

武汉市降水稳定同位素变化特征及其驱动因素分析

陶士勇^{1,2}, 徐 晶^{1,2}, 夏军强¹, 熊兴基^{1,2}, 张 翔^{1,2}, 陈小强^{3,4}, 刘祖凡^{1,2}

(1. 武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室, 湖北 武汉 430072; 2. 武汉大学海绵城市建设水系统科学湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430072; 3. 大连理工大学建设工程学院, 辽宁 大连 116024; 4. 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要:基于 2019—2023 年采集的武汉市降水样品, 利用统计分析方法和 HYSPLIT 模型, 分析了降水稳定同位素变化特性及其与局地气象因子、水汽来源和区域尺度云量的关系。结果表明: 降水稳定同位素表现出夏季风时期相对贫化、冬季风时期相对富集的年内变化规律, 各个时期均不具有降水量效应, 仅冬季风时期呈现温度效应; 识别出 6 种水汽输送类型对武汉市降水的影响, 相对于大陆水汽成因的降水, 海洋水汽成因的降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值显著贫化, 氘盈余值更低; 区域尺度上, 夏季风时期降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值与降水前 10 d 的总云量、高云量和中云量之间存在明显的负相关关系, 相关性最明显的区域与对流过程的发生区域重叠, 处于远洋水汽运移轨迹的上游。综合推断, 武汉市降水稳定同位素的变化特征与水汽来源和上游对流活动的共同作用有关。

关键词:降水稳定同位素; 水汽来源; 对流活动; HYSPLIT 模型; 武汉市

中图分类号: P332.7; X142 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2025)03-0212-10

Analysis of variation characteristics and driving factors of precipitation stable isotopes in Wuhan City//TAO Shiyong^{1,2}, XU Jing^{1,2}, XIA Junqiang¹, XIONG Xingji^{1,2}, ZHANG Xiang^{1,2}, CHEN Xiaoqiang^{3,4}, LIU Zufan^{1,2} (1. State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Hubei Key Laboratory of Water System Science for Sponge City Construction, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. School of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 4. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Based on precipitation samples collected in Wuhan City from 2019 to 2023, this study employed statistical analysis and the HYSPLIT model to investigate the variations in precipitation stable isotopes and their relationships with local meteorological factors, moisture sources, and regional-scale cloud cover. The results indicate that precipitation stable isotopes exhibit a seasonal pattern, with depletion during the summer monsoon and enrichment during the winter monsoon. No significant amount effect was observed in any period, while a temperature effect was only evident during the winter monsoon. Six moisture transport pathways influencing Wuhan's precipitation were identified. Compared to precipitation of continental origin, marine-origin precipitation showed significantly lower $\delta^{18}\text{O}$ and d-excess values. On a regional scale, during the summer monsoon, $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation exhibited a significant negative correlation with total cloud cover, high-level cloud cover, and mid-level cloud cover over the preceding 10 days. The region with the strongest correlation overlapped with areas of convective activity, located upstream along the oceanic moisture transport trajectory. The findings suggest that the variations in precipitation stable isotopes in Wuhan City are jointly influenced by moisture sources and upstream convective processes.

Key words: precipitation stable isotopes; moisture sources; convective activity; HYSPLIT model; Wuhan City

大气降水是水文循环的重要环节, 直接影响区域水量平衡和生态环境质量。水的氢氧稳定同位素($\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$)作为天然环境示踪剂, 能灵敏响应环境与气候变化, 完整记录水循环演化过程的历史信息^[1-2]。由于降水是陆地水资源的主要来源, 降水稳定同位素是水循环过程中不同水体组分之间同位素信号相互比较的重要参考^[3-4]。

降水稳定同位素的变化特征受到诸多因素的影响

基金项目:湖北省自然科学基金项目(2023AFB154); 国家自然科学基金项目(41890823)
作者简介:陶士勇(1995—), 男, 博士, 主要从事生态水文学研究。E-mail: taoshiyong@whu.edu.cn
通信作者:徐晶(1989—), 女, 副教授, 博士, 主要从事地表水水资源与水环境研究。E-mail: jingxu0506@whu.edu.cn

响,已有研究聚焦于局地气象因子与降水稳定同位素的关系,表明氢氧稳定同位素与气温具有显著正相关关系(温度效应),与降水量为显著负相关关系(降水量效应)^[5-7]。然而,这些经验性结论在不同的时间尺度上可能发生改变,Breitenbach 等^[8-9]研究指出,降水稳定同位素在部分热带地区对当地气象参数的依赖性较小。Duy 等^[10-11]的研究强调,降水稳定同位素变化主要受控于相应水汽的动力学特性,与大尺度环流驱动的水汽来源转变有关,并基于后向运移轨迹模拟揭示了大气环流在季节和年际尺度上对降水稳定同位素变化的支配作用。此外,许多学者陆续关注到降水稳定同位素受区域尺度气象要素的影响(如降水量、云量等),发现水汽输送路径上的对流强度与降水稳定同位素密切相关,认为上游对流活动及其淋洗过程是降水稳定同位素变化的主要驱动因素^[12]。

近年来,我国大气降水稳定同位素研究取得了较多进展,陆续开展了降水稳定同位素的时空分布特征、环境因子和水汽来源与降水稳定同位素的关系等研究。沈业杰等^[13]通过分析江西鹰潭降水的 $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ 的关系,发现云下蒸发效应对区域降水的影响较小,降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值存在显著的降水量效应和相反的温度效应。王婷等^[14]对三峡库区秭归段的降水稳定同位素组成进行了监测分析,指出降水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值的季节变化受到局地环境因子和不同水汽来源的共同影响。常昕等^[15]基于湖南长沙实测的日降水稳定同位素数据和全球降水同位素监测网络(global network of isotopes in precipitation, GNIP)月降水同位素数据,发现降水构成对降水稳定同位素的变化特征具有明显影响,降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值随着对流降水比例的增大不断富集。

武汉市地处江汉平原东部、长江中游,受气候变化和人类活动的双重影响,水循环过程正在发生转变^[16-17]。目前针对长江中游地区降水稳定同位素的研究已取得一定的进展^[11,18-20],然而,对于降水稳定同位素的变化是由局地因素还是区域因素主导仍存在争议,特别是针对武汉市降水同位素变化特征及其驱动机制的系统研究仍显不足,在一定程度上限制了对区域水循环的整体性认识。

本文基于2019年1月至2023年12月开展的武汉市降水样品采集工作,分析降水稳定同位素与局地和区域尺度气象因子之间的关系,识别降水在不同季风时期水汽后向运移轨迹的差异,揭示水汽来源和上游对流活动对降水稳定同位素变化的影响。

