

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第12期

Vol.38 No.12

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次(卷终)

|                                                                                   |                                                     |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| 京津冀区域 PM <sub>2.5</sub> 污染相互输送特征 .....                                            | 王燕丽, 薛文博, 雷宇, 王金南, 武卫玲 (4897)                       |
| 顾及尺度效应的多源遥感数据“源”“汇”景观的大气霾效应 .....                                                 | 许凯, 余添添, 孙姣姣, 袁兆祥, 秦昆 (4905)                        |
| 基于多源数据的 PM <sub>2.5</sub> 浓度时空分布预测与制图 .....                                       | 肖璐, 郎艺超, 夏浪, 楼昭涵, 孙楠, 黄李童, George Christakos (4913) |
| 华东区域 PM <sub>2.5</sub> 变化背景下浙江省人口经济暴露水平评估 .....                                   | 郁珍艳, 高大伟, 李正泉, 杨续超, 王阔, 马浩, 徐宏辉 (4924)              |
| 南京北郊不同大气污染程度下气溶胶化学组分特征 .....                                                      | 张程, 于兴娜, 安俊琳, 朱彬, 林梦凡 (4932)                        |
| 菏泽市 PM <sub>2.5</sub> 碳组分季节变化特征 .....                                             | 刘泽珺, 吴建会, 张裕芬, 梁丹妮, 马威, 刘保双, 冯银厂, 张勤勤 (4943)        |
| 辽宁典型城市道路扬尘 PM <sub>10</sub> 、中水溶性无机离子组分特征及来源解析 .....                              | 张伟, 姬亚芹, 张军, 张蕾, 王伟, 王士宝 (4951)                     |
| 天津冬季一次重污染过程颗粒物中水溶性离子粒径分布特征 .....                                                  | 姚青, 刘子锐, 韩素芹, 蔡子颖, 刘敬乐, 黄小娟, 刘景云, 王跃思 (4958)        |
| 高原城市昆明公路隧道大气中 PM <sub>2.5</sub> 理化特征分析 .....                                      | 王成辉, 闫琨, 韩新宇, 施择, 毕丽玫, 向峰, 宁平, 史建武 (4968)           |
| 2015 年中国近地面臭氧浓度特征分析 .....                                                         | 段晓瞳, 曹念文, 王潇, 张玉欣, 梁静舒, 杨思鹏, 宋秀瑜 (4976)             |
| 不同 CDPF 贵金属负载量对柴油公交车 VOCs 组分排放影响 .....                                            | 楼狄明, 张子骏, 刘继凯, 谭丕强, 胡志远 (4983)                      |
| ENSO 事件对上海降水中氢氧同位素变化的影响 .....                                                     | 董小芳, 杨华玮, 张杰, 朱志鹏, 杨言, 郑祥民, 周立旻 (4991)              |
| 我国南方两个典型森林生态系统的硫、氮和汞沉降量 .....                                                     | 程正霖, 罗遥, 张婷, 段雷 (5004)                              |
| 新安江水库二氧化碳排放的时空变化特征 .....                                                          | 杨乐, 李贺鹏, 孙滨峰, 岳春雷 (5012)                            |
| 三峡库区表层沉积物营养盐时空变化及评价 .....                                                         | 卓海华, 邱光胜, 翟婉盈, 刘云兵, 兰静 (5020)                       |
| 三门峡水库水体中不同形态汞的分布特征 .....                                                          | 程柳, 麻冰涓, 周伟立, 王力, 耿音, 刘清伟, 毛宇翔 (5032)               |
| 太子河流域中游地区河流硝酸盐来源及迁移转化过程 .....                                                     | 李艳利, 孙伟, 杨梓睿 (5039)                                 |
| 典型入湖河流水体氮素变化特征及其对降雨的响应: 以太湖乌溪港为例 .....                                            | 连慧妹, 刘宏斌, 李旭东, 宋挺, 刘申, 雷秋良, 任天志, 武淑霞, 李影 (5047)     |
| 缙云山常绿阔叶林湿沉降过程中不同空间层次水质变化特征 .....                                                  | 马明, 孙涛, 李定凯, 王定勇 (5056)                             |
| 基于 MIKE11 模型提高污染河流水质改善效果的方法 .....                                                 | 熊鸿斌, 陈雪, 张斯思 (5063)                                 |
| 北京市地下水典型抗生素分布特征与潜在风险 .....                                                        | 陈卫平, 彭程伟, 杨阳, 吴玉梅 (5074)                            |
| 深圳茅洲河下游柱状沉积物中碳氮同位素特征 .....                                                        | 凌郡鸿, 张依章, 王民浩, 周北海, 陶明, 陈惠明, 闫振广 (5081)             |
| 供水管网铁释放的影响因素相对重要性分析 .....                                                         | 刘莹, 于影, 石宝友, 刘书明, 吴雪 (5090)                         |
| 低温高铁锰氨氮地下水生物同池净化 .....                                                            | 李冬, 曹瑞华, 杨航, 王刘煜, 张杰, 曾辉平 (5097)                    |
| 臭氧预氧化强化混凝对二级出水中 DON 作用机制探讨 .....                                                  | 刘冰, 郑煜铭, 王大祥, 李清飞, 赵承美, 余国忠, 古励 (5106)              |
| 碱活化过一硫酸盐降解水中环丙沙星 .....                                                            | 葛勇建, 蔡显威, 林翰, 徐梦苑, 沈一挺, 周丹, 钱梦洁, 邓靖 (5116)          |
| MIL-88A@MIP 催化活化过硫酸盐靶向降解邻苯二甲酸二丁酯 .....                                            | 王九妹, 关泽宇, 万金泉, 王艳, 马邕文, 闫志成, 张桂华 (5124)             |
| 常温下加装脱硫装置的 MCBMBR 处理高硫酸盐有机废水试验 .....                                              | 徐婷, 金艳青, 李勇 (5132)                                  |
| 载镁天然沸石复合材料对污水中氮磷的同步回收 .....                                                       | 成雪君, 王学江, 王浩, 张志昊, 赵建夫 (5139)                       |
| 不同运行模式下改良型 CAST 工艺处理生活污水的除磷性能 .....                                               | 马娟, 王谨, 俞小军, 周猛, 孙洪伟, 王磊 (5146)                     |
| ABR-MBR 工艺处理生活污水实现短程硝化 .....                                                      | 吕亮, 赵诗惠, 韦佳敏, 张敏, 尤雯, 吴鹏, 沈耀良 (5154)                |
| 海洋厌氧氨氧化菌处理含海水污水的基质抑制及其动力学特性 .....                                                 | 周同, 于德爽, 李津, 吴国栋, 王晓静 (5162)                        |
| 游离氨 (FA) 对氨氧化过程氨逃逸影响试验 .....                                                      | 孙洪伟, 于雪, 尤永军, 彭永臻, 王淑莹 (5169)                       |
| 西安市典型景观水体水质及反硝化细菌种群结构 .....                                                       | 康鹏亮, 黄廷林, 张海涵, 陈胜男, 商潘路, 冯稷, 贾宽宇 (5174)             |
| 厌氧氨氧化启动过程及微生物群落结构特征 .....                                                         | 汪瑶琪, 张敏, 姜滢, 徐乐中, 陈重军, 沈耀良 (5184)                   |
| SBAF 单级自养脱氮快速启动、稳定运行及微生物群落演化 .....                                                | 岳秀, 刘竹寒, 于广平, 吉世明, 唐嘉丽 (5192)                       |
| 活性污泥中硝化螺菌 (Nitrospira) 的富集及其动力学参数 .....                                           | 姚倩, 彭党聪, 赵俏迪, 王博 (5201)                             |
| pH 值对零价铁自养反硝化过程的影响 .....                                                          | 张宁博, 李祥, 黄勇 (5208)                                  |
| 接种单一/混合污泥对厌氧氨氧化反应器快速启动的影响 .....                                                   | 张泽文, 李冬, 张杰, 郭跃洲, 李帅 (5215)                         |
| 活性污泥法和生物膜法 SBR 工艺亚硝化启动和稳定运行性能对比 .....                                             | 孙艺齐, 卞伟, 王盟, 赵青, 王文啸, 梁东博, 李军 (5222)                |
| 长期暴露下纳米 TiO <sub>2</sub> 对厌氧颗粒污泥体系稳定性的影响 .....                                    | 李慧婷, 崔福义 (5229)                                     |
| 长三角典型城郊不同土地利用土壤抗生素组成及分布特征 .....                                                   | 赵方凯, 陈利顶, 杨磊, 方力, 孙龙, 李守娟 (5237)                    |
| 不同有机肥中磷在土壤剖面中累积迁移特征与有效性差异 .....                                                   | 张田, 许浩, 茹淑华, 苏德纯 (5247)                             |
| 有机磷酸酯在三峡库区土壤中污染特征 .....                                                           | 何明靖, 杨婷, 杨志豪, 魏世强 (5256)                            |
| 上海某生活垃圾焚烧厂周边土壤重金属污染特征、来源分析及潜在生态风险评价 .....                                         | 郭彦海, 孙许超, 张士兵, 余广杰, 唐正, 刘振涛, 薛昱, 高品 (5262)          |
| 大庆市不同环境介质中多环芳烃污染特征对比及来源解析 .....                                                   | 宋宁宁, 冯嘉申, 于洋, 李迎霞 (5272)                            |
| 工业区户外儿童游乐场地表灰尘重金属污染的磁学响应 .....                                                    | 杨孟, 李慧明, 李凤英, 王金花, 刁一伟, 钱新, 杨兆平, 王成 (5282)          |
| 上海市郊工业区附近蔬菜中重金属分布及其健康风险 .....                                                     | 周雅, 毕春娟, 周泉潇, 张焕焕, 陈振楼, 包新一 (5292)                  |
| 基施硅肥对土壤微生物有效性及水稻镉累积效应的影响 .....                                                    | 高子翔, 周航, 杨文弢, 辜娇峰, 陈立伟, 杜文琪, 徐珺, 廖柏寒 (5299)         |
| 水稻对气态单质汞的吸收与挥发 .....                                                              | 尚帅, 田珮, 蒋煜, 武婧轩, 姜珊, 邓泓 (5308)                      |
| 麦田 O <sub>3</sub> 浓度的长期变化及其对冬小麦干物质和产量损失的估算 .....                                  | 赵辉, 郑有飞, 李硕, 徐静馨, 曹嘉晨, 魏莉, 关清 (5315)                |
| 缓控释肥侧深施对稻田氨挥发排放的控制效果 .....                                                        | 侯朋福, 薛利祥, 俞映惊, 薛利红, 范立慧, 杨林章 (5326)                 |
| 生物炭和有机肥对华北农田盐碱土 N <sub>2</sub> O 排放的影响 .....                                      | 石玉龙, 刘杏认, 高佩玲, 张晴雯, 张爱平, 杨正礼 (5333)                 |
| 成都平原不同类型沟渠 CO <sub>2</sub> 、CH <sub>4</sub> 和 N <sub>2</sub> O 排放通量特征及其影响因素 ..... | 冯香荣, 邓欧平, 邓良基, 吴铭, 姚昆, 杨泽鹏 (5344)                   |
| 河流 CO <sub>2</sub> 与 CH <sub>4</sub> 排放研究进展 .....                                 | 王晓峰, 袁兴中, 陈槐, 何奕忻, 罗珍, 刘恋, 何宗茂 (5352)               |
| 《环境科学》第 38 卷 (2017 年) 总目录 .....                                                   | (5367)                                              |
| 《环境科学》征稿简则 (4950) 《环境科学》征订启事 (5031) 信息 (4923, 5105, 5161)                         |                                                     |

# ENSO 事件对上海降水中氢氧同位素变化的影响

董小芳, 杨华玮, 张峦, 朱志鹏, 杨言, 郑祥民, 周立旻\*

(华东师范大学地理科学学院, 地理信息科学教育部重点实验室, 上海 200241)

**摘要:** 根据 2012 年 1 月至 2017 年 2 月上海 206 个降水样品实测数据, 结合全球大气降水同位素网络 (GNIP) 提供的南京、武汉、福州、香港 1961 ~ 2012 年大气降水同位素数据分析不同强弱程度的 ENSO 事件对降水中同位素组成影响的差异性。研究时段内上海降水中  $\delta D$  与  $\delta^{18}O$  夏秋为低值, 冬春为高值。El Niño 事件期间大气降水线的斜率与截距均大于非 El Niño 事件期间, La Niña 事件期间反温度效应、降水量效应、水汽压效应较非 La Niña 事件期间显著。不同强弱程度的 El Niño 和 La Niña 事件影响下的上海降水中  $\delta^{18}O$ 、 $d$  值与海洋尼诺指数 (ONI)、海表温度距平值 (SSTA)、ONI 极值、累积值  $\sum_{ONI}$  这 4 个指数具有明显的负相关关系, 并且降水中  $\delta^{18}O$  与 ONI、SSTA 两个指数相关性大小受 ENSO 事件的影响较大。

**关键词:** 上海;  $\delta^{18}O$ ;  $\delta D$ ; ENSO 事件强弱; 氘盈余

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)12-4991-13 DOI: 10.13227/j.hjxx.201705190

## Influence of ENSO Events on the Hydrogen ( $\delta^2H$ ) and Oxygen ( $\delta^{18}O$ ) Isotopic Values of Precipitation in Shanghai

DONG Xiao-fang, YANG Hua-wei, ZHANG Luan, ZHU Zhi-peng, YANG Yan, ZHENG Xiang-min, ZHOU Li-min\*

(Key Laboratory of Geographic Information Science, Ministry of Education, School of Geographical Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

**Abstract:** An analysis of the effect of ENSO events with different strengths on the isotopic composition of precipitation is conducted based on test data for 206 precipitation samples collected from January 2012 to February 2017 in Shanghai coupled with the archives for Nanjing, Wuhan, Fuzhou, and Hong Kong from 1961 to 2012 from the Global Network of Isotopes in Precipitation (GNIP) database. During the research periods, the  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  values in precipitation are lower in summer and autumn but higher in winter and spring. The slope and intercept of the atmospheric precipitation lines during El Niño events are larger than during other times, while anti-temperature, precipitation amount, and vapor pressure effects are more significant than during La Niña events. The  $\delta^{18}O$  and deuterium excess values (value of  $d$ ) of rainfall in Shanghai during El Niño and La Niña events of varied strengths have an obvious negative correlation with the oceanic Niño index (ONI), sea surface temperature anomaly (SSTA), and the extreme and cumulative values of ONI. Moreover, ENSO events are closely intertwined with the correlation between  $\delta^{18}O$  isotopic value in precipitation, ONI, and SSTA.

