

DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2020090105

武茜茜, 陈粉丽, 周鑫, 等. 郑州与福州降水同位素特征及水汽来源对比分析[J]. 环境化学, 2022, 41(1): 125-134.

WU Xixi, CHEN Fenli, ZHOU Xin, et al. Comparative analysis of precipitation isotopes and water vaporsources in Zhengzhou and Fuzhou[J]. Environmental Chemistry, 2022, 41 (1): 125-134.

郑州与福州降水同位素特征及水汽来源对比分析*

武茜茜 陈粉丽** 周鑫 刘雪媛 钱瑞 王生晖 陈举藩

(西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州, 730000)

摘要 研究基于郑州与福州两地区 GNIP(1985—1992年)大气降水同位素资料, 对其大气降水同位素的季节变化以及环境因子进行比较分析. 结果表明, 郑州地区较福州地区季节变化明显, 且两地区与温度和降水量均呈现负相关关系; 根据两地区大气降水线方程得出, 福州地区大气降水线方程斜率和截距大于郑州地区; 两地区的 d -excess 值夏季高, 冬季低; 福州地区受台风影响, 两地区降水量差别较大导致降水量在决定两地区月加权平均 d -excess 值时, 福州地区整体比郑州地区偏大; 采用 MeteoInfo 软件, 并利用由美国国家大气研究中心所提供的气象资料, 对两地区气团轨迹进行后向模拟, 比较分析得出: 郑州地区在夏季大部分水汽来自南海, 春季、秋季和冬季的水汽均来自北方大陆; 福州地区在夏季的水汽全部水汽来自低纬度的海洋, 而春季、秋季和冬季的水汽仅有少部份来自北方大陆.

关键词 大气降水, 郑州, 福州, 同位素, 水汽来源.

Comparative analysis of precipitation isotopes and water vapor sources in Zhengzhou and Fuzhou

WU Xixi CHEN Fenli** ZHOU Xin LIU Xueyuan
QIAN Rui WANG Shenghui CHEN Jufan

(College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou, 730000, China)

Abstract Based on the GNIP (1985—1992) global atmospheric precipitation isotope data in Zhengzhou and Fuzhou, the study compares and analyzes the seasonal variation of atmospheric precipitation isotopes and environmental factors, the results show that Zhengzhou region has more obvious seasonal changes than Fuzhou region, and both regions have negative correlations with temperature and precipitation; At the same time, according to local meteoric water line in the two regions, the slope and intercept of the local meteoric water line in Fuzhou are larger than those in Zhengzhou. The d -excess values of the two regions are high in summer and low in winter. The Fuzhou region is affected by the typhoon, and the difference in precipitation between the two regions is large. When determining the monthly weighted average d -excess value of the two regions, Fuzhou is generally larger than Zhengzhou. Using MeteoInfo software and combining global reanalysis data provided by the National Environmental Forecasting Center/National Atmospheric Research Center to track the water vapor sources in the two regions, and the comparative analysis shows that

2020年9月5日收稿(Received: September 5, 2020).

* 国家自然科学基金地区科学基金(42161007)和甘肃省高等学校创新基金(2021B-081)资助.

Supported by National Natural Science Foundation of China Regional Science Foundation Project (42161007) and Gansu Province Higher Education Innovation Fund Project (2021B-081).

** 通信联系人 **Corresponding author**, Tel: 13609397249, E-mail: chenfenli1102@163.com

Zhengzhou region has water vapor from the low-latitude ocean in summer, and water vapor from northern continent in spring, autumn, and winter. In Fuzhou, all water vapor in summer comes from low-latitude oceans, while only a small part of water vapor comes from the northern continent in spring, autumn and winter.

Keywords atmospheric precipitation, Zhengzhou, Fuzhou, isotope, water vapor source.

降水不仅对地球水循环起到极其重要的作用,也是我们所熟知的陆地水资源的重要来源^[1]. 在水体中表现极为敏感的氢氧同位素记载了水循环过程演化的历史信息^[2]. 大气降水中的氢氧同位素是探究古气候最好的示踪元素,且随温度、降水量、经度和纬度等各种因子的变化而变化^[3]. 然而对于局地的大气降水中氢氧稳定同位素则主要受水汽来源^[4-6]、气团运移^[7-8]的过程和该区域气候条件^[9,10]的影响. 因此,探索大气降水中稳定氢氧同位素的分布特征及其水汽来源的信息对研究两地区水文循环过程、深入了解其地下水起源和形成具有极其重要的意义^[11]. 起初,GNIP 站点的建立对于同位素的研究奠定了很好的基础, Liu 等^[12] 对于中国降水稳定同位素进行了更深入的研究,并做了较为系统的总结. 韩婷婷等^[13]、孟鸿飞等^[14]、Huang 等^[15] 的研究对小区域的水汽来源有了更加明确的认识. 随着一些学者开始在全国范围内进行采样,对于区域降水同位素的研究也逐渐成为热点,王涛等^[16] 根据 GNIP 所提供的郑州地区降水同位素资料,对其大气降水氢氧同位素时间分布特征及其影响因素进行了分析,但其对水汽来源的分析不够透彻. 蔡健榕等^[17]、孙晓双等^[18] 以及许涛等^[19] 都在台风登陆期间对福州地区降水同位素进行短时间尺度的分析,但并没有对福州地区多年大气降水同位素特征及水汽来源进行分析. 很多学者在对我国地区进行大范围的探寻氢氧同位素特征的规律时,却忽略一些受特殊地理位置及复杂水汽来源的地区,以致影响对大范围的氢氧同位素特征规律的认识;且我国对受季风影响的内陆地区和沿海地区降水同位素特征及水汽来源的比较分析的研究也很少.

本研究旨在通过探讨受特殊地理位置因素影响的郑州与福州两地区降水同位素的特征及水汽来源的联系与区别,从而反映降水稳定同位素环境效应的地域特征,为学者研究我国大区域降水同位素的时空分布特征提供很好的理论支撑,并且有助于对两地区水循环演化的历史信息有更深刻的理解.

