

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



2020

Vol.41 No.3
第41卷 第3期

目次

长江经济带 PM_{2.5} 分布格局演变及其影响因素 黄小刚, 赵景波, 曹军骥, 辛未冬 (1013)

中国东海近海岛屿冬季与夏季气溶胶中水溶性离子化学组分特征及来源解析 方言, 曹芳, 范美益, 章炎麟 (1025)

阳泉市秋冬季 PM_{2.5} 化学组分及来源分析 王成, 闫雨龙, 谢凯, 李如梅, 徐扬, 彭林 (1036)

泰安市夏季 PM_{2.5} 中正构烷烃和糖类化合物的化学组成及其来源 衣雅男, 侯战方, 杨千才, 刘晓迪, 李政, 孟静静, 燕丽, 魏本杰, 伏梦璇 (1045)

黄山秋季大气颗粒物理化特性 卞逸舒, 银燕, 王红磊, 陈魁 (1056)

北碚区气溶胶光学厚度特征及其与颗粒物浓度的相关性 曾唯, 郝庆菊, 赵仲婧, 熊维霞, 陈俊江, 辛金元, 江长胜 (1067)

淄博市重点工业行业 VOCs 排放特征 王雨燕, 王秀艳, 杜森, 白瑾丰, 杨文 (1078)

鄂州市大气 VOCs 污染特征及来源解析 付昱萌, 杨红刚, 卢民瑜, 曾颜, 邹迎新 (1085)

浙江省汽车整车制造业挥发性有机物产排污系数 滕富华, 杨忠平, 董事壁, 付超, 缪孝平, 顾震宇 (1093)

基于工艺过程的金属包装业 VOCs 污染特征 王迪, 聂磊, 赵文娟, 张玮琦, 党鸿雁, 邵霞, 张新民 (1099)

薪柴和经济作物秸秆燃烧 VOCs 排放特征 牛真真, 孔少飞, 严沁, 郑淑睿, 郑煌, 曾昕, 姚立全, 吴剑, 张颖, 吴方琪, 程溢, 覃思, 刘奎, 甄莹莹, 祁士华 (1107)

精细化工园区工艺过程 VOCs 产生量核算方法 叶茵韵, 田金平, 陈吕军 (1116)

2017 年春季常州 HONO 观测及对大气氧化能力影响的评估 施晓雯, 戈逸峰, 张玉婵, 马嫣, 郑军 (1123)

中国工程机械使用特征及其尾气排放趋势 庞莉莉, 张凯山, 马帅, 王帆 (1132)

京津冀机场群飞机 LTO 大气污染物排放清单 韩博, 孔魏凯, 姚婷玮, 王愚 (1143)

在用汽油和柴油车排放颗粒物的粒径分布特征实测 王瑞宁, 胡馨遥, 任洪娟, 马冬, 徐冲, 赵奎乾, 王孟昊, 徐为标, 安静宇, 黄成 (1151)

参数选取对畜禽养殖业大气气排放的影响: 以长三角地区为例 张琪, 黄凌, 殷可佳, 王倩, 李红丽, 王杨君, 王军, 陈勇航, 李莉 (1158)

乌海市煤矿区及周边春季降尘污染特征及来源分析 吴红璇, 史常青, 张艳, 赵廷宁, 胡平, 刘韵, 陈童 (1167)

长江中下游地区丰水期河、湖水氢氧同位素组成特征 李静, 吴华武, 周永强, 赵中华, 王晓龙, 蔡永久, 贺斌, 陈雯, 孙伟 (1176)

伊洛河流域河水来源及水化学组成控制因素 刘松韬, 张东, 李玉红, 杨锦媚, 邹翔, 王永涛, 黄兴宇, 张忠义, 杨伟, 贾保军 (1184)

城镇化进程中新疆塔城盆地浅层地下水化学演变特征及成因 吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 周冰, 朱亮, 陈坚 (1197)

基于 Sentinel-2 MSI 影像的河湖系统水体悬浮物空间分异遥感监测: 以安徽省升金湖与连接长江段为例 王行行, 王杰, 崔玉环 (1207)

黄土高原高浑浊水体 CDOM 光学特性及影响因素 梁晓文, 邵田田, 王涛 (1217)

人工强制混合充氧及诱导自然混合对水源水库水质改善效果分析 温成成, 黄廷林, 李楠, 张海涵, 林子深, 李衍庆, 杨尚业, 董亚军 (1227)

滤速与水质对低温含铁锰氨地下水中氨去除的影响 张杰, 梅宁, 刘孟浩, 叶雪松, 李冬 (1236)

太湖梅梁湾浮游动物群落结构长期变化特征(1997~2017年) 杨佳, 周健, 秦伯强, 权秋梅, 黎云祥 (1246)

汤旺河水生硅藻群落及其与环境因子的关系 薛浩, 王业耀, 孟凡生, 郑丙辉, 张铃松, 程佩璋 (1256)

盐龙湖水源生态净化系统 FG 和 MBFG 演替特征及水质响应性评价 王莲, 李璇, 马卫星, 邹立航, 赵强强, 丁成, 吴向阳 (1265)

三峡库区石盘丘小流域氮磷输出形态及流失通量 陈仕奇, 龙翼, 严冬春, 高明, 黎嘉成, 徐国鑫, 黄容 (1276)

化肥减量配施生物炭对紫色土坡耕地磷流失的影响 罗东海, 王子芳, 龙翼, 严冬春, 徐国鑫, 李娇, 高明 (1286)

利用铁改性方解石作为活性覆盖材料控制水体内源磷的释放 柏晓云, 林建伟, 詹艳慧, 常明玥, 辛慧敏, 吴俊麟 (1296)

茶渣生物炭制备及其对溶液中四环素的去除特性 范世锁, 刘文浦, 王锦涛, 胡红梅, 杨伊宁, 周娜 (1308)

3 种典型多孔高温改性固废材料对磺胺二甲嘧啶的吸附特性 王静, 朱晓丽, 韩自玉, 胡健, 秦之瑞, 焦文涛 (1319)

新制和老化微塑料对多溴联苯醚的吸附 徐鹏程, 郭健, 马东, 葛蔚, 周震峰, 柴超 (1329)

三峡库区支流汝溪河沉积物重金属空间分布及生态风险 方志青, 王永敏, 王训, 谢德体, 王定勇 (1338)

固城湖及出入河道表层水体、沉积物和鱼体中有机氯农药分布及风险评估 阙可聪, 谷孝涛, 李红敏, 陈辉辉, 毛志刚, 曾庆飞 (1346)

衡水湖沉积物中典型持久性有机污染物污染特征与风险评估 张嘉雯, 魏健, 吕一凡, 段亮, 刘利, 王俭, 孟淑锦 (1357)

北京某污水处理厂及接纳水体中典型有机磷酸酯的污染特征和风险评估 张振飞, 吕佳佩, 裴莹莹, 王春英, 郭昌胜, 徐建 (1368)

