

东江下游大气降水氢氧同位素特征及水汽来源*

谢林环¹, 江涛¹, 曹英杰^{2,3}, 黎坤¹, 唐常源^{1,2,3}

(1. 中山大学地理科学与规划学院, 广东 广州 510275;

2. 中山大学环境科学与工程学院, 广东 广州 510275;

3. 广东省环境污染控制与修复技术重点实验室, 广东 广州 510275)

摘要: 大气降水是水循环系统的主要输入源, 其氢、氧稳定同位素组成 (δD 、 $\delta^{18}O$) 受区域气象、地理等因素变化影响较大, 可以对环境变化做出快速、及时的响应, 是研究全球和局地水循环特征的重要技术手段。东江流域地处我国珠江三角洲, 季风环流通过影响水汽输送场的分布控制降水的时空分配。为研究区域降水成因及机理, 本文采集并测定东江流域下游地区 2017 年逐日降水样品中 δD 、 $\delta^{18}O$, 以月为研究时间尺度, 分析其与气温、降水量之间的关系; 利用 HYSPLIT 后向轨迹模式追踪降水气团的传输路径, 进一步探讨区域降水的水汽来源及输送状况。结果表明, 研究期间降水样品中 δD 的变化范围为 $-105.10‰ \sim +9.98‰$, 雨量加权平均值为 $-57.88‰$; $\delta^{18}O$ 的变化范围为 $-14.80‰ \sim -0.55‰$, 雨量加权平均值为 $-8.61‰$, 局地大气降水线为 $\delta D = 8.60\delta^{18}O + 16.15$ ($R^2 = 0.99$)。月尺度下 $\delta^{18}O$ 最高值出现在 1 月份, 为 $-3.47‰$, 最低值出现在 8 月份, 为 $-10.17‰$ 。 $\delta^{18}O$ 与气温、降水量均呈显著负相关关系, 表现“反温度效应”和“降水量效应”。太平洋水汽带来的降水 $\delta^{18}O$ 、 δD 偏高, 印度洋水汽带来的降水 $\delta^{18}O$ 、 δD 偏低, 而南海降水气团中 $\delta^{18}O$ 、 δD 则随季节的不同而改变, 表现为夏、秋两季明显较春季贫化, 存在明显“降水同位素环流效应”。

关键词: 氢氧同位素; 大气降水; 水汽来源; HYSPLIT; 东江

中图分类号: P426.6 文献标志码: A 文章编号: 0529-6579(2020)01-0086-10

The hydrogen and oxygen isotope characteristics of precipitation and water vapor sources in the lower Dongjiang River reaches, Guangdong Province

XIE Linhuan¹, JIANG Tao¹, CAO Yingjie^{2,3}, LI Kun¹, TANG Changyuan^{1,2,3}

(1. School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

2. School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Environmental Pollution Control and Remediation Technology, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Atmospheric precipitation is the main input source of the water cycle system, and the stable isotope compositions (δD , $\delta^{18}O$) are greatly influenced by regional meteorological and geographical factors and are very sensitive to environmental changes. Stable oxygen and hydrogen isotope technique is widely used to study the characteristics of the global and local water circulation. The Dongjiang River Ba-

* 收稿日期: 2018-07-20

基金项目: 国家自然科学基金(41501512); 国家自然科学基金(41471020); 广东省自然科学基金(2017A030313231)

作者简介: 谢林环(1993年生), 女; 研究方向: 水文与水环境; E-mail: xielh8@mail2.sysu.edu.cn

通信作者: 江涛(1965年生), 女; 研究方向: 水文与水环境; E-mail: eesjt@mail.sysu.edu.cn

sin is located in the Pearl River Delta, China. The monsoon circulation controls the time and space distributions of precipitation by affecting the distribution of water vapor transport field. The lower reaches of the Dongjiang River was taken as the research object to study the mechanism of regional precipitation. Daily precipitation samples were collected in 2017, δD and $\delta^{18}O$ were measured and the relationships between δD , $\delta^{18}O$ and temperature, precipitation were analyzed. The HYSPLIT backward trajectory model was used to trace water vapor sources and the transport of regional precipitation. The results show that the δD and $\delta^{18}O$ values ranged from -105.10‰ to $+9.98\text{‰}$ and -14.80‰ to -0.55‰ , respectively, and the annual weighted mean values were -57.88‰ and -8.61‰ . Regional Meteoric Water Line was $\delta D = 8.60\delta^{18}O + 16.51$ ($R^2 = 0.99$). The maximum $\delta^{18}O$ appeared in January, which was -3.47‰ , and the minimum value appeared in August, which was -10.17‰ . In the monthly scale, $\delta^{18}O$ shows “anti-temperature effect” and “quantity effect”. The δD and $\delta^{18}O$ in precipitation which caused by water vapor in the Pacific Ocean were higher than those in the Indian Ocean. However, the δD and $\delta^{18}O$ in precipitation caused by the air masses from the South China Sea changed with the seasons, which were significantly lower in summer and autumn than those in spring. There was obvious circulation effect of isotope in atmospheric precipitation.

Key words: hydrogen and oxygen isotopes; atmospheric precipitation; water vapor source; HYSPLIT; Dongjiang River

存在于自然水体中的环境同位素 D 和 ^{18}O 在水的相变过程中, 其含量会相应发生变化, 称为同位素分馏。基于此原理, ^{18}O 和 D 被广泛应用于水循环过程的示踪研究^[1-3]。大气降水是全球水循环系统的主要输入源, 其同位素组成对环境变化极其敏感^[4-5], 通常将大气降水中同位素组成与环境要素间的相关关系称为环境同位素效应^[6]。通过分析降水同位素组成, 可揭示水汽来源及局地、区域乃至全球的水循环特征^[7]。

