

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第8期

Vol.38 No.8

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

用于滤膜称重的饱和氯化镁溶液恒湿系统搭建与评估 李晓晓,张强,邓建国,蒋靖坤,郝吉明(3095)

钢铁工业排放颗粒物中碳组成的特征 张进生,吴建会,马威,冯银厂(3102)

常州市大气 PM_{2.5} 中 PAHs 污染特征及来源解析 顾爱军,刘佳澍,罗世鹏,毕承路,苏亚兰,叶招莲,盖鑫磊(3110)

兰州河谷盆地大气多环芳烃干沉降通量及来源 尉媛丽,刘攀亮,于周锁,高宏,毛潇萱,马建民,黄韬(3120)

株洲市大气降尘中元素特征及来源分析 王世豪,张凯,柴发合,钟学才,周广柱,杨晴,柯馨姝(3130)

传统北京烤鸭烤制过程中大气污染物的排放特征 徐敏,何万清,聂磊,韩力慧,潘涛,石爱军(3139)

基于车载测试的重型柴油车尾气典型烷烃排放特征 史纯珍,郝雪薇,申现宝,曹鑫悦,张伟,吴辉,姚志良(3146)

基于 wavelet-SVM 的 PM₁₀ 浓度时序数据预测 王平,张红,秦作栋,姚清晨,耿红(3153)

广州港船舶停泊工况排放因子实测及排放量初步估算 黄学良,张洲,杨威强,李晟,朱明,方华,何俊杰,陈俊文,万承浩,张艳利,刘国光,黄祖照,王宇骏,王新明(3162)

沙尘天气对生物气溶胶中总微生物浓度及粒径分布的影响 李鸿涛,祁建华,董立杰,高冬梅(3169)

典型生活垃圾处理设施恶臭排放特征及污染评价 芦会杰(3178)

杭州地区城区降雪中全氟化合物的污染特征 张明,唐访良,俞雅雯,徐建芬,陈金汉,余波,周姗,张伟(3185)

黄浦江流域典型污水中不同粒径胶体的三维荧光光谱特征 聂明华,晏彩霞,杨毅,周俊良,刘敏(3192)

漓江地表水体有机碳来源 赵海娟,肖琼,吴夏,刘凡,苗迎,蒋勇军(3200)

夏季热分层效应对典型岩溶水库水化学及溶解无机碳的影响 吴飞红,蒲俊兵,李建鸿,张陶,李丽,黄思宇(3209)

城市不同功能区地表水重金属污染特性比较:以宁波为例 徐美娟,童桂华,孙丹,李建新,虞效益(3218)

地下水主要组分水化学异常识别方法对比:以柳江盆地为例 张小文,何江涛,彭聪,张昌延,倪泽华(3225)

人为扰动背景下城郊溪流底质磷的生物-非生物吸收潜力分析 李如忠,叶舟,高苏蒂,郑悦(3235)

长江口低氧区沉积物中磷的形态及其环境意义 刘军,臧家业,冉祥滨,赵晨英,刘季花,王小静(3243)

三峡库区小流域不同土地利用类型“土壤-水体”氮磷含量特征及其相互关系 陈成龙,高明,木志坚,倪九派,祁乐(3254)

黄土高原降雨驱动下流域碳输移特征及其碳流失评估:以羊圈沟坝系流域为例 鄂馨卉,汪亚峰,高扬,陈利顶,陈世博,陈维梁(3264)

新型溴代苯酚类消毒副产物的氯化降解机制 李欢,李正魁,李爱民,周庆,王莹,潘咏(3273)

藻形态及混凝剂组成对混凝-超滤过程的影响 张大为,徐慧,王希,门彬,王东升,段晋明(3281)

汝溪河浮游硅藻功能群特征及其与环境因子相关性分析 向蓉,李巧玉,喻毅,张洪波,董聪聪,施军琼,吴忠兴(3290)

石岩水库叶绿素 a 时空分布及其影响因子分析 宋云龙,张金松,郭小雅,朱佳,王丽,陶益,张丽(3302)

不同湿地模型中根系微生物的多样性 王林,李冰,余家辉,朱加宾,朱健(3312)

北海湖微生物群落结构随季节变化特征 张雅洁,李珂,朱浩然,张洪勋(3319)

基于高通量测序的流化床生物滤器细菌群落结构分析 张海耿,宋红桥,顾川川,单建军,张宇雷,倪琦(3330)

高效反硝化菌和包埋填料性能及微生物群落分析 孟婷,杨宏(3339)

基于城市污水资源化的微藻筛选与污水预处理 韩松芳,金文标,涂仁杰,陈洪一(3347)

生物膜贴壁培养小球藻净化猪粪沼液废水的效果 王愿珠,程鹏飞,刘德富,刘天中(3354)

微气泡臭氧催化氧化-生化耦合工艺深度处理煤化工废水 刘春,周洪政,张静,陈晓轩,张磊,郭延凯(3362)

pH 冲击对海洋厌氧氨氧化菌处理含海水污水脱氮效能的影响 于德爽,周同,李津,王晓霞,吴国栋,王晓静(3369)

酒精废水部分亚硝化-厌氧氨氧化脱氮的可行性 周正,林兴,王凡,顾澄伟,沈婧,袁砚,金润(3377)

模拟废水中钼的微生物回收及其对亚甲基蓝的催化特性 康乃馨,朱能武,郭雯颖,何志心(3385)

采用颜色空间表征 ANAMMOX 启动与冲击过程 王利君,李志华,韩冬,张天宇,杨成建(3393)

CSTR 和 MBR 反应器的短程硝化快速启动 张婷,吴鹏,沈耀良,闫刚,徐乐中, Samwine Thomas(3399)

硫酸盐还原氨氧化体系中基质转化途径 完颜德卿,黄勇,毕贞,刘沂,姚鹏程,张文静(3406)

不同 TOC/NH₄⁺-N 对厌氧氨氧化脱氮效能的影响 王凡,刘凯,林兴,周正,李祥,黄勇(3415)

盐度对 EGSB 反应器的运行及厌氧颗粒污泥的影响 谭潇,黄靓,杨平,涂弈州(3422)

CANON 颗粒污泥工艺的启动与负荷提高策略 孙延芳,韩晓宇,张树军,李星,曹相生(3429)

胞外聚合物对活性污泥吸附去除全氟辛烷磺酸(PFOS)的影响 刘鑫彤,尹华,彭辉,李浩榕,杨萍萍,曹雅娟(3435)

不同施肥方式下紫色土 N₂O 与 NO_x 的排放特征 胡磊,刘韵,朱波(3442)

地膜覆盖对蔬菜地甲烷排放的影响 张凯莉,郝庆菊,冯迪,石将来,石孝均,江长胜(3451)

模拟的增温增雨对内蒙古温带草原土壤氨氧化微生物的影响 张翠景,沈菊培,孙翼飞,王军涛,杨中领,韩红艳,张丽梅,万师强,贺正(3463)

长期施肥酸性旱地土壤硝化活性及自养硝化微生物特征 徐白璐,钟文辉,黄欠如,秦红益,邓欢,韩成(3473)

