

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0142

YUE Xiaobo, ZHANG Mingjun, WANG Shengjie, et al. Variation characteristics and influencing factors of precipitation isotopes in Lanzhou[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(5):1620-1630. [岳晓博, 张明军, 王圣杰, 等. 兰州市降水同位素变化特征及影响因素[J]. 冰川冻土, 2022, 44(5):1620-1630.]

兰州市降水同位素变化特征及影响因素

岳晓博^{1,2}, 张明军^{1,2}, 王圣杰^{1,2}, 田媛媛^{1,2}

(1. 西北师范大学 地理与环境科学学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃省绿洲资源环境与可持续发展重点实验室, 甘肃 兰州 730070)

摘 要: 利用2018年4月至2021年4月在兰州市4个站点收集到的349个降水事件样品, 对兰州市降水同位素的变化特征和影响因素进行了研究。结果表明: 兰州市降水同位素表现出夏季高冬季低的季节变化特征, 并且夏半年降水同位素的空间变异性比冬半年显著。兰州市的大气降水线为 $\delta^2\text{H}=7.34\delta^{18}\text{O}+7.28$ ($R^2=0.96, P<0.01$), 反映了兰州较为干旱的气候特点。在影响因素方面, 兰州市降水同位素表现出温度效应。后向轨迹表明, 兰州市夏半年降水受到季风水汽和西风带水汽的影响, 冬半年降水主要来自于西风带水汽的输送; 利用潜在源贡献因子(PSCF)分析法和浓度权重轨迹(CWT)分析法发现, 潜在蒸发源区在夏半年主要分布在兰州东部区域, 而冬半年几乎不存在潜在蒸发源区。此外, 在夏半年, 降水事件前几天的对流活动会对降水同位素产生综合影响, 累积时间与对流活动的强度及频率有关, 在季风初期和末期累积时间较长, 季风强盛期较短; 在冬半年, 降水事件前几天的温度会对降水同位素产生综合影响, 累积时间受到冷空气南下频率的影响。以上认识将为季风边缘区水循环过程的研究提供新的视角。

关键词: 降水同位素; 季风边缘区; 潜在蒸发源区; 对流活动

中图分类号: P426.61² **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2022)05-1620-11

0 引言

保存在冰芯^[1]、石笋^[2]、湖泊沉积物^[3]、树轮^[4]等自然档案中的降水同位素记录是古气候和水循环研究的理想载体。在过去几十年中, 国内外学者对此进行了大量研究^[1-8]。然而, 对这些档案中 $\delta^{18}\text{O}$ 数据的解释却一直存在争议^[5-8]。例如在对青藏高原南部冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 的解释上, 一些学者认为冰芯中 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化是由温度主导^[5], 而另一些学者则主张从南亚季风强度的角度去解释数据^[7-8]。这极大地限制了对这一数据的应用。因此, 对现代降水同位素变化特征及影响因素的研究就显得尤为重要。

降水同位素的研究始于20世纪50年代对水循环过程的研究, 研究内容主要关注降水同位素的时空分布特征及影响因素。Dansgaard^[9]提出的“温度效应”、“降水量效应”长期以来被认为是降水同位

素变化的主要控制因素。一般认为, 温度是中高纬度地区特别是内陆地区降水同位素的主要控制因素^[10-11], 而降水量效应主要在低纬度地区特别是在具有海洋环境背景的地方体现^[9,12]。水汽来源也被认为是影响降水同位素变化的主要因素之一^[13-16]。Tian等^[13]从水汽来源的角度研究了中国西部不同气候区降水同位素的季节分布。Wang等^[14]利用三元混合模型对天山地区再循环水汽对降水同位素影响进行了研究。越来越多的研究表明, 对流活动会对季风区降水同位素产生重要影响^[17-20]。Cai等^[17]的研究表明ENSO事件会影响到东亚季风区的对流活动, 进而解释了东亚季风区降水同位素的年际变化。Aggarwal等^[18]从降水类型的角度研究了对流降水和平流降水对降水同位素的影响。但大多数研究关注的是对流活动和降水同位素的

收稿日期: 2022-02-17; 修订日期: 2022-08-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(41771035)资助

作者简介: 岳晓博, 硕士研究生, 主要从事寒旱区生态水文过程研究. E-mail: yuexiaobo1997@126.com

通信作者: 张明军, 教授, 主要从事气候变化与冰川研究. E-mail: mjzhang2004@163.com

同步变化。然而近期的研究发现,在降水事件前几天的对流活动会对降水同位素产生更为重要的影响^[21-23]。对这一问题的研究,Gao等^[21]在青藏高原南部的研究具有代表性,其研究表明降水事件前几天的对流活动会对降水同位素产生综合影响,并且累积时间与对流活动的强度和频率有关。

兰州位于东部季风区、西北干旱区、青藏高原区三个气候区的过渡地带,气候受到东亚季风、高原季风、西风带等大气环流模式的影响^[24],气候条件较为复杂。尽管前人已经对兰州市降水同位素做了一些研究^[25-28],但重点探讨的是降水同位素的环境效应以及与水汽来源的关系。而对流活动对兰州市降水同位素的影响尚未可知。基于此,本研究将利用兰州市2018年4月—2021年4月的降水事件数据,在降水同位素环境效应的基础上,进一步研究降水同位素与水汽来源以及对流活动之间

的联系,旨在深化对兰州市降水同位素的认识,并为季风边缘区气候及水文过程的研究提供新的视角。

1 研究区概况

兰州市(35°34'~37°07' N,102°35'~104°34' E)位处中国西北内陆地区,黄土高原西缘,黄河穿城而过从西南流向东北(图1)。该区为典型的温带大陆性气候^[29],但由于地处东亚季风边缘区,同时受东亚季风,高原季风,西风带等大气环流模式的影响^[24],使研究区气候状况较为复杂。根据1981—2010年的历史气象数据,月平均气温7月最高,1月最低,年平均降水量为293.7 mm(图2)。降水事件主要集中在夏半年(5—9月),占全年降水量的80%以上;在冬半年(10月至翌年4月)西风带以及北极的气团会影响到该区,气候寒冷干燥。

