

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第10期

Vol.37 No.10

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

北京地区空气重污染下雾凇和偏东风对 PM_{2.5} 清除作用 孙兆彬, 廖晓农, 王占山, 李梓铭, 赵秀娟, 花丛 (3679)

降雨对不同粒径气溶胶粒子碰撞清除能力 董群, 赵普生, 陈一娜 (3686)

北京冬季雾霾频发期 VOCs 源解析及健康风险评价 刘丹, 解强, 张鑫, 王海林, 闫志勇, 杨宏伟, 郝郑平 (3693)

浙江省制鞋行业挥发性有机物污染特征及其排放系数 徐志荣, 姚轶, 蔡卫丹, 李嫣, 许明珠, 王浙明 (3702)

2014 年 APEC 期间北京市 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 氧化性损伤能力研究 郭茜, 邵龙义, 王文华, 侯聪, 赵承美, 幸娇萍, 马施民 (3708)

武汉市洪山区夏季 PM_{2.5} 浓度、水溶性离子与 PAHs 成分特征及来源分析 孙焰, 祁士华, 张莉, 邢新丽, 杨丹, 胡天鹏, 翟程凯 (3714)

基于快速聚类方法分析常州市区 PM_{2.5} 的统计特性 王振, 余益军, 徐圃青, 李艳萍, 夏京, 殷磊 (3723)

PM_{2.5} 在线水溶性离子与滤膜采集-实验室检测的比对分析 杨懂艳, 刘保献, 石爱军, 张大伟, 丁萌萌, 周健楠, 富佳明, 景宽 (3730)

树木模拟燃烧排放烟尘中水溶性离子的组成 刘刚, 黄柯, 李久海, 徐慧 (3737)

轻型汽油车排放颗粒物数浓度和粒径分布特征 樊筱筱, 蒋靖坤, 张强, 李振华, 何立强, 吴焯, 胡京南, 郝吉明 (3743)

基于台架测试的我国船用柴油机废气排放因子 邢辉, 段树林, 黄连忠, 韩志涛, 刘勤安 (3750)

西安城区地表灰尘中邻苯二甲酸酯分布、来源及人群暴露 张文娟, 王利军, 王丽, 史兴民, 卢新卫 (3758)

生活垃圾焚烧厂垃圾的汞含量与汞排放特征研究 段振亚, 苏海涛, 王凤阳, 李智坚, 李韶璞, 王书肖 (3766)

三峡库区消落带土壤中硫酸盐还原菌对汞甲基化作用的影响 陈瑞, 陈华, 王定勇, 向玉萍, 申鸿 (3774)

城市化进程对地下河中溶解态正构烷烃来源的影响 廖昱, 孙玉川, 沈立成, 梁作兵, 王尊波 (3781)

基于 PMF 模型的长江流域水体中多环芳烃来源解析及生态风险评价 王成龙, 邹欣庆, 赵一飞, 李宝杰 (3789)

贡嘎山地区地表水化学特征及水环境质量评价 何晓丽, 吴艳宏, 周俊, 邴海健 (3798)

多元数理统计法研究太子河本溪城市段水体 DOM 紫外光谱特征 钱锋, 吴婕贻, 于会彬, 宋永会, 张美, 孔令昊, 何孟常 (3806)

地下水中溶解性有机物的垂直分布特征及成因 何小松, 张慧, 黄彩红, 李敏, 高如泰, 李丹, 席北斗 (3813)

昆明市不同功能区排水管道沉积物性质 常海东, 金鹏康, 付博文, 李雪兵, 贾锐珂 (3821)

滇池水生植物分布对沉积物间隙水磷浓度的影响 丁帅, 王圣瑞, 张蕊, 肖焱波, 焦立新, 李乐, 王忠诚, 尹诗诗 (3828)

紫色母岩覆盖层控制底泥磷释放的效果及机制 黄雪娇, 石纹豪, 倪九派, 李振轮 (3835)

排水循环灌溉下稻田磷素时空分布特征 焦平金, 许迪, 朱建强, 于颖多 (3842)

快速高效去除微囊藻的 GO/QPEI 复合纳米材料 李洁, 肖琳 (3850)

一体式生物净化-沉淀池对微污染水体污染物的强化去除性能 王文东, 刘荟, 马翠, 韩雨, 常妮妮 (3858)

生物粉末活性炭-超滤组合工艺对微污染水源水中臭味物质的去除效能及其微生物特性 宣雍祺, 周丽, 邓慧萍, 蔡宙, 李大鹏, 刘刚 (3864)

聚硅酸对不同形态铝沉积行为的影响 赵园园, 张玥, 李素英, 石宝友, 李贵伟, 孙改清 (3870)

典型南方水源氨基酸浓度变化与去除 刘伟, 蔡广强, 卢小艳, 刘丽君, 张金松, 刘嘉祺, 曲莹 (3877)

O₃/UV 降解含氮杂环化合物喹啉 陈傲蕾, 常凤民, 汪翠萍, 徐恒, 吴静, 左剑恶, 王凯军 (3884)

蒽醌-2-磺酸钠促进 *Klebsiella oxytoca* GS-4-08 脱色产氢机制与产能分析 胡金梅, 虞磊, 黄天寅 (3891)

2-丁烯醛生产废水中溶解性有机物的分级解析 孙秀梅, 宋广清, 席宏波, 周岳溪, 牛远方 (3899)

不同缺氧段硝酸盐氮浓度条件下连续流单污泥污水处理系统 PHA、TP 代谢 王晓玲, 员东丹, 白莉, 李紫棋, 余勇, 秦旭东, 张晓旭, 赵可 (3906)

长江口邻近海域沉积物中厌氧氨氧化细菌分布特征研究 付璐璐, 甄毓, 贺惠, 张玉, 米铁柱 (3914)

焦化废水活性污泥细菌菌群结构分析 蒙小俊, 李海波, 曹宏斌, 盛宇星 (3923)

黄土高原不同植被类型下土壤细菌群落特征研究 刘洋, 黄懿梅, 曾全超 (3931)

苯酚对活性污泥活性及微型动物群落结构的影响 胡小兵, 饶强, 唐素兰, 姜晶, 谢瑞桃, 郝文静, 钟梅英 (3939)

城市生活污水和生活垃圾渗滤液抗生素抗性基因污染的比较研究 黄福义, 李虎, 安新丽, 欧阳纬莹, 苏建强 (3949)

菌株 *Desulfovibrio* sp. CMX 的 DNRA 性能和影响因素 谢柄柯, 张玉, 王晓伟, 孙超越, 周集体 (3955)

生活污水灌溉对麦秸还田稻田氨挥发排放的影响 徐珊珊, 侯朋福, 范立慧, 薛利红, 杨林章, 王绍华, 李刚华 (3963)

模拟氮沉降对重庆缙云山马尾松林土壤呼吸和酶活性的季节性影响 曾清苹, 何丙辉, 李源, 夏力文, 杨龙龙, 邓雪梅, 李川 (3971)

生物炭添加和灌溉对温室番茄地土壤反硝化损失的影响 张文娟, 余冬立, Gamareldawla H. D. Agbna, 夏永秋 (3979)

土壤质地对自养固碳微生物及其同化碳的影响 王群艳, 吴小红, 祝贞科, 袁红朝, 隋方功, 葛体达, 吴金水 (3987)

