Eco-Environmental Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

$PM_{2.5}$和O_3污染协同防控区的遥感精细划定与分析
李沈鑫，邹滨，张凤英，刘宁，薛琛昊，刘婧

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社

2022年10月
第43卷 第10期
Vol.43 No.10

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第43卷 第10期
2022年10月15日

目 次

$PM_{2.5}$和O_3污染协同防控区的遥感精细划定与分析 …… 李沈鑫, 邹滨, 张凤英, 刘宁, 薛琛昊, 刘婧(4293)
广州市冬季一次典型臭氧污染过程分析 …… 裴成磊, 谢雨彤, 陈希, 张涛, 邱晓暖, 王瑜, 王在华, 李梅(4305)
佛山臭氧浓度预报方程的建立与应用 …… 陈辰, 洪莹莹, 谭浩波, 司徒淑娉, 程银琳, 步巧利, 吴蒙, 潘巧英(4316)
乌海市高分辨率大气污染源排放清单构建及其在臭氧污染成因探究中的应用 …… 张瑞欣, 楚波, 尚春林, 曹喜萍, 李光耀, 朱玉凡, 刘晓, 夏佳琦, 陈强(4327)
结合在线监测和自动识别系统分析东海沿岸船舶排放特征 …… 邱浩, 刘丹彤, 吴杨周, 李思遠, 丁朔, 胡康, 张家乐, 陈梅汀(4338)
机动车制动磨损颗粒物及挥发性有机物的组分特征 …… 门正宇, 刘笃优, 郭全有, 张静, 彭剑飞, 吴琳, 毛洪钧(4348)
笼养肉鸡舍冬季挥发性有机物排放特征 …… 曹甜甜, 郑云昊, 张羽, 王悦, 丛群欣, 王源昊, 董红敏(4357)
上海市生活垃圾房气溶胶中可培养细菌污染状况及种群特征 …… 卢冰洁, 张翔, 王川, 邰俊, 李丹(4367)
浙江省2008~2018年人为源氨排放清单及分布特征 …… 方利江, 杨一群, 叶观琼(4380)
“双碳”目标下钢铁行业控煤降碳路线图 …… 薛英岚, 张静, 刘宇, 陈瑜, 孙健, 蒋洪强, 张伟, 曹东(4392)
空间关联网络结构特征的减排效应:基于城市群视角 …… 郑航, 叶阿忠(4401)
中国对外直接投资的减污降碳效应及其实现机制 …… 白梓函, 吕连宏, 赵明轩, 张楠, 罗宏(4408)
近年全国地表水水质变化特征 …… 嵇晓燕, 侯欢欢, 王姗姗, 杨凯(4419)
湟水河流域地表水体微塑料分布、风险及影响因素 …… 范梦苑, 黄懿梅, 张海鑫, 李好好, 黄倩(4430)
汾河流域地表水水化学同位素特征及其影响因素 …… 赵春红, 申豪勇, 王志恒, 梁永平, 赵一, 谢浩, 唐春雷(4440)
城镇化进程中珠江三角洲高锰地下水赋存特征及成因 …… 吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 朱亮, 李海军(4449)
喀什噶尔河下游平原区地下水咸化特征及成因分析 …… 鲁涵, 曾妍妍, 周金龙, 孙英(4459)
重庆市老龙洞地下河流域硝酸盐来源和生物地球化学过程的识别 …… 王雨旸, 杨平恒, 张洁茹(4470)
蓝藻水华过程中优势种群演替模式、效应及驱动因子分析 …… 欧阳添, 赵璐, 纪璐璐, 杨宋琪, 郑保海, 杜雨欣, 李佳欣, 李玉鑫, 施军琼, 吴忠兴(4480)
珠海市磨刀门水道输水水源水库群浮游植物群落特征及其环境驱动因子 …… 张茉莉, 王恩瑞, 昌盛, 王山军, 金德才, 樊月婷, 张坤锋, 谢琼, 付青(4489)
营养物质对铜绿微囊藻生长和藻际细菌的影响 …… 吕萍, 李慧莉, 徐勇, 郑效旭, 黄振华, 王聪, 徐圣君, 庄绪亮(4502)
老化作用对微塑料吸附四环素的影响及其机制 …… 王林, 王姝歆, 曾祥英, 何杨, 黄雯, 郑世界, 张建强(4511)
沉积物和土壤中胶体对氯霉素吸附行为的影响 …… 晏彩霞, 罗燕清, 聂明华, 周旋, 丁明军(4522)
历史抗生素胁迫改变磺胺甲噁唑和甲氧苄啶对活性污泥的影响:ARGs及其潜在宿主 …… 张忠兴, 樊晓燕, 李星, 高玉玺, 赵君如(4536)
阳朔典型铅锌矿区流域土壤重金属空间分布特征及来源解析 …… 陈盟, 潘泳兴, 黄奕翔, 王檑橦, 张睿东(4545)
白洋淀及周边土壤重金属的分布特征及生态风险评估 …… 郑飞, 郭欣, 汤名扬, 朱冬, 董四君, 康乐, 陈兵(4556)
基于地理探测器的镇域尺度土壤重金属含量空间分异及其影响因素分析 …… 龚仓, 王亮, 王顺祥, 张志翔, 董航, 刘玖芬, 王德伟, 严步青, 陈映(4566)
燃煤电厂重金属排放与周边土壤中重金属污染特征及健康风险 …… 车凯, 陈崇明, 郑庆宇, 范辉, 魏明磊, 罗蓬, 郁金星(4578)
海南岛半干旱区农用地土壤重金属富集因素、健康风险及来源识别 …… 杨剑洲, 龚晶晶, 王振亮, 高健翁, 杨建坤, 胡树起, 唐世新(4590)
九龙江口红树林表层沉积物重金属赋存形态及污染评价 …… 张华兰, 于瑞莲, 万瑞安, 胡恭任, 黄华斌, 吴雅清(4601)
我国茶叶主产区有机肥重金属含量现状 …… 伊晓云, 方丽, 杨向德, 马立锋, 刘美雅, 张群峰, 倪康, 石元值(4613)
甘肃省农业土壤邻苯二甲酸酯累积特征及来源分析 …… 陈玉玉, 张光全, 张杨, 李明凯, 郝佳欣, 熊有才, 李崇霄, 曹靖(4622)
三峡库区澎溪河不同高程消落带土壤磷形态及磷酸酶活性分布特征 …… 高艺伦, 方芳, 唐子超, 张蕊, 蒋艳雪, 郭劲松(4630)
塔里木盆地北缘绿洲不同连作年限棉田土壤有机碳组分特征及其与理化因子的相关性 …… 李昕竹, 贡璐, 唐军虎, 罗艳, 丁肇龙, 朱海强, 张涵, 李蕊希(4639)
黄土丘陵区柠条人工林不同深度土壤呼吸速率对土壤温湿度的响应 …… 孙亚荣, 王亚娟, 赵敏, 薛文艳, 梁思琦, 刘乐, 刘超, 陈云明(4648)
基于Meta-analysis的生物炭对土壤硝态氮淋失和磷酸盐固持影响 …… 姜志翔, 崔爽, 张鑫, 郗敏, 孙德茂(4658)
低分子有机酸强化植物修复重金属污染土壤的作用与机制 …… 方治国, 谢俊婷, 杨青, 卢烨桢, 黄海, 朱芸娴, 尹思敏, 吴鑫涛, 都韶婷(4669)
无机钝化剂对镉污染酸性水稻土的修复效果及其机制 …… 张剑, 孔繁艺, 卢升高(4679)
改良铅锌矿渣对栾树幼苗铅锌富集与耐性机制 …… 谢天志, 陈永华, 苏荣葵, 刘慧, 姚海松(4687)
CaO_2@FA复合材料富集磷效能及其回收物对土壤改良作用 …… 岳薇, 李大鹏, 吴玲予, 王璐, 汤尧禹, 朱企, 黄勇(4697)
早稻秸秆还田和减钾对晚稻产量和土壤肥力的影响 …… 黄巧义, 黄建凤, 黄旭, 吴永沛, 李苹, 付弘婷, 唐拴虎, 刘一锋, 徐培智(4706)
秸秆连续还田配施化肥对稻-油轮作土壤碳库及作物产量的影响 …… 蔡影, 付思伟, 张博睿, 胡宏祥, 刘文雯, 俞金涛, 贾临东, 刘运峰(4716)
化肥减量配施秸秆对双季稻田固氮微生物群落的影响 …… 陈凯鹏, 韦菊娴, 陈丹, 王聪, 沈健林, 李勇, 吴金水(4725)
化肥减量与有机物料添加对华北潮土微生物氮循环功能基因丰度和氮转化遗传潜力的影响 …… 李胜君, 胡菏, 李刚, 王蕊, 赵建宁, 张贵龙, 修伟明(4735)
长期覆膜条件下农田土壤微生物群落的响应特征 …… 胡志娥, 肖谋良, 丁济娜, 季剑虹, 陈剑平, 葛体达, 鲁顺保(4745)
长期秸秆还田对潮土真菌群落、酶活性和小麦产量的影响 …… 马垒, 李燕, 魏建林, 李子双, 周晓琳, 郑福丽, 吴小宾, 王利, 刘兆辉, 谭德水(4755)
土壤改良剂对再生水滴灌根际土壤菌群多样性及病原菌和抗生素抗性基因丰度的影响 …… 崔丙健, 崔二苹, 刘春成, 胡超, 樊向阳, 李中阳, 高峰(4765)
氮素对苜蓿植物修复垃圾堆场镉-多环芳烃复合污染土壤及土壤细菌群落结构的影响 …… 李怡佳, 马俊伟, 李玉倩, 肖琛, 沈心怡, 牛云, 陈家军(4779)
抗生素降解菌剂对猪粪堆肥腐熟和细菌群落演替的影响 …… 李玮琳, 张昕, 马军伟, 孙万春, 成琪璐, 林辉(4789)
《环境科学》征订启事(4337) 《环境科学》征稿简则(4407) 信息(4521, 4705, 4800)

