

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2025.06.008

三峡库区湖北段降水氢氧稳定同位素季节性特征及水汽来源研究

叶宗超^{1,2}, 王卫光^{1,2,3}, 邢万秋^{1,2}, 潘晓龙^{1,2}

(1. 河海大学水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098;
3. 河海大学长江保护与绿色发展研究院, 江苏 南京 210098)

摘要: 为研究气候变化下三峡库区湖北段降水时空演变规律, 利用 2022 年 10 月至 2023 年 9 月收集的 187 个降水样品, 分析了降水氢氧稳定同位素特征, 并探讨了气温、降水量和相对湿度等气象因子的影响, 同时利用 HYSPLIT 模型追踪水汽输送轨迹, 解析了水汽来源。结果表明: 三峡库区湖北段降水氢氧稳定同位素具有明显季节性变化, 夏秋季相对贫化, 冬春季相对富集; 研究区降水 $\delta D - \delta^{18}O$ 关系为 $\delta D = 8.21\delta^{18}O + 11.23 (R^2 = 0.94, p < 0.01)$, 反映了区域湿润多雨的气候特征; 降水量和相对湿度是影响研究区降水氢氧稳定同位素的主要因素, 气温是影响 d-excess 的主要因素; 研究区降水来源存在季节性差异, 即夏季降水主要来自东南季风和西南季风所携带太平洋、南海和印度洋海洋水汽, 冬季降水则多为来自亚欧大陆西和西北方向水汽, 春秋季节是海源、陆源水汽对降水贡献主导地位变化的过渡时期。

关键词: 降水; 氢氧稳定同位素; HYSPLIT 模型; 水汽来源; 三峡库区

中图分类号: P426 文献标志码: A 文章编号: 1000-1980(2025)06-0065-10

Seasonal characteristics of stable hydrogen and oxygen isotopes in precipitation and water vapor sources in Hubei section of the Three Gorges Reservoir Region

YE Zongchao^{1,2}, WANG Weiguang^{1,2,3}, XING Wanqiu^{1,2}, PAN Xiaolong^{1,2}

(1. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. Yangtze Institute for Conservation and Development, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To investigate the spatiotemporal evolution patterns of precipitation in the Hubei section of the Three Gorges Reservoir Region under climate change, 187 precipitation samples collected from October 2022 to September 2023 were utilized to analyze the stable hydrogen and oxygen isotope characteristics of precipitation. The influence of meteorological factors such as temperature, precipitation amount, and relative humidity was examined. Additionally, the HYSPLIT model was used to trace water vapor transport trajectories and identify water vapor sources. The results indicate that there are obvious seasonal variations of stable hydrogen and oxygen isotopes in precipitation in the Hubei section of the Three Gorges Reservoir Region, with relative depletion in summer and autumn and relative enrichment in winter and spring. The relationship between δD and $\delta^{18}O$ in the study area is $\delta D = 8.21\delta^{18}O + 11.23 (R^2 = 0.94, p < 0.01)$. It reflects the regional wet and rainy climatic characteristics. Precipitation amount and relative humidity are the main factors affecting the stable hydrogen and oxygen isotopes in precipitation. Temperature is the dominant factor influencing d-excess. Seasonal variations are observed in the sources of precipitation for the study area. In summer, precipitation mainly comes from the water vapor of the Pacific Ocean, South China Sea, and Indian Ocean carried by the southeast monsoon and the southwest monsoon. In winter, precipitation primarily derives from the west and northwest directions of the Eurasian continent. Spring and

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(U2240218); 中央高校基本科研业务费专项资金学生项目(B240205020)

作者简介: 叶宗超(2001—), 男, 硕士研究生, 主要从事同位素水文研究。E-mail: yezh22@163.com

通信作者: 王卫光(1979—), 男, 教授, 博士, 主要从事水文学物理规律模拟及水文预报研究。E-mail: wangweiguang2016@126.com

引用本文: 叶宗超, 王卫光, 邢万秋, 等. 三峡库区湖北段降水氢氧稳定同位素季节性特征及水汽来源研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(6): 65-74.

YE Zongchao, WANG Weiguang, XING Wanqiu, et al. Seasonal characteristics of stable hydrogen and oxygen isotopes in precipitation and water vapor sources in Hubei section of the Three Gorges Reservoir Region[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2025, 53(6): 65-74.

autumn serve as transitional periods, witnessing shifts in the predominant source of precipitation between the ocean and land.

Key words: precipitation; stable hydrogen and oxygen isotope; HYSPLIT model; water vapor source; the Three Gorges Reservoir Region

降水是水循环的重要组成部分,是陆表水体的重要补给来源^[1-2],也是气候变化的重要指标。降水时空分布不均是水旱灾害发生和人类可利用水量变化的重要诱因。因此,研究降水特性对分析环境变化和水汽来源进而深入了解水循环过程具有重要意义。水循环过程通常伴随水体氢氧稳定同位素(D 和¹⁸O)分馏^[3]。这种同位素分馏对外部环境变化高度敏感,所以氢氧稳定同位素常作为自然水体中优秀的示踪剂^[3-4],被广泛应用于降水来源^[5-6]、气候变化^[3,7]以及水源划分^[8-9]等领域。

降水氢氧同位素组成可以反映区域环境差异和时间变化特征^[10-12],并可以体现研究区距海远近^[13]、海拔高低^[14-15]和纬度差异^[16]。对于不同气候分区氢氧同位素年内变化规律的差别,可以通过研究气象因子^[12,17]、追踪水汽源地^[17]和分析云下蒸发作用^[18-19]等方式探究内在成因。中国气候和地形复杂多样,降水时空分布不均且来源不一致,学者们以氢氧同位素为切入点揭示降水特性,已取得丰富成果^[18,20-29]。三峡库区位于长江上游末端,建成以来极大地提高了水资源存储和调控能力,减轻了洪涝灾害风险。同时,气候变化与人类活动的日益加剧,使得库区水文循环愈发受到关注^[30-34]。胡艳茹等^[30]发现三峡水库蓄水后西北部年降水显著增加 13.2%。在全球气候变化的背景下,降水异常增多或减少严重威胁库区运行以及长江流域水安全。因此,开展降水特征和来源的研究对分析区域气候和保障生产生活十分必要。由于长江流域降水同位素采样点主要位于全球降水同位素监测网络站点城市或中下游地区^[22-25,31-36],而在对气候变化敏感的三峡库区相对较少,加之该地区物理试验相对缺乏,制约了三峡库区水循环机制的深入探索。

本文通过收集三峡库区湖北段 2022 年 10 月至 2023 年 9 月的大气降水样品,分析大气降水氢氧稳定同位素组成变化特征,研究气温、降水量和相对湿度等气象要素的影响,明晰水汽输送情况,同时利用混合单粒子拉格朗日积分轨迹(hybrid single-particle lagrangian integrated trajectory, HYSPLIT)模型追踪水汽输送轨迹,以为研究季风区水文气象、应对气候变化和规划利用区域水资源提供一定的理论依据。

