

保定市2014—2018年采暖季PM_{2.5}中金属与类金属元素的健康风险评估

安玉琴¹, 王磊², 金红¹, 裴秀坤¹, 李小平², 李硕², 刘毅刚¹

1. 河北省疾病预防控制中心环境卫生监测与评价所, 河北 石家庄 050021

2. 保定市疾病预防控制中心环境健康监测与评价科, 河北 保定 071000

摘要:

[背景] 全国空气重点监测的72个大中城市中, 保定市大气污染较严重, 且采暖季PM_{2.5}污染状况较非采暖季严重。

[目的] 评估保定市采暖季PM_{2.5}中金属与类金属的健康风险, 为治理空气污染提供科学依据。

[方法] 2014—2018年每年11月15日至次年3月15日(采暖季)的每月10—16日, 在保定市乐凯小学教学楼4楼楼顶采用石英纤维滤膜采集PM_{2.5}样品, 共采样145 d。采用石英纤维滤膜采样前后重量差和采样体积计算得到PM_{2.5}质量浓度, 采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)检测12种金属与类金属元素浓度, 包括锑(Sb)、铝(Al)、砷(As)、铍(Be)、镉(Cd)、铬(Cr)、汞(Hg)、铅(Pb)、锰(Mn)、镍(Ni)、硒(Se)、钽(Ti)。应用经呼吸途径的健康风险评价模型评价金属Pb、Hg、Mn的非致癌效应, 类金属As与金属Cd、Cr、Ni的致癌效应。

[结果] 2014—2018年的5个采暖季中, PM_{2.5}日均质量浓度依次为 2.00×10^2 、 1.79×10^2 、 2.05×10^2 、 1.14×10^2 、 $1.19 \times 10^2 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, Pb的平均质量浓度依次为 3.41×10^{-1} 、 1.44×10^{-1} 、 1.31×10^{-1} 、 5.22×10^{-2} 、 $8.49 \times 10^{-2} \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 与GB 3095—2012《环境空气质量标准》比较, PM_{2.5}日均浓度均超标, Pb平均浓度均达标; 5个采暖季的金属与类金属总质量浓度依次为 9.21×10^{-1} 、 8.15×10^{-1} 、 5.61×10^{-1} 、 3.58×10^{-1} 、 $4.49 \times 10^{-1} \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 分别占PM_{2.5}质量浓度的0.46%、0.46%、0.27%、0.31%、0.38%。2017年、2018年采暖季PM_{2.5}质量浓度和金属与类金属质量浓度较其余3个采暖季低。金属Pb、Mn、Hg的5个采暖季非致癌风险(HQ)范围依次为 $4.00 \times 10^{-4} \sim 2.08 \times 10^{-1}$ 、 $4.00 \times 10^{-4} \sim 8.77 \times 10^{-2}$ 、 $4.00 \times 10^{-4} \sim 7.98 \times 10^{-2}$ 、 $1.00 \times 10^{-4} \sim 3.18 \times 10^{-2}$ 、 $1.00 \times 10^{-4} \sim 5.77 \times 10^{-2}$, HQ均小于1; 每个采暖季Pb产生的HQ最大, Mn次之, Hg最小。类金属As与金属Cd、Cr、Ni的5个采暖季的致癌风险范围依次为 $2.20 \times 10^{-7} \sim 1.68 \times 10^{-4}$ 、 $1.30 \times 10^{-7} \sim 3.20 \times 10^{-5}$ 、 $8.00 \times 10^{-8} \sim 3.51 \times 10^{-5}$ 、 $5.00 \times 10^{-8} \sim 2.82 \times 10^{-5}$ 、 $3.00 \times 10^{-8} \sim 1.70 \times 10^{-5}$; 2014年、2015年采暖季产生的致癌风险顺序为Cr>As>Cd>Ni, 其余年份As>Cr>Cd>Ni, As、Cr顺序略有差异, Ni最小。金属与类金属对成年男性产生的健康风险最大, 成年女性次之, 青少年最小。

[结论] 保定市采暖季PM_{2.5}中金属Pb、Mn、Hg产生的非致癌效应和Ni产生的致癌效应在可接受的风险水平内, 类金属As以及金属Cr、Cd存在潜在的致癌效应, 但非致癌效应和致癌风险在年份上有下降趋势。

