

DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20180321

水汽源区变化对陕西关中降水稳定同位素的影响

畅俊斌^{1,2}, 吴广涛^{1,2}, 元佳飞^{1,2}, 郭政昇³

(1.陕西地矿九〇八水文地质工程地质大队,陕西 西安 710600; 2.陕西省矿产资源勘查与综合利用重点实验室,陕西 西安 710600; 3.山西师范大学地理科学学院,山西 临汾 041000)

摘要:基于关中地区7个站点的降水同位素及气象数据,分析了 $\delta^{18}\text{O}$ 的时空特征及环境效应,模拟出代表站点的气团运移轨迹,利用向外长波辐射(OLR)数据研究水汽源区变化及对夏半年降水稳定同位素的影响。结果表明: $\delta^{18}\text{O}$ 有着较为明显的季节性变化规律,由春季到冬季逐渐下降,空间分布则呈由东南向西北递减的趋势;大气降水线方程表现出明显的过渡性区位特征,夏半年以降水量效应为主;水汽主要通过西北与东南两个水汽通道输送,青藏高原的热力、动力性质对水源差异产生了较大影响;水汽源区变化与对流层中上部水汽含量场都与稳定同位素特征、水汽运移轨迹有着较强的对应关系,8、9月形成于西太平洋的热带辐合带(ITCZ)使东南季风成为夏季关中地区主要的水汽输送通道。

关键词:降水同位素;水汽来源;OLR场;ITCZ;关中地区

中图分类号:P342

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2019)05-0071-07

水循环是自然界各圈层相互联系中最活跃的一环,在物质与能量的分配、运移过程中有着重要的作用。降水作为流域水循环中重要的输入因子,在各种时空尺度下的变化影响着整个区域的水资源状况,进而引起自然环境的改变^[1]。 ^{18}O 和D是水分子中所蕴含的天然同位素,随水分子的运移广泛参与到自然界水循环中,因其分馏特征对环境变化有着极为敏感的响应,广泛应用于大气降水水汽来源及水循环过程的示踪,被称为水的“指纹”^[2]。近年来的研究表明,水汽源区变化、大尺度对流过程与季风区降水稳定同位素特征关系密切,水汽源区的位置、水汽输送距离和水汽输送过程中的降水淋洗作用同样影响着降水稳定同位素的水平与特征^[3]。

近年来,我国许多学者着眼于区域尺度上降水氢氧稳定同位素特征的研究,如长江流域^[4]、西北地区^[5]、华北地区^[6]等。李小飞^[7]等基于黄河流域12个站点的降水同位素数据,分析了全流域大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的时空变化特征及影响因素;较大空间范围乃至全国尺度的同位素研究也取得了许多成果,如Yao等^[8]深入研究了季风气候对青藏高原降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的影响,Liu等^[9]基

于最新的同位素观测数据提出了中国大气降水线方程,并分析了中国降水同位素的时空分布特征及环境效应;目前国内外开始对水汽源区变化或ENSO事件与降水稳定同位素之间的响应机制进行研究,Kurita^[10]、Vimeux等^[11]证明了水汽源区变化与降水 $\delta^{18}\text{O}$ 之间存在显著相关性,并对其内在机制进行了探索;Tang等^[12]将向外长波辐射(Outgoing Longwave Radiation, OLR)技术应用于降水同位素的研究中,证明了南京降水稳定同位素的特征与水源区热带辐合带位置及强度变化之间的相关性。

本文依据关中地区7个站点(区内4个、区外3个)的降水稳定同位素及相关气象数据,利用OLR技术明确流域水汽来源及其与水汽源区变化之间的响应,有助于进一步还原大气过程、追溯水汽来源,深入了解区域水循环过程,进而为关中地区水资源的科学管理和利用、气象变化的预测提供理论支撑。

1 数据来源与分析方法

1.1 研究区概况

陕西关中地区含西安、宝鸡、咸阳、渭南、铜川五

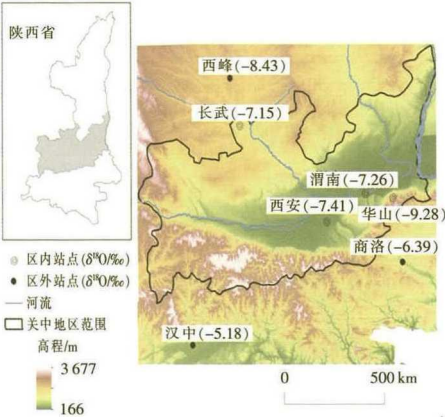
收稿日期:2018-08-27

基金项目:国家自然科学基金项目(40972154)

