

机动车尾气污染因子季节变化特征及防控对策

凌 辉

武汉市生态环境监控中心, 湖北 武汉

收稿日期: 2026年8月20日; 录用日期: 2026年9月14日; 发布日期: 2026年9月20日

摘 要

机动车尾气是城市 NO_x 、CO、 $\text{PM}_{2.5}$ 、VOCs的重要排放源, 气象条件与季节变化会显著改变机动车污染物排放强度与组分构成。在国内移动源污染管控中, 普遍采用全年统一管控模式, 对污染物季节差异的考虑尚有不足。本文基于现有台架、车载实测与城市观测文献资料, 系统归纳机动车常规污染物及VOCs的季节排放特征, 解析温度、冷启动、尾气后处理、气象扩散条件对污染过程的驱动作用。研究发现, 常规污染物CO、 NO_x 、 $\text{PM}_{2.5}$ 冬季排放压力最大; VOCs存在尾气与蒸发排放的双途径, 夏、冬两季污染来源与化学活性差异明显。结合季节污染风险, 梳理分季节管控路径, 为移动源精细化管控和后续相关研究提供参考。

关键词

机动车尾气, 季节变化, VOCs, 冷启动, 差异化防控

Seasonal Variation Characteristics of Motor Vehicle Exhaust Pollutants and Prevention and Control Strategies

Hui Ling

Wuhan Municipal Ecological Environment Monitoring Center, Wuhan Hubei

Received: August 20, 2026; accepted: September 14, 2026; published: September 20, 2026

Abstract

Vehicle exhaust is an important emission source of urban NO_x , CO, $\text{PM}_{2.5}$, and VOCs. Meteorological conditions and seasonal variations can significantly alter the emission intensity and component composition of vehicle-derived pollutants. In China's mobile-source pollution management, a year-round unified control mode is generally adopted, which gives insufficient consideration to the seasonal

differences of pollutants. Based on existing bench-scale tests, on-vehicle real-world measurements and urban observation literature, this paper systematically summarizes the seasonal emission characteristics of conventional vehicle pollutants and VOCs, and analyzes the driving effects of temperature, cold-start conditions, exhaust after-treatment devices and meteorological diffusion conditions on pollution processes. The results show that conventional pollutants, including CO, NO_x and PM_{2.5}, present the highest emission pressure in winter. VOCs have dual emission pathways of tail-pipe exhaust and fuel evaporation, with obvious differences in pollution sources and chemical reactivity between summer and winter. Combined with seasonal pollution risks, seasonal-targeted control approaches are sorted out. This work can provide references for refined mobile-source pollution control and future related research.

Keywords

Vehicle Exhaust, Seasonal Variation, VOCs, Cold Start, Differentiated Control Strategies

Copyright © 2026 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

随着我国社会经济持续发展与居民出行需求不断提升, 机动车保有量连年稳步增长, 机动车尾气已成为我国城市大气污染的核心人为污染源之一。国内多个城市的监测统计表明, 移动源在城市 NO_x、CO、VOCs 等大气污染物中的贡献占比普遍较高, 机动车尾气已经成为城市大气污染的重要人为来源[1]。机动车尾气的排放并非保持恒定状态, 而是受到环境温度、气象、发动机运行工况等因素共同影响, 不同季节下各类污染因子的排放强度和组成成分存在显著差异。现实行的大气污染管控方案采用全年统一的防控措施, 未充分应对机动车污染的季节性变化, 管理精度不足。基于此, 本文系统性理清机动车尾气各类污染因子的季节性变化特征, 剖析污染季节性差异的核心驱动机制, 并分季节制定差异化防控对策, 对优化城市移动源污染治理体系具有重要的现实意义。

