

华北地区大气降水稳定同位素特征与水汽来源

邓文平, 余新晓, 贾国栋

北京林业大学 教育部水土保持与荒漠化防治重点实验室, 北京 100083

摘要: 选取华北地区的包头, 石家庄, 天津, 太原 IAEA/WMO/GNIP 大气降水的氢氧同位素组成的资料, 分析了华北地区降水稳定同位素的时空分布特征及其影响因素。研究表明: 华北地区降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 值都表现出明显的“夏高冬低”的季风气候特征, 夏季表现雨量效应, 冬季温度效应明显; 华北各地区降水线方程与全国及全球降水线相比, 斜率和截距都偏小, 揭示了华北地区降水是在非瑞利条件下进行的, 并且除天津外, 其他地区稳定同位素特征还受到降水过程中局地水汽循环的影响; d 值总体表现出冬高夏低的季节变化特征, 说明了冬季风和夏季风期间降水的水源区蒸发条件不同。

关键词: 大气降水; 同位素; 华北地区; 环境效应

中图分类号: P597 文献标识码: A 文章编号: 1007-2802(2012)05-0489-06

Sources and Stable Isotope Characteristics of Precipitation in North China

DENG Wen-ping, YU Xin-xiao, JIA Guo-dong

*College of Soil and Water Conservation and Desertification Combating, Ministry of Education,
Beijing Forestry University, Beijing 100083, China*

Abstract: Hydrogen (H) and Oxygen (O) stable isotope data of precipitation water in the north China area, which were collected at Baotou, Tianjin, Shijiazhuang and Taiyuan by IAEA/WMO/GNIP, were compiled to analyze their temporal and spatial variations and to trace their controlling factors. The results indicate that, the values of $\delta^{18}\text{O}$ in north China precipitation are high in the half year of summer and low in the half year of winter, showing the significant monsoon climate precipitation characteristics of presenting precipitation amount effect during the half year of summer while presenting temperature effect during the half year of winter. The observed slopes and the intercepts of meteoric water lines in this study are smaller than those of averaged meteoric water lines for overall China or the world indicates that isotope fractionations in north China precipitation does not follow the Rayleigh fractionation; the values of deuterium are high in the half year of winter and low in the half year of summer, this seasonal characteristics implies different evaporation conditions at their vapor sources.

Key words: precipitation; stable isotope; North China; environmental effect

气候是人类及一切生物赖以生存的重要条件。气候变化影响着工农业生产及人民生活, 同时人类活动对气候变化也有重要影响。大气降水作为气候变化中一个重要的气象要素在各种时空尺度下的变化一直受到气象界的极大关注^[1]。作为输入项的大气降水, 是陆地水资源的根本来源。因此, 要了解当今气候的变化原因, 必须了解对降水的变化特征和趋势^[2]。降水稳定同位素的丰度与降水形成的气象条件以及水汽源区的初始状态存在密切的联系。随着气外环境的变化, 大气降水中氘(D)和氧-18(^{18}O)

也会随之变化^[3~5]。因此降水中稳定同位素可以作为水汽源的自然示踪或利用其变化来反演大气过程, 能在一定程度上反映区域气候特征^[6]。

上世纪 50 年代初国外开始观测降水的同位素比值, 但大范围有组织的取样工作始于 1961 年。在国际原子能委员会(International Atomic Energy Agency, 简称 IAEA)和世界气象组织(World Meteorological Organization, WMO)的积极努力下全球共建立了 100 多个观测点, 对降水中稳定同位素成分进行连续监测。我国对降水中稳定同位素的测定

收稿日期: 2011-11-21 收到; 12-05 改回

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41171028)

第一作者简介: 邓文平(1987-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 森林水文及同位素水文. E-mail: deng_wen_ping@126.com.

