

**【PM<sub>2.5</sub>与O<sub>3</sub>协同防控科技攻关成果专题】编者按:**2017年,国务院常务会议确定设立大气重污染成因与治理攻关项目,由生态环境部牵头,会同科学技术部、中国科学院、农业农村部、工业和信息化部、中国气象局、国家卫生健康委员会、高校等多部门和单位,集中优秀科研团队,针对京津冀及周边地区秋冬季大气重污染成因、重点行业和污染物排放管控技术、居民健康防护等开展集中攻关.生态环境部探索“1+X”科技攻关新型举国体制机制,组建国家大气污染防治攻关联合中心.2020年,生态环境部陆续启动一系列细颗粒物(PM<sub>2.5</sub>)和臭氧(O<sub>3</sub>)复合污染协同防控科技攻关先导项目和城市二期“一市一策”驻点跟踪研究,进一步推动京津冀及周边地区、汾渭平原等区域空气质量持续改善.本专题将展示2017年以来大气攻关系列项目取得的研究成果,本期内容涉及大气重污染成因与治理、大气污染防治路径、O<sub>3</sub>前体物管控现状及减排策略、大气挥发性有机物(VOCs)源排放特征、大气污染物排放清单编制等研究内容.专题相关研究成果可为推动我国PM<sub>2.5</sub>与O<sub>3</sub>复合污染协同防控相关领域研究提供参考.

## 我国重点行业氮氧化物管控现状及减排策略

单玉龙<sup>1</sup>, 彭悦<sup>2</sup>, 楚碧武<sup>1</sup>, 单文坡<sup>3</sup>, 徐光艳<sup>1</sup>, 陈建军<sup>2</sup>, 余运波<sup>1</sup>, 李俊华<sup>2\*</sup>,  
贺泓<sup>1,3\*</sup>

1. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085
2. 清华大学环境学院, 北京 100084
3. 中国科学院城市环境研究所, 福建 厦门 361021

**摘要:**氮氧化物(NO<sub>x</sub>)减排对于我国细颗粒物(PM<sub>2.5</sub>)与臭氧(O<sub>3</sub>)复合污染的协同控制至关重要.本文对我国重点行业NO<sub>x</sub>管控现状和减排策略进行了综述与展望.研究表明,我国NO<sub>x</sub>排放主要来源于工业炉窑和柴油机尾气,其中工业烟气NO<sub>x</sub>排放主要来源于钢铁、建材和有色等行业;柴油机NO<sub>x</sub>排放主要来源于柴油车、非道路移动机械与船舶.NO<sub>x</sub>减排策略主要包括技术措施和政策措施,其中技术措施主要包括清洁燃烧,如低氮燃烧、废气再循环、清洁燃料替代等,以及后处理净化技术,如选择性催化还原技术、选择性非催化还原、臭氧氧化吸收等;政策措施主要包括提升NO<sub>x</sub>排放标准,加强排放智能监测监管,布局新能源相关技术等.研究显示:现阶段,机动车和非电行业的NO<sub>x</sub>减排仍有较大空间;未来,在“碳达峰碳中和”背景下,通过发展大气污染物和温室气体的协同控制技术,将进一步深度减排NO<sub>x</sub>,实现PM<sub>2.5</sub>与O<sub>3</sub>的协同控制.

**关键词:**氮氧化物(NO<sub>x</sub>);工业烟气;移动源尾气;选择性催化还原;排放标准

中图分类号: X511

文章编号: 1001-6929(2023)03-0431-08

文献标志码: A

DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2023.01.10

## Control Status and Emission Reduction Strategies of Nitrogen Oxides in Key Industries in China

SHAN Yulong<sup>1</sup>, PENG Yue<sup>2</sup>, CHU Biwu<sup>1</sup>, SHAN Wenpo<sup>3</sup>, XU Guangyan<sup>1</sup>, CHEN Jianjun<sup>2</sup>, YU Yunbo<sup>1</sup>,  
LI Junhua<sup>2\*</sup>, HE Hong<sup>1,3\*</sup>

1. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China
2. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China
3. Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China

**Abstract:** The reduction of nitrogen oxide (NO<sub>x</sub>) emissions is critical for the control of fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) and ozone (O<sub>3</sub>)

收稿日期: 2022-11-09 修订日期: 2023-01-12

作者简介: 单玉龙(1990-),男,辽宁阜新人,助理研究员,博士,主要从事移动源污染排放控制研究, [ylshan@rcees.ac.cn](mailto:ylshan@rcees.ac.cn).

\* 责任作者: ①李俊华(1970-),男,河南安阳人,教授,博士,博导,主要从事大气污染物控制与减污降碳技术研究, [lijunhua@tsinghua.edu.cn](mailto:lijunhua@tsinghua.edu.cn); ②贺泓(1965-),男,河北邯郸人,中国工程院院士,研究员,博士,博导,主要从事环境催化和非均相大气化学过程研究, [honghe@rcees.ac.cn](mailto:honghe@rcees.ac.cn)

基金项目: O<sub>3</sub>和PM<sub>2.5</sub>复合污染协同防控科技攻关预研项目(No.DQGG202009)

Supported by Pre-Research on Cooperative Prevention and Control of Compound Pollution of O<sub>3</sub> and PM<sub>2.5</sub>, China (No.DQGG202009)

complex air pollution in China. Therefore, in this paper the control status and emission reduction strategies of  $\text{NO}_x$  in key industries in China are reviewed and future prospects are discussed. Exhaust gases from non-electric industrial furnaces and diesel engines are major sources of  $\text{NO}_x$  emissions. The  $\text{NO}_x$  in industrial flue gas mainly comes from the steel, construction material and metallurgical industries, while the  $\text{NO}_x$  in diesel engine exhaust mainly comes from diesel vehicles, off-road machinery and marine engines. The reduction strategies for  $\text{NO}_x$  include both technical and policy measures. The technical measures include clean combustion, such as low-nitrogen combustion, exhaust gas recirculation and clean fuel substitution; and after-treatment purification, such as selective catalytic reduction and selective non-catalytic reduction, and ozone oxidation combined with absorption. Policy measures include raising  $\text{NO}_x$  emission standards, strengthening intelligent monitoring and supervision, and developing new energy technologies. At the present stage, there is still room for  $\text{NO}_x$  reduction from motor vehicles and non-electric industries. In future, under the background of 'carbon peak and carbon neutrality', developing synergetic emission reduction technologies for atmospheric pollutants and greenhouse gases will further reduce  $\text{NO}_x$  emissions and achieve synergetic control of both  $\text{PM}_{2.5}$  and  $\text{O}_3$ .