关键词: 采暖季; PM_{2.5}; 金属; 类金属; 健康风险评估

Health risk assessment of metals and metalloids in PM_{2.5} during heating season from 2014 to 2018 in Baoding AN Yu-qin¹, WANG Lei², JIN Hong¹, PEI Xiu-kun¹, LI Xiao-ping², LI Shuo², LIU Yi-gang¹ (1.Environmental Health Monitoring and Evaluation Institute, Hebei Provincial Center for Disease Control and Prevention, Shijiazhuang, Hebei 050021, China; 2.Environmental Health Monitoring and Evaluation Institute, Baoding Center for Disease Prevention and Control, Baoding, Hebei 071000, China)

Abstract:

[Background] Among the 72 large and medium-sized cities monitored in China, the air pollution of Baoding is still high, and the pollution of PM_{2.5} in heating season is more serious than that in non-heating season.

[Objective] This assessment focuses on the health risks of metals and metalloids in PM_{2.5} during heating season in Baoding, aiming to provide scientific evidence for air pollution control.

DOI 10.13213/j.cnki.jeom.2020.20140

基金项目

2020年河北省医学研究重点课题计划(20200692)

作者简介

安玉琴(1983—), 女, 硕士, 副主任医师; E-mail: anyuqin1983@126.com

通信作者

刘毅刚, E-mail: liuyigang797@163.com

利益冲突 无申报

收稿日期 2020-03-27

录用日期 2020-10-09

文章编号 2095-9982(2020)11-1083-06

中图分类号 R12

文献标志码 A

►引用

安玉琴, 王磊, 金红, 等. 保定市2014—2018年采暖季PM_{2.5}中金属与类金属元素的健康风险评估[J]. 环境与职业医学, 2020, 37(11): 1083-1088.

►本文链接

www.jeom.org/article/cn/10.13213/j.cnki.jeom.2020.20140

Funding

This study was funded.

Correspondence to

LIU Yi-gang, E-mail: liuyigang797@163.com

Competing interests None declared

Received 2020-03-27

Accepted 2020-10-09

►To cite

AN Yu-qin, WANG Lei, JIN Hong, et al. Health risk assessment of metals and metalloids in PM_{2.5} during heating season from 2014 to 2018 in Baoding[J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2020, 37(11): 1083-1088.

►Link to this article

www.jeom.org/article/en/10.13213/j.cnki.jeom.2020.20140

[Methods] During the heating season (15 November to 15 next March) from 2014 to 2018, PM_{2.5} samples were collected on the roof of a four-storey school building of Lekai Primary School in Baoding City from 10 to 16 every month, totaling 145 d. The concentration of PM_{2.5} was calculated by weight difference before and after sampling and sampling volume of quartz fiber filter membrane. The concentrations of 12 metals and metalloids were determined by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS), including antimony (Sb), aluminum (Al), arsenic (As), beryllium (Be), cadmium (Cd), chromium (Cr), mercury (Hg), lead (Pb), manganese (Mn), nickel (Ni), selenium (Se), and thallium (Tl). The non-carcinogenic risks of metals (Pb, Hg, and Mn) and the carcinogenic risks of metals and metalloids (As, Cd, Cr, and Ni) were evaluated by the health risk assessment model for inhalation exposure.

