

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

环境DNA宏条形码监测湖泊真核浮游植物的精准性

张丽娟, 徐杉, 赵峥, 周小华, 冯庆, 杨江华, 李飞龙, 王志浩, 张效伟



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年2月

第42卷 第2期
Vol.42 No.2

目次

2013~2017年中国PM _{2.5} 污染防治的健康效益评估	张梦娇, 苏方成, 徐起翔, 张瑞芹, 魏煜, 谢刘震 (513)
区域气象条件和减排对空气质量改善的贡献评估	武文琪, 张凯山 (523)
2016年1月京津冀地区大气污染特征与多尺度传输量化评估	姚森, 张哈宇, 王晓琦, 杨书申 (534)
广州市2020年春节期间烟花爆竹燃放对空气质量的影响	裴成磊, 王宇骏, 毕燕茹, 廉秀峰, 周倩妮, 王在华, 马理, 李梅 (546)
长三角地区一次区域污染过程中细颗粒物的来源解析及其光学特性	夏丽, 朱彬, 王红磊, 康汉青 (556)
南京市不同天气过程下颗粒物中水溶性离子分布特征及其来源解析	张杨, 王红磊, 刘安康, 陈魁, 张艺馨, 刘思晗 (564)
天津市冬季气溶胶吸湿因子的粒径分布特征	丁净, 张裕芬, 郑乃源, 张会涛, 余卓君, 李立伟, 元洁, 唐森, 冯银厂 (574)
输送、滞留叠加海上回流的长时间沙尘天气影响判断及贡献分析	张哲, 乔利平, 周敏, 黄丹丹, 安静宇, 郭会琴, 王红丽, 黄成, 董赵鑫, 王书肖 (584)
洛阳市秋冬季PM _{2.5} 中多环芳烃的污染特征、来源解析及健康风险评价	齐静文, 张瑞芹, 姜楠, 李利萍, 苗青青 (595)
郑州市臭氧污染变化特征、气象影响及输送源分析	王旭东, 尹沙沙, 杨健, 袁明浩, 张瑞芹, 李亚松, 卢轩 (604)
基于正交试验的臭氧及其前体物的非线性响应及控制方案	李光耀, 陈强, 郭文凯, 张瑞欣, 夏佳琦 (616)
汽车工业区大气挥发性有机物(VOCs)变化特征及来源解析	叶露, 邵菁菁, 俞华明 (624)
兰州市高分辨率人为源排放清单建立及在WRF-Chem中应用评估	郭文凯, 李光耀, 陈冰, 夏佳琦, 张瑞欣, 刘晓, 朱玉凡, 陈强 (634)
2010~2017年四川省机动车污染物排放趋势分析	李媛, 石嘉诚, 陈军辉, 潘玉瑾, 周虹辉, 范武波, 叶宏, 钱骏, 刘政 (643)
珠江三角洲海陆交互沉积物中镉生物有效性及生态风险评价	王芳婷, 包科, 陈植华, 黄长生, 张彩香, 赵信文, 刘学浩 (653)
乌梁素海流域地表水中全氟化合物分布、来源及其生态风险	史锐, 毛若愚, 张梦, 吕永龙, 宋帅, 赵纪新 (663)
乌梁素海冰盖中微塑料的分布特征及其与盐度、叶绿素a的响应关系	王志超, 杨建林, 杨帆, 杨文焕, 李卫平, 李兴 (673)
张家口清水河拦沙坝对磷输移、滞留的影响	王维, 李叙勇 (681)
三峡水库典型支流磷素赋存形态特征及其成因	杨凡, 王丽婧, 纪道斌, 李虹, 李莹杰, 李鑫, 许杨, 田盼, 吴雅婷 (688)
巢湖沉积物氮磷分布及污染评价	王艳平, 徐伟伟, 韩超, 胡维平 (699)
巢湖南淝河河口底泥污染特征及疏浚决策	杨盼, 杨春晖, 马鑫雨, 尹洪斌 (712)
氧化强化对氢氧化钙原位固磷效果的影响	徐楚天, 李大鹏, 岳薇, 吴宇涵, 孙培荣, 汤尧禹, 黄勇 (723)
降雨径流事件对三峡水库香溪河库湾甲烷释放的影响	陈敏, 许浩震, 王雪竹, 肖尚斌 (732)
典型喀斯特河流-水-气界面二氧化碳交换特性及其营养调控因素	刘睿, 张静, 陈祖胜, 倪茂飞, 刘文胜 (740)
江苏省代表性水源地抗生素及抗性基因赋存现状	王龙飞, 程逸群, 胡晓东, 朱金鑫, 李轶 (749)
尾矿库水体环境抗生素抗性基因的分布特征	黄福义, 朱永官, 苏建强 (761)
涡河流域中部地区地下水化学特征及其成因分析	郑涛, 焦团理, 胡波, 龚建师, 侯香梦, 王赫生 (766)
天津七里海湿地水化学组成及主要离子来源分析	何明霞, 张兵, 夏文雪, 崔旭, 王中良 (776)
秸秆覆盖与氮减施对土壤氮分布及地下水氮污染影响	张万锋, 杨树青, 孙多强, 靳亚红, 姜帅, 刘鹏 (786)
环境DNA宏条形码监测湖泊真核浮游植物的精准性	张丽娟, 徐杉, 赵峰, 周小华, 冯庆, 杨江华, 李飞龙, 王志浩, 张效伟 (796)
浮游植物群落及粒径结构对光吸收特性的影响	黄新, 施坤, 张运林, 朱广伟, 周永强 (808)
松花江干流2014~2019年夏季着生藻类群落结构特征及其对环境因子的响应	于宗灵, 陈威, 赵然, 李中宇, 董英莉, 张蕊, 王业耀, 金小伟 (819)
汛期前后老鹳河干流人类干扰下浮游细菌多样性及功能预测	韩雪梅, 龚子乐, 杨晓明, 李玉英, 陈兆进, 朱会会, 王凡梅 (831)
两种典型PPCPs在潜流人工湿地中的季节性去除效果及降解产物	李超予, 杨怡潇, 张宁, 谢慧君, 胡振, 张建 (842)
人工生态系统对城市河流中抗生素和ARGs的去除	周海东, 黄丽萍, 陈晓萌, 李丹妍, 李昕, 崔锦裕 (850)
紫外氯胺组消毒供水系统中病毒微生物的分布特征	韩雪, 孙坚伟, 张力, 王哲明, 白晓慧 (860)
高炉水渣负载硫化纳米零价铁对水中土霉素的去除	孙秋楠, 张荣斌, 邓曼君, 李远, 王学江 (867)
胺硫改性生物炭对水溶液中不同重金属离子的吸附特性及吸附稳定性	汪存石, 何敏霞, 周峰, 陈靛, 祝建中 (874)
电凝聚氧化耦合工艺的有机物处理特性及去除机制解析	谢新月, 许建军, 张少华, 刘雨果, 金鑫, 金鹏康 (883)
微米零价铁对剩余活性污泥和餐厨垃圾厌氧联合消化的加强效果及机制	陈圣杰, 姚福兵, 皮洲洁, 侯坤杰, 何丽, 李小明, 王东波, 杨麒 (891)
河南省典型工业区周边农田土壤重金属分布特征及风险评价	孟晓飞, 郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 郑国砥, 乔鹏炜, 卞建林, 陈同斌 (900)
南京市绿地土壤重金属分布特征及其污染评价	陈佳林, 李仁英, 谢晓金, 王红, 徐静, 邵京, 简静, 阿克居里·乌尔曼, 沈嘉, 央宗 (909)
复合改良剂FZB对砷污染土壤的修复效果	丁萍, 贺玉龙, 何欢, 余江 (917)
石灰配施有机物料修复酸性Cd污染稻田	李光辉, 成晴, 陈宏 (925)
叶面喷施纳米MnO ₂ 对水稻富集镉的影响机制	周一敏, 黄雅媛, 刘晓月, 李冰玉, 刘羽翼, 李卓晴, 王薪琪, 雷鸣 (932)
典型喀斯特地区土壤-作物系统镉的富集特征与污染评价	王锐, 邓海, 贾中民, 严明书, 周蛟, 董金秀, 王佳彬, 余飞 (941)
辣椒果实高中低镉累积型对镉的富集、转运特性及在亚细胞分布特点比较	邵晓庆, 贺章味, 徐卫红 (952)
4种草本植物对镉的富集特征	陈迪, 李伯群, 杨永平, 和兆荣, 李雄 (960)
不同施肥条件下紫色土旱坡地可溶性有机碳流失特征	熊子怡, 郑杰炳, 王丹, 王富华, 王鑫燕, 王子芳, 高明 (967)
降雨变化对荒漠草原植物群落多样性与土壤C:N:P生态化学计量特征的影响	高江平, 赵锐锋, 张丽华, 王军锋, 谢忠奎 (977)
水分管理对水稻生长与根际激发效应的影响特征	林森, 肖谋良, 江家彬, 魏亮, 李科林, 刘守龙, 祝贞科, 葛体达, 吴金水 (988)
铜胁迫对小麦根系微域微生物群落的影响	葛艺, 徐民氏, 徐绍辉, 徐艳 (996)
臭氧污染、氮沉降和干旱胁迫交互作用对杨树叶和细根非结构性碳水化合物的影响	李品, 周慧敏, 冯兆忠 (1004)
颗粒物有机源示踪物的筛选与应用综述	李源速, 吴爱华, 童梦雪, 栾胜基, 李鸢 (1013)
《环境科学》征订启事 (522)	
《环境科学》征稿简则 (722)	
信息 (748, 899, 924)	

颗粒物有机源示踪物的筛选与应用综述

李源遽^{1,2}, 吴爱华^{1*}, 童梦雪¹, 栾胜基¹, 李贇¹

(1. 北京大学深圳研究院, 深圳 518057; 2. 北京大学环境科学与工程学院, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100871)

摘要: 大气颗粒物中的不少有机组分具有较强的源指向性, 是识别颗粒物来源并评估各污染源对城市大气环境影响的重要工具之一。前人因此针对不同污染源颗粒物有机组成进行了广泛研究, 并筛选出大量具有源指纹意义的有机示踪物。本文对前人的相关工作进行了简要整理, 重点关注了生物质燃烧、餐饮源、化石燃料燃烧和交通源排放颗粒物有机组成特征, 总结了这4类污染源主要的源示踪物, 系统计算了各污染源的比值, 并以此讨论了有机源示踪物在颗粒物源解析方面的运用。此外, 也进一步分析了目前国内外源示踪物筛选工作的不足, 指出了新的源示踪物筛选方向。

关键词: 大气环境; 颗粒物; 有机示踪物; 源排放; 源解析

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)02-1013-10 DOI: 10.13227/j.hjks.202006164

Review of Screening and Applications of Organic Tracers in Fine Particulate Matter

LI Yuan-ju^{1,2}, WU Ai-hua^{1*}, TONG Meng-xue¹, LUAN Sheng-ji¹, LI Zhi¹

(1. Shenzhen Institute, Peking University, Shenzhen 518057, China; 2. State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Specific organic compounds within atmospheric particulate matter are indicators of specific pollution sources and, as such, can be used to differentiate inputs from various air pollution emissions sources in urban areas. Therefore, many studies have been conducted to detect organic particulate matter and screen the associated organic tracers that provide provenance information. This review provides a brief summary of the emission characteristics of biomass burning, cooking, fossil fuel combustion, and traffic. The particular marker compounds that carry provenance information for these four emission sources are discussed and diagnostic ratios are calculated to discuss the use of organic tracers in source apportionment. The shortcomings and new directions of using source tracer screening are also discussed.