Eco-Environmental Knowledge Web
环 境 科 学
Environmental Science
第43卷第10期 2022年10月
Vol.43, No.10 Oct., 2022

机动车制动磨损颗粒物及挥发性有机物的组分特征

门正宇[1], 刘笃优[2], 郭全有[1], 张静[3*], 彭剑飞[1], 吴琳[1*], 毛洪钧[1]
(1. 南开大学环境科学与工程学院, 天津市城市交通污染防治研究重点实验室, 天津 300071; 2. 中国汽车技术研究中心有限公司, 天津 300300; 3. 天津市生态环境监测中心, 天津 300191)

摘要: 利用制动惯性实验台测试了6套制动系统,分别采集了制动磨损颗粒物(BWPs)和制动过程中排放的挥发性有机物(VOCs)样品,提取并检测了颗粒物中39种元素、12种水溶性离子、7种碳组分和18种多环芳烃(PAHs)的含量,分析了气体样品中74种VOCs的浓度. 含量较高的12种无机元素(即Sb、Mg、Cu、Zn、Ti、Ca、Si、Zr、K、Ba、Al和Fe)在$PM_{2.5}$和PM_{10}中的质量分数平均值分别为43.4%和40.3%,其中Fe的质量分数最高,在$PM_{2.5}$和PM_{10}中分别为16.6%和13.1%. 元素的粒径分布与BWPs质量分布一致. 12种水溶性离子在$PM_{2.5}$和PM_{10}中的质量分数平均值分别为16.5%和12.6%,其中NO_3^-、SO_4^{2-}和Ca^{2+}的质量分数平均值较高. 总碳(TC)在$PM_{2.5}$和PM_{10}中的质量分数平均值分别为21.9%和18.1%,有机碳(OC)的质量分数平均值是元素碳(EC)的5倍左右. 检出率大于50%的PAHs共有6种,其中萘(Nap)含量最为丰富. 74种VOCs的浓度平均值为316.04 $\mu g \cdot m^{-3}$,其中芳香烃的浓度最高. 6套制动系统排放的BWPs组分和VOCs构成的差异较大,主要是由刹车片的品牌和制造使用的材料决定的.

关键词:制动磨损; 颗粒物; 化学组分; 粒径分布; 挥发性有机物(VOCs)
中图分类号: X511 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2022)10-4348-09 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.202112127

Chemical Component of Particulate Matters and VOCs Characteristics During Vehicle Brake Processes

MEN Zheng-yu[1], LIU Du-you[2], GUO Quan-you[1], ZHANG Jing[3*], PENG Jian-fei[1], WU Lin[1*], MAO Hong-jun[1]
(1. Tianjin Key Laboratory of Urban Transport Emission Research, College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China; 2. China Automotive Technology and Research Center Co., Ltd., Tianjin 300300, China; 3. Tianjin Eco-Environmental Monitoring Center, Tianjin 300191, China)

Abstract: Six sets of brake systems were tested using a brake dynamometer, and the brake wear particles (BWPs) and volatile organic compounds (VOCs) were collected during the braking process. In total, 39 elements, 12 water-soluble ions, 7 carbon components, and 18 polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in BWPs were extracted and detected, and 74 VOCs in gas samples were analyzed. The average mass fractions of 12 inorganic elements (i.e., Sb, Mg, Cu, Zn, Ti, Ca, Si, Zr, K, Ba, Al, and Fe) with higher contents in $PM_{2.5}$ and PM_{10} were 43.4% and 40.3%, respectively, and the average mass fraction of Fe was the highest, accounting for 16.6% and 13.1% of $PM_{2.5}$ and PM_{10}, respectively. The average mass fractions of the 12 water-soluble ions in $PM_{2.5}$ and PM_{10} were 16.5% and 12.6%, respectively, and NO_3^-, SO_4^{2-}, and Ca^{2+} were the ions with high contents. The average mass fraction of total carbon (TC) in $PM_{2.5}$ and PM_{10} were 21.9% and 18.1%, respectively, and the average mass fraction of organic carbon (OC) was approximately five times that of elemental carbon (EC). There were six types of PAHs with a detection rate greater than 50%, among which naphthalene (Nap) was the most abundant. The average mass concentration of 74 VOCs was 316.04 $\mu g \cdot m^{-3}$, of which the aromatic hydrocarbon had the highest mass concentration. The compositions of BWPs and VOCs emitted by the six sets of brake systems were quite different, which was mainly determined by the brand and raw materials of the brake pads.

Key words: brake wear; particulate matter; chemical component; size distribution; volatile organic compounds (VOCs)

近年来,由于机动车保有量持续增长,城市空气质量改善面临着严峻的挑战. 多个城市的颗粒物来源解析表明,机动车排放已经成为城市颗粒物的重要来源,甚至是第一大污染源[1~3]. 传统燃油车对颗粒物的贡献不仅来源于尾气排放,还来源于轮胎磨损和制动磨损等非尾气排放. 随着机动车第六阶段(国Ⅵ)排放标准的实施和新能源汽车的大力推广,尾气排放量将呈现下降趋势,这进一步凸显了非尾气排放的重要性.

制动磨损颗粒物(brake wear particles, BWPs)是由刹车片/垫和刹车盘/鼓的磨损产生的. BWPs中大约有35%~55%会释放到空气中,其余部分则粘附在制动器表面或沉积在路面上. 随着机动车行驶,粘附的颗粒物会被重新释放,而车辆运动引起的湍流会将沉积在路面上的颗粒物再悬浮于空气中. 有研究表明, BWPs占非尾气相关PM_{10}的16%~55%,占交通相关PM_{10}的11%~21%[4~6],是非常重要的城市颗粒物来源.

BWPs的化学组分主要取决于刹车片的材质[7],具有多样性和复杂性,甚至驾驶习惯也会对其产生影响[8]. 有研究发现, BWPs载带着很多有毒性的重金属,对人体有潜在的健康风险[9,10],比如

收稿日期: 2021-12-13; **修订日期**: 2022-02-13
基金项目: 天津市自然科学基金项目(18JCYBJC23700); 天津市科技计划项目(19YFZCSF00960, 18PTZWHZ00120); 中央高校基本科研业务费(63213074, 63211075)
作者简介: 门正宇(1991~),男,博士研究生,主要研究方向为机动车非尾气(制动磨损等)排放污染, E-mail: zhengyu_men@hotmail.com
* 通信作者,E-mail:zhangjing_gogo@126.com; dr.wu@msn.com

Ba、Mg、Mn、Ni、Sn、Cd、Cr、Ti、K 和 Sb 等元素均在 BWPs 中被检出[9]. 此外，还有研究分析了 BWPs 中碳组分的含量，结果显示有机碳（OC）含量较高[11].

基于颗粒物组分的源解析，是精准治理城市大气污染的重要技术手段. 然而，目前对机动车排放 BWPs 组分的了解还不够充分，特别是对碳组分和多环芳烃（polycyclic aromatic hydrocarbons，PAHs）的研究甚少，更鲜见有分析制动过程中挥发性有机物（volatile organic compounds，VOCs）的报道. 基于此，本研究利用制动惯性实验台，采集了 6 种类型的刹车片磨损颗粒物，并收集了制动过程中的气体样品，以期获得完整的 BWPs 成分谱和 VOCs 构成.

1　材料与方法

1.1　实验装置与采集

本研究利用 TS102B 型制动惯性实验台对车辆制动过程进行模拟，并设计了一个 L（500 mm）× W（600 mm）× H 1 000 mm的密封采样箱，采样装置如图 1 所示. 采样箱的入风口加装带有活性炭吸附剂的高效过滤器（HEPA H13），以减少背景环境的影响；K 型热电偶镶嵌在刹车片中，用于监控刹车片温度. 采样管道内的风速设定在 6 $m\cdot s^{-1}$. 利用 4 台 HY-100WS 型中流量采样器（青岛恒远，100 $L\cdot min^{-1}$）分别采集 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 颗粒物，每种粒径的颗粒物分别采集在石英膜（Q 膜，Φ90 mm）和有机膜（P膜，Φ90 mm）上，用于不同组分的分析；荷电低压冲击器 ELPI +（Dekati，10 $L\cdot min^{-1}$）可将 6 nm ~ 10 μm 的颗粒分为 14 级，每级撞击器配备 Φ25 mm 的滤膜，用于分粒径收集颗粒物样品；只在制动进行时打开 Summa 罐（ENTECH）进气阀门采集气体样品. 在制动前后，分别采集采样箱内颗粒物和气体样品，用于测量本底值.

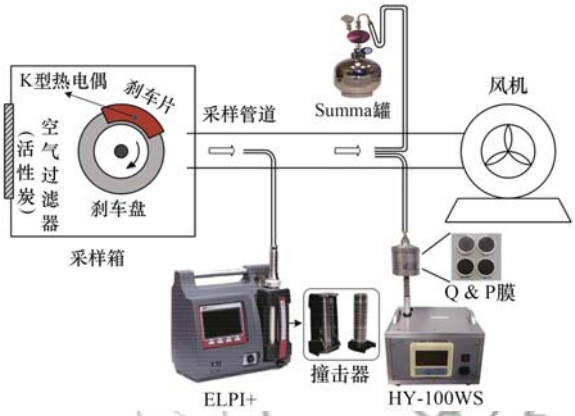


图 1　采样装置示意

Fig. 1　Schematic diagram of sampling devices

1.2　实验样品与条件

根据市场调研，本研究选取了中国市场上占有率较高的 5 款车型（model1 ~ model5）共 6 套制动系统（type1 ~ type6，图 2）进行实验. 这 5 款车型均为前轮驱动，其中 model5 和 model6 为运动型多用途汽车，其他均为轿车. 其他参数如表 1 所示. 制动条件设计为初速度 v = 60 $km\cdot h^{-1}$，末速度 v' = 0，减速度 a = −2 $m\cdot s^{-2}$，制动初温 T = 100℃. 单个制动系统的实验次数为 100 次.

