

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第4期

Vol.36 No.4

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

中美空气质量指数(AQI)对比研究及启示	高庆先,刘俊蓉,李文涛,高文康(1141)
2013年1月北京市PM _{2.5} 区域来源解析	李璇,聂滕,齐珩,周震,孙雪松(1148)
2013年1月北京市一次空气重污染成因分析	程念亮,李云婷,张大伟,聂滕,邱启鸿,徐文帅(1154)
上海大气总悬浮颗粒物中金属的可溶性特征	常燕,冯冲,瞿建国,张经(1164)
厦门春季PM ₁₀ 中PAHs成分谱特征及其与气象要素相关性分析	张健,樊曙先,孙玉,张悦,魏锦成(1173)
硫氧同位素示踪南京北郊大气PM _{2.5} 中硫酸盐来源	魏英,郭照冰,葛鑫,祝胜男,姜文娟,石磊,陈姝(1182)
结合激光雷达分析2014年春季南京地区一次大气污染过程	包青,贺军亮,查勇,程峰,李倩楠(1187)
春季华东高山背景区域PM _{2.5} 和PM _{2.5-10} 中水溶性无机离子特征	苏彬彬,张智胜,陶俊,许梹洋,纪贤鑫,刘心东,张若宇(1195)
落叶燃烧排放的颗粒物及有机碳、元素碳的研究	杨伟宗,刘刚,李久海,徐慧,吴丹(1202)
四川省秸秆露天焚烧污染物排放清单及时空分布特征	何敏,王幸锐,韩丽,冯小琼,毛雪(1208)
深圳市船舶排放清单与时空特征研究	杨静,尹佩玲,叶斯琪,王水胜,郑君瑜,区家敏(1217)
超细颗粒通过建筑狭缝的传输特性	孙在,陈秋方,蔡志良,杨文俊,汪晗(1227)
空调病房真菌气溶胶浓度及粒径分布特征	张华玲,冯鹤华,方子梁,王本栋,李丹(1234)
基于氢氧稳定同位素的黄土高原云下二次蒸发效应	靳晓刚,张明军,王圣杰,朱小凡,董蕾,任正果,陈粉丽(1241)
黄河小浪底水库水沙调控对DOC输送的影响	张永领,王明仕,董玉龙(1249)
调水调沙工程长期实施对黄河口近岸沉积物粒度分布与黏土矿物组成特征的影响	王苗苗,孙志高,卢晓宁,王伟,王传远(1256)
春季生物作用对山地岩溶池水地球化学特征的影响	于正良,杨平恒,赵瑞一,李林立,张琳,童小容,罗刚(1263)
降雨期间岩溶城镇区地下水重金属变化特征及来源解析	任坤,杨平恒,江泽利,王尊波,师阳,王凤康,李晓春(1270)
北江和珠江广州河段水体的三卤甲烷风险评价	钟惠舟,韦朝海(1277)
丰水期洪湖水水质空间变异特征及驱动力分析	李昆,王玲,李兆华,王祥荣,陈红兵,吴忠,朱鹏(1285)
三峡库区典型干-支流相互作用过程中的营养盐交换:以梅溪河为例	操满,傅家楠,周子然,邓兵,王雨春,汪福顺(1293)
营养盐输入对太湖水体中磷形态转化及藻类生长的影响	王睿喆,王沛芳,任凌霄,王超,王颖雪(1301)
一小型藻华池塘浮游植物群落动态及其影响因子研究	杨文,朱津永,张克鑫,万莉,陆开宏(1309)
昌黎生态监控区夏季浮游植物群落年际变化特征分析	梁晓林,杨阳,王玉良,张月明,赵志楠,韩晓庆,张鉴达,高伟明(1317)
河道曝气提升河流水质的WASP模型研究	朱文博,王洪秀,柳翠,张建,梁爽(1326)
γ辐射降解水中的盐酸丙沙星的研究	祝胜男,郭照冰,赵永富,葛鑫,魏英,陈姝,王静(1332)
电化学氢化物发生法处理含锑废水及对锑的回收	陈京晶,张国平,李海霞,付志平,欧阳小雪,吴琼(1338)
Fe-MCM-41催化臭氧氧化间甲酚废水	孙文静,王亚旻,卫皇墨,王森,李旭宁,李敬美,孙承林,安路阳(1345)
生物阳极及其反转为生物阴极降解氯霉素	孔德勇,梁斌,云慧,王爱杰,任南琪(1352)
308 nm光作用下α-Fe ₂ O ₃ 表面HNO ₃ 的光解	陆军,孙云东,谢晶晶,赵军,邹家骥,朱承强(1359)
L-组氨酸-赤藓红复合膜修饰电极同时检测对苯二酚、邻苯二酚	何家洪,徐强,丁武泉,李强(1365)
酞基功能型高分子生物载体(PET-AQS)制备及催化生物反硝化特性研究	许晴,侯正浩,田秀蕾,牛春梅,郭延凯,廉静,郭建博(1374)
枯草芽孢杆菌对土臭素和2-甲基异冰片的降解动力学特性	马念念,罗国芝,谭洪新,姚妙兰,王晓用(1379)
嗜碱降解菌筛选及其对焦化废水强化处理	李静,李文英(1385)
Fe ³⁺ 对同步硝化反硝化过程氮元素迁移转化及N ₂ O释放的影响	李浩,闫玉洁,谢慧君,贾文林,胡振,张建(1392)
内循环半短程亚硝化工艺运行条件与微生物群落研究	赵志瑞,焦海华,崔丙健,黄迪,曹世超,王云,刘上千,马斌,白志辉(1399)
利用处理含4-氯苯酚模拟废水的剩余污泥培养普通小球藻	王璐,陈秀荣,闫龙,何怡萱,施震东(1406)
进水渗滤液总氮和BOD ₅ /TN对填埋场反应器反硝化和厌氧氨氧化协同脱氮的影响	杨盈盈,陈奕,李明杰,谢冰(1412)
重庆金佛山土壤中PAHs含量的海拔梯度分布及来源解析	师阳,孙玉川,梁作兵,任坤,袁道先(1417)
湖南攸县典型煤矿和工矿区水稻田土壤镉污染特征及污染途径分析	张敏,王美娥,陈卫平,牛俊杰(1425)
沟渠化对三江平原湿地铁元素沉积过程的影响	苏文辉,于晓菲,王国平,栾金花,邹元春(1431)
施用磷酸盐和沸石对土壤镉形态转化的影响	王秀丽,梁成华,马子惠,韩月(1437)
不同条件下皂苷对污染壤土中Cu、Pb的淋洗修复	邓红侠,杨亚莉,李珍,许岩,李荣华,孟昭福,杨亚提(1445)
陕北某化工企业周围污灌区土壤-作物系统重金属积累特征及评价	齐雁冰,楚万林,蒲洁,刘梦云,常庆瑞(1453)
有机无机缓释复合肥对不同土壤微生物群落结构的影响	王菲,袁婷,谷守宽,王正银(1461)
玉米对铅胁迫的响应及体内铅化学形态研究	程海宽,张彪,景鑫鑫,杨素勤,赵鹏,孙晓雪,周志云(1468)
硼锑交互作用对水稻吸收积累锑和硼的影响	向猛,黄益宗,蔡立群,保琼莉,黄永春,王小玲,乔敏,胡莹,金姝兰,李季,王斐(1474)
丛枝菌根真菌对不同含盐量湿地土壤中芦苇生长的影响	郭江源,郭伟,毕娜,付瑞英,赵文静,赵仁鑫,王立新(1481)
滨海区芦苇和香蒲耐盐碱性及除氮磷效果对比研究	陈友媛,孙萍,陈广琳,王宁宁(1489)
不同温度下的土壤微生物呼吸及其与水溶性有机碳和转化酶的关系	吴静,陈书涛,胡正华,张旭(1497)
工业VOCs经济手段和工程技术减排对比性分析	王宇飞,刘昌新,程杰,郝郑平,王铮(1507)
《环境科学》征订启事(1216)	
《环境科学》征稿简则(1248)	
信息(1163,1194,1248,1424)	

深圳市船舶排放清单与时空特征研究

杨静,尹佩玲,叶斯琪,王水胜,郑君瑜*,区家敏

(华南理工大学环境与能源学院,广州 510006)

