

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.3
第41卷 第3期

目次

长江经济带 PM _{2.5} 分布格局演变及其影响因素	黄小刚, 赵景波, 曹军骥, 辛未冬 (1013)
中国东海近海岛屿冬季与夏季气溶胶中水溶性离子化学组分特征及来源解析	方言, 曹芳, 范美益, 章炎麟 (1025)
阳泉市秋冬季 PM _{2.5} 化学组分及来源分析	王成, 闫雨龙, 谢凯, 李如梅, 徐扬, 彭林 (1036)
泰安市夏季 PM _{2.5} 中正构烷烃和糖类化合物的化学组成及其来源	衣雅男, 侯战方, 杨千才, 刘晓迪, 李政, 孟静静, 燕丽, 魏本杰, 伏梦璇 (1045)
黄山秋季大气颗粒物理化特性	卞逸舒, 银燕, 王红磊, 陈魁 (1056)
北碚区气溶胶光学厚度特征及其与颗粒物浓度的相关性	曾唯, 郝庆菊, 赵仲婧, 熊维霞, 陈俊江, 辛金元, 江长胜 (1067)
淄博市重点工业行业 VOCs 排放特征	王雨燕, 王秀艳, 杜森, 白瑾丰, 杨文 (1078)
鄂州市大气 VOCs 污染特征及来源解析	付昱萌, 杨红刚, 卢民瑜, 曾颜, 邹迎新 (1085)
浙江省汽车整车制造业挥发性有机物产排污系数	滕富华, 杨忠平, 董事壁, 付超, 缪孝平, 顾震宇 (1093)
基于工艺过程的金属包装业 VOCs 污染特征	王迪, 聂磊, 赵文娟, 张玮琦, 党鸿雁, 邵霞, 张新民 (1099)
薪柴和经济作物秸秆燃烧 VOCs 排放特征	牛真真, 孔少飞, 严沁, 郑淑睿, 郑煌, 曾昕, 姚立全, 吴剑, 张颖, 吴方琪, 程溢, 覃思, 刘玺, 燕莹莹, 祁士华 (1107)
精细化工园区工艺过程 VOCs 产生量核算方法	叶茵韵, 田金平, 陈吕军 (1116)
2017 年春季常州 HONO 观测及对大气氧化能力影响的评估	施晓雯, 戈逸峰, 张玉婵, 马嫣, 郑军 (1123)
中国工程机械使用特征及其尾气排放趋势	庞凯莉, 张凯山, 马帅, 王帆 (1132)
京津冀机场群飞机 LTO 大气污染物排放清单	韩博, 孔魏凯, 姚婷玮, 王愚 (1143)
在用汽油和柴油车排放颗粒物的粒径分布特征实测	王瑞宁, 胡馨遥, 任洪娟, 马冬, 徐冲, 赵玺乾, 王孟昊, 徐为标, 安静宇, 黄成 (1151)
参数选取对畜禽养殖业大气氨排放的影响: 以长三角地区为例	张琪, 黄凌, 殷司徒, 王倩, 李红丽, 王杨君, 王军, 陈勇航, 李莉 (1158)
乌海市煤矿区及周边春季降尘污染特征及来源分析	吴红璇, 史常青, 张艳, 赵廷宁, 胡平, 刘韵, 陈童 (1167)
长江中下游地区丰水期河、湖水氢氧同位素组成特征	李静, 吴华武, 周永强, 赵中华, 王晓龙, 蔡永久, 贺斌, 陈雯, 孙伟 (1176)
伊洛河流域河水来源及水化学组成控制因素	刘松韬, 张东, 李玉红, 杨锦媚, 邹霜, 王永涛, 黄兴宇, 张忠义, 杨伟, 贾保军 (1184)
城镇化进程中新疆塔城盆地浅层地下水化学演变特征及成因	吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 周冰, 朱亮, 陈坚 (1197)
基于 Sentinel-2 MSI 影像的河湖系统水体悬浮物空间分异遥感监测: 以安徽省升金湖与连接长江段为例	王行行, 王杰, 崔玉环 (1207)
黄土高原高浑浊水体 CDOM 光学特性及影响因素	梁晓文, 郇田田, 王涛 (1217)
人工强制混合充氧及诱导自然混合对水源水库水质改善效果分析	温成成, 黄廷林, 李楠, 张海涵, 林子深, 李衍庆, 杨尚业, 董亚军 (1227)
滤速与水质对低温含铁锰氨地下水中氨去除的影响	张杰, 梅宁, 刘孟浩, 叶雪松, 李冬 (1236)
太湖梅梁湾浮游动物群落结构长期变化特征 (1997~2017 年)	杨佳, 周健, 秦伯强, 权秋梅, 黎云祥 (1246)
汤旺河水生硅藻群落及其与环境因子的关系	薛浩, 王业耀, 孟凡生, 郑丙辉, 张铃松, 程佩璋 (1256)
盐龙湖水源生态净化系统 FG 和 MBFG 演替特征及水质响应性评价	王莲, 李璇, 马卫星, 邹立航, 赵强强, 丁成, 刘向阳 (1265)
三峡库区石盘丘小流域氮磷输出形态及流失通量	陈仕奇, 龙翼, 严冬春, 高明, 黎嘉成, 徐国鑫, 黄容 (1276)
化肥减量配施生物炭对紫色土坡耕地磷流失的影响	罗东海, 王子芳, 龙翼, 严冬春, 徐国鑫, 李娇, 高明 (1286)
利用铁改性方解石作为活性覆盖材料控制水体内源磷的释放	柏晓云, 林建伟, 詹艳慧, 常明玥, 辛慧敏, 吴俊麟 (1296)
茶渣生物炭制备及其对溶液中四环素的去除特性	范世锁, 刘文浦, 王锦涛, 胡红梅, 杨伊宁, 周娜 (1308)
3 种典型多孔高温改性固废材料对磺胺二甲嘧啶的吸附特性	王静, 朱晓丽, 韩自玉, 胡健, 秦之瑞, 焦文涛 (1319)
新制和老化微塑料对多溴联苯醚的吸附	徐鹏程, 郭健, 马东, 葛蔚, 周震峰, 柴超 (1329)
三峡库区支流汝溪河沉积物重金属空间分布及生态风险	方志青, 王永敏, 王训, 谢德体, 王定勇 (1338)
固城湖及出入湖河道表层水体、沉积物和鱼体中有机氯农药分布及风险评估	阚可聪, 谷孝鸿, 李红敏, 陈辉辉, 毛志刚, 曾庆飞 (1346)
衡水湖沉积物中典型持久性有机污染物污染特征与风险评估	张嘉雯, 魏健, 吕一凡, 段亮, 刘利, 王俭, 孟淑锦 (1357)
北京某污水处理厂及接纳水体中典型有机磷酸酯的污染特征和风险评估	张振飞, 吕佳佩, 裴莹莹, 王春英, 郭昌胜, 徐建 (1368)
基于短程反硝化厌氧氨氧化的低碳源城市污水深度脱氮特性	马斌, 许鑫鑫, 高茂鸿, 委燕, 彭永臻 (1377)
PD-DPR 系统处理城市污水与高硝酸盐废水实现稳定亚硝酸盐积累和磷去除的特性	王秋颖, 于德爽, 赵骥, 王晓霞, 袁梦飞, 巩秀珍, 楚光玉, 何彤晖 (1384)
中试 MBBR 反应器启动 CANON 工艺及其短程硝化	付昆明, 杨宗珏, 廖敏辉, 靳怡然, 张晓航 (1393)
抗生素对耐药型反硝化菌反硝化过程及微生物群落结构的影响	代莎, 李彭, 彭五庆, 刘玉学, 王拯, 何义亮, 亮根祥, 胡双庆 (1401)
多次进水-曝气的好氧颗粒污泥系统实验	张杰, 王玉颖, 李冬, 刘志成, 曹思雨 (1409)
剩余污泥碱性发酵产物对硝化过程及性能的影响	邱圣杰, 刘瑾瑾, 李夕耀, 彭永臻 (1418)
硫酸盐对污泥高级厌氧消化过程中甲基汞迁移转化的影响	何湘琳, 刘吉宝, 阴永光, 谭颖锋, 朱爱玲, 左壮, 高山, 解立平, 魏源送 (1425)
工业城市农田土壤重金属时空变异及来源解析	李艳玲, 卢一富, 陈卫平, 杨阳, 蔡斌 (1432)
耕地土壤重金属健康风险空间分布特征	姬超, 侯大伟, 李发志, 包广静, 邓爱萍, 沈红军, 孙华 (1440)
黄河三角洲盐碱土根际微环境的微生物多样性及理化性质分析	赵娇, 谢慧君, 张建 (1449)
不同土地利用方式对土壤细菌分子生态网络的影响	李冰, 李玉双, 魏建兵, 宋雪英, 史荣久, 侯永侠, 刘△瑶 (1456)
红壤丘陵区土壤有机碳组分对土地利用方式的响应特征	章晓芳, 郑生猛, 夏银行, 胡亚军, 苏以荣, 陈香碧 (1466)
有机肥与无机肥配施对潮土 N ₂ O 排放的影响	孙赫阳, 万忠梅, 刘德燕, 廖霞, 丁维新 (1474)
冬小麦吸收重金属特征及与影响因素的定量关系	王怡雯, 芮玉奎, 李中阳, 苏德纯 (1482)
钙镁磷肥对石灰、海泡石组配修复镉污染稻田土壤的影响	鄢德梅, 郭朝晖, 黄凤莲, 冉洪珍, 张鹏 (1491)
桉树遗态磷灰石材料对铅污染土壤的钝化修复效应	方雅莉, 朱宗强, 赵宁宁, 朱义年, 李超, 张立浩 (1498)
外源亚精胺对 As ⁵⁺ 胁迫下水稻种子萌发和 As 吸收积累的影响	刘书锦, 黄益宗, 保琼莉, 黄永春, 张盛楠, 韩廿, 刘玉荣, 胡红青 (1505)
《环境科学》征订启事 (1024) 《环境科学》征稿简则 (1092) 信息 (1226, 1264, 1417)	

