

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第5期

Vol.35 No.5

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长三角地区秸秆燃烧排放因子与颗粒物成分谱研究	唐喜斌, 黄成, 楼晟荣, 乔利平, 王红丽, 周敏, 陈明华, 陈长虹, 王倩, 李贵玲, 李莉, 黄海英, 张钢锋 (1623)
南京市大气颗粒物中水溶性离子的粒径分布和来源解析	薛国强, 朱彬, 王红磊 (1633)
2011年春季沙尘天气影响下上海大气颗粒物及其化学组分的变化特征	李贵玲, 周敏, 陈长虹, 王红丽, 王倩, 楼晟荣, 乔利平, 唐喜斌, 李莉, 黄海英, 陈明华, 黄成, 张钢锋 (1644)
结合外场观测分析珠三角二次有机气溶胶的数值模拟	郭晓霜, 司徒淑婷, 王雪梅, 丁翔, 王新明, 闫才青, 李小滢, 郑玫 (1654)
2013年夏季嘉兴市一次光化学事件的观测分析	沈利娟, 李莉, 吕升, 张孝寒, 吴博, 章国骏, 王翥 (1662)
移动监测法测量厦门春秋季节近地面 CO ₂ 的时空分布	李燕丽, 邢振雨, 穆超, 杜可 (1671)
秸秆烟尘和灰烬中元素碳的稳定同位素组成	刘刚, 李久海, 徐慧, 吴丹, 刘艳 (1680)
连续测量大气·OH的化学电离飞行时间质谱仪的研制	窦健, 花磊, 侯可勇, 蒋蕾, 谢园园, 赵无垠, 陈平, 王卫国, 田地, 李海洋 (1688)
我国重点城市水源及水厂出水中乙草胺的残留水平	于志勇, 金芬, 李红岩, 安伟, 杨敏 (1694)
巢湖水体组分垂向分布特征及其对水下光场的影响	马孟泉, 张玉超, 钱新, 马荣华, 段洪涛 (1698)
京杭大运河(杭州段)典型断面水生植物多样性调查及其与水环境相关性研究	陆胤, 许晓路, 张德勇, 王莉, 朱旭妮, 冯凤, 周巧君, 谢鹏 (1708)
合肥市典型景观水体氮磷污染特征及富营养化评价	李如忠, 刘科峰, 钱靖, 杨继伟, 张翩翩 (1718)
重庆园博园龙景湖新建初期内源氮磷分布特征及扩散通量估算	潘延安, 雷沛, 张洪, 单保庆, 李杰 (1727)
千岛湖库区及其主要入库河流水中有机氯农药残留污染特征及健康风险评价	唐访良, 张明, 徐建芬, 阮东德, 陈峰, 吴志旭, 程新良 (1735)
九龙江流域潜在病原菌污染分析	侯丽媛, 胡安谊, 马英, 于昌平 (1742)
江湖关系变化对鄱阳湖沉积物重金属分布及生态风险影响	刘婉清, 倪兆奎, 吴志强, 王圣瑞, 曾清如 (1750)
鄱阳湖-乐安河湿地水土环境中重金属污染的时空分布特征	简敏菲, 李玲玉, 徐鹏飞, 陈朴青, 熊建秋, 周雪玲 (1759)
典型岩溶水系统中溶解性有机质的运移特征	姚昕, 邹胜章, 夏日元, 许丹丹, 姚敏 (1766)
基于扰动分析方法的 AnnAGNPS 模型水文水质参数敏感性分析	席庆, 李兆富, 罗川 (1773)
混合胁迫条件下蓝藻运动特性研究	孙秀秀, 丛海兵, 高郑娟, 崔朝杰, 曹倩倩 (1781)
不同波长和强度光照对水体汞还原的影响	李希嘉, 钟紫旋, 孙荣国, 杨鲲, 王定勇 (1788)
地下水中常见离子对纳米零价铁除 Se(IV) 动力学的影响	杨文君, 郭迎庆, 杜尔登 (1793)
溴氧化铋可见光催化降解高效氯氟酯的研究	彭一荣, 赵小蓉, 贾漫珂, 周薇, 黄应平 (1798)
石墨烯基磁性复合材料吸附水中亚甲基蓝的研究	常青, 江国栋, 胡梦璇, 黄佳, 唐和清 (1804)
电化学氧化 PFOA 阳极材料筛选及其机制研究	卓琼芳, 邓述波, 许振成, 余刚 (1810)
典型抗生素在中国西南地区某污水处理厂中的行为和归趋	甘秀梅, 严清, 高旭, 张怡昕, 訾成方, 彭绪亚, 郭劲松 (1817)
颗粒状大孔阴树脂去除有机物以及缓解膜污染的效果与机制	何欢, 董秉直, 许光红, 闫昭辉 (1824)
石墨-活性炭纤维复合电极电吸附处理含盐废水的研究	周贵忠, 王兆丰, 王珣, 李文倩, 李少香 (1832)
酞基甲基化聚苯乙烯的制备及废水生化处理应用	张华雨, 许晴, 牛春梅, 王亚君, 侯正浩, 李绍英, 陈延明, 廉静, 吴士彬, 郭建博 (1838)
FePMo ₁₂ 催化电化学反应降解染料废水的研究	王栗, 岳琳, 郭建博, 杨景亮, 廉静, 罗晓, 王开红 (1843)
实际污水培养好氧颗粒污泥及其特性研究	杨淑芳, 张健君, 邹高龙, 杜至力 (1850)
SFBR 中好氧颗粒污泥的培养及特性研究	龙焙, 杨昌柱, 濮文虹, 杨家宽, 白俊, 王晶, 周玄月, 蒋国盛, 李春阳, 刘福标 (1857)
不同好/厌氧区容积负荷对生物膜/颗粒污泥耦合工艺脱氮除磷的影响	尹航, 刘畅, 高辉, 高大文 (1866)
黄原酸化废弃污泥吸附 Cu ²⁺ 研究	岑艳, 全向春, 姜晓满 (1871)
轮叶黑藻和穗花狐尾藻对铜的吸收机制研究	薛培英, 李国新, 赵全利 (1878)
不同烧制温度下玉米秸秆生物炭的性质及对苯的吸附性能	黄华, 王雅雄, 唐景春, 朱文英 (1884)
北京常见绿化树种叶片富集重金属能力研究	李少宁, 孔令伟, 鲁绍伟, 陈波, 高琛, 石媛 (1891)
泰州市区重金属污染的薛袋法与路生法评价研究	陈勤, 方炎明, 颜赞, 陈步金 (1901)
放牧对呼伦贝尔草甸草原土壤呼吸温度敏感性的影响	王旭, 闫瑞瑞, 邓钰, 闫玉春, 辛晓平 (1909)
苹果园土壤呼吸的变化及生物和非生物因素的影响	王蕊, 郭胜利, 刘庆芳, 张彦军, 姜继超, 郭慧敏, 李如剑 (1915)
重庆铁山坪森林土壤汞释放通量的影响因子研究	王琼, 罗遥, 杜宝玉, 叶芝祥, 段雷 (1922)
上海市郊区养殖场周边环境砷含量特征	奚功芳, 周守标, 丁海城, 姚春霞, 孔娟娟 (1928)
不同施氮量下水稻分蘖期光合碳向土壤碳库的输入及其分配的量化研究: ¹³ C 连续标记法	谭立敏, 吴昊, 李卉, 周萍, 李科林, 王久荣, 葛体达, 袁红朝, 吴金水 (1933)
污灌区盐分累积对土壤汞吸附行为影响的模拟研究	郑顺安, 李晓华, 徐志宇 (1939)
石灰干化污泥稳定后土壤中 Pb、Cd 和 Zn 浸出行为的研究	李翔, 宋云, 刘永兵 (1946)
大连市海产品中短链氯化石蜡的含量与分布研究	虞俊超, 王宝盛, 王亚韩, 孟梅, 陈茹, 江桂斌 (1955)
应用生物配体模型(BLM)研究辽河与太湖水体中铜对大型溞的急性毒性	周腾耀, 曹莹, 覃璐玫, 张亚辉, 曾鸿鸣, 闫振广, 刘征涛 (1962)
氧化铜纳米颗粒对水稻幼苗根系代谢毒性的研究	王淑玲, 张玉喜, 刘汉柱, 辛华 (1968)
吐温 80 对苏云金芽孢杆菌降解三苯基锡的促进机制	黄捷, 叶锦韶, 尹华, 彭辉, 马嘉雯, 唐立椿, 王惜若 (1974)
牛粪混合液微生物燃料电池长期运行稳定性研究	焦燕, 张国栋, 赵庆良 (1981)
针铁矿对城市生活垃圾有机组分厌氧发酵的影响	杨露露, 岳正波, 陈天虎, 王进 (1988)
城市生活垃圾集装箱转运过程中污染物产生状况研究	王晓媛, 刘殷华, 汪飞, 黄长缨, 陆峰, 谢冰 (1994)
铈插层黏土负载铁催化剂在 H ₂ S 选择性催化氧化过程中催化性能的研究	孙超, 张鑫, 郝郑平, 窦广玉, 孙春宝 (2002)
脱硫类水滑石衍生复合氧化物不同方法的制备与表征	祝春蕾, 王海林, 孙春宝 (2010)
固定污染源排气中 PM _{2.5} 采样方法综述	蒋靖坤, 邓建国, 李振, 李兴华, 段雷, 郝吉明 (2018)
产甲烷微生物研究概况	李煜珊, 李耀明, 欧阳志云 (2025)
《环境科学》征稿简则(1961) 《环境科学》征订启事(1967) 信息(1643, 1687, 1803, 1837)	