基于短程反硝化厌氧氨氧化的低碳源城市污水深度脱氮特性 马斌, 许鑫鑫, 高茂鸿, 委燕, 彭永臻 (1377)

PD-DPR 系统处理城市污水与高硝酸盐废水实现稳定亚硝酸盐积累和磷去除的特性 王秋颖, 于德爽, 赵骥, 王晓霞, 袁梦飞, 巩秀珍, 楚光玉, 何彤晖 (1384)

中试 MBBR 反应器启动 CANON 工艺及其短程硝化 付昆明, 杨宗玥, 廖敏辉, 靳怡然, 张晓航 (1393)

抗生素对耐药型反硝化菌反硝化过程及微生物群落结构的影响 代莎, 李彭, 彭五庆, 刘玉学, 王拯, 何义亮, 沈根祥, 胡双庆 (1401)

多次进水-曝气的好氧颗粒污泥系统实验 张杰, 王玉颖, 李冬, 刘志诚, 曹思雨 (1409)

剩余污泥碱性发酵产物对硝化过程及性能的影响 邱圣杰, 刘瑾瑾, 李夕耀, 彭永臻 (1418)

硫酸盐对污泥高级厌氧消化过程中甲基汞迁移转化的影响 何湘琳, 刘吉宝, 阴永光, 谭颖锋, 朱爱玲, 左壮, 高山, 解立平, 魏源送 (1425)

工业城市农田土壤重金属时空变异及来源解析 李艳玲, 卢一富, 陈卫平, 杨阳, 蔡斌 (1432)

耕地土壤重金属健康风险空间分布特征 姬超, 侯大伟, 李发志, 包广静, 邓爱萍, 沈红军, 孙华 (1440)

黄河三角洲盐碱土根际微环境的微生物多样性及理化性质分析 赵娇, 谢慧君, 张建 (1449)

不同土地利用方式对土壤细菌分子生态网络的影响 李冰, 李玉双, 魏建兵, 宋雪英, 史荣久, 侯永侠, 刘△瑶 (1456)

红壤丘陵区土壤有机碳组分对土地利用方式的响应特征 章晓芳, 郑生猛, 夏银行, 胡亚军, 苏以荣, 陈香碧 (1466)

有机肥与无机肥配施对潮土 N₂O 排放的影响 孙赫阳, 万忠梅, 刘德燕, 廖霞, 丁维新 (1474)

冬小麦吸收重金属特征及与影响因素的定量关系 王怡雯, 芮玉奎, 李中阳, 苏德纯 (1482)

钙镁磷肥对石灰、海泡石组配修复镉污染稻田土壤的影响 鄢德梅, 郭朝晖, 黄凤莲, 冉洪珍, 张鹏 (1491)

桉树遗态磷灰石材料对铅污染土壤的钝化修复效应 方雅莉, 朱宗强, 赵宁宁, 朱义年, 李超, 张立浩 (1498)

外源亚精胺对 As⁵⁺ 胁迫下水稻种子萌发和 As 吸收积累的影响 刘书锦, 黄益宗, 保琼莉, 黄永春, 张盛楠, 韩甘, 刘玉荣, 胡红青 (1505)

《环境科学》征订启事(1024) 《环境科学》征稿简则(1092) 信息(1226, 1264, 1417)

浙江省汽车整车制造行业挥发性有机物产排污系数

滕富华, 杨忠平, 董事壁, 付超, 缪孝平, 顾震宇

(浙江省环境保护科学设计研究院, 杭州 310007)

摘要: 选取了浙江省内 4 家典型汽车整车制造企业进行调研, 并对其中的两家企业开展了实地监测, 通过分析生产工艺及其所使用的主要原辅材料, 确定了该行业挥发性有机物 (VOCs) 的主要产生和排放环节, 计算了浙江省汽车整车制造行业的挥发性有机物产生和排放系数, 估算了 2017 年全省汽车整车制造行业的 VOCs 产生和排放量. 结果表明, 浙江省汽车整车制造业的 VOCs 主要产生及排放环节为涂装工序; 现阶段浙江省内仅有部分汽车整车制造企业对喷漆废气进行了高效处理; 除涂料外, 溶剂型清洗剂也是该行业 VOCs 的主要来源之一. 计算得出的浙江省汽车整车制造业的 VOCs 产生系数为 $0.20 \text{ t}\cdot\text{t}^{-1}$ 、 $3.92 \text{ kg}\cdot\text{辆}^{-1}$ 和 $29.36 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$, 排放系数为 $0.13 \text{ t}\cdot\text{t}^{-1}$ 、 $2.63 \text{ kg}\cdot\text{辆}^{-1}$ 和 $19.72 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$; 2017 年全省汽车整车制造行业的 VOCs 产生量为 2 425.84 t, 排放量为 1 627.54 t.

关键词: 浙江; 汽车整车制造; 涂装; 挥发性有机物 (VOCs); 产生系数; 排放系数

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)03-1093-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.201906015

Producing Coefficients and Emission Coefficients of Volatile Organic Compounds from the Automobile Manufacturing Industry in Zhejiang Province

TENG Fu-hua, YANG Zhong-ping, DONG Shi-bi, FU Chao, MIAO Xiao-ping, GU Zheng-yu

(Zhejiang Province Academy of Environmental Science, Hangzhou 310007, China)

Abstract: Four typical automobile manufacturing enterprises in Zhejiang Province were selected to determine the main production and emission links of volatile organic compounds (VOCs) in this industry by analyzing their production processes and the main raw and auxiliary materials used. Two of them were monitored on the spot, and the producing coefficients and emission coefficients of the VOCs discharged from the automobile manufacturing industry in Zhejiang Province were calculated. Then, the production and emission of VOCs in this industry in 2017 in Zhejiang Province were estimated. The results show that the main production and emission links of VOCs in the automobile manufacturing industry in Zhejiang Province are coating processes. Only a few of the automobile manufacturers in Zhejiang Province can deal with the paint exhaust gas effectively at present; in addition to coatings, solvent-based cleaning agents are also one of the main sources of VOCs in this industry. The VOC producing coefficients of the automobile manufacturing industry in Zhejiang Province are $0.20 \text{ t}\cdot\text{t}^{-1}$, $3.92 \text{ kg}\cdot\text{vehicle}^{-1}$, and $29.36 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$; the emission coefficients are $0.13 \text{ t}\cdot\text{t}^{-1}$, $2.63 \text{ kg}\cdot\text{vehicle}^{-1}$, and $19.72 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$. The quantity of VOCs generated by this industry in 2017 was 2 425.84 t, while the quantity of emissions was 1 627.54 t.

Key words: Zhejiang Province; automobile manufacturing industry; coating; volatile organic compounds (VOCs); producing coefficient; emission coefficient

汽车在生产过程中会用到大量涂料, 尽管当前水性底漆已被广泛使用, 但在清漆等的使用上仍是以溶剂型为主^[1,2]. 由于溶剂型涂料中含有大量挥发性有机物 (volatile organic compounds, VOCs), 且其在涂装过程中多会以气态形式挥发, 汽车整车制造业已成为当前浙江省重要的 VOCs 工业排放源之一^[3].

