

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第5期

Vol.34 No.5

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

基于过氧化物的消毒技术研究进展	习海玲, 赵三平, 周文 (1645)
环境损害评估: 国际制度及对中国的启示	张红振, 曹东, 於方, 王金南, 齐霖, 贾倩, 张天柱, 骆永明 (1653)
不同国家基于健康风险的土壤环境基准比较研究与启示	徐猛, 颜增光, 贺萌萌, 张超艳, 侯红, 李发生 (1667)
蚯蚓堆肥及蝇蛆生物转化技术在有机废弃物处理应用中的研究进展	张志剑, 刘萌, 朱军 (1679)
基于生态分区的我国湖泊营养盐控制目标研究	刁晓君, 席北斗, 何连生, 邓祥征, 吴锋, 王鹏腾 (1687)
我国东北地区地表水酸化现状	徐光仪, 康荣华, 罗遥, 段雷 (1695)
西安市对渭河水质的影响分析	于婕, 李怀恩 (1700)
极端干旱水文年(2011年)夏季珠江口溶解氧的分布特征及影响因素研究	叶丰, 黄小平, 施震, 刘庆霞 (1707)
应用相平衡分配法建立湘江衡阳段沉积物重金属质量基准	韩超南, 秦延文, 郑丙辉, 张雷, 曹伟 (1715)
长江口海域底栖生态环境质量评价——AMBI和M-AMBI法	蔡文倩, 孟伟, 刘录三, 朱延忠, 周娟 (1725)
温州城市降雨径流中BOD ₅ 和COD污染特征及其初始冲刷效应	王骏, 毕春娟, 陈振楼, 周栋 (1735)
影响悬浮颗粒物吸收系数测量的相关因素研究	余小龙, 沈芳, 张晋芳 (1745)
香溪河库湾春季pCO ₂ 与浮游植物生物量的关系	袁希功, 黄文敏, 毕永红, 胡征宇, 赵玮, 朱孔贤 (1754)
紊流脉动强度对藻类生长及水环境的影响研究	雷雨, 龙天渝, 伞磊, 安强, 朱芳 (1761)
高铁酸钾对水中藻类及其次生臭味污染物二甲基三硫醚同步去除研究	马晓雁, 张泽华, 王红宇, 胡仕斐, 李青松 (1767)
纳米Fe ₃ O ₄ -H ₂ O ₂ 非均相Fenton反应催化氧化邻苯二酚	何洁, 杨晓芳, 张伟军, 王东升 (1773)
水中茶普生的紫外光降解机制及其产物毒性研究	马杜娟, 刘国光, 吕文英, 姚锐, 周丽华, 谢成屏 (1782)
酸活化赤泥催化臭氧氧化降解水中硝基苯的效能研究	康雅凝, 李华楠, 徐冰冰, 齐飞, 赵伦 (1790)
镉污染应急处置含镉絮体稳定性实验研究	柳王荣, 魏清伟, 杨仁斌, 许振成, 曾东 (1797)
基于光学在线监测及形态学研究的絮凝体强度分析方法	金鹏康, 冯永宁, 王宝宝, 王晓昌 (1802)
不同电子供体下三氯苯酚的还原脱氯机制研究	万金泉, 胡梦蝶, 马邕文, 黄明智 (1808)
壳聚糖季铵盐磁性颗粒的制备及其对甲基橙的吸附效果	张聪璐, 胡筱敏, 英诗颖, 王芳 (1815)
城市污水二级出水超滤膜污染与膜特性的研究	孟晓荣, 张海珍, 王磊, 王旭东, 赵亮 (1822)
倒置A ² /O-MBR处理城市污水的中试研究	张健君, 邹高龙, 杨淑芳, 丁星, 王莉, 毛乾庄, 杨丹 (1828)
不同电子供体的硫自养反硝化脱氮实验研究	袁莹, 周伟丽, 王晖, 何圣兵 (1835)
短程同步硝化反硝化过程的脱氮与N ₂ O释放特性	梁小玲, 李平, 吴锦华, 王向德 (1845)
基于固相萃取的水中多种有毒有害有机污染物富集方法优化	张明全, 李锋民, 吴乾元, 胡洪营 (1851)
多环麝香污染胁迫对蚯蚓特异性蛋白基因表达的影响	陈春, 刘潇威, 郑顺安, 周启星, 李松 (1857)
浙江省制药行业典型挥发性有机物臭氧产生潜力分析及健康风险评价	徐志荣, 王浙明, 许明珠, 何华飞 (1864)
苯系物光催化开环降解产物低级醛类的健康效应	赵伟荣, 廖求文, 杨亚楠, 戴九松 (1871)
四川妇女血清中多溴联苯醚的浓度水平与组成特征	邵敏, 陈永亨, 李晓宇 (1877)
咪唑类离子液体毒性的QSAR/QSPR研究	赵继红, 赵永升, 张宏忠, 张香平 (1882)
宁夏石嘴山河滨工业园区表层土壤重金属污染的时空特征	樊新刚, 米文宝, 马振宁, 王婷玉 (1887)
内蒙古包头白云鄂博矿区及尾矿区周围土壤稀土污染现状和分布特征	郭伟, 付瑞英, 赵仁鑫, 赵文静, 郭江源, 张君 (1895)
福建省重点城市路面尘负荷及化学组成研究	郑桢, 杨冰玉, 吴水平, 王新红, 陈晓秋 (1901)
重金属污染场地电阻率法探测数值模拟及应用研究	王玉玲, 能昌信, 王彦文, 董路 (1908)
丛枝菌根真菌对稀土尾矿中大豆生长和稀土元素吸收的影响	郭伟, 赵仁鑫, 赵文静, 付瑞英, 郭江源, 张君 (1915)
海洋细菌N3对几种赤潮藻的溶藻效应	史荣君, 黄洪辉, 齐占会, 胡维安, 田梓杨, 戴明 (1922)
1株分离自煤矿废水的铁硫氧化细菌LY01的鉴定及其氧化特性研究	刘玉娇, 杨新萍, 王世梅, 梁银 (1930)
1株苯并[a]芘高效降解菌的筛选与降解特性	蔡瀚, 尹华, 叶锦韶, 常晶晶, 彭辉, 张娜, 何宝燕 (1937)
2,2',4,4'-四溴联苯醚的好氧微生物降解	张姝, Giulio Franco, 李晓豹, 卢晓霞, 侯珍, 杨君君 (1945)
养猪废水培养微生物絮凝剂产生菌群B-737及发酵特性	裴瑞林, 信欣, 张雪乔, 周迎芹, 姚力, 羊依金 (1951)
1997~2011年北京市空气中酸性物质与降水组分变化趋势的相关性分析	陈圆圆, 田贺忠, 杨懂艳, 邹本东, 鹿海峰, 林安国 (1958)
黄山降水酸度及电导率特征分析	石春娥, 邓学良, 吴必文, 洪杰, 张苏, 杨元建 (1964)
夏季黄山不同高度大气气溶胶水溶性离子特征分析	文彬, 银燕, 秦彦硕, 陈魁 (1973)
广州秋季灰霾污染过程大气颗粒物有机酸的污染特征	谭吉华, 赵金平, 段菁春, 马永亮, 贺克斌, 杨复沫 (1982)
福建省三大城市冬季PM _{2.5} 中有机碳和元素碳的污染特征	陈衍婷, 陈进生, 胡恭任, 徐玲玲, 尹丽倩, 张福旺 (1988)
上海市含碳大气颗粒物的粒径分布	袁宁, 刘卫, 赵修良, 王广华, 姚剑, 曾友石, 刘遂庆 (1995)
上海市浦东城区二次气溶胶生成的估算	崔虎雄, 吴迺名, 段玉森, 伏晴艳, 张懿华, 王东方, 王茜 (2003)
沙尘暴期间上海市大气颗粒物元素地球化学特征及其物源示踪意义	钱鹏, 郑祥民, 周立旻 (2010)
厦门秋季近郊地面CO ₂ 浓度变化特征研究	李燕丽, 穆超, 邓君俊, 赵淑惠, 杜可 (2018)
GC-MS和GC-ECD同时在线观测本底大气中的HCFC-142b	郭立峰, 姚波, 周凌晔, 李培昌, 许林 (2025)
城市居家环境空气真菌群落结构特征研究	方治国, 欧阳志云, 刘芃, 孙力, 王小勇 (2031)
城市污水处理厂挥发性芳香烃的气味指纹及定量评价研究	郭薇, 王伯光, 唐小东, 刘舒乐, 何洁, 张春林 (2038)
内河多点分散码头大气污染叠加影响特征	刘建昌, 李兴华, 徐洪磊, 程金香, 王忠岱, 肖杨 (2044)
义马煤中铅的热稳定性及转化行为研究	刘瑞卿, 王钧伟 (2051)
基于能源消费情景模拟的北京市主要大气污染物和温室气体协同减排研究	谢元博, 李巍 (2057)
《环境科学》征订启事(1652) 《环境科学》征稿简则(1789) 信息(1807, 1821, 1881, 1987) 专辑征稿通知(1863)	