**Key words:** Shanghai;  $\delta^{18}O$ ;  $\delta D$ ; ENSO event of varied strengths; deuterium excess

ENSO 事件是全球尺度的大气候事件, 主要包括南方涛动、La Niña 和 El Niño 这 3 个事件。ENSO 事件通过海-汽相互作用影响全球气候, 从而导致不同地区出现异常天气与气候事件。上世纪 70 年代初学者开始了对 El Niño 对全球的影响的系统研究, 而对 La Niña 的研究则始于 80 年代初<sup>[1]</sup>, ENSO 事件对中国气候影响的研究很多<sup>[2~4]</sup>, 近十年来, 学者们在 ENSO 事件与东亚冬夏季风的联系方面做了许多工作<sup>[5~7]</sup>, 发现该事件是影响我国东部年际、年代际降水的重要因子之一。大气降水中的氢氧同位素研究始于 20 世纪 50 年代<sup>[8]</sup>, 大气降水作为水循环的一个重要环节, 水汽来源是水文科学关注的重点对象, 目前利用同位素示踪法追踪降水水汽来源是国际上研究的热点。降水中的  $^{18}O$  与氘 (D) 两种稳定同位素对环境变化有敏感响应, 丰度易受到温

度、降水量、海陆位置等因素的影响<sup>[9, 10]</sup>, 研究表明, 珠江三角洲降水中  $\delta^{18}O$  对 ENSO 事件的强信号具有显著响应<sup>[11]</sup>, 青藏高原冰芯中的  $\delta^{18}O$  与 ENSO 事件具有显著的相关关系<sup>[12, 13]</sup>, 重庆地区大气降水中氢氧同位素特征与大气环流关系密切<sup>[14]</sup>。上海地区位于中国东部季风区, 对 2014 ~ 2015 年上海降水中同位素组成研究表明, El Niño 事件影响下的季风气候导致上海降水中同位素组成与分布具有特殊的特征<sup>[15]</sup>。但是不同强弱程度的 ENSO 事件对降水中同位素组成影响是否具有差异性仍然需要进一步研究。本文结合上海地区 5 a 实测数据及南京、

收稿日期: 2017-05-19; 修订日期: 2017-06-16

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41371032, 41571040)

作者简介: 董小芳 (1991 ~), 女, 硕士, 主要研究方向为大气降水中的同位素组成, E-mail: 15802197306@163.com

\* 通信作者, E-mail: lmzhou@geo.ecnu.edu.cn



武汉、福州、香港 1961 ~ 2012 年数据, 分析不同强弱程度的 ENSO 事件对降水中同位素组成的影响差异, 探索 ENSO 事件与降水中氢氧同位素组成的紧密联系.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

实测数据采样地点位于上海市闵行区华东师范大学资源与环境科学学院实验楼楼顶, 该处距离地面 25 m, 能有效避免近地面降尘对水样的影响, 采样时间为 2012 年 1 月至 2017 年 2 月. 由于 ENSO 事件是较长时间尺度的, 以 2 ~ 7 a 为周期, 为了进行更长时间尺度的对比分析, 通过全球大气降水同位素网络 (GNIP) 获取与上海具有相似气候背景的南京、武汉、福州、香港 4 站点 1961 ~ 2012 年大气降水同位素数据, 利用 4 站点同类型 ENSO 事件多年加权平均值作为上海降水中氢氧同位素的参考值. 4 个站点均匀分布在东部季风区 (图 1), 冬季夏季气候背景相似, 其平均值作为参考值较为合理.

1.2 资料来源与研究方法

1.2.1 资料来源

由于中国进入到国际原子能机构 (IAEA) 和世界气象组织 (WMO) 全球监测网的站点较少, 并且

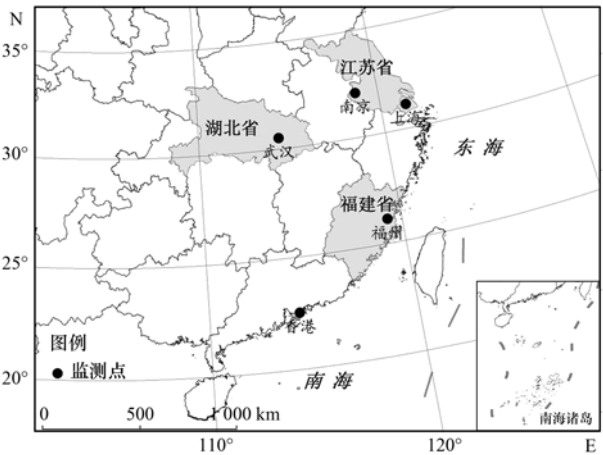


图 1 研究区位置示意

Fig. 1 Map of research area

监测时间较短, 因此, 可供选择的站点较少. 2012 年 1 月至 2017 年 2 月 S2 (上海) 降水中  $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta\text{D}$  为实测数据, S1 (南京)、S3 (武汉)、S4 (福州)、S5 (香港) 4 个站点降水中  $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta\text{D}$  数据通过国际原子能机构的 GNIP 网站 (<http://www.iaea.org/water>) 下载 (表 1). 水汽通量和水汽通量散度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  $1.5^\circ \times 1.5^\circ$  网格点, 该数据资料可通过美国 NOAA 气候预测中心 ([www.noaa.gov](http://www.noaa.gov)) 获得.

表 1 数据构成

Table 1 Composition of experimental data and archive data

| 站点      | 经度       | 纬度      | 取样时间                                                    | 数据来源 |
|---------|----------|---------|---------------------------------------------------------|------|
| S1 (南京) | 118.78°E | 32.07°N | 1987-06 ~ 1992-12                                       | GNIP |
| S2 (上海) | 121.38°E | 31.12°N | 2012-01 ~ 2017-02                                       | 实测   |
| S3 (武汉) | 114.31°E | 30.51°N | 1986-01 ~ 1997-06; 1992-06 ~ 1992-10; 1996-01 ~ 1998-05 | GNIP |
| S4 (福州) | 119.28°E | 26.08°N | 1985-10 ~ 1987-05; 1988-01 ~ 1992-12                    | GNIP |
| S5 (香港) | 114.33°E | 22.50°N | 1961-01 ~ 1965-08; 1973-05 ~ 2014-12                    | GNIP |

1.2.2 样品收集与分析

为了避免不同实验方法对测试结果产生影响, 实验过程均参考了 GNIP 的样品收集与测试方法, 考虑到仪器分辨率对实验结果的影响, 对 D/O 同位素测试结果参考氢氧同位素的数值修约规则进行处理. 降水样品经  $0.45\ \mu\text{m}$  滤纸过滤后及时装入 50 mL 白色聚乙烯瓶冷藏保存. 自 2012 年 1 月至 2017 年 2 月共收集样品 206 个, 在华东师范大学地理信息科学教育部重点实验室利用 Los Gatos Research 公司生产的 (T-LWIA)-Model 912-0050 激光光谱仪进行  $\delta^{18}\text{O}$  与  $\delta\text{D}$  测定,  $\delta\text{D}$  的测量精度为  $0.2\text{‰} \leq 0.5\text{‰}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$  测量精度为  $0.02\text{‰} \leq 0.1\text{‰}$ , 两者均满足测量精度要求. 每个平行样品测量 6 次, 去除前 2 针以减少记忆效应对结果的影响. 测量所

得结果采用相对于维也纳标准平均海洋水 (VSMOW) 的千分差 ( $\delta$ ) 表示:

$$\delta^{18}\text{O} (\text{or } \delta\text{D}) = \left[ \left( R_{\text{sample}} / R_{\text{v-smow}} \right) - 1 \right] \times 1000\text{‰}$$
式中,  $R_{\text{sample}}$  和  $R_{\text{v-smow}}$  分别代表水样和 V-SMOW 中氘或氧稳定同位素比率  $R(^{18}\text{O}/^{16}\text{O}, \text{D}/\text{H})$ , 实验标样为美国 LGR 公司生产的标样 LGR3C、LGR4C、LGR5C,  $\delta\text{D}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$  已知参考值分别为  $-97.30$ 、 $-13.39$ ;  $-51.60$ 、 $-7.94$ ;  $-9.20$ 、 $-2.69$ .

2 结果与讨论

2.1 降水中氢氧同位素的变化特征

2.1.1 降水中  $\delta\text{D}$  与  $\delta^{18}\text{O}$  变化

对上海和其他 4 个站点降水中氢氧同位素数据按照正常年、厄尔尼诺年、拉尼娜年分别计算多年



月平均, 得到上海和 4 个站点 1~12 月降水中  $\delta D$  与  $\delta^{18}O$  值. 由图 2 可知, 上海降水中  $\delta D$  与  $\delta^{18}O$  多年月平均值与 4 个站点多年月平均值在正常年与厄尔尼诺年在不同月份变化趋势基本相同. 全球大气降水中  $\delta^{18}O$  的变化范围为  $-54\text{‰} \sim 31\text{‰}$ , 郑淑慧等<sup>[16]</sup> 通过对北京等 8 个站点的研究得出中国大气降水中  $\delta^{18}O$  的变化范围为  $-24\text{‰} \sim 2\text{‰}$ , 结合表 2 可知, 上海与 4 个站点的多年月平均值均在其范围内, 并且 El Niño 较非 El Niño 期间  $\delta D$  与  $\delta^{18}O$  值偏正. 结合图 2(a) 可知, 在 El Niño 与非 El Niño 期间, 降水中  $\delta D$  与  $\delta^{18}O$  变化具有明显的季节变化特征, 即夏秋为低值, 冬春为高值. 上海多年月平均最低值出现在正常年份的 7 月, 为  $-11.5\text{‰}$  (标准偏差为 3.01); 最高值出现在厄尔尼诺年 3 月, 为  $-2\text{‰}$  (标准偏差

为 1.05). 图 2(b) 表明降水中  $\delta^{18}O$  对 El Niño 与非 El Niño 事件具有不同响应, La Niña 事件降水中  $\delta^{18}O$  较 El Niño 事件偏负, 这说明降水中的氢氧同位素值反映了 ENSO 事件对气候造成的影响. 夏秋降水中同位素为低值, 冬春为高值, 季节变化明显, 这可能是由于温度会直接影响降水过程中氢氧同位素分馏程度, 春季干暖的天气有利于雨滴的同位素蒸发富集作用, 夏半年研究区域深受东亚季风影响, 水汽向大陆迁移的过程中, 重同位素优先凝结产生降水, 水汽越深入大陆内部, 剩余水汽产生的降水  $\delta^{18}O$  与  $\delta D$  越偏负. 故春季大气降水中  $\delta^{18}O$  与  $\delta D$  较夏季降水中偏高一些. 冬季降水中的  $\delta^{18}O$  与  $\delta D$  较高, 主要是由于冬季有部分局地蒸发水汽导致降水中的  $\delta^{18}O$ 、 $\delta D$  较高.