移动监测法测量厦门春秋季节近地面 CO₂ 的时空分布

李燕丽, 邢振雨, 穆超, 杜可*

(中国科学院城市环境研究所中国科学院城市环境与健康重点实验室, 厦门 361021)

摘要: 移动监测对研究城市近地面空气污染物时空分布特征具有重要意义。本研究采用野外移动监测车, 利用二氧化碳测量仪、粉尘仪及小型气象站, 在春秋季节共选取 14 d, 沿厦门不同功能区, 在每天不同时间段 (09:00 ~ 12:00、13:00 ~ 16:00、22:00 ~ 01:00) 进行了 CO₂ 与颗粒物 (PM) 浓度及气象参数的监测, 并分析了春秋季节不同时段下各功能区近地面 CO₂ 空间分布特征以及 CO₂ 与颗粒物的相互关系。结果表明: ①监测期间, 路线从北部的坂头水库背景区经郊区进入市中心最终在城市南部边缘沿海干道结束, CO₂ 浓度的空间分布呈现中间市中心高沿市中心向两边边缘处降低的结构, 不同功能区 CO₂ 空间分布存在差异, 受城市交通、工业、人类活动等排放, 地面植物/作物以及气象条件的影响。主要表现为交通繁忙区 (仙岳路/厦禾路/嘉禾路, $477.33 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1} \pm 6.11 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$) 高于商业居民区 (杏林/思北, $454.95 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1} \pm 5.45 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$) 高于自然风景区 (文屏/环岛路/演武路, $441.01 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1} \pm 6.24 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$) 高于耕地 (农田, $436.79 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1} \pm 1.87 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$) 高于山体林地 (坂头水库, $434.06 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1} \pm 0.31 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$); ②监测期间春季平均 CO₂ 浓度为 $452.04 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1} \pm 20.24 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 最大值出现在 2013 年 4 月 12 日的嘉禾路路段 (市内交通繁忙区) 为 $533.10 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 最小值出现在 2013 年 4 月 10 日的坂头水库路段 (远离市区, 受人为活动影响较小, 水库周围有大量植被, 可认为监测过程中的背景区域) 为 $413.25 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。秋季平均 CO₂ 浓度为 $451.80 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1} \pm 21.56 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 其中最大值出现在 2012 年 11 月 19 日的厦禾路路段 (市内交通繁忙区) 为 $526.45 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 最小值出现在 2012 年 11 月 20 日的坂头水库路段为 $415.01 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。这符合 Idso 等在 1998 年提出“城市 CO₂ 岛”的现象; ③不同时间段 CO₂ 浓度表现出夜晚时段 (22:00 ~ 01:00) 高于上午时段 (09:00 ~ 12:00) 高于下午时段 (13:00 ~ 16:00), 阴天普遍高于晴天, 且不同功能区 CO₂ 浓度在夜晚时段 (22:00 ~ 01:00) 和白天时段 (09:00 ~ 12:00 和 13:00 ~ 16:00) 的差异不同, 春季的差异范围为 $-0.66 \sim 29.48 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 秋季的差异范围为 $-4.01 \sim 33.69 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$; ④市区 CO₂ 浓度与周围郊区存在差异, 市区 CO₂ 浓度均高于郊区; ⑤移动监测主要受道路车辆排放的影响, CO₂ 浓度与 PM_{2.5} 呈显著正相关关系 ($R=0.73, P<0.01$)。

关键词: CO₂; 移动监测; 功能区; 时空分布; 厦门

中图分类号: X831 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)05-1671-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.05.006

Spatial and Temporal Variations of Near Surface Atmospheric CO₂ with Mobile Measurements in Fall and Spring in Xiamen, China

LI Yan-li, XING Zhen-yu, MU Chao, DU Ke

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

Abstract: The study on the spatial distribution of near surface air pollutants carbon dioxide (CO₂) and particulate matters (PM) is essential for understanding the pollution characteristics with mobile measurements. Near surface concentrations of CO₂, PM and meteorological parameters were measured in Xiamen city, China along the route passing through different functional areas using the mobile laboratory during different time periods of the day [09:00-12:00, 13:00-16:00, 22:00-01:00 (local time)] in spring (April) and fall (November), 2013. Carbon dioxide, PM and meteorological parameters data were analyzed for the spatial distribution of CO₂ in different functional areas and the relationship of CO₂ and PM_{2.5}. During the study period, the measurements started at the northern part of the city, across the suburban area and ended at about 60 km in the southern Xiamen. The spatial distribution of CO₂ along the road showed a high CO₂ level in the central area of the city and low values in the outlying areas. Different CO₂ concentrations were observed at different functional areas because of the differences in emissions from traffic and industry, the emission and absorption by vegetation, and meteorological conditions. The concentrations of CO₂ at different areas fell into the following order: areas with heavy traffic ($477.33 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1} \pm 6.11 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$) > commercial residential area ($454.95 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1} \pm 5.45 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$) > the natural scenic spot ($441.01 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1} \pm 6.24 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$) > cultivated land ($436.79 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1} \pm 1.87 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$) > mountain woodlands ($434.06 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1} \pm 0.31 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$). The average CO₂ concentration in spring 2013 was measured to be $452.04 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1} \pm 20.24 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ with the maximum value of $533.10 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ at the heavy traffic area in downtown Jiahe

收稿日期: 2013-09-22; 修订日期: 2013-12-06

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, E-mail: ylli@iue.ac.cn

* 通讯联系人, E-mail: kddu@ucalgary.ca

on April 12, 2013 and the minimum value of $413.25 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ on April 10, 2013 at the mountain woodland, which is about 23 km away from the downtown area. The mountain woodland is surrounded by a reservoir and woods and regarded as the background area. The average CO_2 concentration in fall 2013 was determined to be $451.80 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1} \pm 21.56 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ with the maximum value of $526.45 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ at a heavy traffic area of Xiahe road in downtown, on November 19, 2013 and the minimum value of $415.01 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ at the mountain woodland on November 10, 2013. This phenomenon was called “ CO_2 dome” by Idso in 1998. In addition, the CO_2 concentrations tended to be the highest at night (22:00-01:00) and the lowest in afternoon (13:00-16:00). During overcast days, the CO_2 concentrations were generally higher than those on clear days. At different functional areas, differences between nighttime (22:00-01:00) and daytime (09:00-12:00 and 13:00-16:00) ranged from -0.66 - $29.48 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ in spring and from $-4.01 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ - $33.69 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ in fall. The CO_2 concentrations at the urban and the suburban areas were also different in spring and autumn and at different time of the day. The CO_2 concentration was in significant correlation with $\text{PM}_{2.5}$ ($R=0.73$, $P<0.01$) indicating the important impact of traffic pollution on the ambient CO_2 concentration.