厦门秋季近郊近地面 CO₂ 浓度变化特征研究

李燕丽, 穆超, 邓君俊, 赵淑惠, 杜可*

(中国科学院城市环境研究所城市环境与健康重点实验室, 厦门 361021)

摘要: 利用 CO₂ 监测仪在厦门近郊中国科学院城市环境研究所超级监测站进行了秋季 CO₂ 数据采集, 并结合监测站气象要素和气体污染物监测, 分析了近地面 CO₂ 浓度变化特征、风速风向对其变化特征的影响以及 CO₂ 与部分气体污染物的相互关系。结果表明, 厦门近郊秋季近地面 CO₂ 浓度主要集中分布在 375 ~ 415 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 范围内, 约占 70.87%; 近地面大气 CO₂ 日变化曲线呈单峰型结构, CO₂ 浓度日变化范围 375.74 ~ 418.18 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 日平均最高值出现在黎明前后 (408.54 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$), 最小值出现在午后附近 (379.14 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$), 夜晚 (18:00 ~ 05:00, 北京时间) 平均浓度 (400.87 $\pm$ 4.05) $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 高于白天 (06:00 ~ 17:00) 平均浓度 (388.86 $\pm$ 9.40) $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$; 风速日变化曲线与 CO₂ 呈现完全相反的变化趋势, 夜晚时段 (22:00 ~ 04:00) 风速波动范围在 1.0 ~ 1.5 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 对应的 CO₂ 浓度变化平稳, 基本稳定在 (400.72 $\pm$ 2.12) $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。白天时段 (09:00 ~ 18:00) 风速变化范围在 2.0 ~ 2.5 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 对应的 CO₂ 浓度变化范围较大为 379.14 ~ 394.83 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$; 用指数函数模型估测到该站点区域 CO₂ 背景浓度为 386.84 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$; 观测期间该站点主要风向为东北偏东, 统计该方向上 CO₂ 浓度与风速的相关关系, 得出 CO₂ 浓度与风速呈极显著负相关 ($r = -0.67$), 相关系数高于所有方向统计的 CO₂ 浓度与风速的相关系数 ($r = -0.41, P < 0.01$), 不同风向上 CO₂ 浓度贡献来源不同; 此外, CO₂ 浓度与温度、辐射量呈负相关 ($r = -0.541/-0.515, P < 0.01$), 与湿度呈正相关 ($r = 0.66, P < 0.01$); 与其它大气气体污染物相比 CO₂ 与 CO、NO 的相关程度较高 ($r = 0.469/0.436, P < 0.01$), 与 SO₂ 相关程度较弱 ($r = 0.126, P < 0.01$), 经分析推测监测站点区域 CO₂ 排放源部分来自机动车排放, 而燃煤排放贡献较小。

关键词: CO₂; 风速; 日变化; 气体污染物; 厦门

中图分类号: X831 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)05-2018-07

Near Surface Atmospheric CO₂ Variations in Autumn at Suburban Xiamen, China

LI Yan-li, MU Chao, DENG Jun-jun, ZHAO Shu-hui, DU Ke

(Key Laboratory of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China)

Abstract: Near surface concentrations of carbon dioxide (CO₂) were measured at the super station of atmospheric monitoring located at the suburban area of Xiamen in the fall of 2011. The results were analyzed together with the meteorological data and concentrations of other gaseous pollutants to study the diurnal variations of near-surface atmospheric CO₂ concentration and the relationships of CO₂ with wind speed and gaseous pollutants. The diurnal variation of CO₂ concentrations showed a single-peak pattern with the highest value (408.54 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$) observed in dawn when the atmosphere was stable and the lowest value (379.14 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$) was recorded in late afternoon following several hours of relatively unstable condition. The average CO₂ concentration at night (400.87 $\pm$ 4.05) $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ was higher than that of daytime (388.8 $\pm$ 9.40) $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$. Overall, the CO₂ concentrations ranged from 375.74 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ to 418.18 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$. CO₂ and wind speed showed opposite trends. At night, the CO₂ concentration (400.72 $\pm$ 2.12) $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ was stable with wind speed of 1.0-1.5 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. During daytime, the CO₂ concentrations 379.14-394.83 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ were more variable with wind speed of 2.0-2.5 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. The background CO₂ concentration of this site was estimated to be 386.84 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ using an exponential function model. Northeast wind was dominant at this site. The correlation coefficient between the wind speed and the CO₂ concentrations ($r = -0.67, P < 0.01$) was higher for wind direction of NE than other directions ($r = -0.41, P < 0.01$). The source contributions were different for different wind directions. Moreover, the CO₂ concentration had a significant negative correlation with temperature and irradiation, and had a significant positive correlation with humidity. CO₂ had a higher correlation with primary air pollutants CO and NO ($r = 0.469/0.436, P < 0.01$) than SO₂ ($r = 0.126, P < 0.01$), indicating that the source of CO₂ emission in this area was motor vehicle emission in part, with little contribution from coal combustion.

Key words: CO₂; wind speed; diurnal variation; gaseous pollutant; Xiamen

收稿日期: 2012-08-07; 修订日期: 2012-11-12

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41005081)

作者简介: 李燕丽 (1984 ~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为大气环境监测, E-mail: ylli@ iue. ac. cn

* 通讯联系人, E-mail: kdu@ iue. ac. cn

二氧化碳(CO₂)是一种重要的温室气体,在地球气候的形成和气候变迁中起着重要作用^[1,2].其主要源有海洋释放、生物呼吸、化石燃料燃烧等,陆地生态系统光合作用、海洋呼吸、碳沉积等是大气中CO₂的重要汇^[3,4].自工业革命以来,由于人类活动特别是大量化石燃料和森林破坏的影响,CO₂的收支平衡被打破,大气中的CO₂快速增加^[1].美国Mauna Loa观测站监测结果显示^[5],大气中CO₂浓度从1959年的316 μmol·mol⁻¹增至2011年的392 μmol·mol⁻¹.2007年IPCC的报告指出^[6],近年来全球CO₂年平均增长速率为1.9 μmol·(mol·a)⁻¹.大气中CO₂的持续增长给全球气候、生态、经济等各方面造成很大影响,因而受到各国政府以及国内外学者的普遍关注^[7~9].

