

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第5期

Vol.38 No.5

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

南京工业区分夏季二次有机气溶胶浓度估算及来源解析	刘静达, 安俊琳, 张玉欣, 师远哲, 林旭 (1733)
南京北郊大气细粒子在人体呼吸系统沉积特性	梁静舒, 安俊琳, 王红磊, 张玉欣, 王俊秀, 施双双, 王潇 (1743)
广西北海涠洲岛春季大气颗粒物浓度特征及影响因素	高元官, 张凯, 王体健, 陈志明, 耿红, 孟凡 (1753)
神农架大九湖大气中的多环芳烃	金梦云, 邢新丽, 柯艳萍, 郑煌, 胡天鹏, 孙焰, 丁洋, 李绘, 张泽洲, 祁士华 (1760)
沧州市春季 NMHCs 空间分布特征	段菁春, 周雪明, 张鹤丰, 谭吉华, 胡京南, 柴发合 (1769)
北京市民用燃煤烟气中气态污染物排放特征	梁云平, 张大伟, 林安国, 马召辉, 郭晓东 (1775)
生活垃圾堆肥设施 VOCs 排放特征及臭氧生成潜势分析	邵珠泽, 郑国砥, 王元刚, 高定, 朱彦莉, 陈同斌, 聂二旗 (1783)
低温等离子体对复合 CVOCs 的降解特性	姜理英, 张迪, 郭海倩, 缪晶晶, 陈怡伶, 李慧 (1792)
运城市道路扬尘化学组成特征及来源分析	武媛媛, 李如梅, 彭林, 端允, 王海京, 李颖慧, 白慧玲, 牟玲 (1799)
高架道路周边建筑物灰尘重金属污染风险: 以常州市为例	姚静波, 王明新, 齐今笛, 孙向武, 张文艺 (1807)
上海降水中氢氧同位素特征及与 ENSO 的关系	董小芳, 邓黄月, 张彦, 朱志鹏, 王琳, 郑祥民, 周立旻 (1817)
DOC + CDPF 对重型柴油车排放特性的影响	张允华, 楼狄明, 谭丕强, 胡志远 (1828)
我国重点城市饮用水中砷健康累积风险评价	张秋秋, 潘申龄, 刘伟, 张昱, 安伟 (1835)
基于 Monte Carlo 模拟法对水源水体中微囊藻毒素的健康风险评估	王阳, 徐明芳, 耿梦梦, 黎明, 耿耕南 (1842)
北京城区水体中 PPCPs 的分布特征及潜在风险	张盼伟, 周怀东, 赵高峰, 李昆, 赵晓辉, 刘巧娜, 任敏, 赵丹丹, 李东佼 (1852)
长江口及邻近海域春夏季有色溶解有机物时空分布特征及主要影响因素	孙语嫣, 白莹, 苏荣国, 石晓勇 (1863)
垃圾填埋有色溶解性有机质与铜络合机制	肖晓, 何小松, 高如泰, 席北斗, 张慧, 黄彩红, 李丹, 袁志业 (1873)
3 种生物滞留设计对城市地表径流溶解性氮的去除作用	李立青, 胡楠, 刘雨情, 涂声亮, 陈华超 (1881)
三峡库区小流域稻田空间格局对氮磷流失影响	陈成龙, 高明, 倪九派, 谢德体, 邓华 (1889)
NO ₃ ⁻ -N 负荷对树皮填料人工湿地早期反硝化及释碳速率的影响	姜应和, 李瑶, 张莹, 张翔凌 (1898)
湿地基质及阴极面积对人工湿地型微生物燃料电池去除偶氮染料同步产电的影响	李薛晓, 程思超, 方舟, 李先宁 (1904)
阳极材料对 6 L 微生物燃料电池性能及有机废水处理效果的影响	丁为俊, 于立亮, 陈杰, 成少安 (1911)
臭氧-混凝交互作用对水体有机物的影响	刘海龙, 付晶森, 郭雪峰, 柴建恬, 张忠民 (1918)
紫外线和次氯酸钠对 <i>Escherichia coli</i> 和 Poliovirus 的消毒作用	徐丽梅, 张崇森, 王晓昌, 吉铮, 周进宏 (1928)
不同沉淀 pH 值条件下制备的水合氧化铝对水中磷酸盐的吸附作用	王星星, 林建伟, 詹艳慧, 张志斌, 邢云青, 姜博汇, 储鸣 (1936)
树脂基纳米钛锆氧化物复合吸附剂同步去除水中磷和氟	陈家凯, 聂广泽, 刘志英, 姚远, 徐炎华 (1947)
灼烧净水污泥投加方式对磷吸附和磷形态的影响	朱培颖, 李大鹏, 于胜楠 (1957)
城市污水管网中污染物冲刷与沉积规律	桑浪涛, 石烜, 张彤, 付博文, 金鹏康 (1965)
11 种邻苯二甲酸酯在好氧污水处理系统中的归趋	周林军, 古文, 刘济宁, 石利利, 徐炎华 (1972)
反硝化抑制硫酸盐还原的工艺特性	金鹏康, 杨珍瑞, 李蓉, 李岩, 周立辉 (1982)
Fe ⁽⁰⁾ -活性炭强化短程反硝化脱氮及影响因素	吕永涛, 刘婷, 曾玉莲, 孙婷, 张瑶, 王磊 (1991)
两种不同抑制策略下部分亚硝化系统运行特性比较	李惠娟, 彭党聪, 陈国燕, 王博, 姚倩, 卓杨 (1997)
基质比对 ABR 厌氧氨氧化工艺脱氮性能的影响	闫刚, 徐乐中, 沈耀良, 吴鹏, 张婷, Samwine Thomas (2006)
温度对 SCSC-S/Fe 复合系统脱氮除磷及微生物群落特性的影响	范军辉, 郝瑞霞, 朱晓霞, 万京京, 刘思远, 王丽沙 (2012)
SCAR 处理城市生活污水的效能及其微生物群落动态分析	杨波, 徐辉, 冯修平, 李方, 田晴, 马春燕 (2021)
嗜碱降解菌 <i>Ochrobactrum</i> sp. 的好氧降解特性及其在焦化废水中的生物强化作用	徐伟超, 吴翠平, 张玉秀, 张琪, 张怡鸣 (2030)
锰氧化菌 <i>Arthrobacter</i> sp. HW-16 的锰氧化特性和氧化机制	万文结, 薛芷筠, 张泽文, 何冬兰 (2036)
温度对海洋厌氧氨氧化菌脱氮效能的影响	周同, 于德爽, 李津, 吴国栋, 王晓静 (2044)
包埋固定化活性污泥脱氮特性与微生物群落分析	许晓毅, 尤晓露, 吕晨培, 王斌, 胡碧波 (2052)
强化两相污泥高固厌氧消化系统的微生物群落	曹知平, 吴静, 左剑恶, 王晓璐, 王翀, 王广启, 王凯军, 钱易 (2059)
三峡库区城乡消落带人工植被恢复土壤放线菌多样性特征	秦红, 任庆水, 杨文航, 李昌晓 (2065)
川中丘陵区农田源头沟渠玉米季中氧化亚氮排放及其影响因素	田琳琳, 朱波, 汪涛, 赵原, 董宏伟, 任光前, 胡磊 (2074)
双氰胺对冬闲稻田和油菜地 N ₂ O 排放的影响	伍延正, 张苗苗, 秦红灵, 陈春兰, 王娟, 魏文学, 李勇 (2084)
生物炭介导的不同地表条件下土壤 N ₂ O 的排放特征	邹娟, 胡学玉, 张阳阳, 张迪, 陈威, 王向前, 陈窈君, 刘扬 (2093)
垄作秸秆覆盖下西南地区蚕豆田土壤呼吸与有机碳特征	熊瑛, 王龙昌, 杜娟, 赵琳璐, 周泉, 张赛 (2102)
广东省土壤 Cd 含量空间分布预测	孙慧, 郭治兴, 郭颖, 袁宇志, 柴敏, 毕如田, 杨静 (2111)
宿鸭湖沉积物重金属空间分布及潜在生态风险评价	张鹏岩, 康国华, 庞博, 郭依, 何坚坚, 秦明周 (2125)
腐殖酸活性组分及其比例对紫色潮土中铅形态转化和有效性演变动态的影响	王青清, 蒋珍茂, 王俊, 魏世强 (2136)
紫色水稻土颗粒有机质对重金属的富集特征	李秋言, 赵秀兰 (2146)
生物炭增强黄绵土对西替利嗪的吸附作用	吴志娟, 毕二平 (2154)
两种木材生物炭对铜离子的吸附特性及其机制	王彤彤, 马江波, 曲东, 张晓媛, 郑纪勇, 张兴昌 (2161)
牛粪源蛭蛭及其生物炭对 Pb ²⁺ 、Cd ²⁺ 的吸附特性	杜文慧, 朱维琴, 潘晓慧, 沈旭阳, 陈思远, 陈可乐, 坎吉汗·木沙拉, 张杭君, 丁颖 (2172)
C ₃ N ₄ /BiOBr 复合可见光催化剂的性能及其作用机制	鲍玥, 周旻昀, 邹骏华, 史宇滨, 万先凯, 史惠祥 (2182)
《环境科学》征稿简则 (2020) 《环境科学》征订启事 (2035) 信息 (1782, 1798, 1827)	

