

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

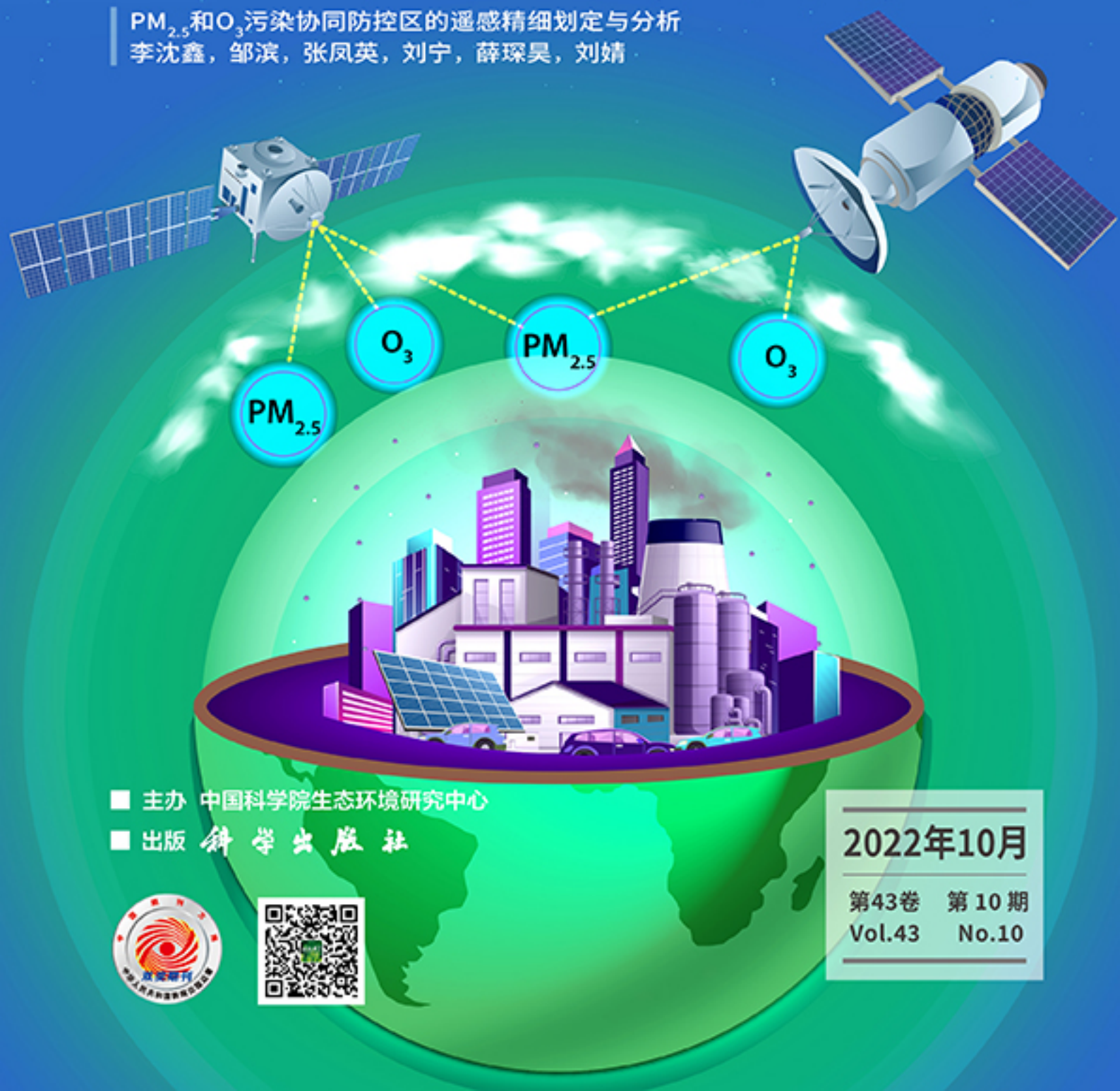
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

PM_{2.5}和O₃污染协同防控区的遥感精细划定与分析
李沈鑫, 邹滨, 张凤英, 刘宁, 薛琛昊, 刘婧



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年10月

第43卷 第10期
Vol.43 No.10

目次

PM _{2.5} 和O ₃ 污染协同防控区的遥感精细划定与分析	李沈鑫, 邹滨, 张凤英, 刘宁, 薛琛昊, 刘婧 (4293)
广州市冬季一次典型臭氧污染过程分析	裴成磊, 谢雨彤, 陈希, 张涛, 邱晓暖, 王瑜, 王在华, 李梅 (4305)
佛山臭氧浓度预报方程的建立与应用	陈辰, 洪莹莹, 谭浩波, 司徒淑婷, 程银琳, 步巧利, 吴蒙, 潘巧英 (4316)
乌海市高分辨率大气污染源排放清单构建及其在臭氧污染成因探究中的应用	张瑞欣, 楚波, 尚春林, 曹喜萍, 李光耀, 朱玉凡, 刘晓, 夏佳琦, 陈强 (4327)
结合在线监测和自动识别系统分析东海沿岸船舶排放特征	邱浩, 刘丹彤, 吴杨周, 李思远, 丁朔, 胡康, 张家乐, 陈梅汀 (4338)
机动车制动磨损颗粒物及挥发性有机物的组分特征	门正宇, 刘笃优, 郭全有, 张静, 彭剑飞, 吴琳, 毛洪钧 (4348)
笼养鸡舍冬季挥发性有机物排放特征	曹甜甜, 郑云昊, 张羽, 王悦, 丛群欣, 王源昊, 董红敏 (4357)
上海市生活垃圾房气溶胶中可培养细菌污染状况及种群特征	卢冰洁, 张翔, 王川, 邱俊, 李丹 (4367)
浙江省2008~2018年人为源氨排放清单及分布特征	方利江, 杨一群, 叶观琼 (4380)
“双碳”目标下钢铁行业控煤降碳路线图	薛英岚, 张静, 刘宇, 陈瑜, 孙健, 蒋洪强, 张伟, 曹东 (4392)
空间关联网络结构特征的减排效应: 基于城市群视角	郑航, 叶阿忠 (4401)
中国对外直接投资的减污降碳效应及其实现机制	白梓函, 吕连宏, 赵明轩, 张楠, 罗宏 (4408)
近年全国地表水水质变化特征	嵇晓燕, 侯欢欢, 王姗姗, 杨凯 (4419)
湟水河流域地表水体微塑料分布、风险及影响因素	范梦苑, 黄懿梅, 张海鑫, 李好好, 黄倩 (4430)
汾河流域地表水化学同位素特征及其影响因素	赵春红, 申豪勇, 王志恒, 梁永平, 赵一, 谢浩, 唐春雷 (4440)
城镇化进程中珠江三角洲高锰地下水赋存特征及成因	吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 朱亮, 李海军 (4449)
喀什噶尔河下游平原区地下水咸化特征及成因分析	鲁涵, 曾妍妍, 周金龙, 孙英 (4459)
重庆市老龙洞地下河流域硝酸盐来源和生物地球化学过程的识别	王雨畅, 杨平恒, 张洁茹 (4470)
蓝藻水华过程中优势种群演替模式、效应及驱动因子分析	欧阳添, 赵璐, 纪璐璐, 杨宋琪, 郑保海, 杜雨欣, 李佳欣, 李玉鑫, 施军琼, 吴忠兴 (4480)
珠海市磨刀门水道输水水源水库群浮游植物群落特征及其环境驱动因子	张茉莉, 王思瑞, 昌盛, 王山军, 金德才, 樊月婷, 张坤峰, 谢琼, 付青 (4489)
营养物质对铜绿微囊藻生长和藻际细菌的影响	吕萍, 李慧莉, 徐勇, 郑效旭, 黄振华, 王聪, 徐圣君, 庄绪亮 (4502)
老化作用对微塑料吸附四环素的影响及其机制	王林, 王姝歆, 曾祥英, 何杨, 黄雯, 郑世界, 张建强 (4511)
沉积物和土壤中胶体对氯霉素吸附行为的影响	晏彩霞, 罗燕清, 聂明华, 周旋, 丁明军 (4522)
历史抗生素胁迫改变磺胺甲噁唑和甲氧苄啶对活性污泥的影响: ARGs及其潜在宿主	张忠兴, 樊晓燕, 李星, 高玉玺, 赵君如 (4536)
阳朔典型铅锌矿区流域土壤重金属空间分布特征及来源解析	陈盟, 潘泳兴, 黄奕翔, 王耀耀, 张睿东 (4545)
白洋淀及周边土壤重金属的分布特征及生态风险评估	郑飞, 郭欣, 汤名扬, 朱冬, 董四君, 康乐, 陈兵 (4556)
基于地理探测器的镇域尺度土壤重金属含量空间分异及其影响因素分析	龚仓, 王亮, 王顺祥, 张志翔, 董航, 刘玖芬, 王德伟, 严步青, 陈映 (4566)
燃煤电厂重金属排放与周边土壤中重金属污染特征及健康风险	车凯, 陈崇明, 郑庆宇, 范辉, 魏明磊, 罗蓬, 郁金星 (4578)
海南岛半干旱区农用地土壤重金属富集因素、健康风险及来源识别	杨剑洲, 龚晶晶, 王振亮, 高健翁, 杨建坤, 胡树起, 唐世新 (4590)
九龙江口红树林表层沉积物重金属赋存形态及污染评价	张华兰, 于瑞莲, 王瑞安, 胡恭任, 黄华斌, 吴雅清 (4601)
我国茶叶主产区有机肥重金属含量现状	伊晓云, 方丽, 杨向德, 马立峰, 刘美雅, 张群峰, 倪康, 石元值 (4613)
甘肃省农业土壤邻苯二甲酸酯累积特征及来源分析	陈玉玉, 张光全, 张杨, 李明凯, 郝佳欣, 熊有才, 李崇霄, 曹靖 (4622)
三峡库区澎溪河不同高程消落带土壤磷形态及磷酸酶活性分布特征	高艺伦, 方芳, 唐子超, 张蕊, 蒋艳雪, 郭劲松 (4630)
塔里木盆地北缘绿洲不同连作年限棉田土壤有机碳组分特征及其与理化因子的相关性	李昕竹, 贡璐, 唐军虎, 罗艳, 丁肇龙, 朱海强, 张涵, 李蕊希 (4639)
黄土丘陵区柠条人工林不同深度土壤呼吸速率对土壤湿度的响应	孙亚荣, 王亚娟, 赵敏, 薛文艳, 梁思琦, 刘乐, 刘超, 陈云明 (4648)
基于Meta-analysis的生物炭对土壤硝态氮淋失和磷酸盐固持影响	姜志翔, 崔爽, 张鑫, 郝敏, 孙德茂 (4658)
低分子有机酸强化植物修复重金属污染土壤的作用与机制	方治国, 谢俊婷, 杨青, 卢烨桢, 黄海, 朱芸娟, 尹思敏, 吴鑫涛, 都韶婷 (4669)
无机钝化剂对镉污染酸性水稻土的修复效果及其机制	张剑, 孔繁艺, 卢升高 (4679)
改良铅锌矿渣对栎树幼苗铅锌富集与耐性机制	谢天志, 陈永华, 苏荣葵, 刘慧, 姚海松 (4687)
CaO ₂ /FA复合材料富集磷效能及其回收物对土壤改良作用	岳薇, 李大鹏, 吴玲予, 王璐, 汤尧禹, 朱企, 黄勇 (4697)
早稻秸秆还田和减钾对晚稻产量和土壤肥力的影响	黄巧义, 黄建凤, 黄旭, 吴永沛, 李苹, 付弘婷, 唐拴虎, 刘一峰, 徐培智 (4706)
秸秆连续还田配施化肥对稻-油轮作土壤碳库及作物产量的影响	蔡影, 付思伟, 张博睿, 胡宏祥, 刘文雯, 俞金涛, 贾临东, 刘运峰 (4716)
化肥减量配施秸秆对双季稻田固氮微生物群落的影响	陈凯鹏, 韦菊娟, 陈丹, 王聪, 沈健林, 李勇, 吴金水 (4725)
化肥减量与有机物料添加对华北潮土微生物氮循环功能基因丰度和氮转化遗传潜力的影响	李胜君, 胡荷, 李刚, 王蕊, 赵建宁, 张贵龙, 修伟明 (4735)
长期覆膜条件下农田土壤微生物群落的响应特征	胡志娥, 肖谋良, 丁济娜, 李剑虹, 陈剑平, 葛体达, 鲁顺保 (4745)
长期秸秆还田对潮土真菌群落、酶活性和小麦产量的影响	马垒, 李燕, 魏建林, 李子双, 周晓琳, 郑福丽, 吴小宾, 王利, 刘兆辉, 谭德水 (4755)
土壤改良剂对再生水滴灌根际土壤菌群多样性及病原菌和抗生素抗性基因丰度的影响	崔丙健, 崔二革, 刘春成, 胡超, 樊向阳, 李中阳, 高峰 (4765)
氮素对苜蓿植物修复垃圾堆场镉-多环芳烃复合污染土壤及土壤细菌群落结构的影响	李怡佳, 马俊伟, 李玉倩, 肖琛, 沈心怡, 牛云, 陈家军 (4779)
抗生素降解剂对猪粪堆肥腐熟和细菌群落演替的影响	李琳琳, 张昕, 马军伟, 孙万春, 成琪璐, 林辉 (4789)
《环境科学》征订启事 (4337)	《环境科学》征稿简则 (4407)
信息 (4521, 4705, 4800)	