中国工程机械使用特征及其尾气排放趋势

庞凯莉, 张凯山*, 马帅, 王帆

(四川大学建筑与环境学院, 成都 610065)

摘要: 非道路移动源的尾气排放因其对空气污染的贡献大而日益受到关注. 准确估算非道路移动源的尾气排放清单对空气质量至关重要. 本研究通过收集整理调研获取的工程机械活动水平数据, 分析工程机械使用特征, 包括: 不同机械间的活动水平差异、活动水平的区域性差异及活动水平与机械车龄的关系等; 此外, 研究使用 BP 神经网络模型预测 2018 ~ 2025 年中国工程机械保有量, 利用便携式尾气测量系统对 47 台工程机械进行现实工况下的尾气排放测量, 量化其污染物排放水平, 并最终结合机械活动水平估算 2015 ~ 2025 年中国工程机械的尾气排放清单. 结果表明, 工程机械的活动水平随着机械种类的不同而不同, 年均使用时间在 1 439 ~ 4 332 h 之间变化. 同一类机械在不同区域范围内的活动水平也存在较大的地域差异, 最大差别可达 3 倍以上. 此外, 工程机械的活动水平一般也随机械车龄的增加而减少, 据估计, 车龄增加一年, 其活动水平减少约 140 ~ 150 h. 经估算, 2015 年, 中国工程机械 CO、HC、NO 和 PM_{2.5} 的排放量分别为 209.9、46.2、345.2 和 57.4 万 t; 由于 2015 年后工程机械保有量增速放缓, 到 2020 年, CO、HC 和 PM_{2.5} 排放量比 2015 年下降 2.4% ~ 33.1% 不等, 到 2025 年, 排放量将进一步下降 7.1% ~ 64.7%. 而 NO 排放量在 2015 年后稍有增加, 但 2020 年后开始下降. 然而, 虽然工程机械污染物的排放持续下降, 但与道路移动源相比, 幅度较小, 因此, 其排放对大气污染的贡献将在未来日益突出, 需引起足够重视.

关键词: 工程机械; 保有量; 活动水平分析; 尾气排放; 排放清单

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)03-1132-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.201909174

Analysis of Activity and Its Emissions Trend for Construction Equipment in China

PANG Kai-li, ZHANG Kai-shan*, MA Shuai, WANG Fan

(College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Emissions from non-road equipment are attracting more attention due to their increasing contribution to air pollution. Thus, an accurate estimate of emission inventory for non-road equipment is imperative for air quality management and improvement. Activity data from a large range of construction equipment were collected from multiple sources, including on-site/phone interviews and literature review, and used for further analysis to characterize its operations. Activity analysis of construction equipment included: ①activity of construction equipment by type (functionality); ②activity differences by geographical area; and ③activity differences by age. A back-propagation neural network model was developed to estimate the construction equipment population in China from 2018 to 2025. Furthermore, real-world measurements of emissions were made on 47 selected examples of construction equipment using a portable emission measurement system. Population, activity, and emission factors were then combined to develop emission inventories for construction equipment in China from 2015 to 2025. The results showed that activity of construction equipment differs by type or functionality, ranging from 1 439 to 4 332 hours per year. Furthermore, there are differences in activity by as much as three times due to geographical area differences for the same construction equipment type. In general, activity of construction equipment decreases as it ages by a rate of approximately 140 to 150 hours per year. It is estimated that CO, HC, NO, and PM_{2.5} emissions of construction equipment in China in 2015 were approximately 2.099, 0.462, 3.452, and 0.574 million tons, respectively. Compared to 2015, due to the slow growth of the construction equipment population, CO, HC, and PM_{2.5} emissions will decrease by 2.4%-33.1% and 7.1%-64.7% by 2020 and 2025, respectively, depending on pollutant. It should be noted that NO emissions appear to increase slightly for the first several years in the future, but then decrease after 2020. As increasingly stringent regulations have been enforced for on-road vehicles, but less has been done regarding non-road equipment, although total emissions from non-road equipment continue to decrease, their contribution to air pollution will continue to increase; they should therefore be one of the focuses for future work.

Key words: construction equipment; population; activity analysis; tailpipe emissions; emission inventory

工程机械是非道路机械中尾气排放贡献率较大的一类, 例如: 中国长三角地区工程机械的 NO_x 和 PM_{2.5} 排放贡献率分别为 49% 和 35%^[1]. 工程机械主要包括: 挖掘机、装载机、推土机、起重机、叉车、压路机和摊铺机等. 截至 2017 年底, 中国工程机械数量增至 720 万台^[2]. 由于工程机械主要以柴油为燃料, 其排放的 NO_x 和 PM 通常比汽油等其他燃料高^[3], 加之如此庞大的保有量, 所带来的污染

不可忽视.

排放清单的估算是量化污染的重要手段, 也是空气质量改善政策制定的依据. 保有量、活动水平和排放因子是估算排放清单的三大要素, 其数据准

收稿日期: 2019-09-18; 修订日期: 2019-10-30

基金项目: 环境保护公益性行业科研专项(201409012)

作者简介: 庞凯莉(1993~), 女, 博士, 主要研究方向为大气污染控制, E-mail: pklscu@163.com

* 通信作者, E-mail: zhangkaishan@scu.edu.cn

确与否对排放清单的影响巨大。

为了全面掌握工程机械大气污染物排放特征,一些专家学者先后根据中国工程机械的保有情况建立了全国^[4~6]及地区^[7~11]尺度的工程机械大气污染物排放清单,但其所使用的活动水平和排放因子等数据大多借用国际上现有的一些研究或模型数据,如美国环保署的 NONROAD 模型^[12],从而存在很多的不确定性。因此,针对我国使用的工程机械开展其活动水平调研和排放因子本地化测试是非常必要且迫切的。然而,由于我国在这方面的研究起步较晚,预测我国未来年份工程机械尾气排放清单的相关工作相对较少。

因此,本研究的主要目的是利用本地化数据分析我国工程机械的使用特征及其尾气排放趋势。一方面,可以弥补我国在工程机械活动水平和排放因子实测数据等方面的不足,减少现有排放清单的不确定性,另一方面,以期为我国工程机械的尾气排放管控提供科学支撑。

1 材料与方法

为分析我国工程机械的使用特征并预测其未来的尾气趋势,需要收集和整理全国范围内的工程机械活动水平数据,并对不同种类的工程机械开展实际使用条件下的尾气排放测量。工程机械活动水平主要通过实际调研获取,包括部门走访、现场调研、电话询访和文献收集等。使用特征的分析包括:①不同机械类型的活动水平差异;②同一机械在不同地区的活动水平差异;③活动水平与机械车龄的关系等。同时,利用便携式尾气排放测量系统(PEMS)对选取的不同种类的工程机械进行现实使用条件下的尾气排放测量以量化其污染物排放水平。此外,利用 BP 神经网络模型^[13,14]预测未来年份的工程机械保有量,结合实际调研的活动水平和实测的尾气排放因子估算相应年份的尾气排放清单。

1.1 工程机械使用特征分析

本研究通过多种调研方式获取工程机械的活动水平,建立活动水平数据库,并量化分析工程机械的使用特征。活动水平的实际调研主要在西南(四川成都、重庆等)、华北(山西太原)和西北(陕西西安、新疆乌鲁木齐)等地区开展。调研的形式主要包括部门走访、现场问卷调查、电话询访和文献收集。调研的主要信息包括:机械种类、型号、燃料类型、生产厂家、引擎排量、额定功率、生产及出厂日期、尾气排放后处理设施、日平均使用时间、年平均使用时间、使用的季节性变化、执行的排放标准和年均燃油消耗等。其中,部门走访的主要目的是

获取机械的类型及其具体的使用情况,走访的部门包括建设委员会和安全监督部门等。现场问卷调查的目的是从机械的具体使用者处获取第一手的机械使用情况以及详细的机械信息。这些信息的获取,除设计问卷,填写相关信息外,还结合其他记录方式,如照片和信息后续查询及完备等;电话询访则主要针对现场调查中不常见的机械类型。通常在此类调研之前,需明确目标调查机械的类型、使用用途和区域分布,再通过电话向相关单位(如机械销售处等)询问。此种方法所获取的数据准确度不如上述两种方法,但却是对调研数据的有效补充。此外,收集整理有关学者在工程机械活动水平方面的研究成果也是本研究完善工程机械活动水平数据库的另外一种手段。

由于工程机械的功能和种类繁多,且具有较强的区域性,在实际调查过程中无法兼顾所有的机械类型。因此,本研究根据文献^[2,15]中工程机械分类,重点关注常见的工程机械类型,并将调研类型划分为挖掘机、装载机、叉车、起重机、压路机、推土机、摊铺机、平地机和其他机械等 9 类。其中,其他机械指的是混凝土搅拌车、混凝土泵车、混凝土拖泵和混凝土车载泵等。

在分析活动水平数据之前,需对调研的数据进行质量控制后建立活动水平数据库,数据的质量控制主要是剔除条目不全和信息明显有误等数据。活动水平数据分析主要采用常见的统计方法描述机械的活动水平,例如均值和标准偏差,以及活动水平与其影响要素之间的关系曲线等。活动水平分析的内容主要包括:各类机械的年平均活动水平、活动水平的地区差异和活动水平与机械车龄之间的变化关系,分析方法详述如下。

(1) 各类机械的年均活动水平 按不同机械种类整理分析调研收集的活动水平数据。机械类型按上述的 9 大类划分而不再按功率或其他特性细分。对于不在上述划分前 8 类的机械,都归属于其他机械类。

(2) 同一机械活动水平的区域差异 本研究工程机械活动水平调研在全国范围内开展。对于同一类机械,如果存在实际的调研数据,则分地区进行对比,如果数据不存在,则结合文献的研究成果或现有的数据(例如文献^[16]给出的参考数值)进行对比分析。

(3) 活动水平与机械车龄的关系 由于实际的调研数据相对有限,特别是同一类机械中不同车龄的样本量相对较少。因此,为研究活动水平与机械车龄的关系,本研究先将所有工程机械车龄划分为 3

个车龄区间,即 0~3、4~6 和 7~9 a,对于任一车龄区间,不同车龄机械的活动水平用该区间的平均值替代,然后用一元二次方程拟合活动水平与机械车龄之间的关系,如式(1)所示:

$$y = ax^2 + bx + c \quad (1)$$

式中, a 、 b 和 c 表示拟合参数; x 表示机械车龄; a ; y 表示机械活动水平, $\text{h}\cdot\text{a}^{-1}$.