1 研究区概况

武汉市($29^{\circ}58' \text{N} \sim 31^{\circ}22' \text{N}$, $113^{\circ}41' \text{E} \sim 115^{\circ}05' \text{E}$)是中国中部地区的中心城市,也是长江经济带的核心城市,长江及其最大支流汉江在此交汇(图1)。武汉市北部为低山丘陵区,中部为长江中游平原,南部为丘陵、垄岗区,市内河流纵横、湖泊众多,形成以长江为主干的庞大水系网络,水资源丰富,总水域面积占全市土地面积的26.1%^[21-22]。武汉市属亚热带湿润季风气候,具有雨量丰沛、雨热同期、四季分明等特点,受印度夏季风、东亚夏季风和亚洲冬季风等多个大气环流系统的共同影响,降水季节性明显^[17]。基于武汉气象站监测资料,武汉市多年平均气温为 17.5°C 、相对湿度为75.5%、蒸发量为957.3 mm、降水量为1 294 mm;降水集中在夏季风时期(6—9月),大约占全年降水量的49%,冬季风时期(11月至次年3月)降水量相对较少,占全年降水的23%左右。

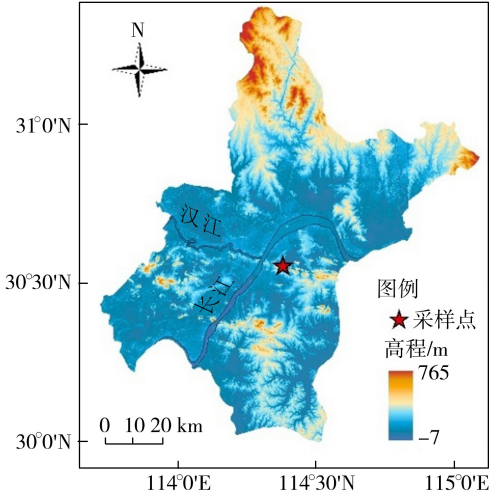


图1 研究区概况及降水采样点位置

Fig. 1 Overview of study area and location of sampling sites

2 样品采集与分析方法

2.1 样品采集与测定

于2019年1月至2023年12月在武汉大学工学部($30^{\circ}32'31'' \text{N}$, $114^{\circ}21'43'' \text{E}$)收集大气降水样品。具体采集方法为:在开放空地距离地面约0.9 m放置一个1 000 mL玻璃锥形瓶,在锥形瓶顶端放置漏斗,确保每次样品采集前锥形瓶洁净、干燥。采用日降水时段(前1日20:00至当日20:00)作为采样周期,自降水起始时刻开始采集水样;对于持续性降水事件,每日20:00作为采样分界点,前后时段分别归入不同降水样品;对于短历时降水过程,则在每次降水结束后采集样品。收集的水样立即转

移到 50 mL 聚乙烯瓶中,经 0.22 μm 滤膜过滤后,贮存在 2 mL 的进样瓶中加盖密封,置于冰箱中 4℃ 冷藏保存。采样时期内,共采集 126 个降水样品。

所有大气降水样品的稳定同位素测定工作在武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室完成,利用 MAT253 稳定同位素质谱仪进行测试分析,通过连接 Flash 2000HT 元素分析仪,采用高温裂解法测定 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值,测定结果以 V-SMOW 为参考标准的千分差表示,分析不确定性分别小于 1‰ 和 0.1‰。测定结果的 δR 表示为

$$\delta R = (R_{\text{样品}}/R_{\text{标准}} - 1) \times 1000\text{‰} \quad (1)$$

式中 $R_{\text{样品}}$ 、 $R_{\text{标准}}$ 分别为降水样品和标准样品中氢或氧元素的重同位素与轻同位素丰度之比。

采用降水量加权平均值描述多次降水事件稳定同位素的平均情况:

$$\overline{\delta X} = \sum_i^n P_i \delta X_i / \sum_i^n P_i \quad (2)$$

式中: δX_i 为日降水的 $\delta^2\text{H}$ 或 $\delta^{18}\text{O}$ 值; n 为降水次数; P_i 为与其对应的日降水量。

2.2 气象数据来源

采用武汉气象站的观测数据(地表气温、降水量、相对湿度和蒸发量)分析局地气象因子与降水稳定同位素之间的关系,数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>);采用美国国家海洋和大气管理局(U. S. Agency for Ocean and Climate, NOAA)发布的向外长波辐射(outgoing longwave radiation, OLR)再分析数据集(<https://psl.noaa.gov/data/gridded/index.html>,空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$)分析低纬度地区对流活动的时空变化;采用欧洲天气预报中心(the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)发布的 ERA5 再分析数据集(<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/search?type=dataset>,空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$)分析区域尺度云量与降水稳定同位素之间的关系,包括总云量(TCC)、高云量(HCC)、中云量(MCC)和低云量(LCC)。

2.3 分析方法

2.3.1 后向运移轨迹

混合单粒子拉格朗日积分轨迹(hybrid single-particle Lagrangian integrated trajectory, HYSPLIT)模型由 NOAA 下属的空气资源实验室和澳大利亚气象局合作研发,可用来追踪气流所携带的粒子或者气体移动方向,被广泛用于计算和分析降水主要水汽的后向运移轨迹^[10]。本文使用 HYSPLIT 模型对降水的水汽后向运移轨迹进行模拟,采用美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental

Prediction, NCEP)的全球数据同化系统(Global Data Assimilation System,空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$, GDAS1)作为输入,设定单条轨迹的后向溯源时间为 240 h,每条轨迹的时间间隔为 6 h,选取的后向溯源时间与 Gat^[23]估计的大气水汽滞留时间一致。此外,后向运移轨迹分析的起始高度设定为距离地面 1 500 m,对应大约 850 hPa 的气压面,Dos Santos 等^[24]认为在这一起始高度进行模拟更具准确性和可信性。

2.3.2 统计分析方法

通过线性回归分析建立降水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值之间的线性关系;由于 Shapiro-Wilk 检验表明部分数据不符合正态分布,采用 Spearman 相关分析比较本文降水稳定同位素与历史公开数据之间的变化特性,分析降水稳定同位素与局地气象因子及区域尺度云量的关系;采用 Mann-Whitney 非参数检验和 Kruskal-Wallis 非参数检验结合事后多重比较法,分别评估不同时期、不同水汽输送类型降水稳定同位素特性的差异;显著性水平取 0.05。