始于1966年珠穆朗玛峰科学考察^[7],而1983年以前,全球降水同位素监测网(Global Network of Isotopes in Precipitation, GNIP)在我国只有香港一个站点^[8],之后陆续在齐齐哈尔,和田,银川,石家庄,天津,拉萨,昆明,长沙,贵阳,南京,福州,海口,桂林,西安,广州等城市建立长期观测站,监测降水中稳定同位素比值,到目前其中多个监测站已被纳入IAEA全球观测网。但仍不能满足科研需要。2004年对照GNIP,借鉴国外的成功经验,以中国生态系统研究网络(Chinese Ecosystem Research Network, CERN)各野外台站为依托,建立中国大气降水同位素网络(Chinese Network Isotope in Precipitation, CHNIP)系统地 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 进行观测^[9],揭示我国降水中同位素比值的变化特征和分布规律。

华北地区是我国经济社会发达的地区,同时又是水资源供需矛盾十分突出的地区。近三十年来,华北地区一直处在干旱气候的状态。本文试图利用GNIP华北地区的天津站,石家庄站,太原站及包头站的资料为基础,研究氢氧同位素的变化特征及与主要气象要素的相关性,探讨气候年际变化的特征等,并建立大气降水线方程,探讨他们与水汽来源的关系,以期为理解和掌握区域水循环过程,合理保护和利用水资源提供科学依据。

1 研究方法

本文采用GNIP华北地区的天津站(1988~2001),石家庄站(1985~2003),太原站(1986~1988),包头站(1986~1992)降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD ,测量精度分别为 $\pm 1\%$ 和 $\pm 0.1\%$ ^[10]。数据通过国际互联网可以直接下载(<http://isohis.iaea.org>)。

2 结果及分析

2.1 大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 的季节变化

华北地区大气降水同位素比值变化幅度较大。如图1,石家庄地区 $\delta^{18}\text{O}$ 变化范围是 -1.46% ~ -14.94% , δD 为 -9.5% ~ -111.3% ,天津地区 $\delta^{18}\text{O}$ 变化范围是 -2.03% ~ -14.4% , δD 为 -6.4% ~ -108.7% ,太原地区 $\delta^{18}\text{O}$ 变化范围是 -1.09% ~ -13.83% , δD 为 -10.4% ~ -94.3% ,包头地区 $\delta^{18}\text{O}$ 变化范围是 -3.64% ~ -21.82% , δD 为 -25.9% ~ -153.4% 。全球降水平均同位素比值, $\delta^{18}\text{O}$ 介于 10% ~ -50% , δD 介于 50% ~ -350% 之间^[2]。郑淑慧等^[11]报道了中国大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 为 2.0% ~ -24% 之间, δD 为 2% ~ -210% 。

张天宇等^[12]通过统计降水,把每年的4~9月作为华北地区的雨季,旱季则为10月至次年3月。华北地区4~9月代表夏半年,10~3月代表冬半年。

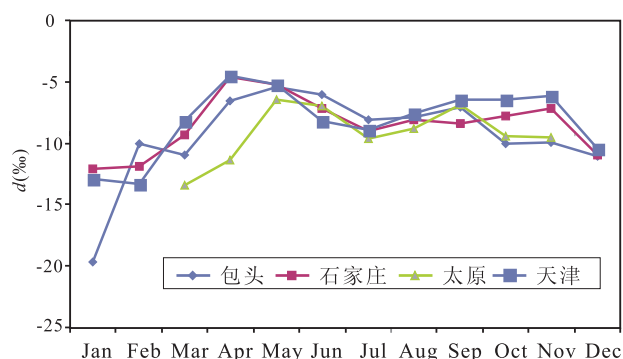


图1 大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的月均变化

Fig. 1 The seasonal variations of the monthly weighted mean $\delta^{18}\text{O}$

石家庄和天津两站的月均 $\delta^{18}\text{O}$ 变化趋势相同,从1月份到5月份呈现上升的趋势,且变化幅度超过 -5% ,6月到7月呈现减小的趋势,并在8月到11月又缓慢上升但变化不大。整个4月到11月间 $\delta^{18}\text{O}$ 在 -9% ~ -5% 之间,12月较11月减小,均小于 -9% 。该地区地处中纬度, $\delta^{18}\text{O}$ 同时受到降雨量和温度的影响,在1月到4月,降雨量稀少,随着温度的升高, $\delta^{18}\text{O}$ 表现出逐渐富集。6月到7月降雨量开始变大,进入雨季,此时温度也开始升高至最大,温度效应和降雨量效应的交互作用中,降雨量效应起主导作用, $\delta^{18}\text{O}$ 值表现出减少。在8月到11月,在温度和降雨量的交互作用下,观测站 $\delta^{18}\text{O}$ 缓慢上升,但均不明显。这主要是由于,在夏末到秋季,降雨量明显下降,而温度虽然也下降,但仍然在 10°C 上下,且北方秋季干燥多风,空气湿度较小,局地蒸发较快,因而 $\delta^{18}\text{O}$ 值升高。

