

南昌市地铁 PM_{2.5} 时空分布及金属特征研究*

黄 珊¹ 潘志卫¹ 黄继焯¹ 陆小卫¹ 毛意中² 黄 庭¹ 吴代赦^{1#}

(1.南昌大学资源环境与化工学院,鄱阳湖环境与资源利用教育部重点实验室,江西 南昌 330031;

2.洪崖建筑工程检测有限公司,江西 南昌 330096)

摘要 为有效预防 PM_{2.5} 污染,深入了解南昌市地铁 PM_{2.5} 特征,选取不同背景区域的地铁站,探讨地铁 PM_{2.5} 分布规律及其重金属元素污染情况。结果表明:(1)车厢 PM_{2.5} 最高,其次是站外入口、站台,售票口最低。站台和售票口 PM_{2.5} 相关性较高($r=0.668, p=0.001$),可能有相近的来源。相对湿度对车厢内 PM_{2.5} 影响很大,而客流量变化与车厢内 PM_{2.5} 日均值变化趋势相关性不显著。(2)站台和车厢 PM_{2.5} 中 Fe 元素比其他采样区域高 3.6~34.7 倍,站外入口最低。Cr、As、Cd、Hg、Pb 元素最大值均出现在车厢,其次是站外入口,最小值出现在售票口和站台。(3)车厢中各金属元素污染较重,Fe 元素污染指数达 11.17,为强污染,Cr、As、Hg、Pb 元素为中度污染,Cd 元素为轻污染。

关键词 PM_{2.5} 地铁 时空分布 金属

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2020.07.022

Spatial and temporal distribution of PM_{2.5} and characteristics of metals in Nanchang metro HUANG Shan¹, PAN Zhiwei¹, HUANG Jichan¹, LU Xiaowei¹, MAO Yizhong², HUANG Ting¹, WU Daishe¹. (1. Key Laboratory of Poyang Lake Environment and Resource Utilization, Ministry of Education, School of Resources Environmental and Chemical Engineering, Nanchang University, Nanchang Jiangxi 330031; 2. Hongya Construction Engineering Inspection Co., Ltd., Nanchang Jiangxi 330096)

Abstract: To effectively prevent PM_{2.5} pollution and give an insight to the characteristics of PM_{2.5} in Nanchang metro, the spatial and temporal distribution of PM_{2.5} and its heavy metal characteristics in three metro stations with different background regions were studied. The results showed that: (1) the highest concentrations of PM_{2.5} appeared in carriage, followed by in entrance of station, platform and ticket counter. A strong correlativity ($r=0.668, p=0.001$) between ticket counter PM_{2.5} and platform PM_{2.5} indicated similar sources. (2) The Fe content of PM_{2.5} in platform and carriage was 3.6-34.7 times higher than that in other regions, and the lowest was in entrance of station. The maximum values of Cr, As, Pb, Cd and Hg all appeared in the carriage, followed by entrance of station, ticket counter and platform. (3) The metal elements pollution was serious in the carriage, the pollution index of Fe was 11.17, indicating high contamination level. Cr, As, Hg and Pb showed moderate contamination levels and Cd were lightly contaminated.

Keywords: PM_{2.5}; metro; spatial and temporal distribution; heavy metals

近年来,随着城市地铁交通建设的迅速发展,地铁成为人们出行首选的交通工具,地铁室内环境质量引起广泛关注。诸多研究表明,地铁系统由于其相对密闭的环境及存有内在污染源导致地铁内 PM_{2.5} 常高于室外环境^[1-2],季节、气象条件、地理位置、交通密度、地上/地下、站台设计、站台深度、通风系统、刹车系统、乘客量、运行时长、活塞效应等因素均会影响地铁颗粒物浓度^{[3]1509, [4]82-83, [5]297-298, [6-8]}。为对地铁内 PM_{2.5} 污染状况作出准确评估,开展实地监测分析非常必要。

