

汽车尾气多环芳烃衍生物排放研究进展

周文清^{1,2}, 陈 诚³, 张靖松^{1,2}, 雷超文^{1,2}, 蒋若曼^{1,2}, 潘锁柱^{1,2*}, 暴秀超^{1,2}, 童 勇^{1,2}

¹西华大学汽车与交通学院, 四川 成都

²汽车测控与安全四川省重点实验室, 四川 成都

³中国人民解放军32272部队41分队, 四川 德阳

收稿日期: 2025年3月16日; 录用日期: 2025年4月22日; 发布日期: 2025年5月12日

摘 要

多环芳烃衍生物毒性高、持久性强且难于降解, 是新兴的环境污染物。随着汽车保有量的增长, 汽车尾气已成为多环芳烃衍生物的主要贡献者之一, 得到了国内外学者的广泛关注。鉴于此, 本文基于国内外的研究成果, 针对汽车尾气多环芳烃衍生物排放的理化特征、研究方法以及影响因素进行了梳理和总结。汽车尾气多环芳烃衍生物主要含有毒性远高于母体多环芳烃(PAHs)的硝基多环芳烃(NPAHs)和含氧多环芳烃(OPAHs); 其排放水平与燃料类型、车辆技术水平、汽车发动机运行工况、后处理技术等密切相关。含氧燃料能够降低NPAHs, 但增加OPAHs; 发动机负荷增加, PAHs衍生物排放增加; 车辆技术水平提高以及应用后处理技术, 能够减少PAHs衍生物排放。本文旨在阐明汽车尾气多环芳烃衍生物的排放特征及影响因素, 为汽车排放控制技术开发及排放法规制定提供参考。

关键词

汽车, 衍生物, 硝基多环芳烃, 含氧多环芳烃, 尾气排放

Research Progress on Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Derivatives Emissions from Automobile Exhaust

Wenqing Zhou^{1,2}, Cheng Chen³, Jingsong Zhang^{1,2}, Chaowen Lei^{1,2}, Ruoman Jiang^{1,2}, Suozhu Pan^{1,2*}, Xiuchao Bao^{1,2}, Yong Tong^{1,2}

¹School of Automobile and Transportation, Xihua University, Chengdu Sichuan

²Vehicle Measurement, Control and Safety Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu Sichuan

³Unit 32272 Detachment 41, Deyang Sichuan

Received: Mar. 16th, 2025; accepted: Apr. 22nd, 2025; published: May 12th, 2025

*通讯作者。

文章引用: 周文清, 陈诚, 张靖松, 雷超文, 蒋若曼, 潘锁柱, 暴秀超, 童勇. 汽车尾气多环芳烃衍生物排放研究进展[J]. 可持续发展, 2025, 15(5): 92-102. DOI: 10.12677/sd.2025.155127

Abstract

Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) derivatives have been considered as an emerging environmental pollutant due to their high toxicity, strong durability and difficult degradation. With the increase of automobile ownership, automobile exhaust has become one of the main contributors of the PAHs derivatives. This has received extensive attention from scholars over the worldwide. Therefore, this paper sorted out and summarized the physicochemical properties, research methods and influence factors of PAHs derivatives emissions from automobile exhaust based on the research results over the worldwide. PAH derivatives from automobile exhaust mainly included nitrated PAHs (NPAHs) and oxygenated PAHs (OPAHs), which have much higher toxicity than their parent PAHs. Their emission level was closely related to the fuel type, vehicle technical level, operating condition of vehicle engine, after-treatment technology, etc. Oxygenated fuels could reduce NPAHs, but increase OPAHs. With the increase of engine load, the PAHs derivatives emission increased. The improvement of vehicle technology and the application of after-treatment technology could reduce the PAHs derivatives emission. The purpose of this paper was to clarify the emission characteristics and influence factors of PAHs derivatives from automobile exhaust, which would provide reference for the development of automobile emission control technology and the formulation of emission regulations.

Keywords

Automobile, Derivatives, Nitrated PAHs, Oxygenated PAHs, Exhaust Emissions

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

多环芳烃(PAHs)衍生物为母体多环芳烃结构中氢原子被化学官能团(如:硝基、羰基、烷基等官能团)取代后形成的有机化合物,是一种新兴的环境污染物,具有毒性强、难降解、持久性强等特点[1]。在城市大气环境中,硝基多环芳烃(NPAHs)和含氧多环芳烃(OPAHs)是多环芳烃衍生物的两种主要存在形式。这两种污染物的浓度在环境中虽然低于母体 PAHs,但由于硝基、羰基等极性官能团的存在,使其具有比母体 PAHs 更强的“三致效应”(致癌、致畸和致基因突变)[2]。

在城市大气环境中,化石燃料和生物质的不完全燃烧或热解反应是多环芳烃衍生物的主要来源[3]。近年来,随着机动车保有量的逐步增加和全球化石燃料消耗量的不断增长,汽车尾气排放已成为大气环境中 NPAHs 和 OPAHs 等多环芳烃衍生物的主要排放源[4][5]。Zhao [6]等通过对 54 辆不同排放水平的汽油车(国 I~国 V)进行转鼓试验和发动机台架试验发现,汽油车的 NPAHs 排放因子可达 5.42~7.95 $\mu\text{g}/\text{km}$ 。Ozaki [7]等还分别测试了柴油车和汽油车的多环芳烃衍生物排放因子,通过对比分析发现,柴油车的 NPAHs 排放因子明显高于汽油车。

