

# 西鄂尔多斯荒漠夏季大气降水氢氧同位素特征与水汽来源

陈 婕, 高德强<sup>1</sup>, 徐 庆<sup>1\*</sup>, 郝玉光<sup>2</sup>, 马迎宾<sup>1,2</sup>, 张蓓蓓<sup>1</sup>

(1. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 北京 100091; 2. 中国林业科学研究院沙漠林业实验中心, 内蒙古 磴口 015200)

**摘要:** [目的] 内蒙古西鄂尔多斯荒漠生态环境脆弱、气候变化较敏感, 探究该地区大气降水氢氧稳定同位素组成及其水汽来源, 对揭示我国西鄂尔多斯荒漠生态系统水循环过程、减缓或防止土地沙漠化和制定区域水资源合理利用策略等具有重要的理论意义。 [方法] 本研究运用稳定同位素技术, 分析了西鄂尔多斯荒漠夏季大气降水的  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  组成、关系及其影响因素, 同时, 运用 HYSPLIT 气团轨迹模型判定了该地区夏季大气降水的水汽来源。 [结果] 西鄂尔多斯夏季大气降水氢氧稳定同位素关系为  $\delta D = 7.287\delta^{18}O + 1.170$ ; 大气降水  $\delta D(\delta^{18}O)$  与降水量呈负相关关系 ( $P < 0.05$ ), 与温度无显著相关性 ( $P > 0.05$ ); 大气降水过量氘 (d-excess) 均为正值且小于全球平均 d 值 (10‰), 表明该地区受到了海洋季风作用的影响; HYSPLIT 气团轨迹模型得出西鄂尔多斯荒漠在 6 月和 8 月的水汽来源于大量局地蒸发和西北方向的水汽, 特大暴雨 (>30 mm) 是受到东南季风的影响; 而 7 月的水汽来源于东南和西南方向海洋性水汽团。 [结论] 西鄂尔多斯荒漠大气降水经历了一定程度的蒸发作用; 西鄂尔多斯夏季降水量效应显著, 温度效应不显著; 夏季降水受到西北方向、东南和西南方向季风以及局地蒸发水汽的共同影响。

**关键词:** 西鄂尔多斯荒漠; 大气降水; 水汽来源; 氢氧稳定同位素

中图分类号: P426.61

文献标识码: A

## Characteristics of $\delta D$ and $\delta^{18}O$ in Summer Precipitation in the West Ordos Desert and Its Water Vapor Sources

CHEN Jie<sup>1</sup>, GAO De-qiang<sup>1</sup>, XU Qing<sup>1</sup>, HAO Yu-guang<sup>2</sup>, MA Ying-bin<sup>1,2</sup>, Zhang Bei-bei<sup>1</sup>

(1. Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;

2. Experimental Center of Desert Forestry, Chinese Academy of Forestry, Dengkou 015200, Inner Mongolia, China)

**Abstract:** [Objective] The ecological environment and climate in the West Ordos Desert of Inner Mongolia is fragile and sensitive. Study on the hydrogen ( $\delta D$ ) and oxygen ( $\delta^{18}O$ ) stable isotopic compositions and sources of precipitation in the West Ordos Desert is theoretically important to reveal the process of hydrological cycle in the West Ordos Desert and develop strategies for reducing or preventing land desertification and the use of regional water resource. [Methods] By using stable isotope technique, the compositions and relationships of  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  in precipitation and the effect of climatic factors on them in West Ordos Desert in summer were analyzed. Furthermore, the water vapor sources were determined based on HYSPLIT model. [Results] The relationship of  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  in precipitation in summer was  $\delta D = 7.287\delta^{18}O + 1.170$ . An apparent inverse correlation between stable isotopes and precipitation existed in the West Ordos Desert in summer ( $P < 0.05$ ), but no significant correlation was found between stable isotopes and temperature ( $P > 0.05$ ). The d-excess was positive and less than the global average d-ex-

收稿日期: 2015-09-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(31170661, 30771712)及林业公益行业专项(201504423)资助。

作者简介: 陈 婕(1987—), 女, 博士。主要研究方向: 稳定同位素生态学。E-mail: 657165743@qq.com。

\* 通讯作者: 徐 庆(1964—), 女, 博士, 研究员。主要研究方向: 稳定同位素生态学。E-mail: xuqing@caf.ac.cn。

cess (10‰), indicating that the precipitation in the West Ordos Desert was affected by ocean monsoon. The results of air mass back trajectories of summer precipitation using the HYSPLIT model indicated a dominant effect of local evaporation and continental northwesterly monsoon air masses in June and August, an effect of southeasterly monsoon on heavy rainfall (>30 mm), and the co-influence of oceanic monsoons southeasterly and southwesterly air masses in July. [Conclusion] The precipitation in the West Ordos Desert experiences evaporation effect. Analysis of precipitation and temperature effects indicates that the “amount effect” exists significantly, whereas the “temperature effect” is not obvious during summer. The water vapor from continental northwesterly, oceanic monsoons southeasterly and southwesterly, and local evaporation collectively have influence on precipitation in summer in the West Ordos Desert.

