

# 我国非道路移动源排放清单估算及 技术减排潜力分析

王燕军,黄志辉\*,唐祎骥,吉喆,解淑霞,滕琦,梁占彬

(中国环境科学研究院/国家环境保护机动车污染控制与模拟国家重点实验室,北京 100012)

**【摘要】**非道路移动源排放正逐渐成为影响我国空气质量的重要来源之一。本文在调研2017年我国非道路移动源分类保有量的基础上,测算了2017年我国工程机械、农业机械、船舶(渔船、客货船等)、铁路内燃机车、飞机(起降阶段)等主要非道路移动源碳氢化合物(HC)、氮氧化物(NO<sub>x</sub>)和颗粒物(PM)的排放状况,并以工程机械为例分析了排放标准升级和采用颗粒物捕集器(DPF, Diesel Particulate Filter)进行治理改造对非道路移动源减排的影响。研究表明,2017年我国主要非道路移动源碳氢化合物排放77.9万吨,氮氧化物排放573.5万吨,颗粒物排放48.5万吨。在2019年主要非道路移动源保有量持续增长的情况下,提前实行国IV阶段排放标准可减少工程机械各种污染物排放约0.8%~4.4%,国I、国II工程机械加装DPF后颗粒物减排可达20%左右,挖掘机、装载机与叉车减排效果明显。本研究可为我国非道路移动源排放管控提供思路。

**【关键词】**非道路移动源;排放清单;情景分析;减排潜力;2017年

中图分类号:X821 文献标识码:A 文章编号:1673-288X(2021)04-0064-06 DOI:10.19758/j.cnki.issn1673-288x.202104064

移动污染源已成为大气污染排放的重要来源<sup>[1]</sup>。移动源可分为道路源与非道路源。道路源是指行驶在道路上的机动车辆污染排放源;非道路源是相对于道路源的污染源,主要指各类在道路外应用的作业机械的污染排放源。在我国颁布的《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)》(GB 20891—2014)<sup>[2]</sup>中对非道路移动机械定义为:用于非道路的移动机械,即(1)自驱动或具有双重功能,既能自驱动又能进行其功能操作的机械;(2)不能自驱动,但被设计为能够从一个地方转移到另一个地方的机械。我国非道路移动机械按照用途主要包括工程机械、农业机械、船舶、机车、航空器、户外动力设备,以及草坪和园艺设备等移动机械。目前,我国对道路移动源的排放已经建立了相对完善的监管体系,但对非道路移动源排放长期以来缺乏有效的监督管理<sup>[3]</sup>。

目前我国非道路移动源排放法规相对落后,单机排放控制水平低,加之使用年限长、维护保养差、燃油消耗高、燃油质量差、排放污染大,我国非道路移动源的排放总量不容忽视,正逐渐成为影响我国城市和区域空气质量的另一重要来源<sup>[4]</sup>。加强非道路移动源控制将成为持续改善我国城市和区域空气质量的关键举措之一。为此,本文估算了近年我国主要非道路移动源的排放状况,分析了非道路移动机械淘汰升级、后处理改造等不同技术政策下非道路移动源的减排潜力,以期为我国非道路移动源排放管理提供技术思路。

## 1 我国非道路移动源排放估算方法

### 1.1 非道路移动机械

非道路移动机械包括工程机械、农业机械、小型通用机械、柴油发电机组等。本次清单是根据不同的类别、功率段、排放阶段的非道路移动机械保有量及活动水平计算得出的,具体公式如下:

**基金项目:**国家重点研发计划项目课题“基于动态过程的移动源排放定量技术”(课题编号:2016YFC201504)

**作者简介:**王燕军,正高级工程师,主要研究方向为机动车污染控制与检测技术、污染特征模拟研究

**通讯作者:**黄志辉,高级工程师,主要研究方向为移动源排放清单测算方法

$$E = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^p (P_{i,j,k} \times G_{i,j,k} \times LF_{i,j,k} \times hr_{i,j,k} \times EF_{i,j,k}) \times 10^{-6} \quad (1)$$

