

公交站交通颗粒物污染的时空分布^{*}

马 范 罗斌儒 杨文彬 陈舒婷 胡喜生 徐锦强 王占永[#]

(福建农林大学交通与土木工程学院,福建 福州 350108)

摘要 为识别公交站空气污染分布差异,以横跨市区和郊县的福州市某繁忙道路为例,实地测量解析沿路公交站之间及站内不同位置上亚微米颗粒物($PM_{1.0}$)和黑碳(BC)浓度的分布与变化特征。结果表明:风速小等不利气象条件使秋季公交站颗粒物平均浓度高于春季,公交站颗粒物浓度呈现早晚高峰大于中午的时间特征,郊区公交站颗粒物浓度对车流量变化敏感而市区公交站对瞬时高排车辆及交通拥堵敏感。公交站四周不够通透、路段车流量大或拥堵、位于道路下风向等是增加站内颗粒物暴露风险的主要原因。无论市区或郊区,公交站局部位置的颗粒物浓度基本服从远离道路而衰减的规律,但BC分布的站点间差异较 $PM_{1.0}$ 更明显。公交站牌对站前颗粒物的拦截率最高近30%,针对空间有限且交通量大的峡谷道路公交站,合理优化其站牌结构和布局将有利于减少站内候车人群的污染暴露风险。

关键词 大气颗粒物 实地监测 时空变化 公交站

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2023.03.011

Spatiotemporal distribution of traffic particulate matter at bus stations MA Fan, LUO Binru, YANG Wenbin, CHEN Shuting, HU Xisheng, XU Jinqiang, WANG Zhanyong. (College of Transportation and Civil Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou Fujian 350108)

Abstract: In order to identify the differences of air pollution distributions at bus stations, the submicron particulate matter ($PM_{1.0}$) and black carbon (BC) concentrations were collected in a busy road across urban and suburban areas in Fuzhou, and then their spatiotemporal distributions and variations were statistically analyzed. The results showed that due to the adverse weather such as low wind speed, the average concentration of particulate matter in autumn was higher than that in spring. Particulate matter concentrations in the bus station were generally greater in morning and evening traffic peaks than at noon. Particulate matter concentrations in suburban bus stations were sensitive to the change of the traffic volume, while the urban bus stations were sensitive to instantaneously high-emitted vehicles and traffic congestion. The lack of roadside transparency, heavy and congested traffic on the road, and located in the downwind of the road were main reasons of increasing the risk of particulate matter exposure in the station. Regardless of urban or suburban stations, the particle concentration in local locations of each bus station basically tended to decay away from the road, but the BC distribution showed more obvious difference among stations than $PM_{1.0}$. The interception rate of station signs to the road particles could be close to 30%. For bus stations in the road canyon especially with limited space at roadside and heavy traffic on the road, rational optimization of the structure and layout of the station signs will help reduce personal pollution exposure risk when waiting in the bus station.

Keywords: atmospheric particulate matter; field monitoring; spatiotemporal variation; bus station

道路环境往往呈现高于其他环境的空气污染水平,这对于频繁穿梭其中的人们无疑产生更大的健康危害^[1-2]。有关道路环境空气污染的研究主要集中在交叉路口、路段、高架路、快速路等典型场景;有研究讨论不同类型或等级道路之间的空气污染差异;也有研究剖析某一类型道路内部空气污染的时空变化特征^[3-11]。而对于临路而建的公交站而言,来往车流量大和交通拥堵常导致污染排放的增多,

四周环境不通透又易于使污染物积聚^{[12]260},站内候车人群将面临高污染暴露风险。因此,理清公交站空气污染的分布与变化特征,对于改善候车环境极为重要^[13]。

然而,有关公交站空气污染的研究较早出现在国外发达国家和城市,国内则起步较晚。现有研究主要集中在对不同车站的污染差异及其影响因素的探讨,以及近年来对候车人群污染暴露剂量的评

第一作者:马 范,男,1995年生,硕士研究生,主要从事交通设施空气污染暴露研究。[#] 通讯作者。

^{*} 福建省自然科学基金资助项目(No.2021J01105);国家自然科学基金资助项目(No.41701552)。

估^[14]。仅有少数研究关注公交站局部特征对站内空气质量的影响。例如,王省身^[15]研究认为,完全封闭或半封闭的站台构造差异显著影响站内候车人群的污染暴露水平;HESS等^[16]利用多变量回归模型讨论大气颗粒物暴露与在站候车时间、位置、站台设施设置以及环境因素之间的关系;也有学者实测调查发现站台类型、长度和位置等对公交站颗粒物排放污染有显著影响^[17-20]。总体来说,目前很少有研究讨论公交站局部不同候车位置的空气污染差异,针对与公交车排放密切相关的大气颗粒物的认识尚且不足,更不清楚市区和郊区不同类型公交站的上述污染特征的变化情况。

本研究以横跨市区和郊区的福州某繁忙干道为实验靶区,针对沿路不同类型的公交站,收集站内不同位置上亚微米颗粒物($PM_{1.0}$)和黑碳(BC)的浓度样本,统计解析其时间和空间变化特征,为公交站候车环境的优化改善以及候车人群的安全防护提供科学依据。