**Keywords:** nitrogen oxides; industrial fumes; mobile source exhaust; selective catalytic reduction; emission standard

近年来,我国大气污染防治取得长足进展,大气环境质量明显好转。然而,京津冀、长三角和珠三角等人口密集区域仍然面临严峻的大气污染问题。一方面,大部分城市  $\text{PM}_{2.5}$  浓度仍远高于 GB 3095—2012《环境空气质量标准》一级标准限值 ( $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 和世界卫生组织的指导值 ( $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ); 另一方面,区域  $\text{O}_3$  污染呈现恶化趋势。 $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{O}_3$  的协同控制面临严峻挑战。我国政府高度重视大气污染防治工作。多年来,为了改善城市空气质量,控制大气污染,我国从总量、标准、城市空气质量综合整治等方面入手,实施了多项控制措施。自“十五”以来,国家相继出台了一系列的法律、法规、政策和标准等重要举措,加大了大气环境保护力度,我国的脱硫、脱硝、除尘等燃煤烟气污染控制技术也有了实质性的进展,建设了大量的大气污染物治理装置。尤其是“十三五”以来,通过实施富有创新性的政策措施,在全国范围内推动电力行业与钢铁行业等固定源烟气污染物超低排放和重型柴油车国六和非道路机械国四排放标准,倒逼企业升级改造,为打赢蓝天保卫战提供了关键支撑<sup>[1-5]</sup>。回顾我国大气污染防治历程, $\text{PM}_{2.5}$  浓度的下降主要归功于一次  $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{SO}_2$  的减排。 $\text{NO}_x$  是  $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{O}_3$  的共同前体物,减排  $\text{NO}_x$  对于协同控制  $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{O}_3$  至关重要<sup>[6]</sup>。

然而,我国氮氧化物 ( $\text{NO}_x$ ) 排放量处于高位,2012年  $\text{NO}_x$  排放量超过  $2\,300 \times 10^4 \text{ t}$ <sup>[7]</sup>,成为世界第一  $\text{NO}_x$  排放国。即使电力行业全面实现超低排放和柴油车全面实施国五/国六排放标准,2020年我国  $\text{NO}_x$  排放依然超过  $1\,000 \times 10^4 \text{ t}$ ,其中超过90%的  $\text{NO}_x$  排放量来自固定源烟气和移动源尾气排放<sup>[8]</sup>。随着我国  $\text{NO}_x$  排放问题的凸显,酸雨污染已由硫酸型向硫酸、硝酸复合型转变<sup>[9-10]</sup>,许多大中城市  $\text{PM}_{2.5}$  中硝酸盐占比超过硫酸盐占比<sup>[11]</sup>,使得控制  $\text{NO}_x$  排放变得越来越迫切。对于固定源行业,钢铁、水泥、玻璃等各类工

业炉窑/锅炉量大面广,造成了主要大气污染物硫、硝、尘以及非常规污染物二噁英、汞等的排放总量居高难下。虽然国内外工业烟气治理技术研究取得了积极进展,但仍面临着中低温下主要污染物及非常规污染物高效协同深度治理的国际性难题。此外,不同行业工艺过程差异明显,烟气温度、流量等波动范围大,烟气成分复杂多变、腐蚀性强,对多污染物协同控制技术的适应性提出了新挑战<sup>[12-16]</sup>。对于移动源行业,尽管轻型汽车和重型柴油车国六排放标准已经非常严格,但我国仍然存在大量的国三、国四和国五排放标准的在用车,排放的  $\text{NO}_x$  占汽车  $\text{NO}_x$  排放总量的95%以上<sup>[17-19]</sup>。此外,我国非道路移动机械管理较为粗放、分布广种类多,工况条件繁多复杂,燃油质量良莠不齐,因此其污染排放问题日益凸显<sup>[19-20]</sup>。以上重点行业的排放源使我国大气呈现  $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{O}_3$  复合污染的特征。本研究通过调研重点非电力行业工业(钢铁、建材、有色)烟气和移动源(柴油车、机、船)尾气  $\text{NO}_x$  排放特征和排放控制水平,提出持续削减  $\text{NO}_x$  的控制策略,形成  $\text{NO}_x$  控制的精细化管控和深度减排方案,为未来多污染物和温室气体协同减排提供关键技术支撑,为我国大气污染控制提供技术支持和决策依据。

## 1 工业烟气 $\text{NO}_x$ 排放管控现状及减排策略

### 1.1 钢铁行业

钢铁行业作为我国  $\text{NO}_x$  重点排放源,其2017年  $\text{NO}_x$  排放量为  $172 \times 10^4 \text{ t}$ <sup>[21]</sup>。在2018年《政府工作报告》中李克强总理提出“推动钢铁等行业超低排放改造”。随后,生态环境部联合各部委在2019年4月发布《关于推进实施钢铁行业超低排放的意见》,将烧结(球团)烟气中  $\text{NO}_x$  的超低排放限值规定为  $50 \text{ mg}/\text{m}^3$ 。开展钢铁行业环保技术升级,对于改善环境空气质量、打赢蓝天保卫战具有重要意义。钢铁行业

排放的废气中,  $\text{NO}_x$  排放主要集中在烧结、炼焦、热轧等工序. 此外, 废气中通常伴随有颗粒物、 $\text{SO}_2$  以及二噁英等非常规污染物. “十二五”期间, 钢铁行业开始执行《钢铁烧结、球团工业大气污染物排放标准》(GB 16297—2012), 在颗粒物、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$  排放标准加严的同时, 关注二噁英等非常规污染物, 基于半干法的钢铁烧结/球团烟气多污染物协同控制技术成为主流趋势. “十三五”期间, 钢铁行业全流程超低排放成为发展趋势. 中国钢铁行业大气污染治理已实现从“单工序”向“全流程”的过渡, 控制技术也已实现从“单一污染物控制”向“多污染物协同控制”的技术升级<sup>[22]</sup>. “十四五”以来, 钢铁行业在重点行业绿色升

级工程位列第一, 推进节能改造和污染物深度治理, 提出“到 2025 年, 完成 5.3 亿吨钢铁产能超低排放改造, 大气污染防治重点区域燃煤锅炉全面实现超低排放”目标<sup>[23]</sup>. 针对钢铁行业,  $\text{NO}_x$  的主流减排工艺包括烧结烟气选择性循环技术、半干法脱硫耦合中低温选择性催化还原 (SCR) 脱硝技术、活性炭法一体化技术、臭氧氧化-硫硝协同吸收技术、钠基旋转喷雾干燥法 (SDA) 脱硫耦合低温 SCR 脱硝技术和高炉炉料结构优化的硫硝源头减排技术 (见图 1). 目前全国钢铁企业超低排放开展已取得良好的治理效果, 但在钢铁行业统筹规划、污染物计量合理性、非常规污染物管控、碳减排等方面仍存在挑战.