流行病学研究发现,颗粒物暴露会引发呼吸系统不适、肺功能破坏、慢性肺病、心血管疾病及肺癌^[9-10]。国际癌症研究机构已将室外污染空气中的颗粒物列为一类致癌物^[11]。大量毒理性研究表明,颗粒物对人体的潜在伤害与其粒径^[12]、浓度^[13-14]和主要化学组成^[15]有关,细颗粒物和超细颗粒物的化学成分与其毒性关联更强^[16]。此外,Fe 等过渡金属的含量会影响颗粒物的遗传毒性,过量的 Fe 主要通过增加体内活性氧,引起或加速炎症反应^[17]。BA-CHOUAL 等^[18]发现,巴黎地铁颗粒物引起的炎症

第一作者:黄 珊,女,1986 年生,博士,讲师,研究方向为大气污染控制。* 通讯作者。

* 国家自然科学基金资助项目(No.41402312);江西省青年科学基金资助项目(No.20181BAB213017);江西省博士后基金资助项目(No.2016KY13);江西省教育厅科学技术研究项目(No.60011)。

和氧化效应是一般大气颗粒物的 4 倍。KARLSSON 等^[19]研究表明,斯德哥尔摩地铁颗粒物毒性比其附近的城市街道颗粒物毒性约高 8 倍,长期吸入此类颗粒物,将破坏人体 DNA 和免疫系统。为有效预防地铁 $PM_{2.5}$ 危害,需全面了解其污染特征及来源。

南昌市地铁 1 号线是江西省南昌市首条开通运营的地铁线路,2015 年 12 月 26 日正式载客运营,迄今为止仅有江西省疾控中心利用激光粉尘仪抽查南昌市 12 个地铁站 PM_{10} 含量的报道^[20]。为有效预防 $PM_{2.5}$ 污染、深入了解南昌市地铁 $PM_{2.5}$ 特征,本研究选取不同背景区域的地铁站作为研究对象,探讨地铁 $PM_{2.5}$ 空间分布规律、 $PM_{2.5}$ 中 5 种毒性重金属(Cr、As、Cd、Hg、Pb)和 Fe 元素污染情况及可能的污染源,为进一步有效控制 $PM_{2.5}$ 、改善地铁环境空气质量提供依据。

1 研究方法

1.1 研究区域及时间

为便于考察环境背景对地铁 $PM_{2.5}$ 的影响,选取 3 个研究区域,分别是以旅游为主要产业、位于环湖郊区的瑶湖西站,以商贸交易为主要产业、位于中心商业区的八一馆站和以工业制造业为主要产业、位于工业区的双港站。于 2017 年 7 月 31 日至 8 月 6 日、8 月 7—13 日、8 月 14—20 日分别对八一馆站、双港站和瑶湖西站空气中的 $PM_{2.5}$ 进行连续采样监测,监测时间为每天 8:00—19:00。

3 个地铁站均为地下站,监测位置为每个地铁站的站外人口、售票口和站台,避开人流通道和通风口,距离墙壁 1 m。同时,在车厢中设置监测点,采集行驶中车厢里的 $PM_{2.5}$ 。每个地铁站均装有屏蔽门系统,空调系统设置粗效过滤器。

1.2 样品采集及分析方法

采用崂应 2030 型中流量智能采样器在售票口和站台采集 $PM_{2.5}$ 样品(流量 100 L/min),采用 TAS-5.0 型 MiniVol 采样器在站外人口和车厢内采集 $PM_{2.5}$ 样品(流量 8 L/min)。

采样前后石英滤膜均先经 500 °C 灼烧 4 h,恒温恒湿 24 h(20~25 °C,湿度 40%~50%)后称重,根据采样前后滤膜的质量差和采样体积确定 $PM_{2.5}$ 质量浓度。

$PM_{2.5}$ 中 Cr、As、Cd、Hg、Pb 和 Fe 元素利用电感耦合等离子体质谱仪(PE NEXION 350D)测定。

1.3 数据分析方法

使用 SPSS 软件对数据进行 Person 相关性分析和 R-cluster 聚类分析。

污染指数法能指示颗粒物中金属污染的程度,定义为地铁颗粒物中某一特定金属元素平均值与相应金属元素背景值的比值,其值可定性判断各元素的污染水平。本研究取各站站外人口 $PM_{2.5}$ 中金属元素为其背景值,参考文献[21]中污染指数分级: <1 ,轻污染; $1\sim<3$,中度污染; $3\sim<6$,显著污染; ≥ 6 ,强污染。