式中,  $E$  为非道路移动机械污染物排放量(吨);  $P_{i,j,k}$  为  $i$  机型  $j$  功率段、 $k$  阶段非道路移动机械保有量(台);  $G_{i,j,k}$  为  $i$  机型  $j$  功率段、 $k$  阶段非道路移动机械平均额定净功率(千瓦/台);  $LF_{i,j,k}$  为  $i$  机型  $j$  功率段、 $k$  阶段非道路移动机械负载因子;  $hr_{i,j,k}$  为  $i$  机型  $j$  功率段、 $k$  阶段非道路移动机械年均使用小时数(小时);  $EF_{i,j,k}$  为  $i$  机型  $j$  功率段、 $k$  阶段非道路移动机械排放因子(克/千瓦时);  $n$  为非道路移动机械种类数(种);  $m$  为非道路移动机械功率段数(个);  $p$  为非道路移动机械排放阶段数(个)。

### 1.2 铁路内燃机车

对于铁路内燃机车排放量,基于燃料消耗量计算,具体公式如下:

$$E = (Y \times EF) \times 10^{-6} \quad (2)$$

式中,  $E$  为铁路内燃机车排放量(吨);  $Y$  为铁路内燃机车柴油消耗量(千克);  $EF$  为铁路内燃机车排放因子(克/千克燃料)。

### 1.3 内河、沿海船舶

对于内河、沿海船舶排放量,基于燃料消耗量计算,具体公式如下:

$$E = (Y \times EF) \times 10^{-6} \quad (3)$$

式中,  $E$  为内河、沿海船舶排放量(吨);  $Y$  为内河、沿海船舶燃油消耗量(千克);  $EF$  为内河、沿海船舶排放因子(克/千克燃料)。

### 1.4 民航飞机

对于民航飞机排放量,基于飞机起降次数(LTO)计算,具体公式如下:

$$E = (C_{LTO} \times EF) \times 10^{-3} \quad (4)$$

式中,  $E$  为民航飞机污染物排放量(吨);  $C_{LTO}$  为民航飞机起飞着陆循环次数(次);  $EF$  为民航飞机起飞着陆循环时的排放因子(千克/LTO)。

### 1.5 保有量和活动水平调查

本文中,工程机械保有量采用了《中国工程机械工业年鉴》数据<sup>[5]</sup>,农业机械保有量采用《中国农村统计年鉴》数据<sup>[6]</sup>,铁路内燃机车燃油消耗量根据客货周转量、货运日产量、货运铁路内燃机车油耗计算获得,客运周转量、货运日产量、货运铁路内燃机车油耗系数采用《中国交通运输年

鉴》数据<sup>[7]</sup>。内河、沿海船舶燃油消耗量采用交通运输部数据,并通过客货周转量计算获得,客货周转量采用《中国交通运输年鉴》数据<sup>[7]</sup>。民航飞机起飞着陆循环次数基于起降架次获得,一次起飞着陆循环等于两个起降架次,起降架次从民用航空管理部门发布的《民航机场生产统计公报》<sup>[8]</sup>中获取。其他未调查获取的活动水平数据和排放系数采用了生态环境部在《非道路移动源大气污染物排放清单编制技术指南》(试行)<sup>[9]</sup>中推荐的数据。

## 2 我国非道路移动源排放量测算

### 2.1 我国主要非道路移动机械保有量变化趋势分析

从2010年到2017年,我国各主要非道路移动机械门类的保有量如表1所示:工程机械保有量由430.0万台增加到720.0万台,年均增长8.5%;农业机械柴油总动力由74597.1万千瓦增加到76776.3万千瓦;船舶保有量由17.8万艘降低至14.5万艘,年均下降2.9%;飞机起降由553.2万架次增加到1024.9万架次,年均增长9.2%。