世界气象组织(WMO)在世界各地建立了很多大气CO₂观测本底站,目前已有60多个国家的200多个站点加入世界气象组织大气本底观测网(WMO/GAW),用于监测CO₂时空变化.在国际上,许多国家同时开展了城市、郊区、乡村的CO₂浓度分布特征的观测^[10~16].我国对于温室气体的观测起步较晚,20世纪80年代以后,中国气象局在青海瓦里关、北京上甸子、浙江临安和黑龙江龙凤山建立了大气本底站,陆续开始温室气体采样工作,得到中国几个典型区域大气CO₂本底浓度变化特征,具有重要的科学意义^[17~19],但本底站观测受到站点数量和分布的限制,很难用于中国具体区域空间分布特征的研究,为准确评估城市温室气体排放情况,了解不同区域受自然和人为活动影响的程度,2010年我国环保部门开始在全国范围内展开31个城市的温室气体监测试点项目.城市是人口、建筑、交通、工业、物流的集中地也是能源消耗的高强度地区,大城市气候领导集团(C40)的研究报告认为城市排放了世界80%的人为温室气体.然而我国真正城市意义的CO₂观测与排放研究相对较少^[20~23].本文以城市CO₂为研究对象,分析了厦门近郊秋季近地面CO₂浓度变化特征及其与大气气体污染物的关系以及气象要素尤其是风对近地面CO₂浓度的影响,以期获取城市CO₂动态排放信息,更准确地监测城市区域CO₂排放变化,提供重要的科学依据与数据支撑.

1 材料与方法

1.1 监测站点

监测点位于厦门近郊的中国科学院城市环境研究所超级监测站楼顶(24°36′42.05″N; 118°03′53.31″E).仪器装置距地面约6.5 m,周围地势开阔,无明显污染排放源.离人口密集区约8 km,离最近的自由公路(车辆稀少)约0.2 km.方圆1 km内只有一个学校,除西南方向有一条水库,其它周围均为建设用地.距离人口聚集地分别为新新村4.3 km,田头0.73 km,灌口镇6.38 km,杏林镇5.53 km,集美区5 km.

1.2 仪器与方法

监测仪器为二氧化碳测量仪(Carbon Dioxide Meter GM70,维萨拉,芬兰),该仪器采用(非分散红外线)单光束、双波长传感器,传感器由光源、干涉计和红外探测器三大部件构成.在可被二氧化碳吸收的波长,光线被气体中的二氧化碳吸收,法布里-珀罗干涉计排除掉所有其它波长,从而使到达红外探测器的光强度只随传感器内二氧化碳的量而变化.仪器出厂前进行了严格校准,校准条件为 $t = 25^{\circ}\text{C}$, $P = 1\,013\text{ hPa}$,校准方法为两点校准法(netherlands measurement institute, NMI),校准时间为2011-03-29.监测期间按照规定进行仪器维护与设置,每周用CO₂标准气体[400.06 μmol·mol⁻¹,空气底气,林德气体(厦门)有限公司]对仪器进行计量,发现仪器运行良好,未出现数据异常情况.按照地面气象数据设定仪器的温度和压力参数,在与设定条件有出入的温度和压力条件下的CO₂测量值按如下公式进行修正:

$$c_{\text{corrected}} = c_{\text{measured}} \frac{P_s \times (t_m + 273)}{(t_s + 273) \times P_m}$$

式中, $c_{\text{corrected}}$ 代表修正后数据, c_{measured} 代表实际测量数据, P_m 和 t_m 分别代表环境中实测压力(hPa)和温度(°C), P_s 和 t_s 分别代表仪器设定的压力(hPa)和温度(°C).仪器设置每隔5 min获取一次数据,连续24 h观测,观测时间2011-09-17~2011-11-14.

1.3 数据处理与质量控制

观测期间,剔除观测过程中偶尔出现的不合理数据(如开机后短暂的负值)后,共获得5 min有效数据12 960组.对数据进行日平均值分析时剔除日有效记录小于18 h的天数,同时剔除了雨天数据以排除降水对CO₂浓度的影响,共获取有效CO₂数据31 d,获取有效CO₂小时数据738个,小时资料完整率为99.19%.将获得的完整有效天数与气象要素及气体污染物数据进行匹配后,用SPSS 18.0进行数据统计分析.

2 结果与讨论

2.1 近地面 CO₂ 浓度变化特征

观测期间厦门近郊秋季近地面 CO₂ 频率分布特征如图 1 所示. 从中可见, 近地面 CO₂ 浓度分布范围为 320 ~ 500 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$. 观测到频率最高的 CO₂ 浓度分布在 395 ~ 405 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 之间, 占有所有站点数据的 16.88%; 其次是 405 ~ 415 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 之间为 15.65%, 385 ~ 390 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 之间为 15.06%, 415 ~ 425 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 之间为 12.34%, 375 ~ 385 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 之间为 10.96%, 分布于 375 ~ 415 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 之间的 CO₂ 浓度占有所有站点数据的 70.87%; CO₂ 浓度数据分布于 425 ~ 435 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 之间的为 8.43%, 365 ~ 375 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 之间为 6.35%, 分布于 365 ~ 435 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 之间的 CO₂ 浓度数据高达 85.56%; 低于 365 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 的占有所有站点数据的 4.59%, 很少的数据分布在 335 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 以下, 高于 455 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 的占有所有站点数据的 4.80%, 同样很少的数据分布在 475 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 以上.

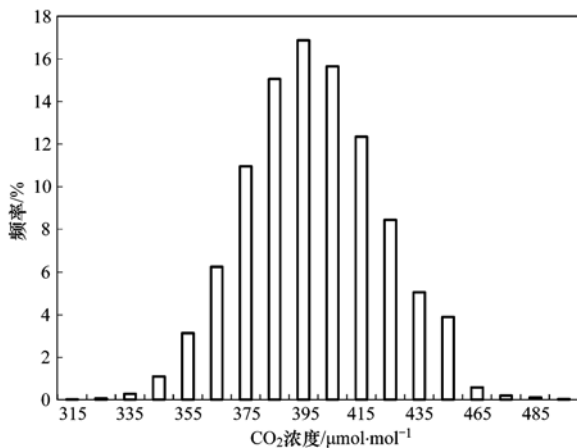
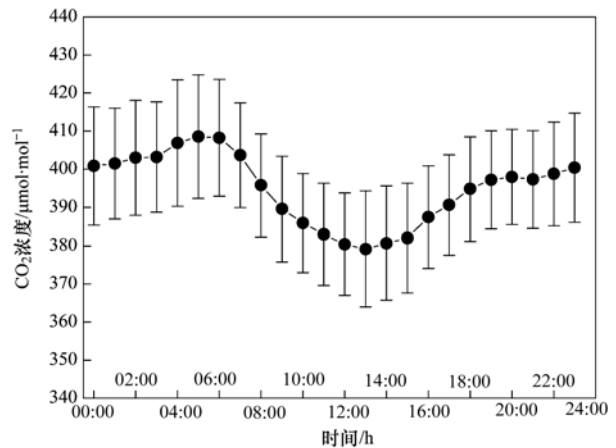