土壤-作物系统中重金属元素吸收、迁移和积累过程模拟 施亚星, 吴绍华, 周生路, 王春辉, 陈浩 (3996)

组配改良剂对稻田系统 Pb、Cd 和 As 生物有效性的协同调控 王英杰, 邹佳玲, 杨文强, 周航, 廖柏寒 (4004)

几种有机物料对设施菜田土壤 Cd、Pb 生物有效性的影响 周贵宇, 姜慧敏, 杨俊诚, 张建峰, 张水勤, 梁雷 (4011)

蒙脱石对有机物料施入土壤磷形态和有效性的影响 宋贤威, 赵秀兰, 张进忠, 胡梦坤, 徐艳昭, 王明禹 (4020)

不同镉浓度及 pH 条件下纳米沸石对土壤镉形态及大白菜镉吸收的影响 秦余丽, 熊仕娟, 徐卫红, 赵婉伊, 王卫中, 陈永勤, 迟芬琳, 陈序根, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (4030)

黑麦草和牵牛花对铬耐受能力和积累效果的指标表征研究 董冰冰, 陈友媛, 惠红霞, 陆维佳, 杨秀卿, 刘逸凡 (4044)

挥发性甲基硅氧烷的体外代谢行为 黎敏丹, 郑国贸, 万伟, 胡建英 (4054)

中药渣与城市污泥好氧共堆肥的效能 宿程远, 郑鹏, 阮祁华, 覃菁菁, 卢宇翔, 李俊兵 (4062)

《环境科学》征订启事 (3827) 《环境科学》征稿简则 (4053) 信息 (3736, 3930, 4043)

2-丁烯醛生产废水中溶解性有机物的分级解析

孙秀梅^{1,2}, 宋广清^{1,2}, 席宏波², 周岳溪^{2*}, 牛远方³

(1. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 2. 中国环境科学研究院水污染控制技术研究中心, 北京 100012; 3. 中国石油吉林石化公司电石厂, 吉林 132022)

摘要: 采用超滤膜法将 2-丁烯醛生产废水中的有机物分为相对分子质量不同的 7 个级分, 并应用溶解性有机碳 (dissolved organic carbon, DOC)、紫外吸收光谱 (ultraviolet spectrum, UV)、傅里叶变换红外光谱 (fourier transform infrared spectrometer, FT-IR) 和气相色谱/质谱联用仪 (gas chromatography with mass spectrometry, GC-MS) 技术对不同相对分子质量区间的有机物所占比例及物质结构进行了研究. 结果表明, 废水中相对分子质量 $< 1 \times 10^3$ 的有机物所占比例最高, 达到 88.57%; 采用 GC-MS 对废水中相对分子质量 $< 1 \times 10^3$ 的级分进行分析, 定性出 27 种化合物, 包含醛、酮、酯、醇、酚、酸、烷烃类及其他苯系物等, 其峰面积占有有机物峰面积总和的比例分别为 6.9%、5.3%、35.4%、13.2%、4.6%、0.4%、1.7%、16.8%, 总和为 84%. UV 和 FT-IR 分析结果均显示不同相对分子质量区间的光谱吸收特征没有明显差别, 级分中存在含有不饱和双键、羧基、羰基化合物及芳香族化合物, 与 GC-MS 检测结果相吻合. 研究结果为废水处理工艺的开发与优化提供了重要的指导作用.

关键词: 2-丁烯醛生产废水; 超滤膜法; 气相色谱-质谱联用仪 (GC-MS); 紫外吸收光谱 (UV); 红外光谱 (FT-IR)

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)10-3899-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.10.031

Classification and Analysis of Dissolved Organic Matter in 2-Butenal Manufacture Wastewater

SUN Xiu-mei^{1,2}, SONG Guang-qing^{1,2}, XI Hong-bo², ZHOU Yue-xi^{2*}, NIU Yuan-fang³

(1. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Research Center of Water Pollution Control Technology, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3. Calcium Carbide Factory of Jilin Petrochemical Company, Petro China, Jilin 132022, China)

Abstract: The dissolved organic matters from 2-butenal manufacture wastewater were fractionated into seven fractions by ultra-filtration membrane separation. The amounts and structural compositions of organic compounds in different molecular weight ranges were characterized by dissolved organic carbon (DOC), ultraviolet spectrum (UV), Fourier transform infrared spectrometer (FT-IR) and gas chromatography with mass spectrometry (GC-MS). The results showed that the fraction of molecular weight less than 1×10^3 had the largest proportion in the wastewater, and occupied 88.57% of the DOC. There were 27 kinds of compounds qualitatively analyzed by GC-MS, mainly including aldehyde, ketone, ester, alcohol, phenol, organic acid, alkane and other heterocyclic compounds. The proportions of compounds of peak area accounting for total peak area of organic matters were 6.9%, 5.3%, 35.4%, 13.2%, 4.6%, 0.4%, 1.7% and 16.8% respectively, adding up to 84%. The analysis of UV and FT-IR demonstrated that the spectral absorptive characteristics of organic compounds from different fractions were not significantly different. The fractions contained carbonyls, hydroxys and aromatic compounds, which was consistent with the qualitative analysis of GC-MS. The results of this study provide an important guidance for the development and optimization of 2-butenal manufacture wastewater treatment process.

Key words: 2-butenal manufacture wastewater; ultra-filtration technology; gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS); ultraviolet spectrum (UV); fourier transform infrared spectrometry (FT-IR)

2-丁烯醛俗称巴豆醛, 是一种重要的有机化工原料, 工业上主要用于生产丁醛、丁醇、2-乙基己醇、山梨酸、3-甲氧基丁醇、丁烯酸、喹哪啶、顺丁烯二酸酐及吡啶系产品等^[1]. 国内主要采用乙醛缩合法生产 2-丁烯醛^[2], 生产过程中产生的废水采用焚烧法处理^[3], 由于热值较低, 处理时需要补充辅助燃料, 成本较高; 且废水中有机物浓度高, 组分复杂, 焚烧过程中与空气中的氧气反应或者有机物焚烧不完全分解产生其他的有毒有害气体^[4], 会对环

境造成二次污染, 探究更经济环保的废水处理工艺已显得刻不容缓. 有报道显示水处理工艺的选择与有机物的相对分子量分布息息相关^[5~7], 如张定定等^[8]研究废水深度处理过程中的有机物相对分子量分布变化发现, 不同的处理工艺单元对不同相对

收稿日期: 2016-02-28; 修订日期: 2016-05-21

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2012zx07201-005)

作者简介: 孙秀梅 (1990~), 女, 博士, 主要研究方向为水污染控制, E-mail: sunxiumei.cool@163.com

* 通讯联系人, E-mail: zhoyuexi@263.net

分子量区间的有机物有效去除效果不同. 因此, 弄清废水中有机物的相对分子量分布及物质结构对废水处理工艺的选择具有指导意义.

国内外关于水源水和城市污水中有机物的相对分子量分布研究较多, 如董秉直等^[9]研究混凝粉末活性炭联用处理黄浦江水源水发现, 混凝单元主要去除大分子量的有机物, 粉末活性炭主要去除小分子量的有机物. 舒诗湖等^[10]发现, 臭氧-活性炭工艺可以有效去除天然有机物中相对分子量大于 10×10^3 的有机物, 但不能去除生物可同化有机碳 (AOC). Han 等^[11]通过研究混凝吸附去除城市污水二级出水中三卤甲烷 (THMs) 的前驱物发现, 混凝吸附不能有效地去除相对分子量小于 5×10^3 的级分. 可见, 水处理工艺对不同相对分子量的有机物去除具有选择性. 针对工业废水中的有机物相对分子量分布特性及各处理单元对不同相对分子量有

机物的去除已有报道^[12,13], 但 2-丁烯醛生产废水中有机物相对分子量的分布特性还鲜见报道.

