

# 汤浦水库湿地森林区大气降水氢氧同位素特征及水汽来源

马迎宾<sup>1,2</sup>, 徐庆<sup>1\*</sup>, 高德强<sup>1</sup>, 张蓓蓓<sup>1</sup>

(1. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 北京 100091; 2. 中国林业科学研究院沙漠林业实验中心, 内蒙古 磴口 015200)

**摘要:** [目的] 研究汤浦水库湿地森林区大气降水中的氢氧稳定同位素特征及水汽来源, 为定量阐明降水在会稽山-汤浦水库过渡带湿地森林生态系统水文循环过程中的分配和转化规律及绍兴饮用水水质的保护和管理提供科学依据。[方法] 采集 2015 年 7 月至 2017 年 7 月 2 个水文年 166 个大气降水样品, 利用稳定同位素技术, 分析降水氢氧同位素组成, 并阐明其与环境因子(温度、降水量)的关系; 采用 HYSPLIT 模型中的后向轨迹法模拟追踪该地区降水气团的运输过程, 判断气团的运移轨迹和水汽来源。[结果] 汤浦水库湿地森林区大气降水  $\delta D$  与  $\delta^{18}O$  关系式:  $\delta D = 8.36\delta^{18}O + 14.92$  ( $R^2 = 0.966, n = 166, P < 0.01$ ); 大气降水中的  $\delta D$  值变化范围  $-147.52\text{‰} \sim 2.71\text{‰}$ , 均值  $-38.13\text{‰} \pm 27.61\text{‰}$ ;  $\delta^{18}O$  值变化范围  $-19.05\text{‰} \sim -1.17\text{‰}$ , 均值  $-6.34\text{‰} \pm 3.24\text{‰}$ , 且不同季节的大气降水氢氧同位素值明显不同; 过量氘( $d$ 值) ( $12.61\text{‰}$ ) 高于全球  $d$  值的均值 ( $10\text{‰}$ ), 呈现干季高湿季低的现象; 大气降水  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  温度效应不显著, 但降水量效应显著。[结论] 汤浦水库湿地森林区大气降水线与全球及我国大气降水线有差异, 降水中的  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  值有明显的季节变化; 根据大气降水中的  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  值、 $d$  值及后向轨迹法模拟结果得出, 汤浦水库湿地森林区干季(10 月—次年 4 月) 大气降水的水汽主要来源于内陆地区, 湿季(5 月—9 月) 的水汽主要来源于西太平洋和印度洋。

**关键词:** 大气降水; 水汽来源; 降水量效应; 氢氧稳定同位素; 汤浦水库湿地森林区

中图分类号: P426.6

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2018)03-0037-08

## Composition of Hydrogen and Oxygen Isotope in Precipitation and Source Apportionment of Water Vapor in the Wetland Forest Area of Tangpu Reservoir, Zhejiang Province

MA Ying-bin<sup>1,2</sup>, XU Qing<sup>1</sup>, GAO De-qiang<sup>1</sup>, ZHANG Bei-bei<sup>1</sup>

(1. Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;

2. Experimental Center of Desert Forestry, Chinese Academy of Forestry, Dengkou 015200, Inner Mongolia, China)

**Abstract:** [Objective] To study the characteristics of hydrogen and oxygen stable isotope in precipitation and the source of regional atmospheric precipitation in wetland forest area of Tangpu reservoir and to provide reference information for water resource conservation and management by clarifying quantitatively the distribution and transformation of precipitation in the process of hydrologic cycle in the forest ecosystem of the Kuaijishan-Tangpu reservoir transition zone. [Method] In this study, the data of hydrogen-oxygen isotope in 166 atmospheric precipitation samples obtained from July 2015 to July 2017 in the Tangpu reservoir wetland forest were analyzed by using isotope technology to examine the composition of hydrogen and oxygen stable isotope and to clarify the relationship between the

收稿日期: 2017-10-10

基金项目: 林业公益行业专项(201504423)、国家自然科学基金(31670720, 31170661)。

作者简介: 马迎宾(1988—), 男, 博士研究生, 工程师。主要研究方向: 稳定同位素生态学。E-mail: mayingbin1988@126.com。

\* 通讯作者: 徐庆(1964—), 女, 博士, 研究员。主要研究方向: 稳定同位素生态学。E-mail: xuqing@caf.ac.cn。

composition and environmental factors (precipitation and temperature). The source and migration path of water vapor were determined by simulating the air mass transmission pathway based on backward trajectory method of the HYSPLIT model. [Result] The relational expression of  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  in atmospheric precipitation in the wetland forest area of Tangpu reservoir was  $\delta D = 8.36\delta^{18}O + 14.92$  ( $R^2 = 0.966$ ,  $n = 166$ ,  $P < 0.01$ ); the value of  $\delta D$  in precipitation ranged from  $-147.52\text{‰}$  to  $2.71\text{‰}$ , with the average value was  $-38.13\text{‰} \pm 27.61\text{‰}$ ; the value of  $\delta^{18}O$  ranged from  $-19.05\text{‰}$  to  $-1.17\text{‰}$ , with the average value was  $-6.34\text{‰} \pm 3.24\text{‰}$ , and the values changed significantly among seasons. The value of excess deuterium ( $12.61\text{‰}$ ) was higher than the global average ( $10\text{‰}$ ), and a seasonal pattern of excess deuterium in atmospheric precipitation with low value in wet season and high value in dry season was found. The “temperature effect” was not obvious whereas the “precipitation effect” existed significantly. [Conclusion] The meteoric water line of the wetland forest is different from the global meteoric water line and China meteoric water line, The values of  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  in atmospheric precipitation follows obvious seasonal variation in this area. The seasonal change of the water vapor sources of atmospheric precipitation is obvious. It is concluded that the meteoric water vapor is mainly from the inland areas in dry season (from October to April of the following year), while it mainly comes from the western Pacific and the Indian Ocean in wet season (from May to September) according to hydrogen and oxygen isotopic value in precipitation, excess deuterium, and the results of trajectory simulation.