影响降水稳定同位素组成的因素较多, 如温度、降水量等^[8]。云团冷凝服从瑞利条件, 氢、氧同位素组成与分馏系数 α 有关, α 是冷凝温度的函数, 故同位素值随温度的变化而改变。由于云层冷凝温度难以直接测量, 地面温度与冷凝温度在一定程度上有对应关系, 故常用地面温度替代^[9]。章新平^[10]基于国际原子能机构 (IAEA) 和世界气象组织 (WMO) 监测网数据 24 个站点资料, 按照年际、月和天气三个时间尺度, 分析了降水稳定同位素与温度间相关关系, 得到月尺度下温度效应主要分布在中高纬度、年际尺度下 $\delta^{18}O$ 与年均温度间也存在一定程度的正相关关系的结论。陈中笑等^[11]指出, 影响大气降水同位素组成的大陆效应、高度效应、纬度效应等, 本质上都是受温度控制。但是在低纬度沿海地区或季风区, 温度效应会受到一定程度的抑制, 降水量效应显著^[12-13], 即稳定同位素比率与降水量之间存在反相关关系。

卫克勤等^[9]通过研究我国降水 ^{18}O 和 D 同位素

发现, 受季风气候影响的地区夏季降水同位素组成偏负, 但跟当地降水量并不都直接相关, 降水气团的来源和性质等气候环境背景也是决定降水同位素组成的重要因素。不同的水汽蒸发源地和输送路径, 雨滴氢、氧同位素动力分馏程度不同, 从而造成局地降水同位素组成的差异, 利用该特征可示踪大气降水的水汽来源, 为大气环流及气候变化提供重要的参考信息^[14-16]。庞洪喜等^[17]基于 IAEA 全球降水同位素观测网 (GNIP) 中新德里和香港两站同位素资料确定的季风降水的水汽源区, 与基本大气环流背景相吻合。柳鉴容等^[18]利用中国大气降水同位素网络 (CHNIP) 南部 7 个站点, 于 2005 年 7 月收集并分析月大气降水样品, 发现降水中氧同位素对夏季南部地区 3 条主要水汽通道 (西南、南海和东南水汽通道) 有很好的指示作用。

东江流域地处我国珠江三角洲, 季风环流为区域降水的发生提供了充沛的水汽条件, 同时通过影响水汽输送场的分布控制降水的时空分配^[18]。本文通过采集分析东江下游 2017 年逐日降水样品中氢、氧同位素组成特征, 探讨其与气温、降水量等气象要素之间的关系, 并利用 HYSPLIT (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory) 后向轨迹模式, 模拟研究区域大气降水气团的历史轨迹, 进一步验证氢、氧稳定同位素对于指示区域降水水汽来源及输送状况的作用, 为区域降水成因及机理研究提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

东江是广东省四大水系之一, 发源于江西省寻邬县桫髻钵山, 上游称寻乌水, 在广东省的龙川县合河坝与安远水汇合后称东江, 地理位置介于 $113^{\circ}52' \sim 115^{\circ}52' \text{E}$, $22^{\circ}38' \sim 25^{\circ}14' \text{N}$ 。东江干流全长 562 km, 河床平均坡降为 0.39‰ ^[19], 在广东省境内自东北向西南流经河源、惠州、东莞等市后注入狮子洋 (图 1)。流域面积 $35\,340\text{ km}^2$, 其中广东省境内 $31\,840\text{ km}^2$, 占流域总面积的 90% ^[20]。东江流域属亚热带季风性湿润气候, 高温多雨, 多年平均气温 $20.4\text{ }^{\circ}\text{C}$, 多年平均降雨量为 $1\,750\text{ mm}$ ^[21]。

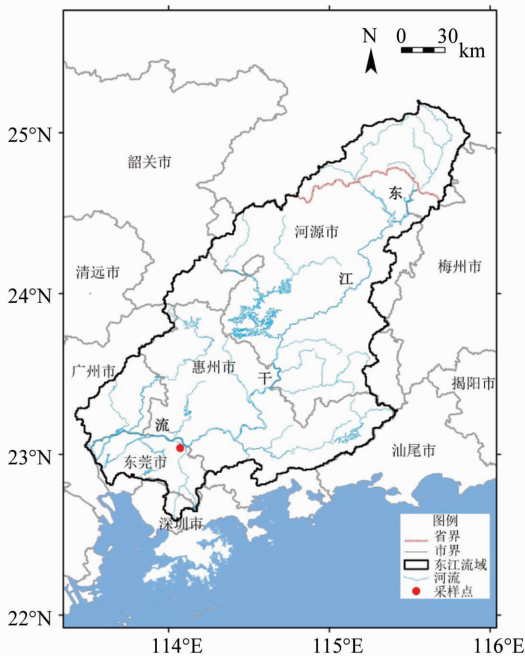


图 1 东江流域范围及采样点分布

Fig. 1 Location of the Dongjiang River Basin and sampling site

1.2 采样与分析方法

在东江下游东莞市桥头镇设置采样点 ($114^{\circ}6'24''\text{E}$, $23^{\circ}2'26''\text{N}$), 收集 2017 年逐日 (当日上午 8:00~ 次日上午 8:00) 降水样品, 并记录每日降水量, 个别样品由于降水量较小 ($<1\text{ mm}$) 未进行收集, 共收集样品 81 个。采集的样品装于聚乙烯瓶中, 瓶口用封口膜密封后置于 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 恒温环境下保存; 经 $0.22\text{ }\mu\text{m}$ 滤膜过滤后, 用 Picarro L2130-i 激光水汽同位素分析仪进行测定, 氢、氧同位

素的分析精度分别为 0.1‰ 和 0.02‰ 。氢、氧稳定同位素组成以维也纳标准平均海水 (VSMOW) 为基准表示 ($\delta, \text{‰}$)^[22], 计算公式如下:

$$\delta D = \left[\left(\frac{D}{H} \right)_{\text{样品}} / \left(\frac{D}{H} \right)_{\text{VSMOW}} - 1 \right] \times 1\,000\text{‰} \quad (1)$$

$$\delta^{18}\text{O} = \left[\left(\frac{{}^{18}\text{O}}{{}^{16}\text{O}} \right)_{\text{样品}} / \left(\frac{{}^{18}\text{O}}{{}^{16}\text{O}} \right)_{\text{VSMOW}} - 1 \right] \times 1\,000\text{‰} \quad (2)$$