Key words: atmospheric environment; particulate matter; organic tracers; source emission; source apportionment

近年来,随着我国加快生态文明体制改革,城市大气环境开始好转,但PM_{2.5}相关污染事件仍时有发生,部分城市PM_{2.5}平均浓度甚至超过了100 μg·m⁻³, PM_{2.5}已经成为我国大气复合污染的关键污染物^[1~5]。PM_{2.5}化学组成复杂,不同来源的PM_{2.5}对大气环境和人体健康具有多重影响^[6],对大气颗粒物进行来源解析,准确分析不同污染源对大气颗粒物的贡献是解决当前我国大气复合污染问题的基础。

解析一次源排放和大气颗粒物之间关系的方法一般有两种,一种是基于排放源的模式,另一种是基于受体的模式^[6]。目前常用的源解析模式都是基于受体的模式如CMB模型。CMB模型是基于质量守恒,定量解析大气污染物来源的方法^[6,7]。此种方法的关键是分析并利用污染物中具有“化学指纹”意义的特征组分评估某个类型污染源对大气颗粒物的贡献^[6~8]。大气颗粒物中含有大量的有机物,据报道我国城市大气PM₁₀中大约含有15%的有机碳,而在PM₁中,有机物的百分含量为47%^[4,8~10]。并且颗粒物中不少有机组分结构稳定、具有一定的源指纹意

义,是潜在的源示踪物。因此,过去30年来,国内外学者已经开展了广泛的研究,筛选出了大量有机化合物作为不同污染源的示踪物,并运用多种源解析方法评估了不同污染源对大气颗粒物的贡献^[8~21]。目前已有不少学者对CMB等模式在大气颗粒物源解析方面的应用进行了非常详尽的综述,但却缺乏对不同污染源有机示踪物的筛选和应用的系统总结。

随着我国对工厂排放的严格控制,机动车排放、烹饪和固体燃料燃烧将是我国大气的主要污染源^[1~5,8~10,12],本文整理了机动车、餐饮、生物质和化石燃料燃烧这4类主要污染源的颗粒物组成特征,并总结了各污染源主要的有机源示踪物,通过计算特征比值阐述了有机示踪物在颗粒物源解析方面的应用;也探讨了国内外已有研究在本领域存在的不足。

收稿日期: 2020-06-16; 修订日期: 2020-08-18

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0211501); 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室开放课题项目(19K02ESPCP)

作者简介: 李源遽(1990~),男,博士,博士后,主要研究方向为大气污染控制, E-mail: xqsrljy@qq.com

* 通信作者, E-mail: IEResp@163.com

足,指出了潜在源示踪物筛选方向,以期为我国大气颗粒物溯源工作提供新的思路。

1 不同污染源特征污染组分

颗粒物成分复杂,且不同来源的颗粒物有机组成差异明显,要从中筛选出具有源指向意义的化合物需遵循以下3点准则:①具有代表性,是某一类污染源的 特征组分;②性质相对稳定,不易与其他物质发生反应,也不能转化为气相;③不能由大气化学反应生成^[20]。表1总结了已有研究中生物质燃烧、城市交通、餐饮源和化石燃料燃烧这4类一次源排放的主要有机组分和特征源示踪物。从目前的研究来看,已确定的有机源示踪物主要包括:多环芳烃、萜烷、甾烷、藿烷、单糖、C16 和 C18 脂肪酸^[15~20],多环芳烃广泛存在于各类污染源排放的颗粒物中,其中菲、芘和蒽等与各自同分异构体的比值是区分不同污染源的重要依据^[16],其余有机物则主

要是一类或者两类源排放的示踪物。

如表1所示,生物质燃烧的主要源示踪物是脱水单糖、 β -谷甾醇和萜族化合物等^[21~23]。脱水单糖主要来源于生物质燃烧过程中木质素或者纤维素的热解,主要是左旋葡聚糖和少量的半乳糖和甘露聚糖^[21,23]。由于在煤和石油燃烧源颗粒物中并未检测到左旋葡聚糖等单糖的存在,早期的研究认为左旋葡聚糖等脱水单糖是生物质燃烧的特征源示踪物^[23]。植物体内的甾族化合物主要以植物甾醇的形式存在,通常 β -谷甾醇的排放速率最高^[21~23]。萜族化合物是区分木材和秸秆燃烧的重要标志化合物,木材燃烧排放的颗粒物中含有大量的二萜,而在秸秆、竹子以及苔藓等燃烧排放的颗粒物中则仅见到少量三萜^[21~27,29]。此外,三环的二萜是非等小分子多环芳烃的主要来源,因此木材燃烧排放的颗粒物中菲及其同系或间系物等小分子 PAHs 的含量远高于其他污染源^[21,28,30]。

表1 不同的排放源排放的颗粒物主要有机组分及源示踪物
Table 1 Organic components and tracers of PM emitted from different emission sources

污染源	类型	碳数检测范围	主要有机物	有机示踪物
生物质燃烧	木材 ^[21~28]	C1~C34	二萜类、脂肪酸、单糖、酚类和多环芳烃	二萜、三萜、单糖和植物甾醇
	秸秆 ^[22,23,28~32]	C1~C35	脂肪酸、单糖、酚类、烷烃和多环芳烃	三萜、单糖和植物甾醇
城市交通	机动车 ^[33~37]	C1~C32	烷烃、多环芳烃、芳香酮和含氮杂环化合物	藿烷、甾烷和多环芳烃
	轮胎磨损、刹车、路尘 ^[38]	C1~C29	烷烃、脂肪酸、多环芳烃、三萜类和规则甾烷	藿烷、甾烷和多环芳烃
餐饮	中式 ^[39~42]	C1~C33	脂肪酸、二元羧酸、多环芳烃、正构烷烃和醛酮	胆甾醇、脂肪酸和单糖
	西式 ^[39,43~47]	C1~C29	脂肪酸、二元羧酸、多环芳烃、正构烷烃和醛酮	胆甾醇和脂肪酸
化石燃料燃烧	煤 ^[48~50]	C1~C34	烷烃、脂肪酸、藿烷、多环芳烃和酚类	多环芳烃、酚类和藿烷
	石油及其制品 ^[51~54]	C1~C32	烷烃、环烷烃、多环芳烃、不饱和烃和非烃类	藿烷、甾烷、多环芳烃和正构烷烃

机动车排放的主要示踪物是藿烷、甾烷和多环芳烃。机动车排放的颗粒相藿烷构型相对简单,均是17 α (H)、21 β (H)型,主要包括:17 α (H)21 β (H)-藿烷、17 α (H)21 β (H)29-降藿烷和22R&S-17 α (H)21 β (H)30-升藿烷等^[33~35]。这个系列的藿烷结构稳定,不易降解,是区分机动车排放和化石燃料燃烧的重要指标。甾烷存在于机动车、煤和石油燃烧等非生物源颗粒物中^[33]。与藿烷类似,甾烷同样存在大量不同的立体构型,机动车排放的甾烷主要是C27~C29的规则甾烷和C27的重排甾烷^[34,35],其中C17上是 α -H的甾烷最为普遍,如20R-5R(H)、14 α (H)、17 α (H)-胆甾烷和20S-13 α (H)、17 α (H)-重排胆甾烷。

中餐和西餐的源示踪物主要是胆甾醇和脂肪酸^[39~43]。由于西式肉类烹饪过程排放的胆甾醇与大气环境中胆甾醇的浓度非常接近,早期的研究认为胆甾醇是餐饮源的特征示踪物^[44]。但随后的研究表明雪茄燃烧等过程也会排放胆甾醇^[45],因而后续的研究大多同时利用胆甾醇与脂肪酸作为

餐饮源的示踪指标^[46,47]。烹饪过程中,脂肪酸的排放量远高于机动车和燃煤等污染源,主要原因是石油和煤的演化过程中动植物体内脂肪酸会经细菌分解、水解以及氧化等作用而大幅度减少^[55]。脂肪酸主要以甘油酯的形式赋存于动植物油脂当中,碳数多在4~34之间,以偶碳数脂肪酸为主^[39]。陆生动植物体内脂肪酸含量最高的是C16和C18的直链脂肪酸,因此前人的研究常常利用C16和C18脂肪酸之间的比值作为区分颗粒物来源的指标^[39]。

植物体内的萜族化合物是多环芳烃的重要来源,因此在植物演化为煤的过程中,会产生大量的多环芳烃,而在煤演化或者燃烧过程中,多环芳烃又会氧化形成苯酚类化合物^[55]。苯酚类化合物仅在燃煤过程排放的颗粒物中有发现,因而被认为是燃煤源颗粒物的特征示踪物^[48~50]。石油及相关制品燃烧过程中颗粒物有机组成特征与机动车接近,源示踪物主要是多环芳烃、甾族、萜族和正构烷烃^[51~53]。石油燃烧和机动车均会排放大量的藿烷和甾烷,但

