

北京某地铁站台空气颗粒物的数量浓度和质量浓度 以及粒径分布和元素组成

王春艳^{1,2} 樊星³ 刘佳³ 陈宇^{1,2}

(1. 北京市地铁运营有限公司地铁运营技术研发中心, 102208, 北京; 2. 地铁运营安全保障技术北京市重点实验室, 102208, 北京;
3. 北京工业大学环境与能源工程学院, 100124, 北京//第一作者, 工程师)

摘 要 为了解地铁站台空气颗粒物的污染状况, 对北京某地铁站台空气颗粒物的数量浓度和质量浓度, 以及粒径分布情况进行了 1 d 的实地监测, 同时采集了站台内外的总悬浮颗粒物样品, 研究了颗粒物元素组成特征。结果表明, 监测粒径为 0.006 0~9.890 0 μm 范围内, 地铁站台空气中颗粒物总数量浓度与粒径为 0.006 0~0.017 0 μm 的颗粒息息相关, 总质量浓度主要取决于粒径为 0.612 0~6.670 0 μm 的颗粒; 早晚乘车高峰时段内站台空气中颗粒物的数量浓度和质量浓度都显著增大, 晚高峰时段颗粒物质量浓度高于早高峰时段; 监测期间, $\text{PM}_{2.39}$ (粒径为 0.006 0~2.390 0 μm 颗粒) 和 $\text{PM}_{9.89}$ (粒径为 0.006 0~9.890 0 μm 颗粒) 平均质量浓度超过了环境空气中 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的标准限值。站台空气颗粒物中 Fe 含量最高, Fe、Cu、Mn、Cr、Mo 的含量显著高于站外。

关键词 地铁站台; 颗粒物; 数量浓度; 粒径分布; 元素组成

中图分类号 X820.1:U231.4

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2020.03.004

Number/Mass Concentration, Particle Size Distribution and Elemental Composition of Airborne Particulate Matter at A Subway Station in Beijing

WANG Chunyan, FAN Xing, LIU Jia, CHEN Yu

Abstract In order to understand the pollution status of airborne particulate matter (PM) at subway platform, a one-day site monitoring of PM concentration and particle size distribution is carried out at a subway platform in Beijing. Meanwhile, the total suspended particle (TSP) samples at the platform and outside the subway station are collected, and their elemental compositions are analyzed. The results show that at the subway platform, the total number concentration of PM within the monitored size range (0.006 0~9.890 0 μm) is closely related with the number concentration of PM in the size range of 0.006 0~0.017 0 μm , while the total mass concentration of PM is mainly dependent on the mass concentration of

PM in the size range of 0.612 0~6.670 0 μm . The concentrations of PM in the platform air increase during the morning and the evening rush hours, and the mass concentration of PM during the evening rush hours is higher than that in the morning rush hours. The average mass concentrations of $\text{PM}_{2.39}$ (particles in the size range of 0.006 0~2.390 0 μm) and $\text{PM}_{9.89}$ (0.006 0~9.890 0 μm) during the monitoring period rush hours are higher than the standard limits of $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} in ambient air. The concentration of Fe is the highest among the elements detected in TSP samples collected at the platform, and concentrations of Fe, Cu, Mn, Cr and Mo detected at the platform are significantly higher than those outside the station.

Key words subway platform; particulate matter; number concentration; particle size distribution; elemental composition

First-author's address Subway Operation Technology R & D Center, Beijing Subway Operation Co., Ltd., 102208, Beijing, China

地铁站台是旅客候车、逗留的场所, 客流密度大, 大部分位于地下二层, 属于半封闭的建筑结构, 自然通风困难, 不利于污染物的扩散。虽然新建车站大都采用屏蔽门系统分割站台与隧道环境, 但当列车进站后屏蔽门和车门打开时, 隧道以及车厢内的污染物会向站台迁移^[2-7]; 另外在隧道活塞风的作用下, 隧道内产生的以及经由通风井由室外进入隧道的污染物也会通过屏蔽门的缝隙持续向站台渗透^[2,4-5]。