式中, D/H 、 ${}^{18}\text{O}/{}^{16}\text{O}$ 为同位素丰度比。

气温资料使用临近研究区的东莞站 (编号: 59289) 作为代表, 数据由中国气象局网站 (www.cma.gov.cn) 共享资料中心提供。

1.3 HYSPLIT 后向轨迹模式及模拟方法

本文利用 Wang 等^[23] 开发的 TrajStat 软件计算气团轨迹, 模拟研究区域大气降水气团的来源。该软件气团轨迹计算使用美国国家海洋和大气管理局 NOAA 和澳大利亚气象局联合开发的 HYSPLIT 后向轨迹模式, 在计算轨迹或空气团的平移和扩散采用运动参考系, 空气中粒子运动轨迹为时间 t 和空间位置矢量 V 的积分, 最终位置由初始位置 $L(t)$ 和第一猜测位置 $L'(t + \Delta t)$ 的三维平均速率得到, 速度矢量在时空上都是线性插值的, 其计算公式为^[24]:

$$\begin{aligned} L'(t + \Delta t) &= L(t) + V(L, t) \Delta t \\ &= L(t) + \frac{1}{2} [V(L, t) \\ &\quad + V(L', t + \Delta t)] \Delta t \end{aligned} \quad (3)$$

式中, Δt 为时间步长, 本文选取 1 h 。

此次模拟以全球数据同化系统 GDAS 的输出资料作为驱动, 选取 $1\,500\text{ m}$ 作为初始高度, 代表低层环流中垂直气柱水汽通量最大的高度层^[25], 以采样点为起始位置, 后向追踪采集降水样品当天空气粒子 120 h 的轨迹, 每隔 6 h 输出一条轨迹, 每小时输出一条轨迹点位置及相应的温度、高度、气压和相对湿度等物理属性。由于轨迹数量较多, 为了直观看出轨迹分布, 利用 TrajStat 软件中聚类分析模块, 基于欧氏距离对每个月的轨迹簇进行聚类归并, 得到各月主要的水汽通道。各通道输送水汽贡献率计算参考江志红等^[26] 的方法, 计算公式为:

$$Q_s = \frac{\sum_1^m q_{\text{last}}}{\sum_1^n q_{\text{last}}} \times 100\% \quad (4)$$

式中, Q_s 表示某一通道水汽贡献率, q_{last} 表示通道最终位置的比湿, m 表示通道包含的轨迹数, n 表示轨迹总数。

2 结果与讨论

2.1 局地大气降水线

大气降水中 δD 的变化范围为 $-105.10‰ \sim +9.98‰$, 雨量加权平均值为 $-57.88‰$; $\delta^{18}O$ 的变化范围为 $-14.80‰ \sim -0.55‰$, 雨量加权平均值为 $-8.61‰$ 。 δD 和 $\delta^{18}O$ 均落在中国大气降水氢、氧同位素组成范围内 δD : $-229.6‰ \sim +45.4‰$, $\delta^{18}O$: $-29.47‰ \sim +9.15‰$ [27]。

同位素分馏使 δD 、 $\delta^{18}O$ 之间存在一定线性关系, Craig [28] 通过研究全球不同地区的 400 多个降水样品, 提出全球大气降水线 (GMWL): $\delta D = 8\delta^{18}O + 10‰$ 。其中斜率代表蒸发、凝结等相变过程, 截距则受海气相互作用的影响 [29]。由于局地环流系统的差异 [22], 不同区域得到的降水 $\delta D - \delta^{18}O$ 关系线相比 GMWL 会有所偏离, 称为局地大气降水线 (LMWL)。利用采样点降水氢、氧同位素的月雨量加权平均值, 通过最小二乘法得到东江下游地区大气降水线:

$$\delta D = 8.60\delta^{18}O + 16.15, \quad R^2 = 0.99 \quad (5)$$

该大气降水线斜率与截距均高于 GMWL 和郭政昇等 [30] 得到的珠江流域大气降水线 $\delta D = 8.084\delta^{18}O + 10.998$, 与 Xie 等 [31] 得到的广州大气降水线 $\delta D = (8.46 \pm 0.13)\delta^{18}O + (15.0 \pm 0.9)$ 相近。利用 GNIP 中香港站 1985 - 2015 年月 δD 、 $\delta^{18}O$ 长序列历史资料, 得到香港的大气降水线 $\delta D = 8.14\delta^{18}O + 11.61$ ($R^2 = 0.97$), 相比东江下游地区大气降水线, 该线斜率和截距略小。

2.2 $\delta^{18}O$ 与温度和降水量的关系

图 2 为东江下游地区大气降水 δD 、 $\delta^{18}O$ 月加权平均值与月均气温 T 、月降水量 P 的变化情况。由于 2017 年 11 ~ 12 月降水量较小, 未收集到雨水

样品, 故不参与分析。其中 δD 和 $\delta^{18}O$ 变化趋势较为一致, 以 $\delta^{18}O$ 分析为主。不同月份间 $\delta^{18}O$ 差异明显, 最高值出现在 1 月份 ($-3.47‰$), 最低值出现在 8 月份 ($-10.17‰$)。

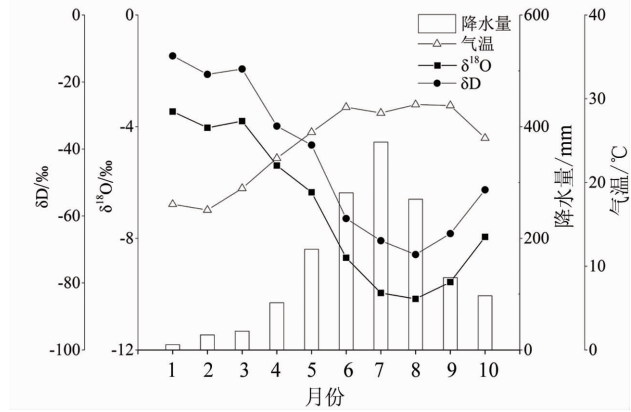


图 2 2017 年各月降水量、气温、 $\delta^{18}O$ 和 δD
Fig. 2 Monthly precipitation amount, air temperature and $\delta^{18}O$, δD in precipitation in 2017

