

DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2022112203

柴建伟, 牛月圆, 闫雨龙, 等. 地下停车场内挥发性有机物变化特征、来源及人体健康风险评估: 以北京市某一地下停车场为例[J]. 环境化学, 2023, 42(7): 2292-2303.

CHAI Jianwei, NIU Yueyuan, YAN Yulong, et al. Variation, source and health risk assessment of volatile organic compounds in underground park: A case study of an underground park in Beijing [J]. Environmental Chemistry, 2023, 42 (7): 2292-2303.

地下停车场内挥发性有机物变化特征、来源及人体健康风险评估: 以北京市某一地下停车场为例*

柴建伟¹ 牛月圆¹ 闫雨龙^{2**} 段小琳¹ 张翔宇¹
邢怡然¹ 郑旭¹ 彭林²

(1. 华北电力大学环境科学与工程学院资源环境系统优化教育部重点实验室, 北京, 102206; 2. 北京交通大学环境学院智能交通绿色低碳技术教育部工程研究中心, 北京, 100044)

摘要 采集北京市某一地下停车场内环境空气样品, 利用气相色谱-质谱/氢火焰离子化检测器 (GC-MSD/FID) 测定了挥发性有机物 (VOCs) 的组成, 分析其浓度特征、组分特征和影响因素, 运用特征物种比值法和正定矩阵因子分析模型 (PMF) 解析 VOCs 来源, 采用健康风险评估模型定量评估部分 VOCs 的健康风险. 结果表明, 地下停车场内 VOCs 平均浓度为 $514.16 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 其中烷烃占比最大 (43.76%), 其次是芳香烃 (28.89%)、烯烃 (10.97%). 影响停车场内 VOCs 浓度的主要因素包括机动车运行工况、机动车进出车次及扩散条件. 冷启动工况、较多的出入车次和不利的扩散条件会导致 VOCs 浓度显著上升. 苯/乙苯和苯/甲基叔丁基醚 (MTBE) 的均值分别为 1.5 和 0.8, 表明机动车尾气和汽油挥发是地下停车场内 VOCs 的主要来源. PMF 解析结果表明地下停车场内 VOCs 的首要来源为机动车尾气源 (44.58%), 汽油挥发源和汽车内饰挥发源分别贡献 24.56% 和 9.18%. 其中, 汽油挥发源在 08:00—10:00 时段贡献最大, 机动车尾气源在 16:00—18:00 时段贡献最大. 健康风险评估结果显示, 在日常暴露和职业暴露条件下苯、乙苯和 MTBE 的致癌风险均在 16:00—18:00 时段达到最大值, 而在职业暴露下苯和乙苯的致癌风险均高于安全阈值. 本研究定量解析了地下停车场内 VOCs 的来源, 可为停车场污染评估和人员健康风险的防控提供有效支撑.

关键词 地下停车场, 挥发性有机物, 变化特征, 来源解析, 健康风险.

Variation, source and health risk assessment of volatile organic compounds in underground park: A case study of an underground park in Beijing

CHAI Jianwei¹ NIU Yueyuan¹ YAN Yulong^{2**} DUAN Xiaolin¹
ZHANG Xiangyu¹ XING Yiran¹ ZHENG Xu¹ PENG Lin²

(1. Key Laboratory of Resources and Environmental System Optimization, Ministry of Education, College of Environmental Science and Engineering, North China Electric Power University, Beijing, 102206, China; 2. Engineering Research Center of Clean and Low-carbon Technology for Intelligent Transportation, Ministry of Education, School of the Environment, Beijing Jiaotong University, Beijing, 100044, China)

2022年11月22日收稿(Received: November 22, 2022).

* 国家重点研发计划项目 (2019YFC0214200) 和国家自然科学基金 (21976053, 42103056, 42273058) 资助.

Supported by the National Key R&D Program Project (2019YFC0214200) and National Natural Science Foundation of China (21976053, 42103056, 42273058).

** 通信联系人 Corresponding author, Tel: 010-51681262, E-mail: yanyulong@bjtu.edu.cn

Abstract The ambient air samples were collected from an underground park in Beijing and the composition of volatile organic compounds (VOCs) was determined by gas chromatography-mass spectrometry/hydrogen flame ionization detector (GC-MSD/FID). The concentration characteristics, composition characteristics and influencing factors of VOCs were analyzed. The sources of VOCs were identified by diagnostic ratios and positive matrix factorization (PMF). The health risk assessment model was used to quantitatively assess the health risks of some VOCs. The results showed that the average concentrations of VOCs in underground park were $514.16 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Alkanes were the main components (43.76%), followed by aromatics (28.89%) and alkenes (10.97%). The main influence factors on VOCs in underground park included the vehicles operation condition, the diffusion conditions and the number of vehicles entering and exiting. The cold start condition of vehicles, frequent vehicles entering and exiting and the unfavorable diffusion conditions can lead to a significant increase in VOCs concentration. The ratios of benzene/ethylbenzene and benzene/methyl tert-butyl ether (MTBE) were 1.5 and 0.8, respectively, which indicated that vehicle emissions and gasoline evaporation were the main sources of VOCs in underground park. The results of PMF showed that the main source of VOCs in underground park was the vehicle emission (44.58%), followed by the gasoline evaporation and the automobile interior evaporation, accounting for 24.56% and 9.18%, respectively. The gasoline evaporation made the largest contribution during 08:00—10:00, and the vehicle emissions made the largest contribution during 16:00—18:00. The results of health risk assessment showed that the carcinogenic risks of benzene, ethylbenzene and MTBE reached the maximum during 16:00—18:00 under the conditions of daily and occupational exposure. The carcinogenic risks of benzene and ethylbenzene were above the safety threshold under the condition of occupational exposure. This study quantitatively analyzed the sources of VOCs in the underground park, which provided the effective support for pollution assessment of the underground park and the control of health risks to people in the underground park.

Keywords underground park, volatile organic compounds, variation characteristics, source apportionment, health risk.

作为对流层臭氧(O_3)^[1]和二次有机气溶胶(secondary organic aerosol, SOA)生成的重要前体物^[2-3],挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)对城市 O_3 污染、光化学烟雾及灰霾污染有着重要影响^[4-6]。此外,部分VOCs具有“三致(致癌、致畸、致突变)”性,会通过皮肤和呼吸道进入人体,直接危害人体健康^[7-8]。因此,VOCs治理已经成为许多国家和科学家研究的重点方向之一^[9-10]。研究表明,VOCs成分复杂多变且来源众多,主要有工业源、燃煤源、机动车源、汽油和溶剂挥发源、植物排放源及生活源等^[4,11-12],研究难度较大。

随着我国城市化进程的不断发展,机动车保有量大幅上升,2021年北京、成都、重庆3个城市的汽车保有量均超过500万辆,另有17个城市保有量超过300万辆^[13]。研究显示,机动车尾气已经成为北京^[14]、成都^[15]、郑州^[16]等城市大气VOCs的最大来源,贡献分别达到35.08%、34.00%、30.50%。作为机动车大量停放和频繁出入的半封闭场所,地下停车场内高浓度的VOCs不仅会对人体健康产生危害,同时也会持续不断向室外传输VOCs,参与大气光化学反应,对城市空气质量产生重要影响^[17-18]。目前,国内外已经针对地下停车场内VOCs展开了相关研究。Castro等^[19]对巴西里约热内卢封闭停车场的研究表明,甲苯是浓度最高的芳香烃化合物;刘妍等^[20]对天津某地下停车场的研究显示,车辆进出次数和冷启动会显著影响VOCs浓度水平和分类特征;Mariusz等^[21]对波兰地下停车场的研究显示,停车场内空气流通较少会导致有机物浓度较高;Yan等^[22]研究了广东地下停车场内VOCs的来源,结果显示发动机排放和汽油挥发是停车场内芳香烃的主要来源;张猛^[23]对大连市某大型商场地下停车场的研究表明,苯对停车场内人员构成潜在致癌风险。

