

# 湖北宜昌西陵峡地区大气降雨氢氧同位素特征分析

武亚遵<sup>1</sup>, 万军伟<sup>1</sup>, 林云<sup>2</sup>

(1. 中国地质大学环境学院, 武汉 430074; 2. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041)

**摘要:** 通过测定湖北宜昌西陵峡地区 2009 年 5 月至 10 月降雨样品的氢氧同位素组成, 分析了该区降雨的氢氧同位素特征及其与降雨量的关系, 并与区内 2007 年同期的降雨同位素资料进行了对比。结果表明, 该区大气降雨线公式为:  $\delta(D) = 8.45\delta(^{18}O) + 11.55$ , 与全球降雨线和全国降雨线公式相比, 斜率和截距均偏大, 这与凝结物在未饱和大气中降落时受到非平衡蒸发的影响、重同位素的快速富集有关; 区内降雨的氘盈余  $d$  值平均值较全球的略低,  $d$  值波动范围较小且比较集中, 说明该区大气降雨的水蒸汽在源区的蒸发速率较慢, 且降雨的水蒸汽来源较单一、降雨条件不甚复杂。次降雨同位素的降雨量效应不明显, 但持续时间较长降雨的同位素比率与降雨量呈显著的负相关关系。与 2007 年同期降雨相比, 2009 年降雨的  $\delta(^{18}O)$  和  $\delta(D)$  均出现了富集, 但  $d$  值平均值偏小, 表明 2009 年降雨的水蒸汽来源路径较短, 且水蒸汽来源地湿度较大, 这可能与水库水位上升引起的水域面积变大、水面蒸发加强、空气湿度变大等局地气候环境变化有关。

**关键词:** 大气降雨; 氢氧同位素; 宜昌西陵峡地区

**中图分类号:** P597; P426.61

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-7849(2011)03-0093-05

环境同位素技术是研究流域水循环的一种有效手段, 通过分析水循环中不同组分的同位素特征, 可以查明区域水分之间的转换关系, 有助于水资源的管理和可持续利用。大气降雨作为水循环过程中的一个重要环节, 是地表水、地下水等水体系统的重要补给来源, 其稳定同位素比率的大小与产生降水的气象过程、水蒸汽来源区的初始状态以及水蒸汽输送方式等密切相关<sup>[1-2]</sup>, 同时降水中的氢、氧同位素 [ $\delta(D)$  和  $\delta(^{18}O)$ ] 组成又记录着重要的气候、环境信息, 是运用冰芯、石笋等稳定同位素来重建古气候极其重要的依据<sup>[3-5]</sup>。1961 年全球降水同位素监测网站的建立, 为研究全球及区域的水循环机制提供了宝贵的同位素资料。从 20 世纪 70 年代起, 我国一些学者开始从区域尺度上对降雨同位素的环境效应进行分析研究, 并取得了一些有意义的成果<sup>[6-9]</sup>。如在中低纬度海洋及其海岸、海岛或季风区, 降水中稳定同位素具有显著的降水量效应, 即降水中的稳定同位素比率与降水量之间存在显著的负相关关系<sup>[6-7]</sup>; 而在中高纬度大陆内陆区, 无论是在时间尺度上还是在空间尺度上, 降水中稳定同位素都具有显著的温度效应, 即降水中的稳定同位素比率与温度都存在显著正相关关系<sup>[8-9]</sup>。近年来, 国内有不少学者对青藏高原区<sup>[6]</sup>、东部沿海区<sup>[7]</sup>、西北内陆

区<sup>[8-9]</sup>、西南季风区<sup>[10-11]</sup>以及长江中上游及其源区<sup>[12-13]</sup>等区域的现代大气降水稳定同位素特征及其影响因素、水蒸汽来源等进行了深入的探讨, 而对水蒸汽交汇区、流域过渡区的相关研究却涉及甚少。宜昌西陵峡地区属长江中游与上游的过渡区, 该区气候复杂多变, 三峡大坝和葛洲坝的建立, 使区域小气候环境发生了改变, 区内气候更加复杂, 气候环境的变化不仅影响着整个流域, 而且影响着坝区的稳定性。因此, 笔者将以宜昌西陵峡地区降雨的氢氧稳定同位素为研究对象, 分析其组分特征和影响因素, 期为研究该区的水循环特征以及环境的变迁演化提供依据。

