

南昌市大气降水 H-O 稳定同位素特征 及其水汽来源解析

张海发¹, 郑芳文^{2,*}, 杨海全³

(1. 水利部珠江水利委员会技术咨询(广州)有限公司, 广州 510610; 2. 南昌工程学院 水利与生态工程学院, 南昌 330099; 3. 中国科学院地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081)

摘 要: 南昌市位于长江流域中下游, 濒临中国第一大淡水湖—鄱阳湖, 水文网系发育。为了深入理解南昌市大气降水来源与路径, 并为区域水循环研究提供基础数据, 本研究于 2015~2016 年期间采集南昌市 93 个日降水事件样品, 开展降水 H-O 稳定同位素特征及其影响因素研究, 并试图阐明该区域大气降水水汽来源。结果表明: (1) 降水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 值变化范围较大, 相对于其它季节春季偏正, 不是单一气候因子的制约而是多种因子共同影响的结果; (2) 建立的当地大气降水线方程为 $\delta^2\text{H} = 8.03\delta^{18}\text{O} + 12.1$, H-O 稳定同位素分馏处于相对平衡状态, 为区域水循环研究提供可靠的参考线。氘盈余 (*d-excess*) 和 HYSPLIT 模型综合分析进一步表明: 夏秋季降水多与东南和西南季风携带的太平洋和印度洋水汽有关, 而冬春季降水来源广泛, 涉及季风、西风带、极地气流及局地蒸发的水汽。本研究成果有助于完善中国南方大气湿度循环理论, 对指导当地水资源管理、防洪减灾有重要的实际意义。

关键词: 南方都市; 大气降水; H-O 稳定同位素; HYSPLIT 模型; 水汽来源

中图分类号: P426.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9250(2023)02-0133-10 **doi:** 10.14050/j.cnki.1672-9250.2022.50.087

大气降水是陆地水文循环中的重要输入项, 维系着地表水和地下水的动态平衡^[1]; 是重要的生态水源, 促进植物生长发育^[2]; 是大气环境的清洁工, 改善空气质量^[3]; 也是区域洪涝灾害的诱发因子, 对人们的生产生活构成潜在威胁。因此, 降水来源、路径及其变化规律等方面的研究对理解区域水循环、保护生态环境、指导水资源管理及防治洪涝灾害既有较高的学术价值又有重要的实际意义。

H-O 稳定同位素是水分子的固有组成, 在水汽循环过程中由于不同区域气候与环境的差异会发生不同程度的分馏: ^1H 、 ^{16}O 由于其质量较轻优先进入气相中, 而 ^2H 、 ^{18}O 由于其质量较重倾向于在液相中富集^[4]。由此, 自然界中降水 H-O 稳定同位素存在温度、降水量、高程、大陆、纬度等多种效应, 敏感地记录了丰富的气象与水文信息^[5]。通过对大气降水 H-O 稳定同位素分析, 可以探究降水水汽形成、运移路径及变化过程、周期, 进而追踪区域气候特征和大气环流规律^[6]。同时, 根据大气降水 H-O

稳定同位素变化关系所构建的当地大气降水线, 不仅可以反映不同地区间大气降水过程的差异, 而且可为区域水循环研究提供可靠的参考^[7]。

国际原子能机构 (IAEA) 和世界气象组织 (WMO) 建立的全球降水同位素观测网 (GNIP) 为流域、区域甚至全球水循环与气候研究提供了宝贵数据, 极大地推动了全球范围内的降水同位素研究。基于 GNIP 资料和各自研究的测量数据, 从同位素关系的定性描述、同位素分馏的深入阐述到同位素模型的定量模拟, 学者们开展了大量研究^[8-12]。较典型的成果有 Craig^[8] 于 1961 年提出的全球和当地大气降水线, Dansgaard^[9] 于 1964 年定义的同位素效应和过量氘概念及瑞利分馏理论, 引入稳定同位素效应的大气环流模式 (GCM) 等。这些已有研究大大提升了人们对全球水循环的系统认识。自上世纪 80 年以来, 国内降水同位素研究蓬勃发展, 包括 GNIP、CHNIP 等在内的多个大气降水同位素监测体系, 涉及不同的流域、地貌单元及气候区, 对全

收稿日期: 2022-06-25; 改回日期: 2022-10-02

基金项目: 江西省水利厅科技项目 (202123YBKT10); 国家自然科学基金项目 (41273015)。

第一作者简介: 张海发 (1976-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为水文地质与工程地质。E-mail: 969154331@qq.com.

* 通讯作者: 郑芳文 (1982-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为同位素水文和环境地质。E-mail: zhengfangwen82@163.com.

国范围内降水同位素在空间和时间上的分布规律及驱动机制有了一定程度的认识^[7,13-23]。相对于国外,国内已有研究存在降水 H-O 稳定同位素监测点分布稀疏、监测持续性不够等问题。我国流域众多、地貌多样、气候复杂,降水 H-O 稳定同位素在时间与空间上具有较大的差异性和多变性。为更深入、更全面地把握国内降水 H-O 稳定同位素变化规律及趋势并为水文循环及气候变化等相关研究提供基础数据,多区域详细化的降水同位素研究非常必要。

南昌市是中国南方的典型都市,位于长江中下游,濒临中国第一大淡水湖—鄱阳湖,水系发育,多降水,在中国南方降水研究中占有重要地位。然而,南昌市及周边区域未被 GNIP 和 CHNIP 监测网络所覆盖,仅极少数研究报道了该地区短时间尺度的降水同位素数据^[1,24-25],例如刘萍^[24]于 2010 年对南昌市大气降水 H-O 稳定同位素组成进行了分析,建立了当地大气降水线方程,为 $\delta^2\text{H} = 8.96\delta^{18}\text{O} + 11.04$; Wu 等^[1]分析了 2017~2018 年湖口县 81 个降水事件样品 H-O 稳定同位素特征,为探讨鄱阳湖与周边河流之间的水力联系提供了可供参考的基础数据。另外,该地区地下水循环研究多采用 GNIP 监测的长沙降水数据和全球降水线为参考^[26]。总体上,南昌市降水同位素研究相当薄弱。南昌市降水同位素组成有什么特征、受什么因素驱动,水汽来自哪里、随时间有何变化,与其他城市有怎样的差异?对于这些信息目前还知之甚少。本研究选

