

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

不同国家农用地土壤环境标准比较与启示
李勣之, 姜璐, 王国庆, 陈玉东, 龙涛, 林玉锁

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年2月

第43卷 第2期
Vol.43 No.2

目次

综述

- 不同国家农用地土壤环境标准比较与启示 李勛之, 姜蓉, 王国庆, 陈玉东, 龙涛, 林玉锁 (577)
- 再生水水质稳定性评价指标与体系 张馨怡, 魏东斌, 杜宇国 (586)

研究报告

- 兰州市采暖期和非采暖期大气降尘重金属的分布特征及来源 黄文, 王胜利 (597)
- 基于多种新型受体模型的 $PM_{2.5}$ 来源解析对比 王振宇, 李永斌, 郭凌, 宋志强, 许艳玲, 王丰, 梁维青, 史国良, 冯银厂 (608)
- 华中地区夏季 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子污染特征及来源分析 苏业旺, 刘威杰, 毛瑶, 程铨, 石明明, 许安, 李星谕, 胡天鹏, 祁士华, 邢新丽 (619)
- 淄博2021年元宵节 $PM_{2.5}$ 水溶性离子污染特征 陈巧, 吴丽萍, 徐勃, 张向炎, 李梦辉, 赵雪艳, 杨文 (629)
- 浙江省大气颗粒物 $PM_{2.5}$ 中全氟化合物污染特征分析及健康风险评估 李冰洁, 陈金媛, 刘铮铮, 王静, 何士冲 (639)
- 2001~2019年气象条件对江苏省 $PM_{2.5}$ 分布的影响 潘晨, 康志明 (649)
- 基于神经网络和数值模型的重点区域 $PM_{2.5}$ 预报比较分析 高愈霄, 汪巍, 黄永海, 王晓彦, 朱媛媛, 朱莉莉, 许荣, 李健军 (663)
- 2015~2020年海南省臭氧时空变化及其成因分析 符传博, 徐文帅, 丹利, 佟金鹤 (675)
- 济南市城区夏季臭氧污染过程及来源分析 孙晓艳, 赵敏, 申恒青, 刘杨, 杜明月, 张文娟, 许宏宇, 范国兰, 公华林, 李青松, 李大秋, 高晓梅, 张丽娜 (686)
- 山东临沂大气夏季典型时段臭氧污染特征及其控制因素分析 杨雪, 安馨悦, 刘玉启, 江春美, 张鹏程, 李灵婕, 赵世阳, 张书源 (696)
- 基于气团老化程度对挥发性有机物分类改善 PMF 源解析效果 朱玉凡, 陈强, 刘晓, 张瑞欣, 郭文凯 (707)
- 日照市夏季 VOCs 物种空间分布特征及其对臭氧生成的影响 姚维杰, 王大玮, 谢付堂, 朱宏伟, 孟祥宇, 田雨, 刘航, 刘晓咏, 张宇婷, 雷山东, 孙业乐, 吴林, 潘小乐, 王自发 (714)
- 泰山大气卤代烃的长期变化趋势与来源 赵峰, 陈天舒, 董灿, 李洪勇, 刘子璐, 毕于健, 国兆新, 王新锋, 杨凌霄, 王韬, 王文兴, 薛丽坤 (723)
- 典型内燃叉车尾气挥发性有机物与正构烷烃的排放特征 周文钦, 李成, 刘俊文, 朱曼妮, 桂小亮, 余飞, 廖松地, 姜帆, 李光辉, 蒋斌, 郑君瑜 (735)
- 2000~2020年黄河流域植被时空演化驱动机制 田智慧, 任祖光, 魏海涛 (743)
- 西南喀斯特流域土地利用对河流溶解无机碳及其同位素的影响 徐森, 李思亮, 钟君 (752)
- 生物炭添加对太湖滨岸带土壤氮矿化和淋失特征的影响 熊钰婷, 袁旭音, 周慧华, 高一丹, 汪宜敏 (762)
- 不同降雨条件下北运河河岸带类型对径流污染削减效果的影响 朱利英, 赵凯, 张俊亚, 王春荣, 魏源送 (770)
- 雨源型城市河流污染特征及水质联合评价: 以深圳龙岗河为例 毕业亮, 王华彩, 夏兵, 姜参参, 吴伟业, 李志林, 李诗敏, 宿辉, 白志辉, 徐圣君, 庄绪亮 (782)
- 廊坊市区径流污染时空分布特征及来源解析 潘欣荣, 左剑恶, 张宇, 门聪, 张丽萍, 黄守斌 (795)
- 北运河京津冀段河道浮游微生物群落多样性变化分析 郭芝芝, 苏振华, 邱琰茗, 郭道宇 (803)
- 河北省典型景观水体反硝化菌群落时空分布特征及驱动因素: 以石家庄为例 陈召莹, 张紫薇, 张甜娜, 周石磊, 张艺冉, 董宛佳, 于明会, 张一凡, 张家丰 (813)
- 青海湖流域有色可溶性有机物来源与特征分析 俞晓琴, 孟先强, 吴华武, 陈慧敏, 李宇阳, 朱俊羽, 郭燕妮, 姚磊 (826)
- 鄱阳湖丰枯情景对有色可溶性有机物生物可利用性及收支平衡的影响 郭燕妮, 姚晓龙, 陈慧敏, 俞晓琴, 李宇阳, 朱俊羽, 韩龙飞, 周蕾, 周永强 (837)
- 鄱阳湖沉积物溶解性有机质光谱特征 罗燕清, 万智巍, 晏彩霞, 聂明华, 丁明军, 鞠民, 刘赞 (847)
- 汤逊湖表层沉积物重金属污染与潜在生态风险评价 李星谕, 李朋, 苏业旺, 石明明, 胡天鹏, 毛瑶, 刘力, 张雅, 邢新丽, 祁士华 (859)
- 基于核密度估计的城市基础要素与街尘营养元素含量特征关联 王子娇, 李叙勇 (867)
- 新冠疫情下武汉典型饮用水水源中 DBPs 污染特征与风险评估 张坤峰, 昌盛, 涂响, 付青, 杨光, 樊月婷, 孙兴滨 (878)
- 铁改性石英砂过滤协同控制饮用水含氮消毒副产物和条件致病菌 齐鹏, 胡春, 邢学群, 毕志浩, 李泽松 (887)
- 氮掺杂生物炭催化臭氧对于布洛芬的降解特性与机制 柴铨, 许路, 金鑫, 石炬, 吴晨曦, 金鹏康 (896)
- 环糊精多孔聚合物对水中染料分子的吸附性能及主客效应 赵传靓, 王子婕, 闫仪, 徐慧, 周俊垣, 杨利伟, 王东升 (907)
- 冷冻 PN/A 颗粒污泥快速活化过程中的污泥形态与菌群演化特征分析 黄子恒, 张立, 崔舒惠, 张琦英, 文言, 钱飞跃 (920)
- 不同阳离子聚丙烯酰胺有机脱水剂对污泥脱水性能的影响 冯齐云, 高宝玉, 岳钦艳, 石伟杰, 冯春晖, 周继柱, 王国瑞 (928)
- 云南某矿区小流域土壤重金属健康风险评价 刘洋, 何朝辉, 牛学奎, 张迪, 潘波 (936)
- 山地平原过渡带耕地土壤重金属空间特征及潜在生态风险因素探析 张丁, 黄容, 高雪松 (946)
- 地累积指数法评价多金属环境质量的方法优化探索: 以农业发达地区为例 鞠铁男, 雷梅 (957)
- 西南地质高背景区蔬菜 Pb 的安全生产阈值与土地质量类别划分 穆德苗, 孙约兵 (965)
- 典型锰矿区周边农田土壤-农作物重金属污染特征及生态风险评价 黄钟霆, 易盛炜, 陈贝贝, 彭锐, 石雪芳, 李峰 (975)
- 矿业废弃地不同生态修复模式下植物多样性及重金属富集迁移特征 周鹏飞, 张世文, 罗明, 魏洪斌, 宋强, 方兵, 庄红娟, 陈弘扬 (985)
- 不同种植年限蔬菜大棚土壤特性、重金属累积和生态风险 任强, 孙瑞玲, 郑凯旋, 刘祎丹, 阮心玲, 王洋洋 (995)
- 温室与大田种植方式对胡萝卜生长过程中重金属吸收的影响 曹春, 任丹, 吕贞英, 张鹏, 李锦超, 陈勋文, 王俊坚 (1004)
- 两种淹水模式下施用钝化材料对镉污染农田水稻安全性的影响 王港, 余海英, 李廷轩, 唐婵 (1015)
- 复合淋洗条件下农用地耕作层土壤去镉效率及其功能调节 曹坤坤, 张沙沙, 胡学玉, 张敏, 胡晓晓, 王子劲 (1023)
- 产多胺细菌调控根际细菌群落阻控小麦 Cd 吸收效应 李晓哲, 覃善梅, 陈兆进, 张君, 姚伦广, 李娜, 庞发虎, 韩辉 (1031)
- 土壤 *phoC* 和 *phoD* 微生物群落对化肥和有机肥配施生物炭的响应 杨文娜, 余冻, 罗东海, 熊子怡, 王莹燕, 王子芳, 高明 (1040)
- 刺槐林恢复过程中土壤微生物碳降解酶的变化及与碳库组分的关系 李文杰, 张颖皎, 赵雅萍, 许森平, 任成杰, 杨改河, 冯永忠, 任广鑫, 王晓娟, 韩新辉 (1050)
- 中亚热带不同林龄马尾松林土壤酶学计量特征 焦鹏宇, 郭文, 陈泽龙, 刘先, 胡亚林, 王玉哲 (1059)
- 稻田与旱地土壤中真菌和细菌对秸秆碳的利用特征 邓少虹, 郑小东, 毛婉琼, 陈香碧, 胡亚军, 程爱武, 何寻阳, 苏以荣 (1069)
- 模拟及实际根系分泌物对苤蓝土壤微生物群落的影响 韩博远, 张闻, 胡芳雨, 赵庆庆, 卢媛, 孔学, 吕俊岗 (1077)
- 德兴铜矿区抗生素抗性基因污染特征及其驱动因子 韩柳, 楼倩, 乔敏, 刘梦婷, 钟家有, 丁惠君 (1089)
- 陕西渭北旱塬区农田土壤有机质空间预测方法 尉芳, 刘京, 夏利恒, 徐仲伟, 龙小翠 (1097)
- 长三角农田轮作系统氨排放特征、转化机制和减排潜力 徐昶, 苗文亮, 倪远之, 沈根祥, 钱晓雍, 付侃, 高宗源, 王振旗 (1108)
- 《环境科学》征订启事(618) 信息(685, 935, 956)