结合在线监测和自动识别系统分析东海沿岸船舶排放特征

邱浩¹, 刘丹彤^{1*}, 吴杨周¹, 李思远¹, 丁朔¹, 胡康¹, 张家乐¹, 陈梅汀²

(1. 浙江大学地球科学学院, 杭州 310027; 2. 舟山市气象局, 舟山 316021)

摘要: 海运排放大气污染物对空气质量和气候具有重要影响, 但是由于船舶类型及其运行工况的复杂性, 人们对船舶排放特征的认识仍然不足. 东海沿岸是全球航运活动最为密集的地区之一, 汇集了各种国内国际运输船只. 选取宁波舟山港作为研究地点, 使用在线仪器长时间测量主要的环境大气气体和颗粒污染物, 并利用自动识别系统(AIS), 获得每种船舶的速度. 根据后向轨迹区分出: ①受船舶排放影响主导的时期(夏季风, 由处于完全运行或停泊的船舶占主导地位); ②受内陆气流影响主导的时期(冬季风). 结果表明二氧化硫(SO_2)、氮氧化物(NO_x)和黑碳气溶胶(BC)的排放与高速运行的船舶相关, 而一氧化碳(CO)可能与较低的运行速度的船舶有关, 总颗粒物(PM)与船舶速度没有显著相关关系. 主要污染物在巡航工况下的排放增强因子约为怠速工况1~4倍. 研究通过对直接环境背景下船舶排放进行原位观测, 为评估船舶排放清单提供重要参考.

关键词: 大气污染物; 船舶排放; 自动识别系统(AIS); 船舶工况; 宁波舟山港

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)10-4338-10 DOI: 10.13227/j.hjkk.202110069

Investigating the Pollutants of Marine Shipping Emissions Along the East China Sea by Combining in-situ Measurements and Automatic Identification System

QIU Hao¹, LIU Dan-tong^{1*}, WU Yang-zhou¹, LI Si-yuan¹, DING Shuo¹, HU Kang¹, ZHANG Jia-le¹, CHEN Mei-ting²

(1. Department of Atmospheric Sciences, School of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. Zhoushan Meteorological Bureau, Zhoushan 316021, China)

Abstract: Marine shipping emissions have important impacts on air quality and climate. This type of anthropogenic emission remains largely unclear due to complex vessel types and activities. A coastal site near the Ningbo-Zhoushan port along the East China Sea was selected for this study, representing one of the hotspot regions globally with the most intensive shipping activities, in combination with vessels for both domestic and international transportation. Long-term temporal variations in key gaseous and particulate pollutants were obtained at the site using in-situ measurements, and the vessel speed associated with each classified vessel type was obtained according to the automatic identification system (AIS). In combination of backward trajectories, we were able to identify the periods predominated by the surrounding vessel emissions (in warm seasons, dominated by vessels in full operation or idle mode) or influenced by continental outflow (in cold season). We found that emissions of sulphur dioxide (SO_2), nitrogen oxides (NO_x), and black carbon (BC) aerosol were highly correlated with high-speed vessels, whereas carbon monoxide (CO) was likely related to lower operation speed. The total particulate matter (PM) was not directly linked to vessel activities. The enhancement factor in operation mode compared to that in idle mode was approximately 1-4 for most pollutants. This direct ambient observation of the emissions from a range of mixed vessel types may provide a basis for evaluating the shipping emission inventory.

Key words: atmospheric pollutant; ship emissions; automatic identification system (AIS); ship operation; Ningbo-Zhoushan Port

在各种运输方式中, 船舶运输在国际贸易中占有重要地位. 繁荣的水上交通带来便利的同时, 也给区域空气质量带来巨大的挑战. 船舶排放污染物是导致沿海城市空气污染的主要成因之一^[1~8]. 船舶大多以柴油或重油为燃料^[9], 不仅排放大量气态和颗粒态污染物^[10], 还会增加温室气体预算^[11]、扰乱云的微物理性质^[12]和影响全球辐射强迫^[13]等.

近年来, 船舶排放越来越受到国内外学者的关注. 在船舶排放贡献率方面, 如香港特别行政区环境保护署公布, 2012年船舶排放已成为香港最大的排放源, 其中船舶的排放 SO_2 占全香港的50%, NO_x 占全香港32%, $\text{PM}_{2.5}$ 占全香港的37%^[14]. Lu等^[15]估算了珠三角地区2000~2009年期间的船舶废气排放量, 指出非道路移动源(船排放)是 SO_2 和 NO_x 的重要来源. 在船舶速度对排放的影响方面, Cappa

等^[16]的研究表明在船舶航速低于12节范围内, 船舶的BC和 NO_x 污染物排放与船舶速度呈正相关. Lindstad等^[17]的研究同样表明速度可以影响船舶的污染物排放量. 船舶排放还会影响人体健康^[18], Corbett等^[19]根据船舶排放和港口附近居民的死亡率的关系给出了全球尺度的评估.

宁波舟山港位于长江三角洲地区, 2017年, 宁波舟山港年货物吞吐量超10亿t, 成为全球首个“10亿t”港口^[20], 同时舟山也是我国最大的海鲜生产地, 当地渔业活动十分发达. 现阶段长三角地区船舶排放已有部分研究, 但多是在国外研究成果上开发

收稿日期: 2021-10-11; 修订日期: 2022-02-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(41875167)

作者简介: 邱浩(1997~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为船舶排放污染, E-mail: 21938038@zju.edu.cn

* 通信作者, E-mail: dantongliu@zju.edu.cn

了大气污染物排放清单,如宁波-舟山港船舶排放清单的计算^[21]. 长三角地区对于船舶运行时排放情况的研究,多集中在少量的船舶^[22],如针对于大型货船的排放研究^[23]以及单只船舶在不同工况下排放特征研究^[24,25],缺少真实大气背景下大范围大数量船舶排放的观测研究. 但对于宁波-舟山港地区来说,其繁荣的海运交通包括了各式各样的船舶排放,该地区的污染物排放是各种船舶共同作用的结果,单一船舶的观测及排放清单不能准确描述真实大气条件下船舶排放特征,而目前对于真实大气环境下船舶排放的研究较少^[26].

本研究通过在长三角大型港口宁波-舟山港(29°56'53.82"N, 122°18'11.88"E)附近建立大气监测站进行观测,结合船舶自动识别(automatic identification system, AIS)系统,获得了舟山2019年8~12月大气污染物的浓度变化及船舶航运情况. 在真实大气环境背景下研究宁波-舟山港船舶排放大气污染物情况,通过气团分析以剥离陆地源的影响,可以清晰地分离和分析船舶排放对真实大气环境的影响,从而分析污染物与船舶之间的关系,对研究船舶排放污染物的特性具有十分重要的意义.

