

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第7期

Vol.34 No.7

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版



目次

|                                                                             |                                                  |
|-----------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| 唐山市大气颗粒物 OC/EC 浓度谱分布观测研究 .....                                              | 郭育红, 辛金元, 王跃思, 温天雪, 李杏茹, 封孝信 (2497)              |
| 北京东灵山地区主要大气污染物浓度变化特征 .....                                                  | 于阳春, 胡波, 王跃思 (2505)                              |
| 奥运前期与奥运期间北京市大气细颗粒物特征比较分析 .....                                              | 张菊, 欧阳志云, 苗鸿, 王效科, 任玉芬, 宋文质 (2512)               |
| 华东森林及高山背景区域臭氧变化特征及影响因素 .....                                                | 苏彬彬 (2519)                                       |
| 北京市居家空气微生物粒径及分布特征研究 .....                                                   | 方治国, 孙平, 欧阳志云, 刘芄, 孙力, 王小勇 (2526)                |
| 民用燃煤源中多环芳烃排放因子实测及其影响因素研究 .....                                              | 海婷婷, 陈颖军, 王艳, 田崇国, 林田 (2533)                     |
| 醇类汽油车醇醛酮、芳香烃和烯烃类排放的试验研究 .....                                               | 张凡, 王建海, 王小臣, 王建昕 (2539)                         |
| 微波解吸-催化燃烧净化甲苯研究 .....                                                       | 曹晓强, 张浩, 黄学敏 (2546)                              |
| 生物滴滤池对 BTEX 的去除及相应细菌群落分析 .....                                              | 李建军, 廖东奇, 许玫英, 孙国萍 (2552)                        |
| 炼油厂废水处理站挥发性羰基化合物成分谱研究 .....                                                 | 周博宇, 刘旺, 王伯光, 周咪, 黄青, 周磊 (2560)                  |
| 春季东、黄海溶解甲烷的分布和海气交换通量 .....                                                  | 曹兴朋, 张桂玲, 马啸, 张国玲, 刘素美 (2565)                    |
| 千岛湖湖泊区水体季节性分层特征研究 .....                                                     | 董春颖, 虞左明, 吴志旭, 吴春金 (2574)                        |
| 新安江流域土地利用结构对水质的影响 .....                                                     | 曹芳芳, 李雪, 王东, 赵越, 王玉秋 (2582)                      |
| 长江中下游草型湖泊浮游植物群落及其与环境因子的典范对应分析 .....                                         | 孟睿, 何连生, 过龙根, 席北斗, 李中强, 舒俭民, 刁晓君, 李必才 (2588)     |
| 河口盐度梯度下溶解态核酸的微生物可利用性 .....                                                  | 杨青青, 李朋辉, 黄清辉 (2597)                             |
| 水藻暴发的影响因素定量化研究初步 .....                                                      | 张卓, 宋志尧, 黄昌春, 俞肇元 (2603)                         |
| 深水型水库藻类功能组时空演替及生境变化的影响 .....                                                | 卢金锁, 胡亚潘 (2611)                                  |
| 结合水体光学分类反演太湖总悬浮物浓度 .....                                                    | 周晓宇, 孙德勇, 李云梅, 李俊生, 龚绍琦 (2618)                   |
| Subwet 模型在人工湿地设计中的应用 .....                                                  | 李慧峰, 黄津辉, 林超 (2628)                              |
| 白洋淀荷茎叶提取液对铜绿微囊藻及四尾栅藻化感效应 .....                                              | 何连生, 孟繁丽, 刁晓君, 李一葳, 孟睿, 席北斗, 舒俭民 (2637)          |
| 苦草 ( <i>Vallisneria spiralis</i> ) 对城市缓流河道黑臭底泥理化性质的影响 .....                 | 许宽, 刘波, 王国祥, 马久远, 曹勋, 周峰 (2642)                  |
| 铁屑-微生物协同还原去除水体中 Cr(VI) 研究 .....                                             | 汤洁, 王卓行, 徐新华 (2650)                              |
| 铁铜催化剂非均相 Fenton 降解苯酚及机制研究 .....                                             | 杨岳主, 李玉平, 杨道武, 段锋, 曹宏斌 (2658)                    |
| 不同形态无机氮对水中微量药物安替比林光降解效能影响 .....                                             | 赵倩, 陈超, 封莉, 张立秋 (2665)                           |
| 邻苯二甲酸二甲酯的紫外光-H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 降解机制研究 .....                     | 刘青, 陈成, 陈泓哲, 杨绍贵, 何欢, 孙成 (2670)                  |
| 二胺基改性有序多孔 SBA-15 对溶液中 Cd <sup>2+</sup> 离子的吸附研究 .....                        | 张萌, 杨亚提, 秦睿, 王力, 张增强, 李忠宏, 李荣华, 孟昭福 (2677)       |
| 酸化蛭石的表面有机修饰及其对疏水性微污染物的吸附 .....                                              | 蒋争明, 于旭彪, 胡芸, 任源, 李雪辉, 韦朝海 (2686)                |
| 基于废陶瓷的多孔陶瓷研制及其对 Ni <sup>2+</sup> 的吸附性能 .....                                | 张永利, 王承智, 史册, 尚玲玲, 马瑞, 董婉莉 (2694)                |
| 树皮支持的厌氧生物法去除地下水中的高氯酸盐 .....                                                 | 王蕊, 刘菲, 陈楠, 陈鸿汉 (2704)                           |
| Cr(VI) 污染地下水修复的 PRB 填料实验研究 .....                                            | 朱文会, 董良飞, 王兴润, 翟亚丽 (2711)                        |
| 化学沉淀法去除稀土湿法冶炼废水中钙与高浓度氨氮研究 .....                                             | 王浩, 成官文, 宋晓薇, 徐子涵, 蒙金结, 董传强 (2718)               |
| 镍铁尾矿硫酸浸出动力学研究 .....                                                         | 陈安安, 周少奇, 黄鹏飞 (2729)                             |
| HRT 对 A <sup>2</sup> O 工艺中典型多环麝香迁移转化的影响 .....                               | 刘鹏程, 黄满红, 陈东辉, 陈亮 (2735)                         |
| 发酵液作为 EBPR 碳源的动力学模拟 .....                                                   | 张超, 陈银广 (2741)                                   |
| 强化污泥利用水解反应器改善碳源与污泥减量作用研究 .....                                              | 熊娅, 王强, 宋英豪, 朱民, 林秀军 (2748)                      |
| 污泥胞外聚合物的提取方法及其对污泥脱水性能的影响 .....                                              | 周俊, 周立祥, 黄焕忠 (2752)                              |
| 不同粒径铁铝泥对砷(Ⅲ)的吸附效果 .....                                                     | 林璐, 胥嘉瑞, 吴昊, 王昌辉, 裴元生 (2758)                     |
| 我国畜禽粪便污染的区域差异与发展趋势分析 .....                                                  | 仇焕广, 廖绍攀, 井月, 栾江 (2766)                          |
| 浙北平原富硒土壤资源区硒来源的定量分离 .....                                                   | 徐明星, 潘卫丰, 岑静, 马学文 (2775)                         |
| 三江平原土地利用方式变化对土壤锰形态影响 .....                                                  | 张仲胜, 吕宪国, 宋晓林 (2782)                             |
| 吉林前郭水田土壤有机碳垂直分布规律和储量研究 .....                                                | 汤洁, 张雯辉, 李昭阳, 张楠, 胡猛 (2788)                      |
| 关中地区农田土壤有机碳固存速率及影响因素: 以陕西武功县为例 .....                                        | 张晓伟, 许明祥 (2793)                                  |
| 三峡库区不同林草措施土壤活性有机碳及抗蚀性研究 .....                                               | 黄茹, 黄林, 何丙辉, 周立江, 于传, 王峰 (2800)                  |
| 土壤自养微生物同化碳向土壤有机碳库输入的定量研究: <sup>14</sup> C 连续标记法 .....                       | 史然, 陈晓娟, 吴小红, 简燕, 袁红朝, 葛体达, 隋方功, 童成立, 吴金水 (2809) |
| 西南丘陵区保护性耕作下小麦农田土壤呼吸及影响因素分析 .....                                            | 张赛, 张晓雨, 王龙昌, 罗海秀, 周航飞, 马仲炼, 张翠微 (2815)          |
| 丹江口水库迁建区土壤有机氯农药的分布特征及风险评价 .....                                             | 李子成, 秦延文, 郑丙辉, 张雷, 赵艳民, 时瑶 (2821)                |
| 农药企业场地苯系物污染风险及调控对策 .....                                                    | 庞博, 王铁宇, 杜立宇, 谭冰, 朱朝云, 吕永龙 (2829)                |
| 水分管理对硫铁镉在水稻根区变化规律及其在水稻中积累的影响 .....                                          | 张雪霞, 张晓霞, 郑煜基, 王荣萍, 陈能场, 卢普相 (2837)              |
| 硝酸盐对沉积物中有机物氧化减量及微生物群落结构的影响 .....                                            | 刘近, 邓代永, 孙国萍, 刘永定, 许玫英 (2847)                    |
| 零价铁对脱色希瓦氏菌 S12 偶氮还原的促进作用 .....                                              | 周庆, 陈杏娟, 郭俊, 孙国萍, 许玫英 (2855)                     |
| 2 株好氧反硝化菌的筛选及其强化贫营养生物膜脱氮效果 .....                                            | 全向春, 岑艳, 钱殷 (2862)                               |
| 反硝化聚磷菌快速富集、培养及其荧光原位杂交技术鉴别 .....                                             | 刘立, 汤兵, 黄绍松, 付丰连, 张启泰, 黎健彬, 罗建中 (2869)           |
| 1 株反硝化除磷菌的鉴定及其反硝化功能基因研究 .....                                               | 张倩, 王弘宇, 桑穗姣, 李孟, 杨开, 马放 (2876)                  |
| 1 株高效 BBP 降解菌的分离与特性研究 .....                                                 | 陈湖星, 杨雪, 张凯, 钟秋, 郭佳, 王攀, 熊丽, 刘德立 (2882)          |
| 微生物-化学水解联合作用下烟嘧磺隆的降解 .....                                                  | 张小林, 李咏梅, 袁志文 (2889)                             |
| 扑草净降解菌的分离、筛选与鉴定及降解特性初步研究 .....                                              | 周际海, 孙向武, 胡锋, 李辉信 (2894)                         |
| 固定化 <i>Lysinibacillus cresolovorans</i> 的 PVA-SA-PHB-AC 复合载体制备及间甲酚的降解 ..... | 李婷, 任源, 韦朝海 (2899)                               |
| 生物破乳菌 <i>Alcaligenes</i> sp. S-XJ-1 表面活性物质提取与其破乳特性分析 .....                  | 黄翔峰, 张树聪, 彭开彰, 陆丽君, 刘佳 (2906)                    |
| A <sup>2</sup> O 工艺活性污泥中可培养丝状细菌的多样性 .....                                   | 高莎, 金德才, 赵志瑞, 齐嵘, 彭霞薇, 白志辉 (2912)                |
| 生活垃圾堆肥渗滤液污染物组成与演化规律研究 .....                                                 | 李丹, 何小松, 席北斗, 魏自民, 潘红卫, 赵国鹏, 崔东宇 (2918)          |
| 专辑征稿通知 (2551) 《环境科学》征稿简则 (2685) 《环境科学》征订启事 (2868) 信息 (2875)                 |                                                  |