**Keywords:** West Ordos Desert; meteoric water; water resource; hydrogen and oxygen stable isotopes

大气降水是水循环过程中最为重要的环节<sup>[1]</sup>,也是当今全球及局地气候变化的关键指标之一。稳定同位素是自然水体的重要组成部分。水分子中不同同位素间由于分子质量差异造成同位素以不同的比值分配到两种物质或物相中而呈现分馏现象。水源区的初始状态、水汽的输送过程决定着降水中稳定同位素的组成和变化<sup>[2-3]</sup>,同时当地的温度、降水量、经纬度等气候和地理因素也会影响大气降水稳定同位素特征<sup>[4-6]</sup>,使得不同地区具有明显的时空差异<sup>[7-9]</sup>。大气降水中的稳定同位素不仅可以记录水循环演化过程中的历史信息,还能有效的反演天气系统和大气环流过程<sup>[10]</sup>。因此,开展大气降水氢氧稳定同位素特征的研究将有助于人们了解和识别不同地区、不同历史阶段的水汽来源<sup>[11]</sup>和大气水循环过程<sup>[3,6]</sup>,从而为进一步判别降水补给源区、分析区域水循环的季节性和年际性变化、模拟古气候和古水文状况等提供重要的科学依据<sup>[12-15]</sup>。

1966年,珠穆朗玛峰的科学考察开启了我国对于降水稳定同位素的研究<sup>[16]</sup>。1983年,我国加入GNIP研究计划<sup>[17]</sup>。2004年建立了中国大气降水同位素网络CHNIP(Chinese Network of Isotope in Precipitation),开始系统地降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta\text{D}$ 进行观测和研究<sup>[18]</sup>。近几十年来,一些学者已对我国东部季风区<sup>[19]</sup>、长江流域<sup>[20]</sup>、西北干旱地区<sup>[9,21]</sup>、西南季风区<sup>[22-25]</sup>、青藏高原区<sup>[26-29]</sup>等区域和局部地区乌鲁木齐<sup>[30]</sup>、湖南<sup>[31-32]</sup>、宜昌<sup>[33]</sup>、桂林<sup>[34]</sup>等地的降水中氢氧稳定同位素进行了分析研究,这些研究主要为区域或大尺度水循环特征提供数据支持,分析了降水中氢氧同位素的分布特征、变化规律及其机制、同位素和各种环境因子间的效应及水汽输送过程<sup>[35-37]</sup>。然而,由于我国地域辽阔,各地区之间气候、地理条件差异大且复杂多变,造成大气降水稳定

同位素组成变异较大。郑淑慧<sup>[38]</sup>利用8个台站107个降水样品得出了我国大气降水线方程,它并不能完全代表我国大气降水特征。因此,为了全面详细的认知、研究我国大气降水稳定同位素特征,还需要积累更多地区的大气降水数据<sup>[1]</sup>。

西鄂尔多斯荒漠位于我国内蒙古鄂尔多斯高原西部,生态环境脆弱敏感。由于它地处我国西北内陆气候与东部季风气候的过渡地带,因此该地区的大气降水既可能来自太平洋的东南夏季风,也可能来自西北方向的冬季风。查明西鄂尔多斯的大气降水氢氧稳定同位素的变化特征及其水汽来源,将有助于了解西鄂尔多斯大气水循环过程、减缓或防止土地沙漠化和合理利用和管理当地珍贵的水资源。而前人的研究主要集中于鄂尔多斯沙区周边降水同位素组成与来源<sup>[39]</sup>和鄂尔多斯盆地大气降水氢氧同位素特征<sup>[40-41]</sup>等,对于西鄂尔多斯荒漠大气降水同位素组成及来源的研究较少。

本研究通过对代表西鄂尔多斯荒漠的乌加庙、桃司兔和乌海地区夏季降水的氢氧稳定同位素组成特征进行分析,建立了西鄂尔多斯荒漠夏季降水线方程,分析了过量氙的变化特征,并结合HYSPLIT气团轨迹模型判定该地区夏季降水的水汽来源。这对深入研究西鄂尔多斯荒漠降水分配机制,揭示该区域水循环机制等具有重要的理论意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

本研究选择了乌加庙(107°09' E,40°14' N)、桃司兔(106°52' E,40°07' N)、乌海(106°53' E,39°32' N)3个研究样地(50 m × 50 m)进行大气降水样品的采集。这3个样地位于西鄂尔多斯荒漠,属于温带大陆性气候。冬季寒冷漫长,春秋短暂,夏季炎

热,降水量少,光照充足,热量丰富,昼夜温差大,无霜期短。年平均气温 7.6~9.8℃,年平均降水量 144.5~200 mm,年均蒸发量 2 397.6~3 481.0 mm。从地形上看,桃司兔在乌加庙西部,两地相距约 30 km,乌海距离桃司兔在约 70 km。研究区中植被类型主要是沙漠灌木和半灌木,如沙冬青(*Ammodendron mongolicum* (Maxim. ex Kom.) Cheng f.)、白刺(*Nitraria tangutorum* Bobr.)、四合木(*Tetraena mongolica* Maxim.)和红砂(*Reaumuria songarica* (Pall.) Maxim.)等。

## 1.2 野外采集

2012年6—8月野外测定研究区的气温、降水量,并采集降水样品。方法如下:在乌加庙、桃司兔和乌海样地内各放置2个雨量筒,筒内各放置一个漏斗,将一个乒乓球放在漏斗口上以防止雨水蒸发。每次降雨结束后,记录降水量并立即用玻璃采样瓶收集降水样品,迅速拧紧盖子,用Parafilm封口膜密封,以最大程度地降低由于蒸发造成的数据误差。所有水样在野外条件下用保温箱低温(0℃~5℃)保存,带回实验室后在-5℃以下冰柜中保存。该区域的温度、降水量由野外实测获得。该区域2004年~2014年的月平均气温、月平均降水量、月平均蒸发量、月平均相对湿度等气象数据由中国林业科学研究院沙漠林业实验中心提供。2012年6—8月的日降水量、温度、相对湿度等气象数据由野外各样地实测获得。

