

 方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV  
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心  
■ 出版 科学出版社



**2019**

Vol.40 No.2  
第40卷 第2期

目次

冬季山谷风和海陆风对京津冀地区大气污染分布的影响 ..... 李青春, 李炬, 郑祚芳, 王耀庭, 于淼 (513)

珠三角地区利用 PM<sub>2.5</sub> 反演气溶胶数浓度谱方法 ..... 李菲, 谭浩波, 邓雪娇, 邹宇, 刘礼, 蔡明甫, 张芷言, 周声圳 (525)

广州冬季气溶胶中水溶性有机物和类腐殖质的吸光性和荧光光谱特性 ..... 范行军, 余旭芳, 操涛, 王艳, 肖新, 谢越, 李飞跃, 宋建中, 彭平安 (532)

扬州市 PM<sub>2.5</sub> 中重金属来源及潜在健康风险评估 ..... 董世豪, 谢扬, 皇甫延琦, 史旭荣, 易睿, 史国良, 冯银厂 (540)

聊城市冬季 PM<sub>2.5</sub> 中正构烷烃和糖类的污染特征及来源解析 ..... 刘晓迪, 孟静静, 侯战方, 衣雅男, 魏本杰, 伏梦璇 (548)

博斯腾湖流域大气多环芳烃污染特征、干沉降通量及来源 ..... 宋世杰, 黄韬, 赵留元, 毛潇萱, 穆熙, 高宏, 马建民 (558)

某集约化肉鸡饲养场 PM<sub>2.5</sub> 中抗生素抗性基因的分布特征 ..... 刘菲, 许霞, 屠博文, 汪楚乔, 江晓栋, 王利平, 薛银刚 (567)

水汽源地和局地蒸发对大气降水氢氧稳定同位素组分的影响 ..... 胡勇博, 肖薇, 钱雨妃, 刘强, 谢成玉, 张秀芳, 张文庆, 温学发, 刘寿东, 李旭辉 (573)

滇池大气沉降氮磷形态特征及其入湖负荷贡献 ..... 任加国, 贾海斌, 焦立新, 王一茹, 杨苏文, 武倩倩, 高秋生, 崔志丹, 郝子峰 (582)

基于地统计学分析的太湖颗粒态和溶解态氮、磷营养盐时空分布特征及来源分析 ..... 吕伟伟, 姚昕, 张保华, 高光, 邵克强 (590)

湖泊蓝藻水华对连通河道水质的影响 ..... 余茂蕾, 洪国喜, 许海, 朱广伟, 朱梦圆, 权秋梅 (603)

异龙湖沉积物重金属人为污染与潜在生态风险 ..... 李小林, 刘恩峰, 于真真, 张恩楼, 林祺, 王荣, 沈吉 (614)

珠江河口悬浮物中重金属时空变化特征及其影响因素 ..... 杜佳, 王永红, 黄清辉, 戴琦, 杨远东 (625)

北运河粪源微生物分布特征及健康风险评价 ..... 陈磊, 李蕾芳, 郅晓沙, 张普, 戴莹, 肖月晨, 沈珍瑶 (633)

氧化还原循环过程中沉积物磷的形态及迁移转化规律 ..... 郝文超, 王从锋, 杨正健, 刘德富, 纪道斌, 赵萍, 丹勇, 胡子龙 (640)

磁性赭铁改性膨润土添加对河道底泥磷迁移与形态转化的影响 ..... 王艳, 林建伟, 詹艳慧, 张宏华, 张志斌, 何思琪, 赵钰颖, 吴小龙, 俞阳 (649)

钙预处理对磁性赭铁改性膨润土吸附水中磷酸盐的影响 ..... 赵钰颖, 林建伟, 张宏华, 张志斌, 詹艳慧, 姜博汇, 何思琪, 俞阳, 吴小龙, 王艳, 陈璐, 李十盛 (658)

NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 对镁改性生物炭除磷效果的影响 ..... 郭蒙蒙, 王鹏飞, 侯泽英, 曹晶, 储昭升, 杨永哲 (669)

3种吸附剂对污水磷污染去除性能与机制比较 ..... 吴露, 刘锋, 龙睿, 罗沛, 肖润林, 陈向, 吴金水 (677)

硝酸纤维素膜光降解水中对硝基苯酚的机制 ..... 代志峰, 赵同谦, 阴永光, 余加平, 武俐, 郅超, 孙静阳, 罗玉俊 (685)

ZnTiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> 复合光催化剂的制备及光催化降解有机污染物机制分析 ..... 张文海, 吉庆华, 兰华春, 李静 (693)

高指数晶面 TiO<sub>2</sub> 对铬的吸附及光催化去除 ..... 钟德健, 张建峰, 李尧, 谢晓丹 (701)

Fe<sup>0</sup>/海藻酸钙微球还原-Fenton 氧化协同降解酸性红 B ..... 张环, 李爽爽, 魏俊富, 傅敏, 李雪曦, 丁琦, 白蓉 (708)

不同滤料滤池启动期内对铁锰离子的去除机制 ..... 蔡言安, 毕学军, 张嘉凝, 何静, 董杨, 王海港 (717)

SGO 改性复合纳滤膜的制备及分盐性能 ..... 张彦君, 张少峰, 赵长伟, 王军 (724)

一体式铝盐絮体-超滤膜净水效能与机制 ..... 薛文清, 李文江, 刘娟, 马百文 (730)

臭氧-CNT 膜改性联用工艺曝气量及膜污染分析 ..... 王凯伦, 刘芳, 关羽琪, 祝学东, 董丹, 薛小雷, 马燕林, 栾桂荣, 郭瑾 (738)

多环芳烃及其衍生物在 SBR/MBBR 工艺中的分布与去除 ..... 刘淑惠, 田伟君, 周建仁, 赵婧, 王喆 (747)

微气泡曝气生物膜反应器处理低 C/N 比废水脱氮过程 ..... 刘春, 王聪聪, 陈晓轩, 张静, 张瑞娜, 张磊 (754)

从枝菌根强化型生态浮床处理煤化工模拟含盐废水 ..... 袁文清, 何皓, 宋文萍, 王曙光, 戴东伟 (761)

夏季高温下污水处理厂生物处理系统的硝化性能及强化方法 ..... 宋天伟, 盛晓琳, 王家德, 刘锐, 陈吕军 (768)

硝化包埋菌颗粒氨吸附性能及动力学特性 ..... 于德爽, 吕廷廷, 陈光辉, 王晓霞, 唐鹏, 黄硕, 刘诚诚, 杜世明 (774)

乙酸钠作为碳源不同污泥源短程反硝化过程亚硝酸盐积累特性 ..... 毕春雪, 于德爽, 杜世明, 王晓霞, 陈光辉, 王钧, 巩秀珍, 都叶奇 (783)

DPR-SNED 系统处理低 C/N 城市污水与硝酸盐废水的运行特性 ..... 杜世明, 于德爽, 毕春雪, 王晓霞, 陈光辉, 袁梦飞, 甄建园, 张帆, 吕廷廷 (791)

间歇曝气连续流反应器同步硝化反硝化除磷 ..... 赵智超, 黄剑明, 李健, 张为堂, 张力航, 吴雪晴, 陈永志 (799)

ABR-MBR 反硝化除磷工艺的启动及稳定运行 ..... 韦佳敏, 蒋志云, 程诚, 朱琳, 刘文如, 沈耀良 (808)

进水 C/N 对 SNEDPR 系统脱氮除磷的影响 ..... 都叶奇, 于德爽, 甄建园, 王晓霞, 陈光辉, 唐鹏, 王钧, 毕春雪, 巩秀珍, 黄硕, 刘诚诚 (816)

ABR 除碳-CANON 耦合工艺除碳脱氮特性 ..... 李田, 印雯, 王昕竹, 沈耀良, 吴鹏, 宋吟玲 (823)

不同曝气密度对 CANON 工艺启动的影响 ..... 李冬, 高雪健, 张杰, 曹正美, 郭跃洲, 李帅 (829)

调控温度和沉降时间实现 ANAMMOX 颗粒快速启动及其稳定运行 ..... 李海玲, 李冬, 张杰, 刘博, 李帅 (837)

C/N 和污泥浓度对以 pH 值调控的亚硝化系统影响 ..... 张敏, 韦佳敏, 黄慧敏, 姜滢, 郭萌蕾, 陈重军, 沈耀良 (845)

基于活性微生物特征的供水管壁生物膜生长特性 ..... 王杨, 朱斌, 董俊, 白晓慧 (853)

黄山土壤细菌群落和酶活性海拔分布特征 ..... 姚兰, 胡立煌, 张焕朝, 方炎明, 王良梅 (859)

基于高通量测序分析的生物修复石油污染土壤菌群结构变化 ..... 祁燕云, 吴蔓莉, 祝长成, 叶茜琼, 徐会宁 (869)

硝化作用对盐碱湿地 N<sub>2</sub>O 排放的影响及其环境因子分析 ..... 杨曲, 高伟峰, 刘凤琴, 王文锋, 马建华, 徐卓, 梁红, 高大文 (876)

长期定位施用牛粪对夏玉米-冬小麦体系农田 N<sub>2</sub>O 和 NO 排放的影响 ..... 聂皇华, 张家升, 和周明, 安梅, 杨学云, 顾江新 (885)

地膜覆盖和施肥对菜地 N<sub>2</sub>O 排放的影响 ..... 倪雪, 郝庆菊, 陈世杰, 李晓茜, 石孝均, 江长胜 (893)

双季稻品种根际特征与甲烷排放差异及其关系 ..... 肖志祥, 傅志强, 徐华勤, 苏姗, 郭昱, 张浪, 唐剑武 (904)

多年施用生物炭对河南烤烟种植区土壤呼吸的影响 ..... 李亚森, 丁松爽, 殷金玉, 李佳轶, 周迪, 刘国顺 (915)

