

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第4期

Vol.33 No.4

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

碳同位素比技术定量估算城市大气 CO ₂ 的来源	刘卫, 位楠楠, 王广华, 姚剑, 曾友石, 范雪波, 耿彦红, 李燕 (1041)
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	廖聪云, 钟巍, 马巧红, 薛积彬, 尹焕玲, 龙昆 (1050)
北京雾霾天气期间气溶胶光学特性	于兴娜, 李新妹, 登增然登, 德庆央宗, 袁帅 (1057)
白马泉风景区夏季大气 PM _{2.5} 中二次有机物的初步研究	代东决, 李黎, 刘子芳, 赵敏, 冯加良, 赖玮, 曾燕梅, 周宇, 刘露云, 邓仕槐 (1063)
机动车尾气排放 VOCs 源成分谱及其大气反应活性	乔月珍, 王红丽, 黄成, 陈长虹, 苏雷燕, 周敏, 徐骅, 张钢锋, 陈宜然, 李莉, 陈明华, 黄海英 (1071)
法国梧桐叶片氮含量及氮同位素对城市大气湿沉降氮的响应研究	王燕丽, 肖化云, 肖红伟 (1080)
胶州湾及邻近海域表层海水中一氧化氮浓度分布及其影响因素探讨	薛超, 刘春颖, 杨桂朋, 祝陈坚, 张洪海 (1086)
基于不确定性分析的太湖水体多环芳烃的生态风险评价	郭广慧, 吴丰昌, 何宏平, 冯承莲, 张瑞卿, 李会仙 (1091)
流域水质时空分布特征及其影响因素初析	黄金良, 黄亚玲, 李青生, 周增荣, 冯媛, 张祯宇 (1098)
潮白河周丛生物群落元素组成与水质变化的生态计量学关系研究	崔经国, 单保庆, 王帅 (1108)
春季盘溪水质日变化规律及水质评价	张千千, 王效科, 郝丽岭, 逯非, 欧阳志云, 侯培强 (1114)
西南喀斯特流域风化作用季节性变化研究	肖琼, 沈立成, 杨雷, 伍坤宇, 陈展图 (1122)
三峡水库开县消落区水域冬季蓄水期间藻类群落结构与水质评价	郭劲松, 谢丹, 李哲, 陈园, 孙志禹, 陈永柏, 龙曼 (1129)
淀山湖水华高发期浮游植物群落变化特征研究	徐春燕, 杨洁, 马明睿, 胡雪芹, 由文辉 (1136)
三峡库区典型消落带草本植物氮磷养分浸泡释放实验	王建超, 朱波, 汪涛, 易礼军 (1144)
沂蒙山区典型小流域特殊降雨的磷素输出特征	李振伟, 于兴修, 刘前进, 井光花 (1152)
合肥城区地表灰尘氮磷形态分布及生物有效性	李如忠, 周爱佳, 童芳, 李峰, 钱家忠 (1159)
鹤地水库沉积物营养盐及重金属分布和污染特征分析	张华俊, 陈修康, 韩博平, 罗勇, 杨浩文, 曾艳, 陈敬安 (1167)
三门峡库区河流湿地沉积物重金属赋存形态和风险评价	敖亮, 单保庆, 张洪, 唐文忠 (1176)
黄河三角洲滨海湿地表层沉积物重金属区域分布及生态风险评价	刘志杰, 李培英, 张晓龙, 李萍, 朱龙海 (1182)
竺山湾重金属污染底泥环保疏浚深度的推算	姜霞, 王雯雯, 王书航, 金相灿 (1189)
雷州近海、流沙湾和深圳湾沉积物 PAHs 污染特征分析	赵利容, 孙省利, 柯盛 (1198)
中国与印度典型城市道路街尘中多环芳烃与黑碳的对比研究	潘苏红, 张千, 孙亚莉, 解启来 (1204)
三江平原典型灌区井灌地下水中的随水迁移特征	邹元春, 于晓菲, 霍莉莉, 吕宪国, 姜明 (1209)
海水淡化水在既有管网输配的铁释放控制研究	田一梅, 刘扬, 赵鹏, 单金林, 杨所印, 刘伟 (1216)
新生态铁的混凝作用探索	杨雪, 张景成, 关小红 (1221)
饮用水中甲羟孕酮的臭氧氧化降解研究	岳婵媛, 缪恒峰, 任洪艳, 阮文权 (1227)
核壳式磁性碳纳米吸附剂的制备及其对水环境中金霉素的吸附研究	王懿萱, 张娣, 牛红云, 孟昭福, 蔡亚岐 (1234)
络合-超滤耦合工艺去除水中镍离子的研究	秦姝, 邵嘉慧, 何义亮, 李雯玺 (1241)
赤铁矿光助类 Fenton 降解有毒有机污染物	张钰, 顾彦, 杨慧, 何燕, 李瑞萍, 黄应平, 张爱清 (1247)
掺氮 Ta ₂ O ₅ 诱发可见光-类 Fenton 体系降解阿特拉津研究	赵璐, 邓一荣, 杜瑛珣, 傅翔 (1252)
O ₃ /H ₂ O ₂ 降解水中扑灭通效能研究	李绍峰, 孙楚 (1260)
Pr-N 共掺杂 TiO ₂ 光电催化降解孔雀石绿动力学	沙爽, 周少奇, 张小娜, 周晓 (1267)
铜陵相思谷尾矿用于处理酸性矿山排水的实验研究	张楠, 陈天虎, 周跃飞, 黎少杰, 金杰, 王延明 (1272)
聚合铝铁对 A ² /O 系统 EPS 及生物絮凝性能的影响	温沁雪, 刘爱翠, 陈志强, 施汉昌, 吕炳南 (1278)
温度对污水脱氮系统污染物去除效果及氧化亚氮释放的影响	张婷婷, 张建, 杨芳, 谢慧君, 胡振, 李一冉 (1283)
温度对厌氧氨氧化反应器脱氮效能稳定性的影响	李祥, 黄勇, 郑宇慧, 袁怡, 李大鹏, 潘杨, 张春蕾 (1288)
好氧颗粒污泥处理制糖工业废水厌氧出水的除磷特性研究	王硕, 于水利, 时文歆, 暴瑞玲, 衣雪松, 李建政 (1293)
除磷颗粒污泥系统中不同粒径颗粒的理化特性分析	李志华, 张玉蓉, 杨帆, 李胜, 姬晓琴 (1299)
利用氧化亚氮还原酶基因 (nosZ) 评价人工湿地系统中的反硝化菌	王晓君, 陈少华, 张兆基, 肖俊超 (1306)
紫外诱变法提高好氧反硝化菌降解性能的研究	于佳佳, 陈浚, 杨宣, 陈建孟 (1313)
1 株异养硝化菌胞外聚合物的研究	陈哲, 张斌, 湛志强, 邱志刚, 郭迎庆, 李君文, 王景峰 (1318)
氨氮对稀有鮕鲫胚胎及卵黄囊期仔鱼的毒性效应研究	王志坚, 鲁增辉, 石萍 (1323)
多年蔬菜连作对土壤氨氧化微生物群落组成的影响	孟德龙, 杨扬, 伍延正, 吴敏娜, 秦红灵, 朱亦君, 魏文学 (1331)
生物质炭施用对土壤中氯虫苯甲酰胺吸附及消解行为的影响	王廷廷, 余向阳, 沈燕, 张超兰, 刘贤进 (1339)
水稻光合同化碳向土壤有机碳库输入的定量研究: ¹⁴ C连续标记法	聂三安, 周萍, 葛体达, 童成立, 肖和艾, 吴金水, 张杨珠 (1346)
油田污染土壤残油组成与特征参数分析	王坚, 张旭, 李广贺 (1352)
挥发性氯代烃在湿润土壤中的平衡吸附研究	孟凡勇, 刘锐, 小林刚, 万梅, 余素林, 陈吕军 (1361)
田间土壤外源铜镍在小麦中的累积及其毒害研究	黄锦孙, 韦东普, 郭雪雁, 马义兵 (1369)
中国磷消费结构的变化特征及其对环境磷负荷的影响	马敦超, 胡山鹰, 陈定江, 李有润 (1376)
基于 3MRA 模型的填埋场安全填埋废物污染物阈值评估方法与应用研究	袁英, 席北斗, 何小松, 魏自民, 李鸣晓, 姜永海, 苏婧, 安达 (1383)
填埋垃圾初始含水率对渗滤液产量的影响及修正渗滤液产量计算公式	兰吉武, 詹良通, 李育超, 陈云敏 (1389)
生物反应器填埋场中邻苯二甲酸二丁酯的迁移转化	方程冉, 龙於洋, 沈东升 (1397)
岩溶区峰丛洼地植被指数的克里格分析	杨奇勇, 蒋忠诚, 马祖陆, 曹建华, 罗为群, 李文军, 段晓芳 (1404)
《环境科学》征订启事 (1062) 《环境科学》征稿简则 (1107) 信息 (1135, 1215, 1396)	