# 华东森林及高山背景区域臭氧变化特征及影响因素

苏彬彬

(福建省武夷山大气背景值监测站,武夷山 354302)

**摘要:** 为了探讨华东森林及高山背景区域大气中地面  $O_3$  质量浓度的变化特征,以及相关物质和气象因子对  $O_3$  生成和变化的影响,选取国家大气背景监测福建武夷山站 2011 年 3 月~2012 年 2 月  $O_3$  为期 1 a 的监测数据,研究其浓度变化特征和影响因素,并利用后向轨迹模式探讨区域输送对华东森林及高山背景区域  $O_3$  质量浓度的影响. 结果表明,华东森林及高山区域  $O_3$  背景浓度为  $(87.9 \pm 34.1) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $O_3$  浓度具有明显的季节变化特征,春季 > 秋季 > 夏季 > 冬季;与其它气体污染物的相关性分析结果表明, $O_3$  来源于远距离水平输送、平流层注入和光化学反应生成;来自高空、长三角地区、珠三角地区气团的输送导致武夷山背景点  $O_3$  浓度出现极大值.

**关键词:** 高山背景站; 臭氧; 变化特征; 影响因子; 区域输送; 聚类分析

**中图分类号:** X515 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2013)07-2519-07

## Characteristics and Impact Factors of $O_3$ Concentrations in Mountain Background Region of East China

SU Bin-bin

(Atmospheric Background Monitoring Station in Wuyishan of Fujian Province, Wuyishan 354302, China)

**Abstract:** The  $O_3$  concentrations were measured online from March 2011 to February 2012 at the national atmospheric background monitoring station in Wuyishan of Fujian Province to discuss the characteristic of  $O_3$  concentrations and the impact factors in forest and mountain background region of East China. HYSPLIT (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Model was used to investigate the potential sources of particulates during the pollution episodes. The results showed that the background concentration of  $O_3$  was  $(87.9 \pm 34.1) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ . Seasonal variations of  $O_3$  loadings were observed, and the loadings decreased in the order spring > autumn > summer > winter. Analysis of correlation between  $O_3$  and other gas pollutants suggested regional transportation, stratospheric injection and photochemical production were the major sources of  $O_3$  in Wuyishan background station. The episodes were related with transportations of air parcel from Yangtze River Delta region, Pearl River Delta region and the high altitudes.

**Key words:** high mountain background site; ozone; variation characteristic; impact factor; regional transportation; cluster analysis

臭氧( $O_3$ )是大气中重要的微量气体之一,大气中约 90% 的  $O_3$  存在于平流层中,只有 10% 存在于对流层<sup>[1]</sup>. 对流层的  $O_3$  在大气窗区( $9.6 \mu\text{m}$ )有很强的红外吸收带,使其成为一种重要的温室气体, $O_3$  浓度和分布的变化直接影响大气的辐射平衡,对全球及区域性增暖有极其重要的影响<sup>[2]</sup>. 随着城市化、工业化的不断发展,人类活动排放的  $\text{NO}_x$ 、NMHC、CO 等  $O_3$  前体物逐年增加<sup>[3]</sup>,经过光化学反应引起地面  $O_3$  浓度相应增加,高浓度的地面  $O_3$  对人类健康及地表生态系统存在严重危害<sup>[4,5]</sup>.

近年来,不仅城市和郊区近地面  $O_3$  浓度大幅度增加,背景地区  $O_3$  浓度也有增加的趋势<sup>[6,7]</sup>. 虽然清洁大气的组成比污染大气简单,浓度也较低,但仍然存在着一系列的化学和光化学反应.  $O_3$  作为一种强氧化剂,它的变化将改变对流层大气的氧化能力. 因此对于对流层  $O_3$  及其前体物和影响因子的变化特征及相互关系的研究,将有助于对  $O_3$  形成机

制的深入了解. 国内对本底区域对流层  $O_3$  进行了大量的研究<sup>[7~15]</sup>,这些研究分布在不同海拔高度的背景区域:瓦里关 3 810 m<sup>[7]</sup>、龙凤山 325 m<sup>[8]</sup>、临安 132 m<sup>[8]</sup>、上甸子 293 m<sup>[13]</sup>、泰山 1 536 m<sup>[14]</sup>、鼎湖山 420 m(由文献[11]中监测点位的经纬度推算而得).  $O_3$  在对流层的垂直分布特征决定了不同高度站点地面  $O_3$  的差异,且  $O_3$  是化学活泼性气体,不同地区、不同气象条件和地理特征等都会对  $O_3$  的分布和变化产生不同影响,目前未见对 1 000~1 200 m 海拔高度的背景区域  $O_3$  进行研究,对华东背景区域  $O_3$  的分析研究也未见报道.

国家大气背景监测福建武夷山站是我国 14 个大气背景监测站之一,代表我国华东森林及高山区

收稿日期: 2012-06-26; 修订日期: 2013-02-28

基金项目: 2008 年中央财政主要污染物减排专项; 环境保护公益性行业科研专项(200709054)

作者简介: 苏彬彬(1980~),女,工程师,主要研究方向为大气背景监测, E-mail: binwys@163.com

域的大气背景状况. 为了解该区域大气中地面  $O_3$  质量浓度的变化特征, 分析其影响因素, 并评估远距离输送的影响, 本研究对武夷山背景点 2011 年 3 月 ~ 2012 年 2 月  $O_3$  为期 1 a 的监测数据进行分析, 以期为更好地研究清洁地区地面  $O_3$  的形成机制提供依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 监测点位

国家大气背景监测福建武夷山站由中国环境监测总站建立, 监测点位于武夷山自然保护区摩天岭顶峰, 东经  $117^{\circ}43'$ , 北纬  $27^{\circ}35'$ , 海拔高度 1 139 m. 站点周边视野开阔, 近距离内没有影响气流的障碍物, 且周围 50 km 范围内无显著人为污染源, 受到局地排放源的影响很小, 因此采集的大气样品能反映华东森林及高山区域大气成分的背景特征, 可用于研究大气的区域性污染特征和污染物的远距离输送.

