

典型厄尔尼诺期间台风降水 $\delta^{18}\text{O}$ 变化分析: 以 2018 年 22 号台风“山竹”为例

杨云月¹, 许涛¹, 罗翠榆¹, 刘娟³, 姜修洋^{1,2}

1. 福建师范大学地理科学学院, 福建 福州 350007;

2. 福建师范大学地理研究所, 福建 福州 350007;

3. 广州大学大湾区环境研究院, 广东 广州 511400

摘要: 台风因其特殊的物理结构, 带来的降雨有别于一般的暴雨事件, 其降水稳定同位素组成与一般的大气降水事件也有较大的差异。本文根据 2018 年第 22 号台风“山竹”登陆前后广州、东莞两地气象资料和每小时间隔的降水样品收集, 分析了此次台风在两地的降水稳定同位素变化特征及其影响因素。台风“山竹”影响期间, 广州降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化范围为 -5.7‰ ~ 19.2‰ , 变化幅度达 13.5‰ , 其平均值为 -15.5‰ ; 东莞降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化范围为 -7.3‰ ~ 20.0‰ , 变化幅度达 12.7‰ , 平均值为 -14.8‰ ; 两地降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值均呈现为 3 个阶段倒 U 型的变化特征。受到蒸发作用的影响, 两地台风前端和尾端的降水氧同位素值相对偏正, 其中广州为 -5.7‰ ~ 9.3‰ , 东莞为 -7.3‰ ~ 8.1‰ 。两地台风中端的降水稳定同位素值极端偏负, $\delta^{18}\text{O}$ 值变化范围分别为 -16.0‰ ~ 19.2‰ (广州)和 -13.0‰ ~ 20.0‰ (东莞), 是该地区迄今为止已报道的最为偏负的降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值。分析认为, 在厄尔尼诺状态下生成的远源台风“山竹”强度增强, 其内部具有更强的对流和水汽循环过程, 导致降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值极端偏负。

关键词: 台风“山竹”; 降水 $\delta^{18}\text{O}$; 微物理过程; 厄尔尼诺

中图分类号: P732.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-5470(2020)04-0034-08

Analysis on the variation of typhoon precipitation $\delta^{18}\text{O}$ during typical El Niño event: A case study of Typhoon Mangkhut (2018)

YANG Yunyue¹, XU Tao¹, LUO Cuiyu¹, LIU Juan³, JIANG Xiuyang^{1,2}

1. School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China;

2. Institute of Geography, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China;

3. Institute of Environmental Research at Greater Bay, Guangzhou University, Guangzhou 511400, China

Abstract: The rainfall caused by typhoon is different from the other precipitation event due to its unique physical structure. The stable isotope composition of typhoon precipitation is also quite different from that of a general precipitation event. Based on meteorological data before and after the landing of Typhoon Mangkhut (2018) in Guangzhou and Dongguan and stable isotope data of precipitation at hourly resolution, we analyzed the characteristics of the stable isotope variation of the typhoon precipitation and its influencing factors. During the influence of Typhoon Mangkhut, the $\delta^{18}\text{O}$ value of precipitation in Guangzhou ranged from -5.7‰ ~ 19.2‰ , with a variation of 13.5‰ ; and the average value was -15.5‰ . The variation of $\delta^{18}\text{O}$ value in Dongguan was -7.3‰ ~ 20.0‰ , with a variation of 12.7‰ ; and the average was -14.8‰ . The variations of $\delta^{18}\text{O}$ value

收稿日期: 2019-08-31; 修订日期: 2019-10-28。姚衍桃编辑

基金项目: 国家自然科学基金项目(41672170); 福建省自然科学基金项目(2017J01654)

作者简介: 杨云月(1995—), 女, 四川省宜宾市人, 硕士研究生, 主要从事自然地理学研究。E-mail: yyunyue_1995@126.com

通信作者: 姜修洋。E-mail: xyjiang@fjnu.edu.cn

Received date: 2019-08-31; Revised date: 2019-10-28. Editor: YAO Yantao

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (41672170); Natural Science Foundation of Fujian Province (2017J01654)

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

of precipitation in the two places both showed the three-stage variation characteristics of inverted U-shape. Due to the influence of evaporation, the precipitation oxygen isotope values in the typhoon at the front and back were relatively positive in two places, of which Guangzhou was $(-5.7\text{‰} \sim -9.3\text{‰})$, and Dongguan was $(-7.3\text{‰} \sim -8.1\text{‰})$. The stable isotope values of precipitation in the typhoon central area of the two places were extremely negative, ranging from -16.0‰ to -19.2‰ (Guangzhou) and from -13.0‰ to -20.0‰ (Dongguan), which were the most negative precipitation $\delta^{18}\text{O}$ values reported in this region so far. According to the analysis, the generated distant typhoon intensity was enhanced during the El Niño. Thus, the stronger convection and water-vapor circulation in Typhoon Mangkhut (2018) led to extreme negative $\delta^{18}\text{O}$ value of its precipitation.

