

机动车轮胎磨损颗粒物化学组分特征研究

吴琳¹, 张新峰², 门正宇¹, 张静³, 常俊雨¹, 张宝玺¹, 毛洪钧^{1*} (1.南开大学环境科学与工程学院, 天津 300071; 2.中国汽车技术研究中心有限公司, 天津 300300; 3.天津天滨瑞成环境技术工程有限公司, 天津 300190)

摘要: 为研究机动车道路行驶过程中轮胎磨损排放的颗粒物理化特性, 利用轮胎轮廓仿真磨耗仪, 对国内主流 17 种轮胎胎面进行仿真磨耗实验, 获得颗粒物样品, 提取并检测其中 18 种元素和 20 种多环芳烃(PAHs)的含量。结果显示, 元素和 PAHs 含量因轮胎品牌和速度等级的不同而差异显著。18 种元素平均含量为 (99.04 ± 68.43) mg/g, 占样品总重的 9.90%, 其中 Si (88.97 ± 67.85) mg/g、Zn (6.77 ± 1.64) mg/g 和 Na (1.05 ± 0.75) mg/g 的平均含量均超过 1 mg/g, Cd 的含量最低, 为 (0.43 ± 0.31) μg/g。20 种 PAHs 含量之和($\Sigma 20\text{PAHs}$) 在 12.13 ~ 433.64 μg/g, 平均为 (94.13 ± 110.18) μg/g, PY 的平均含量最高 (30.98 ± 31.27) μg/g, 其次是 CHR、BaP、FA、PHE 和 BghiP, 平均含量最低的是 AC (0.58 ± 0.2) μg/g; 从环数看, 以 4 环 PAHs 为主(占 $\Sigma 20\text{PAHs}$ 的 45.03%~67.93%), 其次为 3 环(平均含量为 15.45%)和 5 环(平均含量为 12.62%)。总体来说, 国外品牌轮胎样品中元素和 PAHs 含量略高于国内品牌, 而主要 PAHs 环数略低于国内品牌。

关键词: 轮胎; 磨损; 颗粒物; 元素; 多环芳烃

中图分类号: X513 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2020)04-1486-07

The chemical component characteristics of vehicle tire wear particles. WU Lin¹, ZHANG Xin-feng², MEN Zheng-yu¹, ZHANG Jing³, CHANG Jun-yu¹, ZHANG Bao-xi¹, MAO Hong-jun^{1*} (1.College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China; 2.China Automotive Technology and Research Center Co., Ltd., Dongli District, Tianjin 300300, China; 3.Tian-bin Rui-cheng Environmental Technology and Engineering Co., Ltd., Tianjin 300190, China). *China Environmental Science*, 2020,40(4): 1486~1492

Abstract: To obtain the physical and chemical characteristics of particulate matter emitted from the tire wears of on-road vehicles, 17 kinds of selected tire tread were worn away by use of the tire profile simulation abrasion instrument. Tire wear particle samples were obtained, and 18 kinds of elements and 20 kinds of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) were extracted and detected. The results showed that the content of elements and PAHs varied significantly with different brand and speed level. The average content of 18 kinds of elements was (99.04 ± 68.43) mg/g, accounting for 9.90% of the samples according to weight percentage, the average content of Si (88.97 ± 67.85) mg/g, Zn (6.77 ± 1.64) mg/g and Na (1.05 ± 0.75) mg/g exceeded 1 mg/g, the average content of Cd was (0.43 ± 0.31) μg/g. The total content of 20 kinds of PAHs changed from 12.13 to 433.64 μg/g, the average content was (94.13 ± 110.18) μg/g. The most abundant component was PY (30.98 ± 31.27) μg/g, followed by CHR, BaP, FA, PHE and BghiP. Among them, AC contributes the lowest share with (0.58 ± 0.2) μg/g on average. In term of the ring number, 4-ring PAHs were the major contents (accounting for 45.03%~67.93%), followed by 3-ring (15.45% on average) and 5-ring (12.62% on average) PAHs. In general, the contents of elements and PAHs in tires of foreign brands were slightly higher than those of domestic brands, while the numbers of PAHs rings were slightly lower than those of domestic brands.

Key words: tire; wear; particle; elements; PAHs

多个城市大气颗粒物源解析结果表明^[1-2], 机动车排放已成为细颗粒物(PM_{2.5})的主要来源之一, 其带来的环境污染与人群健康影响受到越来越多的关注。广义的机动车排放不仅包括尾气排放, 还包括轮胎、刹车片磨损等非尾气排放。研究表明, 轮胎磨损颗粒物(TWPs)及其衍生物在大气总悬浮颗粒物中的占比最高可达 16%, 其中 PM₁₀ 可达 10%, PM_{2.5} 可达 3%^[3]。轮胎磨损速率受驾驶习惯、路面特征、天气等因素影响, 轿车的每条轮胎在报废之前平均行驶 4 万 km, 其磨损速率约为 0.006~0.09 g/km^[4]。据