作者简介:畅俊斌(1968-),男,陕西咸阳人,高级工程师,主要研究方向为水文地质、工程地质、环境地质。E-mail:majorgzs@163.com

通讯作者:吴广涛(1987-),男,陕西渭南人,工程师,主要研究方向为水文地质、工程地质、环境地质。E-mail:2961329897@qq.com

市和杨凌国家农业高新技术产业示范区, 约占全省总面积的 26.9 %, 包括 53 个县(市、区), 是关中-天水经济区的核心区^[13]。集中了全省 52 % 的耕地、75 % 的灌溉面积、60 % 的人口、80 % 的工业, 而水资源量仅占全省地表水资源总量的 17.7 %, 属于水资源贫乏区^[14]。关中地区分布的 4 个观测点包括渭南、华山、西安、长武, 由于西部缺少测站, 同时选取 3 个区外站点(商洛、汉中、西峰)用以对比分析, 各同位素站点及区外站点的空间位置如图 1 所示。



注: 本图基于国家基础地理信息中心网站下载的审图号为 GS(2005)908 号的标准地图制作, 底图无修改。

图 1 关中地区降水稳定同位素站点的空间分布

Fig.1 The spatial distribution of the precipitation stable isotope stations in Guanzhong region

1.2 数据来源及方法

关中地区的降水同位素站点包括: 全球降水同位素监测网络(Global Network of Isotopes in Precipitation, GNIP)(西安)、中国大气降水同位素网络(Chinese Network of Isotopes in Precipitation, CHNIP)(长武), 及国内学者所设立的观测点(渭南、华山、商洛、汉中、西峰)。各站点多为短时间采样, 难以避免气候变化带来的影响。但从总体来看, 仍准确反映了所在地的降水

同位素水平及其与地理环境之间的关系。选取采样时间较长的西安站点计算 $\delta^{18}\text{O}$ 的年际变异系数(-0.09), 其年际波动并不影响定性研究结果, 各站地理信息及降水稳定同位素数据如表 1 所示。

表 1 中, 同位素 δ 值均以维也纳标准海洋水 (V-SMOW) 的千分差表示。

$$\delta^{18}\text{O}(\text{or } \delta\text{D}) = (R_{\text{水样}}/R_{\text{V-SMOW}} - 1) \times 1000\text{‰} \quad (1)$$

式中: $R_{\text{水样}}$ 、 $R_{\text{V-SMOW}}$ 分别为样品与 V-SMOW 中的 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 和 D/H 比值。

降水中氢氧稳定同位素数据的年均加权平均值, 公式为:

$$\delta(w) = \sum P_i \times \delta_i / \sum P_i \quad (2)$$

式中: $\delta(w)$ 为加权平均值; P_i 为降水量; δ_i 为其相应的同位素值。

OLR 及对流层中上部水汽含量数据源自国家卫星气象中心提供的风云二 F 地球同步轨道气象卫星, 可见光红外自旋扫描辐射仪所处理的 2016 年月均向外长波辐射及对流层中上部水汽含量数据, 空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 。卫星定位于 105°E , 能更好地反映我国及周边区域的水热变化状况。在 HYSPLIT-4 模型示踪水汽来源轨迹的基础上, 研究关中地区降水同位素的变化特征与水汽源区之间的相关关系。

2 关中地区降水同位素特征分析

2.1 大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的时空特征

各站点大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的年内变化如图 2 所示, $\delta^{18}\text{O}$ 有着明显的季节性变化规律, 由春季到冬季逐渐下降。3~5 月春季气温升高, 同位素随之富集, 但华山站则先下降再上升, 与地处秦岭山区的商洛站一致, 是由于夏季风渐强, 地处迎风面的两站降水量剧增, 同位素贫化, 5 月升温再次推高 $\delta^{18}\text{O}$ 值。6~8 月夏季 $\delta^{18}\text{O}$ 值随降水增多而持续下降, 但西安 8 月小幅上升, 与 8 月的高温有关, 这与黄土高原上西峰站的上升趋势

表1 关中地区各站点降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 及地理信息

Table1 $\delta^{18}\text{O}$ and geographical information of the sampling stations in Guanzhong region

位置	站点	纬度/ $^\circ\text{N}$	经度/ $^\circ\text{E}$	海拔/m	年均降水/mm	年均/ $^\circ\text{C}$	年均 $\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	研究时段/年	数据来源
区内 站点	西安	34.30	108.93	397	519.5	11.7	-7.41	1985~1992	GNIP
	华山	34.52	110.00	2 064	775.9	6.5	-9.28	1986~1987	张生春 ^[15]
	渭南	34.50	109.47	367	609.4	16.6	-7.26	2012~2014	王晓艳等 ^[16]
	长武	35.14	107.41	1 200	575.1	9.4	-7.15	2005、2010、2013	陈曦等 ^[17]
区外 站点	商洛	32.33	109.52	710	695.1	13.6	-6.39	2015	冯婧 ^[18]
	汉中	33.06	107.03	510	1 201.4	14.3	-5.18	1986~1987	张生春 ^[15]
	西峰	36.14	107.08	1421	442.6	9.2	-8.43	2015	魏笑 ^[19]

