

我国西北地区多年降水的氢氧同位素分布特征研究

黄锦忠¹, 谭红兵¹, 王若安², 温夏伟¹

(1.河海大学地球科学与工程学院,江苏 南京 210098; 2.甘肃省平凉市气象局,甘肃 平凉 744000)

摘要:降水是干旱区水文循环研究不可缺少的水文要素,为了揭示我国西北地区大气降水的氢氧同位素时空分布特征,合理开展不同尺度水文循环研究和建立对比标准,系统搜集分析了乌鲁木齐、银川、张掖、兰州、平凉、西安和拉萨七个地区多年大气降水的氢氧同位素数据资料。分析结果表明:乌鲁木齐、银川、张掖和兰州四个地区的 $\delta^{18}\text{O}$ 值夏半年明显高于冬半年,从全年尺度上来看只是受到了温度效应的影响;而位于关中盆地的西安地区则由于复杂的水汽来源,冬半年表现出受温度效应的控制,夏半年转为雨量效应控制为主。平凉地区 $\delta^{18}\text{O}$ 与其它海拔相近地区(如兰州)相比5~9月份均偏负,这与平凉地区较弱的城市热岛效应有关。西北地区大气降水 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化范围均在全球大气降水的变化范围之内,除平凉和拉萨外,其它几个地区大气降水线方程的斜率和截距均小于全球大气降水线,说明这些地区的降水是在干旱环境下经历较强程度的蒸发条件下进行的,且在降水过程中还可能受到了局地二次蒸发凝结等水汽循环的影响。而该区域大气降水的氘盈余(d 值)表现出冬半年高、夏半年低的特点,表明冬半年和夏半年水汽来源不同或者水源地的蒸发条件不同。

关键词:西北地区;大气降水;氢氧同位素;分布特征

中图分类号:P426.62

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2015)01-0033-07

大气降水作为干旱区水循环的最重要组成部分,广泛地参与地球各个圈层之间的物质、能量交换。氢氧稳定同位素作为自然界水体的组成部分,由于较大的同位素质量差而具有很宽的分布范围,记录了水循环所经历各个过程。在研究地表水体领域常被用来示踪大气降水的水汽来源及反演水汽的输送途径。

我国的西北地区面积辽阔,各种矿产资源丰富,但是年降雨量稀少,地下水资源匮乏,气候以干旱为主^[1]。前人在应用同位素水文学方法研究地下水形成及循环过程、土壤水运移规律及生态环境演变等科学问题时,总离不开与当地或大范围的降水进行对比, Ma等(2009)在研究戈壁沙漠的地下水补给源时,指出地下水的氢氧同位素值较当地现代降水偏正,得出此区域地下水的补给源并非现代大气降水的结论^[2]; Tian等(2008)在研究玉树地区大气降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化特征时,将其与降水受季风影响的南部地区和受内陆气团

影响的北部地区的大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 进行对比,得出玉树地区大气降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 既受来自南部季风的影响,又受来自北部内陆气团的影响,且玉树地区水汽输送主要受来自南部季风的影响^[3]; Chen等(2012)在研究中国北部鄂尔多斯地区地下水的补给源时,将土壤水、地下水的氢氧同位素值与鄂尔多斯周边地区监测站降水的氢氧同位素加权平均值进行比较,发现地下水 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值比大气降水 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 的加权平均值偏负,得出土壤水、地下水可能是由 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值较低的水源补给,而不是现代大气降水来源^[4]。然而,由于降水同位素时空变化比较复杂,长期监测站数量又十分有限,在一些缺少监测站的区域往往比较随机地选取临近监测站的降水数据进行对比,有时会得到与事实不符的结果,如我们前期调查发现兰州的多年降水 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素加权平均值显著高于陇中黄土高原(如通渭、定西等)地区黄土地下水值,但并不能据此认为地下水不是由当地降水补给。因此,分析西北地区大气

收稿日期:2014-05-08

基金项目:国家自然科学基金项目(41271041;41073034)

作者简介:黄锦忠(1989-),男,安徽宿州人,硕士研究生,主要从事水文地球化学研究。E-mail:327314908@qq.com

降水的氢氧稳定同位素特征不仅能够反演西北地区大气降水的水汽来源,从而更好地了解西北地区大气降水循环机制,更是研究大气降水、地表水和地下水转换机制的重要部分。此外,对于多数涉及大气降水同位素研究,并未考虑实际的季节效应、温度效应,特别是城市热效应等影响,尤其是在研究局部区域不同水体转换时,忽略了当地的补给条件,笼统地将年降水平均值认为是最接近实际的补给水体特征,从而产生许多隐含的、难以发现的错误信息。为此,本文在综合分析西北地区降水同位素时空变化数据的基础上,深入讨论各种可能因素对降水同位素产生的影响,旨在为区域水循环研究对比讨论大气降水同位素值时提供理论参考。

1 研究方法

本文收集了国际原子能机构(IAEA)与世界气象组织(WMO)合作建立的全球降水同位素网(GNIP)中我国西北地区平凉站(2003~2004)、拉萨站(1986~1999)、乌鲁木齐站(1986~2003)、西安站(1985~1993)、银川站(1988~2000)、张掖站(1986~2003)和兰州(1985~1999)站的大气降水氢氧同位素数据,数据可以通过互联网下载(<http://www.iaea.org/>)。