## 1 研究区概况

研究区位于长江流域秭归至宜昌段的南岸(纬度  $30^{\circ}40' \sim 30^{\circ}50'$ , 经度  $110^{\circ}12' \sim 111^{\circ}15'$ ), 属长江中游与上游的过渡区, 同时该区又处在鄂西山地向江汉平原过渡地带, 地势自西向东倾斜。区内气候属亚热带季风气候, 年平均气温为  $16.8^{\circ}\text{C}$ , 多年平均降雨量为  $1\,166.9\text{ mm}$ , 降雨季节变化较大, 主要集中在 7—9 月份, 占全年降雨总量的 50% 以上。区内雨季的起迄、雨带的移动以及雨量的异常等都与季风环流和季风活动密切相关。

收稿日期: 2011-01-09 编辑: 刘江霞

作者简介: 武亚遵(1981—)男, 现正攻读水文学及水资源专业博士学位, 主要从事水文地质方面的学习和研究。E-mail: wuyazun@163.com

通信作者: 万军伟(1964—)男, 教授, 博士生导师, 主要从事工程水文地质、同位素水文地质研究工作。E-mail: wanjw@cug.edu.cn

## 2 样品采集与测定

采样地点选在研究区内一座高约10 m的楼顶,该处四周开阔,且周围无污染源。采样时间从2009年5月到10月,按时间将每次降雨进行收集。收集降雨时,记录降雨时的气温和降雨的起止时间,雨水盛满50 cm<sup>3</sup>的塑料瓶中加盖并密封,按编号放置低温处保存。样品的稳定同位素采用DLT-400型便携式液态水同位素分析仪进行测试,同位素氘和<sup>18</sup>O含量分别用 $\delta(D)$ 、 $\delta(^{18}O)$ 表示,测定结果以相对于VSMOW标准的千分差表示,测定精度分别为 $\pm 0.6\text{‰}$ 和 $\pm 0.2\text{‰}$ 。

## 3 大气降雨的同位素特征

### 3.1 大气降雨的氢氧同位素特征

研究区2009年5至10月大气降雨中 $\delta(D)$ 和 $\delta(^{18}O)$ 值的变化范围分别为 $-9.85\text{‰} \sim -82.08\text{‰}$ 和 $-2.64\text{‰} \sim -11.12\text{‰}$ ,平均值分别为 $-47.56\text{‰}$ 和 $-7.00\text{‰}$ (图1)。与全球大气降雨中 $\delta(D)$ 和 $\delta(^{18}O)$ 的平均值 [ $\delta(D) = -22\text{‰}$ ,  $\delta(^{18}O) = -4\text{‰}$ ]相比,绝大多数样品的 $\delta(D)$ 和 $\delta(^{18}O)$ 都严重亏损。而与全国降雨中的平均值 [ $\delta(D) = -50\text{‰}$ ,  $\delta(^{18}O) = -8\text{‰}$ ]相比,除7月份亏损外,其他各月都有盈

