DOI:10.14188/j.1671-8844.2024.0329 文章编号:1671-8844(XXXX)XX-0001-10

闽南流域华南汛期降水稳定同位素特征及水汽来源

李文彧[1,2],赵超[1,2],李铠峰[1,2],刘涵[1,2],李宜润[1,2],邓淇耘[1,2]

(1. 厦门理工学院环境科学与工程学院,福建 厦门 361024;2. 厦门市水资源利用与保护重点实验室,福建 厦门 361024)

摘要:为探究华南汛期降水稳定同位素特征及水汽来源,采集闽南东西溪流域2021—2023年华南汛期不同类型降水样品及环境因子数据,分析该流域大气降水氢氧同位素组成变化特征及影响因素,揭示华南汛期不同类型降水水汽来源。结果表明:1)降水δD、$\delta^{18}O$组成总体上呈现华南前汛期富集,后汛期次之,台风期贫化的变化特征;2)氘盈余呈现前汛期大于台风期,后汛期最小的变化趋势;3)前汛期、后汛期和台风期降水δD($\delta^{18}O$)具有显著的降水量效应,但未见显著温度效应;4)后向轨迹追踪模式和浓度权重轨迹分析结果显示研究区域华南汛期降水水汽来源主要由西南水汽和东南水汽组成,同时华南前汛期还受来自内陆干燥水汽的影响,同期的氘盈余受局地水汽再循环影响较大。

关键词:华南汛期;大气降水;氢氧同位素;水汽来源;浓度权重轨迹分析

中图分类号: **文献标志码:**A

Stable isotope characteristics of precipitation and water vapor sources during the South China flood period in the southern Fujian basin

LI Wenyu[1,2], ZHAO Chao[1,2], LI Kaifeng[1,2], LIU Han[1,2], LI Yirun[1,2], DENG Qiyun[1,2]

(1. School of Environmental Science and Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China;
2. The Key Laboratory of Water Resources Utilization and Protection of Xiamen, Xiamen 361024, China)

Abstract: The data of different types of precipitation samples and environmental factors were collected during the South China flood season of 2021-2023 in the East-West Creek watershed of South Fujian region. The hydrogen and oxygen stable isotopic composition of rain and identify moisture sources in this basin were analyzed. The results showed that: 1) the hydrogen and oxygen isotopic composition in general show the changing characteristics of enrichment during the first flood period, followed by depletion during the post- flood period, and depletion during the typhoon period in South China; 2) The trend of d-excess is larger than that of the typhoon period in the pre-flood period and smallest in the post-flood period; 3) Precipitation δD($\delta^{18}O$) shows a significant precipitation effect during the pre-flood, flood and typhoon periods, which masks the temperature effect; 4)The results of backward track tracking model and concentration weight trajectory analysis show that the water vapor sources of flood season precipitation in South China are mainly southwest water vapor and southeast

收稿日期:2024-08-09

作者简介:李文彧(1998-),女,硕士研究生,主要从事同位素水文学研究,E-mail: lwy_2022@163.com。

通信作者:赵超(1977-),女,教授,博士,主要从事同位素水文学研究,E-mail: zhaochao@xmut.edu.cn。

基金项目:福建省自然科学基金项目(编号:2022J011232);厦门理工学院研究生科技创新计划项目(编号:YKJCX2023158)。

本文引用格式:李文彧,赵超,李铠峰,等.闽南流域华南汛期降水稳定同位素特征及水汽来源[J].武汉大学学报(工学版),XXXX,XX(XX):1-10.

Citation: LI Wenyu, ZHAO Chao, LI Kaifeng, et al. Stable isotope characteristics of precipitation and water vapor sources during the South China flood period in the southern Fujian basin[J]. Engineering Journal of Wuhan University, XXXX, XX(XX):1-10.

water vapor, and the deuterium surplus in South China before flood season is greatly affected by local water vapor recycling.

Key words: Flood period in South China; Atmospheric precipitation; Hydrogen and oxygen isotopes; Water vapor sources; Concentration weighted trajectory

我国华南地区地处欧亚大陆与太平洋的海陆过渡带前缘,海陆热力作用明显,以亚热带季风气候为主,雨热同期[1-2]。华南地区主要包括广东、广西、福建和海南四省(自治区)。每年南海季风爆发后,华南地区成为我国汛期开始最早,持续时间最长,暴雨次数最多的一个地区[3-4]。华南有两个多雨期,第一个多雨期发生时间通常为每年的4-6月,称为华南前汛期;7-9月约为第二个多雨期,称为后汛期,其中在后汛期期间,同时受到东亚季风和热带气旋控制,会出现极端降水事件多发的台风季[5]。研究华南汛期降水,不仅可以加强对其规律的了解,同时对汛期降水机理的研究与预报具有指导意义,进而提高城市防灾抗灾能力。

近几十年来,已有学者针对华南汛期降水展开了相关研究,詹国伟等[6]通过分析研究区域降水观测资料,探讨华南前汛期不同等级降水的特征及其对前汛期总降水的影响;Ling等[7]利用再分析数据比较了华南前汛期和后汛期台风降水期间,代表性降水事件的水蒸气输运特性,结果表明,台风降水过程的水汽输送通道和水汽通量辐合的分布均高于华南前汛期;林爱兰等[8]对华南前、后汛期极端降水年际变化以及与大气环流的关系进行分析,发现前汛期与后汛期在华南及周边环流异常和水汽输送来源等方面都存在一定差异。