2. 尾气主要污染因子及其季节变化特征

据公安部官方统计显示, 2025 年全国机动车保有量达到 4.69 亿辆, 新能源汽车保有量达 4397 万辆, 占汽车总量的 12.01% [2]。庞大的燃油机动车存量带来了持续的尾气污染排放压力, 根据《中国移动源环境管理年报(2025 年)》最新核算数据, 2024 年全国移动污染源总排放量为 1858.2 万吨, 其中机动车污染物排放量 1285.6 万吨¹, 机动车是移动源污染的核心来源。

机动车尾气常规污染物主要包括一氧化碳(CO), 氮氧化物(NO_x)、颗粒物作为机动车尾气核心常规污染物, 这些污染物不仅会直接威胁人体呼吸系统与心血管健康, 同时作为酸雨、光化学烟雾、灰霾的重要前体物, 对大气复合污染有重大影响。受季节气象条件、车辆工况的综合调控, 其排放水平并非常年稳定, 呈现出显著的周期性季节分异规律。

2.1. 常规污染物季节规律

机动车燃油以碳氢化合物为主要组分, 充分燃烧的最终产物为二氧化碳与水, 而当燃烧不充分、工

¹https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/ydyhjgl/202512/t20251203_1137022.shtml

况异常及尾气净化效率不足时,会产生大量 CO、NO_x、PM 等常规大气污染物。受环境温度、大气扩散条件、车辆冷启动工况、三元催化器净化活性等季节性因素影响,机动车各类常规污染物排放呈现出稳定且差异化的季节变化规律,是城市大气污染物浓度季节性波动的重要诱因。

Table 1. Comparison of motor vehicle CO, NO_x, PM and VOCs emissions/contribution rates in different studies during winter and summer seasons

表 1. 不同研究中机动车 CO、NO_x、PM 及 VOCs 冬夏季节排放量/贡献率对比

污染物	夏季排放量/贡献率	冬季排放量/贡献率	冬/夏比	车辆工况/地区	文献来源
CO	41.9 g/km	51.7 g/km	1.23	汽油轿车	[3]
CO	29.5 g/km	42.8 g/km	1.45	微型汽车	[3]
CO	17.1 g/km	17.1 g/km	1.00	重型柴油车	[3]
CO	13.6 g/km	18.8 g/km	1.38	摩托车	[3]
CO	—	夏季的 1.31 倍~1.64 倍	1.31~1.64	重型柴油货车	[4]
NO _x	1.4 g/km	1.7 g/km	1.21	汽油轿车	[3]
NO _x	7.4 g/km	9.1 g/km	1.23	重型汽油车	[3]
NO _x	0.007 g/s	0.03 g/s	4.28	机动车瞬时冷启动	[5]
NO _x	1.2 g/kg 燃料	2.0 g/kg 燃料	1.67	汽油车(隧道实测)	[6]
NO _x	—	夏季的 1.31 倍~1.72 倍	1.31~1.72	重型柴油货车(冷启动)	[4]
PM _{2.5}	0.56 mg/veh/km	0.90 mg/veh/km	1.61	山体隧道	[7]
PM ₁₀	687 mg/veh/km	714 mg/veh/km	1.04	山体隧道	[8]
PM ₁₀	200 mg/veh/km	1200 mg/veh/km	6.00	道路监测(含道路扬尘)	[9]
PN	—	夏季的 2.0 倍	2.0	近路实测	[10]
VOCs	5.3 g/km (HC)	6.9 g/km (HC)	1.30	汽油轿车	[3]
VOCs	17.8 g/km	21.1 g/km	1.19	重型汽油车	[3]
VOCs	9.7 mg/km (23℃)	50.4 mg/km (0℃)	5.19	国VI轻型汽油车	[6]
VOCs	30.9%贡献率	35.8%贡献率	1.16	PMF 源分析	[11]
VOCs	7.37%月均贡献率	10.19%月均贡献率	1.38	全年月份排放占比	[12]