表1 主要非道路移动机械保有量及活动水平状况

年份	工程机械 保有量/ 万台	农业机械 保有量/ 万台	农业机 械柴油 总动力/ 万千瓦	机动 渔船 保有量/ 万艘	船舶 保有量/ 万艘	铁路 机车 拥有量/ 万台	飞机 起降 架次/ 万架次
2010	430.0	4795.4	74597.1	247.60	17.8	1.9	553.2
2011	525.5	4983.7	78536.3	301.60	17.9	2.0	598.0
2012	584.8	5112.8	82365.0	348.80	17.9	2.0	660.3
2013	636.5	5099.1	84541.0	374.03	17.3	2.1	731.5
2014	677.6	5158.2	86717.0	399.26	17.2	2.1	793.3
2015	690.8	5205.1	89783.8	416.34	16.6	2.1	856.6
2016	700.0	3960.0	75220.0	433.28	16.0	2.1	923.8
2017	720.0	4020.0	76776.3	460.00	14.5	2.1	1024.9

在2017年全国工程机械保有量中,挖掘机、推土机、装载机、叉车、压路机、摊铺机、平地机,不含轮式起重机、塔式起重机、混凝土搅拌车、混凝土泵车、混凝土泵、混凝土搅拌站等总计626.3万台。其中包括挖掘机167.8万台、推土机7.1万台、装载

机 171.2 万台、叉车 261.6 万台、压路机 13.0 万台、摊铺机 2.3 万台、平地机 3.3 万台。各类工程机械保有量占比如图 1 所示。在各类工程机械中,包括国 I 前标准的工程机械 170.9 万辆、国 I 标准的工程机械 97.9 万辆、国 II 标准的工程机械 259.3 万台、国 III 标准的工程机械 98.1 万台,各类工程机械不同排放水平等级占比如图 2 所示。

