

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第5期

Vol.36 No.5

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目 次

深圳大气颗粒物中卤代多环芳烃污染研究	孙建林, 常文静, 陈正侠, 曾辉 (1513)
北京市典型餐饮企业 VOCs 排放特征研究	崔彤, 程婧晨, 何万清, 任培芳, 聂磊, 徐东耀, 潘涛 (1523)
2006~2010 年珠三角地区 SO ₂ 特征分析	李菲, 谭浩波, 邓雪娇, 邓涛, 徐婉筠, 冉靛, 赵春生 (1530)
环境空气 PM _{2.5} 连续监测系统手工采样比对测试	王强, 钟琪, 迟颖, 张杨, 杨凯 (1538)
燃煤电厂可凝结颗粒物的测试与排放	裴冰 (1544)
南海水域不同深度非光合微生物的固碳潜能及其对不同电子供体的响应	方峰, 王磊, 席雪飞, 胡佳俊, 付小花, 陆兵, 徐殿胜 (1550)
基于 GOCI 影像和水体光学分类的内陆湖泊叶绿素 a 浓度遥感估算	冯驰, 金琦, 王艳楠, 赵丽娜, 吕恒, 李云梅 (1557)
贵州清水江流域丰水期水化学特征及离子来源分析	吕婕梅, 安艳玲, 吴起鑫, 罗进, 蒋浩 (1565)
东莞石马河流域水化学特征时空差异及来源辨析	高磊, 陈建耀, 王江, 柯志庭, 朱爱萍, 许凯 (1573)
河南鸡冠洞洞穴水对极端气候的响应及其控制因素研究	刘肖, 杨琰, 彭涛, 赵景耀, 任小凤, 张银环, 聂旭东, 李建仓, 凌新有, 张志钦 (1582)
石漠化治理对岩溶地下水水化学和溶解无机碳稳定同位素的影响	肖时珍, 熊康宁, 蓝家程, 张晖, 杨龙 (1590)
旱季不同土地利用类型下岩溶碳汇效应差异	赵瑞一, 梁作兵, 王尊波, 于正良, 江泽利 (1598)
有机氯农药在岩溶区上覆土壤中的垂直迁移特征及对地下水的影响	孙玉川, 王永启, 梁作兵, 袁道先 (1605)
山东南四湖沉积物中汞的污染现状及迁移研究	曹霏霏, 杨丽原, 庞绪贵, 王炳华, 王云倩 (1615)
摇蚊幼虫扰动下沉积物微环境和微界面对物理扰动强度的响应	史晓丹, 李勇, 李大鹏, 王忍, 邓猛, 黄勇 (1622)
南方红壤区氮湿沉降特征及其对流域氮输出的影响	郝卓, 高扬, 张进忠, 徐亚娟, 于贵瑞 (1630)
不同紫色母岩对景观水体氮磷及有机物去除的影响	黄雪娇, 刘晓晨, 李振轮, 石纹豪, 杨珊 (1639)
荔枝落叶对铜绿微囊藻生长和光合作用的影响	汪小雄, 姜成春, 李锦卫, 汪晓军 (1648)
黄连根茎浸提物对绿藻的毒理作用	陈亚楠, 袁玲 (1655)
饮用水中消毒副产物 1,1-二氯丙酮的形成机制	丁春生, 孟壮, 徐洋洋, 缪佳 (1662)
水中利谷隆氯化降解动力学和消毒副产物生成特性	凌晓, 胡晨燕, 程明, 谷建 (1668)
化学消毒的中和剂对水中内毒素活性检测的影响	张灿, 刘文君, 史云, 安代志, 白森, 徐稳 (1674)
牛粪生物炭对水中氨氮的吸附特性	马锋锋, 赵保卫, 刁静茹, 钟金魁, 李安邦 (1678)
丁二酸改性茶油树木屑吸附铅的研究	张晓峰, 陈迪云, 彭燕, 刘永胜, 熊雪莹 (1686)
SPG 膜表面润湿性对膜污染和化学耐受性的影响	张静, 肖太民, 张晶, 曹丽亚, 杜亚威, 刘春, 张磊 (1694)
TiO ₂ 诱导下左旋氧氟沙星的可见光降解及其机制	郭宏生, 刘亚楠, 乔琪, 魏红, 董呈幸, 薛洁, 李克斌 (1700)
新型高分子絮凝剂对废水中 Cr(VI) 的捕集性能	王刚, 杜凤龄, 常青, 徐敏 (1707)
基于 OUR-HPR 测量在线估计活性污泥合成 PHA 量	曾善文, 王泽宇, 高敬, 刘东, 张代钧, 卢培利 (1713)
分离高浓度污泥产酸发酵液的自生动态膜形成机制	黄帅, 刘宏波, 殷波, 马惠君, 符波, 刘和, 白洁 (1720)
通风强度对市政污泥生物干化中试效果的影响	张喻, 韩融, 陆文静, 王洪涛, 明中远, 王强, 夏伟 (1727)
生物可降解螯合剂谷氨酸 N,N-二乙酸四钠对污泥中重金属萃取效率的研究	吴青, 崔延瑞, 汤晓晓, 杨慧娟, 孙剑辉 (1733)
百乐克 (BIOLAK) 活性污泥宏基因组的生物多样性及功能分析	田美, 刘汉湖, 申欣, 赵方庆, 陈帅, 姚永佳 (1739)
异养硝化-好氧反硝化菌 YL 的脱氮特性	梁贤, 任勇翔, 杨垒, 赵思琪, 夏志红 (1749)
菌株 <i>Arthrobacter</i> sp. CN2 降解对硝基苯酚的特性与动力学	任磊, 史延华, 贾阳, 姚雪松, Ruth Nahurira, 弥春霞, 闫艳春 (1757)
短短芽胞杆菌及其芽胞对苣的降解	刘芷辰, 叶锦韶, 彭辉, 刘则华, 邓庭进, 尹华, 廖丽萍 (1763)
垃圾填埋场抗生素抗性基因初探	李蕾, 徐晶, 赵由才, 宋立岩 (1769)
不同构型人工湿地基质中土著菌的耐药性及整合子丰度调查	麦晓蓓, 陶然, 杨扬, 张敏, 林剑华, 满滢 (1776)
硝酸盐和甲烷对覆土中苯系物厌氧氧化的影响	柳蓉, 龙焰, 王立立, 何婷, 叶锦韶 (1785)
山西高原落叶松人工林土壤呼吸的空间异质性	严俊霞, 李洪建, 李君剑, 武江星 (1793)
施氮对黄土旱塬区春玉米土壤呼吸和温度敏感性的影响	姜继韶, 郭胜利, 王蕊, 刘庆芳, 王志齐, 张彦军, 李娜娜, 李如剑, 吴得峰, 孙棋棋 (1802)
宣威街道尘中重金属的分布特征及其健康风险评估	张文超, 吕森林, 刘丁戎, 刘品威, 米持真一, 王效举, 王青耀 (1810)
宝鸡市街道尘埃磁学特征空间分布及环境意义	张俊辉, 王瑾, 张健, 房妮, 夏敦胜 (1818)
长期施肥下浙江稻田不同颗粒组分有机碳的稳定特征	毛霞丽, 陆扣萍, 孙涛, 张小凯, 何丽芝, 王海龙 (1827)
矿区植被恢复方式对土壤微生物和酶活性的影响	李君剑, 刘峰, 周小梅 (1836)
三江平原典型湿地类型土壤微生物特征与土壤养分的研究	肖烨, 黄志刚, 武海涛, 吕宪国 (1842)
钠盐类型对表面活性剂清洗煤油污染土壤的强化效应	黄昭露, 陈泉源, 周娟, 谢墨函 (1849)
石油污染土壤的生物修复技术及微生物生态效应	杨茜, 吴蔓莉, 聂麦茜, 王婷婷, 张明辉 (1856)
可生物降解螯合剂 GLDA 诱导东南景天修复重金属污染土壤的研究	卫泽斌, 陈晓红, 吴启堂, 谭蒙 (1864)
绿洲土 Pb-Zn 复合胁迫下重金属形态特征和生物有效性	金诚, 赵转军, 南忠仁, 王胜利, 武文飞, 王厚成 (1870)
硫素对水稻根系铁锰胶膜形成及吸收的影响	王丹, 李鑫, 王代长, 饶伟, 杜光辉, 杨军, 化党领 (1877)
臭氧对几种楠木气体交换参数的影响	李苗苗 (1888)
某货车侧翻水污染事件的环境损害评估方法探索	蔡锋, 赵士波, 陈刚才, 鲜思淑, 杨清玲, 周贤杰, 余海 (1902)
《环境科学》征订启事 (1543) 《环境科学》征稿简则 (1756) 信息 (1667, 1726, 1809, 1848)	