桂林毛村不同土地利用方式下土壤呼吸空间变异特征 ..... 丁梦凯, 胡晓农, 曹建华, 吴夏, 黄芬, 王奇岗, 闵佳 (924)

工业发达城市土壤重金属时空变异与源解析 ..... 李锋, 刘思源, 李艳, 史舟 (934)

膨润土对不同类型农田土壤重金属形态及生物有效性的影响 ..... 林海, 靳晓娜, 董颖博, 罗明科, 赵一鸣 (945)

缙云山不同林分下土壤有机碳及矿化特征 ..... 陈仕奇, 吕盛, 高明, 黄容 (953)

复杂地形条件下根系对土壤有机碳的贡献 ..... 张彦军, 郭胜利 (961)

不同水平外源碳在稻田土壤转化与分配的微生物响应特征 ..... 王季斐, 童瑶瑶, 祝贞科, 陈珊, 邓悟悟, 葛东达, 吴金水 (970)

宝鸡市植被叶子重金属分布规律及生态风险评价 ..... 张俊辉, 林青, 姜珊, 刘滨, 李东兴, 王彦虎 (978)

生物炭对污泥堆肥及其利用过程重金属有效态的影响 ..... 周楫, 余亚伟, 蒋越, 杨雨滢, 张成 (987)

污泥停留时间对餐厨垃圾与剩余污泥中温厌氧混合发酵系统的影响 ..... 袁宏林, 马静, 邢保山, 温俊伟, 韩宇乐, 李倩, 王晓昌 (994)

热碱-分步酶水解-厌氧消化工艺处理秸秆畜粪混合物料及其甲烷高值化条件 ..... 卞爱琴, 远野, 张璐璐, 付强, 陈天明, 何磊, 丁成, 王爱杰 (1003)

《环境科学》征订启事(547) 《环境科学》征稿简则(828) 信息(581, 933, 952)

# 水汽源地和局地蒸发对大气降水氢氧稳定同位素组分的影响

胡勇博<sup>1</sup>, 肖薇<sup>1,2\*</sup>, 钱雨妃<sup>1</sup>, 刘强<sup>1</sup>, 谢成玉<sup>1</sup>, 张秀芳<sup>1</sup>, 张文庆<sup>1</sup>, 温学发<sup>3</sup>, 刘寿东<sup>1,2</sup>, 李旭辉<sup>1</sup>  
(1. 南京信息工程大学大气环境中心, 南京 210044; 2. 南京信息工程大学江苏省大气环境与装备技术协同创新中心, 南京 210044; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101)

**摘要:** 降水氢氧稳定同位素组分是一种良好的示踪剂, 对水汽循环的研究有重要意义. 本研究基于2016年在南京、溧阳、宜兴和东山这4个站点按降水事件采集的降水样品, 测定了降水 HDO 和 H<sub>2</sub><sup>18</sup>O 组分, 分析了降水 HDO、H<sub>2</sub><sup>18</sup>O 组分以及过量氘的时间变化特征; 探讨了水汽源地和局地蒸发对降水稳定同位素组分的影响. 结果表明: ①冬夏季风期间水汽源地的差异使4个站点降水 HDO、H<sub>2</sub><sup>18</sup>O 组分及过量氘有明显的季节变化, 主要表现为 HDO 和 H<sub>2</sub><sup>18</sup>O 组分夏季风期间贫化, 冬季风期间富集; 过量氘夏季风期间小于冬季风期间; ②夏季风期间, 太湖蒸发补给使下游地区的降水过量氘变大, 局地大气降水线方程的截距变高; 冬季风期间, 局地蒸发对降水同位素影响很小, 降水 HDO、H<sub>2</sub><sup>18</sup>O 组分以及过量氘的空间变化不明显; ③4个站点局地大气降水线方程的斜率和截距均较高, 原因可能是冬夏季风期间的降水水汽来源的差异和冬季风期间水汽再循环过程的影响.

**关键词:** 降水; 氢氧同位素; 过量氘; 大气降水线; 水汽源地; 局地蒸发

中图分类号: X14 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)02-0573-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201805227

## Effects of Water Vapor Source and Local Evaporation on the Stable Hydrogen and Oxygen Isotopic Compositions of Precipitation

HU Yong-bo<sup>1</sup>, XIAO Wei<sup>1,2\*</sup>, QIAN Yu-fei<sup>1</sup>, LIU Qiang<sup>1</sup>, XIE Cheng-yu<sup>1</sup>, ZHANG Xiu-fang<sup>1</sup>, ZHANG Wen-qing<sup>1</sup>, WEN Xue-fa<sup>3</sup>, LIU Shou-dong<sup>1,2</sup>, LEE Xu-hui<sup>1</sup>

(1. Yale-NUIST Center on Atmospheric Environment, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Jiangsu Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology (CICAEET), Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 3. Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

**Abstract:** Stable hydrogen and oxygen isotopic compositions in precipitation are good tracers and can provide unique information about the water cycle. Precipitation samples were collected at the Nanjing, Liyang, Yixing, and Dongshan sites in 2016, and the HDO and H<sub>2</sub><sup>18</sup>O compositions of precipitation were measured. The temporal variability of HDO and H<sub>2</sub><sup>18</sup>O compositions and deuterium-excess of precipitation were analyzed, and the influence of the water vapor source and local evaporation on stable isotopic composition of precipitation were discussed. The results indicated that: ① Seasonal variations in the HDO composition, H<sub>2</sub><sup>18</sup>O composition, and deuterium-excess of precipitation occurred due to different water vapor sources during the summer and winter monsoon seasons. The HDO and H<sub>2</sub><sup>18</sup>O compositions were depleted during the summer monsoon season and enriched during the winter monsoon season. The deuterium-excess during the summer monsoon season was lower compared to the winter monsoon season. ② During the summer monsoon, the evaporation of Lake Taihu made the deuterium-excess of downwind precipitation and the downwind intercept of the local meteoric water line higher. During the winter monsoon season, local evaporation had little influence on HDO and H<sub>2</sub><sup>18</sup>O components in precipitation. ③ Both of the intercepts and slopes of the local meteoric water line were higher than those of the global meteoric water line, due to moisture recycling during the winter monsoon season and different water vapor sources between the summer and winter monsoon seasons.

**Key words:** precipitation; hydrogen and oxygen stable isotopic compositions; deuterium-excess; local meteoric water line; water vapor source; local evaporation

大气降水是内陆水循环的重要水分输入项, 在降水的形成过程中, 伴随着蒸发和凝结过程等会产生同位素的分馏作用<sup>[1,2]</sup>, 使降水中的稳定氢氧同位素组分(HDO 和 H<sub>2</sub><sup>18</sup>O)有不同的特征, 从而可以被视为一种良好的示踪剂, 被广泛应用于水汽源地的示踪<sup>[3-5]</sup>以及局地水汽循环<sup>[6-8]</sup>的研究.

大气降水中的稳定同位素组分受多种因素的影

响. 传统的研究认为降水氢氧同位素组分主要是由

收稿日期: 2018-05-28; 修订日期: 2018-08-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(41475141, 41505005, 41575147); 江苏省高校优势学科建设工程项目(PAPD); 教育部长江学者和创新团队发展计划项目(PCSIRT)

作者简介: 胡勇博(1993~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为稳定同位素水文学, E-mail: 971414065@qq.com

\* 通信作者, E-mail: wei.xiao@nuist.edu.cn

局地气象或地理因素控制,表现有温度效应、降水量效应、纬度效应和高程效应<sup>[1,9,10]</sup>. 但最近的研究表明,在低纬度地区或亚热带季风气候区,局地降水量对降水稳定氢氧同位素组分的影响很弱甚至是不存在的<sup>[11~13]</sup>,而主要会受到水汽源地<sup>[14~17]</sup>、大尺度的对流<sup>[18,19]</sup>、传输过程中的降水量<sup>[14,20,21]</sup>和局地蒸发<sup>[22~24]</sup>的影响.

大尺度的水汽输送项是大气降水的主要来源<sup>[25,26]</sup>,水汽源地的不同会使大气降水中的稳定同位素组分明显的差异. 卫克勤等<sup>[27]</sup>的研究表明,我国季风气候区4月的降水同位素组分比8月富集; Tang等<sup>[14]</sup>的研究表明南京夏季风期间来自孟加拉湾的水汽形成降水的同位素组分比来自南海的水汽形成的降水贫化. 局地水汽贡献相对大气降水的贡献虽然很小<sup>[25,26]</sup>,但对区域或局地的水循环却起着不可忽视的作用<sup>[28~30]</sup>. Gat等<sup>[22]</sup>在五大湖区的研究表明,五大湖的蒸发补给作用会使下游地区的降水中的过量氘升高; Wang等<sup>[24]</sup>对于天山地区的研究表明,局地蒸发会在一定程度抵消由于降水的掉落而对降水同位素组分分化作用.

为了更好地了解水汽源地和局地蒸发对亚热带季风气候区降水中的稳定同位素的影响,多站点高时间分辨率的观测就显得非常重要. 但目前对于太湖流域和南京地区的研究多是基于全球大气降水同位素观测网(Global Network of Isotopes in Precipitation, GNIP)南京站<sup>[31~33]</sup>或中国大气降水同位素观测网(China Network of Isotopes in Precipitation, CHNIP)常熟站<sup>[34]</sup>的低时空分辨率的降水同位素数据,或是单站点的高时间分辨率的大气降水同位素数据<sup>[14]</sup>.