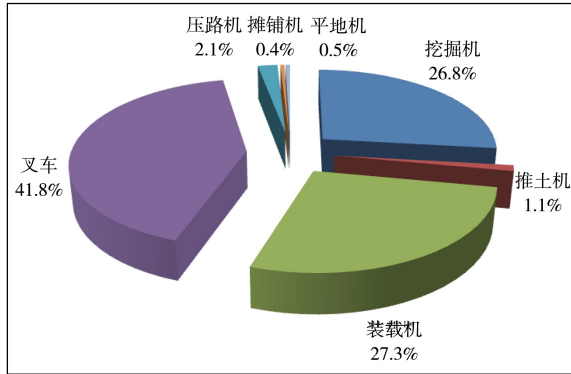


图 1 按类型划分工程机械保有量占比

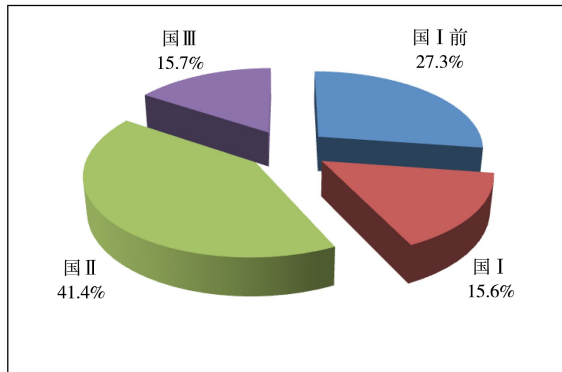


图 2 按排放阶段划分工程机械保有量占比

在 2017 年全国农业机械柴油总动力中,包括大中型拖拉机总动力 21583.5 万千瓦、小型拖拉机 16036.5 万千瓦、联合收割机 10356.6 千瓦、

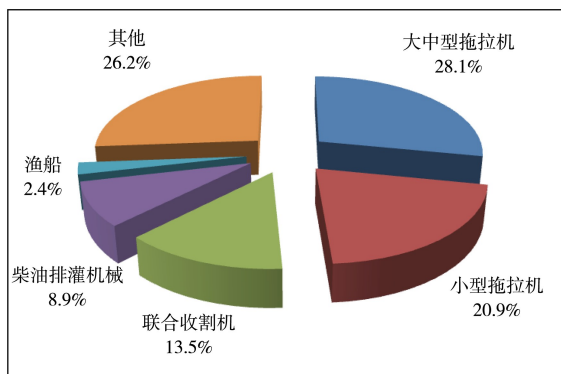


图 3 按类型划分农业机械保有量占比

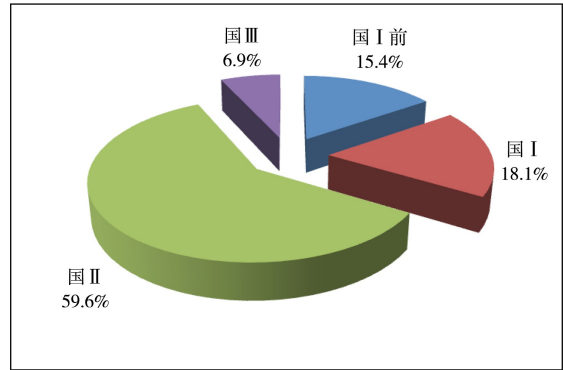
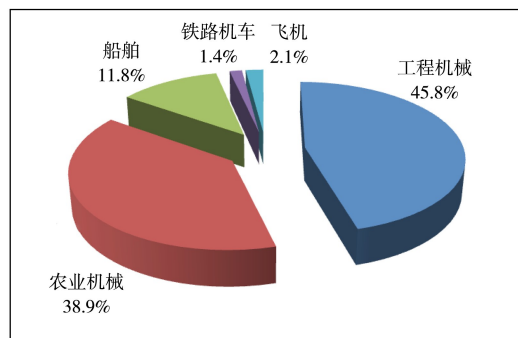


图 4 按排放阶段划分农业机械保有量占比

柴油排灌机械 6843.7 万千瓦、渔船 1838.3 万千瓦、其他机械 20117.7 万千瓦。按排放等级划分,包括国 I 前标准的农业机械 11784.7 万千瓦、国 I 标准的农业机械 13867.1 万千瓦、国 II 标准的农业机械 45792.3 万千瓦、国 III 标准的农业机械 5332.2 万千瓦。按类型和排放阶段划分的农业机械保有量占比分别如图 3 和图 4 所示。

### 2.2 2017 年我国主要非道路移动机械排放状况

2017 年,以上调查得到的主要非道路移动机械共排放碳氢化合物(HC) 77.9 万吨,氮氧化物(NO<sub>x</sub>) 573.5 万吨,颗粒物(PM) 48.5 万吨。其中,工程机械排放碳氢化合物、氮氧化物、颗粒物分别为 30.5 万吨、197.1 万吨、12.9 万吨;农业机械排放碳氢化合物、氮氧化物、颗粒物分别为 25.9 万吨、168.1 万吨、19.1 万吨;船舶排放碳氢化合物、氮氧化物、颗粒物分别为 7.9 万吨、134.6 万吨、13.1 万吨;铁路内燃机车排放碳氢化合物、氮氧化物、颗粒物分别为 1.0 万吨、17.1 万吨、0.6 万吨;飞机排放碳氢化合物、氮氧化物、颗粒物分别为 1.4 万吨、8.3 万吨、0.3 万吨。2017 年非道路移动源排放构成如图 5 所示。



