E方知库
Eco-Environmental Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社

中国期刊方阵
双奖期刊
中华人民共和国新闻出版总署

2020
Vol.41 No.9
第41卷 第9期

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第41卷 第9期
2020年9月15日

目 次

2020年天津市两次重污染天气污染特征分析 …… 肖致美, 徐虹, 蔡子颖, 李鹏, 刘彬, 元洁, 郑乃源, 唐邈, 陈魁, 邓小文(3879)
基于高分辨率MARGA分析成都市$PM_{2.5}$中水溶性离子污染特征 …… 尹寒梅, 陈军辉, 冯小琼, 姜涛, 钱骏, 刘政(3889)
宿迁市$PM_{2.5}$中水溶性无机离子的季节特征和来源分析 …… 马红璐, 赵欣, 陆建刚, 王辉, 许纯领, 欧阳琰, 朱新胜, 殷堂兵, 漆丹, 陆亚秋, 汪玖阳, 陆声兴(3899)
鼎湖山大气颗粒物中OC与EC的浓度特征及粒径分布 …… 李安娜, 温天雪, 华维, 杨员, 孟泽, 胡波, 辛金元(3908)
鞍山市道路扬尘碳组分特征及来源解析 …… 林孜, 姬亚芹, 林宇, 国纪良, 马妍, 赵静琦(3918)
西安市冬季$PM_{2.5}$中WSOC的光谱特性和来源解析 …… 杨毅, 张亚楠, 刘焕武, 田萍萍, 李亚飞, 雷颖, 王一博(3924)
长三角地区气溶胶光学性质与新粒子生成观测 …… 杜盈盈, 陈军, 张家洛, 甘桂城, 刘瑜存, 苏明旭, 楼晟荣, 周敏, 陶士康, 乔利平(3932)
连云港市挥发性有机化合物的组分特征及来源解析 …… 崔金梦, 王体健, 李秋潼, 董立文, 黄丛吾, 曹云擎(3941)
成都市城区大气VOCs季节污染特征及来源解析 …… 王成辉, 陈军辉, 韩丽, 徐晨曦, 王波, 李英杰, 刘政, 钱骏(3951)
德州市夏季臭氧敏感性特征及减排方案 …… 严茹莎(3961)
超低改造下中国火电排放清单及分布特征 …… 屈加豹, 王鹏, 伯鑫, 薛晓达, 董广霞, 崔磊, 康明雄, 王彤, 汤铃, 朱法华, 李时蓓(3969)
浙江省人为源氨排放清单建立及分布特征 …… 赵睿东, 于兴娜, 侯新红, 沈丽(3976)
垃圾焚烧烟气中二噁英控制技术的评估与筛选 …… 赵思岚, 奚鹏飞, 郭凤艳, 邓双, 贾建丽(3985)
兰州市两场典型降水事件稳定同位素特征及其水汽来源 …… 韩婷婷, 张明军, 王圣杰, 杜勤勤, 马转转, 郭蓉, 曹晏风(3993)
然乌湖流域地表水水化学特征及控制因素 …… 张涛, 王明国, 张智印, 刘廷, 何锦(4003)
河套灌区地下水化学演变特征及形成机制 …… 崔佳琪, 李仙岳, 史海滨, 孙亚楠, 安海军, 邢进平(4011)
石期河流域地下水化学特征及物质来源分析 …… 李笑, 于爽, 李亮, 郭永丽(4021)
长江中下游湖泊水体氮磷比时空变化特征及其影响因素 …… 季鹏飞, 许海, 詹旭, 朱广伟, 邹伟, 朱梦圆, 康丽娟(4030)
2016~2017年长荡湖流域河湖系统营养盐时空分布机制分析 … 李新艳, 李恒鹏, 姜三元, 马培, 赖锡军, 邓建才, 陈东强, 耿建伟(4042)
菹草对湖泊水质及浮游植物群落结构的影响 …… 康丽娟, 许海, 邹伟, 朱广伟, 朱梦圆, 季鹏飞, 陈洁(4053)
金泽水库库区细菌群落构建过程与关键驱动因子分析 …… 刘明坤, 童俊, 朱慧峰, 白晓慧(4062)
典型氟工业园周边河流沉积物中全(多)氟化合物的分布特征 …… 孙琳婷, 赵祯, 唐建辉(4069)
微塑料对河水抗生素抗性基因的影响 …… 周昕原, 王言仔, 苏建强, 黄福义(4076)
莲花水库水体中抗生素污染特征及生态风险评价 …… 廖杰, 魏晓琴, 肖燕琴, 李青松, 范洪勇, 刘学军, 庄马展, 刘超翔(4081)
拟柱孢藻生长及碱性磷酸酶活性对不同磷浓度和磷形态响应的株系间差异 …… 叶金梅, 赵莉, 罗旭, 彭亮, 雷腊梅(4088)
妫水河湿地植物作用及调水水质响应模拟 …… 李亚娟, 杜彦良, 毕二平, 王亮, 陈翠柏(4095)
浅基质层干植草沟运行效果的现场实验 …… 张佳炜, 李田, 张庭秀(4105)
海绵城市地块汇水区颗粒污染物的传输 …… 李佳, 谢文霞, 姜智绘, 单溪环, 廖云杰, 赵洪涛, 李叙勇(4113)
天然黄铁矿吸附去除水中Sb(Ⅴ):性能与机制 …… 石松, 吴乾元, 李新正, 黄满红(4124)
过硫酸盐氧化处理含萘磺酸废水 …… 章晋门, 卢钧, 刘晓琛, 陈泉源(4133)
温度对城市污水厌氧生物滤池运行效果与菌群结构的影响 …… 刘智斌, 刘秀红, 周桐, 章世勇, 李健敏, 杨庆(4141)
ABR-MBR耦合工艺启动及优化反硝化除磷性能 …… 缪新年, 汪倩, 郭凯成, 刘文如, 沈耀良(4150)
低温下全自养脱氮颗粒污泥适应低基质效能 …… 刘雨馨, 王建芳, 钱飞跃, 陈倩苗, 乔伟, 沈聪(4161)
雄安新区土壤重金属地球化学监测关键问题探讨 …… 郭志娟, 周亚龙, 杨峥, 赵传冬, 成杭新, 孔牧, 彭敏(4169)
基于土壤重金属及PAHs来源的人体健康风险定量评价:以北京某工业污染场地为例 …… 吴志远, 张丽娜, 夏天翔, 贾晓洋, 李慧颖, 王世杰(4180)
基于乡镇尺度的西南重金属高背景区土壤重金属生态风险评价 …… 张富贵, 彭敏, 王惠艳, 马宏宏, 徐仁廷, 成晓梦, 侯召雷, 陈子万, 李括, 成杭新(4197)
云南兰坪铅锌矿区优势植物重金属富集特性及应用潜力 …… 张龙, 张云霞, 宋波, 吴勇, 周子阳(4210)
水培试验下水稻Pb吸收累积关键生育期 …… 胡雨丹, 周航, 辜娇峰, 霍洋, 邓鹏辉, 魏宾纭, 刘俊, 廖柏寒(4218)
田间条件下养分调控八宝景天Cd修复效率 …… 郭俊姆, 杨俊兴, 杨军, 郑国砥, 周小勇, 陈同斌, 卞建林, 孟晓飞, 李玉峰(4226)
桉树枝条生物炭输入对桂北桉树人工林酸化土壤的作用效果 …… 段春燕, 沈育伊, 徐广平, 滕秋梅, 张德楠, 何成新, 张中峰, 周龙武, 孙英杰(4234)
秸秆直接还田和炭化还田对红壤酸度、养分和交换性能的动态影响 …… 杨彩迪, 卢升高(4246)
土壤微生物群落结构对生活源和工业源再生水灌溉的差异化响应 …… 王燕, 程东会, 檀文炳, 余红, 席北斗, 姜永海, 党秋玲(4253)
粪肥和有机肥施用对稻田土壤微生物群落多样性影响 …… 理鹏, 吴建强, 沙晨燕, 叶春梅, 黄沈发(4262)
松花江下游沿江湿地土地利用变化对土壤细菌群落多样性的影响 …… 张拓, 徐飞, 怀宝东, 杨雪, 隋文志(4273)
黄土高原草地土壤细菌群落结构对于降水变化的响应 …… 李娜, 王宝荣, 安韶山, 焦峰, 黄倩(4284)
土地利用方式对会仙岩溶湿地土壤真菌群落和功能类群的影响 …… 程跃扬, 靳振江, 王晓彤, 贾远航, 袁武, 周军波(4294)
黑土真菌群落互作及其与梯度有机质碳分子结构的关系 …… 尚秋彤, 黄瑞林, 倪浩为, 隋跃宇, 孙波, 梁玉婷(4305)
贵州茂兰喀斯特森林不同演替下土壤真核微生物多样性 …… 王显, 龙健, 李娟, 刘灵飞, 廖洪凯, 李宜蓉, 杨睿(4314)
玉米秸秆生物炭固化细菌对镉砷吸附 …… 刘玉玲, 朱虎成, 彭鸥, 李丹阳, 杨蕊嘉, 彭晶, 铁柏清(4322)
无机态氮素转化机制及水土体氮源识别方法 …… 梁杏, 孙立群, 张鑫, 张洁, 付鹏宇(4333)
《环境科学》征订启事(4061) 《环境科学》征稿简则(4132) 信息(4233, 4293, 4304)

Eco-Environmental Knowledge Web

环 境 科 学
Environmental Science

第41卷第9期 2020年9月
Vol.41, No.9 Sep., 2020

兰州市两场典型降水事件稳定同位素特征及其水汽来源

韩婷婷, 张明军*, 王圣杰, 杜勤勤, 马转转, 郭蓉, 曹晏风
(西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070)

摘要: 为了加深对短时间尺度下降水同位素变化规律的认识,利用兰州市2019年夏季典型的长历时弱降水(6月26~27日)和短时强降水(7月28日)事件短时间尺度(10 min和30 min)的连续样品,结合HYSPLIT模型对降水氢氧稳定同位素的变化特征及其机制进行分析. 结果表明,降水初始阶段,二次蒸发效应使事件内连续降水的大气水线(SMWL)斜率偏小. 连续样点大都分布在GMWL和LMWL上方,且SMWL的截距都大于局地年平均过量氘(8.13),说明降水一定程度上经历了水汽再循环. 6月26~27日连续2 d的降水事件,第1 d的$\delta^{18}O$呈"L"型变化,第2 d呈波动变化, $\delta^{18}O$不遵循降雨量效应. 7月28日, $\delta^{18}O$呈平稳下降趋势,变化范围超过9‰. 6月26日, 500 m高度层水汽输送路径整体较短, 27日以局地水汽蒸发为主. 7月28日降水的水汽来源变化不明显,气团较单一,同位素值无明显波动. 因此,对于短时间尺度下的单次降水事件,水汽来源的异同也是降水期间同位素变化的原因之一.

