

庐山地区大气降水中稳定同位素变化特征

陈琦^{1,2}, 郭锦荣^{1,2}, 李超^{1,2}, 王翰琨^{1,2}, 吴春生^{1,2,3},
邓文平^{1,2,3}, 刘苑秋^{1,2,3}, 叶清^{1,2,3}, 李晓东^{1,2,3}

(1. 江西农业大学林学院, 南昌 330045; 2. 鄱阳湖流域森林生态系统保护与修复实验室, 南昌 330045;
3. 江西庐山森林生态系统定位观测研究站, 九江 332900)

摘要: 氢氧稳定同位素技术被广泛用来研究水循环过程中的水汽来源、水量平衡及不同水体间的补给关系。以2016年4月至2017年4月在庐山地区三个不同研究点(庐山西北面莲花镇, 山顶牯岭镇和东南面海会镇)采集的102个次降水样品同位素资料为基础, 应用线性回归分析和对比分析等方法, 对庐山地区大气降水中氢氧稳定同位素和氡盈余的时空分布特征及大气水汽来源进行了研究。结果发现: 庐山地区夏半年降水中的稳定同位素值 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值(-6.1%)小于冬半年(-4.8%); 氢氧同位素特征和氡盈余呈现明显的季节差异; 平均氡盈余值(10.6%)大于全球大部分地区的评估值(10.0%); 当地大气降水线(LMWL) $\delta\text{D}=7.45\delta^{18}\text{O}+8.36$ 与全球大气降水线(GMWL) $\delta\text{D}=8\delta^{18}\text{O}+10$ 相比, 其斜率和截距均偏小。结合HYSPLIT后向轨迹模型分析同位素特征发现, 庐山地区大气水汽夏半年主要来源于低纬度南海和印度洋, 冬半年来自于干燥的华北和西北内陆; 局地水汽影响和地理位置差异导致了降雨同位素特征的空间差异性。本研究可为今后展开庐山地区水循环过程的研究提供科学依据。

关键词: 庐山; 大气降水; 稳定同位素; 氡盈余; HYSPLIT模型

地球水循环中一个重要的环节就是大气降水, 而水汽来源是水文学科的热点关注对象^[1]。自然水体中的氢氧稳定水同位素所占的比例虽然小, 但对环境变化的响应却十分敏感^[2-3], 这样的特征使得它们在气候学、水文学等学科的研究中具有重要的应用价值^[4-6]。平衡和动力学同位素分馏机制是大气降水中氢氧稳定同位素变化的主要原因^[3], 同时由于水分的蒸发和凝结过程中伴随着分馏作用导致自然界中各种水源稳定同位素的组成差别很大, 所以同位素可以作为理想的天然示踪剂。目前, 研究者大多利用氢氧稳定同位素进行大气水汽来源追踪。中国研究区域主要分布于西北干旱区、西南地区、东部季风区、长江流域等地区^[1,7-10]; 研究内容主要是大气降水氢氧同位素组成、水汽来源、变化特征和异常现象等。研究区由于气象、地形条件的不同, 导致水汽来源差异较大, 西北干旱区^[9-11]中降水中蒸发强烈, 干旱区有两条水汽路径分别为西风带输送的大西洋海水源水汽以及极地北冰洋地区水汽。作为中国季风区重要组成的西南季风区^[12-14], 其水汽包括南海、阿拉伯海以及跨赤道气流等来源, 并向长江中下游和东亚输送。中亚热带地区如长沙^[15]、武汉^[16]、鹰潭^[17]、昆明^[18]等地的研究结果表明, 西南季风和东南季风输送的海

收稿日期: 2018-11-28; 修订日期: 2019-02-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(31460185); 江西省教育厅项目(GJJ60396); 江西省科技厅项目(20171BABZ04025)

作者简介: 陈琦(1993-), 女, 山西忻州人, 硕士, 主要从事生态水文及同位素水文研究。E-mail: cyyawll@163.com

通讯作者: 邓文平(1987-), 男, 湖北随州人, 助理研究员, 主要从事生态水文及同位素水文研究。

E-mail: deng_wen_ping@126.com

洋性气团是夏季降水的主要水汽来源,特点是降水中重同位素贫化,西风带输送的大陆性气团是冬季降水的主要水汽来源,特点是降水中重同位素富集。有些地区由于独特的地理位置使得其水汽来源较为复杂,例如腾冲^[19],该地区位于西南季风通道上,受南亚季风、高原季风以及东亚季风的错综复杂影响。马潜等^[20]利用氢氧稳定同位素信息追踪大气水循环路径,发现东南部地区不同区域水汽贡献率介于1.4%~4.1%之间,平均水汽贡献为2.2%。张应华等^[21]发现受水库水体蒸发水汽的影响,黑河流域降水中氢氧同位素存在空间差异,位于水库附近的区域站点受到的局地水体蒸发的影响较大,而海拔较低区域站点的降水来源于局地水体蒸发的水汽微弱。这些研究都强调了地理因素对水汽再循环程度的影响。

庐山拥有特殊的地形,也常成为暴雨中心,很多学者对其进行研究。例如支树林^[22]在论文中提到除气团本身携带的大量水汽外,庐山常成为暴雨中心的根本原因是庐山迎风坡的地形抬升作用与鄱阳湖水域充沛的水汽,这也是庐山常年产生云雾的原因。桑博^[23]也对庐山雨水和云雾水的化学元素做了详细的分析,指出庐山地理位置的特殊,以及多雾的特征。基于此,本研究利用庐山降水氢氧稳定同位素的组成与变化特征来揭示大气降水的时空变化规律,以此来推断降水的水汽来源及水源地的气象条件。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

庐山(115°52'~116°8'E, 29°26'~29°41'N)位于江西省的北部,海拔为1474 m,地形较为复杂,东西窄,南北长,常年雾气缭绕。庐山是一个块状山,构成的岩层也较复杂,主要为变质岩^[24]。该地区属于典型的亚热带季风气候,由热带海洋气团与大陆气团交替控制,特点是夏季湿润多雨,冬季温和少雨。根据庐山1954-2016年的降水量和温度数据可知月均温为12.8℃,最高温出现在7月为23.1℃,最低温0.2℃,出现在1月;月降水量为216.4 mm,6月份降水最多为484.0 mm,11月份降水最少为53.9 mm(图1)。