[Results] The daily average concentrations of PM_{2.5} in the five heating periods from 2014 through 2018 were 2.00×10^2 , 1.79×10^2 , 2.05×10^2 , 1.14×10^2 , and $1.19 \times 10^2 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ respectively, all above the national secondary standard limit of *Ambient Air Quality Standards* (GB 3095—2012). The daily average concentrations of Pb were 3.41×10^{-1} , 1.44×10^{-1} , 1.31×10^{-1} , 5.22×10^{-2} , and $8.49 \times 10^{-2} \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, respectively, all within the national secondary standard limit (GB 3095—2012). The total concentrations of metals and metalloids were 9.21×10^{-1} , 8.15×10^{-1} , 5.61×10^{-1} , 3.58×10^{-1} , and $4.49 \times 10^{-1} \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, accounting for 0.46%, 0.46%, 0.27%, 0.31%, and 0.38% of the concentration of PM_{2.5} respectively. The concentrations of PM_{2.5} and metals and metalloids in the heating periods of 2017 and 2018 were lower than those in the other three heating periods. The hazard quotients (HQs) of Pb, Mn, and Hg in the five heating periods were 4.00×10^{-4} – 2.08×10^{-1} , 4.00×10^{-4} – 8.77×10^{-2} , 4.00×10^{-4} – 7.98×10^{-2} , 1.00×10^{-4} – 3.18×10^{-2} , and 1.00×10^{-4} – 5.77×10^{-2} , respectively, all below 1. Pb generated the highest HQ, followed by Mn and then Hg. The carcinogenic risks (R) of As, Cd, Cr, and Ni in the five heating periods were 2.20×10^{-7} – 1.68×10^{-4} , 1.30×10^{-7} – 3.20×10^{-5} , 8.00×10^{-8} – 3.51×10^{-5} , 5.00×10^{-8} – 2.82×10^{-5} , and 3.00×10^{-8} – 1.70×10^{-5} , respectively. From 2014 to 2015, the order of carcinogenic risk was Cr>As>Cd>Ni, and in the other heating periods, it was As>Cr>Cd>Ni; the ranks of As and Cr was slightly different, and Ni was always at the bottom. The health risks of metals and metalloids to adult men was the highest, followed by adult women and then adolescents.

[Conclusion] In Baoding during heating periods, the non-carcinogenic risks of Pb, Mn, and Hg and the carcinogenic risk of Ni are acceptable; metalloid As and metals Cr and Cd may pose potential carcinogenic risks; both carcinogenic and non-carcinogenic risks of the selected elements show a downward trend over time.

Keywords: heating period; fine particulate matter; metal; metalloid; health risk assessment

环境中金属与类金属具有不可降解性,其组分能够不断地迁移、转化和富集,大气中的金属与类金属大部分能够在气溶胶上富集^[1],尤其在细颗粒物(fine particulate matter, PM_{2.5})中富集能力更强,经呼吸道进入人体,导致人体出现功能性障碍和不可逆性损伤,且部分金属与类金属具有致癌或者潜在致癌作用。

健康风险评估近年来被广泛用于评价由空气、水、土壤等环境介质污染造成的人体健康风险,可以定量评估人体暴露于环境污染物中对健康产生的非致癌风险和致癌风险。

保定市位于河北省中部,地处京、津、石三角腹地,在全国重点监测的72个大中城市中,大气污染排名居高不下,且采暖季PM_{2.5}污染状况较非采暖季严重^[2]。保定市有关大气污染的研究多集中于污染源、污染特征及防治建议等方面^[3-5],鲜见采暖季PM_{2.5}中金属与类金属的健康风险研究。

从2013年开始,保定市开展空气污染(雾霾)对人群健康影响监测,位于竞秀区的乐凯小学作为PM_{2.5}成分监测点,监测PM_{2.5}中金属与类金属等成分浓度。PM_{2.5}中金属与类金属可通过呼吸道、消化道、皮肤接触等途径进入人体,其中经呼吸道为最常见途径。

因此,本研究运用美国环境保护署(U.S. Environmental Protection Agency, US EPA)推荐的呼

吸途径健康风险模型评估保定市2014—2018年5个采暖季PM_{2.5}中金属与类金属的健康风险,以揭示采暖季空气污染对人群的健康影响,为采取有效干预措施,保护公众健康提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 采样时间和地点

保定市乐凯小学位于国控环境空气质量监测站胶片厂监测范围内,与主要交通干道相距大约20 m,采样点设在教学楼4层楼顶,周围避开了污染源、障碍物、交通道路等,仪器放置在采样亭内,进气口距离楼顶1.5 m,采用TH-150型PM_{2.5}中流量采样器和石英纤维滤膜采集PM_{2.5}中金属与类金属,包括锑(Sb)、铝(Al)、砷(As)、铍(Be)、镉(Cd)、铬(Cr)、汞(Hg)、铅(Pb)、锰(Mn)、镍(Ni)、硒(Se)、铊(Tl),采样流速 $\geq 100 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

