

DOI: 10.7524/AJE.1673-5897.20231129002

杜伟, 崔占朋, 王金泽, 等. 典型室内吸烟环境细颗粒物与黑碳动态变化及人群暴露特征[J]. 生态毒理学报, 2024, 19(2): 324-332

Du W, Cui Z P, Wang J Z, et al. Dynamic variations and human exposure characteristics of PM_{2.5} and BC in typical indoor smoking environment [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2024, 19(2): 324-332 (in Chinese)

典型室内吸烟环境细颗粒物与黑碳动态变化及人群暴露特征

杜伟^{1,2}, 崔占朋^{1,2}, 王金泽^{3,*}, 姜肃^{1,2}, 李珂欣^{1,2}, 朱子阳⁴, 林楠⁵

1. 昆明理工大学环境科学与工程学院, 昆明 650504
2. 云南省土壤固碳与污染控制重点实验室, 昆明 650500
3. 北京大学城市与环境学院地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871
4. 中国科学院新疆生态与地理研究所荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 乌鲁木齐 830011
5. 上海交通大学医学院公共卫生学院, 上海 200025

收稿日期: 2023-11-29 录用日期: 2024-01-25

摘要: 中国大多数城市尚未出台室内控烟法令, 导致公共环境室内吸烟行为较为普遍, 对室内空气质量和相关风险人群的健康造成了严重危害。目前仍缺乏研究表征吸烟引发的室内空气污染及其动态变化特征, 阻碍了控烟政策的制定。本研究基于高时间分辨率在线细颗粒物(PM_{2.5})和黑碳(BC)监测仪, 结合相关风险人群暴露特征调研数据, 探究了典型吸烟环境(棋牌室)的室内污染水平、动态变化特征、影响因素和吸烟导致的污染物排放强度及风险人群的额外暴露。结果表明棋牌室日均PM_{2.5}和BC浓度分别为(154±68.9) mg·L⁻¹和(3.7±1.4) mg·L⁻¹, 其中营业期间的浓度为非营业期间浓度的6.5倍和2.6倍。PM_{2.5}和BC浓度的室内外比值(I/O)分别为6.3和4.1, 表明室内源排放是棋牌室空气污染的主要来源。吸烟可以迅速升高室内PM_{2.5}和BC浓度并产生浓度峰, 峰值可达(502±111) mg·L⁻¹和(8.5±2.9) mg·L⁻¹。吸烟导致棋牌室PM_{2.5}和BC的排放强度分别为(332±218) mg·L⁻¹·min⁻¹和(3.2±1.8) mg·L⁻¹·min⁻¹, 风险人群因吸烟导致的日均PM_{2.5}和BC的额外暴露分别为74.5 mg·L⁻¹和0.67 mg·L⁻¹, 年均额外暴露分别为21.3 mg·L⁻¹和0.19 mg·L⁻¹, 表明室内吸烟引发的额外暴露会导致严重的健康风险。本研究为吸烟导致的室内空气污染提供了基础数据, 研究结果可为控烟政策制定提供科学支撑。

关键词: 细颗粒物; 黑碳; 吸烟; 室内空气; 额外暴露

文章编号: 1673-5897(2024)2-324-09 中图分类号: X171.5 文献标识码: A

Dynamic Variations and Human Exposure Characteristics of PM_{2.5} and BC in Typical Indoor Smoking Environment

Du Wei^{1,2}, Cui Zhanpeng^{1,2}, Wang Jinze^{3,*}, Jiang Su^{1,2}, Li Kexin^{1,2}, Zhu Ziyang⁴, Lin Nan⁵

1. Faculty of Environmental Science & Engineering, Kunming University of Science & Technology, Kunming 650504, China
2. Yunnan Provincial Key Laboratory of Soil Carbon Sequestration and Pollution Control, Kunming 650500, China
3. Ministry of Education Laboratory of Earth Surface Processes, College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China
4. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences,

基金项目: 云南省基础研究专项-面上项目(202301AT070331); 云南省西南联合研究生院科技专项(202302AO370001); 深圳市城市环境健康风险精准测量与预警技术重点实验室开放基金项目(ZDSYS20220606100604008)

第一作者: 杜伟(1991—), 男, 博士, 研究方向为生物质综合利用的环境与健康效应, E-mail: duwpku@gmail.com

* **通信作者 (Corresponding author),** E-mail: 1754500076@qq.com

Urumqi 830011, China

5. School of Public Health, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200025, China

Received 29 November 2023 accepted 25 January 2024

Abstract: Exposure to smoke emitted by smoking can trigger serious health risks, while indoor smoking laws are still lacking for many Chinese cities, resulting in frequent smoking behavior in public indoor environments. Meanwhile, limited studies have focused on indoor air pollution associated with smoking as well as its dynamic variations. In this study, real-time high resolution sensors were used to explore pollution levels and dynamic variations of indoor fine particles ($PM_{2.5}$) and black carbon (BC) in typical smoking environments of mahjong and chess room. The contribution of smoking to indoor pollution and the extra pollutant exposure due to smoking were further calculated based on exposure characteristic data derived from questionnaire. Results showed that the daily average concentrations of $PM_{2.5}$ and BC in mahjong and chess rooms were $(154 \pm 68.9) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and $(3.7 \pm 1.4) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively. Higher $PM_{2.5}$ and BC concentrations were observed during operation period, which were 6.5 and 2.6 times of those during non-operation period. The indoor to outdoor ratios (I/O) of $PM_{2.5}$ and BC were 6.3 and 4.1, respectively, indicating the major contribution of indoor source to indoor air pollution. Smoking can rapidly increase indoor $PM_{2.5}$ and BC and generate concentration peaks, which can be as high as $(502 \pm 111) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and $(8.5 \pm 2.9) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively. Indoor $PM_{2.5}$ and BC emission intensity attributed to smoking were $(332 \pm 218) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ and $(3.2 \pm 1.8) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$, respectively. The calculated daily averages of smoking-induced extra exposures of $PM_{2.5}$ and BC to target population were $74.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and $0.67 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, and were $21.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and $0.19 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ for annual averages, respectively, indicating severe health risks due to indoor smoking. This study fills in the data gap of indoor air pollution caused by smoking and can provide scientific support for formulating smoking control policies.

