

# 东台沟实验流域降水氧同位素特征与水汽来源

刘相超<sup>1,3</sup>, 宋献方<sup>1</sup>, 夏 军<sup>1,2</sup>, 于静洁<sup>1</sup>, 杨 聪<sup>1,3</sup>, 李发东<sup>1,3</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101;

2. 武汉大学, 武汉 430072; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 运用环境同位素技术研究水循环中水分子组成发生的微观变化, 是兴起于 20 世纪中期研究宏观、微观水文过程机理的新技术。研究流域降水同位素时间和空间变化规律以及与降水要素的相关关系, 对于研究流域水资源属性具有重要的理论与实践意义。本文以北京市怀柔区汤河口镇东台沟实验流域为研究对象, 研究了该流域 2003 年 7 月至 10 月降水氧同位素含量及降水的时空变化, 分析了降水  $\delta^{18}O$  与降水量、高程及空气湿度的关系, 评估了雨量、高程及空气湿度等因子对降水过程的影响及作用, 阐明了其间实验流域降水  $\delta^{18}O$  的时空分布规律, 并得出实验流域在实验期间降水的主要水汽来源为由东南向西北方向。

**关键词:** 环境同位素; 雨量效应; 高程效应; 水汽来源

文章编号: 1000-0585(2005)02-0178-10

## 1 引言

降水是水循环过程的重要环节, 研究流域内水的来源、组成及运移必须追溯到降水的来源与形成<sup>[1~3]</sup>。在流域尺度上, 降水同位素组成的时空分布与降水的时空分布存在着紧密的联系——降水是具有微观和中观尺度结构属性的降水过程形成的, 前者与降水深度、降水历时以及降水场次之间的时间间隔相联系; 后者与降水过程中降水强度的时空分布相联系<sup>[4]</sup>。因此, 研究降水同位素组成的时空变化, 借以推断降水过程发生的时空变化<sup>[5,6]</sup>, 对于研究地表水径流与蒸发<sup>[7]</sup>、土壤水蒸发与下渗<sup>[8]</sup>、确定地下水水流路径和滞留时间<sup>[9,10]</sup>、量化评价区域地表水和地下水<sup>[11,12]</sup>, 都是不可缺少的前提。

我国对流域降水同位素也开展了一系列研究, 并加入到国际原子能协会 (IAEA) 全球大气降水同位素监测网 (GNIP) 进行降水同位素观测研究工作。例如章新平<sup>[13,14]</sup>等人研究了我国降水中  $\delta^{18}O$  的分布特点, 阐明了平均  $\delta^{18}O$  的分布与月平均温度和月降水量的关系; 并利用南亚、青藏高原以及毗邻的中亚地区的采样资料, 分析青藏高原及其毗邻地区降水中稳定同位素的时空变化规律, 揭示不同影响因子对降水同位素的影响, 为我国相关领域研究提供了参考。

潮白河流域是密云水库的惟一来水源地, 密云水库又是当今北京市城市供水的惟一水

收稿日期: 2004-05-10; 修订日期: 2004-10-18

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KZCX-SW-317-01)、中国科学院知识创新工程领域前沿项目 (CX10G-E01-08-02) 及中国科学院地理科学与资源研究所所长基金 (DW862) 资助

作者简介: 刘相超 (1972-), 男, 河南许昌人, 博士生, 主要从事同位素水文循环研究。

E-mail: liuxc@igsnr.ac.cn

通讯作者: 宋献方 (1965-), 男, 河北邢台人, 研究员, 主要从事同位素水文循环研究。

E-mail: songxf@igsnr.ac.cn

源。近几十年来, 潮白河流域的入库径流特征发生了一系列深刻变化<sup>[15]</sup>, 潮白河流域对密云水库的入库径流补给总体上呈指数减少趋势。入库径流的减少对北京地区水资源可持续利用产生了深刻的影响, 从而引起水文学家展开了以潮白河流域为重点的变化环境下水资源形成与演化规律及华北地区水文水资源安全研究<sup>[15~17]</sup>。为阐明研究区域在变化环境下的水资源演化规律, 选定白河流域东台沟为研究基地开展流域水循环研究, 并运用环境同位素技术对流域水循环进行示踪, 为研究区域流域水循环提供可靠的研究手段。

## 2 实验流域概况

为了研究潮白河流域降水径流变化规律, 搞清降雨径流减少机理及人类活动的水循环效应, 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室于 2003 年在北京市怀柔区汤河口镇的东台沟建立了流域水循环研究基地 (图 1), 为研究我国北方大流域尺度的流域水循环建立了实验平台。

