

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第6期

Vol.37 No.6

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

双级虚拟撞击采样器应用于固定污染源 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 排放测量 蒋靖坤, 邓建国, 李振, 马子珍, 周伟, 张强, 段雷, 郝吉明 (2003)

黄山夏季气溶胶吸湿性及与化学组分闭合 陈卉, 杨素英, 李艳伟, 银燕, 张泽锋, 于兴娜, 康娜, 严殊祺, 夏航 (2008)

沈阳大气气溶胶中水溶性无机离子的观测研究 苗红妍, 温天雪, 王璐, 徐慧 (2017)

南京夏秋季节大气干沉降水溶性离子特征及来源分析 秦阳, 朱彬, 邹嘉南, 庞博 (2025)

太原市大气颗粒物粒径和水溶性离子分布特征 曹润芳, 闫雨龙, 郭利利, 郭文帝, 何秋生, 王新明 (2034)

2014 年北京市城区臭氧超标日浓度特征及与气象条件的关系 程念亮, 李云婷, 张大伟, 陈添, 王欣, 邹宁, 陈晨, 孟凡 (2041)

机动车尾气烟尘中烷烃和有机酸的组成 袁佳雯, 刘刚, 李久海, 徐慧 (2052)

DOC/CCRT 老化对柴油公交车气态物排放特性的影响 楼狄明, 贺南, 谭丕强, 胡志远 (2059)

紫外辐照改性生物炭对 VOCs 的动态吸附 李桥, 雍毅, 丁文川, 侯江, 高屿涛, 曾晓岚 (2065)

三峡库区内陆腹地典型水库型湖泊中 DOM 吸收光谱特征 江韬, 卢松, 王齐磊, 白薇扬, 张成, 王定勇, 梁俭 (2073)

三峡库区典型农业小流域水体中溶解性有机质的光谱特征 王齐磊, 江韬, 赵铮, 梁俭, 木志坚, 魏世强, 陈雪霜 (2082)

高分辨率降水氧氮同位素变化及洞穴水响应: 以河南鸡冠洞为例 孙喆, 杨琰, 张萍, 刘肖, 梁沙, 张娜, 聂旭东, 梁胜利, 李建仓, 凌新有, 张志钦 (2093)

不同雨强条件下河流水质对流域土地利用类型与格局空间响应 季香, 刘红玉, 李玉凤, 皋鹏飞, 孙一鸣, 李玉玲 (2101)

丹江口水库沉积物重金属背景值的确定及潜在生态风险评估 赵丽, 王雯雯, 姜霞, 王书航, 李佳璐, 陈俊伊 (2113)

滴水湖及其环湖水系沉积物、土壤中多氯联苯的空间分布特征及风险评价 王薛平, 黄星, 毕春娟, 贾晋璞, 郭雪, 陈振楼 (2121)

粤桂水源地有机氯农药的污染特征及生态风险 阳宇翔, 刘昕宇, 詹志薇, 解启来, 汤嘉骏, 欧阳培毓, 陈镇新, 徐晨 (2131)

鄱阳湖浮游植物叶绿素 a 及营养盐浓度对水位波动的响应 刘霞, 刘宝贵, 陈宇炜, 高俊峰 (2141)

周期性的温度扰动对藻类群落结构演替的影响 贡丹丹, 刘德富, 张佳磊, 杨正健, 朱晓明, 谭纤茹 (2149)

溴酸盐对普通小球藻的生长以及生理特性的影响 王执伟, 刘冬梅, 张文娟, 崔福义 (2158)

微囊藻水华对水体中氮转化及微生物的影响 李洁, 张思凡, 肖琳 (2164)

城市污染河道沉积物碳氮赋存对有机质分解的影响 唐千, 刘波, 王文林, 邢鹏, 袁婧雯, 嵇玮, 沈晓宇, 季家乐 (2171)

两亲性共聚物共混 PVDF 超滤膜的界面性质与抗蛋白质污染的研究 孟晓荣, 鲁冰雪, 付东会, 辛晓强, 唐卫婷 (2179)

巯基改性海泡石吸附水中的 Hg(II) 谢婧如, 陈本寿, 张进忠, 刘江 (2187)

改性芦苇生物炭对水中低浓度磷的吸附特征 唐登勇, 黄越, 胥瑞晨, 胡洁丽, 张聪 (2195)

UiO-66 对废水中二氯苯氧乙酸的吸附特性 任天昊, 杨智临, 郭琳, 陈海, 杨琦 (2202)

对硝基苯酚在高炉水淬渣上的吸附机制及表面形研究 王哲, 黄国和, 安春江, 陈莉荣, 张思思 (2211)

高岭石、针铁矿及其二元体对胡敏酸的吸附特性 牛鹏举, 魏世勇, 方敦, 但悠梦 (2220)

硫铁比对再生水深度脱氮除磷的影响 周彦卿, 郝瑞霞, 王珍, 朱晓霞, 万京京 (2229)

单质硫颗粒尺寸及反应器类型对硫自养反硝化反应器启动的影响 马航, 朱强, 朱亮, 李祥, 黄勇, 魏凡凯, 杨朋兵 (2235)

钛盐混凝剂调理对活性污泥絮体理化性质的影响作用机制 王彩霞, 张伟军, 王东升, 王庆飞, 喻德忠 (2243)

城市污水管网中产甲烷菌的分布特性规律 孙光溪, 金鹏康, 宋吉娜, 王先宝, 杨柯瑶 (2252)

低 DO 下 AGS-SBR 处理低 COD/N 生活污水长期运行特征及种群分析 信欣, 管蕾, 姚艺朵, 羊依金, 郭俊元, 程庆锋 (2259)

微丝菌 (*Microthrix parvicella*) 原位荧光杂交 (FISH) 定量过程的条件优化 王润芳, 张红, 王琴, 王娟, 顾剑, 齐嵘, 杨敏 (2266)

基于高通量测序解析碳化温度对麻杆电极微生物群落影响 吴义诚, 贺光华, 郑越, 陈水亮, 王泽杰, 赵峰 (2271)

1 株高效去除氨氮的红假单胞菌的分离鉴定及特性 黄雪娇, 杨冲, 倪九派, 李振刚 (2276)

长期保护性耕作制度下紫色土剖面无机磷变化特征 韩晓飞, 高明, 谢德体, 王子芳 (2284)

有机物料对两种紫色土氮素矿化的影响 张名蒙, 卢吉文, 赵秀兰 (2291)

生物质炭和秸秆配合施用对土壤有机碳转化的影响 张婷, 王旭东, 逢萌雯, 刘思新, 白如霞, 黎妮, 王钰莹 (2298)

多元统计与铅同位素示踪解析旱地垂直剖面土壤中重金属来源 孙境蔚, 胡恭任, 于瑞莲, 苏光明, 王晓明 (2304)