Keywords: fine particles; black carbon; smoking; indoor air; extra exposure

空气污染是影响人体健康的主要环境问题之一,全球每年有数百万人因空气污染暴露而过早死亡^[1]。鉴于人们在室内所处时间的占比超过 80%^[2],因此相较于大气污染,室内空气污染对人体健康的危害更大,更应受到重视。室内排放源如吸烟形成的环境烟草烟雾可以显著地影响室内空气质量^[3-5]。以往研究指出,环境烟草烟雾是室内颗粒物的重要排放源^[6]。如 Slezakova 等^[7]的研究显示,吸烟场所收集的室内细颗粒物($PM_{2.5}$)质量相较于禁烟场所增加了 320%。类似地,Savdie 等^[8]研究指出吸烟会导致室内 $PM_{2.5}$ 及黑碳(BC)浓度显著升高,分别高于无吸烟时的背景值 165 倍和 63 倍。环境烟草烟雾中 $PM_{2.5}$ 的主要组分为有机碳、BC 和 K 元素^[9]。虽然 BC 的占比相对较低(如 1.4% ~ 1.9%)^[9-10],但因其对人体健康的重要影响而引发关注^[11-16]。有研究表明,BC 对我国 2000—2010 年间 $PM_{2.5}$ 浓度增长的贡献仅为 6.4%,但却是 $PM_{2.5}$ 归因死亡负担的主导组分(46.7%),表明其是 $PM_{2.5}$ 毒性的关键指标^[9,17]。因此,BC 的暴露特征需要引起人们的重视。

吸烟不仅会直接影响主动吸烟人群的健康,还可以通过二手烟和二手烟暴露影响不吸烟人群的健康^[18-19],因而广受关注。吸烟和二手烟暴露会引发心脑血管疾病、恶性肿瘤、呼吸系统疾病等在内的多种疾病^[20-23]。据估算,全球每年因吸烟和二手烟暴露导致的死亡人数约为 700 万和 120 万^[24]。针对吸烟尤其是室内吸烟对人体健康的危害,截至 2020 年,全球已有 67 个国家实施了“全面无烟法规”^[25]。但目前中国仅有 24 个城市出台了控烟法规,且大多集中于发达城市,如北京和上海^[26]。绝大部分地区,尤其是经济欠发达地区,尚未颁布控烟政策,导致这些地区室内吸烟行为相当普遍。而在诸如棋牌室和餐厅等娱乐消费场所,室内吸烟现象尤其严重,对暴露于其中的风险人群身体健康造成了严重危害。

为阐明室内吸烟对居民健康的危害,对吸烟期间室内空气污染特征的研究至关重要。以往针对室内空气污染的研究大多基于滤膜采样,该方法可以对污染物成分谱进行详细分析^[27-30]。但其时间分辨率较低,难以反映吸烟行为发生时室内空气污染的

动态变化特征。近年来,随着传感器技术的革新,高分辨率在线传感器被广泛应用于室内空气污染的评估,极大地推动了人们对室内空气污染的空间异质性、动态变化、垂直分布等特征的认知^[31-34]。然而,目前利用在线仪器刻画典型室内吸烟环境污染特征的研究十分匮乏,导致吸烟环境污染水平等数据的缺失,阻碍了控烟政策的制定及推行。

本研究选取棋牌室作为典型室内吸烟环境,利用高分辨率在线细颗粒物和黑碳监测仪持续监测棋牌室室内空气质量,旨在精确刻画吸烟行为对室内空气质量的影响,并结合相关风险人群的行为模式调查评估其额外暴露。本研究有望为吸烟行为对典型吸烟环境下室内空气质量的影响及相关健康风险的评估提供基础数据,并为我国控烟政策的制定提供科学依据。

1 材料与方法 (Materials and methods)

1.1 采样点描述

本研究开展于西南地区某市区,选取了具备营业资质的典型棋牌室开展研究,打麻将等娱乐方式在当地广为流行。棋牌室日常营业时间为 13:00—19:00,偶尔可持续到 21:00,上午一般不营业。棋牌室的每个房间都配备一张麻将桌,并装有独立的门窗和空调,营业期间棋牌室房门均关闭,由于在夏季采样,空调普遍打开。由于当地没有颁布室内控烟法令,故吸烟行为在当地棋牌室不受约束。

1.2 数据获取

本研究的采样时间为夏季(8月),累计2周。随机选取10个棋牌室房间进行采样,每个房间均放置一台PM_{2.5}监测仪和一台BC监测仪。仪器放置要求为距墙1.0 m,离地1.5 m。PM_{2.5}监测仪为便携式颗粒物光学监测仪(攀藤 PMS7003,泽帆公司,中国),采样分辨率为5 s,可同步监测环境温度和湿度。BC监测仪为AE51在线BC仪(microAeth® AE51, AethLab, 美国),采样分辨率为1 min。同时使用标准问卷记录了棋牌室的房间参数信息(长、宽、高、开窗时间、开空调时间)、人员信息(性别、数量、所处时间)和吸烟行为(是否吸烟、吸烟数量)。此外,同步采集了室外PM_{2.5}和BC数据以探究污染物的室内外关系,仪器放置于棋牌室旁边的一个三层建筑楼顶。

1.3 质量控制和数据分析

使用前,所有PM_{2.5}监测仪均与标准仪器(实时

在线环境颗粒物监测仪,model 5030,赛默飞科技,美国)进行了15 d以上的校准。校准结果显示,二者相关性超过0.990。BC监测仪在监测前也经过校准,其误差小于5%,均满足研究需求。