1 材料与方法

1.1 观测地点及时段

本次观测时间为2019年8月至2019年12月,观测站点位于浙江省舟山市普陀区青龙山公园的一座小山上(29°56'53.82"N, 122°18'11.88"E, 海拔94.5 m),该站点距离内陆较远. 宁波-舟山港是东海沿岸最严重的船舶排放区之一,包含各种大小型及速度不同的船舶,船舶类型和船舶数量较多.

1.2 单颗粒黑碳光度计

单颗粒黑碳光度计(single-particle soot photometer, SP2)^[27],是目前能直接测量单个粒子中黑碳质量的主要仪器. 该仪器由位于美国科罗拉多州博德市(Boulder, Colorado, USA)的粒子测量技术公司(Droplet Measurement Technologies, Inc., DMT)制造. 该仪器的工作原理是利用其模具内的Nd:YAG激光器来发射波长为808 nm的激光,并通过crystal后形成稳定的1064 nm激光束,由于BC具有较强的红外光吸收能力,它会吸收所发射的高能激光,被加热燃烧并发出白炽信号. 再根据白炽信号与黑碳质量浓度成正比的关系而进一步获得每个黑碳颗粒物的质量浓度. SP2仪器在采样前利用Aquagad对白炽信号接收器信号进行了标定. Petzold等^[28]曾使用SP2量化BC含量. 此外SP2还装有散光光探测器,能推断单颗粒物中BC气溶胶

的大小与混合状态.

1.3 气体物质

采用热电气体仪器(thermo fisher scientific model 42i、thermo fisher scientific model 43i、thermo fisher scientific model 48i)同步测量NO_x、SO₂和CO等气态物种的混合比,该仪器由美国赛默飞世尔科技公司制造,并在试验前接入标准气体用于校准仪器.

1.4 后向轨迹分型

本研究采用拉格朗日混合粒子轨迹模型(hybrid single-particle lagrangian integrated trajectory, HYSPLIT)^[29],版本号为4.2.0. 该模型是美国国家海洋和大气管理局(NOAA)和澳大利亚气象局联合研发的一个专门用于研究污染物在大气中的传输轨迹、扩散和沉降的综合模式系统,它既能模拟大气污染物在大气中的传输轨迹,还能模拟它们的扩散与沉降,目前被广泛用于污染物的传输方面的研究分析. 由于东海沿岸的局部排放是其主要特征,所以本研究重点分析24 h的后向轨迹,考察最近气团的影响. 每一个小时执行一次后向轨迹,然后将每条轨迹放到地图上,同时对这些轨迹进行区域划分,从而确定每个划定区域的轨迹贡献^[30]. 本研究根据地形高度将这些区域划分为海洋和陆地,每个气团的后向轨迹对应24个坐标点(纬度和经度),如果它们在陆地上,则被归类为陆地;如果它们在地面以上没有相应区域,则被归类为海洋. 同时,每条后向轨迹对应24 h. 如果在过去的24 h,返回轨道在陆地区域停留的时间超过5%,则被归类为来自陆地,否则来自海洋.

1.5 自动船舶识别分析系统

卫星和岸基自动识别系统(AIS)联合信号可以用于识别船舶活动信息^[31]. 我国各地的港口的船舶排放清单建立均结合了AIS数据,如大连港^[32]、深圳^[33]和舟山^[34]等. 其原理是通过安装在船舶上的AIS系统通过无线电定期报告瞬时信息,如船舶位置(经纬度),航行速度和导航状态等. 本试验期间选定区域内(29.90°~29.98°N, 122.26°~122.34°E)共收集3000万余条AIS信号. 为了确保清单尽可能详细地反映真实情况,首先需要对AIS数据进行整理,将所有AIS信号按照时间排序,提取出某一类型的船舶信息. 然后根据MMSI号进行标记(MMSI是船舶的唯一标志),对船舶数量分析时(如10 min分辨率),将一个连续的10 min内所有相同MMSI号的船舶标记为同一艘船舶,以去除重复记录;根据10 min内该船只的所有瞬时速度的中位值来确定船舶速度.

2 结果与讨论

2.1 舟山港大气污染物的来源及贡献

图1显示了试验区域内夏季风主导试验期的后向轨迹. 后向轨迹主要有两个部分, 一是来自西北方向的内陆气流, 这部分后向轨迹路径短, 移动速度慢, 占总轨迹数的极少部分, 携带了来自内陆的大气污染物; 另一部分则是来自海洋方向, 该部分后向轨迹路径较长, 移动速度快, 是后向轨迹的主体部分, 携带了海洋上的大气污染物. 如图1所示, 当试验港口受夏季风影响时, 主要受到海洋气团的影响, 偶尔会受到陆地气流的影响. 通过气团轨迹贡献进一步证实了这个结论(图2). 2019年8~12月船舶及大气污染物组分浓度时间序列如图2所示, 其中只列出两种数量最多的船舶类型(渔船和货船). 在8~10月时间段内(夏季风时期), 80%

以上的时间由海洋气团主导, 从船舶速度可以看出, 此时宁波舟山港区由处于完全运行(速度较快)或闲置模式(速度较慢)的船舶占主导地位; 而在11~12月内, 陆地气团传输明显增加, 占总时间的50%左右. 在试验期间, 二氧化硫(SO_2)、氮氧化物(NO_x)和黑炭气溶胶(BC)等大气污染物存在明显的变化特征, 各污染物在时间尺度上具有一定的统一性. 例如, 在8月10日、9月22日和10月3日左右存在明显峰值, 此时船舶数量也达到峰值, 说明此时间内 SO_2 、 NO_x 和BC与船舶之间存在一定关联. 然而, 在11月和12月内, SO_2 、 NO_x 和BC等大气污染物浓度变化幅度更加明显, 起伏较大, 但此时船舶数量变化幅度较小, 结合气团轨迹贡献分析表明, 此时污染物浓度受到陆地气流传输的影响较大, 是船舶排放与陆地气流的共同作用结果.

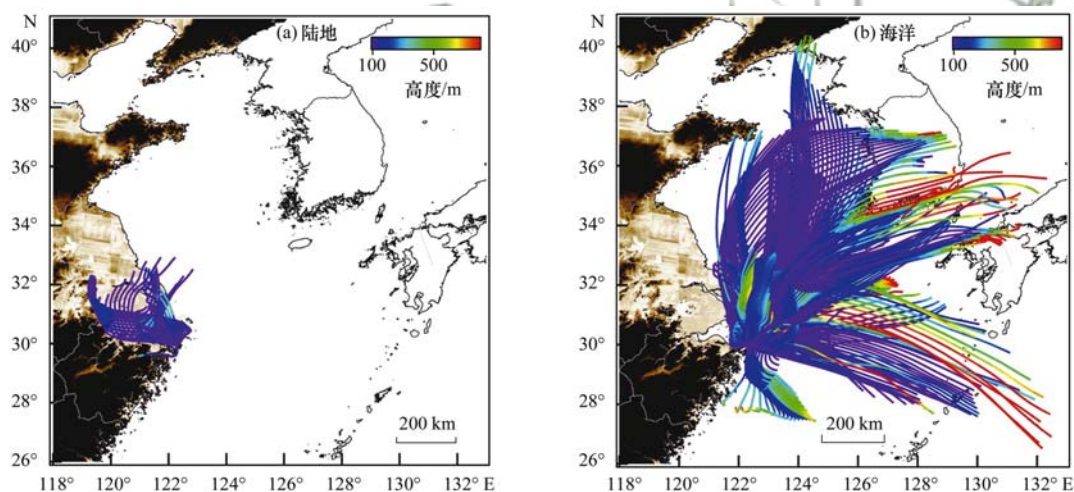


图1 受海洋和陆地影响的分类气团的后向轨迹

Fig. 1 Examples of backward trajectories for classified air masses dominated by marine and continental influences

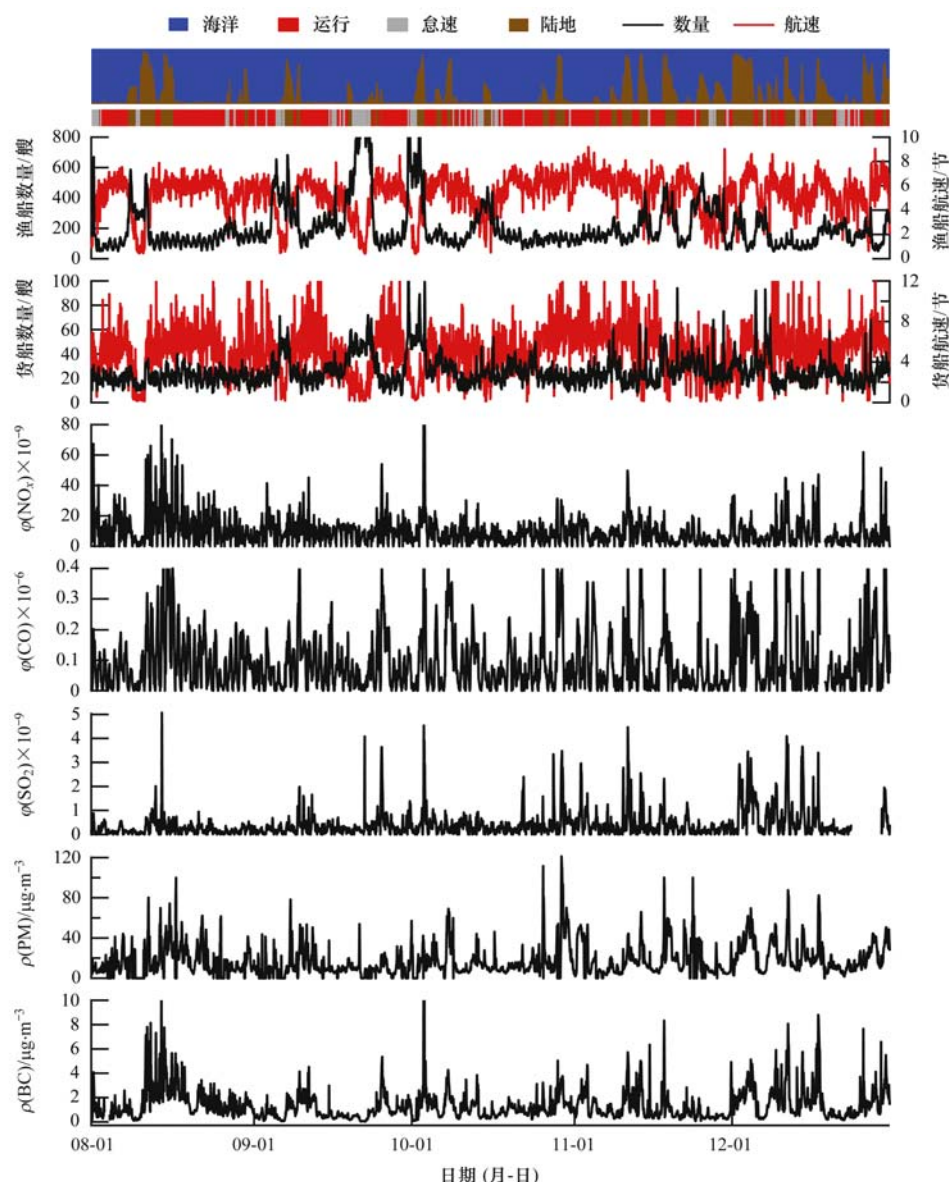
图3为大气污染物组分浓度与船舶艘次的相关性数据分析, 分为大陆污染物组分与海洋污染物组分. 在海洋污染物中, 当船舶数量较多时, 各污染物浓度均处于较低值, 此时船舶速度也处于较低值. 而当船舶数量较少时, 船舶速度较快, 污染物浓度也随之增加, 说明污染物组分浓度与船舶存在一定的关联性, 即在船舶数量达到一定值时, 污染物浓度与船舶数量呈反比关系, 与船舶速度呈正比关系. 而对于大陆污染物组分, 污染物组分分布较为分散, 与船舶数量及速度并无显著关联.