上海降水中氢氧同位素特征及与 ENSO 的关系

董小芳, 邓黄月, 张峦, 朱志鹏, 王琳, 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: 基于收集 2014 年 8 月至 2015 年 8 月上海 70 个降水样品, 分析上海降水同位素特征与温度、降水量的相关关系, 分析不同时间尺度下降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 、氘盈余与 ENSO 事件的联系。结果表明上海地区大气降水中 δD 与 $\delta^{18}\text{O}$ 冬春较高, 夏秋较低。上海大气降水线方程截距和斜率比全球降水线方程偏小, 可能是因为降水过程中受到不平衡的二次蒸发。在不同的时间尺度下, 上海地区降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与气温和降水量具有不同的相关关系, 冬季存在着较弱的温度效应, 而全年呈现出较显著的降水量效应, 受大气环流过程影响明显。取样期间, 降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与 d 值(过量氘)清晰记录了 La Niña 向 El Niño 之间的过渡, 拉尼娜期间, 降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与 d 值偏负; El Niño 期间, $\delta^{18}\text{O}$ 与 d 值偏正。

关键词: 上海; 稳定同位素; ENSO; 大气环流; $\delta^{18}\text{O}$; δD

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)05-1817-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.201609152

Characteristics of Stable Isotope in Precipitation and Its Relationship with ENSO in Shanghai

DONG Xiao-fang, DENG Huang-yue, ZHANG Luan, ZHU Zhi-peng, WANG Lin, 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: A total of 70 precipitation samples were collected from August 2014 to August 2015 in Shanghai and the oxygen and hydrogen isotope of precipitation were analyzed. The relationship between the $\delta^{18}\text{O}$ and deuterium excess of precipitation and ENSO events was addressed. The results showed that δD and $\delta^{18}\text{O}$ of precipitation in Shanghai were higher in winter and spring than in summer and fall. The slope of meteoric water line with these data was a little smaller than the global meteoric water line. The main reason could be the unbalanced secondary evaporation in the process of precipitation. The correlation between the $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation and temperature and precipitation varied in different time scales. On a seasonal scale, this work revealed that there was no significant temperature effect in winter, but significant precipitation effect was found in the annual scales, which was obviously affected by the atmospheric circulation. $\delta^{18}\text{O}$ values and deuterium excess in precipitation recorded the La Niña and El Niño conversion process. During the La Niña event, the $\delta^{18}\text{O}$ and d values were more negative than those in the El Niño event.

Key words: Shanghai; stable isotope; ENSO; atmospheric circulation; $\delta^{18}\text{O}$; δD

地球表面水体循环主要包括蒸发、水汽输送、大气降水、地表径流几个过程。其中, 大气降水是水循环中至关重要的一个环节。自然界水体中主要包含 ^{18}O 与氘(D)两种稳定同位素, 虽然两者所占比例很小, 但对环境变化有敏感响应, 比如水体中氢氧同位素丰度易受到纬度、海拔、温度、降水量、海陆位置等因素的影响^[1~3]。降水中稳定同位素丰度也易受降水时的气象过程、水汽源区气候环境、大尺度环流背景等因素的影响, 不同气候环境形成的降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与 δD 具有不同时空变化特征和分异。因此, 降水中氢氧稳定同位素特征研究是追踪大气降水水汽来源及大气环流过程的重要手段。在中低纬度地区, ENSO 事件是影响气候年际变化的一个重要因子^[4], 我国东部及南部大部分地区均受季风影响, 但受季风影响形成的降水中氢氧同位素组成

与同纬度北美、西欧相比具有不同特点^[5]。已有研究表明: 青藏高原冰芯中的 $\delta^{18}\text{O}$ 与 ENSO 事件具有显著的相关关系^[6,7]; 珠江三角洲降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 对 ENSO 事件的强信号也具有显著响应^[8], 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^[9]。由此可见, 季风区降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与 ENSO 机制具有紧密联系, 并且主要通过季风气候强弱影响同位素丰度。通过研究上海地区 2014~2015 年天气尺度降水样品, 分析该地区降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的时间变化特征及与 ENSO 事件的联系; 定量、定向分析降水水

收稿日期: 2016-09-19; 修订日期: 2016-11-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271054, 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

汽来源,揭示 ENSO 气候背景下降水中氢氧同位素特征与大气环流的联系;使得稳定同位素在区域水汽来源、降水过程及水循环研究中能得到更好的运用,以期为亚洲季风古气候记录的定量恢复提供一定依据。

1 样品采集与数据分析

1.1 研究区概况

实验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。采样期间上海受超强厄尔尼诺事件影响,年降水总量为 835.6 mm,年平均气温为 20.17℃。

1.2 样品收集与测定

每次降水样品过滤后及时装入 50 mL 白色聚乙烯瓶冷藏保存。自 2014 年 8 月至 2015 年 8 月共收集样品 70 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 光谱仪进行 $\delta^{18}\text{O}$ 与 δD 测定, δD 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。每个样品进行 6 次测量,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(δ)表示:

$$\delta^{18}\text{O}(\text{or } \delta\text{D}) = (R_{\text{sample}}/R_{\text{VSMOW}} - 1) \times 1000\text{‰}$$

式中, R_{sample} 和 R_{VSMOW} 分别代表水样和 VSMOW 中氢或氧稳定同位素比率 $R(^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 、 $\text{D}/\text{H})$,实验采用的标样为美国 LGR 公司生产的标样 LGR3C、LGR4C、LGR5C,相关具体参数可在其公司官网查看(www.lgrinc.com)。

2 氢氧(δD 、 $\delta^{18}\text{O}$)同位素的基本特征

2.1 大气降水中稳定同位素的变化特征

图 1 显示了研究时段内上海地区四季大气降水中 δD 与 $\delta^{18}\text{O}$ 的季节变化,从中可知,由于同位素分馏, δD 与 $\delta^{18}\text{O}$ 变化具有很好的一致性。同时,春季与冬季降水中 δD 与 $\delta^{18}\text{O}$ 值较高,而夏秋季季节较低。2014 年 8 月~2015 年 8 月上海地区大气降水中 δD 与 $\delta^{18}\text{O}$ 年变化范围分别为 $-83\text{‰} \sim -2\text{‰}$ 、 $-12.0\text{‰} \sim -0.2\text{‰}$,降水量加权平均值分别为 -49‰ 、

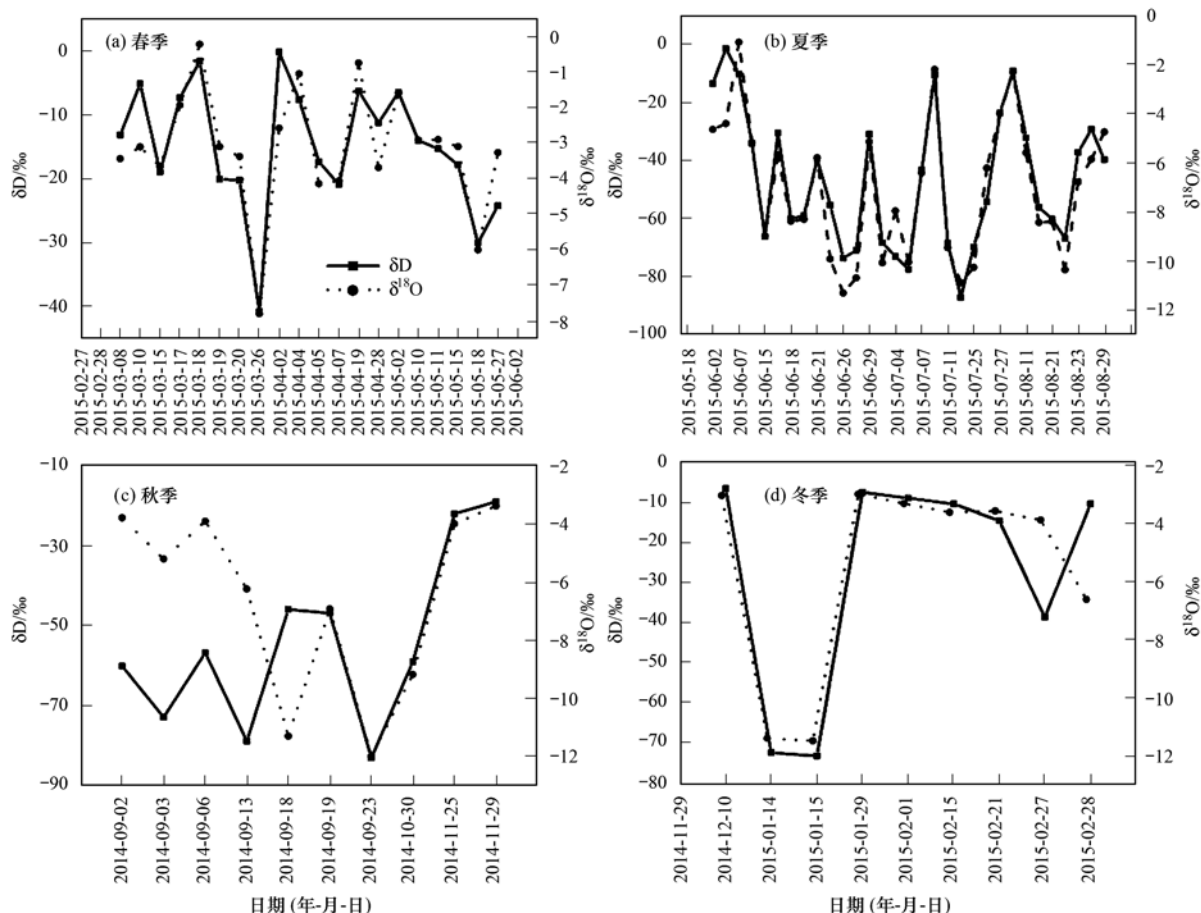


图 1 上海地区降水同位素组成

Fig. 1 Isotope composition of the precipitation in Shanghai

-7.5‰。其中, 春季 δD 与 $\delta^{18}O$ 变化范围分别为 -41‰ ~ -2‰、-7.8‰ ~ -0.2‰; 夏季为 -74‰ ~ -10‰、-11.3‰ ~ -1.1‰; 秋季为 -83‰ ~ -19‰、-12.0‰ ~ -3.4‰; 冬季为 -73‰ ~ -7‰、-11.5‰ ~ -3.0‰; 秋季与冬季 δD 与 $\delta^{18}O$ 极差大于春季与夏季。年内变化范围与柳鉴容等^[10] 研究我国南部地区降水中 $\delta^{18}O$ 变化范围 -16.2‰ ~ 0.4‰ 较为接近。前人研究表明, 全球大气降水中 $\delta^{18}O$ 的变化范围为 -54‰ ~ 31‰, 郑淑慧等^[11] 通过对北京、南京等 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‰ ~ 2‰, 说明在季节上上海地区 δD 与 $\delta^{18}O$ 变化范围比前人研究结果更为偏负。