公式(1)的 a 和 b 两个系数对所有的工程机械均是一样.但为区分不同种类的工程机械,本研究通过改变 c 值来满足每类机械所有车龄(0~9 a)活动水平的均值与该类机械的平均活动水平一致.因此,不同种类工程机械的活动水平与车龄关系曲线的位置参数计算方法如式(2)所示:

$$c_i = \text{HRS}_i - \frac{a \sum_{0}^9 x^2 + b \sum_{0}^9 x}{10} \quad (2)$$

式中, c_i 表示 i 类机械活动水平与车龄关系曲线的位置参数; HRS_i 表示 i 类机械的年均活动水平, $\text{h}\cdot\text{a}^{-1}$.

则每类机械活动水平与车龄的关系曲线为式(3)所示:

$$y = ax^2 + bx + c_i \quad (3)$$

1.2 工程机械尾气排放清单估算及趋势分析

采用排放因子法估算的工程机械的尾气排放清单为机械保有量、活动水平和排放因子三者的乘积.本研究将工程机械划分为如上所述的 9 大类,并按这些分类预测其未来年份的保有量,结合调研和尾气排放实测结果确定相应车龄的活动水平和排放因子,估算尾气排放清单.本研究以 2015 年为基准年,并假设工程机械的使用年限为 10 a^[2].本部分的内容主要包括:①保有量车龄分布及预测;②活动水平确定;③排放因子数据获取及处理;④尾气排放清单估算方法.

1.2.1 保有量车龄分布及预测

本研究保有量数据主要来源于国家和行业统计年鉴^[2].年鉴给出了各类型工程机械 2006~2015 年间每年新增机械的数量.本研究假设新增机械在其被淘汰之前数量均保持不变,也即是在机械的使用年限内,其对应车龄的新增量与 2006~2015 年新增机械数量总和的比值就是该车龄的数量分布.例如,按文献[2]的数据,挖掘机在 2006 年的新增量为 70 018,而 2006~2015 年全国的挖掘机新增量为 1 246 008,因此,车龄为 9 a 的挖掘机占全部挖掘机的数量比为 5.6%.以此类推,即可估算其他车龄挖掘机占全部挖掘机的数量占比.但由于统计数据的不完整、使用年限有超过 10 a 的机械等的不确定

性,文献[2]中推荐将 2006~2015 年每年新增机械数量相加后,再增加 20% 才为 2015 年该类机械的全国保有量.

本研究利用 BP 神经网络模型^[13,14]预测 2018~2025 年中国工程机械的保有量.该模型的输入层有 3 个神经元,即施工面积、竣工面积和建筑业总产值,而输出层为工程机械保有量.具体的模型建立及验证方法在前期研究^[17]中已经介绍,这里不再赘述.但需要特别说明的是本研究将该模型变量数据更新至 2018 年,保有量数据更新至 2017 年,在具体的模型构建时,先用 2000~2015 年的数据搭建和训练神经网络模型,再用 2013~2017 年的数据进行模型验证.

1.2.2 活动水平确定

本研究使用式(1)~(3)的方法建立不同机械的活动水平与机械车龄之间的关系.在具体使用时,需要根据预测年份与基准年份确定该类机械的车龄并预测其相应地活动水平.

1.2.3 排放因子数据获取及处理方法

本研究使用 PEMS 测量了 47 台不同类型、不同功率和不同车龄的工程机械的尾气排放.机械的选择兼顾种类和其是否可供测量,具体的机械信息如表 1 所示.研究所用的 PEMS 由研究团队自己开发.该系统可实时报告逐秒的发动机参数数据、气体污染物质量排放速率和油耗速率,以及基于滤膜的间歇性的颗粒物平均质量排放速率(即两次滤膜更换之间的颗粒物排放).该系统用电化学传感器测量 NO 和 O₂ 的浓度;用非分散红外(NDIR)光学传感器测量 CO、CO₂ 和 HC 等浓度;用滤膜称重法测量颗粒物的质量排放;同时用温度、压力和转速传感器测量发动机进气口温度、尾气温度、主管压力和转速等.最后,整合上述各类数据,结合化学反应平衡和理想气体方程,估算各种污染物的质量排放数据^[18].此外,测量系统前期已经验证并应用于工程机械尾气的实际测量^[19,20],并取得较好的效果.该测量系统各气体的测量精度分别为:NO 3×10^{-6} ,CO 和 CO₂ 0.01%,HC 1×10^{-6} ;其他传感器的测量精度均经计量检定单位测试合格.测量相对误差分别为:NO $\pm 4\%$,CO、HC 和 CO₂ $\pm 5\%$.此外,为了确保仪器的正常工作,每次测量前后均采用标准气体对仪器进行标定.用于标定的标准气体浓度分别为:CO 8.02%,CO₂ 20.06%,C₃H₈ 1.603×10^{-6} ,NO 2.905×10^{-6} .

由于我国对工程机械的排放标准越来越严格,因此未来年份新增机械尾气污染物的排放因子与基准年有所差异.由于本研究中实测的各类型机械的

表 1 测量机械信息

Table 1 List of selected equipment in this study

序号	机械类型	生产厂家	机械型号	排放标准	出厂年份	气缸体积/L	额定功率/kW
1	挖掘机	韩国现代	H60-7	国 3	2014	3.054	66
		日本日立	ZX-230	国 2	2008	6.494	132.3
		韩国斗山	DH60-7	国 2	2010	3.054	38.1
		神钢	SK260LC	国 2	2008	5.123	137
		现代	H60-7	国 3	2014	3.054	40
		现代	275LC-9T	国 1	2002	8.3	186
		日立建机	ZX210K-8	国 1 前	2006	5.193	122
		神钢	SK260LC	国 1	2008	5.123	137
		斗山	DH225LC-7	国 1	2010	8.071	115
		神钢	260LC	国 2	2011	5.123	137
		竹内	TB150-C	国 1	2010	2.19	27.3
		现代	R60-7	国 2	2011	3.054	53.1
		杭州神钢	SK260LC-8	国 2	2009	5.123	131
		成都神钢	SK260LC-8	国 2	2009	5.123	137
		日本小松	PC400-7	国 2	2009	11.04	246
		日本小松	PC360-7	国 2	2011	8.27	180.5
2	装载机	成都成工	ZL30B	国 2	2008	6.75	81
		成都成工	ZL50E-3	国 2	2013	10	162
		成工	ZL30B-2	国 1	2007	6.557	86
		神工	ZL30	国 2	2009	3.8	65
		成工	ZL30B	国 1	2008	7.127	86
		成工	ZL30B	国 1	2008	7.127	86
		合力	FD40Z	国 2	2014	3.168	45
		浙江美斯科	FD35	国 2	2011	2.67	40
		浙江美斯科	FD60T	国 1	2010	5.785	81
		浙江美斯科	FD35	国 2	2013	2.67	40
		上海龙工	LG100DTIC	国 1	2008	6.494	84.4
		浙江美斯科	FD35T	国 2	2014	2.67	40
3	叉车	浙江美斯科	FD35T	国 3	2011	2.67	40
		上海龙工	FD35-2	国 3	2016	2.156	36.8
		安徽梯西埃姆	FD30T3C	国 2	2009	3.168	45
		合力	CPCD30	国 1 前	2004	2.67	40.9
		龙工	FD35	国 2	2009	2.67	40
		安徽合力	CPC30	国 3	2007	6.871	92
		徐工	XZJ4403JQ250K	国 3	2009	9.726	247
		徐工	XZJ5160JQZ12	国 1	2003	8.27	152
		徐工	XAJ5164JQZ12	国 3	2009	8.27	170
		徐工	XZJ5164JQZ12	国 2	2010	8.27	170
4	汽车起重机	徐工	XZJ5164JQZ12	国 2	2011	8.27	170
		四川长江牌	QZC5102JQZQY8F	国 1	2008	4.257	105
		江苏徐工	XS262J	国 2	2012	8.3	140
		江苏徐工	XP301	国 2	2012	8.27	132
		美国悍马	HD130	国 2	2012	4.764	98
		厦工	XG6202M	国 1 前	2004	6.871	128
		山东山推	SD22	国 1	2007	14	162
		四川眉山新筑	MT9000C	国 2	2012	8.3	160
8	平地机	广西柳工	CLG-416	国 2	2010	8.3	125

排放因子随车龄升高的趋势较弱,因此本研究假设在基准年,不同车龄的机械排放水平保持一致,且使用实际测量的平均值.但文献[21]规定,2016年起,新增机械实施国3排放标准,2020年起,新增机械实施国4排放标准.因此,本研究假设对于没有实

测结果的未来年份的机械的尾气排放水平严格遵守相关的排放标准要求,即2016~2020年之间,新增机械在其使用年限内均满足国3排放标准,2020~2025年新增机械的排放因子均满足国4排放标准.满足国3和国4排放标准的各类机械在其使用年限

内的排放因子均采用文献[1,22]中排放因子的推荐值. 这些研究的排放因子主要参考文献[12,16]的推荐值. 就满足不同排放标准的测量机械对应的排放因子而言, 国3排放阶段的CO、HC和NO排放因子分别比国2阶段降低6%、16%和31%, PM_{2.5}基本无降低; 而国4排放阶段的CO、HC和NO排放因子基本无降低, PM_{2.5}比国3阶段降低33%.