Key words: Typhoon Mangkhut (2018); $\delta^{18}\text{O}$ value of precipitation; microphysical process; El Niño

台风因具有特殊的物理结构、强降水过程及影响范围广等特点而区别于一般的降雨事件。一般认为, 台风降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值显著低于一般的夏季降水事件, 通常低 $4\text{‰} \sim 10\text{‰}$ (Lawrence et al, 1996; Ohsawa et al, 2000; Gedzelman et al, 2003), 这可能与台风的云层高度和深度、寿命及体积等因素有关 (Lawrence et al, 1998)。研究表明, 台风系统内部的微物理过程导致了降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值的显著偏负, 即“云雨区效应” (许涛等, 2018; Xu et al, 2019)。台风系统是一个高效的对流和循环系统, 其特点是螺旋雨带上具有极大的风力和有效降水 (Lutgens et al, 2013)。气流对流上升过程中, 水汽快速凝结降落, 强降水的高凝结效率导致降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值极端偏负 (Lawrence et al, 1996)。此外, 台风对流系统还存在微弱的下沉气流 (Houze et al, 2010), 氧同位素耗尽的水汽会随下沉气流向相对较低的云层移动, 同时水汽凝结释放的潜热会促进台风的发育, 来自海洋的水汽会不断补给台风系统 (Lutgens et al, 2013)。当来自海洋的水汽到达台风中心时, 向上移动成为上升气流, 氧同位素耗尽的水汽又会被带到随后的冷凝降水过程中, 造成降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏负 (Risi et al, 2010; Kurita, 2013; Lekshmy et al, 2014; Munksgaard et al, 2015; Xu et al, 2019)。另一方面, 台风的生成和活动与厄尔尼诺现象 (指秘鲁沿岸及赤道东太平洋地区海水温度异常持续偏高的现象, 一般用赤道东太平洋地区平均海表水温 (Sea Surface Temperature, SST) 的持续异常偏高作为标志) 有一定的关系 (Gray, 1984; 李崇银, 1985, 1987; Zhang et al, 2014)。厄尔尼诺年期间, 台风活动天数 (从编号开始到消亡的天数) 较多, 强度较强 (阮均石, 1989), 且台风多在西太平洋偏东、偏南等地生成 (Ramage et al, 1981; 何敏等, 1999)。台风降水较低的稳定同位素组成受诸多因素影响, 而台风的生成地、强度和活动天数又受到厄尔尼诺现象的影响, 目前关于在厄尔尼诺状态下生成的台风降水稳定同位素的特征及影响机制仍认识不清楚,

需要进一步探讨。此外, 了解台风降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化特征对于了解台风信号能否被古气候载体所记录和古气候重建都具有重要意义。

华南地区是我国受台风影响最频繁的地区之一。据统计, 1951—2015 年的 65 年间, 平均每年有 4.5 个台风影响到广东沿海地区 (陈劲等, 2018)。2018 年 2 月起, 太平洋厄尔尼诺关键区海温指数持续上涨, 9 月赤道中东太平洋海温已进入厄尔尼诺状态。较高的海水温度利于台风的生成, 且温度越高, 台风强度越强 (陈志伟, 2019)。因此, 中东太平洋的厄尔尼诺状态为超强台风的生成提供了有利条件。2018 年 9 月前, 太平洋生成的台风基本是偏西、偏北的弱台风, 如“云雀”、“安比”; 9 月后, 便生成了一系列偏东的远洋超强台风, 如“山竹”、“玉兔”、“蝴蝶”。这为研究厄尔尼诺状态下台风降水稳定同位素组成的特征以及影响因素提供了基础条件。

“山竹”是 2018 年 9 月赤道中东太平洋海温进入厄尔尼诺状态后首个影响我国的台风, 其强度和移动距离均远超过 2018 年 9 月之前的台风。本文以台风“山竹”为例, 通过对台风影响期间广州、东莞两地降水稳定同位素数据及气象数据的分析, 探究此次台风在厄尔尼诺状态下的降水稳定同位素变化特征以及影响因素。

1 台风概况

2018 年 2 月起, 太平洋厄尔尼诺关键区的海温不断升高, 6 月已超过正常值, 同年 9 月中国国家气候中心正式宣布赤道中东太平洋海温进入厄尔尼诺状态。“山竹” (Mangkhut, 2018 年第 22 号) 是赤道中东太平洋海温进入厄尔尼诺状态后首个影响我国的台风, 是 2018 年登陆我国的最强台风。台风“山竹”于 2018 年 9 月 7 日 20:00 (北京时间, 下同) 在西太平洋偏东的洋面上生成, 于 15 日 1:40 在菲律宾北部登陆, 登陆时为超强台风级 ($\sim 65\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$); 16 日 17:00 前后, 在广东江门沿海附近二次登陆, 登陆时为强台风级

($\sim 45 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), 中心最低气压 955hPa; 台风“山竹”登陆我国后继续向西北方向移动, 进入广西境内; 17 日 20:00, 因难以确定其环流中心, 中央气象台停止对其编号(图 1a)。

台风“山竹”在广东江门沿海附近登陆时中心风力达 14 级, 属强台风级。在登陆前 1h 左右, 广州与东莞两地均已处于 10 级风圈内(图 1b)。受台风“山竹”影响, 南海北部、广东大部沿海、珠江口有 11~13 级大风, 阵风 14~15 级; “山竹”中心经过的附近海面或地区风力可达 14~16 级, 阵风 17 级或 17 级以上。此外, 台风“山竹”给华南地区带来极大降水, 其中最大降水量地区为广东(王晓雅 等, 2019), 本文采样点广州和东莞降水量分别为 130mm 和 95mm(降水数据来源于中国天气网)。