本文以 2-丁烯醛生产废水为研究对象, 采用超滤膜法对废水中的有机物进行分子量分级, 分析了不同相对分子质量区间的溶解性有机碳 (DOC) 含量和分布情况. 并联用气相色谱/质谱联用仪 (GC-MS)、紫外吸收光谱 (UV)、傅里叶变换红外光谱 (FT-IR) 这 3 种检测分析方法对不同相对分子质量区间级分进行定性分析, 了解 2-丁烯醛生产废水中不同分子质量有机物的分布及物质结构, 以期为水处理工艺的开发和优化提供理论依据.

1 材料与方 法

1.1 水样来源及水质

试验水样取自某电石厂 2-丁烯醛生产装置脱水塔, 其常规水质指标如表 1 所示.

表 1 2-丁烯醛生产废水的水质指标

Table 1 Water-quality index of 2-buternal manufacture wastewater

指标	pH	COD /mg·L ⁻¹	BOD ₅ /mg·L ⁻¹	BOD ₅ /COD	TOC /mg·L ⁻¹	SS /mg·L ⁻¹
参数	5.1	106 233	22 660	0.21	38 490	142

1.2 试验仪器与试剂

仪器: Millipore 8400 型超滤杯 (美国 Millipore 公司); 7890/5975c 气相色谱质谱联用仪 (美国安捷伦公司); TOC-V_{CPH} 型总有机碳分析仪 (日本岛津公司); UV-1700 紫外分光光度计 (日本岛津公司); Spectrum100 型傅里叶变换红外光谱仪 (美国珀金埃尔默公司).

试剂: 氢氧化钠、无水硫酸钠、氯化钠均为分析纯 (国药集团化学试剂有限公司), 溴化钾为光谱纯 (国药集团化学试剂有限公司), 二氯甲烷为色谱纯 (J. T. Baker 公司).

1.3 试验方法

相对分子量分布的测定方法: 采用超滤膜法进行相对分子量分布的测定. 超滤膜使用前用质量浓度为 $50 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 溶液浸泡 30 min (光滑面向下), 再用超纯水浸泡漂洗 3 次 (每次 1 h, 光滑面向下), 使用前再用超纯水反复冲洗至洗脱液 TOC < $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 并将水样调至中性, 稀释至一定浓度, 用 $0.45 \mu\text{m}$ 微滤膜过滤后, 分别通过截留相对分子质量为 100×10^3 、 30×10^3 、 10×10^3 、 5×10^3 、 3×10^3 、 1×10^3 的超滤膜. 各相对分子质量区间的有机物含量用差减法计算. 超滤杯的有效容积为 400 mL, 有效过滤面积为 41.8 m^2 , 内有磁力搅拌装置,

高纯氮气作为压力驱动力, 过滤压力为 0.15 MPa.

GC-MS 检测方法: 取 7 种不同相对分子质量的滤液各 50 mL, 加入 5 g 干燥 NaCl, 混匀后, 用二氯甲烷萃取 6 次 (每次 5 mL), 萃取相经无水硫酸钠干燥后利用氮吹仪浓缩至 1 mL, 待 GC-MS 检测分析; 选用 HP-5MS UI 色谱柱 ($30 \text{ m} \times 250 \mu\text{m} \times 0.25 \mu\text{m}$); 柱温箱升温程序: 40°C 保持 1 min, 以 $10^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 升至 280°C , 保持 2 min, 总时间为 27 min; 柱流速为 $1.2 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$; 进样口温度为 260°C , 分流比为 10:1, 四级杆温度为 150°C , 离子源温度为 230°C , 电离电压为 70 eV, 辅助通道温度为 280°C , 采用全扫描方式 (Scan), 扫描质量范围为 10 ~ 700 u, 载气为高纯氮气 (99.999%).

红外光谱检测方法: 称取 200 mg 研磨好的 KBr 干燥粉末放入压片模具, 然后利用 10 t 压力压制 1 min, 制成空白 KBr 压片以扣除红外光谱背景值; 不同相对分子质量区间的水样于 40°C 干燥箱中烘干, 水样烘干后残渣样品与 200 mg KBr 粉末混合均匀后压片. 采用 Spectrum100 型 FT-IR 光谱仪检测分析, 扫描范围 $4000 \sim 450 \text{ cm}^{-1}$.

1.4 分析测定方法

COD 采用快速消解法测定, BOD₅ 采用无汞压力法测定, SS 采用重量法测定, pH 值采用 FE30 pH

计(梅特勒-托利多上海有限公司)测定; DOC 是指经 0.45 μm 微滤膜过滤后的 TOC 值, TOC 采用 TOC-V_{CPH} 型总有机碳分析仪(日本岛津公司)测定; 紫外-可见光谱采用 UV-1700 紫外可见分光光度计(日本岛津公司)测定。

2 结果与讨论

2.1 各级分的溶解性有机碳(DOC)分布

原水的 DOC 浓度为 34 300 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 采用超滤膜法测定的各相对分子质量区间 DOC 分布及所占比例如图 1 所示。

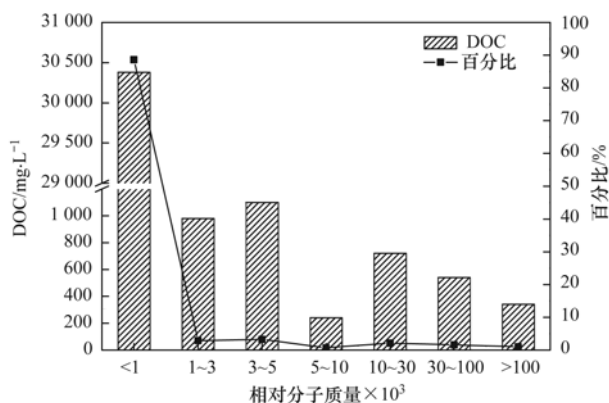


图 1 各相对分子质量区间 DOC 分布及所占比例

Fig. 1 Percentage and distribution of DOC in different molecular weight fractions

由图 1 可见, 废水中相对分子质量小于 1×10^3 的有机物所占比例明显高于其他各相对分子质量区间, 其 DOC 浓度占原水 DOC 的 88.57%。相对分子质量为 $1 \times 10^3 \sim 3 \times 10^3$ 、 $3 \times 10^3 \sim 5 \times 10^3$ 、 $10 \times 10^3 \sim 30 \times 10^3$ 、 $30 \times 10^3 \sim 100 \times 10^3$ 区间内的有机物所占比例相当, 其 DOC 浓度分别占原水 DOC 的 2.86%、3.21%、2.1%、1.57%, 相对分子质量为 $5 \times 10^3 \sim 10 \times 10^3$ 、 $> 100 \times 10^3$ 区间内的有机物所占比例相对较少, 其 DOC 浓度分别仅占原水 DOC 的 0.7%、0.99%。上述结果表明, 废水中主要以相对分子质量小于 1×10^3 的有机物为主。罗晓鸿等^[14]对各净水工艺对不同相对分子量区间有机物的去除效果研究表明: 生物处理对相对分子量区间小于 500 和 $3 \times 10^3 \sim 10 \times 10^3$ 的有机物去除效果显著, 活性炭吸附对相对分子量区间 $0.5 \times 10^3 \sim 3 \times 10^3$ 的有机物去除效果较好, 混凝沉淀对相对分子量区间 $10 \times 10^3 \sim 100 \times 10^3$ 的有机物去除率最高。董秉直等^[15]发现混凝处理优先去除大分子有机物, 粉末活性炭对大小分子有机物都能有效去除, 臭氧主要氧化大分子量有机物, 生物处理没有相对分子