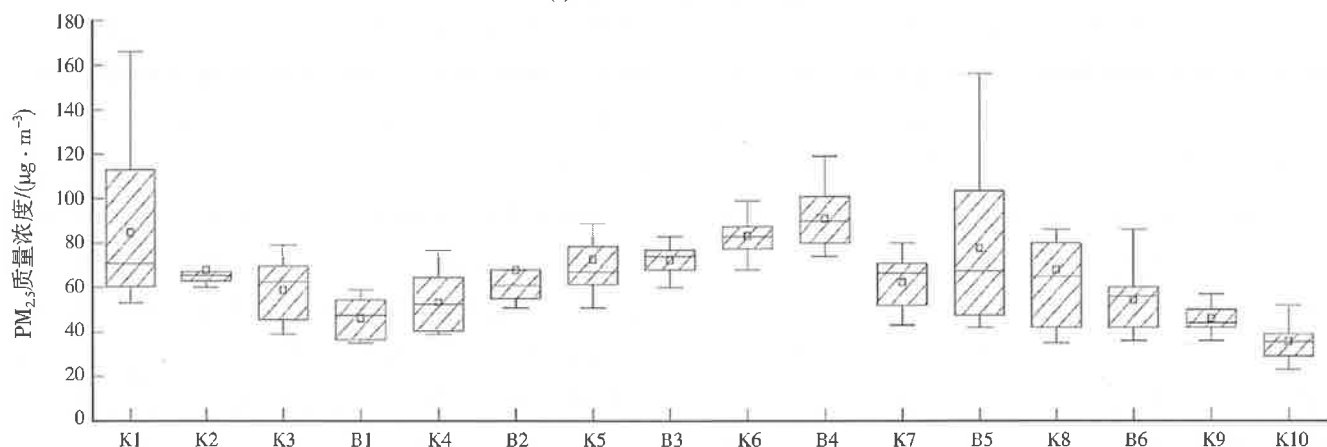
1 数据与方法

1.1 实验区域与实验方案

本研究以横贯郊县和市区的福州市旗山大道和金山大道为实验道路(见图1(a)),承担着来往于郊县和市区的繁重交通量,金山大道车流量超过3 000辆/h,为旗山大道的1.5~2.0倍,旗山大道的柴油车比例高于或接近于金山大道,路侧空气污染问题也异常突出。实验道路周边无工业源,沿路多为商业、学校和居住用地,周边居民常就近公交出行。根据预实验调查发现,沿路公交站的构造主要为半暴露式和全暴露式两种类型,不同站点所处路边环境、交通状况等多有变化而使其候车环境存在差异。如图1(b)所示,事先对沿路16对公交站(每对公交站为分布于同一条道路两侧的同名反向站点)逐对进行站内细颗粒物($PM_{2.5}$)浓度调查发现,分布于市区(或郊县)的部分站点具有相似的站点结构以及相近的颗粒物污染水平。这16对公交站分别为:大学城



(a) 实验道路及沿线公交站



(b) 预实验 $PM_{2.5}$ 质量浓度

图1 实验道路沿线公交站及预实验 $PM_{2.5}$ 质量浓度分布

Fig.1 Bus stations along the experimental road with the distribution of pre-experimental $PM_{2.5}$ mass concentrations

表 1 实验公交站概况
 Table 1 Overview of experimental bus stations

站点	行政区划	公交线路数量	道路车流量 ¹⁾ /(千辆·h ⁻¹)		环境状况
			高峰	平峰	
B1	闽侯县	2	0.65	0.73	周边是公园和大学,人群流量适中,车流量小
B2	闽侯县	7	1.92	1.70	站点靠近加油站、地铁站和购物中心,临近道路交叉口,人流量和车流量较大
B3	闽侯县	6	2.27	1.79	附近是中学和大学,人群流量较大,车流量大
B4	闽侯县	3	3.46	2.29	周边为小区和商铺,人群流量小,车流量适中
B5	仓山区	8	3.16	2.65	站点位于商业活动中心,临近道路交叉口,人群流量大,车流量大
B6	仓山区	7	2.77	2.63	周边都为小区,人群流量大,车流量大

注: ¹⁾道路车流量取春秋两个季节的平均值,其中秋季车流量是春季的 1.5 倍左右,高峰时段道路车流量取早晚时段平均值。

农林大学(K1)、上街岐安(K2)、福大新区北门(B1)、金屿地铁口(K3)、博仕后购物广场(B2)、旗山高校公寓(K4)、福大新区东门(K5)、上街浦口(B3)、大学城一中校区(K6)、建平村(B4)、橘园洲(K7)、融信第一城(B5)、交通枢纽中心(K8)、江南名城(B6)、金山明星(K9)、北京金山(K10)。为了减少测量的冗余性,正式实验选定公交站为: B1、B2、B3、B4、B5、B6 等 6 对路侧站点。其中 B1~B4 分布于郊区, B5 和 B6 分布于市区。除 B1 站点所在道路为次干路外,其他站点均位于一级主干路。所选公交站既覆盖了两两种站点类型,又兼顾了市区和郊区的区位差异。

外场观测实验包括 2021 年春季 2 d(4 月 21、22 日)和秋季 5 d(10 月 29 日至 11 月 12 日),共计 7 d。春季每日观测实验包括中午平峰期(11:30—14:30)和晚高峰(17:30—20:00)两个时段,秋季实验则增加了早高峰(6:30—9:00)采样时段。各站点的相关信息如表 1 所示。

沿图 1 所示实验路线,依次进行站点测量。春季采样站点为 B1、B3、B4、B5 和 B6,为了与同一条道路上的全暴露式 B3 站点进行结构差异性比较,秋季采样则在春季的基础上增加了半暴露式 B2 站点。每个实验位置覆盖道路两侧同站名公交站进行同步测量,主要利用便携式仪器设备收集 PM_{1.0}、BC 浓度、路段车流量、气象参数等样本数据。针对干道两侧的每对站点,实验员背带可收集 PM_{1.0} 和 BC 浓度设备的移动背包,在站牌前中心位置、站牌后中心位置和人行道各测量 5 min,采样高度始终保持在成人呼吸道高度(约 1.5 m)(见图 2)。

实验采用 TSI SidePak AM520 个体暴露粉尘仪和 MicroAeth Model AE51 微型 BC 仪测量公交站 PM_{1.0}、BC 的质量浓度,PM_{1.0} 和 BC 的采样间隔均为 1 s。同时,利用 Kestrel 5500 气象记录仪收集站内温度、相对湿度等基本气象参数。春季实验期