结合人群调研数据,利用公式(1)、(2)和(3)分别估算了风险人群因棋牌室吸烟暴露导致的日均和年均额外PM_{2.5}和BC暴露浓度。

$$C_E = \frac{\sum_i (C_{\text{indoor}} - C_{\text{baseline}})}{t} \quad (1)$$

$$C_{E\text{-daily}} = \frac{C_E \times t}{1440} \quad (2)$$

$$C_{E\text{-annual}} = \frac{C_E \times t \times 7}{1440 \times 7} \quad (3)$$

式中: C_E 为因吸烟导致的污染物排放强度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$; C_{indoor} 为室内污染物实时浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; C_{baseline} 为室内污染物背景浓度,即营业前30 min内的室内污染物浓度均值, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; t 为总营业时间, min。根据本研究调研结果可知,棋牌室的平均营业时长 t 为(315±81.5) min。 $C_{E\text{-daily}}$ 和 $C_{E\text{-annual}}$ 分别表示因吸烟导致的污染物额外日均和年均暴露, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。1440为每天分钟数,7为每周天数。本研究假设每年额外暴露天数为每周2 d。此外,利用蒙特卡洛方法(运行10 000次)模拟额外暴露计算中的不确定性,前提假设为污染物额外暴露呈对数正态分布,营业时间成正态分布,使用软件为Python(V 3.8.7)。

2 结果与讨论 (Results and discussion)

2.1 浓度水平

本研究共有76.9%的棋牌室被记录到室内吸烟行为,其中,平均吸烟数量为(35.1±26.6)支,表明棋牌室吸烟现象普遍。棋牌室日均PM_{2.5}浓度为(154±68.9) $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,范围为56.6~261 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,日均BC浓度为(3.7±1.4) $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,范围为1.9~6.3 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。我国《室内空气质量标准》(GB/T 18883—2022)规定的室内PM_{2.5}日均标准为50 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[35]。与该标准相比,棋牌室PM_{2.5}的超标率为100%,且高于该标准1.1倍~5.2倍,表明棋牌室严重的PM_{2.5}污染。为研究吸烟对室内空气质量的影响,本研究进一步将测定时间划分为营业期间(即房间内有人打麻将)和非营业期间(即房间无人)。如图1所示,营业期间室内PM_{2.5}和BC的浓度分别为(382±220) $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和(4.9±2.2) $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,而非营业期间的浓度则分别为(58.7±13.2) $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和(1.9±0.6) $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,分别低

于营业期间 6.5 倍和 2.6 倍,表明营业期间室内更严重的空气污染。鉴于非营业期间棋牌室没有明显人为排放源,因此营业期间的污染源(室内吸烟)是棋牌室空气污染的主要贡献源。

以往研究也报道了吸烟对不同场所室内 $PM_{2.5}$ 和 BC 浓度的重要贡献。例如陈陵等^[36]报道南昌市 5 类公共场所(学校、办公室、卫生所、交通场所及餐厅)的室内 $PM_{2.5}$ 浓度为 $63.46 \sim 164.64 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,其中禁烟场所内的 $PM_{2.5}$ 浓度($72.48 \pm 36.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)显著低于不禁烟场所($153.95 \pm 122.69 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。李善鹏等^[37]测定了青岛市 5 类公共场所(餐厅、宾馆、学校、医院和政府机构)的室内 $PM_{2.5}$ 浓度,发现相较于学校和医院这类重点控烟场所(室内 $PM_{2.5}$ 浓度分别为 $51.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $69.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),餐厅和宾馆因控烟较难,室内 $PM_{2.5}$ 污染更严重(浓度分别为 $97.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $77.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。Lu 等^[38]基于高分辨率在线仪器量化了不同人类活动对北京市城区住宅内 $PM_{2.5}$ 的贡献,发现吸烟的贡献为每支香烟($0.34 \pm 0.24 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。目前鲜有研究表征吸烟对室内环境中 BC 浓度的影响,仅有的研究表明吸烟同样可以加剧室内 BC 污染。如 Lin 等^[39]研究发现,吸烟可以显著升高汽车内 BC 浓度,其中,有吸烟和无吸烟情景下车内的 BC 浓度分别为 $9.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $2.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。综上,吸烟对室内空气质量有较大影响,因此有必要在中国进一步推进室内控烟政策,从而改善室内空气质量。

2.2 动态变化特征

图 2 展示了室内和室外 $PM_{2.5}$ 和 BC 浓度的典型日变化特征。如图 2 所示,非营业期间,室内 $PM_{2.5}$ 和 BC 的浓度变化较为平稳,均维持在相对较低的水平。营业期间,室内 $PM_{2.5}$ 和 BC 浓度迅速升高,从人员进入后 8 min 出现第一个浓度峰,此后一直维持在较高浓度。在此期间, $PM_{2.5}$ 浓度均值为 $(397 \pm 130) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,最高可达 $713 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,显著高于非营业期间的($46.2 \pm 23.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。营业期间共观察到 14 个 $PM_{2.5}$ 浓度峰,单个峰的持续时间为 11 ~ 36 min,平均持续时间为($22.5 \pm 7.8 \text{ min}$)。峰值为 $301 \sim 713 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,平均峰值为($502 \pm 111 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。营业期间棋牌室的人为 $PM_{2.5}$ 排放源为吸烟,因此 $PM_{2.5}$ 的浓度峰是由吸烟导致的。而营业期间棋牌室 BC 平均浓度为($6.4 \pm 3.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),是非营业期间 BC 浓度的 1.8 倍,为($3.5 \pm 1.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),BC 浓度峰值为 $5.0 \sim 13.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,平均峰值为($8.5 \pm 2.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。营业期间室内 BC 的动态变化特征与 $PM_{2.5}$ 相似,且二者浓度峰出现时间一致,这可归因于二者一致的排放源。Zhou 等^[40]基于短期采样(1 ~ 2 h)研究了纽约市酒吧因吸烟引发的室内空气污染,结果显示吸烟会显著加剧酒吧内 $PM_{2.5}$ 和 BC 污染(小时均值浓度分别为 $1180 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $4.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。此外,该研究也观察到酒吧内 $PM_{2.5}$ 与 BC 相似的动态变化特征,与本研究结果一致。营业结束后,工作人员会将房门打开通风,导致室内 $PM_{2.5}$ 浓度会在 30 min 内