1.2 水样采集与分析

2016年4月至2017年4月以庐山西北面的莲花镇(29°38'27.09"N, 115°58'47.11"E)、山顶牯岭(29°34'17.33"N, 115°58'37.05"E)和东南面海会镇(29°32'29.32"N, 116°03'16.32"E)为主要的采样点(图2),防止其因分馏而引发的数据不准确,降雨以后立即采集次降雨。利用500 ml的塑料瓶连接直径为10 cm的漏斗,对每次降水进行及时收集采样,为了防止雨水样品的蒸发,在漏斗内放置一颗乒乓球,将其装入螺纹塑料瓶内,并且用Parafilm膜进行封口处理。放置在冰箱内进行冷藏处理,防止由于分馏导致同位素比值发生变化。

将收集的水样先摇匀,然后用10 ml的一次性注射器将水样吸出,再在注射器头上

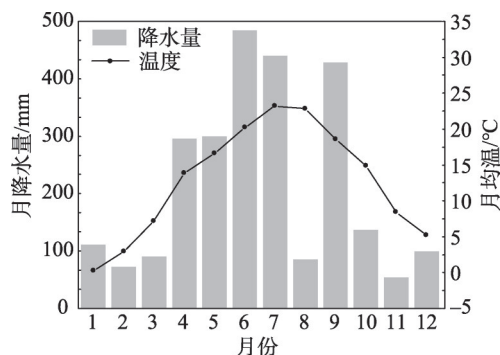


图1 庐山的月均降水量和平均温度

Fig. 1 The monthly average precipitation and average temperature of Mount Lu

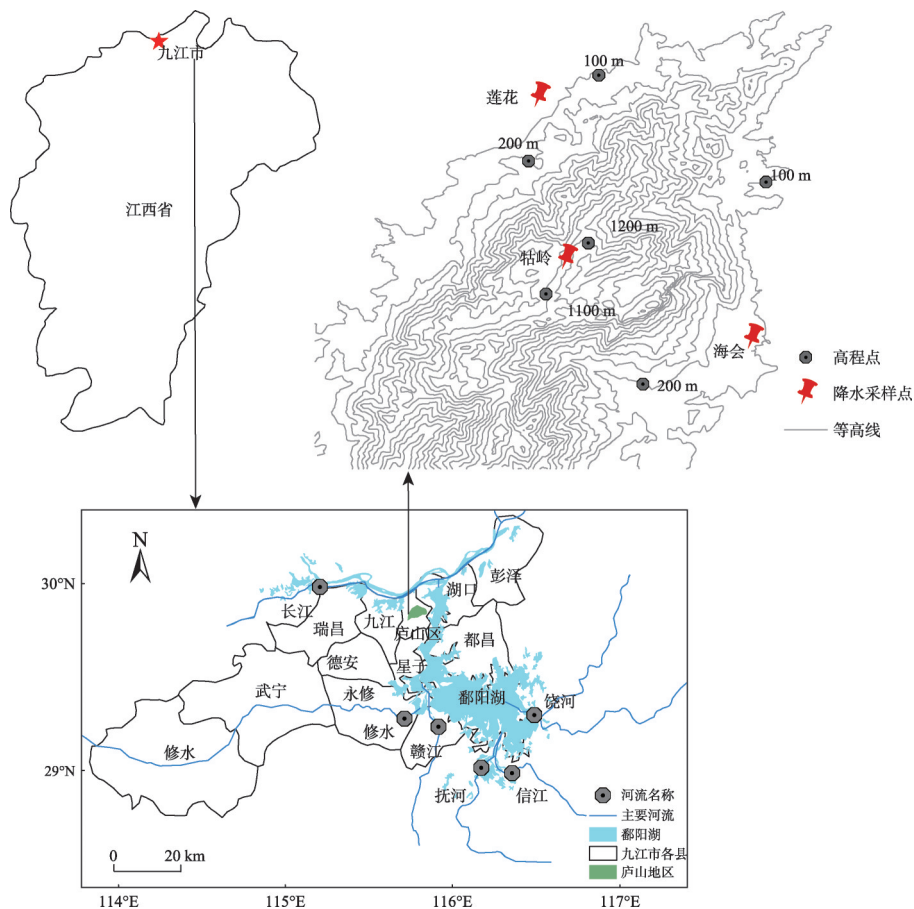


图2 采样点位置

Fig. 2 Position of sampling points

部安装一个 $0.22\ \mu\text{m}$ 的针式滤膜, 将水样注射到已经用蒸馏水润洗烘干的 2 ml 进样瓶中, 且及时盖上瓶盖待分析。处理好的水样带到江西农业大学森林培育重点实验室内进行分析测定, 注射进同位素质谱仪 (Delta v Advantage) 中进行水分同位素分析, 分析误差 δD 小于 2‰、 $\delta^{18}\text{O}$ 小于 0.2‰。

氢氧稳定同位素组成用 δ 表示, 其中, δ 是指样品的同位素比值相对于标准物质同位素比值的千分值 (parts per thousand, per mil, ‰)。

$$\delta = (R_{\text{samp}}/R_{\text{std}} - 1) \times 1000 \quad (1)$$

式中: R_{samp} 表示样品中重轻同位素丰度之比; R_{std} 表示标准物质的重轻同位素丰度之比, 一般采用维也纳标准平均海水 (Vienna Standard Mean Ocean Water, VSMOW) 作为标准样品。降水同位素的月平均值为降水量的加权平均值 (δt), 计算方法如下:

$$\delta t = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \delta_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (2)$$

式中: P_i 降水量; δ_i 为同位素值。

1.3 数据处理与分析

本文运用 Origin 8.5 线性回归分析方法得到庐山大气降水线方程, 用相关分析的方法

得到降水量、温度分别与降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 之间的相关关系,其中温度和降水量数据是从中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)下载获得。