余。8月3日亏损最大,差值分别为 $-32.08\text{‰}$ 和 $-3.12\text{‰}$ 。这可能与研究区所处的地理位置以及水蒸汽团来源和输送方式等因素有关。研究区地处中纬度亚热带季风气候区,区内水蒸汽团主要有大洋水蒸汽团和区域水蒸汽团,夏季蒸发量较大,破坏了同位素之间的平衡关系,从而使 $\delta(D)$ 、 $\delta(^{18}O)$ 值降低,水蒸汽从源地向研究区运移的过程中可能形成降雨, $\delta(D)$ 、 $\delta(^{18}O)$ 值从水蒸汽团中再次分馏,残留于水汽团中的 $\delta(D)$ 、 $\delta(^{18}O)$ 值再次减小,到达研究区的降雨中 $\delta(D)$ 、 $\delta(^{18}O)$ 值就会严重亏损。同时夏季对流较旺盛,云层不稳定,同时加之区内山区、丘陵相间,海拔变化较大,易形成区域性降雨,因此到达取样点,降雨中的 $\delta(D)$ 、 $\delta(^{18}O)$ 值就严重亏损<sup>[14]</sup>;此外受长江水域的影响,造成了外来水蒸汽中携带的 $\delta(D)$ 、 $\delta(^{18}O)$ 值发生偏移,最终导致降雨中 $\delta$ 值的偏离。比较 $\delta(D)$ 和 $\delta(^{18}O)$ 值的变化范围可发现,研究区 $\delta(^{18}O)$ 值的变化幅度较小,为 $-8.48\text{‰}$ ;而 $\delta(D)$ 值的变化幅度较大,可达到 $-72.23\text{‰}$ ,这种现象主要是由二者不同的同位素性质导致的。D和<sup>1</sup>H的相对原子质量相差50%,为所有同位素中相差最大的,其分馏作用要比氧同位素强得多,因此其在降雨过程中对环境变化的响应更加灵敏一些。

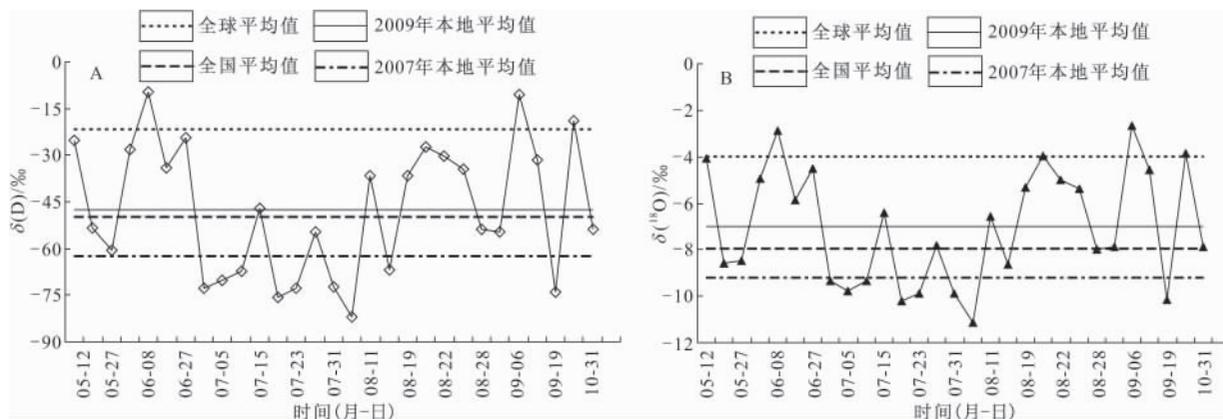


图1 2009年研究区大气降雨氢氧同位素变化特征

Fig. 1 Variation characteristics of hydrogen and oxygen isotopes for precipitation in 2009

大气降雨中 $\delta(D)$ 和 $\delta(^{18}O)$ 之间的关系称为大气降雨线,其对研究水循环过程中稳定同位素比率的变化具有重要意义。由于某地区的大气降雨线可以较好地反映该区自然地理、气象等条件,因此在解决气候变迁及水蒸汽来源等方面具有明显优势<sup>[15]</sup>。1961年Craig<sup>[16]</sup>首先提出的全球降雨线公式为: $\delta(D) = 8.0\delta(^{18}O) + 10$ 。随后国际原子能委员会根据全球114个站点的同位素资料对其进行了修正,得出的全球降雨线公式为: $\delta(D) = 8.17\delta(^{18}O) + 10.56$ 。郑淑蕙等<sup>[1]</sup>根据107个大气降雨的稳定同

位素值得出的我国的降雨线方程为: $\delta(D) = 7.9\delta(^{18}O) + 8.2$ 。根据本次实测数据,得到宜昌西陵峡地区的降雨线方程为: $\delta(D) = 8.45\delta(^{18}O) + 11.55$  ( $r = 0.988$ ,  $n = 29$ ) (图2)。与全球大气降雨线和全国降雨线方程相比,该区降雨线无论是斜率还是截距均偏大,这与凝结物在未饱和大气中降落时受到非平衡蒸发的影响、重同位素的快速富集有关<sup>[17]</sup>。