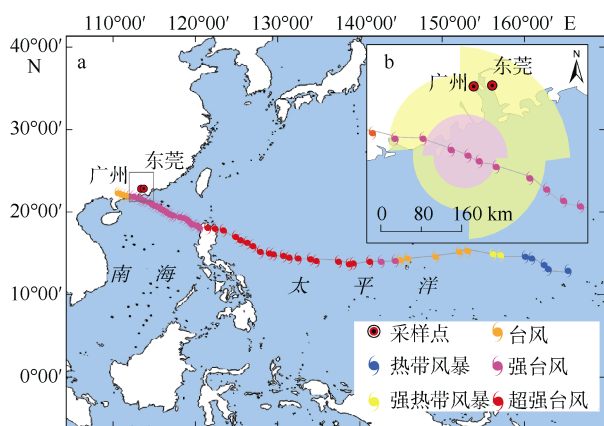


图 1 2018 年 22 号台风“山竹”路径

该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2016)2950 号的标准地图制作; 图 b 中黄色阴影代表 10 级风圈, 紫色阴影代表 12 级风圈

Fig. 1 The path of Typhoon Mangkhut in 2018. The yellow and purple shadings in (b) represent the wind radii of level ten and level twelve, respectively

2 研究区域概况、样品采集及测试

本研究采样点分别位于广州市广州大学番禺校区 ($113^{\circ}12'36''\text{E}$, $23^{\circ}01'12''\text{N}$) 和东莞市虎门镇 ($113^{\circ}24'00''\text{E}$, $22^{\circ}29'24''\text{N}$) 的开阔地面, 周围无遮蔽物遮挡。广州和东莞位于中国南部珠江下游, 毗邻中国南海北部, 属于东亚季风控制的亚热带季风气候区。

2018 年 9 月 16 至 17 日, 台风“山竹”影响广州和东莞两地期间, 以约 1h 间隔对降水样品进行采集, 样品均为采样时段内的混合雨水, 共收取样品 27 组, 其中广州 13 组, 东莞 14 组。采样时使用洁净的锥形瓶, 采用锡箔纸裹住瓶身, 瓶口插入漏斗并放置

一个乒乓球以减少蒸发。接取降水后立即倒入 50mL 和 2mL 的干净无色塑料平底离心管中, 装满并用封口膜密封以防止样品蒸发, 并置于 4°C 冰箱中冷藏保存以避免发生同位素分馏。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)同位素分析仪。 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 测试精度分别优于 $\pm 1\text{‰}$ 和 $\pm 0.1\text{‰}$ 。采样点的气象数据来源于中国天气网。文中 $\delta^{18}\text{O}$ 的平均值为加权平均结果, 公式如下:

$$\delta \bar{A} = \sum_{i=1}^n P_i \delta A_i / \sum_{i=1}^n P_i$$

式中, δA_i 和 P_i 分别表示降水稳定氧同位素值及相应时段的降水量。

3 结果

3.1 台风降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化特征

受台风“山竹”影响, 广州采样点于 9 月 16 日 10:00 左右开始降水, 并于 17 日 11:00 左右停止降水, 降水总量达 130mm, 分别占当月和全年降水的 85% 和 7%。台风降水过程中, 广州大气温度在 $24\sim 29^{\circ}\text{C}$ 之间; 除开始降水的 2h 和最后降水的 2h 外, 空气相对湿度均大于 90%。东莞采样点于 9 月 16 日 9:30 左右开始降水, 结束于 17 日凌晨 5:00 左右, 降水总量为 95mm, 温度变化与广州相近, 在 $23\sim 29^{\circ}\text{C}$ 之间; 空气相对湿度也与广州采样点类似, 除降水过程前后的 2h, 其他时段均超过 90%。

数据显示, 台风“山竹”期间, 广州和东莞两地降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值呈现出整体一致的 3 个阶段的倒 U 型变化特征(图 2)。其中, 前端降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值相对偏正, 广州采样点为 -9.3‰ , 东莞采样点为 -7.3‰ 。采样点开始降水后, 两地的相对湿度开始增加, 温度开始下降, 两地均仅下降 2°C 。随着台风的登陆, 降水量逐渐增加, 此阶段广州采样点共计降水 114mm, 最大降水量出现在 16 日 20:00 左右, 约为 32mm; 东莞采样点降水 94mm, 最大降水量出现在 16 日 15:00 左右, 约为 19mm; 两地在此阶段的降水均占整个台风降水的 90% 以上。此阶段两地降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值显著偏负, 广州采样点变化范围为 $-16.0\text{‰}\sim -19.2\text{‰}$, 变化幅度较小, 最负值出现在 16 日 18:00 左右; 东莞采样点为 $-13.0\text{‰}\sim -20.0\text{‰}$, 变化幅度超过广州采样点, 最负值出现在 16 日 13:50 左右, 随后开始偏正, 但仍远负于前端降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值, 于 16 日 21:00 左右又转为负偏趋势, 23:00 左右开始偏正。在此阶段, 两地的空气相对湿度较大且保持稳定, 温度在

24~26℃之间。随着台风的偏离,降水量逐渐减少,降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏正,广州采样点为-5.7‰,东莞采样点为-8.1‰。台风“山竹”期间,广州和东莞两地降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值的倒 U 型变化特征与前人研究结果一致(孙晓双等, 2016; 许涛等, 2018; Xu et al, 2019)。此外,广州和东莞两地降水的 $\delta^2\text{H}$ 值变化与其对应的 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化特征一致,同样表现为 3 个阶段的倒 U 型特征:前端和尾端相对偏正,广州采样点 $\delta^2\text{H}$ 值的变化范围为 -72.1‰~-38.6‰,东莞采样点为 -58.5‰~-64.7‰;中端降水 $\delta^2\text{H}$ 值极端偏负,最负值达-146.9‰(图 2)。