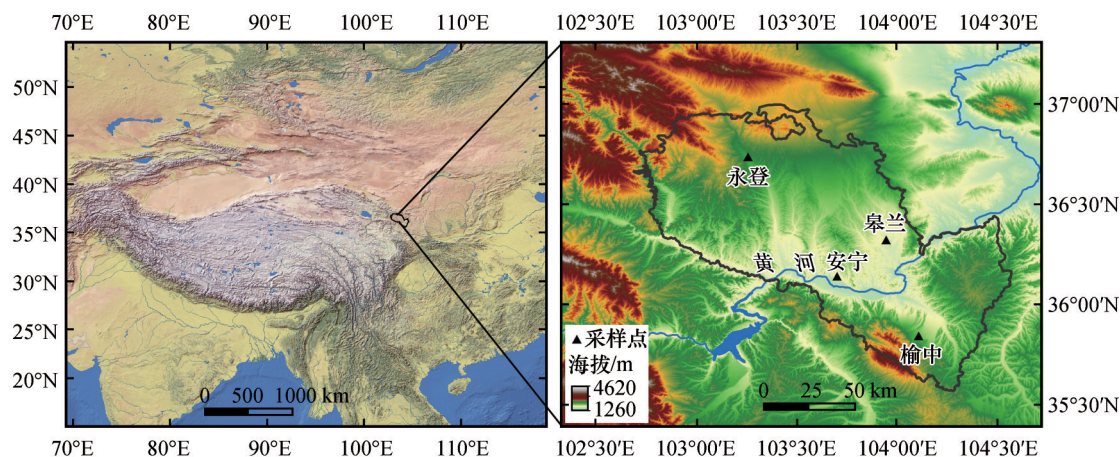


图1 研究区位置及采样站点分布

Fig. 1 Location of study area and distribution of the sampling sites

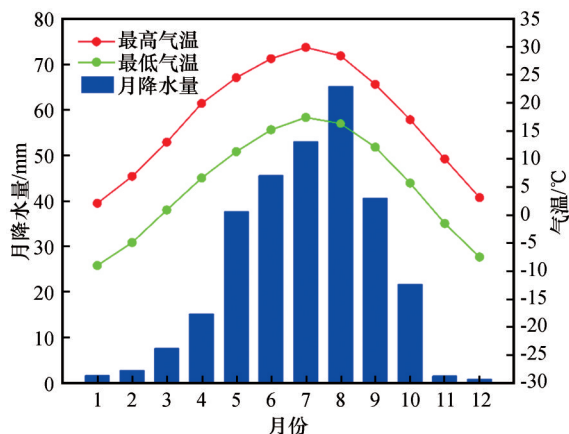


图2 1981—2010年兰州市月平均降水量及气温

Fig. 2 Monthly average precipitation and air temperature in Lanzhou from 1981 to 2010

2 数据与方法

2.1 降水样品采集及实验室分析

本研究选取2018年4月—2021年4月分布在兰州市的四个采样站点所收集的降水事件样品,共计349个(表1)。永登、皋兰、榆中的降水样品由当地气象局的观察员收集。安宁站点的降水样品在西北师范大学新校区气象园内由研究人员收集。对于液体降水样品,每次降水事件结束后立即将样品装入50 mL高密度聚乙烯窄口瓶中密封保存;对于固体降水样品,则将其装入低密度聚乙烯密封袋中,待其在室温下融化后,密封在HDPE中。样品收集完成之后立即放入冰箱中冷冻保存直至实验分

表 1 采样站点的基本信息

Table 1 Basic information of the sampling sites

站点	经度/E	纬度/N	海拔/m	采样期(年-月)	样品数	温度/℃	降水量/mm	相对湿度/%	δ ¹⁸ O/‰
安宁	103. 73°	36. 10°	1 548. 0	2018-04/2020-12	95	15. 3	1 031. 1	75. 0	-6. 47
榆中	104. 15°	35. 87°	1 874. 4	2019-05/2021-04	90	12. 9	647. 1	81. 1	-6. 79
皋兰	103. 93°	36. 35°	1 668. 5	2019-05/2021-04	60	13. 7	373. 2	79. 6	-5. 16
永登	103. 25°	36. 75°	2 118. 8	2019-05/2021-04	105	12. 4	635. 5	77. 4	-6. 39

注：温度、相对湿度为采样期间的平均值；降水量为采样期间的总降水量；δ¹⁸O为采样期间的加权平均值。

析。样品分析在西北师范大学地理与环境科学学院稳定同位素实验室中进行。所使用的分析仪器为美国 ABB-Los Gatos Research 公司研发的 T-LWIA-45-EP 型液态水同位素分析仪,其对 δ²H 的测试误差不超过 ±1‰,对 δ¹⁸O 的测试误差不超过 ±0. 3‰。分析结果表示为相对于维也纳标准平均海洋水(V-SMOW)的千分差值。

$$\delta = \left(\frac{R_{\text{样品}}}{R_{\text{标准}}} - 1 \right) \times 1000\text{‰}$$
 (1)

式中: $R_{\text{样品}}$ 为样品中重同位素(²H、¹⁸O)与轻同位素(¹H、¹⁶O)的比值; $R_{\text{标准}}$ 为 V-SMOW 中的同位素比率。

每月 δ²H 和 δ¹⁸O 根据当月降水日 δ²H 和 δ¹⁸O 及降水量进行加权平均,公式为

$$\delta = \frac{\sum \delta_i P_i}{\sum P_i}$$
 (2)

式中: δ 为同位素加权平均值; P_i 为降水量; δ_i 为降水量对应的同位素值。

在讨论对流活动对降水 δ¹⁸O 影响时,将四个站点的降水同位素数据整合为一个时间序列,整合方式根据降水量进行加权平均^[30]。

2.2 气象及再分析数据

兰州市的长期气象数据(1981—2010)来自中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>),长期气象数据用于描述研究区的气候条件,以及用于划分研究区的冬半年、夏半年^[31]。用于研究环境效应的气象数据主要来自实测数据,对降水过程起始时刻和终止时刻的气象数据进行了采集和记录,安宁站 2018 年 4 月至 2019 年 5 月的气象数据来自中国气象数据网。此外利用美国国家环境预测中心(NCEP)的全球数据同化系统(GDAS ftp://arlftp.arlhq.noaa.gov/pub/archives/gdas1)数据计算后向轨迹,其空间分辨率为 1°×1°。射出长波辐射(OLR)数据来自美国国家海洋和大气管理局(NOAAhttps://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data_interp_OLR.html)分辨率为 2. 5°×2. 5°。本研究中,射出长波辐射数据被用作对流活动(夏半年)和温度(冬半年)的

指标^[22]。

2.3 HYSPLIT 后向轨迹模型计算

本研究使用拉格朗日混合单粒子模型(HYSPLIT)计算降水日的后向轨迹^[32],选择 1 500 m 为起始高度,时间间隔为 6 h 每日进行四次(世界标准时间 00:00, 06:00, 12:00, 18:00)后向轨迹计算,计算时间为 240 h。选择地面高度 1 500 m 处是由于对流层下部 1 000~3 000 m 之间的水汽输送浓度以及 850 hPa 标准水平附近的峰值输送^[33];选择 240 h 是由于水汽在大气中平均停留时间为 8~9 天^[34]。最后,使用 HYSPLIT 模型中提供的聚类分析工具,将多个相似的气团轨迹合并成簇。

2.4 潜在源贡献因子(PSCF)分析法

PSCF(potential source contribution function)模型被广泛应用于空气污染研究^[35-36],是基于条件概率函数来识别潜在污染源区,其原理通过计算污染轨迹与指定区域所有轨迹停留时间的比值来表示网格对研究区污染的贡献程度。本研究定义经过某一区域的所有轨迹到达研究点所对应某一要素值(降水 d -excess 值)超过设定阈值(d -excess 平均值)时,则认为该轨迹的水汽 d -excess 值较高,该网格对应的下垫面蒸发强烈,是研究点的潜在蒸发源区^[37]。当网格与研究点距离较远时, n_{ij} 会减小,使得 PSCF 分析的误差增大,不确定性增加。为了控制这种不确定性,将 W_{ij} (权重函数)乘以 PSCF 值^[38],权重函数的确定参考了文献[39-40]。

$$PSCF_{ij} = \frac{m_{ij}}{n_{ij}}$$
 (3)

$$WPSCF = W_{ij} \cdot PSCF$$
 (4)

$$W_{ij} = \begin{cases} 1.00 & n_{ij} > 80 \\ 0.70 & 20 < n_{ij} \leq 80 \\ 0.42 & 10 < n_{ij} \leq 20 \\ 0.05 & n_{ij} \leq 10 \end{cases}$$
 (5)