典型内燃叉车尾气挥发性有机物与正构烷烃的排放特征

周文钦¹, 李成², 刘俊文¹, 朱曼妮³, 桂小亮¹, 余飞¹, 廖松地³, 姜帆¹, 李光辉¹, 蒋斌¹, 郑君瑜^{1*}

(1. 暨南大学环境与气候研究院, 广州 511443; 2. 东莞理工学院生态环境工程技术研发中心, 东莞 523808; 3. 华南理工大学环境与能源学院, 广州 510006)

摘要: 非道路柴油车尾气是影响我国空气质量的重要排放源,但目前针对其化学组分及其影响因素的了解仍然非常有限。以6台内燃叉车为研究对象,利用气态组分在线监测结合样品采集离线分析方法,重点探讨了柴油机颗粒物过滤器(DPF)对叉车尾气中的关键化学组分挥发性有机物(VOCs)和正构烷烃含量及其特征的影响。结果表明,含氧挥发性有机物(OVOCs)、烯烃、烷烃、芳香烃和卤代烃在叉车尾气 VOCs 中的质量分数分别为: 26%~37%、16%~36%、19%~22%、13%~21% 和 4%~7%。小功率和大功率叉车的 VOCs 排放因子分别为: $(2.47 \pm 0.33) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $(1.48 \pm 0.24) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。叉车在使用 DPF 前后的总 VOCs 排放因子平均值分别为 $(1.94 \pm 0.58) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $(2.08 \pm 0.79) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, DPF 对 VOCs 排放因子无显著影响。然而值得注意的是,DPF 可对部分 OVOCs 组分的去除产生重要作用,乙醛和丙酮排放因子在使用 DPF 后分别降低了 19% 和 26%。正构烷烃组分的碳数分别在 $\text{C}_7 \sim \text{C}_{17}$ 和 $\text{C}_{24} \sim \text{C}_{31}$ 呈双峰分布,其中 C_{15} 为主峰碳。正构烷烃在使用 DPF 前和后的平均排放因子分别为 $(115 \pm 34) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $(53.7 \pm 19) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,下降幅度达到 53%,说明 DPF 能够有效地控制正构烷烃的排放。研究结果可对非道路工程机械尾气排放的精准控制以及区域空气质量的进一步改善提供科学支撑。

关键词: 工程机械; 挥发性有机物(VOCs); 正构烷烃; 柴油机颗粒物过滤器(DPF); 排放因子

中图分类号: X511 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2022)02-0735-08 **DOI:** 10.13227/j.hjxx.202107174

Emission Characteristics of VOCs and *n*-alkanes from Diesel Forklifts

ZHOU Wen-qin¹, LI Cheng², LIU Jun-wen¹, ZHU Man-ni³, GUI Xiao-liang¹, YU Fei¹, LIAO Song-di³, JIANG Fan¹, LI Guang-hui¹, JIANG Bin¹, ZHENG Jun-yu^{1*}

(1. Institute for Environment and Climate Research, Jinan University, Guangzhou 511443, China; 2. Research Center for Eco-Environment Engineering, Dongguan University of Technology, Dongguan 523808, China; 3. College of Environment and Energy, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Non-road diesel vehicle exhaust is an important emission source that affects air quality in China, yet knowledge regarding its chemical composition and potential influence factors remains limited. Six typical forklifts were selected to study the effect of diesel particulate filters (DPF) on the emission characteristics of volatile organic compounds (VOCs) and *n*-alkanes using online monitoring of gaseous components combined with offline analysis. The results showed that oxygenated volatile organic compounds (OVOCs), olefins, alkanes, aromatic hydrocarbons, and halogenated hydrocarbons accounted for 26%-37%, 16%-36%, 19%-22%, 13%-21%, and 4%-7% of the measured VOCs in forklift exhaust, respectively. The VOCs emission factors of low-power and high-power forklifts were $(2.47 \pm 0.33) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $(1.48 \pm 0.24) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively. The forklift exhaust emission factors of total VOCs without and with DPF were $(1.94 \pm 0.58) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $(2.08 \pm 0.79) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively. Our results showed that DPF exerted minor impact on VOCs emission. However, it is worth noting that DPF can efficiently remove some types of OVOCs components. For example, the emission factors of acetaldehyde and acetone of the forklifts with DPF were reduced by 19% and 26%, respectively, compared to that of those without DPF. The carbon numbers of *n*-alkane fractions showed a bimodal distribution of $\text{C}_7 \sim \text{C}_{17}$ and $\text{C}_{24} \sim \text{C}_{31}$, respectively, with C_{15} being the dominant peak carbon. The average emission factors of *n*-alkanes were $(115 \pm 34) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (without DPF) and $(53.7 \pm 19) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (with DPF), respectively, with a decrease of 53%, indicating that DPF can effectively reduce the emission of *n*-alkane in the exhaust of forklifts. Our results can provide scientific support for the precise control of non-road construction machinery exhaust emissions and the further improvement of regional air quality.

Key words: construction machinery; volatile organic compounds(VOCs); *n*-alkanes; diesel particulate filter(DPF); emission factor

挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)和正构烷烃(*n*-alkanes)是造成大气污染的重要化合物,与大气细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)和臭氧(O_3)的形成和演化密切相关^[1~5]。中国生态环境部报告显示,移动源(包括机动车、非道路工程机械、船舶和农业机械等)是我国大型城市区域大气环境 $\text{PM}_{2.5}$ 的主要来源^[6]。随着中国城市化的持续推进,基础设施建设得到了快速发展,非道路工程机械尾气排放对大气环境的影响愈来愈受到关注。现阶段,我国工程机械保有量达到了 760 多万辆,且呈现逐年增

长的态势,其中挖掘机、装载机和叉车分别占工程机械的 23.4%、17.8% 和 41.4%,是支撑我国工业生产和建筑建设的主要机械类型^[7]。由于工程机械体积庞大、施工环境复杂且缺乏成熟的排放源测试系统,国内外针对工程机械尾气排放的 VOCs 和正构烷烃的组分特征认知依然不足。

收稿日期: 2021-07-21; **修订日期:** 2021-08-02

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0213904); 广东省重点领域研发计划项目(2019B110206001)

作者简介: 周文钦(1995~),男,硕士研究生,主要研究方向为大气污染控制, E-mail: 951622831@qq.com

* 通信作者, E-mail: zhengjunyu_work@hotmail.com

以往非道路工程机械的排放研究主要集中在气态污染物[如:一氧化碳(CO)、氮氧化物(NO_x)、碳氢化合物(HC)、二氧化碳(CO_2)等]和颗粒物(PM). Lindgren 等^[8]的研究基于台架实验分析了非道路柴油机在怠速、受控瞬态运行工况下 CO、 NO_x 、PM 和 HC 排放特征,但台架实验具有较大的局限性不足以代表真实排放. 因此,随着便携式测试系统(portable emission measurement system, PEMS)在现场测试上的应用,国外学者基于 PEMS 现场测试分析了非道路柴油机的发动机参数、工况变化、进气压变化等因素对多种工程机械排放的 CO_2 、HC、 NO_x 和其他污染物的特征影响^[9, 10]. Fu 等^[11]的研究也首次在我国采用 PEMS 测试了 12 台挖掘机和 8 台装载机在不同工况下 HC、PM 和 NO_x 等的排放特性. 而随着研究的深入, VOCs 和正构烷烃组分测试分析也被逐渐开展. Wang 等^[12]的研究识别了工程机械的类型、排放标准、运行工况对其尾气中 VOCs 含量及变化特征的影响,发现不同机械间的尾气 VOCs 排放因子差异较大,排放标准对不同运行工况排放的 VOCs 也有着明显的影响. Li 等^[13]的研究认为机械间额定功率的差异也是影响 VOCs 排放的重要因素之一. 此外,有研究发现随着排放标准的提升,工程机械尾气排放的正构烷烃总体上表现出降低的趋势,且低负荷运行状态排放高于高负荷^[14, 15]. 但不同学者研究结果也存在一定差异,范国樑等^[16]的研究认为柴油机在高负荷时正构烷烃排放高于低负荷. 因此,构建规范测试方法体系对于提升工程机械尾气组分特征的认识具有重要意义.