综上所述,城市大气环境中汽车尾气产生的多环芳烃衍生物排放不容忽视,同时也引起了国内外学者的广泛关注。但现有针对汽车尾气多环芳烃衍生物排放的研究还相对零散,缺乏系统化的研究。鉴于此,本文针对汽车尾气多环芳烃衍生物的理化性质、研究方法以及影响因素等进行梳理和总结,阐明汽车尾气多环芳烃衍生物的排放特征及影响因素,为汽车排放控制技术开发及排放法规制定提供参考。

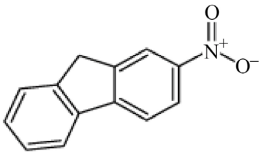
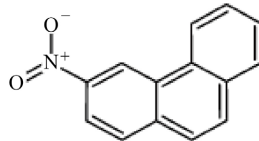
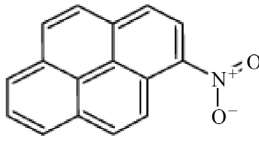
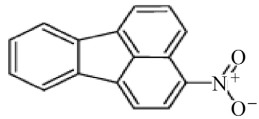
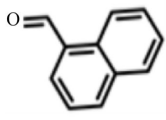
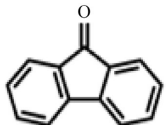
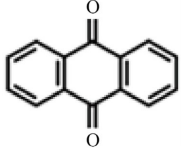
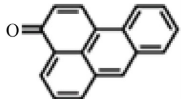
2. 多环芳烃衍生物

2.1. 理化性质及来源

多环芳烃衍生物的形成机制较为复杂、种类多样，迄今通过非靶向检测技术已鉴定的就多达 200 多种[1]。在城市大气环境中，典型的多环芳烃衍生物主要包含 NPAHs 和 OPAHs [8]。NPAHs 是指在多环芳环分子中至少含有一个硝基官能团的多环芳烃衍生物，OPAHs 是指在多环芳环分子中至少含有一个羰基官能团(酮、醌等)的多环芳烃衍生物[9]。大气环境中典型的 NPAHs 和 OPAHs 分子结构及性质如表 1 所示[10]-[12]。

Table 1. The physicochemical properties and molecular structures of typical NPAHs and OPAHs

表 1. 典型 NPAHs 和 OPAHs 的理化性质及分子结构

类型	中文名称	环数	饱和蒸气压(hPa)	水中溶解度(g/L)	分子结构
NPAHs	2-硝基茈	3	5.9×10^{-6}	0.216×10^{-3}	
	3-硝基菲	3	6.75×10^{-5}	1.03×10^{-3}	
	1-硝基芘	4	1.11×10^{-7}	0.118×10^{-4}	
	3-硝基荧蒽	4	7.36×10^{-8}	1.95×10^{-5}	
	1-萘甲醛	2	7.80×10^{-1}	-	
OPAHs	9-茚酮	3	9.33×10^{-1}	-	
	9,10-蒽醌	3	1.5×10^{-7}	1.353×10^{-3}	
	苯并蒽酮	4	1.33	-	

NPAHs 在环境中的来源主要包括汽车尾气、工业废气、光化学反应以及有机物的燃烧[13]。OPAHs 是通过大气中的化学反应、生物降解等途径形成。环境中较高的 NO_x 及 O_3 浓度可促进 PAHs 的降解和 PAHs 衍生物(如 NPAHs 和 OPAHs)的二次形成[11]。因此,汽车尾气排放 NO_x 会对 NPAHs 和 OPAHs 的生成起到积极的促进作用,尤其是,发动机燃烧过程中的含氧、含氮等中间产物有利于 NPAHs 和 OPAHs 等多环芳烃衍生物的生成。另外, Zimmermann 等[14]的研究结果表明,大气环境中,OPAHs 和 NPAHs 的一次来源主要是化石燃料和生物质燃料的不完全燃烧,如汽车尾气排放等;二次来源主要是母体多环芳烃与 OH 、 NO_2 、 NO_3 等自由基发生化学反应而生成的。赵楠[15]的研究还发现,大气中的痕量气相物质(甲醇、乙醇、水等)能够促进 OH 、 NO_2 、 NO_3 等自由基引发的母体 PAHs 向 NPAHs 转化的化学反应,增加 NPAHs 排放浓度,尤其是在相对湿度较大或重度污染天气时,这种转化的可能性更为显著。