2006 ~ 2010 年珠三角地区 SO₂ 特征分析

李菲¹, 谭浩波¹, 邓雪娇¹, 邓涛¹, 徐婉筠², 冉靓³, 赵春生⁴

(1. 中国气象局广州热带海洋气象研究所, 广东省区域数值天气预报重点实验室, 广州 510080; 2. 中国气象科学研究院大气成分研究所, 中国气象局大气化学重点开放实验室, 北京 100081; 3. 中国科学院大气物理研究所, 中层大气与全球环境探测重点实验室, 北京 100029; 4. 北京大学物理学院大气与海洋科学系, 北京 100871)

摘要: 对广州番禺大气成分站 2006 ~ 2010 年期间的 SO₂ 资料进行了分析, 讨论了珠江三角洲 (珠三角) 地区地面 SO₂ 体积分数的年、季节、月、日变化特征和概率的分布特征. 珠三角地区地面 SO₂ 变化特征的分析结果表明, 2010 年地面 SO₂ 体积分数的总体水平相对近年来有一定下降, 高浓度事件发生频率降低; 冬、春季 SO₂ 各项统计值要高于夏、秋季, 干季明显高于湿季, 可能与大气边界层高度和太阳辐射等因素的季节性变化相关; SO₂ 干湿季的日变化趋势相仿, 日最高峰时间相同, 只是湿季达次高峰和最低点的时间比干季要提前 1 h, 这可能与季节性的大气边界层高度和辐射强度变化, 以及日照时间长度有关; SO₂ 体积分数的概率分布特征比较复杂, 各月谱型分布各有不同, 可能与季节性因素的变化规律相关.

关键词: 二氧化硫; 珠江三角洲; 气象条件; 大气边界层高度; 日变化特征

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)05-1530-08 DOI: 10.13227/j.hj.kx.2015.05.003

Characteristics Analysis of Sulfur Dioxide in Pearl River Delta from 2006 to 2010

LI Fei¹, TAN Hao-bo¹, DENG Xue-jiao¹, DENG Tao¹, XU Wan-yun², RAN Liang³, ZHAO Chun-sheng⁴

(1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Regional Numerical Weather Prediction, Institute of Tropical and Marine Meteorology, China Meteorological Administration, Guangzhou 510080, China; 2. Key Laboratory for Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Composition, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China; 3. Key Laboratory of Middle Atmosphere and Global Environment Observation, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 4. Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Based on the in-situ SO₂ observation dataset from 2006 to 2010 in Pearl River Delta (PRD), the temporal characteristics of SO₂ are analyzed. The results show that the annual average volume fraction of surface SO₂ in 2010 declines to a level below average values in recent years, with reducing the frequency of high concentration episodes occurring. The seasonal, monthly and diurnal characteristics of surface SO₂ are influenced by particular weather conditions in the PRD. The Probability Distribution Function (PDF) of surface SO₂ volume fraction are complicated. The PDF is different every month maybe caused by the variation of the seasonal factors.

Key words: sulfur dioxide; Pearl River Delta; meteorology condition; height of atmospheric boundary layer; diurnal characteristics

SO₂ 是痕量气体的一种, 是全球硫循环中的重要成分, 是人类活动产生的主要含硫大气污染物, SO₂ 的产生主要有自然源和人为源. 大气中的 SO₂ 浓度过高, 其本身或通过化学反应参与生成的细粒子会危害人类身体健康. SO₂ 在日照条件下, 与 OH 自由基发生气相氧化生成 H₂SO₄ 蒸气, 也可与 HO₂、CH₃O₂ 以及双元自由基 CH₃CHOO 发生气相氧化反应; SO₂ 溶于液态水, 在云、雾中或在高湿度环境下的颗粒物表面经液相氧化生成硫酸, 并随雨水降落到地面; 由 SO₂ 气相反应生成的 H₂SO₄ 气体通过均相成核过程, 或在粒子表面通过非均相凝结过程转化为硫酸和硫酸盐粒子, 经干、湿清除过程 (云、雨等) 返回地面^[1]. 20 世纪 70 年代, 欧洲监测与评价计划 (European Monitoring and Evaluation Programme, EMEP) 在官方网站 ([http://www.emep.](http://www.emep.int/)

<http://www.emep.int/>) 上公开发布由 95 个国家的上百个站点组成的站网地面观测结果, 以及模式评估的结果^[2,3]. 除地面站点之外, 从垂直方向探测 SO₂ 等要素以获取垂直方向上的综合特征^[4]. 2006 年 3 月, Molina 等^[5] 在 MILAGRO (Megacity Initiative: Local And Global Research Observations) 大型综合观测项目的综述里提到了 SO₂ 通量和浓度的观测系统, 运用 SO₂ 和 Aura-OMI 卫星资料反演进行相关模式评估和各种排放源影响的分析研究以及气溶胶颗粒物中关于硫酸盐的研究工作. 在我国, 针对酸雨的大规模监测

收稿日期: 2014-10-05; 修订日期: 2014-12-29

基金项目: 国家重点基础研究发展规划 (973) 项目 (2011CB403403); 国家自然科学基金青年基金项目 (41405133); 公益性行业 (气象) 项目 (201306042); 广东省科技计划重点项目 (2010A030200012); 广东省气象局科技创新团队计划项目 (201103)

作者简介: 李菲 (1981 ~), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为大气物理与大气环境, E-mail: lifei@gmcc.gov.cn

工作始于 20 世纪 70 年代末,1982 年国家环保管理部门建立了全国酸雨监测网,用于调查研究我国酸雨的分布状况. 1989 年起中国气象局也建立了相应的酸雨监测网,由于监测点设置不同,对环保监测网起到了积极有益的补充^[6],并用于全国各地的 SO_2 地面浓度时间变化趋势和特征,从排放源的角度出发讨论治理措施等分析^[7~13]. 除了业务布网, SO_2 地面观测站点广泛布设和相关科研项目逐步开展^[14~16],国内也开始飞机和利用百米以上的高塔梯度观测,研究结果包括 SO_2 在内的各种要素的垂直分布特征^[17~20]. 另外,还有一些关于 SO_2 参与多相反应^[21~24],模式耦合^[25~27]以及对气候影响^[28~31]等问题,仍是社会关注度高、亟待进一步研究的前沿性研究课题.

同时,尤其是 21 世纪以来,随着我国经济迅猛发展,交通网络化加速,严重的大气污染导致环境压力与日剧增. 2006 年以来,珠三角地区经历了城市快速建设和不断改造,机动车辆等交通工具持续增加. 低能见度事件、霾、光化学烟雾等一系列污染事件越来越受到公众和政府的关注,作为酸雨和细粒子的前体物, SO_2 对空气质量和人体健康乃至气候与环境的影响十分重要,因此对 SO_2 的监测与分析,以及对 SO_2 到硫酸盐的转化方面的分析研究成为重要的课题. 近年来,特别是对于珠三角地区,虽然已经有许多关于霾、气溶胶光学特性、臭氧等方面^[32~46]的讨论研究;但是关于 SO_2 方面的研究,包括早期的关于二氧化硫和硫酸盐的研究,较多地是研究污染事件或特定时段的 SO_2 变化规律^[47~55]. 随着“十一五”计划的实施,该地区的能源结构及大气环境在逐渐地改变,现状可能与以前的研究结果有差别,所以对该地区 SO_2 最新现状的更新了解非常必要.

1 材料与方法

1.1 观测地点简述

本研究观测数据来自广州番禺大气成分站(113°21'E,23°00'N,如图 1),位于广州市番禺区南村镇大镇岗山上,下垫面为次生林植被覆盖,2 km 外山脚下(海拔 1~5 m)为低密度别墅群区,无明显工业污染源. 番禺区是广州市直辖区,位于广州市南部、珠江三角洲腹地,珠江三角洲是中国大陆第二大的三角洲,位于大陆海岸线南端,河网纵横,孤丘散布,平均海拔 1~20 m. 广阔的三角洲平原已经高度城市化. 在这块 26 820 km² 的土地上,聚集了

约 2 967 万人,是中国人口密度最高的地区之一,是全国产值最大的高新技术产业带之一,也是中国南部经济和金融中心. 番禺大气成分站 2005 年底建成并投入试运行,可在一定程度上代表珠江三角洲城市群环境大气平均状况. 该观测站为钢平台上放置的集装箱,箱顶仪器进气口海拔约 150 m.