式中: n_{ij} 为所选研究区网格单元中的轨迹总数; m_{ij} 为同一网格单元中降水 d -excess 超过其阈值的轨迹数。

2.5 浓度权重轨迹(CWT)分析法

PSCF 分析只能给出潜在蒸发源区的空间分布,而对不同源区的贡献信息表达模糊,为了克服这种限制,本研究引入了 Hsu 等^[41]提出的浓度加权轨迹(concentration weighted trajectory, CWT)分析法,利用计算出的降水 d -excess 值数据,计算了每条后向轨迹的 d -excess 值权重值,以反映不同轨迹水汽 d -excess 值的大小、水汽源地以及再循环水汽对降水 d -excess 值的影响。在 CWT 分析中,首先将研究区域网格化($0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$),每个网格均有一个权重降水 d -excess 值,通过计算经过该网格的所有轨迹对应的平均降水 d -excess 值来实现^[37]。减小误差的方法同样采用了权重函数 W_{ij} 。

$$C_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^m C_k T_{ijk}}{\sum_{k=1}^m T_{ijk}} \quad (6)$$

$$WCWT = C_{ij} \cdot W_{ij} \quad (7)$$

式中: C_{ij} 为网格 (i, j) 上的平均权重降水 d -excess; k

为轨迹数目; m 为水汽输送轨迹经过网格 (i, j) 时降水 d -excess 超过其阈值的轨迹数; C_k 为轨迹 k 经过网格 (i, j) 时对应研究区降水 d -excess 的大小; T_{ijk} 为轨迹 k 在网格 (i, j) 上停留的时间,计算过程中用落在网格内轨迹的端点数来代替停留时间。

3 结果与讨论

3.1 降水同位素的时空特征

观测期间,在日尺度上,降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化范围为 $-21.05\text{‰} \sim 5.52\text{‰}$, 加权平均值为 -6.47‰ ; 降水 $\delta^2\text{H}$ 的变化范围为 $-160.73\text{‰} \sim 40.79\text{‰}$, 加权平均值为 -38.85‰ ; d -excess (d -excess = $\delta^2\text{H} - 8.00\delta^{18}\text{O}$) 的变化范围为 $-18.42\text{‰} \sim 30.33\text{‰}$, 加权平均值为 12.94‰ (图 3)。在月尺度上,降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化范围为 $-21.05\text{‰} \sim -2.15\text{‰}$, 加权平均值为 -6.51‰ ; 降水 $\delta^2\text{H}$ 的变化范围为 $-160.73\text{‰} \sim -14.3\text{‰}$, 加权平均值为 -39.02‰ ; d -excess 的变化范围为 $-0.59\text{‰} \sim 30.33\text{‰}$, 加权平均值为 13.02‰ (图 3)。兰州市降

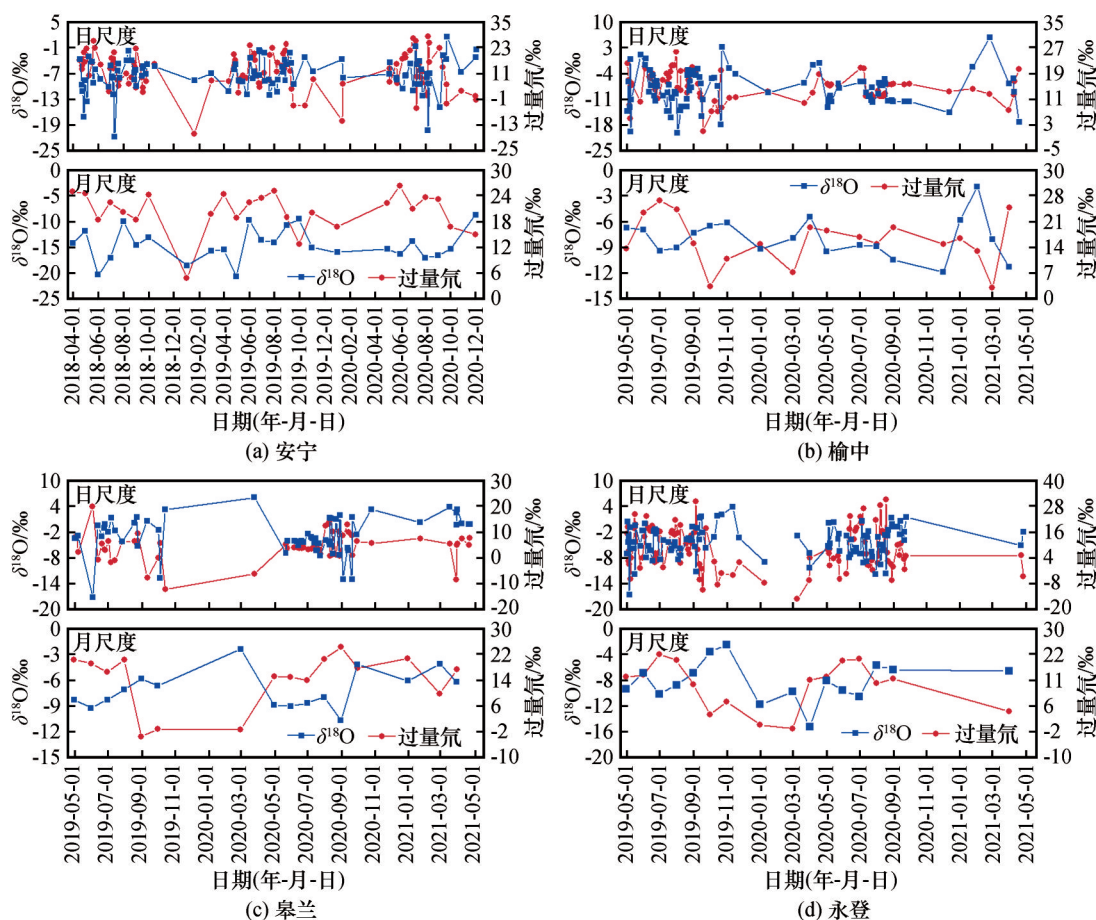


图3 兰州市四个站点降水 $\delta^{18}\text{O}$ 在日尺度和月尺度上的时间序列

Fig. 3 Time series of precipitation $\delta^{18}\text{O}$ on daily and monthly scales at four sampling sites in Lanzhou: Anning District (a), Yuzhong County (b), Gaolan County (c) and Yongdeng County (d)

水 $\delta^{18}\text{O}$ 的波动范围比东部黄土高原降水 $\delta^{18}\text{O}$ 更大^[42],较大的波动范围可能体现出季风边缘区降水过程复杂的特点^[43]。整体而言,兰州市降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值在夏半年较高,冬半年较低,而 $d\text{-excess}$ 则表现出夏季低冬季高的季节模式,在周边地区也观察到类似结果^[44]。

对于降水同位素的空间分布,兰州市降水 $\delta^{18}\text{O}$ 在夏半年期间最大值(5.52‰)在永登站测得,最小值(-19.50‰)在榆中站测得;在冬半年期间最大值(-2.11‰)与最小值(-21.05‰)均在安宁站测得,降水 $\delta^2\text{H}$ 的空间分布与 $\delta^{18}\text{O}$ 类似。由此看来,兰州市夏半年降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的空间变异性比冬半年显著。