气温 T 在 1 ~ 6 月份总体呈现上升趋势, 6 ~ 9 月份在 $28 \sim 30^\circ C$ 附近波动, 之后呈下降趋势。氢氧同位素组成变化则与 T 相反, 且增减变化基本同步。对月雨量加权平均 $\delta^{18}O$ 与 T 进行线性回归分析 (图 3a):

$$\delta^{18}O = -0.51T + 5.40, \quad R^2 = 0.89 \quad (6)$$

$\delta^{18}O$ 随 T 增加而减小, 表现“反温度效应”, 这可能与研究区位于低纬度季风区有关。东江下游地区年内平均气温变化较小, 降水量集中于汛期, 受海洋季风影响, 空气湿度较大, 降水过程中雨滴再蒸发使氢、氧同位素值增加的作用不明显, 因而降水量效应可能掩盖温度效应 [16, 32]。

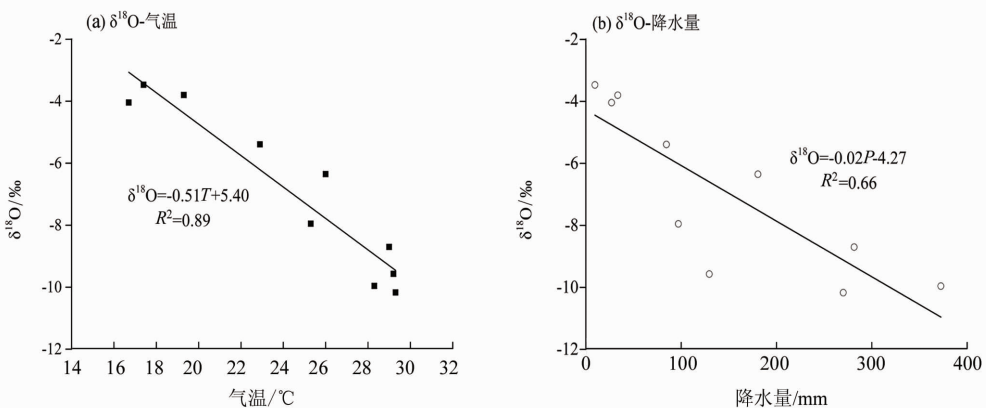


图 3 $\delta^{18}O$ 与气温和降水量的相关关系

Fig. 3 Correlations between monthly $\delta^{18}O$ and temperature, precipitation

降水量在 1 ~ 7 月份逐月增加, 于 7 月份达到最大值而后逐月减少, 年内降水主要集中在汛期 5 ~ 9 月份。对月雨量加权平均 $\delta^{18}\text{O}$ 与 P 进行线性回归分析 (图 3b):

$$\delta^{18}\text{O} = -0.02P - 4.27, \quad R^2 = 0.66 \quad (7)$$

$\delta^{18}\text{O}$ 随 P 的增加而逐渐降低, 遵循“降水量效应”。研究区域位于沿海季风区, 季风环流让降水气象条件复杂化^[9,33-34]。非汛期主要受湿度低、蒸发性强的大陆性气团控制, 大气降水量少, $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 值较高。汛期降水量大且集中, $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 值相对偏低或贫化, 主要是因为该阶段盛行夏季风, 以海洋暖湿气团为主, 云层厚度大, 对流强烈。随着高度增加, 气团内温度降低, 水汽同位素随高度呈指数型减小^[35]。强上升气流快速凝结, 凝结物碰并增大到一定程度后下落, 此时的凝结物已是形成于不同高度的经过强冷却过程的凝结综合体, 具有较低的同位素值^[36]。同位素值与冷却程度呈反比, 降水量与冷却程度呈正比, 所以降水量与同位素值呈反比^[37]。而且来自热带、副热带海洋的气团具有湿度大、降水量大的特征, 根据瑞利模型, 降水同位素值与残留湿气团比例 f 呈正比, 伴随降水过程的发生, 气团从海洋运移到沿海地区登陆, f 越来越小, 同位素值也越来越贫化^[38-39]。由图 2 还可以看出, 降水量最大的 7 月, 对应的降水 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 值并不是年内最小, 即其变化对降雨量响应有滞后, 说明降水量并不是决定氢、氧同位素组成的根本性因素, 可能还与水汽源地及到达研究区域前的分馏过程有关^[26,39]。

2.3 水汽来源模拟及分析

2.3.1 春季水汽来源与降水氢、氧同位素组成的关系

图 4 为春季各月水汽通道模拟结果, 由图可知, 2017 年 3 月进入研究区的水汽分为 3 支, 其中 69% 的降水气团显示来自中国东南南海附近海域, 带来 72% 的降水水汽贡献比例。I~III 水汽通道对应的降水 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 雨量加权平均值分别为 -4.25‰ 、 -18.10‰ ; -0.92‰ 、 $+3.92\text{‰}$ 和 -4.49‰ 、 -22.16‰ , 降水同位素组成随着水汽源的改变而改变, 海洋气团氢氧同位素组成明显较陆地气团贫化, 揭示了水汽源的控制作用。

4 月份石马河流域开始受夏季风影响, 雨带从南海北迁。该月总降水量明显增加。降水气团主要来自两条水汽通道, 23% 的轨迹显示来自印度北部的气团, 直接西行进入我国西南边境, 带来 17% 的水汽; 77% 的气团来自中南半岛中部, 沿东偏北方向进入研究区, 带来 83% 的水汽, 水汽贡献率

较前者通道高。I~II 水汽通道对应的降水 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 雨量加权平均值分别为 -6.32‰ 、 -40.96‰ 和 -4.21‰ 、 -23.40‰ 。I 通道水汽团运移路径较长, 同位素贫化较明显。