采样时间为2014—2018年每年的11月15日到次年3月15日,共5个采暖季,于各采暖季的每月10—16日采样,每日采样时间不少于20 h,共计145 d。

1.2 方法

1.2.1 样品测定 (1) PM_{2.5}质量浓度(后简称浓度):根据采样前后滤膜的重量差和采样体积,计算出PM_{2.5}浓度。称量石英纤维滤膜上PM_{2.5}质量前使用静电去

除器去除滤膜静电,同一滤膜两次称量质量之差均不大于0.04 mg,满足恒重要求;以两次称量结果的平均值作为滤膜称重值,将称量后的滤膜放入滤膜保存盒中备用。(2) 金属与类金属浓度:将石英纤维滤膜上PM_{2.5}中的金属和类金属成分经超声浸提预处理后,经雾化由载气送入电感耦合等离子体质谱仪(inductively coupled plasma mass spectrometer, ICP-MS) 炬焰中,经蒸发、解离、原子化、电离等过程,转化为带正电荷的正离子,经离子采集系统进入质谱仪,质谱仪根据质荷比进行分离。对于一定的质荷比,质谱积分面积与进入质谱仪中的离子数成正比。即样品中金属和类金属元素的浓度与质谱的积分面积成正比,通过测量质谱的峰面积来测定样品中12种金属与类金属元素的浓度。Sb、Al、As、Be、Cd、Cr、Hg、Pb、Mn、Ni、Se、Ti的检出限依次为0.02、1.80、0.10、0.02、0.005、0.42、0.02、0.05、0.43、0.40、0.05、0.02 ng·m⁻³。

1.2.2 健康风险评估 PM_{2.5}中的金属与类金属主要经呼吸系统进入人体,对人体造成了一定的健康危害。金属Pb、Hg、Mn具有非致癌效应,类金属As与金属Cd、Cr、Ni具有致癌效应^[6]。应用US EPA推荐的呼吸途径健康风险评估模型^[7],评价PM_{2.5}中具有非致癌效应以及致癌效应的金属与类金属对6~17岁儿童青少年、成年男性、成年女性产生的非致癌风险和致癌风险。

$$ADD = (C \times IR \times EF \times ED) / BW \times AT \quad (1)$$

$$LADD = (C \times IR \times EF \times ED) / BW \times AT \quad (2)$$

式(1)、(2)中:ADD—非致癌物质的日均暴露剂量(average daily dose), mg·(kg·d)⁻¹。LADD—致癌物质的终生日均暴露剂量(life average daily dose), mg·(kg·d)⁻¹。C—空气中污染物的浓度(concentration), mg·m⁻³; IR—呼吸量(inhalation rates), m³·d⁻¹; EF—暴露频率(exposure frequency), d·年⁻¹; ED—暴露持续时间(exposure duration), 年; BW—体重(body weight), kg; AT—平均暴露时间(average contact time), d^[8]。

对于非致癌效应,以非致癌物质的日均暴露剂量ADD与参考浓度(reference concentration, RfC)的比值来表示:HQ=ADD/RfC (3)

式中:HQ—危害系数(hazard quotient),表示非致癌风险,无量纲;HQ<1,非致癌风险较低,预期不会造成明显损害,即暴露低于会产生不良反应的阈值;HQ≥1,表示暴露剂量超过阈值,可能产生非致

癌风险,数值越大,风险越大。RfC—金属元素会引起非致癌风险的最大暴露参考浓度, mg·(kg·d)⁻¹。

对于致癌效应,以致癌物质的终生日均暴露剂量LADD与致癌斜率因子(carcinogenic slope factor, SF)的乘积来表示:R=LADD×SF (4)

式中:R—致癌风险(risk),表示人群癌症发生的概率,通常以一定数量人口出现癌症患者的个体数表示,无量纲;R<1×10⁻⁶,表示人群可接受的风险水平;R位于1×10⁻⁶~1×10⁻⁴之间,表示存在潜在的致癌风险;R>1×10⁻⁴,表示可能对人群产生致癌风险,数值越大,风险越大。SF—污染物的致癌斜率因子, (mg·kg⁻¹·d⁻¹)⁻¹。