汽车尾气中 PAHs 衍生物多以气相形式存在,颗粒相 PAHs 衍生物相对较少。Cao 等[16]通过对 18 辆 6 种类型柴油卡车进行实际道路测试发现,汽车尾气中气相 NPAHs 占总 NPAHs 的比例高达约 97%。另外,汽车尾气排放中 OPAHs 的排放浓度明显高于 NPAHs。刘宗鑫[12]在柴油机台架试验研究中指出,OPAHs 排放浓度与 PAHs 的排放浓度处于同一数量级,而 NPAHs 排放浓度比 PAHs 低一个数量级。此外,车辆类型、车辆控制技术、驾驶循环、燃油类型、取样技术以及分析方法等均对汽车尾气 PAHs 衍生物排放有显著影响[16]。Bakeas [17]等就已证实,柴油车燃用含氧燃料可能会增加醌等含氧自由基浓度增加,从而导致 OPAHs 排放浓度增加。

2.2. 毒性

PAHs 对人体具有致癌、致畸和致突变的“三致效应”。而 NPAHs 和 OPAHs 由于硝基或含氧官能团的存在,使其与生物体内的生物分子更容易结合,从而导致其相对于母体 PAHs 具有更强的“三致效应”[18]。NPAHs 的致癌性可以达到其母体 PAHs 的 10 倍,致突变性甚至可以达到其母体 PAHs 的 10^5 倍[19]。NPAHs 可直接通过硝基还原酶生成活性氮自由基,形成 DNA 加合物,导致基因突变以及癌症[1]。OPAHs 由于具有醌等含氧官能团,会产生活性氧,导致出现氧化应激反应,破坏细胞的氧化还原平衡,因此其具有更为直接的“三致效应”,引发人体过敏性疾病和细胞凋亡[20]。研究表明,环境空气中的 NPAHs 和 OPAHs 可伴随着细颗粒物进入人体肺部和支气管等末端组织,造成潜在健康风险[21]。徐晓白[22]院士研究指出,NPAHs 能够诱导哺乳动物(鼠、狗、猴)致癌,对人体健康存在潜在威胁。另外,学者们还发现 NPAHs 和 OPAHs 能够显著恶化人脐静脉内皮细胞(HUVECs)中内皮一氧化氮酶(eNOS)的活力,抑制 HUVECs 的 NO 生成,增加人体心血管疾病的风险[23]。因此,长期暴露在多环芳烃衍生物环境下对人体健康具有显著的健康威胁。

3. 汽车尾气 PAHs 衍生物排放研究方法

目前,汽车尾气 PAHs 衍生物排放研究方法主要有以下三种,分别为:车载道路试验法、隧道试验法和实验室台架试验法。

3.1. 车载道路试验法

车载道路试验能够清晰地反映汽车在实际道路中的污染物排放情况,已成为汽车尾气排放测试的重要手段之一。近年来,随着便携式排放测试系统(PEMS)技术日臻成熟,PEMS 系统已经逐渐应用于汽车尾气 PAHs 衍生物的排放测试。因此,车载道路试验法已成为真实道路汽车尾气污染物排放测试的首选技术手段。

在车载道路试验中,通常将改进的 PEMS 系统与汽车尾气管相连接进行 PAHs 衍生物排放测试,其结构如图 1 所示。测试过程中,汽车尾气首先流经瞬时排气流量计对汽车尾气流量进行测量;然后,一

部分尾气按体积比进入气体分析仪,对常规气体排放(CO、HC、NO_x等)进行测量;另一部分尾气按体积比进入稀释装置,经稀释后进入 PAHs 衍生物采集装置[24] [25]。PAHs 衍生物采集装置中安装有石英滤膜和聚氨酯泡沫(PUF),分别对颗粒相 PAHs 衍生物和气相 PAHs 衍生物进行采集,以备后续采用色谱技术对其排放浓度进行测量[24] [25]。

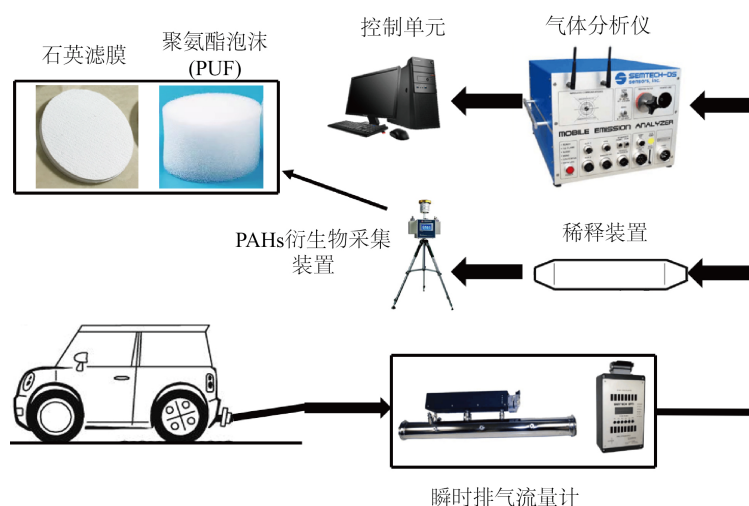


Figure 1. The diagram of the improved PEMS [24] [25]

图 1. 改进的便携式排放测试系统示意图[24] [25]