总体而言,目前国内针对地下停车场的调查有限,基础研究还比较薄弱,尚未定量解析停车场内 VOCs 的来源.因此,开展地下停车场内 VOCs 的研究,定量识别不同排放源对地下停车场 VOCs 的贡献,对进一步认识机动车排放对 VOCs 以及人体健康风险的影响具有重要意义.本研究选取北京市某一地下停车场作为研究对象,对停车场内环境空气进行采样,研究停车场内 VOCs 浓度及组分特征,使用正定矩阵因子分析模型(positive matrix factorization, PMF 模型)精细化解析 VOCs 来源,同时评估不同时段停车场内 VOCs 对人体健康的影响,旨在定量解析地下停车场 VOCs 的来源,为停车场内人员健康风险的防控提供有效支撑.

1 材料与方法 (Materials and methods)

1.1 样品采集与分析方法

1.1.1 样品采集

本研究选取北京市某一办公楼地下负 2 层停车场作为采样地点(图 1),该停车场面积约为 1278.4 m²,共计 48 个停车位,与楼体有 3 处电梯口相连,与室外仅有 1 个出入口相通.实验期间,停车场内人工通风系统停止工作,电梯口处于常闭状态,仅门禁出入口与室外有气体交换.本研究于 2021 年 5 月 31 日—6 月 6 日对停车场进行 7 d 连续采样,采样时间为 06:00—22:00,每个样品进行 2 h 连续积分采样,避免了车辆瞬时排放对采样结果的影响,采样口距离地面约 1.2—1.5 m,基本处于人体呼吸带高度.采样时使用阻尼采样器将空气样品采集到 3.2 L 苏玛罐(SUMMA canister)中,采样后的苏玛罐在避光室温下保存,且确保采样后 1 周之内进行分析.采样期间,同时记录停车场内温度、湿度及进出车辆数等信息.停车场内的车辆均为汽油车和电动汽车,其中电动汽车 4 辆,在研究中已扣除.采样 7 d 停车场车辆正常来往,日出入车次最多为 107 次,最少为 36 次,日均出入车次为 78 次,工作日早晚高峰期间基本均可停满.实验温差为室内温度-室外温度,室内温度使用温度计手动记录,室外温度来源为慧聚数据网站昌平区站点数据(<http://www.hjhj-e.com>).

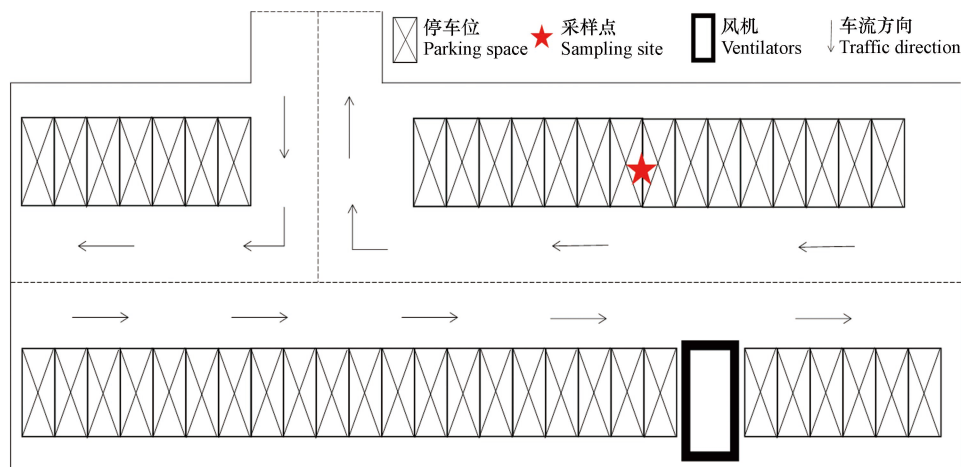


图 1 车场及采样点示意图

Fig.1 Schematic diagram of the park and sampling site

1.1.2 样品分析

本研究使用三级预浓缩仪(7200A, Entech Inc., USA)对气体样品进行预处理,随后通过气相色谱-质谱/火焰离子化检测器(7890B GC/5977B MSD/FID, Agilent Inc., USA)对 VOCs 物种进行检测分析.先从苏玛罐中抽出 400 mL 样品,将其收集到一级冷阱中,样品在-160 °C 冷却并在 10 °C 下解吸,然后使用纯氮和 Tenax-TA(吸附剂)将来自一级冷阱的样品在-40 °C 的二级冷阱中浓缩两次并于 180 °C 下解吸,之后 VOCs 样品被转移到-190 °C 的三级阱进行冷冻聚焦.随后,样品在高于 60 °C 的条件下解吸,并以高纯度氦气(99.99%)作为载气,经分流平板部分送至 HP-PLOT/Q 色谱柱(30 m×0.53 mm×40 μm, Agilent Inc., USA)分离后使用 FID 对 C2-C3 化合物检测,其余化合物经 DB-1 色谱柱(60 m×

0.25 mm×0.25 μm, Agilent Inc., USA) 进行分离后由 MSD 检测. 本文共研究地下停车场内 89 种 VOCs 物种, 包括 29 种烷烃、23 种芳香烃、10 种烯烃、1 种炔烃、14 种卤代烃和 12 种含氧/含硫类化合物, 如表 1 所示. 化合物的定性依据为色谱保留时间和质谱图, 本研究采用内标法(内标化合物为苯-d6、2-溴-1,1,1-三氟乙烷和氯苯-d5), 通过建立工作曲线对目标化合物进行定量分析^[24]. 每次使用仪器前都需要验证系统稳定性, 将内标添加到样品中, 根据内标浓度变化判断系统是否稳定.

表 1 VOCs 物种及分类
Table 1 Species and classification of VOCs

分类 Classification	物种 Species
烷烃	乙烷、丙烷、异戊烷、正戊烷、正丁烷、异丁烷、正己烷、2-甲基戊烷、3-甲基戊烷、2,2,4-三甲基戊烷、甲基环戊烷、异丁基环己烷、正庚烷、3-甲基己烷、2-甲基己烷、2,3-二甲基己烷、2,3,4-三甲基戊烷、甲基环己烷、辛烷、2-甲基庚烷、3-甲基庚烷、2,3-二甲基戊烷、壬烷、2,4-二甲基戊烷、2,2-二甲基丁烷、环戊烷、正癸烷、正十一烷、正十二烷
芳香烃	苯、甲苯、乙苯、间/对二甲苯、邻二甲苯、偏三甲苯、间乙基甲苯、对乙基甲苯、邻乙基甲苯、正丙苯、1,2,3-三甲苯、均三甲苯、对二乙苯、异丙基苯、间二乙苯、1,4-二氯苯、氯苯、1,2,4-三氯苯、1,2-二氯苯、1,3-二氯苯、苯乙烯、苯甲醛、萘
烯烃	乙烯、丙烯、1-丁烯、反-2-丁烯、反-2-戊烯、顺-2-丁烯、异戊二烯、1-戊烯、1-己烯、顺-2-戊烯
炔烃	乙炔
卤代烃	四氯化碳、三氯甲烷、1,2-二氯丙烷、1,2-二氯乙烷、溴二氯甲烷、氯乙烷、溴甲烷、二氯甲烷、氯甲烷、六氯-1,3-丁二烯、四氯乙烯、顺-1,3-二氯丙烯、氯乙烯、1,1-二氯乙烯
含氧/含硫类化合物	甲基叔丁基醚、丙酮、丁烯醛、甲基乙基酮、二硫化碳、甲基异丁基酮、正丁醛、异丙醇、己醛、四氢呋喃、乙酸乙酯、2-己酮