(a) HC 排放占比

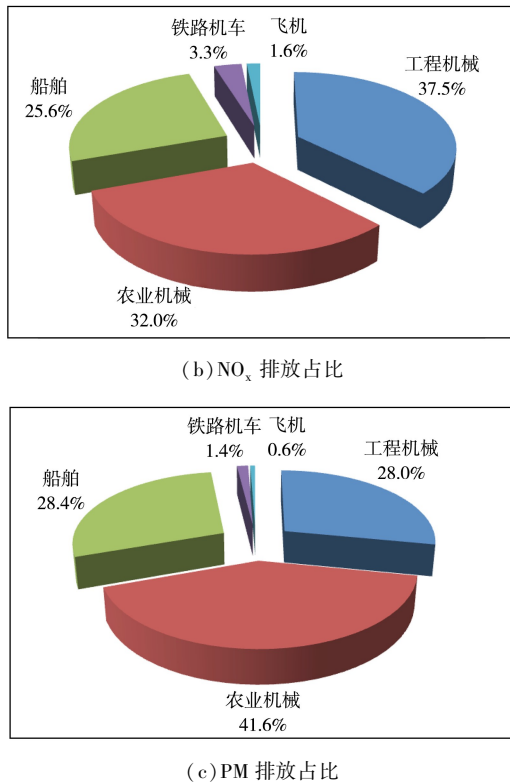


图5 2017年我国主要门类非道路移动机械排放占比

在2017年工程机械排放的各类污染物中,碳氢化合物分担率为:装载机43.3%、挖掘机30.6%、叉车21.2%;氮氧化物分担率为:装载机45.1%、挖掘机31.0%、叉车19.1%;颗粒物分担率为:装载机38.3%、挖掘机33.0%、叉车23.8%。装载机、挖掘机、叉车所占比重较大。在农业机械排放量分担率中,大中型拖拉机、小型拖拉机所占比重较大,其中碳氢化合物分担率为:大中型拖拉机33.7%、小型拖拉机25.9%;氮氧化物分担率为:大中型拖拉机34.6%、小型拖拉机25.4%;颗粒物分担率为:大中型拖拉机35.5%、小型拖拉机25.6%。

### 3 非道路移动机械减排情景模拟

上述研究表明,工程机械排放量在非道路移动源中排放占比较大。本节主要以工程机械为例,重点研究标准升级和尾气治理即加装颗粒物捕集器(DPF, Diesel Particulate Filter)对工程机械排放的影响。

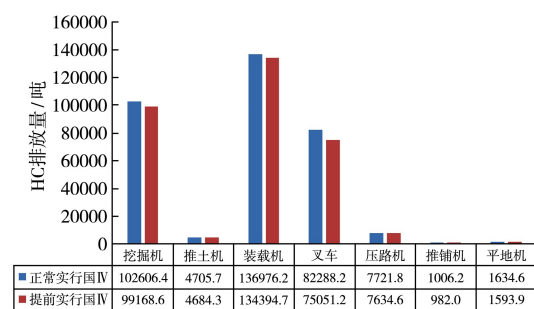
根据《工程机械统计年鉴》的历年各种机械种类的保有量,推算出各机械种类的年均增长率,从而推算出2019年各种类工程机械保有量。推

算显示,2019年工程机械保有量估计为742.4万台,其中国I前排放标准的工程机械151.4万台,国I排放标准的工程机械97.7万台,国II排放标准的工程机械259.2万台,国III排放标准的工程机械234.1万台,无国IV排放标准工程机械。

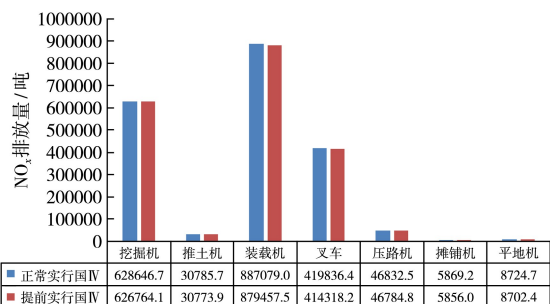
#### 3.1 提前实施国IV阶段标准减排潜力分析

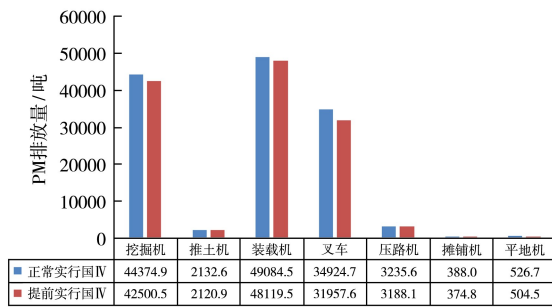
根据《非道路移动机械用柴油机排气污染物排放限值及测量方法(中国第三、四阶段)》(GB 20891—2014)中标准实施要求,第四阶段标准于2020年1月1日起正式实施。上述标准中各排放阶段污染物排放限值对比表明,第四阶段各污染物排放限值相比于第三阶段降低50%~90%。在2017年提前实行国IV阶段排放标准情景下,2019年工程机械保有量预估为742.4万台,其中国I前排放标准的工程机械为151.4万台,国I排放标准的工程机械为97.7万台,国II排放标准的工程机械为259.2万台,国III排放标准的工程机械为162.6万台,国IV排放标准的工程机械为71.4万台。

