

# 秦岭南北两侧降水稳定同位素特征与水汽来源差异分析

李晓刚<sup>1,2\*</sup>, 赵咏琪<sup>2</sup>, 张艳艳<sup>2</sup>

(1. 秦岭南麓生态水文陕西省野外科学观测研究站, 陕西 商洛 726000;  
2. 商洛学院 城乡规划与建筑工程学院, 陕西 商洛 726000)

**摘要:** 通过对秦岭南北两侧6个站点大气降水氢氧同位素数据的收集与整理, 揭示了该区域南北两侧大气降水线方程、环境效应、 $d$ 值(氘过量参数)及水汽来源的南北差异特征。结果表明:(1)秦岭北麓大气降水线方程斜率(7.84) > 秦岭南麓(7.52) > 东部季风区(7.46), 截距则表现为秦岭南麓(13.10) > 秦岭北麓(10.10); (2)秦岭北麓冬半年呈现出一定的温度效应, 秦岭南麓夏半年呈现出强降水效应; 同时, 秦岭南北两侧的纬度效应特征明显, 其贫化梯度远超全国平均水平; (3)秦岭北麓夏半年降水的水汽源自低纬度海洋地区, 该区域水汽相对湿度大, 导致降水 $d$ 值低于全年平均值; 冬半年降水的水汽则来自西风环流携带的北大西洋水汽, 相对湿度较低, 使得 $d$ 值高于全年平均值。研究结果对理解秦岭“中央水塔”功能具有重要的理论指导意义, 同时可为秦岭南北区域水资源管理提供重要的科学支撑。

**关键词:** 氢氧同位素; 降水; 水汽来源; 秦岭

中图分类号: P426

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Analysis of the characteristics of precipitation stable isotopes and differences in water vapor sources on the northern and southern sides of the Qinling Mountains

LI Xiaogang<sup>1,2\*</sup>, ZHAO Yongqi<sup>2</sup>, ZHANG Yanyan<sup>2</sup>

(1. Shaanxi Field Research Station of Ecohydrology at the Southern Qinling Mountains, Shangluo 726000, China;  
2. College of Urban and Rural Planning and Architectural Engineering, Shangluo University, Shangluo 726000, China)

**Abstract:** Hydrogen and oxygen isotope data from atmospheric precipitation were collected and analyzed at six stations located on both the northern and southern sides of the Qinling Mountains. Based on this analysis, the precipitation isotope lines, environmental effects,  $d$ -excess (deuterium excess) characteristics, and differences in water vapor sources between the two regions were elucidated. The following results were obtained: (1) The slope of the meteoric water line equation in the northern foot of the Qinling Mountains (7.84) was greater than that in the southern foot (7.52), which in turn was greater than that in the eastern monsoon region (7.46). For the intercept, the southern foot of the Qinling Mountains (13.10) was higher than the northern foot (10.10). (2) A temperature effect was identified on the northern slope during the cold season, while a strong precipitation amount effect was demonstrated on the southern slope. Significant latitude effects were exhibited on both sides, with depletion gradients that far exceeded the national average. (3) During summer, precipitation on the northern slope was determined to originate from low-latitude oceanic regions with high relative humidity, resulting in a  $d$ -excess lower than the annual average. In winter, precipitation was derived from westerly circulation carrying North Atlantic water

收稿日期: 2025-07-18; 修回日期: 2025-09-22; \* 通信联系人, E-mail: sxlixiaogang@163.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(41701090); 陕西省创新能力支撑计划项目(2019KJXX-026); 陕西省教育厅青年创新团队项目(22JP021); 商洛学院科研项目(18SKY002)

作者简介: 李晓刚(1983—), 男, 山西吕梁人, 教授, 博士, 主要从事水文地貌学研究。

引用格式: 李晓刚, 赵咏琪, 张艳艳. 秦岭南北两侧降水稳定同位素特征与水汽来源差异分析[J]. 信阳师范大学学报(自然科学版), 2026, 39(1): 19-25.

LI Xiaogang, ZHAO Yongqi, ZHANG Yanyan. Analysis of the characteristics of precipitation stable isotopes and differences in water vapor sources on the northern and southern sides of the Qinling Mountains[J]. Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition), 2026, 39(1): 19-25.

vapor with lower relative humidity, leading to a higher  $d$ -excess. These findings provided important theoretical insights into the Qinling Mountains' role as the "Central Water Tower" and offered scientific support for water resource management on both sides of the mountain range.