1.2 质量控制与保证

采样前, 用清罐仪(Entech-3100D)对苏玛罐进行 3—5 次重复清洗, 至少选取 1 只充入高纯氮气放置 24 h, 作为样品进行分析, 以保证目标化合物未检出或低于检出限; 清洗完成后, 置于避光恒温室内暂存. 采样期间, 用不锈钢密封帽将苏玛罐的进气口密封, 以避免接口处被污染或者真空状态被破坏. 进行实际样品分析前, 先进行空白检查, 确保仪器系统不会带来污染. 检测过程中进行重复性试验, 确保检测目标化合物浓度的相对偏差≤15%. 绘制标准曲线时, 保证每个响应因子的相对标准偏差(RSD)均<30%.

1.3 研究方法

1.3.1 PMF 模型

本研究使用 PMF 模型^[25], 根据模型物种选取原则^[26], 从 89 种 VOCs 物种中选择 41 种代表性物种进行来源定量分析, 其中包括 15 种烷烃、3 种烯烃、15 种芳香烃、6 种卤代烃和 2 种含氧化合物. 其基本原理是将受体矩阵分解为源成分谱矩阵、源贡献矩阵和残差矩阵. PMF 计算过程中的基本公式如(1)所示:

$$E_{ik} = \sum_{j=1}^p A_{ik} B_{jk} + \varepsilon_{ik} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中, E_{ik} 为 k 次观测的污染物 i 的浓度; j 为因子, A_{ik} 和 B_{jk} 分别为源成分谱和源贡献; ε_{ik} 为残差. PMF 主要是计算目标函数 Q 的最小值, 目标函数如(2)所示:

$$Q = \sum_i^m \sum_k^n \left(\frac{\varepsilon_{ik}}{\sigma_{ik}} \right)^2 \quad (2)$$

式中, σ_{ik} 样品的不确定性偏差. 样品的不确定度 U 计算公式如(3)所示:

$$U = \begin{cases} \sqrt{(E \cdot c)^2 + M^2} & (c > M) \\ \frac{5}{6} M & (c \leq M) \end{cases} \quad (3)$$

式中, E 为误差比例; M 为检测限; c 为污染物的浓度.

1.3.2 人体健康风险评估模型

苯、甲苯、乙苯、二甲苯(BTEX)和 MTBE 是美国环保署(US EPA)和国际癌症研究机构公布的有毒有害空气污染物,对人体健康有较大危害.本研究使 US EPA 的综合风险信息系统^[27](Integrated Risk Information System, IRIS)对 BTEX 和 MTBE 开展职业暴露和日常暴露下的非致癌风险评估,对苯、乙苯和 MTBE 开展两种暴露条件下的致癌风险评估.暴露浓度的计算公式如(4)所示:

$$EC = \frac{CA \times ET \times EF \times ED}{AT} \quad (4)$$

式中, EC 是吸入暴露浓度, $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; CA 是污染物平均浓度, $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; ET 是暴露时间,结合刘妍等^[20]和 Yan 等^[22]的研究,本文拟定停车场内人员职业暴露时间为 $10\text{ h}\cdot\text{d}^{-1}$,日常暴露时间为 $10\text{ min}\cdot\text{d}^{-1}$; EF 是暴露频率,按国家规定的正常工作时间 $260\text{ d}\cdot\text{a}^{-1}$ ^[28]; ED 是持续暴露时间,结合已有研究^[20,22],职业暴露选取 10 a ,日常暴露选取 30 a ; AT 是平均暴露时间,参考《中国人群暴露参数手册{成人卷}》规定(中华人民共和国环境保护部,2013年),选取 $74.8 \times 365\text{ d} \times 24\text{ h}$.

特定 VOCs 物种致癌风险(R)和非致癌风险(HQ)的估算公式分别如(5)所示:

$$R = EC \times IUR; HQ = EC / (RfC \times 1000) \quad (5)$$

式中, R 是估算的吸入性致癌风险; IUR 是单位吸入风险, $\text{m}^3\cdot\mu\text{g}^{-1}$,数据来自 US EPA 的 IRIS^[27]; HQ 是特定 VOCs 物种的非致癌风险商; RfC 是慢性参考浓度, $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$,数据来自 US EPA 的 IRIS; 致癌风险 R 低于 1×10^{-6} 被认为是相对安全的.此外,本文使用 $HI = \sum HQ$ 进行分析,其中 HI 是几种污染物的 HQ 之和.如果 HQ 或 HI 低于 1,则表示没有慢性致癌风险;但如果 HQ 超过 1,则代表长期接触后会有慢性致癌风险.

2 结果与讨论 (Results and discussion)

2.1 VOCs 浓度和组分特征

研究期间北京市某地下停车场内所有 VOCs 样品的平均浓度为 $514.16\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,远高于北京市^[29]空气中 VOCs 浓度($83.4\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$),与大连市^[23]某大型商场地下负 1 层停车场 VOCs 浓度($508.00\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)相当,低于该商场负 2 层停车场 VOCs 浓度($1250.00\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$);日均值变化范围为 $310.60\text{—}742.69\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,显著高于北京市^[29]空气中 VOCs 的浓度变化范围($21.4\text{—}439.1\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$).

研究期间,烷烃(43.76%)是地下停车场内 VOCs 的主要组分(图 2),其次是芳香烃(29.89%)和烯烃(10.97%),炔烃(1.08%)占比最小,与北京市^[29-30]空气中 VOCs 组分特征基本一致.

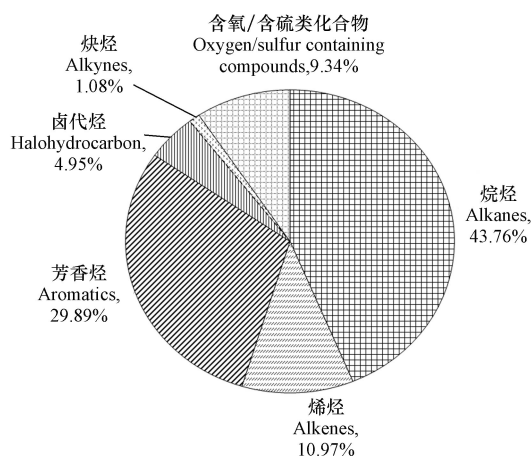


图 2 地下停车场 VOCs 组分特征

Fig.2 Composition characteristics of VOCs in underground park

浓度排名前十的物种分别为:甲苯($67.94\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)、异戊烷($57.43\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)、正戊烷($26.94\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)、甲基叔丁基醚($23.42\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)、乙烯($21.43\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)、苯($18.63\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)、正丁烷($17.79\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)、正己烷

($15.74 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)、间/对二甲苯($15.33 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)和丙烯($14.97 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)。本研究中甲苯浓度最高, 与里约热内卢^[19]($209.24 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)、波兰北部^[21]($12.90 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)和广州^[22]($239.90 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)等城市停车场研究中甲苯为优势物种的结果一致, 但浓度大小存在一定差异, 可能与采样周期、采样方式以及停车场状况不同有关。