利用《非道路移动源排放清单编制技术指南》中提供的国IV阶段非道路移动机械排放因子,研究测算得到2019年工程机械正常状况下各污染物排放量及2017年提前实行国IV阶段情况下各污染物排放量对比,如图6所示。



(a) HC 排放对比

(b) NO<sub>x</sub> 排放对比



(c) PM 排放对比

图6 正常实施与提前实施国IV标准工程机械排放量对比(2019年)

研究表明,提前实行国IV阶段的工程机械碳氢化合物总排放量比正常实行国IV阶段下降4.0%,减排1.34万吨;提前实行国IV阶段的工程机械氮氧化物总排放量比正常实行国IV阶段下降0.8%,减排1.51万吨;提前实行国IV阶段的工程机械颗粒物总排放量比正常实行国IV阶段下降4.4%,减排0.59万吨。按机械类型划分的各污染物减排量见表2。测算表明,相比于正常实行国IV阶段排放标准,提前实行国IV阶段排放标准对工程机械减排效果较为明显,尤其是挖掘机、装载机与叉车减排效果较为显著。

表2 按机械类型划分的工程机械减排量

机械类型	单位/吨		
	HC 减排量	NO <sub>x</sub> 减排量	PM 减排量
挖掘机	3437.8	1882.6	1874.4
推土机	21.4	11.7	11.7
装载机	2581.5	7621.5	965.0
叉车	7237.0	5518.2	2967.2
压路机	87.1	47.7	47.5
摊铺机	24.2	13.3	13.2
平地机	40.7	22.3	22.2

### 3.2 国I、国II非道路移动机械加装DPF减排潜力分析

根据作者前期在部分地市对国I前~国III排放标准的非道路移动机械排放水平测试以及改造的可行性研究,国I、国II排放阶段的工程机械比较适合加装DPF,改造后的颗粒物减排效率为90%,其中适合加装DPF的国I、国II排放阶段的工程机械占50%左右。因此,本文假设全国50%的国I、国II工程机械均进行改造。在此情

景下,2019年工程机械改造总量为178.4万台,其中包括挖掘机49.2万台、推土机2.2万台、装载机51.1万台、叉车70.0万台、压路机4.0万台、摊铺机0.8万台、平地机1.1万台。

减排量测算表明,在正常情况下,2019年工程机械颗粒物排放总量为13.5万吨;而在50%的国I、国II工程机械加装DPF后,2019年工程机械颗粒物排放总量为10.8万吨,按机械类型划分的工程机械颗粒物排放量见图7。在模拟情景下2019年工程机械颗粒物排放总量比2019年正常情况下颗粒物排放总量下降20%,按机械类型划分的工程机械减排量见表3。

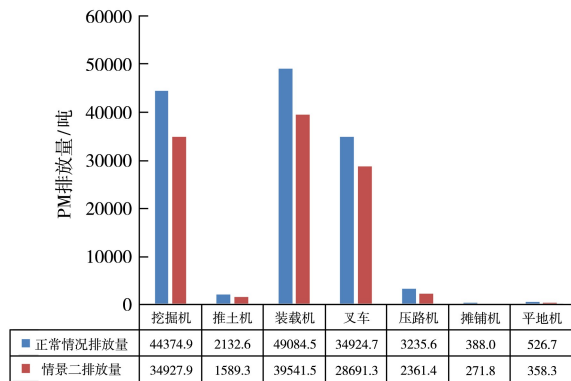


图7 正常情况与情景模拟下各类工程机械PM排放量对比

表3 按机械类型划分的工程机械减排量

机械类型	单位/吨	
	PM 减排量	PM 减排量
挖掘机	9447.0	压路机 874.2
推土机	543.3	摊铺机 116.3
装载机	9543.0	平地机 168.4
叉车	6233.4	

