



文章栏目：环境监测技术

DOI 10.12030/j.cjee.202204075 中图分类号 X508 文献标识码 A

王涵, 黄盛浩, 邓梦思, 等. 成都市地铁站及车厢内挥发性有机化合物种类探究及影响因素分析[J]. 环境工程学报, 2022, 16(8): 2796-2806. [WANG Han, HUANG Shenghao, DENG Mengsi, et al. Investigation of volatile organic compounds types in Chengdu metro stations and carriages and their influencing factor analysis[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(8): 2796-2806.]

成都市地铁站及车厢内挥发性有机化合物种类探究及影响因素分析

王涵^{1,2}, 黄盛浩¹, 邓梦思¹, 袁艳平^{1,✉}

1. 西南交通大学机械工程学院, 成都 610031; 2. 西南交通大学唐山研究生院, 唐山 063000

摘要 为探究成都地铁站及车厢内部挥发性有机化合物 (VOCs) 种类、来源及影响因素, 使用恒流气体采样器和 TENAX-TA 采样管, 对不同路线不同人流量期间地铁车厢内、车厢通风口和站台内部 (站厅层和站台层) 空气进行采样, 利用气相色谱质谱联用仪 (GC-MS) 对车厢内 VOCs 进行分析。结果表明: 地铁站及车厢内部 VOCs 主要以烷烯烃类和苯系物为主, 分别占污染物种类的 42.59% 和 27.78%; 高峰期时段车厢内 VOCs 整体质量浓度 (46.47 ± 3.2) $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 略高于非高峰期时段 (41.35 ± 3.82) $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; 地铁机械通风系统可以有效稀释车厢内 VOCs 质量浓度; 站厅层 VOCs 质量浓度 (44.99 ± 13.84) $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 高于站台层的质量浓度 (35.05 ± 11.28) $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。由此可以看出, 成都地铁内 VOCs 污染种类受人员密集、大气环境和通风设施等综合因素影响。本研究成果可为西南地区地铁系统 VOCs 污染的监管和防治提供数据支撑, 亦可为相关部门提高地铁内部空气质量、降低乘客健康风险决策的制定提供参考。

关键词 地铁站; 地铁车厢; 挥发性有机化合物; 人员密集程度; 通风系统; 监测效果

随着我国城市化进程的加快和人民生活水平的提高, 轨道交通迎来了跨越式的发展, 选择乘坐地铁的人数也随之增加, 地铁目前已成为人们日常出行最常用的交通工具之一^[1]。然而, 随着地铁越来越普及, 地铁站及地铁车厢中空气质量问题逐渐凸显出来, 人们越来越注重地铁车厢环境的健康效应。

在地铁站及车厢中, 常见的空气污染物主要有颗粒物 (particulate matter, PM)、挥发性有机化合物 (volatile organic compounds, VOCs) 和细菌等^[2]。其中 VOCs 是车厢内具有代表性的污染性气体, 其来源广泛, 成分复杂。大多数 VOCs 有令人不适的气味且会危害健康, 对人体健康影响较大^[3]。世界卫生组织 (WHO) 对 VOCs 的定义是指在熔点低于室温而沸点在 50~260 °C 之间的挥发性有机化合物的总称^[4], 包括烷烃类、烯烃类、芳烃类、醛类、醇类、酯类、酮类等^[5]。根据 WHO 报道, VOCs 中具有使人致癌的物质, 例如三氯乙烯、苯、甲苯、二甲苯等^[6], 这些物质会使人患呼吸道疾病^[7]、神经系统障碍和诱发白血病^[8], 甚至会致人死亡。

地铁站作为一种特殊的建筑, 结构紧凑, 通风性能差, 污染物容易积聚^[9]。许多研究^[10-12]表明, 地铁内的 VOCs 质量浓度有超标的现象。JI 等^[13]研究发现, 南京地铁站内 TVOCs 的质量浓度

收稿日期: 2022-04-12; 录用日期: 2022-05-23

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (2682021CX031)

第一作者: 王涵 (1997—), 女, 硕士研究生, hanwang@my.swjtu.edu.cn; ✉通信作者: 袁艳平 (1973—), 男, 博士, 教授, yuyuan@swjtu.edu.cn

为 $1\ 027.6\sim 1\ 801.8\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，超过国家标准限值。ZHANG 等^[14]测定了上海 5 个地铁站站台层的苯、甲苯、乙苯和二甲苯质量浓度值分别为 (10.3 ± 2.1) 、 (38.7 ± 9.0) 、 (19.4 ± 10.1) 和 $(30.0\pm 11.1)\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。PARK 等^[15]发现，韩国首尔地铁站甲醛污染水平为 $(15.4\pm 7.2)\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，TVOCs 污染水平为 $(169.5\pm 55.6)\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。地铁内污染物质量浓度较高，会对人群健康造成影响^[16-18]。NYSTRÖM 等^[19]通过对 20 名工作在地铁站的志愿者健康监测发现，地铁站内的 VOCs 污染会对人体呼吸道产生潜在影响。地铁车厢相对于地铁站而言环境更为密闭，车厢内部主要通过通风系统来对空气品质进行调节^[20]。FENG 等^[21]发现上海 3 条线路的地铁车厢 VOCs 污染水平为 $23.8\sim 90.9\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。CHEN 等^[22]对中国台湾北部地铁车厢 TVOCs 进行测定，冬季体积分数为 6.4×10^{-8} ，夏季体积分数为 7.38×10^{-7} 。GONG 等^[23]研究发现，列车内 VOCs 体积分数对人体的暴露水平为 $8.5\times 10^{-6}\sim 4.8\times 10^{-5}$ ，会对人群造成轻度致癌风险。

