

文章编号: 1671-6612 (2022) 03-488-08

基于乘客主观评价的地铁车厢气味调研

王 涵^{1, 2} 黄盛浩¹ 袁艳平¹ 邓梦思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】 为深入了解地铁车厢内的空气品质现状, 进而改善车厢内空气质量, 本研究基于乘客的主观评价, 采用问卷调查的方式对地铁车厢内气味类型、气味来源、气味影响因素、乘客的健康意识以及乘客希望采用的车厢内空气品质改善措施等方面进行了调查分析。调研共回收有效问卷 541 份, 结果显示 52.5% 的受访者能感觉到车厢内存在异味, 75.3% 的受访者认为车厢内的气味会影响到身体健康, 且车厢内气味会影响 33.5% 受访者乘坐地铁的选择。因此, 亟需深入研究并改善地铁车厢空气品质, 营造舒适、健康的乘车环境。

【关键词】 空气品质; 影响因素; 健康意识; 问卷调查; 解决措施
中图分类号 X508 文献标识码 A

Investigation of Sensory Evaluation in Metro Carriage Odor by Passengers

Wang Han^{1,2} Huang Shenghao¹ Yuan Yanping¹ Deng Mengsi¹

(1. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031;

2. School of Graduate of Tangshan, Southwest Jiaotong University, Tangshan, 063000)

【Abstract】 In order to deeply understand the air quality in the metro carriage, and then develop the improvement measures, This study conducted questionnaires to investigate and analyze the odor characteristics, odor emission sources, odor influencing factors, health awareness of passengers in the metro carriage and the desired improvement solutions. A total of 541 questionnaires were collected, and the results indicated that 52.5% of passengers reflected strange odor existed in the metro carriage, and 75.3% of the passengers believed that the odor in the metro carriage would affect their health. Moreover, this odor would affect the choice of 33.5% of the respondents to take the subway. Therefore, it is urgent to conduct further study to improve the air quality of metro carriage, for creating a comfortable and healthy traveling environment.

【Keywords】 air quality; influencing factors; health awareness; questionnaire investigation; improvement solutions

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52038009); 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (2682021CX031)

作者简介: 王 涵 (1997.05-), 女, 在读硕士研究生, E-mail: hanwang@my.swjtu.edu.cn

通讯作者: 邓梦思 (1992.08-), 女, 讲师, E-mail: mengsideng@swjtu.edu.cn

收稿日期: 2021-11-17

0 引言

随着经济发展、人民生活水平的提高以及城市化进程, 人们对公共交通的需求也逐渐增大, 地面交通已经无法满足人们出行的需要, 城市轨道交通逐渐成为城市居民出行的重要方式。地铁以其快速高效的优点, 迅速受到大众青睐。自 1969 年北京

成为中国第一个拥有地铁的城市以来, 地铁建设进入快车道。截至目前, 国内已有 33 个城市开通了地铁, 就总里程而言, 上海以 783.7km 位列榜首, 其次是北京, 里程数为 727.8km, 然后是成都、广州和深圳, 里程数分别为 557.7km、530.6km 和 423km^[1]。地铁能够到达的地方越来越多, 选择乘

坐地铁的人数也随之增加,然而地铁车厢中空气质量问题和乘客舒适度问题也随之而来。和地面交通工具不同,地铁车厢环境相对封闭,主要通过空调送风系统和过滤系统来降低车厢内污染物浓度。在客流高峰期,如果不及及时将车厢内的空气污染物稀释排除,将会导致车厢内空气品质恶化^[2],使乘客产生不良反应,甚至危害健康^[3],所以提高地铁车厢的空气品质对于改善城市居民健康出行十分重要。