1 研究区概况

三峡库区湖北段(30°14'N~31°34'N, 110°05'E~111°39'E)位于湖北省中西部,总面积约为 1.15 万 km²(图 1)。长江自巴东县流入,境内主体为山区峡谷,海拔较高,高差较大,气候垂直差异明显。土地覆盖类型主要为林地,自然植被以亚热带常绿阔叶林为主,河网复杂,水系连通巴东县、兴山县、秭归县和夷陵区,下接江汉平原。研究区属亚热带季风气候区,雨热同期,年降水量为 1 100~1 500 mm,年均潜在蒸散发大于 800 mm,降水集中于 6—10 月,年均气温为 12~19℃^[37],湿度较大(图 2)。研究区四季分明,3—5 月为春季,6—8 月为夏季,9—11 月为秋季,12 月至次年 2 月为冬季。研究区靠近三峡大坝坝址,水位年变幅大,年径流量丰富。径流量主要集中在汛期,宜昌站年径流量多年平均值为 4 510 亿 m³,79%的径流量集中在汛期 5—10 月。研究期间,年降水量从大到小依次为秭归(1 377.4 mm)、兴山(1 287.2 mm)、巴东(1 240.6 mm),年均气温排序为巴东(18.0℃)、秭归(17.6℃)、兴山(17.4℃),年均相对湿度排序为秭归(74.1%)、巴东(72.6%)、兴山(70.0%)。

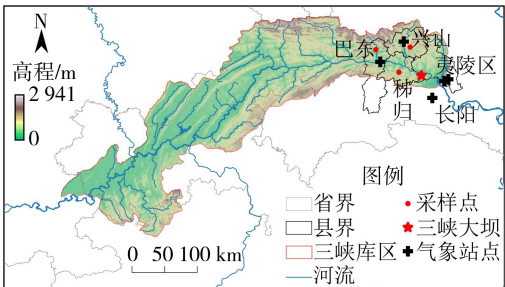


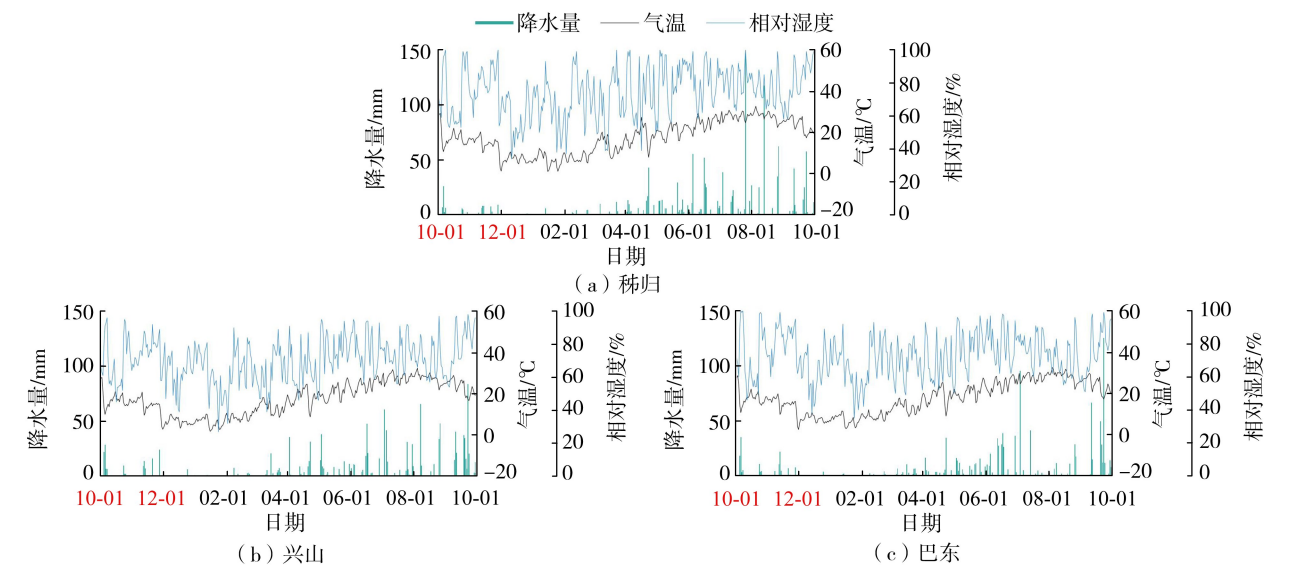
图 1 研究区及采样点位置

Fig. 1 Location of study area and sampling sites

2 研究数据与方法

2.1 样品采集与测试

本文选取三峡库区湖北段秭归县(海拔 549 m)、兴山县(海拔 926 m)和巴东县(海拔 152 m)3 个采样区,于 2022 年 10 月至 2023 年 9 月收集次降水样品,3 个采样区收集的样品分别为 59、43、85 个。采样过程如下:降雨开始,在空旷地上,用自制集雨装置收集降雨,该装置底部为 5 L 聚乙烯塑料桶,上方装有塑料漏斗;为防止样品蒸发,降雨结束时,立即将液态降水储存在 60 mLHDPE 窄口瓶中,并尽量装满,加盖后用保鲜膜



注:红色日期表示 2022 年,黑色日期表示 2023 年,下同。

图 2 各气象站降水量、气温和相对湿度的时间变化

Fig. 2 Temporal variations of precipitation, temperature, and relative humidity at each meteorological station

和防水胶带密封,之后放进冰箱低温(3~5℃)冷藏保存。连续降雨时,则按照固定的时间间隔收集(早晚 8:00)。降雪时,先收集样品于塑料袋中密封,室温下自然融化后,进行相同处理。为防止污染,在每次降水收集前对收集装置进行清洗、干燥处理,同时记录降水日期。

样品收集完成后,尽快运送至海河大学水灾害防御全国重点实验室进行冷藏保存,直至上机测量。测试前,使用 0.22 μm 有机滤膜过滤到 2 mL 进样瓶中。降水同位素测量使用仪器为液态水同位素分析仪(L2130-i, Picarro, USA)。每个样品测量 6 次,丢弃前 3 个值取平均值以避免记忆效应。测量结果用相对于 V-SMOW(维也纳标准平均海水)标准的 δ(‰)表示,δ¹⁸O 和 δD 的测量精度分别为±0.2‰和±0.6‰。氢氧稳定同位素月均值由降水量加权平均公式计算得出。Dansgaard^[11]将全球降水中氢氧稳定同位素比率出现的差值定义为过量氘(d-excess),d-excess 可以反映局地蒸发分馏过程和指示水汽来源地。

2.2 气象数据

降水、气温和相对湿度数据来自国家气象科学数据中心(<https://data.cma.cn>),兴山和巴东使用气象站点数据,秭归通过对临近站点数据进行反距离权重插值获得。水汽通量分析中使用的经向风速、纬向风速和比湿数据来自欧洲中期天气预报中心(ECMWF)全球气候第五代产品 ERA5^[38],时空分辨率分别为月和 0.25°×0.25°。

2.3 HYSPLIT 模型

为了确定降水来源,利用 HYSPLIT 模型进行后向追踪,对水汽输送轨迹进行聚类分析。该模型由美国海洋大气研究中心空气资源实验室开发^[39],模拟所使用的全球同化系统气象数据由美国国家环境预报中心(NCEP)提供。本文以研究区内采样点作为水汽运动终点,参考文献[33,40],初始高度选取 1 500 m,调整世界时以在北京时间 0:00、6:00、12:00 和 18:00 向后追踪 168 h。