### 3.2 大气降雨的氘盈余

区域大气降雨线与全球大气降雨线在斜率和截

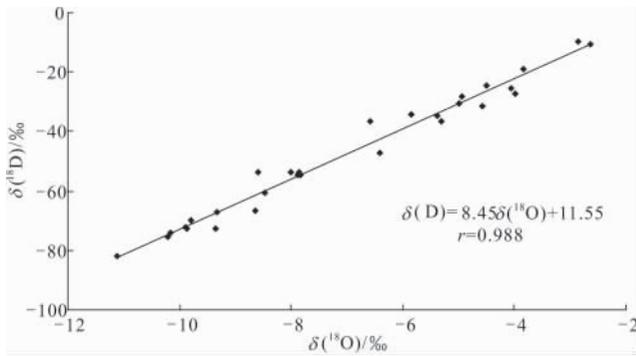


图 2 2009 年宜昌西陵峡地区大气降雨线

Fig. 2 Local meteoric water line in Xiling Gorge region of Yichang in 2009

距上的偏移,反映了区域大气降雨形成时水蒸汽来源及运移过程中受环境变化影响所导致的气、液两相同位素分馏不平衡程度的差异<sup>[18]</sup>。为量化这一差异,Dansgaard<sup>[19]</sup>提出了氘盈余( $d$ )的概念,定义为: $d = \delta(D) - 8\delta(^{18}O)$ 。 $d$ 值不仅受水蒸汽团源区湿度、温度的影响,还受云下雨滴再蒸发分馏作用的影响<sup>[20-22]</sup>。全球平均 $d$ 值约为10‰,如果某一区域的蒸发速率越大,则该区的 $d$ 值也会越大。研究区2009年降雨中 $d$ 值为2.18‰~16.16‰,波动幅度较小(图3-a)。其中 $d$ 值最小为2.18‰,出现在6月29日降水事件中,对应降水量为82.1 mm,降水持续了将近2 d,降水过程中的平均温度为20.7℃,

这反映出在该时段内研究区空气比较湿润。在相对湿润气候条件下,动力分馏作用较弱,形成的降水中 $d$ 值低,而在相对干燥的气候条件下,水分蒸发的动力分馏作用也较强,形成的降水 $d$ 值也较高。

研究区2009年 $d$ 值平均值为8.42‰,小于全球的平均值,其中在29个样品中仅有9个样品的 $d$ 值超过10‰,但幅度都不大。总体而言,该区降雨的 $d$ 值波动范围较小且比较集中,这说明该地区大气降雨的水蒸汽在源区的蒸发速率较慢,降雨的水蒸汽来源较单一且降雨条件不甚复杂。区内各月降雨 $d$ 值的平均值变化存在着一定的差异,5、6和10月份的 $d$ 值平均值较高,大于或接近10‰,这可能与在此期间空气湿度相对较小、降雨过程中受到的非平衡蒸发影响较大有关;7月至9月份的 $d$ 值平均值均较低,平均为7.47‰(图3-b)。此期间区内降雨增多,降雨量明显增加,空气湿度也随之增大, $d$ 值减小。

### 3.3 大气降雨同位素与降雨量的关系

在高纬度地区影响降雨中稳定同位素的主要因素是温度,在低纬度地区影响降雨中稳定同位素的主要因素是降雨量,而在中纬度地区温度和降雨量均影响同位素比率的变化。研究区次降雨的氢氧同位素比率与降雨量( $p$ )之间的关系不明显(图4-a),但对于同一水蒸汽来源条件下持续时间较长(大于1 d)的降雨来说,如5月12-13日、5月15-16日、6月29-30日、9月8-9日以及9月19-20日等

