

甘秋莹,范伶俐,陈汉森,等. 湛江地区汛期降水稳定同位素的变化与水汽来源的关系[J].海洋气象学报,2021,41(1): 129-137.

GAN Qiuying, FAN Lingli, CHEN Hansen, et al. Relationship between variation of stable isotopes in precipitation and water vapor source of Zhanjiang in flood season[J]. Journal of Marine Meteorology, 2021, 41(1): 129-137. DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2021.01.013. (in Chinese)

湛江地区汛期降水稳定同位素的变化与水汽来源的关系

甘秋莹,范伶俐,陈汉森,李丽芳,李俊宇,郑侦明

(广东海洋大学海洋与气象学院,广东 湛江 524088)

摘要:以湛江降水为研究对象,利用收集的2019年汛期68个降水样品及同期气象资料,采用同位素示踪技术,结合HYSPLIT(Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory)模式溯源,分析了湛江地区汛期降水稳定同位素的变化与水汽源地的关系,并对5个代表性的降水个例进行了诊断分析。结果表明:1)湛江地区汛期局部降水线为 $\delta D = 8.023^{18}O - 0.7037$, $R^2 = 0.954$, $n = 68$;前汛期季风带来西太平洋的水汽, ^{18}O 含量丰富;后汛期降雨主要取决于局部大气环流,一定程度受云下二次分馏影响, δD 和 ^{18}O 偏低。2)前汛期西南季风爆发前,湛江降水的水汽主要源于副热带高压外围东南气流输送的西太平洋水汽,西南季风爆发后,南海、孟加拉湾为其水汽源地;后汛期热带系统带来的降水,南海、孟加拉湾为主要水汽源地;非热带系统带来的降水,孟加拉湾为主要水汽源地。

关键词:降水;稳定同位素;水汽来源;HYSPLIT轨迹模式;湛江

中图分类号: P426.6;X142 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2021)01-0129-09

DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2021.01.013

Relationship between variation of stable isotopes in precipitation and water vapor source of Zhanjiang in flood season

GAN Qiuying, FAN Lingli, CHEN Hansen, LI Lifang, LI Junyu, ZHENG Zhenming

(School of Ocean and Meteorology, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China)

Abstract The precipitation of Zhanjiang is analyzed through 68 precipitation samples and observational weather data collected in the flood season of 2019. The isotope tracing method and the Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT) model are used to analyze the relationship between the variations of stable isotopes in precipitation and the water vapor source of Zhanjiang in the flood season. Besides, 5 representative precipitation cases are analyzed to find out the water vapor source of Zhanjiang in the flood season. The results are shown below. 1) The local meteoric water line is $\delta D = 8.023^{18}O - 0.7037$ ($R^2 = 0.954$, $n = 68$) during the flood season in Zhanjiang; the monsoon in the early flood season brings water vapor from the western Pacific and the content of ^{18}O is abundant; the rainfall in the latter flood season, which is mainly caused by local atmospheric circulation, is affected to some extent by second evaporation under the cloud, and the content of δD and ^{18}O is low. 2) Before the onset of the southwest monsoon in the early flood season, the southeast airflow around the subtropical high brings the water vapor of the western Pacific to Zhanjiang; when the southwest monsoon erupts, the South China Sea

收稿日期:2020-04-04;修订日期:2020-06-19

基金项目:国家重点研发计划“重大自然灾害监测预警与防范”重点专项(2018YFC1506002);广东海洋大学大学生省级创新训练型项目(CXXL2019044)

第一作者:甘秋莹,女,硕士研究生,主要研究方向为海气相互作用,1661589633@qq.com。

通信作者:范伶俐,女,博士,教授,主要研究方向为海气相互作用,fanglingli@126.com。

and the Bay of Bengal become its water vapor sources; for the precipitation caused by tropical systems in the latter flood season, the South China Sea and the Bay of Bengal are the main water vapor sources of Zhanjiang; while for the precipitation caused by non-tropical systems, the Bay of Bengal is the main water vapor source.

Key words precipitation; stable isotope; water vapor source; HYSPLIT model; Zhanjiang

引言

大气降水是陆地水资源的重要来源,其稳定同位素 $D(^2H)$ 和 ^{18}O 作为天然的示踪剂,一直以来是水文学、水文气象学及环境化学等学科的研究热点^[1-4]。降水稳定同位素 δD 和 $\delta^{18}O$ 之间的线性关系可表示为大气降水线,大气降水线反映一个地区的自然地理和气象条件,常用于分析历史气候变迁及水汽来源等问题^[5-6]。1961年,CRAIG^[7]根据全球400多个降水、河水、湖水样品定义了全球大气降水线(global meteoric water line, GMWL) $\delta D = 8\delta^{18}O + 10$,后修定为: $\delta D = 8.17\delta^{18}O + 10.35$ ^[8-9]。特定区域大气降水氢氧同位素组分之间的线性相关关系称局地大气降水线^[7]。地区的降雨过程受到动力分馏作用^[10]等影响,地区降水线会与大气降水线呈现截距和斜率上的差异。同时,氢氧同位素组分受到传输过程差异以及环境因子等诸多因素的影响而出现差异,如温度效应^[11-14]、降水量效应^[8,15-16]等,因此,可以通过分析降水同位素特征判定水汽的来源。

HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) 气流轨迹模式是广泛使用的气团溯源模型之一^[17-18],该模式基于拉格朗日方法对气块轨迹的模拟进行计算,气块随着三维风场运动,运动轨迹可视为气块在时间和空间上的位置矢量积分,通过对后向轨迹进行分析,可确定气团的来源^[19-21]。

降水是大气中水的相变过程。某一地区降水的形成,从天气学角度分析有两个条件。首先是水汽由源地水平输送到降水地区,这是水汽条件。其次是水汽在降水地区辐合上升,在上升中绝热膨胀冷却凝结成云,这是动力条件^[22-24]。