用Origin 8.5、ArcGIS软件作图。由于降水中 δD 与 $\delta^{18}\text{O}$ 有很好的相关性,避免分析结果冗余,所以数据分析主要以 $\delta^{18}\text{O}$ 为主。

2 结果分析

2.1 庐山降水量、温度规律

庐山地区大气降水存在明显的季节变化特征(图3),降水量季节分布不均,集中分布在雨季(4-9月)。该地区年降水量为2702.2 mm,雨季降水量为2033.2 mm,占全年降水量的75.2%,旱季降水量相对较少为669 mm,占全年降水量的24.8%;雨季一共有183天,雨天有101天,占整个雨季的55.0%,其中日降水量最大达到了184.1 mm。该区域温度的变化范围是 $-4.5\sim 26.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,最高温为 $26.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,出现在2016年7月25日,最低温出现在2017年2月9日为 $-4.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,温度呈季节变化。

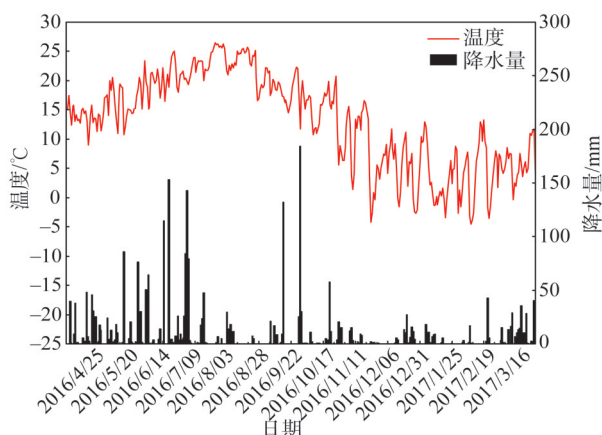


图3 庐山地区2016年4月至2017年4月降水量和温度随时间的变化

Fig. 3 Variation of precipitation and temperature with time from April 2016 to April 2017 in Mount Lu area

2.2 大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 d 的季节变化

为评价地区降水因地理与气候因素偏离全球降水线的程度,Dansgaard^[25]定义了“氕盈余(d)”,即 $d=\delta\text{D}-8\delta^{18}\text{O}$ 。从庐山地区大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 d 随时间的变化可以看出,大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 d 的波动幅度较大,且变化规律相似。 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化范围为 $-12.3\text{‰}\sim 0.1\text{‰}$,平均值为 -5.7‰ ,标准差为 $\pm 2.9\text{‰}$,相比于中国大气降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ ($-50.0\text{‰}\sim 10.0\text{‰}$)^[26],落在了其变化范围之内。

d 值介于 $-15.5\text{‰}\sim 33.2\text{‰}$ 之间,平均值为 10.6‰ ,与世界大部分地区大气降水中的 d 值(10.0‰)略高,且绝大多数 d 值大于 10.0‰ ,这与地中海、里海、咸海及美国五大湖附近区域的降水氕盈余相似^[4,27],即大面积地表水体蒸发水汽与大气水汽(上风方向)混合参与降水过程。为了更好地看出其中的季节变化规律,根据庐山地区1954-2016年降水量以及气温的数据将4-9月划分为夏半年,10月到次年3月划分为冬半年^[17]。从图4可以看出,冬半年的 $\delta^{18}\text{O}$ (-4.8‰ , $n=29$, $P=0.05$)高于夏半年(-6.1‰ , $n=53$),显示出季风区降水的特点,由冬夏半年降水水汽来源及蒸发条件差异导致;冬半年 d 值(10.0‰ , $n=29$, $P=0.684$)大于夏半年(9.5‰ , $n=53$)。邻近的鄱阳湖湿地以及鹰潭地区大气降水同位素特征以及氕盈余也呈现出相似的变化^[17,28],这与该地区处在亚热带季风区有着很大的关系,不同季节降水水汽来源及蒸发条件的差异导致,夏半年主要受海洋性水汽来源影响,空气湿润,冬半年受极地大陆性气团控制,盛行西风,空气干燥。

2.3 庐山大气降水线方程

庐山地区大气降水中氢氧稳定同位素值变化幅度较大： δD 的变化范围为 -93.5‰ ~ 8.4‰ ， $\delta^{18}O$ 的范围为 -12.3‰ ~ 0.1‰ ，相比于中国大气降水中的 δD (-210.0‰ ~ 20.0‰)和 $\delta^{18}O$ (-24.0‰ ~ 2.0‰)^[29]，庐山大气降水的氢氧稳定同位素比值的变化范围在该范围内。应用大气降水中 δD 和 $\delta^{18}O$ 之间的关系，又称为大气降水线方程，对于研究水循环过程具有十分重要的意义。一般来说，大气越干热，大气降水线的斜率就越小，截距也越小^[30]，这是由于凝结物在未饱和大气中降落而造成重同位素蒸发富集^[18]。根据 δD 和 $\delta^{18}O$ 数据求得庐山大气降水线方程： $\delta D = 7.45\delta^{18}O + 8.36$ ，其中 $n=102$ ， $R^2=0.83$ (图5)，与全球大气降水线 ($\delta D = 8\delta^{18}O + 10$)、鹰潭大气降水线^[17] ($\delta D = 8.61\delta^{18}O + 18.34$) 以及鄱阳湖大气降水线^[28] ($\delta D = 8.99\delta^{18}O + 11.52$) 方程相比，斜率和截距均偏小。在干燥少雨的地区，雨滴在相对干燥的大气条件下发生二次蒸发从而导致斜率和截距偏低；而湿润多雨的区域相反^[28]。庐山、鹰潭、鄱阳湖同属于季风区，气候湿润多雨，这样的条件使得二次蒸发微弱，因此导致其变小的原因主要是来自局地蒸发。为了可以更直观地了解哪个季节的局地蒸发最强烈，对春季 (3-5月)、夏季 (6-8月)、秋季 (9-11月)、冬季 (12-2月) 四季的大气降水线进行分析 (图6)，从图中可以看出夏季的斜率最小，也就是说夏季的局地蒸发最强，原因可能是夏季温度高，降雨量大，而春季的局地蒸发最弱，因为春季降雨量大，温度低，相对湿度大，蒸发强度较夏季弱。

