

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第4期

Vol.37 No.4

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2013年12月上海市重度污染期间细颗粒物化学特征与输送轨迹影响	
..... 周敏, 乔利平, 朱书慧, 李莉, 楼晟荣, 王红丽, 陶士康, 黄成, 陈长虹 (1179)	
利用 SPAMS 研究华北乡村站点(曲周)夏季大气单颗粒物老化与混合状态	黄子龙, 曾立民, 董华斌, 李梅, 朱彤 (1188)
南京大气气溶胶混合态与云凝结核活化特征研究	朱麟, 马嫣, 郑军, 李时政, 王利朋 (1199)
北京地区不同天气条件下气溶胶数浓度粒径分布特征研究	苏捷, 赵普生, 陈一娜 (1208)
重庆市主城区 PM _{2.5} 时空分布特征	刘永林, 孙启民, 钟明洋, 钟部卿, 雒昆利 (1219)
大气细颗粒物中有机碳和元素碳监测方法对比	庞博, 吉东生, 刘子锐, 朱彬, 王跃思 (1230)
深圳市大气中全氟化合物的残留特征	何鹏飞, 张鸿, 李静, 何龙, 罗骥, 刘国卿, 沈金灿, 杨波, 崔晓宇 (1240)
北京上甸子站大气 CO ₂ 及 δ ¹³ C(CO ₂) 本底变化	夏玲君, 周凌晔, 刘立新, 张根 (1248)
梅雨期大学宿舍室内生物气溶胶浓度及粒径分布	刘婷, 李露, 张家泉, 占长林, 刘红霞, 郑敬茹, 姚瑞珍, 曹军骥 (1256)
城市黑臭水体空气微生物污染及健康风险	刘建福, 陈敬雄, 辜时有 (1264)
北京市典型室内外灰尘中重金属的粒径和季节变异特征及人体暴露评估	
..... 曹治国, 余刚, 吕香英, 王梦蕾, 李琦路, 冯精兰, 闫广轩, 余浩, 孙剑辉 (1272)	
西安市地表灰尘中多环芳烃分布特征与来源解析	王丽, 王利军, 史兴民, 卢新卫 (1279)
PDMS 基涂层活性炭对甲苯、苯和丙酮吸附研究	刘寒冰, 姜鑫, 王新, 杨兵, 薛南冬, 张石磊 (1287)
海南东北部滨海湿地沉积物微量元素分布特征、来源及污染评价	张卫坤, 甘华阳, 闭向阳, 王家生 (1295)
曹妃甸围填海土壤重金属积累的磁化率指示研究	薛勇, 周倩, 李远, 章海波, 胡雪峰, 骆永明 (1306)
滇南蒙自地区降水稳定同位素特征及其水汽来源	李广, 章新平, 许有鹏, 宋松, 王跃峰, 季晓敏, 项捷, 杨洁 (1313)
江苏省浅水湖泊表层沉积物重金属 GIS 空间分布及生态风险评价	李莹杰, 张列宇, 吴易雯, 李曹乐, 杨天学, 唐军 (1321)
城市景观水体甲基汞的形成机制及微宇宙模拟研究	刘小红, 司友斌, 郭子薇, 杜成竹, 朱聪聪 (1330)
我国北方温排水库——周村水库季节性热分层现象及其水质响应特性	
..... 曾明正, 黄廷林, 邱晓鹏, 王亚平, 史建超, 周石磊, 刘飞 (1337)	
额尔齐斯河源区融雪期积雪与河流的水化学特征	韦虹, 吴锦奎, 沈永平, 张伟, 刘世伟, 周嘉欣 (1345)
太原汾河景区浮游植物群落结构及其与环境因子关系分析	冯佳, 郭宇宁, 王飞, 吕俊平, 刘琪, 谢树莲, 程革, 张建民 (1353)
铜陵市河流沉积物中硝化和反硝化微生物分布特征	程建华, 窦智勇, 孙庆业 (1362)
基流对亚热带农业流域氮素输出的贡献研究	马秋梅, 李玮, 王毅, 刘新亮, 李勇, 吴金水 (1371)
重庆南山表层岩溶泉与地下河三氮运移及氮通量估算	张远瞩, 贺秋芳, 蒋勇军, 李勇 (1379)
山美水库沉积物氮磷和有机质污染特征及评价	邱祖凯, 胡小贞, 姚程, 张文慧, 许秋瑾, 黄天寅 (1389)
伊乐藻-固定化脱氮微生物技术对入贡河道脱氮机制的影响	韩华杨, 李正魁, 王浩, 朱倩 (1397)
环太湖不同性质河流水体磷的时空分布特征	高永霞, 宋玉芝, 于江华, 朱广伟 (1404)
藻类与扰动共存下水体中不同形态磷的数量分布规律	陈俊, 李勇, 李大鹏, 黄勇, 朱培颖 (1413)
扰动对悬浮颗粒物粒径及上覆水中磷形态分布的影响	郭俊锐, 李大鹏, 刘焱见 (1422)
铅改性高岭土覆盖对底泥与上覆水之间磷迁移转化的影响	章喆, 林建伟, 詹艳慧, 王虹 (1427)
电化学还原-氧化工艺降解 4-氯酚的毒性研究	王岩, 施钦, 王辉, 卞兆勇 (1437)
水合氧化铝负载的磁性核/壳结构 Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ 纳米颗粒对水中磷的去除及再利用	
..... 赖立, 谢强, 方文侃, 邢明超, 吴德意 (1444)	
多环芳烃及其衍生物在北京典型污水处理厂中的存在及去除	乔梦, 齐维晓, 赵旭, 刘会娟, 曲久辉 (1451)
污水处理厂污泥水溶性有机物的光谱特性分析	牛天浩, 周振, 胡大龙, 魏海娟, 李晶, 窦微笑, 葛红花 (1460)
高含氟的光伏废水反硝化可行性及经济性分析	李祥, 朱亮, 黄勇, 杨朋兵, 崔剑虹, 马航 (1467)
连续流反应器短程硝化的快速启动与维持机制	吴鹏, 张诗颖, 宋吟玲, 徐乐中, 沈耀良 (1472)
反硝化颗粒污泥在纳米零价铁胁迫下的性能恢复	王翻翻, 钱飞跃, 沈耀良, 王建芳, 张月茹, 刘郭洵 (1478)
低浓度环丙沙星对曝气生物滤池生物膜硝化过程及硝化微生物的作用影响	
..... 何势, 顾超超, 魏欣, 黄圣琳, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (1485)	
低碳源条件下改良双污泥系统脱氮除磷优化研究	
..... 杨伟强, 王冬波, 李小明, 杨麒, 徐秋翔, 张志贝, 李志军, 向海弘, 王亚利, 孙剑 (1492)	
短期保护性耕作措施对大豆-冬小麦轮作系统温室气体排放的影响	谢燕, 陈曦, 胡正华, 陈书涛, 张寒, 凌慧, 申双和 (1499)
不同封育年限荒漠草原土壤呼吸日、季动态变化及其影响因子	崔海, 张亚红 (1507)
塔里木盆地南缘典型绿洲土壤有机碳、无机碳与环境因子的相关性	贡璐, 朱美玲, 刘曾媛, 张雪妮, 解丽娜 (1516)
小分子有机酸对紫色土及其溶液中 Pb 的赋存影响	刘江, 江韬, 黄容, 张进忠, 陈宏 (1523)
鸢尾对石油烃污染土壤的修复以及根系代谢分析	王亚男, 程立娟, 周启星 (1531)
水锰矿氧化水溶性硫化物过程及其影响因素	罗瑶, 李珊, 谭文峰, 刘凡, 蔡崇法, 邱国红 (1539)
高温纤维素降解菌筛选及产酶特性	冯红梅, 秦永胜, 李筱帆, 周金星, 彭霞薇 (1546)
基于固相萃取及高效液相色谱-荧光检测分析的污泥中氟喹诺酮类抗生素研究方法的开发	
..... 戴晓虎, 薛勇刚, 刘华杰, 戴翎翎, 严寒, 李宁 (1553)	
养殖场周边土壤-蔬菜系统磺胺类药物残留及风险评价	金彩霞, 司晓薇, 王子英, 张琴文 (1562)
4 种典型 PPCPs 对蚕豆和大蒜根尖细胞微核率的影响	王兰君, 王金花, 朱鲁生, 王军, 赵祥 (1568)
新型污染物卤代吡啉的环境行为及生态毒理效应	林坤德, 陈艳秋, 袁东星 (1576)
水源地土壤环境保护优先区划分方法与实例研究	李蕾, 王铁宇, 王晓军, 肖荣波, 李奇峰, 彭驰, 韩存亮 (1584)
《环境科学》征订启事 (1218) 《环境科学》征稿简则 (1370) 信息 (1352, 1412, 1498)	