3 结果与分析

3.1 降水氢氧稳定同位素的时间变化

由图 3 可知,2022 年 10 月至 2023 年 9 月,秭归、兴山和巴东 δD 的变化范围分别为-92.98‰~19.49‰、-121.68‰~-2.39‰和-108.55‰~26.01‰,δ¹⁸O 的变化范围分别为-12.35‰~2.97‰、-16.69‰~-1.01‰和-15.15‰~2.62‰。δD 降水加权平均值从小到大依次为兴山(-61.15‰)、巴东(-43.50‰)、秭归(-29.08‰)。δ¹⁸O 降水加权平均值从小到大依次为兴山(-8.88‰)、巴东(-6.70‰)、秭归(-4.57‰)。降水氢氧稳定同位素变化范围落在全球变化范围之内^[41],十分接近中国降水同位素变化范围^[42]。对研究区所有降水样品的氢氧稳定同位素数据按月进行降水量加权平均,得到区域降水同位素年内变化情况,如

图 3(d) 所示。研究区降水 δD 和 $\delta^{18}O$ 最大值出现在 3 月, 9 月和 10 月最为贫化。各采样区和研究区降水氢氧稳定同位素在时间变化上同步性较好, 均整体表现出冬半年(2022 年 10 月至 2023 年 3 月)逐渐富集而夏半年(2023 年 4 月至 9 月)逐渐贫化的特征。秭归、兴山和巴东 d-excess 变化范围分别为 $-14.94\text{‰} \sim 22.45\text{‰}$ 、 $-6.01\text{‰} \sim 17.21\text{‰}$ 和 $-14.17\text{‰} \sim 34.02\text{‰}$, 且在研究期间变化均很大。研究区降水 d-excess 月均值介于 $3.99\text{‰} \sim 25.43\text{‰}$ 之间, 最大值和最小值分别出现在 12 月和 7 月, 均值为 12.41‰ , 高于全球降水 d-excess (10‰)。

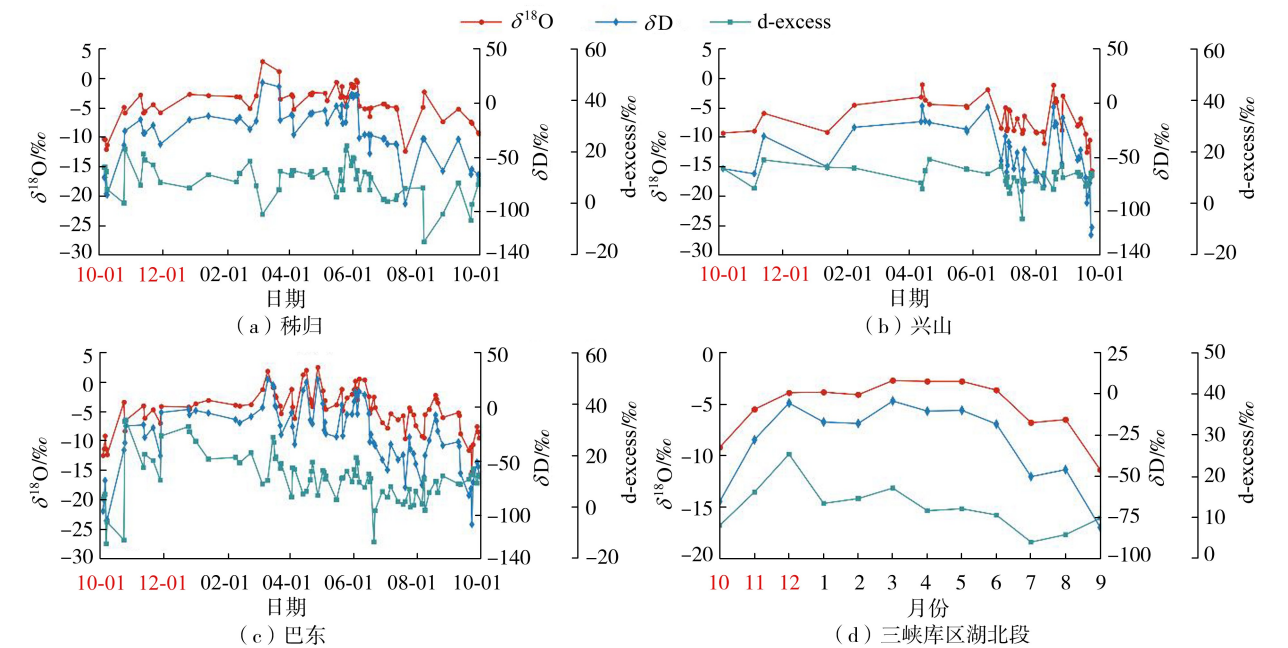


图 3 降水 $\delta^{18}O$ 、 δD 和 d-excess 的时间变化
Fig. 3 Temporal variations of $\delta^{18}O$, δD , and d-excess in precipitation

由图 4 可知, 各采样区 $\delta^{18}O$ 、 δD 季节变化特征一致, 均表现为自春季至秋季降低, 随后在冬季上升。空间上, 兴山的 $\delta^{18}O$ 、 δD 值低于秭归、巴东, 这可能与其海拔最高^[34, 40]有关。各采样区降水 d-excess 均呈现出自春季至夏季减少随后增加的时间分布规律。

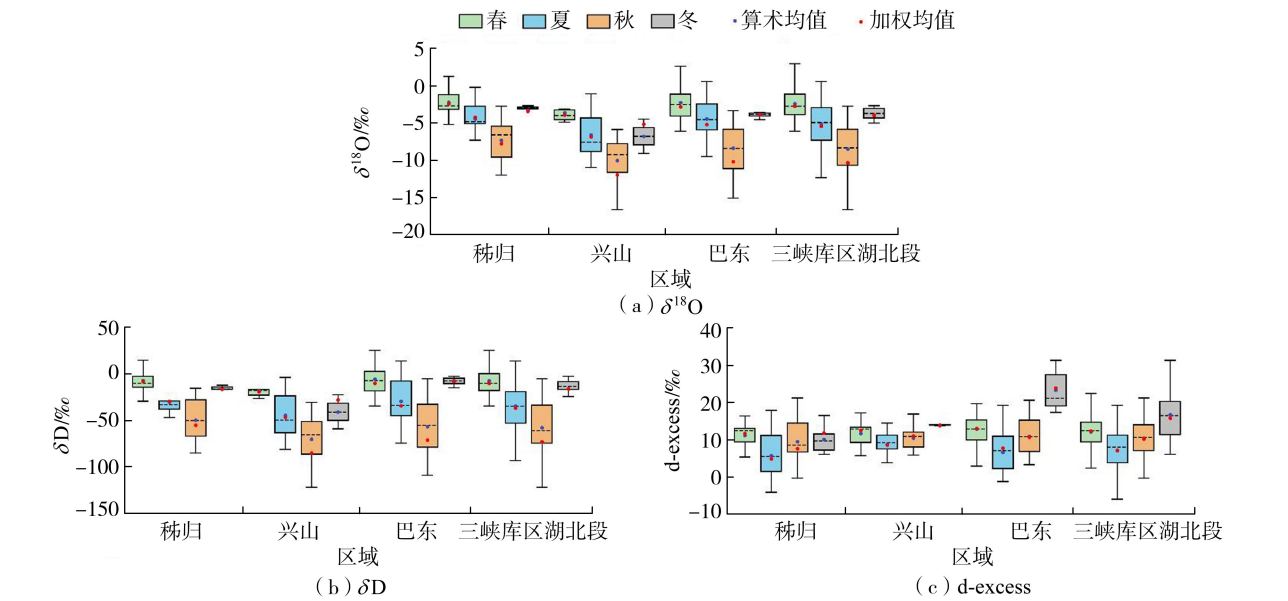


图 4 降水 $\delta^{18}O$ 、 δD 和 d-excess 季节变化范围
Fig. 4 Seasonal variation ranges of $\delta^{18}O$, δD , and d-excess in precipitation