湛江地区降水多发生在每年4—9月(华南汛期)且伴有热带风暴影响,年降水量近1800 mm^[25-26],暴雨等极端天气容易形成洪涝灾害,造成人员伤亡和财产损失。目前的研究^[27-29]表明,南海和孟加拉湾是湛江地区的重要水汽源。了解水汽来源对湛江地区降水预报,尤其是对前汛期旱涝预

判具有重要指示作用。本文基于湛江地区2019年5—10月收集的68个大气降水的氢氧稳定同位素(δD 与 $\delta^{18}O$)样品实测值,结合研究区域同期气象观测资料数据,利用HYSPLIT轨迹模式及天气学分析方法深入探讨了该地区降水的水汽来源,研究结果可以为进一步完善全国乃至全球的降水同位素监测网络提供科学依据和参考。

1 研究区概况

湛江市($20^{\circ}13' \sim 21^{\circ}57'N$, $109^{\circ}40' \sim 110^{\circ}58'E$)隶属广东省,多年平均气温 $23.5^{\circ}C$,年降水量超1500 mm^[25]。该地区雨热同期,属亚热带季风气候;因其气候的不稳定性,也属于“典型气候脆弱区”^[25-26]。其降水主要集中在汛期,汛期可分为前汛期(4—6月)和后汛期(7—9月);前汛期降水主要受锋面低槽系统影响^[29],后汛期降水主要以热带气旋、热带辐合带等热带系统降水为主。陈杨瑞雪^[30]根据时间序列长度为1979—2014年的ERA-interim再分析数据分析表明:前汛期在南海夏季风爆发前,沿西太平洋副热带高压外围的东南向气流是华南的重要水汽通道,使得太平洋地区在此阶段为重要的水汽贡献区,贡献了21%的水汽;前汛期在南海夏季风爆发后,越赤道气流的建立增强了来自西南方向的水汽输送,使得源于孟加拉湾和印度洋的水汽贡献显著增加。后汛期,西向的水汽通道搭建以后,湛江地区水汽主要由西南向水汽通道带来孟加拉湾的水汽;台风等热带系统带来南海及西北太平洋的水汽^[22,30]。

2 研究方法

2.1 降水样品的采集与同位素测定

2019年5—10月,在广东海洋大学科技楼顶放置雨量筒,每次降雨过程结束后,立即用采样瓶收集降水样品,迅速拧紧盖子密封,放进实验室 $-20^{\circ}C$ 的恒温冰柜保存,共收集68个降水样品,通过广东海洋大学陆架及深远海气候、资源与环境广东省高等学校重点实验室的253 Plus质谱分析仪器进行同位素的测定(δD 的测定精度为 $\pm 0.2\%$, $\delta^{18}O$ 的测

定精度为 $\pm 0.02\%$), 最终得到降水样品中的 δD 和 $\delta^{18}O$ 的数据。同期的降水量、日平均气温、日照的观测数据来自湛江市地面气象观测站。

2.2 HYSPLIT 气团轨迹模型

大气气团传输过程采用美国 NOAA 空气资源实验室开发的拉格朗日积分轨迹模型 (HYSPLIT) (https://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT_traj.php) 进行后向轨迹模拟^[15,31-32], 该轨迹模型被用于追踪降水降雪过程的水汽来源^[17-18]。模拟区域选取湛江地区 ($21.3^{\circ}N, 110.4^{\circ}E$), 4—6 月初始场空间分辨率 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$, 7—9 月初始场空间分辨率 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。水汽输送主要在对流层低层, 且华南汛期水汽含量的 85% 集中于 700 hPa 以下的大气层当中^[33], 因此垂直高度上选取 1 500 m 作为模拟的初始高度。模拟空气块后向轨迹追踪 5 d 的三维轨迹, 每 6 h 从同一位置重新开始计算一条轨迹。

2.3 降水个例物理量场分析

根据湛江汛期不同时期的水汽输送特征, 选取汛期降水的 5 个代表性个例, 利用欧洲中期天气预报中心 (European Center for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) 的再分析资料 (分辨率 $0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$) 和实况降水观测资料, 从水汽条件和动力条件两个方面探讨湛江地区 2019 年汛期降水的水汽来源和成因。850 hPa 水汽通量及风场合成图可以估计水汽的来源; 850 hPa 水汽通量散度图, 可以判断湛江地区是否处于水汽通量辐合区, 并结合垂直运动寻找降水的动力条件^[23]。

2.4 数据处理与分析

运用 Grapher12 制图软件作图得到局地大气降水线方程, 利用 SPSS12.0 统计分析软件进行变量的相关性分析, 得到降水量与温度以及日照时长和 $\delta^{18}O$ 之间的相关关系, 运行 HYSPLIT 模型开展气团传输后向轨迹的模拟, 用 Grads 绘图软件将汛期降水个例的物理量场进行可视化处理。

3 结果与分析

3.1 大气降水 δD 和 $\delta^{18}O$ 的特征

在 δD 和 $\delta^{18}O$ 的关系图中, 表示降水 δD 和 $\delta^{18}O$ 关系的直线为大气水线 (meteoric water line, MWL)。除了全球大气水线 (GMWL) 以外, 不同的地区也有反映区域降水特点的局地大气水线 (local meteoric water line, LMWL)^[8]。根据湛江地区 2019 年 5—10 月大气降水 δD ($\delta^{18}O$) 实测值, 将大气降水的 δD 对 $\delta^{18}O$ 通过最小二乘法进行线性回归分析,

得到湛江地区局地大气水线为: $\delta D = 8.023\delta^{18}O - 0.7037$, $R^2 = 0.954$, $n = 68$ (图 1)。与全球大气降水线相比, 拟合方程的斜率差距不大, 而截距明显偏小, 即过量氘 (D-excess) 明显偏小, 过量氘反映了水体在动力分馏过程中稳定同位素变化的差异, 受水汽源地的温度以及相对湿度影响, 同时也与降水过程中的气象条件有关。近距离传输的湿润气流中 ^{18}O 的含量偏大, 一定程度上导致过量氘偏小^[16]。