近年来, 我国多地多次出现以细颗粒物 ($\text{PM}_{2.5}$) 污染为特征的雾霾天气现象, 公众对于室外以及包括城市轨道交通环境在内的室内环境空气中颗粒物污染状况的关注越来越高。大量研究表明, 地铁内大气颗粒物在浓度、粒径分布以及化学组成等理化特性上与站外大气颗粒物存在显著差异。文献[8]指出, 在伦敦搭乘地铁出行的乘客 $\text{PM}_{2.5}$ 平均暴露水平比搭乘地面交通的乘客高 3~8 倍。文献

[9]表明,地铁内大气颗粒物中 Fe、Mn、Cr、Ni、Cu 等金属元素显示出富集特性。

文献[1-5,10-11]对地铁环境中的颗粒物也进行了一些调查和研究,包括颗粒物的数量和质量浓度、粒径分布以及元素组成特征等。但由于地铁微环境受城市环境、建筑结构、建造年代、列车运行方式、客流量以及通风模式等诸多因素的影响,地铁微环境中颗粒物的浓度水平、理化特性等在不同城市、不同地铁系统甚至不同车站间差异较大。对于北京地铁环境空气中颗粒物的污染状况,目前仅有不同站台门系统(敞开式、半高安全门、全高安全门、屏蔽门系统)^[2]、不同区域(站厅、站台、车厢)^[1-2]、不同时间段(夏季/冬季、工作日/周末)^[10]颗粒物(PM_{2.5}和PM₁₀)的数量浓度和质量浓度的报道,对于颗粒物粒径分布、化学组成特性等研究较少。考虑到颗粒物对人体健康的影响与颗粒物粒径大小、化学组成等密切相关,本研究选取北京某具有屏蔽门系统的地铁站台,实地监测颗粒物的数量浓度和质量浓度,以及粒径分布在1 d内的变化情况,同时在站台和站外同步采集颗粒物样品,分析站台内外颗粒物元素组成特征,以期为评价和控制北京地铁站台颗粒物污染提供科学依据。

1 地铁站台空气颗粒物采样与分析方法

1.1 采样地点和时间

实测地铁站是一座有两个站厅的地下端厅车站,南端是地下两层,北端是地下三层,采用岛式站台。本研究站台监测点位于南端地下二层站台的中央位置。该站台采用屏蔽门系统,配有中央机械通风系统。

监测站台空气颗粒物粒径分布以及采集站台空气颗粒物样品时,在站台的中央位置布设监测和采样点,监测和采样点距地铁屏蔽门和墙壁1 m以上并远离通风口,监测高度为1 m左右,采样高度为1.5 m左右。采集站外空气颗粒物样品时,采样点位于进出站口处,距墙壁1 m以上并远离通风口,采样高度为1.5 m左右。

采样和监测时间选在2016年9月29日列车正常运行时段,采样和监测时段为07:48—19:32,基本覆盖了早高峰(07:00—09:00)、晚高峰(17:00—19:00)和平峰时段。早晚高峰时段内列车发车间隔为4 min 58 s,平峰时段内为7 min 30 s。现场观测表明早晚高峰时段内车站客流量显著高于平峰时段。

采样和监测期间站台平均温度为24.6℃,比站外高约3℃;站台内外平均相对湿度相差不大,均为30%左右。另外,采样和监测当天北京市环境空气质量从早到晚呈逐渐恶化之趋势,早晨时段空气质量较优,傍晚时段(17:00—19:00)出现了轻度污染,室外PM_{2.5}和PM₁₀的质量浓度从07:00的22 μg/m³和39 μg/m³增加至19:00的78 μg/m³和119 μg/m³^[12]。

1.2 采样和分析方法

采用芬兰 Dekati 公司的静电低压撞击器(Electrical Low Pressure Impactor, ELPI+)在线实时测量地铁站台空气中颗粒物的浓度和粒径分布,以考察颗粒物粒径分布特征及其随时间的变化规律。ELPI+采样流速为10 L/min,取样间隔为20 s。监测的颗粒物粒径范围为0.006 0~9.890 0 μm,共分为14个通道(CH1—CH14),CH1—CH14对应的粒径区间依次为:0.006 0~0.017 0 μm、0.017 0~0.027 5 μm、0.027 5~0.056 1 μm、0.056 1~0.094 1 μm、0.094 1~0.155 0 μm、0.155 0~0.261 0 μm、0.261 0~0.381 0 μm、0.381 0~0.612 0 μm、0.612 0~0.946 0 μm、0.946 0~1.600 0 μm、1.600 0~2.390 0 μm、2.390 0~3.990 0 μm、3.990 0~6.670 0 μm、6.670 0~9.890 0 μm。

