

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第9期

Vol.39 No.9

**2018**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

长三角区域非道路移动机械排放清单及预测 ..... 黄成, 安静宇, 鲁君 (3965)

基于 COPERT 模型的江苏省机动车时空排放特征与分担率 ..... 李荔, 张洁, 赵秋月, 李慧鹏, 韩军赞 (3976)

上海典型燃烧源铅和汞大气排放趋势分析 ..... 杨静, 陈龙, 刘敏, 孟祥周, 张希 (3987)

广东省秸秆燃烧大气污染物及 VOCs 物种排放清单 ..... 孙西勃, 廖程浩, 曾武涛, 张永波, 梁小明, 叶代启 (3995)

重庆市北碚城区气溶胶中水溶性无机离子的质量浓度及其粒径分布 ..... 李彦沛, 郝庆菊, 温天雪, 吉东生, 刘子锐, 王跃思, 江长胜 (4002)

济南市夏、冬季 PM<sub>2.5</sub> 中化学组分的季节变化特征及来源解析 ..... 刘晓迪, 孟静静, 侯战方, 李静, 邢继钊, 魏本杰, 张二勋, 刘加珍, 董杰 (4014)

聊城冬季一重污染过程 PM<sub>2.5</sub> 污染特征及成因分析 ..... 张敬巧, 吴亚君, 张萌, 王涵, 陈振兴, 胡君, 李慧, 范晓龙, 柴发合, 王淑兰 (4026)

夏季青岛大气气溶胶中不同形态磷的浓度、来源及沉降通量 ..... 王楠, 马森, 石金辉, 高会旺, 姚小红 (4034)

晋城市冬季环境空气中挥发性有机物的污染特征及来源解析 ..... 杨帆, 闫雨龙, 戈云飞, 李如梅, 李颖慧, 余化龙, 彭林 (4042)

北京冬季降尘重金属富集程度及综合污染评价 ..... 熊秋林, 赵文吉, 李大军, 周涛 (4051)

合肥市典型交通干道大气苯系物的特征分析 ..... 孟凡昊, 秦敏, 梁帅西, 谢品华, 夏晖晖, 段俊, 方武, 唐科, 李昂, 魏楨, 王凤 (4060)

填埋场作业面 NMOCs 臭氧生成潜势及高贡献物质 ..... 李昊, 刘彦君, 陈坦, 闫秋鹤, 代辉祥, 王洪涛, 陆文静 (4070)

北京市混凝土搅拌站风蚀扬尘排放特征 ..... 李贝贝, 韩凯丽, 秦建平, 王鑫, 宋博, 黄玉虎, 张春来 (4078)

基于源解析的傍河水源地污染风险季节性变化特征分析 ..... 高翔, 左锐, 郭学茹, 孟利, 刘鑫, 王朕, 滕彦国, 王金生 (4086)

透水路面-生物滞留池组合道路的城市面源污染控制效果评估 ..... 官曼莉, 左俊杰, 任心欣, 赵洪涛, 罗茜, 廖云杰, 李叙勇 (4096)

黄河兰州段水体中有色溶解性有机质组成、空间分布特征及来源分析 ..... 赵夏婷, 李珊, 王兆炜, 谢晓芸 (4105)

黄河干流宁夏段溶解性有机物组分特征及其与金属离子的相关性 ..... 席玥, 王婷, 倪晋仁, 韩鹏, 仪马兰, 郑彤, 蒋咏, 马若绮, 崔锋 (4114)

伊洛河和浑太河春季水体光学吸收特征的对比 ..... 李柳阳, 邵田田, 张鑫, 宋炎炎, 苏东辉, 王涛 (4122)

马莲河流域化学风化的季节变化和影响因素 ..... 王雨山, 韩双宝, 邓启军, 祁晓凡 (4132)

柳江盆地浅层地下水硝态氮水特征和成因分析 ..... 徐进, 何江涛, 彭颖, 曾颖 (4142)

地下水氮污染原位修复缓释碳源材料的研发与物化-生境协同特性 ..... 张雯, 尹琳, 周念清 (4150)

三峡水库干流沉积物及消落带土壤磷形态及其分布特征 ..... 张志永, 万成炎, 胡红青, 彭建华, 侯娟, 丁庆秋, 袁玉洁 (4161)

蓄水前后三峡库区香溪河沉积物磷形态分布特征及释放通量估算 ..... 刘心愿, 宋林旭, 纪道斌, 刘德富, 李欣, 黄佳维, 赵冲, 唐咏春, 平明明 (4169)

铅改性沸石添加对重污染河道底泥磷释放和钝化的影响 ..... 何思琪, 张薇, 林建伟, 詹艳慧, 李娟英, 邢云青, 高春梅, 黄宏, 梁舒静 (4179)

洱海流域乡镇尺度上人类活动对净氮输入量的影响 ..... 李影, 刘宏斌, 雷秋良, 胡万里, 王洪媛, 翟丽梅, 任天志, 连慧妹 (4189)

我国典型潮间带沉积物-水界面无机氮源汇效应 ..... 聂家琴, 王东启, 陈杰, 李杨杰, 陈姝, 陈振楼 (4199)

东太湖水产养殖对沉积物中氨氧化原核生物的影响 ..... 储瑜, 何肖微, 曾中, 赵大勇, 孙强, 曹萍, 吴庆龙 (4206)

处理采矿废水湿地沉积物中厌氧氨氧化过程 ..... 汪海波, 马丁, 岳正波, 陶巍, 陈天虎, 王进 (4215)

华东地区某饮用水源地中磺胺类抗性基因的分布特征 ..... 胡亚茹, 姜蕾, 张天阳, 雷丹丹, 姜巍巍, 张东, 林匡飞, 崔长征 (4222)

制革废水处理过程中磺胺类抗生素和抗性细菌的分布特征 ..... 花莉, 李璐, 杨春燕 (4229)

人工湿地不同基质和粒径对污水净化效果的比较 ..... 赵林丽, 邵学新, 吴明, 姜小三, 陆琳莹 (4236)

城市污水管网中不同生化作用的基质流向 ..... 姚翔译, 石炬, 桑浪涛, 金鹏康, 王晓昌 (4242)

微絮凝对腐殖酸超滤过程膜污染的减缓特性 ..... 王旭东, 石彩霞, 廖正伟, 贺毓淑, 王磊 (4249)

UV 强化草酸络合 Fe<sup>3+</sup> 活化过硫酸盐氧化降解苯胺 ..... 韩东晖, 李瑛, 李开明, 应光国 (4257)

焦化废水 A/O<sup>2</sup> 和 A/O/H/O 处理工艺中多环芳烃的削减行为分析 ..... 吴海珍, 孙胜利, 刘国新, 韦景悦, 吴超飞, 韦朝海, 钟练文, 彭亚环 (4265)

长期侧流提取对 EBPR 系统除磷及其磷回收性能的影响 ..... 俞小军, 李杰, 周猛, 宋璐, 李维维, 王亚娥, 马娟, 吕慧 (4274)

NaCl 盐度对 A<sup>2</sup>/O 工艺缺氧区胞外聚合物及生物絮凝性的影响 ..... 张兰河, 田蕊, 郭静波, 贾艳萍, 张海丰, 李正, 陈子成 (4281)

温度和 pH 值对铁盐型氨氧化过程氮素转化的影响 ..... 陈方敏, 金润, 袁琨, 李祥, 黄勇, 顾澄伟 (4289)

游离氨 (FA) 对氨氧化菌 (AOB) 活性抑制动力学试验 ..... 孙洪伟, 于雪, 高宇学, 李维维, 祁国平, 许涓 (4294)

HRT 对厌氧氨氧化协同异养反硝化脱氮的影响 ..... 安芳娇, 赵智超, 黄利, 黄剑明, 邵兆伟, 陈永志 (4302)

长期储存亚硝化絮状污泥活性的恢复 ..... 李田, 魏凡凯, 汪裕昌, 沈耀良, 吴鹏, 宋吟玲 (4310)

广西西江流域农田土壤重金属含量特征及来源解析 ..... 宋波, 张云霞, 庞瑞, 杨子杰, 宾娟, 周子阳, 陈同斌 (4317)

紫色土壤有机碳活性组分对生物炭施用量的响应 ..... 罗梅, 田冬, 高明, 黄容 (4327)

秸秆及生物炭还田对油菜/玉米轮作系统碳平衡和生态效益的影响 ..... 李娇, 田冬, 黄容, 徐国鑫, 黎嘉成, 高明, 王子芳 (4338)

低积累水稻品种联合腐殖酸、海泡石保障重镉污染稻田安全生产的潜力 ..... 谢晓梅, 方至萍, 廖敏, 黄宇, 黄小辉 (4348)

臭氧和干旱交互作用对杨树叶片抗氧化酶活性的影响 ..... 周慧敏, 李品, 高峰, 冯兆忠, 张殿波 (4359)

再生水不同灌水水平对土壤酶活性及耐热大肠菌群分布的影响 ..... 韩洋, 李平, 齐学斌, 崔丙健, 常迪, 马欢欢 (4366)

黄淮海地区鸡粪有机肥重金属含量特征及环境风险 ..... 李发, 徐应明, 王林, 梁学峰, 孙约兵, 纪艺凝, 栾润宇 (4375)