已有研究表明,车厢空气中存在一些具有致癌风险的挥发性有机物,例如苯、甲醛、乙苯、乙醛等^[4]。龚宇^[5]等人在对上海地铁车厢的颗粒物和挥发性有机物的检测中发现苯系物是地铁车厢中最主要的气态污染物,且部分旧地铁线路的 $PM_{2.5}$ 浓度高于国家标准《环境空气质量标准》中的规定浓度 ($75\mu g/m^3$)。Park^[6]等人测量了地铁站内环境的甲醛以及 TVOC 的浓度,发现换气次数不足和通风管理不当会导致甲醛和 TVOC 水平高,且浓度水平与季节也有一定关系。王宝清^[7]等对天津地铁车厢的 $PM_{2.5}$ 进行测量,发现地下车内 $PM_{2.5}$ 的浓度要高于地面浓度,说明地铁车厢在地下隧道中行驶时的人体 $PM_{2.5}$ 暴露浓度要高于地面环境。杨伟超^[8]等对地铁内的 CO_2 浓度进行了采样分析,发现地铁内的 CO_2 浓度水平与乘客人数直接相关,客流高峰期时段车厢内的污染物浓度水平要高出其他时段。随着乘客的密度增加,人体对气流的阻碍也会造成车厢内空气的恶化^[9]。

地铁车厢内许多污染物是有气味的。在地铁车厢检测到 VOC 成分中有苯、甲苯、乙苯、二甲苯等有机物均具有特殊芳香味^[5],且与检测人体散发

的 VOC 部分^[10]相对应,说明了车厢中的有味道的有机物部分来源于人体散发的。由人体散发的部分 VOC,如乙酸等短链脂肪酸、烯丙基甲基硫等硫化物也是有气味的^[10],会增加车厢内异味程度。此外,地铁车厢中一部分 VOC 具有刺激性气味,如甲醛,车厢内甲醛浓度的平均值明显高于室外水平^[11]。地铁中的甲醛主要来源有建材、装饰材料、保温材料等散发出来^[12],且室内甲醛浓度达到 $0.05mg/m^3$ 时,人体就会产生不适感^[13]。由此可知,地铁车厢内气味水平能一定程度上反应车厢空气品质。有必要结合气味对地铁车厢内的空气品质进行深入研究。而且,乘客对地铁车厢内气味有着最直观的感受,因此也有必要从乘客的角度出发,对地铁车厢内气味现状进行调查,为后续地铁车厢空气质量改善措施提供基础数据支撑。

本文基于乘客主观评价,采取问卷调查的方式,对地铁乘客关于车厢内气味的主观感受、乘客的健康意识等相关问题进行了调研,探究了气味的类型以及来源,为后续提高地铁车厢空气品质提供了基础信息。

1 研究方法

1.1 调研目的及内容

本次调研的主要目的是基于乘客的主观角度了解地铁车厢内的空气品质的现状、影响因素以及乘客的健康意识。在设计问卷时,问卷内容主要包括被调研对象的基本信息、对车厢气味的主观感受、受访者的健康意识以及希望采取的地铁环境质量改善措施四个方面,具体内容如表 1 所示。

表 1 问卷调查的内容

Table 1 Content of the questionnaire survey

主要问题	主要内容
个人的基本信息	性别、年龄、常住地区、职业、乘坐地铁的次数和在地铁中停留的时长
地铁车厢空气的主观感受	是否有异味、存在哪种气味、通风效果、气味的主要来源、哪个时间段的空气质量不佳、温度、天气、季节对气味是否产生影响
健康意识	车厢气味是否影响身体健康、是否会因为气味选择其他出行方式
改善地铁车厢内空气质量的措施	希望未来采取的地铁环境质量改善措施