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

廖聪云, 钟巍*, 马巧红, 薛积彬, 尹焕玲, 龙昆

(华南师范大学地理科学学院, 广州 510631)

摘要: 以5~30 min的时间间隔, 收集、分析了2007年4月~2008年6月期间广州市各单次大气降水样品中稳定同位素数据。选取2008年初中国南方冰雪灾害期间(2008年1月10日~2月2日)五场大气降水, 分析了极端天气条件下降水中稳定同位素的变化特征及其影响因素。研究发现, 在2008年初冰雪灾害期间, 广州市大气降水中的 δD 、 $\delta^{18}O$ 及 d -excess发生了明显的下降; d -excess及大气降水线分析指示在此次冰灾过程中水汽来源发生了异常; 气团轨迹追踪显示冰灾最盛期降水水汽为内陆和海洋的混合水汽, 且远距离的海洋水汽输送占主导。冰雪灾害历次单次降水过程中稳定同位素呈现3种不同的变化形态, 即上升型、V型和W型, 这些变化可能与水汽来源及降水形成条件导致的再蒸发、再凝结作用及降雨类型有关。

关键词: 广州; 大气降水; 稳定同位素; 水汽来源; 冰雪灾害

中图分类号: X142; X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)04-1050-07

Moisture Sources of Guangzhou During the Freezing Disaster Period in 2008 Indicated by the Stable Isotopes of Precipitation

LIAO Cong-yun, ZHONG Wei, MA Qiao-hong, XUE Ji-bin, YIN Huan-ling, LONG Kun

(School of Geography Science, South China Normal University, Guangzhou 510631, China)

Abstract: From April 2007 to June 2008, stable isotope samples of all single precipitations were collected at the intervals of 5-30 min. We choose five single precipitations in Guangzhou city that happened during the freezing disaster event (from Jan. 10 to Feb. 2, 2008) in South China, aiming to investigate the variation of stable isotopes under the extremely climatic conditions and its controlling factors. The results show that the values of δD and $\delta^{18}O$ in precipitations drop significantly during this freezing disaster. The analyses of the d -excess and LMWL indicate the abnormal oceanic moisture sources. Air mass trajectory tracking shows the moisture sources were characterized by the mixture of inland and marine water vapors during the freezing disaster peak period, while the long-distance oceanic moisture sources is the dominate one. Changes of stable isotope in single rain event during the freezing disaster shows three different trends, i. e., Up trend, V-shaped trend and W-shaped trend, which may be resulted from the re-evaporation, re-condensation and the related precipitation types in association with the different vapor sources and precipitation conditions.

Key words: Guangzhou; stable isotope; precipitation; moisture source; freezing disaster

大气降水是自然界水循环中的一个重要环节, 降水中稳定同位素的变化可揭示局地水循环过程与特征^[1,2], 可为大气环流及气候变化提供重要的信息^[3,4]。降水中的 δD 、 $\delta^{18}O$ 在蒸发、凝聚、降落形成的水分循环发生动力分馏和热力分馏^[5], 主要受雨滴凝结时的温度和降水的水汽来源控制, 此外还受到大尺度天气气候变化和局地气象及地理条件的影响, 使其组成随时间和空间呈一定的规律变化。目前, 利用降水中稳定同位素示踪法来追踪水汽来源是国际上研究的热点, 我国学者利用该方法对青藏高原及季风区降水水汽来源研究做出了重要的贡献^[6-12]。研究表明, 不同水汽来源是降水中稳定同位素变化的重要因素。此外, 稳定同位素的变化还与天气过程有关, Aragués等^[13]分析指出, 亚洲季风区降水中稳定同位素含量与发生在对流云中云团被

冲刷程度、降水强度、水汽再循环以及雨滴在云下与周围大气中稳定同位素成分的物质交换有密切关系, 强烈的暴风雨活动带来的降水能使大气水汽中的重同位素迅速脱离出来, 剩余水汽中 $\delta^{18}O$ 亏损。Gedzeman等^[14]指出: 飓风及热带风暴降雨中的 $\delta^{18}O$ 由于强烈的大气对流, 其 $\delta^{18}O$ 值由外围向台风中心递增, 并于台风中心附近达到最大值。Risi等^[15]研究发现尼日尔飑线降水过程中 $\delta^{18}O$ 呈现W型变化, 并指出飑线的动态和水滴的再蒸发导致了 $\delta^{18}O$ 的变化。Celle-Jeanton等^[16]研究发现法国南部单次降水

收稿日期: 2011-06-24; 修订日期: 2011-10-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(41071137, 40671189); 广东省高层次人才项目(S2011010003413); 广东省自然科学基金项目(8151063101000044)

作者简介: 廖聪云(1988~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为全球变化及其环境信息系统, E-mail: lcy325@126.com

* 通讯联系人, E-mail: DL06@scau.edu.cn

事件中 $\delta^{18}\text{O}$ 随时间变化呈下降型、L型和V型这3种形态,不同的变化形态与降水形成时的气象条件和降雨类型有关.上述研究说明短期的天气过程,特别是一些极端天气事件如超强台风登陆、暴风雪、厄尔尼诺等,对大气降水中稳定同位素具有显著的影响,利用降水中稳定同位素的变化指示极端天气过程是可行的.