石油燃烧过程中排放的藿烷和甾烷通常具有更多的异构类型^[54,55]。此外,对于石油来说,正构烷烃也是重要的示踪物。石油中的正构烷烃多由动植物体内脂肪酸脱羧而来,所以石油及其产品的燃烧排放的颗粒物中正构烷烃的主峰通常位于 C15 或者 C17,而生物质燃烧和餐饮源排放的正构烷烃则主要来源于植物蜡,主峰位于 C25 以上^[24,25,54,55]。此外,大多数污染源排放的颗粒物中正构烷烃都具有较明显的奇碳优势,不过某些强还原条件下形成的石油中正

构烷烃却具有偶碳优势^[55]。

2 源示踪物特征比值

通过计算特征比值可以消除不同源成分谱在采样方法、分析技术以及计量单位等方面的差异,降低模型分析过程的不确定性,并能定性分析颗粒物来源。本文系统计算了生物质燃烧、城市交通、餐饮和化石燃料燃烧源排放颗粒物中多环芳烃、脂肪酸和单糖的特征比值,具体结果见表 2。

表 2 不同污染源特征比值¹⁾
Table 2 Diagnostic ratios of different pollution sources

	污染源	Phe/(Phe + Ant)	Fla/(Fla + Pyr)	BaA/(BaA + Chry)	InP/(InP + BghiP)	$C_0/(C_0 + C_1)$	F16/F18	F18:1/F18	LG/(Gal + Man)
生物质	木材 ($n=18$) ^[23~28]	0.82 ± 0.11 (0.55 ~ 1.00)	0.59 ± 0.21 (0.16 ~ 0.88)	0.53 ± 0.33 (0.07 ~ 0.59)	0.70 ± 0.16 (0.49 ~ 0.86)	0.49 ± 0.19 (0.17 ~ 0.72)	3.52 ± 2.05 (0.36 ~ 7.56)	1.15 ± 1.57 (0.03 ~ 4.90)	2.16 ± 1.26 (0.08 ~ 6.14)
	秸秆和干草 ($n=10$) ^[28~32]	0.55 ± 0.32 (0.16 ~ 0.96)	0.53 ± 0.06 (0.43 ~ 0.63)	0.49 ± 0.08 (0.40 ~ 0.68)	0.59 ± 0.21 (0.39 ~ 0.94)	0.63 ± 0.19 (0.43 ~ 0.94)	10.01 ± 11.10 (2.85 ~ 32.14)	1.86 ± 1.15 (0.70 ~ 3.24)	5.80 ± 2.46 (2.04 ~ 9.47)
	机动车 ($n=9$) ^[33~37,56]	0.83 ± 0.05 (0.77 ~ 0.89)	0.41 ± 0.08 (0.32 ~ 0.61)	0.46 ± 0.20 (0.27 ~ 0.82)	0.29 ± 0.18 (0.13 ~ 0.70)	Nd	2.55 ± 0.71 (2.00 ~ 3.55)	0.31 ± 0.14 (0.11 ~ 0.47)	Nd
城市交通	道路及隧道 ($n=12$) ^[38,57~58]	0.72 ± 0.17 (0.49 ~ 0.94)	0.43 ± 0.09 (0.17 ~ 0.58)	0.41 ± 0.14 (0.13 ~ 0.53)	0.34 ± 0.09 (0.24 ~ 0.50)	Nd	1.21 ± 0.41 (0.80 ~ 1.76)	0.17 ± 0.03 (0.13 ~ 0.19)	Nd
	中式 ($n=10$) ^[40~42]	0.86 ± 0.20 (0.72 ~ 1.00)	0.40 ± 0.13 (0.33 ~ 0.53)	0.41 ± 0.23 (0.22 ~ 0.51)	0.23 ± 0.20 (0.13 ~ 0.45)	Nd	3.43 ± 4.13 (1.26 ~ 8.12)	3.51 ± 3.59 (0.36 ~ 6.55)	11.81 ± 11.13 (1.20 ~ 18.45)
餐饮	西式 ($n=11$) ^[45~46,59]	0.76 ± 0.31 (0.4 ~ 0.92)	0.45 ± 0.08 (0.42 ~ 0.55)	0.49 ± 0.06 (0.46 ~ 0.54)	0.41 ± 0.10 (0.35 ~ 0.51)	<0.01	2.34 ± 1.71 (1.68 ~ 3.55)	1.76 ± 0.85 (1.19 ~ 2.21)	0.85
化石燃料	煤($n=11$) ^[48~50]	0.72 ± 0.10 (0.55 ~ 0.87)	0.54 ± 0.11 (0.46 ~ 0.85)	0.45 ± 0.11 (0.18 ~ 0.55)	0.48 ± 0.11 (0.18 ~ 0.55)	0.42 ± 0.14 (0.21 ~ 0.59)	1.21 ± 0.58 (0.47 ~ 2.08)	0.84 ± 0.84 (0.19 ~ 2.03)	Nd
	石油及相关制品 ($n=10$) ^[16,33,51~54,56]	0.45 ± 0.13 (0.34 ~ 0.77)	0.42 ± 0.06 (0.29 ~ 0.47)	0.61 ± 0.06 (0.52 ~ 0.69)	0.29 ± 0.21 (0.11 ~ 0.74)	0.30 ± 0.16 (0.04 ~ 0.62)	Nd	Nd	Nd

1) n 表示样品总数; Phe 表示菲, Ant 表示蒽, Fla 表示荧蒽, Pyr 表示芘, BaA 表示苯并(a)蒽, Chry 表示荧, InP 表示茚并(1,2,3-cd)芘, BghiP 表示苯并(ghi)芘; C₀ 表示 Phe/Ant, C₁ 表示甲基- Phe/Ant; F16 表示十六烷酸, F18 表示十八烷酸, F18:1 表示十八烯酸; LG 表示左旋葡聚糖, Gal 表示半乳糖, Man 表示甘露聚糖; “Nd”表示没有数据

2.1 多环芳烃

2.1.1 母体多环芳烃

目前常用 PAHs 的特征比值是蒽、荧蒽、苯并(a)蒽(BaA)和茚并(1,2,3-cd)芘等与对应同分异构体的相对比值。由于 PAHs 广泛存在于各类污染源颗粒物中,相关特征比值最早被应用于颗粒物源解析,早期的研究表明蒽与菲(相对分子质量 178,互为同分异构体)的相对比值是区分固体燃料(生物质和煤)和石油的重要指标,常常将 Phe/(Phe + Ant) = 0.50 作为石油和其他污染源特征比值的临界点^[16]。综合前人研究来看(如表 2),石油燃烧排放的颗粒物中 Phe/(Phe + Ant) 的值常小于 0.50,而竹子、甘蔗和苔藓等草类样品燃烧的比值则小于 0.30,两者 Phe/(Phe + Ant) 的分布范围有明显重叠。此外,燃煤排放的比值通常大于 0.60,小麦等农作物秸秆以及大多数木材燃烧的比值同样大于 0.60,交通源和餐饮源样品的比值则分布于 0.50 ~ 1.00 之间。很明显,某些污染源间 Phe/(Phe + Ant) 的分布范围差异较小,再加上大气中 Ant 具有光敏

性,因此 Phe/(Phe + Ant)并不适合单独用于颗粒物溯源分析。

荧蒽(Fla)和芘(Pyr)(同分异构体,相对分子质量 202)的特征比值在早期的研究中也广泛被运用,前人通常将 Fla/(Fla + Pyr) = 0.50 设置为石油和固体燃料燃烧的临界值^[16,54]。从目前的研究来看,大多数煤样品燃烧的特征比值大于 0.50,而生物质燃烧排放的颗粒物中 Fla/(Fla + Pyr) 值分布范围为 0.16 ~ 0.88,大多数木材样品的比值在 0.50 之上,秸秆和竹子等燃烧的比值则在 0.40 ~ 0.60 之间。而石油燃烧源、机动车源和餐饮源样品的特征比值大多分布在 0.30 ~ 0.50 之间,差异较小。综合前人研究来看,当大气颗粒物中 Fla/(Fla + Pyr) > 0.5 时,生物质燃烧对颗粒物的贡献程度较高。

在大多数生物质和部分煤样品燃烧排放的颗粒物中,苯并(a)蒽(BaA)和茚并(1,2,3-cd)芘及其同分异构体的含量偏低,因此早期的研究并未对上述两组高分子量 PAHs 的特征比值进行较深入的讨论。如表 2 所示,餐饮源颗粒物 BaA/(BaA + Chry)

[BaA: 苯并(a)蒽, Chry: 蒽, 同分异构体, 相对分子质量 228] 的值主要集中于 0.40 ~ 0.60, 大多数石油及其制品燃烧的特征比值则集中于 0.50 ~ 0.70, 而少量固体燃料燃烧方面的数据主要分布于 0.40 ~ 0.70 之间. 4 类污染源 BaA/(BaA + Chry) 的比值均集中于 0.40 ~ 0.70 的范围内, 区分度较低, 而苯并(a)蒽同样具有光敏性, 大气颗粒物中 BaA 和 Chry 的相对组成会受到光线的影响, 因此 BaA/(BaA + Chry) 并不能提供较准确的源指纹信息. 而对于 InP/(InP + BghiP) [InP: 茚并(1,2,3-cd)芘, BghiP: 苯并(ghi)芘, 同分异构体, 相对分子质量 276] 来说, 生物质燃烧方面的数据均大于 0.40, 而大多数机动车排放、石油燃烧和餐饮源样品的特征比值则低于这个范围, 只有少量西餐样品特征比值在 0.50 左右, 因此 InP/(InP + BghiP) > 0.50 可能表明生物质燃烧对颗粒物有明显贡献.

