

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第6期

Vol.37 No.6

**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

双级虚拟撞击采样器应用于固定污染源 PM<sub>10</sub> 和 PM<sub>2.5</sub> 排放测量 ..... 蒋靖坤, 邓建国, 李振, 马子珍, 周伟, 张强, 段雷, 郝吉明 (2003)

黄山夏季气溶胶吸湿性及与化学组分闭合 ..... 陈卉, 杨素英, 李艳伟, 银燕, 张泽锋, 于兴娜, 康娜, 严殊祺, 夏航 (2008)

沈阳大气气溶胶中水溶性无机离子的观测研究 ..... 苗红妍, 温天雪, 王璐, 徐慧 (2017)

南京夏秋季节大气干沉降水溶性离子特征及来源分析 ..... 秦阳, 朱彬, 邹嘉南, 庞博 (2025)

太原市大气颗粒物粒径和水溶性离子分布特征 ..... 曹润芳, 闫雨龙, 郭利利, 郭文帝, 何秋生, 王新明 (2034)

2014 年北京市城区臭氧超标日浓度特征及与气象条件的关系 ..... 程念亮, 李云婷, 张大伟, 陈添, 王欣, 邹宁, 陈晨, 孟凡 (2041)

机动车尾气烟尘中烷烃和有机酸的组成 ..... 袁佳雯, 刘刚, 李久海, 徐慧 (2052)

DOC/CCRT 老化对柴油公交车气态物排放特性的影响 ..... 楼狄明, 贺南, 谭丕强, 胡志远 (2059)

紫外辐照改性生物炭对 VOCs 的动态吸附 ..... 李桥, 雍毅, 丁文川, 侯江, 高屿涛, 曾晓岚 (2065)

三峡库区内陆腹地典型水库型湖泊中 DOM 吸收光谱特征 ..... 江韬, 卢松, 王齐磊, 白薇扬, 张成, 王定勇, 梁俭 (2073)

三峡库区典型农业小流域水体中溶解性有机质的光谱特征 ..... 王齐磊, 江韬, 赵铮, 梁俭, 木志坚, 魏世强, 陈雪霜 (2082)

高分辨率降水氧氮同位素变化及洞穴水响应: 以河南鸡冠洞为例 ..... 孙喆, 杨琰, 张萍, 刘肖, 梁沙, 张娜, 聂旭东, 梁胜利, 李建仓, 凌新有, 张志钦 (2093)

不同雨强条件下河流水质对流域土地利用类型与格局空间响应 ..... 季香, 刘红玉, 李玉凤, 皋鹏飞, 孙一鸣, 李玉玲 (2101)

丹江口水库沉积物重金属背景值的确定及潜在生态风险评估 ..... 赵丽, 王雯雯, 姜霞, 王书航, 李佳璐, 陈俊伊 (2113)

滴水湖及其环湖水系沉积物、土壤中多氯联苯的空间分布特征及风险评价 ..... 王薛平, 黄星, 毕春娟, 贾晋璞, 郭雪, 陈振楼 (2121)

粤桂水源地有机氯农药的污染特征及生态风险 ..... 阳宇翔, 刘昕宇, 詹志薇, 解启来, 汤嘉骏, 欧阳培毓, 陈镇新, 徐晨 (2131)

鄱阳湖浮游植物叶绿素 a 及营养盐浓度对水位波动的响应 ..... 刘霞, 刘宝贵, 陈宇炜, 高俊峰 (2141)

周期性的温度扰动对藻类群落结构演替的影响 ..... 贡丹丹, 刘德富, 张佳磊, 杨正健, 朱晓明, 谭纤茹 (2149)

溴酸盐对普通小球藻的生长以及生理特性的影响 ..... 王执伟, 刘冬梅, 张文娟, 崔福义 (2158)

微囊藻水华对水体中氮转化及微生物的影响 ..... 李洁, 张思凡, 肖琳 (2164)

城市污染河道沉积物碳氮赋存对有机质分解的影响 ..... 唐千, 刘波, 王文林, 邢鹏, 袁婧雯, 嵇玮, 沈晓宇, 季家乐 (2171)

两亲性共聚物共混 PVDF 超滤膜的界面性质与抗蛋白质污染的研究 ..... 孟晓荣, 鲁冰雪, 付东会, 辛晓强, 唐卫婷 (2179)

巯基改性海泡石吸附水中的 Hg(II) ..... 谢婧如, 陈本寿, 张进忠, 刘江 (2187)

改性芦苇生物炭对水中低浓度磷的吸附特征 ..... 唐登勇, 黄越, 胥瑞晨, 胡洁丽, 张聪 (2195)

UiO-66 对废水中二氯苯氧乙酸的吸附特性 ..... 任天昊, 杨智临, 郭琳, 陈海, 杨琦 (2202)

对硝基苯酚在高炉水淬渣上的吸附机制及表面形研究 ..... 王哲, 黄国和, 安春江, 陈莉荣, 张思思 (2211)

高岭石、针铁矿及其二元体对胡敏酸的吸附特性 ..... 牛鹏举, 魏世勇, 方敦, 但悠梦 (2220)

硫铁比对再生水深度脱氮除磷的影响 ..... 周彦卿, 郝瑞霞, 王珍, 朱晓霞, 万京京 (2229)

单质硫颗粒尺寸及反应器类型对硫自养反硝化反应器启动的影响 ..... 马航, 朱强, 朱亮, 李祥, 黄勇, 魏凡凯, 杨朋兵 (2235)

钛盐混凝剂调理对活性污泥絮体理化性质的影响作用机制 ..... 王彩霞, 张伟军, 王东升, 王庆飞, 喻德忠 (2243)

城市污水管网中产甲烷菌的分布特性规律 ..... 孙光溪, 金鹏康, 宋吉娜, 王先宝, 杨柯瑶 (2252)

低 DO 下 AGS-SBR 处理低 COD/N 生活污水长期运行特征及种群分析 ..... 信欣, 管蕾, 姚艺朵, 羊依金, 郭俊元, 程庆锋 (2259)

微丝菌 (*Microthrix parvicella*) 原位荧光杂交 (FISH) 定量过程的条件优化 ..... 王润芳, 张红, 王琴, 王娟, 顾剑, 齐嵘, 杨敏 (2266)

基于高通量测序解析碳化温度对麻杆电极微生物群落影响 ..... 吴义诚, 贺光华, 郑越, 陈水亮, 王泽杰, 赵峰 (2271)

1 株高效去除氨氮的红假单胞菌的分离鉴定及特性 ..... 黄雪娇, 杨冲, 倪九派, 李振刚 (2276)

长期保护性耕作制度下紫色土剖面无机磷变化特征 ..... 韩晓飞, 高明, 谢德体, 王子芳 (2284)

有机物料对两种紫色土氮素矿化的影响 ..... 张名蒙, 卢吉文, 赵秀兰 (2291)

生物质炭和秸秆配合施用对土壤有机碳转化的影响 ..... 张婷, 王旭东, 逢萌雯, 刘思新, 白如霞, 黎妮, 王钰莹 (2298)

多元统计与铅同位素示踪解析旱地垂直剖面土壤中重金属来源 ..... 孙境蔚, 胡恭任, 于瑞莲, 苏光明, 王晓明 (2304)

苏南某镇土壤重金属污染的景观格局特征 ..... 陈昕, 潘剑君, 王文勇, 李炳亚 (2313)

河南洛阳市不同功能区土壤重金属污染特征及评价 ..... 刘亚纳, 朱书法, 魏学锋, 苗娟, 周鸣, 关凤杰 (2322)

杭州蔬菜基地重金属污染及风险评价 ..... 龚丹丹, 朱维琴, 顾燕青, 李淑英, 加那提·吐尼克 (2329)

土壤溶解性有机质荧光特征及其与铜的络合能力 ..... 田雨, 王学东, 陈潇霖, 华珞 (2338)

添加稳定剂对尾矿土中砷形态及转换机制的影响 ..... 陈志良, 赵述华, 钟松雄, 桑燕鸿, 蒋晓璐, 戴玉, 王欣 (2345)

应用 SHIME 模型研究肠道微生物对土壤中镉、铬、镍生物可给性的影响 ..... 尹乃毅, 都慧丽, 张震南, 蔡晓琳, 李泽烽, 孙国新, 崔岩山 (2353)

不同基因型杨树的光合特征与臭氧剂量的响应关系 ..... 辛月, 高峰, 冯兆忠 (2359)