统计, 世界上每年约有 15 亿条轮胎因为磨损而报废, 由此产生的颗粒物排放对大气环境特别是城市空气污染的贡献不容忽视。

目前国内外关于机动车尾气排放污染物特征的研究相对全面与深入, 而对非尾气排放尤其是轮胎磨损排放的研究尚处于起步阶段, 轮胎排放颗粒物的理化特征有待进一步深入研究。目前已有的研

收稿日期: 2019-10-08

基金项目: 天津市自然科学基金资助项目(18JCYBJC23700)

* 责任作者, 教授, honjunm@nankai.edu.cn

究,多通过收集道路车道内尘(包含轮胎磨损排放的颗粒物)和路边尘(有研究表明距离道路 30m 处收集的尘中没有 TWP_s 存在^[4])进行对比分析^[5-8],然而此方法获得的样品实际是轮胎颗粒、刹车尘和道路尘的混合尘,利用实验室滚动阻力机械开展单个轮胎磨损实验的研究相对较少,TWP_s 的组分不清晰,数据量不足^[9-10].

基于此,本研究对目前我国在售的 17 种轮胎进行机械磨损实验,获得 TWP_s 样品,并对其组分进行分析,以期获得不同类型轮胎中元素和多环芳烃(PAHs)的分布特征.

1 实验设计与样品分析

1.1 样品采集

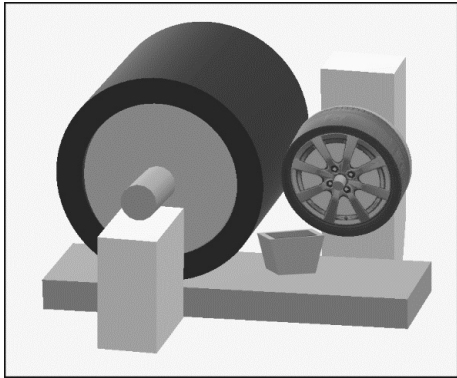


图 1 轮胎磨损示意图
Fig.1 Tire Wear working diagram

表 1 实验选用的 17 种轮胎参数

Table 1 Parameters of 17 tires selected in this experiment

编号	额定负荷(kg)	规格型号	速度等级	品牌
1	650	215/55R16	W	国外品牌
2	630	205/60R16	V	
3	615	195/55R16	H	
4	615	205/55R16	R	
5	615	205/55R16	T	
6	710	215/60R17	T	
7	1250	215/75R16C	H	
8	925	235/55R19	H	
9	690	215/60R16	H	国内品牌
10	850	225/65R17	V	
11	580	165/70R14	V	
12	615	205/55R16	V	
13	670	215/55R17	V	
14	710	215/60R17	H	
15	710	205/60R16	V	
16	850	275/35R20	V	
17	800	245/1.45ZR18	W	

注:速度等级表示轮胎在规定条件下承载规定负荷的最高速度,其中:R (170km/h),T (190km/h),H (210km/h),V (240km/h),W (270km/h).

本研究利用轮胎轮廓仿真磨耗仪(型号 RRM-1),对轮胎胎面进行仿真磨耗实验(见图 1).首先对样品轮胎胎面轮廓进行扫描分析,获得轮胎宽度及花纹深度参数,然后设定花纹深度磨耗率为 50%,按照仪器计算的速度,使用砂轮对胎面进行自动磨耗,最后通过设置在磨耗接触面正下方的集尘装置收集实验过程中产生的磨耗尘,从而得到 TWP_s 样品.本实验所选用的样品为市场上常见的小型客车用轮胎,共 17 种来自国内外不同厂家的产品,具体参数见表 1.

1.2 样品处理与分析

本研究分析了样品中 18 种元素含量,除 As、Si 2 种半金属元素外,其余均为金属元素.每组样品均设置一个平行样,以检验分析过程中待分析样品是否遭受污染.Sr、Zr、Ti、Mg、Fe、Ca、Al、Si 等 8 种元素使用美国 Agilent 公司的 VISTA-MPX 等离子光谱仪(ICP-OES)进行分析.样品前处理方法为:将待测样品 500mg 放入镍坩埚中,在马弗炉中低温升至 300℃,恒温 40min,逐渐升温至 530~550℃灰化,直至灰化完全.取出已灰化好的样品,冷却,无水乙醇润湿后,加入 0.2g 固体氢氧化钠,放入马弗炉中在 500℃熔融 10min,取出冷却,加热水在电热板上煮沸提取,移入预先盛有 2mL 盐酸溶液的塑料管中,用 2%的盐酸溶液冲洗坩埚,以水稀释至 10mL,摇匀待测.其余 10 种元素使用美国 Agilent 公司的 Agilent 7500a 型电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)进行分析.样品前处理方法为:将待测样品 500mg 放入 100mL 带盖的聚四氟乙烯烧杯中,使用经校正的移液管,加入 5mL 稀硝酸(pH=5.6),加一滴 HF(pH=5.3),确认萃取溶液体积足以覆盖全部样品,在控温电热板上于 220℃下加热回流 2.5h 后,利用余温用稀盐酸(pH=5.4)5mL 浸取,移入 10mL 塑料比色管中,以纯水稀释至标线,摇匀待测.