通过对研究区所有降水同位素数据计算得出,兰州市的局地大气降水线(LMWL)为 $\delta^2\text{H}=7.34\delta^{18}\text{O}+7.28$ ($R^2=0.96$, $n=349$, $P<0.01$) (图4),可以看出其斜率与截距均小于全球大气降水线($\delta^2\text{H}=8.00\delta^{18}\text{O}+10.00$)^[45],这表明雨滴在降落过程中经历了较为强烈的云下二次蒸发,反映了兰州较为干旱的气候环境。此外,将兰州市的LMWL的斜率和截距与中国其他地区的LMWL进行了比较,发现兰州市的LMWL的斜率和截距小于广东^[46] ($\delta^2\text{H}=8.46\delta^{18}\text{O}+15.00$)、长沙^[47] ($\delta^2\text{H}=8.44\delta^{18}\text{O}+15.01$)等东亚季风区站点以及羊卓雍措^[30] ($\delta^2\text{H}=8.31\delta^{18}\text{O}+10.04$)、阿里^[22] ($\delta^2\text{H}=8.47\delta^{18}\text{O}+15.20$)等青藏高原区站点,但高于塔里木河流域^[48] ($\delta^2\text{H}=6.19\delta^{18}\text{O}-4.79$)以及由阜康、策勒等西北内陆站点数据计算得出的LMWL($\delta^2\text{H}=7.05\delta^{18}\text{O}-2.17$)^[49]的斜率和截距,这反映出兰州位于季风边缘区独特的水文循环和气候特点。

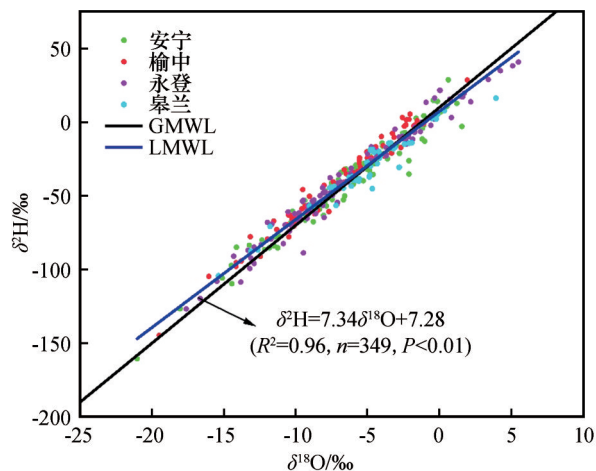


图4 兰州市局地大气降水线方程

Fig. 4 Local meteoric water line equation in Lanzhou

3.2 局地气象参数与降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的关系

温度、降水量、相对湿度等气象参数被认为是影响降水同位素的主要环境因子,因此在本研究中,首先探讨了降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与各气象因子分别在日尺度和月尺度上的关系。结果表明,降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度表现出较强的正相关(图5),在日尺度上, $\delta^{18}\text{O}=0.37T-10.41$ ($R^2=0.19$, $P<0.01$);在月尺度上, $\delta^{18}\text{O}=0.26T-10.55$ ($R^2=0.31$, $P<0.01$),因此兰州市降水 $\delta^{18}\text{O}$ 表现出显著的温度效应。然而,降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与降水量 Pr 的相关性较弱(图5),在日尺度上, $\delta^{18}\text{O}=-0.01Pr-6.32$ ($R^2=0.002$, $P=0.75$);在月尺度上, $\delta^{18}\text{O}=0.04Pr-9.58$ ($R^2=0.19$, $P<0.01$);降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与相对湿度也观测到类似结果(图5),在日尺度上, $\delta^{18}\text{O}=-0.07RH-0.66$ ($R^2=0.05$, $P<0.01$);在月尺度上, $\delta^{18}\text{O}=-0.04RH-4.69$ ($R^2=0.01$, $P=0.39$),由此看来,降水量和相对湿度对兰州市降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的影响有限。

3.3 水汽来源与降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的关系

先前的研究表明,降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的季节变化与水汽来源的季节变化有关^[50]。选择安宁站为研究地点,利用 HYSPLIT 模型,对降水事件的水汽轨迹进行模拟,并对模拟结果进行聚类分析,以此研究兰州市降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与水汽来源的关系。图6显示了兰州市夏半年、冬半年的后向轨迹模拟结果,总的来看,兰州市夏半年降水的水汽来源要比冬半年复杂。根据聚类结果,在夏半年兰州市的水汽来源大致可分为两类。第一类为内陆水汽来源,首先是来自西北方向的水汽, T1 轨迹较长发源于东欧,占比为 18.99%; T2 轨迹较短发源于中亚地区,占比为 22.15%,来自东欧和中亚的水汽在西风带的作用下向东输送至兰州,此外还有来自北方的水汽,这类轨迹较短,发源于蒙古地区,占比为 18.67%。根据前人的研究结果^[51],在夏半年由于温度较高,内陆地区蒸发强烈,这使得来自内陆地区的水汽以及之后生成的降水,其同位素值较为富集。第二类为季风水汽,一部分为来自东亚季风的水汽,占比为 31.33%,另一部分为来自西南季风的水汽,占比为 8.46%。季风水汽会带来大量的降水,加之水汽在向兰州输送过程中受地势抬升的影响,使得降水同位素值较低^[52],这可能是夏半年部分降水事件 $\delta^{18}\text{O}$ 值较低的原因。冬半年兰州市的水汽轨迹主要是在西风带的影响下,来自阿富汗和中国新疆的水汽向东输送至兰州。