施加碳酸钙对酸性土壤微生物氮循环的影响 郭安宁,段桂兰,赵中秋,唐仲,王杨扬,王伯勋(3483)

水稻不同生育期根际与非根际土壤胞外酶对施氮的响应 魏亮,汤珍珠,祝贞科,蔡观,葛体达,王久荣,吴金水(3489)

凋落物呼吸温度敏感性的变化特征及其影响因素 张彦军(3497)

西北干旱区农田土壤磁性特征及其环境意义 王新,夏敦胜,王博,陈红,刘浩(3507)

小麦秸秆驱动菱铁矿热解制备磁性生物质碳及其吸附 Cd²⁺ 活性 张如玉,刘海波,邹雪华,庆承松,李梦雪,陈冬,陈天虎(3519)

交通污染暴露对 DNA 甲基化的影响 汪婷,丁锐,黄丹妮,祝子逸,章军,叶怀庄,徐迎春,金永堂(3529)

外接菌种对污泥堆肥效能及堆体细菌群落的影响 杨萍萍,尹华,彭辉,唐少宇,卢妙,刘皓(3536)

中国电动自行车动力铅酸蓄电池生命周期评价 刘巍,田金平,陈吕军(3544)

《环境科学》征稿简则(3280) 《环境科学》征订启事(3301) 信息(3353, 3472, 3535)

广州港船舶停泊工况排放因子实测及排放量初步估算

黄学良^{1,2}, 张洲², 杨威强^{2,4}, 李晟^{2,4}, 朱明^{2,4}, 方华^{2,4}, 何俊杰³, 陈俊文³, 万承浩³, 张艳利², 刘国光¹, 黄祖照³, 王宇骏³, 王新明^{2,5*}

(1. 广东工业大学环境科学与工程学院, 广州 510006; 2. 中国科学院广州地球化学研究所有机地球化学国家重点实验室, 广东省环境资源利用与保护重点实验室, 广州 510640; 3. 广州市环境监测中心站, 广州 510030; 4. 中国科学院大学, 北京 100049; 5. 中国科学院城市环境研究所区域大气环境卓越创新中心, 厦门 361021)

摘要: 为获取大型船舶停泊工况下排放因子, 选取在广州港停泊的 3 艘总吨位 $> 40 \times 10^3$ t 的大型货柜船为研究对象, 登船采集其辅机尾气样品进行分析, 并利用“碳平衡法”计算得到基于燃油消耗量的污染物排放因子。实测 3 艘大型货柜船 CO_2 排放因子分别为 3 096、3 031 和 3 028 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$; NO_x 排放因子分别为 61.8、19.9 和 27.0 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$; CO 排放因子分别为 8.0、4.0 和 5.3 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$; SO_2 排放因子分别为 31.4、41.9 和 56.7 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$; $\text{PM}_{2.5}$ 排放因子分别为 2.4、1.1 和 1.5 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$; VOCs 排放因子分别为 0.13、0.09 和 0.17 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。结合广州港进出港船舶类型、船舶抵港次数、船舶停泊时间等调查数据, 初步估算 2014 年广州港船舶停泊工况 NO_x 、CO、 SO_2 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 NH_3 的排放量分别为 1 231、226、1 229、47.6 和 0.04 t, 其中总吨位为 $10 \times 10^3 \sim 50 \times 10^3$ t 的船舶对 NO_x 、CO、 SO_2 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 NH_3 的分担率最大, 其次是总吨位 $> 50 \times 10^3$ t 的船舶; VOCs 的排放量为 33.6 t, 总吨位 $< 3 \times 10^3$ t 的船舶分担率最大。

关键词: 船舶排放; 空气污染物; 排放因子; 广州港; 排放估算

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)08-3162-07 DOI: 10.13227/j.hjkk.201612212

Emission Factors and Preliminary Emission Estimates of Air Pollutants from Ships at Berth in the Guangzhou Port

HUANG Xue-liang^{1,2}, ZHANG Zhou², YANG Wei-qiang^{2,4}, LI Sheng^{2,4}, ZHU Ming^{2,4}, FANG Hua^{2,4}, HE Jun-jie³, CHEN Jun-wen³, WAN Cheng-hao³, ZHANG Yan-li², LIU Guo-guang¹, HUANG Zu-zhao³, WANG Yu-jun³, WANG Xin-ming^{2,5*}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. State Key Laboratory of Organic Geochemistry, Guangdong Key Laboratory of Environmental Resources Utilization and Protection, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 3. Guangzhou Environmental Monitoring Center, Guangzhou 510030, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 5. Center for Excellence in Regional Atmospheric Environment, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China)

Abstract: Three large container vessels over a tonnage of 40×10^3 t at berth in the Guangzhou Port were selected for determination of air pollutants in exhausts from auxiliary engines to obtain fuel-based emission factors (EFs). The fuel-based EFs for vessels A, B, and C at berth were 3 096, 3 031, and 3 028 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively, for CO_2 ; 61.8, 19.9, and 27.0 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ for NO_x ; 8.0, 4.0, and 5.3 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ for CO; 31.4, 41.9, and 56.7 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ for SO_2 ; 2.4, 1.1, and 1.5 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ for $\text{PM}_{2.5}$; and 0.13, 0.09, and 0.17 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ for VOCs. With the basic information about ship types, arrival times, and berthing times, the emissions of NO_x , CO, SO_2 , $\text{PM}_{2.5}$, and NH_3 from a ship at berth in the Guangzhou Port in 2014 were roughly estimated to be 1 231, 226, 1 229, 47.6 and 0.04 t, respectively, with ships with a tonnage of $10 \times 10^3 \sim 50 \times 10^3$ t sharing the largest burdens, followed by ships over a tonnage of 50×10^3 t. Estimated emission of VOCs from ships at berth in the Guangzhou Port was about 33.6 t, with vessels below a tonnage of 3×10^3 t contributing the most.

Key words: ship emissions; air pollutants; emission factor; Guangzhou Port; emission estimates

船舶运输是全球贸易最重要的运输方式, 2001 年船舶货物运输量占到全球的 78%^[1]。因船舶尤其是远洋船舶多使用沸点更高的残渣油作为燃料, 且一般未安装尾气净化装置, 船舶尾气排放对全球或区域大气污染物的贡献近年来受到广泛关注。Corbett 等^[2] 基于燃油消耗量估算得到全球船舶尾

收稿日期: 2016-12-25; 修订日期: 2017-03-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(41530641, 41571130031); 中国科学院战略性先导科技专项(XDB05010200); 国家重点研发计划项目(2016YFC0202204)

作者简介: 黄学良(1989~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为污染源排放特征及理化表征, E-mail: xuelianghuang@gig.ac.cn

* 通信作者, E-mail: wangxm@gig.ac.cn

气排放量氮氧化物(NO_x)和二氧化硫(SO_2)分别达到 6.87×10^6 t 和 4.72×10^6 t; Eyring 等^[3]估算 2001 年全球船舶排放的颗粒物(PM)总量为 1.67×10^6 t. 船舶排放的污染物会对人体健康、环境质量、全球气候等造成重要影响. 有研究表明, 船舶排放的 PM 导致每年约 60 000 例心血管疾病和肺癌死亡^[4]. Collins 等^[5]研究发现, 船舶排放的污染物会引起欧洲地区硫酸盐和硝酸盐沉降增加约 15%.