本文选取的4个研究站点(南京、溧阳、宜兴和东山)位于典型的亚热带季风气候区,夏半年(6~9月)和冬半年(12月~次年3月)受夏季风和冬季风的交替控制,且4个站点分布于我国第三大淡水湖泊太湖附近,太湖面积2338 km<sup>2</sup>,平均水深为1.89 m<sup>[35]</sup>,年蒸发量为1000 mm左右<sup>[36~38]</sup>. 本文利用2016年在4个降水采样站点收集到的降水稳定同位素数据,分析4个站点的降水稳定同位素的时空变化特征,探讨水汽源地的差异及局地蒸发的贡献对降水同位素的影响.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究站点

本研究选取了位于太湖流域的溧阳、宜兴和东山,以及距离太湖较远的南京为降水采样站点,其中溧阳、宜兴和东山3个降水采样站点分别位于溧

阳气象站(119.48°E, 31.43°N,与太湖岸边直线距离约为45 km)、宜兴气象站(119.82°E, 31.37°N,与太湖岸边直线距离约为12 km)和东山气象站(120.43°E, 31.07°N,与太湖岸边直线距离约为1.5 km)内,南京的大气降水采样站点位于南京信息工程大学校园内(118.71°E, 32.20°N,与太湖岸边直线距离约为150 km). 4个降水采样站点分布如图1所示,在研究区域的主风方向(东南-西北)上.

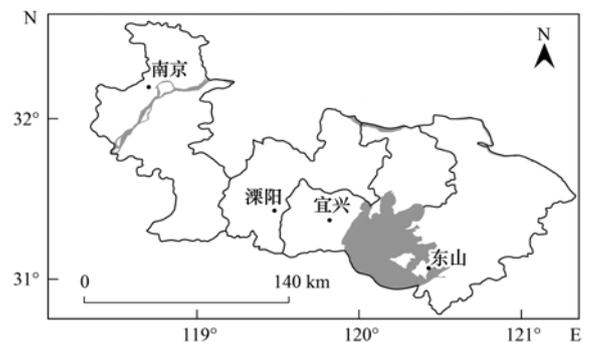


图1 大气降水采样站点分布示意

Fig. 1 Distribution of the precipitation sampling sites

### 1.2 降水样品的采集及稳定同位素组分的测定

自2016年1月1日至12月31日在南京、溧阳、宜兴和东山这4个站点采集降水样品并测量其HDO和H<sub>2</sub><sup>18</sup>O组分. 降水样品按降水事件采集,从降水开始时刻收集水样,对于持续时间较短的降水过程,每次降水过程结束后收集降水水样;对于持续时间较长的降水过程,则在每天北京时间08:00或20:00增加一次采样. 降水样品的采集装置为改装的雨量桶,雨量筒上半部(漏斗形状部分)内置塑料漏斗,雨量筒下部放置塑料瓶,塑料漏斗下端与塑料瓶口紧密相连,没有空隙,降水样品可以从漏斗直接流入塑料瓶内. 漏斗口放置乒乓球,避免蒸发引起降水样品的同位素分馏. 样品采集后,用Parafilm的塑封膜密封瓶口,并放进4℃的冰箱进行保存. 定期将降水样品送往中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟实验室,采用基于离轴积分腔输出光谱技术的液态水同位素分析仪(型号DLT-100, Los Gatos Research, Mountain View, CA, USA)进行测量,每个降水样品会进行6次进样测量,取后4次测量的平均值作为该样品测量值,每测量5个降水样品,会再对3个已知不同HDO和H<sub>2</sub><sup>18</sup>O组分的标准样品进行测量,用于对降水样品测量值的校正,其它的详细信息可从国际原子能机构(International Atomic Energy Agency, IAEA)的测量标准中获得<sup>[39]</sup>. 测量的结果用相对于维也纳标准海洋水的千分差(δ)表示:

$$\delta = \left( \frac{R_{\text{sample}}}{R_{\text{V-SMOW}}} - 1 \right) \times 1000\text{‰} \quad (1)$$

式中,  $R_{\text{sample}}$  为大气降水样品中的稳定氢或氧同位素的比率 (D/H、 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ),  $R_{\text{V-SMOW}}$  表示维也纳标准海洋水中的稳定氢或氧同位素比率 (对于 D 和  $^{18}\text{O}$ ,  $R$  值分别为 0.000 155 76 和 0.002 005 2). 该分析仪对  $\delta\text{D}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  组分的测量精度分别为 0.3‰ 和 0.1‰.

1964 年 Dansgaard<sup>[1]</sup> 根据 Craig<sup>[9]</sup> 的研究得到的全球大气降水线定义了过量氘:

$$d\text{-excess} = \delta\text{D} - 8\delta^{18}\text{O} \quad (2)$$

大气降水中的  $\delta\text{D}$  (或  $\delta^{18}\text{O}$ ) 的降水量加权平均值为:

$$\delta_p = \frac{\sum p_i \delta_i}{\sum p_i} \quad (3)$$

式中,  $p_i$  是第  $i$  次降水的降水量,  $\delta_i$  是第  $i$  次降水的  $\delta\text{D}$  (或  $\delta^{18}\text{O}$ ).

### 1.3 后向轨迹模型

对于研究区域水汽源地的示踪采用的是后向轨迹模型. 后向模型是由美国国家海洋及大气管理局空气资源实验室开发的混合单粒子拉格朗日积分轨迹模型 (hybrid single particle Lagrangian integrated trajectory, HYSPLIT), 该模型已被广泛运用于水汽

源地的示踪研究<sup>[17,40,41]</sup>. 本研究中, 模式运行所用的再分析资料为美国国家环境预报中心/美国国家大气研究中心的全球资料同化系统 (global data assimilation system, GDAS), 该再分析资料的空间分辨率为  $1^\circ \times 1^\circ$ , 模式运行高度为 1 000 m, 模式运行的时间步长为 6 h, 分别为世界标准时间的每日 00:00、06:00、12:00 和 18:00, 即北京时间的每日 08:00、14:00、20:00 和 02:00, 模式运行的时间为 96 h.

## 2 结果与分析

### 2.1 降水稳定同位素组成的时间变化特征

2016 年南京、溧阳、宜兴和东山 4 个站点的降水的氢氧同位素组分和过量氘 ( $\delta\text{D}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$  和  $d\text{-excess}$ ) 的时间变化特征如图 2 所示. 从中可以看出, 4 个站点降水  $\delta\text{D}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  的均表现为夏半年贫化, 冬半年富集.  $\delta\text{D}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  的最大值出现在 3 月, 对于南京、溧阳、宜兴和东山,  $\delta\text{D}$  的最大值分别为 36.1‰、30.9‰、21.9‰ 和 21.7‰,  $\delta^{18}\text{O}$  的最大值分别为 1.9‰、0.8‰、-0.2‰ 和 0.2‰; 而后  $\delta\text{D}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  均逐渐减小, 在 7 月初的梅雨中后期达到一年中的最小值,  $\delta\text{D}$  的最小值分别为 -166.1‰、-126.1‰、-121.8‰ 和 -102.7‰,  $\delta^{18}\text{O}$  的最小值

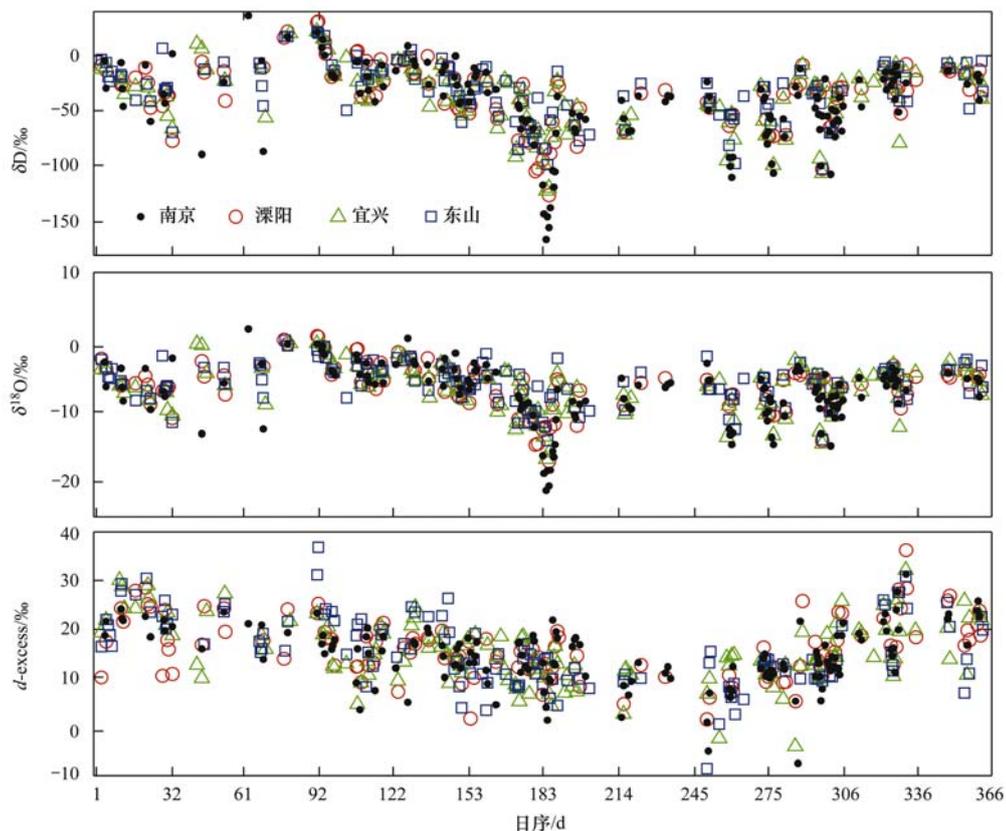


图 2 2016 年 4 个站点降水  $\delta\text{D}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$  和  $d\text{-excess}$  的时间变化特征

Fig. 2 Temporal variability of  $\delta\text{D}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ , and  $d\text{-excess}$  of precipitation at the four stations in 2016

分别为  $-21.3\text{‰}$ 、 $-17.1\text{‰}$ 、 $-16.7\text{‰}$ 和  $-14.1\text{‰}$ ，而后  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  的值又波动上升。4 个站点降水  $d$ -excess 表现为夏半年低冬半年高，在 1~3 月数值较高，约为  $20\text{‰}$ ，在 4~5 月期间  $d$ -excess 逐渐下降，在而后 6~9 月， $d$ -excess 稳定在  $12\text{‰}$  左右，在 10 月， $d$ -excess 的值又逐渐升高，而后的 11 月和 12 月， $d$ -excess 又保持在  $20\text{‰}$  高值。