2.1.2 烷基多环芳烃

除了普通的母体 PAHs 外, 有研究表明石油之中以及生物质和煤燃烧过程还会排放大量的烷基多环芳烃^[16,21,33]. 不过, 目前针对餐饮源颗粒物中烷基 PAHs 的研究还比较欠缺, 仅有文献^[59]报道西

式烤肉过程会产生少量的烷基多环芳烃. 因此, 烷基多环芳烃在源解析方面的应用情况并不多见. 尽管如此, 对比前人研究可以发现不同污染源颗粒相烷基 PAHs 的排放特征差异明显. 如表 3 所示, 餐饮源颗粒物中, 目前仅发现了甲基取代的芴和菲, 且排放量远小于相应的母体 PAHs^[59]. 煤燃烧过程中排放的烷基 PAHs 主要是菲、芴和蒽的烷基取代物, 烷基取代基的碳原子数主要为 C1 ~ C3, 其中 C1 的排放量最高, 约占 PAHs 排放总量的 50%, 但随着煤阶的增加 C2 的排放量逐渐增大, 此外某些煤样品燃烧过程中还会排放少量的 C4 和含氧或者硫的 C1^[48,49]. 生物质燃烧过程中, 颗粒相烷基 PAHs 的烷基取代基同样是 C1 ~ C3, 生物质燃烧过程中排放量最高的是 C3, 但是部分样品烷基取代基碳原子数越大, 烷基-PAHs 的排放量越高^[24,25]. 与固体燃料不同, 石油类样品燃烧过程中除了会排放大量蒽、芴和蒽等常见的烷基 PAHs 外, 还会排放大量的高分子量 PAHs 的烷基取代物, 不过石油类样品燃烧排放的烷基 PAHs 的取代基主要为 C1, C2 取代的 PAHs 含量较低, 且较少见到 C3 及以上的烷基 PAHs^[33,53,54].

表 3 各主要污染源排放单位颗粒物中烷基 PAHs 及对应母体 PAHs 的平均含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$
Table 3 Average content of alkyl-PAHs and corresponding parent PAHs in PM from emission sources/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$

污染源	菲	C1-菲	C2-菲	C3-菲	C4-菲	芴	C1-芴	C2-芴	蒽	C1-蒽	C2-蒽
木材 ($n=18$) ^[23~28]	3 707	6 185	4 174	4 085	0	2 461	1 130	0	360.4	27.8	0
秸秆和干草 ($n=10$) ^[28~32]	140.8	145.6	45.65	0	0	119.4	97.81	0	39.63	19.33	0.876 7
汽车尾气 ($n=9$) ^[33~37,56]	1 574.1	0	1 003	376.9	0	1 378.7	406.6	0	90.92	179.7	0
道路 ($n=12$) ^[57~58]	3 915	1 015	311	0	0	1 194	210.5	0	77.55	133.1	0
烤肉 ($n=6$) ^[59]	1 087	57.96	71.30	0	0	256.2	0	0	53.48	0	0
煤 ($n=11$) ^[43~46,59]	1 007	1 914	1 359	1 531	14.10	54.68	1 000	0	109.4	386.7	20.31
石油 ($n=10$) ^[16,33,51~54]	1 157	1 380	16.53	0	0	429.8	857.3	227.5	222.5	423.7	73.21

1) n 表示样品总数

甲基取代的 PAHs 广泛存在于各类污染源颗粒物中, 因此有国外学者通过计算甲基取代 PAHs 与对应母体 PAHs 的相对比值来分析大气颗粒物的来源信息^[16]. 本文计算了不同污染源颗粒物中 $C_0/(C_0 + C_1)$ 的值, 具体结果见表 2. 对于生物质燃烧来说, 落叶树和大部分干草类样品燃烧的比值高于 0.50, 而温带针叶树样品以及竹子的比值则低于 0.50. 在煤燃烧过程中, 绝大多数样品甲基菲的排放量大于菲的排放量, 所以煤燃烧 $C_0/(C_0 + C_1)$ 的平均值为 0.42 ± 0.14 , 小于 0.50. 同样, 大部分石油样品燃烧排放的 C_1 浓度也高于 C_0 , 因而平均值也小于 0.50. 但是 $C_0/(C_0 + C_1)$ 的使用范围同样十分局限, 仅当比值大于 0.50 时, 才表明生物质燃烧是大气颗粒物的主要来源.

此外需要说明的是, 多甲基取代的 PAHs (如二甲基菲) 也曾被应用于颗粒物来源解析. 国外学者曾通过计算 1,7 和 2,6-二甲基菲两种同分异构体之间的相对比值来判断城市大气颗粒物来源^[13], 国内学者也发现煤在不同燃烧方式下排放的二甲基菲具有不同的异构特征^[29], 但目前关于不同污染源二甲基菲的排放数据还十分不足, 需要进一步研究.

2.2 脂肪酸

近年来餐饮源对城市大气环境的影响增加, 脂肪酸在源解析方面的运用成为国内外学者关注的重点. 十六烷酸、十八烯酸和十八烷酸在生物质燃烧和餐饮源等颗粒物中含量较高, 3 种脂肪酸之间的比值能在一定程度上反映大气污染物特别是脂肪酸的来源. 如表 2 所示, 生物质燃烧过程中排放的颗

颗粒物 F16/F18 的比值分布非常分散,木材样品的平均值为 3.52 ± 2.05 ,常见的落叶树样品的均高于平均值,而温带针叶树样品的比值差距较大。干草类样品的比值差异也非常明显,平均值为 10.01 ± 11.10 ,其中蒲苇燃烧的特征比值远高于其他草本类植物。餐饮源颗粒物中 F16/F18 分布在 $1.26 \sim 8.12$ 之间,其中大部分菜系的比值小于 5.0,只有东北菜的比值达到了 8.12,高于其他菜系。机动车和燃煤排放方面的数据则表明机动车排放 F16/F18 通常大于 2.0,而燃煤则小于 2.0。

与 F16/F18 相比,生物质燃烧排放的颗粒物中 F18:1/F18 的变化范围相对较小,大多数的木材样品和苔藓等草本类样品的比值均小于 1.0,只有竹子、甘蔗等少量样品大于 1.0。而对于城市交通源来说, F18:1/F18 的值小于 0.5。餐饮源颗粒物中 F18 与 F18:1 的比值分布于 $0.36 \sim 6.55$,大部分菜系的比值都大于 1.0,只有上海菜小于 1.0。不过由于烹饪过程中所使用的植物油或者动物油对脂肪酸排放特征的影响较大,而目前的研究中,采样餐厅均以植物油为主,研究结果并未完全反映餐饮源脂肪酸的排放特征。因此在运用脂肪酸特征比值进行来源分析时,还应该考虑烹饪用油的差异。

2.3 单糖

目前仅在生物质燃烧和餐饮源颗粒物中发现了左旋葡聚糖等单糖。早期的研究认为此类单糖是生物质燃烧的特征示踪物。随着后续研究的深入,国内学者在中式餐饮源颗粒物中同样发现了相关组分^[41],近年来国内外学者也在英式和意式料理中发现了左旋葡聚糖^[42,44]。餐饮源排放的颗粒物中,中餐 LG/(Gal + Man) 的变化范围较大,分布范围是 $1.20 \sim 18.45$,其中川菜的值最低,上海菜最高。西餐烹饪过程排放的颗粒物中单糖类物质的含量低于中餐,且多数样品仅检测出左旋葡聚糖。不同菜系之间, LG/(Gal + Man) 的值差距较大,因此单糖类物质的特征比值可以作为区分菜系特别是中西餐的指标。对于生物质燃烧源而言,大部分样品燃烧排放的颗粒物中 LG/(Gal + Man) 的值大于 1.0,目前仅发现桉树和美洲五针松两类样品的特征比值小于 1.0。木材燃烧的平均值为 2.16 ± 1.26 ,秸秆、干草类样品的平均值为 5.80 ± 2.46 ,均低于餐饮源。

3 源示踪物的运用

3.1 特征比值

特征比值较单个有机示踪物能更准确地反映颗粒物来源信息,但要运用 CMB 模型进行源解析,至少需要两组特征指标,而在选择不同的指标前,通常

会根据特征比值建立二维坐标散点图。不同特征比值在散点图上的区分度是衡量该组源示踪物能否作为 CMB 模型源解析数据的标准之一^[60,61]。除此之外,建立二维坐标图,并划分各污染源特征比值的主要分布区域,也能为定性分析大气环境中颗粒物来源提供帮助。

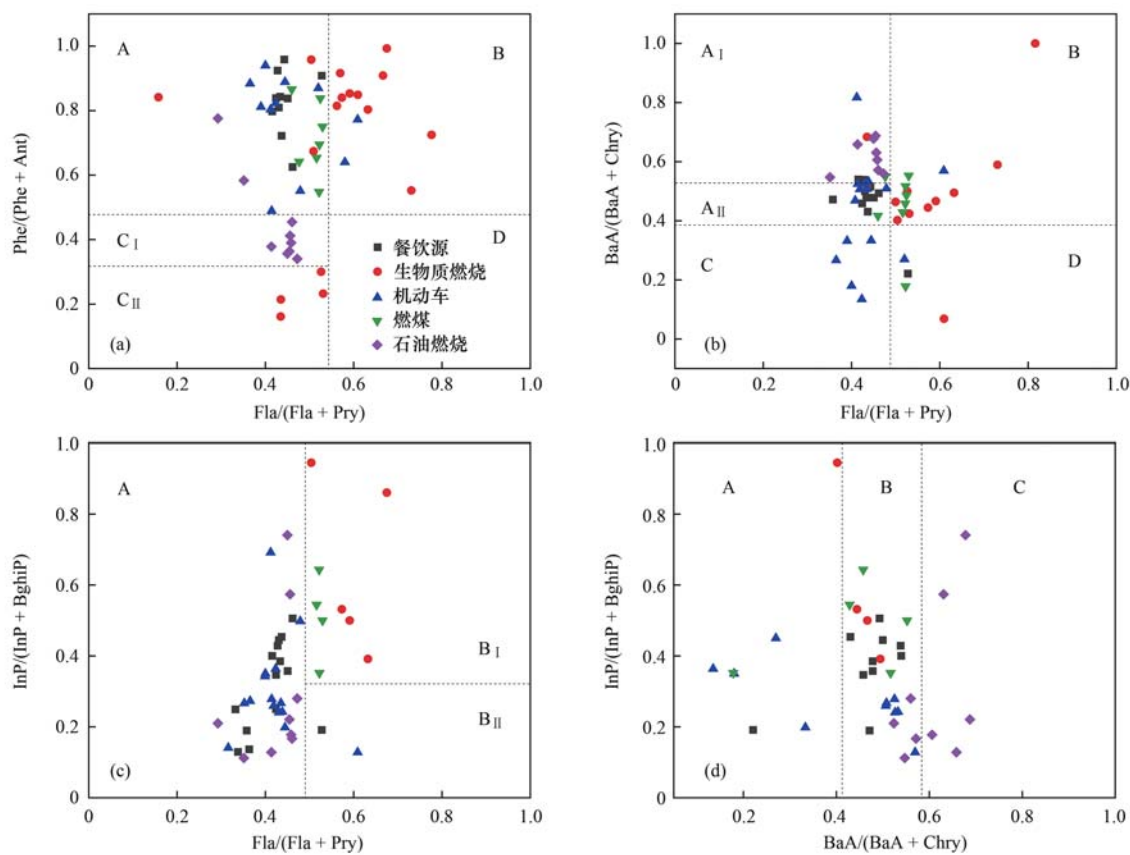
本文根据计算所得特征比值制作了二维散点图。如图 1(a) 所示,生物质燃烧源、石油燃烧的分布区域明显区别于其他污染源。根据 Fla/(Fla + Pyr) 和 Phe/(Phe + Ant) 两项参数,可以将图 1(a) 划分为 A、B、C 和 D 这 4 个区域:区域 A 为餐饮源、燃煤和机动车混合区域,而区域 B 则主要是生物质燃烧及少量的机动车排放数据。区域 C 根据 $\text{Phe}/(\text{Phe} + \text{Ant}) = 0.32$,将该区域划分为 C_I 和 C_{II} 两个区域,其中石油及其制品燃烧产生的颗粒物主要集中于 C_I 区,而 C_{II} 区则是生物质燃烧区域,但与区域 B 中的生物质不同, C_{II} 区域主要是水稻和玉米秸秆样品的数据点。