1.2 调研方法及对象

地铁乘客对地铁的空气品质问题会有更直观的感受,本研究将国内地铁乘客作为调研对象,此次调研问卷采用网络问卷的形式随机发放,调查时

间为 2021 年 3 月 19 日至 4 月 17 日,收回有效问卷共 541 份。

问卷调查所得数据统一采用 Excel 录入,在数据分析前,对回收的问卷进行人工核查,对于存在

个别选项缺失、数据异常或前后问题逻辑不通的问卷剔除，保证数据的可靠性。问卷数据采用 SPSS 24.0 软件进行分析。

1.3 文献调研

为便于更清楚全面的了解在地铁车厢中空气品质的研究现状，本研究在主要问卷调研基础上结合文献调研结果，更加全面分析地铁车厢气味与空气品质关系。文献调研过程中，以“metro carriage & air quality”作为英文关键词以及以“地铁车厢&空气品质”作为中文关键词，分别利用“Web of science”数据库、“SpringerLink”数据库和“中国知网”数据库进行主题搜索，共收集到相关文章 18 篇，在此基础上总结地铁车厢空气品质的现状。

2 调研结果分析

2.1 调研对象的基本信息

表 2 乘客基本信息

Table 2 Basic Information Of Passenger

基本情况		占比%
性别	男	61.55
	女	38.45
年龄/岁	<20	15.16
	20~30	74.86
	30~40	7.21
	40~50	1.85
	>50	0.92
	1~2 次	35.98
每周乘坐地铁次数	3~5 次	19.56
	5~6 次	3.14
	7~8 次	1.85
	9~10 次	1.85
	10 次以上	8.86
每次乘坐地铁时长 /min	<15	24.4
	15~30	42.33
	30~45	21.07
	45~60	7.39
	>60	4.81
	地区	华北地区
华东地区		8.32
华南地区		8.32
华中地区		38.82
西南地区		14.79
西北地区		1.48
东北地区		3.51
其他地区	3.88	

本次调研收回的有效问卷 541 份，调查对象的性别、年龄、乘坐地铁的次数和在地铁中停留的时长如表 2 所示。可以看出，调研对象中男性占据大部分，男女比例约为 1.6:1；调研对象分布在多个年龄段，其中 20~30 岁比例最大，占全部调研对象的 74.86%；调研对象的职业普遍是学生党和上班族，占全部调研对象的 93.16%；调研对象常住地区主要分布在华北、华中和西南地区，所占比例分别是 20.89%、38.82%、14.79%，这些地区也是城市轨道交通较为发达地区，说明调研结果能代表我国大多数地铁乘客的主观感受；调研对象每周乘坐地铁次数在 5 次以内的占据 55.45%，而且单次乘坐地铁时长在 15~30 分钟的占 42.33%，乘车时间超过 30 分钟的占 33.27%，人均乘车时长大约在 28.6 分钟，说明调研对象在地铁环境中暴露的时间较长，这一暴露时长分布为后续健康风险评估提供了基础数据。

2.2 地铁车厢空气质量主观评价

2.2.1 主观气味感受

图 1 显示了受访者对地铁车厢内气味的直观感受，52.50%的受访者感受得到车厢内存在异味，说明大多数受访者对地铁车厢内的空气质量并不完全满意，有接近 10%的乘客认为地铁车厢气味明显，甚至引起身体不适。由此可见车厢内的异味问题亟待解决，空气品质还需改善。

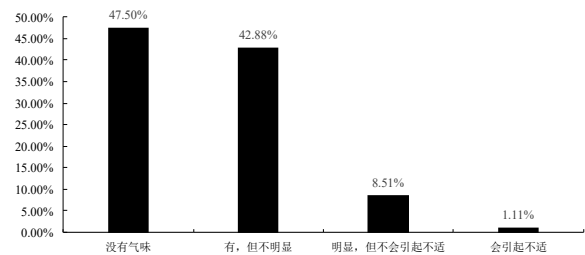


图 1 乘客对车厢气味的直观感受

Fig.1 Passengers' subjective perception of carriage smell

2.2.2 气味类型及来源

乘客对车内气味类型以及气味来源的评价如表 3 所示。

车辆自身材料散发的气味和人员流动引起的不新鲜气味被认为是地铁车厢内的主要气味类型，其中，高达 73.01%的受访者认为气味类型是由人员流动引起的不新鲜气味，说明这类气味属于车厢内典型气味类型，而刺激性和香味占比较少，这可能是因为地铁环境和周围人携带的气味具有偶然