2 结果与分析

2.1 西北地区大气降水中 δD 和 $\delta^{18}O$ 的季节性变化

图1为西北地区、全球和中国大气降水氢氧同位素比值的范围,总体来看西北各地区大气降水氢氧同位素的比值均落在全球和中国大气降水氢氧同位素的变化范围之内。根据降雨量可以将西北地区的4~

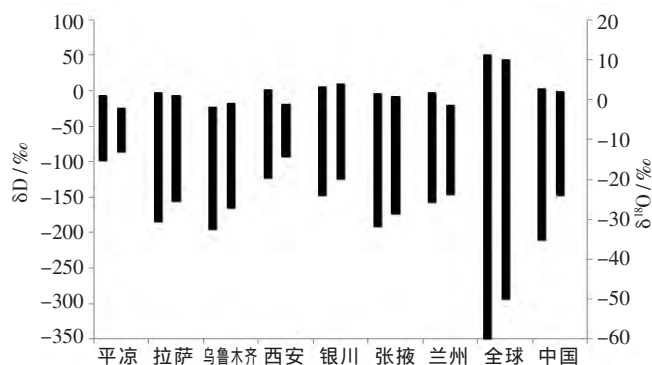


图1 西北地区、全球和中国大气降水 δD 、 $\delta^{18}O$ 值的变化范围

Fig.1 The δD and $\delta^{18}O$ variations of the meteoric waters in northwest China, China and the world

9月份划分为夏半年,10~3月份划分为冬半年^[5]。

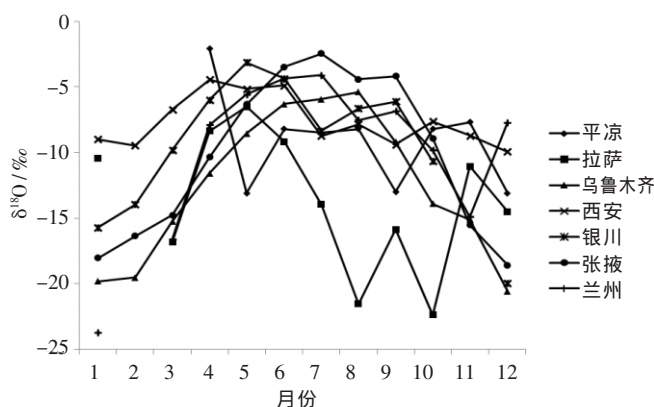


图2 西北地区大气降水 $\delta^{18}O$ 的月均变化

Fig.2 The seasonal variations of the monthly weighted mean $\delta^{18}O$

图2为西北地区不同监测点的氧同位素月均变化关系图,其中,乌鲁木齐、张掖、银川、兰州四个区域的 $\delta^{18}O$ 的月均变化趋势总体上基本一致,1~5月份的同位素值增加较为明显,变化幅度超过10‰,简单的正比关系表明可能受到单一主导因素的影响。在此期间降雨量较少且并未有显著的变化,但是这几个月的温度变化与同位素之间有着较好的对应关系,说明西北地区1~5月份降水同位素值随着温度的升高而不断增大。5~9月份之间波动频繁,波峰的数目和最大值出现的月份除张掖和兰州两地区外各不相同。最大值(首次波峰)代表着由于温度升高而引起的同位素变化,而其出现的月份与各自区域实际的气候条件有关。如银川地区5月份即达到最大值,兰州和张掖地区为7月份,乌鲁木齐则出现在8月份,似乎表明当地气候越干旱,最高温度出现的越晚^[6]。最大值之后伴随的是小幅度的下降,这是因为当气候进入雨季,随着降雨量的不断增加,雨量效应开始逐渐影响降雨同位素的变化。这可以从银川地区同位素值变化看出,虽然6月份的温度高于出现同位素峰值的5月份,但是同位素值并没有随温度继续增加,而是出现了下降,这符合雨季降水雨量效应掩盖温度效应的实际情况。西北地区普遍存在的第二次同位素波峰指示着同位素的缓慢增加,与之相对应的是降雨量的减小和雨季的逐渐结束,亦即这一变化与雨量增大密切相关。但是从9月份开始,可以明显的观察到稳定氧同位素的持续大幅度减小,这是由于研究区域进入冬季温度明显下降所造成的。通过以上分析不难发现,乌鲁木

齐、银川、张掖和兰州四个地区的大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值表现为夏半年高、冬半年低的特点。

西安地区 $\delta^{18}\text{O}$ 变化趋势与上述四地区基本一致,但全年变化幅度不大,仅有 5‰ 左右。随着温度的升高,2 月份开始逐渐升高,到 4 月份中旬达到最大值,直到 6 月份基本保持不变,这是温度和降雨量共同作用的结果。随着降雨量的增大,7 月份 $\delta^{18}\text{O}$ 的值降低,此时降雨量起到主导作用。到 8 月份 $\delta^{18}\text{O}$ 的值略微升高,9 月略微的下降,10 月份又略微升高,这是温度和降雨量叠加作用的结果。10 月份以后温度降低,降雨量减少, $\delta^{18}\text{O}$ 的值逐渐降低^[7]。