## 1.3 同位素样品测试

所有水样品的 $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$ 的测定由中国林业科学研究院稳定同位素实验室的DELTA V Advantage同位素比率质谱仪(Thermo Fisher Scientific Corp.)和Flash EA1112 HT元素分析仪完成, $\delta D$ 的测定精度为 $\pm <1\text{‰}$ , $\delta^{18}O$ 的测定精度为 $\pm <0.2\text{‰}$ 。同位素比值可以表示为:

$$\delta = \left[ \left( R_{\text{sample}} / R_{\text{standard}} \right) - 1 \right] \times 1000\text{‰}$$

其中 $R_{\text{sample}}$ 和 $R_{\text{standard}}$ 分别为样品和维也纳标准平均海洋水的 $^2H/^1H$ 或 $^{18}O/^{16}O$ 。

降水氢氧稳定同位素的加权平均值:

$$\delta_{(w)} = \sum P_i \delta_i / \sum P_i$$

式中: $\delta_{(w)}$ 为加权平均值; $P_i$ 为降水量; $\delta_i$ 为相应的同位素值。

## 1.4 水汽来源模型

混合单粒子拉格朗日积分轨迹模型HYSPLIT是由美国海洋大气研究中心和空气资源实验室共同

合作开发。该模型常用来追踪气体移动方向,研究水汽输送轨迹<sup>[42-43]</sup>。本研究利用网页在线版(<http://www.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>)模型,结合国家环境预测中心(NCEP)的全球同化系统气象数据,以西鄂尔多斯荒漠作为气团运动终点,气团高度设为地面以上500、1 000、1 500 m共3层,分别计算每次降水144 h之前降水气团轨迹。

## 1.5 数据处理与分析

运用Excel 2013对数据进行处理分析,SPSS统计分析软件对数据进行线性回归分析,用Sigmaplot 12.5制图软件绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 大气降水中 $\delta D$ 与 $\delta^{18}O$ 特征

2004—2014年西鄂尔多斯多年平均降雨量127.6 mm,其中2012年降水量最大(219.5 mm),2011年、2013年降水量显著低于平均水平,分别为56.4 mm和59.1 mm。该区的主要降水量集中在6—9月,占了全年降水的79.9%。多年平均蒸发量为2 566.9 mm,是年平均降水量的20倍(图1)。

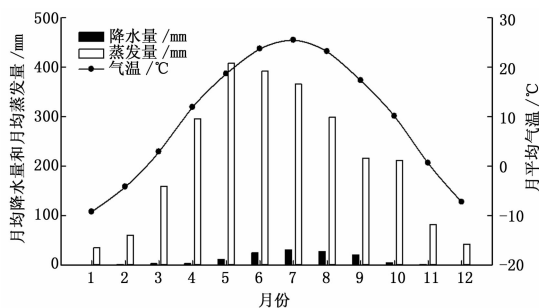


图1 西鄂尔多斯月平均气温、月平均降水量和月平均蒸发量

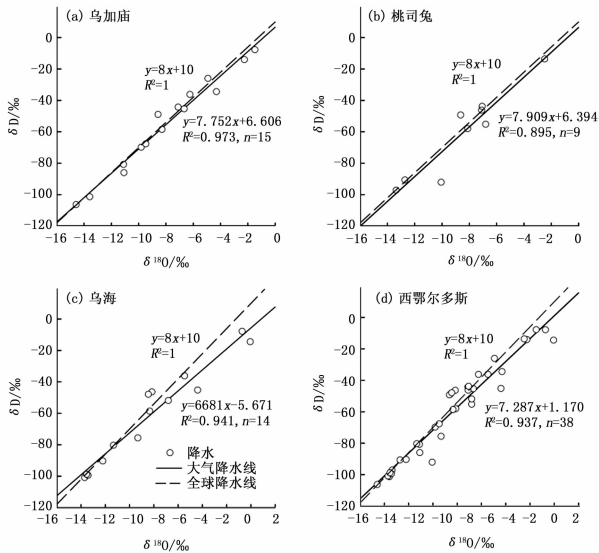
根据内蒙古西鄂尔多斯乌加庙、桃司兔和乌海三个研究区2012年6—8月38个大气降水氢氧稳定同位素组成可以看出(图2),乌加庙大气降水 $\delta D$ 介于 $-106.3\text{‰}$ ~ $-7.8\text{‰}$ 之间, $\delta^{18}O$ 介于 $-14.6\text{‰}$ ~ $-1.5\text{‰}$ ,加权平均值分别为 $-81.9\text{‰}$ 和 $-8.3\text{‰}$ (图2a);桃司兔大气降水 $\delta D$ 介于 $-97.2\text{‰}$ ~ $-13.6\text{‰}$ 之间, $\delta^{18}O$ 介于 $-13.4\text{‰}$ ~ $-2.5\text{‰}$ ,加权平均值分别为 $-74.6\text{‰}$ 和 $-10.4\text{‰}$ (图2b);乌海大气降水 $\delta D$ 介于 $-100.9\text{‰}$ ~ $-7.8\text{‰}$ 之间, $\delta^{18}O$ 介于 $-13.7\text{‰}$ ~ $-0.1\text{‰}$ ,加权平均值分别为 $-80.8\text{‰}$ 和 $-11.1\text{‰}$ (图2c)。西鄂尔多斯地区大气降水 $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$ 加权平均值分别为 $-80.1\text{‰}$ 和 $-11.0\text{‰}$ (图2d)。

## 2.2 夏季大气降水 $\delta D$ 与 $\delta^{18}O$ 的关系

如图2所示乌加庙、桃司兔和乌海及其所代表的西鄂尔多斯地区降水氢氧同位素线性关系为:

乌加庙:  $\delta D = 7.752\delta^{18}O + 6.606$  ( $R^2 = 0.973$ ,  $n = 15$ ); 桃司兔:  $\delta D = 7.909\delta^{18}O + 6.394$  ( $R^2 = 0.895$ ,  $n = 9$ ); 乌海:  $\delta D = 6.681\delta^{18}O - 5.671$  ( $R^2 = 0.941$ ,  $n = 14$ ); 西鄂尔多斯:  $\delta D = 7.287\delta^{18}O + 1.170$  ( $R^2 = 0.937$ ,  $n = 38$ ).