整体上 δD 与 $\delta^{18}O$ 冬春为高值, 夏秋为低值, 具有明显的季节变化特征。最低值出现在 9 月, 为 -83‰、-12.0‰; 最高值出现在 3 月, 为 -2‰、-0.2‰。因为上海为亚热带季风气候区, 降水主要集中在 6 ~ 11 月, 夏季东南季风带来丰富水汽形成大量降水, 但水汽从海洋表面蒸发运移到陆地形成降水的过程中, 沿途水汽中的重水分子 $H_2^{18}O$ 、 $^1H^2H^{16}O$ 优先冷凝降落地表, 因此剩余水汽形成的降水中的重同位素越来越贫化, 降水越降越“轻”。上海地区夏秋季节多台风雨, 而形成台风雨的水汽运移路线较长, 多来自于中低纬的热带洋面, 所以夏秋季节 δD 与 $\delta^{18}O$ 值较低。并且 2014 年开始的 ENSO 事件通过影响中低纬地区大气环流, 我国季风气候受到影响, 使得降水中 δD 与 $\delta^{18}O$ 值比常年更偏负。冬春季节上海地区降水较少, 受大陆性气团及再蒸发水汽的影响, 气团内部降水造成的冲刷作用弱, $\delta D(\delta^{18}O)$ 值高。

2.2 大气降水线

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组成产生差异, 而这种 δD 与 $\delta^{18}O$ 的线性关系 (图 2) 被定义为大气降水线^[12], 大气降水线对于研究大气降水中的同位素变化具有重要作用。其中大气降水线斜率反映了 D 与 ^{18}O 的不同分馏程度差异, 而截距则表示 D 相对于平衡状态的偏离程度。1961 年, Craig^[13] 提出了全球大气降水线 (global atmospheric precipitation line): $\delta D = 8 \delta^{18}O + 10$, 又名 Craig 方程, 揭示了水汽在其源地非平衡蒸发以及水汽在凝结过程中平衡分馏条件下降水中稳定同位素比率 δD 与 $\delta^{18}O$ 间的对比关系^[14], 而国内学者郑淑慧等^[11] 提出了我国的降水方程: $\delta D = 7.9 \delta^{18}O + 8.2$ 。但是由于大气降水同位素的组成

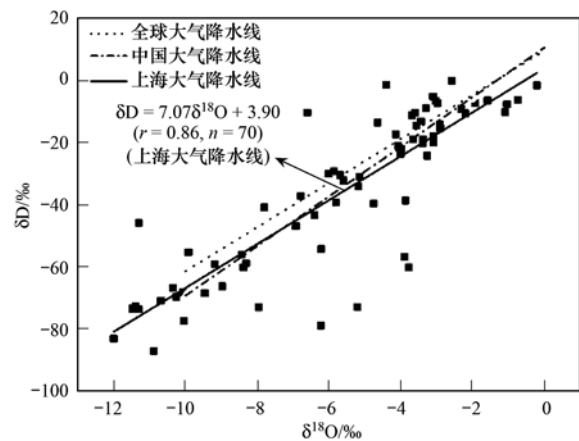


图 2 上海地区大气降水线方程

Fig. 2 LMWL of Shanghai

受到各种因素的影响, 各地区就有了反映各自降水规律的局地降水线 (local atmospheric precipitation line)。根据各季节所得数据利用最小二乘法拟合得到四季及全年 δD - $\delta^{18}O$ 大气降水线方程如下。

春季: $\delta D = 5.03 \delta^{18}O + 0.81$ ($r = 0.88$, $\alpha = 0.001$, $n = 20$)

夏季: $\delta D = 7.83 \delta^{18}O + 8.63$ ($r = 0.93$, $\alpha = 0.001$, $n = 31$)

秋季: $\delta D = 2.90 \delta^{18}O - 35.50$ ($r = 0.42$, $n = 10$)

冬季: $\delta D = 7.12 \delta^{18}O + 12.43$ ($r = 0.90$, $\alpha = 0.001$, $n = 9$)

全年: $\delta D = 7.07 \delta^{18}O + 3.90$ ($r = 0.86$, $\alpha = 0.001$, $n = 70$)

总之, 上海四季节除秋季以外, 线性关系良好, 均通过置信度大于 0.01 的检验。年尺度上表现为: 大气降水线方程截距和斜率比 Craig 的全球降水线方程偏小很多, 全年大气降水线与季风区昆明 ($\delta D = 7.34 \delta^{18}O + 2.56$, GNIP 数据)、海口 ($\delta D = 7.89 \delta^{18}O + 11.04$, GNIP 数据)、天津 ($\delta D = 7.52 \delta^{18}O + 6.63$, GNIP 数据)^[15] 的斜率与截距相接近, 该方程还与柳鉴容等^[16] 在 2005 ~ 2006 年依据东部季风区 17 个站点次降水量数据建立的降水线方程 $\delta D = 7.46 \delta^{18}O + 0.90$ 结果相似。以上结果表明, 该地区虽受厄尔尼诺的影响, 但是降水类型, 水汽性质与来源均受季风气候影响明显。季节尺度上表现为: 春季与秋季截距、斜率低于夏季与冬季, 且夏季大气降水线方程与我国郑淑慧等^[11] 提出的大气降水线方程非常接近。大气降水线斜率主要受雨滴凝结时的平均温度控制, 有研究表明, 较低的斜率与截距主要是由于雨滴降落过程中受到不平衡的二次蒸发引

起的同位素分馏导致^[17],大气越干热,大气降水线的斜率与截距越小^[18].上海春、秋两季气温较高而降水量较少,蒸发作用强烈,雨滴从云层底部降落到地面的过程中部分将蒸发,影响同位素动力分馏,导致降水线斜率与截距偏小.而夏、冬两季降水量较多,水汽来源主要为海洋水汽输送和部分局地水汽蒸发,降水过程中雨滴比较富集¹⁸O与D,因此其降水线斜率较接近全球降水线斜率8.

为了深入分析大气降水线与降水量大小的关系,将上海地区的70次降水按降雨量 Q 大小分为4组,结果为表1.结果显示,降水线方程的截距与斜

率随着降水量的减小而减小,斜率从7.53($Q>25$ mm)减至5.54($Q\leq 5$ mm),所对应截距由4.20减至-0.32,这可能与雨滴在降落过程中受到不平衡的二次蒸发影响引起的同位素分馏有关,降水量越小,二次蒸发效应越明显,即降水过程中受到的蒸发作用越强烈,形成的降水线方程斜率和截距越偏小,表现为表1中 $Q\leq 5$ mm的降水样品的斜率与截距低于其他任意一组.而 $Q>25$ mm的降水线方程与全年降水线方程相似,说明较大降水量事件受云下二次蒸发的影响较小,使其斜率和截距偏大.

表1 上海地区大气降水样 δD - $\delta^{18}O$ 相关关系¹⁾
Table 1 Correlation of δD - $\delta^{18}O$ of precipitation in Shanghai

样品	样品数	降水量 (Q)/mm	斜率	截距	相关系数
全部样品	70	835.6	7.07	3.90	0.86**
$Q>25$ mm	8	353.5	7.53	4.20	0.85**
$10\text{ mm}<Q\leq 25$ mm	18	288.5	6.70	2.03	0.91**
$5\text{ mm}<Q\leq 10$ mm	18	127.79	5.56	1.44	0.78*
$Q\leq 5$ mm	26	65.81	5.54	-0.32	0.94**

1) * 为 $P<0.05$, ** 为 $P<0.01$

2.3 大气降水氢氧同位素组成的主要影响因子

2.3.1 温度效应

有研究者曾在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,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^[19],因为地表温度会影响上空降水云团的冷凝温度,而云团的凝结温度则直接影响大气降水中的 δ 值.若大气降水中 $\delta^{18}O$ 值与温度变化呈现正相关关系,称为“温度效应”,此现象主要存在于中高纬内陆地区.通过对上海地区场降水 $\delta^{18}O$ 与温度进行回归分析(图3),得到秋季、冬季、全年分析结果分别为: $\delta^{18}O = -0.34T + 20.19$ ($n=10$); $\delta^{18}O = -0.17T + 8.62$ ($n=9$); $\delta^{18}O = -0.65T + 16.50$ ($n=70$),3种结果中 $\delta^{18}O$ 与温度相关系数的置信度都达到0.05.结果如表2,上海地区大气降水中 $\delta^{18}O$ 与温度在全年尺度下反温度效应不明显,而仅在冬季存在着较弱的温度效应,在春季与夏季不存在温度效应.较弱的反温度效应可能与厄尔尼诺对长江中下游平原气候的影响有关,有学者指

出,在El Niño年,中国长江流域雨量偏多,而南北方降水减少,太平洋中东部异常升温,此时降水水汽主要来自近海水汽输送及部分局地水汽蒸发,导致降水中 $\delta^{18}O$ 偏正,故气温高, $\delta^{18}O$ 不一定低,反温度效应不明显.