量变化规律。Vidal 等^[16]采用厌氧生物处理纸浆废水后, 相对分子质量小于 1×10^3 的级分, COD 和色度降低, 相对分子质量区间 $1 \times 10^3 \sim 10 \times 10^3$ 的级分, COD 和色度基本没有变化, 相对分子质量大于 10×10^3 的级分, COD 和色度反而增加了 14% 和 5%。由此可见, 不同的水处理单元对相对分子质量级分去除效果不同。2-丁烯醛生产废水浓度较高, 分子质量分布主要集中在小于 1×10^3 , 可以采用厌氧和好氧生物处理相对分子量较小的有机物, 臭氧或者混凝沉淀去除较大分子质量的有机物。然而, 分子质量分布相似的不同水质采用同种水处理工艺, 效果却不同, 这可能与相对分子质量区间有机物的结构类型有关^[17-19]。

2.2 GC-MS 定性分析

为了进一步了解废水中有机物的分子结构信息, 本研究对 1.3 节预处理后各相对分子质量级分进行 GC-MS 检测分析, 试验结果发现不同相对分子质量区间的有机物分布没有显著差异。因此, 以相对分子质量小于 1×10^3 的级分为例, 对有机物进行定性分析, GC-MS 全扫描分析的总离子流色谱图如图 2 所示, 结合标准物质与 NIST05 数据库初步定性出 27 种物质, 定性结果如表 2 所示。

由图 2 及表 2 可知, 废水中相对分子质量小于 1×10^3 的级分中主要定性出 27 种有机化合物, 包含醛、酮、酯、醇、酚、酸、烷烃类及其他苯系物, 种类繁多, 其中醛类物质较多, 酮类、酯类物质次之, 有机物主要是含有不饱和碳碳双键、羰基、羧基及苯环类的难降解有机物, 各类物质峰面积占有有机物峰面积总和的比例分别为 6.9%、5.3%、35.4%、13.2%、4.6%、0.4%、1.7%、16.8%, 总和为 84%。

2.3 紫外光谱分析

有机化合物分子中含有的某种特征基团会在紫外吸收光谱中呈现出具有特征性的吸收带, 从而能推断出化合物的分子结构。2-丁烯醛生产废水各相对分子质量区间有机物在 200~400 nm 波长范围内的紫外可见光谱图见图 3。

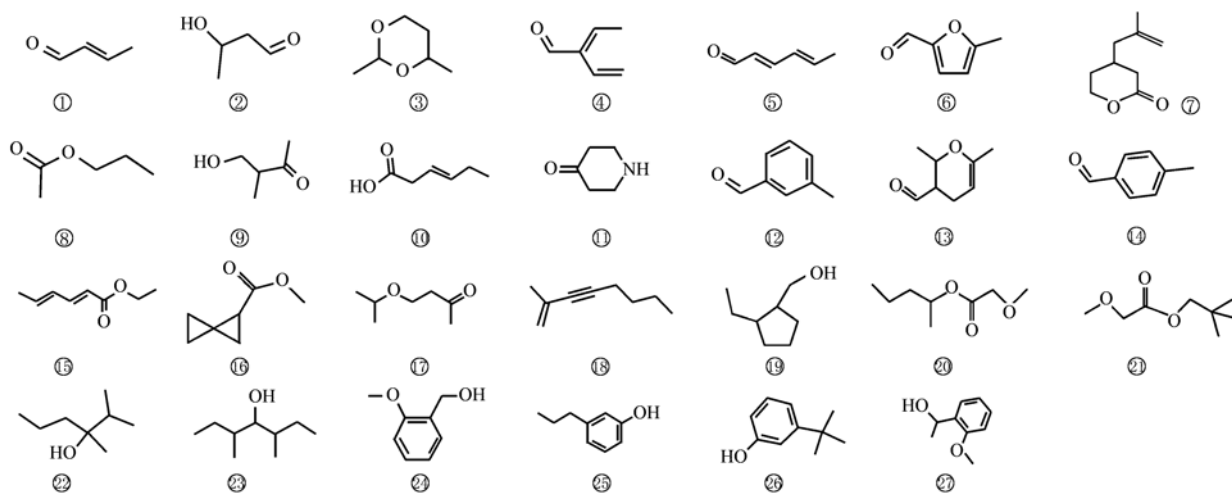
由图 3 可以看出, 不同相对分子质量区间的有机物的紫外可见光谱图都显示了非常相似的光谱特征, 有机物的吸收光谱较宽, 吸光度随着波长的增加先上升后下降。紫外光谱最大吸收峰位于 230 nm 附近, 这可能是各级分存在含不饱和双键官能团的有机物所导致的^[20-22], 随着相对分子质量区间减小, 有机物紫外吸收峰的吸光度稍微下降, 说明更多

