



移动扫码阅读

杜伟凯,江崎正,肖雨霄,等.黑碳气溶胶的污染特征及健康风险评价——以石家庄市南郊为例[J].能源环境保护,2022,36(3):103-108.

DU Weikai,JIANG Qizheng,XIAO Yuxiao,et al. Pollution characteristics and health risk assessment of black carbon aerosol: Taking the southern suburb of Shijiazhuang city as an example[J]. Energy Environmental Protection, 2022,36(3):103-108.

# 黑碳气溶胶的污染特征及健康风险评价 ——以石家庄市南郊为例

杜伟凯,江崎正,肖雨霄,刘思宇,段二红,李双江,肖捷颖\*

(河北科技大学 环境科学与工程学院,河北 石家庄 050000)

**摘要:**为了解石家庄市南郊黑碳(black carbon, BC)气溶胶时间序列变化趋势、季节分布及人员健康风险,采用数据透视表及健康风险评价模型分析2018年8月~2021年4月黑碳气溶胶监测数据。结果表明:PM<sub>2.5</sub>中的BC平均浓度为3.03 μg/m<sup>3</sup>,春夏秋冬4季PM<sub>2.5</sub>中的BC平均浓度分别为2.12、1.76、3.24、4.45 μg/m<sup>3</sup>,春夏秋3季日变化呈双峰单谷型,冬季则呈双峰双谷型;成人与儿童的致癌风险(cancer risk, CR)均高于EPA(Environmental Protection Agency)给定的可接受风险水平(10<sup>-6</sup>);疫情发生前后的CR值和危害商HQ(hazard quotient)值大小均为极重体力活动>重体力活动>中体力活动>轻微活动;极重体力活动的HQ仍未达到阈值,人群在进行极重体力活动时BC产生的非致癌影响不显著。

**关键词:**黑碳气溶胶;日变化;致癌风险;非致癌风险;危害商

中图分类号:X701

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2022)03-0103-06

## Pollution characteristics and health risk assessment of black carbon aerosol: Taking the southern suburb of Shijiazhuang city as an example

DU Weikai,JIANG Qizheng,XIAO Yuxiao,LIU Siyu,DUAN Erhong,LI Shuangjiang,XIAO Jieying\*

(College of Environmental Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology,  
Shijiazhuang 050000, China)

**Abstract:** In order to understand the time series variation trend, seasonal distribution and personnel health risk of black carbon aerosol in the southern suburb of Shijiazhuang city, the monitoring data of black carbon aerosol from August 2018 to April 2021 were analyzed by using the PivotTable method and health risk assessment model. The results showed that the average concentration of BC in PM<sub>2.5</sub> was 3.03 μg/m<sup>3</sup>. The average concentration of BC in PM<sub>2.5</sub> in spring, summer, autumn and winter was 2.12, 1.76, 3.24 and 4.45 μg/m<sup>3</sup>, respectively. The diurnal variation in spring, summer and autumn was bimodal and single valley, while in winter it was bimodal and double valley. The cancer risks (CR) of adults and children were higher than the acceptable risk level (10<sup>-6</sup>) given by the EPA. The orders of CR value and hazard quotient (HQ) value before and after the outbreak of COVID-19 were both extremely heavy physical activity > heavy physical activity > medium physical activity > slight activity. However, the HQ of extremely heavy physical activity did not reach the threshold value, indicating that the non-carcinogenic effect of BC during extremely heavy physical activity was not significant.