2 结果与讨论

2.1 夏季 $PM_{2.5}$ 污染情况

《室内空气质量标准》(GB/T 18883—2002)未规定 $PM_{2.5}$,因此参考《环境空气质量标准》(GB 3095—2012)(一、二级标准限值分别为 35、75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)进行分析。如图 1 所示,车厢及站外人口 $PM_{2.5}$ 平均值相对较高,其次是站台和售票口,其中售票口 $PM_{2.5}$ 平均值低于 GB 3095—2012 二级标准限值。

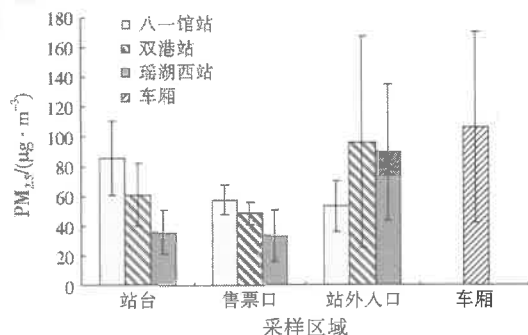


图 1 各站点 $PM_{2.5}$ 质量浓度

Fig.1 $PM_{2.5}$ mass concentration of each station

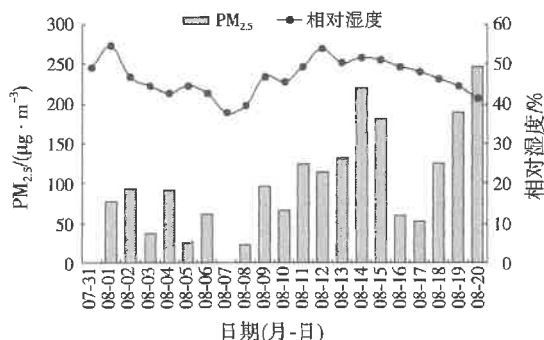
八一馆站站台 $PM_{2.5}$ 最高,其次是双港站和瑶湖西站,主要受两个因素的影响:(1)站台结构。瑶湖西站和双港站站台皆为岛式站台结构,而八一馆站站台为侧式结构,两边站台被中岛隔离开来,空间相对狭窄, $PM_{2.5}$ 受扰动明显,这与 WANG 等^{[4]83} 研究结果相一致。(2)客流量。采样期间,位于中心商业区的八一馆站客流量最高,平均日客流量为 34 068 人次,其次是双港和瑶湖西站,分别为 10 056、6 995 人次。Pearson 相关性分析发现,八一馆、双港和瑶湖西站站台 $PM_{2.5}$ 与日均客流量均显著正相关(r 分别为 0.956、0.952、0.978, p 分别为 0、0.001、0),MA 等^[22] 的研究也有相似的结论。

各站点站外人口 $PM_{2.5}$ 变化较大,双港站和瑶湖西站较高,分别为 (96.15 ± 70.98) 、 (89.74 ± 46.15)

$\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。双港站站外位于马路交汇口,来往车辆较多,受过往车辆尾气及扬尘影响,PM_{2.5}波动较大。瑶湖西站虽位于人流稀少的环湖郊区,但由于采样期间出站口有间断性施工活动,土方开挖产生的扬尘及过往车辆产生的尾气导致 PM_{2.5} 较高、波动较大。八一馆站站外人口 PM_{2.5} 为 $(53.17 \pm 16.91) \mu\text{g}/\text{m}^3$,较其他两站点稍低,主要是因为八一馆站站外人口靠近商场入口,有较好的冷风换气系统,较有效控制了 PM_{2.5} 浓度的波动。

采样期间,八一馆、双港和瑶湖西站售票口 PM_{2.5} 平均值分别为 57.87、48.79、33.19 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,总体比站台稍低。通过聚类分析,站台和售票口的 PM_{2.5} 相关性较高($r=0.668, p=0.001$),有相近的来源,因被室外影响程度低,推测室内源为两者的主要来源,这与 KAM 等^{[3]1512}和樊越胜等^[24]的研究结果类似,认为地铁系统内颗粒物主要产生于室内,室外 PM_{2.5} 对站台和售票口 PM_{2.5} 影响较小。首尔 6 个地铁站的研究表明,站外环境会影响站内空气质量^{[5]300-301}。然而,本研究中仅有双港站站台 PM_{2.5} 受站外环境影响显著($r=0.496, p=0.047$),这是由于在采样过程中仅有双港站是采集了多个站外入口的数据,更能代表地铁站周边室外大气的真实水平,因此建议后续加强对站外入口的多点采样。