## 2.2 夏季风和冬季风期间降水同位素比较

2016 年 4 个站点在夏季风和冬季风期间的  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  和  $d$ -excess 的变化及降水量加权平均值如图 3 和表 1 所示。南京、溧阳、宜兴和东山这 4 个站点夏季风期间  $\delta D$  的变化范围为  $-166.1\text{‰} \sim -11.2\text{‰}$ 、 $-126.1\text{‰} \sim -21.1\text{‰}$ 、 $-121.8\text{‰} \sim -21.5\text{‰}$ 和  $-98.5\text{‰} \sim -10.3\text{‰}$ ，降水量加权平均值分别为  $-81.0\text{‰}$ 、 $-70.3\text{‰}$ 、 $-74.4\text{‰}$  和  $-56.0\text{‰}$ ， $\delta^{18}O$  的变化范围为  $-21.3\text{‰} \sim -3.1\text{‰}$ 、 $-17.0\text{‰} \sim -3.9\text{‰}$ 、 $-16.7\text{‰} \sim -4.1\text{‰}$  和  $-14.1\text{‰} \sim -1.7\text{‰}$ ，降水量加权平均值分别为  $-11.7\text{‰}$ 、 $-10.3\text{‰}$ 、 $-10.9\text{‰}$  和  $-8.5\text{‰}$ ， $d$ -excess 的变化范围为  $-4.9\text{‰} \sim 21.9\text{‰}$ 、 $1.5\text{‰} \sim 19.5\text{‰}$ 、 $-2.3\text{‰} \sim 19.1\text{‰}$  和  $-8.6\text{‰} \sim 19.1\text{‰}$ ，降水量加权平均值分别为  $12.3\text{‰}$ 、 $12.1\text{‰}$ 、 $12.3\text{‰}$  和  $11.2\text{‰}$ ；冬季风期间  $\delta D$  的变化范围为  $-89.4\text{‰} \sim 36.1\text{‰}$ 、 $-77.0\text{‰} \sim 30.9\text{‰}$ 、 $-78.6\text{‰} \sim 21.9\text{‰}$  和  $-69.2\text{‰} \sim 21.7\text{‰}$ ，降水量加权平均值分别为  $-5.9\text{‰}$ 、 $-5.3\text{‰}$ 、 $-5.6\text{‰}$  和  $-5.5\text{‰}$ ， $\delta^{18}O$  的变化范围为  $-13.2\text{‰} \sim 1.9\text{‰}$ 、 $-11.0\text{‰} \sim 0.8\text{‰}$ 、 $-12.3\text{‰} \sim -0.2\text{‰}$  和  $-11.5\text{‰} \sim 0.2\text{‰}$ ，降水量加权平均值分别为  $-26.6\text{‰}$ 、 $-20.6\text{‰}$ 、 $-22.6\text{‰}$  和  $-22.3\text{‰}$ ， $d$ -excess 的变化范围为  $11.2\text{‰} \sim 31.3\text{‰}$ 、

$10.2\text{‰} \sim 36.3\text{‰}$ 、 $10.0\text{‰} \sim 32.2\text{‰}$  和  $7.0\text{‰} \sim 36.9\text{‰}$ ，降水量加权平均值分别为  $20.7\text{‰}$ 、 $21.6\text{‰}$ 、 $22.0\text{‰}$  和  $22.0\text{‰}$ 。对比夏季风和冬季风期间的  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  和  $d$ -excess 可以看出，4 个站大气降水的  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  均表现为夏季风期间贫化，冬季风期间富集， $d$ -excess 的降水量加权平均值在夏季风期间（约为  $12\text{‰}$ ）低于冬季风期间（约为  $21\text{‰}$ ）；此外，对比 4 个站大气降水的  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  和  $d$ -excess 发现，夏季风期间，大气降水中的  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  从东山经宜兴和溧阳到南京的过程中不断减小， $d$ -excess 从东山经太湖到宜兴的过程中升高了  $1.2\text{‰}$ ，而后的过程中基本保持不变；而在冬季风期间南京大气降水  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  和  $d$ -excess 较小，其它 3 个站点大气降水  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  和  $d$ -excess 的差异均很小。

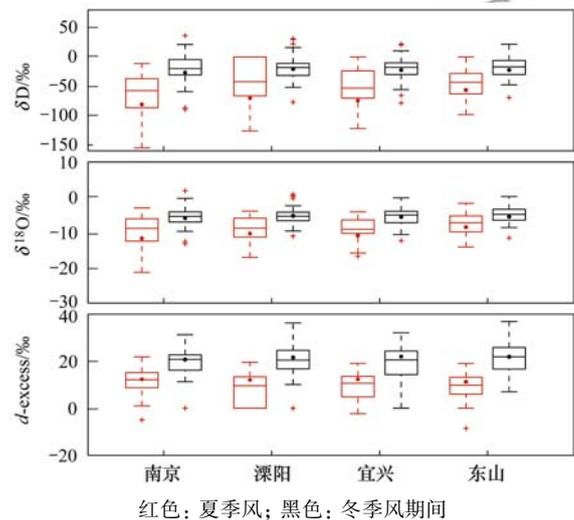


图 3 2016 年 4 个站点在夏季风和冬季风期间  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  和  $d$ -excess 的箱式图

Fig. 3 Box plots of  $\delta D$ ,  $\delta^{18}O$ , and  $d$ -excess at the four stations during the summer and winter monsoon periods in 2016

表 1 2016 年 4 个降水采样站点的夏季风和冬季风期间  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  和  $d$ -excess 的降水量加权平均值/ $\text{‰}$

Table 1 Precipitation-weighted average of  $\delta D$ ,  $\delta^{18}O$ , and  $d$ -excess at the four stations during the summer and winter monsoon periods in 2016/ $\text{‰}$

项目	类型	南京	溧阳	宜兴	东山
$\delta D$	夏季风	-81.0	-70.3	-74.4	-56.4
	冬季风	-26.6	-20.6	-22.6	-22.3
$\delta^{18}O$	夏季风	-11.7	-10.3	-10.9	-8.5
	冬季风	-5.9	-5.3	-5.6	-5.5
$d$ -excess	夏季风	12.6	12.1	12.8	11.6
	冬季风	20.6	21.8	22.2	21.7

## 2.3 降水 $\delta D$ - $\delta^{18}O$ 关系

2016 年 4 个站点的全年、冬夏季风期间和过渡期间降水的  $\delta D$ - $\delta^{18}O$  关系如表 2 和图 4 所示。各站点的局地大气降水线方程分别为：南京  $\delta D = 8.37 \delta^{18}O + 17.39$ ，溧阳  $\delta D = 8.53 \delta^{18}O + 19.54$ ，宜兴  $\delta D = 8.37 \delta^{18}O + 17.92$ ，东山  $\delta D = 8.59 \delta^{18}O + 19.31$ ，与

全球大气降水线方程<sup>[9]</sup>相比 ( $\delta D = 8 \delta^{18}O + 10$ )，4 个站点局地大气降水线方程的斜率和截距均较高。夏季风期间的局地大气降水线方程与全球大气降水线方程更为接近，但东山的局地大气降水线方程的截距相对其它 3 个站点更小；冬季风期间的局地大气降水线方程均表现有高截距的特点。

表 2 2016 年 4 个降水采样站点夏季风、冬季风和过渡期间大气降水线方程的斜率和截距<sup>1)</sup>  
 Table 2 Slopes and intercepts of local meteoric water line of the four stations during the summer monsoon,  
 winter monsoon and transition periods in 2016

项目	南京	溧阳	宜兴	东山
夏季风	8.05/12.11	7.96/11.48	8.03/11.62	7.51/6.45
冬季风	8.30/22.48	7.91/20.58	7.32/17.39	7.56/19.47
过渡期	8.17/14.58	8.39/17.16	8.20/15.66	8.92/20.92
冬季风和夏季风	8.54/19.71	8.71/21.66	8.56/20.04	8.48/18.66

1) 数值表示斜率/截距

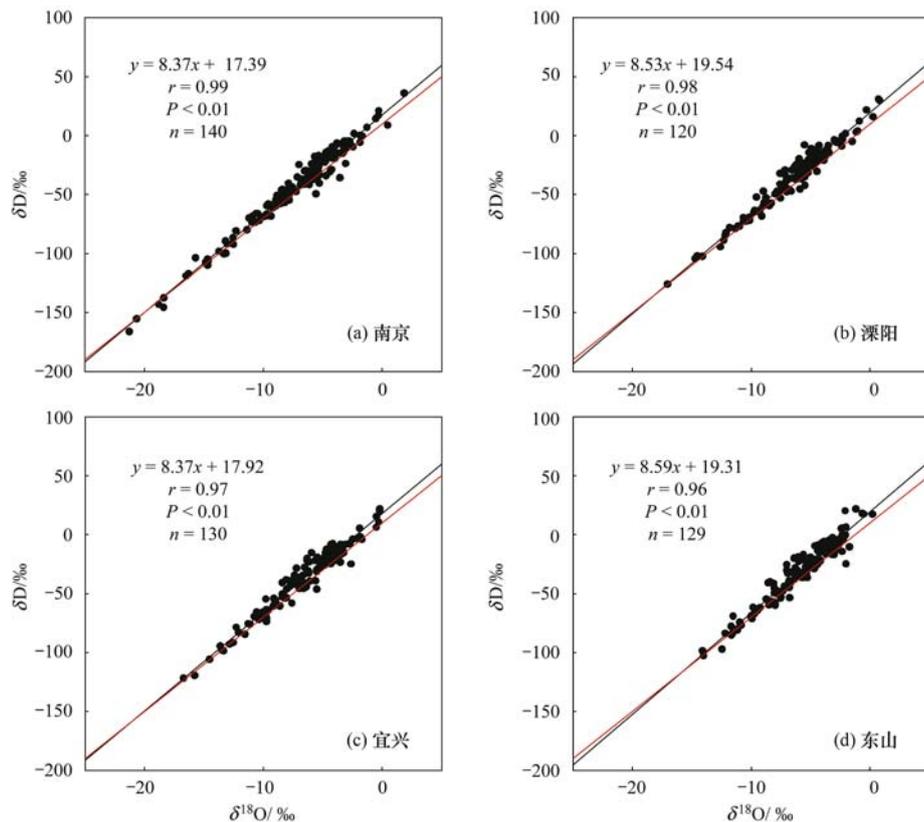


图 4 2016 年 4 个降水采样站点的局地大气降水线方程

Fig. 4 Local meteoric water line of the four stations in 2016

### 3 讨论

#### 3.1 水汽源地对降水同位素的影响

2016 年夏季风和冬季风期间水汽源地的示踪结果如图 5 所示(以宜兴为例),该地区夏季风期间的水汽源地主要为相对湿度较高的海洋表面,约占 67%,而冬季风期间的水汽主要来源于干燥的内陆地区。