三峡库区湖北段的降水氢氧同位素在冬春季富集, 夏秋季贫化, 这种季节性变化在长江流域广大季风

地区普遍存在^[35,43],表明降水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 深受季风气候影响。夏季,印度洋和太平洋蒸发形成丰富的暖湿水汽经西南季风和东南季风传输至研究区,然而水汽运送途中会因地形等影响发生数次降水,当水汽冷凝形成降水时,重同位素优先凝结,因此当水汽到达研究区形成降水时,降水的重同位素会贫化^[35,43]。高温下,茂密植被和长江水域蒸发能力提高,大量蒸散水汽促使形成区域性降水,水汽再循环率偏高^[44],因此 9 月和 10 月降水 δ 低值集中出现,这与秭归^[33]和成都地区^[36]的研究一致。冬季风自北方大陆吹来,干燥寒冷,途中降水较少,重同位素较为富集,经过干季富集,3 月为降水 δ 高值月份。 d-excess 年内分布特征与秭归^[33]和长沙^[22]等地相似,表现出冬高夏低,表明夏季海源水汽湿润而冬季陆源水汽较为干燥,但与昆明^[13]相反,也体现区域降水来源差异。

3.2 降水 δD - $\delta^{18}\text{O}$ 关系

利用最小二乘法对降水中 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 进行线性拟合,得到当地大气降水线 (LMWL, 图 5)。与中国大气降水线 ($\delta\text{D}=7.9\delta^{18}\text{O}+8.2$)^[42]相比,研究区的降水同位素关系线斜率和截距均偏高。通常,水汽冷却凝结时温度越低,D 和 ^{18}O 的分馏效应之比越向大于 8 (瑞利平衡条件下) 的方向偏移。云下二次蒸发会导致同位素动力分馏,作用越强烈,LMWL 斜率和截距越小,反之则越大^[26,35]。因此,位于亚热带季风区的重庆^[35]、安庆^[24]、长沙^[22]等地,因气候湿润,受海洋性气候影响^[24],LMWL 斜率和截距均接近或大于全球大气降水线 (GMWL)^[10],而西北干旱半干旱地区由于雨滴受蒸发影响,LMWL 的斜率和截距往往较小^[18],具备大陆性气候特征。LMWL 的空间变化特征也体现了区域间气候差异。

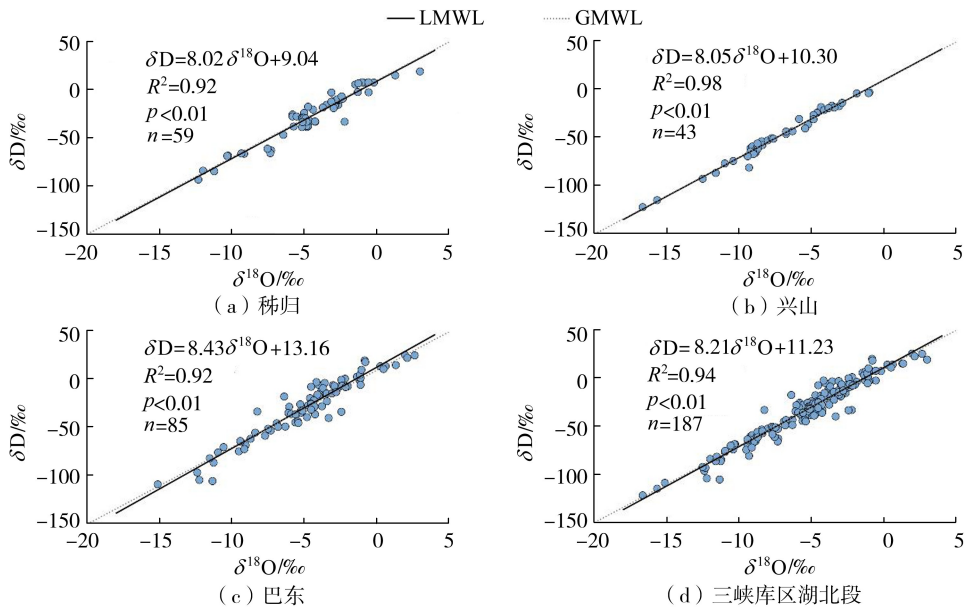


图 5 降水 δD - $\delta^{18}\text{O}$ 关系

Fig. 5 Relationship between δD and $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation

研究区降水同位素关系线接近 GMWL,反映出区域气候湿润,降水较为丰沛,受海洋水汽影响较大^[24]的特征。秭归、兴山、巴东的降水同位素关系线差异不大,秭归和兴山的关系线与 GMWL 较为接近,降水同位素组成较为均匀地分布在 GMWL 两侧。巴东的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 关系线的斜率和截距均大于 GMWL,其原因可能是降水期间湿度大,云下二次蒸发效应弱和特殊地形易发生局地性降水^[32-33]。各地 LMWL 相对 GMWL 的不同程度偏离也体现相应时段各自降水特征。本文降水同位素关系线斜率和截距较王婷等^[33]在秭归地区 (斜率 8.52,截距 20.11‰)和黄荷等^[34]在香溪河流域 (斜率 8.35,截距 14.65‰)的研究结果偏小,可能是因为采样时间不同,具有年际差异。

3.3 降水氢氧稳定同位素与局地气象因子的关系

为研究局地气象因子对降水同位素组成的影响,利用线性回归法,在日尺度和月尺度上分析研究区 $\delta^{18}\text{O}$ 、 d-excess 与气温 (T)、降水量 (P) 和相对湿度 (H_{R}) 的关系 (表 1)。研究区 $\delta^{18}\text{O}$ 在日或月尺度上与气温、降水和相对湿度的回归方程斜率均为负。 $\delta^{18}\text{O}$ 与气温的相关性较差 ($p>0.05$),因此研究期间反温度效应不显著,气温不是影响降水同位素的主要因素。 $\delta^{18}\text{O}$ 与降水量和相对湿度有很好的相关性 ($p<0.01$),而且日

尺度上的相关性好于月尺度,表明降水量和相对湿度是降水同位素组成的主控因素。研究区日、月尺度上 d-excess 与 T 的回归方程斜率分别为 $-0.51\text{‰}/\text{℃}$ 、 $-0.55\text{‰}/\text{℃}$,且均通过显著性水平为 0.01 时的检验,表明在温暖环境中降水 d-excess 较寒冷条件下低。月尺度上 d-excess 与 P 的斜率略陡于日尺度,但其负相关具有统计学意义($p<0.01$)。时间尺度从日到月,虽然 d-excess 与 H_R 的负相关关系增强(斜率由 0 变 $-0.35\text{‰}/\%$),但并不显著($p>0.05$)。