早高峰时段(8:00—10:00)烷烃(54.26%)占比最大, 其次是芳香烃(22.16%)。该时段异戊烷浓度最高($67.01 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 其次是甲苯($34.85 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)。异戊烷是汽油挥发典型示踪物^[31], 该时段 VOCs 浓度可能与汽油挥发排放较大有关。晚高峰时段(16:00—18:00)烷烃(40.23%)占比最大, 其次是芳香烃(32.89%)。该时段甲苯浓度最高($109.40 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 相比早高峰上升 213.92%, 甲苯是机动车尾气排放的特征物种^[32-33], 该时段 VOCs 可能受尾气排放影响较大。

2.2 地下停车场 VOCs 浓度影响因素分析

研究期间, 周五地下停车场内 VOCs 日均浓度最高($742.69 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 相比周四浓度上升了 139.15%, 为变化幅度最大的一天。考虑到周末放假的影响(图 3), 周五当天办公楼内人员活动频率上升, 燃油车出入次数(107 次)的显著增加导致较多的尾气排放可能是当天 VOCs 浓度急剧升高的原因。早高峰时段和晚高峰时段是地下停车场内 VOCs 浓度上升最快的两个时段, 变化率分别达到 93.92% 和 56.28%, 可能是由于这两个时段燃油车出入次数最多(分别为 17 次和 16 次), 短时间内污染物排放量大导致

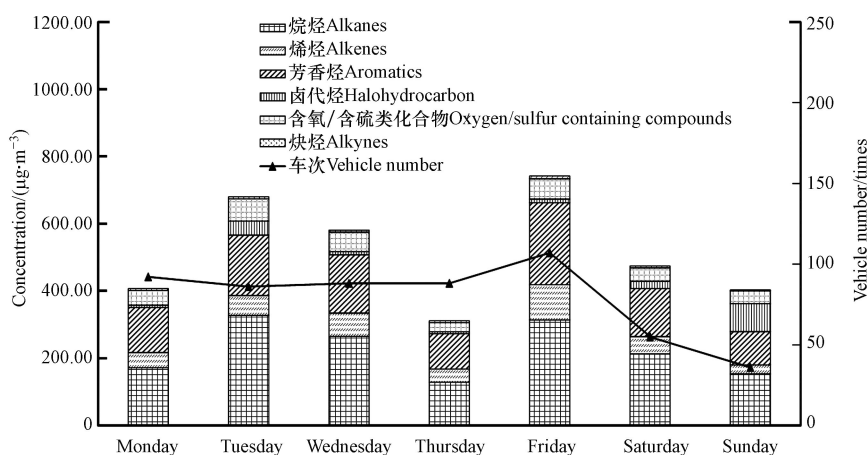


图 3 地下停车场 VOCs 变化特征和机动车出入情况

Fig.3 Variation characteristics of VOCs and vehicle number in underground park

地下停车场内 VOCs 浓度在周二达到第二高峰($680.92 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 相比周一增加了 67.41%。当天燃油车出入次数只有 86 次, 比周一减少 6 次, 但周一到周三期间, 室外天气以阴雨天为主。连续的阴雨天导致室内外温差较小, 其中周二室内外温差仅为 0.1°C 。研究表明, 当室内外温差较小时, VOCs 不利于向室外扩散^[34]。周四当天天气转晴, 室内外温差增大, 有利于气体交换, VOCs 浓度明显降低。因此, 不利的扩散条件会导致燃油车排放的大量尾气无法及时排出, 从而使得 VOCs 累积。

研究期间, VOCs 浓度呈现“单峰”的变化特征(图 4), 最高峰出现在晚高峰时段, 峰值为 $789.29 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。在进出车次相近的情况下, 晚高峰时段 VOCs 浓度是早高峰时段的 2.25 倍, 这可能是由于晚高峰燃油车冷启动时发动机内温度较低, 燃油燃烧不充分导致^[35], 同时三元催化器在燃油车冷启动时起燃时间较长导致尾气无法得到有效处理也有一定影响^[36]。此外, 由于地下停车场与外界气体交换能力有限, 造成的污染物不断累积也会影响 VOCs 浓度^[23, 37]。采样 7 d 内, 晚高峰时段 VOCs 浓度均大于早高峰时段, 表明燃油车冷启动对停车场内 VOCs 浓度的影响大于正常运行工况。

2.3 VOCs 来源解析

2.3.1 特征物种比值

研究表明, 芳香烃之间的比值可以用来识别不同排放源^[4, 12]。隧道内机动车的研究发现, 通常苯/乙苯(B/E)比值小于 5, 甲苯/乙苯(T/E)比值小于 6^[38-39]。广州某隧道 B/E 值和 T/E 值分别为 0.7 和 3.1^[22]。

异戊烷与正戊烷具有相似的大气寿命,通过异戊烷与正戊烷的比值(I/N)可初步判断 VOCs 来源.有研究结果显示,我国隧道实验和汽油挥发 I/N 值分别约为 2.9 和 3.8^[40-41].本研究中 B/E 值和 T/E 值分别为 1.5 和 5.9,约为广州某隧道的 2 倍,高甲苯和高苯表明地下停车场受机动车尾气的影响显著高于隧道^[42]; I/N 值为 2.4,与隧道实验的比值较为接近,表明地下停车场内 VOCs 可能主要受机动车尾气的影

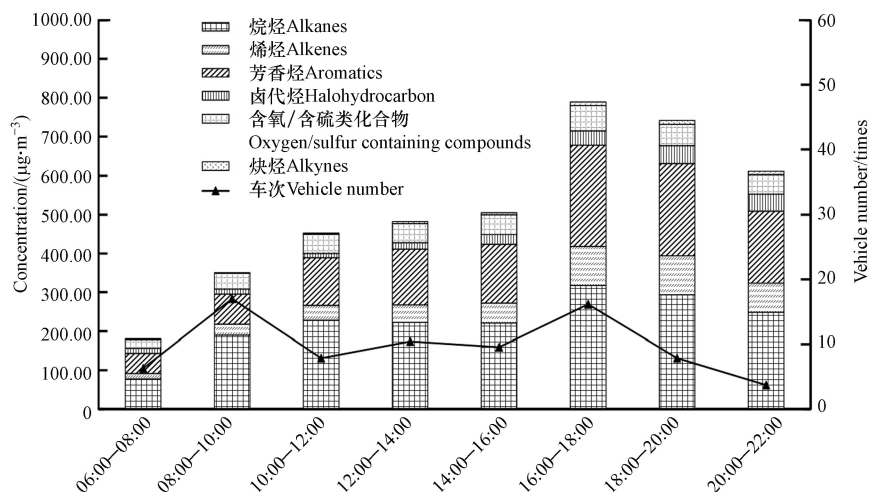


图 4 地下停车场 VOCs 日变化和车辆出入情况

Fig.4 Diurnal variation of VOCs and vehicle number in underground park

MTBE 通常被用作汽油蒸发和汽车尾气排放的示踪物^[43].本研究中, B/MTBE 值和 T/MTBE 值分别为 0.8 和 2.9,略大于隧道空气内的比值(0.6 和 2.1); E/MTBE 值和 X/MTBE 值分别为 0.5 和 1.2,与 90#汽油中的比值(0.4 和 1.2)相似^[22].研究发现,由于发动机运转时甲苯和二甲苯脱烷基导致 MTBE 和苯的富集量减少,此时 B/MTBE 比值较高,机动车尾气排放是主要影响^[22].本研究中,较高的 B/MTBE 值(0.8)表明汽车尾气排放可能是地下停车场内 VOCs 的主要来源,另外汽油挥发也有一定影响.