村镇生活垃圾重金属含量及其来源分析 ..... 靳琪, 高红, 岳波, 黄启飞, 王瑜堂, 吴小丹, 於俊颖, 杨惠媛 (4385)

《环境科学》征订启事 (3986)      《环境科学》征稿简则 (4050)      信息 (4085, 4104, 4337)

# 长三角区域非道路移动机械排放清单及预测

黄成, 安静宇, 鲁君

(上海市环境科学研究院, 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)

**摘要:** 基于长三角典型城市非道路移动机械实地调查成果, 结合长三角各城市非道路移动机械相关指标现状及变化趋势, 建立了长三角三省一市非道路移动机械大气污染源排放清单, 并开展了2005~2025年区域非道路移动机械保有量、燃油消费量及污染物排放量预测。2014年长三角非道路移动机械总量约为 $8.23 \times 10^6$ 台, 柴油消费量约 $9.95 \times 10^6$  t,  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、CO、VOCs、 $\text{PM}_{10}$ 和 $\text{PM}_{2.5}$ 排放分别为 $5.5 \times 10^3$ 、 $4.9 \times 10^5$ 、 $7.6 \times 10^5$ 、 $1.1 \times 10^5$ 、 $2.9 \times 10^4$ 和 $2.7 \times 10^4$  t, 农用机械占长三角机械总量的93%, CO和VOCs排放贡献分别为88%和77%; 建筑及市政工程机械的 $\text{NO}_x$ 和 $\text{PM}_{2.5}$ 排放贡献较为突出, 分别占49%和35%。长三角中部和北部城市机械排放贡献相对突出。2005~2014年间, 长三角地区非道路移动机械保有量、油耗及排放增幅均相对较快, 预计到2020和2025年, 区域非道路移动机械总量增速明显放缓, 柴油消费量分别比2014年增加2%和8%。到2020年,  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、CO、VOCs、 $\text{PM}_{10}$ 和 $\text{PM}_{2.5}$ 排放分别比2014年下降97%、10%、3%、10%、11%和11%; 到2025年分别下降97%、16%、3%、15%、21%和21%。预计未来长三角区域非道路移动机械排放将呈现逐年下降趋势, 但相比机动车降幅仍相对较小, 其排放贡献将日益突出, 加快老旧机械淘汰并进一步提升机械排放标准对削减非道路移动机械排放总量具有十分重要的意义。

**关键词:** 非道路移动机械; 排放清单; 排放预测; 大气污染; 长三角区域

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)09-3965-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.201802082

## Emission Inventory and Prediction of Non-road Machineries in the Yangtze River Delta Region, China

HUANG Cheng, AN Jing-yu, LU Jun

(State Environmental Protection Key Laboratory of the Cause and Protection of Urban Air Pollution Complex, Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, China)

**Abstract:** An air pollutant emission inventory of non-road machineries for the Yangtze River Delta (YRD) region was developed, based on local surveys and relative indicator predictions for cities in the region. Population, fuel consumption, and air pollutant emissions of non-road machineries were predicted for the period 2005 to 2025. The population of non-road machineries in the YRD region in 2014 was  $8.23 \times 10^6$  units, diesel consumption was about  $9.95 \times 10^6$  t, and  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ , CO, VOCs,  $\text{PM}_{10}$ , and  $\text{PM}_{2.5}$  emissions were  $5.5 \times 10^3$ ,  $4.9 \times 10^5$ ,  $7.6 \times 10^5$ ,  $1.1 \times 10^5$ ,  $2.9 \times 10^4$ , and  $2.7 \times 10^4$  t, respectively. Agricultural machineries accounted for 93% of the total population, with their CO and VOC emissions contributing 88% and 77% of respective totals. Construction machineries contributed 49% and 35% of  $\text{NO}_x$  and  $\text{PM}_{2.5}$  emissions. Air pollutant emissions from non-road machineries were mainly concentrated in the middle and northern cities of the YRD region. During the period 2005-2014, the growth rates of population, fuel consumption, and air pollutant emissions of non-road machineries in the YRD region were relatively high. It is estimated that growth will be slowing down in 2020 and 2025. Diesel consumption will increase by 2% and 8% in 2020 and 2025, respectively, compared with 2014 levels. By 2020,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ , CO, VOCs,  $\text{PM}_{10}$ , and  $\text{PM}_{2.5}$  emissions will decrease by 97%, 10%, 3%, 10%, 11%, and 11%, respectively; by 2025, these decreases will reach 97%, 16%, 3%, 15%, 21%, and 21%, respectively. It is expected that air pollutant emissions from non-road machineries will continue to decline in future. However, the decreasing trend of  $\text{NO}_x$ , VOCs, and  $\text{PM}_{2.5}$  emissions from motor vehicles reached 22%, 50%, and 48%, much greater than that of non-road machinery. The emission contributions of non-road machinery will become increasingly significant in future. It is necessary to accelerate the scrapping of old machinery and to further promote emission standards for new machinery to reduce emissions from non-road machineries.

**Key words:** non-road machineries; emission inventory; emission projection; air pollution; the Yangtze River Delta (YRD) region

移动源已成为全球各大城市大气污染的主要来源之一, 对  $\text{PM}_{2.5}$  及光化学前体物均具有重要贡

献<sup>[1~4]</sup>。近年来, 各国机动车排放标准不断提升, 全球道路移动源排放呈逐年下降趋势, 但是非道路

收稿日期: 2018-02-09; 修订日期: 2018-03-13

基金项目: 环境保护公益性行业科研专项(201509005); 国家自然科学基金项目(21777101); 上海市科委项目(16dz1206704)

作者简介: 黄成(1980~), 男, 高级工程师, 主要研究方向为大气污染源排放与控制, E-mail: huangc@saes.sh.cn

移动机械的排放贡献日益突出<sup>[5,6]</sup>,其 $\text{NO}_x$ 、CO、THC和PM排放在全球移动源中的占比已达到18%~29%左右<sup>[7]</sup>.非道路移动机械通常指挖掘机、装载机、推土机、叉车等工程机械以及拖拉机、联合收割机等农用机械,此外还包括港口、机场和企业内部等未纳入道路移动源管理的车辆和设备.为了全面掌握移动源大气污染物排放特征,一些专家学者先后根据我国工程和农业机械保有情况建立了全国尺度非道路移动机械的大气污染物排放清单<sup>[8,9]</sup>.在城市尺度方面,上海、杭州、北京、天津、南京等地也相继通过调查建立了非道路移动机械排放清单<sup>[10~13]</sup>,为非道路移动源排放管控提供了重要支撑.相对而言,区域层面既缺乏可靠的统计资料、也难以开展全面的调查,除珠三角区域外,研究成果仍相对较少<sup>[14~16]</sup>.

长三角是我国经济活动最为频繁、能源消费最为密集的区域之一,人为源大气污染物排放集中<sup>[17]</sup>.区域内建筑施工、港口作业、民航和工业运输频繁,也不乏农业占比较高的城市,各类非道路移动机械的使用频率较高,其大气污染物排放贡献不容忽视.研究团队前期通过实地调查建立了上海、杭州等长三角典型城市的非道路移动机械排放清单,获得了相关的活动水平数据,但区域层面研究仍相对较少;另一方面,该区域机动车排放通过严格管控呈逐年下降趋势<sup>[18]</sup>,非道路移动机械的排放贡献可能逐渐凸显,但缺乏相关的研究予以佐证.因此,本研究结合长三角区域统计资料及典型城市非道路移动机械调查结果,以2014年为基准年,建立了长三角三省一市非道路移动机械大气污染物排放清单,并对2005~2025年间非道路移动机械排放进行了预测,旨在为区域非道路移动机械管控提供科学支撑.

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区域及对象

本研究的区域包括江苏、浙江、安徽和上海三省一市共41个城市.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,包括建筑及市政工程机械、港作机械、场(厂)内机械、农用机械和机场地勤设备,在此基础上进一步按照机械种类、燃料类型、发动机功率和排放标准进行划分,具体分类原则参见文献<sup>[10]</sup>.

### 1.2 排放清单建立方法

#### 1.2.1 油耗及排放计算

各类机械的排放量根据其燃油消耗量及基于单

位燃油的排放因子进行计算,具体如式(1)所示.

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

式中, $E_j$ 为 $j$ 类污染物的排放量(t),污染物种类包括 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、CO、VOCs、 $\text{PM}_{10}$ 和 $\text{PM}_{2.5}$ ;  $FC_i$ 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( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ).

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,如式(2)所示.其中,各类机械的小时油耗数据取自文献<sup>[10]</sup>的研究成果.

$$FC_i = P_i \times H_i \times FR_i \quad (2)$$

式中, $P_i$ 为 $i$ 类机械的保有量(台);  $H_i$ 为 $i$ 类机械的年平均工作小时数(h);  $FR_i$ 为 $i$ 类机械的小时油耗( $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$ ).

#### 1.2.2 保有量估算

由于目前我国尚未建立非道路移动机械台账管理体系,除农用机械外,均无统一的保有量信息可直接获取.为此,本研究根据上海和杭州实地调查获得的保有量对其他城市进行了推算,上海和杭州市非道路移动机械的调查方法和结果参见文献<sup>[10]</sup>.其中,建筑及市政工程机械采用房屋施工面积进行推算;港作机械根据港口货物吞吐量进行推算;企业场(厂)内机械根据重工业总产值进行估算;机场地勤设备根据民航客运量进行估算;农用机械直接使用各城市统计年鉴结果.

