

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.8
第41卷 第8期

目次

首都重大活动与空气重污染应急减排措施效果对比分析	钟焱盛, 周颖, 程水源, 王晓琦, 邵玄逸 (3449)
基于天津市在线数据评估 ISORROPIA-II 模式结果及气溶胶 pH 的影响因素	高洁, 史旭荣, 卫昱婷, 宋少洁, 史国良, 冯银厂 (3458)
餐饮源有机颗粒物排放特征	李源遽, 吴爱华, 童梦雪, 栾胜基, 李鹭, 胡敏 (3467)
华中地区黄冈市一次重度污染期间 PM _{2.5} 中 12 种微量元素特征及来源解析	陈展乐, 田倩, 毛瑶, 刘威杰, 石明明, 程钺, 胡天鹏, 邢新丽, 祁士华, 胡金旭 (3475)
艾比湖地区气溶胶光学特性分析	张喆, 丁建丽, 王瑾杰 (3484)
天津市冬季重污染二次有机化学污染特征及 VOCs 对 SOA 生成潜势	徐虹, 唐迦, 肖致美, 高璟赞, 杨宁, 李立伟, 郑乃源, 陈魁, 邓小文 (3492)
郑州市某城区冬季不同污染水平大气 VOCs 特征及源解析	李一丹, 尹沙沙, 张瑞芹, 于世杰, 杨健, 张栋 (3500)
长江三角洲 2010 ~ 2018 年生物质燃烧中等挥发性有机物 (IVOCs) 排放清单	朱永慧, 王倩, 黄凌, 殷司佳, 李莉, 王杨君 (3511)
北方常见绿化树种 BVOCs 排放特征及其与光合作用参数的相关性	许燕, 李双江, 袁相洋, 冯兆忠 (3518)
广州地区秋季不同站点类型地面臭氧变化特征与影响因子	高平, 庄立跃, 王龙, 陈瑜萍, 闫慧, 沈劲, 范丽雅, 叶代启 (3527)
泰安市大气臭氧污染特征及敏感性分析	李凯, 刘敏, 梅如波 (3539)
有色冶炼园区道路扬尘中重金属污染特征及健康风险评价	冯于耀, 史建武, 钟曜谦, 韩新宇, 封银川, 任亮 (3547)
西安市高校校园地表灰尘重金属污染来源解析	樊馨瑶, 卢新卫, 刘慧敏, 秦青 (3556)
超低排放高湿度气总颗粒物监测方法及燃气电厂实际测试	胡月琪, 颜旭, 孔川, 张虎, 郭晓东 (3563)
厦门市船舶控制区大气污染物排放清单与污染特征	王坚, 黄压, 刘艳英, 陈森阳, 吴艳聪, 何月云, 杨心怡 (3572)
基于交通流的成都市高分辨率机动车排放清单建立	潘玉瑾, 李媛, 陈军辉, 石嘉诚, 田红, 张季, 周敬, 陈霞, 刘政, 钱骏 (3581)
基于无人机多光谱影像和 OPT-MPP 算法的水质参数反演	黄昕晰, 应晗婷, 夏凯, 冯海林, 杨垠晖, 杜晓晨 (3591)
不同水体分层对沉积物间隙水氮素垂向分布影响: 以三峡水库和小湾水库为例	刘静思, 朱晓声, 胡子龙, 张思思, 杨正健, 纪道斌, 刘德富 (3601)
城市河道表层水及沉积物中微塑料的污染现状与污染行为	赵昕, 陈浩, 贾其隆, 沈忱思, 朱奔, 李磊, 聂云汉, 叶建锋 (3612)
上海河道浮游植物群落结构时空变化特征及影响因素分析	许志, 陈小华, 沈根祥, 朱英, 钱晓雍, 张心良, 张卫, 胡双庆, 白玉杰 (3621)
过氧化钙 (CaO ₂) 联合生物炭对河道底泥的修复	李雨平, 姜莹莹, 刘宝明, 阮文权, 缪恒锋 (3629)
基于双同位素 ($\delta^{15}\text{N}$ -NO ₃ ⁻ , $\delta^{18}\text{O}$ -NO ₃ ⁻) 和 IsoSource 模型的岩溶槽谷区地下水硝酸盐来源的定量示踪	徐璐, 蒋勇军, 段世辉, 何瑞亮 (3637)
三峡库区规模化顺坡沟垄果园氮、磷输出过程及流失负荷	严坤, 王玉宽, 刘勤, 徐佩, 闫洋洋 (3646)
高度城镇化地区城市小区降雨径流污染特征及负荷估算	高斌, 许有鹏, 陆苗, 林芷欣, 徐兴 (3657)
Fe@GOCS 的制备及其对水中 As(III) 的吸附	赵超然, 单慧媚, 曾春芽, 张进贤, 彭三曦 (3665)
微塑料对水中铜离子和四环素的吸附行为	薛向东, 王星源, 梅雨晨, 庄海峰, 宋亚丽, 方程冉 (3675)
多孔填料特性对生物膜形成影响	江宇勤, 厉炯慧, 方治国 (3684)
硝化生物膜系统对低温的适应特性: MBBR 和 IFAS	李韧, 于莉芳, 张兴秀, 戴子承, 滑思思, 彭党聪 (3691)
单质硫自养短程反硝化耦合厌氧氨氧化强化脱氮	方文烨, 李祥, 黄勇, 郭超然, 胡羽婷, 陶仁杰 (3699)
间歇梯度曝气的生活污水好氧颗粒污泥脱氮除磷	张玉君, 李冬, 李帅, 张杰 (3707)
基于不同废污泥源的短程反硝化快速启动及稳定性	张星星, 王超超, 王焱, 徐乐中, 吴鹏 (3715)
基于 AHP-PROMETHEE II 法的鸟粪石磷回收污泥预处理方案决策	刘晓蕾, 李安婕 (3725)
零价铁对厌氧消化过程中氨氮抑制解除的影响	刘吉宝, 牛雨彤, 郁达伟, 谭颖峰, 左壮, 魏源送 (3731)
基于厌氧膜生物反应器的剩余污泥-餐厨垃圾厌氧共消化性能	戴金金, 牛承鑫, 潘阳, 陆雪琴, 甄广印, 郑朝辉, 张瑞良, 何欣昱 (3740)
亚剂量抗生素诱导抗性基因水平迁移	袁其懿, CHEN Hong-jie, Laurence Haller, 何义亮 (3748)
四环素胁迫对 <i>Shigella flexneri</i> 细菌四环素抗性基因抗性表达的影响过程	高品, 阮晓慧, 邱文婕, 薛罡, 钱雅洁 (3758)
羟胺对氨氧化菌和亚硝酸盐氧化菌的竞争性选择	乔昕, 王博, 郭媛媛, 彭永臻 (3765)
高温冲击对亚硝酸盐氧化过程中微生物菌群结构影响	侯晓薇, 牛永健, 李维维, 王光杰, 孙洪伟 (3773)
微生物种间相互作用产生锰氧化的普适性及其潜在应用	宁雪, 梁金松, 柏耀辉, 廖恺玲俐, 刘会娟, 曲久辉 (3781)
三亚河红树林表层沉积物中好氧氨氧化微生物的分布特征及潜在硝化速率	罗晴, 甄毓, 彭宗波, 贺惠 (3787)
臭氧污染对水稻生长、产量及矿质金属元素含量的影响	方笑堃, 罗小三, 张丹, 吴礼春, 邱丹, 陈志炜, 赵朕 (3797)
改变碳输入对新疆天山雪岭云杉林土壤呼吸的短期影响	邵康, 贡璐, 何学敏, 陈文静, 张雪妮, 朱海强 (3804)
有机无机肥配施对不同程度盐渍土 N ₂ O 排放的影响	周慧, 史海滨, 郭珈玮, 张文聪, 王维刚 (3811)
原位电阻热脱附土壤升温机制及影响因素	葛松, 孟宪荣, 许伟, 施维林 (3822)
羽序灯心草作为酸性矿山废弃地先锋植物潜力	黄建洪, 伏江丽, 严鑫睿, 尹凤, 田森林, 宁平, 李英杰 (3829)
滴灌方式和生物质炭对温室土壤矿质态氮及其微生物调控的影响	蔡九茂, 刘杰云, 邱虎森, 吕谋超, 周新国 (3836)
棉秆炭调控对碱性镉污染水稻根际土壤真菌群落结构和功能的影响	刘师豆, 韩耀光, 朱新萍, 吴相南 (3846)
不同水分管理模式联合叶面喷施硅肥对水稻 Cd 累积的影响	魏宾斌, 周航, 刘佳炜, 张竞颐, 黄芳, 霍洋, 胡雨丹, 辜娇峰, 刘俊, 廖柏寒 (3855)
螯合剂 GLDA 对象草修复镉污染农田的影响	覃建军, 唐盛爽, 蒋凯, 黄敬, 侯红波, 龙坚, 彭佩钦 (3862)
种植业面源污染防控技术发展历程分析及趋势预测	俞映惊, 杨林章, 李红娜, 朱昌雄, 杨祺, 薛利红 (3870)
《环境科学》征订启事 (3636) 《环境科学》征稿简则 (3764) 信息 (3538, 3628, 3724)	