包头月均 $\delta^{18}\text{O}$ 变化趋势从1月到5月呈上升趋势,5月以后缓缓下降,但变化幅度不大,且在4月到9月,月均 $\delta^{18}\text{O}$ 在 -7% 上下波动。在9月以后开始下降,减小幅度大, $\delta^{18}\text{O}$ 低于 -9% 。太原缺少了三个月的月均 $\delta^{18}\text{O}$ 数据,但总体变化趋势和包头相同。从1月到5月随着温度的升高, $\delta^{18}\text{O}$ 逐渐增大,5月到9月,在温度和降水量的共同作用下, $\delta^{18}\text{O}$ 表现出先减小后增大。10月以后包头地区温度迅速降低, $\delta^{18}\text{O}$ 值降低。太原地区受到局地地理因素,西北东三面环山,受西北季风的影响小,同时温度比天津、石家庄站都要小,因此减少了蒸发分馏的影响,所以我们会发现太原地区的月均 $\delta^{18}\text{O}$ 值几乎都要低于天津和石家庄。

通过分析发现,天津,石家庄,太原,包头四站, $\delta^{18}\text{O}$ 值呈现出明显的夏秋高冬低;同时还发现在夏半年,天津、石家庄的4~9月,太原、包头的5~9月, $\delta^{18}\text{O}$ 值都表现出先减小后增大的趋势,这与明显受季风气候影响的中低纬度沿海区和青藏高原南部的降水同位素季节变化有明显不同。这些地区,夏季来自海洋的气团具有湿度大,蒸发弱,降水量大, $\delta^{18}\text{O}$ 相对较低的特点,而冬季西风环流携带的空气具有大陆性气团的特性,湿度低,蒸发强,降水量小, $\delta^{18}\text{O}$ 相对较高^[13],因此,夏季华北地区不仅受到北太平洋东亚夏季风的影响,还受到局地地理因素、温度、大气湿度的影响。

通过比较这四个站降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值发现,除个别月份外,天津>石家庄>太原,而包头地区变化幅度较大,季节差异较大。说明随着经度的增加,距离海岸线变远,来自海洋气团经沿途多次分馏形成的降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 逐渐贫化。而包头地区降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值相对其他三站较为贫化,特别是在冬半年,这是由于在中高纬度大陆内陆,无论是时间尺度还是空间尺度上,降水稳定同位素和温度存在显著正相关关系,这一事实主要基于水在相变过程中其水汽输送的环流模式中的凝结和蒸发都受到温度控制^[14],在冬半年包头地区相对于其他三站,温度低,降水量变化不大,温度效应明显;从另外一个方面来看,随着纬度的增加, $\delta^{18}\text{O}$ 降低。

2.2 降水线方程

大气降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 之间的关系对研究水循环过程中稳定同位素的变化具有重要意义^[1],它可以较好地反映自然地理和气象条件,了解历史气候变迁及水汽来源^[15]。根据IAEA/WMO/GNIP的降水同位素数据用线性回归求得各地的地区大气降水线方程:

$$\text{天津: } \delta\text{D} = 7.6995\delta^{18}\text{O} + 8.6974 \quad (R^2 = 0.9244)$$

$$\text{石家庄: } \delta\text{D} = 6.8102\delta^{18}\text{O} - 1.417 \quad (R^2 = 0.8826)$$

$$\text{太原: } \delta\text{D} = 6.42\delta^{18}\text{O} - 4.66 \quad (R^2 = 0.945)$$

$$\text{包头: } \delta\text{D} = 6.4215\delta^{18}\text{O} - 4.0703 \quad (R^2 = 0.9688)$$

各方程与Craig^[16]首次提出的全球降水线方程 $\delta\text{D} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$, Yurtsever^[17]获得的全球降水线方程 $\delta\text{D} = 8.17\delta^{18}\text{O} + 10.56$ 以及郑淑慧等^[11]报道的中国将水线方程 $\delta\text{D} = 7.9\delta^{18}\text{O} + 8.2$ 相比较,除天津地区大气降水线的斜率和截距稍微接近外,其他地区的斜率和截距相对都偏低,说明天津地区主要受北太平洋东亚季风的影响,海洋水汽是其降水的主要来源,而石家庄,太原,包头降雨,随着距离海洋长度的变远,除了受北太平洋东亚季风的影响外,还