1.2.4 尾气排放清单估算方法

由于工程机械的工作环境复杂多样, 不同机械的操作工况和发动机功率差别较大, 其相应地尾气排放存在着较大的变化性. 相关研究表明, 采用基于油耗的排放清单比基于时间的排放清单具有较小的变化性^[23,24], 因此, 本研究采用基于油耗的排放因子估算尾气排放清单, 计算方法如式(4)所示:

$$E_k = \sum (\text{Pop}_{i,j,l} \times \text{FR}_{i,j,l} \times \text{HRS}_{i,j,l} \times \text{EF}_{i,j,k,l}) \times 10^{-7} \quad (4)$$

式中, E_k 为 k 类污染物的排放总量, 万 t; Pop 为机械的保有量, 台; i 为机械类型, j 为年份, l 为机械车龄; FR 为机械的小时油耗, $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$; HRS 为机械的年均活动水平, $\text{h} \cdot \text{a}^{-1}$; EF 为基于油耗的排放因子, $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$.

2 结果与讨论

本部分主要介绍利用工程机械活动水平实际调研和尾气排放实测结果, 分析我国工程机械的使用特征以及其尾气排放水平和变化趋势.

2.1 工程机械使用特征

本研究在全国各地区共调研工程机械 385 台, 对不能使用和条目不全的数据进行剔除后, 剩余有效数据 374 条. 其中叉车 25 台, 挖掘机 77 台, 装载机 52 台, 起重机 64 台, 压路机 38 台, 推土机 28 台, 摊铺机 10 台, 平地机 22 台, 其他机械 58 台. 本部分内容主要介绍: ①不同类型工程机械活动水平; ②活动水平的地区性差异; ③工程机械活动水平与车龄关系.

2.1.1 不同类型工程机械活动水平

如图1所示, 工程机械的年平均活动水平随机械类型的不同而有所不同, 可以从 $1\,439 \text{ h} \cdot \text{a}^{-1}$ 变化至 $4\,332 \text{ h} \cdot \text{a}^{-1}$. 其中, 摊铺机的年均活动水平最小, 约为 $1\,439 \sim 2\,005 \text{ h} \cdot \text{a}^{-1}$, 其他机械的年均活动水平最大, 约为 $3\,167 \sim 4\,332 \text{ h} \cdot \text{a}^{-1}$, 这是由于摊铺机主要用于高速公路上各种材料的摊铺作业, 使用功能单一, 且有规定速度, 累积工作时间受限; 而其他机械主要由混凝土机械构成, 其为生产建筑过程中所需混凝土的设备, 需求大, 使用多. 挖掘机的年均活动水平在所有机械类型中变化范围最小, 为 $1\,795 \sim 2\,171 \text{ h} \cdot \text{a}^{-1}$, 平地机的年均活动水平变化范围最大, 为 $1\,578 \sim 3\,526 \text{ h} \cdot \text{a}^{-1}$, 这可能与机械功能和调研数量等有关.

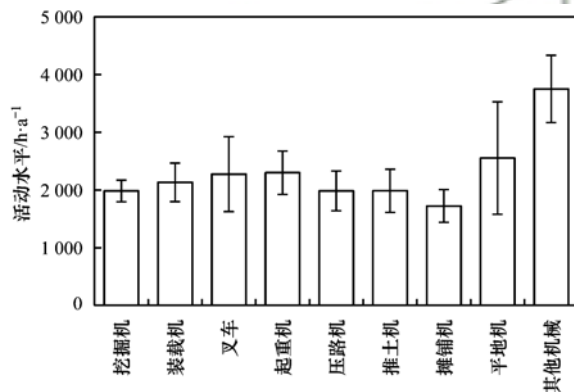


图1 不同类型工程机械活动水平

Fig. 1 Activities of different construction equipment

2.1.2 活动水平的地区性差异

本研究中西南地区活动水平的调研主要采取问卷调查的方式, 而华北及西北地区则采用问卷调查与电话访谈相结合的形式进行. 如表2所示, 从相同类别的工程机械活动水平的调研结果来看, 活动水平存在着较大的地区差异. 例如, 华北地区挖掘机的平均活动水平高于西南和西北地区, 原因可能是由于调研区域主要在山西, 矿产资源丰富, 挖掘机使用较多. 在不同的研究中同一地区同一机械类型活动

表2 不同区域工程机械年均活动水平¹⁾/ $\text{h} \cdot \text{a}^{-1}$

Table 2 Annual activity of construction equipment in different regions/ $\text{h} \cdot \text{a}^{-1}$

序号	机械类型	本研究				指南 ^[16]	西南 ^[11]	华北/西北 ^[4]	华东 ^[1]
		西南	华北	西北	平均值				
1	挖掘机	1 666	2 513	1 770	1 983	770	1 279	1 800	1 580
2	装载机	2 131	—	—	2 131	770	872	1 100	1 261
3	叉车	2 274	—	—	2 274	770	815	—	950
4	起重机	2 299	—	—	2 299	770	682	—	1 826
5	压路机	1 474	2 492	—	1 983	770	545	—	617
6	推土机	1 987	—	—	1 987	770	815	—	1 261
7	摊铺机	694	2 750	—	1 722	770	—	—	559
8	平地机	2 552	—	—	2 552	770	—	—	1 261
9	其他机械	4 848	2 650	—	3 749	770	—	—	1 505

1) “—”表示无调研数据

水平的调研结果均有差别,最大的差别可达 3 倍以上. 总体上,本研究确定的各类机械年均活动水平高于文献[16]及其他研究中推荐的小时数,这与调研区域、工地类型和作业内容等有关.

目前文献[16]对所有的工程机械只给出一个活动水平,但实际调研结果表明,随着作业类型与区域的不同,其活动水平将会出现大的波动. 这充分说明,为提高排放清单估算的精准度,需要加强本地化活动水平的调研.

2.1.3 工程机械活动水平与车龄的关系

如图 2 所示,工程机械年均活动水平通常随着车龄的增大呈现明显的减小趋势.

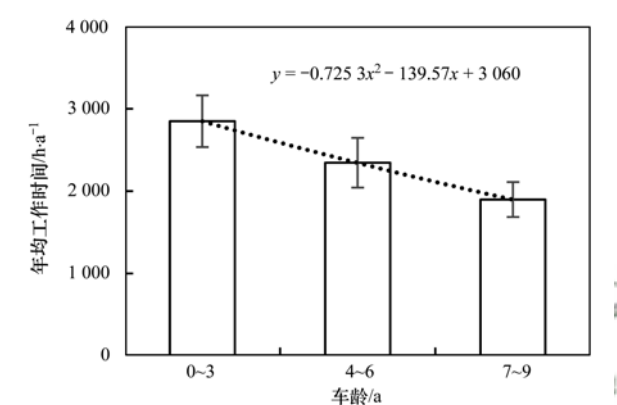


图 2 不同车龄段工程机械的年均活动水平
Fig. 2 Activity of different age sections

但在具体预测不同类型机械不同车龄下的活动时,需首先根据图 2 中的公式系数值与式(2)对式(3)中的 c 值进行估算. 不同机械活动水平与车龄关系曲线各参数如表 3 所示.

表 3 不同机械活动水平与车龄关系曲线参数¹⁾

Table 3 Parameters of curve between activity and age for different equipment

序号	机械类型	$y = ax^2 + bx + c$ 曲线参数		
		a	b	c
1	挖掘机	-0.725 3	-139.57	2 632
2	装载机	-0.725 3	-139.57	2 780
3	叉车	-0.725 3	-139.57	2 923
4	起重机	-0.725 3	-139.57	2 948
5	压路机	-0.725 3	-139.57	2 632
6	推土机	-0.725 3	-139.57	2 636
7	摊铺机	-0.725 3	-139.57	2 371
8	平地机	-0.725 3	-139.57	3 201
9	其他机械	-0.725 3	-139.57	4 398

1) y 为机械的年均活动水平, $\text{h} \cdot \text{a}^{-1}$; x 为机械车龄, a

2.2 工程机械尾气排放趋势

本部分内容主要介绍:①工程机械保有量车龄分布与预测结果;②活动水平结果分析;③各类工程机械排放因子结果分析;④排放清单估算;以及⑤不确定性分析.

2.2.1 工程机械保有量车龄分布与预测结果

(1) 2015 年各类工程机械车龄分布

2015 年中国工程机械保有量约为 690 万台^[2], 各类机械的保有量占比及估算的车龄分布如表 4 所示. 其中,叉车、装载机和挖掘机是保有量较大的三类机械,分别占工程机械总保有量的 31.9%、25.6% 和 22.9%. 因此,在研究工程机械尾气排放时,应该更多地关注叉车、装载机和挖掘机等保有量较大从而尾气排放相对较大的工程机械. 在后续工程机械保有量的预测分析中,本研究假设各类工

表 4 2015 年各类工程机械保有量占比及车龄分布¹⁾/%

Table 4 Population percentage and the corresponding age distribution of different construction equipment in 2015/%

序号	类型	保有量占比	车龄/a									
			0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	挖掘机	22.9	4.6	8.3	10.2	10.4	17.4	17.3	9.8	8.7	7.7	5.6
2	装载机	25.6	3.1	8.3	10.3	9.8	15.8	14.6	9.7	9.7	10.0	8.7
3	叉车	31.9	11.7	13.6	13.0	11.6	13.9	11.2	6.7	6.8	6.7	4.7
4	起重机	9.8	4.2	10.4	13.6	12.2	15.5	13.9	10.1	7.3	8.4	4.4
5	压路机	1.8	7.3	9.8	11.0	10.8	10.4	17.4	14.9	4.4	7.2	6.9
6	推土机	1.1	3.1	6.8	8.8	9.9	15.8	19.1	11.5	8.6	8.2	8.1
7	摊铺机	0.3	9.5	7.8	9.9	9.0	18.9	18.4	6.6	6.3	6.7	6.9
8	平地机	0.7	9.7	10.7	11.6	14.0	12.0	9.6	11.5	10.3	6.0	4.7
9	其他机械	5.9	10.3	14.5	16.5	14.9	15.9	11.6	7.5	3.6	3.2	3.1

1) 基准年为 2015 年, 0 a 为 2015 年投入使用, 9 a 为 2006 年投入使用

程机械的保有量占比保持不变.