### 1.2 数据采集

观测仪器采用紫外光度法  $O_3$  分析仪 (Thermo Fisher Scientific, 美国), 对  $O_3$  进行 24 h 连续在线监测, 数据采集频率为 5 min. 2011 年 3 月 ~ 2012 年 2 月共监测 352 d, 其中有效监测天数为 348 d, 共取得有效小时监测数据 8 085 个, 平均每天有效监测 23.2 h, 满足《环境空气质量标准》(GB 3095-2012) 中每年至少有 324 个日平均浓度值和每日至少有 20 h 平均浓度值或采样时间的数据有效性规定. 分析仪器型号为 49i, 最低检测限  $2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 零漂  $\leq 2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  (24 h), 跨漂  $\leq 20 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  (30 d). 每周进行 1 ~ 2 次零点和跨度点校准, 每季度进行 1 次多点校准, 并从 2011 年 12 月 8 日起每天进行零点检查, 以保证数据可靠性. 零点、跨度点校准及零点检查

期间的数据剔除, 不参与统计. 同时测量的  $\text{SO}_2$  采用 43iTLE 紫外荧光法气体分析仪 (Thermo Fisher Scientific, 美国),  $\text{NO}_2$  采用 42iTL 化学发光法气体分析仪 (Thermo Fisher Scientific, 美国),  $\text{CO}$  采用 48iTLE 气体滤光相关法气体分析仪 (Thermo Fisher Scientific, 美国), 进行 24 h 连续在线监测, 数据采集频率为 5 min.

## 2 结果与讨论

### 2.1 $O_3$ 背景浓度

一般认为, 背景浓度应代表研究区域内未受人类活动直接影响的自然情况<sup>[16]</sup>. 但由于大气的流动性, 监测的浓度不仅可能受研究区域内人为排放源的影响, 而且可能受研究区域外排放源长距离输送的影响<sup>[17]</sup>. 武夷山背景点周围 50 km 范围内无显著人为污染源, 基本没有本地污染源排放, 受到区域输送影响显著, 监测浓度中包含本地区的自然排放和区域外的远距离输送. 统计监测期间的所有有效监测数据得出:  $O_3$  日平均质量浓度为  $(87.9 \pm 34.1) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ; 小时均值在  $2.0 \sim 216.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  之间, 用《环境空气质量标准》(GB 3095-1996) 小时均值一级标准浓度限值  $160 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  评价, 超标率为 5.2%;  $O_3$  日最大 8 h 平均浓度在  $26.6 \sim 193.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  之间, 用《环境空气质量标准》(GB 3095-2012) 一级标准浓度限值  $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  评价, 超标率为 43.4%.

### 2.2 $O_3$ 时间变化趋势浓度变化

#### 2.2.1 逐日变化

图 1 为 2011 年 3 月 ~ 2012 年 2 月武夷山背景点  $O_3$  浓度逐日变化. 结果显示,  $O_3$  日均值范围为  $22.0 \sim 182.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ; 浓度峰值主要出现在春季和

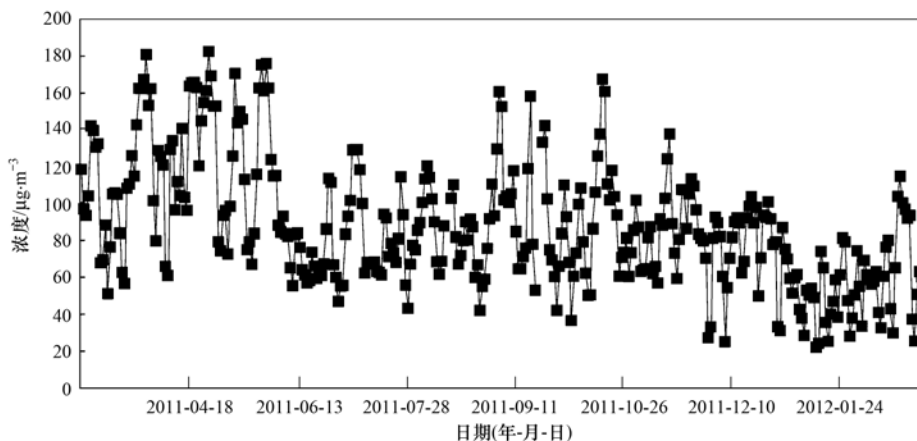


图 1 武夷山背景点  $O_3$  浓度日均值变化曲线

Fig. 1 Daily variation of  $O_3$  concentrations at Wuyishan background station

秋季,最大日均值出现在4月26日,是背景浓度  $87.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  的2.1倍;日均值分布主要集中在  $50.0 \sim 120 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  之间,占74.4%.

### 2.2.2 季节变化

用  $\text{O}_3$  浓度的月均值变化曲线说明季节变化趋势,如图2所示:4月最高,1月最低,高值  $129.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  是低值  $51.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  的2.5倍,波动幅度明显;从季节变化趋势来看,春季 ( $119.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) > 秋季 ( $91.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) > 夏季 ( $81.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) > 冬季 ( $63.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ). 与国内外部分清洁站点及城市点位比较,结果如表1所示,武夷山背景点  $\text{O}_3$  月均值浓度最大值出现在春季,与瓦里关<sup>[7]</sup>、上甸子<sup>[13]</sup>、北京市区<sup>[20]</sup> 出现在夏季,龙凤山<sup>[8]</sup>、鼎湖山<sup>[11]</sup> 点位出现在秋季不同,与全球背景站点 Mauna Loa、Jungfraujoch、Izana 站<sup>[7]</sup>、临安站<sup>[15]</sup> 及上海市中心城区<sup>[21]</sup> 的观测结果一致,但 Jungfraujoch 和临安站的夏季日均值高于春季,上海市中心城区夏季日均值也与春季接近,与武夷山背景点不同;  $\text{O}_3$  浓度最低值出现在冬季,与除了瓦里关、Izana 和 Mauna Loa 之外的清洁站点及城市点位的观测结果一致. 夏季和秋季太阳辐射较春季强烈,但  $\text{O}_3$  浓度远低于春季,说明光化学反应并不是武夷山背景点  $\text{O}_3$  浓度增加的主要因素. 春季武夷山背景点地面  $\text{O}_3$  浓度较高,与春季平流层顶折叠现象的频繁发生<sup>[18,19]</sup> 和远距离输送有关.

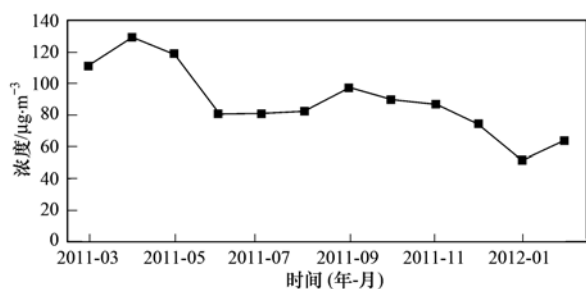


图2 武夷山背景点  $\text{O}_3$  浓度季节变化

Fig. 2 Seasonal variation of  $\text{O}_3$  concentrations at Wuyishan background station

### 2.2.3 日变化

统计监测期间每天 00:00 ~ 23:00 小时值的算术平均值(部分 01:00 数据因零点检查而剔除),  $\text{O}_3$  小时均值日变化如图3所示:  $\text{O}_3$  浓度在  $79.5 \sim 93.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  范围内波动,变化幅度很小;最小值出现在 10:00,最大值出现在 00:00; 08:00 ~ 11:00 变化幅度极小,维持在低值区,晚间 19:00 ~ 次日凌晨 03:00 变化幅度也很小,维持在相对高值. 与国内外

部分清洁站点及城市点位进行比较(表1),武夷山背景点与龙凤山、临安、上甸子、鼎湖山等清洁站点<sup>[8~13,15]</sup> 及城市点位<sup>[20~22]</sup> 日出前较小,午后较大的单峰型变化不同,呈现单谷型分布型态,夜间浓度较高,白天较低,与瓦里关、Izana 和 Mauna Loa 等站点<sup>[7]</sup> 的分析结果相似. 泰山点位  $\text{O}_3$  小时均值日变化则呈双峰型<sup>[14]</sup>,夜间浓度相对较高,且最小值也出现在 10:00,但其在下午 16:00 ~ 19:00 出现另一峰值,与武夷山背景点位不同.