关键词:短时间尺度; 典型降水; 连续采样; 氢氧稳定同位素; 水汽来源; 兰州市
中图分类号: X142 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2020)09-3993-10 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201912142

Characteristics of Stable Isotopes and Moisture Sources of Two Typical Precipitation Events in Lanzhou City

HAN Ting-ting, ZHANG Ming-jun*, WANG Sheng-jie, DU Qin-qin, MA Zhuan-zhuan, GUO Rong, CAO Yan-feng
(College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: To better understand the isotope variations on a short time scale, this study focused on a long-term rainfall event with light precipitation (June 26-27) and a short-term one with heavy precipitation (July 28) in Lanzhou City in the summer of 2019. Combined with HYSPLIT model, samples collected during a continuous precipitation event every 10 min and 30 min were analyzed to explore the characteristics and mechanism of stable hydrogen and oxygen isotopes in precipitation. The results indicate that the effect of sub-cloud secondary evaporation makes the slope of the sequential meteoric water line (SMWL) smaller at the beginning of the rainfall event. Most of the continuous sampling points are distributed above the global meteoric water line (GMWL) and local meteoric water line (LMWL). Moreover, the deuterium excess is larger than the local average annual deuterium (8.13), indicating that the samples have experienced moisture recycling to a certain extent. During two consecutive days (June 26-27) of rainfall, the variations in oxygen isotope $\delta^{18}O$ did not follow the effect of precipitation amount; the precipitation $\delta^{18}O$ of the first day was "L" shaped, and it fluctuated the next day. On July 28, $\delta^{18}O$ steadily decreased, and the range of $\delta^{18}O$ exceeded 9‰. On June 26, the moisture transport path was short at the height of 500 m and on June 27 local evaporation was the main pathway. On July 28, with a relatively stable air mass, the moisture source of the entire precipitation event did not change significantly, neither did the isotope value. Therefore, for a single precipitation event on a short time scale, the difference in moisture sources is one of the reasons for isotope variations.

Key words: short-time scale; typical precipitation; continuous sampling; stable hydrogen and oxygen isotopes; moisture source; Lanzhou City

氢氧稳定同位素是水分子的重要组成部分,被广泛用作天然示踪剂来研究不同时空尺度的水文过程,如生态水文过程和气候水文过程等[1~4]. 降水作为水循环的重要组成部分,其氢氧稳定同位素(δ^2H和$\delta^{18}O$)包含了丰富的气候和环境信息[5~8]. 降水同位素不仅对不同时间尺度的气候变化响应敏感,而且与极端天气事件有密切的联系[9]. 气温上升通常伴随着中高纬度地区降雨强度的增加[10,11]. 夏季温暖的空气可能含有更多有利于降水的水分,这是形成强降雨的关键因素[12,13]. 单靠当地已有的水汽不能形成强降雨,必须要有充沛的水汽源源不断地输入降雨区[14]. 而在不同极端降水事件中,由于受外界诸多因素的不同影响,同位素的变化错综复杂,包含的信息也值得研究. 在中、高纬度地区,降水中δ^2H和$\delta^{18}O$的变化主要受温度影响[15],而热带地区降水量是主控因素[16]. 同时,降水同位素也受气团来源、凝结高度和纬度等影响[2,15]. 此外,对于某地的次降水事件,降水氢氧稳定同位素主要受水汽来源、水汽运移过程以及区域气象条件的影响[2,17,18]. 那么,水汽来源的异同就是降水期间同位素值变化

收稿日期: 2019-12-18; **修订日期**: 2020-03-13
基金项目: 国家自然科学基金项目(41771035)
作者简介: 韩婷婷(1994~),女,硕士研究生,主要研究方向为同位素水文过程,E-mail:hantting2018@163.com
* 通信作者,E-mail:mjzhang2004@163.com

的原因之一[19,20].

自 1961 年以来,全球大气降水同位素监测网络(GNIP)以其月尺度和年尺度的降水氢氧稳定同位素数据受到了同位素水文领域的持续关注[8],但是其时间分辨率较为粗略,尚不足刻画更为细致的天气过程,不能满足对降水稳定同位素变化机制的精细化研究需求[21]. 根据不同的研究目的,在月尺度采样的基础上,日尺度采样越来越多,这使得对降水同位素组成基本规律及影响因素的相关研究越发深入[22,23],对水循环过程(降水过程、水汽来源、水汽输送等)中稳定同位素细节变化的认识也越来越详细[24,25],尤其是单次降水过程中稳定同位素的变化研究已成为热门话题[17,19,26,27]. 1968 年, Miyake[28] 利用在日本东京地区采集的 10 组连续性降水事件样品进行研究,发现连续性降水事件中的$\delta^{18}O$呈现出"上升型"、"下降型"和"稳定型"等变化趋势. 更多国外学者的研究也通过不同的数据证实了类似的趋势,并尝试从天气系统、水汽输送与近地面气象条件等方面进行解释[29~31]. 近年来,国内学者对单次降水过程中稳定同位素变化也展开了研究[20,32~34]. 尽管存在上述单次降水的研究,但多数研究的样品对一次降水事件内的样品采集是随机的,即收集降水过程中的若干样品,规范化的样品收集有待于自动采样仪器的应用.

兰州市作为西北地区东部的主要城市之一,位于亚洲季风边缘区[21],是高原阻碍形成绕流气流的降水异常敏感的区域[35],水汽来源相对复杂. 在地形、城市环境与气候背景的综合作用下,会发生强降水事件. 虽然对兰州降水同位素已有监测记录,但大都是基于月尺度、日尺度以及降水事件对兰州市降水稳定同位素的基本特征进行研究[36~38]. 本文利用德国 Eigenbrodt 公司研发的自动降水收集器(型号为 NSA 181/S),对 2019 年兰州市夏季单个降水事件进行短时间尺度的连续采集. 本研究选取两场典型降水事件并结合 HYSPLIT 分析事件内连续样品的稳定同位素变化特征,以期为深入探究降水稳定同位素变化机制提供一种全新视角.

1 研究区概况

兰州市(35°34′~37°07′N, 102°35′~104°34′E 之间)深居内陆,为干旱和半干旱地区. 地形复杂,地势南部和西部高,东北低,黄河横穿全境,形成峡谷和盆地相间的串珠状河谷,平均海拔为1 520 m. 整体来看该区属于典型的温带大陆性气候[39],降水量偏少,季节性冷暖交替和干湿交替明显,冬季寒冷干燥,夏季高温多雨. 具体表现为:多年平均气温为 7.4℃,昼夜温差大,年均降水量 310 mm,多集中于夏季. 蒸发强烈,日照时间长. 兰州市地处亚洲季风边缘区域[38],由于其独特地理位置,使得该区域内的水循环机制较为复杂.

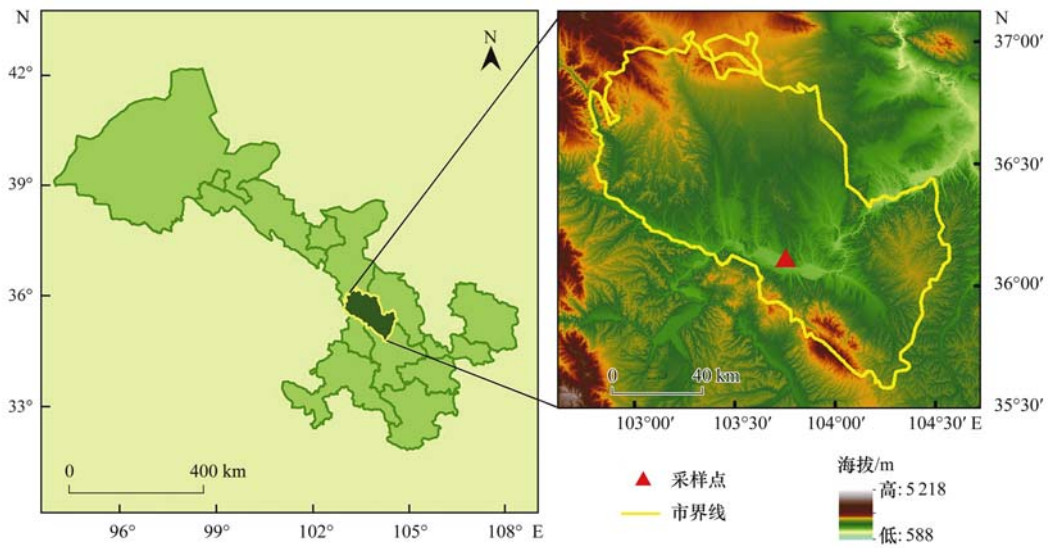

图 1 研究区及采样点位置示意

Fig. 1 Location of the study area and sampling site

2 材料与方法

2.1 样品的采集

本研究的采样点位于兰州市西北师范大学新校区气象园内(图 1). 2019 年夏季使用德国 Eigenbrodt 公司研发的自动降水收集器(型号为 NSA 181/S)对降水进行连续采集. 该采样器由样品收集器、感雨器和压盖驱动组成,可对降水进行较高频次的采样. 本文预先设置系统时间间隔为 10 min 或 30 min,当感雨器感应到雨水信号后开始采样. 一

个循环可连续收集 16 个样品，每隔 10 min 或 30 min 会自动换瓶，并且记录下各样品采集的起始时间、降水量等信息. 气温、相对湿度等则由自动气象站进行同步观测. 一个循环完成后会再次启动循环直到降水结束. 每次循环完成后立即收集水样，并装入标有序号的 50 mL 的 HDPE 塑料瓶，拧紧后密封，整理后当日就进行水样分析，以最大限度减小蒸发分馏. 降水期间，如果一次降水中出现的降水间歇时间不足 6 h 视为一次降水过程，间歇时间大于 6 h 则视为两次降水过程[40].