根据 Fla/(Fla + Pyr) 和 BaA/(BaA + Chry) 两项参数也可以将图 1(b) 划分为 4 个区域。其中区域 A 根据 $\text{BaA}/(\text{BaA} + \text{Chry}) = 0.53$,可划分为 A_I 和 A_{II} 两个区域,石油类样品燃烧相关数据主要分布于区域 A_I,而区域 A_{II} 则是餐饮、机动车、生物质燃烧和燃煤源样品的混合区域。区域 B 有一个机动车样品的数据点分布,但主要是生物质燃烧和燃煤数据的混合区域。区域 C 仅分布有机动车排放相关数据,是机动车源的特征区域。区域 D 同样是 4 类污染源的混合区域,但数据点较少。

图 1(c) 可以根据 Fla/(Fla + Pyr) 和 InP/(InP + BghiP) 分为 A 和 B 两个区域。其中区域 A 为餐饮源、机动车和石油燃烧样品的混合区域。而根据 $\text{InP}/(\text{InP} + \text{BghiP}) = 0.30$,又可将区域 B 划分 B_I 和 B_{II} 两个区域, B_I 属于生物质燃烧和燃煤源样品的混合区域,而区域 B_{II} 则仅少量分布有餐饮源和机动车源的数据点。

图 1(d) 根据 BaA/(BaA + Chry) 和 InP/(InP + BghiP) 两组参数可以划分为 A、B 和 C 这 3 个区域,区域 A 主要分布机动车排放的相关数据点以及少量餐饮源和燃煤源数据。区域 B 为 4 类污染源的混合区域,而区域 C 则仅有石油燃烧排放的相关数据。

区域划分的规则是尽量保证某区域内污染源单一。由于不同排放源的 PAHs 的特征比值存在相似性,如果城市大气颗粒物特征比值落入混合区域,仅靠 PAHs 的特征比值并不能指示大气颗粒物的来源。特征有机分子或特征比值,在颗粒物来源分析中还必须结合相关的受体模型,才能进一步量化来



A、B、C 和 D 表示不同污染源数据主要集中区域

图 1 不同污染源 PAHs 特征比值

Fig. 1 Diagnostic ratios of PAHs in different pollution sources

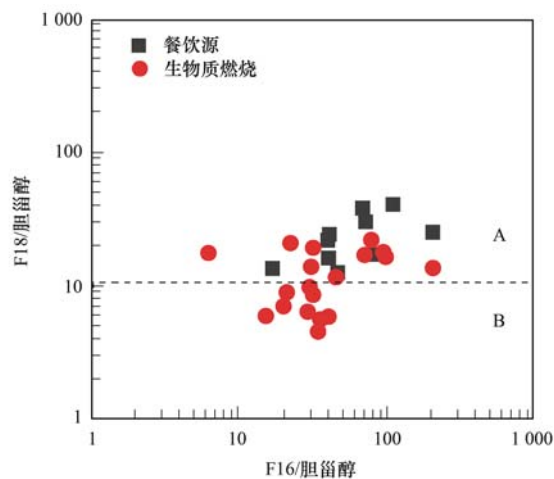
源贡献.

3.2 CMB 分析模型

CMB 是最常用的源解析模型之一. 早期的研究通常利用微量元素作为示踪物计算不同类型污染源对大气颗粒物的相对贡献, 但是微量元素作为示踪物能解析的污染源有限, 且随着能源结构的变化和清洁能源的使用, 不少微量元素不再具有源指纹意义^[8,20]. 因此, 国外学者较早将有机物作为示踪剂并讨论了污染源对大气污染物的贡献^[19,20], 并认为机动车排放、燃煤、生物质燃烧、肉类烹饪、道路尘、轮胎磨损以及烟草是城市大气颗粒物的主要来源. 随后, 基于有机示踪物的 CMB 模型计算在国内外得到了广泛应用: Zheng 等^[62]利用有机示踪物对美国南部的 $PM_{2.5}$ 进行源解析, 发现有机碳的主要来源是柴油车 (14%~30%)、木材燃烧 (25%~66%)、肉类烹饪 (5%~12%) 和汽油车 (0~10%). Huang 等^[15]的研究也发现 2008 年北京奥运期间, 餐饮源对大气有机气溶胶的贡献达到了 24%.

但是, 如果大气颗粒物来源较复杂, CMB 模型可能无法准确评估各污染源对大气颗粒物的贡献. 以大气中的脂肪酸为例, 其主要来源包括餐饮、生物质燃烧和少量的机动车排放. 国外学者 Robinson

等^[61]的研究发现, 当城市大气中的脂肪酸来源超过一种时, CMB 模型的计算结果存在明显偏差. 为了解决这个问题, 他们首先计算了大气颗粒物中 F16/F18 和 F16:1/F18:1 的比值, 并发现只有当大气颗粒物特征比值集中于某个范围内时, CMB 模型才能准确判断大气中脂肪酸的来源. 如图 2 所示, 本文也根据餐饮源和生物质燃烧源颗粒物中 F16 与 F18



A 和 B 表示不同污染源数据主要集中区域

图 2 不同污染源脂肪酸特征比值

Fig. 2 Diagnostic ratios of fatty acids in different pollution sources

(以胆甾醇为参考物种进行均一化)的比值建立了散点图. 根据(F18/胆甾醇)的比值可将图2划分为A和B两个区域, 区域A为餐饮源和生物质燃烧源的混合区域, 区域B则仅分布有生物质燃烧源样品. 因此当大气背景特征比值落入A区域时, 表明颗粒物中脂肪酸来源多于一种, CMB模型的运行结果可能会存在偏差.

4 存在问题与发展趋势

颗粒物有机组成复杂, 分析和提取难度大. 无论是常规离线采集分析, 还是利用AMS等仪器进行现场实时检测, 目前的研究中已测定的有机物仅占颗粒物总质量的10%~20%^[18~20], 还有大量有机组分未被识别, 源成分谱和源示踪物的研究工作还存在以下问题.

4.1 大分子化合物检测不足

常规GC-MS技术只能检测分子量较小的有机组分, 缺乏对大分子化合物的检测能力. 表1列举了目前对不同污染源颗粒物有机组分碳数的检测范围, 目前对颗粒物有机组分的研究多集中于C35以下. 但是石油的主要组分碳数分布是C1~C45, 前人已经在其中发现了不少重要的高碳数有机物, 这些有机物稳定存在于石油等地质体中, 可用于指示石油来源和成熟度等特征, 如番茄蜡丸(C40), 在生物体内主要以番茄红素的形式存在^[63], 可以作为区分石油和生物质燃烧的潜在指示物. 此外, 不少大分子有机物特别是与生物相关的生物大分子化合物广泛赋存于不同环境之中, 并与环境协同演化, 具有很强的源指向性, 是重要的源示踪物. 如卟啉, 其结构稳定, 分布广泛, 是一类非常重要的生物标志化合物. 卟啉的基本结构是由甲基桥联结的4个吡咯环组成, 环中心常与不同的金属发生络合反应, 形成相应的金属络合物. 不同的金属卟啉络合物能直接指示其来源: 镁络合物和铁络合物分别来自生物体内的叶绿素和血红素, 能表明颗粒物来源于生物质燃烧或者烹饪; 而石油中则仅含有镍和钒的卟啉络合物, 对机动车排放有指示意义^[55,63]. 不仅如此, 卟啉在紫外线的作用下会使分子氧从三线态激发成单线态, 这可能是大气氧化性增强、有机物发生光催化氧化生成二次污染物的原因之一^[55].

4.2 甾烷和藿烷的立体结构特征分析不够深入

前人研究显示不同污染源颗粒物中均存在大量具有手征性碳原子的有机组分, 如甾族和萜族化合物^[24,25,34,56]. 在不同环境中, 这类化合物会发生同位异构化, 生成稳定性不同的同位异构体, 各同位异构体的相对比率能反映污染物形成环境和时

间^[55,63], 是潜在的源示踪物. 比如藿烷和甾烷, 但目前的研究仅分析了石油燃烧和机动车源部分甾烷和藿烷的排放特征, 并未对甾烷和藿烷的异构化特征进行深入讨论.