地铁站及车厢内 VOCs 来源一般分为内部来源和外界来源。内部来源通常有站内及车厢内的部分设施^[24]和人员散发^[25]。设施通过黏合剂材料和装饰材料挥发产生 VOCs^[26]。李人哲等^[27]对轨道客车司机室内的 VOCs 进行溯源发现，内饰板散发的苯甲醛质量浓度为 $27.49\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，对车内 VOCs 的来源贡献最大。已有研究^[28]表明，人员散发对室内的 VOCs 质量浓度的贡献率约为 40%。高峰期时随着人员的增多，VOCs 的质量浓度也会增加^[29]。GONG 等^[23]发现，车厢乘客数量从 40 人增加到 200 人，丙酮和丙烯醛的质量浓度从 $7.71\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 增至 $26.28\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。外部来源主要由人员流动^[30]和通风系统换气引起^[31]。人员行走时，VOCs 随空气流动扩散，造成其他地方污染增加。通风管理不当使外界高质量浓度 VOCs 进入地铁站或车厢内，也会导致 VOCs 污染水平升高^[32]。由此可见，地铁车厢内 VOCs 质量浓度受许多因素综合影响^[33]，故对地铁站及车厢内 VOCs 进行系统研究至关重要。但目前对 VOCs 种类、来源及影响因素并未进行全方面的报道较少。

本研究针对成都地铁部分线路和站点，通过采样泵和 Tenax-TA 采样管进行现场采样，用 GC-MS 分析地铁站台及车厢中 VOCs 的主要种类，探究人员密集程度与车厢内 VOCs 质量浓度的关系，分析通风系统对车厢内 VOCs 质量浓度的影响，探索地铁站内站厅层和站台层 VOCs 的空间分布变化并确定地铁站及车厢内 VOCs 的种类和影响因素，旨在为相关部门制定地铁系统 VOCs 污染防治相关政策提供数据支撑，从而有效控制地铁站以及车厢内 VOCs 质量浓度、降低乘客健康风险。

1 材料与方法

1.1 采样方案

为探究地铁站及车厢内的 VOCs 的具体种类及质量浓度，本研究按照成都地铁开通的时间顺序选取具有代表性的 5 条线路(开通日期依次为 2010-09-27(1 号线)、2016-01-01(4 号线)、2017-12-06(7 号线)、2020-09-27(18 号线)和 2020-12-18(6 号线))进行采样(表 1)。地铁车厢采样时刻包含高峰期(17:00—19:00)和非高峰期时段(14:00—16:00)，地铁车厢通风口采样时间均在非高峰期时段进行，且同步采样地铁车厢内空气。地铁车站的采样在非高峰期时段的站厅层以及站台层进行。所采样的站点均在 7 号线上，包含换乘站太平园站(3、7、10 号线换乘)和西南交大站(6、7 号线换乘)以及非换乘站八里庄站、槐树店站和九里堤站(表 2)。成都地铁线路图及开通日期见图 1，地铁站示意图及站内采样点如图 2 所示。

表 1 采样线路、采样时刻及路段范围

Table 1 Sampling lines, sampling moments and section ranges

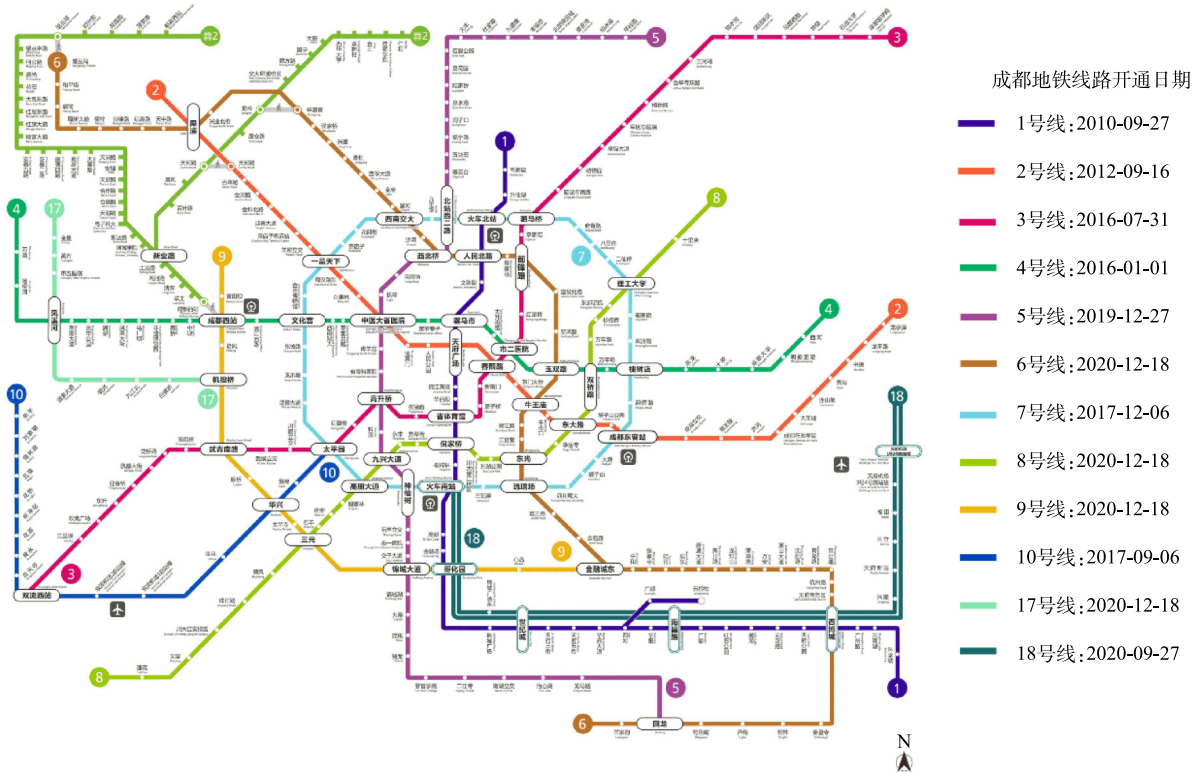
采样线路	非高峰期	高峰期	采样路段
	采样时刻	采样时刻	
1号线	14:00—16:00	17:00—19:00	高新站—麓湖站
4号线	14:00—16:00	17:00—19:00	玉双路站—非遗公园站
6号线	14:00—16:00	17:00—19:00	西南交大站—金石路站
7号线	14:00—16:00	17:00—19:00	花照壁站—琉璃场站
18号线	14:00—16:00	17:00—19:00	孵化园站—三岔站

1.2 采样装置

现场采集地铁站台以及车厢内的 VOCs 样品, 所用采样装置包括采样导管、填充柱采样管 (TENAX-TA 采样管, MARKS 英国)、恒流气体采样器 (QC-2B 型, 北京劳动保护研究所) 以及 CO₂ 监测仪 (HOBO MX1102A, 美国)。采样导管由低吸附的聚四氟乙烯制成, 出气口与填充柱采样管及恒流气体采样器相连。