图 1 观测站点-广州番禺大气成分观测站

Fig. 1 Station for atmospheric composition monitoring at Panyu, Guangzhou

1.2 观测仪器简述

本研究用于分析地面 SO_2 统计特征的观测数据,主要来自于澳大利亚 ECOTECH 公司出产的 EC9850B(紫外荧光法)分析仪在观测站点监测的资料. 紫外荧光法 SO_2 分析仪是基于经典的荧光光谱学原理制造,包括光学传感器集合、模拟电信号预处理模块、基于微处理机的控制和电子计算以及用于抽气的空气泵系统. 该仪器主机放置在室内运行,其前端进样系统是从室外垂直引入室内的大气采样总管,再通过分支气路连接到 EC9850B 分析仪,仪器排出的废气通过外置抽气泵出口连接排出室外低处. 为尽量减少 SO_2 被吸附在进样管内,大气采样总管经过喷聚四氟乙烯处理,分支气路也使用聚四氟乙烯材质软管. 由于在珠江三角洲湿季相对湿度较高,而且室内外温差较大,所以采取了一系列措施避免管里凝结的水珠中氧化:室内空调保持在 25~28℃,在高温天气通过手动调温来尽量减小室内外温差;使用缠绕加热带来加热采样总管的室内部分,在分支进样管上包裹保温材料.

仪器观测期间,通过以下定期维护操作来保障仪器观测数据的有效性:在每日零时(世界时)会自动进行零点检测;进样粒子过滤器每 2 个星期更换一次滤膜;仪器每月/季度做零点、跨度检测校准;每季度对仪器内部系统、采样系统、外置抽气泵等进行清洁维护操作.

1.3 分析方法

关于 SO_2 资料处理:本研究使用的是观测站点

从 2006 年 5 月二氧化硫分析仪开机观测至 2010 年 12 月的地面 SO_2 体积分数 ($\times 10^{-9}$) 资料, 数据分辨率: 5 min. 仪器观测期间, 在每日的零点检测, 定期更换滤膜、做零点、跨度检测校准, 已知局地源排放以及对仪器内部系统定期清洁维护等操作的对应过程中的资料均不作为观测数据参与统计. 由于该站观测时间为世界时, 为方便本研究进行对 SO_2 的日变化、季节变化等特征分析, 将原始资料处理为本地时间的小时均值、日均值等序列进行统计分析. 仪器定期的监测标定结果显示, 仪器在正常观测阶段相邻两次的线性漂移量在 0.4% ~ 3.2% 之间; 观测数据中, 出现 $-5 \times 10^{-9} \sim 0$ 之间的值, 认为是仪器零漂移的现象, 视为 0 处理; 而且对原始资料每小时做标准化处理, 标准化数据结果显示在 1h 内气体浓度变化不大. 为保证小时平均值的代表性, 本研究在对原始资料做小时平均处理时, 样本数量不小于每小时采集数据理论总数的 75% 时, 做小时算术平均值; 而样本数量不足的, 该小时算术平均值计为缺失. 设置不同的阈值作为浓度高值计算出现频率.

将观测站的数据经过以上方法处理后, 发现 2006 ~ 2009 年的年有效数据量均不足 75% (年有效数据量 = 年有效小时均值数据/年理论小时总数), 但是考虑数年观测数据的宝贵性, 仍然做特征统计以作参考, 而着重分析 2010 年数据.

关于气象资料处理, 本文使用观测站点上芬兰 Vaisala 公司的自动气象站资料的降水量要素, 对原始的降水量分钟资料通过加和得到小时累积值. 在本研究使用相关分析时使用大于 0 的小时资料; 与 SO_2 地面观测资料做统计时, 将两列按对应时间序列进行筛选, 如出现其中一列有缺测值, 则将对对应时间两列的数据同时删去, 筛选结果作为统计的样本.

2 结果与分析

本研究分析的数据来自广州番禺大气成分站连续监测的资料, 该站是中国气象局大气成分站网在华南布设的首个大气成分站点, 对于珠三角地区城市群研究具有一定的时空代表性. 本研究主要通过小时均值数据资料做客观分析, 对珠三角地区地面 SO_2 体积分数的日、月、季节、年际等变化特征进行详细讨论.

2.1 地面 SO_2 的年际变化特征

图 2(b) 中显示的是 2006 年 10 月 ~ 2010 年 12 月的地面 SO_2 体积分数的小时均值, 每个月分上、

中、下旬统计均值 (每月样本量达到标准的情况下) 得到的变化特征; 图 2(c) 是每个月分上、中、下旬统计日均值变化图; 其中空白部分是由于仪器故障, 不作为正常观测数据参与统计作图而缺失部分. 从图 2 可以看出, 2006 ~ 2008 年的地面 SO_2 平均值的高值较多, 2009 年以后出现较少, SO_2 地面统计日平均体积分数的波动程度低于 2006 ~ 2008 年. 结合表 1 中的结果, 2006 ~ 2008 年, SO_2 年均值逐年增长; 2009、2010 年则开始下降, 尤其是 2010 年, SO_2 年平均值和中值是 5 a 内的最小值, 均低于 5 a 的平均水平, 不过该年的最大值较高, 仅次于 2007 年; 2008 年的年平均值和中值则是 5 a 中最高, 由于有效数据量较少的原因, 该数值仅作为参考. 地面 SO_2 年度平均状况的变化可能与排放源的变化相关: 2007 年政府开始规划的产业园区转移, 企业陆续迁移至北边的清远市; 全球经济危机引发的珠江三角洲各类企业紧缩减产; “十五”、“十一五”国家发展计划中强调节能减排, 相关部门对作为主要排放源的发电厂等采取的发电煤耗降低改革措施和脱硫新技术、关闭小火电和锅炉排放源限制、淘汰落后水泥、钢铁、造纸产能等结构减排、钢铁厂烧结烟气脱硫减排等手段, 使得珠三角地区的能源结构在逐渐改变, 源排放中硫排放量减少; 而且由于 2010 年第 16 届亚运会在广州举办, 周边城市协助提供赛场, 为保障环境空气质量, 实施机动车辆单双号限行, 采取区域性源排放限制等方案可能也对 SO_2 地面浓度年均值降低起到一定贡献. 结合表 2 对地面 SO_2 高值取不同阈值统计出现频率显示, 虽然 2010 年地面 SO_2 的最大值仍较高, 但同年 25×10^{-9} 以上高值出现的频率均为 5 a 中的最低. 这说明 2010 年的高值污染事件还是依然存在, 但出现频率较前几年有所减少, 可能与未知的局地性源排放和气象条件等其他因素相关.

2.2 地面 SO_2 的季节变化特征

结合图 2(b) 和表 3 分析各年内地面 SO_2 的季节变化特征: 由季度统计特征值分析, 2006 ~ 2009 年的地面 SO_2 季度有效小时数量不足理论小时总数的 75%, 因此主要讨论分析 2010 年四季的变化特征, 地面 SO_2 体积分数的春、冬季均值明显高于夏、秋季, 夏、秋季均值还低于年均值 ($17.8 \times 10^{-9} \pm 18.9 \times 10^{-9}$). 由于珠三角地区特殊的气候特征, 雨热同季, 干湿季明显. 所以如果将 2010 年的资料按干、湿季统计 (干季为该年 1 ~ 3 月和 10 ~ 12 月, 湿季为该年 4 ~ 9 月), 得到结果分别为 (19.1×10^{-9}

$\pm 21.2 \times 10^{-9}$ 、 $16.6 \times 10^{-9} \pm 16.3 \times 10^{-9}$),干季高于湿季. 统计的季节性变化可能与大气边界层高度、太阳辐射量、风向风速、相对湿度等气象因素的季节变化密切相关. 出现相对较低值的夏、秋季,大气边界层高度相对较高,使得 SO₂地面浓度向垂直方向扩散稀释得更充分; 太阳辐射也相对冬、春季较强,更有利于光化学反应产生,SO₂ 气体快速与大气中的 OH 等自由基、臭氧等发生复杂氧化反应转化为硫酸盐,以及植物生长茂盛、生物质排放增加,都对 SO₂ 参与各种大气化学反应,起到更多消

耗作用; 春季珠三角地区的近地面的逆温现象,冬季冷空气过境前后的静小风稳定天气形势,经常造成水平和垂直方向不利的扩散条件,可能造成地面 SO₂ 体积分数的偏高. 珠三角地区的湿季,前汛期和雨季期间,频繁受热带风暴、台风等天气系统影响,使得降水次数较多和降水量较大(统计得 2010 年湿季的总降水量达 1 472.6 mm,干季的为 133.6 mm),可看出湿季对于 SO₂ 气体的湿清除起主要作用,也可能是湿季地面 SO₂ 体积分数相对较低的原因.

