

李佳奇, 黄亚楠, 石培君, 等. 陕北黄土区大气降水同位素特征及其水汽来源. 应用生态学报, 2022, 33(6): 1459-1465

Li J-Q, Huang Y-N, Shi P-J, et al. Isotopic characteristics and vapor sources of atmospheric precipitation in the loess region of North Shaanxi, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(6): 1459-1465

## 陕北黄土区大气降水同位素特征及其水汽来源

李佳奇 黄亚楠 石培君 李志\*

(西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

**摘要** 为探究陕北黄土区大气降水氢氧稳定同位素特征及其水汽来源,以陕西省定边县为研究区,于2018—2020年共收集107次降水事件样品,分析了该区降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 组成特征,并探讨了不同季节的水汽来源。结果表明:定边氢氧稳定同位素存在明显的季节变化,湿季(6—9月)偏贫化,干季(4—5月、10—11月)偏富集;氘盈余呈现干季高湿季低的特点。当地大气降水线方程为 $\delta^2\text{H} = 7.35\delta^{18}\text{O} + 4.19$  ( $R^2 = 0.96$ ,  $P < 0.01$ )斜率和截距均小于全球大气降水线,表明该区域降水受到一定程度的蒸发分馏影响。全年降水同位素组成表现出温度效应,而湿季和干季差异较大,仅干季存在温度效应,湿季降水同位素组成可能受温度和降水量的共同影响。HYSPLIT气团轨迹模型表明,干季水汽主要来自大西洋和极地北冰洋地区,而湿季降水主要来自印度洋和太平洋,同时受到西风带的影响。

**关键词** 黄土区; 氢氧稳定同位素; 环境因素; HYSPLIT; 水汽来源

**Isotopic characteristics and vapor sources of atmospheric precipitation in the loess region of North Shaanxi, China.** LI Jia-qi, HUANG Ya-nan, SHI Pei-jun, LI Zhi\* (College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China).

**Abstract:** To explore the hydrogen and oxygen stable isotopes and vapor sources of atmospheric precipitation in the loess region of north Shaanxi, we collected 107 samples of precipitation during 2018 to 2020 in the Dingbian County, Shaanxi Province. After measuring  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta^2\text{H}$  of precipitation, we analyzed the isotopic characteristics and vapor sources of precipitation in different seasons. There was obvious seasonal variability in  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta^2\text{H}$ , in that they were more depleted in the wet season (June–September) but more enriched in the dry season (April–May, October–November). In addition, the deuterium excess values were high in the dry season but low in the wet season. The local meteoric water line was regressed as  $\delta^2\text{H} = 7.35\delta^{18}\text{O} + 4.19$  ( $R^2 = 0.96$ ,  $P < 0.01$ ) with slope and intercept lower than that of the global meteoric water line, indicating an impact of evaporation on isotope fractionation. There was temperature effect in the precipitation isotopes for the whole year and for the dry season, while the precipitation isotopes in the wet season were affected by the combined effects of temperature and rainfall amount. The HYSPLIT model showed that the dry season water vapor mainly came from the Atlantic Ocean and the polar Arctic Ocean, while the wet season vapor mainly came from the Indian Ocean and Pacific subject to the Westerly.

**Key words:** loess region; hydrogen and oxygen stable isotope; environmental factor; HYSPLIT; water vapor source.

大气降水是地球水循环系统的重要环节<sup>[1]</sup>,而降水中氢氧稳定同位素(如 $^2\text{H}$ 、 $^{18}\text{O}$ )可以敏锐地记录不同环境下水循环的重要信息,同时也为追踪水汽来源提供了有效的方法。然而,对于干旱区而言,降水同位素组成易受环境因素的影响,这使其在时间尺度上发生较大变化且水汽来源不明确。另外,大气降水是联系土壤水、植被和地下水的重要组

成<sup>[2-3]</sup>,明确降水同位素信号的变化是探究地表水、土壤水和地下水关系的关键,对了解整个区域水循环过程有着重要的意义。

降水氢氧稳定同位素组成主要受水汽来源、气象条件以及地理因素的影响<sup>[4]</sup>。受不同气候和海陆距离的影响,干旱半干旱区<sup>[5]</sup>、高寒干旱区<sup>[6]</sup>和南方季风区<sup>[7]</sup>降水同位素组成存在显著差异。以往研究表明,降水的季节性变化对稳定同位素组成也有很大影响,在不同的时间尺度上降水同位素组成表现出不同的特征<sup>[8-9]</sup>。此外,雨滴从云底降落的过程中,经过不饱和空气时会受到分馏作用的影

