

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

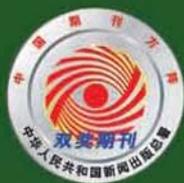
ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第7期

Vol.37 No.7

**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

2015年北京市两次红色预警期间PM<sub>2.5</sub>浓度特征 ..... 程念亮, 张大伟, 陈添, 石爱军, 孙峰, 刘保献, 邹本东, 王琴, 李倩, 王小菊, 姜磊, 孟凡 (2409)

北京市冬季雾霾天人体呼吸高度PM<sub>2.5</sub>变化特征对气象因素的响应 ..... 张南, 熊黑钢, 葛秀秀, 段鹏程, 毛先如, 王亚龙 (2419)

兰州大气细颗粒物中多环芳烃污染特征及来源分析 ..... 李英红, 饶志国, 谭吉华, 段晋春, 马永亮, 贺克斌 (2428)

南京北郊冬季PM<sub>2.5</sub>中芳香酸的测定及来源解析 ..... 张亚飞, 马嫣, 亓鲁, 王振, 王利朋, 朱麟 (2436)

海洋-大气过程对南海气溶胶数浓度谱分布的影响 ..... 孔亚文, 盛立芳, 刘寿, 李秀镇 (2443)

新疆准东煤田降尘重金属污染及健康风险评价 ..... 杨春, 塔西甫拉提·特依拜, 侯艳军, 高宇潇, 刘芳, 夏楠 (2453)

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 ..... 温艳茹, 王建力 (2462)

湖水氢氧同位素组分的时间变化特征及影响因素分析 ..... 徐敬争, 肖薇, 肖启涛, 王伟, 温学发, 胡诚, 刘诚, 刘寿东, 李旭辉 (2470)

河水-地下水侧向交互带地球化学特征: 以重庆市马鞍溪为例 ..... 张宇, 杨平恒, 王建力, 谢世友, 陈峰, 詹兆君, 任娟, 张海月, 刘黛薇, 孟元可 (2478)

亚热带典型岩溶溪流水气界面CO<sub>2</sub>交换通量变化过程及其环境影响 ..... 李丽, 蒲俊兵, 李建鸿, 于爽, 肖琼, 张陶 (2487)

淹水条件下三峡库区典型消落带土壤释放DOM的光谱特征: 紫外-可见吸收光谱 ..... 梁俭, 江韬, 卢松, 魏世强, 王定勇, 陈雪霜, 王齐磊 (2496)

淹水条件下三峡库区典型消落带土壤释放DOM的光谱特征: 荧光光谱 ..... 梁俭, 江韬, 卢松, 魏世强, 王定勇, 陈雪霜, 王齐磊 (2506)

华东地区某水源水中13种磺胺类抗生素的分布特征及人体健康风险评价 ..... 金磊, 姜蕾, 韩琪, 薛佳怡, 叶辉, 曹国民, 林匡飞, 崔长征 (2515)

北京水环境中氯胺酮和去甲氯胺酮的浓度水平 ..... 张华方, 杨军, 杜鹏, 王琮淙, 李喜青 (2522)

输水期间于桥水库流域水体中溶解态多环芳烃的分布特征与风险 ..... 昌盛, 赵兴茹, 付青, 郭睿, 王山军 (2530)

卤系阻燃剂在东江工业水体中的质量浓度及其分配特征 ..... 何明靖, 李琦, 赵佳渊, 王登祥 (2539)

岩溶地下水多环芳烃、脂肪酸分布特征及来源分析 ..... 谢正兰, 孙玉川, 张媚, 廖昱, 江泽利, 王尊波, 梁作兵 (2547)

哈尔滨主城区不同下垫面融雪径流污染特性 ..... 孙夕涵, 刘硕, 万鲁河, 王宏 (2556)

降水对泃河水质和水体微生物的影响 ..... 卢思丹, 孙寓姣, 赵轩, 王蕾, 郑丹阳 (2563)

不同磷源下铜绿微囊藻的生长差异及对磷酸盐的响应 ..... 王振红, 张汉鹏, 罗专溪 (2570)

布洛芬和双氯芬酸在不同构型人工湿地中的去除行为研究 ..... 景瑞瑛, 杨扬, 戴玉女, 万翔, 邹义萍, 樊静静 (2577)

化学预氧化对苏氨酸生成三氯乙醛的影响 ..... 蔡广强, 傅学敏, 刘丽君, 卢小艳, 张金松, 刘嘉祺, 曲莹 (2586)

活性炭负载Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>活化过一硫酸盐降解金橙G ..... 王忠明, 陈家斌, 张黎明, 李文卫, 黄天寅 (2591)

碳纳米管活化过一硫酸盐降解金橙G过程及动力学 ..... 张黎明, 陈家斌, 李文卫, 王忠明, 黄天寅 (2601)

碳纳米管修饰电极电催化还原去除废水中的氯霉素 ..... 邓飞, 唐柏彬, 张进忠, 汤民, 刘江 (2610)

铁刨花-Fenton-絮凝工艺对染料生产废水中AOX、色度和TOC的去除效果研究 ..... 舒小铭, 徐灿灿, 文晓刚, 朱静娜, 赵远, 刘锐, 陈吕军 (2618)

Fenton氧化去除制药企业活性污泥中AOX的效果研究 ..... 陈思, 徐灿灿, 刘锐, 李国华, 陈吕军, 郑炜 (2625)

中试规模微气泡曝气生物膜反应器运行性能评估 ..... 刘春, 张晶, 张静, 陈晓轩, 张磊, 曹丽亚 (2632)

基于CANON工艺的新型HABR反应器生物脱氮性能研究 ..... 鲍林林, 陈婉秋 (2639)

异养与硫自养反硝化协同处理高硝氮废水特性研究 ..... 李祥, 马航, 黄勇, 朱亮, 杨朋兵, 朱强 (2646)

基于高通量测序的ABR厌氧氨氧化反应器各隔室细菌群落特征分析 ..... 陈重军, 张海芹, 汪瑶琪, 喻徐良, 王建芳, 沈耀良 (2652)

NUA-DAS生态滤池脱氮效果与反硝化菌特征研究 ..... 汪龙眠, 仇皓雨, 车昱晓, 张松贺, 郭照冰, 张毅敏 (2659)

葡萄藻生物膜贴壁培养处理含钴工业废水与烃类生产的耦合 ..... 程鹏飞, 王艳, 杨期勇, 汤明, 刘天中 (2666)

拉乌尔菌sari01的分离及其异养硝化好氧反硝化特性 ..... 颜薇芝, 郝健, 孙俊松, 史吉平 (2673)

海水异养硝化-好氧反硝化芽孢杆菌SLWX<sub>2</sub>的筛选及脱氮特性 ..... 成钰, 李秋芬, 费聿涛, 张艳 (2681)

焦化废水活性污泥中降解硫氰化物细菌种群多样性分析 ..... 徐伟超, 蒙小俊, 尹莉, 张玉秀, 李海波, 曹宏斌 (2689)

浮游微型真核生物群落对电厂温排水增温的响应 ..... 戴文芳, 阳石页, 阙治家, 熊金波 (2696)

磷脂脂肪酸(PLFA)法检测蒙古沙冬青根围土壤微生物群落结构 ..... 左易灵, 贺学礼, 王少杰, 赵丽莉 (2705)

半干旱区土壤微生物呼吸对极端降水的响应 ..... 赵慢, 王蕊, 李如剑, 杜兰兰, 吴得峰, 孙棋棋, 高鑫, 郭胜利 (2714)

三峡库区消落带N<sub>2</sub>O排放及其影响因素 ..... 李睿, 雷利国, 江长胜, 柴雪思, 黄哲, 范志伟, 郝庆菊 (2721)

不同量碳源输入梯度下果园排水沟底泥氮素反硝化与N<sub>2</sub>O排放研究 ..... 高雪梅, 余冬立, 颜晓元, 夏永秋 (2731)

冬季污泥堆肥过程温室气体排放特征 ..... 易建婷, 杨雨洽, 张成, 陈宏, 赵秀娟, 木志坚 (2738)

藏东南春季拉山土壤中有机氯农药和多环芳烃的浓度分布及来源解析 ..... 罗东霞, 张淑娟, 杨瑞强 (2745)