Key words: CO_2 ; mobile measurements; functional areas; spatial and temporal distribution; Xiamen

二氧化碳(CO_2)是受人类活动影响明显的主要温室气体。自1750年工业革命以来,由于化石燃料燃烧、水泥生产、土地利用变化等原因,大气 CO_2 浓度迅速增加^[1]。美国Mauna Loa观测站监测结果显示^[2],大气中 CO_2 浓度从1959年的 $316 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 增至2011年的 $392 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。有报告显示1990~2009年所有长寿命温室气体的辐射强迫增加了27.5%,其中 CO_2 的贡献近80%^[3]。2009年12月召开的哥本哈根世界气候大会,温室气体浓度升高对全球温度影响的问题再次成为研究和争论的焦点。美国在2010年4月17日正式宣布,将 CO_2 等6种温室气体列为有害健康的物质,也促使世界范围内大规模开展 CO_2 监测和研究,减少 CO_2 的排放已受到各国政府和科学家的普遍关注^[4~6]。

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,城市排放的温室气体占全球人类活动温室气体排放的80%^[7]。城市的排放结构主要受车辆、当地的燃烧、电厂、工业设施的影响,此外还受到地理位置和气象条件的影响。到目前为止,国内外城市 CO_2 的监测主要应用定点监测来研究特定区域的日变化和季节变化^[8~10],或者通过定点监测研究城乡 CO_2 浓度分布的差异^[11~13]。定点监测有着很高的时间分辨率,但是只能代表均匀的排放区域。城市地区也存在着排放的非均匀区域,而非均匀区域的排放具有时间和空间分布的不稳定性,这可以利用移动测量的方法进行监测。目前,尽管通过高频率的移动测量可以解决低时间分辨率的缺点,但移动监测法测量城市区域 CO_2 动态排放较少得到应用^[14~17]。

厦门市位于亚热带地区,是中国东南部的一个沿海城市,具有温暖的气候和较高的湿度,其 CO_2 浓度变化规律^[18]有别于我国的内陆城市如北

京^[19~21]、上海^[22]、淮安^[23]、乌鲁木齐^[24]等。国家环境保护部在2010年《环境监测工作要点》中提出要在有条件的地区增加温室气体试点监测^[25],并明确在北京、上海、天津、重庆、石家庄、郑州等31个城市开展温室气体监测试点研究。这些城市多为省会城市,集中分布在内陆,而对沿海城市 CO_2 研究基本未见文献公开报道。本研究通过移动监测的方法,分析了厦门市不同路段 CO_2 浓度的时空分布特征,初步得到了不同功能区城市 CO_2 浓度的变化规律,对直接获取城市温室气体的动态排放信息,更准确地监测城市区域 CO_2 的动态排放变化,进而控制温室气体在城市的排放具有重要的意义。

1 材料与方法

1.1 监测路线

监测路线覆盖了厦门市的3个行政区,分别为思明区(93万人)、湖里区(93万人)及集美区(58万人),思明区与湖里区是主要城市建成区,聚集了厦门市人口(353万人)的一半(厦门市2010年第六次全国人口普查主要数据公报),人类活动频繁。监测路线从厦门北部的坂头水库开始到南部的环岛路结束,全程约为60 km,具体路线如图1所示。路线选取原则有:沿途经过不同的土地利用类型;监测路线上车流量较少,保证研究区域内 CO_2 浓度的变化不完全是城市交通造成的;路线上可考虑设计相似的土地利用类型或者差别很大的土地利用类型。

1.2 监测仪器与方法

采用便携式 CO_2 测量仪(VAISALA GMP343, Finland)连接数据采集器,粉尘仪(DustTrack 8534, USA),小型气象站(Kestrel 4500, USA)等进行移动监测的数据获取。二氧化碳测量仪采用(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



图 1 移动监测路线示意

Fig. 1 Map of Xiamen city showing the location of the CO₂ transect route

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. 仪器量程为 $0 \sim 1\,000 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, 误差范围 $\pm (3 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1} + \text{读数的 } 1\%)$. 仪器出厂前进行了严格校准,校准时间为 2012 年 6 月 19 日,零点的校准为高纯氮气体,CO₂ 的校准为精确的 N 与 CO₂ 混合气体 (Dutch Metrology Institute). 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 ($400.06 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, 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. DustTrack 8534 气溶胶监测仪具有特有的鞘气系统隔离了气溶胶和光学室,光散射激光光度计可以实现实时读取气溶胶的质量浓度. 粉尘仪按照 ISO 12103-A1 粉尘测试标准进行了校正,在每次使用仪器前都用过滤膜进行零点的标定.

CO₂ 测量仪的探头用铁架台安置在移动监测车顶的天窗处,距离天窗正上方约 30 cm,距离地面约 2 m,小型气象站垂直的安装在 CO₂ 测量仪附近,数据采集器固定在移动监测车的试验台上. 粉尘仪同样固定在移动监测车内部的试验台上,管子通过天窗伸入外部进行数据的采集. 于 2013 年 4 月和 2012 年 11 月分别选取 7 d,在每天不同时间段进行数据采集. 为了减少汽车尾气对测量结果的影响,与前边的车保持至少 2 m 的距离^[26],避开每天车流量的高峰期,设定的观测时段分别为 09:00 ~ 12:00、13:00 ~ 16:00 和 22:00 ~ 01:00. 车速控制在 $30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,数据记录间隔设置 1 s. 监测过程中

对路况进行了详细的记录,剔除红绿灯、拥堵、扬尘、垃圾焚烧等非可控因素的干扰造成监测组分浓度瞬时剧烈变化的数据. 由于在不同功能区各监测组分的变化,计算出浓度均匀路段下的各测量组分的平均值进行后续分析.

2 结果与讨论

2.1 近地面 CO₂ 浓度沿路线分布

如图 1 所示,CO₂ 浓度的监测是从厦门集美区人为活动影响较小的坂头水库出发,穿过集美区,经过杏林大桥,进入厦门的主要建成区厦门岛,然后一直到岛边缘的沿海环岛干道结束. 杏林大桥作为连接城市和郊区桥梁,全长 8.53 km,由于受海面上 CO₂ 释放/吸收及海风的影响,CO₂ 浓度较低,除此点,如图 2 所示,监测期间 CO₂ 浓度在全路段的空间分布呈现两边低中间高的现象,峰值出现在市中心,远离市中心的边缘处较低. 春季和秋季两条 CO₂ 曲线的变化趋势一致,相关系数 $R = 0.95$ ($P < 0.01$). 春秋季节的高值集中在市中心的仙岳路,嘉禾路和厦禾路路段为市区交通繁忙区,CO₂ 浓度均值为 $477.33 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1} \pm 6.11 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$. 324 国道、安仁大道、成功大道为郊区运输路线,CO₂ 浓度均值为 $457.80 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1} \pm 2.66 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$. 郊区的杏林商业居民区与市区内思北商业居民区,CO₂ 平均浓度为 $454.95 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1} \pm 5.45 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$. 后溪镇属于郊区的一个小村庄,CO₂ 浓度为 $446.28 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1} \pm 0.70 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$. 杏林大桥和演武大桥属于海面路段,CO₂ 平均浓度为 $440.26 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1} \pm 2.60 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$. 文屏路,环岛路和演武路属于自然风景区路段,CO₂ 平均浓度为 $441.01 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1} \pm 6.24 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$. 农田区域夏季主要作物为玉米,秋季主要为水稻,CO₂ 平均浓度为 $436.79 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1} \pm 1.87 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$. 灌口工业区坐落在边远的郊区面积约 7 km^2 ,周围地势开阔,主要是一些工艺品,汽车部件等的生产,生产区与生活区相结合,CO₂ 浓度为 $434.27 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1} \pm 1.26 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$. 坂头水库主要为山体林地,有大面积植被覆盖,平均 CO₂ 浓度为 $434.06 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1} \pm 0.31 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$. 可见不同土地利用类型下 CO₂ 空间分布存在差异,受城市交通、工业、居民生活等人类活动排放,地面植物/作物以及气象条件的影响,主要表现为交通繁忙区(仙岳路/厦禾路/嘉禾路)高于商业居民区(杏林/

思北)高于自然风景区(文屏路,环岛路,演武路)高于耕地(农田)高于山体林地(坂头水库).