表 2 有机物成分及峰面积所占比例¹⁾

Table 2 Compositions and percentage of peak area for organic matters

序号	保留时间/min	化合物	CAS 号	化学式	相对分子质量	结构式	峰面积百分比/%
1	2.247	2-丁烯醛*	123-73-9	C ₄ H ₆ O	70.09	①	3.73
2	3.148	3-羟基丁醛*	107-89-1	C ₄ H ₈ O ₂	88.05	②	0.97
3	3.708	2,4-二甲基-1,3-二氧杂环己烷 ⁺	766-20-1	C ₆ H ₁₂ O ₂	116.16	③	0.10
4	4.514	2-乙基-2-丁烯醛 ⁺	20521-42-0	C ₆ H ₈ O	96.13	④	0.24
5	5.485	(E,E)-2,4-己二烯醛*	142-83-6	C ₆ H ₈ O	96.13	⑤	1.28
6	5.580	5-甲基呋喃醛 ⁺	620-02-0	C ₆ H ₆ O ₂	110.04	⑥	0.29
7	6.443	3-(2-甲基-2-丙烯)-5-戊内酯 ⁺	1000153-91-9	C ₉ H ₁₄ O ₂	154.10	⑦	16.34
8	6.630	乙酸丙酯 ⁺	109-60-4	C ₅ H ₁₀ O ₂	102.13	⑧	0.50
9	6.721	4-羟基-3-甲基-2-丁酮 ⁺	3393-64-4	C ₅ H ₁₀ O ₂	102.07	⑨	1.48
10	6.942	反式-3-己烯酸 ⁺	1577-18-0	C ₆ H ₁₀ O ₂	114.14	⑩	0.41
11	6.989	4-吡啶酮 ⁺	41661-47-6	C ₅ H ₉ NO	99.13	⑪	2.52
12	8.052	3-甲基苯甲醛 ⁺	620-23-5	C ₈ H ₈ O	120.15	⑫	0.08
13	8.203	5-甲醛基-2,6-二甲基-2,3-二氢吡喃 ⁺	1000288-90-6	C ₈ H ₁₂ O ₂	154.10	⑬	16.77
14	8.277	对甲基苯甲醛*	104-87-0	C ₈ H ₈ O	120.15	⑭	0.34
15	8.52	山梨酸乙酯*	2396-84-1	C ₈ H ₁₂ O ₂	140.185	⑮	14.53
16	8.619	1-螺[2,2]己酸甲酯 ⁺	33447-49-3	C ₇ H ₁₀ O ₂	126.07	⑯	1.78
17	9.768	4-异丙氧基-2-丁酮 ⁺	32541-58-5	C ₇ H ₁₄ O ₂	130.18	⑰	1.34
18	10.354	2-甲基-3-炔-辛烯 ⁺	17603-76-8	C ₉ H ₁₄	122.21	⑱	1.62
19	10.705	(2-乙基环氧戊)-甲醇 ⁺	36431-59-1	C ₈ H ₁₄ O	126.10	⑲	0.68
20	11.112	甲氧基乙酸-4-甲戊酯 ⁺	1000282-69-2	C ₈ H ₁₆ O ₃	160.11	⑳	1.04
21	11.238	甲氧基乙酸-2,2-二甲基丙酯 ⁺	1000282-41-0	C ₈ H ₁₆ O ₃	160.11	㉑	1.20
22	11.68	2,3-二甲基-3-己醇 ⁺	4166-46-5	C ₈ H ₁₈ O	130.23	㉒	3.70
23	11.737	3,5-甲基-4-庚醇 ⁺	19549-79-2	C ₉ H ₂₀ O	144.25	㉓	4.44
24	12.291	2-甲氧基苯甲醇 ⁺	612-16-8	C ₈ H ₁₀ O ₂	138.16	㉔	3.63
25	12.465	3-正-丙基苯酚*	621-27-2	C ₉ H ₁₂ O	136.19	㉕	2.79
26	12.729	3-叔丁基苯酚 ⁺	585-34-2	C ₁₀ H ₁₄ O	150.22	㉖	1.77
27	12.911	甲氧基二甲基苯甲醇 ⁺	13513-82-1	C ₉ H ₁₂ O ₂	152.19	㉗	0.72

1) * 表示 NIST05 数据库及标准物质定性; + 表示 NIST05 数据库定性



的不饱和双键共轭结构对于紫外光的吸收能力更强. 在 270 ~ 280 nm 范围出现吸收光谱较宽的肩峰, 此区域的紫外吸收峰可能源自于含有羰基或共轭羰基基团^[23~27], 验证了废水中存在 2-丁烯醛、3-羟基丁醛、2-乙基-2-丁烯醛、(E,E)-2,4-己二烯

醛、5-甲基呋喃醛等有机物.