如图 2 所示,车厢 PM_{2.5} 为 $(106.3 \pm 64.4) \mu\text{g}/\text{m}^3$,显示出工作日中周一和周五较高、周四较低的趋势,最高为 246.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,最低为 23.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。2017 年,南昌市地铁 1 号线全天行车间隔均为 6.5 min,包括早晚高峰(6:30—9:00、16:30—19:00)及双休日高峰(11:30—20:00),因此列车运营不对车厢内 PM_{2.5} 波动造成影响。



注:07-31、08-07、08-14 为周一,08-03、08-10、08-17 为周四,08-04、08-11 和 08-18 为周五;07-31、08-07 由于仪器故障,车厢 PM_{2.5} 未检测。

图 2 地铁车厢 PM_{2.5} 质量浓度和相对湿度

Fig.2 PM_{2.5} mass concentration and relative humidity in carriage

PM_{2.5} 与室内相对湿度的变化趋势大体一致。

这与宋秀瑜等^[24]研究观点一致,在一定湿度范围(以不发生重力沉降为界限)内,相对湿度越大越有利于颗粒物的形成,南京地区大气环境中 PM_{2.5} 不发生重力沉降的界限为 50%~59%。相对湿度对车厢内 PM_{2.5} 影响很大,分析原因:(1)车厢封闭的环境形成了较差的空气扩散条件;(2)地铁室内有大量的 SO₂ 和 NO₂,它们是形成二次气溶胶的前体物,而二次气溶胶的生成是引起 PM_{2.5} 升高的主要原因^[25]。这与有些研究结果不同,如 ZHANG 等^[26]对天津某典型住宅建筑的研究表明,湿化可通过增大 PM_{2.5} 粒径来加快其沉积速率,从而降低室内 PM_{2.5} 浓度,而这个结论是在 PM_{2.5} 质量浓度较高(0.91~1.73 mg/m³)的情况下成立。

客流通常被认为是引起 PM_{2.5} 二次扰动的重要原因。然而,本研究中客流量变化与车厢内 PM_{2.5} 日均值变化趋势相关性不显著,这与卓思华等^[27]的研究结果有出入。对比发现,北京地铁最高日客流量为南昌市地铁最高日客流量的 18 倍,可认为客流量对车厢内 PM_{2.5} 的影响具有分段性,客流量大到一定程度时,其影响才开始有较显著的线性特征。结合相关研究^[28],推断南昌市地铁车厢内 PM_{2.5} 污染水平主要受列车轨道、车轮及刹车片、站台结构、气象条件(湿度)、客流量和室内通风等因素的综合影响。

总体来说,研究期间车厢 PM_{2.5} 最高,其次是站外入口、站台,售票口最低。站台和售票口 PM_{2.5} 相关性较高($r=0.668, p=0.001$),可能有相近的来源。相对湿度对车厢内 PM_{2.5} 影响很大,而客流量变化与车厢内 PM_{2.5} 日均值变化趋势相关性不显著。整体来说,瑶湖西站内 PM_{2.5} 质量状况相对较优,其次是双港站和八一馆站。

2.2 地铁 PM_{2.5} 金属元素空间分布特征

如表 1 所示,Fe 元素站内平均值为 $(6.557 \pm 4.677) \mu\text{g}/\text{m}^3$,是地铁 PM_{2.5} 中质量浓度最大的元素,其次是 As、Pb、Cr、Hg 和 Cd。站台和车厢 PM_{2.5} 中 Fe 元素比其他采样区域高 3.6~34.7 倍,站外入口最低,这与其他文献表述 Fe 主要来自于地铁轨道车轮摩擦等观点相一致^{[29]、[30]182}。毒理性重金属元素最大值均出现在车厢,其次是站外入口,最小值出现在售票口和站台,Cr、As 最大值与最小值的倍差达 5~11 倍,Pb 为 3~8 倍,Cd 为 2~5 倍,Hg 为 2~13 倍。地铁的半封闭地下环境使 PM_{2.5} 受外部环境条件影响较小,从而更易造成重金属污染物