苏南某镇土壤重金属污染的景观格局特征 陈昕, 潘剑君, 王文勇, 李炳亚 (2313)

河南洛阳市不同功能区土壤重金属污染特征及评价 刘亚纳, 朱书法, 魏学锋, 苗娟, 周鸣, 关凤杰 (2322)

杭州蔬菜基地重金属污染及风险评价 龚丹丹, 朱维琴, 顾燕青, 李淑英, 加那提·吐尼克 (2329)

土壤溶解性有机质荧光特征及其与铜的络合能力 田雨, 王学东, 陈潇霖, 华珞 (2338)

添加稳定剂对尾矿土中砷形态及转换机制的影响 陈志良, 赵述华, 钟松雄, 桑燕鸿, 蒋晓璐, 戴玉, 王欣 (2345)

应用 SHIME 模型研究肠道微生物对土壤中镉、铬、镍生物可给性的影响 尹乃毅, 都慧丽, 张震南, 蔡晓琳, 李泽烽, 孙国新, 崔岩山 (2353)

不同基因型杨树的光合特征与臭氧剂量的响应关系 辛月, 高峰, 冯兆忠 (2359)

芘胁迫对 5 种羊茅属植物根系分泌的几类低分子量有机物的影响 潘声旺, 袁馨, 刘灿, 李亚闾, 杨婷, 唐海云, 黄方玉 (2368)

维管束植物樟树和马尾松叶组织氮、硫含量指示贵阳地区大气氮、硫沉降的空间变化 徐宇, 肖化云, 郑能建, 张忠义, 瞿玲露, 赵晶晶 (2376)

苏北潮滩温室气体排放的时空变化及影响因素 许鑫王豪, 邹欣庆, 刘晶茹 (2383)

g-C₃N₄/Bi₂S₃ 复合物的制备及可见光催化降解 MO 张志贝, 李小明, 陈飞, 杨麒, 钟宇, 徐秋翔, 杨伟强, 李志军, 陈寻峰, 谢伟强 (2393)

海南省淘汰落后产能政策的污染物协同减排效应评价 耿静, 任丙南, 吕永龙, 王铁宇 (2401)

《环境科学》征订启事(2130) 《环境科学》征稿简则(2251) 信息(2178,2344)

机动车尾气烟尘中烷烃和有机酸的组成

袁佳雯, 刘刚*, 李久海, 徐慧

(南京信息工程大学环境科学与工程学院, 南京 210044)

摘要: 本研究采用直接采样方法分别对 11 辆柴油公交车和 20 辆汽油小汽车的排气管壁积尘进行采集, 再使用气相色谱与质谱联用仪(GC-MS)对样品中的烷烃和有机酸进行定性以及定量分析. 结果表明, 公交车($C_{14} \sim C_{30}$)和小汽车($C_{14} \sim C_{33}$)正构烷烃质量分数分别为 $1.31 \sim 149.08 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $15.35 \sim 556.03 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 公交车尾气尘中正构烷烃以 C_{20} 为主峰碳, 小汽车中正构烷烃以 C_{29} 为主峰碳, 且小汽车生成更多高沸点长链烷烃. 公交车中姥鲛烷和植烷总质量分数分别是 $15.24 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $21.79 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 小汽车中姥鲛烷和植烷总质量分数分别是 $2.31 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $2.69 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 公交车和小汽车姥鲛烷和植烷的比值分别为 0.699 4 和 0.858 7, 植烷和十八烷的比值分别是 0.356 5 和 0.747 2. 脂肪族有机酸的质量分数变化都比较大, 公交车和小汽车中其变化范围分别为 $0.01 \sim 40.87 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $3.8 \sim 113.7 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 公交车烟尘中质量分数最大的有机酸是 3-羟基丁酸, 丙二酸(C_3)和丁二酸(C_4)比的最大值为 5.93, 小汽车烟尘中质量分数最高的正构烷酸是正十六烷酸(C_{16}), 芳香族有机酸的质量分数范围分别为 $5.05 \sim 31.70 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $0.1 \sim 228.38 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$.

关键词: 机动车; 烟灰; 脂肪酸; 正构烷烃; 芳香酸

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)06-2052-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.06.007

Chemical Composition of Alkanes and Organic Acids in Vehicle Exhaust

YUAN Jia-wen, LIU Gang*, LI Jiu-hai, XU Hui

(School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: The soot of 11 diesel buses and 20 gasoline cars was sampled by direct sampling, and the main organic compounds of the samples were separated and qualitatively analyzed by GC-MS. The results showed that the mass fraction of *n*-alkanes was $1.31 \sim 149.08 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ and $15.35 \sim 556.03 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$. The main carbon number of *n*-alkanes in diesel buses and gasoline cars soot was 20 and 29, respectively, and gasoline cars generated more long chain alkanes with high boiling point. The total mass fraction of pristane and phytane in diesel buses was $15.24 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ and $21.79 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, respectively, while the two values in gasoline cars were $2.31 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ and $2.69 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, respectively. The ratios of pristane and phytane were 0.699 4 and 0.858 7, and the ratios of phytane and octadecane were 0.356 5 and 0.747 2. The changes of the relative mass of fatty acids were relatively large, the change ranges in buses and cars were $0.01 \sim 40.87 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ and $3.8 \sim 113.7 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, respectively, and the organic acid with the highest content in the buses was 3-hydroxybutyric acid. The maximal ratio of hexadecanoic acid and butanedioic acid (C_3/C_4) was 5.93. The most abundant *n*-alkanes in gasoline cars soot was C_{16} , and the mass fraction of aromatic acids was $5.05 \sim 31.70 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ and $0.1 \sim 228.38 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, respectively.

Key words: vehicle; soot; fatty acid; *n*-alkane; aromatic acid

近年来,随着经济发展以及城市水平的提高,汽车工业迅猛发展,能源消耗的增加,我国机动车的保有量迅速增加,空气颗粒物的粒径特征和化学组分以及污染来源也发生着变化. 机动车排放已经成为城市空气颗粒物的第一大污染源,机动车尾气带来的污染也日益严重,城市大气环境呈现出以二氧化硫、氮氧化物、臭氧和细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)为主要污染物的复合型污染特征^[1]. 机动车除了直接排放一定量的颗粒物外,还排放氮氧化物、挥发性有机物(VOCs)等污染物,而大气中的氮氧化物,能引起一系列包含有机物的复杂的化学反应,导致光化学烟雾的形成并产生臭氧,臭氧是强氧化剂,可以进一步将氮氧化物和二氧化硫氧化成二次颗粒物,同时还会将大气中的 VOCs 氧化为二次有机颗粒

(SOA)^[2,26].