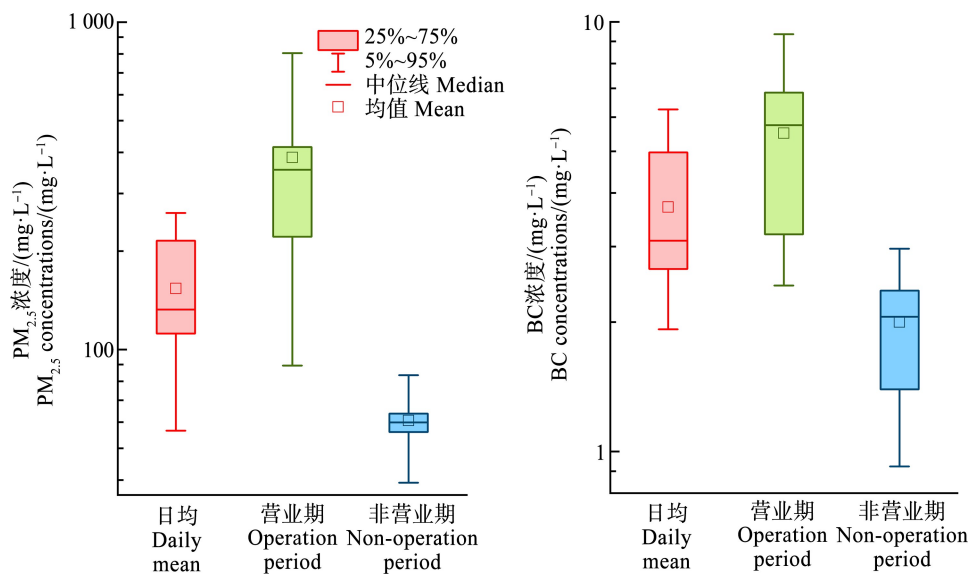


图 1 棋牌室内 $PM_{2.5}$ 和黑碳 (BC) 的日均浓度

Fig. 1 The daily average concentrations of $PM_{2.5}$ and black carbon (BC) in mahjong and chess room

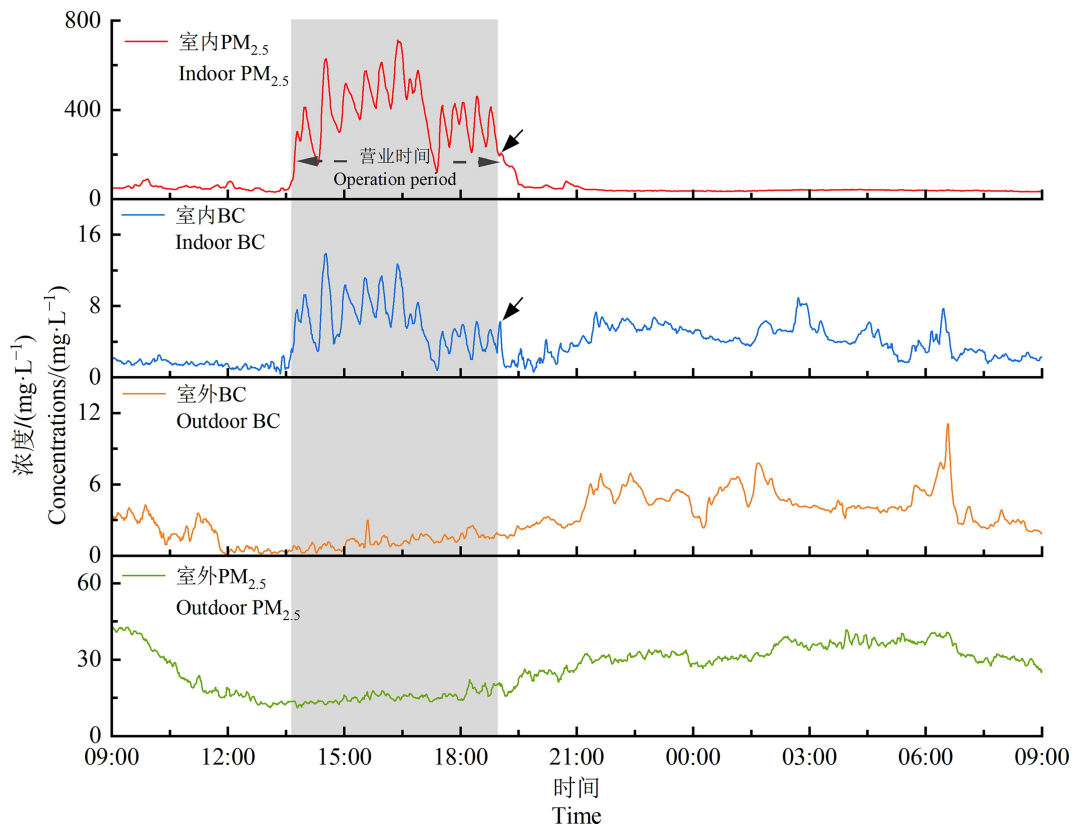


图2 典型室内外 $PM_{2.5}$ 及 BC 浓度的日变化特征

Fig. 2 Typical diurnal variations of indoor and outdoor $PM_{2.5}$ and BC in mahjong and chess room

迅速下降到房间背景浓度。在此阶段,还观察到一个 $PM_{2.5}$ 和 BC 的浓度峰,峰值分别为 $206 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $6.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,可能是由于室内尚未熄灭的烟头持续燃烧排放 $PM_{2.5}$ 和 BC 导致的。

