

# 福州降水稳定同位素对 ENSO 事件的响应机制

张晓东<sup>1</sup>, 郭政昇<sup>2</sup>

(1.重庆旅游职业学院, 重庆 409099; 2.山西师范大学 地理科学学院, 山西 临汾 041004)

**摘要:** ENSO 事件背景下的水汽源区变化在很大程度上影响着季风区水循环过程, 基于福州的降水同位素及气象数据, 研究了 ENSO 背景下  $\delta^{18}\text{O}$  的时空分布特征, 并利用 OLR(向外长波辐射) 技术进一步探索降水中氢氧同位素特征对 ENSO 事件及水汽源区变化的响应机制。结果表明: 水汽源区变化主要通过影响降水的年内分配, 特别是雨季降水的时间分配状况影响  $\delta^{18}\text{O}$  的年际变化; 各事件年大气降水线方程有着规律性的变化, 拉尼娜年凸显出海洋性较强的气候特征; 厄尔尼诺年减弱雨季降水量效应而增强旱季反温度效应, 拉尼娜年则削弱旱季反温度效应; 通过 OLR 场反演的水汽源区变化与福州稳定同位素特征有着较强的对应关系, 西太平洋水汽源区的位置与对流强度的变化是 ENSO 事件年中影响福州降水稳定同位素变化的主要因素。

**关键词:** 降水同位素; ENSO; OLR 场; ITCZ; 福州

中图分类号: P342

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2020)01-0221-06

## Mechanism of the Response of Stable Isotopes of Precipitation to ENSO Events in Fuzhou

ZHANG Xiaodong<sup>1</sup>, GUO Zhengsheng<sup>2</sup>

(1. Chongqing Vocational Institute of Tourism, Chongqing 409099, China;

2. College of Geographical Sciences, Shanxi Normal University, Linfen, Shanxi 041000, China)

**Abstract:** The variation of moisture sources under the background of ENSO has a great influence on the hydrological cycle process in monsoon area. Based on the precipitation isotope and meteorological data of Fuzhou, the temporal and spatial distribution characteristics of  $\delta^{18}\text{O}$  were studied under the background of ENSO, and the mechanism of response of hydrogen and oxygen isotopic characteristics of precipitation to ENSO events was further explored by OLR technology. The results show that the variation of moisture source prominently affects the annual distribution of precipitation, especially the temporal distribution of precipitation in rainy season, which affects the interannual change of  $\delta^{18}\text{O}$ ; the Meteoric Water Line of each ENSO event changes regularly, and the La Nina year highlights the stronger oceanic characteristics; the El Nino year weakens the precipitation effect in rainy season. Meanwhile, the anti-temperature effect in dry season is strengthened, while that in La Nina year is weakened; the variation of moisture sources inverted by OLR field strongly corresponds to the stable isotope characteristics in Fuzhou, and the changes of location and convective intensity of moisture sources in the western Pacific Ocean are the main factors causing the stable isotope variation of precipitation in Fuzhou during ENSO event year.

**Keywords:** stable isotopes; ENSO; OLR field; ITCZ; Fuzhou

大气降水作为水循环过程中的一个重要环节, 是各种水体的重要补给来源, 水循环在时间和空间上不断地发生变化, 影响着—个地区生态环境的平衡, 也是地区可持续发展的重要影响因素。 $^{18}\text{O}$  和 D 是水分

子中所蕴含的天然同位素, 随水分子的运移广泛参与到自然界水循环中<sup>[1]</sup>。由于水汽所经过不同区域自然条件的差异, 温度、降水量、海拔等环境因素将导致水汽中的稳定同位素发生相应的分馏, 之后的蒸发、

不同水体间的局地水循环则会引起同位素的二次分馏,表现为水体中稳定同位素浓度与自然环境条件之间的相关性<sup>[2]</sup>,是目前追踪大气降水水汽来源及大气环流过程的主要手段。近年来诸多学者的研究表明,水汽源区的变化与大尺度对流过程制约着降水稳定同位素的特征<sup>[3]</sup>,而 ENSO(El Niño-Southern Oscillation)事件作为全球海气耦合的最强信号之一,对东亚季风区降水稳定同位素的年际波动有着极大的影响<sup>[4]</sup>。