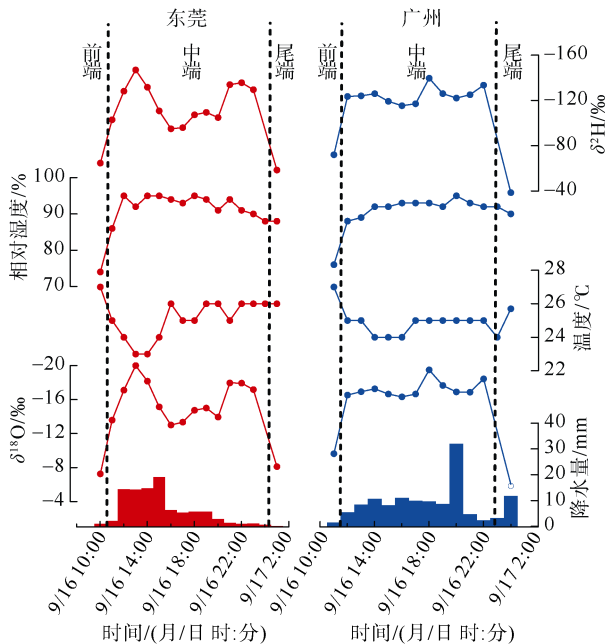


图 2 台风“山竹”期间广州及东莞采样记录

Fig. 2 Sampling records in Guangzhou and Dongguan during Typhoon Mangkhut (2018)

台风“山竹”在广州和东莞的降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值最为显著的特征为中端极端偏负,广州采样点最偏负值达 -19.2‰,东莞采样点最偏负值达 -20.0‰,远低于广州雨季降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值的加权平均值 -7.9‰。此外,台风“山竹”在广州、东莞两地的降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值也较其他登陆或影响广州及相邻地区的台风降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏负(表 1)。2004 年 7 月台风“圆规”以及“南川”在广州采样点的最负降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值分别达 -8.2‰和 -13.1‰;2007 年台风“帕布”在影响广州期间带来大量降水,记录到最负的降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 -14.1‰(尹焕玲等, 2012)。2007—2009 年,在广州采集的 7 个台风事件样品中,最负的降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值在 -11.7‰~-16.4‰之间(Xie et al, 2011)。此外,2013—2017 年, Xu 等(2019)监测了 8 个影响福州的台风,这 8 个台风中最负的

降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值范围在 -11.4‰~-17.9‰之间。综上可见,台风“山竹”的降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值是目前已报道的华南地区所观测到的台风降水中最负的。

表 1 台风“山竹”与其他台风降水最负 $\delta^{18}\text{O}$ 值的比较

Tab. 1 Comparison of the most negative precipitation $\delta^{18}\text{O}$ values of Typhoon Mangkhut (2018) and other typhoons

年份	台风名称	最负 $\delta^{18}\text{O}$ 值/‰	采样地点
2018	山竹	-19.2	广州
2018	山竹	-20.0	东莞
2004	圆规	-8.2	广州
2004	南川	-13.1	广州
2007	帕布	-14.1	广州
2007—2009	--	-17.7~-16.4	广州
2013—2017	--	-11.4~-17.9	福州

注: “--”表示多个台风。

3.2 台风大气降水线方程

台风“山竹”降水 $\delta^2\text{H}$ 值和 $\delta^{18}\text{O}$ 值呈线性关系,广州和东莞的线性方程分别为 $\delta^2\text{H}=7.41\delta^{18}\text{O}+0.83$ ($R^2=0.99$)(Mangkhut-广州)和 $\delta^2\text{H}=7.04\delta^{18}\text{O}-5.96$ ($R^2=0.98$)(Mangkhut-东莞)(图 3)。两地大气降水线方程的斜率均略低于全球大气降水线的斜率 8(Craig, 1961)。台风“山竹”在广州和东莞的降水线方程也均偏离广州大气降水线方程 $\delta^2\text{H}=8.46\delta^{18}\text{O}+15$ ($R^2=0.93$)(LMWL-广州)(Xie et al, 2011)。广州和东莞两地的台风降水同位素值大都位于大气降水线

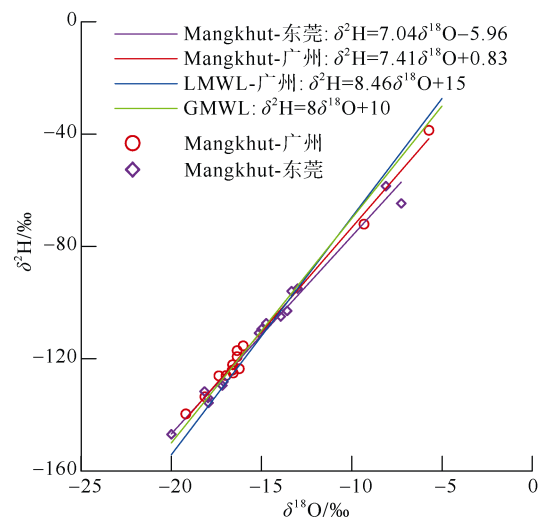


图 3 台风“山竹”降水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的线性关系

GMWL 为全球大气降水线方程(Global Meteoric Water Line), 由 Craig(1961)提出

Fig. 3 Relationship between $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ in Typhoon Mangkhut (2018) precipitation. GMWL is the Global Meteoric Water Line proposed by Craig (1961)