水汽源地的差异会导致冬夏季风期间降水  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  数值明显不同。对于中高纬度的研究表明,夏季水汽主要来自于海洋,降水  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  较富集;冬季水汽主要来自内陆,通常会经历多次的蒸发循环,使得冬季降水  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  贫化<sup>[32,42]</sup>,而本研究区大气降水  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  却表现为夏季贫化冬季富集的特点,除了水汽源地引起的降水  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  差异外,

这主要因为东亚季风区夏季风期间降水  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  会受上游地区降水过程的影响<sup>[14,20,21,43]</sup>,根据降水  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  随降水过程变化的瑞利分馏原理<sup>[1]</sup>可知,在凝结温度为 10℃ 的情况下,30% 的水汽降落就会使  $\delta D$  的值降低 100‰<sup>[44]</sup>。我国季风区的降水特点为夏季风期间远多于冬季风期间,夏季风期间水汽在传输过程中形成的降水要远多于冬季风期间,更多的水汽在传输的过程中降落使得夏季风期间大气降水中的  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  更加贫化。降水  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  的夏季贫化冬季富集的特点在我国季风气候区广泛存在<sup>[14,27,34]</sup>

水汽源地的差异会导致冬夏季风期间降水  $d$ -excess 的差异。 $d$ -excess 主要是受动力分馏过程的控制<sup>[45]</sup>,对于近表面大气  $d$ -excess 的研究表明,在海洋<sup>[3,4,40]</sup>、内陆湖泊<sup>[46]</sup>和内陆生态系统<sup>[47-49]</sup>等

下垫面上大气  $d$ -excess 与相对湿度之间存在的显著负相关关系, 所以来自冬季风期间干旱内陆的水汽所形成的降水  $d$ -excess 比来自夏季风期间湿润海洋的水汽形成的降水  $d$ -excess 更大.

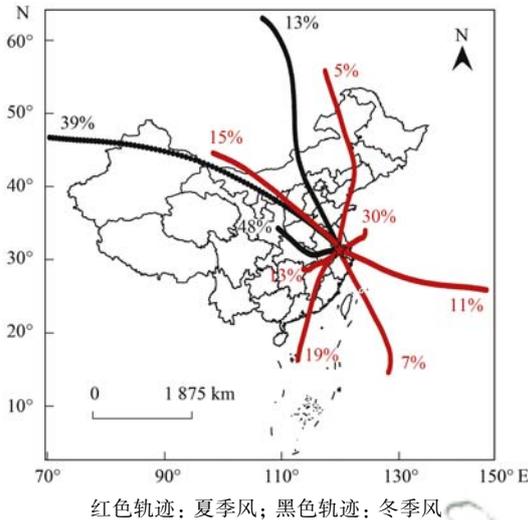


图5 利用 HYSPLIT 模型对宜兴站夏季风和冬季风期间水汽来源状况的分析

Fig. 5 Results of the water vapor source during the summer and winter monsoon periods by HYSPLIT at the Yixing station in 2016

### 3.2 局地蒸发对降水同位素的影响

夏季风期间, 局地蒸发对降水同位素的影响主要表现在太湖蒸发对下游地区降水  $d$ -excess 和局地大气降水线方程的影响. 对比位于上风方向的东山站和下风方向的宜兴站, 降水  $d$ -excess 升高了 1.2‰, 根据徐敬争等<sup>[50]</sup>得到的夏季太湖的局地蒸发线方程  $\delta D = 3.32 \delta^{18}O - 16.86$  可知, 下游地区大气降水  $d$ -excess 升高主要是受到了太湖蒸发的补给作用. 虽然降水降落过程和陆地生态系统的蒸散作用的水汽补也会改变降水同位素组分, 但是降水凝结过程属于平衡分馏, 而陆地生态系统的蒸散作用中蒸腾作用占主导作用, 且长时间尺度上的植物蒸腾又处于稳态, 因此这两个过程对  $d$ -excess 的影响均很小<sup>[45, 51~53]</sup>. Gat 等<sup>[22]</sup>在对夏季五大湖的研究中也发现, 湖泊蒸发会导致下游地区大气降水中的  $d$ -excess 值比上游地区高, 差值最高可达 3.5‰. 东山夏季风期间的局地大气降水线方程  $\delta D = 7.51 \delta^{18}O + 6.45$  同上海夏季的局地大气降水线方程<sup>[54]</sup>  $\delta D = 7.83 \delta^{18}O + 8.63$  更为接近, 与下游地区的局地大气降水线方程相比截距偏小, 由此可见太湖蒸发补给会使夏季风期间下游地区局地大气降水线方程的截距升高.

冬季风期间, 局地蒸发对降水同位素的影响很小, 降水  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  并没有随传输过程中降水的不断掉落而逐渐贫化. Wang 等<sup>[24]</sup>对受西风气流控制的

西北干旱区的研究中也发现, 在局地蒸发对降水贡献较小的石河子地区降水  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  与其上游的伊宁相比差异较小. 此外, 对于太湖蒸发的研究也表明<sup>[38]</sup>, 冬季风期间湖泊的蒸发量也很小, 约占全年蒸发总量的 17%.

### 3.3 局地大气降水线方程的斜率和截距分析

大气降水线方程的斜率和截距是分别反映了水汽凝结过程中的瑞利分馏及水汽形成过程中的动力分馏作用, 夏季风期间研究区域 4 个站点的局地大气降水线方程与全球大气降水线方程较为接近, 反映了夏季风来自海洋水汽的影响; 冬季风期间局地大气降水线方程均具有高截距特点, 体现了经历多次再循环的内陆水汽的影响.

本文 4 个站点的大气降水线方程普遍存在斜率和截距较高特点, 这在我国亚热带季风气候区的其他站点也存在(表 3). 从季节尺度上来看, 无论是夏季风期间, 还是冬季风期间, 当水汽来源比较单一时, 局地大气降水线方程的斜率都不具有全年尺度上大气降水线方程的斜率较高的特点, 但在过渡期间或同时考虑夏季风和冬季风时, 大气降水线方程的斜率又会表现有与全年尺度上大气降水线方程相同的斜率较高的特点. 目前已有的研究对于这种斜率较高的解释比较模糊, 本研究认为是冬、夏季风期间的降水水汽来源的不同, 造成了冬、夏季风期间稳定氢氧同位素组分的差异, 因此基于全年的数据回归会得到斜率较高的局地大气降水线方程. 由此可知, 基于全年数据得到的斜率和截距较高的局地大气降水线方程, 并不表示各个季节的局地大气降水线方程都存在这样的特征, 其变化特征和影响因素需针对不同季节区别分析.

表 3 我国具有斜率和截距较高特点局地大气降水线方程的站点

Table 3 Stations in China that have local meteoric water line with higher slopes and intercepts

地区	局地大气降水线	文献
重庆	$\delta D = 8.73 \delta^{18}O + 15.73$	[55]
贵州贵阳	$\delta D = 8.82 \delta^{18}O + 22.07$	[56]
广西环江	$\delta D = 9.01 \delta^{18}O + 19.66$	[57]
广西桂林	$\delta D = 8.42 \delta^{18}O + 16.28$	[58]
湖南桃源	$\delta D = 8.55 \delta^{18}O + 17.10$	[34]
湖南长沙	$\delta D = 8.38 \delta^{18}O + 17.30$	[59]
江西鹰潭	$\delta D = 8.61 \delta^{18}O + 18.34$	[60]
江苏南京	$\delta D = 8.47 \delta^{18}O + 17.52$	[33]
江苏常熟	$\delta D = 8.48 \delta^{18}O + 13.96$	[34]

## 4 结论

通过对 2016 年南京、溧阳、宜兴和东山这 4 个站点采集到的大气降水稳定同位素数据的分析, 发现: 水汽源地的差异引起大气降水  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  和  $d$ -

excess 的明显季节变化, 夏季风期间  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  表现为比冬季风期间贫化。局地蒸发也会对大气降水  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  和  $d$ -excess 产生影响, 夏季风期间太湖蒸发会使下游降水中的  $d$ -excess 升高 1.2‰, 局地大气降水线方程的截距也会升高; 冬季风期间, 局地蒸发对降水同位素的影响很小, 降水同位素并没有随雨滴降落而贫化的效应。局地大气降水线方程的高截距主要是由于受冬季风期间来自内陆的经历了多次水汽再循环的水汽所形成的降水的影响; 斜率较高的主要原因是冬、夏季风期间的降水水汽来源的不同, 造成了冬、夏季风期间稳定氢氧同位素组分的差异, 因此基于全年的数据回归会得到较高斜率的局地大气降水线方程。此外, 量化局地蒸发对降水的贡献也十分重要, 对进一步探究局地蒸发对降水同位素和局地气候的影响有重要作用。