各样地大气降水氢氧稳定同位素线性关系可以反映出该地区大气降水中氢氧同位素的变化过程、复杂的气候和自然地理特征条件。斜率越低,表明二次蒸发较强。桃司兔地区大气降水氢氧稳定同位素线性方程中的斜率较大,可能是因为桃司兔更接近黄河,空气湿度相对较大。而乌海地区大气降水氢氧稳定同位素线性方程中的斜率和截距最小,表明乌海地区蒸发强度剧烈。



注:(a) 乌加庙;(b) 桃司兔;(c) 乌海;(d) 西鄂尔多斯

图2 乌加庙、桃司兔、乌海及其代表的西鄂尔多斯夏季大气降水氢氧稳定同位素关系

## 2.3 降水 $\delta D$ 与 $\delta^{18}O$ 的降雨量效应

乌加庙、桃司兔、乌海和西鄂尔多斯地区夏季降水中  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  与降水量进行线性回归(图3),得出拟合方程分别为:

乌加庙:  $\delta D = -1.201P - 36.781$  ( $r = 0.698$ ,  $n = 15$ ,  $F = 12.355$ ,  $P < 0.01$ );  $\delta^{18}O = -0.146P - 5.731$  ( $r = 0.668$ ,  $n = 15$ ,  $F = 10.484$ ,  $P < 0.01$ )

桃司兔:  $\delta D = -2.201P - 38.036$  ( $r = 0.682$ ,  $n = 9$ ,  $F = 6.095$ ,  $P < 0.05$ );  $\delta^{18}O = -0.310P - 5.296$  ( $r = 0.803$ ,  $n = 9$ ,  $F = 12.664$ ,  $P < 0.01$ )

乌海:  $\delta D = -0.870P - 46.810$  ( $r = 0.565$ ,  $n =$

14,  $F = 5.627$ ,  $P < 0.05$ );  $\delta^{18}O = -0.123P - 6.278$  ( $r = 0.550$ ,  $n = 14$ ,  $F = 5.198$ ,  $P < 0.05$ )

西鄂尔多斯:  $\delta D = -1.033P - 43.467$  ( $r = 0.592$ ,  $n = 38$ ,  $F = 19.467$ ,  $P < 0.01$ );  $\delta^{18}O = -0.137P - 6.203$  ( $r = 0.590$ ,  $n = 38$ ,  $F = 19.180$ ,  $P < 0.01$ )

可见,在夏季,乌加庙、桃司兔、乌海及其所代表的西鄂尔多斯荒漠地区大气降水  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  与降水量之间存在负相关关系( $P < 0.05$ ),具有降水量效应,即随着降雨量的增加, $\delta^{18}O$  逐渐贫化。

## 2.4 降水 $\delta D$ 与 $\delta^{18}O$ 的温度效应

乌加庙、桃司兔、乌海和西鄂尔多斯地区中降水中  $\delta^{18}O$  与温度进行线性回归,得出拟合方程分别为:

乌加庙:  $\delta D = -2.992T + 12.212$  ( $r = 0.362$ ,  $n = 15$ ,  $F = 1.966$ ,  $P > 0.05$ );  $\delta^{18}O = -0.289T - 1.455$  ( $r = 0.275$ ,  $n = 15$ ,  $F = 1.067$ ,  $P > 0.05$ )

桃司兔:  $\delta D = -0.374T - 50.423$  ( $r = 0.036$ ,  $n = 9$ ,  $F = 0.009$ ,  $P > 0.05$ );  $\delta^{18}O = 0.170T - 13.133$  ( $r = 0.138$ ,  $n = 9$ ,  $F = 0.136$ ,  $P > 0.05$ )

乌海:  $\delta D = 1.734T - 106.311$  ( $r = 0.244$ ,  $n = 14$ ,  $F = 0.761$ ,  $P > 0.05$ );  $\delta^{18}O = 0.323T - 16.713$  ( $r = 0.313$ ,  $n = 14$ ,  $F = 1.302$ ,  $P > 0.05$ )

西鄂尔多斯:  $\delta D = -0.558T - 44.663$  ( $r = 0.08$ ,  $n = 38$ ,  $F = 0.234$ ,  $P > 0.05$ );  $\delta^{18}O = 0.029T - 8.937$  ( $r = 0.032$ ,  $n = 38$ ,  $F = 0.036$ ,  $P > 0.05$ )

可见,乌加庙、桃司兔、乌海和西鄂尔多斯地区夏季降水  $\delta D$  ( $\delta^{18}O$ ) 与温度没有显著的相关关系,即表明该地区夏季大气降水温度效应不显著。

## 2.5 大气降水的过量氘( $d$ )

水在蒸发时产生动力分馏作用,该作用可破坏氢氧稳定同位素的平衡分馏,在降水中  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  的关系中会出现一个差值, Dansgaard (1964) 称之为过量氘( $d$ -excess):  $d = \delta D - 8\delta^{18}O$ , 全球降水中  $d$  的平均值在 10‰ 左右。乌加庙、桃司兔、乌海和西鄂尔多斯地区夏季大气降水过量氘( $d$ -excess) 均为正值且小于全球平均  $d$  值(10‰)(图3),其中乌加庙夏季过量氘均值为 8.3‰,桃司兔夏季过量氘均值为 8.9‰,乌海夏季过量氘均值为 7.8‰,西鄂尔多斯夏季过量氘均值为 8.2‰,这表明夏季西鄂尔多斯受到了海洋季风作用的影响,降雨量增加,空气湿度相应增大,而  $d$  值减小。