性所导致。在对气味进行溯源的调研中, 周围人散发、车厢内的基本设施散发以及车厢空调通风系统带入被认为是主要气味来源, 其中, 被认为是周围人散发的占比最高, 达 68.58%, 与气味类型中占比最高的人员流动引起的不新鲜气味相对应。已有研究表明, 人体散发的 VOC 有成百上千种, 其中芳香族化合物、硫化物、短链脂肪酸等都是有味味的, 它们会极大的影响感知空气质量^[10]。随着乘客密度的增加, 车厢内的拥挤情况会导致空气流通性变差, 车厢内的空气异味感也随之升高^[1]。

表 3 地铁车厢内的气味类型及来源调研结果

Table 3 Investigation results of odor types and sources in metro carriages

气味类型及来源	票数	所占百分比%
车辆本身气味	241	44.55
刺激性气味	63	11.65
人员流动引起的	395	73.01
不新鲜气味		
香味	73	13.49
车厢内设施散发	241	44.55
来自空调通风系统	182	33.64
气味来源		
周围人散发	371	68.58
列车在停站时	86	15.9
自站台进入		

2.2.3 影响因素

调研结果表明, 受访者认为地铁车厢温度、天气以及季节均会影响地铁车厢空气品质, 如图 2、表 4、表 5 所示。

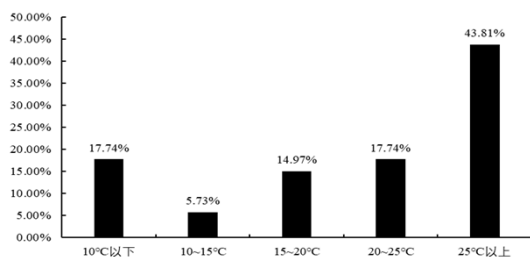


图 2 温度对地铁车厢气味的影响

Fig.2 Influence of temperature on odor of subway carriage

本次调研共有 341 人认为车厢温度对车厢气味变化有影响, 占有所有受访者的 63.27%, 说明大部分乘客觉得温度是影响车厢内空气质量的一个主要因素。大部分乘客觉得温度在 25°C 以上时车

厢的气味比较明显, 这可能是由于温度升高可能会增强材料与人员散发造成的^[14], 同时温度升高时也会造成气味传播速度加快。据测量, 地铁温度在高峰时段会相应增大, 可能显著影响车厢内空气品质, 降低乘客乘车的舒适度^[9]。

表 4 天气对地铁车厢气味的影响

Table 4 Influence of weather on odor of subway carriage

天气情况	票数	所占百分比%
下雨	229	42.33
下雪	84	15.53
刮风	83	15.34
晴天	158	29.21
阴天	131	24.21
其他天气	32	5.91
影响不明显	140	25.88

表 5 季节对地铁车厢气味的影响

Table 5 The influence of seasons on the smell of metro carriages

季节	票数	所占百分比%
春季	34	6.28
夏季	325	60.07
秋季	24	4.44
冬季	73	13.49
无明显差别	85	15.71

如表 4 所示, 约一半的受访者认为下雨天对地铁车厢气味影响比较明显, 雨天会导致空气湿度增大, 进而空气流动性会变差, 会导致产生的气味很难散发出去。仅有 25.88% 的受访者认为天气对车厢气味的影响不明显, 说明大部分乘客认为天气对地铁车厢的气味产生了影响。如表 5 所示, 超 60% 的受访者觉得夏季的车厢气味比较明显, 夏天的大气温度较高, 会导致气味分子的运动加剧, 气味的传播也就会较其他季节快一些, 而且人体的新陈代谢更加旺盛, 代谢率升高时, 由人体产生的内源性 VOC 浓度也随之增加^[10], 因此夏季车厢气味会较其他季节更明显一些。觉得不同季节地铁车厢内气味无明显差别的仅占 15.71%, 证明绝大部分乘客认为季节对地铁车厢的气味产生了一定影响。以上结果说明地铁车厢内通风设计及运行应该根据不同的气候特点以及季节变化进行针对性调整。