#### 参考文献:

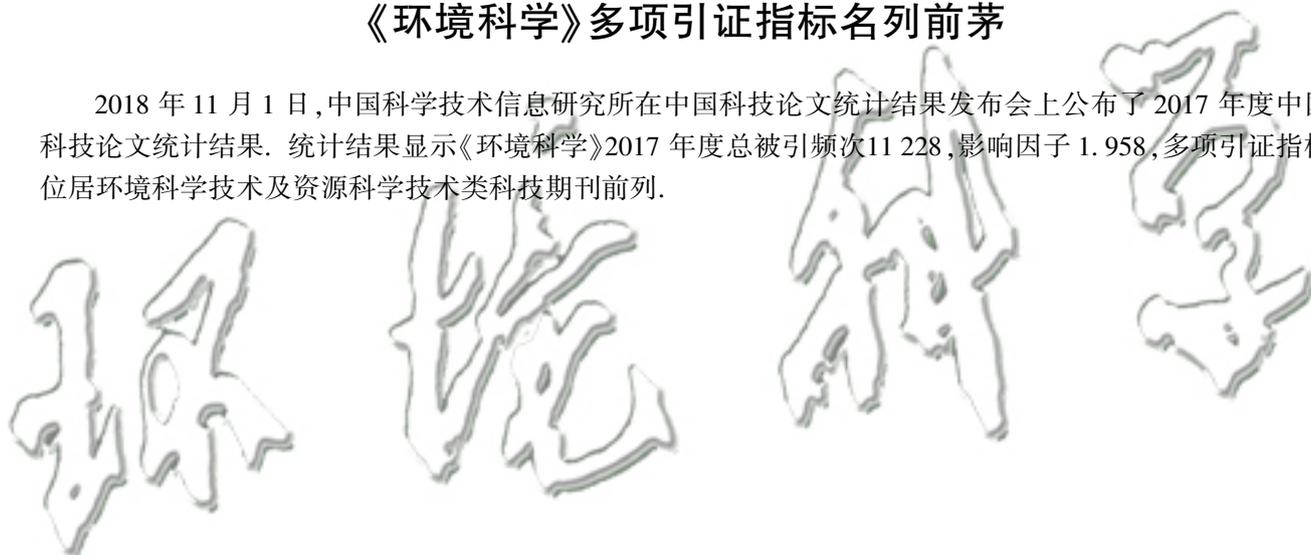
- [ 1 ] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation[J]. *Tellus*, 1964, **16**(4): 436-468.
- [ 2 ] 章新平, 刘晶森, 孙维贞, 等. 中国西南地区降水中氧稳定同位素比率与相关气象要素之间关系的研究[J]. *中国科学 D 辑 地球科学*, 2006, **36**(9): 850-859.
- [ 3 ] Uemura R, Matsui Y, Yoshimura K, *et al.* Evidence of deuterium excess in water vapor as an indicator of ocean surface conditions[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, **113**(D19): D19114.
- [ 4 ] Aemisegger F, Pfahl S, Sodemann H, *et al.* Deuterium excess as a proxy for continental moisture recycling and plant transpiration[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**(8): 4029-4054.
- [ 5 ] Pfahl S, Sodemann H. What controls deuterium excess in global precipitation? [J]. *Climate of the Past*, 2014, **10**(2): 771-781.
- [ 6 ] Gat J R. Oxygen and hydrogen isotopes in the hydrologic cycle [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1996, **24**: 225-262.
- [ 7 ] Gibson J J, Edwards T W D. Regional water balance trends and evaporation-transpiration partitioning from a stable isotope survey of lakes in northern Canada[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2002, **16**(2): 1026.
- [ 8 ] 章新平, 刘晶森, 田立德, 等. 亚洲降水中  $\delta^{18}O$  沿不同水汽输送路径的变化[J]. *地理学报*, 2004, **59**(5): 699-708.  
Zhang X P, Liu J M, Tian L D, *et al.* Variations of  $\delta^{18}O$  in precipitation along vapor transport paths over Asia [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2004, **59**(5): 699-708.
- [ 9 ] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters [J]. *Science*, 1961, **133**(3465): 1702-1703.
- [ 10 ] Rozanski K, Araguás-Araguás L, Gonfiantini R. Isotopic patterns in modern global precipitation [A]. In: Swart P K, Lohmann K C, Mckenzie J, *et al.* (Eds.). *Climate Change in Continental Isotopic Records* [M]. Washington DC: American Geophysical Union, 1993. 1-36.
- [ 11 ] Breitenbach S F M, Adkins J F, Meyer H, *et al.* Strong influence of water vapor source dynamics on stable isotopes in precipitation observed in Southern Meghalaya, NE India [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, **292**(1-2): 212-220.
- [ 12 ] Peng T R, Wang C H, Huang C C, *et al.* Stable isotopic characteristic of Taiwan's precipitation: A case study of western Pacific monsoon region [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, **289**(3-4): 357-366.
- [ 13 ] Conroy J L, Cobb K M, Noone D. Comparison of precipitation isotope variability across the tropical Pacific in observations and SWING2 model simulations [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, **118**(11): 5867-5892.
- [ 14 ] Tang Y Y, Pang H X, Zhang W B, *et al.* Effects of changes in moisture source and the upstream rainout on stable isotopes in precipitation—a case study in Nanjing, eastern China [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2015, **19**(10): 4293-4306.
- [ 15 ] Cai Z Y, Tian L D. Atmospheric Controls on seasonal and interannual variations in the precipitation isotope in the East Asian monsoon region [J]. *Journal of Climate*, 2016, **29**(4): 1339-1352.
- [ 16 ] Nguyen L D, Heidbüchel I, Hanno M, *et al.* What controls the stable isotope composition of precipitation in the Mekong Delta? A model-based statistical approach [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2018, **22**(2): 1239-1262.
- [ 17 ] Wei Z W, Lee X H, Liu Z F, *et al.* Influences of large-scale convection and moisture source on monthly precipitation isotope ratios observed in Thailand, Southeast Asia [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2018, **488**: 181-192.
- [ 18 ] Moerman J W, Cobb K M, Adkins J F, *et al.* Diurnal to interannual rainfall  $\delta^{18}O$  variations in northern Borneo driven by regional hydrology [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2013, **369-370**: 108-119.
- [ 19 ] He Y, Risi C, Gao J, *et al.* Impact of atmospheric convection on south Tibet summer precipitation isotopologue composition using a combination of in situ measurements, satellite data, and atmospheric general circulation modeling [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, **120**(9): 3852-3871.
- [ 20 ] Yang X X, Yao T D, Yang W L, *et al.* Isotopic signal of earlier summer monsoon onset in the bay of Bengal [J]. *Journal of Climate*, 2012, **25**(7): 2509-2516.
- [ 21 ] Soderberg K, Good S P, O'connor M, *et al.* Using atmospheric trajectories to model the isotopic composition of rainfall in central Kenya [J]. *Ecosphere*, 2013, **4**(3): 1-18.
- [ 22 ] Gat J R, Bowser C J, Kendall C. The contribution of evaporation from the Great Lakes to the continental atmosphere; estimate based on stable isotope data [J]. *Geophysical Research Letters*, 1994, **21**(7): 557-560.
- [ 23 ] Kong Y L, Pang Z H, Froehlich K. Quantifying recycled moisture fraction in precipitation of an arid region using deuterium excess [J]. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 2013, **65**(1): 19251.
- [ 24 ] Wang S J, Zhang M J, Che Y J, *et al.* Contribution of recycled moisture to precipitation in oases of arid central Asia: A stable isotope approach [J]. *Water Resources Research*, 2016, **52**(4): 3246-3257.
- [ 25 ] Trenberth K E. Atmospheric moisture recycling: role of advection and local evaporation [J]. *Journal of Climate*, 1999, **12**(5): 1368-1381.
- [ 26 ] Li X P, Zhong S Y, Bian X D, *et al.* Hydroclimate and variability in the Great Lakes region as derived from the North American regional reanalysis [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2010, **115**(D12): D12104.
- [ 27 ] 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): 32-41.
- 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): 32-41.
- [28] Scott R W, Huff F A. Impacts of the great lakes on regional climate conditions[J]. *Journal of Great Lakes Research*, 1996, **22**(4): 845-863.
- [29] Notaro M, Zarrin A, Vavrus S, *et al.* Simulation of heavy lake-effect snowstorms across the Great Lakes Basin by RegCM4: synoptic climatology and variability [J]. *Monthly Weather Review*, 2013, **141**(6): 1990-2014.
- [30] Bryan A M, Steiner A L, Posselt D J. Regional modeling of surface-atmosphere interactions and their impact on Great Lakes hydroclimate [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, **120**(3): 1044-1064.
- [31] 董小芳, 邓黄月, 郑祥民, 等. 长江流域降水中氢氧同位素特征及水汽来源[J]. *环境科学与技术*, 2017, **40**(4): 78-84.
- Dong X F, Deng H Y, Zheng X M, *et al.* Analysis of stable isotope characteristics and water vapor origins in atmospheric precipitation in the Yangtze River basin [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **40**(4): 78-84.
- [32] Araguás-Araguás L, Froehlich K, Rozanski K. Stable isotope composition of precipitation over southeast Asia[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1998, **103**(D22): 28721-28742.
- [33] 王涛, 张洁茹, 刘笑, 等. 南京大气降水氧同位素变化及水汽来源分析[J]. *水文*, 2013, **33**(4): 25-31.
- Wang T, Zhang J R, Liu X, *et al.* Variations of stable isotopes in precipitation and water vapor sources in Nanjing area [J]. *Journal of China Hydrology*, 2013, **33**(4): 25-31.
- [34] Liu J R, Song X F, Yuan G F, *et al.* Stable isotopic compositions of precipitation in China[J]. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 2014, **66**(1): 22567.
- [35] Qin B Q. Lake Taihu, China: dynamics and environmental change[M]. Dordrecht: Springer, 2008.
- [36] Lee X H, Liu S D, Xiao W, *et al.* The Taihu eddy flux network: an observational program on energy, water, and greenhouse gas fluxes of a large freshwater lake[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2014, **95**(10): 1583-1594.
- [37] Hu C, Wang Y W, Wang W, *et al.* Trends in evaporation of a large subtropical lake[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2016, **129**(1-2): 159-170.
- [38] 肖薇, 符靖茹, 王伟, 等. 用稳定同位素方法估算大型浅水湖泊蒸发量——以太湖为例[J]. *湖泊科学*, 2017, **29**(4): 1009-1017.
- Xiao W, Fu J R, Wang W, *et al.* Estimating evaporation over a large and shallow lake using stable isotopic method: a case study of Lake Taihu [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2017, **29**(4): 1009-1017.
- [39] Aggarwal P, Araguás-Araguás L, Gröning M, *et al.* Laser spectroscopic analysis of liquid water samples for stable hydrogen and oxygen isotopes[R]. Vienna, Austria: IAEA, 2009. 35.
- [40] Pfahl S, Wernli H. Air parcel trajectory analysis of stable isotopes in water vapor in the eastern Mediterranean[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, **113**(D20): D20104.
- [41] Liu J R, Song X F, Fu G F, *et al.* Precipitation isotope characteristics and climatic controls at a continental and an island site in Northeast Asia[J]. *Climate Research*, 2011, **49**(1): 29-44.
- [42] Bowen G J. Spatial analysis of the intra-annual variation of precipitation isotope ratios and its climatological corollaries[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, **113**(D5): D05113.
- [43] Pang H, Hou S, Kaspari S, *et al.* Influence of regional precipitation patterns on stable isotopes in ice cores from the central Himalayas[J]. *The Cryosphere*, 2014, **8**(1): 289-301.
- [44] Gat J R. Atmospheric water balance—the isotopic perspective [J]. *Hydrological Processes*, 2000, **14**(8): 1357-1369.
- [45] Merlivat L, Jouzel J. Global climatic interpretation of the deuterium-oxygen 18 relationship for precipitation[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1979, **84**(C8): 5029-5033.
- [46] Xiao W, Qian Y F, Lee X H, *et al.* Hydrologic implications of the isotopic kinetic fractionation of open-water evaporation[J]. *Science China Earth Sciences*, 2018, doi: 10.1007/s11430-018-9246-9.
- [47] Welp L R, Lee X H, Griffis T J, *et al.* A meta-analysis of water vapor deuterium-excess in the midlatitude atmospheric surface layer [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2012, **26**(3): GB3021.
- [48] 朱珊娟, 肖薇, 张弥, 等. 加拿大温带落叶林生态系统氢氧同位素组成研究[J]. *生态学报*, 2017, **37**(22): 7539-7551.
- Zhu S X, Xiao W, Zhang M, *et al.* Hydrogen and oxygen stable isotopic composition in a deciduous forest ecosystem in Canada [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(22): 7539-7551.
- [49] Simonin K A, Link P, Rempe D, *et al.* Vegetation induced changes in the stable isotope composition of near surface humidity [J]. *Ecology*, 2014, **7**(3): 936-949.
- [50] 徐敬争, 肖薇, 肖启涛, 等. 湖水氢氧同位素组分的时间变化特征及影响因子分析[J]. *环境科学*, 2016, **37**(7): 2470-2477.
- Xu J Z, Xiao W, Xiao Q T, *et al.* Temporal dynamics of stable isotopic composition in Lake Taihu and controlling factors [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(7): 2470-2477.
- [51] Dongmann G, Nürnberg H W, Förstel H, *et al.* On the enrichment of H<sub>2</sub><sup>18</sup>O in the leaves of transpiring plants [J]. *Radiation and Environmental Biophysics*, 1974, **11**(1): 41-52.
- [52] Yakir D, Sternberg L D S L. The use of stable isotopes to study ecosystem gas exchange[J]. *Oecologia*, 2000, **123**(3): 297-311.
- [53] Lee X H, Kim K, Smith R. Temporal variations of the <sup>18</sup>O/<sup>16</sup>O signal of the whole-canopy transpiration in a temperate forest[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2007, **21**(3): GB3013.
- [54] 董小芳, 邓黄月, 张弥, 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 isotope in precipitation and its relationship with ENSO in Shanghai [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(5): 1817-1827.
- [55] 李廷勇, 李红春, 沈川渊, 等. 2006~2008年重庆大气降水 δD 和 δ<sup>18</sup>O 特征初步分析[J]. *水科学进展*, 2010, **21**(6): 757-764.
- Li T Y, Li H C, Shen C Z, *et al.* Study on the δD and δ<sup>18</sup>O characteristics of meteoric precipitation during 2006-2008 in Chongqing, China [J]. *Advances in Water Science*, 2010, **21**(6): 757-764.
- [56] 朱磊, 范玆, 郭欢. 西南地区大气降水中氢氧稳定同位素特征与水汽来源[J]. *云南地理环境研究*, 2014, **26**(5): 61-67.
- Zhu L, Fan T, Guo H. Sources and stable isotope characteristics of precipitation in southwest of China [J]. *Yunnan Geographic*