摘要:为分析深圳市船舶排放特征,本研究以劳氏船级社数据库(Lloyd's register of shipping, LR)以及船舶自动识别系统(automatic identification system, AIS)为基础,收集整理深圳市各主要船舶类型及其活动水平的本地化参数,使用基于引擎功率和燃料消耗量的排放因子法,估算深圳市 2010 年船舶排放清单,并利用船舶 AIS 活动轨迹建立 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 空间分配因子和时间特征谱。结果表明,2010 年深圳市各类船舶排放的 SO_2 、 NO_x 、 CO 、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 VOCs 总量分别为 13.6×10^3 、 23.3×10^3 、 2.2×10^3 、 1.9×10^3 、 1.7×10^3 和 $1.1 \times 10^3\text{ t}$,全槽格式集装箱船为最大贡献船型,靠泊模式排放比例最大。船舶排放的高峰期集中在白天时段,但不同船舶的具体峰值有所不同;船舶排放量的空间分布呈面状及带状分布交错,高值排放区为西部港口群、东部大鹏湾海域及主要水运航道。

关键词:深圳市;船舶排放清单;劳氏船级社数据库;AIS;时空分布特征

中图分类号:X51 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2015)04-1217-10 DOI: 10.13227/j. hjkx. 2015. 04. 011

Marine Emission Inventory and Its Temporal and Spatial Characteristics in the City of Shenzhen

YANG Jing, YIN Pei-ling, YE Si-qi, WANG Shui-sheng, ZHENG Jun-yu*, OU Jia-min

(College of Environment and Energy, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: To analyze the characteristic of marine emission in Shenzhen City, activity-based and fuel-based approaches were utilized to develop the marine emission inventory for the year of 2010, using the vessel files from the Lloyd's register of shipping (LR) and vessel track data from the automatic identification system (AIS). The marine emission inventory was temporally (resolution: 1 hour) and spatially (resolution: $1\text{ km} \times 1\text{ km}$) allocated based on the vessel track data. Results showed that total emissions of SO_2 , NO_x , CO , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ and VOCs from marine vessels in Shenzhen City were about 13.6×10^3 , 23.3×10^3 , 2.2×10^3 , 1.9×10^3 , 1.7×10^3 and $1.1 \times 10^3\text{ t}$, respectively. Among various types of marine vessels, emission from container vessels was the highest; for different driving modes, hotelling mode was found with the largest mission. Marine emissions were generally higher in the daytime, with vessel-specific peaks. For spatial distributions, in general, marine emissions were zonally distributed with hot spots in the western port group, Dapeng Bay and the key waterway.

Key words: Shenzhen City; marine emission inventory; Lloyd's register of shipping (LR); automatic identification system (AIS); temporal and spatial distribution characteristics

大气排放源清单是某一地理区域在某一时期内,基于污染源分类的由各种污染源排放到大气中的一种或几种污染物排放大小的列表^[1]。排放清单的建立对于识别研究区域的大气污染排放来源及演变趋势,利用空气质量模型研究污染物形成机制以及制定大气污染控制管理措施具有重要作用,已成为大气污染控制与预防的关键科学手段之一^[2]。由于船舶在航行时使用柴油引擎和残渣油^[3],会产生大量的气体污染物,且活动范围广,对大气环境影响极大,因此,船舶排放清单的建立工作目前已受到广泛关注。

国外于 20 世纪 90 年代开始建立不同尺度和精度的船舶排放清单,定量评估其对区域空气质量的影响^[4~8]。近年来,我国部分沿海港口城市,如香港^[9,10]、上海^[11]、青岛^[12]、天津^[13]等,也相继进行

了船舶清单研究。针对广东省地区,叶斯琪等^[14]参考美国环保署的估算方法,开发了初步的全省船舶排放清单,但所使用的仍是客货运输量等间接统计数据,清单的不确定较大。另一方面,随着船舶自动识别技术的发展,部分国内学者^[15,16]也开始应用 AIS 系统来改进相关研究结果。但是,现有的船舶排放研究存在使用间接的活动数据,对时间和空间的分布特征研究不够深入和分辨率较低等问题,无法精确地反映基于城市尺度的船舶实际活动和排放

收稿日期:2014-10-06;修订日期:2014-12-01

基金项目:国家杰出青年科学基金项目(41325020);国家自然科学基金-广东省政府联合基金重点项目(U1033001);国家自然科学基金项目(41175085)

作者简介:杨静(1989~),女,硕士研究生,主要研究方向为大气排放清单及空气质量模型,E-mail: yangjingscut@foxmail.com

* 通讯联系人,E-mail: zheng_junyu@gmail.com

特征.

深圳市位于珠江三角洲(以下简称“珠三角”)南部,珠江口东岸,毗邻香港.作为我国第一个标志性经济特区,自改革开放以来,深圳市出口贸易和运输产业快速发展,成为我国对外贸易的重要港口城市.以2012年为例,深圳市集装箱年吞吐量达2.28亿t,超过珠三角总量50%的比例,已连续十年位列全球港口第4位^[17].由此导致的船舶港口排放对深圳市空气质量有重要影响,然而,关于深圳市的详细船舶清单研究却鲜见报道.

因此,本研究以深圳市主要港区的重要船舶类型为研究对象,结合文献调研、实地调查等手段,在收集大量AIS实时数据的同时,利用劳氏船级社数据库作为补充,获取直接的、高精度的深圳市船舶特征信息和活动水平本地参数,选择合适的排放因子,建立深圳市2010年高时空分辨率船舶排放清单.进一步根据收集的船舶活动轨迹和航道分布特点,应用GIS技术,系统研究该地区船舶排放源的时空分布特征,以期为空气质量模型和区域环境管理提供基础数据,为制定船舶大气污染控制措施和政策提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域与对象

本研究以深圳市东西部的9个港口(福永、妈湾、赤湾、蛇口、东头角、盐田、下洞、沙鱼涌、大铲湾)及14个锚地(大屿山1号和2号锚地、东角头锚地、蛇口小型船舶锚地、蛇口海上服务区、妈湾南锚地、妈湾液化船锚地、大铲锚地、孖洲西危险品锚地、大鹏湾海域1~5号锚地)作为研究对象,以港口群为中心约20~40 n mile的海域为研究范围,划定经纬度范围为东经113.6°~114.5°,北纬22.1°~22.9°(图1).船舶类型分为化学品运载船、普通货船、散装干货船、全槽格式集装箱船、气体运载船、油轮、拖轮、客轮和渔船^[18,19],涵盖SO₂、NO_x、CO、PM₁₀、PM_{2.5}和VOCs等大气污染物,基准年为2010年.

1.2 船舶排放清单估算方法

1.2.1 基于船舶引擎功率的排放因子法

除渔船外,其他船舶排放估算方法参考美国环保署^[20]的基于引擎功率排放因子估算方法,公式如下:

$$E_{i,j,k,m} = \text{VAN}_i \times \sum_{i,j,k} (P_i \times \text{LF}_{i,j,k} \times A_{i,k} \times \text{EF}_{i,j,k,m}) \quad (1)$$

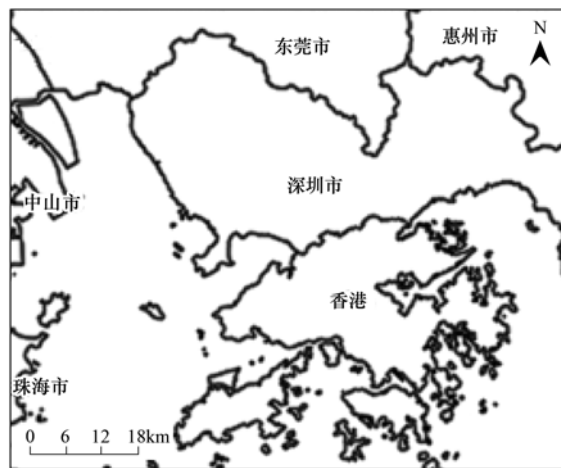


图1 研究区域地理位置示意

Fig. 1 Geographical location of the study area

式中, i 、 j 、 k 、 m 分别为船舶类型、引擎等级、行驶模式和污染物种类; $E_{i,j,k,m}$ 为引擎功率为 j 的 i 类船舶在 k 模式行驶下的 m 种污染物的排放量($\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$); VAN_i 为 i 类船舶的抵港次数; P_i 为 i 类船舶的引擎功率(kW); $\text{LF}_{i,j,k}$ 为 j 类引擎等级的 i 类船舶在 k 行驶模式下的引擎负荷系数(无量纲); $A_{i,k}$ 为 i 类船舶在 k 行驶模式下的活动时间(h); $\text{EF}_{i,j,k,m}$ 为对应参数的 m 类污染物的排放因子 $[\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}]$.

根据航行速度,本研究把船舶行驶模式划分为以下4种:普通速度行驶(fairway cruise, $> 12 \text{ n mile} \cdot \text{h}^{-1}$)、慢速行驶(Slow Cruise, $8 \sim 12 \text{ n mile} \cdot \text{h}^{-1}$)、泊岸行驶(Maneuvering, $1 \sim 8 \text{ n mile} \cdot \text{h}^{-1}$)和靠泊(Hotelling, $< 1 \text{ n mile} \cdot \text{h}^{-1}$)^[9].