2.2　实验分析

所有样品的室内处理和分析都在西北师范大学地理与环境科学学院稳定同位素实验室进行. 降水样品的氢氧稳定同位素的测定采用美国 ABB-Los Gatos Research 公司研发的 T-LWIA-45-EP 型液态水同位素分析仪. 为避免样品蒸发引起的同位素分馏，本次测试环境温度为 25℃ 左右. 选用 LGR3E、LGR4E 和 LGR5E 作为参比标样，测试的 3 个标样分别为：LGR3E ($\delta^{18}O = -11.04‰$, $\delta^{2}H = -79.6‰$)、LGR4E ($\delta^{18}O = -7.81‰$, $\delta^{2}H = -49.2‰$) 和 LGR5E ($\delta^{18}O = -2.99‰$, $\delta^{2}H = -9.9‰$). 符合张自超等[41]对稳定同位素分析结果的有效位数规则. $\delta^{2}H$ 值和 $\delta^{18}O$ 值的测试误差分别不超过 ±1‰ 和 ±0.3‰，分析得出的 $\delta^{18}O$ 和 $\delta^{2}H$ 以相对于维也纳标准平均海洋水 (vienna standard mean ocean water, VSMOW) 的千分差值表示：

$$\delta = \left(\frac{R_{样品}}{R_{标准}} - 1\right) \times 1\,000‰$$

式中，$R_{样品}$ 为水样中重同位素和轻同位素的比值 (即同位素比率)，对 $\delta^{2}H$ 和 $\delta^{18}O$ 分别为 $^{2}H/H$ 和 $^{18}O/^{16}O$，$R_{标准}$ 为 VSMOW 中的同位素比率.

水循环过程中，除了 $\delta^{2}H$ 和 $\delta^{18}O$ 的线性变化外，还会产生一差值，这一差值被定义为过量氘 (d-excess $= \delta^{2}H - 8 \times \delta^{18}O$，记为 d-excess)[22]，其主要受水汽源地的温度、湿度和风速的控制[22,42]，环境条件的不同会使 d-excess 和大气水线在时间和空间上均存在明显的差异[15].

2.3　拉格朗日轨迹追踪模型

本文利用美国国家海洋和大气管理局 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 大气资源实验室 (Air Resources Laboratory, ARL) 开发的混合单粒子拉格朗日积分轨迹模式 (hybrid single-particle lagrangian integrated trajectory, HYSPLIT) 结合 GDAS 气象数据，对降水不同阶段内的水汽后向轨迹进行后向反演. 计算采样点观测期间每次降水前 10 日内的降水不同高度层的气团轨迹 (气团高度分为地面以上 500、1 000、1 500、2 000和2 500 m共 5 层). 由于水汽在平流层中最长停留时间是 10 d 左右[43,44]. 因此采用 10 d 作为回溯日数，即计算每次降水 240 h 之前降水气团轨迹，以研究区为气团运动终点.

3　结果与讨论

3.1　典型降水事件中 $\delta^{2}H$ 和 $\delta^{18}O$ 的关系

在全球大气降水线 (global meteoric water line, GMWL) 中，$\delta^{2}H$ 和 $\delta^{18}O$ 的关系是 $\delta^{2}H = 8\,\delta^{18}O + 10$[45]，而兰州市局地大气水线 (local meteoric water line, LMWL) 方程是 $\delta^{2}H = 7.48\,\delta^{18}O + 8.13$[38]. 结合 GMWL 可以为局地大气降水同位素的组成提供基准，对于研究水循环过程中稳定同位素的变化具有重要意义. 根据收集的样品，得到事件内连续降水的大气水线 (sequential meteoric water line, SMWL) 方程 (1) 和 (2)：

$$\delta^{2}H = (7.43 \pm 0.23)\,\delta^{18}O + (11.72 \pm 1.85) \quad (R^{2} = 0.92,\ P < 0.000\,1,\ n = 94) \qquad (1)$$

$$\delta^{2}H = (7.00 \pm 0.42)\,\delta^{18}O + (13.20 \pm 2.24) \quad (R^{2} = 0.92,\ P < 0.001,\ n = 27) \qquad (2)$$

在两场典型降水过程中，$\delta^{2}H$ 和 $\delta^{18}O$ 沿 SMWL 发生，散落在 SMWL 上，二者之间存在显著的线性相关关系，连续样点大都分布在 GMWL 和 LMWL 上方，且截距都大于局地年平均过量氘 (8.13)，这说明样点在一定程度上经历了水汽再循环.

6 月 26～27 日的降水事件，历时 29 h 42 min，总降水量为 49.2 mm，属于典型的长历时弱降水事件 [图 2(a)]. 第 1 阶段 $\delta^{18}O$ 较大，样点多数在 SMWL 的右上方，同位素富集；第 2、3 阶段 $\delta^{18}O$ 偏负，位于 SMWL 的下方，蒸发作用变弱；6 月 27 日 $\delta^{18}O$ 显著偏负，位于 SMWL 的左下方，说明持续降雨使大气中水汽含量趋于饱和或过饱和，云下二次蒸发减弱.

7 月 28 日的降水事件，历时 5 h 30 min，总降水量达 32.7 mm，属于典型的短时强降水事件 [图 2(b)]. 第 1 阶段 $\delta^{18}O$ 偏正，样点位于大气水线的右下方，由于周围大气干热，受二次蒸发的影响较大，使大气水线的斜率减小；第 2 阶段样点偏中间位置，$\delta^{18}O$ 主要受平衡分馏的影响；第 3 阶段 $\delta^{18}O$ 偏负，样点在 SMWL 的左下方，降雨接近尾声，大气达到饱和状态，雨滴受二次蒸发的影响变弱. 同时强降水的雨滴较大，其表面积和体积之比较小，下降速度快，蒸发时间短，使得大气水线截距偏大[46].

与以往 GNIP 收集的月平均数据相比，基于短时间尺度的降水稳定同位素更容易受到蒸发、温度等短期天气状况的影响[47,48]. 在较小的空间尺度上，氢和氧同位素在一次蒸发过程中由于相对湿度

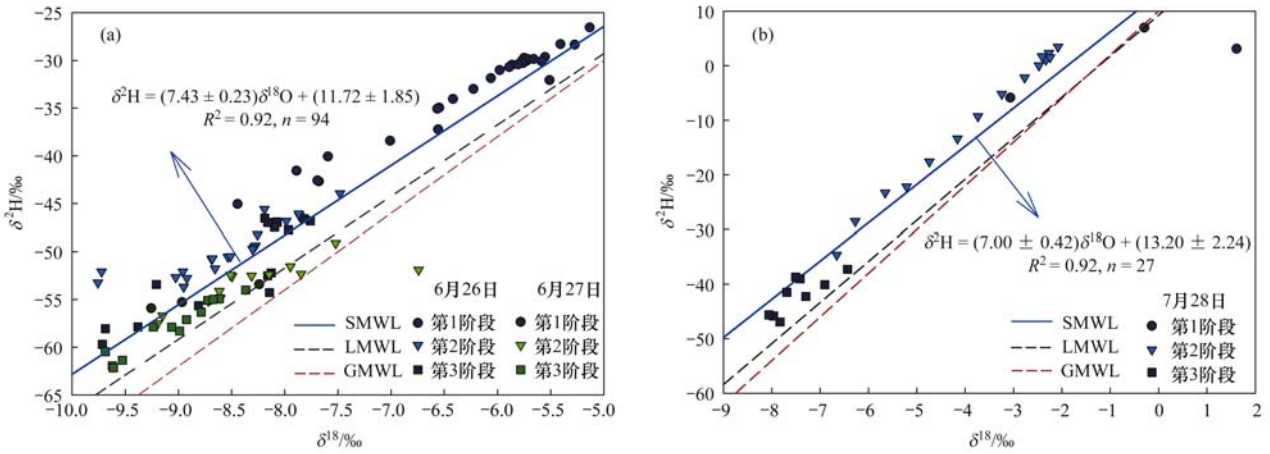

图 2 典型降水事件的大气水线

Fig. 2 Meteoric water line of typical rainfall in a precipitation event

和温度以及二次蒸发效应而产生分馏差异[49],出现 SMWL 的斜率小于 8. 因此,在连续性降水事件内的样品都记录着相应时刻下的物理变化和稳定同位素的分馏速率比[46],说明短时间尺度下更能精细真实地反映局地的综合环境特征. 这也印证了降水事件内稳定同位素研究可用于评价降雨过程中较重同位素的贫化对样品蒸发的响应[46,50].