2008年初,中国南方地区所受到的50年一遇的暴雪和冻雨灾害天气,给交通运输、电力供应、林业和农业以及人民正常的生产和生活造成了严重的影响.这次冰冻灾害造成了100余人死亡,直接经济损失达1500多亿元^[17].已有研究指出^[18~21],此次冰雪灾害期间欧亚大气环流持续性异常是造成冷空气不断侵袭中国南方的直接原因,而孟加拉湾和南海地区暖湿气流的北上则是大范围冻雨和降雪形成并持续在中国南方的必要条件.本研究通过收集、分析广州市高时间分辨率的降水稳定同位素数据,探讨冰雪灾害期间其降水中稳定同位素的变化特征,力求进一步了解华南地区此次冰雪灾害的成因.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

位于华南沿海的广州地区($112^{\circ}57' \sim 114^{\circ}3'E$, $22^{\circ}26' \sim 23^{\circ}56'N$)为典型的亚热带季风气候,受冬夏季风的交替控制(图1),年平均气温 22°C ,年降雨量 $1\,640 \sim 1\,970\text{ mm}$,4~10月为雨季,11月~次年3月为干季.冬夏季风的交替是广州季风气候

的突出特征,冬季的偏北风由极地大陆气团向南伸展而成,干燥寒冷,夏季的偏南风由热带海洋气团向北扩张所形成,温暖潮湿.

该地区降水中稳定同位素的影响因子较为复杂.已有学者从季风活动、水汽来源等方面研究了季节、天气尺度下广州大气降水中稳定同位素的变化^[12,22],但是对极端天气影响下的大气环流及水汽来源等问题的研究基本属于空白.本研究系统收集了2007年4月~2008年6月高分辨率的广州市历次大气降水样品,其中包括2008年华南冰雪灾害期的5场单次降水.这些样品为从大区域环流背景来分析此次冰灾各阶段降水中稳定同位素的变化特征及降水形成条件提供了非常宝贵的研究材料.

1.2 样品采集与实验方法

本研究降水样品采集地点位于华南师大地理科学学院气象站内.对2007年4月10日~2008年6月12日期间54场具有显著天气过程的降水按5~30 min间隔进行了降水样品采集.所收集的降水样品经密封、低温保存,在中国科学院青藏高原研究所用MAT-253型气体同位素质谱仪进行了稳定同位素测试. δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 的分析精度分别为 $\pm 0.2\text{‰}$ 和 $\pm 1\text{‰}$.分析依据VSMOW标准,得到稳定同位素比率 $\delta(\text{‰})$,即: $\delta(\text{‰}) = (R_{\text{SAMPLE}}/R_{\text{SMOW}} - 1) \times 1\,000\text{‰}$.式中, R_{SAMPLE} 和 R_{SMOW} 分别指样品中和标准物中同位素成分的相对含量.

为深入探讨广州地区冰灾期间的水汽来源,本研究利用美国海洋与大气局(NOAA)空气资源实验

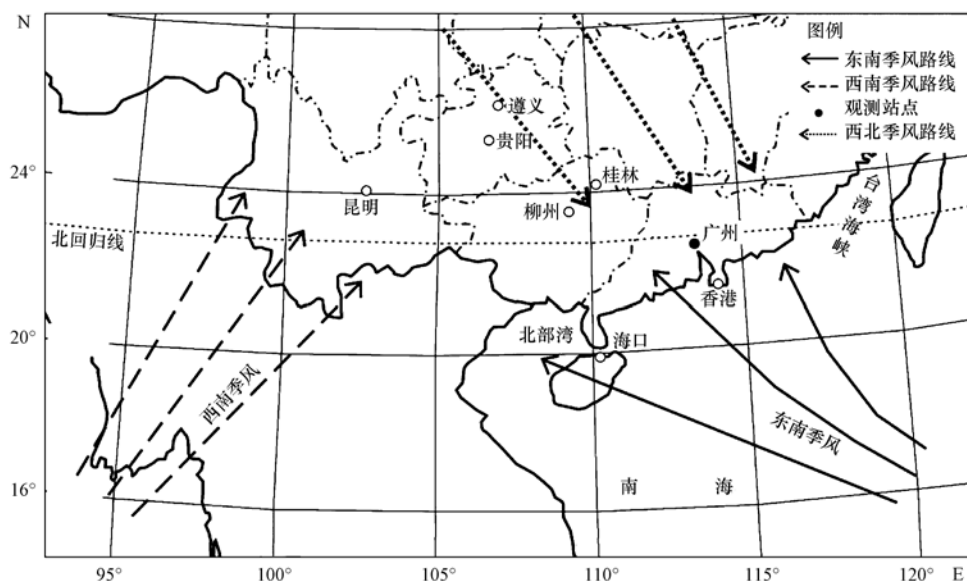


图1 采样点位置及季风路径示意

Fig. 1 Location of the study area and the monsoon trajectories

室 ARL (Air Resources Laboratory) 和澳大利亚墨尔本气象研究中心联合开发的混合型单粒子拉格朗日综合轨迹模式 HYSPLIT, 对引起每次降水的大气气团进行后推模拟, 用于分析降水气团的来源和传输途径的变化. 相关气象数据选用 GDAS 数据库, 每次向后延伸时间为 144 h (6 d), 起始高度分别为地面以上 500、1 000 和 1 500 m. 与研究期间 54 场单次降水相关的气象资料来自华南师范大学地理科学学院气象站, 包括逐日的气温、降水、水汽压、相对湿度、露点温度等数据.

2 结果与分析

2.1 冰灾期间稳定同位素变化特征

如图 2 中所示, 在 2007 年 4 月~2008 年 6 月期间, 广州市大气降水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 的波动遵循着中国南方季风区的变化规律^[10,22], 季节变化非常明显, 表现为夏季较低 (δD 、 $\delta^{18}O$ 分别为 -39.4‰ 和 -7.3‰)、冬季较高 (δD 、 $\delta^{18}O$ 分别为 -17.7‰ 和 -3.7‰). 2008 年我国华南地区的暴雪、冰冻灾害天气大约始于 2008 年 1 月 10 日, 于 2 月 2 日结束. 有研究将此次冰雪灾害划分为四次天气过程^[17]: 第一阶段 (1 月 10~16 日), 强降水主要位于长江中游地区, 广州地区的降水发生在 1 月 17 日, 降水量较小, 为 5 mm; 第二阶段 (1 月 18~21 日), 强降水中心在长江中下游地区, 但此阶段广州没有降水记录; 第三阶段 (1 月 25~29 日), 强降水中心在华南长江流域一带, 广州分别于 25、29、30 日出现三次降水过程, 并于 25 日记录到了冰灾期间的最大降雨量 (43.9 mm), 30 日的降雨量也较大, 为 32.4 mm; 第四阶段 (1 月 31~2 月 2 日), 强降水中心主要集中于江南地区, 广州于 1 月 31 日测得 3.8 mm 的降水量. 值得注意的是, 在 2008 年初的冰雪灾害期间, 降水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 值发生了明显的下降, 最低值出现在冰灾最盛期的 1 月 25 日, 随着冰灾期间降水的结束, 1 月 31 日 δD 、 $\delta^{18}O$ 回归到冬季期间的较高值 (图 2), 暗示着冰雪灾害期间大气环流状况及降水形成条件发生了异常.