不同的机械类型,保有量的车龄分布不同. 总体上,车龄 4~5 a 的机械最多,约占工程机械总保有量的 30%. 与总体不同的是,车龄 1~2 a 的叉车保有量超过车龄为 5 a 的叉车. 平地机与其他机械保

有量多集中在 2~4 a.

(2) 工程机械保有量预测结果

本研究采用 2013~2017 年模型变量及保有量的数据检验构建的工程机械保有量 BP 神经网络预测模型. 结果表明,预测的保有量的相对误差较小,

分别为 0.85%、0%、0%、0.29% 和 1.44%，都在可以接受的范围之内。

我国工程机械 2000 ~ 2025 年的历史和预测保有量如图 3 所示。2000 ~ 2014 年正是我国经济建设高速增长的时期，与此相对应，这些年间的工程机械的数量增长速度较快。2015 年以后，与我国乃至世界的经济发展趋势一致，工程建设相对趋于平缓，相对应工程机械的数量增长也相对稳定。

2.2.2 活动水平结果分析

由图 2 中公式可以计算出，工程机械车龄每增加 1 a，其相应的活动水平可减少约 140 ~ 150 h。依据表 3 估算而得的各类工程机械在不同车龄下的活动水平如表 5 所示。由于我国现有的工程机械排放标准以及减排政策中，几乎未涉及对工程机械工作

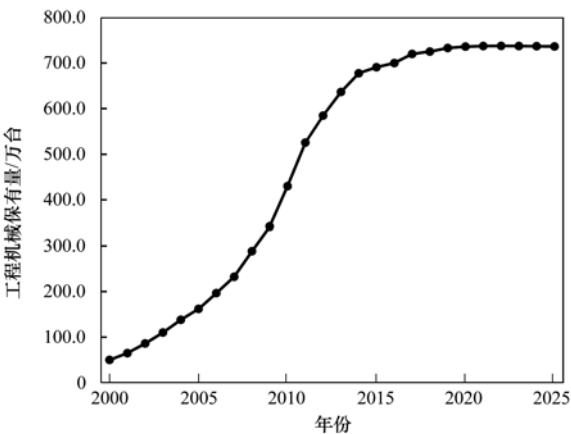


图 3 我国工程机械 2000 ~ 2025 年保有量

Fig. 3 Construction equipment population for 2000-2025

时间的限制，因此，未来年份新增工程机械的年均活动水平随车龄的变化与基准年一致。

表 5 各类型工程机械不同车龄活动水平/h·a⁻¹

Table 5 Activity at different ages for different construction equipment/h·a⁻¹

序号	机械类型	机械车龄/a									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	挖掘机	2 632	2 491	2 350	2 206	2 062	1 916	1 768	1 619	1 469	1 317
2	装载机	2 780	2 639	2 498	2 354	2 210	2 064	1 916	1 767	1 617	1 465
3	叉车	2 923	2 782	2 641	2 497	2 353	2 207	2 059	1 910	1 760	1 608
4	起重机	2 948	2 807	2 666	2 522	2 378	2 232	2 084	1 935	1 785	1 633
5	压路机	2 632	2 491	2 350	2 206	2 062	1 916	1 768	1 619	1 469	1 317
6	推土机	2 636	2 495	2 354	2 210	2 066	1 920	1 772	1 623	1 473	1 321
7	摊铺机	2 371	2 230	2 089	1 945	1 801	1 655	1 507	1 358	1 208	1 056
8	平地机	3 201	3 060	2 919	2 775	2 631	2 485	2 337	2 188	2 038	1 886
9	其他机械	4 398	4 257	4 116	3 972	3 828	3 682	3 534	3 385	3 235	3 083

2.2.3 各类型工程机械排放因子分析

本研究使用 PEMS 系统测量的工程机械数量相对较少，其集中在挖掘机、装载机和叉车等。对于测量样本数较多的几类机械，其排放因子采用实测的结果。对于测量样本数量较少的机械，例如压路机、平地机、摊铺机和推土机等，其排放因子为这几类机械实际测量结果的平均值。这里需要指出的，有研究表明，非道路机械的尾气排放受多种要素影响^[24]，包括机械类型、车龄、引擎技术、作业内容、运行工况和环境要素等。如表 6 所示，工程机械类型不同，其排放水平将出现一定的变化性。本研究挖掘机、装载机和叉车单位油耗的 NO 实测排放因子分别为：11.0 ~ 31.0、6.9 ~ 58.7 和 18.8 ~ 31.6 g·kg⁻¹，以装载机的排放变化率最大，叉车的排放变化率最小。而对 PM_{2.5}而言，叉车的排放因子最大，分别是挖掘机和装载机排放因子的 1.8 和 1.6 倍。当然，如表 7 所示，排放标准不同，其排放水平也会有所差异。从理论上讲，随着排放标准的提升，各污染物排放水平呈下降趋势，但由于本研究中每一类型机械如按照功率和排放标准划分后，其测试样本量

很少，详细划分后排因子变化性较大且无法全面描述相应机械的代表性排放水平。

此外，也由于测试机械数量相对较少，按不同类型划分之后，不同车龄的机械数量少之又少，因此导致机械尾气排放与车龄之间的关系不明显。例如图 4 所示，各类机械的 NO 和 PM_{2.5}排放与车龄呈离散关系。随着车龄的增加，其相应尾气排放的增加趋势并不明显。排放相对较大的车龄段主要集中在 5 ~ 9 年之间。这可能与这些车龄的机械较其他车龄段使用更为频繁，引擎的劣化程度较高等有关。由于本研究主要关注的是工程机械的使用特征，特别是保有量和活动水平的变化趋势，以及这些使用特征对排放清单估算的影响，因此，为量化工程机械的保有量和活动水平变化对尾气排放清单估算的影响，本研究假设工程机械的尾气排放水平由其满足的排放标准决定且不受车龄的影响。当然，尾气排放实测数据存在较大的变化性同时也说明继续加强非道路机械尾气排放实测研究和完善其排放因子数据库的重要性。

本研究同时对比了已有的国内外排放因子测试

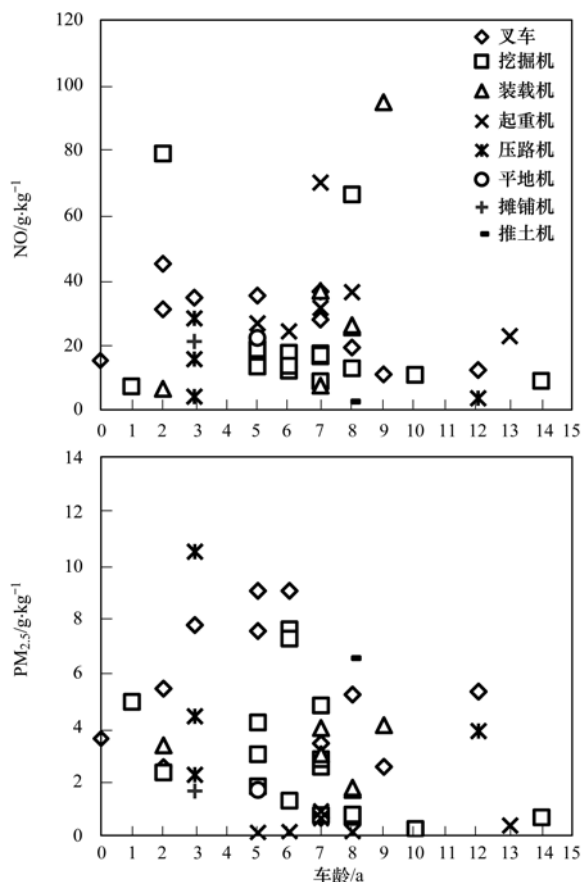


图4 不同车龄工程机械 NO 和 PM_{2.5} 排放因子
Fig. 4 NO and PM_{2.5} emissions factors of construction equipment at different ages

结果,从表6中可以看出,各个研究之间所得到的平均排放因子相差较大,这主要是由于目前缺乏统一的测试方法和规范,而且不同的研究测试设备不尽相同,测试对象的选取也有所差异.例如:各研究NO的测量方法多样,本研究与文献[24]均使用电化学传感器,而文献[25]则采用非分散紫外(NDUV)传感器;对PM,本研究采用滤膜称重法,而文献[24,25]均采用激光散射法.在测试对象的选取上,由于测量研究开展的时间不同,所选择机械的生产年份也有所差异,例如,本研究测量机械的生产年份大都在2007~2014年,而本文罗列的其他研究^[23~25]的测量机械的生产年份相对较老,因此,其排放也相对较本研究高.此外,造成同一类型机械尾气排放存在差异的原因还有很多,包括:作业内容、引擎技术和功率大小、驾驶员的操作习惯、作业环境和不同辅助作业工具的使用等.就挖掘机的NO排放因子而言,本研究结果范围(11.0~31.0 g·kg⁻¹)低于各类研究的范围内(31.1~54.9 g·kg⁻¹),尽管该范围低于同类研究的高值区,但实际测试过程中也存在高NO的作业工况,所以NO结果范围的偏低一方面可能是由于测试机械本身活

动及作业内容引起,另一方面可能是由于近年非道路机械排放标准收严引起.就PM_{2.5}来说,本研究挖掘机结果范围(1.8~4.0 g·kg⁻¹)处于同类研究范围内(0.3~6.6 g·kg⁻¹),且处于中值区.对装载机,与挖掘机相同,本研究NO排放因子结果范围(6.9~58.7 g·kg⁻¹)低于同类研究(42.6~83.4 g·kg⁻¹)或处于低值区,PM_{2.5}排放因子结果范围(2.2~4.2 g·kg⁻¹)基本处于同类研究范围内(0.3~4.0 g·kg⁻¹).