3.2 典型降水事件中同位素的阶段性变化特征

3.2.1 典型长历时弱降水事件

6 月 26 ~ 27 日的降水事件,随着降水的持续, 6 月 26 日降水$\delta^{18}O$不断减小,在降水量变小时达到一个平稳值,呈"L"型趋势(图 3),整体符合降水稳定

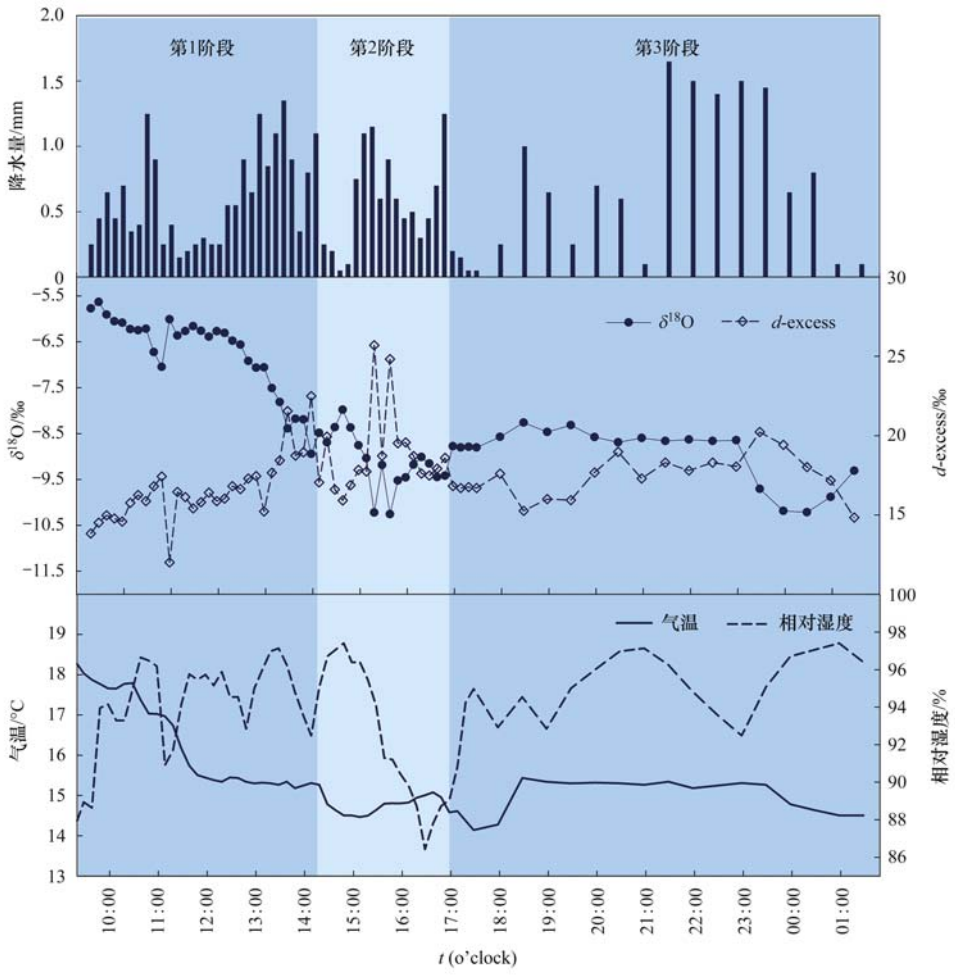

图 3 6 月 26 ~ 27 日降水事件中$\delta^{18}O$、*d*-excess、气温、相对湿度和降水量的变化

Fig. 3 Temporal variations in precipitation $\delta^{18}O$, *d*-excess, temperature, relative humidity, and precipitation amount in June 26-27 precipitation event

同位素的瑞利分馏特征. 根据$\delta^{18}O$的变化特征,划分为 3 个阶段(图 3).

第 1 阶段(09:18 ~ 14:07),降水历时 4 h 49 min,降水量为 17.1 mm,占该场降水总量的 41.8%. 该阶段$\delta^{18}O$明显偏大,呈下降趋势,其加权平均值为 -6.53‰,*d*-excess 值呈升高趋势. 降水初期气温较高,空气中的水汽含量少,随后气温逐渐减小,相对湿度增大;

第 2 阶段(14:08 ~ 16:50),$\delta^{18}O$整体呈现出先减小后增大的态势,在 -9.76‰~ -7.48‰之间呈"V"型波动变化. *d*-excess 值偏大,在 15.91‰~ 25.69‰之间也有明显波动. 该阶段气温较低,降水量减少,相对湿度偏低;

第 3 阶段(6 月 26 ~ 27 日 16:51 ~ 01:30),23:00以前,气温相对稳定,$\delta^{18}O$变幅不大,同位素组成几乎保持不变. *d*-excess 值在上下波动中有所增大. 而 23:00 以后,降水量减小,$\delta^{18}O$先减小又增大,而 *d*-excess 持续减小.

6 月 27 日(08:18 ~ 14:07),降水历时 5 h 34 min,降水量为 8.6 mm. 根据$\delta^{18}O$的变化特征,划分为 3 个阶段(图 4).

第 1 阶段(08:18 ~ 09:20),具有低$\delta^{18}O$和高 *d*-excess,$\delta^{18}O$随气温的降低而降低,而 *d*-excess 值随气温降低而增大,与相对湿度变化趋势相同;

第 2 阶段(09:21 ~ 12:00),$\delta^{18}O$在 -9.20‰~ -6.74‰之间波动较大,与 *d*-excess 呈相反趋势. 其中$\delta^{18}O$出现一些不规则且呈短暂上升趋势,这可能与新水汽的汇入使原降水气团中重同位素含量升高有关;

第 3 阶段(12:01 ~ 14:07),$\delta^{18}O$先减小后增加,从 -8.40‰降至 -9.65‰,出现了$\delta^{18}O$的低值,表现为最大降雨强度时达到最大耗竭. *d*-excess 值波动较小. 气温有回升的趋势,相对湿度减小.

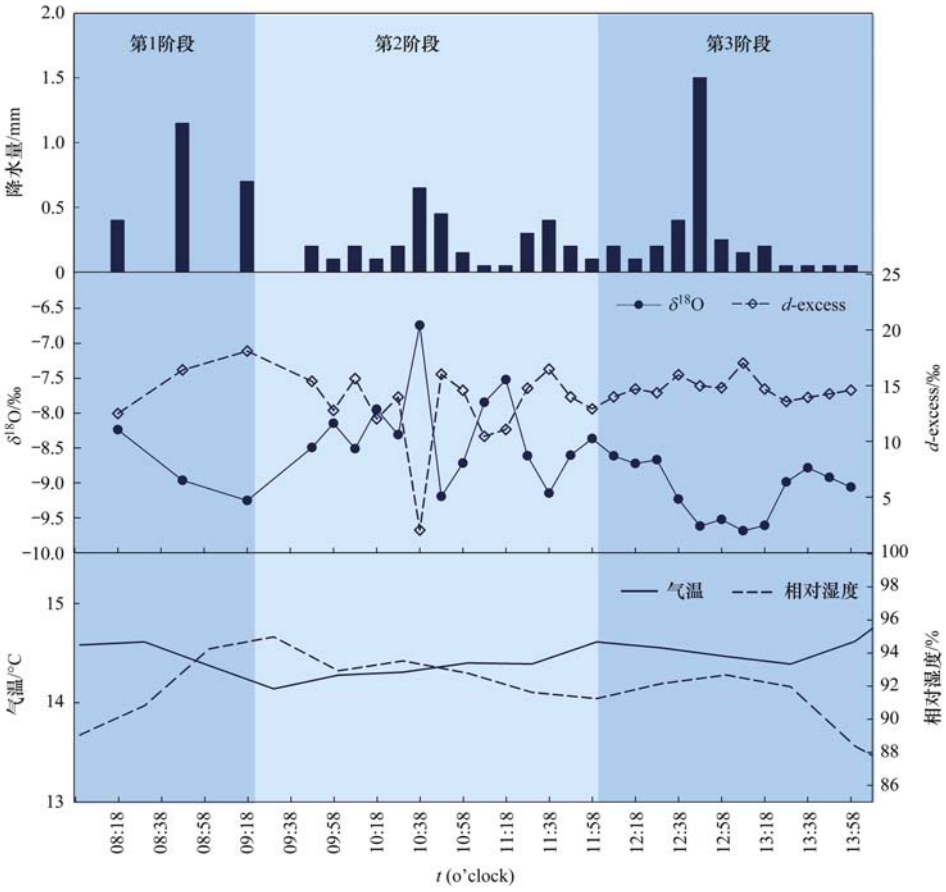

图 4　6 月 27 日降水事件中$\delta^{18}O$、*d*-excess、气温、相对湿度和降水量的变化

Fig. 4　Temporal variations in precipitation $\delta^{18}O$, *d*-excess, temperature, relative humidity, and precipitation amount in June 27 precipitation event

3.2.2　典型短时强降水事件

7 月 28 日的降水事件,随着降水的持续,同位素值呈持续下降趋势(图 5). 起初$\delta^{18}O$值为 1.62‰,由于重同位素的贫化,持续降低至 -8.06‰,变化范围超过 9‰,这符合降水稳定同位素的瑞利分馏特征. 根据$\delta^{18}O$变化特征,划分为 3 个阶段(图 5).

第 1 阶段(17:50 ~ 19:19),降水量较大,占该场降水总量的 37.2%. $\delta^{18}O$加权平均值为 -1.77‰,具有高$\delta^{18}O$和低 *d*-excess 值,说明了高温和低湿度使雨滴从云底降落时,更易受到云下蒸发的影响;

第 2 阶段(19:20 ~ 21:49),$\delta^{18}O$从 -2.27‰持续平稳下降至 -6.98‰,加权平均值为 -5.21‰.