由于水汽蒸发导致的动力分馏效应可以破坏 δD 和 $\delta^{18}O$ 的平衡分馏, 因而在 δD 和 $\delta^{18}O$ 之间出现一个差值, Dansgaard 将其定义为过量氙参数 $d\text{-excess}$ ($d = \delta D - 8 \times \delta^{18}O$)^[1]. $d\text{-excess}$ 主要受控于水汽源区的蒸发条件、风速和海水表层温度等因素. 众多研究表明, 季风区降水 $d\text{-excess}$ 的季节变化与水汽来源密切相关, 它可以揭示降水的水汽来源及水循

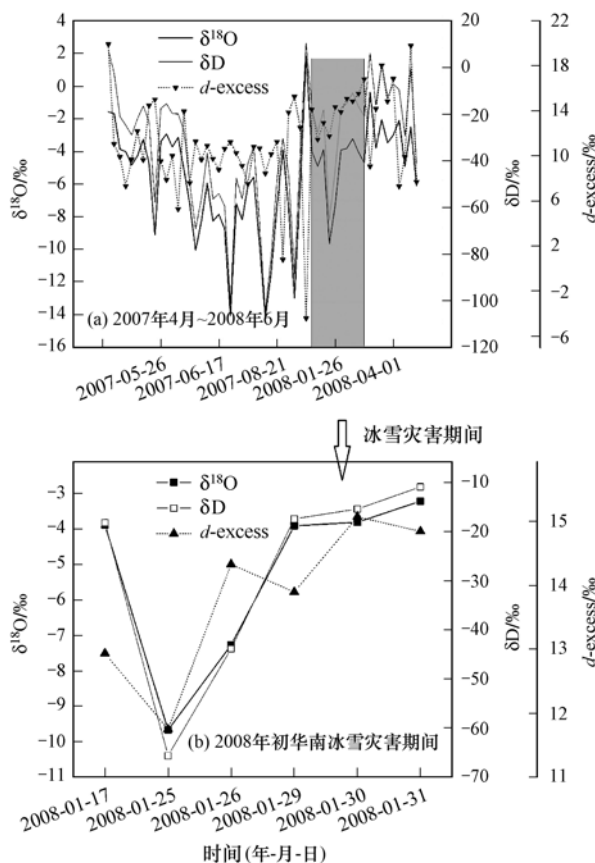


图 2 广州大气降水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 和 $d\text{-excess}$ 的变化

Fig. 2 Changes of δD , $\delta^{18}O$ and $d\text{-excess}$ in Guangzhou precipitations

环方式的时空变化^[23,24]. 根据 Araguás 等^[13]统计计算的亚洲区各 IAEA/WMO 取样站的稳定同位素数据, 得到西太平洋区 18 个、印度洋 8 个和中亚区 8 个取样站降水中的平均 $d\text{-excess}$ 分别为 10.1‰、8.36‰ 和 11.71‰. 2007 年 4 月~2008 年 6 月期间, 夏季 (4~10 月份) 广州大气降水的水汽主要来源于低纬度海洋, 空气湿度大, $d\text{-excess}$ 平均值为 10.4‰; 冬季 (11 月~次年 3 月), 受大陆性气团的影响, 广州地区降水的水汽来自高纬度亚洲内陆及局地蒸发水, 空气湿度小, $d\text{-excess}$ 平均值为 12.8‰. 冰雪灾害发展最盛期 (1 月 25 日), 广州降水中 $d\text{-excess}$ 的平均值为 11.7‰, 而单次降水中曾出现 7.7‰ 的超低值, 低于印度洋区的平均值, 这种现象可能暗示了冰雪灾害期间广州地区降水水汽来源较一般情况下冬季降水水汽来源发生了改变.

除 $d\text{-excess}$ 外, 大气降水线也可描述 δD 和 $\delta^{18}O$ 之间的线性关系. 每一个地方的大气降水线, 受地方气候因子, 包括水汽气团的起源、降水期间的二次蒸发、降水的季节变化控制^[1,25], 已有研究表明, 水

汽来源的改变对广州地区的大气降水线影响更大^[22,23]. 从图 3 可以看出:2008 年初的冰灾期间,广州大气降水线无论是截距还是斜率都与夏季大气降水线比较接近,且都高于夏季,暗示着冰灾期间广州大气降水中水汽来源与夏季水汽来源比较相似,水汽来源区的相对湿度较大,降水形成过程中二次蒸发效应微弱.

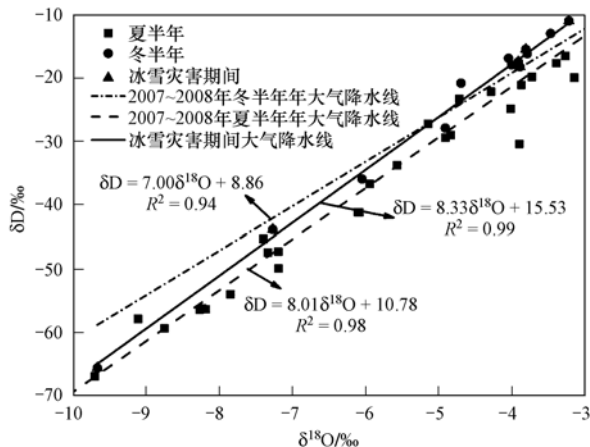


图 3 广州大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 关系

Fig. 3 Correlation between δD and $\delta^{18}\text{O}$ of precipitation in Guangzhou

2.2 冰雪灾害期间广州单次降水中稳定同位素变化与水汽来源分析

笔者对冰灾期间的广州市 5 场降水按 15 ~ 30 min 时间间隔进行了采样分析. 除了 1 月 31 日因降水历时较短只采集到一个样品外,其他各次降水样品中的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 都表现为明显的波动(图 4). $\delta^{18}\text{O}$ 的变化呈现 3 种不同的变化形态:① 1 月 17 日降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 前期较低,后期升高,呈现为“上升”形态[图 4(a)];② 29 日降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 先下降而后上升[图 4(c)],大体呈现“V”型;③ 1 月 25 日和 30 日降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 则呈现“W”型波动[图 4(b)和 4(d)]. 除了 1 月 29 日的降水外, δD 的波动几乎与 $\delta^{18}\text{O}$ 呈现同步变化, $d\text{-excess}$ 则整体呈现下降趋势,即降水前期 $d\text{-excess}$ 值较高,随后降低(如 1 月 17 日和 1 月 29 日),或是发生波动下降(如 1 月 25 日和 1 月 30 日). $d\text{-excess}$ 主要反映水汽源区的蒸发条件,可间接反映水汽来源的变化^[27],但一般指的是不同的降水过程,而在同一次短暂的降水过程中 $d\text{-excess}$ 的变化则有可能是降水过程的再蒸发、再凝结等其他因素影响所致.

根据众多学者对 2008 年初冰雪灾害所进行的相关研究,冰雪灾害过程可划分为不同的阶段(2.1

节),由于在第二阶段中广州没有降水记录,因此本研究分 3 个阶段讨论.

2.2.1 第一阶段:1 月 10 日 ~ 17 日

广州于 1 月 17 日收集到 5 mm 的降水,降水前后持续将近 12 h. 该次降水中的 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 较 2007 年 12 月 23 日收集的降水样品发生较大幅度的下降, δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值分别为 -18.2‰ 和 -3.9‰ ,且呈现“上升型”变化特征[图 4(a)]. 后推气流模型显示[图 5(a)],1 月 17 日降水的水汽主要来自俄罗斯西伯利亚途径中国黄渤海地区及南海上空的转向气流,水汽来源高度较低(都在 1 000 m 以下),因掺有海洋洋面蒸发水汽,降水中同位素亏损. 但降水后期同位素值升高, $d\text{-excess}$ 从 16.4‰ 迅速下降到 9.1‰ ,导致这种变化的原因可能是由于降水初期降水量大,降水量效应导致 $\delta^{18}\text{O}$ 值低且二次蒸发较少而 $d\text{-excess}$ 值高;而后期降水量急剧减少,导致 $\delta^{18}\text{O}$ 值升高而且 $d\text{-excess}$ 值由于二次蒸发强烈而降低. 水汽来源导致同位素含量变化,与此阶段的大气环流形势密切相关. 1 月 17 日,西风带的北支有明显阻塞形势出现,在贝加尔湖和西西伯利亚一带有明显的高压脊,其东西两侧各为低压区,东侧低压区在蒙古国东部和我国东北北部,有利于冷空气沿超极地路径入侵我国. 而在西风带的南支气流上,不断有小槽东移,在云南与中印半岛的北部有南支槽活跃与停滞,其槽前有大量的暖湿气流输送,非常有利于中国南方地区降水的发生^[18,19]. 此阶段沿长江流域有一条准静止锋维持,降水主要集中在长江流域. 虽然广州位于该准静止锋活动边缘以外,但仍可受到西风带南支槽所输送的水汽,但水汽通量较小.