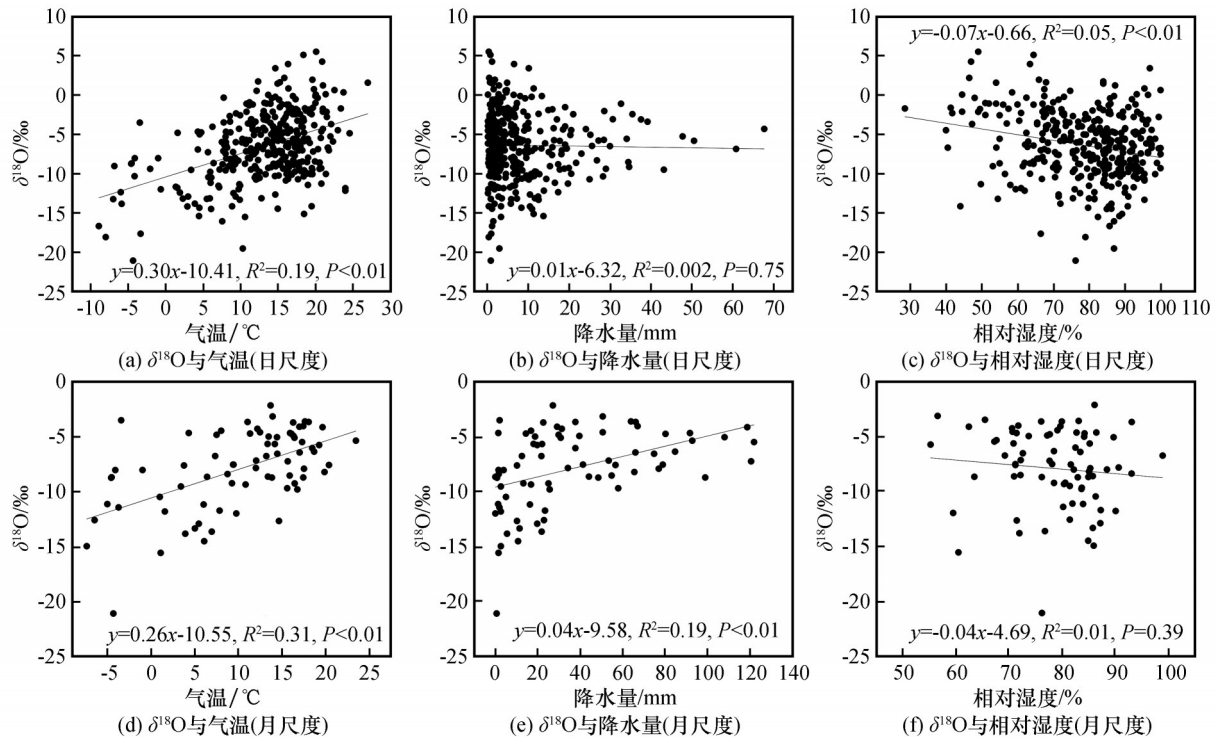
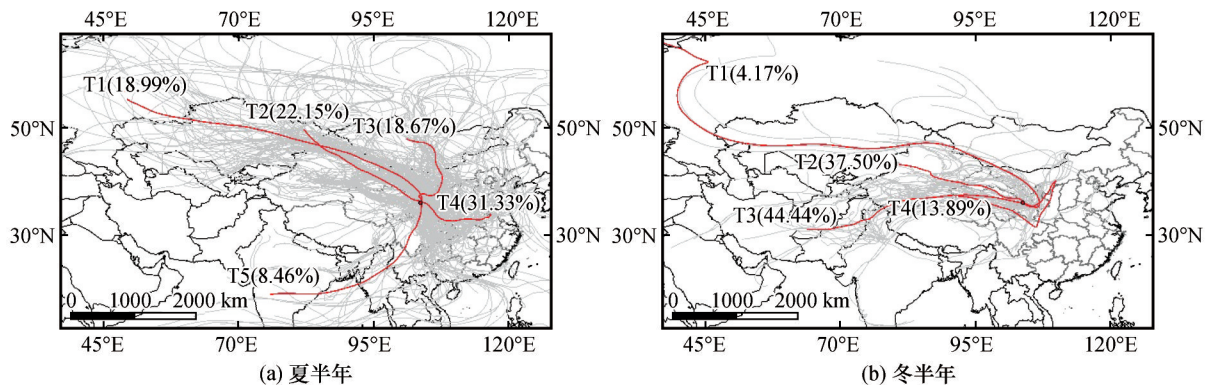
图5 兰州市降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与日尺度和月尺度气温、降水量及相对湿度相关关系Fig. 5 Correlations between precipitation $\delta^{18}\text{O}$ and air temperature, precipitation and relative humidity on daily and monthly scales in Lanzhou

图6 兰州市夏半年和冬半年降水水汽来源的后向轨迹聚类

Fig. 6 Backward trajectory clustering of sources of precipitation and water vapor in summer (a) and winter (b) in Lanzhou

利用 HYSPLIT 模型只能确定兰州市降水水汽来源的主要方位和位置。值得注意的是局地再循环水汽对降水 $\delta^{18}\text{O}$ 具有重要影响。因此,还利用 PSCF 分析法和 CWT 分析法研究了兰州市的潜在蒸发源区。PSCF 分析和 CWT 分析均能反映出潜在蒸发源区对研究区降水同位素影响的大小,不同的是 CWT 分析能够体现出潜在蒸发源区的具体贡献值。由图 7 可知,兰州市夏半年和冬半年的 PSCF 分析结果存在明显差异。从图 7(a)可以看出,在夏半年, PSCF 分析的高值区域呈片状分布于兰州市东部区域,高值概率在 20% 以上,特别是在白银、定西地

区,高值概率在 30% 以上。而在冬半年[图 7(b)],只有零星的几个高值点分布在兰州市周围,总的来看,并无明显的高值区域。CWT 的分析结果与 PSCF 的分析结果类似(图 8),在夏半年 CWT 的分析的高值区域主要分布在兰州东部区域,对研究区 $d\text{-excess}$ 的贡献度普遍大于 $4\text{‰}\cdot\text{m}^{-3}$,在靠近兰州的地区其贡献度甚至在 $6\text{‰}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上[图 8(a)]。而在冬半年[图 8(b)],并无明显的高值区域。由此看来,潜在蒸发源区对兰州市降水同位素的影响主要集中在夏半年,而冬半年主要受到外来水汽输送的影响。

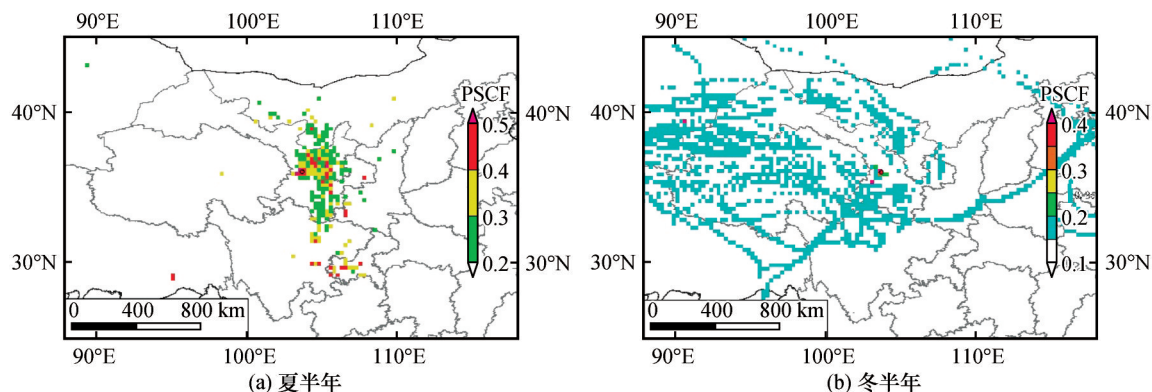


图7 兰州市夏半年和冬半年降水过量氘潜在源的贡献因子分析

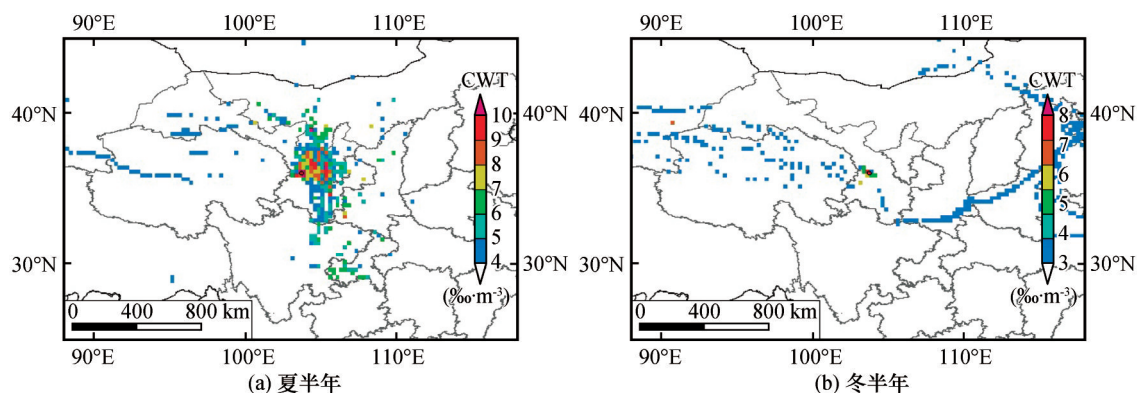
Fig. 7 Contribution factor analysis of potential sources of d -excess in summer (a) and winter (b) precipitation in Lanzhou