受大陆性气团的影响;斜率都小于8,说明各地的降水过程都是在非瑞利条件下进行的。

2.3 d值的变化

四站的大气降水线方程与全球大气降水线相比,斜率和截距都偏小,反映了华北地区大气降水形成时水蒸气来源及运移过程中受环境变化影响导致气液两相同位素分馏不平衡程度的差异。为了便于研究,Dansgaard^[5]定义为 $d = \delta\text{D} - 8\delta^{18}\text{O}$ 。它既能反映海水蒸发形成的热力条件和水汽平衡条件,又反映了降水形成时的地理环境和气候条件^[10]。当海水蒸发进行很快时,蒸发速度大于凝结速度,水气之间处于不平衡状态,整个蒸发可以分为动力蒸发和同位素交换两个方面,受水分子扩散速度的控制,轻同位素优先蒸发和动力分馏效应的共同作用使得蒸发水汽中D和 ^{18}O 分馏效应之比加速,这样就出现了蒸发相中 $\delta^{18}\text{O}$ 相对于 δD 的贫化,因而使得d值增加,即云团形成越快d值越大^[1]。降水中的d主要受制于相变过程中D和 ^{18}O 分馏速率的相对差异,其大小与形成降水的水汽源地的温度、相对湿度和风速密切相关,温度越高,湿度越小,D与 ^{18}O 分馏效应之比的增长速度越快,d值越大^[18];海水是大气降水中水汽的主要来源,海水在平衡条件下蒸发,蒸发速率与凝结速率相等,则d为0;因此d值反映了降水形成过程中的水汽团同位素组成,含有形成气团源区的重要信息,包括蒸发过程的平衡或不平衡状态及蒸发速率等^[19]。

根据对华北地区各站d的监测数据统计发现(图2),包头地区d在10月至次年3月都大于10%,石家庄地区的d在10月至次年2月都大于10%,而9月接近10%,天津在每年的2~6月d值小,7~9月份d值接近10%,10月至次年1月都大于15%,由于数据本身的精确性(太原地区除外),d

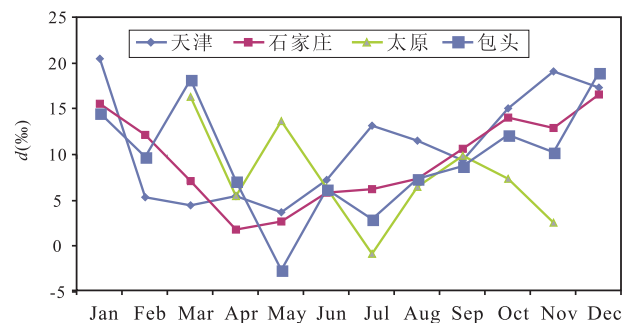


图2 华北地区天津、太原、石家庄和包头大气降水d的月均变化

Fig. 2 The seasonal variations of the monthly weighted mean deuterium excess at north China, Tianjin, Taiyuan, Shijiazhuang and Baotou

大于10‰的月份,表明该地降水水汽源地蒸发较快。天津在2~9月,石家庄在3~9月,包头在4~9月的 d 值明显小于其他月份,都在10‰以下,或稍微接近10‰,而其他月份基本都大于10‰。因此 d 表现出夏低冬高的季节。夏半年较低的 d 值反映了华北地区的降水主要为锋面雨和夏季风雨,同时还受大气降水过程,雨滴降落途中的蒸发影响。冬半年较高的 d 值,反映了华北地区冬季受蒙古高压的西北季风控制,气温低,雪和冰雹等因分馏大使得 δ 较小而 d 值会升高,同时由于气候干旱空气湿度小,地面蒸发强烈,也使 d 值升高。

2.4 大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的环境因素

从图3可见,月均降水量的变化和月均温度变

化一致。4~7月份,随降雨量的增加,降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值降低;8~9月份,随降雨量的减少,降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 增加,即在夏半年表现出一定的雨量效应;10~12月份随着温度的降低,降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 慢慢降低,而在1~3月份随着温度的升高, $\delta^{18}\text{O}$ 增加,因此在冬半年, $\delta^{18}\text{O}$ 与温度呈正相关关系。因此,在华北地区,冬半年表现出明显的温度效应,夏半年则可能降水量起主导作用。