本文由国家自然科学基金项目(42071043)和中央高校基本科研业务费专项资金(2452020002)资助。

2021-12-07 收稿,2022-04-01 接受。

\* 通讯作者 E-mail: lizhibox@nwfu.edu.cn

响,使同位素组成发生变化。这种现象在中亚地区<sup>[10-11]</sup>和我国西部地区<sup>[12]</sup>等地都普遍存在,尤其是在干旱少雨的内陆地区更为明显<sup>[12-14]</sup>。随着降水同位素研究的深入,同位素的二阶变量——氘盈余( $d\text{-excess}$ )被提出,能够反映水汽源地蒸发凝结过程的不平衡程度,可以作为示踪水汽源地的重要指标<sup>[15]</sup>。但影响降水同位素组成的因素有区域差异,因此,需要加强监测和研究不同区域的降水同位素特征,进而探究其水汽来源。

大气降水作为西北地区水资源的主要来源,对整个区域水资源利用具有十分重要的意义。然而,目前对西北地区大气降水的研究偏少且零散,多集中在新疆<sup>[16]</sup>、甘肃兰州<sup>[13]</sup>等地,亟需不断增加监测点位,扩大对西北半干旱地区降水同位素组成特征和水汽来源的认识,这将有助于更深入地了解旱区水循环演变过程。为了解陕北黄土区大气降水特征,本研究于2018—2020年在定边县收集了107个降水样品,分析其氢氧稳定同位素组成,并结合气象数据(降水量、温度)探究降水同位素的组成特征和季节变化特征;利用 $d\text{-excess}$ 变化和HYSPLIT气团轨迹模型定性分析陕北黄土区不同季节的水汽来源,以期为陕北黄土区水循环的深入研究提供理论依据。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

定边县(36°49′—37°53′ N, 107°15′—108°22′ E)属于陕西省榆林市,位于黄土高原西北部,与陕、甘、宁、蒙四省区交界,地处鄂尔多斯草原与陕北黄土高原过渡地带。全县海拔1303~1907 m,该地区雨热同期,年均降水量325 mm,年均潜在蒸发量2490 mm,年均气温8.8℃,夏秋两季多雨,属于温带半干旱大陆性季风气候。全年降水分布不均匀,降水多集中在雨季(6—9月),降水量为222.6 mm,占全年降水量的70%左右,雨季较迟且年际变化大。在干季(10月—次年5月)该地区主要受蒙古或西伯利亚干冷气团的控制,太阳辐射较弱、气温低,降水量仅有全年的20%,其中11月—次年3月降水量仅占约2%。日照充足,年均日照2700 h,无霜期在140 d左右,干旱、风沙、霜冻的影响较大。定边县主要分为南部黄土沟壑旱作农业区和北部风沙滩井农业区,土地利用方式主要为农地、林地。土壤类型以黄土性土壤为主,也有风沙土、黑垆土等。

### 1.2 降水样品采集与测定

于2018—2020年的4—11月收集定边县次降

水事件的雨水样品,共采集107个降水样品。降水收集装置安放在无任何遮挡的开阔地区,周围没有障碍物或污染源。每次降水结束后立即收集降水样品,将其密封于100 mL的聚乙烯塑料瓶中,用Parafilm封口膜密封,防止蒸发。同时将样品立即转移到冰箱并置于-5~0℃低温保存,并尽快上机测定同位素比率。降水样品采用激光水稳定性同位素分析仪(LGR IWA-45EP)进行测定,<sup>2</sup>H/<sup>1</sup>H、<sup>18</sup>O/<sup>16</sup>O、<sup>17</sup>O/<sup>16</sup>O测定精度分别为0.5‰、0.1‰和0.1‰。测定结果为维也纳标准平均海水(V-SMOW)对应的千分差,公式如下:

$$\delta = (R_{\text{sam}} - R_{\text{sta}}) / R_{\text{sta}} \times 1000\text{‰}$$

式中: $R_{\text{sam}}$ 为降水样品<sup>2</sup>H、<sup>18</sup>O浓度; $R_{\text{sta}}$ 为维也纳标准平均海水<sup>2</sup>H、<sup>18</sup>O浓度。为了保证仪器的稳定性和精确性,每次测定前使用专业润滑剂润洗样针,样品加入前使其温度与室温一致,每个样品测定6个数据,前两个数据舍弃,以减小记忆效应对数据的影响。温度、降雨量等数据来自小型气象站。

### 1.3 水汽来源分析

使用美国国家海洋大气管理局开发的拉格朗日积分轨迹模型(<http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>)对研究区大气降水的气团移动过程进行模拟。利用该模型对研究区2018—2020年干季和湿季典型的12组降水事件进行该次降水前168 h气团运动轨迹模拟,垂直方向选取2000、3000、4000 m作为模拟的3个初始高度。采用Excel 2016和SPSS 26.0软件处理数据,采用Origin 2017软件作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 大气降水氢氧稳定同位素组成特征