表 1　制动系统的参数

Table 1　Parameters of the brake systems

项目	type1	type2	type3	type4	type5	type6
前/后轮	前轮	后轮	前轮	前轮	前轮	前轮
刹车片编号	a	b	c	d	e	f
类型	陶瓷	低金属	低金属	低金属	陶瓷	低金属
面积/cm^2	47.75	22.5	41.25	35.5	59	51.75
车型	model1	model2	model2	model3	model4	model5
品牌	美国	中国	中国	日本	中国	美国
市场占有率/%	3.40	6.70	6.70	6.60	3.40	3.40

1.3　样品处理与分析

1.3.1　无机金属元素

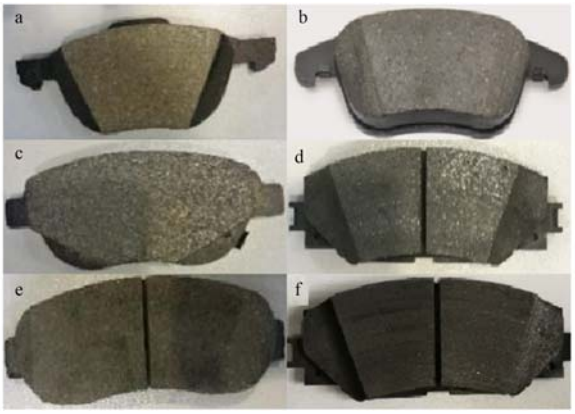
利用 Agilent 7500a 型电感耦合等离子体质谱仪（ICP-MS）分析 BWPs 中 Li、P、As、Cd、Be、La、W、Bi、Y、Co、Cr、Cu、K、Mn、Mo、Na、Ni、Pb、Sb、Sn、V、Zn、Ce、Sc、Rb、Tl、Cs、Sm、U 和 Th 的含量，利用电感耦合等离子体发射光谱法（ICP-OES）分析 Al、Ba、Ca、Fe、Mg、Si、Ti、Sr 和 Zr 的含量. 样品处理与分析参照吴琳[12] 和孙友敏[13] 等的方法. 分析时，同步做空白实验.

1.3.2　水溶性离子

BWPs 中的水溶性离子使用 DX-120 型离子色谱仪进行检测，分析了 5 种阳离子（Na^+、NH_4^+、K^+、Mg^{2+} 和 Ca^{2+}）和 7 种阴离子（F^-、Cl^-、Br^-、NO_2^-、NO_3^-、SO_4^{2-} 和 PO_4^{3-}）. 样品处理与分析参照张金等[14] 的方法. 分析时，同步做空白实验.

1.3.3　碳组分

使用 DRI Model 2001A 型热光碳分析仪分析



a ~ f 分别对应表 1 中 type1 ~ type6

图 2 6 套刹车片样品

Fig. 2 Six sets of brake pad samples

BWPs 中的碳组分,得到 OC1、OC2、OC3、OC4 共 4 种 OC 和 EC1、EC2、EC3 共 3 种元素碳(EC),以及在 OC 碳化过程中形成的裂解碳(OPC). 分析条件与过程参照张静等[15]的方法. 分析时,同步做空白实验.

1.3.4 PAHs

利用气相色谱质谱联用仪(GC-MS, Agilent 7890A-5975C)对 BWPs 中的 18 种 PAHs 进行检测. PAHs 提取与分析参照吴琳等[12]的方法. 分析时,同步做空白实验.

1.3.5 VOCs

气体样品通过低温冷阱预浓缩仪进行预处理,然后利用气相色谱-火焰离子化检测器-质谱法(GC-FID/MS, Agilent 7820A-5977B)进行 VOCs 全组分的双通道分离和检测. 详细测试分析参见孙露娜等[16]的方法.

2 结果与讨论

2.1 元素

2.1.1 元素构成与含量特征

本研究测定了 BWPs 中的 39 种元素,数据经过本底值和空白实验校正. 含量较高的 12 种元素(在 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的 39 种元素中的质量分数平均值分别为 98.4% 和 98.4%)如图 3 所示. 这 12 种元素占 $PM_{2.5}$ 的质量分数为 34.7% ~ 59.0%,平均值为 43.4%,占 PM_{10} 的质量分数为 37.0% ~ 45.9%,平均值为 40.3%. Fe 的质量分数平均值最高,在 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中分别为 16.6% 和 13.1%; 其次是 Ba,在 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中的质量分数平均值分别为 4.9% 和 5.6%; 然后是 Zr,在 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中的质量分数平均值分别为 4.4% 和 4.6%. 含量较为丰富的其他元素,如 Al、Si、Ca、Ti、Zn 和 Cu,占 $PM_{2.5}$ 的质量分数平均值分别为: 4.2%、3.2%、3.2%、1.9%、1.5% 和 1.7%,占 PM_{10} 的质量分数平均值分别为: 2.6%、3.1%、3.6%、2.0%、1.7% 和 1.9%. 此外, 27 种质量分数平均值低于 0.5% 的元素列在表 2 中.

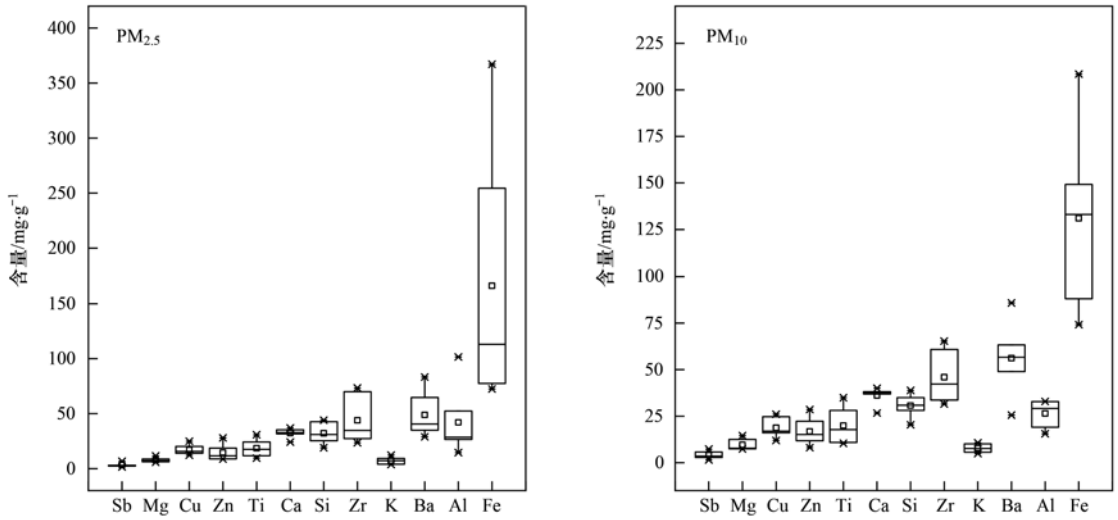


图 3 BWPs 中 12 种元素的含量

Fig. 3 Content of 12 elements in BWPs

刹车片原材料中 Fe 占比可高达 60%[7,17],并且刹车盘主要是铸铁材质的,因此在 BWPs 中 Fe 的质量分数最高. 部分研究中 Cu 的质量分数在 11.2% ~ 17.6%[18~20],远高于本研究; 也有研究表明 Cu 的质量分数在 1.5% ~ 2.7%[21],与本研究接近. Iijima 等[22]的研究发现 BWPs 中 Ba 的质量分数为 7.3% ~ 13.2%,略高于本研究. 与 Sanders 等[23]的研究结果不同,本研究中 K 的含量较低. Wahlström 等[24]对不同粒径的 BWPs 进行组分分析,认为细颗粒物主要由 Fe、Cu、Ti、Al 和含碳物质组成,而粗颗粒物主要由 Fe 的氧化物组成. 不同类型的刹车片/盘的生产原材料种类与配比的不同,

表 2　27 种微量元素的含量平均值/μg·g^{-1}

Table 2　Average content of 27 trace elements /μg·g^{-1}

元素	含量平均值		元素	含量平均值	
	$PM_{2.5}$	PM_{10}		$PM_{2.5}$	PM_{10}
Li	5.74	5.75	La	4.23	5.59
P	371.79	434.27	W	6.48	6.68
Mn	1 260.00	1 182.28	Bi	215.68	153.76
As	211.60	265.61	Sr	507.08	541.10
Mo	232.66	168.63	Na	1 393.48	1 536.97
Cs	0.78	0.76	V	103.09	114.69
Sm	0.96	1.12	Ni	83.90	80.48
Pb	89.61	110.30	Y	41.01	50.98
U	10.84	12.35	Sn	1747.95	1193.24
Be	0.22	0.21	Ce	7.24	8.98
Sc	116.33	19.06	Tl	0.67	0.66
Co	11.55	11.26	Th	5.55	7.05
Rb	13.53	13.98	Cr	591.61	575.90
Cd	44.30	31.58			

导致产生的颗粒物中元素组分含量差异较大. 比如, type3 产生的 $PM_{2.5}$ 中含量较高的 12 种元素所占质量分数为 59.0%, 远高于 type4 (34.7%). 又如, type6 产生的颗粒物中 Sb 含量是其他几种刹车片的 2 倍以上, type1 和 type4 产生的颗粒物中 Fe 含量只有其他几种刹车片的 1/3 ~ 1/2.