5 月份降水量明显高于 4 月份, 有 3 条主要的水汽通道: 第一条为中国南海附近海域, 第二条从华北地区南下, 第三条经泰国-老挝-越南, 而后进入我国南部地区。该月降水水汽以第一条水汽通道为主, 占 79%。I~III 水汽通道对应的降水 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 雨量加权平均值分别为 -6.67‰ 、 -41.25‰ ; -7.53‰ 、 -49.42‰ 和 -4.28‰ 、 -21.11‰ 。

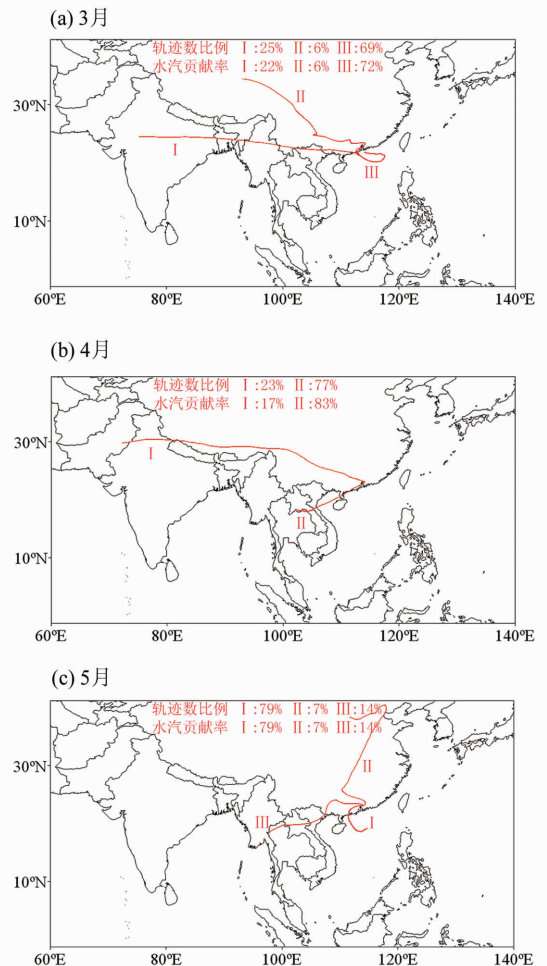


图 4 2017 年春季影响东江流域降水的主要水汽通道图中红线代表水汽通道, “轨迹数比例”“水汽贡献率”分别为该月隶属于某一通道的轨迹数百分比和水汽贡献百分比

Fig. 4 Main water vapor channels in spring

The red lines denote the vapor channels. The numbers denote the percentage of trajectory amount and the contribution to the moisture supply of each channel.

2.3.2 夏季水汽来源与降水氢、氧同位素组成的关系 研究区夏季雨热同期, 夏季风强盛, 同时也是热带气旋的活跃期, 各月水汽通道模拟结果如图 5 所示, 孟加拉湾和南海为主要的海洋水汽源。

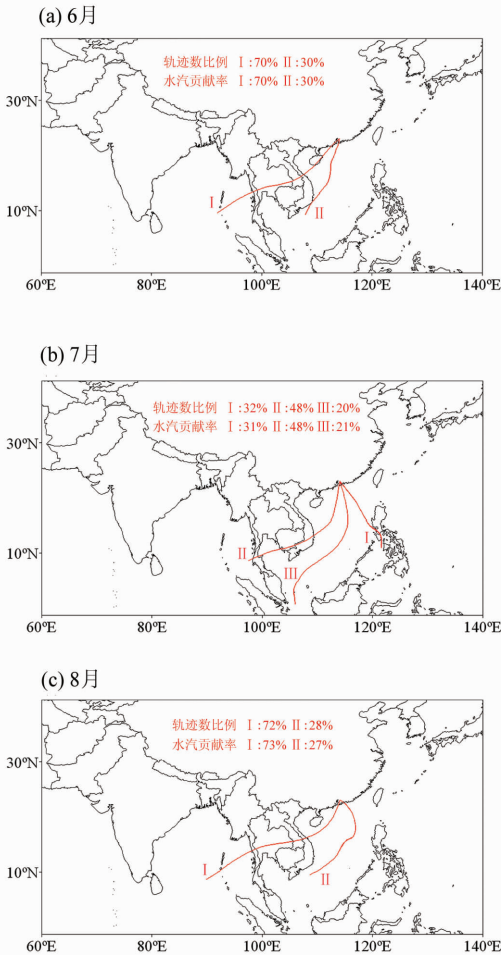


图 5 2017 年夏季影响东江流域降水的主要水汽通道 图中红线代表水汽通道, “轨迹数比例”“水汽贡献率”分别为该月隶属于某一通道的轨迹数百分比和水汽贡献百分比

Fig. 5 Main water vapor channels in summer

The red lines denote the vapor channels. The numbers denote the percentage of trajectory amount and the contribution to the moisture supply of each channel.

2017 年 6 月来自孟加拉湾 - 中南半岛和南海的水汽给研究区带来降水, 轨迹数比例分别为 70% 和 30%。I ~ II 水汽通道对应的降水 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 雨量加权值平均分别为 -7.40‰ 、 -50.63‰ 和 -10.21‰ 、 -72.67‰ , 来自孟加拉湾的支气流在输送途中可能增加了部分来自中南半岛的水汽, 同位素值偏正。

7 月份研究区降水气团主要来自孟加拉湾和南

海, 其中来自孟加拉湾的降水 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 雨量加权值平均为 -7.60‰ 、 -49.72‰ 。而来自南海的两支水汽, 一支从赤道附近南海西南端北折插入, 一支从菲律宾以西海域流经南海进入。前者水汽通道对应的降水 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 雨量加权平均值为 -12.70‰ 、 -88.62‰ , 后者为 -11.20‰ 、 -75.99‰ , 前者水汽运输距离较远, 移动过程中可能受到较强的衰减或分馏作用的影响, 所以氢氧同位素值偏负。

8 月份主要水汽通道与 6 月份类似, 主要是来自印度洋和南海的两支水汽。I 和 II 水汽通道分别对应的降水 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 雨量加权平均值为 -6.67‰ 、 -46.75‰ 和 -12.91‰ 、 -90.92‰ 。而且 II 通道的 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 为季节最低值, 可能是南海水汽团在运移过程中剧烈“淋洗”作用造成的。