**Keywords:** meteoric water; water source; precipitation effect; stable hydrogen and oxygen isotopes; wetland forest area of Tangpu reservoir

大气降水会影响陆地水循环中各水体的氢氧稳定同位素组成<sup>[1]</sup>,分析其氢氧稳定同位素特征,可探讨地区大气降水水汽来源及水循环过程<sup>[2-4]</sup>,定量阐明降水在森林生态系统水文循环过程中的分配和转化规律<sup>[5-7]</sup>,判别水循环中各水体水分来源<sup>[8]</sup>。通常来自海洋性气团形成的降水  $\delta^{18}O$  值低,而来源于陆地局地蒸发气团的水汽形成的降水  $\delta^{18}O$  值高<sup>[9]</sup>。不同区域的降水量、温度效应差异显著,在中低纬度地区<sup>[10]</sup>以及季风气候区<sup>[11]</sup>,普遍存在降水量效应,在中高纬度内陆区,存在温度效应<sup>[12-13]</sup>。利用 HYSPLIT 后向轨迹模型可以分析和模拟地区水汽来源及水汽输送路径<sup>[4,7,14-16]</sup>。国内学者对不同地区大气降水同位素特征进行研究,取得了一定成果,但因降水同位素组成的时空分布差异较大<sup>[7,17-21]</sup>,小流域地区研究仍显不足<sup>[7]</sup>,加上全球降水同位素监测网络在中国的监测点有限,监测时间序列不足,因此不能满足当前科研工作的需要<sup>[22]</sup>。

汤浦水库位于浙江省境内,流域内森林资源丰富,包括水源涵养林、水土保持林以及库区上游的湿地森林等。本研究分析汤浦水库湿地森林区大气降水中氢氧稳定同位素组成及其季节变化规律,并对降水量、温度等影响其同位素组成的环境因子进行深入探讨,可对理解该地区的水汽输送以及循环过

程有所帮助。同时可补充长三角地区降水氢氧同位素组成数据库,以期定量研究浙江会稽山-汤浦水库过渡区湿地森林生态系统水循环过程以及保护和科学管理饮用水及流域内的森林资源提供科学依据,为进一步完善全国乃至全球降水同位素监测网络提供理论参考。

## 1 研究区概况

汤浦水库处于浙江会稽山脉中,建在曹娥江下游重要支流小舜江上,为绍兴市一级饮用水源地区,坝址  $30^{\circ}52' N$ ,  $120^{\circ}47' E$ ,库区控制流域集雨面积  $460 \text{ km}^2$ ,流域内植物资源丰富,森林覆盖率较高,包括马尾松 (*Pinus massoniana* Lamb.) 林、毛竹 (*Phyllostachy edulis* (Carr.) H. de Lehaie) 林、香榧 (*Torreya grandis* Fort. et Lindl.)、茶 (*Camellia sinensis* (L.) O. Ktze.) 园等。水库入口的水源保护区建有人工湿地生态系统,主要起到水源入库之前的自净作用,其中以耐湿耐涝的植物为主,乔木包括池杉 (*Taxodium distichum* (L.) Rich.)、河桦 (*Betula nigra* L.)、柳叶栎 (*Quercus phellos* L.)、北美枫香 (*Liquidambar styraciflua* L.)、水紫树 (*Nyssa aquatica* L.) 等。该地区属于亚热带季风气候,气候湿润,温暖适中,平均降水量高达  $1400 \text{ mm}$ 。年均温  $16.5^{\circ}C$ ,无霜期年均  $238 \text{ d}$ 。该地区四季分明,春季 4—5 月,

夏季 6—9 月,秋季 10—11 月,冬季 12 月—次年 3 月<sup>[23-24]</sup>。

## 2 材料与方法

### 2.1 降水样品采集与测定

2015 年 7 月至 2017 年 7 月,在汤浦水库湿地森林区放置 3 个雨量筒,分别位于人工针叶林(29°47′32.0″ N,120°42′18.9″ E)、阔叶林(29°47′23.1″ N,120°42′18.2″ E)外的空旷地及汤浦水库王坛管理处(29°47′32.7″ N,120°42′07.5″ E),上午 7:00—8:00 从各雨量筒采集前一天大气降水并混合,立即用采样瓶收集,并迅速密封,共收集 166 个降水样品。所有降水样品低温保存(0 ~ -5℃)。同时实测采样点的日降水量、日平均温度等气象数据。

所有降水样品送至稳定同位素实验室(清华大学地学中心),采用 MAT253 同位素比率质谱仪(Isotope Ratio Mass Spectrometer)和 Flash2000HT 元素分析仪测定其氢氧稳定同位素组成( $\delta D$  测定精度为  $\pm <1\text{‰}$ , $\delta^{18}O$  测定精度为  $\pm <0.2\text{‰}$ )。测量结果用相对维也纳标准平均海洋水(V-SMOW)的千分差表示:

$$\delta = (R_{\text{sample}} - R_{\text{standard}}) \times 1000\text{‰} / R_{\text{standard}}$$