Zn 常被视作 BWPs 标志性元素而用于大气颗粒物来源解析. 本研究中, PM_{10} 中 Zn 的质量分数平均值为 1.7%, 该数值低于已有的研究结果[7,18,19,25,26], 但略高于 Iijima[27] 等的结果. Sb 含量较低, 但因为其在刹车片原材料中使用的广泛性和独特性, 也是 BWPs 组分研究的重点[21,22,27,28]. 此外, 由于我国已全面禁止销售和使用含铅汽油, BWPs 成为机动车排放中重要的 Pb 来源. 已有研究中, Pb 含量在 120 ~ 2 900 μg·g^{-1}[18,29], 明显高于本研究. 除标志性元素外, 特征元素比值也常被用于大气颗粒物来源解析[30]. Sternbeck 等[31] 提出将含量之比 Cu/Sb = 4.6 ± 2.3 作为 BWPs 元素特征比值的标准值. 本研究中, $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中 Cu/Sb 的平均值分别为 6.3 ± 3.5 和 5.4 ± 2.8, 均高于标准值. type1 的 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中 Cu/Sb 分别为 13.1 和 11.1, 明显高于其他几种刹车片. 其他研究中的 Cu/Sb 也存在明显差异(表 3). 因此, 在对不同地区进行大气颗粒物来源解析时, 应充分考虑当地市场的机动车构成.

表 3　不同研究中 BWPs 的 Cu/Sb

Table 3　Cu/Sb ratios of BWPs in different studies

地点, 年份	Cu/Sb	文献
德国科隆, 2001	4.6 ± 1.2	[32]
日本, 2004	1.3	[33]
中国台湾, 2005	9.1 ± 1.79(PM_{10}); 2.17 ± 0.83($PM_{2.5}$)	[34]
瑞典斯德哥尔摩, 2007	5.3	[25]
意大利巴勒莫, 2009	4.9(PM_{10}); 2.5($PM_{2.5}$)	[35]
英国伦敦, 2010	9.1	[36]
瑞士苏黎世, 2010	6.2(PM_{10})	[5]
荷兰, 2014	4.6	[26]
日本, 2016	5.6 ± 2.6	[37]
中国天津, 2021	5.4 ± 2.8(PM_{10}); 6.3 ± 3.5($PM_{2.5}$)	本研究

2.1.2　元素粒径分布

利用 ELPI + 的滤膜, 本研究重点分析了含量较高且具有代表性的 K、Cu、Zn、Sb、Zr 和 Ba 共 6 种元素的粒径分布. 由图 4 可知, 6 种元素的粒径分布基本呈现单峰分布. K 的峰值在 1.1 ~ 2.2 μm. Cu 的峰值在 1.3 ~ 2.0 μm, 此外 type4 中的 Cu 在 40 nm 出现了一个较小的峰. type1 中的 Zn 呈双峰分布, 第一个在 1.7 μm 左右, 第二个在 5 ~ 6 μm, 其他几种刹车片的 Zn 峰值在 1.3 ~ 2.1 μm. Sb、Zr 和 Ba 的粒径分布都比较一致, 峰值在 1.3 ~ 2.1 μm. 图 5 展示了基于 ELPI + 膜质量的颗粒物粒径分布. 可以看出, 粒径分布基本为单峰分布, 峰值粒径在 1 ~ 2.3 μm, 说明元素的粒径分布规律与颗粒物质量的粒径分布保持一致. Iijima 等[22] 利用安德森小流量颗粒物采样器进行样品采集, 发现 Ti、Fe、Cu、Zn、Sb 和 Ba 的粒径分布规律相似, 含量均在 1 μm 时开始明显升高, 到 4 μm 左右时达到最高, 之后开始下降. Kukutschová 等[7] 利用 Berner 低压冲击器 (BLPI) 对 25 nm ~ 13.5 μm 粒径的颗粒物进行采集, 并检测了 Fe、Cu、Sn 和 Zn 的含量, 发现 4 种元素均在 1.221 μm 和 4.776 μm 处存在明显的峰, 此外 Fe 还在 127 nm 处有一个峰. 与已有研究相比[7,22], 本研究中各元素的峰值粒径较小. 造成这种差异的原因, 除了刹车片原材料的不同, 可能还与测量方法有关.

2.2　水溶性离子

图 6 列出了 BWPs 中 7 种阴离子和 5 种阳离子的含量. 12 种水溶性离子占 $PM_{2.5}$ 的质量分数为

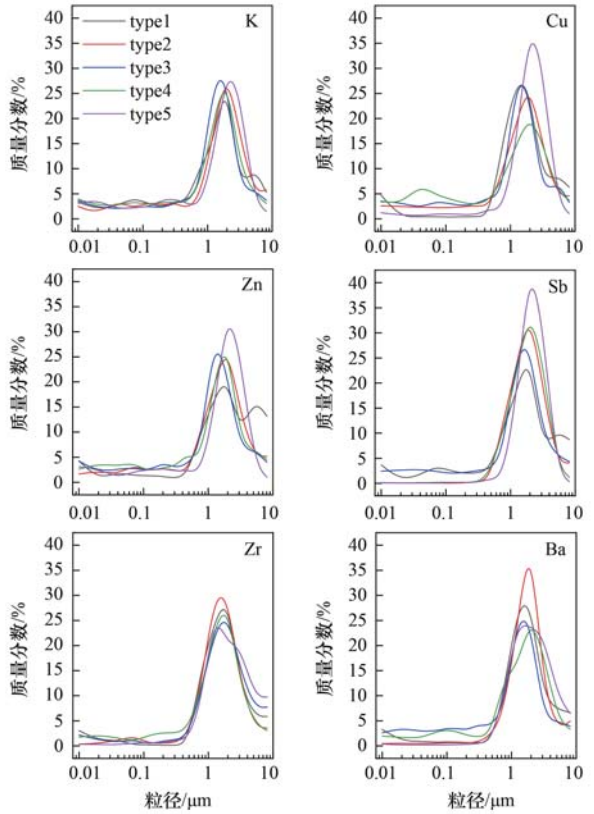


图 4 BWPs 中元素的粒径分布

Fig. 4 Size distribution of elements in BWPs

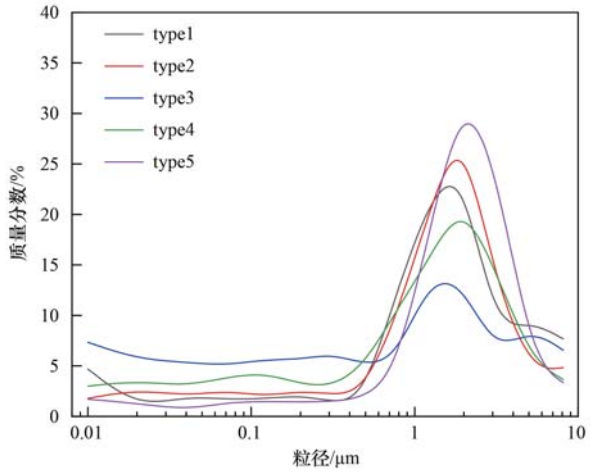


图 5 BWPs 质量的粒径分布

Fig. 5 Mass size distribution of BWPs

8.6%~28.4%,平均值为 16.5%. 阴离子所占质量分数为 5.0%~17.9%,平均值为 10.1%,质量分数最高的是 NO_3^-,为 4.5%; 阳离子所占质量分数为 3.6%~10.6%,平均值为 6.4%,质量分数最高的是 Ca^{2+},为 2.8%. 12 种水溶性离子占 PM_{10} 的质量分数为 6.4%~20.4%,平均值为 12.6%. 阴离子所占质量分数为 3.8%~11.7%,平均值为 7.1%,质量分数最高的是 SO_4^{2-},为 2.7%; 阳离子所占质量分数为 2.3%~8.7%,平均值为 5.6%,质量分数最高的是 Ca^{2+},为 3.0%. 从刹车片类型来看, type4 中水溶性离子的质量分数最高,在 $PM_{2.5}$ 中占到 28.4%,在 PM_{10} 中占到 20.4%. type6 的 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子的质量分数最低,为 8.6%,而 type3 的 PM_{10} 中水溶性离子的质量分数最低,为 6.4%. 从离子种类来看, type2、type3、type4 和 type5 的 $PM_{2.5}$ 中 NO_3^- 含量均最高,而 type6 中 NO_3^- 含量非常低,仅为 0.24%. type1 的 $PM_{2.5}$ 中 SO_4^- 含量最高, type6 的 $PM_{2.5}$ 中 Ca^{2+} 含量最高. 对于 PM_{10}, SO_4^{2-} 在 type1、type2 和 type3 中含量最高, NO_3^- 在 type4 中含量最高, Ca^{2+} 在 type5 中含量最高, PO_4^{3-} 在 type6 中含量最高.

关于 BWPs 中水溶性离子的研究比较少. Hildemann 等[38] 对刹车磨损粉尘中 Mg^{2+}、Cl^-、NO_3^-、SO_4^{2-} 和 NH_4^+ 等进行了分析,其质量分数分别是 8.3%、0.15%、0.16%、3.34% 和 0.003%. 其中, Mg^{2+} 的质量分数明显高于本研究,而 NH_4^+ 的质量分数远低于本研究. 可见,不同研究结果之间的差异较大,也说明需要更多更全面的研究.