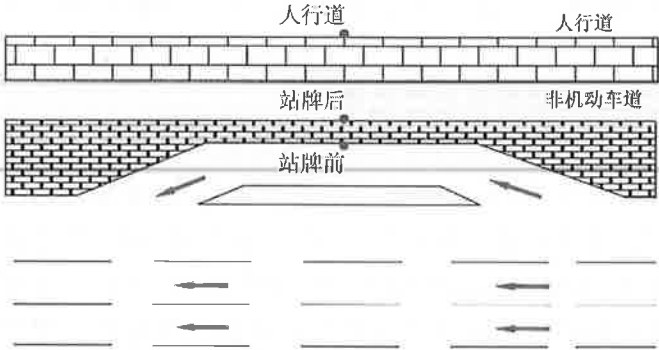


图 2 公交站局部采样位置示意图
 Fig.2 Schematic diagram of local sampling locations in the bus station

间的气象监测数据来自福州长乐机场气象站,秋季实验则来自研究团队在福州大学科技园自建的气象监测站。其中福州长乐机场气象站距实验区域约 40 km;福州大学科技园自建气象站与 4 个郊区站点的距离均小于 1.5 km,与两个市区站点的距离为 5 km 左右。经研究比对,两个气象站数据具有较高的相关性。气象监测数据如表 2 所示。

1.2 数据分析方法

所用个体暴露粉尘仪会受空气湿度的影响而扭曲测量结果,为此采用 LAULAINEN^[21] 提出的相对湿度校准公式进行测量修正。微型 BC 仪能快速采集 BC 浓度且具有高时间分辨率,但也因设备振动或滤膜负荷等原因,在测量中常出现噪音和负值样本。对此,研究采取设备生产商官网发布的一种自适应时间平均处理方法,对原始样本进行平滑降噪处理^[22]。

基于数据预处理结果,利用能够覆盖多种统计指标参数的箱线图,对公交站之间和站内颗粒物的分布与变化进行比较分析,直观揭示颗粒物浓度的分布规律。此外,采用两独立样本秩和检验方法(曼-惠特尼 U 检验),通过对两组样本的对比分析来推断样本来自的两个总体分布是否存在显著性差异。如果两组的秩和差距比较大,即对应较小的 P 检验值,则认为这两组样本间有显著差异。当 P 小

表 2 实验期间气象监测数据
Table 2 Meteorological monitoring data during the experiment

日期(年-月-日)	时段	温度/℃	相对湿度/%	风向	风速/(m·s ⁻¹)
2021-04-21	12:00—14:30	24.4	62	东北风	9.8
	17:30—20:00	20.6	77	东北偏北风	6.0
2021-04-22	12:00—14:30	26.1	62	东北偏东风	4.9
	17:30—20:00	21.5	85	东北偏北风	3.9
2021-10-29	7:00—9:30	21.8	71	东风	0.3
	11:30—14:30	23.7	65	东南风	2.1
	17:30—20:00	21.0	71	东北偏东风	0.4
2021-10-30	6:30—9:30	19.9	80	东南偏南风	0.3
	11:30—14:30	27.7	48	东南偏南风	0.7
	17:30—20:00	21.9	66	南风	0.6
2021-11-02	6:30—9:30	18.8	80	东北风	0.2
	12:00—14:30	25.2	59	西南偏西风	0.6
	17:30—20:00	21.2	67	东北偏东风	0.6
2021-11-03	6:30—9:00	19.9	77	西北风	0.4
	11:30—14:00	20.8	77	西南偏西风	0.6
	17:30—20:00	19.2	88	西风	0.7
2021-11-12	6:30—9:00	17.1	70	西南风	0.6
	11:30—14:00	23.3	41	东南风	1.7
	17:30—20:00	18.7	61	东风	1.2

于 0.05 时,说明两组样本存在显著性差异,反之不存在显著性差异。

2 结果与讨论

2.1 不同公交站颗粒物浓度的总体分布

从图 3 看出,市区和郊区公交站之间的 PM_{1.0} 浓度变化不尽相同。春季,郊区公交站 PM_{1.0} 平均浓度均明显大于市区,但秋季不明显。春季市郊连接处 B4 站点的 PM_{1.0} 浓度高于市区但低于郊区其他站点,而秋季 B4 站点较其他站点表现出最高的 PM_{1.0} 平均浓度。结合表 1 与表 2,春季平均风速明显大于秋季,有利于春季颗粒物的扩散,且秋季的车

流量是春季的 1.5 倍左右,这综合导致秋季颗粒物浓度高于春季。春季郊区路段车流量中柴油车占比明显高于市区,这是春季郊区公交站颗粒物浓度大于市区的可能原因,也反映出柴油车排放是颗粒物的重要来源。与波特兰(10.14 μg/m³)^[23]、新加坡(34 μg/m³)^{[12]255}等国外经济发达城市公交站 PM_{1.0} 浓度平均水平相比,福州市公交站 PM_{1.0} 浓度较高,预示着城市交通设施环境质量仍有待改善。但是,福州市公交站 PM_{1.0} 浓度低于上海(80 μg/m³)^[24]等我国特大城市,这与近年来福州公交“电动化”比例已近 100%以及整体城市空气质量位居全国前列密切相关。此外,PM_{1.0} 浓度在部分站点有较大的波动