金属Pb、Hg、Mn、Cd、Cr、Ni以及类金属As的呼吸途径健康风险评估模型参数见表1~2。

表1 暴露评价模型参数^[8-9]
Table 1 Exposure assessment model parameters^[8-9]

人群	呼吸量 IR/ (m ³ ·d ⁻¹)	暴露频率 EF/ (d·a ⁻¹)	暴露持 续时间 ED/a	体重 BW/kg	非致癌平均 暴露时间 AT/d	致癌平均 暴露时间 AT/d
6~8岁	10.2	365	6	27.5	365×10	365×70
9~11岁	13.5	365	6	38.3	365×18	365×70
12~14岁	13.8	365	14	51.3	365×18	365×70
15~17岁	14.4	365	14	57.0	365×18	365×70
成年男性	18.7	365	30	71.4	365×30	365×70
成年女性	15.1	365	30	63.0	365×30	365×70

表2 金属与类金属RfC与SF值^[6]
Table 2 RfC and SF values of metals and metalloids^[6]

金属与类金属	参考浓度 RfC/ [mg·(kg·d) ⁻¹]	致癌斜率因子 SF/ [(mg·kg ⁻¹ ·d ⁻¹) ⁻¹]
As	—	20.07
Cd	—	8.40
Cr	—	56.00
Ni	—	1.19
Pb	4.30×10 ⁻⁴	—
Hg	1.00×10 ⁻⁴	—
Mn	3.00×10 ⁻⁴	—

1.3 校正系数

保定市共有6个国控环境空气质量监测站,乐凯小学所在的胶片厂监测站为其中的一个,所有监测站的每日PM_{2.5}日均浓度算术平均值代表当日全市PM_{2.5}浓度平均水平。经统计学检验,2014—2018年每年11月至次年3月(采暖季)的胶片厂监测站PM_{2.5}日均浓度不能代表全市PM_{2.5}浓度平均水平。因此,将2014—2018年每年11月至次年3月(采暖季)的全市PM_{2.5}平均浓度与胶片厂监测站PM_{2.5}日均浓度比值的

算术平均数 1.07, 作为校正系数, 将乐凯小学 2014—2018 年每年 11 月至次年 3 月 5 个采暖季的 PM_{2.5} 浓度和金属与类金属浓度均乘以 1.07, 以代表全市平均水平。

1.4 统计学分析

EXCEL 2007 建立数据库, SPSS 21.0 软件进行统计分析。PM_{2.5} 浓度和金属与类金属浓度经正态性检验, 不服从正态分布, 采用 Kruskal-Wallis *H* 检验进行统计分析, 两两比较用 Bonferroni 法; 检验水准 $\alpha=0.05$ 。

2 结果

2.1 PM_{2.5} 及金属与类金属浓度

与 GB 3095—2012《环境空气质量标准》PM_{2.5} 日均浓度二级标准 (75 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 比较^[10], 2014—2018 年保定市采暖季 PM_{2.5} 平均浓度均超标, 2016 年采暖季超标倍数最大 (1.67)。5 个采暖季金属与类金属总浓度分别占 PM_{2.5} 浓度的 0.46%、0.46%、0.27%、0.31%、0.38%。Pb 平均浓度均低于 GB 3095—2012《环境空气

质量标准》Pb 季平均浓度 (1.00 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 和年平均浓度 (0.50 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)。

经 Kruskal-Wallis *H* 检验, 5 个采暖季 PM_{2.5} 浓度和金属与类金属浓度差异有统计学意义 ($P<0.05$), 经 Bonferroni 法两两比较, 除 2014 年与 2015 年、2017 年与 2018 年采暖季 PM_{2.5} 浓度和金属与类金属浓度差异没有统计学意义外 ($P>0.05$), 其余年份采暖季两两之间的浓度差异均有统计学意义 ($P<0.05$)。见表 3。

2.2 金属与类金属的健康风险评估

2.2.1 金属非致癌风险 保定市 5 个采暖季 Pb、Mn、Hg 产生的非致癌风险 HQ 小于 1, 表明人群暴露均低于产生不良反应的阈值, 预期不会造成明显损害。2014—2016 年采暖季 Hg 产生的 HQ 较 2017 年、2018 年产生的 HQ 高。5 个采暖季 Pb 产生的 HQ 最大, Mn 次之, Hg 最小。Pb、Mn、Hg 对成年男性产生的非致癌风险 HQ 最大, 成年女性次之, 青少年最小。见表 4。