#### 1.2.3 活动水平确定

活动水平是编制源清单的关键要素,非道路移动机械的活动水平主要为各类机械的年均工作小时数.考虑到长三角地区工业、交通和农业等工作方式基本相近,本研究采用上海和杭州实地调查的工作小时数进行计算,具体如表1所示.本研究确定的各类机械工作小时数普遍高于文献<sup>[19]</sup>中推荐的小时数,其中工程类机械和农用机械分别高出92%和16%.挖掘机械和铲运机械与李东玲等<sup>[20]</sup>的调查结果较为接近,农用机械在各地的使用方式差异较大,本研究略高于付明亮等<sup>[21]</sup>和葛蕴珊等<sup>[22]</sup>调查的结果.

#### 1.2.4 排放因子确定

非道路移动机械 $\text{SO}_2$ 排放因子采用燃料平衡法计算,如式(3)所示.

$$EF_{i,l} = 2 \times \sum (S_l \times F_{i,l}) \times 1000 \quad (3)$$

式中, $S_l$ 为 $l$ 类燃料的硫含量;  $F_{i,l}$ 为 $i$ 类机械使用

表 1 各类非道路移动机械年工作小时数

Table 1 Annual working hours for various non-road machineries		
机械类型		年均工作小时数/h
第 1 级	第 2 级	
	挖掘机械	1 580
	铲运机械	1 261
	起重机械	1 826
	压实机械	617
	路面机械	559
	桩工机械	617
	发电机	371
建筑及市政工程机械	起重机械	4 342
	叉车	950
	牵引车	2 969
	其他工程机械	1 505
场(厂)内机械	所有	1 156
	拖拉机	615
农用机械	收割机	262
	其他农用机械	315
	场内客/货车	2 104
机场地勤设备	机场工程车	1 639

l 类燃料的占比。其中，柴油和汽油硫含量分别根据普通柴油和车用汽油标准的实施时间确定，2005 和 2010 年非道路移动机械用普通柴油以国 1 为主，硫含量为  $2 \times 10^{-3}$ ；2014 年升级至国 3，硫含量为  $3.5 \times 10^{-4}$ ；2020 和 2025 年非道路移动机械用柴油将升级至国 6 水平，硫含量为  $1 \times 10^{-5}$ 。

各类机械的  $\text{NO}_x$ 、CO、VOCs、 $\text{PM}_{10}$  和  $\text{PM}_{2.5}$  平均排放因子主要参考 NONROAD 模型<sup>[23]</sup>、环境保护部排放清单指南<sup>[19]</sup>及国内相关研究实测的排放因子<sup>[20-22, 24-27]</sup>进行确定。除平均排放因子外，本研究还考虑了不同功率段及排放标准阶段的排放因子差异，该数据主要根据 NONROAD 模型、环境保护部排放清单指南以及排放标准中各功率和排放标准的排放因子相对值推算获得，如表 2 所示。

### 1.2.5 空间分配

不同类型非道路移动机械排放分别按照点源或面源形式分配入长三角  $4 \text{ km} \times 4 \text{ km}$  网格，建筑及市政工程机械、企业场(厂)内机械和农用机械按照面源进行分配，其中，建筑及市政工程机械和农用机械分别按照城市和农田土地利用类型进行分摊，企业场(厂)内机械按照长三角地区工业企业分布进行分摊。港作机械和机场地勤设备按照港口码头和机场的经纬度位置进行分摊。

## 1.3 排放预测方法

### 1.3.1 驱动力预测

本研究假设房屋施工面积、港口货物吞吐量、重工业总产值和民航客运量与各省市人均国民生产

总值(GDP)相关，农业机械总动力与第一产业(一产)GDP 相关，并收集建立了 2005 ~ 2016 年长三角三省一市上述指标与非道路移动机械相关指标的关联性，如图 1 所示，其中实心点为 2005 ~ 2013 年各

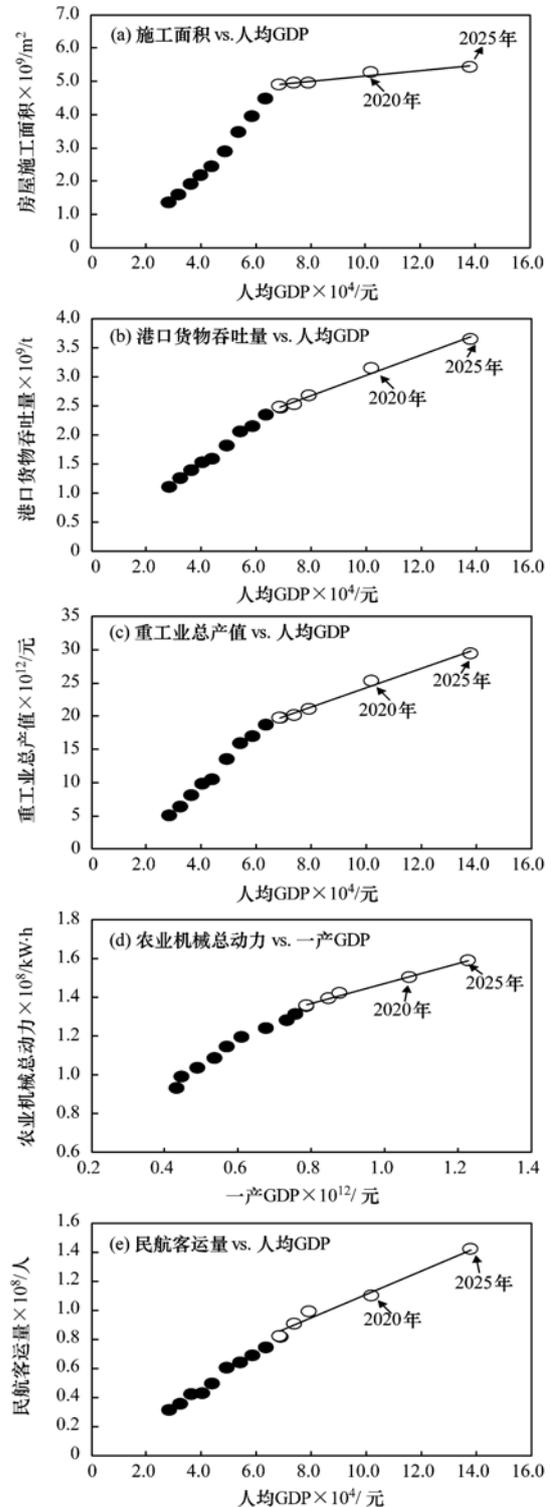


图 1 2005 ~ 2025 年非道路移动机械相关指标与社会经济发展指标的关联性

Fig. 1 Relationships of non-road machinery related indicators with economic indicators from 2005 to 2025

表 2 主要类型非道路移动机械确定的排放因子

Table 2 Emission factors of major non-road machineries

机械类型	燃料类型	功率/kW	排放标准	排放因子/ $g \cdot kg^{-1}$				
				NO <sub>x</sub>	CO	VOCs	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>
挖掘机械/铲运机械/压实机械/路面机械/桩工机械/叉车/牵引车/其他工程机械/机场工程车/发电机	柴油	<37	国0	52.0	24.6	8.6	4.7	4.5
			国1	43.3	12.6	3.0	2.7	2.6
			国2	36.4	12.6	3.0	2.7	2.5
			国3	34.8	11.7	2.9	2.2	2.1
			国4	34.8	11.7	2.9	2.2	2.1
		[37, 75)	国0	59.1	19.2	6.5	4.3	4.0
			国1	48.7	16.2	4.6	3.1	2.9
			国2	38.0	13.5	3.2	1.7	1.6
			国3	25.1	13.7	2.5	1.9	1.8
			国4	21.3	13.7	2.5	0.9	0.9
		[75, 130)	国0	68.3	22.7	5.7	3.1	3.0
			国1	51.3	13.2	4.1	2.4	2.3
			国2	36.0	12.0	3.0	1.4	1.4
			国3	21.2	10.5	2.3	1.5	1.4
			国4	18.1	10.5	2.3	0.8	0.7
		≥130	国0	70.7	18.0	5.9	2.9	2.8
			国1	56.9	12.0	3.0	1.8	1.8
			国2	39.1	8.1	2.4	0.9	0.8
			国3	21.7	7.4	2.1	1.0	1.0
			国4	18.5	7.4	2.1	0.5	0.5
起重机械	柴油	[75, 130)	国0	48.8	16.1	4.3	2.6	2.5
			国1	38.0	8.6	2.9	2.1	2.0
			国2	26.2	8.6	2.5	1.1	1.0
			国3	14.3	7.4	1.7	1.1	1.1
			国4	12.2	7.4	1.7	0.6	0.5
		≥130	国0	50.0	14.1	4.7	2.5	2.4
			国1	40.2	9.4	2.4	1.6	1.5
			国2	27.7	6.3	1.9	0.8	0.7
			国3	14.5	5.8	1.7	0.8	0.8
			国4	12.3	5.8	1.7	0.4	0.4
拖拉机/联合收割机	柴油	<37	国0	57.4	43.6	13.6	5.8	5.5
			国1	41.5	28.1	6.6	3.1	2.9
			国2	34.6	23.4	5.4	2.5	2.4
			国3	33.1	22.4	5.2	2.4	2.3
			国4	33.1	22.4	5.2	2.4	2.3
		[37, 75)	国0	51.6	33.4	10.5	4.7	4.5
			国1	45.2	27.1	6.8	3.5	3.4
			国2	38.1	22.0	4.3	2.5	2.4
			国3	24.3	18.5	2.8	2.3	2.2
			国4	20.6	18.5	2.8	1.1	1.1
所有机械	汽油	[75, 130)	国0	55.7	38.6	10.8	5.4	5.1
			国1	48.1	30.8	7.3	4.1	3.9
			国2	35.7	24.7	4.9	2.4	2.3
			国3	21.5	18.7	2.4	2.2	2.1
			国4	18.3	18.7	2.4	1.1	1.0
		≥130	国0	65.5	36.3	9.5	4.2	4.0
			国1	51.1	20.0	6.3	3.4	3.2
			国2	35.1	15.6	5.1	2.2	2.1
			国3	20.2	11.1	2.6	2.0	1.9
			国4	17.1	11.1	2.6	1.0	0.9
所有机械	CNG/LPG/其他	—	国0	5.5	787.1	118.1	1.8	1.8
			国1	6.8	802.0	75.2	1.3	1.3
			国2	4.8	703.5	64.5	0.8	0.8
			国3	3.6	641.2	51.6	0.6	0.6
所有机械	CNG/LPG/其他	—	—	24.7	130.6	68.6	0.3	0.3