船舶尾气排放对港口地区大气环境质量影响尤其值得关注. 以西班牙阿尔赫西拉斯湾区域为例, 船舶尾气排放对 $\text{PM}_{2.5}$ 贡献比例可达 17%^[6]; 刘静等^[7]利用大气扩散模型解析出船舶尾气对青岛市环境空气中的 SO_2 和 NO_x 浓度贡献分别约占 8.0% 和 12.9%. 船舶在停泊工况^[8](指船舶关闭主机, 使用辅机供电的状态), 辅机功率虽小, 但停泊时间较长, 造成污染物的排放可能也较大. Chen 等^[9]对天津港船舶不同工况排放的总污染物研究发现, 船舶在停泊工况下 SO_2 的分担率可达 40%. 为减少船舶停靠港口期间的排放对当地大气环境质量的影响, 一些国家或地区采取转用低硫油、岸电等措施, 我国也于 2015 年 12 月发布了《珠三角、长三角、环渤海(京津冀)水域船舶排放控制区实施方案》.

国内沿海港口城市, 如上海^[10]、天津^[11]、香港^[8, 12]、大连^[13]、深圳^[14]等, 相继开发了船舶尾气排放清单. 但客观而言, 因船舶排放因子测量操作难度大, 基于实测的我国本地化的排放因子还比较缺乏, 这无疑给船舶污染物排放量的估算带来很大的不确定性. 根据已有的报道, Fu 等^[15]基于对京杭大运河的 7 艘内河货船在巡航工况和机动操纵工况的实测, 获得了单位里程一氧化碳(CO)、碳氢化合物(HC)、 NO_x 和 PM 排放因子; Zhang 等^[16]通过对 2 艘柴油科考船和 1 艘柴油工程船尾气污染物排放的实测, 获得了分别基于燃油消耗量和引擎功率的二氧化碳(CO_2)、CO、 NO_x 、总挥发性有机物(TVOCs)、PM 和 SO_2 排放因子. 这些实测研究主要针对总吨位较小($< 5 \times 10^3$ t)的柴油发动机船舶, 而对使用油品更差和船舶总吨位更大的船舶, 目前国内还未有相关的实测研究报道.

地处珠江三角洲地区的广州港, 是国家综合运输体系的重要枢纽和华南地区对外贸易的重要口岸. 2014 年广州港完成货物吞吐量 5.01×10^8 t, 位居全国第四、世界第五; 集装箱吞吐量达 1663 万标准集装箱(TEU), 位居全国第五, 世界第八^[17]. Li 等^[18]研究发现, 珠江三角洲地区船舶排放的 SO_2 和

NO_x 分别占该地区排放总量的 14.1% 和 11.6%. 广州港船舶在停泊工况所排放的污染物可能会对周边城市的空气质量造成一定影响. 因此, 开展停泊工况的船舶排放实测研究, 可为广州港船舶尾气污染物排放量估算、管理决策乃至区域空气质量精细化控制提供基础数据. 对 2014 年广州港进出港船舶数据的分析表明, 货柜船是进出广州港的主要船舶类型. 其中, 总吨位 $> 10 \times 10^3$ t 的船舶中货柜船数量占比达 37%. 本研究在广州港选择 3 艘总吨位 $> 40 \times 10^3$ t 的大型货柜船, 在其停泊工况登船实测尾气中气态和颗粒态污染物浓度, 并用“碳平衡法”计算各污染物排放因子, 同时结合船舶信息数据初步估算了广州港船舶停泊工况污染物排放量.

1 材料与方法

1.1 船舶尾气样品采集与分析

船舶尾气实测采样系统主要由烟气稀释系统、烟气分析仪、颗粒物采样器以及气体采样器等组成(如图 1). 船舶尾气首先经过导流管进入稀释器利用洁净空气进行稀释后, 再分流到 4 个不同的采样支路; 第一路经 $\text{PM}_{2.5}$ 切割头后用石英滤膜采集 $\text{PM}_{2.5}$ 样品, 第二路经 $\text{PM}_{2.5}$ 切割头后用特氟龙膜采集 $\text{PM}_{2.5}$ 样品, 第三路经过滤膜后用苏玛罐采集气体样品, 第四路为排空口. 此外, 采样期间使用烟气分析仪(F-550, WOHLER, GER)同步直接分析稀释前烟气中气体污染物浓度, 并用苏玛罐和特氟龙气袋同步采集稀释前烟气. 烟气稀释系统的稀释比通过测定烟气稀释前后及环境的 CO_2 浓度计算获得. 每艘船舶的燃油用棕色玻璃瓶各采集 500 mL.

采集于苏玛罐和特氟龙采气袋中的尾气样品, 用预浓缩仪(Entech 7100, Entech Instruments Inc., USA)与气相色谱/质谱(6890GC/5973 MSD, Agilent Technologies, USA)联用系统分析其挥发性有机物(VOCs)含量^[19, 20]; 用气相色谱/氢火焰离子检测器(6890N GC/FID, Agilent Technologies, USA)联用系统分析其 CO_2 和 CO 浓度^[21]; 利用痕量氨气分析仪(EAA-30r-EPF, LGR, USA)分析所采集样品中的 NH_3 . 采集于石英膜上的颗粒物样品利用 DRI Model 2015 热/光碳分析仪测定有机碳/元素碳(OC/EC)含量. 燃油中 C 和 N 两种元素的含量用元素分析仪(Vario EL III, Elementar, GER)进行分析, S 的含量用氧弹燃烧-离子色谱法分析^[22].

1.2 船舶的基本信息及实测燃料组成

本研究选择的 3 艘货柜船基本信息及燃油组

成如表 1 所示. 采样期间 A 船只开 1 台功率为 1320kW 的辅机(8L21/31, MAN), B 船只开 1 台功率为 1 760 kW 的辅机(6L21/31, MAN); C 船只开 1 台功率为 2 045 kW 的辅机(6R32LN,

WARTSILA),且在实测过程中,3 艘船舶的辅机均正常运转,无故障发生. 燃油硫含量 1.6% ~ 2.9%,与全球范围内船用残渣油的平均含硫率相近(2.7%)^[23~25].