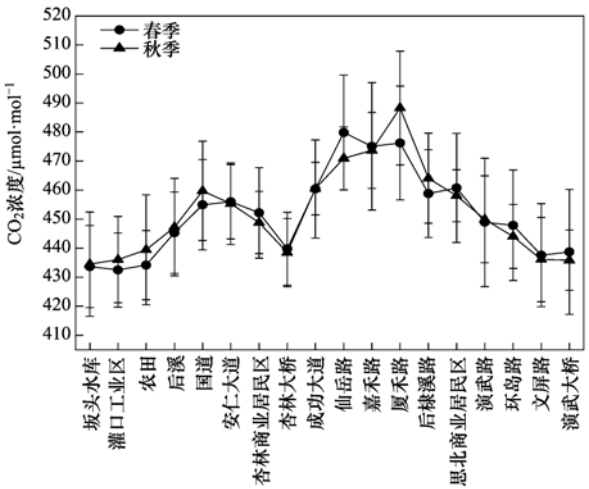


图2 不同路段下近地面平均 CO₂ 浓度在春秋季节的分布

Fig. 2 Near ground CO₂ distribution in the city of Xiamen (2012-11 and 2013-04)

天气条件对城市 CO₂ 积累和扩散有着十分重要的影响^[17]. 监测期间气象参数见表 1. 方差分析表明,不同天气条件下(2013 年 4 月 7 日、2013 年 4 月 10 日、2013 年 4 月 15 日、2012 年 11 月 12 日、2012 年 11 月 15 日和 2012 年 11 月 20 日)全路段的日平均 CO₂ 浓度呈显著差异,4 月 7 日和 11 月 15 日晴朗大风天气条件下 CO₂ 浓度显著偏低,4 月 10 日和 11 月 12 日阴天天气条件下 CO₂ 浓度显著偏高 ($P<0.05$). 在 4 月 7 日和 11 月 15 日 CO₂ 的平均浓度分别为: $441.12 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1} \pm 13.65 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 和 $444.05 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1} \pm 15.52 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$,天气均晴朗,日平均风速分别为 $14 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $16 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$,能见度分别为 19.1 km 和 11.5 km ; 在 4 月 17 日 CO₂ 的浓度值为: $458.66 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1} \pm 25.41 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$,天气条件为阴天有雾,日平均风速 $6 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$,能见度为 6.8 km ,在 11 月 12 日 CO₂ 浓度值为 $461.93 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1} \pm 17.77 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$,天气条件为多云转阴,日平均风速 $13 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$,能见度 9.5 km . 在 4 月 10 日和 13 日,在 09:00 ~ 12:00 时段, CO₂ 浓度分别为 $447.00 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1} \pm 16.23 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 和 $449.75 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1} \pm 19.87 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$,13:00 ~ 16:00 时段, CO₂ 浓度分别为 $440.58 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1} \pm 17.36 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 和 $443.98 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1} \pm 20.47 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$,天气条件均为阴天伴有转晴,风速分别为 $12 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $7 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$,能见度分别为 10.3 km

和 11.9 km ,而在 4 月 15 日,监测期间天气条件由多云有雾转为晴,风速 $6 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$,能见度 6.8 km 条件下, CO₂ 浓度在 09:00 ~ 12:00 时段浓度为 $464.46 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1} \pm 22.80 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 在 13:00 ~ 16:00 时段为 $437.40 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1} \pm 14.18 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$. 11 月 19 日天气条件为晴间多云,风速 $7 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$,能见度 11.2 km 条件下, CO₂ 浓度在 09:00 ~ 12:00 时段浓度为 $451.76 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1} \pm 25.41 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$,在 13:00 ~ 16:00 时段为 $443.11.40 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1} \pm 20.18 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$. 且林地区域在阴天和晴天天气条件下的 CO₂ 浓度差为 $18.34 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 高于商业居民区 CO₂ 浓度差 $15.49 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$. 可见,阴天伴有低风速低能见度的天气条件下的 CO₂ 浓度普遍高于天气晴朗风速大能见度高的天气条件下的 CO₂ 浓度,这可能与阴天日照较弱,植被光合作用造成的 CO₂ 汇减弱,此外阴天边界层高度较低,且风速低等条件不利于扩散,容易造成 CO₂ 积累有关.

表 1 监测期间气象参数统计

Table 1 Meteorological conditions during the study period			
日期(年-月-日)	风速/ $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	能见度/ km	天气条件
2013-04-06	8	8.5	多云
2013-04-07	14	19.1	晴
2013-04-10	12	10.3	阴
2013-04-12	8	11.5	晴转多云
2013-04-13	7	11.9	多云转晴
2013-04-15	6	6.8	雾转晴
2013-04-17	6	6.8	阴天 有雾
2012-11-12	13	9.5	多云转阴
2012-11-15	16	11.5	晴
2012-11-18	8	10	晴
2012-11-19	7	11.2	晴间多云
2012-11-20	17	10.8	多云

2.2 近地面 CO₂ 浓度的时空变化

2.2.1 近地面 CO₂ 浓度的时间变化

CO₂ 浓度的时间变化规律可以从两个方面阐述,一方面是日变化特征(09:00 ~ 12:00、13:00 ~ 16:00、22:00 ~ 01:00),二是季节变化特征. 移动监测法获得的春季平均 CO₂ 浓度为 $452.04 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1} \pm 20.24 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$,其中最大值出现在 2013 年 4 月 12 日的嘉禾路路段(市内交通繁忙区)为 $533.10 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$,最小值出现在 2013 年 4 月 10 日的坂头水库路段(远离市区,受人为活动影响较小,水库周围有大量植被,可认为监测过程中的背景区域)为 $413.25 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$. 秋季平均 CO₂ 浓度为 $451.80 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1} \pm 21.56 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$,其中最大值出现在 2012 年 11 月 19 日的厦禾路路段(市

内交通繁忙区)为 $526.45 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 最小值出现在 2012 年 11 月 20 日的坂头水库路段为 $415.01 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$. 这与 Idso 等^[27]在 1998 年提出的“城市 CO₂ 岛”现象相似. Idso 等用移动监测的方法分别在黎明和午后监测了亚利桑那州菲尼克斯市的 CO₂ 浓度,数据揭示了城市 CO₂ 岛的存在,市中心 CO₂ 浓度可达到 $555 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, CO₂ 浓度随着市中心向边远山区乡村的过渡而降低到 $370 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$.

不同时间段(09:00~12:00、13:00~16:00、22:00~01:00)春季 CO₂ 浓度分别为: $454.00 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1} \pm 21.54 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 、 $442.54 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1} \pm 18.86 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 、 $460.65 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1} \pm 21.97 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$; 秋季 CO₂ 浓度分别为: $452.19 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1} \pm 21.31 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 、 $445.93 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1} \pm 20.06 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 、 $458.71 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1} \pm 17.35 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$. 可见,移动监测获得的 CO₂ 浓度在春秋季节差别不明显,但在一天中各时间段表现出明显的差异,CO₂ 浓度值均为晚上时段 22:00~01:00 大于上午时段 09:00~12:00 大于下午时段 13:00~16:00.

2.2.2 近地面 CO₂ 浓度的空间变化——市区郊区的对比

厦门作为东南沿海城市,由厦门岛和周围的岛屿和海域地区等组成,监测路线由远离市区的坂头水库所在的集美区通过杏林大桥进入人口聚集的厦门岛,因此以杏林大桥作为连接郊区和市区的分割点进行研究. 图 3 显示了不同时间段在春秋季节 CO₂ 浓度在厦门市各路段的空间分布. 从中可知,在各时段条件下,CO₂ 浓度均表现出市区高于郊区,且在 09:00~12:00 和 22:00~01:00 时段下各路段功能区 CO₂ 浓度波动范围较大,而在 13:00~16:00 时段不同监测日期各路段功能区 CO₂ 浓度变化趋势具有很好的一致性并且波动范围较小,此刻太阳辐射较强,空气对流运动强烈,在一天当中 CO₂ 混合比较充分,浓度也随之降低. 有研究指出^[28]此时的 CO₂ 浓度可看作是代表区域 CO₂ 浓度的背景值. 春季各时段郊区和市区的平均浓度分别对应为 09:00~12:00 时段郊区 $445.13 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1} \pm 16.95 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ < 市区 $461.10 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1} \pm 22.32 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ (3.59% : 城区比郊区高出的百分比), 13:00~16:00 时段郊区 $434.63 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1} \pm 11.20 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ < 市区 $448.87 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1} \pm 21.32 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ (3.27%), 22:00~01:00 时段郊

区 $452.73 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1} \pm 15.18 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ < 市区 $466.99 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1} \pm 24.55 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ (3.15%). 秋季各时段郊区和市区的平均浓度分别对应为 09:00~12:00 时段郊区 $441.66 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1} \pm 14.13 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ < 市区 $460.62 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1} \pm 22.46 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ (4.29%), 13:00~16:00 时段郊区 $434.99 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1} \pm 13.53 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ < 市区 $454.70 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1} \pm 20.26 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ (4.53%), 22:00~01:00 时段郊区 $458.19 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1} \pm 15.49 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ < 市区 $459.12 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1} \pm 18.89 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ (0.21%). Henninger 等^[16]用移动监测的方法研究表明市区 CO₂ 浓度比周边的乡村 CO₂ 浓度高 25%, 而 Idso 等^[14]用同样的监测方法发现市中心平均 CO₂ 浓度比周边的乡村地区,工作日高出 43%, 周末高出 38%, 整个商业区的 CO₂ 浓度较周边地区增加的趋势降低,工作日为 30%, 周末为 23%. 可见,厦门市 CO₂ 浓度在市区和郊区的差异并没有国外的城市大,这可能与厦门市郊区的快速城镇化发展有关.