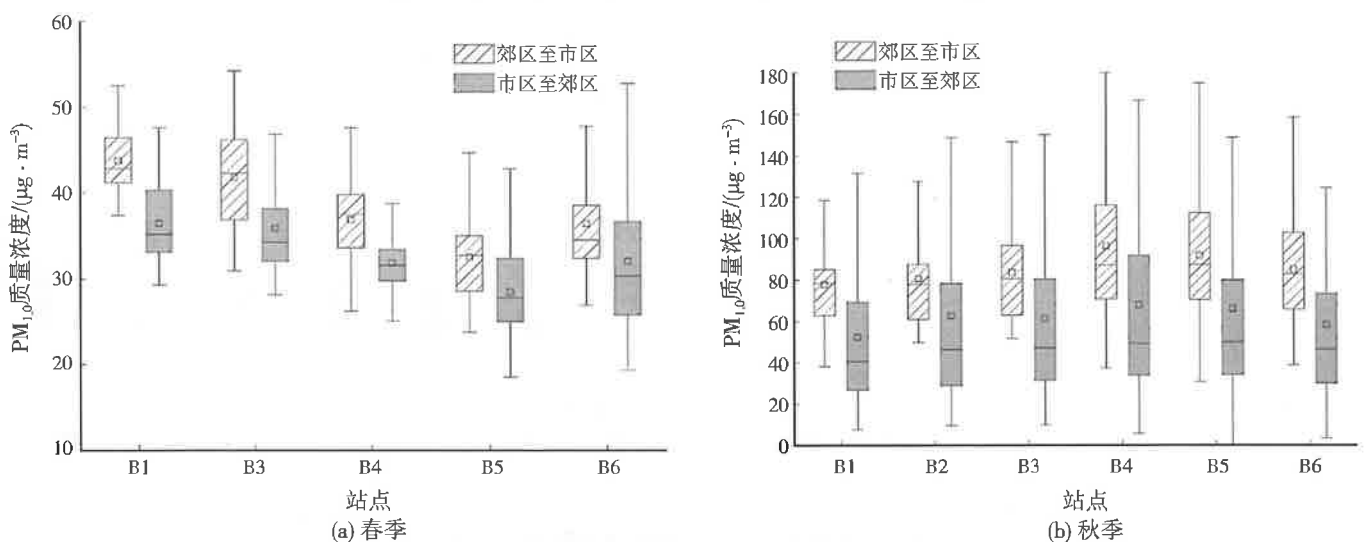


图 3 双向道路成对公交站 PM_{1.0} 质量浓度的总体分布

Fig.3 Overall distribution of PM_{1.0} mass concentrations at paired bus stations along the two-way road

性,这与机动车尾气排放、道路扬尘、周边生活生产等其他排放以及环境背景变化等不无关系^[25]。从图 3 还发现,道路两侧成对公交站的 $\text{PM}_{1.0}$ 浓度存在一定的差异,郊区至市区方向站点的 $\text{PM}_{1.0}$ 平均浓度高于市区至郊区方向站点 20%~40%,这主要与风向驱动影响有关。实验期间春季和秋季分别盛行东北风和东南风,而郊区公交站为西北-东南走向、市区公交站为东西走向,因此东南风近似平行于郊区公交站走向,更有利于站台污染物的扩散;郊区至市区方向侧公交站的 $\text{PM}_{1.0}$ 浓度总体大于市区至郊区方向侧对应站点,与前者位于道路下风侧有一定关系,郊区站点更明显。道路两侧成对公交站点 $\text{PM}_{1.0}$ 浓度的非参数检验所得的 P 值小于 0.05(见表 3),表明每对站点的 $\text{PM}_{1.0}$ 浓度变化存在显著的统计差异。

图 4 显示,公交站 BC 浓度的季节变化不明显;郊区 B1、B2 和 B3 站点的 BC 平均浓度接近,而相比之下,市郊连接处 B4 站点的 BC 浓度显著抬升,且与市区 B5、B6 站点均呈现 BC 平均浓度显著大于中位数浓度的特征。对于市区站点,BC 浓度表现出市区至郊区方向略高于郊区至市区方向,而郊区除 B3

外的其他站点呈相反特征。另外,秋季路侧每对站点的 BC 浓度变化在 0.05 水平下不存在显著的统计差异(见表 3),暗示着站点 BC 污染水平受路两侧环境差异影响有限。在路段车流量接近的情况下,秋季 B5 站点的颗粒物浓度始终高于 B6 站点,可能原因是 B5 地处泊车数较多的商业广场附近且四周建筑密集,机动车尾气排放多且无法向外扩散而沿路积聚。据实地调查并结合表 1 所示站点车流量进一步分析可知,即便市区和郊区部分站点的车流量接近,但郊区公交站周边环境更通透而使道路污染物更容易快速扩散,对于平均风速更小的秋季尤为明显。

2.2 不同交通时段的公交站颗粒物分布差异

从图 5 看出,春季,郊区及市郊结合处站点中午的 $\text{PM}_{1.0}$ 平均浓度接近交通晚高峰时段。春季的中午和晚上风速较大但相对接近,是造成环境通透且路段车流量差距不明显的郊区中午和晚上 $\text{PM}_{1.0}$ 浓度接近的可能原因。然而,春季市区站点中午的 $\text{PM}_{1.0}$ 平均浓度显著高于交通晚高峰时段,这可能与市区站点附近中午其他排放上升但大气扩散条件弱等潜在原因有关。秋季,市区站点交通早晚高峰时

表 3 双向道路公交站 $\text{PM}_{1.0}$ 和 BC 浓度总体样本的曼-惠特尼 U 检验
 Table 3 Mann-Whitney U test of $\text{PM}_{1.0}$ and BC concentrations samples at bus stations along the two-way road

季节	道路方向	颗粒物种类	颗粒物 ¹⁾ /($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	Z 检验	P 检验
春季	郊区至市区	$\text{PM}_{1.0}$	36.93(32.76~41.93)	51.71	0
	市区至郊区		32.03(28.31~35.26)		
秋季	郊区至市区	$\text{PM}_{1.0}$	81.20(64.64~99.82)	20.58	0
	市区至郊区		46.80(30.26~80.29)		
秋季	郊区至市区	BC	2.39(1.83~3.07)	-1.24	0.22
	市区至郊区		2.43(1.84~3.13)		

注:1)春季因设备有限只对道路一侧公交站进行 BC 质量浓度监测,故无春季 BC 检验结果;颗粒物质量浓度为其平均质量浓度,括号内数字为颗粒物质量浓度的上下四分位数。