后处理装置可对尾气排放产生重要影响, Zhao 等^[17]的研究通过台架实验发现使用柴油机颗粒物过滤器(diesel particulate filter, DPF)后柴油机排放的 VOCs 比未使用任何处理装置时增加了 4.3%,原因可能是喷油助燃持续的再生方式增加了尾气中碳氢化合物的浓度^[18]. 但是,目前的研究认为 DPF 可以有效降低柴油车尾气正构烷烃的排放^[19~22], DPF

对正构烷烃的去除效果与车辆排气温度、运行工况等多个参数密切相关. 例如,车辆低速行驶状态下, DPF 对正构烷烃的去除效率远低于高速行驶状态,并且排气温度不同 DPF 对正构烷烃去除效果也有较大差异^[20]. 目前,我国对工程机械的排放提出了严格要求, DPF 已成为最具市场需求的后处理技术之一^[23~25],但关于 DPF 对非道路工程机械尾气 VOCs 与正构烷烃的认识仍然非常有限. Wu 等^[26]的研究也指出,因缺乏相关测试数据结果,导致工程机械的排放清单存在很大的不确定性. 因此,针对特定的非道路工程机械开展 VOCs 和正构烷烃的组分测试,识别其具体组分特征和影响因素显得非常重要.

基于此,本文选用目前工程机械保有量最大的内燃叉车作为研究对象,对其实际工作状态下尾气排放的 VOCs 和正构烷烃进行了分析,探讨了 DPF、发动机功率和机械差异等关键因素对 VOCs 和正构烷烃含量和组成特征的影响. 本研究结果对工程机械尾气的精准排放表征、治理政策的科学制定以及区域空气质量的持续改善具有重要的意义.

1 材料与方法

1.1 叉车和 DPF 的选取

中国非道路工程机械国一、国二、国三和国四阶段排放标准的实施时间分别为 2008 年底、2010 年底、2016 年初和 2020 年底. 目前,大部分在用非道路工程机械实施的排放标准为国二和国三,总占比约为 70%. 其中,叉车的占比最大,保有量达 290 多万辆^[7]. 本研究共选取 6 台典型国三排放标准叉车,包括 3 台载重 3 500 kg 的小型叉车和 3 台载重 12 000 kg 的大型叉车(表 1). DPF 为目前广泛使用的壁流式类型^[27],属主动再生型清洁过滤器,过滤介质为含有多毛细微孔的陶瓷材质,横截面圆形,总体长度 80 cm,直径 30 cm,其中内圈陶瓷载体长度 30 cm,内径 26 cm,平均每平方英寸约有 200 个微孔(6 台叉车使用同一款可拆卸的 DPF).

表 1 测试叉车基本信息

Table 1 Detailed information of tested forklifts

编号	厂商	排放标准	发动机型号	出厂年份	车重/kg	载重量/kg	额定功率/kW	累计工作时间/h
T1	杭叉	国三	CPC35-AG51	2017	4 556	3 500	37	2 490
T2	杭叉	国三	CPC35N-RG51	2017	4 555	3 500	37	1 712
T3	杭叉	国三	CPC35N-RG51	2018	4 845	3 500	37	1 170
T4	合力	国三	CPCWG038798	2017	14 500	12 000	118	1613
T5	合力	国三	CA6DF3-16GAH3U	2018	14 500	12 000	118	858
T6	合力	国三	CA6DF3-16GAG3U	2016	14 400	12 000	118	1 658

1.2 测试系统搭建

叉车尾气排放测试采样系统由 4 个模块组成(图 1):第一个模块为便携式烟气分析仪(Madur-

Photon, 奥地利),用于实时测量尾气中 CO、 CO_2 、 NO 、 NO_2 和 SO_2 浓度以及环境温度、尾气温度和大气压力;第二个模块为便携式尾气流量监测计

(kurz-2445, 美国), 用于实时监测尾气的流量动态变化; 第三个模块为多功能稀释通道细颗粒采样器 (MFD25, 上海贝塞尔), 用于采集尾气排放细颗粒物; 第四模块为尾气稀释采样系统, 包括样气稀释系统 (SEMTECH-MPS, Sensors, 美国)、SUMMA 罐 (Entech, 美国)、2, 4-二硝基苯并胍管 (2, 4-Dinitrophenylhydrazine, DNPH) 和装填 Tenax-TA (60/80 目) 的热脱附管 (CAMSCO, 美国)。所有仪器均放置在与叉车同步移动的卡车车厢中。叉车尾气经阻燃管进入 DPF 处理装置后通入排气流量管, 流量管尾部分别接入烟气分析仪、多功能稀释通道细颗粒采样器以及样气稀释系统的采样探头。稀释后的尾气分支路 1、2、3 以 SUMMA 罐、热脱附管、DNPH 管来采集样品。支路 1 和支路 2 中, 样气稀释系统分别连接一段不锈钢管和 Teflon 管, 稀释后的废气以 $0.2 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 的流量通过颗粒物-水气过滤头进入到 SUMMA 罐和热脱附管中。支路 3 中, 在 DNPH 管前端连接 KI 管 (Bonna-Agela, 中国) 以除去 O_3 的干扰, 并使用多功能采样器 (ZC-QL, 恒达, 中国) 以 $0.2 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 流量进行采样。

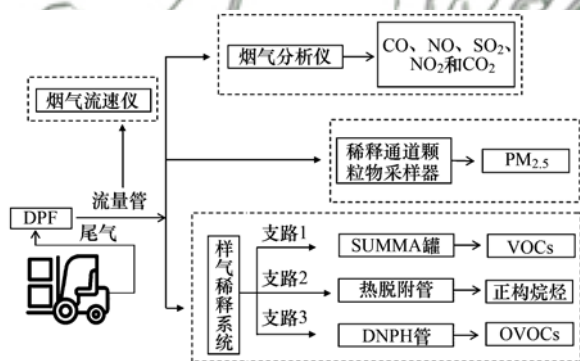


图 1 非道路工程机械尾气采集系统示意

Fig. 1 Non-road construction machinery exhaust collection system

1.3 样品分析

VOCs 分析流程参考美国 EPA TO-14/TO-15 方法^[28,29]. 样品首先经低温冷阱预浓缩, 再通过气相色谱-质谱联用系统 (Agilent 7890B/5977, 美国) 对 VOCs 进行定性和定量分析. VOCs 方法检测限为 $0.01 \sim 0.038 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 回收率为 $76.4\% \sim 110\%$, 详细实验步骤见文献^[30]. OVOCs 分析参考美国 EPA 推荐的 TO-11A 法^[31]. 该方法基于 OVOCs 和 DNPH 硅胶小柱与强酸作为催化剂的特定反应, 将含羰基化合物快速衍生化为有色的腙类化合物, 然后使用乙腈将这些化合物从小柱上进行洗脱, 通过高效液相色谱 (Agilent 1260, 美国) 进行定性定量检测. 正构烷烃的定量采用热脱附-气相色谱/质谱联用仪 (Agilent 7890B/5977, 美国), 在分析之前使用一组氙代标准品 (氙代二氯苯和氙代正构烷烃) 注入吸

附管中, 以确定正构烷烃的回收率. 样品在 TD 热脱附中进行热解析 (280°C) 后进入色谱柱 (DP-5MS, $30 \text{ m} \times 0.25 \text{ mm} \times 0.25 \text{ mm}$), 60°C 恒温 5 min , 再以 $6^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 速率加热到 300°C 恒温 10 min , 最后使用 MS 进行选择扫描。

1.4 质量保证和质量控制

样品在采集、运输、储存和实验分析过程均严格遵守质量保证和质量控制措施, 包括尾气采样管路的污染防控、多功能采样器的校准、SUMMA 罐使用前的清洁、热脱附管活化、DNPH 管防光保护, 采集后样品的保存和实验室分析. 尾气采样管路使用的是低吸附、高阻燃、气密性好的阻燃软管以满足测试需求. 在采样前, 使用高精度流量计 (MW-20SLPM-D, Alicat, 美国) 对多功能采样器 (ZC-QL, 恒达, 中国) 进行校准, 以保证热脱附管与 DNPH 管采样时抽气流量的精准控制; SUMMA 罐通过清洗仪使用高纯氮进行 10 次循环的反复清洗, 确保 SUMMA 罐的清洁; 热脱附管使用前经活化仪在 350°C 、氮气流量 $0.05 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 状态下进行 120 min 老化, 确保管子无残留污染物. 采样时, DNPH 管前端连接 KI 管 (Bonna-Agela) 以除去 O_3 的干扰, 并将 DNPH 管和热脱附管用锡箔包裹, 以避免阳光直射. 为确保热脱附管和 DNPH 管的收集率, 分别将两根热脱附管、两根 DNPH 管进行串联连接以减少穿透损失, 将 DNPH 和热脱附管用铝箔紧密包装放入密实袋中, 并在低温 (-18°C) 下冷藏. 本研究中的 DNPH 管穿透率为 $12.6\% \sim 15.5\%$. 热脱附管穿透率为 $28.80\% \sim 40.11\%$, 正构烷烃的标准样品的回收率为 $80.59\% \sim 112.90\%$, 相对标准偏差 (RSD) 为 $4.30\% \sim 12.36\%$ ($n=12$).