**Key Words:** Black carbon aerosol; Diurnal variation; Cancer risk; Non-carcinogenic risk; Hazard quotient

收稿日期:2022-02-17;责任编辑:蒋雯婷

基金项目:河北省重点研发计划项目(21374001D)

第一作者简介:杜伟凯(1997-),男,河北平山人,在读硕士研究生,研究方向为大气污染控制理论与方法。E-mail:1459709947@qq.com

通讯作者简介:肖捷颖(1970-),女,河北涿州人,博士,教授,研究方向为环境遥感、环境规划与评价。E-mail:jyxiao2014@126.com

## 0 引言

黑碳(BC)气溶胶占大气气溶胶质量浓度的比例可高达5%~15%<sup>[1-3]</sup>,由化石燃料和生物质燃料等含碳物质的不完全燃烧产生,是典型的一次气溶胶<sup>[4]</sup>。BC吸收可见光,可导致大气能见度降低<sup>[5]</sup>,在BC大规模排放期易造成大气能见度的迅速下降<sup>[6]</sup>,大气中的BC可以通过吸收太阳辐射直接影响气候,或与大气中的水蒸气相互作用,通过影响云的形成间接影响区域气候<sup>[7]</sup>。BC表面具有疏松多孔结构,易吸附多种有毒有害物质,同时BC气溶胶由于多具有纳米尺度,易穿透人体的肺组织,对健康造成严重影响<sup>[8]</sup>。2010~2013年姚青<sup>[9]</sup>等人对天津城区BC进行来源分析与健康风险评价,发现天津城区各季节成人和儿童的致癌风险(CR)均高于EPA给定的可接受风险水平( $10^{-6}$ ),而非致癌风险水平较低。2010年,国际癌症研究机构(IARC)将黑碳列为2B类致癌物。Janssen等<sup>[10]</sup>通过BC浓度与死亡率之间的关系进行Meta分析,发现其不良健康反应强于PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>。国内开展BC的健康效应研究起步较晚<sup>[11-12]</sup>,对于从致癌风险、非致癌风险等方面系统研究BC的健康风险的研究有待深入。鉴于石家庄地区大气BC健康风险尚不清楚,故本研究采用2018年8月~2021年4月的连续在线观测数据,通过对研究期间长时间序列及四季BC浓度的对比,分析石家庄市南郊BC浓度差异及健康风险,同时按不同性别、年龄和劳动强度进行疫情发生前后的健康风险评价,为城市BC气溶胶污染治理和公共卫生管理提供技术支持。

## 1 研究方法

### 1.1 监测点介绍

监测点位于河北科技大学信息科学与工程学院楼顶(河北省石家庄市裕华区,114°31'10"E,37°58'27"N),四周空旷,距地面高度约20 m,距离东边裕翔街约500 m,西边建设大街约为1 km,西南方向有一发电厂距学校3 km,东北方向的南郊客运站距学校3 km。

### 1.2 监测时间及数据来源

监测时间为2018年8月~2021年4月。监测仪器为美国MetOne BC1054黑碳监测仪,该仪器为十波段监测,可自动测量并记录BC对370~950 nm的十波段光的吸收情况。根据测量结果

可以确定BC光吸收系数及质量浓度。采样管PM<sub>2.5</sub>切割头需进行周期性清理。本研究采用880 nm波长的测量结果作为BC质量浓度,将数据进行小时平均处理。

### 1.3 健康风险评价方法

健康风险评价是将环境污染与人体健康建立联系,定量描述人体暴露于污染物中受到危害的风险<sup>[15]</sup>。应用美国EPA(Environmental Protection Agency)人体健康风险评价方法<sup>[16]</sup>,采用针对特定场所吸入途径污染物的健康风险评价方法(EPA-540-R-070-002)<sup>[16]</sup>进行BC的人群健康风险评价。

BC的健康风险可分为致癌性和非致癌性。一般假设BC可连续70 a致癌,而可接受的风险水平为 $10^{-6}$ <sup>[12]</sup>。BC的致癌风险评价公式如下

$$CR = CDI \times CSF \quad (1)$$

式(1)中:CR为终生致癌风险,无量纲;CSF为癌症斜率因子,为了评估暴露于不同水平的环境BC的健康风险,采用柴油尾气颗粒物代替BC,1.1 (kg·d)/mg作为BC的CSF<sup>[12]</sup>。

BC的非致癌风险可采用下式获得:

$$HQ = CDI/RfC \quad (2)$$

式(2)中:HQ为危害商,无量纲;RfC为参考浓度,为了评估暴露于不同水平的环境BC的健康风险,5 μg/m<sup>3</sup>作为BC的RfC<sup>[13]</sup>,数据来源于1998年OEHHA(Office of Environmental Health Hazard Assessment)报告。