表 1 降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 、d-excess 与气象因子间的线性拟合关系

Table 1 Linear fitting relationships between $\delta^{18}\text{O}$, d-excess in precipitation and meteorological factors			
时间尺度	$\delta^{18}\text{O}$ 与 T 拟合关系式	$\delta^{18}\text{O}$ 与 P 拟合关系式	$\delta^{18}\text{O}$ 与 H_R 拟合关系式
日尺度	$\delta^{18}\text{O} = -0.07T - 3.96 (R^2 = 0.01, p > 0.05)$	$\delta^{18}\text{O} = -0.06P - 4.44 (R^2 = 0.09, p < 0.01)$	$\delta^{18}\text{O} = -0.07H_R + 1.23 (R^2 = 0.04, p < 0.01)$
月尺度	$\delta^{18}\text{O} = -0.11T - 3.34 (R^2 = 0.10, p > 0.05)$	$\delta^{18}\text{O} = -0.01P - 4.16 (R^2 = 0.15, p < 0.05)$	$\delta^{18}\text{O} = -0.07H_R - 0.23 (R^2 = 0.03, p > 0.05)$
时间尺度	d-excess 与 T 拟合关系式	d-excess 与 P 拟合关系式	d-excess 与 H_R 拟合关系式
日尺度	$d = -0.51T + 19.97 (R^2 = 0.18, p < 0.01)$	$d = -0.03P + 10.58 (R^2 = 0.01, p > 0.05)$	$d = 0.00H_R + 9.72 (R^2 = 0.00, p > 0.05)$
月尺度	$d = -0.55T + 21.41 (R^2 = 0.37, p < 0.01)$	$d = -0.04P + 15.93 (R^2 = 0.32, p < 0.01)$	$d = -0.35H_R + 36.63 (R^2 = 0.11, p > 0.05)$

注: d 为 d-excess。

由表 2 可知,除日尺度兴山降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与 T 呈不显著($p>0.05$)正相关关系外,在其他地点和时间尺度下, $\delta^{18}\text{O}$ 与 T 均呈不显著负相关关系,相关系数介于 $-0.46 \sim -0.01$ 。降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与 P 在日尺度下,除秭归($-0.05, p>0.05$)呈不显著负相关关系外,其余地点均呈显著($p<0.05$)或极显著负相关关系($p<0.01$);虽然月尺度下负相关系数较日尺度增加,但仅三峡库区湖北段呈显著负相关关系。秭归、兴山、巴东日尺度降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与 H_R 呈显著负相关关系,三峡库区湖北段为极显著负相关关系($-0.20, p<0.01$),湿度效应显著;月尺度下,降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与 H_R 负相关关系并不显著。d-excess 与 T 相关系数变化范围为 $-0.82 \sim -0.30$,均通过显著性检验,月尺度上的相关性好于日尺度,表明 T 是影响 d-excess 的主要因素。日尺度 d-excess 与 P 呈负相关关系,与 H_R 呈正相关关系(除巴东外)。月尺度 d-excess 与 P 和 H_R 的相关系数向负方向增加,其中,秭归、兴山和研究区的 d-excess 与 P 呈显著负相关关系。

表 2 降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 、d-excess 与气象因子的 Pearson 相关性

Table 2 Pearson correlations between $\delta^{18}\text{O}$, d-excess in precipitation and meteorological factors							
时间尺度	区域	$\delta^{18}\text{O}$			d-excess		
		T	P	H_R	T	P	H_R
日尺度	秭归	-0.01	-0.05	-0.31 [*]	-0.30 [*]	-0.18	0.24
	兴山	0.09	-0.38 [*]	-0.33 [*]	-0.37 [*]	-0.01	0.18
	巴东	-0.10	-0.35 ^{**}	-0.27 [*]	-0.55 ^{**}	-0.07	-0.09
	三峡库区湖北段	-0.12	-0.30 ^{**}	-0.20 ^{**}	-0.42 ^{**}	-0.08	0.01
月尺度	秭归	-0.34	-0.19	-0.30	-0.58 [*]	-0.70 [*]	-0.14
	兴山	-0.07	-0.42	-0.15	-0.72 [*]	-0.69 [*]	-0.20
	巴东	-0.46	-0.56	-0.30	-0.82 ^{**}	-0.54	-0.55
	三峡库区湖北段	-0.31	-0.39 [*]	-0.17	-0.61 ^{**}	-0.56 ^{**}	-0.33

注: ^{*} 表示在 0.05 的显著性水平上显著, ^{**} 表示在 0.01 的显著性水平上显著。

整体来看,三峡库区湖北段降水量同位素主要受降水量和相对湿度影响,存在明显的降水量效应和湿度效应。降水量效应明显地区多位于中低纬度近海区域^[11]。长江流域作为典型的中低纬度季风区,其境内的湖口^[25]、长沙^[22]和昆明^[13]等许多地区均观测到降水量效应。然而,安庆^[24]、宜昌^[32]则与本文秭归相似,降水同位素与降水量相关性不明显,原因是单次降水量很大可能受到风速、湿度和水汽来源等短期天气状况的影响,导致降水 $\delta^{18}\text{O}$ 离散程度高,与降水量相关性减弱^[24]。研究区存在明显的湿度效应,这在同处长江流域、同属亚热带季风气候的湖口地区亦观测到相似规律^[25]。在日尺度上, H_R 越小,表示环境越干燥,雨水中的重同位素在空气中的蒸发富集作用越强, D 和 ^{18}O 分馏效应之比减小, d-excess 减小,反之 d-excess 增大^[22]。但巴东 d-excess 与 H_R 呈负相关关系,可能是因为降水气团的性质是影响其降水同位素的主要因素。此外,月尺度 d-excess 与 H_R 呈负相关关系也表明降水来源气团所携带的水汽同位素组成特征不同:夏季海洋性湿润气团与冬季大陆性干燥气团相比 d-excess 较低。长江流域季风区雨热同期,季风环流输送的水汽中氢氧稳定同位素夏贫冬富^[13],在空气湿度、冷凝温度等多种因素的影响下,很可能会掩盖中低纬季风区的温度效应,导致普遍存在降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度呈负相关关系的现象^[21]。研究区反温度效应并不显著,可能是由

于降水量效应和湿度效应的抑制。

3.4 水汽来源

水汽是降水的物质基础,降水由水汽冷却凝结而成。分析区域水汽来源有助于进一步把握降水氢氧稳定同位素时空变化特征。d-excess 可以有效指示水汽源地,研究区 d-excess 具有夏秋偏低、冬春偏高的变化特点,d-excess 的季节差异表明不同季节的水汽来源不同。季风对研究区降水水汽输送影响显著^[45-46],为更全面认识研究区降水来源,选取季节中间月份即采样期内的 10 月、1 月、4 月和 7 月研究水汽通量随时间变化情况(图 6),利用 HYSPLIT 模型追踪秭归、兴山、巴东的降水水汽来源,并进行聚类分析(图 7,图中数字代表路径占比),同时结合 FLEXPART 模型^[43]的结果进行综合分析。