## 2.6 水汽来源轨迹模拟

本研究选择了2012年西鄂尔多斯荒漠3场典

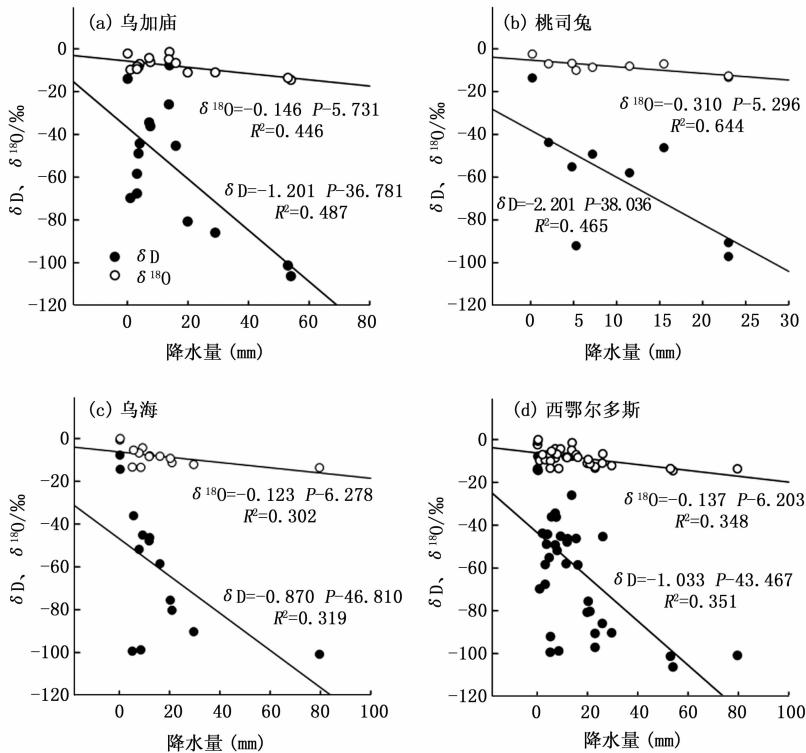


图3 乌加庙、桃司兔、乌海和西鄂尔多斯地区夏季大气降水 $\delta D(\delta^{18}O)$ 与降水量的关系

注:(a) 乌加庙;(b) 桃司兔;(c) 乌海;(d) 西鄂尔多斯

型夏季降水事件的气团轨迹模拟图(图5),此图包含了该季节的所有水汽来源途径。西鄂尔多斯在6月和8月的水汽来源于大量局地蒸发和西北方向(一条是经俄罗斯、蒙古向南输送;另一条是经新疆向东)的水汽,期间偶有强降雨( $>30\text{ mm}$ )发生是受到东南季风的影响;而到了7月,主要受到来自东南及西南方向海洋性水汽团的影响。

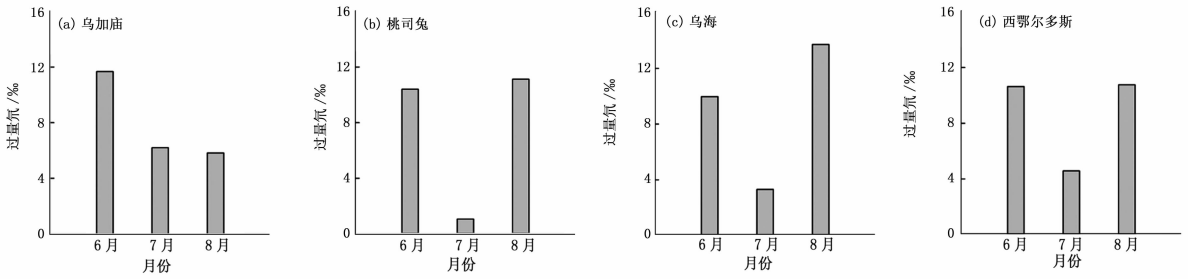
### 3 讨论

郑淑慧等<sup>[38]</sup>报道了中国大气降水中 $\delta D$ 与 $\delta^{18}O$ 范围分别为 $-190\text{‰}\sim 20\text{‰}$ 、 $-24\text{‰}\sim 2\text{‰}$ 。从图2可见,西鄂尔多斯地区大气降水的氢氧同位素含量均落在中国雨水的变化范围之内。 $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$ 的变化特征可以反映出降水的水汽来源和不同地区之间气候条件的差异<sup>[44]</sup>。李小飞<sup>[45]</sup>发现,黄河流域大气降水氢氧同位素特征不仅可以体现出其所在位置的气候特征,同时也表现出季风气候的变化规律。乌加庙、桃司兔、乌海3个研究区降水中 $\delta D$ 和 $\delta^{18}O$ 值的变化范围具有一定的相似性,表明这3个地区受到了大空间尺度上相同水汽来源的影响。