武夷山背景点  $\text{O}_3$  较高浓度不是出现在太阳辐射强烈的中午和下午,而是出现在午夜或凌晨,进一步说明了光化学反应并不是武夷山背景点  $\text{O}_3$  浓度增加的主要因素. 日变化特征主要受日夜交替引起的气象条件变化影响. 夜间温度较低,大气层结稳定,不利于污染物扩散,  $\text{O}_3$  逐渐累积,且夜间以下沉气流为主,富含  $\text{O}_3$  的平流层大气注入近地面,而出现较高的  $\text{O}_3$  浓度;白天温度升高,湍流混合作用增强,扩散条件较好,且白天以上升气流为主,夜间经地面沉降在谷底的低  $\text{O}_3$  含量大气随气流上升,使位于山顶的背景点  $\text{O}_3$  浓度降低,并在 10:00 出现最小值,之后随着对流发展及太阳辐射增强,周边地区污染物向背景点输送以及光化学反应补充,  $\text{O}_3$  浓度逐渐上升,并在夜间保持在相对高值. 此外,武夷山背景点  $\text{NO}$  浓度夜间极低,对  $\text{O}_3$  的气相滴定作用很小,所以夜间  $\text{O}_3$  没有损耗而浓度较高,相反在白天  $\text{NO}$  因森林土壤微生物活动排放<sup>[23]</sup> 和  $\text{NO}_2$  的光解反应而浓度较高,对  $\text{O}_3$  的滴定反应使得  $\text{O}_3$  浓度较低,这可能也是  $\text{O}_3$  呈单谷型分布型态的原因之一.

图3也给出了四季  $\text{O}_3$  浓度日变化以及  $\text{NO}$ 、 $\text{NO}_2$  和  $\text{CO}$  的日变化趋势,可见,武夷山背景点  $\text{O}_3$  浓度四季的日变化趋势基本相似,最低值出现在 10:00 ~ 11:00,最高值各季节出现时间略有不同,夏季出现在 20:00,春、冬季出现在 22:00,秋季出现在 00:00.  $\text{CO}$  与  $\text{O}_3$  在春季除了 15:00 ~ 19:00 外,变化趋势几乎相反,在冬季的 06:00 ~ 13:00 之间变化趋势相反,当  $\text{O}_3$  出现低值时,  $\text{CO}$  表现出相对高值,说明在春冬季,白天的上坡气流带来了低浓度  $\text{O}_3$  的同时也带来了沉积在谷底的较高浓度的  $\text{CO}$ ; 秋季  $\text{CO}$  与  $\text{O}_3$  变化趋势相似,夏季  $\text{CO}$  日变化不明显.  $\text{NO}$  与  $\text{O}_3$  在 05:00 ~ 17:00 之间的变化趋势相反,说明  $\text{NO}$  对  $\text{O}_3$  具有一定的滴定作用,但冬季  $\text{NO}$  呈现出非常明显的单峰型变化,  $\text{O}_3$  的日变化特征却未更明显,说明武夷山背景点可能还存在其它物质

生成过氧自由基与 O<sub>3</sub> 竞争,氧化 NO 生成 NO<sub>2</sub>,使 NO<sub>2</sub> 浓度在 17:00 出现峰值,因为傍晚至夜间光化学反应减弱,且温度较低有利于硝酸盐生成,故 O<sub>3</sub>

浓度并未出现峰值;春季 NO<sub>2</sub> 与 O<sub>3</sub> 日变化趋势有所不同,且没有明显的相关性,秋季日变化趋势较为一致,夏季 NO<sub>2</sub> 日变化不明显.

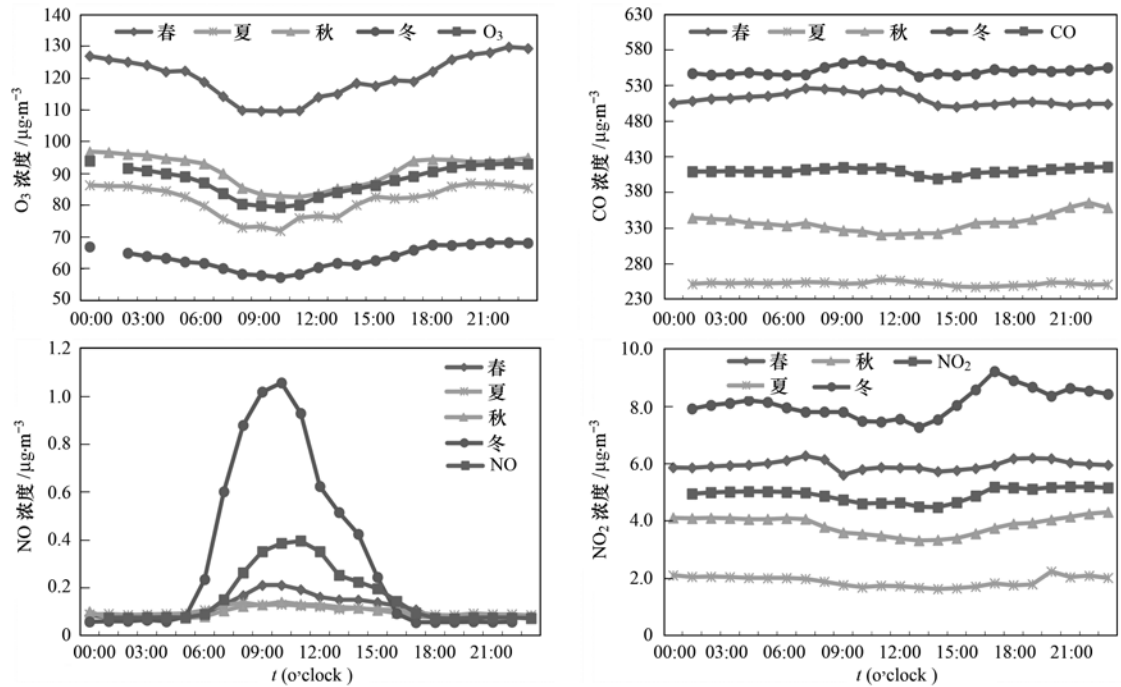


图 3 武夷山背景点 O<sub>3</sub>、CO、NO、NO<sub>2</sub> 浓度日变化

Fig. 3 Diurnal variation of O<sub>3</sub>, CO, NO and NO<sub>2</sub> concentrations at Wuyishan background station

表 1 不同清洁站点及城市点位 O<sub>3</sub> 浓度变化特征比较

Table 1 Comparison of variation of O<sub>3</sub> concentrations in background stations and city sites

| 地点          | 时间              | 季节变化特征<br>最高季、最低季 | 月变化特征<br>最大月、最小月    | 日变化特征                                            | 文献   |
|-------------|-----------------|-------------------|---------------------|--------------------------------------------------|------|
| 瓦里关         | 1994~2002       | 夏季、秋季             | 6月、10月              | 单谷型(10:00~14:00小, 20:00~次日06:00大)                | [7]  |
| Izana       | 1994~2002       | 春季、秋季             | 5月、10月              | 单谷型(12:00~19:00小, 00:00~09:00大)                  | [7]  |
| Mauna Loa   | 1994~2002       | 春季、秋季             | 4月、11月              | 单谷型(14:00~16:00小, 23:00~次日09:00大)                | [7]  |
| Jungfrauoch | 1994~2002       | 夏季、冬季             | 5月、12月              | 基本无变化                                            | [7]  |
| 龙凤山         | 1994-08~1995-08 | 秋季、冬季             | 11月、7月              | 单峰型(06:00~07:00小, 15:00~17:00大)                  | [8]  |
| 临安          | 2003-11~2004-11 | 夏季、冬季             | 5月、1月               | 单峰型(04:00最小, 14:00最大)                            | [15] |
| 鼎湖山         | 1998-07~1999-06 | 秋季、冬季             | — <sup>1)</sup> 、1月 | 单峰或双峰型(13:00~14:00最大, 17:00~19:00和01:00~03:00较大) | [11] |
| 上甸子         | 2004-01~2004-12 | 夏季、冬季             | 6月、12月              | 单峰型(04:00~07:00小, 15:00~18:00大)                  | [13] |
| 泰山          | 2003-07~2003-09 | —                 | 7月、9月               | 双峰型(00:00~05:00较大, 10:00最小, 16:00~19:00最大)       | [14] |
| 北京          | 2004-08~2005-07 | 夏季、冬季             | —                   | 单峰型(07:00最小, 15:00最大)                            | [20] |
| 上海          | 2005-01~2005-12 | 春季、冬季             | 5月、12月              | 单峰型(00:00~01:00小, 13:00~15:00大)                  | [21] |
| 涿州、保定、石家庄   | 2009-07~2009-10 | —                 | —                   | 单峰型(07:00最小, 15:00最大)                            | [22] |
| 武夷山背景点      | 2011-03~2012-02 | 春季、冬季             | 4月、1月               | 单谷型(08:00~11:00小, 19:00~次日03:00大)                | 本研究  |

