

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.7

第40卷 第7期

目次

《大气污染防治行动计划》实施的环境健康效果评估	武卫玲, 薛文博, 王燕丽, 雷宇, 冯涛, 蔡泽林 (2961)
基于达标约束的南京市环境空气质量情景模拟	谢放尖, 史之浩, 李婧祎, 郑新梅, 胡建林, 刘春蕾, 杨峰 (2967)
郑州市 PM _{2.5} 中水溶性离子特征及来源分析	杨留明, 王申博, 郝祺, 韩士杰, 李晨, 赵庆炎, 燕启社, 张瑞芹 (2977)
能见度与 PM _{2.5} 浓度关系及其分布特征	王继康, 张恒德, 桂海林, 饶晓琴, 张碧辉 (2985)
基于扩散模式反演的橡胶轮胎制造行业 VOCs 排放特征	白红祥, 魏巍, 王雅婷, 任云婷, 臧佳欣, 程水源 (2994)
太原市环境空气中挥发性芳香烃碳同位素组成及来源	李颖慧, 闫雨龙, 李志生, 郝爱胜, 李如梅, 杨帆, 彭林 (3001)
办公楼聚集区空气中 PBDEs 谱分布与污染特征	王琳, 邓雅佳, 廖晓勇, 曹红英, 焦杏春 (3008)
南北水调东线中游枢纽湖泊有色可溶性有机物来源组成特征	张柳青, 彭凯, 周蕾, 石玉, 李元鹏, 周永强, 龚志军, 张运林, 杨艳 (3018)
黄土丘陵沟壑区小流域不同水体氢氧同位素特征	张荷惠子, 于坤霞, 李占斌, 李鹏, 赵宾华, 柯浩成, 蒋凯鑫 (3030)
基于碳氮同位素的澜沧江水库 TOC 来源差异性分析	王从锋, 胡子龙, 杨正健, 丹勇, 赵萍, 郝文超, 聂小芬, 聂睿, 徐刘得, 刘德富 (3039)
李家河水库污染物来源及水体分层对水质的影响	徐进, 黄廷林, 李凯, 杨尚业, 温成成, 林子深, 李衍庆, 刘雪晴 (3049)
水库淹没带土壤有机氯农药分布特征及风险评价	王霞, 张青琢, 赵高峰, 王晓燕 (3058)
银川市湿地表层水中多环芳烃的分布、来源及生态风险评价	田大年, 党丽慧, 丁润梅, 蔡倩, 张鹏举, 汪岭, 杨慧芳 (3068)
人类活动影响下的垂直气候带岩溶泉地球化学特征对比: 以重庆金佛山水房泉、碧潭泉为例	谢国文, 杨平恒, 盛婷, 邓书金, 洪爱花 (3078)
漓江冲洪积扇地下水化学特征及控制因素分析	唐金平, 张强, 胡漾, 张宇, 聂保伟 (3089)
三峡库区蓄水期和非蓄水期附石藻类群落变化及其影响因子分析	付君珂, 刘黎, 贺新宇, 张红波, 董聪聪, 杨燕君, 施军琼, 吴忠兴 (3099)
降雨对香溪河库湾主要藻种原位生长的影响	翁传松, 刘德富, 张佳磊, 龚川, 沈旭舟 (3108)
绿狐尾藻分解及其氮磷释放特征	童雄, 罗沛, 刘锋, 黄敏, 陈哲, 肖润林, 吴金水 (3118)
微藻固定化条件优化及其污水氨氮去除潜力分析	刘祥, 王婧瑶, 吴娟娟, 彭飞, 王凯军 (3126)
钛酸盐纳米管对水中氨氮的吸附特性	张政, 冯长生, 张晓瑞, 郑建奎, 蒋彩云, 李攀杰, 王玉萍 (3135)
基于缺陷重构的类芬顿光催化剂在降解染料废水中的应用	唐清文, 安晓强, 兰华春, 刘会娟, 李海翔 (3146)
N 原子杂化石墨烯高效活化过一硫酸盐降解 RBK5 染料废水	于永波, 黄湾, 董正玉, 吴丽颖, 张倩, 洪俊明 (3154)
Cu ²⁺ 对以 NO ₃ ⁻ 为电子受体反硝化过程的影响	买文可, 彭永臻, 吉建涛 (3162)
CANON 中试反应器启动及性能优化	孙庆花, 吴迪, 周家中, 郑志佳 (3169)
好氧段碳源浓度对同步去除和富集磷酸盐生物膜的影响	徐林建, 潘杨, 章豪, 冯鑫, 魏攀龙, 尤星怡 (3179)
有机物特性对 AAO 系统污泥沉降性能的影响	刘小博, 袁林江, 陈希, 薛欢婷 (3186)
不同污泥浓度下缺氧 FNA 对硝化菌活性的影响	吕心涛, 周桐, 田夏迪, 谷鹏超, 杨岸明, 王佳伟, 张树军 (3195)
ANAMMOX 菌铁自养反硝化工艺的稳定性	张文静, 黄勇, 毕贞, 胡羽婷, 董石语 (3201)
在线 NaClO 反洗对倒置 A ² O-MBR 系统微生物群落的影响	王旭东, 高森, 王莹莹, 杨永哲, 刚家斌, 符国力, 王磊 (3208)
基于有机物释放和经济性的污泥预处理方法评价	袁悦, 谭学军, 郑舍予 (3216)
北京市清水与再生水协同利用优化模型	张田媛, 谭倩, 王淑萍 (3223)
N-亚硝胺在不同处理工艺污水处理厂中的分布及其去除	柳王荣, 赵建亮, 杨愿愿, 姚理, 刘有胜, 应光国 (3233)
北京市生活污水中曲马多和芬太尼的赋存	周子雷, 杜鹏, 白雅, 韩胜, 黄红梅, 徐泽琼, 李喜青 (3242)
贵阳市污水处理厂中典型抗生素的污染水平及生态风险	杨钊, 李江, 张圣虎, 向福亮, 唐涛涛, 杨娅红 (3249)
紫色土丘陵区畜禽养殖场土壤中抗生素抗性基因分布特征	程建华, 唐翔宇, 刘琛 (3257)
四环素对污泥蚯蚓粪中微生物种群和抗性基因的影响	陈景阳, 夏慧, 黄魁, 吴颖 (3263)
热水解污泥厌氧消化过程中肠球菌抗生素抗性基因与毒力基因的转归	李慧莉, 裴媛玫, 李姗, 何芙蓉, 杨月婷, 魏源送, 佟娟 (3270)
鸡粪与中药渣共堆肥对抗生素抗性基因的影响	武晋萍, 陈建文, 刘勇, 张红, 李君剑 (3276)
宁武亚高山湖泊细菌群落的时空格局及驱动机制	王雪, 刘晋仙, 柴宝峰, 罗正明, 赵鹏宇, 暴家兵 (3285)
石家庄市春季景观水体 nirS 型反硝化细菌群落特征分析	张艺冉, 李再兴, 孙悦, 霍然, 孟文茹, 王凌霄, 申邵恒, 杨子程, 周石磊 (3295)
磷差异性调控水稻根际 nirK/nirS 型反硝化菌组成与丰度	湛钰, 高丹丹, 盛荣, 魏文学, 秦红灵, 张文钊, 侯海军, 汤亚芳 (3304)
会仙岩溶湿地、稻田与旱地土壤细菌群落结构特征比较	贾远航, 靳振江, 袁武, 程跃扬, 邱江梅, 梁锦桃, 潘复静, 刘德深 (3313)
湘中典型稻田系统 Cd 平衡分析	蒋凯, 邓潇, 周航, 龙坚, 李欣阳, 董霞, 王树兵, 刘文辉, 侯红波, 彭佩钦, 廖柏寒 (3324)
改良剂对根际土壤-水稻系统中镉运移的影响	李义纯, 王艳红, 唐明灯, 巫彬芳, 李林峰, 艾绍英, 凌志祥 (3331)
重金属固定植物促生细菌的筛选及其阻控小麦富集重金属效应	韩辉, 王晓宇, 蔡红, 姚伦广, 蔡倩迪, 王逸雪, 陈兆进 (3339)
不同品种辣椒镉亚细胞分布和化学形态特征差异	彭秋, 李桃, 徐卫红, 焦璐琛, 邓继宝 (3347)
添加磷对水稻-油菜轮作土壤 N ₂ O 排放影响	孙正, 苏荣琳, 徐鹏, 吴宏涛, 胡金丽, 赵劲松, 胡荣桂 (3355)
渭北旱原土地利用方式对土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响	刘杰, 马艳婷, 王宪玲, Sompouviset Thongsouk, 李利敏, 秦亚旭, 赵志远, 郑伟, 翟丙年 (3361)
不同土地利用类型的土壤中多环芳烃的纵向迁移特征	鲁垠涛, 向鑫鑫, 张士超, 刘明丽, 王静, 李爽, 姚宏, 孙绍斌 (3369)
西湖景区土壤中邻苯二甲酸酯污染水平、来源分析和空间分布特征	廖健, 邓超, 陈怡, 周文钊, 林春绵, 张辉 (3378)
生物炭对壤土土壤容重和团聚体的影响	李倩倩, 许晨阳, 耿增超, 张久成, 陈树兰, 王慧玲, 张妍, 负方悦, 杨林, 董胜虎 (3388)
《环境科学》征订启事 (3194)	《环境科学》征稿简则 (3222)
信息 (3256, 3284, 3323)	