本研究使用美国 Agilent 公司的 7890A-5975C 气相色谱质谱联用仪(GC-MS)检测样品中 20 种 PAHs 含量.样品前处理方法为:称取 100mg 样品,用清洗过滤纸包好,加入 100 μL 替代物使用液,放入快速溶剂萃取管中.萃取溶剂为丙酮/正己烷(1/1=v/v)混合溶液,萃取温度为 125℃,压力为 10.3MPa.预加热 3min,然后加热 5min,静态萃取 5min.再用 60%溶剂冲洗并 70s 氮气吹脱.萃取过程循环 2 次.将萃取液

转移至浓缩瓶中进行浓缩,之后将溶剂置换为正己烷,并浓缩至 1.0mL 以下.利用硅胶柱(3mL/500mg)对浓缩后的样品进行净化,用二氯甲烷/正己烷(V/V=1/1)进行洗脱,将洗脱液的溶剂置换为正己烷,最后浓缩定容至 1.0mL,摇匀待测.

分析结果及数据通过 Origin 2018 软件进行分析绘制.

2 结果与分析

2.1 轮胎磨损颗粒物样品中各元素含量特征

2.1.1 各元素的平均含量 如图 2 所示,18 种元素的总含量为 11.56 ~ 193.13mg/g,平均为(99.04 ± 68.43) mg/g.各个元素的平均含量差距较大,其中 Si 的平均含量最高,达到(88.97 ± 67.85) mg/g;Zn 次之,平均含量为(6.77±1.64)mg/g;Cd 的平均含量最低,为(0.43± 0.31)μg/g.除 Si、Zn 和 Na(1.05 ± 0.75) mg/g 之外的 15 种元素,其平均含量均低于 1mg/g.18 种元素平均含量占到 9.90%.国外品牌样品中 18 种元素质量平均占比为 10.96%,略高于国内品牌(质量平均占比 8.97%).

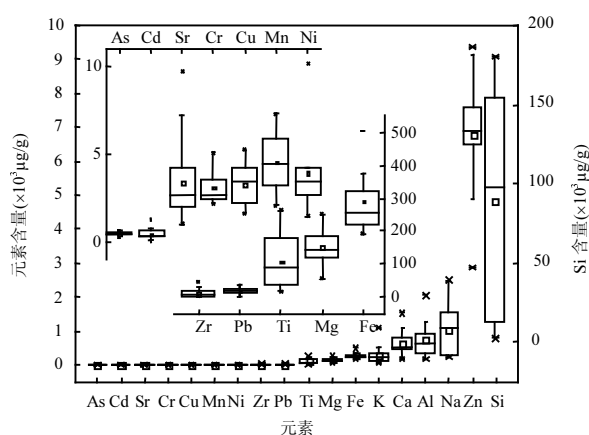


图2 TWP样品中18种元素的含量特征

Fig.2 Characteristics of 18 elements in TWP samples

Si、Al、Fe、Ca、Na、K、Mg 是主要的地壳元素,在 TWP 样品中,上述 7 种地壳元素平均占样品质量的 9.21%,平均占 18 种元素的 93%,其中,国外品牌轮胎样品中地壳元素占比为 94%,高于国内品牌的占比(92%).在除地壳元素以外的微量元素中,Zn 的平均含量最高,占有微量元素的 98%,其次为 Ti(1.6%).

国外品牌轮胎样品中 Mn、Zr、Ti、K、Al、Na、

Si 等 7 种元素的平均含量高于国内品牌,而其他元素的平均含量均低于国内品牌(图 3).其中,Zr 的含量差距最大,国外品牌样品中 Zr 的平均含量是 15.72μg/g,是国内品牌(Zr:6.96μg/g)的 2.26 倍;K、Al 和 Na 的含量差距也较大,国外品牌分别是国内品牌的 1.67 倍、1.38 倍和 1.43 倍.国内外不同品牌轮胎中元素含量差异明显,说明产品生产配方存在较大不同,这可能与生产商所在地的行业标准与产品性能等因素有关.