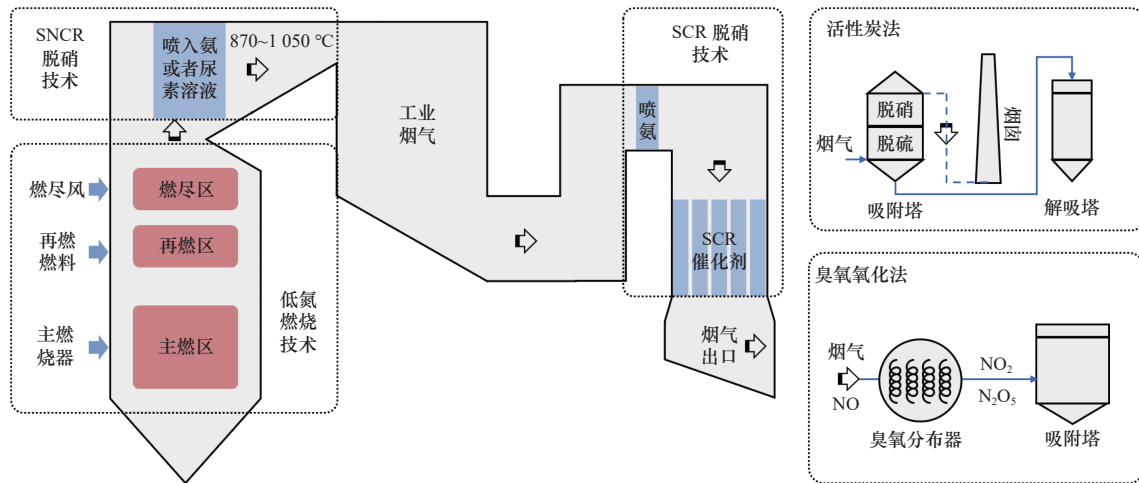


图 1 我国工业烟气的主要脱硝技术

Fig.1 Main denitrification technologies for industrial flue gas in China

因此, 对于下一步推动全国范围内的钢铁行业超低排放改造乃至钢铁行业的节能减排高质量发展, 提出如下建议: ①生产技术绿色升级. 积极研发短流程全氢冶炼技术、高炉高比例球团 (全球团) 冶炼等新技术, 实现钢铁行业多污染物的大幅减排. ②污染计量合理化. 适当允许不同生产工序之间污染物等量或减量置换, 污染物计量由“单工序独立计量”向“全流程总量折算”过渡, 形成吨钢或吨铁污染物排放的计算方式. ③碳排放管理强化. 完善对生产过程碳排放的监测和统计, 应用新型节能技术提高能源产出率, 推动企业绿色转型. ④协同减排新技术应用. 优化 SCR 脱硝催化剂配方, 开发多功能协同催化剂体系, 实现在满足  $\text{NO}_x$  脱除同时协同净化烟气中的二噁英、Hg、HCl 等非常规大气污染物<sup>[24]</sup>.

## 1.2 建材行业

我国建材产品水泥、平板玻璃、建筑卫生陶瓷等产量多年居世界首位. 2017 年我国建材行业  $\text{NO}_x$  排

放量为  $250 \times 10^4$  t, 约占全国总排放量的 14%. 由于我国建材行业产能大, 排放污染物的分担率居高难下, 因此迫切需要加严建材行业烟气排放标准. 2016 年 9 月京津冀地区采用特别排放限值, 部分城市甚至提出更加严格的深度减排要求. 在超低排放改造方面, 京津冀地区对建材行业大气污染物排放指标要求日趋严格, 其中水泥企业排放限值对 A 级企业要求是<sup>[25]</sup>: 水泥窑及窑尾余热利用系统的  $\text{NO}_x$  排放浓度均不高于  $50 \text{ mg/m}^3$  (以 N 计, 下同), 氨逃逸浓度小于  $5 \text{ mg/m}^3$  (窑尾基准氧含量为 10%). 将玻璃工业  $\text{NO}_x$  的排放限值加严到  $100 \text{ mg/m}^3$ , 同时增加了氨逃逸指标, 对玻璃工业大气污染物排放实施严格管理. 陶瓷工业在 8.6% 基准氧含量条件下,  $\text{NO}_x$  的排放浓度限值为  $100 \text{ mg/m}^3$ . 面对日益严苛的排放标准, 建材行业  $\text{NO}_x$  污染物治理路线通常采用选择性非催化还原 (SNCR) 脱硝和 SCR 脱硝技术相结合的方式以实现

建材行业烟气污染控制技术逐步发展,装备水平明显提高,目前 $\text{NO}_x$ 排放标准已显得宽松,同时在非常规污染物(如卤化物和重金属)管控以及氨逃逸等方面的管理上仍存在欠缺。