表 1 船舶基本信息及实测燃料组成¹⁾

Table 1 Basic information of the tested ships and determined fuel compositions

编号	总吨位 /t	主机功率 /kW	辅机			燃油类型及组成				
			功率/kW	数量/台	负荷/%	油耗率/t·d ⁻¹	类型	S/%	C/%	N/%
A	47 917	21 910	1 760	1	—	—	残渣油	1.6	84.9	0.6
			1 320	2	53	3.0				
B	49 437	21 910	1 760	1	55	4.0	残渣油	2.1	82.7	0.3
			1 320	2	—	—				
C	41 482	36 560	2 045	3	40	—	残渣油	2.9	82.9	0.4

1) “—”表示无数据

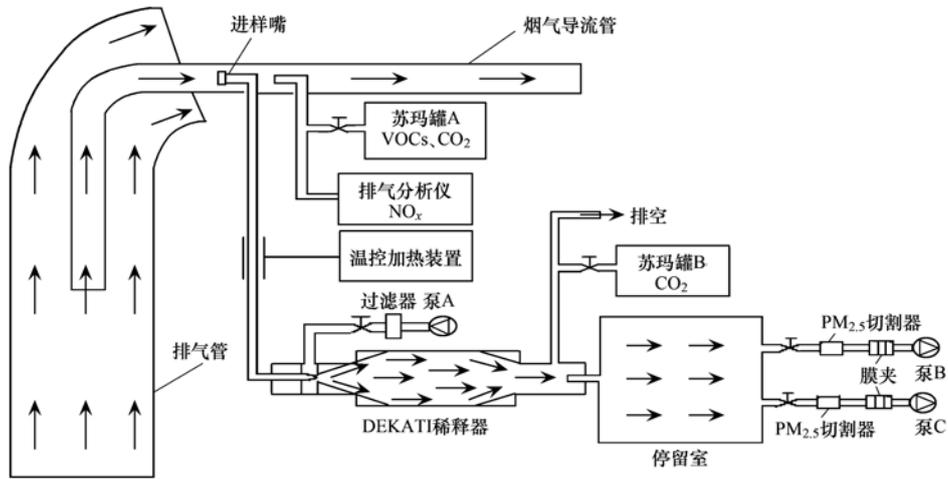


图 1 船舶尾气测量采样系统示意
Fig. 1 Schematic diagram of the ship emission test system

1.3 排放因子的计算

本研究使用“碳平衡法”计算基于燃油消耗量的排放因子^[26]. “碳平衡法”假设理想状态下燃油中的碳完全燃烧后全部转化为 CO₂、CO、PM 中的 OC/EC 和 VOCs 中的碳,CO₂ 排放因子计算公式为:

$$EF_{CO_2} = \frac{c_F \times \Delta(CO_2)}{\Delta(c_{CO_2}) + \Delta(c_{CO}) + \Delta(c_{PM}) + \Delta(c_{VOCs})}$$

(1)

式中,EF_{CO₂} 为 CO₂ 的排放因子(g·kg⁻¹), Δ(CO₂) 为 CO₂ 扣除环境背景后的质量浓度(g·m⁻³), c_F 为每千克燃料中的碳含量(g·kg⁻¹), Δ(c_{CO₂}), Δ(c_{CO}), Δ(c_{PM}) 和 Δ(c_{VOCs}) 分别代表 CO₂、CO、PM、VOCs 扣除背景后以碳表示的质量浓度(g·m⁻³).

污染物 X 排放因子计算公式:

$$EF_X = \frac{\Delta(X)}{\Delta(CO_2)} \times EF_{CO_2}$$

(2)

式中,EF_X 为污染物 X 的排放因子(g·kg⁻¹), Δ(X) 代表污染物 X 扣除环境背景后的质量浓度(g·m⁻³).

SO₂ 排放因子除实测烟气外,还假设燃油中 S 全部转化为 SO₂,利用公式(3)计算 SO₂ 排放因子:

$$EF_{SO_2} = S\% \times \frac{64}{32} \times 10^3$$

(3)

式中,EF_{SO₂} 为 SO₂ 的排放因子(g·kg⁻¹), 32 表示 S 的相对原子质量,64 表示 SO₂ 的相对分子质量,S% 表示燃油中的含硫率.

1.4 基于燃油消耗量的污染物排放量估算

利用上述得到的实测排放因子,结合船舶类型、引擎功率及船舶活动水平等基础数据,可初步估算广州港船舶停泊工况污染物排放量^[2]:

$$E_X = \sum_i \frac{P_i \times L_i \times F_i \times T_i \times SFOC_i \times EF_X}{10^6}$$

(4)

式中, E_x 为污染物 X 的排放总量(t), 其中 i 为船舶类型, P_i 为第 i 类船舶的辅机功率(kW), L_i 为第 i 类船舶辅机的负荷因子, F_i 为第 i 类船舶的抵港次数, T_i 为第 i 类船舶的停泊时间(h), $SFOC_i$ 为第 i 类船舶辅机的燃油消耗速率 [$\text{kg} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$], EF_x 为污染物 X 基于燃油消耗量的排放因子 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$).

1.5 排放清单不确定性分析

为进一步分析船舶污染物排放清单的不确定性来源, 利用 AuvToolPro 不确定性分析工具^[27] 定量分析广州市船舶停泊工况排放清单不确定性范围.

2 结果与讨论

2.1 基于燃油消耗量的排放因子

表 2 给出了本研究实测的 3 艘货柜船停泊工况各气态污染物 (CO_2 、 NO_x 、 CO 、 SO_2 、 NH_3 和 VOCs) 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的排放因子, 并与国内外相关报道值进行了

比较. CO_2 排放因子指示着燃烧效率, 主要受发动机功率和燃油含碳量的影响^[28]. 本研究中 A、B 和 C 船 CO_2 排放因子分别为 3 096、3 031 和 3 028 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 对应燃烧效率分别为 99.5%、99.8% 和 99.8%. CO 是主要的不完全燃烧产物, A、B 和 C 船 CO 排放因子分别为 8.0、4.0 和 5.3 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 在其他研究报道的 CO 排放因子 3.4 ~ 9.2 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 范围之内^[16,29,31].

A、B 和 C 船 NO_x 排放因子分别为 61.8、19.9 和 27.0 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其中 NO 占 NO_x 的 86.2% ~ 91.0%. 排放因子最高的 A 船与 Fridell 等^[29] 的测量结果接近, 高于 Zhang 等^[16] 的结果, 而 B 和 C 船则明显比 Fridell 等^[29] 和 Cooper^[31] 的研究低. NO_x 排放因子受到发动机燃烧室的燃烧温度和在高温环境中的持续时间等因素的影响^[33], 目前尚不清楚实测 3 艘船舶 NO_x 排放因子差异较大的原因. 船舶尾

表 2 基于燃油消耗的排放因子及其与文献报道值比较¹⁾

Table 2 Fuel-based EFs from this study and previous studies

数据来源	A	B	C	文献[29]	文献[30] ²⁾	文献[31] ²⁾	文献[16]
船舶类型	货柜船	货柜船	货柜船	货柜船	—	客轮	科考船
燃油类型	残渣油	残渣油	残渣油	残渣油	残渣油	低硫油	柴油
引擎类型	辅机	辅机	辅机	辅机	辅机	辅机	—
CO_2	3 096	3 031	3 028	3 190	3 302	3 200	3 151
NO_x	61.8	19.9	27.0	58.8	63.7	63.5	31.6
NO	53.3	18.1	24.5	—	—	—	—
NO_2	8.4	1.8	2.5	—	—	—	—
CO	8.0	4.0	5.3	4.1	—	3.4	9.2
$\text{SO}_2^2)$	31.4	41.9	57.6	48.0	56.3	1.8	2.6
$\text{SO}_2^3)$	28.7	35.0	45.5	—	—	—	—
$\text{PM}_{2.5}$	2.4	1.1	1.5	0.9	—	—	—
OC	0.60	0.22	0.30	—	—	—	—
EC	0.15	0.08	0.07	—	—	—	—
NH_3	—	0.7	0.8	—	—	4.6	—
VOCs	0.13	0.09	0.17	—	—	0.65	4.18