太原市环境空气中挥发性芳香烃碳同位素组成及来源

李颖慧^{1,2}, 闫雨龙^{1*}, 李志生³, 郝爱胜³, 李如梅¹, 杨帆¹, 彭林^{1*}

(1. 华北电力大学环境科学与工程学院, 资源环境系统优化教育部重点实验室, 北京 102206; 2. 华北电力大学可再生能源学院, 北京 102206; 3. 中国石油勘探开发研究院天然气地质所, 廊坊 065007)

摘要: 利用 Tenax TA 吸附管采集太原市不同排放源及不同功能区环境空气样品, 色谱-质谱、同位素质谱联用技术测定了其挥发性芳香烃化合物的碳同位素组成, 并分析了其组成特征。结果表明, 柴油挥发源、汽油挥发源、溶剂挥发源、机动车尾气源和民用燃煤源排放的挥发性芳香烃化合物中稳定碳同位素值($\delta^{13}\text{C}$)测定范围依次为: $(-30.79 \pm 0.98)\text{‰} \sim (-29.10 \pm 0.14)\text{‰}$ 、 $(-30.96 \pm 0.88)\text{‰} \sim (-28.02 \pm 1.77)\text{‰}$ 、 $(-32.13 \pm 0.59)\text{‰} \sim (-27.67 \pm 0.49)\text{‰}$ 、 $(-27.58 \pm 0.16)\text{‰} \sim (-25.50 \pm 0.75)\text{‰}$ 和 $(-25.14 \pm 0.93)\text{‰} \sim (-23.44 \pm 1.32)\text{‰}$, 民用燃煤源显著富集 ^{13}C 。仅在民用燃煤源排放烟气中检出苯乙烯, $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $(-23.44 \pm 1.32)\text{‰}$ 。太原市4个不同功能区采样分析显示, 居民交通混合区环境空气中挥发性芳香烃的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $(-25.61 \pm 2.20)\text{‰} \sim (-23.91 \pm 0.78)\text{‰}$, 较其他区域富集 ^{13}C ; 工业区 $\delta^{13}\text{C}$ 检测值为 $(-29.15 \pm 1.06)\text{‰} \sim (-24.53 \pm 1.07)\text{‰}$, 较其他区域贫 ^{13}C 。将环境空气中挥发性芳香烃 $\delta^{13}\text{C}$ 值与排放源 $\delta^{13}\text{C}$ 值比较可发现, 太原市4个环境空气点位的挥发性芳香烃主要来源是机动车尾气源和民用燃煤源, 工业区受溶剂挥发影响较大。

关键词: 挥发性芳香烃; 稳定碳同位素; 环境空气; 污染源; 来源分析

中图分类号: X131.1; X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)07-3001-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201812174

Stable Carbon Isotope Compositions and Source Apportionments of Volatile Aromatic Compounds in the Urban Atmosphere of Taiyuan, China

LI Ying-hui^{1,2}, YAN Yu-long^{1*}, LI Zhi-sheng³, HAO Ai-sheng³, LI Ru-mei¹, YANG Fan¹, PENG Lin^{1*}

(1. Key Laboratory of Resources and Environmental Systems Optimization, Ministry of Education, College of Environmental Science and Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. School of Renewable Energy, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 3. Department of Gas Geology Petrochina RIPED, Langfang 065007, China)

Abstract: This study used Tenax TA absorption tubes to sample volatile aromatic compounds from different emission sources and functional zones in Taiyuan City, Shanxi Province, China. Thermal desorption-gas chromatography-isotope ratio mass spectrometry (TD-GC-IRMS) was subsequently employed to analyze the stable carbon isotope characteristics of the volatile aromatic compounds. The results revealed that the stable carbon isotope ratio ($\delta^{13}\text{C}$) of the volatile aromatic compounds emitted through diesel, gasoline, and solvent volatilization, vehicle exhaust, and domestic coal combustion ranged from $(-30.79 \pm 0.98)\text{‰}$ to $(-29.10 \pm 0.14)\text{‰}$, $(-30.96 \pm 0.88)\text{‰}$ to $(-28.02 \pm 1.77)\text{‰}$, $(-32.13 \pm 0.59)\text{‰}$ to $(-27.67 \pm 0.49)\text{‰}$, $(-27.58 \pm 0.16)\text{‰}$ to $(-25.50 \pm 0.75)\text{‰}$, and $(-25.14 \pm 0.93)\text{‰}$ to $(-23.44 \pm 1.32)\text{‰}$, respectively. The $\delta^{13}\text{C}$ value of styrene was $(-23.44 \pm 1.32)\text{‰}$, which was only detected in the fumes emitted through domestic coal combustion. Additionally, the sample analysis based on data collected from four different functional zones of Taiyuan City revealed the following: ① the $\delta^{13}\text{C}$ values of the atmospheric volatile aromatic compounds in the mixed residential and traffic zone ranged from $(-25.61 \pm 2.20)\text{‰}$ to $(-23.91 \pm 0.78)\text{‰}$. Compared with other functional zones, the emissions in this zone were enriched with ^{13}C ; and ② the $\delta^{13}\text{C}$ values measured in the industrial zone ranged from $(-29.15 \pm 1.06)\text{‰}$ to $(-24.53 \pm 1.07)\text{‰}$; the emissions in this functional zone were relatively low in ^{13}C compared with other zones. A comparison of the $\delta^{13}\text{C}$ values of the atmospheric volatile aromatic compounds and emission sources indicated that the main sources of volatile aromatic compounds at the four sampling points in Taiyuan were vehicle exhausts and domestic coal combustion, while the air sampled in the industrial functional zone was heavily affected by the volatilization of solvents.