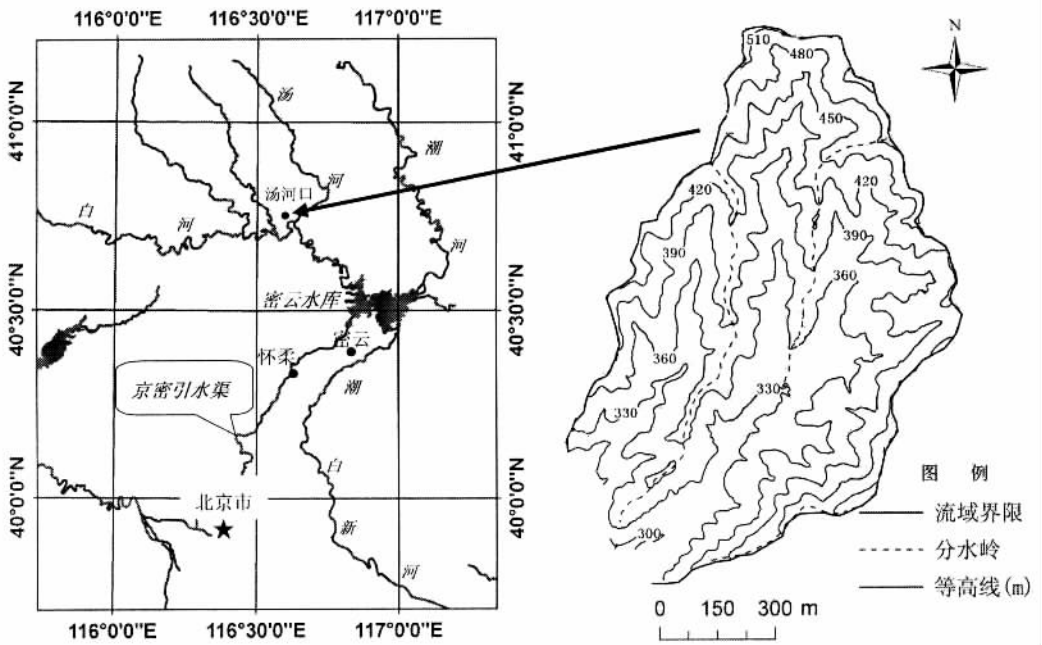


图 1 东台沟实验流域地理位置及流域地形特征

Fig. 1 Location and topographic characteristics of Dongtaigou experimental basin

东台沟流域位于华北地区中北部燕山山脉, 属于白河流域中游的顶级小流域。流域位于  $40^{\circ}45'3''N \sim 40^{\circ}45'12''N$ 、 $116^{\circ}37'12''E \sim 116^{\circ}37'30''E$  之间, 东北—西南走向, 面积  $0.64 \text{ km}^2$ , 海拔  $290 \sim 530 \text{ m}$ 。流域属温带半湿润大陆性季风气候区, 多年平均年气温  $9 \sim 9.5^{\circ}\text{C}$ , 1 月平均气温  $-7.5 \sim -8^{\circ}\text{C}$ , 负积温  $-580 \sim -600^{\circ}\text{C}$ ; 7 月平均气温  $24 \sim 25^{\circ}\text{C}$ , 年积温  $3900 \sim 4050^{\circ}\text{C}$ 。全年无霜期 160d, 年水面蒸发量约  $1200 \text{ mm}$ , 多年平均降水量  $511 \text{ mm}$ 。降水年际年内分配极不均匀, 多集中在 6~9 月, 占全年降水量的  $81.2\%$ , 降水多以暴雨的形式出现。流域内植被组成单纯, 层次结构简单, 覆被率较低; 流域地形地质状况较为简单, 主要是以厚层安山岩为基底的封闭流域, 沟道内为疏松的风化冲积物, 坡面为微弱风化的裸露基岩。

### 3 实验仪器的布置及样品的测定

#### 3.1 实验仪器的布置

研究流域内水的来源、组成及在时间和空间上量的变化,必须明确降水的时间和空间形式,为此在整个流域内共布设 7 个雨量筒和 10 个降水采样点(图 2),对降水进行实时观测并采样进行同位素分析。雨量筒采用美国 Onset 公司的 RG2-M 型自记雨量筒,精度为 0.2mm。空气温度和湿度采用澳大利亚 Monitor Sensors PTY 公司的自动气象站测定。降水采样采用自制的采集装置(图 3),降水通过塑料漏斗收集在木箱中的塑料瓶内。瓶口和漏斗颈通过橡胶塞紧密连接,漏斗口上面放置一乒乓球,防止瓶内的水样蒸发;同时,木箱、塑料瓶和乒乓球具有隔热作用,可防止由蒸发引起的重同位素富集。流域内 6 个雨量筒(P1~P6)布置在山脊上;MP 为气象站附带雨量筒,布置在流域中部地势较低的平坦部位。雨量筒的布置有利于对整个流域的降水量进行观测并实时记录。10 个降水采样点中有 7 个和雨量筒布点一致,其余 3 个布置在支沟出口处。

