

# 台风“玛莉亚”期间福州、将乐降水 $\delta^{18}\text{O}$ 变化特征及影响因素

蔡健榕<sup>1</sup>, 许涛<sup>2</sup>, 杨云月<sup>1</sup>, 姜修洋<sup>1</sup>

1. 湿润亚热带生态-地理过程教育部重点实验室, 福建师范大学 地理科学学院, 福州 350007  
2. 南京大学 地理与海洋科学学院, 南京 210023

**摘要:** 基于2018年第8号台风“玛莉亚”登陆前后福州、将乐两地小时分辨率的降水同位素数据, 结合气象资料, 分析了此次台风期间两地的降水  $\delta^{18}\text{O}$  变化特征及影响因素。台风“玛莉亚”影响期间, 福州降水  $\delta^{18}\text{O}$  值变化范围为  $-2.72\text{‰}$  —  $-10.52\text{‰}$ , 振幅达  $7.80\text{‰}$ , 平均值为  $-8.42\text{‰}$ , 呈现倒U型的三阶段变化特征, 阶段1、3降水  $\delta^{18}\text{O}$  值相对偏正, 受蒸发效应影响显著; 阶段2降水  $\delta^{18}\text{O}$  值显著偏负, 平均值为  $-8.95\text{‰}$ , 远低于福州夏季多年降水  $\delta^{18}\text{O}$  平均值  $-6.53\text{‰}$ 。将乐降水  $\delta^{18}\text{O}$  值变化范围为  $-1.70\text{‰}$  —  $-11.93\text{‰}$ , 振幅为  $10.23\text{‰}$ , 平均值为  $-10.06\text{‰}$ , 呈现“厂”字型的两阶段变化特征, 阶段1降水  $\delta^{18}\text{O}$  值相对偏正, 变化范围为  $-1.70\text{‰}$  —  $-7.54\text{‰}$ ; 阶段2降水  $\delta^{18}\text{O}$  值显著偏负, 平均值为  $-10.66\text{‰}$ 。台风期间, 两地阶段2的降水  $\delta^{18}\text{O}$  值受“云雨区效应”的影响显著偏负。随着台风登陆并向内陆移动, 受同位素瑞利分馏及地形的影响, 内陆将乐  $\delta^{18}\text{O}$  值进一步偏负。水汽输送通量分析表明, 此次台风影响期间水汽主要来源于西北太平洋、印度洋和南海通道。

**关键词:** 台风“玛莉亚”; 降水; 稳定同位素; 水汽源; 云雨区效应

## The characteristics and influence factors of typhoon “Maria” induced rainfall $\delta^{18}\text{O}$ at Fuzhou and Jiangle

CAI Jianrong<sup>1</sup>, XU Tao<sup>2</sup>, YANG Yunyue<sup>1</sup>, JIANG Xiuyang<sup>1</sup>

1. Key Laboratory for Humid Subtropical Eco-Geographical Processes of the Ministry of Education, School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China  
2. School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China

**Abstract: Background, aim, and scope** Hydrogen and oxygen stable isotopes in atmospheric precipitation are often used in hydrological cycles and paleoclimatic reconstruction studies for their high sensibility to environmental changes. Typhoon precipitation has a large contribution rate to precipitation in southeastern China. However, the influence of typhoons often lasts only 1 to 2 days, and the existing monthly and daily precipitation data are not suitable for in-depth study of the internal variation characteristics of stable isotopes

收稿日期: 2020-05-14; 录用日期: 2020-09-04; 网络出版: 2020-09-12

Received Date: 2020-05-14; Accepted Date: 2020-09-04; Online first: 2020-09-12

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41672170)

Foundation Item: National Natural Science Foundation of China (41672170)

通信作者: 姜修洋, E-mail: xyjiang@fjnu.edu.cn

Corresponding Author: JIANG Xiuyang, E-mail: xyjiang@fjnu.edu.cn

引用格式: 蔡健榕, 许涛, 杨云月, 等. 2021. 台风“玛莉亚”期间福州、将乐降水  $\delta^{18}\text{O}$  变化特征及影响因素 [J]. 地球环境学报, 12(1): 93–103.

Citation: Cai J R, Xu T, Yang Y Y, et al. 2021. The characteristics and influence factors of typhoon “Maria” induced rainfall  $\delta^{18}\text{O}$  at Fuzhou and Jiangle [J]. *Journal of Earth Environment*, 12(1): 93–103.

of typhoon precipitation. In addition, when the typhoon landed on the southeast coast and moved inland, with the weakening of the typhoon energy, the precipitation weakened and mixed with local water vapor, making the inland precipitation  $\delta^{18}\text{O}$  more complicated. Based on the meteorological data and stable isotope compositions in precipitation of No.8 typhoon “Maria” at Fuzhou and Jiangle, the characteristics of stable isotope compositions in precipitation of typhoon “Maria” and its influence factors have been analyzed. This has important implications for understanding the mechanism of typhoon impact on regional rainfall stable isotopes. **Materials and methods** Based on the meteorological data and stable isotope compositions in precipitation of No.8 typhoon “Maria” in 2018 at Fuzhou and Jiangle, combined with the HYSPLIT model to simulate the source trajectory of water vapor, the mechanism of the influence of typhoon movement on the stable isotope of regional precipitation is explored. **Results** The results show that: (1) the local meteoric water line, established as:  $\delta^2\text{H}=7.30\delta^{18}\text{O}-3.51$  ( $R^2=0.95$ ,  $N=13$ , Fuzhou);  $\delta^2\text{H}=6.93\delta^{18}\text{O}-4.37$  ( $R^2=0.99$ ,  $N=17$ , Jiangle). (2) During the period of typhoon “Maria”, the variation of precipitation  $\delta^{18}\text{O}$  in Fuzhou is characterized by three stages, which exhibiting a reversed U-shaped pattern. The precipitation  $\delta^{18}\text{O}$  in stage one and three are relative positive, while in the second stage is relative negative which is far below the average value of summer precipitation  $\delta^{18}\text{O}$  in Fuzhou ( $-6.53\%$ ). (3) The variation of precipitation  $\delta^{18}\text{O}$  in Jiangle is characterized by two stages, which are similar to Chinese character “chang”. The precipitation  $\delta^{18}\text{O}$  in the stage one of Jiangle is relative positive, while the precipitation  $\delta^{18}\text{O}$  in stage two of Jiangle is relative negative. **Discussion** (1) The local meteoric water line (MLY-Fuzhou, MLY-Jiangle) had a lower slope and intercept than GMWL and LMWL which indicated that the stable isotopes composition in typhoon precipitation at Fuzhou and Jiangle are affected by strong “evaporation effect”. (2) The stable isotope composition of stage two precipitation which has the most negative values is mainly influenced by “rain shield effect” with large-scale convection, high condensation efficiency, and isotopically depleted recycling. (3) Through the study of typhoon precipitation  $\delta^{18}\text{O}$ , typhoon precipitation  $\delta^{18}\text{O}$  has the characteristics of spatial variation. As the typhoon landed and moved inland, affected by Rayleigh fractionation, the inland  $\delta^{18}\text{O}$  value was further negative. However, due to the fact that the terrain of Fujian is high in the west and low in the east, the change of terrain factors must also be considered. **Conclusions** The extreme negative of the  $\delta^{18}\text{O}$  value of precipitation in stage two is affected by “rain shield effect”. As the typhoon landed and moved inland, the inland  $\delta^{18}\text{O}$  value became further negative, which is the result of the combined effect of Rayleigh fractionation and terrain. During the impact of the typhoon, water vapor mainly originated from the Northwest Pacific, Indian Ocean and South China Sea channels. **Recommendations and perspectives** This study is based on the Fuzhou and Jiangle sites to study the impact of typhoon precipitation on the local precipitation  $\delta^{18}\text{O}$ . If more sampling points can be added for a more comprehensive comparison study, then more accurate conclusions can be drawn.