图 1 监测期间 CO₂ 浓度频率分布

Fig. 1 Frequency distribution of 5-min average CO₂ concentrations during the study period

观测期间厦门近郊秋季近地面 CO₂ 浓度的日变化特征如图 2 所示. 从中可知, 近地面 CO₂ 浓度表现为夜晚高于白天, 夜晚 (18:00 ~ 05:00) 平均浓度 400.87 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 白天 (06:00 ~ 17:00) 平均浓度 388.86 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 白天 CO₂ 浓度变化范围为 379.14 ~ 408.23 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 夜晚 CO₂ 浓度变化范围为 397.21 ~ 408.54 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ (以小时平均计算). 秋季 CO₂ 浓度全天变化范围 375.74 ~ 418.18 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 平均变化幅度 39.83 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$. CO₂

日变化曲线呈单峰型结构, 最高值出现在早晨 05:00 ~ 06:00 附近, 为 408.54 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 随后 CO₂ 浓度开始下降, 直至下午 13:00 附近达到最小值, 为 379.14 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 随后 CO₂ 浓度继续上升, 至 20:00 附近出现了一个不明显的次峰值, 为 397.21 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 之后 CO₂ 浓度在夜间继续小幅度上升直至凌晨达到一天的最大值.



误差棒是小时平均值的标准差

图 2 观测期间 CO₂ 浓度日变化特征

Fig. 2 Diurnal variation of CO₂ concentrations in suburban Xiamen in autumn

近地面 CO₂ 出现上述日变化的原因在于: 白天由于对流输送与光合作用等汇比较活跃, 尤其到下午 13:00 ~ 15:00 对流输送和光合作用的程度达到顶峰, 也就出现了一天中 CO₂ 浓度的最低值. 而到晚上汇的作用减弱, 而 CO₂ 的源在继续排放, 晚上 20:00 附近的高值可能与车辆、餐饮等排放有关, 之后这些活动停止, CO₂ 的排放源减少, CO₂ 浓度随之短暂降低, 这种降低可能与夜间的微弱气象扩散有关. 但由于晚上大气稳定度以及大气边界层的作用, 使得 CO₂ 浓度得到积累而上升, 因此晚上浓度一般高于白天. 王长科等^[20] 研究表明, 北京市秋季大气 CO₂ 浓度, 全天最低值出现在 15:00 前后, 最高值在 22:00 出现. 胡晏玲^[24] 研究结果表明, 乌鲁木齐秋季大气 CO₂ 浓度, 峰值出现在夜间 23:00 ~ 24:00, 次高峰出现在早上 08:00, 全天谷值出现在下午 18:00. 除去因所处经度不同导致的时差外, 这可能与大气 CO₂ 浓度测量所处的地理位置、地形地貌以及不同的气候条件等有关. Rice 等^[25] 对美国俄勒冈州波特兰市一乡村站点进行了大气 CO₂ 浓度监测 (2009 年 7 ~ 12 月) 结果表明, CO₂ 小时平均浓度最高值出现在当地时间早上 05:00 ~ 08:00, 最

低浓度出现在下午 03:00 ~ 05:00, 这一特征与生物活动的联合作用(光合和呼吸作用)及区域边界层高度变化有关。

2.2 近地面 CO₂ 浓度与风向、风速的关系

影响 CO₂ 浓度的主要因素有研究区域的地理特征, CO₂ 人为源的变化, 生物过程(光合和呼吸作用), 大气边界层状况, 气象要素的变化(风速、温度、气压)等。分析气象要素与 CO₂ 浓度的关系有助于判断区域内 CO₂ 浓度变化的主要驱动力, 气象要素被认为是 CO₂ 源变化的第二控制因素^[13]。表 1 给出了观测期间气象要素的统计结果及其与 CO₂ 的相关系数。从中可知, CO₂ 与温度、辐射及风速呈

负相关, 相关系数 r 分别为 -0.54 、 -0.52 、 -0.41 ($P < 0.01$), 即随着温度、辐射、风速的升高, CO₂ 浓度降低, 白天 CO₂ 浓度与温度相关系数 $r = -0.62$ ($P < 0.01$), 晚上 CO₂ 浓度与温度的相关系数为 $r = -0.25$ ($P < 0.01$), 这可能与白天太阳辐射造成的温度、辐射、风速增加从而促进 CO₂ 的混合导致 CO₂ 浓度降低有关。CO₂ 与湿度相关性较高, 相关系数为 0.66 , 厦门常年气候湿润, 植被覆盖率高, 表 1 显示观测期间平均相对湿度为 64.60% 。从 CO₂ 排放来看, 这可能与湿度高有利于土壤呼吸^[26]和植物呼吸有关。CO₂ 与大气压相关性较弱, 相关系数为 -0.24 。

表 1 观测期间气象要素及其与 CO₂ 浓度的相关统计¹⁾

Table 1 Statistics of meteorological parameters and correlation coefficient with CO ₂					
项目	风速/m·s ⁻¹	温度/℃	湿度/%	大气压/hPa	辐射/W·m ⁻²
平均值	1.75	24.63	64.60	1 012.94	124.74
最大值	3.69	28.93	92.98	1 018.15	236.89
最小值	0.75	19.13	47.89	1 004.24	10.14
标准差	0.65	2.38	10.92	2.93	58.21
相关系数 r	-0.41^{**}	-0.54^{**}	0.66^{**}	-0.24^{**}	-0.52^{**}

1) 表中为观测期间的小时平均值, ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关

不同风向与风速的气团会导致 CO₂ 浓度的升高或降低^[27]。由图 3 可知, 观测期间的主要风向为东北偏东(包括 NE、ENE、E 风向), 此风向群上平均风速为 $(2.21 \pm 0.12) \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, CO₂ 平均浓度为 $(391.10 \pm 1.47) \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 统计该方向上 CO₂ 浓度与风速的相关关系, 发现 CO₂ 浓度与风速呈极显著负相关($r = -0.67$), 相关系数高于所有方向统计的 CO₂ 浓度与风速的相关系数($r = -0.41$, $P < 0.05$)。由图 4 可知, 从 SSW 到 WNW 风向, 平均风速 $0.88 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 平均 CO₂ 浓度为 $405.00 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 该风向群上 CO₂ 浓度的主要贡献来自于人口聚集地 W 方向的灌口镇与 SSW 方向上的杏林镇。在 NW、NNW 风向, 平均风速为 $0.84 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 平均 CO₂ 浓度为 $404.02 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 该风向群上 CO₂ 浓度的主要贡献主要来自山体林地和部分农田。以上两组风向上 CO₂ 浓度值均高于统计的所有风向上 CO₂ 浓度平均值 $396.98 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。从 ESE ~ SSE 风向上, 平均风速为 $1.40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 平均 CO₂ 浓度为 $389.32 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 低于统计的所有风向上 CO₂ 浓度平均值 $396.98 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 该风向上 CO₂ 浓度变化的主要贡献为集美与厦门岛之间的浔江海域。从海面来的 CO₂ 浓度低于农田、林地和人口聚居地方向, 其原因可能有两种, 即来自海上的风

速大导致 CO₂ 浓度降低, 或海面方向 CO₂ 浓度原本低于农田和人口聚集区。具体原因可能需要对这几种不同土地类型进行 CO₂ 浓度监测以及对同一风向不同风速下进行 CO₂ 浓度监测来研究。