由于缺乏本地船舶排放因子,本研究参考国内外相关研究^[18],结合深圳市船舶发动机类型、转速、燃料类型和含硫率等关键因素进行选取.具体考虑:引擎特征是影响船舶排放的主要因素,本研究根据劳氏船舶档案调研获取的船舶引擎类型和转速信息,将船舶主引擎划分为低速柴油机和中速柴油机,辅助引擎则不作细分.对于客船而言,由于缺乏可用信息,主引擎和辅助引擎均不作进一步划分.根据前期调研结果,确定燃料类型主要为残渣油、船用柴油和船用汽油3种,燃料含硫率与文献^[18]基于珠三角地区和香港地区调研的结果保持一致.根据上述对应关系选取排放因子,如表1所示.另外,当主引擎的引擎负荷系数低于0.2时,燃烧效率降低,采用经验系数对排放因子进行调整.

1.2.2 基于燃油消耗量的排放因子法

由于渔船与其他类型船舶的活动特征差异明

表 1 不同类型船舶排放因子/g·(kW·h)⁻¹

Table 1 Emission factors of marine vessels by categories/g·(kW·h) ⁻¹									
引擎类型	燃料类型	含硫率/%	SO ₂	NO _x	PM ₁₀	PM _{2.5} ¹⁾	HC ²⁾	CO	
主引擎	低速柴油机	残渣油	2.70	10.29	18.10	1.42	1.31	0.60	1.40
主引擎	低速柴油机	船用柴油	1.00	3.62	17.00	0.45	0.42	0.60	1.40
主引擎	低速柴油机	船用汽油	0.50	1.81	17.00	0.31	0.28	0.60	1.40
主引擎	中速柴油机	残渣油	2.70	11.24	14.00	1.43	1.32	0.50	1.10
主引擎	中速柴油机	船用柴油	1.00	3.97	13.20	0.47	0.43	0.50	1.10
主引擎	中速柴油机	船用汽油	0.50	1.98	13.20	0.31	0.29	0.50	1.10
主引擎 ³⁾	柴油机	船用汽油	0.50	2.08	13.20	0.31	0.29	0.47	1.10
辅助引擎	柴油机	残渣油	2.70	11.98	14.70	1.44	1.32	0.40	1.10
辅助引擎	柴油机	船用柴油	1.00	4.24	13.90	0.49	0.45	0.40	1.10
辅助引擎	柴油机	船用汽油	0.50	2.12	13.90	0.32	0.29	0.40	1.10
辅助引擎 ³⁾	柴油机	船用汽油	0.50	2.12	10.00	0.31	0.29	0.26	1.50

1)取PM_{2.5}和PM₁₀质量比为0.92进行估算PM_{2.5}排放因子^[19]; 2)取VOCs和HC质量比为1.053进行估算VOCs排放量^[21]; 3)适用于客轮^[9]

显,因此,本研究采用基于燃油消耗量的排放因子法^[14]进行估算,公式如下:

$$E_{i,j,n,m} = EF_{i,j,n,m} \times \sum R_{i,j,n} \tag{2}$$

式中,*i*、*j*、*n*、*m*分别为船舶类型、功率分布、作业方式和污染物种类;*E_{i,j,n,m}*为功率*j*的第*i*类渔船在第*n*种作业方式下排放的*m*类污染物总量(t·a⁻¹);*R_{i,j,n}*为功率*j*的第*i*类渔船在第*k*种作业方式下的耗油量(t·a⁻¹);*EF_{i,j,n,m}*为对应的排放因子(kg·t⁻¹).

根据深圳市各类渔船的功率分布,参考相关研究^[9,13,22]选取排放因子,如表2所示.

表 2 渔船排放因子/kg·t⁻¹

Table 2 Emission factors of fishing vessels/kg·t ⁻¹						
区域	SO ₂ ¹⁾	NO _x	CO	PM ₁₀	PM _{2.5} ²⁾	HC ³⁾
内河	30.0	46.3	8.8	2.4	2.2	4.6
沿海	30.0	60.1	7.0	2.4	2.2	3.2
平均	30.0	53.2	7.9	2.4	2.2	3.9

- 1) SO₂ 排放因子采用物料衡算法估算得到,燃油含硫率取 1.5%;
2)取PM_{2.5}和PM₁₀质量比为0.92进行估算PM_{2.5}排放因子^[19];
3)取VOCs和HC质量比为1.053进行估算VOCs排放量^[21]

1.2.3 船舶活动水平及估算参数确定

由上述估算模型可知,本研究所需的船舶大气污染物排放清单活动水平数据和估算参数包括船舶抵港次数、航行时间、引擎负荷系数、深圳市港口船舶的技术构成(如吨位,主、辅助引擎功率与转速以及燃油状况)等.

本研究综合采用了多种方式得到上述参数:
①船舶抵港次数:通过深圳市海事部门走访调研得到深圳市港口船舶抵港次数(2010年船舶总抵港次数约为14万艘次);
②航行时间:结合研究区域、

航行速度(行驶模式)和船舶轨迹估算各类型船舶不同行驶模式下的估算时间.各船型在4种行驶模式下的平均活动时间如表3所示;
③引擎负荷系数:分为主引擎负荷系数和辅助引擎负荷系数,主引擎负荷系数由最大航行速度和实际航行速度决定,辅助引擎会因不同的船舶类型和操作模式而有所不同.本研究参考国内外研究成果^[18]选取引擎负荷系数;
④船舶的技术构成:本研究结合劳氏船级社数据库和AIS数据,追踪和统计进出深圳市各种船舶类型的技术参数,分析得到深圳市港口船舶的技术构成.其中,辅助引擎功率利用香港地区研究^[18]中的“调整后辅助引擎功率/主引擎功率”比值,结合调研的实际情况来确定,如表4所示.

表 3 深圳市船舶平均活动时间统计/h

Table 3 Average activity time of marine vessels in the city of Shenzhen/h				
船舶类型	普通速度行驶	慢速行驶	泊岸行驶	靠泊
化学品运载船	0.53	0.87	2.92	24.60
普通货船	0.08	2.13	4.29	22.49
散装干货船	0.80	3.07	1.87	29.34
全槽格式集装箱船	0.76	1.13	0.77	18.56
气体运载船	0.28	0.41	1.84	14.40
油轮	0.70	1.03	2.83	25.23
拖船	0.09	0.77	1.19	17.44
客轮	0.77	0.03	0.18	0.99

对于渔船大气污染物排放,深圳市不同类型渔船的发动机功率相关数据来自于文献^[23],耗油系数和耗油率则参考徐皓等^[24]的相关实地调研数据.

1.3 时间分配

本研究以AIS数据为基础,通过统计各种船舶类型不同行驶模式下的活动时间,估算不同船舶类型-行驶模式下的平均时间变化系数.在此基础上,

表 4 深圳市各类型船舶平均主引擎和辅助引擎功率

Table 4 Average power of main engines and auxiliary engines of marine vessels in the city of Shenzhen

船舶类型	主引擎功率/kW	辅助引擎功率/kW
化学品运载船	4 171	880
普通货船	5 019	959
散装干货船	10 335	2 294
全槽格式集装箱船	31 896	7 017
气体运载船	6 156	1 299
油轮	10 229	2 159
拖轮	2 258	501
客轮	1 740	484

开展基于船舶类型和行驶模式的时间分配,得到深圳市船舶污染物的小时排放量. 船舶轨迹点数与小时变化系数的关系如公式(3)所示:

$$h_{i,n} = a_{i,n} / \sum_{n=1}^{24} a_{i,n} \quad (3)$$

式中, i 、 n 分别为船舶类型和小时数; $h_{i,n}$ 为第 i 类船舶在第 n 个小时的时间变化系数(%); $a_{i,n}$ 为 i 类船舶在第 n 个小时内的船舶轨迹点数.

1.4 空间分配

船舶排放源是移动排放源,其污染物排放空间分布主要受航行轨迹和行驶模式等因素影响. 本研究通过结合研究区域的船舶活动轨迹和行驶模式,建立了基于船舶类型-航行轨迹-行驶模式的深圳市船舶大气污染物排放空间分配方案. 在此基础上,应用 GIS 技术,开展深圳市船舶排放量空间分配工作,得到 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 高分辨率船舶排放清单.

1.5 不确定性分析

本研究采用自展模拟技术和专家判断方法定量分析排放因子和引擎负荷系数的不确定性,并且采用蒙特卡罗模拟技术模拟输入参数不确定性引起的船舶排放源清单不确定性,利用 AuvToolPro 不确定性分析工具^[1]定量分析深圳市不同污染物和不同船型的船舶排放清单不确定性范围(图 2).