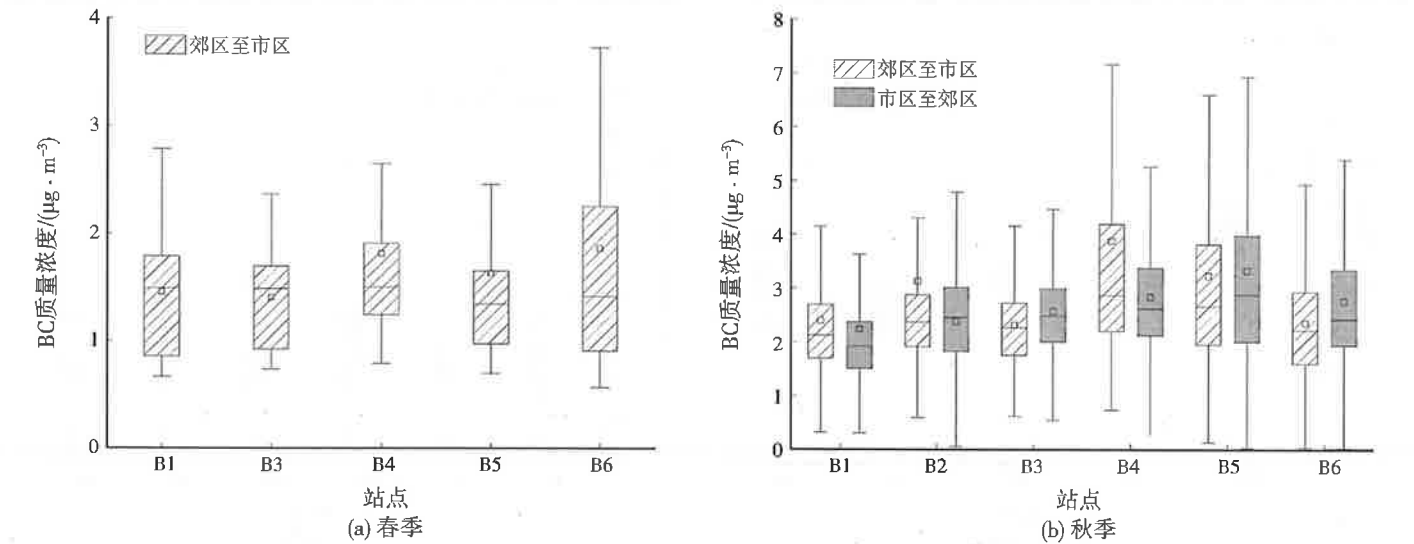


图 4 道路公交站 BC 质量浓度的总体分布
 Fig.4 Overall distribution of BC mass concentrations at the bus stations along the road

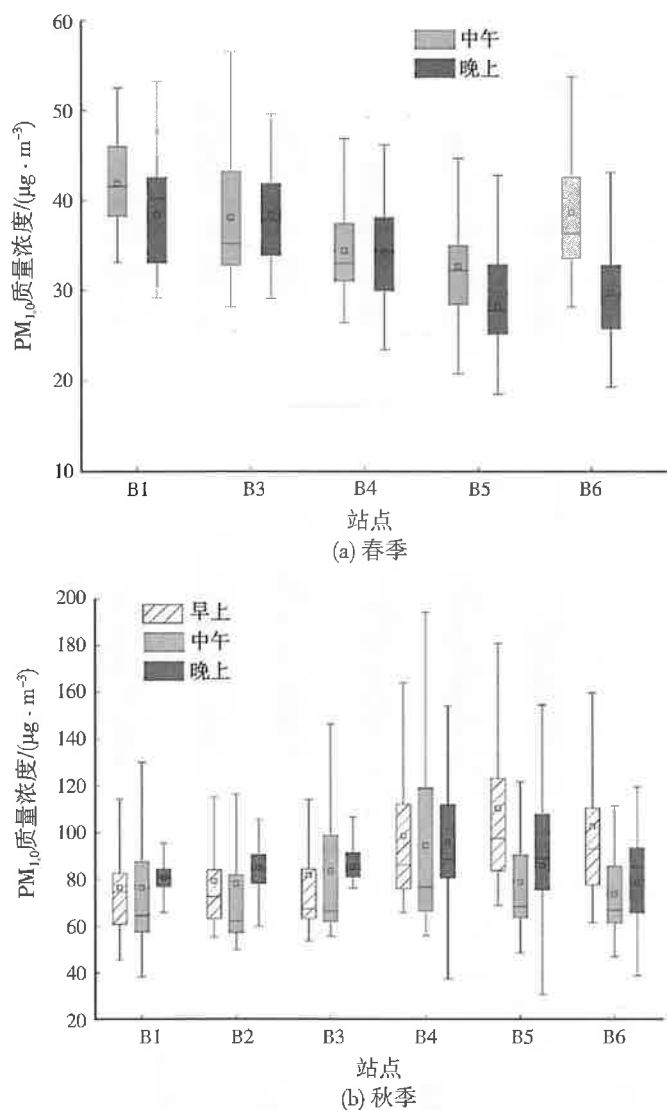


图5 一天中不同交通时段的公交站 $PM_{1.0}$ 质量浓度分布

Fig.5 Distribution of $PM_{1.0}$ mass concentrations in different traffic periods of a day at the bus stations

段的 $PM_{1.0}$ 浓度略大于郊区,并呈现早晚大于中午的 $PM_{1.0}$ 浓度,表现出与路段交通强弱变化的时间一致性。但是,秋季实验时段的风速大体呈现中午>晚高峰>早高峰,又使得市区 $PM_{1.0}$ 浓度出现早高峰>晚高峰>中午。这些结果暗示,风引起的大气扩散差异影响郊区和市区公交站 $PM_{1.0}$ 浓度的总体差异,且改变着路边空气污染对交通时段变化的响应强度。