在影响降水同位素组成的诸多要素中,温度是影响同位素分馏的关键因素^[20]。气温对降水中稳定同位素产生作用的主要机制是:降水中稳定同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 值在一定程度上与上空降水云团的初始温度和冷凝温度有对应关系,而后者与降水 δ 值有直接关系。温

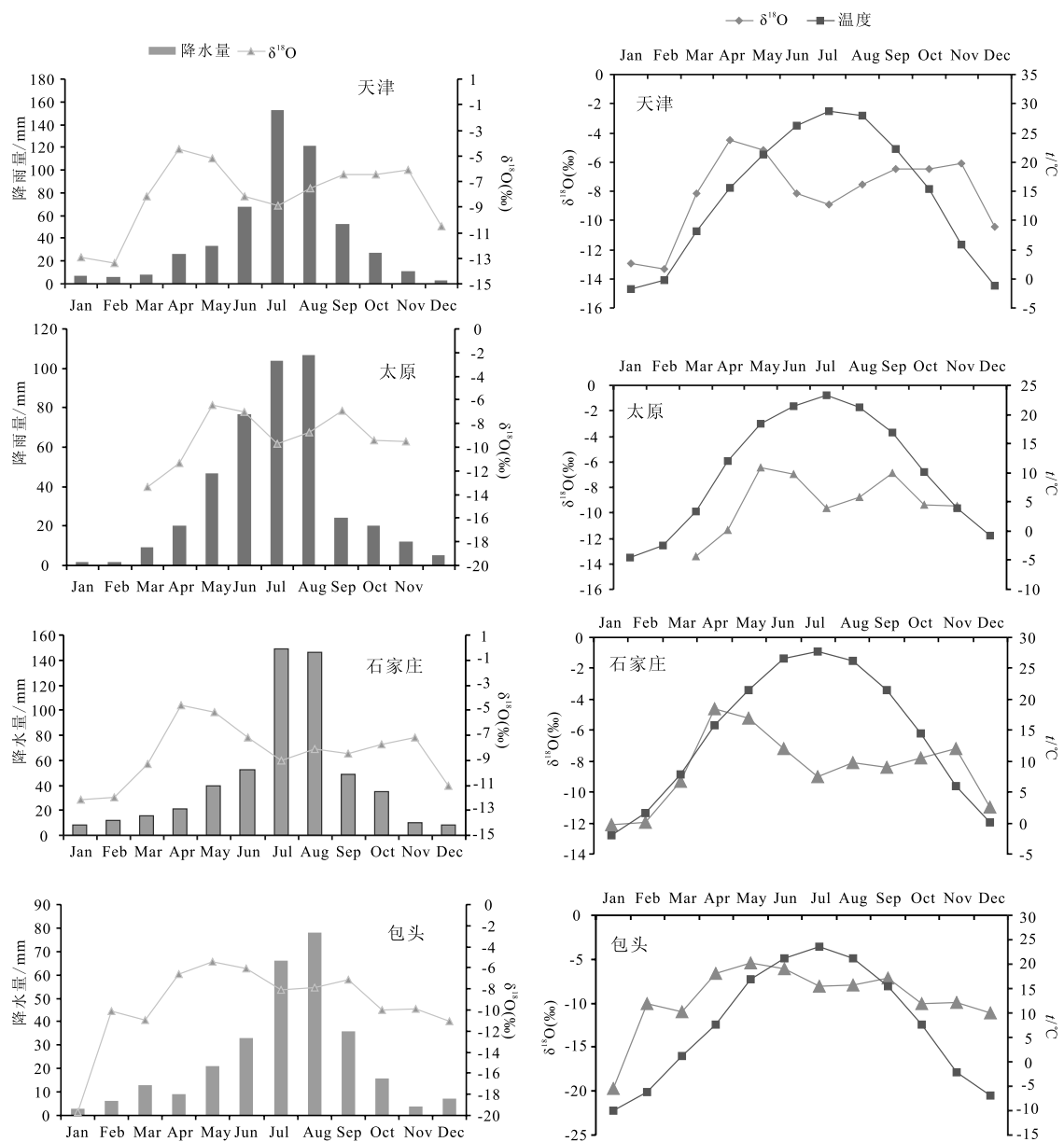


图3 华北地区天津,石家庄,太原,包头站点的月均降水量, $\delta^{18}\text{O}$ 和温度的变化

Fig. 3 The variations of the monthly weighted mean precipitation, $\delta^{18}\text{O}$ and temperature