3 结果与分析

3.1 气象因子与降水稳定同位素特性

如图 2 所示,观测时段内,武汉市地表气温、降水量和蒸发量存在明显的季节变化规律,而相对湿度的季节变化特征不明显。月平均气温的变化范围为 3.7(2019 年 1 月)~31.6℃(2022 年 8 月),月降水量的变化范围为 0.1(2022 年 9 月)~554.9 mm(2020 年 7 月),月平均相对湿度的变化范围为 62.1%(2022 年 9 月)~88.2%(2020 年 7 月),月蒸发量的变化范围为 16.2(2019 年 2 月)~195.7 mm(2022 年 8 月)。观测时段内,武汉市降水 $\delta^2\text{H}$ 值的变化范围为-90.2‰~19.0‰,降水量加权平均值为-30.5‰; $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化范围为-12.8‰~1.4‰,降

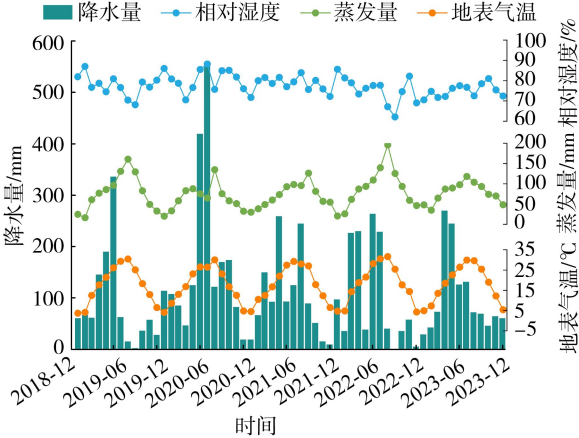


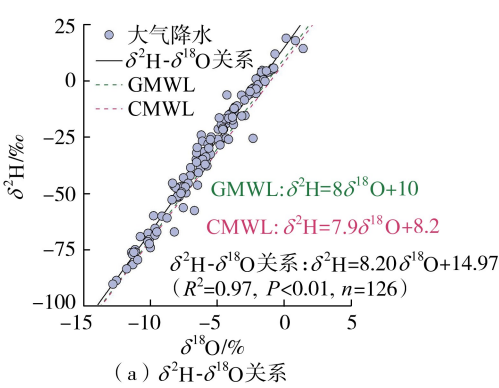
图 2 武汉市 2019—2023 年局地气象因子的逐月变化特征
Fig. 2 Monthly variation characteristics of local meteorological factors in Wuhan City from 2019 to 2023

水量加权平均值为 $-5.6‰$ (表1)。Dansgaard^[5]定义了氘盈余(d-excess,为 $\delta^2\text{H}$ 与 $8\delta^{18}\text{O}$ 的差值)的概念,作为源水蒸发过程中非平衡条件的度量,降水d-excess值与水汽源地的相对湿度和气温等参数密切相关,常用于反映降水的水汽来源。武汉市降水d-excess值的变化范围为 $-6.8‰\sim 28.1‰$,降水量加权平均值为 $14.3‰$ (表1)。基于收集到的所有降水样品,对降水的 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值进行线性拟合,得到武汉市降水 $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ 的关系如图3(a)所示,并与长江中游地区主要研究区域降水的 $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ 关系

表1 武汉市2019—2023年的降水稳定同位素特征统计

Table 1 Statistical characteristics of precipitation stable isotopes in Wuhan City from 2019 to 2023

观测时段	参数	最小值/‰	最大值/‰	加权平均值/‰	算术平均值/‰	标准偏差/‰
全年	$\delta^2\text{H}$	-90.2	19.0	-30.5	-31.3	26.6
	$\delta^{18}\text{O}$	-12.8	1.4	-5.6	-5.6	3.2
	d-excess	-6.8	28.1	14.3	13.9	4.9
夏季风时期	$\delta^2\text{H}$	-88.6	-28.4	-53.1	-57.5	16.1
	$\delta^{18}\text{O}$	-12.5	-4.8	-8.0	-8.4	2.0
	d-excess	-3.8	14.3	10.9	9.6	4.0
冬季风时期	$\delta^2\text{H}$	-76.1	19.0	-20.9	-22.7	22.6
	$\delta^{18}\text{O}$	-11.4	1.4	-4.7	-4.9	2.9
	d-excess	3.2	28.1	16.7	16.5	4.0



(表2)对比,结果与大多数区域较为接近,总体上表现出略高于全球大气降水线^[25](global meteoric water line, GMWL)和中国大气降水线^[26](Chinese meteoric water line, CMWL)的斜率和截距,反映了长江中游地区较为湿润的气候特征。不同区域降水 $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ 关系之间斜率和截距的差异与降水的水汽来源和当地环境条件的影响有关^[27]。

如图3(b)(c)所示,降水稳定同位素存在较明显的年内变化规律,相对贫化的降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值分布在夏季风时期(降水量加权平均值为 $-8.0‰$),该时期的降水d-excess值更小(降水量加权平均值为 $10.9‰$),冬季风时期的降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值相对富集(降水量加权平均值为 $-4.7‰$),相应的降水d-excess值更大(降水量加权平均值为 $16.7‰$)。将本文降水稳定同位素的降水量加权月平均 $\delta^{18}\text{O}$ 值与GNIP武汉站的历史数据进行比较,表现出相似的逐月变化规律。两者之间的Spearman相关系数 ρ 为0.78($P < 0.01$),总体上具有从4月开始逐渐贫化、9月开始逐渐富集的年内变化特征。一般来说,来自低纬度海洋蒸发的降水d-excess值大约在 $10‰$ 左右,来自内陆水体蒸发的降水d-excess值高于 $10‰$ ^[27-28]。Mann-Whitney非参数检验发现,夏、冬

■ 25%~75% —中位数 ▨ 10%~90% □ 算术平均值

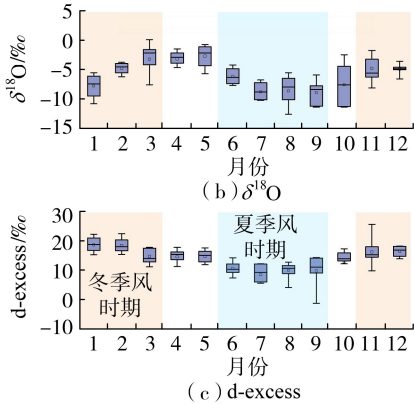


图3 降水 $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ 关系及月平均 $\delta^{18}\text{O}$ 和d-excess值的变化特征

Fig. 3 $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ relationships of precipitation and variations in monthly $\delta^{18}\text{O}$ and d-excess values