由表 1 可见,各污染物冬季排放普遍高于夏季。气态污染物(CO, NO_x, VOCs)的冬/夏比值在 1.2~2.8 之间,冷启动阶段可骤增至 5~8 倍。颗粒物方面,尾气 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的冬/夏比值约为 1.0~1.6,增幅小于气态污染物;但若计入道路扬尘等非尾气排放,PM₁₀ 的冬/夏比值可高达 6.0。

一氧化碳(CO)作为机动车发动机不完全燃烧所产生的特征污染物,呈现冬季高,夏季低,春秋季节平缓过渡的分布规律。低温环境下,车辆启动后发动机升温慢,长期处于冷启动、低温怠速状态,会使气缸内燃油雾化效果变差,燃烧效率变低,直接导致 CO 生成量显著增加[13]。再者,机动车三元催化器需达到 250℃ 以上的起燃温度方可实现高效污染物净化,冬季低温会大幅延长催化器升温时长,低温阶段催化转化效率不足 30%,大量未净化 CO 直接排入大气,夏季则反之[14]。春秋季节环境温度温和,无极端工况,大气扩散条件适中,CO 整体排放在中等水平。

氮氧化物(NO_x)的季节变化规律整体表现为冬季和春季偏高,夏季和秋季偏低,与环境温度呈现负相关关系[15]。NO_x 主要源于发动机高温富氧燃烧条件下空气中氮气与氧气的热合成反应,其生成量和发

动机燃烧工况、尾气处理装置密切相关。机动车在冬季冷启动和怠速运转较多,发动机燃烧工况不稳定,为了维持运转喷油量增大,造成局部高温富氧环境促进 NO_x 生成[14]。同时尾气脱硝催化装置在低温条件下活性降低,导致净化效率下降,尾气中 NO_x 的比例显著上升。从气象层面看,冬季大气扩散条件差,近地面会产生逆温层,空气上下不流通,会进一步累积城市中的 NO_x 浓度,使冬季成为全年 NO_x 污染最重的时段。夏季高温多雨,发动机可快速达到最佳工况,从源头减少了 NO_x 的产生。加之夏季的大气对流强,能有效带走污染物,让 NO_x 排放和环境浓度处于全年低值[14] [16]。

颗粒物($\text{PM}_{2.5}$, PM_{10})是典型的机动车尾气固态污染物,季节波动特征极为突出,呈现冬季污染峰值显著,夏季污染最轻的变化规律[17]。马云云等针对潍坊市大气颗粒物的全年连续监测研究发现,区域内 $\text{PM}_{2.5}$ 与 PM_{10} 质量浓度均呈现显著的冬季最高、夏季最低的季节性分布特征,秋冬季采暖期颗粒物累积污染效应突出,印证了颗粒物污染显著的季节分异规律[18]。柴油车和老旧燃油车是颗粒物排放的主体,冬季的低温环境下燃油雾化不充分,燃烧残渣多,加剧颗粒物的生成和排放。从气象角度看,夏季雨水充沛,持续的雨水能有效带走大气中的颗粒物,降低环境累积效应。春秋季节气象扩散条件优良,气候温润,使颗粒物污染整体维持较低水平[17]。

现有研究大多集中北方城市,南方高温高湿地区的实测相对匮乏,且观测站点集中在城区路面,对隧道、高架桥等高频点位的连续观测相对有限。较多排放因子仍直接使用全国统一的标准,缺失本地化的分析和修正。

2.2. VOCs 及其组分季节规律

挥发性有机物(VOCs)是城市臭氧和二次有机气溶胶生成的核心前体物,是大气污染的核心污染物之一,对区域空气质量和人体健康有显著的负面影响。相对于 CO 、 NO_x 等常规污染物,机动车 VOCs 排放来源更加复杂,包括尾气不完全燃烧排放、燃油高温蒸发两大途径,两种排放机制有不同的季节性差异,使整体污染规律与常规污染物有明显反差。各地全年检测数据与实测结果表明,机动车尾气 VOCs 组分结构复杂,涵盖烷烃、烯炔烃、芳香烃、含氧挥发性有机物(OVOCs)等大类,受温度、车辆工况、启动模式、燃油特性、风向气候等因素耦合调控,呈现“夏季峰值最高、冬季次之、春季秋季处于低位”的季节性变化规律[19]。