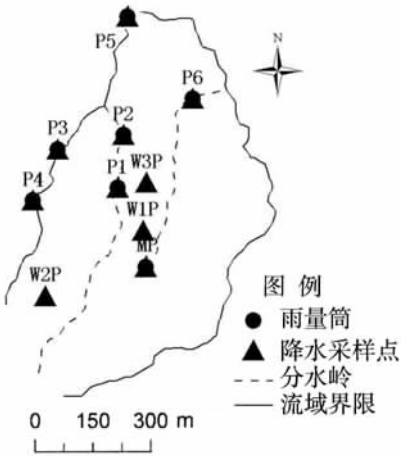


图 2 雨量筒及降水采样点布置

Fig. 2 Distribution of the rain gauges and sampling sites

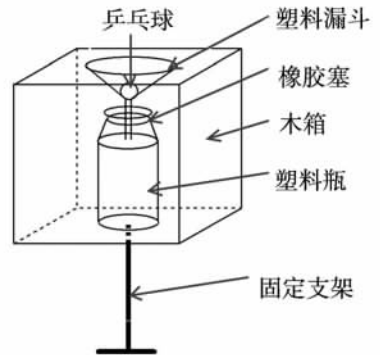


图 3 降水采样装置

Fig. 3 Sampling apparatus of precipitation

#### 3.2 样品的采集与测定

2003 年 7 月 19 日至 10 月 25 日在研究流域进行了为期 3 个多月的降水观测和采样工作,其间共采集到 9 场降水样。降水样在每场降水过后及时采集,样品密封储存于塑料样品瓶内,并在冰点以上的低温下保存,以防止水样的蒸发与结冰。样品于 2003 年 11 月 28 日至 2003 年 12 月 2 日在中国科学院地质与地球物理研究所环境同位素实验室分析,分析项目为降水中氧稳定同位素实测比值  $\delta^{18}O$ ,前期处理采用 25℃ 室温下  $CO_2-H_2O$  平衡法,平衡时间为 4 小时,测定仪器为德国 Finnigan 公司生产的 MAT-252 气体源稳定同位素质谱仪,测量标准采用国家标准水,测量精度为  $\pm 0.1\%$ ,分析结果以相对于 V-SMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water) 的千分差表示:

$$\delta^{18}O(\text{‰}) = \left[ \frac{(^{18}O/^{16}O)_{\text{样品}}}{(^{18}O/^{16}O)_{\text{标准}}} - 1 \right] \times 1000 \quad (1)$$

### 4 大气降水的氧同位素分析

对采集的 8 个场次降水  $\delta^{18}O$  进行分析发现：总体上，降水的  $\delta^{18}O$  值位于  $-7\text{‰} \sim -14.5\text{‰}$  之间。不同场次降水  $\delta^{18}O$  有较大的差异，其影响因素主要有水汽来源、降水量、水汽凝结高度、水汽凝结时的大气湿度以及温度等大气环流和气象条件。不同场次降水的大气环流和气象条件有很大的差异，因此不同场次降水  $\delta^{18}O$  值存在着很大的差异；同一场次降水的  $\delta^{18}O$  值在一定区域的差异也受以上因素的影响，但对于面积相当小、高程相差不大的实验流域，同一场降水的大气环流和气象条件差异相当小，因此同一场次不同采样点降水  $\delta^{18}O$  值差异很小。

#### 4.1 降水 $\delta^{18}O$ 值与降水量相关关系

降水过程中首先凝结的水汽形成的降水  $\delta^{18}O$  值较大，后来形成的降水  $\delta^{18}O$  值愈来愈小；在同一场降水过程中，随着雨量的增加，降水中的  $\delta^{18}O$  值呈逐渐减小趋势。对于不同场次的降水，降水量较小的场次降水  $\delta^{18}O$  值较大<sup>[18]</sup>，但这种关系也受降水时期空气相对湿度的影响。例如，Ian C. Jones<sup>[19]</sup> 等人研究了 Barbados 地区的更新世石灰岩含水层降水补给的季节变化和空间变化，结果表明，降水  $\delta^{18}O$  值的变化主要受降水量的影响，月降水的  $\delta^{18}O$  值和降水量呈负相关关系。