表 2 各地区不同 ENSO 事件背景下的降水同位素特征/‰

Table 2 Characteristics of isotopes in the precipitation in various areas under different types of ENSO events/‰

| 站点          |     | 拉尼娜事件期间           |                | 正常年份期间            |                 | 厄尔尼诺事件期间         |               |
|-------------|-----|-------------------|----------------|-------------------|-----------------|------------------|---------------|
|             |     | $\delta^{18}O$    | $\delta D$     | $\delta^{18}O$    | $\delta D$      | $\delta^{18}O$   | $\delta D$    |
| S2          | 范围  | $-10.7 \sim -3.6$ | $-72 \sim -13$ | $-11.5 \sim -1.5$ | $-79 \sim -5.0$ | $-9.0 \sim -1.8$ | $-54 \sim -3$ |
|             | 平均值 | -7.0              | -43            | -6.8              | -43             | -5.0             | -30           |
| S1、S3、S4、S5 | 范围  | $-15.1 \sim 2.6$  | $-110 \sim 21$ | $-14.2 \sim 1.2$  | $-105 \sim 18$  | $-12.5 \sim 0.8$ | $-87 \sim 17$ |
|             | 平均值 | -5.8              | -35            | -5.2              | -31             | -5.1             | -30           |

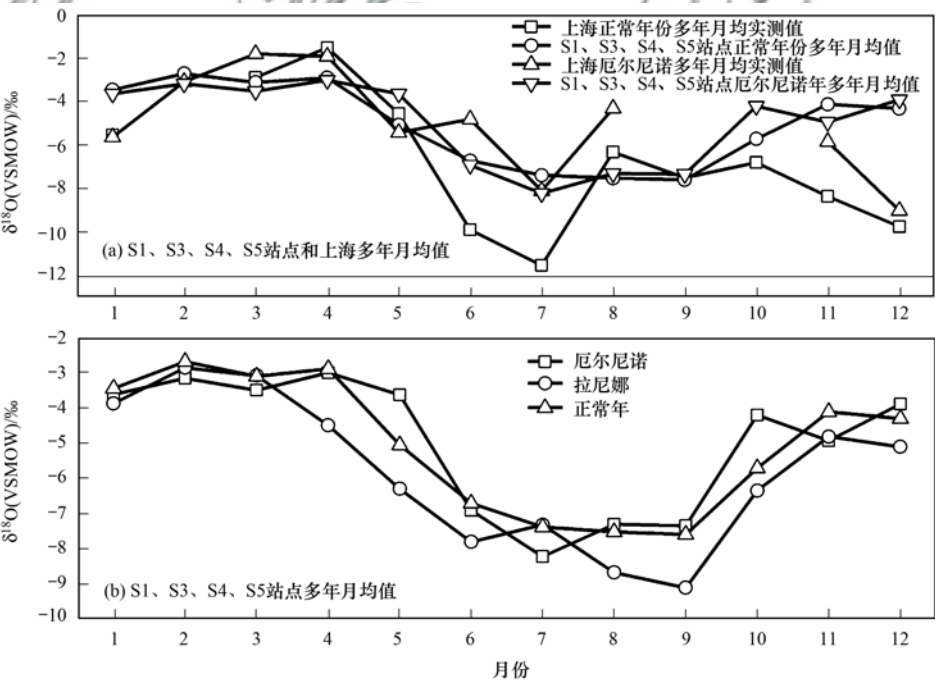


图 2 S1、S3、S4、S5 站点和 S2 站点降水中多年月均  $\delta^{18}O$  分布

Fig. 2 Distribution of  $\delta^{18}O$  in precipitation for S2 and S4 stations

2.1.2 大气降水线的变化特征

降水过程中同位素的平衡分馏与动力分馏会导致降水中的氢氧同位素  $\delta D$  与  $\delta^{18}O$  具有线性关系,

这种关系被定义为大气降水线<sup>[17]</sup>, 大气降水线的斜率反映了同位素 D 与  $^{18}O$  分馏速率的差异, 截距则反映氘对平衡状态的偏离程度<sup>[18]</sup>. Craig<sup>[19]</sup> 在

1961 年提出了全球大气降水线 (global atmospheric precipitation line):  $\delta D = 8 \delta^{18}O + 10$ , 又称 Craig 方程, 揭示了全球尺度下大气降水中  $\delta D$  与  $\delta^{18}O$  的关系. 我国学者郑淑蕙等提出了我国的降水方程:  $\delta D = 7.9 \delta^{18}O + 8.2$ . 各地区受不同气候条件、海陆位置的影响也产生了反映各地降水规律的局地降水线 (local atmospheric precipitation line).

对 4 个站点多年月平均值利用最小二乘法拟合得到  $\delta D \sim \delta^{18}O$  大气降水线方程如图 3(a), 从中可知, 拉尼娜年、正常年与厄尔尼诺年大气降水线斜率分别为 8.55、8.68、8.78, 截距分别为 14.26、13.95、14.34, 大气降水线均通过 0.01 的显著性检验. 总体而言, 与全球大气降水线较接近. 从年份性质上来看, 不同的气候事件导致降水中  $\delta D$  与  $\delta^{18}O$  差异明显. 图 3(b) 为上海大气降水线, 由于 2012 年 1 月~2017 年 2 月期间无完整的 La Niña 事件, 故未绘制其大气降水线. 上海大气降水线与郑淑蕙

的全国大气降水线接近, El Niño 期间和正常年份期间斜率分别为 7.72、7.34; 截距分别为 8.72、7.20, 同样满足 El Niño 事件期间的斜率与截距在数值上大于非 El Niño 期间的规律, 与 4 个站点大气降水线分布的规律相同, 说明 4 个站点大气降水同位素的平均值体现了上海雨水同位素组成的普遍特征. 但是对不同时间段的 El Niño 和 La Niña 期间的大气降水线的斜率和截距进行差异性  $T$  检验, 在 95% 的置信区间上,  $P$  值分别为 0.28、0.60, 两者  $P > 0.05$ , 在统计学上无显著性差异, 仅在数值上存在较小差别. El Niño 与非 El Niño 事件期间斜率和截距数值上的差异可能是受 ENSO 事件的影响, 降水时的温度和水汽来源均有较大差异, 从而导致大气降水线的斜率和截距存在数值上的差别. 整体上, El Niño 期间研究区降水较非 El Niño 年份多, El Niño 期间温暖湿润的气候背景与全球大气降水线的背景相似, 体现了较强的海洋性.

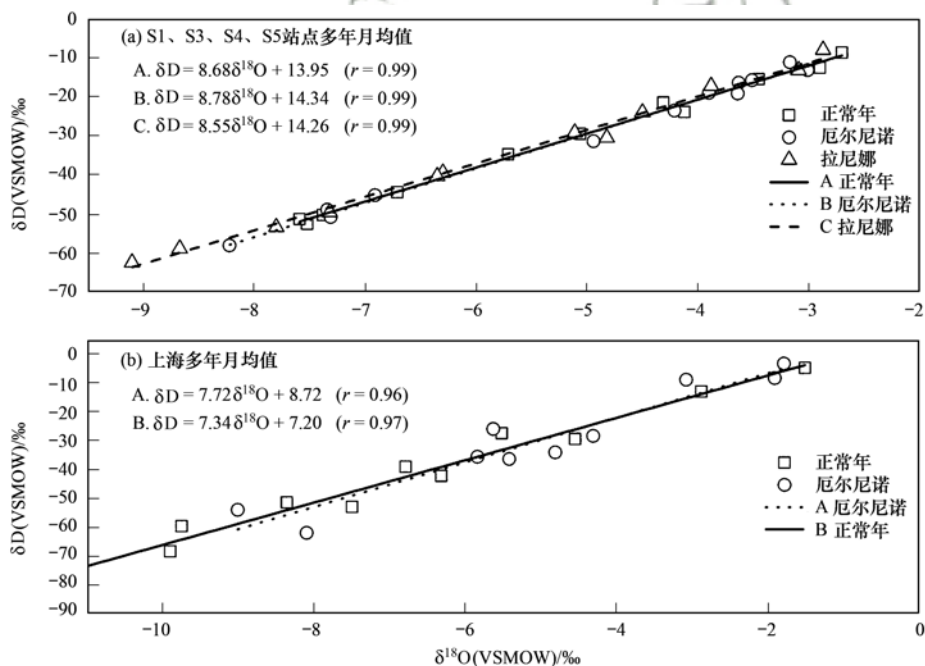


图 3 大气降水  $\delta D$  与  $\delta^{18}O$  相关散布

Fig. 3 Distribution of  $\delta^{18}O$  and  $\delta D$  in precipitation

### 2.1.3 影响降水中氢氧同位素组成的因素

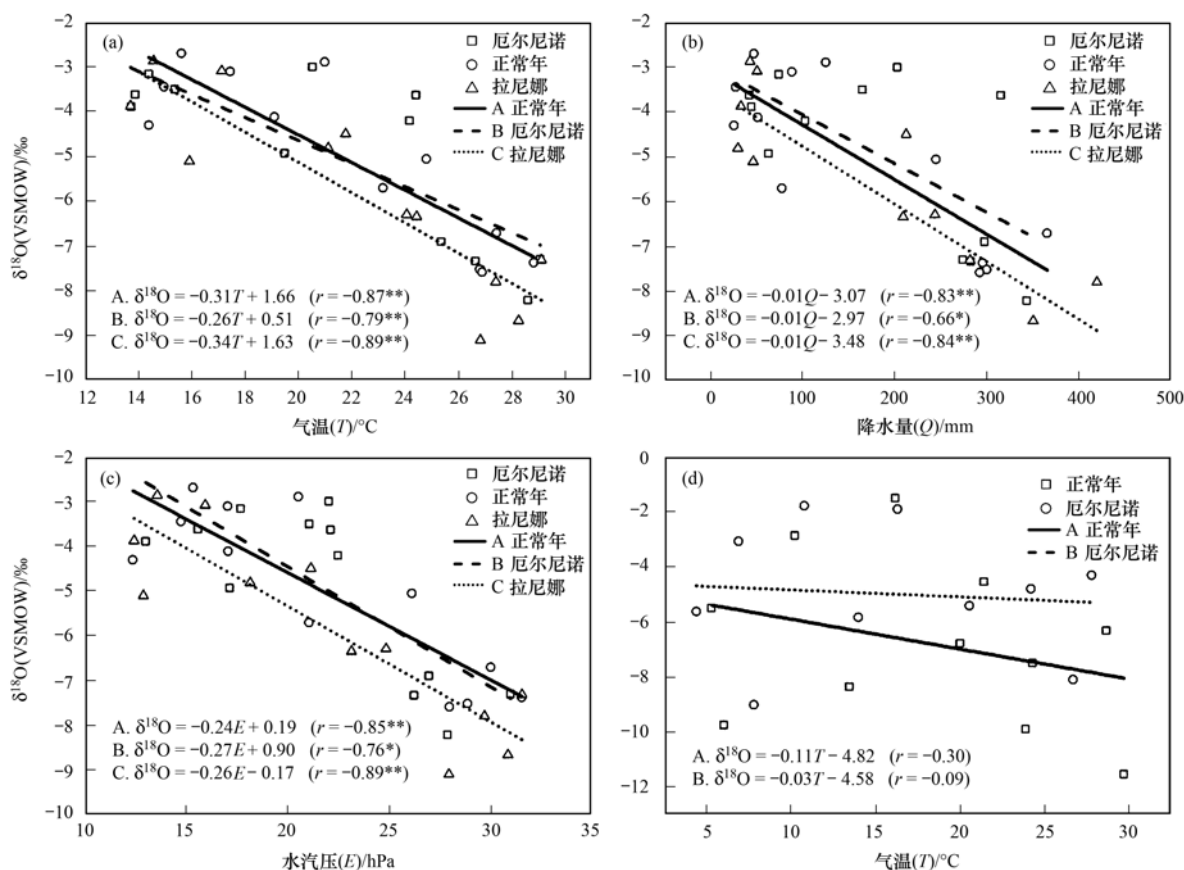
降水中的同位素组成具有较多的分布规律, 由于雨水稳定同位素组成主要受降水时雨滴凝结温度和水汽来源控制, 因此不同地理和气候背景条件下呈现不同的同位素分布规律. Dansgaard<sup>[20]</sup> 曾在 1964 年依据北极和大西洋的观测资料提出了温度效应、降水量效应、海拔效应等, 但在影响降水稳定同位素的诸多因素中, 温度被认为是对其影响最

大的<sup>[21]</sup>, 大气降水的  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  值与地面年平均气温往往呈线性关系, 温度升高,  $\delta$  值增大, 温度降低,  $\delta$  值减小, 称这种效应为“温度效应”, 温度效应主要是由于蒸发过程中的分馏作用随着温度的升高而减弱所造成的, 主要存在于中高纬内陆地区. 但是有时受其他因素 (云下二次蒸发、不同源地水汽来源混合) 的影响, 降水中同位素值和温度呈现反相关关系, 被称为“反温度效应”, 主要存在于沿

海地区.