VOCs 的大量排放不仅会对周边大气环境造成不利影响, 也会危害人体健康^[4-9], 近年来环保部门对 VOCs 的管控日渐严格^[10-12]. 为减少汽车整车制造业的 VOCs 排放, 国家出台了《汽车涂料中有害物质限量》(GB 24409-2009)^[13] 和《清洁生产标准 汽车制造业 (涂装)》(HJ/T 293-2006)^[14] 等多个标准文件, 北京、广东、江苏、山东和上海等地也相继出台了专门针对汽车整车制造业的 VOCs 排放标准^[15-19].

浙江省于 2018 年发布并实施了《工业涂装工序

大气污染物排放标准》(DB33/2146-2018)^[20], 该标准对汽车整车制造业的 VOCs 排放浓度、单位涂装面积的 VOCs 排放量等做出了限值规定. 鉴于浙江省内分布有吉利、大众、福特、东风和众泰等多家知名汽车整车制造企业, 本研究选取了其中的 4 家典型企业进行调研, 以期在全省环保部门开展相关行业整治行动提供技术支撑.

1 材料与方法

本研究共选取了浙江省内 A、B、C 和 D 这 4 家典型汽车整车制造企业, 其中企业 A 主要生产 C 级

收稿日期: 2019-06-03; 修订日期: 2019-10-15

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFC0213806); 浙江省环保科研项目 (2018A030); 浙江省科技计划项目 (2017C03007)

作者简介: 滕富华 (1982 ~), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为 VOCs 污染控制, E-mail: fuwazju@163.com

乘用车,设计双班年产5万辆,企业B主要生产A级和B级乘用车,设计年产共计30万辆,企业C主要生产SUV型乘用车,设计年产5万辆,企业D主要生产SUV型乘用车和C级乘用车,设计年产共计25万辆。

以4家企业2017年的生产工艺、原辅材料使用情况、有机废气收集治理情况、产品产量、单车最大涂装面积及其中两家的废气检测报告等资料为基础,整理整车制造过程中涉及VOCs排放的主要生产环节,分析4家被调查企业的VOCs排放特征,计算相应的VOCs产排污系数、估算2017年浙江省汽车整车制造业的VOCs排放量。

本研究中,样品的采样及分析方法主要参考了以下3个标准^[21-23]:HJ 38-2017、HJ 584-2010和HJ 732-2014。

本研究中的VOCs产生和排放量主要采用全过程物料衡算法进行计算,具体的计算公式如下:

$$E_{\text{产生}} = E_{\text{物料}} - W_{\text{废弃}} \quad (1)$$

式中, $E_{\text{产生}}$ 表示统计期内VOCs的产生量,kg; $E_{\text{物料}}$ 表示统计期内使用物料中(包括但不限于涂料、稀释剂和固化剂等)VOCs含量之和,kg,可用含有VOCs的物料投用量及相应的VOCs质量分数计算得出; $W_{\text{废弃}}$ 表示统计期内,废弃物中(包括但不限于废弃涂料、废弃稀释剂和废弃固化剂等)VOCs含量之和,kg,不含漆渣(漆渣中的VOCs量可忽略不计),可用含有VOCs的物料废弃量及相应的VOCs质量分数计算得出(结合调查期间企业实际生产情况,物料的废弃量和使用量相比可忽略,故以0计)。

$$E_{\text{排放}} = E_{\text{产生}} - C_{\text{削减}} \quad (2)$$

式中, $E_{\text{排放}}$ 表示统计期内VOCs排放量,kg; $C_{\text{削减}}$ 表示统计期内的VOCs削减量,kg,计算方法如公式(3)和公式(4)所示:

$$C_{\text{削减}} = \sum_{i=1} C_{\text{削减},i} \quad (3)$$

$$C_{\text{削减},i} = \sum_{j=1} E_{\text{产生},j} \times \eta_{\text{收集}} \times \eta_{\text{处理}} \quad (4)$$

式中, $C_{\text{削减},i}$ 表示统计期内废气处理装置*i*的VOCs削减量,kg; $E_{\text{产生},j}$ 表示统计期内某排放环节*j*的VOCs产生量,kg; $\eta_{\text{收集}}$ 表示排放环节*j*对应的废气收集装置的收集效率,%(实地调查发现,企业均采用了密闭间进行密闭收集,可认为收集效率达到了90%); $\eta_{\text{处理}}$ 表示排放环节*j*对应的废气处理装置的处理效率,%(有废气监测报告的参考废气检测报告,无废气监测报告的可根据处理工艺进行估算,如采用直接燃烧法的,若燃烧温度不低于760℃,可认为处理效率为90%,若燃烧温度低于760℃,可认为

处理效率为60%;采用沸石转轮浓缩+燃烧的,若采用沸石转轮时,气体流速不小于3.5 m·s⁻¹,厚度不小于0.5 m,且燃烧温度不低于760℃,则可认为处理效率为80%,否则为50%)

VOCs的产生、排放系数则将由公式(5)和公式(6)分别计算得出。

$$e_{\text{产生}} = E_{\text{产生}} \div a \times b \quad (5)$$

$$e_{\text{排放}} = E_{\text{排放}} \div a \times b \quad (6)$$

式中, a 表示活动水平,当 a 表示汽车产量时,单位为“辆”;当 a 表示涂装面积时,单位为“m²”;当 a 表示含VOCs物料总用量时,单位为“t”; b 表示单位转换系数,当 a 表示汽车产量时, $b=1$,kg·kg⁻¹;当 a 表示涂装面积时, $b=1000$,g·kg⁻¹;当 a 表示含VOCs物料总用量时, $b=0.001$,t·kg⁻¹; $e_{\text{产生}}$ 及 $e_{\text{排放}}$ 分别表示产生系数和排放系数,当 a 表示汽车产量时,单位为“kg·辆⁻¹”;当 a 表示涂装面积时,单位为“g·m⁻²”;当 a 表示含VOCs物料总用量时,单位为“t·t⁻¹”。

2 结果与讨论

2.1 典型生产工艺

汽车整车制造的典型生产流程如图1所示,一般可分为冲压、焊接、涂装和总装这4个步骤。其中冲压车间的主要任务是以冲压的方式对汽车车身的大型外覆盖件和内骨架件进行成形加工;焊接车间主要负责白车身总成,以及分总成的漆前组装、焊接、铆接、胶接和螺柱连接等工作;涂装车间主要是对白车身进行涂装处理,其主要工艺包括有前处理、电泳、焊缝密封、防震隔热胶喷涂、中涂和面涂等;总装车间的主要任务则是将成品车身与内饰、底盘和电气等零部件进行装配,即完成整车的生产过程。