2.2.2 第二阶段:1 月 25 ~ 29 日

此阶段是冰冻灾害最严重的阶段. 降水中的 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 于 2008 年 1 月 25 日达到冬季降水的最低值,而且 25 日单次降水中 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 曾于 08:15 ~ 08:30 期间分别出现了 -95.8‰ 和 -12.9‰ 的超低值[图 4(b)],远低于全年平均值 -33.4‰ 和 -5.6‰ ,直逼 2007 年夏季降水最低值 -101.2‰ 和 -14.1‰ . 降水中稳定同位素出现如此的异常,显然与大气环流形势的改变所导致的水汽输送密切相关. 后推水汽来源显示[图 5(b)],广州 1 月 25 日水汽来源通量加大,三条水汽分别为中国东海海面-南海上空的海洋气流、中国东南大陆上空的内陆气流及源于印度洋-孟加拉湾途径中南半岛的西南转向气流. 因其水汽主要来自于海洋洋面,降水中稳定同位素亏损,特别是来自印度洋-孟加拉湾的低空水

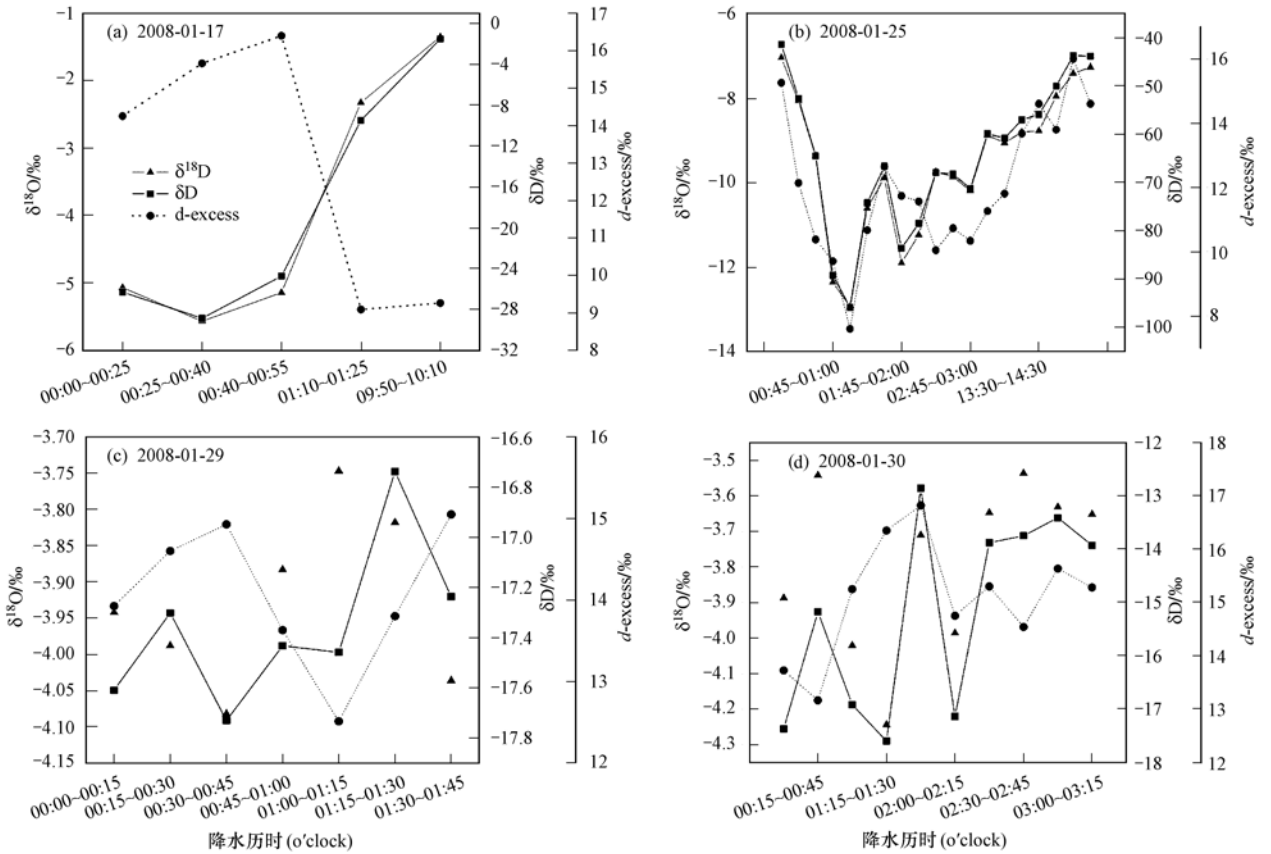
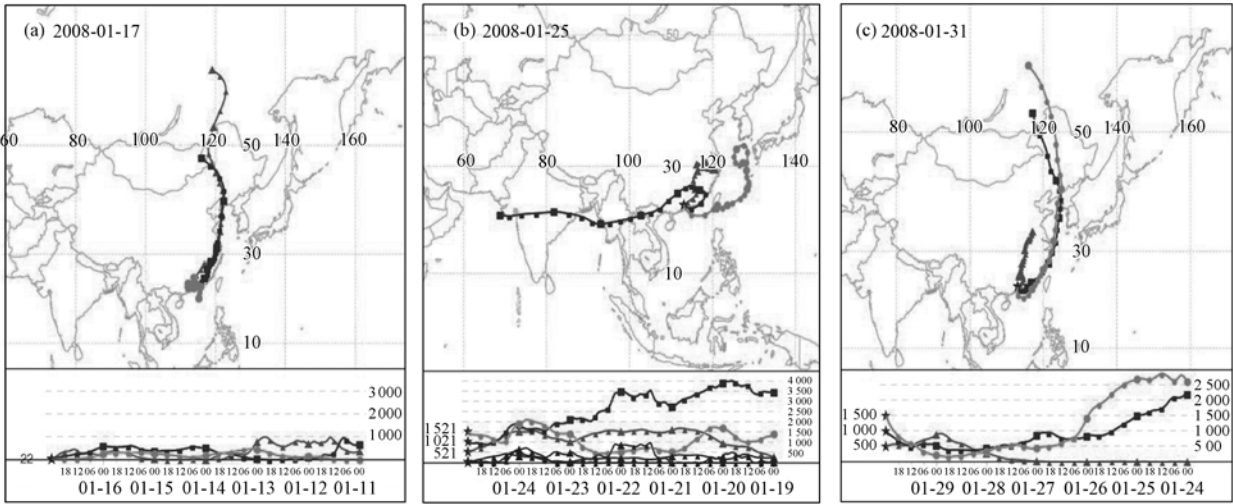