本研究将前11个通道(CH1—CH11,0.006 0~2.390 0 μm)的颗粒物记为PM_{2.39},将全部14个通道(CH1—CH14,0.006 0~9.890 0 μm)的颗粒物记为PM_{9.89},以分别反映地铁站台空气中PM_{2.5}和PM₁₀的污染特征。

在监测站台空气颗粒物粒径分布的同时,利用KC-120E型中流量TSP采样器(青岛崂山电子仪器总厂有限公司生产)和玻纤滤膜(φ90 mm)手工采集站台和站外空气中的总悬浮颗粒物样品,采样流量为100 L/min。

采样后的玻纤滤膜密封后放在冰箱中(<4℃)保存。分析时先将滤膜剪成碎片,用高纯HNO₃超声提取后加热消解、浓缩,然后用超纯水将浓缩液稀释,添加内标后,用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS,Agilent 7500系列)进行元素分析。分析的无机元素包括Na、Mg、Al、S、Ca、Ti、V、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、As、Sr、Mo、Cd、Sb、Ce、Pb等21种。

2 采样数据分析

2.1 不同粒径区间颗粒物数量浓度随时间的变化

站台空气中未检测到CH14区间粒径为

6.670 0~9.890 0 μm 的颗粒物,其余粒径区间颗粒物数量浓度日变化趋势如图1所示。由图1可以看出,颗粒物数量浓度随粒径增大而显著减小,粒径从0.006 0~0.017 0 μm (CH1) 增大到0.056 1~0.094 1 μm (CH4)时,颗粒物数量浓度降低约1个数量级。不同粒径区间颗粒物数量浓度随时间变化的特征包括:①颗粒物粒径(CH1—CH3, 0.006 0~0.056 1 μm)较小时,其数量浓度随时间整体呈波动中逐渐降低之趋势,但早晚高峰时段出现了明显的浓度高峰;②颗粒物粒径(CH4—CH8, 0.056 1~0.612 0 μm)居中时,其数量浓度随时间整体呈逐渐升高之趋势,中午时段有一个较为明显的浓度高峰;③颗粒物粒径(CH9—CH13, 0.612 0~6.670 0 μm)较大时,其数量浓度呈早晚高、其余时段低且基本保持稳定的趋势,晚高峰时段浓度显著高于早高峰时段。

早晚高峰时段粒径(CH1—CH3, 0.006 0~0.056 1 μm)较小和粒径(CH9—CH13, 0.612 0~6.670 0 μm)较大的颗粒物数量都显著增加,可能与高频次列车和大流量乘客通过导致人群散发的小粒子增多、站内沉降的粒径较大的颗粒物二次飞扬以及由隧道和车厢进入站台的颗粒物增多有关。这与文献[5, 13]报道的地铁站台内无论是细颗粒还是粗颗粒浓度在高峰期均高于非高峰期的结论一致。粒径(CH4—CH8, 0.056 1~0.612 0 μm)居中的颗粒物在中午时段出现浓度高峰,可能与中午时段站内温度升高,由列车运行摩擦以及材料挥发等散发的粒子显著增多有关。另外,粒径(CH4—CH8, 0.056 1~0.612 0 μm)居中的颗粒物数量浓度随时间呈逐渐升高之趋势,可能与监测当天北京市环境空气中颗粒物浓度从早到晚呈逐渐升高之趋势有关。站外环境空气中颗粒物浓度从早到晚逐渐升高可能也是晚高峰时段大粒径(CH9—CH13, 0.612 0~6.670 0 μm)颗粒物浓度显著高于早高峰时段的主要原因。