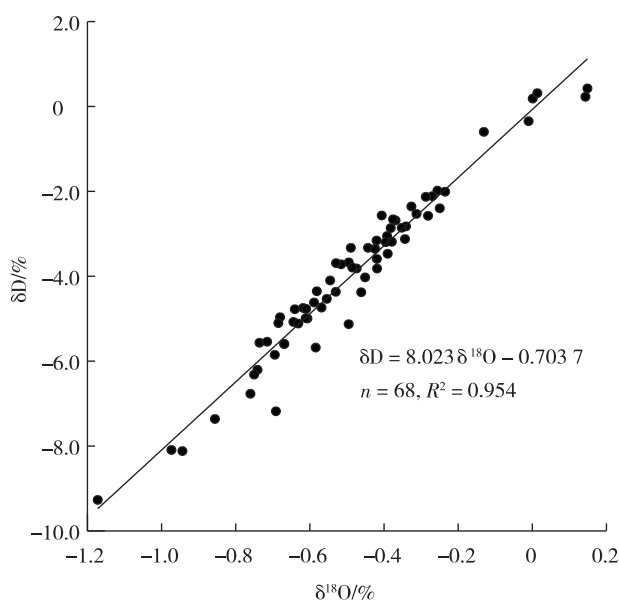


图1 湛江地区局地大气降水线

Fig.1 Local meteoric water line in Zhanjiang

一般而言, 海洋的湿润气流中 ^{18}O 和 D 含量偏高。近距离的水汽输送可使到达研究区域的降水中 $\delta^{18}O$ 含量偏高; 长距离的水汽输送中, 由于途中的分馏作用导致 ^{18}O 流失, 到达研究区域的 ^{18}O 含量偏低; 另外局地大气循环所带来的降水中, ^{18}O 含量也偏低^[16]。分析表明, δD 和 $\delta^{18}O$ 的值受气象要素的影响总体上呈现波动变化。5 月, 受湿润海洋气流近距离传输的影响, δD 和 $\delta^{18}O$ 的值都偏高, D-excess 值较大。7 月底到 8 月初, 台风带来的持续降水造成的降雨量效应的作用, 使得 δD 和 $\delta^{18}O$ 出现最低值, 8 月底到 9 月同位素变化值不大, 与整个时间段对比起来, δD 和 $\delta^{18}O$ 的值相对较低, δD 达到 -8% , $\delta^{18}O$ 达到 -1% 。2019 年的厄尔尼诺事件影响下, 此阶段登陆华南地区的台风较常年偏少^[34-35], 判断此阶段降水的水汽来源于远距离海洋的水汽输送, 或是局地大气循环导致的可能性较大 (图 2)。

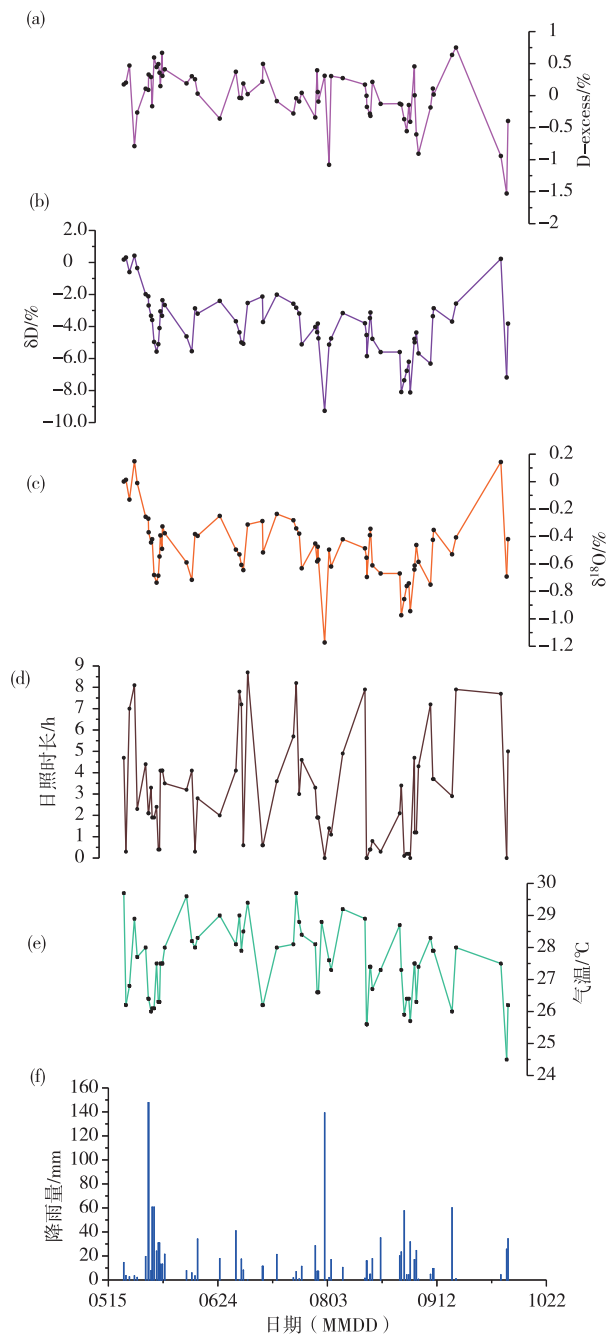


图2 2019年汛期降水稳定同位素及气象要素的变化趋势(a. D-excess; b. δD ; c. $\delta^{18}O$; d. 日照时长, 单位: h; e. 气温, 单位: $^{\circ}C$; f. 降雨量, 单位: mm)

Fig.2 Variation trend of stable isotopes in precipitation and meteorological elements in flood season in 2019 (a. Dexcess; b. δD ; c. $\delta^{18}O$; d. sunshine duration, units: h; e. air temperature, units: $^{\circ}C$; f. precipitation, units: mm)

3.2 降水 $\delta^{18}O$ 与温度的关系

将降水 $\delta^{18}O$ 的数据与温度 (T) 进行线性回归分析, 得降水 $\delta^{18}O$ - T 线性方程: $\delta^{18}O = 0.652T - 22.684$, $R^2 = 0.095$, $n = 68$ (图 3a)。利用 SPSS 软件