2.3.3 秋季水汽来源与降水氢、氧同位素组成的关系 夏季风在 9 月份开始减弱, 逐渐受西北太平洋副热带高压的影响, 研究区域秋季气温仍较高, 但降水量明显减少, 图 6 为秋季各月水汽通道模拟结果, 降水水汽主要来自中国南海和西太平洋。

2017 年 9 月水汽主要有 2 支, 一支沿中国东南沿海到达研究区, 另一支由中南半岛南端流经中国南海北部后进入研究区, 南海为主要海洋水汽源。I ~ II 水汽通道对应的降水 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 雨量加权平均值分别为 -8.07‰ 、 -53.91‰ 和 -10.13‰ 、 -69.46‰ , 南海的水汽通道海洋气团特征更明显, $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 较中国沿海的贫化。

10 月份水汽来源由印度洋过渡到南海、西太平洋。其中, 一支来自中国台湾南端海域, 另一支来自西太平洋。对应的降水 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 雨量加权平均值分别为 -8.03‰ 、 -52.70‰ 和 -5.54‰ 、 -36.0‰ , 来自西太平洋水汽较南海富集。谭明等^[40]对具有太平洋、印度洋复合水汽源的中国季风区进行研究后提出“降水同位素环流效应”, 指出太平洋水汽带来的降水同位素值偏高, 印度洋水汽降水同位素值偏低。10 月份来自西太平洋的降水相比夏季来自印度洋的降水, $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 明显富集, 符合“降水同位素环流效应”。

2.3.4 冬季水汽来源与降水氢、氧同位素组成的关系 1 月、2 月和 12 月冬季风活动较强, 冷空气南下, 温度明显降低, 降水量年内最少。冬季各月水汽通道模拟结果 (图 7) 显示冬季降水水汽通道基本呈顺时针, 来自南半球的越赤道气流显著削弱、消失, 东亚南支偏西风水汽支逐渐形成, 主要水汽来自中国近海海洋和青藏高原南侧。

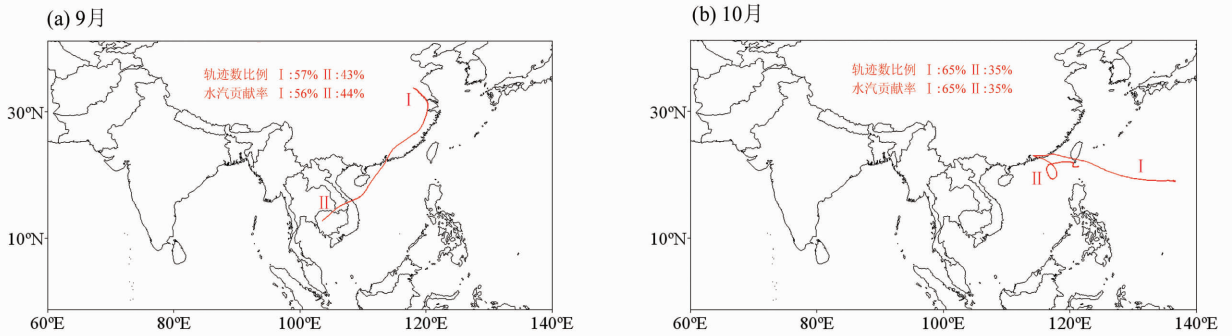


图 6 2017 年秋季影响东江流域降水的主要水汽通道

图中红线代表水汽通道，“轨迹数比例”“水汽贡献率”分别为该月隶属于某一通道的轨迹数百分比和水汽贡献百分比

Fig. 6 Main water vapor channels in autumn

The red lines denote the vapor channels. The numbers denote the percentage of trajectory amount and the contribution to the moisture supply of each channel.

2017 年 1 月降水气团均来自 $20^{\circ} \sim 30^{\circ}\text{N}$ 的东海海域, I ~ II 水汽通道对应的降水 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 雨量加权平均值分别为 -3.47‰ 、 -12.31‰ 和 -3.46‰ 、 -11.66‰ , 同位素组成明显较其他季节富集。而且两条水汽通道 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 较接近, 显示水汽来源对氢氧同位素组成的控制作用。

2 月份大部分气团轨迹 (85%) 显示来自东海

台湾海峡, 少部分 (15%) 来自印度 - 缅甸 - 中国西南地区, 来自陆地的气团水汽贡献率仅为 10%。两个水汽通道对应的降水 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 雨量加权平均值分别为 -4.61‰ 、 -21.21‰ 和 -0.73‰ 、 $+2.26\text{‰}$, 海洋气团明显较大陆气团贫化, 体现了两种气团不同的同位素组成特征。

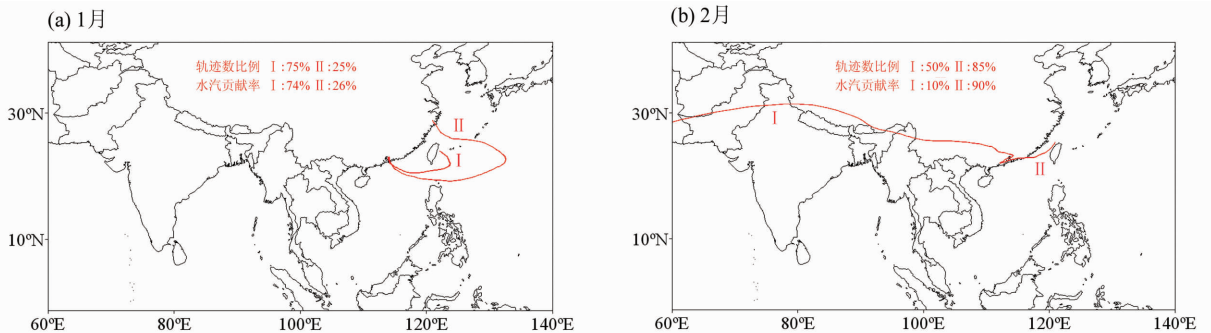


图 7 2017 年冬季影响东江流域降水的主要水汽通道

图中红线代表水汽通道，“轨迹数比例”“水汽贡献率”分别为该月隶属于某一通道的轨迹数百分比和水汽贡献百分比

Fig. 7 Main water vapor channels in winter

The red lines denote the vapor channels. The numbers denote the percentage of trajectory amount and the contribution to the moisture supply of each channel.