2.2 船舶及主要污染物的特征

为了进一步研究大气污染物与船舶之间的关系, 利用AIS数据获取了试验时间内选定研究区域内的船舶信息. 在试验区域内, 在各类型船舶中, 渔船是数量最多的船只(图4), 从分布上可以看出有30%以上的试验时间渔船数量在150艘之上, 且船

速集中于4~8节之间. 除此之外, 货船、邮轮和其他类型船舶(未定义类型的船舶)数量也较多, 这4类船舶占据了船舶总数的95%以上. 因此, 本研究将主要分析这4类船舶.

船舶数量较多与较少时的分布情况如图5所示, 从图5(c)可以看出, 当渔船及货船数量较多时, 其航行速度较慢, 而船舶数量较少时航速更快. 这是由于船舶数量较多时造成港口堵塞, 船舶集中在港口区域; 船舶数量较少时航线空旷, 船舶能以较快速度航行通过(图5). 根据船舶的不同工况, 结合气团轨迹将研究时段分为3个类别: ①陆地气团主导期; ②船舶怠速期; ③船舶运行期. 分类后大气污染物的分布情况如图6所示. 陆地气团主导期是根据气团轨迹将这一时期内船舶归为一类; 将剩下受海洋主导的船舶根据航行速度大小分为怠速期与运行期两类. 与怠速期相比, 在船舶运行期 SO_2 、 NO_x 、



由于设备故障原因, SO_2 数据在 12 月 23 ~ 29 日缺失

图 2 8 ~ 12 月船舶和污染物时间序列

Fig. 2 Time series of ships and pollutants from August to December

CO 和 BC 等大气污染物占比分布整体偏右, 说明 SO_2 、 NO_x 和 BC 在船舶巡航期具有更高浓度, 表明船舶对其具有重要贡献. PM 在两类时期分布整体不变, 表明其与船舶活动没有显著的关系.

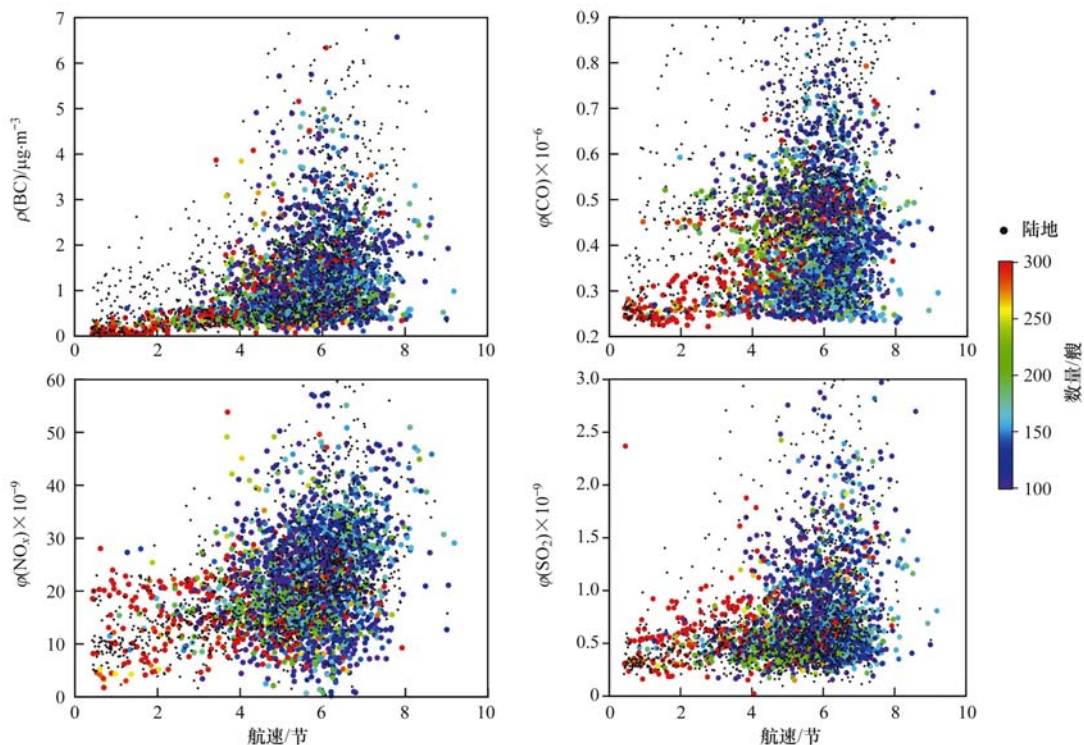
2.3 污染物浓度日变化特征

本试验期间内各船舶和各污染物的日变化如图 7 和图 8 所示. 4 类船舶在运行期和怠速期数量均有明显的日变化特征, 早高峰时呈现密集的船舶活动, 包括离港和到港, 其中渔船数量在早高峰时增量明显(图 7), 这是由于当地的渔业活动. 而 4 类船舶速度日变化在各个时期却没有明显日变化, 这是由于分类时以速度为依据将船舶分类, 导致船舶各时期在各个时间段的速度相近, 因此需要新的表示方法来综合考虑船舶数量和速度. 以往估算船舶排放

因子最常用的方法如下^[35]:

$$E = \text{MCR} \cdot \text{EF} \cdot \sum \text{LF} \cdot A \cdot \Delta t \quad (1)$$

式中, E 为排放因子; MCR 为主机最大连续额定功率; EF 为基础排放因子; LF 为瞬时负荷因子, $\text{LF} = (V_i/\text{MDS})^3$, V_i 为瞬时速度, MDS 为该类型船舶的最大设计速度; A 为调整系数; t 为时间. 从公式 (1) 可以得出, E 和 V_i 的 3 次方之间存在相对重要的关系, 所以将船舶数量乘以船舶速度的 3 次方得到相对排放因子 E_R (图 7). 从图 7 中可以看出, 4 类船舶的 E_R 均呈白天高晚上低的特征. 根据运行期和怠速期的比值获取船舶的排放增强因子, 发现邮轮在运行工况下的排放增强因子白天有较强的增加, 总体而言, 4 类船舶的排放增强因子没有明显的日变化特征, 其平均排放增强因子分别为 $3.22 \pm$



彩色点为海洋污染物组份
图 3 污染物浓度与船舶数量及航速关系

Fig. 3 Relationship between pollutant concentration and number and speed of ships

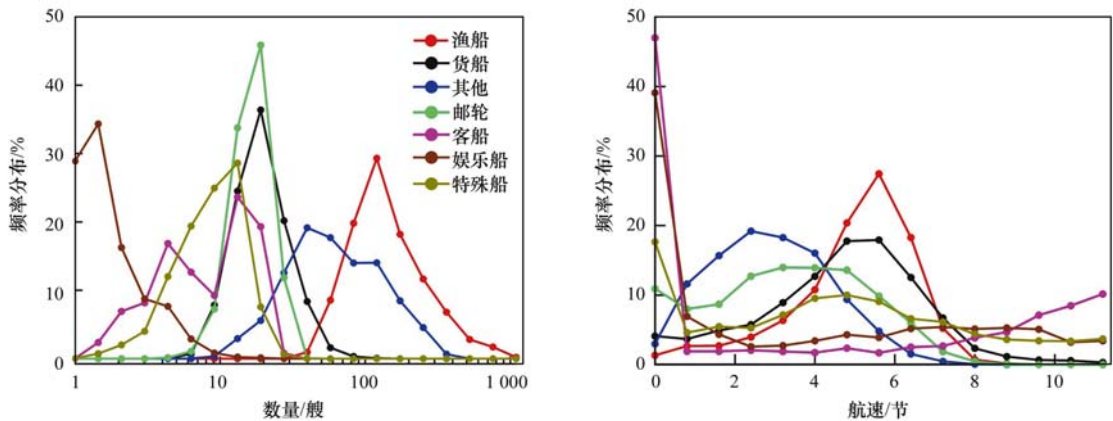


图 4 试验期间船舶数量和航速的频率分布情况

Fig. 4 Frequencies of vessel quantities and speed during all experimental period

0.76 (渔船)、 6.11 ± 1.48 (货船)、 3.83 ± 0.87 (其他)和 7.47 ± 1.42 (邮轮)。

从污染物浓度日变化可以看出,BC 浓度在船舶怠速期时全天维持不变(图 8);而在船舶运行时期 BC 浓度从早上开始升高,在当地时间 09:00 达到峰值,与 E_R 一致,全天保持相对较高的水平,表明 BC 的排放与船舶速度相关,且速度越高,排放越高。Buffaloe 等^[36]的研究表明随着船舶速度的增加,BC 排放因子逐渐增高。 NO_x 混合比在上午有类似于 BC 的增加,但在中午出现了一个低谷,这可能是由于中午船舶启动(离港或到港活动)数量减少的缘故。船舶排放 NO_x 的主要来源于燃料中的氮以及氮气的