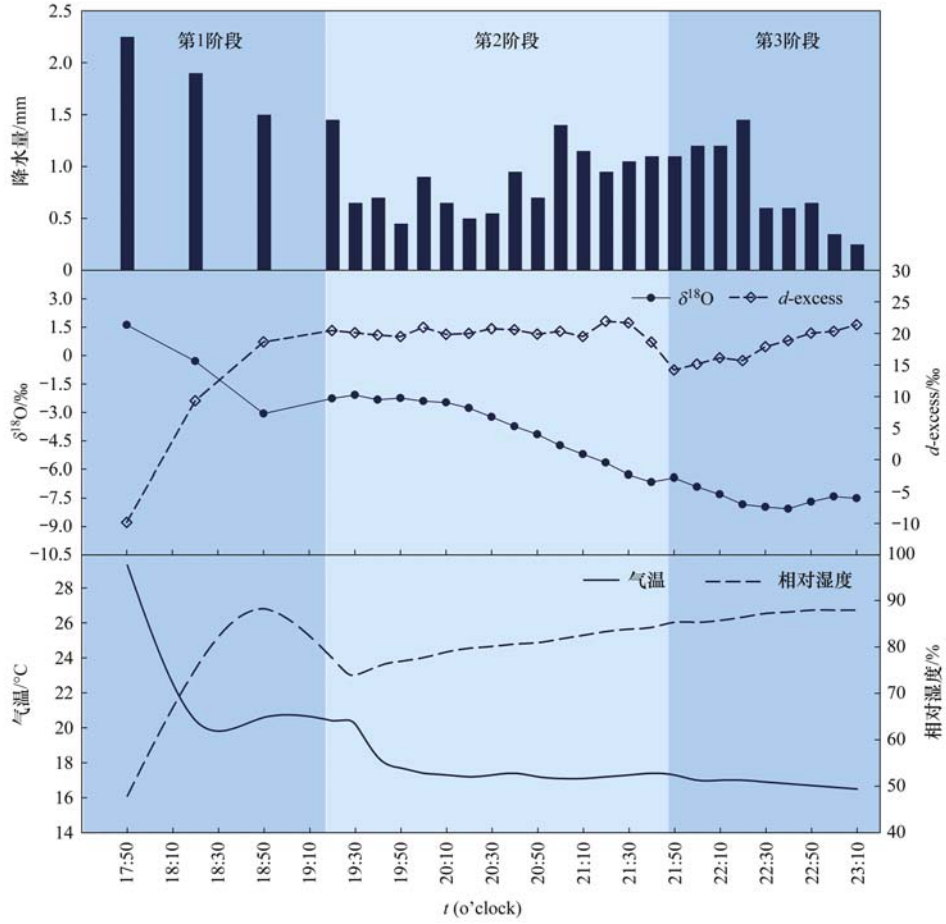

图5 7月28日降水事件中$\delta^{18}O$、*d*-excess、气温、相对湿度和降水量的变化

Fig. 5 Temporal variations in precipitation $\delta^{18}O$, *d*-excess, temperature, relative humidity, and precipitation amount in July 28 precipitation event

21:30之前,*d*-excess平稳变化,之后突然减小为14.21‰,其间气温呈平稳变化,相对湿度略有升高;

第3阶段(21:50~23:19),$\delta^{18}O$变幅很小,是$\delta^{18}O$的低值区,而*d*-excess值逐渐增大. 该阶段降水强度逐渐变弱,气温偏低,相对湿度很大. 该场降水由于起初降雨强度较大,造成周围空气相对湿度快速升高,大气很快趋于饱和,使得降雨过程中蒸发变小,水汽循环较慢,因此$\delta^{18}O$无明显的波动,而是呈持续平稳下降趋势.

一般而言,研究尺度越小,研究的问题也越精细. 6月26~27日的降水事件中,6月26日的降水量(40.7 mm)要明显大于6月27日(8.6 mm),而第2 d降水的$\delta^{18}O$(-8.96‰)要比第1 d偏负(-7.72‰),这与相关研究的结果类似[51]. 这一现象与降雨量效应相反,说明降水量的大小并不是影响降水中^{18}O含量变化的决定性因素,降雨量效应很可能只是一种外部表现形式[52]. 对于连续2 d降水的同位素组成,第2 d的降水事件很可能受前一天降水过程中同位素分馏作用的影响. 这可能就是为什么在连续2 d的降水事件中,$\delta^{18}O$的变化不遵循降水量效应的原因. 7月28日的降水过程中,初始阶段^{18}O较为富集,云团中重同位素不断凝结降落,降水中^{18}O逐渐贫化,$\delta^{18}O$呈平稳下降趋势. 所以,在某些降雨事件中,$\delta^{18}O$没有与当地降雨量显著相关,同位素组成的变化可能与降水过程的变化有关,并且会对水汽来源的变化有快速地响应[20,51].

3.3 典型降水事件中同位素与水汽输送关系

3.3.1 典型长历时弱降水事件

图6分别为6月26~27日不同时刻水汽来源模拟结果. 在09:00,1 500 m高度处与纬度方向大致平行的西风带,水汽路径较长,水汽较稳定,气团干燥,沿途发生的降水事件少,使得$\delta^{18}O$值(-5.1‰)偏高. 500 m和1 000 m高度,来自中高纬度的大陆性水汽,其输送距离远,温度低,蒸发较弱,降水中的重同位素不断贫化,$\delta^{18}O$值降低,*d*-excess值逐渐升高[53]. 2 000 m和2 500 m高度,来自孟加拉湾的水汽主要沿经线方向输送,水汽含量丰富,输送距离长,沿途经历了多次降水过程,水汽团中的重同位素不断贫化[49,54],造成$\delta^{18}O$快速下降. 16:00水汽来自中高纬度内陆地区,$\delta^{18}O$值持续减小. 与09:00相比,500 m和1 000 m高度的水汽来源变化最明显,此时,同位素值出现最低值. 在21:30,500

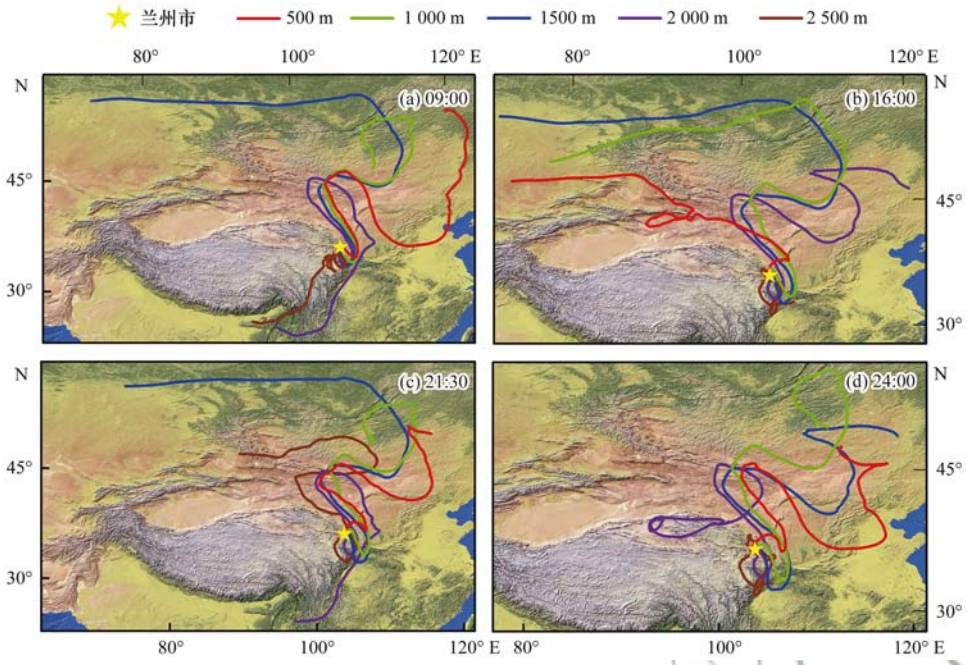

图 6　6 月 26 日降水事件不同时刻水汽来源

Fig. 6　Moisture source at different times of June 26 precipitation event

m 和1 000 m水汽输送路径显著变短；2 500 m高度，水汽变为局地大陆水汽，$\delta^{18}O$值比第 2 阶段高. 在 24:00，1 500 m和2 500 m高度的水汽路径变短，降水量减小，同位素值减小，再次出现低值.

图7 分别为 6 月 27 日不同时刻水汽来源模拟结果. 在 08:20，500 m 高度水汽输送为偏西方向，路径较短；1 000、1 500和2 000 m高度来自中高纬度的大陆性水汽，输送路径也较短，使剩余水汽中$\delta^{18}O$值偏高，*d*-excess 值较大. 在 09:20 和 11:00，500 m 高度的水汽输送路径明显变长，经过长距离的输送，携带水汽中重同位素不断贫化. 在 13:00，1 000 m 高度的水汽来源方向变为西北方向，路径变长，经过长途输送，携带水汽少，同位素值出现低值. 上述不同时刻的水汽来源，除500 m 高度外，在其它高度层局地大陆水汽以不同方向输送至兰州市，由于局地水汽蒸发的影响，同位素值一直处于波动状态.

6 月 26 日相比 27 日，500 m 高度层水汽输送路径整体较短，造成 27 日降水$\delta^{18}O$值比 26 日偏负，这与上述同位素变化相符. 而 6 月 27 日（08:18 ~ 14:04），除 500 m 高度外，在不同高度层以局地内陆

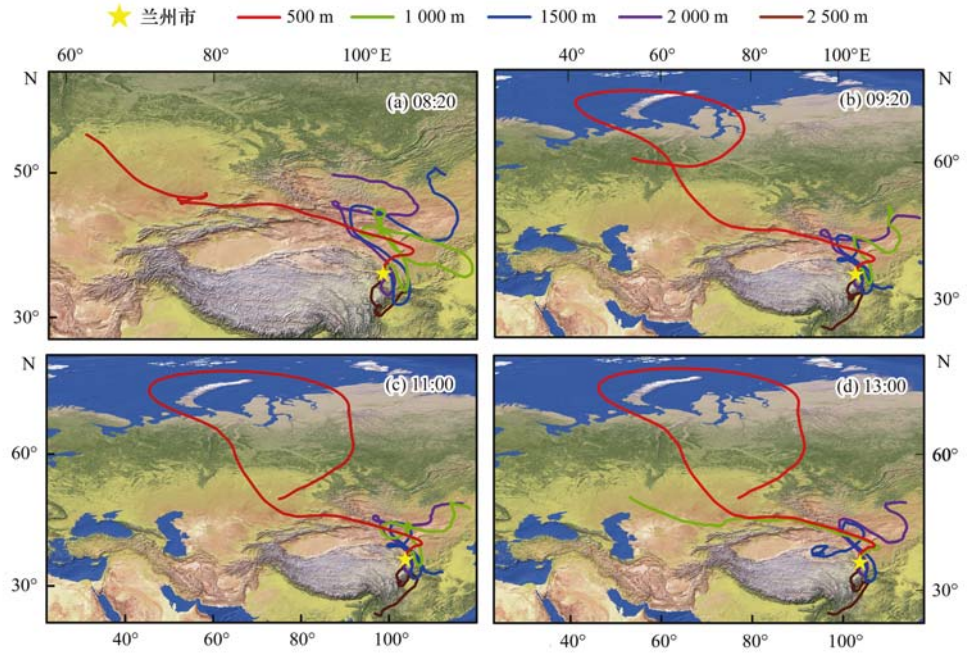

图 7　6 月 27 日降水事件不同时刻水汽来源

Fig. 7　Moisture source at different times of June 27 precipitation event

水汽输送为主,使得降水同位素的波动变化明显. 因而,对于一场降水来说,不同时刻水汽输送表现不同,会造成降水同位素特征具有明显差异. 所以降水的水汽来源与水汽团运移过程中稳定同位素的分馏程度都是影响降水中$\delta^{18}O$变化的决定性因素.