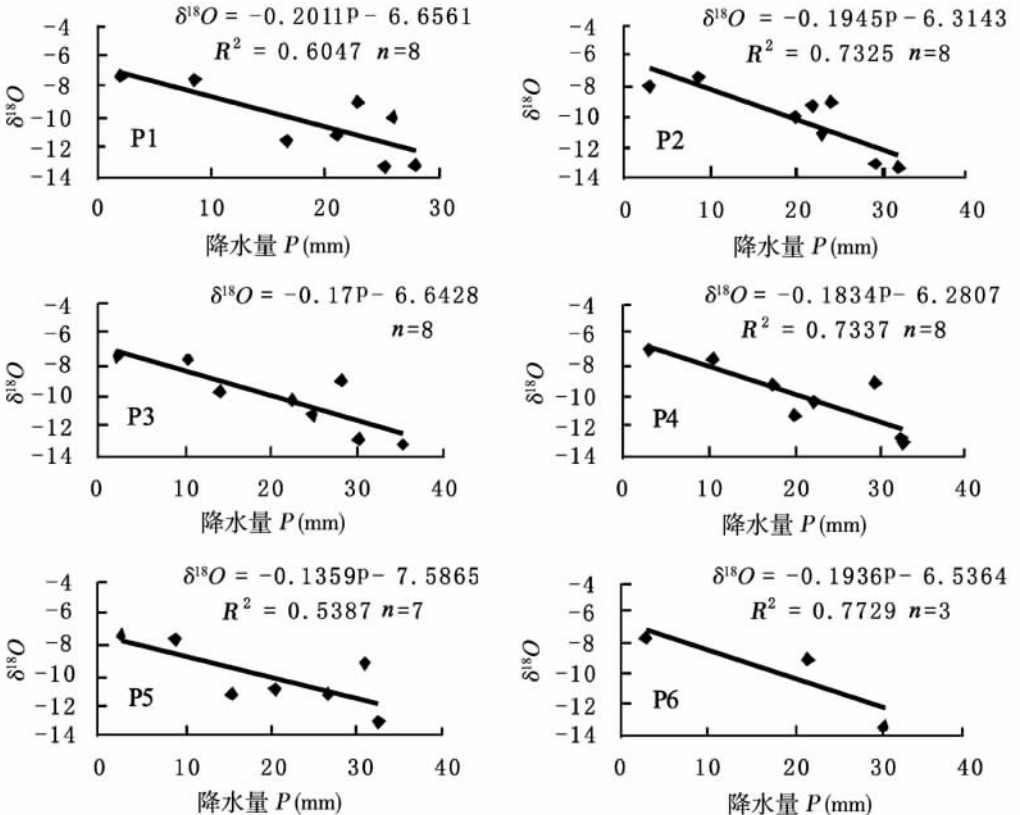


图 4 每一采样点不同场次降水的  $\delta^{18}O$  值与降水量相关关系

Fig. 4 The correlativity between the  $\delta^{18}O$  value and rainfall for different rain events at each sampling site

**4.1.1 每一采样点不同场次降水  $\delta^{18}O$  值与降水量关系** 每一采样点不同场次降水的  $\delta^{18}O$  值与降水量相关分析表明 (图 4): 每一采样点不同场次降水  $\delta^{18}O$  值与降水量具有较好的相关关系。并且随着降水量的增加, 降水中的  $\delta^{18}O$  值呈降低趋势, 表明了一定地理位置上同位素的雨量效应。

**4.1.2 所有采样点所有场次降水  $\delta^{18}O$  值与降水量关系** 所有场次降水  $\delta^{18}O$  值和降水量关系表明, 降水  $\delta^{18}O$  值与降水量存在着明显的线性关系: 降水量越大, 降水中的  $\delta^{18}O$  值越小 (图 5), 并得出降水  $\delta^{18}O$  值与降水量的关系式为:

$$\delta^{18}O = -0.1764P - 6.7008 \quad (2)$$

$$R^2 = 0.6728, n = 43$$

式中,  $\delta^{18}O$  为降水氧同位素实测比值;  $P$  为降水量, 单位为 mm。

## 4.2 降水 $\delta^{18}O$ 值与高程的关系

地形对降水量和降水  $\delta^{18}O$  值有着明显的影响<sup>[20]</sup>, 据 M. A. Scholl 等人研究表明, 区域降水同位素组成的空间变化与地形有很大关系<sup>[12]</sup>, 降水同位素组成与高程具有明显的线性关系<sup>[11,21]</sup>。

对 6 个场次降水  $\delta^{18}O$  值与高程进行分析发现 (图 6): 降水  $\delta^{18}O$  值与高程成负相关关系, 但不同场次降水的  $\delta^{18}O$  值随高程的变化梯度不同, 即不同场次降水的高程效应不同, 表明不同场次降水的空间温度和湿度梯度有较大的差异。

从长期趋势看, 一个区域特定时段降水存在一个稳定的降水  $\delta^{18}O$  值随高程变化的梯度, 这个梯度是以每一场降水量作为权重, 对每一场降水  $\delta^{18}O$  值随高程的变化梯度进行加权平均的梯度值, 其计算公式如下:

$$\left(\frac{d\delta^{18}O}{dh}\right) = \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \left(\left(\frac{d\delta^{18}O}{dh}\right)_i \cdot \bar{P}_j\right)}{\sum_{j=1}^n \bar{P}_j} \quad m=6, n=6 \quad (3)$$

式中,  $\left(\frac{d\delta^{18}O}{dh}\right)$  为降水  $\delta^{18}O$  值随高程加权平均梯度,  $\left(\frac{d\delta^{18}O}{dh}\right)_i$  为第  $i$  场次降水  $\delta^{18}O$  值随高程的变化梯度,  $\bar{P}_j$  为第  $j$  场次的平均降水量。

经计算可知, 实验流域降水  $\delta^{18}O$  值随高程变化的梯度为  $-0.58\text{‰}/100\text{m}$ , 即海拔每升高 100m,  $\delta^{18}O$  下降  $0.58\text{‰}$ 。

## 4.3 降水 $\delta^{18}O$ 值与温度和空气湿度的关系

降水过程中雨滴的二次蒸发引起降水同位素值发生变化, 控制雨滴发生二次蒸发的因素主要为降水时的温度。降水时温度越高, 蒸发越强烈, 使降水同位素发生富集偏离水汽同位素值就越远, 同时空气湿度就较大; 降水时温度越低, 蒸发越微弱, 使降水同位素组成接近于原水汽组成, 同时空气湿度就较小。研究表明, 降水  $\delta^{18}O$  值与温度存在一定的关系, 但关系不很明显, 这是因为温度是控制水汽形成雨滴而发生分馏的主要因素, 与水汽变为雨滴时  $\delta^{18}O$  值的变化有关系, 而与雨滴的  $\delta^{18}O$  值关系不明显。

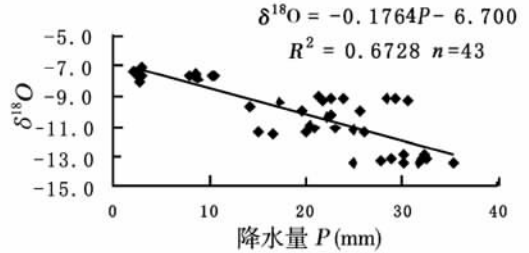


图 5 所有采样点所有场次降水的  $\delta^{18}O$  值与降水量相关关系

Fig. 5 The correlativity between the  $\delta^{18}O$  value and rainfall for all rain events at all sampling sites