滇南蒙自地区降水稳定同位素特征及其水汽来源

李广^{1,2}, 章新平², 许有鹏^{1*}, 宋松¹, 王跃峰¹, 季晓敏¹, 项捷¹, 杨洁¹

(1. 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023; 2. 湖南师范大学资源与环境科学学院, 长沙 410081)

摘要: 大气降水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 值具有规律性变化特征, 与诸多气象要素及水汽来源之间存在密切联系. 根据 2009 年 1 月至 2011 年 12 月对滇南蒙自地区大气降水的连续性采样, 结合欧洲中期数值预报中心 (ECMWF) 以及美国国家环境预报中心/美国国家大气研究中心 (NCEP/NCAR) 的再分析资料, 并利用 HYSPLIT_4.8 后向轨迹追踪模型, 分析了天气尺度下蒙自地区大气降水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 的变化特征, 探究了降水稳定同位素与温度、降水量、风速及水汽来源之间的关系. 结果表明, 蒙自地区降水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 值表现出明显的季节变化, 即干季偏高, 湿季偏低; 降水中 $\delta^{18}O$ 与温度、降水量之间存在显著负相关, 但与不同气压层 (300、500、700、800 hPa) 风速之间呈现出显著正相关, 表明风速也是影响降水中 $\delta^{18}O$ 变化的一个重要因素; 随着降雨等级的增加, 其大气水线的斜率与截距也增大, 说明降水稳定同位素存在一定程度的云底二次蒸发效应; 水汽输送轨迹显示, 干季降水的水汽主要来自于西风带输送及局地再蒸发水汽, 而湿季降水的水汽主要来源于远源海洋水汽的输送, 并且在受台风影响期间, 降水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 值更加偏负.

关键词: 大气降水; 稳定同位素; 大气水线; 二次蒸发; 水汽来源; 蒙自地区

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)04-1313-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.04.016

Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Their Moisture Sources in Mengzi Region, Southern Yunnan

LI Guang^{1,2}, ZHANG Xin-ping², XU You-peng^{1*}, SONG Song¹, WANG Yue-feng¹, JI Xiao-min¹, XIANG Jie¹, YANG Jie¹

(1. School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2. College of Resources and Environmental Sciences, Hunan Normal University, Changsha 410081, China)

Abstract: The δD and $\delta^{18}O$ values in precipitation have disciplinary variations, and they have close connections with meteorological parameters and moisture sources. Based on the continuously collected precipitation samples in Mengzi from Jan. 2009 to Dec. 2011, the reanalysis data from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) and the National Centre for Environmental Prediction/National Centre for Atmospheric Research (NCEP/NCAR), and the Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory for 4.8 (HYSPLIT_4.8) model, we analyzed the variations of δD and $\delta^{18}O$ in precipitation at synoptic scale in Mengzi, and the relations between $\delta^{18}O$ in precipitation and air temperature, $\delta^{18}O$ in precipitation and amount, $\delta^{18}O$ in precipitation and wind speed, $\delta^{18}O$ in precipitation and moisture sources. The results showed that the variations of δD and $\delta^{18}O$ values in precipitation exhibited remarkable seasonal variability. The stable isotopic values in precipitation were higher during dry season than those during wet season. The relations between $\delta^{18}O$ in precipitation and air temperature, $\delta^{18}O$ in precipitation and amount indicated significant negative correlations. However, it exhibited significant positive correlation between precipitation $\delta^{18}O$ and wind speed at different pressure levels (300 hPa, 500 hPa, 700 hPa, and 800 hPa), and this result indicated that the wind speed was an important influencing factor for the variations of precipitation $\delta^{18}O$. With the increasing rainfall levels, the intercept and slope of meteoric water line also increased, and this phenomenon suggested that there was a secondary evaporation effect under sub-cloud in stable isotopes of precipitation. The backward trajectory model showed that the main moisture sources during dry season came from the westerly and the inland. However, during wet season, the remote ocean vapor was the main moisture source in Mengzi, and the $\delta^{18}O$ values in precipitation were much lower during typhoon period.

Key words: precipitation; stable isotopes; meteoric water line; secondary evaporation; moisture sources; Mengzi region

在水文循环过程中, 稳定水同位素的组成与变化, 发端于水汽进入大气层的阶段以及降水通过大气层的过程, 由此形成的同位素标记随后传递给其他水体并记载水循环的演化信息^[1]. 降水是水圈与大气圈之间物质能量交换最为活跃的因子, 降水中稳定同位素的组成随着时间和空间的变化而变化^[2], 并与产生降水的气象条件、水汽源区的初始

状态以及大尺度环流形势存在紧密联系^[3]. 因此,

收稿日期: 2015-11-08; 修订日期: 2015-12-06

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41571021); 水利部水利公益性行业科研专项 (201301075-03); 中央高校基本科研业务费专项 (020914380011); 江苏省普通高校研究生创新计划项目 (KYLX15_0041)

作者简介: 李广 (1988 ~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为水文与水资源, E-mail: liguangda1988@163.com

* 通讯联系人, E-mail: xuy305@163.com

监测大气降水中稳定同位素的组成变化对于研究现在与过去气候条件下的水文循环特征及大气环流特征均具有重要意义。

国际原子能机构 (IAEA) 联合世界气象组织 (WMO), 于 1961 年开始运行全球降水同位素监测网 (Global Network for Isotopes in Precipitation, GNIP), 此后对降水中稳定同位素的研究逐渐增多。Dansgaard^[4] 依据当时在北极与大西洋观测到的降水稳定同位素资料, 开创性地提出了诸如“温度效应”、“降水量效应”等同位素效应, Craig^[5] 通过分析来自不同地理位置的多种水体样, 发现水体中 δD 与 $\delta^{18}O$ 之间存在非常好的线性关系: $\delta D = 8.0 \delta^{18}O + 10.0$, 该方程后来也被定义为全球大气水线 (GWML), 以上研究的发现为国内外学者的相关研究提供了最为基础的理论支持。我国学者对水体中 δD 、 $\delta^{18}O$ 的研究始于 1966 年的珠穆朗玛峰科学考察^[6], 通过近几十年的相关研究, 取得了明显进展。研究表明, 我国大气降水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 的时空分布差异较为明显, 空间尺度上表现为东南沿海及西北干旱区的降水稳定同位素值偏高, 东北地区与青藏高原的降水稳定同位素值偏低, 而在时间尺度上, 冬半年降水稳定同位素值普遍高于夏半年, 存在一个明显的季节变化趋势。在我国, 温度效应主要出现在中高纬地区, 并且越深入大陆内部, 其正相关越显著; 而降水量效应一般出现在低纬度地区, 与强对流天气过程有着密切关系^[7]。具体某地区的降水稳定同位素特征主要归因于区域气候背景及局地地理因素, 例如水汽来源性质, 降水时气象要素特征, 当地经纬度等^[8]。此外, 采用后向轨迹模型追踪降水水汽来源也已成功应用在我国东北地区、西北地区、洞庭湖流域等研究区^[9-11], 并有效地佐证了不同水汽来源对降水稳定同位素的影响作用。