基于地质统计及随机模拟技术的天津武清区土壤重金属源解析 ..... 宋志廷, 赵玉杰, 周其文, 刘潇威, 张铁亮 (2756)

水热变化对三峡水库消落带紫色土有机碳矿化的影响 ..... 丁长欢, 王莲阁, 唐江, 慈恩, 谢德体 (2763)

减磷施肥有机肥对紫色土早坡地磷素流失的消减效应 ..... 韩晓飞, 高明, 谢德体, 王子芳, 陈晨 (2770)

水稻根际与非根际土壤硫素赋存形态转化及其迁移规律 ..... 杜光辉, 饶伟, 李鑫, 张亚楠, 王代长, 杨军, 化党领, 刘世亮, 李培培, 刘红恩 (2779)

组配改良剂对污染稻田中Pb、Cd、Cu和Zn钝化效果持续性比较 ..... 吴玉俊, 周航, 杨文骏, 邹紫今, 朱维, 辜娇峰, 彭佩钦, 张平, 曾敏, 廖柏寒 (2791)

生物法回收贵金属铂纳米颗粒及其机制 ..... 商儒, 朱能武, 康乃馨, 石超宏 (2799)

热处理天然褐铁矿制备γ-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>及其NH<sub>3</sub>-SCR活性探究 ..... 徐彬, 陈天虎, 刘海波, 朱承驻, 陈冬, 邹雪华, 蒋阳 (2807)

《环境科学》征订启事(2569) 《环境科学》征稿简则(2576) 信息(2744, 2769, 2790)

# 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

温艳茹, 王建力\*

(西南大学地理科学学院, 重庆 404100)

**摘要:** 根据 2015 年 4~10 月重庆地区 61 场降水稳定同位素资料与相关气象资料, 分析了不同时间尺度下重庆大气降水中氢氧同位素( $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$ )、过量氘( $d$ )的变化特征以及它们与降水量、温度及厄尔尼诺/拉尼娜和南方涛动(ENSO)的关系. 结果表明: ①研究区大气降水线方程为:  $\delta D = 8.28 \delta^{18}O + 12.34$  ( $r = 0.99$ ,  $n = 61$ ), 其斜率和截距与中国东部季风区的多处南方地区大气降水线方程的斜率和截距相似. ②研究区大气降水中氢氧同位素和  $d$  均出现夏半年低、冬半年高的季节变化, 影响重庆降水中氢氧同位素变化的主要原因为不同季节降水的水汽来源及气团性质的差异. ③监测时段内研究区大气降水中 $\delta^{18}O$ 与温度、降水量相关性不显著( $r = 0.03$ ;  $r = 0.12$ ), 但却敏感响应了大气环流过程, 表现出与 ENSO 正相关. 大气降水中 $\delta^{18}O$ 和过量氘( $d$ )清晰记录了 2014~2015 年 La Niña 和 El Niño 的转换过程. El Niño 期间研究区域大气降水中 $\delta^{18}O$ 和  $d$  明显偏重; 而在 La Niña 期间,  $\delta^{18}O$ 和  $d$  偏轻.

**关键词:** 大气降水;  $\delta^{18}O$ ;  $\delta D$ ; 过量氘; ENSO; 重庆地区

中图分类号: X142; X16 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)07-2462-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.07.007

## Variations of Stable Isotope in Precipitation and Its Atmospheric Circulation Effect in Chongqing

WEN Yan-ru, WANG Jian-li\*

(School of Geographic Sciences, Southwest University, Chongqing 404100, China)

**Abstract:** Variations of hydrogen and oxygen in stable isotopes and deuterium excess in precipitation as well as their relationship with precipitation, temperature and ENSO (El Niño/La Niña-Southern Oscillation) were analyzed by using 100 daily precipitation stable isotope data from April to October, 2015. The result showed that: ①The equation of local meteoric water line (LMWL) was established:  $\delta D = 8.28 \delta^{18}O + 12.34$ , the intercept and slope of which were greater than the global meteoric water line (GMWL) but was similar to most of the southern China monsoon region. ②Both stable isotopes and deuterium excess in precipitation indicated obvious seasonal variation in the monsoon region, high in summer and low in winter. This was attributed to the difference in moisture sources in different seasons. ③In addition, no significant correlation was detected between  $\delta^{18}O$  values in precipitation with temperature and precipitation ( $r = 0.03$ ;  $r = 0.12$ ). But it was sensitive to atmospheric circulation effect, and was positively correlated with ENSO.  $\delta^{18}O$  values in precipitation and deuterium excess in precipitation clearly recorded the La Niña and El Niño conversion process between 2014 and 2015. During the El Niño event, the  $\delta^{18}O$  and  $d$  values became obvious on the high side, and the changes were the opposite during La Niña.

**Key words:** precipitation;  $\delta^{18}O$ ;  $\delta D$ ; deuterium excess; ENSO (El Niño/La Niña-Southern Oscillation); Chongqing

水循环是联系地表各个圈层的核心和纽带, 降水是水循环过程中一个重要环节. 自然水体中的氢氧同位素虽然比例很小, 但对环境变化的响应却十分敏感, 能够记录水循环的历史信息<sup>[1]</sup>. 对于降水中氢氧同位素的研究, 目前在利用冰芯、石笋等载体进行古气候环境研究时已经得到了广泛的应用<sup>[2-6]</sup>. 降水中氢氧同位素的丰度与水汽来源以及水汽的输送过程有密切关系, 同时作为研究水循环的重要载体, 不仅在不同的水体相态转变中存在差异, 而且取决于纬度、距海远近、海拔、温度、降水量等因子<sup>[7-9]</sup>. 因此降水中蕴含的氢氧稳定同位素信息对于追踪水汽来源和还原大气环流过程具有重要意义<sup>[10-12]</sup>.

在全球中低纬度的大部分地区, ENSO 事件是影响气候年际变化的一个重要的因子<sup>[13]</sup>. 国内外众多研究表明: 东亚季风区 $\delta^{18}O$ 变化特征与大气降水的水汽来源和水汽输送距离有关<sup>[14]</sup>; 中国季风区 $\delta^{18}O$ 变化特征与大气环流中西北太平洋副热带高压位置和强度共同转换所引起的水汽变化密切相关<sup>[15]</sup>; 在青藏高原地区, 冰芯中 $\delta^{18}O$ 与 ENSO 事件存在显著的相关关系<sup>[16,17]</sup>; 在珠江三角洲地区,

收稿日期: 2015-11-24; 修订日期: 2016-03-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(40971122); 重庆市教委项目(yjgl22019)

作者简介: 温艳茹(1991~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境变化, E-mail: raina\_wen@163.com

\* 通讯联系人, E-mail: wangjl@swu.edu.cn

ENSO 事件的强信号对降水中稳定同位素的年际变化也具有重要影响<sup>[18]</sup>。综上所述,我国季风区降水  $\delta^{18}\text{O}$  的变化特征响应于 ENSO 变化<sup>[19]</sup>,并且以“环流效应”即中国南方季风区大气环流对大气降水中稳定同位素的影响来响应 ENSO 机制。在 El Niño 期间,中国季风区内来自印度洋的远源水汽份额减少,而来自西太平洋的水汽份额增大,由于后者输送路程较近,导致降水中  $\delta^{18}\text{O}$  较重<sup>[20]</sup>。因此,现代大气降水中  $\delta^{18}\text{O}$  监测和大气环流的分析,是解译亚洲季风区不同沉积物古气候记录恢复的一种重要方法。

我国西南地区位于典型的季风气候区,水汽来源以及影响降水的因素比较复杂<sup>[21]</sup>。夏季降水的水汽主要来源于低纬度海洋,冬季受大陆气团的影响,降水的水汽主要来自西风带的输送和内陆水汽再蒸发的补给。本研究通过对西南地区的重庆 2015 年 4~10 月进行天气尺度下降水取样分析,揭示了复杂季风系统下降水中稳定同位素、过量氙的变化特征以及它们与大气环流运动的关系,为进行区域水汽来源、降水过程以及水循环过程的研究提供了来自降水中稳定同位素的证据,并为亚洲季风区不同沉积物中古气候记录的定量恢复提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