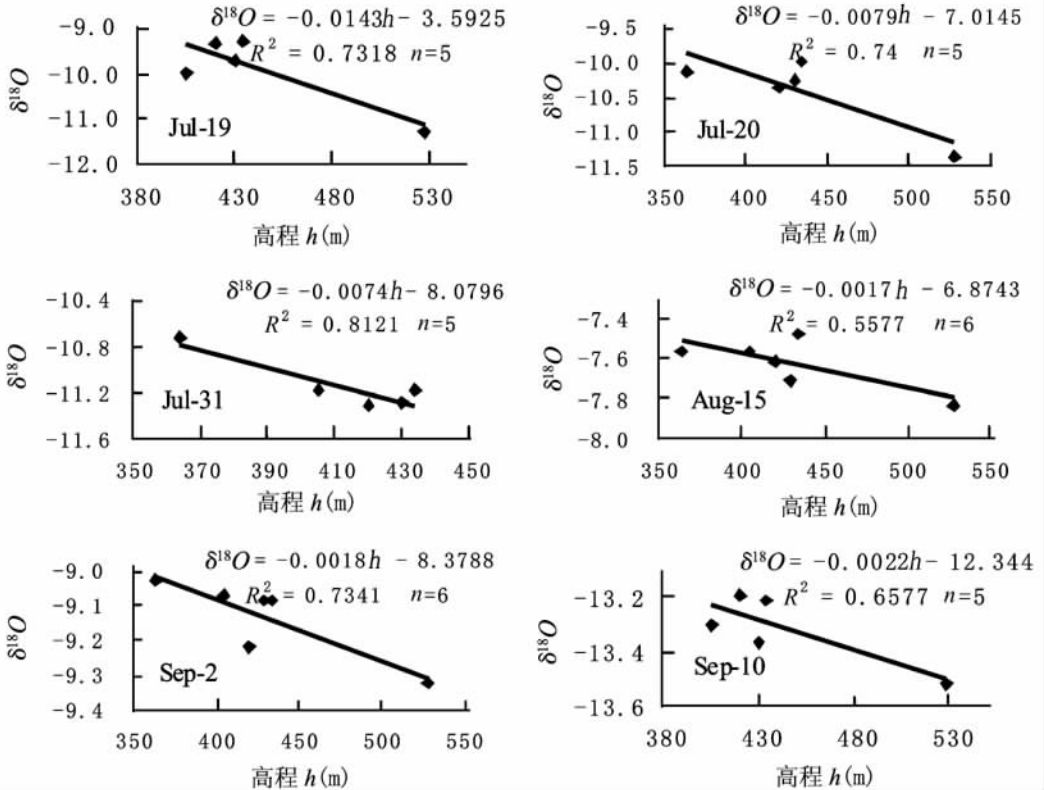
图6 每一场次降水的 $\delta^{18}O$ 值与高程相关关系

Fig. 6 The correlativity of the  $\delta^{18}O$  value and altitude for each precipitation event

对降水 $\delta^{18}O$ 值和降水时的空气湿度进行相关分析(图7)发现:降水的 $\delta^{18}O$ 值与空气湿度存在着较为明显的线性关系:

$$\delta^{18}O = -0.1962H - 26.518 \quad (4)$$

$$R^2 = 0.677 \quad n = 9$$

式中,  $H$  为降水时的平均空气湿度。

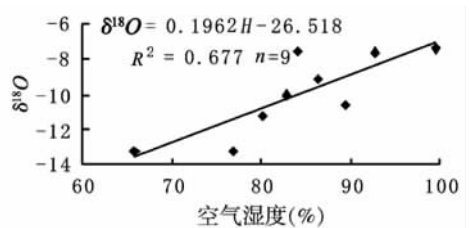
图7 每一场次降水的 $\delta^{18}O$ 值与空气湿度相关关系

Fig. 7 The correlativity of  $\delta^{18}O$  value and humidity for each precipitation event

## 5 降水同位素时间与空间变化规律

### 5.1 降水稳定同位素组成分析

降水对地表径流的形成、对土壤水和地下水的补给是在一定的时间和空间尺度上的平均补给,随着时间尺度的延伸,一定区域的大气降水对土壤水和地下水补给的同位素组成呈现出稳定的值。这个值是以降水量为权重,以每场降水 $\delta^{18}O$ 值求平均值得到的。对所有场次所有采样点的 $\delta^{18}O$ 值加权平均,公式如下:

$$\overline{(\delta^{18}O)}_{\text{总}} = \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m (P_{ij} \cdot (\delta^{18}O)_{ij})}{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m P_{ij}} \quad m=6, n=8 \quad (5)$$

式中,  $\overline{(\delta^{18}O)}_{\text{总}}$  为所有场次所有采样点降水的  $\delta^{18}O$  加权平均值,  $P_{ij}$  为第  $j$  场次第  $i$  点降水量,  $(\delta^{18}O)_{ij}$  为第  $j$  场次第  $i$  点降水  $\delta^{18}O$  值。