有机物是城市大气颗粒物的主要组分之一,目前能分离出上万种、鉴别出几百种、能追踪分析的仅有几十种,其中极性物质有机酸是其中最难研究的一类化合物,但由于其在二次有机气溶胶形成过程中的重要性,目前已成为气溶胶化学研究重点之一^[3]. 本研究通过对不同燃料种类的公交车和小汽车中烷烃以及极性物质有机酸的测定,分析烷烃和有机酸的排放种类和特征,以及不同品牌之间小汽车尾气烟尘灰的差异,以期为大气环境污染控制提供

收稿日期: 2015-12-14; 修订日期: 2016-01-21

作者简介: 袁佳雯(1991~),女,硕士研究生,主要研究方向为大气污染防治与控制, E-mail: 1256231202@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: liugang650104@sina.com

可靠资料. 当今全球变暖和环境污染问题日益严重, 大气污染越来越受到人们的关注, 因此研究机动车排放颗粒物的化学组分特征对于正确评估其危害和识别其对空气环境质量的贡献具有重要的意义^[4,24,25].

1 材料与方法

1.1 烟尘采集

用不锈钢勺在 11 辆柴油公交车和 20 辆汽油小汽车排气管内壁刮取烟灰各 5 ~ 10 g (每辆车取 3 个平行样), 并记录下车车型、采样时间、地点. 样品在挖取后立即用铝箔 (在 500℃ 灼烧 2 h) 包裹后, 立即在冰箱中冷冻保存.

1.2 样品前处理

取 50 ~ 80 mg 混匀的烟尘样本置于试管中, 经多次预实验选择用 10 mL 二氯甲烷/甲醇混合溶剂 (2:1, 体积比) 作为洗脱液, 在室温条件下以 100 Hz 超声振荡 15 min, 重复提取 3 次. 将 3 次超声振荡后的提取液合并, 以 3 000 r·min⁻¹ 的转速离心 2 min, 用旋转蒸发器在 40℃ 浓缩上清液至 3 ~ 5 mL, 之后按照体积比 1:1 的比例分为两部分, 对这两部分浓缩液使用氮吹仪在 40℃ 吹至近干, 并对其中一部分进行衍生化处理, 另一部分用正己烷定容至 0.2 mL 后直接上气质联用仪 (Agilent6890N/5975B GC/MS) 进行检测. 选取品牌为 Adamas 的 BSTFA 衍生试剂, 经过得到的预实验结果比较, 衍生反应的最佳条件为在 70℃ 恒温水浴锅衍生 1.5 h, 衍生化完成后氮吹至近干, 以二氯甲烷/甲醇混合溶剂定容至 0.2 mL.

1.3 样品分析

样品使用 GC-MS 进行分析, 采用非极性石英毛细管色谱柱, 型号为 Agilent-5MS (30 m × 0.25 mm × 0.25 μm), GC 分析条件: 色谱总的载气流量为 0.8 mL·min⁻¹, 气化温度: 300℃, 进样量设置为 1 μL (不分流). 升温程序初始温度 60℃, 保持 2 min, 以 10℃·min⁻¹ 升温至 300℃ 后, 保持 24 min. MS 分析条件: 使用的离子源为 EI (电子轰击源), 离子源温度为 230℃, 四级杆温度保持 150℃, 溶剂延迟时间为 4.5 min, 电离电压为 70 eV, 采用全扫描方式 (SCAN), 50 ~ 350 u 进行定性分析, 并采用外标法定量.

1.4 定性和定量分析

使用 Agilent 公司的软件进行数据处理, 用 NIST 标准有机质谱库查询并结合标准化合物的保留时间进行定性分析. 使用了 4 个浓度级别的正二

十烷、十二烷酸和十八烷酸的外标曲线进行定量分析, 定量特征离子为 57 和 73, 其对应的相关系数 (R^2) 为 0.999 3 和 0.998 6.

2 结果与讨论

2.1 正构烷烃

正构烷烃是机动车排放 PM_{2.5} 中可定量有机物中的优势组分^[4], 本研究对 11 辆柴油公交车 C₁₄ ~ C₃₀ 以及 20 辆小汽车 C₁₄ ~ C₃₃ 的正构烷烃进行了定量分析, 见表 1 和表 2. 公交车和小汽车排放的正构烷烃质量分数分别为 1.31 ~ 149.08 μg·g⁻¹ 和 15.35 ~ 556.03 μg·g⁻¹, 且 11 辆公交车都能检测出正构烷烃而 20 辆小汽车中仅有 6 辆能够定量出正构烷烃 (表 2), 通过表 2 可以发现 6 辆小汽车中有两辆 (哈佛 CUV 和桑塔纳 2000) 测出的正构烷烃质量分数是其余的好几十倍, 因此, 小汽车正构烷烃质量分数与其品牌有很大关系.

Schauer 等^[6,7] 采用急速稀释采样法得到汽油车尾气排放正构烷烃 C₁₆ ~ C₂₇、柴油车尾气 C₁₅ ~ C₂₉ 和测定天然气直接燃烧产生 C₁₃ ~ C₂₉, Perrone 等^[8] 通过研究不同欧洲排放标准下正构烷烃 C₂₀ ~ C₃₂ 的排放因子, 发现欧 I 标准下正构烷烃的排放因子 (2 034 μg·km⁻¹) 是欧 II (356 μg·km⁻¹) 将近 6 倍, 欧 III (87 μg·km⁻¹) 标准下其排放因子继续下降, 而欧 IV (101 μg·km⁻¹) 与欧 III 标准下其排放因子相对持平, 王桂华等^[9] 在 13 种工况下采集排气微粒, 分析结果表明, 微粒 SOF 组分中 80% 左右为正构烷烃和支链烷烃, 碳数为 C₉ ~ C₂₈. 上述研究中排放的正构烷烃碳数范围与本研究略有差异, 由此可见, 不同采样方法以及不同燃油种类都会影响碳数的变化.

2 种燃料类型 (汽油、柴油) 的机动车尾气尘中正构烷烃的分布特征存在显著差别, 见图 1. 公交车尾气尘中正构烷烃以 C₂₀ 为主峰碳, 近似于标准正态分布, 且 C₁₉ ~ C₂₁ 烷烃比重明显高于小汽车尾气尘, 该特征可用于识别环境空气颗粒物中来自柴油尾气排放的正构烷烃^[10,11]. 小汽车中正构烷烃以 C₂₉ 为主峰碳, 呈后峰型, 且小汽车生成更多高沸点长链烷烃. 由于小汽车中的正构烷烃含量低, 从而并未得出和文献 [12] 中高碳区间 (C₂₅ ~ C₃₁) 呈现奇数优势的结论. 润滑油的使用对于汽车尾气中正构烷烃的分布有着更大的影响, 所以导致二者排放的颗粒物中正构烷烃有着不同的分布^[4,13].

