+10)和区域大气降水线(dD= 8.82d¹⁸ O+18.97)附近,并且水库水样与大气降水的 斜率和截距相差甚小,表明二者存在紧密的联系,水 库的水主要接受大气降水的补给。另外,水库水样氢 氧同位素样点测试结果全部位于北碚区大气降水线 的下方,主要是由于每场降水过后及时收集、封闭、冷 藏以免分馏,而水库中的水则是每月中旬和月底各采 集一次,在采样之前,水库中的水滞留时间较长,并且 水库的水不存在大幅度的流动,蒸发分馏作用较强, 由此看来,水库水样稳定同位素的变化受蒸发分馏作





3.3 河水与大气降水过量氘参数(d)的季节变化

图 9 为水库水样月平均过量氘与大气降水月平 均过量氘参数(*d*)的变化。总体而言,降水过量氘 与水库中水的过量氘的变化趋势基本一致。降水过 量氘参数变化范围为+5.85%~+23.45%,变化幅 度为 17.60%;水库水的过量氘参数为+8.93%~ +12.81%,变化幅度为 3.88%,降水过量氘的变化 幅度远远大于水库水的过量氘的变化幅度。二者变 化趋势大体一致,表明降水是水库的主要补给来源, 而两者的变化幅度相差甚大则是由于水库在受降水 影响的同时,还受地下水和土壤水的补给,使得水库 中无论是稳定同位素值还是过量氘值的变化幅度都 小于降水。



图 9 水库水样和大气降水月平均氘过量参数(d)的变化 Fig. 9 Seasonal variations of the d-excess of the reservoir and the precipitation

4 结 论

(1)重庆市北碚区大气降水中 δD、δ¹⁸ O 含量变 化均落于全球雨水线和中国雨水线的变化范围之内。 北碚区大气降水线方程 δD=8.82δ¹⁸ O+18.97,r= 0.99,n=101,P<0.01。其斜率和截距均大于全球 大气降水线和中国大气降水线的斜率和截距。

(2)北碚区大气降水的 δD、δ¹⁸ O 呈现明显的季 节变化。夏半年,研究区接受来自东南季风和西南季 风的暖湿气流,降水量大,温度高,δD、δ¹⁸ O 偏负;冬 半年,该区主要受大陆气团控制,降水少,温度低, δD、δ¹⁸ O 偏正。

(3)该研究区大气降水 ôD、ô¹⁸ O 的降水量效应

和反温度效应显著,并且降水量不是影响降水效应的 唯一原因。 dD、d¹⁸O除了受降水量的影响之外,还受 水汽源地、输送过程和区域环流的控制,而诸多因素 造成的降水同位素组成的差异掩盖了温度效应。

(4)水库中水的的 $\delta D_{\lambda} \delta^{18} O$ 的线性关系式为: δD =8.38 $\delta^{18} O$ +13.23(r=0.996,n=22,P<0.01),其 $\delta D_{\lambda} \delta^{18} O$ 样点落于全球降水线和区域降水线附近,并 且水库水样 d 值与降水 d 值的变化趋势基本一致, 表明水库的水与降水存在密切的关系,前者主要受后 者补给。此外,水库还受土壤水和地下水的补给,其 $\delta D_{\lambda} \delta^{18} O$ 和 d 的变化幅度远远小于降水。

致 谢:感谢西南大学地理科学学院氢氧同位素实验 室以及本人导师王勇对本研究的大力支持和帮助。

参考文献

- Brezgunov V S, Derevyagina Y U, Chizhov A B. Using natural stable hydrogen and oxygen isotopes for studying the conditions of ground ice formation [J]. Water Resources, 2001, 28(6): 604-608.
- [2] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation [J]. Tellus, 1964,16(4):436-468.
- [3] Yurteever Y, Gat J R. Stable isotope hydrology:Deuterium and Oxygen-18 in the water cycle [R]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 1981:103-142.
- [4] Tian L, Yao T, Macclune K, et al. Stable isotopic variations in West China: A consideration of moisture sources[J]. Journal of Geophysical Research, Atomspheres, 2007, 112 (D10): 185-194.
- [5] Hoffmann G, Werner M, Heimann M. Water isotope module of the ECHAM atmospheric general circulation model: A stud yon timescales from days to several years[J]. Journal of Geophysical Research, 1998, 103(014): 16871-16896.
- [6] Jouzel J, Russell G L, Suozzo R J. Simulations of the δD and δ¹⁸O atmospheric cycles using the NASA-GISS General Circulation Model—The seasonal cycle for present day conditions[J]. Journal of Geophysical Research, 1987, 92: 14739-14760.
- [7] Noone D C, Simmonds I. Associations between δ¹⁸ O of water and climate parameters in a simulation of atmospheric circulation for 1979-95[J]. Journal of Climate, 2002, 15: 3150-3169.
- [8] Yoshimura K, Oki T, Ohte N, et al. A quantitative analysis of short-term δ¹⁸O variability with a rayleigh-type isotope circulation model[J]. Journal of Geophysical Research Atmospleies , 2003, 108(D20) 4647, doi: 10.1029 /2003JD003477.