降水中稳定氧和氢同位素组成($\delta^{18}O$和δD)反映了蒸发、凝结和降水过程,在水文循环中有显著的标记效应[9-10]。研究降水中作为环境示踪剂的稳定同位素组成,是提高当地和全球水循环知识水平的有效手段[11]。但从降水氢氧稳定同位素角度对华南汛期降水进行的相关研究较少,且多数研究仅针对华南前汛期,后汛期或台风期中的某个时期,对华南整个汛期降水同位素水文特征研究鲜有报道。

本研究从同位素角度出发,结合气象数据,选取闽南典型流域-东西溪流域为研究区域,探究华南汛期闽南流域降水同位素组成变化特征,分析降水量、气温等气象因素与降水氢氧同位素组成的关系,揭示华南汛期降水同位素特征及水汽来源之间的关系,以期为华南汛期极端降水预测和防洪减灾提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区域选择为闽南地区东西溪流域,位于福建省厦门市同安区。东西溪由西溪和东溪支流汇合而成。东西溪主河道长34 km,流域面积为491.5 km^2,是典型的闽南地区小型流域。东西溪流域属于亚热带海洋性季风气候,温暖湿润、光照充足,干湿季节差异明显。多年平均降水量山区为1800~2500 mm,沿海为1100~1600 mm。降水时空分布不均,西北向东南递减。东西溪流域全年50~80%降水集中在华南汛期。

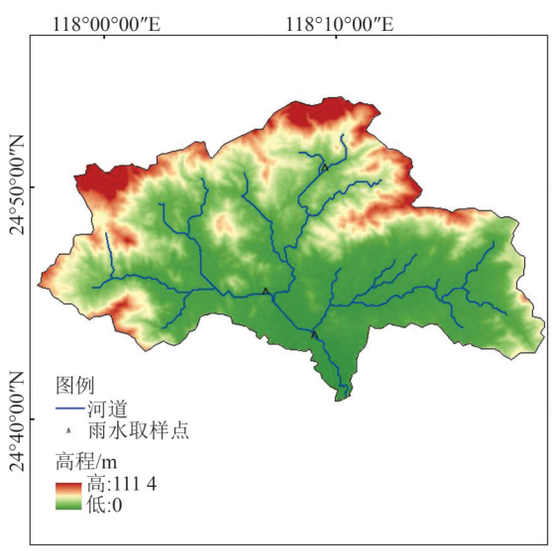


图1 东西溪流域水系和采样点位置分布图

Fig.1 Distribution of water systems and sampling site locations in the East and West Creek Basin

1.2 降水类型划分

由于华南前汛期的形成主要受到冷空气与暖湿气流的相互作用和南海季风的爆发等影响。而后汛期则主要受热带天气系统的影响,表现为台风带来的降水[12]。故本研究将降水分为以下三种类型:

①华南前汛期降水:以福建省气象局公布的华南前汛期时间为依据,具体起始时间如表1所示,此期间的降水为华南前汛期降水;

②华南后汛期降水:以福建省气象局公布的华南后汛期时间为依据(表1),此期间的降水为华南后汛期降水。闽南地区的台风降水多发在7-9月,隶属于华南后汛期降水。但对于有编号的台风降水,因其极端降水特性,除了和其他后汛期降水一起分析外,还特将其单独进行分析研究;

③台风降水:2021-2023年发生在东西溪流域的有编号的台风降水主要为2021年台风"卢碧",2023年台风"杜苏芮"和2023年台风"海葵"。根据研究区域具体降水时间以及热带气旋的移动路径确定三个台风降水时段(表1)

表1 2021-2023年华南前汛期、后汛期及台风降水起始时间

Table1 Starting time of precipitation during pre-flood season, post-flood season and typhoon in South China from 2021-2023

	华南前汛期	华南后汛期	台风期
2021年	4.26~7.2	7.3~10.15	8.4~8.9
2022年	3.24~6.22	6.23~10.15	—
2023年	3.26~6.28	6.29~10.31	7.25~7.29;9.3~9.6

1.3 样品采集与测试

东西溪的上、中、下游各设置一个降水同位素水样采集点,采样点位置远离污染源,且四周无树木与高大建筑物阻挡,具体位置见图1。在采样点采集降水样品,并同步记录温度、降水量。2021-2023年东西溪流域在华南汛期共采集142个降水样品。按照本研究降水类型划分方法,获得华南前汛期降水样品69个,后汛期降水样品73个,其中台风降水样品16个。

所有水样的氢氧同位素均在厦门理工学院环境科学与工程学院实验室测定,采用美国LGR(Los Gatos Research)激光同位素液态分析仪(GLA431-LWIA)进行测试分析。测试的所有实验数据参照国际V-SMOW标准,同位素的值采用δ(‰)作标记,δ值是指样品中两种同位素的比值相对于标准样品同位素比值的千分差值即:

$$\delta(‰)=\left(\frac{R_{sample}}{R_{standard}}-1\right)*1000‰ \#(1)$$

公式中R为同位素的比值(D/H或$^{18}O/^{16}O$)。氢氧同位素的计算采用分析仪自带的分析软件(LGR Post-Processing)自动处理计算得出,测量精度为δD<0.6‰、$\delta^{18}O$<0.2‰。

1.4 数据与方法

1.4.1 数据来源

气象数据采用研究区自设的三个雨水取样点(118.1493E, 24.7278N; 118.1151E, 24.7582N; 118.1581E,24.8451N)连续监测的气温和降水数据。全球资料同化系统气象要素数据(Global Data Assimilation System,GDAS)来源于美国国家环境预报中心(National Center for Environmental Prediction,NCEP)和美国国家大气研究中心(National Center for Atmosphere Research,NCAR),时间分辨率6 h,空间分辨率1°×1°。