式中  $R_{\text{sample}}$  为降水样品中氢氧重同位素浓度, $R_{\text{standard}}$  为 V-SMOW 中氢氧重同位素的浓度。

### 2.2 HYSPLIT 模拟

采用美国国家海洋大气管理局开发的拉格朗日积分子轨迹模型(Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model, <http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>)模拟大气降水的大气气团传输途径和过程。分别模拟海拔 500、1 000 和 1 500 m 3 个高度层上的水汽的后向运动轨迹,追踪时长 144 h。

### 2.3 数据处理与分析

运用 Excel 整理数据及作图,采用 SPSS17.0 软件分析得到降水线方程,用相关分析方法分析环境因子(降水量、温度)与降水中的氢氧稳定同位素值之间的相关关系。

## 3 结果与分析

### 3.1 大气降水中氢氧稳定同位素变化特征

汤浦水库湿地森林区 2 个水文年大气降水中的  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  值变化如图 1 所示, $\delta D$  介于 -147.52‰ ~ 2.71‰ 之间,均值为 -38.13‰ ± 27.61‰; $\delta^{18}O$  介于 -19.05‰ ~ -1.17‰ 之间,均值为 -6.34‰ ± 3.24‰。汤浦水库湿地森林区降水中  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  的均值较郑淑蕙等<sup>[25]</sup>对我国降水氢氧稳定同位素组成研究  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  均值( $\delta D$  值为 -50‰, $\delta^{18}O$  值为 -8‰)低。

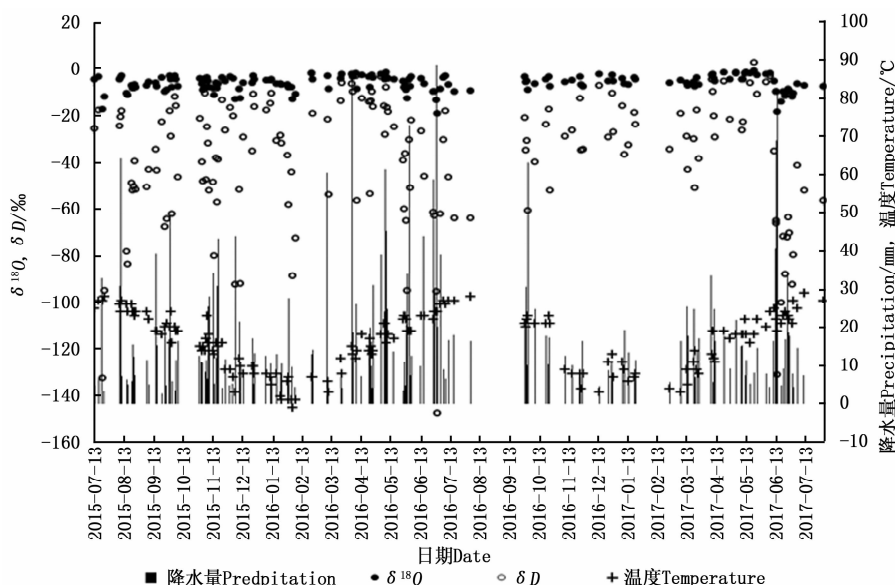


图 1 汤浦水库湿地森林区大气降水  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$ 、降水量、温度随采样时间的变化

Fig. 1 Variation of  $\delta D$ ,  $\delta^{18}O$  composition of precipitation, rainfall and temperature along with the change of sampling time in the wetland forest area of Tangpu reservoir

研究期间日降水量值显示,汤浦水库湿地森林区降水量比较充足,且有较明显的季节变化(图1)。干季(10月—次年4月)大气降水中的 $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$ 值分别为 $-30.58\text{‰} \pm 20.42\text{‰}$ 和 $-5.73\text{‰} \pm 2.43\text{‰}$ ;湿季(5—9月)大气降水中的 $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$ 值分别为 $-46.45\text{‰} \pm 31.92\text{‰}$ 和 $-7.02\text{‰} \pm 3.85\text{‰}$ 。干季降水中的 $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$ 值高,湿季的 $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$ 值低,这种现象普遍存在于中低纬度季风区,降水水汽来源不同及蒸发的季节性差异均会造成这种现象<sup>[26]</sup>,汤浦水库湿地森林区大气降水中的 $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$ 值的季节变化规律为:春季>冬季>秋季>夏季(图1,表1)。

### 3.2 大气降水中过量氘值的变化

Dansgaard<sup>[27]</sup>将大气降水中 $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$ 出现的差值定为过量氘( $d$ 值),方程为 $d = \delta D - 8\delta^{18}O$ ,全球范围的平均值 $10\text{‰}$ 。本研究区 $d$ 值为 $12.61\text{‰}$ ,比全球平均值高。