表 2 7 号线地铁站采样情况

采样站点	非高峰期采样时刻	是否为换乘站
九里堤站	14:00—16:00	否
西南交大站	14:00—16:00	是(与6号线换乘)
槐树店站	14:00—16:00	否
八里庄站	14:00—16:00	否
太平园站	14:00—16:00	是(与3、10号线换乘)



注: 图片来自于网络(<http://cd.bendibao.com/ditie/linemap.shtml>)。

图 1 成都地铁线路图及开通日期

Fig. 1 Chengdu metro lines map and opening date

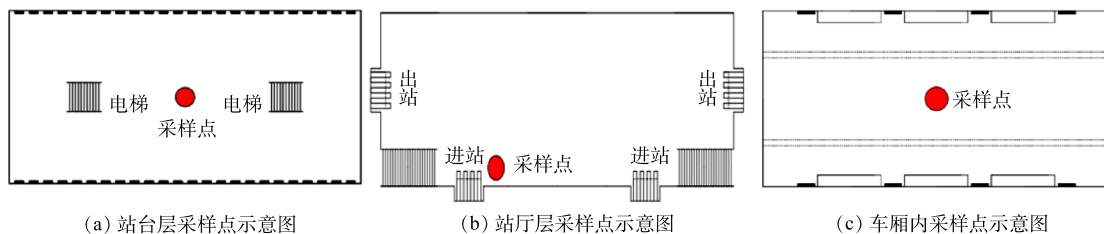


图 2 地铁站采样点示意图

Fig. 2 Schematic of the sampling points

1.3 采样方法

2021 年 9—11 月, 对成都地铁站进行 50 余次采样。采集样品前, 先开启采样泵运行约 30 s, 流量设为 0.3 L·min⁻¹, 确保采样导管中的非舱内气体排出, 气体排出完毕, 开始正式采样。使用

TENAX-TA 采样管采集空气中的 VOCs 组分, 采样流速为 $0.3 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, 采样时间为 30 min, 采样量为 9 L。采样位置参照《室内空气质量标准》(GB/T 18883-2002)^[34] 中的相关要求。在车厢内采样时, 采样点固定在车厢中部呼吸区区域(离地面约 1~1.5 m 高度处); 在车厢内通风口采样时, 将采样点设置在通风口处; 在站厅层采样时, 采样点位于检票口处, 高度约 1~1.5 m 处; 在站台层采样时, 采样点位于站台两侧的屏蔽门中间处, 高度约 1 m。仪器及现场采样位置见图 3。每次测试使用 2 根未采样的 TENAX-TA 采样管作为空白样, 以减少采样管本身的影响和分析过程中造成的样品污染。

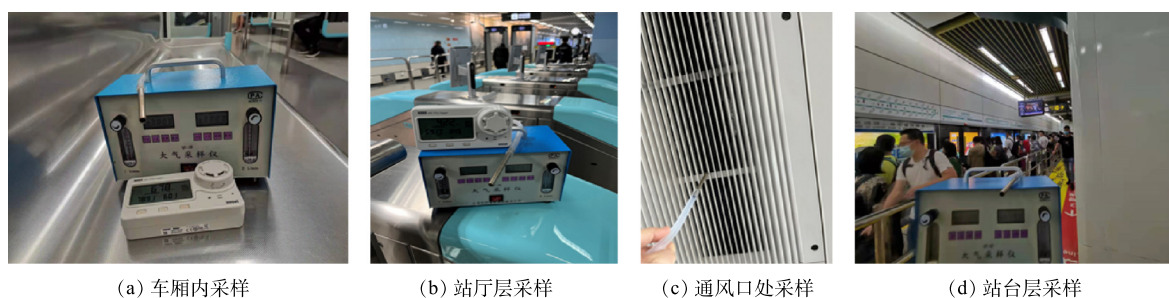


图 3 地铁站及车厢内实际采样位置

Fig. 3 Actual sampling locations in metro stations and carriages

1.4 分析方法

采用热脱附仪将 TENAX-TA 采样管吸附的 VOCs 脱离出来, 再用 GC-MS 对物质进行分离和识别。热脱附分为 2 个阶段。在第 1 阶段, 初始温度为 $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 保持 3 min, 此后, 在 8 min 内, 将温度升至 $160 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 后保持 2 min。在第 2 阶段, 继续升温至 $240 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 并保持 4 min。热脱附过程使用的载气为氮气, 流量为 $55 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 。色谱仪被用来分离不同种类的物质, 质谱仪以 2.5 Hz 的频率扫描整个范围, 将所得光谱与原子发射光谱对比, 来确认所测化合物的种类。

采用外部标线法对 VOCs 进行定量分析, 向管中注入 VOCs 混合标准溶液, 来制作标准曲线, 对于苯、乙苯、甲苯、对/间二甲苯、乙酸乙酯、苯乙烯、邻二甲苯和十一烷 8 种物质使用标准溶液进行定量, 其他 VOCs 使用甲苯标线进行定量。

为确保本实验结果的可重复性, 随机选取 2 条线路进行平行样采样, 平行样的采样结果表明平均相对标准偏差 (RSD) 小于 14%, 证实本实验具有较好的重复性。

1.5 数据处理

为保证数据的有效性, 需要对检测出的原始数据进行处理。从数据中删去出峰时间小于 7 min 的物质, 选出匹配度大于 75% 的物质进行定量分析。计算方法见式 (1)。

$$R(x) = \frac{F(x)}{N} \quad (1)$$

式中: $R(x)$ 为检出率; $F(x)$ 为有机物被检出次数; N 为检测总次数。

2 结果与讨论

2.1 地铁站台及车厢内 VOCs 种类

本研究所测到的 VOCs 种类约为 135 种。根据式 (1) 计算出各个物质的检出率并由此确定 VOCs 种类 (大约为 54 种)。根据化学官能团分类方法, 检出地铁站台及车厢空气中存在烷烯炔类、苯系物、醛酮醇酯类和包含乙酸、癸酸等有机酸类物质的其他种类 (图 4)。其中检出种类最多的是烷烯炔类物质, 占总 VOCs 种类的 42.59%, 其次是具有毒性的苯系物, 占比为 27.78%, 剩余