1.5 基于燃料的 VOCs 与正构烷烃排放因子的计算方法

本研究利用碳平衡公式计算叉车的排放因子, 计算公式如下:

$$EF_i = R_{\text{FC}} \times \rho_i \quad (1)$$

式中, EF_i 为污染物的排放因子 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), ρ_i 为污染物 i 的浓度 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), R_{FC} 为单位质量燃油气体排放量 ($\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$)

$$R_{\text{FC}} = \frac{C_F}{\rho(\text{CO}) + \rho(\text{PM}) + \rho(\text{CO}_2)} \quad (2)$$

式中, C_F 为 1 kg 柴油中的碳质量 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), $\rho(\text{CO})$ 、 $\rho(\text{CO}_2)$ 和 $\rho(\text{PM})$ 分别为 CO 、 CO_2 和 PM 的碳排气浓度 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$). 本研究根据实际运行条件下不同工况的时长, 将工况的采样时间权重进行分配, 具体为怠速工况 10% , 行走工况 45% 以及作业工况 45% .

2 结果与讨论

2.1 叉车尾气排放 VOCs 组成特征

本研究共检测了 119 种 VOCs 组分(29 种烷烃、11 种烯烃、1 种炔烃、18 种芳烃、35 种卤代烃和 25 种 OVOCs)和 29 种正构烷烃组分($C_7 \sim C_{36}$). 如图 2 所示,未使用柴油机颗粒物过滤器(without diesel particulate filter, WDPF)条件下,VOCs 的主要成分为:OVOCs、烯烃、烷烃和芳香烃,平均质量分数分别为:31%、27%、20% 和 15%,使用 DPF 后,OVOCs、烯烃、烷烃和芳香烃平均质量分数分别为:28%、30%、20% 和 15%,DPF 的使用可致 OVOCs 的组分质量分数略微降低,烯烃略微升高,而其他组分不受影响. 以 WDPF 为例,叉车尾气排放的 VOCs 成分平均质量分数排序(卤代烃<芳香烃<烷烃<烯烃<OVOCs)与其他典型工程机械尾气排放的 VOCs(烷烃<芳香烃<烯烃<OVOCs)^[12] 和我国柴油车尾气排放的 VOCs 组成类似(烯烃<烷烃<芳香烃<OVOCs)^[32,33],但明显区别于欧美发达国家的柴油车排放的 VOCs(烯烃<OVOCs<烷烃<芳香烃)^[34,35],这主要可能是柴油发动机技术以及燃料差异所导致^[36]. 此外,叉车比柴油车排放的烯烃(ω)相对较高,这与叉车在的高负荷低速运行模式和燃料在柴油机的燃烧状况有关,柴油机在高负荷低速的条件下烯烃排放量要比其他运行模式高^[37].

如图 2 所示,无论是否使用 DPF,大功率(额定功率>75 kW,包括 T4、T5、T6)叉车尾气 OVOCs 和芳香烃组分的质量分数均高于小功率叉车(额定功率<75 kW,包括 T1、T2、T3),然而小功率叉车

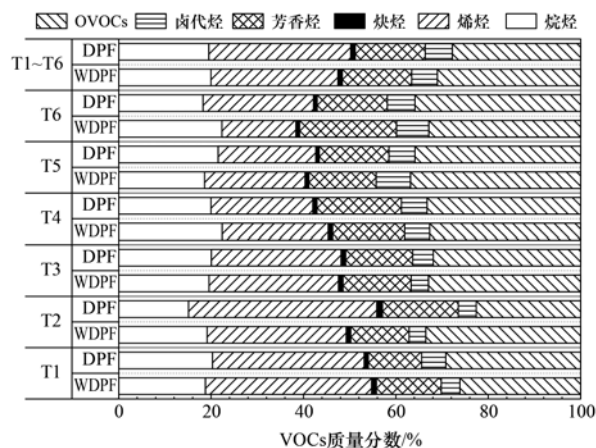


图 2 叉车尾气 VOCs 化学成分组成分布

Fig. 2 Chemical composition distribution of forklift exhaust VOCs

排放烯烃组分质量分数却高于大功率叉车,但烷烃的质量分数几乎不受叉车功率大小的影响. 通过对 119 种 VOCs 浓度归一化分析(图 3),本研究进一步发现未使用和使用 DPF 叉车尾气排放的前 41 种 VOCs 分别占总 VOCs 的 88.6% 与 90.3%. 其中,乙烯(14.6%)、丙烯(6.7%)、乙烷(5.9%) 和甲苯(5.6%) 质量分数最大(以 WDPF 为例),这与船舶尾气 VOCs 成分组成类似^[38],但与柴油车以及部分工程机械有着很大的差异^[32,33],反映了不同柴油发动机类型以及燃料的差异对 VOCs 化学成分的影响.

2.2 叉车 VOCs 排放因子及其影响因素

如图 4 所示,叉车在未使用和使用 DPF 时 VOCs 的排放因子平均值分别为 $(1.95 \pm 0.58) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $(2.09 \pm 0.79) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. 叉车使用 DPF 后 VOCs 排放总量略微增加了 6.6%,这与 Zhao 等^[17]

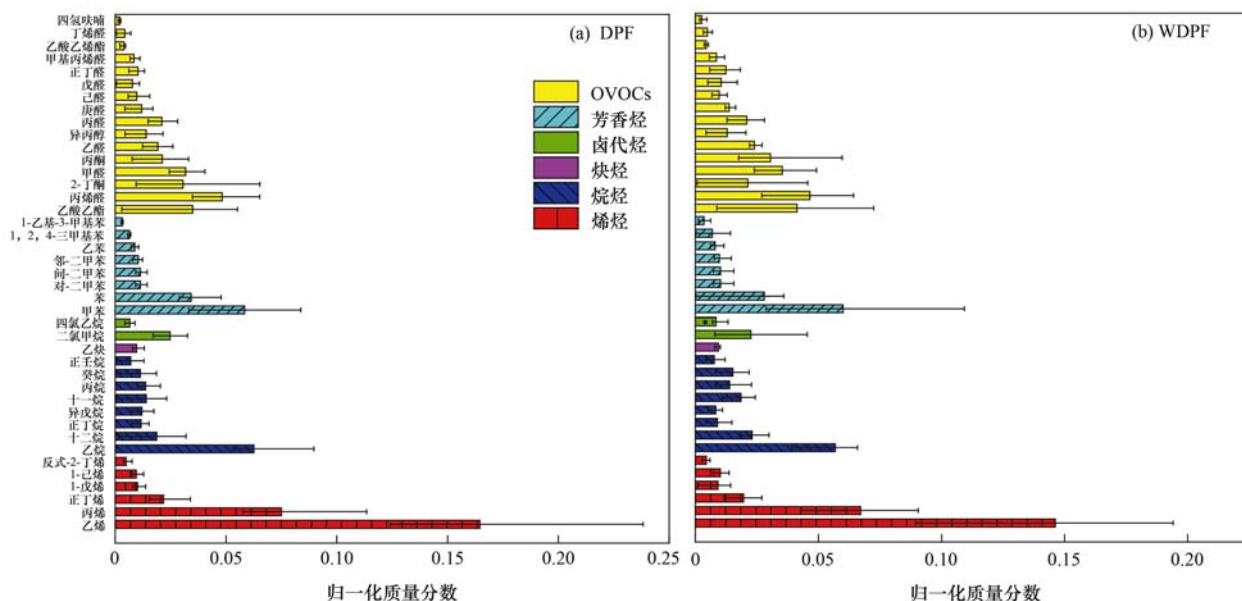


图 3 归一化的前 41 种物种质量分数

Fig. 3 Normalization mass fraction of top 41 species

的研究结果类似. VOCs 的微小增加可能是因 DPF 的使用增加了发动机排气背压,引起发动机内燃油燃烧不充分导致的^[39]. 此外,未使用 DPF 时,烷烃、烯烃、炔烃、芳香烃、卤代烃和 OVOCs 的排放因子分别为: (0.39 ± 0.10) 、 (0.54 ± 0.28) 、 (0.018 ± 0.01) 、 (0.29 ± 0.06) 、 (0.094 ± 0.01) 和 $(0.61 \pm 0.14) \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$. 使用 DPF 后,烷烃、烯烃、炔烃、芳香烃、卤代烃和 OVOCs 的排放因子分别为: (0.41 ± 0.15) 、 (0.64 ± 0.039) 、 (0.02 ± 0.01) 、 (0.32 ± 0.01) 、 (0.11 ± 0.04) 和 $(0.58 \pm 0.16) \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$. 显然,DPF 的使用导致了烷烃、烯烃、芳香烃和卤代烃的排放量略微增加,但可以降低 OVOCs 的排放. 其中,甲醛、乙醛、丙酮和乙酸乙酯平均排放因子分别从 67.80、45.80、52.60 和 72.00 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 降低到 64.20、36.80、39.00 和 60.40 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,分别降低了 5.2%、19.3%、25.8% 和 16.1%,与 Zhao 等^[17]的研究结果一致.