1.4.2 后向轨迹模型

采用HYSPLIT-5后向轨迹追踪模式来追踪研究区2021-2023年华南汛期水汽输送路径,使用GDAS数据集(ftp://arlftp.arlhq.noaa.gov/pub/archives/gdas1)作为模型的气象输入数据。通过MeteoInfoMap软件对华南前汛期,后汛期以及台风期的气团轨迹聚类分析计算出每组输送路径的比例,对降水水汽来源进行识别。

1.4.3 浓度权重轨迹分析

浓度权重轨迹法(Concentration Weighted Trajectory,CWT)是一种通过气流轨迹识别潜在来源的方法,可将研究结果可视化在网格上来判断源地。本研究利用大气降水氘盈余(d-excess)日值并结合对应后向轨迹,计算出每条轨迹对应的d-excess权重,以分析东西溪流域降水水汽源地,权重浓度C_{ij}计算如下:

$$C_{ij}=\frac{\sum_{K=1}^{K}C_kT_{ijk}}{\sum_{K=1}^{K}T_{ijk}} \#(2)$$

公式中,C_{ij}是网格(i,j)上的d-excess浓度值;k是轨迹数目;C_k是轨迹k经过网格(i,j)时对应的研究站点d-excess值的大小;$Tijk$是轨迹k在网格(i,j)上的停留时间,计算过程中用落在网格内的轨迹k的端点数来代替。

2 结果与分析

2.1 华南汛期不同类型降水δD和$\delta^{18}O$变化特征

研究期间降水日采集的大气降水样品中,2021-2023年华南汛期降水δD和$\delta^{18}O$最大值分别为-5.40‰,-2.37‰;-9.35‰,-1.41‰;-6.62‰,-2.21‰(表2)。2021年和2023年的华南汛期降水同位素最低值(-109.19‰,-15.57‰;-136.66‰,-19.26‰)出现在后汛期台风降水,

研究发现若将台风降水数据从后汛期整体降

水数据中去除,可以排除台风因素的干扰,2021年和2023年汛期同位素最低值则出现在前汛期,与2022年(δD和$\delta^{18}O$分别为-90.41‰,-11.77‰)保持一致,因此出现不同的年际变化特征可能主要与台风有关。

华南前汛期和华南后汛期δD和$\delta^{18}O$均值分别为-38.25‰,-6.80‰;-46.80‰,-7.15‰,表现出前汛期>后汛期的变化趋势。该变化趋势体现了东西溪流域所处的闽南地区的降水时间变化差异,可能与水汽来源与水汽输送路径有关。

表2 东西溪流域2021-2023年华南汛期降水同位素δD,$\delta^{18}O$变化情况/‰

Table2 Changes in precipitation isotopes δD, $\delta^{18}O$ in the East-West Creek basin during the 2021-2023 flood season in South China/‰

降水类型	时间	δD变化范围	平均值	$\delta^{18}O$变化范围	平均值
华南前汛期降水	2021	−75.89～−5.40	−36.35	−11.99～−2.37	−6.40
	2022	−90.41～−9.35	−47.50	−11.77～−1.41	−7.52
	2023	−95.26～−10.23	−29.45	−13.21～−3.28	−6.26
	2021−2023	−95.26～−5.40	−38.25	−13.21～−1.41	−6.80
华南后汛期降水	2021	−109.19～−12.36	−54.34	−15.57～−2.79	−8.04
	2022	−71.09～−15.39	−39.50	−10.16～−1.60	−6.02
	2023	−136.66～−6.62	−45.07	−19.26～−2.21	−7.14
	2021−2023	−136.66～−6.62	−46.80	−19.26～−1.60	−7.15
台风降水	2021	−109.19～−48.34	−81.74	−15.57～−7.59	−11.69
	2023	−136.66～−53.67	−95.17	−19.26～−7.97	−13.62
		−89.50～−18.93	−62.71	−14.50～−2.94	−9.70
	2021, 2023	−136.66～−18.93	−73.90	−19.26～2.94	−10.93
全球大气降水[14]	—	−350～50	−300	−50～10	−4
中国大气降水[15]	—	−229.6～45.4	−54.82	−29.47～9.15	−7.95

2.2 降水δD和$\delta^{18}O$关系

基于东西溪流域2021-2023年华南前汛期降水氢氧同位素实测值,得到该区域华南前汛期大气降水线方程为$\delta D=8.40\delta^{18}O+17.43$($R^2=0.93$, $p<0.01$),见图2(a)所示,该方程斜率与全球大气降水线GMWL($\delta D=8\delta^{18}O+10$)斜率相似。华南后汛期大气水线方程为$\delta D=6.74\delta^{18}O+1.00$($R^2=0.93$,$p<0.01$),斜率和截距显著小于GWML和LMWL,与我国东部季风区大气降水量线[13]:$\delta D=7.5\delta^{18}O+0.9$比较接近。台风期大气降水线方程为:$\delta D=7.25\delta^{18}O+5.38$($R^2=0.97$,$p<0.01$),斜率和截距也均小于GWML和LWML,这一特征与福州相似[10]。

Dansgaard[11]首次将δD与8倍$\delta^{18}O$的差值定义为氘盈余(d-excess),即:$D=\delta D-8\delta^{18}O$。如图2(b)所示,华南前汛期降水氘盈余平均值为16.17‰,大于全球降水氘盈余平均值(10‰)。华南后汛期降水氘盈余平均值10.75‰,与全球平均值基本持平;台风期间氘盈余平均值为13.57‰,大于全球平均值。华南汛期期间氘盈余在均值上呈现出前汛期>台风期>后汛期的变化趋势。