项指标的相关性,可见施工面积、港口货物吞吐量、重工业总产值、农业机械总动力和民航客运量

分别与人均 GDP 和一产 GDP 存在密切的相关关系;自 2014 年起,非道路移动机械相关指标随经济

指标的增长趋势逐步趋缓. 因此, 根据长三角三省一市 2020 和 2025 年 GDP、人口和一产占比的规划要求, 本研究对 2020 和 2025 年长三角三省一市非道路移动机械相关指标进行了预测, 如图 1 中空点所示. 预计到 2020 年, 施工面积、港口货物吞吐量、重工业总产值、农业机械总动力和民航客运量等指标相比 2014 年分别增长 8%、27%、28%、11% 和 34%, 2025 年各项指标进一步比 2020 年增长 3%、16%、17%、6% 和 29%.

### 1.3.2 排放标准预测

排放标准构成对非道路移动机械排放计算结果具有较大影响, 为此, 本研究依据各阶段排放标准的实施时间, 结合机械的新增量和淘汰量, 对各年度非道路移动机械排放标准构成进行滚动更新. 各类机械的排放标准实施时间参照国家标准规定的时间节点, 并假定 2019 年实施国 4 排放标准, 场内车辆的排放标准参照机动车排放标准的实施节点. 机

械的淘汰量根据各类机械的平均机龄推算获得, 据调查, 建筑及市政工程机械、港作机械、场(厂)内机械、农用机械和机场地勤设备的平均机龄依次为 9、7、8、10 和 6 a, 假定机械存活率符合正态分布, 各类型机械的新增量可参照 NONROAD 模型<sup>[28]</sup> 进行计算, 具体如式(4)所示.

$$NG_w = PG_w / [(-1.4306 \times PG_w \times Age) + (-0.24 \times PG_w) + 1] \quad (4)$$

式中,  $NG_w$  为机械新增量(台);  $PG_w$  为机械净增量(台), 本研究根据驱动力预测获得;  $Age$  为各类机械的平均机龄(a).

图 2 所示为预测所得的各类机械 2005 ~ 2025 年各阶段排放标准构成情况. 2005 ~ 2014 年长三角区域非道路移动机械以国 0、国 1 和国 2 标准为主, 随着排放标准的提升, 2020 年和 2025 年国 3 机械占比相对增加, 港作机械和机场地勤设备中将新增一定量的国 4 和国 5 标准场内车辆.

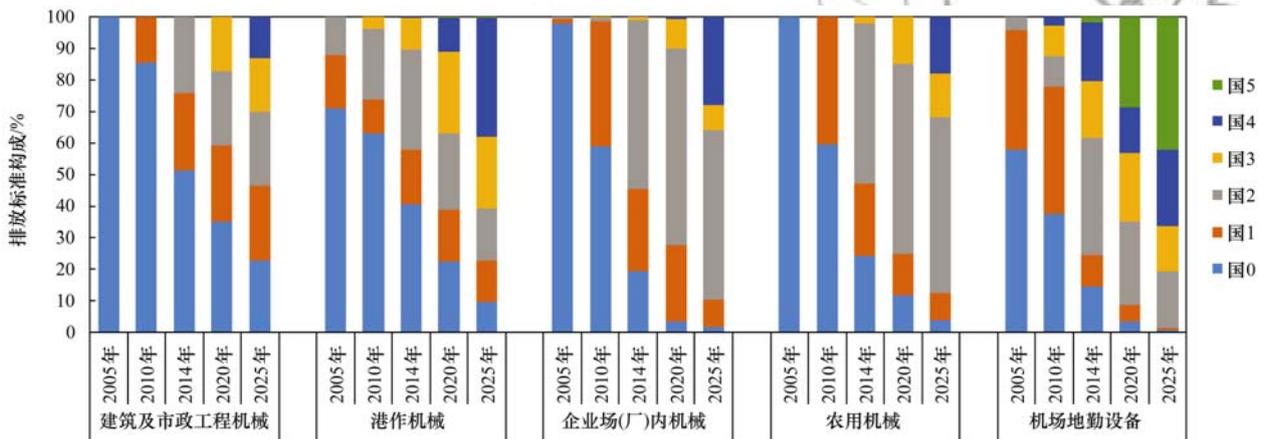


图 2 2005 ~ 2025 年各类非道路移动机械排放标准构成预测

Fig. 2 Predictions of emission standards for various non-road machineries from 2005 to 2025

## 2 结果与讨论

### 2.1 基准年非道路移动机械排放清单

表 3 所示为 2014 年长三角区域非道路移动机械保有量、柴油消费量及大气污染物排放量计算结果. 根据测算, 区域机械总量约为  $8.23 \times 10^6$  台, 主要集中在江苏省和安徽省, 分别占 36% 和 53%; 机械柴油消费量约为  $9.95 \times 10^6$  t, 约占三省一市柴油总消费量的 30% 左右<sup>[29]</sup>, 上海、江苏、浙江和安徽分别占 6%、41%、21% 和 32%; 机械的  $SO_2$ 、 $NO_x$ 、CO、VOCs、 $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  排放合计分别为  $5.5 \times 10^3$ 、 $4.9 \times 10^5$ 、 $7.6 \times 10^5$ 、 $1.1 \times 10^5$ 、 $2.9 \times 10^4$  和  $2.7 \times 10^4$  t, 江苏省排放占比最高, 约为 41% ~ 45%, 其次为安徽省, 约为 30% ~ 39%. 与国家环

保部发布的 2015 年全国工程机械和农用机械排放总量相比, 本研究测算的长三角区域非道路移动机械  $NO_x$ 、VOCs 和  $PM_{10}$  排放分别占到 12%、17% 和 8% 左右<sup>[9]</sup>.

图 3 所示为长三角三省一市非道路移动机械排放的  $4 \text{ km} \times 4 \text{ km}$  网格化空间分布结果. 可见, 长三角中东部地区非道路机械主要污染物排放均相对集中, 特别是在上海市、江苏省沿江 8 市及浙江省嘉兴、杭州和宁波等城市地区排放相对密集, 主要来自建筑及市政工程机械; 长三角北部地区排放相对高于南部, 主要来自农用机械排放.