2.2 支链烷烃

支链烷烃是化石燃料中的一种重要成分, 姥烷

表 1 公交车排气管烟灰中烷烃的质量分数¹⁾/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$
Table 1 Mass fraction of alkanes in diesel bus exhaust/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$

项目	编号										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
C ₁₄		0.52	1.48	4.01	0.29	0.55		0.27	0.31	0.12	0.14
C ₁₅	1.16	1.10	6.24	10.59	0.53	1.35		0.54	0.61	0.22	0.28
C ₁₆	2.30	1.90	13.58	14.61	0.72	2.44	0.07	0.96	0.87	0.35	0.48
C ₁₇	4.45	2.88	19.73	16.07	0.92	3.98	0.08	1.72	1.10	0.49	0.77
姥鲛烷	2.35	1.23	5.58	2.75	0.37	1.47	0.11	0.39	0.43	0.22	0.35
C ₁₈	9.07	3.79	21.85	14.98	1.12	5.19	0.11	2.39	1.22	0.56	0.86
植烷	4.00	1.22	7.35	4.76	0.52	1.81	0.14	0.75	0.48	0.29	0.47
C ₁₉	19.59	4.79	22.70	12.66	1.29	6.12	0.15	3.35	1.36	0.57	0.90
C ₂₀	28.46	5.29	24.58	10.50	1.43	6.61	0.18	4.25	1.56	0.55	0.87
C ₂₁	28.69	5.00	25.14	7.05	1.38	6.46	0.16	4.35	1.53	0.52	0.55
C ₂₂	21.28	3.61	22.98	4.73	1.17	5.68	0.16	3.31	1.23	0.42	0.35
C ₂₃	13.75	2.11	17.65	3.23	0.84	4.12	0.16	2.20	0.95	0.43	0.22
C ₂₄	7.58	1.18	11.67	2.24	0.66	2.94		1.40	0.67	0.35	0.17
C ₂₅	3.87	0.81	6.75	1.60	0.60	2.21		0.73	0.47	0.34	0.16
C ₂₆	1.72	0.62	3.41	1.13	0.42	1.32			0.28	0.20	0.15
C ₂₇	0.81	0.51	1.90		0.42	0.66					0.12
C ₂₈		0.52			0.38	0.54					0.12
C ₂₉		0.47			0.33						0.12
C ₃₀					0.35						
C _{max}	21	20	21	19	20	20	20	21	20	19	19
总质量分数	149.08	37.56	212.61	110.91	13.75	53.43	1.31	26.61	13.08	5.61	7.08

1) C_{max}表示最高质量分数酸的碳数,下同

表 2 小汽车排气管烟灰中烷烃的质量分数/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$
Table 2 Mass fraction of alkanes in gasoline car exhaust/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$

项目	Mini Cooper 2	宝马 328Li	别克 GL8	福特 蒙迪欧	哈佛 CUV	桑塔纳 2000
C ₁₄	0.36		0.51			
C ₁₅	0.74	0.59	0.69	0.29	6.49	0.41
C ₁₆	1.07	0.76	0.79	0.38	13.52	0.98
C ₁₇	1.61	0.90	0.85	0.56	21.26	2.26
姥鲛烷	0.96	0.57	0.47	0.32	14.11	1.29
C ₁₈	1.37	0.89	0.81	0.52	29.86	4.50
植烷	1.16	0.64	0.58	0.31	18.49	2.31
C ₁₉	1.19	0.77	0.77	0.63	46.44	7.47
C ₂₀	1.32	0.94	0.70	0.73	77.26	11.55
C ₂₁	1.05	0.74	0.61	0.74	94.62	13.52
C ₂₂	0.80	0.86	0.53	0.77	91.03	12.12
C ₂₃	0.92	0.96	0.56	0.72	71.38	8.86
C ₂₄	0.65	1.67	0.58	0.91	39.80	5.14
C ₂₅	0.69	2.45	0.92	1.04	20.36	4.45
C ₂₆	0.96	3.82	0.60	0.95	7.80	
C ₂₇	2.10	5.14	0.71	0.97	3.59	
C ₂₈	1.68	5.98	0.99	1.47		
C ₂₉	1.90	6.27	1.03	1.67		
C ₃₀	1.11	5.24	0.76	0.93		
C ₃₁	0.80	3.87	0.77	1.01		
C ₃₂	0.50	2.40	0.69	0.63		
C ₃₃		1.16	0.43			
C _{max}	27	29	29	29	21	21
总质量分数	22.93	46.59	15.35	15.55	556.03	74.88

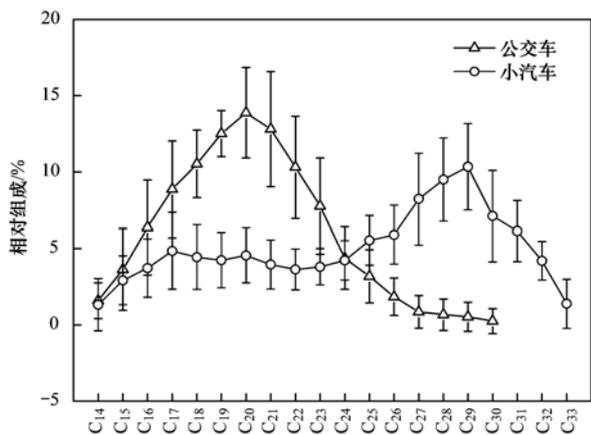


图1 机动车尾气排放中单体正构烷烃相对组成分布

Fig. 1 Relative composition of individual n-alkane from vehicle emissions

烷和植烷的比值以及植烷和十八烷的比值常分别用来判断原始物质的沉积环境和沉积物的成熟度^[5]。在饱和烃气相色谱图中,不同碳数的正构烷烃系列呈均匀间隔分布,姥鲛烷、植烷在油品中具有较高浓度,且分别紧随正十七烷、正十八烷出峰^[14]。

本研究对公交车和小汽车中姥鲛烷和植烷进行了定量分析(表1和表2),公交车中姥鲛烷和植烷总质量分数分别是 $15.24 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $21.79 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,小汽车中姥鲛烷和植烷总质量分数分别是 $2.31 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $2.69 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,姥鲛烷和植烷的比值分别为0.699 4和0.858 7,此结果略高于文献^[5]。Schauer等^[7]在有催化装置的汽油机动车的研究中并未在颗粒相污染物中检测到姥鲛烷和植烷,只在气相尾气中测得其比值分别为2.4(有催化装置)和0.9(无催化装置),其结果都比本研究中的比值高(图1),其原因可能是采样方法、燃料和样品本身的差异。

公交车和小汽车尾气排放中,植烷和十八烷的比值分别是0.356 5和0.747 2,明显高于方冬青等^[5]研究中的比值(0.290 0和0.488 2)。柴油车和汽油车在姥鲛烷和植烷上的差异可能是由于燃料的不同所致。