1) NH_3 排放因子的单位是 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其他污染物排放因子的单位是 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 文献[30,31]中排放因子单位由 $\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$ 转换为 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 该转换引自文献[32], 取参数为 0.215 $\text{kg} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$; “—”表示无数据; 2) 该 SO_2 排放因子是根据公式(3)计算所得; 3) 该 SO_2 排放因子是根据公式(2)计算所得

气中 SO_2 的排放取决于燃料含硫量, 本研究及文献[29,30]中船用燃油含硫量要远高于文献[31]的低硫油含硫量(0.09%)及文献[16]的柴油含硫量(0.13%), 因而本研究 SO_2 排放因子(31.4 ~ 57.6 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)与文献[29,30]的结果接近, 但远高于以柴油为燃料的科考船的 SO_2 排放因子(2.6 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[16] 和低硫油为燃料的客轮的排放因子^[31]. 此外, 用现场实测 SO_2 的浓度计算的 SO_2 排放因子比用燃油含硫量计算的 SO_2 排放因子低 8.6% ~ 21.0%.

A、B 和 C 船 $\text{PM}_{2.5}$ 排放因子分别为 2.4、1.1

和 1.5 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 大于文献[29]报道 $\text{PM}_{2.5}$ 排放因子(0.9 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$). 3 艘船舶排放含碳气溶胶(OC + EC)占 $\text{PM}_{2.5}$ 的比例分别为 31.3%、27.3% 和 24.7%. A、B 和 C 船 VOCs 排放因子分别为 0.13、0.09 和 0.17 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 低于 Cooper 的研究结果^[31]. 本研究实测的 B 和 C 船 NH_3 排放因子接近, 分别为 0.7 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 0.8 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 低于 Cooper 针对客轮实测的 4.6 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[31].

2.2 2014 年广州市船舶停泊工况排放量初步估算
广东省 90% 以上的内河船舶总吨位 $< 3 \times 10^3$

t^[34], 主要以柴油为燃料, 故本研究在估算污染物排放量时将总吨位 $< 3 \times 10^3$ t 的船舶视为内河船舶 (表 3), 利用 Zhang 等^[16] 对科考船实测的排放因子作为总吨位 $< 3 \times 10^3$ t 的船舶的排放因子; 远洋船

舶的引擎则主要以残渣油为燃料, 本研究将船舶总吨位 $> 3 \times 10^3$ t 的船舶视为远洋船舶, 以本研究 3 艘船舶的实测排放因子作为总吨位 $> 3 \times 10^3$ t 的船舶的排放因子。

表 3 2014 年广州港各类型船舶的活动水平及辅机功率¹⁾

船舶总吨位 $\times 10^3$ /t	辅机功率 /kW	停泊时间 /h	抵港次数/次							
			化学品船	散货船	货柜船	滚装船	其他货船	非运输船	油船	拖船
< 3	239	32.8	541	1 929	1 152	0	6 033	937	9 501	1 157
3 ~ 10	384	39.7	426	677	605	142	1 507	126	734	79
10 ~ 50	1 975	29.6	218	2 452	1 641	422	1 062	78	238	35
> 50	5 255	25.3	1	57	1 270	197	96	2	34	0

1) $3 \times 10^3 \sim 10 \times 10^3$ t 包括 3×10^3 t, $10 \times 10^3 \sim 50 \times 10^3$ t 包括 10×10^3 t 和 50×10^3 t; 辅机功率参考文献[35]并结合广州港船舶的实际情况进行调整; 船舶抵港次数等相关数据由广州市海事部门提供; 参考文献[10], 本研究中船舶停泊工况辅机的负载因子取 0.2

2014 年广州港船舶停泊工况下排放量如表 4 所示, 污染物 NO_x 、CO、 SO_2 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 NH_3 和 VOCs 的排放量分别为 1 231.3、226.0、1 229、47.6、0.04 和 33.6 t。与广州市大气排放源清单^[36] 进行比对可知, 本研究估算的广州港船舶停泊工况下排放 SO_2 和 NO_x 贡献率分别为其总排放量的 1.5% 和 0.5%。

表 4 2014 年广州港船舶停泊工况排放估算及不确定性分析

污染物	估算量/t	95% 置信区间平均值 不确定性范围/t	相对误差/%
NO_x	1 231	(421, 2 353)	(-61, 118)
CO	226	(97.9, 374)	(-52, 82)
SO_2	1 229	(451, 2 072)	(-56, 104)
$\text{PM}_{2.5}$	47.6	(22.9, 100)	(-56, 94)
NH_3	0.04	(0.02, 0.05)	(-45, 71)
VOCs	33.6	(10.0, 81.6)	(-73, 124)

图 2 是不同总吨位船舶停泊工况尾气排放污染物的分担率。对于污染物 NO_x 、CO、 SO_2 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 NH_3 来说, 总吨位为 $10 \times 10^3 \sim 50 \times 10^3$ t 的船舶的分担率最大, 其次是总吨位 $> 50 \times 10^3$ t 的船舶, 这主要是由不同总吨位的船舶抵港次数及其停泊时间等因素造成的。值得注意的是, 对于 VOCs, 总吨位 $< 3 \times 10^3$ t 的船舶分担率最大, 可能是因为总吨位 $< 3 \times 10^3$ t 的船舶的数量最多, 同时柴油发动机 VOCs 的排放因子也相对较大。

2.3 排放量不确定性分析

估算 2014 年广州港船舶停泊工况下排放量, 其不确定性主要来自两方面: 其一是排放因子的不确定性。由于国内对船舶排放因子方面实测研究较少, 本研究虽通过对大型货柜船在停泊工况的辅机排放进行的实测研究, 得到了基于燃油消耗量的排

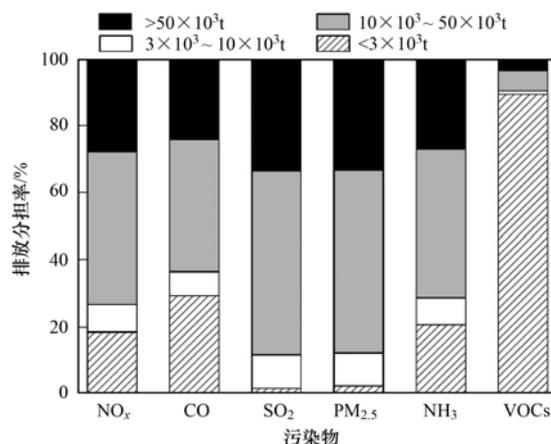


图 2 2014 年广州港不同总吨位船舶停泊工况排放污染物分担率
Fig. 2 Emission contributions in the Guangzhou Port in 2014 by ships at berth according to their gross tonnages