利用 4 个站点多年月平均  $\delta^{18}\text{O}$  与气温、降水、水汽压这 3 个要素进行相关分析, 结果如图 4. 在  $\delta^{18}\text{O}$  与气温的相关分析中, 整体上 3 种类型年份均呈现出显著的反温度效应, La Niña 期间、正常年份、El Niño 期间相关系数分别为  $-0.89$ 、 $-0.87$ 、 $-0.79$ , La Niña 事件所在年份反温度效应最为显著. 同样的规律在  $\delta^{18}\text{O}$  与降水和水汽压的相关分析中依然有体现, 如图 4(b) 和图 4(c), La Niña 年、正常年份、El Niño 年  $\delta^{18}\text{O}$  与降水和水汽压相关系数分别为  $-0.84$ 、 $-0.83$ 、 $-0.66$ ;  $-0.89$ 、 $-0.85$ 、 $-0.76$ . La Niña 事件期间反温度效应、降水量效应、水汽压效应较非 La Niña 事件期间显著, 均通过了 0.01 或 0.05 的显著性检验. 图 4(d) 为上海实

测数据  $\delta^{18}\text{O}$  与气温相关分析的结果, 但不存在显著的反温度效应, 上海正常年份降水中  $\delta^{18}\text{O}$  与水汽压和降水的相关系数分别为  $-0.41$ 、 $-0.17$  (未通过显著性检验), El Niño 期间与水汽压和降水的相关系数分别为  $-0.19$ 、 $-0.09$  (未通过显著性检验), 这可能与样品收集时间尺度太短有关, 因为分析的数据均为多年月平均值, 而上海数据长度仅为 5 a, 且期间没有完整的 La Niña 事件, 故相关分析结果不太准确, 反温度效应不明显, 因此利用长时间序列来分析 ENSO 事件与对降水中氢氧同位素的影响更为准确. 以上结果表明, 温度效应、降水量效应、水汽压效应具有一定联系, 并且相互影响, 即其中一个效应较显著的事件类型, 其他效应可能也较显著.



(a) ~ (c) 为 S1、S3、S4、S5 站点多年月均值, (d) 上海多年月均值; \* 表示  $P < 0.05$ , \*\* 表示  $P < 0.01$

图 4 大气降水中  $\delta^{18}\text{O}$  与气象要素的相关散布

Fig. 4 Correlations between  $\delta^{18}\text{O}$  and meteorological factors

## 2.2 ENSO 事件对降水中氢氧同位素的影响

ENSO 是全球尺度的气候事件, 主要发生在赤道中、东太平洋上, 变化周期为  $2 \sim 7$  a<sup>[22]</sup>, 可造成全球性的影响, 通过异常的天气和气候事件影响降水中的同位素组成. ENSO 事件定量分析的常用指标是 Niño3.4 区 ( $5^{\circ}\text{N} \sim 5^{\circ}\text{S}$ ,  $170^{\circ}\text{W} \sim$

$120^{\circ}\text{W}$ ) 的海表温度异常 (SSTA)<sup>[23]</sup>、美国气象预测中心发布的南方涛动指数序列 (SOI)<sup>[24]</sup> 和美国海洋大气局 (NOAA) 提供的海洋尼诺指数 (ONI). ONI 是基于 NOAA 扩展重建的海面温度资料<sup>[25]</sup>, 是 Niño3.4 区海表温度距平 SSTA 的 3 个月滑动平均值, 该数据资料可通过美国 NOAA



气候预测中心 (www.noaa.gov) 获得. 本文主要通过 ONI 定义 ENSO 事件:  $ONI \geq +0.5^{\circ}\text{C}$  (或  $ONI \leq -0.5^{\circ}\text{C}$ ) 持续 5 个月以上时称为一次 El Niño (或 La Niña) 事件. 利用事件持续期 ONI 的极值和累积值  $\sum_{ONI}$  作为 ENSO 事件的双海温强度指数, 分别计算 1961 ~ 2016 年的 18 次 El Niño 事件和 12 次 La Niña 事件的 ONI 极值和累

积值  $\sum_{ONI}$ , 对不同性质的事件相关指数标准化处理后, 以海温强度指数为标准分为极弱、弱、中等、强、极强这 5 个等级, 如若 ONI 极值和累积值  $\sum_{ONI}$  两个指标不一致时, 以较弱的那个指标为准, 以字母 E 对不同时间段的 El Niño 事件排序, 以字母 L 对不同时间段的 La Niña 事件排序, 计算与统计结果如表 3.

表 3 1961 ~ 2016 年厄尔尼诺事件和拉尼娜事件统计

Table 3 Statistics of El Niño and La Niña events 1961-2016

| 序号  | 起始年月              | 持续时间/月 | ONI 极值 | $\sum_{ONI}$ | 强度 |
|-----|-------------------|--------|--------|--------------|----|
| E1  | 1963-07 ~ 1964-02 | 8      | 1.2    | 7.9          | 中等 |
| E2  | 1965-06 ~ 1966-04 | 11     | 1.9    | 13.4         | 强  |
| E3  | 1968-11 ~ 1969-06 | 8      | 1      | 6            | 弱  |
| E4  | 1969-08 ~ 1970-01 | 6      | 0.8    | 4.2          | 弱  |
| E5  | 1972-05 ~ 1973-03 | 11     | 2      | 14.5         | 强  |
| E6  | 1976-09 ~ 1977-02 | 6      | 0.8    | 4.1          | 弱  |
| E7  | 1977-09 ~ 1978-01 | 5      | 0.8    | 3.4          | 弱  |
| E8  | 1979-10 ~ 1980-02 | 5      | 0.6    | 2.7          | 极弱 |
| E9  | 1982-04 ~ 1983-06 | 15     | 2.1    | 19.5         | 极强 |
| E10 | 1986-09 ~ 1988-02 | 18     | 1.6    | 19.7         | 中等 |
| E11 | 1991-06 ~ 1992-07 | 14     | 1.6    | 14.1         | 中等 |
| E12 | 1994-10 ~ 1995-03 | 6      | 1      | 4.6          | 弱  |
| E13 | 1997-05 ~ 1998-05 | 13     | 2.3    | 20.3         | 极强 |
| E14 | 2002-06 ~ 2003-02 | 9      | 1.3    | 8.5          | 中等 |
| E15 | 2004-07 ~ 2005-04 | 10     | 0.7    | 6.2          | 极弱 |
| E16 | 2006-09 ~ 2007-01 | 5      | 1      | 3.9          | 弱  |
| E17 | 2009-07 ~ 2010-04 | 10     | 1.3    | 9            | 中等 |
| E18 | 2015-03 ~ 2016-05 | 15     | 2.3    | 21.7         | 极强 |
| L1  | 1964-05 ~ 1965-01 | 9      | -0.8   | -6.3         | 弱  |
| L2  | 1967-12 ~ 1968-04 | 5      | -0.8   | -3.2         | 极弱 |
| L3  | 1970-07 ~ 1972-01 | 19     | -1.3   | -16.7        | 中等 |
| L4  | 1973-06 ~ 1974-07 | 14     | -1.9   | -17.6        | 中等 |
| L5  | 1974-10 ~ 1976-03 | 18     | -1.6   | -16.8        | 中等 |
| L6  | 1984-10 ~ 1985-06 | 9      | -1.1   | -6.9         | 弱  |
| L7  | 1988-05 ~ 1989-05 | 16     | -1.8   | -16          | 中等 |
| L8  | 1995-08 ~ 1996-03 | 8      | -1     | -6.2         | 弱  |
| L9  | 1998-07 ~ 2001-03 | 33     | -1.6   | -32.7        | 中等 |
| L10 | 2007-08 ~ 2008-06 | 11     | -1.4   | -10.9        | 中等 |
| L11 | 2010-07 ~ 2011-04 | 10     | -1.4   | -11.1        | 中等 |
| L12 | 2011-08 ~ 2012-03 | 8      | -0.9   | -5.6         | 弱  |

2.2.1 ENSO 事件对降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的影响

ENSO 事件具有一定的周期性, 降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 受到 ENSO 事件影响, 呈现一些重要特点. ENSO 事件促使不同性质的年份降水量及气温差异明显, 这将直接影响大气降水中的氢氧同位素丰度. 研究表明<sup>[26]</sup>, 在 El Niño 年, 中国长江流域冬夏季降水较正常年份增多, 但北方地区降水较正常年份减少; 而在 La Niña 年, 中国长江流域冬夏季降水较正常年份减少, 而北方地区降水较正常年份增多. 为了深入分析 1979 ~ 2016 年不同性质年份的气温及气

候背景, 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  $1.5^{\circ} \times 1.5^{\circ}$  网格点, 分别计算 1979 ~ 2016 年 (4 个站点在此时间段数据重叠度较高) 之间的 11 次 El Niño 事件和 7 次 La Niña 事件在冬、夏两季 850hPa 水汽通量及水汽通量散度分布结果, 由于 ENSO 事件的时间段多为跨年度的, 并非某年度的某个季节均有同类性质的 ENSO 事件发生, 因此, 按冬、夏两个季度划分不能准确地体现计算结果, 故将相同性质的 ENSO

事件按月份进行多年月平均, 结果如图 5 和图 6.

对 S1、S2、S3、S4、S5 这 5 个站点的气温和降水量等数据进行多年月平均计算, 结果如图 7. 这 5 个站点多年月平均值降水中  $\delta^{18}\text{O}$  分布在 El Niño 事件与 La Niña 事件期间均具有明显的季节特征, 夏秋为低值, 冬春为高值, 这主要与降水的季节分布有关. 4 站点均位于季风区, 降水主要集中在夏季. 在降水水汽来源较稳定的地区, 形成降水的水汽云团中较富集重同位素 D 与  $^{18}\text{O}$ , 而重同位素在降水过程中会优先凝结形成降水, 导致早期降水呈现出较高  $\delta^{18}\text{O}$  值, 随着降水的进行, 云团中重同位素不断贫化, 雨水中  $\delta\text{D}$  与  $\delta^{18}\text{O}$  越来越偏负, El Niño 事件与 La Niña 事件期间, 研究区受东亚冬、夏季风影响, 虽气温降水有较大差异, 但水汽来源较为稳

定, 故夏季降水中  $\delta\text{D}$  与  $\delta^{18}\text{O}$  偏负, 而冬季降水较少, 且部分水汽来源为局地蒸发, 故冬季降水中  $\delta\text{D}$  与  $\delta^{18}\text{O}$  偏正. 图 8 反映了 1982 ~ 2016 年的不同时间段 10 次 El Niño 事件和 7 次 La Niña 事件期间分别对应的降水  $\delta^{18}\text{O}$  值、气温、降水量, 整体而言, 不同时间段 (ENSO 事件序号对应年份详见表 3) 的同类型 ENSO 事件发生时的气温、降水量、降水中  $\delta^{18}\text{O}$  值等指标差异明显.