1) “—”表示参考文献中未给出

2.3 影响因子分析

2.3.1 O<sub>3</sub> 与前体物及 SO<sub>2</sub> 的关系

NO<sub>x</sub>、VOC<sub>s</sub>、CO 等物质都是对流层 O<sub>3</sub> 生成的前体物,它们对近地面和对流层 O<sub>3</sub> 的光化学过程有着重要作用<sup>[24]</sup>. 有研究<sup>[25]</sup>指出,在清洁地区,由于

空气团在低对流层大气(高 CO、低 O<sub>3</sub>)和上对流层大气(低 CO、高 O<sub>3</sub>)的交替,背景大气的 CO 和 O<sub>3</sub> 应显示负相关. 但将 CO 与 O<sub>3</sub> 浓度全年日均值进行相关分析(表 2),长时间系列的 CO 与 O<sub>3</sub> 并没有显示明显的负相关,可见,武夷山背景点地面 O<sub>3</sub> 的全

年变化并不是完全由于 stratosphere-troposphere exchange (STE)作用,还可能与水平输送和光化学过程等作用有关. 将SO<sub>2</sub>、NO、NO<sub>2</sub>、CO与O<sub>3</sub>浓度全年日均值、各季度日均值以及春季各月份日均值进行相关分析,结果见表2. 可见,O<sub>3</sub>与SO<sub>2</sub>浓度日均值在全年各个时段均具有较好的正相关性,尤其是在春季和秋季,说明远距离水平输送是武夷山背景点O<sub>3</sub>的主要来源;与NO浓度在春季和冬季的负相关性较好,说明春季和冬季较高的NO浓度对O<sub>3</sub>的滴定作用较为明显;与前体物NO<sub>2</sub>和CO浓度在夏季和秋季的正相关性较好,说明夏季和秋季武夷山背景点地面O<sub>3</sub>有一部分来源于光化学反应;与CO浓度在春季的4月、5月和冬季具有较好的负相关性,说明在春季和冬季平流层的O<sub>3</sub>注入对于武夷山背景点O<sub>3</sub>浓度增加具有重要影响.

2.3.2 O<sub>3</sub>浓度与气象因子的关系

气象条件的变化影响着污染物的扩散、稀释、

积聚和滞留. 不同季节影响空气质量的气象因子并不相同,其中起主要作用的气象因子为气温、风速和相对湿度. 将温度、相对湿度、风速与O<sub>3</sub>浓度进行相关分析(表2),结果显示:O<sub>3</sub>浓度与湿度有较好的负相关性,这是因为水汽与O<sub>3</sub>的反应是对流层O<sub>3</sub>的一个重要的汇<sup>[26]</sup>,许多在对流层的观测结果已阐述了高湿度、低O<sub>3</sub>的这种对应关系<sup>[21,26,27]</sup>;O<sub>3</sub>浓度与温度在春季的4月和5月具有较好的正相关性,从理论上说一般在高温、强日照条件下,易发生一系列光化学反应生成O<sub>3</sub><sup>[28]</sup>,但在夏季和秋季O<sub>3</sub>浓度与温度的相关性较差,说明温度对武夷山背景点O<sub>3</sub>浓度的影响机制有所不同,春季的4月和5月温度高、O<sub>3</sub>浓度高可能与较高的温度能促进STE作用有关,因为温度影响大气的稳定性和湍流的强度;O<sub>3</sub>浓度与风速在冬季具有一定的正相关性,可能是因为冬季大气层结稳定,而风速增大有利于周边地区污染物向背景点输送,O<sub>3</sub>前体物也在输送过程中通过光化学反应生成O<sub>3</sub>.

表2 SO<sub>2</sub>、NO、NO<sub>2</sub>、CO、温度、相对湿度、风速与O<sub>3</sub>浓度的相关性<sup>1)</sup>

Table 2 Correlation of O<sub>3</sub> concentrations with SO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, CO, temperature, relative humidity and wind speed

| 相关系数  | SO <sub>2</sub> -O <sub>3</sub> | NO-O <sub>3</sub> | NO <sub>2</sub> -O <sub>3</sub> | CO-O <sub>3</sub> | O <sub>3</sub> -温度 | O <sub>3</sub> -相对湿度 | O <sub>3</sub> -风速 |
|-------|---------------------------------|-------------------|---------------------------------|-------------------|--------------------|----------------------|--------------------|
| 全年日均值 | 0.49**                          | -0.29**           | 0.02                            | -0.04             | 0.30**             | -0.73**              | 0.27**             |
| 春季日均值 | 0.61**                          | -0.43**           | 0.19                            | -0.28             | 0.48**             | -0.85**              | 0.17               |
| 夏季日均值 | 0.50**                          | -0.02             | 0.56**                          | 0.57**            | 0.15               | -0.30*               | -0.17              |
| 秋季日均值 | 0.81**                          | -0.31*            | 0.69**                          | 0.45**            | 0.07               | -0.61**              | 0.28               |
| 冬季日均值 | 0.51**                          | -0.45**           | -0.16                           | -0.48**           | 0.26               | -0.73**              | 0.44**             |
| 3月日均值 | 0.81**                          | -0.44             | 0.44                            | -0.05             | 0.23               | -0.86**              | 0.19               |
| 4月日均值 | 0.80**                          | -0.41             | 0.27                            | -0.56*            | 0.61**             | -0.87**              | 0.29               |
| 5月日均值 | 0.97**                          | -0.37             | 0.52                            | -0.61**           | 0.83**             | -0.93**              | 0.10               |

1) \*表示在置信度α=0.01水平上,P<0.005(双侧检验);\*\*表示在置信度α=0.01水平上,P<0.001(双侧检验)

2.4 O<sub>3</sub>浓度受区域输送影响分析

后向轨迹方法在许多研究中被用来分析气团来向,研究不同来源气团对区域污染的作用<sup>[22,29]</sup>. 聚类分析则将得到的单个轨迹按照空间相似性程度聚类,得到具有代表性的轨迹簇,判断气团来源和途经区域<sup>[29]</sup>. 为进一步了解输送对武夷山背景点O<sub>3</sub>浓度的影响,对27.59、117.73、1149 m(背景点坐标和采样点高程),日均值>120 μg·m<sup>-3</sup>的O<sub>3</sub>高值日进行后向48 h气流轨迹追踪,并利用HYSPLIT4.8进行聚类分析,探讨O<sub>3</sub>的可能来源. 结合监测的O<sub>3</sub>浓度,求得不同轨迹簇所对应的平均浓度. 在本研究中采用世界时(UTC)前一日16:00的后向轨迹资料,对应北京时间当日00:00~次日00:00的监测数据日均值.