图8 兰州市夏半年和冬半年降水过量氘浓度的权重轨迹分析

Fig. 8 Weighted trajectory analysis of d -excess concentration in summer (a) and winter (b) precipitation in Lanzhou

3.4 对流活动与降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的关系

先前的研究表明,对流活动是影响季风区降水同位素的主要因素之一^[17-20],但大多数研究关注的是对流活动和降水同位素的同步变化。然而在青藏高原南部和西北部的研究发现,降水事件前几天的对流活动会对降水同位素产生综合影响,并且累积时间与对流活动的强度和频率有关^[21-22]。首先将兰州市四个站点的降水 $\delta^{18}\text{O}$ 数据合成为一个时间序列^[28],然后计算其与降水事件前 d (0~20)天在 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 、 $7.5^\circ \times 7.5^\circ$ 、 $12.5^\circ \times 12.5^\circ$ 空间尺度上平均OLR之间的相关性,以此研究对流活动对兰州市降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的影响。

如图9所示,无论是夏半年还是冬半年,降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与当天($d=0$)的OLR的相关性并非最为显著,相关性最显著的时间均在降水事件前几天($d>0$),这个结果与Gao等^[21]在青藏高原南部的研究结果一致,这表明降水 $\delta^{18}\text{O}$ 更受前几天天气过程的综合影响。在夏半年[图9(b)~(f)],5月、6月、9月降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与OLR的相关性达到最显著的时间在降水事件发生前3~5天,要大于在7月($d=2$)、8月($d=1$)降

水 $\delta^{18}\text{O}$ 与OLR的相关性最显著的时间。这可能与对流系统的强度和频率有关,在季风初期和末期,对流活动较少且强度较小,水汽同位素综合了较长时间内对流系统的特征;在季风强盛期,对流活动的强度和频率都强于季风初期和末期,因此,需要较短的时间间隔来消除先前对流系统的特征。在冬半年[图9(a),(g)~(h)],降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与OLR的相关性达到最显著的时间较长($d>7$),由于对流活动很少发生,因此这可能是由于温度对降水同位素的综合影响。此外,11月至翌年3月降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与平均OLR的相关性达到最显著的时间在7天[图9(h)],与4月($d=12$)和10月($d=16$)相比较短[图9(a),(g)],这可能与11月至翌年3月频繁南下的冷空气有关。从空间角度上看,夏半年降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与平均OLR在 $7.5^\circ \times 7.5^\circ$ 、 $12.5^\circ \times 12.5^\circ$ 范围上的相关性要大于 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 的范围[图9(b)~(f)],而冬半年的模式与夏半年相反[图9(a),(g)~(h)]。这可能是因为夏半年强烈的对流活动使其有较大的组织范围;而冬半年,降水 $\delta^{18}\text{O}$ 更多是温度综合作用的结果,这使得其组织的空间范围较小。

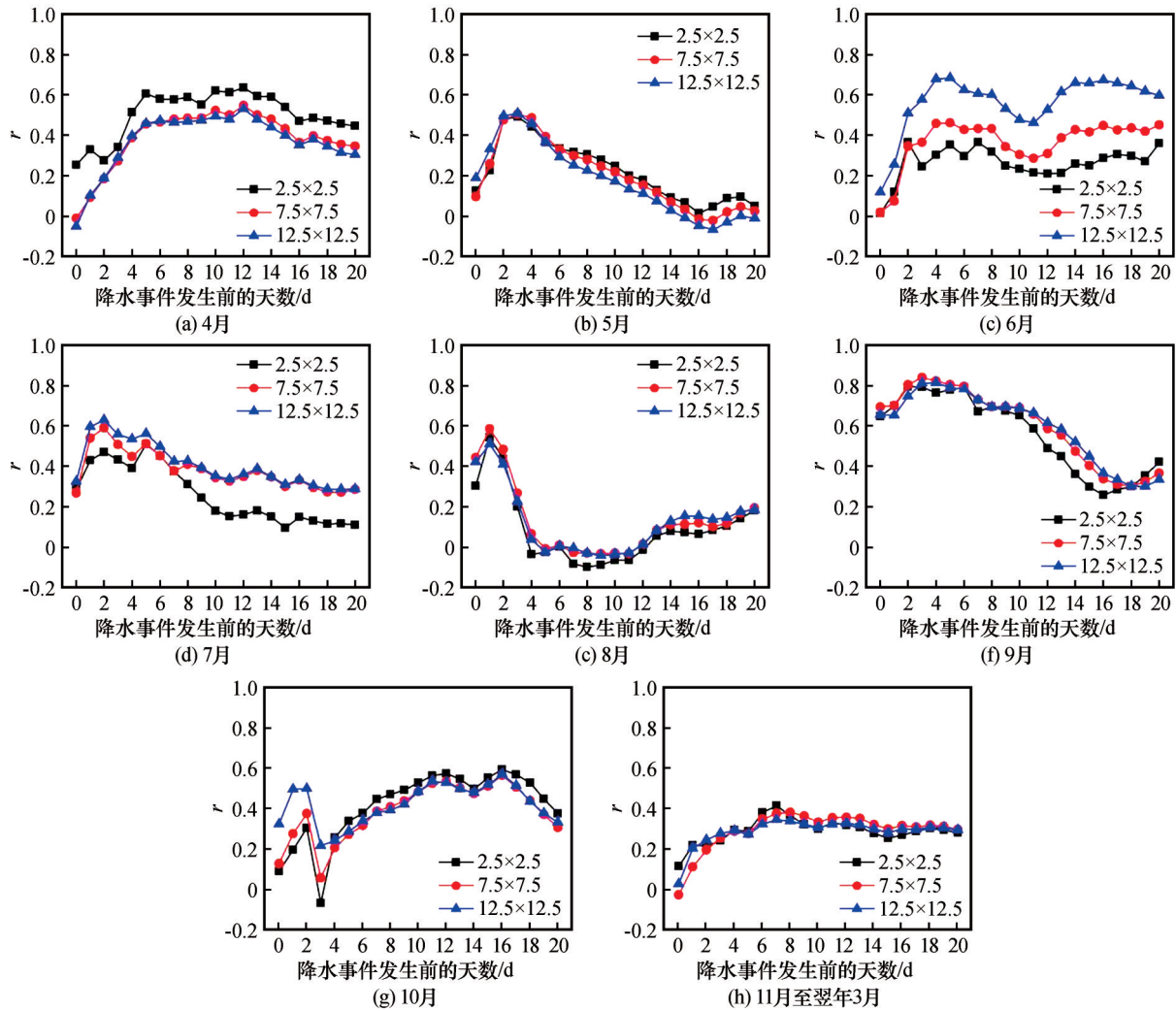


图9 在降水事件发生前0~20天 $\delta^{18}\text{O}$ 和平均OLR之间的皮尔逊相关系数

Fig. 9 Pearson correlation coefficient between $\delta^{18}\text{O}$ and average OLR from 0 to 20 days before the precipitation event: April (a), May (b), June (c), July (d), August (e), September (f), October (g) and November to March (h)

4 结论

本文在对兰州市降水同位素时空分布特征分析的基础上,研究了降水同位素与局地气象参数、水汽来源、对流活动的关系,主要得出以下结论:

(1)兰州市降水同位素夏半年富集,冬半年贫化,并且夏半年降水同位素的空间变异性比冬半年显著。此外兰州市的大气降水线(LMWL)为 $\delta^2\text{H}=7.34\delta^{18}\text{O}+7.28$,反映了兰州市较为干旱的气候特点。

(2)兰州市降水同位素表现出明显的温度效应,而降水量和相对湿度对降水同位素的影响有限。

(3)根据HYSPLIT模型模拟,兰州市夏半年降水受到季风水汽和西风带水汽的影响,冬半年降水主要来自西风带水汽的输送;利用PSCF分析法和

CWT分析法发现潜在蒸发源区主要分布在兰州市的东部,并主要对兰州市夏半年降水同位素产生影响,而冬半年几乎不存在潜在蒸发源区。

(4)在夏半年,降水事件前几天的对流活动会对降水同位素产生综合影响,累积时间与对流活动的强度及频率有关,在季风初期和末期的累积时间在3~5天,在季风强盛期的累积时间在1~2天;而在冬半年,降水事件前几天的温度会对降水同位素产生综合影响,累积时间在7天以上,并且受到冷空气南下频率的影响。

参考文献(References):

- [1] Klein E S, Nolan M, McConnell J, et al. McCall Glacier record of Arctic climate change: interpreting a northern Alaska ice core with regional water isotopes [J]. Quaternary Science Reviews, 2016, 131: 274-284.
- [2] Hu Jun, Emile-Geay J, Tabor C, et al. Deciphering oxygen

- isotope records from Chinese speleothems with an isotope-enabled climate model[J]. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 2019, 34(12): 2098-2112.
- [3] DeCelles P G, Quade J, Kapp P, et al. High and dry in central Tibet during the Late Oligocene[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 253(3/4): 389-401.
- [4] Labotka D M, Grissino-Mayer H D, Mora C I, et al. Patterns of moisture source and climate variability in the southeastern United States: a four-century seasonally resolved tree-ring oxygen-isotope record[J]. *Climate Dynamics*, 2016, 46(7/8): 2145-2154.
- [5] Yao Tandong, Thompson L G, Mosley-Thompson E, et al. Climatological significance of $\delta^{18}\text{O}$ in north Tibetan ice cores[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1996, 101(D23): 29531-29537.
- [6] Thompson L G, Yao Tandong, Mosley-Thompson E, et al. A high-resolution millennial record of the South Asian monsoon from Himalayan ice cores[J]. *Science*, 2000, 289(5486): 1916-1920.
- [7] Kaspari S, Mayewski P, Kang S, et al. Reduction in northward incursions of the South Asian monsoon since ~1400 AD inferred from a Mt. Everest ice core[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(16): L16701.
- [8] Joswiak D R, Yao Tandong, Wu Guangjian, et al. A 70-yr record of oxygen-18 variability in an ice core from the Tanggula Mountains, central Tibetan Plateau[J]. *Climate of the Past*, 2010, 6(2): 219-227.
- [9] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation[J]. *Tellus*, 1964, 16(4): 436-468.
- [10] Siegenthaler U, Oeschger H. Correlation of ^{18}O in precipitation with temperature and altitude[J]. *Nature*, 1980, 285(5763): 314-317.
- [11] Sun Congjian, Chen Yaning, Li Jie, et al. Stable isotope variations in precipitation in the northwesternmost Tibetan Plateau related to various meteorological controlling factors[J]. *Atmospheric Research*, 2019, 227: 66-78.
- [12] Xia Chengcheng, Liu Guodong, Mei Jie, et al. Characteristics of hydrogen and oxygen stable isotopes in precipitation and the environmental controls in tropical monsoon climatic zone[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(11): 5417-5427.
- [13] Tian Lide, Yao Tandong, MacClune K, et al. Stable isotopic variations in west China: a consideration of moisture sources[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, 112(D10): JD007718.
- [14] Wang Shengjie, Zhang Mingjun, Che Yanjun, et al. Contribution of recycled moisture to precipitation in oases of arid Central Asia: a stable isotope approach[J]. *Water Resources Research*, 2016, 52(4): 3246-3257.
- [15] Shi Yudong, Wang Shengjie, Wang Liwei, et al. Isotopic evidence in modern precipitation for the westerly meridional movement in Central Asia[J]. *Atmospheric Research*, 2021, 259: 105698.
- [16] Ren Wei, Tian Lide, Shao Lili. Regional moisture sources and Indian summer monsoon (ISM) moisture transport from simultaneous monitoring of precipitation isotopes on the southeastern and northeastern Tibetan Plateau[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 601: 126836.
- [17] Cai Zhongyin, Tian Lide. Atmospheric controls on seasonal and interannual variations in the precipitation isotope in the East Asian monsoon region[J]. *Journal of Climate*, 2016, 29(4): 1339-1352.
- [18] Aggarwal P K, Romatschke U, Araguas-Araguas L, et al. Proportions of convective and stratiform precipitation revealed in water isotope ratios[J]. *Nature Geoscience*, 2016, 9(8): 624-629.
- [19] 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.
- [20] Zwart C, Munksgaard N C, Kurita N, et al. Stable isotopic signature of Australian monsoon controlled by regional convection[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2016, 151: 228-235.
- [21] Gao Jing, Masson-Delmotte V, Risi C, et al. What controls precipitation $\delta^{18}\text{O}$ in the southern Tibetan Plateau at seasonal and intra-seasonal scales? A case study at Lhasa and Nyalam[J]. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 2013, 65(1): 21043.
- [22] Guo Xiaoyu, Tian Lide, Wen Rong, et al. Controls of precipitation $\delta^{18}\text{O}$ on the northwestern Tibetan Plateau: a case study at Ngari Station[J]. *Atmospheric Research*, 2017, 189: 141-151.
- [23] 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 and Planetary Science Letters*, 2011, 307(1/2): 47-58.
- [24] Zhang Qiang, Yu Yaxun, Zhang Jie. Characteristics of water cycle in the Qilian Mountains and the oases in Hexi inland river basins[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, 30(6): 907-913. [张强, 俞亚勋, 张杰. 祁连山与河西内陆河流域绿洲的大气水循环特征研究[J]. *冰川冻土*, 2008, 30(6): 907-913.]
- [25] Chen Fenli, Zhang Mingjun, Wang Shengjie, et al. Environmental controls on stable isotopes of precipitation in Lanzhou, China: an enhanced network at city scale[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 609: 1013-1022.
- [26] Han Tingting, Zhang Mingjun, Wang Shengjie, et al. Sub-hourly variability of stable isotopes in precipitation in the marginal zone of East Asian monsoon[J]. *Water*, 2020, 12(8): 2145.
- [27] Chen 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. [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.]
- [28] Han Tingting, Zhang Mingjun, Wang Shengjie, et al. Characteristics of stable isotopes and moisture sources of two typical precipitation events in Lanzhou City[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(9): 3993-4002. [韩婷婷, 张明军, 王圣杰, 等. 兰州市两场典型降水事件稳定同位素特征及其水汽来源[J]. *环境科学*, 2020, 41(9): 3993-4002.]
- [29] Dang Yu. The environmental degeneration has influence on the climate of Lanzhou area[J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2004, 34(3): 355-358. [党瑜. 生态环境退化对兰州城市气候的影响[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2004, 34(3): 355-358.]
- [30] Wang Di, Tian Lide, Cai Zhongyin, et al. Indian monsoon precipitation isotopes linked with high level cloud cover at local and regional scales[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2020, 529: 115837.
- [31] Cai Zhongyin, Tian Lide, Bowen G J. ENSO variability re-