定边县日降水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化范围较大(图1、表1),但总体落在我国大气降水同位素值范围之内<sup>[17]</sup>,分别介于-148.5‰~18.2‰和-19.1‰~3.5‰,平均值分别为-51.1‰和-7.5‰;而月均加权值变化范围较小,分别介于-81.7‰~1.1‰和-17.8‰~-1.3‰,平均值分别为-53.4‰和-7.9‰。降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^2\text{H}$ 组成存在明显的年内变化,干季(10月—次年5月)同位素偏富集,湿季(6—9月)同位素偏贫化(表1),湿季同位素变化范围大于干季,呈现出明显的“干高湿低”的特征。同时,该地区降水同位素还存在一定的年际差异(图1),2020年降水同位素相较于前两年偏贫化, $\delta^{18}\text{O}$ 的最小值多出现在7—8月,而2019年却出现在5月且明显小于其他月份。

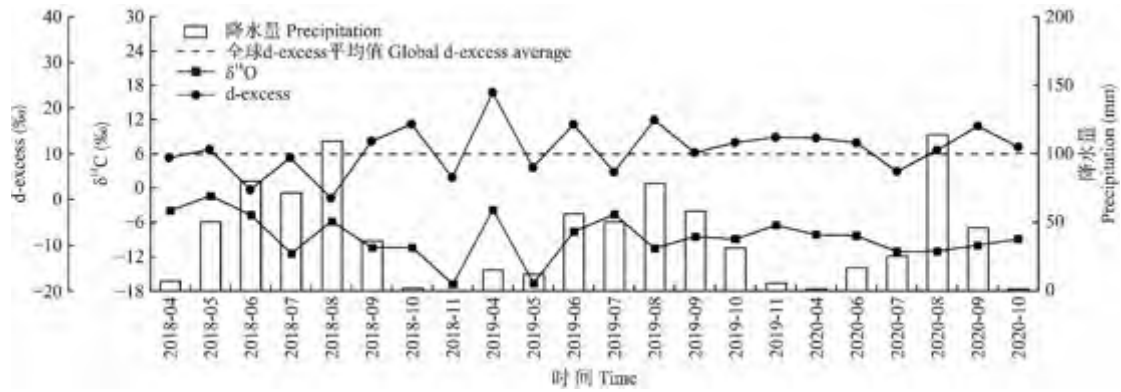


图 1 月降水量与月均降水量加权  $\delta^{18}\text{O}$ 、d-excess

Fig.1  $\delta^{18}\text{O}$  and d-excess of weighted monthly precipitation and monthly average precipitation.

表 1 不同季节降水氢氧稳定同位素平均值及降水量加权平均值

Table 1 Average value of hydrogen and oxygen stable isotopes and weighted average value of precipitation in different seasons (%)

季节 Season	$\delta^{18}\text{O}$		$\delta^2\text{H}$		d-excess	
	算术平均值 Arithmetic average	加权平均值 Weighted average	算术平均值 Arithmetic average	加权平均值 Weighted average	算术平均值 Arithmetic average	加权平均值 Weighted average
干季 Dry season	-7.8	-5.5	-50.3	-31.0	12.0	13.0
湿季 Wet season	-7.4	-8.5	-51.3	-58.1	8.1	9.8
全年 Whole year	-7.5	-8.0	-51.0	-53.4	9.0	10.4

全年降水同位素组成主要分布在全球大气降水线(GMWL)右侧(图2),降水中 $\delta^2\text{H}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 之间的线性关系为(LMWL): $\delta^2\text{H} = 7.35\delta^{18}\text{O} + 4.19$  ( $R^2 = 0.96, P < 0.01, n = 107$ )。LMWL的斜率和截距均小于GMWL<sup>[17]</sup>,表明研究区水汽来自不同稳定同位素比率的地区<sup>[18]</sup>,LMWL与GMWL线的交点( $\delta^2\text{H} = -69.9\text{‰}, \delta^{18}\text{O} = -8.9\text{‰}$ )可近似代表水汽源地的原始平均同位素组成。干季降水同位素组成主要分布在GMWL的左侧,而湿季降水同位素组成大部分在GMWL的右侧。干、湿季 $\delta^2\text{H}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 之间的线性关系分别为: $\delta^2\text{H} = 7.83\delta^{18}\text{O} + 10.75$  ( $R^2 = 0.93, P <$

$0.01, n = 25$ ),  $\delta^2\text{H} = 7.13\delta^{18}\text{O} + 1.6$  ( $R^2 = 0.95, P < 0.01, n = 82$ )。湿季的斜率和截距明显低于干季。

2.2 大气降水稳定同位素的温度效应和降水量效应

将全年日降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度( $T$ )建立线性回归方程: $\delta^{18}\text{O} = 0.23T - 11.26$  ( $R^2 = 0.06, P < 0.01, n = 107$ ) (图3)。将干季、湿季日降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与 $T$ 建立线性回归方程: $\delta^{18}\text{O} = 0.73T - 15.30$  ( $R^2 = 0.35, P < 0.01, n = 25$ )、 $\delta^{18}\text{O} = 0.22T - 11.54$  ( $R^2 = 0.03, P > 0.01, n = 82$ )。分别对全年、干季和湿季日降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^2\text{H}$ 与 $T$ 进行相关性分析(表2),发现全年温度与 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^2\text{H}$ 呈显著相关,温度效应显著;干季温