1 实验部分(Experimental section)

1.1 研究区概况

郑州市地处中国华北平原的南部、黄河下游,是“中国八大古都”之一,东西长约 166 km,南北长约 75 km,总面积达 7446 km²,地势西南高,东北低^[16],介于东经 112°42′—114°14′,北纬 34°16′—34°58′之间^[20],属北温带大陆性季风气候,风向更替明显,冬季寒冷干燥,夏季多偏南风,温暖而湿润,气温变化显著,年均气温 14.44 °C 左右,1月最冷,平均气温 0.07 °C,7月最热,平均气温 27.18 °C^[21]. 年平均降雨量 641 mm^[22].

福州市位于我国东南部边缘,地处中国东南沿海,介于东经 118°08′—120°31′,北纬 25°15′—26°39′^[23]之间,是福建省省会. 属于亚热带季风气候,气温适宜,温暖湿润,冬夏季干湿差别不大,年平均降水量在 900—2100 mm 左右,年平均气温在 20—25 °C 左右^[24],该地区主导风向为东北风,夏季则以南风为主. 且福州市是我国受台风影响较为严重的地区,每年台风频繁登陆本市境内.

1.2 资料来源

研究区大气降水同位素数据由 GNIP(全球大气降水同位素观测网)提供,其中包括 δD 、 $\delta^{18}O$ 以及两个地区的温度、降水量和水汽压.

气象资料来自于美国国家环境预报中心/美国国家大气研究中心 (National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research, NCEP/NCAR) 的全球再分析资料 (global reanalysis),其空间分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$,由 NOAA 提供.

1.3 研究方法

本研究采用的大气降水同位素数据这些观测数据记录均为月加权平均值,环境同位素表示方法用

千分差来表示,是相对于维也纳标准平均海水(VSOMW)的千分差表示为如下形式:

$$\delta(\text{‰}) = \left[\frac{R_{\text{样品}}}{R_{\text{SMOW}}} - 1 \right] \times 1000 \quad (1)$$

式中, $R_{\text{样品}}$ 为降水样中 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 的比值, R_{SMOW} 为 SMOW 中 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 的比值, 全球降水同位素观测网郑州与福州站点数据记录时间均为 1985—1992 年. 大气降水中的氢氧稳定同位素的加权平均值为:

$$\delta_{(w)} = \frac{\sum P_i \delta_i}{\sum P_i} \quad (2)$$

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.

对降水同位素数据进行统计, 计算两地区降水同位素的月加权平均值及多年月平均值, 运用 Origin8.0 制图软件进行绘图, 研究两地区的大气降水同位素的季节变化以及环境因子, 从而来探讨两地区大气降水同位素特征的联系与区别, 并通过研究两地区 d -excess 值来预测其水汽源地的特征.

运用 MeteoInfo^[23] 软件并结合美国国家环境预报中心/美国国家大气研究中心所提供的全球再分析资料, 对我国郑州和福州两地区 1985—1992 年的后向轨迹进行追踪, 并运用 ArcGIS10.0 软件对两地区水汽来源进行比较分析.

2 结果与讨论 (Results and discussion)

2.1 大气降水同位素的季节变化

全球降水平均稳定同位素^[25]中 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化范围在 -50‰ — 10‰ 之间, δD 的变化范围在 -350‰ — 50‰ 之间, 我国大气降水同位素中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 的组成为^[26] -24‰ — 2‰ 和 -210‰ — 20‰ , 通过分析数据得出郑州地区 $\delta^{18}\text{O}$ 值介于 -13.15‰ — 0.21‰ 之间, δD 值介于 -90.80‰ — -5.50‰ 之间, 福州地区 $\delta^{18}\text{O}$ 值介于 -14.16‰ — 0.92‰ 之间, δD 值介于 -87.20‰ — 0.10‰ 之间, 两地区的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 的值均在全球以及我国大气降水同位素变化范围之内. 由图 1 可以看出, 两地区 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 月变化明显. 由图 1a 可以看出, 郑州地区 $\delta^{18}\text{O}$ 的月平均值在 -9.33‰ — -3.23‰ 范围内波动, 进入春季郑州地区的 $\delta^{18}\text{O}$ 值呈现逐渐上升的趋势, 在 4 月达到最大值, 从 4 月开始逐渐下降, 7 月达到最低值, 随后又逐渐上升, 秋季 $\delta^{18}\text{O}$ 值相对平稳, 10 月开始下降, 到 12 月降至最低值. 郑州地区 $\delta^{18}\text{O}$ 值在春秋两季相对富集, 夏季和冬季相对贫乏. 福州地区 $\delta^{18}\text{O}$ 的月平均值在 -10.17‰ — -3.32‰ 范围内波动, 相比郑州地区偏小, 福州地区从 1 月份至 6 月份 $\delta^{18}\text{O}$ 值基本处于持续下降趋势, 从 6 月份开始 $\delta^{18}\text{O}$ 值波动显著, 整体而言, 郑州地区 $\delta^{18}\text{O}$ 值较福州地区季节变化显著. 由图 1b 可以看出, 郑州地区 δD 的月平均值在 -70.40‰ — -23.20‰ 范围内波动, 福州地区 δD 的月平均值在 -59.70‰ — -12.80‰ 范围内波动, 在秋冬季比较高, 而在春夏季逐渐降低, 变化趋势与 $\delta^{18}\text{O}$ 值一致.

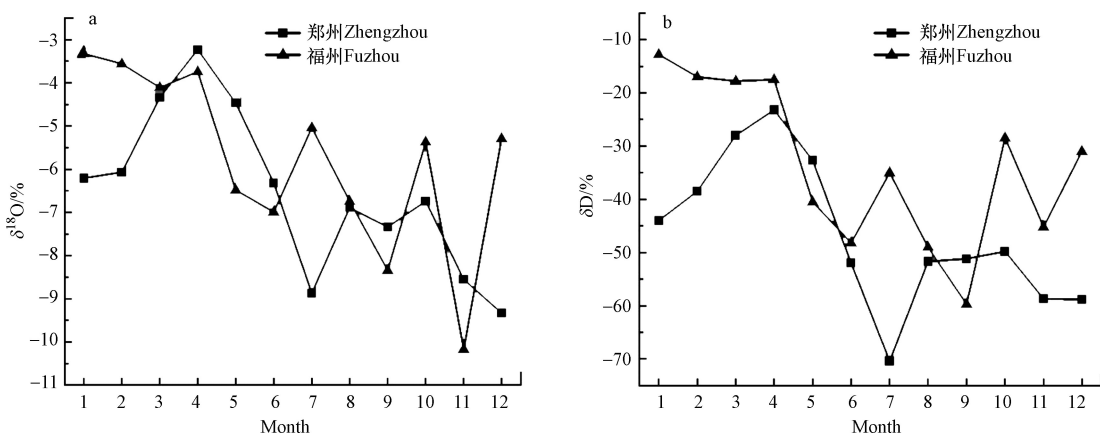


图 1 郑州与福州地区(1985—1992年) $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 月加权平均值变化