图6显示,除春季的B4和市区站点外,实验公交站早晚高峰的BC浓度大都大于中午,这与早晚高峰路段车流量明显大于中午有关。而柴油车作为BC的主要贡献者^[26],尤其在柴油车无严格限制的郊区,实验发现傍晚大排量柴油车的增加,并伴随着市区下班族回流郊区的交通拥堵,郊区晚高峰时段沿路公交站的BC浓度明显抬升。B1站点位于一条车流量小且道路两侧为开阔校园的支路,其中午和晚高峰的 $PM_{1.0}$ 平均浓度接近(见图5),而晚高峰

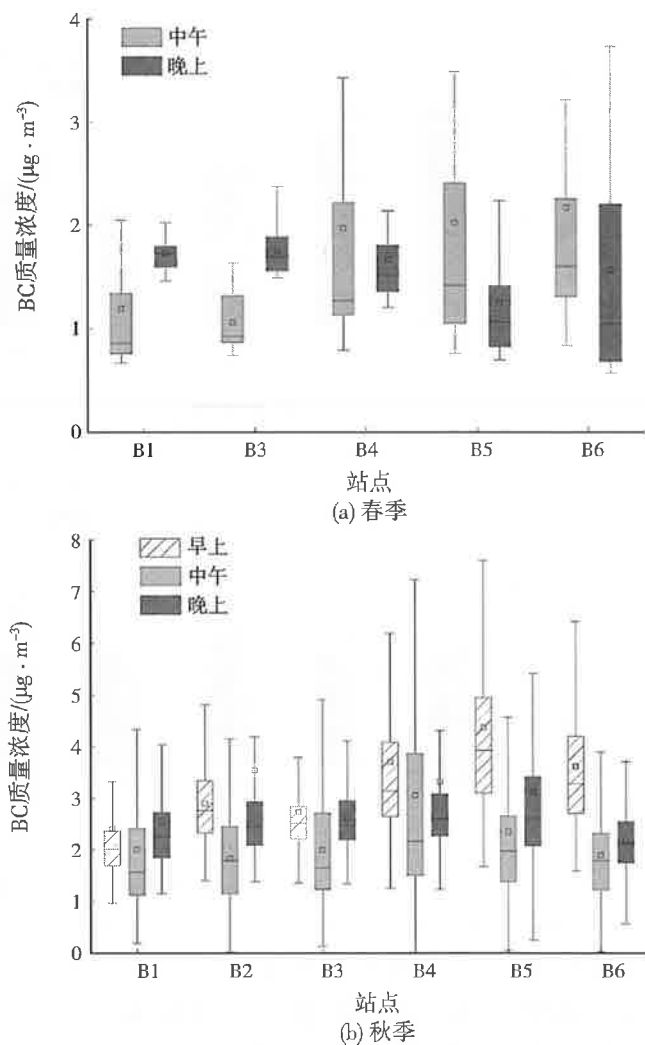


图6 一天中不同交通时段的公交站BC质量浓度分布

Fig.6 Distribution of BC mass concentrations in different traffic periods of a day at the bus stations

的BC浓度明显大于中午(见图6)。该对比进一步说明,BC有着强于 $PM_{1.0}$ 的对时段变化引起的交通排放强弱的敏感性。对于同处郊区的B1和B3站点来说,秋季车流量为B1近3倍的B3站点的早、晚高峰BC平均浓度比中午分别高出了37%和31%,暗示了在相近的大气扩散条件下,道路交通排放对路边公交站BC污染的突出贡献。

2.3 公交站内不同位置上的颗粒物浓度差异

利用道路两侧成对公交站的观测数据,比较各公交站站内不同位置上的 $PM_{1.0}$ 和BC平均浓度,如图7所示。总体来看,无论春季或秋季,大部分站点的颗粒物浓度随着远离机动车道而趋于逐渐下降,尤其是BC平均浓度基本遵循站牌前>站牌后>人行道的距离衰减规律。该结果与VELASCO等^{[12]257}在新加坡的研究结果相近,即公交车站候车区的颗粒物浓度大于车站外部和人行道。对于车流量小且站台周围空旷的郊区站点B1,在春季,站牌前后的颗粒物平均浓度比较接近但大于人行道,而在秋季,不同位置上的颗粒物平均浓度则有明显差异。