图 4 广州 2008 年初冰雪灾害期间历次降水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 和 $d\text{-excess}$ 变化

Fig. 4 Changes of δD , $\delta^{18}O$ and $d\text{-excess}$ in all single precipitations at Guangzhou during the freezing disaster period at the beginning of 2008



上部曲线代表气流水平迁移路径;下部曲线代表垂直方向气流轨迹

图 5 广州市 2008 年初冰雪灾害期间不同时间气流轨迹图

Fig. 5 Moisture trajectories of different precipitations at Guangzhou during the freezing disaster at the beginning of 2008

汽,经远距离输送及中南半岛的山地效应,降水中心同位素亏损严重. 而此阶段,乌拉尔阻塞高压进一步发展^[17,18],里海、咸海东侧出现了切断低压,十分有利

于西风带南支槽的维持和涡度的输送,1 月 25 日南支槽东移,将印度洋和孟加拉湾的水汽沿云贵高原向我国西南及华南地区输送. 切变线所指示的准静

止锋摆动于长江流域和华南之间,且摆动幅度较大,根据孙建华等^[19]研究此阶段的准静止锋比常年春季(4~5月)华南准静止锋的强度更强,雨带维持在长江流域及华南一带,使得25日单次降水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 亏损严重并呈现“W”型波动变化。Rindsberger等^[26]曾指出单次降雨过程中 $\delta^{18}O$ 波动幅度很大,可能反映了当地气象条件如降雨强度的变化,特别是当有锋面形成时,降水中的 $\delta^{18}O$ 将发生明显的下降,如果有2个锋面连续经过,降水中 $\delta^{18}O$ 则会呈现“W”型变化,(或“双V型”)变化。该阶段广州大气降水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 的波动变化暗示了由于大气环流状况变化所导致的锋面的摆动情况,而该阶段降水中 d -excess的变化趋势与 $\delta^{18}O$ 完全一致,更指示了降水形成条件的复杂变化。

2.2.3 第三阶段:1月31日~2月2日

1月31日广州降水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 分别为 -10.9‰ 和 -3.2‰ , d -excess为 -10.9‰ ,较于第二阶段发生了明显的变化,回归到了冬季的较高值(图2)。从后推水汽来源可以看出[图5(c)],降水水汽来源与1月17日的相似,高空水汽自俄罗斯西伯利亚地区途径中国东部洋面,低空水汽特别是近地面水汽来自陆上水汽蒸发,导致降水中 $\delta^{18}O$ 值高于冰雪灾害最盛期。而此阶段的环流状况发生较大幅度的调整^[18,19],中亚地区的阻塞高压减弱,中高纬度欧亚地区西高东低的大气环流及东亚中低纬度地区东高西低的环流形势逐步消退,高纬冷空气来源及南支槽减弱,水汽来源通量减小。

3 讨论

综合以上分析,笔者认为在2008年初华南地区冰雪灾害期间不同阶段中大气环流形势的改变,导致广州大气降水水汽来源发生变化,导致降水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 于冰灾期间经历了一次明显的下降过程。结合冰雪灾害期间几次降水的水汽来源情况分析,本研究发现2008年1月25日的降水主要为海洋性水汽来源,并掺有一定的内陆来源水汽,来自印度洋的水汽经远距离输送过程中的淋洗作用,来自内陆的冷空气入侵以后,可以抬升当地的暖湿气团而产生降水,导致1月25日大气降水中的稳定同位素严重亏损。而其他几次降水水汽来源主要为内陆来源,降水的发生是暖湿气团受到抬升后水汽冷凝所致。此期间的大气环流形势适宜锋面在我国南岭及其以北地区较长时间停留,为持续降水确立了背景,也使得单次降水过程中的稳定同位素呈现复杂波动。

Celle-Jeanton^[16]指出,单次降水过程中稳定同位素一般呈现“V”型变化,这是由于降水初始阶段由于水汽凝结高度较低,且雨滴在下降过程中受到二次蒸发作用,重同位素含量较高;随后,降水凝结高度抬升(锋面雨中主要是暖湿气团被抬升,对流雨中对流高度升高),此时大气的绝热冷却过程遵循瑞利分馏,同位素亏损最严重;最后,由于残留水汽的减少、云下雨滴的二次蒸发作用,或是有淋洗较弱的新的水汽来源加入,降水中稳定同位素含量上升。降水中稳定同位素除了“V”型变化外,其他类型的也有报道和记载。Rindsberger等^[26]指出锋面降水中一般呈现“W”型。Adar等^[27]在研究了以色列降水同位素后总结出,降水强度大、历时短的降水中 $\delta^{18}O$ 呈现“V”型变化,历时较长的降水中呈现“W”型变化。冰雪灾害期间在广州收集的5场降水中:“W”型变化降水历时较长、降水量也较大,上升型和“V”型变化的降雨历时较短,降雨量也小。基于 d -excess和大气降水线所指示的冰灾期间广州大气降水中存在微弱的二次蒸发,整个冰雪灾害期间稳定同位素的变化主要受到水汽来源改变的影响,但单次降水中可能还受到更加复杂的因素影响,如降雨量大小及强度、降水形成条件导致的二次蒸发和二次凝结等。

4 结论

本研究认为广州市大气降水中稳定同位素对2008年初的冰雪灾害有很好的响应, δD 、 $\delta^{18}O$ 及 d -excess发生了显著下降,与基于 d -excess及大气降水线分析基础上所指示的冰雪灾害期间水汽来源的改变密切相关;单次降水过程中的稳定同位素也因此呈现不同的变化形态,同时还与降水形成条件及降雨类型有关。冰灾期间水汽来源的改变是广州大气降水中稳定同位素变化的直接原因,水汽来源的改变受到异常的大气环流形势影响。

致谢 衷心感谢中国科学院青藏高原研究所康世昌研究员对降水样品同位素分析的大力支持和帮助。感谢华南师范大学地理科学学院气象小组提供了相关气象观测数据。

参考文献:

- [1] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation [J]. Tellus, 1964, 16(4): 436-468.
- [2] 庞洪喜,何元庆,张忠林,等. 季风降水中 $\delta^{18}O$ 与季风水汽来源[J]. 科学通报, 2005, 50(20): 2263-2266.
- [3] 章新平,刘晶淼,孙维贞,等. 中国西南地区降水中氧稳定同位素比率与相关气象要素之间关系的研究[J]. 中国科学