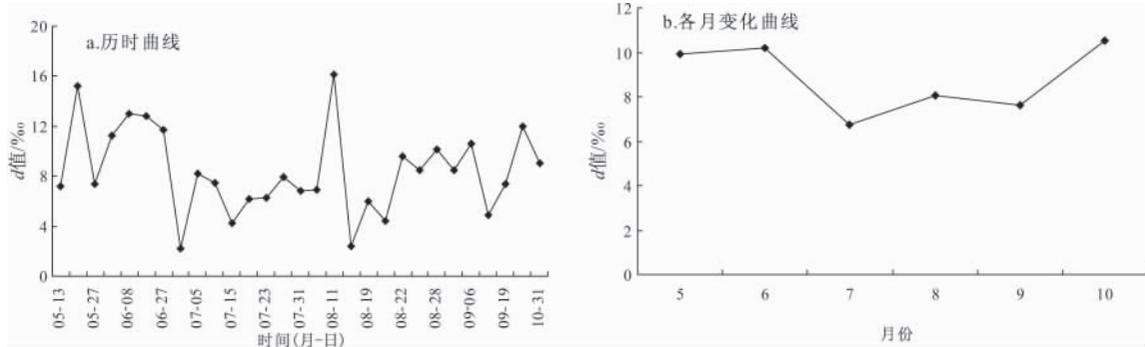


图 3 2009 年氘盈余随时间的变化

Fig. 3 Variation of deuterium excess value in 2009

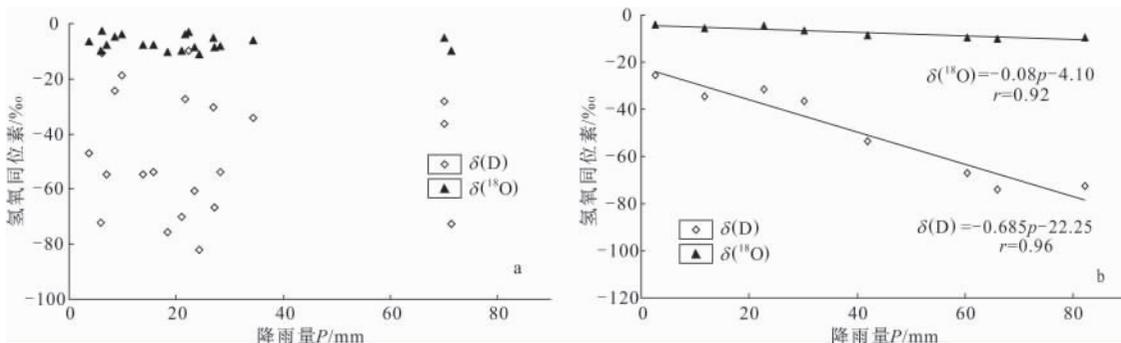


图 4  $\delta(D)$ 、 $\delta(^{18}O)$ 与降雨量的关系(a. 次降雨; b. 持续时间大于1 d时的降雨)

Fig. 4 Relationship between the isotope composition and precipitation amount

降雨事件,降雨量对同位素的影响较为显著,随着降雨量的增大 $\delta(D)$ 和 $\delta(^{18}O)$ 逐渐减小,氢氧同位素比率与降雨量之间呈现出显著的负相关关系,且相关系数 $r$ 均在0.92以上(图4-b)。

### 3.4 三峡水库水位变化对降雨同位素的影响

据赵家成等<sup>[23]</sup>的研究成果,2007年宜昌地区同期降雨的 $\delta(D)$ 和 $\delta(^{18}O)$ 值的变化范围分别为 $-20.8‰ \sim -127.43‰$ 和 $-4.54‰ \sim -16.74‰$ ,平均值分别为 $-62.81‰$ 和 $-9.21‰$ ,大气降雨线方程为 $\delta(D) = 8.54\delta(^{18}O) + 15.71$ , $d$ 值的变化范围为 $0.78‰ \sim 22.32‰$ ,平均值为 $10.75‰$ 。将其与2009年进行对比,发现2009年降雨的氢氧同位素呈现以下特点:①降雨的 $\delta(D)$ 和 $\delta(^{18}O)$ 值均出现富集现象,显示2009年区内降雨的水蒸汽来源较2007年的略近一些,由于随着水蒸汽输送沿程的增加,降雨中重同位素逐渐贫化,因此,降雨的水蒸汽来源越远,降雨中的氢氧同位素值就越轻;②大气降雨线的斜率和截距均偏小,表明2009年区内的降雨在降落过程中经历了更为强烈的蒸发过程;③ $d$ 值的变化范围小于2007年的,且平均值也偏小,这表明2009年降雨的水蒸汽来源和降雨条件与2007年相比较单一,且水蒸汽来源地的空气湿度要大于2007年。