- Environment Research, 2014, **26**(5): 61-67.
- [57] 胡可, 陈洪松, 聂云鹏, 等. 桂西北喀斯特峰丛洼地降水氢氧稳定同位素的季节变化特征[J]. 农业工程学报, 2013, **29**(5): 53-62.
- Hu K, Chen H S, Nie Y P, *et al.* Characteristics of seasonal variation of deuterium and oxygen-18 isotope composition of precipitation in karst peak-cluster depression area, northwest Guangxi of China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, **29**(5): 53-62.
- [58] 涂林玲, 王华, 冯玉梅. 桂林地区大气降水的 D 和<sup>18</sup>O 同位素的研究[J]. 中国岩溶, 2004, **23**(4): 304-309.
- Tu L L, Wang H, Feng Y M. Research on D and <sup>18</sup>O isotope in the precipitation of Guilin [J]. Carsologica Sinica, 2004, **23**(4): 304-309.
- [59] 吴华武, 章新平, 孙广禄, 等. 湖南长沙地区大气降水中稳定同位素特征变化[J]. 长江流域资源与环境, 2012, **21**(5): 540-546.
- Wu H W, Zhang X P, Sun G L, *et al.* Variations of stable isotopic characteristics of atmospheric precipitation from Changsha, Hunan [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2012, **21**(5): 540-546.
- [60] 沈业杰, 彭新华. 鹰潭地区大气降水中氢氧稳定同位素特征研究[J]. 生态环境学报, 2014, **23**(1): 101-105.
- Shen Y J, Peng X H. Stable isotopes of hydrogen and oxygen in the precipitation of Yingtan [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, **23**(1): 101-105.

## 《环境科学》多项引证指标名列前茅

2018年11月1日,中国科学技术信息研究所在中国科技论文统计结果发布会上公布了2017年度中国科技论文统计结果.统计结果显示《环境科学》2017年度总被引频次11228,影响因子1.958,多项引证指标位居环境科学技术及资源科学技术类科技期刊前列.