2 结果与讨论

2.1 深圳市船舶排放清单特征分析

2010 年深圳市船舶排放清单如表 5 所示.

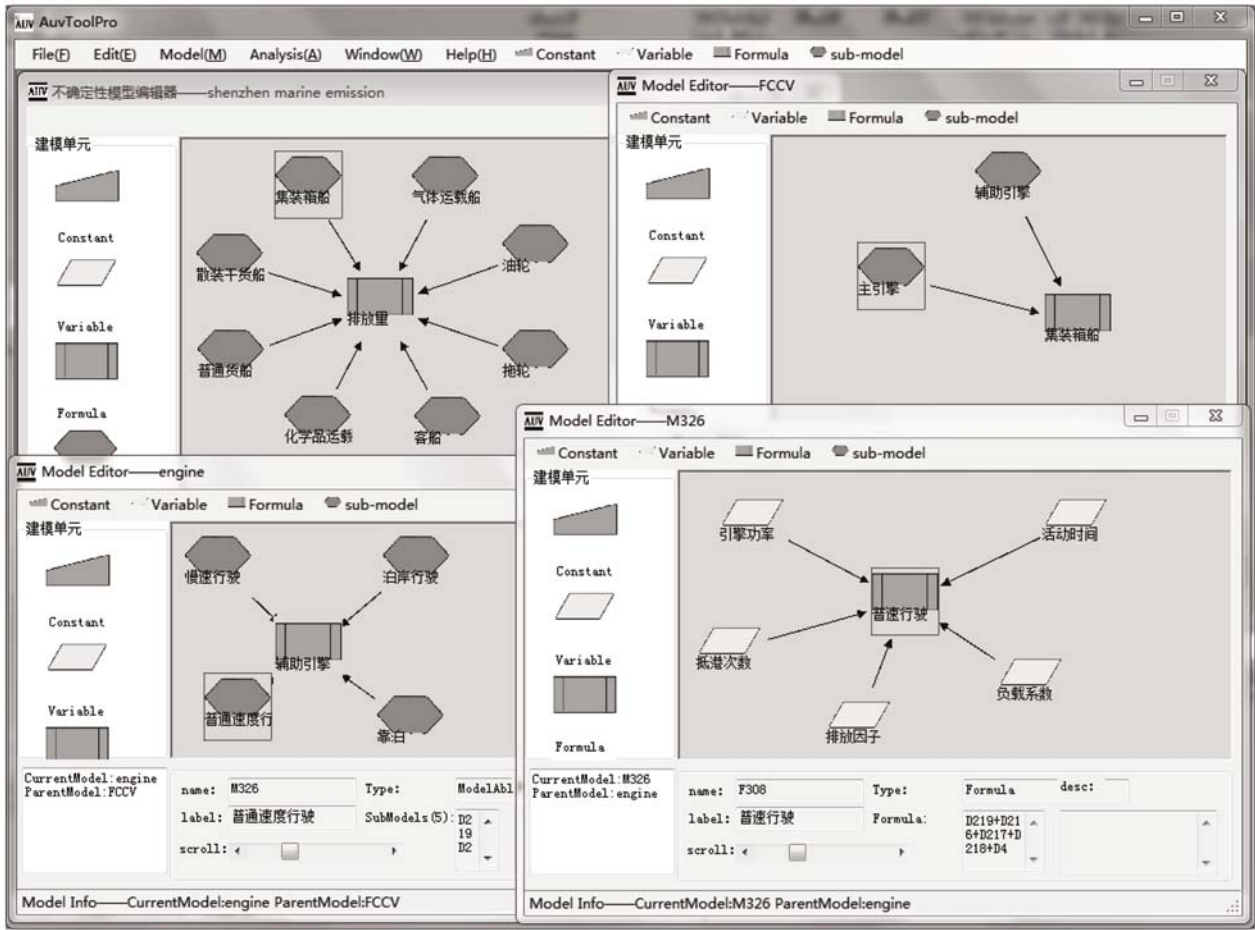


图 2 基于 AuvToolPro 工具建立船舶清单不确定性分析模型框架

Fig. 2 Uncertainty analysis model framework for Shenzhen marine sources emission inventory, established based on AuvToolPro tools

由表可知, SO_2 和 NO_x 是深圳市船舶排放的主要污染物. 其中, 全槽格式集装箱船是首要排放贡献船型, 主要是因为深圳港区集装箱货运量较大, 而且通常使用中低速柴油机和重质残渣油, 导致了大量 SO_2 、 NO_x 、VOCs 和颗粒物的产生^[25]. 值得注意的是, 渔船是第二大排放贡献船型. 造成渔船排放较大的原因有, 大部分渔船属于中小型个体经营, 使用的柴油含硫率在 1.5% 左右, 加之发动机的使用年限一般较长^[24], 导致排放因子较大, 此外, 由于捕捞需求要频繁作业使得燃油消耗较大, 致使渔船的排放贡献占了相当重要的地位.

由图 3 可知, 对于不同污染物, 各种船舶类型的

排放分担率各不相同. 造成这种差异的主要原因是各种船型的活动水平、技术特征和燃料性质共同决定的. 例如, 对于 SO_2 和颗粒物, 虽然散货干货船的抵港次数不及普通货船, 但前者使用的引擎和燃料与集装箱船类似, 会产生更多的 SO_2 、 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$; 而 NO_x 、CO 和 VOCs 与船舶活动频次和数量密度有关, 因此普通货船分担更多污染物排放.

另一方面, 本研究结果表明不同行驶模式的污染物排放差异较大, 其中, 普通速度行驶和靠泊两种模式下大气污染物排放最大, 如图 4 所示. 船舶在普通速度行驶时, 主辅引擎的负载因子是最大的, 并且研究区域内航道较为宽阔, 船舶处于普通速度行驶的时间较长, 因此排放比例较大. 在靠泊阶段, 其

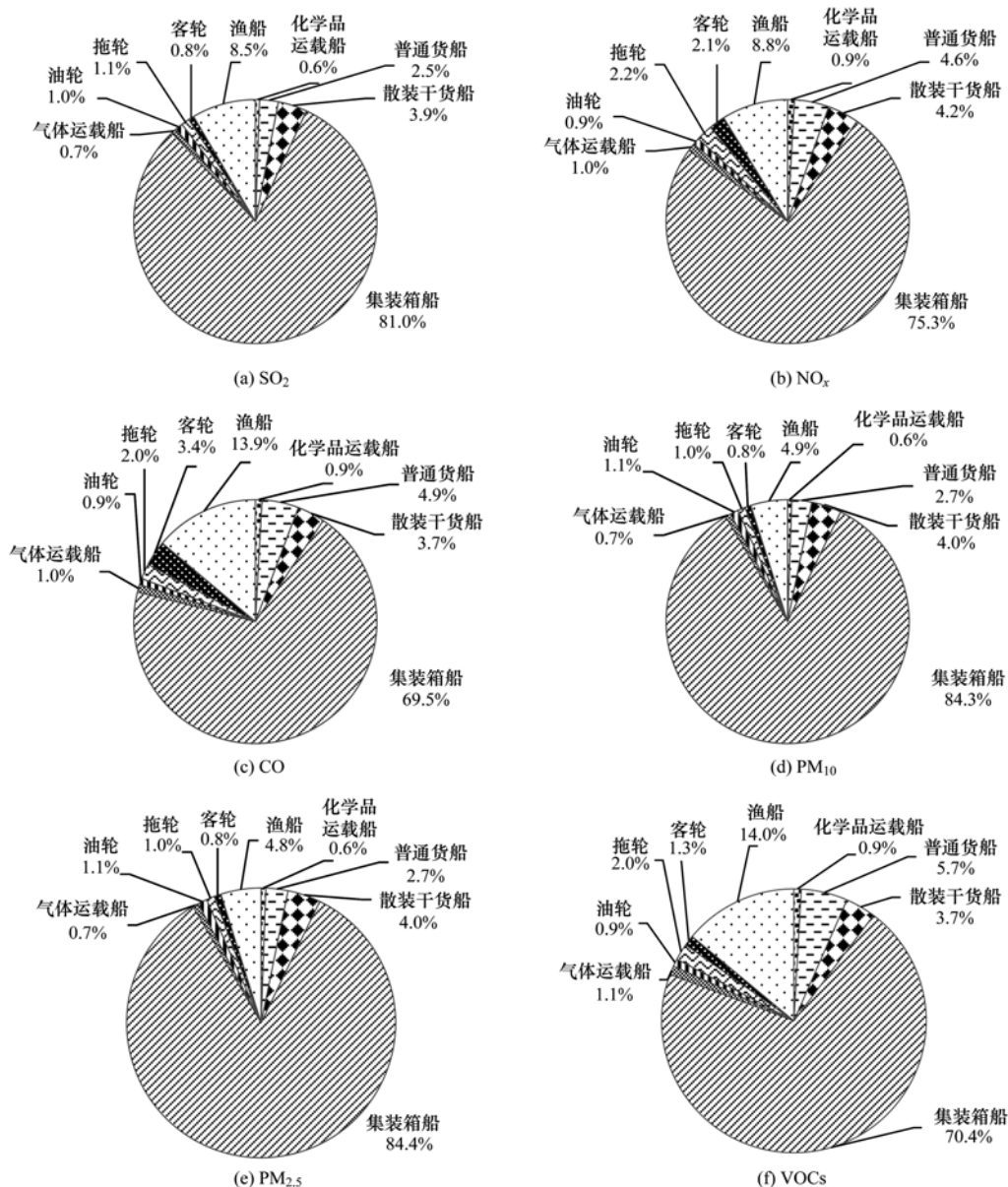


图 3 深圳市各类型船舶主要污染物贡献率

Fig. 3 Emission contribution rates by marine vessel types in the city of Shenzhen