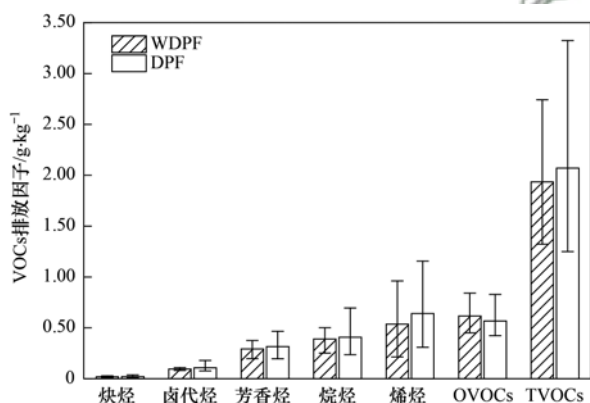


图4 综合工况下 VOCs 的排放因子

Fig. 4 Emission factors of VOCs on combined working condition

工程机械的发动机额定功率的大小是影响污染排放的一个重要影响因素. 如图 5 所示,以未使用 DPF 为例,小功率叉车 VOCs 的排放因子为 $(2.47 \pm 0.33) \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,而大功率叉车的排放因子为 $(1.48 \pm 0.24) \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$. 其中,小功率叉车的烷烃、烯烃、炔烃、芳香烃、卤代烃和 OVOCs 的平均排放因子分别为: (0.46 ± 0.042) 、 (0.77 ± 0.18) 、 (0.024 ± 0.003) 、 (0.33 ± 0.036) 、 (0.092 ± 0.016) 和 $(0.72 \pm 0.064) \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,而大功率叉车的烷烃、烯烃、炔烃、芳香烃、卤代烃和 OVOCs 的平均排放因子分别为: (0.31 ± 0.075) 、 (0.30 ± 0.098) 、 (0.012 ± 0.004) 、 (0.25 ± 0.047) 、 (0.096 ± 0.004) 和 $(0.49 \pm 0.048) \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$. 与大功率发动机相比,小功率发动机的烷烃、烯烃、芳香烃、卤代烃和 OVOCs 分别增加了 32.3%、60.3%、50%、25.1% 和 32.2%,卤代烃类物质几乎不受发动机功率大小的影响,这与 Li 等^[13]的研究发现的工程机械功率大小对

VOCs 排放影响一致. 烯烃、烷烃和 OVOCs 的产生主要是由于燃料的不完全燃料导致的,这与发动机的运行工况状态密切相关,当发动机的功率增大时,发动机的技术要求也更加先进,特别是当功率 $> 75 \text{ kW}$ 时发动机会普遍使用高压共轨技术和电子精准喷油控制系统^[40],提高燃料燃烧效率从而降低污染物的排放,以达到国家排放标准.

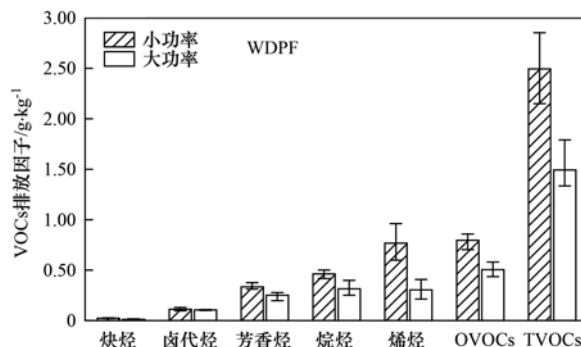


图5 不同功率叉车尾气的 VOCs 排放因子

Fig. 5 Emission factors of VOCs from forklift exhaust of different powers

将本研究叉车 VOCs 的排放因子与其他文献进行了比较. 如表 2 所示,本研究国三叉车 VOCs 排放因子总体上与其他研究处于同一水平,但与已有研究结果存在 2~4 倍间的差异,反映了非道路机械尾气 VOCs 的排放因子与机械种类、发动机类型、生产年份、额定功率、使用时长和维护水平等因素密切相关. 例如国三叉车的 VOCs 排放因子远高于国三压路机和打桩机 (额定功率范围为 136~296 kW) 的 VOCs 排放因子^[12] (较高的额定功率使燃料有更高的燃烧效率,更低 VOCs 排放),但都远低于文献 [42] 中国三排放的推荐值. 此外从表 2 中可知,不同机械间的 VOCs 排放差异较为明显,但国一和国二机械排放因子与文献 [42] 的推荐值相似. 从中可以进一步观察到随着国家标准的日益严格,工程机械尾气 VOCs 的排放呈现逐渐降低的趋势,说明了标准加严对控制工程机械尾气 VOCs 的重要.

2.3 正构烷烃的排放因子及其影响因素

正构烷烃是工程机械尾气有机物污染物排放的重要组成成分,本研究主要针对气态 $\text{C}_7 \sim \text{C}_{36}$ 碳数的正构烷烃进行分析. 在未使用 DPF 下,叉车正构烷烃的平均排放浓度为 $1761.3 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,比柴油车尾气中正构烷烃浓度 ($351.06 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) 高 5 倍^[43]. $\text{C}_7 \sim \text{C}_{11}$ 、 $\text{C}_{12} \sim \text{C}_{22}$ 、 $\text{C}_{23} \sim \text{C}_{32}$ 和 $\text{C}_{33} \sim \text{C}_{36}$ 的平均排放浓度分别为 354.2、1 038.7、463.3 和 9.9 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,随碳数的增加,正构烷烃挥发性降低,高碳链的正构烷烃的相对浓度排放呈现降低趋势^[44]. 将正构烷烃的浓度归一化处理,如图 6 所示,无论是否使用 DPF,

表 2 本研究中的叉车基于燃料的排放因子与其他文献的对比

Table 2 Comparison of fuel-based emission factors of the forklifts with other literature

类型	国标	排放物质	基于燃料的排放因子/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	文献
叉车(WDPF)	国三	VOCs	1.95 ± 0.58	本研究
叉车(DPF)	国三		2.08 ± 0.79	
压路机和打桩机	国一	VOCs	$4.57 \sim 7.49$	[12]
压路机和平地机	国二		$3.57 \sim 5.82$	
压路机和平地机	国三		$0.45 \sim 1.15$	
挖掘机	国一和国二	HC	3.47	[41]
装载机	国一和国二		5.99	
挖掘机	国一和国二	HC	3.31	[11]
装载机	国一和国二		7.61	
非道路机械清单 编制指南推荐值	国一	HC	$5.2 \sim 6.19$	[42]
	国二		$4.76 \sim 5.65$	
	国三		$3.91 \sim 5$	

正构烷烃的质量分数分布趋势都极为相似. 以未使用 DPF 为例, 正构烷烃组分的碳数分布主要以 $C_7 \sim C_{17}$ 和 $C_{24} \sim C_{31}$ 为主导, 分别占总正构烷烃的 74.3% 和 21.9%. 其中, C_{15} 为主碳峰, 占总正构烷烃的 27.8%, 这表明相对低碳数的正构烷烃是排放的主体. 与本研究类似, 范国樑等^[16]的研究发现非道路用柴油机排放的气态正构烷烃的主碳峰为 $C_{15} \sim C_{16}$. 但柴油机排放的颗粒态正构烷烃却主要以 $C_{21} \sim C_{22}$ 为主碳峰^[44], 这可能是正构烷烃气粒相分配的差异导致的. Huang 等^[45]的研究结果显示, 使用重油为燃料的船舶排放约 60% 中等挥发性有机物 (IVOCs, 有效饱和浓度相当于 $C_{12} \sim C_{22}$)^[22] 是以颗粒相的形式存在. 但有研究却发现工程机械排放的颗粒态 IVOCs 只占总 IVOCs 的 5%, 而颗粒态的中低挥发性有机物 (SVOCs, 有效饱和浓度相当于 $C_{22} \sim C_{36}$)^[22] 则占了 61.8%~71.2%^[46], 以上表明机械和燃料的差异可以影响气态和颗粒态正构烷烃的占比以及主峰碳的分布. 此外, 图 6 表明使用 DPF 后较低挥发性的 $C_{17} \sim C_{20}$ 和 $C_{25} \sim C_{32}$ 质量分数相对于

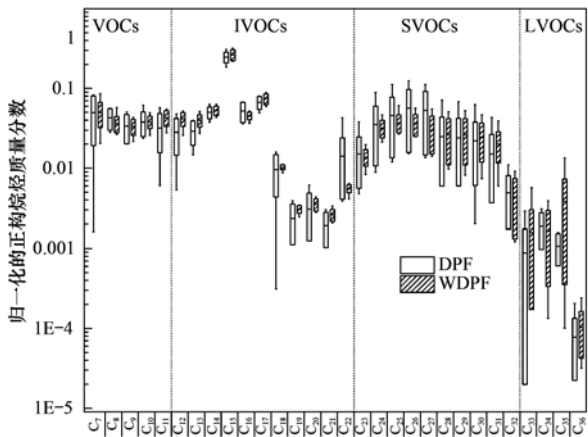


图 6 归一化的正构烷烃质量分数分布

Fig. 6 Normalization mass fraction distribution of *n*-alkanes

未使用 DPF 时存在降低趋势, DPF 的使用对不同碳数的正构烷烃存在不同的影响.