表 1 珠江三角洲 2006 ~ 2010 年 SO₂ 体积分数年度特征¹⁾ $\times 10^{-9}$

项目	年份					5 a 平均
	2006	2007	2008	2009	2010	
平均值	19.4	23.5	25.3	20.0	17.8	21.2
标准差	17.3	23.4	23.9	19.7	18.9	20.6
中值	12.7	15.4	17.4	13.8	11.7	14.2
最大值	103.2	244.8	225.8	205.3	230.8	202.0

1) 2006 年为 5 ~ 12 月正常观测数据小时均值全部参与统计平均,其余年份为 1 ~ 12 月正常观测数据小时均值全部参与统计平均; 未加黑字体标注值表示年有效小时数不足理论小时总数的 75%,数据仅供参考,下同

表 2 珠江三角洲 2006 ~ 2010 年 SO₂ 体积分数高值出现频率统计

项目	年份				
	2006	2007	2008	2009	2010
高值 1 ($\geq 25 \times 10^{-9}$)	26.2	29.4	33.9	24.0	19.5
高值 2 ($\geq 50 \times 10^{-9}$)	7.3	10.8	12.1	7.2	6.2
高值 3 ($\geq 100 \times 10^{-9}$)	0.2	1.6	1.9	1.1	0.6
高值 4 ($\geq 180 \times 10^{-9}$)	/	0.4	0.3	0.1	0.1

表 3 珠江三角洲 2010 年地面 SO₂ 体积分数季节特征¹⁾ $\times 10^{-9}$

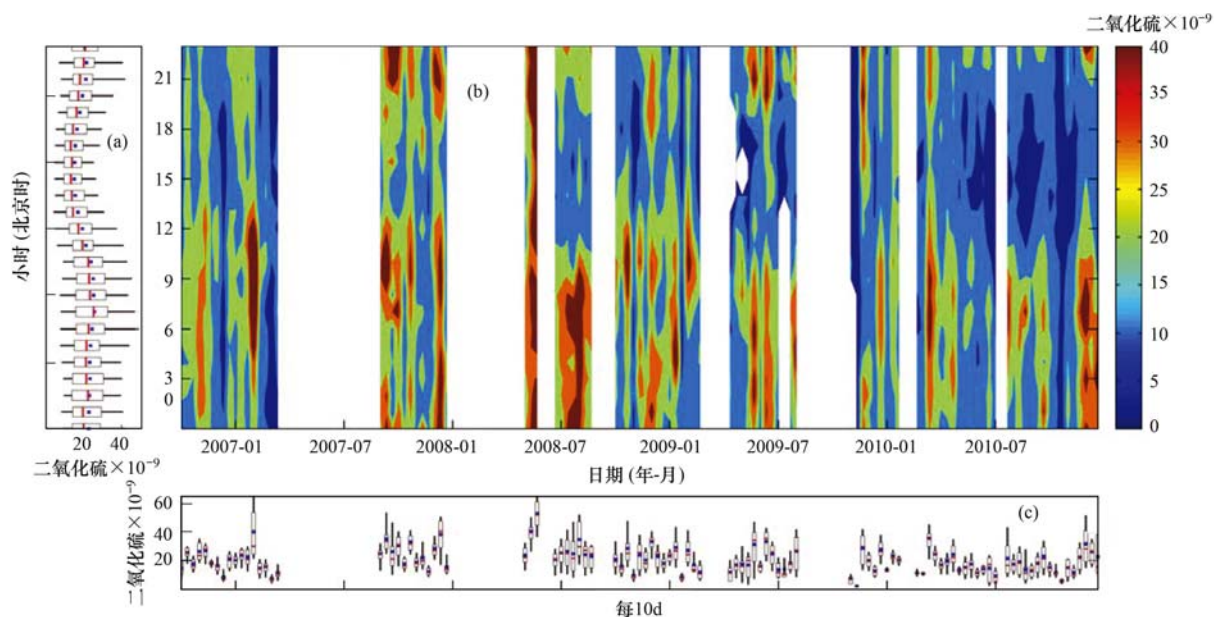
年份	春季			夏季			秋季			冬季		
	min	max	mean	min	max	mean	min	max	mean	min	max	mean
2010	0.0	162.3	20.2	0.0	170.5	15.2	0.0	154.9	15.0	0.0	230.8	27.8

1) 春季为 3 ~ 5 月,夏季为 6 ~ 8 月,秋季为 9 ~ 11 月,冬季为 1、2、12 月

2.3 地面 SO₂ 的日变化特征

由图 2(c)是 2006 年 10 月 ~ 2010 年 12 月地面 SO₂ 体积分数统计全天每小时的总平均值的日变化. 从中可看出,地面 SO₂ 体积分数的日变化呈类似余弦型,00:00 ~ 23:00 的总平均值在 15.0×10^{-9} ~ 25.4×10^{-9} 之间波动,从 00:00 的 $22.1 \times 10^{-9} \pm 21.7 \times 10^{-9}$ 开始逐渐增大,至 07:00 达到日最高值 $25.4 \times 10^{-9} \pm 26.8 \times 10^{-9}$,维持约 25×10^{-9} 至 10:00,之后 SO₂ 体积分数随时间逐渐减少,至 15:00 到日最小值 $15.0 \times 10^{-9} \pm 14.3 \times 10^{-9}$,持续约 15×10^{-9} 至 18:00 之后再随时间回升至 21×10^{-9} 左

右. 各小时最大值的极大值为 236.6×10^{-9} ,出现在 10:00,各小时中位值在 10.0×10^{-9} ~ 16.3×10^{-9} 间波动,最小值 10.0×10^{-9} 出现在下午 15:00. 统计的日变化特征与珠三角地区的大气边界层高度日变化,人们工作生活规律,以及太阳辐射的综合关系密切: 一般情况下,凌晨大气边界层高度较低且稳定,大气中前 1 d 积累的 SO₂ 体积分数较高,07:00 日出后,随着大气边界层高度的不断发展,SO₂ 气体随着大气整体逐渐向垂直方向混合扩散,原本近地面的 SO₂ 应该得到稀释,不过由于 08:00 ~ 10:00 是珠三角地区的工厂企业开始工作产生源排放,特别是高架源等排放的 SO₂,伴随着大气边界层的垂直演变



(a) 观测期间总平均的日变化; (b) 小时值按旬统计均值的时序变化; (c) 日均值按旬统计均值的时序变化

图 2 2006 年 10 月 ~2010 年 12 月地面 SO₂ 体积分数变化特征

Fig. 2 Variation characteristics of surface SO₂ volume fraction (Oct. 2006-Dec. 2010)

下传到近地面,使得地面的 SO₂ 体积分数维持,变化不大;午后虽然同时有人为源的不断排放,但由于太阳辐射达到日间最强,大气中的各种反应物增多,随之带来复杂光化学的反应剧烈,可以大量消耗 SO₂ 气体,导致地面浓度快速下降;17:00 以后,迎来晚高峰期,对于地面 SO₂ 有一定累积,至夜间光化学反应减弱,日间的源排放不断积聚,大气边界层高度也随时间降低,使得地面 SO₂ 体积分数增加。