表 5 2010 年深圳市各类船舶排放源清单/t

Table 5 Marine emissions inventory of Shenzhen City in 2010 /t							
船舶类型	抵港次数	SO ₂	NO _x	CO	PM ₁₀	PM _{2.5}	VOCs
化学品运载船	5 073	76.0	212.9	19.2	10.3	9.5	9.7
普通货船	42 718	338.4	1 069.4	107.6	49.8	45.7	61.6
散装干货船	4 055	529.3	966.7	81.0	74.6	68.6	40.4
全槽格式集装箱船	42 159	11 055.8	17 511.3	1 529.8	1 581.6	1 454.8	764.9
气体运载船	4 885	94.5	232.1	22.0	13.3	12.2	11.9
油轮	939	141.8	217.9	18.8	20.5	18.8	10.1
拖轮	10 305	146.5	508.9	44.1	18.7	17.1	22.0
客轮	30 355	103.2	493.5	74.0	14.9	14.3	13.9
渔船	—	1 158.3	2 054.1	305.8	91.9	83.4	151.7
合计	140 489	13 643.8	23 266.8	2 202.3	1 875.7	1 724.5	1 086.3

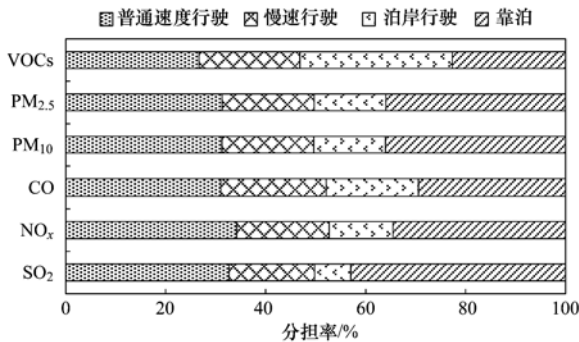


图 4 深圳市船舶不同行驶模式的污染物排放分担率
Fig. 4 Emission contribution rates by operation modes in the city of Shenzhen

引擎负载因子较小,但停泊时间较长,造成在这种模式下的污染物排放也较大. 然而,对于 VOCs,泊岸行驶模式下污染物排放比例最高(约 30.5%),其主要原因是在泊岸行驶状态下,柴油机低速运转,混合气形成质量差,循环温度降低,燃烧不完全导致生成的 VOCs 有所增加.

2.2 深圳市船舶排放时空特征

2.2.1 时间分布特征

本研究建立了深圳市船舶排放小时变化时间特征谱,如图 5 所示. 深圳市船舶排放高峰期集中在白天的 08:00 ~ 18:00 时段,夜间时段持续降低,在凌晨 03:00 ~ 04:00 达到最低值 2.0%. 具体变化是不同类型船舶排放的共同作用结果.

危险品运输船包括化学品运载船、气体运载船和油轮,基于安全原因,该类型船舶大部分在白天进离港,夜间活动少. 拖轮作为协助大型船舶进出港的船型,其中一个重要作用对象就是危险品运载船. 因此两者在活动规律上有一定的相关性:拖轮的高峰处近似出现在危险品运载船的高峰处之后. 对于普通货船以及散装干货船,两者排放特征具有明显差异:普通货船以小货船为主,活动灵活,日夜作业

限制较少,因此排放的时间变化差异较小;而散装干货船一般为远洋船舶,有固定的营运公司和航班,因此排放高峰期集中,夜间作业比例较小. 而深圳市集装箱船同样也是一般是具有固定船期、航线的大吨位船舶,其排放集中在白天主要工作时段. 客轮的排放时间特征与深圳蛇口码头 (<http://www.szgky.com/>) 的航班信息相符,23:00 ~ 次日 07:00 时段没有客轮班次往返深圳,该时段的客轮排放量约为 0. 与其他船型相比,渔船排放的时间变化较为平缓,主要是因为渔船的机动灵活性大,规律不强,而且捕捞作业不分昼夜.

2.2.2 空间分布特征

深圳市船舶排放的空间分布特征如图 6 所示(以 SO₂ 为例),主要集中在西部港口群、东部大鹏湾海域及主要水运航道,呈现面状及带状分布交错的空间分布特征.

不同船舶类型的污染物排放空间分布存在明显差异,如图 7 所示. 集装箱船进入深圳有 3 条主要线路,分别是经大鹏湾进入盐田港区、经香港龙鼓水道和铜鼓航道进入蛇口港. 对于危险品运载船的排放,受市政府规划的影响,西部高值区出现在妈湾液货船锚地附近以及大小铲岛港区,而在深圳东部,则是沙鱼涌港区下方的 3 号危险品锚地,此处主要是供进入东部港区的危险品运载船等待引航. 深圳市普通货船和散装干货船的污染物排放主要分布在西部港区,东部只有少量的大型散装干货船进出盐田港,排放强度较低. 深圳市与珠三角其他城市之间的散货运输量相对较少,大部分大宗散装干货船一般从香港的龙鼓水道进入蛇口港,再通过公共航道抵达其他港口. 深圳市的客流运输较为集中在蛇口客运码头,蛇口港现有投入运营的客运航线包括前往珠海九州港、香港国际机场、澳门氹仔码头以及港澳码头等的 4 条航线,每条航线每日至少有 12