目前国内外对水汽源区变化/ENSO 与降水稳定同位素之间遥相关关系的研究尚处于起步阶段。Vimeux 等<sup>[5]</sup>、Tremoy 等<sup>[6]</sup>、Kurita<sup>[7]</sup>证明了水汽源区变化与降水  $\delta^{18}\text{O}$  之间存在显著相关性,并对其内在机制进行了初步探索;Gao 等<sup>[8]</sup>、He 等<sup>[9]</sup>对青藏地区降水中的氢氧同位素与北印度洋对流活动之间的关系进行了研究;我国学者对珠江三角洲地区<sup>[10]</sup>、洞庭湖流域<sup>[11]</sup>、上海<sup>[12]</sup>降水中同位素组成与分布特征与 ENSO 事件的关系进行初步探索,证明了 ENSO 事件对降水稳定同位素的影响,但 ENSO 事件对季风区的影响是否具有同一性仍待明确。向外长波辐射 OLR(Outgoing Longwave Radiation)是从大气层外观测到的地气系统的对外辐射,是热带对流指示量,也是热带环流异常的重要表征<sup>[13]</sup>。相比于传统方法,OLR 技术能够更精确地反映水汽源区热带辐合带(Intertropical Convergence Zone, ITCZ)的位置与强度变化,并广泛的应用于海气相互作用等方面的研究。因 OLR 对 ENSO 事件的过程有着极为敏感响应,美国国家环境预报中心与日本气象厅等机构均将 OLR 技术用于 ENSO 事件的监测工作中<sup>[14]</sup>。目前对于 OLR 资料的应用主要集中于气象领域,Tang 等<sup>[15]</sup>将 OLR 技术应用于同位素水文学研究中,对 2012—2014 年南京降水稳定同位素与水源区 ITCZ 位置与强度变化之间的相关性进行了探索。然而目前对水源区变化/ENSO 事件与  $\delta^{18}\text{O}$  相关机制的研究刚刚起步,尚不明确 ENSO 事件对不同区域降水稳定同位素的影响程度及特征,也需要用新的方法深入对水汽源区变化过程的探索,提高指示精度,完善对 ENSO 事件发展过程的示踪。

福州位于我国东部季风区的东南沿海,地貌为河口盆地,闽江由此入海,属亚热带海洋性季风气候<sup>[16]</sup>。能够避免水汽深入内陆导致的同位素分馏及局地气候带来的影响,从而更为准确的反映同位素特征对 ENSO 事件的响应过程。本文依据福州站点的降水同位素与气象数据,利用 OLR 技术进一步探索水汽源区

变化及 ENSO 事件对降水中同位素特征的影响,能够深入了解我国季风区水汽来源及降水过程的变化,有助于进一步推进对季风区水循环机制的研究。

## 1 数据来源与方法

### 1.1 数据与方法

本文所用的福州站点(26.08°N, 119.28°E)月均降水稳定同位素数据来自全球大气降水同位素网络(Global Network of Isotope in Precipitation, GNIP),数据起止时间为 1985—1992 年。同位素  $\delta$  值均以维也纳标准海洋水(V-SMOW)的千分差表示:

$$\delta^{18}\text{O}(\text{or } \delta\text{D}) = [(R_{\text{水样}}/R_{\text{V-SMOW}}) - 1] \times 1000\text{‰}$$

式中: $R_{\text{水样}}$ 、 $R_{\text{V-SMOW}}$  分别为样品与 V-SMOW 中的  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  及 D/H 比值。

福州站点的气象数据来自中国气象数据网,OLR 数据源自国家卫星气象中心提供的风云二 E 地球同步轨道气象卫星,可见光红外自旋扫描辐射仪所处理的月均向外长波辐射(OLR)数据,空间分辨率为  $1^\circ \times 1^\circ$ 。卫星定位于  $105^\circ\text{E}$ ,能更好的反映我国及周边区域的水热状况及 ENSO 背景下水汽源区的演变过程。