分析发现: 所有场次所有采样点降水  $\delta^{18}O$  值的加权平均值为  $-10.011\%$ , 这与 Araguas L 等人<sup>[5]</sup> 研究的世界大气降水  $\delta^{18}O$  分布等值线穿过北京附近的  $\delta^{18}O$  等值线  $\delta^{18}O = -10\%$  十分接近, 与章新平等人<sup>[16]</sup> 研究的我国降水  $\delta^{18}O$  分布等值线穿过北京附近的  $\delta^{18}O$  等值线  $\delta^{18}O = -10\%$  也接近。

## 5.2 稳定环境同位素组成时间序列分析

研究降水  $\delta^{18}O$  在时间序列上的变化, 可以得出降水随时间的变化规律。同一场降水的降水量和降水  $\delta^{18}O$  具有空间差异性, 研究小范围的降水时间分布规律, 必须把不同场次所有采样点的降水同位素组成以降水量作为权重进行加权平均, 不同场次的降水  $\delta^{18}O$  的加权平均值计算公式如下:

$$\overline{(\delta^{18}O)}_j = \frac{\sum_{i=1}^m (P_{ij} \cdot (\delta^{18}O)_{ij})}{\sum_{i=1}^n P_{ij}} \quad m=6 \quad (6)$$

式中,  $\overline{(\delta^{18}O)}_j$  为第  $j$  场次所有采样点降水的  $\delta^{18}O$  加权平均值。

从不同场次降水  $\delta^{18}O$  随时间的变化 (图 8) 可以看到: 场次相距很近的降水同位素组成相当接近, 说明它们属于同一场降水过程中不同场次的降水, 并且后次降水的同位素含量比前次降水的含量要低, 说明相同降水过程中不同场次的降水水汽来源一样。例如 7 月 19 日和 7 月 20 日两个场次的降水属于同一场降水过程, 并且 7 月 20 日场次降水  $\delta^{18}O$  加权平均值小于 7 月 19 日降水

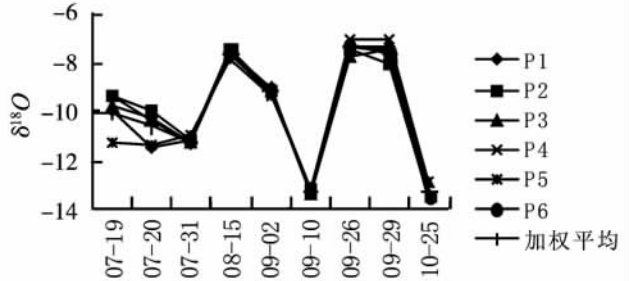


图 8 降水  $\delta^{18}O$  加权平均值随时间的变化

Fig. 8 the fluctuation of powered-average value of  $\delta^{18}O$  in the precipitation

$\delta^{18}O$  加权平均值, 9 月 26 日和 9 月 29 日两个场次的降水也具有相同的结果。从降水时间序列上看, 降水  $\delta^{18}O$  加权平均值波动比较大, 反映了研究区域夏秋季节多变的降水特征。9 月 10 日和 10 月 25 日两个场次降水的  $\delta^{18}O$  加权平均值很负, 是因为 9 月 10 日为夏末季节, 10 月 25 日为秋季, 降水时空气温度较低 (9 月 10 日和 10 月 25 日的日平均气温分别为  $16.9^{\circ}\text{C}$  和  $6.4^{\circ}\text{C}$ ), 降水时二次蒸发微弱, 降水的  $\delta^{18}O$  值接近水汽的  $\delta^{18}O$  值。

## 5.3 稳定同位素组成空间序列分析及水汽来源

结合不同降水过程降水的  $\delta^{18}O$  空间分布, 可以确定出研究区域内降水过程的水汽运移规律: 在空间同一高程面上, 降水中稳定环境同位素的组成是顺着水汽运移方向降低的, 根据空间同一高程面上降水同位素成分分布趋势, 可以判断出水汽运移方向。在空间上确定降水  $\delta^{18}O$  空间分布, 首先把具有相同大气环流形势下的降水场次的降水  $\delta^{18}O$  值以降水量作为权重, 计算出历次降水的  $\delta^{18}O$  加权平均值, 点绘在平面图上, 根据平面图上降水  $\delta^{18}O$  加权平均值的递减变化方向, 确定出降水过程中水汽的运移方向。计算空间不同采样点具有相同降水过程的降水  $\delta^{18}O$  加权平均值公式如下:

$$\overline{(\delta^{18}O)_i} = \frac{\sum_{j=1}^n (P_{ij} \cdot (\delta^{18}O)_{ij})}{\sum_{j=1}^n P_{ij}} \quad n=8 \quad (7)$$

式中,  $\overline{(\delta^{18}O)_i}$  为第  $i$  点所有场次降水的  $\delta^{18}O$  加权平均值。

在高程相差明显的小流域范围内, 降水样的采集往往是在不同的高程处采集到的, 由于高程效应的影响, 往往看不出降水中稳定环境同位素的空间分布规律, 难以确定降水过程中水汽的运移方向。因此, 有必要把在不同高程处采集的降水样中的稳定环境同位素实测比值校正到同一高程处, 才能消除高程影响, 在空间上比较出空间降水  $\delta^{18}O$  分布趋势<sup>[19]</sup>。已知实验流域降水  $\delta^{18}O$  值的垂直变化梯度为  $-0.58\text{‰}/100\text{m}$ , 并且流域内最高点为 P5 点, 可以把其它各点的降水  $\delta^{18}O$  值都校正到 P5 点上再作对比, 校正公式如下:

$$\overline{(\delta^{18}O)_i}' = (-0.58/100) \cdot (h_5 - h_i) \cdot \overline{(\delta^{18}O)_i}' \quad (8)$$