2.3 白天时段与夜晚时段 CO₂ 分布的差异

春秋季节各路段 CO₂ 浓度在白天(09:00~12:00 和 13:00~16:00)和夜晚(22:00~01:00)的分布如图 4 所示,从中可知,春季各路段功能区夜间平均 CO₂ 浓度普遍高于白天 CO₂ 浓度,且二者差值变化范围较大. 监测期间春季白天平均 CO₂ 浓度为 $448.27 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1} \pm 20.99 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 夜晚平均 CO₂ 浓度为 $460.65 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1} \pm 21.97 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$. 各路段功能区白天时段与夜晚时段 CO₂ 浓度差值范围,除仙岳路两者几乎一致外,最小差值从成功大道(主要交通干道周围多为仓储用地) $4.29 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 到最大差值的文屏路(自然风景区) $29.48 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$. 秋季白天平均 CO₂ 浓度为 $449.06 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1} \pm 18.59 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 夜晚平均 CO₂ 浓度为 $458.71 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1} \pm 11.48 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$. 而在主要交通干道(成功大道,仙岳路,厦禾路,后埭溪路,演武路)CO₂ 浓度白天稍高于夜晚,差值范围从 $-9.03 \sim -4.01 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 这些路段主要受人为活动尤其车辆排放的影响. 而在其余路段,白天和夜晚 CO₂ 浓度的差值最小出现在环岛路为 $6.54 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 最大出现在农田区域为 $33.69 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$. 造成夜晚浓度高于白天主要是由于白天对流输送与光合作用等汇比较活跃,而晚上汇的作用减弱,CO₂ 的源在继续排放,如动植物的

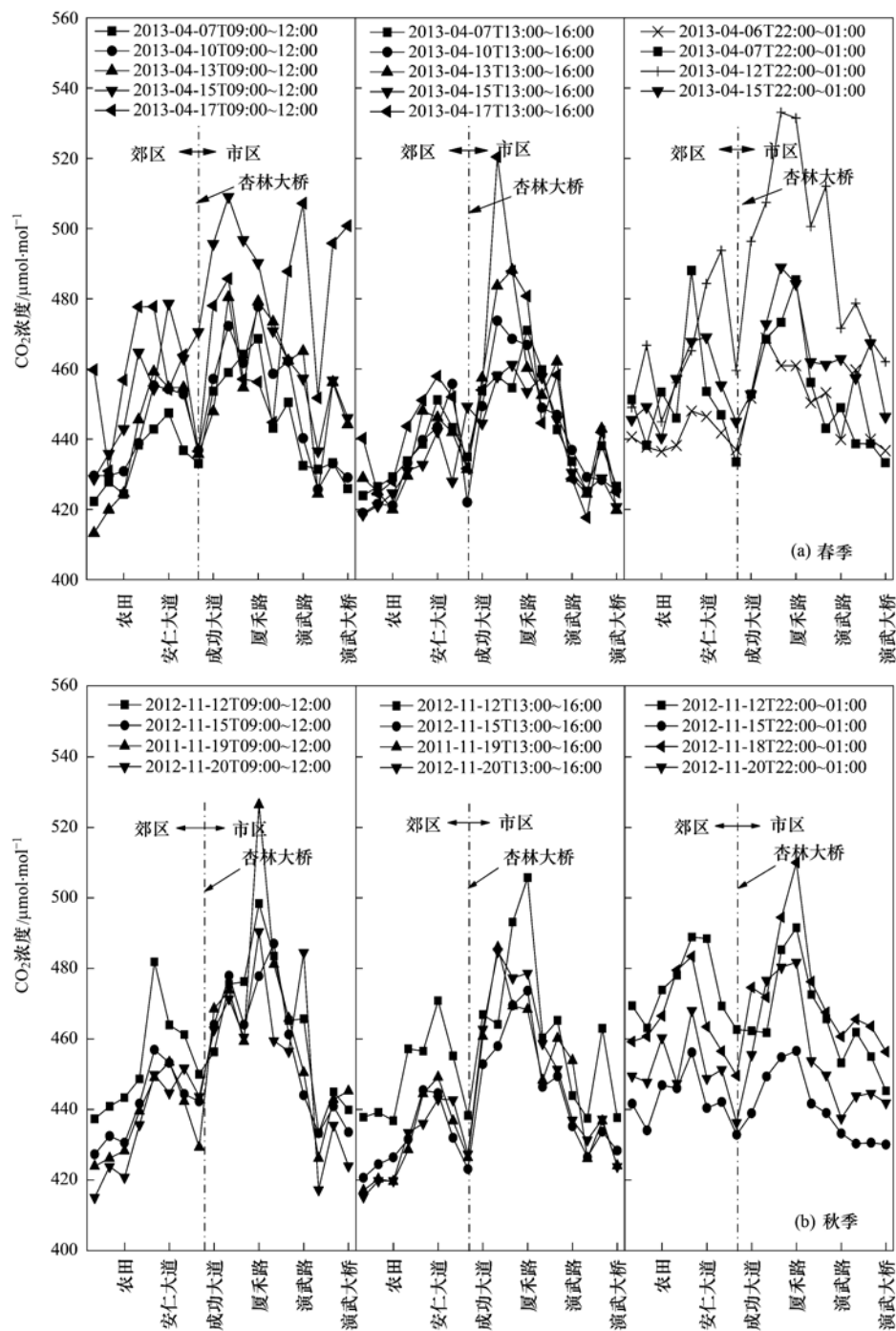


图3 厦门市春秋季节城市与郊区近地面 CO_2 浓度分布

Fig. 3 Near ground CO_2 distribution through the city of Xiamen at different times of the day in autumn (2012-11) and spring (2013-04)

呼吸作用、人类活动的排放,且晚上大气稳定度比白天要高,不利于 CO_2 扩散,使得 CO_2 浓度得到积累.各路段差值范围波动的原因在于,各路段功能区不同影响 CO_2 浓度的变化,如坂头水库,农田,及文屏路均受植物活动光合和呼吸作用的影响,而仙岳路段白天与夜晚 CO_2 浓度很高且几乎没有差别,主要是此路段只有一个单向车道,车辆较多易交通堵塞,且从地理位置上四周比较封闭,不利于 CO_2

的扩散,即造成 CO_2 源汇变化不大,甚至出现白天浓度高于夜晚的情况.杏林大桥,演武大桥均属于海面上 CO_2 浓度的监测, CO_2 浓度较其他路段较低,同时受海洋 CO_2 的吸收释放及海风的影响.

