

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第10期

Vol.39 No.10

**2018**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

|                                                                       |                                                         |
|-----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| 我国典型城市环境大气挥发性有机物特征比值 .....                                            | 王鸣, 陈文泰, 陆思华, 邵敏 (4393)                                 |
| 2015年北京大气 VOCs 时空分布及反应活性特征 .....                                      | 张博韬, 安欣欣, 王琴, 闫贺, 刘保献, 张大伟 (4400)                       |
| 北京市建筑类涂料 VOCs 排放清单编制技术方法及应用 .....                                     | 邓子钰, 高美平, 王庆玮, 聂磊 (4408)                                |
| 基于实测的建筑类涂料挥发性有机物 (VOCs) 含量水平及组分特征 .....                               | 高美平, 邓子钰, 聂磊, 邵霞, 安小栓 (4414)                            |
| 2014~2016年京津冀沿山城市空气质量首要污染物特征分析 .....                                  | 王晓彦, 王帅, 朱莉莉, 许荣, 李健军 (4422)                            |
| 北京市大气环境 PM <sub>2.5</sub> 和 PM <sub>1</sub> 及其碳质组分季节变化特征及来源分析 .....   | 樊啸辰, 郎建奎, 程水源, 王晓琦, 吕喆 (4430)                           |
| 南京春季北郊地区大气 PM <sub>2.5</sub> 中主要化学组分及碳同位素特征 .....                     | 周一鸣, 韩珣, 王瑾瑾, 陈善莉, 沈潇雨, 章炎麟, 朱彬, 郭照冰 (4439)             |
| 热脱附法快速分析大气细颗粒物中非极性有机物 .....                                           | 马英歌, 吴霞, 彭梦梦, 冯加良, 郁建珍, 乔利平, 周敏, 朱书慧, 李莉 (4446)         |
| 杭州市空气细颗粒物浓度与哮喘就诊人次的关系 .....                                           | 王安旭, 陈曦, 宋从波, 应颂敏, 李倩, 吴琳, 毛洪钧 (4457)                   |
| 基于远程通讯技术的混动公交车 SCR 系统运行及 NO <sub>x</sub> 排放特征 .....                   | 杨强, 胡馨遥, 黄成, 陈昀, 刘佳栋, 李莉, 熊忠亮, 唐伟 (4463)                |
| 基于环境风险排序的流域优先污染物筛选 .....                                              | 李奇峰, 吕永龙, 王佩, 张悦清 (4472)                                |
| 重庆远郊丰都雪玉洞流域大气无机氮湿沉降变化特征与来源分析 .....                                    | 段世辉, 蒋勇军, 张远瞩, 胡刘婵, 曾泽, 吕现福 (4479)                      |
| 黑龙江凉水国家级自然保护区大气氮沉降特征 .....                                            | 宋蕾, 田鹏, 张金波, 金光泽 (4490)                                 |
| 脱甲河水系 N <sub>2</sub> O 关键产生过程及氮素来源探讨 .....                            | 赵强, 吕成文, 秦晓波, 吴红宝, 万运帆, 廖育林, 鲁艳红, 李健陵 (4497)            |
| 生物炭添加对曝气人工湿地脱氮及氧化亚氮释放的影响 .....                                        | 王宁, 黄磊, 罗星, 梁岩, 王燕, 陈玉成 (4505)                          |
| 黑麦草对水体中镉-壬基酚复合污染的生理响应及修复 .....                                        | 史广宇, 李中义, 张路, 程媛媛, 陈宏伟, 施维林 (4512)                      |
| 城市黑臭水体的吸收特性分析 .....                                                   | 丁潇蕾, 李云梅, 吕恒, 朱利, 温爽, 雷少华 (4519)                        |
| 岷江上游水体中 DOM 光谱特征的季节变化 .....                                           | 范诗雨, 秦纪洪, 刘堰杨, 孙辉 (4530)                                |
| 防渗型生物滞留中试系统降雨径流水质与三维荧光特征 .....                                        | 林修咏, 王书敏, 李强, 谢云成 (4539)                                |
| 基于 $\delta^{15}\text{N}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的农业区地下河硝酸盐污染来源 ..... | 盛婷, 杨平恒, 谢国文, 洪爱花, 曹聪, 谢世友, 时伟宇 (4547)                  |
| 垃圾填埋场地下水溶解性有机物光谱特征 .....                                              | 彭莉, 虞敏达, 何小松, 刘思佳, 张鹏 (4556)                            |
| 铅负载颗粒沸石改良底泥对水中磷酸盐的吸附行为 .....                                          | 梁舒静, 林建伟, 詹艳慧, 汪振华, 李雅灵, 何思琪, 陈海洋, 唐凤霞, 李志强 (4565)      |
| 基于紫外光谱分析的腐殖质混凝控制 .....                                                | 张北辰, 张晓蕾, 秦兰兰, 黄海鸥 (4576)                               |
| AAO 工艺联合臭氧削减污水中微量有机污染物及遗传毒性 .....                                     | 李默, 汪震哲, 陈志强, 温沁雪 (4584)                                |
| 抗生素抗性基因在两级废水处理系统中的分布和去除 .....                                         | 李奥林, 陈吕军, 张衍, 代天娇, 田金平, 刘锐, 温东辉 (4593)                  |
| 磁性壳聚糖凝胶球固定厌氧铁氨氧化菌对废水氨氮去除的影响 .....                                     | 刘志文, 陈琛, 彭晓春, 谢武明, 黄镇扬, 韩庆吉 (4601)                      |
| 海藻糖强化厌氧氨氧化耦合反硝化工艺处理高盐废水的脱氮除碳效能 .....                                  | 杨振琳, 于德爽, 李津, 王晓霞, 冯莉 (4612)                            |
| 低温下 A <sup>2</sup> /O-BAF 反硝化除磷脱氮特性 .....                             | 黄剑明, 赵智超, 郑隆举, 邵兆伟, 安芳娇, 陈永志 (4621)                     |
| O <sub>3</sub> -BAC 深度处理石化废水厂尾水的特性及菌群结构分析 .....                       | 张超, 单明皓, 许丹宁, 古明哲, 代蓓蓓, 纪轩, 孙井梅 (4628)                  |
| 基于 MBR 不同种泥短程硝化启动的微生物群落结构分析 .....                                     | 吴鹏, 陈亚, 张婷, 沈耀良, 徐乐中 (4636)                             |
| 3 种不同工艺切换下活性污泥菌群结构及代谢产物对污泥沉降性能的影响 .....                               | 温丹丹, 袁林江, 陈希, 王洋, 申童童, 刘小博 (4644)                       |
| 硫酸盐还原菌活性污泥胞外聚合物对环丙沙星的吸附机制 .....                                       | 张会群, 贾妍艳, 方荷婷, 阴琳婉, 吕慧 (4653)                           |
| 包埋活性污泥反硝化性能的快速提高及群落分析 .....                                           | 杨宏, 徐富, 孟琛, 苏姗, 袁星 (4661)                               |
| 中国粮食主产区耕地土壤重金属时空变化与污染源分析 .....                                        | 尚二萍, 许尔琪, 张红旗, 黄彩红 (4670)                               |
| 典型区土壤重金属空间插值方法与污染评价 .....                                             | 马宏宏, 余涛, 杨忠芳, 侯青叶, 曾庆良, 王锐 (4684)                       |
| 秸秆与化肥减量配施对菜地土壤温室气体排放的影响 .....                                         | 黄容, 高明, 黎嘉成, 徐国鑫, 吕盛, 罗梅 (4694)                         |
| 不同肥料施用对设施蔬菜地 NH <sub>3</sub> 挥发和 N <sub>2</sub> O 排放的影响 .....         | 山楠, 韩圣慧, 刘继培, 陈清, 袁玉玲, 王立刚, 李虎 (4705)                   |
| 施肥类型和水热变化对农田土壤氮素矿化及可溶性有机氮动态变化的影响 .....                                | 田飞飞, 纪鸿飞, 王乐云, 郑西来, 辛佳, 能惠 (4717)                       |
| 长期不同施肥量对全程氨氧化细菌丰度的影响 .....                                            | 王梅, 王智慧, 石孝均, 蒋先军 (4727)                                |
| 典型绿洲不同土壤类型有机碳含量及其稳定碳同位素分布特征 .....                                     | 陈新, 贡璐, 李杨梅, 安申群, 赵晶晶 (4735)                            |
| 凹凸棒石及其改性材料对土壤镉生物有效性的影响与机制 .....                                       | 陈展祥, 陈传胜, 陈卫平, 焦文涛 (4744)                               |
| 天然有机物活化过硫酸盐降解土壤有机污染物效果 .....                                          | 刘琼枝, 廖晓勇, 李尤, 龚雪刚, 曹红英, 罗俊鹏 (4752)                      |
| 水分管理和外源硒对水稻吸收累积铅的影响 .....                                             | 万亚男, 刘哲, Aboubacar Younoussa Camara, 余垚, 王琪, 李花粉 (4759) |
| 窖水中微生物降解污染物的关键细菌 .....                                                | 杨浩, 杨晓妮, 张国珍, 王宝山, 张翔, 李健 (4766)                        |
| 砷氧化菌对胡敏酸络合 As(III) 的氧化作用 .....                                        | 李泽姣, 崔岩山, 尹乃毅, 蔡晓琳, 都慧丽, 王鹏飞 (4778)                     |
| 海域高温油田 1 株耐高温耐盐硫酸盐还原菌的筛选与生理特性及活性抑制 .....                              | 杨春璐, 苑美玉, 史荣久, 闫鹏举, 赵峰, 韩斯琴, 张颖 (4783)                  |
| 1 株耐盐异养硝化-好氧反硝化菌 <i>Zobellella</i> sp. B307 的分离及脱氮特性 .....            | 白洁, 陈琳, 黄潇, 胡春辉, 赵阳国, 李岍然 (4793)                        |
| 1 株镰刀菌属 KY123915 的分离及其对 17 $\beta$ -雌二醇的降解特性 .....                    | 吴蔓莉, 祝长成, 祁燕云, 时艺馨, 徐会宁, 杨瑾如 (4802)                     |
| 氟喹诺酮对垂直流人工湿地性能及微生物群落的影响 .....                                         | 李新慧, 郑权, 李静, 王晓慧, 海热提 (4809)                            |
| 林可霉素菌渣堆肥微生物群落多样性分析 .....                                              | 任省涛, 郭夏丽, 芦阿度, 张倩倩, 郭笑盈, 王岩, 王连忠, 张宝宝 (4817)            |
| DEP 对蚯蚓抗氧化酶系的影响及 DNA 损伤 .....                                         | 平令文, 李现旭, 张翠, 宋佩佩, 王金花, 朱鲁生, 王军 (4825)                  |
| 生活垃圾焚烧灰灰矿物学特性及重金属分布 .....                                             | 李建陶, 曾鸣 (4834)                                          |
| 《环境科学》征订启事 (4429)      《环境科学》征稿简则 (4471)      信息 (4529, 4777, 4816)   |                                                         |