近年来, 对云南省不同区域大气降水稳定同位素的研究取得一定进展, 某些研究结论也引起有关学者的关注。例如, 庞洪喜等^[12] 研究表明, 在天气尺度下丽江地区降水中 $\delta^{18}O$ 变化存在一定程度温度效应, 而章新平等^[13] 对腾冲地区日尺度下降水中 $\delta^{18}O$ 的研究发现, 该区降水中 $\delta^{18}O$ 与温度之间呈现显著负相关。但需说明的是, 上述两位学者对研究区降水样品的采集工作分别只进行了 4 个月及 1 a。因此, 为了减除可能因降水样品序列长度对研究结果造成的影响, 本研究选择在滇南蒙自地区进行长时间连续性采样工作, 进而深入分析蒙自地区降水稳定同位素变化特征及其与水汽来源之间的关系,

这可以指导本地区水资源的合理利用, 以期为探讨区域水循环以及季风区古气候、古环境的重建工作提供更多依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况与降水样品采集

蒙自地区位于云南省南部, 为红河哈尼族彝族自治州首府, 其土地面积约为 $2.23 \times 10^3 \text{ km}^2$, 属云贵高原的组成部分, 主要地形为山地和坝区。该区属于典型的亚热带季风气候区, 其降水的水汽来源与影响降水的因素比较复杂, 年平均气温 18.6°C , 极端最高气温 33.8°C , 极端最低气温 2.9°C , 年均降水量 815.8 mm , 干季 (10 月 ~ 翌年 4 月) 降水稀少, 湿季 (5 ~ 10 月) 降水充沛。但在 2009 ~ 2012 年间, 云南省遭遇史无前例的特大旱灾, 各地年降水量下降明显^[14]。

本研究于 2009 年 1 月 1 日至 2011 年 12 月 31 日在蒙自气象站 (23.23°N , 103.23°E , 海拔 1301.7 m) 进行了长达 3 a 的连续性降水采样工作 (图 1)。所有降水均通过标准口径集雨器收集, 并于每日 08:00、20:00 分别进行一次降水观测, 对 $\geq 0.1 \text{ mm}$ 的降水事件, 直接倒入已编号的 30 mL 聚乙烯塑料瓶中, 随即密封, 进行低温保存处理, 并记录好每次降水事件的起止时间、站点降水量、站点平均气温、站点平均水汽压等气象要素。通过对该区连续 3 a 的大气降水采样, 共收集到降水样 239 个 (若一日出现两次降水事件, 其 δD 与 $\delta^{18}O$ 值均将进行加权处理, 故最终只计作一个降水样)。

1.2 样品分析

所有降水样品中 δD 、 $\delta^{18}O$ 值的分析测定均采用 LGR (Los Gatos Research) 公司研发的液态水同位素分析仪 (DLT-100, 型号: 908-0088, 产地: 美国), 其原理是通过红外激光技术测定光腔内水汽中 H_2^{18}O 、 HD^{16}O 的分子浓度, 最终获得降水样与标准样中 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 与 D/H 的比值。所有测试结果用相对于维也纳标准平均海洋水的千分差法 (‰) 表示:

$$\delta X = (R_{\text{sample}}/R_{\text{V-SMOW}} - 1) \times 1000\text{‰} \quad (1)$$

式中, R_{sample} 和 $R_{\text{V-SMOW}}$ 分别代表降水样与维也纳标准平均海洋水中的氧或氢稳定同位素比率 $R(^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 、 $\text{D}/\text{H})$ 。本仪器测试水体中 δD 、 $\delta^{18}O$ 值的精度分别达 $\pm 2\text{‰}$ 、 $\pm 0.3\text{‰}$ 。

此外, 对于一日出现两次降水事件, 将进行日加权平均计算:

$$\overline{\delta X} = \sum P_i \delta X_i / \sum P_i \quad (2)$$

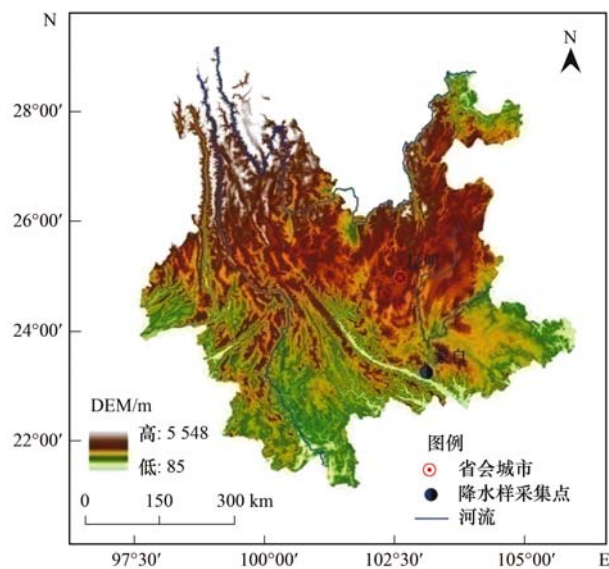


图1 蒙自地区降水采样点位置示意

Fig. 1 Precipitation sampling site in Mengzi region

式中, δX_i 与 P_i 分别为 ^{18}O 或D稳定同位素比率以及相应降水量。

1.3 其他资料来源

本研究中的高空风速资料来自于欧洲中期数值预报中心 (ECMWF) 提供的 $0.75^\circ \times 0.75^\circ \text{NC}$ 格式再分析数据; 后向轨迹追踪模型 (HYSPLIT_4.8) 所采用的气象数据来源于美国国家环境预报中心/美

国国家大气研究中心 (NCEP/NCAR) 提供的 $2.5^\circ \times 2.5^\circ \text{GBL}$ 格式再分析资料。

1.4 后向轨迹追踪模型简介

拉格朗日混合单粒子轨迹模型 (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) 由美国国家海洋与大气管理局 (NOAA) 空气资源实验室 (ARL) 研制。该模型采用地形跟随坐标系, 其水平网格与输入的气象场一致, 并在垂向上分成 28 层^[15,16], 模型可以用来追踪气流所携带粒子的运移轨迹, 实时预报风场形势。模型包括前向轨迹追踪模块与后向轨迹追踪模块, 本研究采用该模型的后向轨迹追踪模块。

2 结果与讨论

2.1 大气降水中 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 变化特征

根据滇南蒙自地区 2009 年 1 月至 2011 年 12 月降水中 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值以及温度、降水量等气象要素的日变化可知 (图 2), 本地区降水中 δD 值介于 -152‰ ~ 52‰ 之间, 均值 -51‰ ; $\delta^{18}\text{O}$ 值介于 -19.9‰ ~ 5.9‰ 之间, 均值 -7.3‰ 。可以看出, 蒙自地区降水中 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 的均值接近郑淑蕙等^[17] 通过研究我国 8 个台站的大气降水中 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 变化范围的均值 (δD 值为 -50‰ , $\delta^{18}\text{O}$ 值为 -8‰); 而张

