

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2020.06.011

三峡库区秭归段大气降水 δD 和 $\delta^{18}O$ 特征及水汽来源

王 婷¹, 高德强¹, 徐 庆^{1*}, 靳 翔², 张蓓蓓¹, 左海军¹

(1. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 国家林业和草原局森林生态环境重点实验室, 北京 100091;

2. 北京禹冰水利勘测规划设计有限公司, 北京 100161)

摘要: [目的] 研究长江三峡库区秭归段大气降水 δD 和 $\delta^{18}O$ 特征及水汽来源, 揭示该库区森林生态系统水循环过程对气候变化的响应机制。[方法] 运用氢氧稳定同位素技术测定并分析三峡库区秭归段 2016 年 9 月至 2019 年 8 月共 3 个水文年大气降水氢氧稳定同位素组成, 建立三峡库区秭归段大气降水 δD - $\delta^{18}O$ 关系式; 在年尺度和季节尺度上分析影响大气降水氢氧同位素特征主要环境因子, 并用 HYSPLIT 验证其水汽来源。[结果] (1) 三峡库区秭归段大气降水氢稳定同位素 (δD) 和氧稳定同位素 ($\delta^{18}O$) 的关系式为: $\delta D = 8.52 \delta^{18}O + 20.11$ ($R^2 = 0.96$, $n = 186$, $p < 0.01$); 大气降水 δD ($\delta^{18}O$) 季节性变化明显, 干季降水 δD ($\delta^{18}O$) 富集, 湿季降水 δD ($\delta^{18}O$) 贫化。(2) 在年尺度上, 降水 δD ($\delta^{18}O$) 与降水量和温度均呈显著负相关关系; 在季节尺度上, 降水量是影响库区湿季降水 δD ($\delta^{18}O$) 值变化的主要因素。(3) 过量氘 (d) 值与 HYSPLIT 气团轨迹模型结果均表明, 该库区秭归段湿季大气降水主要受东南季风和西南季风所携带海洋水汽的影响; 干季大气降水气团主要来自于亚欧大陆内部及局地的水汽蒸发。[结论] 三峡库区秭归段大气降水氢氧同位素组成季节性变化受局地环境因子 (降水量、温度) 和不同水汽来源共同影响。降水 δD 和 $\delta^{18}O$ 呈现“降水量效应”和“反温度效应”。湿季降水来自海洋气团, 干季降水为局地水汽蒸发和大陆气团主导。

关键词: 大气降水; 氢氧同位素; 过量氘; 水汽来源; 三峡库区

中图分类号: P426.6

文献标志码: A

文章编号: 1001-1498(2020)06-0088-08

大气降水是陆地生态系统水循环过程的输入端^[1-2], 是地表水、土壤水和地下水等水体的重要补给来源^[3], 也是指示气候变化的关键因子^[4-5]。通过监测和分析降水中氢氧稳定同位素组成, 可以有效地示踪区域的水汽来源和运动路径, 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^[6-8]。国际上对大气降水的研究始于 20 世纪 50 年代初期, 并于 1961 年启动全球大气降水同位素网络 (GNIP), 在全球范围内对降水中氢氧稳定同位素组成进行连续监测^[9]。基于该网络数据库, Craig^[10] 提出全球大气降水方程 (GMWL): $\delta D =$

$8 \delta^{18}O + 10$ 。由于水汽形成及运移过程中降水氢氧同位素的分馏差异, 使各地区大气降水线与全球大气降水线的斜率和截距相比存在不同程度的偏移^[11]。近年来, 我国大气降水氢氧同位素的研究取得了较大进展^[12-15]。尤其在长江流域地区, 陆续开展了基于大气降水氢氧同位素时空分布特征^[16]、大气降水线方程^[17]、水汽来源和大气降水氢氧同位素组成与环境因子的关系^[18] 等研究。孟玉川等^[17] 研究得出长江流域大气降水线为 $\delta D = 7.251 \delta^{18}O + 4.297$, 云下二次蒸发效应对长江流域大气降水方程的斜率和截距影响较小。吴华武等^[18] 研究表明

收稿日期: 2020-08-18 修回日期: 2020-10-09

基金项目: 国家重点研发计划子课题 (2016YFD060020106)、中国林业科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金重点项目 (CAFYBB2017ZB003) 和国家自然科学基金项目 (31870716)

* 通讯作者: 徐庆, 博士, 研究员。主要研究方向: 稳定同位素生态学。Email: xuqing@caf.ac.cn

长江流域大气降水 $\delta^{18}O$ 存在显著的降水量效应、反温度效应和湿度效应。但是, 前人对长江流域大气降水氢氧同位素特征研究主要集中在全球降水同位素观测网络 GNIP 站点城市, 对三峡库区秭归段的大气降水氢氧同位素组成及水汽来源的研究还未见报道。