重庆(105°17'~110°11'E,28°10'~32°13'N)位于中国西南部,四川盆地东部和长江上游,地形以丘陵、山地为主。该区属典型的亚热带季风气候,降水丰沛,雨热同期。在监测的 2015 年期间,年平均气温 17.7℃;年平均降水量约为 1 257 mm,较多年平均降水量偏多 6.2%;5~10 月降水量( $h$ )约 1 015 mm,约占年平均降水的 80%;11 月~次年 4 月降水量约 242 mm。

### 1.2 样品采集与测试

2015 年 4~10 月在研究区域进行了为期 8 个月的降水观测和样品采集工作,监测其间共采集降水样 61 场。采集地点位于重庆市北碚区西南大学地理科学学院顶楼,放置干燥洁净的大气降水采集器于露天环境,采集器装置距离顶楼地面 1.7 m,受地面杂尘影响小。所有样品均为一次完整降水过程的雨水样品,每次降水结束后及时采集雨水,先将预先清洗干净的聚乙烯广口瓶用降水样润洗,再将采集到的雨水装入样品瓶中,旋紧瓶盖后用封口膜将其瓶口密封,以防止蒸发引起的同位素分馏。采集到的雨水样品及时放入冰箱内低温保存。同时记录

样品的降水量、起始及结束的时刻、温度、湿度、气压等相关气象指标。

所有样品利用美国 LGR(Los Gatos Research)公司研发的液态水同位素分析仪(DLT-100,型号:908-0008)进行测定,测试精度为  $\delta^{18}\text{O} \leq 0.1\text{‰}$ ,  $\delta\text{D} \leq 0.5\text{‰}$ 。在分析之前,首先将样品取出,待其在室温下恢复常温之后进行实验分析<sup>[22]</sup>。本实验选取美国 LGR 公司生产的工作标样 LGR3A、LGR4A、LGR5A 作为参考标样,表 1 中标明了所用标样的  $\delta\text{D}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  所对应的真值。在样品测试序列中,每隔 3 个样品插入一个工作标样,每个样品进行 6 次测量,前 2 次测量结果被自动删除,保存后 4 次测量结果,以去除记忆效应。

表 1 不用规格的标样/‰

Table 1 Standard samples of different specifications/‰		
标样名称	$\delta^{18}\text{O}(\text{V-SMOW})$	$\delta\text{D}(\text{V-SMOW})$
LGR3A	-13.1	-96.4
LGR4A	-7.7	-51.0
LGR5A	-2.8	-9.5

在样品的测试分析中,采用来自国际原子能机构(IAEA)不同同位素比率的标样作为参考,标样值用相对于维也纳平均海洋水(V-SMOW)的千分差表示:

$$\delta^{18}\text{O}(\text{‰}) = [(R_{\text{样品}}/R_{\text{SMOW}}) - 1] \times 1000 \quad (1)$$

式中,  $R_{\text{样品}}$  为降水样品中  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  的比值,  $R_{\text{SMOW}}$  为 SMOW 中  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  的比值。

降水中稳定氢氧同位素比率的加权平均值为:

$$\delta = \sum P_i \delta_i / \sum P_i \quad (2)$$

式中,  $\delta$  为加权平均值,  $P_i$  为降水量,  $\delta_i$  为其相应的稳定同位素值。

## 2 结果与分析

### 2.1 区域大气降水线

大气降水中氢氧同位素的组成比率随着水的相态转化而变化,稳定同位素的平衡分馏和动力分馏使得降水过程中的氢氧同位素组成存在差异,  $\delta\text{D}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  之间的线性关系被定义为大气降水线<sup>[6]</sup>,其斜率和截距受到水汽来源、输送方式、水汽凝结温度以及降水期间的温度、湿度等的影响。因此大气降水线对于研究水循环过程中稳定同位素的变化有着重要意义。大气降水线的斜率反映两类稳定同位素 D 和  $^{18}\text{O}$  分馏速率的对比关系,常数项指示 D 对平衡状态的偏离程度<sup>[23]</sup>。

采用最小二乘法对 2015 年 4 ~ 10 月时段内全部场降水数据中稳定氢氧同位素的值分别进行计算,得出重庆地区的区域全年大气降水线(local meteoric water line, LMWL)为  $\delta D = 8.28 \delta^{18}O + 12.34$ ,  $r = 0.99$ ,  $P < 0.01$ , 见图 1.

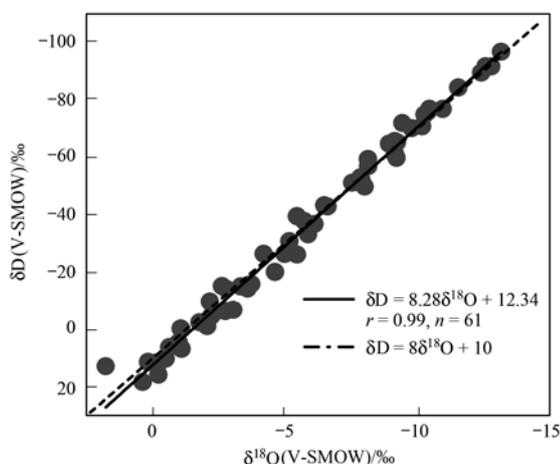


图 1 重庆地区大气降水线方程

Fig. 1 LMWL of Chongqing

重庆地区大气降水线方程与 Craig 提出的全球降水线方程(global meteoric water line, GMWL):  $\delta D = 8 \delta^{18}O + 10$ <sup>[6]</sup> 和 Yurtsever 的全球降水线方程  $\delta D = 8.17 \delta^{18}O + 10.56$ <sup>[24]</sup>, 以及郑淑蕙等<sup>[25]</sup> 提出的中

国降水线方程  $\delta D = 7.9 \delta^{18}O + 8.2$  相比较,该方程的斜率和截距均稍大. 但发现研究区域全年大气降水线方程与我国东部季风区尤其是宜昌( $\delta D = 8.45 \delta^{18}O + 11.50$ )<sup>[26]</sup>、长沙( $\delta D = 8.47 \delta^{18}O + 15.46$ , 基于 GNIP 数据)、武汉( $\delta D = 8.97 \delta^{18}O + 15.99$ )<sup>[27]</sup>、桂林( $\delta D = 8.42 \delta^{18}O + 16.48$ )<sup>[28]</sup>、福州( $\delta D = 8.84 \delta^{18}O + 16.49$ )<sup>[29]</sup>的斜率和截距十分接近,该方程与李廷勇等<sup>[30]</sup>从 2006 年 5 月 ~ 2008 年 9 月采用次降水数据建立的降水线方程  $\delta D = 8.73 \delta^{18}O + 15.73$  结果相似. 这反映上述地区的大气降水与季风的类型、降水水汽来源和性质基本相同. 本研究样品均为次降水样品,与 GNIP 收集的月平均样品数据不同,基于次降水的稳定氢氧同位素更易受到湿度、风速、大气稳定度等短期天气状况的影响. 由于分子质量数的差异,氢同位素比氧同位素的分馏速率要大,因此在其他条件相同的情况下,由经历过多次分馏过程的水汽所形成的降水  $\delta D$  相对偏重,导致基于此类次降水所建立的区域大气降水线的斜率和截距偏大<sup>[30]</sup>.

为了进一步分析重庆地区大气降水中氢氧同位素的变化特征,将 61 个降水数据根据降水量的大小细分为 4 组,并计算出它们各自降水量、回归方程的斜率、截距及相关系数(表 2).

