中方知库
Eco-Environmental Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社

2019
Vol.40 No.9
第40卷 第9期

中国期刊方阵 双奖期刊 中华人民共和国新闻出版总署

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第40卷 第9期
2019年9月15日

目 次

气溶胶中不同类型碳组分粒径分布特征 …… 杜翔, 赵普生, 董群, 苏捷(3849)
郑州市2014~2017年大气污染特征及气象条件影响分析 …… 郭蒙蒙, 姜楠, 王申博, 段时光, 张瑞芹(3856)
济南市背景区域大气$PM_{2.5}$污染特征及其对能见度的影响 …… 别淑君, 杨凌霄, 高颖, 姜盼, 李岩岩, 杨雨蒙, 赵彤, 王文兴(3868)
聊城市冬季$PM_{2.5}$中多环芳烃来源解析及健康风险评估 …… 刘晓迪, 侯战方, 孟静静, 燕丽, 周贝贝, 刘子亭, 衣雅男, 李静, 魏本杰, 伏梦璇(3875)
2001~2017年全国气溶胶光学厚度时空分布及变化趋势 …… 刘海知, 郭海燕, 马振峰, 徐辉, 包红军, 徐成鹏(3886)
长三角地区吸收性气溶胶时空分布特征 …… 赵楠, 曹梵诗, 田晴, 陈勇航, 刘琼, 黄艺伟, 王羽佳(3898)
燃煤锅炉颗粒物化学组成排放特征 …… 杨艳蓉, 周雪明, 秦娟娟, 谭吉华, 胡京南, 陈荣志, 段菁春, 李艳(3908)
高速公路沿线$PM_{2.5}$中重金属污染特征 …… 李晓宝, 廖祖文, 赵红, 彭成辉, 谭腾飞, 黄萍(3916)
北京市道路扬尘重金属污染特征及潜在生态风险 …… 胡月琪, 郭建辉, 张超, 王铮, 颜旭, 杨懂艳, 刘兆莹(3924)
风蚀扬尘抑尘剂效率测试方法与应用 …… 秦建平, 李贝贝, 杨涛, 宋博, 黄玉虎, 张春来(3935)
京津冀地区典型印刷企业VOCs排放特征及臭氧生成潜势分析 …… 刘文文, 方莉, 郭秀锐, 聂磊, 王敏燕(3942)
成都市典型工艺过程源挥发性有机物源成分谱 …… 周子航, 邓也, 吴柯颖, 谭钦文, 周小玲, 宋丹林, 黄凤霞, 曾文骁(3949)
工业园区恶臭污染源排放特征和健康风险评估 …… 孟洁, 翟增秀, 荆博宇, 崔焕文, 王亘(3962)
典型华北农村地区冬季HONO的浓度水平及来源分析 …… 王玉征, 薛朝阳, 张成龙, 刘鹏飞, 张圆圆, 陈晖, 陈建民, 牟玉静, 刘俊锋(3973)
不同方法制备Co_3O_4催化剂CO-SCR性能及机制 …… 仲雪梅, 张涛, 李佳荫, 秦萱, 王亚洲, 曾洁, 张光明, 常化振(3982)
全氟烷基物质在胶州湾海水、沉积物及生物中污染特征 …… 崔文杰, 彭吉星, 谭志军, 翟毓秀, 郭萌萌, 李兆新, 牟海津(3990)
江苏水源地型水库异味物质发生风险及影响因素 …… 史鹏程, 朱广伟, 杨文斌, 许海, 朱梦圆, 邹伟, 胡林娜, 笪文怡, 季鹏飞(4000)
城镇流域水体-沉积物中溶解性有机质的荧光特性及影响因素:以宁波市小浃江为例 …… 高凤, 邵美玲, 唐剑锋, 曹昌丽, 易辉(4009)
水华对沉积物中氮的转化和去除的影响 …… 肖琳, 杨佳怡(4018)
沉积物有效态磷对湖库富营养化的指示及适用性 …… 刘辉, 胡林娜, 朱梦圆, 赵林林, 许海, 邹伟, 史鹏程, 韩慧洁, 季鹏飞, 朱广伟(4023)
汾河下游雨季硝酸盐污染源解析 …… 汪银龙, 冯民权,董向前(4033)
新疆喀什三角洲地下水化学特征及演化规律 …… 魏兴, 周金龙, 乃尉华, 曾妍妍, 范薇, 李斌(4042)
基于多个扩增子的DNA metabarcoding技术探究黄海微型真核浮游植物多样性 …… 张莉, 张远, 林佳宁, 王书平(4052)
FG、MFG和MBFG浮游植物功能群的比较:以贵州三座水库为例 …… 陈倩, 李秋华, 马欣洋, 熊梅君, 何应, 韩孟书(4061)
天然含铁矿物对砷的吸附效果及机制 …… 邵金秋, 温其谦, 阎秀兰, 申俊峰, 杨林生, 杨硕(4072)
镁-钙羟基磷灰石吸附剂对水中Pb^{2+}的去除 … 何豪, 朱宗强, 刘杰, 朱义年, 阎起明, 刘阳, 莫南, 玄惠灵, 魏婉莹(4081)
2,6-二氨基蒽醌/石墨烯复合电极强化电吸附Pb^{2+} …… 晋圣珧, 向阳, 张隽瑀, 张凯, 吉庆华(4091)
钙掺杂四氧化三铁回收水中磷的实验 …… 白润英, 刘建明, 郝俊峰, 徐慧, 胡文斌, 宋蕾, 刘宇红, 李会东, 周琦善(4098)
大型城市污水处理厂处理工艺对微塑料的去除 …… 贾其隆, 陈浩, 赵昕, 李磊, 聂云汉, 叶建锋(4105)
A^2/O流量分配处理低C/N污水性能与微生物结构优化 …… 荣懿, 刘小钗, 何音旋, 章武首, 金鹏康(4113)
上向流厌氧滤池(UAF)处理城市生活污水的运行效能 …… 杨忠启, 刘秀红, 李海鑫, 刘智斌, 刘润雨, 杨庆(4121)
微氧条件下自养-异养联合反硝化工艺的电子平衡分析 …… 张若晨, 陈川, 邵博, 王威, 徐熙俊, 任南琪(4128)
基于反硝化除磷的低温启动与稳定运行的中试试验 …… 张帆, 于德爽, 刘杰, 王晓霞, 宋新新, 李传举, 赵峰辉(4136)
聚己内酯与聚羟基丁酸戊酸酯的脱氮性能对比 …… 易成豪, 秦伟, 陈湛, 文湘华(4143)
厌氧氨氧化颗粒污泥快速培养及其抑制动力学 …… 唐鹏, 于德爽, 陈光辉, 张培玉, 王晓霞, 吕廷廷, 黄硕, 刘诚诚(4152)
Ca^{2+}对污泥硝化活性和絮凝沉降性能的影响 …… 张兰河, 赵倩男, 张海丰, 贾艳萍, 李正, 陈子成, 郭静波, 赵天鹏(4160)
从剩余污泥厌氧发酵上清液中以鸟粪石形式回收磷 …… 畅萧, 曾薇, 王保贵, 许欢欢(4169)
信号分子联合脱氮硫杆菌对同步脱氮除硫的影响 …… 徐金兰, 陈紫薇, 张少枫, 魏旖旎(4177)
海水养殖尾水直排对河道沉积物细菌群落的影响 …… 胡越航, 宣丽霞, 裘琼芬(4185)
耦合短程硝化反硝化的垃圾渗滤液厌氧氨氧化处理系统构建及微生物群落分析 …… 赵晴, 刘梦莹, 吕慧, 梁俊宇, 刁兴兴, 张鑫, 孟了(4195)
稻秸添加对两种水稻土产甲烷古菌及细菌的影响 …… 保琼莉, 王凤花, 保万魁, 黄益宗(4202)
地膜覆盖对稻-油轮作农田温室气体排放的影响 …… 陈世杰, 江长胜, 倪雪, 李晓茜, 郝庆菊(4213)
氮肥深施及间种白三叶草对茶园N_2O排放的影响 …… 吕天新, 伍延正, 沈健林, 陈丹, 姜文倩, 王娟, 李勇, 吴金水(4221)
三峡库区及其下游溶解氧化亚氮(N_2O)分布和释放 …… 程芳, 丁帅, 刘素美, 宋国栋, 张桂玲(4230)
沉降除藻协同沉积物覆盖对藻华水体甲烷释放的影响 …… 朱琳, 于江华, 施文卿, 易齐涛, 曹华勇, 蒲寅羽(4238)
新建铅蓄电池集聚区对周边土壤环境的影响:基于重金属空间特征 …… 丁亚丽, 廖敏, 方至萍, 陈树森, 张云, 郭佳雯, 梁雨琦(4244)
不同碳氮磷源改良剂对铅锌尾矿废弃地植被与土壤性质的影响 …… 杨胜香, 李凤梅, 彭禧柱, 曹建兵, 高智席(4253)
基于农产品安全的土壤重金属有效态含量限值推定方法 …… 张云慧, 杜平, 何赢, 仲小飞, 罗会龙, 秦晓鹏, 徐刚(4262)
缙云山不同土地利用方式下土壤植硅体碳的含量特征 …… 罗东海, 王子芳, 陆畅, 黄容, 王富华, 李娇, 高明(4270)
西南喀斯特土地利用变化对植物凋落物-土壤C、N、P化学计量特征和土壤酶活性的影响 …… 田静, 盛茂银, 汪攀, 温培才(4278)
调理剂+淹水措施对Cd污染稻田控Cd效果分析 …… 彭鸥, 刘玉玲, 铁柏清, 何钟响, 杨蕊嘉, 李丹阳, 刘寿涛, 罗海艳(4287)
海螺沟植物和积雪中有机磷酸酯的分布及来源 …… 陈阳, 印红玲, 吴迪, 罗怡, 邓旭, 徐维新, 柳锦宝(4295)
《环境科学》征订启事(3923) 《环境科学》征稿简则(3941) 信息(4041, 4051, 4229)