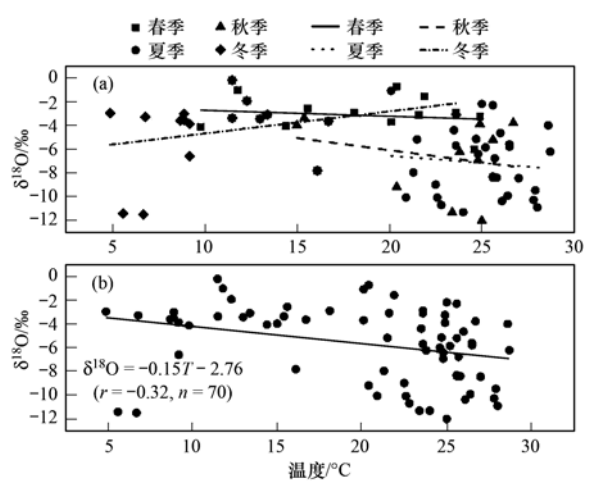


图3 上海降水中 $\delta^{18}O$ 与温度的相关关系
Fig. 3 Correlation between $\delta^{18}O$ and temperature in Shanghai

表2 上海地区降水 $\delta^{18}O$ 与温度的相关系数¹⁾
Table 2 Correlation coefficient between $\delta^{18}O$ and temperature in Shanghai

$\delta^{18}O$ 与温度	春季	夏季	秋季	冬季	全年
相关系数	-0.15	-0.10	-0.27*	0.28*	-0.31**

1) * 为 $P<0.05$, ** 为 $P<0.01$

2.3.2 降水量效应

若大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与降水量的变化成相反关系,即降水量越大,降水 $\delta^{18}\text{O}$ 越小,称之为“降水量效应”.对上海地区降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与实测降水量进行回归分析(图4),计算结果如表3.结果表明,全年尺度上,上海地区大气降水存在较弱降水量效应,相关系数为 -0.41 .在季节尺度上,秋季与冬季皆存在较显著的降水量效应,其中秋季相关系数高达 -0.84 ,此结果与陈衍婷等^[20]在厦门的研究,李广

等^[21]在滇南研究结果类似.这与降水水汽来源有关,根据瑞利分馏模型,对于来自单一水汽源地的降水,降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 沿水汽输送路径不断衰减.秋、冬两季受干冷西北季风影响明显,水汽来源主要为局地水汽蒸发,降水量较少,形成的降水 $\delta^{18}\text{O}$ 偏负.春、夏两季水汽主要为来源于太平洋与印度洋的长距离水汽输送及部分局地水汽蒸发,水汽来源不单一,导致降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 未表现出明显的降水量效应.

表3 上海地区降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与降水的相关系数¹⁾

Table 3 Correlation coefficient between $\delta^{18}\text{O}$ and precipitation in Shanghai					
$\delta^{18}\text{O}$ 与降水	春季	夏季	秋季	冬季	全年
相关系数	-0.09	-0.25	-0.84**	-0.64**	-0.41*

1) * 为 $P < 0.05$, ** 为 $P < 0.01$

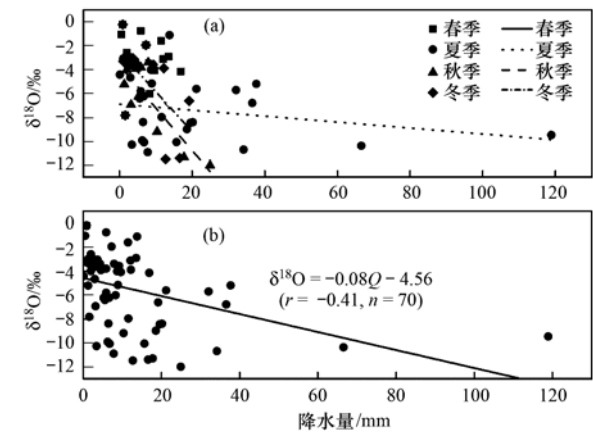


图4 上海降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与降水量的相关关系

Fig. 4 Correlation between $\delta^{18}\text{O}$ and precipitation in Shanghai

在2014年8月~2015年8月采样期间,共收集4组单场降水连续性降水样品,采样时间间隔为30 min~2 h不等,样品处理与测量方法与其他样品相同.图5表明,4组降水中 δD 与 $\delta^{18}\text{O}$ 均随着降水的进行呈现不同变化结果,6月2日与6月8日两组样品降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 随着降水的进行有波动上升的趋势,如6月2日降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 由 -4.7‰ 升至 -3.7‰ ,6月8日则由 -5.2‰ 升至 -2.9‰ .7月23日与8月24日两组样品则表现为持续降低,比如:7月23日降水中 δD 与 $\delta^{18}\text{O}$ 分别由 -43‰ 、 -6.7‰ 减至 -65‰ 、 -10.0‰ ;8月24日降水中 δD 与 $\delta^{18}\text{O}$ 分别由 -87‰ 、 -10.9‰ 减至 -116‰ 、 -15.9‰ ,究其原因两组样品中形成连续性降水的水汽来源相同,形成降水的水汽云团中重同位素D与 $\delta^{18}\text{O}$ 较富集,在降水过程中重同位素优先凝结形成降水,导致早期降水还有较高的 δD 与 $\delta^{18}\text{O}$ 值,随着降水的进

行,云团中重同位素不断贫化,雨水中 δD 与 $\delta^{18}\text{O}$ 越来越偏负,此结果与前人研究结果得到的雨除效应效果相同.6月2日与6月8日不同阶段降水中 δD 与 $\delta^{18}\text{O}$ 不降反升,可能是由于单场降水不同时间段的水汽来源不同,形成降水的外来水汽与本地水汽的混合,能造成不同阶段雨水中 δD 与 $\delta^{18}\text{O}$ 值的波动.

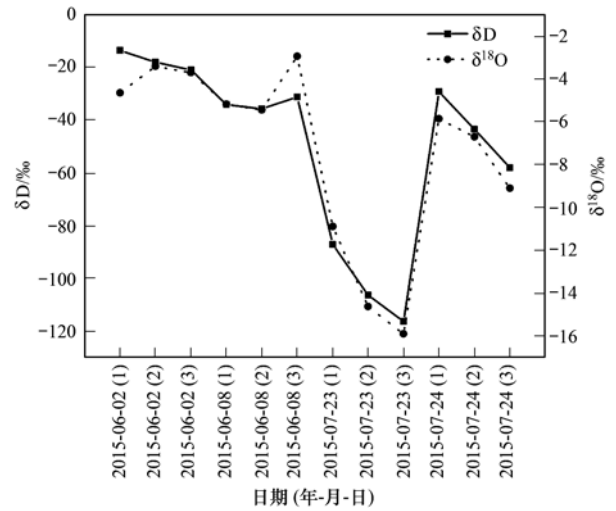


图5 上海地区连续性降水氢氧同位素变化

Fig. 5 Variations of hydrogen and oxygen isotopes of continuous precipitation in Shanghai

3 上海大气降水中氢氧同位素与 ENSO 的联系

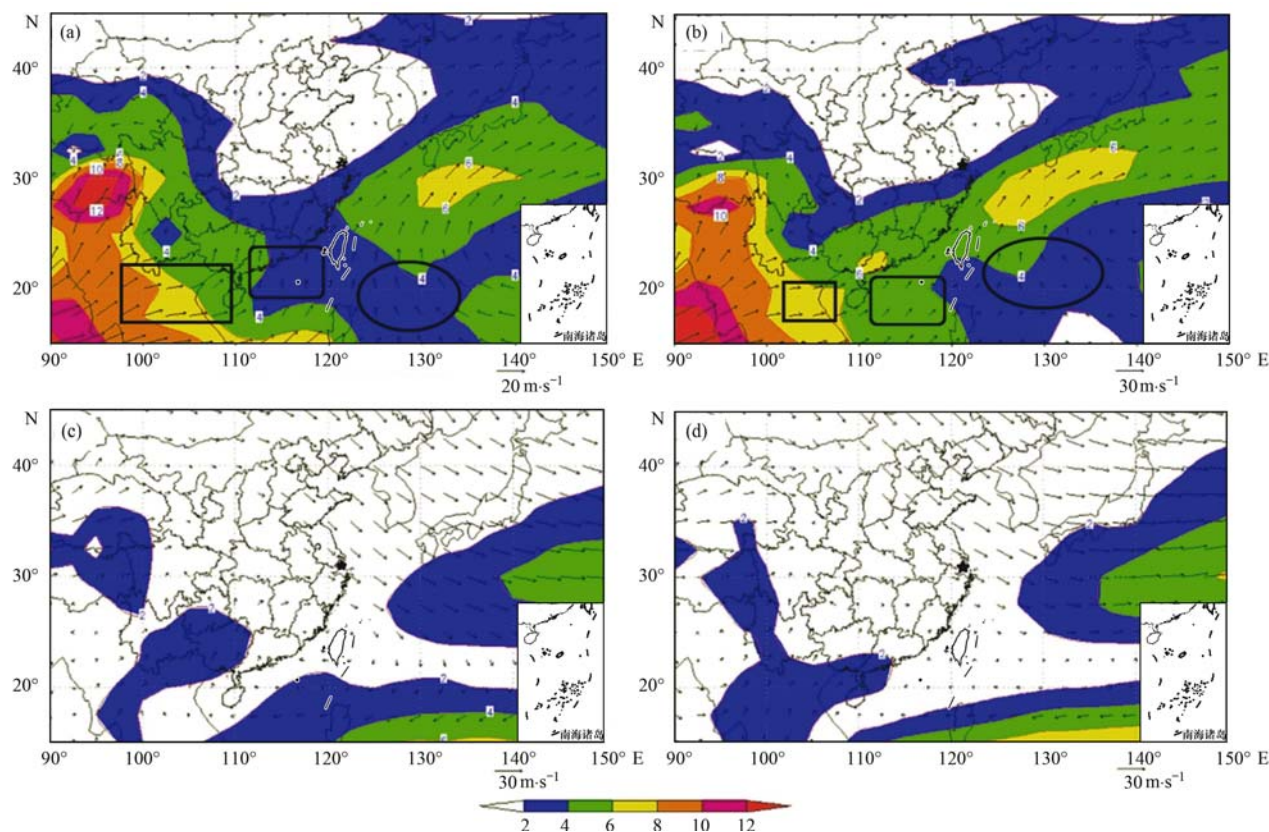
大气降水中的同位素丰度主要受降水量及降水时的温度影响,而大气环流和重要的气候事件是制约温度和降水量的重要因素. ENSO 是全球尺度的气候事件,是厄尔尼诺、拉尼娜(El Niño/La Niña)和南方涛动(Southern Oscillation)的总称,主要发生