监测期间共有57 d O<sub>3</sub>日均值浓度>120

μg·m<sup>-3</sup>,其中有39 d分布在春季,可见春季是高浓度O<sub>3</sub>易发季节. 利用聚类分析工具,对这57 d O<sub>3</sub>高值日后向气流轨迹进行聚类分析,有1 d的气流轨迹无法实现聚类,故仅有56 d气流轨迹参与聚类,得到造成武夷山背景点高浓度O<sub>3</sub>的4类典型气团,分布如图4所示,统计结果见表3. 1类气团来自东北象限,移动高度较低,移动速度较慢,主要受我国东部高污染负荷区影响;近年来长江三角洲地区大气光化学烟雾污染十分严重,李莉等<sup>[30]</sup>通过模拟2001年7月长三角地区大气O<sub>3</sub>的区域污染特征,结果显示长三角区域16个主要城市中,有14个城市O<sub>3</sub>小时最大浓度超过国家二级标准,且春季长江三角洲地区的O<sub>3</sub>浓度全年最高,高浓度O<sub>3</sub>出现的频率也最高<sup>[31]</sup>,因此气团途经此区域时夹带了较高浓度的O<sub>3</sub>到达武夷山背景点,使站点O<sub>3</sub>浓度明

显升高;这类轨迹共出现 22 次,占总轨迹数的 39%,受此影响武夷山背景点  $O_3$  平均浓度达  $150.3 \mu g \cdot m^{-3}$ . 2 类气团来自西北偏北象限的高空,气团移动速度快,起始高度超过 2 000 m,且在高空经过的时间较长,有研究<sup>[33]</sup>指出,边界层以上高度处的  $O_3$  浓度常常显著高于下部,气团在较高  $O_3$  浓度区域穿过时,可将高浓度  $O_3$  输送到地面;徐晓斌等<sup>[29]</sup>也在研究中发现来自高空的轨迹会将富含  $O_3$  的气块输送到地面,从而使站点  $O_3$  浓度明显升高;这类轨迹共出现 7 次,占总轨迹数的 13%,受此影响武夷山背景点  $O_3$  浓度达  $156.0 \mu g \cdot m^{-3}$ . 3 类气团来自西北风向,起源于江西省的山区,气团移动高度也相对较高,移动速度慢,沿途所经区域多为人烟稀少的清洁地区,可能主要受到高空  $O_3$  的影响,到达武夷山背景站时使背景点  $O_3$  浓度升高;这类轨迹共出现 19 次,占总轨迹数的 34%,受此影响武夷山背景点  $O_3$  浓度达  $146.0 \mu g \cdot m^{-3}$ . 4 类气团来自西南方向,气团移动高度较高,移动速度较慢,可能同时受高空和我国南部污染区影响;近年的观测发现珠三角区域在春、夏季经常出现  $O_3$  极大值  $> 120 \mu g \cdot m^{-3}$  的事件<sup>[32]</sup>,来自此方向的气团难免携带较

高浓度的  $O_3$ ,从而使站点  $O_3$  浓度升高;这类轨迹共出现 8 次,占总轨迹数的 14%,受此影响武夷山背景点  $O_3$  浓度达  $133.3 \mu g \cdot m^{-3}$ .

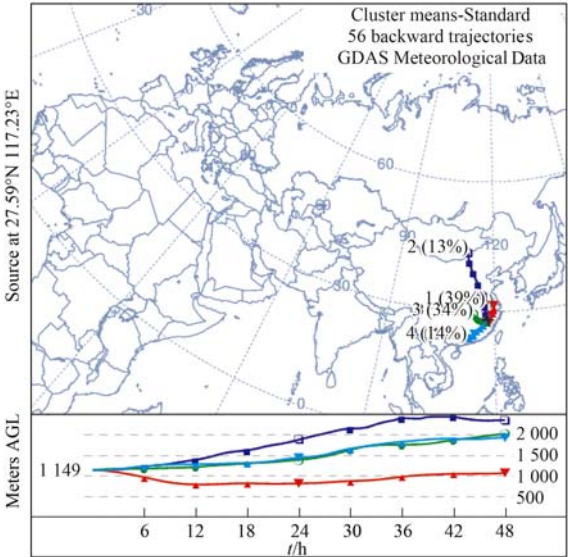


图 4 武夷山背景点  $O_3$  污染期间平均后向轨迹分布  
Fig. 4 Mean trajectories for Wuyishan background station during pollution episodes

表 3 武夷山背景点  $O_3$  污染期间各类轨迹统计结果

| Table 3 Statistics of different clusters of trajectories for Wuyishan background station during pollution episodes |      |        |        |          |                                  |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|--------|--------|----------|----------------------------------|
| 类别                                                                                                                 | 出现次数 | 主要出现季节 | 出现比例/% | 轨迹平均高度/m | $O_3$ 平均浓度/ $\mu g \cdot m^{-3}$ |
| 1                                                                                                                  | 22   | 春、秋    | 39     | 925.0    | 150.3                            |
| 2                                                                                                                  | 7    | 春      | 13     | 1 868.1  | 156.0                            |
| 3                                                                                                                  | 19   | 春      | 34     | 1 503.4  | 146.0                            |
| 4                                                                                                                  | 8    | 春、夏    | 14     | 1 534.8  | 133.3                            |

3 结论

(1) 华东森林及高山区域  $O_3$  背景浓度为  $(87.9 \pm 34.1) \mu g \cdot m^{-3}$ ;最高浓度出现在春季的 4 月份,季节变化特征表现为:春季  $>$  秋季  $>$  夏季  $>$  冬季,且日变化特征呈现单谷型分布形态,说明光化学反应不是武夷山背景点  $O_3$  浓度增加的主要因素.

(2) 武夷山背景点  $O_3$  来源于远距离水平输送、平流层注入和光化学反应生成;来自高空、长三角地区、珠三角地区气团的输送导致武夷山背景点  $O_3$  浓度出现极大值.

致谢:感谢中国环境监测总站王帅博士对本论文中后向轨迹聚类分析提供的帮助和指导,感谢环境保护部华南环境科学研究所陶俊副研究员、张毅强博士对本论文写作给予的帮助.

参考文献:

[ 1 ] Lelieveld J, Dentener F J. What controls tropospheric ozone? [J]. Journal of Geophysical Research, 2000, **105** (D3): 3531-3551.

[ 2 ] Fishman J, Solomon S, Crutzen P J. Observational and theoretical evidence in support of a significant in-situ photochemical source of tropospheric ozone [J]. Tellus, 1979, **31**(5): 432-446.

[ 3 ] Berntsen T, Isaksen I S A, Wang W C, et al. Impacts of increased anthropogenic emissions in Asia on tropospheric ozone and climate[J]. Tellus B, 1996, **48**(1): 13-32.

[ 4 ] Lippmann M. Health effects of tropospheric ozone [J]. Environmental Science & Technology, 1991, **25** (12): 1954-1962.

[ 5 ] Heck W W, Adams R M, Cure W W, et al. A reassessment of crop loss from ozone[J]. Environmental Science & Technology, 1983, **17**(12): 572-581.