2类物质占比分别为20.37%和9.26%。图5展示出检出率为80%以上的物质,平均有20种。苯系物的检出率极高,其中检出率高达100%的苯乙烯、对二甲苯,均为对人体容易产生危害的苯系物。环己酮^[35]、乙酸乙酯^[36]是具有特殊气味的物质,容易对乘客乘车舒适性产生影响。图6反映了7号线的车厢内部、7号线九里堤站站台层和站厅层VOCs种类的对比情况。可以明显看出,车厢内部的烷烃类、苯系物、醛酮醇酯类物质均高于站台层和站厅层。这可能是由于乘客在车厢内停留时间要高于在车站停留时间且车厢内设施与站台地铁站不同导致的。

2.2 地铁站台及车厢内VOCs质量浓度

图7为车厢以及站台所得样品中检出率较高的20种物质的质量浓度分布图。由质量浓度检测结果可以看出,大部分物质质量浓度的分布范围比较集中。车厢内环戊硅氧烷的质量浓度最高,为 $11.104 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$;其次为甲苯,质量浓度为 $9.518 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$;最小的为二氯甲烷,质量浓度为 $0.011 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。站台内质量浓度最高的为甲苯,质量浓度为 $5.064 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$;其次为2-乙基己醇,质量浓度为 $2.537 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$;最小的为二氯甲烷,质量浓度为 $0.085 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。环戊硅氧烷一般来源于化妆品和护肤品中^[37]。甲苯来源较为复杂,除了来源于油漆、黏合剂,还有一部分来源于乘客^[25],故质量浓度分布较大。由于二氯甲烷来源较为单一,只存在于油漆、涂料之中^[33,38],故质量浓度最少。除此之外,不同物质之间的平均质量浓度相差较大,苯系物平均质量浓度均较其他种类高。来源和散发强度不同都会导致平均质量浓度存在较大差异。CHAN等^[39]得到广州地铁车厢内VOCs质量浓度为 $60.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,其污染程度高于成都地铁。

DO等^[40]对比利时地铁车厢的研究发现,VOCs质量浓度为 $33 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,这与本研究结果基本一致。李丽^[41]得出上海地铁站台内VOCs质量浓度为 $(188\pm 3.0) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,HWANG等^[42]分析了韩国地铁站台VOCs,测得VOCs质量浓度为 $(119.7\pm 79.5) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,高于本研究辨析出的成都地铁中VOCs各种污染物质量浓度之和。这可能是由于上海和韩国乘坐地铁人流量高导致的。通过将实测数据与国内关于室内或乘用车VOCs质量浓度限制的相关标准进行对比(表3),可以得出成都地铁VOCs质量浓度低于相关标准,说明成都地铁VOCs污染程度较轻。这可能是由于地铁系统采用机