公式(1)和(2)中日平均摄入量(CDI)计算公式如下:

$$CDI = C \times IR \times EF \times ED / (BW \times AT) \quad (3)$$

式(3)中:CDI为日平均摄入量,mg/(kg·d);C为BC环境浓度,mg/m<sup>3</sup>;IR为吸入率,m<sup>3</sup>/d;EF为暴露频率,d/a;ED为暴露时间,a;BW为体重,kg;AT为平均时间,d。根据相关研究<sup>[14]</sup>,IR取7.6 m<sup>3</sup>/d(儿童)、16.6 m<sup>3</sup>/d(成人男)、13.5 m<sup>3</sup>/d(成人女);基于中国人口出行情况,EF取346 d/a;参考EPA数据<sup>[12]</sup>,ED设定为6 a(儿童),26 a(成人)。对于致癌风险评价,AT=365 d/a×70 a,而非致癌风险评价则为AT=365 d/a×ED<sup>[15]</sup>。BW按照儿童、成人男和成人女分别设定为15、67.3、57.5 kg<sup>[14]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 长时间序列变化趋势

图1为BC浓度的长时间序列,平均浓度值为3.03 μg/m<sup>3</sup>。2018年秋冬季BC浓度值偏高,因为

2018年雾霾天气导致污染事件的发生,BC浓度值高,2019年秋冬季BC浓度值较2018年偏低,表明大气环境治理的成效。2020年1月23日之后

BC浓度骤然下降,原因是疫情发生导致人类活动的减少,且之后春季气温回升、供暖需求减弱。到2021年4月6日BC浓度变化幅度相对较小。

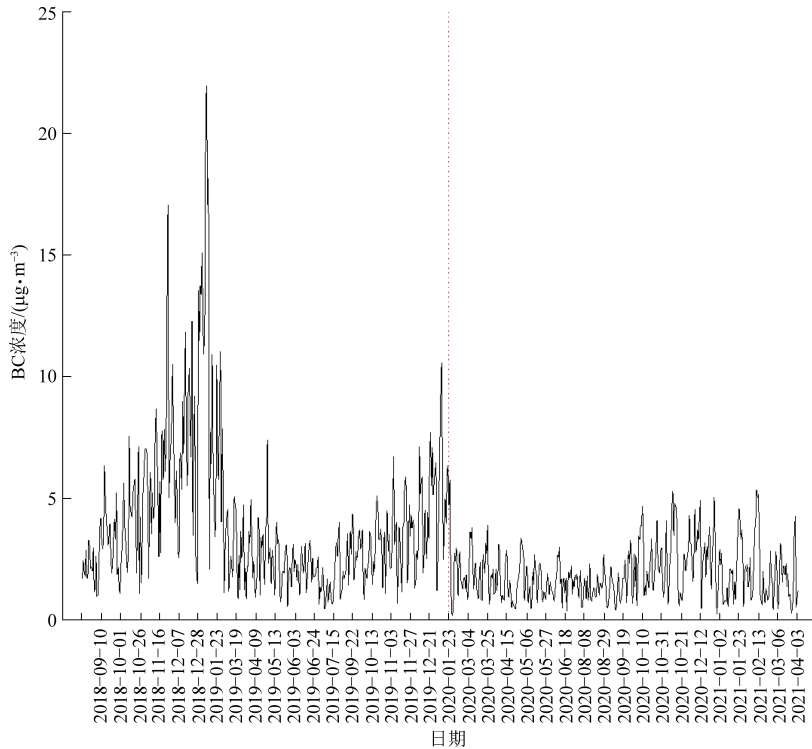


图1 BC浓度时间序列图

Fig.1 Time series diagram of BC concentration

## 2.2 四季BC浓度的日变化趋势

图2为四季BC浓度日变化趋势,图3为四季BC平均浓度变化(取1/2标准方差作误差线)。四季BC平均浓度值分别为 $2.12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (春)、 $1.76 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (夏)、 $3.24 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (秋)、 $4.45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (冬)。