择南昌市为研究区,收集该区 2015~2016 年期间大气降水样品并测定其中的 H-O 稳定同位素组成,旨在阐明南昌市降水 H-O 稳定同位素特征及影响因素并揭示当地降水来源。其预期成果有助于丰富中国南方城市大气湿度循环理论,并为当地雨洪灾害防治提供决策依据。

1 研究区概况

南昌市是江西省会(115°27'~116°35' E, 28°10'~29°11' N),平均海拔 25 m,位于中国东南部长江中下游区,北临我国第一大淡水湖—鄱阳湖(图 1)。该市有 6 个市辖区、3 个国家级开发区和 3 个县,赣江、抚河绕城而过(图 1)。其中,城区面积 85 km²,占全市总面积的 1.2%,城区人口约 180 万,占全市总人口的 34.3%。地貌上平原占全市总面积的 35.8%,岗地低丘占 34.4%,水域占 29.8%。南昌市水系发育,分布有青山湖、艾溪湖、瑶湖、象湖等多个湖泊。该市盛行亚热带湿润季风气候,一年中夏冬季长、春秋短,冬季多偏北风,夏季多偏南风,年均气温在 17.1℃~17.8℃之间,多年平均降水量为 1 645 mm^[27]。降水量年内分布不均,4~6 月为雨季,其降水量占全年的 51.3%;枯水期为 11 月至次年 1 月,降水量占全年的 9.6%。四季多年平均相对湿度在 70%~80%之间。多年平均年蒸发量为 934.4 mm,主要集中在夏季(299.65 mm)和秋季(347.28 mm)^[28]。

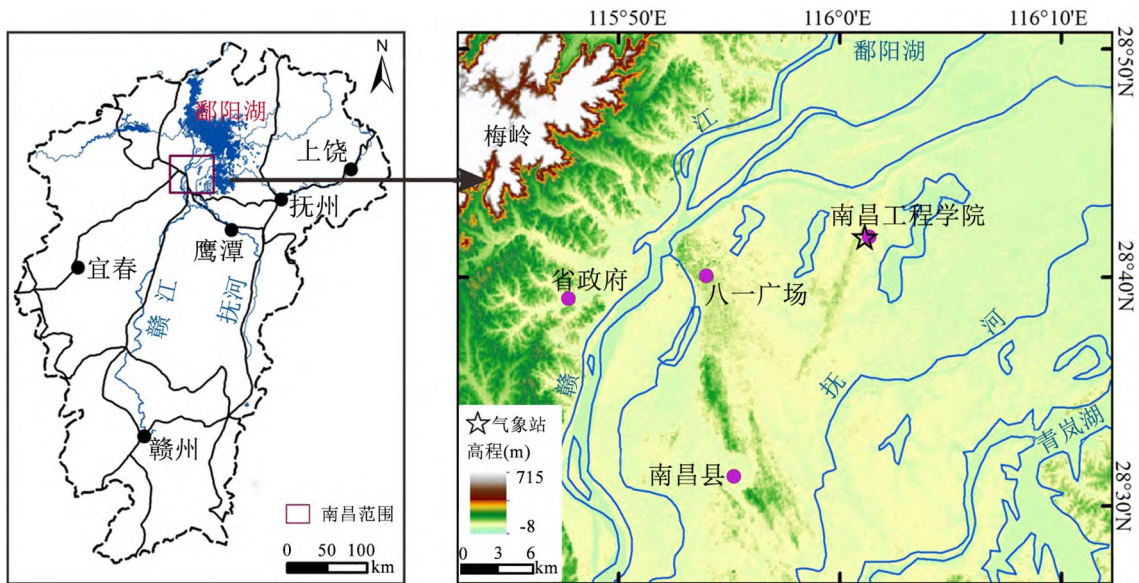


图 1 南昌市大气降水监测点位置

Fig. 1 Location of atmospheric precipitation monitoring point in Nanchang City

2 样品与方法

2.1 样品采集

降水采样点设于南昌市城东北南昌工程学院(28.693° N, 116.022° E)内,附近建有气象站(图 1)。参照水利部通用的降水采集器设计标准,本研究自制一套降水采集器,主要部件包括漏斗、导水连接器和接收瓶。漏斗接收和汇集降水,导水连接器连接漏斗和接收瓶,把漏斗收集的水导入接收瓶。为防止降水采集过程中蒸发的影响,在漏斗承水口处放置一个乒乓球,同时在接收瓶中装入 2 mm 厚度以上的矿物油。降水采集器安放在逸夫实验楼(13.5 m 高)顶 2 m 高的位置,其主要目的是排除周围障碍物干扰。于 2015 年 11 月至 2016 年 10 月期间收集每一个日降水事件样品,共 93 个样品。当日上午 8:00 至次日上午 8:00 的降水被视为一个日降水事件。一个日降水事件结束后,立即将降水装入事先洗净、烘干的玻璃瓶中。为防止蒸发影响,根据所接水量选择合适体积的玻璃瓶盛装降水样品,采用分子生化级封口膜密封瓶口,贴好编号,并将样品保存于室内 4 °C 条件下。同时,收集气象站监测数据,包括降水时间、降水量、气温等。

2.2 样品测试

经孔径为 0.45 μm 的滤膜过滤后,所有降水样品 H-O 稳定同位素测量在中国科学院青藏高原研究所液态水同位素质谱仪(Picarro L2130-1, USA)上进行,测量精度分别为 ±1‰ 和 ±0.1‰,测定结果以相对维也纳标准平均海水(V-SMOW)的 δ(‰)表示:

$$\delta^2\text{H 或 } \delta^{18}\text{O} = (R_{\text{样品}}/R_{\text{V-SMOW}} - 1) \times 1000\text{‰} \quad (1)$$

式中:R 代表 $^2\text{H}/^1\text{H}$ 或 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 。

2.3 HYSPLIT 模型

由美国海洋大气局(NOAA)设计的 HYSPLIT (Hybrid-Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory)模型是一个分析大气颗粒物迁移与扩散的专业模型^[3,29],可追踪水汽来源与路径^[7,30]。该模型是在拉格朗日方法的基础上耦合了欧拉方法的一种混合算法,使用了移动参考系和固定三维网格框架计算质点对流和扩散随风场变化的轨迹,具有处理多种气象要素输入场、多种物理过程和不同类型污染物排放源功能的输送、扩散和沉降模式。HYSPLIT 反向轨迹模拟需要多个参数设置,除了起始点