表6 不同研究工程机械排放因子对比¹⁾/g·kg⁻¹

Table 6 Comparison of emission factors of construction equipment in different studies/g·kg⁻¹

机械类型	文献	排放因子			
		CO	HC	NO	PM _{2.5}
挖掘机	本研究	8.1	2.2	21	2.9
	[23]	12.9	1.3*	54.9	6.6
	[24]	11.7	3.3	31.1	1.4 [#]
	[25]	7.9	6.0	42.6	0.3 [#]
	[4]	NA	NA	52.5	3.8 [#]
	[26]	14.5	NA	50.3	2.3 [#]
装载机	本研究	21.6	3.5	32.8	3.2
	[23]	21.4	1.2*	60.1	4.0
	[24]	17.5	7.6	83.4	1.5 [#]
	[25]	11.0	6.0	42.6	0.3 [#]
	[4]	NA	NA	52.5	3.8 [#]
	[26]	14.5	NA	50.3	2.3 [#]
叉车	本研究	16.8	6.5	25.4	5.2
	[23]	23.5	0.9*	59.1	2.7
	[4]	NA	NA	52.5	3.8 [#]
	[26]	14.5	NA	50.3	2.3 [#]
起重机	本研究	11.7	2.0	35.2	0.4
	[4]	NA	NA	52.5	3.8 [#]
	[26]	14.5	NA	50.3	2.3 [#]
压路机	本研究	12.2	2.6	12.9	4.2
	[4]	NA	NA	52.5	3.8 [#]
	[26]	14.5	NA	50.3	2.3 [#]
平地机	本研究	12.2	2.6	12.9	4.2
	[4]	NA	NA	52.5	3.8 [#]
	[26]	14.5	NA	50.3	2.3 [#]
摊铺机	本研究	12.2	2.6	12.9	4.2
	[4]	NA	NA	52.5	3.8 [#]
	[26]	14.5	NA	50.3	2.3 [#]
推土机	本研究	12.2	2.6	12.9	4.2
	[22]	12.9	1.3*	54.9	6.6
	[4]	NA	NA	52.5	3.8 [#]
	[26]	14.5	NA	50.3	2.3 [#]
其他机械	本研究	12.2	2.6	12.9	4.2
	[4]	NA	NA	52.5	3.8 [#]
	[26]	14.5	NA	50.3	2.3 [#]

1) 文献[4, 26]研究的机械类型为工程机械,故所有类型机械的排放因子采用同一数值; * 表示 VOC 的值, # 表示颗粒物 PM 的值, 而非 PM_{2.5}

表 7 工程机械不同排放标准下的排放因子/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 7 Emission factors of construction equipment in different emission standards/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

机械类型	功率范围 /kW	排放标准	测试数量	CO			HC			NO			PM _{2.5}		
				怠速	行走	作业	怠速	行走	作业	怠速	行走	作业	怠速	行走	作业
挖掘机	$P<37$	国 1	1	12.1	5.9	5.3	3.5	0.1	3.8	13.4	14.2	13.6	2.3	7.6	8.0
	$37\leq P<75$	国 2	2	21.2	14.1	13.3	3.5	2.6	3.4	13.9	16.4	15.5	13.8	5.4	4.8
		国 3	2	28.9	12.3	11.3	9.6	0.9	0.8	19.9	49.0	45.3	3.6	2.3	3.9
	$75\leq P<130$	国 1 前	1	7.6	4.7	3.7	2.0	0.6	0.9	9.4	10.8	11.1	0.1	0.1	0.4
		国 1	1	10.2	2.9	2.6	3.0	1.2	1.3	22.6	17.8	16.9	0.4	1.7	1.4
	$P\geq 130$	国 1	2	8.3	9.4	6.0	2.4	0.9	0.9	14.9	9.1	10.5	0.2	0.5	0.9
		国 2	7	14.5	15.9	5.9	4.3	2.3	2.4	20.1	32.8	22.4	1.1	3.1	2.5
	$37\leq P<75$	国 2	1	32.9	12.0	38.0	1.5	11.3	8.5	30.8	40.0	39.4	1.0	1.9	2.4
装载机	$75\leq P<130$	国 1	3	16.2	14.2	23.9	3.4	2.7	3.5	36.7	56.2	53.8	1.4	2.7	6.7
		国 2	1	—	—	15.6	—	—	2.9	—	—	7.6	—	—	3.4
	$P\geq 130$	国 2	1	43.5	32.3	23.1	3.5	1.8	0.4	3.2	9.0	7.7	5.4	4.7	1.9
	$P<37$	国 3	1	19.0	10.3	16.2	7.9	3.1	0.9	14.7	15.6	15.4	1.1	4.8	3.5
叉车	$37\leq P<75$	国 1 前	1	43.7	9.6	26.3	14.2	12.0	10.9	8.8	10.1	14.9	4.9	1.3	8.1
		国 2	6	17.1	14.2	11.0	7.5	5.3	5.7	35.7	28.9	38.7	2.5	7.6	3.3
		国 3	1	16.3	19.7	14.6	7.8	5.6	3.3	28.7	15.4	22.6	6.4	6.5	11.4
	$75\leq P<130$	国 1	2	27.3	23.7	16.7	6.4	6.6	3.6	15.9	20.7	13.7	1.7	15.3	3.4
		国 3	1	42.1	26.4	27.1	10.1	14.2	13.5	11.6	10.0	11.6	3.3	3.2	1.9
	$75\leq P<130$	国 1	1	10.3	10.4	6.2	1.8	2.6	4.5	37.5	24.8	35.6	0.1	2.3	0.2
汽车起重机	$P\geq 130$	国 1	1	11.8	9.7	7.4	1.5	2.9	4.1	28.9	21.3	19.0	0.2	0.9	0.5
		国 2	2	11.2	17.2	7.3	3.3	5.6	3.1	20.4	32.6	28.7	0.5	1.5	0.2
		国 3	2	19.3	10.6	16.7	0.3	0.3	0.2	44.0	37.2	54.8	0.9	1.1	0.7
	$75\leq P<130$	国 1 前	1	9.0	4.8	4.5	5.1	5.7	2.8	27.3	26.5	28.5	0.7	5.8	11.2
压路机	$P\geq 130$	国 2	1	6.1	—	14.0	2.1	—	0.2	3.9	—	4.3	3.4	—	4.4
推土机	$P\geq 130$	国 2	2	26.3	18.2	20.9	0.6	2.6	0.9	16.3	16.7	14.1	5.1	2.9	2.4
摊铺机	$P\geq 130$	国 1	1	—	22.7	34.9	—	9.2	9.6	—	1.9	2.7	—	3.5	6.6
平地机	$75\leq P<130$	国 2	1	15.4	8.2	11.2	8.1	2.2	1.5	31.2	23.0	20.8	0.8	1.0	1.8
				45.1	15.5	5.5	7.1	5.6	1.4	20.1	26.5	21.7	5.7	4.4	1.3

2.2.4 排放清单估算结果

根据前期所收集的数据,采用基于油耗的排放因子法,同时考虑机械车龄对工程机械活动水平的影响,本研究建立了我国 2015 年工程机械的尾气排放清单,并与国家发布的 2015 年工程机械排放清单对比,详见表 8. 其中,挖掘机和装载机的 NO 排放贡

献率最大,分别为 33.7% 和 26.0%. 虽然叉车的保有量较挖掘机和装载机多,但排放贡献率比挖掘机和装载机小,NO 的贡献率仅为 6.4%. 对 PM_{2.5} 而言,挖掘机的贡献率最大,为 27.8%,其次是装载机,贡献率为 15.4%. 这说明挖掘机和装载机是工程机械尾气减排的重点关注机械类型.

表 8 2015 年各类型工程机械排放清单对比¹⁾/万 t

Table 8 Comparison of emission inventory of different construction equipment/ 10^4 t

序号	机械类型	CO	HC		NO		PM _{2.5}	
		本研究	本研究	文献[15]	本研究	文献[15]	本研究	文献[15]
1	挖掘机	44.8	12.0	9.1	116.5	62.7	16.0	4.4
2	装载机	59.2	9.5	13.9	90.0	96.6	8.9	5.5
3	叉车	14.6	5.6	5.6	22.0	35.7	4.5	2.9
4	起重机	10.2	1.8	—	30.7	—	0.4	—
5	压路机	9.3	2.0	0.8	9.9	5.4	3.2	0.4
6	推土机	5.5	1.2	0.5	5.8	3.7	1.9	0.3
7	摊铺机	1.4	0.3	0.1	1.4	0.6	0.5	0.1
8	平地机	4.7	1.0	0.2	5.0	1.5	1.6	0.1
9	其他机械	60.2	12.8	—	63.9	—	20.6	—
合计		209.9	46.2	30.20	345.2	206.20	57.4	13.50

1) “—”表示无相关数据

本研究估算的我国 2015 年工程机械 CO、HC、NO 和 $PM_{2.5}$ 排放量分别为 209.9、46.2、345.2 和 57.4 万 t。各污染物排放量比文献[15]估算数据偏大,这主要是由于本研究调研的工程机械活动水平比文献[16]推荐值大。另一方面凸显了对工程机械在现实工况下调研和实测以获取相对准确的活动水平及尾气排放因子的必要性。

如前所述,污染物排放清单的准确估算是减排控制的基础。而预测未来的尾气排放趋势更是对制定尾气控制措施有重大意义。因此,本部分的主要内容是通过上述章节预测的未来工程机械保有量和排放标准的提升带来的排放因子变化,对我国 2020~2025 年工程机械的尾气排放清单进行预测。

预测结果如图 5 所示,CO、HC 和 $PM_{2.5}$ 的排放呈下降趋势,NO 的排在 2020 年左右达到峰值。到 2020 年,CO、HC 和 $PM_{2.5}$ 排放分别比 2015 年下降 3.6%、2.4% 和 33.1%; 到 2025 年,CO、HC 和 $PM_{2.5}$ 排放分别比 2015 年下降 10.1%、7.1% 和 64.7%。排放标准提升是排放下降的主要原因。2020 年与 2025 年的 NO 排放分别比 2015 年上升了 21.9% 和 19.4%,但 2025 年比 2020 年的 NO 排放减少了 2.0%。因此,加严工程机械排放标准尤其是 NO 的排放限值及继续加快老旧机械的淘汰对减少工程机械的污染物排放尤为重要。