**Key words:** hydrogen and oxygen isotopes; precipitation; water vapor sources; Qinling Mountains

## 0 引言

降水是陆地水资源的重要来源,厘清其水汽来源是完整认识陆地水循环过程的关键<sup>[1]</sup>。氢氧同位素虽在水体中含量极低,却因具有独特的“指纹”特性,成为追溯降水水汽来源的主要手段<sup>[2]</sup>。秦岭作为中国的“中央水塔”,既是南水北调中线工程的关键水源涵养区,也是我国水文气候的南北过渡带<sup>[3]</sup>。其独特的地形作用显著:夏季可阻挡东南与西南季风携带的暖湿气流,冬季能削弱西北干冷空气,这种屏障效应直接导致秦岭南北两侧在年降水量、降水日数及雨季降水量等方面呈现明显的区域差异<sup>[4]</sup>。围绕这一核心差异,学术界已针对秦岭南北的极端降水<sup>[5]</sup>、降水时空差异<sup>[6]</sup>及降水日变化<sup>[7]</sup>等开展大量系统研究。过去 30 余年陕西省降水氢氧同位素领域的研究也取得了丰硕成果<sup>[8-14]</sup>。然而,专门针对秦岭南北两侧降水稳定同位素特征差异的研究尚属空白。

秦岭南北两侧降水稳定同位素是否有差异?水汽来源又有何差异?对这些关键问题的探索,不仅有助于深化对秦岭南北水循环过程的认知,更能为区域气候预测与古气候重建提供科学支撑。本文利用降水氢氧稳定同位素数据,系统解析了秦岭南北两侧大气降水线方程的地域分异特征并阐明其环境指示意义,同时定量表征了  $d$ -excess(氘过量参数)的空间变异规律及水汽来源的区域差异性。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

秦岭地处中国地理版图中心,不仅是我国南北气候分界线,更是气候变化的敏感区域与重要的生态屏障<sup>[3]</sup>。其核心段位于陕西省境内,地理坐标介于  $32^{\circ}40'N$ — $34^{\circ}35'N$  和  $105^{\circ}30'E$ — $111^{\circ}3'E$  之间,海拔 195~3 767.2 m(图 1)。从水汽来源与降水时段来看,秦岭降水主要依赖印度洋的西南季风与太平洋的东南季风输送的暖湿气流,年内降水集中在 5—10 月,占全年降水量的 80%~85%。秦岭淮河一线大致与中国东部季风区 1 月

$0^{\circ}C$ 等温线及年 800 mm 等降水量线重合。秦岭北麓地形陡峻,属暖温带半湿润气候,年均降水量 500~650 mm,年降水日数 125~135 d,MODIS 卫星监测的气溶胶光学厚度(aerosol optical depth,简称 AOD)为 0.4~0.9;秦岭南麓地形和缓,属北亚热带湿润气候,年均降水量 700~850 mm,年降水日数 145~175 d,AOD 为 0.4~0.9<sup>[15]</sup>。秦岭南部降水频率高但强度相对偏小,降水量和降水频率的日峰值主要出现在夜间,而北部 20 mm/h 的降水频率低但强度异常偏高,降水频率与量级的日峰值出现在午后<sup>[7]</sup>。

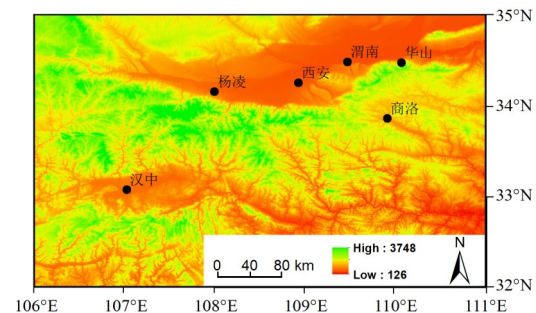


图 1 秦岭南北两侧 6 站点空间分布图

Fig. 1 Spatial distribution map of six stations on the north and south sides of the Qinling Mountains

### 1.2 数据来源及方法

选取的秦岭南北两侧 6 个降水同位素站点,包含两部分:一是全球降水同位素监测网络(Global Network of Isotopes in Precipitation, GNIP)的西安站点;二是近年来国内学者设立的华山、渭南、杨凌、汉中和商洛观测点。需要说明的是,自设站点采样时间较短,存在缺乏长期连续观测数据的局限。但同一区域内不同时间间隔的站点,其大气降水稳定同位素值与季节变化规律保持一致;且西安站点  $\delta^{18}O$  的年际变异系数仅为 -0.09,结合秦岭南北两侧站点的综合观测时间跨度已达 30 a,所以年际波动不会对研究结果的准确性产生影响。研究时段内 6 个站点的温度及降水量数据均来源于国家气象科学数据中心(<http://data.cma.cn/>)。各站点地理位置、环境信息及大气降水  $\delta^{18}O$  和  $\delta D$  数据详见表 1。

表1 秦岭南北两侧各站点地理信息及年均降水同位素加权

Tab. 1 Geographical information of each station on the north and south sides of the Qinling Mountains and the weighted average of annual precipitation isotopes