经纬度、延伸时间和模拟层高度的设定之外,还需要沿轨迹转储气象数据参数的设定,例如,周边温度、降水量、相对湿度、太阳辐射及混合层深度等。起始点经纬度取决于研究点的地理位置,延伸时间和模拟层高度需要根据研究区域的实际情况自行设定。沿轨迹转储气象数据参数可以在该模型的轨迹端点文件(tdump file)中输出,在模型设置中通常选择默认模式。基于美国国家环境预报中心(NCEP)和国家大气研究中心(NCAR)全球再分析数据,本研究采用此模型对 2015 年 11 月至 2016 年 10 月期间南昌市 93 个日降水事件水汽运移路径进行后向轨迹追踪模拟,模型轨迹起点为南昌市南昌工程学院。通常 200~2 000 km 的水平距离范围内大气环流时间为 2~3 天^[31],考虑南昌市及其周边地区的气候主要受亚洲季风控制^[6],而且中国南方地区积雨云及降水云云底高度通常在 600~1 500 m 范围^[32],因此,模型中设置的后向轨迹延伸时间为 72 h,模拟层高度设为 1 000 m。根据模拟结果,进一步的统计分析得到了南昌市 1 000 m 高度不同方向的风向频率。

3 结果与分析

3.1 H-O 稳定同位素组成特征及影响因素

研究期间南昌市日降水 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^2\text{H}$ 及氦盈余值(*d-excess*)的变化范围分别为 -12.76‰~2.78‰、-91.5‰~28.7‰和 -17.9‰~30.7‰,年加权均值分别为 -6.1‰、-36.7‰和 11.92‰(图 2)。四个季节降水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的加权均值低于其算术均值(表 1),表明大的日降水事件有较低的 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值。就均值而言,与 2010 年相比,研究期间南昌市降水 H-O 稳定同位素组成基本偏正。这主要是刘萍^[24]仅采集降水量大的日降水样品的缘故。整体而言,南昌市降水 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^2\text{H}$ 及 *d-excess* 值均位于我国降水氢氧同位素组成范围之中^[6,18]。月尺度上,降水 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^2\text{H}$ 值五月最大而七月最小,*d-excess* 值二月最大而八月最小;季节尺度上,降水 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^2\text{H}$ 值春季偏正而其它季节偏负,*d-excess* 值夏秋季较低而冬春季较高(表 1,图 2)。这与受东亚季风影响的上海、南京、广东及香港地区降水 H-O 稳定同位素的季节特征相似,而与北美、西欧降水 H-O 稳定同位素组成的季节特征正好相反^[6,33-35]。

南昌市日降水 H-O 稳定同位素组成与主要气象因子(降水量、气温、蒸发量及相对湿度)的

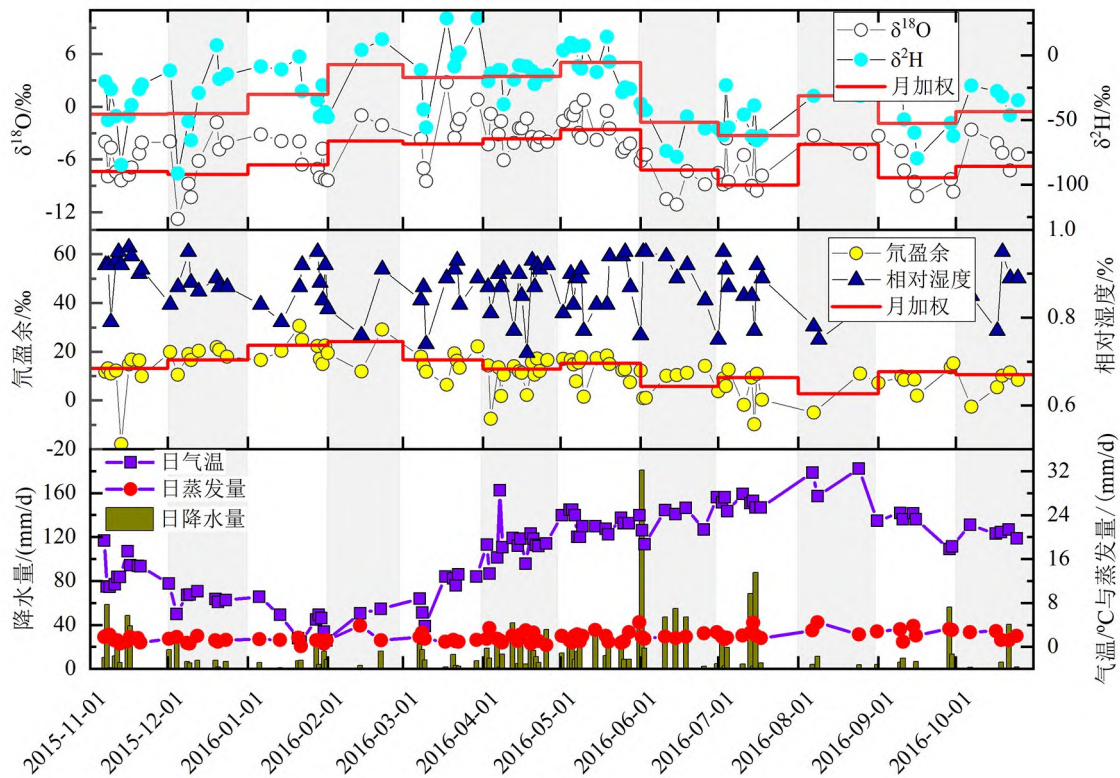


图2 2015~2016年南昌市日与月降水H-O稳定同位素组成随时间的分布

Fig. 2 Temporal distributions of stable H-O isotope compositions in daily and monthly precipitation in Nanchang during 2015 to 2016

表1 2015~2016年南昌市日降水事件H-O稳定同位素组成统计结果

Table 1 Statistical results of stable H-O isotope compositions of daily precipitation events in Nanchang during 2015 to 2016

