

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第7期

Vol.38 No.7

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

基于船载走航气溶胶质谱技术的海洋气溶胶研究	颜金培, 陈立奇, 林奇, 赵淑惠, 李磊, 朱大勇 (2629)
利用 MODIS C6 数据分析中国西北地区气溶胶光学厚度时空变化特征	赵仕伟, 高晓清 (2637)
秋冬季节华北背景地区 PM ₁ 污染特征及来源	张周祥, 张养梅, 张小曳, 王亚强, 沈小静, 孙俊英, 周怀刚 (2647)
杭州市 PM _{2.5} 中水溶性离子的污染特征及其消光贡献	吴丹, 蔺少龙, 杨焕强, 杜荣光, 夏俊荣, 齐冰, 刘刚, 李凤英, 杨孟, 盖鑫磊 (2656)
青岛不同强度霾天气溶胶中二次无机离子的生成及粒径分布	谢丹丹, 祁建华, 张瑞峰 (2667)
西安市重污染与清洁天 PM _{2.5} 组分及其活性氧物质对比	王堃, 韩永明, 何世恒, 张婷, 刘随心, 曹军骥 (2679)
黄山 PM ₁₀ 中二元羧酸类化合物的季节变化特征及其来源	孟静静, 侯战方, 张二勋, 董杰, 刘晓迪, 邢继钊, 刘加珍 (2688)
泉州市大气 PM _{2.5} 铜系元素组成特征及来源解析	张云峰, 于瑞莲, 胡恭任, 孙境蔚, 许文质, 张棕巍 (2698)
西北石化区周围毒害类空气污染物污染特征及健康风险评价	许亚宣, 李小敏, 于华通, 董林艳, 赵玉婷, 姚懿函, 邹广迅, 张新民 (2707)
G20 峰会期间宜兴市大气 VOCs 特征及来源分析	张璘, 张祥志, 秦玮, 茅晶晶, 秦艳红, 谢卫平, 史文科, 陈文泰 (2718)
四川省 2005 ~ 2014 年农业源氨排放清单及分布特征	冯小琼, 陈军辉, 姜涛, 钱骏, 叶宏 (2728)
长三角地区典型城市非道路移动机械大气污染物排放清单	鲁君, 黄成, 胡馨遥, 杨强, 井宝莉, 夏阳, 卢滨, 唐伟, 楼晨荣, 陶士康, 李莉 (2738)
我国城市饮用水中 N-亚硝基二甲胺的健康风险评估及水质标准制定	张秋秋, 潘申龄, 张昱, 杨敏, 安伟 (2747)
地下水污染风险评价中污染源荷载量化方法的对比分析	赵鹏, 何江涛, 王曼丽, 崔亚丰 (2754)
胶州湾表层海水中的正构烷烃及其来源解析	张倩, 宋金明, 彭全材, 李学刚, 袁华茂, 李宁, 段雨琴, 曲宝晓, 王启栋 (2763)
桂江流域夏季水-气界面 CO ₂ 脱气的空间变化及其影响因素	张陶, 李建鸿, 蒲俊兵, 吴飞红, 李丽, 袁道先 (2773)
都柳江水系沉积物锑等重金属空间分布特征及生态风险	宁增平, 肖青相, 蓝小龙, 刘意章, 肖唐付, 赵彦龙, 吴世良 (2784)
太湖表层水体及沉积物中双酚 A 类似物的分布特征及潜在风险	陈政宏, 郭敏, 徐怀洲, 刘丹, 程杰, 李江, 张圣虎, 石利利 (2793)
洱海沉积物水提取态有机氮特征及与其他来源溶解性有机氮的差异	李文章, 张莉, 王圣瑞, 肖尚斌, 钱伟斌, 席银, 许可宸, 史玲珑 (2801)
阿哈水库沉积物-水界面磷、铁、硫高分辨率空间分布特征	孙清清, 陈敬安, 王敬富, 杨海全, 计永雪, 兰晨, 王箫 (2810)
北京市水环境中精神活性物质污染特征	张艳, 张婷婷, 陈卫平, 郭昌胜, 花镇东, 张远, 徐建 (2819)
降雨特征及污染物赋存类型对路面径流污染排放的影响	陈莹, 王昭, 吴亚刚, 赵剑强, 杨文娟 (2828)
CaO ₂ 不同投加方式对黑臭河道底泥内源磷释放抑制作用	徐焱, 李大鹏, 韩菲尔, 宋小君, 李鑫, 周婧, 黄勇 (2836)
坡耕地薄层紫色土-岩石系统中氮磷的迁移特征	鲜青松, 唐翔宇, 朱波 (2843)
微生物强化组合浮床净化微盐碱水体的效果	陈友媛, 吴亚东, 孙萍, 吴丹 (2850)
氧化镁基生物炭高效去除水体中磷的特性	王彬斌, 林景东, 万顺利, 何锋 (2859)
Pd/Fe ⁰ 双金属复合催化纤维降解水中痕量亚硝基二甲胺	张环, 傅敏, 魏俊富, 王一冰, 安慧颖, 沈书怡 (2868)
针铁矿、磁铁矿和石膏对 2,4-二氯苯酚厌氧降解的影响	孔殿超, 周跃飞, 陈天虎, 王进, 李碧 (2875)
污水再生过程中消毒副产物前体物转化规律	韩慧慧, 缪恒峰, 张雅晶, 陆敏峰, 黄振兴, 阮文权 (2883)
微生物燃料电池改性阳极处理 PTA 废水	孙靖云, 范梦婕, 陈英文, 祝社民, 沈树宝 (2893)
水稻秸秆浸泡液对蓝藻和绿藻生长选择性抑制作用	苏文, 陈洁, 张胜鹏, 孔繁翔 (2901)
沼液 SBR 处理出水养殖螺旋藻	蔡小波, 郁强强, 刘锐, 赵远, 陈吕军 (2910)
K ⁺ 强化高盐环境下厌氧氨氧化脱氮效能	吴国栋, 于德爽, 李津, 周同, 王晓静 (2917)
包埋氨氧化细菌短程硝化的高效稳定运行	于濛雨, 刘毅, 田玉斌, 石欢, 徐富, 杨宏 (2925)
ANAMMOX 的快速启动及 EPS 在 ANAMMOX 颗粒污泥中的空间分布	李惠娟, 彭聪聪, 陈国燕, 姚倩, 卓杨, 王彬斌 (2931)
厌氧氨氧化污泥中氨氧化的潜在电子受体	李祥, 林兴, 王凡, 袁砚, 黄勇, 袁怡, 毕贞, 刘忻, 杨朋兵 (2941)
基于厌氧氨氧化的含氮废气原位处理	林兴, 王凡, 袁砚, 李祥, 黄勇, 袁澄伟 (2947)
基于污泥资源化利用的粗放型绿色屋顶生长基质的组成	沈庆然, 李田, 曹熠, 潘奥 (2953)
罗红霉素短期冲击对活性污泥中氨氧化微生物丰度和多样性的影响	高景峰, 孙丽欣, 樊晓燕, 潘凯玲, 李定昌 (2961)
不同盐度下活性污泥中微生物群落变化规律及其处理模拟染料废水	周贵忠, 许硕, 姚倩, 银钗 (2972)
CO ₂ -咸水-砂岩相互作用过程中微生物群落结构动态变化特征	王博强, 李晨阳, 卢伟, 樊昊, 张冬至, 汪治, 吕聪, 沈福东 (2978)
油菜/玉米轮作农田土壤呼吸和异养呼吸对秸秆与生物炭还田的响应	田冬, 高明, 黄容, 吕盛, 徐畅 (2988)
模拟气候升温对湿地土壤微生物群落及磷素形态的影响	腾昌运, 沈建国, 王忠, 王行, 李鸿毅, 张志剑 (3000)
秦岭红桦林土壤细菌群落剖面分布特征及其影响因素	杜璨, 许晨阳, 王强, 张帆, 马武功, 和文祥, 侯琳, 耿增超 (3010)
微生物对汞矿区农田土壤汞甲基化的影响	贾钦, 朱雪梅, 王琪, 傅海辉, 郝亚琼, 何洁, 杨子良 (3020)
施用海泡石对铅、镉在土壤-水稻系统中迁移与再分配的影响	方至萍, 廖敏, 张楠, 吕婷, 黄小斌 (3028)
BS + CTMAB 复配修饰在黄棕壤吸附苯酚上的应用	刘伟, 孟昭福, 任爽, 李文斌 (3036)
1999 年与 2014 年贡嘎山峨眉冷杉枝和叶中常见重金属的生物富集特征对比	李芬, 王训, 罗辑, 袁巍, 喻子恒, 商立海 (3045)
铅锌尾矿污染区 3 种菊科植物体内重金属的亚细胞分布和化学形态特征	朱光旭, 肖化云, 郭庆军, 张忠义, 杨曦, 孔静 (3054)
膨润土调质对污泥堆肥的脱毒及重金属钝化和雌酮消除作用	周莉娜, 蔡函臻, 李荣华, 王美净, 赵军超, 王权, 张增强 (3061)
餐厨垃圾与秸秆混合中温和高温厌氧消化对比	郭香麟, 左剑恶, 史绪川, 王凯军, 李静 (3070)
我国村镇生活垃圾可燃组分基本特征及其时空差异	晏卓逸, 岳波, 高红, 李志龙, 黄启飞, 聂小琴, 汪群慧 (3078)
甲烷催化还原 NO _x 中 Co 基/分子筛催化剂的助剂和载体优化	潘华, 建艳飞, 陈宁娜, 刘红霞, 何焱, 贺亚飞 (3085)
《环境科学》征稿简则 (2737) 《环境科学》征订启事 (2809) 信息 (2867, 2971, 3027)	