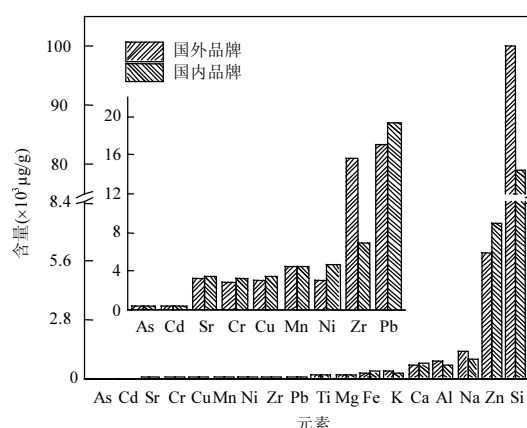


图3 国内、外轮胎品牌样品中各元素平均含量对比

Fig.3 Average contents of each element in domestic and foreign brand samples

表 2 汇总了其它相关研究中 TWP 元素的含量.从中可明显看出,轮胎和轮胎碎片中含有大量的 Zn.氧化锌(ZnO)是汽车轮胎的重要添加剂.ZnO 除了硫化作用外,还能大大提高橡胶的热传导性能,有助于轮胎的散热,保证行车安全.ZnO 添加剂同时也阻止了霉菌生物或紫外线对橡胶的侵蚀.Smolders 等^[20]检测到汽车轮胎碎屑中(<100μm)Zn 的含量为 11.4mg/g,卡车轮胎碎屑中 Zn 的含量较高,为 24.1mg/g;Councell 等^[18]通过汇总 13 项研究,发现轮胎胎面中 Zn 的含量占到 0.04%~1.55%;根据 Ahlbom 等^[21]的研究,瑞典城市轮胎磨损对空气总悬浮颗粒物中 Zn 的贡献量占 10%.虽然环境中有许多不同的来源,但它已被用作轮胎磨损颗粒示踪元素.Fauser^[22]认为可萃取的有机 Zn(存在于 Zn 促进剂配合物中)可作为轮胎磨损颗粒示踪物,这是由于除发动机润滑剂外,轮胎磨损是空气颗粒中有机 Zn 的重要贡献源,可萃取的有机 Zn 在轮胎橡胶中的含量约为 1.2g/kg.本研究 Zn 的含量为(6.77±1.64) mg/g,相较于已有研究报道,位于中等水平.总体来说,本研究

中各种元素的含量略低于美国^[12,19]和日本^[17]的结果,而略高于其他几项研究,尤其是 Na、Si、Al 和 Ca 的含量明显较高。

2.1.2 速度等级与元素含量的关系 轮胎主要由高分子复合材料及其他添加剂构成,温度升高会加速轮胎橡胶老化.当机动车高速行驶时,轮胎表面与路面摩擦会导致整个胎面温度升高,从而使磨损加剧,故轮胎均有其设计的临界速度,即轮胎的速度等级.速度等级越高,对轮胎设计及其对材料的要求也就越高,这也就导致了不同速度等级的 TWP_s 组分之间存在一定的差异.本研究中选用的 17 个轮胎样品,涵盖了 R、T、H、V 和 W5 种速度等级,其中,国内轮胎品牌样品只有 H、V 和 W3 个速度等级的样品。

如图 4(a)所示,国内品牌中 As、Cd、Sr、Ni、Mg、Fe、Ca 和 Zn 在速度等级 V 中含量高于 H 和 W,而 Cu、Al、Na 和 Si 则相反,在速度等级 V 中含量最低.Cr、Mn、Zr、Pb 和 K 含量随着速度等级的增加(H<V<W)而降低,而 Ti 含量随着速度等级的增加而增加.如图 4(b)所示,国外品牌中 As、Ni、Pb 和 Zn 元素含量随速度等级的增加(R<T<H<V<W)呈现“M”型变化趋势,Sr、Mn、Zr、Ti、Mg、Fe、Ca、Al、Na 和 Si 元素含量则随速度等级的增加呈现“W”型变化趋势.此外,Cd 呈现“∧”型变化趋势,在速度等级 H 中含量最高;Cr 和 Cu 呈现“∨”型变化趋势,分别在速度等级 V 和 T 中含量最低;K 含量则随速度等级的增加而降低.结果表明,不同速度等级的轮胎中各种元素的含量差异性明显,并随着速度等级的增加呈现出不同的变化趋势.这说明为满足不同速度等级的性能参数,轮胎配料有明显的不同,这直接导致了 TWP_s 中元素含量存在较大差异。

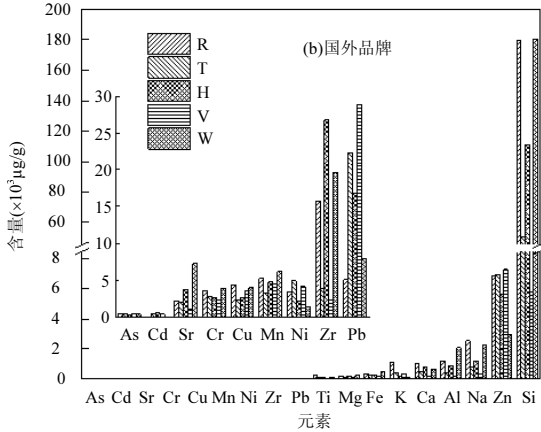
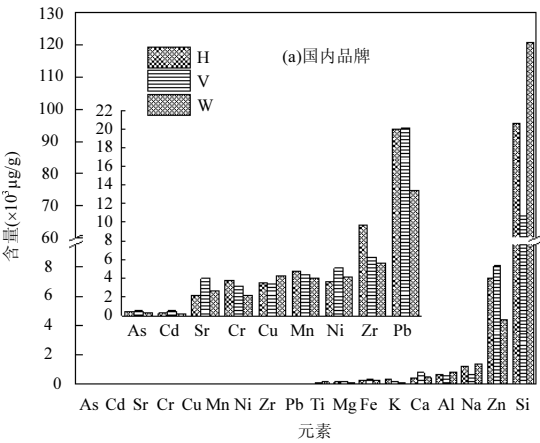