Key words: volatile aromatic compounds; stable carbon isotope ratio; ambient air; pollution source; source apportionment

环境空气中的挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)是形成臭氧和二次有机物的前体物,使大气氧化性增强,进一步产生二次污染^[1-3],包括烷烃、烯烃和芳香烃等,主要来源于燃煤排放、机动车排放、油品挥发、溶剂挥发等人为源和植物排放等天然源^[4-6]。近年来挥发性有机物已经成为城市复合空气污染的重要污染物质^[7],为了有效控制VOCs的产生,必须研究其在环境中的来源。

目前,对VOCs的来源解析手段主要集中于受体采样结合化学质量平衡模型(CMB)和正矩阵因子分析模型(PMF)等方法^[8-11],但这些方法由于

收稿日期: 2018-12-22; 修订日期: 2019-01-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(41673004); 国家重点研发计划项目(2016YFC0208500); 大气重污染成因与治理攻关项目(DQGG-05-13); 中央高校基本科研业务费专项(2016XS48, 2018ZD12)

作者简介: 李颖慧(1986~),女,博士研究生,主要研究方向为大气环境同位素化学, E-mail: liyinghui2008@hotmail.com
* 通信作者, E-mail: yanyulong@yeah.net; penglin6611@163.com

部分 VOCs 化合物在环境空气中易发生光化学反应导致解析结果存在一定不确定性^[12]。稳定同位素质谱技术是近年发展起来用于识别、评价环境有机污染物和生物转化、降解过程的新方法^[13]。Rodolph 等^[14, 15]和 Kawashima 等^[16]的研究表明,可利用挥发性芳香烃等 VOCs 化合物的稳定碳同位素组成特征研究其在环境空气中的来源。目前,国外有较少的研究主要关注于环境空气中机动车尾气源、植物燃烧源排放的挥发性芳香烃碳同位素组成。Kawashima 等^[16]的研究指出加油站和机动车尾气中苯的碳同位素值($\delta^{13}\text{C}$)分别为 $(-27.35 \pm 1.60)\text{‰}$ 和 $(-20.19 \pm 0.15)\text{‰}$,存在显著差异,认为可用于挥发性芳香烃污染溯源。有研究用苯、甲苯和萘这 3 种化合物的碳、氢同位素值(δD)成功区分 C_3 和 C_4 生物质燃烧源与机动车尾气源^[17-19]。而针对燃煤污染源等典型污染源排放的挥发性芳香烃化合物稳定碳同位素鲜有报道。稳定碳同位素技术在对环境空气中颗粒物的来源解析中已有初步应用,白慧玲等^[20]指出煤烟尘中多环芳烃(PAHs)随环数增加贫 ^{13}C ,机动车尾气尘中 PAHs 随环数增加富集 ^{13}C ,利用此特性可区分环境空气中煤烟尘和机动车尾气尘来源。但将稳定碳同位素技术应用在环境空气中挥发性芳香烃类化合物源解析中的报道则十分有限。

太原市位于山西省中部,是我国重要的煤炭产地和煤化工基地,属于京津冀大气污染传输通道城市之一^[21]。本研究针对太原市柴油挥发源、汽油挥发源、溶剂挥发源、机动车尾气源和民用燃煤源中挥发性芳香烃化合物进行稳定碳同位素测定,分析各污染源碳同位素特征,以期为太原市控制 VOCs 排放和改善环境空气质量提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

使用 Tenax TA 吸附管(北京劳动保护研究所)采集了太原市污染源和环境空气中挥发性芳香烃样品。采样前对装有 Tenax TA 吸附剂的吸附管进行活化再生处理,首先通入高纯 N_2 ,之后在 320°C 条件下活化 45 min,活化完成后立即用橡胶帽密封保

存,2 d 内使用该吸附管进行样品采集。样品采集过程中使用美国 A. P. BUCK 公司生产的采样泵(LP-4TM),采样流量为 $0.5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

污染源样品采集如下。

采集了柴油挥发源、汽油挥发源、溶剂挥发源、机动车尾气源和民用燃煤源等污染源样品,每个污染源采集 3 个样品做平行分析,保存时间不超过 10 d。

汽油和柴油挥发源样品:从加油站取 95 号汽油和 0 号柴油各 3 份,分装于密封的样品瓶中,采集样品瓶上端的挥发性蒸气,每个样品采集 1.5 h。

机动车尾气源样品:样品采自一辆大众牌汽车,在样品采集时期其各方面性能良好,车辆正常行驶 0.5 h 后,开始进行样品采集,将样品采集装置放置于机动车排气筒出口处,每个样品采集 1.5 h。

溶剂使用源样品:样品采自一规模较大的家具生产厂家,其使用的油漆和溶剂种类较多,采样点位分布在家具堆放密集处,共选择 3 个采样点进行样品采集,每个样品采集 2.5 h。

民用燃煤源样品:选取位于不同区域的 2 个民用燃煤炉进行样品采集,在燃煤炉烟筒排放口处直接采集,采样高度距地面约 5 m,每个样品采集 1.5 h。

环境空气样品采集:采集了太原市环境空气样品,采样时间为 2018-02-26 ~ 2018-03-01。采样点位如图 1 所示,其周边环境特征如表 1 所示,采样流量 $0.5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$,采样时间 24 h,采集好的吸附管立刻用橡胶帽密封,10 d 内完成测试。

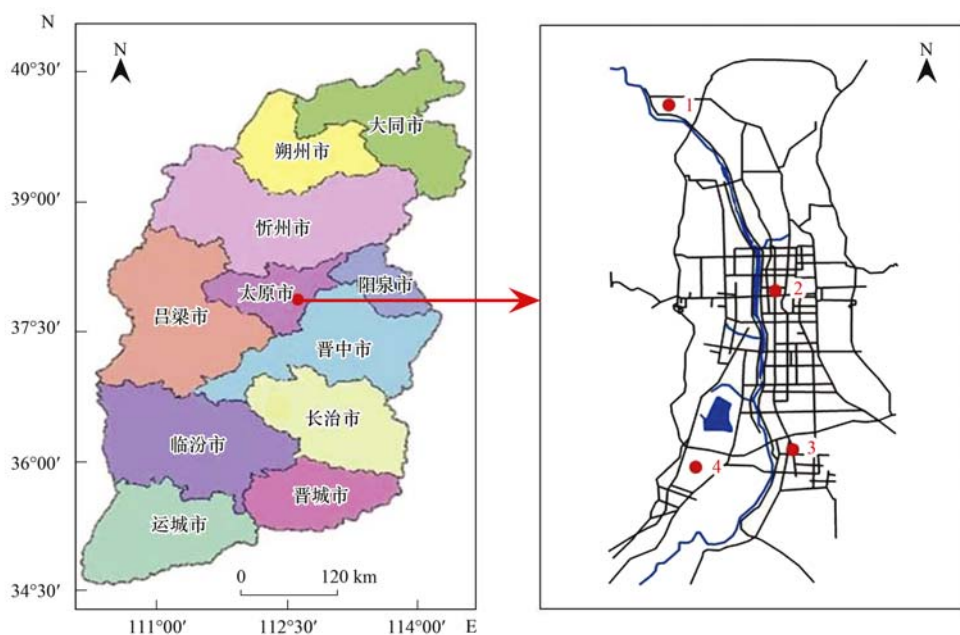
1.2 样品测试

将热解析仪与气相色谱连接,将已吸附样品的吸附管放置于热解吸仪器中,在 300°C 下保持 2 min,热解析出的 VOCs 样品被载气吹入 GC-IRMS 中,同时在色谱柱初始端放置冷阱,将色谱柱前端置于冷阱中,待解析仪温度降至 100°C 以下,撤冷阱,启动色谱,化合物经色谱柱分离后进入氧化炉,在 950°C 条件下被氧化成 CO_2 后进入同位素质谱仪测定样品的碳同位素组成,文中所用同位素值均为 3 次平行测量的平均值。

表 1 采样点位的周边环境特征

Table 1 Environmental characteristics around the sampling locations

采样点	环境特征
1	清洁对照区,位于太原市北部,远离市中心,周边植被茂盛,有部分交通污染源和燃煤污染源
2	居民交通商业混合区,位于太原市中部,周边被交通主干道包围,车流量较大
3	居民交通混合区,位于太原市南部,属于近年来新建城区,周边城中村较多,车流量大
4	工业交通区,位于太原市西南部,远离市中心,其周边分布有涂料厂,配件厂,家具厂,养殖场等



1. 清洁对照区; 2. 居民交通商业混合区; 3. 居民交通混合区; 4. 工业交通区

图1 太原市环境空气采样点位

Fig. 1 Location map of the four sampling sites in Taiyuan

色谱条件:GC 为 Agilent 7890B, DB-1 色谱柱, 柱长 60 mm, 内径 0.32 mm, 涂层厚度 0.25 μm , 载气为氦气, 分流比为 20:1, 升温程序, 起始温度为 30 $^{\circ}\text{C}$, 维持 15 min, 之后以 1.5 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 升温至 70 $^{\circ}\text{C}$, 再以 3 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 的升温速率升至 250 $^{\circ}\text{C}$, 维持 10 min.