图 3 是 2010 年地面 SO₂ 体积分数按照干湿季及全年平均得到的日变化特征。发现 2010 年地面 SO₂ 体积分数的平均值与 2006 ~ 2010 年总平均值的年变化特征,稍有差别:在早上 07:00 最高峰值前,凌晨浓度缓慢上升过程中,在 02:00 开始下降到 04:00 (地面 SO₂ 体积分数为 $20.5 \times 10^{-9} \pm 19.8 \times 10^{-9}$);之后浓度恢复上涨,到 07:00 达日最高值 $24.5 \times 10^{-9} \pm 28.0 \times 10^{-9}$,略小于 2006 ~ 2010 年总平均值在该时的峰值;在 10:00 前,SO₂ 地面浓度迅速下降,至下午 16:00 达日最低值 ($11.8 \times 10^{-9} \pm 11.5 \times 10^{-9}$),夜晚 23:00 回升至 $20.0 \times 10^{-9} \pm 22.6 \times 10^{-9}$ 。大气中的双元自由基 CH₃CHOO 可在无日照的情况下与 SO₂ 发生反应,凌晨时段大气中地面 SO₂ 体积分数较高,易于发生反应消耗一部分 SO₂,可能因此造成短时间的降低。干、湿季的平均日变化与全年均值相仿,均在 07:00 达到日最高值,可说明珠三角地区的 SO₂ 源总量高值全年变化不大;不

过可以看到,位于黑实线年平均值上方的干季平均曲线,全日都大于年均值,与之相反,湿季平均值则全日小于年平均值;干湿季均值对应时间的差值 $[SO_{2(干)} - SO_{2(湿)}]$ 在 $0.8 \times 10^{-9} \sim 4.2 \times 10^{-9}$ 之间波动,在午后 13:00 差值达到最大;干季均值的日变化幅度小于湿季均值日变化;这些都明显反映出干湿季的季节因素对于 SO₂ 的沉降清除能力的强弱程度不同。而干季均值开始下落时间是 03:00,比湿季均值晚 1 h,但干湿季均值恢复上升时间都是在 04:00;在达到峰值下落的过程中,湿季均值达到最低值的时间在 15:00,相对于干季均值的 16:00 提前

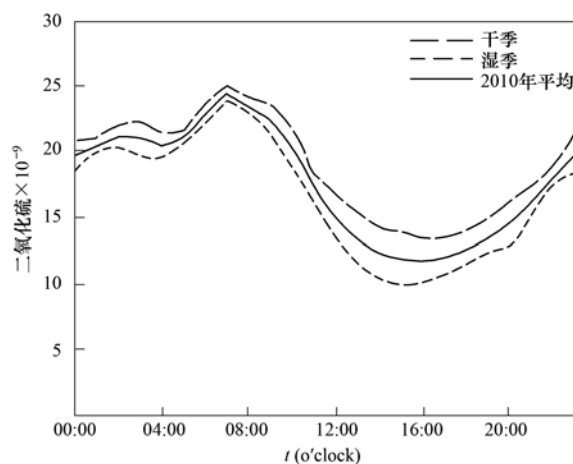


图 3 2010 年地面 SO₂ 体积分数干湿季均值与年均值日变化

Fig. 3 Diurnal variation of the dry/wet season mean and annual mean values of surface SO₂ volume fraction (2010)

1 h. 珠三角地区湿季的日照强度和长度均大于干季,而且大气边界层高度的演变程度和时间段的差异可能是造成干湿季日变化极值出现时间不一致的原因,需要结合边界层、辐射等资料进一步分析.

2.4 地面 SO_2 的概率分布分析

统计珠三角地面 SO_2 体积分数的概率分布来了解 SO_2 浓度的总体分布情况. 图 4 展示的是 2010 年全年的地面 SO_2 资料进行概率统计的结果: 以 10×10^{-9} 为间隔分档, $0 \sim 100 \times 10^{-9}$ 的概率分布情况. $0 \sim 10 \times 10^{-9}$ 出现的概率最高, 达 42.3%, 而 $10 \times 10^{-9} \sim 20 \times 10^{-9}$ 出现的概率也达 31.8%. 综合来看, $0 \sim 40 \times 10^{-9}$ 的地面 SO_2 体积分数发生概率, 约占全年的 90%, 其余体积分数发生概率随着浓度升高而降低. 说明珠三角地区 2010 年地面 SO_2 的污染水平主要在 $0 \sim 40 \times 10^{-9}$.

图 5 是 2010 年珠三角地区地面 SO_2 体积分数按月统计的概率分布. 与年总概率分布不同的是, 以 5×10^{-9} 分档, SO_2 概率分布各月有不同. $5 \times 10^{-9} \sim 10 \times 10^{-9}$ 这档基本是各月频率的最高值, 相对来说, 1、2、10 月的 $5 \times 10^{-9} \sim 10 \times 10^{-9}$ 出现频率较高, 基本在 40% 以上, 其余各月该值基本在 20%

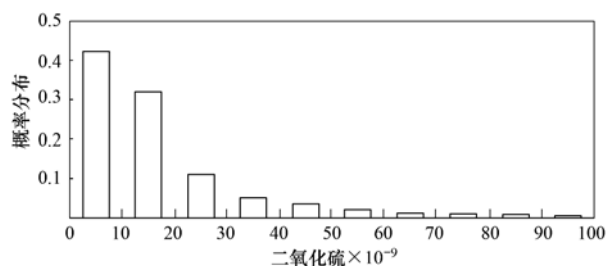


图 4 2010 年珠江三角洲地面 SO_2 体积分数概率分布

Fig. 4 Probability distribution of surface SO_2 volume fraction in PRD (2010)

$\sim 30\%$, 从 $0 \sim 20 \times 10^{-9}$ 各档发生概率来看, 其中 6~9 月的分布形势大略相同, 大致以 $5 \times 10^{-9} \sim 10 \times 10^{-9}$ 以内的发生概率暂主导, $10 \times 10^{-9} \sim 15 \times 10^{-9}$ 档概率高于 $0 \sim 5 \times 10^{-9}$ 档, 20×10^{-9} 之上的体积分数概率基本在 1% 以下, 谱型分布类似, 说明这几个月大气中的 SO_2 相对稳定且维持在较低的浓度, 可能与夏季的降水等干湿沉降相关. 而 1、10、11、12 月, 除 $5 \times 10^{-9} \sim 10 \times 10^{-9}$ 出现频率相当高之外, 30×10^{-9} 以上的几档所占份额相对较大, 说明该时期地面 SO_2 体积分数波动较大, 且高浓度事件较频繁发生, 特别是 1 月和 11 月, $40 \times 10^{-9} \sim 70 \times 10^{-9}$ 各