**Key words:** typhoon “Maria”; precipitation; stable isotope ratios; moisture source; rain shield effect

大气降水是全球水循环的重要环节，氢、氧稳定同位素作为水分子的重要组成部分，对环境变化的响应十分敏感，常用于水文循环（Dansgaard, 1964; Tian et al, 2003; Cai et al, 2017, 2019）、古气候重建（Thompson et al, 2000; Wang et al, 2001）等研究中。华南地区的日降水  $\delta^{18}\text{O}$  特征显示出雨季较低、旱季较高的特征（Xie et al, 2011; Ruan et al, 2019），但台风作为天气尺度下典型的极端事件，目前对其降水同位素特征的研究还不多。Lawrence et al（2002）

发现，热带气旋在降水时会留下独特的同位素特征，可能提供有关热带气旋的演化和结构信息。过去许多基于季节尺度的研究指出，降水量与  $\delta^{18}\text{O}$  之间具有反相关性，即雨量效应，然而最近的研究指出热带地区日降水  $\delta^{18}\text{O}$  与降水量之间的相关性很弱（Konecky et al, 2019）。除雨量效应外，水汽源位置的不同在控制降水  $\delta^{18}\text{O}$  方面十分重要（Peng et al, 2010; Xie et al, 2011），水分源的位置决定了水蒸汽必须经过的距离，从而影响了降水  $\delta^{18}\text{O}$ 。中国东南地区受台风活动影响强

烈, 台风常常为本地区带来极端降水, 台风降水占比最高超过全年降水总量的 40% (Zhang et al, 2018), 且台风降水  $\delta^{18}\text{O}$  具有不同于一般大气降水  $\delta^{18}\text{O}$  的特征 (孙晓双等, 2016), 使得东南地区大气降水稳定同位素变化更加复杂。

当前关于台风降水稳定同位素已有少量研究。许涛等 (2018) 分析了台风“杜鹃”的降水稳定同位素变化特征及影响因素; 孙晓双等 (2018) 研究了台风“灿鸿”在中国东部沿海北上四个城市降水同位素的时空变化特征及冲刷效应。Xu et al (2019) 研究指出, 台风降水  $\delta^{18}\text{O}$  值的极端偏负是受到“云雨区效应”的影响: 即云雨区大规模对流, 高冷凝效率和同位素耗竭蒸汽的再循环作用三个因素组合导致了台风期间降水  $\delta^{18}\text{O}$  值的极端偏负。但台风登陆东南沿海向内陆移动时, 随着台风能量的削弱, 降水减弱并混合当地的水汽, 使得内陆的降水  $\delta^{18}\text{O}$  变化更为复杂。因此, 沿台风登陆沿海并向内陆移动的路径, 设置研究监测点有助于加强台风对区域降雨稳定同位素影响机制的认识。

当前, 关于东南地区降水同位素的研究主要为月和日分辨率的大气降水研究 (Xie et al, 2011; Ruan et al, 2019)。但台风的影响往往仅持续 1—2 天, 已有的月降水和日降水数据不适于对台风降水稳定同位素的内部变化特征进行深入研究。本文通过对 2018 年第 8 号台风“玛莉亚”

在 2018 年 7 月 11 日影响沿海福州和内陆将乐两地小时分辨率的降水同位素数据的分析及气象数据收集, 结合水汽输送通量, 探究台风移动过程中对区域降水稳定同位素的影响机制。

## 1 台风概况

2018 年第 8 号台风“玛莉亚” (Maria) (图 1, 路径数据来源于中央气象台台风网, <http://typhoon.nmc.cn/web.html>), 于 7 月 4 日 20:00 (北京时间, 下同) 在美国关岛以东洋面生成, 之后向西偏北方向移动并逐渐增强; 于 11 日 09:10 在福建省连江黄岐半岛沿海登陆, 登陆时为强台风级, 中心附近最大风力为 14 级 ( $42 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), 中心最低气压约为 960 hPa。登陆后向西北偏西移动, 强度逐渐减弱, 于 20:00 在江西境内减弱为热带低压 (图 1)。台风“玛莉亚”具有登陆早、强度大、减弱快、位置北等特点, 是 1949 年以来于 7 月登陆福建的台风中, 强度最强、位置最北的, 其结构紧实, 最强降水及大风区集中在台风中心附近 (孙劭等, 2018)。

受台风“玛莉亚”的影响, 福建沿海地区出现 10—13 级阵风、沿海岛屿 14—16 级, 9 个县 (市) 极大风速突破有气象记录以来 7 月极值 (柳龙生等, 2019)。福建省东北部和中部出现大到暴雨、局地大暴雨, 部分地区累计降水量 50—150 mm, 局部地区达 200—250 mm, 其中福州 64.9 mm, 将乐 44.3 mm。