燃烧^[37],NO 是 NO_x 中的主要组成,较高的氧浓度和燃烧温度是 NO 产生的先决条件^[38]。在早晚高峰时,大量船舶启航,船舶发动机燃料燃烧温度,滞燃时间及含氧量达到高温燃烧的条件,使得 NO_x 出现峰值,表明研究区域 NO_x 的排放与高速船舶相关。这与已有的 BC 和 NO_x 排放与船舶速度呈正相关的研究结果一致^[39]。

有研究表明,船舶尾气排放硫氧化物主要与燃料的硫含量直接相关,与发动机类型和功率无关^[40]。在船舶运行时期 SO_2 在早高峰时则具有明显的峰值(图 8),达 0.5×10^{-9} ,是夜间 SO_2 混合比的两倍以上。但从图 8 中可以看出,陆地传输

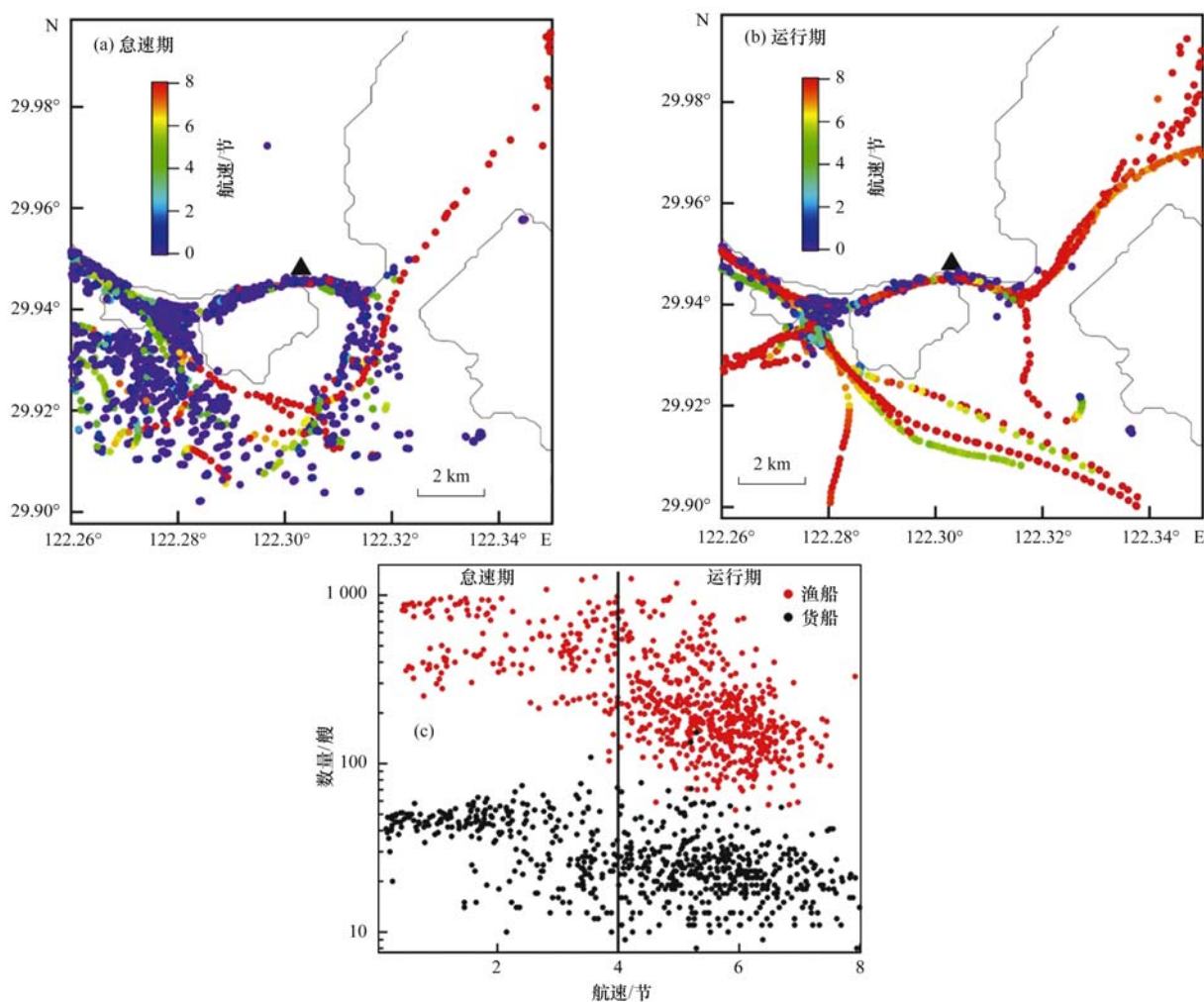


图5 船舶正常与拥挤情况

Fig. 5 Normal and congested conditions of vessels

对 SO_2 有较强的贡献(陆地期 - 运行期). 造成船舶怠速期 SO_2 增加趋势不明显的主要原因可能是 E_R 较低(图7). 在船舶运行期时, CO 混合比在 15:00 达到峰值, 但边界层的抬升并没有使 CO 的混合比降低, 这表明中午有很强的 CO 排放, 甚至抵消了附近边界层的稀释效应. Haglind^[41] 发现在发动机低速或怠速状态下容易形成 CO . 船舶怠速时运行速度较低, 主机高负荷做功导致主机燃烧室局部缺氧生成 CO . 本研究在船舶怠速期 CO 同样具有此排放特征, 表明 CO 的排放可能与船舶较低的运行速度有关.

PM 是柴油机尾气排放的主要污染物之一^[42], 从观测结果上来看, 在 3 个类别下 PM 在 06:00 ~ 12:00 之间呈现下降趋势, 表明总颗粒物与船只活动没有显著联系, 但在夜间时 3 个类别下 PM 水平平均高于白天, 表明除了船舶排放的颗粒物外, 夜间可能有其他来源. 利用 PM/BC 可大致评估 BC 的来源信息, 交通排放中的 PM/BC 比其他来源(如生物质来源)更低^[43~45]. 图 8 显示, 3 种类别下 PM/BC 均

呈现夜间大于白天, 从 05:00 开始, PM/BC 值逐渐降低, 在 12:00 时达到最低值, 这是由于上午船舶数量及速度增加导致 BC 排放增加, 从而导致 PM/BC 的降低, 同样证明 BC 的排放与船舶数量及速度相关. 而在夜间时, 船舶数量与速度降低, E_R 降低, 且变化很小, 但 PM/BC 有明显增加, 在夜晚 03:00 达到最大值, 表明夜间 PM 存在本地其他来源.

同一时间内污染物受到海洋气团及陆地气流的影响, 为了表征单独的陆地影响, 用陆地气团主导期污染物减去船舶运行期来将船舶排放影响分离出去(图 8). 仅考虑陆地气团影响时, BC、 CO 、 SO_2 和 PM 等污染物, 日浓度存在显著变化, 其中, BC 和 CO 污染物呈现凹型日变化特征, 从 00:00 开始, BC 与 CO 开始下降, 在 12:00 达到最小值, 此后又逐渐上升; SO_2 和 PM 的日变化特征较为相似, 从 06:00 开始逐渐增加, 到 15:00 左右达最大值, 之后逐渐降低; 而 NO_x 则变化不大, 表明陆地气团对 NO_x 贡献不大.