- flected in precipitation oxygen isotopes across the Asian summer monsoon region[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2017, 475: 25-33.
- [32] 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*, 2015, 96(12): 2059-2077.
- [33] Yang Kun, Koike T, Fujii H, et al. The daytime evolution of the atmospheric boundary layer and convection over the Tibetan Plateau: observations and simulations[J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2004, 82(6): 1777-1792.
- [34] Ent R J, Tuinenburg O A. The residence time of water in the atmosphere revisited[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, 21(2): 779-790.
- [35] Jiang Huimin, Li Zhongqin, Zhang Xin, et al. Chemical components characteristics and source analysis of PM_{2.5} over Lanzhou City in winter and summer[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, 41(5): 1690-1702. [蒋慧敏, 李忠勤, 张昕, 等. 兰州市秋冬季大气PM_{2.5}化学组分特征及来源分析[J]. *环境科学学报*, 2021, 41(5): 1690-1702.]
- [36] Wang Rui, Ding Jianli, Ma Wen, et al. Analysis of atmospheric particulates source in Urumqi based on PSCF and CWT models[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, 41(8): 3033-3042. [汪蕊, 丁建丽, 马雯, 等. 基于PSCF与CWT模型的乌鲁木齐市大气颗粒物源区分析[J]. *环境科学学报*, 2021, 41(8): 3033-3042.]
- [37] Meng Hongfei, Zhang Mingjun, Wang Shengjie, et al. Isotopic characteristics of water vapor and its sources during day and night along the Heihe River in summer[J]. *Arid Land Geography*, 2020, 43(2): 360-370. [孟鸿飞, 张明军, 王圣杰, 等. 黑河中游夏季昼夜水汽同位素特征及水汽来源分析[J]. *干旱区地理*, 2020, 43(2): 360-370.]
- [38] Xu X, Akhtar U S. Identification of potential regional sources of atmospheric total gaseous mercury in Windsor, Ontario, Canada using hybrid receptor modeling[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, 10(15): 7073-7083.
- [39] Zeng Y, Hopke P K. A study of the sources of acid precipitation in Ontario, Canada[J]. *Atmospheric Environment*, 1989, 23(7): 1499-1509.
- [40] Zhang Lei, Jin Lianji, Zhu Bin, et al. The influence of advective transport on the concentrations of pollutants at the top of Mountain Huangshan from June to August, 2011[J]. *China Environmental Science*, 2013, 33(6): 969-978. [张磊, 金莲姬, 朱彬, 等. 2011年6—8月平流输送对黄山顶污染物浓度的影响[J]. *中国环境科学*, 2013, 33(6): 969-978.]
- [41] Hsu Y K, Holsen T M, Hopke P K. Comparison of hybrid receptor models to locate PCB sources in Chicago[J]. *Atmospheric Environment*, 2003, 37(4): 545-562.
- [42] Wan Hao, Liu Weiguo, Xing Meng. Isotopic composition of atmospheric precipitation and its tracing significance in the Lohequ Basin, Loess Plateau, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 640/641: 989-996.
- [43] Sun Cunjian, Chen Wei, Chen Yaning, et al. Stable isotopes of atmospheric precipitation and its environmental drivers in the eastern Chinese Loess Plateau, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 581: 124404.
- [44] Li Zongxing, Feng Qi, Song Yong, et al. Stable isotope composition of precipitation in the south and north slopes of Wusholing Mountain, northwestern China[J]. *Atmospheric Research*, 2016, 182: 87-101.
- [45] Craig H. Standard for reporting concentrations of deuterium and oxygen-18 in natural waters[J]. *Science*, 1961, 133(3467): 1833-1834.
- [46] Xie Luhua, Wei Gangjian, Deng Wenfeng, 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.
- [47] Yao Tianci, Zhang Xinping, Xie Yulong, et al. Variations of hydrogen and oxygen isotopes in atmospheric water vapor of near surface in Changsha[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(2): 545-553. [姚天次, 章新平, 谢宇龙, 等. 长沙地区近地面水汽中氢氧稳定同位素的变化特征[J]. *环境科学学报*, 2017, 37(2): 545-553.]
- [48] Song Yang, Wang Shengjie, Zhang Mingjun, et al. Stable isotopes of precipitation in the eastern Tarim River basin and water vapor sources[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(1): 199-209. [宋洋, 王圣杰, 张明军, 等. 塔里木河流域东部降水稳定同位素特征与水汽来源[J]. *环境科学*, 2022, 43(1): 199-209.]
- [49] Liu Jianrong, Song Xianfang, Yuan Guofu, et al. Characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation over Northwest China and its water vapor sources[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(1): 12-22. [柳鉴容, 宋献方, 袁国富, 等. 西北地区大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的特征及水汽来源[J]. *地理学报*, 2008, 63(1): 12-22.]
- [50] 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, 19(10): 4293-4306.
- [51] Gat J R, Klein B, Kushnir Y, et al. Isotope composition of air moisture over the Mediterranean Sea: an index of the air-sea interaction pattern[J]. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 2011, 55(5): 953-965.
- [52] Bhattacharya S K, Froehlich K, Aggarwal P K, et al. Isotopic variation in Indian monsoon precipitation: records from Bombay and New Delhi[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(24): GL018453.

Variation characteristics and influencing factors of precipitation isotopes in Lanzhou

YUE Xiaobo^{1,2}, ZHANG Mingjun^{1,2}, WANG Shengjie^{1,2}, TIAN Yuanyuan^{1,2}

(1. College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China; 2. Key Laboratory of Resource Environment and Sustainable Development of Oasis of Gansu Province, Lanzhou 730070, China)

Abstract: This study used 349 precipitation event samples collected at 4 stations in Lanzhou from April 2018 to April 2021 to study the characteristics and influencing factors of precipitation isotope changes in Lanzhou. The results show that the precipitation isotopes in Lanzhou show seasonal variation characteristics of high summer and low winter, and the spatial variability of precipitation isotopes in the summer half year is more significant than that in the winter half year. The local meteoric water line (LMWL) is $\delta^2\text{H}=7.34\delta^{18}\text{O}+7.28$ ($R^2=0.96$, $P<0.01$), and it reflects the arid climate characteristics of Lanzhou. In terms of influencing factors, the precipitation isotope in Lanzhou exhibits a temperature effect. The backward trajectory indicates that the precipitation in the summer half of the year in Lanzhou is affected by the monsoon water vapor and the water vapor in the westerly zone, and the precipitation in the winter half of the year mainly comes from the transportation of water vapor in the westerly zone. Using potential source contribution function (PSCF) analysis and concentration weighted trajectory (CWT) analysis, it was found that potential evaporation sources were mainly distributed in the eastern part of Lanzhou in the summer half year, while there were almost no potential evaporation sources in the winter half year. In addition, in the summer half year, the convective activities in the days before the precipitation events have an integrated effect on the precipitation isotopes. The accumulated time is related to the intensity and frequency of the convective activities, and the accumulated time is longer at the beginning and end of the monsoon. During the winter half year, the temperature in the days before the precipitation event will have an integrated effect on the precipitation isotopes, and the accumulated time is influenced by the southward frequency of the cold air. The above understanding will provide a new perspective for the study of the water circulation process in the monsoon marginal area.

Key words: precipitation isotope; monsoon marginal area; potential evaporation source area; convective activity

(责任编辑: 田立德)