面对新时期建材行业的自身特点,提出如下建议:①加严 $\text{NO}_x$ 排放限值,增加氨逃逸指标。针对水泥行业,现行《水泥工业大气污染物排放标准》(GB 4915—2013)要求 $\text{NO}_x$ 浓度不高于 $400 \text{ mg/m}^3$ (重点地区为 $320 \text{ mg/m}^3$ ),氨逃逸浓度为 $10 \text{ mg/m}^3$ (重点地区为 $8 \text{ mg/m}^3$ )。随着近年来各地区对水泥行业SCR脱硝技术应用, $\text{NO}_x$ 出口浓度可长期稳定在 $50 \text{ mg/m}^3$ 甚至 $30 \text{ mg/m}^3$ 以下。因此,建议水泥工业 $\text{NO}_x$ 排放国家标准按照 $50 \text{ mg/m}^3$ 制定,同时增加氨逃逸浓度为 $3 \text{ mg/m}^3$ 。针对玻璃行业,《玻璃工业大气污染物排放标准》(GB 26453—2022)要求玻璃熔窑的 $\text{NO}_x$ 排放限值为 $400 \text{ mg/m}^3$ ,氨逃逸浓度为 $8 \text{ mg/m}^3$ ;对于平板玻璃、电子玻璃工业,建议增加特别排放限值,将 $\text{NO}_x$ 排放限值调整为 $200 \text{ mg/m}^3$ 。对于日用玻璃工业,建议根据日用玻璃行业污染物排放特性,结合可行的污染控制技术,参考平板玻璃、电子玻璃工业的上述建议值。针对陶瓷工业,《河南省2019年工业炉窑治理专项方案》规定喷雾干燥塔、陶瓷窑窑炉烟气中 $\text{NO}_x$ 排放限值为 $100 \text{ mg/m}^3$ ,氨逃逸浓度为 $8 \text{ mg/m}^3$ 。考虑到生产过程中排烟温度只有 $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右,目前该行业低温SCR技术成熟度与普遍适用性不高,因此建议将 $\text{NO}_x$ 限值调整为 $100 \text{ mg/m}^3$ 。此外建议采用臭氧氧化或活性炭/活性焦脱硫脱硝一体化技术实现该领域 $\text{NO}_x$ 减排。②加大SCR脱硝技术的推广力度。SNCR脱硝技术氨逃逸量大,二次污染严重,而SCR技术脱硝效率高且氨逃逸浓度小于 $3 \times 10^{-6}$ ,因此推广SCR脱硝技术在建材领域应用是严格控制氨逃逸和实现 $\text{NO}_x$ 超低排放的有效措施。同时在烟道中安装氨逃逸在线检测装置,规范环保政策要求。③开发多污染物协同减排新技术。针对建材行业中存在的氯化物、氟化物、 $\text{SO}_3$ 和重金属等非常规污染物,需要进一步优化、组合、提效改造末端治理工艺等,如研发新型多功能SCR催化剂以实现 $\text{NO}_x$ 、氯化物、氟化物的脱除转化,应用湿式静电除尘技术协同减排 $\text{PM}_{2.5}$ 和 $\text{SO}_3$ 。

### 1.3 有色行业

近年来,我国有色冶炼工业发展迅猛,有色金属的产能及产量高速增长,铝铜镍铅锌的冶炼技术和装备水平已达到或接近世界先进水平。目前冶金行业 $\text{NO}_x$ 污染物的产生浓度在 $150 \sim 700 \text{ mg/m}^3$ 之间,大部

分在 $400 \text{ mg/m}^3$ 附近。目前国标要求冶金行业 $\text{NO}_x$ 排放限值在 $200 \text{ mg/m}^3$ 以下,个别特殊地区要求 $\text{NO}_x$ 排放限值为 $100 \text{ mg/m}^3$ <sup>[26]</sup>。冶金行业采用的 $\text{NO}_x$ 治理路线主要包括臭氧氧化法、SNCR+臭氧氧化法和SNCR+SCR三种。臭氧氧化法主要应用于烟气中 $\text{NO}_x$ 浓度较低的工况,通常脱除效率可达85%,能控制排放的 $\text{NO}_x$ 浓度低于 $100 \text{ mg/m}^3$ 。SNCR+臭氧氧化法和SNCR+SCR治理工艺可使烟气中 $\text{NO}_x$ 转化率达到90%以上,将 $\text{NO}_x$ 排放浓度稳定维持在 $50 \text{ mg/m}^3$ 以下,实现 $\text{NO}_x$ 超低排放。SNCR+SCR工艺需要保证SCR装置中烟气温度高于 $200 \text{ }^\circ\text{C}$ ,以确保SCR催化剂能正常运行。对于末端烟气温度低于 $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 的工况,宜采用SNCR+臭氧氧化法并结合碱液吸收法控制 $\text{NO}_x$ 和 $\text{SO}_2$ 的排放。

未来我国冶金行业发展仍会呈现总体稳步上升的趋势,但上升幅度不大。随着近年来我国冶金行业生产工艺、技术装备,尤其是烟气污染控制技术的进步,以及个别特殊地区大气污染的严重情况,上述排放标准已显得宽松,已经不适合继续指导新时期冶金行业大气污染物的减排,因此应严格控制企业的污染排放行为,制订更加严格的冶金行业地方污染物排放标准。以制铝工业为例,《铝工业污染物排放标准》(GB 25465—2010)要求氧化铝厂、电解铝厂、铝用炭素厂的 $\text{NO}_x$ 排放限值为 $100 \text{ mg/m}^3$ 。2019年,《河南省2019年工业炉窑治理专项方案》中要求该地区有色金属行业 $\text{NO}_x$ 排放限值设定为 $50 \text{ mg/m}^3$ ,氨逃逸浓度低于 $8 \text{ mg/m}^3$ 。因此,建议将 $\text{NO}_x$ 浓度限值调整为 $50 \text{ mg/m}^3$ ,同时增加氨逃逸浓度限值为 $8 \text{ mg/m}^3$ ,督促企业严格控制氨逃逸。此外,考虑到有色行业废气中Pb、Hg、As浓度水平较高的情况,所采用SCR催化剂需具备一定的抗重金属中毒性能且在SCR装置前需加装除尘装置。

## 2 重点移动源 $\text{NO}_x$ 排放管控现状及减排策略

### 2.1 柴油车

2020年,我国汽车 $\text{NO}_x$ 排放 $626.3 \times 10^4 \text{ t}$ ,其中,保有量占比约10%的柴油车 $\text{NO}_x$ 排放 $544.9 \times 10^4 \text{ t}$ ,是移动源 $\text{NO}_x$ 排放控制的重点<sup>[27]</sup>。我国柴油车排放标准主要参考欧洲标准(见图2),但起步较晚。在过去的20年中,我国柴油车排放标准从国一逐渐过渡到国六的超低排放标准,从气态污染物减排到气态和颗粒物多污染物协同控制,经历了“氧化—(SCR+ASC)/(DOC+DPF)—DOC+DPF+SCR+ASC”3个阶段的控制体系,形成了后处理高效净化和车载诊断集成的智能控制体系<sup>[28-30]</sup>。2022年11月,欧盟公布