2.3 降水同位素与气象因子关系

当地降水同位素通常受到降水量、气温、海拔、纬度、相对湿度和风速等因素影响[14]。东西溪流域受季风影响显著,降水同位素主要存在降水量效应和温度效应[15]。本研究分别探讨华南前汛期(图3a),华南后汛期(图3b)和台风降水(图3c)中的$\delta^{18}O$与温度、降水量的关系。

2.3.1 温度

将研究区域降水$\delta^{18}O$和温度(T)进行线性回归分析,得到2021-2023年华南前汛期降水同位素与温度的相关关系为$\delta^{18}O=-0.07T-5.20$($R^2=0.009$,$p>0.05$),台风期为$\delta^{18}O=-1.17T+19.62$($R^2=0.02$,$p>0.05$),华南后汛期降水同位素$\delta^{18}O$与温度的线性关系为$\delta^{18}O=0.15T+43.14$($R^2=0.18$,$p>0.05$),整体分析2021-2023年华南汛期降水样本$\delta^{18}O$值与温度的线性关系为$\delta^{18}O=0.03T-7.59$($R^2=0.008$,$p>0.05$)。前汛期、后汛期、台风期和整体华南汛期降水同位素与温度相关性并不显著,均未表现出明显的温度效应。

2.3.2 降水量

将2021年-2023年华南汛期降水$\delta^{18}O$与降水量(P)进行线性回归分析,得到降水$\delta^{18}O$与降水量的

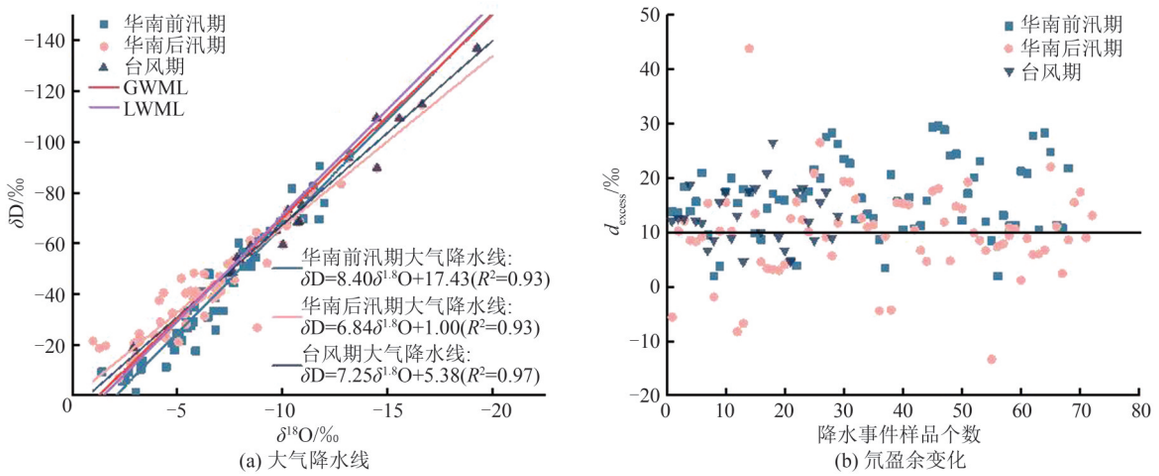


图2 东西溪流域华南汛期降水氢氧同位素关系图

Fig.2 Hydrogen and oxygen isotope relationships of precipitation during the flood season in South China in the East West Creek basin

线性方程,其中华南前汛期为$\delta^{18}O=-0.04P-5.51$($R^2=0.23$,$p<0.01$),华南后汛期$\delta^{18}O=-0.05P-5.07$($R^2=0.31$,$p<0.01$),台风期为$\delta^{18}O=-0.07P-6.08$($R^2=0.40$,$p<0.01$)。华南汛期整体降水氢氧同位素与降水量的线性关系为$\delta^{18}O=-0.05P-5.27$($R^2=0.29$,$p<0.01$)。东西溪流域降水氢氧同位素组成与降水量存在负相关关系,表现出降水量效应。

2.4 不同类型降水水汽来源分析

2.4.1 后向轨迹模型对不同类型降水水汽来源的指示

利用拉格朗日后向轨迹模型,对研究区域2021-2023年华南前汛期、后汛期以及台风降水的水汽来源进行追踪和聚类分析,分别得到聚类后的来源比例。

结果表明,印度夏季风控制下的西南水汽输送与西太副高控制下的东南水汽输送是华南前汛期最重要的两条水汽输送路径。来自西南的印度洋水汽输送占比44.67%,而太平洋水汽进入中国东部地区的东南水汽输送占比为19.79%。来自西太平洋和黄海洋面的东风气流贡献水汽占比为18.60%。值得注意的是,在华南前汛期阶段,来自陆地气块的水汽占比为16.94%,不容忽视。

华南后汛期降水水汽来源均为海洋暖湿气团,其中西南水汽输送和东南水汽输送仍是华南后汛期两条主要的水汽输送通道,水汽输送占比分别为29.91%和32.70%。后汛期期间东风气流贡献水汽占比为37.39%,东风气流与西南、东南水汽相结合,对研究区域降水做出贡献。

台风"卢碧"期间,来自西南的气块所占比例最多为49.99%,与来自东南水汽(20.83%)混合。台风"杜苏芮"期间,东西溪流域降水水汽来源由东南水汽和西南水汽输送,分别占60%和40%。在台风"海葵"影响期间,东西溪流域降水组成包括来自东南水汽输送,占比最大为81.25%,另一部分西南水汽占18.75%。

2.4.2 浓度权重轨迹分析法对不同类型降水水汽来源的指示

由于浓度权重轨迹分析法需将所研究的采样点及轨迹覆盖到的周边区域格网化,需选择降水事件较多的采样点才能够有效实现[16],因此只选择华南前汛期和后汛期采样点数据进行分析(图6)。