长三角地区典型城市非道路移动机械大气污染物排放清单

鲁君^{1,2}, 黄成^{1,2*}, 胡馨遥^{1,2}, 杨强³, 井宝莉³, 夏阳³, 卢滨³, 唐伟³, 楼晟荣^{1,2}, 陶士康^{1,2}, 李莉^{1,2}

(1. 国家环境保护城市大气复合污染成因与防治重点实验室, 上海 200233; 2. 上海市环境科学研究院, 上海 200233; 3. 杭州市环境保护科学研究院, 杭州 310014)

摘要: 本研究选取上海和杭州两市开展了非道路移动机械的实地调查, 分析了各城市非道路移动机械的种类构成、使用特点、燃料类型、功率分布和排放标准等级, 在此基础上建立了城市尺度非道路移动机械排放清单技术方法, 编制了上海和杭州市2014年非道路移动机械大气污染物排放清单。结果表明, 上海和杭州市非道路移动机械柴油消费分别为 6.1×10^5 t 和 3.2×10^5 t, NO_x 排放分别为 3.09×10^4 t 和 1.72×10^4 t, $\text{PM}_{2.5}$ 排放分别为 1.41×10^3 t 和 8.1×10^2 t, 其中, 挖掘机等建筑市政施工机械的排放贡献最为突出。非道路移动机械 NO_x 排放分别占两城市所有源的 11.1% 和 16.1%, 占流动源的 18.5% 和 32.2%, 已成为城市大气污染的重要来源之一。

关键词: 非道路移动机械; 移动源; 排放清单; 工程机械; 农用机械; 港作机械; 机场地勤设备; 排放因子

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)07-2738-09 DOI: 10.13227/j.hjks.201612185

Air Pollutant Emission Inventory of Non-road Machineries in Typical Cities in Eastern China

LU Jun^{1,2}, HUANG Cheng^{1,2*}, HU Qing-yao^{1,2}, YANG Qiang³, JING Bao-li³, XIA Yang³, LU Bin³, TANG Wei³, LOU Sheng-rong^{1,2}, TAO Shi-kang^{1,2}, LI Li^{1,2}

(1. State Environment Protection Key Laboratory of Formation and Prevention of the Urban Air Complex, Shanghai 200233, China; 2. Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, China; 3. Hangzhou Academy of Environmental Science, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Based on site investigation of non-road vehicles in Shanghai and Hangzhou located in east China, non-road vehicle emission inventory in 2014 was established in these cities as well as its emission inventory technology. Characteristics of non-road vehicle were also analyzed, including classification, type of fuel, power and emission standard. The results showed that diesel consumed by non-road vehicles was 6.1×10^5 t in Shanghai and 3.2×10^5 t in Hangzhou; NO_x emission was 3.09×10^4 t in Shanghai and 1.72×10^4 t in Hangzhou; $\text{PM}_{2.5}$ emission was 1.41×10^3 t in Shanghai and 8.1×10^2 t in Hangzhou, 2014. Emissions from excavators and other construction equipment contributed the most in non-road vehicle emission inventory. Non-road vehicle has become one of the important sources of urban air pollution, whose NO_x emissions accounted for 11.1% of all urban sources in Shanghai and 16.1% in Hangzhou, and accounted for 18.5% of mobile sources in Shanghai and 32.2% in Hangzhou.

Key words: non-road machinery; mobile source; emission inventory; construction equipment; agricultural machinery; port machinery; airport ground equipment; emission factor

非道路移动机械指不在道路上行驶的移动式机械设备或车辆, 包括推土机、挖掘机等工程机械, 拖拉机等农用机械, 叉车、拖车等场(厂)内和港口作业机械以及机场地勤设备等。非道路移动机械与机动车、船、飞机等同属流动源。近年来, 机动车排放的控制水平不断提升, 使非道路移动机械的污染问题逐渐凸显, 其 NO_x 、CO、THC 和 PM 排放在全球移动源中的占比达到 18% ~ 29% 左右^[1], 在我国及重点区域的排放贡献也不容忽视^[2~4]。非道路移动机械流动性大、缺乏有效的登记管理制度, 活动水平数据较难获取, 因此, 过去的大气污染物排放清单研究中较少涉及完整的非道路移动机械排放^[5~10]。

近年来, 一些专家学者在全国、区域和城市尺度分别开展了非道路移动机械大气污染物排放清单的探索性研究^[2,3,11~14], 但是, 除农用机械具有较完整的保有量和活动水平数据外, 大部分非道路移动机械的排放均以统计年鉴和燃油消耗量推算为主, 基本未考虑机械的使用方式和排放控制水平差异,

收稿日期: 2016-12-21; 修订日期: 2017-03-01

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2014BAC22B03); 环境保护公益性行业科研专项(201409012); 中国科学院战略性先导科技专项(XDB020300); 上海市科委项目(16dz1206704)

作者简介: 鲁君(1984~), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为大气污染源排放与控制, E-mail: lujun@saes.sh.cn

* 通信作者, E-mail: huangc@saes.sh.cn

清单的不确定性普遍较高。美国环保署(EPA)在非道路移动机械排放清单方面建立较为成熟的NONROAD模型,相对而言,我国的研究基础仍比较薄弱,相关参数在我国的适用性还有待进一步探讨^[15]。为此,本研究构建了城市尺度非道路移动机械排放清单编制的技术方法,分别选取上海和杭州两大东部地区城市开展了非道路移动机械的排放调查,以2014年为基准年,建立了上海和杭州市非道路移动机械大气污染物排放清单,旨在为城市尺度非道路移动机械排放清单的建立提供参考,并为各城市开展非道路移动机械排放控制提供科学支撑。