Hao [24]等采用车载道路试验对我国不同排放标准(国 I~国 V)乘用车的 NPAHs 排放因子进行了测试,结果表明,气相、颗粒相和总 NPAHs 的排放因子平均为 $315.7 \pm 109.4 \mu\text{g}/\text{km}$ 、 $7.9 \pm 1.7 \mu\text{g}/\text{km}$ 和 $323.5 \pm 205.7 \mu\text{g}/\text{km}$ 。Fu [25]等进行的车载道路试验发现,随着海拔的升高,气相 NPAHs 和颗粒相 OPAHs 的排放浓度显著增加。

3.2. 隧道试验法

隧道试验法是汽车实际道路排放测试方法之一,能够快速测量实际运行车队的整体排放特征[26]。该方法由于具有测试成本低、操作简单、测量仪器要求不高等特点,而被广泛应用。

在汽车尾气 PAHs 衍生物排放隧道试验测试过程中,隧道通常被看作为理想的圆柱形活塞[27]。测试过程中,一般在隧道进、出口处利用安装有石英滤膜和聚氨酯泡沫(PUF)的 PAHs 衍生物取样器对 PAHs 衍生物浓度进行测量;同时记录隧道内风速、风向、大气温度和大气湿度等自然气象参数以及车流量、行驶速度、车辆类型、行驶里程等车队信息;然后利用质量守恒原理便可得到车队 PAHs 衍生物综合排放因子;如图 2 所示[28]。利用隧道试验法得到的车辆污染物排放能够代表车辆实际行驶状态下的平均污染物排放水平。

Zhao [29]等采用隧道试验测试了青岛仰口隧道内颗粒相 PAHs 衍生物的排放水平,结果显示 NPAHs 和 OPAHs 单车排放因子分别为 $9.02 \mu\text{g}/\text{km}$ 和 $8.47 \mu\text{g}/\text{km}$ 。另外,他还分析了不同环数颗粒相 NPAHs 的占比,结果如图 3 所示,其中 4 环 NPAHs 所占比例最高,达 70%以上[18]。Keyte [30]等在隧道试验中也得到了类似的测试结果,汽车尾气颗粒相 PAHs 衍生物较大比例为半挥发性的 3 环和 4 环 NPAHs 和 OPAHs。Tong [31]等在隧道试验中发现,隧道内的 OPAHs 和 NPAHs 浓度明显高于城市区域,表明汽车尾气是城市环境中 PAHs 衍生物的主要来源之一。

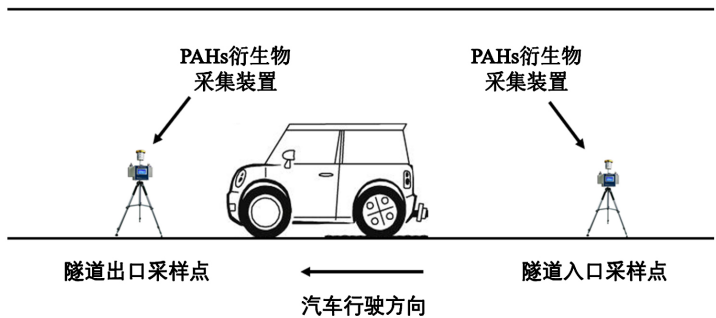


Figure 2. The diagram of the tunnel experiment
图 2. 隧道试验示意图

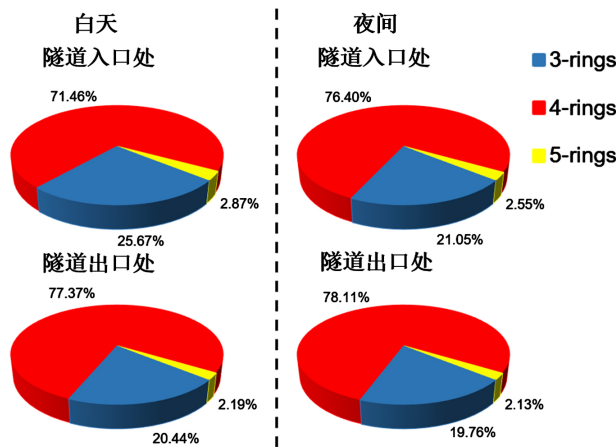


Figure 3. The proportion of particle-phase NPAHs with different rings [18]
图 3. 不同环数颗粒相 NPAHs 的比例[18]

3.3. 实验室台架试验法

实验室台架试验能够在相对理想的条件下模拟汽车或者发动机的实际运行状态，从而实现对污染物排放的测试。该方法具有控制精度高、重复性好等特点，是整车及发动机性能开发的典型测试方法。常用的实验室台架主要包括底盘测功机试验台架和发动机试验台架。测试过程中，通过底盘测功机或发动机测功机控制汽车或发动机的运行状态，汽车尾气或发动机排气首先流进稀释装置，然后经稀释后的废气再流入安装有石英滤膜和聚氨酯泡沫(PUF)的 PAHs 衍生物采集装置，从而实现对 NPAHs 和 OPAHs 的采集，以备后续采用色谱技术进行测量分析，同时采用流量计对气体流量进行监测，如图 4、图 5 所示。