### 1.2 ENSO 事件的划分依据与标准

本文用 Niño 3.4 区海洋尼诺指数(Oceanic Niño index, ONI),即海表温度指数(Sea Surface Temperature, SST)距平的 3 个月滑动平均值来定义 ENSO 事件,参考南方涛动指数(Southern Oscillation Index, SOI)计算海气强度指数。依美国气候预测中心(CPC)标准,ONI 指数连续 5 个月  $\geq 0.5^\circ\text{C}$ ,则定义为厄尔尼诺事件(El Niño),ONI 指数连续 5 个月  $\leq -0.5^\circ\text{C}$ ,则定义为拉尼娜事件(La Niña)。依照 ONI 与 SOI 累计值的标准差计算海气综合强度指数(Oceanic Niño & Southern Oscillation Composite Index, OSI):

$$\text{OSI}_n = \text{Std}(\sum \text{ONI}) - \text{Std}(\sum \text{SOI})$$

将海气综合强度指数(OSI)作为划分 ENSO 事件强度的依据,参照陈虹颖等<sup>[17]</sup>的分类方法,按表 1 标准将 ENSO 事件分为极强、强、中等、弱、极弱 5 个等级,字母 E 代表各阶段厄尔尼诺事件,字母 L 代表各阶段拉尼娜事件,1985—1992 年共经历了 2 次厄尔尼诺事件和 2 次拉尼娜事件,划分结果见表 2。

表 1 ENSO 事件的海气综合强度指标

海气综合强度	极弱	弱	中等	强	极强
厄尔尼诺事件	$\leq -2.0$	$-1.9 \sim -1.0$	$-0.9 \sim 0.9$	$1.0 \sim 1.9$	$\geq 2.0$
拉尼娜事件	$\geq 2.0$	$1.9 \sim 1.0$	$0.9 \sim -0.9$	$-1.0 \sim -1.9$	$\leq -2.0$

表 2 厄尔尼诺事件和拉尼娜事件统计

事件	序号	起始年月	持续 时间/月	ONI 极值	ΣONI 强度	海温 强度	SOI 极值	ΣSOI	OSI	海气 强度
厄尔尼诺 事件	E1	1986-09—1988-02	18	1.6	19.7	强	-2.4	-23.20	2.74	极强
	E2	1991-06—1992-07	14	1.6	14.1	强	-4.7	-21.90	1.73	强
拉尼娜 事件	L1	1984-10—1985-06	9	-1.1	-6.9	弱	2.0	4.50	1.95	弱
	L2	1988-05—1989-05	13	-1.8	-16.0	中等	3.0	-0.62	-1.58	中等

## 2 福州降水同位素特征分析

### 2.1 大气降水 δ<sup>18</sup>O 的季节变化

对福州站的 δ<sup>18</sup>O、降水、气温数据分别按厄尔尼诺年、正常年、拉尼娜年计算采样时段内多年月平均值,结果如图 1 所示。

总体上,福州站 δ<sup>18</sup>O 值表现为夏半年较低冬半年较高的趋势,由 1 月至 12 月表现为先波动下降再急剧上升的过程。由各事件年来看,δ<sup>18</sup>O 值总体表现出厄尔尼诺年>正常年>拉尼娜年的特征,特别是在夏季,这一特征更为突出,证明降水中 δ<sup>18</sup>O 值的水平敏感的响应着 ENSO 事件对季风气候的影

响。由图 1 可见,厄尔尼诺年、正常年、拉尼娜年的气温差异并不显著,但各事件年降水的差异则十分明显,与各事件年 δ<sup>18</sup>O 值的变化有着较好的对应。依据各事件年降水量数据,计算雨季 4—10 月各事件年降水量所占比例(图 2),可见在前期(4—7 月)厄尔尼诺年降水量所占比例稳定在 40%左右,而在后期(8—10 月),特别是 9—10 月则是拉尼娜年降水比例显著增多,因而厄尔尼诺年降水显著集中于雨季前期,而拉尼娜年降水在雨季后期占主导地位。由此可见,ENSO 事件对大气降水 δ<sup>18</sup>O 的影响主要通过影响降水的年内分布,特别是雨季降水的时间分布状况而实现。