三峡库区秭归段位于长江中上游, 距三峡大坝坝址约 2 km, 是长江流域气候变化的敏感区, 也是我国重要生态屏障和国家战略性淡水资源库。受全球气候变化的影响, 极端降水事件对该库区影响日趋严重, 导致长江流域洪涝灾害频发、水土流失严重。加之三峡大坝的建立, 使区域环境发生了显著改变, 区内气候更加复杂^[19-20]。基于此, 本研究通过对三峡库区湖北秭归段 2016 年 9 月至 2019 年 8 月 3 个水文年大气降水氢氧稳定同位素实测数据分析, 结合降水量、温度等环境因子, 运用 HYSPLIT 轨迹模型, 分析研究区大气降水氢氧同位素变化特征和水汽来源, 为揭示三峡库区森林生态系统水文过程对气候变化响应机制和减缓长江流域洪涝灾害的发生等提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

三峡库区秭归段 (106°50'~110°50' E, 29°16'~31°25' N) 位于湖北省西部, 长江两岸, 三峡工程坝上库首。属亚热带季风气候区, 年均气温 14.0~18.8 °C, 年均降水量 1 000~1 200 mm, 干季 (11 月—次年 4 月) 湿季 (5—10 月) 分明, 湿季降水量占全年降水量的 70% 左右。境内山脉起伏, 垂直气候变化明显。库区属于我国暴雨中心之一, 强降水过程导致水土流失严重, 并伴有滑坡、泥石流等自然灾害发生。研究区植物资源丰富, 森林覆盖率高, 植被以人工林为主, 其中马尾松 (*Pinus massoniana* Lamb.) 林分布在库区酸性或者中性土壤上, 柏木 (*Cupressus funebris* Endl.) 林是钙质土壤上的主要森林植被类型, 这两种森林植被类型在库区森林中面积最大, 伴生有木姜子 (*Litsea cubeba* (Lour.) Pers.)、漆树 (*Toxicodendron vernicifluum* (Franch.) F. A. Barkl.) 等植物, 林下植被主要有胡枝子 (*Lespedeza bicolor* Turcz.)、狗脊 (*Woodwardia japonica* (L. f.) Sm.) 等。

1.2 降水样品采集

2016 年 9 月至 2019 年 8 月, 在湖北秭归长江

三峡库区森林生态系统国家定位观测研究站 (110°18' E, 30°37' N) 和秭归县九岭头林场 (110°48' E, 30°58' N) 的空旷地各放置 1 个雨量筒, 在每个雨量筒上放置 1 个漏斗, 漏斗内放置乒乓球以防止水分蒸发, 分别采集大气降水样品, 并将两个地点每天采集的降水样品混合 (即日降水样品)。每天上午 7:00—8:00 用采样瓶收集大气降水, 并用 Parafilm 封口膜密封。采集的样品置于 -5~0 °C 冰箱低温保存, 以备测试。降水量、温度等气象数据由秭归长江三峡库区森林生态站提供和野外实测获得, 即在各采样点的空旷地放置自制雨量筒和温度计, 每天早 7:00 和晚 19:00, 记录降水量和温度等气象数据。

1.3 同位素样品测试

大气降水氢氧同位素 (δD 、 $\delta^{18}O$) 由清华大学稳定同位素实验室的 MAT 253 同位素比率质谱仪和 Flash 2000 HT 元素分析仪测定 (δD 测定精度为 $\pm 1\%$, $\delta^{18}O$ 测定精度为 $\pm 0.2\%$)。测定结果以相对于维也纳标准平均海水 (VSOMW) 的千分差 (‰), 即:

$$\delta(\text{‰}) = [(R_s/R_d) - 1] \times 1000\text{‰} \quad (1)$$

式中: δ 为氢 (氧) 同位素的比值, R_s 为样品中 $^2H / ^1H$ (或 $^{18}O / ^{16}O$), R_d 为 VSOMW 中 $^2H / ^1H$ (或 $^{18}O / ^{16}O$)。

1.4 水汽来源模型

大气气团传输途径运用拉格朗日积分轨迹模型 (HYSPLIT) 的后向轨迹法进行模拟, 选取垂直方向 500、1 000、1 500 m 作为模拟的初始高度, 以研究区作为终点, 模拟每次降水前 144 h 内水汽运动轨迹。

1.5 数据处理

采用 SPSS 24.0 对数据进行处理, 用相关分析确定大气降水 δD ($\delta^{18}O$) 与降水量、温度的相关关系, 线性回归分析拟合大气降水 δD 与 $\delta^{18}O$ 关系式。用 Origin 9.1 软件制图。

2 结果与分析

2.1 降水量及气温月动态变化

由 2016 年 9 月至 2019 年 8 月三峡库区气象资料可知 (图 1), 该库区秭归段总降水量为 2 484.9 mm, 其中湿季 (5—10 月) 降水量为 1 734.3 mm, 约占全年降水总量的 70%, 干季 (11 月—翌