Fig.1 Monthly weighted average change of $\delta^{18}\text{O}$ and δD in Zhengzhou and Fuzhou(1985—1992)

2.2 大气降水线方程的建立

大气降水线方程较好地表示了 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 的显著线性关系, 可来分析两地区气候变化及水汽来源等问题. Craig^[27] 研究得出全球大气降水线方程为: $\delta\text{D}=8\delta^{18}\text{O}+10$. 我国大气降水线方程为^[28]: $\delta\text{D}=7.9\delta^{18}\text{O}+8.2$. 受近地面气象条件等各因素不同导致各个地区的大气降水线也不尽相同^[29], 基于郑州和福州两地区的大气降水氢氧同位素资料, 计算得出两地区大气降水线方程: 郑州: $\delta\text{D}=6.75\delta^{18}\text{O}-2.71$; 福州: $\delta\text{D}=8.19\delta^{18}\text{O}+11.73$ (图 2). 郑州地区大气降水线方程的斜率和截距均小于全球以及我国大气降水线方程, 表明该地区大气降水过程受北太平洋季风和北方大陆气团的影响. 由于地处内陆, 受二次蒸发的影响, 使得 δ 值会因蒸发而偏离我国大气降水线. 福州地区大气降水线方程的斜率和截距均大于全球以及我国大气降水线方程, 其属于我国低纬度地区, 由于靠近水汽补给区, 水汽在运移过程中并没有经过强烈的动力学分馏作用^[30], 所以大气降水线斜率接近或偏大于全球标准线的斜率.

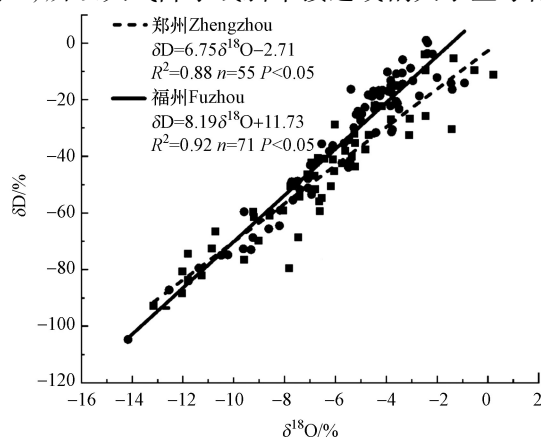


图 2 郑州与福州地区大气降水线

Fig.2 Atmospheric precipitation line in Zhengzhou and Fuzhou

2.3 降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的温度效应

形成降水的物理过程对降水中 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 变化有不可忽视的影响, 尤其是水相变过程中蒸发与凝结阶段^[29]. 在蒸发与凝结过程中, 温度的影响至关重要, 且影响降水中稳定同位素的分馏. Dansgaard^[3] 提出降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度正相关关系, 即温度效应. 基于两地区降水同位素资料, 对其大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度的全部数据进行拟合得以下方程: 郑州: $\delta^{18}\text{O}=-0.0093T-0.647$; 福州: $\delta^{18}\text{O}=-0.1605T-2.323$.

从图 3 可见, 郑州与福州两地区降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度之间均呈负相关关系, 且福州地区较郑州地区负相关现象显著, 即在温度逐渐升高的基础上, 降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值逐渐减小, 呈现反温度效应. 张琳^[31] 等通过研究我国不同时间尺度下大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值与气温的关系, 表明在我国北回归线以北地区降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度呈现正相关关系, 在低纬度地区, 呈现负相关, 在短时间尺度下, 基本不存在温度效应. 福州地区属于低纬度地区, 与温度的拟合结果为负相关关系, 符合前人研究结果, 但郑州地区地处北回归线以北, 其大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值却与温度呈现出负相关关系, 说明郑州大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值受多种因素影响.

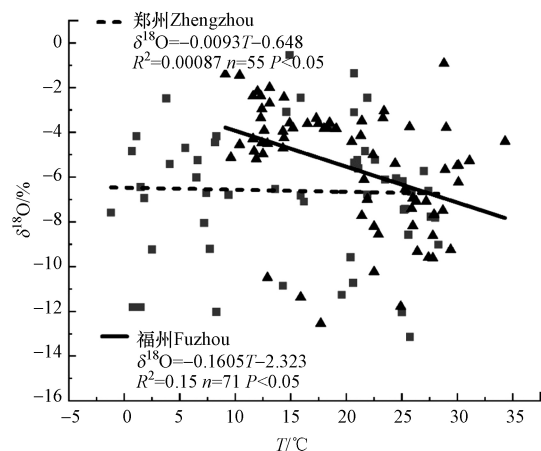


图 3 郑州与福州地区 $\delta^{18}\text{O}$ 和气温的散点分布

Fig.3 Scatter distribution of $\delta^{18}\text{O}$ and temperature in Zhengzhou and Fuzhou

通过对两地区月平均 $\delta^{18}\text{O}$ 与月平均温度的关系可得, 由图 4a 所示郑州地区只有在秋季和冬季 $\delta^{18}\text{O}$ 随温度呈现一致的变化趋势外, 其他月份均没有出现. 而图 4b 中福州地区大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 月平均值与温度月平均值均呈现相反的变化趋势, 综上所述, 基于降水 $\delta^{18}\text{O}$ 月平均变化, 福州地区较郑州地区而言, 反温度效应更明显.