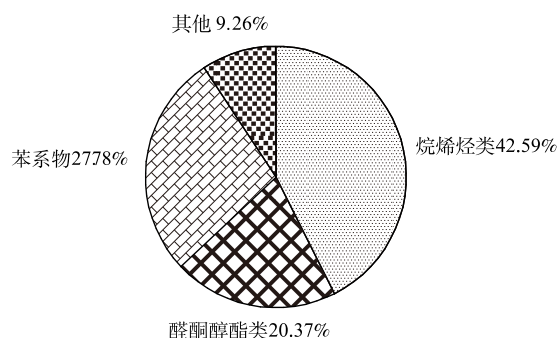


图4 VOCs中各类物质占比

Fig. 4 Percentage of components in VOCs

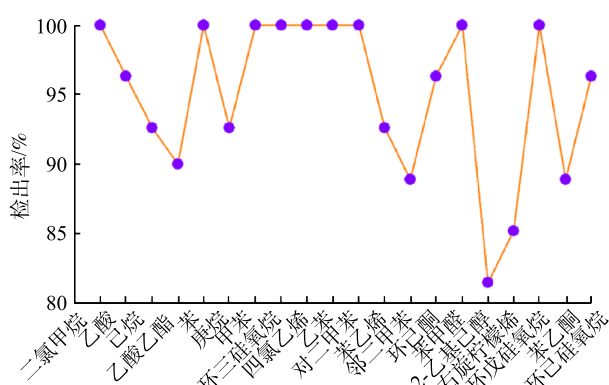


图5 地铁站及车厢内高检出率VOCs物质种类

Fig. 5 VOCs with high detection rate in metro stations and carriages

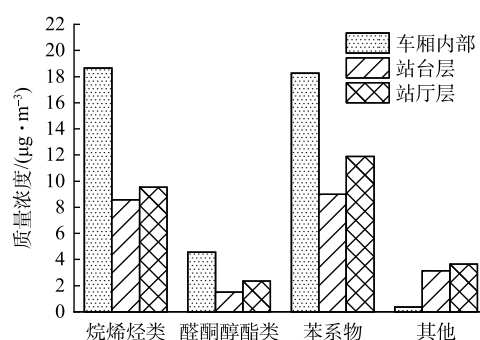


图6 地铁站及车厢内VOCs种类对比

Fig. 6 Comparison of VOCs types in metro stations and carriages

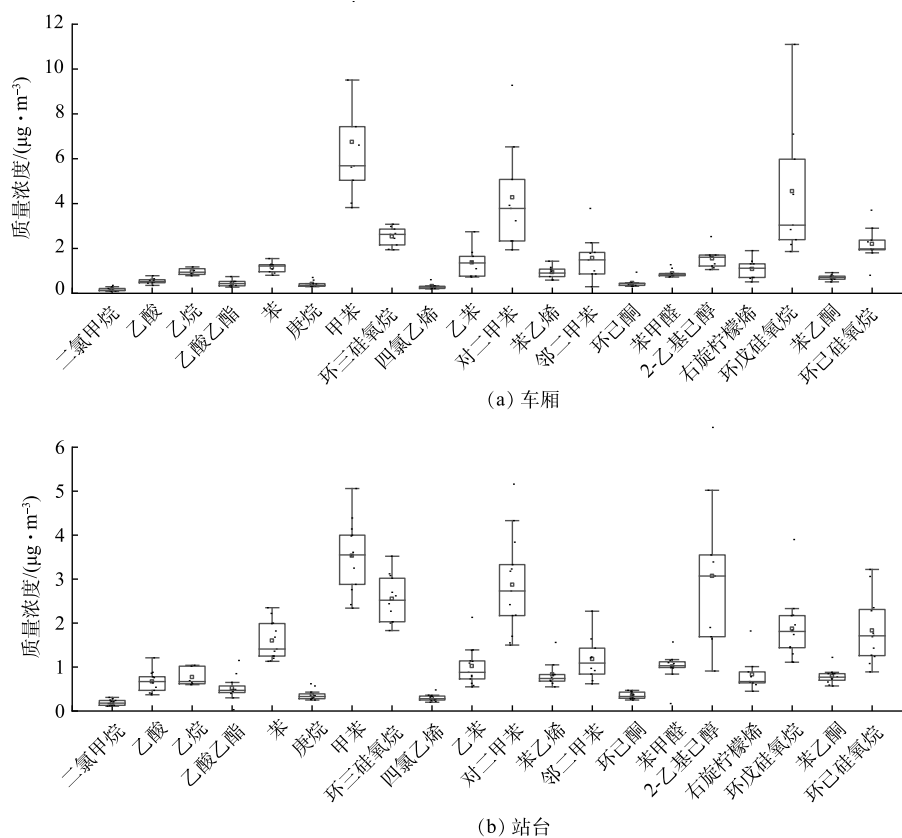


图 7 车厢和站台 VOCs 质量浓度

Fig. 7 VOCs mass concentrations in carriages and on platforms

表 3 成都地铁系统 VOCs 浓度与国内外相关规范中质量浓度限制比较

Table 3 Comparison of VOCs mass concentrations in the metro system and limits in relevant standards

种类	车厢质量浓度/ ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	站台质量浓度/ ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	GB/T 18883-2002 ^[34] 质量浓度限制/($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	GB/T 27630-2011 ^[43] 质量浓度限制/($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	WHO质量浓度限制/ ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)
苯	1.13~2.35	0.78~1.55	110	110	—
甲苯	2.34~5.07	3.82~9.52	200	1 100	—
二甲苯	0.62~5.16	0.29~9.28	200	1 500	4 800
乙苯	0.55~2.13	0.73~2.75	—	1 500	—
苯乙烯	0.55~1.56	0.59~1.42	—	260	260

注：GB/T 18883-2002为室内空气质量标准；其余2类分别为中国和WHO的乘用车空气质量标准。

械通风，通风量通常比住宅及乘用车大得多，对污染物的稀释倍数较高所致。

2.3 地铁站台及车厢内 VOCs 种类和质量浓度的影响因素

1) 地铁车厢内不同时段对 VOCs 质量浓度的影响。不同路线车厢内部 VOCs 在不同时段的质量浓度对比结果如图 8 所示。由于 6 号线高峰期采样前采样管密封不严密，造成样品污染，故剔除了这一数据。除此之外，高峰期的 VOCs 质量浓度均略高于非高峰期。各种类 VOCs 对比结果如图 9 所示。高峰期的醛酮醇酯类物质质量浓度较高，原因在于乙酸正丁酯、壬醛等物质质量浓度较高。根据已有研究，乙酸正丁酯一般用于涂料之中^[44]，壬醛多为人體散发成分之一^[25]，丙酮也可以通过人体新陈代谢过程中排出^[45]。在高峰期，车厢内人员密集，温度有升高的趋势^[46]，即源数

量增多且由于升温导致散发加强,故会造成高峰期时段 VOCs 质量浓度高。刘冰玉^[29]的研究表明了车厢内 VOCs 质量浓度在人员拥挤情况下会存在超标现象。LI 等^[47]研究发现,苯和二甲苯在高峰期时质量浓度分别为 $(12.2 \pm 5.0) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $(3.5 \pm 2.0) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 非高峰期分别为 $(11.9 \pm 6.0) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $(2.8 \pm 1.3) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 同样说明了高峰期质量浓度要大于非高峰期。

2) 车厢内部通风系统对 VOCs 质量浓度的影响。地铁车厢内的通风系统对车厢内 VOCs 的消除具有积极作用。除 18 号线之外,其余线路车厢内的通风系统送入车厢内部的 VOCs 质量浓度均低于同一时刻车厢内部(图 10)。地铁通风系统对于 VOCs 的去除率可以达到 18 号线的相反结果。这可能是因为这条线路开通时间较晚,部分车厢内部座椅设施为软座,材料为人造革、蒙面织物,并没有使用与其他线路相同的塑料座椅,使得车厢内部的 VOCs 源减少。除此之外,18 号线自天府机场站—三岔站行驶路线由地下变为地上,自三岔站—兴隆站由地上变为地下,地铁在经过地上路段停靠站台时开关屏蔽门,使得车厢内污染物质量浓度不仅受隧道内空气的影响外,还受到大气污染的影响。FENG 等^[21]研究表明地面的车厢 VOCs 质量浓度高于地下轨道车厢内的质量浓度。GONG 等^[48]研究也表明地下路段所测得的 VOCs 质量浓度要低于地上路段 30%~40%。因此,18 号线通风系统中 VOCs 质量浓度受到大气影响较大,在采样时段的通风口处污染物质量浓度略大于车厢内部。

3) 站厅层和站台层的 VOCs 质量浓度的对比。由图 11 可以看出,乘客刷卡的站厅层的 VOCs 质量浓度要高于站台层。由于站厅层设施较站台层更多,且站厅层与大气相连通,易受到大气中 VOCs 质量浓度影响^[49]。同时站厅层除了刷卡进站的乘客,还有相当大一部分是换乘的乘客,人员流动性比站台层更大一些,使得人员散发 VOCs 质量浓度增加,造成站厅层的 VOCs 质量浓度要高于站台层。太平园站 VOCs 质量浓度较高,这可能是由于太平园站为 3、7、10 号线 3 条线路换乘站,其站厅层相对其他站点的人员流动程度更大所导致的。而李丽^[41]的研究与本研究结果相反,站台质量浓度 $(188 \pm 3.0) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 要高于站厅质量浓度 $(155 \pm 2.0) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。这可