### 2.2 各类型非道路移动机械排放构成

图 4 所示为 2014 年长三角区域各类型非道路移动机械保有量、柴油消费量及大气污染物排放构

表 3 2014 年长三角区域非道路移动机械保有量、柴油消费量及大气污染物排放量

Table 3 Population, diesel consumption, and air pollutant emissions from non-road machineries in the YRD region in 2014

省市	机械保有量 $\times 10^4$ /台	柴油消费量 $\times 10^4$ /t	大气污染物排放量 $\times 10^4$ /t					
			SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	CO	VOCs	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>
上海市	10.43	60.63	0.03	3.08	1.64	0.33	0.15	0.14
江苏省	294.09	411.07	0.23	20.41	34.06	4.70	1.18	1.12
浙江省	83.21	207.53	0.12	11.08	10.50	1.67	0.54	0.51
安徽省	435.25	315.79	0.17	14.77	30.09	4.14	1.00	0.95
合计	822.99	995.02	0.55	49.33	76.30	10.85	2.87	2.73

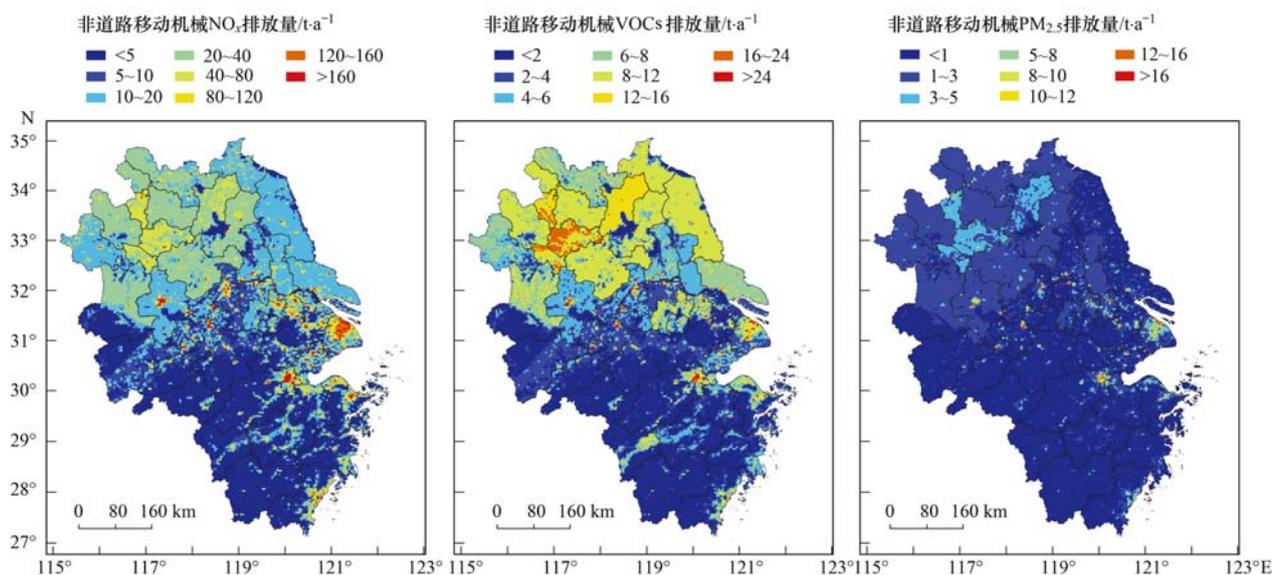


图 3 2014 年长三角区域非道路移动机械排放的空间分布

Fig. 3 Spatial allocations of non-road machinery emissions in the YRD region in 2014

成情况。可见，农用机械是长三角地区最主要的非道路移动机械类型，占机械总量的 93%，其对 CO 和 VOCs 排放的贡献最为突出，分别占 88% 和 77%。建筑及市政工程机械是单机油耗和排放贡献最大的机械种类，尽管其保有量仅占 4%，柴油消费量占比可达 43%，SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、PM<sub>10</sub> 和 PM<sub>2.5</sub> 排放贡献分别为 47%、49%、35% 和 35%，一方面是由于建筑及市政工程机械的功率相对高于农用机械；另一方面与建筑及市政工程机械工作时长大于农用机械有关。港作机械、企业场(厂)内机械和机场地勤设备分别占机械总量的 0.2%、2.9% 和 0.2%，柴油消费量分别占 2.7%、10.9% 和 0.8%，污染物排放分别在 0.8% ~ 2.8%、2.5% ~ 9.7% 和 0.4% ~ 1.0% 之间。

图 5 给出了长三角三省一市各城市不同类型非道路移动机械主要大气污染物排放的构成情况。可见，长三角各城市非道路移动机械排放构成存在显著差异，中部和南部城市建筑及市政工程机械的排放贡献相对较高，企业场(厂)内机械排放也相对突

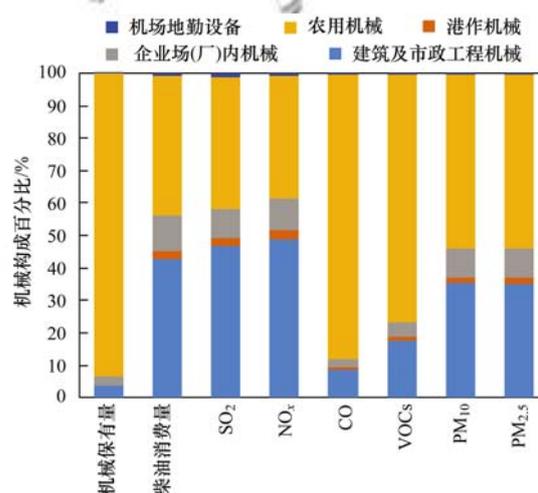


图 4 2014 年长三角区域各类非道路移动机械保有量、柴油消费量及大气污染物排放构成

Fig. 4 Composition of population, diesel consumption, and air pollutant emissions from non-road machineries in the YRD region in 2014

出，主要与长三角中部和南部城市建设力度相对较大及其重工业占比相对较高有关；西部和北部城市

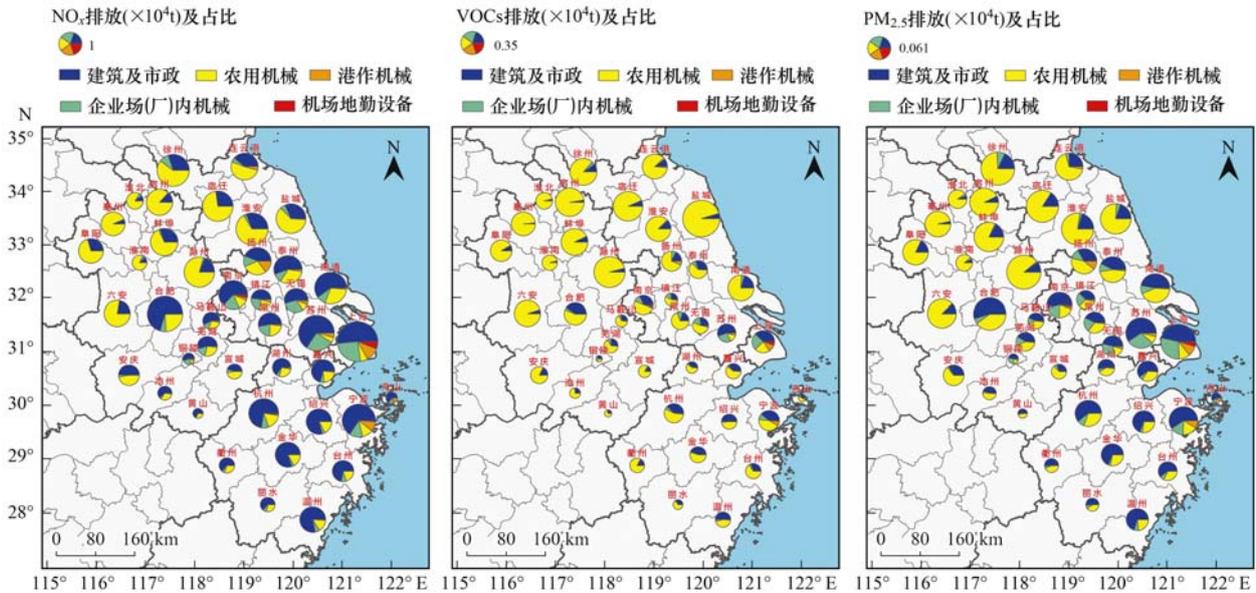


图 5 2014 年长三角各城市不同类型非道路移动机械排放构成

Fig. 5 Emission contributions of various non-road machinery types for each city in the YRD region in 2014

农用机械排放贡献相对突出；沿海及长江一带城市的港作机械排放占比相对较高。

### 2.3 机械保有量与柴油消费量预测

图 6 所示为 2005 ~ 2025 年长三角地区各类型非道路移动机械保有量及柴油消费量的预测结果。可见，2005 ~ 2014 年间，长三角地区非道路移动机械总量和柴油消费量增长较为迅速，2010 年和 2014 年非道路移动机械保有量相比 2005 年分别增加了 33% 和 57%，柴油消费量增幅更大，分别为 62% 和 124%。各类型机械中，建筑及市政工程机械和企业场(厂)内机械的增幅最大，主要与近 10 年来长三角地区城市建设和工业发展速度较快有关，其次为港作机械和机场地勤设备，随长三角地区港口货运量及民航客运量上升呈较快增长趋势。根据预测，2020 年和 2025 年长三角地区社会经济

将基本进入稳定发展态势，机械保有量及柴油消费量增速将相对放缓，2020 年和 2025 年非道路移动机械保有量相比 2014 年分别增加了 2% 和 9%，柴油消费量增幅分别为 2% 和 8%。港作机械和机场地勤设备预计将成为长三角地区增幅最大的机械类型。相对而言，长三角区域农用机械基本保持稳定，2010、2014、2020 和 2025 年农用机械保有量分别比 2005 年增加了 30%、50%、53% 和 63%，柴油消费量分别增加 29%、49%、51% 和 61%。

### 2.4 各类型非道路移动机械排放预测

长三角地区 2005 ~ 2025 年各类型非道路移动机械大气污染物排放量的变化趋势如图 7 所示。其中，机械 SO<sub>2</sub> 排放自 2014 年起将呈现快速下降趋势，主要是由于油品标准快速提升使硫含量显著下降。NO<sub>x</sub> 排放于 2014 年左右达到峰值，分别比