同位素表达式用 δ 值来表示同位素的变化, δ 值是指样品中两种稳定同位素的比值相对于国际标准对应比值的千分偏差, 单位是 permil 或 ‰,

$$\delta(\text{‰}) = [(R_{\text{样品}}/R_{\text{标准}}) - 1] \times 1000$$

式中, R 表示样品和标准物质中重同位素与轻同位素的比值, 碳同位素分析的标准样品为南卡罗来纳州白垩纪皮狄组箭石(PDB), 其碳同位素比值 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C} = 1123.72 \times 10^{-5}$, 定义其 $\delta^{13}\text{C} \approx 0\text{‰}$.

2 结果与讨论

2.1 太原市各污染源中挥发性芳香烃稳定碳同位素组成特征

采集太原市典型污染源, 柴油挥发源、汽油挥发源、溶剂挥发源、机动车尾气源和民用燃煤源这 5 类污染源, 利用热脱附与稳定同位素质谱联用技术(TD-GC-IRMS)测定其挥发性有机物的芳香烃类化合物的稳定碳同位素, 结果如图 2 所示.

在采集样品中, 可检出苯、甲苯、乙苯、间、对-二甲苯、苯乙烯和邻-二甲苯共 6 种挥发性芳香烃类化合物. 本研究各污染源中挥发性芳香烃类化合物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值依次为: 柴油挥发源 (-30.79 ± 0.98) ‰

~ (-29.10 ± 0.14) ‰、汽油挥发源 (-30.96 ± 0.88) ‰ ~ (-28.02 ± 1.77) ‰、溶剂挥发源 (-32.13 ± 0.59) ‰ ~ (-27.67 ± 0.49) ‰、机动车尾气源 (-27.58 ± 0.16) ‰ ~ (-25.50 ± 0.75) ‰ 和民用燃煤源 (-25.14 ± 0.93) ‰ ~ (-23.44 ± 1.32) ‰. 整体来看, 民用燃煤源和机动车尾气源排放的挥发性芳香烃 $\delta^{13}\text{C}$ 值与汽油挥发源、柴油挥发源以及溶剂挥发源相比富集 ^{13}C . 任照芳^[22] 研究指出, 燃煤烟气与柴油挥发源、汽油挥发源和溶剂挥发源等污染源中的 NMHCs $\delta^{13}\text{C}$ 值相比显著富集 ^{13}C , 本研究结果与其相比, 变化趋势相同.

2.1.1 机动车尾气源与汽油挥发源

本研究分析了机动车尾气源与汽油挥发源中挥发性芳香烃类化合物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值(表 2), 汽油挥发源中挥发性芳香烃 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布范围为 (-30.96 ± 0.88) ‰ ~ (-28.02 ± 1.77) ‰, 与文献[15]和文献[16]中的 $\delta^{13}\text{C}$ 值相比贫 ^{13}C . 而机动车尾气源中挥发性芳香烃 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布范围为 (-27.58 ± 0.16) ‰ ~ (-25.50 ± 0.75) ‰, 与文献[15]中测定的隧道样品中 $\delta^{13}\text{C}$ 值 (-27.50 ± 1.00) ‰ ~ (-26.50 ± 1.00) ‰ 结果相似, 与文献[16]中机动车样品 $\delta^{13}\text{C}$ 值 (-24.93 ± 0.50) ‰ ~ (-20.19 ± 0.15) ‰ 和文献[19]中机动车样品 $\delta^{13}\text{C}$ 值 (-22.90 ± 0.10) ‰ ~ (-21.50 ± 0.20) ‰ 相比贫 ^{13}C , 可能是因为国内外汽油种类、机动车类型和机动车启动方式的不同引起碳同位素值差异.

由表 2 可知, 本研究中挥发性芳香烃类化合物

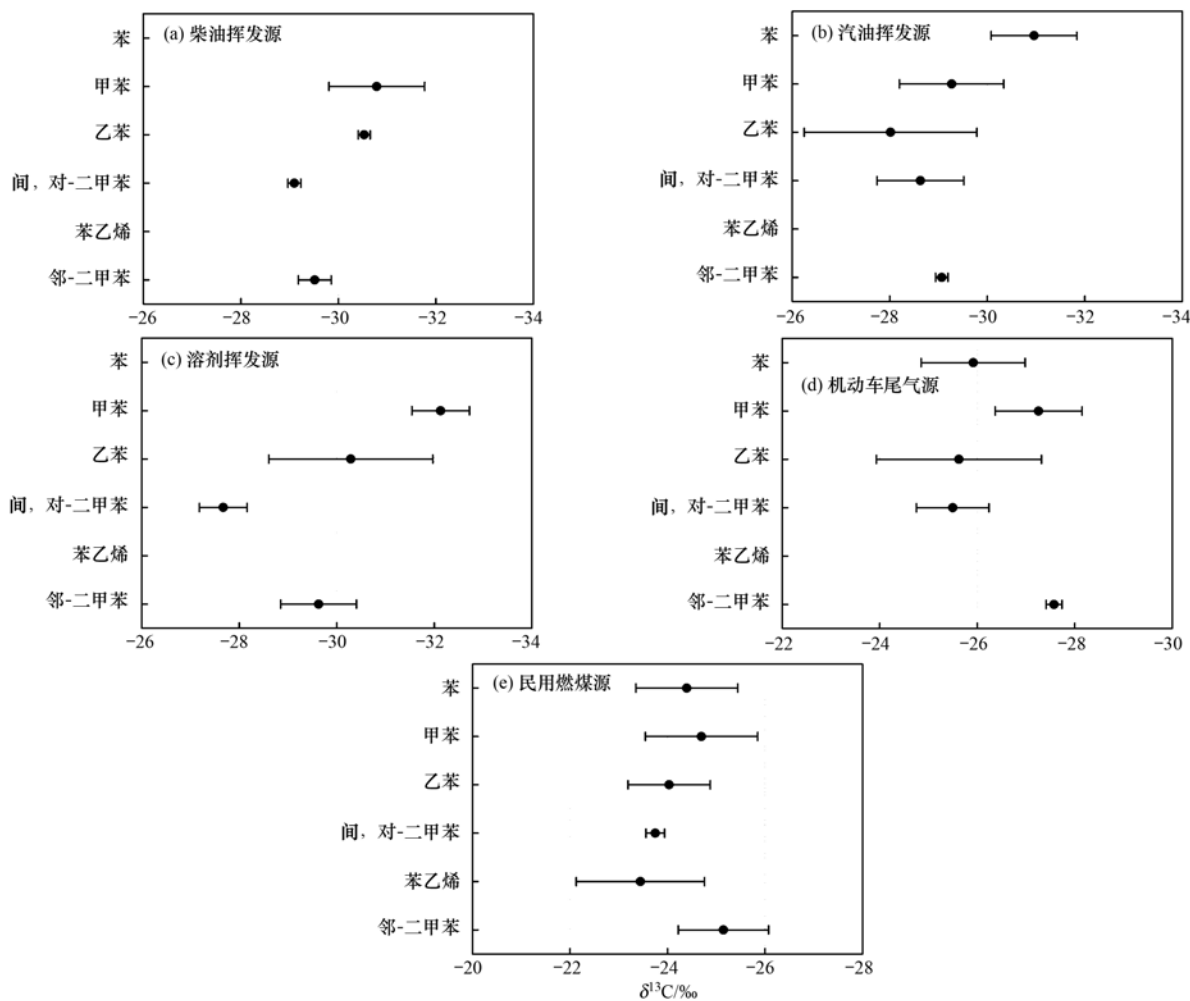


图2 太原市各污染源中部分挥发性芳香烃的稳定碳同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 组成

Fig. 2 The $\delta^{13}\text{C}$ for values of volatile aromatic compounds from five emission sources

表2 太原市汽油挥发源与机动车尾气排放的挥发性芳香烃类化合物与其他学者研究结果对比/ ‰

Table 2 The $\delta^{13}\text{C}$ for values of volatile aromatic compounds in measurements of samples from gasoline, vehicles exhaust fumes, and values from previous research/ ‰