年4月)降水量为757.5 mm。气温变化同降水量变化趋势一致,表现为夏季高温多雨、冬季寒冷干燥的气候特征。

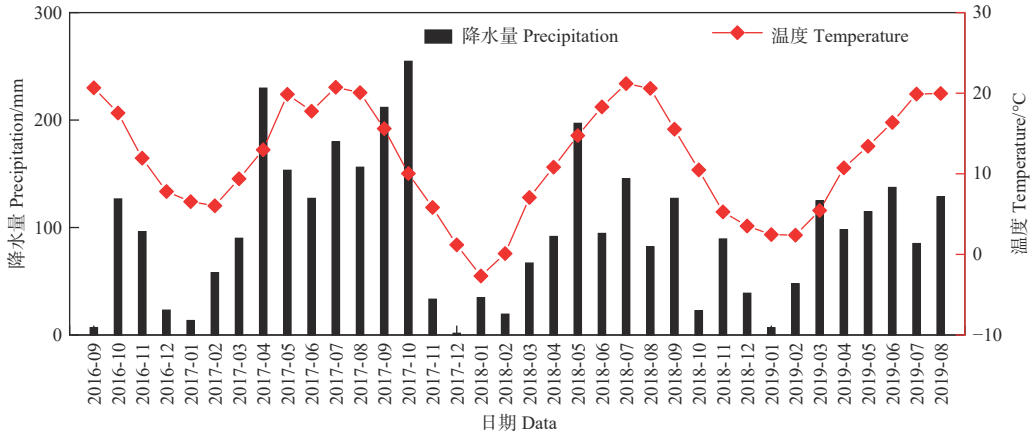


图1 三峡库区秭归段降水量和温度月动态变化

Fig. 1 The monthly variation of precipitation and temperature in Zigui section of the Three Gorges Reservoir Area

2.2 大气降水氢氧同位素季节性变化特征

三峡库区秭归段大气降水 δD 的变化范围为 $-137.34\text{‰} \sim -3.66\text{‰}$, 均值为 -51.81‰ ; $\delta^{18}O$ 的变化范围为 $-18.38\text{‰} \sim -2.90\text{‰}$, 均值为 -8.44‰ (图2, 表1)。可见, 该库区秭归段大气降水 δD ($\delta^{18}O$) 变化范围均介于全球^[10]与中国^[21]大气降水氢氧同

位素变化范围内, 均值低于全球及中国大气降水氢氧同位素均值。

湿季大气降水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 变化范围分别为 $-137.34\text{‰} \sim -3.66\text{‰}$ 和 $-18.38\text{‰} \sim -3.24\text{‰}$, 均值分别为 -64.90‰ 和 -9.74‰ ; 干季大气降水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 变化范围分别为 $-131.95\text{‰} \sim -4.10\text{‰}$ 和 $-18.17\text{‰} \sim$

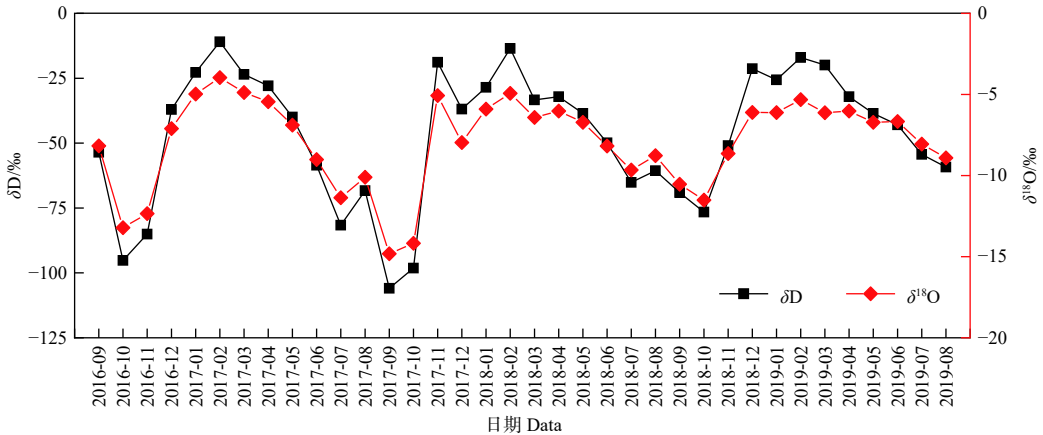


图2 三峡库区秭归段大气降水 δD 和 $\delta^{18}O$ 月动态变化

Fig. 2 The monthly variation of precipitation δD and $\delta^{18}O$ in Zigui section of the Three Gorges Reservoir Area

表1 三峡库区秭归段大气降水氢氧同位素及环境因子季节变化特征

Table 1 Seasonal variation characteristics of hydrogen and oxygen isotopes of precipitation and meteorological elements in Zigui section of the Three Gorges Reservoir Area

季节 Season	δD 平均值 δD average /‰	$\delta^{18}O$ 平均值 $\delta^{18}O$ average /‰	d -excess平均值 d -excess average /‰	年平均降水量 Mean annual precipitation/mm	年平均温度 Mean annual temperature/°C
干季 Dry season	-30.61	-6.33	20.06	387.49	5.9
湿季 Wet season	-64.90	-9.74	13.05	783.12	17.2
全年 Annual	-51.81	-8.44	15.72	1170.61	11.4

