

## 上海市轨道交通列车车厢空气质量调查分析

张海云<sup>1</sup>, 李丽<sup>2</sup>, 蒋蓉芳<sup>2</sup>, 宋伟民<sup>2</sup>

**摘要:** [目的] 了解上海轨道交通列车车厢 4 个月份空气中主要污染物的污染状况, 为疾病预防、卫生监督等工作的开展提供科学依据及合理建议。[方法] 分别选取上海市轨道交通 1、3、8 号线路中 DC01 型、AC01 型、C 型列车车厢并于 2009 年 5 月、7 月、11 月及 2010 年 1 月 4 个月份分别连续监测 3 个工作日, 每日 3 个时段。在每个监测点监测细菌总数、真菌总数、一氧化碳(CO)、二氧化碳(CO<sub>2</sub>)、挥发性有机物(volatile organic compound, VOC)、可吸入颗粒物(PM<sub>10</sub>)等空气卫生学指标。[结果] 微生物指标三条线路车厢差异无统计学意义, 且全年平均水平均低于参考标准限值。3 号线车厢 CO 浓度明显低于其他线路车厢。1、3 号线车厢 CO<sub>2</sub> 浓度平均水平高于 8 号线车厢。1 号线车厢 VOC、PM<sub>10</sub> 浓度明显高于其他线路车厢。细菌总数在 5、7 月份存在超标现象, 7 月份细菌总数最高达 87.6 个/皿。三条线路车厢的 CO<sub>2</sub> 浓度在 4 个月份均有严重超标, 最大浓度达 0.37%, 细菌总数、真菌总数、CO<sub>2</sub>、PM<sub>10</sub> 浓度在中午时段明显低于上、下午时段, 呈典型的“低谷”状。VOC 浓度在下午时段明显低于上午时段。真菌总数、VOC 浓度在 7 月份明显高于其他月份, 且差异有统计学意义( $P < 0.05$ )。PM<sub>10</sub> 在 1 月份平均浓度最高, 最大值为 0.278 mg/m<sup>3</sup>, 明显高于其他月份。[结论] 上海市轨道交通列车车厢细菌总数存在超标现象, CO<sub>2</sub> 浓度在 4 个月份均有严重超标。

**关键词:** 列车车厢; 空气污染; 影响因素

**A Survey on Air Quality of Shanghai Subway Carriages** ZHANG Hai-yun<sup>1</sup>, LI Li<sup>2</sup>, JIANG Rong-fang, SONG Wei-min (1. Agency for Public Health Inspection, Shanghai Municipal Health Bureau, Shanghai 200031, China; 2. School of Public Health, Fudan University, Shanghai 200032, China). Address correspondence to SONG Wei-ming, E-mail: wmsong@shmu.edu.cn • The authors declare they have no actual or potential competing financial interests.

**Abstract:** [Objective] To collect data of major air pollutants in Shanghai subway carriages in four discrete months and to provide scientific basis and reasonable proposals for disease prevention and health supervision. [Methods] Carriages of DC01, AC01 and C serving Shanghai metro line 1, 3 and 8 were selected and monitored 3 times per day for 3 continuous days in May, July, November of 2009 and January of 2010. The monitoring indices included total colony forming units (CFU) of bacteria and fungi, carbon monoxide (CO), carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), volatile organic compound (VOC) and respirable particulate matter (PM<sub>10</sub>). [Results] There was no significant difference in microbiological pollution index among all selected carriages, and the average annual level was lower than the reference standard limit. The concentration of CO in line 3's carriages was significantly lower than that in other lines'. The average concentration of CO<sub>2</sub> in carriages of line 1 and line 3 was higher than that of line 8. The concentrations of VOC and PM<sub>10</sub> in line 1's carriages were significantly higher than those in other lines'. The total counts of bacteria exceeded the related standard in May and July, and were as high as 87.6 colonies per plate in July. The concentrations of CO<sub>2</sub> exceeded the related standard in the three lines' carriages in all 4 months and the highest was 0.37%. The total CFU of bacteria and fungi and the concentrations of CO<sub>2</sub> and PM<sub>10</sub> were significantly lower at noon than in the morning and in the afternoon, presenting a typical trough shape. The concentration of VOC was significantly lower in the afternoon than in the morning. The average total count of fungi and the concentration of VOC in July were significantly higher than in the other monitored months ( $P < 0.05$ ). The concentration of PM<sub>10</sub> was significantly higher in January than in other monitored months, with the maximum of 0.278 mg/m<sup>3</sup>. [Conclusion] The total count of bacteria in Shanghai subway carriages exceeded the related standard. The concentrations of CO<sub>2</sub> significantly exceeded the related standard in all 4 months.