ONI、SSTA 是定量分析 ENSO 事件的常用标准, 将 El Niño 事件期间降水中多年月均  $\delta^{18}\text{O}$  与月均 ONI、SSTA 进行回归分析发现: El Niño 期间  $\delta^{18}\text{O}$  与 ONI、SSTA 两指数的相关系数分别为  $-0.46$ 、 $-0.43$  (通过信度为 0.05 的显著性检验). La Niña 期间  $\delta^{18}\text{O}$  与 ONI、SSTA 两指数的相关系数分别为

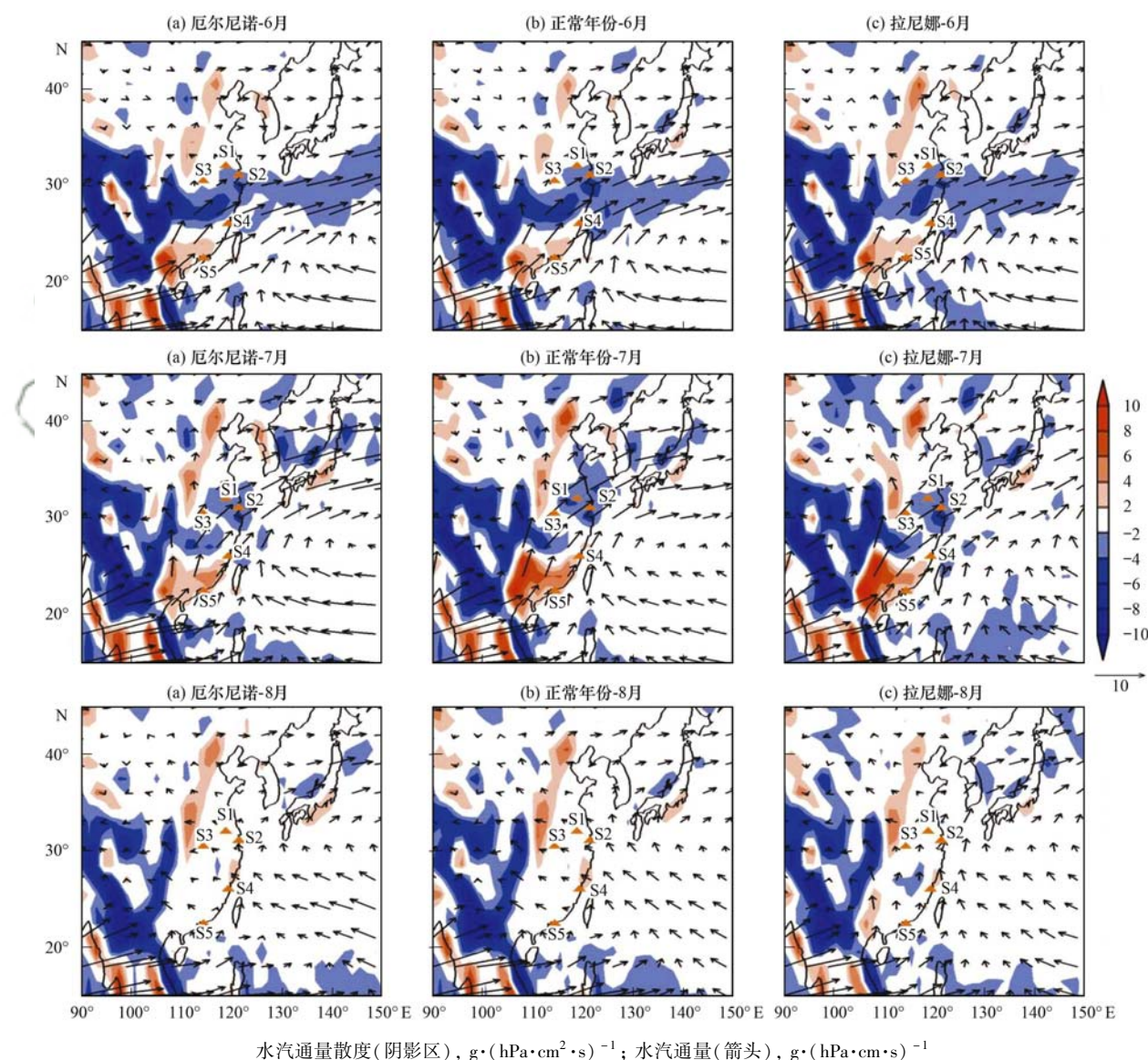


图 5 上海地区夏季 850 hPa 水汽通量散度和水汽通量的水平分布

Fig. 5 Horizontal distribution of water vapor flux divergence and water vapor flux at 850 hPa height in summer



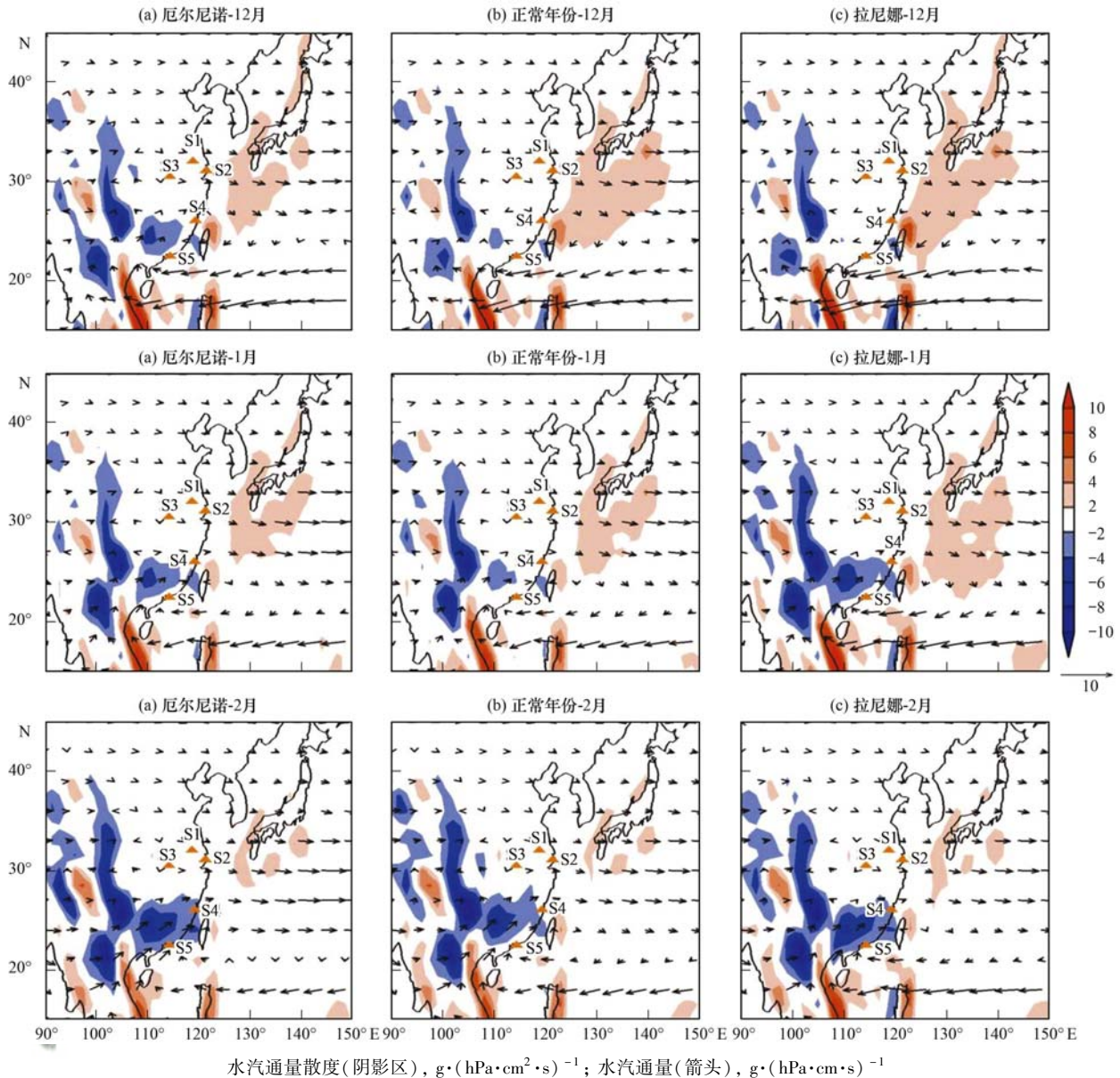


图6 上海地区冬季850 hPa水汽通量散度和水汽通量的水平分布

Fig. 6 Horizontal distribution of water vapor flux divergence and water vapor flux at 850 hPa height in winter

-0.34、-0.40(通过信度为0.05的显著性检验).可以看出,降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 在El Niño事件与La Niña事件期间与两指数具有显著负相关性,其结果与图9相同.究其原理,可能与ENSO事件对研究区气温和降水的影响有关.

据图5和图6可知,在El Niño、La Niña和正常年份期间,研究区的降水具有较大差异.研究区域6~8月的多年月平均水汽通量合成与水汽通量散度场显示,夏季受东部东南风和南部西南风影响,研究区西部在平均状况下是水汽“汇”(水汽通量散度的负值中心),水汽通量呈现辐合状态,表明该地区存在较强的水汽辐合,对应的近地面降水可能性较大,而处于长江中下游平原的研究区受该

水汽汇的影响明显,降水天气较多. El Niño事件6月和7月研究区水汽通量较大值范围大于La Niña期间,说明受ENSO事件影响,在El Niño期间,长江流域相较非El Niño期间降水增多,我国东部整体呈现出南北降水少,中部长江流域降水多的格局,此研究结果与王月等<sup>[27]</sup>的研究结果相同.研究区域12月多年月平均水汽通量合成与水汽通量散度场表明El Niño期间研究区西部和南部有明显的水汽“汇”形成,受偏西风水汽通量输送的影响,降水量较大,而非El Niño期间影响不明显.1月期间,非El Niño期间研究区东部形成面积较大的水汽源,水汽通量呈现辐散状态,受其影响,研究区降水较El Niño期间减少.2月研究区在El Niño与



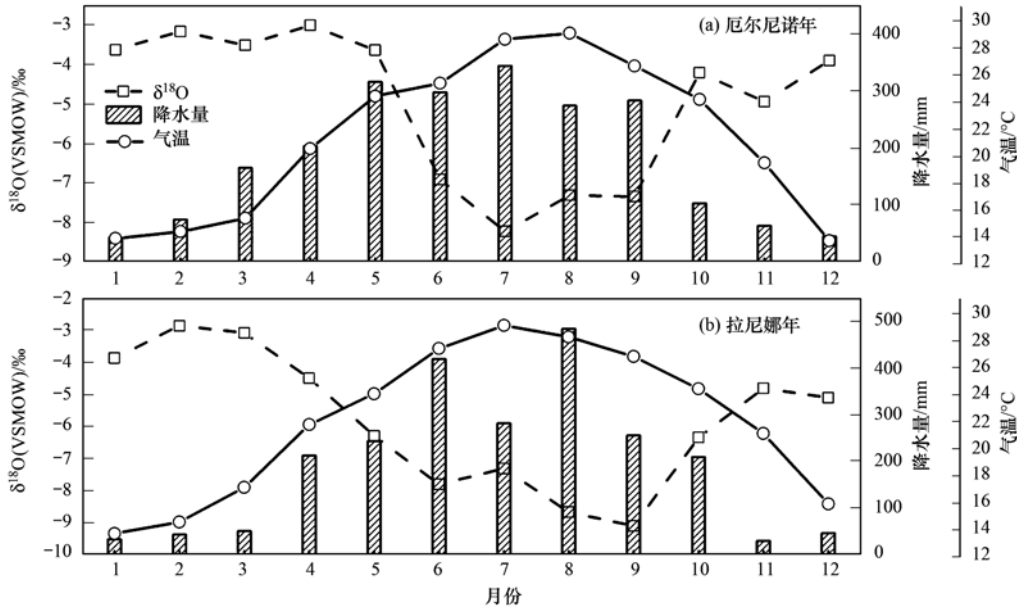


图7 降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度、降水量的变化

Fig. 7 Monthly variance of  $\delta^{18}\text{O}$ , precipitation amount, and temperature

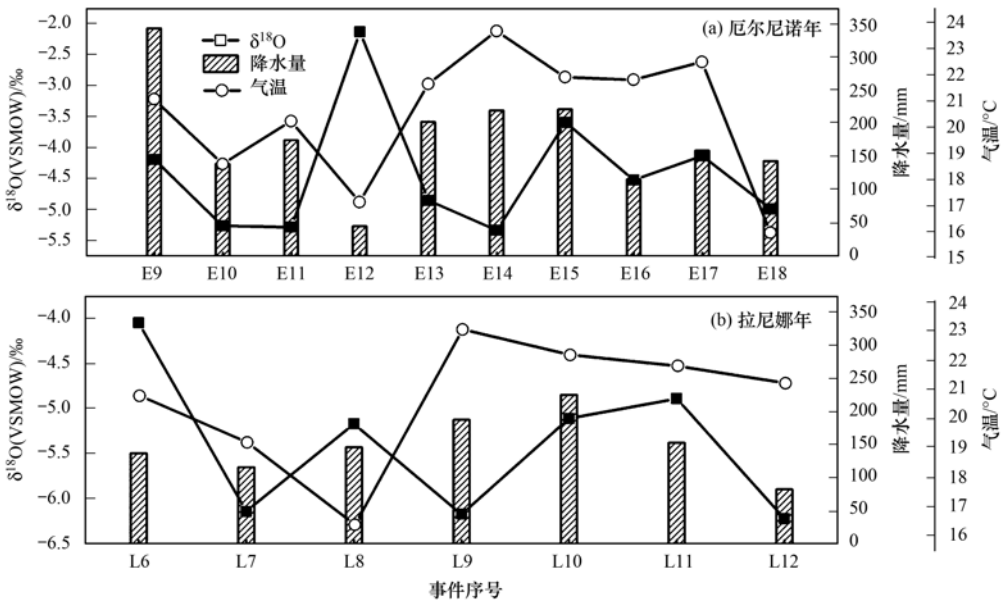


图8 不同时间段降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度、降水量的变化

Fig. 8 Variance of  $\delta^{18}\text{O}$ , precipitation amount, and temperature for different time periods

非 El Niño 期间虽水汽分布类似,但 El Niño 年水汽通量输送单位值大于 La Niña 期间. 总体而言,El Niño 夏季各月与冬季各月降水分别较 La Niña 多,冬季长江流域与北方地区降水差异较夏季明显,并且主要为来自太平洋的近源水汽输送,水汽输送距离较 La Niña 事件期间短,因此 El Niño 事件期间降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 较非 El Niño 事件期间偏正(表 2). 同时,同一个事件类型期间,降水水汽来源稳定且单一,伴随着降水的持续进行,降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 不断下降,因此,El Niño 事件和 La Niña 事件的强弱会影响降水

中 $\delta^{18}\text{O}$ 值,体现为 El Niño 事件越强,受其影响的研究区域降水量越大,降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 越偏负,而 ONI 与 SSTA 是衡量 ENSO 事件强弱的重要标准,当 ONI 与 SSTA 值越偏正时,说明 El Niño 事件越强,导致降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值与 ONI 与 SSTA 值反相关关系明显.