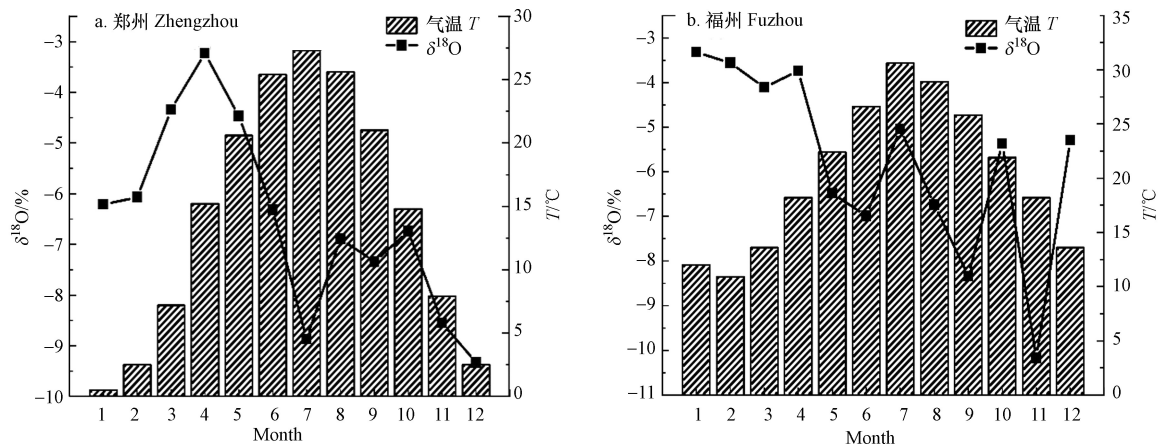


图 4 郑州与福州 $\delta^{18}\text{O}$ 和气温随时间变化

Fig.4 $\delta^{18}\text{O}$ and temperature in Zhengzhou and Fuzhou change with time

2.4 降水 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的降水量效应

空气湿度对大气降水中稳定同位素的组成有着重要的影响^[3], 因此降水量的大小与降水中氢氧同位素的丰度有着紧密的联系, 即降水量的大小与大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值呈现一种负向的关系, 被称之为降水量效应. 也可以理解为是一种“淋洗”作用^[32], 表示同位素的分馏作用会使得同一气团在多次降雨的过程中剩余水汽同位素值不断贫化的现象. 基于两地区大气降水同位素资料, 对其 $\delta^{18}\text{O}$ 值与降水量进行线性拟合得以下方程: 郑州: $\delta^{18}\text{O} = -0.0190P - 5.533$; 福州: $\delta^{18}\text{O} = -0.0089P - 4.412$. 如图 5 所示从线性拟合结果来看, 郑州与福州两地区降水 $\delta^{18}\text{O}$ 均与降水量呈现负相关, 表现为降水量效应. 研究表明^[33], 降水量效应一般出现在低纬度地区, 低纬度地区海洋水汽单一, 且全年均受海洋性气团的影响^[34]. 然而郑州地区处于中纬度内陆地区, 却呈现出较福州地区更加明显的降水量效应. 刘进达等^[35]认为决定降水中稳定同位素组成分布规律的主导因素是形成降水的水汽来源, 其中区域地理、气候条件也是影响其变化的外在因素, 因此明晰两地区水汽来源对分析其环境效应具有重要意义.

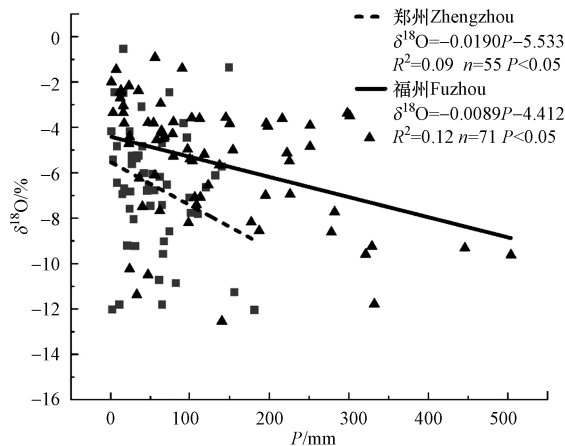


图 5 郑州与福州地区 $\delta^{18}\text{O}$ 和降水量的散点分布

Fig.5 Scatter distribution of $\delta^{18}\text{O}$ and precipitation in Zhengzhou and Fuzhou

通过对两地区月平均 $\delta^{18}\text{O}$ 与月平均降水量的关系可得, 郑州地区在秋冬两季, 降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值和月平均降水量呈现一致的变化趋势, 但在春季和夏季呈现相反的变化趋势, 在春季和夏季符合降水量效应. 对于福州地区而言, 由图 6 可以看出, 降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值与月平均降水量的变化均呈现相反的趋势, 即降

水量效应明显. 由于年际之间的变化会削弱不同水汽来源对降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 丰度的影响^[36], 因此会出现在对两地区降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值与降水量进行线性拟合时郑州地区比福州地区降水量效应更明显. 综上所述, 通过对降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值与月平均降水量的分析得出, 福州地区较郑州地区降水量效应更明显.

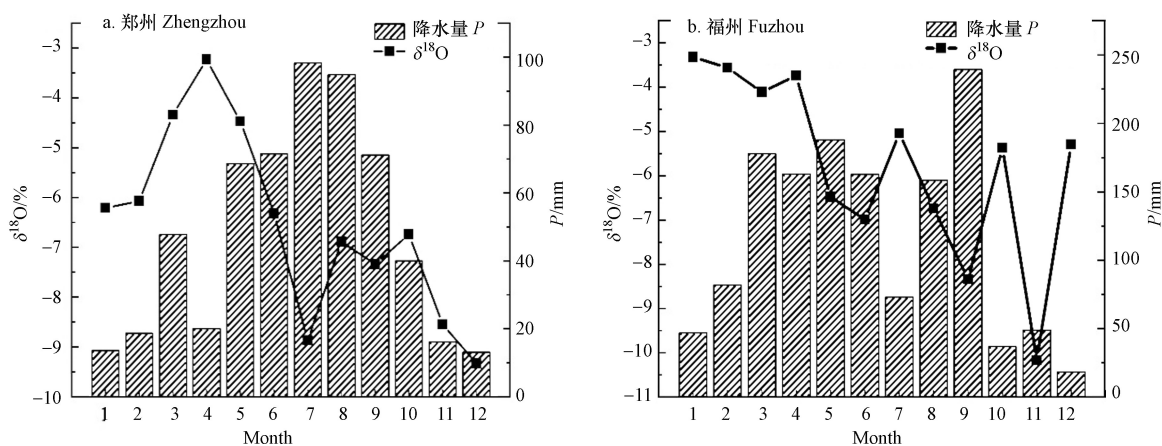


图 6 郑州与福州 $\delta^{18}\text{O}$ 和降水量随时间变化

Fig.6 $\delta^{18}\text{O}$ and precipitation in Zhengzhou and Fuzhou change with time