方程的左下方, 仅有少数几个降水同位素值位于降水线方程的右上方, 说明此次台风的降水主要集中在台风的中端, 且同位素值显著偏负。台风期间, 广州和东莞大气降水线较小的斜率主要是受台风前端和尾端降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值所影响, 此两阶段 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏正, 其降水经历了一定程度的蒸发, 导致了同位素的非平衡分馏(许涛 等, 2018)。

4 讨论

4.1 过量氘及台风降水的水汽来源

过量氘(d -excess)被定义为 $d = \delta\text{D} - 8\delta^{18}\text{O}$, 一般与降水的水汽来源相联系(Dansgaard, 1964), 是追踪水汽来源的重要参数(田立德 等, 2001)。台风“山竹”影响期间, 广州采样点 d 值变化范围介于 2.5‰~13.9‰, 平均值为 9.9‰; 东莞采样点 d 值变化范围为 6.6‰~10.6‰, 平均值为 8.3‰。广州和东莞两地的 d 值略低于全球平均 d 值(10‰), 也低于广州市多年大气降水平均 d 值(11.42‰)(Xie et al, 2011)。根据 Dansgaard(1964)的研究, 水汽源在暖湿条件下, 其降水 d 值较低。广州和东莞两地较低的 d 值说明台风“山竹”降水主要受到海洋暖湿气团的影响。

不同水汽来源的降水同位素变化差异较大(Tian et al, 2001; Yu et al, 2014; Wu et al, 2015), 中国南方地区夏季降水主要有西南水汽通道、南海水汽通道以及东南水汽通道 3 种水汽来源(柳鉴容 等, 2007)。来自西南水汽通道的水汽团降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏

负, 来自南海及东南水汽通道的水汽团降水 $\delta^{18}\text{O}$ 偏正(谭明 等, 2010)。为更好地理解台风“山竹”的水汽源, 利用 HYSPLIT 轨迹模型模拟了广州采样点在台风影响期间不同时刻的水汽轨迹, 模拟的时刻分别是 9 月 16 日 10:00、16:00 及 9 月 17 日 6:00。台风前端 AGL(Above Ground Level)500m 处有明显来自于大陆局地的水汽(图 4a), 同时又受到蒸发效应的影响, 降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值相对偏正(广州为-9.2‰, 东莞为-7.3‰), 与广州多年雨季平均降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值(-7.9‰)相差不大(Xie et al, 2011)。台风登陆后, 台风中端降水的水汽补给主要来源于南海海域(图 4b)。前文提到, 来自南海及东南水汽通道的水汽团降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏正, 但是在此阶段两地的台风降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值极端偏负(最负值达-20‰), 远负于广州多年雨季平均降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值(-7.9‰)(Xie et al, 2011)。随台风远离采样点, 台风尾端降水的水汽补给同样主要来自南海海域(图 4c), 但其 $\delta^{18}\text{O}$ 值相对偏正(广州为-5.7‰, 东莞为-8.1‰)。前人在对来自南海及太平洋的台风“纳沙”、“海棠”的降水同位素特征研究时发现, 二者结构特征相似, 且降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的最负值也较为接近(分别为-15.5‰和-17‰), 说明不同的生成源地和水汽通道对台风降水稳定同位素组成影响不大(蔡健榕 等, 2019)。此外, 大西洋飓风降水同位素组成的研究也表明水汽来源不是造成飓风降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值极端偏负的主要因素(Konecky et al, 2019)。综上可见, 水汽来源不是导致台风“山竹”降水氧同位素极端偏负的主要原因。

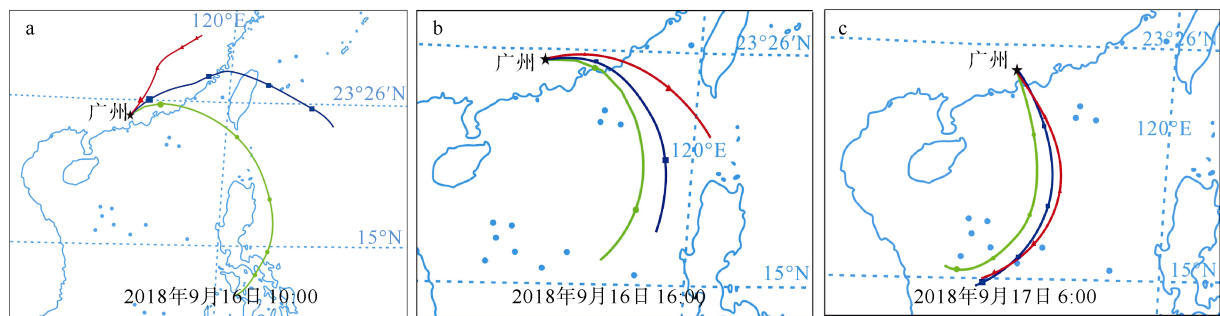


图 4 台风“山竹”期间广州市的水汽轨迹

该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2016)2950 号的标准地图制作。图中红色、蓝色、绿色线条分别表示 AGL500m、AGL1000m、AGL1500m 的水汽轨迹