时间(样品数/个)	同位素类型	最小值/‰	最大值/‰	加权均值/‰	算术均值/‰	标准偏差
冬季(25)	$\delta^2\text{H}$	-91.5	7.70	-42.4	-33.4	24.0
	$\delta^{18}\text{O}$	-12.76	-1.76	-7.30	-6.20	2.5
	氘盈余	-17.9	30.7	16	16.2	8.6
春季(25)	$\delta^2\text{H}$	-55.9	28.7	-15.7	-12.5	20.0
	$\delta^{18}\text{O}$	-8.46	2.78	-3.79	-3.20	2.6
	氘盈余	-7.5	29.1	14.6	13.1	7.2
夏季(29)	$\delta^2\text{H}$	-78.7	14.4	-41.0	-31.7	28.3
	$\delta^{18}\text{O}$	-11.15	0.77	-6.31	-5.15	3.3
	氘盈余	-9.7	18.4	9.5	9.5	6.9
秋季(14)	$\delta^2\text{H}$	-79.7	-19.6	-48.7	-41.5	17.3
	$\delta^{18}\text{O}$	-10.20	-2.61	-7.47	-6.12	2.4
	氘盈余	-5.0	15.2	11.1	7.4	5.8
全年(93)	$\delta^2\text{H}$	-91.5	28.7	-36.7	-28.5	25.3
	$\delta^{18}\text{O}$	-12.76	2.78	-6.08	-5.05	3.0
	氘盈余	-17.9	30.7	11.9	11.9	7.8

Pearson 相关分析结果列于表 2。降水量、气温及蒸发量等主要气象因子与日降水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值不存在明显的相关关系(表 2)。气象因子分区计算分析表明降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值与上述各气象因子之间也未存在

明显的同步或反向变化特征(图 3)。因此,降水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值应当是当地降水、气温及蒸发等气象因素共同影响的结果,并非受某一或两个因素的主导。值得注意的是,降水量大(>50 mm/d)的日降

表 2 2015~2016 年南昌市日降水事件 H-O 稳定同位素组成与主要气象因子的相关系数
Table 2 Correlation coefficients of stable H-O isotope compositions and main meteorological factors of daily precipitation events in Nanchang during 2015 to 2016

参数	气温/°C	蒸发量/mm	相对湿度/%	降水量/mm	$\delta^2\text{H}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$
蒸发量/mm	0.36(0.00)					
相对湿度/%	-0.06(0.58)	-0.57(0.00)				
降水量/mm	0.18(0.08)	0.02(0.83)	0.29(0.00)			
$\delta^2\text{H}/\text{‰}$	-0.11(0.29)	-0.09(0.37)	-0.15(0.14)	-0.24(0.02)		
$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	0.06(0.60)	0.03(0.79)	-0.23(0.03)	-0.25(0.02)	0.95(0.00)	
氘盈余/‰	-0.52(0.00)	-0.37(0.00)	0.22(0.04)	-0.00(0.99)	0.32(0.00)	0.01(0.90)

注:相关系数 r (显著性参数 p)

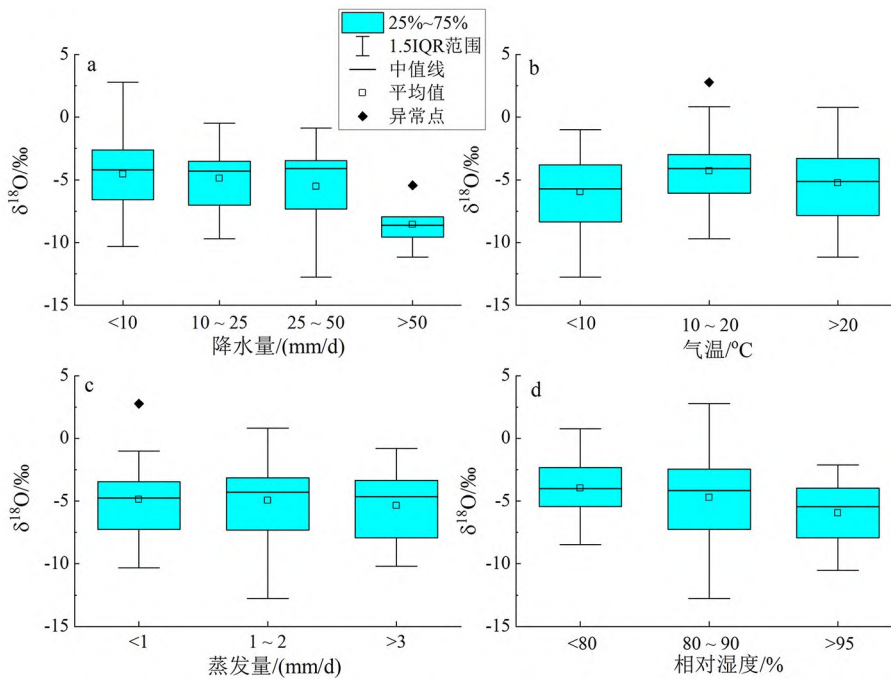


图 3 南昌市降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值随气象因子的变化特征

Fig. 3 Variations of precipitation $\delta^{18}\text{O}$ values with meteorological factors in Nanchang

水倾向于有较负的 $\delta^{18}\text{O}$ 值(图 3a)。已有研究表明,降水 H-O 稳定同位素组成在纬度大于 35°N 的中国北方区域主要受温度控制,而在广西、广东、云南及四川等华南、西南省份降水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 值受降水量影响明显,且部分可能同时受温度影响^[6,18]。中南、东南部分地区既不受温度也不受降水量的单独控制,如福州降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值与降水量和气温的线性相关系数 r 分别为 0.2 和 0.47,武汉的分别为 0.2 和 0.36^[6,18]。这与本研究的结果一致。然而,南昌市日降水氘盈余(d -excess)与气温有较明显的负相关关系,与蒸发量有一定的负相关关系(表 2)。饶文波等^[36]在研究格尔木河流域降水 H-O 稳定同位素组成的影响因素时也得到相似的结果,即日降水氘盈余值与气温在 $p=0.01$ 水平上存在明显的负相关关系,与蒸发量在 $p=0.05$ 水平上存在一定的负

相关关系。但他们同时发现日降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值与气温及蒸发量存在一定的正相关关系,并认为气温是日降水 H-O 稳定同位素组成的主控因素^[36]。本研究并未发现日降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值与气温或蒸发量之间存在类似的关系。因此,南昌市日降水氘盈余(d -excess)值可能主要指示水汽源区或降水之前的气象水文信息。