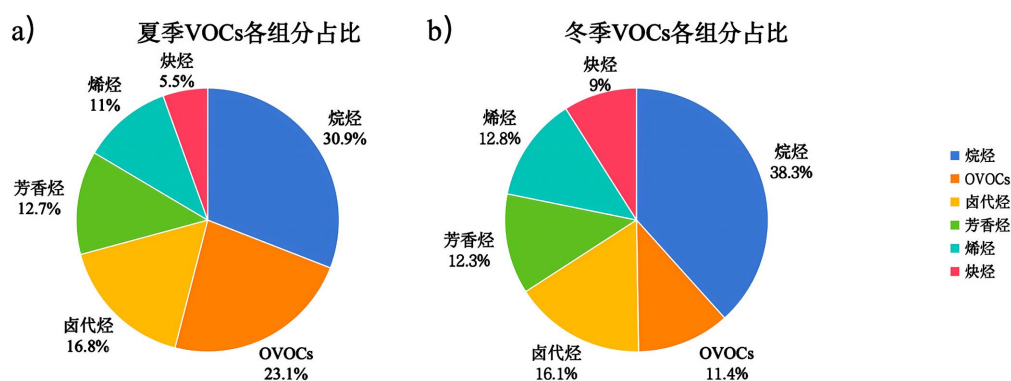


Figure 1. Proportion of VOCs components in the atmosphere of Chongqing's central urban area during summer and winter
图 1. 重庆市中心城区夏季与冬季大气 VOCs 各组分占比

为直观揭示 VOCs 组分的季节性转换规律,图 1 展示了重庆市中心城区夏季与冬季 VOCs 各组分占比的变化。从图 1 可见,夏季烷烃占比最高(30.9%),OVOCs 次之(23.1%),卤代烃(16.8%)、芳香烃(12.7%)、烯炔(11.0%)和炔烃(5.5%)依次递减。冬季烷烃占比进一步升至 38.3%,OVOCs 则大幅降至 11.4%,而烯炔

烃(12.8%)与炔烃(9.0%)较夏季有所上升。

冬季环境气温较低,油箱油气挥发作用被显著抑制,蒸发源 VOCs 整体处于低位,机动车 VOCs 排放以尾气贡献占主导。冬季车辆频繁发生冷启动过程,发动机升温缓慢,缸内燃油雾化效果变差,混合气燃烧不完全,同时三元催化装置尚未达到起燃温度,对碳氢类污染物的转化效率下降,直接导致 VOCs 排放量增多[20]。北方城市清单结果表明,12月机动车尾气 VOCs 排放贡献占全年的 11.32%,为全年最高,该阶段 VOCs 组分以稳定性相对较强的烷烃占比更高,烯烃、芳香烃等高活性组分占比有所下降[12]。冬季逆温气象条件下,VOCs 容易在近地面累积,虽然臭氧生成潜力有限,但可和 NO_x 、颗粒物共同参与二次转化,加剧秋冬季复合型大气污染[12]。

夏季高温环境下,发动机可以快速达到热机状态,冷启动事件大幅减少,尾气燃烧产生的 VOCs 得到有效净化,尾气源排放降至全年较低水平。但高温会显著刺激燃油系统挥发,热浸、昼间呼吸、加油过程带来的蒸发排放快速上升,成为夏季机动车 VOCs 的主导来源,7月蒸发类 VOCs 各分项排放量均达到年内峰值。环境温度每升高一定幅度,汽油的挥发活性会明显提升,盛夏时段蒸发排放可占到机动车 VOCs 总排放较高比重。从组分看,夏季机动车源 VOCs 中烯烃、芳香烃等光化学活性较强的组分占比明显提升[21],该类物种臭氧生成潜势 OFP 高,在强日照条件下极易驱动臭氧污染形成,是国内很多城市夏季臭氧超标的重要诱因[22]。值得注意的是,夏季光化学反应消耗作用较强,环境受体观测的 VOCs 浓度会被部分消耗,因此环境监测浓度与机动车实际排放强度并不完全同步。