2.3 脂肪族有机酸

实验分析了11辆柴油公交车和20辆汽油小汽车排气管烟灰样品共31个,检测出公交车中脂肪族4种,分别为3-羟基丁酸、丙二酸(C_3)、丁二酸(C_4)、顺丁烯二酸;小汽车中有正构烷酸7种,分别为 C_8 、 C_9 、 C_{10} 、 C_{12} 、 C_{14} 、 C_{16} 、 C_{18} ,其质量分数参照表3和表4。

由表3和表4可以看出,公交车和小汽车烟灰中脂肪族有机酸的质量分数变化都比较大,变化范围分别为 $0.01 \sim 40.87 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $3.82 \sim 113.75$

$\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,公交车烟灰中质量分数最大的有机酸是3-羟基丁酸,小汽车烟灰中质量分数最高的正构烷酸是正十六烷酸(C_{16}),且表现出明显的偶碳数优势,这与He等^[15]、Rogge等^[16]和刘晨书等^[17]对隧道以及大气颗粒物的研究结果一致,但本研究中的正构烷酸的种类都少于上述报道,其中He等测得正构烷酸 $\text{C}_{11} \sim \text{C}_{23}$,其总排放量是 $24.4 \mu\text{g}\cdot(\text{辆}\cdot\text{km})^{-1}$;刘晨书等测出正构烷酸 $\text{C}_{10} \sim \text{C}_{30}$ 以及油酸、亚油酸和桐油酸这3种烯酸;Rogge等测出 $\text{C}_{14} \sim \text{C}_{20}$ 的正构烷酸浓度在 $5 \sim 926 \text{ ng}\cdot\text{mg}^{-1}$;同时还测出两个不饱和脂肪酸分别为9-hexadecenoic, $240 \text{ ng}\cdot\text{mg}^{-1}$ 和9-octadecenoic, $71 \text{ ng}\cdot\text{mg}^{-1}$ 。正构烷酸是脂肪酸一元羧酸的一种,它在机动车方面的来源包括排气管废气、轮胎磨损碎片和刹车摩擦碎片等,并且不同类型的机动车尾气的成分也大有不同^[16],因此采样方法、种类以及采样过程和环境等因素都是造成本研究与上述文献差别的原因。一般认为正构烷酸来自于烷烃的燃烧或氧化过程,并且在有催化的条件下产率更高^[18,19,27],因此本实验中未装有催化装置的柴油公交车排放的正构烷酸相对于汽油车而言并未检测出正构烷酸。

通过采集不同种类机动车尾气烟灰发现,小汽车烟灰的成分会因汽车品牌而不同^[20],如奇瑞QQ和桑塔纳2000并未检测出脂肪族有机酸,公交车烟灰中脂肪族有机酸种类中二元羧酸较多。Kawamura等^[18]检测到汽油和柴油机动车排放的二元羧酸与城区空气中的种类相似,而机动车排放二元羧酸的浓度是大气中平均浓度的28倍(汽油)和144倍(柴油),说明机动车尾气是大气气溶胶中有机酸的一个重要来源,其二元羧酸在柴油车排放浓度明显高于汽油车,与本研究一致。

由于丙二酸 C_3 和丁二酸 C_4 在燃料中均存在,并可由于机动车燃料的不完全燃烧而被排放到大气中,但由于结构的差异,丙二酸在机动车燃料的燃烧中更容易被分解,所以有机动车排放的丙二酸与丁二酸的比值往往小于1且具有一定的数量特征。因此, C_3 和 C_4 比值可以作为衡量机动车排放的有机酸对气溶胶中有机酸贡献的参考。1987年在洛杉矶对机动车排放源的研究指出机动车所排放的有机酸 C_3/C_4 平均值为0.35,当气溶胶中 C_3/C_4 大于该值时即可认为大气的光化学氧化作用对二元羧酸的贡献(大气环境下丁二酸可通过光化学反应生成丙二酸)^[16]。本研究中 C_3/C_4 的最大值为5.93,远高于0.35,说明环境大气中二元羧酸存在光化学二次转化来源^[21,22]。

表3 公交车排气管烟灰中脂肪酸的质量分数/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$
Table 3 Mass fraction of fatty acids in diesel bus exhaust/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$

项目	编号										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
3-羟基-丁酸			14.77	14.58	0.67	0.89		5.00	0.03	0.33	
丙二酸(C ₃)			11.62	3.95							
丁二酸(C ₄)			1.96	11.43				0.63			
顺丁烯二酸			7.54	10.91			0.01	3.98			1.08
总质量分数	0	0	35.89	40.87	0.67	0.89	0.01	9.60	0.03	0.33	1.08
C ₃ /C ₄			5.93	0.35							

表4 小汽车排气管烟灰中正构烷酸的质量分数/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$
Table 4 Mass fraction of normal alkane acids in gasoline car exhaust/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$

项目	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₂	C ₁₄	C ₁₆	C ₁₈	总质量分数	C _{max}
Mini Cooper 2		0.67	3.18	5.84	5.27	24.66	4.14	43.76	16
奥迪 A4L	0.42		4.93	7.44	4.44	33.14	8.23	58.58	16
奥迪 A6			0.74	3.50	1.05	2.05		7.34	16
宝马 118i		0.38	1.91	12.59	8.18	22.13	2.24	47.43	16
宝马 328Li		0.09	1.54	2.19				3.82	
别克 GL8		0.56	0.34	2.35	1.74	13.99	3.49	22.46	16
大众 Magotan		0.40	5.03	6.53	1.63	6.81		20.40	16
大众 帕萨特		0.30		1.34	0.70	8.91	0.52	11.76	16
丰田 Previa				31.37		14.62		45.99	12
福特 蒙迪欧		1.66	6.96	11.17	6.73	54.53	18.14	99.20	16
哈佛 CUV	7.95	10.33	11.69	46.72	30.95	6.11		113.75	12
华晨宝马 320Li		1.07	1.76	11.20	6.29	20.19		40.51	16
马自达 3		0.24	0.49	1.23		3.79	0.38	6.14	16
奇瑞 QQ								0.00	
桑塔纳 2000								0.00	
沃尔沃 CX60		0.32	0.88	2.82	1.63	3.05		8.69	16
沃尔沃 S80L		-0.50		1.13	1.37	2.28		4.29	16
宝马 328i		0.40	0.11	0.70	0.18	5.96		7.35	16
本田 Odyssey			0.81	4.04	1.06			5.92	
奥迪 Q7		0.42	1.38	2.91	2.21	6.53		13.44	16

2.4 芳香族有机酸

公交车和小汽车排气管烟灰中芳香族有机酸的质量分数如表5和表6所示,本研究对5种芳香酸(2-羟基苯甲酸、3-羟基苯甲酸、4-羟基苯甲酸、1,2-苯二甲酸、1,4-苯二甲酸)进行了定量分析,公交车和小汽车排放的质量分数范围分别为5.05~31.70 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 和0.1~228.38 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$.