另外值得注意的是,在更高的时间分辨条件下,各粒径区间颗粒物数量浓度随时间呈明显的周期性波动,尤其是CH9—CH13(粒径为0.612 0~6.670 0 μm)的颗粒物,由于数量少,波动更为显著,波动周期与列车通过的时间间隔基本一致,表明列车通过会导致站台内颗粒物出现反复的飞扬与沉积。列车到站屏蔽门打开时,活塞风以及人群的移动是引起颗粒物飞扬的原因;而列车驶出站台屏蔽

门关闭后,飞扬的颗粒物,尤其是粒径较大的颗粒物,会重新沉积;而这也是平峰时段CH13(粒径为3.990 0~6.670 0 μm)的颗粒物在某些时刻浓度为0的原因。文献[2]报道了类似由车门和屏蔽门启闭引起的站台PM_{2.5}和PM₁₀浓度呈周期性变化规律。

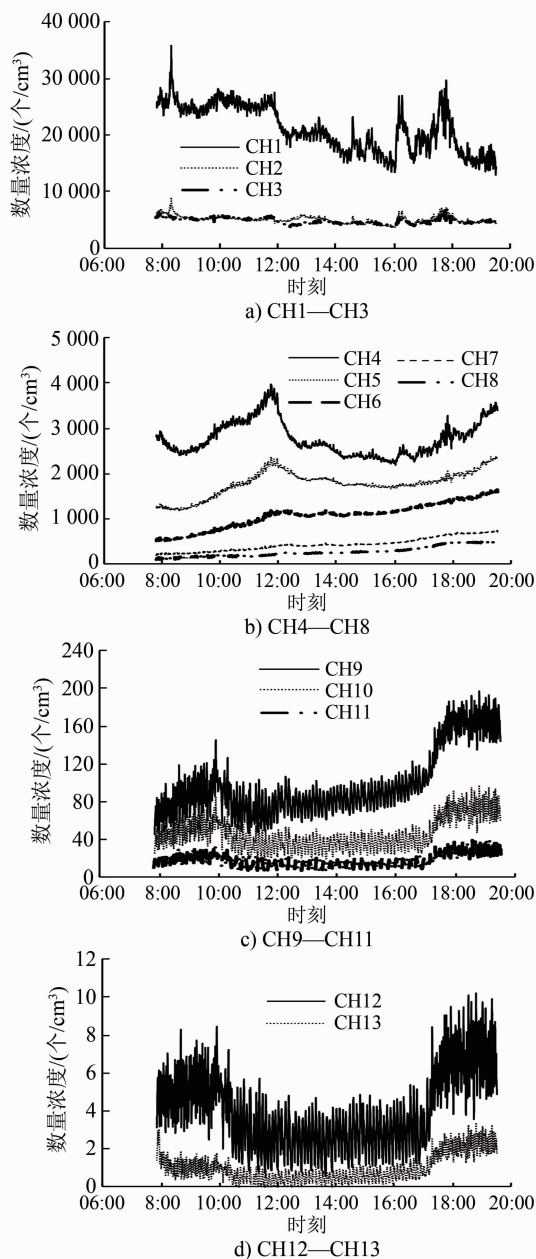


图1 站台空气中颗粒物数量浓度日变化趋势

站台空气中PM_{2.39}和PM_{9.89}数量浓度随时间的变化如图2所示。由图2可以看出,在整个监测时段内,PM_{2.39}和PM_{9.89}数量浓度之间无显著差异,表明监测粒径范围内颗粒物的数量主要来自小于2.39 μm 的颗粒。另一方面,PM_{2.39}和PM_{9.89}数量浓度随时间变化的规律与CH1—CH3(0.006 0~

0.056 1 μm)的颗粒物数量浓度随时间变化的规律基本一致,这与CH1—CH3的颗粒物数量浓度远高于其余粒径区间的颗粒物有关。监测期间 $\text{PM}_{2.39}$ 和 $\text{PM}_{9.89}$ 数量浓度分别为 $(37\,547 \pm 4\,771)$ 个/ cm^3 和 $(37\,552 \pm 4\,771)$ 个/ cm^3 ,最高值出现在08:18:29,分别为55 455个/ cm^3 和55 459个/ cm^3 ;最低值出现在16:02:34,分别为26 892个/ cm^3 和26 895个/ cm^3 ;晚高峰时段最高值出现在17:49:23,分别为52 064个/ cm^3 和52 069个/ cm^3 。