2.4 HYSPLIT模型与庐山大气水汽来源

大气气团传输途径通常运用美国国家海洋和大气管理局开发的拉格朗日积分轨迹模型 (HYSPLIT) (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model, <http://readyarl.noaa.gov/HYSPLIT.php>) 的后向轨迹模型进行模拟研究^[31]，美国国家环境预报中心 NCEP (National Centers for Environmental Prediction) 为该模型提供气象资料。降水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 变化不仅受局地气象要素的影响，大气降水的水汽来源与输送过程对降水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 影响更为直接^[32]。鉴于此分别选取冬、夏半年有代表性的降水事件一共6组，利用HYSPLIT后向轨迹模块追踪每次降水事件的水汽来源及运移路径，分别模拟了庐山地

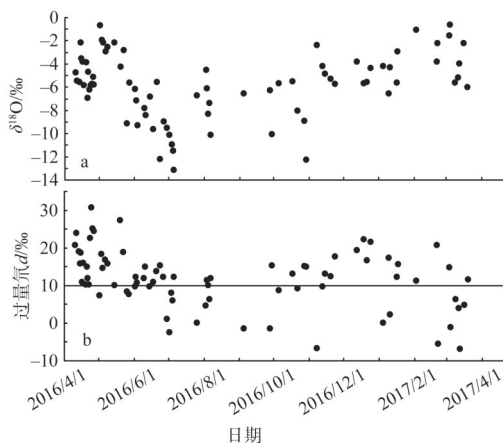


图4 庐山大气降水中 $\delta^{18}O$ 和 d 的季节变化

Fig. 4 Seasonal variation of $\delta^{18}O$ and d in precipitation in Mount Lu

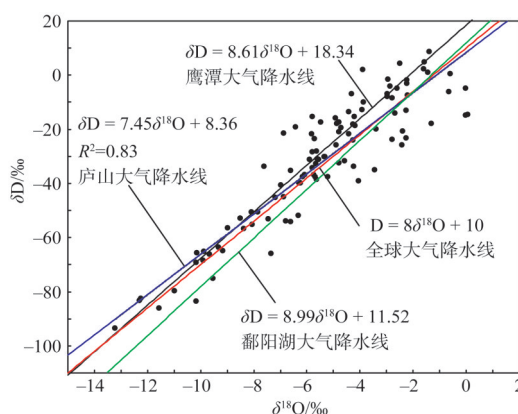


图5 庐山地区、鄱阳湖以及鹰潭大气降水中的 δD 与 $\delta^{18}O$ 的关系

Fig. 5 The relationship between δD and $\delta^{18}O$ in the precipitation in the Mount Lu Area, Poyang Lake and Yingtan

区上空海拔 500 m、2000 m 和 3000 m 在降水 120 小时之前大气气团后向传输途径。

研究发现由 d 值的季节变化可知, 季风区的 d 值存在明显的冬半年高夏半年低, 的季节变化特征。在夏半年, 庐山地区水汽主要来源于低纬度海洋, 降水过程中受到的蒸发作用弱, 随着降水的进行使得降水中氢氧稳定同位素比值低, d 值较小; 在冬半年, 由于受到中国华北地区、寒冷干燥的亚欧大陆等气团以及局地蒸发的影响, 使得降水中的氢氧稳定同位素比值和 d 值较大。这个结论同时在后向轨迹模型 (HYSPLIT) (图 7) 中也得到了证实。

图 7a~图 7c 分别为冬半年 1 月 5 日降水事件海会、牯岭和莲花站的水汽运移轨迹结果, 图 7a~图 7c 可以明显看出, 局地水汽贡献了该次降水事件; 图 7d~图 7f 则为夏半年海会站 3 组降水事件的水汽运移路径结果, 图 7a、图 7g、图 7h 为冬半年海会站的 3 组降水事件的水汽运移路径结果。可以看出 HYSPLIT 后

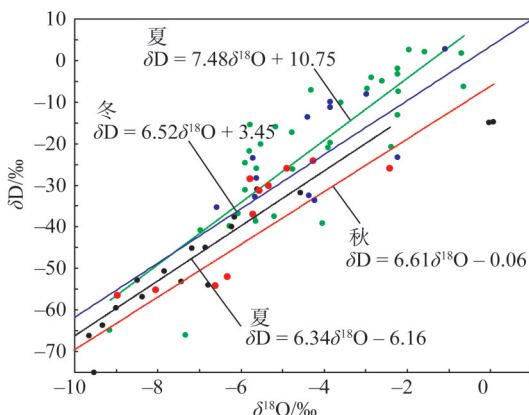
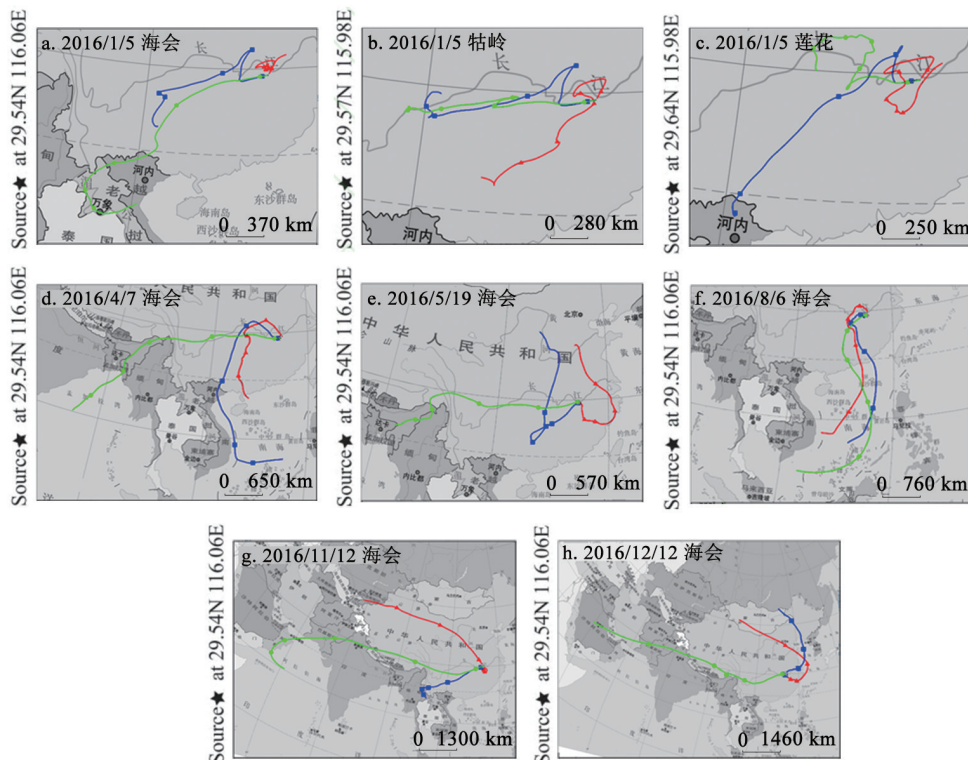