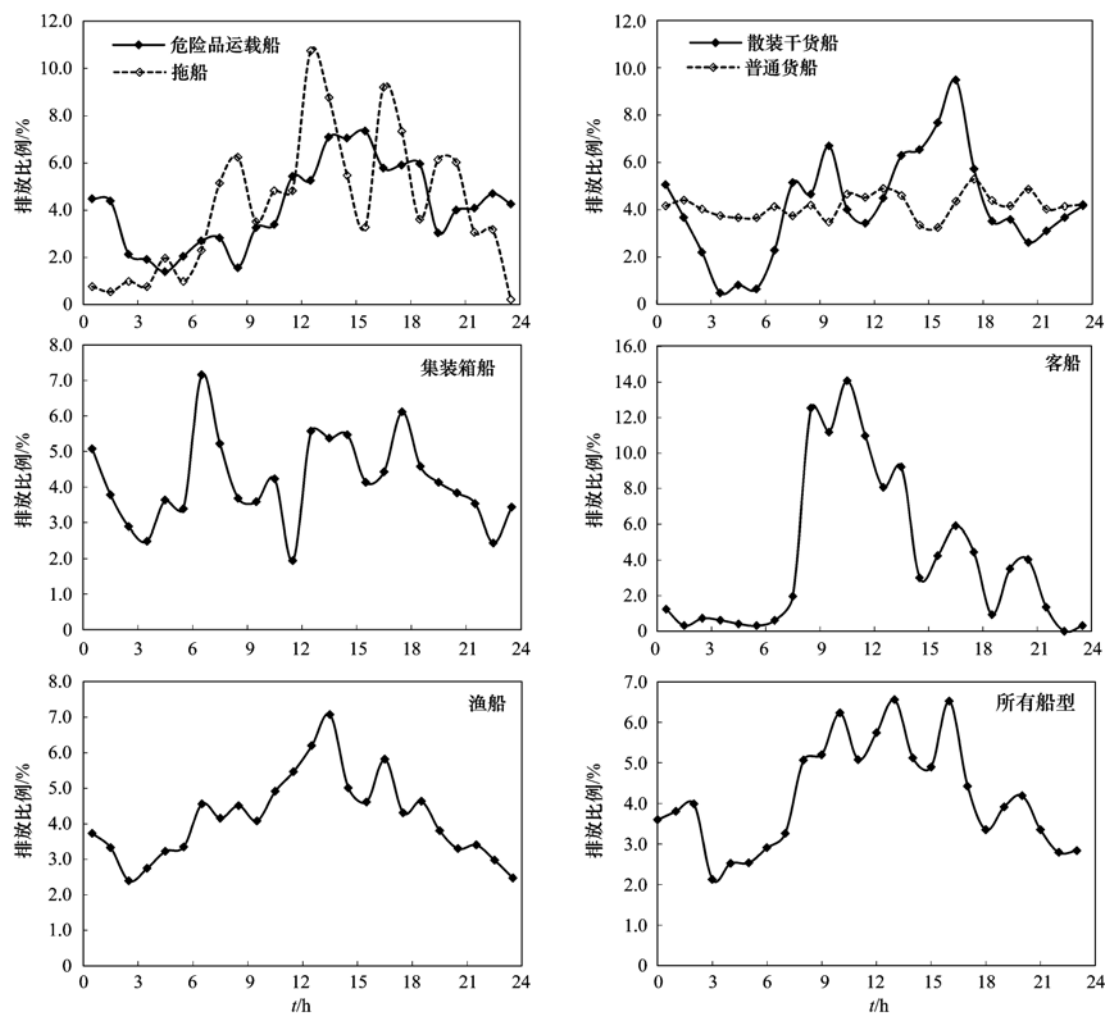


图5 深圳市各船舶类型污染物排放小时变化特征谱

Fig. 5 Hourly profile of marine emissions by categories in the city of Shenzhen

个固定班次的客轮来往^[26],因此在深圳蛇口港与上述城市客运港口之间存在明显的条带状排放区域. 渔船则主要是在西部港口区进行近海捕捞,以及运

送渔获至广州等其他城市. 与其他船型不同,深圳市的拖轮多为港作拖船,在港区范围内协助大型船舶如集装箱船、油轮和散装干货船等进港和离港,因此拖轮的活动范围和污染物排放分布在东西港区的近岸区域.

2.3 不确定性分析

本研究综合采用定性和定量分析手段,评估2010年深圳市船舶排放清单的不确定性主要来源于以下4个方面.

(1) 抵港次数的推算. 深圳市港口及海事部门统计的船舶抵港次数并没有涵盖估算的所有船舶类型,本研究结合相关资料来推算各类型船舶抵港次数,因此可能存在较大的不确定性.

(2) 各类型船舶引擎功率的确定. 由于缺乏深圳市抵港船舶全面的技术统计资料,本研究通过劳氏船级社数据库的船舶档案获得,受到样本数据代表性、数据样本容量等因素影响,也会给清单估算

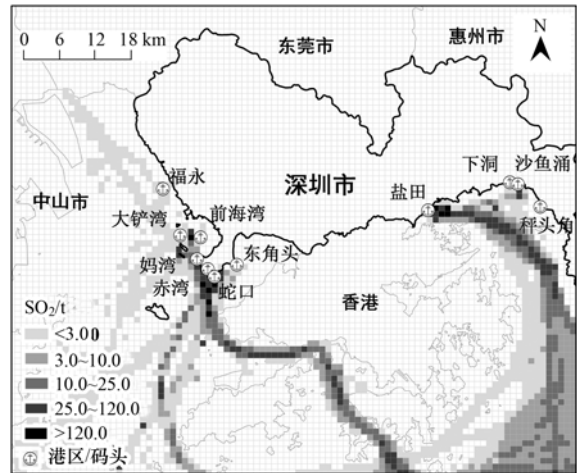


图6 深圳市船舶 SO₂ 排放空间分配示意

Fig. 6 Spatial distribution of marine SO₂ emission in the city of Shenzhen

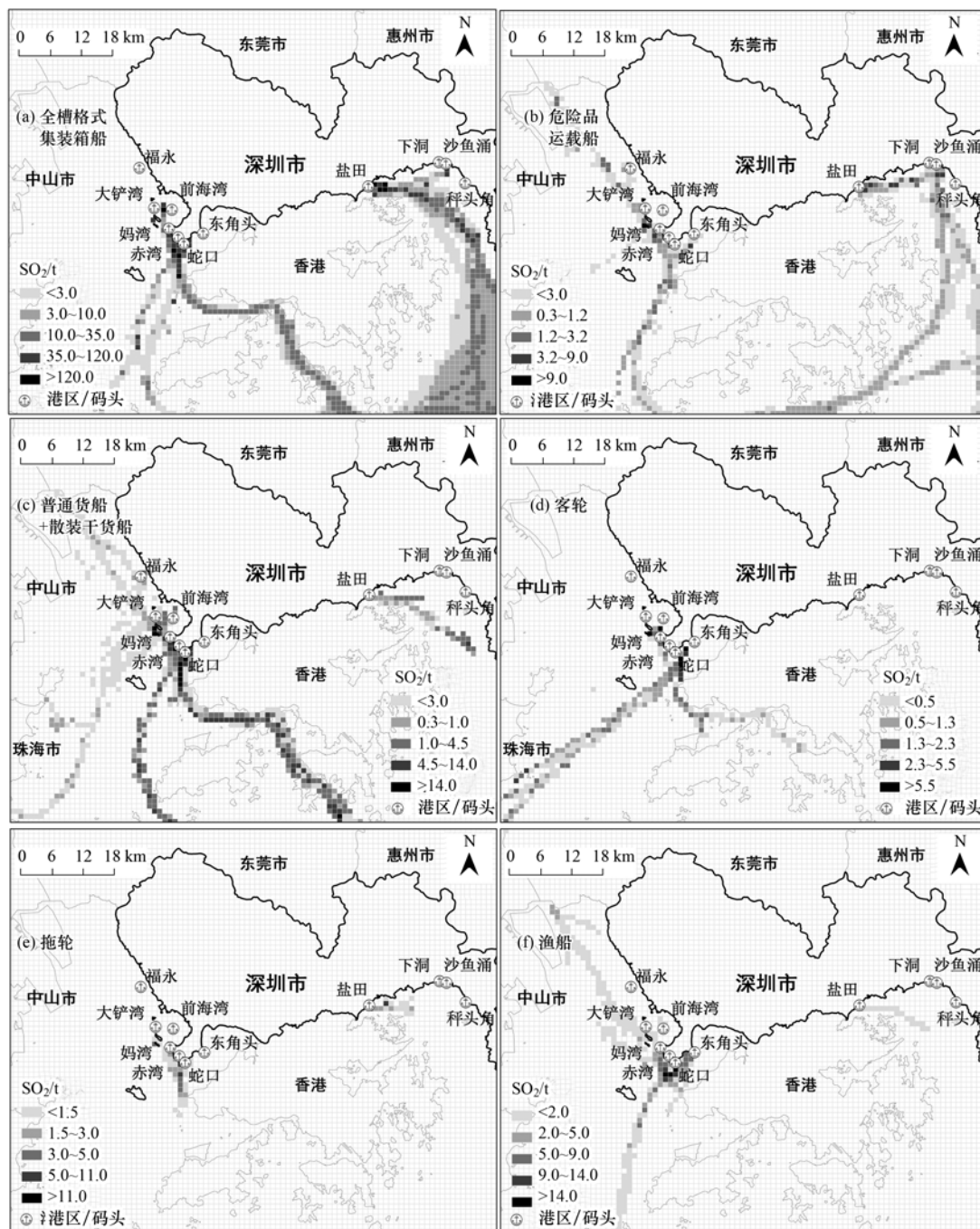


图7 深圳市各船舶类型 SO_2 排放空间分配示意

Fig. 7 Spatial distribution of marine SO_2 emission by vessel types in the city of Shenzhen

引入不确定性。

(3) 活动时间的统计. 由于搜集的船舶轨迹样本数量有限,且轨迹时长小于一年,因此时间分配系数可能具有较大的不确定性。

(4) 排放因子和引擎负荷系数的选取. 本研究参考国内外相关研究成果选取排放因子和引擎负荷系数,考虑到各地在船舶构成、活动特征以及燃料类型等方面存在较大差异,会带来一定的不确定性。

进一步对清单结果进行定量不确定性分析,结果如表6和表7所示. 总体而言, SO_2 、 NO_x 和 CO 这3种污染物的不确定性较低,而 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 VOCs 的不确定性较高. 化学品运载船和气体运载船等船型由于可供参考的研究结果较少,存在相对较大的不确定性. 同时,需要指出的是,由于不能量化所有的影响因素,清单结果的不确定性大小极有可能被低估。

表 6 2010 年深圳市船舶排放清单不确定性分析结果

Table 6 Uncertainty analysis results for marine emission estimation of Shenzhen City in 2010