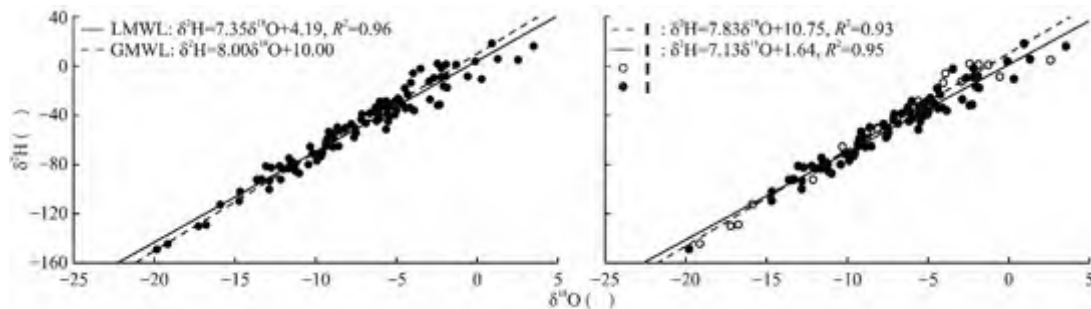


图 2 降水中  $\delta^{18}\text{O}$  与  $\delta^2\text{H}$  之间的关系

Fig.2 Relationship between  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta^2\text{H}$  of precipitation.

LMWL: 当地大气降水线 Local meteoric water line; GMWL: 全球大气降水线 Global meteoric water line. I: 干季 Dry season; II: 湿季 Wet season. 下同 The same below.

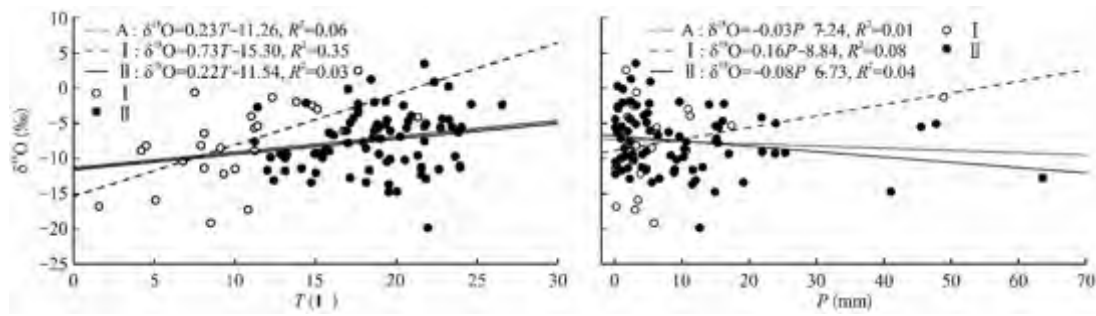


图 3 不同季节降水中  $\delta^{18}\text{O}$  与温度 ( $T$ ) 和降水量 ( $P$ ) 之间的关系

Fig.3 Relationship between  $\delta^{18}\text{O}$  of precipitation and temperature ( $T$ ) and precipitation ( $P$ ) in different seasons.

A: 全年 Whole year.

度与  $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^2\text{H}$  呈极显著相关,表现出较强的温度效应。

将全年日降水  $\delta^{18}\text{O}$  与降水量 ( $P$ ) 建立线性回归方程:  $\delta^{18}\text{O} = -0.03P - 7.24$  ( $R^2 = 0.01, P > 0.05, n = 107$ ) (图 3)。将干季、湿季日降水  $\delta^{18}\text{O}$  与  $P$  建立线性回归方程:  $\delta^{18}\text{O} = 0.16P - 8.84$  ( $R^2 = 0.08, P > 0.05, n = 25$ )、 $\delta^{18}\text{O} = -0.08P - 6.73$  ( $R^2 = 0.04, P > 0.05, n = 82$ )。分别对全年、干季和湿季日降水的  $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^2\text{H}$  与  $P$  进行相关性分析(表 2),发现无论全年还是干季、湿季,降水量与  $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^2\text{H}$  的关系均不显著,不存在雨量效应。

### 2.3 水汽来源

降水同位素组成特征除受到局地条件的影响

外,还与水汽来源密切相关,而 d-excess 是反映水汽来源的一个重要指标。降水中 d-excess 值变化范围为  $-15.5\text{‰} \sim 25.7\text{‰}$ ,平均值为  $9.0\text{‰}$ ,小于全球平均

表 2 大气降水  $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^2\text{H}$  与温度和降水量的相关系数  
Table 2 Correlation coefficients between  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^2\text{H}$  of atmospheric precipitation and temperature and precipitation

季节 Season	$\delta^{18}\text{O}$		$\delta^2\text{H}$	
	降水量 Precipitation	温度 Temperature	降水量 Precipitation	温度 Temperature
干季 Dry season	0.284	0.591 **	0.300	0.589 **
湿季 Wet season	-0.203	0.181	-0.177	0.092
全年 Whole year	-0.772	0.253 **	-0.510	0.185*

\*  $P < 0.05$ ; \*\*  $P < 0.01$ .