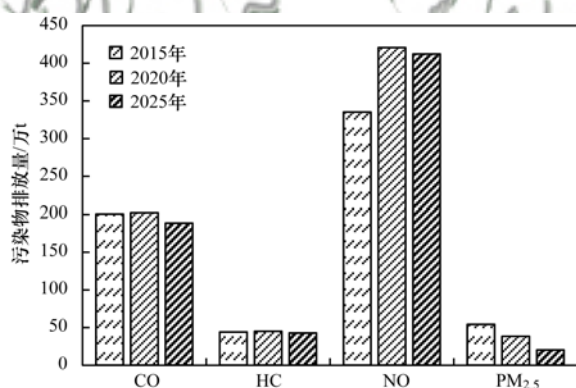


图 5 工程机械 2015~2025 年排放清单

Fig. 5 Emission inventory of construction equipment for 2015-2025

2.2.5 不确定性分析

工程机械排放清单在我国的研究起步较晚,本地化数据积累较少,不确定性主要来自于工程机械的保有量、活动水平和排放因子这 3 个部分。

本研究中保有量数据来自于国家统计局年鉴,具有较小的不确定性;年均工作小时数来源于实际调研,尽管对调研数据进行了筛选,但可能由于数据量有限引起不确定性。另外,排放因子数据来源于部分工程机械现实工况下的尾气测量,但由于测量数量有限,新增机械的排放因子参考了文献[16]或其他

研究中推荐使用的数据,而机械类型、使用时长、燃油品质、工作工况、排放标准和生产厂家等都能导致排放因子发生较大的变化,因此,排放因子也是导致清单不确定性的来源。目前,已经有不少学者对工程机械中占比较大的挖掘机和装载机进行了排放因子测试研究,但其他种类机械的尾气排放实测研究还很少,为了提高排放清单的准确性,需要加强对挖掘机和装载机外其他机械的实测研究。

3 结论

(1) 经实际调研数据分析,工程机械作业类型不同,其活动水平有所差异,最大差别达 1.9 倍。不同的区域其活动水平的调研结果也有差别,最大的差别可达 3 倍以上。因此,为提高排放清单估算的精准度,需要继续加强本地化活动水平的调研。

(2) 整体上,工程机械活动水平随着车龄的增大呈减小趋势,车龄每增加 1 a,其年活动水平平均减少约 150 h。这说明工程机械越老旧,使用频率越低。

(3) 研究估算了 2015 年中国工程机械 CO、HC、NO 和 $PM_{2.5}$ 的尾气排放清单,排放量在 46~345 万 t 不等,以 NO 最大,CO 次之,HC 最小。在所有工程机械类型中,挖掘机的污染物贡献最大。

(4) 经预测,2015 年后,我国工程机械保有量增速放缓,工程机械的尾气污染物排放量将呈现下降趋势。到 2020 年,CO、HC 和 $PM_{2.5}$ 的排放量将比 2015 年下降 2.4% 至 33.1% 不等,以 $PM_{2.5}$ 降幅最大;至 2025 年,排放量也将比 2015 年进一步减少 7.1% 至 64.7% 不等。同样以 $PM_{2.5}$ 降幅最大。而 NO 的排放将在未来一些年份里稍有增加,但 2020 年后逐渐下降。由于道路移动源排放控制日益严格,其对移动源的尾气排放贡献将逐年减少,而相比之下,非道路工程机械的尾气排放贡献将在未来年份日渐突出。

参考文献:

- [1] 黄成,安静宇,鲁君. 长三角区域非道路移动机械排放清单及预测[J]. 环境科学, 2018, **39**(9): 3965-3975.
Huang C, An J Y, Lu J. Emission inventory and prediction of non-road machineries in the Yangtze River Delta Region, China [J]. Environmental Science, 2018, **39**(9): 3965-3975.
- [2] 中国机械工业年鉴编辑委员会. 中国工程机械工业年鉴[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.
- [3] 樊守彬,田灵娣,张东旭,等. 北京市机动车尾气排放因子研究[J]. 环境科学, 2015, **36**(7): 2374-2380.
Fan S B, Tian L D, Zhang D X, et al. Emission factors of vehicle exhaust in Beijing[J]. Environmental Science, 2015, **36**(7): 2374-2380.
- [4] 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, **33**(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, **33**(2): 518-524.
- [5] 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.
- [6] 李明月. 移动污染源排放清单研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016. 34-39.
- [7] 隗潇. 京津冀非道路移动源排放清单的建立[A]. 第十七届二氧化硫氮氧化物、汞污染防治技术暨细颗粒物(PM_{2.5})控制与监测技术研讨会论文集[C]. 杭州: 中国环境科学学会, 2013. 231-237.
- [8] 张景文, 咸月, 陈报章. 南昌市移动源排放清单研究[J]. *环境科学学报*, 2017, **37**(7): 2449-2458.
- Zhang J W, Xian Y, Chen B Z. Study on the emission inventory from mobile source in Nanchang [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(7): 2449-2458.
- [9] 卞雅慧, 范小莉, 李成, 等. 广东省非道路移动机械排放清单及不确定性研究[J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(6): 2167-2178.
- Bian Y H, Fan X L, Li C, *et al.* A sector-based emission inventory and its uncertainty from non-road mobile machinery in Guangdong Province, China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(6): 2167-2178.
- [10] 解淑霞, 唐祎骥, 陈秋宇, 等. 成都市非道路施工机械排放清单研究[J]. *环境科学学报*, 2019, **39**(9): 2889-2895.
- Xie S X, Tang Y S, Chen Q Y, *et al.* Emission inventory of non-road construction machinery in Chengdu [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39**(9): 2889-2895.
- [11] 范武波, 陈军辉, 李媛, 等. 四川省非道路移动源大气污染物排放清单研究[J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(12): 4460-4468.
- Fan W B, Chen J H, Li Y, *et al.* Study on the non-road mobile source emission inventory for Sichuan province [J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(12): 4460-4468.
- [12] United States Environmental Protection Agency. User's guide for the final NONROAD2005 model [R]. Washington D. C.: United States Environmental Protection Agency, 2005.
- [13] Liu M, Pang Y L, Xiang W. The Population Prediction based on Grey Model and BP Neural Networks [A]. In: 2nd International Conference proceedings on Mechatronics Engineering and Information Technology (ICMEIT 2017) [C]. Paris: Atlantis Press, 2017. 299-303.
- [14] 王栋. 基于灰色关联和BP神经网络的汽车保有量预测[J]. *计算技术与自动化*, 2015, **34**(1): 29-33.
- Wang D. Prediction of car ownership based on grey relational analysis and BP neural network [J]. *Computing Technology and Automation*, 2015, **34**(1): 29-33.
- [15] 环境保护部. 中国机动车环境管理年报 2017 [R]. 北京: 环境保护部, 2018.
- [16] 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].
- [17] 庞凯莉, 张凯山, 第宝锋, 等. 中国农业与工程机械尾气减排控制措施的费效分析[J]. *中国环境管理*, 2019, **11**(2): 55-61.
- Pang K L, Zhang K S, Di B F, *et al.* Cost-benefit analysis of emission control measures for agricultural and industrial equipment in China [J]. *Chinese Journal of Environmental Management*, 2019, **11**(2): 55-61.
- [18] 张凯山. 机动车尾气测量与预测 [M]. 北京: 科学出版社, 2012. 21-25.
- [19] Li Z, Zhang K S, Pang K L, *et al.* A fuel-based approach for emission factor development for highway paving construction equipment in China [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2016, **66**(12): 1214-1223.
- [20] 马帅, 张凯山, 王帆, 等. 现实工况下挖掘机尾气排放特征分析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(4): 1670-1679.
- Ma S, Zhang K S, Wang F, *et al.* Characterization of tailpipe emissions from in-use excavators [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(4): 1670-1679.
- [21] 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].
- [22] 鲁君, 黄成, 胡馨遥, 等. 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[J]. *环境科学*, 2017, **38**(7): 2738-2746.
- Lu J, Huang C, Hu Q Y, *et al.* Air pollutant emission inventory of non-road machineries in typical cities in eastern China [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(7): 2738-2746.
- [23] 夏泽群. 基于实测的工程机械气态及颗粒态污染物排放特征研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017. 50-58.
- [24] Frey H C, Rasdorf W, Lewis P. Comprehensive field study of fuel use and emissions of nonroad diesel construction equipment [J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2010, **2158**(1): 69-76.
- [25] 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.
- [26] 谭建伟, 宋亚楠, 葛蕴珊, 等. 大连海域远洋船舶排放清单[J]. *环境科学研究*, 2014, **27**(12): 1426-1431.
- Tan J W, Song Y N, Ge Y S, *et al.* Emission inventory of ocean-going vessels in Dalian Coastal area [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2014, **27**(12): 1426-1431.