Eco-Environmental Knowledge Web
环 境 科 学
Environmental Science
第 40 卷 第 9 期 2019 年 9 月
Vol. 40, No. 9 Sep., 2019

京津冀地区典型印刷企业 VOCs 排放特征及臭氧生成潜势分析

刘文文[1], 方莉[2], 郭秀锐[1], 聂磊[3], 王敏燕[3]*
(1. 北京工业大学环境与能源工程学院, 区域大气复合污染防治北京市重点实验室, 北京 100124; 2. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048; 3. 北京市环境保护科学研究院, 城市大气挥发性有机物污染防治技术与应用北京市重点实验室, 北京 100037)

摘要: 本研究在京津冀地区选取 23 家典型印刷企业进行调研, 并对其中具备采样条件的企业通过气袋采样-GC-MSD/FID 采集及分析系统, 获得 48 组分析结果, 定量分析了京津冀地区印刷企业 VOCs 的排放特征, 并估算其臭氧生成潜势. 结果表明, 各企业排气筒有组织排放的 VOCs(以非甲烷总烃表征)浓度差异很大, 包装印刷企业 VOCs 排放浓度范围为 29.9 ~ 755.0 mg·m^{-3}, 出版物印刷企业 VOCs 排放浓度范围为 3.3 ~ 99.0 mg·m^{-3}; 各企业车间印刷工位中, 包装印刷企业 VOCs 排放浓度在 129.7 ~ 958.4 mg·m^{-3}之间, 出版物印刷企业 VOCs 排放浓度范围为 19.1 ~ 113.7 mg·m^{-3}; 包装印刷企业排放的 VOCs 浓度普遍高于出版物印刷企业, 这与其使用溶剂型油墨有关. VOCs 组分构成方面, 包装印刷和出版物印刷企业印刷工位排放的 VOCs 中, 含氧 VOCs 均为首要 VOCs 种类, 占比在 32.6% ~ 99.4% 之间, 其次是烷烃. 臭氧生成潜势方面, 印刷企业臭氧生成潜势(OFP 值)平均值为 505.5 mg·m^{-3}, 其中包装印刷企业为 564.1 mg·m^{-3}, 出版物印刷企业为 52.9 mg·m^{-3}; 臭氧生成系数(SR 值)平均值为 1.24 g·g^{-1}, 其中包装印刷企业为 1.70 g·g^{-1}、出版物印刷企业为 0.89 g·g^{-1}. 从 OFP 值和 SR 值可以看出, 包装印刷企业应作为未来京津冀地区印刷行业 VOCs 管控的重点.

关键词: 包装印刷; 出版物印刷; 挥发性有机物(VOCs); 排放特征; 臭氧生成潜势
中图分类号: X511 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2019)09-3942-07 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201901043

Emission Characteristics and Ozone Formation Potential of VOCs in Printing Enterprises in Beijing-Tianjin-Hebei

LIU Wen-wen[1], FANG Li[2], GUO Xiu-rui[1], NIE Lei[3], WANG Min-yan[3]*
(1. Key Laboratory of Beijing on Regional Air Pollution Control, College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 3. Beijing Key Laboratory of Urban Atmospheric Volatile Organic Compounds Pollution Control and Application, Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection, Beijing 100037, China)

Abstract: In this study, 23 typical printing enterprises were selected in Beijing-Tianjin-Hebei. Through gas chromatography-mass spectrometry/flame ionization detection (GC-MS/FID), 46 sets of analysis results were obtained to quantitatively analyze the emissions characteristics of volatile organic compounds (VOCs) and the ozone generation potential of these printing enterprises. The results show that the emission concentrations of total VOCs (TVOCs) in exhaust funnels of the printing enterprises varied greatly, ranging from 3.3 mg·m^{-3} to 755.0 mg·m^{-3}. In the printing stations of printing enterprises, the emission concentrations of VOCs were 129.7-958.4 mg·m^{-3} and 19.1-113.7 mg·m^{-3} in packaging and printing enterprises and publications printing enterprises, respectively. The concentration of VOCs emitted by packaging and printing enterprises was significantly higher than that of publications printing enterprises, which is related to the use of solvent-based inks. In terms of VOC composition, oxygen-containing VOCs were the primary type of those emitted by the printing station of packaging and printing enterprises and publications printing enterprises, which accounted for a ratio of 32.6%-99.4%, followed by alkanes. In terms of ozone generation potential, the average of ozone formation potential (OFP) of the printing enterprises was 505.5 mg·m^{-3}, in which the packaging and printing enterprises was 564.1 mg·m^{-3}, and the publication printing enterprises was 52.9 mg·m^{-3}. The average VOC source reactivity (SR) emitted from the printing process was 1.24 g·g^{-1}; that is, 1.24 g of O_3 was formed owing to the unit mass of VOC emission, of which the packaging and printing enterprises was 1.70 g·g^{-1}, and the publication printing enterprises was 0.89 g·g^{-1}. According to the OFP and SR, the use of environmentally friendly ink can reduce the generation of O_3 and promote air quality improvement.