芘胁迫对 5 种羊茅属植物根系分泌的几类低分子量有机物的影响 ..... 潘声旺, 袁馨, 刘灿, 李亚闾, 杨婷, 唐海云, 黄方玉 (2368)

维管束植物樟树和马尾松叶组织氮、硫含量指示贵阳地区大气氮、硫沉降的空间变化 ..... 徐宇, 肖化云, 郑能建, 张忠义, 瞿玲露, 赵晶晶 (2376)

苏北潮滩温室气体排放的时空变化及影响因素 ..... 许鑫王豪, 邹欣庆, 刘晶茹 (2383)

g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Bi<sub>2</sub>S<sub>3</sub> 复合物的制备及可见光催化降解 MO ..... 张志贝, 李小明, 陈飞, 杨麒, 钟宇, 徐秋翔, 杨伟强, 李志军, 陈寻峰, 谢伟强 (2393)

海南省淘汰落后产能政策的污染物协同减排效应评价 ..... 耿静, 任丙南, 吕永龙, 王铁宇 (2401)

《环境科学》征订启事(2130) 《环境科学》征稿简则(2251) 信息(2178,2344)

# 高分辨率降水氧氘同位素变化及洞穴水响应：以河南鸡冠洞为例

孙喆<sup>1,2,3</sup>, 杨琰<sup>1,2,3\*</sup>, 张萍<sup>1,2,3</sup>, 刘肖<sup>1,2,3</sup>, 梁沙<sup>1,2,3</sup>, 张娜<sup>1,2,3</sup>, 聂旭东<sup>1,2,3</sup>, 梁胜利<sup>4</sup>, 李建仓<sup>5</sup>, 凌新有<sup>5</sup>, 张志钦<sup>5</sup>

(1. 西南大学地理科学学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715; 2. 国土资源部岩溶生态环境-重庆南川野外基地, 重庆 408435; 3. 西南大学地球化学与同位素实验室, 重庆 400715; 4. 河南省栾川县气象局, 栾川 471500; 5. 鸡冠洞风景名胜管理处, 栾川 471500)

**摘要:** 大气降水稳定同位素受温度、雨量、海拔高程、水汽源等多种因素控制, 进而影响洞穴水及沉积物的同位素变化. 为了更好地认识我国南北交汇带季风敏感区洞穴水对降水的响应过程, 本研究分析了 2015 年 8 月 4~6 日河南栾川县鸡冠洞强降雨和洞内 4 处地下水点样品, 并结合 2009~2015 年栾川地区近 6 年大气降水氧氘同位素数据研究发现: ①采用 HYSPLIT 模型可以将鸡冠洞强降雨划分为不同水汽来源的 2 个阶段: 高空来自南中国海的水汽以及近地面来自内陆局地蒸发的水汽, 并且可以记录在单场降雨期间雨水的  $\delta^{18}\text{O}$  变化特征上. ②近地面来自内陆局地蒸发水汽的蒸发过程一定程度上掩盖了温度效应, 并使局地大气降水线的斜率、截距和雨水过量氘均减小. ③此次降雨期间鸡冠洞洞穴滴水  $\delta^{18}\text{O}$  特征主要响应夏季风海源水汽的降水; 鸡冠洞洞穴滴水对降雨响应最快, 间隔时间约为 3 h, 滴水  $\delta^{18}\text{O}$  随滴率升高变重, 之后缓慢变轻; 地下河具有相似的模式, 稍有滞后; 靠近洞口的池水反映出不同阶段的雨水  $\delta^{18}\text{O}$  变化的差异.

**关键词:** 大气降水; 洞穴水; 水汽来源;  $\delta^{18}\text{O}$ ;  $\delta\text{D}$ ; 蒸发; 河南鸡冠洞

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)06-2093-08 DOI: 10.13227/j.hjks.2016.06.012

## High-resolution Variations of Oxygen and Hydrogen Isotopes of Precipitation and Feedback from Cave Water: An Example of Jiguan Cave, Henan

SUN Zhe<sup>1,2,3</sup>, YANG Yan<sup>1,2,3\*</sup>, ZHANG Ping<sup>1,2,3</sup>, LIU Xiao<sup>1,2,3</sup>, LIANG Sha<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Na<sup>1,2,3</sup>, NIE Xu-dong<sup>1,2,3</sup>, LIANG Sheng-li<sup>4</sup>, LI Jian-cang<sup>5</sup>, LING Xin-you<sup>5</sup>, ZHANG Zhi-qin<sup>5</sup>

(1. Key Laboratory of Eco-Environments in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Field Scientific Observation & Research Base of Karst Eco-environments at Nanchuan in Chongqing, Ministry of Land and Resources, Chongqing 408435, China; 3. Laboratory of Geochemistry and Isotope, Southwest University, Chongqing 400715, China; 4. Luanchuan Meteorological Bureau, Luanchuan 471500, China; 5. Administrative Office of Jiguan Cave Scenic Spot, Luanchuan 471500, China)

**Abstract:** The stable isotopes of atmospheric precipitation that affect the isotopes of speleothem and cave water are controlled by a variety of factors, such as temperature, rainfall amount, altitude, vapor source and others. Knowledge in the factors causing rainfall stable isotopes change is one of the keys to understanding the cave water stable isotopes change of monsoon-sensitive area in the north-south China intersection. The samples collected from 4 ground water sites in Jiguan Cave and the instantaneous heavy rain during Aug. 4<sup>th</sup>-6<sup>th</sup>, 2015 were analyzed, and combined with the precipitation oxygen and hydrogen isotopes data for samples from almost 6 years (2009-2015) collected in Jiguan Cave of Luanchuan County in Henan Province, leading to the following findings: ① The precipitation was divided into 2 stages with different vapor sources (high-altitude water vapor from the South China Sea and inland areas from near the ground to evaporate moisture) that could be recorded in the  $\delta^{18}\text{O}$  of single rainfall by HYSPLIT model. ② The evaporation of stage 2 masked the temperature effect to some extent, which also decreased the slope and intercept of LMWL and *d*-excess of precipitation. ③ The  $\delta^{18}\text{O}$  values feature of cave drip water in Jiguan Cave during this rainfall was mainly a response to the summer monsoon precipitation from sea source vapor. The cave drip water of Jiguan Cave responded to the heavy rain very quickly, and the time was ~ 3 h. The  $\delta^{18}\text{O}$  of drip became heavier when dripping rate increased and then decreased slowly. The same pattern could be found in underground river with slight delay, and the pool near the cave entrance reflected the difference of precipitation  $\delta^{18}\text{O}$  in two stages.

**Key words:** precipitation; cave water; vapor source;  $\delta^{18}\text{O}$ ;  $\delta\text{D}$ ; evaporation; Jiguan Cave of Henan Province

收稿日期: 2015-11-13; 修订日期: 2016-01-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(41372177, 40902053); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20090182120005); 中央高校基本科研业务费专项(XDJK2011B004)

作者简介: 孙喆(1992~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为全球变化, E-mail: michael2482004@126.com

\* 通讯联系人, E-mail: yy2954@gmail.com

稳定氧同位素作为古气候研究中常见的替代指标,是全球变化研究的重要内容<sup>[1-4]</sup>. 石笋由于自身具有易获取、精确定年、各种气候条件下广泛分布,持续沉积时间长等优势<sup>[5,6]</sup>,在过去数十年研究中取得了重要进展. 但对石笋记录中 $\delta^{18}\text{O}$ 指示的环境意义的认识却不尽相同,一些学者对洞穴石笋的研究认为氧同位素的波动反映了局地降水的变化<sup>[7-9]</sup>,但有人提出反驳,认为其反映的是季风强度的改变<sup>[1,10,11]</sup>. 不仅大区域的气象条件影响了石笋的氧同位素组成,洞穴的局地环境变化也可能造成影响,例如:在美国南达科他州一处洞穴中相距不足 10 m 的同时代石笋也有着超过 5‰ 的差异<sup>[12]</sup>. 事实上,大气条件对雨水氧同位素的调节,雨水在表层岩溶带受到的影响,渗透水有效参与碳酸盐沉积以及洞内沉积条件的改变均对最终的石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 有着重要影响<sup>[13]</sup>. 氧同位素变化反映的是一个复杂的过程,包括温度驱动的同位素分馏以及大气环流导致的水汽来源的改变,而非单个条件改变的结果. 为了更准确地解译氧同位素信息,在已有石笋研究地区开展长期的、高分辨率洞穴监测工作是十分必要的,当前国内外学者已开展许多前期工作<sup>[14-18]</sup>,从不同角度分析总结了影响滴水、降水以及碳酸盐沉积 $\delta^{18}\text{O}$ 的影响因素. 然而以季节<sup>[19]</sup>、月<sup>[20,21]</sup>、半月<sup>[22]</sup>间隔的监测工作时间跨度较长,难以准确揭示关键降水对石笋记录信息的影响过程,尤其是在降水同位素信号和沉积速率变化敏感的地区<sup>[23]</sup>. 前人研究表明雨水氧同位素的短时间监测可以追踪到单个天气系统(如台风)<sup>[24,25]</sup>的变化以及水汽源的改变<sup>[17,26]</sup>. 对监测时间内所有降雨的追踪<sup>[27,28]</sup>在国内外已有研究,然而单场降雨的气象机制<sup>[29]</sup>是变化的,影响雨水 $\delta^{18}\text{O}$ 的主要因素是物理过程(蒸发、冷凝)的变化,不同的水汽来源<sup>[17]</sup>也会对雨水 $\delta^{18}\text{O}$ 产生显著影响. 因此,有必要在单场降雨条件下加密收集雨水和洞穴滴水,并分析其变化及联系,有助于更好地认识敏感区洞穴水对降水的响应过程.