图 6 庐山地区四季大气降水线的比较

Fig. 6 Comparison of local meteoritic water line of four seasons in Mount Lu



注: 本图基于国家测绘地理信息局标注地图服务网站下载审图号为 GS(2016)2938 号标准地图制作, 底图无修改。图中红色线条代表 500 m, 蓝色线条代表 2000 m, 绿色线条代表 3000 m。

图 7 庐山地区不同时间水汽输送轨迹

Fig. 7 Backward trajectory of water vapor at different time in the Mount Lu region

向轨迹模型分析得出的水汽来源与该地区同位素的变化特征吻合。

2.5 降水同位素特征的空间异质性

图8和图9选择海会、牯岭和莲花站在4月11日至5月28日期间的大气降水线和4月11日至4月28日降水密集期 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化特征。根据HYSPLIT模拟结果,在此期间,三个站点上风方向大气水汽主要来源于南海,也有少量的西北内陆水汽(4月16日), $\delta^{18}\text{O}$ 值表现出相似的变化趋势,各站点 $\delta^{18}\text{O}$ 偶有起伏但总体趋于稳定,这也说明了在此期间稳定的水汽来源; $\delta^{18}\text{O}$ 值的大小表现为莲花>海会>牯岭,结合各点大气降水线斜率大小差异莲花(8.75)>海会(6.06)>牯岭(5.61),反映了局地水汽补充的差异性,莲花站降水线斜率略大于全球大气降水线,显示出湿润区的特点,因此其上风方向的大气水汽在此期间以海洋水汽为主;海会和牯岭站上风方向大气水汽源中混合了局地再循环的水汽,且牯岭站受局地水汽的影响最大。根据站点地理位置分析,是由于莲花背靠鄱阳湖,其受鄱阳湖水汽输送影响小,而此时相对湿度大,局地蒸发水汽中植被蒸腾水汽的贡献也不多;而海会站毗邻鄱阳湖,其上风方向大气水汽易受鄱阳湖水汽平流输送;而牯岭站位于庐山高海拔地带,来自鄱阳湖的水汽随地形抬升,低温冷凝,极易在此成云致雨。

2.6 大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的温度与降水量效应

由于牯岭站和海会站数据的缺失,因此选择莲花站进行降水量效应和温度效应的分析。庐山与别的地区不同,存在着反温度效应,却不存在降水量效应。从图10、图11可以看出,将降水中 $\delta^{18}\text{O}$ -温度(T)进行线性回归分析,降水中 $\delta^{18}\text{O}$ - T 线性方程为: $\delta^{18}\text{O} = -0.188T - 2.298$ ($R^2 = 0.210$, $n = 41$, $P = 0.003$);将降水中 $\delta^{18}\text{O}$ -降水量(P)进行线性回归分析,降水中 $\delta^{18}\text{O}$ - P 线性方程为: $\delta^{18}\text{O} = 0.234P - 7.000$ ($R^2 = 0.162$, $n = 41$, $P = 0.01$)。可以发现,该地区不存在降水量效应,反而存在着显著的反温度效应。究其原因,是由于特殊的地形导致四季起雾。雾水是维持多雾生态系统水分输入不可缺少的因素^[33],凝结时的温度差异是导致雾水中重同位素富集的根本原因^[34]。学者对雾水的认识大多集中在雾水物理化学性质。刘文杰等^[35]指出,对于热带、亚热带山地森林等森林类型来说,雾是必不可少的环境因子,因此在多雾地区研究森林水循环时不可忽视雾水对其的影响。在研究中发现,雾水发生在近地表且具有早期降水的特点,重同位素富集,同位素

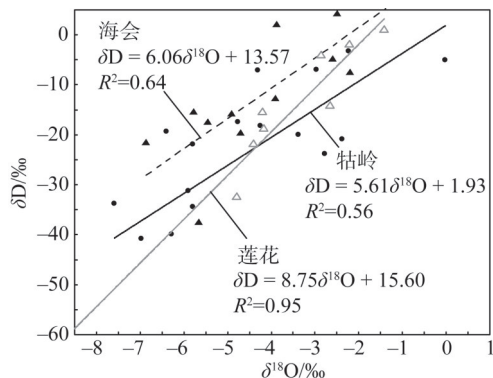


图8 海会、牯岭、莲花的大气降水线

Fig. 8 Local meteoritic water line of Haihui, Guling and Lianhua stations

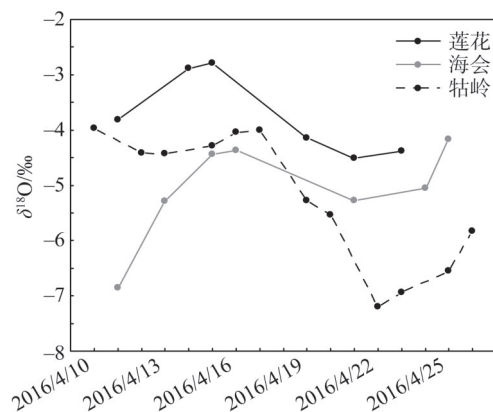


图9 4月11日至4月28日降水密集期 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化特征

Fig. 9 Variation characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ values during and precipitation intensive period from April 11th to April 28th