3.2 当地大气降水线方程

如图 4 所示,本研究的南昌日降水 H-O 同位素数据基本落在全球大气降水线(GMWL)两侧,也在 95%的置信区间之中。利用该数据建立的南昌市当地大气降水线(LMWL)为 $\delta^2\text{H} = 8.03\delta^{18}\text{O} + 12.1$ ($r = 0.95, n = 93$),在斜率和截距上与 GMWL ($\delta^2\text{H} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$)接近^[8],也与鄱阳湖的当地大气降水线 $\delta^2\text{H} = 8.17\delta^{18}\text{O} + 12.5$ ($r = 0.98, n = 81$)接近^[1]。然

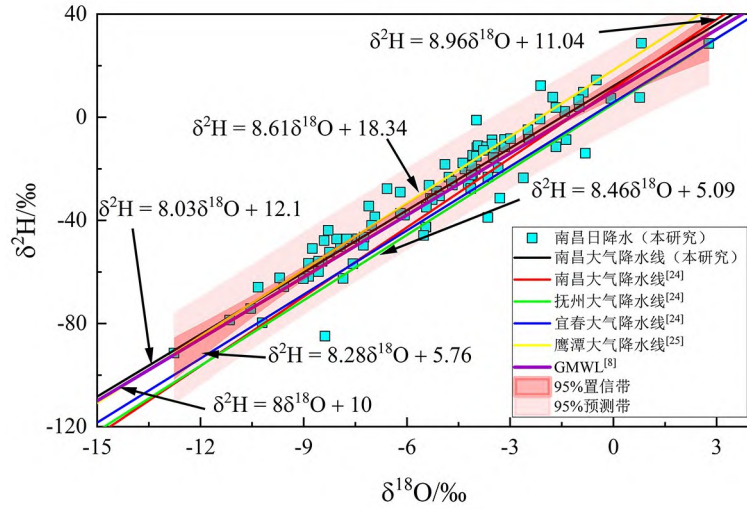


图4 南昌市及周边当地大气降水线

Fig. 4 Local meteoric water lines in Nanchang and surrounding areas

而,本研究建立的南昌市当地大气降水线与刘萍^[24]基于日降水 H-O 稳定同位素数据建立的南昌市当地大气降水线方程 ($\delta^2\text{H} = 8.96\delta^{18}\text{O} + 11.04$, $r = 0.97$, $n = 55$) 在斜率上差别明显。刘萍^[24]未考虑小的降水事件,而且大的日降水事件有较负的 H-O 同位素比值(图 3a),因此,相对于本研究的当地大气降水线,其获得的降水样品总体上受到的蒸发影响较低。本研究建立的南昌市当地大气降水线与全国大气降水线 $\delta^2\text{H} = 7.48\delta^{18}\text{O} + 1.01$ ($r = 0.97$, $n = 928$) 也有明显差别^[18]。

刘萍^[24]报道了江西省抚州、宜春当地大气降水线(LMWL),它们分别为 $\delta^2\text{H} = 8.46\delta^{18}\text{O} + 5.09$ ($r = 0.93$, $n = 74$) 和 $\delta^2\text{H} = 8.28\delta^{18}\text{O} + 5.76$ ($r = 0.96$, $n = 93$)。与这些临近的城市相比,本研究建立的南昌市当地大气降水线方程斜率较小但截距偏大。沈业杰等^[25]报道了江西省鹰潭的当地大气降水线方

程, $\delta^2\text{H} = 8.61\delta^{18}\text{O} + 18.34$ ($r = 0.99$, $n = 72$)。相对这个地区,本研究建立的南昌市当地大气降水线方程在斜率和截距上都偏低(图 4)。这表明南昌市降水经历的二次蒸发作用较弱且其与上述区域在水汽来源上存在一定的差异^[37-38]。

表 3 列出了 2007~2017 年期间中国南方主要城市基于日降水同位素数据建立的当地大气降水线方程。此期间中国南方主要城市当地大气降水线斜率和截距都在 8 以上,明显高于西北地区降水线的值^[7]。这种南北之间的降水 H-O 稳定同位素组成差异主要是由水汽来源与影响机制不同所造成的,南方降水主要由西南和东南季风从太平洋和印度洋携带水汽所补给,而西北降水主要由西风带和极地气流从大西洋和北海等地携带水汽所供给^[6]。华南、华东地区主要城市当地大气降水线也呈现明显的区域特征,即华南及附近区域当地大气

表 3 2007~2017 年中国东南部主要城市基于日降水同位素数据建立的当地大气降水线方程

Table 3 Local meteoric precipitation line equations established based on daily precipitation isotopes of major cities in South and East China from 2007 to 2017

行政区	研究区	样品数/个	$\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ 关系线	相关系数	研究时间	数据来源
江西	南昌	93	$\delta^2\text{H} = 8.03\delta^{18}\text{O} + 12.1$	0.95	2015~2016	本文
江苏	高邮	121	$\delta^2\text{H} = 8.08\delta^{18}\text{O} + 14.98$	0.98	2015~2017	[41]
上海	上海	54	$\delta^2\text{H} = 8.1\delta^{18}\text{O} + 10.44$	0.96	2016~2017	[39]
安徽	安庆	154	$\delta^2\text{H} = 8.16\delta^{18}\text{O} + 11.67$	0.99	2015~2017	[42]
湖北	武汉	65	$\delta^2\text{H} = 8.13\delta^{18}\text{O} + 8.18$	0.94	2011~2013	[43]
湖南	长沙	170	$\delta^2\text{H} = 8.38\delta^{18}\text{O} + 17.3$	0.98	2010~2011	[44]
福建	厦门	60	$\delta^2\text{H} = 8.35\delta^{18}\text{O} + 12.52$	0.95	2012~2013	[20]
广东	广州	314	$\delta^2\text{H} = 8.46\delta^{18}\text{O} + 15$	0.96	2007~2009	[21]
	东江	81	$\delta^2\text{H} = 8.6\delta^{18}\text{O} + 16.15$	0.99	2017	[40]