## 1 研究区概况

鸡冠洞(111°34'E,33°46'N)位于黄土高原东南缘,河南省洛阳市栾川县城西 4 km 处的鸡冠山上(图 1),洞口海拔约 900 m,洞内长约 5 600 m,分上下 5 层,落差约 138 m,已开发洞长 1 800 m. 洞内温度在 14.0~19.5℃ 之间,平均温度 16.4℃. 据 1957~2014 年栾川气象资料统计,鸡冠洞所在区年均温约 13.11℃,年均降水量 840.58 mm,雨季为 7~9

月,约占全年降水的 50%. 上覆基岩较薄,约 30~40 m;土壤层为棕壤,厚度不大,10~30 cm 左右<sup>[30]</sup>;地表基岩裸露达 10%~30%. 植被以次生橡树、松柏科乔木和灌木丛为主. 区内地质条件较复杂,碳酸盐岩岩溶作用相对强烈,研究区属北秦岭地层,主要出露蓟县系大理岩、青白系硅质白云石大理岩、震旦系大理岩(鸡冠洞岩性为震旦系绿泥大理岩)、二叠系变质大理岩. 构造以三川-栾川复向斜为主体,次级褶皱发育,多风化,形态多样. 因构造应力比较集中,各种性质的裂隙以及低次级构造面发育,在次级褶皱构造的轴部,特别是垂直于轴部走向的张裂往往呈羽毛状排列<sup>[31]</sup>. 鸡冠洞地处秦岭-淮河北侧,位于长江、黄河两大流域分水岭,又是中国地理南北湿润区与半干旱区过渡地带,特殊的地理位置决定了该区对亚洲夏季风变化响应的敏感性<sup>[32]</sup>.



图 1 鸡冠洞位置

Fig. 1 Location of Jiguan Cave

## 2 材料与方法

### 2.1 野外采样

在鸡冠洞内设立 1 个滴水监测点:鲤鱼戏水(LYXS),另有 3 处水点:玉柱潭(YZT)是位于鸡冠洞入口的一处池水;洞天河(DTH)为地下河,是鸡冠洞内最低点;瑶池宫(YCG)是靠近 LYXS 的另一处池水. 从 2015 年 8 月 4 日 15:00 起至 8 月 6 日 12:00 分别在洞内外采集雨水和洞穴水,降雨于 8 月 5 日 08:00 左右结束. 根据降雨强度以 5 min~5 h 间隔不等进行雨水采集,洞穴滴水以 2~3 h 为间隔进行采样,其余三处洞穴水采样间隔为 4~6 h,共计获得雨水样品 16 个,滴水样品 15 个,池水与地下河样品各 8 个,封存于 25 mL 经硝酸浸泡并用去离子水清洗 3 遍以上的聚四氟乙烯瓶中,放置在冰箱

4℃冷藏防止蒸发分馏以备分析。

## 2.2 测定方法

样品分析在西南大学地理科学学院利用美国 Los Gatos Research 公司的液态水稳定同位素分析仪 (IWA-35d-EP) 进行测试, 结果相对于 VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water) 标准:

$$\delta^{18}\text{O} = \frac{[(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{sample}} - (^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{VSMOW}}]}{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{VSMOW}}} \times 10^3\text{‰}$$

$$\delta\text{D} = \frac{[(\text{D}/\text{H})_{\text{sample}} - (\text{D}/\text{H})_{\text{VSMOW}}]}{(\text{D}/\text{H})_{\text{VSMOW}}} \times 10^3\text{‰}$$

误差分别小于 0.07‰ 和 0.30‰, 滴水用量杯收集, 收集到的水量换算得出滴率, 单位 mL·min<sup>-1</sup>. 雨水采集的同时记录气温, 精度为 0.1℃, 降水量数据取自栾川县气象站, 位于鸡冠洞东部 8.4 km 左右, 海拔 742.4 m, 该站为国家基站, 采用仪器自动记录与人工记录相结合的方式采集数据. 拉格朗日混合单粒子轨道模型 (HYSPLIT4.0) 由美国海洋与大气管理局 (NOAA) 的全球同化系统 (global data

assimilation system, GDAS) 提供的分辨率为 1° (经纬度), 间隔为 6 h 的气象参数, 在线生成 (<http://ready.arl.noaa.gov/hypub-bin/trajtype.pl?runtype=archive>).

## 3 结果与分析

### 3.1 降水同位素变化

栾川县气象局监测结果显示此次降水共计 29.2 mm, 雨水主要出现在两个时段: 8 月 4 日 15:00 ~ 18:00 雨量 24.2 mm, 22:00 ~ 24:00 雨量 4.3 mm. 降雨强度分别为 8.07 mm·h<sup>-1</sup> 和 2.15 mm·h<sup>-1</sup>. 表 1 给出了雨水氢氧同位素结果, δ<sup>18</sup>O 变化范围 -12.77‰ ~ -10.33‰, δD: -92.34‰ ~ -79.11‰, 体现出夏季风雨水偏轻的特点. 图 2 显示雨水 δ<sup>18</sup>O 和 δD 经历两次下降后又上升, 呈现两个“波谷”, 以 17:00 为节点划分两个阶段, 阶段 2 较阶段 1 整体偏重, 过量氘 (*d-excess*) 表现出相反的变化趋势.

表 1 雨水氢氧同位素、气温参数

Table 1 Oxygen and hydrogen isotopes of precipitation and instantaneous air temperature

时间(8月4~5日)	δ <sup>18</sup> O/‰	STD/‰	δD/‰	STD/‰	气温/℃
15:00	-10.62	0.02	-79.11	0.16	27.5
15:10	-11.60	0.06	-83.23	0.10	26.0
15:15	-12.05	0.04	-87.33	0.22	23.0
15:20	-12.77	0.05	-92.23	0.16	21.5
15:25	-12.06	0.03	-88.31	0.06	23.0
15:30	-11.86	0.05	-88.68	0.18	23.0
15:40	-10.89	0.01	-84.80	0.16	22.5
17:00	-10.61	0.02	-82.48	0.30	22.0
22:25	-11.01	0.04	-84.06	0.10	21.0
22:40	-11.62	0.02	-81.63	0.08	19.0
22:47	-12.09	0.04	-92.34	0.19	19.5
22:53	-12.03	0.03	-91.58	0.06	19.0
23:00	-11.31	0.02	-89.05	0.11	19.0
23:20	-11.01	0.02	-87.61	0.16	18.8
03:40	-10.93	0.04	-86.95	0.13	16.8
08:15	-10.33	0.02	-81.21	0.09	23.0

### 3.2 局地大气降水线 (LMWL)

大气降水线反映了地区多年降水的平均特征, 研究大气降水线有利于了解气候和水汽来源的变化<sup>[33]</sup>. Craig<sup>[34]</sup> 于 1961 年给出全球大气降水线 (GMWL) 方程: δD = 8 δ<sup>18</sup>O + 10, 郑淑蕙等<sup>[35]</sup> 给出中国的大气降水线: δD = 7.9 δ<sup>18</sup>O + 8.2. 利用笔者所在研究团队自 2009 年 10 月至 2015 年 9 月在栾川收集的每场降水, 拟合栾川局地大气降水线 (LMWL): δD = 7.63 δ<sup>18</sup>O + 6.91 (*n* = 236, *r* = 0.95, *P* < 0.001), 而由本次降水样品可得 LMWL: δD =