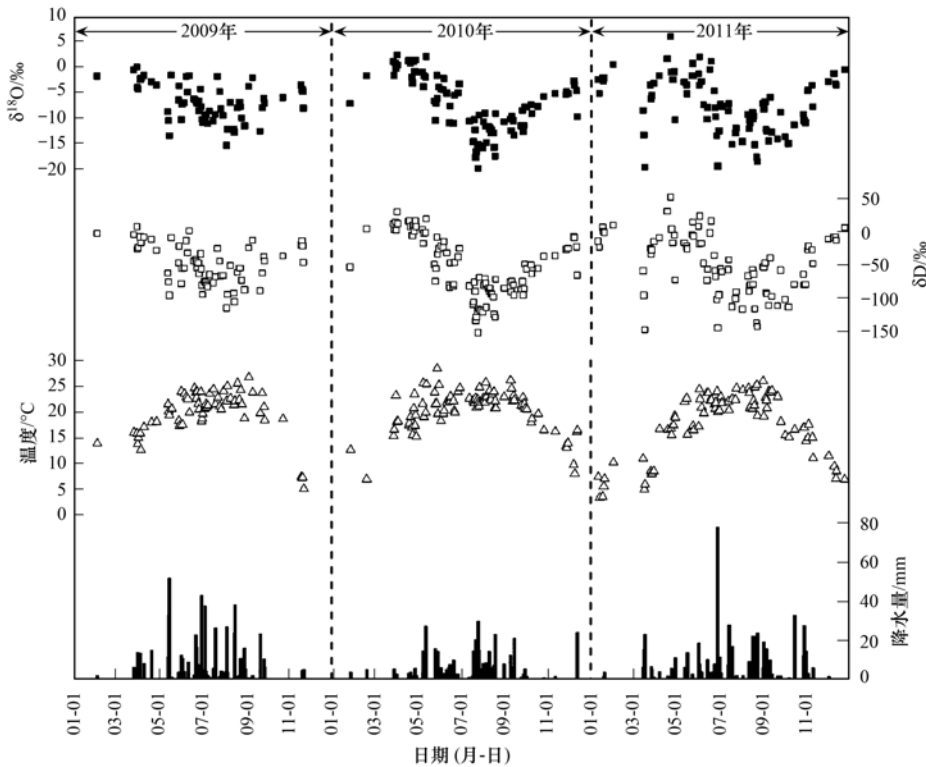


图2 蒙自地区降水中 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 与近地面气象要素的日变化

Fig. 2 Daily variations of δD and $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation and near-surface meteorological parameters in Mengzi region

小娟等^[18]于2014年7~8月在同属红河哈尼族彝族自治州管辖的元阳县进行了大气降水的采样,发现降水中 δD 的均值为 -70‰ , $\delta^{18}\text{O}$ 的均值为 -9.4‰ ,远低于本研究中蒙自地区全年降水中 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 的平均值,这也表明在受夏季风影响期间,滇南地区的降水水汽团由于经过长距离的运移,导致水汽中D、 ^{18}O 等重同位素在沿途不断被“冲刷”,最终使得本地区降水中 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值更加偏负。

由图2可知,蒙自地区降水中 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值呈现出较为明显的季节变化规律,干季降水中 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值整体偏高,而湿季降水中 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值整体偏负,周而复始,并与本地区的温度及降水量变化存在明显反位相关关系。这也是中低纬季风区普遍存在的一种现象,根本原因在于降水水汽来源以及蒸发条件的季节性差异^[19]。

2.2 大气降水中 d 值的变化

氘盈余($d = \delta D - 8\delta^{18}\text{O}$)是由降水中 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 组成的一个二级指标,是描述降水中氢氧稳定同位素特征的重要参数,在全球范围内,其平均值为 10‰ 。某地区大气降水中的 d 值变化主要与水汽源地的气象条件(相对湿度、风速、水体表面温度等)存在密切关系。此外,当地的气象状况与降水过程也会影响到降水中 d 值的变化。通过分析降水中 d

值变化,可以在宏观层面上追踪降水水汽从源地到降落地的复杂气象过程^[20]。

蒙自地区降水中 d 值存在一定程度的波动:介于 -10.1‰ ~ 23.2‰ 之间,均值为 7.5‰ ,低于全球平均值,说明该区降水受海洋水汽影响显著^[21]。此外,本地区干湿季降水中的平均 d 值具有明显差异,干季平均 d 值高达 11.2‰ ,而湿季平均 d 值却只有 6.5‰ ,干季平均 d 值将近是湿季平均 d 值的两倍,这可能表明蒙自地区干湿季降水的水汽来源明显不同,下文将会详细讨论。由图3可以发现,A、B两块区域的 d 值异常偏低,均小于0,最小值达 -10.1‰ 。对此,通过中国天气台风网(<http://typhoon.weather.com.cn/>)查询A、B对应时段影响我国西南地区大范围降水的台风云图动态信息发现,2009年第4~8号台风“浪卡”、“苏迪罗”、“莫拉菲”、“天鹅”、“莫拉克”以及2010年第11号超强台风“凡亚比”均影响到蒙自地区,并带来充沛的降水,但由于台风带来的海洋水汽经过了长距离输送,加之水汽中稳定同位素经过多次分馏,最终导致该时段降水中 d 值异常偏负。同时也发现某些时段降水中 d 值异常偏高,但是基本都处于干季期间,这可能与本地区干季受大陆性气团影响有关,加之空气湿度小,蒸发更加强烈,从而使得降水中 d 值异常偏正。

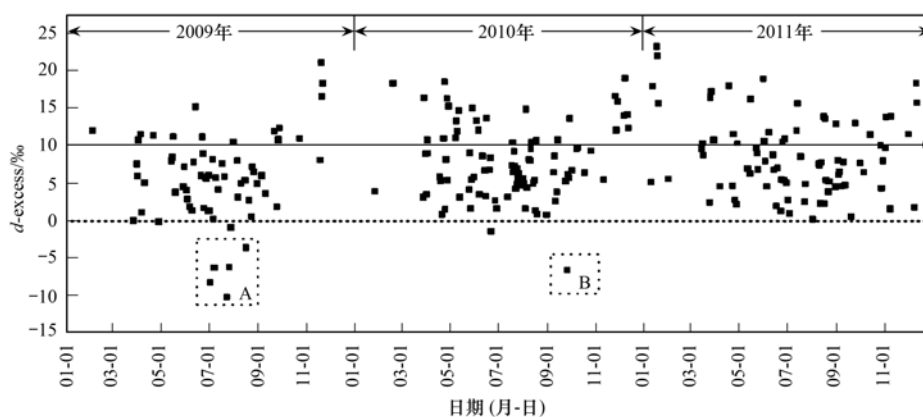


图3 蒙自地区降水中氘盈余值的日变化

Fig. 3 Daily variations of d-excess in precipitation in Mengzi region

2.3 大气水线及云底二次蒸发效应

由于受近地面气象条件以及大尺度海洋、大气环流的影响,各个地区的大气水线不尽相同^[22]。大气水线的斜率反映的是D与 ^{18}O 间分馏效应的对比关系,而截距则是由于海水蒸发时的动力同位素效应引起的,表征D对平衡状态的偏离程度^[4]。

基于蒙自地区连续3a的降水氢氧稳定同位素资料,采用最小二乘法求得本地区的全年大气水线

方程为(图4):

$$\text{LMWL: } \delta D = 8.16 \delta^{18}\text{O} + 8.70$$

$$r = 0.992, \alpha = 0.001, n = 239 \quad (3)$$

类似地,用相同方法求得蒙自地区干、湿季的大气水线方程(图4):

$$\text{干季: } \delta D = 8.11 \delta^{18}\text{O} + 11.83$$

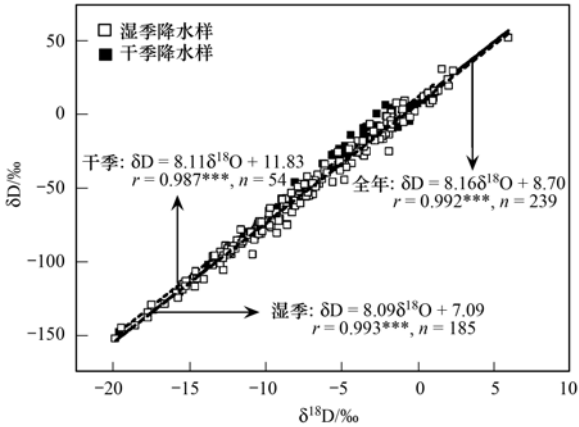
$$r = 0.987, \alpha = 0.001, n = 54 \quad (4)$$

$$\text{湿季: } \delta D = 8.09 \delta^{18}\text{O} + 7.09$$

$r = 0.993, \alpha = 0.001, n = 185$ (5)

与全球大气水线方程 $\delta D = 8.0 \delta^{18}O + 10.0$ 相比,LMWL 的斜率稍微偏大,截距稍微偏小. 蒙自地区全年的降水主要受夏季风影响,来自海洋的暖湿气流所形成的降水具有不稳定、对流性强及能量高的特点,云下蒸发较弱,因此斜率一般大于 GMWL 的斜率;而截距小于 10‰,这与非平衡分馏因素以及局地气象条件有很大联系^[22]. 与地理位置相近的腾冲地区大气水线方程 $\delta D = 8.0 \delta^{18}O + 9.0$ 相比^[13],其斜率与截距均比较接近,表明两地区的大气环流背景相似,基本在同一条水汽通道上.