# 基于实测的建筑类涂料挥发性有机物 (VOCs) 含量水平及组分特征

高美平<sup>1</sup>, 邓子钰<sup>2</sup>, 聂磊<sup>1\*</sup>, 邵霞<sup>1</sup>, 安小栓<sup>1</sup>

(1. 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; 2. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048)

**摘要:** 选取内墙涂料、外墙涂料、防水涂料、地坪涂料、防腐涂料 5 类建筑涂料为研究对象, 通过对企业生产与市场销售的涂料抽检获取涂料样品, 利用国内建筑涂料挥发性有机化合物标准检测方法, 对其 VOCs 含量水平及组分特征进行检测。结果表明, 内墙涂料与外墙涂料 VOCs 含量水平分别处于  $0 \sim 145 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  与  $0 \sim 171 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  之间, 内墙面漆、内墙底漆、外墙面漆与外墙底漆符合 HJ 2537-2014 中 VOCs 含量限值的样品数分别占抽检样品总数的 90%、80%、96% 与 94%, VOCs 含量水平较低。90% 以上聚合物水泥防水涂料与丙烯酸酯聚合物乳液防水涂料 VOCs 含量水平都小于  $10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ , 聚氨酯防水涂料 VOCs 含量水平处于  $1 \sim 324 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  之间。溶剂型涂料 VOCs 含量水平总体很高, 溶剂型防腐涂料与溶剂型地坪涂料 VOCs 含量水平分别处于  $291 \sim 681 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  与  $16 \sim 580 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ , 不同成分与不同品牌溶剂型涂料 VOCs 含量水平有很大差异。水性建筑涂料中 VOCs 物种占比最高的是 1,2-丙二醇与乙二醇, 其次是甲醇与 2-氨基-2-甲基-1-丙醇, 不同品牌涂料使用的醇类物质种类与比例不同。溶剂型建筑涂料中 VOCs 物种主要包括甲苯、乙苯、间/邻/对二甲苯等芳香烃类, 乙酸乙酯、乙酸丁酯与乙酸异丁酯等酯类。

**关键词:** 建筑涂料; 实测; 挥发性有机物; 含量水平; 组分特征

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)10-4414-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201712038

## Content Levels and Compositions Characteristics of Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission from Architectural Coatings Based on Actual Measurement

GAO Mei-ping<sup>1</sup>, DENG Zi-yu<sup>2</sup>, NIE Lei<sup>1\*</sup>, SHAO Xia<sup>1</sup>, AN Xiao-shuan<sup>1</sup>

(1. Beijing Key Laboratory of Urban Atmospheric Volatile Organic Compounds Pollution Control and Application, Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection, Beijing 100037, China; 2. School of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

**Abstract:** The content levels and composition characteristics of Volatile Organic Compounds (VOCs) from architectural coatings including interior wall coatings, exterior wall coatings, waterproofing coatings, anticorrosive coatings and floor coatings were investigated in this study. Architectural coating samples were obtained from manufacturers and retail outlets and the associated VOC contents and compositions were determined based on the domestic standard methods for measurement of VOCs in architectural coatings. The results showed that the VOC contents were  $0 \sim 145 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  and  $0 \sim 171 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  for interior and exterior wall coatings respectively. The proportion of samples that met the standards of HJ 2537-2014 were 90%, 80%, 96% and 94% for interior wall finishing coats, interior wall primary coats, exterior wall finishing coats and exterior wall primary coats respectively. The VOC content was found to be less than  $10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  for more than 90% of polymer-cement based waterproof coatings and acrylate polymer emulsion waterproof coatings respectively, and  $1 \sim 324 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  for polyurethane waterproof coatings. The VOC contents for solvent-based coatings were found to be generally high, with VOC contents ranging from between  $291 \sim 681 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  and  $16 \sim 580 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  for solvent-based anticorrosive coatings and solvent-based floor coatings respectively, with great variation shown between different compositions and brands. The 1,2-propanediol and ethylene glycol were the most VOC in water-based coatings with methanol and 2-amino-2-methyl-1-propanol equal second. The main VOCs in solvent-based coatings were toluene, ethyl benzene, xylenes (total), ethyl acetate, butyl acetate and isobutyl acetate.

**Key words:** architectural coatings; actual measurement; volatile organic compounds (VOCs); content levels; composition characteristics

建筑涂料作为建筑工程与住宅装饰装修工程中使用相当广泛的建材之一, 近年来随着我国经济较快发展和城镇化水平不断提高, 住宅及其他施工面积高居不下, 对建筑涂料的需求量不断增加。据行

收稿日期: 2017-12-06; 修订日期: 2018-04-16

基金项目: 环境保护公益性行业科研专项(201509006)

作者简介: 高美平(1986~), 女, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为大气污染物控制, E-mail: gaomeiping@cee.cn

\* 通信作者, E-mail: nielei@cee.cn



业统计,我国建筑涂料总产量由 2006 年的 155.4 万 t 增加到 2016 年的 577 万 t,10 年间建筑涂料产量增长了 3.7 倍,其总体产量已居于全球前列,与美国、日本、德国等涂料生产大国相当<sup>[1]</sup>。建筑类涂料虽然一直在推进水性化,但溶剂型涂料仍有一定占比,溶剂型涂料在涂装过程中约有 50% 以上的 VOCs 排放到大气中<sup>[2]</sup>,其中含有对人体健康造成一定危害的苯、甲苯、乙苯、二甲苯、三甲苯、正十一烷、环己烷、丁醇、乙酸丁酯、丁酸丁酯等有毒有害物质。同时,一些化学反应活性较强的 VOCs 是臭氧和二次有机气溶胶形成的前体物,引发光化学烟雾污染与大气灰霾,增强温室效应<sup>[3~8]</sup>。

我国针对 VOCs 排放研究起步较晚,近年来国内研究机构和学者主要侧重对工业点源与移动源的源成分谱、排放清单、排放特征及排放源分配等进行了相应研究<sup>[9~22]</sup>,对餐饮生活面源也有研究<sup>[23,24]</sup>,但对其他生活面源研究较少。然而,美国的治理历程表明,随着机动车尾气污染控制及工业点源治理的推进,使得面源 VOCs 排放问题凸显并被逐渐重视。