结果表明,在华南前汛期期间(图6a),氘盈余浓度表现出自水汽源地至研究区域逐渐递增趋势,且离研究区域越近氘盈余变化越频繁,说明氘盈余受到局地水循环的影响较大[17],与后向轨迹模拟的结果保持一致。前汛期来自西南和东南的暖湿海洋水汽在输送过程中沿途与其他来自的干冷内陆水汽气团汇入,造成氢氧同位素富集,故靠近研究区域氘盈余较高。由后向轨迹模拟结果可知,华南后汛期期间西南和东南水汽输送占比较大,水汽源地相对湿度较高,故该时期平均氘盈余值(图6b)与前汛期相比偏小,且变化趋势趋于平缓。

3 讨论

3.1 华南汛期不同类型降水δD和$\delta^{18}O$与水汽来源之间的关系

华南前汛期降水水汽来源较为复杂,来自西南水汽输送与东南水汽输送的暖湿气流占据主导地

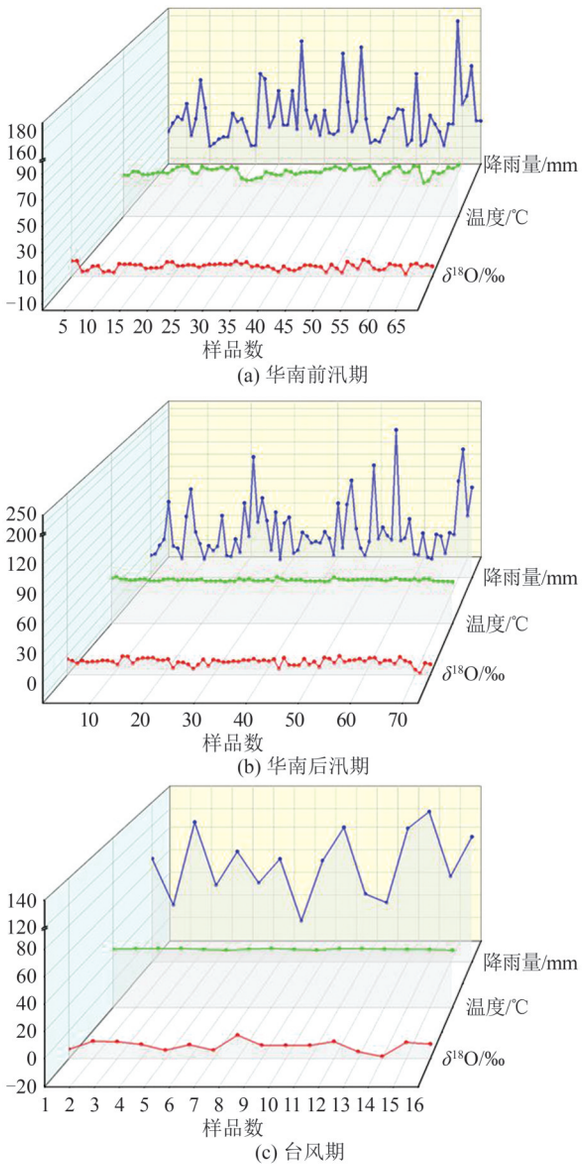


图3 降水$\delta^{18}O$与温度,降水量变化特征图

Fig.3 Precipitation $\delta^{18}O$ versus temperature, and precipitation change characteristics

位。与此同时研究区还受到来自于西北和华北地区湿度低的冷空气影响[18],且局地水汽蒸发贡献的自循环降水占比也不容忽视。空气湿度较小,局地蒸发较快,雨水在下降过程中强烈的二次蒸发作用引起的重同位素富集,故前汛期降水稳定同位素偏高,这与蔡明刚[19]和陈锦芳[20]的研究结论一致。而后汛期降水期间来自东南水汽和西南水汽和东风暖湿气流占绝对主导地位,具有湿度大、蒸发较弱的特点[21]。海洋湿润气团在向大陆移动过程中不断降水,重同位素不断贫化,同时降水量效应掩盖了温度效应,导致降水稳定同位素降低,使得后汛期降水中同位素的δ值较低[22]。故2021-2023年华南汛期整体呈现出:华南前汛期降水氢氧同位素算数平均值>后汛期的变化趋势。

氘盈余值取决于形成降水时水汽源地的相对湿度,水汽源地相对湿度较低时,氘盈余值较高;反之,若水汽源地相对湿度较高,则氘盈余值较低[23]。研究区华南后汛期较华南前汛期相比,由于来自于低纬度的海洋湿润水汽占比更大,沿途空气相对湿润,氘盈余值较低,所以降水中氘盈余值出现后汛期较前汛期偏低的现象。

3.2 台风对华南汛期降水δD和$\delta^{18}O$的影响

以往研究表明,降水再蒸发程度可能与局地环境下的相对湿度条件有关[24]。由于中国东南部受到夏季北太平洋亚热带西部强烈影响[25],水蒸气在台风登陆前后,相对湿度较低,在一定程度上蒸发。每年的夏秋季是热带气旋的活跃时期,其驱动的台风对东西溪流域的大气降水过程必然产生了重要的影响。2021年和2023年华南后汛期期间,闽南地区受到台风过境或登陆影响,并且带来大量降水,由于更多的水汽参与凝结,导致较重的同位素被更有效地移除,从而使得台风降水的δD和$\delta^{18}O$值显著贫化,最终导致该时间段δD和$\delta^{18}O$值常表现为全年最低值。这与Lawrence等和Ohsawa[26-27]等的研究结论热带气旋降水同位素偏轻于夏季其他降水相一致。同时,台风引起的强烈对流活动过程中,使得较轻的同位素更容易在云中凝结成雨滴,而较重的同位素则留在大气中的水汽里,这种选择性的凝结过程也可能是导致了台风降水中同位素值的贫化[28]。