**Key Words:** subway carriage; air pollution; impact factors

[作者简介] 张海云(1977—), 男, 学士, 主管医师; 研究方向: 环境空气卫生; E-mail: zhanghaiyun@hs.sh.cn

[通信作者] 宋伟民教授, E-mail: wmsong@shmu.edu.cn

[作者单位] 1. 上海市卫生局卫生监督所, 上海 200031; 2. 复旦大学公共卫生学院环境卫生教研室, 上海 200032

随着上海市轨道交通客运量的不断增加, 地铁空气卫生状况也日益受到人们重视<sup>[1]</sup>。轨道交通作为相对封闭的特殊环境, 通风情况不佳, 不利于空气污染物稀释; 又因缺乏日光照射、人群密集、流动性大, 易引起疾病传播, 其对人群健康的影响要比其他交通工具更为严重<sup>[2]</sup>。现有开展的调查研

究主要针对轨道交通车站,而针对列车车厢空气质量的研究迄今仍较少。为提高轨道交通列车车厢空气质量,保护人群健康,本调查拟通过对列车车厢空气中的一氧化碳(CO)、二氧化碳(CO<sub>2</sub>)、挥发性有机物(volatile organic compound, VOC)、可吸入颗粒物(PM<sub>10</sub>)及微生物学指标进行系统全面的监测,分析了解目前轨道交通列车车厢主要污染指标及其变化规律,为疾病预防、卫生监督等工作的开展,提供科学依据及合理建议。

## 1 材料与方法

### 1.1 监测布点

按照车型、客流量大小及使用年限等不同特征,分别选取上海市轨道交通1、3、8号线中DC01型、AC01型、C型列车车厢进行监测。其中1号线车型为DC01型电动客车,使用年限最长,1995年正式运营使用,相对最为繁忙。3号线车型为AC01型,2000年投入使用。8号线较新,于2007年运营使用,车型为C型。DC01型车额定载客量为410人,AC01型车额定载客量为310人,C型车额定载客量为210人。列车车厢除夏季空调开放外,其他季节均为自然通风,新风来源除夏季来自空调送风,其他季节均为隧道活塞风及自然通风,地铁车厢空调系统采用离心式通风机和滤尘系统。各监测点监测时轨道交通处于正常运营状态,且不影响乘客活动,因客流量大,流动性强,只能监测各车站各时间段相对客流情况。根据《公共场所卫生监测技术规范》(GB/T 17220—1998)<sup>[3]</sup>的要求,选取车厢对角线交点位置为监测点,避免靠近空调送风口及门窗等与外界空气交换频繁的位置。采样点高度为人群呼吸带,距离地面约1.2~1.5 m处。每个指标平行采样3次,结果取平均值,各线路监测指标样本数均为108。

### 1.2 监测时间

于2009年5月、7月、11月及2010年1月4个月份,分别选择3个工作日连续监测。

### 1.3 监测指标及仪器(或方法)

CO、CO<sub>2</sub>的监测,采用美国TSI-7545便携式直读仪(MIRCON ELECTRONICS CO., LTD),最低分辨率分别为0.1 mg/m<sup>3</sup>和1 mg/m<sup>3</sup>。PM<sub>10</sub>的监测,采用美国TSI-AM-510个体粉尘仪(MIRCON ELECTRONICS CO., LTD),最低分辨率为0.001 mg/m<sup>3</sup>。VOC的监测,采用美国PGM-7240挥发性有机物VOC检测仪,最低分辨率为1 mg/m<sup>3</sup>。微生物指标采用暴皿法监测,每个监测点平行监测3次,每次暴皿5 min(培养皿直径9 cm),细菌菌落选用普通营养琼脂培养基,样品于37℃培养24 h后进行菌落计数。真菌选用沙氏琼脂培养基培养,样品于28℃、相对湿度为85%的真菌培养箱中培养3~5 d,并记录菌落总数。两种培养基均购于上海市疾病预防控制中心华康科技开发公司。