- [9] Lisa M B , Frank M D, James U L , et al. An investigation of the controls on Irish precipitation δ¹⁸O values on monthly and event timescales[J]. Climate Dynamics, 2010, 35(6) : 977-993.
- [10] 陈中笑,程军,郭品文,等.中国降水稳定同位素的分布特点 及其影响因素[J].大气科学学报,2010,33(6):667-679.
- [11] 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.
- [12] 李广,章新平,吴华武,等.云南大气降水中δ¹⁸O与气象要素
 及水汽来源之间的关系[J].自然资源学报,2014,29(6):
 1043-1052.
- [13] 王永森, 董四方, 陈益钟. 基于温度与湿度的大气降水同位素 特征影响因素分析[J]. 中国农村水利水电, 2013, 6:12-15.
- [14] 涂林玲, 王华, 冯玉梅. 桂林地区大气降水的 δD 和 δ¹⁸ O 同位 素的研究[J]. 中国岩溶, 2004, 23(4):48-53.
- [15] 李玄,王建力,李俊云,等.重庆芙蓉洞上覆泉水一滴水的氢 氧稳定同位素变化研究[J].地下水,2013,35(2):8-12.
- [16] 蒲俊兵.重庆岩溶地下水氢氧稳定同位素地球化学特征[J].地球学报,2013,34(6):713-722.
- [17] 李廷勇,李红春,沈川洲,等. 2006~2008 年重庆大气降水
 δD和δ¹⁸O特征初步分析[J].水科学进展,2010,25(6):757 -764.
- [18] 黄一民,章新平,唐方雨,等.长沙大气降水中稳定同位素变 化及过量氘指示水汽来源[J].自然资源学报,2013,28(11): 1945-1954.
- [19] 柳艳菊,丁一汇,赵南. 1998年南海季风爆发时期中尺度对流 系统的研究:I中尺度对流系统发生发展的大尺度条件[J]. 气 象学报,2005,63(4):49-60.
- [20] 吴华武,章新平,关华德,等.不同水汽来源对湖南长沙地区 降水中 dD、d¹⁸O 的影响[J].自然资源学报,2012,27(8):1404 -1414.
- [21] Araguás-Araguás L, Froehlich K, Rozanski K. Stable isotope composition of precipitation over southeast Asia[J]. J Geophys Res, 1998, 103(D22):28721-28742.
- [22] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters[J]. Science, 1961, 133 (3465): 1702 - 1703, doi: 10.1126/science. 133. 3465. 1702.
- [23] 丁悌平. 氢氧同位素地球化学[M]. 北京:地质出版社, 1980.
- [24] 郑淑蕙, 侯发高, 倪葆龄. 我国大气降水的氢氧稳定同位素研 究[J]. 科学通报, 1983,13,801-806.
- [25] 章新平,姚檀栋. 我国降水中 δ¹⁸O的分布特点[J]. 地理学 报,1998,53(4):70-78.
- [26] 刘进达,赵迎昌,刘恩凯,等.中国大气降水稳定同位素时-空分布规律探讨[J].勘察科学技术,1997,(3):34-39.
- [27] 武亚遵,万军伟,林云. 湖北宜昌西陵峡地区大气降雨氢氧同 位素特征分析[J]. 地质科技情报, 2011, 30(3):93-97.