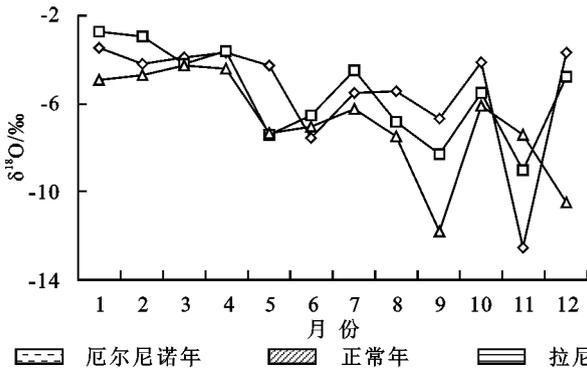


图 1 福州大气降水 δ<sup>18</sup>O、降水量、温度的多年平均变化

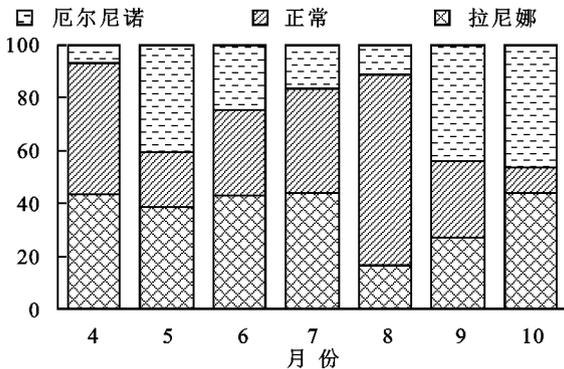
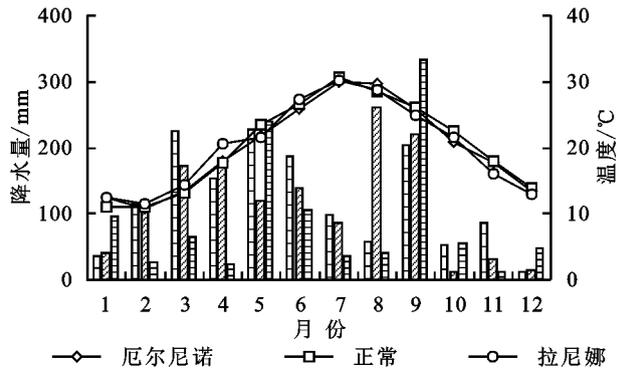


图 2 雨季各事件年平均降水量对比

### 2.2 大气降水线方程的差异

大气降水中 δD 和 δ<sup>18</sup>O 之间的线性关系被称作大气降水线方程。因降水中的同位素分馏状况及比率变化受降水区自然环境要素的影响,大气降水线方程代表着稳定同位素与地理特征之间的独特关系,深刻的反映着不同地域独特的降水特征<sup>[18]</sup>。依据 78

组月均数据,得到福州站厄尔尼诺年、正常年、拉尼娜年大气降水线方程为:

$$\text{厄尔尼诺年: } \delta D = 8.03\delta^{18}O + 12.87 (R^2 = 0.89)$$

$$\text{正常年: } \delta D = 8.21\delta^{18}O + 10.38 (R^2 = 0.92)$$

$$\text{拉尼娜年: } \delta D = 8.68\delta^{18}O + 16.80 (R^2 = 0.98)$$

图 3 为福州 δD-δ<sup>18</sup>O 间的线性关系,可见厄尔尼诺年的斜率小于正常年,拉尼娜年的斜率与截距均大于正常年,表明 ENSO 事件对降水中稳定同位素的分馏状况有着规律性的影响,造成这一差异的原因可能是由于 ENSO 事件改变了福州降水的年内分配状况。厄尔尼诺年降水集中于雨季前期,是旱季向雨季转换的季节,蒸发旺盛,雨水在降落过程中受到了二次蒸发,局地再循环水汽在降水中所占比例也较高,从而使厄尔尼诺年的斜率与截距降低。拉尼娜年降水集中于雨季后期,水汽蒸发趋缓,局地再循环水

汽在降水中的比例也随之下降,从而推高了拉尼娜年的斜率与截距。但这一结论与上海<sup>[12]</sup>站的大气降水线方程不同,其厄尔尼诺年的斜率与截距在数值上大于非厄尔尼诺年。由此可见,ENSO 事件对大气环流的影响极为复杂,其对大气降水线方程的影响因地区而异,这一规律还有待于进一步研究。与 Yurtsever 等<sup>[19]</sup>获得的全球大气降水线方程( $\delta D=8.17\delta^{18}O+10.56$ )相比,正常年斜率与截距与之极为相近,非正常年斜率与截距则发生轻微的反向变化;与 Liu 等<sup>[20]</sup>提出的中国降水线方程( $\delta D=7.48\delta^{18}O+1.01$ )、柳鉴容等<sup>[21]</sup>所报道的中国东部季风区降水线方程( $\delta D=7.46\delta^{18}O+0.90$ )相比,斜率与截距均较高,与珠江流域大气降水线方程( $\delta D=8.08\delta^{18}O+11.00$ )相近<sup>[18]</sup>。综合来看,与全球、珠江流域大气降水线方程相近,而较中国各地大气降水线方程显著较高的斜率与截距,体现出暖湿性的气候特征。