站点	纬度/(°N)	经度/(°E)	年均降水/mm	年均温/°C	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	$\delta\text{D}/\text{‰}$	研究时段	数据来源
西安	34.30	108.93	520	13.4	-7.41	-49.37	1985—1992	GNIP
华山	34.52	110.00	776	7.4	-9.36	-65.62	1986—1987	张生春 <sup>[8]</sup>
渭南	34.50	109.50	610	16.6	-8.57	-56.54	2012—2014	王晓艳等 <sup>[10]</sup>
杨凌	34.30	108.06	574	14.1	-7.37	-46.11	2015—2018	赵明华等 <sup>[13]</sup>
汉中	33.06	107.03	900	16.4	-5.44	-31.63	1986—1987	张生春 <sup>[8]</sup>
商洛	33.88	109.95	695	13.6	-6.91	-34.78	2016	冯婧 <sup>[9]</sup>

表1中大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与 $\delta\text{D}$ 的数值,均以维也纳标准海洋水(SMOW)为基准,采用千分差的形式表示:

$$\delta^{18}\text{O} = \left( \frac{R_{\text{降水}}}{R_{\text{SMOW}}} - 1 \right) \times 1000\text{‰}, \quad (1)$$

$$\delta^{18}\text{D} = \left( \frac{Q_{\text{降水}}}{Q_{\text{SMOW}}} - 1 \right) \times 1000\text{‰}, \quad (2)$$

式中: $R_{\text{降水}}$ 表示大气降水中的 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 值, $R_{\text{SMOW}}$ 表示SMOW的 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 值; $Q_{\text{降水}}$ 表示大气降水中的D/H值, $Q_{\text{SMOW}}$ 表示SMOW的D/H值。

大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与 $\delta\text{D}$ 的年均加权平均值的计算公式为:

$$\delta(w) = \sum_i (p_i \delta_i / \sum_i p_i), \quad (3)$$

式中: $\delta(w)$ 为加权平均值, $p_i$ 为降水量, $\delta_i$ 为其对应的同位素值。

## 2 结果分析与讨论

### 2.1 大气降水线方程

美国加利福尼亚大学水文地质学家CRAIG,通过测定全球400多个大气降水样品的 $\delta\text{D}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 值,发现二者存在显著线性关系,并提出全球大气降水线(GMWL)方程<sup>[16]</sup>,其表达式为 $\delta\text{D} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$ 。北京大学郑淑慧等收集并测定了全国101个站点的大气降水样品,基于 $\delta\text{D}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 数据,建立了全国大气降水线方程<sup>[17]</sup>,具体为 $\delta\text{D} = 7.9\delta^{18}\text{O} + 8.2$ 。基于秦岭北麓4个站点的108组 $\delta\text{D}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 月均数据,通过拟合分析得出该区域大气降水线方程为: $\delta\text{D} = 7.84\delta^{18}\text{O} + 10.10$ ,结果详见图2。同样,利用秦岭南麓2个站点的21组 $\delta\text{D}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 月均数据,建立该区域的大气降水方程为: $\delta\text{D} = 7.52\delta^{18}\text{O} + 13.10$ ,结果亦见图2。

大气降水线方程的斜率可反映D与 $^{18}\text{O}$ 的分

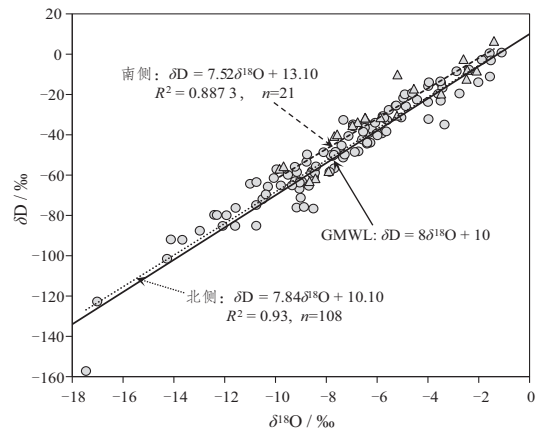


图2 秦岭南北两侧大气降水线方程

Fig. 2 Equations of atmospheric precipitation lines on the north and south sides of the Qinling Mountains

馏速率对比关系,截距指示D对平衡状态的偏离程度<sup>[18]</sup>。秦岭南北两侧大气降水线方程斜率均小于全球大气降水线方程与全国大气降水线方程的斜率,截距均大于全球大气降水线方程与全国大气降水线方程的截距。值得注意的是,秦岭南麓方程的斜率与截距均大于中国东部季风区降水线方程( $\delta\text{D} = 7.46\delta^{18}\text{O} + 0.90$ )的对应参数。秦岭南麓的斜率处于全球、全国与东部季风区之间,说明秦岭南麓的雨滴在降落过程中,均受到了不平衡的二次蒸发影响。