春、夏、秋季日变化呈双峰单谷型,其中,春季在6~7时、22~23时出现两次峰值,14~16时出现谷值;夏季在5~7时、20时左右出现两次峰值,14~16时出现谷值;秋季在6~8时、21~23时出现两次峰值,14~15时出现谷值;而冬季则呈双峰双谷型,在7~9时、21~22时出现峰值,4~6时、13~15时出现谷值。第一个峰值点按时间出现的顺序为夏季、春季、秋季、冬季,其中冬季出现延迟,原因是冬季昼短夜长,导致冬季早晨人类活动的开始时间也较其它季节晚,同时大气边界层发展晚于其它季节,污染物较晚扩散。第二个峰值点出现的原因是下午17:00之后出现交通晚高峰、烹饪活动密集、日落后大气结构趋于稳定,导致污染物累积,出现第二个峰值点,且夏季要早于其它三季2h。谷值持续的时间春、夏季要大于秋、冬季,原因是春、夏季太阳辐射增强,湍流运动加强,导致

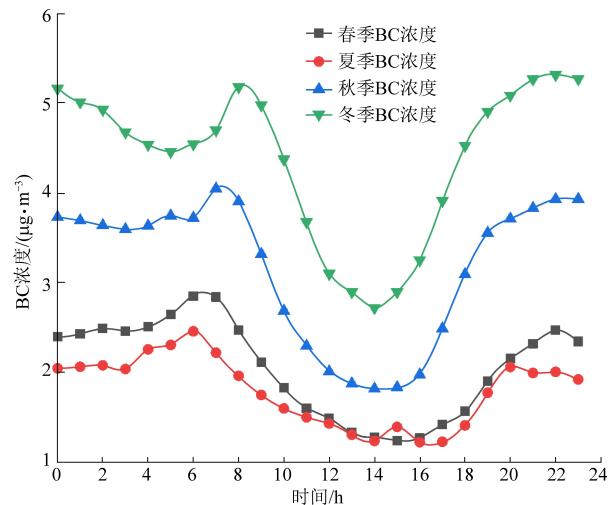


图2 四季BC浓度的日变化趋势特征

Fig.2 Characteristics of diurnal variation trend of BC concentration in four seasons

BC浓度较长时间处于较低的水平。冬季第一个谷值点出现的原因是晚间黑碳排放来源较少及风的净化作用。第二个谷值点出现的原因是随着太阳辐射增强,温度升高,空气对流增强。冬季BC第二个峰值点值大于第一个峰值点值,原因是冬季日照时间短,逆温现象时常发生,同时风速较低,

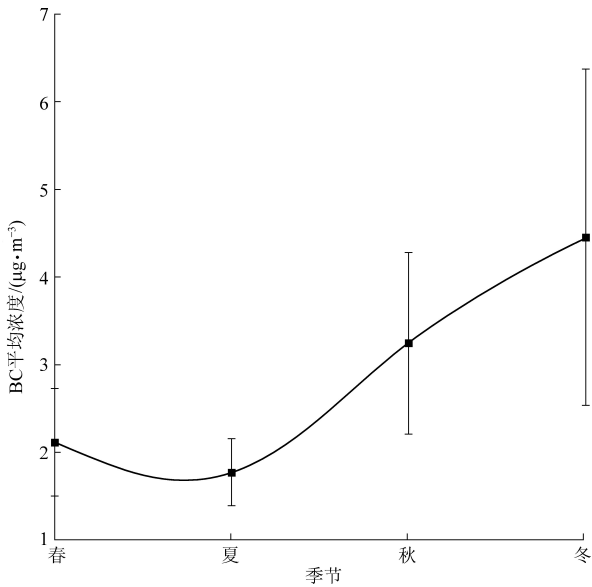


图 3 四季 BC 平均浓度变化

Fig.3 The variation of the average concentration of BC in four seasons

季人类取暖等因素导致晚上的高浓度大于白天。BC 浓度峰与谷的差值秋冬季要大于春夏季,主要与各季节间边界层高度、大气扩散能力等不同导致。BC 浓度大小一般呈冬季>秋季>春季>夏季的趋势,原因是冬季开始取暖,距离观测点 2 km 处的热力公司在冬季达到燃煤高峰期及不利气象条件影响,导致 BC 浓度偏高。春季常见大风天气,夏季多降雨,有助于 BC 的清除。