1 材料与方法

1.1 研究对象及分类

本研究涵盖的非道路移动机械主要是指装载内

燃机的非道路用机械设备及场(厂)内车辆,并按照5级分类对机械进行划分。第1级根据机械的使用性质分为建筑市政施工机械、港作机械、场(厂)内机械、农用机械和机场地勤设备,上述分类可分别对应建设、交通、质监、农业、民航等管理部门,便于数据获取及后续排放控制措施的落实;第2级根据机械种类进行划分,由于机械种类繁多,本研究根据其作业方式进行了一定的归并,主要包括挖掘机械、铲运机械、起重机械、压实机械、路面机械、桩工机械、叉车、牵引车、拖拉机、收割机、场内客车、场内货车等;第3级根据常用燃料类型,分为柴油、汽油、天然气、液化气(CNG)、液化石油气(LPG)、油气两用及其他;第4级根据发动机功率进行划分,划分方式参照我国新生产非道路移动机械排放标准^[16];第5级根据国0~国5排放标准进行划分。具体如图1所示。

第1级	第2级	第3级	第4级	第5级
建筑市政施工机械	挖掘机械	柴油	<10 kW	国0
	铲运机械			
港作机械	起重机械	汽油	[19, 37) kW	国1
	压实机械			
	路面机械			
	桩工机械			
	叉车			
场(厂)内机械	牵引车	天然气	[37, 56) kW	国2
	场内客车			
	场内货车			
	机场工程车			
农用机械机场地勤设备	其他工业机械	液化天然气	[56, 75) kW	国3
	拖拉机			
	收割机			
	耕整地机械			
	田间管理机械			
机械地勤设备	农用运输车	油气两用	[75, 130) kW	国4
	机动船			
	发电机			
		其他燃料	≥560 kW	国5

图1 非道路移动机械分类

Fig. 1 Categories of non-road machineries

1.2 排放计算方法

本研究建立的非道路移动机械排放清单为上述各类机械排放计算结果之和,每类机械根据其燃油消耗量和基于单位燃油的排放因子进行计算,具体如式(1)所示。

$$E_j = \sum (FC_i \times EF_{i,j}) \times 10^{-3} \tag{1}$$

式中, E_j 为*j*类污染物的排放量(t),污染物种类包括SO₂、NO_x、CO、VOCs、PM₁₀和PM_{2.5};FC_{*i*}为*i*类非道路移动机械的燃油消耗量(t);EF_{*i,j*}为*i*类非道路移动机械*j*类污染物的单位油耗排放因子(g·kg⁻¹)。

各类机械的燃油消耗量根据其保有量、工作小时数和小时油耗进行计算,其中,建筑市政施工机械的保有量根据典型工地实地调查推算获得,如式(2)所示;港作机械、场(厂)内机械、农用机械和机场地勤设备根据其注册保有量进行计算,如式(3)所示.

$$FC_i = \sum (N_k \times p_{i,k}) \times H_i \times FR_i \quad (2)$$

$$FC_i = P_i \times H_i \times FR_i \quad (3)$$

式中, N_k 为 k 类施工工地(个); $p_{i,k}$ 为单位工地中 i 类建筑市政施工机械(台·个⁻¹); P_i 为除建筑市政施工机械外 i 类机械的注册保有量(台); H_i 为 i 类机械的年平均日工作小时数(h); FR_i 为 i 类机械的小时油耗(kg·h⁻¹).

1.3 活动水平调查

1.3.1 使用方式

为获取各类非道路移动机械活动水平信息,本研究分别结合上海和杭州的实地调查和机械申报登记,对施工工地、港口码头、工厂企业、农业合作社、航空公司等单位的机械使用情况进行了调查,共发放调查问卷1 349份,获取17 051台机械活动水平信息.表1所示为各类非道路移动机械的使用频率、工作小时数等调查结果.可见,各类建筑市政施工机械的单位工地使用台数平均约在0.26~1.89台·个⁻¹左右,其数量取决于工地大小及其施工阶段.各类机械中,挖掘机械数量相对较高.建

筑和市政道路工地的各类机械使用数量不等,建筑工地中挖掘机械、起重机械数量相对较高,市政道路工地中的铲运机械、压实机械和路面机械数量较多.从年均工作小时数来看,建筑市政施工机械中,挖掘机械、铲运机械和起重机械的工作小时数相对较高;港作机械中,起重机械使用最为频繁,其次为牵引车;场(厂)内机械的工作小时数显著低于港作机械,与机场地勤设备接近;农用机械的工作小时数与东部地区农业活动周期有关,工作时间显著低于其他机械.已有研究可获取的非道路移动机械工作小时数据较少,国家环境保护部《非道路移动源大气污染物排放清单编制技术指南》^[17]中将工程机械和农用机械归为两大类,给出的工作小时数普遍低于本研究调查结果,势必导致对非道路移动机械排放量的低估.李东玲等^[3]调查的挖掘机和装载机工作时间与本研究较为接近,而樊守彬^[12]、付明亮^[18]、葛蕴珊^[19]等调查的农用机械工作小时数也普遍低于本研究,可能是由于调查地区的农业活动时间与东部地区存在差异.总体来看,本研究调查结果与美国NONROAD模型中给出的使用小时数较为接近,其中,建筑市政施工机械和机场地勤设备相对较高.可以看出,不同机械种类的工作时间存在相当大的差异,细化机械分类对提升非道路移动机械排放清单的精细度和准确度具有较大意义.

表1 各类非道路移动机械的活动水平信息
Table 1 Activity level of each non-road machinery type

机械类型		单位使用台数/台·个 ⁻¹				年均工作小时数/h					NONROAD 模型 ^[20]
第1级	第2级	建筑 工地	市政 道路	平均	本研究	清单指 南 ^[17]	文献[3]	文献[12]	文献[18]	文献[19]	
建筑市政 施工机械	挖掘机械	2.16	1.37	1.89	1 580 ± 750	770	1 800				1 092
	铲运机械	0.61	1.37	0.86	1 261 ± 894	770	1 100				905 ± 143
	起重机械	0.55	0.26	0.46	1 826 ± 1 020	770					990
	压实机械	0.13	1.84	0.70	617 ± 589	770					760
	路面机械	0.05	1.26	0.46	559 ± 516	770					722 ± 141
	桩工机械	0.13	0.63	0.30	617 ± 321	770					470 ± 12
	发电机	0.05	0.68	0.26	371 ± 293	770					160 ± 100
港作机械	起重机械				4 342 ± 2 271	770					
	叉车				950 ± 937	770					
	牵引车				2 969 ± 908	770					
	其他机械				1 505 ± 1 012	770					
场(厂) 内机械	所有	按其注册保有量统计			1 156 ± 566	770					1 097 ± 533
农用机械	拖拉机				615 ± 502	500		282	400 ~ 430		510 ± 49
	收割机				262 ± 165	150		104		140 ~ 160	
	其他机械				315 ± 318	380		221			305 ± 116
机场地勤 设备	场内客/货车				2 104 ± 1 152						
	机场工程车				1 639 ± 746						691 ± 23

1.3.2 燃料种类

非道路移动机械使用的燃料种类对其大气污染物排放具有重要影响. 表2所示为调查所得各类机械使用的不同燃料种类构成情况. 柴油是非道路移动机械使用的最主要燃料,其中尤以普通柴油为主. 各类机械中,使用普通柴油的数量分别在

43.1%~87.1%左右,还有约12.9%~35.5%的机械使用车用柴油. 近年来,上海等长三角城市港作机械正加快推进牵引车等机械的天然气替代工作,约3.3%的机械开始使用天然气. 农用机械中约有41.8%使用汽油,主要为功率较小的田园管理机械和耕整地机械.

表2 各类非道路移动机械使用的燃料种类分布/%

机械分类	柴油			汽油	天然气	液化石油气	油气两用	其他燃料
	普通柴油	车用柴油	合计					
建筑市政施工机械	87.1	12.9	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
港作机械	74.3	21.8	96.1	0.2	3.3	0.0	0.0	0.3
场(厂)内机械	60.6	35.6	96.2	1.2	0.0	1.5	0.5	0.6
农用机械	43.1	15.2	58.2	41.8	0.0	0.0	0.0	0.0
机场地勤设备	82.1	0.0	82.1	17.9	0.0	0.0	0.0	0.0

1.3.3 功率分布

图2所示为各类非道路移动机械的发动机功率大小分布及其平均功率. 可见,挖掘机械、铲运机械、起重机械、压实机械和路面机械的发动机功率(kW,下同)普遍分布在[75,130)和[130,560)的中高功率段,平均功率分别为110、139、157、102和158 kW,桩工机械和发电机的功率相对较小,分别在96 kW和

79 kW左右. 港口和场(厂)内作业机械中,牵引车功率最大,平均为154 kW,其次为场内客车、场内货车和其他工业机械,平均功率分别为109、77和58 kW,叉车功率最小,主要分布在[37,56),平均功率为49 kW. 农用机械的功率普遍小于工程机械,各类机械的平均功率约在10~54 kW左右. 机场工程车的功率主要分布在[75,130),平均功率为100 kW.