室外 $PM_{2.5}$ 与 BC 的日变化特征较为相似,呈现早晚高,下午低的变化趋势。早晚较高的 $PM_{2.5}$ 与 BC 浓度主要是由于早高峰和晚高峰时段机动车尾气排放增多导致的^[41]。此外,夜间大气边界层高度较低,扩散条件差,污染物容易积聚从而导致夜间污染物浓度升高。而下午机动车排放减少,且大气边界层的抬升有利于污染物扩散从而导致 $PM_{2.5}$ 及 BC 浓度的降低。类似的大气 $PM_{2.5}$ 和 BC 的日变化特征在我国多个城市均有报道^[41-43]。

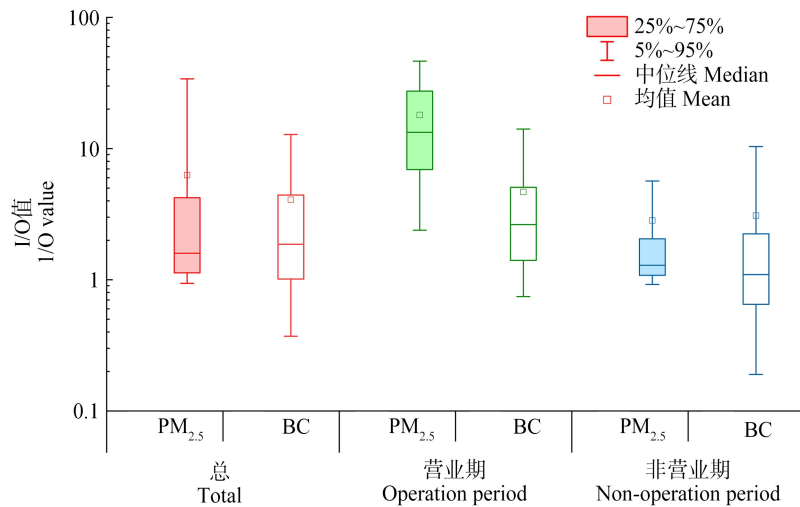
2.3 室内外污染物关系

污染物室内浓度与室外浓度的比值(I/O)可以反映室内源和室外源对室内环境的影响。基于高时间分辨率数据,本研究计算了 $PM_{2.5}$ 与 BC 浓度的室内外比值。如图3所示,棋牌室 $PM_{2.5}$ 和 BC 的 I/O 均值分别为 6.3 和 4.1,均大于 1.0,表明室内源对室内空气质量的影响大于室外源。此外, $PM_{2.5}$ 和 BC 的

I/O 中位数分别为 1.6 和 1.9,小于平均值,表明二者 I/O 的分布相较于正态分布偏右(偏度分别为 3.0 和 21.7)。棋牌室 I/O 的右拖尾源自于吸烟导致室内 $PM_{2.5}$ 和 BC 浓度升高,而二者的室外浓度相对稳定,从而导致室内外浓度比值出现极高值。营业期间 $PM_{2.5}$ 和 BC 的 I/O 比值分别为 18.0 (中位数:13.3)和 4.7(中位数:2.6),显著高于非营业期间的 2.8 (中位数:1.3)和 3.1(中位数:1.1)。Men 等^[44]研究了河北农村燃煤家庭 $PM_{2.5}$ 的 I/O 变化特征,结果表明这些家庭 $PM_{2.5}$ 的 I/O 均值为 1.95,中位数为 1.24,呈右偏分布。此外,该研究还指出在室内源排放更强烈的供暖期, $PM_{2.5}$ 的 I/O 比值相较于非供暖期间更高(分别为 2.08 和 1.65),与本研究结果一致,再次表明室内源排放对室内空气污染的重要贡献。

2.4 影响因素

基于相关性分析研究了棋牌室 $PM_{2.5}$ 和 BC 浓度的影响因素。如图4(a)所示,棋牌室 $PM_{2.5}$ 与 BC 浓度与营业期间 $PM_{2.5}$ 与 BC 浓度显著正相关,而非营业期间和室外的 $PM_{2.5}$ 与 BC 浓度的相关性较弱,表明室内源排放对棋牌室空气质量的影响更大。

图 3 PM_{2.5} 与 BC 浓度的室内外 (I/O) 比值Fig. 3 Indoor and outdoor (I/O) relationships of PM_{2.5} and BC

鉴于此,本文进一步研究了营业期间棋牌室 PM_{2.5} 和 BC 浓度的影响因素。如图 4(b)所示,营业期间棋牌室 PM_{2.5} 与 BC 浓度与房间内烟头数量显著正相关,表明室内抽烟数量越多,空气污染则越严重。因此,有必要减少棋牌室的吸烟行为。此外,营业期间棋牌室 PM_{2.5} 与 BC 浓度也与营业时长呈显著正相关关系,这主要可以归因于以下 2 点:首先棋牌室营业时,室内为半封闭状态,较长的营业时间有利于污染物的积累;其次,营业时长与烟头数量显著正相关(图 4(b)),表明长时间打麻将往往会伴随更多的吸烟活动,从而加剧室内空气污染。而营业期间室内 PM_{2.5} 与 BC 浓度与通风条件并无显著相关关系,这可能是由于大部分棋牌室的窗户(53.8%)于营业期间一直开启,导致不同房间通风条件的差异较小所导致的。