### 1.4 评价标准

因目前尚未出台轨道交通系统相关卫生标准,本次研究轨道交通列车车厢卫生状况参照《公共交通工具卫生标准》(GB 9673—1996)<sup>[4]</sup>进行评价。因《公共交通工具卫生标准》中未对VOC浓度进行限定,本研究参照《室内空气质量标准》(GB/T 18883—2002)<sup>[5]</sup>中VOC的标准限值进行评价。因真菌总数暂无相应参考标准,故未作超标分析。

## 1.5 统计学分析

数据采用Excel 2003录入,使用SPSS 11.5统计软件对数据进行单因素方差分析和最小显著差法(least-significant-difference, LSD)检验。检验水准 $\alpha=0.05$ 。

## 2 结果

### 2.1 车厢空气污染指标总体状况

由表1可见,三条线路车厢的微生物指标差异无统计学意义,且全年平均水平均低于参考标准限值。3号线车厢CO浓度明显低于其他两条线路车厢( $P<0.05$ )。1、3号线车厢CO<sub>2</sub>浓度平均水平高于8号线车厢,且高于参考标准限值,这可能与此两条线路车厢载客量大,且在上下班高峰期经常存在超员现象有一定关系。1号线车厢VOC、PM<sub>10</sub>浓度明显高于其他两条线路车厢( $P<0.05$ )。

表1 不同路线车厢空气污染指标监测结果( $n=108$ )

| 指标                                    | 1号线                        | 3号线                      | 8号线                        | 平均值           |
|---------------------------------------|----------------------------|--------------------------|----------------------------|---------------|
| 细菌总数(个/皿)                             | 23.3 ± 1.5                 | 23.5 ± 1.1               | 22.6 ± 2.2                 | 23.1 ± 1.8    |
| 真菌总数(个/皿)                             | 20.3 ± 2.6                 | 22.7 ± 1.8               | 23.0 ± 4.2                 | 23.1 ± 6.5    |
| CO(mg/m <sup>3</sup> )                | 0.63 ± 0.01                | 0.46 ± 0.03 <sup>*</sup> | 0.72 ± 0.03                | 0.60 ± 0.01   |
| CO <sub>2</sub> (%)                   | 0.158 ± 0.010              | 0.200 ± 0.042            | 0.135 ± 0.034 <sup>*</sup> | 0.164 ± 0.041 |
| VOC(mg/m <sup>3</sup> )               | 0.202 ± 0.067 <sup>*</sup> | 0.100 ± 0.009            | 0.091 ± 0.018              | 0.131 ± 0.019 |
| PM <sub>10</sub> (mg/m <sup>3</sup> ) | 0.112 ± 0.007 <sup>*</sup> | 0.068 ± 0.002            | 0.078 ± 0.012              | 0.084 ± 0.033 |

[注]<sup>\*</sup>:与其他线路车厢比较, $P<0.05$ 。

### 2.2 车厢空气污染指标超标情况

由表2可见,细菌总数在5、7月份存在超标现象,7月份细菌总数最高达87.6个/皿,提示可能与7月份温度较高,新风系统送风不足有关。CO<sub>2</sub>浓度在4个月份均有严重超标,最大浓度达0.37%,在列车超员时,CO<sub>2</sub>超标更为严重。其余指标未见有超标现象。

表2 不同月份车厢空气污染指标超标率( $n=324$ , %)

| 指标                                    | 1月   | 5月   | 7月   | 11月  | 全年   |
|---------------------------------------|------|------|------|------|------|
| 细菌总数(个/皿)                             | 0    | 2.7  | 0.9  | 0    | 0.9  |
| CO(mg/m <sup>3</sup> )                | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| CO <sub>2</sub> (%)                   | 55.3 | 52.8 | 42.6 | 19.4 | 42.5 |
| VOC(mg/m <sup>3</sup> )               | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| PM <sub>10</sub> (mg/m <sup>3</sup> ) | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |

### 2.3 车厢空气污染指标不同时段的变化

由表3可见,细菌总数、真菌总数、CO<sub>2</sub>、PM<sub>10</sub>浓度在中午时段显著低于上、下午时段,呈典型的“低谷”状,提示这些污染指标可能与人群活动有密切关系。VOC浓度在下午时段低于上午时段。其他指标不同时段差异无统计学意义。