对特征物种比值进行小时特征分析, B/MTBE、T/MTBE、E/MTBE、X/MTBE 的比值均表现出相同特征:早高峰时段比值最小,而在晚高峰时段最大.可能由于早高峰时段机动车较热,大量机动车短时间涌入地下停车场,停车场内温度升高,有利于汽油挥发,特征物种比值较低^[22];随着出入车辆减少及室内外气体交换,停车场内温度逐渐降低,汽油挥发作用减弱,汽车尾气影响逐渐增大;晚高峰时段,机动车因冷启动在短时间内排放出大量尾气,导致 VOCs 浓度迅速升高,特征物种比值也达到最大值.因此,早高峰时段汽油挥发对停车场内 VOCs 影响最大,而晚高峰时段机动车尾气占主导作用.

2.3.2 PMF 来源解析

本研究使用 EPA PMF 5.0 模型对停车场内 VOCs 样品进行源解析,结果如图 5 所示.因子 1 中甲苯、乙苯、丙烯、C3—C5 烷烃和芳香烃贡献较大,甲苯等芳香烃物是汽车尾气示踪剂^[32-33],丙烯主要来自机动车尾气排放^[44], C3-C5 类烷烃以及芳香烃是城市机动车尾气排放的主要物种^[45-47],因子 1 被识别为是机动车尾气源.因子 2 中正戊烷、异戊烷和 MTBE 贡献较大,3 个物种均是汽油挥发的示踪物^[31,48];结合源谱^[49]可知,正丁烷、异戊烷、正戊烷和环戊烷对汽油挥发源的贡献大于机动车尾气源,而乙烯和丙烯对两个污染源的贡献则表现出相反的特征,因子 2 被识别为是汽油挥发源.因子 3 中贡献较大的物种有三氯乙烯、四氯化碳、氯代烃和丙酮等,三氯乙烯和四氯化碳是汽车内有机清洗剂的主要成分^[50],氯代烃和丙酮是常见的汽车内饰挥发物^[51-53],因子 3 被识别为是汽车内饰挥发源.因子 4 中贡献较大的物种有异戊二烯、四氯化碳、正己烷、环戊烷、苯乙烯和均三甲苯等,由于特征物种来源较为复杂,可能受室外空气交换的影响,因子 4 被识别为是其他源.

如图 6 所示,机动车尾气源对地下停车场内 VOCs 贡献最大(44.58%),汽油挥发源和汽车内饰挥发源贡献分别为 24.56% 和 9.18%.由此可知,地下停车场内 VOCs 的主要来源是机动车尾气源,汽油挥发源也有较大贡献.

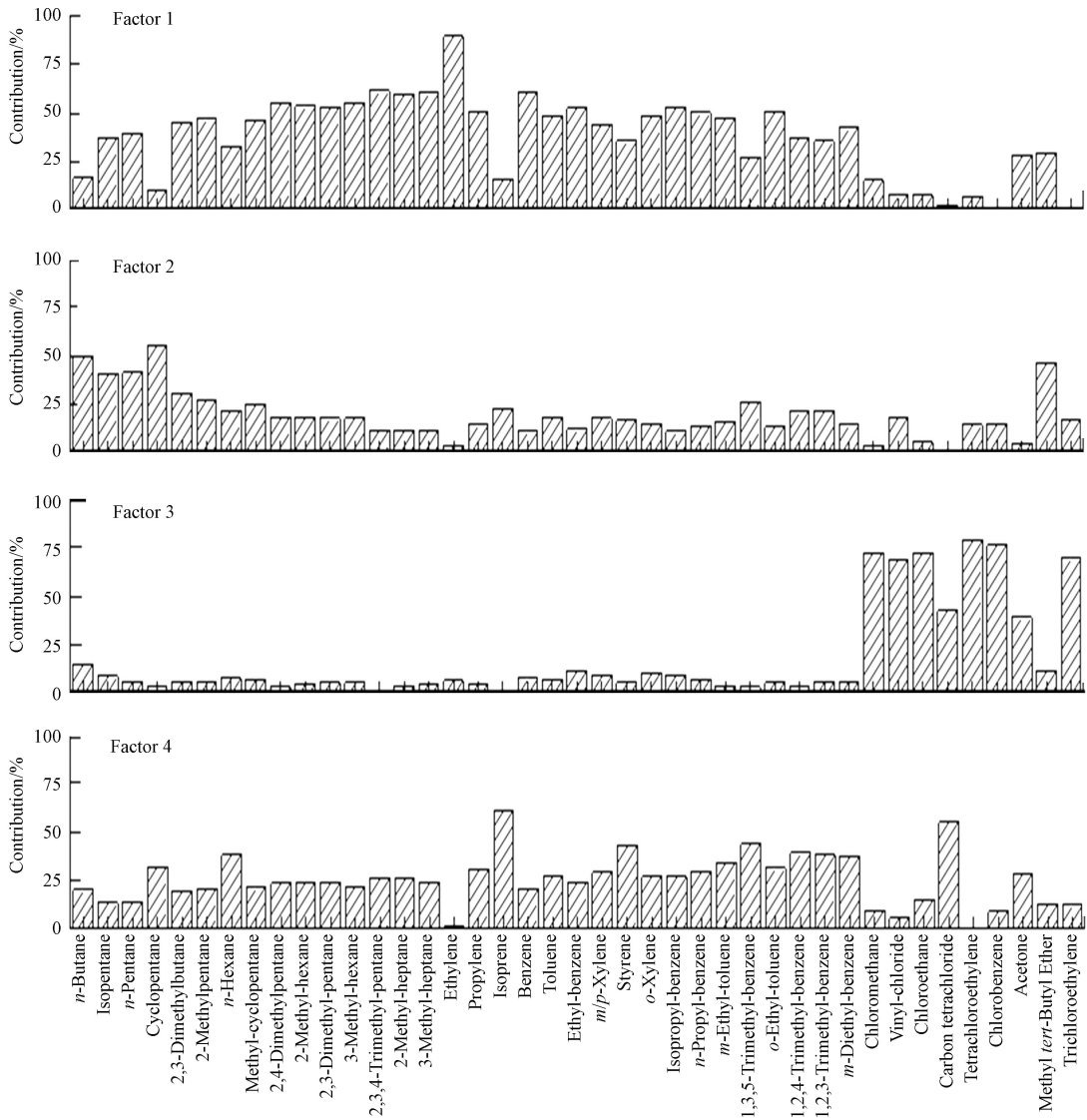


图 5 PMF 源解析源谱结果

Fig.5 Source apportionment results of PMF

- ▨ 机动车尾气源 Vehicle emission
- ▩ 汽油挥发源 Gasoline evaporation
- ▧ 汽车内饰挥发源 Automobile interior evaporation
- ▦ 其他源 Others