实际上藿烷是一类五环三萜, 在C17、C21和C22以上位置容易发生立体异构化, C17和C21的异构化分为 α 和 β 两种构型, 而当藿烷的碳数大于30时, 还会在C22以上位置存在R和S两种构型^[55]. 不同污染源排放的藿烷立体异构化特征不同: 在机动车排放颗粒物中藿烷的构型主要是 $\alpha\beta$ 构型: 17 α (H), 21 β (H)-藿烷, 区别于生物体内主要存在的 $\beta\beta$ 构型, 以及燃煤排放的 $\beta\alpha$ 型的藿烷^[24,34,49]. 甾族化合物广泛分布于活的生物体中, 在动植物界中都很丰富. 甾烷继承了生物甾族化合物的基本结构, 即三个六元环和一个五元环组成的碳环结构. 甾烷的碳数范围一般在C27~C30, 在不同环境中也会发生类似的同位异构化. 甾烷的异构化主要发生在C5、C14、C17、C20和C24(当碳数大于27时), 前3个位置上的氢构型有 α 和 β 之分, 后两种则分为R和S构型^[55,63]. 机动车排放的颗粒物中甾烷的构型主要是5 α 14 β , 而生物体内的甾族化合物则以 $\beta\beta$ 构型为主^[34,55,56]. 因此, 甾烷和藿烷的同位异构体特征, 对于评估大气颗粒物中机动车排放、煤和生物质燃烧的贡献具有非常重要的意义. 近年有学者在餐饮源排放颗粒物中也发现了少量的甾烷和藿烷^[64], 但并未对构型组成进行具体报道. 因此后续的研究应进一步分析各污染源排放颗粒物中甾烷和藿烷的构型组成, 对比分析不同污染源颗粒物中甾烷和藿烷同位异构体的相对比例, 探讨其源示踪意义.

4.3 先进测量技术亟待推广

先进的测量技术是解决前述问题的关键. 线性离子阱-轨道阱质谱联用仪(LTQ-Orbitrap-HRMS)具有高灵敏度、高通量的特性, 是用于检测颗粒物中卟啉等生物大分子的最有效手段. 而三重四极杆气质联用系统(TQ-MS/MS)具有超高的灵敏度, 能为痕量有机组分的检测提供强力支持. 目前国外不少学者已经将HPLC-LTQ-Orbitrap和GC-TQ-MS/MS系统成功应用于石油中卟啉、藿烷和甾烷的检测以及食材、饮用水中其他生物大分子和痕量有机组分的分析^[55,65,66]. 而国内也有研究团队开始将LTQ-Orbitrap系统用于对工厂烟尘有机组分的分析, 总共测定了96种有机组分, 其中包括大量在空气中存在时间较短的有机污染物, 如氯代或溴代PAHs, 并发现此类有机物与生铜冶炼关系密切, 可能是二噁英的前体物^[67]. 后续的研究应利用上述最新检测技

术对颗粒物有机组分进行检测,扩大源示踪物筛选范围。

5 结论

(1)随着近年来对颗粒物有机组成研究的不断深入,大量的有机源示踪物被确定。多环芳烃、甾族、萜族、脂肪酸和单糖等有机化合物被广泛用于大气颗粒物源解析,其中 PAHs 特征比值的运用相对成熟,适用范围广,但准确性不高,而脂肪酸和单糖等特征比值的运用则主要集中于生物质燃烧和餐饮源方面。通过组合一系列不同有机化合物对颗粒物来源进行分析,能得到相对可靠的结果。但需要注意的是由于不同排放源的源成分谱存在一定相似性,在运用 CMB 等受体模型进行源解析的过程中,即使是选用有机源示踪物仍存在共线性问题,通过计算有机组分的特征比值能辅助相关问题的解决,但这更表明了新有机示踪物的筛选工作的必要性。

(2)此外,前人的研究大多基于某个地区,反映局部区域的特点,而源示踪物的确定往往需要大量的数据积累。所以尽管前人已经建立了机动车排放、生物质燃烧、餐饮源等相关源成分谱,但基于不同地区、不同污染源基础数据的收集工作仍需进一步深入。后续的研究除了运用先进检测技术扩大源示踪物的筛选范围外,也应该结合离线分析与在线检测技术对大气及不同污染源进行长期、广泛地观测,以便建立长期大区域性乃至全球性的大尺度数据库。

参考文献:

- [1] Yang F, Tan J, Zhao Q, *et al.* Characteristics of PM_{2.5} speciation in representative megacities and across China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, **11** (11): 5207-5219.
- [2] 郑庆峰, 史军, 谈建国, 等. 2007~2016 年上海颗粒物浓度特征与气候背景异同分析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(1): 14-22.
Zheng Q F, Shi J, Tan J G, *et al.* Characteristics of aerosol particulate concentrations and their climate background in shanghai during 2007-2016 [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(1): 14-22.
- [3] 周静博, 段青春, 王建国, 等. 2019 年元旦前后石家庄市重污染过程 PM_{2.5} 污染特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(1): 39-49.
Zhou J B, Duan J C, Wang J G, *et al.* Analysis of pollution characteristics and sources of PM_{2.5} during heavy pollution in Shijiazhuang city around new year's day 2019 [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(1): 39-49.
- [4] 张小曳, 孙俊英, 王亚强, 等. 我国雾-霾成因及其治理的思考[J]. *科学通报*, 2013, **58**(13): 1178-1187.
Zhang X Y, Sun J Y, Wang Y Q, *et al.* Factors contributing to haze and fog in China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, **58** (13): 1178-1187.
- [5] 张远航, 邵可声, 唐孝炎, 等. 中国城市光化学烟雾污染研究[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 1998, **34**(2-3): 392-400.
Zhang Y H, Shao K S, Tang X Y, *et al.* The study of urban photochemical smog pollution in China [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 1998, **34**(2-3): 392-400.
- [6] 唐孝炎, 张远航, 邵敏. 大气环境化学[M]. (第二版). 北京: 高等教育出版社, 2006. 223-457.
- [7] Lin L, Lee M L, Eatough D J. Review of recent advances in detection of organic markers in fine particulate matter and their use for source apportionment [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2010, **60**(1): 3-25.
- [8] 何凌燕, 胡敏, 黄晓锋, 等. 北京大气气溶胶 PM_{2.5} 中的有机示踪化合物[J]. *环境科学学报*, 2005, **25**(1): 23-29.
He L Y, Hu M, Huang X F, *et al.* Determination of organic molecular tracers in PM_{2.5} in the atmosphere of Beijing [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, **25**(1): 23-29.
- [9] 邹春林, 李美菊, 于赤灵, 等. 珠三角典型地区大气细颗粒物中有机物质的化学组成研究[J]. *地球与环境*, 2019, **47** (3): 301-309.
Zou C L, Li M J, Yu C L, *et al.* Chemical characteristics of organic material in atmospheric fine particles in the pearl river delta [J]. *Earth and Environment*, 2019, **47**(3): 301-309.
- [10] Xu J, Zhang Q, Chen M, *et al.* Chemical composition, sources, and processes of urban aerosols during summertime in Northwest China: insights from high-resolution aerosol mass spectrometry [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14** (23): 12593-12611.
- [11] Katsoyiannis A, Sweetman A J, Jones K C. PAH molecular diagnostic ratios applied to atmospheric sources: a critical evaluation using two decades of source inventory and air concentration data from the UK [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(20): 8897-8906.
- [12] 李杏茹, 白羽, 陈曦, 等. 北京冬季重污染过程大气细颗粒物化学组成特征及来源分析[J]. *环境化学*, 2018, **37**(11): 2397-2409.
Li X R, Bai Y, Chen X, *et al.* Chemical composition and source apportionment of PM_{2.5} during winter in Beijing [J]. *Environmental Chemistry*, 2018, **37**(11): 2397-2409.
- [13] 温梦婷, 胡敏. 北京餐饮源排放细粒子理化特征及其对有机颗粒物的贡献[J]. *环境科学*, 2007, **28**(11): 2620-2625.
Wen M T, Hu M. Physical and chemical characteristics of fine particles emitted from cooking emissions and its contribution to particulate organic matter in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2007, **28**(11): 2620-2625.
- [14] Allan J D, Williams P I, Morgan W T, *et al.* Contributions from transport, solid fuel burning and cooking to primary organic aerosols in two UK cities [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, **10**(2): 647-668.
- [15] Huang X F, He L Y, Hu M, *et al.* Highly time-resolved chemical characterization of atmospheric submicron particles during 2008 Beijing Olympic Games using an aerodyne high-resolution aerosol mass spectrometer [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, **10**(18): 8933-8945.
- [16] Yunker M B, Macdonald R W, Vingarzan R, *et al.* PAHs in the Fraser River Basin: a critical appraisal of PAH ratios as indicators of PAH source and composition [J]. *Organic Geochemistry*, 2002, **33**(4): 489-515.
- [17] Schauer J J, Rogge W F, Hildemann L M, *et al.* Source apportionment of airborne particulate matter using organic compounds as tracers [J]. *Atmospheric Environment*, 1996, **30** (22): 3837-3855.