污染物	估算量/t	平均值/t	95% 置信区间平均值 不确定性范围/t	相对误差/%
SO ₂	12 485. 4	16 974. 2	(13 815, 20 459. 4)	(-18. 6, 20. 5)
NO _x	21 212. 7	27 579. 6	(21 954. 5, 35 862. 7)	(-20. 3, 30. 4)
PM ₁₀	1 783. 8	2 689. 8	(1 912. 1, 4 006. 9)	(-31. 9, 43. 3)
PM _{2.5}	1 641. 1	2 465. 7	(1 678. 4, 3 527. 2)	(-31. 9, 43. 3)
CO	1 896. 5	2 588. 8	(2 004. 6, 3 339)	(-22. 5, 28. 9)
VOCs	934. 5	1 483. 8	(1 101. 8, 1 898. 9)	(-31. 8, 46. 1)

表 7 PM_{2.5}排放量分船舶类型不确定性分析结果

Table 7 Uncertainty analysis results for PM_{2.5} emission by marine vessel types of Shenzhen City in 2010

船舶类型	估算量/t	平均值/t	95% 置信区间平均值 不确定性范围/t	相对误差/%
化学品运载船	9. 5	21. 6	(7. 8, 44. 5)	(-63. 8, 106. 0)
普通货船	45. 7	88. 7	(38. 7, 173. 3)	(-56. 3, 95. 4)
散装干货船	68. 6	126. 4	(65, 212. 5)	(-48. 5, 68. 1)
集装箱船	1 454. 8	2134. 1	(931, 4075. 6)	(-56. 3, 90. 9)
气体运载船	12. 2	16. 8	(5. 8, 34. 4)	(-65. 4, 105. 4)
油轮	18. 8	29. 5	(15. 4, 50. 3)	(-47. 6, 70. 4)
客轮	14. 3	14. 3	(5. 5, 28. 3)	(-60. 9, 97. 7)
拖轮	17. 1	34. 4	(16. 1, 70. 3)	(-52. 9, 104. 6)
合计	1 641. 1	2 465. 7	(1 678. 4, 3 527. 2)	(-31. 9, 43. 0)

3 结论

(1) 深圳市 2010 年船舶排放的 SO₂、NO_x、CO、PM₁₀、PM_{2.5} 和 VOCs 总量分别为 13.6 × 10³、23.3 × 10³、2.2 × 10³、1.9 × 10³、1.7 × 10³ 和 1.1 × 10³ t。

(2) 全槽格式集装箱船是排放贡献率最大的船舶类型,超过 69.5% 的比例,其次是普通货船以及渔船,船舶排放主要与运转工况、燃料含硫率、活动频次等参数相关。

(3) 深圳市船舶排放放在 4 种模式下的排放比例依次为:靠泊 > 普通速度行驶 > 慢速行驶 > 泊岸行驶。

(4) 清单的不确定性主要来自于抵港次数、引擎功率、活动时间以及排放因子和引擎负荷系数等关键参数的搜集与选取,其中 PM₁₀、PM_{2.5} 和 VOCs 这 3 种污染物的清单估算不确定性较高。

(5) 船舶排放的高峰期集中在白天时段,但不同船舶的具体峰值有所不同。

(6) 深圳市船舶排放主要集中在西部港口群、东部大鹏湾海域及主要水运航道,呈现面状及带状分布交错的空间分布特征,不同船舶类型的污染物排放空间分布存在明显差异。

(7) 建议进一步开展深圳市船舶清单的校验研

究,并利用空气质量模型分析船舶排放对于深圳市大气环境的影响与作用。

参考文献:

[1] 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]. 广州: 科学出版社, 2014. 3-6.

[2] 环发[2013]92 号, 关于发布《大气颗粒物来源解析技术指南(试行)》的通知[Z].

[3] International Maritime Organization. Prevention of air pollution from ships-sulphur monitoring for 2007[R]. UK: IMO, 2007. 20-132.

[4] USEPA. Non-road engine and vehicle emission study-report and appendixes[R]. Washington, DC, United States: EPA, 1991. 18-142.

[5] USEPA. Analysis of commercial marine vessels emissions and fuel consumption data[R]. United States: EPA, 2000. 5-46.

[6] Entec UK Limited. UK ship emissions inventory [R]. UK, 2010. 20-33.

[7] Schrooten L, Vlieger I D, Panis L I, et al. Emissions of maritime transport: A European reference system[J]. Science of the Total Environment, 2009, 408(2): 318-323.

[8] Paxian A, Eyring V, Beer W, et al. Present-day and future global bottom-up ship emission inventories including Polar Routes [J]. Environmental Science & Technology, 2010, 44(4): 1333-1339.

[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: The Hong Kong Environmental Protection Department, 2012. 9-103.

- [10] 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**(1): 299-306.
- [11] Yang D Q, Kwan S H, Lu T. An emission inventory of marine vessels in Shanghai in 2003 [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41**(15): 5183-5190.
- [12] 刘静, 王静, 宋传真, 等. 青岛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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [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.
- [16] Song S. Ship emissions inventory, social cost and eco-efficiency in Shanghai Yangshan port [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **82**: 288-297.
- [17] 广东省统计局. 广东统计年鉴 2013[M]. 北京: 中国统计出版社, 2013.
- [18] Institute for the Environment. The Hong Kong University of Science & Technology. Study on marine vessels emission inventory [R]. Hong Kong: The Hong Kong Environmental Protection Department, 2012. 25-108.
- [19] ICF International. Current methodologies in preparing mobile source port-related emission inventories [R]. United States: EPA, 2009. 1-116.
- [20] USEPA. Analysis of commercial marine vessels emissions and fuel consumption data[R]. United States: EPA, 2000. 36-88.
- [21] USEPA. Draft regulatory impact analysis: Control of emissions of air pollution from locomotives engines and marine compression ignition engines less than 30 litres per Cylinder [R]. United States: EPA, 2007. 41-125.
- [22] 傅立新, 程玲琳, 粘桂莲, 等. 移动污染源大气环境影响研究报告[R]. 北京: 清华大学, 2005. 20-98.
- [23] 《广东农村统计年鉴》编撰委员会. 广东农村统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2011.
- [24] 徐皓, 张祝利, 赵平. 我国渔船耗能调查与分析[J]. *中国水产*, 2009, **12**(9): 5-7.
- [25] 徐曼平, 石平, 蒋祖星, 等. 营运船舶 NO_x 排放快速检测[J]. *广州航海高等专科学校学报*, 2009, **17**(1): 23-26.
- [26] 深圳市蛇口招港客运实业有限公司. 航班信息[EB/OL]. <http://www.szgky.com/ferry.asp>, 2013-01-01.