降水线的斜率和截距高于华东及附近区域的值(表3)。这可能由两者气候环境差异所造成,尽管这些地区都位于季风区域,但总体上华南区域处于湿热状态而华东区域处于湿温状态^[39-40]。

使用日降水 H-O 稳定同位素数据建立的降水线方程通常忽略降水量权重的影响,对指示 1~2 年内的降水信息有效,但该时期月降水同位素加权值数据较少;如果要较准确描述 3 年以上多年平均降水信息,就需要利用月降水同位素数据(考虑日降水量的权重)来建立当地大气降水线方程^[7]。全球或全国大气降水线尽管已广泛地被用于水文循环研究中,但其反映的是全球或区域性的降水信息而不能准确指示局地或流域的降水信息。由于局地或流域的地理及气候特殊性,当地大气降水线更能准确描述这些区域的降水信息^[5]。因此,本研究基于 2015~2016 年日降水同位素数据建立的大气降水线方程能够反映本研究时期南昌市大气降水的基本特征,可为该时期南昌市水文循环研究提供参考,而且相对于全球或全国大气降水线更合适。

3.3 水汽来源辨析

由于蒸发的影响降水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 之间通常存在差值,Dansgaard^[9]称之为氘盈余($d\text{-excess}$), $d\text{-excess} = \delta^2\text{H} - 8\delta^{18}\text{O}$ 。氘盈余是衡量水汽蒸发过程中 H-O 稳定同位素因动力学分馏而偏离平衡的程度,可反映水汽形成时的水源地特征、热力平衡条件和降水时的地理气候条件,是示踪水汽来源的重要参数^[9,45]。

通常,来自内陆蒸发的降水 $d\text{-excess}$ 值 $>10\text{‰}$,而来自海洋蒸发的降水 $d\text{-excess}$ 值 $<10\text{‰}$ ^[5]。我国受季风影响区降水 $d\text{-excess}$ 值在冬季风期间大于 10‰ ,而夏季风期间小于 10‰ ^[33,46]。学者们对长沙、广州、上海等南方多地降水 H-O 稳定同位素的分析基本得到与上述相似的结果^[20,39,47-49]。不过,在水汽来源上不同地区存在一定的差异。例如由于降水 $d\text{-excess}$ 值及 $\delta^{18}\text{O}$ ($\delta^2\text{H}$) 冬半年较高而夏半年较低,一些学者认为珠江流域、长沙及上海等地降水来源在夏季为西南季风、东南季风所携带的海洋水汽而冬季为西风带的输送和内陆再蒸发水汽的补给^[39,47-48]。基于 $d\text{-excess}$ 和 HYSPLIT 模型的综合应用,一些学者指出江苏高邮水汽夏季来源于我国南海、印度洋及太平洋,而其它季节来源于亚欧大陆、大西洋、北冰洋水汽混合及局地蒸发^[41]。另一些学者发现,安庆地区春季水汽主要来源于大

陆性气团及局地蒸发水汽,而其它季节水汽受我国南海气团、印度洋西南季风及太平洋东南季风的影响^[42]。武茜茜等^[49]的氘盈余分析却表明福州地区夏季所有水汽均来自低纬度海洋,而其它季节部分来自北方大陆水汽。

如图 2 所示,南昌市 93 个日降水事件中,67 个日降水事件的 $d\text{-excess}$ 值大于 10‰ ,大部分集中在 2015 年 11 月至 2016 年 5 月。月尺度上,降水 $d\text{-excess}$ 值在 2015 年 11 月至 2016 年 3 月明显高于 10‰ ,4~7 月接近 10‰ ,9~10 月等于 10‰ ,而 8 月明显低于 10‰ (图 2)。季节上,降水 $d\text{-excess}$ 值冬春季明显高于 10‰ 而夏秋季接近 10‰ (表 1)。南昌市降水 $d\text{-excess}$ 的季节特征与已有研究相似。如图 5a 所示,南昌降水样品点落在南京、长沙、福州、香港及昆明的范围之内,与乌鲁木齐、张掖及包头的不同。同时,南昌降水 H-O 稳定同位素值呈现雨季低、非雨季高的月变化模式,与南京、长沙、福州、香港及昆明的相似(图 5b),与乌鲁木齐、张掖及包头等西北地区的差异明显。由此推测,与南方其它区域一样,南昌市降水冬春季似乎也来自西风带、极地气流及局地蒸发而夏秋季来自低纬度的海洋水汽。HYSPLIT 模型结果的统计分析表明(图 6),2015~2016 年期间,南昌市冬季以西和西南风向为主,春季和夏季以西南和南向风为主,秋季主要为东南至东北风向(图 6a)。综合 $d\text{-excess}$ 值和 HYSPLIT 模型结果的分析,本研究认为,2015~2016 年期间,南昌市秋季降水与东南季风携带的西太平洋水汽有关;夏季降水以东南季风携带的南太平洋水汽和西南季风携带的印度洋水汽为主;冬季降水除了西南季风携带水汽供给之外还存在西风带、北方及局地水汽的加入;春季降水以西南和东南季风携带的水汽补给及局地蒸发为主,也接受少量的北方水汽补给。如图 6b 所示,近地面 10 m 高度处的风向与 HYSPLIT 模型统计的 1 000 m 高度处风向则有差异。造成这种差异的原因可能是近地面风向受诸如地形、高楼等多种因素的干扰。

4 结论

2015~2016 年期间南昌市大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 及氘盈余($d\text{-excess}$)值的范围分别为 $-12.76\text{‰} \sim 2.78\text{‰}$ 、 $-91.47\text{‰} \sim 28.66\text{‰}$ 和 $-17.87\text{‰} \sim 30.66\text{‰}$ 。月尺度上,降水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 值在七月最低而五月最高, $d\text{-excess}$ 值在八月最低而在二月最高。季