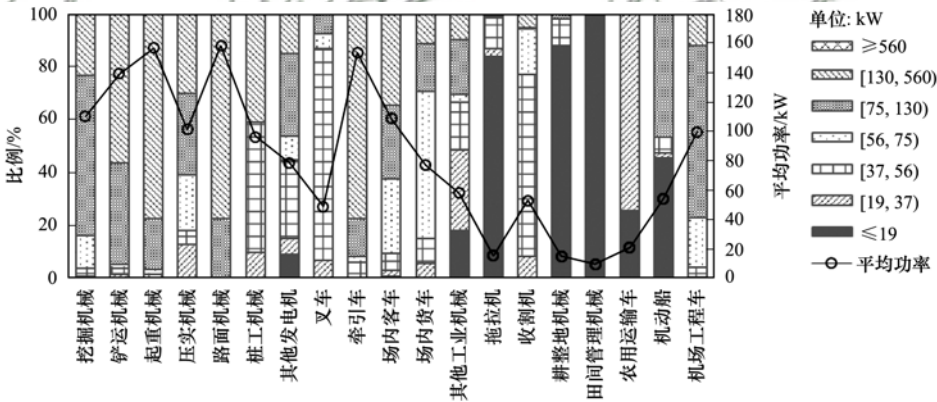


图2 各类非道路移动机械的功率分布和平均功率

Fig. 2 Engine power distributions and average powers of different non-road machinery types

1.3.4 小时油耗

为了解各类机械的油耗,从而估算其大气污染物排放,本研究调查建立了各类机械发动机功率与小时油耗的相关关系,如图3所示. 可见,发动机功率与小时油耗呈线性相关关系,该结果与李东玲等^[3]调查的结论基本一致. 不同类型机械的小时油耗相对发动机功率的斜率存在一定差异,挖掘机械、铲运机械、压实机械、路面机械、收割机和拖拉机等小时油耗随发动机功率的增长幅度相对较大,说明上述机械在相同功率段下作业使用的油耗相对较高.

1.3.5 排放标准分布

图4所示为各类机械的排放标准分布情况,其中,欧美日等国家进口机械按其排放标准转换为我国对应的非道路移动机械排放阶段. 可见,目前国内非道路移动机械的排放控制水平总体偏低. 建筑市政施工机械中,未达到一阶段(Stage 0)标准的机械占到33%~58%左右. 叉车的排放标准主要为二阶段(Stage 2),占61.8%. 港口和场(厂)内机械的排放标准相对较高,主要分布在二、三阶段(Stage2, 3). 农用机械中,拖拉机、农用运输车排放控制水平相对滞后,分别有64.6%和50.0%的机械为

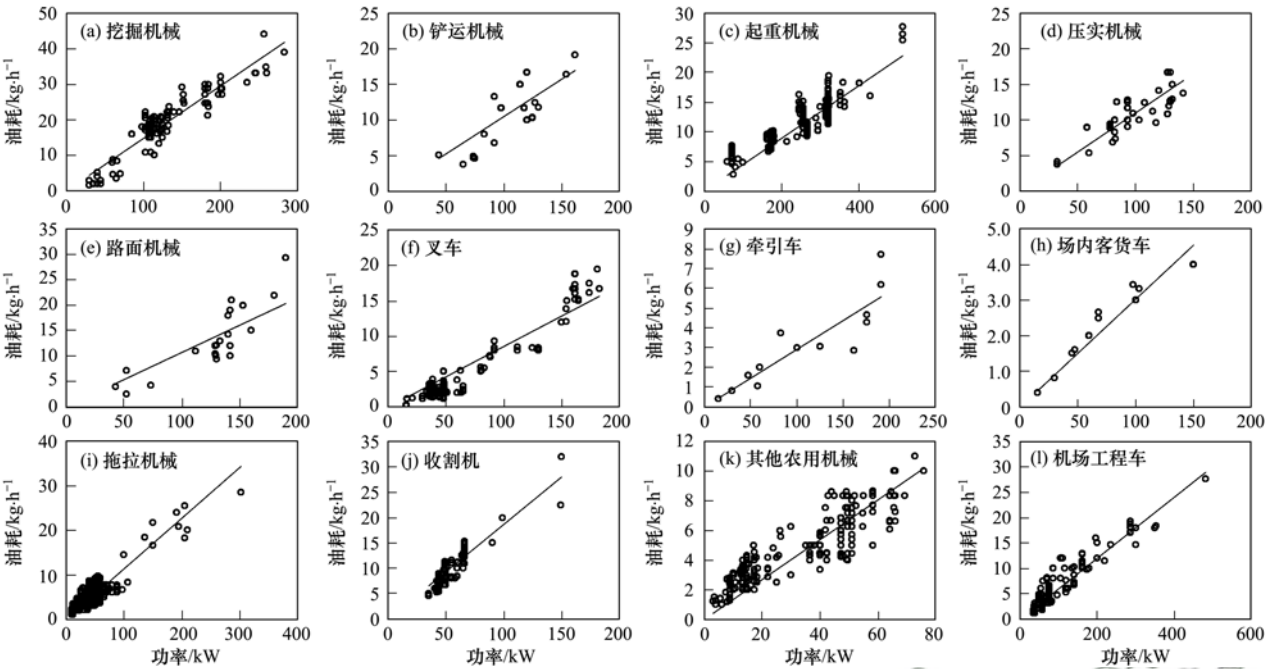


图3 主要非道路移动机械发动机功率与小时油耗的相关性

Fig. 3 Correlations of engine powers and fuel consumptions of major non-road machineries

Stage 0, 收割机、耕整地机械和田园管理机械大部分已达到 Stage 2, 占到 69.8% ~ 89.5%. 机场工程车中约 58.7% 达到 Stage 2. 总体来看, 非道路移动机械的排放标准明显滞后于车用发动机, 应当引起足够的重视.

1.4 排放因子确定

排放因子是估算大气污染物排放量的关键参数. 对 SO_2 排放因子, 本研究采用燃料平衡方法进行计算, 如式(4)所示.

$$\text{EF}_{i,l} = 2 \times \sum (S_l \times F_{i,l}) \times 1000 \quad (4)$$

式中, S_l 为 l 类燃料的硫含量; $F_{i,l}$ 为 i 类机械使用 l 类燃料的占比. 2014 年, 上海和杭州市普通柴油标

准均为国三, 硫含量为 3.5×10^{-4} , 车用柴油分别为国五和国四标准, 硫含量分别为根据 1.0×10^{-5} 和 5.0×10^{-5} , 按照表 3 中各类机械燃料种类分布情况, 可分别计算获得上海市和杭州市各类机械使用各类燃料的 SO_2 排放因子.