2.3 碳组分

图 7 展示了 BWPs 中碳组分的含量. 总碳(TC)占 $PM_{2.5}$ 的质量分数为 11.2%~30.8%,平均值为 21.9%,其中 OC 的质量分数为 9.6%~26.5%,平均值为 17.9%, EC 的质量分数为 1.5%~5.1%,平均值为 3.9%. TC 占 PM_{10} 的质量分数为 7.3%~29.3%,平均值为 18.1%,其中 OC 的质量分数为 6.4%~22.4%,平均值为 15.0%, EC 的质量分数为 0.8%~6.9%,平均值为 3.1%. 可见, OC 的质量分数明显高于 EC. 从组分来看, OC 中 OC3 的质量分数最高,占 $PM_{2.5}$ 的平均值为 6.5%,占 PM_{10} 的平均值为 5.2%,其次为 OC2 和 OC4. EC 中 EC1 的质量分数最高,占 $PM_{2.5}$ 的平均值为 2.2%,占 PM_{10} 的平均值为 1.5%,其次为 EC2. 从刹车片类型来看, type3 的 $PM_{2.5}$ 中碳组分的质量分数最高(30.8%), type6 的 $PM_{2.5}$ 中最低(11.2%); type3 的 PM_{10} 中碳组分的质量分数最低(7.3%), type5 的 PM_{10} 中最高(29.3%). BWPs 中含有大量碳组分的原因可能是由于在制造刹车片的过程中添加了大量的炭黑、酚醛树脂、芳纶纤维和天然橡胶等. 制动温度是影响 BWPs 中 OC 和 EC 含量的重要因素, Hagino 等[37] 的研究证明,部分碳组分可能在制动过程中挥发和/或被氧化.

在不同的热解过程中, EC 可分为 char-EC(即 EC1-OPC)和 soot-EC(即 EC2 + EC3). 对于 $PM_{2.5}$, char-EC/soot-EC 含量比值范围为 0.31~1.65,平均值为 0.95 ± 0.43; 对于 PM_{10}, char-EC/soot-EC 范围为 0~1.36,平均值为 0.68 ± 0.55. OC/EC 含量比

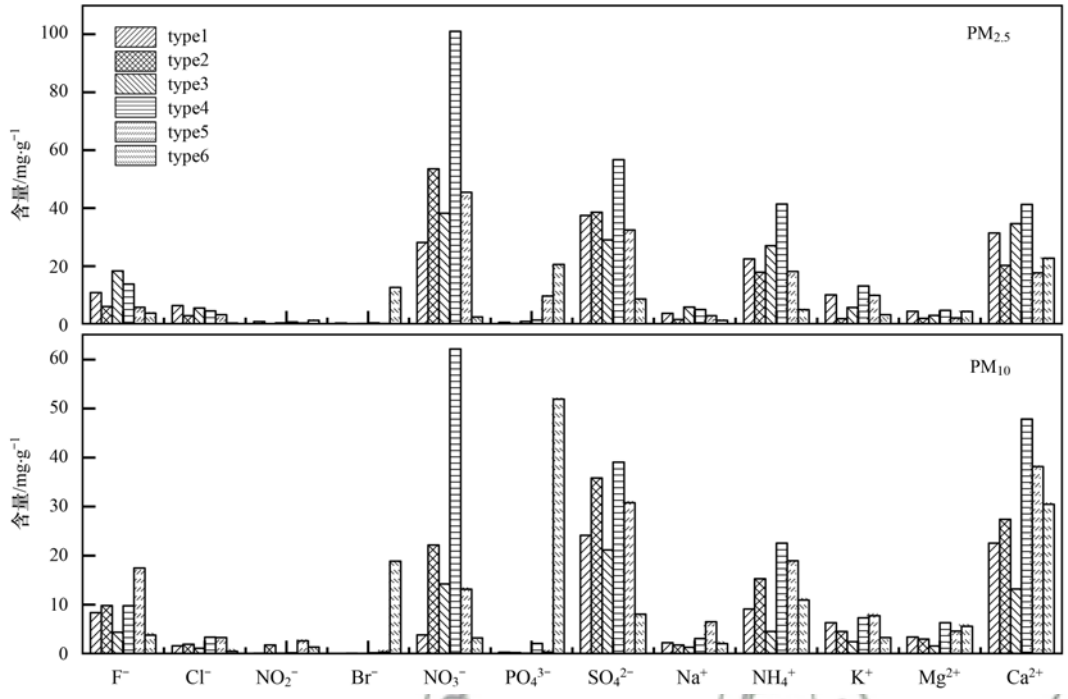


图 6　BWPs 中的水溶性离子含量

Fig. 6　Content of water-soluble ions in BWPs

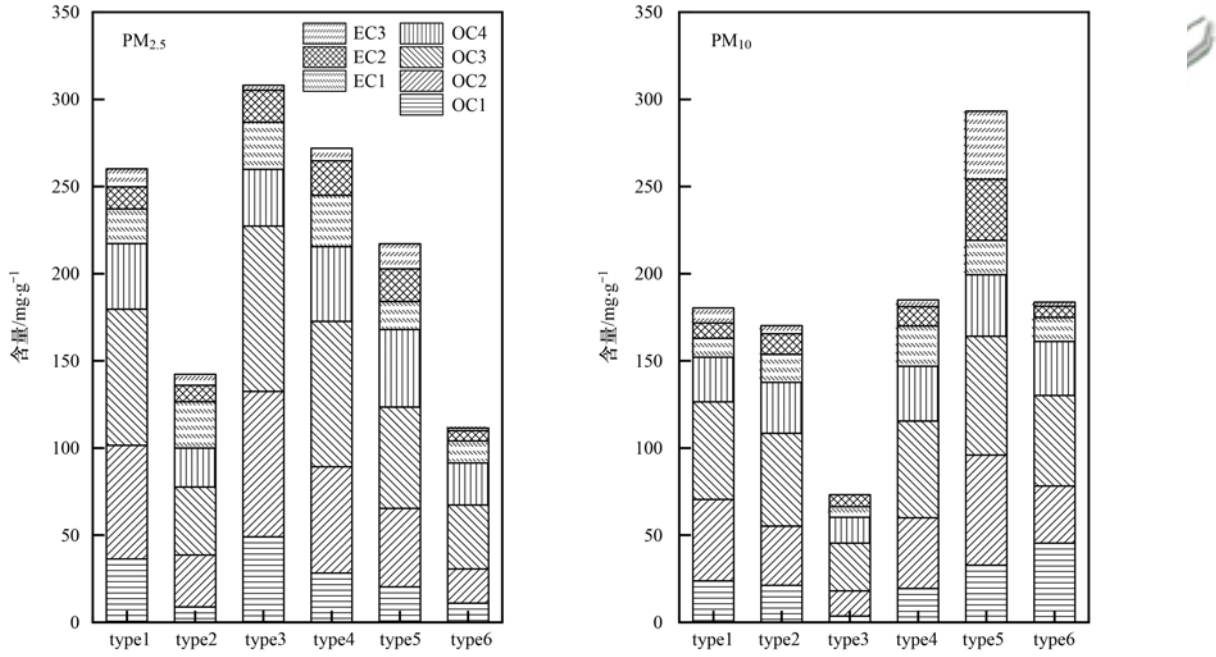


图 7　BWPs 中的碳组分含量

Fig. 7　Content of carbon in BWPs

值对于了解颗粒物的有机污染具有重要意义. $PM_{2.5}$中，OC/EC 范围为 2.41 ~ 6.40，平均值为 4.76 ± 1.49. PM_{10}中，OC/EC 范围为 3.25 ~ 7.84，平均为 5.59 ± 1.70. Hildemann 等[38]的研究结果显示，OC/EC 的值约为 4.1，略低于本研究结果. 本研究显示，BWPs 对环境中 OC 和 EC 的贡献不容忽视，了解 BWPs 碳组分对于精细化源解析具有重要意义.

2.4　PAHs

本研究对 BWPs 中 18 种 PAHs 进行了检测，其中检出率≥ 50% 的 PAHs 共有 6 种，如表 4 所示. $PM_{2.5}$和 PM_{10}中 6 种 PAHs 的含量平均值分别为 26.24 μg·g^{-1}和 19.24 μg·g^{-1}. 除 Pyr 外，$PM_{2.5}$中其他 5 种 PAHs 的含量平均值均高于 PM_{10}. $PM_{2.5}$和 PM_{10}中 Nap 含量最高，分别为(7.36 ± 3.05) μg·g^{-1}和(5.39 ± 4.65) μg·g^{-1}，其次为 BbF. $PM_{2.5}$中含量

最少的是 Pyr,为(3.60 ± 1.69) μg·g^{-1},而 PM_{10}中含量最少的是 BghiP,为(1.85 ± 2.37) μg·g^{-1}. 在本研究中, $PM_{2.5}$中的 Fla/(Fla + Pyr)含量比值为 0.58,在 PM_{10}中为 0.49,其比值与煤和木材等生物质燃烧源相似[39].