表3 各列车不同时段车厢空气污染指标( $n=108$ )

| 指标                                    | 7:00—9:00     | 11:00—13:00                | 17:00—19:00                |
|---------------------------------------|---------------|----------------------------|----------------------------|
| 细菌总数(个/皿)                             | 25.2 ± 2.5    | 18.9 ± 4.7 <sup>#</sup>    | 25.5 ± 7.7                 |
| 真菌总数(个/皿)                             | 24.7 ± 6.9    | 19.0 ± 4.4 <sup>#</sup>    | 27.7 ± 5.2                 |
| CO <sub>2</sub> (%)                   | 0.195 ± 0.051 | 0.100 ± 0.018 <sup>#</sup> | 0.188 ± 0.023              |
| CO(mg/m <sup>3</sup> )                | 0.60 ± 0.03   | 0.51 ± 0.13                | 0.61 ± 0.12                |
| VOC(mg/m <sup>3</sup> )               | 0.172 ± 0.002 | 0.173 ± 0.001              | 0.130 ± 0.070 <sup>#</sup> |
| PM <sub>10</sub> (mg/m <sup>3</sup> ) | 0.079 ± 0.012 | 0.058 ± 0.016 <sup>#</sup> | 0.086 ± 0.018              |

[注]<sup>#</sup>:与其他时段比较, $P<0.05$ 。

2.4 车厢空气污染指标不同月份的变化

由表 4 可见,真菌总数、VOC 浓度在 7 月份明显高于其他月份,且差异有统计学意义( $P<0.05$ )。PM<sub>10</sub>在 1 月份平均浓度最高,最大值为 0.278 mg/m<sup>3</sup>,明显高于其他月份。其余指标未见有季节变化差异。

表 4 不同月份车厢空气污染指标 (n=324)

| 指标                                    | 1月                       | 5月          | 7月                       | 11月         |
|---------------------------------------|--------------------------|-------------|--------------------------|-------------|
| 细菌总数(个/皿)                             | 21.4±2.2                 | 22.7±2.1    | 24.7±1.7                 | 23.8±2.8    |
| 真菌总数(个/皿)                             | 14.3±1.9                 | 26.9±1.1    | 34.9±4.2 <sup>#</sup>    | 15.9±1.9    |
| CO(mg/m <sup>3</sup> )                | 0.50±0.07                | 0.69±0.02   | 0.78±0.01                | 0.45±0.03   |
| CO <sub>2</sub> (%)                   | 0.160±0.030              | 0.163±0.023 | 0.203±0.049              | 0.130±0.036 |
| VOC(mg/m <sup>3</sup> )               | 0.021±0.002              | 0.084±0.012 | 0.376±0.014 <sup>#</sup> | 0.041±0.003 |
| PM <sub>10</sub> (mg/m <sup>3</sup> ) | 0.108±0.049 <sup>#</sup> | 0.095±0.006 | 0.072±0.017              | 0.063±0.005 |

[注]<sup>#</sup>:与其他时段比较, $P<0.05$ 。

3 讨论

CO<sub>2</sub>是地铁车厢空气污染物的主要成分,CO<sub>2</sub>浓度指标是可以反映空气状况的评价指标,是判断地铁车厢污染程度最主要的参数之一。当地铁在隧道内行驶时,因刹车摩擦产生的粉末及由活塞风带入隧道内的颗粒物最终会通过新风系统进入车厢内,被人群吸入,因此,颗粒物也是判断地铁车厢污染程度最主要的参数之一。空气颗粒物越细(PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>)越容易进入人体呼吸系统深部,对人体造成的危害越大。环境卫生学中通常用空气中的细菌浓度来表征其清洁度和潜在的致病性<sup>[6]</sup>,细菌浓度可以反映地铁车厢污染程度。另外,真菌污染也是引起人群各类感染的重要因素。各种微生物均易附着于颗粒物表面,长期悬浮于空气中,当相对湿度高于70%、灰尘多、通风不良、日光照射不足的情况下可存活较长时间,严重影响人群健康<sup>[7]</sup>。

地铁客车的通风状况与地上客车不同,对于新风量的确定应有所区别。地上铁路客车一般要求新风量为 20 m<sup>3</sup>/(h·人),CO<sub>2</sub>含量换算容积比,最大不允许超过0.15%。而地铁车厢空间小,载客量大,又是在隧道内运行,运行中产生负压,使新鲜空气吸入比较困难,特别受车辆限界的限制,布置大型吸风机是很难做到的,加之受隧道内换气条件的限制,其CO<sub>2</sub>的含量比地面要高。所以,不能照搬地上铁路客车的卫生标准。地铁列车作为城市内的重要交通工具,其运行区间短,短途乘客多,适当提高CO<sub>2</sub>含量容积比应该是允许的。因此,建议CO<sub>2</sub>含量容积比取0.15%~0.12%<sup>[8]</sup>。合理的气流组织,不仅可以将新鲜空气按质按量送入车厢,还可以及时将污染物排出,提高列车车厢内空气品质<sup>[9]</sup>。莫培杰等<sup>[10]</sup>对上海地铁列车夏季空调通风系统的实验结果表明,车厢内CO<sub>2</sub>平均浓度远高于站台。CO<sub>2</sub>最大值分别为0.201%和0.185%,超过了公共交通工具卫生标准值的规定(≤0.15%)。