在赤道中、东太平洋上的大尺度海气相互作用事件,变化周期为 2~7 a 之间^[22],可造成全球性的影响,使世界各地产生异常的天气和气候事件^[23],从而影响降水中的同位素组成. ENSO 事件定量分析的常用指标是 NION 3.4 区(5°N~5°S,170°W~120°W)的海表温度异常(SSTA)^[24]和美国气象预测中心发布的南方涛动指数序列(SOI)^[25]. 一般说来,SSTA 与 SOI 具有很高的负相关性,SOI 若为负值,则表明该地倾向为厄尔尼诺事件,SOI 若为正值,则表明该地倾向为拉尼娜事件. 为了具体分析 ENSO 事件对上海地区大气降水中 δD 与 $\delta^{18}O$ 的影响,本文依托 NION 3.4 区 2014 年 7 月~2015 年 8 月 SSTA 和 SOI 序列数据进行分析,该数据资料可通过美国 NOAA 气候预测中心(www.noaa.gov)获得.

3.1 上海大气降水中 $\delta^{18}O$ 对 ENSO 事件的响应

据美国气象预测中心(NOAA)SOI 及 SSTA 等数据显示,自 2014 年 9 月起,NION 3.4 区海表温度(SSTA)呈现为正异常,并且保持不断上升的趋势,厄尔尼诺的状态开始形成,采样时间段恰处于该海区由拉尼娜事件向厄尔尼诺事件的过渡期间,降水中的 $\delta^{18}O$ 受到 ENSO 事件影响,呈现一些重要特征.

前人的研究表明^[26,27],在 El Niño 年,中国长江流域雨量偏多,而南北方降水减少,而在 La Niña 年,长江流域雨量偏少,南北方降水偏多^[28]. 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 2014 年与 2015 年冬、夏两季 850 hPa 水汽通量及大气环流分布结果,如图 6 和图 7(图中圆形区域为来自于太平洋的水汽输送,无分明棱角的矩形区域为南海水汽输送,矩形区域为印度洋水汽输送,五角星为研究区位置). 2014 年夏季,上海地区大气降水主要有两组水汽来源:南海和南部太平洋气流向北输送,在日本南部附近汇合加强,同时,另一股来自于印度洋的水汽则通过向东北方向推送到达上海地区[图 6(a)]. 上海 2014 年夏季环流分布[图 7(a)]显示该区域主要受西南风和东南风影响,在山东附近有反气旋分布,黄海海区处于气旋控制之下,上海处于低压槽南方,降水较少. 2015 年夏季[图 6(b)]上海降水水汽输送带西移,水汽通量较大值位于东海附近,El Niño 现象导致赤道附近太平洋中、东部海水温度升高,印度洋海区海温相对变低,因此大量水汽



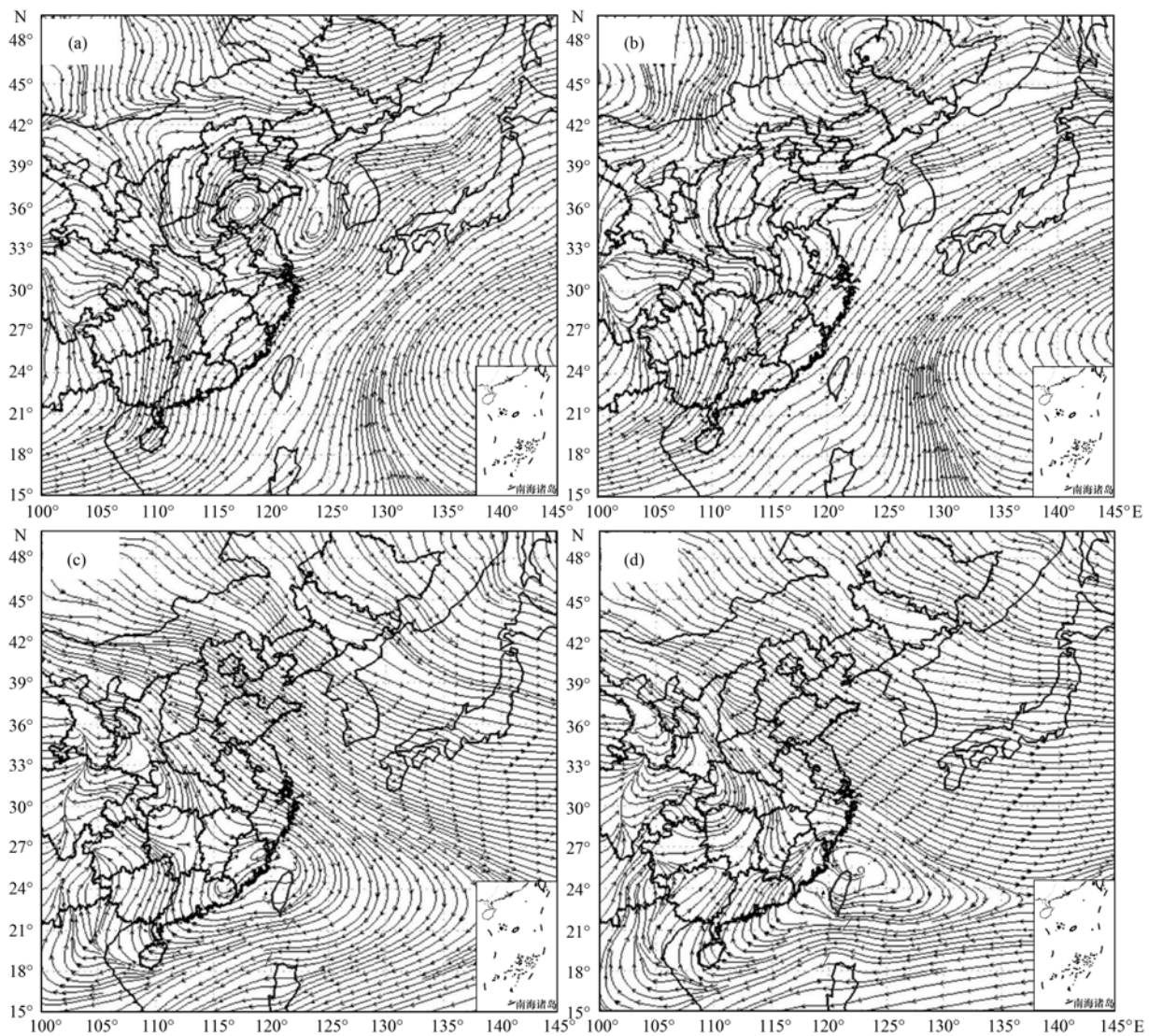
(a) 2014 年夏季, (b) 2015 年夏季, (c) 2014 年冬季, (d) 2015 年冬季; 水汽通量(阴影区), $g \cdot (hPa \cdot cm \cdot s)^{-1}$

图 6 上海地区 2014 年、2015 年夏季与冬季 850 hPa 水汽通量和矢量风场的水平分布

Fig. 6 Horizontal distribution of 850 hPa water vapor flux and vector wind field in Shanghai from 2014 to 2015

从南海和太平洋南部由东南风向北推送,而印度洋推送的水汽减少,此结果与谭明^[29]与袁娜等^[30]的研究结果类似。冬季,上海地区 2014 年与 2015 年水汽主要受大陆气团影响[图 6(c)和图 6(d)],依靠西北风及 40°N 左右西风进行水汽输送,并且 2015 年冬季太平洋水汽通量值变大,降水增多[图 6(d)和图 7(d)]。研究区域 2014 年 9 月降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 加权平均值为 -7.0‰ ,除去 2015 年 1 月、7 月与 10 月,其余月份降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 均比 9 月偏重,分别为: -3.7‰ 、 -3.0‰ 、 -4.2‰ 、 -3.3‰ 、 -2.7‰ 、 -3.3‰ 、 -6.8‰ 、 -6.5‰ 。可见,研究区降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 清晰地记录了 La Niña 向 El Niño 之间的过渡。在拉尼娜期间,上海地区大气降水主要来自于印度洋及南海远距离水汽输送,水汽中重同位素在输送

过程中优先凝结而逐渐贫化,导致上海降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏负,而在 El Niño 期间,赤道中东太平洋海温迅速上升,上海地区来自于近源太平洋的水汽增加,重同位素损失较少, $\delta^{18}\text{O}$ 偏正, $\delta^{18}\text{O}$ 值变化与 850 hPa 水汽通量及环流分布分析结果相吻合。而 1、10 月由于受厄尔尼诺影响,冬季气温较往年偏低,虽受西北季风影响,但大陆气团寒冷干燥,降水水汽主要为局地水汽蒸发,而低温条件下蒸发水汽产生的大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 偏负,导致 1、10 月降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 偏负,而 7 月上海地区降水水汽主要来自于长距离海洋水汽输送,水汽运移过程中重同位素不断贫化,使其 $\delta^{18}\text{O}$ 偏负。图 8 表明,降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与月均 SSTA、SOI 指数有一定的相关性,通过对降水中加权月均 $\delta^{18}\text{O}$ 与月均 SSTA、SOI 进行回归分析发现: $\delta^{18}\text{O} = 0.07\text{SOI}_{\text{NION } 3.4}$