表 3 福州大气降水  $\delta^{18}O$  与气温、降水的关系

分类	时节	$\delta^{18}O$ 与降水量	$R_{\delta-P}^2$	$\delta^{18}O$ 与气温	$R_{\delta-T}^2$
厄尔尼诺年	雨季	$\delta^{18}O = -0.12P - 3.67$	0.30*	$\delta^{18}O = -3.1T - 2.18$	0.25
	旱季	$\delta^{18}O = -2.83P - 1.06$	0.64	$\delta^{18}O = -0.24T - 3.97$	0.69*
正常年	雨季	$\delta^{18}O = -0.11P - 1.72$	0.89*	$\delta^{18}O = 0.07T - 7.36$	0.08
	旱季	$\delta^{18}O = -0.01P - 4.36$	0.01	$\delta^{18}O = -0.47T - 2.48$	0.22*
拉尼娜年	雨季	$\delta^{18}O = -0.01P - 5.8$	0.59*	$\delta^{18}O = -0.03T - 8.40$	0.01
	旱季	$\delta^{18}O = -0.02P - 6.98$	0.03	$\delta^{18}O = -0.35T - 11.34$	0.19

注: \* 为通过 0.05 显著性水平检验。

福州站  $\delta^{18}O$  的环境效应在不同事件年有着不同的表现,总体上雨季以降水量效应为主,旱季以反温度效应为主。在雨季,各事件年  $\delta^{18}O$  与降水量的关系都通过 0.05 显著性水平检验,证明雨季降水量效应占主导地位,正常年  $R_{\delta-P}^2$  高达 0.89,拉尼娜年略有减少,而厄尔尼诺年则减弱至 0.30, $\delta^{18}O$  与温度的关系全部未通过显著性检验。这应是由于 ENSO 事件导致水汽源区湿度出现异常,从而影响到水汽中的稳定同位素分馏状况所致。在旱季,厄尔尼诺年与正常年  $\delta^{18}O$  与温度的关系通过显著性检验,且厄尔尼诺年  $R_{\delta-T}^2$  为 0.69,拉尼娜年反温度效应则并不存在,各事件年的降水量效应也都并不存在。总体而言,ENSO 事件对福州环境效应的影响主要体现在:厄尔尼诺年减弱雨季降水量效应而增强旱季反温度效应,拉尼娜年则削弱旱季反温度效应,这一规律应与水汽源区的年际差异有关。

### 3 ENSO 事件对降水中 $\delta^{18}O$ 的影响

#### 3.1 ENSO 事件与降水中 $\delta^{18}O$ 年内变化的关系

在影响降水稳定同位素特征的诸多因素中,水汽源区变化首先影响着稳定同位素的分馏状况,水汽团

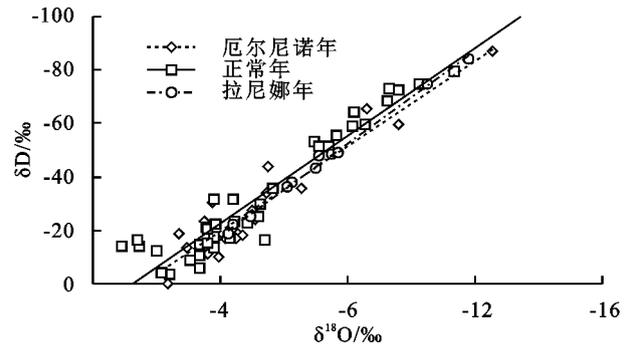


图 3 福州大气降水线方程

#### 2.3 大气降水 $\delta^{18}O$ 的与局地环境的关系

在我国季风区,降水同位素组成受环境因素的限制,在不同季节形成不同的氢氧稳定同位素特征<sup>[22]</sup>,其中温度与降水量对同位素分馏比率的影响最为显著。因全年尺度下的环境效应并不显著,依据福州站月均数据,分别计算各事件年旱雨两季的降水量效应与温度效应(表 3)。