4.43 δ<sup>18</sup>O - 35.76 (*n* = 16, *r* = 0.75, *P* < 0.01). 栾川大气降水线较 GMWL 和我国 LMWL 的斜率、截距显著偏小, 单场降水拟合的 LMWL 更小 (图 3), 说明水汽来源不固定<sup>[29]</sup>, 与此同时也指示存在一定程度的云下二次蒸发<sup>[36,37]</sup>. 赵景耀等<sup>[15]</sup> 曾利用 2009 ~ 2012 年的栾川降雨拟合出 LMWL: δD = 8.10 δ<sup>18</sup>O + 10.51, 这可能是由于 2009 ~ 2010 年是 ENSO 年, 中东太平洋海水温度正异常, 西太平洋副高偏南向西延伸增强, 太平洋水汽在河南输入较往年增加<sup>[38]</sup>, 受到近源太平洋水汽的输入增加的影响, 此

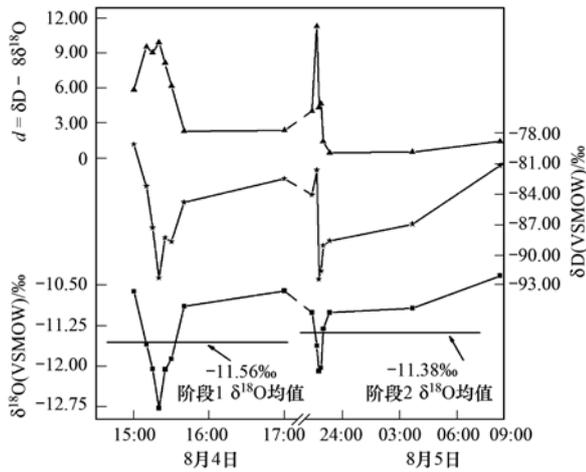


图2 雨水 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta\text{D}$ 及过量氘变化

Fig. 2 Variations of  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$  and  $d$ -excess of precipitation

后 Nino3.4 海区海水温度下降, ENSO 减弱<sup>[39]</sup>, 使得局地降水线的斜率和截距与笔者利用 2009 ~ 2015 年降水拟合的 LMWL 不一致. 根据 HYSPLIT4.0 模型显示(图 4)此次降水过程自 8 月 4 日 17:00 后来自南方的远源水汽开始下沉, 而内陆局地水汽蒸发持续抬升形成降雨, 阶段 1 的降水多位于 LMWL 和 GMWL 附近, 说明降雨时的气象状况稳定, 但在亚小时尺度上, 降雨形成时的蒸发与凝结变化程度大<sup>[40]</sup>; 阶段 2 的雨水大多位于 LMWL 下方(阴影), 反映了阶段 2 雨水是在非瑞利分馏条件下进行的, 经历了一定程度的蒸发, 去除阶段 2 的点, 仅将第一

阶段雨水拟合 LMWL, 得到斜率和截距分别为 4.83、-30.00 ( $n=8, r=0.91, P < 0.01$ ), 表示阶段 2 的雨水在形成或下落过程中受非平衡蒸发影响较为明显<sup>[41]</sup>.

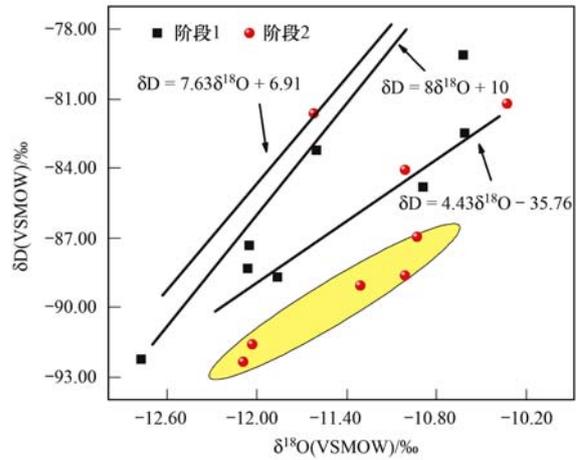
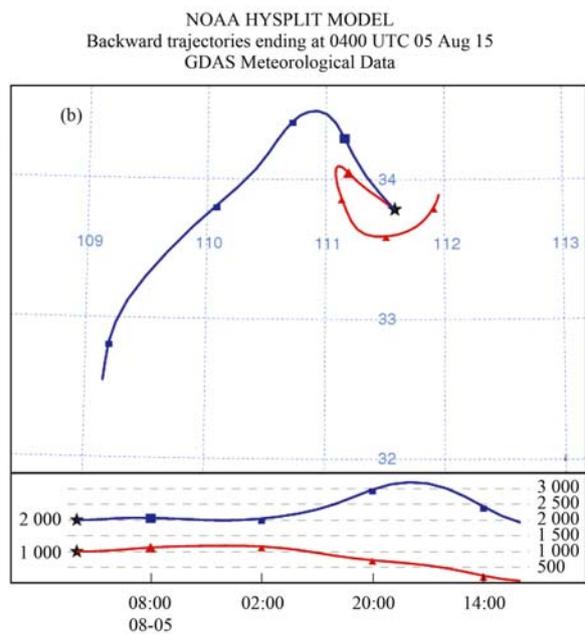
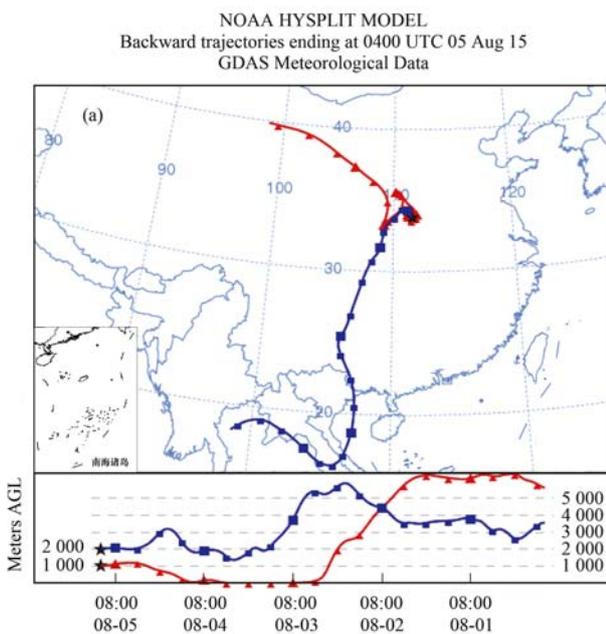


图3 栾川大气降水线

Fig. 3 Local meteoric water line at Luanchuan

### 3.3 降水同位素值与温度、雨量的关系

短时间尺度的雨水  $\delta\text{D}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$  主要受制于水汽的物理过程(蒸发、凝结)<sup>[42]</sup>, 影响雨水  $\delta\text{D}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$  的一个重要因素即温度效应: 降水受瑞利分馏的影响, 在低温条件下降水增多, 损失较多的<sup>18</sup>O 和 D, 呈现温度越高,  $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta\text{D}$  越重<sup>[43,44]</sup>, 在高纬度地区较为明显. 根据此次降水数据得出同位素与温度的关



后推 120 h&24 h

图4 1000 m 和 2000 m 高度栾川地区 8 月 5 日 HYSPLIT 轨迹模型

Fig. 4 HYSPLIT trajectory model on Aug. 5th in Luanchuan at 1000 & 2000 m AGL

系:  $\delta D = 0.72T - 101.84$  ( $n = 16, r = 0.50, P < 0.05$ ),  $\delta^{18}O = 0.03T - 12.05$  ( $n = 16, r = 0.12$ , 未能通过 0.1 置信水平的相关性检验), 相关性不如前人研究<sup>[35,44]</sup>, 可能是由于单场降雨受风速、湿度、大气稳定度及水汽来源影响更显著. 仅将阶段 1 的雨水同位素与温度进行拟合, 消除阶段 2 蒸发对流的影响可得:  $\delta D = 1.44T - 119.7$  ( $n = 8, r = 0.72, P < 0.05$ ),  $\delta^{18}O = 0.15T - 15.17$  ( $n = 8, r = 0.41$ , 未能通过 0.1 置信水平的相关性检验), 温度效应有了显著提升.  $\delta D$  较  $\delta^{18}O$  受温度影响更明显, 可能是因为栾川地区夏季强降水过程中的强烈对流以及阶段 2 局地水汽带来的不同  $\delta^{18}O$  减弱了温度效应对  $\delta^{18}O$  的影响<sup>[29]</sup>. 李廷勇等<sup>[27]</sup> 在研究重庆大气降水稳定同位素时认为氢同位素相比氧同位素拥有更明显的质量分数差异, D 较  $\delta^{18}O$  动力分馏速率更大, 更易受到温度变化引起的同位素分馏. 二者受温度影响的差异根本上反映了它们对蒸发敏感程度的不同.