表 3 为各类机械的 NO_x 、 CO 、 VOCs 、 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 平均排放因子, 分别参考 NONROAD 模型^[21]、环保部非道路移动源排放清单指南^[17]及国内相关研究实测的排放因子^[3, 18, 19, 22 ~ 26], 取平均值计算获得. 按照各类机械的工作方式和燃料类型, 将排放因子分为 8 大类, 场内客、货车的排放因子取自研究团队已有的研究成果^[27]. 获取平均排放因子后,

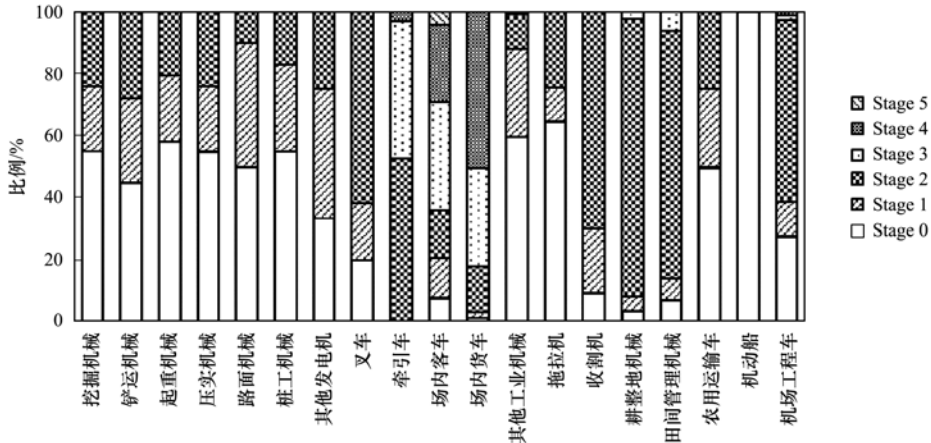


图4 各类非道路移动机械的排放标准分布

Fig. 4 Emission standard distributions of different non-road machinery types

本研究进一步根据各类型机械的功率和排放标准分布,对排放因子进行了细化,细化的依据主要是采用NONROAD 模型和环保部排放清单指南中各阶段功率和排放标准下排放因子相对平均值的系数关系进行推算. 总体来看,实测的非道路移动机械排放因子普遍高于 NONROAD 模型和环保部排放清单指

南,但是由于目前国内非道路移动机械实测排放因子数据较少,尚无法对各类机械的排放因子进行系统化更新校正,建议在后续研究中加强非道路移动机械排放因子的实测研究,以建立可反映我国非道路移动机械实际排放水平的本地化排放因子数据库.

表 3 各类非道路移动机械的平均排放因子

Table 3 Average emission factors of different non-road machinery types							
机械种类	燃料类型	数据来源	平均排放因子/g·kg ⁻¹				
			NO _x	CO	VOCs	PM ₁₀	PM _{2.5} ⁽¹⁾
挖掘/铲运/压实/路面/桩工/叉车/牵引车/其他工业机械/机场工程车等	柴油	本研究	42.78	14.37	3.91	2.40	2.28
		NONROAD 模型 ^[21]	28.60	17.81	2.88	2.46	2.33
		清单指南 ^[17]	32.79	10.72	3.39	2.09	1.99
		文献[3]	52.50			3.79	3.60
		文献[22]	57.24	14.57	5.46	1.46	1.39
		文献[23]				2.20	2.09
起重机械	柴油	本研究	31.49	11.22	3.09	2.03	1.93
		NONROAD 模型 ^[21]	30.19	11.72	2.79	1.97	1.88
		清单指南 ^[17]	32.79	10.72	3.39	2.09	1.99
发电机	柴油	本研究	31.72	12.13	3.18	2.15	2.04
		NONROAD 模型 ^[21]	30.64	13.54	2.98	2.21	2.10
		清单指南 ^[17]	32.79	10.72	3.39	2.09	1.99
拖拉机/收割机/耕整地机械/田园管理机械等	柴油	本研究	42.77	21.44	6.31	3.00	2.85
		NONROAD 模型 ^[21]	28.60	17.81	2.88	2.46	2.33
		清单指南 ^[17]	35.04	10.94	3.37	1.74	1.65
		文献[18]	54.86	33.64	10.70	2.77	2.63
		文献[19]	52.58	23.37	8.29	5.05	4.79
田园管理机械	汽油	本研究	5.34	739.95	76.84	1.09	1.09
		NONROAD 模型 ^[21]	5.73	784.33	23.79	0.22	0.22
		清单指南 ^[17]	4.95	695.58	129.90	1.96	1.96
农用运输车	柴油	平均	56.46	89.04	13.58	2.67	2.51
		清单指南 ^[17]	54.86	50.51	15.80	2.67	2.51
		文献[24]	58.05	127.58	11.35		
机动船	柴油	本研究	57.54	16.71	6.69	3.90	3.71
		清单指南 ^[17]	47.60	23.80	6.19	3.81	3.65
		文献[25]	64.25	10.88	4.18	4.45	4.23
		文献[26]	60.77	15.44	9.71	3.43	3.26
所有机械	CNG/LPG/其他	本研究	24.68	130.64	68.61	0.25	0.25
		NONROAD 模型 ^[21]	24.68	130.64	68.61	0.25	0.25

1) 文献中未列出 PM_{10} 或 $\text{PM}_{2.5}$ 排放因子的,分别以 PM 的 100% 和 95% 推算获得

2 结果与讨论

2.1 各城市非道路移动机械的油耗和排放量

表 4 所示为上海市和杭州市非道路移动机械的柴油消费和大气污染物排放清单计算结果. 可见,上海和杭州两市非道路移动机械保有量相近,但机械构成差异较大,上海市建筑市政工程机械、港作机械和场(厂)内机械保有量显著高于杭州,农用机械则少于杭州,由此导致两市机械的柴油消费和大气污染物排放相差较大. 上海市非道路移动机械柴油消费量约为杭州市的 2 倍左右, SO_2 、 NO_x 、 PM_{10}

和 $\text{PM}_{2.5}$ 排放约为杭州市的 1.8 倍左右,CO 和 VOCs 排放与杭州市相近. 上海市非道路移动机械的柴油消费和大气污染物排放主要来自建筑市政施工机械、场(厂)内机械和港作机械;杭州市建筑市政施工机械的柴油油耗和排放贡献显著高于其他机械,农用机械对 CO 和 VOCs 的排放贡献较大. 可见,即使城市地域相近、保有量接近,但两个城市的排放总量和构成存在明显差异,细化城市尺度非道路移动机械分类和清单构建方法,对于准确识别城市非道路移动机械排放的主要来源具有十分重要的意义.

表 4 上海与杭州非道路移动机械柴油消费与大气污染物排放清单

Table 4 Diesel consumption and air pollutant emission inventories of non-road machineries in Shanghai and Hangzhou

城市	机械分类	保有量/台	柴油消费量 × 10 ⁴ /t	排放量/t					
				SO ₂	NO	CO	VOCs	PM ₁₀	PM _{2.5}
上海市	建筑市政工程机械	19 707	28.28	173	15 825	4 354	1 267	681	647
	港作机械	5985	6.94	38	3 361	1 921	340	138	131
	场(厂)内机械	38 552	17.43	78	8 074	4 302	904	450	428
	农用机械	35 609	4.09	22	1 815	5 856	740	148	141
	机场地勤设备	5 650	4.01	28	1 840	974	191	67	64
	合计	105 503	60.76	339	30 915	17 406	3 443	1 484	1 411
杭州市	建筑市政工程机械	13 657	21.87	136	12 438	3 371	973	510	485
	港作机械	179	0.34	2	200	52	16	8	8
	场(厂)内机械	7 503	3.46	17	1 432	527	131	75	71
	农用机械	87 063	5.61	31	2 935	12 969	1 604	252	240
	机场地勤设备	882	0.41	3	200	315	40	6	6
	合计	109 283	31.68	188	17 204	17 233	2 764	851	810