用船舶运行期减去船舶怠速期来将海洋本身等影响因素剔除, 从而分析单独船舶排放的污染物日

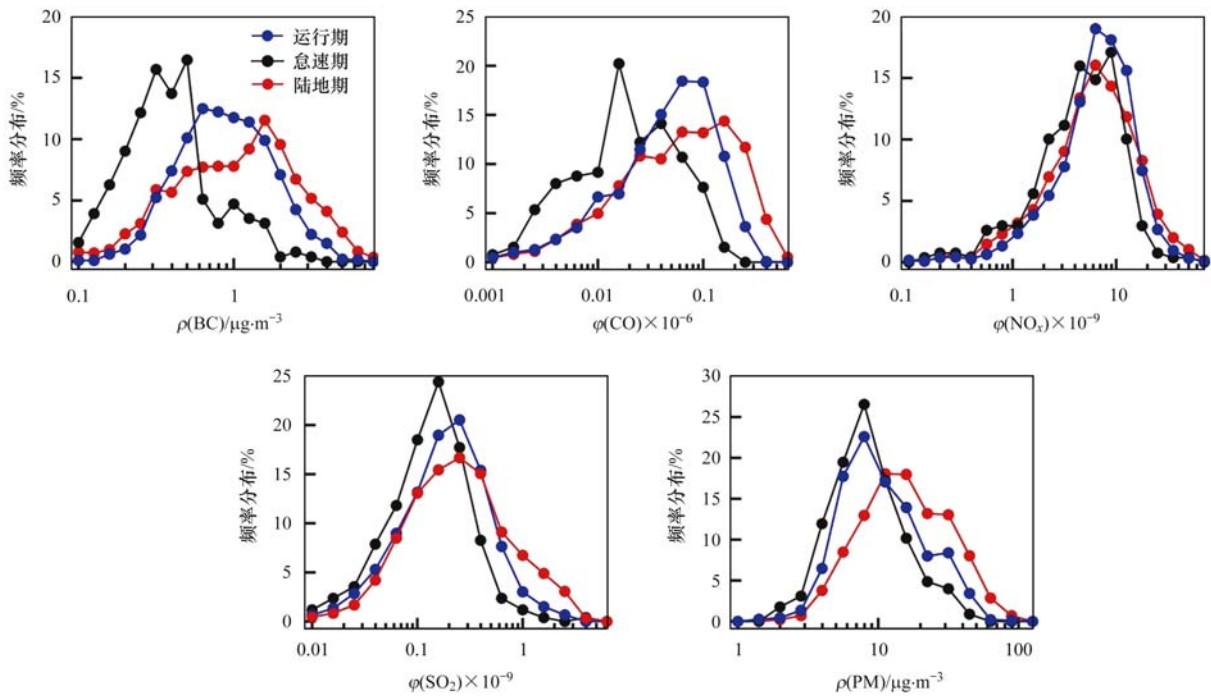
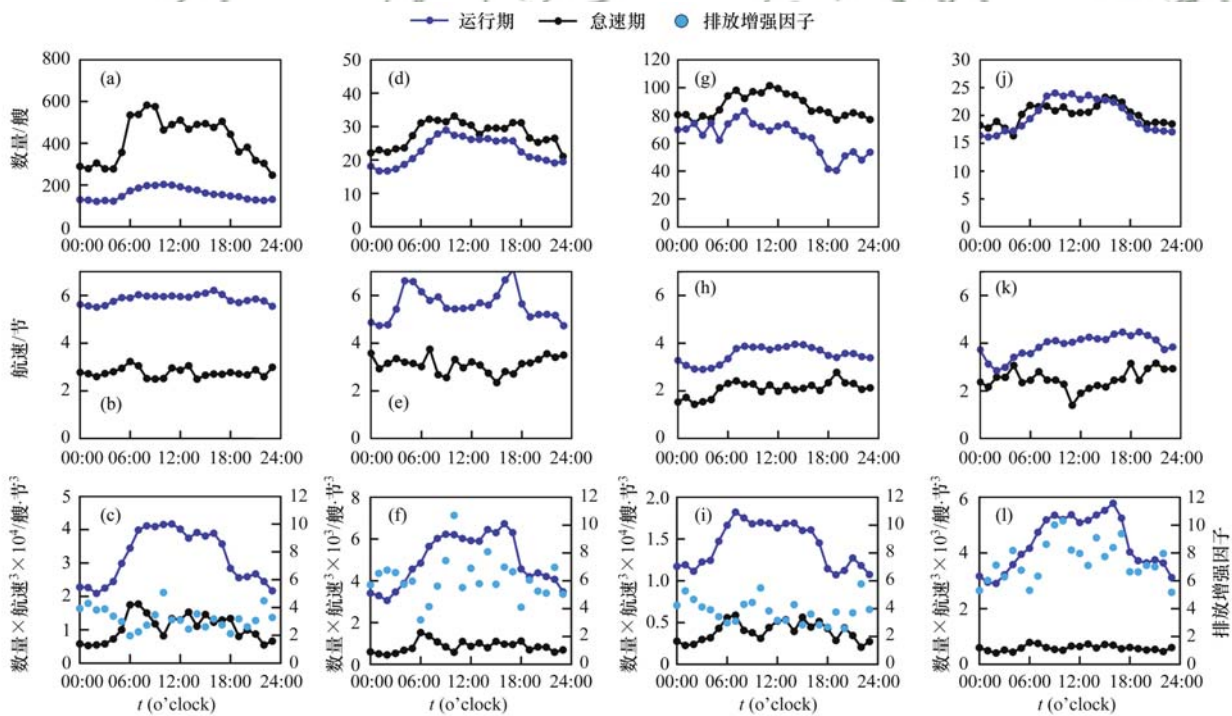


图 6 8~12 月污染物分布情况
Fig. 6 Distribution of pollutants from August to December



(a)~(c) 表示渔船, (d)~(f) 表示货船, (g)~(i) 表示其他船舶, (j)~(l) 表示邮轮
图 7 8~12 月船舶日变化及航速变化

Fig. 7 Daily number and speed changes of ships from August to December

变化特征. 如图 8 所示, BC、CO、SO₂ 和 NO_x 等污染物均呈现白天高晚上低的特征, 且变化趋势与 E_R 一致, 表明船舶对 BC、CO、SO₂ 和 NO_x 等污染物具有重要贡献. 船舶排放是 BC 的主要来源, 对于船舶运行期和船舶怠速期, 船舶运行期夜晚 BC 排放会略高于船舶怠速期, 故对于 PM/BC 来说, 夜晚船舶

怠速期的 PM/BC 值较高, 因此船舶运行期减去船舶怠速期的 PM/BC 在夜晚可能为负值. 结果表明, 在船舶运行时排放污染物能力有明显增强, 增强因子范围约为 1~4, 各污染物平均排放增强因子分别为 2.41 ± 0.74 (BC)、 2.17 ± 0.90 (CO)、 1.63 ± 0.54 (SO₂) 和 1.30 ± 0.23 (NO_x).

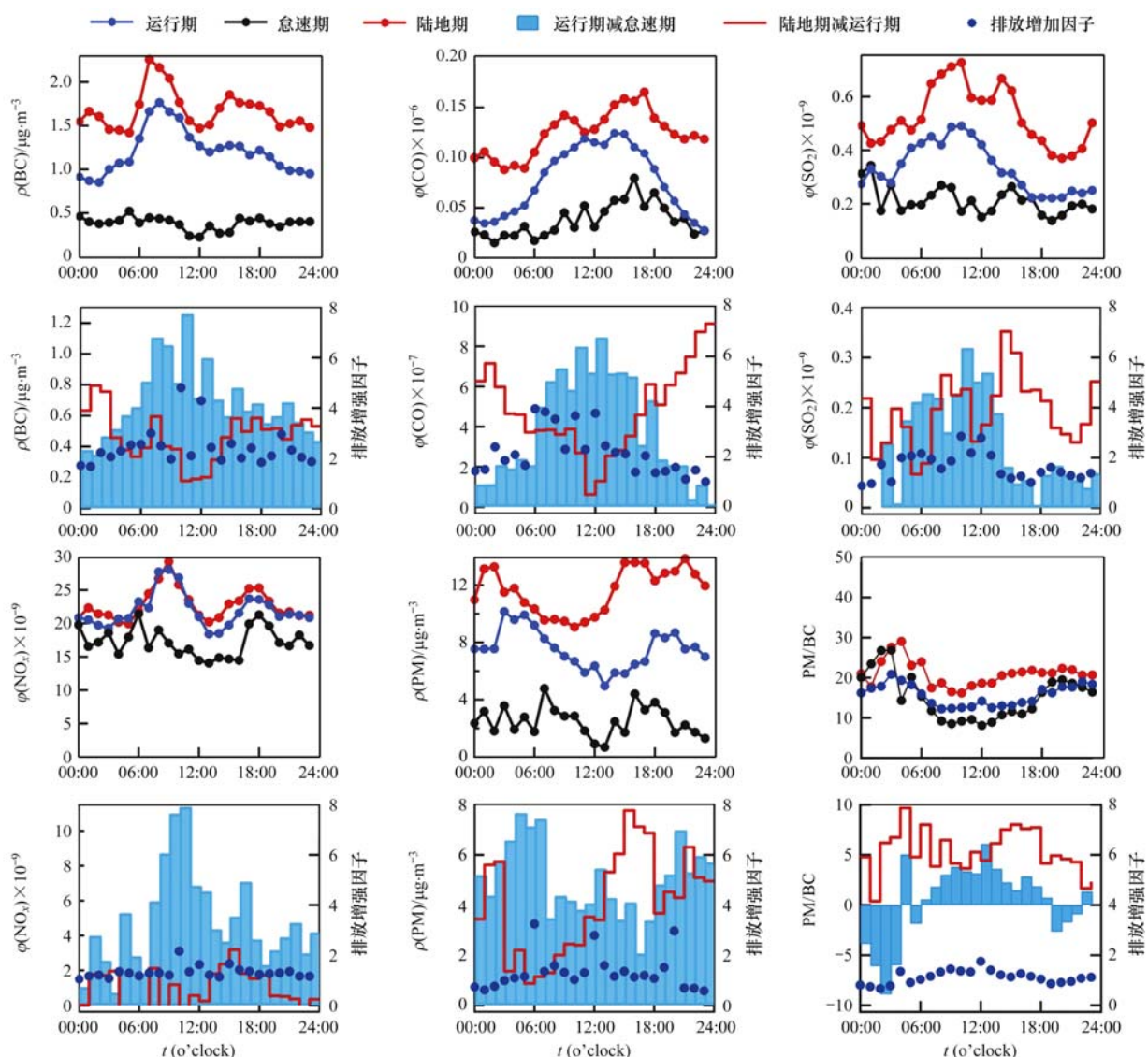


图 8 8~12月污染物日变化

Fig. 8 Diurnal variations in pollutants from August to December

3 结论

(1) BC 和 NO_x 的排放与高速船舶相关, 且船舶速度越高, 排放越高, 但 NO_x 受陆地气团影响不大, 船舶排放是 NO_x 的主要来源;

(2) SO_2 的排放也与高速船舶相关, 船舶尾气排放硫氧化物主要与燃料的硫含量直接相关, 除此之外, 陆地传输对 SO_2 也有较强的贡献;

(3) CO 可能与船舶较低的运行速度相关, 当船舶处于怠速期时 CO 排放增强明显;

(4) 在运行工况下大部分主要污染物的排放增强因子约为怠速工况的 1~4 倍。

参考文献:

- [1] Liu H, Meng Z H, Lv Z F, *et al.* Emissions and health impacts from global shipping embodied in US-China bilateral trade[J]. *Nature Sustainability*, 2019, **2**(11): 1027-1033.
- [2] Yuan Z B, Lau A K H, Zhang H Y, *et al.* Identification and spatiotemporal variations of dominant PM_{10} sources over Hong Kong[J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(10): 1803-1815.
- [3] Viana M, Amato F, Alastuey A, *et al.* Chemical tracers of particulate emissions from commercial shipping [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, **43**(19): 7472-7477.
- [4] 王延龙, 李成, 黄志炯, 等. 2013 年中国海域船舶大气污染物排放对空气质量的影响[J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(6): 2517-2166.
- [5] Wang Y L, Li C, Huang Z J, *et al.* Impact of ship emissions on air quality over Chinese waters in 2013 [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(6): 2517-2166.
- [6] Zhang Y, Yang X, Brown R, *et al.* Shipping emissions and their impacts on air quality in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **581-582**: 186-198.
- [7] Zhang F, Chen Y J, Cui M, *et al.* Emission factors and environmental implication of organic pollutants in PM emitted from various vessels in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2019, **200**: 302-311.
- [7] Lv Z F, Liu H, Ying Q, *et al.* Impacts of shipping emissions on $\text{PM}_{2.5}$ pollution in China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(21): 15811-15824.