2.3 乘客的健康意识

乘客对地铁车厢内空气污染认识程度的统计

结果如表 6、图 3、图 4 所示。

表 6 地铁车厢内气味可能引起的不适反应

Table 6 Possible uncomfortable reactions caused by odors in metro carriages

是否影响身体健康	票数	所占百分比%
影响不大	227	41.96
有影响, 可以接受	159	29.39
影响大, 担心引发疾病	22	4.07
没有影响	104	19.22
不知道	29	5.36

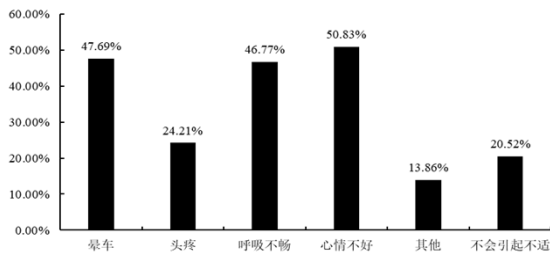


图 3 车厢内气味可能引起的不良反应

Fig.3 Possible adverse reactions caused by odor in the carriage

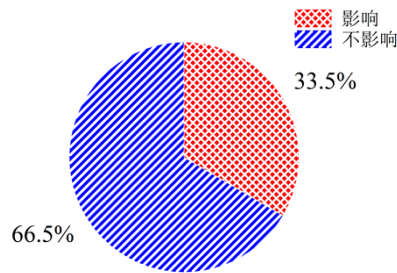


图 4 车厢内的气味对乘客选择地铁乘车的影响程度

Fig.4 Influence degree of smell in carriage on passengers' choice of metro

由表 6 可以看出有 75.42% 的乘客觉得车厢内的气味会影响到身体健康, 仅有 19.22% 的乘客认为地铁车厢内的气味不会对身体产生影响。如图 3 所示, 大部分受访者认为车厢内的气味会引起产生晕车、呼吸不畅、心情不好等不良反应。如图 4 所示, 33.5% 的乘客会因为地铁车厢异味而改变交通方式, 如打车、驾车, 这不利于低碳交通目标的实现。66.5% 的乘客并不会因为地铁车厢的空气污染而选择其他交通方式, 说明即便车厢内的气味会引起乘客多种类型的不良反应, 但大多数乘客依然会选择地铁出行, 这可能是由于地铁的便捷性和经济性导致的, 这进一步说明了改善车厢内空气品质的

紧迫性, 进而提高乘客的乘车舒适性。

2.4 提高地铁车厢空气品质的相关建议

如图 5 所示, 73.1% 的受访者希望可以通过增大通风量以及加强空气过滤的方式来改善地铁车厢的空气品质, 增大通风量可以加速车厢内与外界的空气交换, 提高空气过滤系统的过滤效果可以过滤掉一部分有机污染物和粉尘颗粒物, 以此提高车厢空气质量。根据模拟分析, 车厢人员过多时易出现涡流等死角区域, 且除送风口及回风口处, 车辆两端风速小, 污染物会漂浮在空中, 造成乘客的不舒适感^[15], 即保证室内空气品质的主要措施还是全面通风。

车厢内的通风系统对乘客的热舒适也起到一定的调节作用, 故建议地铁通风系统在人流量低峰期可以适当减少通风量降低能耗, 在高峰时段适当增大通风, 以提高乘客的乘车的舒适度, 为乘客提供较好的乘车环境。空气净化是以提高空气的洁净度为主要目的的空调调节技术, 地铁空调系统的空气净化也可以根据不同季节的空气污染物的特点提供合适的新风量, 以及采用不同的净化技术, 如臭氧负离子空气净化技术、紫外线消毒杀菌技术、活性炭过滤技术等, 降低由新风带入车厢的污染物浓度。