2.5 降水气盈余

Dansgaard^[3]把大气降水中的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的差值命名为 *d-excess*, 定义为 $d\text{-excess} = \delta\text{D} - 8\delta^{18}\text{O}$, *d-excess* 值不仅反映了海水在蒸发过程中形成云气团时的热力条件和水汽平衡条件, 同时又反映降水形成时的自然环境和气候条件^[37]. 有研究表明^[38], *d-excess* 值的大小和降水时水汽源地的相对湿度有着密切的关系, 水汽源地湿度较低时, *d-excess* 值较高, 反之, 若水汽源地相对湿度较高时, *d-excess* 值较低. 因此本研究也可通过研究两地区的 *d-excess* 值来反映其水汽源地的相对湿度.

基于研究资料对两地区的多年月加权平均 *d-excess* 值进行分析, 图 7 显示郑州地区 *d-excess* 值在 -1.44 — 15.84 范围内波动, 福州地区 *d-excess* 值在 4.92 — 36.16 范围内波动, 对于两地区月加权平均 *d-excess* 值而言, 福州地区整体比郑州地区 *d-excess* 值偏大, 然而福州地处我国东部沿海, 受东南季风影响, 较郑州地区空气湿度高, 但 *d-excess* 值却呈现相反的结果, 造成这一结论的主要原因是由于福州地区常年受台风影响, 两地区降雨量差别较大, 降水量在决定月加权平均 *d-excess* 值中不具有代表性; 但两地区夏季降水中的 *d-excess* 值则明显低于冬季, 反映出夏季降水的水汽源地的相对湿度高于冬季.

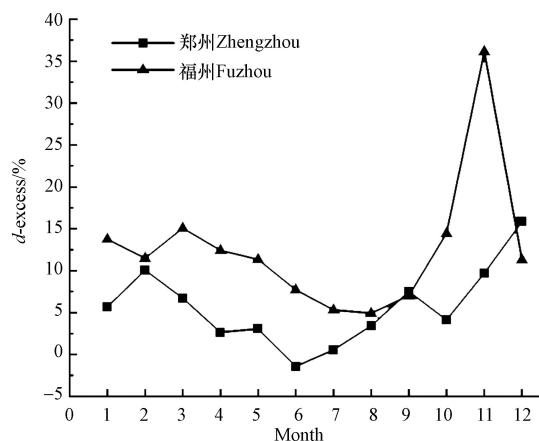


图 7 郑州与福州地区降水中 *d-excess* 值随时间变化

Fig.7 The *d-excess* value of precipitation in Zhengzhou and Fuzhou area changes with time

2.6 降水水汽来源的轨迹模拟

气团轨迹的后向模拟对于分析降水气团的水汽来源以及对该地区降水的贡献率有着很大的帮助^[39-40]. 本研究应用 MeteoInfo 软件, 并结合美国国家环境预报中心/美国国家大气研究中心所提供的全球再分析资料, 对两地区水汽来源进行了模拟. 为了较好的比较两地区的水汽来源, 基于其大气降水

同位素资料分别选取了 1985—1992 年间两站点各季节大气降水同位素数据 (春季: 3 月; 夏季: 7 月; 秋季: 10 月; 冬季: 1 月)。通过对各个季节每天 4 个时间点 (00:00、06:00、12:00 和 18:00) 到达两站点的气团轨迹进行后向 10 d 的模拟, 并对两地区气团轨迹按其来源进行 4 条聚类分析。本研究使用 ArcGIS10.0 软件对聚类分析结果做进一步处理, 得出两地区四个季节的降水水汽的后向轨迹 (图 8)。