-2.90‰, 均值分别为-30.61‰和-6.33‰ (表 1)。由此可知, 三峡库区秭归段干季大气降水 δD 和 $\delta^{18}O$ 富集, 而湿季大气降水 δD 和 $\delta^{18}O$ 贫化。

2.3 大气降水 δD 和 $\delta^{18}O$ 的关系

根据三峡库区秭归段 3 个水文年大气降水 δD ($\delta^{18}O$) 实测值, 采用最小二乘法拟合该地区大气降水 δD - $\delta^{18}O$ 的关系式为: $\delta D = (8.52 \pm 0.12) \delta^{18}O + (20.11 \pm 1.14)$ ($R^2 = 0.96, p < 0.01, n = 186$) (图 3)。

研究区干季大气降水 δD - $\delta^{18}O$ 关系式为: $\delta D = (8.43 \pm 0.34) \delta^{18}O + (22.76 \pm 2.29)$ ($R^2 = 0.90, p < 0.01, n = 71$); 湿季大气降水 δD - $\delta^{18}O$ 关系式为: $\delta D = (8.09 \pm 0.11) \delta^{18}O + (13.95 \pm 0.19)$ ($R^2 = 0.98, p < 0.01, n = 115$)。湿季大气降水线的斜率和截距均小于干季 (图 3)。

2.4 过量氘 (d) 季节动态变化

三峡库区秭归段大气降水过量氘 (d -excess) 变化范围为 1.52‰~37.76‰, 均值为 15.72‰, 明显高于全球平均过量氘值 (10‰)。研究区过量氘 (d) 季节变化显著, 干季过量氘 (d) 均值为 20.06‰, 湿季过量氘均值为 13.05‰, 湿季过量氘值明显低于干季 (图 4, 表 1)。降水过量氘 (d) 的这种季节变化是季风区气候的特点之一。

2.5 大气降水 δD ($\delta^{18}O$) 与降水量和温度的关系

将三峡库区秭归段大气降水中 δD ($\delta^{18}O$) 分别与降水量 (P) 建立线性回归方程, 得到 P - δD 的关系为: $\delta D = (-0.88 \pm 0.24) P + (-38.41 \pm 4.47)$ ($R^2 = 0.05, p < 0.01, n = 186$); P - $\delta^{18}O$ 的关系

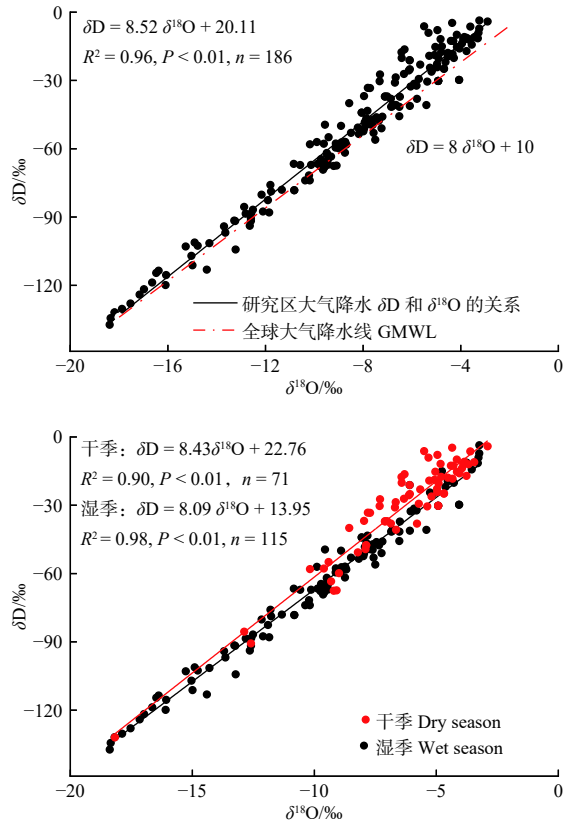


图 3 三峡库区秭归段大气降水 δD 和 $\delta^{18}O$ 的关系
Fig. 3 Relationship between δD and $\delta^{18}O$ of precipitation in Zigui section of the Three Gorges Reservoir Area

为: $\delta^{18}O = (-0.09 \pm 0.02) P + (-7.04 \pm 0.52)$ ($R^2 = 0.04, p < 0.05, n = 186$)。由表 2 可知, 在年尺度上, 三峡库区秭归段大气降水 δD ($\delta^{18}O$) 与降水量 (P) 呈显著负相关关系, 表现出降水量效应; 在季节尺度上, 湿季降水量效应显著, 而干季