秦岭北麓大气降水线方程斜率(7.84) > 秦岭南麓(7.52) > 东部季风区(7.46),表明秦岭南麓水汽来源与东部季风区更为相似,核心原因在于秦岭的地形阻隔作用:夏秋季,东南季风和西南季风难以翻越秦岭;冬春季,秦岭又阻挡了北方冬季风的南下。秦岭南麓截距(13.10)大于秦岭北麓(10.10),这与南麓丰富的水体分布密切相关。仅

汉中地区就有大小湖泊 344 个,占陕西省湖泊总数的 1/3,大量水体的强烈蒸发形成局地水循环,最终导致南麓降水同位素截距偏高。秦岭北麓地处黄土高原南缘,属于黄河流域,其大气降水线方程斜率(7.84)与黄土高原内部的汾河谷地(7.72)、太行山区(8.23)斜率数值相近<sup>[19]</sup>;秦岭南麓属于长江流域,其大气降水线方程斜率(7.52)更接近长江流域整体斜率(6.71)<sup>[20]</sup>,这一特征充分说明,作为黄河流域与长江流域的地理分界线,秦岭不仅控制着地表径流的空间分布,还对大气降水的水汽来源产生了显著的影响。

## 2.2 环境效应

### 2.2.1 温度效应

大气降水  $\delta^{18}\text{O}$  值与温度主控的蒸发、凝结相关。从表 2 数据来看,秦岭南北两侧全年尺度的温度效应均不突出;秦岭北麓降水  $\delta^{18}\text{O}$  与温度的线性回归方程为  $\delta^{18}\text{O} = 0.0629T - 8.4746$  ( $R^2 = 0.028, P = 0.104$ ),秦岭南麓降水  $\delta^{18}\text{O}$  与温度的线

性回归方程为  $\delta^{18}\text{O} = -0.0344T - 5.2725$  ( $R^2 = 0.0104, P = 0.660$ )。考虑到秦岭南北两侧地处季风边缘区,夏半年降水高度集中,因此进一步将各站点降水  $\delta^{18}\text{O}$  按夏、冬半年拆分分析。秦岭南麓夏半年降水  $\delta^{18}\text{O}$  与温度的线性回归方程为  $\delta^{18}\text{O} = -0.1998T - 1.8022$  ( $R^2 = 0.1058, P = 0.302$ ),呈现弱反温度效应。这一现象与南麓山区地形相关,夏季山区雾天较多,雾水凝结过程会导致重同位素富集,进而引发反温度效应<sup>[21]</sup>。秦岭北麓夏半年降水  $\delta^{18}\text{O}$  与温度之间无显著相关性,未呈现温度效应。秦岭南麓冬半年降水  $\delta^{18}\text{O}$  与温度之间无显著相关性,未呈现温度效应。秦岭北麓冬半年降水  $\delta^{18}\text{O}$  与温度的线性回归方程为  $\delta^{18}\text{O} = 0.3395T - 10.005$  ( $R^2 = 0.2872, P = 0.0003$ ),呈现一定的温度效应。说明在秦岭地区温度并不是影响降水稳定同位素的主要因素,可能受水汽来源和降水量的共同作用主导。

表 2 秦岭南北两侧各站点  $\delta^{18}\text{O}$  与温度、降水量回归方程

Tab. 2 Regression equations of  $\delta^{18}\text{O}$  and temperature, precipitation at each station on both sides of the qinling mountains

站点	全年		夏半年		冬半年	
	$\delta^{18}\text{O}$ 与温度 $T$	$\delta^{18}\text{O}$ 与降水量 $p$	$\delta^{18}\text{O}$ 与温度 $T$	$\delta^{18}\text{O}$ 与降水量 $p$	$\delta^{18}\text{O}$ 与温度 $T$	$\delta^{18}\text{O}$ 与降水量 $p$
北麓 综合	$\delta^{18}\text{O} = 0.0629T - 8.4746$ ( $R^2 = 0.028, P = 0.104$ )	$\delta^{18}\text{O} = -0.0118p - 6.8424$ ( $R^2 = 0.0252, P = 0.123$ )	$\delta^{18}\text{O} = 0.0127T - 7.7067$ ( $R^2 = 0.0003, P = 0.893$ )	$\delta^{18}\text{O} = -0.0305p - 5.0492$ ( $R^2 = 0.1742, P = 0.002$ )	$\delta^{18}\text{O} = 0.3395T - 10.005$ ( $R^2 = 0.2872, P = 0.0003$ )	$\delta^{18}\text{O} = 0.0454p - 8.9687$ ( $R^2 = 0.0935, P = 0.052$ )
南麓 综合	$\delta^{18}\text{O} = -0.0344T - 5.2725$ ( $R^2 = 0.0104, P = 0.660$ )	$\delta^{18}\text{O} = -0.0134p - 4.8738$ ( $R^2 = 0.0544, P = 0.309$ )	$\delta^{18}\text{O} = -0.1998T - 1.8022$ ( $R^2 = 0.1058, P = 0.302$ )	$\delta^{18}\text{O} = -0.051p - 0.764$ ( $R^2 = 0.3578, P = 0.040$ )	$\delta^{18}\text{O} = 0.1246T - 6.5915$ ( $R^2 = 0.0397, P = 0.607$ )	$\delta^{18}\text{O} = 0.055p - 7.0076$ ( $R^2 = 0.0738, P = 0.480$ )