进行直接相关分析得到 Pearson 系数^[36-38]为 0.309, 相关性通过了显著性水平为 0.01 的显著性检验。剔除降雨量和日照时数影响, 降水 $\delta^{18}O$ 与温度 (T) 偏相关系数为 0.058, 相关性没有通过显著性检验。猜测温度因子不是直接影响 $\delta^{18}O$ 的含量变化, 而是通过影响其他因子的变化进而影响 $\delta^{18}O$ 的含量变化。气温的升高同时会导致蒸发作用的加强, 云下的二次蒸发作用对 ^{18}O 有富集作用^[16]。正是温度这种通过影响其他因子的变化进而影响 ^{18}O 含量变化的机制, 使得温度与 $\delta^{18}O$ 的含量呈现显著的正相关关系。

3.3 降水 $\delta^{18}O$ 与降雨量的关系

将降水 $\delta^{18}O$ 的数据与降雨量 (P) 进行线性回归分析, 得降水 $\delta^{18}O$ - P 线性方程: $\delta^{18}O = -0.0185P - 4.414$, $R^2 = 0.054$, $n = 68$ (图 3b)。剔除气温和日照时数影响, 降水 $\delta^{18}O$ 与降雨量 (P) 偏相关系数为 -0.126, 相关性没有通过显著性检验。一般情况下, 由于降水量效应的作用, 降雨过程导致水汽中 ^{18}O 丢失, 因此降水量效应的结果就是导致一般情况下降雨量的大小与 $\delta^{18}O$ 呈负相关关系^[16]。在降雨量与 $\delta^{18}O$ 的相关分析中, 猜测降雨量与 $\delta^{18}O$ 之间的关系一方面受到降水区干燥环境导致的云下二次蒸发对雨水 ^{18}O 富集作用的影响^[16], 一部分因降水流失的 ^{18}O 得到补充; 另一方面, 部分 ^{18}O 含量丰富的近海水汽对本地降雨有一定的贡献^[8]。分别对 5、6 月和 7、8 月的降雨量和 $\delta^{18}O$ 的关系作线性回归分析。结果显示: 5、6 月呈现的降雨量和 $\delta^{18}O$ 的负相关关系更弱 ($R^2 = 0.0085$)。这是因为 5 月中旬西南季风爆发以后, 湛江地区的水汽源地主要是南海, ^{18}O 含量丰富的近海水汽一定程度上补给因降雨量效应导致的 ^{18}O 的丢失, 以至于即使在降雨量较大的情况下 ^{18}O 丢失的量不算太多, 最后致使湛江在这一时期所呈现的降雨量效应较弱, 负相关程度不高^[8]。

3.4 降水 $\delta^{18}O$ 和日照时长的关系

将降水 $\delta^{18}O$ 的数据与日照时长 (S) 进行线性回归分析, 得降水 $\delta^{18}O$ - S 线性方程: $\delta^{18}O = 0.379S - 5.964$, $R^2 = 0.156$, $n = 68$ (图 3c)。进行直接相关分析得到 Pearson 系数为 0.395, 相关性通过了显著性水平为 0.01 的显著性检验。剔除气温和降雨量的影响, 降水 $\delta^{18}O$ 与日照时长偏相关系数为 0.265, 也通过了显著性水平为 0.01 的显著性检验。分析说明日照时长对雨水中 ^{18}O 含量有重要影响作用, 日照时长越长, 增温越大, 蒸发作用导致 ^{18}O 的富集。

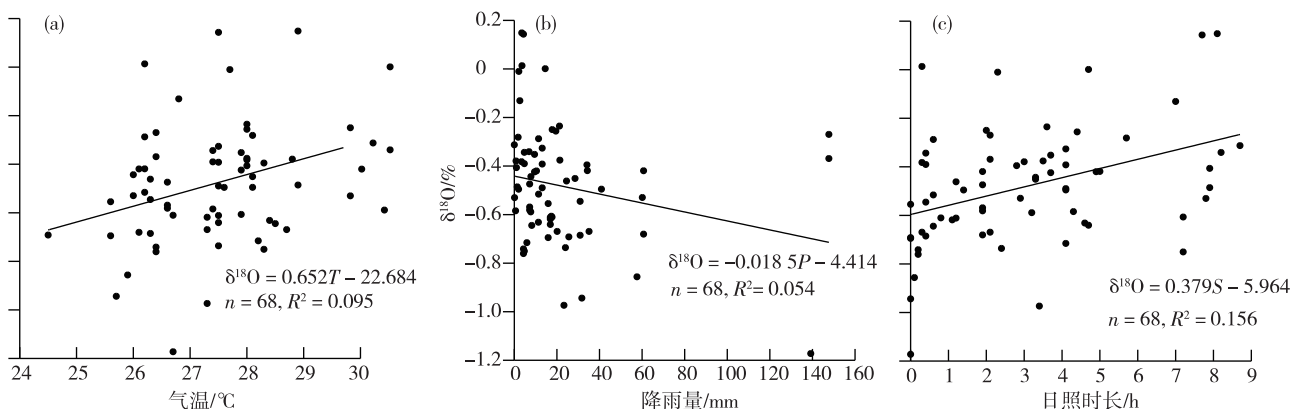


图3 各气象要素与 $\delta^{18}\text{O}$ 的关系 (a. 气温, 单位: $^{\circ}\text{C}$; b. 降水量, 单位: mm ; c. 日照时长, 单位: h)

Fig.3 Correlation between meteorological element and $\delta^{18}\text{O}$ (a. air temperature, units: $^{\circ}\text{C}$; b. precipitation, units: mm ; c. sunshine duration, units: h)