厦门市船舶控制区大气污染物排放清单与污染特征

王坚, 黄屋, 刘艳英, 陈森阳, 吴艳聪, 何月云, 杨心怡

(厦门市环境科学研究院, 厦门 361021)

摘要: 以船舶自动识别系统 (automatic identification system, AIS) 数据, 结合大量厦门港口实地调查信息, 采用自下而上的动力法对在控制区内航行的船舶进行逐艘计算, 得出 2018 年厦门市船舶控制区大气污染物排放清单, 并详细分析了其污染物排放特征及时空分布。结果表明, 2018 年厦门市船舶控制区内船舶污染物排放总量共 16 413 t, 其中进出港船舶污染物排放占 82.2%, 未进港船舶占 17.8%, 各污染物中以 NO_x 的排放量最大, 占比达 64.2%, 不同航行状态下污染物排放量的顺序为停泊 > 巡航 > 低速巡航 > 机动操控 > 锚泊, 控制区内船舶的主要污染来源于货船, 并以集装箱船的污染物排放量为最大; 1 d 中 09:00 ~ 16:00 处于船舶污染物排放高峰期, 1 a 中以 2 月的排放量为最低, 3 月和 5 月出现排放峰值; 空间特征上各污染物排放高值主要分布于主航道和港区海岸线。

关键词: 厦门港; 排放清单; AIS 动力法; 排放特征; 时空分布

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)08-3572-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202001067

Vessels' Air Pollutant Emissions Inventory and Emission Characteristics in the Xiamen Emission Control Area

WANG Jian, HUANG Zhi, LIU Yan-ying, CHEN Sen-yang, WU Yan-cong, HE Yue-yun, YANG Xin-yi

(Xiamen Research Academy of Environmental Science, Xiamen 361021, China)

Abstract: Based on the automatic identification system (AIS) data and large field survey datasets for Xiamen port, the activity-based approach was used to calculate the emissions from each sailing ship in the Xiamen Emission Control Area (XECA), and to obtain the 2018 air emissions inventory for the XECA. This study subsequently analyzed the emission characteristics and spatiotemporal distribution characteristics of pollutants. The results showed that in 2018, the total amount of pollutants discharged from ships in the XECA was 16 413 t, of which 82.2% were from ships entering and leaving the port and 17.8% were from ships outside of the port. NO_x emissions were the highest among all of the pollutants and accounted for 64.2% of the total. Comparing the results of the five modes, emissions at berth were the highest, which was followed by the cruise mode, reduced speed-zone mode and maneuvering mode, and finally, the hoteling mode. In addition, the analysis indicated that the main source of pollutant emissions in Xiamen Port was cargo ships, of which, container ships contributed the most. The peak period of pollutant emissions from ships was between 09:00 and 16:00. The emission value during February was the lowest over the year, whereas the highest emission values occurred mostly during March and May. In terms of the spatial distribution, this study revealed that the main channel and port coastline had the highest emission values.

Key words: Xiamen Port; emission inventory; AIS activity-based approach; characteristics of emission; spatio-temporal distribution

海上贸易的繁荣是港口城市经济发展的重要推动力,但是随着水路运输和港口建设的发展,船舶运输活动对港口城市大气环境质量的影响也日益显著^[1-5]。厦门港是我国沿海主要港口之一,是我国综合运输体系的重要枢纽、集装箱运输干线港和对台航运主要口岸。同时,厦门港又是一个复式港湾,海域封闭,群山环绕,大气交换能力较弱^[6],航运业的飞速发展,使得船舶运输活动对厦门市大气环境质量的影响不容忽视;王征等^[7]的研究表明,90%的船舶排放发生在海岸线至领海基线外 96 海里范围内,即距离陆地 200 km 的海域内。国外学者对船舶大气污染物排放及其影响研究起步较早,2009 年 Jalkanen 等^[8]首次利用船舶自动识别系统 (AIS) 数据建立排放模型,估算波罗的海船舶 NO_x 、 SO_x 、 CO_2 、PM 和 CO 的排放量,至今,如希腊^[9]、西班牙^[10]和美国洛杉矶港^[11,12]等多地均有较深入的船

舶排放研究。我国对船舶污染物排放的研究相对较少,少数几个沿海地区在参考国外研究成果基础上,初步开发了当地港口的船舶大气污染物排放清单,如广东省^[13]、深圳市^[14]、上海港^[15-17]、天津港^[18]、青岛港^[19]、宁波舟山港^[20]、珠江三角洲^[21]以及龙潭集装箱港^[22]等船舶排放清单。本研究选择本地中速船舶开展排放因子测试,验证所选择的船舶基准排放因子的准确性,根据每一艘船舶的航行轨迹和行驶工况进行逐艘船舶的污染物排放清单的计算,建立了高精度的 100 m × 100 m 污染物排放网格数据库,分析船舶控制区内的污染物排放的时空分布特

收稿日期: 2020-01-08; 修订日期: 2020-02-24

基金项目: 福建省自然科学基金项目 (2015J01626); 厦门市清洁空气行动计划项目 (厦府办[2014]17 号)

作者简介: 王坚 (1961 ~), 女, 教授级高级工程师, 主要研究方向为环境科学、环境影响评价、环境监测及大气污染防治, E-mail: xmwangjian@sina.com

征,以期为有效防治船舶大气污染与绿色港口减排成效评估提供可靠的技术支撑。

1 材料与方法

本文以厦门市船舶控制区为研究区域,以 2018 年为基准年,通过对 AIS 数据的有效应用和实地调查,获得了各类型船舶静态和动态数据以及燃油油质量参数等信息。

1.1 研究范围与航道限速

根据国家船舶大气污染物排放控制区实施方案^[23]及厦门市绿色港口建设与管理规定,确定本研究的控制区域为海沧:E117°46.621', N24°27.825';翔安:E118°15.111', N24°44.531';控制区南:E118°23.280', N24°0.900';控制区北:E118°51.563'; N24°19.65'构成的区域。厦门海事局 2018[1]号文规定了厦门海域船舶航速限制要求,航道限速情况见图 1。



图 1 航道限速情况
Fig. 1 Channel speed limit

1.2 船舶污染物排放清单估算方法

船舶大气污染物排放清单的计算根据 AIS 动态数据,采用自下而上的动力法进行逐条船的单独核算,然后分类统计的方式,其单船计算公式^[11]为:

$$EF = BEF \times LCF \times FCF \times CF \tag{1}$$

$$W = MCR \times LF \tag{2}$$

$$E = W \times EF \times Act \times 10^{-6} \tag{3}$$

式中,EF 为本地化船舶污染物排放因子 [$g \cdot (kW \cdot h)^{-1}$]; BEF 为船舶污染物基准排放因子, [$g \cdot (kW \cdot h)^{-1}$]; LCF 为低负荷修正因子(仅对主机负荷进行修正); FCF 为燃油修正因子(根据本地使用的燃油含硫量确定); CF 为减排技术的控制因子(本文未考虑减排措施取 $CF = 1$); W 为船舶主机、辅机或锅炉实际功率(kW); MCR 为船舶主机、辅机或锅炉额定功率(kW); LF 为船舶主机负荷系数(该系数为实际航速与设计航速比值的三次方);

E 为船舶污染物排放量(t); Act 为船舶在不同航行状态下的运行时间(h)。

鉴于船舶在不同的航行状态下,具有各自不同的污染物排放特征. 本文综合国内外研究及厦门市航道限速情况,将船舶控制区内的航行分为巡航、低速巡航、机动操控、锚泊和停泊 5 种状态,根据船舶主机功率与英国劳氏船级社数据库的匹配情况,建立航行的判定依据(表 1)。