表 2 重庆地区大气降水样  $\delta D$ - $\delta^{18}O$  相关关系

Table 2 Relationship of  $\delta D$ - $\delta^{18}O$  of precipitation in Chongqing

样品	样品数	降水量(h)/mm	斜率	截距	相关系数
全部样品	61	1 095	8.28	12.34	0.99
$P > 25$	15	757.50	8.51	13.95	0.99
$10 < P \leq 25$	12	194.10	8.59	16.31	0.98
$5 < P \leq 10$	11	79	8.14	11.60	0.99
$P \leq 5$	23	64.40	8.01	8.22	0.98

从表 2 可以看出,除  $P > 25$  这组外,降水线方程的斜率和截距随着降水量的减少而减小,斜率从 8.59 ( $10 < P \leq 25$ ) 减至 8.01 ( $P \leq 5$ ),相应的截距从 16.31 减至 8.22. 较低的斜率和截距主要是由于雨滴降落过程中受到不平衡的二次蒸发引起的同位素分馏导致<sup>[31]</sup>. 降水量越少,雨滴在降水过程中受到的云下二次蒸发而引起的同位素动力分馏越强烈,使得斜率和截距越小<sup>[17]</sup>. 此外, $P > 25$  的降水线方程斜率和截距与全年大气降水线相似,没有体现出最大的斜率和截距,由于降水线方程的斜率和截距除受到降水量的影响之外,还受到温度、湿度、水汽压等的影响,在降水从云层底部降落到地面的过程中,仅较小降雨事件有明显的二次蒸发现象,并伴

随同位素的分馏;大降雨事件的云下二次蒸发同位素效应不明显,基本能反映云层内部的同位素组成,得出的降水线斜率和截距,与地区大气降水线方程很接近<sup>[31]</sup>.

## 2.2 降水中稳定同位素的季节变化

图 2 给出了研究时段内重庆地区大气降水中  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  的季节变化,同时给出的还有降水中过量氘( $d$ )以及气温、降水的变化情况. 可以看出,重庆地区大气降水中  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  的变化具有一定的同步性,这是由于水汽凝结成降水过程中,同位素分馏使得  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  存在一种线性关系. 温度在夏半年偏高,而在冬半年偏低;降水主要集中在 6 ~ 9 月. 2015 年 4 ~ 10 月在研究区域采集的大气降水样品

的  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  变化范围分别是  $-96.3\text{‰} \sim 18.0\text{‰}$ 、 $-13.1\text{‰} \sim 1.7\text{‰}$ , 降水量加权平均值分别是  $-34.7\text{‰}$  和  $-5.7\text{‰}$ . 降水中  $\delta^{18}O$  的变化范围及降水量加权平均值与柳鉴容等<sup>[32]</sup> 计算的我国南部地区  $\delta^{18}O$  的变化范围  $-16.20\text{‰} \sim 0.38\text{‰}$ , 降水量加权平均值在  $-5.94\text{‰} \sim -6.50\text{‰}$  结果相似.

$\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  体现出明显的夏半年低值冬半年高值的季节变化.  $\delta^{18}O$  在 11 月 ~ 次年 5 月偏高, 降水量加权平均值为  $-1.8\text{‰}$ ; 6 ~ 10 月降水量加权平均值为  $-7.0\text{‰}$ , 明显偏低.  $\delta D$  的变化特征与  $\delta^{18}O$  一致, 6 月降水中开始减小, 在 7 ~ 9 月出现一年中的最低值.  $\delta^{18}O$  的最负值出现在 8 月和 9 月, 分别是  $-13.1\text{‰}$ 、 $-12.7\text{‰}$ 、 $-12.5\text{‰}$ , 这与我国夏季风影响显著的南方地区  $\delta^{18}O$  在 7 ~ 9 月达到一年中最低值的变化趋势一致<sup>[33]</sup>. 原因在于重庆地区不同季节的水汽来源与温度湿度不同. 5 月, 夏季风在我国沿海地区登陆, 携带着蒸发弱的海洋性气团深入内陆的过程中, 沿途的重同位素不断冷凝被冲刷而大大贫化, 致使位于西南地区的重庆 6 ~ 9 月重同位素偏低, 重同位素的最低值出现在夏季风减弱的 9 月. 10 月, 夏季风逐渐退出我国, 西风环流所携带的大陆性气团逐渐占主导地位, 使得重庆 11 月 ~ 次年 5 月的重同位素值偏高, 由于大陆性气团及内陆水汽再蒸发的气团湿度低, 导致降水量小, 气团被沿途冲刷作用小,  $\delta^{18}O$  ( $\delta D$ ) 偏高.

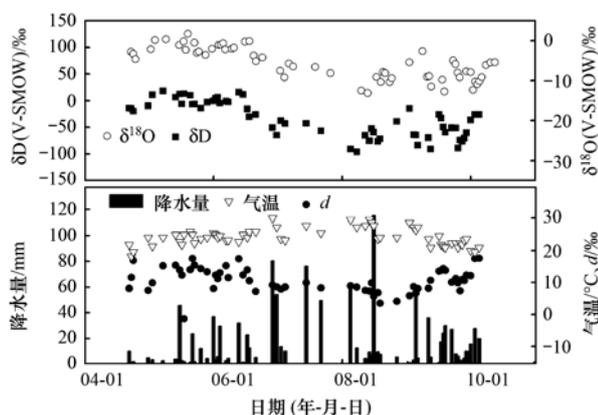


图 2 重庆大气降水中稳定同位素 ( $\delta^{18}O$ 、 $\delta D$ )、过量气 ( $d$ ) 及气温、降水的日变化

Fig. 2 Daily variations of  $\delta^{18}O$ ,  $\delta D$ ,  $d$  in precipitation, temperature and precipitation in Chongqing

### 2.3 过量气

Dansgaard<sup>[1]</sup> 在 1964 年首次提出了过量气 ( $d$ ):  $d = \delta D - 8 \delta^{18}O$ , 表示水汽蒸发过程中因同位素的动力分馏而偏离平衡分馏或偏离全球大气降水线的程度.  $d$  主要与水汽源地的状况有关, 如空气湿度、风

速、水体表面温度、盐度等<sup>[30,31]</sup>. 实际上是一个大气降水的重要综合环境因素指标, 并常常被用来追踪水汽源地<sup>[35]</sup>.

在研究时段, 重庆地区  $d$  的变化范围为  $-1.3\text{‰} \sim 17.5\text{‰}$ , 降水量加权平均值为  $10.7\text{‰}$ . 5 ~ 9 月和 4 月、10 月,  $d$  的降水量加权平均值分别为  $10.4\text{‰}$ 、 $12.2\text{‰}$ 、 $15.7\text{‰}$ , 表现出明显的季节差异 (图 2), 夏半年中, 气温偏高, 降水量大,  $d$  值偏小; 冬半年中, 气温偏低, 降水量小,  $d$  值偏高. 这主要是由于在重庆地区夏半年, 受夏季风影响的降水主要来自低纬度海洋的水汽凝结, 空气湿度大, 因水汽源地较远, 降水中稳定同位素偏负,  $d$  值偏小; 而在冬半年, 重庆地区的降水主要受大陆性气团的影响, 以及西风带输送和内陆水汽的再蒸发补给, 空气湿度小, 降水中的稳定同位素偏正,  $d$  值偏大. 因此, 重庆地区大气降水中  $d$  的季节性变化, 体现的是夏半年夏季风与冬半年非夏季风影响下降水水汽源地的差异.

### 2.4 降水中 $\delta^{18}O$ 与温度、降水量关系分析

根据已有的研究<sup>[36]</sup>, 在中纬度海洋或者季风气候区, 雨热同期, 降水中稳定同位素具有显著的降水量效应, 表现出来的是降水量中  $\delta^{18}O$  与降水量大小呈现负相关关系. 研究区域大气降水中  $\delta^{18}O$  与降水量 ( $h$ ) 之间没有体现出明显的相关性 [图 3 (a)]:  $\delta^{18}O = -0.03h - 5.02$ ,  $r = 0.03$ ,  $P < 0.01$ ,  $n = 61$ . 说明降水量大小不是导致  $\delta^{18}O$  变化的唯一原因, 重庆地区降水中  $\delta^{18}O$  还呈现出季节变化,  $\delta^{18}O$  变化与大气环流<sup>[34,37]</sup>、以及不同季节的水源地差异<sup>[33]</sup> 有密切差异, 同时也要取决于水汽团在输送运移过程中的分馏作用, 同一源地水汽团经过多次凝结分馏过程, 即使后期降水量比前期降水量小, 后期降水中  $\delta^{18}O$  也会比前期降水中  $\delta^{18}O$  偏负<sup>[30]</sup>. 因此不同季节的水源地差异及大气环流运动是导致重庆地区大气降水中  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  变化特征的重要原因.