CONTENTS

Evolution of the Distribution of PM _{2.5} Concentration in the Yangtze River Economic Belt and Its Influencing Factors	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, CAO Jun-ji, <i>et al.</i>	(1013)
Chemical Characteristics and Source Apportionment of Water-Soluble Ions in Atmosphere Aerosols over the East China Sea Island During Winter and Summer	FANG Yan, CAO Fang, FAN Mei-yi, <i>et al.</i>	(1025)
Analysis of Chemical Components and Sources of PM _{2.5} During Autumn and Winter in Yangquan City	WANG Cheng, YAN Yu-long, XIE Kai, <i>et al.</i>	(1036)
Chemical Compositions and Sources of <i>n</i> -Alkanes and Saccharides in PM _{2.5} from Taian City During the Summer	YI Ya-nan, HOU Zhan-fang, YANG Qian-cai, <i>et al.</i>	(1045)
Physical and Chemical Characteristics of Atmospheric Particles in Autumn in Mt. Huangshan	BIAN Yi-shu, YIN Yan, WANG Hong-lei, <i>et al.</i>	(1056)
Characteristics of Aerosol Optical Depth in the Urban Area of Beibei and Its Correlation with Particle Concentration	ZENG Wei, HAO Qing-ju, ZHAO Zhong-jing, <i>et al.</i>	(1067)
Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds from Typical Industries in Zibo	WANG Yu-yan, WANG Xiu-yan, DU Miao, <i>et al.</i>	(1078)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of Atmospheric VOCs in Ezhou City	FU Yu-meng, YANG Hong-gang, LU Min-yu, <i>et al.</i>	(1085)
Producing Coefficients and Emission Coefficients of Volatile Organic Compounds from the Automobile Manufacturing Industry in Zhejiang Province	TENG Fu-hua, YANG Zhong-ping, DONG Shi-bi, <i>et al.</i>	(1093)
Pollution Characteristics of Volatile Organic Compounds Emission from the Metal Packaging Industry Based on Analysis of Process	WANG Di, NIE Lei, ZHAO Wen-juan, <i>et al.</i>	(1099)
Profile Characteristics of VOCs from Wood and Economic Crop Burning	NIU Zhen-zhen, KONG Shao-fei, YAN Qin, <i>et al.</i>	(1107)
Accounting Methods of VOCs Emission Associated with Production Processes in a Fine Chemical Industrial Park	YE Han-yun, TIAN Jin-ping, CHEN Lü-jun	(1116)
HONO Observation and Assessment of the Effects of Atmospheric Oxidation Capacity in Changzhou During the Springtime of 2017	SHI Xiao-wen, GE Yi-feng, ZHANG Yu-chan, <i>et al.</i>	(1123)
Analysis of Activity and Its Emissions Trend for Construction Equipment in China	PANG Kai-li, ZHANG Kai-shan, MA Shuai, <i>et al.</i>	(1132)
Air Pollutant Emission Inventory from LTO Cycles of Aircraft in the Beijing-Tianjin-Hebei Airport Group, China	HAN Bo, KONG Wei-kai, YAO Ting-wei, <i>et al.</i>	(1143)
Particle Size Distribution of PM Emission from In-use Gasoline and Diesel Vehicles	WANG Rui-ning, HU Qing-yao, REN Hong-juan, <i>et al.</i>	(1151)
Impact of Parameterization on the Estimation of Ammonia Emissions: A Case Study over the Yangtze River Delta	ZHANG Qi, HUANG Ling, YIN Si-jia, <i>et al.</i>	(1158)
Characteristics and Source Apportionment of Dustfall Pollution in the Coal Mine Area and Surrounding Areas of Wuhai City in Spring	WU Hong-xuan, SHI Chang-qing, ZHANG Yan, <i>et al.</i>	(1167)
Variations of Stable Oxygen and Deuterium Isotopes in River and Lake Waters During Flooding Season Along the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River Regions	LI Jing, WU Hua-wu, ZHOU Yong-qiang, <i>et al.</i>	(1176)
Water Sources and Factors Controlling Hydro-chemical Compositions in the Yiluo River Basin	LIU Song-tao, ZHANG Dong, LI Yu-hong, <i>et al.</i>	(1184)
Chemical Evolution of Groundwater in the Tacheng Basin of Xinjiang in the Process of Urbanization	LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i>	(1197)
Remote Sensing Monitoring on Spatial Differentiation of Suspended Sediment Concentration in a River-Lake System Based on Sentinel-2 MSI Imaging: A Case for Shengjin Lake and Connected Yangtze River Section in Anhui Province	WANG Hang-hang, WANG Jie, CUI Yu-huan	(1207)
CDOM Optical Characteristics and Related Environmental Factors of High-turbidity Waters on the Loess Plateau	LIANG Xiao-wen, SHAO Tian-tian, WANG Tao	(1217)
Effects of Artificial Destratification and Induced-natural Mixing on Water Quality Improvement in a Drinking Water Reservoir	WEN Cheng-cheng, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i>	(1227)
Effect of Filter Speed and Water Quality on Ammonia Removal in Groundwater Containing Iron, Manganese, and Ammonia at Low Temperature	ZHANG Jie, MEI Ning, LIU Meng-hao, <i>et al.</i>	(1236)
Long-term Variation Characteristics of Zooplankton Community Structure in Meiliang Bay, Lake Taihu	YANG Jia, ZHOU Jian, QIN Bo-qiang, <i>et al.</i>	(1246)
Community of Benthic Diatoms and Their Relationship with Aquatic Environmental Factors in the Tangwang River, China	XUE Hao, WANG Ye-yao, MENG Fan-sheng, <i>et al.</i>	(1256)
Succession Characteristics and Water Quality Responsiveness Evaluation of FG and MBFG in Yanlong Lake Water Source Ecological Purification System	WANG Lian, LI Xuan, MA Wei-xing, <i>et al.</i>	(1265)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Output and Loss Flux in the Shipanqiu Watershed, Three Gorges Reservoir Area	CHEN Shi-qi, LONG Yi, YAN Dong-chun, <i>et al.</i>	(1276)
Effect of Optimized Fertilization and Biochar Application on Phosphorus Loss in Purple Soil Sloping Farmland	LUO Dong-hai, WANG Zi-fang, LONG Yi, <i>et al.</i>	(1286)
Use of Iron-modified Calcite as an Active Capping Material to Control Phosphorus Release from Sediments in Surface Water Bodies	BAI Xiao-yun, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i>	(1296)
Preparation of Tea Waste Biochar and Its Application in Tetracycline Removal from Aqueous Solution	FAN Shi-suo, LIU Wen-pu, WANG Jing-tao, <i>et al.</i>	(1308)
Adsorption Characteristics of Sulfamethazine on Three Typical Porous High-temperature Modified Solid Waste Materials	WANG Jing, ZHU Xiao-li, HAN Zi-yu, <i>et al.</i>	(1319)
Sorption of Polybrominated Diphenyl Ethers by Virgin and Aged Microplastics	XU Peng-cheng, GUO Jian, MA Dong, <i>et al.</i>	(1329)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Ruxi Tributary of the Three Gorges Reservoir	FANG Zhi-qing, WANG Yong-min, WANG Xun, <i>et al.</i>	(1338)
Distribution and Risk Assessment of OCPs in Surface Water, Sediments, and Fish from Lake Gucheng and Inflow and Outflow Rivers	KAN Ke-cong, GU Xiao-hong, LI Hong-min, <i>et al.</i>	(1346)
Occurrence and Ecological Risk Assessment of Typical Persistent Organic Pollutants in Hengshui Lake	ZHANG Jia-wen, WEI Jian, LÜ Yi-fan, <i>et al.</i>	(1357)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Typical Organophosphate Esters in Beijing Municipal Wastewater Treatment Plant and the Receiving Water	ZHANG Zhen-fei, LÜ Jia-pei, PEI Ying-ying, <i>et al.</i>	(1368)
Advanced Nitrogen Removal Characteristics of Low Carbon Source Municipal Wastewater Treatment via Partial-denitrification Coupled with ANAMMOX	MA Bin, XU Xin-xin, GAO Mao-hong, <i>et al.</i>	(1377)
Stable Nitrite Accumulation and Phosphorus Removal from High-nitrate and Municipal Wastewaters in a Combined Process of Partial Denitrification and Denitrifying Phosphorus Removal (PD-DPR)	WANG Qiu-ying, YU De-shuang, ZHAO Ji, <i>et al.</i>	(1384)
Start-up of CANON Process and Short-cut Nitrification in a Pilot-scale MBBR Reactor	FU Kun-ming, YANG Zong-yue, LIAO Min-hui, <i>et al.</i>	(1393)
Influence of Antibiotics on the Denitrification Process of Antibiotic Resistant Denitrifying Bacteria and the Analysis of Microbial Community Structure	DAI Sha, LI Peng, PENG Wu-qing, <i>et al.</i>	(1401)
Aerobic Granular Sludge System with Multiple Influent-Aeration Operation Strategy	ZHANG Jie, WANG Yu-ying, LI Dong, <i>et al.</i>	(1409)
Effect of Alkaline Sludge Fermentation Products on the Nitrification Process and Performance	QIU Sheng-jie, LIU Jin-jin, LI Xi-yao, <i>et al.</i>	(1418)
Effect of Sulfate on the Migration and Transformation of Methylmercury in Advanced Anaerobic Digestion of Sludge	HE Xiang-lin, LIU Ji-bao, YIN Yong-guang, <i>et al.</i>	(1425)
Spatial-temporal Variation and Source Change of Heavy Metals in the Cropland Soil in the Industrial City	LI Yan-ling, LU Yi-fu, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i>	(1432)
Assessment and Spatial Characteristics Analysis of Human Health Risk of Heavy Metals in Cultivated Soil	JI Chao, HOU Da-wei, LI Fa-zhi, <i>et al.</i>	(1440)
Microbial Diversity and Physicochemical Properties of Rhizosphere Microenvironment in Saline-alkali Soils of the Yellow River Delta	ZHAO Jiao, XIE Hui-jun, ZHANG Jian	(1449)
Effects of Different Land Use Types on the Molecular Ecological Network of Soil Bacteria	LI Bing, LI Yu-shuang, WEI Jian-bing, <i>et al.</i>	(1456)
Responses of Soil Organic Carbon Fractions to Land Use Types in Hilly Red Soil Regions, China	ZHANG Xiao-fang, ZHENG Sheng-meng, XIA Yin-hang, <i>et al.</i>	(1466)
Effect of Organic Fertilizer and Inorganic Fertilizer Application on N ₂ O Emissions from Fluvio-aquic Soil in the North China Plain	SUN He-yang, WAN Zhong-mei, LIU De-yan, <i>et al.</i>	(1474)
Characteristics of Heavy Metal Absorption by Winter Wheat and Its Quantitative Relationship with Influencing Factors	WANG Yi-wen, RUI Yu-kui, LI Zhong-yang, <i>et al.</i>	(1482)
Effect of Calcium Magnesium Phosphate on Remediation Paddy Soil Contaminated with Cadmium Using Lime and Sepiolite	YAN De-mei, GUO Zhao-hui, HUANG Feng-lian, <i>et al.</i>	(1491)
Passivation and Remediation Effects and Mechanisms of Plant Residual Modified Materials on Lead-Contaminated Soils	FANG Ya-li, ZHU Zong-qiang, ZHAO Ning-ning, <i>et al.</i>	(1498)
Effects of Exogenous Spermidine on Seed Germination and As Uptake and Accumulation of Rice Under As ⁵⁺ Stress	LIU Shu-jin, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i>	(1505)