关于芳香酸的报道比较少,多集中在燃油锅炉

的研究中. Kawamura 等^[23]比较大气、机动车和机油中C₁~C₁₀有机酸研究结果表明,未使用过的机油中不含有苯甲酸,但是使用后的机油中便有苯甲酸,其推测苯甲酸是内燃机运行中的氧化产物.另外,方冬青等^[5]对汽油车、大型柴油车和小型柴油车中9种芳香酸进行了定量研究,排放的浓度分别为2461.6、246.5和2361.6 $\text{ng}\cdot\text{mg}^{-1}$,其值均比本研究中的高.

表5 公交车排气管烟灰中芳香族有机酸的质量分数/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$
Table 5 Mass fraction of aromatic acids in diesel bus exhaust/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$

项目	编号										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
3-羟基苯甲酸	1.16		0.50	1.11							
4-羟基苯甲酸	3.92		1.78	0.59							
1,2-苯二甲酸				2.58							
1,4-苯二甲酸			17.10	27.42				5.95			
总质量分数	5.08		19.38	31.70				5.95			

表 6 小汽车排气管烟灰中芳香族有机酸的质量分数/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$
Table 6 Mass fraction of aromatic acids in gasoline car exhaust/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$

项目	2-羟基苯甲酸	3-羟基苯甲酸	4-羟基苯甲酸	1,2-苯二甲酸	1,4-苯二甲酸	总质量分数
Mini Cooper 2	2.25	7.59	12.66	72.85	108.10	203.45
奥迪 A4L	0.70	5.50	8.24	4.26	8.22	26.92
奥迪 A6		0.04	0.55			0.59
宝马 118i			1.09	0.68		1.77
宝马 328Li		0.22	0.04			0.26
别克 GL8			0.10			0.10
大众 Magotan		0.10	1.23			1.33
大众 帕萨特		0.32	0.61		1.44	2.37
丰田 Previa	32.42	51.16	90.89		10.15	184.62
福特 蒙迪欧	1.62	2.97	10.02	9.49	7.59	31.69
哈佛 CUV		42.66	82.66		34.31	159.63
华晨宝马 320Li		2.47	4.00			6.47
马自达 3	0.85	2.76	5.77	14.61	17.98	41.97
奇瑞 QQ		193.64	34.74			228.38
桑塔纳 2000		20.40	35.21			55.61
沃尔沃 CX60	0.21	2.54	5.88	3.73	6.35	18.71
沃尔沃 S80L		3.02	2.84		3.74	9.60
宝马 328i						0.00
本田 Odyssey		0.78	0.09			0.87
奥迪 Q7		2.15	3.46		1.18	6.79

本研究中在公交车以及小汽车烟灰排放的芳香酸中比较可以看出,小汽车中芳香酸种类以及含量都明显高于公交车,并且小汽车中丰田 Previa、哈佛 CUV、奇瑞 QQ 以及桑塔纳 2000 中芳香酸的含量都是其余小汽车的几十倍,从中可以看出小汽车不同品牌之间芳香酸排放存在着很大差异。

3 结论

(1) 汽油车中烷烃的质量分数明显低于柴油公交车,且汽油车中会产生更长的更多高沸点长链烷烃。公交车尾气尘中正构烷烃呈以 C_{20} 为主峰的单峰型,且 $\text{C}_{19} \sim \text{C}_{21}$ 烷烃比重明显高于小汽车尾气尘,小汽车中正构烷烃以 C_{29} 为主峰碳,呈后峰型。

(2) 汽油车烟灰中脂肪酸种类大多是正构烷酸,而柴油公交车中二元羧酸比较多,两种燃油类型机动车中脂肪酸质量分数最大分别是十六烷酸和 3-羟基丁酸,小汽车中芳香酸种类以及含量都明显高于公交车。不同品牌的小汽车有机酸有很大不同,如丰田 Previa、哈佛 CUV、奇瑞 QQ 以及桑塔纳 2000 中有机酸总质量分数都是其余小汽车的几十倍。

参考文献:

[1] 宋晓晖, 毕晓辉, 吴建会, 等. 杭州市空气颗粒物污染特征及变化规律研究[J]. 环境污染与防治, 2012, 34(7): 60-63.
[2] 芮冬梅, 陈建江, 冯银厂. 南京市可吸入颗粒物(PM_{10})来源及防治对策[J]. 环境科学导刊, 2008, 27(1): 77-79.

[3] 徐小娟, 李杏茹, 王跃思, 等. 北京及周边城市一元脂肪酸大气颗粒物干沉降通量及来源分析研究[J]. 环境科学, 2012, 33(5): 1425-1430.
[4] China S, Salvadori N, Mazzoleni C. Effect of traffic and driving characteristics on morphology of atmospheric soot particles at freeway on-ramps [J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48(6): 3128-3135.
[5] 方冬青, 蔡天骥, 张阳, 等. 我国机动车和燃油锅炉颗粒有机物排放特征[J]. 化学工业与工程, 2015, 32(5): 44-51.
[6] Schauer J J, Kleeman M J, Cass G R, et al. Measurement of emissions from air pollution sources. 2. C_1 through C_{30} organic compounds from medium duty diesel trucks [J]. Environmental Science & Technology, 1999, 33(10): 1578-1587.
[7] Schauer J J, Kleeman M J, Cass G R, et al. Measurement of emissions from air pollution sources. 5. C_1 - C_{32} organic compounds from gasoline-powered motor vehicles [J]. Environmental Science & Technology, 2002, 36(6): 1169-1180.
[8] Perrone M G, Carbone C, Faedo D, et al. Exhaust emissions of polycyclic aromatic hydrocarbons, *n*-alkanes and phenols from vehicles coming within different European classes [J]. Atmospheric Environment, 2014, 82: 391-400.
[9] 王桂华, 王钧效, 黄学政, 等. 气相色谱-质谱联用测定柴油机排气微粒中的可溶性有机组分[J]. 色谱, 2004, 22(4): 445-448.
[10] Kerminen V M, Mäkelä T E, Ojanen C H, et al. Characterization of the particulate phase in the exhaust from a diesel car [J]. Environmental Science & Technology, 1997, 31(7): 1883-1889.
[11] Fujitani Y, Saitoh K, Fushimi A, et al. Effect of isothermal