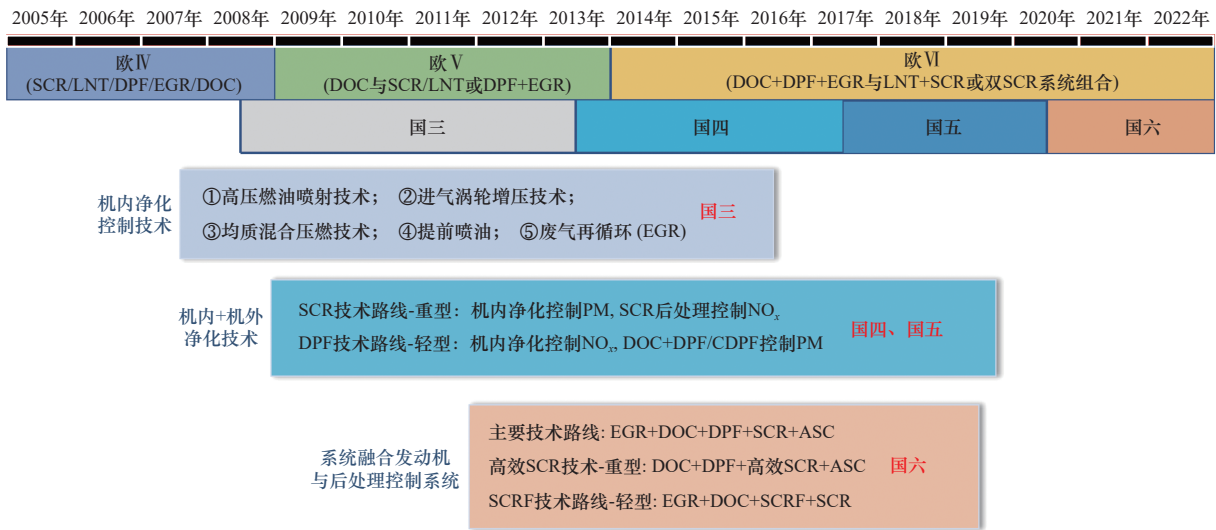


图 2 我国柴油车排放标准及控制技术发展历程

Fig.2 Developing process of emission standard and control technology of diesel vehicles in China

了最新的欧VII排放法规提案, 重型车辆的欧VII法规将于 2027 年实施. 污染物限值均存在不同程度的加严, 并增加了 N<sub>2</sub>O 等污染物限值要求. 我国已于 2021 年 7 月 1 日全面实施了国际先进的重型柴油车国六排放标准, 国七法规仍处于预研中. 尽管目前我国执行的国六法规新车排放限值较低, 但在用柴油车污染排放问题仍比较突出. 国三及以前的柴油货车由于无后处理装置, 未完全淘汰, 其 NO<sub>x</sub> 排放占柴油车排放总量的 37.6%; 国四、国五柴油货车虽安装了选择性催化还原 (SCR) 后处理系统, 但也存在后处理装置失效、人为破坏、不添加尿素等现象, 导致 NO<sub>x</sub> 排放高.

因此, 柴油车减排策略需要针对不同标准类型的车进行分类控制. 针对国三柴油车超标问题, 需进行后处理改造或淘汰, 采用 DOC+CDPF+SCR+ASC 双降技术路线改造, 可以实现 NO<sub>x</sub> 减排 60% 以上, PM 减排 85% 以上, 从而实现高污染柴油车的深度治理; 针对国四、国五柴油车, 需安装在线监控装置, 并通过数据无缝传输、云计算、大数据等手段将污染物排放、后处理装置运行情况等数据汇总至在线监控平台. 通过在线监控平台, 监管部门可实现随时随地监管、定位、证据采集、处罚等功能, 大幅降低监管和执法成本. 终端用户可知晓实时排放状况, 发现问题可就近维护、解决, 确保排放达标.

对于新车管控方案与技术体系, 主要包含以下策略: ①加强监管柴油和车用尿素品质. 提升油品清洁性, 健全燃油、清洁增效剂和车用尿素管理制度, 严厉打击生产、销售、储存、使用不合格油品和车用尿素行为, 坚决取缔黑加油站. ②加强“天地车人”一体化监控体系, 实现柴油车全生命周期监管. 建立大

样本实际道路排放测试技术和法规排放测试技术 (台架、PEMS) 的对比关系, 从而优化多源测试数据融合, 建立数据质控方法体系, 形成基于上述多种在线监管测试技术并行的检测监管体系, 强化实际道路在用车监管. ③开发和建立自主智能控制技术体系. 夯实控制系统基础软硬件, 开展自主控制系统的开发, 重点发展先进模型与算法, 打造核心开发平台、工具与方法, 并建立法规、标准及创新体系, 提升自主能力, 支撑内燃动力的电气化、信息化、智能化变革, 推动内燃动力的高效、清洁、低碳和高品质. ④自主研发高效低成本高寿命的后处理系统. 结合新材料和新技术的发展, 重点突破高性能载体、高效催化剂和快速气体均匀混合技术, 形成高可靠性催化器系统总成的开发; 推动整机和后处理企业的技术匹配, 促进多领域跨学科的产学研合作, 强化尾气控制技术基础研究与创新, 发展高精度控制系统产品与技术, 形成载体、催化剂、封装、消声、控制、匹配方面的自主核心技术与工艺. ⑤建立全生命周期评价体系. 针对我国柴油车污染物减排对社会、经济和环境的效益评价. 开展柴油车主要清洁化技术路线生命周期评价研究.