表 1 船舶航行状态判定依据		
Table 1 Basis of the ships' operating conditions		
状态	已匹配船舶	未匹配船舶
巡航	主机负荷 $\geq 65\%$	航速 ≥ 12 节
低速巡航	$20\% \leq \text{主机负荷} < 65\%$, 航速 ≥ 8 节	$8 \text{ 节} \leq \text{航速} < 12 \text{ 节}$
机动操控	主机负荷 $< 20\%$, 航速 > 3 节	$3 \text{ 节} \leq \text{航速} < 8 \text{ 节}$
锚泊	$1 \text{ 节} \leq \text{航速} < 3 \text{ 节}$	$1 \text{ 节} \leq \text{航速} < 3 \text{ 节}$
停泊	航速 < 1 节	航速 < 1 节

1.3 研究资料获取

1.3.1 船舶静态与动态数据库的建立

基于厦门市海事局提供的全年进出港船舶静态数据、厦门市公安局公共安全平台提供的所有无证船舶的静态数据、厦门船级分社和实地船舶综合信息的调查(包括发放 230 份调查表并收回 90% 有效资料)及船舶 AIS 的静态信息,建立包括船舶类型、IMO 号、MMSI 号、建造年份、船长、船宽、吃水、载重量、设计航速及主机、辅机、锅炉额定功率、锅炉油耗、不同航行工况下的辅机输出功率及锅炉使用情况等基础信息的船舶静态数据库. 获取 AIS 动态数据,建立控制区内每艘船舶的航行轨迹数据库。

船舶污染物排放水平受油品质量、船舶建造年代和航行工况等因素影响. 本文选用 2012 年美国洛杉矶港大气污染物排放清单的排放因子^[11](表 2 ~ 3)作为基准排放因子; 该排放因子是在硫含量为 2.7% 的重油基础上制定的,当船舶所用燃油硫含量不同于 2.7% 时,用燃油修正因子进行修正^[12](表 4); 当船舶主机的负载低于 20% 时,由于发动机的热效率低下造成污染物排放的增加,必须进行主机低负荷修正^[11,12](表 5)。

因所选的基准排放因子中无高速船舶的数据,本研究的高速船舶采用国家环境保护部发布的非道路移动污染源清单编制中的船舶大气污染物的排放因子^[24],调查国内高速船舶的设计油耗及本地产游艇的额定油耗,确定高速船舶和游艇的平均额定油耗分别为 $213.5 g \cdot (kW \cdot h)^{-1}$ 和 $221 g \cdot (kW \cdot h)^{-1}$. 根据港口管理部门提供的各类型无证船舶年平均活动水平和油耗,核算 2018 年该类型船舶中工作、渔业和货船的年耗油量分别为 693、2 965 和 2 679 t,共计 6 337 t。

表 2 主机污染物基准排放因子/ $\text{g}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}$
Table 2 Emission factors for main engines/ $\text{g}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}$

机型	建造时间	PM ₁₀	PM _{2.5}	NO _x	SO ₂	CO	HC
低速柴油机 ^[11]	1999 年前	1.50	1.20	18.1	10.5	1.4	0.6
	2000 ~ 2010 年	1.50	1.20	17.0	10.5	1.4	0.6
	2011 ~ 2015 年	1.50	1.20	15.3	10.5	1.4	0.6
中速柴油机 ^[11]	1999 年前	1.50	1.20	14.0	11.5	1.1	0.5
	2000 ~ 2010 年	1.50	1.20	13.0	11.5	1.1	0.5
	2011 ~ 2015 年	1.50	1.20	11.2	11.5	1.1	0.5
高速船 ¹⁾		0.81	0.78	10.2	2.1	5.1	1.3
游艇 ¹⁾		0.84	0.81	10.5	2.2	5.3	1.4
无证船舶 ^[24] (以燃油计)/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$		3.81	3.65	47.60	10	23.80	6.19

1) 该类型船舶的排放因子已是本地基准排放因子,该因子对应的是硫含量为 0.5% 轻质柴油

表 3 辅机和锅炉污染物基准排放因子^[11]/ $\text{g}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}$
Table 3 Emission factors for auxiliary engines
and boilers/ $\text{g}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}$

类型	建造时间	PM ₁₀	PM _{2.5}	NO _x	SO ₂	CO	HC
辅机	1999 年前	1.5	1.2	14.7	12.3	1.1	0.4
	2000 ~ 2010 年	1.5	1.2	13.0	12.3	1.1	0.4
	2011 ~ 2015 年	1.5	1.2	11.2	12.3	1.1	0.4
锅炉		0.8	0.64	2.1	16.5	0.2	0.1

表 4 燃油修正因子^[12]
Table 4 Correction factors for fuel oil

燃油类型	含硫量/%	PM	NO _x	SO ₂	CO	HC
重油	1.5	0.82	1	0.56	1	1
柴油	1.5	0.47	0.9	0.56	1	1
轻质柴油	0.5	0.25	0.94	0.18	1	1
轻质柴油	0.2	0.19	0.94	0.07	1	1
轻质柴油	0.1	0.17	0.94	0.04	1	1

表 5 船舶主机低负荷修正因子^[11,12]

Table 5 Correction factors for main engines under low loading

负荷/%	PM	NO _x	SO ₂	CO	HC
2	7.29	4.63	1	9.68	21.18
3	4.33	2.92	1	6.64	11.68
4	3.09	2.21	1	4.86	7.71
5	2.44	1.83	1	3.89	5.61
6	2.04	1.60	1	3.25	4.35
7	1.79	1.45	1	2.79	3.52
8	1.61	1.35	1	2.45	2.95
9	1.48	1.27	1	2.18	2.52
10	1.38	1.22	1	1.96	2.18
11	1.30	1.17	1	1.79	1.96
12	1.24	1.14	1	1.64	1.76
13	1.19	1.11	1	1.52	1.60
14	1.15	1.08	1	1.41	1.47
15	1.11	1.06	1	1.32	1.36
16	1.08	1.05	1	1.24	1.26
17	1.06	1.03	1	1.17	1.18
18	1.04	1.02	1	1.11	1.11
19	1.02	1.01	1	1.05	1.05
20	1	1	1	1	1

1.3.2 控制区内船舶分布特征

厦门市船舶控制区内只有沿海船舶,因国内目

前尚无统一的船舶分类规定,本文按照用途,将 2018 年途经控制区的船舶划分为客运船舶(载客 12 人以上)、货运船舶(以载运货物为主和载客 12 个以下)、工作船舶(不直接参加客货运输专为港口生产服务)、工程船舶(在港口、航道等水域从事工程作业)和渔业船舶(从事渔业生产或为渔业生产服务)这 5 种类型,对于无证船舶(大多数为总吨位 < 500t 的小型船舶)的污染物排放量单独计算后,按船舶分类分配至上述 5 种类型的船舶中。

2018 年厦门市船舶控制区船舶大气污染物排放清单计算的船舶共计 7 787 艘,其中货船 3 272 艘(集装箱货船 1 173 艘,其它货船 2 099 艘)、客船 155 艘、工作船舶 95 艘、工程船舶 88 艘、渔业船舶 1 420 艘和无证货船 2 757 艘。本年度进出港船舶合计 168 456 艘次,控制区内直行未进港和作业未进港船舶共计 15 208 艘次。

2018 年厦门市船舶控制区内船舶分布(图 2)中集装箱船舶占 15.1%、干、散、杂货及油船占 23.8%,以无证船舶为主的其它货船占 38.6%,呈现了以货船为主、渔业船舶次之、其余船舶占比不足 5% 的特征;虽然厦门是邮轮母港,但 2018 年进出港邮轮数量仅为 13 艘,占比为 0.2%,尚属起步阶段。

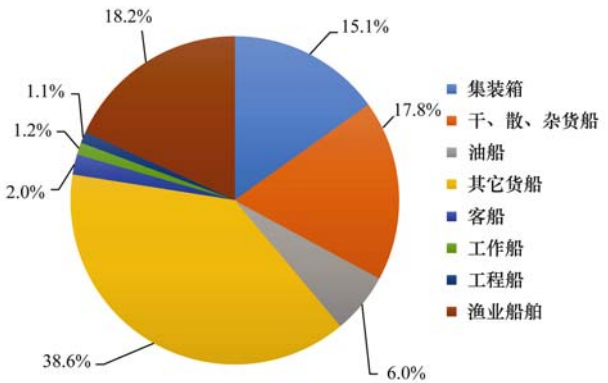


图 2 2018 年进出厦门港船舶分布情况

Fig. 2 Distribution of ships entering and leaving Xiamen port in 2018

1.3.3 控制区内船舶活动水平

根据船舶航行状态的判断依据(表1),按每艘船舶的 AIS 轨迹数据结合船舶静态信息统计各类型船舶每个进出港周期(2 艘次)的平均活动水平及其在不同航行状态下的辅机和锅炉使