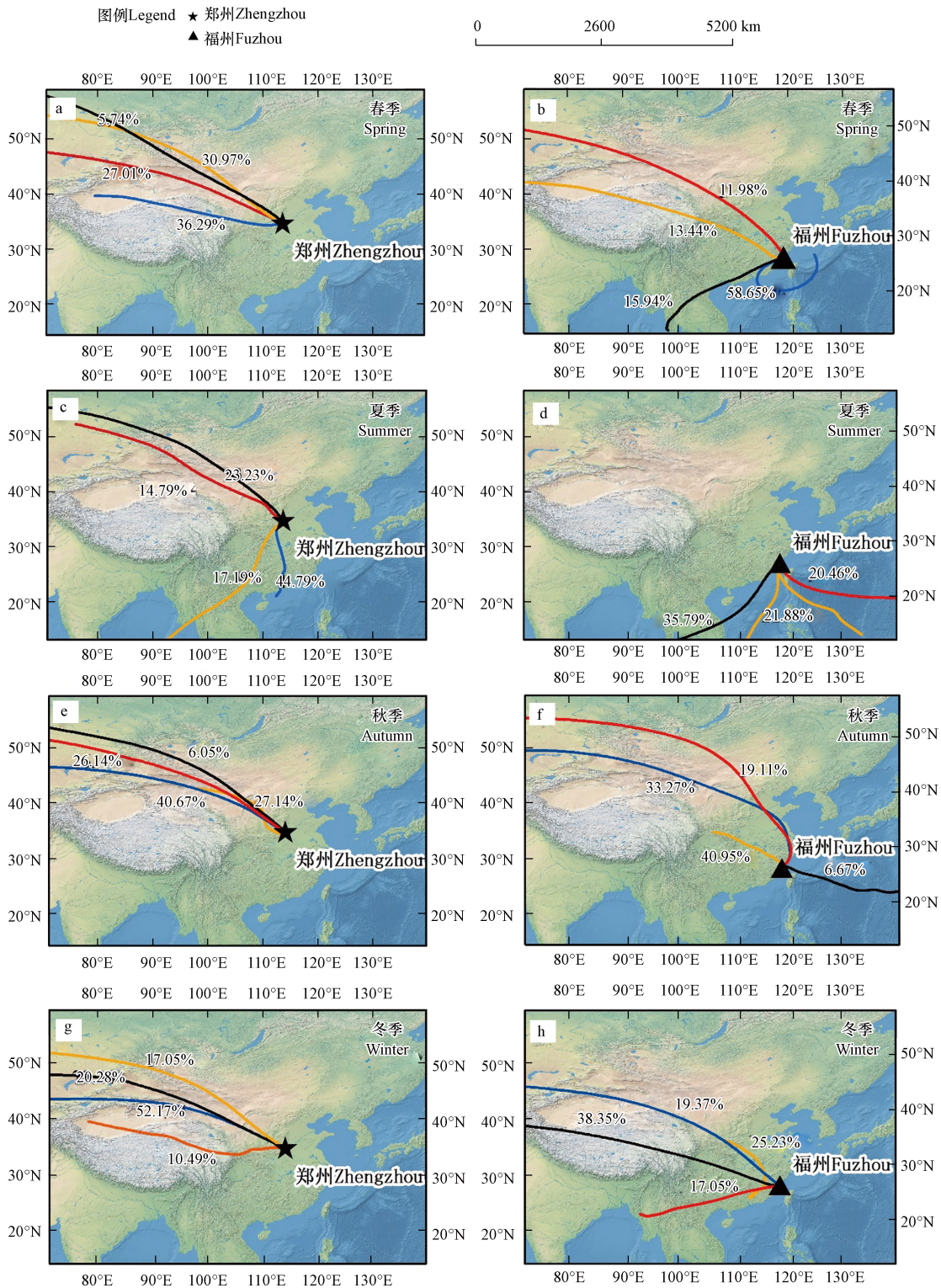


图 8 郑州与福州地区气流后向轨迹聚类图

Fig.8 Clustering map of airflow backward trajectory in Zhengzhou and Fuzhou

图 8 中 a、b 显示了两地区春季的水汽来源。由图 8 可以看出, 在冬季风开始逐渐减弱的春季, 郑州地区水汽来源均由四支北方大陆气团组成, 其中占比最大的为 36.29%。而福州地区水汽来源是由两支

北方大陆气团、一支印度洋气团和一支来自西太平洋的气团组成,然而来自西太平洋的水汽占比最大,达 58.65%。图 8c、d 显示了两地区夏季的水汽来源,夏季是我国夏季风全盛时期,受夏季风影响的郑州地区夏季主要的水汽来源为来自南海的水汽团,占比 44.79%,仅有 17.19% 来自印度洋水汽,对于受季风影响较强的福州地区夏季大部分水汽则来自低纬度的海洋,包括印度洋、南海以及西太平洋的水汽。图 8e、f 显示了两地区秋季的水汽来源,对于我国,秋季受西风影响逐渐加强,郑州地区秋季的气团轨迹也主要来自于北方大陆,福州地区秋季的气团轨迹则大部分来自近源气团,只有一支占比仅为 6.67% 的西太平洋气团。图 8g、h 显示了两地区冬季的水汽来源,在我国冬季风强盛时期,郑州地区的水汽全部由受西风影响的北方大陆的气团组成,福州地区的气团轨迹大部分来自北方大陆,有一支占比 17.05% 的水汽气团来自印度洋。

通过对两地区水汽来源进行聚类分析,发现郑州地区在夏季有来自南海和印度洋低纬度的水汽,春季、秋季和冬季的水汽均来自北方大陆,并且由于其特殊的地理位置导致其为各气团水汽来源的交汇处,影响降水的因素复杂。而福州地区受台风影响显著,且主要受低纬度海洋水汽影响,导致福州地区降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值与大气降水负相关性没有郑州地区显著。

3 结论(Conclusion)

(1) 郑州地区氢氧同位素值在春秋季节相对富集,夏季和冬季相对贫乏;常年均受东南季风影响的福州地区,降水氢氧同位素值较郑州地区季节变化不显著。

(2) 由于受二次蒸发影响,郑州地区大气降水线方程为 $\delta\text{D}=6.754\delta^{18}\text{O}-2.71$,而福州地区受复杂水汽来源影响大气降水线方程为 $\delta\text{D}=8.19\delta^{18}\text{O}+11.73$;且郑州和福州地区的温度和降水量之间均表现出负相关关系。

(3) 福州地区月平均 *d-excess* 比郑州地区偏大,且两地区夏季 *d-excess* 值均偏低,冬季 *d-excess* 值均偏高,反映出夏季降水水汽来源的相对湿度高于冬季;通过研究气团轨迹对水汽来源进行进一步模拟得出郑州地区在夏季有来自南海和印度洋的水汽,春季、秋季和冬季的水汽均来自北方大陆,福州地区在春季、秋季和冬季有部分来自北方大陆的水汽,夏季所有的水汽均来自低纬度海洋。

参考文献 (References)

- [1] 周慧,章新平,姚天次,等.我国大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 变化的多气象因子分析及分区研究[J].环境科学学报,2018,38(6):2242-2252. ZHOU H, ZHANG X P, YAO T C, et al. Multi-meteorological analysis and zoning study of $\delta^{18}\text{O}$ changes in atmospheric precipitation in China [J]. *Journal of Environmental Science*, 2018, 38(6): 2242-2252 (in Chinese).
- [2] 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. LIU J R, SONG X F, YUAN G F, et al. Characteristics of atmospheric precipitation $\delta^{18}\text{O}$ and water vapor source in Northwest China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(1): 12-22 (in Chinese).
- [3] DANSGAARD WW. Stable isotopes in precipitation [J]. *Tellus*, 1964, 16(4): 436-468.
- [4] 田立德,姚檀栋,余武生,等.青藏高原水汽输送与冰芯中稳定同位素记录[J].第四纪研究,2006,26(2):145-152. TIAN L D, YAO T D, YU W S, et al. Water vapor transport on the Tibetan Plateau and stable isotope records in ice cores [J]. *Quaternary Research*, 2006, 26(2): 145-152 (in Chinese).
- [5] 谭明,南素兰.中国季风区降水氧同位素年际变化的“环流效应”初探[J].第四纪研究,2010,30(3):620-622. TAN M, NAN S L. A preliminary study on the "circulation effect" of the interannual variation of oxygen isotopes in precipitation in the monsoon region of China [J]. *Quaternary Studies*, 2010, 30(3): 620-622 (in Chinese).
- [6] 陶涛,谭明,段武辉.最短时间尺度环流效应:单场降水 $\delta^{18}\text{O}$ 对复合水汽来源的示踪[J].第四纪研究,2013,33(3):615-617. TAO T, TAN M, DUAN W H. Shortest time scale circulation effect: Single field precipitation $\delta^{18}\text{O}$ tracer of composite water vapor source [J]. *Quaternary Research*, 2013, 33(3): 615-617 (in Chinese).
- [7] 王圣杰,张明军.新疆天山降水稳定同位素的时空特征与影响因素[J].第四纪研究,2017,37(5):1119-1130. WANG S J, ZHANG M J. Temporal and spatial characteristics and influencing factors of stable isotope of precipitation in Tianshan Mountains, Xinjiang [J]. *Quaternary Research*, 2017, 37(5): 1119-1130 (in Chinese).
- [8] 靳晓刚,张明军,王圣杰,等.基于氢氧稳定同位素的黄土高原云下二次蒸发效应[J].环境科学,2015,36(4):1241-1248. JIN X G, ZHANG M J, WANG S J, et al. Second evaporation effect under the clouds on the Loess Plateau based on hydrogen and