式中,  $\overline{(\delta^{18}O)_i}'$  为经过高程校正后的第  $i$  点所有场次降水的  $\delta^{18}O$  加权平均值,  $h_5$  为 P5 点高程 (m),  $h_i$  为  $P_i$  点高程 (m)。

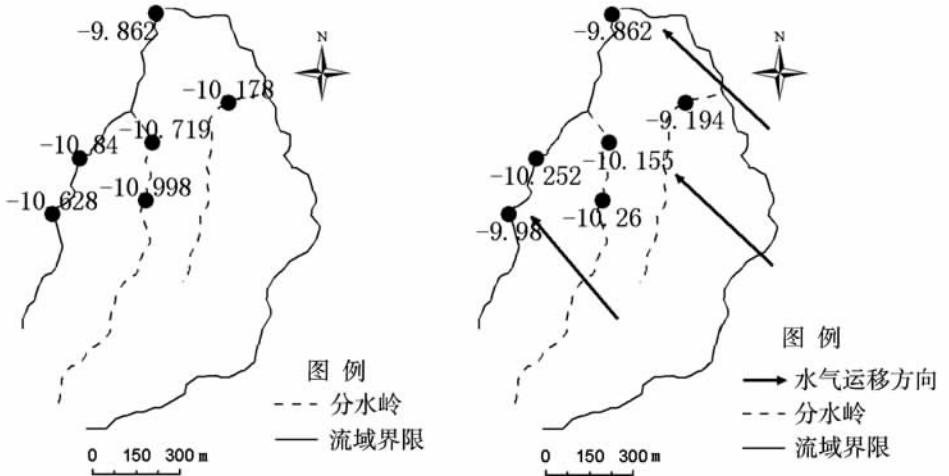


图 9 高程校正前(左)后(右)所有采样点降水  $\delta^{18}O$  加权平均值空间分布及水汽运移方向

Fig. 9 The spatial distribution of powered-average value of  $\delta^{18}O$  in the precipitation before (the left fig) and after (the right fig) the altitude-calibration and the transportation direction of water vapor

高程校正前看不出降水  $\delta^{18}O$  值空间分布规律 (图 9 左); 经高程校正后 (图 9 右), 可以看出  $\delta^{18}O$  值的空间分布总体趋势是由东南向西北方向降低的, 根据水汽运移时降水中重环境同位素贫化原理, 沿着  $\delta^{18}O$  值空间分布降低方向即是水汽运移方向。可以看出, 研究区 6 月到 10 月的夏秋季节, 降水的水汽来源方向为由东南向西北方向, 这与前人研究的我国夏秋季节降水主要受东南季风影响<sup>[22, 23]</sup>, 夏秋季的降水主要处于太平洋副高控制的大气环流形势之下的结果一致。

## 6 结论

(1) 实验流域降水氧同位素呈现明显的降水量效应: 不同场次的降水同位素含量有明显的差异, 降水中同位素含量与降水量呈负相关关系; 同一场次降水过程中, 不同采样



点的降水量不相同,相应地降水中同位素含量也有差异,但在实验流域范围内,同一场次不同点的降水中的同位素值差异很小。

(2) 实验流域降水氧同位素呈现明显的高程效应:实验得出流域内降水  $\delta^{18}\text{O}$  值随高程变化的梯度为  $-0.58\text{‰}/100\text{m}$ ;降水时的温度是控制降水二次蒸发的主要因素,二次蒸发引起降水中重同位素富集,同时引起空气温度升高,因此降水  $\delta^{18}\text{O}$  值与空气湿度之间存在着一定的相关关系。

(3) 研究区 6 月到 10 月的夏秋季节降水  $\delta^{18}\text{O}$  值随时间波动较大,说明降水有多变的特征;降水的水汽来源方向为东南向西北方向,说明本地区夏秋季的降水主要处于太平洋副高控制的大气环流形势之下。对不同场次和不同采样点降水  $\delta^{18}\text{O}$  值以降雨量为权重进行加权平均,可以分析出降水  $\delta^{18}\text{O}$  值的时间和空间分布规律,分析降水的时间和空间会分布规律。