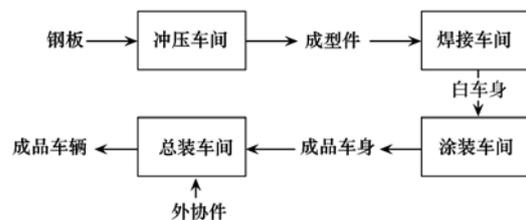


图1 汽车整车制造典型生产流程示意

Fig. 1 Typical process flow chart of the automobile manufacturing industry

2.2 VOCs产排污环节

通过分析各类原辅材料的成分可以发现,企业排放的VOCs主要源自涂装时用到的各类涂料、固化剂及清洗喷枪时用到的有机清洗剂等,即可认为涂装车间是企业VOCs的主要产生区域。涂装车间

的典型生产工艺及涉及 VOCs 的产排污环节如图 2 所示(不同企业可能采用不同涂装工艺,如企业 B 就采用了免中涂工艺,即没有中涂及相应的烘干环节^[24],其中所示的仅为最常见的涂装工艺)。其中,

预处理主要包括脱脂、磷化、钝化和水洗等工序,用到的原料主要为无机盐类物质,基本不涉及 VOCs 的排放.涂装车间内涉及含 VOCs 原辅材料使用的,主要为电泳、PVC 密封和涂覆及烘干等环节.

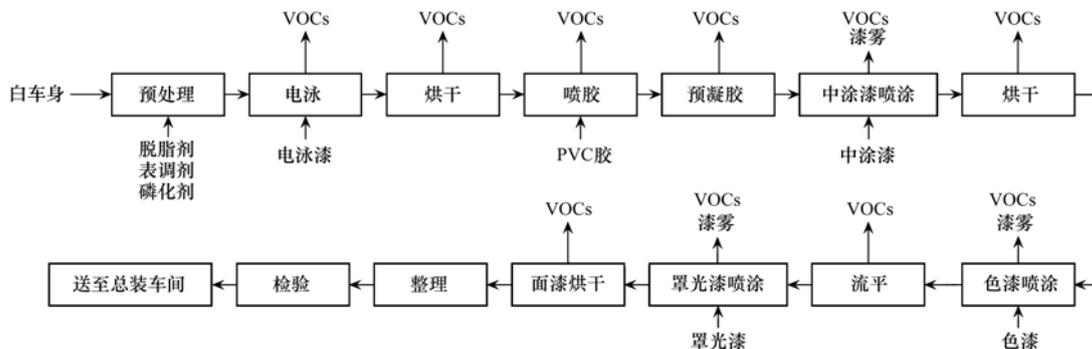


图 2 涂装车间典型生产工艺及 VOCs 产生排放环节

Fig. 2 Typical production process and main production and emission links of VOCs in a coating workshop

此外,调查发现 4 家企业均设有集中供漆房.考虑到企业所使用的均为外购桶装成品漆,无需调配,平时只需将涂料通过隔膜泵打入原料桶,再经管道输送至涂装房即可,期间的 VOCs 排放量较小,故不予考虑.

2.3 VOCs 收集治理情况

现场调查时发现,调查企业的涂装过程均在密闭空间内进行,且均配有废气收集装置;烘房进出口处的气压相对喷漆室的均为负压,烘房中产生的有机废气可认为被全部收集.因此,就此次调查的几家企业而言,有机废气的收集效率相对较高,无组织排放量相对较少.

关于治理情况,调查企业对烘干废气主要采用燃烧法进行处理;对于涂覆废气,企业 A 和企业 D 仅对其中的漆雾进行去除后就直接排放,企业 B 和企业 C 则是在去除漆雾的基础上再加装了沸石转

轮浓缩 + 燃烧的废气处理装置.

2.4 VOCs 排放特征

汽车整车制造业的 VOCs 污染主要是由于涂料、固化剂及清洗剂等含 VOCs 类原辅材料的使用造成的,其产生和排放特征与原辅材料的成分含量及使用情况密切相关.现根据调查对象提供的 MSDS 及原辅料使用台账,对 4 家企业含 VOCs 类原辅材料的 VOCs 含量及使用情况进行统计分析.

4 家企业所使用主要原辅材料的 VOCs 含量情况如表 1 所示,可以发现,在企业所使用的含 VOCs 类原辅材料中,除清漆(罩光漆)和溶剂型清洗剂外,其余的多为水性材料.此外,企业 A 使用的原辅材料的 VOCs 平均含量为 17.36%;企业 B 的为 11.94%;企业 C 的为 12.72%;企业 D 的为 22.45%.调查企业含 VOCs 类原辅材料的单车用量情况如表 2 所示.企业 A 单车平均消耗含 VOCs

表 1 调查企业主要原辅材料 VOCs 含量情况/%

Table 1 Content of VOCs in the raw and auxiliary materials used by the enterprises investigated/%

企业	底漆	PVC 胶	中涂漆	色漆	清漆(罩光漆)	水性清洗剂	溶剂型清洗剂
A	1.0	2.0	5.6	12.3	55.0	10.0	100
B	5.0	3.0	/	16.2	42.9	/	100
C	1.0	2.0	5.6	12.3	55.0	10.0	100
D ¹⁾	9.9	/	13.4	14.2	42.0	/	100
4 家企业平均水平 ²⁾	8.6	2.8	12.4	14.2	44.3	10.0	100

1)除表中列出的原辅材料外,D厂还在产品返修区使用了含 VOCs 类原辅材料,其 VOCs 含量为 30.03%; 2)不包括 D 厂返修区

表 2 调查企业含 VOCs 原辅材料单车用量/kg·辆⁻¹

Table 2 Dosage of the raw and auxiliary materials used by the enterprises investigated per vehicle/kg·vehicle⁻¹

企业	底漆	PVC 胶	中涂漆	色漆	清漆(罩光漆)	水性清洗剂	溶剂型清洗剂
A	5.01	5.60	2.48	2.96	5.61	0.10	0.02
B	9.40	19.30	/	2.31	1.90	/	1.91
C	6.80	8.03	3.20	5.05	2.91	0.80	0.80
D ¹⁾	6.86	/	1.88	3.26	2.35	/	0.98
4 家企业平均水平 ²⁾	7.02	2.69	1.74	3.17	2.53	0.02	1.01

1)除表中列出的原辅材料外,D厂还在产品返修区使用了含 VOCs 类原辅材料,其单车用量为 1.01 kg·辆⁻¹; 2)不包括 D 厂返修区

类原辅材料 21.77 kg,其中用量最多的为溶剂型罩光漆,单车用量为 5.61 kg; PVC 胶与之相当,单车用量为 5.60 kg; 排第三的为无铅电泳漆,单车用量为 5.01 kg. 企业 B 单车平均消耗含 VOCs 类原辅材料 34.82 kg,其中用量最多的为 PVC 胶,单车用量为 19.30 kg; 电泳漆次之,单车用量为 9.40 kg. 企业 C 单车平均消耗含 VOCs 类原辅材料 27.59 kg,其中用量最多的为 PVC 胶,单车用量为 8.03 kg; 电泳漆次之,单车用量为 6.80 kg. 企业 D 单车平均消耗含 VOCs 类原辅材料 16.34 kg,其中用量最多的为电泳底漆,单车用量为 6.86 kg; 色漆次之,单车用量为 3.26 kg. 从 4 家企业的原辅料平均使用水平来看,用量最多的为底漆,单车用量为 7.02 kg; 其次为色漆,单车用量为 3.17 kg. 根据表 1、表 2 中的统计数据,可以发现 4 家企业原辅材料的用量及 VOCs 含量存在着一定的差异,这和企业的生产工艺、涂料利用率以及涂层厚度等因素有关.