用情况(表6)。另外,直行未进港船舶中货船占 98.3%,在控制区内每艘次平均航行时间 3.7 h,航行工况为巡航或低速巡航;作业船舶中捕捞船占 96%,每艘次的平均作业时间为 16.3 h,以锚泊或停泊状态为主。

表 6 各类型船舶不同航行工况的平均活动水平

Table 6 Average activity level of various types of ships under different navigation conditions						
船舶类型	项目	巡航	低速巡航	机动操控	锚泊	停泊
货船 ¹⁾	每周期时长/min	16.7	38.2	29.1	3.3	621.9
	平均航速/节	12.8	9.7	5.9	1.8	—
	辅机功率占比 ³⁾ /%	22	24	34	25	25
客船 ²⁾	每周期时长/min	55.5	12.3	6.6	—	409
	平均航速/节	16.4	9.8	5.7	—	—
	辅机功率/kW	—	—	60	60	60
	邮轮辅机/%	63.1	63.1	63.1	63.1	60.7
工程船	每周期时长/min	16.2	53.8	153.3	129.3	2 195
	平均航速/节	12.6	9.8	5.1	1.8	—
	辅机功率占比 ³⁾ /%	17	27	45	20	20
工作船	每周期时长/min	28.8	36.1	28.2	12.0	4 422
	平均航速/节	13.0	9.5	5.9	—	—
	辅机功率占比 ³⁾ /%	—	—	35	20	20
渔业船舶	每周期时长/min	2.2	37.2	14.8	1.4	2 868
	平均航速/节	12.6	9.9	5.7	1.8	—
	辅机功率占比 ³⁾ /%	—	—	35	20	20

1) 货船锅炉油耗为 0.5~1.842 t·d⁻¹; 2) 客船中邮轮的锅炉功率为 3 690 kW; 3) 辅机功率占主机的比例

各类型船舶均呈现停泊时间高于其它航行状态的特征,其中工作船、渔业船和工程船的停泊状态明显高于其它船舶,体现了这些船舶的工作特征;各类型船舶在巡航状态下的平均航速以客船为最高,在低速巡航、机动操控和锚泊状态下,各类型船舶的平均航速很接近,体现了控制区内不同航道的限速情况。

1.3.4 控制区内船舶燃油硫含量

根据 2018 年海事局对进出港船舶进行的 500 多次的燃油硫含量检测数据的统计,拖轮所用柴油硫含量 0.001%~0.014%,平均为 0.008%;对其它船舶的用油测定硫含量为 0.001%~7.3%,其中,外贸货船和内贸集装箱船、油船使用平均硫含量为 1.5%的重油,停泊按规定使用硫含量 0.5%的轻质柴油,其余船舶燃油硫含量取平均值为 0.5%的轻质柴油。

2 结果与讨论

2.1 控制区内船舶大气污染物排放清单

2018 年厦门市船舶控制区内所有船舶大气污染物排放总量 16 413 t,其中:PM₁₀ 592 t、PM_{2.5} 491 t、NO_x 10 544 t、SO₂ 2 816 t、CO 1 755 t、HC 706 t,各类型船舶大气污染物排放情况见表 7。

根据 2018 年厦门市船舶控制区进出港船舶分布情况,虽然进出港船舶中集装箱船的比例仅为进出港船舶总数的 15.1%,但贡献了污染物排放总量的 64.6%;究其原因是集装箱船不仅单船污染物排放量大,且航行过程使用平均硫含量为 1.5%重油所造成;进出港船舶中除集装箱船以外的货船占比为 62.4%,但仅贡献了污染物排放总量的 12.8%,与深圳市^[13]的船舶污染物排放清单具有共性。客船、工作船、工程船和渔业船舶占进出港船舶的 22.5%,贡献了污染物排放总量的 22.6%,这些船舶除邮轮外,其它均使用硫含量为 0.001%~0.5%的轻质柴油,且辅机功率低、无锅炉等因素是其污染物排放较少的主要原因。

控制区内船舶大气污染物排放顺序为货船>渔业船>工作船>工程船>客船,且工作船、工程船和客船的污染物排放总量与渔业船舶的排放量相近,可见船舶大气污染物排放清单与控制区内船舶分布特征(1.3.2 节)一致,真实反映了厦门船舶大气污染物排放情况。

2.2 控制区内船舶大气污染物排放特征

控制区内船舶污染物排放总量表明,进出港船舶污染物排放占 82.6%,未进港船舶占 17.4%;各污染物中以 NO_x 的排放量最大,占比达 64.2%(图

表 7 2018 年厦门港各类船舶污染物排放清单/ $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$

Table 7 Vessels' emission inventory for Xiamen Port in 2018/ $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$

类型	PM_{10}	$\text{PM}_{2.5}$	NO_x	SO_2	CO	HC
货船船舶	401.4	329.5	6 784.3	2 055.2	916.4	333.2
客船	13.6	11.2	447.4	104.2	101.6	33.9
进出港船舶	37.8	35.7	495.2	45.7	230.1	66.7
工程船	22.5	18.8	550.2	102.1	105.5	60.1
渔业船	18.5	16.6	438.7	70.2	98.3	30.4
未进港船舶	42.8	34.2	844.1	214.0	77.7	35.1
渔业船	55.7	44.6	983.8	225.0	225.6	146.2
合计	592	491	10 544	2 816	1 755	706

3), SO_2 次之, 然后是 CO, 与 2010 年上海港^[15] 和深圳市^[14] 船舶大气污染物排放特征具有相似性, 与 2012 年大连海域远洋船舶(包括货船与邮轮)污染物排放特征^[25] 有差异, 大连的污染物排放顺序为 NO_x 、 SO_2 和 PM_{10} , 其主要原因是大连进出港远洋船舶使用硫含量为 2.7% 的重油^[25], 油品质量较厦门港差; 由表 4 可见, 油品质量提升对 PM 减排明显, 当船舶处于航行时大连港船舶排放的 PM 比厦门港高 18%、处于停泊时大连港比厦门港高 75%, 致使该港区船舶排放的 PM 数量相对较大。

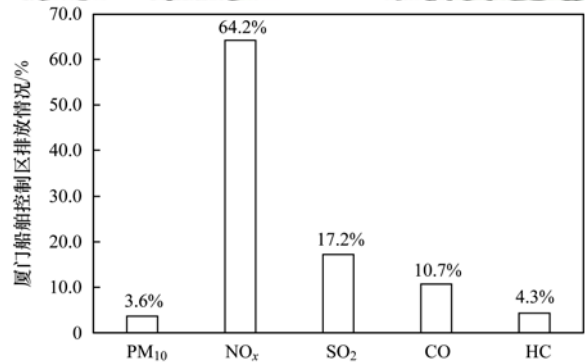


图 3 2018 年厦门港船舶控制区内船舶各污染物排放情况

Fig. 3 Pollutant emissions by vessels in the Xiamen Port ECA in 2018

2018 年厦门进出港船舶污染物排放总量 13 563.2 t, 各类型船舶中以货船污染物排放占比最高, 达到 77.4%, 而客船、工作船、工程船和渔业船舶的污染物排放量相近(图 4)。与控制区内所有船舶的污染物排放总量相比, 货船的排放量更大, 因此货船的污染物排放控制是厦门港的重要防控方向。

2.3 不同航行工况下的污染物排放特征

因不同航行工况下, 船舶的主机、辅机输出负荷和锅炉的使用情况和活动时长有很大差异, 造成了不同航行状态下污染物排放量的差异性变化。2018 年进出港船舶各航行工况下污染物排放量的顺序为: 停泊 > 巡航 > 低速巡航 > 机动操控 > 锚泊(图 5), 各类型船舶呈现的停泊时间高于其它航行状态的特征, 及邮轮和大部分货船停泊时均使用锅炉, 使