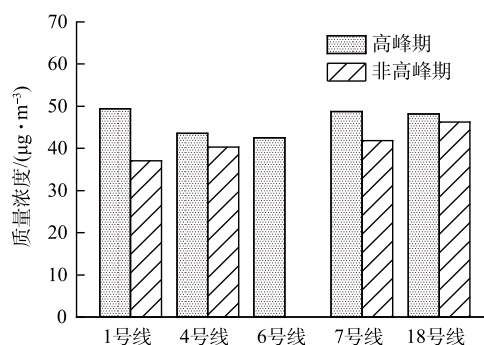


图 8 不同线路在不同时段 VOCs 质量浓度对比
Fig. 8 Comparison of VOCs mass concentrations in different lines during different periods

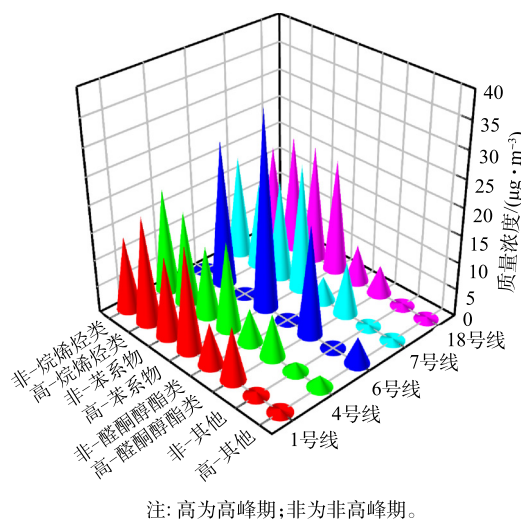


图 9 不同时段各种类 VOCs 质量浓度对比
Fig. 9 Comparison of VOCs mass concentrations during different periods

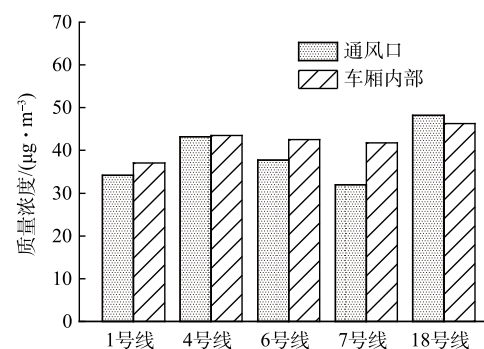


图 10 通风口与车厢内 VOCs 质量浓度对比
Fig. 10 Comparison of VOCs mass concentrations in vents and compartments

能是由于上海站台层一般处于地下 2~3 层，人流量密度大，新风量有限，不足以稀释 VOCs 质量浓度，因而会造成站台质量浓度高于站厅质量浓度。

4) 不同地铁线路车厢内 VOCs 种类的对比。1 号线和 18 号线开通时间相隔 10 a，且 1 号线与 18 号线有重合线路(火车南站到兴隆站)。1 号线与 18 号线共同线路的非高峰时期地铁车厢内部 VOCs 种类对比结果如图 12 所示。可以看出，18 号线的烷烃类物质和苯系物的质量浓度高于 1 号线。醛酮醇酯类物质和其他物质的质量浓度表现为 1 号线高于 18 号线。这 2 条线路车厢内苯系物浓度最高，车厢内的苯系物主要有苯、甲苯、二甲苯、苯乙烯等。如图 13 所示，18 号线车厢内的甲苯质量浓度为 1 号线车厢的 2.49 倍。甲苯的来源一般为黏合剂、油漆、香水^[50]及人体散发等。1 号线开通日期为 2010 年 9 月 27 日，开通至今已有 12 年，车厢内部散发甲苯质量浓度比 18 号线低。因此，尽管 18 号线车厢内散发 VOCs 的内部装饰较 1 号线少一些，其甲苯质量浓度仍然高于 1 号线。

2.4 建议及本研究的局限性

成都地铁承载人流密度高，为降低地铁站及车厢内空气中的 VOCs 质量浓度，避免危害人体健康。在以上研究的基础上，提出如下建议。

1) 动态调节通风系统。在高峰期时段增大车厢内部通风量或增加新风量的占比；在非高峰时段，人员稀少，应减少通风降低能耗。

2) 降低车厢 VOCs 散发。针对 2020 年和 2021 年新开通的地铁线路，车厢内饰散发高质量浓度的 VOCs，可采取布置吸附材料等措施来降低 VOCs 的质量浓度。

3) 增加空气净化系统。地铁站与室外大气环境进行空气交换，会将室外高质量浓度 VOCs 引入站内。通过室外 VOCs 监测，当质量浓度高于站内时，可开启净化系统，净化换入站内的空气以降低 VOCs 污染。

本研究对成都地铁车站及车厢 VOCs 进行了实测并得出一些结果，但仍存在一些局限性。首先，成都地铁共有 12 条线路，本研究只选择其中的 5 条具有代表性的线路进行实测，未来将会对其他线路进行深入研究。其次，本研究聚焦于地铁系统 VOCs 种类、质量浓度及影响因素，未对人员自身和设施散发的 VOCs 质量浓度进行测定，故本研究未准确判断这些因素的贡献。最后，室外大气环境对地铁系统 VOCs 有一定影响，但本研究未进行室内外同步采样。

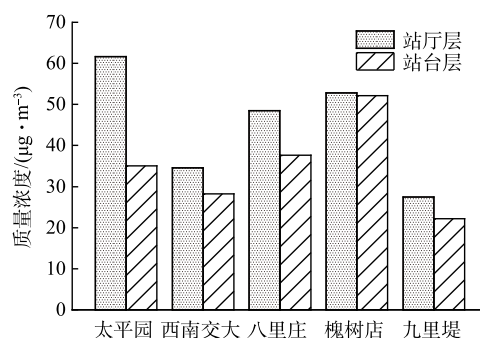


图 11 站厅层与站台层质量浓度对比

Fig. 11 Comparison of mass concentration at station hall layers and platform layers