CONTENTS

Comparative Analysis and Inspiration of Air Quality Index Between China and America	GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, LI Wen-tao, <i>et al.</i>	(1141)
Regional Source Apportionment of PM _{2.5} in Beijing in January 2013	LI Xuan, NIE Teng, QI Jun, <i>et al.</i>	(1148)
Formation Mechanism of a Serious Pollution Event in January 2013 in Beijing	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i>	(1154)
Soluble of Metals within TSP in Shanghai	CHANG Yan, FENG Chong, QU Jian-guo, <i>et al.</i>	(1164)
Analysis of Component Spectral Characteristics of PM ₁₀ -Bound PAHs and the Influence of Weather Conditions During Spring in Xiamen	ZHANG Jian, FAN Shu-xian, SUN Yu, <i>et al.</i>	(1173)
Tracing Sources of Sulfate Aerosol in Nanjing Northern Suburb Using Sulfur and Oxygen Isotopes	WEI Ying, GUO Zhao-bing, GE Xin, <i>et al.</i>	(1182)
Analysis of an Air Pollution Process Using LiDAR in Nanjing, Spring of 2014	BAO Qing, HE Jun-liang, ZHA Yong, <i>et al.</i>	(1187)
Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} and PM _{2.5-10} in Mountain Background Region of East China in Spring	SU Bin-bin, ZHANG Zhi-sheng, TAO Jun, <i>et al.</i>	(1195)
Emission of Particulate Matter, Organic and Elemental Carbon from Burning of Fallen Leaves	YANG Wei-zong, LIU Gang, LI Jiu-hai, <i>et al.</i>	(1202)
Emission Inventory of Crop Residues Field Burning and Its Temporal and Spatial Distribution in Sichuan Province	HE Min, WANG Xing-rui, HAN Li, <i>et al.</i>	(1208)
Marine Emission Inventory and Its Temporal and Spatial Characteristics in the City of Shenzhen	YANG Jing, YIN Pei-ling, YE Si-qi, <i>et al.</i>	(1217)
Characteristic of Ultrafine Particles Transferring Through Building Envelopes	SUN Zai, CHEN Qiu-fang, CAI Zhi-liang, <i>et al.</i>	(1227)
Airborne Fungal Aerosol Concentration and Distribution Characteristics in Air-Conditioned Wards	ZHANG Hua-ling, FENG He-hua, FANG Zi-liang, <i>et al.</i>	(1234)
Effect of Below-cloud Secondary Evaporation in Precipitations over the Loess Plateau Based on the Stable Isotopes of Hydrogen and Oxygen	JIN Xiao-gang, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, <i>et al.</i>	(1241)
Effect of the Runoff-sediment Control of the Xiaolangdi Reservoir on DOC Transport	ZHANG Yong-ling, WANG Ming-shi, DONG Yu-long	(1249)
Effects of Long-term Implementation of the Flow-Sediment Regulation Scheme on Grain and Clay Compositions of Inshore Sediments in the Yellow River Estuary	WANG Miao-miao, SUN Zhi-guo, LU Xiao-ning, <i>et al.</i>	(1256)
Influences of Biological Processes on Geochemical Characteristics: An Example of a Mountain Karst Pool in Spring Season	YU Zheng-liang, YANG Ping-heng, ZHAO Rui-yi, <i>et al.</i>	(1263)
Variation Characteristics and Sources of Heavy Metals in an Urban Karst Groundwater System during Rainfall Event	REN Kun, YANG Ping-heng, JIANG Ze-li, <i>et al.</i>	(1270)
Risk Assessment of Trihalomethane Production Using the Beijiang River and the Pearl River, Guangzhou as Drinking Water Sources	ZHONG Hui-zhou, WEI Chao-hai	(1277)
Spatial Variability Characteristics of Water Quality and Its Driving Forces in Honghu Lake During High Water-level Period	LI Kun, WANG Ling, LI Zhao-hua, <i>et al.</i>	(1285)
Nutrient Exchange Between Meixi River and Yangtze River Due to the Typical Interaction Process of the Three Gorges Reservoir and Its Tributary	CAO Man, FU Jia-nan, ZHOU Zi-ran, <i>et al.</i>	(1293)
Effects of Nutrient Inputs on Changes of Phosphorus Forms and Phytoplankton Growth in Taihu Lake	WANG Rui-zhe, WANG Pei-fang, REN Ling-xiao, <i>et al.</i>	(1301)
Community Dynamics of Phytoplankton and Related Affecting Factors in a Eutrophicated Small Pond	YANG Wen, ZHU Jin-yong, ZHANG Ke-xin, <i>et al.</i>	(1309)
Yearly Changes of Phytoplankton Community in the Ecology-monitoring Area of Changli, Hebei in Summer	LIANG Xiao-lin, YANG Yang, WANG Yu-liang, <i>et al.</i>	(1317)
Improvement of River Water Quality by Aeration: WASP Model Study	ZHU Wen-bo, WANG Hong-xiu, LIU Cui, <i>et al.</i>	(1326)
Radiolytic Decomposition of Ciprofloxacin Hydrochloride in Aqueous Solution Using γ Irradiation	ZHU Sheng-nan, GUO Zhao-bing, ZHAO Yong-fu, <i>et al.</i>	(1332)
Removal of Antimony in Wastewater by Electrochemical Hydride Generation and the Recovery of Antimony	CHEN Jing-jing, ZHANG Guo-ping, LI Hai-xia, <i>et al.</i>	(1338)
Degradation of <i>m</i> -Cresol with Fe-MCM-41 in Catalytic Ozonation	SUN Wen-jing, WANG Ya-min, WEI Huang-zhao, <i>et al.</i>	(1345)
Bioanode and Inversion of Bioanode to Biocathode for the Degradation of Antibiotic Chloramphenicol	KONG De-yong, LIANG Bin, YUN Hui, <i>et al.</i>	(1352)
Photolysis of Gaseous HNO ₃ on the α -Fe ₂ O ₃ Films Under 308 nm UV Light	LU Jun, SUN Yun-dong, XIE Jing-jing, <i>et al.</i>	(1359)
Simultaneous Determination of Hydroquinone and Catechol Based on L-Histidine-Erythrosine Composite Film Modified Glassy Carbon Electrode	HE Jia-hong, XU Qiang, DING Wu-quan, <i>et al.</i>	(1365)
Preparation and Characterization of Quinone Functional Polymer Biocarrier (PET-AQS) for Bionitrification Catalysis	XU Qing, HOU Zheng-hao, TIAN Xiu-lei, <i>et al.</i>	(1374)
Kinetic Characteristics of Degradation of Geosmin and 2-Methylisoborneol by <i>Bacillus subtilis</i>	MA Nian-nian, LUO Guo-zhi, TAN Hong-xin, <i>et al.</i>	(1379)
Screening of a Highly Efficient Quinoline-degrading Strain and Its Enhanced Biotreatment on Coking Waste Water	LI Jing, LI Wen-ying	(1385)
Effect of Ferric Iron on Nitrogen Immigration and Transformation and Nitrous Oxide Emission During Simultaneous Nitrification Denitrification Process	LI Hao, YAN Yu-jie, XIE Hui-jun, <i>et al.</i>	(1392)
Running Condition and Bacterial Community Associated with the Partial Nitrification System	ZHAO Zhi-rui, JIAO Hai-hua, CUI Bing-jian, <i>et al.</i>	(1399)
Using Excess Activated Sludge Treated 4-Chlorophenol Contained Waste Water to Cultivate <i>Chlorella vulgaris</i>	WANG Lu, CHEN Xiu-rong, YAN Long, <i>et al.</i>	(1406)
Effects of Total Nitrogen and BOD ₅ /TN on Anaerobic Ammonium Oxidation-Denitrification Synergistic Interaction of Mature Landfill Leachate in Aged Refuse Bioreactor	YANG Ying-ying, CHEN Yi, LI Ming-jie, <i>et al.</i>	(1412)
Altitudinal Gradient Distribution and Source Analysis of PAHs Content of Topsoil in Jinpo Mountain, Chongqing	SHI Yang, SUN Yu-chuan, LIANG Zuo-bing, <i>et al.</i>	(1417)
Characteristics and Inputs of Cd Contamination in Paddy Soils in Typical Mining and Industrial Areas in Youxian County, Hunan Province	ZHANG Min, WANG Mei-e, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i>	(1425)
Effects of Canalization on the Iron Deposition in Sanjiang Plain	SU Wen-hui, YU Xiao-fei, WANG Guo-ping, <i>et al.</i>	(1431)
Effects of Phosphate and Zeolite on the Transformation of Cd Speciation in Soil	WANG Xiu-li, LIANG Cheng-hua, MA Zi-hui, <i>et al.</i>	(1437)
Leaching Remediation of Copper and Lead Contaminated Lou Soil by Saponin Under Different Conditions	DENG Hong-xia, YANG Ya-li, LI Zhen, <i>et al.</i>	(1445)
Accumulation Characteristics and Evaluation of Heavy Metals in Soil-Crop System Affected by Wastewater Irrigation Around a Chemical Factory in Shenmu County	QI Yan-bing, CHU Wan-lin, PU Jie, <i>et al.</i>	(1453)
Effects of Organic and Inorganic Slow-Release Compound Fertilizer on Different Soils Microbial Community Structure	WANG Fei, YUAN Ting, GU Shou-kuan, <i>et al.</i>	(1461)
Response of Maize to Lead Stress and Relevant Chemical Forms of Lead	CHENG Hai-kuan, ZHANG Biao, JING Xin-xin, <i>et al.</i>	(1468)
Effect of Boron-antimony Interaction on the Uptake and Accumulation of Antimony and Boron by Rice Seedling	XIANG Meng, HUANG Yi-zong, CAI Li-qun, <i>et al.</i>	(1474)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth of Reeds in Wetland Soils with Different Salt Content	GUO Jiang-yuan, GUO Wei, BI Na, <i>et al.</i>	(1481)
A Contrastive Study on Salt-alkaline Resistance and Removal Efficiency of Nitrogen and Phosphorus by <i>Phragmites australis</i> and <i>Typha angustifolia</i> in Coastal Estuary Area	CHEN You-yuan, SUN Ping, CHEN Guang-lin, <i>et al.</i>	(1489)
Soil Microbial Respiration Under Different Soil Temperature Conditions and Its Relationship to Soil Dissolved Organic Carbon and Invertase	WU Jing, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i>	(1497)
Comparison Analysis of Economic and Engineering Control of Industrial VOCs	WANG Yu-fei, LIU Chang-xin, CHENG Jie, <i>et al.</i>	(1507)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年4月15日 第36卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 4 Apr. 15, 2015

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行