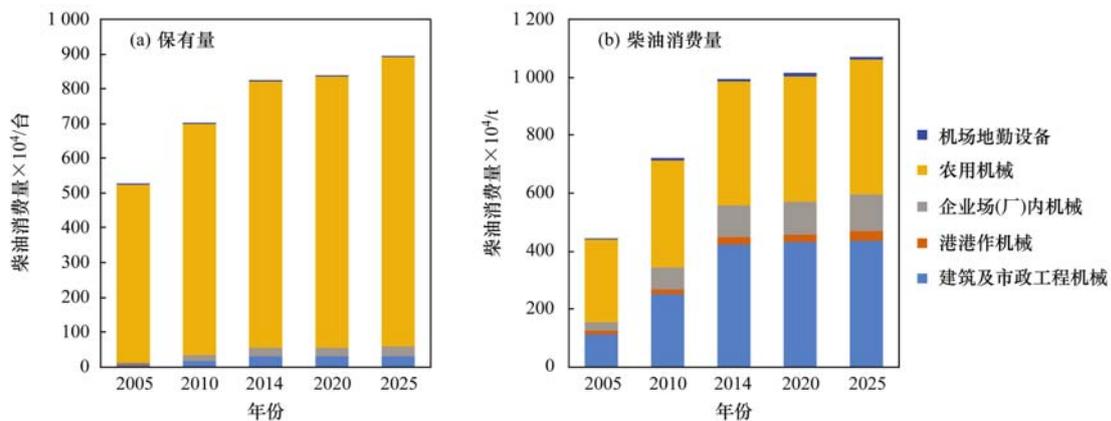


图 6 2005 ~ 2025 年长三角各类型非道路移动机械保有量及柴油消费量变化预测

Fig. 6 Predictions of population and diesel consumption of various non-road machinery types in the YRD region from 2005 to 2025

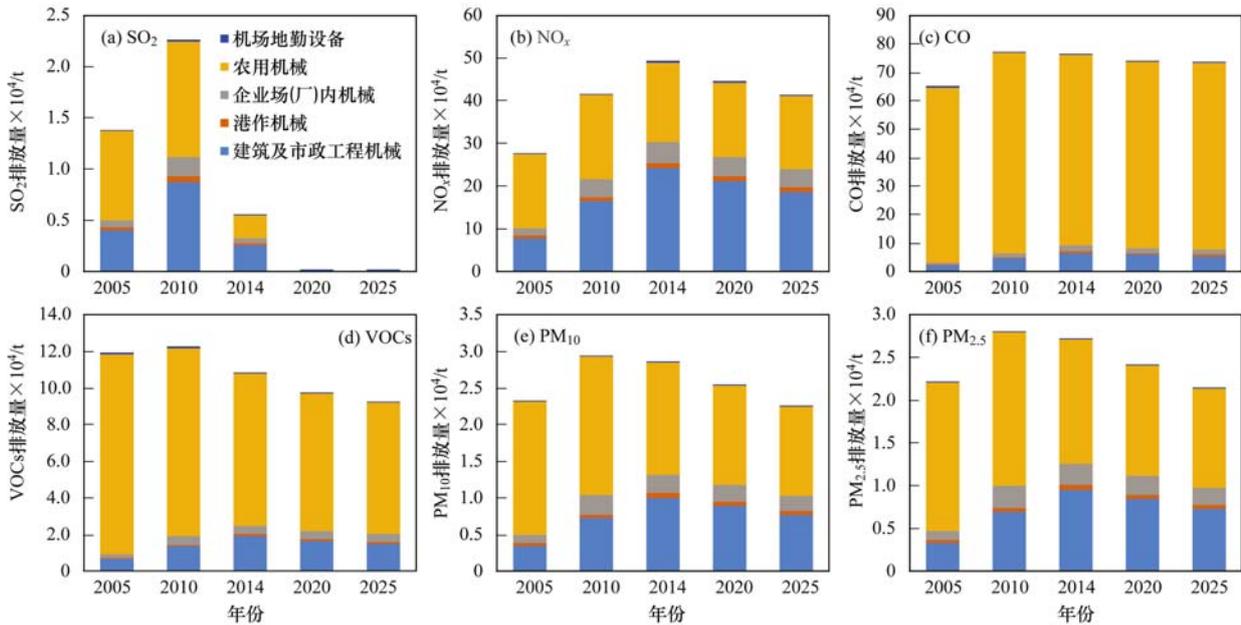


图 7 2005 ~ 2025 年长三角各类型非道路移动机械污染物排放量变化预测

Fig. 7 Predictions of air pollutant emissions from various non-road machinery types in the YRD region from 2005 to 2025

2005 和 2010 年上升 78% 和 18%，2020 和 2025 年将比 2014 年分别下降 10% 和 16%。CO、VOCs、PM<sub>10</sub> 和 PM<sub>2.5</sub> 排放分别于 2010 年左右达到峰值，到 2020 年，CO、VOCs、PM<sub>10</sub> 和 PM<sub>2.5</sub> 排放分别比 2014 年下降 3%、10%、11% 和 11%，到 2025 年分别下降 3%、15%、21% 和 21%。排放标准提升是非道路移动机械排放下降的主要原因，但是与机动车相比，非道路移动机械主要污染物降幅仍相对较小，Zhang 等<sup>[18]</sup> 的研究预测，到 2020 年长三角主要城市机动车 NO<sub>x</sub>、HC 和 PM<sub>2.5</sub> 将分别比 2014 年下降 22%、50% 和 48% 左右，远高于非道路移动机械的

排放降幅。可见，非道路移动机械在未来长三角区域流动源中的排放贡献将更加突出，有必要进一步提升非道路移动机械排放标准，加强对机械尾气污染物排放的管控。

图 8 给出了长三角各城市 2005 ~ 2025 年非道路移动机械主要大气污染物排放的预测结果。各城市非道路移动机械 NO<sub>x</sub> 和 PM<sub>2.5</sub> 排放均呈现先上升后下降的趋势，VOCs 排放则自 2005 和 2010 年起呈现持续下降态势。从区域分布来看，长三角沿海及北部城市的非道路移动机械排放相对较高，在未来相当长一段时期内，非道路移动机械排放仍将保

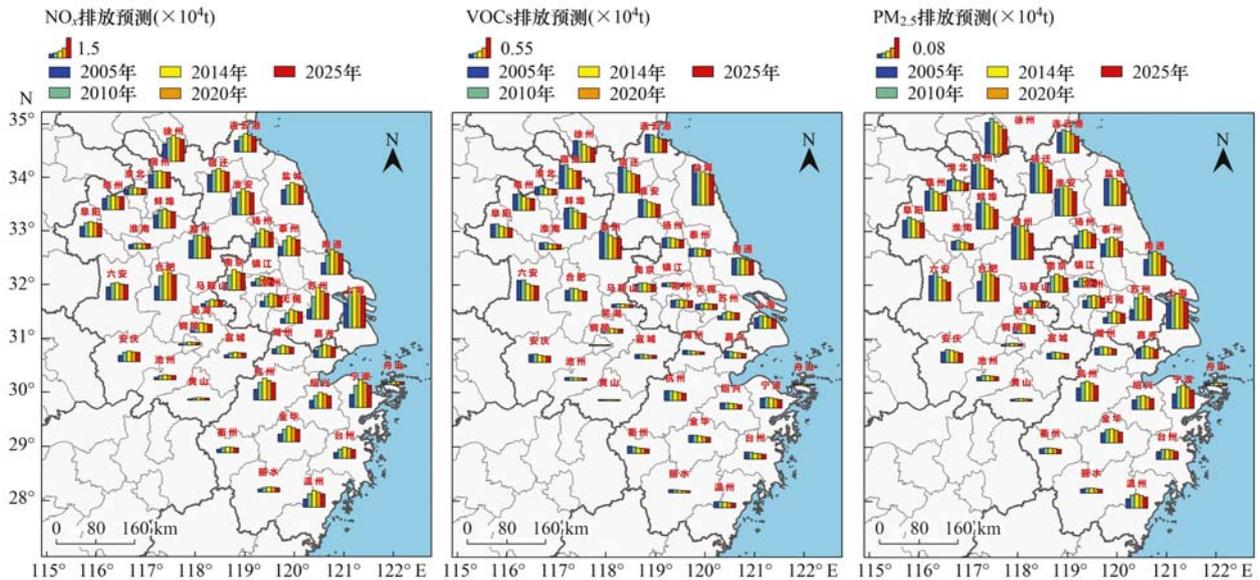


图 8 2005 ~ 2025 年长三角各城市非道路移动机械排放预测

Fig. 8 Predictions of air pollutant emissions from non-road machineries for each city in the YRD region from 2005 to 2025

持在较高的水平上。

## 2.5 各类型机械平均排放水平变化预测

图9所示为2005~2025年各类型非道路移动机械主要污染物单位油耗排放的预测结果。可见,各类型机械的 $\text{NO}_x$ 、VOCs和 $\text{PM}_{2.5}$ 单位油耗排放总体上均呈逐年下降趋势,其中,VOCs和 $\text{PM}_{2.5}$ 的单位油耗排放降幅相对较大,2010、2014、2020和2025年VOCs平均排放水平分别比2005年下降了28%、52%、60%和66%; $\text{PM}_{2.5}$ 分别下降了21%、44%、51%和59%; $\text{NO}_x$ 的降幅相对较小,分别下