通过对比蒙自地区干湿季大气水线方程发现,干季大气水线的斜率与截距均要大于湿季,但是干湿季大气水线的斜率相差不大,截距的差异比较明显,说明本地区冷凝成雨过程基本属于平衡分馏,并且干湿季的动力分馏过程也明显不同,这与卫克勤等^[19]对腾冲地区不同季节大气水线的研究发现一致,造成这一现象的原因可能与蒙自地区干湿季的温度差异,特别是不同季节的蒸发效应有着密切联



*** 表示通过 0.001 显著性检验,下同

图 4 蒙自地区大气水线方程

Fig. 4 Equation of local meteoric water line in Mengzi region

系,但干湿季降水的不同水汽来源应是引起大气水线变化的重要原因.

为了探讨蒙自地区降水稳定同位素是否存在云底二次蒸发效应,将其 239 个降水样品依据降雨等级分成 4 组,并对比分析不同降雨等级下大气水线方程的斜率、截距以及相关系数(表 1).

表 1 蒙自地区不同降雨等级的 $\delta D \sim \delta^{18}O$ 相关关系参数¹⁾

Table 1 The $\delta D \sim \delta^{18}O$ correlation parameters for different precipitation levels in Mengzi region

降雨等级	样品数目	降雨量/mm	MWL 斜率/‰	MWL 截距/‰	相关系数(r)
$P \leq 1 \text{ mm}$	61	33.20	7.57	8.23	0.982 ***
$1 \text{ mm} < P \leq 5 \text{ mm}$	79	214.40	8.28	8.32	0.994 ***
$5 \text{ mm} < P \leq 10 \text{ mm}$	44	306.85	8.31	11.75	0.991 ***
$P > 10 \text{ mm}$	55	1166.40	8.33	12.09	0.995 ***
全部降水样品	239	1720.85	8.16	8.70	0.992 ***

1) *** 表示通过 0.001 显著性检验,下同

结果表明,随着降雨等级的增加,其大气水线的斜率与截距也随着变大,其中斜率由 7.57‰($P \leq 1 \text{ mm}$)增至 8.33‰($P > 10 \text{ mm}$),相应的截距由 8.23‰升至 12.09‰. 可以发现,对于 $P \leq 1 \text{ mm}$ 的降雨事件,大气水线的斜率与截距明显小于其他降雨等级,这说明小降雨事件中的雨滴在降落过程中更易受云底二次蒸发影响,稳定同位素的动力分馏也会随之加剧,从而致使大气水线的斜率与截距下降明显^[23]. 而对于大的降雨或者持续性降雨事件,由于云底大气更加趋于饱和状态,因此雨滴在降落过程中受二次蒸发的影响将会减弱,最终大气水线的斜率与截距也将相应增大.

2.4 降水中 $\delta^{18}O$ 与气象要素的相关关系

2.4.1 降水中 $\delta^{18}O$ 与温度的相关关系

形成降水的物理过程对降水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 变化有着不可忽视的影响,尤其是水相变过程中的蒸发与

凝结阶段^[24]. 而温度又制约着蒸发与凝结过程,并影响着降水中稳定同位素的分馏. Dansgaard^[4]发现降水中 $\delta^{18}O$ 与温度之间存在显著正相关,并将此现象定义为温度效应.

图 5(a) 显示,蒙自地区全年降水中 $\delta^{18}O$ 与温度之间表现出负相关关系,通过 0.001 显著性检验. 这也就意味着随着温度的升高,降水中 $\delta^{18}O$ 值反而减小. 很显然,这种现象与温度效应的内涵截然相反,但是在中低纬季风区却普遍存在,并习惯将此现象称之为反温度效应. 反温度效应的显现可能是受中低纬地区显著的季风气候,以及冷凝成雨时的温度、云底蒸发、空气湿度等因素的综合影响,从而掩盖了其温度效应.

2.4.2 降水中 $\delta^{18}O$ 与降水量的相关关系

降水中稳定同位素的组成是空气湿度的函数^[4],因此降水量大小与雨水中稳定同位素的丰

度也会存在一定联系. 所谓降水量效应, 主要表现为降水中稳定同位素比率与降水量之间存在显著的负相关, 其本质可以理解为“淋洗”作用, 表示同一水汽团经过多次降雨过程, 由于同位素分馏作用导致剩余水汽中同位素比值不断偏小的现象.

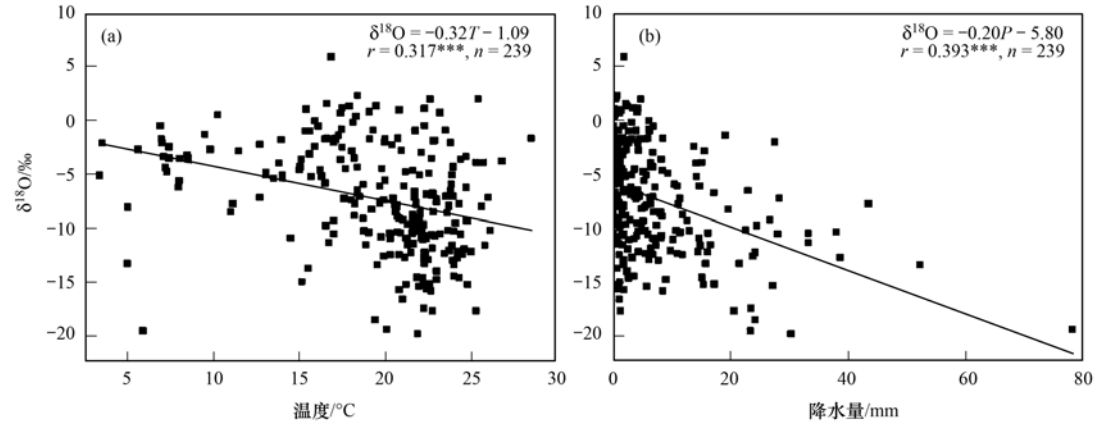


图 5 蒙自地区降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与气象要素的相关关系

Fig. 5 Correlations between $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation and meteorological parameters in Mengzi region

2.4.3 降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与高空风速的相关关系

在季风区, 温度、降水量以及风速是体现季风活动的 3 个重要气候参数, 季风区的风场信息能够较好体现季风活动的变化情况^[26]. 对此, 采用欧洲中期数值预报中心 (ECMWF) 再分析资料, 分析了蒙自地区在 300、500、700、800 hPa 高空风速与降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的相关关系.