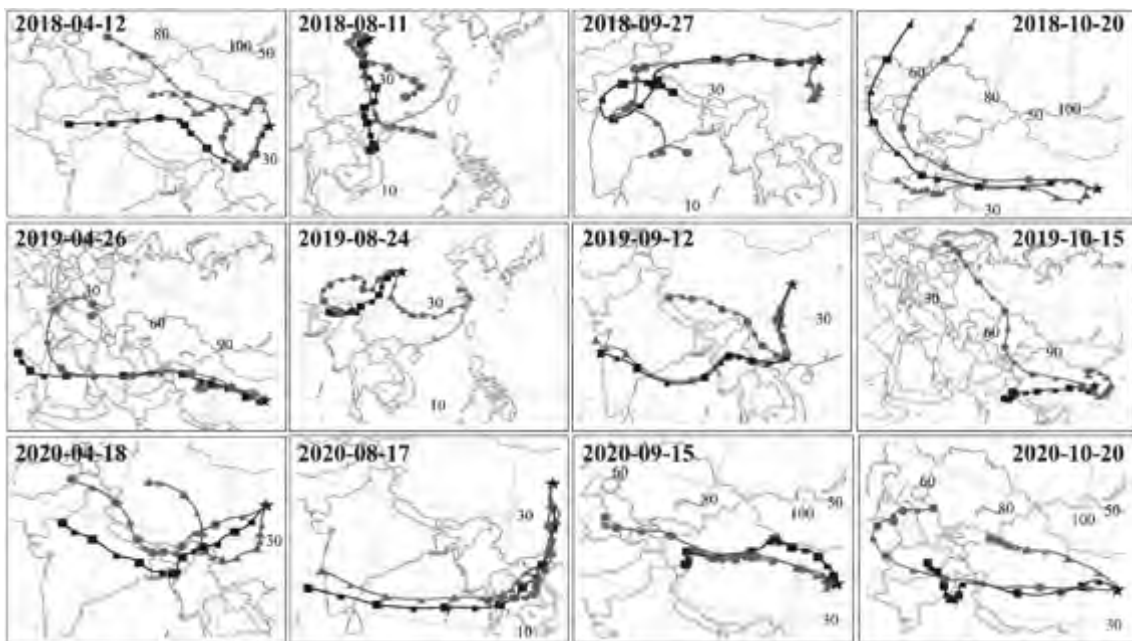


图 4 2018—2020 年陕北黄土区不同时间典型降水事件气团轨迹

Fig.4 Air mass trajectories of typical precipitation events at different time in the loess area of northern Shaanxi from 2018 to 2020.

三角形、正方形、圆形分别代表海拔 2000、3000、4000 m 高度上的气团轨迹 Triangle, square and circle represented air mass trajectories at altitude of 2000, 3000, 4000 m, respectively.

值的 10‰,且表现出一定的季节性规律(表 1)。干季和湿季  $d\text{-excess}$  变化范围分别为  $-12.9\text{‰}\sim 25.7\text{‰}$  和  $-15.5\text{‰}\sim 25.6\text{‰}$ ,平均值分别为 12.0‰和 8.1‰。 $d\text{-excess}$  的最小值出现在 7—8 月,最大值多出现在 4—5 月。干季  $d\text{-excess}$  相对稳定,绝大多数大于 10‰(图 1),而湿季  $d\text{-excess}$  的波动范围比干季大,这种波动间接反映了季风区的气候变化。

HYSPLIT 模拟结果显示(图 4),研究区 8—9 月水汽主要来自西太平洋和印度洋地区,同时西风带还没有完全消退,对该时期的降水也会产生影响,此时该地区降水增多、温暖湿润。4 月的降水主要来自西北方向的大西洋水汽和中亚地区水汽,远洋水汽向东南方向移动为该地区带来降水。10 月随着季风的衰退,来自北方的极地气团占据主导地位,水汽主要来自北冰洋地区,此时该地区降水减少、寒冷干燥。