放因子, 但还缺乏其他类型船舶停泊工况的排放因子, 用货柜船辅机的排放因子来估算总吨位 $> 3 \times 10^3$ t 的船舶的排放量, 会有较大的不确定性。另一方面燃油消耗量的估算也存在不确定性, 因当前船舶在停泊工况燃油消耗量尚不能直接获取系统性数据, 只能通过各类船舶的数量、抵港次数、辅机功率和燃油消耗速率等数据进行计算获得。

对排放量进行定量不确定性分析, 结果如表 4 所示, 其不确定性范围在 $-73\% \sim 124\%$ 之间。CO 和 NH_3 这两种污染物排放量的不确定性较低, 而 NO_x 和 VOCs 这两种污染物排放量的不确定性较高。对于不确定性来源利用 Pearson 方法分析表明, 不确定性主要来自辅机功率和排放因子的不确定性。因此, 为提升船舶停泊工况排放量估算的可靠性, 一方面应收集与辅机功率相关数据, 另一方面应进一步通过实测获取有代表性的本地化排放因子。

3 结论

(1)通过对3艘总吨位 $>40 \times 10^3$ t的货柜船在广州港停泊期间辅机排放的实测,获得了A、B和C船基于燃油消耗量的 CO_2 排放因子分别为3 096、3 031和3 028 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$; NO_x 排放因子分别为61.8、19.9和27.0 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$; CO排放因子分别为8.0、4.0和5.3 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$; SO_2 排放因子分别为31.4、41.9和56.7 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$; $\text{PM}_{2.5}$ 排放因子分别为2.4、1.1和1.5 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$; VOCs排放因子分别为0.13、0.09和0.17 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$; B和C船的 NH_3 排放因子分别为0.7 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和0.8 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

(2)初步估算2014年广州港船舶停泊工况下 NO_x 、CO、 SO_2 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 NH_3 和VOCs的排放量分别为1 231、226、1 229、47.6、0.04和33.6 t.

(3)对于 NO_x 、CO、 SO_2 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 NH_3 来说,总吨位为 $10 \times 10^3 \sim 50 \times 10^3$ t的船舶排放分担率最大,其次是总吨位 $>50 \times 10^3$ t的船舶;总吨位 $<3 \times 10^3$ t的船舶对VOCs排放分担率最大.

(4)排放清单的不确定性主要来自于辅机功率和排放因子不确定性, NO_x 和VOCs这两种污染物的不确定性较高.

致谢:本研究船舶实测采样工作及广州港船舶活动等数据的调查由广州海事局协助完成,在此表示感谢.

参考文献:

- [1] U. S. Department of Transportation Bureau of Transportation Statistics. U. S. international trade and freight transportation trends [R]. Washington, DC: U. S. Department of Transportation Bureau of Transportation Statistics, 2003. 25-28.
- [2] Corbett J J, Koehler H W. Updated emissions from ocean shipping [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2003, **108**(D20): 4650.
- [3] Eyring V, Köhler H W, Van Aardenne J, *et al.* Emissions from international shipping: 1. The last 50 years [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2005, **110** (D17): D17305.
- [4] 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.
- [5] Collins B, Sanderson M G, Johnson C E. Impact of increasing ship emissions on air quality and deposition over Europe by 2030 [J]. Meteorologische Zeitschrift, 2009, **18**(1): 25-39.
- [6] Pandolfi M, Gonzalez-Castanedo Y, Alastuey A, *et al.* Source apportionment of PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$ at multiple sites in the strait of Gibraltar by PMF: impact of shipping emissions [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2011, **18**(2): 260-269.
- [7] 刘静,王静,宋传真,等.青州市港口船舶大气污染排放清单的建立及应用 [J]. 中国环境监测, 2011, **27**(3): 50-53.
- [8] Liu J, Wang J, Song C Z, *et al.* The establishment and application of ship emissions inventory in Qingdao port [J]. Environmental Monitoring in China, 2011, **27**(3): 50-53.
- [9] Ng S K W, Lin C B, Chan J W M, *et al.* Study on marine vessels emission inventory, Final Report [R]. Hong Kong, China: The Hong Kong Environmental Protection Department, 2012. 9-103.
- [10] Chen D S, Zhao Y H, Nelson P, *et al.* Estimating ship emissions based on AIS data for port of Tianjin, China [J]. Atmospheric Environment, 2016, **145**: 10-18.
- [11] 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.
- [12] 金陶胜,殷小鸽,许嘉,等.天津港运输船舶大气污染物排放清单 [J]. 海洋环境科学, 2009, **28**(6): 623-625.
- [13] Jin T S, Yin X G, Xu J, *et al.* Air pollutants emission inventory from commercial ships of Tianjin Harbor [J]. Marine Environmental Science, 2009, **28**(6): 623-625.
- [14] Yau P S, Lee S C, Corbett J J, *et al.* Estimation of exhaust emission from ocean-going vessels in Hong Kong [J]. Science of the Total Environment, 2012, **431**: 299-306.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] Fu M L, Ding Y, Ge Y S, *et al.* Real-world emissions of inland ships on the Grand Canal, China [J]. Atmospheric Environment, 2013, **81**: 222-229.
- [20] Zhang F, Chen Y J, Tian C G, *et al.* Emission factors for gaseous and particulate pollutants from offshore diesel engine vessels in China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2016, **16**(10): 6319-6334.
- [21] 中国港口年鉴2015 [M]. 上海:中国港口杂志社, 2015.
- [22] Li C, Yuan Z B, Ou J M, *et al.* An AIS-based high-resolution ship emission inventory and its uncertainty in Pearl River Delta region, China [J]. Science of the Total Environment, 2016, **573**: 1-10.
- [23] Zhang Y L, Wang X M, Li G H, *et al.* Emission factors of fine particles, carbonaceous aerosols and traces gases from road vehicles: Recent tests in an urban tunnel in the Pearl River Delta, China [J]. Atmospheric Environment, 2015, **122**: 876-884.
- [24] Zhang Y L, Wang X M, Barletta B, *et al.* Source attributions of hazardous aromatic hydrocarbons in urban, suburban and rural areas in the Pearl River Delta (PRD) region [J]. Journal of Hazardous Materials, 2013, **250-251**: 403-411.
- [25] Zhang Z, Wang X M, Zhang Y L, *et al.* Ambient air benzene at background sites in China's most developed coastal regions: Exposure levels, source implications and health risks [J]. Science of the Total Environment, 2015, **511**: 792-800.