- [18] Mancilla Y, Mendoza A, Fraser M P, *et al.* Organic composition and source apportionment of fine aerosol at Monterrey, Mexico, based on organic markers [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, **16**(2): 953-970.
- [19] Schauer J J, Cass G R. Source apportionment of wintertime gas-phase and particle-phase air pollutants using organic compounds as tracers[J]. *Environmental Science & Technology*, 2000, **34**(9): 1821-1832.
- [20] Cass G R. Organic molecular tracers for particulate air pollution sources[J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 1998, **17**(6): 356-366.
- [21] Simoneit B R T. Biomass burning-a review of organic tracers for smoke from incomplete combustion[J]. *Applied Geochemistry*, 2002, **17**(3): 129-162.
- [22] 刘刚, 袁静, 陈敏东, 等. 生物质燃烧颗粒物中有机质及源解析研究进展[J]. *南京信息工程大学学报(自然科学版)*, 2011, **3**(2): 141-145.
Liu G, Yuan J, Chen M D, *et al.* The research progress of source organic matters emitted apportionment and particulate from biomass burning[J]. *Journal of Nanjing University of Information Science & Technology (Natural Science Edition)*, 2011, **3**(2): 141-145.
- [23] Fraser M P, Lakshmanan K. Using levoglucosan as a molecular marker for the long-range transport of biomass combustion aerosols [J]. *Environmental Science & Technology*, 2000, **34**(21): 4560-4564.
- [24] Oros D R, Simoneit B R T. Identification and emission factors of molecular tracers in organic aerosols from biomass burning Part 1. Temperate climate conifers[J]. *Applied Geochemistry*, 2001, **16**(13): 1513-1544.
- [25] Oros D R, Simoneit B R T. Identification and emission factors of molecular tracers in organic aerosols from biomass burning Part 2. Deciduous trees [J]. *Applied Geochemistry*, 2001, **16**(13): 1545-1565.
- [26] Simoneit B R T, Elias V O. Detecting organic tracers from biomass burning in the atmosphere [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2001, **42**(10): 805-810.
- [27] Rogge W F, Hildemann L M, Mazurek M A, *et al.* Sources of fine organic aerosol. 9. Pine, oak, and synthetic log combustion in residential fireplaces [J]. *Environmental Science & Technology*, 1998, **32**(1): 13-22.
- [28] Iinuma Y, Brüggemann E, Gnauk T, *et al.* Source characterization of biomass burning particles; the combustion of selected European conifers, African hardwood, savanna grass, and German and Indonesian peat [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, **112**(D8), doi: 10.1029/2006JD007120.
- [29] Oros D R, bin Abas M R, Omar N Y M J, *et al.* Identification and emission factors of molecular tracers in organic aerosols from biomass burning; part 3. Grasses [J]. *Applied Geochemistry*, 2006, **21**(6): 919-940.
- [30] Jenkins B M, Jones A D, Turn S Q, *et al.* Emission factors for polycyclic aromatic hydrocarbons from biomass burning [J]. *Environmental Science & Technology*, 1996, **30**(8): 2462-2469.
- [31] Oanh N T K, Ly B T, Tipayarom D, *et al.* Characterization of particulate matter emission from open burning of rice straw [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(2): 493-502.
- [32] 王真真, 谭吉华, 毕新慧, 等. 三种农作物秸秆燃烧颗粒态多环芳烃排放特征[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(4): 1065-1071.
Wang Z Z, Tan J H, Bi X H, *et al.* Emission characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons from three types of agricultural straw burning smoke [J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(4): 1065-1071.
- [33] 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.
- [34] Schauer J J. Measurement of emissions from air pollution sources. 5. C₁-C₃₂ organic compounds from gasoline-powered motor vehicles [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, **36**(6): 1169-1180.
- [35] Simoneit B R T. Application of molecular marker analysis to vehicular exhaust for source reconciliations [J]. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 1985, **22**(3-4): 203-232.
- [36] Chellam S, Kulkarni P, Fraser M P. Emissions of organic compounds and trace metals in fine particulate matter from motor vehicles; a tunnel study in Houston, Texas [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2005, **55**(1): 60-72.
- [37] Fraser M P, Cass G R, Simoneit B R T. Particulate organic compounds emitted from motor vehicle exhaust and in the urban atmosphere [J]. *Atmospheric Environment*, 1999, **33**(17): 2715-2724.
- [38] Rogge W F, Hildemann L M, Mazurek M A, *et al.* Sources of fine organic aerosol. 3. road dust, tire debris, and organometallic brake lining dust; roads as sources and sinks [J]. *Environmental Science & Technology*, 1993, **27**(9): 1892-1904.
- [39] Abdullahi K L, Delgado-Saborit J M, Harrison R M. Emissions and indoor concentrations of particulate matter and its specific chemical components from cooking: a review [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **71**: 260-294.
- [40] He L Y, Hu M, Huang X F, *et al.* Measurement of emissions of fine particulate organic matter from Chinese cooking [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(38): 6557-6564.
- [41] Zhao Y L, Hu M, Slanina S, *et al.* Chemical compositions of fine particulate organic matter emitted from Chinese cooking [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41**(1): 99-105.
- [42] Pei B, Cui H Y, Liu H, *et al.* Chemical characteristics of fine particulate matter emitted from commercial cooking [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2016, **10**(3): 559-568.
- [43] Zhao Y L, Hu M, Slanina S, *et al.* The molecular distribution of fine particulate organic matter emitted from Western-style fast food cooking [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(37): 8163-8171.
- [44] Rogge W F, Hildemann L M, Mazurek M A, *et al.* Sources of fine organic aerosol. 1. charbroilers and meat cooking operations [J]. *Environmental Science & Technology*, 1991, **25**(6): 1112-1125.
- [45] Schauer J J, Kleeman M J, Cass G R, *et al.* Measurement of emissions from air pollution sources. 1. C₁ through C₂₉ organic compounds from meat charbroiling [J]. *Environmental Science & Technology*, 1999, **33**(10): 1566-1577.
- [46] Schauer J J, Kleeman M J, Cass G R, *et al.* Measurement of emissions from air pollution sources. 4. C₁-C₂₇ organic compounds from cooking with seed oils [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, **36**(4): 567-575.
- [47] Reyes-Villegas E, Bannan T, Le Breton M, *et al.* Online chemical characterization of food-cooking organic aerosols: implications for source apportionment [J]. *Environmental Science*

- & Technology, 2018, **52**(9): 5308-5318.
- [48] Oros D R, Simoneit B R T. Identification and emission rates of molecular tracers in coal smoke particulate matter[J]. Fuel, 2000, **79**(5): 515-536.
- [49] Simoneit B R T, Bi X H, Oros D R, *et al.* Phenols and hydroxy-PAHs (arylphenols) as tracers for coal smoke particulate matter: source tests and ambient aerosol assessments[J]. Environmental Science & Technology, 2007, **41**(21): 7294-7302.
- [50] Grimmer G, Jacob J, Dettbarn G, *et al.* Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons, azaarenes, and thiaarenes emitted from coal-fired residential furnaces by gas chromatography/mass spectrometry[J]. Fresenius'Zeitschrift für analytische Chemie, 1985, **322**(6): 595-602.
- [51] Wang Z D, Fingas M, Shu Y Y, *et al.* Quantitative characterization of PAHs in burn residue and soot samples and differentiation of pyrogenic PAHs from petrogenic PAHs—the 1994 Mobile burn study [J]. Environmental Science & Technology, 1999, **33**(18): 3100-3109.
- [52] Grimmer G, Jacob J, Naujack K W. Profile of the polycyclic aromatic hydrocarbons from lubricating oils inventory by GCGC/MS—PAH in environmental materials, part 1 [J]. Fresenius'Zeitschrift für Analytische Chemie, 1981, **306**(5): 347-355.
- [53] Grimmer G, Jacob J, Naujack K W, *et al.* Profile of the polycyclic aromatic hydrocarbons from used engine oil—inventory by GCGC/MS—PAH in environmental materials, part 2 [J]. Fresenius'Zeitschrift für Analytische Chemie, 1981, **309**(1): 13-19.
- [54] Li C K, Kamens R M. The use of polycyclic aromatic hydrocarbons as source signatures in receptor modeling [J]. Atmospheric Environment. Part A. General Topics, 1993, **27**(4): 523-532.
- [55] 约翰斯 R B. 沉积记录中的生物标志物[M]. 王铁冠, 黄第藩, 徐丽娜, 译. 北京: 科学出版社, 1991. 156-247.
- [56] Schauer J J, Kleeman M J, Cass G R, *et al.* Measurement of emissions from air pollution sources. 2. C₁ through C₃₀ organic compounds from medium duty diesel trucks[J]. Environmental Science & Technology, 1999, **33**(10): 1578-1587.
- [57] 王伯光, 吕万明, 周炎, 等. 城市隧道汽车尾气中多环芳烃排放特征的研究[J]. 中国环境科学, 2007, **27**(4): 482-487.
- Wang B G, Lü W M, Zhou Y, *et al.* Emission characteristic of PAHs composition in motor vehicles exhaust of city tunnel[J]. China Environmental Science, 2007, **27**(4): 482-487.
- [58] 吴杰, 熊丽君, 吴健, 等. 上海市郊道路地表径流多环芳烃污染特征对比及源解析[J]. 环境科学, 2019, **40**(5): 2240-2248.
- Wu J, Xiong L J, Wu J, *et al.* Comparison and source apportionment of PAHs pollution of runoff from roads in suburb and urban areas of Shanghai[J]. Environmental Science, 2019, **40**(5): 2240-2248.
- [59] McDonald J D, Zielinska B, Fujita E M, *et al.* Emissions from charbroiling and grilling of chicken and beef[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2003, **53**(2): 185-194.
- [60] Robinson A L, Subramanian R, Donahue N M, *et al.* Source apportionment of molecular markers and organic aerosol- 1. polycyclic aromatic hydrocarbons and methodology for data visualization[J]. Environmental Science & Technology, 2006, **40**(24): 7803-7810.
- [61] Robinson A L, Subramanian R, Donahue N M, *et al.* Source apportionment of molecular markers and organic aerosol. 3. Food cooking emissions [J]. Environmental Science & Technology, 2006, **40**(24): 7820-7827.
- [62] Zheng M, Cass G R, Schauer J J, *et al.* Source apportionment of PM_{2.5} in the southeastern United States using solvent-extractable organic compounds as tracers [J]. Environmental Science & Technology, 2002, **36**(11): 2361-2371.
- [63] 彼得斯 K E, 沃尔特斯 C C, 莫尔多万 J M. 生物标志化合物指南[M]. 张水昌, 李振西, 译. 北京: 石油工业出版社, 2011. 237-355.
- [64] 王红丽, 景盛翱, 乔利平. 餐饮排放有机颗粒物的质量浓度、化学组成及排放因子特征[J]. 环境科学, 2019, **40**(5): 2010-2018.
- Wang H L, Jing S A, Qiao L P. Chemical compositions, mass concentrations, and emission factors of particulate organic matters emitted from catering [J]. Environmental Science, 2019, **40**(5): 2010-2018.
- [65] Nunes V O, Silva R V S, Romeiro G A, *et al.* The speciation of the organic compounds of slow pyrolysis bio-oils from Brazilian tropical seed cake fruits using high-resolution techniques; GC × GC-TOFMS and ESI(±)-Orbitrap HRMS [J]. Microchemical Journal, 2020, **153**, doi: 10.1016/j.microc.2019.104514.
- [66] Lim H S, Lee K G. Development and validation of analytical methods for ethyl carbamate in various fermented foods[J]. Food Chemistry, 2011, **126**(3): 1373-1379.
- [67] Yang L L, Wang S, Peng X, *et al.* Gas chromatography-orbitrap mass spectrometry screening of organic chemicals in fly ash samples from industrial sources and implications for understanding the formation mechanisms of unintentional persistent organic pollutants[J]. Science of the Total Environment, 2019, **664**: 107-115.