度越低,降水中同位素的分馏系数 α 越大,同位素分馏越大,因此降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 也越低,只有当大气水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 保持基本稳定时,气温和降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 才有可能表现出明显的正相关关系^[21]。一般而言,温度效应主要出现在中高纬度地区,另一方面,越深入大陆内部,其正相关关系越密切^[13]。

利用北大西洋的观测数据,Dansgaard^[5]最先报告了温度效应: $\delta^{18}\text{O}=0.695t-13.6$,Yurtsever^[22]则利用 GNIP 站点的资料分析得到 $\delta\text{D}=(0.512\pm 0.014)t-(14.96\pm 0.21)$ 。而根据现有的资料得出,华北地区各站的温度效应较弱,为了减少降水量的影响,采用月加权平均来分析温度效应,得出包头地区的温度效应较为明显 $\delta^{18}\text{O}=0.2288t-11.109$, $R^2=0.5444$,其它三站线性回归得到的斜率较小。但如果我们只考虑冬半年 $\delta^{18}\text{O}$ 值与温度的关系,会发现在冬半年温度效应明显(除太原站),得到 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度的回归方程:

$$\text{包头: } \delta^{18}\text{O}=0.3428t-11.008 \quad (R^2=0.3331)$$

$$\text{天津: } \delta^{18}\text{O}=0.3853t-11.273 \quad (R^2=0.6768)$$

$$\text{石家庄: } \delta^{18}\text{O}=0.284t-11.211 \quad (R^2=0.6563)$$

由此可见,在冬半年温度效应显著,而在夏半年温度与 $\delta^{18}\text{O}$ 关系较弱,主要由于降水量的影响,降低了温度与 $\delta^{18}\text{O}$ 的关系

事实上,降水中稳定同位素与降水量的关系与整个水汽输送路径上的降水量有关,而不仅仅是观测点上的降水量有关,从另一方面而言,严格的降水量效应是指同一水汽团的一次降水事件,而 GNIP 的样本采集是按月进行。虽然如此,考虑一定期间内(月、季)水汽来源相对稳定,分析站点降水量效应对降水同位素的分布乃至水汽团特征有重要意义。通过分析发现,华北地区各站,降水中月均 $\delta^{18}\text{O}$ 与降水量之间没有明显相关,这是由于月均 $\delta^{18}\text{O}$,受到温度和降水量两种因素的影响,造成如果从全年的角度来分析,降雨量效应会受温度的影响而表现不太明显。但如果只分析夏半年中降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值会发现各站,都与降水量呈负相关关系,且相关性显著 $R^2>0.50$ 。

$$\text{包头: } \delta^{18}\text{O}=-0.0323X-5.5502 \quad (R^2=0.6688)$$

$$\text{石家庄: } \delta^{18}\text{O}=-0.0236X-5.3005 \quad (R^2=0.5514)$$

$$\text{天津: } \delta^{18}\text{O}=-0.0296X-4.5615 \quad (R^2=0.7426)$$

而太原地区由于 4 月份只取了一次样,考虑到数据的精确性我们将它除去,从五月份开始取,得到线性回归方程为:

$$\delta^{18}\text{O}=-0.0321X-5.3005 \quad (R^2=0.696)$$

由此我们可以看出,在夏半年降水中同位素特

征表现了一定的降水量效应,而在冬半年温度效应比较明显。章新平^[3]在分析亚洲降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 沿不同水汽输送路径的变化发现,北方水汽路径降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化特征,冷半年受范围广大的大陆冷高压的影响,降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 存在显著的温度效应,暖半年降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 表现为显著的降水量效应。