[ 6 ] Vingarzan R. A review of surface ozone background levels and

- trends[J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(21): 3431-3442.
- [7] 金赛花, 樊曙先, 王自发, 等. 青海瓦里关地面臭氧浓度的变化特征[J]. *中国环境科学*, 2008, **28**(3): 198-202.
- [8] 颜鹏, 李兴生, 罗超, 等. 我国地面  $O_3$ 、 $NO_x$ 、 $SO_2$  背景值的观测研究[J]. *应用气象学报*, 1997, **8**(1): 53-61.
- [9] 丁国安, 徐晓斌, 罗超, 等. 中国大气本底条件下不同地区地面臭氧特征[J]. *气象学报*, 2001, **59**(1): 88-96.
- [10] 赵玉成, 何发祥, 乜虹, 等. 瓦里关地区气象因子对近地面臭氧浓度影响的分析[J]. *青海环境*, 2002, **12**(2): 50-53.
- [11] 白建辉, 徐永福, 陈辉, 等. 鼎湖山森林地区臭氧及其前体物的变化特征和分析[J]. *气候与环境研究*, 2003, **8**(3): 370-380.
- [12] Cheung V T F, Wang T. Observational study of ozone pollution at a rural site in the Yangtze Delta of China [J]. *Atmospheric Environment*, 2001, **35**(29): 4947-4958.
- [13] 刘洁, 张小玲, 张晓春, 等. 上甸子本底站地面臭氧变化特征及影响因素[J]. *环境科学研究*, 2006, **19**(4): 19-25.
- [14] 殷永泉, 单文坡, 王韬, 等. 泰山顶臭氧及其前体物一氧化碳浓度变化规律[J]. *环境科学*, 2006, **27**(1): 9-13.
- [15] 杨关盈, 樊曙先, 汤洁, 等. 临安近地面臭氧变化特征分析[J]. *环境科学研究*, 2008, **21**(3): 31-35.
- [16] 环境科学大辞典编辑委员会. *环境科学大辞典* [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1991. 14.
- [17] 蔡旭晖, 张睿, 宋宇, 等. 北京地区大气  $PM_{10}$  和  $SO_2$  的背景浓度分析[J]. *气候与环境研究*, 2004, **9**(3): 445-453.
- [18] Danielsen E F. Stratospheric-tropospheric exchange based on radioactivity, ozone and potential vorticity [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1968, **25**(3): 502-518.
- [19] 唐孝炎, 张远航, 邵敏. *大气环境化学* [M]. (第二版). 北京: 高等教育出版社, 2006. 232-242.
- [20] 安俊琳, 王跃思, 李昕, 等. 北京大气  $O_3$  与  $NO_x$  的变化特征[J]. *生态环境*, 2008, **17**(4): 1420-1424.
- [21] 张爱东, 王晓燕, 修光利. 上海市中心城区低空大气臭氧污染特征和变化状况[J]. *上海环境科学*, 2007, **26**(2): 62-66, 76.
- [22] 吴莹, 吉东生, 宋涛, 等. 夏秋季北京及河北三城市的大气污染联合观测研究[J]. *环境科学*, 2011, **32**(9): 2741-2749.
- [23] Rohrer F, Bruning D, Grobler E S, *et al.* Mixing ratios and photostationary state of  $NO$  and  $NO_2$  observed during the POPCORN field campaign at a rural site in Germany [J]. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 1998, **31**(1-2): 119-137.
- [24] Mckeen S A, Hsie E Y, Liu S C, *et al.* A study of the dependence of rural ozone on ozone precursors in the Eastern United States [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1991, **96**(D8): 15377-15394.
- [25] Mauzerall D L, Narita D, Akimoto H, *et al.* Seasonal characteristics of tropospheric ozone production and mixing ratios over East Asia: a globe three-dimensional chemical transport model analysis [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, **105**(D14): 17895-17910.
- [26] 任丽红, 胡非, 王玮. 北京夏季  $O_3$  垂直分布与气象因子的相关研究[J]. *气候与环境研究*, 2005, **10**(2): 166-174.
- [27] Tsutsumi Y, Making Y, Jensen J. Aircraft measurements of tropospheric ozone over the western Pacific Ocean [J]. *Atmospheric Environment*, 1996, **30**(10-11): 1763-1772.
- [28] 杨昕, 李兴生. 近地面  $O_3$  变化化学反应机理的数值研究[J]. *大气科学*, 1999, **23**(4): 427-438.
- [29] 徐晓斌, 刘希文, 林伟立. 输送对区域本底站痕量气体浓度的影响[J]. *应用气象学报*, 2009, **20**(6): 656-664.
- [30] 李莉, 陈长虹, 黄成, 等. 长江三角洲地区大气  $O_3$  和  $PM_{10}$  的区域污染特征模拟[J]. *环境科学*, 2008, **29**(1): 238-247.
- [31] 朱帅, 马建中, 王堰, 等. 长江三角洲地区春季臭氧异常高值的数值模拟研究[J]. *环境科学研究*, 2006, **19**(6): 1-8.
- [32] 邓雪娇, 周秀骥, 吴兑, 等. 珠江三角洲大气气溶胶对地面臭氧变化的影响[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2011, **41**(1): 93-102.
- [33] 郑向东, 陈尊裕, 崔宏, 等. 长江三角洲地区春季低空大气臭氧垂直分布特征[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2004, **34**(12): 1184-1192.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                        |                                                                       |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| Observation of Size Distribution of Atmospheric OC/EC in Tangshan, China .....                                                                                         | GUO Yu-hong, XIN Jin-yuan, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (2497)          |
| Changing Characteristics of the Main Air Pollutants of the Dongling Mountain in Beijing .....                                                                          | YU Yang-chun, HU Bo, WANG Yue-si (2505)                               |
| Characteristic Comparative Study of Particulate Matters in Beijing Before and During the Olympics .....                                                                | ZHANG Ju, OUYANG Zhi-yun, MIAO Hong, <i>et al.</i> (2512)             |
| Characteristics and Impact Factors of O <sub>3</sub> Concentrations in Mountain Background Region of East China .....                                                  | SU Bin-bin (2519)                                                     |
| Studies on the Size Distribution of Airborne Microbes at Home in Beijing .....                                                                                         | FANG Zhi-guo, SUN Ping, OUYANG Zhi-yun, <i>et al.</i> (2526)          |
| Emission Factors of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Residential Coal Combustion and Its Influence Factors .....                                             | HAI Ting-ting, CHEN Ying-jun, WANG Yan, <i>et al.</i> (2533)          |
| Experimental Research on Alcohols, Aldehydes, Aromatic Hydrocarbons and Olefins Emissions from Alcohols Fuelled Vehicles .....                                         | ZHANG Fan, WANG Jian-hai, WANG Xiao-cheng, <i>et al.</i> (2539)       |
| Combination Process of Microwave Desorption-Catalytic Combustion for Toluene Treatment .....                                                                           | CAO Xiao-qiang, ZHANG Hao, HUANG Xue-min (2546)                       |
| Removal of BTEX by a Biotrickling Filter and Analysis of Corresponding Bacterial Communities .....                                                                     | LI Jian-jun, LIAO Dong-qi, XU Mei-ying, <i>et al.</i> (2552)          |
| Source Profile of Volatile Carbonyl Compounds in Wastewater Treatment Plant of an Oil Refinery .....                                                                   | ZHOU Bo-yu, LIU Wang, WANG Bo-guang, <i>et al.</i> (2560)             |
| Distribution and Air-Sea Fluxes of Methane in the Yellow Sea and the East China Sea in the Spring .....                                                                | CAO Xing-peng, ZHANG Gui-ling, MA Xiao, <i>et al.</i> (2565)          |
| Study on Seasonal Characteristics of Thermal Stratification in Lacustrine Zone of Lake Qiandao .....                                                                   | DONG Chun-ying, YU Zuo-ming, WU Zhi-xu, <i>et al.</i> (2574)          |
| Effects of Land Use Structure on Water Quality in Xin'anjiang River .....                                                                                              | CAO Fang-fang, LI Xue, WANG Dong, <i>et al.</i> (2582)                |
| Canonical Correspondence Analysis Between Phytoplankton Community and Environmental Factors in Macrophtic Lakes of the Middle and Lower Reaches of Yangtze River ..... | MENG Rui, HE Lian-sheng, GUO Long-gen, <i>et al.</i> (2588)           |
| Microbial Bioavailability of Dissolved Nucleic Acids Across the Estuarine Salinity Gradient .....                                                                      | YANG Qing-qing, LI Peng-hui, HUANG Qing-hui (2597)                    |
| Elementary Quantitative Study on Factors of Phytoplankton Bloom .....                                                                                                  | ZHANG Zhuo, SONG Zhi-yao, HUANG Chang-chun, <i>et al.</i> (2603)      |
| Spatiotemporal Succession of Algae Functional Groups and the Influence of Environment Change in a Deep-water Reservoir .....                                           | LU Jin-suo, HU Ya-pan (2611)                                          |
| Hyperspectral Remote Sensing of Total Suspended Matter Concentrations in Lake Taihu Based on Water Optical Classification .....                                        | ZHOU Xiao-yu, SUN De-yong, LI Yun-mei, <i>et al.</i> (2618)           |
| Application of Subwet Model in the Design of Constructed Wetland .....                                                                                                 | LI Hui-feng, HUANG Jin-hui, LIN Chao (2628)                           |
| Allelopathic Effect of <i>Nelumbo nucifera</i> Stem and Leaf Tissue Extract on the Growth of <i>Microcystis aeruginosa</i> and <i>Scenedesmus quadricauda</i> .....    | HE Lian-sheng, MENG Fan-li, DIAO Xiao-jun, <i>et al.</i> (2637)       |
| Influence of <i>Vallisneria spiralis</i> on the Physicochemical Properties of Black-odor Sediment in Urban Sluggish River .....                                        | XU Kuan, LIU Bo, WANG Guo-xiang, <i>et al.</i> (2642)                 |
| Removal of Cr(VI) by Iron Filings with Microorganisms to Recover Iron Reactivity .....                                                                                 | TANG Jie, WANG Zhuo-xing, XU Xin-hua (2650)                           |
| Degradation of Phenol with a Fe/Cu-Catalytic Heterogeneous-Fenton Process .....                                                                                        | YANG Yue-zhu, LI Yu-ping, YANG Dao-wu, <i>et al.</i> (2658)           |