### 2.3 四季 BC 的健康风险评价

根据健康风险评价方法 (EPA-540-R-070-002)<sup>[16]</sup>,计算研究区域成人男、女性和儿童的致癌风险 (CR) 和非致癌风险 (HQ),成人与儿童的 CR 均高于 EPA 给定的可接受风险水平 (10<sup>-6</sup>),表明研究区域 BC 的致癌风险需要引起重视。CR 值大小顺序为成年男性>成年女性>儿童。一般而言 HQ<1 表明暴露人群不太可能产生不良的非癌症影响<sup>[11]</sup>,本研究中儿童的非致癌风险 HQ 值高于成人,但均未达到阈值。

导致白天 BC 不易扩散,逐渐累积到晚上,此外冬

表 1 按性别评价四季的 BC 健康风险

Table 1 Health risk assessment of BC in four seasons by gender

季节	致癌风险 [CR(×10 <sup>-4</sup> )]			非致癌风险 (HQ)		
	儿童	成年男性	成年女性	儿童	成年男性	成年女性
春	0.96	2.04	1.94	0.20	0.10	0.09
夏	0.80	1.68	1.60	0.17	0.08	0.08
秋	1.47	3.10	2.95	0.31	0.15	0.14
冬	2.02	4.25	4.05	0.43	0.21	0.20

### 2.4 不同劳动强度 BC 健康风险评价

以 2020 年 1 月 23 日为节点,疫情发生前 BC 浓度均值为 4.07 µg/m<sup>3</sup>,疫情发生后 BC 浓度均值为 1.94 µg/m<sup>3</sup>。按劳动强度划分为轻微活动、中体力活动、重体力活动、极重体力活动进行 BC 的致癌与非致癌健康风险评价,其中,河北省的体重推荐值 (BW) 为 65.1 kg;IR 为吸入率, m<sup>3</sup>/d,具体取值如表 2;EF 为暴露频率,取 346 d/a;ED 为暴露时间,取 26 a;对于致癌风险评价,AT=365 d/a

×70 a,而非致癌风险评价则为 AT=365 d/a×ED。

从表 2 发现,疫情发生后 BC 的致癌 (CR) 与非致癌风险 (HQ) 值均小于疫情发生前,但疫情发生后的 CR 值仍大于 EPA 给定的可接受风险水平 (10<sup>-6</sup>),表明石家庄市南郊区域 BC 的致癌风险不容忽视,其中疫情发生前后的 CR 值和 HQ 值大小均为极重体力活动>重体力活动>中体力活动>轻微活动,但极重体力活动的 HQ 仍未达到阈值 1,表明即使在极重体力活动条件下大气 BC 对人群产生非致癌影响也不大。

表 2 不同体力活动呼吸量的推荐值<sup>[17]</sup>及不同劳动强度 BC 健康风险评价

Table 2 Recommended value of respiratory volume of different physical activities<sup>[17]</sup> and health risk assessment of BC under different labor intensities

地区:河北	轻微活动	中体力活动	重体力活动	极重体力活动
IR 呼吸量/(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	12.10	32.11	48.24	80.35
疫情发生前 CR	2.93×10 <sup>-4</sup>	7.78×10 <sup>-4</sup>	11.68×10 <sup>-4</sup>	19.46×10 <sup>-4</sup>
疫情发生后 CR	1.4×10 <sup>-4</sup>	3.71×10 <sup>-4</sup>	5.57×10 <sup>-4</sup>	9.27×10 <sup>-4</sup>
疫情发生前 HQ	0.05	0.14	0.21	0.35
疫情发生后 HQ	0.03	0.07	0.10	0.17