4 结论

以2021年至2023年闽南地区东西溪流域华南汛期降水事件为单位进行雨水样品采集,探究研究区域分别在华南前汛期、华南后汛期和台风影响期间降水稳定氢氧同位素的变化特征及其影响因素,追踪研究区域前汛期,后汛期以及台风期降水水汽来源及占比,得出以下结论:

1)华南汛期降水稳定氢氧同位素平均值整体上呈现出前汛期>后汛期的变化趋势,与受台风影响的2021年和2023年表现出相同特征,与2022年不同。

2)研究区域华南前汛期局地大气降水线方程截距和斜率均大于全球大气降水线方程,后汛期和台风期与之相反,反映出研究区域汛期水汽来源复杂的特征。

3)研究区域在前汛期、后汛期和台风期降水氢氧同位素均具有显著的雨量效应,未表现出显著温

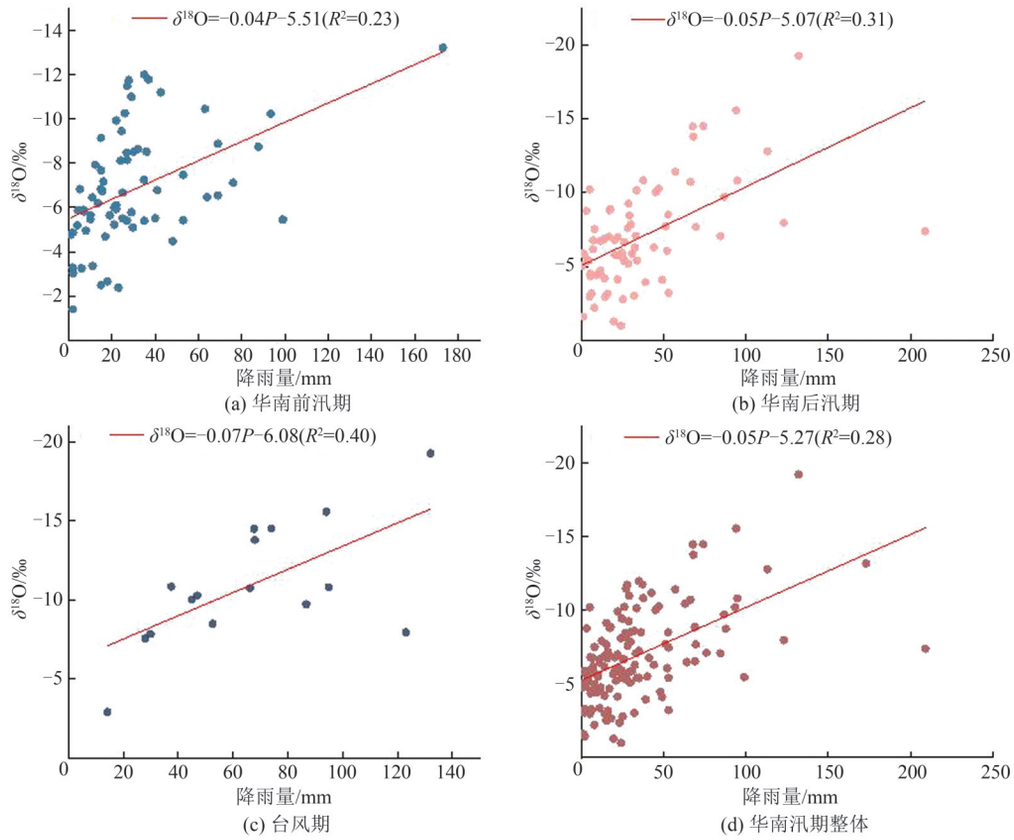


图 4　大气降水 δ^{18}O 与温度的关系

Fig.4　Relationship between δ^{18}O and temperature of atmospheric precipitation

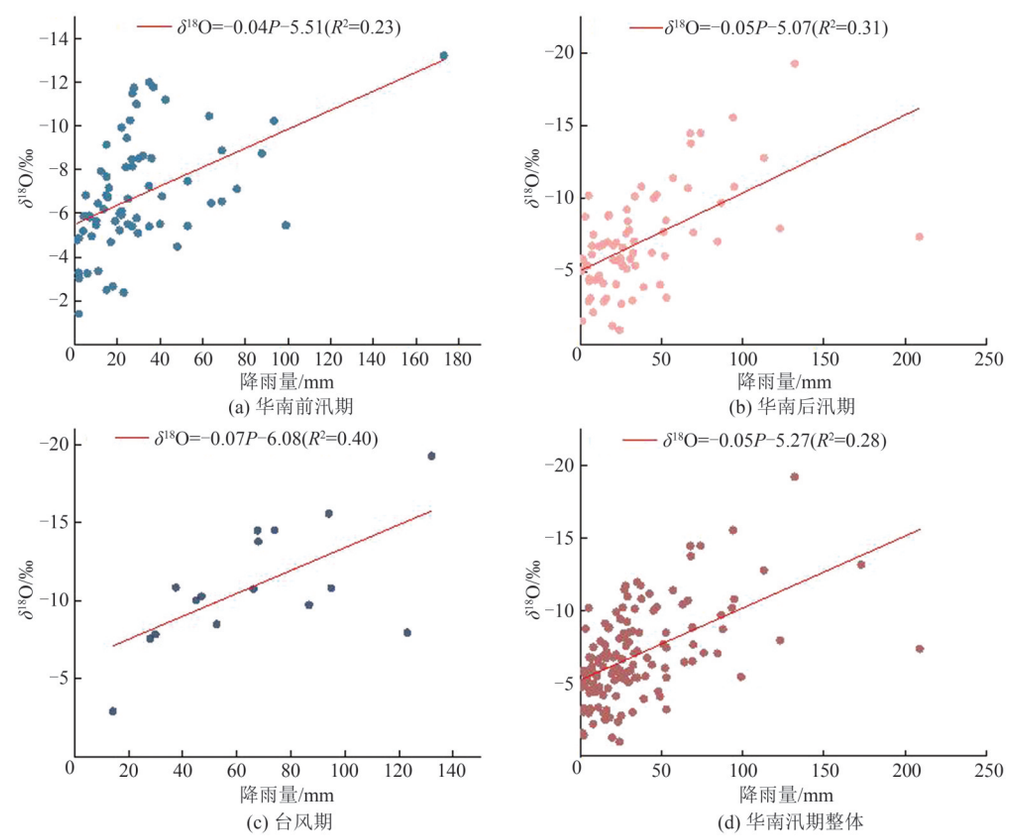


图 5　降水 δ^{18}O 与降水量关系

Fig5　Relationship between δ^{18}O and precipitation in precipitation

表3 研究区不同时期降水水汽主要来源占比分析

Table 3 Analysis of the Proportion of Main Sources of Precipitation and Water Vapor in the Study Area at Different Times

水汽来源 时期	西南输送水汽	东南输送水汽	东风输送水汽
华南前汛期	44.67%	19.79%	18.60%
华南后汛期	29.91%	32.70%	37.39%
台风“卢碧”	49.99%	20.83%	—
台风“杜苏芮”	60%	40%	—
台风“海葵”	18.75%	81.25%	—

度效应。

4)研究区域华南汛期大气降水水汽输送主要与西南水汽和东南水汽密切相关。同时在前汛期,受局地水汽再循环影响较大。

参考文献:

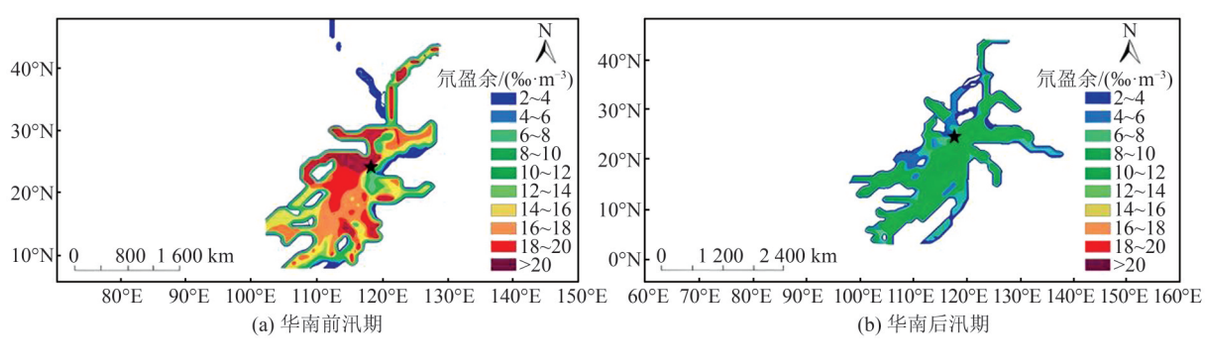


图6 研究区d-excess浓度轨迹分析

Fig6 CWT analysis of d-excess concentration in the study area

[1] GAO W H, XUE L L, LIU L P, et al. A study of the fraction of warm rain in a pre-summer rainfall event over South China[J]. Atmospheric Research, 2021, 262: 105792.

[2] ZHENG M L, WANG C Z. Interdecadal changes of tropical cyclone intensity in the South China Sea[J]. Climate Dynamics, 2023, 60(1): 409-425.

[3] 李丽平, 章开美, 王超, 等. 近40年华南前汛期极端降水时空演变特征[J]. 气候与环境研究, 2010, 15(4): 443-450.