3 结论

1) 东江下游地区大气降水中 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化范围分别为 $-105.10\text{‰} \sim +9.98\text{‰}$ 和 $-14.80\text{‰} \sim -0.55\text{‰}$, 局地大气降水线为 $\delta\text{D} = 8.60\delta^{18}\text{O} + 16.15$ ($R^2 = 0.99$)。月尺度下, 降水氢、氧同位素组成与气温、降水量呈显著负相关关系, 表现出

“反温度效应”和“降水量效应”, 这主要与我国季风气候的影响有关。

2) 在具有太平洋、印度洋复合水汽源的东江下游地区, 存在显著“降水同位素环流效应”。秋、冬两季太平洋水汽带来的降水 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 偏高, 夏季印度洋孟加拉湾水汽带来的降水 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 偏低。而来自南海降水的气团, 降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 则

随季节的不同而改变, 总体表现为夏季 < 秋季 < 春季, 夏、秋两季明显比春季贫化。

参考文献:

- [1] KLAUS J, MCDONNELL J J. Hydrograph separation using stable isotopes: Review and evaluation [J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 505(24): 47–64.
- [2] LAWRENCE J R, GEDZELMAN S D, GAMACHE J, et al. Stable isotope ratios: Hurricane Olivia [J]. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 2002, 41: 67–82.
- [3] 丁梯平, 高建飞, 石国钰, 等. 长江水氢、氧同位素组成的时空变化及其环境意义[J]. *地质学报*, 2013, 87(5): 661–676.
- DING T P, GAO J F, SHI G Y, et al. Spacial and temporal variations of H and O isotope compositions of the Yangtze River Water and their environmental implications [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2013, 87(5): 661–676.
- [4] GEDZELMAN S D, LAWRENCE J R. The isotopic composition of cyclonic precipitation [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1982, 21: 1385–1404.
- [5] ROZANSKI K, SONNTAG C, MUNNICH K O. Factors controlling stable isotope composition of European precipitation [J]. *Tellus*, 1982, 34(2): 142–150.
- [6] 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.
- ZHU X Y, ZHANG M L, WU X, et al. The relationship between $\delta^{18}\text{O}$ characteristics of the precipitation (heavy rainfall or rainstorm) and its water vapor sources in Guilin, China [J]. *Carsologica Sinica*, 2017, 36(2): 139–161.
- [7] GAT J R. Oxygen and hydrogen isotopes in the hydrologic cycle [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1996, 24: 225–262.
- [8] DANSGAARD W. Stable isotopes in precipitation [J]. *Tellus*, 1964, 16(4): 436–468.
- [9] 卫克勤, 林瑞芬. 论季风气候对我国雨水同位素组成的影响[J]. *地球化学*, 1994, 23(1): 33–41.
- WEI K Q, LIN R F. The influence of the monsoon climate on the isotopic composition of precipitation in China [J]. *Geochimica*, 1994, 23(1): 33–41.
- [10] 章新平. 降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 月变化和年际变化的比较[J]. *湖南师范大学自然科学学报*, 2005, 28(1): 88–93.
- ZHANG X. Comparisons on seasonal and annual variations of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation [J]. *Journal of Natural Science of Hunan Normal University*, 2005, 28(1): 88–93.
- [11] 陈中笑, 程军, 郭品文, 等. 中国降水稳定同位素的分布特点及其影响因素[J]. *大气科学学报*, 2010, 33(6): 667–679.
- CHEN Z X, CHENG J, GUO P W, et al. Distribution characters and its control factors of stable isotope in precipitation over China [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2010, 33(6): 667–679.
- [12] JOUZEL J, FROEHLICH K, SCHOTTERER U. Deuterium and oxygen-18 in present day precipitation: data and modeling [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 1997, 42(5): 747–763.
- [13] ARAGUAS-ARAGUAS L, FROEHLICH K, ROZANSKI K. Stable isotope composition of precipitation over Southeast Asia [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(22): 28721–28742.
- [14] 宋献方, 柳鉴容, 孙晓敏, 等. 基于 CERN 的中国大气降水同位素观测网络[J]. *地球科学进展*, 2007, 22(7): 738–747.
- SONG X F, LIU J R, SUN X M, et al. Establishment of Chinese network of isotopes in precipitation (CHNIP) based on CERN [J]. *Advances in Earth Science*, 2007, 22(7): 738–747.
- [15] 章新平, 刘晶淼, 田立德, 等. 亚洲降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 沿不同水汽输送路径的变化[J]. *地理学报*, 2004, 59(5): 699–708.
- ZHANG X P, LIU J M, TIAN L D, et al. Variations of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation along vapor transport paths over Asia [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(5): 699–708.
- [16] 张琳, 陈立, 刘君, 等. 香港地区大气降水的 D 和 ^{18}O 同位素研究[J]. *生态环境学报*, 2009, 18(2): 572–577.
- ZHANG L, CHEN L, LIU J, et al. D and ^{18}O isotopes in atmospheric precipitation in Hongkong area [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(2): 572–577.
- [17] 庞洪喜, 何元庆, 张忠林, 等. 季风降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与季风水汽来源[J]. *科学通报*, 2005, 50(20): 2263–2266.