根据各企业废气的产生和收集治理情况,结合物料平衡法,对各企业厂区内排放的有机废气的来源进行分析,分析结果如图 3~6 所示. 企业 A 的溶剂型罩光漆用量大, VOCs 含量高,是 VOCs 排放的主要来源,其对企业 A 的 VOCs 排放贡献率为 81.09%. 企业 B 的 PVC 胶单车用量高于其他 3 家企业,是其 VOCs 排放的主要来源,贡献率为 28.89%. 企业 C 色漆的用量是罩光漆的 1.7 倍,企业 C 排放的 VOCs 主要是源自于色漆,其对企业 C 的 VOCs 排放贡献率为 30.74%. 企业 D 未对清洗剂中挥发出来的有机废气进行收集处理,导致清洗溶剂中的 VOCs 大量无组织排放,清洗剂对企业 D 的 VOCs 排放贡献率为 38.07%.

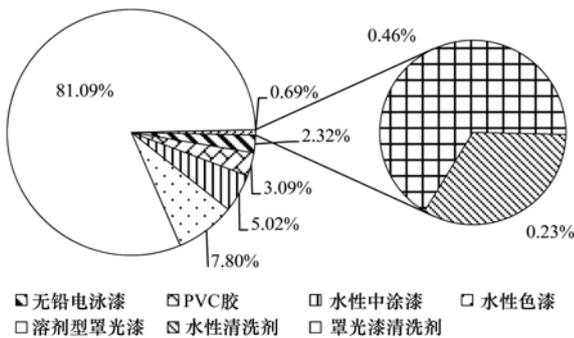


图 3 企业 A 有机废气中 VOCs 来源分布
Fig. 3 Source and distribution of VOCs in organic waste gas discharged from enterprise A

2.5 VOCs 产排污系数的计算

考虑到在文献[25]中,以单车汽车的 VOCs 排放量来表示汽车整车制造业的 VOCs 排放系数;在

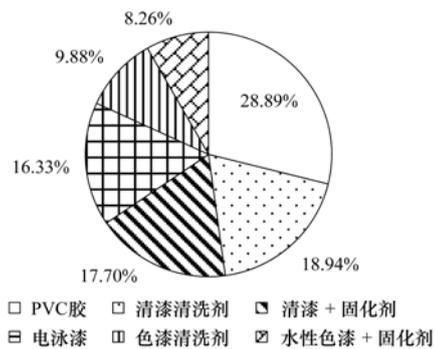


图 4 企业 B 有机废气中 VOCs 来源分布
Fig. 4 Source and distribution of VOCs in organic waste gas discharged from enterprise B

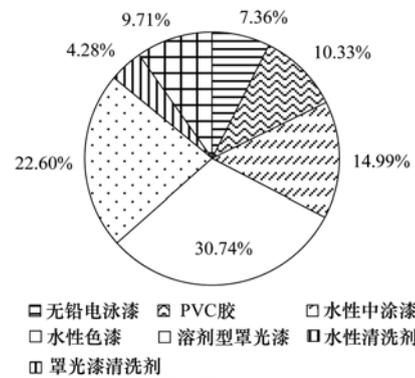


图 5 企业 C 有机废气中 VOCs 来源分布
Fig. 5 Source and distribution of VOCs in organic waste gas discharged from enterprise C

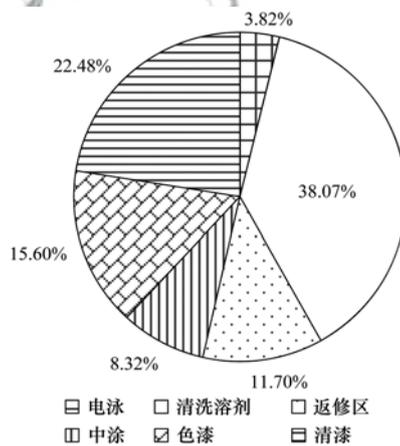


图 6 企业 D 有机废气中 VOCs 来源分布
Fig. 6 Source and distribution of VOCs in organic waste gas discharged from enterprise D

文献[20]中,对汽车整车制造业的单位涂装面积的 VOCs 排放量提出了限值要求. 本研究将参考这两份文件的思路,以“kg·辆⁻¹”及“g·m⁻²”(以 VOCs/涂装面积计算)的形式表示行业的产生和排放系数. 同时,考虑到汽车整车制造行业具有涂装工艺相对成熟、物料的用料配比相对恒定及废气收集治理设施的运行状态较为稳定等特点,本研究还将以含 VOCs 原辅材料的用量为基数,计算 VOCs 的产生和

排放系数,即以“ $t \cdot t^{-1}$ ”的形式表示。

根据公式,可计算出 4 家企业及能代表行业平均水平的 VOCs 产排污系数,计算结果如表 3 所示。

表 3 汽车整车制造行业涂装工序 VOCs 产生和排放系数汇总

Table 3 Summary of the producing coefficients and emission coefficients of VOCs from the automobile manufacturing industry

企业	产生系数	排放系数
A	$0.17 t \cdot t^{-1}$	$0.08 t \cdot t^{-1}$
	$3.76 \text{ kg} \cdot \text{辆}^{-1}$	$1.95 \text{ kg} \cdot \text{辆}^{-1}$
	$33.00 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$	$17.07 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$
B	$0.13 t \cdot t^{-1}$	$0.03 t \cdot t^{-1}$
	$5.99 \text{ kg} \cdot \text{辆}^{-1}$	$1.46 \text{ kg} \cdot \text{辆}^{-1}$
	$60.51 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$	$14.76 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$
C	$0.11 t \cdot t^{-1}$	$0.06 t \cdot t^{-1}$
	$2.98 \text{ kg} \cdot \text{辆}^{-1}$	$1.57 \text{ kg} \cdot \text{辆}^{-1}$
	$25.71 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$	$13.51 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$
D	$0.22 t \cdot t^{-1}$	$0.18 t \cdot t^{-1}$
	$3.67 \text{ kg} \cdot \text{辆}^{-1}$	$2.88 \text{ kg} \cdot \text{辆}^{-1}$
	$26.13 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$	$20.51 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$
4 家企业均值	$0.20 t \cdot t^{-1}$	$0.13 t \cdot t^{-1}$
	$3.92 \text{ kg} \cdot \text{辆}^{-1}$	$2.63 \text{ kg} \cdot \text{辆}^{-1}$
	$29.36 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$	$19.72 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$