Key words: packaging printing; publication printing; volatile organic compounds (VOCs); emissions characteristics; ozone formation potential

收稿日期: 2019-01-04; **修订日期**: 2019-03-20
基金项目: 大气重污染成因与治理攻关项目(DQGG0204-04); 北京市科技重大专项(Z171100004417029)
作者简介: 刘文文(1993 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气污染防治, E-mail:1109262877@qq.com
* 通信作者, E-mail:wangminyan@cee.cn

挥发性有机物(volatile organic compounds，VOCs)是指在常温下饱和蒸气压大于 70 Pa、常压下沸点在 50 ~ 260℃以内的有机化合物，它对大气环境及人体健康都会产生不可忽视的危害：①是对流层臭氧(O_3)和二次有机气溶胶(SOA)的重要前体物，也是驱使大气氧化性增强的主要因素[1,2]；②部分 VOCs 物种对人体具有急性和长期的毒性，损害人体健康[3]. 印刷生产过程中使用的油墨、稀释剂、润版液、洗车水、胶黏剂、光油等原辅材料中均含有 VOCs，这些原辅材料在使用、调配、转运和贮存等过程中均会产生废气排放. 相关研究表明[4,5]，2010 年印刷行业 VOCs 排放量为 92.6 万 t，约占我国工业源 VOCs 排放总量的 6.9%，但其贡献率在逐年增加，到 2013 年已增长到 35.8%，成为 VOCs 治理过程中被高度关注的行业之一.

欧美等国对印刷行业 VOCs 排放特征及污染防治技术路线的研究起步较早，目前已建立了排放量核算方法及排放清单，发布了排放标准及最佳控制技术指南. 近年来，随着国内环境管理部门对印刷行业 VOCs 治理要求的不断提高，针对印刷行业 VOCs 排放特征及污染防治技术的研究逐渐受到大气污染防治研究机构和学者的关注. 蔡宗平等[12]和王家德等[13]分别对广东省和浙江省印刷行业的 VOCs 排放特征进行了研究；王慧慧等[14]对京津冀地区印刷行业的发展现状开展了研究[15]. 但针对京津冀地区印刷行业 VOCs 排放特征的研究相对较少. 近年来，印刷行业源头及末端治理技术均取得了较大进展，特别是京津冀地区行业构成与长三角、珠三角存在一定的差异性，所以摸清京津冀地区印刷行业 VOCs 的排放特征，对于评估前期治理工作的成效并开展下一步 VOCs 的治理及监管具有重要的意义.

相关研究表明[14,15]，京津冀地区印刷企业以包装印刷和出版物印刷为主. 本研究对京津冀地区典型印刷企业的废气非甲烷总烃浓度及 VOCs 组分进行检测分析，并基于 MIR(最大增量反应活性法)系数计算印刷企业 VOCs 排放的臭氧生成潜势，以期为京津冀地区 VOCs 排放清单的建立、印刷行业 VOCs 成分谱的研究和环保油墨替代等行业政策的推动提供数据支撑.

1　材料与方法

1.1　研究对象

基于本课题组 2018 年印刷行业1 000多家企业问卷调研结果，筛选出京津冀地区具有代表性的 8 家包装印刷企业和 15 家出版物印刷企业进行实地调研，其中北京 10 家、天津 3 家和河北省 10 家. 筛选原则为尽量涵盖不同省市、不同规模、不同印刷工艺和不同废气处理工艺. 在调研过程中对具备采样条件的 9 家企业进行采样，共获得包装印刷样品 12 个和出版物印刷样品 36 个. 通过对排气筒废气的非甲烷总烃和苯系物指标进行检测分析，对企业有组织废气排放水平、达标情况及废气治理水平进行评估. 由于 VOCs 处理设施对废气组分影响较大，所以选择在印刷工位进行采样，并检测分析 VOCs 组分及臭氧生成潜势. 企业概况、采样布点方案等见表 1.

表 1　企业信息及采样布点方案

Table 1　Enterprise information and sampling distribution plan

印刷类型	企业编号	油墨类型	印刷工艺	采样位置	样品数量/个	废气处理设施
包装印刷	企业 A	溶剂型	凹版印刷	印刷工位	2	UV 光解
	企业 B	溶剂型	凹版印刷	印刷工位 排气筒	2 2	UV 光解
	企业 C	溶剂型	凹版印刷	印刷工位 排气筒	2 2	无
	企业 D	植物油基	平版胶印	排气筒	2	UV 光解
出版物印刷	企业 E	水性	凹版印刷	印刷工位 排气筒	2 2	沸石转轮浓缩 + 催化燃烧
		UV	UV 胶印	排气筒	3	等离子体 + 催化氧化
		植物油基	平版胶印	排气筒	3	
		植物油基	平版胶印	印刷工位 排气筒 1	3 6	活性炭吸附
	企业 F	植物油基	无水胶印	印刷工位 排气筒 2	3 6	
	企业 G	植物油基	平版胶印	排气筒	2	活性炭 + 等离子体
	企业 H	植物油基	平版胶印	排气筒	3	UV 光解 + 催化氧化
	企业 I	植物油基	平版胶印	印刷工位	3	无

1.2 采样与分析

1.2.1 采样方法

排气筒废气的采样按照文献[16]规定的方法进行，均使用 10 L 聚四氟乙烯采样袋，以 500 mL·min^{-1}的流量采集 10 min. 印刷工位废气的采样参照文献[17]，但为了避免高浓度废气污染采样罐，本研究在采样环节对样品进行了稀释，具体方法如下：苏玛罐中充入约三分之一高纯氮气待用. 印刷工位废气采样位置设在印刷生产线周边 1 m 和距地面 1.5 m 处，使用 10 L 聚四氟乙烯采样袋，以 500 mL·min^{-1}的流量采集 10 min，同时利用便携式 PID 对非甲烷总烃浓度进行初步判断，再按照稀释至浓度小于 20 mg·m^{-3}估算采样体积，然后使用气密玻璃注射器从气袋中迅速转移该体积的样品至 3.2 L 的苏玛罐中，样品苏玛罐运回实验室后注满高纯氮气待测. 为规避单个样品带来的不确定性，每个采样点在一个生产周期内等间隔采集 2～3 个样品作为平行样，本研究中实验数据均为多个平行样品的平均值.