(a) 2014 年夏季; (b) 2015 年夏季; (c) 2014 年冬季; (d) 2015 年冬季

图 7 上海地区 2014 年、2015 年夏季与冬季 850 hPa 环流分布

Fig. 7 Horizontal distribution of 850 hPa circulation distribution in Shanghai from 2014 to 2015

+0.05 ($r = -0.40, \alpha = 0.01, n = 12$), 降水中月均 $\delta^{18}\text{O}$ 与 SOI 指数具有较强的相关性。

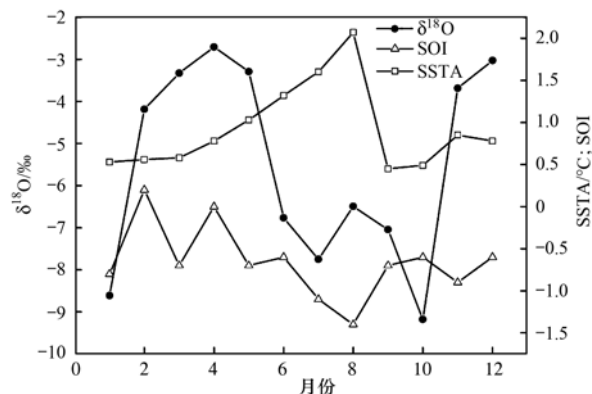


图8 NINO 3.4 区 SSTA、SOI 与上海降水中月平均 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化

Fig. 8 Monthly average variations of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation in Shanghai and mean SSTA/SOI in NINO 3.4

3.2 上海降水中 d (过量氘) 对 ENSO 事件的响应

Dansgaard^[31] 将氘剩余值 (d 值) 定义为: $d = \delta\text{D} - 8\delta^{18}\text{O}$, 它是由降水中 δD 与 $\delta^{18}\text{O}$ 组成的一个二级指标, 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当中的不平衡程度, 可推断水汽来源地大气相对湿度、风速和水面温度等。在研

究期间, 年平均加权 d 值为 11.10‰ , 春、夏、秋、四季 d 值变化范围分别为 $-0.3\text{‰} \sim 21.6\text{‰}$ 、 $-9.3\text{‰} \sim 33.8\text{‰}$ 、 $-31.3\text{‰} \sim 44.5\text{‰}$ 、 $-7.7\text{‰} \sim 42.5\text{‰}$ 。由此可以看出, 自 2014 年 8 月 ~ 2015 年 8 月期间, 降水中 d 值春、秋季较低, 夏、冬季较高, 此时正值 La Niña 向 El Niño 之间的过渡时期, 在拉尼娜事件期间, 印度洋北部 850 hPa 水汽通量最大中心值超过 $12 \text{ g} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$, 而太平洋地区为大于 $6 \text{ g} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ [图 6(a)], 又由于上海局部地区受西南风影响 [图 7(a)], 因此远源印度洋、南海水汽输送比例偏大, 水汽运移过程中同位素贫化, d 值较低。2015 年夏季正是厄尔尼诺的强盛期, 赤道中东太平洋迅速升温, 水汽通量大值区域位于东海附近, 与 2014 年相比明显西移并且范围有所扩大 [图 6(a) 和图 6(b)], 加之研究区夏季主要受东南季风影响, 因此近源太平洋水汽比例偏大, 近源水汽输送, 途中重同位素损失少, d 值较高 (图 9)。冬季上海地区水汽主要受大陆气团影响, 通过西北风与部分中高纬西风进行水汽输送 [图 7(c) 和图 7(d)], 由于水汽源地气候干燥, 多大风天气, 因此受大陆性气团影响形成的降水 d 值较高。同时, 通过对加权月均 d 值

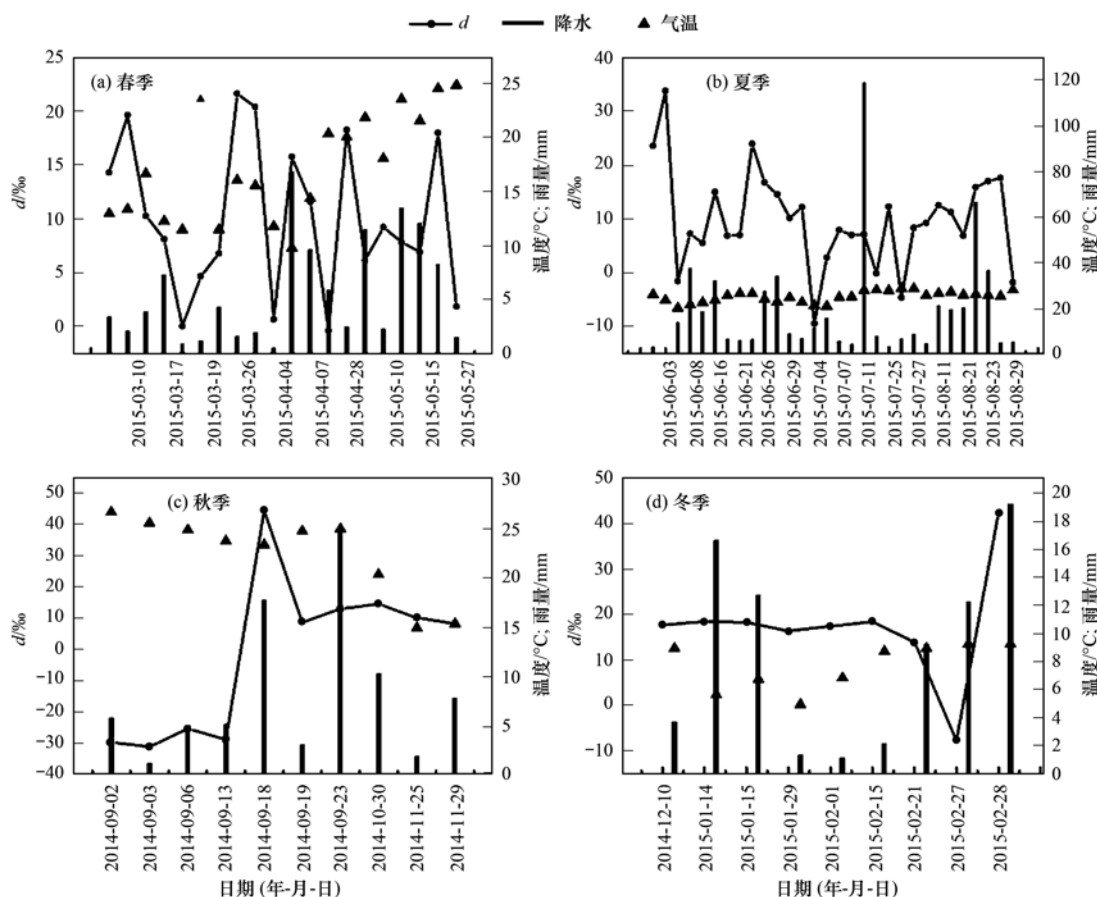


图9 上海降水中 d 值与温度、降水量的变化

Fig. 9 Variations of d , precipitation and temperature in Shanghai

与月均 SSTA、SOI 回归分析发现(图 10): $d = 0.02 \text{ SOI}_{\text{NINO } 3.4} + 0.02$ ($r = -0.28, \alpha = 0.01, n = 12$), 结果表明, d 值与 SOI 指数具有较弱的相关性。值得注意的是, 在 El Niño 形成早期, 西北太平洋温度异常而引起反气旋出现总会滞后一段时间出现^[32], 所以, 降水中 d 值对 ENSO 的响应存在一定的滞后性, 这将大大影响降水中 d 值与 ENSO 相关指数的相关性。

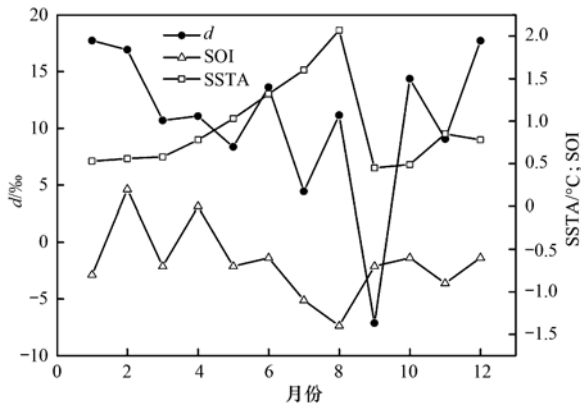


图 10 NINO 3.4 区 SSTA、SOI 与上海降水中月平均 d 值的变化

Fig. 10 Monthly average variations of d in precipitation in Shanghai and mean SSTA/SOI in NINO 3.4

4 结论

(1) 上海地区大气降水中 δD 与 $\delta^{18}O$ 年变化范围分别为 $-83\text{‰} \sim -2\text{‰}$ 、 $-12.0\text{‰} \sim -0.2\text{‰}$, 冬春为高值, 夏秋为低值, 具有明显的季节变化特征, 水汽来源的季节差异是导致氢氧同位素季节变化的重要原因。夏季东南季风带来丰富水汽形成大量降水, 沿途水汽中的重同位素优先凝结降落地表, 因此剩余水汽形成的降水中的重同位素贫化; 冬、春季节上海地区降水较少, 受大陆性气团及局地水汽蒸发影响, 气团内部降水造成的冲刷作用弱, δD ($\delta^{18}O$) 表现为高值。