Fig. 4 Vapor transport trajectories in Guangzhou during Typhoon Mangkhut (2018). The red, blue, and green lines represent the water vapor trajectories of AGL500m, AGL1000m, and AGL1500m, respectively

4.2 台风“山竹”降水氧同位素极端偏负的影响因素

前人研究表明, 大气降水稳定同位素受“同位素效应”影响显著(Dansgaard, 1964)。由于同位素分

馏主要受控于相变过程中的温度, 所以“温度效应”尤其突出, 特别在中高纬内陆地区(Dansgaard et al, 1964; Fricke et al, 1999; Kohn et al, 2005)。但是在沿海地区或海洋环境中, 降水量则是影响降水同位素

组成的主要因素(Dansgaard, 1964; 柳鉴容 等, 2009; Zhang et al, 2016)。台风“山竹”在降水过程中, 东莞和广州两地温度基本一致, 并且台风在移动过程中对流剧烈, 风力强劲, 因此认为台风降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值受局地温度的影响有限。广州、东莞两地台风降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值与温度之间的相关性较低($R^2_{\text{广州}}=0.39$, $n=13$; $R^2_{\text{东莞}}=0.42$, $n=14$), 也说明局地温度不是影响台风降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化的主要原因。另外, 过去有研究表明低纬沿海地区“雨量效应”显著(Dansgaard, 1964; Araguás-Araguás et al, 1998; 柳鉴容 等, 2009), 但这些研究多是基于年际或季节尺度; 对于短时间尺度(日尺度和事件尺度)的降水事件, 降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值与降水量之间的相关性较弱甚至不相关(Lawrence et al, 2004; Kurita et al, 2009)。广州、东莞两地台风“山竹”降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值与降水量之间的相关性表明, 二者之间不存在显著的相关关系($R^2_{\text{东莞}}=0.201$, $n=15$; $R^2_{\text{广州}}=0.006$, $n=12$); 同时, 从图 2 也可以看出, 采样时段内的最大降雨量并不对应最负的降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值。因此, 采样期间局地的气象参数不是造成台风降水氧稳定同位素组成极端偏负的主要原因。

前人研究发现, 在珠江三角洲地区, 降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值在年际变化上与 NINO3 区海水温度存在显著的相关性, 即海水温度会对降水稳定同位素组成产生影响(薛积彬 等, 2007)。厄尔尼诺状态会对台风的生成与活动造成极大影响。厄尔尼诺年间, 台风活动天数较长, 强度较强(阮均石, 1989; 王文秀 等, 2018), 且台风会在西太平洋偏东、偏南等地生成(Ramage et al, 1981; 何敏 等, 1999)。2018 年 2 月起, 太平洋厄尔尼诺关键区海温指数持续上涨, NINO3 区海温指数在 6 月已突破正常值(Japan Meteorological Agency, <http://www.jma.go.jp/jma/index.html>)。9 月, 中国国家气候中心宣布, 赤道中东太平洋海温已进入厄尔尼诺状态。台风“山竹”生成于西太平洋偏东区域(165°E , 13°N)附近, 距离 NINO 关键区较近, 距离登陆地广州约 6000km, 远

超过前文提及影响到广州的台风, 如台风“帕布”、“圆规”、“南川”等, 也远超前文所提及的在华南地区登陆的台风, 如台风“杜鹃”等。因此, 在典型厄尔尼诺状态下, 台风“山竹”较 9 月前生成的台风移动距离明显增加, 且强度明显增强。研究发现, 台风中端降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值极端偏负主要是受到台风系统内部微物理过程的影响, 即“云雨区效应”使得台风降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值极端偏负(Xu et al, 2019)。在厄尔尼诺状态下, 来自远洋的台风“山竹”的风力级别巨大, 中心最大风力达 17 级以上, 更强的强度及更长的移动距离使得在台风云雨区(云墙)内的对流和循环过程更强, 水汽的凝结效率更高, 这有可能是导致台风“山竹”降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值较前文所提及的其它台风降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值更为偏负的主要原因。此外, 有研究表明水汽在向内陆移动过程中会不断地形成降水, 较重的同位素会优先降落, 剩余水汽中的 ^{18}O 会越来越少(Siegenthaler, 1979), 这也同样是导致台风“山竹”降水较其他台风降水具有更负的同位素组成的可能原因。

5 结论

通过对台风“山竹”期间广州、东莞两地的降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值以及相关气象资料的分析, 主要得出以下结论:

- 1) 台风“山竹”期间, 广州、东莞两地降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化范围为 -20.0‰ — -5.7‰ , 变幅达 14.3‰ , 3 个阶段整体呈倒 U 型的变化特征。
- 2) 台风“山竹”期间, 广州、东莞两地的降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值与 $\delta^2\text{H}$ 值均呈线性变化, 其大气降水线方程分别为 $\delta^2\text{H}=7.41\delta^{18}\text{O}+0.83$ ($R^2=0.99$) 和 $\delta^2\text{H}=7.04\delta^{18}\text{O}-5.96$ ($R^2=0.98$)。
- 3) 台风“山竹”期间, 广州、东莞两地的降水出现极端偏负的 $\delta^{18}\text{O}$ 值(广州 -19.2‰ , 东莞 -20.0‰)。在典型厄尔尼诺状态下, 台风“山竹”内部更强的对流和水汽循环过程有可能是造成降水氧同位素组成呈极端偏负的原因。