### 2.2.2 ENSO 事件对降水中 $d$ 值(氕盈余)的影响

氕盈余是由降水中  $\delta\text{D}$  与 $\delta^{18}\text{O}$ 组成的一个二级指标, ( $d$  值)定义为:  $d = \delta\text{D} - 8\delta^{18}\text{O}$ ,不同地区雨水中  $d$  值可直观反映该地水循环蒸发和凝结过程中的不平衡程度,是表征大气降水的重要综合环境

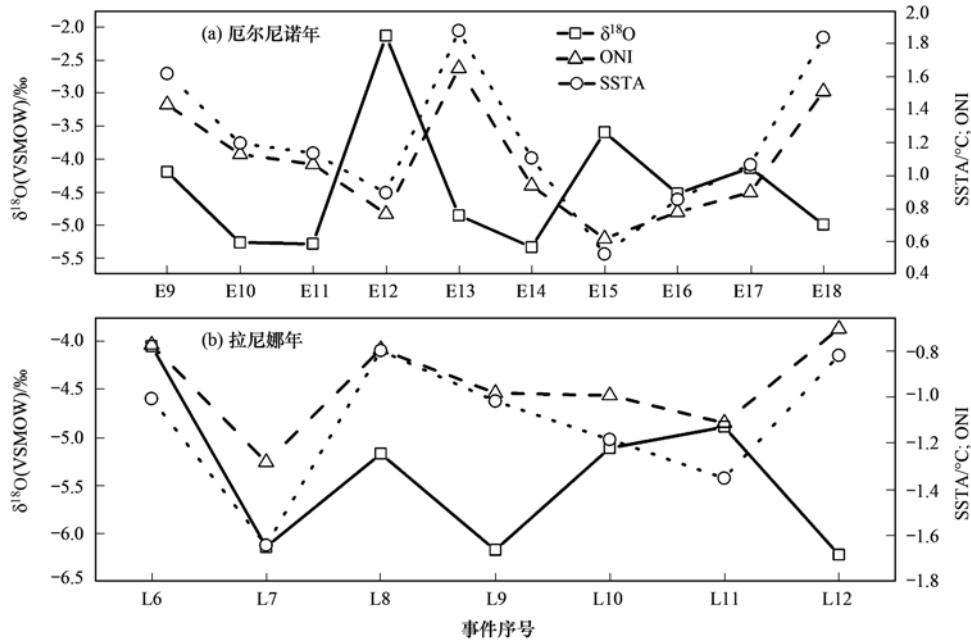


图 9 Niño 3.4 区 SSTA、ONI 与降水中多年月平均 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化

Fig. 9 Variations of SSTA, ONI in Niño 3.4, regional and monthly average values of  $\delta^{18}\text{O}$  in precipitation for different time periods

指标,可推断水汽来源地大气相对湿度、风速和水面表面温度等。

研究期间, E Niño 期间降水中  $d$  值与 ONI、SSTA 两指数的相关系数分别为  $-0.49$ 、 $-0.56$ 。La Niña 期间  $d$  值与 ONI、SSTA 两指数的相关系数分别为  $-0.54$ 、 $-0.46$ , 并且均通过信度 0.05 的显著性检验。由此可见,研究区大气降水中的  $d$  值与表征 ENSO 事件强弱的 ONI、SSTA 两指数具有

显著的负相关关系。图 10(a)表明,在 El Niño 期间,降水中  $d$  值 ONI、SSTA 两指数具有显著的负相关关系,即两指数越偏正值,降水中  $d$  值越小,两指数越偏负值,降水中  $d$  值越大,如图 10(a)中序列号 E11 ~ E17 为 El Niño 事件。此规律在 La Niña 期间依然存在,即拉尼娜事件越强的年份,降水中  $d$  值越大,拉尼娜事件越弱的年份,降水中的  $d$  值越小,如图 10(b)中序列号为 L7、L8、

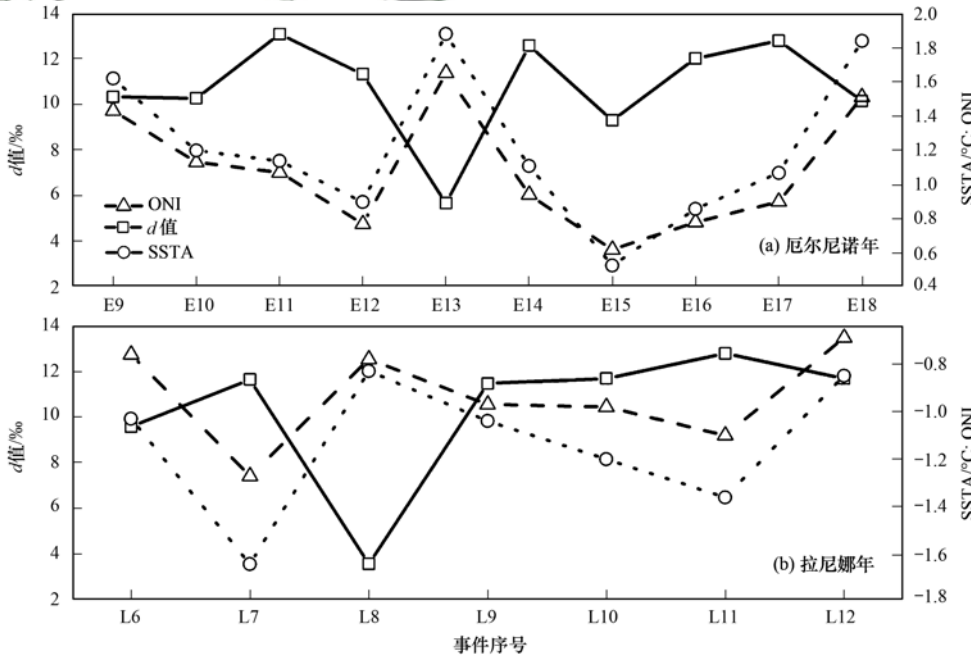


图 10 Niño 3.4 区 SSTA、ONI 与降水中多年月平均  $d$  值的变化

Fig. 10 Variations of  $d$  in precipitation and mean SSTA/ONI in Niño 3.4 for different time periods

L10、L11 的 La Niña 事件均呈现此规律. 不同地区降水中的  $d$  值在季节上具有微小的差异, 但是季节和纬度等因素对  $d$  值的影响特别小<sup>[28]</sup>, 而形成降水的水汽来源地的大气相对湿度、风速和水体表面温度等才是影响降水中  $d$  值的重要因素<sup>[29]</sup>. 前人研究表明<sup>[30]</sup>, 降水中  $d$  值与水汽源地的相对湿度存在具体关系, 并以此为基础建立了理论模型, 使  $d$  值在推断降水水汽来源及相关的气候条件方面的运用具备了一定理论基础. 一般而言, 形成降水的水汽源地相对湿度越高, 形成的降水中  $d$  值就越低, 相反, 随着降水水汽源地大气相对湿度的降低, 降水中  $d$  值会升高. 而在干热的气候条件下, 大气降水过程中存在的二次蒸发则会导致降水中  $d$  值偏低. 在 El Niño 期间, 研究区域西部存在较大的水汽汇, 大气相对湿度较高, 形成的降水中  $d$  值偏低, El Niño 事件越强, 研究区受其影响, 降水量越偏多, 大气湿度越高, 降水中  $d$  值越偏低; 在 El Niño 事件较弱的年份, 研究区降水

较少, 大气相对湿度低, 导致形成的降水中  $d$  值偏高, 如图 10(a). 在 La Niña 期间, La Niña 事件越强, 即 ONI 与 SSTA 指数越偏负, 降水中  $d$  值越偏正; 而 La Niña 越弱时,  $d$  值越偏负. 这是因为 La Niña 事件会导致研究区相对湿度变化, 进而影响降水中  $d$  值, 即 La Niña 强弱与降水中  $d$  值的变化具有负相关关系.

2.2.3 ENSO 事件强弱对氢氧同位素组成的影响

ENSO 事件对降水中  $\delta^{18}\text{O}$  与  $d$  值影响明显, 但是 ENSO 事件对降水中  $\delta^{18}\text{O}$  与各气象要素的相关性影响仍需进一步分析. 对 La Niña 和 El Niño 事件期间降水中  $\delta^{18}\text{O}$  与各气象要素相关性进行统计, 据表 4 可知, ENSO 事件强弱对  $\delta^{18}\text{O}$  与气温、降水量、水汽压这 3 个气象因素的相关性影响较小. 无论 ENSO 事件强弱, 降水中  $\delta^{18}\text{O}$  都和气温、降水、水汽压这 3 个气象要素有显著的负相关关系. 相反, ENSO 事件强弱对  $\delta^{18}\text{O}$  与 ONI、SSTA 两个指数相关性影响较大, 但无明显规律可循.

表 4 厄尔尼诺与拉尼娜事件发生时  $\delta^{18}\text{O}$  与各气象气候要素间的相关性<sup>1)</sup>  
Table 4 Correlation of  $\delta^{18}\text{O}$  in precipitation with meteorological factors during El Niño and La Niña events

| 周期                | 序号  | 强度 | 降水       | 气温       | 水汽       | ONI      | SSTA     |
|-------------------|-----|----|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1982-04 ~ 1983-06 | E9  | 极强 | -0.42    | -0.74 *  | -0.71 *  | 0.60     | 0.54     |
| 1986-09 ~ 1988-02 | E10 | 中等 | -0.11    | -0.56    | -0.58 *  | -0.74 ** | -0.78 ** |
| 1991-06 ~ 1992-07 | E11 | 中等 | -0.54    | -0.63 *  | -0.65 *  | 0.52     | 0.54     |
| 1994-10 ~ 1995-03 | E12 | 弱  | -0.74    | 0.61     | 0.47     | -0.64    | -0.39    |
| 1997-05 ~ 1998-05 | E13 | 极强 | -0.52    | -0.55    | -0.61 *  | -0.13    | -0.13    |
| 2002-06 ~ 2003-02 | E14 | 中等 | -0.92 ** | -0.79 *  | -0.79 *  | 0.04     | 0.29     |
| 2004-07 ~ 2005-04 | E15 | 极弱 | -0.86 *  | -0.89 ** | -0.91 ** | -0.41    | -0.63    |
| 2006-09 ~ 2007-01 | E16 | 弱  | -0.97 ** | -0.56    | -0.57    | 0.59     | 0.26     |
| 2009-07 ~ 2010-04 | E17 | 中等 | -0.95 ** | -0.85 ** | -0.93 ** | 0.65 *   | 0.63     |
| 2015-03 ~ 2016-05 | E18 | 极强 | -0.09    | -0.09    | -0.19    | -0.42    | -0.45    |
| 1964-05 ~ 1965-01 | L1  | 弱  | -0.64    | 0.80     | 0.88 *   | 0.50     | —        |
| 1973-06 ~ 1974-07 | L4  | 中等 | -0.83 ** | -0.76 *  | -0.82 ** | -0.38    | —        |
| 1974-10 ~ 1976-03 | L5  | 中等 | -0.74 ** | -0.81 ** | -0.77 ** | 0.14     | —        |
| 1984-10 ~ 1985-06 | L6  | 弱  | -0.76 *  | -0.68    | -0.85 ** | -0.73 *  | -0.80 *  |
| 1988-05 ~ 1989-05 | L7  | 中等 | -0.66 *  | -0.64 *  | -0.66 *  | -0.02    | 0.04     |
| 1995-08 ~ 1996-03 | L8  | 弱  | -0.82 *  | -0.70    | -0.82 *  | -0.55    | -0.68    |
| 1998-07 ~ 2001-03 | L9  | 中等 | -0.68 *  | -0.83 ** | -0.80 ** | -0.53    | -0.59 *  |
| 2007-08 ~ 2008-06 | L10 | 中等 | -0.54    | -0.75 ** | -0.75 ** | -0.72 *  | -0.60    |
| 2010-07 ~ 2011-04 | L11 | 中等 | -0.95 ** | -0.80 ** | -0.84 ** | 0.11     | 0.23     |
| 2011-08 ~ 2012-03 | L12 | 弱  | -0.58    | -0.56    | -0.48    | -0.52    | -0.42    |