LI Liping, ZHANG Kaimei, WANG Chao, et al. Temporal and spatial variations of extreme precipitation in the pre-flood period of South China in recent 40 years [J]. Climatic and Environmental Research, 2010, 15 (4): 443-450.

[4] REN Z G, ZHANG M J, WANG S J, et al. Changes in daily extreme precipitation events in South China from 1961 to 2011[J]. Journal of Geographical Sciences, 2015, 25(1): 58-68.

[5] 《华南前汛期暴雨》编写组. 华南前汛期暴雨[M]. 广州: 广东科技出版社, 1986: 244.???
Preparation group for the South China Flood Storm. Rainstorms during the Flood Season in South China [M]. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 1986. 244.???

[6] 詹国伟, 黎坚, 谭论婵, 等. 华南前汛期不同等级降水特征及其影响[J]. 广东气象, 2022, 44(5): 11-14.
ZHAN Guowei, LI Jian, TAN Lunchan, et al. Characteristics of precipitation at different intensity in the April-to-June flood season of Southern China and their effect[J]. Guangdong Meteorology, 2022, 44(5): 11-14.

[7] LING G R. Comparing water vapor transport during precipitation processes in the pre-flood period of South China and precipitation processes of typhoons in the post-flood period of South China: a case study[J]. Dynamics of Atmospheres and Oceans, 2023, 102: 101371.

[8] 林爱兰, 谷德军, 李春晖, 等. 影响华南汛期持续性强降水年际变化的大气环流和海温异常[J]. 热带气象学报, 2022, 38(1): 1-10.
LIN Ailan, GU Dejun, LI Chunhui, et al. Atmospheric circulation and sea surface temperature anomalies associated with the interannual variation of persistent heavy precipitation in flood season of South China[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2022, 38(1): 1-10.