春、秋属于温度过渡季节,既没有冬季的持续低温冷启动,也不存在夏季极端高温带来的大量燃油挥发,尾气排放与蒸发排放两者均维持在中等水平,机动车 VOCs 整体污染负荷相对最低。春季气温逐步回升,光照不断增强,虽然蒸发排放尚未达到夏季峰值,但活性 VOCs 组分的光化学反应条件逐步建立,局部时段仍存在臭氧生成风险;秋季温度回落、大气扩散条件整体较好,冷启动频次不高,蒸发挥发强度减弱,VOCs 各类组分整体活性偏低,机动车 VOCs 带来的污染压力全年最小[11]。需要注意的是,现有相关研究中,国内对机动车污染物的季节性变化已经开展较多观测与模拟工作,但仍存在部分短板。多数研究偏向城市整体排放清单的核查,针对不同车型(如老旧车、混动车、国五国六汽油车)的季节排放对比实测仍需进一步细化。

综合四季变化来看,机动车 VOCs 不仅总排放量存在季节波动,组分结构与污染风险类型也发生季节性切换。这种季节差异性,说明机动车 VOCs 管控不能采用统一策略,需要根据季节特点区分尾气治理的侧重点,为分季节差异的防控提供数据支撑。

2.3. 季节差异的驱动机制

上述季节变化规律,本质上是源排放强度与大气化学损耗共同调节的结果,其核心是温度对反应速率的影响。

根据阿伦尼乌斯公式 $k = A \cdot e^{-E_a/(RT)}$,环境温度 T 的降低会导致化学反应速率常数呈指数级下降。温度与燃油雾化黏度成反比,在低温时会降低燃油雾化黏度,导致空燃比偏移和燃烧不充分。催化剂升温时间较夏季延长 3~5 倍,期间对 CO 的转换效率不足 30%,大量一次排放物逸出。三元催化剂的活化能 E_a 难以逾越,使催化转化效率降低。冬季整体呈现“低温-燃烧不充分-催化延迟”的反馈链条,是冬季 CO 与碳氢化合物排放骤增的主因。

排放中,VOCs 组分的光化学消耗速率为 $R = \sum [\text{VOCs}_i] \cdot k_{OH}^i$ 。VOCs 不同组分的 k_{OH} 值差异明显,烯烃(如乙烯、丙烯)通常在 $10^{-11} \sim 10^{-10}$ 数量级,芳香烃(如二甲苯)约在 $10^{-12} \sim 10^{-11}$,而烷烃(如乙烷)则低至 10^{-13} 左右。夏季高·OH 浓度环境下,烯烃和芳香烃被快速氧化消耗,使其环境观测占比相对降低;但这一消耗过程恰恰是臭氧和二次有机气溶胶(SOA)生成的关键前置步骤。相反,冬季·OH 浓度较低,烷烃

因反应惰性得以累积,因此烷烃占比升高。形成了“高活性组分消耗-惰性组分积累”的化学过滤机制,构成了冬夏两季 VOCs 排放强度与组分差异的核心驱动机制。

3. 不同季节机动车污染防治措施

机动车尾气污染具有显著季节分异特征,夏、冬两季污染主导来源不同,春秋季为污染过渡阶段。若执行全年统一管控模式,易造成管控资源浪费、治理效能不足。需结合各季节排放机理,实施差异化精准防控,提升移动源污染治理效率。