通过比较 A、B、C 和 D 这 4 家企业的排放系数,可以发现企业 A 和企业 D 的要高于企业 B 和企业 C 的。这可能是因为企业 A 和企业 D 未对涂覆废气采用高效治理技术导致的。从废气治理的角度看,企业应重视对涂覆废气的治理,建议企业采用高效措施对使用溶剂型原辅材料的涂覆废气进行收集治理,从而降低全厂的 VOCs 排放水平。此外,可以发现尽管企业 B 的色漆和清漆用量相对较少,且没有用到中涂漆,但其产生系数仍要高于其他 3 家企业的。可能的原因是企业 B 的 PVC 胶和溶剂型清洗剂的用量较大。建议此类型企业通过优化现有生产工艺,提高原料利用率,减少含 VOCs 类原辅材料的用量或降低原辅材料中 VOCs 的含量,从源头减少 VOCs 的排放。

另外,本研究中计算得出的以单辆汽车 VOCs 排放量表示的行业 VOCs 排放系数为 $2.63 \text{ kg} \cdot \text{辆}^{-1}$,略大于文献[25]中汽车喷涂的排放系数($2.43 \text{ kg} \cdot \text{辆}^{-1}$),可能的原因有:在 VOCs 产生排放量计算方法的选取上存在一定差异,本研究中除涂料外,还考虑到了清洗剂的挥发,VOCs 产生源涵盖的范围可能更广,使得本研究中的 VOCs 产生量偏大。根据本研究中计算出的结果,以单位涂装面积 VOCs 排放量表示的行业 VOCs 排放系数为 $19.72 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,基本达到了文献[20]中规定的 M1 类汽车 $20 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 的排放限值要求,但考虑到和排放限值较为接近,相关汽车整车制造企业仍应通过优化生产

工艺、对涂装废气进行全过程收集处理等多种手段,继续加大 VOCs 的减排力度,确保 VOCs 能稳定达标排放。

2.6 VOCs 产排污系数的应用

根据文献[26],2017 年浙江省共生产轿车 618 837 辆。利用计算得出的产排污系数,可以初步估算出 2017 年全省汽车整车制造行业的 VOCs 产生量为 2 425.84 t,排放量为 1 627.54 t。

3 结论

(1)除涂料外,溶剂型清洗剂也是行业 VOCs 的主要来源之一,相关企业应对清洗过程中产生的 VOCs 进行有效控制。

(2)当前阶段,浙江省内仍有部分汽车整车制造企业未对使用溶剂型清漆的喷涂废气进行高效处理,在 VOCs 深化治理方面还有一定的提升空间。

(3)从行业平均排放系数来看,已进行过原辅材料替代的浙江省汽车整车制造企业基本能满足浙江省《工业涂装工序大气污染物排放标准》中规定的 M1 类汽车 $20 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 的排放限值要求。

(4)计算得出的浙江省汽车整车制造行业的 VOCs 产生系数为 $0.20 t \cdot t^{-1}$ 、 $3.92 \text{ kg} \cdot \text{辆}^{-1}$ 和 $29.36 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,排放系数为 $0.13 t \cdot t^{-1}$ 、 $2.63 \text{ kg} \cdot \text{辆}^{-1}$ 和 $19.72 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,可用于同类型整车制造企业的 VOCs 排放量核算。

(5)2017 年全省汽车整车制造行业的 VOCs 产生量为 2 425.84 t,排放量为 1 627.54 t。

参考文献:

- [1] 黄伟,邱祖民,肖建军,等.水性涂料的应用现状及研究进展[J].化工新型材料,2015,43(8):210-212.
Huang W, Qiu Z M, Xiao J J, et al. Application and research progress in water-borne coatings[J]. New Chemical Materials, 2015, 43(8): 210-212.
- [2] 莫梓伟,牛贺,陆思华,等.长江三角洲地区基于喷涂工艺的溶剂源 VOCs 排放特征[J].环境科学,2015,36(6):1944-1951.
Mo Z W, Niu H, Lu S H, et al. Process-based emission characteristics of volatile organic compounds(VOCs) from paint industry in the Yangtze River Delta, China[J]. Environmental Science, 2015, 36(6): 1944-1951.
- [3] 浙江省环境保护厅.关于印发《浙江省涂装行业挥发性有机物污染整治规范》和《浙江省印刷和包装行业挥发性有机物污染整治规范》的通知(浙环函[2015]402号)[EB/OL].
http://www.zjepb.gov.cn/art/2018/3/16/art_1475745_91.html, 2015-10-21.
- [4] 陈文严.工业 VOC 的危害分析及治理技术研究[J].化工设计通讯,2018,44(4):188.
Chen W Y. Industrial VOC hazard analysis and treatment technology research [J]. Chemical Engineering Design Communications, 2018, 44(4): 188.
- [5] Zhang H L, Ying Q. Secondary organic aerosol formation and source apportionment in Southeast Texas [J]. Atmospheric