表 4 BWPs 中 6 种 PAHs 的含量/μg·g^{-1}

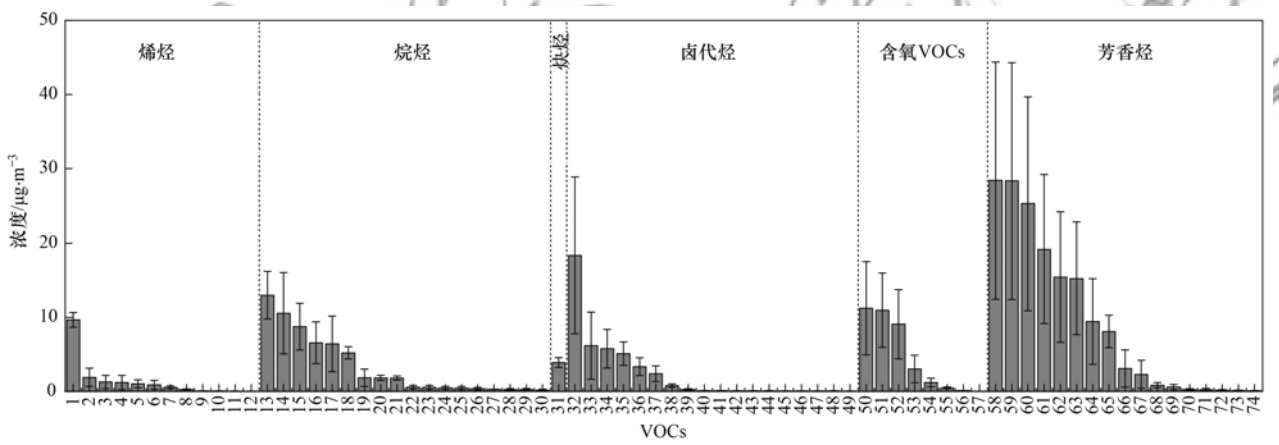
Table 4 Content of six kinds of PAHs in BWPs/μg·g^{-1}

PAHs	$PM_{2.5}$		PM_{10}	
	均值	方差	均值	方差
萘(Nap)	7.36	3.05	5.39	4.65
苯并[ghi]苝(BghiP)	3.90	2.48	1.85	2.37
苯并[b]荧蒽(BbF)	5.61	3.52	4.33	4.53
菲(Phe)	4.61	2.36	4.14	4.40
荧蒽(Fla)	4.87	2.45	3.76	3.11
芘(Pyr)	3.60	1.69	3.88	4.63

Rogge 等[40]对 BWPs 中的 PAHs 进行了检测,共检出了 16 中 PAHs,检出率高于本研究,但是含量(BghiP: 2.6 μg·g^{-1}, BbF: 0.42 μg·g^{-1}, Phe: 0.97 μg·g^{-1}, Fla: 0.69 μg·g^{-1}, Pyr: 1.1 μg·g^{-1})要低于本研究. 在制动过程中,刹车片局部产生高温,原材料中的酚醛树脂、三聚氰胺树脂、环氧树脂和聚酰胺树脂等有机物可能发生某些化学反应,这可能是 BWPs 中 PAHs 的来源. 目前对于 BWPs 中 PAHs 的研究比较少,其形成机制有待进一步探索. 同时,还应优化 PAHs 的提取和检测方法,以提高数据质量.

2.5 VOCs

利用 Summa 罐采集了制动过程中排放的 VOCs,并检出 74 种组分(如图 8),所有样品中 VOCs 的浓度平均值为 316.04 μg·m^{-3}. 其中,二甲基苯的浓度最高, ρ(间-二甲基苯)、ρ(对-二甲基苯)和 ρ(邻-二甲基苯)的平均值分别为(28.4 ± 15.97)、(28.35 ± 15.94)和(25.29 ± 14.4) μg·m^{-3}. 74 种 VOCs 中,有 38 种 VOCs 的浓度平均值 <1 μg·m^{-3}.



1. 乙烯, 2. 乙酸乙烯酯, 3. 1-己烯, 4. 丙烯, 5. 顺-2-丁烯, 6. 苯乙烯, 7. 1-丁烯, 8. 反-2-丁烯, 9. 1-戊烯, 10. 反-2-戊烯, 11. 丁二烯, 12. 顺-2-戊烯, 13. 丙烷, 14. 正丁烷, 15. 乙烷, 16. 正壬烷, 17. 异丁烷, 18. 正十二烷, 19. 正己烷, 20. 正十一烷, 21. 3-甲基己烷, 22. 甲基环戊烷, 23. 环己烷, 24. 正癸烷, 25. 异戊烷, 26. 正戊烷, 27. 2,3-二甲基丁烷, 28. 2-甲基戊烷, 29. 3-甲基戊烷, 30. 环戊烷, 31. 乙炔, 32. 三氯甲烷, 33. 一氟三氯甲烷, 34. 1, 2-二氯乙烷, 35. 1, 2-二氯丙烷, 36. 顺-1, 2-二氯乙烯, 37. 三氯乙烯, 38. 二氯甲烷, 39. 氯代甲苯, 40. 氯乙烷, 41. 邻-二氯苯, 42. 氯苯, 43. 氯乙烯, 44. 对-二氯苯, 45. 间-二氯苯, 46. 1,1,2-三氯乙烷, 47. 1,1-二氯乙烷, 48. 二溴一氯甲烷, 49. 四氯化碳, 50. 2-己酮, 51. 2-丁酮, 52. 乙酸乙酯, 53. 4-甲基-2-戊酮, 54. 四氢呋喃, 55. 叔丁基甲醚, 56. 二恶烷, 57. 丙烯醛, 58. 间-二甲基苯, 59. 对-二甲基苯, 60. 邻-二甲基苯, 61. 乙苯, 62. 对-二乙基苯, 63. 间-二乙基苯, 64. 萘, 65. 甲苯, 66. 1,2,4-三甲基苯, 67. 1,2,3-三甲基苯, 68. 邻-乙基甲苯, 69. 苯, 70. 对-乙基甲苯, 71. 异丙苯, 72. 1,3,5-三甲基苯, 73. 间-乙基甲苯, 74. 正丙苯

图 8 制动过程中排放的 VOCs 质量浓度

Fig. 8 Mass concentration of VOCs emitted during braking

检出的 74 种 VOCs 可以分为 6 类,分别是烯烃(12 种)、烷烃(18 种)、炔烃(1 种)、含氧 VOCs(8 种)、卤代烃(18 种)和芳香烃(17 种). 图 9 展示了 6 种类别 VOCs 的占比. 芳香烃占比最高,为 49.69%,其次为烷烃和卤代烃. 占比最低的是炔烃,为 1.23%. 刹车片原材料中酚醛树脂等多种有机物在高温下的分解,可能是 VOCs 产生的重要途径. 比如,酚醛树脂、三聚氰胺树脂、环氧树脂和聚酰胺树脂等物质裂解,可能产生芳香烃;石墨、橡胶粉和碳纤维等则有可能产生烷烃、烯烃和卤代烃等不含苯环的 VOCs. 目前,VOCs 的产生机制仍有待于深入研究.

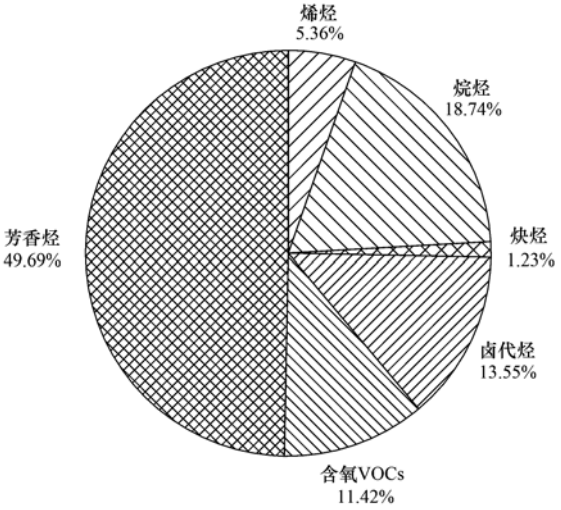


图 9　各类别 VOCs 的占比

Fig. 9　Proportion of VOCs in different categories

3　结论

(1)含量较高的 12 种无机元素(Sb、Mg、Cu、Zn、Ti、Ca、Si、Zr、K、Ba、Al 和 Fe)占 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的质量分数平均值分别为 43.4% 和 40.3%,其中 Fe 的质量分数最高,其次为 Ba 和 Zr. 作为特征比值, $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中 Cu/Sb 分别为 6.3 ± 3.5 和 5.4 ± 2.8. 无机元素的粒径主要呈现单峰分布,峰值在 1 ~ 3 μm.

(2)12 种水溶性离子占 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的质量分数平均值分别为 16.5% 和 12.6%. 阴离子中 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 的质量分数较高,阳离子中 Ca^{2+} 的质量分数最高.

(3)TC 占 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的质量分数平均值分别为 21.9% 和 18.1%. 其中,在 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中 OC 的质量分数分别为 17.9% 和 15.0%,是 EC 的 5 倍左右.

(4)检出率大于 50% 的 PAHs 共有 6 种,在 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中的含量平均值分别为 26.24 $\mu g \cdot g^{-1}$ 和 19.24 $\mu g \cdot g^{-1}$. 其中 Nap 含量最为丰富,其次为 BbF. $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中 Fla/(Fla + Pyr)含量比值分别为 0.58 和 0.49.

(5)74 种 VOCs 的浓度平均值为 316.04 $\mu g \cdot m^{-3}$. 其中有 38 种 VOCs 的浓度平均值 < 1 $\mu g \cdot m^{-3}$. 芳香烃占比最高,为 49.69%,炔烃占比最低,为 1.23%.

(6)BWPs 中各组分合计占 $PM_{2.5}$ 的质量分数为 81.8%,占 PM_{10} 的质量分数 71.0%. 本研究提供了较为完整的 BWPs 和制动排放 VOCs 成分谱,可以为大气精细化源解析提供数据支撑.

参考文献:

[1] 孟红旗, 张家兴, 韩桥, 等. 冬季供暖对城市大气 $PM_{2.5}$ 水溶性组成及污染源解析的影响[J]. 环境化学, 2021, **40**(9): 2768-2779.
Meng H Q, Zhang J X, Han Q, *et al*. Impacts of municipal heat supply in winter on water-soluble ions and sources identification of atmospheric $PM_{2.5}$[J]. Environmental Chemistry, 2021, **40**(9): 2768-2779.

[2] 周睿智, 闫才青, 崔敏, 等. 山东省大气细颗粒物来源解析的研究现状与展望[J]. 中国环境科学, 2021, **41**(7): 3029-3042.
Zhou R Z, Yan C Q, Cui M, *et al*. Research status and prospects on source apportionment of atmospheric fine particulate matter in Shandong Province[J]. China Environmental Science, 2021, **41**(7): 3029-3042.

[3] 许纯领. 苏北城市秋冬季节大气细颗粒物污染来源解析研究[J]. 绿色科技, 2021, **23**(2): 128-129, 132.