- [22] 张俊秀, 祁艳. 氧弹燃烧-离子色谱法测定重质石油产品中硫的含量[J]. 分析仪器, 1995, (3): 25-28.
Zhang J X, Qi Y. Determination of sulphur in heavy oils by oxygen bomb burning-ion chromatography [J]. Analytical Instrumentation, 1995, (3): 25-28.
- [23] 周松, 肖友洪, 朱元清. 内燃机排放与污染控制[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2010. 179-180.
- [24] Starcrest Consulting Group, LLC. The port of Los Angeles inventory of air emissions for calendar year 2012 [R]. Los Angeles: Starcrest Consulting Group, LLC, 2013. 37-55.
- [25] 张冶, 付集新. 船用燃油新标准及管理对策[J]. 世界海运, 2011, 34(1): 32-34.
Zhang Y, Fu J X. Standard and measures on new regulations of marine fuel oil[J]. World Shipping, 2011, 34(1): 32-34.
- [26] Liu T Y, Wang X M, Wang B G, *et al.* Emission factor of ammonia (NH₃) from on-road vehicles in China: tunnel tests in urban Guangzhou[J]. Environmental Research Letters, 2014, 9(6): 064027.
- [27] 郑君瑜, 王水胜, 黄志炯, 等. 区域高分辨率大气排放源清单建立的技术方法与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2014. 3-6.
- [28] Carlton J S, Danton S D, Gawen R W, *et al.* Marine exhaust emissions research programme [R]. London: Lloyd's Register Engineering Services, 1995. 62-65.
- [29] Fridell E, Steen E, Peterson K. Primary particles in ship emissions[J]. Atmospheric Environment, 2008, 42(6): 1160-1168.
- [30] Entec UK Limited. Quantification of emissions from ships associated with ship movements between ports in the European Community[R]. England: Entec UK Limited, 2002. 7-11.
- [31] Cooper D A. Exhaust emissions from high speed passenger ferries [J]. Atmospheric Environment, 2001, 35(24): 4189-4200.
- [32] Endresen Ø, Sjørgård E, Sundet J K, *et al.* Emission from international sea transportation and environmental impact [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2003, 108(D17): 4560.
- [33] Corbett J J, Fischbeck P S, Pandis S N. Global nitrogen and sulfur inventories for oceangoing ships [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1999, 104(D3): 3457-3470.
- [34] 朱倩茹, 廖程浩, 刘剑筠, 等. 广东省典型内河港区主要大气污染物排放特征研究[J]. 安全与环境学报, 2015, 15(3): 191-195.
Zhu Q R, Liao C H, Liu J J, *et al.* Research on the air pollutant emission in the typical river ports and harbors, Guangdong [J]. Journal of Safety and Environment, 2015, 15(3): 191-195.
- [35] 林楚彬, 赵黛青, 蔡国田, 等. 广东货船水运的温室气体排放和低碳发展对策[J]. 环境科学研究, 2013, 26(12): 1340-1348.
Lin C B, Zhao D Q, Cai G T, *et al.* Greenhouse gas emissions from cargo vessels and low-carbon shipping strategies in Guangdong Province [J]. Research of Environmental Sciences, 2013, 26(12): 1340-1348.
- [36] 潘月云, 李楠, 郑君瑜, 等. 广东省人为源大气污染物排放清单及特征研究[J]. 环境科学学报, 2015, 35(9): 2655-2669.
Pan Y Y, Li N, Zheng J Y, *et al.* Emission inventory and characteristics of anthropogenic air pollutant sources in Guangdong Province [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(9): 2655-2669.