值偏大。

雾水是水汽冷凝形成,那么随着温度的增加,越不利于雾的形成,所以雾水的减少导致降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 偏小;随着降水量的增加,为雾的形成提供了充沛的水分条件,有利于雾的形成,所以雾水的增加导致了 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 偏大。通过图10、图11的结论以及分析可知,雾水的存在会对降水量效应以及温度效应产生显著影响,因此在对多雾地区进行水循环研究时,要考虑并通过一些手段来减少雾水的影响。许多学者^[36-37]在文中提到,早上9点之前和傍晚雾水最浓,采样时要避开这个时间点,如果条件允许,降雨一结束就立即采集样品,不要放置过夜再去采集。

3 结论

(1) 庐山地区 $\delta^{18}\text{O}$ 和氡盈余 d 值的变异性较大,分别是 $-12.3\text{‰} \sim -0.1\text{‰}$ 和 $-15.5\text{‰} \sim 33.2\text{‰}$ 。庐山地区大气降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 d 值均具有明显的季节性差异。 d 值也呈现显著的季节性差异且平均 d 值大于全球大部分地区 10.0‰ ,反映了地表水体鄱阳湖区蒸发水汽参与了降水过程。

(2) 基于 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 以及 d 值的特征,并结合HYSPLIT模型模拟,确定了庐山地区的主要水汽来源,在夏半年主要源自低纬度南海和印度洋,在冬半年主要源自华北地区和西北干燥的内陆地区。

(3) 庐山地区的大气降水线方程为 $\delta\text{D}=7.45\delta^{18}\text{O}+8.36$ ($n=102$, $R^2=0.83$)与全球降水线方程 $\delta\text{D}=8\delta^{18}\text{O}+10$ 相比,斜率和截距均偏小。反映出该地区在降水过程中受局地蒸发影响,分析认为由于本地湿润多雨,雨滴降落过程中受二次蒸发影响较小,而更多是受到邻近鄱阳湖区水体蒸发以及局地水汽蒸发的强烈影响导致的。

(4) 由于受鄱阳湖水汽以及特殊地理位置差异的影响,庐山地区大气降水 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值,具有显著的空间差异性,且高海拔区受鄱阳湖水汽影响最大。

(5) 该地区降水量效应不明显,且与温度呈负相关性,即表现为反温度效应,分析认为庐山地区雾水对当地降水有一定的贡献,在该地区水循环的研究中不容忽视。

参考文献(References):

- [1] 张贵玲,角媛梅,何礼平,等.中国西南地区降水氢氧同位素研究进展与展望.冰川冻土,2015,37(4):1094-1103.
[ZHANG G L, JIAO Y M, HE L P, et al. Research progress and prospect of hydrogen and oxygen isotope in precipitation in Southwest China. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(4): 1094-1103.]

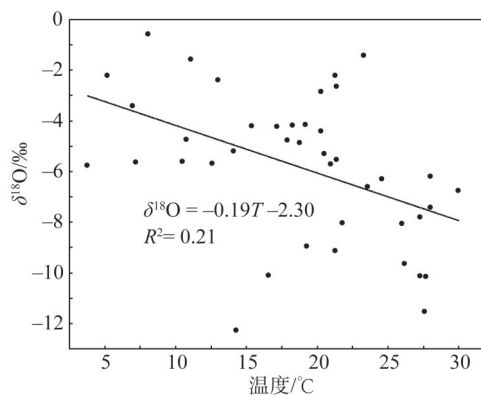


图10 降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度之间的相关性

Fig. 10 Correlation between $\delta^{18}\text{O}$ and temperature in precipitation

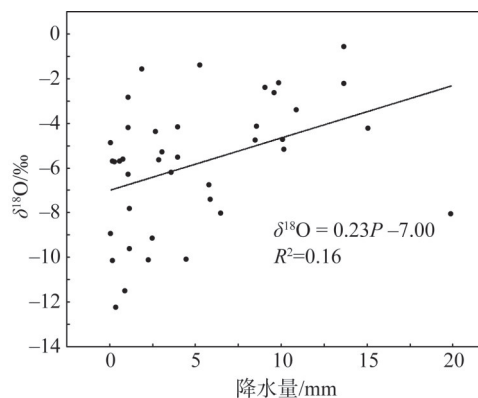


图11 降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与降水量之间的相关性

Fig. 11 Correlation between $\delta^{18}\text{O}$ and precipitation in precipitation