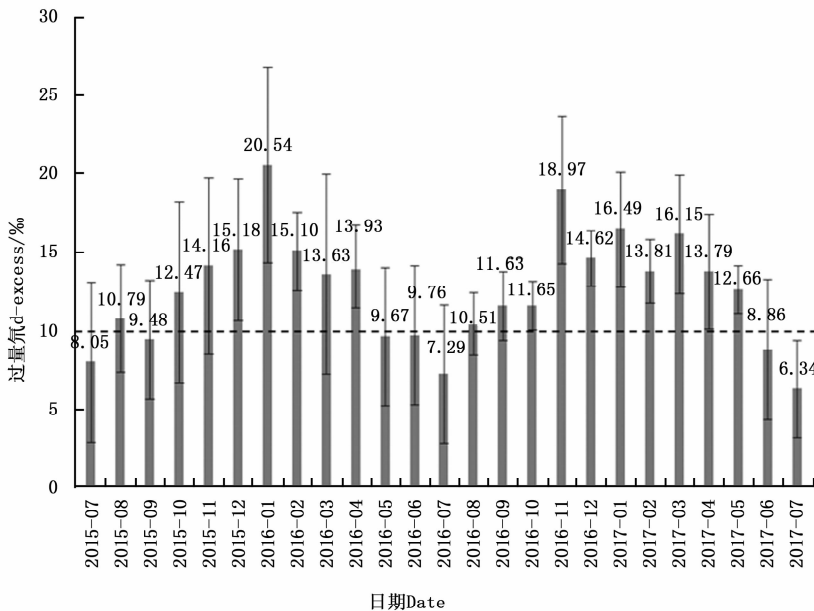


图2 降水过量氘动态变化

Fig.2 The variation of  $d$ -excess of precipitation

### 3.3 汤浦水库湿地森林区大气降水线

基于汤浦水库湿地森林区25个月的大气降水氢氧稳定同位素实测值进行线性回归(图3A),得出该地区大气降水 $\delta D$ 和 $\delta^{18}O$ 的线性关系式为: $\delta D = 8.36\delta^{18}O + 14.92$  ( $R^2 = 0.966, n = 166, P < 0.01$ )。

该地区干季大气降水 $\delta D$ 和 $\delta^{18}O$ 的线性关系式(图3B)为: $\delta D = 8.16\delta^{18}O + 16.13$  ( $R^2 = 0.944, n =$

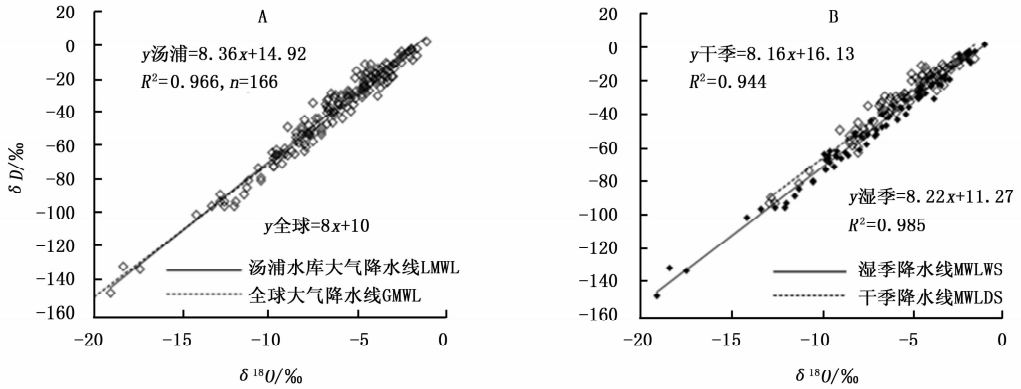
表1 汤浦水库湿地森林区四季大气降水氢氧稳定同位素组成变化

Table 1 Variation of  $\delta D$  ( $\delta^{18}O$ ) composition of rainfall along with four seasons in the wetland forest area of Tangpu reservoir

	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter
$\delta D/\text{‰}$	$-21.6 \pm 21.22$	$-54.45 \pm 30.65$	$-34.66 \pm 17.23$	$-32.56 \pm 22.36$
$\delta^{18}O/\text{‰}$	$-4.22 \pm 2.42$	$-7.97 \pm 3.77$	$-6.12 \pm 2.00$	$-6.12 \pm 2.61$

汤浦水库湿地森林区大气降水过量氘值( $d$ 值)季节变化明显(图2),从图中可以看出 $d$ 值在2015年10月至2016年4月及2016年11月至2017年5月处于峰值区域,5—9月的 $d$ 值低于或接近全球范围的平均值 $10\text{‰}$ ,10月—次年4月 $d$ 值高于全球范围的平均值。有研究表明,湿度较高的地区生成的水汽气团,形成降水的 $d$ 值低;反之, $d$ 值高<sup>[28-29]</sup>。研究区湿季(5—9月)降水中的 $d$ 值均值 $9.71\text{‰}$ ;干季(10月—次年4月)降水中的 $d$ 值均值 $15.24\text{‰}$ 。

$87, P < 0.01$ );湿季大气降水 $\delta D$ 和 $\delta^{18}O$ 的线性关系式为: $\delta D = 8.22\delta^{18}O + 11.27$  ( $R^2 = 0.985, n = 79, P < 0.01$ )。全球大气降水线(GMWL)为 $\delta D = 8.0\delta^{18}O + 10.0$ <sup>[30]</sup>,该地区LMWL的斜率(8.36)和截距(14.92)都较GMWL大;干季降水 $\delta D$ 和 $\delta^{18}O$ 关系式方程截距(16.13)比GMWL大,而湿季降水线方程的截距(11.27)与GMWL相近。

图3 汤浦水库湿地森林区大气降水中 $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$ 的关系Fig. 3 The correlation of  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  of precipitation in the wetland forest area of Tangpu reservoir