1) \* 表示  $P < 0.05$ , \*\* 表示  $P < 0.01$ , “—”表示缺资料

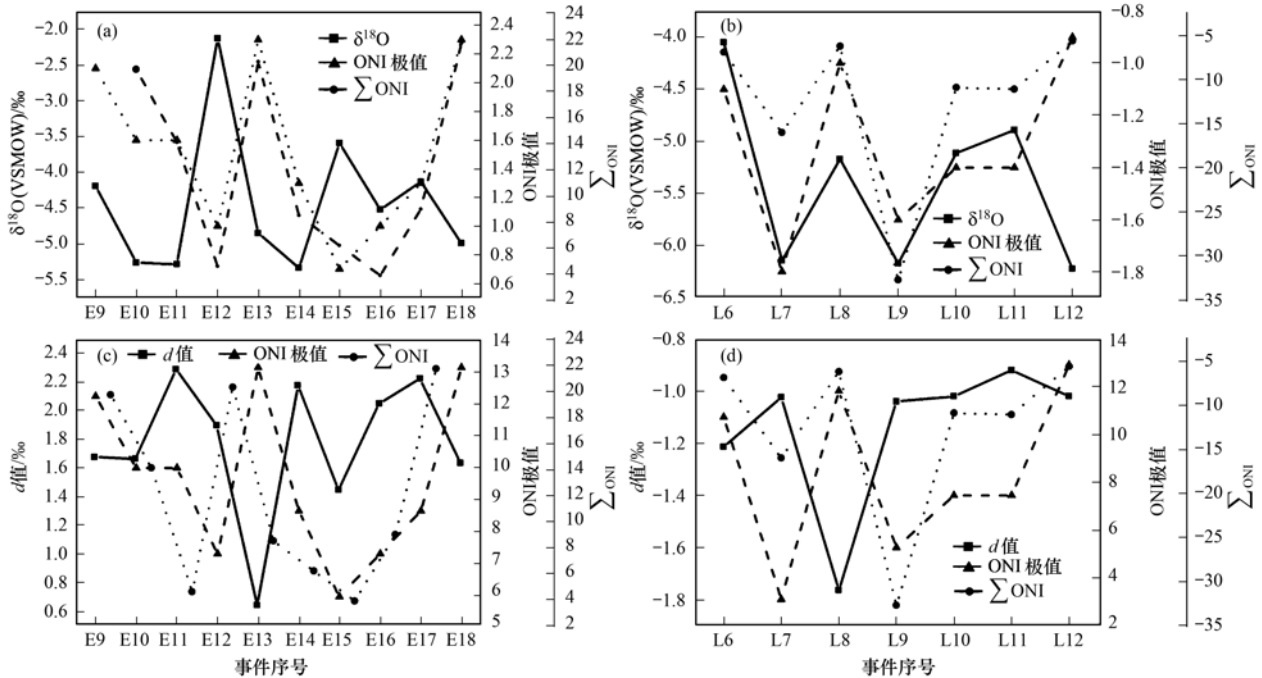
为了进一步分析降水中  $\delta^{18}\text{O}$  与  $d$  值对 ENSO 事件强弱的响应, 将降水中的  $\delta^{18}\text{O}$  与  $d$  值与衡量 ENSO 事件强弱的 ONI 极值和累积值  $\sum_{\text{ONI}}$  进行对比分析. 结果表明降水中  $\delta^{18}\text{O}$  与  $d$  值在 La Niña 和 El Niño 事件期间与 ONI 极值、累积值  $\sum_{\text{ONI}}$  具

有明显的相关关系. El Niño 期间, 降水中  $\delta^{18}\text{O}$  与  $d$  值与两指标成显著的负相关关系, 如图 11(a) 和图 11(c). ONI 极值、累积值  $\sum_{\text{ONI}}$  值越偏正, 说明对应序号的 El Niño 事件越强, 反之则越弱. 在 El Niño 事件较强的年份, 研究区所在的长江流域



降水比较弱的 El Niño 年多,水汽源地的大气相对湿度较高,导致降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与 $d$ 值偏低,呈现明显的负相关关系.在 La Niña 期间,降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与 La Niña 事件强弱联系紧密,较强的 La Niña 年,我国

大部分地区冬春季温度易偏低,夏秋季江淮地区温度易偏高,形成冷冬热夏的局面,且长江流域降水偏少,导致降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与 $d$ 值偏负,如图 11 (b)和图 11(d).



(a) 厄尔尼诺期间 $\delta^{18}\text{O}$ ; (b) 拉尼娜期间 $\delta^{18}\text{O}$ ; (c) 厄尔尼诺期间 $d$ 值; (d) 拉尼娜期间 $d$ 值

图 11 ONI 极值、 $\sum \text{ONI}$  与降水中多年月平均 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $d$  值的变化

Fig. 11 Variation of extreme value and cumulative value of ONI, as well as the perennial monthly average value of  $\delta^{18}\text{O}$  and  $d$ -excess in precipitation for different time periods

### 3 结论

(1) El Niño 事件期间大气降水线的斜率与截距在数值上略大于非 El Niño 期间,说明 ENSO 事件对降水中的氢氧同位素组成具有一定影响; La Niña 事件期间降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的反温度效应、降水量效应、水汽压效应比正常年份、El Niño 期间显著.

(2) 在 El Niño 和 La Niña 事件期间降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值与 ONI、SSTA 两指数存在显著的负相关关系,这与 ENSO 事件对研究区气温和降水的影响有关,El Niño 夏季各月与冬季各月降水较 La Niña 多,并且多为太平洋近源输送,导致降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值 El Niño 较 La Niña 偏正,但 ENSO 事件的强弱会影响降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值,体现为 El Niño 事件越强,降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 越偏负,导致其反相关关系明显.上海大气降水中的 $d$ 值与表征 ENSO 事件强弱的 ONI、SSTA 两指数在 El Niño 和 La Niña 期间均具有显著的负相关关系. $d$ 值大小主要与形成降水的水汽源地相对湿度有关,ENSO 事件通过影响研究区大气相对湿度,进而影

响降水中 $d$ 值的变化,导致 ENSO 事件的强弱与降水中 $d$ 值的变化呈负相关关系.并且降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与 ONI、SSTA 两个指数相关性大小受 ENSO 事件的影响较大.

致谢:国际原子能机构和世界气象组织提供气象数据,刘婷、牛蕊、武登云同学帮助采集水样,特此致谢.

### 参考文献:

- [1] Suplee C. El Nino/la Nina: nature's vicious cycle[J]. National Geographic, 1999, 195(3): 72-95.
- [2] Guo Q. The east Asia monsoon and the southern oscillation: 1871-1980[A]. In: The Climate of China and Global Climate [M]. Beijing: Ocean Press, 1987.
- [3] Wang S W, Zhao Z C. Droughts and floods in China, 1470-1979 [A]. In: Wigley T N L, Ingram M J, Farmer G (Eds.). Climate and History [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1981. 271-288.
- [4] Gong D Y, Wang S W. Impacts of ENSO on rainfall of global land and China[J]. Chinese Science Bulletin, 1999, 44(9): 852-857.
- [5] Wang B, Wu R G, Li T. Atmosphere-warm ocean interaction and its impacts on Asian-Australian monsoon variation [J]. Journal of Climate, 2003, 16(8): 1195-1211.