- [2] POSMENTIER E S, FENG X H, ZHAO M X. Seasonal variations of precipitation $\delta^{18}\text{O}$ in Eastern Asia. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109: 1-9.
- [3] YEPEZ E A, HUXMAN T E, IGNACE D D, et al. Dynamics of transpiration and evaporation following a moisture pulse in semiarid grassland: A chamber-based isotope method for partitioning flux components. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 132(3-4): 359-376.
- [4] GAT J R. Oxygen and hydrogen isotope in the hydrologic. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1996, (24): 225-262.
- [5] SCHMIDT G A, HOFFMANN G, SHINDELL D T, et al. Modeling atmospheric stable water isotopes and the potential for constraining cloud processes and stratosphere-troposphere water exchange. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110: 1-15.
- [6] WILLIAMS D G, CABLE W, HULTINE K, et al. Evapotranspiration components determined by stable isotope, sap flow and eddy covariance techniques. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 125(3-4): 241-258.
- [7] 柳鉴容, 宋献方, 袁国富, 等. 西北地区大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的特征及水汽来源. *地理学报*, 2008, 63(1): 12-22. [LIU J R, SONG X F, YUAN G F, et al. Characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation over Northwest China and its water vapor sources. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(1): 12-22.]
- [8] 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. *环境科学与技术*, 2017, 40(4): 78-84. [DONG X F, DENG H Y, ZHENG X M, et al. Hydrogen oxygen isotopic characteristics and water vapor sources in precipitation in the Yangtze River Basin. *Environmental Science and Technology*, 2017, 40(4): 78-84.]
- [9] 赵良菊, 尹力, 肖洪浪, 等. 黑河源区水汽来源及地表径流组成的稳定同位素证据. *科学通报*, 2011, 56(1): 58-67. [ZHAO L J, YIN L, XIAO H L, et al. Stable isotope evidence of water vapor source and surface runoff composition in Heihe area. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(1): 58-67.]
- [10] 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. *自然资源学报*, 2016, 31(7): 1211-1221. [HAO Y, YU X X, DENG W P, et al. The variations of hydrogen and oxygen compositions and moisture sources in the precipitation in Western Mountain areas of Beijing. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(7): 1211-1221.]
- [11] 李小飞, 张明军, 李亚举, 等. 西北干旱区降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 变化特征及其水汽输送. *环境科学*, 2012, 33(3): 711-719. [LI X F, ZHANG M J, LI Y J, et al. Variation characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation in Northwest arid region and its water vapor transport. *Environmental Science*, 2012, 33(3): 711-719.]
- [12] 章新平, 刘晶森, 中尾正义, 等. 我国西南地区降水中过量氘指示水汽来源. *冰川冻土*, 2009, 31(4): 613-619. [ZHANG X P, LIU J M, MASAYOSHI N, et al. Vapor origins revealed by deuterium excess in precipitation in Southwest China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31(4): 613-619.]
- [13] 胡蕊, 王建力. 云南地区大气降水中氢氧同位素特征及水汽来源分析. *西南师范大学学报: 自然科学版*, 2015, 40(5): 142-149. [HU H, WANG J L. On characteristics of hydrogen and oxygen isotope in precipitation in Yunnan and analysis of moisture sources. *Journal of Southwest China Normal University: Natural Science Edition*, 2015, 40(5): 142-149.]
- [14] 郑征, 李佑荣, 张树斌, 等. 西双版纳海拔变化对水湿状况的影响. *山地学报*, 2007, 25(1): 33-38. [ZHENG Z, LI Y R, ZHANG S B, et al. Influence of the altitudinal increase on water and humidity conditions, Xishuangbanna. *Journal of Mountain Science*, 2007, 25(1): 33-38.]
- [15] 黄一民, 章新平, 孙霞, 等. 长沙大气水汽、降水中稳定同位素季节变化及与水汽输送关系. *地理科学*, 2015, 35(4): 498-506. [HUANG Y M, ZHANG X P, SUN J, et al. Seasonal variations of stable isotope in precipitation and atmospheric water vapor and their relationship with moisture transportation in Changsha. *Scientia Geographica Sinica*, 2015, 35(4): 498-506.]
- [16] 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. *长江科学院院报*, 2016, 33(7): 12-17. [DENG Z M, ZHANG X, PAN G Y. Variations of hydrogen and oxygen isotopes in meteoric precipitation in Wuhan, China. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2016, 33(7): 12-17.]
- [17] 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. *生态环境学报*, 2014, 23(1): 101-105. [SHEN Y J, PENG X H. Stable isotopes of hydrogen and oxygen in the precipitation of Yingtan. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(1): 101-105.]

- [18] 章新平, 孙维贞, 刘晶森. 西南水汽通道上昆明站降水中的稳定同位素. 长江流域资源与环境, 2005, 14(5): 665-669. [ZHANG X P, SUN W Z, LIU J M. Stable isotopes in precipitation in the vapor transport path in Kunming of Southwest China. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2005, 14(5): 665-669.]
- [19] 李广, 章新平, 张新主, 等. 云南腾冲地区大气降水中氢氧稳定同位素特征. 长江流域资源与环境, 2013, 22(11): 1458-1465. [LI G, ZHANG X P, ZHANG X Z, et al. Stable hydrogen and oxygen isotopes characteristics of atmospheric precipitation from Tengchong, Yunnan. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2013, 22(11): 1458-1465.]
- [20] 马潜, 张明军, 王圣杰, 等. 基于氢氧同位素的中国东南部降水局地蒸发水汽贡献率. 地理科学进展, 2013, 32(11): 1712-1720. [MA Q, ZHANG M J, WANG S J, et al. Contributions of moisture from local evaporation to precipitations in Southeast China based on hydrogen and oxygen isotopes. Progress in Geography, 2013, 32(11): 1712-1720.]
- [21] 张应华, 仵彦卿. 黑河流域大气降水水汽来源分析. 干旱区地理, 2008, 31(3): 403-408. [ZHANG Y H, WU Y Q. Precipitation from different water vapor sources in the Heihe River Basin, China. Arid Land Geography, 2008, 31(3): 403-408.]
- [22] 支树林. 台风“碧利斯”影响庐山降水的探测资料分析. 气象与减灾研究, 2006, 29(3): 60-64. [ZHI S L. Analysis of the rainfall data on Mount Lu influenced by the typhoon "Bilis". Meteorology and Disaster Reduction Research, 2006, 29(3): 60-64.]
- [23] 桑博. 庐山雨水和云雾水的化学元素特征. 济南: 山东大学, 2012. [SANG B. Characteristics of chemical elements in rain water and cloud/fog water at Mt. Lushan. Jinan: Shan Dong University, 2012.]
- [24] 任美镠. 庐山地形的初步研究. 地理学报, 1953, 19(1): 61-73. [REN M E. A preliminary study on the topography of Mount Lu. Acta Geographica Sinica, 1953, 19(1): 61-73.]
- [25] DANSGAARD W. Stable isotopes in precipitation. Tellus, 1964, 16(4): 436-468.
- [26] 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. 林业科学研究, 2017, 30(3): 384-391. [GAO D Q, XU Q, ZHANG B B, et al. Characteristics of δD and $\delta^{18}O$ in precipitation in Mt. Dinghu and its water vapor sources. Forest Research, 2017, 33(3): 384-391.]
- [27] MACHAVARAM M V, KRISHNAMURTHY R V. Earth surface evaporative process a case study from the Great Lakes region of the United States based on deuterium excess in precipitation. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, 59(20): 4279-4283.
- [28] 赵惠萍, 张翔, 邓志民, 等. 鄱阳湖湿地降水氢氧稳定同位素特征分析. 水资源研究, 2015, 4: 257-264. [ZHAO H P, ZHANG X, DENG Z M, et al. The characteristics of stable hydrogen and oxygen isotopes of atmospheric precipitation in Poyang Lake wetland. Journal of Water Resources Research, 2015, 4: 257-264.]
- [29] 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. 科学通报, 1983, 28(13): 801-806. [ZHENG S H, HOU F G, NI B L. The research of hydrogen and oxygen stable isotopes in precipitation in China. Chinese Science Bulletin, 1983, 28(13): 801-806.]
- [30] 章新平, 姚檀栋. 青藏高原东北地区现代降水中 δD 与 $\delta^{18}O$ 的关系研究. 冰川冻土, 1996, 18(4): 74-79. [ZHANG X P, YAO T D. Relations between δD and $\delta^{18}O$ in precipitation at present in the Northeast Tibetan Plateau. Journal of Glaciology and Geocryology, 1996, 18(4): 74-79.]
- [31] DRAXLER R R, HESS G D. An overview of the HYSPLIT_4 modelling system for trajectories. Australian Meteorological Magazine, 1998, 47(4): 295-308.
- [32] 徐彦伟, 康世昌, 周石研, 等. 青藏高原纳木错流域夏、秋季大气降水中 $\delta^{18}O$ 与水汽来源及温度的关系. 地理科学, 2007, 27(5): 718-723. [XU Y W, KANG S C, ZHOU S Q, et al. Variations of $\delta^{18}O$ in summer and autumn precipitation and their relationships with moisture source and air temperature in Nam Lake Basin, Tibet Plateau. Scientia Geographica Sinica, 2007, 27(5): 718-723.]
- [33] 王卓娟, 宋维峰, 张小娟. 氢氧稳定同位素在森林雾水研究中的应用及展望. 西南林业大学学报, 2015, 35(4): 106-110. [WANG Z J, SONG W F, ZHANG X J. Application of hydrogen and oxygen stable isotopes technology on research of fog water in forest. Journal of Southwest Forestry University, 2015, 35(4): 106-110.]
- [34] 孙自永, 程国栋, 马瑞, 等. 雾水的D和 ^{18}O 同位素研究进展. 地球科学进展, 2008, 23(8): 794-802. [SUN Z Y, CHENG G D, MA R, et al. Advances in the D and ^{18}O isotopes of fog water. Advances in Earth Science, 2008, 23(8): 794-802.]