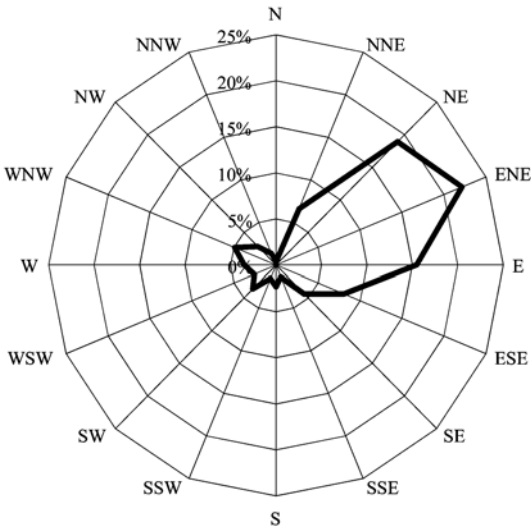


图 3 观测期间风向玫瑰图

Fig. 3 Wind rose in suburban Xiamen during the study period

风速与 CO₂ 浓度的日变化关系如图 5 所示, 风速与 CO₂ 浓度曲线呈相反趋势变化。夜间在(18:00 ~ 05:00)时段, CO₂ 浓度是一个先逐渐增加后平稳变化的过程, 总体是明显的增加趋势。但在 22:00 ~

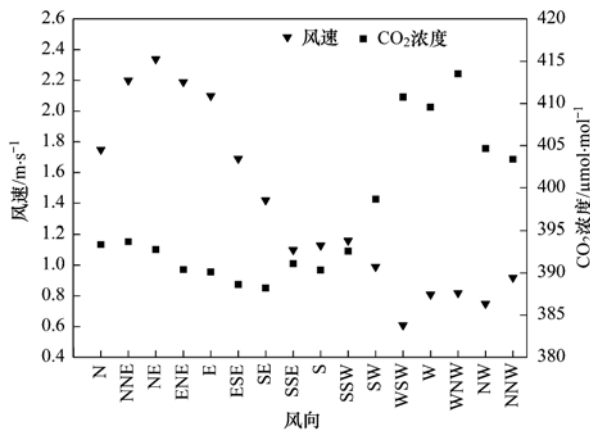


图4 观测期间各风向上 CO_2 平均浓度与平均风速

Fig. 4 CO_2 concentration and wind speed in each wind direction in suburban Xiamen during the study period

04:00 时段, 风速波动范围在 $1.0 \sim 1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 对应的 CO_2 浓度变化平稳, 基本维持在 $(400.72 \pm 2.12) \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$. 白天时段 (09:00 ~ 18:00) 风速变化范围在 $2.0 \sim 2.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 对应的 CO_2 浓度变化范围较大 ($379.14 \sim 394.83 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$), 这与白天较强的垂直对流运动促进 CO_2 在垂直方向上的混合从而影响近地面 CO_2 浓度有关.

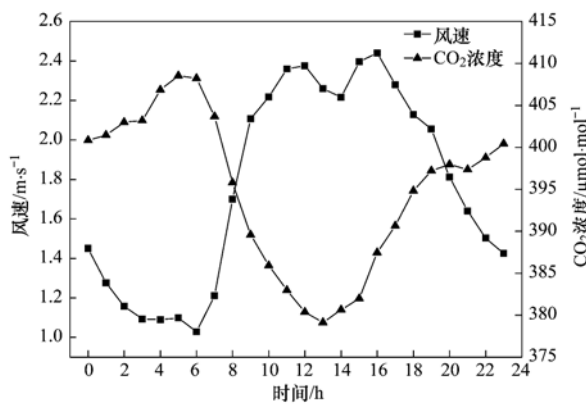


图5 监测期间风速与 CO_2 浓度日变化曲线

Fig. 5 Diurnal variation of hourly mean wind speeds and CO_2 concentrations during the study period

正午时刻, 太阳辐射通常达到最强, 引起强烈的空气对流运动, 导致大气边界层充分的混合, CO_2 浓度降到一天中的最低值. 此最低值可被看作是最具代表的区域 CO_2 浓度背景值. 而当持续微风天气时, 加强了大气边界层的混合, 导致 CO_2 浓度变化非常不明显, 也被认为最适合 CO_2 背景浓度的测量^[28]. CO_2 浓度与风速的关系可以用一个指数函数来表示^[28]:

$$\text{CO}_2 = a + b \times e^{-c \times \text{windspeed}} \quad (1)$$

式中, a 代表渐近线, 这种演算法可以用来估测区域 CO_2 浓度背景值. 用监测站点获得的数据进行拟合得到的结果为:

$$\text{CO}_2 = 386.84 + 30.17 \times e^{-0.96 \times \text{windspeed}} \quad (2)$$

CO_2 浓度与风速的相互作用关系如图 6 所示, 获得渐近线的值为 $386.84 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 在 95% 置信水平上所有拟合参数都达到显著水平, 拟合优度 $r = -0.49$, 渐近线的值代表了区域 CO_2 背景浓度. CO_2 浓度的平均值为 $394.92 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 标准差为 $16.78 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 秋季 CO_2 平均浓度高于区域背景浓度. 由图 6 可知, 当风速低于 $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, CO_2 浓度最高可达 $450 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, CO_2 浓度集中分布在 $370 \sim 450 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 之间, 当风速高于 $2.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 90% 的 CO_2 浓度分散分布在 $400 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 以下.

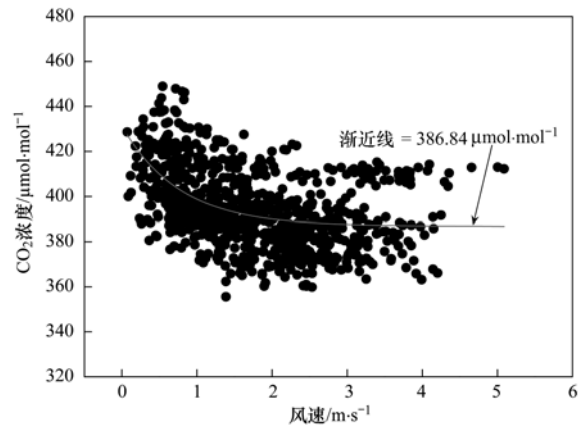


图6 监测期间 CO_2 浓度与风速的关系

Fig. 6 Relationship between mean CO_2 concentration and wind speed during the study period (asymptote = 386.84)

2.3 近地面 CO_2 浓度与主要气体污染物的关系

超级监测站点同时监测气象要素和大气气体污染物, 同时统计了 CO_2 浓度与部分气体污染物的关系. 由图 7 可知, 随着 CO_2 浓度的增加, 气体污染物 NO 、 CO 、 SO_2 呈现上升的趋势. 统计分析表明, CO_2 与 CO 、 NO 的相关程度较高, ($r = 0.47/0.44$, $P < 0.01$), 与 SO_2 相关程度较弱 ($r = 0.13$, $P < 0.01$).