## 2.5 与其它地区的对比分析

为明晰石家庄与国内其它城市或背景区域大气中 BC 浓度值的差异,表 3 列出了部分国内其它城市的 BC 质量浓度值。通过对比发现,石家庄区域的 BC 浓度排放值处于中等水平,很大程度与 2020 年初、2021 年初两次疫情有关,导致 BC 浓度值低于正常状态。四季浓度值与周变红在宝鸡高新区黑碳气溶胶特征<sup>[24]</sup>研究中得到的结论一致,BC 浓度平均值冬季>秋季>春季>夏季。日变化趋势与张林在南京北郊黑碳气溶胶<sup>[25]</sup>研究中结论相似,早上 7:00~9:00 达到峰值,在下午的 15:00~16:00 达到谷值,然后浓度在 20:00~21:00 逐渐上升。本文与姚青在天津城区进行健康风险评估<sup>[9]</sup>一文发现的各季节成人和儿童的致癌风险(CR)均高于 EPA 给定的可接受风险水平,非致癌风险水平较低的结论相似。

表 3 全国其它城市大气中 BC 质量浓度值

Table 3 BC mass concentrations in the atmosphere of other cities in China

地点	地点类型	观测时期	BC/( $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ )	参考文献
石家庄	城市	2018.8~2021.4	3.03	本研究
石家庄	城市	2018.9~2019.8	4.79±4.50	[18]
北京	城市	2015.9~2016.2	5.21	[19]
邯郸	城市	2013.3~2017.2	7.41	[20]
宝鸡	城市	2015.1~2015.12	2.90±1.70	[21]
广州	城市	2016.4~2016.5	2.62±1.39	[22]
深圳	城市	2014.1~2015.6	2.58±1.91	[23]

## 3 结 论

2018 年 8 月~2021 年 4 月 PM<sub>2.5</sub> 中的 BC 平均浓度值为 3.03  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。四季 PM<sub>2.5</sub> 中的 BC 平均浓度值为 2.12  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (春)、1.76  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (夏)、3.24  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (秋)、4.45  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (冬)。其中春、夏、秋季日变化呈双峰单谷型,而冬季则呈双峰双谷型,与源排放强度及大气扩散条件有关。

成人与儿童的 CR 均高于 EPA 给定的可接受风险水平( $10^{-6}$ ),表明石家庄市南郊区域 BC 的致癌风险需要引起重视。其中致癌风险 CR 值成年男性>成年女性>儿童。儿童的非致癌风险 HQ 值高于成人,但均未达到该阈值。

以 2020 年 1 月 23 日为节点,疫情发生后 BC 的致癌(CR)与非致癌风险(HQ)均小于疫情发生前,但疫情发生后的 CR 值仍大于 EPA 给定的可接受风险水平( $10^{-6}$ ),表明石家庄市南郊区域 BC

的致癌风险不容忽视,其中疫情发生前、后的 CR 值和 HQ 值大小均为极重体力活动>重体力活动>中体力活动>轻微活动,但极重体力活动的 HQ 仍未达到阈值 1,表明人群在进行极重体力活动时产生不良的非致癌影响也不大。