- oxygen stable isotopes [J]. *Environmental Science*, 2015, 36(4): 1241-1248(in Chinese).
- [9] 蔡忠银, 田立德. 季风区降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与云顶气压关系 [J]. *第四纪研究*, 2015, 35(6): 1450-1457.
CAI Z Y, TIAN L D. Relationship between precipitation $\delta^{18}\text{O}$ in monsoon area and cloud top pressure [J]. *Quaternary Research*, 2015, 35(6): 1450-1457(in Chinese).
- [10] 赵华标, 徐柏青, 王宁练. 青藏高原冰芯稳定氧同位素记录的温度代用性研究 [J]. *第四纪研究*, 2014, 34(6): 1215-1226.
ZHAO H B, XU B Q, WANG N L. Temperature Substitutability Study of Stable Oxygen Isotope Records of Ice Cores on the Tibetan Plateau [J]. *Quaternary Research*, 2014, 34(6): 1215-1226(in Chinese).
- [11] 王兴, 李王成, 董亚萍, 等. 西安地区降水稳定同位素变化特征及影响因素 [J]. *人民黄河*, 2020, 42(1): 77-81.
WANG X, LI W C, DONG Y P, et al. Characteristics and influencing factors of stable isotopic changes of precipitation in Xi'an area [J]. *People's Yellow River*, 2020, 42(1): 77-81(in Chinese).
- [12] LIU J R, SONG X F, YUAN G F, et al. Stable isotopes of summer monsoonal precipitation in southern China and the moisture sources evidence from $\delta^{18}\text{O}$ signature [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2008, 18(2): 155-165.
- [13] 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.
HAN T T, ZHANG M J, WANG S J, et al. The stable isotope characteristics of two typical precipitation events in Lanzhou and the source of water vapor [J]. *Environmental Science*, 2020, 41(9): 3993-4002(in Chinese).
- [14] 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.
MENG H F, ZHANG M J, WANG S J, et al. Analysis of day and night water vapor isotopic characteristics and water vapor sources in the middle reaches of the Heihe River in summer [J]. *Arid Land Geography*, 2020, 43(2): 360-370(in Chinese).
- [15] HUANG W, CHANG S Q, XIE C L, et al. Moisture sources of extreme summer precipitation events in North Xinjiang and their relationship with atmospheric circulation [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2017, 8(1): 12-17.
- [16] 王涛, 徐丽娜, 刘笑. 郑州大气降水氧同位素变化及水汽来源分析 [C]. 南京, 中国气象学会年会, 2013.
WANG T, XU L N, LIU X. Analysis of oxygen isotope changes and water vapor sources in Zhengzhou atmospheric precipitation [C]. Nanjing, Chinese Meteorological Society Annual Meeting, 2013(in Chinese).
- [17] 蔡健榕, 许涛, 姜修洋. 双台风“纳沙”“海棠”期间福州降水 $\delta^{18}\text{O}$ 特征及影响因素 [J]. *亚热带资源与环境学报*, 2019, 14(2): 34-40.
CAI J R, XU T, JIANG X Y. The $\delta^{18}\text{O}$ characteristics and influencing factors of precipitation in Fuzhou during the double typhoon "Nasha" and "Begonia" [J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2019, 14(2): 34-40(in Chinese).
- [18] 孙晓双, 王晓艳, 翟水晶, 等. 台风“麦德姆”福州降水 $\delta^{18}\text{O}$ 特征及水汽来源分析 [J]. *自然资源学报*, 2016, 31(6): 1041-1050.
SUN X S, WANG X Y, ZHAI S J, et al. Characteristics of precipitation $\delta^{18}\text{O}$ in typhoon "Medum" Fuzhou and analysis of water vapor source [J]. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(6): 1041-1050(in Chinese).
- [19] 许涛, 蔡健榕, 孙晓双, 等. 台风“杜鹃”降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的云雨区效应初探 [J]. *自然资源学报*, 2018, 33(12): 2238-2248.
XU T, CAI J R, SUN X S, et al. Preliminary study on cloud and rain zone effect of typhoon rhododendron rainfall $\delta^{18}\text{O}$ [J]. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(12): 2238-2248(in Chinese).
- [20] 裴志方, 文艳, 杨武年. 城市化下城市热环境与下垫面关系研究——以郑州市为例 [J]. *云南师范大学学报(自然科学版)*, 2019, 39(1): 66-71.
PEI Z F, WEN Y, YANG W N. Research on the relationship between urban thermal environment and underlying surfaces under urbanization——Taking Zhengzhou as an example [J]. *Journal of Yunnan Normal University (Natural Science Edition)*, 2019, 39(1): 66-71(in Chinese).
- [21] 张丽, 胡娟萍, 李宝玉. 郑州市1951—2011年降水及气温的变化特征分析 [J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2014, 35(3): 19-23, 48.
ZHANG L, HU J P, LI B Y. Analysis of the characteristics of precipitation and temperature changes in Zhengzhou City from 1951 to 2011 [J]. *Journal of North China University of Water Resources and Hydropower (Natural Science)*, 2014, 35(3): 19-23, 48(in Chinese).
- [22] 马双良, 黄腾跃, 王楠等. 郑州市降水过程对颗粒物湿沉降的影响 [J]. *干旱环境监测*, 2018, 32(4): 170-175.
MA S L, HUANG T Y, WANG N, et al. Impact of precipitation process on wet deposition of particulate matter in Zhengzhou City [J]. *Arid Environmental Monitoring*, 2018, 32(4): 170-175(in Chinese).
- [23] 范海兰, 胡喜生, 陈灿等. 福州市空气负离子空间变化特征 [J]. *福建林学院学报*, 2008, 28(1): 27-30.
FAN H L, HU X S, CHEN C et al. Spatial variation characteristics of air anions in Fuzhou [J]. *Journal of Fujian Forestry College*, 2008, 28(1): 27-30(in Chinese).
- [24] 王苏颖, 陈志强. 基于TM遥感影像的福州景观生态格局分析 [J]. *太原师范学院学报(自然科学版)*, 2006, 5(1): 111-114, 131.
WANG S Y, CHEN Z Q. Analysis of landscape ecological pattern in fuzhou based on TM remote sensing images [J]. *Journal of Taiyuan Teachers College (Natural Science Edition)*, 2006, 5(1): 111-114, 131(in Chinese).
- [25] IAEA/WMO. Global network for isotopes in precipitation [EB/OL]. [2006-7-6]. <http://isohis.iaea.org>.
- [26] 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, 1(13): 801-806.