如图 7 所示, 在未使用 DPF 情况下, 正构烷烃平均排放因子为 $(115 \pm 34) \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其中 $C_7 \sim C_{11}$ 、 $C_{12} \sim C_{22}$ 、 $C_{23} \sim C_{32}$ 和 $C_{33} \sim C_{36}$ 的排放因子分别为 (20.4 ± 2.3) 、 (62.6 ± 15.2) 、 (30.74 ± 24) 和 $0.64 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 使用 DPF 后, 正构烷烃的综合平均排放因子为 $(53.7 \pm 19) \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其中 $C_7 \sim C_{11}$ 、 $C_{12} \sim C_{22}$ 、 $C_{23} \sim C_{32}$ 和 $C_{33} \sim C_{36}$ 的排放因子分别为 (12.7 ± 0.2) 、 (27.9 ± 3.6) 、 (12.8 ± 18) 和 $0.26 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $C_7 \sim C_{11}$ 、 $C_{12} \sim C_{22}$ 、 $C_{23} \sim C_{32}$ 和 $C_{33} \sim C_{36}$ 排放因子分别下降了 37.7%、55.4%、58.3% 和 59.3%, 说明 DPF 对正构烷烃的去除效果随碳数的增加而加强, 进一步验证了前人研究的结果^[47,48].

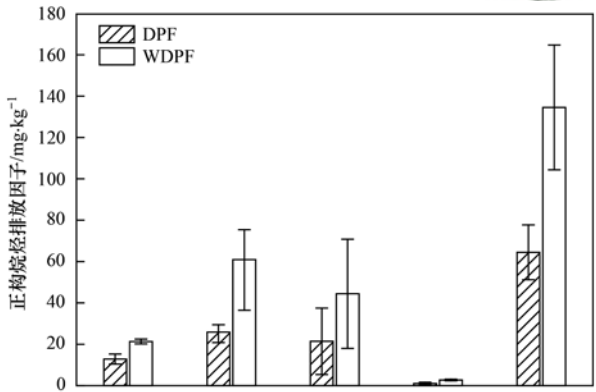


图 7 正构烷烃的排放因子

Fig. 7 Emission factors of *n*-alkanes

将占比最大的 $C_{12} \sim C_{22}$ 排放因子与其他研究进行了比对, 如图 8 所示, 在未使用 DPF 情况下, $C_{12} \sim C_{22}$ 的平均排放因子与工程机械、柴油车的排放因子处于同一水平范围, 远洋船舶略高, 汽油车的排放最低. 这表明了非道路移动源的正构烷烃普遍较高, 而正构烷烃是总碳氢 (THC) 的重要组成部分, 非道路

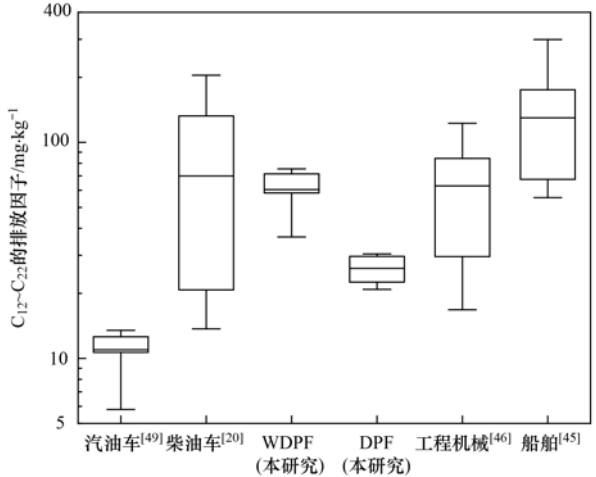


图 8 正构烷烃的排放因子与其他文献的对比

Fig. 8 Comparison with other literature of *n*-alkane emission factors

移动源 THC 的控制政策滞后是造成这一现象的重要原因。此外,燃料是正构烷烃排放的重要影响因素,与汽油相比柴油中含有更高比例的正构烷烃成分从而致使柴油排放更高的正构烷烃,而远洋船舶通常使用的重油比普通柴油具有更高的碳数和更低的燃烧效率,从而导致船舶废气具有更高的正构烷烃的排放水平^[45]。本研究结果表明 DPF 技术可以有效降低正构烷烃的排放,但是目前非道路工程机械只有少部分安装了 DPF 等后处理装置,绝大部分机械还处于无控制排放状态,需引起监管部门的注意。

3 结论

(1) 总体而言,DPF 的使用略微增加了叉车尾气 VOCs 的排放,但与 VOCs 种类相关。VOCs 组分质量分数最大的为 OVOCs,其次是烯烃、烷烃、芳香烃和卤代烃。排放量最大的前 10 种物种分别为: 乙烯、丙烯、乙烷、丙烯醛、甲醛、乙醛、丙酮、丙醛、苯和甲苯。

(2) 未使用 DPF 情况下,小功率和大功率叉车 VOCs 的排放因子分别为 $(2.47 \pm 0.33) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $(1.48 \pm 0.24) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, VOCs 排放因子随机械额定功率增加而减小,尤其对烯烃、烷烃和 OVOCs 影响较为明显,但卤代烃类物质几乎不受影响。

(3) 正构烷烃以 C_{15} 为主峰碳,相对低碳数的正构烷烃是排放的主体,排放随正构烷烃碳数的增加呈下降趋势。DPF 的使用可以显著降低正构烷烃的排放,其中 $\text{C}_7 \sim \text{C}_{11}$ 、 $\text{C}_{12} \sim \text{C}_{22}$ 、 $\text{C}_{23} \sim \text{C}_{33}$ 和 $\text{C}_{33} \sim \text{C}_{36}$ 的排放因子分别下降了 37.7%、55.4%、58.3% 和 59.3%。

参考文献:

- [1] Baudic A, Gros V, Sauvage S, *et al.* Seasonal variability and source apportionment of volatile organic compounds (VOCs) in the Paris megacity (France) [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, **16**(18): 11961-11989.
- [2] Wang H L, Jing S A, Lou S R, *et al.* Volatile organic compounds (VOCs) source profiles of on-road vehicle emissions in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **607-608**: 253-261.
- [3] 王娟, 钟宁宁, 栾媛, 等. 鄂尔多斯市秋季大气 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 颗粒物中正构烷烃的组成分布与来源特征 [J]. *环境科学学报*, 2007, **27**(11): 1915-1923.
Wang J, Zhong N N, Luan Y, *et al.* Chemical composition and emission source of *n*-alkanes in ambient PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$ in autumn in Ordos [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, **27**(11): 1915-1923.
- [4] 邹宇, 邓雪娇, 李菲, 等. 广州番禺大气成分站复合污染过程 VOCs 对 O_3 与 SOA 的生成潜势 [J]. *环境科学*, 2017, **38**(6): 2246-2255.
Zou Y, Deng X J, Li F, *et al.* Effect of VOCs on O_3 and SOA formation potential during the combined pollution process in Guangzhou Panyu Atmospheric Composition Station [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(6): 2246-2255.
- [5] 刘晓迪, 孟静静, 侯战方, 等. 聊城市冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 中正构烷烃和糖类的污染特征及来源解析 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(2): 548-557.
Liu X D, Meng J J, Hou Z F, *et al.* Pollution Characteristics and source analysis of *n*-alkanes and saccharides in $\text{PM}_{2.5}$ during the winter in Liaocheng City [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(2): 548-557.
- [6] 中华人民共和国生态环境部. 中国机动车环境管理年报 (2018) [R]. 北京: 中华人民共和国生态环境部, 2018.
- [7] 中国工程机械工业协会. 中国工程机械工业年鉴-2020 [R]. 北京: 机械工业出版社, 2020.
- [8] Lindgren M, Arrhenius K, Larsson G, *et al.* Analysis of unregulated emissions from an off-road diesel engine during realistic work operations [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(30): 5394-5398.
- [9] Abolhasani S, Frey H C, Kim K, *et al.* Real-world in-use activity, fuel use, and emissions for nonroad construction vehicles: a case study for excavators [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2008, **58**(8): 1033-1046.
- [10] Frey H C, Rasdorf W, Kim K, *et al.* Comparison of real-world emissions of B20 biodiesel versus petroleum diesel for selected nonroad vehicles and engine tiers [J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2008, **2058**(1): 33-42.
- [11] 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.
- [12] Wang R C, Yuan Z B, Zheng J Y, *et al.* Characterization of VOC emissions from construction machinery and river ships in the Pearl River Delta of China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2020, **96**: 138-150.
- [13] Li C, Cui M, Zheng J Y, *et al.* Variability in real-world emissions and fuel consumption by diesel construction vehicles and policy implications [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **786**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.147256.
- [14] Cui M, Chen Y J, Li C, *et al.* Parent and methyl polycyclic aromatic hydrocarbons and *n*-alkanes emitted by construction machinery in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **775**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.144759.
- [15] Cui M, Chen Y J, Feng Y L, *et al.* Measurement of PM and its chemical composition in real-world emissions from non-road and on-road diesel vehicles [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, **17**(11): 6779-6795.
- [16] 范国樑, 李登科, 张仲荣, 等. 非道路用柴油机半挥发性有机物排放特性 [J]. *天津大学学报 (自然科学与工程技术版)*, 2013, **46**(9): 820-825.
Fan G L, Li D K, Zhang Z R, *et al.* Emission characteristics of semi-volatile organic compounds from non-road diesel engine [J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2013, **46**(9): 820-825.
- [17] Zhao H, Ge Y S, Zhang T Z, *et al.* Unregulated emissions from diesel engine with particulate filter using Fe-based fuel borne catalyst [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2014, **26**(10): 2027-2033.
- [18] 钱枫, 薛常鑫, 许小伟, 等. 国六柴油机 DPF 再生时 VOCs 排放特性 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(2): 674-681.
Qian F, Xue C X, Xu X W, *et al.* VOCs emission characteristics of DPF regeneration in national VI diesel engine [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(2): 674-681.