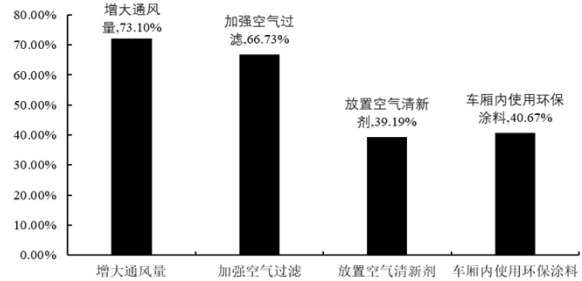


图 5 相关建议

Fig.5 Recommendations

3 讨论

文献调研显示, 近些年来的多个国家均开展过关于地铁车厢空气品质的研究, 其中我国的研究较多集中在部分经济发达省市, 如北京、上海、成都、广州等。

表 7 为近几年国内地铁车厢空气品质的主观调研结果, 由表可知很大一部分工作人员及乘客都认为地铁车厢存在异味, 且通风、人流量是造成车厢内异味的主要原因, 且异味强弱与季节有关, 这与本研究调研结果中关于异味来源、异味季节性变化

等结果较为符合。结合已有研究与本研究可知,对品质改善有助于人们选择乘坐地铁,低碳出行。地铁车厢气味来源及控制进行研究对于车厢内空气

表7 近几年国内地铁车厢空气品质主观调查结果总结

Table 7 Summary of subjective investigation results of air quality in metro cars in recent years

地点	针对对象	结果	参考文献
上海	地铁工作人员、乘客	46.9%和42.0%的工作人员认为客流量大和通风不足是污染的主要原因;71.5%的乘客认为主要是由于通风不足	[11]
北京	地铁工作人员	60%以上的调查对象认为客流量大和通风不足是造成地铁环境空气质量下降的主要原因	[16]
	乘客	调查对象提及最多的是希望改善通风和加强空气净化来提高空气质量	[17]
长春	乘客	显示有47.6%的乘客认为车厢内部有异味,有54%的乘客对空气质量并不满意	[18]
上海	乘客	乘客感觉空气有异味、空气不流通,闷、困倦,其中由于受到高峰时段车载密度的影响,选择空气不流通,闷的比例最高	[19]
青岛	乘客	随着乘客的密度增大,环境有所恶化,乘客的满意度随之降低,乘客出现不适症状的比例也从22.6%增加到了27.1%	[20]
沈阳、北京、上海、广州	乘客	同一地铁线路的夏季均要比冬季的空气异味感高,温度对空气异味感影响最大	[21]
天津	乘客	感受到空气不流通和空气中有异味的乘客占比分别为46%和21.6%,多数人会在高峰时段人流密集时感受到空气不流通、有异味	[22]
郑州	乘客	载客量过少时,人对气流阻碍小,乘客希望可以减小风速;载客量大时,空气不流通,容易产生闷热感觉,乘客希望增大风速	[23]
西安	地铁工作人员、乘客	77.1%的乘客认为车厢空气质量状况差与停留时间以及人流密度较大有关;47.3%和39.8%的乘客和工作人员认为客流量大和通风不足导致地铁内空气质量下降	[24]
昆明	乘客	在高峰期有64.62%的乘客、非高峰期有65.93%的乘客感觉地铁车厢热环境舒适	[25]
北京、上海、广州、沈阳、昆明	乘客	空气异味感夏季较冬季明显;冬季不适症状发生率较夏季严重;空气异味感与温度呈显著正相关	[26]
西安	乘客	49.61%和66.94%的乘客分别在夏季和冬季感受到了车厢内的异味	[27]