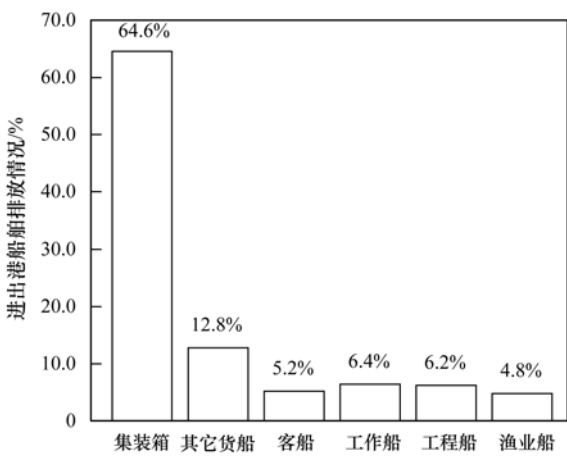


图 4 2018 年厦门港进出港船舶污染物排放情况

Fig. 4 Pollutants Emissions by different types of ship entering and leaving Xiamen Port in 2018

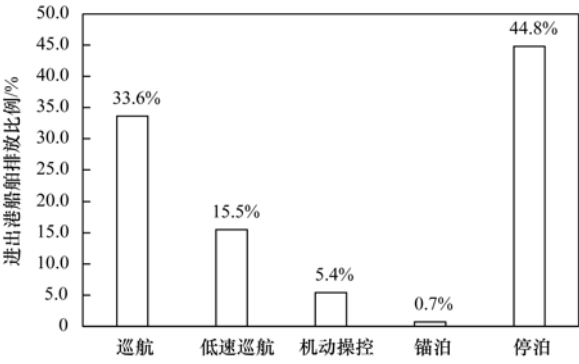


图 5 2018 年厦门港进出港船舶不同工况下污染物排放量分布

Fig. 5 Air pollutant emission shares of vessels entering and leaving Xiamen Port via different operation modes

得停泊状态下污染物的排放量最大。

表 8 分别统计各污染物在不同工况下的排放情况, 其中巡航状态排放量占比较大的污染物有颗粒物、 SO_2 和 NO_x , 产生这一现象的主要原因是大部分货船和邮轮使用重油所致; 而停泊状态排放量占比较大的污染物是 CO、HC 和 NO_x , 体现了船舶辅机和锅炉的污染物排放与主机存在差异及船舶普遍停靠时间长的特征; 同时, SO_2 的排放具有特殊性, 巡航和停泊的排放量接近, 占 SO_2 排放总量的 78.8%。由于停泊时船舶大气污染物排放量最大, 同时在路

程相同情况下低速巡航状态下的污染物排放低于巡航状态,因此岸电的使用和控制区内降低航速能有效降低船舶大气污染物的排放。

表 8 2018 年进出港船舶不同工况下各污染物排放分担率/%

Table 8 Different air pollutant emission contribution rates for different operation modes/%					
状态	PM ₁₀	NO _x	SO ₂	CO	HC
巡航	43.9	33.3	38.1	25.8	27.7
低速巡航	16.6	15.7	16.4	12.8	15.4
机动操控	11.0	5.2	4.1	5.5	9.3
锚泊	3.5	0.6	0.7	0.5	0.8
停泊	25.0	45.2	40.7	55.4	46.8
合计	100	100	100	100	100

2.4 船舶大气污染物排放的时空变化特征

2.4.1 船舶大气污染物排放的日变化规律

根据 AIS 的船舶进出港时间分布情况,统计

进出港船舶污染物排放的日变化特征(见图 6,以 NO_x 为例)。结果表明,各污染物排放量基本上从凌晨 03:00 开始呈上升态势并于 9:00 达到最高峰值,至下午 16:00 均处于排放高峰期期间;各污染物最大值与最小值之比在 1.5~2.0 之间,进出港船舶的污染物排放高峰期处于本市大气扩散条件较好的时段,削弱了船舶污染物排放高峰时段对市区环境空气质量的影响;16:00 之后船舶污染物排放量呈现较大幅度的下降,减轻了晚交通高峰期间的污染叠加程度,但船舶排放的污染物在扩散条件较差的时间段(20:00~23:00)对市区环境空气质量的影响比较明显,特别是夏季风期间夜间海陆风环流的作用明显,容易在市区出现污染物的积累而形成上半夜污染较严重的情形。

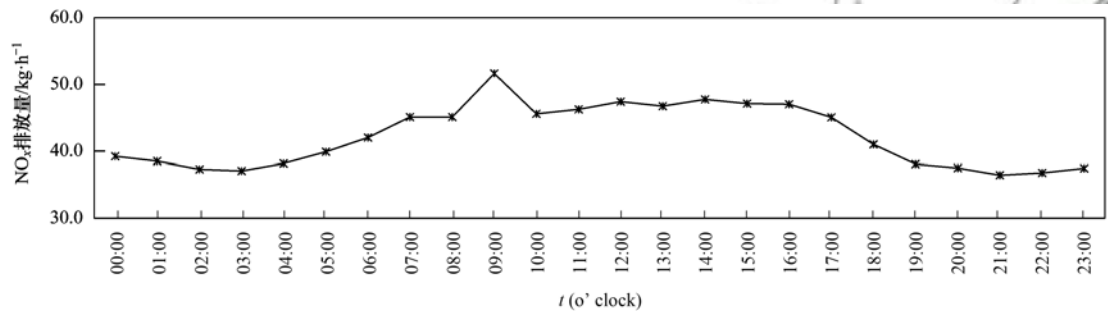


图 6 2018 年厦门港进出港船舶 NO_x 排放日变化特征

Fig. 6 Diurnal variation characteristics of NO_x emissions from vessels entering and leaving Xiamen Port in 2018

2.4.2 船舶大气污染物排放的月变化规律

按月统计船舶污染物排放水平(见图 7,以 NO_x 和 SO₂ 为例)发现,1 a 中各污染物的月变化规律一致,全年以 2 月的排放量为最低,与春节期间船舶活动量减少相关,并与江苏省的船舶大气污染物排放的月变化规律^[26]一致;1、4 和 7 月的排放量也相对较低,全年出现两个污染物排放峰值分别为 3 月和 5 月,由于春季的大气扩散条件为全年最差,这个季节船舶大气污染物排放对环境空气质量的影响相

对较大。

2.4.3 船舶大气污染物排放的空间分布特征

根据上述计算的各类型船舶的污染物排放量,结合 AIS 的船舶航行轨迹数据,在船舶控制区内创建 100m×100m 尺度的格网化污染物排放数据库,利用 ArcGIS 技术进行可视化处理(图 8)。

由船舶污染物排放的空间分布可见,控制区内船舶污染物排放的空间分布规律与船舶的航行轨迹和航行工况密切相关,各污染物排放高值主要分布于主航道、东渡港区和海沧港区的海岸线上(该区域的高排放是船舶停泊过程的排放所致),本研究结果与谭建伟等^[25]关于大连海域远洋船舶污染物排放空间分布特征具有相似性。

2.5 不确定性分析

对于船舶信息完全匹配的船只,计算结果准确可靠;对于按不同类型船舶平均状态匹配的船只,计算结果会产生偏差,因这部分船舶仅占船舶总数的 3.9%,整体偏差水平较小。本文根据 AIS 的船舶航行轨迹数据,获取了近 5 000 万个进出港船舶的计算数据、近 2 000 万个未进港船舶的计算数据,船舶航行工况可信度较高。为检验船舶大气污染物排放