与传统工业源可以通过末端治理技术实现 VOCs 减排不同,建筑涂料使用过程中排放源分散,建筑墙体必须在开放空间中涂装,涂装中产生的 VOCs 基本属于无组织排放,无任何末端治理技术,建筑涂料使用过程中 VOCs 排放量大,建筑涂料成为重要的 VOCs 排放源之一,但目前对建筑涂料的 VOCs 含量水平及组分特征的研究较少。

本研究针对 5 类建筑涂料各自特点,参考国内建筑涂料 VOCs 标准检测方法<sup>[25~30]</sup>,对各类建筑涂料 VOCs 含量水平及组分构成进行分析,以期核算建筑涂料 VOCs 排放量及建立建筑涂料 VOCs 排放清单提供技术支持。

## 1 建筑涂料生产概况

1996 年,国家统计局统计正式开始单独统计建筑涂料产量,当时统计范围是年主营业务收入 2000 万元及以上企业,2011 年之后国家统计局只提供全国规模以上涂料企业的涂料总产量,没有统计建筑涂料产量,建筑涂料的产量是由建材协会和涂料行业专家根据全国竣工建筑面积及相关数据测算,所以建筑涂料产量数据未包括年主营业务收入 2000 万元以下企业。2005~2015 年我国建筑涂料产量增长情况如图 1 所示,我国建筑涂料基本是国内自给自足的。

目前我国建筑涂料生产主要集中在经济发展较快的长三角与珠三角地区,具有一定规模和影响的生产企业大部分集中在上海、广东、湖南省份。2013 年我国各省份建筑涂料产量结构情况见图 2,其他省份是年产量小于 10 万 t 的一些省份产量总和,长三角和珠三角建筑涂料产量分别占全国总产量 36.9% 与 37.6%。

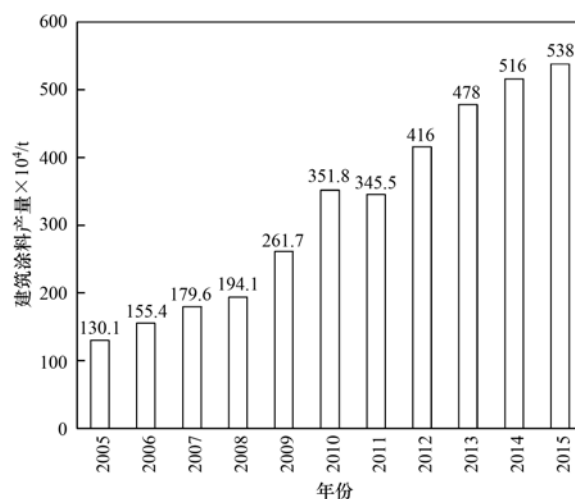


图 1 2005~2015 年我国建筑涂料产量

Fig. 1 Architectural coating production from 2005 to 2015 in China

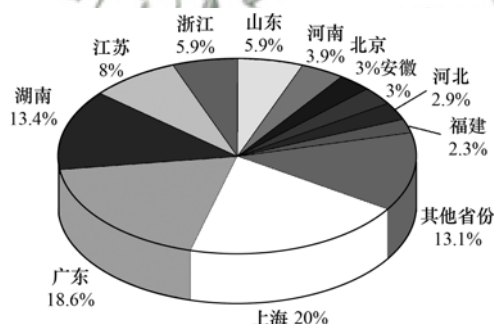


图 2 我国建筑涂料产量分布情况统计

Fig. 2 Statistics for architectural coating production in China

按 GB/T 2705-2003《涂料产品分类和命名》分类方法,建筑涂料包括墙面涂料(内墙涂料与外墙涂料)、防水涂料、地坪涂料、功能性建筑涂料(防火涂料、防腐涂料、防霉涂料、保温隔热涂料、其他功能性建筑涂料)四大类<sup>[31]</sup>。建筑涂料行业 VOCs 排放来源包括建筑涂料生产、储运销与使用过程这 3 个环节,使用过程 VOCs 排放量最大。溶剂型涂料 VOCs 通常包括甲苯、乙苯、间/对/邻二甲苯、乙酸乙酯、乙酸丁酯、乙酸异丁酯等,水性涂料常用 VOCs 包括乙醇、乙二醇、丙二醇、正丁醇、异丁醇、乙二醇单丁醚、碳酸二甲酯、乙酸甲酯及其他醇醚类物质与酯类。



2 材料与方法

2.1 样品采集

涂料样品是通过对企业抽检与市场销售抽检获取,见表1. 墙体涂料、防水涂料与防腐涂料通过市场销售抽检,地坪涂料属于工业涂料产品,不属于消费品,市场上无销售,需通过对生产企业抽检获取,抽检样品密封在塑料或玻璃容器中,采用气相色谱仪与烘箱进行分析.

为使抽检涂料有代表性,选取样品遵循以下原则:对市场抽检的墙体、防水与防腐涂料,选取国际、国内全国性、国内地方性品牌,每个品牌选取不同档次与不同功能的样品,销售企业规模选择了高档建材超市、建材批发市场与个人销售点;对企业抽检的地坪涂料,尽量抽查企业的主导产品.

表 1 抽检建筑涂料基本信息

| Table 1 Basic information about sampling architectural coatings |           |       |          |
|-----------------------------------------------------------------|-----------|-------|----------|
| 涂料类别                                                            | 涂料小类      | 分散介质  | 抽检样品数量/个 |
| 内墙涂料                                                            | 面漆        | 水性    | 63       |
|                                                                 | 底漆        | 水性    | 35       |
|                                                                 | 腻子        | 水性    | 8        |
| 外墙涂料                                                            | 面漆        | 水性    | 24       |
|                                                                 | 底漆        | 水性    | 15       |
| 防水涂料                                                            | 聚合物水泥防水涂料 | 水性    | 49       |
|                                                                 | 丙烯酸防水涂料   | 水性    | 15       |
|                                                                 | 聚氨酯防水涂料   | 反应固化型 | 56       |
| 防腐涂料                                                            |           | 水性    | 5        |
|                                                                 |           | 溶剂型   | 19       |
|                                                                 |           | 水性    | 4        |
| 地坪涂料                                                            |           | 无溶剂型  | 38       |
|                                                                 |           | 溶剂型   | 23       |

2.2 样品分析

水性内墙涂料、水性外墙涂料、水性防水涂料与水性防腐涂料中 VOCs 的检测按照 GB 18582-2008 附录 A 与附录 B 的方法进行测试.

反应型防水涂料中 VOCs 的检测按照 JC 1066-2008 附录 A 的方法进行测试.

溶剂型防腐涂料中 VOCs 的检测按照 GB 30981-2014 附录 A 的方法进行测试.

地坪涂料中 VOCs 的检测按照 GB/T 22374-2008 的方法进行测试.

3 结果与讨论

3.1 建筑涂料 VOCs 含量水平

3.1.1 内墙涂料 VOCs 含量水平

由于目前国内内墙涂料生产技术可以实现零

VOCs, 只是成本相对较高, 因此市售水性内墙涂料的使用已基本达到 100%, 本次抽检内墙涂料全部为水性. 水性内墙面漆共抽检 63 个样品, VOCs 含量处于 0 ~ 145 g·L<sup>-1</sup>, VOCs 含量 ≤ 2 g·L<sup>-1</sup> 检出限与 2 ~ 80 g·L<sup>-1</sup> 样品数最多, 分别占抽检样品总数的 22% 与 68%, 符合 HJ 2537-2014<sup>[32]</sup> 与 GB 18582-2008 VOCs 含量限值的样品数分别占样品总数的 90% 与 97%, 有 2 个样品超出国家标准 GB 18582-2008 含量限值. 水性内墙底漆共抽检 35 个样品, VOCs 含量为 0 ~ 84 g·L<sup>-1</sup>, VOCs 含量 2 ~ 50 g·L<sup>-1</sup> 的样品数最多, 占样品总数的 74%, 符合 HJ 2537-2014 与 GB 18582-2008 中 VOCs 含量限值的样品数分别占样品总数的 80% 与 100%. 从表 2 及抽检结果可知, 水性内墙面漆与底漆的 VOCs 含量总体差异不大, 但是不同品牌内墙涂料 VOCs 含量相差较大. 将近 100% 的内墙涂料满足 GB 18582-2008 中 VOCs 含量限值要求, 国家标准限值相对宽松. 腻子粉 VOCs 含量很低, 检测的 8 个腻子 VOCs 含量均处于 0 ~ 2 g·kg<sup>-1</sup> 之间. 乳胶漆主要以合成树脂乳液为成膜物质, 以水为分散介质, 再加入适当颜料、填料及各种助剂加工而成, 乳胶漆中 VOCs 主要来源于防冻剂、成膜助剂和防腐杀菌剂、pH 调节剂等助剂, 开发低 VOCs 内墙乳胶漆是近年来乳胶漆发展方向, 因此在乳液、颜填料、助剂方面的选择都考虑降低 VOCs, 加之为降低 VOCs, 逐渐用高沸点有机溶剂替代沸点低于 250℃ 的有机溶剂 (我国通常将涂料产品中 VOCs 定义为常压下初沸点不高于 250℃ 的有机化合物<sup>[33]</sup>), 因此内墙涂料 VOCs 含量水平总体较低. 尽管内墙涂料 VOCs 含量不高, 但其使用量很大, VOCs 总排放量大. 市场上抽检内墙涂料 VOCs 含量水平检验结果汇总分析见表 2.