2.4 近地面 CO_2 浓度与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的关系

2.4.1 近地面 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度沿路线的分布

监测期间同时沿各路段监测了 $\text{PM}_{2.5}$ 的瞬时浓度,计算了均匀路段浓度的平均值,春秋季节不同时

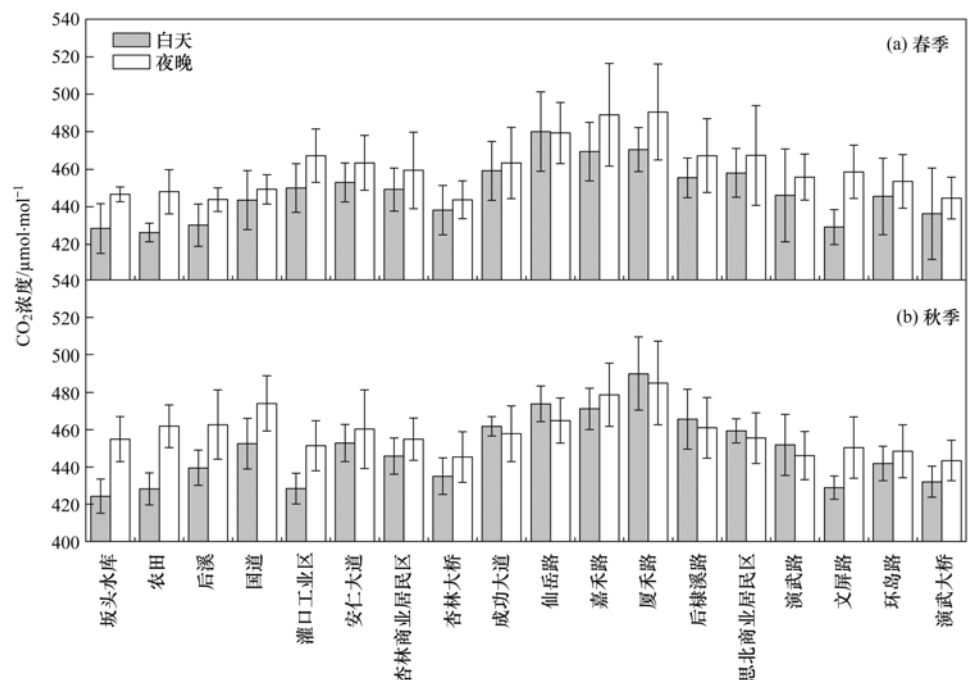


图4 厦门市春秋季白天与夜晚 CO₂ 浓度沿路线分布

Fig. 4 Near ground CO₂ concentration at different functional districts in Xiamen during daytime and nighttime in autumn (2012-11) and spring (2013-04)

间段沿路线上 PM_{2.5} 浓度如图 5 所示. 瞬时高值出现在春季的上午时段 09:00 ~ 12:00, 秋季的晚间时段 22:00 ~ 01:00. 与 CO₂ 不同 PM_{2.5} 的瞬时浓度在市区与郊区的分布无明显差异. 瞬时浓度除受道路上不可避免地车辆尾气影响外, 对车辆带起的扬尘也十分敏感, 此外清洁工人对道路的清扫也会引起颗粒物瞬时浓度的增加. 瞬时浓度在春季的最高值出现在农田区域为 0.57 mg·m⁻³, 最小值出现在坂头水库为 0.03 mg·m⁻³, 在秋季的最高值出现在国道为 0.31 mg·m⁻³, 最小值出现在坂头水库 0.06 mg·m⁻³. 不同季节 PM_{2.5} 瞬时浓度最小值出现在坂头水库是由于人为活动较小, 可视为监测的背景区域, 无明显 PM_{2.5} 的污染来源, 而秋季最高值在国道, 主要受到车辆排放的和车辆扬尘的影响, 春季最高值在农田区域, 主要是由于农田位于后溪镇的一个村庄周边, 监测期间常出现农作物及生活垃圾焚烧处理情况.

2.4.2 近地面 CO₂ 与 PM_{2.5} 的相关性

移动监测同时获取了各路段 PM 的浓度, 由于

移动监测过程中各路段上的 CO₂ 和 PM 的获取不可避免地受到车辆的影响, 如受车辆影响较大, CO₂ 与 PM 会有良好的相关性. 除受车辆排放的影响外, PM 浓度的瞬时变化很容易受到周围车辆扬尘等因素的影响. 统计了监测期间 CO₂ 与 PM_{2.5} 日平均浓度的相关性, 发现二者呈显著正相关关系 ($R = 0.73, P < 0.01$). 如表 2 所示, 本研究分析了各路段 CO₂ 浓度与 PM_{2.5} 的相关性, 结果表明, 杏林商业居民区 CO₂ 和 PM 的相关性较高 ($R = 0.78, P < 0.01$), 商业居民区人口密集, 人类活动排放较强, 此外, 后溪镇, 安仁大道和杏林大桥也表现出较高的相关性 ($R = 0.72/0.72/0.72, P < 0.01$). 除车辆排放影响外, 这些路段同时受到路面扬尘对颗粒物浓度的影响. 厦禾路与嘉禾路为交通繁忙区, CO₂ 浓度与 PM_{2.5} 在厦禾路同时表现出显著正相关, 但在后埭溪路, 此路段为交通繁忙区向自然风景区文屏山过渡路段, 两者相关关系不大 ($R = 0.37$), 说明 CO₂ 和 PM_{2.5} 同时受到其它因素的影响.

表 2 监测期间各路段 CO₂ 浓度与 PM_{2.5} 的相关关系¹⁾

Table 2 Correlation analysis of PM _{2.5} with CO ₂ at different functional areas									
路段	后溪	农田	坂头水库	国道	灌口工业区	安仁大道	杏林商业居民区	杏林大桥	成功大道
相关系数 R	0.72**	0.46*	0.48*	0.57**	0.54**	0.73**	0.78**	0.72**	0.76**
路段	仙岳路	嘉禾路	厦禾路	后埭溪路	思北商业居民区	演武路	文屏路	环岛路	演武大桥
相关系数 R	0.51**	0.63**	0.46**	0.37	0.48*	0.68**	0.67**	0.49*	0.64**

1) ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关, * 表示在 0.05 水平上(双侧)上显著相关

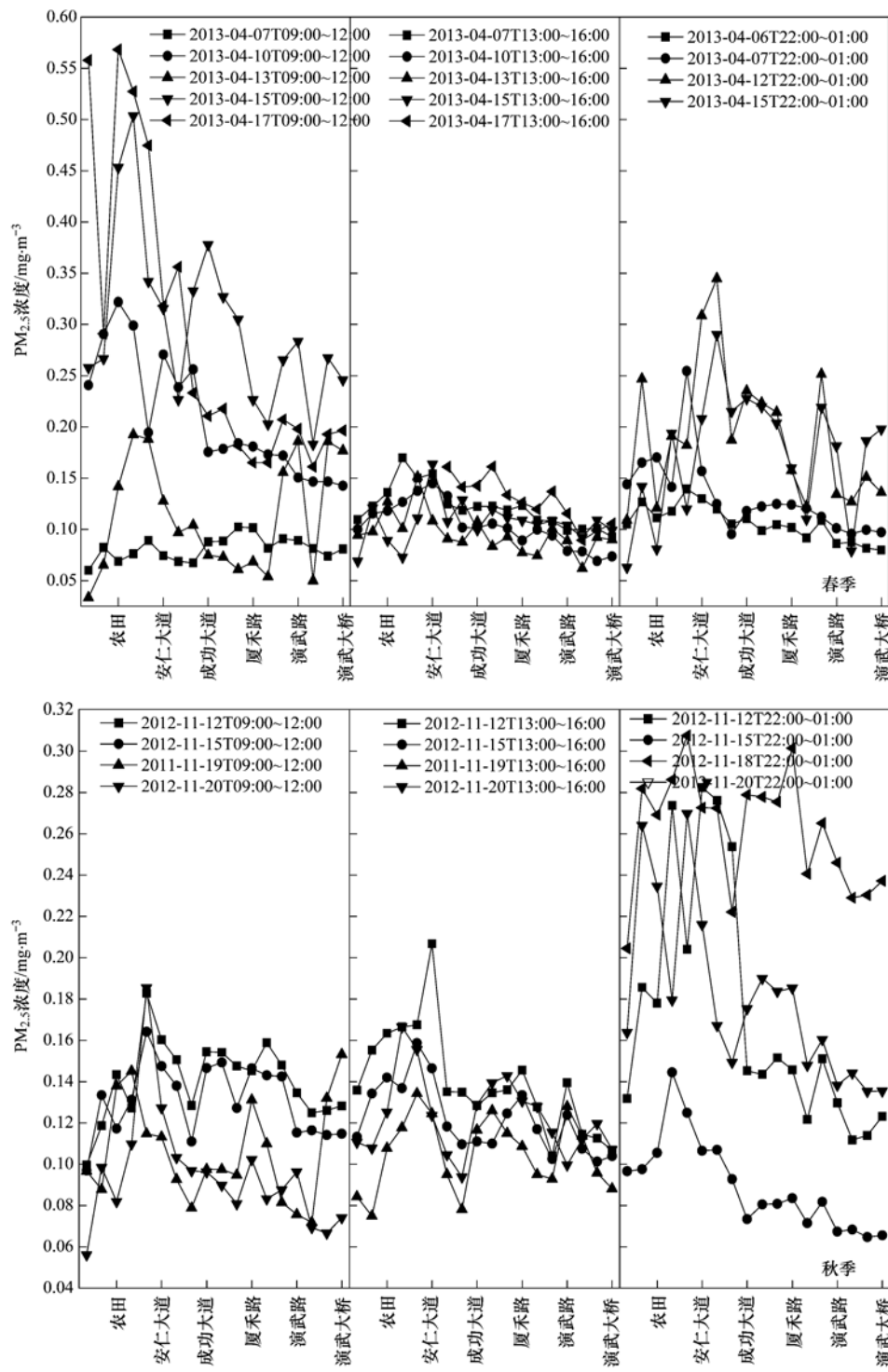


图5 厦门市春秋季节近地面 $PM_{2.5}$ 浓度沿路线分布

Fig. 5 Near ground $PM_{2.5}$ concentrations measured at different functional districts in Xiamen during the autumn (2012-11) and spring (2013-04)

3 结论

(1) 监测期间路线从厦门市北部的坂头水库背景区经郊区进入市中心最终在南部边缘沿海干道结束, CO_2 浓度在各路段的空间分布呈现中间市中心高沿市中心向边缘降低的结构, 不同功能区 CO_2 空

间分布存在差异, 受城市交通, 工业, 人类活动等排放, 地面植物作物以及气象条件的影响, 主要表现为交通繁忙区高于商业居民区高于自然风景区高于耕地高于山体林地.