- dilution on emission factors of organic carbon and *n*-alkanes in the particle and gas phases of diesel exhaust [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **59**: 389-397.
- [12] 胡冬梅, 彭林, 白慧玲, 等. 高等植物、燃煤和机动车排放正构烷烃特征分析[J]. *环境化学*, 2014, **33**(5): 716-723.
- [13] Brandenberger S, Mohr M, Grob K, *et al.* Contribution of unburned lubricating oil and diesel fuel to particulate emission from passenger cars [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(37): 6985-6994.
- [14] 王鑫平, 孙培艳, 周青, 等. 原油饱和烃指纹的内标法分析[J]. *分析化学*, 2007, **35**(8): 1121-1126.
- [15] He L Y, Hu M, Zhang Y H, *et al.* Fine particle emissions from on-road vehicles in the Zhujiang Tunnel, China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **42**(12): 4461-4466.
- [16] Rogge W F, Hildemann L M, Mazurek M A, *et al.* Sources of fine organic aerosol. 2. Noncatalyst and catalyst-equipped automobiles and heavy-duty diesel trucks [J]. *Environmental Science & Technology*, 1993, **27**(4): 636-651.
- [17] 刘晨书, 李杏茹, 张姗姗, 等. 北京大气颗粒物中一元羧酸的季节变化和来源分析[J]. *中国环境科学*, 2009, **29**(7): 673-678.
- [18] Kawamura K, Kaplan I R. Motor exhaust emissions as a primary source for dicarboxylic acids in Los Angeles ambient air [J]. *Environmental Science & Technology*, 1987, **21**(1): 105-110.
- [19] Biswas S, Verma V, Schauer J J, *et al.* Chemical speciation of PM emissions from heavy-duty diesel vehicles equipped with diesel particulate filter (DPF) and selective catalytic reduction (SCR) retrofits [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(11): 1917-1925.
- [20] 艾宏志, 周围. 气相色谱质谱联用分析机动车尾气中的有机成分[J]. *光谱实验室*, 2010, **27**(3): 839-843.
- [21] 杨冰玉, 黄星星, 郑桢, 等. 厦门城区大气颗粒物 PM₁₀ 中有有机酸源谱特征分析[J]. *环境科学*, 2013, **34**(1): 8-14.
- [22] Ban-Weiss G A, McLaughlin J P, Harley R A, *et al.* Long-term changes in emissions of nitrogen oxides and particulate matter from on-road gasoline and diesel vehicles [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(2): 220-232.
- [23] Kawamura K, Ng L L, Kaplan I R. Determination of organic acids (C1-C10) in the atmosphere, motor exhausts, and engine oils [J]. *Environmental Science & Technology*, 1985, **19**(11): 1082-1086.
- [24] Herrington J S, Hays M D, George B J, *et al.* The effects of operating conditions on semivolatile organic compounds emitted from light-duty, gasoline-powered motor vehicles [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **54**: 53-59.
- [25] Vouitsis E, Ntziachristos L, Pistikopoulos P, *et al.* An investigation on the physical, chemical and ecotoxicological characteristics of particulate matter emitted from light-duty vehicles [J]. *Environmental Pollution*, 2009, **157**(8-9): 2320-2327.
- [26] Pio C, Mirante F, Oliveira C, *et al.* Size-segregated chemical composition of aerosol emissions in an urban road tunnel in Portugal [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **71**: 15-25.
- [27] Grigoratos T, Fontaras G, Kalogirou M, *et al.* Effect of rapeseed methylester blending on diesel passenger car emissions-Part 2: unregulated emissions and oxidation activity [J]. *Fuel*, 2014, **128**: 260-267.