表2 长江中游地区各研究区域降水的 $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ 关系

Table 2 $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ relationships of precipitation in different study areas of the middle Yangtze River region

省级行政区	研究区域	降水的 $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ 关系	观测时段	数据来源
湖北	宜昌市兴山县	$\delta^2\text{H} = 8.17\delta^{18}\text{O} + 13.38 (n = 92)$	2014—2015年	文献[29]
	宜昌市秭归县	$\delta^2\text{H} = 8.52\delta^{18}\text{O} + 20.11 (n = 186)$	2016—2019年	文献[14]
	襄阳市保康县	$\delta^2\text{H} = 8.65\delta^{18}\text{O} + 16.09 (n = 31)$	2013—2016年	文献[19]
	武汉市	$\delta^2\text{H} = 8.20\delta^{18}\text{O} + 14.97 (n = 126)$	2019—2023年	本文
湖南	长沙市	$\delta^2\text{H} = 8.45\delta^{18}\text{O} + 17.7 (n = 189)$	2010—2011年	文献[18]
	怀化市会同县	$\delta^2\text{H} = 7.45\delta^{18}\text{O} + 10.10 (n = 149)$	2017—2019年	文献[20]
江西	鹰潭市	$\delta^2\text{H} = 8.61\delta^{18}\text{O} + 18.34 (n = 72)$	2012—2013年	文献[13]
	九江市永修县	$\delta^2\text{H} = 8.83\delta^{18}\text{O} + 12.77 (n = 186)$	2015—2019年	文献[11]
	九江市湖口县	$\delta^2\text{H} = 8.23\delta^{18}\text{O} + 13.6 (n = 297)$	2017—2020年	文献[12]

季风时期的降水 d-excess 值有显著差异 ($P<0.01$), 表明水汽来源对武汉市降水稳定同位素的季节变化可能有重要影响。

3.2 降水稳定同位素与局地气象因子的关系

对武汉市降水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 d-excess 值与相应的地表气温、降水量、相对湿度和蒸发量进行 Spearman 相关分析,结果如表 3 所示。可见降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值在全年与相对湿度存在显著的负相关关系 ($\rho=-0.36$, $P<0.01$)。在夏季风时期,降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值与局地气象因子均不存在相关关系,而在冬季风时期,降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值与气温($\rho=0.63$, $P<0.01$)和蒸发量($\rho=0.38$, $P<0.01$)具有显著的正相关性,与相对湿度之间表现出显著的负相关性($\rho=-0.46$, $P<0.01$)。Araguás-Araguás 等^[30-31]研究发现,在受季风气候影响显著的亚热带地区,降水稳定同位素存在明显的降水量

效应和相反的温度效应,认为海洋湿润气团在向大陆运移的过程中受到较强的淋洗作用,在一定程度上掩盖了降水稳定同位素的温度依赖性。Xie 等^[32]研究认为,在季风气候主导的东亚地区,由于受到水汽来源转变等诸多大气过程的影响,降水稳定同位素的温度效应通常不存在,甚至在更高的时间分辨率上表现出相反的温度效应。

本文降水稳定同位素在各个时期均不具有降水量效应,仅在冬季风时期表现出温度效应,综合考虑气温和降水量的多元线性回归也无法解释降水稳定同位素的变化特征 ($P>0.05$)。在全年和冬季风时期,降水稳定同位素与相对湿度之间显著的负相关关系表明降水在一定程度上经历了云下蒸发^[33],即降水过程中较低的空气湿度增强了云下降水稳定同位素的蒸发富集作用,但是云下蒸发的影响情况仍不能解释降水稳定同位素与气温和降水量之间的关系。降水 d-excess 值在全年和冬季风时期表现出与气温之间显著的负相关性,在各个时期与降水量、相对湿度和蒸发量均不存在相关关系。由于降水 d-excess 值可以指示降水的水汽来源,其与气温之间的相关关系反映出大气环流为研究区提供了不同来源的降水水汽。综合以上分析,认为局地气象因子对武汉市降水稳定同位素的影响不明显,降水稳定同位素的时间变化可能受到区域尺度影响因素的控制。

3.3 降水稳定同位素与水汽来源的关系

如图 4 所示,夏季风和冬季风时期的主要水汽

表 3 降水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 d-excess 值与局地气象因子的 Spearman 相关分析
Table 3 Spearman's correlations of precipitation $\delta^{18}\text{O}$ and d-excess values with local meteorological variables

参数	观测时段	地表气温/℃	降水量/mm	相对湿度/%	蒸发量/mm
$\delta^{18}\text{O}$	全年	-0.13	-0.04	-0.36**	-0.09
	夏季风时期	0.27	0.16	-0.26	0.01
	冬季风时期	0.63**	-0.13	-0.46**	0.38**
d-excess	全年	-0.68**	0.04	0.10	-0.33
	夏季风时期	-0.19	0.18	0.33	-0.27
	冬季风时期	-0.56**	0.18	0.23	-0.19

注: ** 表示 $P<0.01$ 。

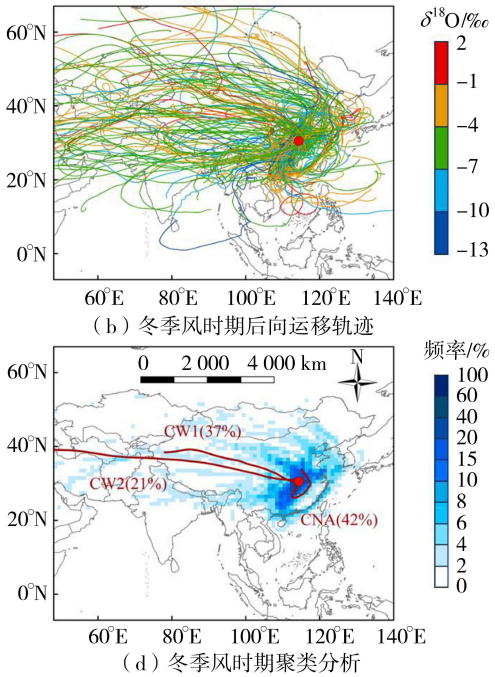
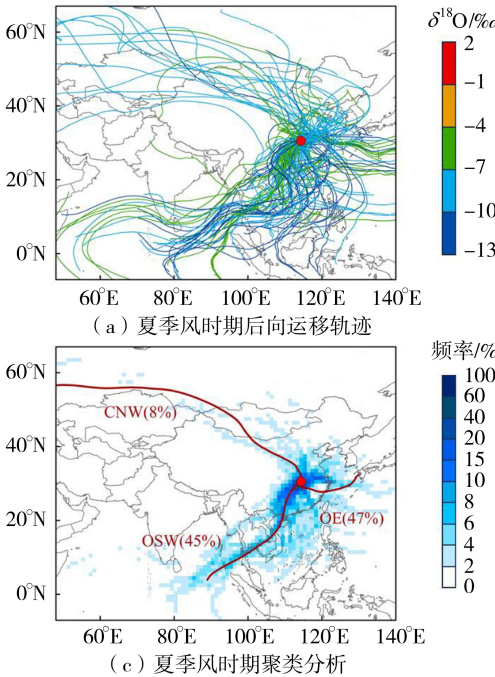