以上这些变化特征可能与三峡水库水位变化有关。2007年三峡水库水位为150m左右,至2009年水位上升到170m附近,水库水位的上升使得水域面积增大,水面蒸发加剧,空气湿度增大,在一定程度上改变了局地的气候环境,加之区内山区、丘陵相间,海拔变化较大,极易形成局地性降雨,从而使区内的降雨多由该区的水蒸汽形成,水蒸汽运移的路径变短,因此降雨的同位素值变重。

## 4 结 论

(1) 研究区2009年大气降雨中 $\delta(^{18}O)$ 值为 $-2.64‰ \sim -11.12‰$ ,平均值为 $-7.00‰$ ;  $\delta(D)$ 值为 $-9.85‰ \sim -82.08‰$ ,平均值为 $-47.56‰$ 。与全球及国内降雨中的 $\delta(^{18}O)$ 和 $\delta(D)$ 值相比,除个别处于盈余外,绝大多数处于亏损状态。

(2) 研究区大气降雨线公式为: $\delta(D) = 8.45\delta(^{18}O) + 11.55$  ( $r=0.988$ ,  $n=29$ ),与全球降雨线和全国降雨线公式相比,无论是斜率还是截距均偏大,这与凝结物在未饱和大气中降落时受到非平衡蒸发的影响、重同位素的快速富集有关。

(3) 降雨中的氕盈余( $d$ 值)为 $2.18‰ \sim 16.16‰$ ,平均值为 $8.42‰$ ,小于全球的 $d$ 值平均值, $d$ 值波动范围较小且比较集中,说明该区大气降雨的水蒸汽在源区的蒸发速率较慢,水蒸汽来源较

单一且降雨条件不甚复杂。同时由于受空气湿度变化的影响,各月的 $d$ 值呈现出不同的变化特征。

(4) 次降雨的氢氧同位素比率与降雨量关系不明显,但同一水蒸汽来源条件下持续时间较长的降雨的 $\delta(^{18}O)$ 、 $\delta(D)$ 值与降雨量呈现出显著负相关关系。

(5) 与2007年同期资料相比,2009年降雨的 $\delta(^{18}O)$ 和 $\delta(D)$ 均出现了富集,但 $d$ 值平均值偏小,表明2009年降雨的水蒸汽来源路径较短,且水蒸汽来源地湿度较大,这可能与水库水位上升引起的水域面积变大、水面蒸发加强、空气湿度变大等局地气候环境变化有关。