- D 辑:地球科学, 2006, **36**(9): 850-859.
- [4] Zhang X P, Liu J M, Sun W Z, *et al.* Relations between oxygen stable isotopic ratios in precipitation and relevant meteorological factors in southwest China [J]. *Science in China (Series D): Earth Sciences*, 2007, **50**(4): 571-581.
- [5] Clark I D, Fritz P. 水文地质学中的环境同位素 [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2006. 1-61.
- [6] Zhang X P, Liu J M, Sun W Z, *et al.* Stable isotopic variations in precipitation in southwest China [J]. *Advances in Atmospheric Science*, 2006, **23**(4): 649-658.
- [7] 章新平, 田立德, 刘晶森, 等. 沿三条水汽输送路径的降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 变化特征 [J]. *地理科学*, 2005, **25**(2): 190-196.
- [8] 田立德, 马凌龙, 余武生, 等. 青藏高原东部玉树降水中稳定同位素季节变化与水汽输送 [J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2008, **38**(8): 986-992.
- [9] 柳鉴容, 宋献方, 袁国富, 等. 我国南部夏季季风降水水汽来源的稳定同位素证据 [J]. *自然资源学报*, 2007, **22**(6): 1004-1012.
- [10] Breitenbach S F M, Jess F A, Meyer H, *et al.* Strong influence of water vapor source dynamics on stable isotopes in precipitation observed in Southern Meghalaya, NE India [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, **292**(1-2): 212-220.
- [11] 陈锦芳, 曹建平, 黄奕普. 厦门沿岸地区大气降水中氢、氧稳定同位素组成及其影响因素 [J]. *海洋性研究*, 2010, **28**(1): 11-17.
- [12] 郑琰明, 钟巍, 彭晓莹, 等. 粤西云浮市大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与水汽来源的关系 [J]. *环境科学*, 2009, **30**(3): 637-643.
- [13] Aragués-Aragués L, Froehlich K, Rozanski K. Stable isotope composition of precipitation over southeast Asia [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, **103**(D22): 28721-28742.
- [14] Gedzelman S, Lawrence J, Gamache J, *et al.* Probing hurricanes with stable isotopes of rain and water vapor [J]. *Monthly Weather Review*, 2003, **131**(6): 1112-1127.
- [15] Risi C, Bony S, Vimeux F, *et al.* Evolution of the stable water isotopic composition of the rain sampled along Sahelian squall lines [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2010, **136**(Sup. 1): 227-242.
- [16] 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.
- [17] 李崇银, 杨辉, 顾薇. 中国南方雨雪冰冻异常天气原因的分析 [J]. *气候与环境研究*, 2008, **13**(2): 113-122.
- [18] 赵思雄, 孙建华. 2008 年初南方雨雪冰冻天气的环流场与多尺度特征 [J]. *气候与环境研究*, 2008, **13**(4): 351-366.
- [19] 孙建华, 赵思雄. 2008 年初南方雨雪冰冻灾害天气静止锋与层结结构分析 [J]. *气候与环境研究*, 2008, **13**(4): 368-384.
- [20] 李灿, 张礼平, 吴义城, 等. 南方极端雨雪冰冻过程东亚冬季风环流特征及与 El Nino/La Nina 事件的关系 [J]. *暴雨灾害*, 2010, **29**(2): 142-147.
- [21] 马晓刚. 2008 年 1 月我国南方罕见冰冻雨雪灾害性天气诊断分析 [J]. *气象与环境学报*, 2009, **25**(1): 23-26.
- [22] 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.
- [23] Xie L H, Wei G J, Deng W F, *et al.* Daily $\delta^{18}\text{O}$ 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.
- [24] Kwang S L, Andrew J G, David B W, *et al.* Climatic controls on the stable isotopic composition of precipitation in Northeast Asia [J]. *Climate Research*, 2003, **23**(2): 137-148.
- [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, (13): 801-806.
- [26] Rindsberger M, Haffe S, Rahamim S, *et al.* Patterns of the isotopic composition of precipitation in time and space: data from the Israeli storm water collection program [J]. *Tellus*, 1990, **42B**(3): 263-271.
- [27] Adar E M, Karnieli A, Sandler, *et al.* A mechanical sequential rain sampler for isotopic and chemical analyses [R]. IAEA Report, Contract No. 5542/RO/RB. Vienna: IAEA.