1.2.2 分析方法

排气筒废气中非甲烷总烃的检测按照文献[18]的方法进行. 苯、甲苯和二甲苯的检测按照文献[19]的方法进行. 印刷工位废气采用三级冷阱预浓缩-二维 GC-FID/MS(气相色谱-氢火焰离子/质谱)挥发性有机物监测系统分析 VOCs 组分. 采用 TO-15 (Scott Gases，美国)、PAMS(Spectra gases，美国)和含有 4 种化合物的内标标气(溴氯甲烷、1，4-二氟苯、D5-氯苯、1-溴-4-氟苯)(Spectra gases，美国)进行定性和定量，共分析 123 种物质.

2 结果与分析

2.1 VOCs 浓度水平及组分特征

2.1.1 排气筒 VOCs 浓度水平

印刷企业排气筒非甲烷总烃排放浓度如图 1 所示. 排放浓度范围为 3.3～755.0 mg·m^{-3}，其中，包装印刷企业的排放浓度范围为 29.9～755.0 mg·m^{-3}，出版物印刷企业的排放浓度范围为 3.3～99.0 mg·m^{-3}. 包装印刷企业排放浓度普遍高于出版物印刷企业，这与包装印刷企业多使用溶剂型凹印油墨，而出版物印刷企业多使用植物油基胶印油墨有关. 凹印工艺排放水平普遍高于胶印工艺，但同时与治理工艺相关. E 企业凹印排口浓度远低于 B、C 企业凹印排口，主要因为采用了沸石转轮浓缩＋催化燃烧的处理工艺. 与京津冀各地区印刷行业排气筒非甲烷总烃排放限值相比[20～22]，有 54.5% 的企业非甲烷总烃浓度满足北京市排放标准 30.0 mg·m^{-3}；70.0% 的企业非甲烷总烃浓度满足天津市和河北省排放标准 50.0 mg·m^{-3}.

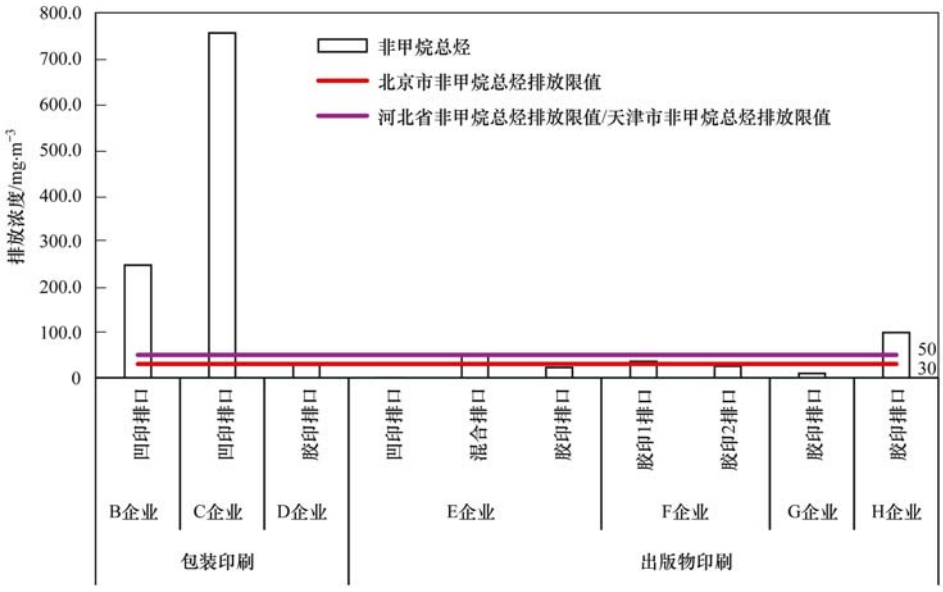

图 1 排气筒非甲烷总烃排放浓度

Fig. 1 Concentration of NMTHC of the exhaust funnels emission

对部分企业排气筒废气的苯、甲苯与二甲苯排放浓度进行了检测，结果如图 2 所示. 苯排放浓度范围为 0.01～0.44 mg·m^{-3}，甲苯与二甲苯合计排放浓度范围为 0.03～11.32 mg·m^{-3}，均满足北京市《印刷业挥发性有机物排放标准》(DB 11/1201)[20]中设备或车间排气筒挥发性有机物排放浓度限值.

2.1.2 车间 VOCs 浓度水平及组分特征

各企业印刷工位旁 VOCs 浓度水平(此处为全部可定量的 VOCs 物质浓度之和)及组成如图 3 所

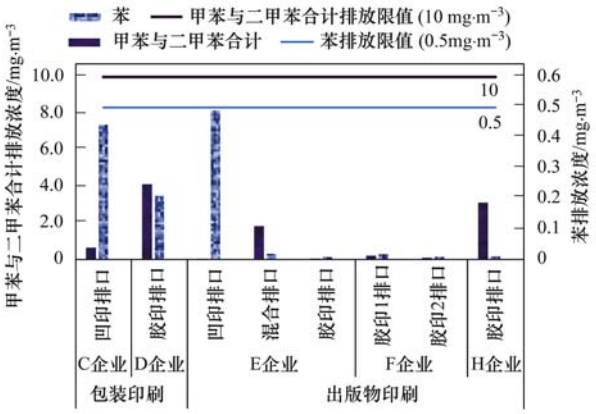

图 2　排气筒苯类污染物排放浓度

Fig. 2　Concentration of benzene contaminants of the exhaust funnels emission

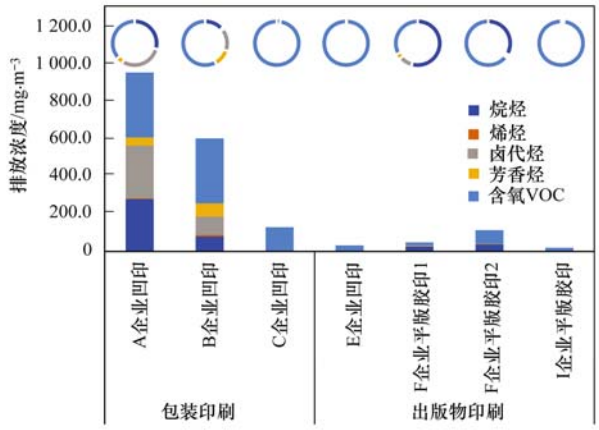

图 3　印刷工位 VOCs 排放浓度及组成

Fig. 3　Concentration and composition of VOCs of printing process emission

示. VOCs 浓度范围为 19.1 ~ 958.4 mg·m^{-3}，包装印刷 VOCs 浓度水平显著高于出版物印刷.

在 VOCs 组分方面，大多数印刷工序排放的 VOCs 以含氧 VOCs 为主，对总 VOCs 浓度的贡献率为 32.6% ~ 99.4%；其次为烷烃和卤代烃，贡献率分别为 0.8% ~ 54.2% 和 0.2% ~ 29.6%；芳香烃和烯烃排放浓度较低. 包装印刷企业排放的 VOCs 中含氧 VOC 占比均在 36.0% 以上，其次为卤代烃；出版物印刷企业排放的 VOCs 大多以含氧 VOC 为主，占比均在 64.3% 以上，只有使用植物油油墨的 F 企业排放的 VOCs 以烷烃为主，略高于含氧 VOC.