研究表明,将国I、国II非道路机械加装DPF,颗粒物减排效果显著,尤其是挖掘机、装载机与叉车减排效果明显。

## 4 结论

(1)2010—2017年我国工程机械保有量和飞机起降次数增加较快,年均增长率在8.5%~9.2%之间;农业机械柴油总动力基本持平,在74597.1万千瓦~76776.3万千瓦之间;船舶保有量由17.8万艘降低至14.5万艘,年均下降2.9%。

(2) 2017年我国主要非道路移动源碳氢化合物排放 77.9 万吨,氮氧化物排放 573.5 万吨,颗粒物排放 48.5 万吨。

(3) 在 2019 年主要非道路移动源保有量持续增长的情况下,提前实行国Ⅳ阶段排放标准可减少工程机械各种污染物排放 0.8%~4.4%左右,国Ⅰ、国Ⅱ工程机械加装 DPF 后颗粒物减排可达 20%左右,挖掘机、装载机与叉车减排效果明显。

#### 参考文献:

- [1] 杨俊益,辛金元,吉东生,等.2008—2011年夏季京津冀区域背景大气污染变化分析[J].环境科学,2012,33(11):3693-3704.
- [2] 生态环境部.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].北京:中国环境科学出版社,2014.
- [3] 马东,尹航,黄志辉,等.我国非道路移动源排放管理现状及展望[J].环境与可持续发展,2017,42(02):36-40.
- [4] 张礼俊,郑君瑜,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(04):886-891.
- [5] 中国机械工业年鉴编委会.中国工程机械工业年鉴[M].北京:机械工业出版社,2018.
- [6] 国家统计局农村社会经济调查司.中国农村统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2019.
- [7] 交通运输部.中国交通运输年鉴[M].北京:人民交通出版社,2019.
- [8] 交通运输部.2019年民航机场生产统计公报[R].2020.
- [9] 生态环境部.非道路移动源大气污染物排放清单编制技术指南(试行)[R].北京:生态环境部,2014.

## Estimation on non-road mobile source emission inventory in 2017 and its technological reduction potential analysis

WANG Yanjun, HUANG Zhihui\*, TANG Yisu, JI Zhe, XIE Shuxia, TENG Qi, LIANG Zhanbin

(State Environmental Protection Key Laboratory of Vehicle Emission Control and Simulation/  
Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

**Abstract:** Non-road mobile source emission is gradually becoming one of the important sources of air pollution in China. Based on the investigation of the classified populations of non-road mobile sources in China, the emissions of hydrocarbons (HC), Nitrogen Oxides (NO<sub>x</sub>) and particulate matter (PM) from construction machinery, agricultural machinery, ships (fishing vessels, passenger and cargo vessels), railway diesel locomotive and aircraft (take-off and landing) in 2017 were estimated. Taking construction machinery as an example, the influence of upgrading emission standards and using Diesel Particulate Filter (DPF) to reduce emissions from non-road mobile sources were analyzed. The results show that in 2017, the main non-road mobile sources in China emitted 779,000 tons of HC, 5735,000 tons of NO<sub>x</sub> and 485,000 tons of PM. In 2019, with the continuous increase population of major non-road mobile sources, the early implementation of the National Phase IV emission standard can reduce the emission of various pollutants from construction machinery by about 0.8 to 4.4 percent. PM Emission can be reduced by about 20% after the Phase I and Phase II construction machineries were installed with DPF. The effect of emission reduction for excavators, loaders and forklifts is obvious. The study can provide ideas for the non-road mobile source emission control in China.

**Keywords:** non-road mobile source; emission inventory; scenario analysis; emission reduction potential; 2017