- [19] Liu Z G, Eckerle W A, Ottinger N A. Gas-phase and semivolatile organic emissions from a modern nonroad diesel engine equipped with advanced aftertreatment[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2018, **68**(12): 1333-1345.
- [20] Zhao Y L, Nguyen N T, Presto A A, *et al.* Intermediate volatility organic compound emissions from on-road diesel vehicles: chemical composition, emission factors, and estimated secondary organic aerosol production[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(19): 11516-11526.
- [21] Liu Z G, Berg D R, Swor T A, *et al.* Comparative analysis on the effects of diesel particulate filter and selective catalytic reduction systems on a wide spectrum of chemical species emissions[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **42**(16): 6080-6085.
- [22] Zhao Y L, Hennigan C J, May A A, *et al.* Intermediate-volatility organic compounds: a large source of secondary organic aerosol [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(23): 13743-13750.
- [23] GB 17691-2018, 重型柴油车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段)[S].
- [24] 吴凤英, 王站成, 徐斌, 等. 柴油机颗粒捕集器(DPF)再生技术分析[J]. *环境工程*, 2015, **33**(6): 67-70, 18.
Wu F Y, Wang Z C, Xu B, *et al.* Analysis of the regeneration technologies for diesel particulate filter [J]. *Environmental Engineering*, 2015, **33**(6): 67-70, 18.
- [25] 贺泓, 翁端, 资新运. 柴油车尾气排放污染控制技术综述[J]. *环境科学*, 2007, **28**(6): 1169-1177.
He H, Weng D, Zi X Y. Diesel emission control technologies: a review[J]. *Environmental Science*, 2007, **28**(6): 1169-1177.
- [26] Wu L Q, Wang X M, Lu S H, *et al.* Emission inventory of semi-volatile and intermediate-volatility organic compounds and their effects on secondary organic aerosol over the Pearl River Delta region[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, **19**(12): 8141-8161.
- [27] 苏兆杰, 王军, 张朝刚. 非道路机械柴油机尾气后处理技术综述[J]. *工程机械与维修*, 2018, (1): 41-45.
- [28] EPA/625/R-96/010b, Method TO-15. Determination of volatile organic compounds (VOCs) in air collected in specially prepared canisters and analyzed by gas chromatography/mass spectrometry (GC/MS)[S].
- [29] EPA/625/R-96/010b, Method TO-14A. Determination of volatile organic compounds (VOCs) in ambient air using specially prepared canisters with subsequent analysis by gas chromatography[S].
- [30] 李光辉, 蒋斌, 王思行, 等. 罐采样-预浓缩/气相色谱-质谱联用测定污染源废气中118种挥发性有机物[J]. *分析测试学报*, 2020, **39**(12): 1441-1450.
Li G H, Jiang B, Wang S H, *et al.* Determination of 118 volatile organic compounds in source emission by canister sampling-preconcentration/gas chromatography-mass spectrometry [J]. *Journal of Instrumental Analysis*, 2020, **39**(12): 1441-1450.
- [31] EPA/625/R-96/010b, Method TO-11A, Determination of formaldehyde in ambient air using adsorbent cartridge followed by high performance liquid chromatography (HPLC)[S].
- [32] Yao Z L, Wu B B, Shen X B, *et al.* On-road emission characteristics of VOCs from rural vehicles and their ozone formation potential in Beijing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **105**: 91-96.
- [33] Yao Z L, Shen X B, Ye Y, *et al.* On-road emission characteristics of VOCs from diesel trucks in Beijing, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **103**: 87-93.
- [34] Tsai J H, Chang S Y, Chiang H L. Volatile organic compounds from the exhaust of light-duty diesel vehicles[J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **61**: 499-506.
- [35] Caplain I, Cazier F, Nouali H, *et al.* Emissions of unregulated pollutants from European gasoline and diesel passenger cars[J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(31): 5954-5966.
- [36] 莫梓伟, 邵敏, 陆思华. 中国挥发性有机物(VOCs)排放源成分谱研究进展[J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(9): 2179-2189.
Mo Z W, Shao M, Lu S H. Review on volatile organic compounds (VOCs) source profiles measured in China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(9): 2179-2189.
- [37] 王海龙, 冯斌. 柴油机苯系物及烯烃污染物的排放特性研究[J]. *车用发动机*, 2014, (1): 45-49.
Wang H L, Feng B. Emission characteristics of benzene series and olefin pollutant for diesel engine[J]. *Vehicle Engine*, 2014, (1): 45-49.
- [38] Wu D, Ding X, Li Q, *et al.* Pollutants emitted from typical Chinese vessels: potential contributions to ozone and secondary organic aerosols[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, **238**, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.117862.
- [39] 刘旭刚, 张国彬, 蔚建玺, 等. 柴油发动机高压共轨技术的产生与发展[J]. *汽车运用*, 2007, (11): 30-31.
- [40] 张国民, 张铖, 钱坤, 等. 柴油机边界条件对排放污染物的影响[J]. *内燃机与动力装置*, 2019, **36**(3): 25-29.
Zhang G M, Zhang C, Qian K, *et al.* Influence of boundary conditions on the emission of diesel engine [J]. *Internal Combustion Engine & Powerplant*, 2019, **36**(3): 25-29.
- [41] 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.
- [42] 环境保护部. 非道路移动源大气污染物排放清单编制技术指南(试行)[EB/OL]. <http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201501/W020150107594587960717.pdf>, 2020-02-18.
- [43] 胡冬梅, 彭林, 白慧玲, 等. 高等植物、燃煤和机动车排放正构烷烃特征分析[J]. *环境化学*, 2014, **33**(5): 716-723.
Hu D M, Peng L, Bai H L, *et al.* Characteristics of *n*-alkanes emissions from higher plants, coal ashes and vehicles [J]. *Environmental Chemistry*, 2014, **33**(5): 716-723.
- [44] Shah S D, Ogunyoku T A, Miller J W, *et al.* On-road emission rates of PAH and *n*-alkane compounds from heavy-duty diesel vehicles[J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(14): 5276-5284.
- [45] Huang C, Hu Q Y, Li Y J, *et al.* Intermediate volatility organic compound emissions from a large cargo vessel operated under real-world conditions[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, **52**(21): 12934-12942.
- [46] Qi L J, Liu H, Shen X E, *et al.* Intermediate-volatility organic compound emissions from nonroad construction machinery under different operation modes [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, **53**(23): 13832-13840.
- [47] Hosoya M, Shimoda M. The application of diesel oxidation catalysts to heavy duty diesel engines in Japan [J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 1996, **10**(1-3): 83-97.
- [48] Alam M S, Zeraati-Rezaei S, Xu H M, *et al.* Characterization of gas and particulate phase organic emissions (C_9 - C_{37}) from a diesel engine and the effect of abatement devices [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, **53**(19): 11345-11352.