运移过程与降水区环境特征都是在其基础上,对降水中的稳定同位素特征进行再塑造<sup>[23]</sup>。就水汽源区变化的影响而言,ENSO 事件无疑是最为显著的因子,对水汽源区的季节性演变、区域乃至全球的降水、气温等气候要素的异常有着密切关系<sup>[24]</sup>,并直接影响着水循环中稳定同位素的分馏状况与特征。由于降水同位素的水平及特征在一个较长的时期内都处于较为稳定的状态,综合考虑降水同位素与气象卫星数据的起止时间,因 ENSO 事件的多为跨年度发生,且转换时间一般为夏半年,选定 2015—2016 年、2014—2015 年、2010—2011 年作为厄尔尼诺年、正常年与拉尼娜年的分析时间,以 7 月、10 月、1 月、4 月 OLR 场图代表水汽源区的年内变化状况。需要说明的是,2015—2016 年厄尔尼诺事件为极强,其 OLR 场表现较拉尼娜年更为极端,但也更加凸显其变化规律,结果如附图 1 所示。

同月份在不同 ENSO 事件背景下,水汽源区的状况有着显著差异,其 OLR 值总体上呈现出厄尔尼诺年 > 正常年 > 拉尼娜年的特征,这与图 2 中各站点在不同年份背景下表现出的  $\delta^{18}O$  值水平差异相一致,证明 ENSO 事件背景下水汽源区的变化对  $\delta^{18}O$  值的年际变化有着很大的影响。

具体来看,7月代表的夏季是气温最高、降水较多的季节,此时厄尔尼诺年水汽源区的 OLR 场表现为高值区域,无明显的水汽中心,而正常年与拉尼娜年则建立了明显的 ITCZ。正常年孟加拉湾与西太平洋水汽源连为一体,西太平洋 OLR 低值区程度更深,水汽辐合更强,而拉尼娜年则相对较弱,孟加拉湾低值区辐合更强,表明正常年与拉尼娜年水汽源区特征差异显著。这一时期各站点正常年与拉尼娜年降水量总体大于厄尔尼诺年,由沿海向内陆这一特点更趋明显,图 1 中的  $\delta^{18}\text{O}$  值同样表现为正常年 > 拉尼娜年 > 厄尔尼诺年,与 OLR 场特征一致,这一时期也是 OLR 与  $\delta^{18}\text{O}$  值的差异表现最为显著的时期。

10月代表的秋季是气温与降水逐步降低的阶段,此时水汽源区已经南移,副高已经控制华南地区,厄尔尼诺年与正常年 ITCZ 显著减弱,而拉尼娜年则十分明显。这一时期降水显著减少, $\delta^{18}\text{O}$  值则出现了拉尼娜年与厄尔尼诺年先上升再下降的现象,特别是在 11 月演变为拉尼娜年 > 正常年 > 厄尔尼诺年,与 OLR 场一致。此时拉尼娜年辐合带范围更广、更偏北且程度更深,海温相对较高且水汽运移路线相对于正常年与厄尔尼诺年更短,稳定同位素在水汽团运移过程中贫化程度更低,气温降低的同时  $\delta^{18}\text{O}$  值下降并不多。

1月代表的冬季是气温与降水最低的季节, $10^\circ\text{N}$  地区由副高控制,ITCZ 退至赤道地区,厄尔尼诺年辐合中心极为微弱,而正常年与拉尼娜年则较为明显。这一时期拉尼娜年辐合带保持着范围更广、更偏北且程度更深的特点,但这一时期福州主要受北方大陆气团影响,水汽源区的变化与  $\delta^{18}\text{O}$  的变化并不同步。

4月代表的春季是气温与降水逐步升高的阶段,此时副高减弱,ITCZ 北移,厄尔尼诺年辐合中心逐渐加强,正常年与拉尼娜年较为明显,正常年 ITCZ 加深,厄尔尼诺年 ITCZ 至 5 月方才建立,降水也随之增多。这一时期是厄尔尼诺年 ITCZ 最强的时期,随着孟加拉湾水汽源区的发展,厄尔尼诺年  $\delta^{18}\text{O}$  值逐渐上升,这一时期  $\delta^{18}\text{O}$  值水平全部为厄尔尼诺年 > 正常年 > 拉尼娜年的状态。