研究区域大气降水中  $\delta^{18}O$  与温度之间没有呈现明显的相关性 [图 3 (b)]:  $\delta^{18}O = -0.46T + 4.49$ ,  $r = 0.12$ ,  $P < 0.05$ ,  $n = 61$ . 但是从  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  与温度的变化趋势 (图 2) 可以看出: 在我国的季风降水区, 温度越低, 大气降水中  $\delta^{18}O$  越大; 温度越高,  $\delta^{18}O$  反而越小<sup>[38,39]</sup>. 这主要是季风气候对大气降水中  $\delta^{18}O$  的影响较大, 在某种程度上, 季风气候抑制和掩盖了温度效应, 使得呈现出反温度效应.

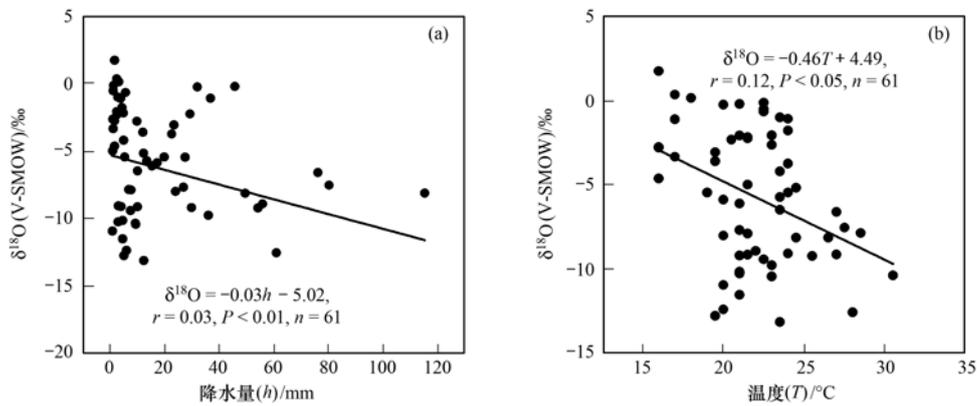


图3 重庆地区大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与气象要素的相关性分析

Fig. 3 Correlations between  $\delta^{18}\text{O}$  in Precipitation and Meteorological Factors in Chongqing

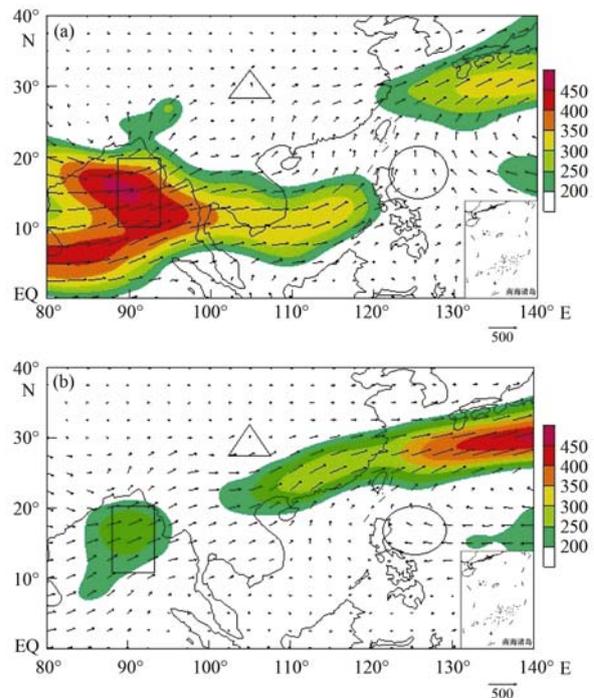
2.5 重庆大气降水中氢氧同位素对 ENSO 的响应

ENSO 是厄尔尼诺/拉尼娜 (El Niño/La Niña) 和南方涛动 (Southern Oscillation) 的总称,是发生在赤道中、东太平洋上的大尺度海气相互作用事件,它以 2~7 a 的周期不断循环<sup>[40]</sup>. 许多地方的降水、气温等气候要素的异常与 ENSO 具有密切关系<sup>[41]</sup>. 定量分析 ENSO 的常用指标是 Nino3.4 区 (5°N~5°S, 170°W~120°W) 的海表温度异常 (SSTA)<sup>[41,42]</sup> 和美国气象预测中心发布的南方涛动指数序列 (SOI)<sup>[42]</sup>. 一般来说, SSTA 与 SOI 具有很高的负相关性<sup>[26]</sup>. SOI 的正值表示有发生 El Niño 的倾向, SOI 的负值表示有发生 La Niña 的倾向.

根据美国气象预测中心 (NOAA) 标准: 以 Nino3.4 区 SSTA 的 3 个月滑动平均值连续 5 个月  $\geq 0.5^\circ\text{C}$  ( $\leq -0.5^\circ\text{C}$ ) 定义为一次 El Niño (La Niña) 事件<sup>[43]</sup>. 2015 年 Nino3.4 区 SSTA 的 3 个月滑动平均值连续 8 个月 (3~8 月), 为一次 El Niño 事件. 事实上, SOI 及 SSTA 等数据显示 2012 年 12 月~2014 年 8 月, 中东太平洋的海表温度 (SSTA) 呈现为负异常, 表现为 La Niña 暴发; 8 月起, 中东太平洋的海表温度 (SSTA) 负异常已经恢复, La Niña 已经结束. 2014 年 9 月起, Nino3.4 区的海表温度 (SSTA) 呈现为正异常, 并持续升高, El Niño 已于 2014 年 9 月开始形成 (图 4). 有研究表明, El Niño 形成初期, 西北太平洋异常反气旋伴随海表温度正异常滞后一段时间出现<sup>[44]</sup>, 因此, 降水  $\delta^{18}\text{O}$  响应会有一些的滞后.

利用美国国家环境预报中心 (National Centers for Environmental Prediction) 的 NCEP/NCAR 逐月再分析格点资料, 空间分辨率为水平  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$  网格点, 分别计算了 2014 年夏季 (6~8 月) 和 2015 年夏

季 (6~8 月) 的水汽输送场及其水汽输送散度, 建立模型来追踪 2014~2015 年夏季重庆地区不同水汽来源的关系, 结果见图 4 (其中三角形区域代表重庆地区, 左侧矩形圈出了来自印度洋的水汽输送, 右侧椭圆形圈出了来自太平洋的水汽输送). SOI 等数据表明 2012 年 12 月~2014 年 8 月, 中东太平洋的海温异常偏低 (La Niña), 可以看出, 2014 年夏季, 来自远源印度洋的水汽输送份额增大 [图 4 (a)]; 2014 年 9 月起, 中东太平洋的海温异常偏高



矢量单位:  $\text{g} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$ ; 阴影单位:  $10^{-3} \text{g} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$

图4 2014年、2015年夏季整层大气平均水汽通量以及水汽通量散度

Fig. 4 Vertically integrated moisture fluxes and divergence for summer in 2014, 2015

(El Niño), 西太平洋副热带高压偏南西伸加强, 并引导其南缘水汽到达东亚大陆, 2015 年夏季, 来自近源太平洋的水汽输送份额增大, 这与 ENSO 事件以及“环流效应”相吻合[图 4(b)].

### 2.5.1 重庆地区大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 对 ENSO 事件的记录

研究区域 2015 年 9 月 $\delta^{18}\text{O}$ 的降水量加权平均值为  $-7.6\text{‰}$ ; 2014 年 9 月 $\delta^{18}\text{O}$ 的降水量加权平均值为  $-8.7\text{‰}$ (表 3)<sup>[45]</sup>. 2015 年 $\delta^{18}\text{O}$ 的降水量加权平均值明显偏重. 研究区 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化清晰地记录了本次 El Niño 现象(图 4), 2014 年 8 月起, 为 La Niña 结束后的衰减期, 西南季风区获得远源印度洋水汽增加, 由于水汽输送路径较远, 重同位素在输送过程中不断冷凝而逐渐减少,  $\delta^{18}\text{O}$ 偏轻; 2014 年 9 月起, El Niño 已经开始形成, 来自近源太平洋的海洋水汽逐渐增加, 深入重庆(图 5), SOI 持续为负值, 此期间为 El Niño 控制, 使得 2015 年夏季风影响的 6~9 月 $\delta^{18}\text{O}$ 偏重,  $\delta^{18}\text{O}$ 降水量加权平均值为  $-7.1\text{‰}$ . 谭明<sup>[46]</sup>的“环流效应”<sup>[16]</sup>和研究区大气环流背景分析可知: 在 El Niño 期间, 中国季风区获得远源印度洋水汽降低, 获得近源太平洋水汽比例明显增加, 大气

降水 $\delta^{18}\text{O}$ 偏重. 珠江三角洲地区 $\delta^{18}\text{O}$ 在年际间变化上与 ENSO 存在显著的正相关, 与南方涛动指数(SOI)具有显著的负相关<sup>[7]</sup>, 亦响应于上述变化.