3.3.2 典型短时强降水事件

图 8 分别为 7 月 28 日不同时刻水汽来源模拟结果. 18:00、19:00 和 21:00,在 500、1 000 和 1 500 m高度都是局地大陆水汽,由于局地蒸发,重同位素富集,初始阶段$\delta^{18}O$偏高,随着降雨持续进行,重同位素不断贫化,造成同位素值减小. 而 2 000 m和2 500 m高度,水汽输送变化不明显. 23:00降水接近尾声, 500、1 000和1 500 m高度,水汽均来自西北方向的大陆性水汽,水汽输送路径较长,途经干旱地区,水汽补充较少,降水量明显减少,剩余降水中$\delta^{18}O$偏低,这与水汽来源的变化是有联系的.

7 月 28 降水在不同阶段水汽输送的结果反映出局地大陆水汽和西向水汽共同作用导致降水同位素的变化. 整场降水的同位素值呈平稳下降趋势,说明水汽来源变化不明显,气团较单一,在强对流作用下,不断形成降水,气团中的重同位素不断贫化,后期 *d*-excess 值变小并且富含轻同位素,这符合该场降水的同位素变化特征.

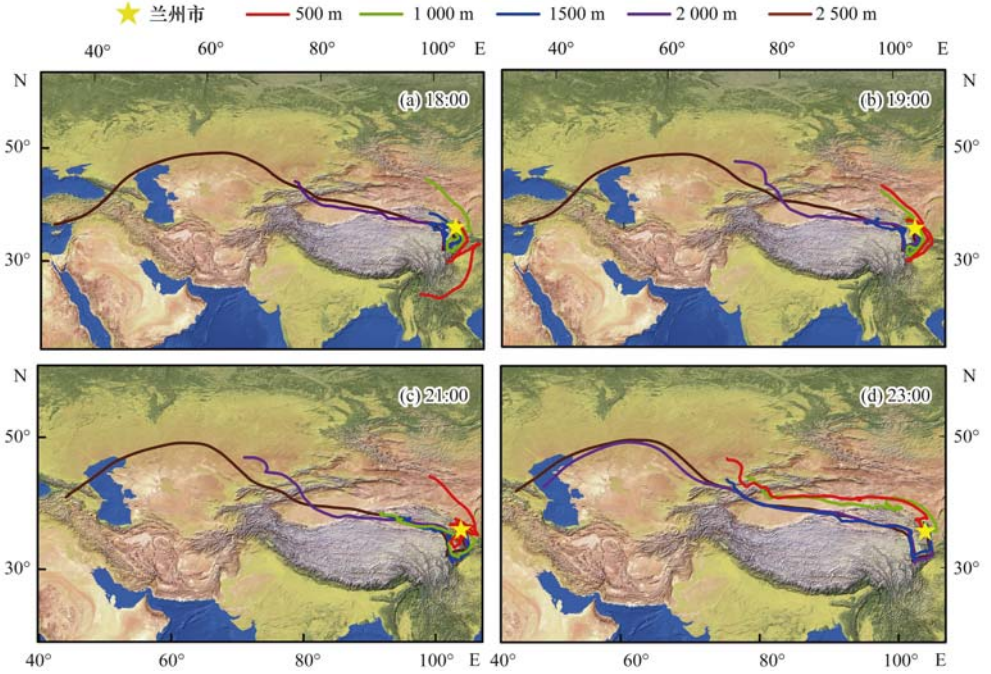

图 8 7 月 28 日降水事件不同时刻水汽来源

Fig. 8 Moisture source at different times of July 28 precipitation event

综上可知,两场典型连续降水事件不同时段水汽来源有差异,但整体反映出西向水汽、高纬度大陆水汽和局地水汽循环的共同作用导致了降水同位素的变化. 在 500 m 和1 000 m高度,水汽输送轨迹变化较明显. 在一些降水事件中尽管有相似的水汽来源,事件内的同位素的变化特征也有明显差异. 因此,通过了解单个降水事件的短时尺度变化不仅可以揭示长期平均所掩饰的现象,还对局地小气候和水分循环过程具有很重要的指示意义.

4 结论

(1)两场典型降水事件中$\delta^{2}H$和$\delta^{18}O$之间具有显著线性关系,受二次蒸发的影响,事件内连续降水的大气水线(SMWL)斜率都小于 8; 连续样点大都分布在 GMWL 和 LMWL 上方,且 SMWL 的截距都大于局地年平均过量氘(8.13),这说明样点在一定程度上经历了水汽再循环.

(2) 6 月 26 ~ 27 日连续两天的降水事件中,$\delta^{18}O$不遵循降雨量效应. 6 月 26 日降水量要明显大于 27 日,降水中$\delta^{18}O$呈“L”型变化; 而在 27 日$\delta^{18}O$值更偏负,波动变化较大. 7 月 28 日,$\delta^{18}O$呈持续平稳下降趋势. 两场降水事件内 *d*-excess 的变化与$\delta^{18}O$的变化趋势相反.

(3)单次降水事件内不同阶段水汽输送的结果反映出同位素的差异. 6 月 26 日相比 27 日, 500 m 高度层水汽输送路径整体较短,使 27 日降水$\delta^{18}O$值比 26 日的要偏负. 7 月 28 日整场降水水汽来源变化不明显且气团较单一,$\delta^{18}O$持续减小无明显波动. 说明对于同一场降水来说,$\delta^{18}O$变化除了受水汽运移过程中同位素分馏程度的影响,水汽来源不同也会造成降水同位素发生变化.

参考文献：

[1] Zhao L J, Xiao H L, Zhou M X, *et al*. Factors controlling spatial and seasonal distributions of precipitation $\delta^{18}O$ in China[J]. Hydrological Processes, 2012, **26**(1): 143-152.

[2] Crawford J, Hughes C E, Parkes S D. Is the isotopic composition of event based precipitation driven by moisture source or synoptic scale weather in the Sydney Basin, Australia? [J]. Journal of Hydrology, 2013, **507**: 213-226.

[3] 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.

[4] 汪少勇, 王巧丽, 吴锦奎, 等. 长江源区降水氢氧稳定同位素特征及水汽来源[J]. 环境科学, 2019, **40**(6): 2615-2623.
Wang S Y, Wang Q L, Wu J K, *et al*. Characteristics of stable isotopes in precipitation and moisture sources in the headwaters of the Yangtze River[J]. Environmental Science, 2019, **40**(6): 2615-2623.

[5] Araguás-Araguás L, Froehlich K, Rozanski K. Deuterium and oxygen-18 isotope composition of precipitation and atmospheric moisture[J]. Hydrological Processes, 2000, **14**(8): 1341-1355.

[6] Xie L H, Wei G J, Deng W F, *et al*. Daily $\delta^{18}O$ 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.

[7] Ren W, Yao T D, Xie S Y, *et al*. Controls on the stable isotopes in precipitation and surface waters across the southeastern Tibetan Plateau[J]. Journal of Hydrology, 2017, **545**: 276-287.

[8] Tian C, Wang L X, Kaseke K F, *et al*. Stable isotope compositions (δ^2H, $\delta^{18}O$ and $\delta^{17}O$) of rainfall and snowfall in the central United States[J]. Scientific Reports, 2018, **8**(1): 6712.

[9] Xu T, Sun X S, Hong H, *et al*. Stable isotope ratios of typhoon rains in Fuzhou, Southeast China, during 2013-2017[J]. Journal of Hydrology, 2019, **570**: 445-453.

[10] Meehl G A, Arblaster J M, Tebaldi C. Understanding future patterns of increased precipitation intensity in climate model simulations[J]. Geophysical Research Letters, 2005, **32**(18): L18719.

[11] 马京津, 李书严, 王冀. 北京市强降雨分区及重现期研究[J]. 气象, 2012, **38**(5): 569-576.
Ma J J, Li S Y, Wang J. The study of Beijing's rainstorm division and its return periods[J]. Meteorological Monthly, 2012, **38**(5): 569-576.

[12] Chang C B. A case study of excessive rainfall forecasting[J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 1998, **66**(3-4): 215-227.

[13] Romero Y L, Bessembinder J, Van de Giesen N C, *et al*. A relation between extreme daily precipitation and extreme short term precipitation[J]. Climatic Change, 2011, **106**(3): 393-405.

[14] 孙军, 谌芸, 杨舒楠, 等. 北京721特大暴雨极端性分析及思考(二)极端性降水成因初探及思考[J]. 气象, 2012, **38**(10): 1267-1277.
Sun J, Chen Y, Yang S N, *et al*. Analysis and thinking on the extremes of the 21 July 2012 torrential rain in Beijing part Ⅱ: preliminary causation analysis and thinking[J]. Meteorological Monthly, 2012, **38**(10): 1267-1277.

[15] Jouzel J, Delaygue G, Landais A, *et al*. Water isotopes as tools to document oceanic sources of precipitation[J]. Water Resources Research, 2013, **49**(11): 7469-7486.