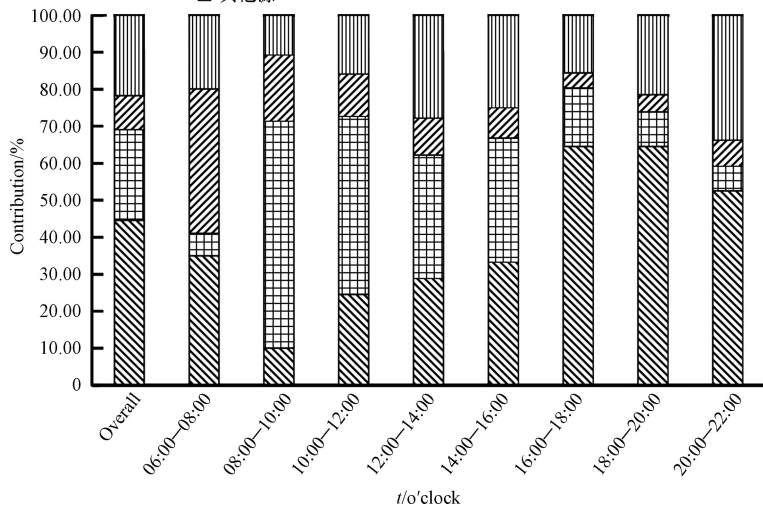


图 6 PMF 源解析结果

Fig.6 Source apportionment results of PMF

各时段四类源的贡献如图 6 所示, 汽车内饰挥发源在 06:00—08:00 时段对 VOCs 的贡献最大 (38.98%), 早高峰时段汽油挥发源贡献最大 (61.27%), 晚高峰时段机动车尾气贡献最大 (64.57%)。06:00—08:00 时段, 由于机动车出入较少, 此时累积在停车场中的汽车内饰挥发物贡献最大; 早高峰时段机动车温度较高, 短时间内大量机动车进入使停车场内温度升高, 利于汽油挥发出大量 VOCs; 晚高峰时段, 大量机动车在冷启动工况下汽油不完全燃烧排放出高浓度的 VOCs, 导致机动车尾气贡献最大。因此, 在早晚高峰时段应加大地下停车场的通风强度, 以减少汽油挥发和机动车尾气的影响。

2.4 人体健康风险评估

本研究对苯(B)、甲苯(T)、乙苯(E)、二甲苯(间\对二甲苯和邻二甲苯)(X)和 MTBE 开展停车场中人员(成人)的职业暴露和日常暴露健康风险评估。采样期间这 6 类芳香烃物种占总芳香烃浓度的 82.21%, MTBE 占含氧/含硫类化合物总浓度的 48.73%。

在职业暴露的情况下, 采样期间 BTEX 和 MTBE 的 HI 为 3.72×10^{-2} , 低于 EPA 认定的安全阈值 (HI=1), 表明 BTEX 和 MTBE 的非致癌风险在安全范围内; 苯、乙苯和 MTBE 的致癌风险 R 分别为 5.77×10^{-6} 、 1.14×10^{-6} 和 2.42×10^{-7} , 苯和乙苯高于 EPA 规定的安全阈值 (1.0×10^{-6}), 表明苯和乙苯有致癌风险。日变化分析显示(图 7), 苯的致癌风险全天均高于安全阈值, 乙苯的致癌风险在 12:00—22:00 期间高于安全阈值, 两个物种均在晚高峰时段达到一天中的最大值, 分别是安全阈值的 10.56 倍和 2.00 倍。因此, 工作人员应加强个人防护, 尽量减少晚高峰期间在停车场内停留的时间。

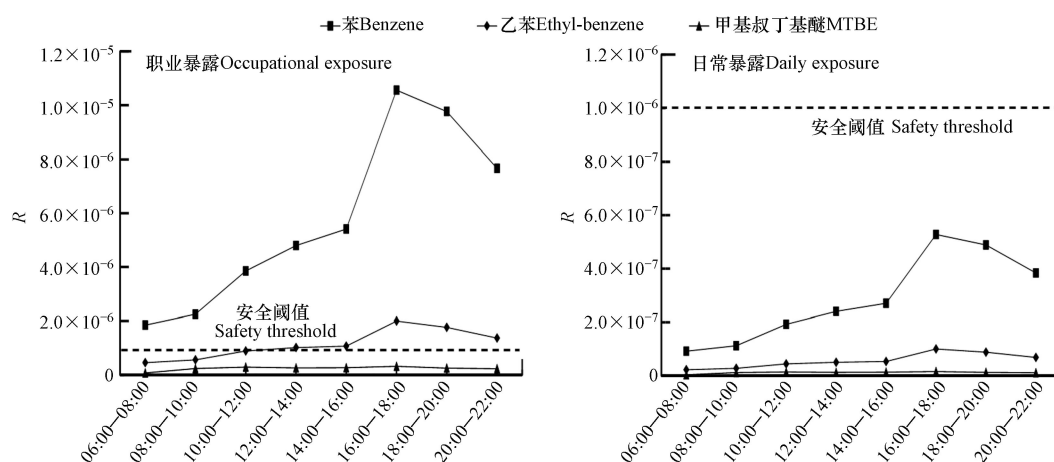


图 7 职业暴露和日常暴露下三个物种致癌风险 R 小时变化

Fig.7 Hourly variation of carcinogenic risk of three species under occupational exposure and daily exposure

在日常暴露的情况下, 采样期间 BTEX 和 MTBE 的 HI 为 1.86×10^{-3} , 低于 EPA 认定的安全阈值 (HI=1), 表明 BTEX 和 MTBE 的非致癌风险在安全范围内; 苯、乙苯和 MTBE 的致癌风险 R 分别为 2.88×10^{-7} 、 5.71×10^{-8} 和 1.21×10^{-8} , 全部低于 EPA 规定的安全阈值 (1.0×10^{-6}), 表明 3 个物种的致癌风险均在安全范围内。日变化分析显示(图 7), 苯、乙苯和 MTBE 的致癌风险全天均低于安全阈值, 在晚高峰时段达到一天中的最大值, 分别比前一时段上升 95.28%、86.91% 和 19.77%。因此, 晚高峰时段要尽量避免在停车场内长时间停留。

3 结论 (Conclusion)

(1) 观测期间, 地下停车场内 VOCs 样品平均浓度为 $514.16 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, VOCs 浓度日变化呈现“单峰”特征, 峰值浓度达到 $789.29 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。影响停车场内 VOCs 浓度的主要因素有: 机动车运行工况、进出车次以及扩散条件, 其中车辆冷启动工况影响较大。

(2) 源解析结果显示, 机动车尾气 (44.58%) 是地下停车场内 VOCs 的最大排放源, 汽油挥发 (24.56%) 也有较大贡献。其中, 在早高峰时段汽油挥发源对 VOCs 贡献最大 (61.27%), 而机动车尾气是晚高峰时段 VOCs 的主要来源 (64.57%)。

(3) 健康风险评估结果显示, 在日常暴露和职业暴露条件下苯、乙苯和 MTBE 的致癌风险均在 16:00-18:00 时段达到最大值, 而在职业暴露下苯和乙苯的致癌风险均高于安全阈值。

(4) 为保护暴露人群健康, 早晚高峰期间要加大地下停车场内的通风强度, 同时人们应尽量避免晚高峰时段在停车场内长时间停留。

(5) 本文对机动车运行工况、进出车次及扩散条件三个因素进行了研究, 未来会针对机动车类型、品牌、油品等其他因素继续深入研究。

参考文献 (References)