### 2.5.2 重庆地区大气降水过量氘( $d$ )对 ENSO 事件的记录

研究区域过量氘( $d$ ) 2015 年 4~9 月的平均值为  $12.9\text{‰}$ ; 2014 年 4~9 月平均值为  $12.8\text{‰}$ <sup>[45]</sup>; 明显高于 2014 年同期平均值, 这指示了水汽来源和路径的差异(图 4). 2014 夏半年为 La Niña 时期, 水汽来源以西南季风带来的远源印度洋水汽比例偏多, 由于水汽源地较远, 降水中的重同位素值偏低,  $d$  值较低; 2015 年 5~9 月为 El Niño 盛期, 同时, 2015 年夏季风影响下的 4~10 月的  $d$  平均值为  $13.4\text{‰}$ ; 水汽来源以东南季风带来的近源太平洋水汽比例偏多, 水汽源地较近,  $d$  值偏高. 结果表明研究区在 La Niña 及其衰减期, 来自远源印度洋的水汽比例高, 而在 El Niño 时期, 来自近源太平洋的水汽比例高,  $d$  值变化特征记录了此次 ENSO 事件的转换.

## 3 结论

(1) 重庆地区大气降水样品 $\delta^{18}\text{O}$ 变化范围是  $-13.1\text{‰} \sim 1.7\text{‰}$ , 夏半年偏低, 冬半年偏高. 同时,  $d$  也具有夏低冬高的变化特征, 不同季节的水汽源地的差异是导致重庆氢氧同位素和过量氘出现明显季节变化的主要原因. 夏半年, 降水的水汽主要来源于夏季风所携带的海洋水汽, 空气湿度大,  $d$  小, 在水汽输送过程中重同位素不断被冲刷而大大贫化, 因而降水中 $\delta^{18}\text{O}$  ( $\delta\text{D}$ ) 表现为低值; 冬半年中, 重庆受大陆性气团控制, 降水的水汽主要来源于西风环流及内陆水汽再蒸发, 空气湿度小, 降水中 $\delta^{18}\text{O}$  ( $\delta\text{D}$ ) 以及  $d$  表现为高值.

(2) 根据 2015 年 4 月~10 月采集的大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta\text{D}$  建立了重庆地区大气降水线方程:  $\delta\text{D} = 8.28 \delta^{18}\text{O} + 12.34$  ( $r = 0.99$ ,  $n = 61$ ), 该方程与我国东部季风区尤其是南方多数地区大气降水水线的斜率和截距非常接近, 这反映了它们的大气降水与季风的类型、降水水汽来源和云团性质相似.

(3) 监测期间, 重庆地区大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度、降水量的相关性不显著. 但 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化特征敏感地响应大气环流运动, 与 ENSO 表现为正相关. El Niño 期间, 重庆地区获得近源太平洋水汽比例增加,  $\delta^{18}\text{O}$ 显著偏高; 在 La Niña 结束后的衰减期, 获得西南季风带来的印度洋水汽偏多,  $\delta^{18}\text{O}$ 显著偏低. 同时,  $d$  值也明显呈现了与 $\delta^{18}\text{O}$ 相同的变化特征, 记

表 3 2014 年 9 月重庆地区降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 及降水量<sup>1)</sup>

Table 3 The  $\delta^{18}\text{O}$  in precipitation and precipitation in Chongqing in Sep. 2014

日期(月-日)	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	降水量/mm
09-14	-5.68	16.70
	-9.51	5.60
09-17	-6.68	103.40
	-16.65	33.10
09-27	-6.67	4
	-8.72	3.20

1) 根据文献[45]转绘

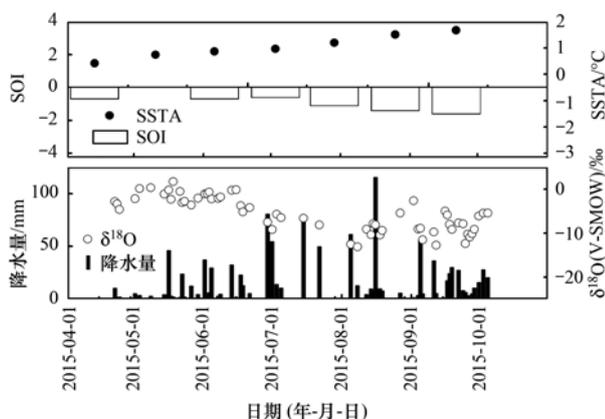


图 5 重庆地区 2015 年大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 、降水量与南方涛动指数(SOI)、海表温度(SSTA)的关系

Fig. 5 Relationships between  $\delta^{18}\text{O}$  in precipitation and SOI, SSTa, precipitation in Chongqing in 2015