3.1.2 外墙涂料 VOCs 含量水平

市场上抽检外墙涂料全部为水性, 没有抽检到溶剂型, 由于目前水性外墙涂料使用比例达到 90% 以上, 特殊场合使用的溶剂型外墙涂料先在工厂预涂后安装, 建筑施工现场基本不使用溶剂型外墙涂料. 水性外墙面漆共抽检 24 个样品, VOCs 含量处于 0 ~ 104 g·L<sup>-1</sup> 之间, 符合 HJ 2537-2014 与 GB 24408-2009 VOCs 含量限值的样品数占样品总数的 96% 与 100%. 水性外墙底漆共抽检 15 个, VOCs 含量处于 0 ~ 171 g·L<sup>-1</sup>, 94% 的样品符合 HJ 2537-2014 与 GB 24408-2009 VOCs 含量限值要求, 有 1 个涂料样品超出了国家标准 GB 24408-2009 含量限

值. 从表 3 可以看出, 水性外墙面漆与底漆 VOCs 含量也相差不大. 由于水性内墙与外墙涂料都是乳胶漆, 主要成分相差不大, VOCs 含量水平也相差不多. 建筑外墙涂料使用量很大, 虽然其 VOCs 含量水平不高, 但排放量大. 市场上抽检外墙涂料 VOCs 含量水平检验结果汇总分析见表 3.

表 2 内墙涂料 VOC 含量水平检验结果汇总情况

Table 2 Statistics for the VOC content of interior wall coatings

| 涂料类别   | 样品总数 | 统计指标<br>(扣除水分)<br>/g·L <sup>-1</sup> | 达到统计指标的<br>样品数/个 | 达到统计指标的<br>样品数占总<br>样品数的比例/% | 标准 VOCs 含量限值                               |
|--------|------|--------------------------------------|------------------|------------------------------|--------------------------------------------|
| 水性内墙面漆 | 63   | ≤2                                   | 14               | 22                           | GB 18582-2008 检测方法检出限为 2 g·L <sup>-1</sup> |
|        |      | 2 ~ 8 080                            | 43               | 68                           | HJ 2537-2014 含量限值为 80 g·L <sup>-1</sup>    |
|        |      | 80 ~ 120                             | 4                | 7                            | GB 18582-2008 含量限值为 120 g·L <sup>-1</sup>  |
|        |      | > 120                                | 2                | 3                            |                                            |
| 水性内墙底漆 | 35   | ≤2                                   | 2                | 6                            | GB 18582-2008 检测方法检出限为 2 g·L <sup>-1</sup> |
|        |      | 2 ~ 50                               | 26               | 74                           | HJ 2537-2014 含量限值为 50 g·L <sup>-1</sup>    |
|        |      | 50 ~ 120                             | 7                | 20                           | GB 18582-2008 含量限值为 120 g·L <sup>-1</sup>  |
|        |      | > 120                                | 0                | 0                            |                                            |
| 腻子     | 8    | ≤2 g·kg <sup>-1</sup>                | 8                | 100                          | HJ 2537-2014 含量限值为 10 g·kg <sup>-1</sup>   |

表 3 外墙涂料 VOC 含量水平检验结果汇总情况

Table 3 Statistics for the VOC content of exterior wall coatings

| 涂料类别   | 样品总数 | 统计指标<br>(扣除水分)<br>/g·L <sup>-1</sup> | 达到统计指标的<br>样品数/个 | 达到统计指标的<br>样品数占总<br>样品数的比例/% | 标准 VOCs 含量限值                              |
|--------|------|--------------------------------------|------------------|------------------------------|-------------------------------------------|
| 水性外墙面漆 | 24   | ≤2                                   | 9                | 38                           |                                           |
|        |      | 2 ~ 100                              | 14               | 58                           | HJ 2537-2014 含量限值为 100 g·L <sup>-1</sup>  |
|        |      | 100 ~ 150                            | 1                | 4                            | GB 24408-2009 含量限值为 150 g·L <sup>-1</sup> |
|        |      | > 150                                | 0                | 0                            |                                           |
| 水性外墙底漆 | 15   | ≤2                                   | 4                | 27                           |                                           |
|        |      | 2 ~ 80                               | 10               | 67                           | HJ 2537-2014 含量限值为 80 g·L <sup>-1</sup>   |
|        |      | 80 ~ 120                             | 0                | 0                            | GB 24408-2009 含量限值为 120 g·L <sup>-1</sup> |
|        |      | > 120                                | 1                | 6                            |                                           |

3.1.3 防水涂料 VOCs 含量水平

聚氨酯防水涂料具有强度高、延伸率大、耐水性能好等特点, 常用于地下室、泳池、高铁桥梁等长期浸水地方起防护作用, 聚合物水泥防水涂料与丙烯酸酯聚合物乳液防水涂料适用于非暴露露台、厕浴间及外墙的防水, 这 3 种防水涂料占市场主流, 因此主要抽检这 3 类防水涂料. 聚合物水泥防水涂料与丙烯酸酯聚合物乳液防水涂料分别抽检 49 个与 15 个, VOCs 含量都很低, VOCs 含量 ≤ 2 g·L<sup>-1</sup> 检出限样品数分别占样品总数的 47% 与 67%, 90% 以上样品符合 HJ 457-2009 含量限值要求. 聚氨酯防水涂料抽检 56 个样品, VOCs 含量处于 1 ~ 324 g·L<sup>-1</sup> 之间, VOCs 含量处于 0 ~ 50、50 ~ 100 与 100 ~ 200 g·L<sup>-1</sup> 的样品数分别占样品总数的 36%、16% 与 39%, 5 个样品超出标准 JC 1066-2008 含量限值, 大部分企业生产的聚氨酯防水涂料 VOCs 含量水平处于 100 ~ 200 g·L<sup>-1</sup>, 因为进一步降低聚氨酯防水涂料 VOCs 含量意味着减少有机溶

剂添加量, 引起涂料粘度增加会影响使用性能与施工, 且增加成本, 聚氨酯防水涂料为防水涂料 VOCs 排放的主要来源. 市场上抽检防水涂料 VOCs 含量水平检验结果汇总分析见表 4.

3.1.4 防腐涂料 VOCs 含量水平

水性与溶剂型防腐涂料分别抽检 5 个与 19 个, 水性防腐涂料 VOCs 含量水平为 0 ~ 66 g·L<sup>-1</sup>, 溶剂型防腐涂料 VOCs 含量水平为 291 ~ 681 g·L<sup>-1</sup>. 溶剂型防腐涂料 VOCs 含量很高, VOCs 含量为 600 ~ 700 g·L<sup>-1</sup> 的涂料样品占样品总数的 47%, 不同成分溶剂型防腐涂料 VOCs 含量水平差别较大, 硝基漆 VOCs 含量较高, 醇酸漆 VOCs 含量较低, 且不同品牌相同成分溶剂型涂料 VOCs 含量也有较大差别. 水性防腐涂料虽然可以大幅度降低 VOCs 含量, 但受干燥速度、防腐性能等影响, 溶剂型防腐涂料使用比例仍高于水性防腐涂料, 溶剂型是防腐涂料 VOCs 排放主要来源. 市场上抽检防腐涂料 VOCs 含量水平检验结果汇总分析见表 5.