化合物	本研究		文献[15]			文献[16]		文献[19]
	汽油	机动车尾气	加油站	地下停车场	隧道	汽油	机动车热启动	机动车
苯	-30.96±0.88	-25.91±1.07	-29.10±0.30	-27.70±0.70	-26.50±1.00	-27.35±1.60	-20.19±0.15	-21.50±0.20
甲苯	-29.27±1.07	-27.26±0.89	-27.40±0.60	-27.10±0.70	-27.50±1.00	-27.08±0.69	-24.93±0.50	-22.50±0.20
乙苯	-28.02±1.77	-25.62±1.69	-28.20±0.40	-27.50±1.10	-27.40±0.90	-26.48±1.60	-23.78±0.42	-22.70±0.10
间,对-二甲苯	-28.63±0.89	-25.50±0.75	-27.70±0.50	-27.70±1.00	-26.90±2.00	-27.42±0.77	-24.80±0.42	-22.65±0.10
邻-二甲苯	-29.07±0.13	-27.58±0.16	—	—	—	—	—	-22.90±0.10

在机动车尾气源中 $\delta^{13}\text{C}$ 值与汽油挥发源中的 $\delta^{13}\text{C}$ 值相比富集 ^{13}C ，富集程度依次为：苯 5.05‰、甲苯 2.01‰、乙苯 2.40‰、间,对-二甲苯 3.13‰和邻-二甲苯 1.49‰，苯富集程度最大。Rudolph 等^[15, 23, 24]针对多伦多地区研究指出，隧道内机动车尾气排放的挥发性芳香烃 $\delta^{13}\text{C}$ 值较汽油挥发源富集 ^{13}C ，富集程度依次为：苯 2.60‰、甲苯 0.10‰、乙苯 0.80‰、间,对-二甲苯 0.80‰，其中苯的富集程度最大。Kawashima 等^[16]将机动车尾气细化为冷启动尾气与热启动尾气，结果表明冷启动状态下机动车

尾气排放挥发性芳香烃 $\delta^{13}\text{C}$ 值与汽油挥发源相比两者差别不大，而热启动机动车尾气 $\delta^{13}\text{C}$ 值与汽油挥发源相比显著富集 ^{13}C ，富集程度依次为：苯 7.16‰、甲苯 2.15‰、乙苯 2.70‰和间,对-二甲苯 2.62‰，苯的富集程度最大，利用此特性可判断环境空气中机动车尾气来源。本研究中苯的变化趋势与文献^[15, 16]研究结果相似，可能原因为为在机动车热启动状况下，汽油中的化合物在高温高压状态下燃烧效率较高，且 ^{12}C — ^{12}C 键较 ^{13}C — ^{12}C 键容易断裂，生成大量富集 ^{12}C 的完全燃烧产物 CO_2 ，则剩余物中

则相对富集 ^{13}C , 导致挥发性芳香烃类化合物在尾气排放中较汽油挥发源富集 ^{13}C [20, 25].

2.1.2 民用燃煤源

图2可知, 民用燃煤源排放的挥发性芳香烃类化合物 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围为 $(-25.14 \pm 0.93)\text{‰}$ ~ $(-23.44 \pm 1.32)\text{‰}$, 均值为 $(-24.25 \pm 0.74)\text{‰}$. Widory等[26]对煤及燃煤烟气进行研究, 指出母体煤的 $\delta^{13}\text{C}$ 均值为 $(-23.60 \pm 0.70)\text{‰}$, 燃煤烟气均值为 -25.60‰ ~ -24.60‰ . 本研究中民用燃煤源烟气均值与文献[26]的研究结果相似. 民用燃煤燃烧效率相对较低, 部分 ^{12}C — ^{12}C 键优先断裂, 碳键之间重新聚合生成苯和甲苯等新的分子化合物, 故民用燃煤源中检出的挥发性芳香烃类化合物 $\delta^{13}\text{C}$ 值与母体煤相比贫 ^{13}C [27, 28].

5类污染源中仅有燃煤源中检出苯乙烯, 其 $\delta^{13}\text{C}$ 均值为 $(-23.44 \pm 1.32)\text{‰}$. 余化龙[29]的研究指出苯乙烯为民用燃煤源主要特征化合物. 赵锐[30]指出在溶剂挥发源和机动车尾气源VOCs特征组分研究中检出苯乙烯, 而本研究均未在这两类源中检出苯乙烯的原因, 可能为其排放浓度未达到碳同位素检测所需浓度导致.

2.1.3 柴油挥发源和溶剂挥发源

本研究中柴油挥发源共检出甲苯、乙苯、间、对-二甲苯和邻-二甲苯这4种挥发性芳香烃类化合物, 其 $\delta^{13}\text{C}$ 值依次为 $(-30.79 \pm 0.98)\text{‰}$ 、 $(-30.53 \pm 0.12)\text{‰}$ 、 $(-29.10 \pm 0.14)\text{‰}$ 和 $(-29.52 \pm 0.34)\text{‰}$; 溶剂挥发源共检出甲苯、乙苯、间、对-二甲苯和邻-二甲苯这4种芳香烃类化合物, 其 $\delta^{13}\text{C}$ 值依次为 $(-32.13 \pm 0.59)\text{‰}$ 、 $(-30.29 \pm 1.69)\text{‰}$ 、 $(-27.67 \pm 0.49)\text{‰}$ 和 $(-29.63 \pm 0.78)\text{‰}$. 与汽油挥发源、机动车尾气源、燃煤源相比, 柴油挥发源和溶剂挥发源相对贫 ^{13}C .

2.2 太原市不同功能区环境空气中挥发性芳香烃稳定碳同位素组成特征

从4个功能区排放的挥发性芳香烃类化合物(苯、甲苯、乙苯、间、对-二甲苯、苯乙烯和邻-二甲苯)的 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布可知(图3), 太原市4个功能区环境空气中挥发性芳香烃 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布范围依次为: 清洁对照区 $(-26.92 \pm 0.37)\text{‰}$ ~ $(-24.68 \pm 1.31)\text{‰}$ 、居民交通商业混合区 $(-26.87 \pm 0.88)\text{‰}$ ~ $(-24.48 \pm 0.14)\text{‰}$ 、居民交通混合区 $(-25.61 \pm 2.20)\text{‰}$ ~ $(-23.91 \pm 0.78)\text{‰}$ 和工业交通区 $(-29.15 \pm 1.06)\text{‰}$ ~ $(-24.53 \pm 1.07)\text{‰}$. 4个点位均检出苯乙烯, 苯乙烯 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围为 $(-26.92 \pm 0.37)\text{‰}$ ~ $(-24.48 \pm 0.14)\text{‰}$, 略贫于民用燃煤源中所测得 $\delta^{13}\text{C}$ 值 $(-23.44 \pm 1.32)\text{‰}$, 可能与环境空

气中苯乙烯还受到溶剂挥发源与机动车尾气源等其他来源影响有关.