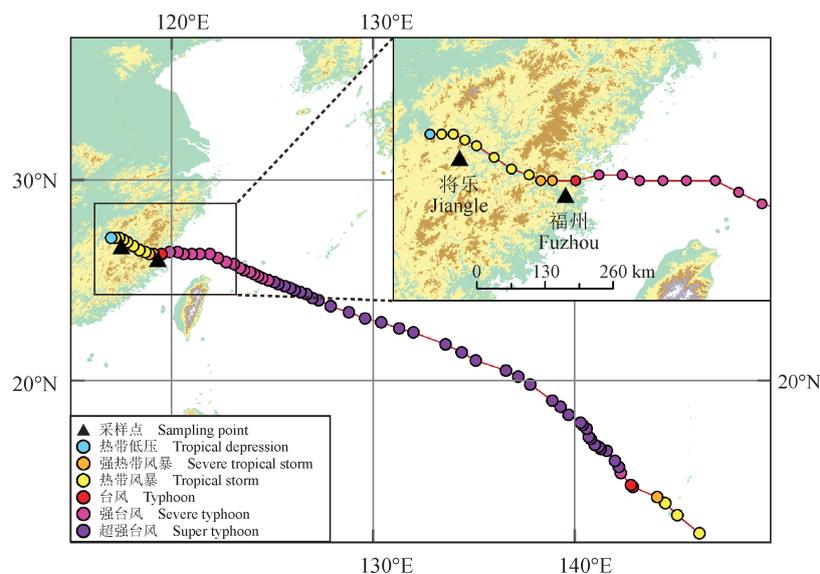


图 1 2018 年第 8 号台风“玛莉亚”路径图  
Fig. 1 The path of No.8 typhoon “Maria” in 2018

## 2 研究区、数据与方法

### 2.1 研究区

本研究采样点分别位于福州和将乐。福州地处福建东北部，位于 25°15′—26°39′N、118°08′—120°31′E，属于典型的中亚热带海洋性季风气候。全年平均气温为 19—22℃，最热月平均气温在 27—29℃，最冷月 10—13℃，气温年较差大。平均相对湿度 76%—80%，年平均降水量为 900—2100 mm，7—9 月是台风活动期，平均每年直接登陆市境的台风约有 2 次，年平均台风降水量约为 350—550 mm，约占总降水的 25%—60%（林小红等，2008）。将乐县地处中亚热带南部，武夷山脉东南麓，属湿润亚热带季风气候。近 60 a 来气象站（永安，距将乐县约 100 km）资料统计，年平均气温 19℃，1 月平均气温 9℃，7 月平均气温 28℃，年平均降水量约为 1600 mm，集中于 4—9 月，约占全年的 70%（姜修洋等，2012）。

### 2.2 数据

本研究采样点分别位于福建师范大学仓山校区地理科学学院（119°19′E、26°03′N，31 m）的开阔楼顶和将乐玉华洞（117°30′E、26°42′N，300 m）空旷地面，于 2018 年 7 月 11 日台风“玛莉亚”影响期间，以 0.5—2 h 不等的的时间间隔对台风降水进行样品收集，共获取降水样品 30 组，其中福州 13 组，将乐 17 组。采样时使用干净的 2 L 烧杯接取雨水，每个样品采样结束后立即倒入 50 mL 及 2 mL 的 PP 材质无色塑料样品瓶装满，并用 Parafilm 封口膜密封，置于 4℃ 冰箱冷藏保存。降水稳定同位素测试在福建师范大学地理科学学院稳定同位素中心完成，测试仪器为 Picarro-L2140-i 型同位素分析仪。 $\delta^2\text{H}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  测试精度分别优于 0.5‰ 和 0.08‰，测试结果用相对于维也纳标准平均海水（V-SMOW）的千分差表示如下：

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

式中： $R$  为  $^2\text{H}/\text{H}$  或  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 。文中  $\delta^{18}\text{O}$  及  $d$  的平均值为降雨量加权平均数，计算公式为：

$$\delta^{18}\text{O}_a = \frac{x_1 p_1 + x_2 p_2 + x_3 p_3 + \dots + x_n p_n}{p_1 + p_2 + p_3 + \dots + p_n}$$

$$d_a = \frac{d_1 p_1 + d_2 p_2 + d_3 p_3 + \dots + d_n p_n}{p_1 + p_2 + p_3 + \dots + p_n} \quad (2)$$

式中： $\delta^{18}\text{O}_a$  为降雨量加权平均  $\delta^{18}\text{O}$  值， $x_n$  为降水  $\delta^{18}\text{O}$  值， $d_a$  为降雨量加权平均  $d$  值， $p_n$  为降水量。

### 2.3 水汽通量

水汽通量又称水汽输送量，指单位时间内流经与速度矢正交的某一单位截面积的水汽质量（北京大学地球物理系气象教研室，1976），它表征了水汽输送的强度和方向，可用于反映暴雨过程的水汽来源，以及这种水汽输送和某些天气系统的关系（文宝安，1980）。水汽通量散度，指单位时间内单位体积中水汽的净流失量，为正则有水汽流失，为负则有水汽积聚，它表征输送来的水汽的集中程度，可用于探究暴雨出现在何处，雨量大小等（文宝安，1980）。

## 3 结果

### 3.1 台风大气降水线方程

受同位素分馏效应的影响，大气降水中氢氧同位素呈现线性相关的变化，被称作大气水线（meteoric water line, MWL），广泛应用于大气降水稳定同位素研究中（章新平和姚檀栋，1996；田立德等，2001；柳鉴容等，2009）。台风“玛莉亚”降水  $\delta^2\text{H}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  呈显著线性相关关系，线性方程为福州市（MLY-Fuzhou）： $\delta^2\text{H} = 7.30\delta^{18}\text{O} - 3.51$ （ $R^2 = 0.95$ ， $N = 13$ ）、将乐县（MLY-Jiangle）： $\delta^2\text{H} = 6.93\delta^{18}\text{O} - 4.37$ （ $R^2 = 0.99$ ， $N = 17$ ）（图 2）。两地降水线的斜率和截距比较接近，但均偏离全球大气水线（GMWL）： $\delta^2\text{H} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$ （Craig，1961）和东部季风区的局地大气降水线方程（LMWL）： $\delta^2\text{H} = 7.46\delta^{18}\text{O} + 0.90$ （柳鉴容等，2009）。

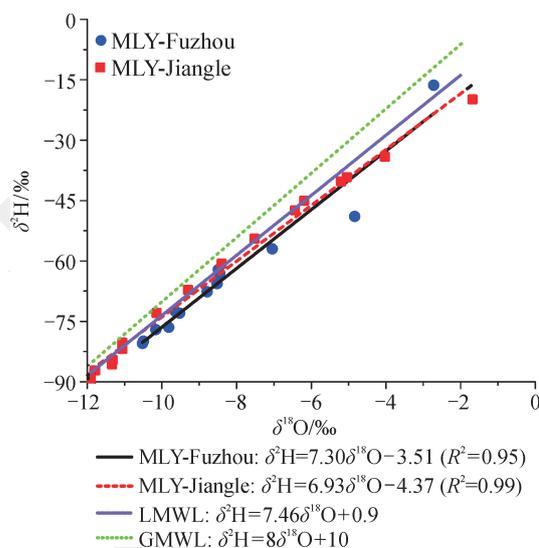


图 2 台风“玛莉亚”降水  $\delta^2\text{H}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  的关系  
Fig. 2 Relationship between  $\delta^2\text{H}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  in the precipitation of typhoon “Maria”