- [35] 刘文杰, 李鹏菊, 李红梅, 等. 西双版纳热带季节雨林林冠截留雾水和土壤水的关系. 生态学报, 2006, 26(1): 9-15. [LIU W J, LI P J, LI H M, et al. Fog interception and its relation to soil water in the tropical seasonal rain forest of Xishuangbanna, Southwest China. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(1): 9-15.]
- [36] 陈建生, 赵洪波, 詹沪成. 赤水林区旱季雾水对地表径流的水量贡献. 水科学进展, 2016, 27(3): 377-384. [CHEN J S, ZHAO H B, ZHAN L C. Water contribution of fog drip to surface runoff in Chishui forest region during the dry season. *Advances in Water Science*, 2016, 27(3): 377-384.]
- [37] 崔军, 安树青, 徐振, 等. 卧龙巴郎山高山灌丛降雨和穿透水稳定性氢氧同位素特征研究. 自然资源学报, 2005, 20(4): 660-668. [CUI J, AN S Q, XU Z, et al. Isotopic characteristics of precipitation and throughfall of alpine shrubs on Balang Mountains in Wolong. *Journal of Natural Resources*, 2005, 20(4): 660-668.]

Variation characteristics of stable isotope in precipitation in Mount Lu area

CHEN Qi^{1,2}, GUO Jin-rong^{1,2}, LI Chao^{1,2}, WANG Han-kun^{1,2}, WU Chun-sheng^{1,2,3},
DENG Wen-ping^{1,2,3}, LIU Yuan-qiu^{1,2,3}, YE Qing^{1,2,3}, LI Xiao-dong^{1,2,3}

(1. College of Forestry, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China; 2. Laboratory of Forest ecosystem Conservation and Restoration in Poyang Lake Basin, Nanchang 330045, China; 3. Mount Lu Forest Ecosystem Positioning Research Station, Jiujiang 332900, Jiangxi, China)

Abstract: Stable isotope technique is widely used to study the source of water vapor during water cycle, the supply relationship and water balance among different waters. From April 2016 to April 2017, the thesis selects three different sites in the Mount Lu area (Lianhua Town lies to the west of Mount Lu, Guling Town at the top of hill, and Haihui Town to the east of Mount Lu). Based on the isotopic data of 102 precipitation samples collected from the three places, we used linear regression analysis and comparative analysis to explore the temporal and spatial characteristics of hydrogen and oxygen stable isotopes and deuterium excess in precipitation in the Mount Lu area and their influencing factors. The results show that: In the study area, the stable isotope value of $\delta^{18}\text{O}$ in summer precipitation was lighter than that in winter. The seasonal difference of water vapor source is obvious. The deuterium excess also showed a significant seasonal difference, and the deuterium excess value was higher than that in most parts of the world, being 10.0‰. Compared with the global meteoritic water line (GMWL) $\delta\text{D}=8\delta^{18}\text{O}+10$, the slope and intercept of the local meteoritic water line (LMWL) $\delta\text{D}=7.45\delta^{18}\text{O}+8.36$ are smaller in the Mount Lu area than in the global meteoritic water line (GMWL) $\delta\text{D}=8\delta^{18}\text{O}+10$. Based on the HYSPLIT model, the atmospheric water vapor in this region is mainly derived from the South China Sea and the Indian Ocean at low latitudes in summer, and the dry inland in North and Northwest China in winter. The influence of local water vapor and geographical location differences lead to the spatial differences of rainfall isotopic characteristics. This study provides a scientific basis for the future study of water cycle in Mount Lu area.

Keywords: Mount Lu; precipitation; stable isotope; deuterium excess; HYSPLIT model