与全球降水线 $\delta D = 8\delta^{18}O + 10$ 相比,西鄂尔多斯夏季大气降水氢氧稳定同位素关系线性方程的斜

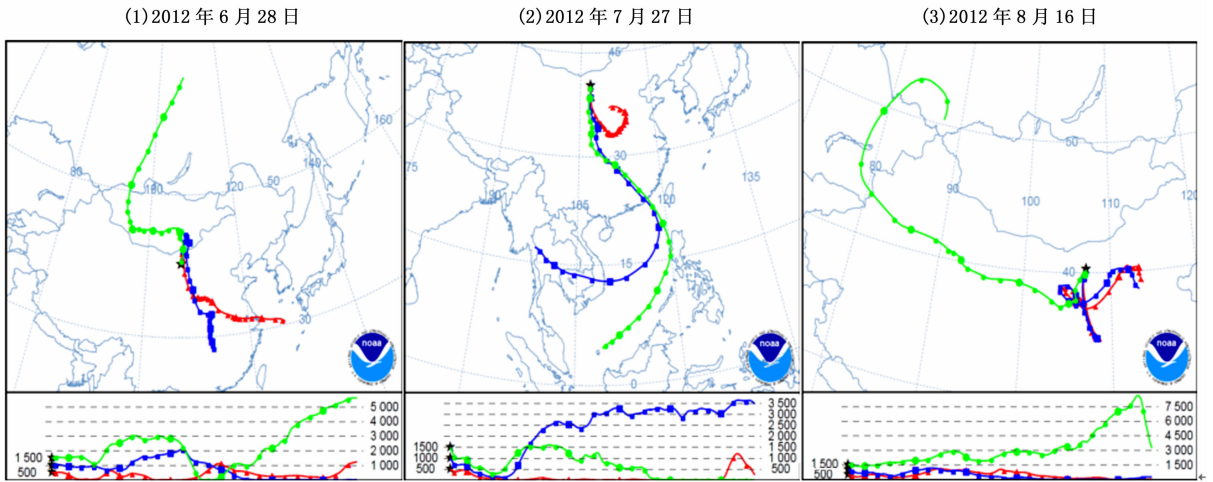
率和截距都偏小,表明在气候干燥、蒸发强、空气相对湿度低的西鄂尔多斯,雨水在降落过程中容易受到非平衡蒸发的影响,发生一定程度的二次蒸发,致使雨水中富集大量重同位素。该方程与鄂尔多斯盆地大气降水线方程( $\delta D = 6.45\delta^{18}O - 6.51$ )相比,斜率和截距相对较大,这是由于鄂尔多斯盆地地域广阔,而Yin等<sup>[40]</sup>使用的是鄂尔多斯周边地区的降水样品,造成地域差异性较大;而该方程与鄂尔多斯沙区全年大气降水线方程( $\delta D = 7.00\delta^{18}O - 3.02$ )<sup>[39]</sup>比较相似,稍高的斜率和截距反映了该地区夏季受东南海洋季风影响降水量大,相对湿度增高。

大气降水氢氧同位素的变化组成基本遵循瑞利分馏。而大气降水的氢氧同位素组成变化具有以下几种效应:纬度效应,即纬度越高,温度会逐渐降低,大气降水中的 $\delta D$ 和 $\delta^{18}O$ 值也会逐渐降低;大陆效应,即距离海岸越远, $\delta D$ 和 $\delta^{18}O$ 值越低;高度效应,即 $\delta D$ 和 $\delta^{18}O$ 值随海拔升高而逐渐降低<sup>[23]</sup>;温度效应,即同位素的组成成分与温度呈正相关关系;降水量效应,即同位素组成成分与降水量呈负相关关系。同位素的分馏作用主要受制于相变过程中的温度<sup>[46]</sup>。不同纬度地区大气降水中稳定同位素比率



注:(a) 乌加庙;(b) 桃司兔;(c) 乌海;(d) 西鄂尔多斯

图4 乌加庙、桃司兔、乌海和西鄂尔多斯地区夏季大气降水过量氧的月动态变化



注:红色、蓝色、绿色曲线分别代表地面以上500、1000、1500 m 高度气团轨迹

图5 西鄂尔多斯夏季典型气团轨迹

的影响因素不同<sup>[47]</sup>,西鄂尔多斯荒漠位于中纬度地区,降水量和温度会影响当地大气降水稳定同位素组成。而本文的研究显示,西鄂尔多斯在夏季存在显著的降水量效应,而温度效应不显著。这是由于夏季气温变化幅度不明显,但降雨频繁且降雨量较大,因而降水量效应对西鄂尔多斯荒漠夏季大气降水同位素组成的影响高于温度效应的影响。这与包头地区大气降水研究结果一致<sup>[1]</sup>。由于地理位置和气候条件的相似性,我们推测西鄂尔多斯荒漠全年大气降水的降雨量效应和温度效应的存在结果与黄河上游地区<sup>[45]</sup>、银川<sup>[48]</sup>、西北干旱地区<sup>[37]</sup>表现出的结果相一致。

过量氧  $d$  值可较直观地反映该地区大气降水蒸发、凝结过程的不平衡程度,是空气中水汽团中氢氧同位素组成特征的反映。过量氧  $d$  的高低受制于水汽蒸发源地的环境条件<sup>[49]</sup>,是一个大气降水的重要综合环境因素指标<sup>[50]</sup>。Merlivat 和 Jouzel 认为水汽源地相对湿度较低时, $d$  值较高;反之,若水汽源地相对湿度较高,则  $d$  值较低<sup>[49, 51]</sup>。在干旱地区,大

气降水过程中,雨滴在降落过程中受到蒸发作用而使  $d$  值降低。局地蒸发形成的小区域水循环会导致降水中  $d$  值的增加<sup>[52]</sup>。过量氧  $d$  值在水汽团的长距离输送、冷凝过程中会保持不变,因此,常被用作追踪判别降水的水汽源地。鄂尔多斯沙区雨水主要来自西北方向(俄罗斯、蒙古等)的水汽和由东南风带来的太平洋水汽,在夏季降雨来自东南方向<sup>[39]</sup>。而本研究中,7月西鄂尔多斯的  $d$  值为 4.6‰,显著低于6月的  $d$  值(10.6‰),这是由于海洋性季风作用的加强,水汽源区的相对湿度不断增高导致的。到雨季后期(8月),降雨频率逐渐减小,蒸发作用依然较强,导致  $d$  值相对增大(10.9‰)。