表8 近几年国内地铁车厢空气品质实测调查结果总结

Table 8 Summary of air quality survey results of domestic metro cars in recent years

地点	所测物质种类	实测浓度 (mg/m ³)	标准值 (GB/T18883-2002、GB50157-2013)
上海[28]	TVOCs	0.940±0.341 mg/m ³	0.60 mg/m ³
上海[11]	甲醛	0.018±0.0025 mg/m ³	0.1 mg/m ³
上海[29]	PM10	0.5±0.3 mg/m ³	0.25 mg/m ³
昆明[30]	NH ₃	0.121±0.003 mg/m ³	0.2 mg/m ³
	NO ₂	0.079±0.0034 mg/m ³	0.24 mg/m ³
武汉[31]	氡	24.650 Bq/m ³	400 Bq/m ³
	甲醛	0.030 mg/m ³	0.1 mg/m ³
长春[18]	PM2.5	1.146 mg/m ³	0.035 mg/m ³
北京[12]	TVOCs	0.153 mg/m ³	0.60 mg/m ³
北京[32]		0.408 mg/m ³	

由近几年国内地铁车厢空气品质实测结果(见表 8)可知,车厢内测得的甲醛、 NH_3 、 NO_2 等污染物浓度在《室内空气质量标准》(GB/T 18883-2002)和《地铁设计规范》(GB 50157-2013)限值范围内,但车厢内 TVOC、颗粒物等的污染物浓度有严重超标现象,因此还需要对车厢内污染物,尤其是带有气味的污染物进行进一步研究,以提出有效的控制措施,改善地铁车厢空气品质。

4 结论

本文通过网络问卷对国内 541 名地铁乘客关于地铁车厢的空气品质主观评价进行了调研,通过统计分析,可得以下结论:

(1) 52.5%的受访者感受得到地铁车厢内存在异味且由人员流动引起的不新鲜气味被认为是车厢内的主要气味类型。

(2) 大部分乘客认为气味来源于周围人以及地铁车厢内设施的散发,而且温度、天气和季节都对车厢内的气味产生了影响。

(3) 地铁乘客对车厢空气品质的关注程度在逐步提高,且多数受访者具有较强的健康意识,并且希望能通过加强通风及空气过滤来提高地铁车厢空气品质,因此改善地铁车厢空气品质十分重要。

参考文献:

- [1] 叶晓平,冯爱军.中国城市轨道交通 2020 年数据统计与发展分析[J/OL].隧道建设(中英文),[2021-05-09]:1-4.
- [2] 王刚,邵李燕,王明明,等.乘客密度对地铁车厢空气品质的影响研究[J].建筑热能通风空调,2021,40(1):35-38, 34.
- [3] Wen Yueming, Leng Jiawei, Shen Xiaobing, et al. Environmental and Health Effects of Ventilation in Subway Stations: A Literature Review[J]. International journal of environmental research and public health, 2020,17(3):1084.
- [4] Yu Gong, Yijie Wei, Jinghui Cheng, 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.
- [5] Yu Gong, Tao Zhou, Youcai Zhao, 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.
- [6] Wha Me Park, Jae Bum Park, Jaehoon Roh, 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: An International Journal, 2018,24(4):1030-1042.
- [7] Wang Bao-Qing, Liu Jian-Feng, Ren Zi-Hui, et al. Concentrations, properties, and health risk of $\text{PM}_{2.5}$ in the Tianjin City subway system[J]. Environmental science and pollution research international, 2016,23(22): 22647-22657.
- [8] 杨伟超.运营地铁内污染物浓度的计算方法及应用研究[D].长沙:中南大学,2010.
- [9] 王刚,刘进宇,张晓霞,等.乘客密度对地铁车厢热环境的影响研究[J].青岛理工大学学报,2019,40(4):71-75, 120.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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院,2016.
- [13] 吴泳,张成云,刘明兴,等.甲醛浓度与人体健康效应试验研究[J].预防医学情报杂志,2006,(5):623-625.
- [14] Tu Zhijun, Li Yong, Geng Shibin, et al. Human responses to high levels of carbon dioxide and air temperature[J]. Indoor Air, 2021,31(3):872-886.
- [15] 冯劲梅,朱倩翎.地铁车厢污染物浓度分布特性模拟与分析[C].中国环境科学学会 2019 年科学技术年会——环境工程技术创新与应用分论坛论文集(二),2019:5.
- [16] 王春艳,樊星,杜孟威,等.北京地铁环境质量调查与对策分析[J].河北环境工程学院学报,2021,31(1):74-80.
- [17] 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.
- [18] 石岩,黄贤闯,李恒,等.冬季长春地铁车厢内空气质量调研分析[J].北方建筑,2020,5(6):49-52.
- [19] 庄晓芸.上海地铁车厢空气环境实测调查与数值研究[D].上海:东华大学,2012.

- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 李俊. 天津市地铁一号线内部环境空气状况测试与模拟研究[D]. 河北工业大学, 2016.
- [23] 王嘉琪. 郑州地铁车厢冬季热舒适研究[D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2020.
- [24] 左甜甜. 西安地铁环境空气品质调查及其污染因素分析研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.
- [25] 管宏宇, 胡松涛, 刘国丹. 温和地区地铁车厢夏季热环境现状调查研究[J]. 暖通空调, 2019, 49(8): 63-67.
- [26] 胡松涛, 武在天, 刘光乘, 等. 我国不同气候区地铁车厢内空气品质的评价与分析[J]. 暖通空调, 2017, 47(5): 1-8.
- [27] 王堃. 西安地铁站热舒适与空气品质研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2019.
- [28] 邓勇庆, 印木泉, 张胜年. 地铁车站厅台挥发性有机化合物污染调查[J]. 劳动医学, 2001, (4): 219-221.
- [29] 王迪, 沈恒根. 上海市一号线地铁站空气质量调研分析[J]. 建筑热能通风空调, 2019, 38(8): 44-47.
- [30] 韩新宇, 陈缘奇, 邓昊, 等. 昆明地铁环境空气质量检测分析[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2017, 39(6): 1023-1029.
- [31] 石梦蝶, 石斌, 王佩, 等. 2017—2018年武汉市地铁系统室内空气质量分析[J]. 环境卫生学杂志, 2020, 10(6): 574-578.
- [32] 刘雅倩, 张文楼, 刘琪, 等. 地铁车厢内挥发性有机物污染水平及对健康人群心电图指标的影响[J]. 首都公共卫生, 2020, 14(1): 13-15.

(上接第443页)

- [5] 杨建荣, 李先庭, A. Melikov. 个性化送风微环境的实验测试研究[J]. 暖通空调, 2004, (9): 87-90.
- [6] Habchi C, Chakroun W, Alotaibi S, et al. Effect of shifts from occupant design position on performance of ceiling personalized ventilation assisted with desk fan or chair fans[J]. Energy and Buildings, 2016, 117: 20-32.
- [7] Kaczmarczyk J, Melikov A, Fanger P O. Human response to personalized ventilation and mixing ventilation[J]. Indoor Air, 2010, 14(s8): 17-29.
- [8] 陆亚俊, 马最良, 邹平华. 暖通空调[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015: 318-319.
- [9] GB 50736-2012, 民用建筑供暖通风与空气调节设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [10] Rohdin P, Moshfegh B. Numerical predictions of indoor climate in large industrial premises. A comparison between different $k-\epsilon$ models supported by field measurements[J]. Building and Environment, 2007, 42(11): 3872-3882.
- [11] Gao R, Wang C, Li A, et al. A novel targeted personalized ventilation system based on the shooting concept[J]. Building and Environment, 2018, 135: 269-279.