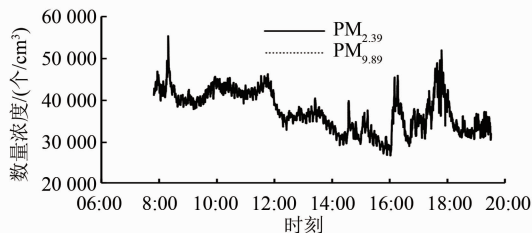


图2 站台空气中 $\text{PM}_{2.39}$ 和 $\text{PM}_{9.89}$ 数量浓度日变化趋势

2.2 不同粒径区间颗粒物质量浓度随时间的变化

由于颗粒物质量浓度由数量浓度结合粒径,并假定不同粒径颗粒物密度都为单位密度计算得来,因此对于一定的粒径区间,颗粒物质量浓度随时间变化的规律与其数量浓度随时间变化的规律完全相同。整体而言,颗粒物质量浓度随粒径增大而增大。粒径较大(CH9—CH13,0.612 0~6.670 0 μm)的颗粒物数量虽少(图1),但对于质量浓度的贡献远高于小粒径(CH1—CH8,0.006 0~0.612 0 μm)颗粒物。对数量浓度贡献最大的小粒径(CH1—CH3,0.006 0~0.056 1 μm)颗粒物对于质量浓度的贡献几乎可以忽略。

站台空气中 $\text{PM}_{2.39}$ 和 $\text{PM}_{9.89}$ 质量浓度随时间的变化如图3所示。由图3可以看出, $\text{PM}_{2.39}$ 和 $\text{PM}_{9.89}$ 质量浓度随时间变化的规律与CH9—CH13(粒径为0.612 0~6.670 0 μm)的颗粒物数量浓度随时间变化的规律(见图1)基本一致,这与CH9—CH13的颗粒物质量浓度远高于其余粒径区间的颗粒物有关。

$\text{PM}_{2.39}$ 和 $\text{PM}_{9.89}$ 数量浓度无显著差异(见图2),但 $\text{PM}_{9.89}$ 质量浓度显著高于 $\text{PM}_{2.39}$ (见图3),即站台空气中2.39 μm 以上的颗粒物数量虽少,但会导致颗粒物质量浓度显著增加。监测期间 $\text{PM}_{2.39}$ 和 $\text{PM}_{9.89}$ 质量浓度分别为 (0.170 ± 0.055) mg/m^3 和 (0.303 ± 0.134) mg/m^3 ,最高值出现在晚高峰时段(18:49:06),分别为0.345 mg/m^3 和0.743 mg/m^3 ;最低值出现在10:59:12,分别为0.083 mg/m^3 和

0.096 mg/m^3 ;10:30—17:00时间段(平峰时段)内 $\text{PM}_{2.39}$ 和 $\text{PM}_{9.89}$ 质量浓度分别在0.139 mg/m^3 和0.220 mg/m^3 附近波动。监测期间和平峰时段 $\text{PM}_{2.39}$ 和 $\text{PM}_{9.89}$ 平均质量浓度都分别高于GB 3095—2012《环境空气质量标准》^[14]规定的 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 日均浓度二级限值(分别为0.075 mg/m^3 和0.15 mg/m^3),可见所监测的地铁站台空气存在较为严重的细颗粒物和可吸入颗粒物污染。

从图3还可以看出,监测期间站台空气中颗粒物($\text{PM}_{2.39}$ 和 $\text{PM}_{9.89}$)质量浓度始终高于室外颗粒物($\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10})质量浓度,尤其早晚高峰时段内差距更为显著,这表明高频次列车和大流量乘客通过导致站台微环境内产生了严重的颗粒物污染。

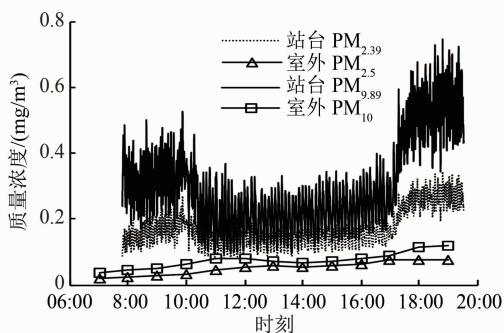


图3 站台空气中 $\text{PM}_{2.39}$ 和 $\text{PM}_{9.89}$ 质量浓度日变化趋势及与室外 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 质量浓度的对比