- Environment, 2011, **45**(19): 3217-3227.
- [6] Boeglin M L, Wessels D, Henshel D. An investigation of the relationship between air emissions of volatile organic compounds and the incidence of cancer in Indiana counties [J]. Environmental Research, 2006, **100**(2): 242-254.
- [7] 王红丽. 上海市大气挥发性有机化学消耗与臭氧生成的关系[J]. 环境科学, 2015, **36**(9): 3159-3167.
Wang H L. Chemical loss of volatile organic compounds and its impact on the formation of ozone in Shanghai[J]. Environmental Science, 2015, **36**(9): 3159-3167.
- [8] 卢滨, 黄成, 卢清, 等. 杭州市工业源 VOCs 排放清单及排放特征[J]. 环境科学, 2018, **39**(2): 533-542.
Lu B, Huang C, Lu Q, *et al.* Emission inventory and pollution characteristics of industrial VOCs in Hangzhou, China [J]. Environmental Science, 2018, **39**(2): 533-542.
- [9] 高爽, 张坤, 高松, 等. 上海城郊地区冬季霾污染事件反应性 VOCs 物种特征[J]. 环境科学, 2017, **38**(3): 855-866.
Gao S, Zhang K, Gao S, *et al.* Characteristics of reactive VOCs species during high haze-pollution events in suburban area of Shanghai in winter[J]. Environmental Science, 2017, **38**(3): 855-866.
- [10] 国务院办公厅. 国务院办公厅转发环境保护部等部门关于推进大气污染联防联控工作改善区域空气质量指导意见的通知(国办发[2010] 33 号) [EB/OL]. http://www.gov.cn/xxgk/pub/govpublic/mrlm/201005/t20100513_56516.html, 2010-05-11.
- [11] 国务院. 国务院关于印发大气污染防治行动计划的通知(国发[2013] 37 号) [EB/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2013-09/13/content_4561.htm, 2013-09-10.
- [12] 浙江省环境保护厅. 关于印发《浙江省挥发性有机物污染整治方案》的通知(浙环发[2013] 54 号) [EB/OL]. http://www.zjepb.gov.cn/art/2013/11/4/art_1201816_15010257.html, 2013-11-04.
- [13] GB 24409-2009, 汽车涂料中有害物质质量[S].
- [14] HJ/T 293-2006, 清洁生产标准 汽车制造业(涂装)[S].
- [15] DB11/1227-2015, 汽车整车制造业(涂装工序)大气污染物排放标准[S].
- [16] DB44/T 816-2010, 表面涂装(汽车制造业)挥发性有机化合物排放标准[S].
- [17] DB32/2862-2016, 表面涂装(汽车制造业)挥发性有机物排放标准[S].
- [18] DB37/2801.1-2016, 挥发性有机物排放标准 第1部分: 汽车制造业[S].
- [19] DB31/859-2014, 汽车制造业(涂装)大气污染物排放标准[S].
- [20] DB33/2146-2018, 工业涂装工序大气污染物排放标准[S].
- [21] HJ 38-2017, 固定污染源废气 总烃、甲烷和非甲烷总烃的测定 气相色谱法[S].
- [22] HJ 584-2010, 环境空气 苯系物的测定 活性炭吸附/二硫化碳解吸-气相色谱法[S].
- [23] HJ 732-2014, 固定污染源废气 挥发性有机物的采样 气袋法[S].
- [24] 高伟峰, 冉浩, 赵旭星, 等. 汽车免中涂工艺探讨[J]. 涂料工业, 2015, **45**(3): 77-80.
Gao W F, Ran H, Zhao X X, *et al.* Discussion on intercoat-free coating process for automotive[J]. Paint & Coatings Industry, 2015, **45**(3): 77-80.
- [25] 环境保护部. 关于发布《大气细颗粒物一次源排放清单编制技术指南(试行)》等4项技术指南的公告(公告 2014 年第 55 号) [EB/OL]. http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201408/t20140828_288364.htm, 2014-08-20.
- [26] 浙江省统计局, 国家统计局浙江调查总队. 浙江统计年鉴-2018[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018. 235-237.