### 3.2 水汽源区的年际差异

基于以上对 OLR 场各事件年内变化规律的分析,为进一步确证水汽源区的位置及其在不同 ENSO 背景下的总体变化状况,依据各事件年 12 个月份的月均 OLR 场,得到各事件年的年均 OLR 场,并分别计算厄尔尼诺年/拉尼娜年与正常年的差值,结果见附图 2。

从 ENSO 事件的发展过程来看,与正常年相比,厄尔尼诺与拉尼娜年 ITCZ 的变化规律呈现出相反的趋势。厄尔尼诺年 ITCZ 在 4 月开始建立并加深,至 7 月达到最盛,而 10 月则较弱;正常年在 7 月和 4 月左右是 ITCZ 程度最深的阶段;拉尼娜年 ITCZ 则在 10 月达到最盛,1 月仍保持着较大的范围。因此,厄尔尼诺年 ITCZ 主要建立并加深在春夏季,且总体偏南,规模较小;而拉尼娜年 ITCZ 则在秋季达到一年中的峰值,总体偏北,范围较大,不同事件年 ITCZ 的变化特征与福州站  $\delta^{18}\text{O}$  的环境效应规律相吻合。厄尔尼诺年对降水和  $\delta^{18}\text{O}$  值的影响主要体现在雨季前期,而拉尼娜年主要体现在雨季的后期,这与 2.1 与 2.3 中的分析结果一致。

厄尔尼诺年与正常年的 OLR 差值主要体现在西太平洋,印度洋水汽源区差值与范围相对较小,主要位于赤道附近地区,其 OLR 均值较正常年偏高  $10\sim 15\text{ W}/\text{m}^2$ 。拉尼娜年 OLR 差值同样体现在西太平洋水汽源区,且范围更广,强度更大,其 OLR 均值较正常年偏低  $20\text{ W}/\text{m}^2$  左右,而印度洋水源区的波动范围与强度相较于厄尔尼诺年都明显减弱。拉尼娜年水源区位置要更靠北,接近  $10^\circ\text{N}$  左右,西太平洋水汽源区的波动范围与强度都远大于印度洋水源区,因此印度洋水源区较为稳定,西太平洋水汽源区位置与对流强度的变化是 ENSO 事件年中影响研究区降水稳定同位素变化的主要因子。

## 4 结论

(1) ENSO 事件背景下的水汽源区变化是影响稳定同位素年际差异的主要因素,主要通过影响降水的年内分配,特别是雨季降水的时间分配状况而实现;ENSO 事件对大气降水线方程有着明显规律性的影响,拉尼娜年凸显出海洋性较强的气候特征;厄尔尼诺年减弱雨季降水量效应而增强旱季反温度效应,拉尼娜年则削弱旱季反温度效应。

(2) 水汽源区 ITCZ 的位置、对流活动强度及气团运移过程显著影响着稳定同位素的特征,厄尔尼诺与拉尼娜年 ITCZ 的变化规律呈现出相反的趋势,其 OLR 场的变化与研究区稳定同位素特征有着较强的对应关系;西太平洋水汽源区位置与对流强度的变化是 ENSO 事件年中影响研究区降水稳定同位素变化的主要因子。

本文基于 OLR 技术初步研究了 ENSO 事件对福州降水中稳定同位素的影响,由于 ENSO 事件的影响及水汽源区变化的过程极为复杂,降水稳定同位素对 ENSO

事件的响应机制仍需深入探索。福州大气降水线方程在不同事件背景下的变化规律与上海相反,这说明 ENSO 事件对大气水线方程的影响具有显著的地域差异性,但目前尚无更多的资料说明 ENSO 事件对水线方程产生影响的规律;其次,目前对这一机制的研究尚处于起步阶段,在今后的研究中有望通过大气环流模型或其他技术手段进一步做出定量化分析。