参考文献 References

- 蔡健榕, 许涛, 姜修洋, 2019. 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, 14(2): 34-40. CAI JIANRONG, XU TAO, JIANG XIUYANG, 2019. Characteristics and influence factors of $\delta^{18}\text{O}$ in the precipitation of binary typhoon “Nesat” and “Haitang” at Fuzhou[J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 14(2): 34-40 (in Chinese with English abstract).
- 陈劲, 杨玺, 汤振鹏, 2018. 登陆广东的台风强度和路径特征

- 分析[J]. 气象研究与应用, 39(3): 37-39+56. CHEN JIN, YANG XI, TANG ZHENPENG, 2018. The intensity and path characteristics analysis of the typhoons landing in Guangdong[J]. Journal of Meteorological Research and Application, 39(3): 37-39, 56 (in Chinese with English abstract).
- 陈志伟, 2019. 西太热带气旋的气候特征及对海洋热状态响应机理的研究[D]. 上海: 上海师范大学: 1-165. CHEN

- ZHIWEI, 2019. Climatic characteristics of the Northwest Pacific tropical cyclone and its response mechanism with the thermal status of ocean[D]. Shanghai: Shanghai Normal University: 1–165 (in Chinese with English abstract).
- 何敏, 宋文玲, 陈兴芳, 1999. 厄尔尼诺和反厄尔尼诺事件与西北太平洋台风活动[J]. 热带气象学报, (1): 18–26 (in Chinese).
- 李崇银, 1985. 厄尼诺与西太平洋台风活动[J]. 科学通报, (14): 1087–1089 (in Chinese).
- 李崇银, 1987. 厄·尼诺影响西太平洋台风活动的研究[J]. 气象学报, 45(2): 229–236. LI CHONGYIN, 1987. A study on the influence of El Niño upon typhoon action over western pacific[J]. Acta Meteorologica Sinica, 45(2): 229–236 (in Chinese with English Abstract).
- 柳鉴容, 宋献方, 袁国富, 等, 2007. 我国南部夏季季风降水水汽来源的稳定同位素证据[J]. 自然资源学报, 22(6): 1004–1012. LIU JIANRONG, SONG XIANFANG, YUAN GUOFU, et al, 2007. Stable isotope evidence of vapor sources in summer monsoonal precipitation over southern China[J]. Journal of Natural Resources, 22(6): 1004–1012 (in Chinese with English abstract).
- 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 JIANRONG, SONG XIANFANG, YUAN GUOFU, 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 (in Chinese).
- 阮均石, 1989. 1982—1983 年强厄尔尼诺现象与西北太平洋台风活动的初步分析[J]. 海洋通报, (3): 21–28 (in Chinese).
- 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 XIAOSHUANG, WANG XIAOYAN, ZHAI SHUIJING, 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 (in Chinese with English abstract).
- 谭明, 南素兰, 2010. 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, 30(3): 620–622. TAN MING, NAN SULAN, 2010. Primary investigation on interannual changes in the circulation effect of precipitation oxygen isotopes in monsoon China[J]. Quaternary Sciences, 30(3): 620–622 (in Chinese).
- 田立德, 姚檀栋, 孙维贞, 等, 2001. 青藏高原南北降水中 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 关系及水汽循环[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 31(3): 214–220 (in Chinese).
- 王文秀, 林燕丹, 许桂旋, 等, 2018. 1951~2016 年厄尔尼诺/拉尼娜事件对登陆华南地区台风的影响[J]. 亚热带水土保持, 30(2): 13–19. WANG WENXIU, LIN YANDAN, XU GUIXUAN, et al, 2018. Impact of El Niño or La Niña on the typhoon landed in south China from 1951 to 2016[J]. Subtropical Soil and Water Conservation, 30(2): 13–19 (in Chinese with English abstract).
- 王晓雅, 蒋卫国, 邓越, 等, 2019. “山竹”台风影响地区的小时降雨动态变化及危险性动态评估[J]. 灾害学, 34(3): 202–208. WANG XIAOYA, JIANG WEIGUO, DENG YUE, et al, 2019. Hourly rainfall dynamics and hazard dynamic assessment of Mangkhut Typhoon-affected areas[J]. Journal of Catastrophology, 34(3): 202–208 (in Chinese with English abstract).
- 许涛, 蔡健榕, 孙晓双, 等, 2018. 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, 33(12): 184–194. XU TAO, CAI JIANRONG, SUN XIAOSHUANG, et al, 2018. A tentative study of “Cloudy and Rainy Area Effect” of the $\delta^{18}\text{O}$ in the precipitation of typhoon “Dujuan”[J]. Journal of Natural Resources, 33(12): 184–194 (in Chinese with English abstract).
- 薛积彬, 钟巍, 赵引娟, 2007. 珠江三角洲地区降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化特征及与 ENSO 的关系[J]. 地理科学, 27(6): 825–830. XUE JIBIN, ZHONG WEI, ZHAO YINJUAN, 2007. Variations of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation in the Zhujiang (Pearl) river delta and its relationship with ENSO event[J]. Scientia Geographica Sinica, 27(6): 825–830 (in Chinese with English abstract).
- 尹焕玲, 钟巍, 马巧红, 等, 2012. 极端天气事件下广州市大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化特征研究[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 44(4): 121–127. YIN HUANLING, ZHONG WEI, MA QIAOHONG, et al, 2012. Variational characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation in Guangzhou under extreme weather events[J]. Journal of South China Normal University (Natural Science Edition), 44(4): 121–127 (in Chinese with English abstract).
- ARAGUÁS-ARAGUÁS L, FROELICH K, ROZANSKI K, 1998. Stable isotope composition of precipitation over southeast Asia[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 103(D22): 28721–28742.
- 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.
- FRICKE H C, O’NEIL J R, 1999. The correlation between $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ratios of meteoric water and surface temperature: its use in investigating terrestrial climate change over geologic time[J]. Earth and Planetary Science Letters, 170(3): 181–196.
- GRAY W M, 1984. Atlantic seasonal hurricane frequency. Part I: El Niño and 30 mb quasi-biennial oscillation influences[J]. Monthly Weather Review, 112(9): 1649–1668.
- GEDZELMAN S, LAWRENCE J, GAMACHE J, et al, 2003. Probing hurricanes with stable isotopes of rain and water vapor[J]. Monthly Weather Review, 131(6): 1112–1127.
- HOUZE R A, 2010. Clouds in tropical cyclones[J]. Monthly Weather Review, 138(2): 293–344.
- KOHN M J, WELKER J M, 2005. On the temperature correlation of $\delta^{18}\text{O}$ in modern precipitation[J]. Earth and Planetary Science Letters, 231(1–2): 87–96.
- KONECKY B L, NOONE D C, CONN K M, 2019. The influence of competing hydroclimate processes on stable isotope ratios in tropical rainfall[J]. Geophysical Research Letters, 46(3): 1622–1633.
- KURITA N, 2013. Water isotopic variability in response to mesoscale convective system over the tropical ocean[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 118(18): 1622–1633.