表 2 列出了线性方程的回归系数与相关系数. 可以看出, 不同高度的风速与降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 之间均呈现出正相关关系, 并且都通过 0.001 显著性检验, 回归系数由高空 300 hPa 的 0.18 迅速增加到低空 800 hPa 的 1.19, 但是相关系数的最大值出现在 500 hPa. 庞洪喜等^[27]对昆明降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与不同高度风速之间的相关关系也做了类似分析, 发现降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与各气压层风速均表现出显著正相关, 并且相关系数的最大值也出现在 500 hPa. 研究表明^[13], 温度越低, 同位素分馏效应越大, 所以降水水汽在云中凝结, 将致使雨滴中重同位素含量偏低; 而中低纬季风区在高空一定高度存在水汽层, 并且该水汽层中重同位素含量往往偏高, 当雨滴经过该水汽层时, 将与之发生稳定同位素交换, 风速越大, 越利于雨滴中水分子的扩散, 从而加快雨滴同周围水汽的稳定同位素交换^[28], 这可能是风速与降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 之间存在正相关的原因. 蒙自与昆明地理位置相近, 并且风速与降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 相关关系的最大系数值均出

由图 5(b)可知, 蒙自地区全年降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与降水量之间呈现出显著负相关关系, 降水量效应明显. 对于雨热同期的中低纬季风区, 降水量效应的产生与强对流天气的降水过程有密不可分的联系^[25], 并且降水量效应在某种程度上也会掩盖该地区温度效应的凸显.

现在 500 hPa, 这可能说明两地区的高空水汽层主要出现在 500 hPa 高度.

表 2 蒙自地区降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与不同高度风速的关系

Table 2 Relations between $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation and wind speed at different pressure levels in Mengzi region

气压层/hPa	回归系数/‰	相关系数
300	0.18	0.457 ***
500	0.37	0.501 ***
700	0.61	0.432 ***
800	1.19	0.258 ***

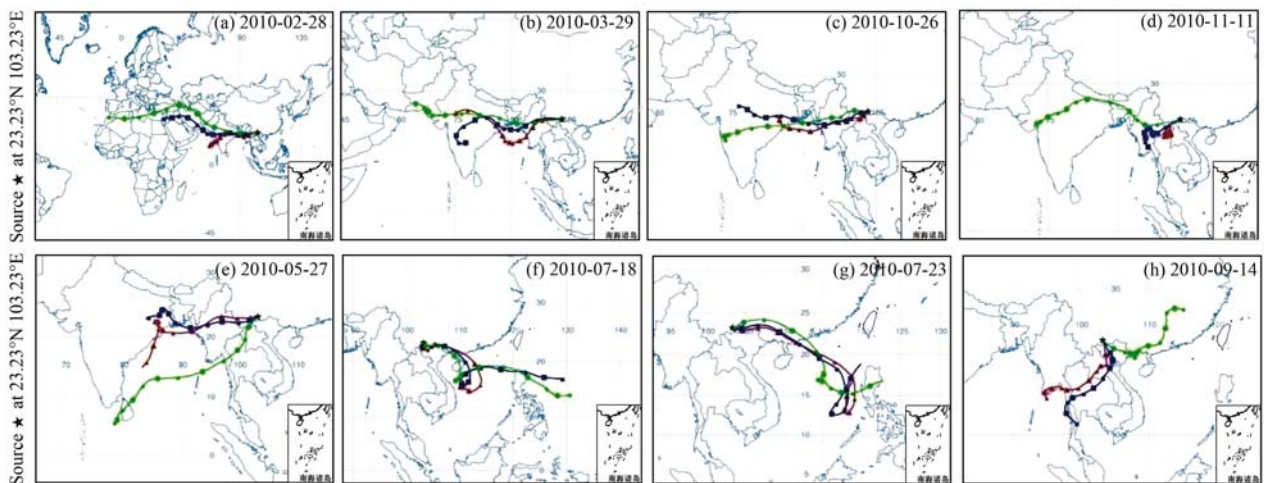
2.5 降水中稳定同位素与水汽来源之间的关系

降水中 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 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 、 $\delta^{18}\text{O}$ 影响更为直接^[29]. 鉴于此, 分别选取干、湿季有代表性的 4 组降水事件, 利用 HYSPLIT_4.8 后向轨迹模块追踪每次降水事件的水汽来源及运移路径. 本研究选取在 800、700 以及 500 hPa 高度对水汽来源进行追踪, 并将模块的回溯时间调整为 144 h (6 d), 这样便可覆盖连续性降水事件, 提高水汽来源及其输送路径的追踪精度.

图 6(a)~6(d) 为干季 4 组降水事件的水汽运移轨迹结果; 图 6(e)~6(f) 则为湿季 4 组降水事件的水汽运移路径结果. 上文研究已表明, 蒙自地区降水中 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值存在明显的季节变化, 干季整体偏高, 湿季整体偏低, 这与水汽来源的季节性差异

存在密切关系. 在干季期间,蒙自地区降水的水汽主要来源于西风带的输送,也有局地再蒸发水汽及近源海洋水汽的补充. 来自西风带的水汽比较稳定,沿途发生的降水事件较少,并且其水汽中的重同位素含量较高^[7];近源海洋水汽以及局地再蒸发水汽,由于运移路径较短,水汽中重同位素经历的“冲刷”作用并不强烈. 因此,上述三类水汽到达蒙自地区形成降水后必将导致降水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 值的整体偏高. 而在湿季期间,蒙自地区降水水汽主要来源于远源海洋水汽的输送,位于印度洋的阿拉伯海、孟加拉湾,以及中国南海、西太平洋的水汽是蒙自地区湿季降水的重要水汽来源. 远源海洋水汽经过长距离的运移输送,沿途经历了多次降水事件,水汽团中的重稳定同位素不断被“淋洗”,所以当水汽抵达

蒙自地区形成降水时,降水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 值也将普遍偏低. 此外,在受台风影响期间,降水中稳定同位素的变化将呈现出独特特征,图 6(f)、6(g) 表示受热带气旋“康森”、“灿都”的影响. 可以看出,“康森”、“灿都”均生成于西太平洋,其水汽经过长途跋涉到达蒙自地区,并带来丰沛降水,但降水中稳定同位素值异常偏低,受“康森”影响降水期间,其降水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 加权平均值为 $-106.9‰$ 、 $-14.6‰$;受“灿都”影响降水期间,其降水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 加权平均值更加偏负,分别为 $-139.4‰$ 、 $-18.2‰$. 受台风影响期间,降水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 值远低于全年平均值,这表明台风输送的水汽在运移过程中,其水汽中稳定同位素发生了强烈的分馏,最终导致降水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 更加偏负.



红色线条代表 800 hPa,蓝色线条代表 700 hPa,绿色线条代表 500 hPa

图 6 蒙自地区不同时间水汽输送轨迹

Fig. 6 Backward trajectory of water vapor at different time in Mengzi region

3 结论

(1) 蒙自地区降水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 值表现出明显的季节变化,干季整体偏高,湿季整体偏低;干湿季降水中平均 d 值也存在明显差异,并且在受台风影响期间,降水中 d 值异常偏负,表明水汽来源对降水中稳定同位素的变化具有至关重要的影响.

(2) 本地区全年大气水线方程为 $\delta D = 8.16 \delta^{18}O + 8.70$,说明蒙自地区受夏季风携带的海洋水汽影响明显;而干湿季大气水线的差异则表明,水汽来源及区域气象条件的季节性差异是引起大气水线变化的重要原因.

(3) 蒙自地区降水中稳定同位素存在一定程度的云底二次蒸发效应,随着降雨等级的升高,其大气

水线的斜率与截距也增大,并且对小降雨事件的影响更为显著;本地区降水量效应显著,在一定程度上掩盖了温度效应,从而表现出显著的反温度效应;雨滴经过高空水汽层时将与之发生同位素交换,风速越大,越有利于雨滴水分子的扩散,表明高空风速也是影响降水中稳定同位素变化不可忽视的因素.