- ZHENG S H, HOU F G, NI Y L. Hydrogen and oxygen stable isotopes of atmospheric precipitation in China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1983, 1(13): 801-806(in Chinese).
- [27] CRAIG H. Isotopic variations in meteoric waters [J]. *Science*, 1961, 133(3465): 1702-1703.
- [28] VAUGHAN J I. An evaluation of observed and simulated high-resolution records of stable isotopes in precipitation[D]. Melbourne: University of Melbourne, 2007.
- [29] 李广, 章新平, 张新主, 等. 云南腾冲地区大气降水中氢氧稳定同位素特征 [J]. *长江流域资源与环境*, 2013, 22(11): 1458-1465. LI G, ZHANG X P, ZHANG X Z, et al. Stable isotope characteristics of hydrogen and oxygen in atmospheric precipitation in Tengchong, Yunnan [J]. *Resources and Environment in the Yangtze River Basin*, 2013, 22(11): 1458-1465(in Chinese).
- [30] 高宗军, 于晨, 田禹, 等. 中国大陆大气降水线斜率分区及其水汽来源研究 [J]. *地下水*, 2017, 39(6): 149-152,177. GAO Z J, YU C, TIAN Y, et al. Research on the division of the slope of the atmospheric precipitation line in mainland China and the source of water vapor [J]. *Groundwater*, 2017, 39(6): 149-152,177(in Chinese).
- [31] 张琳, 陈宗宇, 聂振龙, 等. 我国不同时间尺度的大气降水氧同位素与气温的相关性分析 [J]. *核技术*, 2008, 31(9): 715-720. ZHANG L, CHEN Z Y, NIE Z L, et al. Correlation analysis between atmospheric oxygen isotope and air temperature at different time scales in China [J]. *Nuclear Techniques*, 2008, 31(9): 715-720(in Chinese).
- [32] 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 [J]. *环境科学*, 2016, 37(4): 1313-1320. LI G, ZHANG X P, XU Y P, et al. Stable isotope characteristics of precipitation and its water vapor source in Mengzi area, southern Yunnan [J]. *Environmental Science*, 2016, 37(4): 1313-1320(in Chinese).
- [33] 章新平, 姚檀栋. 全球降水中氧同位素比率的分布特点 [J]. *冰川冻土*, 1994, 16(3): 202-210. ZHANG X P, YAO T D. Distribution characteristics of oxygen isotope ratio in global precipitation [J]. *Glaciology and Geocryology*, 1994, 16(3): 202-210(in Chinese).
- [34] ZHANG X P, SHI Y F, YAO T D. Variational features of precipitation $\delta^{18}\text{O}$ in Northeast Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Science in China(Series B)*, 1995, 38(7): 854-864.
- [35] 刘进达, 赵迎昌, 刘恩凯, 等. 中国大气降水稳定同位素时空分布规律探讨 [J]. *勘察科学技术*, 1997, 1(3): 34-39. LIU J D, ZHAO Y C, LIU E K, et al. Discussion on the temporal-spatial distribution of stable isotopes of atmospheric precipitation in China [J]. *Investigation Science and Technology*, 1997, 1(3): 34-39(in Chinese).
- [36] 程中双, 张永波. 不同水汽源控制下的降水同位素分布特征 [J]. *勘察科学技术*, 2015, 1(1): 25-31. CHENG Z S, ZHANG Y B. Distribution characteristics of precipitation isotopes under the control of different water vapor sources [J]. *Prospecting Science and Technology*, 2015, 1(1): 25-31(in Chinese).
- [37] 侯典炯, 秦翔, 吴锦奎, 等. 乌鲁木齐大气降水稳定同位素与水汽来源关系研究 [J]. *干旱区资源与环境*, 2011, 25(10): 136-142. HOU D J, QIN X, WU J K, et al. Study on the relationship between stable isotope of atmospheric precipitation and water vapor source in Urumqi [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2011, 25(10): 136-142(in Chinese).
- [38] JOUZEL J, MERILVAT L. Deuterium and oxygen 18 in precipitation: modeling of the isotope effects during snow formation [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1984, 89(D7): 11749-11757.
- [39] BRIMELOW C J, REUTER W G. Transport of atmospheric moisture during three extreme rainfall events over the Mackenzie River Basin [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2005, 6(4): 423-440.
- [40] 马京津, 于波, 高晓清等. 大尺度环流变化对华北地区夏季水汽输送的影响 [J]. *高原气象*, 2008, 27(3): 517-523. MA J J, YU B, GAO X Q, et al. Impact of large-scale circulation changes on summer water vapor transport in North China [J]. *Plateau Meteorology*, 2008, 27(3): 517-523(in Chinese).