冬半年西北地区大气降水的水汽来源于西风带的输送,水汽从新疆地区流入西北地区,向东输送^[8]。但是在整个输送过程中,随着距离的增大,乌鲁木齐、张掖、兰州、银川和西安五个地区大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 表现为逐渐富集的现象,这是因为西北地区降水的水汽以动力分馏为主,雨水在降落过程中经历了一定的二次蒸发,而且有一定量的局地蒸发水汽的混入。而西北地区夏半年大气降水的水汽来源比较复杂,较强的降雨或暴雨往往来自季风驱动下的海洋水汽,一些小的降雨可能多来自西北大陆水汽,或者持续时间较长的降雨也受到这两种水汽双重作用叠加的影响。

平凉地区因冬季降水少,缺少 1 月、2 月、3 月的数据,但是根据我们一个水文年的采样分析平凉地区 2 月份和 3 月份两个月的 $\delta^{18}\text{O}$ 值分别为 -27.6‰ 和 -22.6‰,以及西北地区春季同位素值总的变化规律,可以估计平凉地区春季的同位素值也是逐渐增高的。值得注意的是,在所有地区 5~9 月份的 $\delta^{18}\text{O}$ 中,平凉地区明显小于其它地区(除拉萨外),这可能与高程效应有关,平凉市位于六盘山区,海拔比乌鲁木齐、西安、张掖、银川和兰州都要高。另外,乌鲁木齐、西安、银川、兰州属于大城市,而平凉属于小城市,认为城市热岛效应对区域降水也起了一定的影响,平凉城市热岛效应可能对区域降水影响较小,降水到达地面时二次蒸发作用较弱,同位素相对偏负。

2.2 西北地区大气降水氧同位素的温度效应和雨量效应

在西北干旱地区,温度效应被认为是影响降水同位素组成的诸多要素中决定性的因素^[9]。温度效应是指大气降水稳定同位素的值与温度呈现出正相关关系,其作用机制是:地面温度在一定程度上与上空降水云团的冷凝温度有对应关系,而后者与降水的 δ 值有

直接关系,即气温越低,大气降水中稳定同位素的分馏也就越大,大气降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值也越低;气温越高雨水由于蒸发富集,大气降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 值也越高。雨量效应是指大气降水的稳定同位素值与雨量呈负相关,其主要作用机制是云团在冷凝时遵循瑞利分馏^[10]。

从各地区 $\delta^{18}\text{O}$ 值与温度、降雨量之间的关系图可见(图 3),我国西北地区,除平凉、拉萨和西安外,温度效应在该地区降雨同位素变化中起主导作用, $\delta^{18}\text{O}$ 的最大值出现在夏半年。从 1 月开始,雨量、温度和 $\delta^{18}\text{O}$ 都较低,随着时间的推移,降雨量增大、温度升高, $\delta^{18}\text{O}$ 的值也相应的不断在增大,银川、张掖和兰州在 7、8 月份表现出了微弱的雨量效应,9 月份以后随着温度的降低、雨量的减少, $\delta^{18}\text{O}$ 的值也在减小。西安地区夏半年同位素变化异常区别于其它地区,这可能与当地的实际降雨条件有关。降雨主要集中在夏半年,5~10 月份的降水可占全年降水量的 79%,而冬半年降水较少。为此,我们用月加权平均的方法来进一步分析西安大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的温度效应和雨量效应。西安地区全年 $\delta^{18}\text{O}$ 值和温度效应、雨量效应之间并没有明显的规律(图 3),将此地区时间区间分为冬半年和夏半年分别讨论,冬半年的 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度和夏半年 $\delta^{18}\text{O}$ 与雨量的线性回归方程分别为: $\delta^{18}\text{O}=0.17T-9.45$ ($R^2=0.49$)
 $\delta^{18}\text{O}=-0.10X-6.16$ ($R^2=0.81$)。两者之间具有较好的线性关系,而夏半年 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度和冬半年 $\delta^{18}\text{O}$ 与雨量之间的线性关系很差,表明西安地区大气降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值冬半年表现出显著的温度效应,夏半年则受到雨量效应的影响。对于具有高原气候的拉萨地区,夏季出现较低值与其水汽的整个输送过程有关,水汽主要来源于阿拉伯海,途径印度大陆,然后到孟加拉湾洋面进入拉萨地区,远距离的水汽输送水汽凝结程度大,重同位素贫化程度也越导致 $\delta^{18}\text{O}$ 出现较低值。另外,水汽的输送过程中可能伴随着厚层水汽输送,导致重同位素贫化严重,使得 $\delta^{18}\text{O}$ 出现较低值,表明拉萨地区夏季 $\delta^{18}\text{O}$ 的较低值并不是雨量效应所致,主要与季风活动强弱有关^[11]。由于平凉地区的数据较少,这里我们不做讨论。