表 4 防水涂料 VOC 含量水平检验结果汇总情况  
Table 4 Statistics for the VOC content of waterproof coatings

| 涂料类别         | 样品总数<br>/个 | 统计指标<br>(水性涂料扣除水分)<br>/g·L <sup>-1</sup> | 达到统计指标<br>的样品数/个 | 达到统计指标<br>的样品数占总<br>样品数的比例/% | 标准 VOCs 含量限值                             |
|--------------|------------|------------------------------------------|------------------|------------------------------|------------------------------------------|
| 聚合物水泥防水涂料    | 49         | ≤2                                       | 23               | 47                           | HJ 457-2009 含量限值为 10 g·L <sup>-1</sup>   |
|              |            | 2~10                                     | 24               | 49                           |                                          |
|              |            | >10                                      | 2                | 4                            |                                          |
| 丙烯酸聚合物乳液防水涂料 | 15         | ≤2                                       | 10               | 67                           | HJ 457-2009 含量限值为 10 g·L <sup>-1</sup>   |
|              |            | 2~10                                     | 4                | 27                           |                                          |
|              |            | >10                                      | 1                | 6                            |                                          |
| 聚氨酯防水涂料      | 56         | 0~50                                     | 20               | 36                           | JC1066-2008 A 级含量限值 50 g·L <sup>-1</sup> |
|              |            | 50~100                                   | 9                | 16                           | HJ 457-2009 含量限值为 100 g·kg <sup>-1</sup> |
|              |            | 100~200                                  | 22               | 39                           | JC1066-2008 B 级含量限值 50 g·L <sup>-1</sup> |
|              |            | >200                                     | 5                | 9                            |                                          |

表 5 防腐涂料 VOCs 含量水平检验结果汇总情况  
Table 5 Statistics for the VOC content of anticorrosive coatings

| 涂料类别    | 样品总数<br>/个 | 统计指标<br>(水性涂料扣除水分)<br>/g·L <sup>-1</sup> | 达到统计指标<br>的样品数/个 | 达到统计指标<br>的样品数占总<br>样品数的比例/% |
|---------|------------|------------------------------------------|------------------|------------------------------|
| 水性防腐涂料  | 5          | ≤2                                       | 1                | 20                           |
|         |            | 2~70                                     | 4                | 80                           |
| 溶剂型防腐涂料 | 19         | 200~400                                  | 2                | 11                           |
|         |            | 400~500                                  | 7                | 37                           |
|         |            | 500~600                                  | 1                | 5                            |
|         |            | 600~700                                  | 9                | 47                           |

3.1.5 地坪涂料 VOCs 含量水平

地坪涂料共抽检 65 个,水性、无溶剂型与溶剂型地坪涂料分别抽检 4 个、38 个与 23 个,VOCs 含量处于 104~116、3~60 与 16~580 g·L<sup>-1</sup>,抽检的水性与无溶剂型地坪涂料都满足 GB/T 22374-2008 的 VOCs 限量指标要求,且水性地坪涂料 VOCs 含量都接近该标准限量要求,有 3 个溶剂型地坪涂料

超出 GB/T 22374-2008 限量指标.溶剂型地坪涂料 VOCs 含量水平总体很高,实际应用中,由于水性地坪涂料对环境要求苛刻,普遍应用无溶剂型与溶剂型地坪涂料,尤其底漆与面漆仍以溶剂型为主,溶剂型是地坪涂料 VOCs 排放主要来源.对企业抽检地坪涂料 VOCs 含量水平检验结果汇总分析见表 6.

表 6 地坪涂料 VOC 含量水平检验结果汇总情况  
Table 6 Statistics for the VOC content of floor coatings

| 涂料类别     | 样品总数<br>/个 | 统计指标<br>(水性涂料扣除水分)<br>/g·L <sup>-1</sup> | 达到统计指标<br>的样品数/个 | 达到统计指标的<br>样品数占总样<br>品数的比例/% | 标准 VOCs 含量限值                                |
|----------|------------|------------------------------------------|------------------|------------------------------|---------------------------------------------|
| 水性地坪涂料   | 4          | ≤100                                     | 0                | 0                            | GB/T 22374-2008 含量限值为 120 g·L <sup>-1</sup> |
|          |            | 100~120                                  | 4                | 100                          |                                             |
| 无溶剂型地坪涂料 | 38         | 0~30                                     | 20               | 53                           | GB/T 22374-2008 含量限值为 60 g·L <sup>-1</sup>  |
|          |            | 30~60                                    | 18               | 47                           |                                             |
|          |            | 0~50                                     | 3                | 13                           |                                             |
|          |            | 50~200                                   | 5                | 22                           |                                             |
| 溶剂型地坪涂料  | 23         | 200~300                                  | 2                | 8                            | GB/T 22374-2008 含量限值为 500 g·L <sup>-1</sup> |
|          |            | 300~400                                  | 5                | 22                           |                                             |
|          |            | 400~500                                  | 5                | 22                           |                                             |
|          |            | 500~600                                  | 3                | 13                           |                                             |



### 3.1.6 建筑涂料 VOCs 含量构成分析

内墙和外墙涂料 VOCs 含量处于  $0 \sim 2$ 、 $2 \sim 30$ 、 $30 \sim 50$ 、 $50 \sim 80 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  的样品数最多, 内墙涂料分别占样品总数的 23%、27%、34% 与 9%, 外墙涂料分别占样品总数的 33%、26%、13% 与 18%。防水涂料 VOCs 含量处于  $0 \sim 2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  样品数占样品总数的 29%, 主要是水性聚合物水泥防水涂料与丙烯酸酯聚合物乳液防水涂料, VOCs 含量大于  $30 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  样品数占样品总数的 35%, 主要是反应固化型聚氨酯防水涂料。地坪涂料 VOCs 含量处于  $2 \sim 50 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  的样品数占样品总数 48%, 主要是无溶剂型地坪涂料, VOCs 含量大于  $50 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  样品数占样品总数 52%, 主要是水性与溶剂型地坪涂料。防腐涂料 VOCs 含量大于  $150 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  样品数占样品总数 79%, 主要是溶剂型防腐涂料。对于抽检内墙、外墙、防水、地坪与防腐五类涂料中, VOCs 含量大于  $150 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  的涂料样品占比逐渐增加, 尤其防腐涂料的占比最大, 造成上述现象的原因是内墙与外墙涂料全部为水性涂料, 93% 内墙涂料与 90% 外墙涂料 VOCs 含量水平处于  $0 \sim 80 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ , 大于  $80 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  涂料很少, 而溶剂型地坪涂料与溶剂型防腐涂料 VOCs 含量都很高。四类涂料 VOCs 含量水平构成如图 3 所示。

### 3.2 建筑涂料 VOCs 组分特征

水性内墙与外墙涂料检测出 VOCs 物种主要包括: 甲醇、乙醇、乙二醇、1,2-丙二醇、正丁醇、异丁醇、二乙二醇、2-氨基-2-甲基-1-丙醇、2,2,4-三

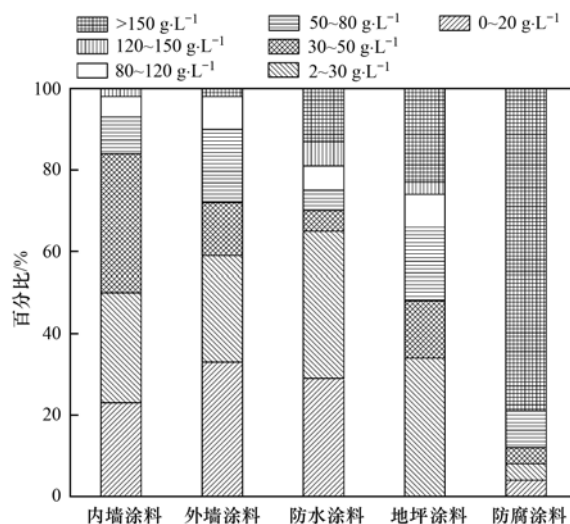


图3 建筑涂料 VOCs 含量水平构成

Fig. 3 VOCs content level for architectural coatings

甲基-1,3-戊二醇等醇类, 乙二醇单丁醚等醇醚类, 碳酸二甲酯, 二乙二醇乙醚醋酸酯、二乙二醇丁醚醋酸酯等醇酯类(图4)。其中 VOCs 含量占比高且使用频率高的是 1,2-丙二醇与乙二醇, 其次是甲醇与 2-氨基-2-甲基-1-丙醇, 不同品牌涂料使用的醇类物质种类与比例有所不同。因为 1,2-丙二醇与乙二醇等二醇类溶剂是乳胶漆中常用防冻剂, 赋予涂料耐冻融稳定性<sup>[34]</sup>, 乳胶漆中 VOCs 最主要来源。2-氨基-2-甲基-1-丙醇(AMP-95)是一种常用多功能胺助剂, 用于调节胶乳聚合物体系 pH 值; 醇、醇酯、醇醚类溶剂是传统的水性涂料成膜助剂, 在涂膜干燥过程中, 水分挥发后余下的成膜助剂使聚合物溶解并融合成连续的膜, 改善成膜性能。