(4) 干季期间,蒙自地区降水水汽主要来源于西风带输送及局地再蒸发水汽与近源海洋水汽的补充,而在湿季期间,本地区降水水汽主要来源于阿拉伯海、孟加拉湾、中国南海以及西太平洋的远源海洋水汽,并且在受热带气旋影响期间,蒙自地区降水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 值更加偏负,佐证了不同水汽来源是影响降水中稳定同位素变化的根本原因.

致谢:感谢湖南师范大学孙广禄、吴华武同学

对降水样品的测定分析.

参考文献:

- [1] 顾慰祖. 同位素水文学[M]. 北京: 科学出版社, 2011. 105.
- [2] 李广, 章新平, 张立峰, 等. 长沙地区不同水体稳定同位素特征及其水循环指示意义[J]. 环境科学, 2015, **36**(6): 2094-2101.
- [3] Araguás-Araguás L, Froehlich K, Rozanski K. Stable isotope composition of precipitation over Southeast Asia[J]. Journal of Geophysical Research, 1988, **103**(D22): 28721-28742.
- [4] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation[J]. Tellus, 1964, **16**(4): 436-468.
- [5] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters[J]. Science, 1961, **133**(3465): 1702-1703.
- [6] 章申, 于维新, 张青莲, 等. 我国西藏南部珠穆朗玛峰地区冰雪水中氘和重氧的分布[J]. 中国科学, 1973, (4): 430-433.
- [7] 章新平, 姚檀栋. 我国降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的分布特点[J]. 地理学报, 1998, **53**(4): 356-364.
- [8] 李亚举, 张明军, 王圣杰, 等. 我国大气降水中稳定同位素研究进展[J]. 冰川冻土, 2011, **33**(3): 624-633.
- [9] 李小飞, 张明军, 马潜, 等. 我国东北地区大气降水稳定同位素特征及其水汽来源[J]. 环境科学, 2012, **33**(9): 2924-2931.
- [10] 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[J]. 环境科学, 2012, **33**(3): 711-719.
- [11] 詹沪成, 陈建生, 张时音. 洞庭湖湖区降水-地表水-地下水同位素特征[J]. 水科学进展, 2014, **25**(3): 327-335.
- [12] 庞洪喜, 何元庆, 卢爱刚, 等. 天气尺度下丽江季风降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 变化[J]. 科学通报, 2006, **51**(10): 1218-1224.
- [13] 章新平, 刘晶淼, 孙维贞, 等. 中国西南地区降水中氧稳定同位素比率与相关气象要素之间关系的研究[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2006, **36**(9): 850-859.
- [14] 杨辉, 宋洁, 晏红明, 等. 2009/2010 年冬季云南严重干旱的原因分析[J]. 气候与环境研究, 2012, **17**(3): 315-326.
- [15] Draxler R R, Hess G D. An overview of the HYSPLIT-4 modeling system for trajectories, dispersion, and deposition[J]. Australian Meteorological Magazine, 1998, **47**: 295-308.
- [16] Draxler R R, Hess G D. Description of the HYSPLIT-4 Modeling system[R]. NOAA Technical Memorandum ERL ARL-224, 1997.
- [17] 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.
- [18] 张小娟, 宋维峰, 吴锦奎, 等. 元阳梯田水源区土壤水氢氧同位素特征[J]. 环境科学, 2015, **36**(6): 2102-2108.
- [19] 卫克勤, 林瑞芬. 论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): 33-41.
- [20] 章新平, 孙治安, 关华德, 等. 东亚水循环中水稳定同位素的 GCM 模拟和相互比较[J]. 冰川冻土, 2011, **33**(6): 1274-1285.
- [21] 章新平, 刘晶淼, 中尾正义, 等. 我国西南地区降水中过量氘指示水汽来源[J]. 冰川冻土, 2009, **31**(4): 613-619.
- [22] Vaughan J I. An evaluation of observed and simulated high-resolution records of stable isotopes in precipitation[D]. Melbourne: University of Melbourne, 2007.
- [23] 赵诗坤, 庞朔光, 文蓉, 等. 海河流域降水稳定同位素的云底二次蒸发效应[J]. 地理科学进展, 2015, **34**(8): 1031-1038.
- [24] 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[J]. 长江流域资源与环境, 2013, **22**(11): 1458-1465.
- [25] 章新平, 关华德, 孙治安, 等. 云南降水中稳定同位素变化的模拟和比较[J]. 地理科学, 2012, **32**(1): 121-128.
- [26] Webster P J, Yang S. Monsoon and ENSO: selectively interactive systems[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1992, **118**(507): 877-926.
- [27] 庞洪喜, 何元庆, 张忠林. 季风降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与高空风速关系[J]. 科学通报, 2004, **49**(9): 905-908.
- [28] Friedman I, Machta L, Soller, R. Water-vapor exchange between a water droplet and its environment[J]. Journal of Geophysical Research, 1962, **67**(7): 2761-2766.
- [29] 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 $\delta^{18}\text{O}$ 与水汽来源及温度的关系[J]. 地理科学, 2007, **27**(5): 718-723.