2.4 红外光谱分析

不同相对分子质量区间的傅里叶变换红外光谱图如图 4 所示. 红外光谱的吸收峰可以反映出废水中有机物所含的官能团, 通过已有研究中关于主要

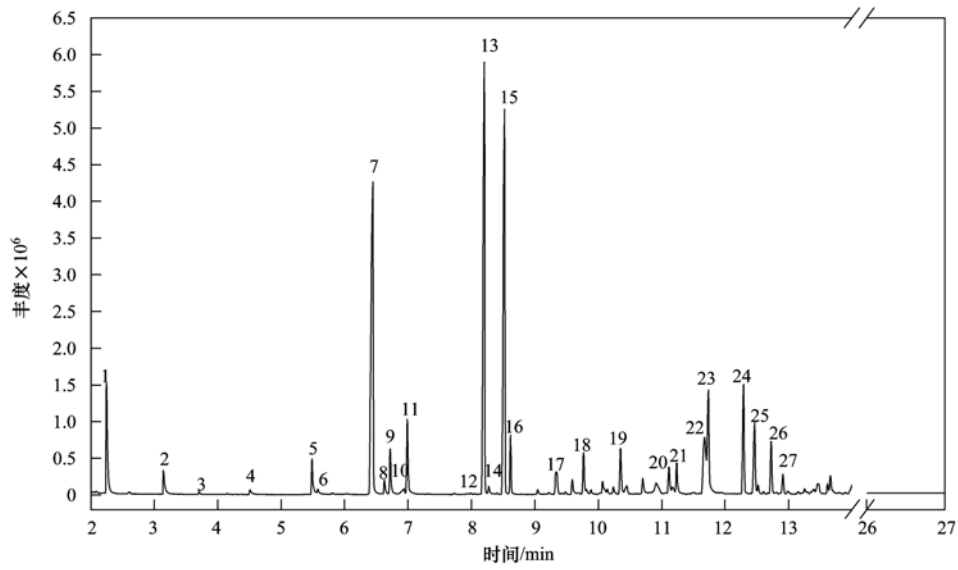


图 2 总离子流(TIC)色谱图

Fig. 2 Total ion current(TIC) chromatogram

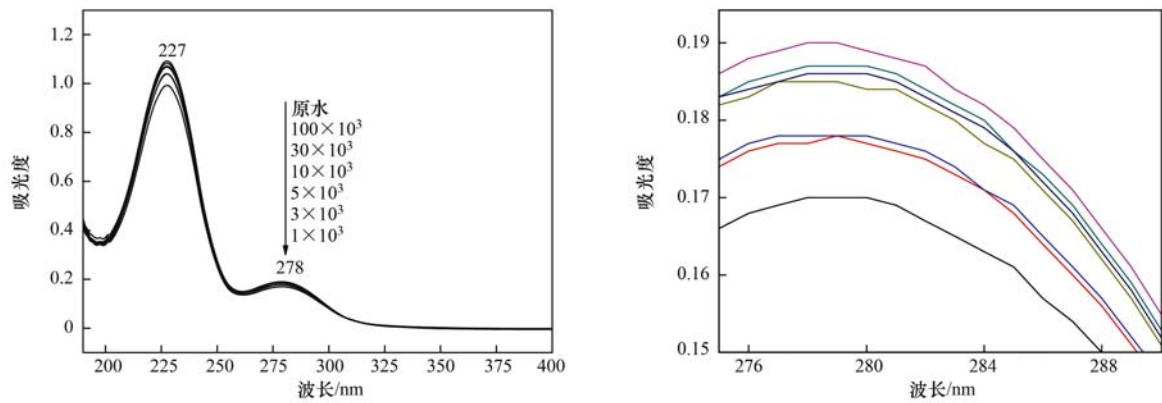


图 3 各相对分子质量区间的紫外吸收光谱

Fig. 3 UV absorption spectra of different molecular weight fractions

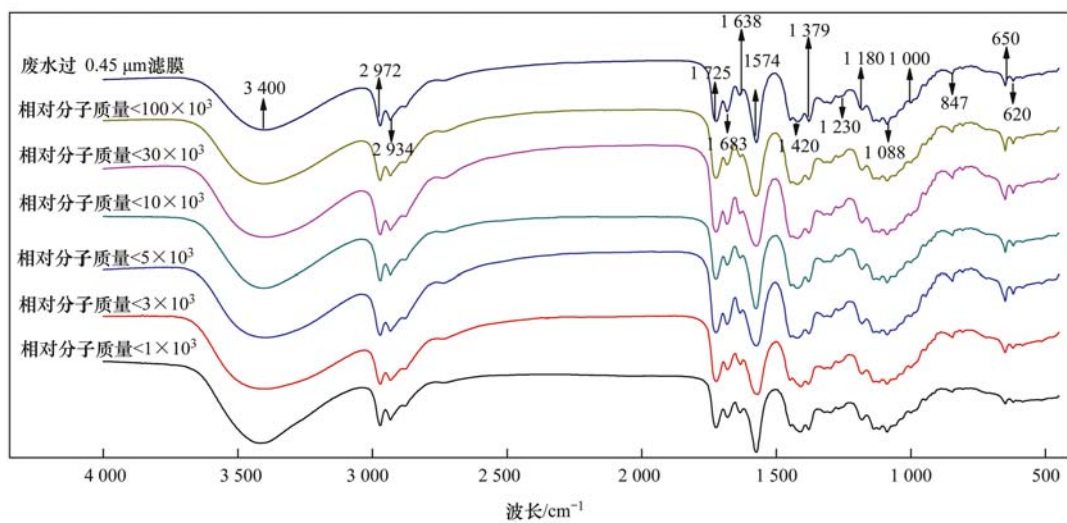


图 4 各相对分子质量区间的红外光谱图

Fig. 4 FT-IR spectra of different molecular weight fractions

红外吸收带的解析结果^[28~36],对各相对分子质量区间有机物的红外光谱图进行分析。

从图4可以看出,废水中相对分子质量大于 1×10^3 级分的光谱图在 $610 \sim 680 \text{ cm}^{-1}$ 之间的特征吸收峰略有突显,该频段的吸收峰归属于腐殖酸,说明废水中相对分子质量大于 1×10^3 级分中含有腐殖酸。不同相对分子质量级分在其他波带都显示了非常相似的红外光谱特征。 3400 cm^{-1} 处的宽峰是由于废水中有机物中醇、酚或者含羧基类化合物上的H—OH伸缩振动引起的, $1000 \sim 1350 \text{ cm}^{-1}$ 之间的吸收峰归属于醇上的—C—O的伸缩振动引起的,说明级分中含有醇类物质。芳环的特征区 $1450 \sim 1600 \text{ cm}^{-1}$ 和指纹区 $680 \sim 880 \text{ cm}^{-1}$ 均存在吸收峰,说明该废水中含有芳香族化合物。 $2850 \sim 3000 \text{ cm}^{-1}$ 之间的峰代表了饱和脂肪族结构中—CH基团的存在。 1725 cm^{-1} 处的吸收峰表明废水中含有一C=O基团,主要是由醛类、酮类、酸类及醌类化合物贡献的。 $1640 \sim 1700 \text{ cm}^{-1}$ 之间存在的特征吸收峰不仅验证了有机物中存在—C=O基团,还显示了C=C双键的存在,这可能是2-丁烯醛、(E,E)-2,4-己二烯醛、山梨酸乙酯等有机物所贡献的;醚键在 $1310 \sim 1020 \text{ cm}^{-1}$ 区间一般有两个强吸收带,高波数带一侧是其不对称伸缩振动,低波数带一侧是对称伸缩振动,而废水光谱在此区域有4个弱吸收峰,此处不符合醚键的特征吸收,因此,可以初步判断出废水中不存在醚类物质。

3 结论

(1) 根据DOC分布,废水中主要以相对分子质量小于 1×10^3 的有机物为主,其占原水DOC浓度的88.57%。采用GC-MS对废水中相对分子质量小于 1×10^3 的级分进行检测分析,通过NIST05数据库和标准物质定性出27种化合物,包含醛、酮、酯、醇、酚、酸、烷烃类及其他苯系物等,种类繁多,其中醛类物质较多,酮类、酯类物质次之,各类物质峰面积占有机物峰面积总和的比例分别为6.9%、5.3%、35.4%、13.2%、4.6%、0.4%、1.7%、16.8%,总和为84%。

(2) 不同相对分子质量区间的有机物紫外吸收光谱、红外光谱均没有明显差别。紫外吸收光谱显示废水中存在含有不饱和双键、羰基及共轭羰基基团化合物,红外光谱分析表明废水中存在着含有不饱和双键、羰基、羟基基团化合物及芳香族化合物,其结果与GC-MS检测结果相吻合。

参考文献:

- [1] 陈宁德. 丁烯醛的生产工艺及应用[J]. 广西化工, 1997, **26**(2): 6-14.
- [2] 王怀利. 2-丁烯醛生产工艺改进研究[J]. 山东化工, 2009, **38**(11): 34-36.
- [3] 宋明川, 王家彩, 王秋慧, 等. 焚烧法处理巴豆醛废水[J]. 西南给排水, 2011, **33**(3): 34-37.
- [4] 徐茂蓉. 高浓度有机废液焚烧二次污染物排放特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005. 10-19.
- [5] 刘增军, 童祯恭, 侯煜堃, 等. 原水有机物分子量分布及去除特性研究-基于北方某水厂实测数据[J]. 华东交通大学学报, 2014, **31**(4): 123-129.
- [6] 黄满红, 李咏梅, 顾国维. 城市污水活性污泥处理系统中有机物分子量的分布及其变化[J]. 环境化学, 2006, **25**(6): 726-729.
- [7] Wang Z W, Wu Z C. Distribution and transformation of molecular weight of organic matters in membrane bioreactor and conventional activated sludge process[J]. Chemical Engineering Journal, 2009, **150**(2-3): 396-402.
- [8] 张定定, 马冬梅, 汤志涛, 等. 印染废水深度处理过程中有机污染物分子量的分布变化[J]. 环境化学, 2014, **33**(7): 1222-1228.
- [9] 董秉直, 曹达文, 范瑾初, 等. UF膜与混凝粉末活性炭联用处理微污染原水[J]. 环境科学, 2001, **22**(1): 37-40.
- [10] 舒诗湖, 严敏, 苏定江, 等. 臭氧—生物活性炭对有机物分子量分布的影响[J]. 中国环境科学, 2007, **27**(5): 638-641.
- [11] Han Q, Yan H, Zhang F, et al. Trihalomethanes (THMs) precursor fractions removal by coagulation and adsorption for bio-treated municipal wastewater: molecular weight, hydrophobicity/hydrophilicity and fluorescence[J]. Journal of Hazardous Materials, 2015, **297**: 119-126.
- [12] 李暮, 钱飞跃, 李欣珏, 等. 印染废水生化出水中有机污染物特性及在硫酸镁混凝过程中的去除行为[J]. 环境化学, 2012, **31**(1): 88-93.
- [13] 刘苗茹, 席宏波, 周岳溪, 等. 水解酸化+A/O工艺对石化废水不同分子量有机物去除效果评价[J]. 环境工程学报, 2014, **8**(7): 2665-2671.
- [14] 罗晓鸿, 曹莉莉, 王占生. 不同分子量的有机物在净水工艺中的去除研究[J]. 中国环境科学, 1998, **18**(4): 341-344.
- [15] 董秉直, 李伟英, 陈艳, 等. 用有机物分子量分布变化评价不同处理方法去除有机物的效果[J]. 水处理技术, 2003, **29**(3): 155-158.
- [16] Vidal G, Videla S, Diez M C. Molecular weight distribution of *Pinus radiata* kraft mill wastewater treated by anaerobic digestion[J]. Bioresource Technology, 2001, **77**(2): 183-197.
- [17] Bernhard M, Eubeler J P, Zok S, et al. Aerobic biodegradation of polyethylene glycols of different molecular weights in wastewater and seawater[J]. Water Research, 2008, **42**(19): 4791-4801.
- [18] Zucker I, Lester Y, Avisar D, et al. Influence of wastewater particles on ozone degradation of trace organic contaminants[J]. Environmental Science & Technology, 2015, **49**(1): 301-308.
- [19] Yaman F B, Çakmakçı M, Karadağ D, et al. Molecular weight distributions in cotton-dyeing textile wastewaters [J]. Desalination and Water Treatment, 2016, **57**(27): 12684-12691.