[16] Landais A, Risi C, Bony S, *et al*. Combined measurements of $^{17}O_{excess}$ and d-excess in African monsoon precipitation: implications for evaluating convective parameterizations[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2010, **298**(1-2): 104-112.

[17] 胡月, 刘国东, 孟玉川, 等. 成都次降水稳定氢氧同位素特征及水汽来源分析[J]. 环境科学, 2019, **40**(3): 1179-1187.
Hu Y, Liu G D, Meng Y C, *et al*. Analysis of stable hydrogen and oxygen isotope characteristics and vapor sources of event-based precipitation in Chengdu[J]. Environmental Science, 2019, **40**(3): 1179-1187.

[18] Sun C J, Shanahan T M, Partin J. Controls on the isotopic composition of precipitation in the south-central United States[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2019, **124**(14): 8320-8335.

[19] Munksgaard N C, Wurster C M, Bass A, *et al*. Extreme short-term stable isotope variability revealed by continuous rainwater analysis[J]. Hydrological Processes, 2012, **26**(23): 3630-3634.

[20] Li J, Tao T, Pang Z H, *et al*. Identification of different moisture sources through isotopic monitoring during a storm event[J]. Journal of Hydrometeorology, 2015, **16**(4): 1918-1927.

[21] 陈粉丽. 基于大气降水稳定同位素的兰州市水循环研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2016. 2-6.
Chen F L. Water cycle research in Lanzhou City based on stable isotope in precipitation[D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2016. 2-6.

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

[23] 徐秀婷, 贾文雄, 朱国锋, 等. 乌鞘岭南、北坡降水稳定同位素特征及水汽来源对比[J]. 环境科学, 2020, **41**(1): 155-165.
Xu X T, Jia W X, Zhu G F, *et al*. Stable isotope characteristics and vapor source of precipitation in the south and north slopes of Wushaoling Mountain[J]. Environmental Science, 2020, **41**(1): 155-165.

[24] Yamanaka T, Tsujimura M, Oyunbaatar D, *et al*. Isotopic variation of precipitation over eastern Mongolia and its implication for the atmospheric water cycle[J]. Journal of Hydrology, 2007, **333**(1): 21-34.

[25] Iqbal M Z. Short-term variability in isotopic composition of precipitation: a case study from the Midwestern United States[J]. Hydrological Processes, 2008, **22**(23): 4609-4619.

[26] Coplen T B, Neiman P J, White A B, *et al*. Extreme changes in stable hydrogen isotopes and precipitation characteristics in a landfalling Pacific storm[J]. Geophysical Research Letters, 2008, **35**(21): L21808.

[27] Barras V J I, Simmonds I. Synoptic controls upon $\delta^{18}O$ in southern Tasmanian precipitation[J]. Geophysical Research Letters, 2008, **35**(2): L02707.

[28] Miyake Y, Matsubaya O, Nishihara C, *et al*. An isotopic study on meteoric precipitation[J]. Papers in Meteorology and Geophysics, 1968, **19**(2): 243-266.

[29] Celle-Jeanton H, Gonfiantini R, Travi Y, *et al*. Oxygen-18 variations of rainwater during precipitation: application of the Rayleigh model to selected rainfalls in Southern France[J]. Journal of Hydrology, 2004, **289**(1-4): 165-177.

[30] Risi C, Bony S, Vimeux F. Influence of convective processes on the isotopic composition ($\delta^{18}O$ and δD) of precipitation and water

vapor in the tropics: 2. physical interpretation of the amount effect [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2008, **113**(D19): D19306.

[31] Muller C L, Baker A, Fairchild I J, *et al*. Intra-event trends in stable isotopes: exploring midlatitude precipitation using a vertically pointing micro rain radar [J]. Journal of Hydrometeorology, 2015, **16**(1): 194-213.

[32] 薛积彬, 钟巍, 谢丽纯, 等. 短时间尺度下降水中稳定同位素变化特征及其意义[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2012, **44**(3): 120-127.
Xue J B, Zhong W, Xie L C, *et al*. Isotopic variations of precipitation in Guangzhou and its implications at short-time scales[J]. Journal of South China Normal University (Natural Science Edition), 2012, **44**(3): 120-127.

[33] 陶涛, 谭明, 段武辉. 最短时间尺度环流效应: 单场降水$\delta^{18}O$对复合水汽来源的示踪[J]. 第四纪研究, 2013, **33**(3): 615-617.
Tao T, Tan M, Duan W H. Circulation effect on the shortest time scale: multiple water sources traced by $\delta^{18}O$ during single precipitation event [J]. Quaternary Sciences, 2013, **33**(3): 615-617.

[34] 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 X F, Tang Y, Zhang Y H, *et al*. Using stable isotopes to study vapor transport of continuous precipitation in Beijing[J]. Advances in Water Science, 2017, **28**(4): 488-495.

[35] 姜兵. 西北地区东部水汽输送特征及其与降水的关系[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2017. 1-3.
Jiang B. Characteristics of summer water vapor transport in the Eastern Northwest China and their relationship with precipitation [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2017. 1-3.

[36] 张明军, 马潜, 李亚举, 等. 季风边缘区降水中$\delta^{18}O$变化特征及水汽来源分析——以兰州市为例[J]. 西北师范大学学报(自然科学版), 2011, **47**(6): 80-86, 93.
Zhang M J, Ma Q, Li Y J, *et al*. Research of isotopic characteristic in precipitation and water vapor origin at the edge of monsoon region-a case study of Lanzhou City [J]. Journal of Northwest Normal University (Natural Science), 2011, **47**(6): 80-86, 93.

[37] Ma Q, Zhang M J, Wang S J, *et al*. An investigation of moisture sources and secondary evaporation in Lanzhou, Northwest China [J]. Environmental Earth Sciences, 2014, **71**(8): 3375-3385.

[38] 陈粉丽, 张明军, 马潜, 等. 兰州及其周边区域大气降水$\delta^{18}O$特征及其水汽来源[J]. 环境科学, 2013, **34**(10): 3755-3763.
Chen F L, Zhang M J, Ma Q, *et al*. Characteristics of $\delta^{18}O$ in precipitation and water vapor sources in Lanzhou City and its surrounding area[J]. Environmental Science, 2013, **34**(10): 3755-3763.

[39] 党瑜. 生态环境退化对兰州城市气候的影响[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2004, **34**(3): 355-358.
Dang Y. The environmental degeneration has influence on the climate of Lanzhou area [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2004, **34**(3): 355-358.

[40] Huff F A. Time distribution of rainfall in heavy storms [J]. Water Resources Research, 1967, **3**(4): 1007-1019.

[41] 张自超, 丁悌平. 关于同位素地质测试数据的数据处理及结果表示[J]. 岩矿测试, 2000, **19**(1): 77-79.
Zhang Z C, Ding T P. Data processing and expression for analytical results in isotope geology [J]. Rock and Mineral Analysis, 2000, **19**(1): 77-79.

[42] Benetti M, Reverdin G, Pierre C, *et al*. Deuterium excess in marine water vapor: dependency on relative humidity and surface wind speed during evaporation [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2014, **119**(2): 584-593.

[43] Trenberth K E. Atmospheric moisture residence times and cycling: implications for rainfall rates and climate change [J]. Climatic Change, 1998, **39**(4): 667-694.

[44] Gat J R. Atmospheric water balance- the isotopic perspective [J]. Hydrological Processes, 2000, **14**(8): 1357-1369.

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

[46] Managave S R, Jani R A, Rao T N, *et al*. Intraevent isotope and raindrop size data of tropical rain reveal effects concealed by event averaged data [J]. Climate Dynamics, 2015, **47**(3-4): 981-987.

[47] 温艳茹, 王建力. 重庆地区大气场降水中氢氧同位素变化特征及与大气环流的关系[J]. 环境科学, 2016, **37**(7): 2462-2469.
Wen Y R, Wang J L. Variations of stable isotope in precipitation and its atmospheric circulation effect in Chongqing [J]. Environmental Science, 2016, **37**(7): 2462-2469.

[48] He S N, Goodkin N F, Kurita N, *et al*. Stable isotopes of precipitation during tropical Sumatra Squalls in Singapore [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2018, **123**(7): 3812-3829.

[49] 李广, 章新平, 许有鹏, 等. 滇南蒙自地区降水稳定同位素特征及其水汽来源[J]. 环境科学, 2016, **37**(4): 1313-1320.
Li G, Zhang X P, Xu Y P, *et al*. Characteristics of stable isotopes in precipitation and their moisture sources in Mengzi Region, Southern Yunnan [J]. Environmental Science, 2016, **37**(4): 1313-1320.

[50] Koehler G. Snow gauge undercatch and its effect on the hydrogen and oxygen stable isotopic composition of precipitation [J]. Isotopes in Environmental and Health Studies, 2019, **55**(4): 404-418.

[51] Li G, Zhang X P, Xu Y P, *et al*. Synoptic time-series surveys of precipitation $\delta^{18}O$ and its relationship with moisture sources in Yunnan, Southwest China[J]. Quaternary International, 2017, **440**: 40-51.

[52] 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.
Li G, Zhang X P, Zhang L F, *et al*. Stable isotope characteristics in different water bodies in Changsha and implications for the water cycle [J]. Environmental Science, 2015, **36**(6): 2094-2101.

[53] 冯芳, 李忠勤, 金爽, 等. 天山乌鲁木齐河流域山区降水$\delta^{18}O$和δD特征及水汽来源分析[J]. 水科学进展, 2013, **24**(5): 634-641.
Feng F, Li Z Q, Jin S, *et al*. Characteristics of $\delta^{18}O$ and δD in precipitation and its water vapor sources in the upper Urumqi River basin, eastern Tianshan[J]. Advances in Water Science, 2013, **24**(5): 634-641.