各企业印刷工位旁 VOCs 组分特征如表 2 所示. 从中可见，由于印刷工艺以及油墨不同，其排放的 VOC 种类以及主要污染物含量有较大差别. 包装印刷企业中，A 企业和 B 企业使用的是溶剂型凹版油墨，检出 VOC 种类较多，其排放浓度最高的物质为溴二氯甲烷，占比分别为 22.6% 和 28.2%；C 企业使用的油墨为溶剂型醇墨，其检出 VOC 种类较少，以含氧 VOC 为主，主要物质为乙醇，占比为 89.9%. 出版物印刷企业均使用植物油基油墨，且油墨种类较多，VOC 检出种类差别较大，但主要物质均为异丙醇，其占比分别为 51.4%、30.3%、63.4% 和 77.5%，该现象是由于平版胶印过程中油墨和润版液在同一工位使用，排放环节无法单独收集，主要组分为异丙醇的润版液的大量使用造成印刷工位排放浓度的叠加，同时造成异丙醇排放占比加大[23].

表 2　印刷工位前五位 VOCs 及占比

Table 2　Top five VOCs and their proportions in the printing process

企业类型	企业	印刷工艺	油墨类型	VOCs 检出数量(种)	主要 VOCs 占比
包装印刷	A	凹印	溶剂型	74	溴二氯甲烷(22.6%)、甲基环己烷(17.9%)、异丙醇(17.0%)、乙醇(10.2%)、甲基丙烯酸甲酯(4.8%)
	B	凹印	溶剂型	74	溴二氯甲烷(28.2%)、异丙醇(21.3%)、乙醇(12.8%)、甲基丙烯酸甲酯(6.0%)、丙酮(4.5%)
	C	凹印	溶剂型醇墨	15	乙醇(89.9%)、乙酸丙酯(4.0%)、异丙醇(2.8%)、环己烷(0.7%)、甲基环己烷(0.5%)
出版物印刷	E	凹印	水性	12	异丙醇(51.4%)、乙酸乙酯(39.2%)、乙醇(6.4%)、乙酸丙酯(1.9%)、2-丁酮(0.5%)
	F	平版胶印	植物油基	89	异丙醇(30.3%)、2-甲基己烷(10.1%)、庚烷(8.9%)、3-甲基己烷(8.7%)、二氯甲烷(5.5%)
		平版胶印	植物油基	87	异丙醇(63.4%)、3-甲基己烷(6.2%)、2-甲基己烷(5.9%)、庚烷(4.6%)、甲基环己烷(3.2%)
	I	平版胶印	植物油基	24	异丙醇(77.5%)、乙醇(15.3%)、乙酸乙酯(2.9%)、乙酸丙酯(1.5%)、苯乙烯(0.3%)

2.2　臭氧生成潜势分析

VOCs 的臭氧生成潜势与其浓度和反应活性有关，目前表征 VOCs 反应活性和近地层臭氧生成潜势使用较广泛的方法是最大增量反应活性法(maximum incremental reactivity，MIR)[24,25]. 本研究结合实测数据和相关的 MIR 值分析各企业 VOCs

的臭氧生成潜势，公式如下[26,27]：

$$OFP_i = MIR_i \times [VOC]_i \quad (1)$$

式中，OFP_i 为物种 i 的臭氧生成潜势，mg·m^{-3}；MIR_i 为物种 i 在臭氧最大增量反应中的臭氧生成系数，g·g^{-1}；$[VOC]_i$ 为实际观测中物种 i 的排放浓度，mg·m^{-3}.

$$SR = \sum_{i=1}^{n} f_i \cdot MIR_i \quad (2)$$

式中，SR 为 VOCs 的臭氧生成系数，g·g^{-1}；f_i 为物种 i 的质量分数；MIR_i 为物种 i 在臭氧最大增量反应中的臭氧生成系数，g·g^{-1}.

各企业印刷工位排放 VOCs 的臭氧生成潜势如图 4 所示，OFP 在 14.7 ~ 1 632.7 mg·m^{-3}之间，平均值为 505.5 mg·m^{-3}. 其中，包装印刷企业 OFP 均值为 564.1 mg·m^{-3}，出版物印刷企业为 52.9 mg·m^{-3}，包装印刷企业的 OFP 显著高于出版物印刷企业. 分析可知，含氧 VOC 是对臭氧生成潜势贡献最大的物质，其 OFP 的范围为 10.3 ~ 1 004.9 mg·m^{-3}，平均贡献率为 68.8%，其次为烷烃(20.5%)、芳香烃(9.6%)和烯烃(1.1%). 不同于其他企业，B 企业由于所排放的 VOCs 中甲苯、1,2,3-三甲基苯和 1,3,5-三甲基苯等高反应活性的芳香烃占比较高，因此该企业芳香烃对臭氧生成潜势的贡献率达 26.9%，高于烷烃对臭氧生成潜势的贡献率.

各企业排放 VOCs 的臭氧生成系数(SR 值)范围是 0.68 ~ 1.98 g·g^{-1}，平均值为 1.24 g·g^{-1}，相对标准偏差为 48.54%，其中包装印刷行业 SR 平均值为 1.70 g·g^{-1}，出版物印刷行业 SR 平均值为 0.89 g·g^{-1}.

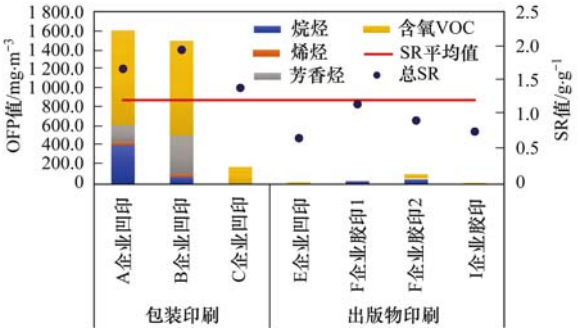

图 4 印刷工位排放 VOCs 的臭氧生成潜势

Fig. 4 Ozone formation potential of VOCs in printing process

2.3 与其他研究结果的比较

虽然目前针对印刷行业 VOCs 排放特征的研究较少，但也有一部分针对工业源和溶剂使用源的研究中涉及到印刷行业. 表 3 列出本研究与其他研究结果的比较. 对比可知，本研究中包装印刷行业 VOCs 以含氧 VOC 为主，与其他研究大致相同，但本研究的 OFP 值要高于珠三角地区，这是由于本研究的 VOCs 中乙醇和甲基丙烯酸甲酯浓度较高，且这两种物质臭氧生成系数较高；此外，本研究中使用环保油墨(水性油墨、植物油基油墨)的出版物印刷行业的 OFP 值略高于珠三角地区，但相较于溶剂型油墨[24,28]，SR 值减少了 71.56%，说明使用植物油基油墨替代溶剂型油墨可以大幅减少 O_3 的潜在生成.