- [20] 蒋绍阶, 刘宗源. UV₂₅₄作为水处理中有机物控制指标的意义[J]. 重庆建筑大学学报, 2002, **24**(2): 61-65.
- [21] 李璐璐, 江韬, 闫金龙, 等. 三峡库区典型消落带土壤及沉积物中溶解性有机质(DOM)的紫外-可见光谱特征[J]. 环境科学, 2014, **35**(3): 933-941.
- [22] 虞敏达, 张慧, 何小松, 等. 河北洺河溶解性有机物光谱学特性[J]. 环境科学, 2015, **36**(9): 3194-3202.
- [23] 李志华, 张芹, 白旭丽, 等. 内源呼吸过程溶解性代谢产物的光谱特性分析[J]. 环境科学, 2014, **35**(9): 3487-3491.
- [24] 范春辉, 张颖超, 杜波, 等. 制革废水处理过程溶解性有机物的光谱特性研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, **35**(6): 1587-1591.
- [25] 郝瑞霞, 曹可心, 赵钢, 等. 用紫外光谱参数表征污水中溶解性有机污染物[J]. 北京工业大学学报, 2006, **32**(12): 1062-1066.
- [26] 陈广银, 王德汉, 吴艳, 等. 蘑菇渣对落叶堆肥中水溶性有机物光谱学特性的影响[J]. 环境化学, 2008, **27**(2): 197-201.
- [27] Hajjouji H E, Fakharedine N, Baddi G A, *et al.* Treatment of olive mill waste-water by aerobic biodegradation: an analytical study using gel permeation chromatography, ultraviolet-visible and Fourier transform infrared spectroscopy [J]. *Bioresource Technology*, 2007, **98**(18): 3513-3520.
- [28] 刘刚, 邢达, 王海珉, 等. 胆结石中蛋白质的傅里叶变换红外光谱和表面增强拉曼光谱研究[J]. 光学学报, 2002, **22**(4): 441-446.
- [29] Yang L Y, Han D H, Lee B M, *et al.* Characterizing treated wastewaters of different industries using clustered fluorescence EEM-PARAFAC and FT-IR spectroscopy: implications for downstream impact and source identification[J]. *Chemosphere*, 2015, **127**: 222-228.
- [30] 时有明, 刘刚, 刘剑虹, 等. 不同产地黑木耳的傅里叶变换红外光谱鉴别[J]. 光学学报, 2007, **27**(1): 129-132.
- [31] Tagg A S, Sapp M, Harrison J P, *et al.* Identification and quantification of microplastics in wastewater using focal plane array-based reflectance micro-FT-IR imaging [J]. *Analytical Chemistry*, 2015, **87**(12): 6032-6040.
- [32] Bernier M H, Levt G J, Fine P, *et al.* Organic matter composition in soils irrigated with treated wastewater: FT-IR spectroscopic analysis of bulk soil samples [J]. *Geoderma*, 2013, **209-210**: 233-240.
- [33] 赖波, 秦红科, 周岳溪, 等. 应用红外光谱技术快速检测ABS废水中特征污染物的分解转化[J]. 光学学报, 2011, **31**(2): 268-273.
- [34] 郗丽娟, 吕娜, 张海丰, 等. SMP形成与降解机制分析及其对MBR膜过滤的影响[J]. 化工学报, 2013, **64**(8): 3003-3008.
- [35] Smide E, Meissl K. The applicability of Fourier transform infrared (FT-IR) spectroscopy in waste management[J]. *Waste Management*, 2007, **27**(2): 268-276.
- [36] 冯计民. 红外光谱在微量物证分析中的应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010. 29-36.