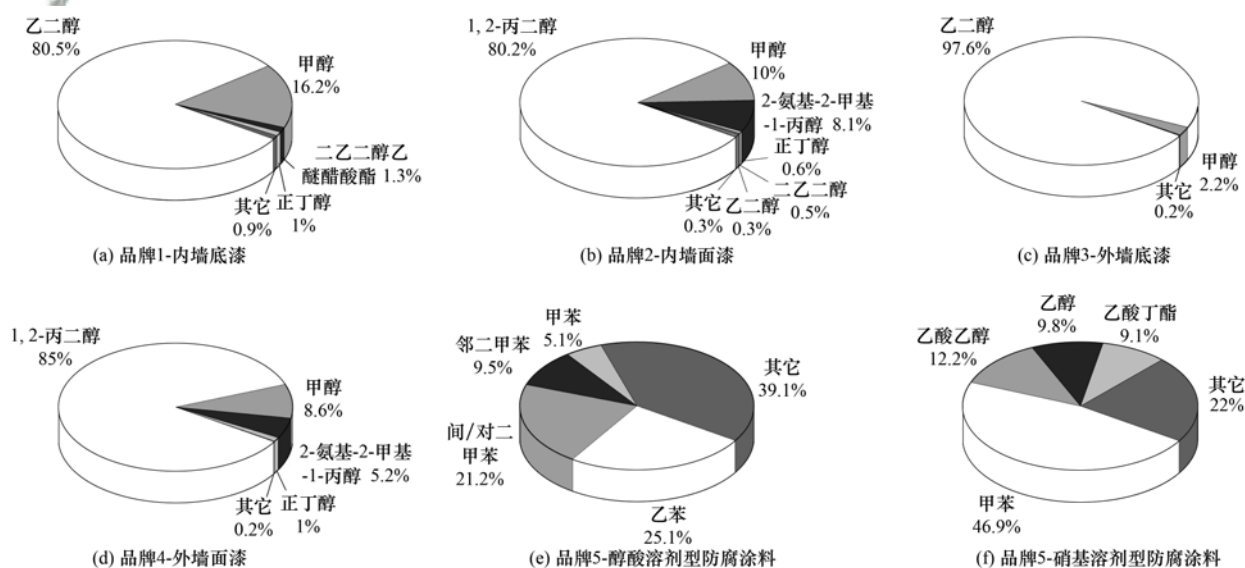


图4 建筑涂料 VOCs 物种构成

Fig. 4 VOCs composition in architectural coatings

醇酸与硝基溶剂型防腐涂料检出 VOCs 物种主要包括: 甲苯、乙苯、间/邻/对二甲苯等芳香烃类; 乙酸乙酯、乙酸丁酯与乙酸异丁酯等酯类; 乙醇。因为甲苯、二甲苯与溶剂油是醇酸树脂涂料中常用溶剂, 酯类也是涂料中常用有机溶剂。其它物质是指出现了标准化合物之外的未知化合物色谱峰, 假设其相对于内标物的校正因子为 1 定量, 如图 4 所示。

#### 4 结论

(1) 抽检水性内墙与外墙涂料中, 内墙涂料与外墙涂料 VOCs 含量分别处于  $0 \sim 145 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  与  $0 \sim 171 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。内墙面漆、内墙底漆、外墙面漆与外墙底漆符合 HJ 2537-2014 VOCs 含量限值的样品数分别占抽检样品总数的 90%、80%、96% 和 94%。腻子粉 VOCs 含量水平很低, 抽检的所有腻子样品 VOCs 含量为  $1 \sim 2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。内墙与外墙涂料 VOCs 含量水平总体不高, 但其使用量很大, VOCs 总排放量较大。

(2) 抽检防水涂料中, 90% 以上聚合物水泥防水涂料与丙烯酸酯聚合物乳液防水涂料 VOCs 含量水平都小于  $10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。聚氨酯防水涂料 VOCs 含量水平处于  $1 \sim 324 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  之间。

(3) 抽检防腐涂料与地坪涂料中, 水性防腐涂料、水性地坪涂料与无溶剂型地坪涂料 VOCs 含量水平较低, 都低于  $120 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。但是, 溶剂型防腐涂料与溶剂型地坪涂料 VOCs 含量水平总体很高, 溶剂型防腐涂料 VOCs 含量水平处于  $291 \sim 681 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ , 溶剂型地坪涂料 VOCs 含量水平为  $16 \sim 580 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ , 不同成分与不同品牌溶剂型涂料 VOCs 含量水平相差较大。尽管溶剂型地坪涂料与溶剂型防腐涂料使用量比内外墙涂料小, 但其 VOCs 含量大, VOCs 排放量不容忽视, 且有降低空间, 应是重点管控对象。

(4) 水性建筑涂料中 VOCs 物种含量占比最高的是 1,2-丙二醇与乙二醇, 其次是甲醇与 2-氨基-2-甲基-1-丙醇, 不同品牌涂料使用的醇类物质种类与比例不同。溶剂型建筑涂料中 VOCs 物种主要包括: 甲苯、乙苯、二甲苯(间/邻/对二甲苯)等芳香烃类; 乙酸乙酯、乙酸丁酯与乙酸异丁酯等酯类。

#### 参考文献:

- [1] 林宜益. 2016 年建筑涂料现状和 2017 年发展趋势[J]. 中国涂料, 2017, **32**(3): 27-30, 37.  
Lin X Y. Current situation of architectural coatings in 2016 and development trend in 2017[J]. China Coatings, 2017, **32**(3): 27-30, 37.
- [2] 赵建国, 杨利娟, 陈晓珊, 等. 美国涂料行业 VOC 污染控制政策与技术研究[J]. 涂料工业, 2012, **42**(2): 44-48, 52.  
Zhao J G, Yang L X, Chen X S, *et al.* Study of American regulations and technologies for VOC control in coating Industry [J]. Paint & Coatings Industry, 2012, **42**(2): 44-48, 52.
- [3] Wu X X, Lu Y M, Zhou S, *et al.* Impact of climate change on human infectious diseases: empirical evidence and human adaptation[J]. Environment International, 2016, **86**: 14-23.
- [4] An T C, Huang Y, Li G Y, *et al.* Pollution profiles and health risk assessment of VOCs emitted during e-waste dismantling processes associated with different dismantling methods [J]. Environment International, 2014, **73**: 186-194.
- [5] Huang R J, Zhang Y L, Bozzetti C, *et al.* High secondary aerosol contribution to particulate pollution during haze events in China[J]. Nature, 2014, **514**(7521): 218-222.
- [6] McNeill V F. Aqueous organic chemistry in the atmosphere: sources and chemical processing of organic aerosols [J]. Environmental Science & Technology, 2015, **49**(3): 1237-1244.
- [7] Guo S, Hu M, Zamora M L, *et al.* Elucidating severe urban haze formation in China[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2014, **111**(49): 17373-17378.
- [8] Millet D B, Baasandorj M, Hu L, *et al.* Nighttime chemistry and morning isoprene can drive urban ozone downwind of a major deciduous forest [J]. Environmental Science & Technology, 2016, **50**(8): 4335-4342.
- [9] Wei W, Chen S Y, Li G H, *et al.* Characteristics of volatile organic compounds (VOCs) emitted from a petroleum refinery in Beijing, China[J]. Atmospheric Environment, 2014, **89**: 358-366.
- [10] Yue T T, Yue X, Chai F H, *et al.* Characteristics of volatile organic compounds (VOCs) from the evaporative emissions of modern passenger cars [J]. Atmospheric Environment, 2017, **151**: 62-69.
- [11] Cao X Y, Yao Z L, Shen X B, *et al.* On-road emission characteristics of VOCs from light-duty gasoline vehicles in Beijing, China[J]. Atmospheric Environment, 2016, **124**: 146-155.
- [12] Wang D, Nie L, Shao X, *et al.* Exposure profile of volatile organic compounds receptor associated with paints consumption [J]. Science of the Total Environment, 2017, **603-604**: 57-65.
- [13] 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.
- [14] Qiu K Q, Yang L X, Lin J M, *et al.* Historical industrial emissions of non-methane volatile organic compounds in China for the period of 1980-2010 [J]. Atmospheric Environment, 2014, **86**: 102-112.
- [15] Yang X F, Liu H A, Cui H Y, *et al.* Vehicular volatile organic compounds losses due to refueling and diurnal process in China: 2010-2050 [J]. Journal of Environmental Sciences, 2015, **33**: 88-96.
- [16] Huang C, Chen C H, Li L, *et al.* Emission inventory of