CONTENTS

Application of a Two-stage Virtual Impactor in Measuring of PM ₁₀ and PM _{2.5} Emissions from Stationary Sources	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, LI Zhen, <i>et al.</i> (2003)
Hygroscopic Properties and Closure of Aerosol Chemical Composition in Mt. Huang in Summer	CHEN Hui, YANG Su-ying, LI Yan-wei, <i>et al.</i> (2008)
Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Shenyang	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Lu, <i>et al.</i> (2017)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Ions in Dry Deposition in the Summer and Autumn of Nanjing	QIN Yang, ZHU Bin, ZOU Jia-nan, <i>et al.</i> (2025)
Distribution Characteristics of Water-soluble Ions in Size-segregated Particulate Matters in Taiyuan	CAO Run-fang, YAN Yu-long, GUO Li-li, <i>et al.</i> (2034)
Characteristics of Ozone over Standard and Its Relationships with Meteorological Conditions in Beijing City in 2014	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2041)
Chemical Composition of Alkanes and Organic Acids in Vehicle Exhaust	YUAN Jia-wen, LIU Gang, LI Jiu-hai, <i>et al.</i> (2052)
Effect of DOC/CCRT Aging on Gaseous Emission Characteristics of an In-used Diesel Engine Bus	LOU Di-ming, HE Nan, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (2059)
Studies of Dynamic Adsorption Behavior of VOCs on Biochar Modified by Ultraviolet Irradiation	LI Qiao, YONG Yi, DING Wen-chuan, <i>et al.</i> (2065)
Absorption Spectral Characteristic Dynamics of Dissolved Organic Matter (DOM) from a Typical Reservoir Lake in Inland of Three Gorges Reservoir Areas: Implications for Hg Species in Waters	JIANG Tao, LU Song, WANG Qi-lei, <i>et al.</i> (2073)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Waters of Typical Agricultural Watershed of Three Gorges Reservoir Areas	WANG Qi-lei, JIANG Tao, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (2082)
High-resolution Variations of Oxygen and Hydrogen Isotopes of Precipitation and Feedback from Cave Water: An Example of Jiguan Cave, Henan	SUN Zhe, YANG Yan, ZHANG Ping, <i>et al.</i> (2093)
Spatial Response of River Water Quality to Watershed Land Use Type and Pattern Under Different Rainfall Intensities	JI Xiang, LIU Hong-yu, LI Yu-feng, <i>et al.</i> (2101)
Determination of Background Value and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Danjiangkou Reservoir	ZHAO Li, WANG Wen-wen, JIANG Xia, <i>et al.</i> (2113)
Spatial Distribution Characteristics and Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in Sediments and Soils from the Dishui Lake and Its River System	WANG Xue-ping, HUANG Xing, BI Chun-juan, <i>et al.</i> (2121)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Water Source Areas of Guangdong and Guangxi	YANG Yu-xiang, LIU Xin-yu, ZHAN Zhi-wei, <i>et al.</i> (2131)
Responses of Nutrients and Chlorophyll a to Water Level Fluctuations in Poyang Lake	LIU Xia, LIU Bao-gui, CHEN Yu-wei, <i>et al.</i> (2141)
Influence of Periodic Temperature Disturbance on the Succession of Algal Community Structure	GONG Dan-dan, LIU De-fu, ZHANG Jia-lei, <i>et al.</i> (2149)
Effects of Bromate on the Growth and Physiological Characteristics of <i>Chlorella vulgaris</i>	WANG Zhi-wei, LIU Dong-mei, ZHANG Wen-juan, <i>et al.</i> (2158)
Effect of Water Bloom on the Nitrogen Transformation and the Relevant Bacteria	LI Jie, ZHANG Si-fan, XIAO Lin (2164)
Effect of Carbon and Nitrogen Forms on Decomposition of Organic Matter in Sediments from Urban Polluted River	TANG Qian, LIU Bo, WANG Wen-lin, <i>et al.</i> (2171)
Interfacial Property of Amphiphilic Copolymer Blending PVDF UF Membrane and Protein Anti-fouling	MENG Xiao-rong, LU Bing-xue, FU Dong-hui, <i>et al.</i> (2179)
Adsorption of Hg(II) in Water by Sulfhydryl-Modified Sepiolite	XIE Jing-ru, CHEN Ben-shou, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (2187)
Adsorption Behavior of Low Concentration Phosphorus from Water onto Modified Reed Biochar	TANG Deng-yong, HUANG Yue, XU Rui-chen, HU Jie-li, <i>et al.</i> (2195)
Adsorption Characteristics of 2,4-D on UiO-66 from Wastewater	REN Tian-hao, YANG Zhi-lin, GUO Lin, <i>et al.</i> (2202)
Mechanism and Surface Fractal Characteristics for the Adsorption of <i>p</i> -nitrophenol on Water-quenched Blast Furnace Slag	WANG Zhe, HUANG Guo-he, AN Chun-jiang, <i>et al.</i> (2211)
Adsorption Characteristics for Humic Acid by Binary Systems Containing Kaolinite and Goethite	NIU Peng-ju, WEI Shi-yong, FANG Dun, <i>et al.</i> (2220)
Effects of Sulfur/sponge Iron Ratio for Deep Denitrification and Phosphorus Removal of Reclaimed Water	ZHOU Yan-qing, HAO Rui-xia, WANG Zhen, <i>et al.</i> (2229)
Effect of Element Sulfur Particle Size and Type of the Reactor on Start-up of Sulfur-based Autotrophic Denitrification Reactor	MA Hang, ZHU Qiang, ZHU Liang, <i>et al.</i> (2235)
Influencing Mechanism of Titanium Salt Coagulant Chemical Conditioning on the Physical and Chemical Properties of Activated Sludge Floes	WANG Cai-xia, ZHANG Wei-jun, WANG Dong-sheng, <i>et al.</i> (2243)
Distribution Characteristics of Methanogens in Urban Sewer System	SUN Guang-xi, JIN Peng-kang, SONG Ji-na, <i>et al.</i> (2252)
Long-term Performance and Bacterial Community Composition Analysis of AGS-SBR Treating the Low COD/N Sewage at Low DO Concentration Condition	XIN Xin, GUAN Lei, YAO Yi-duo, <i>et al.</i> (2259)
Optimization for <i>Microthrix parvicella</i> Quantitative Processing of Fluorescence <i>in situ</i> Hybridization (FISH)	WANG Run-fang, ZHANG Hong, WANG Qin, <i>et al.</i> (2266)
Influence of Carbonization Temperature on Bacterial Community of the Biological Carbon Electrode Based on High-throughput Sequencing Technology	WU Yi-cheng, HE Guang-hua, ZHENG Yue, <i>et al.</i> (2271)
Isolation, Identification and Characteristics of a <i>Rhodospseudomonas</i> with High Ammonia-nitrogen Removal Efficiency	HUANG Xue-jiao, YANG Chong, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (2276)
Variation Characteristics of Inorganic Phosphorus in Purple Soil Profile Under Different Conservation Tillage Treatments	HAN Xiao-fei, GAO Ming, XIE De-ti, <i>et al.</i> (2284)
Effect of Different Organic Materials on Nitrogen Mineralization in Two Purple Soils	ZHANG Ming-hao, LU Ji-wen, ZHAO Xiu-lan (2291)
Impacts of Biochar and Straw Application on Soil Organic Carbon Transformation	ZHANG Ting, WANG Xu-dong, PANG Meng-wen, <i>et al.</i> (2298)
Tracing Sources of Heavy Metals in the Soil Profiles of Drylands by Multivariate Statistical Analysis and Lead Isotope	SUN Jing-wei, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (2304)
Landscape Patterns Characteristics of Soil Heavy Metal Pollution in a Town of Southern Jiangsu	CHEN Xin, PAN Jian-jun, WANG Wen-yong, <i>et al.</i> (2313)
Assessment and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Soil of Different Functional Areas in Luoyang	LIU Ya-na, ZHU Shu-fa, WEI Xue-feng, <i>et al.</i> (2322)
Evaluation on Heavy Metal Pollution and Its Risk in Soils from Vegetable Bases of Hangzhou	GONG Meng-dan, ZHU Wei-qin, GU Yan-qing, <i>et al.</i> (2329)
Fluorescence Spectroscopic Characteristics and Cu ²⁺ -complexing Ability of Soil Dissolved Organic Matter	TIAN Yu, WANG Xue-dong, CHEN Xiao-lin, <i>et al.</i> (2338)
Effect of Stabilizer Addition on Soil Arsenic Speciation and Investigation of Its Mechanism	CHEN Zhi-liang, ZHAO Shu-hua, ZHONG Song-xiong, <i>et al.</i> (2345)
Effects of Human Gut Microbiota on Bioaccessibility of Soil Cd, Cr and Ni Using SHIME Model	YIN Nai-yi, DU Hui-li, ZHANG Zhen-nan, <i>et al.</i> (2353)
Photosynthetic Characteristics and Ozone Dose-response Relationships for Different Genotypes of Poplar	XIN Yue, GAO Feng, FENG Zhao-zhong (2359)
Effects of Pyrene on Low Molecule Weight Organic Compounds in the Root Exudates of Five Species of <i>Festuca</i>	PAN Sheng-wang, YUAN Xin, LIU Can, <i>et al.</i> (2368)
N% and S% in Leaves of Vascular Plants <i>Cinnamomum camphora</i> and <i>Pinus massoniana</i> Lamb. for Indicating the Spatial Variation of Atmospheric Nitrogen and Sulfur Deposition	XU Yu, XIAO Hua-yun, ZHENG Neng-jian, <i>et al.</i> (2376)
Temporal and Spatial Dynamics of Greenhouse Gas Emissions and Its Controlling Factors in a Coastal Saline Wetland in North Jiangsu	XU Xin-wanghao, ZOU Xin-qing, LIU Jing-ru (2383)
Preparation of Visible-light-induced g-C ₃ N ₄ /Bi ₂ S ₃ Photocatalysts for the Efficient Degradation of Methyl Orange	ZHANG Zhi-bei, LI Xiao-ming, CHEN Fei, <i>et al.</i> (2393)
Estimation of Co-benefits from Pollution Emission Reduction by Eliminating Backward Production Capacities in Hainan Province	GENG Jing, REN Bing-nan, LÜ Yong-long, <i>et al.</i> (2401)

《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6月15日 第37卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 6 Jun. 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	中国国际图书贸易总公司 (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