汤浦水库湿地森林区4个季节的大气降水 $\delta D$ 和 $\delta^{18}O$ 的线性关系式为:春季, $\delta D = 8.64\delta^{18}O + 14.85$  ( $R^2 = 0.975, n = 37, P < 0.01$ );夏季, $\delta D = 8.07\delta^{18}O + 9.83$  ( $R^2 = 0.983, n = 58, P < 0.01$ );秋季, $\delta D = 8.19\delta^{18}O + 15.48$  ( $R^2 = 0.901, n = 29, P < 0.01$ );冬季, $\delta D = 8.36\delta^{18}O + 18.62$  ( $R^2 = 0.955, n = 42, P < 0.01$ )。该地区4个季节的关系式方程中,夏季的截距较GMWL小,春秋冬季均比GMWL大,且冬季最大,春秋两季相近。

### 3.4 后向轨迹分析降水水汽的来源

为进一步验证氢氧稳定同位素组成及过量氘值指示汤浦水库湿地森林区大气降水水汽来源的可靠性,在采样周期内共挑选了8次典型降水事件(干、湿季各4次降水事件),利用HYSPLIT模型中的后向轨迹模拟降水气团运移过程及来源。从图4可以看出,研究区湿季大气降水水汽来源主要是西太平洋地区及印度洋(图4,a,b,c,d),沿途降水次数较多,到达研究区后,由于重同位素持续被淋洗,导致降水中 $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$ 值贫化;在干季,降水水汽主要来源于内陆地区(图4,e,f,g,h),沿途降水较少,其水汽中重稳定同位素淋洗作用较小,因此水汽到达研究区形成的降水中 $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$ 值普遍较高<sup>[31]</sup>。

### 3.5 降水氢氧稳定同位素与降水量、温度的关系

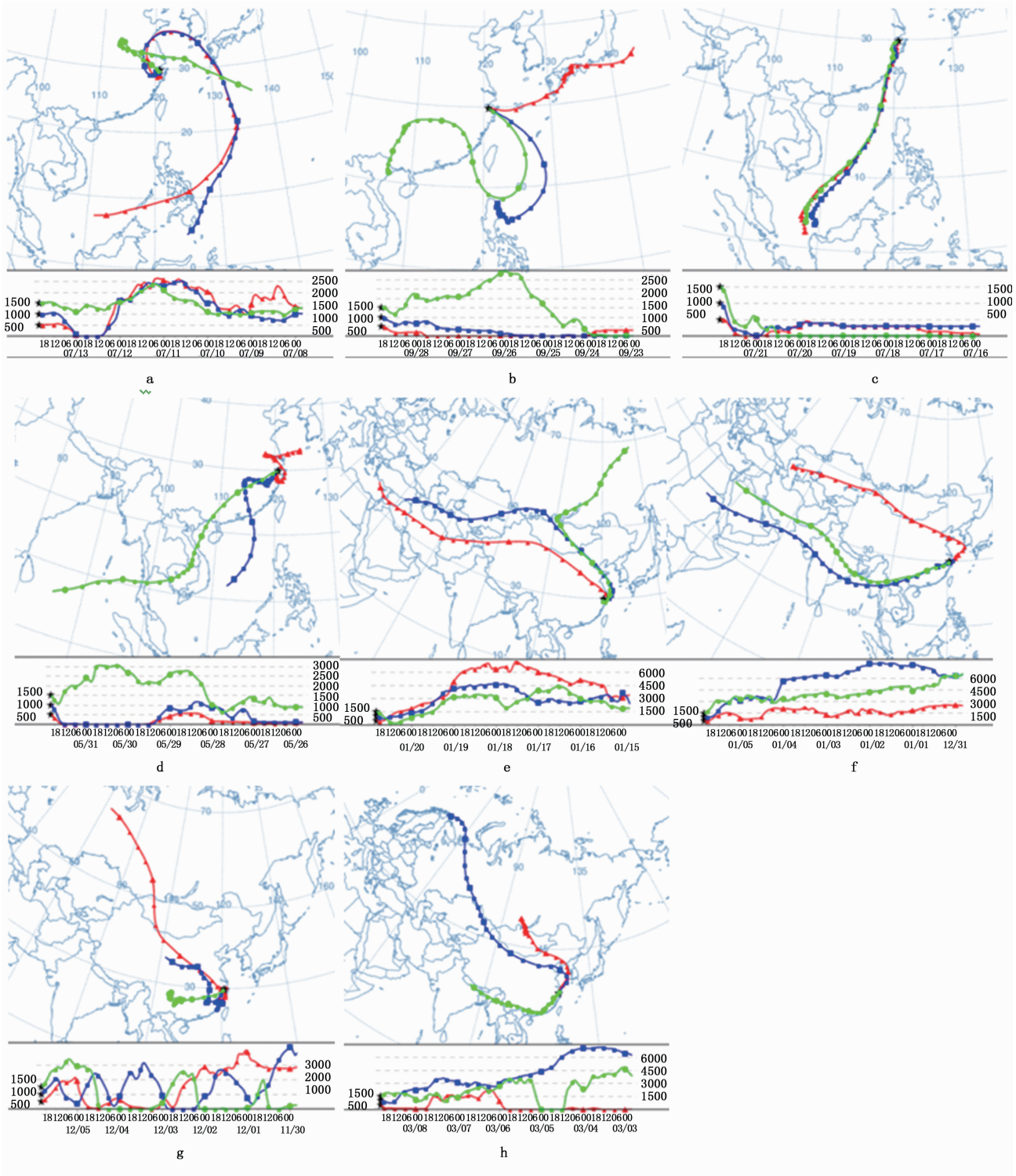
降水中氢氧同位素值与降水量的负相关性称为降水量效应,这是由于经历多次降水的同一来源水汽在输送过程中由于同位素的分馏,导致氢氧同位素值偏轻<sup>[32]</sup>。汤浦水库湿地森林区降水中的 $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$ 与对应降水量( $P$ )数据进行线性拟合得到: $\delta D = -0.33P - 32.08$  ( $r = 0.203, n = 166, P < 0.01$ );