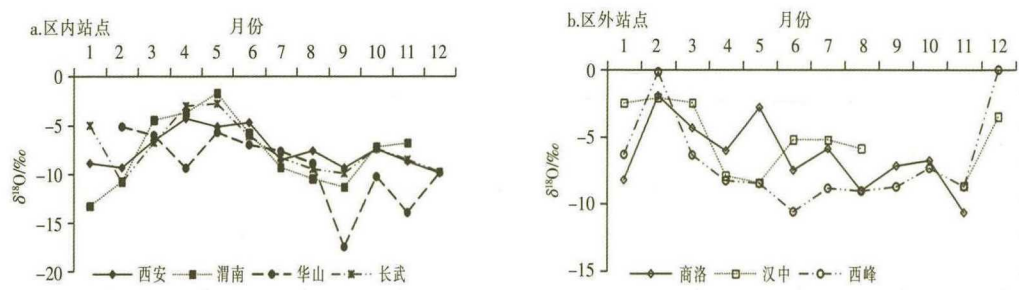


图2 关中地区各站点降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的年内变化
Fig.2 The monthly variations of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation in Guanzhong region

势相似。9~11月秋季 $\delta^{18}\text{O}$ 值相对平稳,但华山与商洛站则显著下降,对应秋季集中的降水。12~2月冬季 $\delta^{18}\text{O}$ 值处于较低水平,体现了冬季低温的影响,汉中与西峰站出现最高值,呈现冬季高夏季低的特点。整体来看,关中地区降水同位素的季节变化呈现出大致相同的趋势,而与周边临近站点相比则差异明显,具有独特的地域特征。

由图1可见,关中地区 $\delta^{18}\text{O}$ 的空间分布由东南向西北降低,这与水汽团的运移过程及局地要素的影响密切相关。商洛与汉中立 $\delta^{18}\text{O}$ 值最高,由于两站地处秦岭南坡,受水汽源区影响大,丰富的海洋水汽使得降水量虽多但 $\delta^{18}\text{O}$ 值也最高。关中地区站点除华山站外都基本一致,受较为一致的局地环境影响,唯有华山站因海拔与降水量最高,同位素贫化也最重,出现 $\delta^{18}\text{O}$ 的极低值。西峰站地处黄土高原腹地,除华山外海拔最高而降水最少,呈现-8.43‰的低值。总体来看,关中各站(除华山)的 $\delta^{18}\text{O}$ 值表现出由秦岭北坡向黄土高原腹地逐步贫化的特征,与关中地区半湿润向半干旱、季风区向非季风区过渡的地理区位相吻合。

2.2 大气降水线方程

大气降水线方程代表着稳定同位素与地理特征之间的独特关系,深刻的反映着不同地域独特的降水特征^[20],斜率反映D和 ^{18}O 分馏速率的对比关系,常数项指示氘对平衡状态的偏离程度^[21]。依据关中地区4个站点的225组月均数据,可得出关中地区的大气降水线方程为:

$$\delta\text{D} = 7.50 \delta^{18}\text{O} + 7.24 \quad (R^2 = 0.93) \quad (3)$$

该方程与 Yurtsever^[22]获得的全球大气降水线方程: $\delta\text{D} = 8.17 \delta^{18}\text{O} + 10.56$ 相比,斜率与截距均较小,与中国降水线方程^[9]: $\delta\text{D} = 7.48 \delta^{18}\text{O} + 1.01$,及中国东部季风区降水线方程^[23]: $\delta\text{D} = 7.46 \delta^{18}\text{O} + 0.90$ 相比,斜率相近而截距较高;与河西走廊降水线方程^[24]: $\delta\text{D} = 7.48$

$\delta^{18}\text{O} + 8.01$ 相比,斜率相近截距较低;同 CHNIP 站点^[9]安塞($\delta\text{D} = 7.06 \delta^{18}\text{O} - 0.62$)及北京($\delta\text{D} = 7.53 \delta^{18}\text{O} - 6.63$)相比,斜率与截距均高于安塞,而截距略高于北京。表明关中地区的降水经历了较大尺度的运移过程,且在运移过程中伴随着非平衡蒸发及重同位素的富集作用,凸显出典型的过渡性气候特征。