- PANG H X, HE Y Q, ZHANG Z L, et al. $\delta^{18}\text{O}$ in monsoon precipitation and water vapor source [J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(20): 2263–2266.
- [18] 柳鉴容, 宋献方, 袁国富, 等. 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, 2007, 22(6): 1004–1012.
- LIU J R, SONG X F, YUAN G F, et al. Stable isotope evidence of vapor sources in summer monsoonal precipitation over Southern China [J]. Journal of Natural Resources, 2007, 22(6): 1004–1012.
- [19] 解晨骥, 高全洲, 陶贞, 等. 东江流域化学风化对大气 CO_2 的吸收[J]. 环境科学学报, 2013, 33(8): 2123–2133.
- XIE C J, GAO Q Z, TAO Z, et al. Chemical weathering and CO_2 consumption in the Dongjiang River Basin [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33(8): 2123–2133.
- [20] 林凯荣, 何艳虎, 陈晓宏. 气候变化及人类活动对东江流域径流影响的贡献分解研究[J]. 水利学报, 2012, 43(11): 1312–1321.
- LIN K R, HE Y H, CHEN X H. Identifying the quantitative effect of climate change and human activity on runoff in the Dongjiang River basin [J]. Shuili Xuebao, 2012, 43(11): 1312–1321.
- [21] 张正浩, 张强, 史培军. 基于 Copula 的东江流域丰枯遭遇及洪水频率分析[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2016, 55(6): 10–19.
- ZHANG Z H, ZHANG Q, SHI P J. Copula-based flood frequency analysis with consideration of synchronous occurrence of wet/dry events in the East River basin [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2016, 55(6): 10–19.
- [22] CLARK I D, FRITZ P. Environmental Isotopes in Hydrogeology [M]. Boca Raton, FL: Lewis Publishers, 1997.
- [23] WANG Y Q, ZHANG X Y, DRAXLER R R. TrajStat: GIS-based software that uses various trajectory statistical analysis methods to identify potential sources from long-term air pollution measurement data [J]. Environmental Modelling & Software, 2009, 24(8): 938–939.
- [24] DRAXLER R R, HESS G D. An overview of the HYSPLIT_4 modeling system for trajectories, dispersion, and deposition [J]. Australian Meteorological Magazine, 1998, 47(4): 295–308.
- [25] 马京津, 高晓清. 华北地区夏季平均水汽输送通量和轨迹的分析[J]. 高原气象, 2006, 25(5): 893–899.
- MA J J, GAO X Q. The transportation paths of water vapor and its relation to climate change over north China [J]. Plateau Meteorology, 2006, 25(5): 893–899.
- [26] 江志红, 梁卓然, 刘征宇, 等. 2007 年淮河流域强降水过程的水汽输送特征分析[J]. 大气科学, 2011, 35(2): 361–372.
- JIANG Z H, LIANG Z R, LIU Z Y, et al. A diagnostic study of water vapor transport and budget during heavy precipitation over the Huaihe River basin in 2007 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2011, 35(2): 361–372.
- [27] LIU J, SONG X, YUAN G, et al. Stable isotopic compositions of precipitation in China [J]. Tellus B, 2014, 66: 22567.
- [28] CRAIG H. Isotopic Variations in Meteoric Waters [J]. Science, 1961, 133(3465): 1702–1703.
- [29] ARAGUAS-ARAGUAS L, FROEHLICH K, ROZANSKI K. Deuterium and oxygen-18 isotope composition of precipitation and atmospheric moisture [J]. Hydrological Processes, 2000, 14(8): 1341–1355.
- [30] 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.
- GUO Z S, WANG J, ZHAO P. Characteristics of Hydrogen and Oxygen Stable isotopes in precipitation in Pearl River Basin [J]. Journal of China Hydrology, 2017, 37(2): 78–82.
- [31] XIE L H, WEI G J, DENG W F, et al. 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, 2011, 400: 477–489.
- [32] 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, 36(2): 667–674.
- CHEN Y T, DU W J, CHEN J S, et al. Composition of hydrogen and oxygen isotopic of precipitation and source apportionment of water vapor in Xiamen Area [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 36(2): 667–674.
- [33] 李亚举, 张明军, 王圣杰, 等. 我国大气降水中稳定同位素研究进展[J]. 冰川冻土, 2011, 33(3): 624–633.
- LI Y J, ZHANG M J, WANG S J, et al. Progress of the research of stable isotope in precipitation in China: a review [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011,

- 33(3): 624 – 633.
- [34] 薛积彬, 钟巍, 赵引娟. 广州大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与气象要素及季风活动之间的关系 [J]. 冰川冻土, 2008, 30(5): 761 – 768.
XUE J B, ZHONG W, ZHAO Y J. Stable oxygen isotope in precipitation in Guangzhou in relation to the meteorological factors and the monsoon activity [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2008, 30(5): 761 – 768.
- [35] ROZANSKI K, SONNTAG C. Vertical distribution of deuterium in atmospheric water vapor [J]. Tellus, 1982, 34: 135 – 141.
- [36] YAPP C J. A model for the relationship between precipitation D/H ratios and precipitation intensity [J]. Journal of Geophysical Research, 1982, 87(C12): 9614 – 9620.
- [37] 章新平, 姚檀栋. 我国部分地区降水中氧同位素成分与温度和降水量之间的关系 [J]. 冰川冻土, 1994, 16(1): 31 – 40.
ZHANG X P, YAO T D. Relations of oxygen isotopic composition in precipitation with temperature and precipitation amount in some regions of China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1994, 16(1): 31 – 40.
- [38] 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 J F, CAO J P, HUANG Y P. The hydrogen and oxygen isotope composition of precipitation in the Xiamen coastal area [J]. Journal of Marine Sciences, 2010, 28(1): 11 – 17.
- [39] 李廷勇, 李红春, 沈川洲, 等. 2006 ~ 2008 年重庆大气降水 δD 和 ^{18}O 特征初步分析 [J]. 水科学进展, 2010, 21(6): 757 – 764.
LI T Y, LI H C, SHEN C Z, et al. Study on the δD and ^{18}O characteristics of meteoric precipitation during 2006 – 2008 in Chongqing, China [J]. Advances in Water Science, 2010, 21(6): 757 – 764.
- [40] 谭明, 南素兰, 段武辉. 中国季风区大气降水同位素的季节尺度环流效应 [J]. 第四纪研究, 2016, 36(3): 575 – 580.
TAN M, NAN S L, DUAN W H. Seasonal scale circulation effect of stable isotope in atmospheric precipitation in the monsoon regions of China [J]. Quaternary Sciences, 2016, 36(3): 575 – 580.

(责任编辑 秦社彩)