表 1 各站点 PM_{2.5} 中金属元素空间分布
Table 1 The spatial distribution of metals in PM_{2.5} of each station

		$\mu\text{g}/\text{m}^3$					
项目		Cr	As	Cd	Hg	Pb	Fe
双港站	售票口	0.029 0±0.005 8	0.272 3±0.056 4	0.000 7±0.000 3	0.006 4±0.002 5	0.056 1±0.016 5	2.492 1±0.122 4
	站台	0.030 9±0.003 8	0.215 5±0.009 7	0.000 7±0.000 2	0.006 8±0.002 1	0.047 1±0.005 0	8.795 8±0.570 6
八一馆站	售票口	0.023 0±0.000 8	0.187 8±0.012 8	0.000 7±0	0.002 3±0.001 5	0.037 7±0.008 0	4.255 7±0.680 4
	站台	0.036 5±0.002 9	0.218 4±0.024 6	0.001 0±0.000 6	0.006 2±0.002 3	0.046 0±0.016 9	14.071 0±0.965 4
瑶湖西站	售票口	0.021 3±0.007 9	0.220 9±0.005 5	0.000 7±0.000 3	0.005 6±0.000 5	0.052 4±0.008 3	0.405 0±0.070 9
	站台	0.017 0±0.000 2	0.187 1±0.003 6	0.000 8±0.000 2	0.004 7±0.002 1	0.046 8±0.005 5	2.337 6±0.187 1
车厢		0.145 6±0.046 0	1.369 9±0.477 8	0.001 7±0.000 7	0.043 4±0.033 8	0.218 2±0.041 5	8.885 8±4.570 2
站内平均		0.066 0±0.062 7	0.601 3±0.606 3	0.001 1±0.000 6	0.048 4±0.114 8	0.104 5±0.085 5	6.557 2±4.677 6
站外入口		0.090 7±0.038 2	1.129 6±0.433 0	0.002 0±0.001 2	0.035 0±0.023 8	0.182 8±0.050 0	0.795 5±0.561 6

的累积;另一方面,隧道中车轮与铁轨的摩擦及刹车片磨损形成的超细颗粒物和地铁隧道的钢筋混凝土结构,也可能是造成车厢重金属污染物浓度偏高的主要原因。

如表 2 所示,金属污染程度上,八一馆站最大,金属元素平均值总和为 $7.146\ 3\ \mu\text{g}/\text{m}^3$,其中 Fe 元素平均值为 $6.545\ 6\ \mu\text{g}/\text{m}^3$;其次是双港和瑶湖西站,金属元素平均值总和分别为 $4.960\ 4$ 、 $1.909\ 7\ \mu\text{g}/\text{m}^3$,其中 Fe 元素平均值分别为 $4.065\ 3$ 、 $1.371\ 3\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。八一馆站 Fe 元素浓度最大导致其总污染程度最高,与其站台的岛式结构有关,污染物不易扩散,积累浓度较大。毒理性重金属污染程度从高到低依次为双港、八一馆、瑶湖西站,双港站 PM_{2.5} 中 As 最大(平均值为 $0.714\ 6\ \mu\text{g}/\text{m}^3$),为八一馆、瑶湖西站的 1.59、1.79 倍,推测工业区周边环境是双港站污染严重的重要原因。

表 2 各站点站内 PM_{2.5} 中金属元素平均值

Table 2 Mean concentrations of metals in indoor PM_{2.5} of each station $\mu\text{g}/\text{m}^3$

项目	八一馆站	双港站	瑶湖西站
Cr	0.054 6	0.053 6	0.035 1
As	0.450 2	0.714 6	0.398 7
Cd	0.001 6	0.001 0	0.001 1
Hg	0.010 2	0.017 9	0.017 4
Pb	0.084 2	0.108 0	0.086 0
Fe	6.545 6	4.065 3	1.371 3
金属元素平均值总和	7.146 3	4.960 4	1.909 7
毒理性重金属平均值总和	0.600 8	0.895 1	0.538 4