表 3 2014—2018 年保定市采暖季 PM_{2.5} 及其中金属与类金属浓度 (M)
Table 3 Metal and metalloid concentrations in PM_{2.5} during heating seasons of 2014—2018 in Baoding (M)
单位 (Unit): $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

成分	年份					χ^2	<i>P</i>
	2014	2015	2016	2017	2018		
PM _{2.5}	2.00×10 ²	1.79×10 ²	2.05×10 ²	1.14×10 ²	1.19×10 ²	20.56	<0.001
Sb	1.79×10 ⁻²	8.31×10 ⁻³	9.36×10 ⁻³	8.54×10 ⁻³	5.90×10 ⁻³	47.41	<0.001
Al	4.18×10 ⁻¹	5.46×10 ⁻¹	3.36×10 ⁻¹	2.40×10 ⁻¹	2.88×10 ⁻¹	31.62	<0.001
As	3.74×10 ⁻²	1.42×10 ⁻²	1.56×10 ⁻²	1.25×10 ⁻²	7.54×10 ⁻³	46.44	<0.001
Be	1.30×10 ⁻⁴	1.30×10 ⁻⁴	5.00×10 ⁻⁵	3.00×10 ⁻⁵	2.00×10 ⁻⁵	85.10	<0.001
Cd	7.06×10 ⁻³	3.72×10 ⁻³	4.48×10 ⁻³	2.30×10 ⁻³	2.21×10 ⁻³	58.61	<0.001
Cr	1.52×10 ⁻²	1.03×10 ⁻²	4.21×10 ⁻³	2.17×10 ⁻³	2.32×10 ⁻³	126.83	<0.001
Hg	3.60×10 ⁻⁴	3.70×10 ⁻⁴	3.50×10 ⁻⁴	8.00×10 ⁻⁵	8.00×10 ⁻⁵	93.09	<0.001
Pb	3.41×10 ⁻¹	1.44×10 ⁻¹	1.31×10 ⁻¹	5.22×10 ⁻²	8.49×10 ⁻²	93.72	<0.001
Mn	6.12×10 ⁻²	7.53×10 ⁻²	4.80×10 ⁻²	3.34×10 ⁻²	5.12×10 ⁻²	26.42	<0.001
Ni	6.09×10 ⁻³	3.63×10 ⁻³	2.13×10 ⁻³	1.49×10 ⁻³	1.10×10 ⁻³	103.49	<0.001
Se	1.47×10 ⁻²	7.67×10 ⁻³	8.65×10 ⁻³	4.42×10 ⁻³	4.51×10 ⁻³	68.39	<0.001
Tl	2.85×10 ⁻³	1.38×10 ⁻³	1.41×10 ⁻³	4.10×10 ⁻⁴	7.70×10 ⁻⁴	106.7	<0.001
金属与类金属合计	9.21×10 ⁻¹	8.15×10 ⁻¹	5.61×10 ⁻¹	3.58×10 ⁻¹	4.49×10 ⁻¹	58.39	<0.001
占比/%	0.46	0.46	0.27	0.31	0.38	—	—

表 4 2014—2018 年保定市采暖季 PM_{2.5} 中金属非致癌风险 (HQ)
Table 4 Non-carcinogenic risks (HQ) of metals and metalloids in PM_{2.5} during heating seasons of 2014—2018 in Baoding
单位 (Unit): $\times 10^{-2}$

人群	2014 年			2015 年			2016 年			2017 年			2018 年		
	Pb	Hg	Mn	Pb	Hg	Mn	Pb	Hg	Mn	Pb	Hg	Mn	Pb	Hg	Mn
6~8 岁	17.71	0.08	4.54	7.45	0.08	5.59	6.78	0.08	3.56	2.70	0.02	2.48	4.39	0.02	3.80
9~11 岁	9.32	0.04	2.41	3.93	0.04	2.95	3.58	0.04	1.88	1.43	0.01	1.31	2.32	0.01	2.01
12~14 岁	16.06	0.08	4.27	7.01	0.08	5.25	6.37	0.07	3.35	2.54	0.02	2.33	4.13	0.02	3.57
15~17 岁	15.61	0.07	4.01	6.58	0.07	4.93	5.99	0.07	3.14	2.39	0.02	2.19	3.88	0.02	3.35
成年女性	19.11	0.09	4.89	8.03	0.09	6.02	7.30	0.08	3.83	2.91	0.02	2.67	4.73	0.02	4.09
成年男性	20.80	0.09	5.34	8.77	0.10	6.57	7.98	0.09	4.19	3.18	0.02	2.92	5.17	0.02	4.47