### 2.2.2 降水量效应

降水量效应是指大气降水  $\delta^{18}\text{O}$  值与当地降水量呈负相关的现象,强对流现象、雨滴降落过程中的蒸发作用均可能诱发该效应<sup>[10]</sup>。从全年尺度来看,秦岭南北两侧的降水量效应均不突出:北麓降水  $\delta^{18}\text{O}$  与降水量的线性回归方程为  $\delta^{18}\text{O} = -0.0118p - 6.8424$  ( $R^2 = 0.0252, P = 0.123$ );南麓降水  $\delta^{18}\text{O}$  与降水量的线性回归方程为  $\delta^{18}\text{O} = -0.0134p - 4.8738$  ( $R^2 = 0.0544, P = 0.309$ )。分季节分析夏半年数据发现,降水量效应的区域差异显著:北麓夏半年降水  $\delta^{18}\text{O}$  与降水量的线性回归方程为  $\delta^{18}\text{O} = -0.0305p - 5.0492$  ( $R^2 = 0.1742, P = 0.002$ ),呈现弱降水量效应。南麓夏半年降水  $\delta^{18}\text{O}$  与降水量的线性回归方程为  $\delta^{18}\text{O} = -0.051p - 0.764$  ( $R^2 = 0.3578, P = 0.040$ ),呈现强降水量效应。说明降水量效应能够对秦岭南北

两侧夏半年降水同位素产生影响,且对南麓的作用更显著。受地形影响,秦岭南侧山间盆地植被覆盖较好,蒸发作用较强,相较于北麓更易形成强对流现象。强对流会延长降水过程,逐步补偿空气饱和差,使雨滴降落过程时的蒸发作用缓慢减弱。秦岭北麓不显著的降水量效应,与刘洁遥等<sup>[18]</sup>在陕甘宁地区的研究结果相符,也符合经典同位素理论中“内陆地区降水量效应不显著”的结论。秦岭南麓显著的降水量效应与董小芳等<sup>[20]</sup>关于“在长江流域等中低纬强对流地区降水量效应显著”的研究结论一致。

### 2.2.3 纬度效应

纬度效应指大气降水  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta\text{D}$  值随纬度升高而呈现出下降趋势的现象<sup>[21]</sup>。其形成机制是产生于低纬度的水蒸气云团向高纬度移动过程中持续发生瑞利分馏作用。从表 1 数据来看,秦岭南麓年均大气降水  $\delta^{18}\text{O}$  的加权值介于  $-6.91\text{‰} \sim$

-5.44‰之间,  $\delta D$  的加权值介于 -34.78‰~-31.63‰之间; 而秦岭北麓年均大气降水  $\delta^{18}O$  的加权值介于 -9.36‰~-7.37‰之间,  $\delta D$  的加权值介于 -65.62‰~-46.11‰之间。整体而言, 秦岭北麓大气降水  $\delta^{18}O$  与  $\delta D$  明显高于南麓。将秦岭南北两侧6个站点的大气降水  $\delta^{18}O$ 、 $\delta D$  值与纬度进行拟合, 得到的方程分别为  $\delta^{18}O = -2.2235Lat + 68.296$  ( $R^2 = 0.829, P = 0.012$ ) 和  $\delta D = -19.804Lat + 627.83$  ( $R^2 = 0.7315, P = 0.030$ ), 说明秦岭南北两侧纬度效应明显, 结果详见图3。

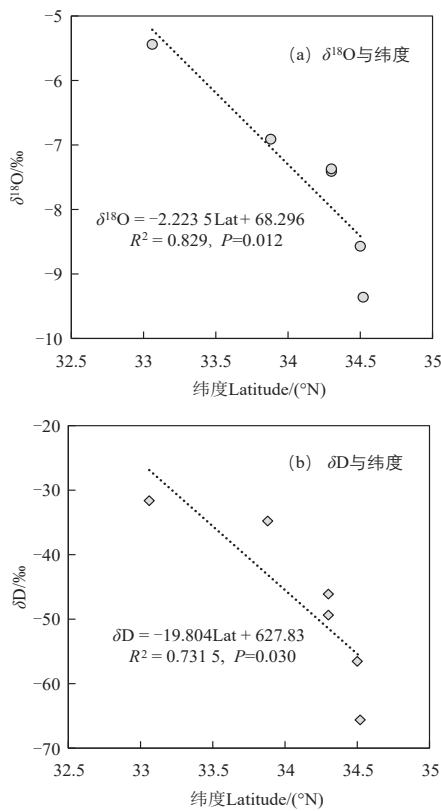


图3 秦岭南北两侧大气降水  $\delta^{18}O$ 、 $\delta D$  与纬度的相关关系  
**Fig. 3 Correlation between  $\delta^{18}O$  and  $\delta D$  of atmospheric precipitation and latitude on both sides of the Qinling Mountains**