- [28] 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,1994,23(1):33-41.
- [29] 章新平,刘晶淼,姚檀栋,等.中纬度地区混合云中稳定同位 素分馏的数学模拟:以乌鲁木齐降水为例[J].气象学报, 2003,61(1):95-105.
- [30] 卫克勤,林瑞芬,王志祥.北京地区降水中的氘、氧-18、氚含量[J].中国科学(B辑化学生物学农学医学地学),1982,(8): 754-757.
- [31] 宋德众. 福建海岛气候[M]. 北京:气象出版社, 1996.
- [32] 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):446-453.
- [33] 王海波,李廷勇,袁娜,等.重庆金佛山羊口洞滴水 δD 和 δ¹⁸ O 变化特征及其环境意义[J].中国岩溶,2014,33(2):146-155.
- [34] 章新平,关华德,孙治安,等.云南降水中稳定同位素变化的 模拟和比较[J].地理科学,2012,32(1):121-128.
- [35] Posmentier E S, Feng X H, Zhao M X. Seasonal variations of precipitation δ¹⁸O in eastern Asia[J]. Journal of Geophysical Research Aturospheres, 2004, 109(D23):D23106.
- [36] 章新平,施雅风,姚檀栋.青藏高原东北部降水中 ∂¹⁸O 的变化特征[J].中国科学(B辑化学生命科学地学),1995,(5): 540-547.
- [37] 刘忠方,田立德,姚檀栋,等.水汽输送对雅鲁藏布江流域降 水中稳定同位素的影响[J].地球科学进展,2007,22(8):842 -850.
- [38] 田立德,姚檀栋,蒲健辰,等.拉萨夏季降水中氧稳定同位素 变化特征[J].冰川冻土,1997,19(4):7-13.
- [39] 王锐,刘文兆,宋献方.长武塬区大气降水中氢氧同位素特征 分析[J].水土保持学报,2008,22(3):56-59.
- [40] 郑永飞,陈江峰.稳定同位素地球化学[M].北京:科学出版 社,2000.
- [41] Mook W G. Environmental isotopes in the hydrological cycle: principles and applications [C]. IAEA Technical Documents in Hydrology. Paris: UNESCO, 2001.
- [42] 田立德,姚檀栋,孙维贞,等. 青藏高原南北降水中 bD和 b¹⁸O关
 系及水汽循环[J]. 中国科学(D辑:地球科学), 2001, (3):
 214-220.
- [43] 章新平,刘晶淼,中尾正义,等. 我国西南地区降水中过量氘 指示水汽来源[J]. 冰川冻土,2009,31(4):613-619.
- [44] 田立德,姚檀栋,沈永平,等. 青藏高原那曲河流域降水及河 流水体中氧稳定同位素研究[J]. 水科学进展,2002,13(2): 206-210.
- [45] Gao J, Tian L D, Liu Y Q, et al. Oxygen isotope variation in the water cycle of the Yamdrok-tso Lake basin in southern Tibetan Plateau [J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54 (16): 2758-2765.

LIU Meng-jiao, WANG Yong, ZHANG Yao-hua, LI Guo

(School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract The hydrogen and oxygen isotopes of precipitation water in Beibei District of Chongqing and water in Longtanzi reservoir in upper stream Maanxi were investigated during a hydrologic year (2014), to explore the relationship of δD and $\delta^{18} O$ between precipitation and the reservoir water.

It was found that the correlation between δD and $\delta^{18} O$ in the precipitation is extremely significant, namely, $\delta D=8.82\delta^{18} O+18.97$, r=0.99, n=101, P<0.01. The slope and intercept of local meteoric water line are both greater than the global meteoric water line and China meteoric water line. The result suggested that southwest monsoon and southeast monsoon have alternative influence on local precipitation; (2) Both δD Dand $\delta^{18} O$ values in rain water exhibited significant seasonal variations, having lower values in summer and higher ones in winter; (3) The δ value and precipitation as well as temperature assumed negative correlation. The precipitation amount effect of the δD and $\delta^{18} O$ in the precipitation was very profound, which concealed the temperature effect; (4) The δD and $\delta^{18} O$ in reservoir had a great correlation and they fell near the global meteoric water line and local meteoric water line. In addition, the excess deuterium (d) in the reservoir water and in the precipitation showed very similar patterns. The result indicated that the precipitation recharged the reservoir. However, the variety range of the δD and $\delta^{18} O$ from reservoir was far less than precipitation. The result suggested that the reservoir was not only recharged by precipitation, but also by soil water and groundwater.

Key words precipitation, different water bodies, hydrogen and oxygen stable isotope, deuterium excess, Beibei District

(编辑 张玲)