轨道交通列车车厢由于其列车型号、使用年限、载客量及通风系统的不同,各类污染指标也存在差异。本次调查显示,CO<sub>2</sub>是列车车厢主要的超标指标。细菌总数、真菌总数、CO<sub>2</sub>、PM<sub>10</sub>浓度均表现为中午时段低于其他两个时段,且差异有统计学意义。VOC在上午时段远高于下午时段,且差异有统计学意义,趋势与各车站类似。其余指标均未见显著的时段差异性。对于运行的列车车厢,乘客是其主要污染源之一。在客流的高峰期,客流量和列车行驶密度均较大,导致CO<sub>2</sub>明显即时升高<sup>[11]</sup>。

四个季度列车车厢卫生学监测结果表明,车厢的卫生污染状况较为严重,7月份超标最为严重。PM<sub>10</sub>浓度最高达0.278 mg/m<sup>3</sup>,需要引起重视。

针对本调查中发现的问题,我们提出以下几点建议,以便更好地指导轨道交通系统卫生监督和疾病预防,保护人群健康。

(1)根据不同季节空气污染物的特点,列车通风系统采用新风三级过滤,新风机组中在装粗效过滤器(滤尘系统)的基础上,适当加装中效甚至是亚高效过滤器,以便降低由新风带入车厢内的颗粒物浓度。

(2)合理控制列车车厢内的人流,采用分流以及缩短列车间隔时间等方式,避免车厢内超员超载。

(3)定期组织和培训人员对列车车厢内易于污染的区域进行清洗消毒;定期清洗列车新风机组设备、过滤网等设施,减少微生物污染。

(4)加强对列车的日常维护保养,减少轮轨摩擦以及刹车产生的粉末通过新风系统进入车厢。

(5)对隧道活塞风井加强管理,在装粗效过滤器的基础上,适当加装中效过滤器,减少外界颗粒物进入隧道并通过新风系统进入车厢。

·作者声明本文无实际或潜在的利益冲突。

参考文献:

[1] 张海云,李丽,蒋蓉芳,等.上海市地铁车站空气污染的监测分析[J].环境与职业医学,2011,28(9):564-566/570.

[2] GERSHON RR, QURESHI KA, BARRERA MA, et al. Health and safety hazards associated with subways: a review[J]. J Urban Health, 2005, 82(1): 10-20.

[3] 中华人民共和国卫生部. GB/T 17220—1998 公共场所卫生监测技术规范[S].北京:中国标准出版社,1998.

[4] 中华人民共和国卫生部. GB 9673—1996 公共交通工具卫生标准[S].北京:中国标准出版社,1996.

[5] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中华人民共和国卫生部. GB/T 18883—2002 室内空气质量标准[S].北京:中国标准出版社,2003.

[6] SALMA I, WEIDINGER T, MAENHAUT W. Time-resolved mass concentration, composition and sources of aerosol particles in a metropolitan underground railway station [J]. Atmos Environ, 2007, 41(37): 8391-8405.

[7] GRASS DS, ROSS JM, FAMILY F, et al. Airborne particulate metals in the New York City subway: a pilot study to assess the potential for health impacts[J]. Environ Res, 2010, 110(1): 1-11.

[8] 朱培根,朱颖心.地铁车厢内人员新风量的研究[J].暖通空调,2006,36(3):75-77.

[9] 丁力行,黄华军,曾宪均.地铁车内空气参数指标分析[J].城市轨道交通研究,2003,6(3):61-64.

[10] 莫培杰.上海地铁车空调通风试验结果及分析[J].铁道车辆,1995,33(8):7-14.

[11] 杨伟超,彭立敏,艾小冬.地铁内空气品质的动态变化特性分析[J].铁道科学与工程学报,2009,6(6):54-58.

(收稿日期:2012-03-21)

(英文编审:金克峙;编辑:张晶;校对:徐新春)