#### 参考文献:

- [1] 刘杨民,张明军,王圣杰,等.基于 GCM 的西北干旱区降水稳定氢氧同位素年际变化模拟[J].水土保持研究,2016,23(1):260-267,277.
- [2] 孙从建,张子宇,李捷,等.青藏高原西北部大气降水稳定同位素时空特征变化[J].山地学报,2018,36(2):217-228.
- [3] Peng T R, Wang C H, Huang C C, et al. Stable isotopic characteristic of Taiwan's precipitation: A case study of western Pacific monsoon region[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2010,289(3/4):357-366.
- [4] 赵侃,陈仕涛,崔英方,等.神农架石笋记录的近 200 年东亚季风变化及其 ENSO 响应[J].地理研究,2015,34(1):74-84.
- [5] Vimeux F, Tremoy G, Risi C, et al. A strong control of the South American SeeSaw on the intra-seasonal variability of the isotopic composition of precipitation in the Bolivian Andes[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2011,307(1/2):47-58.
- [6] Tremoy G, Vimeux F, Mayaki S, et al. A1-year long  $\delta^{18}\text{O}$  record of water vapor in Niamey(Niger)reveals insightful atmospheric processes at different timescales[J]. Geophysical Research Letters, 2012,39(8):85-93.
- [7] Kurita N. Water isotopic variability in response to mesoscale convective system over the tropical ocean[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2013, 118(18):10376-10390.
- [8] Gao J, Masson-Delmotte V, Yao T, et al. Precipitation water stable isotopes in the south Tibetan Plateau: observations and modeling [J]. Journal of Climate, 2011,24(13):3161-3178.
- [9] He Y, Risi C, Gao J, et al. Impact of atmospheric convection on south Tibet summer precipitation isotopologue composition using a combination of in situ measurements, satellite data, and atmospheric general circulation modeling [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2015,120(9):3852-3871.
- [10] 薛积彬,钟巍,赵引娟,等.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,2007,27(6):825-830.
- [11] 黄一民,宋献方,章新平,等.洞庭湖流域降水同位素与 ENSO 关系研究[J].地理科学,2017,37(5):792-798.
- [12] 董小芳,杨华玮,张峦,等. ENSO 事件对上海降水中氢氧同位素变化的影响[J].环境科学,2017,38(12):4991-5003.
- [13] 郭政昇,郑国璋,赵培,等.水汽源区变化对黄河中游降水稳定同位素的影响[J].自然资源学报,2018,33(11):1979-1991.
- [14] Vincent D G, Fink A, Schrage J M, et al. High-and low-frequency intraseasonal variance of OLR on annual and ENSO timescales[J]. Journal of Climate, 1998,11(5):968-986.
- [15] Tang Y, Pang H, Zhang W, et al. Effects of changes in moisture source and the upstream rainout on stable isotopes in precipitation: A case study in Nanjing, eastern China[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 19,10(2015-10-22),2015,12(4):3919-3944.
- [16] 严宇,王雪松,周家斌.福州市区冬春季 PM<sub>2.5</sub> 污染特征与来源差异性分析[J].环境科学学报,2019,39(4):1049-1056.
- [17] 陈虹颖,徐峰,李晓惠,等.近 65 年 ENSO 事件强度变化及时频特征研究[J].热带气象学报,2017,33(5):683-694.
- [18] 郭政昇,王娟,赵培.珠江流域大气降水稳定性氢氧同位素特征[J].水文,2017,37(2):78-82.
- [19] Yurtsever Y, Gat J R. Atmospheric waters[C]//Gat J R, Gonfiantini R. Stable Isotope Hydrology: Deuterium and Oxygen-18 in the Water Cycle. Vienna: International Atomic Energy Agency, 1981:103-142.
- [20] Liu J, Song X, Yuan G, et al. Stable isotopic compositions of precipitation in China[J]. Tellus B: Chemical and Physical Meteorology, 2014,66(1):39-44.
- [21] 柳鉴容,宋献方,袁国富,等.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,2009,54(22):3521-3531.
- [22] 刘澄静,角媛梅,刘歆,等.基于氢氧稳定同位素的哈尼水稻梯田湿地水源补给分析[J].生态学杂志,2018,37(10):3092-3099.
- [23] An W, Hou S, Zhang Q, et al. Enhanced recent local moisture recycling on the northwestern Tibetan Plateau deduced from ice core deuterium excess records: Moisture recycling on Tibetan Plateau[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2017, 122(23):12541-12556.
- [24] Ropelewski C F, Halpert M S. Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño/Southern Oscillation [J]. Monthly Weather Review, 1987,115(8):1606-1626.