雨量效应是指雨水  $\delta^{18}O$  的损耗随降雨量的增加而增加<sup>[43,45]</sup>, 呈现出雨量与  $\delta^{18}O$ 、 $\delta D$  的负相关关系, 在季风区和低纬度地区显著. 本次降水采集间隔多为 5 ~ 10 min, 而栾川气象站的雨量数据采集间隔为 1 h, 无法直接比对雨量与同位素信号的关系, 但两个阶段的雨量变化均为“单峰型”, 较好地对应了  $\delta^{18}O$  在两个阶段的“单谷型”变化, 表明存在雨量效应的可能.

### 3.4 水汽来源和过量氘 ( $d$ -excess)

环境同位素作为一种良好的示踪剂, 是追踪水汽来源的有效工具<sup>[24-26]</sup>, 图 2 显示两个阶段的  $\delta^{18}O$  变化趋势一致, 但阶段 2 较阶段 1 的  $\delta^{18}O$  值偏重. 由于阶段 2 降雨发生在夜间, 温度显著低于阶段 1, 很难用温度效应来解释这种“反常增重”. 因此, 水汽源的变化很可能是导致这种异常的原因. 气象部门通常分析大气层中 850 hPa (约相当于海平面 1 500 m, 临界高度约 2 000 m, 近似视为近地面边界层的顶端) 和 700 hPa (约海拔 3 000 m) 高度的气团<sup>[46,47]</sup> 运动轨迹表示水汽来源, 考虑到栾川县城海拔约 750 m, 选择地表 1 000 m 和 2 000 m 两个高度的气团表示 850 hPa 和 700 hPa 高度水汽运移路径. 利用拉格朗日混合单粒子轨道模型 (HYSPLIT4.0), 反推自 8 月 5 日 12:00 之前 24 h 和 120 h 的地表 1 000 m 及 2 000 m 高度的气团运移路径 (图 4). 结果显示在这两个高度主要存在高空来自南中国海的气团及近地来自内陆的水汽. 如图 4(b), 在 8 月 4 日 17:00 之后, 南方远源水汽开始下沉, 内陆局地水

汽继续抬升, 直至 24:00 左右达到最大高度, 较重的内陆蒸发水汽取代较轻的来自海洋的水汽很好地吻合了阶段 2 和阶段 1 的  $\delta^{18}O$  差异.

Dansgaard 定义过量氘 ( $d$ -excess):  $d = \delta D - 8\delta^{18}O$ <sup>[43]</sup>, 主要与蒸发过程的动力分馏偏离平衡分馏的程度有关, 受水汽源的温度、湿度、风速等影响<sup>[48,49]</sup>.  $d$  与  $\delta^{18}O$  有显著的负相关关系 (图 2), 结合此次降雨拟合的 LMWL 与  $d = \delta D - 8\delta^{18}O$  可得:  $d = -3.57\delta^{18}O - 35.76$ , 相比于  $\delta^{18}O$  在阶段 2 重于阶段 1,  $d$  表现出相反的特点, 孟玉川等<sup>[37]</sup> 研究云下二次蒸发指出  $d$  与大气水汽压呈正相关关系, 阶段 2 与阶段 1 雨水  $d$  的差异反映了阶段 2 较阶段 1 的大气水汽压小, 说明阶段 2 存在蒸发作用, 水汽很可能来自内陆局地蒸发, 单场降雨的不同水汽来源可以很好地记录在雨水  $\delta^{18}O$  中.

### 3.5 滴水同位素变化与洞穴响应

鸡冠洞滴水点滴率很好地响应了两个阶段的降雨过程 (图 5), 阶段 1 的降水大约在 3 h 后便引起滴率的增加, 维持了 16 h 左右, 经过 6 h 的滴率回落之后受第二阶段降水的影响滴率再次上升, 这个过程持续了大约 10 h, 而后滴率在初值恢复稳定. 期间 LYXS 的  $\delta^{18}O$ 、 $\delta D$  波动范围:  $-8.58\text{‰} \sim -8.23\text{‰}$ 、 $-56.72\text{‰} \sim -56.07\text{‰}$ , 呈现出在滴率变大时,  $\delta^{18}O$  先升高后下降的特征. 洞穴监测常以滴率  $500 \text{ mL} \cdot \text{d}^{-1}$  划分管道流和渗透流<sup>[50,51]</sup>, LYXS 常年存在滴水, 最低值为  $524.16 \text{ mL} \cdot \text{d}^{-1}$  (2014 年 7 月 21 日), 雨季时经常出现滴水变流水的情况, 结合此

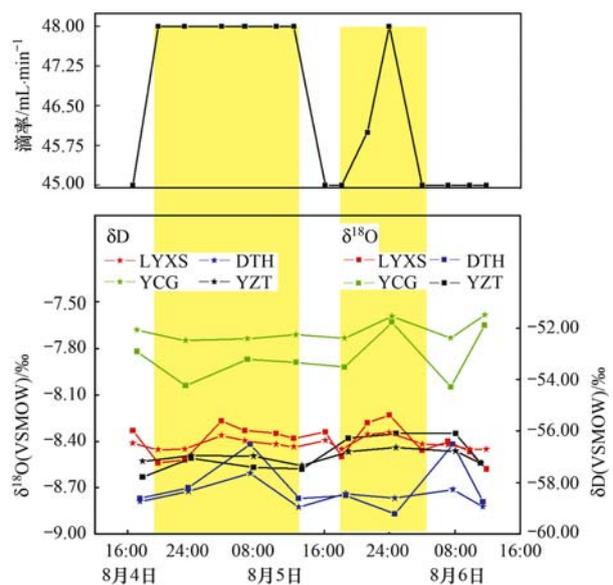


图 5 洞穴水  $\delta^{18}O$ 、 $\delta D$  变化

Fig. 5 Variations of  $\delta^{18}O$  and  $\delta D$  from cave water

次降雨期间滴水对降雨的响应时间,说明滴水上部裂隙较发育,在降雨强度较大时,补给方式可能出现改变,雨水沿新的下渗管道补给滴水<sup>[52]</sup>,活塞效应<sup>[53]</sup>推动偏重的“老水”,而后缓慢回落,表现出此前较轻的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta\text{D}$ 值,此过程可能与较轻的新雨混合.滴水对雨水响应迅速,但漏失较快,整个响应过程不超过48 h,不过这种漏失并非蒸发,可通过沉积的形式留在洞内,滴水点下方次生沉积物具有对极端气候事件记录的潜力.反观其余3处水点,DTH表现出相似的规律,但其对阶段2的雨水响应更加滞后,这与其所处洞内最低处以及阶段2降雨强度减小有关.YZT不存在相似的特征,但阶段2较阶段1明显偏重,这是由于YZT位于洞穴入口处,上覆岩层最薄,对雨水的响应最快,顶部“老水”的影响不显著.池水YCG受多种因素制约,同位素波动没有显著规律.