CONTENTS

Chemical Characteristics of Particulate Matters and Trajectory Influence on Air Quality in Shanghai During the Heavy Haze Episode in December, 2013	ZHOU Min, QIAO Li-ping, ZHU Shu-hui, <i>et al.</i> (1179)
Analysis of Single Particle Aging and Mixing State at an Agriculture Site (Quzhou) in the North China Plain in Summer Using a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer	HUANG Zi-long, ZENG Li-min, DONG Hua-bin, <i>et al.</i> (1188)
Investigation of Aerosol Mixed State and CCN Activity in Nanjing	ZHU Lin, MA Yan, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (1199)
Characteristics of Number Concentration Size Distributions of Aerosols Under Different Weather Processes in Beijing	SU Jie, ZHAO Pu-sheng, CHEN Yi-na (1208)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of PM _{2.5} in Chongqing Urban Areas	LIU Yong-lin, SUN Qi-min, ZHONG Ming-yang, <i>et al.</i> (1219)
Comparison of Monitoring Methods of Organic Carbon and Element Carbon in Atmospheric Fine Particles	PANG Bo, JI Dong-sheng, LIU Zi-rui, <i>et al.</i> (1230)
Residue Characteristics of Perfluorinated Compounds in the Atmosphere of Shenzhen	HE Peng-fei, ZHANG Hong, LI Jing, <i>et al.</i> (1240)
Monitoring Atmospheric CO ₂ and $\delta^{13}\text{C}(\text{CO}_2)$ Background Levels at Shangdianzi Station in Beijing, China	XIA Ling-jun, ZHOU Ling-xi, LIU Li-xin, <i>et al.</i> (1248)
Concentration and Size Distribution of Bioaerosols in Indoor Environment of University Dormitory During the Plum Rain Period	LIU Ting, LI Lu, ZHANG Jia-quan, <i>et al.</i> (1256)
Air Microbial Pollution and Health Risk of Urban Black Odorous Water	LIU Jian-fu, CHEN Jing-xiong, GU Shi-you (1264)
Particle Size Distribution, Seasonal Variation Characteristics and Human Exposure Assessment of Heavy Metals in Typical Settled Dust from Beijing	CAO Zhi-guo, YU Gang, LÜ Xiang-ying, <i>et al.</i> (1272)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Dust of Xi'an City, China	WANG Li, WANG Li-jun, SHI Xing-min, <i>et al.</i> (1279)
Toluene, Benzene and Acetone Adsorption by Activated Carbon Coated with PDMS	LIU Han-bing, JIANG Xin, WANG Xin, <i>et al.</i> (1287)
Distribution Characteristics, Sources and Pollution Assessment of Trace Elements in Surficial Sediments of the Coastal Wetlands, Northeastern Hainan Island	ZHANG Wei-kun, GAN Hua-yang, BI Xiang-yang, <i>et al.</i> (1295)
Heavy Metals Accumulation in the Caoheidian Reclamation Soils: Indicated by Soil Magnetic Susceptibility	XUE Yong, ZHOU Qian, LI Yuan, <i>et al.</i> (1306)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Their Moisture Sources in Mengzi Region, Southern Yunnan	LI Guang, ZHANG Xin-ping, XU You-peng, <i>et al.</i> (1313)
GIS Spatial Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Shallow Lakes in Jiangsu Province	LI Ying-jie, ZHANG Lie-yu, WU Yi-wen, <i>et al.</i> (1321)
Microcosm Simulation Study and Methylmercury Forming Mechanism at Landscape Water of City	LIU Xiao-hong, SI You-bin, GUO Zi-wei, <i>et al.</i> (1330)
Seasonal Stratification and the Response of Water Quality of a Temperate Reservoir—Zhoucun Reservoir in North of China	ZENG Ming-zheng, HUANG Ting-lin, QIU Xiao-peng, <i>et al.</i> (1337)
Hydrochemical Characteristics of Snow Meltwater and River Water During Snow-melting Period in the Headwaters of the Ertis River, Xinjiang	WEI Hong, WU Jin-kui, SHEN Yong-ping, <i>et al.</i> (1345)
Relationship Between the Phytoplankton Distribution and Environmental Factors in Fenhe Scenic Spot of Taiyuan	FENG Jia, GUO Yu-ning, WANG Fei, <i>et al.</i> (1353)
Distribution Characteristics of Nitrifiers and Denitrifiers in the River Sediments of Tongling City	CHENG Jian-hua, DOU Zhi-yong, SUN Qing-ye (1362)
Contribution of Base Flow to Total Nitrogen Loading in Subtropical Agricultural Catchments	MA Qiu-mei, LI Wei, WANG Yi, <i>et al.</i> (1371)
Characteristics and Transport Patterns of Ammonia, Nitrites, Nitrates and Inorganic Nitrogen Flux at Epikarst Springs and a Subterranean Stream in Nanshan, Chongqing	ZHANG Yuan-zhu, HE Qiu-fang, JIANG Yong-jun, <i>et al.</i> (1379)
Pollution Characteristics and Evaluation of Nitrogen, Phosphorus and Organic Matter in Sediments of Shanmei Reservoir in Fujian, China	QIU Zu-kai, HU Xiao-zhen, YAO Cheng, <i>et al.</i> (1389)
Effect of <i>Elodea nuttallii</i> -immobilized Nitrogen Cycling Bacteria on Nitrogen Removal Mechanism in an Inflow River, Gonghu Bay	HAN Hua-yang, LI Zheng-kui, WANG Hao, <i>et al.</i> (1397)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Different Forms of Phosphorus in Three Sorts of Rivers around Lake Taihu	GAO Yong-xia, SONG Yu-zhi, YU Jiang-hua, <i>et al.</i> (1404)
Distribution of Phosphorus Forms in the Overlying Water Under Disturbance with the Addition of Algae	CHEN Jun, LI Yong, LI Da-peng, <i>et al.</i> (1413)
Impacts of Sediment Disturbance on the Distribution of Suspended Particle Size and Phosphorus	GUO Jun-rui, LI Da-peng, LIU Yan-jian (1422)
Effect of Zirconium Modified Kaolin-Based Cap on Migration and Transformation of Phosphorus Between Sediment and Overlying Water	ZHANG Zhe, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (1427)
Toxicity of 4-Chlorophenol Solution Under Electrochemical Reduction-oxidation Process	WANG Yan, SHI Qin, WANG Hui, <i>et al.</i> (1437)
Removal and Recycle of Phosphor from Water Using Magnetic Core/Shell Structured Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ Nanoparticles Functionalized with Hydrous Aluminum Oxide	LAI Li, XIE Qiang, FANG Wen-kan, <i>et al.</i> (1444)
Occurrence and Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in Typical Wastewater Treatment Plants in Beijing	QIAO Meng, QI Wei-xiao, ZHAO Xu, <i>et al.</i> (1451)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matters in Reject Water from Wastewater Treatment Plants	NIU Tian-hao, ZHOU Zhen, HU Da-long, <i>et al.</i> (1460)
Feasibility and Economic Analysis of Denitrification of Photovoltaic Wastewater Containing High Fluorine	LI Xiang, ZHU Liang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (1467)
Quick Start-up and Sustaining of Shortcut Nitrification in Continuous Flow Reactor	WU Peng, ZHANG Shi-ying, SONG Yin-ling, <i>et al.</i> (1472)
Performance Recoverability of Denitrifying Granular Sludge Under the Stressing Effect of Nanoscale Zero-valent Iron	WANG Fan-fan, QIAN Fei-yue, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (1478)
Effect of Low-concentration Ciprofloxacin on the Nitrification and Nitrifying Microorganisms of Biofilms in Biological Aerated Filter	HE Shi, GU Chao-chao, WEI Xin, <i>et al.</i> (1485)
Optimization Study on the Nitrogen and Phosphorus Removal of Modified Two-sludge System Under the Condition of Low Carbon Source	YANG Wei-qiang, WANG Dong-bo, LI Xiao-ming, <i>et al.</i> (1492)
Effects of Short-time Conservation Tillage Managements on Greenhouse Gases Emissions from Soybean-Winter Wheat Rotation System	XIE Yan, CHEN Xi, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (1499)
Diurnal and Seasonal Dynamic Variation of Soil Respiration and Its Influencing Factors of Different Fenced Enclosure Years in Desert Steppes	CUI Hai, ZHANG Ya-hong (1507)
Correlation Among Soil Organic Carbon, Soil Inorganic Carbon and the Environmental Factors in a Typical Oasis in the Southern Edge of the Tarim Basin	GONG Lu, ZHU Mei-ling, LIU Zeng-yuan, <i>et al.</i> (1516)
Effects of Low-Molecular-Weight Organic Acids on the Speciation of Pb in Purple Soil and Soil Solution	LIU Jiang, JIANG Tao, HUANG Rong, <i>et al.</i> (1523)
Phytoremediation of Petroleum Contaminated Soils with <i>Iris pseudacorus</i> L. and the Metabolic Analysis in Roots	WANG Ya-nan, CHENG Li-juan, ZHOU Qi-xing (1531)
Oxidation Process of Dissolvable Sulfide by Manganite and Its Influencing Factors	LUO Yao, LI Shan, TAN Wen-feng, <i>et al.</i> (1539)
Screening and Enzyme Production Characteristics of Thermophilic Cellulase-producing Strains	FENG Hong-mei, QIN Yong-sheng, LI Xiao-fan, <i>et al.</i> (1546)
Development of Determination Method of Fluoroquinolone Antibiotics in Sludge Based on Solid Phase Extraction and HPLC-Fluorescence Detection Analysis	DAI Xiao-hu, XUE Yong-gang, LIU Hua-jie, <i>et al.</i> (1553)
Distribution and Risk Assessment of Sulfonamides Antibiotics in Soil and Vegetables from Feedlot Livestock	JIN Cai-xia, SI Xiao-wei, WANG Zi-ying, <i>et al.</i> (1562)
Influence of Four Kinds of PPCPs on Micronucleus Rate of the Root-Tip Cells of <i>Vicia-faba</i> and Garlic	WANG Lan-jun, WANG Jin-hua, ZHU Lu-sheng, <i>et al.</i> (1568)
Environmental Behaviors and Ecotoxicology of the Emerging Contaminants Polyhalogenated Carbazoles	LIN Kun-de, CHEN Yan-qiu, YUAN Dong-xing (1576)
Classification of Priority Area for Soil Environmental Protection Around Water Sources: Method Proposed and Case Demonstration	LI Lei, WANG Tie-yu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i> (1584)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年4月15日 第37卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 4 Apr. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行