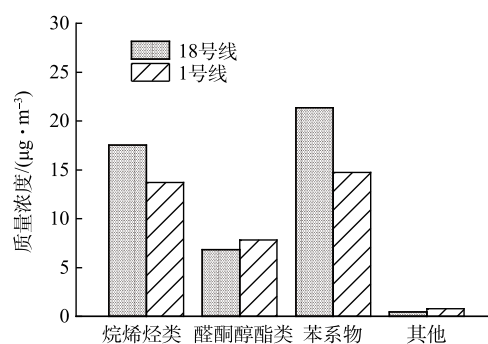


图 12 1 号线和 18 号线 VOCs 成分对比

Fig. 12 Comparison of VOCs composition between line 1 and line 18

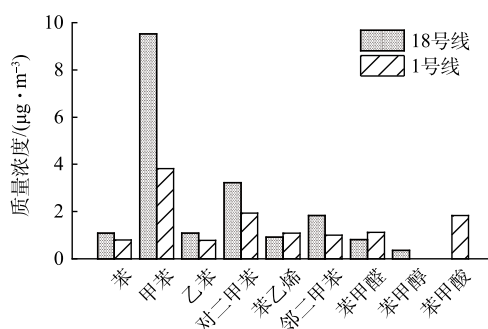


图 13 1 号线和 18 号线 VOCs 中苯系物成分对比

Fig. 13 Comparison of Benzene composition in VOCs on line 1 and line 18

3 结论

1) 地铁系统内 VOCs 以烷烯炔类 (占比为 42.6%) 为主, 其次为苯系物 (占比为 27.8%)、醛酮醇酯类 (占比为 20.4%) 和其他种类 (占比为 9.3%)。

2) 人员密集程度会影响 VOCs 质量浓度的变化, 整体表现为高峰时段车厢内的 VOCs 质量浓度 (46.47 ± 3.2) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 高于非高峰期时段 VOCs 的质量浓度 (41.35 ± 3.82) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

3) 车厢内通风口的 VOCs 的质量浓度 (39.07 ± 6.64) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 较车厢内的质量浓度 (42.22 ± 3.36) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 略低, 故机械通风可降低 VOCs 质量浓度。

4) 地铁车站与大气环境相连通, 且站厅层位置位于候车层上部, 因此, 站厅层 VOCs 质量浓度 (44.99 ± 13.84) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 高于站台层质量浓度 (35.05 ± 11.28) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

参考文献

- [1] 罗慧兰. 新形势下城市轨道交通高质量发展的思考[J]. 中国工程咨询, 2021(2): 51-55.
- [2] 黄宇, 李荣, 崔龙, 等. 轨道交通列车内空气质量研究现状与展望[J]. 地球环境学报, 2020, 11(4): 345-363.
- [3] MCKENZIE L M, WITTER R Z, NEWMAN L S, et al. Human health risk assessment of air emissions from development of unconventional natural gas resources[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 424: 79-87.
- [4] 南淑清, 梁晶, 张丹, 等. 郑州市环境空气中VOCs的空间分布及源解析[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(3): 119-124.
- [5] 武彩虹. 广州城市地区大气挥发性有机物(VOCs)反应活性贡献研究[D]. 广州: 暨南大学, 2020.
- [6] 樊娜, 刘聪, 黄衍, 等. 我国健康建筑中VOC污染控制研究进展及思考[J]. 科学通报, 2020, 65(4): 263-273.
- [7] BAI L, DAI H G, WANG J, et al. Source apportionment and health risk assessment of indoor volatile organic compounds[J/OL]. (2022-01-05) [2022-02-26]. *Indoor and Built Environment*, 2022, <https://doi.org/10.1177/1420326X211065043>.
- [8] TAGIYEVA N, SHEIKH A. Domestic exposure to volatile organic compounds in relation to asthma and allergy in children and adults[J]. *Expert Review of Clinical Immunology*, 2014, 10(12): 1611-1639.
- [9] CHEN T, CAO S-J, WANG J, et al. Influences of the optimized air curtain at subway entrance to reduce the ingress of outdoor airborne particles[J]. *Energy and Buildings*, 2021, 244: 111028.
- [10] 李静, 刘翔翔, 甘平胜, 等. 广州地铁3、4号线首通段室内空气氨和苯浓度监测分析[J]. 现代预防医学, 2007, 4(2): 292-296.
- [11] 吴辉, 余淑苑, 王秀英, 等. 深圳地铁站室内空气质量状况分析[J]. 中国卫生工程学, 2008, 7(4): 206-208.
- [12] 张海云, 李丽, 蒋蓉芳, 等. 上海市地铁车站空气污染监测分析[J]. 环境与职业医学, 2011, 28(9): 564-566.
- [13] JI W, LIU Z, LIU C, et al. Characteristics of fine particulate matter and volatile organic compounds in subway station offices in China[J]. *Building and Environment*, 2021, 188: 107502.
- [14] ZHANG Y, LI C, WANG X, et al. Rush-hour aromatic and chlorinated hydrocarbons in selected subway stations of Shanghai, China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, 24(1): 131-141.
- [15] PARK W M, PARK J B, ROH J, et al. Levels of formaldehyde and TVOCs and influential factors of 100 underground station environments from 2013 to 2015[J]. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2018, 24(4): 1030-1042.
- [16] OROSA J A, OLIVEIRA A C. Hourly indoor thermal comfort and air quality acceptance with passive climate control methods[J]. *Renewable Energy*, 2009, 34(12): 2735-2742.
- [17] 李爽. 典型微环境空气中苯系物的污染特征及来源解析[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- [18] 佟瑞鹏, 张磊. 不同通勤模式暴露于VOCs的健康风险评估[J]. 环境科学, 2018, 39(2): 663-671.
- [19] NYSTRÖM A K, SVARTENGREN M, GRUNEWALD J, et al. Health effects of a subway environment in healthy volunteers[J]. *European Respiratory Journal*, 2010, 36(2): 240-248.
- [20] 张翠林, 张金萍, 蒋佳昀. 城市地铁环境空气污染及热舒适调查[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(1): 318-325.
- [21] FENG Y L, MU C C, ZHAI J Q, et al. Characteristics and personal exposures of carbonyl compounds in the subway stations and in-subway trains of Shanghai, China[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 183(1/2/3): 574-582.