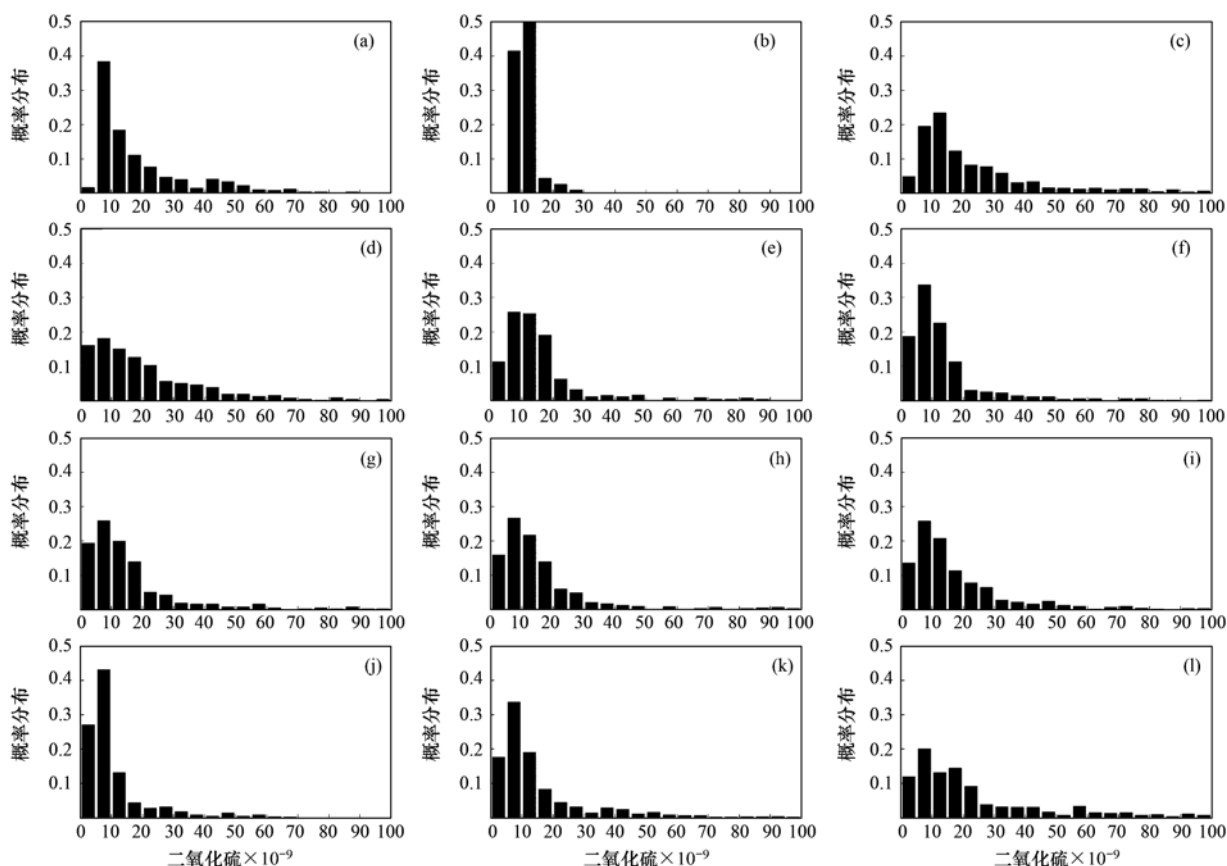


图 5 2010 年珠三角地面 SO_2 体积分数概率分布月统计

Fig. 5 Monthly statistics of surface SO_2 volume fraction in PRD (2010)

档位的概率值较高; 3~5月, 30×10^{-9} 以下各档概率分布比较平均, $5 \times 10^{-9} \sim 10 \times 10^{-9}$ 的频率也基本在 30% 以下, 但是 $10 \times 10^{-9} \sim 30 \times 10^{-9}$ 的概率分布较 6~8 月高, 说明 3~5 月春季大气中的平均 SO_2 水平略高于夏天, 这可能与珠三角地区的“倒春寒”、“回南天”等近地面逆温较强, 不利于 SO_2 的扩散有关。

4 结论

(1) 珠三角地区地面 SO_2 体积分数的年际变化, 2010 年地面 SO_2 年均值和中值总体上都低于 2006~2009 年, 虽然该年最大值仍较高, 但出现高值的频率有所减少。说明 2010 年地面 SO_2 体积分数总体水平相对近年来有一定下降, 高值事件发生频率降低。珠三角地区 SO_2 的季节变化特征, 主要针对 2010 年分析, 发现冬、春季 SO_2 体积分数各项统计值要高于夏、秋季, 干季明显高于湿季, 可能是与大气边界层高度和太阳辐射等因素的季节性变化相关。

(2) 珠三角地区 SO_2 的日变化特征, 以 5 a 的资料平均来看, 在 00:00~23:00 呈弱余弦型分布, 早上 07:00 达日体积分数的最高点, 下午 15:00 为日最低点; 若从 2010 年资料来看, 除日变化波动的幅度较大之外, 在早上 07:00 的最高峰值之前, 02:00 左右还有一个次高峰, 而且分干、湿季对比分析, 也仍然有次峰的存在, 怀疑可能和 SO_2 与双元自由基的夜间反应消耗有关。干湿季的日变化趋势相仿, 日最高峰时间相同, 只是湿季达次高峰和最低点的时间比干季要提前 1 h, 可能与季节性的大气边界层高度和辐射强度变化, 以及日照时间长度有关。

(3) 地面 SO_2 体积分数的概率分布特征比较复杂, 通过年总分布图和分月统计分布图进行讨论, 分析结果显示: 全年来看, $0 \sim 40 \times 10^{-9}$ 档之和几乎占到所有的 90%, 从各月频率分布来看, $5 \times 10^{-9} \sim 10 \times 10^{-9}$ 档的频率很高, 各月情况谱型分布各有不同, 可能与季节性因素的变化规律相关。

参考文献:

- [1] 秦瑜, 赵春生. 大气化学基础[M]. 北京: 气象出版社, 2003. 76-81.
- [2] Luke W T, Kelley P, Lefer B L, *et al.* Measurements of primary trace gases and NO_y composition in Houston, Texas [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(33): 4068-4080.
- [3] Sharma S K, Datta A, Saud T, *et al.* Seasonal variability of ambient NH_3 , NO , NO_2 and SO_2 over Delhi [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, **22**(7): 1023-1028.
- [4] Aiken A C, Salcedo D, Cubison M J, *et al.* Mexico city aerosol analysis during MILAGRO using high resolution aerosol mass spectrometry at the urban supersite (T0)-Part 1: Fine particle composition and organic source apportionment [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, **9**: 6633-6653.
- [5] Molina L T, Madronich S, Gaffney J S, *et al.* An overview of the MILAGRO 2006 Campaign: Mexico City emissions and their transport and transformation [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, **10**: 8697-8760.
- [6] 云雅如, 柴发合, 王淑兰, 等. 欧洲酸雨控制历程及效果综合评述[J]. *环境科学研究*, 2010, **23**(30): 1361-1367.
- [7] 彭贤安, 孙亦军, 黄丽影, 等. 京津唐大气环境及其区域研究[J]. *环境科学研究*, 1988, **1**(2): 31-40.
- [8] 张慧明, 应金生, 林小研, 等. 青岛市大气污染状况及发展趋势[J]. *环境科学进展*, 1994, **2**(5): 45-52.
- [9] 张镭, 陈长和, 李淑霞, 等. 兰州城市大气污染和可能的技术控制措施[J]. *环境科学研究*, 2000, **13**(4): 18-21.
- [10] 盛立芳, 高会旺, 张英娟, 等. 夏季渤海 NO_x 、 O_3 、 SO_2 和 CO 浓度观测特征[J]. *环境科学*, 2002, **23**(6): 31-35.
- [11] 肖梅. 金昌市环境空气中二氧化硫污染趋势分析[J]. *黑龙江环境通报*, 2003, **27**(3): 92-94.
- [12] 薛志钢, 郝吉明, 陈复, 等. 火电厂对城市空气质量的影响模拟[J]. *环境工程*, 2003, **21**(6): 72-75.
- [13] 温丽仙, 李素清. 1996~2005 年太原市 SO_2 污染特征及变化趋势分析[J]. *四川环境*, 2007, **26**(2): 54-57.
- [14] 颜鹏, 房秀梅, 李兴生, 等. 临安地区地面 SO_2 变化规律及其源地分析[J]. *应用气象学报*, 1999, **10**(3): 267-275.
- [15] 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.
- [16] 迪丽努尔·塔力埔, 梁云, 阿布力克木·阿不力孜. 乌鲁木齐市冬季空气中 SO_2 浓度与空气湿度的关系及对人的影响[J]. *安全与环境学报*, 2004, **4**(增刊): 25-26.
- [17] Wang W, Ren L H, Zhang Y H, *et al.* Aircraft measurements of gaseous pollutants and particulate matter over Pearl River Delta in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(25): 6187-6202.
- [18] Geng F H, Zhang Q, Tie X X, *et al.* Aircraft measurements of O_3 , NO_x , CO, VOCs, and SO_2 in the Yangtze River Delta region [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(3): 584-593.
- [19] 张光智, 卞林根, 王继志, 等. 北京及周边地区雾形成的边界层特征[J]. *中国科学(D辑)*, 2005, **35**(增刊 I): 73-83.
- [20] 孟昭阳, 丁国安, 于海青, 等. 北京北部城区 SO_2 和 NO_2 浓度垂直分布特点初探[J]. *应用气象学报*, 2002, **13**(增刊): 109-112.
- [21] Chu P C, Chen Y C, Lu S H. Atmospheric effects on winter SO_2 pollution in Lanzhou, China [J]. *Atmospheric Research*, 2008, **89**(4): 365-373.
- [22] 吉东生, 王跃思, 孙扬, 等. 北京大气中 SO_2 浓度变化特征[J]. *气候与环境研究*, 2009, **14**(1): 69-76.
- [23] Sievering H, Boatman J, Galloway J, *et al.* Heterogeneous sulfur conversion in sea-salt aerosol particles: The role of aerosol water