表 3 与其他研究结果的比较

Table 3 Comparison with other research results

企业类型	编号	区域	油墨	主要 VOCs 占比	SR /g·g^{-1}	OFP[1)] /mg·m^{-3}	文献
包装印刷	1	广东省	溶剂型	苯(39.77%)、乙酸丁酯(12.35%)、甲苯(9.43%)			[12]
			水性	甲苯(48.5%)、正十一烷(51.5%)			
	2	珠三角	溶剂型	含氧 VOC(86.22%)，主要物质：乙酸乙酯、异丙醇、2-丁酮、甲苯		0.72	[29]
	3	全国	溶剂型	芳香烃、酮、酯、醇类			[30]
			水性	乙醇			
	4	京津冀	溶剂型	含氧 VOC(36.4% ~57.8%)、卤代烃(15.6% ~29.9%)，主要物质：溴二氯甲烷、异丙醇、乙醇、甲基环己烷、甲基丙烯酸甲酯	1.70	1.88	本研究
出版物印刷	5	广东省	水性	苯(64.09%)、甲苯(23.87%)、正十一烷(9.47%)			[12]
	6	唐山市	溶剂型	芳香烃(54.8%)、烷烃(39.51%)，主要物质：乙苯、1,2,4-三甲苯、邻二甲苯、葵烷、壬烷	3.91		[24]
	7	北京市	溶剂型	烷烃(66.7%)、芳香烃(31.6%)，主要物质：正十二烷、壬烷、辛烷、对二甲苯、甲苯	2.63		[28]
	8	珠三角	水性	烷烃(46.79%)，主要物质：异丙醇、庚烷		0.89	[26]
	9	京津冀	植物水性	含氧 VOC(48.5%)、烷烃(43.65%)，主要物质：异丙醇、2-甲基己烷、庚烷、3-甲基己烷、甲基环己烷	0.89	0.90	本研究

1)表中 OFP 值表示单位质量浓度(1 mg·m^{-3}) VOCs 的臭氧生成潜势

3 结论

(1)各企业 VOCs 有组织排放浓度在 3.3 ~ 755.0 mg·m^{-3}之间，包装印刷企业的浓度范围为 29.9 ~ 755.0 mg·m^{-3}，使用溶剂型凹版油墨的企业排放浓度高于 240.0 mg·m^{-3}，远超过京津冀三地

的排放标准限值，使用水性凹版油墨的浓度较低；出版物印刷企业的排放浓度均较低，在 3.3 ~ 99.0 $mg\cdot m^{-3}$之间，这与其多使用植物油基油墨有关. 包装印刷企业印刷工位旁 VOCs 排放浓度高于出版物印刷企业，前者 VOCs 排放浓度在 129.7 ~ 958.4 $mg\cdot m^{-3}$之间，使用溶剂型凹版油墨的企业相较于使用水性油墨的企业排放浓度较高；出版物印刷企业 VOCs 排放浓度在 19.1 ~ 113.7 $mg\cdot m^{-3}$之间，各企业之间差距不大.

(2)包装印刷企业印刷工位的 VOCs 以含氧 VOCs 为主，占比均在 36.0% 以上，其次为卤代烃；使用溶剂型油墨的企业，排放浓度最高的物质为溴二氯甲烷，使用溶剂型醇墨的企业，主要 VOCs 为乙醇，占比为 89.9%. 出版物印刷企业印刷工位排放的 VOCs 主要组分同样以含氧 VOCs 为主，4 家出版物企业排放的首要 VOCs 物种均为异丙醇，其占比分别为 51.4%、30.3%、63.4%、77.5%.

(3)京津冀印刷企业的 OFP 平均值为 505.5 $mg\cdot m^{-3}$，其中包装印刷企业为 564.1 $mg\cdot m^{-3}$，出版物印刷企业为 52.9 $mg\cdot m^{-3}$，SR 平均值为 1.24 $g\cdot g^{-1}$，包装印刷企业 1.70 $g\cdot g^{-1}$、出版物印刷企业 0.89 $g\cdot g^{-1}$. 综合分析 VOCs 排放浓度、组分特征、OFP 和 SR 可知，包装印刷企业 VOCs 的排放强度和环境影响要明显高于出版物印刷企业，应作为未来京津冀地区印刷行业 VOCs 管控的重点.

参考文献：

[1] 王扶潘，朱乔，冯凝，等. 深圳大气中 VOCs 的二次有机气溶胶生成潜势[J]. 中国环境科学，2014，**34**(10)：2449-2457.
Wang F P，Zhu Q，Feng N，*et al*. The generation potential of secondary organic aerosol of atmospheric VOCs in Shenzhen[J]. China Environmental Science，2014，**34**(10)：2449-2457.

[2] Shao M，Zhang Y H，Zeng L M，*et al*. Ground-level ozone in the Pearl River Delta and the roles of VOC and NO_x in its production [J]. Journal of Environmental Management，2009，**90**(1)：512-518.

[3] Zhu X D，Liu Y. Characterization and risk assessment of exposure to volatile organic compounds in apartment buildings in Harbin，China[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology，2014，**92**(1)：96-102.

[4] 杨利娴. 我国工业源 VOCs 排放时空分布特征与控制策略研究[D]. 广州：华南理工大学，2012.

[5] 黄薇薇. 我国工业源挥发性有机化合物排放特征及其控制技术评估研究[D]. 杭州：浙江大学，2016.

[6] Wei W，Wang S X，Chatani S，*et al*. Emission and speciation of non-methane volatile organic compounds from anthropogenic sources in China [J]. Atmospheric Environment，2008，**42**(20)：4976-4988.

[7] 刘金凤，赵静，李湉湉，等. 我国人为源挥发性有机物排放清单的建立[J]. 中国环境科学，2008，**28**(6)：496-500.
Liu J F，Zhao J，Li T T，*et al*. Establishment of Chinese anthropogenic source volatile organic compounds emission inventory[J]. China Environmental Science，2008，**28**(6)：496-500.

[8] 夏思佳，刘倩，赵秋月. 江苏省人为源 VOCs 排放清单及其对臭氧生成贡献[J]. 环境科学，2018，**39**(2)：592-599.
Xia S J，Liu Q，Zhao Q Y. Emission inventory of anthropogenically sourced VOCs and its contribution to ozone formation in Jiangsu province[J]. Environmental Science，2018，**39**(2)：592-599.

[9] 薛乃川，贡璐，安尼瓦尔. 阿木提. 新疆能源、经济与环境复合系统协调度综合评价[J]. 干旱区资源与环境，2009，**23**(5)：56-60.
Xue N C，Gong L，Aniwar . Amuti. Coordination degree evaluation of energy-economy-environment composite system in Xinjiang[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment，2009，**23**(5)：56-60.

[10] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴(2001-2016)[M]. 北京：中国统计出版社，2001-2016.

[11] 陆长安. 中国印刷产业技术发展路线图(2016-2015)[M]. 北京：科学出版社，2016.

[12] 蔡宗平，蔡慧华. 印刷行业 VOCs 排放特征研究[J]. 环境科学与管理，2013，**38**(8)：166-172.
Cai Z P，Cai H H. Study on characteristics of VOCs emission from printing industry [J]. Environmental Science and Management，2013，**38**(8)：166-172.

[13] 王家德，吕建璋，李文娟，等. 浙江省包装印刷行业挥发性有机物排放特征及排放系数[J]. 环境科学，2018，**39**(8)：3552-3556.
Wang J D，Lü J Z，Li W J，*et al*. Pollution characteristics and emission coefficients of volatile organic compounds from the packaging and printing industry in Zhejiang province [J]. Environmental Science，2018，**39**(8)：3552-3556.