- [1] MOZAFFAR A, ZHANG Y L, FAN M Y, et al. Characteristics of summertime ambient VOCs and their contributions to O₃ and SOA formation in a suburban area of Nanjing, China [J]. *Atmospheric Research*, 2020, 240: 104923.
- [2] SHENG J J, ZHAO D L, DING D P, et al. Characterizing the level, photochemical reactivity, emission, and source contribution of the volatile organic compounds based on PTR-TOF-MS during winter haze period in Beijing, China [J]. *Atmospheric Research*, 2018, 212: 54-63.
- [3] HE Z R, WANG X M, LING Z H, et al. Contributions of different anthropogenic volatile organic compound sources to ozone formation at a receptor site in the Pearl River Delta region and its policy implications [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, 19(13): 8801-8816.
- [4] 李如梅, 武媛媛, 彭林, 等. 朔州市夏季环境空气中VOCs的污染特征及来源解析 [J]. *环境化学*, 2017, 36(5): 984-993.
LI R M, WU Y Y, PENG L, et al. Characteristics and sources apportionment of ambient volatile organic compounds (VOCs) in summer in Shuozhou [J]. *Environmental Chemistry*, 2017, 36(5): 984-993(in Chinese).
- [5] WANG Y M, WANG Y H, TANG G Q, et al. High gaseous carbonyl concentrations in the upper boundary layer in Shijiazhuang, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 799: 149438.
- [6] DONG Y M, LI J, GUO J P, et al. The impact of synoptic patterns on summertime ozone pollution in the North China Plain [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 735: 139559.
- [7] 曹娟, 毋振海, 鲍捷萌, 等. 美国人为源VOCs管控经验及其对我国的启示 [J]. *环境科学研究*, 2022, 35(3): 633-649.
CAO J, WU Z H, BAO J M, et al. Processes and experience of anthropogenic VOCs management and control in USA and enlightenment to China [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2022, 35(3): 633-649(in Chinese).
- [8] 杨燕萍, 陈强, 孟宪红, 等. 兰州市夏季挥发性有机物污染特征及来源解析 [J]. *环境科学*, 2022, 43(12): 5442-5452.
YANG Y P, CHEN Q, MENG X H, et al. Summer pollution characteristics and sources of volatile organic compounds in Lanzhou [J]. *Environmental Science*, 2022, 43(12): 5442-5452(in Chinese).
- [9] ATKINSON R. Atmospheric chemistry of VOCs and NO_x [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, 34(12/13/14): 2063-2101.
- [10] GARG A, GUPTA N C. A comprehensive study on spatio-temporal distribution, health risk assessment and ozone formation potential of BTEX emissions in ambient air of Delhi, India [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 659: 1090-1099.
- [11] 邵华, 张俊平. 中国VOCs治理现状综述 [J]. *中国氯碱*, 2018(11): 29-32.
SHAO H, ZHANG J P. Overview of VOCs governance in China [J]. *China Chlor-Alkali*, 2018(11): 29-32(in Chinese).
- [12] 牛月圆, 刘悼诚, 李如梅, 等. 阳泉市区夏季挥发性有机物污染特征、来源解析及其环境影响 [J]. *环境科学*, 2020, 41(7): 3066-3075.
NIU Y Y, LIU Z C, LI R M, et al. Characteristics, source apportionment, and environmental impact of volatile organic compounds in summer in Yangquan [J]. *Environmental Science*, 2020, 41(7): 3066-3075(in Chinese).
- [13] 中国政府网. 2021年全国机动车保有量达3.95亿新能源汽车同比增59.25%[EB/OL]. [2022-01-12]. http://www.gov.cn/xinwen/2022-01/12/content_5667715.htm
- [14] 李斌, 张鑫, 李娜, 等. 北京市春夏挥发性有机物的污染特征及源解析 [J]. *环境化学*, 2018, 37(11): 2410-2418.
LI B, ZHANG X, LI N, et al. Pollution characteristics and source analysis of volatile organic compounds in spring and summer in Beijing [J]. *Environmental chemistry*, 2018, 37(11): 2410-2418(in Chinese).
- [15] 徐晨曦, 陈军辉, 姜涛, 等. 成都市区夏季大气挥发性有机物污染特征及来源解析 [J]. *环境科学*, 2020, 41(12): 5316-5324.
XU C X, CHEN J H, JIANG T, et al. Characteristics and sources of atmospheric volatile organic compounds pollution in summer in Chengdu [J]. *Environmental Science*, 2020, 41(12): 5316-5324(in Chinese).
- [16] 张翼翔, 尹沙沙, 袁明浩, 等. 郑州市春季大气挥发性有机物污染特征及源解析 [J]. *环境科学*, 2019, 40(10): 4372-4381.
ZHANG Y X, YIN S S, YUAN M H, et al. Characteristics and source apportionment of ambient VOCs in spring in Zhengzhou [J]. *Environmental Science*, 2019, 40(10): 4372-4381(in Chinese).
- [17] 温肖宇, 赵文婷, 罗淑贞, 等. 运城市区夏季大气挥发性有机物污染特征及来源解析 [J]. *环境科学*, 2022, 43(6): 2979-2986.
WEN X Y, ZHAO W T, LUO S Z, et al. Pollution characteristics and source apportionment of atmospheric volatile organic compounds