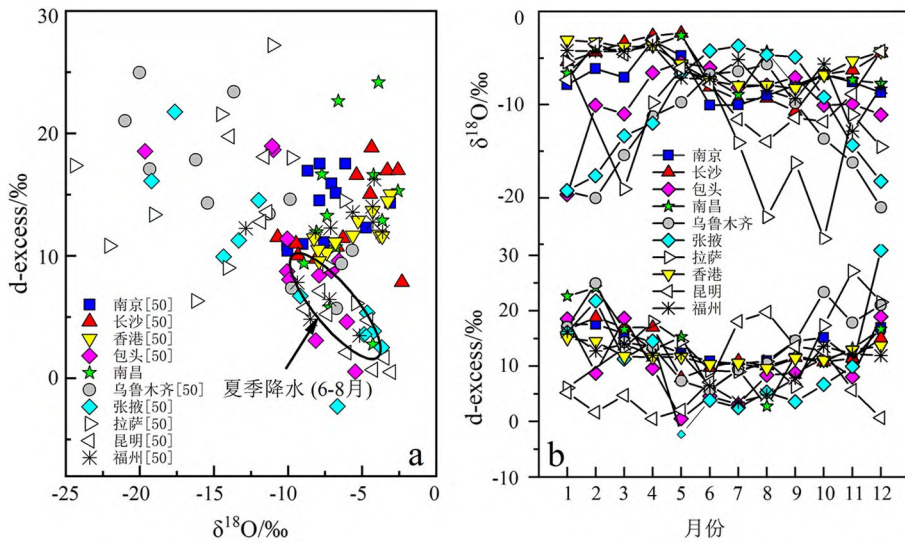


图5 南昌市和其它典型地区降水 $\delta^{18}O$ 和氘盈余值 (*d-excess*) 月变化特征

Fig. 5 Monthly variations of $\delta^{18}O$ and *d-excess* of precipitation in Nanchang and other typical areas

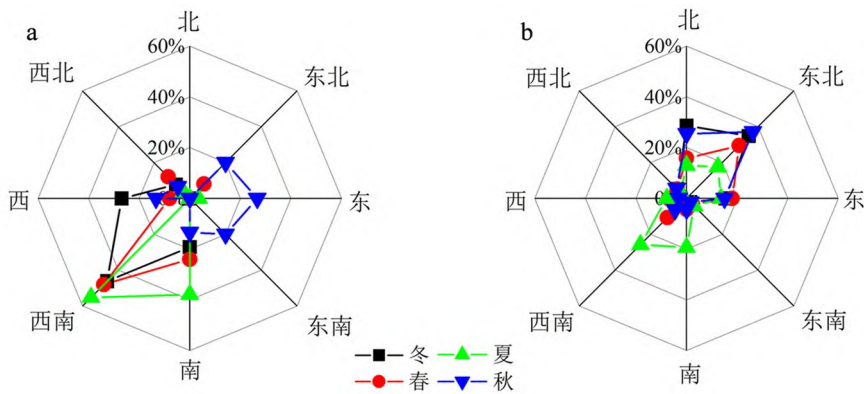


图6 2015~2016年各季节南昌市基于HYSPLIT模型的1000 m(a)和基于近地面观测数据的10 m(b)高度各方向风向频率百分比

Fig. 6 The percentage of wind direction frequency in each direction at 1000 m height based on HYSPLIT model (a) and at 10 m height based on near-surface monitoring data (b) in Nanchang during 2015 and 2016

节尺度上,降水 $\delta^{18}O$ 和 δ^2H 值春季偏正而其它季节偏负。日降水 H-O 稳定同位素组成与主要气象因子没有明显的相关关系,受多个因子的综合影响,而氘盈余值 (*d-excess*) 与气温有较明显的负相关关系,指示水汽源区的气象水文信息。建立的当地大气降水线方程为 $\delta^2H = 8.03\delta^{18}O + 12.1$,与全球降水线接近,是区域水循环研究的重要参考。不同季节水汽来源差异明显。降水冬季来自西南季风、西风带、极地气流及局地蒸

发的水汽,春季除以西南和东南季风及局地蒸发的水汽为主之外接受少量极地水汽补给;夏秋季主要与东南和西南季风携带的太平洋和印度洋水汽有关。因此,今后南昌市水资源管理工作宜针对不同季节调整节水用水及防洪方案。尽管本研究成果是基于较短时间尺度获得的,但仍可作为区域降水水汽长周期变化研究的有益补充,也可为南方城市水循环研究及洪涝灾害防治提供基础资料。