2.3 西北地区 d 值的变化

Dansgarrrd^[12] 根据大气降水线定义了氘盈余: $d=\delta\text{D}-8\delta^{18}\text{O}$ 。 d 值对识别蒸发-凝结循环过程中的二次作用,在大气水汽含量影响、判断水汽来源地等方面是很好的工具。最重要影响 d 值的因素是蒸发过程中空气的温度和相对湿度,全球平均 d 值为 10‰,代表

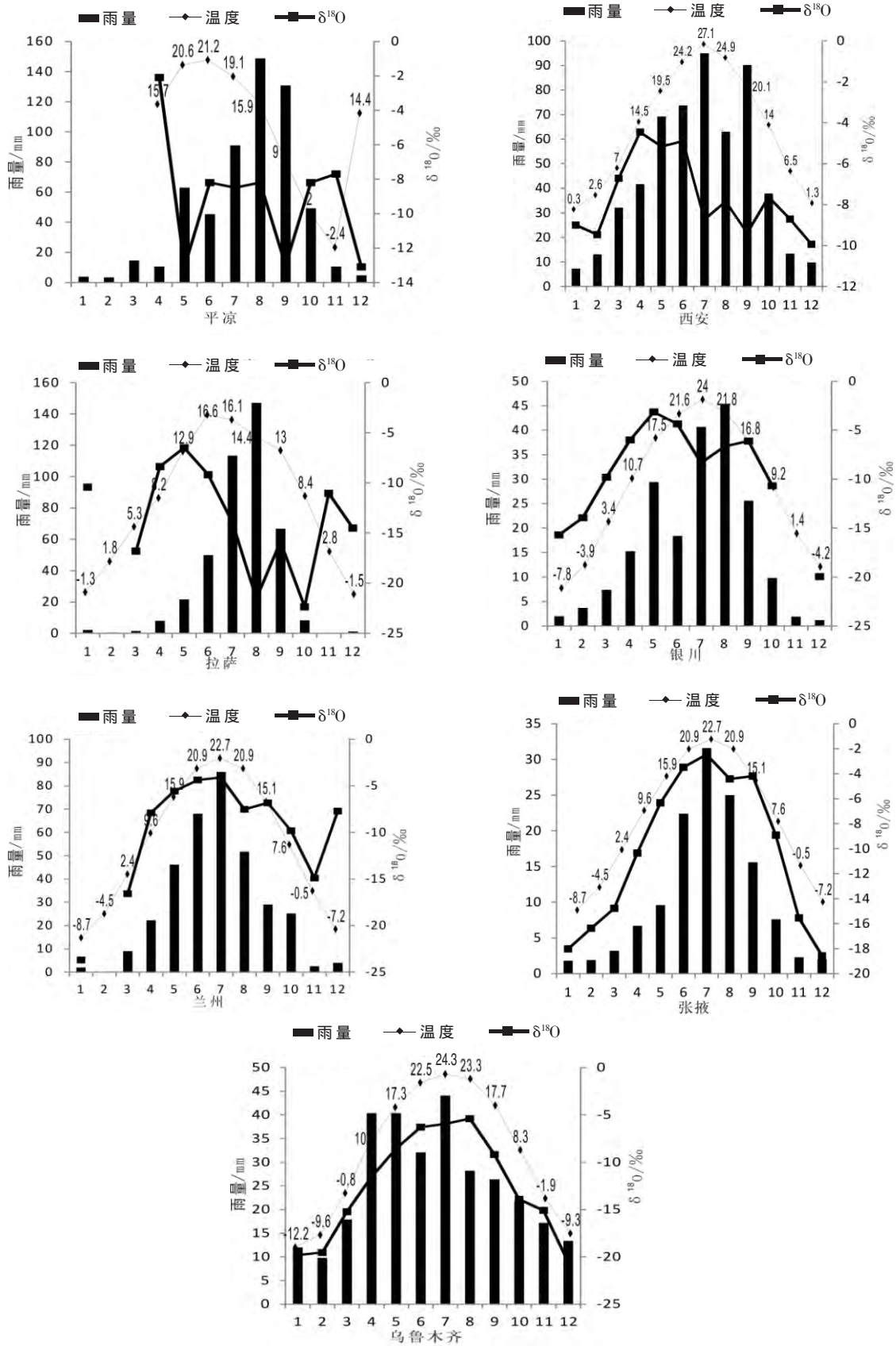


图3 西北地区大气降水的 $\delta^{18}O$ 和雨量、温度的变化

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

85%的相对湿度;当降水水汽源区蒸发过程发生于较小的湿度时降水中的 $d > 10$,而在较高的湿度条件下则 < 10 ^[13];来自不同源区的海洋-大气界面水汽产生的降水都有特定的 d 值,因此也是判断水汽来源地的良好指标;在内陆, d 值被来自内陆蒸发-蒸腾产生的水汽混合或二次蒸发影响而发生改变,降水中较低的 d 值反映了水汽源区湿度较高且蒸发进行缓慢,而高值则反映了水汽源区湿度较低且经过重复蒸发。