2.3 典型时刻颗粒物粒径分布

图4给出了代表性时刻08:18:29、16:02:34和17:49:23站台空气中颗粒物数量浓度的粒径分布情况。由图4可以看出,无论颗粒物总数量浓度(主要指 $\text{PM}_{9.89}$ 数量浓度)偏高(发生于08:18:29和17:49:23)还是最低(发生于16:02:34)时,颗粒物的数量都主要来自0.1 μm 以下(CH1—CH4)的颗粒,尤其是CH1(粒径为0.006 0~0.017 0 μm)的颗粒,占全部颗粒数量的56.2%(该值为监测期间的平均值);1.0 μm 以上(CH10—CH13)的颗粒对于颗粒物数量浓度的贡献基本可以忽略。早晚高峰时段CH1的颗粒占比为64.6%、57.0%,高于平峰时段的49.5%,表明乘车高峰时段站台空气中极细的颗粒显著增多。

通过分析相应时刻颗粒物质量浓度粒径分布可以看出,无论颗粒物总质量浓度(主要指 $\text{PM}_{9.89}$ 质量浓度)较高(发生于08:18:29和17:49:23)时还是偏低(发生于16:02:34)时,颗粒物的质量都主要来自0.1 μm 以上(CH5—CH13)的颗粒,尤其是

CH9—CH13(粒径为 0.612 0~6.670 0 μm)的颗粒,占全部颗粒质量的 89.9%(该值为监测期间的平均值);0.1 μm 以下(CH1—CH4)的颗粒对于颗粒物质量浓度的贡献基本可以忽略。早晚高峰时段 CH9—CH13 的颗粒占比为 93.7%、87.1%,高于平峰时段的 84.2%,表明乘车高峰时段站台空气中粒径较大的颗粒也显著增多。在站台安装空气净化设施并在早晚高峰时段内强化站台微环境中颗粒物的净化对于减少乘客颗粒物暴露至关重要。