- content and size distribution [J]. *Atmospheric Environment*, Part A. General Topics, 1991, **25**(8): 1479-1487.
- [24] Nishikawa M, Kanamori S, Nobuko K, *et al.* Kosa aerosol as eolian carrier of anthropogenic material [J]. *Science of the Total Environment*, 1991, **107**: 13-27.
- [25] 梁思. 华北地区 SO₂ 分布特征及气溶胶吸湿性对硫转化过程的影响[D]. 北京: 北京大学, 2011. 6-56.
- [26] 徐祥德, 丁国安, 周丽, 等. 北京城市冬季大气污染动力: 化学过程区域性三维结构特征[J]. *科学通报*, 2003, **48**(5): 496-501.
- [27] 赵春生, 彭大勇, 段英, 等. 海盐气溶胶和硫酸盐气溶胶在云微物理过程中的作用[J]. *应用气象学报*, 2005, **16**(4): 417-425.
- [28] 田华, 马建中, 李维亮, 等. 中国中东部地区硫酸盐气溶胶直接辐射强迫及气候效应的数值模拟[J]. *应用气象学报*, 2005, **16**(3): 322-333.
- [29] 钟昌琴, 张美根, 朱凌云. 东亚地区春季硫氧化物浓度分布及其收支研究[J]. *高原气象*, 2008, **27**(1): 122-127.
- [30] 朱帅, 颜鹏, 马建中. 超大城市 SO₂ 排放对硫酸盐区域分布影响的观测与模拟[J]. *环境科学研究*, 2009, **22**(1): 7-15.
- [31] 吴蓬萍, 刘煜. 硫酸盐气溶胶对全球水循环因子的影响[J]. *气候变化研究进展*, 2009, **5**(1): 44-49.
- [32] 吴兑. 霾与雾的区别和灰霾天气预警建议[J]. *广东气象*, 2004, **4**(1): 1-4.
- [33] 邓雪娇, 吴兑, 铁学熙, 等. 大城市气溶胶对光化辐射通量及臭氧的影响研究(I)——国内外研究现状与观测事实评述[J]. *广东气象*, 2006, (3): 10-17.
- [34] 邓雪娇, 铁学熙, 吴兑, 等. 大城市气溶胶对光化辐射通量及臭氧的影响研究(II)——数值实验分析[J]. *广东气象*, 2006, (4): 5-11.
- [35] 谭浩波, 吴兑, 毕雪岩. 南海北部气溶胶光学厚度观测研究[J]. *热带海洋学报*, 2006, **25**(5): 21-25.
- [36] Wu D, Deng X J, Bi X Y, *et al.* Study on the visibility reduction caused by atmospheric haze in Guangzhou area [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2007, **23**(1): 1-6.
- [37] 谭浩波, 邓雪娇, 吴兑, 等. TUV-R 型紫外辐射表性能研究[J]. *应用气象学报*, 2008, **19**(3): 367-371.
- [38] 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.
- [39] 邓雪娇, 李菲, 吴兑, 等. 广州地区典型清洁与污染过程的大气湍流与物质交换特征[J]. *中国环境科学*, 2011, **31**(9): 1424-1430.
- [40] 任阵海, 杨礼荣, 林子瑜, 等. 珠江三角洲地区大气中的粒子污染[J]. *环境科学研究*, 1991, **4**(1): 21-36.
- [41] 林子瑜, 唐孝炎, 王文兴, 等. 广州地区 SO₂ 转化规律及其形成气溶胶特征的研究[J]. *环境科学研究*, 1992, **5**(3): 18-24.
- [42] Tao J, Zhang L M, Ho K, *et al.* Impact of PM_{2.5} chemical compositions on aerosol light scattering in Guangzhou — the largest megacity in South China [J]. *Atmospheric Research*, 2014, **135-136**: 48-58.
- [43] Tan J H, Duan J C, Chen D H, *et al.* Chemical characteristics of haze during summer and winter in Guangzhou [J]. *Atmospheric Research*, 2009, **94**(2): 238-245.
- [44] Tan J, Duan J, He K, *et al.* Chemical characteristics of PM_{2.5} during a typical haze episode in Guangzhou [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, **21**(6): 774-781.
- [45] 段菁春, 谭吉华, 盛国英, 等. 广州灰霾期间颗粒态 PAHs 的污染特征及来源[J]. *环境科学*, 2009, **30**(6): 1574-1579.
- [46] 王艳君, 郑晓玲, 何鹰, 等. 大气中总挥发性有机硫化物检测方法的研究[J]. *环境科学*, 2011, **32**(12): 3617-3622.
- [47] 陈文和, 邓明佳, 罗辉, 等. 污泥直接干化产生的恶臭及挥发性有机物特征研究[J]. *环境科学*, 2014, **35**(8): 2897-2902.
- [48] 颜鹏, 李兴生, 罗超, 等. 我国地面 O₃, NO_x, SO₂ 背景值的观测研究[J]. *应用气象学报*, 1997, **18**(1): 53-61.
- [49] 徐晓斌, 丁国安, 李兴生, 等. 龙凤山大气近地层 O₃ 浓度变化及与其它因素的关系[J]. *气象学报*, 1998, **56**(5): 560-572.
- [50] 张远航, 马一琳, 曾立民, 等. 广州市大气中过氧化物的研究[J]. *中国环境科学*, 2001, **21**(3): 221-225.
- [51] 蔡旭晖, 张睿, 宋宇, 等. 北京地区大气 PM₁₀ 和 SO₂ 的背景浓度分析[J]. *气候与环境研究*, 2004, **9**(3): 445-453.
- [52] 白建辉, 王庚辰, 孟昭阳, 等. 华北洁净地区微量气体变化特征的初步研究[J]. *环境科学研究*, 2006, **19**(6): 15-19.
- [53] 刘洁, 张小玲, 谢璞, 等. 上甸子区域本底站大气痕量活性气体的变化规律[J]. *环境化学*, 2007, **26**(5): 693-698.
- [54] 徐晓斌, 林伟立, 颜鹏, 等. 1994—2006 年长江三角洲和东北平原酸性气体浓度变化[J]. *气候变化研究进展*, 2008, **4**(4): 195-201.
- [55] 赵阳, 邵敏, 王琛, 等. 被动采样监测珠江三角洲 NO_x、SO₂ 和 O₃ 的空间分布特征[J]. *环境科学*, 2011, **32**(2): 324-329.