- [6] Wang B, Wu R G, Fu X H. Pacific-East Asian teleconnection: how does ENSO affect East Asian climate? [J]. *Journal of Climate*, 2000, **13**(9): 1517-1536.
- [7] 布和朝鲁, 纪立人. 东亚冬季风活动异常与热带太平洋海温异常[J]. *科学通报*, 1999, **44**(3): 252-259.  
Bueh C, Ji L R. Anomalous activity of East Asian winter monsoon and the tropical Pacific SSTA [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, **44**(10): 890-898.
- [8] Dansgaard W. The abundance of  $O^{18}$  in atmospheric water and water vapour [J]. *Tellus*, 1953, **5**(4): 461-469.
- [9] 李广, 章新平, 张立峰, 等. 长沙地区不同水体稳定同位素特征及其水循环指示意义[J]. *环境科学*, 2015, **36**(6): 2094-2101.  
Li G, Zhang X P, Zhang L F, *et al.* Stable isotope characteristics in different water bodies in Changsha and implications for the water cycle [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(6): 2094-2101.
- [10] Bouchaou L, Michelot J L, Vengosh A, *et al.* Application of multiple isotopic and geochemical tracers for investigation of recharge, salinization, and residence time of water in the Souss-Massa aquifer, southwest of Morocco [J]. *Journal of Hydrology*, 2008, **352**(3-4): 267-287.
- [11] 薛积彬, 钟巍, 赵引娟. 珠江三角洲地区降水中 $\delta^{18}O$ 的变化特征及与 ENSO 的关系[J]. *地理科学*, 2007, **27**(6): 825-830.  
Xue J B, Zhong W, Zhao Y J. Variations of  $\delta^{18}O$  in precipitation in the Zhujiang (Pearl) River Delta and its relationship with ENSO event [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2007, **27**(6): 825-830.
- [12] 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.  
Yang M X, Yao T D. The response of the climate records in the Guliya Ice Core to ENSO events [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, **25**(1): 27-33.
- [13] 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 $\delta^{18}O$ 的影响[J]. *冰川冻土*, 2000, **22**(1): 23-28.  
Zhang X P, Yao T D, Jin H J. The influence of ENSO event on the modern  $\delta^{18}O$  on the Guliya Ice Core [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2000, **22**(1): 23-28.
- [14] 温艳茹, 王建力. 重庆地区大气场降水中氢氧同位素变化特征及与大气环流的关系[J]. *环境科学*, 2016, **37**(7): 2462-2469.  
Wen Y R, Wang J L. Variations of stable isotope in precipitation and its atmospheric circulation effect in Chongqing [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(7): 2462-2469.
- [15] 董小芳, 邓黄月, 张峦, 等. 上海降水中氢氧同位素特征及与 ENSO 的关系[J]. *环境科学*, 2017, **38**(5): 1817-1827.  
Dong X F, Deng H Y, Zhang L, *et al.* Characteristics of stable isotopes in precipitation and its relationship with ENSO in Shanghai [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(5): 1817-1827.
- [16] 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, **23**(13): 801-806.
- [17] 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.  
Hou S G, Wang Y T, Pang H X. Climatology of stable isotopes in Antarctic snow and ice: current status and prospects [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, **58**(10): 1095-1106.
- [18] 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.  
Zhang X P, Sun W Z, Liu J M. Stable isotopes in precipitation in the vapor transport path in Kunming of southwest China [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2005, **14**(5): 665-669.
- [19] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters [J]. *Science*, 1961, **133**(3465): 1702-1703.
- [20] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation [J]. *Tellus*, 1964, **16**(4): 436-468.
- [21] Matthews C J D, Longstaffe F J, Ferguson S H. Dentine oxygen isotopes ( $\delta^{18}O$ ) as a proxy for odontocete distributions and movements [J]. *Ecology and Evolution*, 2016, **6**(14): 4643-4653.
- [22] 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**(S): 125-133.  
Wang S W, Zhu J H, Cai J N, *et al.* Irregularities in ENSO variability [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinesis*, 2003, **39**(S): 125-133.
- [23] Xu K, Zhu C W, He J H. Two types of El Niño-related Southern Oscillation and their different impacts on global land precipitation [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2013, **30**(6): 1743-1757.
- [24] 许武成, 王文, 马劲松, 等. 1951-2007 年的 ENSO 事件及其特征值[J]. *自然灾害学报*, 2009, **18**(4): 18-24.  
Xu W C, Wang W, Ma J S, *et al.* ENSO events during 1951-2007 and their characteristic indices [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2009, **18**(4): 18-24.
- [25] Smith T M, Reynolds R W. Improved extended reconstruction of SST (1854-1997) [J]. *Journal of Climate*, 2004, **17**(12): 2466-2477.
- [26] 朱建佳, 陈辉, 巩国丽. 柴达木盆地东部降水氢氧同位素特征与水汽来源[J]. *环境科学*, 2015, **36**(8): 2784-2790.  
Zhu J J, Chen H, Gong G L. Hydrogen and oxygen isotopic compositions of precipitation and its water vapor sources in eastern Qaidam Basin [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(8): 2784-2790.
- [27] 王月, 张强, 张生, 等. 淮河流域降水过程时空特征及其对 ENSO 影响的响应研究[J]. *地理科学*, 2016, **36**(1): 128-134.  
Wang Y, Zhang Q, Zhang S, *et al.* Spatial and temporal characteristics of precipitation in the Huaihe River basin and its response to ENSO events [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, **36**(1): 128-134.
- [28] Friedman I, Smith G I, Gleason J D, *et al.* Stable isotope composition of waters in southeastern California 1. Modern precipitation [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, **97**(D5): 5795-5812.
- [29] 张应华, 仵彦卿, 温小虎, 等. 环境同位素在水循环研究中的应用[J]. *水科学进展*, 2006, **17**(5): 738-747.  
Zhang Y H, Wu Y Q, Wen X H, *et al.* Application of environmental isotopes in water cycle [J]. *Advances in Water Science*, 2006, **17**(5): 738-747.
- [30] Jouzel J, Merlivat L. Deuterium and oxygen-18 in precipitation: modeling of the isotopic effects during snow formation [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1984, **89**(D7): 11749-11757.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                       |                                                                      |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| Regional Transport Matrix Study of PM <sub>2.5</sub> in Jingjinji Region, 2015 .....                                                                                                  | WANG Yan-li, XUE Wen-bo, LEI Yu, <i>et al.</i> (4897)                |
| Effect of Atmospheric Haze Based on Multi-source Remote Sensing Data Considering the Size Effect of Landscape Sources and Sinks .....                                                 | XU Kai, YU Tian-tian, SUN Jiao-jiao, <i>et al.</i> (4905)            |
| Space-Time Estimations and Mapping of PM <sub>2.5</sub> Fine Particulates Based on Multi-source Data .....                                                                            | XIAO Lu, LANG Yi-chao, XIA Lang, <i>et al.</i> (4913)                |
| Exposure Level of Population and Economy in Zhejiang Province Considering the Background of PM <sub>2.5</sub> in East China .....                                                     | YU Zhen-yan, GAO Da-wei, LI Zheng-quan, <i>et al.</i> (4924)         |
| Aerosol Chemical Characteristics for Different Air Pollution Levels in North Suburban Nanjing .....                                                                                   | ZHANG Cheng, YU Xing-na, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (4932)            |
| Seasonal Variation of Carbon Fractions in PM <sub>2.5</sub> in Heze .....                                                                                                             | LIU Ze-jun, WU Jian-hui, ZHANG Yu-fen, <i>et al.</i> (4943)          |
| Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Inorganic Ions in Road Dust PM <sub>2.5</sub> in Selected Cities in Liaoning Province .....                                 | ZHANG Wei, JI Ya-qin, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (4951)                |
| Characteristics of the Size Distribution of Water-soluble Ions During a Heavy Pollution Episode in the Winter in Tianjin .....                                                        | YAO Qing, LIU Zi-rui, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (4958)               |
| Physico-chemical Characteristic Analysis of PM <sub>2.5</sub> in the Highway Tunnel in the Plateau City of Kunming .....                                                              | WANG Cheng-hui, YAN Kun, HAN Xin-yu, <i>et al.</i> (4968)            |
| Characteristics Analysis of the Surface Ozone Concentration of China in 2015 .....                                                                                                    | DUAN Xiao-tong, CAO Nian-wen, WANG Xiao, <i>et al.</i> (4976)        |
| Effects of Different Precious Metal Loads of CDPF on Characteristics of VOCs Emissions from a Diesel Bus .....                                                                        | LOU Di-ming, ZHANG Zi-jun, LIU Ji-yue, <i>et al.</i> (4983)          |
| Influence of ENSO Events on the Hydrogen ( $\delta^2\text{H}$ ) and Oxygen ( $\delta^{18}\text{O}$ ) Isotopic Values of Precipitation in Shanghai .....                               | DONG Xiao-fang, YANG Hua-wei, ZHANG Luan, <i>et al.</i> (4991)       |
| Deposition of Sulfur, Nitrogen and Mercury in Two Typical Forest Ecosystems in Southern China .....                                                                                   | CHENG Zheng-lin, LUO Yao, ZHANG Ting, <i>et al.</i> (5004)           |
| Spatial and Temporal Variability of CO <sub>2</sub> Emissions from the Xin'anjiang Reservoir .....                                                                                    | YANG Le, LI He-peng, SUN Bin-feng, <i>et al.</i> (5012)              |
| Evaluation of Temporal and Spatial Variation Characteristics of Nutrients in Surface Sediment in the Three Gorges Reservoir Area .....                                                | ZHUO Hai-hua, QIU Guang-sheng, ZHAI Wan-ying, <i>et al.</i> (5020)   |
| Distribution of Different Mercury Species in the Waterbody at Sanmenxia Reservoir .....                                                                                               | CHENG Liu, MA Bing-juan, ZHOU Wei-li, <i>et al.</i> (5032)           |
| Identification of Nitrate Sources and Transformation Processes in Midstream Areas; A Case in the Taizi River Basin .....                                                              | LI Yan-li, SUN Wei, YANG Zi-rui (5039)                               |
| Characteristics of Nitrogen Variation and Its Response to Rainfall; A Case Study in Wuxi Port at Taihu Lake Basin .....                                                               | LIAN Hui-shu, LIU Hong-bin, LI Xu-dong, <i>et al.</i> (5047)         |
| Dynamics of the Water Quality in a Broad-leaf Evergreen Forest at Different Spatial Levels on Jinyun Mountain .....                                                                   | MA Ming, SUN Tao, LI Ding-kai, <i>et al.</i> (5056)                  |
| Method of Improving the Water Quality of Polluted Rivers Based on the MIKE11 Model .....                                                                                              | XIONG Hong-bin, CHEN Xue, ZHANG Si-si (5063)                         |
| Distribution Characteristics and Risk Analysis of Antibiotic in the Groundwater in Beijing .....                                                                                      | CHEN Wei-ping, PENG Cheng-wei, YANG Yang, <i>et al.</i> (5074)       |
| Characteristics of Carbon and Nitrogen in the Downstream Columnar Sediment of Maozhou River, Shenzhen .....                                                                           | LING Jun-hong, ZHANG Yi-zhang, WANG Min-hao, <i>et al.</i> (5081)    |
| Relative Importance of Factors Influencing Iron Release in Drinking Water Distribution Systems .....                                                                                  | LIU Ying, YU Ying, SHI Bao-you, <i>et al.</i> (5090)                 |
| Removal of High Concentration of Iron, Manganese and Ammonia Nitrogen from Low Temperature Groundwater Using Single Bio-filter .....                                                  | LI Dong, CAO Rui-hua, YANG Hang, <i>et al.</i> (5097)                |
| Mechanism of Pre-ozonation Enhanced Coagulation on DON in the Secondary Effluent .....                                                                                                | LIU Bing, ZHENG Yu-ming, WANG Da-xiang, <i>et al.</i> (5106)         |
| Base Activation of Peroxymonosulfate for the Degradation of Ciprofloxacin in Water .....                                                                                              | GE Yong-jian, CAI Xian-wei, LIN Han, <i>et al.</i> (5116)            |
| MIL-88A@MIP Activated Persulfate for Targeted Degradation of Dibutyl Phthalate .....                                                                                                  | WANG Jiu-mei, GUAN Ze-yu, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (5124)         |
| Methane Cycle Anaerobic Membrane Bioreactor with Desulfurization for Treating High Sulfate Organic Wastewater at Normal Temperature .....                                             | XU Ting, JIN Yan-qing, LI Yong (5132)                                |
| Simultaneous Recovery of Nutrients from Wastewater by Mesoporous MgO-loaded Natural Zeolite .....                                                                                     | CHENG Xue-jun, WANG Xue-jiang, WANG Hao, <i>et al.</i> (5139)        |
| Phosphorus Removal Capacity of Domestic Wastewater Treated by a Modified CAST Process Under Different Operating Modes .....                                                           | MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (5146)                 |
| Realization of Shortcut Nitrification in the ABR-MBR Process Treating Domestic Wastewater .....                                                                                       | LÜ Liang, ZHAO Shi-hui, WEI Jia-min, <i>et al.</i> (5154)            |
| Substrate Inhibition and Kinetic Characteristics of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria Treating Saline Wastewater .....                                                     | ZHOU Tong, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (5162)                |
| Effect of Free Ammonia on Ammonia Escape During an Ammonia Oxidation Process .....                                                                                                    | SUN Hong-wei, YU Xue, YOU Yong-jun, <i>et al.</i> (5169)             |
| Water Quality and Diversity of Denitrifier Community Structure of Typical Scenic Water Bodies in Xi'an .....                                                                          | KANG Peng-liang, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, <i>et al.</i> (5174) |
| Start-up and Characteristics of the Microbial Community Structure of ANAMMOX .....                                                                                                    | WANG Yao-qi, ZHANG Min, JIANG Ying, <i>et al.</i> (5184)             |
| Fast Start-up and Performance of the CANON Process Based on a SBAF System and Evolution Properties of Microorganisms .....                                                            | YUE Xiu, LIU Zhu-han, YU Guang-ping, <i>et al.</i> (5192)            |
| Enrichment of <i>Nitrospira</i> in Activated Sludge and Kinetic Characterization .....                                                                                                | YAO Qian, PENG Dang-cong, ZHAO Qiao-di, <i>et al.</i> (5201)         |
| Effect of pH Value on Autotrophic Denitrification Process of Zero Valent Iron Substrate .....                                                                                         | ZHANG Ning-bo, LI Xiang, HUANG Yong (5208)                           |
| Effect of Seeding Single/Mixed Sludge on Rapid Start-up of an ANAMMOX Reactor .....                                                                                                   | ZHANG Ze-wen, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (5215)               |
| Comparison of Start-up and Stable Performance of Nitrification in Activated Sludge and Biofilm Processes in a SBR .....                                                               | SUN Yi-qi, BIAN Wei, WANG Meng, <i>et al.</i> (5222)                 |
| Long-term Impacts of TiO <sub>2</sub> Nanoparticles on the Stability of an Anaerobic Granular Sludge Bioreactor .....                                                                 | LI Hui-ting, CUI Fu-yi (5229)                                        |
| Composition and Distribution of Antibiotics in Soils with Different Land Use Types in a Typical Peri-urban Area of the Yangtze River Delta .....                                      | ZHAO Fang-kai, CHEN Li-ding, YANG Lei, <i>et al.</i> (5237)          |
| Distribution of Phosphorus in Soil Profiles after Continuous Application of Different Fertilizers .....                                                                               | ZHANG Tian, XU Hao, RU Shu-hua, <i>et al.</i> (5247)                 |
| Occurrence of Organophosphate Esters in Soils of the Three Gorges Reservoir .....                                                                                                     | HE Ming-jing, YANG Ting, YANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (5256)          |
| Pollution Characteristics, Source Analysis and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soils Surrounding a Municipal Solid Waste Incineration Plant in Shanghai ..... | GUO Yan-hai, SUN Xu-chao, ZHANG Shi-bing, <i>et al.</i> (5262)       |
| Comparison of Characteristics and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Different Environmental Media in the Urban Area of Daqing City .....                    | SONG Ning-ning, FENG Jia-shen, YU Yang, <i>et al.</i> (5272)         |
| Magnetic Response of Heavy Metal Pollution in Playground Dust of an Industrial Area .....                                                                                             | YANG Meng, LI Hui-ming, LI Feng-ying, <i>et al.</i> (5282)           |
| Distribution Characteristics and Health Risk for Heavy Metals in Vegetables Near the Industrial Areas in Shanghai .....                                                               | ZHOU Ya, BI Chun-juan, ZHOU Xiao-xiao, <i>et al.</i> (5292)          |
| Impacts of Silicon Fertilizer as Base Manure on Cadmium Bioavailability in Soil and on Cadmium Accumulation in Rice Plants .....                                                      | GAO Zi-xiang, ZHOU Hang, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (5299)          |
| Uptake and Volatilization of Gaseous Elemental Mercury by Paddy Rice .....                                                                                                            | SHANG Shuai, TIAN Pei, JIANG Yu, <i>et al.</i> (5308)                |
| Long Term Variations of Ozone Concentration of in a Winter Wheat Field and Its Loss Estimate Based on Dry Matter and Yield .....                                                      | ZHAO Hui, ZHENG You-fei, LI Shuo, <i>et al.</i> (5315)               |
| Control Effect of Side Deep Fertilization with Slow-release Fertilizer on Ammonia Volatilization from Paddy Fields .....                                                              | HOU Peng-fu, XUE Li-xiang, YU Ying-liang, <i>et al.</i> (5326)       |
| Effects of Biochar and Organic Fertilizer on Saline-alkali Soil N <sub>2</sub> O Emission in the North China Plain .....                                                              | SHI Yu-long, LIU Xing-ren, GAO Pei-ling, <i>et al.</i> (5333)        |
| Flux Characteristics of CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , and N <sub>2</sub> O and their Influencing Factors in Different Types of Ditches on the Chengdu Plain .....               | FENG Xiang-rong, DENG Ou-ping, DENG Liang-ji, <i>et al.</i> (5344)   |
| Review of CO <sub>2</sub> and CH <sub>4</sub> Emissions from Rivers .....                                                                                                             | WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, CHEN Huai, <i>et al.</i> (5352)     |