图 4 降水在夏季风和冬季风时期的水汽后向运移轨迹和聚类分析结果

Fig. 4 Precipitation water vapor backward trajectories and cluster analysis results during summer monsoon and winter monsoon periods

来源呈现明显的差异,大体反映出东亚季风、西风带和局地水汽再循环的共同作用。夏季风时期,大部分降水来源于海洋性水汽,主要包括附近太平洋的近海水汽输送(oceanic sources from east,OE)以及孟加拉湾和中国南海的远洋水汽输送(oceanic sources from southwest,OSW),轨迹频率分别占比47%和45%。除了支配性的海洋性水汽,小部分高纬度大陆水汽输送(continental sources from northwest,CNW)也对研究区的降水存在贡献(图4(a)(c))。冬季风时期,西风带输送的大陆性水汽(continental sources from west,CW1(内陆干旱型)、CW2(中纬度过渡型))是降水的主要水汽来源,轨迹频率总占比为58%。此外,局地大陆水汽输送(continental sources from nearby areas,CNA)对降水同样具有显著贡献,轨迹频率占比达到42%(图4(b)(d))。

不同水汽输送类型降水稳定同位素特性和水汽条件如表4所示。总体上,海洋水汽成因的降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值相对于大陆水汽成因显著贫化,并且具有更低的降水d-excess值。理论上,降水稳定同位素组成受到水汽源地的原始同位素特性、长距离水汽输送路径以及沿途降水过程等的共同影响^[34-35]。海洋性气团中水汽含量丰富,水汽运移过程中降水的淋洗作用使得剩余水汽的同位素组成不断贫化,因此,最终形成的降水稳定同位素具有较为贫化的特征(OE和OSW)。由于OSW的水汽运移轨迹长度比OE更长,沿着水汽输送路径增加的降水可能是OSW降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值更加贫化的原因,这一结果与Tan^[36]在我国季风区的发现一致。同时,由于海洋表面的蒸发环境更为湿润,相应降水通常以低d-excess值为特点。一般来说,大陆性水汽主要来源于同位素富集的河流、湖泊或者土壤水等的蒸发贡献^[11],另外,低湿度环境条件下增强的水汽再循环过程可能导致冬季风时期降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值相对富集并且d-excess值相对更高(CNA、CW1和CW2)。其中,CNA对当地降水总量的相对贡献达47.0%,反映了临近地区的地表蒸发对研究区降水的重要作用。需要关注的是,来源于高纬度大陆性水汽(CNW)的降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值较为贫化,并且d-excess值也显著低于其他大陆性水汽输送类型。宋献方等^[37]的研究发现了相似的结果:CNW主要来源于高纬度寒冷地区的水体蒸发,在较长距离的水汽输送过程中通过降水使得水汽同位素组成不断贫化,并且由于环境温度较低,沿途蒸发作用对水汽的补充较少,导致最终形成的降水d-excess值偏低。总的来说,上述结果明确了不同水汽输送类型之间降水稳定同位素特性的明显差异,表明受控于季风活动的水汽

来源转变能够在一定程度上解释武汉市降水稳定同位素的变化特征。

表4 不同水汽输送类型的降水稳定同位素特性和水汽条件

Table 4 Precipitation stable isotopic characteristics and moisture conditions of different moisture transport types					
观测时段	水汽输送类型	$\delta^{18}\text{O}_w/\text{‰}$	d-excess _w /‰	降水贡献率/%	轨迹长度/km
夏季风时期	OE	-7.1 ^b	10.8 ^b	40.7	2164
	OSW	-8.8 ^b	10.4 ^b	42.1	4423
	CNW	-8.0 ^b	12.8 ^b	17.2	11295
冬季风时期	CNA	-4.4 ^a	15.9 ^a	47.0	1926
	CW1	-5.3 ^a	17.5 ^a	33.4	4329
	CW2	-4.3 ^a	17.5 ^a	19.6	13683

注: $\delta^{18}\text{O}_w$ 和d-excess_w分别为 $\delta^{18}\text{O}$ 和d-excess的降水量加权平均值,各组数据间相同字母代表差异不显著,无相同字母代表差异显著($P<0.01$);降水贡献率为各水汽输送类型的当地降水量占相应时期全部统计事件降水总量的百分比。

3.4 降水稳定同位素与区域尺度云量的关系

Wang等^[38]的研究认为,云通过影响地气系统的辐射传输和能量收支,在水文循环中发挥着重要作用,受对流活动影响的云量与降水稳定同位素变化密切相关。在低纬度地区,OLR的低值被视作是深对流发生的重要标志。为了识别对流发生的关键区域,计算了观测时段内月平均OLR的空间分布特征,如图5所示。低纬度地区的OLR存在明显的时间变化特性,特别是6—9月孟加拉湾和印度半岛等部分区域具有较低的OLR值($<220\text{ W/m}^2$),反映了相应范围内较强的对流过程^[12,35]。由图4可知,在夏季风时期,低纬度的海洋性水汽对研究区降水具有明显的贡献,而在冬季风时期,大陆性水汽是降水的主要水汽来源。因此,重点分析夏季风时期的降水稳定同位素与区域尺度云量之间的关系,开展降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值与不同时间云量(TCC、HCC、MCC和LCC)的Spearman相关分析,包括降水当天、降水前1天、降水前2天,依此类推,直至降水前10天。结果表明,在远洋水汽运移轨迹的上游,降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值与云量之间的相关系数在大多数情景下为负值。进一步选取以孟加拉湾为中心的强对流区域作为分析对象,统计分析区域范围内所有格点Spearman相关系数的平均值,如图6所示。结果发现,降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值与云量在降水前0~7天时相关系数平均值的变化范围在-0.2~0.2之间,在降水前8~10天时与TCC、HCC和MCC之间的负相关性表现出明显的增强趋势,反映了水汽源区云量对下游降水稳定同位素影响的时间滞后效应。