[4] Harrison R M, Jones A M, Gietl J, *et al*. Estimation of the contributions of brake dust, tire wear, and resuspension to nonexhaust traffic particles derived from atmospheric measurements[J]. Environmental Science & Technology, 2012, **46**(12): 6523-6529.

[5] Bukowiecki N, Lienemann P, Hill M, *et al*. PM_{10} emission factors for non-exhaust particles generated by road traffic in an urban street canyon and along a freeway in Switzerland[J]. Atmospheric Environment, 2010, **44**(19): 2330-2340.

[6] Lawrence S, Sokhi R, Ravindra K, *et al*. Source apportionment of traffic emissions of particulate matter using tunnel measurements[J]. Atmospheric Environment, 2013, **77**: 548-557.

[7] Kukutschová J, Moravec P, Tomášek V, *et al*. On airborne nano/micro-sized wear particles released from low-metallic automotive brakes[J]. Environmental Pollution, 2011, **159**(4): 998-1006.

[8] Keuken M, van der Gon H D, van der Valk K. Non-exhaust emissions of PM and the efficiency of emission reduction by road sweeping and washing in the Netherlands[J]. Science of the Total Environment, 2010, **408**(20): 4591-4599.

[9] Grigoratos T, Martini G. Brake wear particle emissions: a review[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, **22**(4): 2491-2504.

[10] Park J, Joo B, Seo H, *et al*. Analysis of wear induced particle emissions from brake pads during the worldwide harmonized light vehicles test procedure (WLTP)[J]. Wear, 2021, **466-467**, doi: 10.1016/j.wear.2020.203539.

[11] Gasser M, Riediker M, Mueller L, *et al*. Toxic effects of brake wear particles on epithelial lung cells *in vitro*[J]. Particle and Fibre Toxicology, 2009, **6**(1), doi: 10.1186/1743-8977-6-30.

[12] 吴琳, 张新峰, 门正宇, 等. 机动车轮胎磨损颗粒物化学组分特征研究[J]. 中国环境科学, 2020, **40**(4): 1486-1492.
Wu L, Zhang X F, Men Z Y, *et al*. The chemical component characteristics of vehicle tire wear particles[J]. China Environmental Science, 2020, **40**(4): 1486-1492.

[13] 孙友敏, 范晶, 徐标, 等. 省会城市不同功能区大气 $PM_{2.5}$ 化学组分季节变化及来源分析[J]. 环境科学, 2022, **43**(5): 2304-2316.
Sun Y M, Fan J, Xu B, *et al*. Source apportionment and seasonal changes of $PM_{2.5}$ chemical components from different functional areas of a provincial capital city[J]. Environmental Science, 2022, **43**(5): 2304-2316.

[14] 张金, 姬亚芹, 邢雅彤, 等. 天津市高校夏季道路扬尘 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子污染特征及来源[J]. 环境科学学报, 2020, **40**(5): 1604-1610.

Zhang J, Ji Y Q, Xing Y T, *et al*. Characteristics and sources of water-soluble ions in road dust $PM_{2.5}$ during summer in university campuses of Tianjin[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, **40**(5): 1604-1610.

[15] 张静, 吴琳, 杨志文, 等. 典型道路路边空气颗粒物中碳组分的组成特征[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(9): 2561-2566.
Zhang J, Wu L, Yang Z W, *et al*. Characterization of carbonaceous in $PM_{2.5}$ and PM_{10} at urban roadside environment [J]. China Environmental Science, 2016, **36**(9): 2561-2566.

[16] 孙露娜, 刘妍, 赵静波, 等. 天津隧道机动车 VOCs 污染特征与排放因子[J]. 环境科学, 2019, **40**(1): 104-113.
Sun L N, Liu Y, Zhao J B, *et al*. Pollution characteristics and emission factors of VOCs from vehicle emissions in the Tianjin tunnel[J]. Environmental Science, 2019, **40**(1): 104-113.

[17] Schauer J J, Lough G C, Shafer M M, *et al*. Characterization of metals emitted from motor vehicles[J]. Research Report, 2006, (133): 1-76.

[18] Westerlund K G, Johansson C. Emissions of metals and particulate matter due to wear of brake linings in Stockholm[J]. Air Pollution X, 2002, **11**: 793-802.

[19] Legret M, Pagotto C. Evaluation of pollutant loadings in the runoff waters from a major rural highway[J]. Science of the Total Environment, 1999, **235**(1-3): 143-150.

[20] Figi R, Nagel O, Tuchschmid M, *et al*. Quantitative analysis of heavy metals in automotive brake linings: a comparison between wet-chemistry based analysis and in-situ screening with a handheld X-ray fluorescence spectrometer[J]. Analytica Chimica Acta, 2010, **676**(1-2): 46-52.

[21] von Uexküll O, Skerfving S, Doyle R, *et al*. Antimony in brake pads-a carcinogenic component? [J]. Journal of Cleaner Production, 2005, **13**(1): 19-31.

[22] Iijima A, Sato K, Yano K, *et al*. Particle size and composition distribution analysis of automotive brake abrasion dusts for the evaluation of antimony sources of airborne particulate matter[J]. Atmospheric Environment, 2007, **41**(23): 4908-4919.

[23] Sanders P G, Xu N, Dalka T M, *et al*. Airborne brake wear debris: size distributions, composition, and a comparison of dynamometer and vehicle tests[J]. Environmental Science & Technology, 2003, **37**(18): 4060-4069.

[24] Wahlström J, Olander L, Olofsson U. Size, shape, and elemental composition of airborne wear particles from disc brake materials[J]. Tribology Letters, 2010, **38**(1): 15-24.

[25] Hjortenkrans D S T, Bergbäck B G, Häggerud A V. Metal emissions from brake linings and tires: case studies of Stockholm, Sweden 1995/1998 and 2005[J]. Environmental Science & Technology, 2007, **41**(15): 5224-5230.

[26] Hulskotte J H J, Roskam G D, van der Gon H A C D. Elemental composition of current automotive braking materials and derived air emission factors[J]. Atmospheric Environment, 2014, **99**: 436-445.

[27] Iijima A, Sato K, Yano K, *et al*. Emission factor for antimony in brake abrasion dusts as one of the major atmospheric antimony sources[J]. Environmental Science & Technology, 2008, **42**(8): 2937-2942.

[28] Bukowiecki N, Lienemann P, Hill M, *et al*. Real-world emission factors for antimony and other brake wear related trace elements: size-segregated values for light and heavy duty vehicles[J]. Environmental Science & Technology, 2009, **43**(21): 8072-8078.

[29] Amato F, Cassee F R, van der Gon H A C D, *et al*. Urban air quality: the challenge of traffic non-exhaust emissions[J]. Journal of Hazardous Materials, 2014, **275**: 31-36.

[30] Arditsoglou A, Samara C. Levels of total suspended particulate matter and major trace elements in Kosovo: a source identification and apportionment study[J]. Chemosphere, 2005, **59**(5): 669-678.

[31] Sternbeck J, Sjödin Å, Andréasson K. Metal emissions from road traffic and the influence of resuspension-results from two tunnel studies[J]. Atmospheric Environment, 2002, **36**(30): 4735-4744.

[32] Weckwerth G. Verification of traffic emitted aerosol components in the ambient air of Cologne (Germany)[J]. Atmospheric Environment, 2001, **35**(32): 5525-5536.

[33] Adachi K, Tainosho Y. Characterization of heavy metal particles embedded in tire dust[J]. Environment International, 2004, **30**(8): 1009-1017.

[34] Lin C C, Chen S J, Huang K L, *et al*. Characteristics of metals in nano/ultrafine/fine/coarse particles collected beside a heavily trafficked road[J]. Environmental Science & Technology, 2005, **39**(21): 8113-8122.

[35] Dongarrà G, Manno E, Varrica D. Possible markers of traffic-related emissions [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2009, **154**(1-4): 117-125.

[36] Gietl J K, Lawrence R, Thorpe A J, *et al*. Identification of brake wear particles and derivation of a quantitative tracer for brake dust at a major road[J]. Atmospheric Environment, 2010, **44**(2): 141-146.

[37] Hagino H, Oyama M, Sasaki S. Laboratory testing of airborne brake wear particle emissions using a dynamometer system under urban city driving cycles[J]. Atmospheric Environment, 2016, **131**: 269-278.

[38] Hildemann L M, Markowski G R, Cass G R. Chemical composition of emissions from urban sources of fine organic aerosol[J]. Environmental Science & Technology, 1991, **25**(4): 744-759.

[39] 刘昂, 公金文, 韩彬, 等. 南极菲尔德斯半岛表层土壤中多环芳烃分布特征、源解析及风险评价[J]. 极地研究, 2021, **33**(1): 49-57.
Liu A, Gong J W, Han B, *et al*. Analysis of distribution, sources and ecological risks of polycyclic aromatic hydrocarbons in topsoil of fildes peninsula[J]. Chinese Journal of Polar Research, 2021, **33**(1): 49-57.