为进一步阐明内蒙古西鄂尔多斯荒漠大气降水的水汽来源,我们利用 HYSPLIT 气团轨迹模型推测降水前该地区的气团运输轨迹。从图5可以看出,西鄂尔多斯荒漠夏季降水主要受到来自西北方向、东南和西南海洋性季风气团和局地蒸发水汽的影响。气团从海洋长距离输送至西鄂尔多斯荒漠时,降水量增多,加之夏季气温高,水汽输送过程中受到

二次蒸发的影响,  $d$  值减小。水汽云团从西北方向的大陆内部运移至研究区时,水汽减少、大气相对湿度降低,沿途水汽补充较少,所以  $d$  值较大。此外,下垫面中水体蒸发所产生水汽的补给作用也可能造成  $d$  值升高<sup>[53]</sup>。

## 4 结论

(1) 西鄂尔多斯夏季大气降水氢氧稳定同位素关系的线性方程(LMWL)为  $\delta D = 7.287 \delta^{18}O + 1.170$  ( $R^2 = 0.937$ ,  $n = 38$ ),反映了该区的大气降水经历了一定程度的蒸发作用。

(2) 夏季西鄂尔多斯地区降水量效应显著,降水量越大,降水中的  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  贫化越严重,而降水量小则  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  呈富集趋势,但温度效应不明显。

(3) 西鄂尔多斯荒漠夏季大气降水受西风水汽、局地蒸发水汽以及东南和西南季风水汽的影响。

## 参考文献:

[1] 刘 君,郭华良,刘福亮,等. 包头地区大气降水  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  变化特征浅析[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27 (5): 157 - 162.

[2] 章新平,刘晶淼,田立德,等. 亚洲降水中  $\delta^{18}O$  沿不同水汽输送路径的变化[J]. 地理学报, 2004, 59 (5): 699 - 708.

[3] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation [J]. *Tellus*, 1964, 16 (4): 436 - 468.

[4] Friedman I. Deuterium content of natural waters and other substances [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1953, 4 (1 - 2): 89 - 103.

[5] Craig H. Isotopic variation in meteoric waters [J]. *Science*, 1961, 133 (3465): 1702 - 1703.

[6] Dansgaard W. The abundance of  $\delta^{18}O$  in atmospheric water and water vapour [J]. *Tellus*, 1953, 5 (4): 461 - 469.

[7] He Y Q, Pang H X, Theakstone W H, *et al.* Isotopic variations in precipitation at Bangkok and their climatological significance [J]. *Hydrological Processes*, 2006, 20: 2873 - 2884.

[8] Jeanton H C, Gonfiantini R, Travi Y, *et al.* Oxygen-18 variations of rainwater during precipitation: application of the Rayleigh model to selected rainfalls in southern France [J]. *Journal of Hydrology*, 2004, 289 (1 - 4): 165 - 177.

[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—乌鲁木齐河流域降水中  $\delta^{18}O$  与温度关系研究[J]. 冰川冻土, 2000, 22 (1): 15 - 22.

[10] 柳鉴容,宋献方,袁国富,等. 西北地区大气降水  $\delta^{18}O$  的特征及水汽来源[J]. 地理学报, 2008, 63 (1): 12 - 22.

[11] Araguás-Araguás L, Froehlich K, Rozanski K. Stable isotope composition of precipitation over southeast Asia [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1998, 103 (D22): 28721 - 28742.

[12] Welker J M. ENSO effects on  $\delta^{18}O$ ,  $\delta D$  and d-excess values in pre-

cipitation across the U. S. using a high-density, long-term network (USNIP) [J]. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 2012, 26: 1893 - 1898.

[13] Good S P, Kennedy C D, Stalker J C, *et al.* Patterns of local and nonlocal water resource use across the western U. S. determined via stable isotope intercomparisons [J]. *Water Resources Research*, 2014, 50 (10): 8034 - 8049.

[14] Zanden, H B V, Wunder M B, Hobson K A, *et al.* Contrasting assignment of migratory organisms to geographic origins using long-term versus year-specific precipitation isotope maps [J]. *Methods in Ecology and Evolution*, 2014, 5 (9): 891 - 900.

[15] Bowen G J and Good S P. Incorporating water isoscapes in hydrological and water resource investigations [J]. *Wiley Interdisciplinary Reviews Water*, 2015, 2 (2): 107 - 119.

[16] 章 申,于维新,张青莲,等. 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.

[17] 章新平,姚檀栋. 我国降水中  $\delta^{18}O$  的分布特点[J]. 地理学报, 1998, 53 (7): 356 - 364.

[18] 宋献方,柳鉴容,孙晓敏,等. 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.

[19] 王 涛. 中国东部季风区域降水稳定同位素的时空分布特征及其气候意义[D]. 南京:南京信息工程大学, 2012.

[20] 吴华武,章新平,孙广禄,等. 长江流域大气降水中  $\delta^{18}O$  变化与水汽来源[J]. 气象与环境学报, 2011, 27 (5): 7 - 12.

[21] Ma J Z, Zhang P, Zhu G F, *et al.* The composition and distribution of chemicals and isotopes in precipitation in the Shiyang River system, northwestern China [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 436 - 437: 92 - 101.

[22] 章新平,刘晶淼,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, 35 (9): 850 - 859.

[23] 徐 庆,刘世荣,安树青,等. 卧龙地区大气降水氢氧同位素特征的研究[J]. 林业科学研究, 2006, 19 (6): 679 - 686.