分析降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值与降水前10天时TCC、HCC、MCC和LCC之间Spearman相关系数的空间分布,结果如图7所示。可以看到,降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值在孟加拉

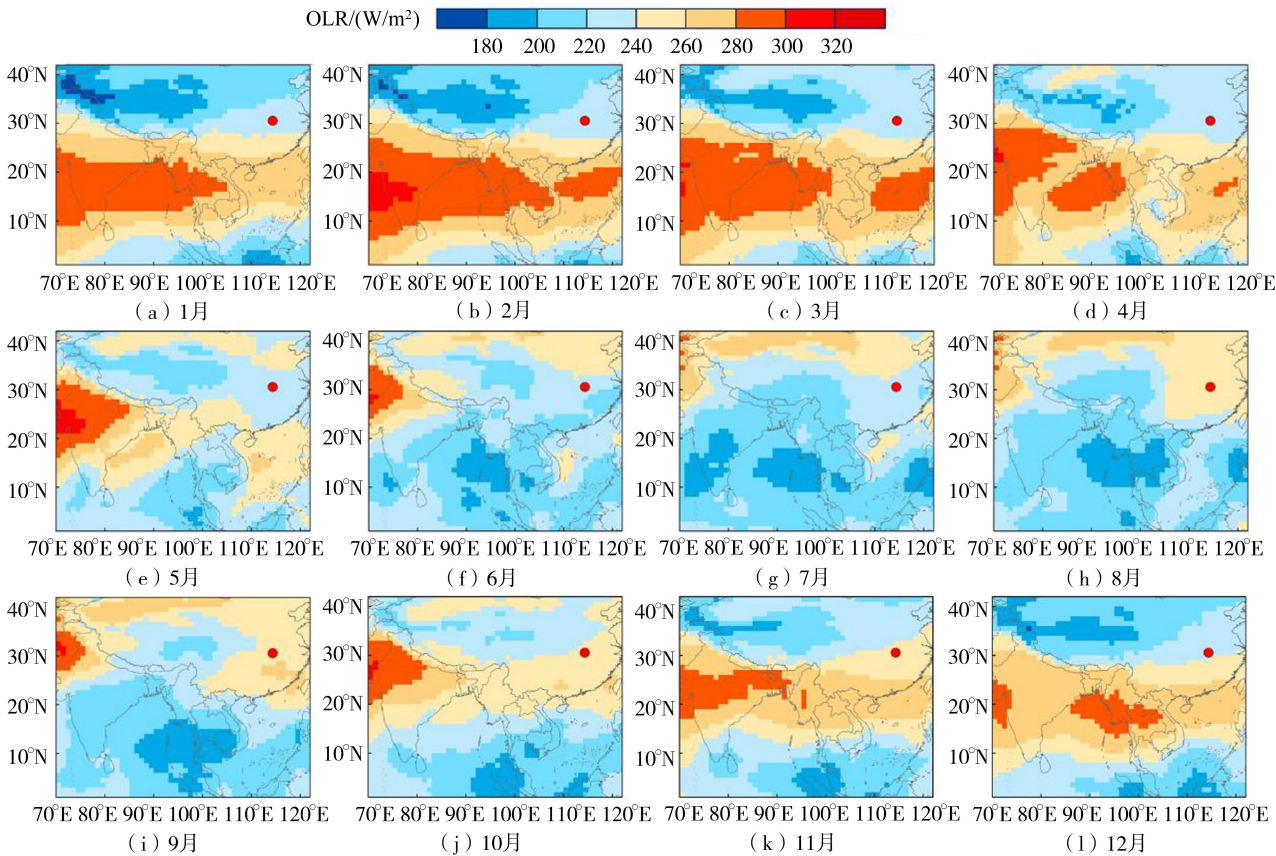


图 5 2019—2023 年月平均 OLR 空间分布特征

Fig. 5 Spatial distribution characteristics of monthly mean OLR from 2019 to 2023

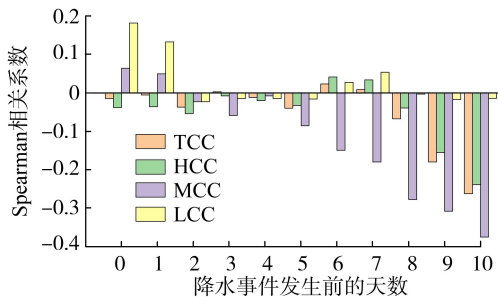


图 6 孟加拉湾范围内降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值与不同时间云量的 Spearman 相关系数

Fig. 6 Spearman correlation coefficients between precipitation $\delta^{18}\text{O}$ and cloud cover over the Bay of Bengal at different time

湾范围内与 MCC 具有显著的相关关系,相关系数平均值为 -0.38 ,与 TCC 和 HCC 相关系数的平均值分别为 -0.26 和 -0.24 ,而与 LCC 几乎不存在相关关系。Wu 等^[12]研究发现,鄱阳湖降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值与沿水汽迁移轨迹的累积降水量在 10 d 的滞后期表现出较强的相关性,与本文的结果一致。这可能是由于研究区与鄱阳湖在地理位置上较为相近,大气环流为这些地区创造了相似的气象条件,强调了大气过程对控制降水稳定同位素变化的重要作用^[35,39]。从机制上分析,低纬度地区因接收更强的太阳辐射,通常表现出更旺盛的对流活动,从而导致云层发展高度显著增加^[40]。本文夏季风时期的降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值



图 7 降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值与降水前 10 天云量之间 Spearman 相关系数的空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of spearman correlation coefficients between precipitation $\delta^{18}\text{O}$ and preceding 10-day cloud cover

与 TCC、HCC 和 MCC 之间负相关性最明显的区域与 OLR 指示的对流过程发生区域重叠,结合后向运移轨迹模拟结果可知,该区域处于远洋水汽运移轨迹的上游,支持了上游对流活动导致降水量增加,从而使得剩余水汽同位素组成不断贫化,进而在季风活动的作用下驱动东亚季风区降水稳定同位素变化这一假说^[41-42]。因此,武汉市降水稳定同位素的变化特征受局地气象因子的影响不明显,主要与水汽来源和上游对流活动的共同作用有关。