录了此次 ENSO 事件。

致谢：感谢西南大学地理科学学院王勇副研究员、李廷勇副研究员、何潇、王家录等在论文完成过程中给予的指导和帮助。

#### 参考文献：

- [ 1 ] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation[J]. *Tellus*, 1964, **16**(4): 436-468.
- [ 2 ] 杨保, 施雅风. 近 2000 年古里雅冰芯气候变化的子波分析[J]. *地理科学*, 2001, **21**(6): 488-492.
- [ 3 ] 邵晓华, 汪永进, 孔兴功, 等. 南京葫芦洞石笋生长速率及其气候意义讨论[J]. *地理科学*, 2003, **23**(3): 304-309.
- [ 4 ] 王建力, 王丽, 何潇, 等. 重庆地区末次冰期气候变化的石笋记录研究[J]. *地理科学*, 2006, **26**(5): 580-585.
- [ 5 ] 侯书贵, 王叶堂, 庞洪喜. 南极冰盖雪冰氢、氧稳定同位素气候学：现状与展望[J]. *科学通报*, 2013, **58**(1): 27-40.
- [ 6 ] 肖可, 沈立成, 王鹏. 藏南干旱区湖泊及地热水体氢氧同位素研究[J]. *环境科学*, 2014, **35**(8): 2952-2958.
- [ 7 ] Friedman I. Deuterium content of natural waters and other substances[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1953, **4**(1-2): 89-103.
- [ 8 ] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters[J]. *Science*, 1961, **133**(3465): 1702-1703.
- [ 9 ] Dansgaard W. The abundance of O<sup>18</sup> in atmospheric water and water vapour[J]. *Tellus*, 1953, **5**(4): 461-469.
- [ 10 ] 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.
- [ 11 ] Araguás-Araguás L, Froehlich K, Rozanski K. Stable isotope composition of precipitation over southeast Asia[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, **103**(D22): 28721-28742.
- [ 12 ] 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.
- [ 13 ] Whetton P, Rutherford I. Historical ENSO teleconnections in the eastern hemisphere[J]. *Climatic Change*, 1994, **28**(3): 221-253.
- [ 14 ] Dayem K E, Molnar P, Battisti D S, *et al.* Lessons learned from oxygen isotopes in modern precipitation applied to interpretation of speleothem records of paleoclimate from Eastern Asia[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, **295**(1-2): 219-230.
- [ 15 ] Maher B A, Thompson R. Oxygen isotopes from Chinese caves: records not of monsoon rainfall but of circulation regime[J]. *Journal of Quaternary Science*, 2012, **27**(6): 615-624.
- [ 16 ] 章新平, 姚檀栋, 金会军. ENSO 事件对青藏高原古里雅冰芯中现代 $\delta^{18}\text{O}$ 的影响[J]. *冰川冻土*, 2000, **22**(1): 23-28.
- [ 17 ] 杨梅学, 姚檀栋. 古里雅冰芯气候记录对 ENSO 事件的响应[J]. *冰川冻土*, 2003, **25**(1): 27-33.
- [ 18 ] 薛积彬, 钟巍, 赵引娟. 珠江三角洲地区降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化特征及与 ENSO 的关系[J]. *地理科学*, 2007, **27**(6): 825-830.
- [ 19 ] Cheng H, Sinha A, Wang X F, *et al.* The global paleomonsoon as seen through speleothem records from Asia and the Americas[J]. *Climate Dynamics*, 2012, **39**(5): 1045-1062.
- [ 20 ] Tan M. Circulation effect: response of precipitation  $\delta^{18}\text{O}$  to the ENSO cycle in monsoon regions of China[J]. *Climate Dynamics*, 2014, **42**(3-4): 1067-1077.
- [ 21 ] 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[J]. *冰川冻土*, 2009, **31**(4): 613-619.
- [ 22 ] West A G, Goldsmith G R, Brooks P D, *et al.* Discrepancies between isotope ratio infrared spectroscopy and isotope ratio mass spectrometry for the stable isotope analysis of plant and soil waters[J]. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 2010, **24**(14): 1948-1954.
- [ 23 ] 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[J]. *长江流域资源与环境*, 2005, **14**(5): 665-669.
- [ 24 ] Yurtsever Y. Worldwide survey of stable isotopes in precipitation[M]. *International Report*. Vienna: IAEA, 1975. 1040.
- [ 25 ] 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.
- [ 26 ] 武亚遵, 万军伟, 林云. 湖北宜昌西陵峡地区大气降雨氢氧同位素特征分析[J]. *地质科技情报*, 2011, **30**(3): 93-97.
- [ 27 ] 刘进达, 赵迎昌, 刘恩凯, 等. 中国大气降水稳定同位素时空分布规律探讨[J]. *勘察科学技术*, 1997, (3): 34-39.
- [ 28 ] 涂林玲, 王华, 冯玉梅. 桂林地区大气降水的 D 和  $^{18}\text{O}$  同位素的研究[J]. *中国岩溶*, 2004, **23**(4): 304-309.
- [ 29 ] 章新平, 姚檀栋. 我国部分地区降水中氧同位素成分与温度和降水量之间的关系[J]. *冰川冻土*, 1994, **16**(1): 31-40.
- [ 30 ] 李廷勇, 李红春, 沈川洲, 等. 2006~2008 年重庆大气降水  $\delta\text{D}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  特征初步分析[J]. *水科学进展*, 2010, **21**(6): 757-764.
- [ 31 ] 孟玉川, 刘国东. 长江流域降水稳定同位素的云下二次蒸发效应[J]. *水科学进展*, 2010, **21**(3): 327-334.
- [ 32 ] 柳鉴容, 宋献方, 袁国富, 等. 中国东部季风区大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的特征及水汽来源[J]. *科学通报*, 2009, **54**(22): 3521-3531.
- [ 33 ] 吴华武, 章新平, 孙广禄, 等. 湖南长沙地区大气降水中稳定同位素特征变化[J]. *长江流域资源与环境*, 2012, **21**(5): 541-546.
- [ 34 ] Merlivat L, Jouzel J. Global climatic interpretation of the deuterium-oxygen 18 relationship for precipitation[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1979, **84**(C8): 5029-5033.
- [ 35 ] Mook W G, Gat J R, Meijer H A J, *et al.* Environmental isotopes in the hydrological cycle: principles and applications[J]. *Clinical Chemistry*, 2001, **37**(3): 327-332.
- [ 36 ] 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.
- [ 37 ] 廖聪云, 钟巍, 马巧红, 等. 广州大气降水中稳定同位素对 2008 年初华南地区冰雪灾害期间水汽来源的反映[J]. *环境科学*, 2012, **33**(4): 1050-1056.

- [38] Posmentier E S, Feng X H, Zhao M X, *et al.* Seasonal variations of precipitation  $\delta^{18}\text{O}$  in eastern Asia[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, **209**(D23): D23106.
- [39] Liu J, Song X, Yuan G, *et al.* Stable isotopic compositions of precipitation in China [J]. *Tellus Series B-Chemical & Physical Meteorology*, 2014, **66**(1): 39-44.
- [40] 王绍武, 朱锦红, 蔡静宁, 等. ENSO 变率的不规则性[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2003, **39**(增刊): 125-133.
- [41] 龚道溢, 王绍武. 近百年 ENSO 对全球陆地及中国降水的影响[J]. *科学通报*, 1999, **44**(3): 315-320.
- [42] Ropelewski C F, Jones P D. An extension of the tahiti darwin southern oscillation Index[J]. *Monthly Weather Review*, 1987, **115**(9): 2161-2065.
- [43] 任福民, 袁媛, 孙丞虎, 等. 近 30 年 ENSO 研究进展回顾[J]. *气象科技进展*, 2012, **2**(3): 17-24.
- [44] 王钦, 李双林, 付建建, 等. 1998 和 2010 年夏季降水异常成因的对比分析: 兼论两类不同厄尔尼诺事件的影响[J]. *气象学报*, 2012, **70**(6): 1207-1222.
- [45] 胡蕊. 重庆市北碚区大气降水中的氢氧同位素特征和水汽来源分析[D]. 重庆: 西南大学, 2015. 23-25
- [46] 谭明. 信风驱动的中国季风区石笋  $\delta^{18}\text{O}$  与大尺度温度场负耦合——从年代际变率到岁差周期的环流效应(纪念 GNIP 建网 50 周年暨葫芦洞石笋末次冰期记录发表 10 周年)[J]. *第四纪研究*, 2011, **31**(6): 1086-1097.