(2) 移动监测法获得的春季平均 CO_2 浓度为 $452.04 \mu mol \cdot mol^{-1} \pm 20.24 \mu mol \cdot mol^{-1}$, 最大值在市

内交通繁忙区为 $533.10 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 最小值出现在远离市区坂头水库为 $413.25 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。秋季平均 CO₂ 浓度为 $451.80 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1} \pm 21.56 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 其中最大值也出现在市内交通繁忙区为 $526.45 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 最小值仍出现在坂头水库路段为 $415.01 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。存在“城市 CO₂ 岛”的现象。

(3) 受到 CO₂ 排放源汇及气象条件的影响, 不同时间段 CO₂ 浓度表现出夜晚时段 (22:00 ~ 01:00) 高于上午时段 (09:00 ~ 12:00) 高于下午时段 (13:00 ~ 16:00), 阴天普遍高于晴天, 且不同功能区夜晚时段 (22:00 ~ 01:00) 与白天时段 (09:00 ~ 12:00、13:00 ~ 16:00) CO₂ 浓度差异不同。

(4) 市区 CO₂ 浓度与周围郊区存在差异, 市区 CO₂ 浓度普遍高于郊区。

(5) 主要受道路车辆排放的影响, CO₂ 浓度与 PM_{2.5} 呈显著正相关关系 ($R=0.73, P<0.01$)。

参考文献:

- [1] Houghton J T, Meira Filho L G, Callander B A, *et al.* Climate Change 1995: The science of climate change [J]. Weather, 1996, **51**(11): 393.
- [2] ftp://ftp.cmdl.noaa.gov/ccg/CO2/trends/CO2_annmean_mlo.txt.
- [3] http://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/ghg/GHGbulletin.html, 2010-11-24.
- [4] Bergeron O, Strachan I B. CO₂ sources and sinks in urban and suburban areas of a northern midlatitude city [J]. Atmospheric Environment, 2011, **45**(8): 1564-1573.
- [5] 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: Geoscience and Remote Sensing Symposium [C]. USA: IEEE Conference Publications, 2010. 1141-1144.
- [6] 胡顺星, 赵培涛, 汪少林, 等. 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.
- [7] 蔡博峰, 刘春兰, 陈操操, 等. 城市温室气体清单研究[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009. 21-48.
- [8] 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.
- [9] Idso S B, Idso C D, Balling R C Jr. 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Balling R C Jr, Cerverny R S, Idso C D, *et al.* Does the urban CO₂ dome of Phoenix, Arizona contribute to its heat island? [J]. Geophysical Research Letters, 2001, **28**(24): 4599-4601.
- [16] Henninger S, Kuttler W. Near surface carbon dioxide within the urban area of Essen, Germany [J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2010, **35**(1-2): 76-84.
- [17] Kolb C E, Herndon S C, McManus J B, *et al.* Mobile laboratory with rapid response instruments for real-time measurements of urban and regional trace gas and particulate distributions and emission source characteristics [J]. Environmental Science & Technology, 2004, **38**(21): 5694-5703.
- [18] 李燕丽, 穆超, 邓君俊, 等. 厦门秋季近郊地面 CO₂ 浓度变化特征研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(5): 2018-2024.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 高松. 夏季上海城区大气中二氧化碳浓度特征及相关因素分析[J]. 中国环境监测, 2011, **27**(2): 70-75.
- [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] 赵敏, 胡静, 汤庆合, 等. 温室气体监测研究进展及对我国的启示[J]. 环境科技, 2012, **25**(4): 75-78.
- [26] Clifford M J, Clarke R, Riffat S B. Local aspects of vehicular pollution [J]. Atmospheric Environment, 1997, **31**(2): 271-276.
- [27] Idso C D, Idso S B, Balling R C Jr. The urban CO₂ dome of Phoenix, Arizona [J]. Physical Geography, 1998, **19**(2): 95-108.
- [28] Massen F, Beck E G. Accurate estimation of CO₂ background level from near ground measurements at non-mixed environments [A]. In: The economic, social and political elements of climate change. Climate Change Management [C]. Berlin Heidelberg: Springer, 2011. 509-522.