### 参考文献:

- [1] 郑淑慧,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,1983,28(13):801-806.
- [2] Schmidt G A, Hoffmann G, Shindell D T, et al. Modeling atmospheric stable water isotopes and the potential for constraining cloud processes and stratosphere-troposphere water exchange[J]. Journal of Geophysical Research, 2005, 110(21): 21314.
- [3] 田立德,姚檀栋,余武生,等.青藏高原水汽输送与冰芯中稳定同位素记录[J].第四纪研究,2006,26(2):145-152.
- [4] Tian L, Yao T, Schuster P, et al. Oxygen-18 concentrations in recent precipitation and ice cores on the Tibetan Plateau[J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108(9): 4293.
- [5] 杨勋林,张平中,陈发虎,等.近50a来青藏高原东部高海拔洞穴现代石笋氧同位素组成及其含义[J].科学通报,2007,52(6):698-706.
- [6] 姚檀栋,周行,杨晓新.印度季风水汽对青藏高原降水和河水中 $\delta^{18}O$ 高程递减率的影响[J].科学通报,2009,54(15):2124-2130.
- [7] 陈锦芳,曹建平,黄奕普.厦门沿岸地区大气降水中氢氧稳定同位素组成及其影响因素[J].海洋学研究,2010,28(1):11-17.
- [8] Liu Jianrong, Song Xianfang, Yuan Guofu, et al. Isotopic composition of precipitation over Arid Northwestern China and its implications for the water vapor origin[J]. Journal of Geographical Sciences, 2009, 19(2): 164-174.
- [9] 姚檀栋,孙维贞,蒲健辰,等.内陆河流域系统降水中的稳定同位素[J].冰川冻土,2000,22(1):15-22.
- [10] 韩庆之,曾克峰,梁杏,等.川西南雷波地区降水的D和 $^{18}O$ 同位素研究[J].地质科技情报,1998,17(02):106-110.
- [11] 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,2006,36(9):850-859.
- [12] 章新平,姚檀栋,中尾正义,等.青藏高原及其毗邻地区降水中稳定同位素成分的经向变化[J].冰川冻土,2002,24(3):245-253.
- [13] 任东兴.基于环境同位素的长江源典型多年冻土小流域水循环规律研究[D].兰州:兰州大学,2010.
- [14] 章新平,姚檀栋.影响青藏高原的天气系统与降水中氧同位素的关系[J].冰川冻土,1995,17(2):125-131.
- [15] 刘鑫,宋献方,夏军,等.黄土高原盆巴河流域降水氢氧同位素特征及水汽来源初探[J].资源科学,2007,29(3):59-66.

- [16] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters [J]. Science See Saiensu, 1961, 133.
- [17] 章新平, 姚檀栋. 青藏高原东北地区现代降水中  $\delta D$  与  $\delta^{18}O$  的关系研究[J]. 冰川冻土, 1996, 18(4): 360-365.
- [18] 尹观, 倪师军, 张其春. 氘过量参数及其水文地质学意义[J]. 成都理工学院学报, 2001, 28(3): 251-254.
- [19] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation [J]. Tellus, 1964, 16(4): 436-468.
- [20] Lide T, Tandong Y, White J et al. Westerly moisture transport to the middle of Himalayas revealed from the high deuterium excess [J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(10): 1026-1030.
- [21] Gammons C, Poulson S, Pellicori D, et al. The hydrogen and oxygen isotopic composition of precipitation, evaporated mine water, and river water in Montana, USA [J]. Journal of Hydrology, 2006, 328(1/2): 319-330.
- [22] 甘义群, 李小倩, 周爱国, 等. 黑河流域地下水氘过量参数特征[J]. 地质科技情报, 2008, 27(2): 85-90.
- [23] 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): 526-531.

## Characteristics of Hydrogen and Oxygen Isotopes for Precipitation in Xiling Gorge Region of Yichang, Hubei Province

WU Ya-zun<sup>1</sup>, WAN Jun-wei<sup>1</sup>, LIN Yun<sup>2</sup>

(1. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

2. Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** Based on the stable isotope analysis of precipitation from May to October in 2009 in Xiling Gorge region of Yichang, characteristics of hydrogen and oxygen isotopes for precipitation were analyzed, and compared to materials of hydrogen and oxygen isotopes for precipitation in 2007. The results show that: the local meteoric water line is fitted as  $\delta D = 8.45\delta^{18}O + 11.55$ . Its slope and intercept are higher than those of global meteoric water line and Chinese meteoric water line, which are related to non-equilibrium evaporation and rapid enrichment of heavy isotopes of condensation objects in the unsaturated atmosphere. The average of  $d$  values for precipitation is lower than that of the globe, and it suggests that the evaporation rate is slow, and vapor source is single, and condition for precipitation is not complicated at the vapor source area. The precipitation amounts have no significant effect on the isotopic compositions of individual precipitation events, but have significant effect on long-term precipitation events. Compared to 2007, precipitation in 2009 have enrichment of  $\delta^{18}O$  and  $\delta D$ , but lower average of  $d$  value, and those phenomena suggest that the vapor source path for precipitation is short and the humidity is large in vapor source areas in 2009, and the phenomena are caused by the circumstance altering in Three Gorge Reservoir after reservoir filling.

**Key words:** precipitation; hydrogen and oxygen isotopes; Xiling Gorge region of Yichang