### 3 讨 论

#### 3.1 环境因素对降水同位素组成特征的影响

大气降水中的  $^2\text{H}$  和  $^{18}\text{O}$  受到蒸发凝结作用、水汽源地及局地环境的影响。我国降水同位素组成主要受到温度效应和降水量效应的控制<sup>[19]</sup>,其中温度效应主要发生在中高纬度的内陆地区。研究区降水中  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta^2\text{H}$  与温度在全年相关关系显著,表明降水同位素组成全年都受到温度的影响,这与西北内陆干旱区以温度效应为主的降水同位素特征是一致的<sup>[20-22]</sup>。从季节角度来看,只有干季存在温度效应,湿季不存在温度效应。主要是因为干季降水量较少,大气相对干燥,空气饱和和差不容易被补偿,雨滴在下落的过程中受到蒸发作用的影响,使得  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta^2\text{H}$  值偏正。湿季降水丰沛,较为稳定的水汽来源连续产生降水,使得  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta^2\text{H}$  值偏负,在一定程度上抑制了温度效应,这一现象在其他受季风影响显著的地区也有发现<sup>[23]</sup>。需要注意的是,相对于高纬度内陆地区,中低纬度地区更易受到空气湿度、风速、冷凝温度、季风等多因素的影响,温度效应可能被弱化<sup>[24]</sup>。

雨滴在穿过大气层时蒸发并与大气中的水汽相互作用<sup>[7]</sup>,导致降水中稳定同位素发生变化,因此,降水的影响不容忽视,但本研究中的降水量效应并不显著。降水量效应主要发生中低纬度的近海地区,内陆地区通常不显著,这种分布格局主要与水汽来源密切相关<sup>[25]</sup>。研究区地处我国西北内陆,湿季大部分降水来自低纬度的海洋水汽,干季主要来自

高纬度的内陆水汽,因此在全年不存在显著的降水量效应。从干季、湿季角度来看,湿季降水来自湿润的海洋水汽,降水量较大, $\delta^{18}\text{O}$  呈现下降趋势。但在西北地区干热的地理环境下雨滴受到云下二次蒸发作用的影响,导致重同位素浓缩,在一定程度上抑制了降水量效应<sup>[26]</sup>。例如,乌鞘岭地区<sup>[27]</sup>、黄土高原东部地区<sup>[28]</sup>降水中  $\delta^{18}\text{O}$  与降水量均呈现出类似的关系,这也是即使湿季  $\delta^{18}\text{O}$  随降水量出现了负相关的趋势,但仍未表现出显著的降水量效应的重要原因。湿季温度效应和降水量效应均不显著,这可能是温度和降水量共同影响降水同位素分配导致的<sup>[28]</sup>。

#### 3.2 区域水汽循环机制

水汽源地的相对湿度是影响  $d\text{-excess}$  值的最主要因素,相对湿度越高, $d\text{-excess}$  值越小,相对湿度越小, $d\text{-excess}$  值越大<sup>[4]</sup>。反过来,不同时期的  $d\text{-excess}$  值变化可以反映研究区水文循环机制的差异。本研究区  $d\text{-excess}$  值呈现明显的季节变化,干季平均值(12.0‰)高于湿季(8.1‰),与受季风影响显著的其他地区有很强的一致性<sup>[25, 29-30]</sup>,这主要归因于干季、湿季不同的水汽来源。干季期间降水时,气团源区上空较低的相对湿度使水分在不平衡条件下快速蒸发形成水汽,导致  $d\text{-excess}$  值偏正。同时 HYSPLIT 模拟的结果显示,在干季,西北方向的气团经过大西洋、地中海等地,它们都处于西风环流的路径上,而且地中海及欧亚大陆腹地又是降水  $d\text{-excess}$  的峰值区<sup>[6]</sup>,这进一步反映了干季水汽源地的特点。干季降水主要受到大陆性气团的控制,降水来自西风带输送的大西洋海源水汽和极地北冰洋水汽,水汽经过长距离的输送,其内部的相对湿度降低;加上受到干燥的极地气团影响,而极地气团携带的水分大都经历了较强的再循环,再循环效应补偿了西风带对降水同位素的消耗,因此,干季的  $\delta^2\text{H}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  偏富集,这也是  $d\text{-excess}$  值偏正的一个重要原因。

本研究结果表明,湿季期间降水主要来自印度洋水汽和太平洋水汽。海洋水汽凝结,空气湿度大,水分蒸发缓慢,导致  $d\text{-excess}$  值偏负。另外,此时较强的季风性水汽和较弱的西风水汽输送也会使  $d\text{-excess}$  值变小。而在西北内陆地区,云下二次蒸发作用对  $d\text{-excess}$  值的影响也不容忽略<sup>[31]</sup>。干季、湿季的 LMWL 的斜率和截距均小于 GMWL,表明雨滴在下降的过程中受到非平衡分馏的影响,在由液态向未饱和空气扩散的过程中水分子扩散速率不同,