陕甘宁3省降水  $\delta^{18}O$  纬度效应显著, 纬度每增加1°, 降水中  $\delta^{18}O$  相应贫化0.27‰<sup>[18]</sup>。受纬度效应影响, 广州和北京两地大气降水  $\delta D$  从 -29.2‰降至 -56.6‰, 平均纬度每增加1°,  $\delta D$  贫化1.72‰<sup>[17]</sup>。于津生等<sup>[22]</sup>利用广西至黑龙江16个站点的数据分析发现, 纬度每增加1°, 降水  $\delta^{18}O$  和  $\delta D$  值分别下降0.24‰和1.84‰。由图3可知, 该区域各站点纬度每增加1°, 降水  $\delta^{18}O$  与  $\delta D$  值分别下降

2.22‰和19.8‰。从贫化梯度来看, 秦岭的梯度远远高于全国与西部区域的平均梯度, 说明秦岭对气团的阻挡作用有效放大了纬度效应的影响。

### 2.3 *d-excess* 与水汽来源

大气降水中的 *d-excess* (译为氘过量参数或过量氘,  $d = \delta D - 8\delta^{18}O$ , 简称 *d* 值) 是局地水汽来源示踪的可靠指标<sup>[23]</sup>。其数值大小主要受水汽来源地的湿度和雨滴下落过程中, 动力分馏与热力分馏共同作用的二次蒸发影响。秦岭北麓大气降水 *d* 值变化范围为 5.76‰~13.96‰, 平均值 11.64‰; 南麓大气降水 *d* 值变化范围为 12.02‰~26.01‰, 平均值 16.13‰ (图4)。秦岭南北两侧降水 *d* 值均处于正常的波动区间, 但二者平均值均高于全球降水 *d* 值的典型水平 (10‰), 这主要由南北麓降水的水汽来源不同所导致。

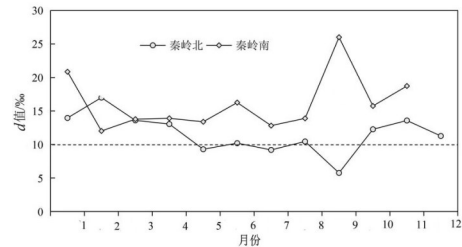


图4 秦岭南北两侧大气降水 *d* 值的季节变化

**Fig. 4 *d-excess* seasonal variations of atmospheric precipitation values on both sides of the Qinling Mountains**

秦岭南北两侧冬、夏半年水汽来源地的蒸发条件不同, 导致 *d* 值差异显著。秦岭北麓夏半年, 源自低纬度海洋地区的水汽相对湿度大 (表3), 导致大气降水 *d* 值整体偏低, 平均为 9.53‰, 低于全年平均水平; 冬半年降水的水汽来自西风环流携带的北大西洋区域 (表3), 气团相对湿度较低, 降水 *d* 值偏高, 平均值为 13.74‰, 高于全年平均水平。秦岭北麓的冬、夏半年水汽来源与刘洁遥等<sup>[18]</sup>在陕甘宁地区降水水汽来源研究结果一致。秦岭南麓夏半年 *d* 值的平均数据为 16.36‰, 冬半年 *d* 值的平均数据为 15.86‰, 全年整体偏高。这主要由秦岭南侧两个采样点地处山间盆地, 植被覆盖度高, 可有效削弱雨滴降落过程中二次蒸发作用, 这与降水量效应所反映的情况相符。另外, 秦岭南麓分布有众多湖泊, 水源的持续蒸发显著增强了局部水循环过程, 导致 *d* 值升高, 这与大气降水方程线截距反映的情况一致, 同时也与张应华等<sup>[24]</sup>在黑河流域上游山区发现的水库局地水循

环造成  $d$  值偏高的研究结果相似。

表 3 秦岭南北两侧各季节水汽来源统计

Tab. 3 Statistics of water vapor sources in different seasons on both sides of the Qinling Mountains

站点	春季	夏季	秋季	冬季	数据来源
西安	62% 西北、38% 西南	52% 西北、48% 东南	57% 西北、43% 东南	77% 西北、23% 西南	畅俊斌 <sup>[12]</sup>
商洛	41% 西北、39% 东南、20% 局地	18% 北方、42% 东南、40% 西南	33% 北方、44% 东南、23% 局地	73% 北方、27% 局地	冯婧 <sup>[9]</sup>