2.3 地铁 PM_{2.5} 金属元素污染指数

如图 3 所示,Fe 元素污染严重:双港站、八一馆站台和车厢均为强污染,污染指数分别为 11.06、17.69 和 11.17;双港站、八一馆售票口均为显著污染,污染指数分别为 3.13 和 5.35;瑶湖西站站台为中度污染,瑶湖西站售票口为轻污染。Fe 元素污染严重主要受人为影响,主要来源于机械磨损,包括车

轮、制动器、轨道及电缆的磨损^[31],还有一部分是外界空气中的 Fe 元素通过扩散或通风系统^{[30]:178} 进入地铁环境。整体上,车厢污染最严重,其次是双港站、八一馆站,瑶湖西站污染最轻。车厢中各金属元素污染较重,Fe 元素污染指数达 11.17,为强污染;Cr、As、Hg、Pb 元素为中度污染,污染指数分别为 1.60、1.21、1.24、1.19;Cd 元素污染指数小于 1,为轻污染。建议加强对南昌市地铁 PM_{2.5} 中 Fe 元素的控制及车厢空气质量的改善,同时加强对地铁站周边环境的管理。

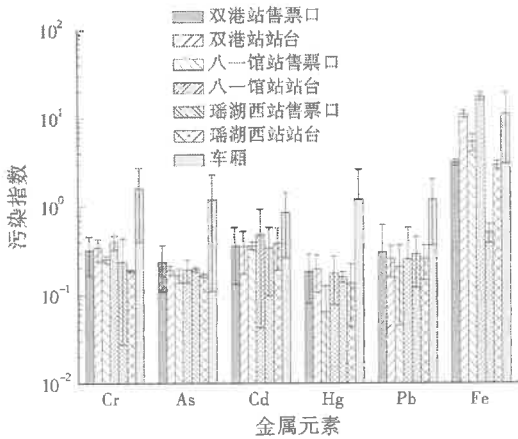


图 3 各站点 PM_{2.5} 中金属元素的污染指数

Fig.3 Pollution index of metals in PM_{2.5} of each station

3 结 论

(1) 车厢 PM_{2.5} 最高,其次是站外入口、站台,售票口最低。站台和售票口 PM_{2.5} 相关性较高($r=0.668$, $p=0.001$),可能有相近的来源。相对湿度对车厢内 PM_{2.5} 影响很大,而客流量变化与车厢内 PM_{2.5} 日均值变化趋势相关性不显著。整体来说,瑶湖西站站内 PM_{2.5} 质量状况相对较优,其次是双港站和八一馆站。

(2) 站台和车厢 PM_{2.5} 中 Fe 元素比其他采样区

域高 3.6~34.7 倍,站外入口最低,Fe 主要来自于地铁轨道车轮摩擦等。毒理性重金属元素最大值均出现在车厢,其次是站外入口,最小值出现在售票口和站台。双港站 PM_{2.5} 中 As 含量最高,主要受所处工业区的影响。

(3) Fe 元素污染严重;双港站、八一馆站台和车厢均为强污染,双港站、八一馆售票口均为显著污染,瑶湖西站站台为中度污染,瑶湖西站售票口为轻污染。车厢中各金属元素污染较重,Fe 元素污染指数达 11.17,为强污染,Cr、As、Hg、Pb 元素为中度污染,Cd 元素为轻污染。整体上,车厢污染最严重,其次为双港站、八一馆站,瑶湖西站污染最轻。

参考文献:

- [1] GUO L, HU Y, HU Q, et al. Characteristics and chemical compositions of particulate matter collected at the selected metro stations of Shanghai, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 496: 443-452.
- [2] GUO E, SHEN H, HE L, et al. Investigation of air pollution of Shanghai subway stations in ventilation seasons in terms of PM_{2.5} and PM₁₀[J]. *Toxicology and Industrial Health*, 2017, 33(7): 588-600.
- [3] KAM W, CHEUNG K, DAHER N, et al. Particulate matter (PM) concentrations in underground and ground-level rail systems of the Los Angeles Metro[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(8).
- [4] 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.
- [5] KWON S B, JEONG W, PARK D, et al. A multivariate study for characterizing particulate matter (PM₁₀, PM_{2.5}, and PM₁) in Seoul metropolitan subway stations, Korea[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, 297.
- [6] SALMA I. Air pollution in underground railway systems[J]. *Issues in Environmental Science and Technology*, 2009, 28: 65-82.
- [7] FIGUEROA LARA J J, MURCIA J M, GARCÍA MARTÍNEZ R, et al. Effect of platform subway depth on the presence of airborne PM_{2.5}, metals, and toxic organic species[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 377: 427-436.
- [8] PAN S, DU S, WANG X, et al. Analysis and interpretation of the particulate matter (PM₁₀ and PM_{2.5}) concentrations at the subway stations in Beijing, China[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2019, 45: 366-377.
- [9] 臧希文, 齐向前. PM_{2.5} 对心血管系统的影响[J]. *中国循环杂志*, 2018, 33(3): 305-307.
- [10] HAYES R B, LIM C, ZHANG Y, et al. PM_{2.5} air pollution and cause-specific cardiovascular disease mortality[J]. *International Journal of Epidemiology*, 2019, 49(1): 1-11.
- [11] LOOMIS D, HUANG W, CHEN G. The International Agency for Research on Cancer (IARC) evaluation of the carcinogenicity of outdoor air pollution: focus on China[J]. *Chinese Journal of Cancer*, 2014, 33(4): 189-196.
- [12] ZANOBETTI A, SCHWARTZ J. The effect of fine and coarse particulate air pollution on mortality: a national analysis[J]. *Environmental Health Perspectives*, 2009, 117(6): 898-903.
- [13] CAO Q, RUI G, LIANG Y. Study on PM_{2.5} pollution and the mortality due to lung cancer in China based on geographic weighted regression model[J]. *BMC Public Health*, 2018, 18(1): 925.
- [14] AI S, QIAN Z M, GUO Y, et al. Long-term exposure to ambient fine particles associated with asthma: a cross-sectional study among older adults in six low-and middle-income countries[J]. *Environmental Research*, 2019, 168: 141-145.
- [15] GILLI G, TRAVERSI D, ROVERE R, et al. Chemical characteristics and mutagenic activity of PM₁₀ in Torino, a Northern Italian City[J]. *Science of the Total Environment*, 2007, 385(1/2/3): 97-107.
- [16] VALAVANIDIS A, FIOTAKIS K, VLACHOGIANNI T. Airborne particulate matter and human health: toxicological assessment and importance of size and composition of particles for oxidative damage and carcinogenic mechanisms[J]. *Journal of Environmental Science and Health Part C: Environmental Carcinogenesis & Ecotoxicology Reviews*, 2008, 26(4): 339-362.
- [17] MØLLER P, FOLKMANN J K, FORCHHAMMER L, et al. Air pollution, oxidative damage to DNA, and carcinogenesis[J]. *Cancer Letters*, 2008, 266(1): 84-97.
- [18] BACHOUAL R, BOCZKOWSKI J, GOVEN D, et al. Biological effects of particles from the Paris subway system[J]. *Chemical Research in Toxicology*, 2007, 20(10): 1426-1433.
- [19] KARLSSON H L, NILSSON L, MÖLLER L. Subway particles are more genotoxic than street particles and induce oxidative stress in cultured human lung cells[J]. *Chemical Research in Toxicology*, 2005, 18(1): 19-23.
- [20] 章英, 赖肖, 谢许情, 等. 南昌市地铁一号线运营前地下车站空气质量调查[J]. *环境卫生学杂志*, 2018, 8(5): 419-422.
- [21] MOHSEN M, AHMED M B, ZHOU J L. Particulate matter concentrations and heavy metal contamination levels in the railway transport system of Sydney, Australia[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2018, 62: 112-124.
- [22] MA H, SHEN H G, LIANG Z, et al. Passengers' exposure to PM_{2.5}, PM₁₀, and CO₂ in typical underground subway platforms in Shanghai[C]//LI A G, ZHU Y X, LI Y G. *Proceedings of the 8th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning*. Heidelberg: Springer, 2014.

(下转第 936 页)