2.2.2 金属与类金属致癌风险 保定市5个采暖季Ni对所有人群产生的R均小于 1×10^{-6} , 为人群可接受的风险水平。As、Cr对所有人群的致癌风险R均在 $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-4}$ 之间, 存在潜在的致癌风险。Cd对成年男、女产生的致癌风险R在 $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-4}$ 之间, 存在潜在的致癌风险; 而对6~17岁儿童青少年的致癌风险在不同年份不同年龄人群有所区别, 为存在潜在的

致癌风险和可接受的风险水平。

As、Cr、Cd、Ni对成年男性产生的致癌风险R最大, 成年女性次之, 青少年最小。2014年与2015年金属R由高到低为 $Cr > As > Cd > Ni$, 其余采暖季 $As > Cr > Cd > Ni$, As、Cr的R顺序略有差异, Cd、Ni的顺序一致, Ni的R最小。见表5。

表5 2014—2018年保定市采暖季PM_{2.5}中金属与类金属致癌风险(R)
Table 5 Carcinogenic risks (R) of metals and metalloids in PM_{2.5} during heating seasons of 2014—2018 in Baoding
单位(Unit): $\times 10^{-6}$

人群	2014年				2015年				2016年				2017年				2018年			
	As	Cd	Cr	Ni	As	Cd	Cr	Ni	As	Cd	Cr	Ni	As	Cd	Cr	Ni	As	Cd	Cr	Ni
6~8岁	23.91	1.89	27.02	0.23	9.06	0.99	23.16	0.14	9.95	1.23	7.51	0.08	7.98	0.61	3.86	0.06	4.81	0.59	4.13	0.04
9~11岁	22.74	1.79	25.69	0.22	8.61	0.94	22.02	0.13	9.46	1.14	7.12	0.08	7.58	0.58	3.67	0.05	4.57	0.56	3.93	0.03
12~14岁	40.43	3.19	45.78	0.39	15.33	1.68	39.24	0.23	16.83	2.02	12.73	0.14	13.50	1.04	6.54	0.09	8.14	0.99	6.99	0.07
15~17岁	37.90	3.01	42.98	0.37	14.43	1.58	36.84	0.22	15.82	1.91	11.91	0.13	12.73	0.98	6.14	0.09	7.65	0.94	6.56	0.06
成年女性	77.11	6.09	87.78	0.74	29.32	3.21	75.24	0.44	32.23	3.87	24.20	0.26	25.81	1.98	12.54	0.18	15.5	1.91	13.33	0.13
成年男性	84.30	6.66	95.41	0.81	32.07	3.51	81.78	0.49	35.10	4.22	26.53	0.29	28.23	2.17	13.63	0.23	17.04	2.08	14.63	0.15

3 讨论

保定市5个采暖季PM_{2.5}中金属与类金属浓度与其他城市冬季PM_{2.5}中金属与类金属浓度比较: 北京市2014年Al浓度, 兰州市2015年As、Cd浓度, 盘锦市2017年Al、Cr浓度, 京津冀某市2016年12月至2017年1月Al、Hg、Mn、Ni、Ti浓度均高于同期保定市金属浓度^[11-14]; 且保定市2017年、2018年采暖季PM_{2.5}中金属与类金属浓度较其余3个采暖季低, 这可能与保定市采取工业减排、扬尘管控、尾气达标、燃烧减量、燃煤锅炉改造、关闭落后产能企业、《保定市大气污染防治条例》发布等大气污染防治措施有关^[15-16]。