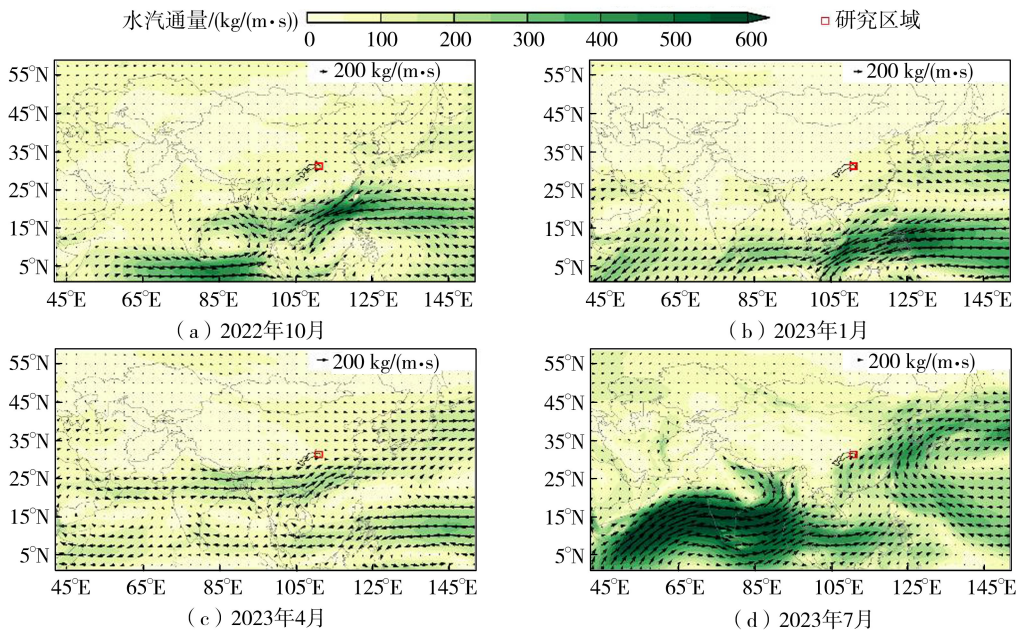


图 6 1000~300 hPa 垂直积分水汽通量季节变化
Fig. 6 Seasonal variations of vertical integrally water vapor flux from 1000 to 300 hPa

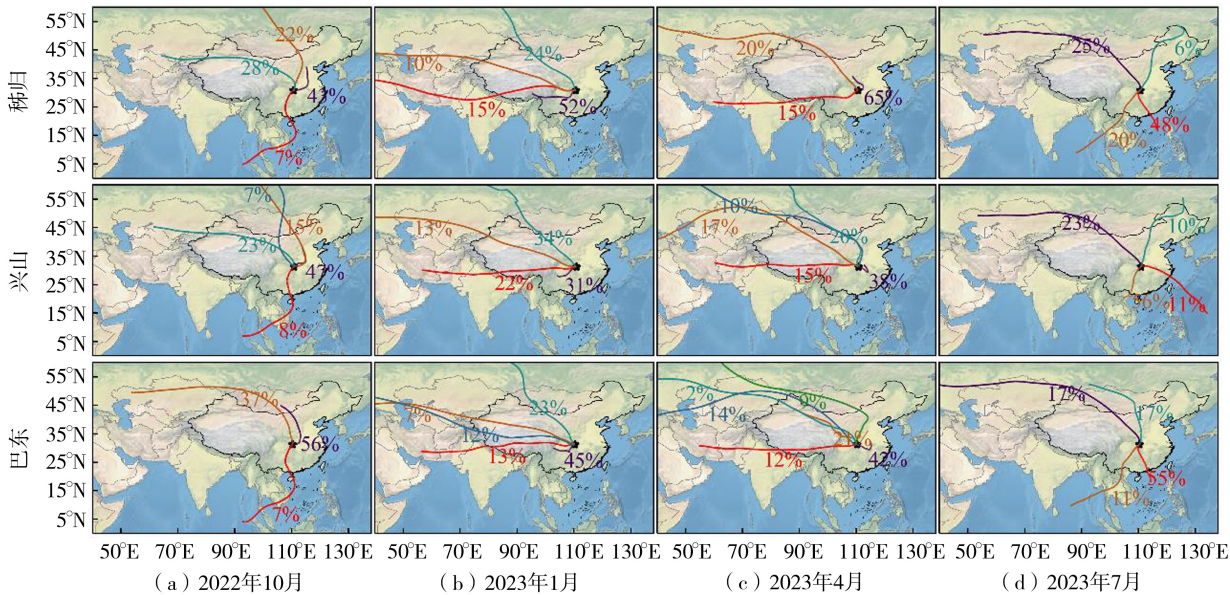


图 7 研究区水汽来源季节变化

Fig. 7 Seasonal variations of water vapor sources in study area

秋季,秭归、兴山、巴东的 d-excess 较高,多分布于 10‰附近(图 3、图 4),部分水汽从中高纬度的亚欧大陆即研究区西北方向传输而来,位于 15°N~25°N 有一条自东向西水汽输送带在孟加拉湾与“西特朗”相遇后自中国西南部进入向东北方向而去(图 6(a))。南方海源性水汽路径仅占 7%左右,其路径为自孟加拉湾

经南海北上。北方路径占主导地位,大体可分为西北风和北风传输两支(图 7(a))。冬季,水汽自西和西北方向而来,由于青藏高原对西风带的阻隔作用,30°N 附近有一条高值水汽输送带自西向东进入研究区,E-P 方法也诊断出高原东南部成为研究区水汽源地^[43];西北方向也有西风带水汽传输到研究区(图 6(b)),包括大西洋水汽(占比较小)、亚欧大陆内部西伯利亚地区寒冷的陆源水汽以及来自地中海、里海和阿拉伯海一带的西气流和附近路径较短的高原东南部的水汽(占比 53%~67%)(图 7(b))。欧亚大陆水汽比湿低,水汽通量小,降水中的 d-excess 值显著增加至最高(图 3、图 4),研究区冬季 d-excess 加权均值为 15.87‰。春季,水汽自高原东北和南部分别从研究区西北和西边传入,研究区南部水汽输送强度增大(图 6(c))。水汽路径仍是西与西北方向偏多,西边水汽输送仅剩来自阿拉伯海附近的一条,附近地区水汽贡献增加(图 7(c))。除局地比湿增加,成为重要水汽来源外,海洋的贡献也逐渐增加^[43],因此,各采样区春季 d-excess 加权均值均低于冬季,且多数分布在 10‰之上(图 4)。夏季,来自南方海洋的空气块数量多,比湿大,水汽输送强度达到最大^[43],主要有两条水汽输送通道:西南方向,受西南季风影响,阿拉伯海和孟加拉湾的水汽在孟加拉湾处一部分向北进入青藏高原,一部分东进与东南季风带来的水汽一同向北;东南方向,西太副高的西南侧也存在东南气流输送水汽(图 6(d))。降水水汽主要由海洋贡献,约占总量 67%(图 7(d)),降水中 d-excess 降到最低,各采样区夏季降水 d-excess 多分布在 10‰以下,研究区夏季 d-excess 加权均值为 7.12‰(图 4)。