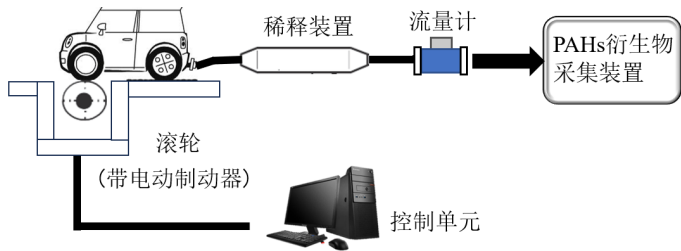


Figure 4. The diagram of chassis dynamometer test bench
图 4. 底盘测功机试验台架示意图

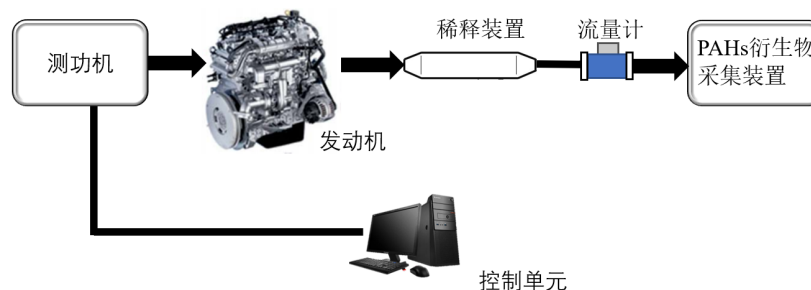


Figure 5. The diagram of engine test bench
图 5. 发动机试验台架示意图

Zhao [6]等采用底盘测功机试验台架对 54 辆在用汽油车进行了测试, 测试结果表明缸内直喷(GDI)汽油车的 NPAHs 排放明显高于进气道喷射(PFI)汽油车。Huang [32]等采用发动机试验台架针对一台重型(6.4 L)柴油机进行测试发现, 排气中 NPAHs 的主要组分为 1-硝基芘、2-硝基萘和 1-硝基萘。

4. 汽车尾气 PAHs 衍生物的影响因素

汽车尾气 PAHs 衍生物的生成过程极其复杂多变, 其排放规律受多种因素影响。因此, 本节针对燃料类型、车辆技术水平、汽车发动机运行工况、车辆类型、后处理技术等汽车尾气 PAHs 衍生物的主要影响因素进行梳理和总结。

4.1. 燃料类型

燃料能够直接影响汽车发动机缸内的放热规律、自由基生成、污染物形成与演化, 是汽车尾气污染物排放最为直接的影响因素。现有研究也已证实, 燃料是影响汽车尾气 PAHs 衍生物排放的关键因素[33]。尤其是, 含氧、含氮燃料的快速发展与应用, 必然引起汽车发动机燃烧过程中含氧、含氮自由基的生成, 进而影响 PAHs 衍生物的生成与演化。

Sahu [34]等在单缸柴油机上的研究发现, 硝基多环芳烃(NPAHs)是柴油机排气颗粒物毒性的主要来源之一, 同时柴油中掺混含氧燃料(甲醇、乙醇和丁醇)能够明显减少颗粒相 NPAHs 浓度, 减少颗粒物的潜在毒性。刘宗鑫[12]在一台四缸轻型柴油机上的研究也证实, 柴油掺混含氧燃料(乙醇、丁醇、戊醇、生物柴油)能够抑制 NPAHs 的生成, 但对 OPAHs 的生成具有积极作用; 在相同条件下, 颗粒相 OPAHs、PAHs 的排放浓度为相同数量级, 而颗粒相 NPAHs 排放浓度比颗粒相 PAHs 低一个数量级。

另外, 相关研究也表明燃用含氧燃料能够降低汽油机 NPAHs 排放, 但增加 OPAHs 排放。Muñoz [35]等研究指出, 相比于纯汽油, 燃用 E10(含 10%乙醇(v/v))和 E85(含 85%乙醇(v/v))乙醇汽油混合燃料可分别使 NPAHs 排放降低 31%~96%和 38%~95%。Ahmed [36]等在汽油机冷、热启动工况排放研究中发现, 燃用乙醇/汽油混合燃料可能会导致含氧自由基增加, 促进母体 PAHs 向 OPAHs 的转化, 致使 OPAHs 排放增加。

4.2. 车辆技术水平

科学技术的快速发展推动了汽车工业的产业升级, 各种先进技术与智能控制手段不断得以应用, 排放法规逐步得以更新和完善, 我国车辆技术水平显著提高。车辆技术水平的提升必然影响汽车尾气污染物的生成机理和演化过程, 进而影响 PAHs 衍生物的排放水平。鉴于此, 学者们针对不同技术水平车辆开展了 PAHs 衍生物排放的检测与分析。

赵彤[18]利用底盘测功机试验台架对 54 辆不同排放标准(国 I~国 V)的在用汽油车的 NPAHs 排放测

试中发现，汽油车颗粒相 NPAHs 排放因子范围为 7.57 $\mu\text{g}/\text{km}$ ~14.31 $\mu\text{g}/\text{km}$ ，并随着车辆技术水平的提升(排放标准提高)颗粒相 NPAHs 排放因子逐渐降低，其平均排放因子的变化趋势为：国 I $\approx$ 国 II> 国 III> 国 IV> 国 V。Hao [24]等通过车载道路试验也得出了类似的结果，NPAHs 排放(包括气相和颗粒相)随着车辆技术水平的提升(排放标准提高)而降低。