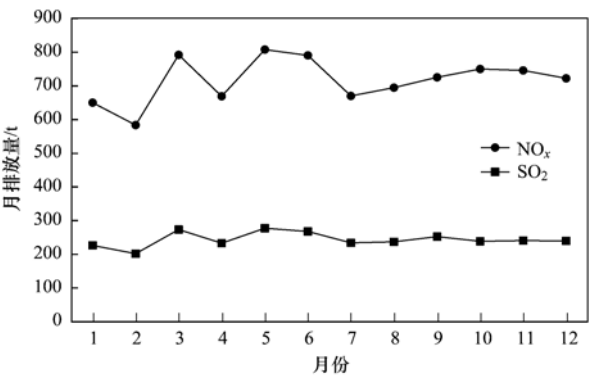


图 7 2018 年船舶排放 NO_x、SO₂ 的月变化情况

Fig. 7 Monthly variation characteristics of NO_x and SO₂ emissions in 2018

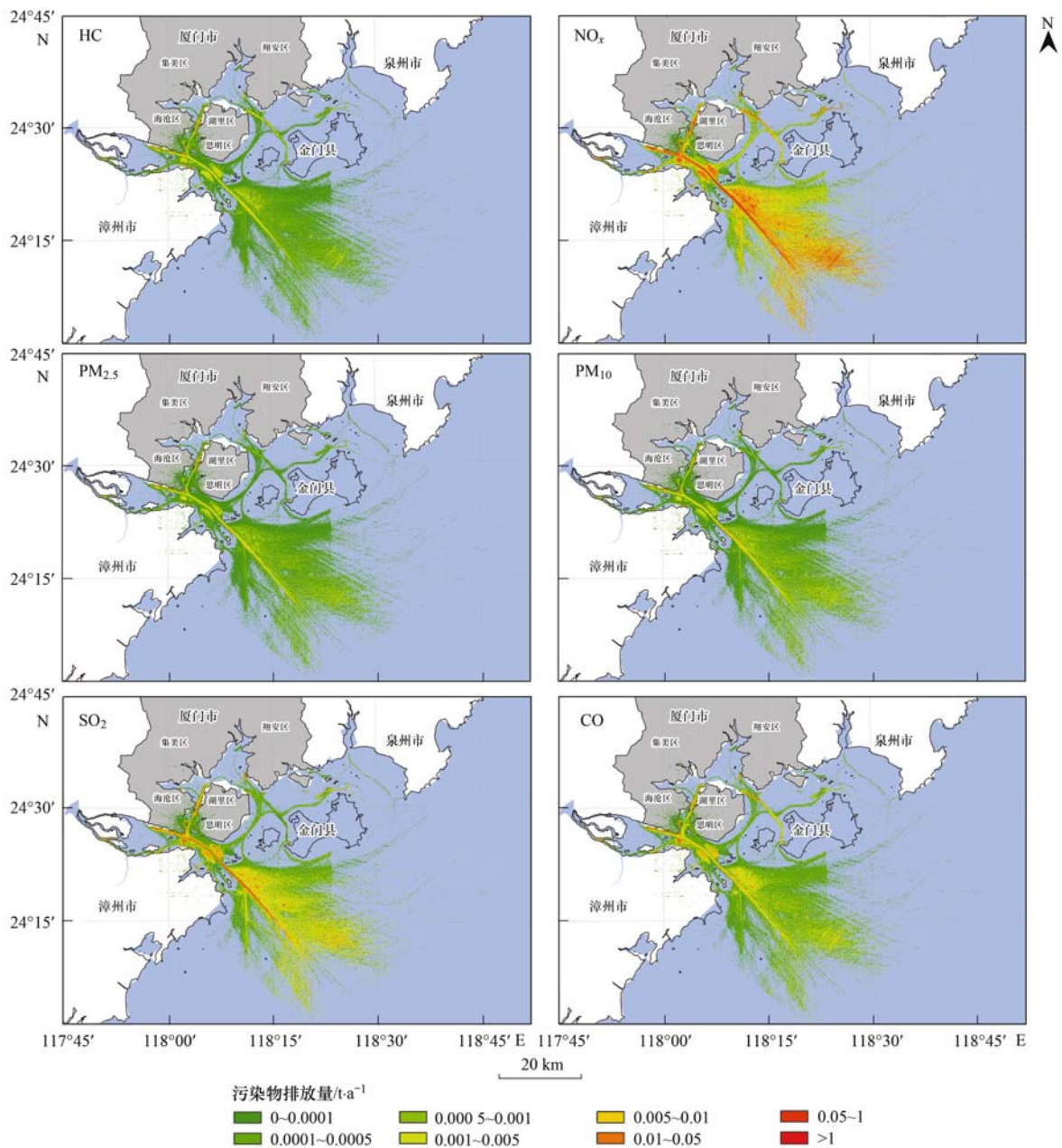


图8 厦门港船舶污染物排放空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of the total ship emission in Xiamen Port

清单的准确性,本文选择2000年制造、发动机额定功率255 kW、额定转速1000 r·min⁻¹、额定航速10节的渔船、正常航速7~8节时的燃烧室温度为400℃、单缸最大排气量4.5 L的渔业船舶和使用硫含量为0.0864%轻质柴油进行实船测试,当船舶发动机输出功率为122 kW时,实测NO_x平均浓度1468 mg·m⁻³、标干流量978 m³·h⁻¹、排放量为1.44 kg·h⁻¹,以基准排放因子按燃油修正系数和主机负荷比计算的NO_x排放量为1.48 kg·h⁻¹,两者相差2.8%,可见本文在船舶污染源排放清单的统计过程中所选择的基准排放因子和本地化处理过程科学合理,能比较准确地反映厦门的船舶尾气排放情况。

3 结论

(1)2018年厦门市船舶控制区内的船舶污染物排放总量16413 t,进出港船舶污染物排放占82.2%、未进港船舶占17.8%,各污染物年排放量为:PM₁₀ 592 t、PM_{2.5} 491 t、NO_x 10544 t、SO₂ 2816 t、CO 1755 t、HC 706 t,以NO_x的排放量最大,占比达64.2%,控制区内船舶的主要污染来源于货船,并以集装箱船的污染物排放量为最大;经船舶污染物排放因子实测验证,厦门市船舶大气污染物排放清单核算科学可靠。

(2)各航行工况下污染物排放量的顺序为:停泊>巡航>低速巡航>机动操控>锚泊,不同航行

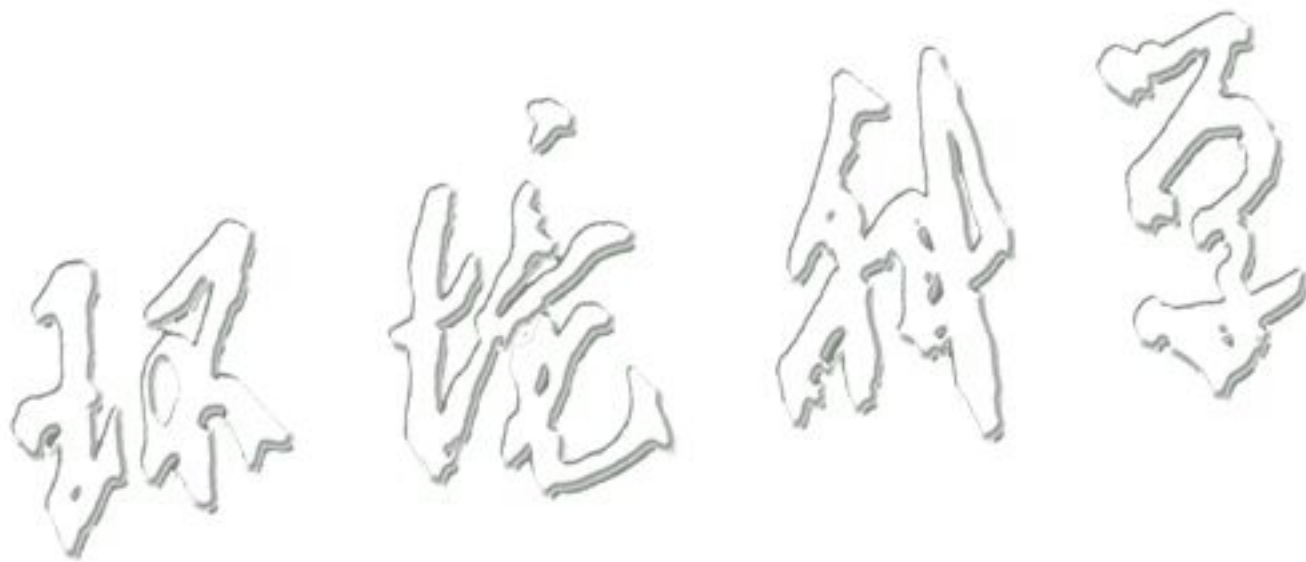
工况下的污染物排放具有明显的特征,其中,巡航状态排放量占比较大的污染物有 PM_{10} 、 SO_2 和 NO_x ; 而停泊状态排放量占比较大的污染物是 CO 、 HC 和 NO_x ; SO_2 的排放具有特殊性,巡航和停泊的排放量接近,占 SO_2 排放总量的 78.8%。岸电的使用、油品质量的提升、控制区内降低航速均能有效减少船舶大气污染物排放。