CO 和 NO 一般由机动车排放产生, Rice 等^[25] 研究表明, CO 和 NO 与 CO_2 呈现出显著的相关关系 ($r^2 = 0.80/0.77$), 这种强相关性表明在美国波特兰区域的 CO_2 浓度主要来源为汽车排放, 并且这个结果与其用同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 追踪观测结果以及排放清单预算结果一致. 可见, 超级监测站点 CO 、 NO 与

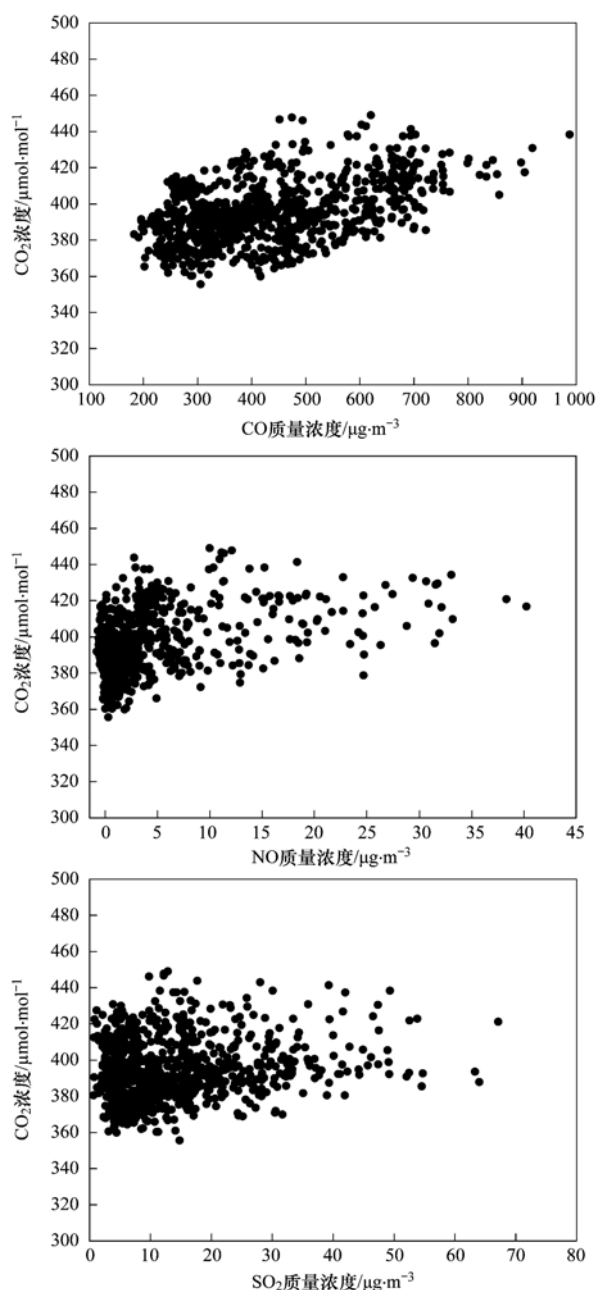


图7 监测期间 CO₂ 浓度与主要气体污染物的关系

Fig. 7 Relationship between CO₂ and three gaseous pollutants during the study period

CO₂ 相关程度 ($r = 0.47/0.44$) 相对 Rice 的研究 ($r^2 = 0.80/0.77$) 较低,可能是由于附近并没有明显的机动车 CO₂ 污染排放源. 根据本研究 CO₂ 与 CO 和 NO 的相关系数,结合站点周围的环境,推测监测站点区域 CO₂ 排放源部分来自机动车排放.

CO₂ 与 SO₂ 相关程度较弱,相关系数为 0.13, SO₂ 主要来源是燃煤,占总排放量的 90% 左右,本站点位于厦门市集美区城市环境研究所内(岛外),附近并没有工业及生活 SO₂ 污染排放源,SO₂ 平均浓

度为 $14.11 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 低于《环境空气质量》(GB 3095-2012)一级标准 $20 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 林长城等^[29]对厦门市 4 个监测站(鼓浪屿、大生理、湖里和洪文)3 种污染物进行了空气质量空间分布分析,从污染物的平均状况来看,因厦门市本岛上没有大型耗能排污企业,岛上各个监测站的 SO₂ 年平均浓度基本一致,分别为 25、26、27、24 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 可见,此区域 CO₂ 排放基本不受燃煤的影响.

3 结论

(1)厦门市近郊秋季近地面 CO₂ 日变化曲线呈单峰型结构,日平均浓度 (394.92 ± 16.78) $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$,夜晚浓度高于白天,CO₂ 浓度主要集中在 375 ~ 415 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 范围内,约占 70.87%.

(2)风速的日变化曲线与 CO₂ 呈现出相反的变化趋势,夜晚时段风速较小且波动范围较小时,CO₂ 浓度基本呈稳定趋势,白天时段,风速相对较大且波动范围较大,对应 CO₂ 浓度变化范围较大. 用指数模型表征 CO₂ 浓度与风速的关系,估测到此站点区域 CO₂ 背景浓度为 386.84 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$.

(3)观测期间的主要风向为东北偏东,该方向上 CO₂ 浓度与风速的相关系数高于所有方向统计的 CO₂ 浓度与风速的相关系数 ($r = -0.67 > r = -0.41$, $P < 0.01$),此外,不同风向上 CO₂ 浓度贡献来源不同,从海面来的风所带来的 CO₂ 浓度低于从人口聚集地、山体林地、农田来的风所带来的 CO₂ 浓度.

(4)CO₂ 浓度与气象要素如温度、辐射、风速呈负相关,与湿度呈正相关. 与其它大气气体污染物相比 CO₂ 与 CO、NO 的相关程度相对较高,与 SO₂ 相关程度相对较弱. 经分析推测本区域 CO₂ 排放源部分来自机动车排放,且燃煤排放贡献较小.

致谢:感谢中国科学院城市环境研究所数字城市环境网提供大气气体污染物数据.

参考文献:

- [1] Houghton J T, Filho L G M, Callander B A, et al. Climate Change 1995: The science of climate change [J]. Weather, 1996, **51**(11): 393.
- [2] Cao M K, Woodward F I. Dynamic responses of terrestrial ecosystem carbon cycling to global climate change [J]. Nature, 1998, **393**(6682): 249-252.
- [3] Gunter W D, Wong S, Cheel D B, et al. Large CO₂ sinks: their role in the mitigation of greenhouse gases from an international, national (Canadian) and provincial (Alberta) perspective [J]. Applied Energy, 1998, **61**(4): 209-227.