## 2.2 非道路移动机械

我国非道路移动源 NO<sub>x</sub> 排放量也不容忽视. 2020 年我国非道路移动源 NO<sub>x</sub> 排放量为 478.2×10<sup>4</sup> t, 与柴油车 NO<sub>x</sub> 排放量相当. 其中移动工程机械和农业机械排放分别占非道路移动源 NO<sub>x</sub> 排放总量的 31.3% 和 34.9%, 是非道路移动源 NO<sub>x</sub> 减排的重中之重. 2007 年, 我国发布了《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 I、II 阶段)》

(GB 20891—2007). 自 2007 年 10 月 1 日起, 凡进行排气污染物排放型式核准的非道路移动机械用柴油机都必须符合第 I 阶段控制标准; 第 II 阶段控制标准自 2009 年 10 月 1 日起开始实行. 2014 年, 我国发布了《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), 相比于第 I、II 阶段标准, 本标准污染物排放限值增加了瞬态试验循环 (NRTC) 和 560 kW 以上柴油机的控制要求以及排放控制耐久性要求. 2015 年开始实施第三阶段标准, 2022 年 12 月将实施第四阶段标准. 我国非道路移动源排放标准有逐步向道路移动源排放标准靠拢的趋势. 目前我国非道路移动机械  $\text{NO}_x$  治理技术主要以燃油管控和机内净化技术为主. 通过提升燃油和润滑油品质等方案, 保障发动机的清洁高效运行. 通过优化发动机本体、增压和增压中冷, 废气再循环 (EGR) 等技术, 实现发动机的清洁燃烧. 管控主要以监管技术为主, 各地依法划定并公布禁止使用高排放非道路移动机械的区域, 强化监督管理, 监控实际使用中的污染物排放. 对于即将实施的非道路移动机械国 IV 标准, 需要采用机内净化技术+后处理技术的组合技术路线, 如优化燃烧+SCR、EGR+DPF/CDPF, 甚至是优化燃烧+SCR+DPF/CPDF 的组合技术路线, 以同时满足较低的  $\text{NO}_x$  和 PM 的限值.

目前国 II 标准的工程机械和农业机械的污染物排放占比最高, 其次为执行国 I 及国 I 前标准的老旧工程机械和农业机械. 考虑到老旧机械的排放劣化, 尤其应该加强国 I 以及以前的机械管控, 推动老旧非道路柴油机的淘汰或改造升级 (单降或双降). 政府可以通过经济激励等政策, 鼓励在用非道路移动机械的淘汰或改造升级, 提高企业或用户对非道路移动源减排的支持力度. 单从机内净化和后处理治理技术而言, 我国柴油车的污染控制体系可以对非道路移动机械柴油机污染物排放控制提供可借鉴的技术解决方案. 然而, 移动机械污染物排放也有其自身的特点, 如种类繁多分布广泛、使用场景多元化、工作环境复杂、运行工况变化幅度和频率大等. 因此, 也要根据非道路移动机械自身的排放特征, 开发不同于道路汽、柴油车的  $\text{NO}_x$  排放控制技术, 提供全方位、高可靠、应用范围广或针对性强的技术解决方案. 此外, 还需完善非道路环境管理体系, 推进管理体系的信息化、简便化和精细化. 进行非道路移动机械的申报登记, 实施非道路移动机械环保信息公开制度, 通过在监管平台填报机械信息, 建立分类别、排放阶段、功率段、技术水平的非道路移动源保有量信息库.

### 2.3 船舶柴油机

除移动机械外, 船舶  $\text{NO}_x$  排放占非道路移动源排放总量的 28.2%, 也不容忽视. 船舶  $\text{NO}_x$  排放尤其对人口密集的港口城市污染贡献较大, 在长三角和珠三角等主要港口区域, 船舶尾气排放可占当地  $\text{NO}_x$  排放总量的 9%~37%. 全球船用柴油机的能效、排放标准是由国际海事组织 (IMO) 牵头制定并组织实施的, 其设立了船用柴油机的  $\text{NO}_x$  排放标准, 分为 3 个阶段实施: ①Tier I (修订于 1997 年) 适用于 2000 年 1 月 1 日后生产的输出功率大于 130 kW 的船舶柴油主机, 或 1990 年 1 月 1 日后 2000 年 1 月 1 日前安装的输出功率为 5 000 kW、单缸排放 90 L 及以上的船用柴油发动机; ②Tier II (修订于 2008 年附则 VI 的修正案) 适用于 2011 年 1 月 1 日之后生产的或主体进行过重大改造的输出功率大于 130 kW 的船用柴油主机; ③Tier III (修订于 2008 年附则 VI 的修正案) 适用于 2016 年 1 月 1 日之后生产的或主体进行过重大改造的输出功率大于 130 kW, 且来往于北美和加勒比海排放控制区 (ECA) 内的船用柴油发动机, 以及 2021 年 1 月 1 日之后生产的或主体进行过重大改造的输出功率大于 130 kW, 且来往于北海和波罗的海排放控制区 (ECA) 内的船用柴油发动机. 我国交通运输部也已于 2015 年 12 月颁布了《珠三角、长三角、环渤海 (京津冀) 水域船舶排放控制区实施方案》, 并在 2018 年 12 月颁布了《关于印发船舶大气污染物排放控制区实施方案的通知》, 扩展了原有排放控制区到沿海 12 海里 (1 海里=1.852 km) 区域 (DECA), 并对中国船舶  $\text{NO}_x$  排放做出了限制<sup>[31]</sup>. 此外, 我国也颁布了《船舶发动机排气污染物排放限值及测量方法 (中国第一、二阶段)》(GB 15097—2016), 并已于 2021 年 7 月 1 日实施了第二阶段排放标准, 对  $\text{NO}_x$  等污染物排放进行管控. 目前我国船舶排放的监管技术主要是利用岸基嗅探和无人机遥测对船舶尾气进行实时监测, 但主要以针对船舶燃料硫含量的监管为主.

船舶柴油机  $\text{NO}_x$  排放减排策略主要分为技术措施和政策措施. 技术措施包括机内技术、机外技术和其他技术. 其中机内技术包括缸内喷水技术、进气加湿技术 (HAM) 和废气再循环 (EGR) 技术; 机外技术包括选择性催化还原 (SCR) 技术和选择性非催化还原 (SNCR) 技术; 其他技术主要是与燃料相关的技术, 如燃料乳液 (WiFE). 整体来看, 目前只有 SCR 技术的运用可以使  $\text{NO}_x$  排放满足 Tier III 标准, 但是这需要较多的改装或安装费用, 以及较高的运行成本. 同时, 结合岸电技术, 可以降低单艘船的平均  $\text{NO}_x$  排放

量。未来的 $\text{NO}_x$ 减排方案应该灵活结合多种减排措施并控制减排成本。Tier标准目前主要针对新船,所以该政策带来的减排效果具有一定的滞后性,随着新船在船队中的比例上升才会逐渐显现减排成效。