图 4 国内外轮胎品牌不同速度等级 TWP_s 中各元素平均含量
Fig.4 Average contents of each element in the samples of different speed grades of domestic andforeign brands

2.2 轮胎样品中 PAHs 含量特征

表 3 TWP_s 中 PAHs 的含量(μg/g)
Table 3 The content of PAHs in TWP_s (μg/g)

PAHs	平均值	方差	最大值	最小值
NA	0.60	0.25	1.15	0.31
1-Me	1.95	0.70	3.48	1.21
2-Me	0.96	0.33	1.72	0.61
ACL	2.09	2.23	8.19	0.70
AC	0.58	0.20	0.98	0.33
FL	1.04	0.54	2.81	0.56
PHE	4.90	5.21	22.54	1.48
AN	0.75	1.08	4.72	0.20
FA	8.75	8.68	25.21	1.18
PY	30.98	31.27	87.86	4.23
BaA	1.91	3.93	14.09	0.01
CHR	12.85	24.56	82.08	0.13
BbFA	0.76	1.39	5.90	0.04
BjFA	2.15	5.01	20.84	0.02
BkFA	2.58	5.75	23.95	3.63E-03
BeP	2.61	4.19	16.73	0.08
BaP	11.67	31.31	130.30	0.06
IND	0.97	1.60	6.19	4.50E-03
DBA	1.24	2.20	9.10	0.01
BghiP	4.78	6.23	20.27	0.03
ΣPAHs	94.13	110.18	433.64	12.13

2.2.1 PAHs 的含量 表 3 为 17 个 TWP_s 样品中 PAHs 的含量统计结果.结果表明,20 种 PAHs 均有检出,其含量之和(Σ20PAHs)在 12.13~433.64μg/g 范围内,平均含量为(94.13±110.18)μg/g;各样品之间差异较大,国外品牌轮胎中 PAHs 的平均含量为(74.88±65.64)μg/g,低于国内轮胎品牌的(111.24±140.75)μg/g.其中,PY 的平均含量最高达(30.98±31.27)μg/g,含量范围为 4.23~87.86μg/g;其次是 CHR、BaP、FA、

PHE 和 BghiP,平均含量分别为(12.85±24.56),(11.67±31.31),(8.75±8.68),(4.90±5.21)和(4.78±6.23)μg/g;平均含量最低的是 AC 为(0.58±0.2)μg/g,含量范围为0.33~0.98μg/g;此外,NA、2-Me、AN、BbFA、IND 的平均含量也相对较低,均低于 1μg/g.

表 4 为本研究及其他相关研究 TWP 中 PAHs 的含量汇总.Rogge 等^[23]发现 TWP 中 PAHs 的含量约为 200μg/g;Oostergo^[14]检测了日本市场上轮胎橡

胶中 10 种 PAHs 的含量,其含量范围为 0.8~34μg/g.PY 在本研究及其他大部分研究中的含量最高;PHE、FA 和 BghiP 的平均含量均小于美国^[23-24]和日本^[14]的研究,而本研究中 BaP 的含量高于其他研究,是瑞典^[10]研究中 BaP 含量的 5.3 倍,是美国^[24]的 3 倍.综上,本研究在选定的轮胎样品中检测到了更高的 PAHs 含量,且具有强致癌效应的 BaP 的含量远高于其他国家的研究.

表 2 其他研究中 TWP 元素的含量汇总(μg/g)
Table 2 Contents summary of TWP elements in other studies