3.1. 夏季防控重点

夏季环境温度高,尾气排放 CO、NO_x 排放水平整体偏低,防控核心由尾气燃烧排放转为蒸发类 VOCs 管控,防范臭氧污染。在车辆使用与管控层面,应当加强对加油站油气回收设施的运维监管,开展城区加油站的专项监督检查;重点审查老旧汽油车油箱及管道密封性检查,建议高温时段减少长时间暴晒驻车,提倡车辆存放在地下车库,引导公众避开正午高温时段使用车辆。在交通运行管控方面,优化城市高峰期交通网络,减少道路拥堵造成的怠速工况。拥堵会造成车辆反复启停,长时间处于怠速状态,影响尾气污染因子的排放。优化交通信号,高峰时期疏导干预车流。对于物流配送、柴油型货运汽车加强通行监管,调整安排作业时间至早晚低温时段[23]。

夏季臭氧是多源共同作用结果,机动车 VOCs 管控需要同步配合 NO_x 减排,协调 VOCs 与 NO_x 的削减比例,抑制臭氧生成潜势。环境监测部门需加大夏季交通干道周边 VOCs 组分的在线监测,重点关注烯烃、芳香烃等高活性物种浓度变化,为应急管控提供数据支撑[22]。

3.2. 冬季防控重点

冬季低温会加剧车辆冷启动现象,三元催化、脱硝后处理装置功效延迟,CO、NO_x、尾气 VOCs、颗粒物排放明显升高;叠加静稳逆温气象,污染物不易扩散,易形成复合型重污染。因此冬季防控重点为降低冷启动带来的 CO、NO_x、和颗粒物的排放,配合重污染天气应急响应[24]。

车辆管控上,老旧机动车冷启动工况下污染物排放增幅远高于国五、国六新车,需要对尾气超标的车辆督促完成维修维护,推进老旧车辆的定期保养及淘汰更新,降低因设备老化而产生的污染排放[25]。

交通出行引导上,应鼓励居民乘坐公共交通,从政策层面加大对公共交通运力的投放,在居民区周边设置便民暖车点、共享停车泊位,减少反复点火冷启动。重污染天气应急阶段,需落实机动车的应急管控,对柴油货车实施绕行、限行,对私家车实施单双号限行[26]。

3.3. 春秋季防控重点

春季、秋季属于气象过渡季节,气温适中,机动车冷启动频次、燃油蒸发强度均处于中等水平,机动车整体污染负荷低于冬夏两季,但并非无管控压力。春季气温逐步回升,光照增强,活性 VOCs 光化学反应条件逐步建立,存在阶段性臭氧污染风险;同时春季多大风天气,机动车行驶会卷起道路扬尘,尾气颗粒物与扬尘叠加,抬升 PM_{2.5}, PM₁₀ 浓度;秋季整体气象扩散条件较好,但早晚温差大,早晚间出现低温冷启动,仍会带来一定尾气污染压力。故春秋季应以常态化、精细化管控为主,利用污染物的分类方法有计划进行综合治理。也要从法律法规、形势政策等多方面入手采取措施,遏制尾气污染的恶化[27]。

3.4. 大数据动态管控策略

上述分季节的措施属于固定时序式的管控,而随着大数据与车联网等技术的成熟,使“实时响应式”的动态调控成为可能。本研究由此提出构建一个“车辆状态-实时监测分析-路网调控”的数字管控框

架。

首先整合远程在线监控终端,道路遥感监测数据和城市交通流量数据,实时获取在途车辆的发动机负荷、尾气处理效率及 GPS 位置信息,汇集信息至智慧交通平台处理。利用机器学习算法,建立车辆排放预测模型,结合气象场数据,对城市路网进行 1 公里 × 1 公里的网格化,绘制动态排放分布图,精准识别高排放车辆和高污染路段。最后根据动态排放图,实施交通诱导策略。如在冬季重污染应急期间,某一路段预测 CO 排放浓度即将超标,系统自动向周边车辆推送绕行建议,对高污染车辆实施电子限行,同时对红绿灯配时调控,减少车辆怠速等待时长,以减轻局部 CO 排放浓度。