2.5 吸烟排放强度及风险人群额外暴露浓度

基于公式(1),本文计算了因室内吸烟导致的 PM_{2.5} 及 BC 的排放强度。结果显示,棋牌室营业期间 PM_{2.5} 的排放强度为(332±218) mg·L⁻¹·min⁻¹,范围为 41.2 ~ 745 mg·L⁻¹·min⁻¹。BC 的排放强度则为(3.2±1.8) mg·L⁻¹·min⁻¹,范围为 0.8 ~ 6.9 mg·L⁻¹·min⁻¹。此外,PM_{2.5} 和 BC 额外排放强度与吸烟数量显著正相关($P < 0.01$),平均每支烟对营业期间 PM_{2.5} 和 BC 排放强度的贡献分别为 6.2 mg·L⁻¹·min⁻¹ 和 0.06 mg·L⁻¹·min⁻¹。基于吸烟排放强度数据和调研得到相关风险人群暴露数据,本研究利用公式(2)和公式(3)估算了风险人群暴露于棋牌室 PM_{2.5} 和 BC

的额外暴露浓度。如图 5 所示,风险人群日均和年均 PM_{2.5} 额外暴露浓度分别为 74.5(中位数:50.4) mg·L⁻¹ 和 21.3(中位数:14.4) mg·L⁻¹,日均和年均 BC 额外暴露浓度则分别为 0.67(中位数:0.54) mg·L⁻¹ 和 0.19(中位数:0.15) mg·L⁻¹。以世界卫生组织(WHO)建议的 PM_{2.5} 标准为基准(日均:15 mg·L⁻¹,年均:5 mg·L⁻¹),风险人群日均及年均 PM_{2.5} 额外暴露浓度严重超标,分别高于 WHO 建议的标准 5.0 倍及 4.3 倍,表明风险人群会因吸烟暴露而导致的较高的健康风险。

2.6 小结与展望

吸烟可对人体健康造成严重危害,不吸烟人群对室内吸烟行为普遍有较强的排斥心理。然而由于立法的滞后性,中国大部分地区尚未出台室内控烟法令。目前,中国无烟立法保护人口仅有 2.24 亿人,健康中国控烟行动仅完成 15.9%,距离 2030 年的目标(80%)仍相去甚远。而在出台室内禁烟令的地区,由于监管缺失,室内吸烟在一些娱乐场所仍较为普遍,因吸烟引发的室内空气污染和人体健康威胁的事情屡见不鲜。然而,由于污染数据的缺失,极大地阻碍了导致对室内吸烟的污染水平及健康风险的评估,不利于室内控烟法令的推行。

本研究基于高分辨率 PM_{2.5} 和 BC 在线传感器研究了典型吸烟环境室内的污染特征及人群暴露风险,结果表明吸烟会显著降低室内空气质量,并对暴露在此情景中的风险人群造成严重的健康威胁。因此,有必要推动室内控烟法令的实施,并进一步加强

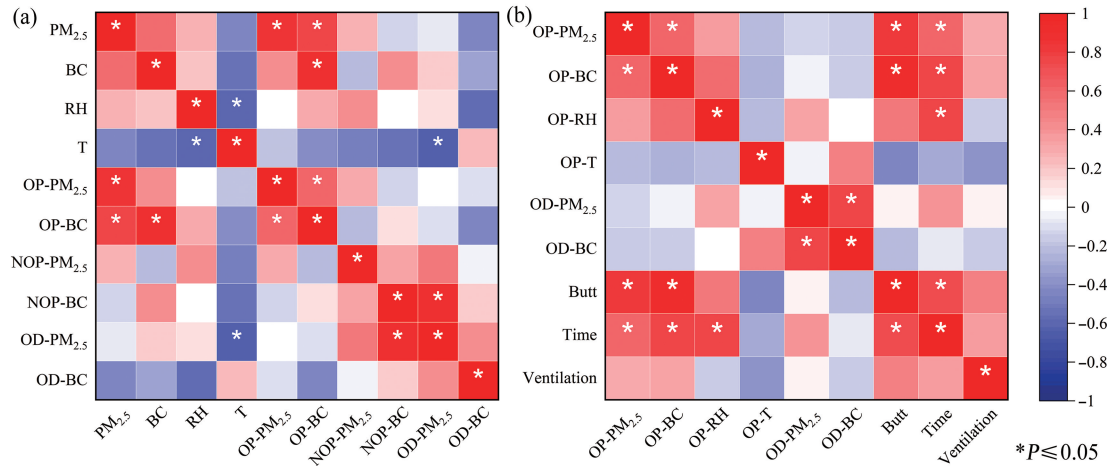


图4 室内污染物浓度与潜在影响因素的相关性分析

注:前缀 OP、NOP 和 OD 分别表示营业期间、非营业期间和室外污染物浓度;RH、T、Butt、Time 和 Ventilation 分别表示相对湿度、温度、烟头数量、营业时长和通风条件。

Fig. 4 Correlation analysis of indoor air pollutant concentrations and potential influencing factors

Note: The prefixes OP, NOP, and OD indicate the concentration of pollutants during operation period, non- operation period, and outdoor, respectively; RH, T, butt, time, and ventilation indicate relative humidity, temperature, number of cigarette butts, operation hours, and ventilation condition, respectively.