西北地区是典型的内陆干旱区,图4为该地区大气降水水汽盈余的月均变化图。从总体上来看,西北地区水汽盈余表现为冬半年高、夏半年低的趋势。乌鲁木齐和张掖都属于非季风区,两地的 d 值全年变化规律基本保持一致,变化范围分别为 $15.3\% \sim 21.2\%$ 和 $6.3\% \sim 22.2\%$,冬半年水汽主要受控于西风带的输送。水汽从新疆地区流入,向西北内陆输送,随着向内陆干旱区输送距离的增长,从而导致 d 值逐渐增大。其中,乌鲁木齐地区大气降水的 d 值均大于张掖地区,这是因为冬半年乌鲁木齐大气降水中混入了大量的局地循环水汽的缘故;夏半年乌鲁木齐和张掖两地区仍然以西风带大陆性水汽输送为主^[14-15],其 d 值的变化范围分别为 $2.7\% \sim 13.3\%$ 和 $-3.2\% \sim 10\%$,大多数位于海洋平均值 10% 以下,究其原因是因为雨滴在降落过程中受到强烈的蒸发而导致 d 值偏小。冬半年水汽来源比较单一,主要来自于西风带和局地再循环水汽^[16],变化趋势也与乌鲁木齐和张掖相近;夏半年水汽来源较为复杂,4~6月份水汽主要是西风带水汽的输送,水汽在输送过程中经过多次凝结降雨引起同位素分馏,表现为 d 值的逐渐增加;6~7月 d 值降低,而到8月又升高,结合夏季亚洲季风的进退时间, d 值的降低是由于此时间段季风作用的加强,水汽源地相对湿度不断升高。这个时间段水汽除了来自西风带的输送,还受到东南季风的影响,8月份 d 值的升高是因为受到一定量局地水汽的混入;8~10月 d 值呈上升趋势,但是要比冬半年小,因此水汽除了来自西风带的输送外,还有部分来自东南方向,部分来自北冰洋水汽。

根据我国季风影响的时间来看,在6~9月是拉萨地区全年降水集中的时期,已有研究表明,夏季降雨与印度洋季风的进退日期一致,因此拉萨地区的大气降水夏季主要来源于孟加拉湾,当然,拉萨地区也会受到局地再循环降水的影响;而冬季来源于相对较干燥的地区^[17]。

银川地区 d 值变化比较平稳,说明此区域多年尺

度下水汽来源比较稳定,这与其特殊的地理位置有关,受到青藏高原和贺兰山等山脉的阻隔,大气环流不畅通,而且离海岸较远,海洋水汽很难到达,因此银川地区夏半年的水汽主要来源于局地水汽的循环,而在7、8月份 d 值较低,可能是因为当地温度过高,从而导致雨滴在降落过程中受到强烈的蒸发。

西安地区冬半年和夏半年 d 值的变化都不是很大,说明两个时间段虽然水汽来源不同,但是来源都相对稳定^[18],冬半年 d 值的变化趋势与乌鲁木齐、兰州和张掖三个地区的变化趋势基本一致,水汽主要由西风带输送;进入夏半年时, d 值出现明显的极低值点,这是由于季风所致,结合季风的影响时间,西南季风首先到达西安地区,随着西南季风的退去,水汽的输送减少, d 值逐渐升高,8月份达到最大值,如图4所示,8月份相较于7月、9月两月份雨量较少;此时应该对应于西南季风和东南季风更替;东南季风到达西安, d 值降低,雨量增大,一直到10月份,东南季风也退去时, d 值才逐渐升高。

平凉夏季雨量较大, d 值变化不大,说明水汽来源比较稳定。与其它地区相比,平凉地区 d 值均小于 10% ,说明平凉降水水汽来源地相对湿度较大,平凉位于六盘山区,海拔较高,也更靠近东部平原区,因此,夏季季风期间其水汽可能主要来源于六盘山东部太平洋及六盘山局地水循环。

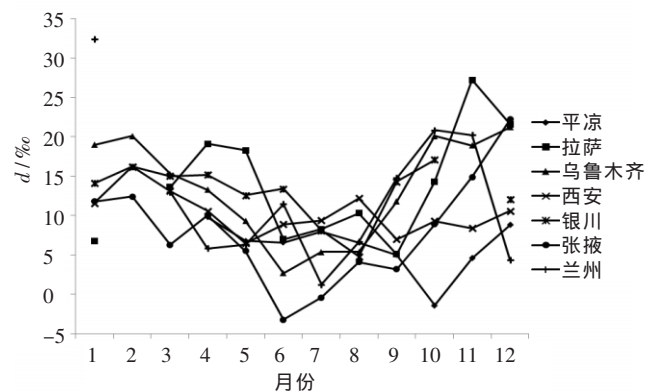


图4 西北地区大气降水 d 值的月均变化

Fig.4 The seasonal variations of the monthly weighted mean deuterium excess at northwest China

2.4 西北地区大气降水线方程

大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 的关系对研究水循环过程有重要的意义。利用 IAEA 的稳定同位素数据线性回归求得西北各地区的大气降水线方程为:

$$\text{平凉: } \delta\text{D} = 8.10\delta^{18}\text{O} + 6.97 \quad (R^2 = 0.98)$$

拉萨: $\delta D = 8.08\delta^{18}O + 12.37$ ($R^2 = 0.98$)