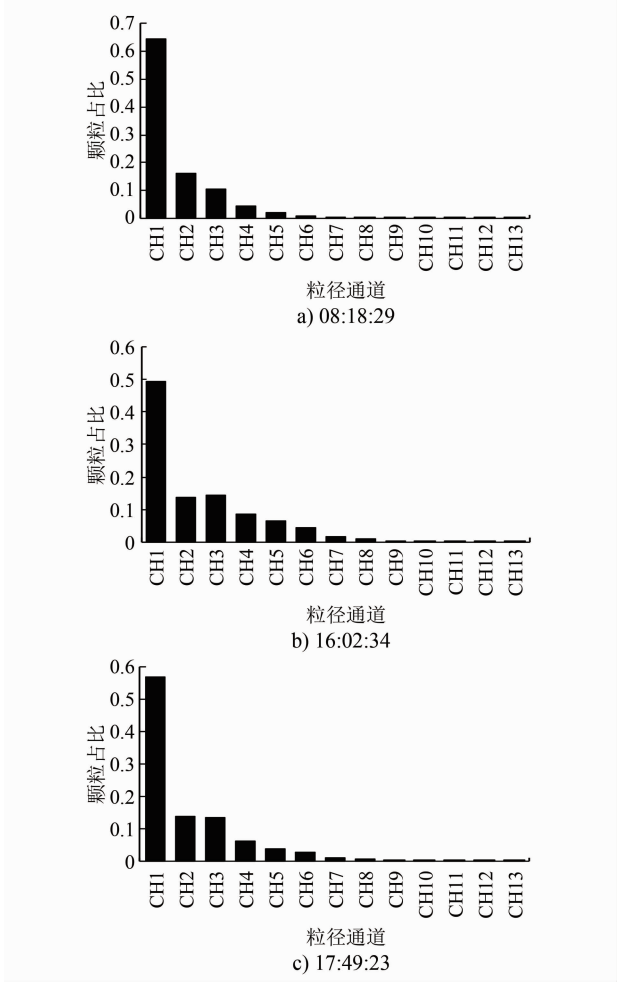


图4 典型时刻站台空气中颗粒物数量浓度粒径分布

2.4 颗粒物元素组成特征

地铁站台和站外总悬浮颗粒物中各元素的含量及站台内外元素含量之比如表 1 所示。由表 1 可以看出,站台空气颗粒物中 Fe 含量最高,达到 45.807 0 μg/m³,远高于其他元素的含量,是站外颗粒 Fe 含量的 16.28 倍。大量研究表明,含 Fe 颗粒物是地铁内最多的颗粒物,如伦敦地铁中富含 Fe/Si 的颗粒占总颗粒数目的 53%^[15],东京地铁颗粒物中含 Fe 颗粒物数目占总悬浮颗粒物的 74%^[16]。含

Fe 颗粒物主要来自地铁站内机械摩擦过程,如铁轨-车轮-刹车系统界面、接触网电缆及接触轨界面之间的摩擦^[4, 11]。另外,站台空气颗粒物中与钢铁组成有关的 Cu、Mn、Cr、Mo 等元素的含量也较高,且都高于站外含量,分别是站外含量的 18.54、6.30、10.80 和 16.93 倍,符合文献[9, 15, 17, 18]中地铁内大气颗粒物中与钢铁组成有关的元素均有较高含量的普遍规律。由于金属颗粒主要来自列车运行过程,加强隧道机械通风及清洁管理有助于改善地铁内部金属颗粒物污染。

站台空气颗粒物中 Ca、Al、Mg、Ti、Zn、As 等元素含量显著低于站外,表明其主要来源于站外,其中 Ca、Al、Mg、Ti 为地壳元素,主要来源于土壤风沙扬尘。Zn 和 As 是燃煤污染的标志元素。

表 1 地铁站台和站外总悬浮颗粒物中各元素的含量及 r 值

元素	元素含量/(μg/m ³)		r
	站台	站外	
Na	0.273 4	0.138 4	1.98
Mg	0.348 0	0.923 4	0.38
Al	0.624 9	3.773 0	0.16
S	3.484 5	1.230 0	2.83
Ca	3.135 2	4.154 8	0.75
Ti	0.053 9	0.1344	0.40
V	0	0.001 4	0
Cr	0.306 6	0.028 4	10.80
Mn	0.401 6	0.063 7	6.30
Fe	45.807 0	2.813 8	16.28
Co	0.003 9	0.001 2	3.25
Ni	0.000 7	0.014 1	0.05
Cu	0.730 7	0.039 4	18.54
Zn	0.164 7	0.219 0	0.75
As	0.003 9	0.006 8	0.57
Sr	0.108 6	0.016 9	6.43
Mo	0.049 1	0.002 9	16.93
Cd	0.000 7	0.001 8	0.39
Sb	0.110 8	0.029 3	3.78
Ce	0.001 1	0.002 2	0.50
Pb	0.144 4	0.070 1	2.06

注: r 代表站台内外元素含量之比

3 结论

1) 在监测粒径范围(0.006 0~9.890 0 μm)内,地铁站台空气中颗粒物数量浓度基本随粒径增大而减小,未检测到粒径大于 6.670 0 μm 的颗粒物,颗粒物总数量浓度与 0.1 μm 以下的颗粒息息相关,尤其是粒径为 0.006 0~0.017 0 μm 的颗粒;颗粒物质量浓度基本随粒径增大而增大,总质量浓度主要

取决于 $0.1\ \mu\text{m}$ 以上的颗粒,尤其是 $0.612\ 0\sim 6.670\ 0\ \mu\text{m}$ 的颗粒。

2) 早晚乘车高峰时段内高频次列车和大流量乘客通过导致小粒径和大粒径的颗粒物同时增多,站台空气中颗粒物的数量和质量浓度都显著增大。晚高峰时段颗粒物质量浓度显著高于早高峰时段,可能与监测当天站外环境空气中颗粒物浓度从早到晚呈逐渐升高之趋势有关。