(2) 2014 年 8 月 ~ 2015 年 8 月上海大气降水线方程为: $\delta D = 7.07 \delta^{18}O + 3.90$ ($r = 0.86, \alpha = 0.001, n = 70$), 季节尺度和年尺度上大气降水线方程截距和斜率比全球降水线方程偏小, 这可能与雨滴在降水过程中受到不平衡的二次蒸发引起的同位素动力分馏有关。监测期间, 超强厄尔尼诺影响上海地区降水水汽来源及降水量, 导致该地区在年尺度上并未表现出显著的降水量效应和反温度效应。但是 4 组单场降水连续降水样品研究则证明了雨除效应的存在, 而不同阶段雨水中 δD 与 $\delta^{18}O$ 值的波动, 则可能与外来水汽与本地水汽的混合有关。

(3) 取样期间, 降水中 $\delta^{18}O$ 与 d 值清晰地记录了 La Niña 向 El Niño 之间的过渡, La Niña 期间, 西南风输送的印度洋与南海水汽比例偏大, 长距离水汽运移导致同位素贫化, 降水中 $\delta^{18}O$ 与 d 值偏负; 而在 El Niño 期间, 东南风输送的近源太平洋水汽比例偏大, 近源水汽输送, 途中重同位素损失少, $\delta^{18}O$ 与 d 值偏正。同时, 上海地区大气降水中 $\delta^{18}O$ 和 d 值与 SOI、SSTA 两指数具有一定的相关性, 但是, 两者对 ENSO 的响应存在一定的滞后性, 这将大大影响降水中 d 值与 ENSO 相关指数的相关性, 此具体过程有待进一步研究。

致谢: 感谢王郭臣、杨华玮等同学在论文完成过程中的指导与帮助。

参考文献:

- [1] 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): 2095-2101.
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): 2095-2101.
- [2] 张应华, 作彦卿, 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.
- [3] 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.
- [4] Yamanaka T, Tsujimura M, Oyunbaatar D, et al. Isotopic variation of precipitation over eastern Mongolia and its implication for the atmospheric water cycle[J]. Journal of Hydrology, 2007, **333**(1): 21-34.
- [5] 卫克勤, 林瑞芬. 论季风气候对我国雨水同位素组成的影响[J]. 地球化学, 1994, **23**(1): 33-41.
Wei K Q, Lin R F. The influence of the monsoon climate on the isotopic composition of precipitation in China[J]. Geochimica, 1994, **23**(1): 33-41.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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 $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation in the Zhujiang (Pearl) River delta and its relationship with ENSO event[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2007, **27**(6): 825-830.
- [9] 温艳茹, 王健力. 重庆地区大气场降水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.
- [10] 柳鉴容, 宋献方, 袁国富, 等. 中国南部夏季季风降水水汽来源的稳定同位素证据[J]. *地理科学*, 2008, **18**(2): 155-165.
- Liu J R, Song X F, Yuan G F, *et al.* Stable isotopes of summer monsoonal precipitation in southern China and the moisture sources evidence from $\delta^{18}\text{O}$ signature[J]. *Geographical Science*, 2008, **18**(2): 155-165.
- [11] 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.
- Zheng S H, Hou F G, Ni B L. Development of stable isotopes of precipitation[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1983, (13): 801-806.
- [12] 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, Ye 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.
- [13] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters [J]. *Science*, 1961, **133**(3465): 1702-1703.
- [14] Li C, Yang S Y, Lian E G, *et al.* Damming effect on the Changjiang (Yangtze River) river water cycle based on stable hydrogen and oxygen isotopic records[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2016, **165**: 125-133.
- [15] 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.
- Zhang X P, Yao T D. Distributional features of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1998, **53**(4): 356-364.
- [16] 柳鉴容, 宋献方, 袁国富, 等. 中国东部季风区大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的特征及水汽来源[J]. *科学通报*, 2009, **54**(22): 3522-3531.
- Liu J R, Song X F, Yuan G F, *et al.* Characteristic of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation over Eastern monsoon China and the water vapor sources[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, **55**(2): 200-211.
- [17] 靳晓刚, 张明军, 王圣杰, 等. 基于氢氧稳定同位素的黄土高原云下二次蒸发效应[J]. *环境科学*, 2015, **36**(4): 1241-1248.
- Jin X G, Zhang M J, Wang S J, *et al.* Effect of below-cloud secondary evaporation in precipitations over the Loess Plateau based on the stable isotopes of hydrogen and oxygen [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(4): 1241-1248.
- [18] 肖可, 沈立成, 王鹏. 藏南干旱区湖泊及地热水体氢氧同位素研究[J]. *环境科学*, 2014, **35**(8): 2952-2958.
- Xiao K, Shen L C, Wang P. Hydrogen and oxygen isotopes of lake water and geothermal spring water in arid area of south Tibet [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(8): 2952-2958.
- [19] Matthews C J D, Longstaffe F J, Ferguson S H. Dentine oxygen isotopes ($\delta^{18}\text{O}$) as a proxy for odontocete distributions and movements[J]. *Ecology and Evolution*, 2016, **6**(14): 4643-4653.
- [20] 陈衍婷, 杜文娇, 陈进生, 等. 厦门地区大气降水氢氧同位素组成特征及水汽来源探讨[J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(2): 667-674.
- Chen Y T, Du W J, Chen J S, *et al.* Composition of hydrogen and oxygen isotopic of precipitation and source apportionment of water vapor in Xiamen Area[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(2): 667-674.
- [21] 李广, 章新平, 许有鹏, 等. 滇南蒙自地区降水稳定同位素特征及其水汽来源[J]. *环境科学*, 2016, **37**(4): 1313-1320.
- Li G, Zhang X P, Xu Y P, *et al.* Characteristics of stable isotopes in precipitation and their moisture sources in Mengzi region, southern Yunnan[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(4): 1313-1320.
- [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**(S1): 125-133.
- Wang S W, Zhu J H, Cai J N, *et al.* Irregularities in ENSO variability [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2003, **39**(S1): 125-133.
- [23] Ham Y G, Kang I S, Kim D, *et al.* El-Nino Southern Oscillation simulated and predicted in SNU coupled GCMS [J]. *Climate Dynamics*, 2012, **38**(11-12): 2227-2242.
- [24] 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.
- [25] Ropelewski C F, Jones P D. An extension of the Tahiti-Darwin southern oscillation index[J]. *Monthly Weather Review*, 1987, **115**(9): 2161-2165.
- [26] 吴江滢, 邵晓华, 汪永进. 南京年纹层石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的冰期气候事件特征[J]. *地理科学*, 2007, **27**(1): 75-80.
- Wu J Y, Shao X H, Wang Y J. Timing and structure of glacial climate events derived from an annually-growth stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ record from Hulu cave, Nanjing [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2007, **27**(1): 75-80.
- [27] 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.
- [28] 耿新. 热带太平洋低层环流主模态及其与东亚大气环流的关系[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2015. 31-42.
- [29] 谭明. 近千年气候格局的环流背景: ENSO 态的不确定性分析与再重建[J]. *中国科学: 地球科学*, 2016, **46**(5): 657-673.
- Tan M. Circulation background of climate patterns in the past millennium: Uncertainty analysis and re-reconstruction of ENSO-like state[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2016, **59**(6): 1225-1241.
- [30] 袁娜, 李廷勇, 王海波, 等. 降水-滴水的 $\delta^{18}\text{O}/\delta\text{D}$ 年季变化及与大气环流的关系——以重庆芙蓉洞地区为例[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2015, **37**(9): 133-139.
- Yuan N, Li T Y, Wang H B, *et al.* Annual and monthly

- variations of δD and $\delta^{18}O$ values in precipitation and drip water and their relationship with atmospheric circulation: a case study in Furong cave area[J]. *Journal of southwest University (Natural Science Edition)*, 2015, **37**(9): 133-139.
- [31] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation[J]. *Tellus*, 1964, **16**(4): 436-468.
- [32] 王钦, 李双林, 付建建, 等. 1998 和 2010 年夏季降水异常成因的对比分析: 兼论两类不同厄尔尼诺事件的影响[J]. *气象学报*, 2012, **70**(6): 1207-1222.
- Wang Q, Li S L, Fu J J, *et al.* On the formation of anomalous summer precipitation in the years of 2010 and 1998: a comparison of the El Niño's impact between modoki and typical El Niño cases[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2012, **70**(6): 1207-1222.

《环境科学》连续 5 次荣获 “中国最具国际影响力学术期刊”称号

2016 年 11 月 22 日, 中国学术期刊(光盘版)电子杂志社(CNKI)等机构发布“2016 中国最具国际影响力学术期刊”评选结果. 《环境科学》再获“2016 中国最具国际影响力学术期刊”称号, 是唯一入选的环境科学与资源科学类中文期刊, 也是自首次评选以来连续 5 次获此殊荣. 评选以期刊国际影响力指数进行排序, 遴选出排名前 5% (Top5%) 的期刊获评“中国最具国际影响力学术期刊”.