乌鲁木齐: $\delta D = 6.98\delta^{18}O + 0.438$ ($R^2 = 0.93$)

西安: $\delta D = 7.49\delta^{18}O + 6.13$ ($R^2 = 0.91$)

银川: $\delta D = 7.22\delta^{18}O + 5.50$ ($R^2 = 0.96$)

张掖: $\delta D = 6.76\delta^{18}O - 4.50$ ($R^2 = 0.94$)

兰州: $\delta D = 7.01\delta^{18}O + 1.53$ ($R^2 = 0.94$)

各个地区的大气降水线方程与全球大气降水线方程相比较我们可以看出,除了平凉和拉萨地区的大气降水线的方程斜率和截距与全球大气降水线相近外,其它各地区的大气降水线的斜率和截距都较小,表明这些地区的水汽在输送过程中发生了动力分馏,在降落过程中受到了二次蒸发,并有一定的局地再循环水汽的混入。拉萨地区海拔较高,温度常年较低,大气降水降到地面时受到的蒸发作用较小。这些地区的大气降水线的斜率和截距与平凉相比均较小,斜率和截距均较小说明这些地区雨水在降落过程中受到的蒸发作用较强,这与前面提到的海拔高程及城市热岛效应强烈会导致 $\delta^{18}O$ 更加富集结论相一致。

2.5 西北地区大气降水 H、O 同位素数据库的选用

很多研究在讨论山区地下水的补给源时,利用地下水的氢氧同位素值与大气降水的多年加权平均值进行比较,以便辅助论证地下水的补给源是否为大气降水,但如果直接采用大城市附近设立的监测点测得的数据或不同海拔高程的临近监测点数据,往往得到不确切的结论。因为城市人口密度大,各类人为活动持续不断产生热效应,强烈的城市热岛效应会使降水的氢氧同位素多年加权平均值增大。同时,山区地形起伏变化很大,平均海拔高程一般高于临近城市降水监测点,同时不同程度的降水往往与局部水汽循环有关,不能机械地把临近城市降水监测点同位素值直接应用于山区进行对比。

在研究山区地下水循环时,受到实际的地下水补给条件影响,不同的降水方式或不同的雨量对区域地下水补给的贡献量相差很大,如久旱之后的降雨可能仅够湿润地表很浅的土壤剖面,并不足以补给到地下含水层中去,对地下水的同位素组成可能没有实际的贡献;一些区域夏季蒸发强烈,降雨绝大部分被蒸发损失了,补给到地下水的量十分有限,相反,持续时间长的绵绵细雨,短时间内较强的暴雨,或者冬季降雪因蒸发相对减弱,有可能易于补给地下,从而使地下水同位素比当地年均降水偏负得多。因此在选取大气降水同位素数据时,虽然国际原子能机构有比较完整的多年

监测数据,但在研究西北黄土高原山区地下水循环或区域水文循环时,要根据实际情况充分考虑海拔效应、热效应、雨量效应及季节效应来确定选择哪些地区、哪些时段的数据作为对比标准。

3 结论

(1)西北地区大气降水的氢氧同位素值均落在全球大气降水的范围内。乌鲁木齐、银川、张掖和兰州四个地区的大气降水的 $\delta^{18}O$ 呈现明显的夏半年高、冬半年低的规律。从全年尺度上来看,这四个地区主要为温度效应,只有在夏季表现出了微弱的雨量效应。相反,线性回归表明西安地区夏季雨量效应明显,冬季温度效应明显。平凉地区大气降水的 $\delta^{18}O$ 值比临近银川、兰州等地区都偏负,主要与高程效应有关。

(2)对西北地区各站点的氘盈余的分析来看,整体上呈现出夏半年低、冬半年高的现象,冬半年水汽主要来源于西风带和局地水汽再循环;夏半年不同地区水汽来源不同,乌鲁木齐和张掖地区为非季风区,主要受控于西风带的输送;兰州地区水汽除了来自西风带的输送,还受东南季风的影响;拉萨地区,其水汽主要来源于孟加拉湾;银川地区由于其特殊的地理位置,全年降水水汽主要来源于局地水汽循环;西安地区主要受到东南季风和西南季风的影响;平凉地区 d 值较小,说明水汽来源地空气相对湿度较大,蒸发缓慢,夏季水汽可能主要来源于东部太平洋以及高峻的六盘山局地水循环。

(3)除了拉萨和平凉两个较高海拔的地区,西北地区大气降水线方程与全球大气降水线方程相比,斜率和截距均偏小,表明这些地区地处内陆干旱区,水汽在输送过程中属于非平衡分馏,而且在降雨过程受到二次蒸发效应较强。平凉地区大气降水线的斜率、截距均大于其它地区,说明其它地区降水受到的蒸发作用较大,这与平凉地区海拔较高,降水水汽来源地的相对湿度较小有关。

(4)在研究流域地下水循环或区域水文循环时,要根据实际情况充分考虑海拔效应、热效应、雨量效应、局地水文循环及季节效应来确定选择哪些地区、哪些时段的大气降水同位素数据作为对比标准。

参考文献:

- [1] 李亚举, 张明军, 王圣杰. 我国大气降水中稳定同位素研究进展[J]. 冰川冻土, 2011, 33(3): 624-629. (LI Yaju, ZHANG Mingjun, WANG Shengjie. Progress of the research of stable isotope in precipitation

- in China: a review[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011,33(3):624–633. (in Chinese))
- [2] Jinzhu Ma, Zhenyu Ding, W. Mike Edmunds, et al. Limits to recharge of groundwater from Tibetan plateau to the Gobi desert, implications for water management in the mountain front[J]. *Journal of Hydrology*, 2009,364:128–141.
- [3] TIAN LiDe, MA LingLong, YU WuSheng, et al. Seasonal variations of stable isotope in precipitation and moisture transport at Yushu, eastern Tibetan Plateau [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2008,51(8):1121–1128.
- [4] Jianshen Chen, Xiaoyan Liu, Chiyuan Wang, et al. Isotopic constraints on the origin of groundwater in the Ordos Basin of northern China[J]. *Environ Earth Sci*, 2012,66:505–517.
- [5] 侯典炯,秦翔,吴锦奎,等. 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):136–141. (HOU Dianjiong, QIN Xiang, WU Jinkui, et al. 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))
- [6] 马晓波. 中国西北地区最高、最低气温的非对称变化[J]. *气象学报*, 1999,57(5):613–621. (MA Xiaobo. The asymmetric change of maximum and minimum temperature in the northwest China [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1999,57(5):613–621. (in Chinese))
- [7] 章新平. 降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 月均变化和年际变化的比较 [J]. *湖南师范大学自然科学学报*, 2005,28(1):88–93. (ZHANG Xinping. Comparisons on seasonal and annual variations of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation [J]. *Acta Sci Nat Univ Norm Hunan*, 2005,28(1):88–93. (in Chinese))
- [8] 王可丽,江灏,赵红岩. 西风带与季风对中国西北地区的水汽输送[J]. 2005,16(3):432–438. (WANG Keli, JIANG Hao, ZHAO Hongyan. Atmospheric water vapor transport from westerly and monsoon over the northwest China [J]. *Advances in Water Science*, 2005,16(3):432–438. (in Chinese))
- [9] 张琳,陈宗宇,聂振龙,等. 我国不同时间尺度的大气降水氧同位素与气温的相关性分析[J]. *核技术*, 2008,31(9):715–720. (ZHANG Lin, CHEN Zongyu, NIE Zhenlong, et al. Correlation between $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation and surface air temperature on different time scale in China [J]. *Nuclear Techniques*, 2008,31(9):715–720. (in Chinese))
- [10] 章新平,姚檀栋. 我国部分地区降水中氧同位素成分与温度和雨量之间的关系 [J]. *冰川冻土*, 1994,16(1):31–39. (ZHANG Xinping, YAO Tandong. Relations of oxygen isotopic composition in precipitation with temperature and precipitation amount in some regions of China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1994,16(1):31–40. (in Chinese))
- [11] 田立德,姚檀栋,蒲健辰,等. 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 Jianchen, et al. Characteristics of stable isotope in summer precipitation at Lhasa [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1997,19(4):295–301. (in Chinese))
- [12] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation [J]. *Tellus*, 1964,16(4):436–468.
- [13] R D Deshpande, S K Bhattacharya, R A Jani, et al. Distribution of oxygen and hydrogen isotopes in shallow groundwater from Southern India influence of a dual monsoon system [J]. *Journal of Hydrology*, 2003,271:226–239.
- [14] 李晖,蒋忠诚,王月,等. 新疆地区大气降水中稳定同位素的变化特征[J]. *水土保持研究*, 2009,16(5):157–161. (LI Hui, JIANG Zhongcheng, WANG Yue, et al. Variation characteristics of stable isotopes in the precipitation of Xinjiang [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2009,16(5):157–161. (in Chinese))
- [15] 吴军年,王红. 张掖大气降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 特征及水汽来源[J]. *安徽农业科学*, 2011,39(3):1601–1604. (WU Junnian, WANG Hong. Characteristics of the $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation and water vapor source in Zhangye [J]. *Journal of Anhui Agri.Sci*, 2011,39(3):1601–1604. (in Chinese))
- [16] 陈粉丽,张明军,马潜,等. 兰州及其周边区域大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 特征及其水汽来源[J]. *环境科学*, 2013,34(10):3755–3763. (CHENG Fenli, ZHANG Mingjun, MA Qian, et al. Characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation and water vapor sources in Lanzhou city and its surrounding area [J]. *Environmental Science*, 2013,34(10):3755–3763. (in Chinese))
- [17] ZHANG Xinping, Nakawo M, YAO Tandong, et al. Variations of stable isotopic compositions in precipitation on the Tibetan Plateau and its adjacent regions [J]. *Science in China (Series D)*, 2002,45(6):481–493.
- [18] 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. (ZHANG Xinping, LIU Jingmiao, Masayoshi Nakawo, et al. Vapor origins revealed by deuterium excess in precipitation in southwest China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009,31(4):613–619. (in Chinese))