政策措施主要包括:①提升岸电使用效率,对于我国来说,现阶段应加快港口岸电建设和船舶受电设备改造,提高具备受电设备船舶比例,增加港口岸电覆盖船型,这是当前阶段最高效的消除靠港船舶大气污染物排放的措施;②提高船舶排放监管技术水平,高效且精准的监管技术是船舶排放政策落到实处的保障。目前国际上和国内都还没有开展监管,应尽快研发船舶 $\text{NO}_x$ 监管技术,实现对在用船 $\text{NO}_x$ 排放进行高效、精准的监管;③设立范围更大、标准更严的船舶排放控制区;④布局清洁能源技术,实现污染物和温室气体的协同减排。

### 3 结论与展望

#### 3.1 结论

随着我国燃煤电厂超低排放标准的实施,我国 $\text{NO}_x$ 排放控制的主战场已转向非电工业炉窑和柴油机尾气。工业烟气 $\text{NO}_x$ 主要来源于钢铁、建材和冶金行业。工业烟气 $\text{NO}_x$ 深度减排策略主要包括:①提高SCR脱硝催化剂的适应性,强化其抗水、硫、重金属和黏性粉尘的能力;②加快建立建材(含水泥、玻璃和陶瓷)和冶金行业的 $\text{NO}_x$ 超低排放标准,增加氨逃逸指标,同时需要关注氧化亚氮的排放;③在碳达峰碳中和背景下,重点关注工业烟气 $\text{NO}_x$ 与非常规污染物及 $\text{CO}_2$ 的协同减排,攻克关键技术和工艺装备,全面实现减污降碳协同增效。

移动源 $\text{NO}_x$ 目前主要来源于以柴油机为主要动力的柴油车、非道路移动机械及船舶排放。在用高排放柴油车和非道路移动机械,以及港口城市船舶的 $\text{NO}_x$ 排放是目前管控的重点。柴油机 $\text{NO}_x$ 减排策略主要包括:①提升柴油、尿素品质,降低其化学和物理毒性物质含量;②统筹油、路、车/机治理,建立健全严格的全防全控智能环境监管制度;③开发和建立自主可控的发动机与后处理智能控制系统;④自主研发高效、低成本、抗中毒、高寿命的后处理系统;⑤开发新能源技术,开展不同动力移动源的全生命周期分析与评价,实现柴油机的碳污协同减排。

#### 3.2 展望

“碳达峰碳中和”目标对大气污染物与温室气体协同减排提出了更高要求,也为 $\text{PM}_{2.5}$ 和 $\text{O}_3$ 的协同控制带来了机遇。在“碳达峰碳中和”目标下, $\text{NO}_x$ 控制技术应关注 $\text{NO}_x$ 与温室气体( $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 等)

的协同减排,尤其关注 $\text{NO}_x$ 控制技术的低温净化效率,从而实现减污降碳、协同增效。在工业烟气方面,钢铁、建材和有色等为代表的非电行业 $\text{NO}_x$ 减排仍有较大空间,亟需加速 $\text{NO}_x$ 排放控制技术的普及和适配,实现 $\text{NO}_x$ 大幅减排;同时需要重视氨逃逸问题,攻克 $\text{NH}_3$ 选择性催化氧化技术的应用瓶颈;进一步推广 $\text{NO}_x$ 减排技术在其他非电行业(如石油化工、生物质燃烧等领域)的应用,全面实现 $\text{NO}_x$ 深度减排;此外,探讨 $\text{NO}_x$ 和 $\text{CO}_2$ 协同减排的相关措施与技术。在移动源方面,短期目标应进一步提升柴油机热效率,降低 $\text{CO}_2$ 排放,匹配高效尾气后处理技术,实现 $\text{NO}_x$ 和其他污染物近零排放;中长期目标是发展碳中和燃料绿色合成技术,研发碳中和燃料内燃机及其后处理技术,实现碳污协同近零排放;远期目标应是实现燃料电池技术和电动技术对内燃机的演替,实现 $\text{CO}_2$ 与 $\text{NO}_x$ 等污染物的零排放。“碳达峰碳中和”目标持续推进必然带来 $\text{NO}_x$ 等大气污染物的深度减排,这也将是实现 $\text{PM}_{2.5}$ 与 $\text{O}_3$ 协同控制、空气质量持续改善的根本之策。

#### 参考文献(References):

- [1] 国家环境保护总局.国家环境科技发展“十五”计划纲要[EB/OL].北京:国家环境保护总局,(2001-05-23)[2023-01-09].[https://www.mee.gov.cn/ywgz/kjycw/sthjkcjx/sthjpk/kpjd/200105/t20010523\\_68123.shtml](https://www.mee.gov.cn/ywgz/kjycw/sthjkcjx/sthjpk/kpjd/200105/t20010523_68123.shtml).
- [2] 环境保护部,国家质量监督检验检疫总局.轻型汽车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段):GB 18352.6—2016[S].北京:中国环境科学出版社,2020.
- [3] 生态环境部,国家市场监督管理总局.重型柴油车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段):GB 17691—2018[S].北京:中国环境科学出版社,2019.
- [4] 国务院.打赢蓝天保卫战三年行动计划[EB/OL].北京:国务院,(2018-06-27)[2023-01-09].[http://www.gov.cn/zhengce/content/2018-07/03/content\\_5303158.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2018-07/03/content_5303158.htm).
- [5] 中央人民政府.中共中央 国务院关于深入打好污染防治攻坚战的意见[EB/OL].北京:新华社,(2021-11-02)[2023-01-09].[http://www.gov.cn/zhengce/2021-11/07/content\\_5649656.htm](http://www.gov.cn/zhengce/2021-11/07/content_5649656.htm).
- [6] CHU B W,DING Y,GAO X,et al.Coordinated control of fine-particle and ozone pollution by the substantial reduction of nitrogen oxides[J].*Engineering*,2022,15:13-16.
- [7] 环境保护部.2012年中国环境统计年报[R].北京:环境保护部,2013.
- [8] 生态环境部.2020年中国生态环境统计年报[R].北京:生态环境部,2022.
- [9] 贺泓,王新明,王跃思,等.大气灰霾成因与控制[J].*中国科学院院刊*,2013,28(3):344-352.  
HE H,WANG X M,WANG Y S,et al.Formation mechanism and control strategies of haze in China[J].*Bulletin of Chinese*