国际原子能机构(IAEA)建立的全球降水同位素监测网络(GNIP)未在栾川设站,采用周边3个站点的多年均 $\delta^{18}\text{O}$ 雨量加权平均值作为背景:郑州(-6.59‰)、西安(-7.33‰)、武汉(-5.76‰),那么栾川大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 雨量加权平均值理论上应在-7.33‰~-5.76‰之间.此次降雨期间滴水、池水与地下河均小于此变化范围.理论上,如果大气降水到洞穴滴水的过程中没有经历蒸发过程或未受外缘水混合的影响,滴水 $\delta^{18}\text{O}$ 的算术平均值应和大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的雨量加权平均值相近<sup>[14]</sup>.洞穴水主要来自大气降水,受上覆包气带和基岩结构发育影响,

其反映的不大可能是某一场降水,而是某一时段甚至是某一季度乃至更长时间降雨的混合物.滴水、池水及地下河的 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta\text{D}$ 表现出相似的特征,绝大多数集中在LMWL上方(图6),表明不受蒸发作用影响或蒸发较弱.Clark等<sup>[54]</sup>和Lacelle等<sup>[55]</sup>监测洞穴滴水时认为造成这种分布模式可能是洞穴水受空气凝结水混入的影响,鸡冠洞内采样点周围空气湿度过饱和,洞壁、拱顶和次生沉积物上常年可见凝结水.但由于滴水速率大,混入的空气凝结水量极少,对同位素影响甚微,基本可以忽略.滴水落于LMWL上方可能是由于降雨来自湿度较高的海源水汽<sup>[45]</sup>,栾川夏季雨水主要是西南季风和东南季风带来的水汽,分析2009年至今的栾川降水同位素数据发现,夏季风期间 $\delta^{18}\text{O}$ 可低至-15.66‰,算术平均值为-7.50‰,本次降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 算术平均值为-11.41‰,滴水 $\delta^{18}\text{O}$ 算术平均值为-8.38‰,二者均表现出了夏季风特征.对比2009年10月至2015年9月LYXS的 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta\text{D}$ 关系[图6(a)],可以发现相对于6a内所有滴水样品在LMWL上下均有分布,本次采集的滴水样品显著在LMWL上方分布[图6(b)],由于蒸发不明显,在不考虑包气带中其他来源水参与滴水的情况下,表示此次降雨期间鸡冠洞滴水 $\delta^{18}\text{O}$ 特征主要响应夏季风海源水汽的降水.但决定降水-滴水 $\delta^{18}\text{O}$ 信号传递的因素有很多,人工采样的时间间隔较大,难免遗漏一些重要信号,仍需更长时间的高密度监测以便深入研究洞穴对环境的响应.

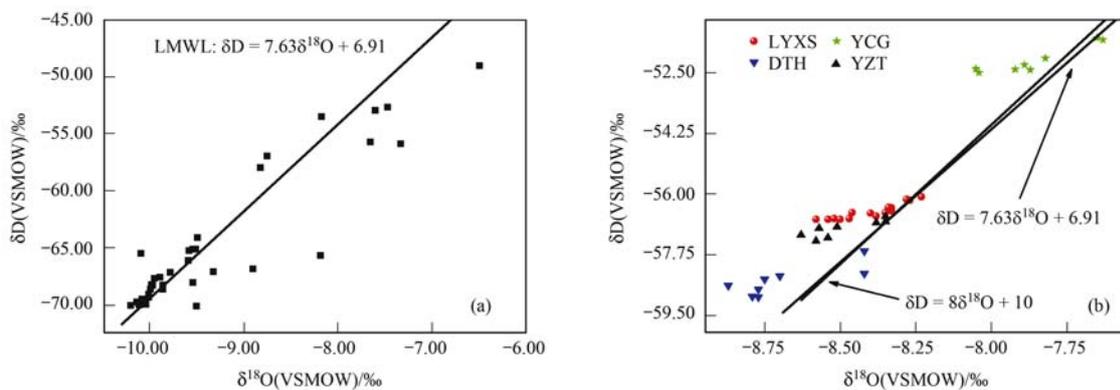


图6 洞穴水 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta\text{D}$ 值关系

Fig. 6 Relation between  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta\text{D}$  values of cave water

#### 4 结论

(1) HYSPLIT模型将此次降雨划分为2个阶段,存在不同的水汽来源:高空来自南中国海的水汽以及近地面来自内陆局地蒸发的水汽.

(2) 受不同水汽的影响,局地蒸发降水 $\delta^{18}\text{O}$ 比远源水汽降雨偏重;蒸发过程减弱降雨温度效应,同时使LMWL的斜率、截距和降水过量氘均减小.

(3) 此次降雨期间鸡冠洞滴水 $\delta^{18}\text{O}$ 特征主要响应夏季风海源水汽的降水;鸡冠洞滴水对

降雨响应最快, 间隔时间约为 3 h, 滴水  $\delta^{18}\text{O}$  随滴率升高变重, 之后缓慢变轻; 地下河具有相似的模式, 稍有滞后; 靠近洞口的池水反映出不同阶段的雨水  $\delta^{18}\text{O}$  变化的差异。

致谢: 感谢河南省栾川县鸡冠洞景区管理处长期以来的大力支持; 感谢河南省栾川县七里坪村杨植泉先生对大气降水采集工作的帮助, 同时感谢王棚飞师弟在采样期间给予的帮助。

#### 参考文献:

- [ 1 ] Yuan D X, Cheng H, Edwards R L, *et al.* Timing, duration, and transitions of the last interglacial Asian monsoon [ J ]. *Science*, 2004, **304**(5670): 575-578.
- [ 2 ] Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, *et al.* A high-resolution absolute-dated late Pleistocene monsoon record from Hulu Cave, China [ J ]. *Science*, 2001, **294**(5550): 2345-2348.
- [ 3 ] Lécalle P. The oxygen isotope composition of landsnail shells as a climatic indicator: applications to hydrogeology and paleoclimatology [ J ]. *Chemical Geology: Isotope Geoscience Section*, 1985, **58**(1-2): 157-181.
- [ 4 ] Treydte K, Frank D, Esper J, *et al.* Signal strength and climate calibration of a European tree-ring isotope network [ J ]. *Geophysical Research Letters*, 2007, **34**(24): L24302.
- [ 5 ] Shopov Y Y. 20 years of speleothem paleoluminescence records of environmental changes: an overview [ J ]. *International Journal of Speleology*, 2004, **33**(1-4): 5-17.
- [ 6 ] Banner J L, Guilfoyle A, James E W, *et al.* Seasonal variations in modern speleothem calcite growth in central Texas, U. S. A. [ J ]. *Journal of Sedimentary Research*, 2007, **77**(8): 615-622.
- [ 7 ] Cai Y J, Tan L C, Cheng H, *et al.* The variation of summer monsoon precipitation in central China since the last deglaciation [ J ]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, **291**(1-4): 21-31.
- [ 8 ] Fleitmann D, Burns S J, Mudelsee M, *et al.* Holocene forcing of the Indian monsoon recorded in a stalagmite from southern Oman [ J ]. *Science*, 2003, **300**(5626): 1737-1739.
- [ 9 ] Sinha A, Cannariato K G, Stott L D, *et al.* A 900-year (600 to 1500 A. D. ) record of the Indian summer monsoon precipitation from the core monsoon zone of India [ J ]. *Geophysical Research Letters*, 2007, **34**(16), doi: 10.1029/2007GL030431.
- [ 10 ] Cai Y J, An Z S, Cheng H, *et al.* High-resolution absolute-dated Indian Monsoon record between 53 and 36 ka from Xiaobailong Cave, southwestern China [ J ]. *Geology*, 2006, **34**(8): 621-624.
- [ 11 ] Cheng H, Edwards R L, Broecker W S, *et al.* Ice age terminations [ J ]. *Science*, 2009, **326**(5950): 248-252.
- [ 12 ] Serefidin F, Schwarcz H P, Ford D C, *et al.* Late Pleistocene paleoclimate in the Black Hills of South Dakota from isotope records in speleothems [ J ]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2004, **203**(1-2): 1-17.
- [ 13 ] Lachniet M S. Climatic and environmental controls on speleothem oxygen-isotope values [ J ]. *Quaternary Science Reviews*, 2009, **28**(5-6): 412-432.
- [ 14 ] 罗维均, 王世杰. 贵州凉风洞大气降水-土壤水-滴水的  $\delta^{18}\text{O}$  信号传递及其意义 [ J ]. *科学通报*, 2008, **53**(17): 2071-2076.
- [ 15 ] 赵景耀, 杨琰, 彭涛, 等. 河南鸡冠洞降水、滴水和现生碳酸钙的  $\delta^{18}\text{O}$  变化特征及其环流意义 [ J ]. *第四纪研究*, 2014, **34**(5): 1106-1116.
- [ 16 ] Genty D, Labuhn I, Hoffmann G, *et al.* Rainfall and cave water isotopic relationships in two South-France sites [ J ]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2014, **131**: 323-343.
- [ 17 ] 陶涛, 谭明, 段武辉. 最短时间尺度环流效应: 单场降水  $\delta^{18}\text{O}$  对复合水汽来源的示踪 [ J ]. *第四纪研究*, 2013, **33**(3): 615-617.
- [ 18 ] 李玲珑, 刘再华. 洞穴滴水-CaCO<sub>3</sub> 体系氧碳同位素组成的气候意义研究现状和问题 [ J ]. *地球与环境*, 2015, **43**(2): 223-232.
- [ 19 ] Cobb K M, Adkins J F, Partin J W, *et al.* Regional-scale climate influences on temporal variations of rainwater and cave dripwater oxygen isotopes in northern Borneo [ J ]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, **263**(3-4): 207-220.
- [ 20 ] 李彬, 袁道先, 林玉石, 等. 桂林地区降水、洞穴滴水及现代洞穴碳酸盐氧碳同位素研究及其环境意义 [ J ]. *中国科学 (D 辑)*, 2000, **30**(1): 81-87.
- [ 21 ] Riechelmann D F C, Schröder-Ritzrau A, Scholz D, *et al.* Monitoring Bunker Cave (NW Germany): a prerequisite to interpret geochemical proxy data of speleothems from this site [ J ]. *Journal of Hydrology*, 2011, **409**(3-4): 682-695.
- [ 22 ] Oster J L, Montañez I P, Kelley N P. Response of a modern cave system to large seasonal precipitation variability [ J ]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2012, **91**: 92-108.
- [ 23 ] Luo W J, Wang S J, Zeng G N, *et al.* Daily response of drip water isotopes to precipitation in Liangfeng Cave, Guizhou Province, SW China [ J ]. *Quaternary International*, 2014, **349**: 153-158.
- [ 24 ] Lawrence J R, Gedzelman S D, White J W C, *et al.* Storm trajectories in eastern US D/H isotopic composition of precipitation [ J ]. *Nature*, 1982, **296**(5858): 638-640.
- [ 25 ] 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), doi: 10.1029/2008GL035481.
- [ 26 ] Xie L H, Wei G J, Deng W F, *et al.* Daily  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta\text{D}$  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.
- [ 27 ] 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.
- [ 28 ] Srivastava R, Ramesh R, Gandhi N, *et al.* Monsoon onset signal in the stable oxygen and hydrogen isotope ratios of monsoon vapor [ J ]. *Atmospheric Environment*, 2015, **108**: 117-124.
- [ 29 ] Wang X Y, Li Z Q, Tayier R, *et al.* Characteristics of