[54] Tang Y, Pang H, Zhang W, *et al*. Effects of changes in moisture source and the upstream rainout on stable isotopes in precipitation- a case study in Nanjing, Eastern China [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2015, **19**(10): 4293-4306.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 41 No. 9

Sep. 15, 2020

CONTENTS

Characterization of Two Heavy Pollution Episodes in Tianjin in 2020 ····· XIAO Zhi-mei, XU Hong, CAI Zi-ying, *et al.* (3879)

Analysis of Characteristics of Water-soluble Ions in $PM_{2.5}$ in Chengdu Based on the MARGA ····· YIN Han-mei, CHEN Jun-hui, FENG Xiao-qiong, *et al.* (3889)

Seasonal Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Ions in $PM_{2.5}$ in Suqian City ····· MA Hong-lu, ZHAO Xin, LU Jian-gang, *et al.* (3899)

Characterization and Size Distribution of Carbonaceous Aerosols at Mountain Dinghu ····· LI An-na, WEN Tian-xue, HUA Wei, *et al.* (3908)

Characteristics and Source Apportionment of Carbon Components in Road Dust in Anshan ····· LIN Zi, JI Ya-qin, LIN Yu, *et al.* (3918)

Spectral Characteristics and Source Analysis of WSOC of $PM_{2.5}$ in Winter of Xi'an ····· YANG Yi, ZHANG Ya-nan, LIU Huan-wu, *et al.* (3924)

Observation of Aerosol Optical Properties and New Particle Formation in the Yangtze River Delta ····· DU Ying-ying, CHEN Jun, ZHANG Jia-luo, *et al.* (3932)

Component Characteristics and Source Appointment of Volatile Organic Compounds in Lianyungang City ····· CUI Jin-meng, WANG Ti-jian, LI Qiu-tong, *et al.* (3941)

Seasonal Pollution Characteristics and Analysis of the Sources of Atmospheric VOCs in Chengdu Urban Area ····· WANG Cheng-hui, CHEN Jun-hui, HAN Li, *et al.* (3951)

Ozone Sensitivity Analysis and Emission Controls in Dezhou in Summer ····· YAN Ru-sha (3961)

Inventory and Distribution Characteristics of China's Thermal Power Emissions Under Ultra-Low Reconstruction ····· QU Jia-bao, WANG Peng, BO Xin, *et al.* (3969)

Establishment and Spatial Distribution of Anthropogenic Ammonia Emission Inventory in Zhejiang Province ····· ZHAO Rui-dong, YU Xing-na, HOU Xin-hong, *et al.* (3976)

Evaluation and Screening of Dioxin Control Technology in Waste Incineration Flue Gas ····· ZHAO Si-lan, XI Peng-fei, GUO Feng-yan, *et al.* (3985)

Characteristics of Stable Isotopes and Moisture Sources of Two Typical Precipitation Events in Lanzhou City ····· HAN Ting-ting, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, *et al.* (3993)

Hydrochemical Characteristics and Possible Controls of the Surface Water in Ranwu Lake Basin ····· ZHANG Tao, WANG Ming-guo, ZHANG Zhi-yin, *et al.* (4003)

Chemical Evolution and Formation Mechanism of Groundwater in Hetao Irrigation Area ····· CUI Jia-qi, LI Xian-yue, SHI Hai-bin, *et al.* (4011)

Chemical Characteristics of Groundwater and Material Sources Analysis in Shiqi River Basin ····· LI Xiao, YU Shi, LI Liang, *et al.* (4021)

Spatial-temporal Variations and Driving of Nitrogen and Phosphorus Ratios in Lakes in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River ····· JI Peng-fei, XU Hai, ZHAN Xu, *et al.* (4030)

Spatiotemporal Variations in Nutrient Loads in River-lake System of Changdang Lake Catchment in 2016-2017 ····· LI Xin-yan, LI Heng-peng, JIANG San-yuan, *et al.* (4042)

Influence of *Potamogeton crispus* on Lake Water Environment and Phytoplankton Community Structure ····· KANG Li-juan, XU Hai, ZOU Wei, *et al.* (4053)

Phylogenetic Processes and Key Driving Factors of Bacterial Communities in Jinze Reservoir ····· LIU Ming-kun, TONG Jun, ZHU Hui-feng, *et al.* (4062)

Distribution Characteristics of Per-/polyflouralkyl Substances in River Sediments Around Typical Fluorine Industrial Parks ····· SUN Lin-ting, ZHAO Zhen, TANG Jian-hui (4069)

Microplastics-Induced Shifts of Diversity and Abundance of Antibiotic Resistance Genes in River Water ····· ZHOU Xin-yuan, WANG Yan-zi, SU Jian-qiang, *et al.* (4076)

Pollution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in Lianhua Reservoir ····· LIAO Jie, WEI Xiao-qin, XIAO Yan-qin, *et al.* (4081)

Intraspecific Variation in Growth and Alkaline Phosphatase Activity of *Cylindrospermopsis raciborskii* Strains in Response to Different Phosphorus Concentrations and Sources ····· YE Jin-mei, ZHAO Li, LUO Xu, *et al.* (4088)

Simulation of Water Quality Response of Guishui River Wetland Plants and Water Diversion ····· LI Ya-juan, DU Yan-liang, BI Er-ping, *et al.* (4095)

Performance Assessment of Field-scale Dry Grass Swale with Shallow Substrate Layer ····· ZHANG Jia-wei, LI Tian, ZHANG Ting-xiu (4105)

Transition of Particulate Pollutant in the Parcel-based Catchment of Sponge City ····· LI Jia, XIE Wen-xia, JIANG Zhi-hui, *et al.* (4113)

Adsorption of Sb(Ⅴ) in Water by Natural Pyrite: Performance and Mechanism ····· SHI Song, WU Qian-yuan, LI Xin-zheng, *et al.* (4124)

Treatment of Wastewater Containing Naphthalene Sulfonic Acid by Persulfate Oxidation ····· ZHANG Jin-men, LU Jun, LIU Xiao-chen, *et al.* (4133)

Effect of Temperature on Performance and Microbial Community Structure of Anaerobic Biofilter-Treated Domestic Wastewater ····· LIU Zhi-bin, LIU Xiu-hong, ZHOU Tong, *et al.* (4141)

Start-up and Optimization of Denitrifying Phosphorus Removal in ABR-MBR Coupling Process ····· MIAO Xin-nian, WANG Qian, GUO Kai-cheng, *et al.* (4150)

Adaptability of Completely Autotrophic Nitrogen Removal over Granular Sludge to Low-Strength at Low Temperature ····· LIU Yu-xin, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, *et al.* (4161)

Discussion on Key Issues of Geochemical Monitoring of Soil Heavy Metal in Xiong'an New District ····· GUO Zhi-juan, ZHOU Ya-long, YANG Zheng, *et al.* (4169)

Quantitative Assessment of Human Health Risks Based on Soil Heavy Metals and PAHs Sources: Take a Polluted Industrial Site of Beijing As an Example ····· WU Zhi-yuan, ZHANG Li-na, XIA Tian-xiang, *et al.* (4180)

Ecological Risk Assessment of Heavy Metals at Township Scale in the High Background of Heavy Metals, Southwestern, China ····· ZHANG Fu-gui, PENG Min, WANG Hui-yan, *et al.* (4197)

Potential of Accumulation and Application of Dominant Plants in Lanping Lead-zinc Mine, Yunnan Province ····· ZHANG Long, ZHANG Yun-xia, SONG Bo, *et al.* (4210)

Key Growth Stage of Pb Accumulation in Rice Through a Hydroponic Experiment with Pb Stress ····· HU Yu-dan, ZHOU Hang, GU Jiao-feng, *et al.* (4218)

Effect of Nutrient Regulation and Control on Cd Accumulation Efficiency of *Hylotelephium spectabile* Under Field Conditions ····· GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, YANG Jun, *et al.* (4226)

Effects of *Eucalyptus* Branches Biochar Application on Soil Physicochemical Properties of Acidified Soil in a *Eucalyptus* plantation in Northern Guangxi ····· DAUN Chun-yan, SHEN Yu-yi, XU Guang-ping, *et al.* (4234)

Dynamic Effects of Direct Returning of Straw and Corresponding Biochar on Acidity, Nutrients, and Exchangeable Properties of Red Soil ····· YANG Cai-di, LU Sheng-gao (4246)

Different Responses of Soil Microbial Community Structure to Irrigation with Treated Wastewater from Domestic and Industrial Sources ····· WANG Yan, CHENG Dong-hui, TAN Wen-bing, *et al.* (4253)

Effects of Manure and Organic Fertilizer Application on Soil Microbial Community Diversity in Paddy Fields ····· LI Peng, WU Jian-qiang, SHA Chen-yan, *et al.* (4262)

Effects of Land Use Changes on Soil Bacterial Community Diversity in the Riparian Wetland Along the Downstream of Songhua River ····· ZHANG Tuo, XU Fei, HUAI Bao-dong, *et al.* (4273)

Response of Soil Bacterial Community Structure to Precipitation Change in Grassland of Loess Plateau ····· LI Na, WANG Bao-rong, AN Shao-shan, *et al.* (4284)

Effect of Land-use on Soil Fungal Community Structure and Associated Functional Group in Huixian Karst Wetland ····· CHENG Yue-yang, JIN Zhen-jiang, WANG Xiao-tong, *et al.* (4294)

Interactions of Fungi Community and Relationship with the Carbon Structure in Arable Mollisols with Gradient Organic Matter Content ····· SHANG Qiu-tong, HUANG Rui-lin, NI Hao-wei, *et al.* (4305)

Diversity of Soil Eukaryotic Microbes in Different Succession Stages in Maolan Karst Forest of Guizhou ····· WANG Xian, LONG Jian, LI Juan, *et al.* (4314)

Adsorption of Cadmium and Arsenic by Corn Stalk Biochar Solidified Microorganism ····· LIU Yu-ling, ZHU Hu-cheng, PENG Ou, *et al.* (4322)

Mechanism of Inorganic Nitrogen Transformation and Identification of Nitrogen Sources in Water and Soil ····· LIANG Xing, SUN Li-qun, ZHANG Xin, *et al.* (4333)