[40] 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.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 43 No. 10

Oct. 15, 2022

CONTENTS

Regionalization and Analysis of $PM_{2.5}$ and O_3 Synergetic Prevention and Control Areas Based on Remote Sensing Data ····· LI Shen-xin, ZOU Bin, ZHANG Feng-ying, *et al.* (4293)

Analysis of a Typical Ozone Pollution Process in Guangzhou in Winter ····· PEI Cheng-lei, XIE Yu-tong, CHEN Xi, *et al.* (4305)

Establishment and Application of Foshan Ozone Concentration Forecast Equation ····· CHEN Chen, HONG Ying-ying, TAN Hao-bo, *et al.* (4316)

Establishment of High-Resolution Emissions Inventory in Wuhai and Its Application in Exploring the Causes of Ozone Pollution ····· ZHANG Rui-xin, CHU Bo, SHANG Chun-lin, *et al.* (4327)

Investigating the Pollutants of Marine Shipping Emissions Along the East China Sea by Combining in-situ Measurements and Automatic Identification System ····· QIU Hao, LIU Dan-tong, WU Yang-zhou, *et al.* (4338)

Chemical Component of Particulate Matters and VOCs Characteristics During Vehicle Brake Processes ····· MEN Zheng-yu, LIU Du-you, GUO Quan-you, *et al.* (4348)

Characterization of VOCs Emissions from Caged Broiler House in Winter ····· CAO Tian-tian, ZHENG Yun-hao, ZHANG Yu, *et al.* (4357)

Concentrations and Community Structures of Culturable Bacteria in Aerosols of Household Garbage Stations in Shanghai ····· LU Bing-jie, ZHANG Xiang, WANG Chuan, *et al.* (4367)

Inventory and Distribution Characteristics of Anthropogenic Ammonia Emissions in Zhejiang Province from 2008 to 2018 ····· FANG Li-jiang, YANG Yi-qun, YE Guan-qiong (4380)

Roadmap of Coal Control and Carbon Reduction in the Steel Industry Under the Carbon Peak and Neutralization Target ····· XUE Ying-lan, ZHANG Jing, LIU Yu, *et al.* (4392)

Carbon Emission Reduction Effect of Spatial Correlation Network Structure Characteristics: From the Perspective of Urban Agglomeration ····· ZHENG Hang, YE A-zhong (4401)

Pollution and Carbon Reduction Effect of OFDI in China and Its Mechanism ····· BAI Zi-han, LÜ Lian-hong, ZHAO Ming-xuan, *et al.* (4408)

Variation Characteristics of Surface Water Quality in China in Recent Years ····· JI Xiao-yan, HOU Huan-huan, WANG Shan-shan, *et al.* (4419)

Distribution, Risk, and Influencing Factors of Microplastics in Surface Water of Huangshui River Basin ····· FAN Meng-yuan, HUANG Yi-mei, ZHANG Hai-xin, *et al.* (4430)

Hydrochemical and Isotopic Characteristics in the Surface Water of the Fenhe River Basin and Influence Factors ····· ZHAO Chun-hong, SHEN Hao-yong, WANG Zhi-heng, *et al.* (4440)

Characteristics and Causes of High-manganese Groundwater in Pearl River Delta During Urbanization ····· LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, *et al.* (4449)

Characteristics and Causes of Groundwater Salinization in the Plain Area of the Lower Kashgar River ····· LU Han, ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, *et al.* (4459)

Sources and Biogeochemical Processes of Nitrate in the Laolongdong Karst Underground River Basin, Chongqing ····· WANG Yu-yang, YANG Ping-heng, ZHANG Jie-ru (4470)

Succession Pattern and Consequences of the Dominant Species During Cyanobacterial Bloom and Its Influencing Factors ····· OUYANG Tian, ZHAO Lu, JI Lu-lu, *et al.* (4480)

Structural Characteristics of Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in a Group of Drinking Water Reservoirs by Water Transmission from Modaomen Waterway in Zhuhai ····· ZHANG Mo-li, WANG En-rui, CHANG Sheng, *et al.* (4489)

Effects of Nutrients on the Growth of *Microcystis aeruginosa* and Bacteria in the Phycosphere ····· LÜ Ping, LI Hui-li, XU Yong, *et al.* (4502)

Effect of Aging on Adsorption of Tetracycline by Microplastics and the Mechanisms ····· WANG Lin, WANG Shu-xin, ZENG Xiang-ying, *et al.* (4511)

Effect of Colloids in Sediment and Soil on Their Sorption Behavior of Chloramphenicol ····· YAN Cai-xia, LUO Yan-qing, NIE Ming-hua, *et al.* (4522)

Historical Antibiotic Stress Changed the Effects of Sulfamethoxazole and Trimethoprim on Activated Sludge: ARGs and Potential Hosts ····· ZHANG Zhong-xing, FAN Xiao-yan, LI Xing, *et al.* (4536)

Spatial Distribution and Sources of Heavy Metals in Soil of a Typical Lead-Zinc Mining Area, Yangshuo ····· CHEN Meng, PAN Yong-xing, HUANG Yi-xiang, *et al.* (4545)

Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Baiyangdian Lake ····· ZHENG Fei, GUO Xin, TANG Ming-yang, *et al.* (4556)

Spatial Differentiation and Influencing Factor Analysis of Soil Heavy Metal Content at Town Level Based on Geographic Detector ····· GONG Cang, WANG Liang, WANG Shun-xiang, *et al.* (4566)

Heavy Metal Emissions from Coal-fired Power Plants and Heavy Metal Pollution Characteristics and Health Risks in Surrounding Soils ····· CHE Kai, CHEN Chong-ming, ZHENG Qing-yu, *et al.* (4578)

Enrichment Factors, Health Risk, and Source Identification of Heavy Metals in Agricultural Soils in Semi-arid Region of Hainan Island ····· YANG Jian-zhou, GONG Jing-jing, WANG Zhen-liang, *et al.* (4590)

Speciation and Pollution Assessment of Heavy Metals in Mangrove Surface Sediments in Jiulong River Estuary ····· ZHANG Hua-lan, YU Rui-lian, WAN Rui-an, *et al.* (4601)

Status of Heavy Metal in Organic Fertilizers in Main Tea Growing Regions of China ····· YI Xiao-yun, FANG Li, YANG Xiang-de, *et al.* (4613)

Accumulation Characteristics and Sources of PAEs in Agricultural Soils in Gansu Province ····· CHEN Yu-yu, ZHANG Guang-quan, ZHANG Yang, *et al.* (4622)

Distribution Characteristics of Soil Phosphorus Forms and Phosphatase Activity at Different Altitudes in the Soil of Water-Level-Fluctuation Zone in Pengxi River, Three Gorges Reservoir ····· GAO Yi-lun, FANG Fang, TANG Zi-chao, *et al.* (4630)

Characteristics of Soil Organic Carbon Components and Their Correlation with Other Soil Physical and Chemical Factors in Cotton Fields with Different Continuous Cropping Years in the Oasis on the Northern Edge of Tarim Basin ····· LI Xin-zhu, GONG Lu, TANG Jun-hu, *et al.* (4639)

Response of Soil Respiration Rates to Soil Temperature and Moisture at Different Soil Depths of *Caragana korshinskii* Plantation in the Loess-Hilly Region ····· SUN Ya-rong, WANG Ya-juan, ZHAO Min, *et al.* (4648)

Influence of Biochar Application on Soil Nitrate Leaching and Phosphate Retention: A Synthetic Meta-analysis ····· JIANG Zhi-xiang, CUI Shuang, ZHANG Xin, *et al.* (4658)

Role and Mechanism of Low Molecular-Weight-Organic Acids in Enhanced Phytoremediation of Heavy Metal Contaminated Soil ····· FANG Zhi-guo, XIE Jun-ting, YANG Qing, *et al.* (4669)

Remediation Effect and Mechanism of Inorganic Passivators on Cadmium Contaminated Acidic Paddy Soil ····· ZHANG Jian, KONG Fan-yi, LU Sheng-gao (4679)

Mechanism of Lead-zinc Enrichment and Resistance of Spent Mushroom Compost to Lead-Zinc Slag in *Koelreuteria paniculata* ····· XIE Tian-zhi, CHEN Yong-hua, SU Rong-kui, *et al.* (4687)

Phosphorus Enrichment Efficiency of CaO_2@FA Composites and the Effect of Its Recovered Material on Soil Improvement ····· YUE Wei, LI Da-peng, WU Ling-yu, *et al.* (4697)

Effects of Early Rice Straw Returning with Reducing Potassium Fertilizer on Late Rice Yield and Soil Fertility ····· HUANG Qiao-yi, HUANG Jian-feng, HUANG Xu, *et al.* (4706)

Effects of Continuous Straw Returning with Chemical Fertilizer on the Carbon Pool and Crop Yield of Rice-Rape Rotation Soils ····· CAI Ying, FU Si-wei, ZHANG Bo-rui, *et al.* (4716)

Effects of Chemical Fertilizer Reduction Combined with Straw Application on Diazotrophic Communities in a Double Rice Cropping System ····· CHEN Kai-peng, WEI Ju-xian, CHEN Dan, *et al.* (4725)

Impacts of Co-application of Chemical Fertilizer Reduction and Organic Material Amendment on Fluvo-aquic Soil Microbial N-cycling Functional Gene Abundances and N-converting Genetic Potentials in Northern China ····· LI Sheng-jun, HU He, LI Gang, *et al.* (4735)

Response Characteristics of Soil Microbial Community Under Long-term Film Mulching ····· HU Zhi-e, XIAO Mou-liang, DING Ji-na, *et al.* (4745)

Effects of Long-term Straw Returning on Fungal Community, Enzyme Activity and Wheat Yield in Fluvo-aquic Soil ····· MA Lei, LI Yan, WEI Jian-lin, *et al.* (4755)

Effects of Soil Amendments on the Bacterial Diversity and Abundances of Pathogens and Antibiotic Resistance Genes in Rhizosphere Soil Under Drip Irrigation with Reclaimed Water ····· CUI Bing-jian, CUI Er-ping, LIU Chun-cheng, *et al.* (4765)

Effect of Nitrogen on the Phytoremediation of Cd-PAHs Co-contaminated Dumpsite Soil by Alfalfa (*Medicago sativa* L.) and on the Soil Bacterial Community Structure ····· LI Yi-jia, MA Jun-wei, LI Yu-qian, *et al.* (4779)

Effect of Antibiotic-Degrading Bacteria on Maturity and Bacterial Community Succession During Pig Manure Composting ····· LI Wei-lin, ZHANG Xin, MA Jun-wei, *et al.* (4789)