4.3. 汽车发动机运行工况

运行工况能够直接改变汽车发动机的缸内热力学状态，影响燃料的物理化学反应过程以及中间产物的生成，进而影响 PAHs 衍生物的排放水平。因此，运行工况对汽车发动机 PAHs 衍生物排放影响得到了研究人员的关注。

刘宗鑫[12]基于柴油机台架试验进行的含氧燃料对柴油机 PAHs 衍生物排放影响研究中发现，当柴油机负荷增加后，颗粒相 OPAHs 也一样呈现增加趋势。另外，Ahmed [36]等在汽油车启动工况 OPAHs 排放试验中还发现，汽油车在冷启动(-7℃)工况的 OPAHs 排放远高于热启动(22℃)工况。

4.4. 车辆类型

汽油车与柴油车在结构形式、控制方式、燃料类型以及排放控制技术等方面明显不同，因此，所产生的 PAHs 衍生物排放也存在显著差异。

Ozaki [7]等针对汽油车和柴油车颗粒物中 NPAHs 浓度进行了测量，结果如表 2 所示，由表 2 可知，柴油车 NPAHs 排放浓度明显高于汽油车。Kostenidou [37]等采用底盘测功机试验台架对汽油车和柴油车 NPAHs 排放测试中却发现，GDI 汽油车的颗粒相 NPAHs 排放高于柴油车。Fu [25]等在车载道路试验中指出，在相同测试条件下，汽油车的 OPAHs 排放因子明显低于柴油车，而 NPAHs 排放因子却明显高于柴油车。另外，Cao [16]等通过车载道路试验对不同类型柴油车 NPAHs 排放的研究中还发现，中型柴油车的 NPAHs 排放因子低于轻型和重型柴油车。

Table 2. NPAHs emission concentrations of diesel and gasoline vehicle ($\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$) [7]

表 2. 柴油车、汽油车 NPAHs 排放浓度($\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$) [7]

中文名称	英文缩写	柴油车	汽油车
9-硝基蒽	9-NAnt	2468	<17
1-硝基芘	1-NP	27,660	129
2-硝基荧蒽	2-NFlt	195	<17
3-硝基荧蒽	3-NFlt	3154	<2
6-硝基喹烯	6-NChr	<12	<17

4.5. 后处理技术

后处理装置是现代汽车的重要组成部分，能够通过催化反应大幅降低汽车尾气污染物排放。因此，后处理技术对汽车尾气 PAHs 衍生物排放的影响同样得到了国内外学者的关注。

Huang [32]等采用发动机试验台架开展的后处理装置对柴油机 NPAHs 排放影响研究中指出，氧化型催化器(DOC)和柴油机颗粒捕集器(DPF)相结合(DOC + DPF)对颗粒相 NPAHs 排放的减排效果十分显著，即使在 DPF 再生阶段，仍能降低 99%的 NPAHs 排放。Yang [38]等采用底盘测功机试验台架对 GDI 汽油车 PAHs 衍生物排放进行了测试，结果表明，汽油机颗粒捕集器(GPF)能够明显降低汽油车尾气中的颗粒相和气相 PAHs 衍生物(包括 NPAHs 和 OPAHs)，但由于 GPF 表面涂覆催化剂的催化作用，可能会导致

新型 PAHs 衍生物的生成。

5. 结论

汽车尾气是大气环境中 PAHs 衍生物的主要来源之一,得到了国内外学者的广泛关注。鉴于此,本文针对汽车尾气 PAHs 衍生物排放的理化特征、研究方法以及影响因素进行了梳理和总结,为汽车排放控制技术开发及排放法规制定提供参考。

1) PAHs 衍生物是一种新兴的环境污染物,以气相和颗粒相共存,具有比母体 PAHs 更强的“三致效应”。一次来源主要为化石燃料和生物质燃料的不完全燃烧;二次来源主要为母体 PAHs 与 OH、NO₂、NO₃ 等自由基的化学反应。

2) 汽车尾气 PAHs 衍生物排放的研究方法主要有车载道路试验法、隧道试验法和实验室台架试验法。

3) 汽车尾气 PAHs 衍生物排放与燃料类型、车辆技术水平、汽车发动机运行工况、车辆类型、后处理技术等影响因素密切相关。燃用含氧燃料能够降低 NPAHs,但会增加 OPAHs;发动机负荷增加,PAHs 衍生物排放也呈现增加趋势;车辆技术水平提高以及应用后处理技术,能够减少 PAHs 衍生物排放。