## CONTENTS

Concentration Characteristics of PM <sub>2.5</sub> in Beijing During Two Red Alert Periods .....	CHENG Nian-liang, ZHANG Da-wei, CHEN Tian, <i>et al.</i> (2409)
Response of Human Respiratory Height PM <sub>2.5</sub> Variation Characteristics to Meteorological Factors During Winter Haze Days in Beijing .....	ZHANG Nan, XIONG Hei-gang, GE Xiu-xiu, <i>et al.</i> (2419)
Pollution Characteristics and Sources Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmospheric Fine Particulate Matter in Lanzhou City .....	LI Ying-hong, RAO Zhi-guo, TAN Ji-hua, <i>et al.</i> (2428)
Determination and Source Apportionment of Aromatic Acids in PM <sub>2.5</sub> from the Northern Suburb of Nanjing in Winter .....	ZHANG Ya-fei, MA Yan, QI Lu, <i>et al.</i> (2436)
Impact of Marine-atmospheric Process on Aerosol Number Size Distribution in the South China Sea .....	KONG Ya-wen, SHENG Li-fang, LIU Qian, <i>et al.</i> (2443)
Assessment of Heavy Metals Pollution and Its Health Risk of Atmospheric Dust Fall from East Part of Junggar Basin in Xinjiang .....	YANG Chun, Tashpolat Tiyp, HOU Yan-jun, <i>et al.</i> (2453)
Variations of Stable Isotope in Precipitation and Its Atmospheric Circulation Effect in Chongqing .....	WEN Yan-ru, WANG Jian-li (2462)
Temporal Dynamics of Stable Isotopic Composition in Lake Taihu and Controlling Factors .....	XU Jing-zheng, XIAO Wei, XIAO Qi-tao, <i>et al.</i> (2470)
Geochemical Characteristics of Lateral Hyporheic Zone Between the River Water and Groundwater, a Case Study of Maanxi in Chongqing .....	ZHANG Yu, YANG Ping-heng, WANG Jian-li, <i>et al.</i> (2478)
Variations of CO <sub>2</sub> Exchange Fluxes Across Water-air Interface and Environmental Meaning in a Surface Stream in Subtropical Karst Area, SW China .....	LI Li, PU Jun-bing, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (2487)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) Releases from Soils of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas; UV-Vis Spectrum .....	LIANG Jian, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (2496)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) Releases from Soils of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas; Fluorescence Spectra .....	LIANG Jian, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (2506)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Thirteen Sulfonamides Antibiotics in a Drinking Water Source in East China .....	JIN Lei, JIANG Lei, HAN Qi, <i>et al.</i> (2515)
Concentrations of Ketamine and Norketamine in the Water Environment in Beijing .....	ZHANG Hua-fang, YANG Jun, DU Peng, <i>et al.</i> (2522)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Water of Yuqiao Reservoir Watershed During the Water Delivery Period .....	CHANG Sheng, ZHAO Xing-ru, FU Qing, <i>et al.</i> (2530)
Concentrations and Partitioning of Halogenated Flame Retardants in Industrial Water of Dongjiang River .....	HE Ming-jing, LI Qi, ZHAO Jia-yuan, <i>et al.</i> (2539)
Distribution Characteristics and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, Fatty Acids in Water of Karst Underground River .....	XIE Zheng-lan, SUN Yu-chuan, ZHANG Mei, <i>et al.</i> (2547)
Pollution Characteristics of Snowmelt Runoff on Different Underlying Surface in Main Urban Area of Harbin .....	SUN Xi-han, LIU Shuo, WAN Lu-he, <i>et al.</i> (2556)
Impact of Precipitation on Fenghe River Water and Aquatic Microorganisms .....	LU Si-dan, SUN Yu-jiao, ZHAO Xuan, <i>et al.</i> (2563)
Response of <i>Microcystis aeruginosa</i> Growth to Arsenate Under Different Phosphorus Regimes .....	WANG Zhen-hong, ZHANG Han-peng, LUO Zhuan-xi (2570)
Removal Behavior of Ibuprofen and Diclofenac in Different Constructed Wetlands .....	JING Rui-ying, YANG Yang, DAI Yu-ni, <i>et al.</i> (2577)
Influence of Chemical Pre-oxidation on Chloral Hydrate Formation of Threonine .....	CAI Guang-qiang, FU Xue-min, LIU Li-jun, <i>et al.</i> (2586)
Activated Carbon Supported Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub> Catalysts to Activate Peroxymonosulfate for Orange G Degradation .....	WANG Zhong-ming, CHEN Jia-bin, ZHANG Li-ming, <i>et al.</i> (2591)
Kinetics for Degradation of Orange G with Peroxymonosulfate Activated by Carbon Nanotubes .....	ZHANG Li-ming, CHEN Jia-bin, LI Wen-wei, <i>et al.</i> (2601)
Removal of Chloramphenicol in Wastewater by Electrocatalytic Reduction with Carbon Nanotubes-Modified Electrode .....	DENG Fei, TANG Bo-bin, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (2610)
Removal of AOX, Chroma and TOC in Chemical Dye-stuff Wastewater with Iron Scraps-Fenton-Coagulation Combined Process .....	SHU Xiao-ming, XU Can-can, WEN Xiao-gang, <i>et al.</i> (2618)
Removal of AOX in Activated Sludge of a Chemical Pharmaceutical Industry with Fenton Oxidation .....	CHEN Si, XU Can-can, LIU Rui, <i>et al.</i> (2625)
Performance Evaluation of a Pilot-scale Microbubble-aerated Biofilm Reactor .....	LIU Chun, ZHANG Jing, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2632)
Nitrogen Removal Performance of Novel HABR Reactor over CANON Process .....	BAO Lin-lin, CHEN Wan-qiu (2639)
Characteristics of a Combined Heterotrophic and Sulfur Autotrophic Denitrification Technology for Removal of High Nitrate in Water .....	LI Xiang, MA Hang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (2646)
Characteristics of Microbial Community in Each Compartment of ABR ANAMMOX Reactor Based on High-throughput Sequencing .....	CHEN Chong-jun, ZHANG Hai-qin, WANG Yao-qi, <i>et al.</i> (2652)
Nitrogen Removal and the Characteristics of Denitrification Bacteria Using NUA-DAS Ecofilter .....	WANG Long-mian, QIU Hao-yu, CHE Yu-xiao, <i>et al.</i> (2659)
Coupling of Hydrocarbon Accumulation and Cobalt Removal During Treatment of Cobalt Enriched Industrial Wastewater with <i>Botryococcus braunii</i> Biofilm Attached Cultivation .....	CHENG Peng-fei, WANG Yan, YANG Qi-yong, <i>et al.</i> (2666)
Isolation of <i>Raoultella</i> sp. sari01 and Its Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Characteristics .....	YAN Wei-zhi, HAO Jian, SUN Jun-song, <i>et al.</i> (2673)
Screening and Nitrogen Removing Characteristics of Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacteria SLWX <sub>2</sub> from Sea Water .....	CHENG Yu, LI Qiu-fen, FEI Yu-tao, <i>et al.</i> (2681)
Biodiversity of Thiocyanate-degrading Bacteria in Activated Sludge from Coking Wastewater .....	XU Wei-chao, MENG Xiao-jun, YIN Li, <i>et al.</i> (2689)
Responses of Plankton Microeukaryotic Community to Increasing Temperatures Created by Power Plant Thermal Discharges .....	DAI Wen-fang, YANG Shi-ye, QUE Zhi-jia, <i>et al.</i> (2696)
Characteristics of Soil Microbial Community Structure in the Rhizospheric Soil of <i>Ammopiptanthus mongolicus</i> by Phospholipid Fatty Acid (PLFA) .....	ZUO Yi-ling, HE Xue-li, WANG Shao-jie, <i>et al.</i> (2705)
Response of Soil Respiration to Extreme Precipitation in Semi-arid Regions .....	ZHAO Man, WANG Rui, LI Ru-jian, <i>et al.</i> (2714)
Features and Influencing Factors of N <sub>2</sub> O Emissions from Drawdown Area in the Three Gorges Reservoir .....	LI Rui, LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, <i>et al.</i> (2721)
Denitrification Loss and N <sub>2</sub> O Emission from Different Carbon Inputs in Orchard Drains Sediments .....	GAO Xue-mei, SHE Dong-li, YAN Xiao-yuan, <i>et al.</i> (2731)
Emissions Characteristics of Greenhouse Gas from Sewage Sludge Composting Process in Winter .....	YI Jian-ting, YANG Yu-han, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (2738)
Distribution and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) and Organochlorine Pesticides (OCPs) in Soils from Shergyla Mountain, Southeast Tibetan Plateau .....	LUO Dong-xia, ZHANG Shu-juan, YANG Rui-qiang (2745)
Applications of Geostatistical Analyses and Stochastic Models to Identify Sources of Soil Heavy Metals in Wuqing District, Tianjin, China .....	SONG Zhi-ting, ZHAO Yu-jie, ZHOU Qi-wen, <i>et al.</i> (2756)
Effects of Soil Moisture and Temperature Variations on Organic Carbon Mineralization of Purple Soil in the Hydro-fluctuation Belt of the Three Gorges Reservoir .....	DING Chang-huan, WANG Lian-ge, TANG Jiang, <i>et al.</i> (2763)
Reduction Effect of Reduced Phosphorus Fertilizer and Combining Organic Fertilizers on Phosphorus Loss of Purple Soil Sloping Field .....	HAN Xiao-fei, GAO Ming, XIE De-ti, <i>et al.</i> (2770)
Transformation and Migration of Sulfur Speciation in the Rhizosphere and Bulk Soil of Paddy Soil .....	DU Guang-hui, RAO Wei, LI Xin, <i>et al.</i> (2779)
Comparison of the Persistence of a Combined Amendment Stabilizing Pb, Cd, Cu and Zn in Polluted Paddy Soil .....	WU Yu-jun, ZHOU Hang, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (2791)
Bio-inspired Recovery of Platinum Nanoparticle and Its Mechanism .....	SHANG Ru, ZHU Neng-wu, KANG Nai-xin, <i>et al.</i> (2799)
Preparation of $\gamma$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Catalyst by Heat Treatment of Natural Limonite for Selective Catalytic Reduction of NO by NH <sub>3</sub> .....	XU Bin, CHEN Tian-hu, LIU Hai-bo, <i>et al.</i> (2807)

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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  
赵进才 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7月15日 第37卷 第7期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 7 Jul. 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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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