4 结 论

- a. 三峡库区湖北段降水 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 和 d-excess 值具有明显的季节波动,均呈现夏秋季低、冬春季高的变化规律。研究区降水氢氧同位素关系线斜率和截距与全球大气水线相似,说明整体上气候环境湿润多雨,研究结果符合亚热带季风区降水同位素变化规律。
- b. 研究区降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与相对湿度呈显著负相关关系,湿度效应明显;秭归降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与降水量呈不显著负相关关系,兴山和巴东呈显著负相关关系,整体来看,研究区存在降水量效应。降水量和相对湿度是影响降水氢氧稳定同位素组成的主控因素。d-excess 与气温具有显著的负相关关系,d-excess 主要受气温影响,d-excess 的季节性变化特点与季风运动携带水汽性质不同有关。
- c. d-excess 变化情况、水汽通量分析和 HYSPLIT 模型模拟结果较一致地反映出研究区水汽来源的季节性变化。夏季东南季风和西南季风所携带太平洋、南海和印度洋海洋水汽抵达研究区后同位素较为贫化,d-excess 较低。冬季降水多为来自亚欧大陆西和西北方向水汽,较为干燥,d-excess 较高。春秋季节是季风交替季节,海陆源地贡献比率发生转换。

参考文献:

[1] 许钦,叶鸣,蔡晶,等. 1956—2018 年太湖流域降水统计特征及演变趋势[J]. 水资源保护,2023,39(1):127-132. (XU Qin, YE Ming, CAI Jing, et al. Precipitation statistical characteristics and evolution trend in Taihu Lake Basin from 1956 to 2018[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(1): 127-132. (in Chinese))

[2] 王雨潇,孙营营,张天宇,等. 1998—2020 年三峡库区最大 1 h 降水的时空变化特征[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(1): 10-18. (WANG Yuxiao, SUN Yingying, ZHANG Tianyu, et al. Temporal and spatial variations of maximum one-hour precipitation in the Three Gorges Reservoir Region from 1998 to 2020[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(1): 10-18. (in Chinese))

[3] KONECKY B L, MCKAY N P, FALSTER G M, et al. Globally coherent water cycle response to temperature change during the past two millennia[J]. Nature Geoscience, 2023, 16(11): 997-1004.

[4] LI Zongjie, LI Zongxing, SONG Lingling, et al. Characteristic and factors of stable isotope in precipitation in the source region of the Yangtze River[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2020, 281: 107825.

[5] RAO Wenbo, ZHANG Wenbing, YONG Bin, et al. Identifying the source of atmospheric moisture over arid deserts using stable isotopes (^2H and ^{18}O) in precipitation[J]. Hydrological Processes, 2018, 32(3): 436-449.

[6] WANG Tao, CHEN Jiansheng, ZHANG Chenming, et al. An entropy-based analysis method of precipitation isotopes revealing main moisture transport corridors globally[J]. Global and Planetary Change, 2020, 187: 103134.

[7] YANG Xiaoxin, DAVIS M E, ACHARYA S, et al. Asian monsoon variations revealed from stable isotopes in precipitation[J]. Climate Dynamics, 2018, 51(5): 2267-2283.

[8] CHEN Heran,LI Jianhong,ZHAO Chu,et al. Seasonal and spatial variations of water recharging in the Yangtze River using hydrogen and oxygen stable isotopes[J]. Journal of Hydrology,2024,639:131563. .

[9] MIGUEZ-MACHO G,FAN Ying. Spatiotemporal origin of soil water taken up by vegetation[J]. Nature,2021,598(7882):624-628.

[10] CRAIG H. Isotopic variations in meteoric waters[J]. Science,1961,133(3465):1702-1703.

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

[12] VALDIVIELSO S,HASSANZADEH A,VÁZQUEZ-SUÑÉ E,et al. Spatial distribution of meteorological factors controlling stable isotopes in precipitation in Northern Chile[J]. Journal of Hydrology,2022,605:127380.

[13] 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. (DONG Xiaofang,DENG Huangyue,ZHENG Xiangmin,et al. Analysis of stable isotope characteristics and water vapor origins in atmospheric precipitation in the Yangtze River Basin [J]. Environmental Science & Technology, 2017, 40 (4) : 78-84. (in Chinese))

[14] 孙从建,周思捷,陈亚宁,等. 中亚高山区云下与地表降水氢氧稳定同位素时空分布特征及其水汽来源分析[J]. 水资源保护,2022,38(5):111-121. (SUN Congjian,ZHOU Sijie,CHEN Yaning,et al. Spatiotemporal distribution and water vapor sources of stable isotopes of hydrogen and oxygen in below-cloud and surface precipitation in alpine region in Central Asia[J]. Water Resources Protection,2022,38(5):111-121. (in Chinese))

[15] LI Jie,PANG Zhonghe. The elevation gradient of stable isotopes in precipitation in the eastern margin of Tibetan Plateau[J]. Science China Earth Sciences,2022,65(10):1972-1984.

[16] ZHAO Pei,GUO Zhengsheng,SHE Dongli,et al. Spatial distribution of the oxygen-18 in precipitation in China based on a new empirical model[J]. Journal of Mountain Science,2019,16(11):2605-2614.

[17] WANG Shengjie,ZHANG Mingjun,CRAWFORD J,et al. The effect of moisture source and synoptic conditions on precipitation isotopes in arid central Asia[J]. Journal of Geophysical Research:Atmospheres,2017,122(5):2667-2682.

[18] WANG Shengjie,JIAO Rong,ZHANG Mingjun,et al. Changes in below-cloud evaporation affect precipitation isotopes during five decades of warming across China[J]. Journal of Geophysical Research:Atmospheres,2021,126(7):e2020JD033075.

[19] MA Fenyang,CHEN Jiaqi,CHEN Jiansheng,et al. Environmental drivers of precipitation stable isotopes and moisture sources in the Mongolian Plateau[J]. Journal of Hydrology,2023,621:129615.

[20] 王帅,饶文波,金可,等. 阿拉善地区降水同位素特征与水汽来源[J]. 河海大学学报(自然科学版),2019,47(5):411-419. (WANG Shuai,RAO Wenbo,JIN Ke,et al. Hydrogen and oxygen isotopic characteristic and moisture source of precipitation of Alxa Desert Plateau[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2019, 47 (5) : 411-419. (in Chinese))

[21] 隋明滇,高德强,徐庆,等. 江苏高邮大气降水氢氧同位素特征及水汽来源[J]. 应用生态学报,2019,30(6):1823-1832. (SUI Mingzhen,GAO Deqiang,XU Qing,et al. Characteristics of hydrogen and oxygen isotopes in precipitation and moisture sources in Gaoyou,Jiangsu Province,China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2019,30(6):1823-1832. (in Chinese))

[22] 黄一民,章新平,唐方雨,等. 长沙大气降水中稳定同位素变化及过量氘指示水汽来源[J]. 自然资源学报,2013,28(11):1945-1954. (HUANG Yimin,ZHANG Xinping,TANG Fangyu,et al. Variations of precipitation stable isotope and vapor origins revealed by deuterium excess in Changsha[J]. Journal of Natural Resources,2013,28(11):1945-1954. (in Chinese))

[23] TAO Shiyong,ZHANG Xiang,PAN Guoyan,et al. Moisture source identification based on the seasonal isotope variation of precipitation in the Poyang Lake Wetland,China[J]. Journal of Hydrology:Regional Studies,2021,37:100892.