- [4] Raich J W, Potter C S. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, **9** (1): 23-36.
- [5] ftp://ftp.cmdl.noaa.gov/ccg/CO₂/trends/CO₂_annmean_mlo.txt.
- [6] IPCC. Summary for policymakers. Climate change 2007: the physical science basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [7] Henninger S, Kuttler W. Near surface carbon dioxide within the urban area of Essen[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2010, **35**(1-2): 76-84.
- [8] Lei L P, Liu Q, Zhang L, *et al.* A preliminary investigation of CO₂ and CH₄ concentration variations with the land use in Northern China by GOSAT[A]. In: IEEE. Geoscience and Remote Sensing Symposium[C]. USA: IEEE Conference Publications, 2010. 1141-1144.
- [9] 胡顺星, 赵培涛, 汪少林. ARL-1 Raman 激光雷达系统探测大气二氧化碳[J]. *大气与环境光学学报*, 2009, **4**(6): 401-405.
- [10] Büns C, Kuttler W. Path-integrated measurements of carbon dioxide in the urban canopy layer[J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **46**: 237-247.
- [11] Pérez I A, Sánchez M L, García M A, *et al.* Daily and annual cycle of CO₂ concentration near the surface depending on boundary layer structure at a rural site in Spain[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2009, **98**(3-4): 269-277.
- [12] George K, Ziska L H, Bunce J A, *et al.* Elevated atmospheric CO₂ concentration and temperature across an urban-rural transect[J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(35): 7654-7665.
- [13] Idso S B, Idso C D, Balling R C. Seasonal and diurnal variations of near-surface atmospheric CO₂ concentration within a residential sector of the urban CO₂ dome of Phoenix, AZ, USA[J]. *Atmospheric Environment*, 2002, **36**(10): 1655-1660.
- [14] Gratani L, Varone L. Daily and seasonal variation of CO₂ in the city of Rome in relationship with the traffic volume[J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(14): 2619-2624.
- [15] Idso C D, Idso S B, Balling R C. An intensive two-week study of an urban CO₂ dome in Phoenix, Arizona, USA[J]. *Atmospheric Environment*, 2001, **35**(6): 995-1000.
- [16] Pérez I A, Sánchez M L, García M A, *et al.* Analysis of CO₂ daily cycle in the low atmosphere at a rural site[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, **431**: 286-292.
- [17] 刘立新, 周凌晞, 张晓春, 等. 我国 4 个国家级本底站大气 CO₂ 浓度变化特征[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2009, **39** (2): 222-228.
- [18] 赵玉成, 温玉璞, 德力格尔, 等. 青海瓦里关大气 CO₂ 本底浓度的变化特征[J]. *中国环境科学*, 2006, **26**(1): 1-5.
- [19] 王庚辰, 温玉璞, 孔琴心, 等. 中国大陆上空 CO₂ 的本底浓度及其变化[J]. *科学通报*, 2002, **47**(10): 780-783.
- [20] 王长科, 王跃思, 刘广仁. 北京城市大气 CO₂ 浓度变化特征及影响因素[J]. *环境科学*, 2003, **24**(4): 13-17.
- [21] 刘强, 王跃思, 王明星. 北京地区大气主要温室气体的季节变化[J]. *地球科学进展*, 2004, **19**(5): 817-823.
- [22] 李晶, 王跃思, 刘强, 等. 北京市两种主要温室气体浓度的日变化[J]. *气候与环境研究*, 2006, **11**(1): 49-56.
- [23] 尹起范, 盛振环, 魏科霞, 等. 淮安市大气 CO₂ 浓度变化规律及影响因素的探索[J]. *环境科学与技术*, 2009, **32**(4): 54-57.
- [24] 胡晏玲. 乌鲁木齐市 2 种主要温室气体浓度水平[J]. *干旱环境监测*, 2011, **25**(2): 80-84.
- [25] Rice A, Bostrom G. Measurements of carbon dioxide in an Oregon metropolitan region[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(5): 1138-1144.
- [26] Liu X Z, Wan S Q, Su B, *et al.* Response of soil CO₂ efflux to water manipulation in a tall grass prairie ecosystem[J]. *Plant and Soil*, 2002, **240**(2): 213-223.
- [27] García M A, Sánchez M L, Pérez I A. Differences between carbon dioxide levels over suburban and rural sites in Northern Spain[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2011, **19**(2): 432-439.
- [28] Massen F, Beck E G. Accurate estimation of CO₂ background level from near ground measurements at non-mixed environments[A]. In: Filho W L (Ed). The economic, social and political elements of climate change. Climate Change Management[C]. New York: Springer, 2011. 509-522.
- [29] 林长城, 王宏, 陈彬彬, 等. 厦门市空气质量时空分布特征及其与气象条件的关系[J]. *福建农林大学学报 (自然科学版)*, 2010, **39**(1): 79-83.