雨滴中<sup>2</sup>HHO 分子的扩散速率大于 H<sub>2</sub><sup>18</sup>O 分子,使液相中出现<sup>18</sup>O 相对于<sup>2</sup>H 富集的现象,从而导致 d-excess 值减小。研究区 d-excess 值大于 10‰ 的降水事件占有降水事件的 51.4%,表明当地蒸散水汽在整个水循环中起着重要的作用。湿季自 6 月开始逐渐受到东亚季风和南亚季风的影响,湿润的海洋水汽在长距离的输送过程中重同位素不断冷凝优先从水汽中分离出来,同时降水量较大,使 δ<sup>2</sup>H 和 δ<sup>18</sup>O 偏贫化。d-excess 的季节性变化与 δ<sup>2</sup>H 和 δ<sup>18</sup>O 的结果一致,进一步反映了干季以大陆性气团为主,湿季以湿润的海洋性气团为主的特点。降水同位素特征与 HYSPLIT 后向轨迹模拟的水汽来源一致,因此,大气降水中的同位素特征为识别水汽来源提供了有力的证据。

#### 4 结 论

本研究基于 2018—2020 年陕北黄土区大气降水同位素组成特征,分析了降水同位素随时间的变化特征及其影响因素,同时结合 d-excess 和 HYSPLIT 模型追踪不同季节的水汽来源,结果显示:大气降水氢氧稳定同位素组成的年际变化不明显,季节变化显著,湿季 δ<sup>18</sup>O 偏贫化,干季 δ<sup>18</sup>O 偏富集。研究区 LMWL 的斜率和截距均小于 GMWL,说明大气降水经历了二次蒸发作用。该区域全年降水稳定同位素主要受温度效应的影响;同时,温度也是影响干季降水同位素组成的最主要原因,而湿季可能受温度和降水量的共同影响。不同水汽来源使降水中 d-excess 存在明显的季节性变化。干季降水主要受大西洋水汽、地中海水汽、北冰洋水汽以及内陆蒸发水汽的影响,d-excess 值较高;湿季降水主要受印度洋水汽、太平洋水汽以及西风带水汽的影响,d-excess 值较低。

#### 参考文献

- [1] 顾熨祖. 同位素水文学. 北京: 科学出版社, 2011: 112-115
- [2] 高德强, 张蓓蓓, 徐庆, 等. 氢氧稳定同位素在淡水湿地森林水文过程研究中的应用. 世界林业研究, 2017, **30**(2): 20-25
- [3] 徐英德, 汪景宽, 高晓丹, 等. 氢氧稳定同位素技术在土壤水研究上的应用进展. 水土保持学报, 2018, **32**(3): 1-15
- [4] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, 1964, **16**: 436-468
- [5] 王宝鉴, 黄玉霞, 陶健红, 等. 西北地区大气水汽的区域分布特征及其变化. 冰川冻土, 2006, **28**(1): 16-21
- [6] 饶文波, 李焱炜, 谭红兵, 等. 高寒干旱区降水氢氧稳定同位素组成及其来源: 以昆仑山北坡格尔木河流域为例. 水利学报, 2021, **52**(9): 1116-1125
- [7] Shi YS, Jin ZF, Wu AJ, et al. Stable isotopic characteristics of precipitation related to the environmental controlling factors in Ningbo, East China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, **28**: 10696-10706
- [8] 陈琦, 郭锦荣, 李超, 等. 庐山地区大气降水中稳定同位素变化特征. 自然资源学报, 2019, **34**(6): 1306-1316
- [9] 赵明华, 陆彦玮, Rachana Heng, 等. 关中平原降水氢氧稳定同位素特征及其水汽来源. 环境科学, 2020, **41**(7): 3149-3156
- [10] Ansari MA, Noble J, Deodhar A. Atmospheric factors controlling the stable isotopes (δ<sup>18</sup>O and δ<sup>2</sup>H) of the Indian summer monsoon precipitation in a drying region of Eastern India. *Journal of Hydrology*, 2020, **584**: 124636
- [11] Bershaw J. Controls on deuterium excess across Asia. *Geosciences*, 2018, **8**: 257
- [12] Wu JK, Ding Y, Ye B, et al. Spatio-temporal variation of stable isotopes in precipitation in the Heihe River Basin, Northwestern China. *Environmental Earth Sciences*, 2010, **61**: 1123-1134
- [13] Ma Q, Zhang MJ, Wang SJ, et al. An investigation of moisture sources and secondary evaporation in Lanzhou, Northwest China. *Environmental Earth Sciences*, 2013, **71**: 3375-3385
- [14] Wang SJ, Jiao R, Zhang MJ, et al. Changes in below-cloud evaporation affect precipitation isotopes during five decades of warming across China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2021, **126**: e2020JD033075
- [15] 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. 地质学报, 2013, **87**(2): 270-277
- [16] 曾康康, 杨余辉, 胡义成, 等. 喀什河流域降水同位素特征及水汽来源分析. 干旱区研究, 2021, **38**(5): 1263-1273
- [17] 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. 科学通报, 1983, **28**(13): 801-806
- [18] 章新平, 姚檀栋. 我国降水中 δ<sup>18</sup>O 的分布特点. 地理学报, 1998, **53**(4): 356-364
- [19] 庞朔光, 赵诗坤, 文蓉, 等. 海河流域大气降水中稳定同位素的时空变化. 科学通报, 2015, **60**(13): 1218-1226
- [20] 袁瑞丰, 李宗省, 蔡玉琴, 等. 干旱内陆河流域降水稳定同位素的时空特征及环境意义. 环境科学, 2019, **40**(5): 2123-2131
- [21] 柳鉴容, 宋献方, 袁国富, 等. 西北地区大气降水 δ<sup>18</sup>O 的特征及水汽来源. 地理学报, 2008, **63**(1): 13-22
- [22] 陈曦, 李志, 程立平, 等. 黄土塬区大气降水的氢氧稳定同位素特征及水汽来源. 生态学报, 2016, **36**(1): 99-106
- [23] 柳鉴容, 宋献方, 袁国富, 等. 我国南部夏季季风降水水汽来源的稳定同位素证据. 自然资源学报,