致谢:野外实验及数据分析得到了刘彩堂老师、李林老师帮助,在此向他们致以深深的感谢。

#### 参考文献:

- [1] 章新平,姚檀栋,等. 乌鲁木齐河流域不同水体中的氧稳定同位素. 水科学进展, 2003, 14(1): 51~56.
- [2] Lee S, Shimada J, Kayane I. Stable isotopes in precipitation in the volcanic island of Cheju, Korea. Hydrol. Process, 1999, 13: 113~121.
- [3] Clark D, Fritz P. Environmental Isotopes in Hydrology. New York: Lewis, 1997. 64~78.
- [4] Kendall C, McDonnell J J. Isotope Tracers in Catchment Hydrology, 1998, 1~2.
- [5] Araguas A L, Froehlich K, Rozanski K. Deuterium and oxygen-18 isotope composition of precipitation and atmospheric moisture. Hydrol. Process, 2000, 14: 1341~1355.
- [6] Welker J M. Isotopic ( $\delta^{18}\text{O}$ ) characteristics of weekly precipitation collected across the USA: an initial analysis with application to water source studies. Hydrol. Process, 2000, 14: 1449~1464.
- [7] Hoeg S, Uhlenbrook S, Leibundgut C. Hydrograph separation in a mountainous catchment—combining hydrochemical and isotopic tracers. Hydrol. Process, 2000, 14: 1199~1216.
- [8] Kendall C, McDonnell J J. Isotope Tracers in Catchment Hydrology. Amsterdam: Elsevier. 1998, 137~163.
- [9] Soulsby C, Malcolm R. Isotope hydrology of the Allt a' Mharcaidh catchment, Cairngorms, Schotland; implications for hydrological pathways and residence times. Hydrol. Process, 2000, 14: 747~762.
- [10] Rains M C and Mount J F. Origin of Shallow Ground Water in an Alluvial Aquifer as Determined by Isotopic and Chemical Procedures. Ground Water, 2002, 40(5): 552~563.
- [11] Williams A E and Rodoni D P. Regional isotope effects and application to hydrologic investigation in southwestern California. Wat. Resour. Res., 1997, 33(7): 1721~1729.
- [12] Scholl M A, Ingebritsen S E, Janik C J. Use of precipitation and groundwater isotopes to interpret regional hydrology on a tropical volcanic island: Kilauea volcano area, Hawaii. Wat. Resour. Res, 1996, 32(12): 3525~3537.
- [13] 章新平,姚檀栋. 我国降水的  $\delta^{18}\text{O}$  的分布特点. 地理学报, 1998, 53(4): 356~364.
- [14] 章新平,中尾正义. 青藏高原及其毗邻地区降水中稳定同位素成分的时空变化. 中国科学, 2001, 31(5): 353~361.
- [15] 高迎春,姚治君,等. 密云水库入库径流变化趋势及动因分析. 地理科学进展, 2002, 21(6): 546~553.
- [16] 宋献方,夏军,等. 应用环境同位素技术研究华北典型流域水循环机理的展望. 地理学报. 2002, 21(6): 527~536
- [17] 王纲胜,夏军,等. 潮河流域时变增益分布式水循环模型研究. 地理科学进展, 2002, 21(6): 574~581.
- [18] Gallaire R, Fontes J C, Zuppi G M. Isotopic characterization and origin of rainwater on the air massif (Niger);

Eilon M. Adar, Application of Tracers in Arid Zone Hydrology, 1994, 293~302.

- [19] Jones I C, Banner J L, John D H. Estimating recharge in a tropical karst aquifer. *Wat. Resour. Res.*, 2000, 36 (5): 1289~1299.
- [20] Tang C Y, Shizuo S, Isao M. Topographical effects on the distributions of rainfall and  $^{18}\text{O}$  distributions: A case in Miyake Island, Japan. *Hydrol. Process.*, 1998, 12: 673~682.
- [21] 章新平. 我国降水中  $\delta^{18}\text{O}$  的分布特点. *地理学报*, 1998, 53(4): 356~364.
- [22] 许孟英. 夏季风期间我国候降水的分析. *地理研究*, 1983, 2(3): 54~62.
- [23] 郭其蕴. 中国季风降水与赤道东太平洋海温的关系. *地理研究*, 1990, 9(4): 49~59.

## A study on oxygen isotope in precipitation of Dongtaigou basin in Chao and Bai river basin

LIU Xiang-chao<sup>1</sup>, SONG Xian-fang<sup>1</sup>, XIA Jun<sup>1,2</sup>,  
YU Jing-jie<sup>1</sup>, YANG Cong<sup>1</sup>, LI Fa-dong<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes,  
Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;  
2. Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** By applying the isotopic technique on the water circulation study arisen in the middle of the 20th century, which is a new technology through the study on macroscopic changes of water molecules in the water circulation to achieve the combining study of macroscopic and microscopic water circulation mechanism. It is of very interest theoretically and practically for the study on the water resources characteristics in the basin to investigate the temporal and spatial variable rules of isotopes in the precipitation and the correlativity of the precipitation elements. Because stable isotopic technologies are being used all over the world to provide better links between the water cycle elements and the water resources characteristics. Much work has been done world-wide on  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta\text{D}$  in rainfall, the best famous work is the precipitation sampling and stable isotope analyzing contribution of IAEA, which offers valid theory basis and practicing experiences to isotopic hydrology study. This paper takes Dongtaigou experimental basin at Tanghekou town Huairou district Beijing city in North China as study object, analyses the spatial and temporal change of the oxygen isotope in the precipitation from July to August in 2003, and then illustrates the correlativity between oxygen isotope ratio  $\delta^{18}\text{O}$  and rainfall, and the correlativity between oxygen isotope ratio  $\delta^{18}\text{O}$  and altitude. At last, this study evaluates the influence and effect of rainfall and altitude factors on the precipitation processes, illuminates the spatial and temporal distribution of  $\delta^{18}\text{O}$  in the precipitation during the sampling period, and offer basis for the later on study of water cycle in basin in the study area. This study draw some conclusions as follows: the  $\delta^{18}\text{O}$  spatial gradient in the basin is 0.58‰/100m, the direction of the water vapor moving in the study period of time is from the south-east to the north-west.

**Key words:** environmental isotope; rainfall effect; altitude effect; water vapor source