### 3 结论

(1) 秦岭北麓大气降水线方程斜率依次大于秦岭南麓与东部季风区, 表明秦岭南麓水汽来源与东部季风区更为相似。受秦岭的阻挡作用, 夏秋季部分东南季风与西南季风难以翻越秦岭, 在冬春季节秦岭同样阻挡了部分北方冬季风南下。

(2) 秦岭北麓冬半年降水稳定同位素呈现出一定的温度效应, 而南麓夏半年降水稳定同位素呈现出强降水量效应。秦岭南北两侧降水稳定同

位素的纬度效应明显, 其贫化梯度远超全国平均, 说明秦岭对气团的阻挡作用有效放大了纬度效应的影响。

(3) 秦岭南北两侧降水  $d$  值的平均数值分别为 11.64‰ 和 16.13‰, 均高于全球降水平均值。秦岭南麓大气降水区域的植被覆盖度高, 可显著削弱雨滴降落过程中的二次蒸发作用, 区域内众多湖泊的水源蒸发增强了局地水循环, 进一步推高了降水  $d$  值。

### 参考文献:

- [1] 庞洪喜, 何元庆, 张忠林, 等. 季风降水中  $\delta^{18}\text{O}$  与季风水汽来源[J]. 科学通报, 2005, 50(20): 2263-2266.  
PANG Hongxi, HE Yuanqing, ZHANG Zhonglin, et al.  $\delta^{18}\text{O}$  in monsoon precipitation and monsoon moisture sources [J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(20): 2263-2266.
- [2] 柳鉴容, 宋献方, 袁国富, 等. 中国东部季风区大气降水  $\delta^{18}\text{O}$  的特征及水汽来源[J]. 科学通报, 2009, 54(22): 3521-3531.  
LIU Jianrong, SONG Xianfang, YUAN Guofu, et al. Characteristics of  $\delta^{18}\text{O}$  in atmospheric precipitation and moisture sources in the eastern monsoon region of China [J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(22): 3521-3531.
- [3] 王斌. 秦岭: “南北分界”还是“和合南北”[J]. 中学地理教学参考, 2021(13): 79-80.  
WANG Bin. Qinling Mountains: A “north-south divide” or a “harmonious convergence of north and south”? [J]. Teaching Reference of Middle School Geography, 2021(13): 79-80.
- [4] 齐瑛, 傅抱璞, 李兆元. 秦岭山脉对冷空气屏障的理论研究[J]. 气象学报, 1995(2): 186-193.  
QI Ying, FU Baopu, LI Zhaoyuan. Theoretical study on cold-air damping of the Qinling Mountains [J]. Acta Meteorologica Sinica, 1995(2): 186-193.
- [5] 李双双, 汪成博, 延军平, 等. 面向事件过程的秦岭南北极端降水时空变化特征[J]. 地理学报, 2020, 75(5): 989-1007.  
LI Shuangshuang, WANG Chengbo, YAN Junping, et al. Variability of the event-based extreme precipitation in the south and north Qinling Mountains [J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(5): 989-1007.
- [6] 刘荷, 邓晨晖, 邵景安, 等. 1964—2017 年秦岭山地降水时空变化特征及其南北差异[J]. 水土保持研究, 2021, 28(2): 210-216, 223.  
LIU He, DENG Chenhui, SHAO Jingan, et al. Spatiotemporal variations of precipitation and the north-south differences in the qinling mountains from 1964 to 2017 [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(2): 210-216, 223.
- [7] 张宏芳, 潘留杰, 陈昊明, 等. 秦岭及周边地区暖季降水日变化及其成因分析[J]. 高原气象, 2020, 39(5): 935-946.  
ZHANG Hongfang, PAN Liujie, CHEN Haoming, et al. Diurnal variations and causes of warm season precipitation in Qinling and surrounding areas [J]. Plateau Meteorology, 2020, 39(5): 935-946.
- [8] 张生春. 陕西省现代大气降水氢氧同位素组成特征研究[J]. 陕西地质, 1989(2): 57-66.  
ZHANG Shengchun. Characteristics of hydrogen-oxygen isotope compositions of contemporarily atmospheric precipitation in Shaanxi Province [J]. Geology of Shaanxi, 1989(2): 57-66.
- [9] 冯婧. 商州区大气降水水汽来源分析[J]. 财讯, 2016(8): 61-62.