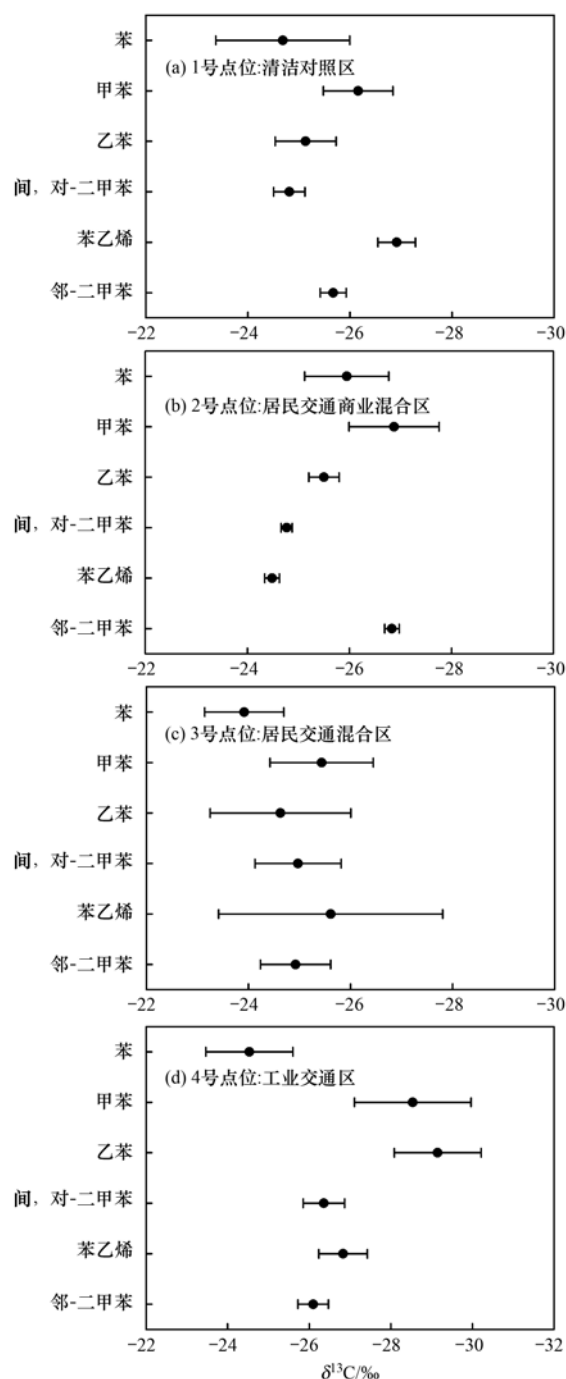


图3 太原市各功能区挥发性芳香烃化合物的稳定碳同位素

Fig. 3 The $\delta^{13}\text{C}$ for values of volatile aromatic compounds from four functional zones

1号点位属于清洁对照区, 检出的挥发性芳香烃类化合物 $\delta^{13}\text{C}$ 均值为 $(-25.56 \pm 0.59)\text{‰}$, 处于燃煤源与机动车尾气源之间, 且检出苯乙烯, 说明其主要污染源为燃煤源与机动车尾气源. 1号点位周边分布有城中村, 民用燃煤情况严重, 是造成其燃煤污染原因之一.

2号点位为居民交通商业混合区, 检出的挥发性芳香烃类化合物 $\delta^{13}\text{C}$ 均值为 $(-25.73 \pm 0.40)\text{‰}$,

该点位于太原市市中心,与3号点位 $\delta^{13}\text{C}$ 值相比贫 ^{13}C ,与机动车尾气源(图2)相近,表明其受机动车排放源影响较大,与采样点周边交通繁忙有关;此外,城市周边燃煤污染物频繁地扩散输入,导致其也受到燃煤污染影响。

3号点位属于居民交通混合区,检出的挥发性芳香烃类化合物 $\delta^{13}\text{C}$ 均值为 $(-24.91 \pm 1.15)\text{‰}$,该点位检出的挥发性芳香烃化合物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值位于燃煤源与机动车尾气源之间,且与其他3个点位相比富集 ^{13}C ,表明与其受燃煤排放源影响更大。采样点位于太原市新建城区,周边分布较多城中村,大量小锅炉分散且无任何的烟气处理措施,且其燃烧效率较低,导致其排放到空气中的VOCs造成城市空气污染严重。

4号点位属于工业交通混合区,检出的挥发性芳香烃类化合物 $\delta^{13}\text{C}$ 均值为 $(-26.92 \pm 0.84)\text{‰}$,该点位周边分布有涂料厂、配件厂和家具厂等,其自身排放大量芳香烃类污染物,故该点位测得的挥发性芳香烃化合物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值较其他3个点位贫 ^{13}C 。

总体来看,采暖期太原市煤炭燃烧污染严重,是导致太原市环境空气中挥发性芳香烃污染的重要原因;机动车排放对挥发性芳香烃的影响也值得重视。

3 结论

(1)柴油挥发源、汽油挥发源、溶剂挥发源、机动车尾气源、民用燃烧源等典型污染源挥发性芳香烃类化合物 $\delta^{13}\text{C}$ 值存在差异,机动车尾气源和民用燃煤源相对富集 ^{13}C 。

(2)民用燃煤源 $\delta^{13}\text{C}$ 值与母体煤 $\delta^{13}\text{C}$ 值相比略贫 ^{13}C ,可能为煤炭不完全燃烧所致;仅燃煤源检出苯乙炔,其 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $(-23.44 \pm 1.32)\text{‰}$ 。

(3)太原市采暖季4个功能区环境空气中挥发性芳香烃类化合物 $\delta^{13}\text{C}$ 均值依次为:清洁对照区 $(-25.56 \pm 0.59)\text{‰}$ 、居民交通商业混合区 $(-25.73 \pm 0.40)\text{‰}$ 、居民交通混合区 $(-24.91 \pm 1.15)\text{‰}$ 、工业交通区 $(-26.92 \pm 0.84)\text{‰}$;居民交通混合区环境空气中挥发性芳香烃较其他区域富集 ^{13}C ,工业交通区贫 ^{13}C 。

(4)与排放源 $\delta^{13}\text{C}$ 值比较可发现,太原市挥发性芳香烃主要来源是民用燃煤源和机动车尾气源,工业区受溶剂挥发影响较大。

(5)本研究为建立和完善污染源中芳香烃类化合物的稳定碳同位素值积累了数据,且利用稳定碳同位素组成研究了环境空气中挥发性芳香烃的来源。后续将针对工业燃煤等进行进一步探讨,为

VOCs的来源解析提供更多的基础数据和研究方法。

参考文献:

- [1] Kuo C P, Liao H T, Chou C C K, *et al.* Source apportionment of particulate matter and selected volatile organic compounds with multiple time resolution data [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **472**: 880-887.
- [2] 陈天增,葛艳丽,刘永春,等.我国机动车排放VOCs及其大气环境影响[J].*环境科学*, 2018, **39**(2): 478-492.
Chen T Z, Ge Y L, Liu Y C, *et al.* VOCs emission from motor vehicles in China and Its impact on the atmospheric environment [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(2): 478-492.
- [3] 罗达通,高健,王淑兰,等.上海秋季大气挥发性有机物特征及污染物来源分析[J].*中国环境科学*, 2015, **35**(4): 987-994.
Luo D T, Gao J, Wang S L, *et al.* Characteristics of volatile organic compounds and relative pollutants observed in autumn Shanghai [J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(4): 987-994.
- [4] Yan Y L, Peng L, Li R M, *et al.* Concentration, ozone formation potential and source analysis of volatile organic compounds (VOCs) in a thermal power station centralized area: a study in Shaozhou, China [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **223**: 295-304.
- [5] 杨帆,闫雨龙,戈云飞,等.晋城市冬季环境空气中挥发性有机物的污染特征及来源解析[J].*环境科学*, 2018, **39**(9): 4042-4050.
Yang F, Yan Y L, Ge Y F, *et al.* Characteristics and source apportionment of ambient volatile organic compounds in winter in Jincheng [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(9): 4042-4050.
- [6] 王鸣,陈文泰,陆思华,等.我国典型城市环境大气挥发性有机物特征比值[J].*环境科学*, 2018, **39**(10): 4393-4399.
Wang M, Chen W T, Lu S H, *et al.* Ratios of volatile organic compounds in ambient air of various cities of China [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(10): 4393-4399.
- [7] 李斌,张鑫,李娜,等.北京市春夏挥发性有机物的污染特征及源解析[J].*环境化学*, 2018, **37**(11): 2410-2418.
Li B, Zhang X, Li N, *et al.* Pollution characteristics and source analysis of volatile organic compounds in spring and summer in Beijing [J]. *Environmental Chemistry*, 2018, **37**(11): 2410-2418.
- [8] Huang L H, Qian H, Deng S X, *et al.* Urban residential indoor volatile organic compounds in summer, Beijing: profile, concentration and source characterization [J]. *Atmospheric Environment*, 2018, **188**: 1-11.
- [9] 王鸣,项萍,牛其恺,等.南阳市冬春交替期大气VOCs污染特征及来源解析[J].*环境科学学报*, 2018, **38**(6): 2233-2241.
Wang M, Xiang P, Niu Q K, *et al.* Characteristics and source apportionment of ambient VOCs during alternating period between winter and spring in Nanyang City, Henan Province [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(6): 2233-2241.
- [10] Guo H, Ling Z H, Cheng H R, *et al.* Tropospheric volatile organic compounds in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **574**: 1021-1043.
- [11] 陆思华,白郁华,张广山,等.大气中挥发性有机化合物(VOCs)的人为来源研究[J].*环境科学学报*, 2006, **26**(5): 757-763.
Lu S H, Bai Y H, Zhang G S, *et al.* Source apportionment of