4 结 论

a. 得到降水 $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ 的关系为 $\delta^2\text{H}=8.20\delta^{18}\text{O}+14.97$,降水稳定同位素呈现明显的季节变化,相对贫化的降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值分布在夏季风时期,该时期降水 d-excess 值更小,在冬季风时期,降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值相对富集,相应的降水 d-excess 值更大。

b. 降水稳定同位素在各个时期均不具有降水量效应,仅在冬季风时期表现出温度效应,降水 d-excess 值在全年和冬季风时期表现出与气温之间显著的负相关性,反映出大气环流为研究区提供了不同来源的降水水汽。

c. 识别 6 种水汽输送类型(OE、OSW、CNW、CNA、CW1 和 CW2)对武汉市降水的影响,不同水汽输送类型的降水稳定同位素特性具有明显差异,受控于季风活动的水汽来源转变能够在一定程度上解释降水稳定同位素的变化特征。

d. 区域尺度上,夏季风时期降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值与 TCC、HCC 和 MCC 在 10d 的滞后期表现出较强的负相关关系,相关性最明显的区域与对流过程的发生区域重叠,处于远洋水汽运移轨迹的上游。综合推断,降水稳定同位素变化主要与水汽来源和上游对流活动的共同作用有关。

参考文献:

[1] BOWEN G J, CAI Zhongyin, FIORELLA R P, et al. Isotopes in the water cycle: regional-to global-scale patterns and applications[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences,2019,47:453-479.

[2] 詹泸成,赵娜,陈建生. 雾水和降水的氢氧稳定同位素差异及其影响因素[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023,51(4):10-17. (ZHAN Lucheng, ZHAO Na, CHEN Jiansheng. Hydrogen and oxygen stable isotope difference between fog water and precipitation and influencing factors [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023,51(4):10-17. (in Chinese))

[3] 孙建建,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))

[4] 陶士勇,张翔,夏军强,等. 鄱阳湖典型洲滩湿地植物水碳稳定同位素与内在水分利用效率变化特征[J]. 湖泊科学, 2024, 36 (1): 99-111. (TAO Shiyong, ZHANG Xiang, XIA Junqiang, et al. Variations of water, carbon isotopic characteristics and intrinsic water use efficiency of vegetation in the typical beach wetland of Lake Poyang, China[J]. Journal of Lake Sciences, 2024, 36(1):99-111. (in Chinese))

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

[6] CHIDAMBARAM S, PRASANNA M V, RAMANATHAN A L, et al. A study on the factors affecting the stable isotopic composition in precipitation of Tamil Nadu, India [J]. Hydrological Processes,2009,23:1792-1800.

[7] ROZANSKI K, ARAGUÁS-ARAGUÁS L, GONFIANTINI R. Relation between long-term trends of oxygen-18 isotope composition of precipitation and climate[J]. Science, 1992,258(5084):981-985.

[8] BREITENBACH S F M, ADKINS J F, MEYER H, et al. Strong influence of water vapor source dynamics on stable isotopes in precipitation observed in Southern Meghalaya, NE India[J]. Earth and Planetary Science Letters,2010, 292(1-2):212-220.

[9] SÁNCHEZ-MURILLO R, BIRKEL C, WELSH K, et al. Key drivers controlling stable isotope variations in daily precipitation of Costa Rica; Caribbean Sea versus Eastern Pacific Ocean moisture sources[J]. Quaternary Science Reviews,2016,131:250-261.

[10] DUY N L, HEIDBÜCHEL I, MEYER H, et al. What controls the stable isotope composition of precipitation in the Mekong Delta? A model-based statistical approach [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2018, 22 (2):1239-1262.

[11] 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.

[12] WU Huawu, FAN Hongxiang, LEI Ruiyu, et al. Atmospheric processes control the stable isotopic variability of precipitation in the middle-lower reaches of the Yangtze River Basin, East Asian monsoon region[J]. Journal of Hydrology,2023,623:129835.

[13] 沈业杰,彭新华. 鹰潭地区大气降水中氢氧稳定同位

- 素特征研究[J]. 生态环境学报, 2014, 23(1): 101-105. (SHEN Yejie, PENG Xinhua. Stable isotopes of hydrogen and oxygen in the precipitation of Yingtian[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(1): 101-105. (in Chinese))
- [14] 王婷, 高德强, 徐庆, 等. 三峡库区秭归段大气降水 δD 和 $\delta^{18}O$ 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 $\delta^{18}O$ in precipitation and water vapor sources in Zigui section of the Three Gorges Reservoir[J]. Forest Research, 2020, 33(6): 88-95. (in Chinese))
- [15] 常昕, 章新平, 刘仲黎, 等. 中国季风区降水构成对降水中稳定同位素的影响: 以长沙为例[J]. 地球环境学报, 2024, 15(1): 59-68. (CHANG Xin, ZHANG Xinping, LIU Zhongli, et al. The influence of the composition of precipitation on the stable isotopes in precipitation in the monsoon region of China: a case study of Changsha[J]. Journal of Earth Environment, 2024, 15(1): 59-68. (in Chinese))
- [16] 杨艳林, 靖晶, 赵永波, 等. 基于氢氧稳定同位素的武汉北部新城地表水-地下水转换关系研究[J]. 中国地质, 2022, 49(3): 706-715. (YANG Yanlin, JING Jing, ZHAO Yongbo, et al. Conversion relationship between surface water and groundwater based on stable isotopes of D and $\delta^{18}O$ of new town in the northern Wuhan[J]. Geology in China, 2022, 49(3): 706-715. (in Chinese))
- [17] TAO Shiyong, ZHANG Xiang, XU Jing, et al. Anthropogenic impacts on isotopic and geochemical characteristics of urban streams: a case study in Wuhan, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(29): 39186-39198.
- [18] WU Huawu, ZHANG Xinping, LI Xiaoyan, 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.
- [19] WANG Quan, WANG Yongjin, ZHAO Kan, et al. The transfer of oxygen isotopic signals from precipitation to drip water and modern calcite on the seasonal time scale in Yongxing Cave, central China [J]. Environmental Earth Sciences, 2018, 77(12): 474.
- [20] 隋明滨, 张瑛, 徐庆, 等. 水汽来源和环境因子对湖南会同大气降水氢氧同位素组成的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(6): 1791-1799. (SUI Mingzhen, ZHANG Ying, XU Qing, et al. Effects of water vapor source and local environmental factors on the hydrogen and oxygen isotopic compositions of precipitation in Huitong, Hunan Province [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(6): 1791-1799. (in Chinese))
- [21] 白杨, 初东, 田良, 等. 武汉城市圈的水源涵养功能重要性评价研究[J]. 地球信息科学学报, 2014, 16(2): 233-241. (BAI Yang, CHU Dong, TIAN Liang, et al. Assessing the importance of water conservation function in Wuhan City circle [J]. Journal of Geo-Information Science, 2014, 16(2): 233-241. (in Chinese))
- [22] LIU Zufan, TAO Shiyong, SUN Zuyou, et al. Determination of heavy metals and health risk assessment in tap water from Wuhan, China, a city with multiple drinking water sources [J]. Water, 2023, 15(21): 3709.
- [23] GAT J R. Atmospheric water balance-the isotopic perspective [J]. Hydrological Processes, 2000, 14(8): 1357-1369.
- [24] DOS SANTOS V, GASTMANS D, SÁNCHEZ-MURILLO R, et al. Regional atmospheric dynamics govern interannual and seasonal stable isotope composition in southeastern Brazil [J]. Journal of Hydrology, 2019, 579: 124136.
- [25] CRAIG H. Isotopic variations in meteoric waters [J]. Science, 1961, 133(3465): 1702-1703.
- [26] 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. (ZHENG Shuhui, HOU Fagao, NI Baoling. Hydrogen and oxygen stable isotopes of atmospheric precipitation in China [J]. Chinese Science Bulletin, 1983, 28(13): 801-806. (in Chinese))
- [27] 饶文波, 李垚炜, 谭红兵, 等. 高寒干旱区降水氢氧稳定同位素组成及其水汽来源: 以昆仑山北坡格尔木河流域为例 [J]. 水利学报, 2021, 52(9): 1116-1125. (RAO Wenbo, LI Yaowei, TAN Hongbing, et al. Stable hydrogen-oxygen isotope composition and atmospheric moisture sources of precipitation in an arid-alpine region: a case study of the Golmud River Watershed on the north slope of the Kunlun Mountains [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(9): 1116-1125. (in Chinese))
- [28] 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.
- [29] 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))
- [30] ARAGUÁS-ARAGUÁS L, FROELICH K, ROZANSKI K. Stable isotope composition of precipitation over southeast Asia [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1998, 103(D22): 28721-28742.
- [31] 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. (LIU Jianrong, SONG Xianfang, YUAN Guofu, et al. Characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation over eastern monsoon China and the water vapor sources[J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(22): 3521-3531. (in Chinese))