初步估算,动态政策相较于传统“一刀切”式的防控政策,可减少重点路段约 10%~20%的排放强度。然而现存的挑战也同样显著,第一是车辆数据的标准化和隐私保护仍然在起步阶段,第二是实时模型对信息的存储和通信要求较高,计算资源紧缺,在极端恶劣天气下的稳定性还需考验。可以倡导开展小范围的实施验证,再逐步推广。

4. 结论与展望

本文围绕机动车尾气主要污染因子季节变化特征开展梳理分析,结合已有研究辨析了 CO、NO_x、PM 常规污染物与 VOCs 的季节演变规律,并提出分季节差异化防控对策,得到主要结论如下:

(1) 机动车常规污染物受低温冷启动与催化装置活性调控显著,CO、NO_x、PM 等污染物浓度整体表现冬季高、夏季低,春秋季节污染负荷处于过渡区间。

(2) 机动车 VOCs 污染物的季节性规律与常规污染物存在明显差异,呈现夏季最高、冬季次之的特征。其夏季组分中烯烃、芳香烃等类占比高,冬季组分中烷烃占比上升。两类污染物来源此消彼长,共同决定 VOCs 中排放量与组分的季节分异。

(3) 不同季节机动车污染主导来源有差异,管控重点应及时动态调整,避免全年无差别的管控模式,精准提升治理效果。

未来可重点开展以下几个方面的工作:第一,开展不同排放标准机动车的现场测试,特别针对南方高温高湿气候区(如海南、长三角地带),丰富本地化排放因子的数据库;第二,强化交通重点点位的长期监测,在隧道出口、高架桥、公交站等热点区域增设化学组分分析仪,明确不同污染物在不同季节的实际贡献;第三,结合本地特征的气象条件和深度机器学习,将气象预报数据与实时交通数据流结合,构建城市路网排放浓度模型,实现从“一刀切”和“经验型”的管控,到“数字孪生型智慧管控”的升级。

参考文献

- [1] 齐晓辉, 段晨斐. 机动车尾气污染与防治措施分析[J]. 黑龙江环境通报, 2024, 37(5): 96-98.
- [2] 全国机动车保有量达 4.69 亿辆 驾驶人达 5.59 亿名[EB/OL].
https://www.mps.gov.cn/n2254314/n6409334/c10383533/content.html?f_link_type=f_linkinlinenote&flow_extra=eyJpbmxbpVfZGlzcGxheV9wb3NpdGlvbil6MCwiZG9jX3Bvc2l0aW9uJjowLCJkb2NfaWQiOiJlZTc2NWVhNjY1ZjAwYTQyLWQ4ZGJjOTUzMjQzTVlnJQifQ%3D%3D, 2026-07-17.
- [3] 用于城市交通规划的机动车污染物排放因子[EB/OL].
<https://transport.chd.edu.cn/article/id/200104020?viewType=HTML#1>, 2026-08-27.
- [4] 李娜, 高成康, 巴乔, 等. 重型柴油货车排放因子本地化研究: 以辽中南为例[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2023, 44(8): 1119-1127.
- [5] Gao, C., You, H., Gao, C., Na, H., Xu, Q., Li, X., et al. (2022) Analysis of Passenger Vehicle Pollutant Emission Factor Based on On-Board Measurement. *Atmospheric Pollution Research*, 13, Article 101421.
<https://doi.org/10.1016/j.apr.2022.101421>
- [6] Li, X., Dallmann, T.R., May, A.A. and Presto, A.A. (2020) Seasonal and Long-Term Trend of On-Road Gasoline and Diesel