- Academy of Sciences,2013,28(3):344-352.
- [10] 楚碧武,马庆鑫,段凤魁,等.大气“霾化学”:概念提出和研究展望[J].化学进展,2020,32(1):1-4.  
CHU B W,MA Q X,DUAN F K,et al.Atmospheric ‘haze chemistry’:concept and research prospects [J].Progress in Chemistry,2020,32(1):1-4.
- [11] LI H Y,CHENG J,ZHANG Q,et al.Rapid transition in winter aerosol composition in Beijing from 2014 to 2017:response to clean air actions[J].Atmospheric Chemistry and Physics,2019,19(17):11485-11499.
- [12] 王赫婧,吴琮,白璐,等.非重点行业炉窑典型大气污染物“十四五”减排潜力研究[J].环境科学研究,2020,33(12):2647-2656.  
WANG H J,WU Q,BAI L,et al.Analysis of the typical air pollutants emission reduction potential of non-key industries furnaces in the ‘14th Five-Year Plan’ [J].Research of Environmental Sciences,2020,33(12):2647-2656.
- [13] 刘飞,薛志钢,续鹏,等.钢铁行业典型烧结机污染物排放特征对比研究[J].环境科学研究,2020,33(4):849-858.  
LIU F,XUE Z G,XU P,et al.Comparative study on pollutant emission characteristics of typical sintering machines in iron and steel industry[J].Research of Environmental Sciences,2020,33(4):849-858.
- [14] 杨建军,杜利劳,马启翔,等.水泥企业不同固定源PM<sub>2.5</sub>排放特性[J].环境科学研究,2018,31(6):1049-1056.  
YANG J J,DU L L,MA Q X,et al.PM<sub>2.5</sub> emission characteristics of different stationary sources in cement enterprise[J].Research of Environmental Sciences,2018,31(6):1049-1056.
- [15] 肖海平,茹宇,李丽,等.水泥窑协同处置生活垃圾焚烧飞灰过程中二噁英的迁移和降解特性[J].环境科学研究,2017,30(2):291-297.  
XIAO H P,RU Y,LI L,et al.Migration and degradation characteristics of dioxins during the process of cement kiln co-processing of municipal solid waste incineration fly ash[J].Research of Environmental Sciences,2017,30(2):291-297.
- [16] 宋畅,张翼,郝剑,等.燃煤电厂超低排放改造前后汞污染排放特征[J].环境科学研究,2017,30(5):672-677.  
SONG C,ZHANG Y,HAO J,et al.Mercury emission characteristics from coal-fired power plant before and after ultra-low emission retrofitting[J].Research of Environmental Sciences,2017,30(5):672-677.
- [17] 生态环境部.中国移动源环境管理年报(2021年)[R].北京:生态环境部,2021.
- [18] 李振华,胡京南,鲍晓峰,等.国3重型柴油车在实际道路行驶中的气态污染物排放[J].环境科学研究,2009,22(12):1389-1394.  
LI Z H,HU J N,BAO X F,et al.Gaseous pollutant emission of China 3 heavy-duty diesel vehicles under real-world driving conditions[J].Research of Environmental Sciences,2009,22(12):1389-1394.
- [19] 范小莉,夏泽群,李成,等.港口机械排放清单估算方法改进及应用[J].环境科学研究,2017,30(4):628-635.  
FAN X L,XIA Z Q,LI C,et al.An improved method for building an emission inventory for cargo handling equipment and its application[J].Research of Environmental Sciences,2017,30(4):628-635.
- [20] 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.
- [21] 我国将大幅削减钢铁行业排放[N/OL].北京:经济日报,2019-05-06 [2023-01-09].[http://paper.ce.cn/jjrb/page/1/2019-05/06/04/2019050604\\_pdf.pdf](http://paper.ce.cn/jjrb/page/1/2019-05/06/04/2019050604_pdf.pdf).
- [22] 工业和信息化部.钢铁工业调整升级规划(2016—2020年)[R].北京:中华人民共和国国家发展和改革委员会,2017.
- [23] 国务院.“十四五”节能减排综合工作方案[R].北京:生态环境部,2021.
- [24] WANG D,CHEN Q Z,ZHANG X,et al.Multipollutant control (MPC) of flue gas from stationary sources using SCR technology: a critical review[J].Environmental Science & Technology,2021,55:2743-2766.
- [25] 生态环境部.重污染天气重点行业应急减排措施制定技术指南[R].北京:生态环境部,2019.
- [26] 环境保护部,国家质量监督检验检疫总局.再生铜、铝、铅、锌工业污染物排放标准:GB 31574—2015[S].北京:中国环境科学出版社,2015.
- [27] 单文坡,余运波,张燕,等.中国重型柴油车后处理技术研究进展[J].环境科学研究,2019,32(10):1672-1677.  
SHAN W P,YU Y B,ZHANG Y,et al.Advances in the development of exhaust aftertreatment technologies for Heavy Duty diesel vehicles in China[J].Research of Environmental Sciences,2019,32(10):1672-1677.
- [28] XU G Y,SHAN W P,YU Y B,et al.Advances in emission control of diesel vehicles in China[J].Journal of Environmental Sciences,2023,123:15-29.
- [29] 胡志远,磨浩浩,宋博,等.在用国III/国IV/国V柴油公交车的颗粒物质量及固态PM<sub>2.5</sub>数量排放特性[J].环境科学研究,2016,29(10):1426-1432.  
HU Z Y,MO W H,SONG B,et al.Emission characteristics of particulate matter mass and quantity of solid PM<sub>2.5</sub> number from in-use China III/IV/V diesel buses [J].Research of Environmental Sciences,2016,29(10):1426-1432.
- [30] 黄成,楼晟荣,乔利平,等.重型柴油公交车实际道路颗粒物排放的理化特征[J].环境科学研究,2016,29(9):1352-1361.  
HUANG C,LOU S R,QIAO L P,et al.Physicochemical characteristics of real-world PM emissions from heavy-duty diesel buses[J].Research of Environmental Sciences,2016,29(9):1352-1361.
- [31] 交通运输部.关于印发船舶大气污染物排放控制区实施方案的通知[R].北京:中华人民共和国中央人民政府,2018.