- atmospheric precipitation isotopes and isotopic evidence for the moisture origin in Yushugou River basin, Eastern Tianshan Mountains, China [J]. *Quaternary International*, 2015, **380-381**: 106-115.
- [30] 周亮. 河南省栾川县生态林业可持续发展研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2012. 15-17.
- [31] 河南省地质局水文地质管理处. 中华人民共和国区域水文地质普查报告(1:200 000)栾川幅 I-49-(22)[M]. 1981.
- [32] 李珊英, 杨琰, 李廷勇, 等. MIS8-MIS9 阶段亚洲季风的轨道尺度气候变率: 栾川老母洞石笋记录[J]. *地质论评*, 2011, **57(5)**: 754-760.
- [33] Price R M, Swart P K, Willoughby H E. Seasonal and spatial variation in the stable isotopic composition ( $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta\text{D}$ ) of precipitation in south Florida[J]. *Journal of Hydrology*, 2008, **358(3-4)**: 193-205.
- [34] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters [J]. *Science*, 1961, **133(3465)**: 1702-1703.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] 刘肖, 杨琰, 彭涛, 等. 河南鸡冠洞洞穴水对极端气候的响应及其控制因素研究[J]. *环境科学*, 2015, **36(5)**: 1582-1589.
- [40] 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.
- [41] Liu J R, Fu G B, Song X F, *et al.* Stable isotopic compositions in Australian precipitation[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2010, **115** ( D23 ), doi: 10.1029/2010JD014403.
- [42] Schotterer U, Fröhlich K, Gäggeler H W, *et al.* Isotope records from Mongolian and Alpine ice cores as climate indicators[A]. In: Diaz H F, Beniston M, Bradley R S (Eds.). *Climatic Change at High Elevation Sites* [M]. Netherlands: Springer, 1997. 287-298.
- [43] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation[J]. *Tellus*, 1964, **16(4)**: 436-468.
- [44] 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.
- [45] Rozanski K, Araguás-Araguás L, Gonfiantini R. Isotopic patterns in modern global precipitation [A]. In: Swart P K, Lohmann K C, Mckenzie J, *et al.* (Eds.). *Climatic Change in Continental Isotopic Records: Geophysical Monograph* [M]. Washington D C: The American Geophysical Union, 1993, **78**: 1-36.
- [46] 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.
- [47] 王佳津, 王春学, 陈朝平, 等. 基于 HYSPLIT4 的一次四川盆地夏季暴雨水汽路径和源地分析[J]. *气象*, 2015, **41(11)**: 1315-1327.
- [48] Jouzel J, Fröhlich K, Schotterer U. Deuterium and oxygen-18 in present-day precipitation: data and modelling [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 1997, **42(5)**: 747-763.
- [49] Uemura R, Matsui Y, Yoshimura K, *et al.* Evidence of deuterium excess in water vapor as an indicator of ocean surface conditions[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, **113(D19)**, doi: 10.1029/2008JD010209.
- [50] Smart P L, Friederich H. Water movement and storage in the unsaturated zone of a maturely karstified carbonate aquifer, Mendip Hills, England [A]. In: *Proceedings of the Environmental Problems of Karst Terrains and Their Solutions Conference*[C]. Dublin OH: National Water Well Association, 1986. 59-87.
- [51] Ford D, Williams P D. *Karst hydrogeology and geomorphology* [M]. New York: John Wiley & Sons, 2007.
- [52] 白晓, 桑文翠, 李丰山, 等. 武都万象洞方解石现代沉积体系 $\delta^{18}\text{O}$ 值月变化特征[J]. *地球化学*, 2015, **44(3)**: 245-253.
- [53] 王新中, 班凤梅, 潘根兴. 洞穴滴水地球化学的空间和时间变化及其控制因素——以北京石花洞为例[J]. *第四纪研究*, 2005, **25(2)**: 258-264.
- [54] Clark I D, Fritz P. *Environmental isotopes in hydrogeology*[M]. Boca Raton, FL: CRC Press, 1997.
- [55] Lacelle D, Lauriol B, Clark I D. Seasonal isotopic imprint in moonmilk from Caverne de l'Ours (Quebec, Canada): implications for climatic reconstruction[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 2004, **41(12)**: 1411-1423.