3.5 HYSPLIT 轨迹模型模拟

对湛江 2019 年汛期降水稳定同位素的分析结果表明, 5—6 月, $\delta^{18}\text{O}$ 偏高, 考虑西南季风带来西太平洋的水汽, 海洋水汽的近距离输送致使 $\delta^{18}\text{O}$ 偏高的可能性偏大; 7—9 月, $\delta^{18}\text{O}$ 偏低, 考虑局部大气环流, 水汽长距离运输及干燥环境下一定程度的云下二次分馏作用造成 $\delta^{18}\text{O}$ 的偏低。鉴于 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化与水汽的源地有密切的联系, 为了进一步验证氢氧稳定同位素技术指示湛江地区大气降水水汽来源结果的可靠性, 本研究选取湛江地区 2019 年汛期降水事件中 5 次典型降水事件 (即前汛期西南季风爆发前和西南季风爆发后; 后汛期由热带系统带来降水及由非热带系统带来的降水), 利用 HYSPLIT 模型进行气团轨迹模拟, 垂直方向上选取 1 500 m 高度作为模拟的初始高度, 模拟其 5 d 后向气团运动轨迹 (图 4)。可以看出, 前汛期西南季风爆发前, 湛江地区主要是副热带高压外围的东南气流输送西太平洋的水汽 (图 4a); 前汛期西南季风爆发后, 越赤道气流带来西南方向孟加拉湾和南海的水汽 (图 4b); 后汛期由台风等热带系统带来的降水中, 其水汽主要来自南海和孟加拉湾 (图 4c 和图 4d), 后汛期由非热带系统带来的降水中, 其水汽主要来自孟加拉湾 (图 4e)。

3.6 代表性降水个例物理量诊断分析

在对同位素的时间变化特征分析中, 同位素的变化特征与水汽的源地及传输过程的气象条件也有密切的联系, 环境风场为水汽的输送提供动力条件, 而水汽输送过程水汽的辐合作用有利于降水, 使得降水量效应一定程度上导致 ^{18}O 的丢失。HYSPLIT 积分轨迹模型运用拉格朗日方法对湛江

地区降水过程的水汽源地进行了溯源分析。在此基础上, 对该地区的风场, 水汽等的空间分布随时间的演变特征来进一步分析, 即运用欧拉方法定量分析湛江地区上空水汽条件, 进而探索有利于水汽输送的气象条件以及进一步验证 HYSPLIT 模拟的结果。本次研究选取湛江 2019 年汛期 5 个降水代表性个例, 研究其降水过程水汽输送特征及动力条件, 进一步诊断降水水汽的来源。

分析前汛期湛江 850 hPa 物理量场 (图 5 和图 6): 1) 4 月 13—16 日, 这段时期的水汽主要来自西南气流输送。水汽通量辐散区逐渐扩大, 16 日 00 时 (世界时, 下同) 水汽通量负散度小于 $-1 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ (图 5a); 13 日 12 时、15 日 12 时湛江地区上空 850 hPa 具有垂直向上的运动 (图 6a); 16 日起, 水汽输送减弱; 水汽的辐合和动力抬升有利于这次降水过程的形成。2) 5 月 28 日—6 月 2 日, 水汽主要来源于孟加拉湾和南海。28 日, 湛江位于水汽通量负散度区, 30 日起, 增强的西南气流将北部湾水汽输送到湛江上空 (图 5b); 2 日 06—12 时气流向上运动 (图 6b), 为降水提供了有利的动力条件。

分析后汛期湛江 850 hPa 物理量场: 1) 7 月 1—4 日, 随着台风“木恩”向湛江西移其后部气流将大量南海水汽输送到湛江, 2 日湛江维持水汽通量负散度和较强的水汽通量 (图 5c), 期间伴有向上运动 (图 6c), 为降水提供了有利条件。2) 7 月 29 日—8 月 1 日, 台风“韦帕”于 8 月 1 日登陆湛江^[38] 后将南海和孟加拉湾水汽向湛江输送, 水汽通量散度负值区也随之增大 (图 5d), 垂直速度达 $2 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 6d), 为此次暴雨过程提供了极有利的动力条

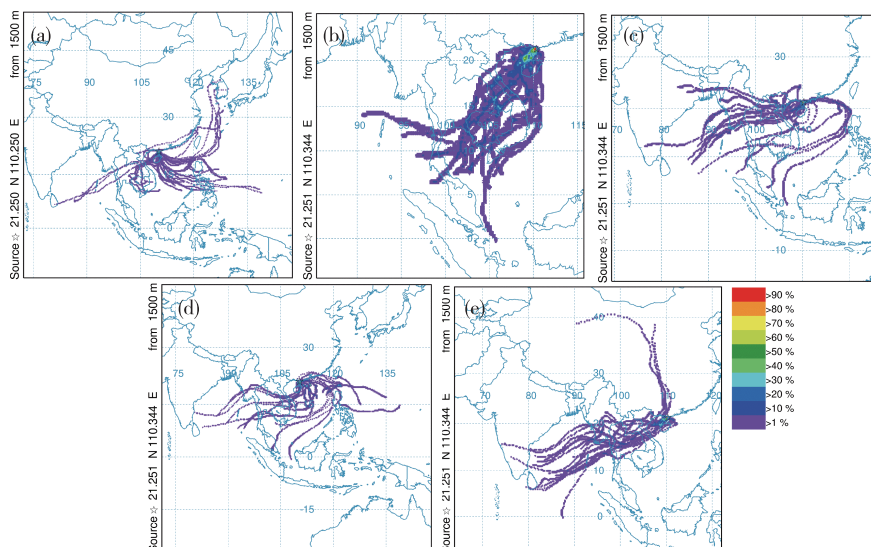


图4 湛江地区2019年汛期部分降水事件的气团后向轨迹模拟(每隔6h从同一位置重新开始计算;色标为轨迹通过网格的频率之和,图中的轨迹频率的网格分辨率为 $0.2^{\circ} \times 0.2^{\circ}$)(a、b分别为湛江地区2019年前汛期西南季风爆发前4月12—16日和爆发后5月28日—6月2号的两次代表性降水事件轨迹模拟;c、d、e分别为湛江地区2019年后汛期由台风等热带系统带来降水7月1—4日、7月30日—8月2日、非热带系统带来降水8月16—19日的3次代表性降水事件的轨迹模拟)