2.2 各类非道路移动机械的油耗和排放分担

图 5 所示为上海和杭州市各类非道路移动机械的累计保有量、柴油油耗和大气污染物排放分担情况。由图 5 可见,挖掘机械尽管保有量占比仅为 8.7%,但其贡献了 32.2% 的柴油消费,对 SO₂、NO_x、PM₁₀ 和 PM_{2.5} 的排放占比分别为 35.8%、37.0%、32.8% 和 32.8%,是东部地区城市非道路移动机械排放的最主要贡献者。其他建筑市政施工机械(如铲运机械、起重机械、压实机械、路面机械等)的单位机械油耗和排放贡献也相对较高。叉车的保有量占比与其油耗和排放分担率基本一致,均在 20% 左右。拖拉机尽管保有量较高(占 18% 左右),但其油耗和排放贡献相对较低。田园管理机械主要以小型点燃式发动机为主,CO 和 VOCs 排放贡献相对较高,保有量占 22% 的田园管理机械分别贡献了 37.4% 的 CO 排放和 20.1% 的 VOCs 排放。通过分析可知,建筑市政施工类机械对城市非道路移动机械油耗和排放的总体贡献较高,其排放控制水平也相对滞后(见图 3),应当成为大气污染防治的重点。

2.3 非道路移动机械与其他源排放贡献比较

根据已有研究获得的上海市和杭州市机动车、船舶及其他污染源排放清单结果,可得到非道路移动机械在各城市大气污染源排放清单中的占比,如图 6 所示。其中,上海市其他污染源排放取自 2014 年试点城市大气污染物排放清单研究成果,杭州市其他污染源取自叶贤满等的 2010 年排放清单研究成果(未考虑船舶)^[28]。由图 6 可见,非道路移动机械的 NO_x 排放贡献相对突出,分别占上海市和杭州市所有源 NO_x 排放的 11.1% 和 16.1%,其他污染源

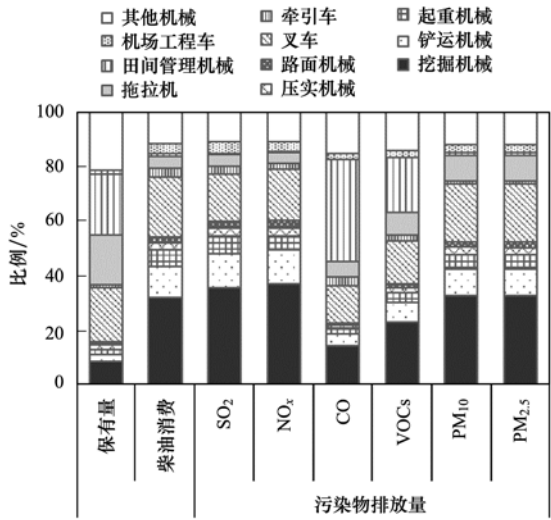


图 5 各类非道路移动机械的柴油油耗和排放构成

Fig. 5 Proportions of diesel consumption and air pollutant emissions of different non-road machinery types

的排放贡献相对较小,均在 3% 以下;非道路移动机械 NO_x 排放分别占两城市流动源的 18.5% 和 32.2%,PM_{2.5} 排放分别占 12.8% 和 6.9%,可见,非道路移动机械在流动源中的排放占比已较为突出,随着各城市机动车排放控制水平的不断提升,非道路移动机械的污染防治应当尽快给予重视和加强。

2.4 不确定性分析

本研究的不确定性主要存在于非道路移动机械的保有量估算、活动水平和排放因子获取这 3 个方面。在机械保有量方面,目前我国各城市均未建立非道路移动机械的登记备案制度,大量建筑市政施工机械无可靠的统计数据来源,本研究采用单位工地使用机械的数量进行推算,调查的工地类型、施工阶段和机械样本的代表性都可能造成较大的不确

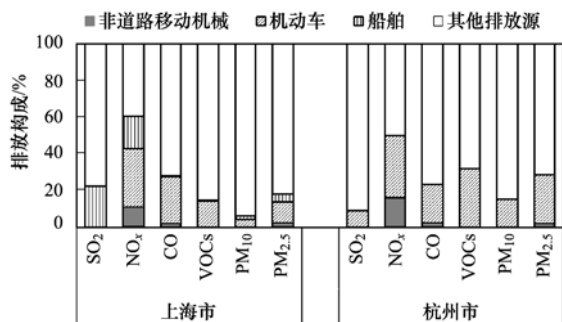


图6 上海市与杭州市非道路移动机械及其他污染源排放分担率

Fig. 6 Emission contributions of non-road machineries and other sources in Shanghai and Hangzhou

定性;相对而言,通过相关部门获取的港作机械、场(厂)内机械、农用机械和机场地勤设备的保有量不确定性较小。在活动水平方面,本研究通过17000余台机械的大样本调查方式统计所得,但是由于机械的种类较多,部分机械的活动水平信息仍可能存在一定的不确定性,相对偏差较大。排放因子是目前我国非道路移动机械排放清单研究最为薄弱的环节,可参考的非道路移动机械排放因子实测研究成果仍十分有限,不足以评估各种机械类型、发动机功率段和排放标准的排放水平,而且实测结果与NONROAD模型和国家清单指南中推荐的排放因子还存在比较大的差异,有必要在后续研究中继续补充各类非道路移动机械的本地化排放因子实测研究,以减少排放清单的不确定性。

3 结论

(1)本研究通过调查建立了上海和杭州市非道路移动机械大气污染物排放清单,2014年上海和杭州市非道路移动机械的保有量分别在 1.0×10^5 台左右,柴油消费量分别为 6.1×10^5 t和 3.2×10^5 t, NO_x 排放分别为 3.09×10^4 t和 1.72×10^4 t, $\text{PM}_{2.5}$ 排放分别为 1.41×10^3 t和 8.1×10^2 t。非道路移动机械 NO_x 排放分别占两城市所有源的11.1%和16.1%,占流动源的18.5%和32.2%,其大气污染物排放已成为城市大气污染的重要来源之一。

(2)由于建筑市政施工机械平均功率和单位油耗相对较高,排放控制水平较为滞后,其大气污染物排放影响较大,其中尤以挖掘机械的排放贡献最为突出,占保有量8.7%的挖掘机械贡献了32.2%的柴油消费量,以及33%~37%的污染物排放量。

(3)机械数量和排放因子是导致非道路移动机械排放清单不确定性的最主要因素,若要进一步提升城市尺度非道路移动机械排放清单的精细度,充

分发挥排放清单在非道路移动机械污染防治工作的作用,有必要建立非道路移动机械的登记备案制度,完善机械信息数据库,同时应加强对各类非道路移动机械排放因子的实测研究,建立可代表我国典型非道路移动机械种类、功率、工况特点及控制水平的本地化排放因子数据库。

参考文献:

- [1] Yan F, Winijkul E, Streets D G, *et al.* Global emission projections for the transportation sector using dynamic technology modeling[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14** (11): 5709-5733.
- [2] 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.
- [3] 李东玲,吴烨,周昱,等. 我国典型工程机械燃油消耗量及排放清单研究[J]. *环境科学*, 2012, **32**(2): 518-524.
Li D L, Wu Y, Zhou Y, *et al.* Fuel consumption and emission inventory of typical construction equipments in China [J]. *Environmental Science*, 2012, **32**(2): 518-524.
- [4] 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.
- [5] Zhang Q, Streets D G, Carmichael G R, *et al.* Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B mission [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, **9**(14): 5131-5153.
- [6] Zheng J Y, Zhang L J, Che W W, *et al.* A highly resolved temporal and spatial air pollutant emission inventory for the Pearl River Delta region, China and its uncertainty assessment [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(32): 5112-5122.
- [7] Huang C, Chen C H, Li L, *et al.* Emission inventory of anthropogenic air pollutants and VOC species in the Yangtze River Delta region, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, **11**(9): 4105-4120.
- [8] 赵斌,马建中. 天津市大气污染源排放清单的建立[J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(2): 368-375.
Zhao B, Ma J D. Development of an air pollutant emission inventory for Tianjin [J]. *Atmospheric Scientiae Circumstantiae*, 2008, **28**(2): 368-375.
- [9] 杨柳林,曾武涛,张永波,等. 珠江三角洲大气排放源清单与时空分配模型建立[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(12): 3521-3534.
Yang L L, Zeng W T, Zhang Y B, *et al.* Establishment of emission inventory and spatial-temporal allocation model for air pollutant sources in the Pearl River Delta region [J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(12): 3521-3534.
- [10] 程钟,章建宁,周俊,等. 常州市大气污染物排放清单及分布特征[J]. *环境监测管理与技术*, 2016, **28**(3): 24-28.
Cheng Z, Zhang J N, Zhou J, *et al.* Air pollutant emission inventory and distribution characteristics in Changzhou [J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*,