## 参考文献

- [1] SCHAUER J J, MADER B T, DEMINTER J T, et al. ACE-Asia intercomparison of a thermal-optical method for the determination of particle-phase organic and elemental carbon [J]. Environmental Science and Technology, 2003, 37 (5): 993-1001.
- [2] HUANG Z, KONG S F, WU F Q, et al. Intra-regional transport of black carbon between the south edge of the North China Plain and central China during winter haze episodes [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2019, 19 (7): 4499-4516.
- [3] ZHANG Q, SHEN Z X, ZHANG T, et al. Spatial distribution and sources of winter black carbon and brown carbon in six Chinese megacities [J]. The Science of the Total Environment, 2020, 762: 143075.
- [4] 章秋英, 牛生杰, 沈建国, 等. 半干旱区冬春季黑碳气溶胶吸收特性的观测研究 [J]. 中国沙漠, 2009, 29 (1): 183-188.
- [5] 姚青, 韩素芹, 毕晓辉. 天津 2009 年 3 月气溶胶化学组成及其消光特性研究 [J]. 中国环境科学, 2012, 32 (2): 214-220.
- [6] 姚青, 蔡子颖, 韩素芹, 等. 天津城区秋冬季黑碳气溶胶观测与分析 [J]. 环境化学, 2012, 31 (3): 324-329.
- [7] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate change 2013 the physical science basis contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [R]. UK: Cambridge University Press, 2013: 13-121.
- [8] LIN W W, ZHU T, XUE T, et al. Association between changes in exposure to air pollution and biomarkers of oxidative stress in children before and during the Beijing Olympics [J]. American Journal of Epidemiology, 2015, 181 (8): 575-583.
- [9] 姚青, 郝天依, 蔡子颖, 等. 天津黑碳气溶胶潜在来源分析与健康风险评估 [J]. 中国环境科学, 2020, 40 (12): 5221-5228.
- [10] JANSSEN N A, HOEK G, SIMIC-LAWSON M, et al. Black carbon as an additional indicator of the adverse effects of airborne particles compared with PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> [J]. Environmental Health Perspectives, 2011, 119 (12): 1691-1699.
- [11] 陈琛, 王娟, 聂亚光, 等. 大气中黑碳的健康效应及机制研究进展 [J]. 生态毒理学报, 2018, 13 (1): 31-39.
- [12] LIN W W, DAI J J, LIU R, et al. Integrated assessment of health risk and climate effects of black carbon in the Pearl River Delta region, China [J]. Environmental Research, 2019, 176: 108522.
- [13] Office of Environmental Health Hazard Assessment (OEHA):

- Diesel exhaust particulate [R/OL]. (1998) [2022-2-10]. <https://oehha.ca.gov/chemicals/diesel-exhaust-particulate>.
- [14] DING A J, HUANG X, NIE W, et al. Enhanced haze pollution by black carbon in megacities in China [J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43: 2873-2879.
- [15] HUY T B, TUYET H, TRAN T, et al. Assessing health risk due to exposure to arsenic in drinking water in Hanam Province, Vietnam [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2014, 11 (8): 7575-7591.
- [16] U. S. EPA, Human Health Risk Assessment [EB/OL]. (2021-6-15) [2022-2-10]. <https://www.epa.gov/risk/human-health-risk-assessment>.
- [17] 赵秀阁, 段小丽. 中国人群暴露参数手册 (成人卷) [M]. 北京: 中国环境出版社, 2014: 15.
- [18] 卢晶晶. 石家庄市黑碳气溶胶污染特征及来源分析 [D]. 石家庄: 河北科技大学, 2020: 12.
- [19] Y LIU, C YAN, M ZHENG. Source apportionment of black carbon during winter in Beijing [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 618: 531-541.
- [20] 齐孟姚, 王丽涛, 张城瑜, 等. 邯郸市黑碳气溶胶浓度变化及影响因素分析 [J]. *环境科学学报*, 2018, 38 (5): 1751-1758.
- [21] B. ZHOU, Q. WANG, Q. ZHOU, et al. Seasonal characteristics of black carbon aerosol and its potential source regions in Baoji, China [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2018, 18 (2): 397-406.
- [22] 程丁, 吴晟, 吴兑, 等. 广州市城区干湿季黑碳气溶胶污染特征及来源分析 [J]. *环境科学学报*, 2018, 38 (6): 2223-2232.
- [23] 程丁, 吴晟, 吴兑, 等. 深圳市城区和郊区黑碳气溶胶对比研究 [J]. *中国环境科学*, 2018, 38 (5): 1653-1662.
- [24] 周变红, 曹夏, 张容端, 等. 宝鸡高新区黑碳气溶胶浓度特征及其影响因素研究 [J]. *中国环境监测*, 2021, 37 (5): 125-132.
- [25] 张林. 2017-2019年南京北郊黑碳气溶胶污染特征及影响因素 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2020: 15-16.