- 2007, **22** (6): 1004–1012
- [24] 李广, 章新平, 许有鹏, 等. 滇南蒙自地区降水稳定同位素特征及其水汽来源. *环境科学*, 2016, **37** (4): 1313–1320
- [25] 隋明贞, 高德强, 徐庆, 等. 江苏高邮大气降水氢氧同位素特征及水汽来源. *应用生态学报*, 2019, **30** (6): 1823–1832
- [26] 张君, 陈洪松, 黄荣. 桂西北喀斯特小流域降雨稳定氢氧同位素组成及影响因素. *生态学报*, 2022, **42** (1): 236–245
- [27] 徐秀婷, 贾文雄, 朱国锋, 等. 乌鞘岭南、北坡降水稳定同位素特征及水汽来源对比. *环境科学*, 2020, **41** (1): 155–165
- [28] Sun CJ, Chen W, Chen YN, *et al.* Stable isotopes of atmospheric precipitation and its environmental drivers in the Eastern Chinese Loess Plateau, China. *Journal of Hydrology*, 2020, **581**: 124404
- [29] 卫克勤, 林瑞芬. 论季风气候对我国雨水同位素组成的影响. *地球化学*, 1994, **23** (1): 34–41
- [30] 张峦, 朱志鹏, 杨言, 等. 上海地区大气降水中氢氧同位素特征及其环境意义. *地球与环境*, 2020, **48** (1): 120–128
- [31] Wei Z, Lee XH. The utility of near-surface water vapor deuterium excess as an indicator of atmospheric moisture source. *Journal of Hydrology*, 2019, **557**: 123923

---

作者简介 李佳奇, 男, 1997 年生, 硕士研究生。主要从事大气降水稳定同位素研究。E-mail: lijiaqinew@163.com  
责任编辑 张凤丽

---

## 封面说明

封面图片由南京信息工程大学应用气象学院博士研究生贾磊在 2020 年 8 月拍摄于安徽省滁州市全椒县武岗镇官渡大气环境试验基地( 32.24° N, 118.69° E)。该基地地处长江三角洲地区, 属亚热带季风气候, 夏季多偏南风、温暖多雨, 冬季多偏北风、寒冷干燥, 年均气温 15.8 °C, 年均降水量 1090 mm。长三角地区河网密布, 水系众多, 是我国重要的人工水产养殖集中区域, 该区域池塘养殖面积占全国池塘养殖总面积的 20% 以上。内陆水体是温室气体重要的排放源, 与自然水体不同, 养殖活动中人工管理措施的饲料投入以及养殖生物代谢产物积累、周围集水区有机碳输入等都会导致水体 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 排放的极大增加, 从而使养殖水体成为温室气体排放的热点。南京信息工程大学气候与环境变化国际合作联合实验室大气环境中心, 基于微气象学方法、水平衡方法、箱式法以及倒置漏斗法开展了多年连续观测, 对小型养殖水体以及复合农业生态系统的温室气体通量时空变化特征及影响因素进行了多项研究。图中的多通道闭路式动态箱观测系统可以实现对于水-气界面 CH<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub> 通量的多点连续原位自动观测, 弥补了箱式法单点观测结果空间代表性不足的缺陷, 摆脱了实验操作对人力的依赖, 将观测范围扩展到远离岸边的水体区域, 避免了因气体样品的采集、保存和运输造成的实验误差, 可广泛应用于水体温室气体通量观测。图片中蓝天白云之下, 一幅美丽渔场的画卷缓缓铺开, 塘中波光粼粼, 池畔边绿意盎然, 清风拂面, 令人心旷神怡。在我国大力发展水产养殖业的同时, 兼顾水生生态系统的保护和温室气体减排, 才能达到人与自然的和谐共生。