CONTENTS

Health Impact Attributable to the Control of PM _{2.5} Pollution in China During 2013-2017	ZHANG Meng-jiao, SU Fang-cheng, XU Qi-xiang, <i>et al.</i> (513)
Contributions of Emissions Reduction and Regional Meteorological Conditions to Air Quality Improvement	WU Wen-qi, ZHANG Kai-shan (523)
Air Pollution Characteristics and Quantitative Evaluation of Multi-scale Transport in the Beijing-Tianjin-Hebei Region in January, 2016	YAO Sen, ZHANG Han-yu, WANG Xiao-qi, <i>et al.</i> (534)
Influence of Burning Fireworks on the Atmosphere During the Spring Festival in Guangzhou in 2020	PEI Cheng-lei, WANG Yu-jun, BI Yan-ru, <i>et al.</i> (546)
Source Apportionment and Optical Properties of Fine Particles Associated with Regional Pollution in the Yangtze River Delta	XIA Li, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (556)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Ions in Particulate Matter Under Different Weather Processes in Nanjing	ZHANG Yang, WANG Hong-lei, LIU An-kang, <i>et al.</i> (564)
Size Distribution of Aerosol Hygroscopic Growth Factors in Winter in Tianjin	DING Jing, ZHANG Yu-fen, ZHENG Nai-yuan, <i>et al.</i> (574)
Time-Determination and Contribution Analysis of Transport, Retention, and Offshore Backflow to Long-Term Sand-Dust Coupling	ZHANG Zhe, QIAO Li-ping, ZHOU Min, <i>et al.</i> (584)
Characterization, Sources, and Health Risks of PM _{2.5} -bound PAHs During Autumn and Winter in Luoyang City	QI Jing-wen, ZHANG Rui-qin, JIANG Nan, <i>et al.</i> (595)
Characteristics, Meteorological Influences, and Transport Source of Ozone Pollution in Zhengzhou City	WANG Xu-dong, YIN Sha-sha, YANG Jian, <i>et al.</i> (604)
Nonlinear Response Characteristics and Control Scheme for Ozone and Its Precursors Based on Orthogonal Experimental Methods	LI Guang-yao, CHEN Qiang, GUO Wen-kai, <i>et al.</i> (616)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in the Automobile Industrial Park of Shanghai	YE Lu, TAI Qing-qing, YU Hua-ming (624)
Establishment of a High-resolution Anthropogenic Emission Inventory and Its Evaluation Using the WRF-Chem Model for Lanzhou	GUO Wen-kai, LI Guang-yao, CHEN Bing, <i>et al.</i> (634)
Trends in Vehicle Emissions in Sichuan Province, 2010-2017	LI Yuan, SHI Jia-cheng, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i> (643)
Bioavailability and Ecological Risk Assessment of Cadmium in the Sea-Land Interaction Sediments of the Pearl River Delta	WANG Fang-ting, BAO Ke, CHEN Zhi-hua, <i>et al.</i> (653)
Distribution, Sources, and Ecological Risks of Polyfluoroalkyl Substances in the Surface Water of the Wuliangsuhai Watershed	SHI Rui, MAO Ruo-yu, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (663)
Distribution Characteristics of Microplastics in Ice Sheets and Its Response to Salinity and Chlorophyll a in the Lake Wuliangsuhai	WANG Zhi-chao, YANG Jian-lin, YANG Fan, <i>et al.</i> (673)
Effect of Check Dam on Phosphorus Transport and Retention in the Qingshui River, in Zhangjiakou City	WANG Wei, LI Xu-yong (681)
Characteristics of Phosphorus Speciation and Genesis in Typical Tributaries of the Three Gorges Reservoir	YANG Fan, WANG Li-jing, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (688)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in Lake Chaohu Sediments and Pollution Evaluation	WANG Yan-ping, XU Wei-wei, HAN Chao, <i>et al.</i> (699)
Sediment Pollution Characteristics and Dredging in the Nanfei River Estuary, Chaohu Lake	YANG Pan, YANG Chun-hui, MA Xin-yu, <i>et al.</i> (712)
Effect of Oxidation Strengthening on In-situ Phosphorus Immobilization of Calcium Hydroxide	XU Chu-tian, LI Da-peng, YUE Wei, <i>et al.</i> (723)
Impact of Rainfall-Runoff Events on Methane Emission from Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir	CHEN Min, XU Hao-ting, WANG Xue-zhu, <i>et al.</i> (732)
Water-air Carbon Dioxide Exchange and Nutritional Controls in a Typical Karst River	LIU Rui, ZHANG Jin, CHEN Zu-sheng, <i>et al.</i> (740)
Occurrence of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Representative Drinking Water Resources in Jiangsu Province	WANG Long-fei, CHENG Yi-qun, HU Xiao-dong, <i>et al.</i> (749)
Diversity and Abundance of Antibiotic Resistance Genes in Tailings Ponds	HUANG Fu-yi, ZHU Yong-guan, SU Jian-qiang (761)
Hydrochemical Characteristics and Origin of Groundwater in the Central Guohe River Basin	ZHENG Tao, JIAO Tuan-li, HU Bo, <i>et al.</i> (766)
Hydrochemical Characteristics and Analysis of the Qilihai Wetland, Tianjin	HE Ming-xia, ZHANG Bing, XIA Wen-xue, <i>et al.</i> (776)
Effects of Straw Mulching and Nitrogen Reduction on the Distribution of Soil Nitrogen and Groundwater Nitrogen Pollution	ZHANG Wan-feng, YANG Shu-qing, SUN Duo-qiang, <i>et al.</i> (786)
Precision of eDNA Metabarcoding Technology for Biodiversity Monitoring of Eukaryotic Phytoplankton in Lakes	ZHANG Li-juan, XU Shan, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (796)
Effect of Phytoplankton Community Composition and Size Structure on Light Absorption Properties	HUANG Xin, SHI Kun, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (808)
Periphytic Algae Community Structure and Its Relation to Environment Factors in the Main Stream of the Songhua River from 2014 to 2019	YU Zong-ling, CHEN Wei, ZHAO Ran, <i>et al.</i> (819)
Diversity and Function Prediction of Bacterioplankton Under Human Disturbance in the Main Stream of the Laoguan River Before and After the Flood Season	HAN Xue-mei, GONG Zi-le, YANG Xiao-ming, <i>et al.</i> (831)
Seasonal Removal Efficiency and Degradation Products of Two Typical PPCPs in Subsurface Flow Constructed Wetlands	LI Chao-yu, YANG Yi-xiao, ZHANG Ning, <i>et al.</i> (842)
Removal of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes from Urban Rivers Using Artificial Ecosystems	ZHOU Hai-dong, HUANG Li-ping, CHEN Xiao-meng, <i>et al.</i> (850)
Distribution Characteristics of Viruses Microorganisms in a Water Supply System with Combined Ultraviolet Chloramine Disinfection	HAN Xue, SUN Jian-wei, ZHANG Li, <i>et al.</i> (860)
Removal of Oxytetracycline from Water Using Blast Furnace Slag Loaded Sulfide Nanoscale Zero-valent Iron	SUN Qiu-nan, ZHANG Rong-bin, DENG Man-jun, <i>et al.</i> (867)
Heavy Metal Ion Adsorption Properties and Stability of Amine-sulfur Modified Biochar in Aqueous Solution	WANG Cun-shi, HE Min-xia, ZHOU Feng, <i>et al.</i> (874)
Characteristics and Removal Mechanism of an Electro-Hybrid Ozonation-Coagulation System in the Treatment of Organic Matters	XIE Xin-yue, XU Jian-jun, ZHANG Shao-hua, <i>et al.</i> (883)
Enhancement Effects and Mechanisms of Microscale Zero Valent Iron on the Performance of Anaerobic Co-digestion of Waste Activated Sludge and Food Waste	CHEN Sheng-jie, YAO Fu-bing, PI Zhou-jie, <i>et al.</i> (891)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils Surrounding a Typical Industrial Area of Henan Province	MENG Xiao-fei, GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, <i>et al.</i> (900)
Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Heavy Metals in Greenbelt Soils of Nanjing City	CHEN Jia-lin, LI Ren-ying, XIE Xiao-jin, <i>et al.</i> (909)
Remediation Effect of Compound Modifier FZB on Arsenic and Cadmium Contaminated Soil	DING Ping, HE Yu-long, HE Huan, <i>et al.</i> (917)
Remediation of Cd Contaminated Acidic Rice Fields Using the Combined Application of Lime and Organic Matter	LI Guang-hui, CHENG Qing, CHEN Hong (925)
Effect and Mechanism of Foliar Application Nano-MnO ₂ on Cadmium Enrichment of Rice	ZHOU Yi-min, HUANG Ya-yuan, LIU Xiao-yue, <i>et al.</i> (932)
Characteristics of Cadmium Enrichment and Pollution Evaluation of a Soil-Crop System in a Typical Karst Area	WANG Rui, DENG Hai, JIA Zhong-min, <i>et al.</i> (941)
Comparison of Enrichment and Transport of Cadmium in the Fruit of High and Low Enrichment Pepper Varieties and Its Distribution in Subcells	SHAO Xiao-qing, HE Zhang-mi, XU Wei-hong (952)
Cadmium Accumulation Characteristics of Four Herbs	CHEN Di, LI Bo-qun, YANG Yong-ping, <i>et al.</i> (960)
Characteristics of Dissolved Organic Carbon Loss in Purple Soil Sloping Fields with Different Fertilization Treatments	XIONG Zi-yi, ZHENG Jie-bing, WANG Dan, <i>et al.</i> (967)
Effects of Precipitation Changes on Plant Community Diversity and Soil C:N:P Ecological Stoichiometric Characteristics in a Desert Steppe of China	GAO Jiang-ping, ZHAO Rui-feng, ZHANG Li-hua, <i>et al.</i> (977)
Effect of Water Management on Rice Growth and Rhizosphere Priming Effect in Paddy Soils	LIN Sen, XIAO Mou-liang, JIANG Jia-bin, <i>et al.</i> (988)
Effects of Copper Pollution on Microbial Communities in Wheat Root Systems	GE Yi, XU Min-min, XU Shao-hui, <i>et al.</i> (996)
Ozone Pollution, Nitrogen Addition, and Drought Stress Interact to Affect Non-structural Carbohydrates in the Leaves and Fine Roots of Poplar	LI Pin, ZHOU Hui-min, FENG Zhao-zhong (1004)
Review of Screening and Applications of Organic Tracers in Fine Particulate Matter	LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, <i>et al.</i> (1013)