$\delta^{18}O = -0.04P - 5.64$  ( $r = 0.201, n = 166, P < 0.01$ )。该区大气降水 $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$ 和降水量的负相关关系显著,说明该地区降水量效应显著。

将汤浦水库湿地森林区降水 $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$ 与对应温度( $T$ )数据进行线性拟合得到: $\delta D = -1.00T - 21.64$  ( $r = 0.264, n = 166, P < 0.01$ ); $\delta^{18}O = -0.07T - 5.20$  ( $r = 0.156, n = 166, P < 0.05$ )。可见,该区降水 $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$ 值与温度显著负相关,说明该地区温度效应不显著,反温度效应显著。

## 4 讨论

浙江汤浦水库湿地森林区大气降水中的 $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$ 变化范围分别介于 $-147.52\text{‰} \sim 2.71\text{‰}$ 、 $-19.05\text{‰} \sim -1.17\text{‰}$ 之间,其值均处于全球<sup>[33]</sup>及我国<sup>[25,34]</sup>大气降水氢氧稳定同位素值变化范围内。大气降水中 $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$ 均值( $-38.13\text{‰}$ 、 $-6.34\text{‰}$ )较全球均值( $\delta D$ 值为 $-22\text{‰}$ 、 $\delta^{18}O$ 值为 $-4\text{‰}$ )<sup>[33]</sup>更为偏负,较我国均值( $\delta D$ 值为 $-50\text{‰}$ 、 $\delta^{18}O$ 值为 $-8\text{‰}$ )更为偏正,说明降水中的重同位素经历了一定程度的淋洗贫化。大气降水中的 $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$ 均值:春季( $-21.6\text{‰}$ 、 $-4.22\text{‰}$ ) > 冬季( $-32.56\text{‰}$ 、 $-6.12\text{‰}$ ) > 秋季( $-34.66\text{‰}$ 、 $-6.12\text{‰}$ ) > 夏季( $-54.45\text{‰}$ 、 $-7.97\text{‰}$ )。这种规律与附近的南京、上海地区相近<sup>[35-36]</sup>。干季(10月—次年4月)大气降水中的 $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$ 值( $-30.58\text{‰}$ 、 $-5.73\text{‰}$ )比湿季(5—9月)大气降水中 $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$ 值( $-46.45\text{‰}$ 、 $-7.02\text{‰}$ )高。造成该森林区降水中 $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$ 季节变化的主要原因是降水水汽来源及季节性气象条件,符合中低纬度季风区的普遍规律<sup>[19-20,26,31]</sup>。



注:a、b、c、d 为湿季 4 次典型降水事件,降水量分别为 4.81、16.74、32.73、72.91 mm;e、f、g、h 为干季降水水汽团轨迹模拟,降水量分别为 7.62、12.59、43.74、60.48 mm。红色、蓝色、绿色分别代表 500、1 000、1 500 m 高度上气团轨迹。

Note:a、b、c、d represent the four rain events in wet season, of which precipitation is 4.81、16.74、32.73、72.91 mm, respectively. e、f、g、h represent the four rain events in wet season, of which precipitation is 7.62、12.59、43.74、60.48 mm, respectively. The red, blue and green line represent air mass trajectory at the altitude of 500 m, 1 000 m, 1 500 m, respectively.

图 4 汤浦水库湿地森林区部分降水水汽团轨迹模拟

Fig. 4 The air trajectory simulation of partial precipitation event in the wetland forest area of Tangpu reservoir

汤浦水库湿地森林区大气降水线(LMWL)为:  
 $\delta D = 8.36\delta^{18}O + 14.92$  ( $R^2 = 0.966, n = 166, P < 0.01$ ),斜率和截距均比全球大气降水线(斜率8,截距10)<sup>[32]</sup>和我国大气降水线(斜率7.9,截距8.2)<sup>[25]</sup>高;该地区大气降水线方程的斜率与截距较接近福州<sup>[31]</sup>、南京大气降水线<sup>[31,35]</sup>,表明汤浦水库湿地森林区的大气环流与福州、南京地区相似;与鼎湖山自然保护区大气降水线<sup>[7]</sup>相比,汤浦水库湿地森林区的降水线方程的斜率和截距都较大,这是由于广东鼎湖山地区台风较多,而台风期间的 $\delta D$ 和 $\delta^{18}O$ 的线性方程的斜率和截距较小<sup>[36]</sup>。该地区四季大气降水线与南京<sup>[35]</sup>、上海<sup>[37]</sup>略有不同,研究区位于浙江会稽山东南麓,而南京和上海属于平原区域。陈衍婷<sup>[17]</sup>将我国各地区的大气降水线进行汇总发现,我国华东大气降水线的斜率及截距比全球大气降水线大,汤浦水库湿地森林区(华东)大气降水线的斜率截距高于全球降水线,符合其研究成果,反映了该区域湿润多雨的气候特征。