- [22] CHEN Y Y, SUNG F C, CHEN M L, et al. Indoor air quality in the metro system in North Taiwan[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2016, 13(12): 1200.
- [23] GONG Y, WEI Y, CHENG J, et al. Health risk assessment and personal exposure to volatile organic compounds (VOCs) in metro carriages: A case study in Shanghai, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 574: 1432-1438.
- [24] AMPOFO F, MAIDMENT G, MISSENDEN J. Underground railway environment in the UK Part I: Review of thermal comfort[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2004, 24(5/6): 611-631.
- [25] 孙筱. 人体散发VOC的特性及人与环境的相互作用研究[D]. 北京: 清华大学, 2017.
- [26] 叶晓江, 连之伟, 蒋淳潇, 等. 上海地铁站台环境质量分析[J]. *建筑节能通风空调*, 2009, 28(5): 61-63.
- [27] 李人哲, 钟源, 关玲玲, 等. 某轨道交通车辆司机室整车及其内饰材料气味溯源研究[J]. *电力机车与城轨车辆*, 2019, 42(6): 44-47.
- [28] LIU S, LI R, WILD R J, et al. Contribution of human-related sources to indoor volatile organic compounds in a university classroom[J]. *Indoor Air*, 2016, 26(6): 925-938.
- [29] 刘冰玉. 地铁车厢环境空气质量研究[D]. 北京: 北京市市政工程研究所, 2016.
- [30] 何生全, 金龙哲, 吴祥, 等. 北京典型地铁系统可吸入颗粒物实测研究[J]. *安全与环境工程*, 2017, 24(1): 40-44.
- [31] 邵李燕. 地铁车厢内空气品质及污染物分布特性研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2019.
- [32] PARK W M, PARK J B, ROH J, et al. Levels of formaldehyde and TVOCs and influential factors of 100 underground station environments from 2013 to 2015[J]. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2017, 24(4): 1030-1042.
- [33] XU B, HAO J. Air quality inside subway metro indoor environment worldwide: A review[J]. *Environment International*, 2017, 107: 33-46.
- [34] 卫生部. 室内空气质量标准: GB/T 18883-2002[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [35] 左宝锋. 环己酮生产技术和工艺路线探讨[J]. *科技展望*, 2015, 25(5): 127.
- [36] 裴鹏正, 负建民, 贾琦, 等. 软儿梨果酒发酵过程中挥发性风味物质变化分析[J]. *生物技术进展*, 2021, 11(6): 758-769.
- [37] 孙宏雨, 李栋学, 徐琳, 等. 生物体内环状挥发性甲基硅氧烷的分布、行为及效应研究进展[J]. *环境化学*, 2022, 41(1): 193-204.
- [38] 王鑫. 安徽省大气中挥发性有机物污染特征、来源解析及健康风险评估[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020.
- [39] CHAN L Y, LAU W L, WANG X M, et al. Preliminary measurements of aromatic VOCs in public transportation modes in Guangzhou, China[J]. *Environment International*, 2003, 29(4): 429-435.
- [40] DO D H, VAN LANGENHOVE H, CHIGBO S I, et al. Exposure to volatile organic compounds: Comparison among different transportation modes[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, 94: 53-62.
- [41] 李丽. 上海市轨道交通系统空气质量调查及其影响因素研究[D]. 上海: 复旦大学, 2011.
- [42] HWANG S H, PARK W M. Indoor air quality assessment with respect to culturable airborne bacteria, total volatile organic compounds, formaldehyde, PM₁₀, CO₂, NO₂, and O₃ in underground subway stations and parking lots[J]. *Air Qual Atmos Health*, 2019, 12: 435-441.
- [43] 环境保护部. 乘用车内空气质量评价指南: GB/T 27630-2011[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2011.
- [44] 张桂芹, 姜德超, 李曼, 等. 城市大气挥发性有机物排放源及来源解析[J]. *环境科学与技术*, 2014, 37(S2): 195-200.
- [45] MIEKISCH W, KISCHKE S, SAWACKI A, et al. Impact of sampling procedures on the results of breath analysis[J]. *Journal of Breath Research*, 2008, 2(2): 026007.
- [46] 武在天. 地铁车厢内空气品质的现状调查与分析[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2016.
- [47] LI T T, BAI Y H, LIU Z R, et al. Air quality in passenger cars of the ground railway transit system in Beijing, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 367(1): 89-95.
- [48] GONG Y, ZHOU T, ZHAO Y, et al. Characterization and risk assessment of particulate matter and volatile organic compounds in metro carriage in Shanghai, China[J]. *Atmosphere*, 2019, 10(6): 302.
- [49] MA J, LI Y, LIU Y, et al. Metal(loid) bioaccessibility and children's health risk assessment of soil and indoor dust from rural and urban school and residential areas[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2020, 42(5): 1291-1303.
- [50] 苏雷燕. 上海市城区大气VOCs的变化特征及反应活性的初步研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2012.

(责任编辑: 郑晓梅)

Investigation of volatile organic compounds types in Chengdu metro stations and carriages and their influencing factor analysis

WANG Han^{1,2}, HUANG Shenghao¹, DENG Mengsi¹, YUAN Yanping^{1,*}

1. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. Graduate School of Tangshan, Southwest Jiaotong University, Tangshan 063000, China

*Corresponding author, E-mail: ypyuan@swjtu.edu.cn

Abstract Aiming to investigate the types, sources, and influencing factors of volatile organic compounds (VOCs) inside Chengdu metro stations and carriages, a constant flow gas sampler and a TENAX-TA sampling tube were used to sample the air inside the metro carriages, at the carriage vents, and inside the platforms (station hall layer and platform layer) during different pedestrian flows on different routes. The sampled VOCs were analyzed by using a gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS). The results showed that the VOCs inside the stations and carriages were mainly alkyl olefins and benzenes, accounting for 42.59% and 27.78% of the air pollutants, respectively. The total VOCs mass concentration in the carriages was $(46.47 \pm 3.2) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ during peak hours, which was slightly higher than $(41.35 \pm 3.82) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ during off-peak hours. The mechanical ventilation system of the metro could effectively dilute the VOCs mass concentration in the carriages. The VOCs mass concentration at the station hall layer was $(44.99 \pm 13.84) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, which was higher than $(35.05 \pm 11.28) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ at the platform layer. VOCs pollution in the Chengdu metro was comprehensively influenced by diverse factors such as people flow, atmospheric environment, and ventilation facilities. This study can provide a support for the regulation and prevention of VOCs pollution in the metro system in Southwest China, also provide a reference for making decisions to improve the air quality inside the metro and reduce health risks to passengers.

Keywords metro stations; metro carriage; volatile organic compounds; intensity of personnel; ventilation system; monitoring effects