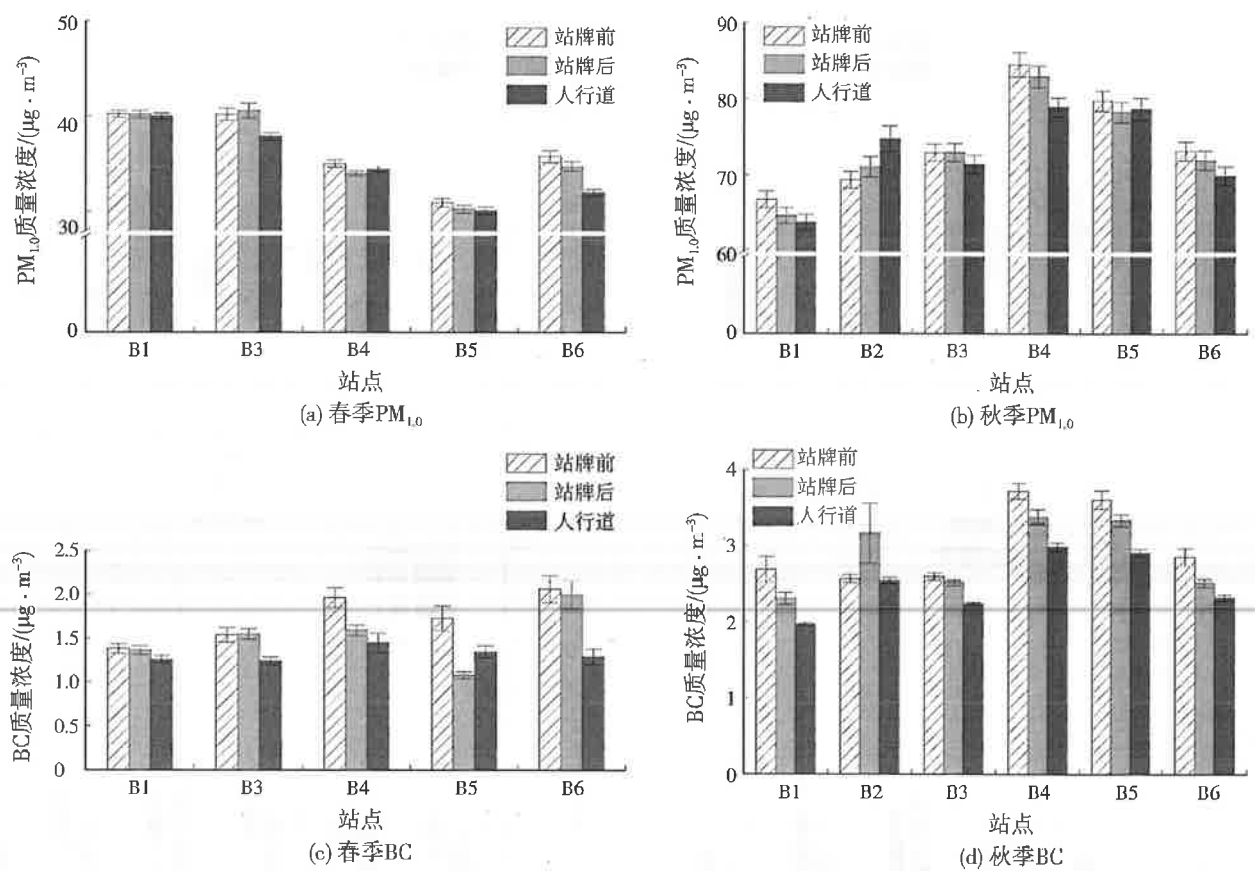


图 7 公交站内不同监测位置上的 $PM_{1.0}$ 和 BC 的平均质量浓度

Fig.7 Average mass concentration of $PM_{1.0}$ and BC in different monitoring locations inside the bus stations

对于 B2 站点而言,因靠近车流量较大的交叉口且周围有地铁站、加油站和购物中心,其局部位置上的颗粒物浓度差异较复杂。对于车流量大且时常拥堵的市郊连接处的 B4 站点以及市区站点,BC 平均浓度基本呈现站牌前>站牌后>人行道的显著特征。而 B5 站点人行道的 $PM_{1.0}$ 平均浓度与站牌前较为接近,可能与其人行道紧邻居住生活、建筑施工等复杂环境有关。

图 8 统计了秋季东南风影响下道路两侧公交站局部位置上的 BC 平均浓度,即区分相对于道路的上、下风向侧公交站。总体上,除 B3 和 B6 站点外,道路下风向侧公交站的 BC 平均浓度高出上风向侧 10%~30%。对于 B6 来说,道路上风向侧站点的 BC 平均浓度略高于下风向侧站点,这可能与下风向侧站点的路边植被密度大而起到积极拦截颗粒物的作用有关。下风向侧公交站局部位置的 BC 平均浓度基本符合站牌前>站牌后>人行道的特征,但市郊连接站点和市区站点表现更明显,与它们所处路段的车流量大相关。此外,下风向侧无站牌遮挡的 B3 站点站台后的 BC 平均浓度与站台前相近,间接佐证了无站牌时风携带 BC 等道路污染物会增大站内交通污染暴露的范围和强度。

综上所述,相对于无站牌的全暴露式 B3 站点,

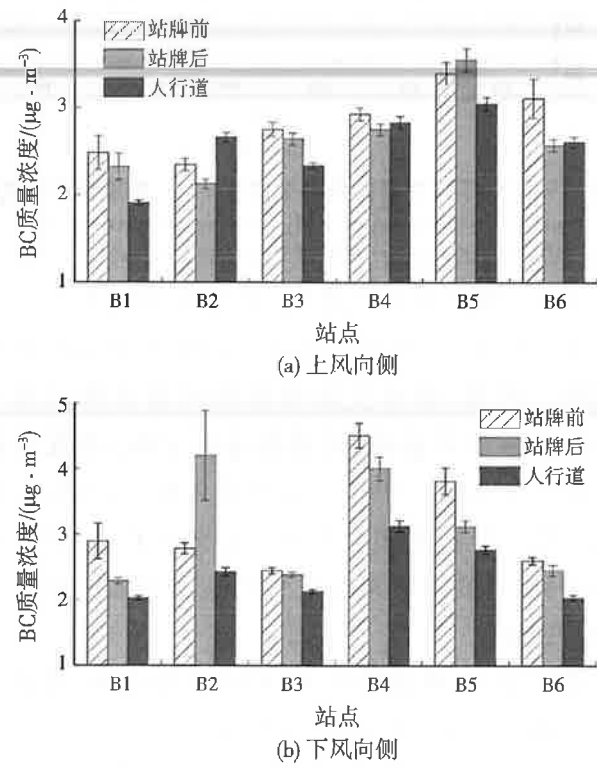
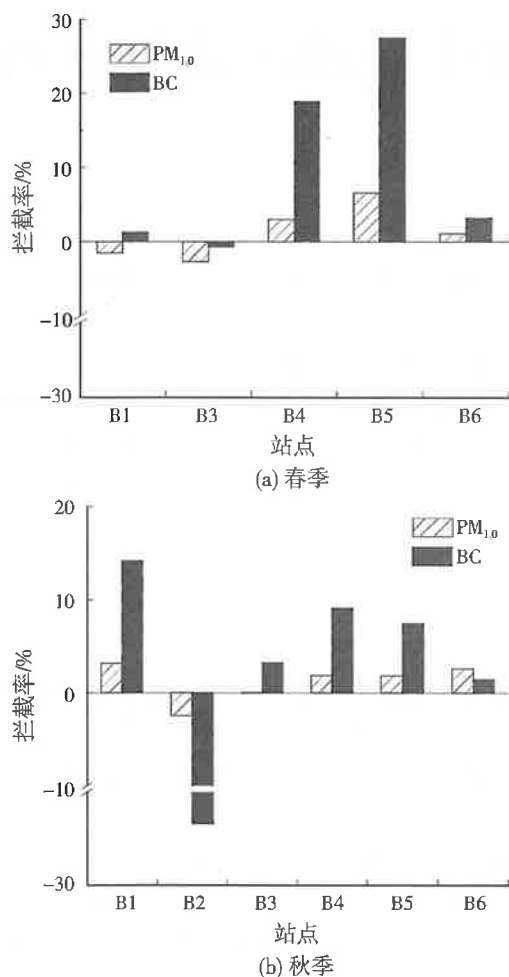