- 2016, **28**(3): 24-28.
- [11] Wang F, Li Z, Zhang K S, *et al.* An overview of non-road equipment emissions in China[J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **132**: 283-289.
- [12] 樊守彬, 聂磊, 阚睿斌, 等. 基于燃油消耗的北京农用机械排放清单建立[J]. *安全与环境学报*, 2011, **11**(1): 145-148.
- Fan S B, Nie L, Kan R B, *et al.* Fuel consumption based exhaust emissions estimating from agriculture equipment in Beijing[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2011, **11**(1): 145-148.
- [13] 金陶胜, 陈东, 付雪梅, 等. 基于油耗调查的2010年天津市农业机械排放研究[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(8): 2148-2152.
- Jin T S, Chen D, Fu X M, *et al.* Estimation of agricultural machinery emissions in Tianjin in 2010 based on fuel consumption[J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(8): 2148-2152.
- [14] 谢轶嵩, 郑新梅. 南京市非道路移动源大气污染物排放清单及特征[J]. *污染防治技术*, 2016, **29**(4): 47-51.
- Xie Y S, Zheng X M. Atmospheric pollutant emission inventory from non-road mobile sources in Nanjing and its characteristics[J]. *Pollution Control Technology*, 2016, **29**(4): 47-51.
- [15] 林秀丽. NONROAD 非道路移动源排放量计算模式研究[J]. *环境科学与管理*, 2009, **34**(4): 42-45.
- Lin X L. A Study On models of NONROAD mobile source emissions[J]. *Environmental Science and Management*, 2009, **34**(4): 42-45.
- [16] GB 20891-2014, 非道路移动机械用柴油机排气污染物排放限值及测量方法(中国第三、四阶段)[S].
- [17] 环境保护部公告2014年第92号, 非道路移动源大气污染物排放清单编制技术指南(试行)[S].
- [18] 付明亮, 丁焰, 尹航, 等. 实际作业工况下农用拖拉机的排放特性[J]. *农业工程学报*, 2013, **29**(6): 42-48.
- Fu M L, Ding Y, Yin H, *et al.* Characteristics of agricultural tractors emissions under real-world operating cycle [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, **29**(6): 42-48.
- [19] 葛蕴珊, 刘红坤, 丁焰, 等. 联合收割机排放和油耗特性的试验研究[J]. *农业工程学报*, 2013, **29**(19): 41-47.
- Ge Y S, Liu H K, Ding Y, *et al.* Experimental study on characteristics of emissions and fuel consumption for combines [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, **29**(19): 41-47.
- [20] U. S. Environmental Protection Agency. Median life, annual activity, and load factor values for NONROAD engine emissions modeling: NR- 005c [R]. Washington, DC: United States Environmental Protection Agency, 2004.
- [21] U. S. Environmental Protection Agency. Exhaust and crankcase emission factors for nonroad engine modeling-compression ignition [R]. Washington, DC: United States Environmental Protection Agency, 2010.
- [22] Fu M L, Ge Y S, Tan J W, *et al.* Characteristics of typical non-road machinery emissions in China by using portable emission measurement system [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, **437**: 255-261.
- [23] 曲亮, 何立强, 胡京南, 等. 工程机械不同工况下PM_{2.5}排放及其碳质组分特征[J]. *环境科学研究*, 2015, **28**(7): 1047-1052.
- Qu L, He L Q, Hu J N, *et al.* Characteristics of PM_{2.5} emissions and its carbonaceous components from construction machines under different typical driving modes [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2015, **28**(7): 1047-1052.
- [24] 申现宝, 王岐东, 姚志良, 等. 农用运输车实际道路油耗特征研究[J]. *北京工商大学学报(自然科学版)*, 2010, **28**(2): 71-75.
- Shen X B, Wang Q D, Yao Z L, *et al.* Study on road fuel consumption characteristics from rural vehicles [J]. *Journal of Beijing Technology and Business University (Natural Science Edition)*, 2010, **28**(2): 71-75.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] Huang C, Wang H L, Li L, *et al.* VOC species and emission inventory from vehicles and their SOA formation potentials estimation in Shanghai, China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15**(19): 11081-11096.
- [28] 叶贤满, 徐昶, 洪盛茂, 等. 杭州市大气污染物排放清单及特征[J]. *中国环境监测*, 2015, **31**(2): 5-11.
- Ye X M, Xu C, Hong S M, *et al.* Emission inventory and characteristics of air pollutants in Hangzhou[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2015, **31**(2): 5-11.