基金项目

移动源污染排放控制技术国家工程实验室开放基金资助项目(NELMS2019A16)。

参考文献

- [1] Peng, B., Dong, Q., Li, F., Wang, T., Qiu, X. and Zhu, T. (2023) A Systematic Review of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Derivatives: Occurrences, Levels, Biotransformation, Exposure Biomarkers, and Toxicity. *Environmental Science & Technology*, **57**, 15314-15335. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c03170>
- [2] Achten, C. and Andersson, J.T. (2015) Overview of Polycyclic Aromatic Compounds (PAC). *Polycyclic Aromatic Compounds*, **35**, 177-186. <https://doi.org/10.1080/10406638.2014.994071>
- [3] 张婉. 中国典型农村室内外多环芳烃及其衍生物的污染特征、来源及健康风险[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2021.
- [4] BP (2024) Statistical Review of World Energy 2024. BP.
- [5] Li, W., Wang, C., Shen, H., Su, S., Shen, G., Huang, Y., et al. (2015) Concentrations and Origins of Nitro-Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Oxy-Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Ambient Air in Urban and Rural Areas in Northern China. *Environmental Pollution*, **197**, 156-164. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.12.019>
- [6] Zhao, T., Yang, L., Huang, Q., Zhang, W., Duan, S., Gao, H., et al. (2020) PM_{2.5}-Bound Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) and Nitrated-PAHs (NPAHs) Emitted by Gasoline Vehicles: Characterization and Health Risk Assessment. *Science of the Total Environment*, **727**, Article 138631. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138631>
- [7] Ozaki, N., Takemoto, N. and Kindaichi, T. (2009) Nitro-PAHs and PAHs in Atmospheric Particulate Matters and Sea Sediments in Hiroshima Bay Area, Japan. *Water, Air, and Soil Pollution*, **207**, 263-271. <https://doi.org/10.1007/s11270-009-0134-5>
- [8] 张俊美. 山东典型地区 PM_{2.5} 中无机元素、多环芳烃及其衍生物污染特征和氧化潜势[D]: [博士学位论文]. 济南: 山东大学, 2019.
- [9] Zhang, Z., Chen, J., Zhao, Y., Wang, L., Teng, Y., Cai, M., et al. (2022) Determination of 123 Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in Atmospheric Samples. *Chemosphere*, **296**, Article 134025. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134025>
- [10] 缙亚峰. 大气中硝基多环芳烃的污染特征和环境行为研究综述[J]. 环境化学, 2023, 42(12): 4135-4150.
- [11] 刘攀亮. 中国西部兰州盆地大气硝基多环芳烃污染特征及呼吸暴露风险[D]: [博士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2019.
- [12] 刘宗鑫. 含氧燃料对柴油机碳质颗粒排放特性影响的研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2019.
- [13] 郭志明, 刘頔, 林田, 等. 太原城区 PM_{2.5} 中多环芳烃、硝基多环芳烃的污染特征、来源解析和健康风险评估[J]. 环境科学学报, 2018, 38(3): 1102-1108.
- [14] Zimmermann, K., Jariyasopit, N., Massey Simonich, S.L., Tao, S., Atkinson, R. and Arey, J. (2013) Formation of Nitro-