Fig.4 Simulation of air mass backward trajectory of partial precipitation events in Zhanjiang during flood season of 2019 (calculation is restarted from the same location every 6 h, color bar is the sum of the frequencies of the trajectories passing through the grid, and the grid resolution of the trajectory frequency is $0.2^{\circ} \times 0.2^{\circ}$; a and b for simulations of trajectories of two representative precipitation cases from 12 to 16 in April before the onset of the southwest monsoon and from 28 in May to 2 in June 2019 after the onset in the early flood season in Zhanjiang, respectively; c, d, and e for simulations of trajectories of three representative precipitation cases by tropical systems from 1 to 4 in July and from 30 in July to 2 in August and by non-tropical system from 16 to 19 in August 2019 in the latter flood season in Zhanjiang, respectively)

件,导致湛江日累计降水量超100 mm。3)8月17—22日,湛江850 hPa物理量场的水汽通量大值区从孟加拉湾沿华南沿海一带将孟加拉湾水汽不断向湛江输送。18日18时湛江处于水汽通量散度负值区,有水汽辐合(图5e);19—21日,存在向上的垂直速度(图6e),为8月16—19日的连续性降水以及22日的降水提供了有利的水汽和动力条件。

4 结论

本文除对湛江地区降水稳定同位素基本特征进行简单分析外,还基于水汽的 $\delta^{18}\text{O}$ 值,利用直接相关分析,偏相关分析等方法对 $\delta^{18}\text{O}$ 的影响因子进行分析,甄别汛期水汽的潜在蒸发源地,并结合后向轨迹回溯追踪,以及代表性个例物理量诊断分析得出以下结论。

1)湛江地区2019年汛期局部降水线 $\delta\text{D} = 8.023\delta^{18}\text{O} - 0.7037$ ($R^2 = 0.954, n = 68$);5—6月西南季风带来的西太平洋水汽, ^{18}O 含量丰富;7—9月受局部大气环流,水汽长距离输送及干燥环境下一定程度的云下二次分馏,造成 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 偏低。

2) δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的值在汛期随时间的变化很大程度上取决于水汽源地,轨迹模型后向追踪的结果显示,前汛期西南季风爆发前,湛江地区主要是副热带高压外围东南气流输送西太平洋的水汽,而对个例物理量的诊断分析显示,此阶段湛江的水汽来源于南海;前汛期西南季风爆发后,西向的水汽输送明显增强,西南季风气流带来南海、孟加拉湾的水汽,这与个例物理量诊断的结果一致。后汛期,由台风等热带系统带来的降水中,主要是台风等热带系统带来南海的水汽,与个例物理量诊断的结果一致,除此以外,西南向的水汽输送通道仍然为湛江输送大量水汽;后汛期,由非台风等热带系统带来的降水中,主要是西南向水汽通道源源不断地输送来自孟加拉湾的水汽,个例物理量诊断的结果与之保持一致。

参考文献:

- [1] LIU X K, RAO Z G, ZHANG X J, et al. Variations in the oxygen isotopic composition of precipitation in the Tianshan Mountains region and their significance for the

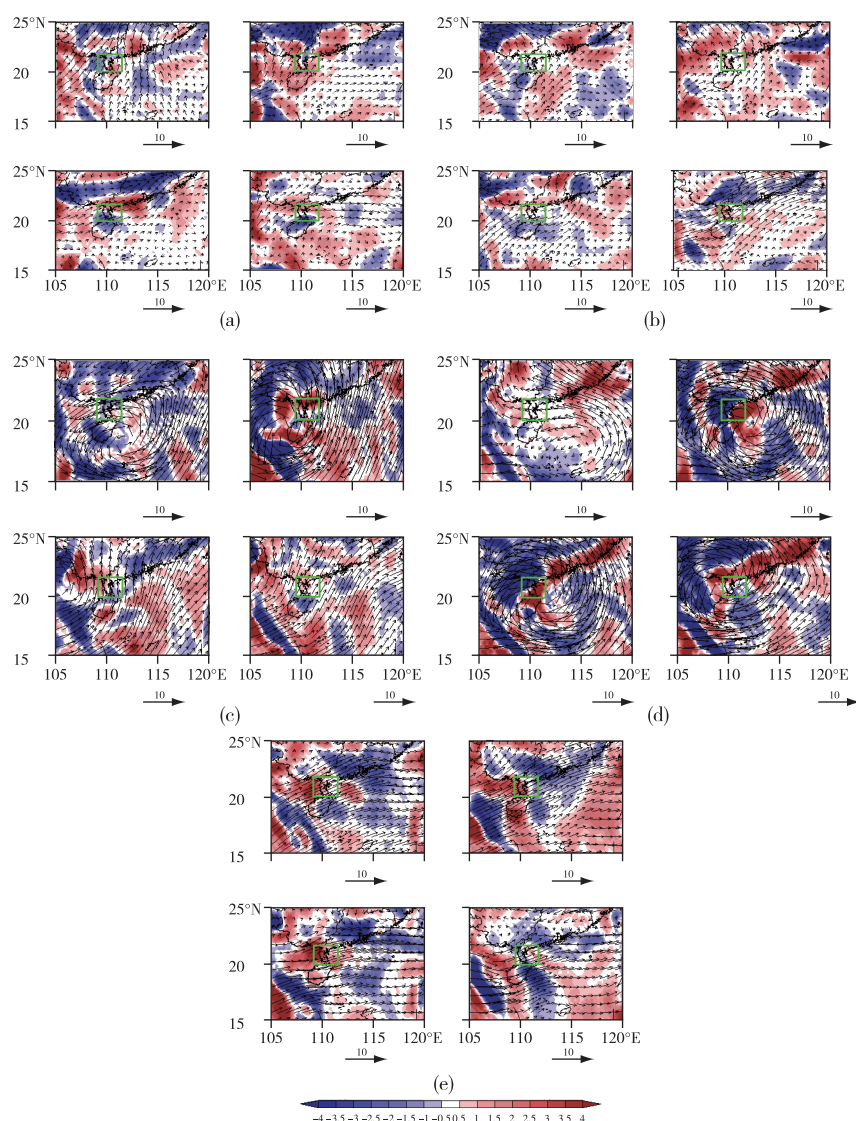


图 5 湛江地区(图中绿色框包围区域)2019 年汛期部分降水事件 850 hPa 的水汽通量散度(填色,单位: $10^{-5} \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)和水汽通量(矢量,单位: $\text{g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)的叠加(a、b 分别为湛江地区 2019 年前汛期西南季风爆发前、后的两次代表性降水事件;c、d、e 分别为湛江地区 2019 年后汛期三次代表性降水事件;5 次降水事件发生时间同图 4)