元素	本研究		英国 ^[11]	美国 ^[12]	英国 ^[13]	日本 ^[14]	法国 ^[15]	新西兰 ^[16] (2000 年)			日本 ^[17]	美国 ^[18]	美国 ^[19]
	范围	平均值	(1990 年)	(1991 年)	(1997 年)	(1997 年)	(1999 年)	乘用车	轻型货车	重型货车	(2004 年)	(2004 年)	(2010 年)
Al	182~2048	725.5	—	470	80.9~181	—	—	7~129	9~13	51~139	27000	—	28200
Ca	166~1537	647.5	—	2000	113~562	—	—	100~1680	60	150~230	14000	—	65300
Cd	0.04~1.29	0.4	0.28~4.96	—	0.56~1.07	1.5	2.6	<0.05~0.34	<0.5~0.10	0.28~0.56	—	—	—
Cr	2.17~5.10	3.1	—	30	2.46~6.73	3	—	<1~2	<1	1~2	—	—	—
Cu	1.61~5.25	3.3	5.5~29.3	490	0.04~0.4	—	1.8	<1~2	1~3	1~2.5	—	—	634
Fe	192~505	291.4	—	4600	2.12~113.66	553	—	40~220	100~110	195~210	—	—	27700
K	59.90~1104	279.3	—	380	—	180	—	110~410	<50~120	200~430	—	—	5810
Mg	55.80~252	152.9	—	—	39.17~105.5	32	—	<4~37	5~37	10~15	—	—	14500
Mn	2.04~7.31	4.5	—	100	—	2	—	0.8~2.5	0.7~1.0	3.2~6.1	—	—	607
Na	226~2493	1050.1	—	—	—	610	—	120~530	<20~80	530~590	—	—	4750
Ni	1.46~10.20	4.0	—	50	—	—	—	<1~3	<1	<1	—	—	52.6
Pb	3.38~35.30	18.3	—	160	0.99~38.94	—	6.3	1~5.7	0.8~1.5	3.2~9.7	—	—	—
Si	2593~180338	88967.5	—	—	—	—	—	—	—	—	28000	—	87000
Ti	15.40~264	108.2	—	560	—	195	—	—	—	—	—	—	1390
Zn	2876~9372	6771.6	—	430	8378~13494	10250	10250	5650~9640	1190~3640	13800~180300	174000	400~15500	3000

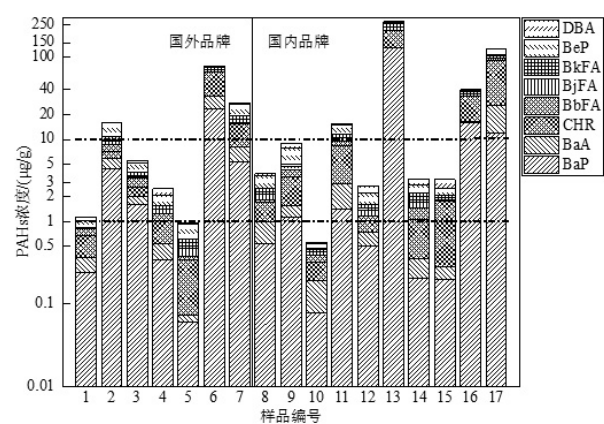


图 5 不同品牌的 TWP 中 8 种 PAHs 的含量
Fig.5 The contents of 8 kinds of PAHs in TWP

根据欧盟 No 1907/2006 法规(即 REACH 法规),自 2010 年 1 月 1 日起,含有 BaP 超过 1 μg/g,BaP、BeP、BaA、CHR、BbFA、BkFA、BjFA、DBA 这 8 种 PAHs 的总含量超过 10 μg/g 的填充油不允许在生产轮胎或轮胎零件时使用.为此本研究对上述 8

种 PAHs 的含量进行了分析,结果如图 5 所示.

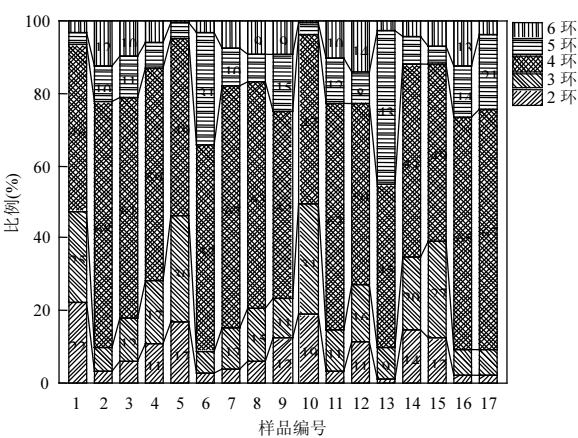


图 6 样品中 PAHs 不同环数之间的比例关系
Fig.6 The proportion of different PAHs cycles in the sample

可以看出,不同品牌之间 PAHs 的含量差距较大,进口品牌 TWP 中所含上述 8 种 PAHs 的平均总含量低于国产品牌.国外轮胎品牌中,样品 2、3、6 和 7

的轮胎碎屑中 BaP 的含量超过了 1μg/g,其中样品 6 超标最严重,达到 23.77μg/g;样品 2、6 和 7 的轮胎碎屑中上述 8 种 PAHs 的含量之和超标,样品 6 超标最严重,为 78.15μg/g,样品 7 次之,为 27.80μg/g.国产品牌轮胎中,样品 9、11、13、16 和 17 的轮胎碎屑中 BaP 的含量超标,其中样品 13 超标最为严重,为 130.30μg/g,其次是样品 16 和 17,分别超标 16 倍和 12 倍;8 种 PAHs 含量之和超标的轮胎样品包括:样品 11、13、16 和 17,分别超标 15 倍、270 倍、40 倍和 127 倍.总体来看,国产轮胎品牌因为不受欧盟 REACH 法规的限制,超标情况比国外品牌严重,特别是样品 13 中 BaP 含量以及 8 种 PAHs 之和超标

问题最为突出.