CONTENTS

Scavenging Effect of Rime and East Wind on PM _{2.5} Under Air Heavy Pollution in Beijing	SUN Zhao-bin, LIAO Xiao-nong, WANG Zhan-shan, <i>et al.</i> (3679)
Impact of Collision Removal of Rainfall on Aerosol Particles of Different Sizes	DONG Qun, ZHAO Pu-sheng, CHEN Yi-na (3686)
Source Apportionment and Health Risk Assessment of VOCs During the Haze Period in the Winter in Beijing	LIU Dan, XIE Qiang, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (3693)
Pollution Characteristics and Emission Coefficient of Volatile Organic Compounds from Shoe-making Industry in Zhejiang Province	XU Zhi-rong, YAO Yi, CAI Wei-dan, <i>et al.</i> (3702)
Oxidative Capacity of the PM ₁₀ and PM _{2.5} in Beijing During 2014 APEC	GUO Qian, SHAO Long-yi, WANG Wen-hua, <i>et al.</i> (3708)
Concentration, Water-Soluble Ionic and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Composition and Sources of PM _{2.5} During Summer in Hongshan District, Wuhan	SUN Yan, QI Shi-hua, ZHANG Li, <i>et al.</i> (3714)
Statistical Characteristics of Urban Changzhou PM _{2.5} Based on <i>k</i> -means Analysis	WANG Zhen, YU Yi-jun, XU Pu-qing, <i>et al.</i> (3723)
Comparison Test Between On-line Monitoring of Water-soluble Ions and Filter-based Manual Methods for PM _{2.5}	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, SHI Ai-jun, <i>et al.</i> (3730)
Chemical Composition of Water-soluble Ions in Smoke Emitted from Tree Branch Combustion	LIU Gang, HUANG Ke, LI Jiu-hai, <i>et al.</i> (3737)
Number Concentration and Size Distribution of Particles Emitted by Light-duty Gasoline Vehicles	FAN Xiao-xiao, JIANG Jing-kun, ZHANG Qiang, <i>et al.</i> (3743)
Testbed-Based Exhaust Emission Factors for Marine Diesel Engines in China	XING Hui, DUAN Shu-lin, HUANG Lian-zhong, <i>et al.</i> (3750)
Distribution, Source and Human Exposure of Phthalic Acid Esters (PAEs) in Surface Dust in Urban Area of Xi'an City, China	ZHANG Wen-juan, WANG Li-jun, WANG Li, <i>et al.</i> (3758)
Mercury Emission Characteristics and Mercury Concentrations of Municipal Solid Waste in Waste Incineration Plants	DUAN Zhen-ya, SU Hai-tao, WANG Feng-yang, <i>et al.</i> (3766)
Role of Sulfate-Reducing Bacteria in Mercury Methylation in Soil of the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir Area	CHEN Rui, CHEN Hua, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (3774)
Impact of Urbanization on the Sources of Dissolved <i>n</i> -alkane in Underground River	LIAO Yu, SUN Yu-chuan, SHEN Li-cheng, <i>et al.</i> (3781)
Source Apportionment and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Water from Yangtze River, China; Based on PMF Model	WANG Cheng-long, ZOU Xin-qing, ZHAO Yi-fei, <i>et al.</i> (3789)
Hydro-chemical Characteristics and Quality Assessment of Surface Water in Gongga Mountain Region	HE Xiao-li, WU Yan-hong, ZHOU Jun, <i>et al.</i> (3798)
UV-Visible Spectra Properties of DOM from Taizi River in Benxi City Section by Multivariable Analysis	QIAN Feng, WU Jie-yun, YU Hui-bin, <i>et al.</i> (3806)
Vertical Distribution Characteristics of Dissolved Organic Matter in Groundwater and Its Cause	HE Xiao-song, ZHANG Hui, HUANG Cai-hong, <i>et al.</i> (3813)
Sediment Characteristics of Sewer in Different Functional Areas of Kunming	CHANG Hai-dong, JIN Peng-kang, FU Bo-wen, <i>et al.</i> (3821)
Concentration of Phosphorus in Sediments Interstitial Water as Affected by Distribution of Aquatic Plants in Dianchi Lake	DING Shuai, WANG Sheng-rui, ZHANG Rui, <i>et al.</i> (3828)
Efficiency and Mechanism of Capping with Purple Parent Rocks to Control Phosphorus Release from Sediments	HUANG Xue-jiao, SHI Wen-hao, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (3835)
Temporal and Spatial Distribution of Phosphorus in Paddy Fields Under Cyclic Irrigation of Drainage Water	JIAO Ping-jin, XU Di, ZHU Jian-qiang, <i>et al.</i> (3842)
GO/QPEI Nanocomposite for Fast and High-capacity Removal of <i>M. Aeruginosa</i>	LI Jie, XIAO Lin (3850)
Enhanced Pollutant Removal Performance of an Integrated Biological Settling Tank from Micro-polluted Water Bodies	WANG Wen-dong, LIU Hui, MA Cui, <i>et al.</i> (3858)
Odorants Removal and Microbial Characteristics in Treatment of Micro-polluted Source Water with Biological Powdered Activated Carbon-Ultrafiltration Combined Process	XUAN Yong-qi, ZHOU Li, DENG Hui-ping, <i>et al.</i> (3864)
Effect of Polysilicic Acid on the Deposition Behavior of Different Aluminum Species	ZHAO Yuan-yuan, ZHANG Yue, LI Su-ying, <i>et al.</i> (3870)
Concentration Variation and Removal of Amino Acids in Typical Drinking Sources in the South of China	LIU Wei, CAI Guang-qiang, LU Xiao-yan, <i>et al.</i> (3877)
Degradation of the Nitrogenous Heterocyclic Compound Quinoline by O ₃ /UV	CHEN Ao-lei, CHANG Feng-min, WANG Cui-ping, <i>et al.</i> (3884)
Impact of Anthraquinone-2-sulfonic Acid on the MO Decolorization, Hydrogen Production and Energy Creation During Anaerobic Fermentation of <i>Klebsiella oxytoca</i> GS-4-08 with Sucrose	HU Jin-mei, YU Lei, HUANG Tian-yin (3891)
Classification and Analysis of Dissolved Organic Matter in 2-Buternal Manufacture Wastewater	SUN Xiu-mei, SONG Guang-qing, XI Hong-bo, <i>et al.</i> (3899)
Concentration of Nitrate in Main Anoxic Stage and PHA, TP Metabolism for Nitrogen and Phosphorus Removal in Single Sludge System with Continuous Flow	WANG Xiao-ling, YUAN Dong-dan, BAI Li, <i>et al.</i> (3906)
Distribution Characteristics of Anaerobic Ammonia Oxidation Bacteria in Sediments from the Adjacent Seas of Yangtze Estuary	FU Lu-lu, ZHEN Yu, HE Hui, <i>et al.</i> (3914)
Bacterial Community Composition of Activated Sludge from Coking Wastewater	MENG Xiao-jun, LI Hai-bo, CAO Hong-bin, <i>et al.</i> (3923)
Soil Bacterial Communities Under Different Vegetation Types in the Loess Plateau	LIU Yang, HUANG Yi-mei, ZENG Quan-chao (3931)
Effects of Phenol on Activity and Microfauna Community Structure of Activated Sludge	HU Xiao-bing, RAO Qiang, TANG Su-lan, <i>et al.</i> (3939)
Comparative Investigation of Antibiotic Resistance Genes Between Wastewater and Landfill Leachate	HUANG Fu-yi, LI Hu, AN Xin-li, <i>et al.</i> (3949)
Performance and Influencing Factors of Dissimilatory Nitrate Reduction to Ammonium Process by the Strain <i>Desulfonitrospira</i> sp. CMX	XIE Bing-ke, ZHANG Yu, WANG Xiao-wei, <i>et al.</i> (3955)
Effect of Straw Incorporation and Domestic Sewage Irrigation on Ammonia Volatilization from Paddy Fields	XU Shan-shan, HOU Peng-fu, FAN Li-hui, <i>et al.</i> (3963)
Seasonal Effect of Simulated Nitrogen Deposition on Soil Respiration and Soil Enzyme Activity in Masson Pine Forest in Mt. Jinyun, Chongqing, China	ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, LI Yuan, <i>et al.</i> (3971)
Effects of Biochar Amendment and Irrigation on Denitrification Losses in Greenhouse Tomato Fields	ZHANG Wen-juan, SHE Dong-li, Gamareldawla H. D. Agbna, <i>et al.</i> (3979)
Effects of Soil Texture on Autotrophic CO ₂ Fixation Bacterial Communities and Their CO ₂ Assimilation Contents	WANG Qun-yan, WU Xiao-hong, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (3987)
Simulation of the Absorption, Migration and Accumulation Process of Heavy Metal Elements in Soil-crop System	SHI Ya-xing, WU Shao-hua, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i> (3996)
Synergetic Control of Bioavailability of Pb, Cd and As in the Rice Paddy System by Combined Amendments	WANG Ying-jie, ZOU Jia-ling, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (4004)
Effects of Different Organic Materials on Bio-availability of Cd, Pb in a Contaminated Greenhouse Soil	ZHOU Gui-yu, JIANG Hui-min, YANG Jun-cheng, <i>et al.</i> (4011)
Effect of Montmorillonite on Fractions and Availability of Phosphorus in Soils Applied with Organic Fertilizer	SONG Xian-wei, ZHAO Xiu-lan, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (4020)
Effect of Nano Zeolite on Chemical Fractions of Cd in Soil and Uptake by Chinese Cabbage at Different Soil pH and Cadmium Levels	QIN Yu-li, XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4030)
Characterization of Cr Tolerance and Accumulation in <i>Lolium perenne</i> L. and <i>Pharbitis purpurea</i> (L.) Voigt	DONG Bing-bing, CHEN Yu-yuan, HUI Hong-xia, <i>et al.</i> (4044)
<i>In vitro</i> Metabolism of Volatile Methyl Siloxanes	LI Min-dan, ZHENG Guo-mao, WAN Yi, <i>et al.</i> (4054)
Efficiency of Aerobic Co-composting of Urban Sludge and Chinese Medicinal Herbal Residues	SU Cheng-yuan, ZHENG Peng, RUAN Qi-hua, <i>et al.</i> (4062)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年10月15日 第37卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 10 Oct. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871 , Beijing 100085 , China Tel : 010-62941102 , 010-62849343 ; Fax : 010-62849343 E-mail : hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street , Beijing 100717 , China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易集团有限公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian) , P. O. Box 399 , Beijing 100044 , China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行