CONTENTS

Advances in Peroxide-Based Decontaminating Technologies	XI Hai-ling, ZHAO San-ping, ZHOU Wen (1645)
Environmental Damage Assessment; International Regulations and Revelation to China	ZHANG Hong-zhen, CAO Dong, YU Fang, <i>et al.</i> (1653)
Human Health Risk-Based Environmental Criteria for Soil: A Comparative Study Between Countries and Implication for China	XU Meng, YAN Zeng-guang, HE Meng-meng, <i>et al.</i> (1667)
Organic Waste Treatment by Earthworm Vermicomposting and Larvae Bioconversion: Review and Perspective	ZHANG Zhi-jian, LIU Meng, ZHU Jun (1679)
Strategies of Nutrients Control in Lakes Based on Ecoregions of Lakes in China	DIAO Xiao-jun, XI Bei-dou, HE Lian-sheng, <i>et al.</i> (1687)
Current Status of Surface Water Acidification in Northeast China	XU Guang-yi, KANG Rong-hua, LUO Yao, <i>et al.</i> (1695)
Impact Analysis of Xi'an to the Water Quality of Weihe River	YU Jie, LI Huai-en (1700)
Distribution Characteristics of Dissolved Oxygen and Its Affecting Factors in the Pearl River Estuary During the Summer of the Extremely Drought Hydrological Year 2011	YE Feng, HUANG Xiao-ping, SHI Zhen, <i>et al.</i> (1707)
Application of Equilibrium Partitioning Approach to Establish Sediment Quality Criteria for Heavy Metals in Hengyang Section of Xiangjiang River	HAN Chao-nan, QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (1715)
Assessing the Benthic Ecological Status in Yangtze River Estuary Using AMBI and M-AMBI	CAI Wen-qian, MENG Wei, LIU Lu-san, <i>et al.</i> (1725)
Pollution Load and the First Flush Effect of BOD ₅ and COD in Urban Runoff of Wenzhou City	WANG Jun, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (1735)
Influencing Factors in Measuring Absorption Coefficient of Suspended Particulate Matters	YU Xiao-long, SHEN Fang, ZHANG Jin-fang (1745)
Relationship Between pCO ₂ and Algal Biomass in Xiangxi Bay in Spring	YUAN Xi-gong, HUANG Wen-min, BI Yong-hong, <i>et al.</i> (1754)
Effects of Turbulent Fluctuation Intensity on the Growth of Algae and Water Environment	LEI Yu, LONG Tian-yu, SAN Lei, <i>et al.</i> (1761)
Simultaneous Removal of Algae and Its Odorous Metabolite Dimethyl Trisulfide in Water by Potassium Ferrate	MA Xiao-yan, ZHANG Ze-hua, WANG Hong-yu, <i>et al.</i> (1767)
Catalyzed Oxidation of Catechol by the Heterogeneous Fenton-like Reaction of Nano-Fe ₃ O ₄ -H ₂ O ₂ System	HE Jie, YANG Xiao-fang, ZHANG Wei-jun, <i>et al.</i> (1773)
Photodegradation of Naproxen in Aqueous Systems by UV Irradiation: Mechanism and Toxicity of Photolysis Products	MA Du-juan, LIU Guo-guang, LÜ Wen-ying, <i>et al.</i> (1782)
Catalytic Ozonation of Nitrobenzene in Water by Acidification-activated Red Mud	KANG Ya-ning, LI Hua-nan, XU Bing-bing, <i>et al.</i> (1790)
Experimental Studies on Stability of Floes from Cadmium Pollution Emergency Treatment	LIU Wang-rong, GUO Qing-wei, YANG Ren-bin, <i>et al.</i> (1797)
Evaluation of Floc Strength Based on Morphological Analysis and Optical Online Monitoring	JIN Peng-kang, FENG Yong-ning, WANG Bao-bao, <i>et al.</i> (1802)
Mechanism of Reductive Dechlorination of Trichlorophenol with Different Electron Donors	WAN Jin-quan, HU Meng-die, MA Yong-wen, <i>et al.</i> (1808)
Preparation of Magnetic Quaternary Chitosan Salt and Its Adsorption of Methyl Orange from Water	ZHANG Cong-lu, HU Xiao-min, YING Shi-ying, <i>et al.</i> (1815)
Membrane Fouling by Secondary Effluent of Urban Sewage and the Membrane Properties	MENG Xiao-rong, ZHANG Hai-zhen, WANG Lei, <i>et al.</i> (1822)
Treatment of Municipal Wastewater Using the Combined Reversed A ² /O-MBR Process	ZHANG Jian-jun, ZOU Gao-long, YANG Shu-fang, <i>et al.</i> (1828)
Study on Sulfur-based Autotrophic Denitrification with Different Electron Donors	YUAN Ying, ZHOU Wei-li, WANG Hui, <i>et al.</i> (1835)
Nitrogen Removal and N ₂ O Emission Characteristics During the Shortcut Simultaneous Nitrification and Denitrification Process	LIANG Xiao-ling, LI Ping, WU Jin-hua, <i>et al.</i> (1845)
Optimization of Solid-Phase Extraction for Enrichment of Toxic Organic Compounds in Water Samples	ZHANG Ming-quan, LI Feng-min, WU Qian-yuan, <i>et al.</i> (1851)
Polycyclic Musks Exposure Affects Gene Expression of Specific Proteins in Earthworm <i>Eisenia fetida</i>	CHEN Chun, LIU Xiao-wei, ZHENG Shun-an, <i>et al.</i> (1857)
Health Risk Assessment and Ozone Formation Potentials of Volatile Organic Compounds from Pharmaceutical Industry in Zhejiang Province	XU Zhi-rong, WANG Zhe-ming, XU Ming-zhu, <i>et al.</i> (1864)
Health Effect of Volatile Aldehyde Compounds in Photocatalytic Oxidation of Aromatics Compounds	ZHAO Wei-rong, LIAO Qiu-wen, YANG Ya-nan, <i>et al.</i> (1871)
Compositions and Distribution Characteristics of Polybrominated Diphenyl Ethers in Serum of Women from Sichuan Province	SHAO Min, CHEN Yong-heng, LI Xiao-yu (1877)
QSAR/QSPR for Predicting the Toxicity of Imidazolium Ionic Liquids	ZHAO Ji-hong, ZHAO Yong-sheng, ZHANG Hong-zhong, <i>et al.</i> (1882)
Spatial and Temporal Characteristics of Heavy Metal Concentration of Surface Soil in Hebin Industrial Park in Shizuishan Northwest China	FAN Xin-gang, MI Wen-bao, MA Zhen-ning, <i>et al.</i> (1887)
Distribution Characteristic and Current Situation of Soil Rare Earth Contamination in the Bayan Obo Mining Area and Baotou Tailing Reservoir in Inner Mongolia	GUO Wei, FU Rui-ying, ZHAO Ren-xin, <i>et al.</i> (1895)
Road Dust Loading and Chemical Composition at Major Cities in Fujian Province	ZHENG An, YANG Bing-yu, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (1901)
Numerical Simulation and Application of Electrical Resistivity Survey in Heavy Metal Contaminated Sites	WANG Yu-ling, NAI Chang-xin, WANG Yan-wen, <i>et al.</i> (1908)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Rare Earth Elements Uptake of Soybean Grown in Rare Earth Mine Tailings	GUO Wei, ZHAO Ren-xin, ZHAO Wen-jing, <i>et al.</i> (1915)
Algicidal Activity Against Red-tide Algae by Marine Bacterial Strain N3 Isolated from a HABs Area, Southern China	SHI Rong-jun, HUANG Hong-hui, QI Zhan-hui, <i>et al.</i> (1922)
Isolation, Identification and Oxidizing Characterization of an Iron-Sulfur Oxidizing Bacterium LY01 from Acid Mine Drainage	LIU Yu-jiao, YANG Xin-ping, WANG Shi-mei, <i>et al.</i> (1930)
Isolation of an Effective Benzo[a]pyrene Degrading Strain and Its Degradation Characteristics	CAI Han, YIN Hua, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1937)
Aerobic Microbial Degradation of 2,2',4,4'-Tetrabrominated Diphenyl Ether	ZHANG Shu, Franco Giulio, LI Xiao-bao, <i>et al.</i> (1945)
Piggery Wastewater Cultivating Biofloculant-Producing Flora B-737 and the Fermentation Characteristics	PEI Rui-lin, XIN Xin, ZHANG Xue-qiao, <i>et al.</i> (1951)
Correlation Between Acidic Materials and Acid Deposition in Beijing During 1997-2011	CHEN Yuan-yuan, TIAN He-zhong, YANG Dong-yan, <i>et al.</i> (1958)
Characteristics of Precipitation pH and Conductivity at Mt. Huang	SHI Chun-e, DENG Xue-liang, WU Bi-wen, <i>et al.</i> (1964)
Chemical Characteristics of Water-Soluble Components of Aerosol Particles at Different Altitudes of the Mount Huang in the Summer	WEN Bin, YIN Yan, QING Yan-shuo, <i>et al.</i> (1973)
Pollution Characteristics of Organic Acids in Atmospheric Particles During Haze Periods in Autumn in Guangzhou	TAN Ji-hua, ZHAO Jing-ping, DUAN Jing-chun, <i>et al.</i> (1982)
Characterization of Organic Carbon (OC) and Elemental Carbon (EC) in PM _{2.5} During the Winter in Three Major Cities in Fujian Province, China	CHEN Yan-ting, CHEN Jin-sheng, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (1988)
Size Distribution of Carbonaceous Particulate Matter in Atmosphere of Shanghai, China	YUAN Ning, LIU Wei, ZHAO Xiu-liang, <i>et al.</i> (1995)
Secondary Aerosol Formation Through Photochemical Reactions Estimated by Using Air Quality Monitoring Data in the Downtown of Pudong, Shanghai	CUI Hu-xiong, WU Ya-ming, DUAN Yu-sen, <i>et al.</i> (2003)
Geochemical Characteristics and Sources of Atmospheric Particulates in Shanghai During Dust Storm Event	QIAN Peng, ZHENG Xiang-min, ZHOU Li-min (2010)
Near Surface Atmospheric CO ₂ Variations in Autumn at Suburban Xiamen, China	LI Yan-li, MU Chao, DENG Jun-jun, <i>et al.</i> (2018)
<i>In-situ</i> Measurement of Background Atmospheric HCFC-142b Using GC-MS and GC-ECD Method	GUO Li-feng, YAO Bo, ZHOU Ling-xi, <i>et al.</i> (2025)
Airborne Fungal Community Composition in Indoor Environments in Beijing	FANG Zhi-guo, OUYANG Zhi-yun, LIU Peng, <i>et al.</i> (2031)
Study on Quantification Assessment and Odor Fingerprint of Volatile Aromatic Hydrocarbons from Sewage Treatment Plant	GUO Wei, WANG Bo-guang, TANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (2038)
Superposition Impact Character of Air Pollution from Decentralization Docks in a Freshwater Port	LIU Jian-chang, LI Xing-hua, XU Hong-lei, <i>et al.</i> (2044)
Thermal Stability and Transformation Behaviors of Pb in Yima Coal	LIU Rui-qing, WANG Jun-wei (2051)
Synergistic Emission Reduction of Chief Air Pollutants and Greenhouse Gases Based on Scenario Simulations of Energy Consumptions in Beijing	XIE Yuan-bo, LI Wei (2057)

《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5月15日 34卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 5 May 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) 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: 90.00 元

国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行