2.2.2 PAHs 的环数 根据苯环数的不同,可将 TWP_s 中的 PAH_s 分为 5 类:2 环(NA、1-Me 和 2-Me)、3 环(AC、ACL、FL、PHE、AN)、4 环(FA、PY、CHR 和 BaA)、5 环(BbFA、BkFA、BjFA、BaP、BeP 和 IND)和 6 环(DBA 和 BghiP)PAH_s.

从图 6 可看出,各样品中均为 4 环 PAH_s 占比最高(45.03%~67.93%);3 环和 5 环 PAH_s 的平均占比接近,分别为 15.45%和 12.62%;6 环 PAH_s 的平均占比最低,为 6.78%.受欧盟 REACH 法规限制,国外品牌中 5 环及以上的 PAH_s 占比相较国产品牌整体略低.

表 4 其他研究中 TWP_s 中 PAH_s 的含量(μg/g)
Table 4 Contents of PAH_s in TWP_s in other studies

PAHs	本研究		美国 ^[23] 1993	美国 ^[24] 1994	美国 ^[25] 1997	日本 ^[14] 1997	泰国 ^[26] 2007	印度 ^[27-28]	瑞典 ^[10]	中国 ^[29]
	范围	平均值	年(乘用车)	年(乘用车与 重型货车)	年(乘用车)	年(乘用车)	年(重型货车)	2010 年	2012 年	2013 年
NA	0.31~1.15	0.6	—	486~816	—	—	—	—	—	—
AC	0.70~8.19	2.09	—	562~861	—	—	<10	—	—	—
ACL	0.33~0.98	0.58	—	290~2446	—	—	—	—	—	—
FL	0.56~2.81	1.04	—	187~261	—	—	—	—	—	—
PHE	1.48~22.54	4.90	11.8	238~253	—	18	<10	5.3±0.1	3.7	—
AN	0.20~4.72	0.75	—	50~56	—	1.6	—	—	0.5	—
FA	1.18~25.21	8.75	11.1	339~458	—	30	<10	4.3±0.1	11.4	—
PY	4.23~87.86	30.98	54.1	34~452	41.4	—	6.3	26.4±1.7	32.4	—
BaA	0.01~14.09	1.91	—	82~102	—	3.8	—	—	—	—
CHR	0.13~82.08	12.85	8.2	71~92	—	13.5	—	—	—	n.d.~0.004
BbFA	0.04~5.90	0.76	—	70~88	—	—	—	—	—	—
BjFA	0.02~20.84	2.15	—	—	—	—	—	—	—	—
BkFA	0.00~23.95	2.58	—	74~99	—	0.8	—	—	—	—
BeP	0.08~16.73	2.61	5.2	—	—	—	—	—	—	n.d.~0.009
BaP	0.06~130.30	11.67	3.9	85~114	—	6.4	—	—	2.2	n.d.~0.003
IND	0.00~6.19	0.97	—	52~86	—	—	—	—	—	—
DBA	0.01~9.10	1.24	—	—	—	—	—	—	—	n.d.~0.018
BghiP	0.03~20.27	4.78	—	66~159	—	34	<10	17.8±1.6	12.7	—

注:n.d.为未检出.

3 结论

3.1 17 个 TWP_s 样品中不同元素的平均含量差异性较大,Si 的平均含量最高,为 168.0mg/g,Cd 的平均含量最低,为 0.8mg/g.18 种元素的平均含量占 TWP_s 质量的 9.90%,国外品牌轮胎略高于国内品牌.

3.2 20 种 PAH_s 含量之和在 12.13~433.64μg/g 之间,其中 PY 平均含量最高,为(30.98±31.27)μg/g,AC 含量最低为(0.58±0.2)μg/g;NA、2-Me、AN、BbFA 和

IND 的平均含量低于 1μg/g.

3.3 从 PAH_s 环数上分析,TWP_s 中 4 环 PAH_s 占比最高,为 45.03%~67.93%,6 环平均占比最低,为 6.78%.

参考文献:

[1] 陈多宏,李 梅,黄 渤,等.区域大气细粒子污染特征及快速来源解析 [J]. 中国环境科学, 2016,36(3):651-659.
Chen D H, Li M, Huang B, et al. The pollution characteristics and source apportionment of regional atmospheric fine particles [J]. China