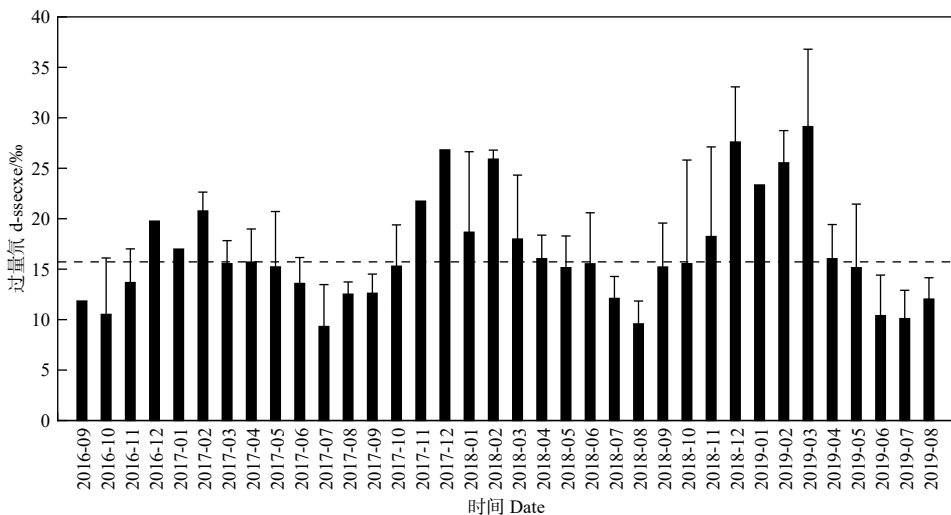


图 4 三峡库区秭归段大气降水过量氘 (d) 月动态变化

Fig. 4 Monthly variation of d -excess of precipitation in Zigui section of the Three Gorges Reservoir Area

表2 三峡库区秭归段大气降水 δD ($\delta^{18}O$) 与降水量和温度相关性统计Table 2 Correlation coefficients between δD ($\delta^{18}O$) and precipitation and temperature in Zigui section of the Three Gorges Reservoir Area

项目 Items	δD			$\delta^{18}O$		
	干季 Dry season	湿季 Wet season	全年 Annual	干季 Dry season	湿季 Wet season	全年 Annual
降水量 Precipitation	-0.076	-0.289**	-0.251**	0.002	-0.293**	-0.229**
温度 Temperature	0.058	0.143	-0.424**	0.175	-0.120	-0.348**

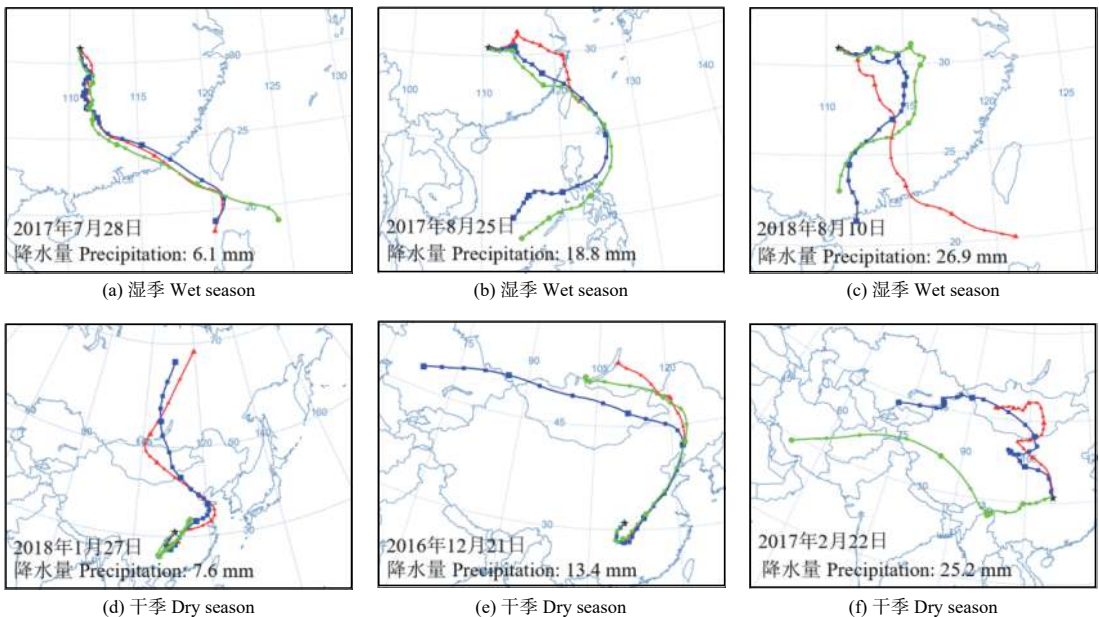
注：“**”为通过0.01显著性检验。
Note: ** $P < 0.01$.