2.3 大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的环境效应

在影响降水同位素分馏特征的局地因素中,温度、降水量对稳定同位素比率的影响最为显著^[22]。由于关中地处季风区边缘,全年的温度效应或降水量效应并不突出,因此将关中地区各站点数据区分为夏半年和冬半年分别讨论。华山站与其他三站差异较大,首先依据渭南、西安、长武三站计算夏半年的 $\delta^{18}\text{O}$ 与降水量、温度的线性回归方程分别为: $\delta^{18}\text{O} = -12.21 P + 0.40$ ($R^2 = 0.70$), $\delta^{18}\text{O} = -0.41 T + 18.01$ ($R^2 = 0.07$),可见在夏半年,关中平原地区降水量效应突出,夏季集中的降水使得降水量效应成为影响夏半年 $\delta^{18}\text{O}$ 变化的主要因素。三站点冬半年 $\delta^{18}\text{O}$ 与降水量、温度的线性回归方程分别为: $\delta^{18}\text{O} = 3.28 P + 44.68$ ($R^2 = 0.26$), $\delta^{18}\text{O} = 1.09 T + 11.31$ ($R^2 = 0.15$),降水量与温度效应并不显著。华山站作为山地站点,与降水量、温度的相关性并不明显,海拔效应应是主要影响因素。降水量效应是关中地区占主导地位的环境因素,夏半年更为突出,这也与李小飞等^[10]得出的黄河中游地区降水量效应为主的研究结果相一致。

3 关中地区 $\delta^{18}\text{O}$ 的波动与水汽来源的关系

HYSPLIT-4 模型是用欧拉-拉格朗日混合计算模式计算和分析大气污染物输送、扩散轨迹的专业模型^[25]。结合 NCEP/NCAR 全球再分析气象数据,对关中地区站点的水汽后向运移轨迹进行模拟。由于降水同位素的水平及特征在一个较长的时期内都处于较为稳定的状态,尽管关中地区观测点采样时间跨度较

大,但总体上仍能代表目前的降水同位素特征。综合考虑降水同位素与风云二 F 气象卫星数据的起止时间,因 2016 年夏半年为正常年^[20],将水汽源分析的时间统一为 2016 年,并合并相邻站点。基于 HYSPLIT-4 模型,利用美国国家海洋和大气管理局所提供的 2016 年分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 的全球再分析资料,选取垂直气柱水汽通量最大的 850 hpa 高度层^[27],计算长武和西安两个站点的气团运移轨迹,按季节进行聚类,以此确定水汽团的源地及运移过程,结果如下:

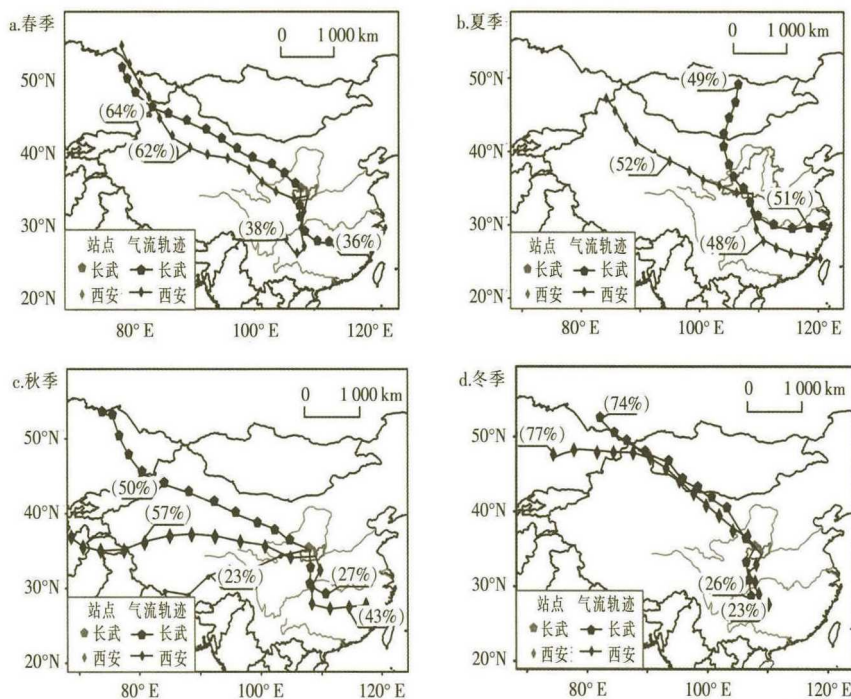
由图 3 可见,关中地区水汽来源较为一致,随季节变化与季风转换而呈现出明显的时间变化规律。春季(3~5 月)时,主要来自北方、西北方的南下水汽与南方近源水汽组成,气温转暖及南向近源局地水汽的加入使各站点春季的 $\delta^{18}\text{O}$ 值波动上升,表现出西北向水汽减弱而南向水汽渐强的特征。夏季(6~8 月)是夏季风主导时,有着明显的东南向水汽源,东南季风输送是夏季关中地区水汽的主要来源。这一时期在显著降水量效应的作用下,加之水汽远距离输送造成的同位素贫化,使各站点 $\delta^{18}\text{O}$ 值处于较低水平。秋季(9~11 月)是季风转换的时期,各站点东南向水汽已明显减弱或转为近源二次蒸发水汽。西北向水汽增强的同时,近西