- Environmental Science, 2016,36(3):651-659.
- [2] Zhao P S, Dong F, He D, et al. Characteristics of concentrations and chemical compositions for PM_{2.5} in the region of Beijing, Tianjin, and Hebei, China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013,13:4631-4644.
- [3] Chem Risk, Inc, DIK Inc. State of knowledge report for tire materials and tire wear particles [EB/OL]. <http://www.wbcsd.org/Pages/Adm/Download.aspx?ID=67&ObjectTypeId=7>. 2008,07.
- [4] Anna W, Goran D. 环境中轮胎磨损颗粒的产生及影响 [J]. 轮胎工业, 2014,34(9):528-538.
Anna W, Goran D. Occurrence and effects of tire wear particles in the environment [J]. Tire Industry, 2014,34(9):528-538.
- [5] Adachi K, Tainosho Y. Characterization of heavy metal particles embedded in tire dust [J]. Environment International, 2004,30:1009-1017.
- [6] Harrison R M, Jones A M, Gietl J, et al. Estimation of the contributions of brake dust, tire wear, and resuspension to non-exhaust traffic particles derived from atmospheric measurements [J]. Environmental Science & Technology, 2012,46:6523-6529.
- [7] Panko J M, Chu J, Kreider M L, et al. Measurement of airborne concentrations of tire and road wear particles in urban and rural areas of France, Japan, and the United States [J]. Atmospheric Environment, 2013,72:192-199.
- [8] Lee S, Kwak J, Kim H, et al. Properties of roadway particles form interaction between the tire and road pavement [J]. International Journal of Automotive Technology, 2013,14:163-173.
- [9] Ozaki H, Watanabe I, Kuno K. Investigation of the heavy metal sources in relation to automobiles [J]. Water Air Soil Pollution, 2004, 157:209-223.
- [10] Sadiqsis I, Bergvall C, Johansson C, et al. Automobile tires – a potential source of highly carcinogenic dibenzopyrenes to the environment [J]. Environmental Science & Technology, 2012,46: 3326-3334.
- [11] Hewitt C N, Rashed M B. An integrated budget for selected pollutants for a major rural highway [J]. Science of the Total Environment, 1990, 93(93):375-384.
- [12] 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.
- [13] Brewer P. Vehicles as a source of heavy metal contamination in the environment [D] Berkshire: University of Reading, 1997.
- [14] Oostergo H. Emission of metals and PACs by traffic [R]. Ministry of VROM, 1997.
- [15] 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.
- [16] Limited K M, Kennedy P, Gadd J, et al. Preliminary examination of trace elements in tires, brake pads and road bitumen in New Zealand [EB/OL]. Revised October 2003. <http://transport.govt.nz/assets/Import/Documents/stormwater-inorganic3.pdf>.
- [17] Adachi K, Tainosho Y. Characterization of heavy metal particles embedded in tire dust [J]. Environment International, 2004,30(8): 1009-1017.
- [18] Councell T B, Duckenfield K U, Landa E R, et al. Tire-wear particles as a source of zinc to the environment [J]. Environmental Science & Technology, 2004,38(15):4206-4214.
- [19] Kreider M L, Panko J M, McAtee B L, et al. Physical and chemical characterization of tire-related particles: Comparison of particles generated using different methodologies [J]. Science of the Total Environment, 2010,408(3):652-659.
- [20] Smolders E, Degryse F. Fate and effect of zinc from tire debris in soil [J]. Environmental Science & Technology, 2002,36(17):3706-3710.
- [21] Ahagon A, Kida M, Kaidou H. Aging of tire parts during service. I. Types of aging in heavy-duty tires [J]. Rubber Chemistry and Technology, 1990,63(5):683-697.
- [22] Fauser P. Particulate air pollution with emphasis on traffic generated aerosols [R]. Ed. Riso national laboratory, 1999.
- [23] 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]. Environ. sci.technol, 1993, 27(9):1892-1904.
- [24] Demarini D M, Lemieux P M, Ryan J V, et al. Mutagenicity and chemical analysis of emissions from the open burning of scrap rubber tires [J]. Environmental Science & Technology, 1994,28(1):136-141.
- [25] Reddy C M, Quinn J G. Environmental chemistry of benzothiazoles derived from rubber [J]. Environmental Science & Technology, 1997,31(10):2847-2853.
- [26] Boonyatumanond R, Murakami M, Wattayakorn G, et al. Sources of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in street dust in a tropical Asian mega-city, Bangkok, Thailand [J]. Science of the Total Environment, 2007,384(1):420-432.
- [27] Aatmeeyata, Sharma M. Polycyclic aromatic hydrocarbons, elemental and organic carbon emissions from tire-wear [J]. Science of the Total Environment, 2010,408(20):4563-4568.
- [28] Aatmeeyata, Sharma M. Contribution of traffic-generated nonexhaust PAHs, elemental carbon, and organic carbon emission to air and urban runoff pollution [J]. Journal of Environmental Engineering, 2010, 136(12):1447-1450.
- [29] 董彩玉, 苍飞飞. GC/MS 内标法测定全钢载重子午线轮胎中的多环芳烃含量 [J]. 轮胎工业, 2013,33(2):119-123.
Dong C Y, Cang F F. Determination of PAHs in Truck and Bus Radial Tire by GC/MS and Internal Standard Method [J]. Tire Industry, 2013,33(2):119-123.

作者简介: 吴琳(1981-),女,河北石家庄人,助理研究员,博士,主要从事以机动车排放为核心的大气污染防治研究.发表论文 10 余篇。