- in summer in Yuncheng city [J]. *Environmental Science*, 2022, 43(6): 2979-2986 (in Chinese).
- [18] 库盈盈, 任万辉, 苏枫枫, 等. 沈阳市不同功能区挥发性有机物分布特征及臭氧生成潜势 [J]. *环境科学*, 2021, 42(11): 5201-5209.
- KU Y Y, REN W H, SU C C, et al. Pollution characteristics and ozone formation potential of ambient VOCs in different functional zones of Shenyang, China [J]. *Environmental Science*, 2021, 42(11): 5201-5209 (in Chinese).
- [19] de CASTRO B P, de SOUZA MACHADO G, BAUERFELDT G F, et al. Assessment of the BTEX concentrations and reactivity in a confined parking area in Rio de Janeiro, Brazil [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 104: 22-26.
- [20] 刘妍, 杨宁, 孙露娜, 等. 地下停车场VOCs污染特征与健康风险评价 [J]. *环境科学*, 2022, 43(12): 5453-5463.
- LIU Y, YANG N, SUN L N, et al. Characteristics and health risk assessment of VOCs in an underground parking garage [J]. *Environmental Science*, 2022, 43(12): 5453-5463 (in Chinese).
- [21] MARĆ M, ŚMIEŁOWSKA M, ZABIEGAŁA B. Concentrations of monoaromatic hydrocarbons in the air of the underground car park and individual garages attached to residential buildings [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 573: 767-777.
- [22] YAN Y L, HE Q, SONG Q, et al. Exposure to hazardous air pollutants in underground car parks in Guangzhou, China [J]. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 2017, 10(5): 555-563.
- [23] 张猛. 停车场中VOCs组分特征研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2016.
- ZHANG M. The research of VOCs components characteristic in a parking area[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2016(in Chinese).
- [24] 张翔宇. 长治市环境空气中挥发性有机物来源解析及环境影响研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2022.
- ZHANG X Y. Source analysis and environmental impact study of volatile organic compounds in Changzhi[D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2022(in Chinese).
- [25] NORRIS G, DUVAL R, BROWN S, et al. EPA Positive Matrix Factorization (PMF) 5.0 Fundamentals and User Guide[C]. 2014.
- [26] HUI L, LIU X, TAN Q, et al. VOC characteristics, sources and contributions to SOA formation during haze events in Wuhan, Central China [J]. *Science of The Total Environment*, 2019, 650: 2624-2639.
- [27] US EPA O O S W. Risk Assessment Guidance for Superfund (RAGS), Volume I: Human Health Evaluation Manual (Part E, Supplemental Guidance for Dermal Risk Assessment) Interim[C]. 2009.
- [28] 南淑清, 张霖琳, 张丹, 等. 郑州市环境空气中VOCs的污染特征及健康风险评价 [J]. *生态环境学报*, 2014, 23(9): 1438-1444.
- NAN S Q, ZHANG L L, ZHANG D, et al. Pollution condition and health risk assessment of VOCs in ambient air in Zhengzhou [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(9): 1438-1444 (in Chinese).
- [29] LIU Y, KONG L, LIU X, et al. Characteristics, secondary transformation, and health risk assessment of ambient volatile organic compounds (VOCs) in urban Beijing, China [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2021, 12(3): 33-46.
- [30] 张利慧, 毋振海, 李斌, 等. 北京市城区春季大气挥发性有机物污染特征 [J]. *环境科学研究*, 2020, 33(3): 526-535.
- ZHANG L H, WU Z H, LI B, et al. Pollution characterizations of atmospheric volatile organic compounds in spring of Beijing urban area [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(3): 526-535 (in Chinese).
- [31] TSAI W Y, CHAN L Y, BLAKE D R, et al. Vehicular fuel composition and atmospheric emissions in South China: Hong Kong, Macau, Guangzhou, and Zhuhai [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2006, 6(11): 3281-3288.
- [32] SONG Y, SHAO M, LIU Y, et al. Source apportionment of ambient volatile organic compounds in Beijing [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41(12): 4348-4353.
- [33] WANG H L, WANG Q, CHEN J M, et al. Do vehicular emissions dominate the source of C6-C8 aromatics in the megacity Shanghai of Eastern China? [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2015, 27: 290-297.
- [34] 陈穗玲, 李锦文, 陈南, 等. 地下车库空气中苯系物浓度的时间分布特征与污染评价 [J]. *中国环境监测*, 2013, 29(5): 32-37.
- CHEN S L, LI J W, CHEN N, et al. Underground garage of benzene homologues in air concentration distribution characteristics and pollution evaluation [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2013, 29(5): 32-37 (in Chinese).
- [35] 张凯. 西安市机动车尾气污染控制研究[D]. 西安: 长安大学, 2014.
- ZHANG K. Study on vehicle pollution and control strategies in xi'an[D]. Xi'an: Changan University, 2014(in Chinese).
- [36] 袁守利, 颜伏伍, 杜传进, 等. 降低汽油机冷启动过程HC排放的分级催化转化技术研究 [J]. *小型内燃机与摩托车*, 2005, 34(4): 26-28.
- YUAN S L, YAN F W, DU C J, et al. Research on technology of classic catalysis for reducing HC emissions from gasoline engines in cold start [J]. *Small Internal Combustion Engine*, 2005, 34(4): 26-28 (in Chinese).
- [37] 黄洪涛, 高运川, 裘季冰, 等. 室内空气环境VOCs浓度场的CFD仿真分析 [J]. *上海师范大学学报(自然科学版)*, 2008, 37(3): 313-320.
- HUANG H T, GAO Y C, QIU J B, et al. CFD simulation and analysis for VOCs concentration field in indoor environment [J]. *Journal of Shanghai Normal University (Natural Sciences)*, 2008, 37(3): 313-320 (in Chinese).
- [38] WANG X M, SHENG G Y, FU J M, et al. Urban roadside aromatic hydrocarbons in three cities of the Pearl River Delta,

- People's Republic of China [J]. *Atmospheric Environment*, 2002, 36(33): 5141-5148.
- [39] ZHAO L R, WANG X M, HE Q S, et al. Exposure to hazardous volatile organic compounds, PM₁₀ and CO while walking along streets in urban Guangzhou, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, 38(36): 6177-6184.
- [40] 齐一谨, 王玲玲, 倪经纬, 等. 郑州市夏季大气VOCs污染特征及来源解析 [J]. *环境科学*, 2022, 43(12): 5429-5441.
QI Y J, WANG L L, NI J W, et al. Characteristics and source apportionment of ambient summer volatile organic compounds in Zhengzhou, China [J]. *Environmental Science*, 2022, 43(12): 5429-5441 (in Chinese).
- [41] ZHENG H, KONG S F, XING X L, et al. Monitoring of volatile organic compounds (VOCs) from an oil and gas station in northwest China for 1 year [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, 18(7): 4567-4595.
- [42] ZHU H, WANG H, JING S, et al. Characteristics and sources of atmospheric volatile organic compounds (VOCs) along the mid-lower Yangtze River in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2018, 190: 232-240.
- [43] WONG Y C, SIN D W M, YEUNG L L. Assessment of the air quality in indoor car parks [J]. *Indoor and Built Environment*, 2002, 11(3): 134-145.
- [44] 刘芮伶, 翟崇治, 李礼, 等. 重庆主城区夏秋季挥发性有机物(VOCs)浓度特征及来源研究 [J]. *环境科学学报*, 2017, 37(4): 1260-1267.
LIU R L, ZHAI C Z, LI L, et al. Concentration characteristics and source analysis of ambient VOCs in summer and autumn in the urban area of Chongqing [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(4): 1260-1267 (in Chinese).
- [45] MO Z W, SHAO M, LU S H. Compilation of a source profile database for hydrocarbon and OVOC emissions in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, 143: 209-217.
- [46] 杨帆, 闫雨龙, 戈云飞, 等. 晋城市冬季环境空气中挥发性有机物的污染特征及来源解析 [J]. *环境科学*, 2018, 39(9): 4042-4050.
YANG F, YAN Y L, GE Y F, et al. Characteristics and source apportionment of ambient volatile organic compounds in winter in Jincheng [J]. *Environmental Science*, 2018, 39(9): 4042-4050 (in Chinese).
- [47] CAI C J, GENG F H, TIE X X, et al. Characteristics and source apportionment of VOCs measured in Shanghai, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, 44(38): 5005-5014.
- [48] POULOPOULOS S, PHILIPPOPOULOS C. Influence of MTBE addition into gasoline on automotive exhaust emissions [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, 34(28): 4781-4786.
- [49] WU R R, XIE S D. Spatial distribution of ozone formation in China derived from emissions of speciated volatile organic compounds. *Environmental Science & Technology*. 2017, 51(5): 2574-2583.
- [50] 王瑞锋, 李芳萍, 李伟伟. 控制汽车车内挥发性有机物的关键点与措施 [J]. *质量与认证*, 2018(5): 60-62.
WANG R F, LI F P, LI W W. The key points and measures to control vehicle interior volatile organic compounds [J]. *China Quality Certification*, 2018(5): 60-62 (in Chinese).
- [51] 郑勇. 浅析车内挥发性有机物的来源及检测 [J]. *纺织科技进展*, 2017(2): 35-39.
ZHENG Y. Analysis of the sources and related test of volatile organic compounds in automobiles [J]. *Progress in Textile Science & Technology*, 2017(2): 35-39 (in Chinese).
- [52] 夏庆云. 汽车车内有机挥发物(VOC)的检测 [J]. *环境技术*, 2010, 29(4): 40-43,46.
XIA Q Y. Introduction of determination of automotive interior volatile organic compounds(VOC) [J]. *Environmental Technology*, 2010, 29(4): 40-43,46 (in Chinese).
- [53] 李亚伟, 安德英, 孙涛, 等. 汽车整车内部VOC检测研究 [J]. *时代汽车*, 2020(3): 28-29.
LI Y W, AN D Y, SUN T, et al. Study on VOC detection in automobile [J]. *Auto Time*, 2020(3): 28-29 (in Chinese).