CONTENTS

Pollution of Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmospheric Particulate Matters of Shenzhen	SUN Jian-lin, CHANG Wen-jing, CHEN Zheng-xia, <i>et al.</i> (1513)
Emission Characteristics of VOCs from Typical Restaurants in Beijing	CUI Tong, CHENG Jing-chen, HE Wan-qing, <i>et al.</i> (1523)
Characteristics Analysis of Sulfur Dioxide in Pearl River Delta from 2006 to 2010	LI Fei, TAN Hao-bo, DENG Xue-jiao, <i>et al.</i> (1530)
Comparison Test Between PM _{2.5} Continuous Monitoring System and Manual Sampling Analysis for PM _{2.5} in Ambient Air	WANG Qiang, ZHONG Qi, CHI Ying, <i>et al.</i> (1538)
Determination and Emission of Condensable Particulate Matter from Coal-fired Power Plants	PEI Bing (1544)
Potential Carbon Fixation Capability of Non-photosynthetic Microbial Community at Different Depth of the South China Sea and Its Response to Different Electron Donors	FANG Feng, WANG Lei, XI Xue-fei, <i>et al.</i> (1550)
Remote Sensing Estimation of Chlorophyll-a Concentration in Inland Lakes Based on GOCI Image and Optical Classification of Water Body	FENG Chi, JIN Qi, WANG Yan-nan, <i>et al.</i> (1557)
Hydrochemical Characteristics and Sources of Qingshuijiang River Basin at Wet Season in Guizhou Province	LÜ Jie-mei, AN Yan-ling, WU Qi-xin, <i>et al.</i> (1565)
Temporal-spatial Variation and Source Identification of Hydro-chemical Characteristics in Shima River Catchment, Dongguan City	GAO Lei, CHEN Jian-yao, WANG Jiang, <i>et al.</i> (1573)
Response and Control Factors of Groundwater to Extreme Weather, Jiguan Cave, Henan Province, China	LIU Xiao, YANG Yan, PENG Tao, <i>et al.</i> (1582)
Impact of Rocky Desertification Treatment on Underground Water Chemistry and Dissolved Inorganic Carbon Isotope in Karst Areas	XIAO Shi-zhen, XIONG Kang-ning, LAN Jia-cheng, <i>et al.</i> (1590)
Difference of Karst Carbon Sink Under Different Land Use and Land Cover Areas in Dry Season	ZHAO Rui-yi, LIANG Zuo-bing, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (1598)
Vertical Migration Characteristics of Organochlorine Pesticides in Overlying Soil in Karst Terranes and Its Impact on Groundwater	SUN Yu-chuan, WANG Yong-qi, LIANG Zuo-bing, <i>et al.</i> (1605)
Pollution Status and Migration of Mercury in the Sediments of Nansi Lake in Shandong Province	CAO Fei-fei, YANG Li-yuan, PANG Xu-gui, <i>et al.</i> (1615)
Response of Sediment Micro Environment and Micro Interface to Physical Disturbance Intensity Under the Disturbance of <i>Chironomus plumosus</i>	SHI Xiao-dan, LI Yong, LI Da-peng, <i>et al.</i> (1622)
Characteristics of Atmospheric Nitrogen Wet Deposition and Associated Impact on N Transport in the Watershed of Red Soil Area in Southern China	HAO Zhuo, GAO Yang, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (1630)
Effect of Different Purple Parent Rock on Removal Rates of Nitrogen, Phosphorus and Organics in Landscape Water	HUANG Xue-jiao, LIU Xiao-chen, LI Zhen-lun, <i>et al.</i> (1639)
Effects of <i>Litchi chinensis</i> Defoliation on Growth and Photosynthesis of <i>Microcystis aeruginosa</i>	WANG Xiao-xiong, JIANG Chen-chun, LI Jin-wei, <i>et al.</i> (1648)
Toxicity of <i>Coptis chinensis</i> Rhizome Extracts to Green Algae	CHEN Ya-nan, YUAN Ling (1655)
Formation Mechanism of the Disinfection By-product 1,1-Dichloroacetone in Drinking Water	DING Chun-sheng, MENG Zhuang, XU Yang-yang, <i>et al.</i> (1662)
Degradation Kinetics and Formation of Disinfection By-products During Linuron Chlorination in Drinking Water	LING Xiao, HU Chen-yan, CHENG Ming, <i>et al.</i> (1668)
Interference for Various Quench Agents of Chemical Disinfectants on Detection of Endotoxin Activities in Water	ZHANG Can, LIU Wen-jun, SHI Yun, <i>et al.</i> (1674)
Ammonium Adsorption Characteristics in Aqueous Solution by Dairy Manure Biochar	MA Feng-feng, ZHAO Bao-wei, DIAO Jing-ru, <i>et al.</i> (1678)
Absorption of Uranium with Tea Oil Tree Sawdust Modified by Succinic Acid	ZHANG Xiao-feng, CHEN Di-yun, PENG Yan, <i>et al.</i> (1686)
Effect of Membrane Wettability on Membrane Fouling and Chemical Durability of SPG Membranes	ZHANG Jing, XIAO Tai-min, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (1694)
TiO ₂ -Induced Photodegradation of Levofloxacin by Visible Light and Its Mechanism	GUO Hong-sheng, LIU Ya-nan, QIAO Qi, <i>et al.</i> (1700)
Performance of Novel Macromolecule Flocculant in the Treatment of Wastewater Containing Cr(VI) Ions	WANG Gang, DU Feng-ling, CHANG Qing, <i>et al.</i> (1707)
On-line Estimation for the Amount of Stored PHA in Activated Sludge Based on OUR-HPR Measurements	ZENG Shan-wen, WANG Ze-yu, GAO Jing, <i>et al.</i> (1713)
Formation Mechanism of Self-forming Dynamic Membrane During Separation of High-concentration Sewage Sludge Fermented for Acid Production	HUANG Shuai, LIU Hong-bo, YIN Bo, <i>et al.</i> (1720)
Influence of Air Flux on Municipal Sludge Biodrying in a Pilot Scale Test	ZHANG Yu, HAN Rong, LU Wen-jing, <i>et al.</i> (1727)
Extraction of Heavy Metals from Sludge Using Biodegradable Chelating Agent <i>N,N</i> -bis(carboxymethyl) Glutamic Acid Tetrasodium	WU Qing, CUI Yan-rui, TANG Xiao-xiao, <i>et al.</i> (1733)
Biodiversity and Function Analyses of BIOLAK Activated Sludge Metagenome	TIAN Mei, LIU Han-hu, SHEN Xin, <i>et al.</i> (1739)
Characteristics of Nitrogen Removal by a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacterium YL	LIANG Xian, REN Yong-xiang, YANG Lei, <i>et al.</i> (1749)
Biodegradation Characteristics and Kinetics of <i>p</i> -nitrophenol by Strain <i>Arthrobacter</i> sp. CN2	REN Lei, SHI Yan-hua, JIA Yang, <i>et al.</i> (1757)
Biodegradation of Pyrene by Intact Cells and Spores of <i>Brevibacillus brevis</i>	LIU Zhi-chen, YE Jin-shao, PENG Hui, <i>et al.</i> (1763)
Investigation of Antibiotic Resistance Genes (ARGs) in Landfill	LI Lei, XU Jing, ZHAO You-cai, <i>et al.</i> (1769)
Investigation of Antibiotic Resistance of Indigenous Bacteria and Abundance of Class I Integron in Matrix of Constructed Wetlands of Different Configurations	MAI Xiao-bei, TAO Ran, YANG Yang, <i>et al.</i> (1776)
Effects of Nitrate and CH ₄ on Anaerobic Oxidation of BETX in Landfill Cover Soils	LIU Rong, LONG Yan, WANG Li-li, <i>et al.</i> (1785)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Planted Larch Forest in Shanxi Plateau	YAN Jun-xia, LI Hong-jian, LI Jun-jian, <i>et al.</i> (1793)
Effects of Nitrogen Fertilization on Soil Respiration and Temperature Sensitivity in Spring Maize Field in Semi-Arid Regions on Loess Plateau	JIANG Ji-shao, GUO Sheng-li, WANG Rui, <i>et al.</i> (1802)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in the Street Dusts in Xuanwei and Their Health Risk Assessment	ZHANG Wen-chao, LÜ Sen-lin, LIU Ding-yu, <i>et al.</i> (1810)
Spatial Distribution of Magnetic Properties of Street Dust in Baoji City and Its Implications of Environment	ZHANG Jun-hui, WANG Jin, ZHANG Jian, <i>et al.</i> (1818)
Effect of Long-term Fertilizer Application on the Stability of Organic Carbon in Particle Size Fractions of a Paddy Soil in Zhejiang Province, China	MAO Xia-li, LU Kou-ping, SUN Tao, <i>et al.</i> (1827)
Effects of Different Reclaimed Scenarios on Soil Microbe and Enzyme Activities in Mining Areas	LI Jun-jian, LIU Feng, ZHOU Xiao-mei (1836)
Soil Microorganism Characteristics and Soil Nutrients of Different Wetlands in Sanjinag Plain, Northeast China	XIAO Ye, HUANG Zhi-gang, WU Hai-tao, <i>et al.</i> (1842)
Strengthening Effects of Sodium Salts on Washing Kerosene Contaminated Soil with Surfactants	HUANG Zhao-lu, CHEN Quan-yuan, ZHOU Juan, <i>et al.</i> (1849)
Effects and Biological Response on Bioremediation of Petroleum Contaminated Soil	YANG Qian, WU Man-li, NIE Mai-qian, <i>et al.</i> (1856)
Enhanced Phytoremediation of Heavy Metals from Contaminated Soils Using <i>Sedum alfredii</i> Hance with Biodegradable Chelate GLDA	WEI Ze-bin, CHEN Xiao-hong, WU Qi-tang, <i>et al.</i> (1864)
Speciation Characteristics and Bioavailability of Heavy Metals in Oasis Soil Under Pb, Zn Combined Stress	JIN Cheng, ZHAO Zhuan-jun, NAN Zhong-ren, <i>et al.</i> (1870)
Influence of Sulfur on the Formation of Fe-Mn Plaque on Root and Uptake of Cd by Rice (<i>Oryza sativa</i> L.)	WANG Dan, LI Xin, WANG Dai-chang, <i>et al.</i> (1877)
Effects of Ozone on Photosynthesis of Several Plants	LI Miao-miao (1888)
A Method Research on Environmental Damage Assessment of a Truck Rollover Pollution Incident	CAI Feng, ZHAO Shi-bo, CHEN Gang-cai, <i>et al.</i> (1902)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2015年5月15日 第36卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 5 May 15, 2015

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行