CONTENTS

Marine Aerosol Using On-board Aerosol Mass Spectrometry	YAN Jin-pei, CHEN Li-qi, LIN Qi, <i>et al.</i> (2629)
Analysis of Spatio-temporal Distribution and Variation Characteristics of Aerosol Optical Depth over the Northwest of China by MODIS C6 Product	ZHAO Shi-wei, GAO Xiao-qing (2637)
Sources and Characteristics of Regional Background PM ₁ in North China During the Autumn and Winter Polluted Period ...	ZHANG Zhou-xiang, ZHANG Yang-mei, ZHANG Xiao-ye, <i>et al.</i> (2647)
Pollution Characteristics and Light Extinction Contribution of Water-soluble Ions of PM _{2.5} in Hangzhou	WU Dan, LIN Shao-long, YANG Huan-qiang, <i>et al.</i> (2656)
Formation and Size Distribution of the Secondary Aerosol Inorganic Ions in Different Intensity of Haze in Qingdao, China	XIE Dan-dan, QI Jian-hua, ZHANG Rui-feng (2667)
Comparison of Characteristics and Reactive Oxidative Species of PM _{2.5} in Xi'an, China During Haze and Clean Days	WANG Kun, HAN Yong-ming, Ho Steven Sai Hang, <i>et al.</i> (2679)
Seasonal Variation and Sources of Dicarboxylic Acids and Related Compounds in PM ₁₀ from Mt. Huangshan	MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, ZHANG Er-xun, <i>et al.</i> (2688)
Composition Characteristics and Sources Apportionment of Lanthanoid in PM _{2.5} of Quanzhou	ZHANG Yun-feng, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (2698)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Hazardous Air Pollutants in the Surroundings of Three Petrochemical Industries in Northwest China	XU Ya-xuan, LI Xiao-min, YU Hua-tong, <i>et al.</i> (2707)
VOCs Characteristics and Sources Apportionment in Yixing City During the G20 Summit	ZHANG Lin, ZHANG Xiang-zhi, QIN Wei, <i>et al.</i> (2718)
Agricultural Ammonia Emission Inventory and Its Spatial Distribution in Sichuan Province from 2005 to 2014	FENG Xiao-qiong, CHEN Jun-hui, JIANG Tao, <i>et al.</i> (2728)
Air Pollutant Emission Inventory of Non-road Machineries in Typical Cities in Eastern China	LU Jun, HUANG Cheng, HU Qing-yao, <i>et al.</i> (2738)
Estimation of Health Risk and Enaction of Safety Standards of <i>N</i> -nitrosodimethylamine (NDMA) in Drinking Waters in China	ZHANG Qiu-qiu, PAN Shen-ling, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (2747)
Comparison and Analysis of the Quantitative Methods for Pollutant Sources Load in Groundwater Contamination Risk Assessment	ZHAO Peng, HE Jiang-tao, WANG Man-li, <i>et al.</i> (2754)
Distribution and Sources of <i>n</i> -alkanes in Surface Seawater of Jiaozhou Bay	ZHANG Qian, SONG Jin-ming, PENG Quan-cai, <i>et al.</i> (2763)
Spatial Variations of CO ₂ Degassing Across Water-air Interface and Its Impact Factors in Summer in Guijiang River, China	ZHANG Tao, LI Jian-hong, PU Jun-bing, <i>et al.</i> (2773)
Spatial Distribution Characteristics and Potential Ecological Risk of Antimony and Selected Heavy Metals in Sediments of Duliujiang River	NING Zeng-ping, XIAO Qing-xiang, LAN Xiao-long, <i>et al.</i> (2784)
Distribution Characteristics and Potential Risk of Bisphenol Analogues in Surface Water and Sediments of Lake Taihu	CHEN Mei-hong, GUO Min, XU Huai-zhou, <i>et al.</i> (2793)
Characteristics of Water Extractable Organic Nitrogen from Erhai Lake Sediment and Its Differences with Other Sources	LI Wen-zhang, ZHANG Li, WANG Sheng-rui, <i>et al.</i> (2801)
High-resolution Distribution Characteristics of Phosphorous, Iron and Sulfur Across the Sediment-Water Interface of Aha Reservoir ...	SUN Qing-qing, CHEN Jing-an, WANG Jing-fu, <i>et al.</i> (2810)
Distribution Characteristics of Drugs of Abuse and Their Metabolites in Aqueous Environment of Beijing, China	ZHANG Yan, ZHANG Ting-ting, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (2819)
Impacts of Rainfall Characteristics and Occurrence of Pollutant on Effluent Characteristics of Road Runoff Pollution	CHEN Ying, WANG Zhao, WU Ya-gang, <i>et al.</i> (2828)
Inhibition of Internal Phosphorus Release in the Black-Odor Channel Under Different Adding Methods of CaO ₂	XU Yao, LI Da-peng, HAN Fei-er, <i>et al.</i> (2836)
Transport of Nitrogen and Phosphorus from Sloping Farmland with Thin Purple Soil Overlying Rocks	XIAN Qing-song, TANG Xiang-yu, ZHU Bo (2843)
Purification of Slightly Salt-alkaline Water Bodies by Microorganism Enhanced Combined Floating Bed	CHEN You-yuan, WU Ya-dong, SUN Ping, <i>et al.</i> (2850)
MgO-Biochar for the Adsorption of Phosphate in Water	WANG Bin-bin, LIN Jing-dong, WAN Shun-li, <i>et al.</i> (2859)
Degradation of <i>N</i> -nitrosodimethylamine by Palladium/ Iron Bimetallic Composite Catalytic Fiber	ZHANG Huan, FU Min, WEI Jun-fu, <i>et al.</i> (2868)
Effects of Goethite, Magnetite and Gypsum on the Anaerobic Degradation of 2,4-Dichlorophenol	KONG Dian-chao, ZHOU Yue-fei, CHEN Tian-hu, <i>et al.</i> (2875)
Transformation of Disinfection Byproduct Precursors During the Wastewater Regeneration Processes	HAN Hui-hui, MIAO Heng-feng, ZHANG Ya-jing, <i>et al.</i> (2883)
Treatment of PTA Wastewater by Modified Anode Microbial Fuel Cell	SUN Jing-yun, FAN Meng-jie, CHEN Ying-wen, <i>et al.</i> (2893)
Selective Inhibition of Rice Straw Extract on Growth of Cyanobacteria and Chlorophyta	SU Wen, CHEN Jie, ZHANG Sheng-peng, <i>et al.</i> (2901)
Cultivation of <i>Spirulina platensis</i> in Digested Piggery Wastewater Pretreated by SBR with Operating Conditions Optimization	CAI Xiao-bo, YU Qiang-qiang, LIU Rui, <i>et al.</i> (2910)
Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX Process with K ⁺ Addition in Saline Surroundings	WU Guo-dong, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (2917)
Efficient and Stable Operation of Shortcut Nitrification by Entrapping Ammonia Oxidizing Bacteria	YU Meng-yu, LIU Yi, TIAN Yu-bin, <i>et al.</i> (2925)
Fast Start-up of ANAMMOX and the Spatial Distribution of EPS in ANAMMOX Granules	LI Hui-juan, PENG Dang-cong, CHEN Guo-yan, <i>et al.</i> (2931)
Ammonia Oxidation with Potential Electron Acceptor in ANAMMOX Sludge	LI Xiang, LIN Xing, WANG Fan, <i>et al.</i> (2941)
Ammoniac Waste Gas in-situ Treatment Based on ANAMMOX Process	LIN Xing, WANG Fan, YUAN Yan, <i>et al.</i> (2947)
Extensive Green Roof Substrate Composition Based on Sludge Recycling	SHEN Qing-ran, LI Tian, CAO Yi, <i>et al.</i> (2953)
Short-term Effect of Roxithromycin on Abundance and Diversity of Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Activated Sludge	GAO Jing-feng, SUN Li-xin, FAN Xiao-yan, <i>et al.</i> (2961)
Influence of Salinity on Microbial Community in Activated Sludge and Its Application in Simulated Dye Wastewater Treatment	ZHOU Gui-zhong, XU Shuo, YAO Qian, <i>et al.</i> (2972)
Shift of Microbial Communities During the CO ₂ -Brine-Sandstone Interaction Process	WANG Bo-qiang, LI Chen-yang, LU Wei, <i>et al.</i> (2978)
Response of Soil Respiration and Heterotrophic Respiration to Returning of Straw and Biochar in Rape-Maize Rotation Systems	TIAN Dong, GAO Ming, HUANG Rong, <i>et al.</i> (2988)
Effect of Simulated Climate Warming on Microbial Community and Phosphorus Forms in Wetland Soils	TENG Chang-yun, SHEN Jian-guo, WANG Zhong, <i>et al.</i> (3000)
Patterns of Bacterial Community Through Soil Depth Profiles and Its Influencing Factors Under <i>Betula albosinensis</i> Burkill in the Xinjiashan Forest Region of Qinling Mountains	DU Can, XU Chen-yang, WANG Qiang, <i>et al.</i> (3010)
Effects of Microbial Activities on Mercury Methylation in Farmland near Mercury Mining Area	JIA Qin, ZHU Xue-mei, WANG Qi, <i>et al.</i> (3020)
Effect of Sepiolite Application on the Migration and Redistribution of Pb and Cd in Soil Rice System in Soil with Pb and Cd Combined Contamination	FANG Zhi-ping, LIAO Min, ZHANG Nan, <i>et al.</i> (3028)
Application of Amphoteric-Cationic Combined Modification on Phenol Adsorption of Yellow Brown Soil	LIU Wei, MENG Zhao-fu, REN Shuang, <i>et al.</i> (3036)
Bioaccumulation of Heavy Metals in Twigs and Leaves of <i>Abies fabri</i> at Mount Gongga in China; A Comparison Study Between 1999 and 2014	LI Fen, WANG Xun, LUO Ji, <i>et al.</i> (3045)
Subcellular Distribution and Chemical Forms of Heavy Metals in Three Types of Compositae Plants from Lead-Zinc Tailings Area	ZHU Guang-xu, XIAO Hua-yun, GUO Qing-jun, <i>et al.</i> (3054)
Effects of Bentonite Amendment on Detoxification, Heavy Metal Passivation and Estrone Elimination of Sewage Sludge Compost	ZHOU Li-na, CAI Han-zhen, LI Rong-hua, <i>et al.</i> (3061)
Mesophilic and Thermophilic Anaerobic Co-Digestion of Food Waste and Straw	GUO Xiang-lin, ZUO Jian-e, SHI Xu-chuan, <i>et al.</i> (3070)
Basic Features of Combustible Rural Garbage Component and Its Spatial-temporal Difference in China	YAN Zhuo-yi, YUE Bo, GAO Hong, <i>et al.</i> (3078)
Optimization of Promoter and Support for Co-based/zeolites Catalysts in Catalytic Reduction of NO _x by CH ₄	PAN Hua, JIAN Yan-fei, CHEN Ning-na, <i>et al.</i> (3085)