过量氘( $d$ )表示水汽蒸发过程中存在不平衡的程度,可将其作为示踪水汽来源的参数<sup>[38-39]</sup>。汤浦水库湿地森林区降水的 $d$ 值干季偏高(15.24‰),湿季偏低(9.71‰),符合季风区过量氘的季节变化:夏半年低、冬半年高<sup>[4,20,40-41]</sup>。 $d$ 值变化与水汽来源有密切关系<sup>[17,42]</sup>,湿季,汤浦水库湿地森林区的降水水汽主要来源于相对湿度较大的西太平洋、印度洋, $d$ 值较低;干季其降水水汽主要来自相对湿度较低的内陆地区,降水过程中蒸发作用较强, $d$ 值较高。HYSPLIT模型的后向轨迹模拟分析降水水汽来源的结果进一步验证了氢氧稳定同位素技术指示该地区大气降水水汽来源的可靠性。

汤浦水库湿地森林区大气降水 $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$ 值与降水量显著负相关( $P < 0.01$ ),存在降水量效应,这与其地处中低纬度的东南沿海地区有关。根据章新平等的研究<sup>[31,43]</sup>,降水量效应往往会出现在低纬度沿海地区或海岛,这些地区的降水水汽来源主要是中低纬度的西太平洋及印度洋,由于同一水汽连续形成降水,降水中重同位素持续被淋洗导致贫化,形成降水量效应<sup>[4,7,17,44]</sup>。汤浦水库湿地森林区降水充沛,不存在温度效应,甚至出现反温度效应,有研究表明,温度效应会被强烈的降水量效应掩盖<sup>[17,26,45-47]</sup>。

## 5 结论

(1)浙江汤浦水库湿地森林区大气降水线为 $\delta D$

$= 8.36\delta^{18}O + 14.92$  ( $R^2 = 0.966, n = 166, P < 0.01$ )。4个季节大气降水线不同,干季和湿季的大气降水线方程差异显著,反映了氢氧稳定同位素组成对研究区气象条件的季节差异的响应比较明显。

(2)汤浦水库湿地森林区降水中的 $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$ 值:春季(-21.6‰、-4.22‰) > 冬季(-32.56‰、-6.12‰) > 秋季(-34.66‰、-6.12‰) > 夏季(-54.45‰、-7.97‰),干季偏高-30.58‰(-5.73‰),湿季偏低-46.45‰(-7.02‰),季节变化明显;过量氘( $d$ )值高于全球平均值,具有明显的季节变化,湿季低于全球平均值,干季高于全球平均值。干季降水水汽主要来源于相对干燥的内陆地区,湿季降水水汽主要来源于湿度较高的西太平洋、印度洋,反映了氢氧稳定同位素组成与水汽来源关系密切。

(3)大气降水中的氢氧稳定同位素组成与日平均降水量呈显著负相关,表现出明显的降水量效应,温度效应不显著。

## 参考文献:

- [1] 顾慰祖. 同位素水文学[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 28-29.
- [2] 何元庆, 姚檀栋, 杨梅学, 等. 玉龙山白水1号冰川区大气降水-冰雪-水文系统内 $\delta^{18}O$ 研究的新结果[J]. 冰川冻土, 2000, 22(4): 391-393.
- [3] Amesbury M J, Charman D J, Newnham R M, et al. Can oxygen stable isotopes be used to track precipitation moisture source in vascular plant-dominated peatlands? [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2015, 430: 149-159.
- [4] 李广, 章新平, 许有鹏, 等. 滇南蒙自地区降水稳定同位素特征及其水汽来源[J]. 环境科学, 2016, 37(4): 1313-1320.
- [5] 刘鑫, 宋献方, 夏军, 等. 黄土高原岔巴沟流域降水氢氧同位素特征及水汽来源初探[J]. 资源科学, 2007, 29(3): 59-66.
- [6] Jouzel J, Delaygue G, Landais A, et al. Water isotopes as tools to document oceanic sources of precipitation[J]. Water Resources Research, 2013, 49(11): 7469-7486.
- [7] 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.
- [8] 边俊景, 孙自永, 周爱国, 等. 干旱区植物水分来源的D、 $^{18}O$ 同位素示踪研究进展[J]. 地质科技情报, 2009, 28(4): 117-120.
- [9] 杨梅学, 姚檀栋, 田立德, 等. 藏北高原夏季降水的水汽来源分析[J]. 地理科学, 2004, 24(4): 426-431.
- [10] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation [J]. Tellus, 1964, 16(4): 436-468.
- [11] 章新平, 关华德, 张新主, 等. 利用稳定同位素大气水平衡模式模拟降水中 $\delta^{18}O$ 的分布[J]. 冰川冻土, 2014, 36(5): 1058-1068.
- [12] Kohn M J, Welker J M. On the temperature correlation of  $\delta^{18}O$  in modern precipitation [J]. Earth and Planetary Science Letters,