## CONTENTS

Influence of Mountain Valley Breeze and Sea Land Breeze in Winter on Distribution of Air Pollutants in Beijing-Tianjin-Hebei Region	LI Qing-chun, LI Ju, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i>	( 513 )
A Method of Aerosol Particle Number Size Distribution Inversed by PM <sub>2.5</sub> Mass Concentration in PRD	LI Fei, TAN Hao-bo, DENG Xue-jiao, <i>et al.</i>	( 525 )
Light Absorption and Fluorescence Characteristics of Atmospheric Water-soluble Organic Compounds and Humic-like Substances During the Winter Season in Guangzhou	FAN Xing-jun, YU Xu-fang, CAO Tao, <i>et al.</i>	( 532 )
Source Apportionment and Health Risk Quantification of Heavy Metals in PM <sub>2.5</sub> in Yangzhou, China	DONG Shi-hao, XIE Yang, HUANGFU Yan-qi, <i>et al.</i>	( 540 )
Pollution Characteristics and Source Analysis of <i>n</i> -alkanes and Saccharides in PM <sub>2.5</sub> During the Winter in Liaocheng City	LIU Xiao-di, MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, <i>et al.</i>	( 548 )
Pollution Characteristics, Dry Deposition Fluxes, and Sources for Atmospheric Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Bosten Lake Watershed	SONG Shi-jie, HUANG Tao, ZHAO Liu-yuan, <i>et al.</i>	( 558 )
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in PM <sub>2.5</sub> of a Concentrated Broiler Feeding Operation	LIU Fei, XU Xia, TU Bo-wen, <i>et al.</i>	( 567 )
Effects of Water Vapor Source and Local Evaporation on the Stable Hydrogen and Oxygen Isotopic Compositions of Precipitation	HU Yong-bo, XIAO Wei, QIAN Yu-fei, <i>et al.</i>	( 573 )
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Formation in Atmospheric Deposition in Dianchi Lake and Their Contributions to Lake Loading	REN Jia-guo, JIA Hai-bin, JIAO Li-xin, <i>et al.</i>	( 582 )
Temporal-spatial Distribution of Nitrogen and Phosphorus Nutrients in Lake Taihu Based on Geostatistical Analysis	LÜ Wei-wei, YAO Xin, ZHANG Bao-hua, <i>et al.</i>	( 590 )
Effects of Cyanobacterial Blooms in Eutrophic Lakes on Water Quality of Connected Rivers	YU Mao-lei, HONG Guo-xi, XU Hai, <i>et al.</i>	( 603 )
Contamination and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Sediments of Yilong Lake, Southwest China	LI Xiao-lin, LIU En-feng, YU Zhen-zhen, <i>et al.</i>	( 614 )
Temporal and Spatial Characteristics of Heavy Metals in Suspended Particulate Matter in Pearl River Estuary and Its Influencing Factors	DU Jia, WANG Yong-hong, HUANG Qing-hui, <i>et al.</i>	( 625 )
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Microorganism Pollutions in the Beiyun River	CHEN Lei, LI Lei-fang, ZHI Xiao-sha, <i>et al.</i>	( 633 )
Speciation and Transformation of Phosphorus in Sediments During the Redox Cycle	HAO Wen-chao, WANG Cong-feng, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i>	( 640 )
Effect of Magnetic Zirconium/Iron-Modified Bentonite Addition on Phosphorus Mobilization and Species Transformation in River Sediments	WANG Yan, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i>	( 649 )
Influence of Calcium Ion Pre-treatment on Phosphate Adsorption onto Magnetic Zirconium/Iron-modified Bentonite	ZHAO Yu-ying, LIN Jian-wei, ZHANG Hong-hua, <i>et al.</i>	( 658 )
Effect of Nitrogen on Magnesium Modified Biochar Adsorption to Phosphorus	ZHI Meng-meng, WANG Peng-fei, HOU Ze-ying, <i>et al.</i>	( 669 )
Removal Performance and Mechanism for Treating Phosphorus in Agricultural Wastewater by Three Adsorbents	WU Lu, LIU Feng, LONG Rui, <i>et al.</i>	( 677 )
Photolysis Mechanism of <i>p</i> -Nitrophenol by Nitrocellulose Membrane in Aqueous Solution	DAI Zhi-feng, ZHAO Tong-qian, YIN Yong-guang, <i>et al.</i>	( 685 )
Preparation of ZnTiO <sub>3</sub> /TiO <sub>2</sub> Photocatalyst and Its Mechanism on Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants	ZHANG Wen-hai, JI Qing-hua, LAN Hua-chun, <i>et al.</i>	( 693 )
Adsorption and Photocatalytic Removal of Chromium on High-index TiO <sub>2</sub> Facet	ZHONG De-jian, ZHANG Jian-feng, LI Yao, <i>et al.</i>	( 701 )
Reduction Cooperated Fenton Oxidation of Zero-valent Iron (ZVI) Immobilized in Alginate Microsphere for Degradation of Acid Red B	ZHANG Huan, LI Shuang-shuang, WEI Jun-fu, <i>et al.</i>	( 708 )
Mechanism of Removing Iron and Manganese from Drinking Water Using Manganese Ore Sand and Quartz Sand as Filtering Material	CAI Yan-an, BI Xue-jun, ZHANG Jia-ning, <i>et al.</i>	( 717 )
Preparation of Sulfonated Graphene Oxide Modified Composite Nanofiltration Membrane and Application in Salts Separation	ZHANG Yan-jun, ZHANG Shao-feng, ZHAO Chang-wei, <i>et al.</i>	( 724 )
Purification Efficiency and Mechanism of Integrated Al Salt Flocculation-ultrafiltration Membrane Process	XUE Wen-jing, LI Wen-jiang, LIU Jian, <i>et al.</i>	( 730 )
Threshold Flux and Membrane Fouling Analysis of the Hybrid Pre-ozonation and CNTs Membrane Modification Process	WANG Kai-lun, LIU Fang, GUAN Yu-qi, <i>et al.</i>	( 738 )
Distribution and Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in SBR/MBBR Process	LIU Shu-hui, TIAN Wei-jun, ZHOU Jian-ren, <i>et al.</i>	( 747 )
Biological Nitrogen Removal Process in a Microbubble-aerated Biofilm Reactor Treating Low C/N Wastewater	LIU Chun, WANG Cong-cong, CHEN Xiao-xuan, <i>et al.</i>	( 754 )
Treatment of Simulated Saline Wastewater from the Coal Chemical Industry Using Ecological Floating Beds Enhanced with Arbuscular Mycorrhiza	DOU Wen-qing, HE Hao, SONG Wen-ping, <i>et al.</i>	( 761 )
Nitrification and Bioaugmentation of Biological Treatment System of Sewage Treatment Plant at High Temperature in Summer	SONG Tian-wei, SHENG Xiao-lin, WANG Jia-de, <i>et al.</i>	( 768 )
Characteristics of Ammonia Adsorption and Kinetics by Nitrifying Sludge Immobilized Pellets	YU De-shuang, LÜ Ting-ting, CHEN Guang-hui, <i>et al.</i>	( 774 )
Nitrite Accumulation Characteristics of Partial Denitrification in Different Sludge Sources Using Sodium Acetate as Carbon Source	BI Chun-xue, YU De-shuang, DU Shi-ming, <i>et al.</i>	( 783 )
Operating Characteristics of a DPR-SNED System Treating Low C/N Municipal Wastewater and Nitrate-containing Sewage	DU Shi-ming, YU De-shuang, BI Chun-xue, <i>et al.</i>	( 791 )
Simultaneous Nitrification and Denitrifying Phosphorus Removal in Continuous Flow Reactor with Intermittent Aeration	ZHAO Zhi-chao, HUANG Jian-ming, LI Jian, <i>et al.</i>	( 799 )
Start-up and Stable Operation of ABR-MBR Denitrifying Phosphorus Removal Process	WEI Jia-min, JIANG Zhi-yun, CHENG Cheng, <i>et al.</i>	( 808 )
Effect of Influent C/N Ratio on the Nutrient Removal Characteristics of SNEDPR Systems	DU Ye-qi, YU De-shuang, ZHEN Jian-yuan, <i>et al.</i>	( 816 )
Carbon and Nitrogen Removal Characteristics of ABR Decarbonization-CANON Coupling Process	LI Tian, YIN Wen, WANG Xin-zhu, <i>et al.</i>	( 823 )
Effect of Aeration Density on Start-up of CANON Process	LI Dong, GAO Xue-jian, ZHANG Jie, <i>et al.</i>	( 829 )
Adjusting Temperature and Settling Time to Achieve ANAMMOX Particles Rapid Start-up and Stable Operation	LI Hai-ling, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i>	( 837 )
Effect of C/N and Sludge Concentration on the pH-Regulated Nitrosation System	ZHANG Min, WEI Jia-min, HUANG Hui-min, <i>et al.</i>	( 845 )
Growth Features of Water Supply Pipeline Biofilms Based on Active Microorganisms	WANG Yang, ZHU Bin, TONG Jun, <i>et al.</i>	( 853 )
Elevational Distribution Characteristics of Soil Bacterial Community and Enzyme Activities in Mount Huangshan	YAO Lan, HU Li-huang, ZHANG Huan-chao, <i>et al.</i>	( 859 )
Microbial Community Structure Shift during Bioremediation of Petroleum Contaminated Soil Using High Throughput Sequencing	QI Yan-yun, WU Man-li, ZHU Chang-cheng, <i>et al.</i>	( 869 )
Effect of Nitrification on N <sub>2</sub> O Emissions and Their Environmental Factors in Saline-alkali Wetlands	YANG Qu, GAO Wei-feng, LIU Feng-qin, <i>et al.</i>	( 876 )
Effect of Long-term Dairy Manure Amendment on N <sub>2</sub> O and NO Emissions from Summer Maize-Winter Wheat Cropping Systems	NIE Huang-hua, ZHANG Jia-sheng, HE Zhou-ming, <i>et al.</i>	( 885 )
Effects of Plastic Film Mulching and Nitrogen Fertilizer Application on N <sub>2</sub> O Emissions from a Vegetable Field	NI Xue, HAO Qing-ju, CHEN Shi-jie, <i>et al.</i>	( 893 )
Differences and Relationship Between Rhizosphere Characteristics and Methane Emissions of Double-cropping Rice Variety	XIAO Zhi-xiang, FU Zhi-qiang, XU Hua-qin, <i>et al.</i>	( 904 )
Effect of Long-Term Biochar Application on Soil Respiration in Flue-Cured Tobacco Planting Fields in Henan Province	LI Ya-sen, DING Song-shuang, YIN Quan-yu, <i>et al.</i>	( 915 )
Spatial Variability in Soil Respiration Under Different Land Use Patterns in Maocun Village, Guilin	DING Meng-kai, HU Xiao-nong, CAO Jian-hua, <i>et al.</i>	( 924 )
Spatiotemporal Variability and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in a Industrially Developed City	LI Feng, LIU Si-yuan, LI Yan, <i>et al.</i>	( 934 )
Effects of Bentonite on Chemical Forms and Bioavailability of Heavy Metals in Different Types of Farmland Soils	LIN Hai, JIN Xiao-na, DONG Ying-bo, <i>et al.</i>	( 945 )
Characteristics of Soil Organic Carbon and Mineralization with Different Stands in Jinyun Mountain	CHEN Shi-qi, LÜ Sheng, GAO Ming, <i>et al.</i>	( 953 )
Contribution of Root Biomass to Soil Organic Carbon Under Complex Landforms Conditions	ZHANG Yan-jun, GUO Sheng-li, <i>et al.</i>	( 961 )
Transformation and Distribution of Soil Organic Carbon and the Microbial Characteristics in Response to Different Exogenous Carbon Input Levels in Paddy Soil	WANG Ji-fei, TONG Yao-yao, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i>	( 970 )
Analysis of Heavy Metal Pollution and Ecological Risk Assessment on Vegetation Leaves in Baoji City	ZHANG Jun-hui, LIN Qing, JIANG Shan, <i>et al.</i>	( 978 )
Effect of Biochar on Available Heavy Metals During Sewage Sludge Composting and Land Application of Compost	ZHOU Ji, YU Ya-wei, JIANG Yue, <i>et al.</i>	( 987 )
Influence of Sludge Retention Time on the Performance and Stability of Mesophilic Anaerobic Co-digestion of Food Waste with Waste Activated Sludge	YUAN Hong-lin, MA Jing, XING Bao-shan, <i>et al.</i>	( 994 )
Performance of Treating Straw and Animal Manure Mixture by an Integrated Process of Thermo-alkali-bi-enzyme Hydrolysis-anaerobic Digestion and Conditions of High Methane Yield	BIAN Ai-qin, YUAN Ye, ZHANG Lu-lu, <i>et al.</i>	( 1003 )