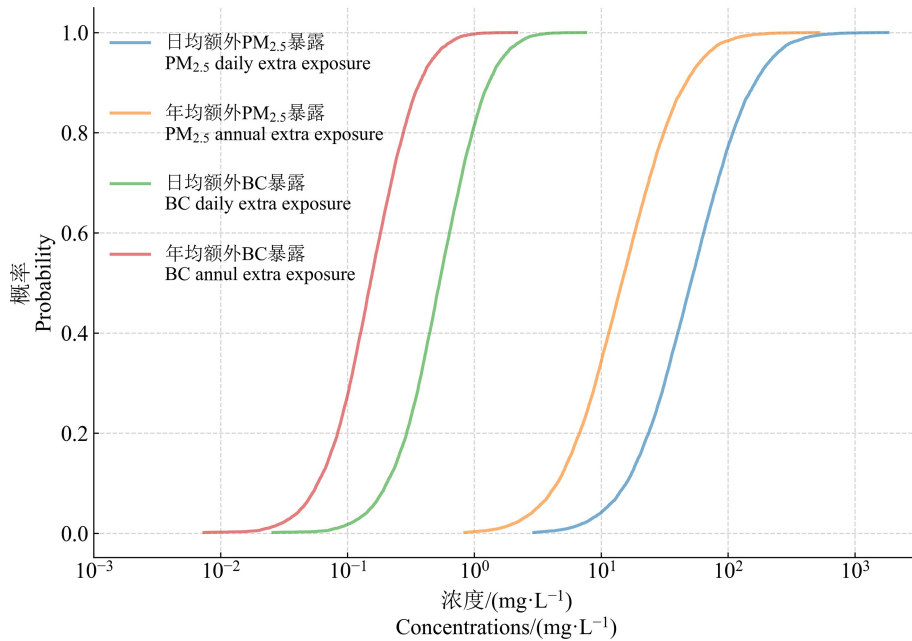


图5 风险人群 PM_{2.5} 及 BC 额外暴露的累积分布函数

Fig. 5 Cumulative distribution of PM_{2.5} and BC additional exposure for target populations

对室内吸烟的管控,如加大处罚力度。鉴于室内不同微环境间污染水平的差异性和区域及人群间暴露特征的复杂性,期待未来更多的研究从大范围、长时间、多因素的角度出发,探究吸烟导致的室内空气污染特征及其引发的健康风险,从而为控烟政策推行

提供数据支撑,为保护人群健康,助力生态文明建设提供科学依据。

通信作者简介:王金泽(1997—),男,博士研究生,主要研究方向为室内外空气污染与人体健康。

参考文献 (References):

- [1] IQAir. Interactive global map of 2022 PM_{2.5} concentrations by city [EB/OL]. (2022-03-22) [2023-11-10]. <https://www.iqair.com/us/world-air-quality-report>
- [2] Li Y G, Wang Y Q, Wang J Z, et al. Quantify individual variation of real-time PM_{2.5} exposure in urban Chinese homes based on a novel method [J]. *Indoor Air*, 2022, 32 (1): e12962
- [3] Du W, Li X Y, Chen Y C, et al. Household air pollution and personal exposure to air pollutants in rural China: A review [J]. *Environmental Pollution*, 2018, 237: 625-638
- [4] Huang Y, Wang J Z, Chen Y, et al. Household PM_{2.5} pollution in rural Chinese homes: Levels, dynamic characteristics and seasonal variations [J]. *The Science of the Total Environment*, 2022, 817: 153085
- [5] Qin L F, Zhai M K, Cheng H F. Indoor air pollution from the household combustion of coal: Tempo-spatial distribution of gaseous pollutants and semi-quantification of source contribution [J]. *The Science of the Total Environment*, 2023, 882: 163502
- [6] Gauvin S, Reungoat P, Cassadou S, et al. Contribution of indoor and outdoor environments to PM_{2.5} personal exposure of children: VESTA study [J]. *The Science of the Total Environment*, 2002, 297(1-3): 175-181
- [7] Slezakova K, Pires J C M, Martins F G, et al. Identification of tobacco smoke components in indoor breathable particles by SEM-EDS [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(4): 863-872
- [8] Savdie J, Canha N, Buitrago N, et al. Passive exposure to pollutants from a new generation of cigarettes in real life scenarios [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(10): 3455
- [9] Zhang N, Han B, Zhao R J, et al. Source profile and excess cancer risk evaluation of environmental tobacco smoking under real conditions, China [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2019, 10(6): 1994-1999
- [10] 梅敏花. 环境烟草烟雾中颗粒物上载带组分及净化研究[D]. 金华: 浙江师范大学, 2015: 16-20
Mei M H. Carrying components analysis and purification efficient of particulate matter in environmental tobacco smoke [D]. Jinhua: Zhejiang Normal University, 2015: 16-20 (in Chinese)
- [11] Harbo Poulsen A, Arthur Hvidtfeldt U, Sørensen M, et al. Components of particulate matter air-pollution and brain tumors [J]. *Environment International*, 2020, 144: 106046
- [12] Rabito F A, Yang Q, Zhang H, et al. The association between short-term residential black carbon concentration on blood pressure in a general population sample [J]. *Indoor Air*, 2020, 30(4): 767-775
- [13] Xu Y F, Chen X, Han Y Q, et al. Ceramide metabolism mediates the impaired glucose homeostasis following short-term black carbon exposure: A targeted lipidomic analysis [J]. *The Science of the Total Environment*, 2022, 829: 154657
- [14] Chen X, Han Y Q, Chen W, et al. Respiratory inflammation and short-term ambient air pollution exposures in adult Beijing residents with and without prediabetes: A panel study [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2020, 128(6): 67004
- [15] De Prins S, Dons E, van Poppel M, et al. Airway oxidative stress and inflammation markers in exhaled breath from children are linked with exposure to black carbon [J]. *Environment International*, 2014, 73: 440-446
- [16] Shang Y, Liu M Y, Wang T T, et al. Modifications of autophagy influenced the Alzheimer-like changes in SH-SY5Y cells promoted by ultrafine black carbon [J]. *Environmental Pollution (Barking, Essex: 1987)*, 2019, 246: 763-771
- [17] Xue T, Zheng Y X, Li X, et al. A component-specific exposure-mortality model for ambient PM_{2.5} in China: Findings from nationwide epidemiology based on outputs from a chemical transport model [J]. *Faraday Discussions*, 2021, 226: 551-568
- [18] Krist A H, Davidson K W, Mangione C M, et al. Interventions for tobacco smoking cessation in adults, including pregnant persons: US preventive services task force recommendation statement [J]. *Journal of the American Medical Association*, 2021, 325(3): 265-279
- [19] Tabatabaei Z, Hoseini M, Fararoei M, et al. Biomonitoring of BTEX in primary school children exposed to hookah smoke [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2022, 29(45): 69008-69021
- [20] Benowitz N L, Burbank A D. Cardiovascular toxicity of nicotine: Implications for electronic cigarette use [J]. *Trends in Cardiovascular Medicine*, 2016, 26(6): 515-523
- [21] Jacobs D R Jr, Woo J G, Sinaiko A R, et al. Childhood cardiovascular risk factors and adult cardiovascular events [J]. *The New England Journal of Medicine*, 2022, 386 (20): 1877-1888
- [22] Gotts J E, Jordt S E, McConnell R, et al. What are the respiratory effects of e-cigarettes? [J]. *BMJ*, 2019, 366: l5275
- [23] 王辰, 肖丹, 池慧. 《中国吸烟危害健康报告2020》概要 [J]. *中国循环杂志*, 2021, 36(10): 937-952
Wang C, Xiao D, Chi H. 2020 report on health hazards of smoking in China: An updated summary [J]. *Chinese Cir-*