- Vehicle Emission Factors Measured in Traffic Tunnels. *Applied Sciences*, **10**, Article 2458.
<https://doi.org/10.3390/app10072458>
- [7] Jiang, C., Lin, C., Zhao, Y., Luo, Z. and Zhao, T. (2025) Investigation on Vehicle Emission Factors in Urban Tunnels through Mobile Measurements with an Optimized Estimation Method. *Atmospheric Pollution Research*, **16**, Article 102646.
<https://doi.org/10.1016/j.apr.2025.102646>
- [8] Chen, F., Hu, W. and Zhong, Q. (2013) Emissions of Particle-Phase Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in the Fu Gui-Shan Tunnel of Nanjing, China. *Atmospheric Research*, **124**, 53-60.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.12.008>
- [9] Ferm, M. and Sjöberg, K. (2015) Concentrations and Emission Factors for PM_{2.5} and PM₁₀ from Road Traffic in Sweden. *Atmospheric Environment*, **119**, 211-219. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.08.037>
- [10] Wang, J.M., Jeong, C., Zimmerman, N., Healy, R.M. and Evans, G.J. (2018) Real World Vehicle Fleet Emission Factors: Seasonal and Diurnal Variations in Traffic Related Air Pollutants. *Atmospheric Environment*, **184**, 77-86.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.04.015>
- [11] 姚佳, 李振亮, 陈木兰, 等. 重庆市中心城区大气 VOCs 季节污染特征与来源解析[J]. 环境科学, 2025, 46(2): 764-773.
- [12] 孙露娜, 仲崇智, 孙世达, 等. 2000-2020 年天津市机动车全过程 VOCs 排放特征及演变[J]. 环境科学, 2023, 44(3): 1346-1356.
- [13] 高成康, 许庆江, 邢玉红, 等. 冬季低温地区道路移动源大气污染物排放清单[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2019, 40(9): 1343-1349.
- [14] 陈婷, 何潇, 陈文倩, 等. 基于车载测试的轻型汽车排放特征[J]. 环境工程技术学报, 2022, 12(4): 1033-1040.
- [15] 典型城市道路交通加密监测点大气污染特征及影响因素[EB/OL].
<https://www.hjgcjxxb.org.cn/article/doi/10.12153/j.issn.1674-991X.20221266>, 2026-07-14.
- [16] 穆睿紫, 赵俊英. 天津市道路移动源氮氧化物排放趋势分析[J]. 天津理工大学学报, 2026, 42(2): 153-160.
- [17] 李颖, 杨韵波, 全继平. 永州市冬季大气颗粒物污染特征及来源解析[J]. 皮革制作与环保科技, 2024, 5(12): 43-45.
- [18] 马云云, 郑学彦, 吴建会, 等. 潍坊市大气环境中 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的污染特征及来源解析[J]. 环境监控与预警, 2023, 15(5): 147-155.
- [19] 高鑫, 荆博宇, 吴琳, 等. 机动车尾气 VOCs 排放特征及影响因素研究进展[J]. 环境科学与技术, 2023, 46(11): 69-78.
- [20] 陈凌建, 杜宝程, 彭竟德, 等. 轻型汽油车实际行驶排放试验中冷启动排放的评估[J]. 重庆大学学报, 2022, 45(6): 1-13.
- [21] 韩周洋, 孙丹, 司尧迪, 等. 季节尺度下宿迁市大气 VOCs 污染特征及来源解析[J]. 环境科技, 2026, 39(3): 65-70.
- [22] 伍乔, 肖曲, 肖童觉, 等. 湘东北重点城市臭氧污染季环境空气 VOCs 污染特征及来源分析[J]. 环境科学研究, 2026, 39(1): 50-60.
- [23] 张立伟. 城市机动车尾气排放污染现状及治理研究[J]. 资源节约与环保, 2020(7): 118.
- [24] 张皓. 冬季交通空气污染特征分析及控制建议[J]. 资源节约与环保, 2022(10): 57-60.
- [25] 万国宇. 机动车尾气污染问题及防治措施[J]. 时代汽车, 2021(17): 16-17.
- [26] 龚雁. 机动车尾气污染控制的研究进展及新技术[J]. 资源节约与环保, 2021(7): 38-39.
- [27] 田明. 机动车尾气污染防治的对策研究[J]. 黑龙江环境通报, 2023, 36(9): 95-97.