[14] 王慧慧，赵志强，魏婉怡，等. 京津冀印刷业发展现状分析[J]. 今日印刷，2017，(9)：21-24.

[15] 本刊编辑部. 2017 走进京津冀软包装行业[J]. 印刷技术，2017，(6)：7-9.

[16] HJ 732-2014，固定污染源废气 挥发性有机物的采样 气袋法[S].

[17] HJ 759-2015，环境空气挥发性有机物的测定 罐采样/气相色谱-质谱法[S].

[18] HJ/T 38-1999，固定污染源排气中非甲烷总烃的测定 气相色谱法[S].

[19] HJ 734-2014，固定污染源废气 挥发性有机物的测定 固相吸附-热脱附/气相色谱-质谱法[S].

[20] DB 11/1201-2015，印刷业挥发性有机物排放标准[S].

[21] DB 12/524-2014，工业企业挥发性有机物排放控制标准[S].

[22] DB 13/2322-2016，工业企业挥发性有机物排放控制标准[S].

[23] 蔺建明. 严格控制润版液浓度 保证印刷生产高效运行[J]. 印刷技术，2011，(2)：52-53.

[24] 田亮，魏巍，程水源，等. 典型有机溶剂使用行业 VOCs 成分谱及臭氧生成潜势[J]. 安全与环境学报，2017，**17**(1)：314-320.
Tian L，Wei W，Cheng S Y，*et al*. Source profiles and ozone formation potential of volatile organic compounds from the use of solvents in typical industry [J]. Journal of Safety and Environment，2017，**17**(1)：314-320.

[25] 印红玲，袁桦蔚，叶芝祥，等. 成都市大气中挥发性有机物的时空分布特征及臭氧生成潜势研究[J]. 环境科学学报，2015，**35**(2)：386-393.
Yin H L，Yuan H W，Ye Z X，*et al*. Temporal and spatial distribution of VOCs and their OFP in the atmosphere of Chengdu [J]. Acta Scientiae Circumstantiae，2015，**35**(2)：386-393

[26] Carter W P L. SAPRC atmospheric chemical mechanisms and VOC reactivity scales[EB/OL]. http://www.engr.ucr.edu/~carter/SAPRC/, 2011-05-11.

[27] Na K, Kim Y P. Chemical mass balance receptor model applied to ambient C_2-C_9 VOC concentration in Seoul, Korea: effect of chemical reaction losses[J]. Atmospheric Environment, 2007, **41**(32): 6715-6728.

[28] Yuan B, Shao M, Lu S H, *et al*. Source profiles of volatile organic compounds associated with solvent use in Beijing, China [J]. Atmospheric Environment, 2010, **44**(15): 1919-1926.

[29] 杨杨, 杨静, 尹沙沙, 等. 珠江三角洲印刷行业 VOCs 组分排放清单及关键活性组分[J]. 环境科学研究, 2013, **26**(3): 326-333.
Yang Y, Yang J, Yin S S, *et al*. Speciated VOCs emission inventory and key species from printing industry in the Pearl River Delta region[J]. Research of Environmental Sciences, 2013, **26**(3): 326-333.

[30] 杨利娴, 谢芳, 刘育. 印刷业挥发性有机物排放特征[J]. 广东化工, 2014, **41**(18): 129-130.
Yang L X, Xie F, Liu Y. The characteristics and control strategies of VOCs emission from the printing industry[J]. Guangdong Chemical Industry, 2014, **41**(18): 129-130.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 40 No. 9

Sep. 15, 2019

CONTENTS

Size Distributions of Different Carbonaceous Components in Ambient Aerosols ····· DU Xiang, ZHAO Pu-sheng, DONG Qun, *et al.* (3849)

Analysis of Air Pollution Characteristics and Meteorological Conditions in Zhengzhou from 2014 to 2017 ····· GUO Meng-meng, JIANG Nan, WANG Shen-bo, *et al.* (3856)

Characteristics of Atmospheric $PM_{2.5}$ Pollution and Its Influence on Visibility in Background Areas of Ji'nan ····· BIE Shu-jun, YANG Ling-xiao, GAO Ying, *et al.* (3868)

Source Analysis and Health Risk Assessment of PAHs in $PM_{2.5}$ During Winter in Liaocheng City ····· LIU Xiao-di, HOU Zhan-fang, MENG Jing-jing, *et al.* (3875)

Temporal-Spatial Characteristics and Variability in Aerosol Optical Depth over China During 2001-2017 ····· LIU Hai-zhi, GUO Hai-yan, MA Zhen-feng, *et al.* (3886)

Spatial-Temporal Distribution of Absorptive Aerosols in the Yangtze River Delta ····· ZHAO Nan, CAO Fan-shi, TIAN Qing, *et al.* (3898)

Emission Characteristics of Chemical Composition of Particulate Matter from Coal-fired Boilers ····· YANG Yan-rong, ZHOU Xue-ming, QIN Juan-juan, *et al.* (3908)

Pollution Characteristics of Heavy Metals in $PM_{2.5}$ Near Highway ····· LI Xiao-bao, LIAO Zu-wen, ZHAO Hong, *et al.* (3916)

Pollution Characteristics and Potential Ecological Risks of Heavy Metals in Road Dust in Beijing ····· HU Yue-qi, GUO Jian-hui, ZHANG Chao, *et al.* (3924)

Application of Test Method for Dust Suppression Efficiency of Wind Erosion Dust Suppressant ····· QIN Jian-ping, LI Bei-bei, YANG Tao, *et al.* (3935)

Emission Characteristics and Ozone Formation Potential of VOCs in Printing Enterprises in Beijing-Tianjin-Hebei ····· LIU Wen-wen, FANG Li, GUO Xiu-rui, *et al.* (3942)

Source Profiles of VOCs Associated with Typical Industrial Processes in Chengdu ····· ZHOU Zi-hang, DENG Ye, WU Ke-ying, *et al.* (3949)

Characterization and Health Risk Assessment of Exposure to Odorous Pollutants Emitted from Industrial Odor Sources ····· MENG Jie, ZHAI Zeng-xiu, JING Bo-yu, *et al.* (3962)

Analysis of HONO Concentration and Source in Typical Rural Area of North China ····· WANG Yu-zheng, XUE Chao-yang, ZHANG Cheng-long, *et al.* (3973)

CO-SCR Performance and Mechanism over Co_3O_4 Catalysts ····· ZHONG Xue-mei, ZHANG Tao, LI Jia-yin, *et al.* (3982)

Pollution Characteristics of Perfluorinated Alkyl Substances (PFASs) in Seawater, Sediments, and Biological Samples from Jiaozhou Bay, China ····· CUI Wen-jie, PENG Ji-xing, TAN Zhi-jun, *et al.* (3990)

Occurrence and Influencing Factors of Odorous Compounds in Reservoirs Used as Drinking Water Resources in Jiangsu Province ····· SHI Peng-cheng, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, *et al.* (4000)

Fluorescence Characteristics and Influencing Factors of Dissolved Organic Matter (DOM) in Water and Sediment of Urban Watershed: A Case Study of Xiaojia River in Ningbo City ····· GAO Feng, SHAO Mei-ling, TANG Jian-feng, *et al.* (4009)