### 3.2 降水 $\delta^{18}\text{O}$ 阶段性变化特征

#### 3.2.1 台风“玛莉亚”降水稳定同位素时间变化特征

数据显示(图3),受台风“玛莉亚”影响,福州市采样点于7月11日上午09:00左右开始降水,7月11日晚22:00左右停止,降水量为64.9 mm,最大降水量出现在11:00左右(22.3 mm),气温在23—24°C,相对湿度在83%—94%,风力3—7级。台风降水期间,福州降水  $\delta^2\text{H}$  值变化范围为-16.40‰—-80.50‰,振幅为64.10‰;降水  $\delta^{18}\text{O}$  值变化范围为-2.72‰—-10.52‰,振幅为7.80‰,降水  $\delta^{18}\text{O}$  平均值为-8.42‰,低于福州夏季多年降水  $\delta^{18}\text{O}$  平均值-6.53‰(程中双和张永波,2015)。台风期间福州降水中  $\delta^{18}\text{O}$  值呈现倒U型变化特征(图3),可将其划分为3个阶段。阶段1(11日09:00—10:00):降水  $\delta^{18}\text{O}$  值相对偏正,为-4.83‰—-7.04‰,平均值为-6.55‰。此阶段降水量约19.3 mm,占降水期间总降雨量的29.7%。该阶段气温基本平稳,相对湿度迅速增加为90%;风力较强,为5—7级。此时台风“玛莉亚”中心距离采样点位置约31.7—70.0 km,处于云墙对流区。研究表明(方勉等,2019),台风登陆减弱时,外围螺旋雨带降水加强,削弱了云墙区对流的发展,使得这一阶段台风中心降水有所减弱。弱降水混合本地水汽导致该阶段降水  $\delta^{18}\text{O}$  值相对偏正。阶段2(11日10:00—16:00):降水  $\delta^{18}\text{O}$  值显著偏负,变化范围在-8.45‰—-10.52‰,振幅为2.07‰,平均值是-8.95‰。该阶段降水量达45.1 mm,占台风“玛莉亚”总降水量的69.5%。此时“玛莉亚”中心距离采样点位置约24.9—175.2 km,受到台风云雨区影响。11日13:30,“玛莉亚”中心距离采样点83.9 km,降水  $\delta^{18}\text{O}$  值最为偏负,达-10.52‰。该阶段,气温保持在23—24°C,相对湿度达97%,风力为4—6级,蒸发引起的同位素分馏效应较弱。阶段3(11日16:00—22:00):降水  $\delta^{18}\text{O}$  相对偏正,为-2.72‰,此时段无明显降水,此时采样点距离“玛莉亚”中心220.5 km,处于“玛莉亚”外圈区域。

将乐采样点降水开始于11日11:00左右,结束于20:00左右,降水量为44.3 mm,最大降水量出现在11日16:00左右(15.4 mm)。台风影响期间,气温在24—26°C,相对湿度在

88%—98%,风力1—2级。与福州相比,将乐台风降水稳定同位素组成整体变化较大,整个过程降水  $\delta^{18}\text{O}$  值变化范围为-1.70‰—-11.93‰,平均值为-10.06‰,振幅为10.23‰;降水  $\delta^2\text{H}$  值变化范围为-19.86‰—-89.13‰,振幅为69.67‰。台风期间将乐降水  $\delta^{18}\text{O}$  值呈现“厂”字型的变化特征,可将其划分为2个阶段。阶段1(11日11:00—14:00):降水  $\delta^{18}\text{O}$  值相对偏正,为-1.70‰—-7.54‰,平均值为-5.55‰。此时段降水量约5.2 mm,占降水期间总降雨量的12%。该阶段气温基本稳定于24—26°C;相对湿度波动较大,为88%—96%;风力较弱,为1—2级。此时“玛莉亚”中心距离采样点位置约91.4—164.6 km,受当地水汽影响较大,降水  $\delta^{18}\text{O}$  值相对偏正,形成台风前端降水。阶段2(11日14:00—20:00):降水  $\delta^{18}\text{O}$  值显著偏负,变化范围在-8.42‰—-11.93‰,振幅为3.51‰,平均值是-10.66‰。该阶段降水量为39.1 mm,占总降雨量的88%。“玛莉亚”中心距离采样点位置约35.2—76.2 km。11日18:30降水  $\delta^{18}\text{O}$  值达到最偏负值-11.93‰,距“玛莉亚”中心50.1 km。该阶段,气温保持在24—25°C,相对湿度大,空气中水汽接近饱和状态,风力平稳为1—2级,由蒸发引起的同位素非平衡分馏效应弱。

#### 3.2.2 降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值的空间变化特征

前人研究表明,降水  $\delta^{18}\text{O}$  值的变化特征与台风中心到采样点的距离具有很好的相关性(Lawrence and Gedzelman, 1996; Ohsawa and Yusa, 2000)。Jackisch et al (2019)在对多次台风降水的研究中发现,台风离采样点越近,  $\delta^{18}\text{O}$  值越偏负。数据显示(图4),将乐采样点台风降水  $\delta^{18}\text{O}$  值整体上随距离的减小而更为偏负,与前人研究相符。但福州采样点的数据略有不同,这可能是由于采样点降水过程主要集中在“玛莉亚”登陆之后,降水初期台风中心距离采样点位置较近,但降水量较小,受蒸发作用影响强烈,降水  $\delta^{18}\text{O}$  值相对偏正。

## 4 讨论

### 4.1 大气水线

研究表明(章新平和姚檀栋,1998;田立德等,2001),气候状况不同会使当地大气降水线的斜率和截距偏离全球平均水平8和10,表明该地区降水的不平衡条件,即降水产生于非瑞利条

件下。福州、将乐两地降水线的斜率均小于 8，表明降水经历了一定的蒸发过程。降水的再蒸发程度可能与不同环境中的相对湿度条件有关 (Lee and Fung, 2008)。章新平等 (2003) 发现在未饱和和大气中的蒸发，水体中  $^{18}\text{O}$  的富集程度一般要高于瑞利模式的结果，且相对而言， $^{18}\text{O}$  的富集速率比 D 快，从而造成实际蒸发中  $\text{D}/^{18}\text{O}$  梯度的减小和常数项向负方向移动。由于福州、将乐夏季为副热带高压影响显著地区，台风“玛莉亚”登陆前后，降水较弱，采样点的相对湿度较低，蒸发作用强烈，使

得降水  $\delta^{18}\text{O}$  值偏正 ( $> -7\text{‰}$ )，数据点主要集中于 GMWL 和 LMWL 右下方。当台风云雨区影响采样点时，降水明显增强，相对湿度接近 100%，大气中的水汽接近饱和，接近于平衡分馏状态。此时，台风降水  $\delta^{18}\text{O}$  值显著偏负 ( $< -7\text{‰}$ )，数据点靠近 LMWL 分布 (图 2)，这表明在此期间降水的再蒸发比较微弱。降水期间，福州相对湿度明显小于将乐，非平衡条件下的蒸发作用更为强烈，使得福州降水  $\delta^{18}\text{O}$  值更为偏正，数据点较将乐而言相对偏离 GMWL 和 LMWL。