3) 监测期间 $\text{PM}_{2.39}$ 和 $\text{PM}_{9.89}$ 数量浓度分别为 $(37\ 547\pm 4\ 771)$ 个/ cm^3 和 $(37\ 552\pm 4\ 771)$ 个/ cm^3 , 质量浓度分别为 (0.170 ± 0.055) mg/m^3 和 (0.303 ± 0.134) mg/m^3 。 $\text{PM}_{2.39}$ 和 $\text{PM}_{9.89}$ 平均质量浓度高于我国环境空气质量标准规定的 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 日均质量浓度二级限值,也高于同时段站外 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的质量浓度。

4) 站台空气颗粒物中 Fe 含量最高,Fe、Cu、Mn、Cr、Mo 的含量显著高于站外颗粒物,其与地铁运行过程中车轮与铁轨、制动系统等的机械摩擦产生的金属颗粒物在站内富集有关。

参考文献

- [1] 王崑阳,张晶,欧阳.北京市地铁站内可吸入颗粒物浓度分布特征[J].环境保护与循环经济,2018(6):51.
- [2] 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(1):40.
- [3] 樊越胜,胡泽源,刘亮,等.西安地铁环境中 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 CO_2 污染水平分析[J].环境工程,2014(5):120.
- [4] 张霞,吕斌,张莉萍,等.上海某地铁站 $\text{PM}_{2.5}$ 中金属元素组成和分布特征分析[J].上海预防医学,2017(5):386.
- [5] 吴颖娣,梁珍,沈恒根,等.上海某地铁站台空气颗粒物粒径分布[J].东华大学学报(自然科学版),2018(5):811.
- [6] WANG J, ZHAO L, ZHU D, et al. Characteristics of particulate matter (PM) concentrations influenced by piston wind and train door opening in the Shanghai subway system[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2016, 47: 77.
- [7] KWON S, NAMGUNG H, JEONG W, et al. Transient

variation of aerosol size distribution in an underground subway station[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2016 (6): 362.

- [8] ADAMS H S, NIEUWENHUIJSEN M J, COLVILLE R N, et al. Fine particle ($\text{PM}_{2.5}$) personal exposure levels in transport microenvironments, London, UK[J]. Science of the Total Environment, 2001(1-3): 29.
- [9] AARNIO P, YLI-TUOMI T, KOUSSA A, et al. The concentrations and composition of and exposure to fine particles ($\text{PM}_{2.5}$) in the Helsinki subway system[J]. Atmospheric Environment, 2005(28): 5059.
- [10] 庞雪莹,王立鑫,王丹丹,等.冬夏两季北京地铁车厢内空气质量研究[J].城市轨道交通研究,2018(4):69.
- [11] 包良满,雷前涛,谈明光,等.上海地铁站台大气颗粒物中过渡金属研究[J].环境科学,2014(6):2052.
- [12] 王杰.中国空气质量在线监测分析平台[EB/OL].(2018-12-17)[2018-12-17].<https://www.aqistudy.cn/>.
- [13] QUEROL X, MORENO T, KARANASIOU A, et al. Variability of levels and composition of PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$ in the Barcelona metro system [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2012(11): 5055.
- [14] 环境保护部,国家质量监督检验检疫总局.环境空气质量标准:GB 3095—2012[S].北京:中国环境科学出版社,2012:3.
- [15] SITZMANN B, KENDALL M, WATT J, et al. Characterisation of airborne particles in London by computer-controlled scanning electron microscopy [J]. Science of the Total Environment, 1999(1-3): 63.
- [16] FURUYA K, KUDO Y, OKINAGA K, et al. Seasonal variation and their characterization of suspended particulate matter in the air of subway stations[J]. Journal of Trace and Microprobe Techniques, 2001(4): 469.
- [17] NIEUWENHUIJSEN M J, GÓMEZ-PERALES J E, COLVILLE R N. Levels of particulate air pollution, its elemental composition, determinants and health effects in metro systems[J]. Atmospheric Environment, 2007(37): 7995.
- [18] SALMA I, WEIDINGER T, MAENHAUT W. Time-resolved mass concentration, composition and sources of aerosol particles in a metropolitan underground railway station[J]. Atmospheric Environment, 2007(37): 8391.

(收稿日期:2018-12-21)

《城市轨道交通研究》欢迎投稿

投稿网址:tougao.umat1998.com