- anthropogenic emissions of volatile organic compounds[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, **26**(5): 757-763.
- [12] 张会敏. 环境空气中非甲烷烃的碳同位素组成及其来源研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2009.
- [13] 陈颖军, 蔡伟伟, 黄国培, 等. 典型排放源黑碳的稳定碳同位素组成研究[J]. *环境科学*, 2012, **33**(3): 673-678.
Chen Y J, Cai W W, Huang G P, *et al.* Stable carbon isotope of black carbon from typical emission sources in China [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(3): 673-678.
- [14] Rudolph J, Lowe D C, Martin R J, *et al.* A novel method for compound specific determination of $\delta^{13}\text{C}$ in volatile organic compounds at ppt levels in ambient air [J]. *Geophysical Research Letters*, 1997, **24**(6): 659-662.
- [15] Rudolph J, Czuba E, Norman A L, *et al.* Stable carbon isotope composition of nonmethane hydrocarbons in emissions from transportation related sources and atmospheric observations in an urban atmosphere [J]. *Atmospheric Environment*, 2002, **36**(7): 1173-1181.
- [16] Kawashima H, Murakami M. Measurement of the stable carbon isotope ratio of atmospheric volatile organic compounds using chromatography, combustion, and isotope ratio mass spectrometry coupled with thermal desorption[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **89**: 140-147.
- [17] von Eckstaedt C V, Grice K, Ioppolo-Armanios M, *et al.* δD and $\delta^{13}\text{C}$ analyses of atmospheric volatile organic compounds by thermal desorption gas chromatography isotope ratio mass spectrometry[J]. *Journal of Chromatography A*, 2011, **1218**(37): 6511-6517.
- [18] von Eckstaedt C V, Grice K, Ioppolo-Armanios M, *et al.* $\delta^{13}\text{C}$ and δD of volatile organic compounds in an alumina industry stack emission[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(31): 5477-5483.
- [19] von Eckstaedt C D V, Grice K, Ioppolo-Armanios M, *et al.* Compound specific carbon and hydrogen stable isotope analyses of volatile organic compounds in various emissions of combustion processes[J]. *Chemosphere*, 2012, **89**(11): 1407-1413.
- [20] 白慧玲, 刘效峰, 宋翀芳. 太原市采暖期 PM_{10} 中 PAHs 的碳同位素组成及源贡献率[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(1): 7-13.
Bai H L, Liu X F, Song C F. Carbon isotope compositions and source apportionments of PAHs in PM_{10} of Taiyuan City during heating period [J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(1): 7-13.
- [21] 曹润芳, 闫雨龙, 郭利利, 等. 太原市大气颗粒物粒径和水溶性离子分布特征[J]. *环境科学*, 2016, **37**(6): 2034-2040.
Cao R F, Yan Y L, Guo L L, *et al.* Distribution characteristics of water-soluble ions in size-segregated particulate matters in Taiyuan [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(6): 2034-2040.
- [22] 任照芳, 彭林, 张建强, 等. 兰州市大气中 NMHCs 的稳定碳同位素组成及来源[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2010, **46**(3): 313-318.
Ren Z F, Peng L, Zhang J Q, *et al.* Stable carbon isotopic composition and Source of nonmethane hydrocarbons in urban air, Lanzhou [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2010, **46**(3): 313-318.
- [23] Rudolph J, Czuba E, Huang L, *et al.* The stable carbon isotope fractionation for reactions of selected hydrocarbons with OH-radicals and its relevance for atmospheric chemistry[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2000, **105**(D24): 29329-29346.
- [24] Rudolph J, Czuba E. On the use of isotopic composition measurements of volatile organic compounds to determine the "photochemical age" of an air mass[J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, **27**(23): 3865-3868.
- [25] 白慧玲, 彭林, 刘效峰, 等. 太原市工、商业区 PM_{10} 中 PAHs 碳同位素组成及来源[J]. *环境科学研究*, 2013, **26**(12): 1276-1282.
Bai H L, Peng L, Liu X F, *et al.* Carbon isotope compositions and source apportionment of PAHs associated with PM_{10} of industrial and commercial districts in Taiyuan city[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2013, **26**(12): 1276-1282.
- [26] Widory D. Combustibles, fuels and their combustion products: a view through carbon isotopes [J]. *Combustion Theory and Modelling*, 2006, **10**(5): 831-841.
- [27] 白慧玲. 环境空气颗粒物中烃类物质的稳定碳、氢同位素组成研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2014.
- [28] 彭林, 白志鹏, 朱坦, 等. 燃煤烟尘和机动车尾气中 PAHs 分子化合物的稳定碳同位素研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2005, **34**(2): 218-221.
Peng L, Bai Z P, Zhu T, *et al.* Research on carbon isotopic compositions of individual PAH in vehicle exhaust and soot of coal combustion [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2005, **34**(2): 218-221.
- [29] 余化龙. 燃煤过程中挥发性有机物排放特征研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2018.
- [30] 赵锐, 黄络萍, 张建强, 等. 成都市典型溶剂源使用行业 VOCs 排放成分特征[J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(3): 1147-1154.
Zhao R, Huang L P, Zhang J Q, *et al.* Emissions characteristics of volatile organic compounds (VOCs) from typical industries of solvent use in Chengdu City[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(3): 1147-1154.