Fig.5 Composites of water vapor flux divergence (colored, units: $10^{-5} \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) and water vapor flux (vector, units: $\text{g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) at 850 hPa in partial precipitation events in Zhanjiang (area surrounded by green frame) during flood season of 2019 (a and b for two representative precipitation cases before and after the onset of the southwest monsoon in the early flood season in Zhanjiang, respectively; c, d, and e for three representative precipitation cases in the latter flood season in Zhanjiang, respectively; the time of occurrence of 5 representative precipitation cases is the same as that in Fig.4)

- westerly circulation [J]. J Geogr Sci, 2015, 25 (7): 801-816.
- [2] 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.
- [3] 李红寿,詹鸿涛,邱飞.应用 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 确定敦煌莫高窟洞窟蒸发水分来源[J].干旱区地理,2017,40(6): 1179-1187.
- [4] 孙芳强,尹立河,马洪云,等.新疆三工河流域土壤水 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 特征及其补给来源[J].干旱区地理,2016, 39(6):1298-1304.
- [5] PRICE R M, SWART P K, WILLOUGHBY H E. Seasonal and spatial variation in the stable isotopic composition ($\delta^{18}\text{O}$ and δD) of precipitation in south Florida[J]. J Hydrol,2008,358(3/4):193-205.
- [6] 徐秀婷,贾文雄,朱国锋,等.乌鞘岭南、北坡降水稳定同位素特征及水汽来源对比[J].环境科学,2020, 41(1):155-165.

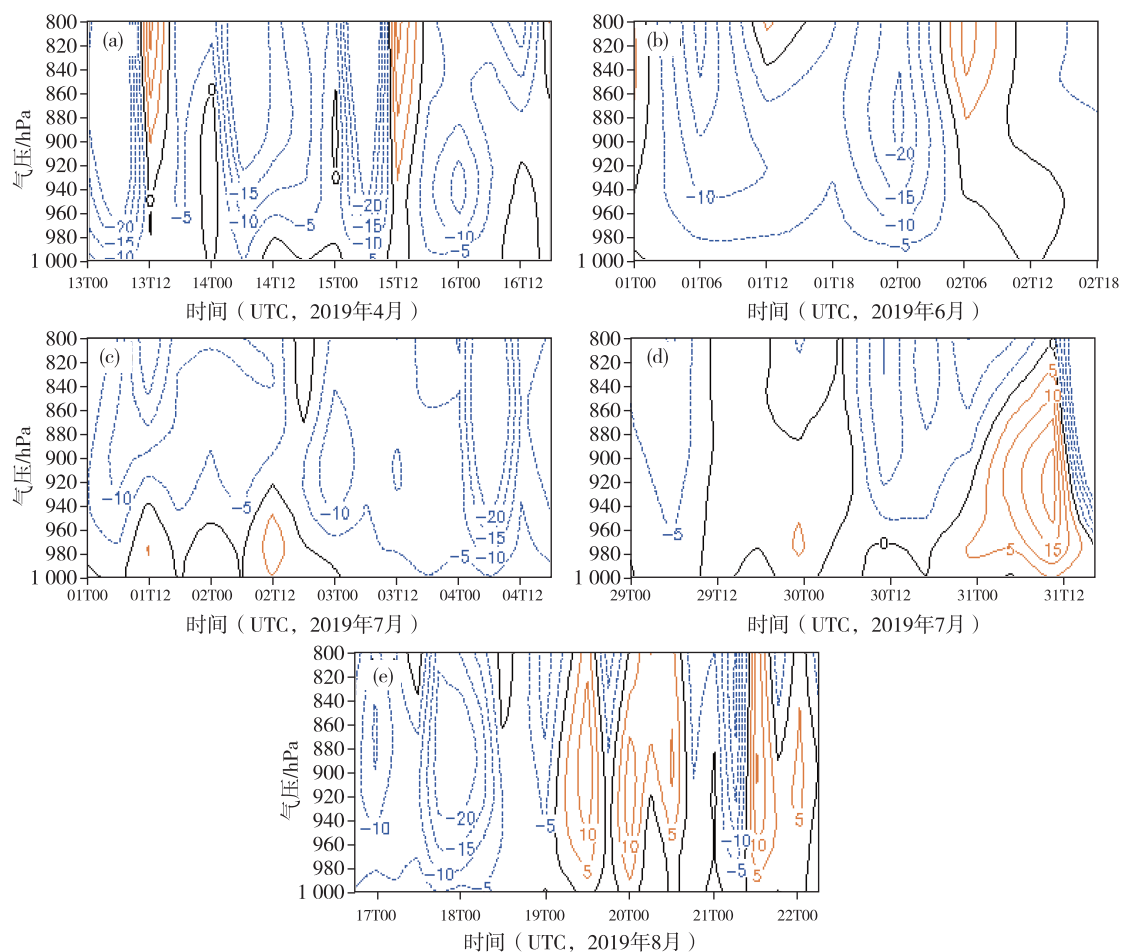


图6 湛江地区2019年汛期部分降水事件的垂直速度图(单位: $10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; a, b 分别为湛江地区2019年前汛期西南季风爆发前、后的两次代表性降水事件; c, d, e 分别为湛江地区2019年后汛期三次代表性降水事件; 5次降水事件发生时间同图4)