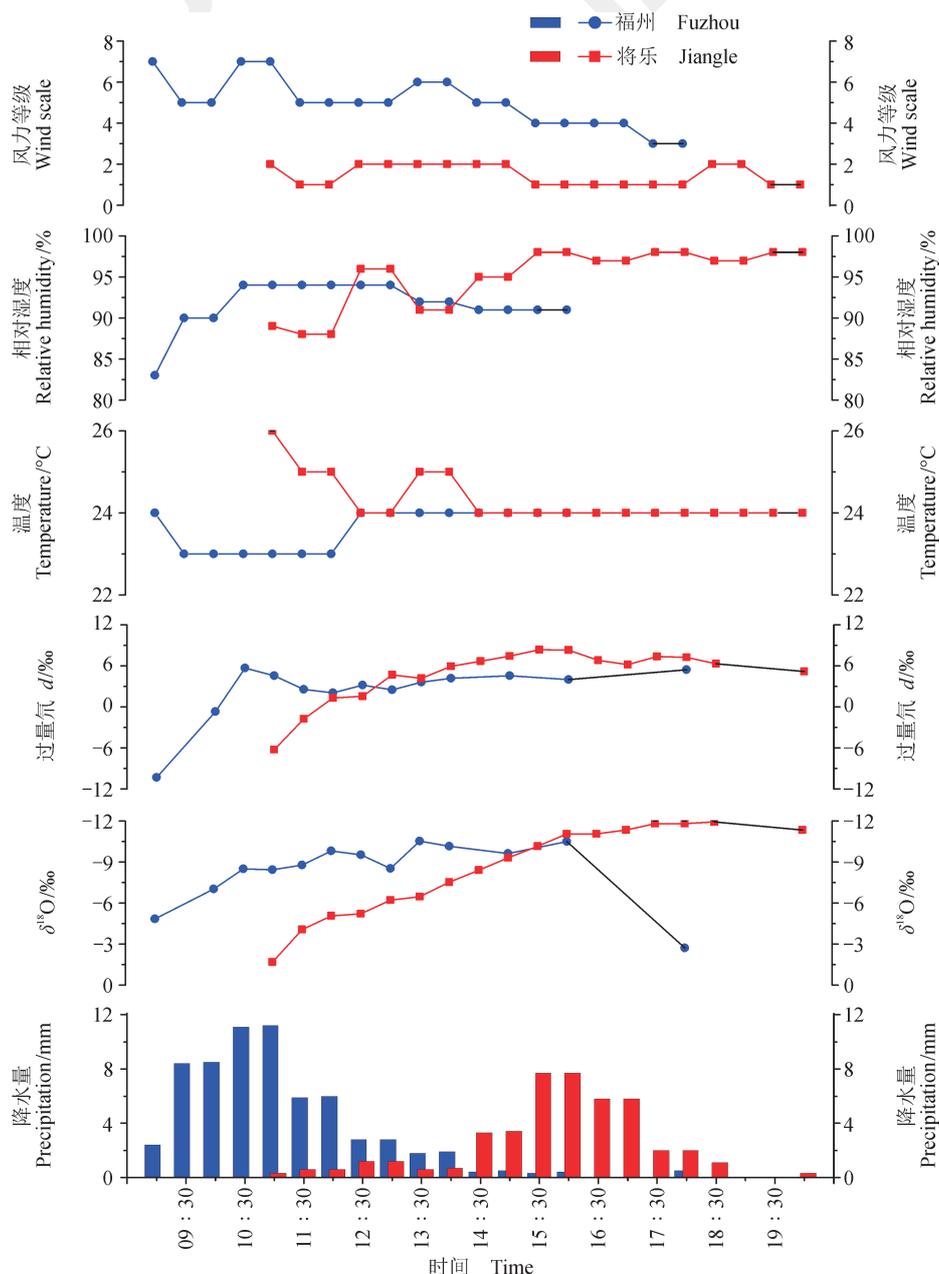


图 3 7 月 11 日台风“玛莉亚”期间福州及将乐采样记录

Fig. 3 Sampling records in Fuzhou and Jiangle during the period of typhoon “Maria” in 11 July

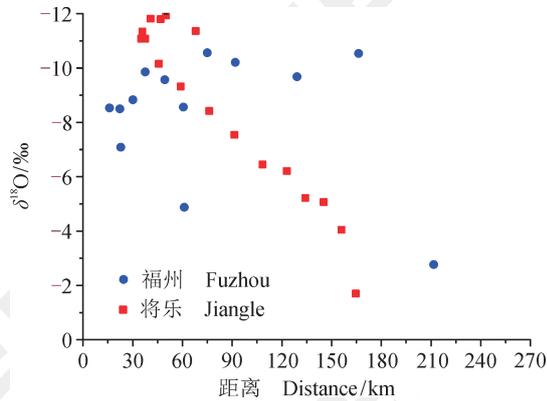


图 4 台风“玛莉亚”降水  $\delta^{18}\text{O}$  和采样点与台风距离关系  
Fig. 4 Relationship between  $\delta^{18}\text{O}$  and distance (sampling points and typhoons) in the precipitation of typhoon “Maria”

#### 4.2 降雨量效应

福州和将乐的降水  $\delta^{18}\text{O}$  值变化范围分别为  $-2.72\text{‰}$ — $-10.52\text{‰}$  和  $-1.70\text{‰}$ — $-11.93\text{‰}$ 。在将乐的阶段 2 中, 降水  $\delta^{18}\text{O}$  值的变化范围为  $-8.42\text{‰}$ — $-11.93\text{‰}$ , 平均值为  $-10.66\text{‰}$ , 低于福州阶段 2 降水  $\delta^{18}\text{O}$  的平均值 ( $-8.95\text{‰}$ )。台风“玛莉亚”降水期间, 福州总降水量 ( $64.9\text{ mm}$ ) 高于将乐总降水量 ( $44.3\text{ mm}$ ), 但福州降水  $\delta^{18}\text{O}$  值较将乐偏正, 这显然与降水量效应不符。前人研究表明 (Xu et al, 2019), 当台风登陆陆地, 海洋表层蒸汽供应被切断, 同位素耗竭的蒸汽再循环随之停止。当台风向内陆移动并形成降水时, 在连续冷凝过程中重同位素的降落会导致从沿海到内陆 (福州到将乐) 降水  $\delta^{18}\text{O}$  值的偏负。

#### 4.3 云雨区效应

台风影响期间, 福州、将乐两地阶段 2 降水  $\delta^{18}\text{O}$  值相对偏负, 分别为  $-8.45\text{‰}$ — $-10.52\text{‰}$  和  $-8.42\text{‰}$ — $-11.93\text{‰}$ 。Xu et al (2019) 指出台风降水  $\delta^{18}\text{O}$  值的极端偏负是受到“云雨区效应”的影响: 即云雨区大规模对流、高冷凝效率 and 同位素耗竭蒸汽的再循环作用三个因素组合导致了台风期间降水  $\delta^{18}\text{O}$  值的极端偏负。如图 5 所示, 海水的  $\delta^{18}\text{O}$  值约为 0, 台风形成过程中, 海水蒸发, 水汽中率先富集较轻的  $^{16}\text{O}$ , 形成初始  $\delta^{18}\text{O}$  值偏负、大量富集轻同位素的云墙结构, 水汽的  $\delta^{18}\text{O}$  值范围接近  $-10.5\text{‰}$ — $-14\text{‰}$  (杨杰东和徐士进, 2007)。台风逐步发展时, 由于其特殊的结构, 极高冷凝的效率, 使得登陆前云体中的  $\delta^{18}\text{O}$  值始终保持较为偏负的状态。台风登陆后  $\delta^{18}\text{O}$  值较为偏负的降水通过耗竭蒸汽的再循环