- culation Journal, 2021, 36(10): 937-952 (in Chinese)
- [24] World Health Organization. Tobacco [EB/OL]. (2023-07-13) [2023-11-10]. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/tobacco>
- [25] World Health Organization. WHO report on the global tobacco epidemic 2021: Addressing new and emerging products [EB/OL]. (2021-07-27) [2023-11-10]. <https://www.who.int/china/publications-detail/9789240032095>
- [26] 王轩, 薛悟娟. 中国控烟法治发展报告(2021)[J]. 民主与法制, 2022(13): 48-53
- [27] He K L, Xu H M, Feng R, et al. Characteristics of indoor and personal exposure to particulate organic compounds emitted from domestic solid fuel combustion in rural areas of Northwest China [J]. Atmospheric Research, 2021, 248: 105181
- [28] Zhang B, Sun J, Jiang N, et al. Emission factors, characteristics, and gas-particle partitioning of polycyclic aromatic hydrocarbons in PM_{2.5} emitted from the typical solid fuel combustions in rural Guanzhong Plain, China [J]. Environmental Pollution, 2021, 286: 117573
- [29] Wang J Z, Zhang S S, Chen Y, et al. Field based measurement of multiple pollutant emissions from residential coal burning in rural Shanxi, Northern China [J]. Atmospheric Pollution Research, 2021, 12(2): 443-450
- [30] Wang D B, Li Q, Shen G F, et al. Significant ultrafine particle emissions from residential solid fuel combustion [J]. The Science of the Total Environment, 2020, 715: 136992
- [31] Ainiwaer S, Chen Y L, Shen G F, et al. Characterization of the vertical variation in indoor PM_{2.5} in an urban apartment in China [J]. Environmental Pollution, 2022, 308: 119652
- [32] Li X Y, Baumgartner J, Harper S, et al. Field measurements of indoor and community air quality in rural Beijing before, during, and after the COVID-19 lockdown [J]. Indoor Air, 2022, 32(8): e13095
- [33] Wang J Z, Du W, Lei Y L, et al. Quantifying the dynamic characteristics of indoor air pollution using real-time sensors: Current status and future implication [J]. Environment International, 2023, 175: 107934
- [34] Reis J, Lopes D, Graça D, et al. Using low-cost sensors to assess real-time comfort and air quality patterns in indoor households [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2023, 30(3): 7736-7751
- [35] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 室内空气质量标准: GB/T 18883—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022
- [36] 陈陵, 范义兵, 杨树, 等. 南昌市公共场所室内空气PM_{2.5}浓度调查[J]. 卫生研究, 2014, 43(1): 146-148
- Chen L, Fan Y B, Yang S, et al. Investigation on indoor air PM_{2.5} concentration in public places in Nanchang [J]. Journal of Hygiene Research, 2014, 43(1): 146-148 (in Chinese)
- [37] 李善鹏, 刘辉, 蔡斐. 青岛市2012年室内场所烟草烟雾PM_{2.5}检测分析[J]. 中国公共卫生, 2016, 32(5): 577-579
- Li S P, Liu H, Qi F. Indoor PM_{2.5} concentration in public places in Qingdao City, 2012 [J]. Chinese Journal of Public Health, 2016, 32(5): 577-579 (in Chinese)
- [38] Lu C X, Xu H R, Meng W J, et al. A novel model for regional indoor PM_{2.5} quantification with both external and internal contributions included [J]. Environment International, 2020, 145: 106124
- [39] Lin N, Du W, Wang J Z, et al. The effect of COVID-19 restrictions on particulate matter on different modes of transport in China [J]. Environmental Research, 2022, 207: 112205
- [40] Zhou S, Weitzman M, Vilcassim R, et al. Air quality in New York City hookah bars [J]. Tobacco Control, 2015, 24(e3): e193-e198
- [41] 张灿, 周志恩, 翟崇治, 等. 重庆市黑碳气溶胶特征及影响因素初探[J]. 环境科学学报, 2014, 34(4): 812-818
- Zhang C, Zhou Z E, Zhai C Z, et al. Characteristics and influencing factors of black carbon aerosol in Chongqing [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, 34(4): 812-818 (in Chinese)
- [42] 曹阳, 安欣欣, 刘保献, 等. 北京市黑碳气溶胶浓度特征及其主要影响因素[J]. 环境科学, 2021, 42(12): 5633-5643
- Cao Y, An X X, Liu B X, et al. Characteristics and main influencing factors of black carbon aerosol in Beijing [J]. Environmental Science, 2021, 42(12): 5633-5643 (in Chinese)
- [43] 汤莉莉, 祝愿, 牛生杰, 等. 南京北郊大气细粒子中黑碳气溶胶的观测研究[J]. 环境科学学报, 2011, 31(4): 709-716
- Tang L L, Zhu Y, Niu S J, et al. Observation of black carbon in fine particulate matter in the north suburb of Nanjing [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31(4): 709-716 (in Chinese)
- [44] Men Y T, Li J P, Liu X L, et al. Contributions of internal emissions to peaks and incremental indoor PM_{2.5} in rural coal use households [J]. Environmental Pollution, 2021, 288: 117753