(3) 船舶污染物排放具有明显的时空特征。进出港船舶排放的各污染物基本上在 9:00 出现峰值,且 09:00 ~ 16:00 处于船舶污染物排放高峰期、16:00 之后船舶污染物排放量呈现较大幅度的下降,污染物排放高峰期处于当地大气扩散条件较好期间,有利于污染物的扩散;船舶污染物排放的最小值出现在 03:00,但上半夜的污染物排放对市区环境空气质量的影响较明显;全年以 2 月的排放量为最低,3 月和 5 月出现排放峰值、加大了春季的污染压力;同时控制区内各污染物排放高值主要分布于主航道和港区海岸线上。

参考文献:

- [1] Minguillón M C, Arhami M, Schauer J J, *et al.* Seasonal and spatial variations of sources of fine and quasi-ultrafine particulate matter in neighborhoods near the Los Angeles-Long Beach harbor [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(32): 7317-7328.
- [2] 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): 2157-2166.
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): 2157-2166.
- [3] 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.
- [4] Aliabadi A A, Staebler R M, Sharma S. Air quality monitoring in communities of the Canadian Arctic during the high shipping season with a focus on local and marine pollution [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15**(5): 2651-2673.
- [5] 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.
- [6] 刘启明, 方梦圆, 曹湘怡, 等. 2006—2015 年厦门港船舶大气污染物排放清单的初步估算[J]. *生态环境学报*, 2016, **25**(9): 1483-1486.
Liu Q M, Fang M Y, Cao X Y, *et al.* Establishment of vessels air pollutant emission inventory in Xiamen port during 2006—2015 [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, **25**(9): 1483-1486.
- [7] 王征, 张卫, 彭传圣, 等. 中国近周边海域船舶排放清单及排放特征研究[J]. *交通节能与环保*, 2018, **14**(63): 11-15.
Wang Z, Zhang W, Peng C S, *et al.* Study on characteristics of ship emissions from surrounding China seas [J]. *Energy Conservation & Environmental Protection in Transportation*, 2018, **14**(63): 11-15.
- [8] Jalkanen J P, Brink A, Kalli J, *et al.* A modelling system for the exhaust emissions of marine traffic and its application in the Baltic Sea area [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, **9**(23): 9209-9223.
- [9] Maragkogianni A, Papaefthimios S. Evaluating the social cost of cruise ships air emissions in major ports of Greece [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2015, **36**: 10-17.
- [10] Tichavska M, Tovar B. Port-city exhaust emission model: an application to cruise and ferry operations in Las Palmas Port [J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2015, **78**: 347-360.
- [11] Group Starcrest Consulting, LLC. The port of Los Angeles inventory of air emissions for calendar year 2012 [R]. Los Angeles: Starcrest Consulting Group, LLC, 2012. 37-55.
- [12] Archana A, Guiselle A, Anderson B, *et al.* Port of Los Angeles air emissions inventory-2009, ADP #050520-525 [R]. LLC, Poulosbo: Starcrest Consulting Group, 2011.
- [13] 叶斯琪, 郑君瑜, 潘月云, 等. 广东省船舶排放源清单及时空分布特征研究[J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(3): 537-547.
Ye S Q, Zheng J Y, Pan Y Y, *et al.* Marine emission inventory and its temporal and spatial characteristics in Guangdong Province [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(3): 537-547.
- [14] 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.
- [15] 伏晴艳, 沈寅, 张健. 上海港船舶大气污染物排放清单研究[J]. *安全与环境学报*, 2012, **12**(5): 57-64.
Fu Q Y, Shen Y, Zhang J. On the ship pollutant emission inventory in Shanghai port [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2012, **12**(5): 57-64.
- [16] Yang D Q, Kwan S H, Lu T, *et al.* An emission inventory of marine vessels in Shanghai in 2003 [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41**(15): 5183-5190.
- [17] Song S. Ship emissions inventory, social cost and eco-efficiency in Shanghai Yangshan port [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **82**: 288-297.
- [18] 张意, Michel A, 李东, 等. 天津市非道路移动源污染物排放清单开发[J]. *环境科学*, 2017, **38**(11): 4447-4453.
Zhang Y, Michel A, Li D, *et al.* Development of a non-road mobile source emissions inventory for Tianjin [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(11): 4447-4453.
- [19] 吕建华, 付飞, 左华, 等. 青岛市船舶废气排放清单及应用[J]. *环境保护科学*, 2019, **45**(5): 107-115.
Lyu J H, Fu F, Zuo H, *et al.* Ship emission inventory and its application in Qingdao [J]. *Environmental Protection Science*, 2019, **45**(5): 107-115.
- [20] 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, Zheng 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.
- [21] 张礼俊, 郑君瑜, 尹沙沙, 等. 珠江三角洲非道路移动源排放清单开发[J]. *环境科学*, 2010, **31**(4): 886-891.
Zhang L J, Zheng J Y, Yin S S, *et al.* Development of non-road mobile source emission inventory for the Pearl River Delta region [J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(4): 886-891.

- [22] 顾建, 王伟, 彭宜蔷, 等. 基于 STEAM 的靠港船舶大气污染物排放清单研究[J]. 安全与环境学报, 2017, **17**(5): 1963-1968.
Gu J, Wang W, Peng Y Q, *et al.* Study on vessel emission inventory based on STEAM [J]. Journal of Safety and Environment, 2017, **17**(5): 1963-1968.
- [23] 中华人民共和国交通运输部. 交通运输部关于印发船舶大气污染物排放控制区实施方案的通知[EB/OL]. http://www.gov.cn/xinwen/2018-12/20/content_5350451.htm, 2018-11-30.
- [24] 中华人民共和国环境保护部. 非道路移动源大气污染物排放清单编制技术指南(试行)[EB/OL]. http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201501/t20150107_293955.htm, 2014-12-31.
- [25] 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.
- [26] 徐文文, 殷承启, 许雪记, 等. 江苏省内河船舶大气污染物排放清单及特征[J]. 环境科学, 2019, **40**(6): 2595-2606.
Xu W W, Yin C Q, Xu X J, *et al.* Vessel emission inventories and emission characteristics for inland rivers in Jiangsu Province [J]. Environmental Science, 2019, **40**(6): 2595-2606.