CONTENTS

Evaluation and Development of a Weighing Chamber by Using Saturated $MgCl_2$ Solution	LI Xiao-xiao, ZHANG Qiang, DENG Jian-guo, <i>et al.</i>	(3095)
Characteristics Research on Carbonaceous Component of Particulate Matter Emitted from Iron and Steel Industry	ZHANG Jin-sheng, WU Jian-hui, MA Xian, <i>et al.</i>	(3102)
Pollution Characteristics and Source Identification of PAHs in Atmospheric $PM_{2.5}$ in Changzhou City	GU Ai-jun, LIU Jia-shu, LUO Shi-peng, <i>et al.</i>	(3110)
Atmospheric Dry Deposition Fluxes and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Lanzhou Valley, Northwest China	JU Yuan-li, LIU Pan-liang, YU Zhou-suo, <i>et al.</i>	(3120)
Characteristics and Sources of Elements in Atmospheric Dust Fall in Zhuzhou City, Central China	WANG Shi-bao, ZHANG Kai, CHAI Fa-he, <i>et al.</i>	(3130)
Atmospheric Pollutant Emission Characteristics from the Cooking Process of Traditional Beijing Roast Duck	XU Min, HE Wan-qing, NIE Lei, <i>et al.</i>	(3139)
Exhaust Emission Characteristics of Typical Alkanes from Heavy-Duty Diesel Vehicles Based on a Portable Emission Measurement System	SHI Chun-zhen, HAO Xue-wei, SHEN Xian-bao, <i>et al.</i>	(3146)
PM_{10} Concentration Forecasting Model Based on Wavelet-SVM	WANG Ping, ZHANG Hong, QIN Zuo-dong, <i>et al.</i>	(3153)
Emission Factors and Preliminary Emission Estimates of Air Pollutants from Ships at Berth in the Guangzhou Port	HUANG Xue-liang, ZHANG Zhou, YANG Wei-qiang, <i>et al.</i>	(3162)
Influence of Dust Events on the Concentration and Size Distribution of Microorganisms in Bioaerosols	LI Hong-tao, Qi Jian-hua, DONG Li-jie, <i>et al.</i>	(3169)
Odor Emission Characteristics and Pollution Evaluation from Typical Household Rubbish Disposal Facilities	LU Hui-jie	(3178)
Perfluorinated Compounds in Snow from Downtown Hangzhou, China	ZHANG Ming, TANG Fang-liang, YU Ya-yun, <i>et al.</i>	(3185)
Fluorescence Characterization of Fractionated Colloids in Wastewaters Received by Huangpu River	NIE Ming-hua, YAN Cai-xia, YANG Yi, <i>et al.</i>	(3192)
Sources of Organic Carbon in the Surface Water of Lijiang River	ZHAO Hai-juan, XIAO Qiong, WU Xia, <i>et al.</i>	(3200)
Impacts of Thermal Stratification on the Hydrochemistry and Dissolved Inorganic Carbon in a Typical Karst Reservoir in Summer	WU Fei-hong, PU Jun-bing, LI Jian-hong, <i>et al.</i>	(3209)
Comparison of Heavy Metal Contamination Characteristics in Surface Water in Different Functional Areas; A Case Study of Ningbo	XU Mei-juan, TONG Gui-hua, SUN Dan, <i>et al.</i>	(3218)
Comparison of Identification Methods of Main Component Hydrochemical Anomalies in Groundwater; A Case Study of Liujiang Basin	ZHANG Xiao-wen, HE Jiang-tao, PENG Cong, <i>et al.</i>	(3225)
Biotic and Abiotic Uptake of Phosphorus in Benthic Sediments of Suburban Streams Under Intense Human Disturbance Scenario	LI Ru-zhong, YE Zhou, GAO Su-di, <i>et al.</i>	(3235)
Sedimentary Phosphorus Speciation in the Coastal Hypoxic Area of Changjiang Estuary and Its Environmental Significance	LIU Jun, ZANG Jia-ye, RAN Xiang-bin, <i>et al.</i>	(3243)
Characteristics and the Relationship of Nitrogen and Phosphorus in Soil and Water of Different Land Use Types of a Small Watershed in the Three Gorges Reservoir Area	CHEN Cheng-long, GAO Ming, MU Zhi-jian, <i>et al.</i>	(3254)
Characteristics of Carbon Transportation Under Rainfall Events and Associated Carbon Loss Evaluation in Loess Plateau, China; A Case Study of Yangjuangou Dam Watershed	E Xin-hui, WANG Ya-feng, GAO Yang, <i>et al.</i>	(3264)
New Bromated Phenolic Disinfection Byproducts: Mechanism of Their Decomposition During Chlorination	LI Huan, LI Zheng-kui, LI Ai-min, <i>et al.</i>	(3273)
Effects of Algal Morphology and Al Species Distribution on the Coagulation-Ultrafiltration Process	ZHANG Da-wei, XU Hui, WANG Xi, <i>et al.</i>	(3281)
Functional Group Characteristics of Planktonic Diatoms and Their Relationship with Environmental Factors in the Ruxi River	XIANG Rong, LI Qiao-yu, YU Yi, <i>et al.</i>	(3290)
Spatiotemporal Variations of Chlorophyll a and Its Relationship to Environmental Factors in Shiyan Reservoir	SONG Yun-long, ZHANG Jin-song, Guo Xiao-ya, <i>et al.</i>	(3302)
Rhizosphere Microbial Diversity in Different Wetland Microcosms	WANG Lin, LI Bing, YU Jia-hui, <i>et al.</i>	(3312)
Community Structure of Microorganisms and Its Seasonal Variation in Beihai Lake	ZHANG Ya-jie, LI Ke, ZHU Hao-ran, <i>et al.</i>	(3319)
Analysis of Microbial Diversity in a Fluidized-Sand Biofilter Based on High-Throughput Sequencing Technology	ZHANG Hai-geng, SONG Hong-qiao, GU Chuan-chuan, <i>et al.</i>	(3330)
Analysis of High-efficiency Denitrifying Bacteria and Embedding Filler Performance and Microflora	MENG Ting, YANG Hong	(3339)
Selection of Microalgae for Biofuel Using Municipal Wastewater as a Resource	HAN Song-fang, JIN Wen-biao, TU Ren-jie, <i>et al.</i>	(3347)
Purification Effect of Piggery Wastewater with <i>Chlorella pyrenoidosa</i> by Immobilized Biofilm-Attached Culture	WANG Yuan-zhu, CHENG Peng-fei, LIU De-fu, <i>et al.</i>	(3354)
Combination of Microbubble Catalytic Ozonation and Biological Process for Advanced Treatment of Biotreated Coal Chemical Wastewater	LIU Chun, ZHOU Hong-zheng, ZHANG Jing, <i>et al.</i>	(3362)
Effect of pH Shock on Nitrogen Removal Performance of Marine Anaerobic Ammonium-Oxidizing Bacteria Treating Saline Wastewater	YU De-shuang, ZHOU Tong, LI Jin, <i>et al.</i>	(3369)
Removal of Nitrogen from Alcohol Wastewater by PN-ANAMMOX	ZHOU Zheng, LIN Xing, WANG Fan, <i>et al.</i>	(3377)
Biorecovery of Palladium from Simulated Wastewaters and Its Catalytic Property for Methylene Blue	KANG Nai-xin, ZHU Neng-wu, GUO Wen-ying, <i>et al.</i>	(3385)
Investigation of Initiation and Shock Process of ANAMMOX Based on Color Space	WANG Li-jun, LI Zhi-hua, HAN Dong, <i>et al.</i>	(3393)
Fast Start-up of Shortcut Nitrification in a CSTR and an MBR	ZHANG Ting, WU Peng, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i>	(3399)
Conversion Pathways of Substrates in Sulfate-Reducing Ammonia Oxidation System	WANYAN De-qing, HUANG Yong, LI Zhen, <i>et al.</i>	(3406)
Effect of Different TOC to NH_4^+ -N Ratios on Nitrogen Removal Efficiency in the ANAMMOX Process	WANG Fan, LIU Kai, LIN Xing, <i>et al.</i>	(3415)
Effects of Salinity on the Operation of EGSB Reactors and the Anaerobic Granular Sludge	TAN Xiao, HUANG Liang, YANG Ping, <i>et al.</i>	(3422)
Start-up of Granule CANON Process and the Strategy for Enhancing Total Nitrogen Removal Rate	SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, <i>et al.</i>	(3429)
Effect of Extracellular Polymeric Substance (EPS) on the Adsorption of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) onto Activated Sludge	LIU Xin-tong, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i>	(3435)
Characteristics of N_2O and NO_x Emissions from Purple Soil Under Different Fertilization Regimes	HU Lei, LIU Yun, ZHU Bo	(3442)
Effect of Plastic Film Mulching on Methane Emission from a Vegetable Field	ZHANG Kai-li, HAO Qing-ju, FENG Di, <i>et al.</i>	(3451)
Responses of Soil Ammonia Oxidizers to Simulated Warming and Increased Precipitation in a Temperate Steppe of Inner Mongolia	ZHANG Cui-jing, SHEN Ju-peí, SUN Yi-fei, <i>et al.</i>	(3463)
Nitrification Activity and Autotrophic Nitrifiers in Long-term Fertilized Acidic Upland Soils	XU Bai-lu, ZHONG Wen-hui, HUANG Qian-ru, <i>et al.</i>	(3473)
Effects of $CaCO_3$ Application on Soil Microbial Nitrogen Cycle in an Acid Soil	GUO An-ning, DUAN Gui-lan, ZHAO Zhong-qiu, <i>et al.</i>	(3483)
Responses of Extracellular Enzymes to Nitrogen Application in Rice of Various Ages with Rhizosphere and Bulk Soil	WEI Liang, TANG Zhen-zhu, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i>	(3489)
Variation in the Temperature Sensitivity of Surface Litter Respiration and Its Influencing Factors	ZHANG Yan-jun	(3497)
Magnetic Properties of Farmland Soils in Arid Regions in Northwest China and Their Environmental Implications	WANG Xin, XIA Dun-sheng, WANG Bo, <i>et al.</i>	(3507)
Preparation of Magnetic Biomass Carbon by Thermal Decomposition of Siderite Driven by Wheat Straw and Its Adsorption on Cadmium	ZHANG Ru-yu, LIU Hai-bo, ZOU Xue-hua, <i>et al.</i>	(3519)
Effects of Traffic-related Air Pollution Exposure on DNA Methylation	WANG Ting, DING Rui, HUANG Dan-ni, <i>et al.</i>	(3529)
Effects of Exogenous Microorganism Inoculation on Efficiency and Bacterial Community Structure of Sludge Composting	YANG Ping-ping, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i>	(3536)
Life Cycle Assessment of Traction Lead-acid Batteries for Electric Bikes in China	LIU Wei, TIAN Jin-ping, CHEN Lü-jun	(3544)