[24] 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,2017,53(12):20-29. (ZHANG Beibei,XU Qing,JIANG Chunwu. Characteristics of δD and $\delta^{18}O$ in the precipitation and evaporation sources in Anqing[J]. Scientia Silvae Sinicae,2017,53(12):20-29. (in Chinese))

[25] 吴华武,欧阳勇峰,姜鹏举,等. 水汽来源和环境因子对典型亚热带季风区降水稳定同位素的影响:以湖口地区为例[J]. 地理科学,2022,42(8):1502-1512. (WU Huawu,OUYANG Yongfeng,JIANG Pengju,et al. Effects of moisture sources and environmental factors on precipitation stable isotopes in a typical subtropical monsoon region:a case of Hukou region[J]. Scientia Geographica Sinica,2022,42(8):1502-1512. (in Chinese))

[26] WANG Shengjie,LEI Shijun,ZHANG Mingjun,et al. Spatial and seasonal isotope variability in precipitation across China: monthly isoscapes based on regionalized fuzzy clustering[J]. Journal of Climate,2022,35(11):3411-3425.

[27] GUO Xiaojiao,GONG Xiaoping,SHI Jiansheng,et al. Temporal variations and evaporation control effect of the stable isotope composition of precipitation in the subtropical monsoon climate region,Southwest China[J]. Journal of Hydrology,2021,599:126278.

[28] ZHANG Jingyi,YU Wusheng,LEWIS S,et al. Controls on stable water isotopes in monsoonal precipitation across the Bay of

Bengal:atmosphere and surface analysis[J]. Geophysical Research Letters,2023,50(5):e2022GL102229.

[29] SUN Congjian,ZHANG Xin,WANG Shiyu,et al. Influences of variability of stable isotopes and composition of moisture sources on precipitation at multiple timescales in the Alpine regions of Central Asia[J]. Science of the Total Environment,2023,874:162595.

[30] 胡艳茹,梁丽娇,何立平,等. 三峡水库蓄水前后库区及周边区域降水变化及其影响因素[J]. 地理研究,2023,42(7):1921-1940. (HU Yanru,LIANG Lijiao,HE Liping,et al. Precipitation change and its influencing factors in the Three Gorges Reservoir area and its surrounding areas before and after impoundment[J]. Geographical Research,2023,42(7):1921-1940. (in Chinese))

[31] WU Huawu,SONG Fan,LI Jing,et al. Surface water isoscapes ($\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$) reveal dual effects of damming and drought on the Yangtze River water cycles[J]. Journal of Hydrology,2022,610:127847.

[32] 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. (ZHAO Jiacheng,WEI Baohua,XIAO Shangbin. Stable isotopic characteristics of atmospheric precipitation from Yichang,Hubei[J]. Tropical Geography,2009,29(6):526-531. (in Chinese))

[33] 王婷,高德强,徐庆,等. 三峡库区秭归段大气降水 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 特征及水汽来源[J]. 林业科学研究,2020,33(6):88-95. (WANG Ting,GAO Deqiang,XU Qing,et al. Characteristics of δD and $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation and water vapor sources in Zigui section of the Three Gorges Reservoir[J]. Forest Research,2020,33(6):88-95. (in Chinese))

[34] 黄荷,罗明明,陈植华,等. 香溪河流域大气降水稳定氢氧同位素时空分布特征[J]. 水文地质工程地质,2016,43(4):36-42. (HUANG He,LUO Mingming,CHEN Zhihua,et al. The spatial and temporal distribution of stable hydrogen and oxygen isotope of meteoric water in Xiangxi river basin[J]. Hydrogeology & Engineering Geology,2016,43(4):36-42. (in Chinese))

[35] 温艳茹,王建力. 重庆地区大气场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. (WEN Yanru,WANG Jianli. Variations of stable isotope in precipitation and its atmospheric circulation effect in Chongqing[J]. Environmental Science,2016,37(7):2462-2469. (in Chinese))

[36] 胡月,刘国东,孟玉川,等. 成都次降水稳定氢氧同位素特征及水汽来源分析[J]. 环境科学,2019,40(3):1179-1187. (HU Yue,LIU Guodong,MENG Yuchuan,et al. Analysis of stable hydrogen and oxygen isotope characteristics and vapor sources of event-based precipitation in Chengdu[J]. Environmental Science,2019,40(3):1179-1187. (in Chinese))

[37] 肖晰文,刘春红,刘再森,等. 三峡库区(湖北段)农业碳排放特征、驱动因素与趋势预测[J]. 中国农业资源与区划,2023,44(9):212-222. (XIAO Xiwen,LIU Chunhong,LIU Zaisen,et al. Characteristics, driving factors and trend prediction of agriculture carbon emission in the Three Gorges Reservoir area (Hubei section)[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning,2023,44(9):212-222. (in Chinese))

[38] HERSBACH H,BELL B,BERRISFORD P,et al. The ERA5 global reanalysis[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,2020,146(730):1999-2049.

[39] DRAXLER R R,HESS G D. An overview of the HYSPLIT_4 modelling system for trajectories,dispersion,and deposition[J]. Australian Meteorological Magazine,1998,47(4):295-308.

[40] 濮鸿雪. 神农架大九湖大气降水氢氧稳定同位素变化特征及其水汽来源研究[D]. 南京:南京师范大学,2018.

[41] ARAGUÁS-ARAGUÁS L,FROELICH K,ROZANSKI K. Deuterium and oxygen-18 isotope composition of precipitation and atmospheric moisture[J]. Hydrological Processes,2000,14(8):1341-1355.

[42] 衣鹏,李文超,万程炜. 河套灌区地表水与地下水转化及水盐运移规律[J]. 河海大学学报(自然科学版),2025,53(5):26-33. (YI Peng,LI Wenchao,WAN Chengwei. Transformation of surface water and groundwater and migration of water and salt in the Hetao Irrigation Area[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2025,53(5):26-33. (in Chinese))

[43] 刘宇佳,满文敏,周天军,等. 中国东部地区大气水汽稳定同位素的影响因子追踪研究[J]. 大气科学,2023,47(3):616-630. (LIU Yujia,MAN Wenmin,ZHOU Tianjun,et al. A tracing study on influence factors of East Asian stable isotopes in atmospheric water vapor[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,2023,47(3):616-630. (in Chinese))

[44] LI Ying,WANG Chenghao,PENG Hui,et al. Contribution of moisture sources to precipitation changes in the Three Gorges Reservoir Region[J]. Hydrology and Earth System Sciences,2021,25(9):4759-4772.

[45] LI Yuanyuan,LIU Xiaodong,XIE Xiaoxun,et al. Interannual modulation of the East and South Asian summer precipitation $\delta^{18}\text{O}$ by the Indian and western North Pacific summer monsoon strength[J]. Global and Planetary Change,2023,227:104187.

[46] WANG Yingzhao,HU Chaoyong,RUAN Jiaoyang,et al. East Asian precipitation $\delta^{18}\text{O}$ relationship with various monsoon indices [J]. Journal of Geophysical Research:Atmospheres,2020,125(13):e2019JD032282.