降水量效应不显著。

将秭归段大气降水中 δD ($\delta^{18}O$) 分别与温度 (T) 建立线性回归方程, 得到 T - δD 的关系为: $\delta D = (-1.80 \pm 0.28) T + (-24.23 \pm 4.87)$ ($R^2 = 0.18$, $p < 0.01$, $n = 186$); T - $\delta^{18}O$ 的关系为: $\delta^{18}O = (-0.17 \pm 0.03) T + (-5.84 \pm 0.58)$ ($R^2 = 0.12$, $p < 0.01$, $n = 186$)。由表2可知, 在年尺度上, 大气降水 δD ($\delta^{18}O$) 与温度 (T) 呈显著负相关关系, 表现出反温度效应; 湿季和干季 δD 、 $\delta^{18}O$ 与温度相关性不显著。

2.6 降水水汽来源轨迹模型模拟

为进一步探究三峡库区秭归段大气降水水汽来源, 选取该地区3个水文年内干季和湿季共6场典型降水事件(干季和湿季各选择3场不同量级降水事件), 利用HYSPLIT水气团轨迹模型对降水气团的运移路径进行模拟。HYSPLIT模拟结果显示(图5), 湿季大气降水气团主要来自于西太平洋、印度洋及我国南海, 干季大气降水气团主要来自于亚欧大陆内部及局地的水汽蒸发。



注: 红色、蓝色、绿色分别代表海拔500 m、1000 m、1500 m 高空上气团运动轨迹。

Note: The red, blue and green line represent air mass trajectory at the altitude of 500 m, 1000 m, and 1500 m, respectively.

图5 三峡库区秭归段典型降水事件水汽轨迹模拟

Fig. 5 Trajectory map of air mass in typical rain events in Zigui section of the Three Gorges Reservoir Area

3 讨论

3.1 大气降水 δD 与 $\delta^{18}O$ 的关系

三峡库区秭归段大气降水 δD 与 $\delta^{18}O$ 的线性关

系及长江流域季风区多个城市(长沙^[8]、武汉^[22]、重庆^[23]、南京^[24])大气降水线的斜率和截距大于中国大气降水线($\delta D = 7.9 \delta^{18}O + 8.2$)^[21], 反映出这些地区大气降水水汽输送类型相似, 且在一定程度

上受到海洋水汽的影响。同时, 本研究得到的三峡库区秭归段大气降水 δD 和 $\delta^{18}O$ 的关系式的斜率和截距略大于长江流域季风区多个城市^[22-24], 产生这种现象的原因可能有两方面: (1) 该研究采样点位于湖北省秭归县三峡库区, 受该库区长江水分的蒸发和长江两岸较高森林覆盖率的影响, 空气相对湿度较大, 雨滴降落过程中受云下二次蒸发效应影响较小, 斜率和截距偏大^[25]; (2) 三峡库区秭归段地理位置及地形差异导致斜率和截距与其他城市相比存在一定程度的偏移, 研究区海拔变化较大, 区内山区、丘陵相间, 极易形成局地性降水^[26]。

3.2 降水量效应和温度效应

大气降水中的氢氧同位素与其蒸发过程条件、分馏凝结过程、水汽传输形式与局地降水量、温度等气象要素密切相关^[27]。我国降水氢氧同位素组成主要受降水量效应和温度效应控制^[28]。在年尺度上, 三峡库区秭归段降水量效应显著; 在季节尺度上, 只有湿季有降水量效应, 这可能与秭归段全年大部分降水均发生在湿季有关。研究区降水量效应与同处在我国长江流域季风区的武汉^[22]、重庆^[23]等地研究结果一致。这可能由以下两方面原因造成: 首先, 库区秭归段湿季降水充沛, 空气饱和差很容易补偿, 雨水下落过程中不易蒸发, 出现较低的 δ 值, 从而引起显著的降水量效应。其次, 中纬度季风区降水中氢氧同位素具有明显的降水量效应^[29], 而三峡库区秭归段、武汉及重庆等均属于中纬度季风区。

温度也是影响降水氢氧同位素组成的主要因素之一^[30-31]。在年尺度上, 研究区大气降水与温度呈负相关关系, 即反温度效应。这种现象在长江流域^[18]等地均有报道。已有研究表明, 反温度效应主要与研究区所处纬度有关^[11]。研究区位于中低纬度季风区, 湿热的气候使雨滴降落过程中蒸发分馏不显著, 长江蒸发水汽与地面蒸发水汽增加了降水量, 在某种程度上, 降水量效应抑制和掩盖了温度效应, 使其呈现出反温度效应。

3.3 过量氘 (d) 及 HYSPLIT 对大气降水水汽来源的指示作用

大气降水中过量氘 (d) 与水汽源地的气象条件密切相关, 因此, d 值可以作为指示地区大气降水水汽来源有效指标^[2]。以往的研究表明, 水汽源地相对湿度是过量氘 (d) 季节变化的主要驱动因素^[32]。研究区过量氘存在明显的季节变化, 干季

d 均值 (19.47‰) 显著高于湿季 d 均值 (12.76‰), 这与李维杰^[33] 在我国西南地区的贵阳、重庆、成都等地研究结果一致, 符合我国季风影响区域的降水特点。这可能由于库区湿季期间降水主要来源于海洋水汽凝结, 空气湿度大, 因此 d 值较小; 而干季降水主要来自于内陆水汽蒸发, 空气湿度小, 水汽源区在不平衡条件下经历了快速蒸发过程, 因此 d 值较大。此外, d 值的变化规律与 HYSPLIT 模拟的水汽来源较为一致, 可见, 地区大气降水氢氧同位素特征能为识别其水汽来源提供有效信息。