3 结 论

(1)通过对华北地区降水氢、氧同位素研究可以看出:华北地区夏半年的 $\delta^{18}\text{O}$ 明显大于冬半年,呈现出夏高冬低的季节变化,在夏季随着降水量的增大 $\delta^{18}\text{O}$ 会减小,表现出降雨量效应,但是在冬半年,在 10~12 月份随着温度的降低, $\delta^{18}\text{O}$ 也会慢慢降低,在 1~3 月份随着温度的升高, $\delta^{18}\text{O}$ 会慢慢增加,反映出温度效应。由此,可以知道,在华北地区夏半年由于受季风气候影响,降水中氧稳定同位素组成存在降雨量效应,说明降雨量效应比温度效应明显,抑制或掩盖了温度效应。在华北地区冬半年降水中氧稳定同位素组成存在温度效应,说明温度效应大于降雨量效应。

(2)华北地区各地的大气降水线方程,与全球和中国的降水线方程相比,其斜率和截距都偏低,说明各地降水过程都是在非瑞利条件下进行的。同时也反映了华北地区大气降水形成时水蒸气来源及运移过程中受环境变化影响导致气液两相同位素分馏不平衡程度的差异。

(3)根据对华北地区各站 d 的监测数据统计发现,在每年的 4~9 月份, d 值小,主要反映是受北太平洋东亚季风形成的夏季风雨的影响;而每年的 10 月至次年 3 月间 d 值较高,主要是受暖湿空气中上升冷却凝结而形成的降水-锋面雨的影响(反映受冬季风的影响和局地环境条件影响),说明受季风影响的地区,冬季风和夏季风影响的地区,冬季风和夏季风期间降水的水源区及蒸发条件不同。

参考文献 (References):

- [1] 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.
Tu Linling, Wang Hua, Feng Yumei. Study on hydrogen and oxygen isotopes in the precipitation of Guilin[J]. Carsologica Sinica, 2004, 23(4): 304-309. (in Chinese with English abstract)
- [2] IAEA/WMO. Global network for istopes in precipitation [EB/OL]. <http://isohislaea.org> 2001.
- [3] 章新平,刘晶淼,田立德,姚檀栋. 亚洲降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 沿不同水汽输送路径的变化[J]. 地理学报, 2004, 59(5): 699-708.
Zhang Xinping, Liu Jinmiao, Tian Lide, Yao Tandong. Vari-