图 8 道路上、下风向侧公交站内不同监测位置上的 BC 平均质量浓度

Fig.8 Averaged BC mass concentration at different monitoring locations inside the bus stations on the upwind and downwind sides of the road

半暴露式公交站的站牌起到了拦截道路颗粒物向站台后移动的屏障作用,一定程度上降低了站台后的颗粒物浓度。图 9 进一步统计了公交站站牌后较站

图9 公交站站牌对 $PM_{1.0}$ 和 BC 的拦截率Fig.9 The ratio of the station board blocking $PM_{1.0}$ and BC among the bus stations

牌前的颗粒物浓度降幅。从图9看出,站牌对站后空气质量有一定的改善效果,站牌对公交站颗粒物的拦截率最高近30%,但会因季节、路段车流量、站台通透性等因素的影响而存在差异。市区公交站的站牌对BC和 $PM_{1.0}$ 的阻隔效果总体好于郊区;无论市区或郊区,站点附近车流量大时更能体现站牌对颗粒物的阻拦强度。这些结果暗示,在空间有限且车流量大的街道峡谷布局优化半暴露式公交站的站牌更有利于减少交通颗粒物对路侧环境的影响。尽管开阔道路沿侧公交站站牌对交通颗粒物的阻隔效果有所减弱,但是其站台后环境空气质量仍好于无站牌公交站。

3 结论

(1) 风速小等不利气象条件使秋季观测到的公交站颗粒物平均浓度高出春季1倍左右,四周空旷的郊区公交站的颗粒物尤其是 $PM_{1.0}$ 对道路交通的响应弱于市区站点,公交站四周不够通透、路段车流量大且拥堵、位于道路下风向等是增加站内颗粒物暴露风险的主要原因。

(2) 尽管公交站颗粒物浓度的交通时段变化会因季节、区位等不同而有差异,但总体呈现早晚高峰大于中午的特征。四周空旷的郊区公交站的颗粒物浓度对车流量变化敏感,而路侧潜在生活排放且环境不够通透的市区公交站对道路瞬时高排车辆及交通拥堵等更敏感。

(3) 市区和郊区公交站局部位置的颗粒物浓度基本服从远离道路而衰减的规律,但BC分布的站点间差异较 $PM_{1.0}$ 更明显。公交站牌对道路下风向侧站内颗粒物的拦截率近30%,但会因季节、路段车流量、站点四周环境的变化而存在差异。针对空间有限且交通量大的峡谷型公交站,合理优化其站牌的结构和布局将有利于减少站内候车人群的污染暴露风险。

参考文献:

- [1] KAUR S, NIEUWENHUIJSEN M, COLVILE R. Personal exposure of street canyon intersection users to $PM_{2.5}$, ultrafine particle counts and carbon monoxide in central London, UK [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, 39(20): 3629-3641.
- [2] SHEN J L, GAO Z. Commuter exposure to particulate matters in four common transportation modes in Nanjing [J]. *Building and Environment*, 2019, 156: 156-170.
- [3] 潘纯珍, 陈刚才, 杨清玲, 等. 重庆市地区道路 $PM_{10}/PM_{2.5}$ 浓度分布特征研究 [J]. *西南农业大学学报(自然科学版)*, 2004(5): 576-579.
- [4] 沈俊秀. 上海市道路交通颗粒污染暴露特征研究 [D]. 上海: 复旦大学, 2011.
- [5] 巴利萌, 邓顺熙, 汪晶发, 等. 渭南主城区道路积尘负荷及交通扬尘颗粒物排放 [J]. *环境污染与防治*, 2020, 42(3): 353-357.
- [6] 王文朋, 沈惠平, 黄云彪, 等. 上海市浦东新区道路交通环境 $PM_{2.5}$ 污染状况及特征 [J]. *职业与健康*, 2018, 34(17): 2399-2402.
- [7] 高嵘, 净新苗, 何红弟. 城市道路交叉口颗粒物浓度及行人暴露研究 [J]. *环境科学与技术*, 2019, 42(5): 214-221.
- [8] 于泉, 梁锐, 郭增增, 等. 城市道路交叉口处颗粒物空间分布规律 [J]. *北京工业大学学报*, 2019, 45(5): 485-492.
- [9] 冯寒立, 赵敬德, 翟静. 高架覆盖的街谷内可吸入颗粒物的浓度分布 [J]. *环境工程学报*, 2017, 11(8): 4669-4676.
- [10] 何红弟, 赵积强, 程丽军, 等. 上海市夏季高架道路边颗粒物垂直分布研究 [J]. *安全与环境学报*, 2018, 18(3): 1177-1184.
- [11] 高雅, 王占永, 路庆昌, 等. 城市高架路沿侧细颗粒物的垂直分布特征研究 [J]. *上海交通大学学报*, 2018, 52(6): 650-657.
- [12] VELASCO E, TAN S H. Particles exposure while sitting at bus stops of hot and humid Singapore [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, 142.
- [13] VAN RYSWYK K, EVANS G J, KULKA R, et al. Personal exposures to traffic-related air pollution in three Canadian bus transit systems: the urban transportation exposure study [J]. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 2021, 31(4): 628-640.

(下转第351页)