HYSPLIT 模拟结果显示, 三峡库区秭归段干季和湿季水汽来源存在明显差异。在干季, 该库区降水主要受大陆性季风控制, 降水气团主要来自高纬度西风带输送的亚欧大陆内部及局地水汽的蒸发补给, 降水量小, 空气湿度较低, 因此, 降水 δD 和 $\delta^{18}O$ 富集。而在湿季, 随着东亚季风和南亚季风于 5 月中旬在我国沿海地区登陆, 大量湿润、蒸发较弱的海洋气流向内陆推进, 降水量明显增加, 大气降水 δD 和 $\delta^{18}O$ 表现出明显的下降趋势; 远距离海洋水汽输送到三峡库区过程中, δD 和 $\delta^{18}O$ 不断冷凝而优先从水汽中分离出来, 致使 δD 和 $\delta^{18}O$ 逐渐贫化。由此可见, 本研究区大气降水 δD ($\delta^{18}O$) 的周期性季节变化与水汽来源密切相关。此结果与同处长江流域季风区的武汉^[22]、重庆^[23]、长沙^[8] 等地结果一致。

4 结论

(1) 三峡库区秭归段大气降水氢氧同位素关系式为: $\delta D = 8.52 \delta^{18}O + 20.11$ ($R^2 = 0.96$, $p < 0.01$, $n = 186$), 反映出三峡库区秭归段大气降水在一定程度上受到海洋水汽的影响。

(2) 三峡库区秭归段大气降水过量氘 (d) 具有明显的季节变化, 主要与水汽来源季节性差异密切相关。湿季水汽主要受东南季风和西南季风所携带海洋水汽的影响, 过量氘 (d) 值较低; 干季大气降水气团主要来自于亚欧大陆内部及局地的水汽蒸发, 过量氘 (d) 值较高。

(3) 不同时间尺度下, 影响三峡库区秭归段降水氢氧同位素变化的环境因子存在差异。年尺度上, 主要受“降水量效应”和“反温度效应”影响。在季节尺度上, 降水量是湿季降水氢氧同位素值变化的主要影响因素。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Qu S, Chen X, Wang Y, *et al.* Isotopic characteristics of precipitation and origin of moisture sources in Hemuqiao Catchment, a small watershed in the lower reach of Yangtze River[J]. *Water*, 2018, 10(9): 1170-1185.
- [3] 郝 玥,余新晓,邓文平,等.北京西山大气降水中D和 ^{18}O 组成变化及水汽来源[J].自然资源学报,2016,31(7): 1211-1221.
- [4] Tang Y, Song X F, Zhang Y, *et al.* Using stable isotopes to understand seasonal and interannual dynamics in moisture sources and atmospheric circulation in precipitation[J]. *Hydrological Processes*, 2017, 31(26): 4682-4692.
- [5] Pang H, Hou S, Kaspari S, *et al.* Influence of regional precipitation patterns on stable isotopes in ice cores from the central Himalayas[J]. *The Cryosphere*, 2014, 8(1): 289-301.
- [6] 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.
- [7] 韦飞黎,李双成,余武生,等.降水稳定同位素研究的历史与现状——基于文献计量学及网络分析方法[J].生态学报,2019,39(7): 2634-2643.
- [8] Wu H W, Zhang X P, Li X Y, *et al.* Seasonal variations of deuterium and oxygen-18 isotopes and their response to moisture source for precipitation events in the subtropical monsoon region[J]. *Hydrological Processes*, 2015, 29(1): 90-102.
- [9] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation[J]. *Tellus*, 1964, 16(4): 436-468.
- [10] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters[J]. *Science*, 1961, 133(3465): 1702-1703.
- [11] 张蓓蓓,徐 庆,姜春武.安庆地区大气降水氢氧同位素特征及水汽来源[J].林业科学,2017,3(12): 20-29.
- [12] 马迎宾,徐 庆,高德强,等.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[J].林业科学研究,2018,31(3): 37-44.
- [13] Yang X, Davis M E, Acharya S, *et al.* Asian monsoon variations revealed from stable isotopes in precipitation[J]. *Climate Dynamics*, 2017, 51(5-6): 2267-2283.
- [14] 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.
- [15] Wan H, Liu W G, Xing M. Isotopic composition of atmospheric precipitation and its tracing significance in the Laohequ Basin, Loess plateau, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 640-641: 989-996.
- [16] 董小芳,邓黄月,郑祥民,等.长江流域降水中氢氧同位素特征及水汽来源[J].环境科学与技术,2017,40(4): 78-84.
- [17] 孟玉川,刘国东.长江流域降水稳定同位素的云下二次蒸发效应[J].水科学进展,2010,21(3): 327-334.
- [18] 吴华武,章新平,孙广禄,等.长江流域大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 变化与水汽来源[J].气象与环境学报,2011,27(5): 7-12.
- [19] Wu L G, Zhang Q, Jiang Z H. Three Gorges Dam affects regional precipitation[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(13): 338-345.
- [20] Deng K, Yang S, Lian E, *et al.* Three Gorges Dam alters the Changjiang (Yangtze) river water cycle in the dry seasons: Evidence from H-O isotopes[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 562: 89-97.
- [21] 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.
- [22] 邓志民,张 翔,潘国艳.武汉市大气降水的氢氧同位素变化特征[J].长江科学院院报,2016,33(7): 12-17+22.
- [23] 温艳茹,王建力.重庆地区大气降水中氢氧同位素变化特征及与大气环流的关系[J].环境科学,2016,37(7): 2462-2469.
- [24] 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.
- [25] Zhu G, Li J, Shi P, *et al.* Relationship between sub-cloud secondary evaporation and stable isotope in precipitation in different regions of China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(10): 876-894.
- [26] 赵家成,魏宝华,肖尚斌.湖北宜昌地区大气降水中的稳定同位素特征[J].热带地理,2009,29(6): 526-531.
- [27] Krklec K, Dominguez-Villar D, Lojen S. The impact of moisture sources on the oxygen isotope composition of precipitation at a continental site in central Europe[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 561: 810-821.
- [28] 庞朔光,赵诗坤,文 蓉,等.海河流域大气降水中稳定同位素的时空变化[J].科学通报,2015,60(13): 1218-1226.
- [29] Yamanaka T, Tsujimura M, Oyunbaatar D, *et al.* Isotopic variation of precipitation over eastern Mongolia and its implication for the atmospheric water cycle[J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 333(1): 21-34.
- [30] 田 超,孟 平,张劲松,等.黄河小浪底库区降水 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 季节变化特征及水汽来源[J].应用生态学报,2015,26(12): 3579-3587.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] 李维杰,王建力,王家录.西南地区不同地形降水稳定同位素特征及其水汽来源[J].长江流域资源与环境,2018,27(5): 1132-1142.