- tions of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation along vapor transport paths over Asia[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(5): 699—708. (in Chinese with English abstract)
- [4] Dansgaard W. The abundance of $\delta^{18}\text{O}$ in atmospheric water and water vapour[J]. *tellus*, 1953, 5(4): 461—469.
- [5] Dansgaard W. Stable istopes in precipitation[J]. *Tellus*, 1964, 16(4): 436—468.
- [6] 章新平, 姚檀栋. 全球降水中氧同位素比率的分布特点[J]. 冰川冻土, 1994, 16(3): 202—210.
Zhang Xinping, Yao Sandong. World spatial characteristics of oxygen isotope ratio in precipitation[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1994, 16(3): 202—210. (in Chinese with English abstract)
- [7] 章申, 于维新, 张青莲, 黄春辉, 张榕森, 顾镇南, 卫勤功, 谢自楚, 曾群柱. 我国西藏南部珠穆朗玛峰地区冰雪水中氘和重氧的分布[J]. 中国科学(A辑), 1973(4): 430—433.
Zhang Shen, Yu Weixin, Zhang Qinlian, Huang Chunhui, Zhang Rongsen, Gu Zhennan, Wei Qingong, Xie Zichu, Zeng Qunzhu. The distribution of deuterium and oxygen-18 in some natural water in Jolmo Lungma region in southen Tibet, China [J]. *Science in China(A)*, 1973(4): 430—433. (in Chinese with English abstract)
- [8] 李政红, 张发旺. 全球降水氢氧同位素研究进展[J]. 勘察科学技术, 2004(1): 1—6.
Li Zhenghong, Zhang Fawang. Hydrogen and oxygen isotope research of global precipitation[J]. *Site Investigation Science and Technology*, 2004(1): 1—6. (in Chinese with English abstract)
- [9] 宋献方, 柳鉴容, 孙晓敏, 袁国富, 刘鑫, 王仕琴, 侯士彬. 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, Yuan Guofu, Liu Xin, Hou Shibing. Establishment of Chinese Network of Isotopes in Precipitation (CHNIP) based on Cern[J]. *Advance in Earth Science*, 2007, 22(7): 738—747. (in Chinese with English abstract)
- [10] 侯典炯, 秦翔, 吴锦奎, 杜文涛. 乌鲁木齐大气降水稳定同位素与水汽来源关系研究[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(10): 136—142.
Hou Dianjiong, Qin Xiang, Wu Jinkui, Du Wentao. Characteristics of stable isotopes in precipitation and the water vapor sources in Urumqi[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2011, 25(10): 136—142. (in Chinese with English abstract)
- [11] 郑淑蕙, 侯发高, 倪葆龄. 我国大气降水的氢氧同位素研究[J]. 科学通报, 1983, 28(13): 801—806.
Zheng Shuhui, Hou Fagao, Ni Baolin. Research on D and ^{18}O isotopes in China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1983, 28(13): 801—806. (in Chinese with English abstract)
- [12] 张天宇, 程炳岩, 王记芳, 张永亮, 刘晓冉. 华北雨季降水集中度 and 集中期的时空变化特征[J]. 高原气象, 2007, 26(4): 843—852.
Zhang Tianyu, Cheng Bingyan, Wang Jifang, Zhang Yongliang, Liu Xiaoran. Temporal and spatial change characteristics of Precipitation Concentration Degree(PCD) and Precipitation-Concentration Period(PCP) over North China in rainy reason[J]. *Plateau Meteorology*, 2007, 26(4): 843—852. (in Chinese with English abstract)
- [13] 章新平, 姚檀栋. 我国降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的分布特点[J]. 地理学报, 1998, 53(4): 356—364.
Zhang Xinping, Yao Tandong. The distribution of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1998, 53(4): 356—364. (in Chinese with English abstract)
- [14] 郭江勇, 李耀辉. 中国西北地区夏季降水的气候特征[J]. 干旱区研究, 2006, 23(3): 489—494.
Guo Jiangyong, Li Yaohui. Climatic characteristics of summer precipitation in Northwestern China[J]. *Arid Zone Research*, 2006, 23(3): 489—494. (in Chinese with English abstract)
- [15] 刘鑫, 宋献方, 夏军, 于静洁, 张学成. 黄土高原岔巴沟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.
Liu Xin, Song Xianfang, Xia Jun, Yu Jingjie, Zhang Xuecheng. Characteristics of hydrogen and oxygen isotopes and preliminary analysis of vapor source for precipitation in Chabagou catchment of the loess plateau[J]. *Resource Science*, 2007, 29(3): 59—66. (in Chinese with English abstract)
- [16] Craig H. Isotopic variation in meteoric waters[J]. *Science*, 1961, 133: 1702—1703.
- [17] Yurtsever Y, Gat J R. Atmospheric waters stable isotope hydrology: Deuterium and oxygen-18 in the water cycle[R]. Gat J R, Gonfiantini R. Technical Reports Series 2010, IAEA, Vienna, 1981: 103—142.
- [18] 章新平, 刘晶森, 中尾正义, 谢自楚. 我国西南地区降水中过量氘指示水汽来源[J]. 冰川冻土, 2008, 31(4): 613—619.
Zhang Xinping, Liu Jingmiao, Masayoshi Nakawo, Xie Zichu. Vapor origins revealed by deuterium excess in precipitation in southwest china[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, 31(4): 613—619. (in Chinese with English abstract)
- [19] 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.
Wei Keqin, Lin Ruifen. The influence of the monsoon climate on the isotope composition of precipitation in China [J]. *Geochimica*, 1994, 23(1): 33—41. (in Chinese with English abstract)
- [20] 章新平, 姚檀栋, 刘晶森, 田立德. 不同时间尺度下的稳定同位素变化[J]. 冰川冻土, 2003, 25(4): 428—432.
Zhang Xinping, Yao Tsndong, Liu Jingmiao, Tian Lide. Isotopic variations under different time scales[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(4): 428—432. (in Chinese with English abstract)
- [21] 田立德, 姚檀栋, 蒲健辰, 杨志红. 拉萨夏季降水中稳定同位素变化特征[J]. 冰川冻土, 1997, 19(4): 295—301.
Tian Lide, Yao Tandong, Pu Jiancheng, Yang Zhihong. Characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ in summer precipitation at Lhasa[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1997, 19(4): 295—301. (in Chinese with English abstract)
- [22] Yurtsever Y. Worldwide survey of isotopes in precipitation [R]. Report of the Isotope Hydrology Section Vienna, IAEA, 1975.