CONTENTS

A Comparative Study of Soil Environmental Standards for Agricultural Land Among Different Countries and Its Implication for China	LI Xu-zhi, JIANG Rong, WANG Guo-qing, <i>et al.</i>	(577)
Evaluation Parameters and System for Reclaimed Water Quality Stability	ZHANG Xin-yi, WEI Dong-bin, DU Yu-guo	(586)
Distribution Characteristics and Sources of Heavy Metals in Atmospheric Deposition During Heating and Non-heating Period in Lanzhou	HUANG Wen, WANG Sheng-li	(597)
PM _{2.5} Source Apportionment Based on a Variety of New Receptor Models	WANG Zhen-yu, LI Yong-bin, GUO Ling, <i>et al.</i>	(608)
Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Pollution in PM _{2.5} During Summer in Central China	SU Ye-wang, LIU Wei-jie, MAO Yao, <i>et al.</i>	(619)
Pollution Characteristics of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During the Lantern Festival of 2021 in Zibo City	CHEN Qiao, WU Li-ping, XU Bo, <i>et al.</i>	(629)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Perfluorinated Compounds in PM _{2.5} in Zhejiang Province	LI Bing-jie, CHEN Jin-yuan, LIU Zheng-zheng, <i>et al.</i>	(639)
Impact of Meteorological Conditions on PM _{2.5} in Jiangsu Province from 2001 to 2019	PAN Chen, KANG Zhi-ming	(649)
Comparison and Analysis of PM _{2.5} Forecast in Key Areas Based on the Neural Network Model and Numerical Model	GAO Yu-xiao, WANG Wei, HUANG Yong-hai, <i>et al.</i>	(663)
Temporal and Spatial Variations in Ozone and Its Causes over Hainan Province from 2015 to 2020	FU Chuan-bo, XU Wen-shuai, DAN Li, <i>et al.</i>	(675)
Ozone Formation and Key VOCs of a Continuous Summertime O ₃ Pollution Event in Ji'nan	SUN Xiao-yan, ZHAO Min, SHEN Heng-qing, <i>et al.</i>	(686)
Pollution Characteristic and Control Factor Analysis of Atmospheric Ozone During Summer Typical Periods in Linyi, Shandong	YANG Xue, AN Xin-yue, LIU Yu-qi, <i>et al.</i>	(696)
Improved Performance of PMF Source Apportionment for Volatile Organic Compounds Based on Classification of VOCs' Aging Degree in Air Mass	ZHU Yu-fan, CHEN Qiang, LIU Xiao, <i>et al.</i>	(707)
Spatial Distribution Characteristics of VOCs and Its Impact on Ozone Formation Potential in Rizhao City in Summer	YAO Wei-jie, WANG Da-wei, XIE Fu-ying, <i>et al.</i>	(714)
Long-term Trends and Sources of Atmospheric Halocarbons at Mount Taishan, Northern China	ZHAO Feng, CHEN Tian-shu, DONG Can, <i>et al.</i>	(723)
Emission Characteristics of VOCs and <i>n</i> -alkanes from Diesel Forklifts	ZHOU Wen-qin, LI Cheng, LIU Jun-wen, <i>et al.</i>	(735)
Driving Mechanism of the Spatiotemporal Evolution of Vegetation in the Yellow River Basin from 2000 to 2020	TIAN Zhi-hui, REN Zu-guang, WEI Hai-tao	(743)
Effects of Land Use on Riverine Dissolved Inorganic Carbon (DIC) and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ in a Karst River Basin, Southwestern China	XU Sen, LI Si-liang, ZHONG Jun	(752)
Effects of Biochar Addition on Soil Nitrogen Mineralization and Leaching Characteristics in Riparian Zone of Taihu Lake	XIONG Yu-ting, YUAN Xu-yin, ZHOU Hui-hua, <i>et al.</i>	(762)
Impacts of Riparian Buffer Zone Type on Reduction in Runoff Pollution in the North Canal River Under Different Rainfall Events	ZHU Li-ying, ZHAO Kai, ZHANG Jun-ya, <i>et al.</i>	(770)
Pollution Characterization and Comprehensive Water Quality Assessment of Rain-source River: A Case Study of the Longgang River in Shenzhen	BI Ye-liang, WANG Hua-cai, XIA Bing, <i>et al.</i>	(782)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Source Apportionment of Runoff Pollution in Langfang City	PAN Xin-rong, ZUO Jian-e, ZHANG Yu, <i>et al.</i>	(795)
Analysis on Diversity of Plankton Microbial Community in the Beijing-Tianjin-Hebei Section of the North Canal River	GUO Zhi-zhi, SU Zhen-hua, DI Yan-ming, <i>et al.</i>	(803)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Driving Factors of Denitrification Bacterial Community Structure from Landscape Water in Hebei Province: Taking Shijiazhuang as Example	CHEN Zhao-ying, ZHANG Zi-wei, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i>	(813)
Source and Optical Dynamics of Chromophoric Dissolved Organic Matter in the Watershed of Lake Qinghai	YU Xiao-qin, MENG Xian-qiang, WU Hua-wu, <i>et al.</i>	(826)
Influences of Hydrological Scenarios on the Bioavailability, Fate, and Balance of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Lake Poyang	GUO Yan-ni, YAO Xiao-long, CHEN Hui-min, <i>et al.</i>	(837)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Sediments from Poyang Lake	LUO Yan-qing, WAN Zhi-wei, YAN Cai-xia, <i>et al.</i>	(847)
Pollution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Tangxun Lake	LI Xing-yu, LI Peng, SU Ye-wang, SHI Ming-ming, <i>et al.</i>	(859)
Identifying Relationship Between Nutrient Contents in Road-Deposited Sediment and Urban Basic Elements Based on Kernel Density Estimation	WANG Zi-qiao, LI Xu-yong	(867)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of DBPs in Typical Drinking Water Sources in Wuhan Under the COVID-19 Pandemic	ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, TU Xiang, <i>et al.</i>	(878)
Synergistic Control of Nitrogenous Disinfection By-products and Opportunistic Pathogens in Drinking Water by Iron-Modified Quartz Sand Filtration	QI Peng, HU Chun, XING Xue-ci, <i>et al.</i>	(887)
Degradation Characteristics and Mechanism of Ibuprofen by Ozone Catalyzed by Nitrogen-Doped Biochar	CHAI Cheng, XU Lu, JIN Xin, <i>et al.</i>	(896)
Adsorption Properties and Host-guest Effects of Porous Cyclodextrin Polymers for Dye Molecules in Water	ZHAO Chuan-liang, WANG Zi-jie, YAN Yi, <i>et al.</i>	(907)
Characterization of Sludge Morphology and Bacterial Community Evolution in the Rapid Activation of Freeze-stored PV/A Granular Sludge	HUANG Zi-heng, ZHANG Li, CUI Shu-hui, <i>et al.</i>	(920)
Effect of Different Cationic Polyacrylamide Organic Dehydrating Agents on Sludge Dewatering Performance	FENG Qi-yun, GAO Bao-yu, YUE Qin-yan, <i>et al.</i>	(928)
Health Risk Assessment of Soil Heavy Metals in a Small Watershed of a Mining Area in Yunnan	LIU Yang, HE Zhao-hui, NIU Xue-kui, <i>et al.</i>	(936)
Spatial Characteristics and Potential Ecological Risk Factors of Heavy Metals in Cultivated Land in the Transition Zone of a Mountain Plain	ZHANG Ding, HUANG Rong, GAO Xue-song	(946)
Geo-accumulation Index Method to Optimize the Evaluation Method of Polymetallic Environment Quality: Taking Developed Agricultural Areas as an Example	JU Tie-nan, LEI Mei	(957)
Safety Production Threshold and Land Quality Classification of Vegetable Pb in High Geological Background Area of Southwest China	MU De-miao, SUN Yue-bing	(965)
Pollution Properties and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils and Crops Around a Typical Manganese Mining Area	HUANG Zhong-ting, YI Sheng-wei, CHEN Bei-bei, <i>et al.</i>	(975)
Characteristics of Plant Diversity and Heavy Metal Enrichment and Migration Under Different Ecological Restoration Modes in Abandoned Mining Areas	ZHOU Peng-fei, ZHANG Shi-wen, LUO Ming, <i>et al.</i>	(985)
Soil Properties, Heavy Metal Accumulation, and Ecological Risk in Vegetable Greenhouses of Different Planting Years	REN Qiang, SUN Rui-ling, ZHENG Kai-xuan, <i>et al.</i>	(995)
Effects of Greenhouse and Open-field Cultivation on Heavy Metal Uptake During Carrot Growth	CAO Chun, REN Dan, LÜ Zhen-ying, <i>et al.</i>	(1004)
Effects of Different Amendments on Cadmium Accumulation in Rice Safety in Cadmium-Contaminated Farmland Under Two Flooding Treatments	WANG Gang, YU Hai-ying, LI Ting-xuan, <i>et al.</i>	(1015)
Effect of Composite Leaching on Cadmium Removal Efficiency in Plow Layer Soil of Agricultural Land and Its Functional Regulation	CAO Kun-kun, ZHANG Sha-sha, HU Xue-yu, <i>et al.</i>	(1023)
Polyamine-producing Bacteria Regulated the Community Structure of Rhizosphere Bacteria and Reduced the Absorption of Cd in Wheat	LI Xiao-zhe, QIN Shan-mei, CHEN Zhao-jin, <i>et al.</i>	(1031)
Responses of Soil <i>PhoC</i> and <i>PhoD</i> Gene Microbial Communities to the Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers	YANG Wen-na, YU Luo, LUO Dong-hai, <i>et al.</i>	(1040)
Changes in Soil Microbial Carbon-Degrading Enzymes and Their Relationships with Carbon Pool Components During the Restoration Process of <i>Robinia pseudoacacia</i>	LI Wen-jie, ZHANG Zhen-jiao, ZHAO Ya-ping, <i>et al.</i>	(1050)
Soil Enzyme Stoichiometric Characteristics of <i>Pinus massoniana</i> Plantations at Different Stand Ages in Mid-subtropical Areas	JIAO Peng-yu, GUO Wen, CHEN Ze-long, <i>et al.</i>	(1059)
Characteristics of Microbial Utilization for Crop Residue-Derived C in Paddy and Upland Soils	DENG Shao-hong, ZHENG Xiao-dong, MAO Wan-qiong, <i>et al.</i>	(1069)
Influence of Artificial Root Exudates and Actual Root Exudates on the Microbial Community in Pyrene-contaminated Soil	HAN Bo-yuan, ZHANG Wen, HU Fang-yu, <i>et al.</i>	(1077)
Pollution Characteristics and Driving Factors of Antibiotic Resistance Genes in Dexing Copper Mine	HAN Liu, LOU Qian, QIAO Min, <i>et al.</i>	(1089)
Spatial Prediction Method of Farmland Soil Organic Matter in Weibei Dryland of Shaanxi Province	WEI Fang, LIU Jing, XIA Li-heng, <i>et al.</i>	(1097)
Emission Characteristics, Transformation Mechanism, and Reduction Potential of Ammonia Emissions from a Crop Rotation System in Yangtze River Delta	XU Chang, MIAO Wen-liang, NI Yuan-zhi, <i>et al.</i>	(1108)