[32] XIE Luhua, WEI Gangjian, DENG Wenfeng, 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(3-4): 477-489.

[33] CRAWFORD J, HOLLINS S E, MEREDITH K T, et al. Precipitation stable isotope variability and subcloud evaporation processes in a semi-arid region [J]. Hydrological Processes, 2017, 31(1): 20-34.

[34] VIMEUX F, GALLAIRE R, BONY S, et al. What are the climate controls on δD in precipitation in the Zongo Valley (Bolivia)? Implications for the Illimani ice core interpretation[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2005, 240(2): 205-220.

[35] ADHIKARI N, GAO Jing, YAO Tandong, et al. The influence of moisture transport processes on the stable isotopic compositions in precipitation on the South slope of the Himalayas[J]. Global and Planetary Change, 2024, 237: 104453.

[36] TAN Ming. Circulation effect: response of precipitation $\delta^{18}\text{O}$ to the ENSO cycle in monsoon regions of China[J]. Climate Dynamics, 2014, 42(3-4): 1067-1077.

[37] 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. (SONG Xianfang, TANG Yu, ZHANG Yinghua, et al. Using stable isotopes to study vapor transport of continuous precipitation in Beijing [J]. Advances in Water Science, 2017, 28(4): 488-495. (in Chinese))

[38] WANG Di, TIAN Lide, CAI Zhongyin, et al. Indian monsoon precipitation isotopes linked with high level cloud cover at local and regional scales[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2020, 529: 115837.

[39] WEI Zhongwang, LEE Xuhui, LIU Zhongfang, et al. Influences of large-scale convection and moisture source on monthly precipitation isotope ratios observed in Thailand, southeast Asia[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2018, 488: 181-192.

[40] CAI Zhongyin, TIAN Lide. Atmospheric controls on seasonal and interannual variations in the precipitation isotope in the east Asian monsoon region[J]. Journal of Climate, 2016, 29(4): 1339-1352.

[41] GUO Rong, YU Wusheng, ZHANG Jingyi, et al. Different dynamics drive Indian Ocean moisture to the southern slope of central Himalayas: an isotopic approach [J]. Geophysical Research Letters, 2024, 51(11): e2024GL109359.

[42] ZHOU Hui, ZHANG Xinping, YAO Tianci, et al. Variation of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation and its response to upstream atmospheric convection and rainout: a case study of Changsha Station, south-central China[J]. Science of the Total Environment, 2019, 659: 1199-1208.

(收稿日期: 2024-08-29 编辑: 胡新宇)

(上接第 186 页)

[21] WUNSCH A, LIESCH T, BRODA S. Forecasting groundwater levels using nonlinear autoregressive networks with exogenous input (NARX) [J]. Journal of Hydrology, 2018, 567: 743-758.

[22] IZADY A, DAVARY K, ALIZADEH A, et al. Application of NN-ARX model to predict groundwater levels in the neishaboor plain, Iran[J]. Water Resources Management, 2013, 27(14): 4773-4794.

[23] LIN T, HORNE B G, TINO P, et al. Learning long-term dependencies in NARX recurrent neural networks [J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 1996, 7(6): 1329-1338.

[24] SAMARASINGHE S. Neural networks for applied sciences and engineering[M]. New York: Taylor and Francis, 2007.

[25] RAJAEI T, EBRAHIMI H, NOURANI V. A review of the artificial intelligence methods in groundwater level modeling[J]. Journal of Hydrology, 2019, 572: 336-351.

[26] 刘天航. 基于机器学习的密怀顺地区短期地下水位动态模型研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2022.

[27] ZANOTTI C, ROTIROTI M, STERLACCHINI S, et al. Choosing between linear and nonlinear models and avoiding overfitting for short and long term groundwater level forecasting in a linear system [J]. Journal of Hydrology, 2019, 578: 124015.

[28] DU Kongchang, ZHAO Ying, LEI Jiaqiang. The incorrect usage of singular spectral analysis and discrete wavelet transform in hybrid models to predict hydrological time series[J]. Journal of Hydrology, 2017, 552: 44-51.

[29] ZARE M, KOCH M. Groundwater level fluctuations simulation and prediction by ANFIS- and hybrid wavelet-ANFIS/fuzzy C-means (FCM) clustering models: application to the Miandarband plain [J]. Journal of Hydro-Environment Research, 2018, 18: 63-76.

[30] PENG Hanchuan, LONG Fuhui, DING Chris. Feature selection based on mutual information criteria of max-dependency, max-relevance, and min-redundancy [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2005, 27(8): 1226-1238.

(收稿日期: 2024-07-16 编辑: 王芳)