CONTENTS

Health Benefit Evaluation for Air Pollution Prevention and Control Action Plan in China	WU Wei-ling, XUE Wen-bo, WANG Yan-li, <i>et al.</i> (2961)
Scenario Simulation Study Constrained by the Ambient Air Quality Standards in Nanjing	XIE Fang-jian, SHI Zhi-hao, LI Jing-yi, <i>et al.</i> (2967)
Characteristics and Source Analysis of Water-Soluble Ions in PM _{2.5} in Zhengzhou	YANG Liu-ming, WANG Shen-bo, HAO Qi, <i>et al.</i> (2977)
Relationship Between Atmospheric Visibility and PM _{2.5} Concentrations and Distributions	WANG Ji-kang, ZHANG Heng-de, GUI Hai-lin, <i>et al.</i> (2985)
Characteristics of VOCs Emitted from the Rubber Tire Manufacturing Industry Based on the Inverse-Dispersion Calculation Method	BAI Hong-xiang, WEI Wei, WANG Ya-ting, <i>et al.</i> (2994)
Stable Carbon Isotope Compositions and Source Apportionments of Volatile Aromatic Compounds in the Urban Atmosphere of Taiyuan, China	LI Ying-hui, YAN Yu-long, LI Zhi-sheng, <i>et al.</i> (3001)
Spectral Distribution and Pollution Characteristics of Polybrominated Diphenyl Ethers in the Air of an Office Building Clustered Area	WANG Lin, DENG Ya-jia, LIAO Xiao-yong, <i>et al.</i> (3008)
Characterizing Chromophoric Dissolved Organic Matter in Key Lakes in the Middle Reaches of the East Route of the South-North Water Diversion Project	ZHANG Liu-qing, PENG Kai, ZHOU Lei, <i>et al.</i> (3018)
Characteristics of Hydrogen and Oxygen Isotopes in Different Water Bodies in Hilly and Gully Regions of the Loess Plateau	ZHANG He-hui-zi, YU Kun-xia, LI Zhan-bin, <i>et al.</i> (3030)
Analysis of Total Organic Carbon Source Differences Between New and Old Cascade Reservoirs using Carbon and Nitrogen Isotopes	WANG Cong-feng, HU Zi-long, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (3039)
Pollution Sources and the Stratification Effects on Water Quality in Lijiahe Reservoir	XU Jin, HUANG Ting-lin, LI Kai, <i>et al.</i> (3049)
Distribution and Potential Risk of Organochlorine Pesticides in the Soil of a Submerged Area Around Miyun Reservoir	WANG Xia, ZHANG Qing-zhuo, ZHAO Gao-feng, <i>et al.</i> (3058)
Distribution, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Waters of the Yinchuan Wetlands	TIAN Da-nian, DANG Li-hui, DING Run-mei, <i>et al.</i> (3068)
Comparison of the Geochemical Characteristics of Karst Springs of a Vertically Zoned Climate Region under Human Activity: A Case of Shuifang Spring and Bitan Spring in the Jinfo Mountain Area, Chongqing	XIE Guo-wen, YANG Ping-heng, SHENG Ting, <i>et al.</i> (3078)
Groundwater Chemical Characteristics and Analysis of Their Controlling Factors in an Alluvial Fan of Jianjiang River	TANG Jin-ping, ZHANG Qiang, HU Yang, <i>et al.</i> (3089)
Dynamics of Epilithic Algae Communities and Their Relationship with Environmental Factors During Storage and Non-storage Periods in the Three Gorges Reservoir	FU Jun-ke, LIU Li, HE Xin-yu, <i>et al.</i> (3099)
Influence of Rainfall on the <i>in situ</i> Growth of Dominant Algae Species in Xiangxi River	WENG Chuan-song, LIU De-fu, ZHANG Jia-lei, <i>et al.</i> (3108)
Decomposition of <i>Myriophyllum aquaticum</i> and the Associated Release of Nitrogen and Phosphorus	TONG Xiong, LUO Pei, LIU Feng, <i>et al.</i> (3118)
Optimization of the Parameters for Microalgae Immobilization and Analysis of Its Recovery Potential for Ammonia Nitrogen in Wastewater	LIU Xiang, WANG Jing-yao, WU Juan-juan, <i>et al.</i> (3126)
Ammonium Adsorption Characteristics in Aqueous Solution by Titanate Nanotubes	ZHANG Zheng, FENG Chang-sheng, ZHANG Xiao-nui, <i>et al.</i> (3135)
Application of Fenton-like Photocatalysts Based on Defect Reconstruction in Degradation of Dye Wastewater	TANG Qing-wen, AN Xiao-qiang, LAN Hua-chun, <i>et al.</i> (3146)
Degradation of RBK5 with Peroxymonosulfate Efficiently Activated by N-Doped Graphene	YU Yong-bo, HUANG Wan, DONG Zheng-yu, <i>et al.</i> (3154)
Effect of Cu ²⁺ on Denitrification Using NO ₂ ⁻ as an Electron Acceptor	MAI Wen-ke, PENG Yong-zhen, JI Jian-tao (3162)
Start-up and Performance Optimization of a CANON Pilot Reactor	SUN Qing-hua, WU Di, ZHOU Jia-zhong, <i>et al.</i> (3169)
Effects of Aerobic Carbon Sources on Biofilm with Simultaneous Phosphate Removal and Enrichment	XU Lin-jian, PAN Yang, ZHANG Hao, <i>et al.</i> (3179)
Effect of Organic Characteristics on Sludge Settability in an AAO System	LIU Xiao-bo, YUAN Lin-jiang, CHEN Xi, <i>et al.</i> (3186)
Effect of Free Nitrous Acid on the Activity of Nitrifying Bacteria in Different Sludge Concentrations Under Anoxic Conditions	LÜ Xin-tao, ZHOU Tong, TIAN Xia-di, <i>et al.</i> (3195)
Stability of ZVI-dependent Autotrophic Denitrification by ANAMMOX Bacteria	ZHANG Wen-jing, HUANG Yong, BI Zhen, <i>et al.</i> (3201)
Effect of On-line NaClO Backwashing on Microbial Communities in an Inverted A ² O-MBR System	WANG Xu-dong, GAO Miao, WANG Ying-ying, <i>et al.</i> (3208)
Evaluation of Organic Matter Release and Economy for Various Pretreatments of Sewage Sludge	YUAN Yue, TAN Xue-jun, ZHENG She-yu (3216)
Model-based Optimization for the Coordinated Supply of Clear and Reclaimed Water in the Central Districts of Beijing, China	ZHANG Tian-yuan, TAN Qian, WANG Shu-ping (3223)
Occurrence and Removal of N-nitrosamines in the Wastewater Treatment Plants Using Different Treatment Processes	LIU Wang-rong, ZHAO Jiang-liang, YANG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (3233)
Occurrence of Tramadol and Fentanyl Use in Domestic Wastewater in Beijing	ZHOU Zi-lei, DU Peng, BAI Ya, <i>et al.</i> (3242)
Pollution Level and Ecological Risk of Typical Antibiotics in Guiyang Wastewater Treatment Plants	YANG Zhao, LI Jiang, ZHANG Sheng-hu, <i>et al.</i> (3249)
Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Various Livestock Feedlot Soils of the Hilly Purple Soil Region	CHENG Jian-hua, TANG Xiang-yu, LIU Chen (3257)
Effects of Tetracycline on Microbial Communities and Antibiotic Resistance Genes of Vermicompost from Dewatered Sludge	CHEN Jing-yang, XIA Hui, HUANG Kui, <i>et al.</i> (3263)
Fate of Antibiotic Resistance Genes and Virulence Genes in Enterococci During Anaerobic Digestion Process of Thermal Hydrolyzed Sludge	LI Hui-li, PEI Yuan-mei, LI Shan, <i>et al.</i> (3270)
Effect of Co-composting of Chicken Manure with Chinese Medicinal Herbal Residues on Antibiotic Resistance Genes	WU Jin-ping, CHEN Jian-wen, LIU Yong, <i>et al.</i> (3276)
Spatio-temporal Patterns of Microbial Communities and Their Driving Mechanisms in Subalpine Lakes, Ningwu, Shanxi	WANG Xue, LIU Jin-xian, CHAI Bao-feng, <i>et al.</i> (3285)
Community Structure Characteristics of <i>nirS</i> Denitrifying Bacteria of Spring Typical Parkland Waterbodies in Shijiazhuang City	ZHANG Yi-ran, LI Zai-xing, SUN Yue, <i>et al.</i> (3295)
Differential Responses of Rhizospheric <i>nirK</i> - and <i>nirS</i> -type Denitrifier Communities to Different Phosphorus Levels in Paddy Soil	ZHAN Yu, GAO Dan-dan, SHENG Rong, <i>et al.</i> (3304)
Comparison of Soil Bacterial Community Structure Between Paddy Fields and Dry Land in the Huixian Karst Wetland, China	JIA Yuan-hang, JIN Zhen-jiang, YUAN Wu, <i>et al.</i> (3313)
Cd Balance Analysis of a Typical Rice Paddy System in Central Hunan	JIANG Kai, DENG Xiao, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (3324)
Effects of an Amendment on Cadmium Transportation in the Rhizosphere Soil-Rice System	LI Yi-chun, WANG Yan-hong, TANG Ming-deng, <i>et al.</i> (3331)
Isolation of Heavy Metal Immobilizing and Plant Growth-Promoting Bacteria and Its Effects on Reducing Heavy Metal Accumulation in Wheat	HAN Hui, WANG Xiao-yu, CAI Hong, <i>et al.</i> (3339)
Differences in the Cadmium-Enrichment Capacity and Subcellular Distribution and Chemical Form of Cadmium in Different Varieties of Pepper	PENG Qiu, LI Tao, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (3347)
Effect of Phosphorus Addition on N ₂ O Emissions from Rice-Rapeseed Rotation Soils	SUN Zheng, SU Rong-lin, XU Peng, <i>et al.</i> (3355)
Impact of Land Use Type on the Stability and Organic Carbon Content of Soil Aggregates in the Weibei Dryland	LIU Jie, MA Yan-ting, WANG Xian-ling, <i>et al.</i> (3361)
Vertical Distribution Characteristics of PAHs in Soils with Different Land Use Types During Rapid Urbanization	LU Yin-tao, XIANG Xin-xin, ZHANG Shi-chao, <i>et al.</i> (3369)
Pollution Levels, Sources, and Spatial Distribution of Phthalate Esters in Soils of the West Lake Scenic Area	LIAO Jian, DENG Chao, CHEN Yi, <i>et al.</i> (3378)
Impact of Biochar on Soil Bulk Density and Aggregates of Lou Soil	LI Qian-qian, XU Chen-yang, GENG Zeng-chao, <i>et al.</i> (3388)