作用被台风吸收, 在沿路径的内陆地区降落时, 使得降水  $\delta^{18}\text{O}$  值进一步偏负。由于福州、将乐两地位于中国东南, 夏季受副热带高压影响显著, 前端降水受强烈蒸发效应影响, 降水  $\delta^{18}\text{O}$  值相对偏正, 变化范围为  $-4.83\text{‰}$ — $-7.04\text{‰}$  (福州) 和  $-1.70\text{‰}$ — $-7.54\text{‰}$  (将乐)。当台风云雨区的大规模对流影响采样点时, 水汽迅速凝结降落, 降水  $\delta^{18}\text{O}$  值偏负, 变化范围为  $-8.45\text{‰}$ — $-10.52\text{‰}$  (福州) 和  $-8.42\text{‰}$ — $-11.93\text{‰}$  (将乐)。随着台风深入大陆, 外围环流水汽影响采样点, 受到蒸发作用和局地水汽混合影响, 降水  $\delta^{18}\text{O}$  值再次偏正, 结果为  $-2.72\text{‰}$  (福州)。

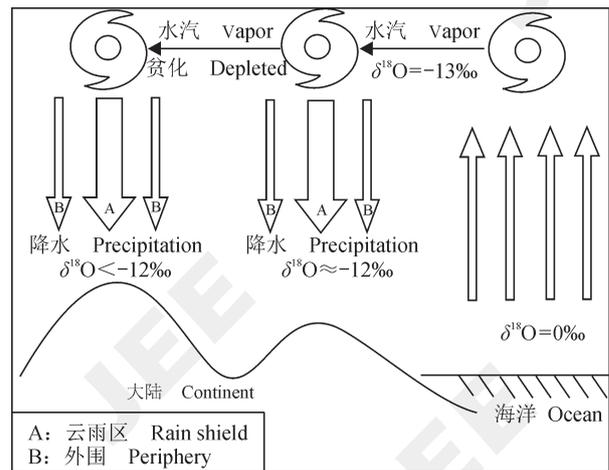


图 5 台风降水中的氧同位素分馏  
Fig. 5 Oxygen isotopic fractionations in typhoon precipitation

#### 4.4 高程效应

福建省地势西高东低, 海拔高度变化对降水同位素的影响不容忽视。降水过程中氢氧同位素存在明显的高程效应, 即大气降水中  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta^2\text{H}$  值随海拔高度增加而下降, 海拔高度越高, 高程效应越显著 (顾慰祖, 2011)。福州采样点海拔高度为  $31\text{ m}$ , 将乐采样点海拔高度为  $300\text{ m}$ , 福州降水  $\delta^{18}\text{O}$  平均值为  $-8.42\text{‰}$ , 将乐为  $-10.06\text{‰}$ 。Liu et al (2010) 发现海拔是华南地区影响降水中  $\delta^{18}\text{O}$  的主要地理因子, 其定量关系为  $-0.2\text{‰} \cdot (100\text{ m})^{-1}$ , 即  $\delta^{18}\text{O}$  随高度增加  $100\text{ m}$  而消耗  $0.2\text{‰}$ 。因而, 除云雨区效应外, 高程效应也可能是导致将乐地区  $\delta^{18}\text{O}$  值更为偏负的原因。

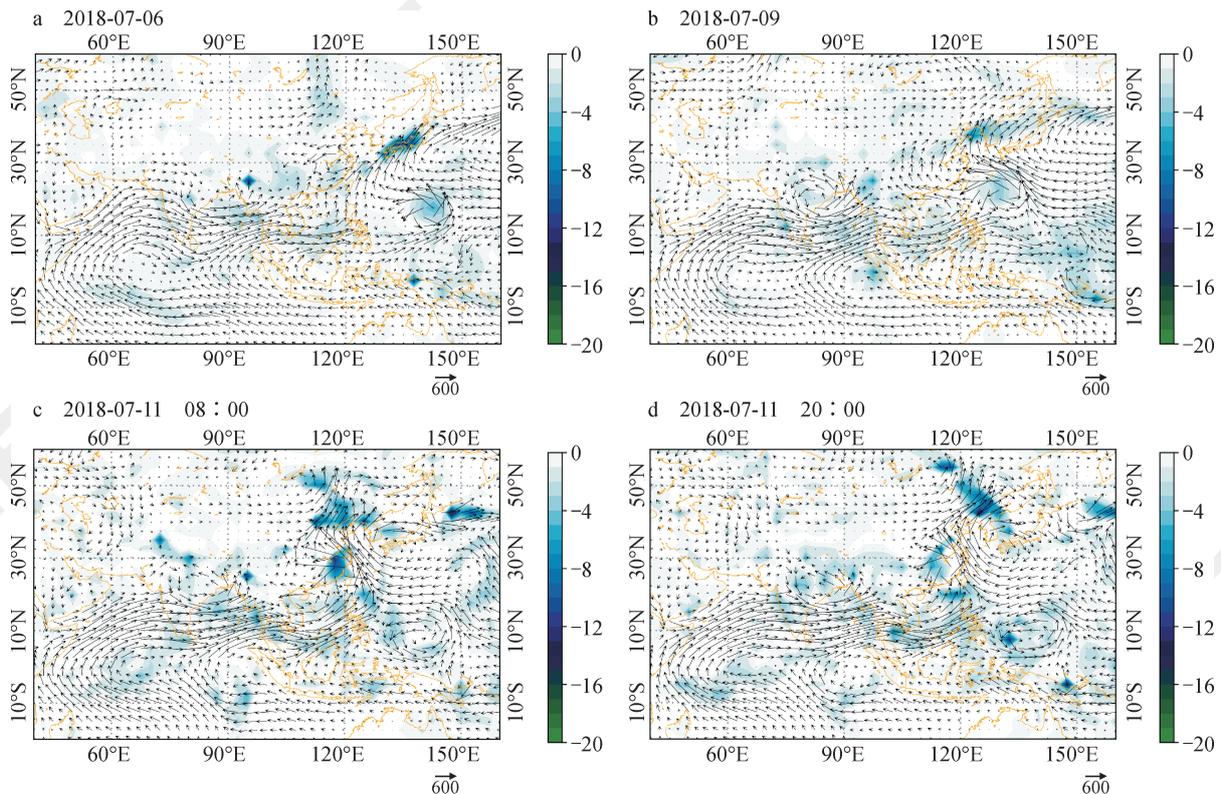
#### 4.5 水汽源分析

图 5 显示了台风“玛莉亚”移动过程中整层水汽输送通量的变化。由图 5 可知, 7 月 6 日、

9日、11日,台风“玛莉亚”由西北太平洋形成并向西北方向移动。7月6日“玛莉亚”位于美国关岛附近洋面菲律宾东部海域,携带大量西北太平洋水汽并逐渐增强至超强台风级。9日保持超强台风级向西北方向移动,水汽主要来自西北太平洋通道和印度洋通道。11日08:00“玛莉亚”移动到福建东部,水汽主要来自西北太平洋通道、南海通道和远源的印度洋水汽通道。11日20:00“玛莉亚”在向内陆移动过程中逐渐减弱,海上水汽源基本切断,降水主要由当地的水汽以及台风残留水汽提供。“玛莉亚”移动过程中最主要的水汽通道有三条:西北太平洋通道、印度洋通道及南海通道。

过量氘 ( $d$ -excess), 其定义为  $d = \delta^2\text{H} - 8\delta^{18}\text{O}$ , 受制于相变过程中  $^2\text{H}$  和  $^{18}\text{O}$  分馏速率的相对差异, 大小取决于水汽源区的气象因素 (相对湿度、海表温度、风速等) (章新平等, 2009)。 $d$