- 2005, 231(1): 87–96.
- [13] Yu W, Yao T, Tian L, *et al.* Relationships between  $\delta^{18}\text{O}$  in precipitation and air temperature and moisture origin on a south–north transect of the Tibetan Plateau[J]. *Atmospheric Research*, 2008, 87(2): 158–169.
- [14] Xie L H, Wei G J, Deng W F, *et al.* Daily  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta\text{D}$  of precipitations from 2007 to 2009 in Guangzhou, South China: Implications for changes of moisture sources[J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 400(3/4): 477–489.
- [15] 陈 婕, 高德强, 徐 庆, 等. 西鄂尔多斯荒漠夏季大气降水氢氧同位素特征与水汽来源[J]. *林业科学研究*, 2016, 29(6): 911–918.
- [16] 宋献方, 唐 瑜, 张应华, 等. 北京连续降水水汽输送差异的同位素示踪[J]. *水科学进展*, 2017, 28(4): 488–495.
- [17] 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.
- [18] 刘相超, 宋献方, 夏 军, 等. 东台沟实验流域降水氧同位素特征与水汽来源[J]. *地理研究*, 2005, 24(2): 196–205.
- [19] 柳鉴容, 宋献方, 袁国富, 等. 中国东南部季风区大气降水  $\delta^{18}\text{O}$  的特征及水汽来源[J]. *科学通报*, 2009, 54(22): 3521–3531.
- [20] 张贵玲, 角媛梅, 何礼平, 等. 中国西南地区降水氢氧同位素研究进展与展望[J]. *冰川冻土*, 2015, 37(4): 1094–1103.
- [21] 黄锦忠, 谭红兵, 王若安, 等. 我国西北地区多年降水的氢氧同位素分布特征研究[J]. *水文*, 2015, 35(1): 33–39, 50.
- [22] 章新平, 田 立, 刘晶淼, 等. 沿三条水汽输送路径的降水中  $\delta^{18}\text{O}$  变化特征[J]. *地理科学*, 2005, 25(2): 190–196.
- [23] 杨诗芳, 毛裕定. 浙江省近 50 年气温变化及四季划分[J]. *浙江气象*, 2007, 29(4): 1–6.
- [24] 郁珍艳, 吴利红, 高大伟, 等. 浙江省四季划分方法探讨[J]. *气象科技*, 2014, 42(3): 474–481.
- [25] 郑淑蕙, 侯发高, 倪葆龄. 我国大气降水的氢氧稳定同位素研究[J]. *科学通报*, 1983, 28(13): 801–806.
- [26] 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.
- [27] Dansgaard W. The abundance of  $\text{O}^{18}$  in atmospheric water and water vapour[J]. *Tellus*, 1953, 5(4): 461–469.
- [28] Merlivat L, Jouzel J. Global climatic interpretation of the deuterium–oxygen–18 relationship for precipitation [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1979, 84(C8): 5029–5033.
- [29] Jouzel J, Merlivat L. Deuterium and oxygen-18 in precipitation: modeling of the isotope effects during snow formation [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1984, 89(D7): 11749–11757.
- [30] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters[J]. *Science*, 1961, 133(3465): 1702–1703.
- [31] 章新平, 姚檀栋. 我国降水中  $\delta^{18}\text{O}$  的分布特点[J]. *地理学报*, 1998, 53(4): 356–364.
- [32] 李廷勇, 李红春, 沈川州, 等. 2006—2008 年重庆大气降水  $\delta\text{D}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  特征初步分析[J]. *水科学进展*, 2010, 21(6): 757–764.
- [33] IAEA/WMO. Global network for isotope in precipitation(EB/OL). <http://isohis.iaea.org>, 1997.
- [34] 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.
- [35] 王 涛, 张洁茹, 刘 笑, 等. 南京大气降水氧同位素变化及水汽来源分析[J]. *水文*, 2013, 33(4): 25–31.
- [36] 孙晓双, 王晓艳, 翟水晶, 等. 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*, 2016, 31(06): 1041–1050.
- [37] 董小芳, 邓黄月, 张 峦, 等. 上海降水中氢氧同位素特征及与 ENSO 的关系[J]. *环境科学*, 2017, 38(5): 1817–1827.
- [38] Welp L R, Lee X, Griffis T J, *et al.* A meta–analysis of water vapor deuterium–excess in the midlatitude atmospheric surface layer [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2012, 26(9): 902–906.
- [39] Lai C T, Ehleringer J R. Deuterium excess reveals diurnal sources of water vapor in forest air [J]. *Oecologia*, 2011, 165(1): 213–223.
- [40] 徐 庆, 刘世荣, 安树青, 等. 卧龙地区大气降水氢氧同位素特征的研究[J]. *林业科学研究*, 2006, 19(6): 679–686.
- [41] 李 广, 章新平, 张新主, 等. 云南腾冲地区大气降水中氢氧稳定同位素特征[J]. *长江流域资源与环境*, 2013, 22(11): 1458–1465.
- [42] 胡 蕾, 王建国. 重庆市 2013 年 10—12 月大气降水中氢氧同位素特征及水汽来源分析[J]. *中国岩溶*, 2015, (3): 247–253.
- [43] 章新平, 姚檀栋. 青藏高原东北地区现代降水中  $\delta\text{D}$  与  $\delta^{18}\text{O}$  的关系研究[J]. *冰川冻土*, 1996, 18(4): 360–365.
- [44] Yurtsever Y, Gat J R. Atmospheric waters[M]// Gat J R, Confiantini R, eds. *Stable Isotope Hydrology: Deuterium and Oxygen-18 in the Water Cycle*. Vienna: International Atomic Energy Agency, 1981, 103–142.
- [45] 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.
- [46] 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.
- [47] 胡海英, 黄华茂, 杨健文. 香港地区降水氢氧同位素多尺度演变特征分析[J]. *武汉大学学报: 工业版*, 2014, 47(5): 577–584.

(责任编辑: 彭南轩)