Fig.6 Vertical velocity diagram of partial precipitation events in Zhanjiang during flood season of 2019 (units: $10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; a and b for two representative precipitation cases before and after the onset of the southwest monsoon in the early flood season in Zhanjiang, respectively; c, d, and e for three representative precipitation cases in the latter flood season in Zhanjiang, respectively; the time of occurrence of 5 representative precipitation cases is the same as that in Fig.4)

- [7] CRAIG H. Isotopic Variations in meteoric waters [J]. Science, 1961, 133(3465): 1702-1703.
- [8] 王邕凡, 余武生, 张寅生, 等. 印度河上游 Bagrot 山谷降水稳定同位素变化及与水汽来源的关系 [J]. 干旱区地理, 2019, 42(2): 252-262.
- [9] ROZANSKI K, ARAGUÁS-ARAGUÁS L, GONFIANTINI R. Isotopic patterns in modern global precipitation [M]// SWART P K, LOHMANN K C, MCKENZIE J, et al. Climate change in continental isotopic records; Geophysical Monograph Series Volume 78. Washington DC: AGU, 1993: 1-36.
- [10] 胡月, 刘国东, 孟玉川, 等. 成都次降水稳定氢氧同位素特征及水汽来源分析 [J]. 环境科学, 2019, 40(3): 1179-1187.
- [11] 朱晓燕, 张美良, 吴夏, 等. 桂林地区大气降水(大雨、暴雨)的 $\delta^{18}\text{O}$ 特征与水汽来源的关系 [J]. 中国岩溶, 2017, 36(2): 139-161.
- [12] LACHNIET M S, PATTERSON W P. Oxygen isotope values of precipitation and surface waters in northern Central America (Belize and Guatemala) are dominated by temperature and amount effects [J]. Earth Planet Sci Lett, 2009, 284(3/4): 435-446.
- [13] SALAMALIKIS V, ARGIRIOU A A, DOTSIKA E. Periodicity analysis of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation over Central Europe: Time-frequency considerations of the isotopic 'temperature' effect [J]. J Hydrol, 2016, 534: 150-163.
- [14] YANG X X, YAO T D, YANG W L, et al. Co-existence of temperature and amount effects on precipitation $\delta^{18}\text{O}$ in the Asian monsoon region [J]. Geophys Res Lett, 2011, 38(21): L21809.

- [15] 高德强,徐庆,张蓓蓓,等.鼎湖山大气降水氢氧同位素特征及水汽来源[J].林业科学研究,2017,30(3):384-391.
- [16] 刘广山.同位素海洋学[M].郑州:郑州大学出版社,2010.
- [17] STOHL A, HITTENBERGER M, WOTAWA G. Validation of the lagrangian particle dispersion model FLEXPART against large-scale tracer experiment data [J]. Atmos Environ,1998,32(24):4245-4264.
- [18] 许彬,熊秋芬,张玉婷.一次热带风暴背景下南昌暴雨的水汽来源及输送特征[J].气象,2019,45(10):1392-1401.
- [19] 施逸.基于拉格朗日方法的中国东部雨季水汽输送路径及其水汽源地的定量分析[C]//中国气象学会.第35届中国气象学会年会S7东亚气候、极端气候事件变异机理及气候预测.北京:中国气象学会,2018:317.
- [20] ANSARI A, NOBLE J, DEODHAR A, et al. Atmospheric factors controlling the stable isotopes ($\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$) of the Indian summer monsoon precipitation in a drying region of Eastern India[J]. J Hydrol,2020,584:124636.
- [21] 任伟,任燕,李兰兰.基于 HYSPLIT 模式的济南机场一次暴雨过程的水汽输送特征分析[J].海洋气象学报,2019,39(1):116-122.
- [22] 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等.天气学原理和方法[M].北京:气象出版社,2000:320-321.
- [23] 刘璇.一次华南前汛期暴雨过程的物理量诊断分析[J].安徽农业科学,2015,43(13):254-258.
- [24] 文萍,许映龙,柳龙生.台风“山竹”(1822)引发华南暴雨过程机制分析[J].海洋气象学报,2019,39(3):29-35.
- [25] 邓冰,潘世康,孙剑.近50年来湛江气候变化初探[J].广东气象,2001,33(1):10-12.
- [26] 池德文.廉江1971到2010年气候变化特征分析[J].气象研究与应用,2015,36(2):50-53.
- [27] 李晓帆.基于拉格朗日方法的华南前汛期水汽输送及其年际年代际变化[D].南京:南京信息工程大学,2018.
- [28] 杨柳,赵俊虎,封国林.中国东部季风区夏季四类雨型的水汽输送特征及差异[J].大气科学,2018,42(1):81-95.
- [29] 王宁.中国大陆地区大气水循环的研究[D].长沙:国防科技大学,2018.
- [30] 陈杨瑞雪.华南前汛期极端降水多尺度特征的统计分析与个例研究[D].北京:中国气象科学研究院,2018.
- [31] DRAXLER R R, HESS G D. An overview of the HYSPLIT_4 modelling system for trajectories, dispersion and deposition [J]. Aust Meteor Mag, 1998, 47(4):295-308.
- [32] 宋春林,孙向阳,王根绪.贡嘎山亚高山降水稳定同位素特征及水汽来源研究[J].长江流域资源与环境,2015,24(11):1860-1869.
- [33] 邢雯慧.华南前汛期南海夏季风爆发前后水汽通道特征研究[D].南京:南京信息工程大学,2014.
- [34] 柳龙生,黄彬,吕爱民,等.2019年夏季海洋天气评述[J].海洋气象学报,2019,39(4):97-107.
- [35] 伍红雨,李文媛,杜尧东.2019年7—8月广东省天气气候特点及其影响评述[J].广东气象,2019,41(5):封2,封3.
- [36] 尹观,倪师军.同位素地球化学[M].北京:地质出版社,2009.
- [37] 赵海龙,张丹丹,黄松,等.基于皮尔逊相关系数的海南省地闪密度与雷击故障关系分析[J].高压电器,2019,55(8):186-192.
- [38] 杨帆,冯翔,阮羚,等.基于皮尔逊相关系数法的水树枝与超低频介损的相关性研究[J].高压电器,2014,50(6):21-25.