Water Bloom Modified Sediment Nitrogen Transformation and Removal ····· XIAO Lin, YANG Jia-yi (4018)

Applicability of Bioavailable Phosphorus in Sediments to Indicating Trophic Levels of Lakes and Reservoirs ····· LIU Hui, HU Lin-na, ZHU Meng-yuan, *et al.* (4023)

Analysis of Nitrate Pollution Sources in the Rainy Season of the Lower Fenhe River ····· WANG Yin-long, FENG Min-quan, DONG Xiang-qian (4033)

Hydrochemical Characteristics and Evolution of Groundwater in the Kashgar Delta Area in Xinjiang ····· WEI Xing, ZHOU Jin-long, NAI Wei-hua, *et al.* (4042)

Community Diversity of Eukaryotic Nano-phytoplankton in Yellow Sea Using DNA Metabarcoding Technology Based on Multiple Amplicons ····· ZHANG Li, ZHANG Yuan, LIN Jia-ning, *et al.* (4052)

Comparison of Functional Groups of Phytoplankton in FG, MFG, and MBFG: Taking Three Reservoirs as an Example in Guizhou Plateau ····· CHEN Qian, LI Qiu-hua, MA Xin-yang, *et al.* (4061)

Adsorption and Mechanism of Arsenic by Natural Iron-containing Minerals ····· SHAO Jin-qiu, WEN Qi-qian, YAN Xiu-lan, *et al.* (4072)

Removal of Pb^{2+} from Aqueous Solution by Magnesium-Calcium Hydroxyapatite Adsorbent ····· HE Hao, ZHU Zong-qiang, LIU Jie, *et al.* (4081)

Intensified Electrosorption of Pb^{2+} by 2,6-diaminoanthraquinone/Graphene Composite Electrode ····· JIN Sheng-yao, XIANG Yang, ZHANG Jun-yu, *et al.* (4091)

Experiment on Recovery of Phosphorus from Aqueous Solution by Calcium Doped Fe_3O_4 ····· BAI Run-ying, LIU Jian-ming, HAO Jun-feng, *et al.* (4098)

Removal of Microplastics by Different Treatment Processes in Shanghai Large Municipal Wastewater Treatment Plants ····· JIA Qi-long, CHEN Hao, ZHAO Xin, *et al.* (4105)

Enhanced Nutrient Removal and Microbial Community Structure in a Step-feed A^2/O Process Treating Low-C/N Municipal Wastewater ····· RONG Yi, LIU Xiao-chai, HE Yin-xuan, *et al.* (4113)

Performances Analysis of an Upflow Anaerobic Filter for Domestic Sewage Treatment ····· YANG Zhong-qi, LIU Xiu-hong, LI Hai-xin, *et al.* (4121)

Electron Equilibrium Analysis of Integrated Autotrophic and Heterotrophic Denitrification Process Under Micro-aerobic Conditions ····· ZHANG Ruo-chen, CHEN Chuan, SHAO Bo, *et al.* (4128)

Pilot Study on Start-up and Stable Operation at Low Temperature Based on Denitrifying Phosphorus Removal ····· ZHANG Fan, YU De-shuang, LIU Jie, *et al.* (4136)

Comparison of Polycaprolactone and Poly-3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate for Nitrogen Removal ····· YI Cheng-hao, QIN Wei, CHEN Zhan, *et al.* (4143)

Rapid Cultivation of Anaerobic Ammonium Oxidation Granular Sludge and Inhibition Kinetics of Granular Sludge ····· TANG Peng, YU De-shuang, CHEN Guang-hui, *et al.* (4152)

Effect of Ca^{2+} on the Nitrification Activity and the Flocculation and Sedimentation Performances of the Activated Sludge ····· ZHANG Lan-he, ZHAO Qian-nan, ZHANG Hai-feng, *et al.* (4160)

Recovery of Phosphorus in the Form of Struvite from the Anaerobic Fermentation Supernatant of Excess Sludge ····· CHANG Xiao, ZENG Wei, WANG Bao-gui, *et al.* (4169)

Effect of Signal Molecule Combined with *Thiobacillus denitrificans* on Simultaneous Removal of Nitrogen and Sulfur ····· XU Jin-lan, CHEN Zi-wei, ZHANG Shao-feng, *et al.* (4177)

Bacterial Community Composition in Channel Sediment in Response to Mariculture Wastewater Drainage ····· HU Yue-hang, XUAN Li-xia, QIU Qiong-fen (4185)

Setup and Microbial Community Analysis of ANAMMOX System for Landfill Leachate Treatment Coupling Partial Nitrification-Denitrification Process ····· ZHAO Qing, LIU Meng-ying, LÜ Hui, *et al.* (4195)

Effects of Rice Straw Addition on Methanogenic Archaea and Bacteria in Two Paddy Soils ····· BAO Qiong-li, WANG Feng-hua, BAO Wan-kui, *et al.* (4202)

Effect of Plastic Film Mulching on Greenhouse Gas Emissions from Rice-Rapeseed Rotation in Cropland ····· CHEN Shi-jie, JIANG Chang-sheng, NI Xue, *et al.* (4213)

N_2O Emissions from a Tea Field with Deep Application of Nitrogen Fertilizer and Intercropping with White Clover ····· LÜ Tian-xin, WU Yan-zheng, SHEN Jian-lin, *et al.* (4221)

Distribution and Emission of Nitrous Oxide (N_2O) in Three Gorges Reservoir and Downstream River ····· CHENG Fang, DING Shuai, LIU Su-mei, *et al.* (4230)

Synergy of Algal Sedimentation and Sediment Capping for Methane Emission Control in Bloom Waters ····· ZHU Lin, YU Jiang-hua, SHI Wen-qing, *et al.* (4238)

Impact of Newly Build Lead-Acid Battery Agglomeration Area on the Surrounding Soil Environment: A Study Based on the Spatial Characteristics of Heavy Metals ····· DING Ya-li, LIAO Min, FANG Zhi-ping, *et al.* (4244)

Effects of Amendments with Different C/N/P Ratios on Plant and Soil Properties of a Pb-Zn Mine Tailings ····· YANG Sheng-xiang, LI Feng-mei, PENG Xi-zhu, *et al.* (4253)

Derivation of the Thresholds of Available Concentrations of Heavy Metals in Soil Based on Agricultural Product Safety ····· ZHANG Yun-hui, DU Ping, HE Ying, *et al.* (4262)

Content of Soil Phytolith-Occluded Organic Carbon in Different Land Use Patterns at Jinyun Mountain ····· LUO Dong-hai, WANG Zi-fang, LU Chang, *et al.* (4270)

Influence of Land Use Change on Litter and Soil C, N, P Stoichiometric Characteristics and Soil Enzyme Activity in Karst Ecosystem, Southwest China ····· TIAN Jing, SHENG Mao-yin, WANG Pan, *et al.* (4278)

Effect of Conditioning Agent Combined with Flooding Measures on Absorption and Accumulation of Cadmium in Rice ····· PENG Ou, LIU Yu-ling, TIE Bai-qing, *et al.* (4287)

Distribution and Sources of OPEs in Plants and Snow in Hailuogou ····· CHEN Yang, YIN Hong-ling, WU Di, *et al.* (4295)