CONTENTS

Comparison Analysis of the Effect of Emission Reduction Measures for Major Events and Heavy Air Pollution in the Capital	ZHONG Yi-sheng, ZHOU Ying, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i>	(3449)
Evaluation of Different ISORROPIA-II Modes and the Influencing Factors of Aerosol pH Based on Tianjin Online Data	GAO Jie, SHI Xu-rong, WEI Yu-ting, <i>et al.</i>	(3458)
Emission Characteristics of Particulate Organic Matter from Cooking	LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, <i>et al.</i>	(3467)
Characteristics and Sources of 12 Trace Amount Elements in PM _{2.5} During a Period of Heavy Pollution in Huanggang, Central China	CHEN Zhan-le, TIAN Qian, MAO Yao, <i>et al.</i>	(3475)
Aerosol Optical Properties over the Ebinur Region	ZHANG Zhe, DING Jian-li, WANG Jin-jie	(3484)
Characteristics of Secondary Organic Particles and the Potential Formation of SOA from VOCs During Wintertime Heavy Pollution Episodes in Tianjin	XU Hong, TANG Miao, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i>	(3492)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs at Different Pollution Levels During the Winter in an Urban Area in Zhengzhou	LI Yi-dan, YIN Sha-sha, ZHANG Rui-qin, <i>et al.</i>	(3500)
Emission Inventory of Intermediate Volatility Organic Compounds (IVOCs) from Biomass Burning in the Yangtze River Delta During 2010-2018	ZHU Yong-hui, WANG Qian, HUANG Ling, <i>et al.</i>	(3511)
Emission Characteristics of Biogenic Volatile Compounds (BVOCs) from Common Greening Tree Species in Northern China and Their Correlations with Photosynthetic Parameters	XU Yan, LI Shuang-jiang, YUAN Xiang-yang, <i>et al.</i>	(3518)
Characteristics of Surface Ozone and Impact Factors at Different Station Types During the Autumn in Guangzhou	GAO Ping, ZHUANG Li-yue, WANG Long, <i>et al.</i>	(3527)
Pollution Characteristics and Sensitivity Analysis of Atmospheric Ozone in Taian City	LI Kai, LIU Min, MEI Ru-bo	(3539)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Road Dust from Non-ferrous Smelting Parks	FENG Yu-yao, SHI Jian-wu, ZHONG Yao-qian, <i>et al.</i>	(3547)
Pollution and Source Analysis of Heavy Metal in Surface Dust from Xi'an University Campuses	FAN Xin-yao, LU Xin-wei, LIU Hui-min, <i>et al.</i>	(3556)
Monitoring Method of Total Particulate Matter in Ultra-low-emission and High-humidity Exhaust Gas from Stationary Sources and an Actual Test in a Gas Power Plant	HU Yue-qi, YAN Xu, KONG Chuan, <i>et al.</i>	(3563)
Vessels' Air Pollutant Emissions Inventory and Emission Characteristics in the Xiamen Emission Control Area	WANG Jian, HUANG Zhi, LIU Yan-ying, <i>et al.</i>	(3572)
Method for High-resolution Emission Inventory for Road Vehicles in Chengdu Based on Traffic Flow Monitoring Data	PAN Yu-jin, LI Yuan, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i>	(3581)
Inversion of Water Quality Parameters Based on UAV Multispectral Images and the OPT-MPP Algorithm	HUANG Xin-xi, YING Han-ting, XIA Kai, <i>et al.</i>	(3591)
Effects of Different Water Stratification on the Vertical Distribution of Nitrogen in Sediment Interstitial Waters: A Case Study of the Three Gorges Reservoir and Xiaowan Reservoir	LIU Jing-si, ZHU Xiao-sheng, HU Zi-long, <i>et al.</i>	(3601)
Pollution Status and Pollution Behavior of Microplastic in Surface Water and Sediment of Urban Rivers	ZHAO Xin, CHEN Hao, JIA Qi-long, <i>et al.</i>	(3612)
Spatial and Temporal Variation of Phytoplankton Community Structure and Its Influencing Factors in Shanghai River Channels	XU Zhi, CHEN Xiao-hua, SHEN Gen-xiang, <i>et al.</i>	(3621)
Restoration of River Sediment by Calcium Peroxide (CaO ₂) Combined with Biochar	LI Yu-ping, JIANG Ying-ying, LIU Bao-ming, <i>et al.</i>	(3629)
Quantification of Nitrate Sources to Groundwater in Karst Trough-valley Areas Based on Dual Stable Isotopes of $\delta^{15}\text{N-NO}_3^-$ and $\delta^{18}\text{O-NO}_3^-$ and the IsoSource Model	XU Lu, JIANG Yong-jun, DUAN Shi-hui, <i>et al.</i>	(3637)
Dynamic Process of Nitrogen and Phosphorus Export and Loss Load in an Intensive Orchard with Ridge and Furrow Plantation in the Three Gorges Reservoir Area	YAN Kun, WANG Yu-kuan, LIU Qin, <i>et al.</i>	(3646)
Analysis of Rainfall Runoff Pollution and Pollution Load Estimation for Urban Communities in a Highly Urbanized Region	GAO Bin, XU You-peng, LU Miao, <i>et al.</i>	(3657)
Adsorption of As(III) in Water by Iron-loaded Graphene Oxide-Chitosan	ZHAO Chao-ran, SHAN Hui-mei, ZENG Chun-ya, <i>et al.</i>	(3665)
Sorption Behaviors of Copper Ions and Tetracycline on Microplastics in Aqueous Solution	XUE Xiang-dong, WANG Xing-yuan, MEI Yu-chen, <i>et al.</i>	(3675)
Effect of Porous Fillers Properties on Biofilm Growth	JIANG Yu-qin, LI Jiong-hui, FANG Zhi-guo	(3684)
Adaptability of Nitrifying Biofilm Systems to Low Temperature: MBBR and IFAS	LI Ren, YU Li-fang, ZHANG Xing-xiu, <i>et al.</i>	(3691)
Improved on Nitrogen Removal of Anaerobic Ammonia Oxidation by Coupling Element Sulfur-based Autotrophic Short-cut Denitrification	FANG Wen-ye, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i>	(3699)
Nitrogen and Phosphorus Removal from Domestic Sewage Aerobic Granular Sludge Under Intermittent Gradient Aeration	ZHANG Yu-jun, LI Dong, LI Shuai, <i>et al.</i>	(3707)
Rapid Start-up and Stability of Partial Denitrification Based on Different Waste Sludge Sources	ZHANG Xing-xing, WANG Chao-chao, WANG Yao, <i>et al.</i>	(3715)
Decision-making Analysis of Excess Sludge Pretreatment for Struvite Recovery Based on AHP-PROMETHEE II Method	LIU Xiao-lei, LI An-jie	(3725)
Effect on Ammonia Inhibition Mitigation in the Anaerobic Digestion Process with Zero-Valent Iron	LIU Ji-bao, NIU Yu-tong, YU Da-wei, <i>et al.</i>	(3731)
Performance of Anaerobic Membrane Bioreactors for the Co-digestion of Sewage Sludge and Food Waste	DAI Jin-jin, NIU Cheng-xin, PAN Yang, <i>et al.</i>	(3740)
Antibiotics Induce Horizontal Gene Transfer of Resistance at Sublethal Concentrations	YUAN Qi-yi, CHEN Hong-jie, Laurence Haller, <i>et al.</i>	(3748)
Impact of Tetracycline Antibiotic on the Transcriptional Expression of Tetracycline Resistance Genes in <i>Shigella flexneri</i>	GAO Pin, RUAN Xiao-hui, QIU Wen-jie, <i>et al.</i>	(3758)
Competitive Selection of Hydroxylamine on Ammonia Oxidizing Bacteria and Nitrite Oxidizing Bacteria	QIAO Xin, WANG Bo, GUO Yuan-yuan, <i>et al.</i>	(3765)
Analysis of the Effect of Temperature on the Microbial Flora Structure During the Nitrite Oxidation Process Using 16S rRNA High-throughput Sequencing	HOU Xiao-wei, NIU Yong-jian, LI Wei-wei, <i>et al.</i>	(3773)
Universality and Potential Application of Mn(II) Oxidation Triggered by Microbial Interspecies Interactions	NING Xue, LIANG Jin-song, BAI Yao-hui, <i>et al.</i>	(3781)
Distribution and Potential Nitrification Rates of Aerobic Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Surface Sediments of Mangrove in Sanya River	LUO Qing, ZHEN Yu, PENG Zong-bo, <i>et al.</i>	(3787)
Effects of Ozone Pollution on Growth, Yields, and Mineral Metallic Element Contents of Paddy Rice	FANG Xiao-kun, LUO Xiao-san, ZHANG Dan, <i>et al.</i>	(3797)
Short Term Effects of a Changing Carbon Input on the Soil Respiration of <i>Picea schrenkiana</i> Forests in the Tianshan Mountains, Xinjiang	SHAO Kang, GONG Lu, HE Xue-min, <i>et al.</i>	(3804)
Effects of the Combined Application of Organic and Inorganic fertilizers on N ₂ O Emissions from Saline Soil	ZHOU Hui, SHI Hai-bin, GUO Jia-wei, <i>et al.</i>	(3811)
Mechanism and Influencing Factors of Increasing Soil Temperature by <i>in-situ</i> Electrical Resistance Heating	GE Song, MENG Xian-rong, XU Wei, <i>et al.</i>	(3822)
Acid Mine Wasteland Reclamation by <i>Juncus ochraceus</i> Buchen as a Potential Pioneer Plant	HUANG Jian-hong, FU Jiang-li, YAN Xin-rui, <i>et al.</i>	(3829)
Effects of Drip Irrigation Patterns and Biochar Addition on Soil Mineral Nitrogen and Microbial Regulation of Greenhouse	CAI Jiu-mao, LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, <i>et al.</i>	(3836)
Effects of Cotton Stalk Biochar on the Structure and Function of Fungi Community in Alkaline Rhizosphere Soil of Rice Under Cadmium Pollution	LIU Shi-dou, HAN Yao-guang, ZHU Xin-ping, <i>et al.</i>	(3846)
Effects of Different Treatments with Water Management Combined with Leaf Spraying Silicon Fertilizer on Cd Accumulation in Rice	WEI Bin-yun, ZHOU Hang, LIU Jia-wei, <i>et al.</i>	(3855)
Effects of Chelate GLDA on the Remediation of Cadmium Contaminated Farmland by <i>Pennisetum purpureum</i> Schum	QIN Jian-jun, TANG Sheng-shuang, JIANG Kai, <i>et al.</i>	(3862)
Situation Analysis and Trend Prediction of the Prevention and Control Technologies for Planting Non-Point Source Pollution	YU Ying-liang, YANG Lin-zhang, LI Hong-na, <i>et al.</i>	(3870)