CONTENTS

Evolution of the Distribution of PM _{2.5} Concentration in the Yangtze River Economic Belt and Its Influencing Factors	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, CAO Jun-ji, <i>et al.</i>	(1013)
Chemical Characteristics and Source Apportionment of Water-Soluble Ions in Atmosphere Aerosols over the East China Sea Island During Winter and Summer	FANG Yan, CAO Fang, FAN Mei-yi, <i>et al.</i>	(1025)
Analysis of Chemical Components and Sources of PM _{2.5} During Autumn and Winter in Yangquan City	WANG Cheng, YAN Yu-long, XIE Kai, <i>et al.</i>	(1036)
Chemical Compositions and Sources of <i>n</i> -Alkanes and Saccharides in PM _{2.5} from Taian City During the Summer	YI Ya-nan, HOU Zhan-fang, YANG Qian-cai, <i>et al.</i>	(1045)
Physical and Chemical Characteristics of Atmospheric Particles in Autumn in Mt. Huangshan	BIAN Yi-shu, YIN Yan, WANG Hong-lei, <i>et al.</i>	(1056)
Characteristics of Aerosol Optical Depth in the Urban Area of Beibei and Its Correlation with Particle Concentration	ZENG Wei, HAO Qing-ju, ZHAO Zhong-jing, <i>et al.</i>	(1067)
Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds from Typical Industries in Zibo	WANG Yu-yan, WANG Xiu-yan, DU Miao, <i>et al.</i>	(1078)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of Atmospheric VOCs in Ezhou City	FU Yu-meng, YANG Hong-gang, LU Min-yu, <i>et al.</i>	(1085)
Producing Coefficients and Emission Coefficients of Volatile Organic Compounds from the Automobile Manufacturing Industry in Zhejiang Province	TENG Fu-hua, YANG Zhong-ping, DONG Shi-bi, <i>et al.</i>	(1093)
Pollution Characteristics of Volatile Organic Compounds Emission from the Metal Packaging Industry Based on Analysis of Process	WANG Di, NIE Lei, ZHAO Wen-juan, <i>et al.</i>	(1099)
Profile Characteristics of VOCs from Wood and Economic Crop Burning	NIU Zhen-zhen, KONG Shao-fei, YAN Qin, <i>et al.</i>	(1107)
Accounting Methods of VOCs Emission Associated with Production Processes in a Fine Chemical Industrial Park	YE Han-yun, TIAN Jin-ping, CHEN Lü-jun	(1116)
HONO Observation and Assessment of the Effects of Atmospheric Oxidation Capacity in Changzhou During the Springtime of 2017	SHI Xiao-wen, GE Yi-feng, ZHANG Yu-chan, <i>et al.</i>	(1123)
Analysis of Activity and Its Emissions Trend for Construction Equipment in China	PANG Kai-li, ZHANG Kai-shan, MA Shuai, <i>et al.</i>	(1132)
Air Pollutant Emission Inventory from LTO Cycles of Aircraft in the Beijing-Tianjin-Hebei Airport Group, China	HAN Bo, KONG Wei-kai, YAO Ting-wei, <i>et al.</i>	(1143)
Particle Size Distribution of PM Emission from In-use Gasoline and Diesel Vehicles	WANG Rui-ning, HU Qing-yao, REN Hong-juan, <i>et al.</i>	(1151)
Impact of Parameterization on the Estimation of Ammonia Emissions: A Case Study over the Yangtze River Delta	ZHANG Qi, HUANG Ling, YIN Si-jia, <i>et al.</i>	(1158)
Characteristics and Source Apportionment of Dustfall Pollution in the Coal Mine Area and Surrounding Areas of Wuhai City in Spring	WU Hong-xuan, SHI Chang-qing, ZHANG Yan, <i>et al.</i>	(1167)
Variations of Stable Oxygen and Deuterium Isotopes in River and Lake Waters During Flooding Season Along the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River Regions	LI Jing, WU Hua-wu, ZHOU Yong-qiang, <i>et al.</i>	(1176)
Water Sources and Factors Controlling Hydro-chemical Compositions in the Yiluo River Basin	LIU Song-tao, ZHANG Dong, LI Yu-hong, <i>et al.</i>	(1184)
Chemical Evolution of Groundwater in the Tacheng Basin of Xinjiang in the Process of Urbanization	LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i>	(1197)
Remote Sensing Monitoring on Spatial Differentiation of Suspended Sediment Concentration in a River-Lake System Based on Sentinel-2 MSI Imaging: A Case for Shengjin Lake and Connected Yangtze River Section in Anhui Province	WANG Hang-hang, WANG Jie, CUI Yu-huan	(1207)
CDOM Optical Characteristics and Related Environmental Factors of High-turbidity Waters on the Loess Plateau	LIANG Xiao-wen, SHAO Tian-tian, WANG Tao	(1217)
Effects of Artificial Destratification and Induced-natural Mixing on Water Quality Improvement in a Drinking Water Reservoir	WEN Cheng-cheng, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i>	(1227)
Effect of Filter Speed and Water Quality on Ammonia Removal in Groundwater Containing Iron, Manganese, and Ammonia at Low Temperature	ZHANG Jie, MEI Ning, LIU Meng-hao, <i>et al.</i>	(1236)
Long-term Variation Characteristics of Zooplankton Community Structure in Meiliang Bay, Lake Taihu	YANG Jia, ZHOU Jian, QIN Bo-qiang, <i>et al.</i>	(1246)
Community of Benthic Diatoms and Their Relationship with Aquatic Environmental Factors in the Tangwang River, China	XUE Hao, WANG Ye-yao, MENG Fan-sheng, <i>et al.</i>	(1256)
Succession Characteristics and Water Quality Responsiveness Evaluation of FG and MBFG in Yanlong Lake Water Source Ecological Purification System	WANG Lian, LI Xuan, MA Wei-xing, <i>et al.</i>	(1265)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Output and Loss Flux in the Shipanqiu Watershed, Three Gorges Reservoir Area	CHEN Shi-qi, LONG Yi, YAN Dong-chun, <i>et al.</i>	(1276)
Effect of Optimized Fertilization and Biochar Application on Phosphorus Loss in Purple Soil Sloping Farmland	LUO Dong-hai, WANG Zi-fang, LONG Yi, <i>et al.</i>	(1286)
Use of Iron-modified Calcite as an Active Capping Material to Control Phosphorus Release from Sediments in Surface Water Bodies	BAI Xiao-yun, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i>	(1296)
Preparation of Tea Waste Biochar and Its Application in Tetracycline Removal from Aqueous Solution	FAN Shi-suo, LIU Wen-pu, WANG Jing-tao, <i>et al.</i>	(1308)
Adsorption Characteristics of Sulfamethazine on Three Typical Porous High-temperature Modified Solid Waste Materials	WANG Jing, ZHU Xiao-li, HAN Zi-yu, <i>et al.</i>	(1319)
Sorption of Polybrominated Diphenyl Ethers by Virgin and Aged Microplastics	XU Peng-cheng, GUO Jian, MA Dong, <i>et al.</i>	(1329)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Ruxi Tributary of the Three Gorges Reservoir	FANG Zhi-qing, WANG Yong-min, WANG Xun, <i>et al.</i>	(1338)
Distribution and Risk Assessment of OCPs in Surface Water, Sediments, and Fish from Lake Gucheng and Inflow and Outflow Rivers	KAN Ke-cong, GU Xiao-hong, LI Hong-min, <i>et al.</i>	(1346)
Occurrence and Ecological Risk Assessment of Typical Persistent Organic Pollutants in Hengshui Lake	ZHANG Jia-wen, WEI Jian, LÜ Yi-fan, <i>et al.</i>	(1357)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Typical Organophosphate Esters in Beijing Municipal Wastewater Treatment Plant and the Receiving Water	ZHANG Zhen-fei, LÜ Jia-pei, PEI Ying-ying, <i>et al.</i>	(1368)
Advanced Nitrogen Removal Characteristics of Low Carbon Source Municipal Wastewater Treatment via Partial-denitrification Coupled with ANAMMOX	MA Bin, XU Xin-xin, GAO Mao-hong, <i>et al.</i>	(1377)
Stable Nitrite Accumulation and Phosphorus Removal from High-nitrate and Municipal Wastewaters in a Combined Process of Partial Denitrification and Denitrifying Phosphorus Removal (PD-DPR)	WANG Qiu-ying, YU De-shuang, ZHAO Ji, <i>et al.</i>	(1384)
Start-up of CANON Process and Short-cut Nitrification in a Pilot-scale MBBR Reactor	FU Kun-ming, YANG Zong-yue, LIAO Min-hui, <i>et al.</i>	(1393)
Influence of Antibiotics on the Denitrification Process of Antibiotic Resistant Denitrifying Bacteria and the Analysis of Microbial Community Structure	DAI Sha, LI Peng, PENG Wu-qing, <i>et al.</i>	(1401)
Aerobic Granular Sludge System with Multiple Influent-Aeration Operation Strategy	ZHANG Jie, WANG Yu-ying, LI Dong, <i>et al.</i>	(1409)
Effect of Alkaline Sludge Fermentation Products on the Nitrification Process and Performance	QIU Sheng-jie, LIU Jin-jin, LI Xi-yao, <i>et al.</i>	(1418)
Effect of Sulfate on the Migration and Transformation of Methylmercury in Advanced Anaerobic Digestion of Sludge	HE Xiang-lin, LIU Ji-bao, YIN Yong-guang, <i>et al.</i>	(1425)
Spatial-temporal Variation and Source Change of Heavy Metals in the Cropland Soil in the Industrial City	LI Yan-ling, LU Yi-fu, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i>	(1432)
Assessment and Spatial Characteristics Analysis of Human Health Risk of Heavy Metals in Cultivated Soil	Ji Chao, HOU Da-wei, LI Fa-zhi, <i>et al.</i>	(1440)
Microbial Diversity and Physicochemical Properties of Rhizosphere Microenvironment in Saline-alkali Soils of the Yellow River Delta	ZHAO Jiao, XIE Hui-jun, ZHANG Jian	(1449)
Effects of Different Land Use Types on the Molecular Ecological Network of Soil Bacteria	LI Bing, LI Yu-shuang, WEI Jian-bing, <i>et al.</i>	(1456)
Responses of Soil Organic Carbon Fractions to Land Use Types in Hilly Red Soil Regions, China	ZHANG Xiao-fang, ZHENG Sheng-meng, XIA Yin-hang, <i>et al.</i>	(1466)
Effect of Organic Fertilizer and Inorganic Fertilizer Application on N ₂ O Emissions from Fluvo-aquic Soil in the North China Plain	SUN He-yang, WAN Zhong-mei, LIU De-yan, <i>et al.</i>	(1474)
Characteristics of Heavy Metal Absorption by Winter Wheat and Its Quantitative Relationship with Influencing Factors	WANG Yi-wen, RUI Yu-kui, LI Zhong-yang, <i>et al.</i>	(1482)
Effect of Calcium Magnesium Phosphate on Remediation Paddy Soil Contaminated with Cadmium Using Lime and Sepiolite	YAN De-mei, GUO Zhao-hui, HUANG Feng-lian, <i>et al.</i>	(1491)
Passivation and Remediation Effects and Mechanisms of Plant Residual Modified Materials on Lead-Contaminated Soils	FANG Ya-li, ZHU Zong-qiang, ZHAO Ning-ning, <i>et al.</i>	(1498)
Effects of Exogenous Spermidine on Seed Germination and As Uptake and Accumulation of Rice Under As ⁵⁺ Stress	LIU Shu-jin, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i>	(1505)