降约6%、19%、28%和37%。从机械类型来看,机场地勤设备的单位油耗排放水平降幅最大,其次为农用机械、企业场(厂)内机械和港作机械,建筑及市政工程机械的排放水平降幅最小,主要是由于其淘汰更新力度较小、标准提升速度较慢所致。提升机械排放标准,降低单机污染物排放水平是削减非道路移动机械排放的根本举措,我国现行的非道路移动机械排放标准距离发达国家或车用发动机仍存在相当大的差距,要有效减少非道路移动机械排放必须大幅加快机械标准的提升步伐。

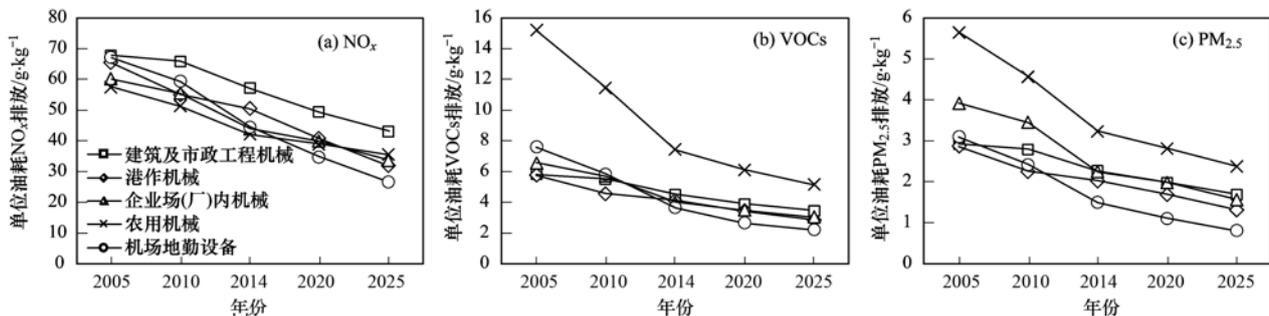


图9 2005~2025年各类型非道路移动机械单位油耗排放预测

Fig. 9 Predictions of fuel-based emission factors of various non-road machinery types from 2005 to 2025

## 3 结论

(1) 2014年长三角三省一市非道路移动机械总量约为 $8.23 \times 10^6$ 台,柴油消费量约 $9.95 \times 10^6$ t, $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、CO、VOCs、 $\text{PM}_{10}$ 和 $\text{PM}_{2.5}$ 排放分别为 $5.5 \times 10^3$ 、 $4.9 \times 10^5$ 、 $7.6 \times 10^5$ 、 $1.1 \times 10^5$ 、 $2.9 \times 10^4$ 和 $2.7 \times 10^4$ t。其中,江苏省和安徽省的机械保有量、油耗及排放占比相对较高。从空间分布来看,上海市、江苏省沿江8市及浙江省嘉兴、杭州和宁波等城市地区排放相对密集,北部地区排放相对高于南部。

(2) 农用机械在长三角地区非道路移动机械中的占比最高,达到93%,其CO和VOCs排放贡献最为突出,分别为88%和77%;建筑及市政工程机械的单机油耗和排放最大,仅占保有量4%的机械贡献了43%的柴油消费量占比,其 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{PM}_{10}$ 和 $\text{PM}_{2.5}$ 排放贡献分别为47%、49%、35%和35%。各城市机械排放构成存在较大差异,长三角中部和南部城市建筑及市政工程机械和企业场(厂)内机械排放占比最大,西部和北部城市农用机械排放贡献相对突出,沿海及长江一带城市的港作机械排放相对较高。

(3) 据预测,2005~2014年间,长三角地区非道路移动机械保有量、油耗及排放增幅均相对较

快,2010年和2014年机械保有量分别比2005年增加了33%和57%,柴油消费量分别上升62%和124%。到2020和2025年,区域非道路移动机械总量增速明显放缓,主要与长三角区域城市建设、工业发展和港口航运基本趋于稳定有关,2020年和2025年机械保有量分别比2014年增加2%和9%,柴油消费量增加2%和8%。各类污染物中, $\text{SO}_2$ 降幅最大,主要得益于油品改进; $\text{NO}_x$ 排放于2014年达到峰值,2020和2025年分别比2014年下降10%和16%。CO、VOCs、 $\text{PM}_{10}$ 和 $\text{PM}_{2.5}$ 排放分别于2010年左右达到峰值。

(4) 预测表明,非道路移动机械单位油耗排放水平呈逐年下降趋势,但降幅显著低于机动车,非道路移动机械在区域流动源中的排放占比预计将更加突出。我国现行的非道路移动机械排放标准距离发达国家或车用发动机还存在相当大的差距,加快老旧机械淘汰并进一步提升机械排放标准对削减非道路移动机械排放总量具有十分重要的意义。

### 参考文献:

- [1] Blanchard C L, Tanenbaum S, Hidy G M. Source contributions to atmospheric gases and particulate matter in the southeastern United States[J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46(10): 5479-5488.
- [2] Jathar S H, Woody M, Pye H O T, et al. Chemical transport model simulations of organic aerosol in southern California; model

- evaluation and gasoline and diesel source contributions [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, **17**(6): 4305-4318.
- [ 3 ] Hu L, Millet D B, Baasandorj M, *et al.* Emissions of C<sub>6</sub>-C<sub>8</sub> aromatic compounds in the United States: constraints from tall tower and aircraft measurements [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, **120**(2): 826-842.
- [ 4 ] 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.
- [ 5 ] Dallmann T R, Harley R A. Evaluation of mobile source emission trends in the United States [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2010, **115**(D14): D14305.
- [ 6 ] Xing J, Pleim J, Mathur R, *et al.* Historical gaseous and primary aerosol emissions in the United States from 1990 to 2010 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(15): 7531-7549.
- [ 7 ] 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.
- [ 8 ] 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.
- [ 9 ] 中华人民共和国环境保护部. 中国机动车环境管理年报 2017 [R]. 北京: 中华人民共和国环境保护部, 2017. Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. China vehicle environmental management annual report 2017 [R]. Beijing: Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, 2017.
- [ 10 ] 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): 2738-2747. 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): 2738-2747.
- [ 11 ] 樊守彬, 聂磊, 阙睿斌, 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.
- [ 12 ] 张意, Michel A, 李东, 等. 天津市非道路移动源污染物排放清单开发 [J]. *环境科学*, 2017, **38**(11): 4447-4453. Zhang Y, Andre M, Li D, *et al.* Development of a non-road mobile source emissions inventory for Tianjin [J]. *Environmental Sciences*, 2017, **38**(11): 4447-4453.
- [ 13 ] 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.
- [ 14 ] 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.
- [ 15 ] 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.
- [ 16 ] 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.
- [ 17 ] 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.
- [ 18 ] Zhang S J, Wu Y, Zhao B, *et al.* City-specific vehicle emission control strategies to achieve stringent emission reduction targets in China's Yangtze River Delta region [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2017, **51**: 75-87.
- [ 19 ] 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].
- [ 20 ] 李东玲, 吴焯, 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.
- [ 21 ] 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.
- [ 22 ] 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.
- [ 23 ] U. S. Environmental Protection Agency. Exhaust and crankcase emission factors for non-road engine modeling-compression-ignition, EPA-420-R-10-018 [R]. Washington, DC: United States Environmental Protection Agency, 2010.
- [ 24 ] 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.
- [ 25 ] 曲亮, 何立强, 胡京南, 等. 工程机械不同工况下 PM<sub>2.5</sub> 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<sub>2.5</sub> emissions and its carbonaceous components from construction machines under different typical driving modes [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2015, **28**(7): 1047-1052.

- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] U. S. Environmental Protection Agency. Calculation of age distributions in the nonroad model: Growth and scrappage, EPA-420-R-05-018 [R]. Washington, DC: United States Environmental Protection Agency, 2005.
- [29] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴 2015[M]. 北京: 中国统计出版社, 2015.