- FENG Jing. Analysis of moisture sources for atmospheric precipitation in Shangzhou District[J]. Finance, 2016(8): 61-62.
- [10] 王艳艳, 卢爱刚, 蒋缠文, 等. 渭南大气降水中氢氧同位素特征与水汽来源关系[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(8): 122-128.  
WANG Xiaoyan, LU Aigang, JIANG Chanwen, et al. Characteristics of  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  in precipitation and the moisture origin in Weinan[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, 31(8): 122-128.
- [11] 贺强, 孙从建, 吴丽娜, 等. 基于GNIP的黄土高原区大气降水同位素特征研究[J]. 水文, 2018, 38(1): 58-66.  
HE Qiang, SUN Congjian, WU Lina, et al. Study on isotopic characteristics of atmospheric precipitation in loess plateau based on GNIP[J]. Journal of China Hydrology, 2018, 38(1): 58-66.
- [12] 畅俊斌, 吴广涛, 元佳飞, 等. 水汽源区变化对陕西关中降水稳定同位素的影响[J]. 水文, 2019, 39(5): 71-77.  
CHANG Junbin, WU Guangtao, YUAN Jiafei, et al. Effect moisture source variation on stable isotopes of precipitation in Guanzhong Region, Shaanxi Province[J]. Journal of China Hydrology, 2019, 39(5): 71-77.
- [13] 赵明华, 陆彦玮, HENG R, 等. 关中平原降水氢氧稳定同位素特征及其水汽来源[J]. 环境科学, 2020, 41(7): 3148-3156.  
ZHAO Minghua, LU Yanwei, HENG R, et al. Analysis of hydrogen and oxygen stable isotope characteristics and vapor sources of precipitation in the Guanzhong Plain[J]. Environmental Science, 2020, 41(7): 3148-3156.
- [14] 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[J]. 应用生态学报, 2022, 33(6): 1459-1465.  
LI Jiaqi, HUANG Yanan, SHI Peijun, et al. Isotopic characteristics and vapor sources of atmospheric precipitation in the loess region of north Shaanxi, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(6): 1459-1465.
- [15] 彭艳, 王钊, 董妍, 等. 1960—2012年陕西降水变化特征及可能成因分析[J]. 高原气象, 2016, 35(4): 1050-1059.  
PENG Yan, WANG Zhao, DONG Yan, et al. Characteristics and reasons of local change of precipitation over Shaanxi during 1960—2012[J]. Plateau Meteorology, 2016, 35(4): 1050-1059.
- [16] CRAIG H. Isotopic variations in meteoric waters[J]. Science, 1961, 133(3465): 1702-1703.
- [17] 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.  
ZHENG Shuhui, HOU Fagao, NI Baoling. Research on hydrogen and oxygen stable isotopes in atmospheric precipitation in China[J]. Chinese Science Bulletin, 1983, 28(13): 801-806.
- [18] 刘洁遥, 张福平, 冯起, 等. 陕甘宁地区降水稳定同位素特征及水汽来源[J]. 应用生态学报, 2019, 30(7): 2191-2200.  
LIU Jieyao, ZHANG Fuping, FENG Qi, et al. Stable isotopes characteristics of precipitation over Shaanxi-Gansu-Ningxia and its water vapor sources[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(7): 2191-2200.
- [19] 周思捷, 孙从建, 陈伟, 等. 黄土高原东部夏半年降水稳定同位素特征及水汽来源分析[J]. 地理学报, 2022, 77(7): 1745-1761.  
ZHOU Sijie, SUN Congjian, CHEN Wei, et al. Precipitation isotope characteristics and water vapor sources in summer in eastern Loess Plateau[J]. Acta Geographica Sinica, 2022, 77(7): 1745-1761.
- [20] 董小芳, 邓黄月, 郑祥民, 等. 长江流域降水中氢氧同位素特征及水汽来源[J]. 环境科学与技术, 2017, 40(4): 78-84.  
DONG Xiaofang, DENG Huangyue, ZHENG Xiangmin, et al. Analysis of stable isotope characteristics and water vapor origins in atmospheric precipitation in the Yangtze River Basin[J]. Environmental Science & Technology, 2017, 40(4): 78-84.
- [21] 刘忠方, 田立德, 姚檀栋, 等. 中国大气降水中 $\delta^{18}O$ 的空间分布[J]. 科学通报, 2009, 54(6): 804-811.  
LIU Zhongfang, TIAN Lide, YAO Tandong, et al. Spatial distribution of  $\delta^{18}O$  in precipitation over China [J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(6): 804-811.
- [22] 于津生, 虞福基, 刘德平. 中国东部大气降水氢、氧同位素组成[J]. 地球化学, 1987(1): 22-26.  
YU Jinsheng, YU Fujie, LIU Deping. The oxygen and hydrogen isotopic compositions of meteoric waters in the eastern part of China[J]. Geochimica, 1987(1): 22-26.
- [23] ZHAO Liangu, YIN Li, XIAO Honglang, et al. Isotopic evidence for the moisture origin and composition of surface runoff in the headwaters of the Heihe River Basin[J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(4): 406-415.
- [24] 张应华, 仵彦卿. 黑河流域大气降水水汽来源分析[J]. 干旱区地理, 2008, 31(3): 403-408.  
ZHANG Yinghua, WU Yanqing. Precipitation from different water vapor sources in the Heihe River Basin, China[J]. Arid Land Geography, 2008, 31(3): 403-408.

责任编辑:陈松楠 张伟博