CONTENTS

Quantitative Estimation Source of Urban Atmospheric CO ₂ by Carbon Isotope Composition	LIU Wei, WEI Nan-nan, WANG Guang-hua, <i>et al.</i> (1041)
Moisture Sources of Guangzhou During the Freezing Disaster Period in 2008 Indicated by the Stable Isotopes of Precipitation	LIAO Cong-yun, ZHONG Wei, MA Qiao-hong, <i>et al.</i> (1050)
Optical Properties of Aerosol During Haze-Fog Episodes in Beijing	YU Xing-na, LI Xin-mei, DENG Zen-grandeng, <i>et al.</i> (1057)
Secondary Organic Tracers in Summer PM _{2.5} Aerosols from Baima Spring Scenic Area, Yaan, Sichuan Province	DAI Dong-jue, LI Li, LIU Zi-fang, <i>et al.</i> (1063)
Source Profile and Chemical Reactivity of Volatile Organic Compounds from Vehicle Exhaust	QIAO Yue-zhen, WANG Hong-li, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (1071)
<i>Platanus orientalis</i> Foliar N% and $\delta^{15}\text{N}$ Responses to Nitrogen of Atmospheric Wet Deposition in Urban Area	WANG Yan-li, XIAO Hua-yun, XIAO Hong-wei (1080)
Distribution and Controlling Factors of Nitric Oxide Concentrations in Surface Seawater of Jiaozhou Bay and Adjacent Waters	XUE Chao, LIU Chun-ying, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (1086)
Uncertainty Characterization Approaches for Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon in Taihu Lake	GUO Guang-hui, WU Feng-chang, HE Hong-ping, <i>et al.</i> (1091)
Preliminary Analysis of Spatiotemporal Variation of Water Quality and Its Influencing Factors in the Jiulong River Watershed	HUANG Jin-liang, HUANG Ya-ling, LI Qing-sheng, <i>et al.</i> (1098)
Ecological Stoichiometric Relationships of Periphyton Community Elemental Composition and Variations of Water Quality in the Chaobai River	CUI Jing-guo, SHAN Bao-qing, WANG Shuai (1108)
Diurnal Variation and Evaluation of Water Quality of Panxi River in Spring	ZHANG Qian-qian, WANG Xiao-ke, HAO Li-ling, <i>et al.</i> (1114)
Weathering Seasonal Variations in Karst Valley in Southwest China	XIAO Qiong, SHEN Li-cheng, YANG Lei, <i>et al.</i> (1122)
Algal Community Structure and Water Quality Assessment on Drawdown Area of Kaixian Waters in Three Gorges Reservoir During Winter Storage Period	GUO Jing-song, XIE Dan, LI Zhe, <i>et al.</i> (1129)
Characteristics of Phytoplankton Community Changes in Dianshan Lake During Peak Period of Algal Blooms	XU Chun-yan, YANG Jie, MA Ming-rui, <i>et al.</i> (1136)
Nitrogen and Phosphorus Release from Herbaceous Vegetation Under Simulated Inundation Experiment of Water-Level Fluctuation Zone in the Three Gorges Reservoir Area	WANG Jian-chao, ZHU Bo, WANG Tao, <i>et al.</i> (1144)
Output Characteristics of Non-point Phosphorus from a Typical Small Watershed in Yimeng Mountainous Area Under the Special Rainfall	LI Zhen-wei, YU Xing-xiu, LIU Qian-jin, <i>et al.</i> (1152)
Distribution and Bioavailability of Nitrogen and Phosphorus Species in the Urban Dusts from Hefei City	LI Ru-zhong, ZHOU Ai-jia, TONG Fang, <i>et al.</i> (1159)
Distribution and Pollution Characteristics of Nutrients and Heavy Metals in Sediments of Hedi Reservoir	ZHANG Hua-jun, CHEN Xiu-kang, HAN Bo-ping, <i>et al.</i> (1167)
Heavy Metals Distribution and Risk Assessment of Sediments in the Riverine Wetland of Sanmenxia Reservoir	AO Liang, SHAN Bao-qing, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (1176)
Regional Distribution and Ecological Risk Evaluation of Heavy Metals in Surface Sediments from Coastal Wetlands of the Yellow River Delta	LIU Zhi-jie, LI Pei-ying, ZHANG Xiao-long, <i>et al.</i> (1182)
Calculation of Environmental Dredging Depth of Heavy Metal Polluted Sediments in Zhushan Bay of Taihu Lake	JIANG Xia, WANG Wen-wen, WANG Shu-hang, <i>et al.</i> (1189)
Characteristics of PAHs Pollution in Sediments from Leizhou Coastal Marine Area, Liusha Bay and Shenzhen Bay	ZHAO Li-rong, SUN Sheng-li, KE Sheng (1198)
Distribution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Black Carbon in Road Dusts from Typical Cities of China and India	PAN Su-hong, ZHANG Gan, SUN Ya-li, <i>et al.</i> (1204)
Waterborne Iron Migration by Groundwater Irrigation Pumping in a Typical Irrigation District of Sanjiang Plain	ZOU Yuan-chun, YU Xiao-fei, HUO Li-li, <i>et al.</i> (1209)
Research on Controlling Iron Release of Desalted Water Transmitted in Existing Water Distribution System	TIAN Yi-mei, LIU Yang, ZHAO Peng, <i>et al.</i> (1216)
Exploration of Newly-Formed Ferric as the Coagulant	YANG Xue, ZHANG Jing-cheng, GUAN Xiao-hong (1221)
Degradation of Medroxyprogesterone in Drinking Water by Ozone Oxidation	YUE Chan-yuan, MIAO Heng-feng, REN Hong-yan, <i>et al.</i> (1227)
Synthesis of Core/Shell Structured Magnetic Carbon Nanoparticles and Its Adsorption Ability to Chlortetracycline in Aquatic Environment	WANG Yi-xuan, ZHANG Di, NIU Hong-yun, <i>et al.</i> (1234)
Removal of Nickel from Aqueous Solutions Using Complexation-Ultrafiltration Process	QIN Shu, SHAO Jia-hui, HE Yi-liang, <i>et al.</i> (1241)
Degradation of Organic Pollutants by Photo-Fenton-Like System with Hematite	ZHANG Yu, GU Yan, YANG Hui, <i>et al.</i> (1247)
Study on the Degradation of Atrazine in Photo-Fenton-Like System Under Visible Light Irradiation Promoted by N-doped Ta ₂ O ₅	ZHAO Lu, DENG Yi-rong, DU Ying-xun, <i>et al.</i> (1252)
Degradation of Prometon by O ₃ /H ₂ O ₂	LI Shao-feng, SUN Chu (1260)
Photoelectrocatalytic Degradation Kinetics of Malachite Green by Pr-N Co-doped TiO ₂ Photocatalyst	SHA Shuang, ZHOU Shao-qi, ZHANG Xiao-na, <i>et al.</i> (1267)
Experimental Study on Acid Mine Drainage Treatment Using Mine Tailings of Xiangsi Valley, Tongling, China	ZHANG Nan, CHEN Tian-hu, ZHOU Yue-fei, <i>et al.</i> (1272)
Effect of Polymeric Aluminum-iron on EPS and Bio-flocculation in A ² /O System	WEN Qin-xue, LIU Ai-cui, CHEN Zhi-qiang, <i>et al.</i> (1278)
Effect of Temperature on Pollutant Removal and Nitrous Oxide Emission of Wastewater Nitrogen Removal System	ZHANG Ting-ting, ZHANG Jian, YANG Fang, <i>et al.</i> (1283)
Effect of Temperature on Stability of Nitrogen Removal in the ANAMMOX Reactor	LI Xiang, HUANG Yong, ZHENG Yu-hui, <i>et al.</i> (1288)
Phosphorus Removal Characteristics by Aerobic Granules in Normal Molasses Wastewater After Anaerobic Treatment	WANG Shuo, YU Shui-li, SHI Wen-xin, <i>et al.</i> (1293)
Physicochemical Characteristics of Granules with Different Size in a Granular Sludge System for Phosphorus Removal	LI Zhi-hua, ZHANG Yu-rong, YANG Fan, <i>et al.</i> (1299)
Denitrifying Bacteria of Constructed Wetland System Based on Nitrous Oxide Reductase Gene (<i>nosZ</i>)	WANG Xiao-jun, CHEN Shao-hua, ZHANG Zhao-ji, <i>et al.</i> (1306)
Improving Degradation Ability of an Aerobic Denitrifier by Ultraviolet Mutagenesis	YU Jia-jia, CHEN Jun, YANG Xuan, <i>et al.</i> (1313)
Characteristics of the Extracellular Polymeric Substances of a Heterotrophic Nitrifying Bacterium Strain	CHEN Zhe, ZHANG Bin, SEN Zhi-qiang, <i>et al.</i> (1318)
Study on Toxic Effects of Ammonia on Embryonic and Yolk-sac Stage Larvae of Rare minnow	WANG Zhi-jian, LU Zeng-hui, SHI Ping (1323)
Effects of Continuous Cropping of Vegetables on Ammonia Oxidizers Community Structure	MENG De-long, YANG Yang, WU Yan-zheng, <i>et al.</i> (1331)
Impact of Biochar Amendment on the Sorption and Dissipation of Chlorantraniliprole in Soils	WANG Ting-ting, YU Xiang-yang, SHEN Yan, <i>et al.</i> (1339)
Quantifying Rice (<i>Oryza sativa</i> L.) Photo-assimilated Carbon Input into Soil Organic Carbon Pools Following Continuous ¹⁴ C Labeling	NIE San-an, ZHOU Ping, GE Ti-da, <i>et al.</i> (1346)
Compositions and Diagnostic Ratios of Heavily Degraded Crude Oil Residues in Contaminated Soil in Oilfields	WANG Jian, ZHANG Xu, LI Guang-he (1352)
Study on Equilibrium Adsorption of Volatile Chlorinated Hydrocarbons on Humid Soils	MENG Fan-yong, LIU Rui, Kobayashi Takeshi, <i>et al.</i> (1361)
Toxicity and Accumulation of Copper and Nickel in Wheat Plants Cropped on Alkaline and Acidic Field Soils	HUANG Jin-sun, WEI Dong-pu, GUO Xue-yan, <i>et al.</i> (1369)
Change Traits of Phosphorous Consumption Structure in China and Their Effects on Environmental Phosphorous Loads	MA Dun-chao, HU Shan-ying, CHEN Ding-jiang, <i>et al.</i> (1376)
Research Based on 3MRA Model About the Risk Assessment Methods and Applications of the Landfill Waste	YUAN Ying, XI Bei-dou, HE Xiao-song, <i>et al.</i> (1383)
Impacts of Initial Moisture Content of MSW Waste on Leachate Generation and Modified Formula for Predicting Leachate Generation	LAN Ji-wu, ZHAN Liang-tong, LI Yu-chao, <i>et al.</i> (1389)
Transformation of Dibutyl Phthalate in Bioreactor Landfill	FANG Cheng-ran, LONG Yu-yang, SHEN Dong-sheng (1397)
Kriging Analysis of Vegetation Index Depression in Peak Cluster Karst Area	YANG Qi-yong, JIANG Zhong-cheng, MA Zu-lu, <i>et al.</i> (1404)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2012年4月15日 33卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 4 Apr. 15, 2012

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人