值反映了形成降水水汽团的同位素组成, 含有水汽源区蒸发性质的重要信息, 如蒸发过程的平衡或不平衡状态及蒸发速率 (卫克勤和林瑞芬, 1994)。整个降水期间, 福州  $d$  值的加权平均值为 2.64‰, 将乐为 6.79‰, 二者均小于全球大气降水  $d$  平均值 10‰ 和福州市夏季多年平均降水  $d$  值 10.42‰, 表明此次台风降水主要受海洋气团影响, 这与图 5 所观察到的结果一致。对其进行阶段分析发现, 台风“玛莉亚”降水期间,  $d$  值的变化与  $\delta^{18}\text{O}$  值十分相似。福州采样点阶段 1 的  $d$  值变化范围为 -10.30‰—-0.70‰, 均值为 -2.82‰; 阶段 2 的  $d$  值变化范围为 2.00‰—5.70‰, 均值为 3.96‰, 阶段 3 为 5.40‰ (只含一个数据)。将乐采样点阶段 1 的  $d$  值范围为 -6.24‰—5.93‰, 均值为 2.31‰; 阶段 2 变化范围为 -6.19‰—8.38‰, 均值为 7.39‰。但两地  $d$  值的相同阶段特征是否指示着一致的水汽源还有待进一步探究。



数据来源于欧洲中期天气预报中心再分析数据集 ERA5 (<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>), 矢量为  $\vec{Q}$  (单位:  $\text{kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$ ), 阴影为  $\vec{Q}_{\text{div}}$  (单位:  $10^{-4} \text{kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ )。

The data comes from the European Centre for Medium-Term Weather Forecasting and reanalysis data set ERA5 (<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>), the vector is  $\vec{Q}$  ( $\text{kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$ ), shadow is  $\vec{Q}_{\text{div}}$  ( $10^{-4} \text{kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ ).

图 6 整层水汽输送通量场及其散度场

Fig. 6 Whole layer of water vapor transmission flux field and its dispersion field

## 5 结论

通过对台风“玛莉亚”影响期间福州、将乐两地降水  $\delta^{18}\text{O}$  值及相关气象数据分析, 发现:

(1) 台风“玛莉亚”大气降水线方程为: 福州 (MLY-Fuzhou):  $\delta^2\text{H}=7.30\delta^{18}\text{O}-3.51$  ( $R^2=0.95$ ,  $N=13$ )、将乐 (MLY-Jiangle):  $\delta^2\text{H}=6.93\delta^{18}\text{O}-4.37$  ( $R^2=0.99$ ,  $N=17$ )。两地降水线的斜率和截距均偏离全球大气水线 (GMWL)。福州地区降雨量明显小于将乐, 非平衡条件下的蒸发作用更强, 数据点较将乐更加偏离 GMWL 和 LMWL。

(2) 台风“玛莉亚”期间, 福州降水  $\delta^{18}\text{O}$  的变化呈现出三个阶段的倒 U 型变化特征, 将乐降水  $\delta^{18}\text{O}$  的变化呈现出两个阶段的“厂”字型变化特征, 第二阶段台风降水  $\delta^{18}\text{O}$  值的显著偏负主要受“云雨区效应”的影响。台风向内陆移动并形成降水时, 离登陆地较远的地区 (将乐)  $\delta^{18}\text{O}$  值比登陆地 (福州) 更加偏负。

(3) 水汽来源分析结果显示此次台风降水主要受海洋气团影响, 台风移动过程中水汽主要来自西北太平洋、印度洋和南海通道。

## 参考文献

北京大学地球物理系气象教研室. 1976. 天气分析和预报 [M]. 北京: 科学出版社. [Department of Meteorology and Geophysics, Peking University. 1976. Weather analysis and forecasting [M]. Beijing: Science Press.]

程中双, 张永波. 2015. 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, (1): 25–31. [Cheng Z S, Zhang Y B. 2015. Distribution characteristics of precipitation isotope controlled by different moisture sources [J]. *Site Investigation Science and Technology*, (1): 25–31.]

方勉, 何君涛, 符永铭, 等. 2019. 基于 GPM 卫星降水产品对 1808 号超强台风“玛莉亚”降水结构的分析 [J]. 大气科学学报, 42(6): 845–854. [Fang M, He J T, Fu Y M, et al. 2019. The precipitation structure for super typhoon Maria (1808) based on GPM satellite rainfall products [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 42(6): 845–854.]

顾慰祖. 2011. 同位素水文学 [M]. 北京: 科学出版社. [Gu W Z. 2011. Isotope hydrology [M]. Beijing: Science Press.]

姜修洋, 李志忠, 李金全, 等. 2012. 最近 500 年来福建玉华洞石笋氧同位素记录及气候意义 [J]. 地理科学, 32(2): 207–212. [Jiang X Y, Li Z Z, Li J Q, et al. 2012. Stalagmite  $\delta^{18}\text{O}$  record from Yuhua cave over the past 500 years and its regional climate significance [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 32(2): 207–212.]

柳鉴容, 宋献方, 袁国富, 等. 2009. 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, 54(22): 3521–3531. [Liu J R, Song X F, Yuan G F, et al. 2009. Characteristics of  $\delta^{18}\text{O}$  in precipitation over Eastern Monsoon China and the water vapor sources [J]. *Chinese Science Bulletin*, 54(22): 3521–3531.]

柳龙生, 吕心艳, 高拴柱. 2019. 2018 年西北太平洋和南海台风活动概述 [J]. 海洋气象学报, 39(2): 1–12. [Liu L S, Lü X Y, Gao S Z. 2019. Overview of typhoon activities over western North Pacific and the South China Sea [J]. *Journal of Marine Meteorology*, 39(2): 1–12.]

林小红, 任福民, 刘爱鸣, 等. 2008. 近 46 年影响福建的台风降水的气候特征分析 [J]. 热带气象学报, 24(4): 411–416. [Lin X H, Ren F M, Liu A M, et al. 2008. Climatic variation features of typhoon precipitation influencing Fujian for the past 46 years [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 24(4): 411–416.]

孙劭, 黄大鹏, 张颖娴. 2018. 2018 年夏季登陆中国台风的主要特点及影响评估 [J]. 中国减灾, (19): 14–17. [Sun S, Huang D P, Zhang Y X. 2018. Key characteristics and impact assessment of typhoons that made landfall in China in the summer of 2018 [J]. *Disaster Reduction in China*, (19): 14–17.]

孙晓双, 王晓艳, 翟水晶, 等. 2016. 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, 31(6): 1041–1050. [Sun X S, Wang X Y, Zhai S J, et al. 2016. The analysis of the characteristics and water vapor source of the  $\delta^{18}\text{O}$  in the precipitation of typhoon “Matmo” at Fuzhou [J]. *Journal of Natural Resources*, 31(6): 1041–1050.]