参 考 文 献

- [1] Wu H W, Huang Q, Fu C S, et al. Stable isotope signatures of river and lake water from Poyang Lake, China: Implications for river-lake interactions[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 592: 125619.
- [2] 朱建佳, 陈辉, 巩国丽. 柴达木盆地东部降水氢氧同位素特征与水汽来源[J]. *环境科学*, 2015, 36(8): 2784-2790.
- [3] Zheng F W, Rao W B, Chu X D, et al. Chemical and sulfur isotopic characteristics of precipitation in a representative urban site, South China: Implication for anthropogenic influences[J]. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 2020, 13(3): 349-359.
- [4] Clark I D, Fritz P. *Environmental isotopes in hydrogeology*[M]. New York: Lewis publishers, 1997.
- [5] 顾慰祖. *同位素水文学*[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [6] Araguás-Araguás L, Froehlich K, Rozanski K. Stable isotope composition of precipitation over Southeast Asia[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1998, 103(D22): 28721-28742.
- [7] Rao W B, Zhang W B, Yong B, 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.
- [8] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters[J]. *Science*, 1961, 133(3465): 1702-1703.
- [9] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation[J]. *Tellus*, 1964, 16(4): 436-468.
- [10] Stumpp C, Klaus J, Stichler W. Analysis of long-term stable isotopic composition in German precipitation[J]. *Journal of Hydrology*, 2014(4), 517: 351-361.
- [11] 田立德, 蔡忠银, 邵莉莉, 等. 亚洲季风区降水中稳定同位素气候意义研究进展[J]. *第四纪研究*, 2021, 41(3): 856-863.
- [12] 常昕, 章新平, 刘仲葵, 等. 长沙降水中稳定同位素的昼夜差别[J]. *热带地理*, 2021, 41(3): 635-644.
- [13] 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.
- [14] 田立德, 姚檀栋, 孙维贞, 等. 青藏高原南北降水中 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 关系及水汽循环[J]. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 2001, 31(3): 214-220.
- [15] 宋献方, 柳鉴容, 孙晓敏, 等. 基于 CERN 的中国大气降水同位素观测网络[J]. *地球科学进展*, 2007, 22(7): 738-747.
- [16] Liu J R, Song X F, Sun X M, et al. Isotopic composition of precipitation over Arid Northwestern China and its implications for the water vapor origin[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2009, 19(2): 164-174.
- [17] 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.
- [18] Liu J R, Song X F, Yuan G F, et al. Stable isotopic compositions of precipitation in China[J]. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 2014, 66(1): 22567.
- [19] Zhang M J, Wang S J. A review of precipitation isotope studies in China: Basic pattern and hydrological process[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2016, 26(7): 921-938.
- [20] 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.
- [21] 郭政昇, 王娟, 赵培. 珠江流域大气降水稳定性氢氧同位素特征[J]. *水文*, 2017, 37(2): 78-82.
- [22] Li Z J, Li Z X, Yu H C, et al. Environmental significance and zonal characteristics of stable isotope of atmospheric precipitation in arid Central Asia[J]. *Atmospheric Research*, 2019, 227: 24-40.
- [23] 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.
- [24] 刘萍. 江西省酸雨的氢、氧、硫同位素特征及成因探讨[D]. 抚州: 东华理工大学, 2012.
- [25] 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.
- [26] Fu L, Wang G C, Yi L X, et al. Identifying locations and sources of groundwater discharge into Poyang Lake (eastern China) using radium and stable isotopes (deuterium and oxygen-18)[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 740(3465): 140163.
- [27] 熊丝, 陆宝宏, 程增辉, 等. 南昌市主要气候要素变化特征及其预测[J]. *水电能源科学*, 2017, 35(3): 15-19, 39.
- [28] 郭建明, 郑博福, 林伟, 等. 近 26 年来南昌市气候变化特征[J]. *安徽农业科学*, 2010, 38(36): 20978-20981.
- [29] 唐玉章, 许东蓓, 苟玉清. 2018 年初冬成都市重污染事件气象条件分析[J]. *地球科学前沿*, 2019, 9(7): 627-638.
- [30] 马京津, 于波, 高晓清, 等. 大尺度环流变化对华北地区夏季水汽输送的影响[J]. *高原气象*, 2008, 27(3): 517-523.
- [31] 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. *天气学原理和方法*[M]. 第三版. 北京: 气象出版社, 2000.
- [32] 刘雪梅, 张明军, 王圣杰, 等. 中国降水云云底高度的估算和分析[J]. *气象*, 2016, 42(9): 1135-1145.
- [33] 卫克勤, 林瑞芬. 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): 32-41.
- [34] Xie L H, Wei G J, Deng W F, et al. Daily $\delta^{18}\text{O}$ and δD of precipitations from 2007 to 2009 in Guangzhou, South China: Implications for changes of moisture sources[J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 400(3/4): 477-489.
- [35] Kong Y L, Wang K, Pu T, et al. Nonmonsoon precipitation dominates groundwater recharge beneath a monsoon-affected glacier in Tibetan Plateau[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2019, 124(10): 10913-10930.
- [36] 饶文波, 李焱炜, 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.
- [37] 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.
- [38] 马潜. 基于降水同位素样品的兰州地区水汽来源研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2013.
- [39] 张峦, 朱志鹏, 杨言, 等. 上海地区大气降水中氢氧同位素特征及其环境意义[J]. 地球与环境, 2020, 48(1): 120-128.
- [40] 谢林环, 江涛, 曹英杰, 等. 东江下游大气降水氢氧同位素特征及水汽来源[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2020, 59(1): 86-95.
- [41] 隋明波, 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.
- [42] 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.
- [43] 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.
- [44] 吴华武, 章新平, 孙广禄, 等. 湖南长沙地区大气降水中稳定同位素特征变化[J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(5): 540-546.
- [45] Welp L R, Lee X H, 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(3): 2011GB004246.
- [46] Posmentier E S, Feng X H, Zhao M X. Seasonal variations of precipitation $\delta^{18}\text{O}$ in eastern Asia[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2004, 109(D23): D23106.
- [47] 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.
- [48] 杜康, 张北赢. 珠江流域降水稳定同位素特征及水汽来源[J]. 水文, 2020, 40(6): 75-82.
- [49] 武茜茜, 陈粉丽, 周鑫, 等. 郑州与福州降水同位素特征及水汽来源对比分析[J]. 环境化学, 2022, 41(1): 125-134.
- [50] International Atomic Energy Agency, World Meteorological Organization. Global network for isotopes in precipitation (GNIP) [DB]. [2016-12-22]. <https://nucleus.iaea.org/wiser/gnip.php>.

The Stable H-O Isotope Characteristic of Atmospheric Precipitation and the Moisture Source Tracing in Nanchang City

ZHANG Haifa¹, ZHENG Fangwen², YANG Haiquan³

- (1. Technology Advisory of Pearl water Resources Commission (Guangzhou) Co., Ltd, Guangzhou 510610, China;
2. College of Hydraulic and Ecological Engineering, Nanchang Institute of Technology College, Nanchang 330099, China;
3. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China)

Abstract: Nanchang city is located in the middle and lower reaches of the Yangtze River Basin, it is close to Poyang Lake, the largest freshwater lake in China, with hydrological network well-developed. In order to deeply understand the moisture source and transport of atmospheric precipitation in Nanchang and provide basic data for regional water cycle research, this study collected 93 daily precipitation event samples in Nanchang from 2015 to 2016 to investigate the stable H-O isotope characteristics and influencing factors of precipitation and attempted to clarify the water vapor source of precipitation. The results showed that: (1) the ranges of precipitation $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ were large, which was more positive in spring than in other seasons, and were not restricted by a single meteorological factor, but resulted from the mutual influences of multiple factors; (2) the local meteoric water line equation was $\delta^2\text{H} = 8.03\delta^{18}\text{O} + 12.1$, and the stable H-O isotope fractionations were in relatively balance states, which can provide a reliable reference for the study of regional water cycle. The comprehensive analyses of the *d*-excess values and HYSPLIT model results further showed that the precipitation in summer and autumn was mostly related to the water vapor in the Pacific and Indian Oceans carried by the southeast and southwest monsoons, while the precipitation in winter and spring came from a wide range of sources, including the water vapor from monsoons, westerly zone, polar airflow and local evaporation. The findings of this study help to complete the theory of the atmospheric moisture cycle in South China and are also of practical significance for local water resource management and flood control and disaster alleviation.

Key words: southern metropolis; atmospheric precipitation; stable H-O isotopes; HYSPLIT model; moisture sources