Hydrogen and Oxygen Isotopic Analysis of Perennial Meteoric Water in Northwest China

HUANG Jinzhong¹, TAN Hongbing¹, WANG Ruohan², WEN Xiawei¹

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Pingliang Meteorology Bureau of Gansu Province, Pingliang 744000, China)

Abstract: Rainfall is a crucial factor of hydrologic cycle, especially in arid region. The hydrogen and oxygen isotopic data of meteoric water in Urumqi, Yinchuan, Zhangye, Lanzhou, Pingliang, Xi'an and Lhasa were collected in this study to analyze the H and O isotopic (下转第 50 页)

- [J]. Hydrological Processes, 2012, doi: 10.1002/hyp.9539
- [18] Mann H B. Nonparametric tests against trend [J]. *ECONOMETRICA*, 1945,13(3):245–259.
- [19] Kendall. Rank Correlation Measures (2nd) [M]. London: Charles Griffin, 1975.
- [20] Searcy J K, Hardison C H. Double Mass Curves [M]. US Geological Survey, Water-Supply Paper 1541-B, 1960, 66.
- [21] Li L J, Zhang L, Wang H, Wang J, Yang J W, et al. Assessing the impact of climate variability and human activities on streamflow from the Wuding River basin in China [J]. *Hydrological Processes*, 2007,21:3485–3491.
- [22] Dooge J C I, Bruen M, Parmentier B. A simple model for estimating the sensitivity of runoff to long-term changes in precipitation without a change in vegetation [J]. *Advances in Water Resources*, 1999,23:153–163.
- [23] Zhang L, Dawes W R, Walker G R. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale [J]. *Water Resources Research*, 2001,37(3):701–708.
- [24] Jones R N, Chiew F H S, Boughton W C, et al. Estimating the sensitivity of mean annual runoff to climate change using selected hydrological models [J]. *Advances in Water Resources*, 2006,29:1419–1429.
- [25] 邱玲花,彭定志,林荷娟,等. 太湖西苕溪流域水文序列突变检测比较和分析研究[J]. *水资源研究*, 2013,2(6):415–419. (QIU Linghua, PENG Dingzhi, LIN Hejuan, et al. Change-point detection and analysis of hydrological time series in Xitiao River basin [J]. *Journal of Water Resources Research*, 2013,2(6):415–419. (in Chinese))
- [26] 李恒鹏,王旭强,杨桂山,等. 基于单元格网的 STREAM 分布式水文模型及其应用——以太湖上游西苕溪流域为例[J]. *长江流域资源与环境*, 2007,16(6):715–720. (LI Hengpeng, WANG Xuqiang, YANG Guishan, et al. Application of grid basin stream distributed hydrological model [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2007,16(6):715–720. (in Chinese))

Quantitative Discrimination of Climate Change and Human Activities Impacting on Runoff in Xitiao River Basin

QIU Linghua¹, PENG Dingzhi¹, LIN Hejuan², ZHANG Mingyue², FANG Jin¹

(1. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Bureau of Taihu Lake Basin, Shanghai 200434, China)

Abstract: Cumulative anomaly curve and Mann–Kendall methods were utilized to do trend analysis of precipitation, potential evapotranspiration and runoff in the Xitiao catchment of the Taihu Lake Basin. The results indicate that the runoff and potential evapotranspiration tend to decrease and precipitation occur without significant trend under the 95% confidence level. As to quantitatively discern the impacts of climate change and human activities on hydrological processes and detect the dominated driving force of hydrological variation, hydrological sensitivity-based method and double mass curve method with original and modified one were applied to distinguish the interference of climate change and human activities to hydrological processes in the basin during 1972~2010. It demonstrated that climate change and human activities contributed 37%~42% and 58%~63% to runoff variation in the basin, showing larger influence of human activities than that of climate change.

Key words: Xitiao River; climate change; human activity; hydrological sensitivity-based method; double mass curve method

(上接第 39 页) characteristics, hydrological cycle and to establish the H and O isotopic standard for the Northwest China. In this paper, the $\delta^{18}\text{O}$ of summer half year display higher values than winter half year in W, Y, Z and L because of the temperature effect. Due to the complicated water vapor sources, the $\delta^{18}\text{O}$ values of meteoric water in Xi'an, which is located in the Guanzhong Basin, are controlled by temperature effect and rainfall effect in summer and winter half year respectively. The meteoric water in Pingliang has much more depleted O isotopic compositions in May to September than meteoric water in other areas with the same altitude, such as Pingliang. This abnormal O isotopic characteristics in Pingliang is related to the relatively weak urban heat island effect. In the Northwest China, the δD and $\delta^{18}\text{O}$ values of meteoric water are varying in the range of global meteoric water. The lower slope and intercept of regional meteoric water lines in investigated places, except Pingliang and Lhasa, than the Global Meteoric Water Line suggest the precipitation process of these places undergo strong evaporation and may mix with condensation waters from vapor of meteoric water in some local areas. The higher deuterium surplus in winter half year than in summer half year may indicate that the vapor sources or conditions of evaporation are different in winter and summer half year.

Key words: Northwest China; meteoric water; hydrogen and oxygen isotopes; distribution characteristics