- [8] 朱倩茹, 廖程浩, 王龙, 等. 基于 AIS 数据的精细化船舶排放清单方法[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(12): 4493-4500.
Zhu Q R, Liao C H, Wang L, *et al.* Application of fine vessel emission inventory compilation method based on AIS data[J]. China Environmental Science, 2017, **37**(12): 4493-4500.
- [9] 翟君, 冯立岩, 王猛, 等. 气体燃料发动机发展对中国温室气体减排贡献的生命周期分析[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(1): 62-71.
Zhai J, Feng L Y, Wang M, *et al.* Life-cycle analysis of contribution of developing gas engines to GHG emissions reduction in China[J]. China Environmental Science, 2015, **35**(1): 62-71.
- [10] 万霖, 何凌燕, 黄晓锋. 船舶大气污染排放的研究进展[J]. 环境科学与技术, 2013, **36**(5): 57-62.
Wan L, He L Y, Huang X F. Progress in research of air pollution emissions from ships[J]. Environmental Science & Technology, 2013, **36**(5): 57-62.
- [11] Villalba G, Gemechu E D. Estimating GHG emissions of marine ports—the case of Barcelona[J]. Energy Policy, 2011, **39**(3): 1363-1368.
- [12] Hobbs P V, Garrett T J, Ferek R J, *et al.* Emissions from ships with respect to their effects on clouds[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2000, **57**(16): 2570-2590.
- [13] Eyring V, Isaksen I S A, Berntsen T, *et al.* Transport impacts on atmosphere and climate: shipping[J]. Atmospheric Environment, 2010, **44**(37): 4735-4771.
- [14] 张嘉琪. 2012 年香港排放清单报告[R]. 香港: 香港特别行政区政府空气科学组, 2014.
- [15] Lu Q, Zheng J Y, Ye S Q, *et al.* Emission trends and source characteristics of SO₂, NO_x, PM₁₀ and VOCs in the Pearl River Delta region from 2000 to 2009[J]. Atmospheric Environment, 2013, **76**: 11-20.
- [16] Cappa C D, Williams E J, Lack D A, *et al.* A case study into the measurement of ship emissions from plume intercepts of the NOAA ship *Miller Freeman* [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2014, **14**(3): 1337-1352.
- [17] Lindstad H, Sandaa I, Strømman A H. Assessment of cost as a function of abatement options in maritime emission control areas[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2015, **38**: 41-48.
- [18] Liu H, Fu M L, Jin X X, *et al.* Health and climate impacts of ocean-going vessels in East Asia[J]. Nature Climate Change, 2016, **6**(11): 1037-1041.
- [19] Corbett J J, Winebrake J J, Green E H, *et al.* Mortality from ship emissions: a global assessment[J]. Environmental Science & Technology, 2007, **41**(24): 8512-8518.
- [20] 陈俊杰. 宁波舟山港成为全球首个“10 亿吨”大港[J]. 珠江水运, 2017, (24): 30.
- [21] 尹佩玲, 黄争超, 郑丹楠, 等. 宁波-舟山港船舶排放清单及时空分布特征[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(1): 27-37.
Yin P L, Huang Z C, Zhen D N, *et al.* Marine vessel emission and its temporal and spatial distribution characteristics in Ningbo-Zhoushan Port[J]. China Environmental Science, 2017, **37**(1): 27-37.
- [22] Zhang F, Chen Y J, Chen Q, *et al.* Real-World emission factors of gaseous and particulate pollutants from marine fishing boats and their total emissions in China[J]. Environmental Science & Technology, 2018, **52**(8): 4910-4919.
- [23] Huang C, Hu Q Y, Li Y J, *et al.* Intermediate volatility organic compound emissions from a large cargo vessel operated under Real-World conditions[J]. Environmental Science & Technology, 2018, **52**(21): 12934-12942.
- [24] Celo V, Dabek-Zlotorzynska E, McCurdy M. Chemical characterization of exhaust emissions from selected Canadian marine vessels: the case of trace metals and lanthanoids[J]. Environmental Science & Technology, 2015, **49**(8): 5220-5226.
- [25] Chu-Van T, Ristovski Z, Pourkhesalian A M, *et al.* On-board measurements of particle and gaseous emissions from a large cargo vessel at different operating conditions[J]. Environmental Pollution, 2018, **237**: 832-841.
- [26] Wu D, Li Q, Ding X, *et al.* Primary particulate matter emitted from heavy fuel and diesel oil combustion in a typical container ship: characteristics and toxicity[J]. Environmental Science & Technology, 2018, **52**(21): 12943-12951.
- [27] Schwarz J P, Gao R S, Fahey D W, *et al.* Single-particle measurements of midlatitude black carbon and light-scattering aerosols from the boundary layer to the lower stratosphere[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2006, **111**(D16), doi: 10.1029/2006JD007076.
- [28] Petzold A, Ogren J A, Fiebig M, *et al.* Recommendations for reporting “black carbon” measurements[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013, **13**(16): 8365-8379.
- [29] Draxler R R, Hess G D. An overview of the HYSPLIT_4 modelling system for trajectories, dispersion, and deposition[J]. Australian Meteorological Magazine, 1998, **47**(4): 295-308.
- [30] Liu D T, Taylor J W, Crosier J, *et al.* Aircraft and ground measurements of dust aerosols over the west African coast in summer 2015 during ICE-D and AER-D[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2018, **18**(5): 3817-3838.
- [31] Last P, Hering-Bertram M, Linsen L. How automatic identification system (AIS) antenna setup affects AIS signal quality[J]. Ocean Engineering, 2015, **100**: 83-89.
- [32] 谭建伟, 宋亚楠, 葛蕴珊, 等. 大连海域远洋船舶排放清单[J]. 环境科学研究, 2014, **27**(12): 1426-1431.
Tan J W, Song Y N, Ge Y S, *et al.* Emission inventory of ocean-going vessels in Dalian coastal area[J]. Research of Environmental Sciences, 2014, **27**(12): 1426-1431.
- [33] 杨静, 尹佩玲, 叶斯琪, 等. 深圳市船舶排放清单与时空特征研究[J]. 环境科学, 2015, **36**(4): 1217-1226.
Yang J, Yin P L, Ye S Q, *et al.* Marine emission inventory and its temporal and spatial characteristics in the city of Shenzhen[J]. Environmental Science, 2015, **36**(4): 1217-1226.
- [34] Huang L, Wen Y Q, Geng X Q, *et al.* Estimation and spatio-temporal analysis of ship exhaust emission in a port area[J]. Ocean Engineering, 2017, **140**: 401-411.
- [35] Chen D S, Wang X T, Nelson P, *et al.* Ship emission inventory and its impact on the PM_{2.5} air pollution in Qingdao Port, North China[J]. Atmospheric Environment, 2017, **166**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2017.07.021.
- [36] Buffaloe G M, Lack D A, Williams E J, *et al.* Black carbon emissions from in-use ships: a California regional assessment[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2014, **14**(4): 1881-1896.
- [37] Ajayi K M, Shahbazi K, Tukkaraja P, *et al.* A discrete model for prediction of radon flux from fractured rocks[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2018, **10**(5): 879-892.
- [38] Rößler M, Koch T, Janzer C, *et al.* Mechanisms of the NO₂ formation in diesel engines[J]. MTZ Worldwide, 2017, **78**(7): 70-75.
- [39] Wu Y Z, Liu D T, Wang X T, *et al.* Ambient marine shipping

- emissions determined by vessel operation mode along the East China Sea[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **769**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.144713.
- [40] 向蜀霞, 姚婷婷, 彭勇平, 等. LNG 动力船舶大气污染物排放特征实船测试[J]. *中国航海*, 2020, **43**(3): 101-104.
Xiang S X, Yao T T, Peng Y P, *et al.* On board tests of emission characteristics of LNG powered vessel at sea[J]. *Navigation of China*, 2020, **43**(3): 101-104.
- [41] Haglind F. A review on the use of gas and steam turbine combined cycles as prime movers for large ships. Part II: previous work and implications [J]. *Energy Conversion and Management*, 2008, **49**(12): 3468-3475.
- [42] Suzuki J, Matsumoto S. Development of catalysts for diesel particulate NO_x reduction[J]. *Topics in Catalysis*, 2004, **28**(1-4): 171-176.
- [43] Chow J C, Watson J G, Lowenthal D H, *et al.* PM_{2.5} source profiles for black and organic carbon emission inventories[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(31): 5407-5414.
- [44] Zhang Q, Streets D G, Carmichael G R, *et al.* Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B mission [J]. *Atmospheric Chemistry & Physics Discussions*, 2009, **9**(14): 5131-5153.
- [45] Oanh N T K, Ly B T, Tipayarom D, *et al.* Characterization of particulate matter emission from open burning of rice straw[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(2): 493-502.