CONTENTS

Emission Factors and PM Chemical Composition Study of Biomass Burning in the Yangtze River Delta Region	TANG Xi-bin, HUANG Cheng, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (1623)
Size Distributions and Source Apportionment of Soluble Ions in Aerosol in Nanjing	XUE Guo-qiang, ZHU Bin, WANG Hong-lei (1633)
Characteristics of Particulate Matters and Its Chemical Compositions During the Dust Episodes in Shanghai in Spring, 2011	LI Gui-ling, ZHOU Min, CHEN Chang-hong, <i>et al.</i> (1644)
Numerical Modeling Analysis of Secondary Organic Aerosol (SOA) Combined with the Ground-based Measurements in the Pearl River Delta Region	GUO Xiao-shuang, SITU Shu-ping, WANG Xue-mei, <i>et al.</i> (1654)
Observation of a Photochemical Event in Jiaying During Summer 2013	SHEN Li-juan, LI Li, LÜ Sheng, <i>et al.</i> (1662)
Spatial and Temporal Variations of Near Surface Atmospheric CO ₂ with Mobile Measurements in Fall and Spring in Xiamen, China	LI Yan-li, XING Zhen-yu, MU Chao, <i>et al.</i> (1671)
Isotope Compositions of Elemental Carbon in the Smoke and Ash from Crop Straw Combustion	LIU Gang, LI Jiu-hai, XU Hui, <i>et al.</i> (1680)
Development of a Chemical Ionization Time-of-Flight Mass Spectrometer for Continuous Measurements of Atmospheric Hydroxyl Radical	DOU Jian, HUA Lei, HOU Ke-yong, <i>et al.</i> (1688)
Residual Levels of Acetochlor in Source Water and Drinking Water of China's Major Cities	YU Zhi-yong, JIN Fen, LI Hong-yan, <i>et al.</i> (1694)
Vertical Distribution of Water Quality and Its Influence on Underwater Light Field in Lake Chaohu	MA Meng-xiao, ZHANG Yu-chao, QIAN Xin, <i>et al.</i> (1698)
Correlation Between Aquatic Plant Diversity and Water Environment in the Typical Sites of Hangzhou Section of the Beijing-Hangzhou Grand Canal	LU Yin, XU Xiao-lu, ZHANG De-yong, <i>et al.</i> (1708)
Nitrogen and Phosphate Pollution Characteristics and Eutrophication Evaluation for Typical Urban Landscape Waters in Hefei City	LI Ru-zhong, LIU Ke-feng, QIAN Jing, <i>et al.</i> (1718)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in the Sediments and Estimation of the Nutrients Fluxes in Longjing Lake, Chongqing City, During the Initial Impoundment Period	PAN Yan-an, LEI Pei, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (1727)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides (OCPs) in the Water of Lake Qiandao and Its Major Input Rivers	TANG Fang-liang, ZHANG Ming, XU Jian-fen, <i>et al.</i> (1735)
Distribution of Potential Pathogenic Bacteria in the Jiulong River Watershed	HOU Li-yuan, HU An-yi, MA Ying, <i>et al.</i> (1742)
Influence of the River-lake Relation Change on the Distribution of Heavy Metal and Ecological Risk Assessment in the Surface Sediment of Poyang Lake	LIU Wan-qing, NI Zhao-kui, WU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (1750)
Spatiotemporal Variation Characteristics of Heavy Metals Pollution in the Water, Soil and Sediments Environment of the Lean River-Poyang Lake Wetland	JIAN Min-fei, LI Ling-yu, XU Peng-fei, <i>et al.</i> (1759)
Dissolved Organic Matter (DOM) Dynamics in Karst Aquifer Systems	YAO Xin, ZOU Sheng-zhang, XIA Ri-yuan, <i>et al.</i> (1766)
Sensitivity Analysis of AnnAGNPS Model's Hydrology and Water Quality Parameters Based on the Perturbation Analysis Method	XI Qing, LI Zhao-fu, LUO Chuan (1773)
Movement Characteristics of <i>Cyanobacteria</i> Under Stress of Water-Lifting Aeration	SUN Xiu-xiu, CONG Hai-bing, GAO Zheng-juan, <i>et al.</i> (1781)
Influence of Light Wavelength and Intensity on the Reduction of Divalent Mercury in Aquatic System	LI Xi-jia, ZHONG Zi-xuan, SUN Rong-guo, <i>et al.</i> (1788)
Dynamic Effects of Commonly Co-Existing Anions on the Removal of Selenite from Groundwater by Nanoscale Zero-Valent Iron	YANG Wen-jun, GUO Ying-qing, DU Er-deng (1793)
BiOBr Promoted the Photocatalytic Degradation of Beta-cypermethrin Under Visible Light	PENG Yi-zhu, ZHAO Xiao-rong, JIA Man-ke, <i>et al.</i> (1798)
Adsorption of Methylene Blue from Aqueous Solution onto Magnetic Fe ₃ O ₄ /Graphene Oxide Nanoparticles	CHANG Qing, JIANG Guo-dong, HU Meng-xuan, <i>et al.</i> (1804)
Selection of Electrochemical Anodic Materials for PFOA Degradation and Its Mechanism	ZHUO Qiong-fang, DENG Shu-bo, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (1810)
Occurrence and Fate of Typical Antibiotics in a Wastewater Treatment Plant in Southwest China	GAN Xiu-mei, YAN Qing, GAO Xu, <i>et al.</i> (1817)
Effects and Mechanism on Removing Organics and Reduction of Membrane Fouling Using Granular Macro-Porous Anion Exchange Resin in Drinking Water Treatment	HE Huan, DONG Bing-zhi, XU Guang-hong, <i>et al.</i> (1824)
Research on Treatment of High Salt Wastewater by the Graphite and Activated Carbon Fiber Composite Electrodes	ZHOU Gui-zhong, WANG Zhao-feng, WANG Xuan, <i>et al.</i> (1832)
Preparation and Application of the Quinonyl Chloromethylation Polystyrene in Biological Treatment of Wastewater	ZHANG Hua-yu, XU Qing, NIU Chun-mei, <i>et al.</i> (1838)
Enhanced Electro-Catalytic Oxidation of Dye Wastewater with FeMo ₁₂ Adopted Catalyst	WANG Li, YUE Lin, GUO Jian-bo, <i>et al.</i> (1843)
Formation and Characterization of Aerobic Granules in a Pilot-scale Reactor for Real Wastewater Treatment	YANG Shu-fang, ZHANG Jian-jun, ZOU Gao-long, <i>et al.</i> (1850)
Research on Cultivation of Aerobic Granular Sludge and Its Characteristics in Sequencing Fed Batch Reactor	LONG Bei, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> (1857)
Effect of Different Volume Loading of Aerobic/Anaerobic Zone on Nitrogen and Phosphorus Removal by Biofilm and Granular Sludge Coupling Process	YIN Hang, LIU Chang, GAO Hui, <i>et al.</i> (1866)
Adsorption of Cu ²⁺ by Xanthate-Functionalized Waste Sludge	CEN Yan, QUAN Xiang-chun, JIANG Xiao-man (1871)
Mechanisms of Copper Uptake by Submerged Plant <i>Hydrilla verticillata</i> (L. f.) Royle and <i>Myriophyllum spicatum</i> L.	XUE Pei-ying, LI Guo-xin, ZHAO Quan-li (1878)
Properties of Maize Stalk Biochar Produced Under Different Pyrolysis Temperatures and Its Sorption Capability to Naphthalene	HUANG Hua, WANG Ya-xiong, TANG Jing-chun, <i>et al.</i> (1884)
Beijing Common Green Tree Leaves' Accumulation Capacity for Heavy Metals	LI Shao-ming, KONG Ling-wei, LU Shao-wei, <i>et al.</i> (1891)
Assessment of Heavy Metal Contamination by Moss-bag Method and Road-dust Method for Taizhou Urban Area	CHEN Qin, FANG Yan-ming, YAN Yun, <i>et al.</i> (1901)
Effect of Grazing on the Temperature Sensitivity of Soil Respiration in Hulunber Meadow Steppe	WANG Xu, YAN Rui-rui, DENG Yu, <i>et al.</i> (1909)
Variation Characteristic in Soil Respiration of Apple Orchard and Its Biotic and Abiotic Influencing Factors	WANG Rui, GUO Sheng-li, LIU Qing-fang, <i>et al.</i> (1915)
Influencing Factors of Mercury Emission Flux from Forest Soil at Tieshanping, Chongqing	WANG Qiong, LUO Yao, DU Bao-yu, <i>et al.</i> (1922)
Characteristics of Arsenic Content in the Livestock Farms' Surrounding Environment in Shanghai Suburbs	XI Gong-fang, ZHOU Shou-biao, DING Hai-cheng, <i>et al.</i> (1928)
Input and Distribution of Rice Photosynthesized Carbon in the Tillering Stage Under Different Nitrogen Application Following Continuous ¹³ C Labeling	TAN Li-min, WU Hao, LI Hui, <i>et al.</i> (1933)
Simulation Study on the Effect of Salinity on the Adsorption Behavior of Mercury in Wastewater-Irrigated Area	ZHENG Shun-an, LI Xiao-hua, XU Zhi-yu (1939)
Leaching Behavior of Pb, Cd and Zn from Soil Stabilized by Lime Stabilized Sludge	LI Xiang, SONG Yun, LIU Yong-bing (1946)
Levels and Distribution of Short Chain Chlorinated Paraffins in Seaford from Dalian, China	YU Jun-chao, WANG Thanh, WANG Ya-wei, <i>et al.</i> (1955)
Application of Biotic Ligand Model for the Acute Toxicity of Copper to <i>Daphnia magna</i> in Water of Liaohe River and Taihu Lake	ZHOU Teng-yao, CAO ying, QIN Lu-mei, <i>et al.</i> (1962)
Phytotoxicity of Copper Oxide Nanoparticles to Metabolic Activity in the Roots of Rice	WANG Shu-ling, ZHANG Yu-xi, LIU Han-zhu, <i>et al.</i> (1968)
Enhancing Effect of Tween 80 on Degradation of Triphenyltin by <i>Bacillus thuringiensis</i>	HUANG Jie, YE Jin-shao, YIN Hua, <i>et al.</i> (1974)
Long-term Performance of Microbial Fuel Cell Using Manure as Substrate	JIAO Yan, ZHANG Guo-dong, ZHAO Qing-liang (1981)
Influence of Goethite on Anaerobic Fermentation of Organic Fraction of Municipal Solid Waste (OFMSW)	YANG Lu-lu, YUE Zheng-bo, CHEN Tian-hu, <i>et al.</i> (1988)
Pollutants Produced in Municipal Refuse Container During Transfer Process	WANG Xiao-yuan, LIU Yin-hua, WANG Fei, <i>et al.</i> (1994)
Selective Catalytic Oxidation of H ₂ S over Supported Fe Catalysts on CeO ₂ -Intercalated Laponite Clay	SUN Chao, ZHANG Xin, HAO Zheng-ping, <i>et al.</i> (2002)
Preparation by Different Methods and Characterization of Desulfurization Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites	ZHU Chun-lei, WANG Hai-lin, SUN Chun-bao (2010)
Sampling Methods for PM _{2.5} from Stationary Sources: a Review	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, LI Zhen, <i>et al.</i> (2018)
A Research Overview of Methanogens	LI Yu-shan, LI Yao-ming, OUYANG Zhi-yun (2025)

《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)

2014年5月15日 35卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 5 May 15, 2014

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

国内外公开发行人