Characteristics of δD and $\delta^{18}O$ in Precipitation and Water Vapor Sources in Zigui Section of the Three Gorges Reservoir

WANG Ting¹, GAO De-qiang¹, XU Qing¹, JIN Xiang², ZHANG Bei-bei¹, ZUO Hai-jun¹

- (1. Key Laboratory of Forest Ecology and Environment, National Forestry and Grassland Administration, Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;
2. Beijing Yubing Hydraulic Survey Planning Design Co., Ltd., Beijing 100161, China)

Abstract: [Objective] To reveal the responsive mechanism of the hydrological cycling in forest ecosystems to climate change, it is necessary to examine the characteristics of hydrogen and oxygen stable isotopes (δD and $\delta^{18}O$, respectively) in precipitation, as well as water vapor sources of precipitation in Zigui section of the Three Gorges Reservoir Area of China. [Method] Using a stable isotope technique, examined the composition of rainfall δD and $\delta^{18}O$ in Zigui section of the Three Gorges Reservoir Area in three hydrological years from September 2016 to August 2019, and established the local meteoric water line. Investigated the main environmental factors affecting the hydrogen and oxygen isotopic characteristics of atmospheric precipitation on annual and seasonal scales. Furthermore, traced the sources of atmospheric water in this area by calculating the D-excess (d) in the precipitation, and verified the results of the sources through the HYSPLIT. [Result] The relationship between δD and $\delta^{18}O$ in rainfall was $\delta D = 8.52 \delta^{18}O + 20.11$ ($R^2 = 0.96$, $n = 186$, $p < 0.01$). Precipitation δD and $\delta^{18}O$ values had obvious seasonal changes, low in the wet season and high in the dry season. On the annual scale, the rainfall δD and $\delta^{18}O$ were significantly negatively associated with temperature and precipitation. On the seasonal scale, precipitation was the main factor affecting the variation of δD and $\delta^{18}O$ values in the wet season. According to d -excess and the HYSPLIT model, the precipitation water vapor during the wet season was mainly influenced by the ocean moisture carried by the southeast and southwest monsoon. During the dry season, the atmospheric vapor mainly derived from the Eurasian Continent and local water evaporation. [Conclusion] The seasonal variation of δD and $\delta^{18}O$ in precipitation is affected by local environmental factors (precipitation and temperature) and different sources of water vapor in the study area. On annual scale, there were “precipitation effect” and “anti-temperature effect”. The precipitation water vapor in the wet season was mainly influenced by the ocean moisture while that in the dry season derived from the continent and local water evaporation.

Keywords: meteoric water; hydrogen and oxygen stable isotopes; d -excess; water vapor resource; the Three Gorges Reservoir Area

(责任编辑: 彭南轩)