## CONTENTS

Application of a Two-stage Virtual Impactor in Measuring of PM <sub>10</sub> and PM <sub>2.5</sub> Emissions from Stationary Sources .....	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, LI Zhen, <i>et al.</i> (2003)
Hygroscopic Properties and Closure of Aerosol Chemical Composition in Mt. Huang in Summer .....	CHEN Hui, YANG Su-ying, LI Yan-wei, <i>et al.</i> (2008)
Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Shenyang .....	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Lu, <i>et al.</i> (2017)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Ions in Dry Deposition in the Summer and Autumn of Nanjing .....	QIN Yang, ZHU Bin, ZOU Jia-nan, <i>et al.</i> (2025)
Distribution Characteristics of Water-soluble Ions in Size-segregated Particulate Matters in Taiyuan .....	CAO Run-fang, YAN Yu-long, GUO Li-li, <i>et al.</i> (2034)
Characteristics of Ozone over Standard and Its Relationships with Meteorological Conditions in Beijing City in 2014 .....	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2041)
Chemical Composition of Alkanes and Organic Acids in Vehicle Exhaust .....	YUAN Jia-wen, LIU Gang, LI Jiu-hai, <i>et al.</i> (2052)
Effect of DOC/CCRT Aging on Gaseous Emission Characteristics of an In-used Diesel Engine Bus .....	LOU Di-ming, HE Nan, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (2059)
Studies of Dynamic Adsorption Behavior of VOCs on Biochar Modified by Ultraviolet Irradiation .....	LI Qiao, YONG Yi, DING Wen-chuan, <i>et al.</i> (2065)
Absorption Spectral Characteristic Dynamics of Dissolved Organic Matter (DOM) from a Typical Reservoir Lake in Inland of Three Gorges Reservoir Areas: Implications for Hg Species in Waters .....	JIANG Tao, LU Song, WANG Qi-lei, <i>et al.</i> (2073)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Waters of Typical Agricultural Watershed of Three Gorges Reservoir Areas .....	WANG Qi-lei, JIANG Tao, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (2082)
High-resolution Variations of Oxygen and Hydrogen Isotopes of Precipitation and Feedback from Cave Water: An Example of Jiguan Cave, Henan .....	SUN Zhe, YANG Yan, ZHANG Ping, <i>et al.</i> (2093)
Spatial Response of River Water Quality to Watershed Land Use Type and Pattern Under Different Rainfall Intensities .....	JI Xiang, LIU Hong-yu, LI Yu-feng, <i>et al.</i> (2101)
Determination of Background Value and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Danjiangkou Reservoir .....	ZHAO Li, WANG Wen-wen, JIANG Xia, <i>et al.</i> (2113)
Spatial Distribution Characteristics and Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in Sediments and Soils from the Dishui Lake and Its River System .....	WANG Xue-ping, HUANG Xing, BI Chun-juan, <i>et al.</i> (2121)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Water Source Areas of Guangdong and Guangxi .....	YANG Yu-xiang, LIU Xin-yu, ZHAN Zhi-wei, <i>et al.</i> (2131)
Responses of Nutrients and Chlorophyll a to Water Level Fluctuations in Poyang Lake .....	LIU Xia, LIU Bao-gui, CHEN Yu-wei, <i>et al.</i> (2141)
Influence of Periodic Temperature Disturbance on the Succession of Algal Community Structure .....	GONG Dan-dan, LIU De-fu, ZHANG Jia-lei, <i>et al.</i> (2149)
Effects of Bromate on the Growth and Physiological Characteristics of <i>Chlorella vulgaris</i> .....	WANG Zhi-wei, LIU Dong-mei, ZHANG Wen-juan, <i>et al.</i> (2158)
Effect of Water Bloom on the Nitrogen Transformation and the Relevant Bacteria .....	LI Jie, ZHANG Si-fan, XIAO Lin (2164)
Effect of Carbon and Nitrogen Forms on Decomposition of Organic Matter in Sediments from Urban Polluted River .....	TANG Qian, LIU Bo, WANG Wen-lin, <i>et al.</i> (2171)
Interfacial Property of Amphiphilic Copolymer Blending PVDF UF Membrane and Protein Anti-fouling .....	MENG Xiao-rong, LU Bing-xue, FU Dong-hui, <i>et al.</i> (2179)
Adsorption of Hg(II) in Water by Sulfhydryl-Modified Sepiolite .....	XIE Jing-ru, CHEN Ben-shou, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (2187)
Adsorption Behavior of Low Concentration Phosphorus from Water onto Modified Reed Biochar .....	TANG Deng-yong, HUANG Yue, XU Rui-chen, HU Jie-li, <i>et al.</i> (2195)
Adsorption Characteristics of 2,4-D on UiO-66 from Wastewater .....	REN Tian-hao, YANG Zhi-lin, GUO Lin, <i>et al.</i> (2202)
Mechanism and Surface Fractal Characteristics for the Adsorption of <i>p</i> -nitrophenol on Water-quenched Blast Furnace Slag .....	WANG Zhe, HUANG Guo-he, AN Chun-jiang, <i>et al.</i> (2211)
Adsorption Characteristics for Humic Acid by Binary Systems Containing Kaolinite and Goethite .....	NIU Peng-ju, WEI Shi-yong, FANG Dun, <i>et al.</i> (2220)
Effects of Sulfur/sponge Iron Ratio for Deep Denitrification and Phosphorus Removal of Reclaimed Water .....	ZHOU Yan-qing, HAO Rui-xia, WANG Zhen, <i>et al.</i> (2229)
Effect of Element Sulfur Particle Size and Type of the Reactor on Start-up of Sulfur-based Autotrophic Denitrification Reactor .....	MA Hang, ZHU Qiang, ZHU Liang, <i>et al.</i> (2235)
Influencing Mechanism of Titanium Salt Coagulant Chemical Conditioning on the Physical and Chemical Properties of Activated Sludge Floes .....	WANG Cai-xia, ZHANG Wei-jun, WANG Dong-sheng, <i>et al.</i> (2243)
Distribution Characteristics of Methanogens in Urban Sewer System .....	SUN Guang-xi, JIN Peng-kang, SONG Ji-na, <i>et al.</i> (2252)
Long-term Performance and Bacterial Community Composition Analysis of AGS-SBR Treating the Low COD/N Sewage at Low DO Concentration Condition .....	XIN Xin, GUAN Lei, YAO Yi-duo, <i>et al.</i> (2259)
Optimization for <i>Microthrix parvicella</i> Quantitative Processing of Fluorescence <i>in situ</i> Hybridization (FISH) .....	WANG Run-fang, ZHANG Hong, WANG Qin, <i>et al.</i> (2266)
Influence of Carbonization Temperature on Bacterial Community of the Biological Carbon Electrode Based on High-throughput Sequencing Technology .....	WU Yi-cheng, HE Guang-hua, ZHENG Yue, <i>et al.</i> (2271)
Isolation, Identification and Characteristics of a <i>Rhodospseudomonas</i> with High Ammonia-nitrogen Removal Efficiency .....	HUANG Xue-jiao, YANG Chong, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (2276)
Variation Characteristics of Inorganic Phosphorus in Purple Soil Profile Under Different Conservation Tillage Treatments .....	HAN Xiao-fei, GAO Ming, XIE De-ti, <i>et al.</i> (2284)
Effect of Different Organic Materials on Nitrogen Mineralization in Two Purple Soils .....	ZHANG Ming-hao, LU Ji-wen, ZHAO Xiu-lan (2291)
Impacts of Biochar and Straw Application on Soil Organic Carbon Transformation .....	ZHANG Ting, WANG Xu-dong, PANG Meng-wen, <i>et al.</i> (2298)
Tracing Sources of Heavy Metals in the Soil Profiles of Drylands by Multivariate Statistical Analysis and Lead Isotope .....	SUN Jing-wei, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (2304)
Landscape Patterns Characteristics of Soil Heavy Metal Pollution in a Town of Southern Jiangsu .....	CHEN Xin, PAN Jian-jun, WANG Wen-yong, <i>et al.</i> (2313)
Assessment and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Soil of Different Functional Areas in Luoyang .....	LIU Ya-na, ZHU Shu-fa, WEI Xue-feng, <i>et al.</i> (2322)
Evaluation on Heavy Metal Pollution and Its Risk in Soils from Vegetable Bases of Hangzhou .....	GONG Meng-dan, ZHU Wei-qin, GU Yan-qing, <i>et al.</i> (2329)
Fluorescence Spectroscopic Characteristics and Cu <sup>2+</sup> -complexing Ability of Soil Dissolved Organic Matter .....	TIAN Yu, WANG Xue-dong, CHEN Xiao-lin, <i>et al.</i> (2338)
Effect of Stabilizer Addition on Soil Arsenic Speciation and Investigation of Its Mechanism .....	CHEN Zhi-liang, ZHAO Shu-hua, ZHONG Song-xiong, <i>et al.</i> (2345)
Effects of Human Gut Microbiota on Bioaccessibility of Soil Cd, Cr and Ni Using SHIME Model .....	YIN Nai-yi, DU Hui-li, ZHANG Zhen-nan, <i>et al.</i> (2353)
Photosynthetic Characteristics and Ozone Dose-response Relationships for Different Genotypes of Poplar .....	XIN Yue, GAO Feng, FENG Zhao-zhong (2359)
Effects of Pyrene on Low Molecule Weight Organic Compounds in the Root Exudates of Five Species of <i>Festuca</i> .....	PAN Sheng-wang, YUAN Xin, LIU Can, <i>et al.</i> (2368)
N% and S% in Leaves of Vascular Plants <i>Cinnamomum camphora</i> and <i>Pinus massoniana</i> Lamb. for Indicating the Spatial Variation of Atmospheric Nitrogen and Sulfur Deposition .....	XU Yu, XIAO Hua-yun, ZHENG Neng-jian, <i>et al.</i> (2376)
Temporal and Spatial Dynamics of Greenhouse Gas Emissions and Its Controlling Factors in a Coastal Saline Wetland in North Jiangsu .....	XU Xin-wanghao, ZOU Xin-qing, LIU Jing-ru (2383)
Preparation of Visible-light-induced g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /Bi <sub>2</sub> S <sub>3</sub> Photocatalysts for the Efficient Degradation of Methyl Orange .....	ZHANG Zhi-bei, LI Xiao-ming, CHEN Fei, <i>et al.</i> (2393)
Estimation of Co-benefits from Pollution Emission Reduction by Eliminating Backward Production Capacities in Hainan Province .....	GENG Jing, REN Bing-nan, LÜ Yong-long, <i>et al.</i> (2401)

# 《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6月15日 第37卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 6 Jun. 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