南向的水汽源也成为水汽的重要组成,这应与青藏高原在季风转换期表现出的热力、动力作用影响有关。这一时期降水的增多使 $\delta^{18}\text{O}$ 在 9 月处于极低值,之后东南向降水的减少, $\delta^{18}\text{O}$ 值逐渐升高。冬季(12~2 月)水汽输送较为单一,蒙古高原、北冰洋与大西洋的水汽通过西风带混合输送至该地区,并加入了部分局地循环水汽,降低了冬季 $\delta^{18}\text{O}$ 值。

4 水汽源区变化及输送过程对关中地区夏半年降水稳定同位素的影响

热带辐合带(Intertropical Convergence Zone, ITCZ)是南北半球两个副热带高压之间的气流辐合带,是夏半年热带海洋向亚洲大陆输送水汽的主要水源区^[12]。利用 OLR 技术,能够直接反映大气对流运动的强度和大尺度垂直运动的信息,并指示副高的中心位置及移动路径^[28]。关中地区地处东亚季风区边缘,水汽源区的变化及水汽团运移过程对研究区的水循环过程有着至关重要的影响。利用国家卫星气象中心提供的风云二 F 气象卫星数据,制成 2016 年夏半年 OLR 合成场与 850 hpa 对流层中上部水汽含量场图(见图 4~5)。

4.5 月代表的春季,印度洋水源区由副高控制转



注:本图基于国家基础地理信息中心网站下载的审图号为 GS(2016)1666 号的标准地图制作,底图无修改。括号中的百分数为该方向轨迹气团来源占总数的百分比。

图 3 关中地区 2016 年不同季节后向轨迹示意图

Fig.3 The backward trajectory from Guanzhong region during different seasons in 2016

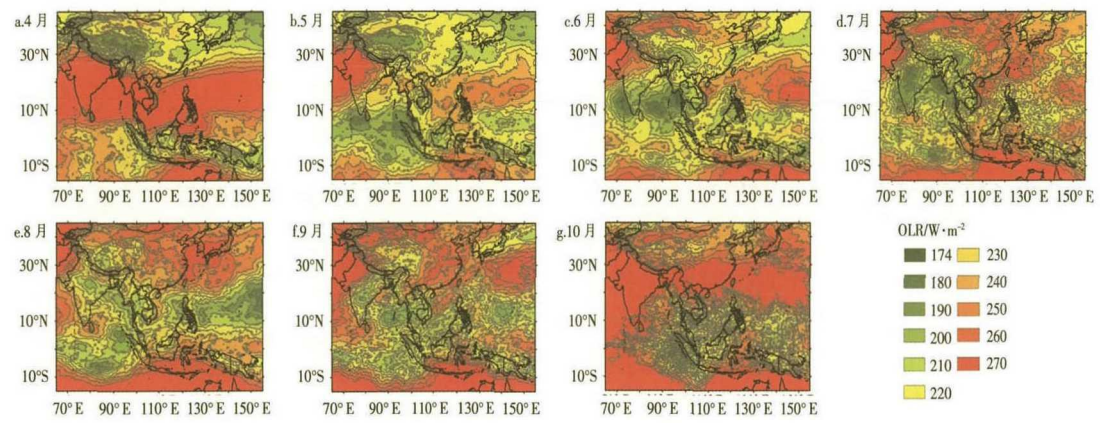


图 4 2016 年 4~10 月 OLR(W/m²)合成场

Fig.4 The results for average OLR (W/m²) from April to October in 2016

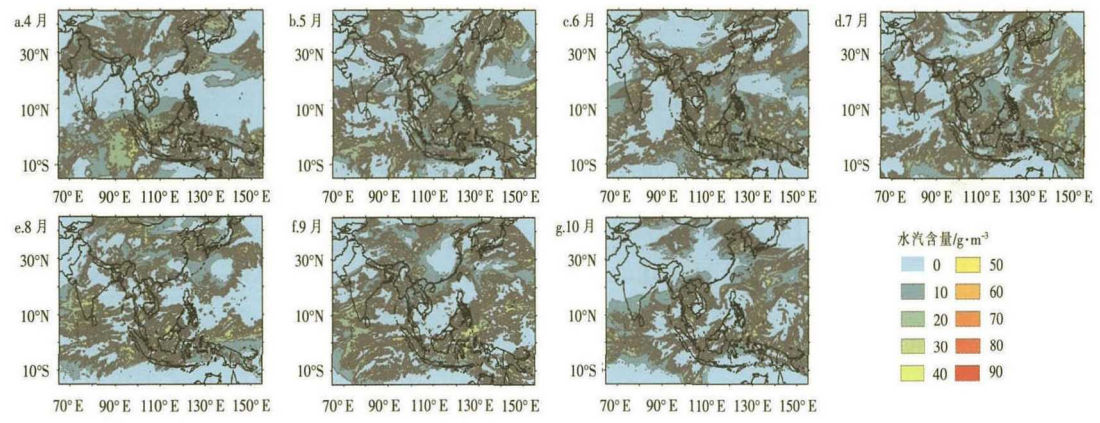


图 5 2016 年 4~10 月对流层中上部水汽含量场(g/m³)