- anthropogenic air pollutants and VOC species in the Yangtze River Delta region, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, **11**(9): 4105-4120.
- [17] 李国昊, 魏巍, 魏峰, 等. 夏秋季节焦化厂附近大气中臭氧及其前体物变化特征和臭氧生成潜势分析[J]. *环境工程学报*, 2014, **8**(3): 1130-1138.
- Li G H, Wei W, Wei F, *et al.* Diurnal variations of ozone and its precursors and ozone formation potential of VOCs at the boundary of a coking plant during summer and autumn [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2014, **8**(3): 1130-1138.
- [18] 肖景方, 叶代启, 刘巧, 等. 消费电子产品生产过程中挥发性有机物(VOCs)排放特征的研究[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(6): 1612-1619.
- Xiao J F, Ye D Q, Liu Q, *et al.* Emission characteristics of volatile organic compounds (VOCs) from the manufacturing process of consumer electronic products [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(6): 1612-1619.
- [19] 黄玉虎, 常耀卿, 任碧琪, 等. 北京市1990-2030年加油站汽油VOCs排放清单[J]. *环境科学研究*, 2016, **29**(7): 945-951.
- Huang Y H, Chang Y Q, Ren B Q, *et al.* Emissions inventory of gasoline VOCs from service stations in Beijing from 1990 to 2030 [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, **29**(7): 945-951.
- [20] 李国昊, 魏巍, 程水源, 等. 炼焦过程VOCs排放特征及臭氧生成潜势[J]. *北京工业大学学报*, 2014, **40**(1): 91-99.
- Li G H, Wei W, Cheng S Y, *et al.* Emission characterization and ozone formation potential of VOCs during the coking process [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2014, **40**(1): 91-99.
- [21] 何华飞, 王浙明, 许明珠, 等. 制药行业VOCs排放特征及控制对策研究——以浙江为例[J]. *中国环境科学*, 2012, **32**(12): 2271-2277.
- He H F, Wang Z M, Xu M Z, *et al.* Studies on the emission characteristics and countermeasures of VOCs from pharmaceutical industry-Based on Zhejiang Province [J]. *China Environmental Science*, 2012, **32**(12): 2271-2277.
- [22] 王宇楠, 叶代启, 林俊敏, 等. 漆包线行业挥发性有机物(VOCs)排放特征研究[J]. *中国环境科学*, 2012, **32**(6): 980-987.
- Wang Y N, Ye D Q, Lin J M, *et al.* A study on emission characteristics of volatile organic compounds (VOCs) from enameled wire industry [J]. *China Environmental Science*, 2012, **32**(6): 980-987.
- [23] Cheng S Y, Wang G, Lang J L, *et al.* Characterization of volatile organic compounds from different cooking emissions [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **145**: 299-307.
- [24] Wang L N, Xiang Z Y, Stevanovic S, *et al.* Role of Chinese cooking emissions on ambient air quality and human health [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **589**: 173-181.
- [25] GB 18582-2008, 室内装饰装修材料内墙涂料中有害物质限量[S].
- GB 18582-2008, Indoor decorating and refurbishing materials-Limit of harmful substances of interior architectural coatings[S].
- [26] GB 24408-2009, 建筑用外墙涂料中有害物质限量[S].
- GB 24408-2009, Limit of harmful substances of exterior wall coatings[S].
- [27] JC 1066-2008, 建筑防水涂料中有害物质限量[S].
- JC 1066-2008, Limit of harmful substances of building waterproof coatings[S].
- [28] GB/T 22374-2008, 地坪涂装材料[S].
- GB/T 22374-2008, Floor coatings[S].
- [29] GB 18581-2001, 室内装饰装修材料溶剂型木器涂料中有害物质限量[S].
- GB 18581-2001, Indoor decorating and refurbishing materials-Limit of harmful substances of solvent based coatings for woodenware[S].
- [30] GB 30981-2014, 建筑钢结构防腐涂料中有害物质限量[S].
- GB 30981-2014, Limit of harmful substances of anticorrosion coatings for construction steel structure[S].
- [31] GB/T 2705-2003, 涂料产品分类和命名[S].
- GB/T 2705-2003, Classification and nomenclature for coating products[S].
- [32] HJ 2537-2014, 环境标志产品技术要求水性涂料[S].
- HJ 2537-2014, Technical requirement for environmental labeling products Water based coatings[S].
- [33] 魏争, 黄洪. 涂料中VOC测试方法简述[J]. *涂料技术与文摘*, 2009, **30**(2): 11-13.
- Wei Z, Huang H. Testing method of VOC in coatings [J]. *Coatings Technology & Abstracts*, 2009, **30**(2): 11-13.
- [34] 刘薇薇, 江庆梅, 张心亚, 等. 超低VOC建筑内墙乳胶漆的配方设计[J]. *河南化工*, 2006, **23**(11): 5-7.
- Liu W W, Jiang Q M, Zhang X Y, *et al.* Formulation design of zero VOC latex paint for interior wall [J]. *Henan Chemical Industry*, 2006, **23**(11): 5-7.



## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                                             |                                                                        |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| Ratios of Volatile Organic Compounds in Ambient Air of Various Cities of China .....                                                                                                                        | WANG Ming, CHEN Wen-tai, LU Si-hua, <i>et al.</i> (4393)               |
| Temporal Variation, Spatial Distribution, and Reactivity Characteristics of Air VOCs in Beijing 2015 .....                                                                                                  | ZHANG Bo-tao, AN Xin-xin, WANG Qin, <i>et al.</i> (4400)               |
| Research and Application of the Technical Method for the Compilation of VOCs Emission Inventories from Architectural Coatings in Beijing .....                                                              | DENG Zi-yu, GAO Mei-ping, WANG Qing-wei, <i>et al.</i> (4408)          |
| Content Levels and Compositions Characteristics of Volatile Organic Compounds(VOCs) Emission from Architectural Coatings Based on Actual Measurement .....                                                  | GAO Mei-ping, DENG Zi-yu, NIE Lei, <i>et al.</i> (4414)                |
| Characteristics of Primary Pollutants of Air Quality in Cities Along the Taihang Mountains in Beijing-Tianjin-Hebei Region During 2014-2016 .....                                                           | WANG Xiao-yan, WANG Shuai, ZHU Li-li, <i>et al.</i> (4422)             |
| Seasonal Variation and Source Analysis for PM <sub>2.5</sub> , PM <sub>1</sub> and Their Carbonaceous Components in Beijing .....                                                                           | FAN Xiao-chen, LANG Jian-lei, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (4430)    |
| Chemical Constitution and Carbon Isotopic Compositions of PM <sub>2.5</sub> in the Northern Suburb of Nanjing in Spring .....                                                                               | ZHOU Yi-ming, HAN Xun, WANG Jin-jin, <i>et al.</i> (4439)              |
| Analysis of Non-polar Organic Compounds in PM <sub>2.5</sub> by Rapid Thermo-desorption Method Coupled with GC/MS .....                                                                                     | MA Ying-ge, WU Xia, PENG Meng-meng, <i>et al.</i> (4446)               |
| Association Between Fine Particulate Matter and Asthma Hospital Outpatient Visits in Hangzhou .....                                                                                                         | WANG An-xu, CHEN Xi, SONG Cong-bo, <i>et al.</i> (4457)                |
| Hybrid Electric Bus SCR System Operation and NO <sub>x</sub> Emission Characteristics Based on Remote Communication Technology .....                                                                        | YANG Qiang, HU Qing-yao, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (4463)             |
| Selection of Priority Contaminants in a Watershed Using Risk Ranking Methodology .....                                                                                                                      | LI Qi-feng, LÜ Yong-long, WANG Pei, <i>et al.</i> (4472)               |
| Characteristics and Sources of Atmospheric Inorganic Nitrogen Wet Deposition in Xueyu Cave Watershed, Outer Suburbs of Chongqing City .....                                                                 | DUAN Shi-hui, JIANG Yong-jun, ZHANG Yuan-zhu, <i>et al.</i> (4479)     |
| Characteristics of Nitrogen Deposition in Heilongjiang Liangshui National Nature Reserve .....                                                                                                              | SONG Lei, TIAN Peng, ZHANG Jin-bo, <i>et al.</i> (4490)                |
| Key Production Process of Nitrous Oxide and Nitrogen Sources in Tuojia River .....                                                                                                                          | ZHAO Qiang, LÜ Cheng-wen, QIN Xiao-bo, <i>et al.</i> (4497)            |
| Impact of Biochar on Nitrogen Removal and Nitrous Oxide Emission in Aerated Vertical Flow Constructed Wetland .....                                                                                         | WANG Ning, HUANG Lei, LUO Xing, <i>et al.</i> (4505)                   |
| Physiological Responses of Ryegrass in Cadmium-Nonylphenol Co-contaminated Water and the Phytoremediation Effects .....                                                                                     | SHI Guang-yu, LI Zhong-yi, ZHANG Lu, <i>et al.</i> (4512)              |
| Analysis of Absorption Characteristics of Urban Black-odor Water .....                                                                                                                                      | DING Xiao-lei, LI Yun-mei, LÜ Heng, <i>et al.</i> (4519)               |
| Seasonal Variations of DOM Spectral Characteristics in the Surface Water of the Upstream Minjiang River .....                                                                                               | FAN Shi-yu, QIN Ji-hong, LIU Yan-yang, <i>et al.</i> (4530)            |
| Water Quality and Three-Dimensional Fluorescence of Stormwater Runoff from Lined Bioretention Field Cells .....                                                                                             | LIN Xiu-yong, WANG Shu-min, LI Qiang, <i>et al.</i> (4539)             |
| Nitrate-Nitrogen Pollution Sources of an Underground River in Karst Agricultural Area Using <sup>15</sup> N and <sup>18</sup> O Isotope Technique .....                                                     | SHENG Ting, YANG Ping-heng, XIE Guo-wen, <i>et al.</i> (4547)          |
| Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Landfill Groundwater .....                                                                                                                          | PENG Li, YU Min-da, HE Xiao-song, <i>et al.</i> (4556)                 |
| Adsorption Behavior of Phosphate from Water on Zirconium-loaded Granular Zeolite-amended Sediment .....                                                                                                     | LIANG Shu-jing, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (4565)       |
| Control of Coagulant Dosing for Humic Substances Based on Ultraviolet Spectrum Analysis .....                                                                                                               | ZHANG Bei-chen, ZHANG Xiao-lei, QIN Lan-lan, <i>et al.</i> (4576)      |
| Reduction of Wastewater Organic Micro-pollutants and Genotoxicity in a Hybrid Process Involving Anaerobic-anoxic-oxic and Ozonation Treatments .....                                                        | LI Mo, WANG Zhen-zhe, CHEN Zhi-qiang, <i>et al.</i> (4584)             |
| Distribution and Removal of Antibiotic Resistance Genes in Two Sequential Wastewater Treatment Plants .....                                                                                                 | LI Ao-lin, CHEN Li-jun, ZHANG Yan, <i>et al.</i> (4593)                |
| Effect of Magnetic Chitosan Hydrogel Beads with Immobilized Feamnox Bacteria on the Removal of Ammonium from Wastewater .....                                                                               | LIU Zhi-wen, CHEN Chen, PENG Xiao-chun, <i>et al.</i> (4601)           |
| Enhanced Nitrogen and Carbon Removal Performance of Simultaneous ANAMMOX and Denitrification (SAD) with Trehalose Addition Treating Saline Wastewater .....                                                 | YANG Zhen-lin, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (4612)              |
| Characteristics of Denitrifying Phosphorus Removal by A <sup>2</sup> /O-BAF at Low Temperatures .....                                                                                                       | HUANG Jian-ming, ZHAO Zhi-chao, ZHENG Long-ju, <i>et al.</i> (4621)    |
| Characteristics of Advanced Treatment of Treated Petrochemical Water by O <sub>3</sub> -BAC and Analysis of Consortium Structure .....                                                                      | ZHANG Chao, SHAN Ming-hao, XU Dan-ning, <i>et al.</i> (4628)           |
| Microbial Community Characteristics of Shortcut Nitrification Start-up in Different MBR-Inoculated Sludges .....                                                                                            | WU Peng, CHEN Ya, ZHANG Ting, <i>et al.</i> (4636)                     |
| Effect of Microbial Community Structure and Metabolites on Sludge Settling Ability Under Three Different Switching Condition Processes .....                                                                | WEN Dan-dan, YUAN Lin-jiang, CHEN Xi, <i>et al.</i> (4644)             |
| Adsorption Mechanisms of Ciprofloxacin by Extracellular Polymeric Substances of Sulfate-reducing Bacteria Sludge .....                                                                                      | ZHANG Hui-qun, JIA Yan-yan, FANG He-ting, <i>et al.</i> (4653)         |
| Rapid Improvement of Denitrification Performance of Embedded Activated Sludge and Community Analysis .....                                                                                                  | YANG Hong, XU Fu, MENG Chen, <i>et al.</i> (4661)                      |
| Spatial-Temporal Trends and Pollution Source Analysis for Heavy Metal Contamination of Cultivated Soils in Five Major Grain Producing Regions of China .....                                                | SHANG Er-ping, XU Er-qi, ZHANG Hong-qi, <i>et al.</i> (4670)           |
| Spatial Interpolation Methods and Pollution Assessment of Heavy Metals of Soil in Typical Areas .....                                                                                                       | MA Hong-hong, YU Tao, YANG Zhong-fang, <i>et al.</i> (4684)            |
| Effect of Straw Residues in Combination with Reduced Fertilization Rate on Greenhouse Gas Emissions from a Vegetable Field .....                                                                            | HUANG Rong, GAO Ming, LI Jia-cheng, <i>et al.</i> (4694)               |
| Emission of NH <sub>3</sub> and N <sub>2</sub> O from Spinach Field Treated with Different Fertilizers .....                                                                                                | SHAN Nan, HAN Sheng-hui, LIU Ji-pei, <i>et al.</i> (4705)              |
| Effects of Various Combinations of Fertilizer, Soil Moisture, and Temperature on Nitrogen Mineralization and Soluble Organic Nitrogen in Agricultural Soil .....                                            | TIAN Fei-fei, JI Hong-fei, WANG Le-yun, <i>et al.</i> (4717)           |
| Long-term Fertilization Effects on the Abundance of Complete Ammonia Oxidizing Bacteria(Comammox <i>Nitrospira</i> ) in a Neutral Paddy Soil .....                                                          | WANG Mei, WANG Zhi-hui, SHI Xiao-jun, <i>et al.</i> (4727)             |
| Spatial Variation of Soil Organic Carbon and Stable Isotopes in Different Soil Types of a Typical Oasis .....                                                                                               | CHEN Xin, GONG Lu, LI Yang-mei, <i>et al.</i> (4735)                   |
| Effect and Mechanism of Attapulgite and Its Modified Materials on Bioavailability of Cadmium in Soil .....                                                                                                  | CHEN Zhan-xiang, CHEN Chuan-sheng, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (4744) |
| Persulfate Oxidation Effect of Soil Organic Pollutants by Natural Organic Matters .....                                                                                                                     | LIU Qiong-zhi, LIAO Xiao-yong, LI You, <i>et al.</i> (4752)            |
| Lead Uptake and Accumulation in Rice ( <i>Oryza sativa</i> L.) with Water Management and Selenite Fertilization .....                                                                                       | WAN Ya-nan, LIU Zhe, Aboubacar Younoussa Camara, <i>et al.</i> (4759)  |
| Key Bacteria for the Microbial Degradation of Pollutants in Cellar Water .....                                                                                                                              | YANG Hao, YANG Xiao-ni, ZHANG Guo-zhen, <i>et al.</i> (4766)           |
| Oxidation of Humic Acid Complexing As(III) by As(III)-Oxidizing Bacteria .....                                                                                                                              | LI Ze-jiao, CUI Yan-shan, YIN Nai-yi, <i>et al.</i> (4778)             |
| A Thermotolerant and Halotolerant Sulfate-reducing Bacterium in Produced Water from an Offshore High-temperature Oilfield in Bohai Bay, China: Isolation, Phenotypic Characterization, and Inhibition ..... | YANG Chun-lu, YUAN Mei-yu, SHI Rong-jiu, <i>et al.</i> (4783)          |
| Isolation and Nitrogen Removal Characteristics of Salt-tolerant Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification Bacteria <i>Zobellella</i> sp. B307 .....                                           | BAI Jie, CHEN Lin, HUANG Xiao, <i>et al.</i> (4793)                    |
| Isolation, Identification and Degradation Characteristics of a 17 $\beta$ -estradiol Degrading Strain <i>Fusarium</i> sp. KY123915 .....                                                                    | WU Man-li, ZHU Chang-cheng, QI Yan-yun, <i>et al.</i> (4802)           |
| Effect of Fluoroquinolones on Performance and Microbial Community of a Vertical Flow Constructed Wetland .....                                                                                              | LI Xin-hui, ZHENG Quan, LI Jing, <i>et al.</i> (4809)                  |
| Microbial Community Diversity Analysis During Lincomycin Mycelia Dreg with Manure .....                                                                                                                     | REN Sheng-tao, GUO Xia-li, LU A-qian, <i>et al.</i> (4817)             |
| Oxidative Stress and DNA Damage Induced by DEP Exposure in Earthworms .....                                                                                                                                 | PING Ling-wen, LI Xian-xu, ZHANG Cui, <i>et al.</i> (4825)             |
| Mineralogy Characteristics and Heavy Metal Distribution of MSWI Fly Ash .....                                                                                                                               | LI Jian-tao, ZENG Ming (4834)                                          |