环 境 科 学

## CONTENTS

Emission Inventory and Prediction of Non-road Machineries in the Yangtze River Delta Region, China .....	HUANG Cheng, AN Jing-yu, LU Jun (3965)
Vehicle Exhaust Emission Characteristics and Their Contributions in Jiangsu Province .....	LI Li, ZHANG Jie, ZHAO Qiu-yue, <i>et al.</i> (3976)
Historical Trends of Atmospheric Pb and Hg Emissions from Fossil Fuel Combustion in Shanghai .....	YANG Jing, CHEN Long, LIU Min, <i>et al.</i> (3987)
Emission Inventory of Atmospheric Pollutants and VOC Species from Crop Residue Burning in Guangdong Province .....	SUN Xi-bo, LIAO Cheng-hao, ZENG Wu-tao, <i>et al.</i> (3995)
Mass Concentrations and Size Distributions of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Beibei District, Chongqing .....	LI Yan-pei, HAO Qing-ju, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (4002)
Analysis of Seasonal Variations in Chemical Characteristics and Sources of PM <sub>2.5</sub> During Summer and Winter in Ji'nan City .....	LIU Xiao-di, MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, <i>et al.</i> (4014)
PM <sub>2.5</sub> Pollution Characterization and Cause Analysis of a Winter Heavy Pollution Event, Liaocheng City .....	ZHANG Jing-qiao, WU Ya-jun, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (4026)
Concentrations, Sources, and Dry Deposition Fluxes of Different Forms of Phosphorus in Qingdao Aerosols in Summer .....	WANG Nan, MA Miao, SHI Jin-hui, <i>et al.</i> (4034)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient Volatile Organic Compounds in Winter in Jincheng .....	YANG Fan, YAN Yu-long, GE Yun-fei, <i>et al.</i> (4042)
Enrichment Levels and Comprehensive Pollution Assessment of Dust Heavy Metals in Winter in Beijing .....	XIONG Qiu-lin, ZHAO Wen-ji, LI Da-jun, <i>et al.</i> (4051)
Characteristics of Atmospheric BTX near a Main Road in Hefei City .....	MENG Fan-hao, QIN Min, LIANG Shuai-xi, <i>et al.</i> (4060)
Ozone Generation Potential and Highly Contributing Substances of NMOCs from Landfill Working Face .....	LI Hao, LIU Yan-jun, CHEN Tan, <i>et al.</i> (4070)
Emission Characteristics of Wind-Eroded Dust from Concrete Batching Plants in Beijing .....	LI Bei-bei, HAN Kai-li, QIN Jian-ping, <i>et al.</i> (4078)
Seasonal Variation Characteristics of Pollution Risk in a Riverside Source Area Based on Source Apportionment .....	GAO Xiang, ZUO Rui, GUO Xue-ru, <i>et al.</i> (4086)
Evaluation of Effect of Urban Non-point Source Pollution Control on Porous Asphalt-Bio-retention Combined Roads .....	GONG Man-li, ZUO Jun-jie, REN Xin-xin, <i>et al.</i> (4096)
Composition, Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Chromophoric Dissolved Organic Matter in the Lanzhou Reach of the Yellow River .....	..... ZHAO Xia-ting, LI Shan, WANG Zhao-wei, <i>et al.</i> (4105)
Characterization of Dissolved Organic Matter Fractions in the Ning-Meng Section of the Yellow River and Relationship with Metal Ions .....	..... XI Yue, WANG Ting, NI Jin-ren, <i>et al.</i> (4114)
Comparative Characteristics of Optical Absorption in Waters from Yiluo River and Huntai River in Spring .....	..... LI Liu-yang, SHAO Tian-tian, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (4122)
Seasonal Variations in River Water Chemical Weathering and Its Influence Factors in the Malian River Basin .....	..... WANG Yu-shan, HAN Shuang-bao, DENG Qi-jun, <i>et al.</i> (4132)
Characteristics and Genesis of NO <sub>3</sub> Type Water in Shallow Groundwater in Liujiang Basin .....	..... XU Jin, HE Jiang-tao, PENG Cong, <i>et al.</i> (4142)
Development and Evaluation of a Sustainable Long-release Carbon Material Applied for In-Situ Remediation of Groundwater Nitrogen Pollution .....	..... ZHANG Wen, YIN Lin, ZHOU Nian-qing (4150)
Phosphorus Forms and Distribution Characteristics in the Sediment and Soil of the Water-Level-fluctuating Zone in the Main Stream of the Three Gorges Reservoir .....	..... ZHANG Zhi-yong, WAN Cheng-yan, HU Hong-qing, <i>et al.</i> (4161)
Distribution Characteristics and Release Fluxes of Phosphorus Forms in Xiangxi Bay Sediments in the Three Gorges Reservoir Before and After Impoundment .....	..... LIU Xin-yuan, SONG Lin-xu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (4169)
Effect of Zirconium-modified Zeolite Addition on Phosphorus Release and Immobilization in Heavily Polluted River Sediment .....	..... HE Si-qi, ZHANG Wei, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (4179)
Impact of Human Activities on Net Anthropogenic Nitrogen Inputs (NANI) at Township Scale in Erhai Lake Basin .....	..... LI Ying, LIU Hong-bin, LEI Qiu-jiang, <i>et al.</i> (4189)
Simulation of Inorganic Nitrogen Fluxes at the Sediment-water Interface in a Typical Intertidal Zone, Eastern China .....	..... NIE Jia-qin, WANG Dong-qi, CHEN Jie, <i>et al.</i> (4199)
Effects of Aquaculture on Ammonia-oxidizing Prokaryotes in Sediments of Eastern Lake Taihu .....	..... CHU Yu, HE Xiao-wei, ZENG Jin, <i>et al.</i> (4206)
Transformation of Ammonia in Wetland Sediments for Treatment of Mining Wastewater .....	..... WANG Hai-bo, MA Ding, YUE Zheng-bo, <i>et al.</i> (4215)
Distribution Characteristics of Sulfonamide Antibiotic Resistance Genes in a Drinking Water Source in East China .....	..... HU Ya-ru, JIANG Lei, ZHANG Tian-yang, <i>et al.</i> (4222)
Distribution Characteristics of Sulfonamides and Sulfamethoxazole-Resistant Bacteria in Tannery Wastewater Treatment Processes .....	..... HUA Li, LI Lu, YANG Chun-yan (4229)
Effects of Different Substrates and Particle Sizes on Wastewater Purification .....	..... ZHAO Lin-li, SHAO Xue-xin, WU Ming, <i>et al.</i> (4236)
Substrate Flow by Different Biochemical Activities in the Urban Sewage Network .....	..... YAO Xiang-yi, SHI Xuan, SANG Lang-tao, <i>et al.</i> (4242)
Reducing Membrane Fouling from Micro-Flocculation in a Humic Acid Ultrafiltration Process .....	..... WANG Xu-dong, SHI Cai-xia, LIAO Zheng-wei, <i>et al.</i> (4249)
Enhanced Degradation of Aniline by PS Oxidation in the Presence of UV and Ferric Oxalate .....	..... HAN Dong-hui, LI Ying, LI Kai-ming, <i>et al.</i> (4257)
Behavior and Degradation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Coking Wastewater of A/O <sup>2</sup> and A/O/H/O Processes .....	..... WU Hai-zhen, SUN Sheng-li, LIU Guo-xin, <i>et al.</i> (4265)
Effects of Long-term Side Stream Extract on Phosphorus Removal and Recovery Performance of EBPR System .....	..... YU Xiao-jun, LI Jie, ZHOU Meng, <i>et al.</i> (4274)
Effect of NaCl Salinity on Extracellular Polymeric Substances and Bioflocculation of Anoxic Sludge in A <sup>2</sup> /O Process .....	..... ZHANG Lan-he, TIAN Rui, GUO Jing-bo, <i>et al.</i> (4281)
Effect of Temperature and pH on Nitrogen Conversion in Feammox Process .....	..... CHEN Fang-min, JIN Run, YUAN Yan, <i>et al.</i> (4289)
Inhibitory Kinetics of Free Ammonia (FA) on Ammonia-oxidizing Bacteria (AOB) .....	..... SUN Hong-wei, YU Xue, GAO Yu-xue, <i>et al.</i> (4294)
Effect of HRT on Nitrogen Removal Using ANAMMOX and Heterotrophic Denitrification .....	..... AN Fang-jiao, ZHAO Zhi-chao, HUANG Li, <i>et al.</i> (4302)
Reactivation Performance of Nitrosation Flocculent Sludge After Long-term Storage .....	..... LI Tian, WEI Fan-kai, WANG Yu-chang, <i>et al.</i> (4310)
Analysis of Characteristics and Sources of Heavy Metals in Farmland Soils in the Xijiang River Draining of Guangxi .....	..... SONG Bo, ZHANG Yun-xia, PANG Rui, <i>et al.</i> (4317)
Soil Organic Carbon of Purple Soil as Affected by Different Application of Biochar .....	..... LUO Mei, TIAN Dong, GAO Ming, <i>et al.</i> (4327)
Effects of Straw and Biochar Addition on Soil Carbon Balance and Ecological Benefits in a Rape-maize Rotation Planting System .....	..... LI Jiao, TIAN Dong, HUANG Rong, <i>et al.</i> (4338)
Potential to Ensure Safe Production from Rice Fields Polluted with Heavy Cadmium by Combining a Rice Variety with Low Cadmium Accumulation, Humic Acid, and Sepiolite .....	..... XIE Xiao-mei, FANG Zhi-ping, LIAO Min, <i>et al.</i> (4348)
Interactive Effects of Ozone and Drought on Antioxidant Enzyme Activities of Poplar Leaves .....	..... ZHOU Hui-min, LI Pin, GAO Feng, <i>et al.</i> (4359)
Effects of Different Levels of Irrigation with Reclaimed Water on Soil Enzyme Activity and Distribution of Thermotolerant Coliforms .....	..... HAN Yang, LI Ping, QI Xue-bin, <i>et al.</i> (4366)
Characteristics of Heavy Metals in Chicken Manure Organic Fertilizers in the Huang-Huai-Hai Region and related Environmental Risk Assessment .....	..... LI Fa, XU Ying-ming, WANG Lin, <i>et al.</i> (4375)
Heavy Metal Content of Rural Living Solid Waste and Related Source and Distribution Analysis .....	..... JIN Qi, GAO Hong, YUE Bo, <i>et al.</i> (4385)