Fig.5 The upper and middle tropospheric water vapor content (g/m³) from April to October in 2016

而初步形成辐合中心,代表了春季南向的部分水汽,由水汽含量场图可看出,这一时期并未建立明显的水汽输送通道,因此以西北向与局地循环水汽为主, $\delta^{18}\text{O}$ 值逐步升高。6、7 月孟加拉湾 ITCZ 强度不断加深,达到最盛,这一时期西南季风为华南、华中带来丰沛降水,但很少直接到达关中,到达关中地区的主要是华南二次蒸发的近源水汽,西南与东南向水汽混合输送是这一阶段的主要输送特征,因而各站点 6、7 月 $\delta^{18}\text{O}$ 值持续降低却未出现极低值。8、9 月是季风转换的关键时期,太平洋 ITCZ 的建立及强盛使得东南季风进一步增强,关中地区各站点 $\delta^{18}\text{O}$ 值降低,并于 9 月出现极低值。此时华中、华北为 OLR 高值区,而青藏高原为低值区,这一强烈反差加之水汽含量场存在的相应水汽通道,证明这一时期关中地区的水汽来源受青藏高原作用影响显著,这也是导致秋季关中两站出现西南向水汽的原因。10 月进入季风末期,海上低压中心南移并消散,西北向的水汽源再次成为主导水源, $\delta^{18}\text{O}$ 值相对升高,随着副高的回归,ITCZ 与降水同位素之间

的对应关系也随之结束。

5 结论

利用关中地区 7 个站点测得的降水稳定同位素及气象数据,对降水稳定同位素的时空变化特征、环境效应、水汽来源状况及水源区变化的影响进行了研究,结论如下:

- (1)时间变化上,关中地区降水 $\delta^{18}\text{O}$ 季节性变化明显,夏半年受降水影响明显;空间变化呈现由东南向西北降低的趋势,受纬度与地形的影响显著。建立关中地区大气降水线方程为: $\delta\text{D}=7.50\delta^{18}\text{O}+7.24(R^2=0.93)$,其斜率和截距的特点是由过渡的区位特征所决定。平原站夏半年以降水量效应为主,温度效应并不突出。
- (2)关中地区的水汽主要通过西北与东南两个水汽通道输送,西南季风在华南、华中形成的降水通过二次蒸发成为南向近源水汽。青藏高原在季风转换期的热力、动力作用可能对关中地区的水汽团运移轨迹产生了较大影响。

(3)水汽源区的位置、对流活动强度及气团运移过程都对关中地区夏半年降水稳定同位素特征有着至关重要的影响,8、9月形成于西太平洋的ITCZ使东南季风成为关中地区主要的水汽源,水汽源区变化与对流层中上部水汽含量场都与研究区稳定同位素特征及水汽运移轨迹有着较强的对应关系。

本文对关中地区降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与水汽源区变化之间的相关性进行了初步研究,相对于本地区渭南站^[16]、商洛站^[18]等单站点的研究而言,将关中地区作为一个整体去揭示 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化规律;相对于包含关中地区的区域研究来说^[7,19],进一步模拟了关中地区的水汽来源,并对 $\delta^{18}\text{O}$ 与水汽源区变化之间的关系进行了研究。由于各降水同位素测站缺乏长期连续观测的数据,同位素数据采样时间差异较大,无法考虑ENSO事件的影响;长武、西安两站在秋季表现出的西南向水汽轨迹应是受到青藏高原独特热力、动力作用的影响所致,但其具体作用机制尚不可知;目前对水汽运移轨迹及水汽源地与同位素特征之间的相关性研究仅限于定性层面,今后的研究中有望通过大气环流模型或其他技术手段做出定量化分析。

参考文献:

- [1] 孙从建,张子宇,李捷,等. 青藏高原西北部大气降水稳定同位素时空特征变化[J]. 山地学报, 2018,36(2):217-228. (SUN Congjian, ZHANG Ziyu, LI Jie, et al. Temporal and spatial characteristics of stable isotopes of atmospheric precipitation in the Northwestern Tibetan Plateau[J]. Mountain Research, 2018,36(2):217-228. (in Chinese))
- [2] 姚檀栋,朴世龙,沈妙根,等. 印度季风与西风相互作用在现代青藏高原产生连锁式环境效应[J]. 中国科学院院刊, 2017,32(9):976-984. (YAO Tandong, PIAO Shilong, SHEN Miaogen, et al. Chained impacts on modern environment of interaction between Westerlies and Indian Monsoon on Tibetan Plateau [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2017,32(9):976-984. (in Chinese))
- [3] Xie L, Wei G, Deng W, et al. Daily $\delta^{18}\text{O}$ and δD of precipitations from 2007 to 2009 in Guangzhou, South China: implications for changes of moisture sources [J]. Journal of Hydrology, 2011,400(3-4):477-489.
- [4] 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. (in Chinese))
- [5] 黄锦忠,谭红兵,王若安,等. 我国西北地区多年降水的氢氧同位素分布特征研究 [J]. 水文, 2015,35(1):33-39. (HUANG Jinzhong, TAN Hongbing, WANG Ruohan, et al. Hydrogen and oxygen isotopic analysis of perennial meteoric water in northwest China [J]. Journal of China Hydrology, 2015,35(1):33-39. (in Chinese))
- [6] 邓文平,余新晓,贾国栋. 华北地区大气降水稳定同位素特征与水汽来源[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2012,31(5):489-494. (DENG Wenping, YU Xinxiao, JIA Guodong. Sources and stable isotope characteristics of precipitation in north China [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2012,(5):489-494. (in Chinese))
- [7] 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. (LI Xiaofei, ZHANG Mingjun, WANG Shengjie, et al. Spatial and temporal variations of hydrogen and oxygen isotopes in precipitation in the Yellow River basin and its environmental significance [J]. Acta Geologica Sinica, 2013,87(2):269-277. (in Chinese))
- [8] Yao T, Masson-Delmotte V, Gao J, et al. A review of climatic controls on $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation over the Tibetan Plateau: observations and simulations [J]. Reviews of Geophysics, 2013,51(4):525-548.
- [9] Liu J, Song X, Yuan G, et al. Stable isotopic compositions of precipitation in China [J]. Tellus Series B-chemical & Physical Meteorology, 2014,66(1):39-44.
- [10] Kurita N. Water isotopic variability in response to mesoscale convective system over the tropical ocean [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2013,118(18):10376-10390.
- [11] Vimeux F, Tremoy G, Risi C, et al. A strong control of the South American SeeSaw on the intra-seasonal variability of the isotopic composition of precipitation in the Bolivian Andes [J]. Earth & Planetary Science Letters, 2011,307(1-2):47-58.
- [12] Tang Y, Pang H, Zhang W, et al. Effects of changes in moisture source and the upstream rainout on stable isotopes in precipitation: a case study in Nanjing, eastern China [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2015,12(4):3919-3944.
- [13] 肖杰,郑国璋,罗悦,等. 关中—天水经济区人类绿色发展指数测度及其分析 [J]. 陕西理工大学学报(自然科学版), 2018,34(2):86-92. (XIAO Jie, ZHENG Guozhang, LUO Yue, et al. Measurement and analysis of human green development index in Guanzhong-Tianshui economic zone [J]. Journal of Shaanxi University of Technology (Natural Science), 2018,34(2):86-92. (in Chinese))
- [14] 王西琴,杨志峰,刘昌明. 区域经济结构调整与环境保护—以陕西关中地区为例[J]. 地理学报, 2000,55(6):707-718. (WANG Xiqin, YANG Zhifeng, LIU Changming. Regional economic structural adjustment and water environmental protection: a case of Guanzhong region in Shaanxi province [J]. Acta Geographica Sinica, 2000,55(6):707-718. (in Chinese))
- [15] 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, 1989,7(2):57-66. (ZHANG Shengchun. Characteristics of hydrogen-oxygen isotope compositions of contemporarily atmospheric sedimentation in Shaanxi Province [J]. Geology of Shaanxi, 1989,7(2):57-66. (in Chinese))
- [16] 王晓艳,卢爱刚,蒋继文,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 δD and $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation and the moisture origin in Weinan [J].

- Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017,31(8):122–128. (in Chinese))
- [17] 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[J]. 生态学报, 2016,36(1):98–106. (CHEN Xi, LI Zhi, CHENG Liping, et al. Analysis of stable isotopic composition and vapor source of precipitation at the Changwu Loess Tableland [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016,36(1):98–106. (in Chinese))
- [18] 冯婧. 商州区大气降水水汽来源分析[J]. 财讯, 2016,3(8):61–62. (FENG Jing. Analysis of source of meteoric water vapor in Shangzhou district [J]. Caixun, 2016,3(8):61–62. (in Chinese))
- [19] 魏笑. 黄土高原同纬度大气降水稳定同位素分析 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016. (Wei Xiao. Stable Isotope Analysis of Atmospheric Precipitation in the Same Latitude on the Loess Tableland [D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2016. (in Chinese))
- [20] 郭政昇,王娟,赵培. 珠江流域大气降水稳定性氢氧同位素特征[J]. 水文, 2017,37(2):78–82. (GUO Zhengsheng, WANG Juan, ZHAO Pei. Characteristics of hydrogen and oxygen stable isotopes in precipitation in Pearl River basin [J]. Journal of China Hydrology, 2017,37(2):78–82. (in Chinese))
- [21] 章新平,孙维贞,刘晶森. 西南水汽通道上昆明站降水中的稳定同位素[J]. 长江流域资源与环境, 2005,14(5):665–669. (ZHANG Xinping, SUN Weizhen, LIU Jingmiao. Stable isotopes in precipitation in the vapor transport path in Kunming of southwest China [J]. Resource and Environment in the Yangtze Basin, 2005,14(5):665–669. (in Chinese))
- [22] Yurtsever Y, Gat J R. Atmospheric waters. stable isotope hydrology: deuterium and oxygen-18 in the water cycle [R]. Technical Reports Series, 1981:103–142.
- [23] 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 precipitation over Eastern Monsoon China and the water vapor sources [J]. Chinese Science Bulletin, 2009,54(22):3521–3531. (in Chinese))
- [24] Guo X, Feng Q, Wei Y, et al. An overview of precipitation isotopes over the extensive Hexi region in NW China [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2015,8(7):4365–4378.
- [25] 郭政昇,郑国璋,赵培,等. 水汽源区变化对黄河中游降水稳定同位素的影响[J]. 自然资源学报, 2018,33(11):1979–1991. (GUO Zhengsheng, ZHENG Guozhang, ZHAO Pei, et al. Effect of variation in water source area on stable isotopes in precipitation in the middle reach of the Yellow River basin [J]. Journal of Natural Resources, 2018,33(11):1979–1991. (in Chinese))
- [26] 陈虹颖,徐峰,李晓惠,等. 近 65 年 ENSO 事件强度变化及时频特征研究 [J]. 热带气象学报, 2017,33(5):683–694. (CHEN Hongying, XU Feng, LI Xiaohui, et al. Intensities and time-frequency variability of ENSO in the last 65 years [J]. Journal of Tropical Meteorology, 2017,33(5):683–694. (in Chinese))
- [27] 马京津,高晓清. 华北地区夏季平均水汽输送通量和轨迹的分析[J]. 高原气象, 2006,(5):893–899. (MA Jingjin, GAO Xiaoping. The transportation paths of water vapor and its relation to climate change over North China [J]. Plateau Meteorology, 2006,(5):893–899. (in Chinese))
- [28] 张菡,巩远发,郑昊,等. 江淮流域旱涝年夏季降水与东亚季风区低频 OLR 的变化特征[J]. 气象科学, 2009,29(2):165–172. (ZHANG Han, GONG Yuanfa, ZHENG Hao, et al. Variation characteristics of OLR LFO in monsoon region of east Asia and its relationship with precipitation of Yangtze-Huaihe River [J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2009,29(2):165–172. (in Chinese))

Effect of Moisture Source Variation on Stable Isotopes of Precipitation in Guanzhong Region, Shaanxi Province

CHANG Junbin^{1,2}, WU Guangtao^{1,2}, YUAN Jiafei^{1,2}, GUO Zhengsheng³

(1. Shaanxi Geological and Mineral Engineering Geological Brigade 908, Xi'an 710600 China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Exploration and Comprehensive Utilization of Mineral Resources, Xi'an 710600 China; 3. College of Geographical Sciences, Shanxi Normal University, Linfen 041000, China)

Abstract: Based on the isotopic values of precipitation from seven stations in Guanzhong region, this paper analyzed the spatial and temporal distribution characteristics and environmental effect, simulated the trajectory of air mass transport in this area, and explored the influence of the changes of the moisture sources and conveying process on stable isotopes of precipitation in summer half year by using OLR technology. The results show that the time variation of $\delta^{18}\text{O}$ has obvious seasonal variation rule, gradually decline from spring to winter, the trend of spatial distribution is decreasing from southeast to northwest; The meteoric water line shows obvious transitional features, and the precipitation effect is relatively significant in summer half year; The water vapor is transported mainly through the two channels: the northwest and southeast, the thermal and dynamic properties of the Tibetan Plateau have a great influence on the differences of water vapor source in the basin. The variation of moisture sources and water vapor content field in the upper and middle troposphere have a better relationship with stable isotope characteristics, in August and September, ITCZ formed in the Western Pacific become the southeast monsoon water vapor channel mainly in summer in Guanzhong region.

Key words: precipitation isotope; moisture source; OLR field; ITCZ; Guanzhong region