孙晓双, 崔梦月, 洪晖, 等. 2018. 台风“灿鸿”期间中国东部沿海城市降水中稳定同位素的变化及影响因素 [J]. 热带地理, 38(5): 651–659. [Sun X S, Cui M Y, Hong H, et al. 2018. Change and influencing factors of  $\delta^{18}\text{O}$  in the precipitation of typhoon “CHAN-HOM” at eastern coastal cities in China [J]. *Tropical Geography*,

- 38(5): 651–659.]
- 田立德, 姚檀栋, 孙维贞, 等. 2001. 青藏高原南北降水中的  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  关系及水汽循环 [J]. *中国科学 (D 辑: 地球科学)*, 31(3): 214–220. [Tian L D, Yao T D, Sun W Z, et al. 2001. Relationship between  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  in precipitation on north and south of the Tibetan Plateau and moisture cycling [J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 31(3): 214–220.]
- 卫克勤, 林瑞芬. 1994. 论季风气候对我国雨水同位素组成的影响 [J]. *地球化学*, 23(1): 32–41. [Wei K Q, Lin R F. 1994. The influence of the monsoon climate on the isotopic composition of precipitation in China [J]. *Geochimica*, 23(1): 32–41.]
- 文宝安. 1980. 水汽通量与水汽通量散度 [J]. *气象*, (6): 34–36. [Wen B A. 1980. Water flux and water vapor flux dispersion [J]. *Meteorological Monthly*, (6): 34–36.]
- 许涛, 蔡健榕, 孙晓双, 等. 2018. 台风“杜鹃”降水  $\delta^{18}O$  的云雨区效应初探 [J]. *自然资源学报*, 33(12): 2238–2248. [Xu T, Cai J R, Sun X S, et al. 2018. A tentative study of “cloudy and rainy area effect” of the  $\delta^{18}O$  in the precipitation of typhoon “Dujuan” [J]. *Journal of Natural Resources*, 33(12): 2238–2248.]
- 杨杰东, 徐士进. 2007. 同位素与全球环境变化 [M]. 北京: 地质出版社: 38–47. [Yang J D, Xu S J. 2007. *Isotopes and global environmental change* [M]. Beijing: Geological Publishing House: 38–47.]
- 章新平, 刘晶淼, 中尾正义, 等. 2009. 我国西南地区降水中过量氘指示水汽来源 [J]. *冰川冻土*, 31(4): 613–619. [Zhang X P, Liu J M, Nakawo M, et al. 2009. Vapor origins revealed by deuterium excess in precipitation in Southwest China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 31(4): 613–619.]
- 章新平, 姚檀栋. 1996. 青藏高原东北地区现代降水中  $\delta D$  与  $\delta^{18}O$  的关系研究 [J]. *冰川冻土*, 18(4): 360–365. [Zhang X P, Yao T D. 1996. Relations between  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  in precipitation at present in the northeast Tibetan Plateau [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 18(4): 360–365.]
- 章新平, 姚檀栋. 1998. 我国降水中  $\delta^{18}O$  的分布特点 [J]. *地理学报*, 53(4): 356–364. [Zhang X P, Yao T D. 1998. Distribution features of  $\delta^{18}O$  in precipitation in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 53(4): 356–364.]
- 章新平, 姚檀栋, 田立德. 2003. 水体蒸发过程中稳定同位素分馏的模拟 [J]. *冰川冻土*, 25(1): 65–71. [Zhang X P, Yao T D, Tian L D. 2003. Study on the fractionation mechanism of stable isotope in evaporating water body [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 25(1): 65–71.]
- Cai Z Y, Tian L D, Bowen G J. 2017. ENSO variability reflected in precipitation oxygen isotopes across the Asian Summer Monsoon region [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 475: 25–33.
- Cai Z Y, Tian L D, Bowen G J. 2019. Influence of recent climate shifts on the relationship between ENSO and Asian monsoon precipitation oxygen isotope ratios [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(14): 7825–7835.
- Craig H. 1961. Isotopic variations in meteoric waters [J]. *Science*, 133(3465): 1702–1703.
- Dansgaard W. 1964. Stable isotopes in precipitation [J]. *Tellus*, 16(4): 436–468.
- Jackisch D, Yeo B X, Switzer A D, et al. 2019. Precipitation stable isotopic signatures of tropical cyclones in Metropolitan Manila, Philippines show significant negative isotopic excursions [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. DOI: 10.5194/nhess-2019-352.
- Konecky B L, Noone D C, Cobb K M. 2019. The influence of competing hydroclimate processes on stable isotope ratios in tropical rainfall [J]. *Geophysical Research Letters*, 46(3): 1622–1633.
- Lawrence J R, Gedzelman S D, Gamache J, et al. 2002. Stable isotope ratios: Hurricane Olivia [J]. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 41(1): 67–82.
- Lawrence J R, Gedzelman S D. 1996. Low stable isotope ratios of tropical cyclone rains [J]. *Geophysical Research Letters*, 23(5): 527–530.
- Lee J E, Fung I. 2008. “Amount effect” of water isotopes and quantitative analysis of post-condensation processes [J]. *Hydrological Processes*, 22(1): 1–8.
- Liu J R, Song X F, Yuan G F, et al. 2010. Characteristics of  $\delta^{18}O$  in precipitation over Eastern Monsoon China and the water vapor sources [J]. *Chinese Science Bulletin*, 55(2): 200–211.
- Ohsawa S, Yusa Y. 2000. Isotopic characteristics of typhonic rainwater: typhoons No. 13 (1993) and No. 6 (1996) [J]. *Limnology*, 1(2): 143–149.

- Peng T R, Wang C H, Huang C C, et al. 2010. Stable isotopic characteristic of Taiwan's precipitation: a case study of western Pacific monsoon region [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 289(3/4): 357–366.
- Ruan J Y, Zhang H Y, Cai Z Y, et al. 2019. Regional controls on daily to interannual variations of precipitation isotope ratios in Southeast China: implications for paleomonsoon reconstruction [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 527: 115794. DOI: 10.1016/j.epsl.2019.115794.
- Thompson L G, Yao T D, Mosley-Thompson E, et al. 2000. A high-resolution millennial record of the south Asian monsoon from Himalayan ice cores [J]. *Science*, 289(5486): 1916–1920.
- Tian L, Yao T, Schuster P F, et al. 2003. Oxygen-18 concentrations in recent precipitation and ice cores on the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D9). DOI: 10.1029/2002jd002173.
- Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, et al. 2001. A high-resolution absolute-dated Late Pleistocene monsoon record from Hulu Cave, China [J]. *Science*, 294(5550): 2345–2348.
- Xie L H, Wei G J, Deng W F, et al. 2011. Daily  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta\text{D}$  of precipitations from 2007 to 2009 in Guangzhou, South China: Implications for changes of moisture sources [J]. *Journal of Hydrology*, 400(3/4): 477–489.
- Xu T, Sun X S, Hong H, et al. 2019. Stable isotope ratios of typhoon rains in Fuzhou, Southeast China, during 2013–2017 [J]. *Journal of Hydrology*, 570: 445–453.
- Zhang Q, Lai Y C, Gu X H, et al. 2018. Tropical cyclonic rainfall in China: changing properties, seasonality, and causes [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(9): 4476–4489.