| Effect of Different Forms of Inorganic Nitrogen on the Photodegradation of Antipyrine in Water .....                                                                   | ZHAO Qian, CHEN Chao, FENG Li, <i>et al.</i> (2665)                   |
| Degradation Mechanisms of Dimethyl Phthalate in the UV-H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> System .....                                                                      | LIU Qing, CHEN Cheng, CHEN Hong-zhe, <i>et al.</i> (2670)             |
| Adsorption of Cd <sup>2+</sup> Ions in Aqueous by Diamine-Modified Ordered Mesoporous SBA-15 Particles .....                                                           | ZHANG Meng, YANG Ya-ti, QIN Rui, <i>et al.</i> (2677)                 |
| Surface Organic Modification of Acid Vermiculite and Its Adsorption of Hydrophobic Micro Pollutants in Aqueous Solutions .....                                         | JIANG Zheng-ming, YU Xu-biao, HU Yun, <i>et al.</i> (2686)            |
| Preparation of Porous Ceramics Based on Waste Ceramics and Its Ni <sup>2+</sup> Adsorption Characteristics .....                                                       | ZHANG Yong-li, WANG Cheng-zhi, SHI Ce, <i>et al.</i> (2694)           |
| Perchlorate Removal from Underground Water by Anaerobic Biological Reduction with Bark .....                                                                           | WANG Rui, LIU Fei, CHEN Nan, <i>et al.</i> (2704)                     |
| Experimental Study on the Remediation of Chromium Contaminated Groundwater with PRB Media .....                                                                        | ZHU Wen-hui, DONG Liang-fei, WANG Xing-run, <i>et al.</i> (2711)      |
| Removal of Calcium and High-strength Ammonia Nitrogen from the Wastewater of Rare-earth Elements Hydrometallurgical Process by Chemical Precipitation .....            | WANG Hao, CHENG Guan-wen, SONG Xiao-wei, <i>et al.</i> (2718)         |
| Leaching Kinetics of Josephinite Tailings with Sulfuric Acid .....                                                                                                     | CHEN An-an, ZHOU Shao-qi, HUANG Peng-fei (2729)                       |
| Effects of HRT on Fate of Typical Polycyclic Musk by A <sup>2</sup> O Process .....                                                                                    | LIU Peng-cheng, HUANG Man-hong, CHEN Dong-hui, <i>et al.</i> (2735)   |
| Kinetic Simulation of Enhanced Biological Phosphorus Removal with Fermentation Broth as Carbon Source .....                                                            | ZHANG Chao, CHEN Yin-guang (2741)                                     |
| Effluent Carbon Source Improvement and Sludge Reduction by Hydrolysis Reactor with Enhanced Sludge Utilization .....                                                   | XIONG Ya, WANG Qiang, SONG Ying-hao, <i>et al.</i> (2748)             |
| Optimization of Extracellular Polymeric Substance Extraction Method and Its Role in the Dewaterability of Sludge .....                                                 | ZHOU Jun, ZHOU Li-xiang, WONG Woo-chung (2752)                        |
| Effectiveness of Arsenite Adsorption by Ferric and Alum Water Treatment Residuals with Different Grain Sizes .....                                                     | LIN Lu, XU Jia-rui, WU Hao, <i>et al.</i> (2758)                      |
| Regional Differences and Development Tendency of Livestock Manure Pollution in China .....                                                                             | QIU Huan-guang, LIAO Shao-pan, JING Yue, <i>et al.</i> (2766)         |
| Quantitative Partitioning of Soil Selenium in the Selenium-Rich Area of Northern Zhejiang Plain .....                                                                  | XU Ming-xing, PAN Wei-feng, CENG Jing, <i>et al.</i> (2775)           |
| Effects of Land Use on Manganese Distribution and Fractions in Wetland Soil of Sanjiang Plain, Northeast China .....                                                   | ZHANG Zhong-sheng, LU Xian-guo, SONG Xiao-lin (2782)                  |
| Research on Vertical Distribution Pattern and Reserve of Organic Carbon in Paddy Field Soil of Qianguo, Jilin .....                                                    | TANG Jie, ZHANG Wen-hui, LI Zhao-yang, <i>et al.</i> (2788)           |
| Soil Organic Carbon Sequestration Rate and Its Influencing Factors in Farmland of Guanzhong Plain; A Case Study in Wugong County, Shanxi Province .....                | ZHANG Xiao-wei, XU Ming-xiang (2793)                                  |
| Effects of Biological Regulated Measures on Active Organic Carbon and Erosion-Resistance in the Three Gorges Reservoir Region Soil .....                               | HUANG Ru, HUANG Lin, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (2800)                |
| Quantifying Soil Autotrophic Microbes-Assimilated Carbon Input into Soil Organic Carbon Pools Following Continuous <sup>14</sup> C Labeling .....                      | SHI Ran, CHEN Xiao-juan, WU Xiao-hong, <i>et al.</i> (2809)           |
| Analysis of Soil Respiration and Influence Factors in Wheat Farmland Under Conservation Tillage in Southwest Hilly Region .....                                        | ZHANG Sai, ZHANG Xiao-yu, WANG Long-chang, <i>et al.</i> (2815)       |
| Distribution Characteristics and Risk Evaluation of Organochlorine Pesticides in Soil from Relocation Areas of the Danjiangkou Reservoir .....                         | LI Zi-cheng, QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (2821)        |
| Risk Assessment and Countermeasure of BTEX in Pesticide Factory .....                                                                                                  | PANG Bo, WANG Tie-yu, DU Li-yu, <i>et al.</i> (2829)                  |
| Accumulation of S, Fe and Cd in Rhizosphere of Rice and Their Uptake in Rice with Different Water Managements .....                                                    | ZHANG Xue-xia, ZHANG Xiao-xia, ZHENG Yu-ji, <i>et al.</i> (2837)      |
| Effects of Nitrate on Organic Removal and Microbial Community Structure in the Sediments .....                                                                         | LIU Jin, DENG Dai-yong, SUN Guo-ping, <i>et al.</i> (2847)            |
| Zero-Valent Iron-Enhanced Azoreduction by the <i>Shewanella decolorationis</i> S12 .....                                                                               | ZHOU Qing, CHEN Xing-juan, GUO Jun, <i>et al.</i> (2855)              |
| Isolation, Identification of Two Aerobic Denitrifiers and Bioaugmentation for Enhancing Denitrification of Biofilm Under Oligotrophic Conditions .....                 | QUAN Xiang-chun, CEN Yan, QIAN Yin (2862)                             |
| Rapid Enrichment and Cultivation of Denitrifying Phosphate-Removal Bacteria and Its Identification by Fluorescence <i>in situ</i> Hybridization Technology .....       | LIU Li, TANG Bing, HUANG Shao-song, <i>et al.</i> (2869)              |
| Identification of a Denitrifying Polyphosphate-accumulating Organism (DPAO) and Study on Its Denitrifying Functional Genes .....                                       | ZHANG Qian, WANG Hong-yu, SANG Wen-jiao, <i>et al.</i> (2876)         |
| Isolation and Characterization of a Highly Efficient BBP-degrading Bacterium .....                                                                                     | CHEN Hu-xing, YANG Xue, ZHANG Kai, <i>et al.</i> (2882)               |
| Degradation of Nicosulfuron by Combination Effects of Microorganisms and Chemical Hydrolysis .....                                                                     | ZHANG Xiao-lin, LI Yong-mei, YUAN Zhi-wen (2889)                      |
| Isolation, Screening and Identification of Prometryne-Degrading Bacteria and Their Degrading Characteristics .....                                                     | ZHOU Ji-hai, SUN Xiang-wu, HU Feng, <i>et al.</i> (2894)              |
| Preparation of PVA-SA-PHB-AC Composite Carrier and <i>m</i> -Cresol Biodegradation by Immobilized <i>Lysinibacillus cresolivorans</i> .....                            | LI Ting, REN Yuan, WEI Chao-hai (2899)                                |
| Extraction of Surface Active Substance and Analysis of Demulsifying Characteristics for the Demulsifying Strain <i>Alcaligenes</i> sp. S-XJ-1 .....                    | HUANG Xiang-feng, ZHANG Shu-cong, PENG Kai-ming, <i>et al.</i> (2906) |
| Diversity of Culturable Filamentous Bacteria in the Activated Sludge from A <sup>2</sup> O Wastewater Treatment Process .....                                          | GAO Sha, JIN De-cai, ZHAO Zhi-rui, <i>et al.</i> (2912)               |
| Composition and Transformation of Leachates During Municipal Solid Waste Composting .....                                                                              | LI Dan, HE Xiao-song, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (2918)                |

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2013年7月15日 34卷 第7期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 7 Jul. 15, 2013

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301  
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行