环境科学

CONTENTS

Regionalization and Analysis of PM _{2.5} and O ₃ Synergetic Prevention and Control Areas Based on Remote Sensing Data	LI Shen-xin, ZOU Bin, ZHANG Feng-ying, <i>et al.</i>	(4293)
Analysis of a Typical Ozone Pollution Process in Guangzhou in Winter	PEI Cheng-lei, XIE Yu-tong, CHEN Xi, <i>et al.</i>	(4305)
Establishment and Application of Foshan Ozone Concentration Forecast Equation	CHEN Chen, HONG Ying-ying, TAN Hao-bo, <i>et al.</i>	(4316)
Establishment of High-Resolution Emissions Inventory in Wuhai and Its Application in Exploring the Causes of Ozone Pollution	ZHANG Rui-xin, CHU Bo, SHANG Chun-lin, <i>et al.</i>	(4327)
Investigating the Pollutants of Marine Shipping Emissions Along the East China Sea by Combining in-situ Measurements and Automatic Identification System	QIU Hao, LIU Dan-long, WU Yang-zhou, <i>et al.</i>	(4338)
Chemical Component of Particulate Matters and VOCs Characteristics During Vehicle Brake Processes	MEN Zheng-yu, LIU Du-you, GUO Quan-you, <i>et al.</i>	(4348)
Characterization of VOCs Emissions from Caged Broiler House in Winter	CAO Tian-tian, ZHENG Yun-hao, ZHANG Yu, <i>et al.</i>	(4357)
Concentrations and Community Structures of Culturable Bacteria in Aerosols of Household Garbage Stations in Shanghai	LU Bing-jie, ZHANG Xiang, WANG Chuan, <i>et al.</i>	(4367)
Inventory and Distribution Characteristics of Anthropogenic Ammonia Emissions in Zhejiang Province from 2008 to 2018	FANG Li-jiang, YANG Yi-qun, YE Guan-qiong	(4380)
Roadmap of Coal Control and Carbon Reduction in the Steel Industry Under the Carbon Peak and Neutralization Target	XUE Ying-lan, ZHANG Jing, LIU Yu, <i>et al.</i>	(4392)
Carbon Emission Reduction Effect of Spatial Correlation Network Structure Characteristics: From the Perspective of Urban Agglomeration	ZHENG Hang, YE A-zhong	(4401)
Pollution and Carbon Reduction Effect of OFDI in China and Its Mechanism	BAI Zi-han, LÜ Lian-hong, ZHAO Ming-xuan, <i>et al.</i>	(4408)
Variation Characteristics of Surface Water Quality in China in Recent Years	JI Xiao-yan, HOU Huan-huan, WANG Shan-shan, <i>et al.</i>	(4419)
Distribution, Risk, and Influencing Factors of Microplastics in Surface Water of Huangshui River Basin	FAN Meng-yuan, HUANG Yi-mei, ZHANG Hai-xin, <i>et al.</i>	(4430)
Hydrochemical and Isotopic Characteristics in the Surface Water of the Fenhe River Basin and Influence Factors	ZHAO Chun-hong, SHEN Hao-yong, WANG Zhi-heng, <i>et al.</i>	(4440)
Characteristics and Causes of High-manganese Groundwater in Pearl River Delta During Urbanization	LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i>	(4449)
Characteristics and Causes of Groundwater Salinization in the Plain Area of the Lower Kashgar River	LU Han, ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, <i>et al.</i>	(4459)
Sources and Biogeochemical Processes of Nitrate in the Laolongdong Karst Underground River Basin, Chongqing	WANG Yu-yang, YANG Ping-heng, ZHANG Jie-ru	(4470)
Succession Pattern and Consequences of the Dominant Species During Cyanobacterial Bloom and Its Influencing Factors	OUYANG Tian, ZHAO Lu, JI Lu-lu, <i>et al.</i>	(4480)
Structural Characteristics of Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in a Group of Drinking Water Reservoirs by Water Transmission from Modaomen Waterway in Zhuhai	ZHANG Mo-li, WANG En-rui, CHANG Sheng, <i>et al.</i>	(4489)
Effects of Nutrients on the Growth of <i>Microcystis aeruginosa</i> and Bacteria in the Phycosphere	LÜ Ping, LI Hui-li, XU Yong, <i>et al.</i>	(4502)
Effect of Aging on Adsorption of Tetracycline by Microplastics and the Mechanisms	WANG Lin, WANG Shu-xin, ZENG Xiang-ying, <i>et al.</i>	(4511)
Effect of Colloids in Sediment and Soil on Their Sorption Behavior of Chloramphenicol	YAN Cai-xia, LUO Yan-qing, NIE Ming-hua, <i>et al.</i>	(4522)
Historical Antibiotic Stress Changed the Effects of Sulfamethoxazole and Trimethoprim on Activated Sludge: ARGs and Potential Hosts	ZHANG Zhong-xing, FAN Xiao-yan, LI Xing, <i>et al.</i>	(4536)
Spatial Distribution and Sources of Heavy Metals in Soil of a Typical Lead-Zinc Mining Area, Yangshuo	CHEN Meng, PAN Yong-xing, HUANG Yi-xiang, <i>et al.</i>	(4545)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Baiyangdian Lake	ZHENG Fei, GUO Xin, TANG Ming-yang, <i>et al.</i>	(4556)
Spatial Differentiation and Influencing Factor Analysis of Soil Heavy Metal Content at Town Level Based on Geographic Detector	GONG Cang, WANG Liang, WANG Shun-xiang, <i>et al.</i>	(4566)
Heavy Metal Emissions from Coal-fired Power Plants and Heavy Metal Pollution Characteristics and Health Risks in Surrounding Soils	CHE Kai, CHEN Chong-ming, ZHENG Qing-yu, <i>et al.</i>	(4578)
Enrichment Factors, Health Risk, and Source Identification of Heavy Metals in Agricultural Soils in Semi-arid Region of Hainan Island	YANG Jian-zhou, GONG Jing-jing, WANG Zhen-liang, <i>et al.</i>	(4590)
Speciation and Pollution Assessment of Heavy Metals in Mangrove Surface Sediments in Jiulong River Estuary	ZHANG Hua-lan, YU Rui-lian, WAN Rui-an, <i>et al.</i>	(4601)
Status of Heavy Metal in Organic Fertilizers in Main Tea Growing Regions of China	YI Xiao-yun, FANG Li, YANG Xiang-de, <i>et al.</i>	(4613)
Accumulation Characteristics and Sources of PAEs in Agricultural Soils in Gansu Province	CHEN Yu-yu, ZHANG Guang-quan, ZHANG Yang, <i>et al.</i>	(4622)
Distribution Characteristics of Soil Phosphorus Forms and Phosphatase Activity at Different Altitudes in the Soil of Water-Level-Fluctuation Zone in Pengxi River, Three Gorges Reservoir	GAO Yi-lun, FANG Fang, TANG Zi-chao, <i>et al.</i>	(4630)
Characteristics of Soil Organic Carbon Components and Their Correlation with Other Soil Physical and Chemical Factors in Cotton Fields with Different Continuous Cropping Years in the Oasis on the Northern Edge of Tarim Basin	LI Xin-zhu, GONG Lu, TANG Jun-hu, <i>et al.</i>	(4639)
Response of Soil Respiration Rates to Soil Temperature and Moisture at Different Soil Depths of <i>Caragana korshinskii</i> Plantation in the Loess-Hilly Region	SUN Ya-rong, WANG Ya-juan, ZHAO Min, <i>et al.</i>	(4648)
Influence of Biochar Application on Soil Nitrate Leaching and Phosphate Retention: A Synthetic Meta-analysis	JIANG Zhi-xiang, CUI Shuang, ZHANG Xin, <i>et al.</i>	(4658)
Role and Mechanism of Low Molecular-Weight-Organic Acids in Enhanced Phytoremediation of Heavy Metal Contaminated Soil	FANG Zhi-guo, XIE Jun-ting, YANG Qing, <i>et al.</i>	(4669)
Remediation Effect and Mechanism of Inorganic Passivators on Cadmium Contaminated Acidic Paddy Soil	ZHANG Jian, KONG Fan-yi, LU Sheng-gao	(4679)
Mechanism of Lead-zinc Enrichment and Resistance of Spent Mushroom Compost to Lead-Zinc Slag in <i>Koeleria paniculata</i>	XIE Tian-zhi, CHEN Yong-hua, SU Rong-kui, <i>et al.</i>	(4687)
Phosphorus Enrichment Efficiency of CaO ₂ @FA Composites and the Effect of Its Recovered Material on Soil Improvement	YUE Wei, LI Da-peng, WU Ling-yu, <i>et al.</i>	(4697)
Effects of Early Rice Straw Returning with Reducing Potassium Fertilizer on Late Rice Yield and Soil Fertility	HUANG Qiao-yi, HUANG Jian-feng, HUANG Xu, <i>et al.</i>	(4706)
Effects of Continuous Straw Returning with Chemical Fertilizer on the Carbon Pool and Crop Yield of Rice-Rape Rotation Soils	CAI Ying, FU Si-wei, ZHANG Bo-rui, <i>et al.</i>	(4716)
Effects of Chemical Fertilizer Reduction Combined with Straw Application on Diazotrophic Communities in a Double Rice Cropping System	CHEN Kai-peng, WEI Ju-xian, CHEN Dan, <i>et al.</i>	(4725)
Impacts of Co-application of Chemical Fertilizer Reduction and Organic Material Amendment on Fluvio-aquic Soil Microbial N-cycling Functional Gene Abundances and N-converting Genetic Potentials in Northern China	LI Sheng-jun, HU He, LI Gang, <i>et al.</i>	(4735)
Response Characteristics of Soil Microbial Community Under Long-term Film Mulching	HU Zhi-e, XIAO Mou-liang, DING Ji-na, <i>et al.</i>	(4745)
Effects of Long-term Straw Returning on Fungal Community, Enzyme Activity and Wheat Yield in Fluvio-aquic Soil	MA Lei, LI Yan, WEI Jian-lin, <i>et al.</i>	(4755)
Effects of Soil Amendments on the Bacterial Diversity and Abundances of Pathogens and Antibiotic Resistance Genes in Rhizosphere Soil Under Drip Irrigation with Reclaimed Water	CUI Bing-jian, CUI Er-ping, LIU Chun-cheng, <i>et al.</i>	(4765)
Effect of Nitrogen on the Phytoremediation of Cd-PAHs Co-contaminated Dumpsite Soil by Alfalfa (<i>Medicago sativa</i> L.) and on the Soil Bacterial Community Structure	LI Yi-jia, MA Jun-wei, LI Yu-qian, <i>et al.</i>	(4779)
Effect of Antibiotic-Degrading Bacteria on Maturity and Bacterial Community Succession During Pig Manure Composting	LI Wei-lin, ZHANG Xin, MA Jun-wei, <i>et al.</i>	(4789)