CONTENTS

Estimating the Secondary Organic Aerosol Concentration and Source Apportionment During the Summer and Winter in the Nanjing Industrial District	LIU Jing-da, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (1733)
Modeled Deposition of Fine Particles in Human Airway in Northern Suburb of Nanjing	LIANG Jing-shu, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (1743)
Concentration Characteristics and Influencing Factors of Atmospheric Particulate Matters in Spring on Weizhou Island, Beihai, Guangxi Province	GAO Yuan-guan, ZHANG Kai, WANG Ti-jian, <i>et al.</i> (1753)
Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Atmosphere of Dajiuahu, Shennongjia, China	JIN Meng-yun, XING Xin-li, KE Yan-ping, <i>et al.</i> (1760)
Spatial Distribution Characteristics of NMHCs in Spring in Cangzhou City	DUAN Jing-chun, ZHOU Xue-ming, ZHANG He-feng, <i>et al.</i> (1769)
Emission Characteristics of Residential Coal Combustion Flue Gas in Beijing	LIANG Yun-ping, ZHANG Da-wei, LIN An-guo, <i>et al.</i> (1775)
Emission Characteristics and Ozone Formation Potential of VOCs from a Municipal Solid Waste Composting Plant	SHAO Zhu-ze, ZHENG Guo-di, WANG Yuan-gang, <i>et al.</i> (1783)
Degradation Characteristics of Composite CVOCs by Non-thermal Plasma	JIANG Li-ying, ZHANG Di, GUO Hai-qian, <i>et al.</i> (1792)
Chemical Compositions and Source Apportionment of Road Dust in Yuncheng	WU Yuan-yuan, LI Ru-mei, PENG Lin, <i>et al.</i> (1799)
Pollution Risk of Heavy Metals in Dust from the Building Along Elevated Road; A Case Study in Changzhou	YAO Jing-bo, WANG Ming-xin, QI Jin-di, <i>et al.</i> (1807)
Characteristics of Stable Isotope in Precipitation and Its Relationship with ENSO in Shanghai	DONG Xiao-fang, DENG Huang-yue, ZHANG Luan, <i>et al.</i> (1817)
Effects of DOC + CDPF on Emission Characteristics of Heavy-duty Diesel Vehicle	ZHANG Yun-hua, LOU Di-ming, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (1828)
Accumulated Health Risk Assessment of Arsenic in Drinking Water of Major Cities of China	ZHANG Qiu-qi, PAN Shen-ling, LIU Wei, <i>et al.</i> (1835)
Health Risk Assessment of Microcystins from Drinking Water Source by Monte Carlo Simulation Method	WANG Yang, XU Ming-fang, GENG Meng-meng, <i>et al.</i> (1842)
Potential Risk and Distribution Characteristics of PPCPs in Surface Water and Sediment from Rivers and Lakes in Beijing, China	ZHANG Pan-wei, ZHOU Huai-dong, ZHAO Gao-feng, <i>et al.</i> (1852)
Assessment of the Spatial-temporal Distribution Characteristics and Main Affecting Factors of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Spring and Summer at the Changjiang Estuary and Adjacent Areas	SUN Yu-yan, BAI Ying, SU Rong-guo, <i>et al.</i> (1863)
Complexation Between Copper(II) and Colored Dissolved Organic Matter from Municipal Solid Waste Landfill	XIAO Xiao, HE Xiao-song, GAO Ru-tai, <i>et al.</i> (1873)
Effects of Three Bioretention Configurations on Dissolved Nitrogen Removal from Urban Stormwater	LI Li-qing, HU Nan, LIU Yu-qing, <i>et al.</i> (1881)
Influence of Spatial Pattern of Paddy Field on the Losses of Nitrogen and Phosphorus in Three Gorges Reservoir Area	CHEN Cheng-long, GAO Ming, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (1889)
Effects of NO ₃ ⁻ -N Loading on the Early-Period Efficiency of Denitrification and Carbon Releasing in Constructed Wetland Filled with Bark	JIANG Ying-be, LI Yao, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (1898)
Effects of Microbial Fuel Cell Coupled Constructed Wetland with Different Support Matrix and Cathode Areas on the Degradation of Azo Dye and Electricity Production	LI Xue-xiao, CHENG Si-chao, FANG Zhou, <i>et al.</i> (1904)
Effects of Anode Materials on Electricity Generation and Organic Wastewater Treatment of 6 L Microbial Fuel Cells	DING Wei-jun, YU Li-liang, CHEN Jie, <i>et al.</i> (1911)
Effects of Joint-reaction Combined by Ozonation and Coagulation on Aquatic Organic Matters	LIU Hai-long, FU Jing-miao, GUO Xue-feng, <i>et al.</i> (1918)
Disinfection Action of Ultraviolet Radiation and Chlorination on <i>Escherichia coli</i> and Poliovirus	XU Li-mei, ZHANG Chong-miao, WANG Xiao-chang, <i>et al.</i> (1928)
Adsorption of Phosphate from Aqueous Solution on Hydrous Zirconium Oxides Precipitated at Different pH Values	WANG Xing-xing, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (1936)
Performance of Polymer-based Titanium and Zirconium Oxides Composite Adsorbent for Simultaneous Removal of Phosphorus and Fluorine from Water	CHEN Jia-kai, NIE Guang-ze, LIU Zhi-ying, <i>et al.</i> (1947)
Effect of Different Adding Means of Ignited Water Purification Sludge on Phosphorus Adsorption and Forms	ZHU Pei-ying, LI Da-peng, YU Sheng-nan (1957)
Law of Pollutant Erosion and Deposition in Urban Sewage Network	SANG Lang-tao, SHI Xuan, ZHANG Tong, <i>et al.</i> (1965)
Fate of Eleven Phthalic Acid Esters in Aerobic Sewage Treatment System	ZHOU Lin-jun, GU Wen, LIU Ji-ning, <i>et al.</i> (1972)
Characteristics of Denitrification Inhibiting Sulfate Reducing Process	JIN Peng-kang, YANG Zhen-rui, LI Rong, <i>et al.</i> (1982)
Enhanced Short-cut Denitrification by Fe ⁽⁰⁾ -activated Carbon and Its Influencing Factors	LÜ Yong-tao, LIU Ting, ZENG Yu-lian, <i>et al.</i> (1991)
Comparison of Operating Performance of Partial Nitrification Systems with Two Different Inhibition Strategies	LI Hui-juan, PENG Dang-cong, CHEN Guo-yan, <i>et al.</i> (1997)
Effect of Substrate Ratio on Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX in ABR	LÜ Gang, XU Le-zhong, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (2006)
Effects of Temperature on the Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Removal and Microbial Community in SCSC-S/Fe	FAN Jun-hui, HAO Rui-xia, ZHU Xiao-xia, <i>et al.</i> (2012)
Analysis on Performance and Microbial Community Dynamics of a Strengthen Circulation Anaerobic Reactor Treating Municipal Wastewater	YANG Bo, XU Hui, FENG Xiu-ping, <i>et al.</i> (2021)
Aerobic Degradation Characteristics of the Quinoline-Degrading strain <i>Ochrobactrum</i> sp. and Its Bioaugmentation in Coking Wastewater	XU Wei-chao, WU Cui-ping, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i> (2030)
Manganese Oxidation Characteristics and Oxidation Mechanism of a Manganese-Oxidizing Bacterium <i>Arthrobacter</i> sp. HW-16	WAN Wen-jie, XUE Zhi-jun, ZHANG Ze-wen, <i>et al.</i> (2036)
Effect of Temperature on Nitrogen Removal Performance of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria	ZHOU Tong, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (2044)
Nitrogen Removal Performance and Microbial Community Analysis of Activated Sludge Immobilization	XU Xiao-yi, YOU Xiao-lu, LÜ Chen-pei, <i>et al.</i> (2052)
Microbial Structure of an Enhanced Two-phase High-solid Anaerobic Digestion System Treating Sludge	CAO Zhi-ping, WU Jing, ZUO Jian-e, <i>et al.</i> (2059)
Comparative Studies on Soil Actinobacterial Biodiversity After Re-vegetation in the Urban and Rural Hydro-fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Region	QIN Hong, REN Qing-shui, YANG Wen-hang, <i>et al.</i> (2065)
Nitrous Oxide Emissions and Its Influencing Factors from an Agricultural Headwater Ditch During a Maize Season in the Hilly Area of Central Sichuan Basin	TIAN Lin-lin, ZHU Bo, WANG Tao, <i>et al.</i> (2074)
Effect of Dicyandiamide on N ₂ O Emission in Fallow Paddy Field and Rape Cropping	WU Yan-zheng, ZHANG Miao-miao, QIN Hong-ling, <i>et al.</i> (2084)
Characteristics of Biochar-mediated N ₂ O Emissions from Soils of Different Surface Conditions	ZOU Juan, HU Xue-yu, ZHANG Yang-yang, <i>et al.</i> (2093)
Characteristics of Soil Respiration and Soil Organic Carbon in Fava Bean Farmland Under Ridge Tillage and Straw Mulching in Southwest China	XIONG Ying, WANG Long-chang, DU Juan, <i>et al.</i> (2102)
Prediction of Distribution of Soil Cd Concentrations in Guangdong Province, China	SUN Hui, GUO Zhi-xing, GUO Ying, <i>et al.</i> (2111)
Spatial Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Suya Lake	ZHANG Peng-yan, KANG Guo-hua, PANG Bo, <i>et al.</i> (2125)
Effects of the Active Components of Humic Acids and Their Proportions on the Dynamics of Lead Transformation and Availability in Purple Alluvial Soil	WANG Qing-qing, JIANG Zhen-mao, WANG Jun, <i>et al.</i> (2136)
Enrichment Characteristics of Heavy Metals in Particulate Organic Matter of Purple Paddy Soil	LI Qiu-yan, ZHAO Xiu-lan (2146)
Enhanced Sorption of Cetirizine to Loessial Soil Amended with Biochar	WU Zhi-juan, BI Er-ping (2154)
Characteristics and Mechanism of Copper Adsorption from Aqueous Solutions on Biochar Produced from Sawdust and Apple Branch	WANG Tong-tong, MA Jiang-bo, QU Dong, <i>et al.</i> (2161)
Adsorption of Pb ²⁺ and Cd ²⁺ from Aqueous Solution Using Vermicompost Derived from Cow Manure and Its Biochar	DU Wen-hui, ZHU Wei-qin, PAN Xiao-hui, <i>et al.</i> (2172)
Performance and Mechanism Study of Visible Light-driven C ₃ N ₄ /BiOBr Composite Photocatalyst	BAO Yue, ZHOU Min-yun, ZOU Jun-hua, <i>et al.</i> (2182)