- PAHs from the Heterogeneous Reaction of Ambient Particle-Bound PAHs with $\text{N}_2\text{O}_5/\text{NO}_3/\text{NO}_2$. *Environmental Science & Technology*, **47**, 8434-8442. <https://doi.org/10.1021/es401789x>
- [15] 赵楠. 典型多环芳烃大气反应生成氧化多环芳烃和硝基多环芳烃机理的理论研究[D]: [博士学位论文]. 济南: 山东大学, 2017.
- [16] Cao, X., Hao, X., Shen, X., Jiang, X., Wu, B. and Yao, Z. (2017) Emission Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Nitro-Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Diesel Trucks Based on On-Road Measurements. *Atmospheric Environment*, **148**, 190-196. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.10.040>
- [17] Bakeas, E.B. and Karavalakis, G. (2013) Regulated, Carbonyl and Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Emissions from a Light-Duty Vehicle Fueled with Diesel and Biodiesel Blends. *Environmental Science: Processes & Impacts Journal*, **15**, 412-422. <https://doi.org/10.1039/c2em30575e>
- [18] 赵彤. 机动车排放 PM_{2.5} 中多环芳烃(PAHs)及其衍生物(NPAHs, OPAHs)污染特征研究[D]: [博士学位论文]. 济南: 山东大学, 2020.
- [19] Idowu, O., Semple, K.T., Ramadass, K., O'Connor, W., Hansbro, P. and Thavamani, P. (2019) Beyond the Obvious: Environmental Health Implications of Polar Polycyclic Aromatic Hydrocarbons. *Environment International*, **123**, 543-557. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.12.051>
- [20] Gramblicka, T., Parizek, O., Stupak, M. and Pulkrabova, J. (2023) Assessment of Atmospheric Pollution by Oxygenated and Nitrated Derivatives of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Two Regions of the Czech Republic. *Atmospheric Environment*, **310**, Article 119981. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.119981>
- [21] Fang, B., Zhang, L., Zeng, H., Liu, J., Yang, Z., Wang, H., *et al.* (2020) PM_{2.5}-Bound Polycyclic Aromatic Hydrocarbons: Sources and Health Risk during Non-Heating and Heating Periods (Tangshan, China). *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **17**, Article 483. <https://doi.org/10.3390/ijerph17020483>
- [22] 徐晓白. 硝基多环芳烃——环境中最近发现的直接致突变物和潜在致癌物[J]. 环境化学, 1984(1): 1-16.
- [23] Wu, H., Lu, L., Chen, J., Zhang, C., Liu, W. and Zhuang, S. (2020) Inhibited Nitric Oxide Production of Human Endothelial Nitric Oxide Synthase by Nitrated and Oxygenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons. *Environmental Science & Technology*, **54**, 2922-2930. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b07163>
- [24] Hao, X., Zhang, X., Cao, X., Shen, X., Shi, J. and Yao, Z. (2018) Characterization and Carcinogenic Risk Assessment of Polycyclic Aromatic and Nitro-Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Exhaust Emission from Gasoline Passenger Cars Using On-Road Measurements in Beijing, China. *Science of the Total Environment*, **645**, 347-355. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.113>
- [25] Fu, J., Fang, T., Gao, Y., Wang, T., Jia, Z., Guo, D., *et al.* (2024) Emission Characteristic, Spatial Distribution, and Health Risk of Polycyclic Aromatic Compounds (PAHs, NPAHs, and OPAHs) from Light-Duty Gasoline and Diesel Vehicles Based on On-Road Measurements. *Science of the Total Environment*, **941**, Article 173390. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173390>
- [26] 刘妍. 我国轻型汽油车蒸发排放特征与趋势预测[D]: [博士学位论文]. 天津: 南开大学, 2022.
- [27] 陈林. 基于国六重型车排放标准的整车与柴油机台架试验方法及排放规律研究[D]: [博士学位论文]. 镇江: 江苏大学, 2018.
- [28] 刘殷佐, 赵静波, 王婷, 等. 机动车来源多环芳烃及其衍生物的排放特征研究进展[J]. 工程科学学报, 2021, 43(1): 10-21.
- [29] Zhao, T., Yang, L., Huang, Q., Zhang, Y., Bie, S., Li, J., *et al.* (2020) PM_{2.5}-Bound Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) and Their Derivatives (Nitrated-PAHs and Oxygenated-PAHs) in a Road Tunnel Located in Qingdao, China: Characteristics, Sources and Emission Factors. *Science of the Total Environment*, **720**, Article 137521. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137521>
- [30] Keyte, I.J., Albinet, A. and Harrison, R.M. (2016) On-Road Traffic Emissions of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Oxy and Nitro-Derivative Compounds Measured in Road Tunnel Environments. *Science of the Total Environment*, **566**, 1131-1142. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.05.152>
- [31] Tong, H., Kourtchev, I., Pant, P., Keyte, I.J., O'Connor, I.P., Wenger, J.C., *et al.* (2016) Molecular Composition of Organic Aerosols at Urban Background and Road Tunnel Sites Using Ultra-High Resolution Mass Spectrometry. *Faraday Discussions*, **189**, 51-68. <https://doi.org/10.1039/c5fd00206k>
- [32] Huang, L., Bohac, S.V., Chernyak, S.M. and Batterman, S.A. (2015) Effects of Fuels, Engine Load and Exhaust After-Treatment on Diesel Engine SVOC Emissions and Development of SVOC Profiles for Receptor Modeling. *Atmospheric Environment*, **102**, 228-238. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.11.046>
- [33] Fu, J., Wang, T. and Mao, H. (2023) Research Progress on the Influencing Factors of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Derivatives from Vehicle Exhaust and Non-Exhaust Emissions. *Chinese Journal of Engineering*, **45**, 863-873.

-
- [34] Sahu, T.K., Shukla, P.C., Mondal, A., Gupta, S., Belgiorno, G. and Di Blasio, G. (2024) Assessment of Particulate PAHs Toxicity from Alcohol-Diesel Blends Fuelled High Compression Ratio CI Engine. *Cleaner Engineering and Technology*, **18**, Article 100725. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2024.100725>
- [35] Muñoz, M., Heeb, N.V., Haag, R., Honegger, P., Zeyer, K., Mohn, J., *et al.* (2016) Bioethanol Blending Reduces Nanoparticle, PAH, and Alkyl and Nitro-PAH Emissions and the Genotoxic Potential of Exhaust from a Gasoline Direct Injection Flex-Fuel Vehicle. *Environmental Science & Technology*, **50**, 11853-11861. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b02606>
- [36] Ahmed, T.M., Bergvall, C. and Westerholm, R. (2018) Emissions of Particulate Associated Oxygenated and Native Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Vehicles Powered by Ethanol/Gasoline Fuel Blends. *Fuel*, **214**, 381-385. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.11.059>
- [37] Kostenidou, E., Martinez-Valiente, A., R'Mili, B., Marques, B., Temime-Roussel, B., Durand, A., *et al.* (2021) Technical Note: Emission Factors, Chemical Composition, and Morphology of Particles Emitted from Euro 5 Diesel and Gasoline Light-Duty Vehicles during Transient Cycles. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **21**, 4779-4796. <https://doi.org/10.5194/acp-21-4779-2021>
- [38] Yang, J., Roth, P., Durbin, T.D., Johnson, K.C., Cocker, D.R., Asa-Awuku, A., *et al.* (2018) Gasoline Particulate Filters as an Effective Tool to Reduce Particulate and Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Emissions from Gasoline Direct Injection (GDI) Vehicles: A Case Study with Two GDI Vehicles. *Environmental Science & Technology*, **52**, 3275-3284. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b05641>