[9] XU T, SUN X S, HONG H, et al. Stable isotope ratios of typhoon rains in Fuzhou, Southeast China, during 2013 – 2017[J]. Journal of Hydrology, 2019, 570: 445-453.

[10] YANG Y Y, JIANG X Y, CAI J R, et al. Variations of stable isotope in Typhoon Lupit (2021) rainfall and its response to upstream convective processes[J]. Hydrological Processes, 2023, 37(3): e14851.

[11] DANSGAARD W. Stable isotopes in precipitation[J]. Tellus, 1964, 16(4): 436-468.

[12] 鹿世瑾. 华南气候[M]. 北京: 气象出版社, 1990: China Meteorological Press, 1990: 336.
LU Shijin. South China Climate[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1990: 336.

[13] 柳鉴容, 宋献方, 袁国富, 等. 中国东部季风区大气降水δ18O的特征及水汽来源[J]. 科学通报, 2009, 54 (22): 3521-3531.
LIU Jianrong, SONG Xianfang, YUAN Guofu, et al. Characteristics of atmospheric precipitation δ18O and water vapor sources in the east monsoon region of China [J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(22): 3521-3531.

[14] 顾慰祖. 同位素水文学[M]. 北京: 科学出版社, 2011. (13 14 15顺序有问题)
GU Weizu. Isotope Hydrology[M]. Beijing: Science Press, 2011.

[15] 陈衍婷, 杜文娇, 陈进生, 等. 厦门地区大气降水氢氧同位素组成特征及水汽来源探讨[J]. 环境科学学报, 2016, 36(2): 667-674.
CHEN Yanting, DU Wenjiao, CHEN Jinsheng, et al. Composition of hydrogen and oxygen isotopic of precipitation and source apportionment of water vapor in Xiamen Area[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36 (2): 667-674.

[16] 孟鸿飞, 张明军, 王圣杰, 等. CWT方法在中国夏季降水水汽来源识别中的应用[J]. 干旱区研究, 2018, 35(4): 872-881.
MENG Hongfei, ZHANG Mingjun, WANG Shengjie, et al. Application of CWT method in identifying water vapor sources of summer precipitation in China[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(4): 872-881.

[17] 宋洋, 王圣杰, 张明军, 等. 塔里木河流域东部降水稳定同位素特征与水汽来源[J]. 环境科学, 2022, 43(1): 199-209.
SONG Yang, WANG Shengjie, ZHANG Mingjun, et al. Stable isotopes of precipitation in the eastern Tarim River Basin and water vapor sources[J]. Environmental Science, 2022, 43(1): 199-209.

[18] 李俊杰, 范伶俐, 梁梅, 等. 不同PDO背景下华南前汛期锋面和季风降水的水汽输送差异[J]. 大气科学学报, 2022, 45(4): 539-551.
LI Junjie, FAN Lingli, LIANG Mei, et al. Water vapor transport differences of frontal and monsoon precipi-

tation during South China pre-flood season under different PDO phases[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2022, 45(4): 539-551.

[19] 蔡明刚, 黄奕普, 陈敏, 等. 厦门大气降水的氢氧同位素研究[J]. 台湾海峡, 2000, 19(4): 446-453.
CAI Minggang, HUANG Yipu, CHEN Min, et al. A study on hydrogen and oxygen isotopes composition of precipitation in Xiamen[J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2000, 19(4): 446-453.

[20] 陈锦芳, 曹建平, 黄奕普. 厦门沿岸地区大气降水中氢、氧稳定同位素组成及其影响因素[J]. 海洋学研究, 2010, 28(1): 11-17.
CHEN Jinfang, CAO Jianping, HUANG Yipu. The hydrogen and oxygen isotope composition of precipitation in the Xiamen coastal area[J]. Journal of Marine Sciences, 2010, 28(1): 11-17.

[21] MERLIVAT L, JOUZEL J. Global climatic interpretation of the deuterium-oxygen 18 relationship for precipitation[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1979, 84(C8): 5029-5033.

[22] 王永森, 陈建生, 汪集旸, 等. 降水过程中氢氧稳定同位素理论关系研究[J]. 水科学进展, 2009, 20(2): 204-208.
WANG Yongsen, CHEN Jiansheng, WANG Jiyang, et al. Theoretical research on the relationship between deuterium and oxygen 18 in precipitation[J]. Advances in Water Science, 2009, 20(2): 204-208.

[23] JOUZEL J, MERLIVAT L. Deuterium and oxygen 18 in precipitation: Modeling of the isotopic effects during snow formation[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1984, 89(D7): 11749-11757.

[24] HE S N, GOODKIN N F, KURITA N, et al. Stable isotopes of precipitation during tropical Sumatra squalls in Singapore[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2018, 123(7): 3812-3829.

[25] LIN Y P, LI Y H, WANG L, et al. Compositions of hydrogen and oxygen isotopes of precipitation in Xiamen, southeast China coast: Seasonal variations, synoptic processes, and typhoons impact[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2023, 149(757): 3607-3622.

[26] LAWRENCE J R. Isotopic spikes from tropical cyclones in surface waters: Opportunities in hydrology and paleoclimatology[J]. Chemical Geology, 1998, 144(1/2): 153-160.

[27] OHSAWA S, YUSA Y. Isotopic characteristics of typhonic rainwater: typhoons No. 13 (1993) and No. 6 (1996)[J]. Limnology, 2000, 1(2): 143-149.

[28] WANG G Y, LAN H M, LIU Z F. Stable isotope record of super typhoon Lekima (2019)[J]. Atmospheric Research, 2021, 264: 105822.