- 10376–10390.
- KURITA N, ICHIYANAGI K, MATSUMOTO J, et al, 2009. The relationship between the isotopic content of precipitation and the precipitation amount in tropical regions[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 102(3): 113–122.
- LAWRENCE J R, GEDZELMAN S D, 1996. Low stable isotope ratios of tropical cyclone rains[J]. *Geophysical Research Letters*, (5)23: 527–530.
- LAWRENCE J R, GEDZELMAN S D, DEXHEIMER D, et al, 2004. Stable isotopic composition of water vapor in the tropics[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 109(D6): D06115.
- LAWRENCE J R, GEDZELMAN S D, ZHANG XIAOPING, et al, 1998. Stable isotope ratios of rain and vapor in 1995 hurricanes[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 103(D10): 11381–11400.
- LEKSHMY P R, MIDHUN M, RAMESH R, et al, 2014. ^{18}O depletion in monsoon rain relates to large scale organized convection rather than the amount of rainfall[J]. *Scientific Reports*, 4: 5661.
- LUTGENS F K, TARBUCK E J, TASA D G, 2012. *The Atmosphere: An introduction to meteorology* [M]. 12th ed. New York: Prentice Hall, 302–325.
- MUNKSGAARD N C, ZWART C, KURITA N, et al, 2015. Stable isotope anatomy of tropical cyclone Ita, North-Eastern Australia, April 2014[J]. *PLoS One*, 10(3): e0119728.
- OHSAWA S, YUSA Y, 2000. Isotopic characteristics of typhonic rainwater: typhoons no.13 (1993) and no.6 (1996)[J]. *Limnology*, 1(2): 143–149.
- RAMAGE C S, HORI A M, 1981. Meteorological aspects of El Niño[J]. *Monthly Weather Review*, 109(9): 1827–1835.
- RISI C, BONY S, VIMEUX F, et al, 2010. Evolution of the stable water isotopic composition of the rain sampled along Sahelian squall lines[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 136(S1): 227–242.
- SIEGENTHALER U, 1979. Stable hydrogen and oxygen isotopes in the water cycle[M] //JÄGER E, HUNZIKER J C. *Lectures in Isotope Geology*. Berlin: Springer: 264–273.
- TIAN LIDE, YAO TANDONG, SUN WEUZHEN, et al, 2001. Relationship between δD and $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation on north and south of the Tibetan Plateau and moisture recycling[J]. *Science in China Series D Earth Sciences*, 44(9): 789–796.
- WU HUAUWU, ZHANG XINPING, LI XIAOYAN, et al, 2015. Seasonal variations of deuterium and oxygen-18 isotopes and their response to moisture source for precipitation events in the subtropical monsoon region[J]. *Hydrological Processes*, 29(1): 90–102.
- XIE LUHUA, WEI GANGJIAN, DENG WENFENG, et al, 2011. 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*, 400(3–4): 477–489.
- XU TAO, SUN XIAOSHUANG, HONG HUI, et al, 2019. Stable isotope ratios of typhoon rains in Fuzhou, Southeast China, during 2013–2017[J]. *Journal of Hydrology*, 570: 445–453.
- YU WUSHENG, YAO TANDONG, LEWIS S, et al, 2014. Stable oxygen isotope differences between the areas to the north and south of Qinling mountains in China reveal different moisture sources[J]. *International Journal of Climatology*, 34(6): 1760–1772.
- ZHANG HAN, GUAN YUPING, 2014. Impacts of four types of ENSO events on tropical cyclones making landfall over mainland China based on three Best-track datasets[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 31(1): 154–164.
- ZHANG MINGJUN, WANG SHENGJIE, 2016. A review of precipitation isotope studies in China: Basic pattern and hydrological process[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 26(7): 921–938.