[24] 徐 振,刘玉虹,王中生,等. 卧龙降水稳定同位素与季风活动的关系[J]. 环境科学, 2008, 29 (4): 1007 - 1013.

[25] Luo W J, Wang S J, Xie X N. A comparative study on the stable isotopes from precipitation to speleothem in four caves of Guizhou, China. *Chemie der Erde-Geochemistry*, 2013, 73: 205 - 215.

[26] 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.

[27] 田立德,姚檀栋,孙维贞,等. 青藏高原中部水蒸发过程中的氧稳定同位素变化[J]. 冰川冻土, 2000, 22 (2): 159 - 164.

[28] 田立德,姚檀栋, Numaguti A. 青藏高原南部季风降水中稳定同位素波动与水汽输送过程[J]. 中国科学(D 辑), 2001, 31 (增刊): 215 - 220.

[29] Yu W S, Wei F L, Ma Y M, *et al.* Stable isotope variations in precipitation over Deqin on the southeastern margin of the Tibetan Plateau during different seasons related to various meteorological factors and moisture sources [J]. *Atmospheric Research*, 2016, 170: 123 - 130.



- [30] 李 晖, 周宏飞. 乌鲁木齐地区大气降水中  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  的变化特征[J]. 干旱区资源与环境, 2007, 21 (9): 46–50.
- [31] Zhang X P, Guan H D, Zhang X Z, *et al.* Simulation of stable water isotopic composition in the atmosphere using an isotopic Atmospheric Water Balance Model [J]. International Journal of Climatology, 2015, 35: 846–859.
- [32] Wu H W, Zhang X P, Li X Y, *et al.* Seasonal variations of deuterium and oxygen-18 isotopes and their response to moisture source for precipitation events in the subtropical monsoon region [J]. Hydrological Processes, 2015, 29: 90–102.
- [33] 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.
- [34] Wu X, Zhu X Y, Pan M C, *et al.* Seasonal variability of oxygen and hydrogen stable isotopes in precipitation and cave drip water at Guilin, southwest China [J]. Environmental Earth Sciences, 2014, 72 (8): 3183–3191.
- [35] 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.
- [36] Liu Z F, Tian L D, Chai X R, *et al.* A model-based determination of spatial variation of precipitation  $\delta^{18}O$  over China [J]. Chemical Geology, 2008, 249 (1–2): 203–212.
- [37] 李小飞, 张明军, 李亚举, 等. 西北干旱区降水中  $\delta^{18}O$  变化特征及其水汽输送[J]. 环境科学, 2012, 33 (3): 711–719.
- [38] 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, 28 (13): 801–806.
- [39] 金 可, 饶文波, 孙 江, 等. 鄂尔多斯沙区大气降水同位素特征及其来源[J]. 人民黄河, 2015, 37 (3): 31–35.
- [40] Yin L H, Hou G C, Su X S, *et al.* Isotopes ( $\delta D$  and  $\delta^{18}O$ ) in precipitation, groundwater and surface water in the Ordos Plateau, China: implications with respect to groundwater recharge and circulation [J]. Hydrogeology Journal, 2011, 19 (2): 429–443.
- [41] 杨郢城, 侯光才, 文东光, 等. 鄂尔多斯盆地大气降雨氢氧同位素的组成与季节效应[J]. 地球学报, 2005, 26 (Sup.): 289–292.
- [42] Draxler R R, Hess G D. An overview of the HYSPLIT 4 modelling system for trajectories, dispersion and deposition [J]. Australian Meteorological Magazine, 1998, 47 (4): 295–308.
- [43] Stein A F, Draxler R R, Rolph G D, *et al.* NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2016, 96 (12): 2059–2077.
- [44] Wu J K, Ding Y, Ye B, *et al.* Spatio-temporal variation of stable isotopes in precipitation in the Heihe River Basin, Northwestern China [J]. Environmental Earth Sciences, 2010, 61 (6): 1123–1134.
- [45] 李小飞, 张明军, 王圣杰, 等. 黄河流域大气降水氢、氧稳定同位素时空特征及其环境意义[J]. 地质学报, 2013, 87 (2): 269–277.
- [46] Liu J R, Song X F, Yuan G F, *et al.* Characteristics of  $\delta^{18}O$  in precipitation over eastern monsoon China and the water vapor sources [J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55 (2): 200–211.
- [47] 陈粉丽, 张明军, 马 潜, 等. 兰州及其周边区域大气降水  $\delta^{18}O$  特征及其水汽来源[J]. 环境科学, 2013, 34 (10): 3755–3763.
- [48] 刘宏伟, 徐 明, 管清浩. 银川地区大气降水中氢氧稳定同位素的变化特征及影响因素分析[J]. 水科学与工程技术, 2012 (1): 88–90.
- [49] Merlivat L, Jouzel J. Global climatic interpretation of the deuterium-oxygen-18 relationship for precipitation [J]. Journal of Geophysical Research Oceans, 1979, 84 (C8): 5029–5033.
- [50] 张应华, 作彦卿, 温小虎, 等. 环境同位素在水循环研究中的应用[J]. 水科学进展, 2006, 17 (5): 738–747.
- [51] Jouzel J, Merlivat L. Deuterium and oxygen 18 in precipitation: modeling of the isotopic effects during snow formation [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1984, 89 (D7): 11749–11757.
- [52] Froehlich K, Gibson J J, Aggarwal P K. Deuterium excess in precipitation and its climatological significance [C]. In: Study of Environmental Change using Isotope Techniques. IAEA, VIENNA, 2002: 54–66.
- [53] 马 潜, 张明军, 王圣杰, 等. 中国西部局地蒸发水汽贡献率探讨[J]. 地理科学进展, 2012, 31 (11): 1452–1459.

(责任编辑: 崔 贝)