保定市5个采暖季PM_{2.5}中金属Pb、Mn、Hg产生的非致癌风险HQ小于1, 说明这3种金属的日均暴露浓度ADD低于金属元素会引起非致癌风险的最大暴露参考浓度RfC, 在可接受范围内。这3种金属的最大暴露参考浓度RfC顺序为 $Hg > Mn > Pb$, 而每年的金属浓度顺序为 $Pb > Mn > Hg$, 根据公式(2)可知, Pb产生的HQ最大, Mn次之, Hg最小。今后工作中应加大Pb污染来源的治理。As和Cr的致癌风险R均高于Cd、Ni的R, Ni的R最低, 与广州市、深圳市、沈阳市结果一致^[17-19], 与保定市夏季结果也一致^[20]。这与类金属As和金属Cd、Cr、Ni的致癌斜率因子SF的顺序为 $As > Cr > Cd > Ni$, As和Cr的日均浓度高于Cd、Ni有关。

本研究中金属Pb、Mn、Hg、Cr、Cd、Ni与类金属As对成年男性产生的健康风险最大, 其次为成年女

性, 青少年最小, 与京津冀某市研究结果一致^[14]。这可能与成年男性的平均体重和呼吸速率是这3类人群中最大, 成年女性次之, 青少年最小有关。

本研究评价采暖季PM_{2.5}中金属与类金属健康风险时, 存在以下局限性: (1) 采样点设在相对清洁的学院区, 采样时间为每月10—16日; (2) 人群有相当一段时间暴露在室内空气中^[21], 本研究将室内外浓度视为等同; (3) 我国有关暴露参数研究有限, 本研究部分暴露参数参考US EPA推荐值^[22]; (4) 大气污染物主要经呼吸道进入人体, 小部分也可经消化道、皮肤、黏膜进入人体, 儿童可直接食入尘土由消化道摄入大气污染物^[23], 本研究只分析了经呼吸途径的健康风险, 因此结果存在一定误差, 未来可通过增加室内外采样点^[24-25]、采样时间、暴露途径等方面, 更全面地评价PM_{2.5}中金属与类金属污染状况及健康风险。

综上, 2014—2018年保定市采暖季PM_{2.5}中金属Pb、Mn、Hg产生的非致癌效应和Ni产生的致癌效应在可接受的风险水平内, 类金属As以及金属Cr、Cd存在潜在的致癌效应, 且总体上呈下降趋势, 说明采取的污染防控措施行之有效, 但治理任务仍艰巨, 应加强As、Cr、Cd、Ni、Pb相关企业的污染物排放的督查, 以降低对人群的健康危害。

参考文献

[1] TIAN HZ, WANG Y, XUE ZG, et al. Trend and characteristics

- of atmospheric emissions of Hg, As, and Se from coal combustion in China, 1980—2007 [J]. *Atmos Chem Phys*, 2010, 10 (23) : 11905-11919.
- [2] 王晨. 保定市环境空气质量评价及影响因素分析 [D]. 保定: 河北农业大学, 2014.
- [3] 郑悦, 程方, 张凯, 等. 保定市大气污染特征和潜在输送源分析 [J]. *环境科学研究*, 2020, 33 (2) : 260-270.
- [4] 魏丽欣, 张良玉, 王欢. 保定市大气污染与气象条件的影响分析和模拟研究 [J]. *环境与发展*, 2018, 30 (8) : 162-163.
- [5] 谢英. 保定市大气污染物来源分析及防治建议 [J]. *环境与发展*, 2017, 29 (3) : 92, 96.
- [6] EPA. Integrated risk information system [EB/OL]. (2005-03-08) [2020-02-27]. <http://www.epa.gov/iris/>.
- [7] HU X, ZHANG Y, DING Z, et al. Bioaccessibility and health risk of arsenic and heavy metals (Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn and Mn) in TSP and PM_{2.5} in Nanjing, China [J]. *Atmos Environ*, 2012, 57 : 146-152.
- [8] 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, 2013 : 14, 26, 759.
- [9] 赵秀阁, 段小丽. 中国人群暴露参数手册 (儿童卷: 6~17岁) [M]. 北京: 中国环境出版社, 2016 : 26, 855.
- [10] 环境空气质量标准: GB 3095—2012 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2016.
- [11] 乔宝文, 刘子锐, 胡波, 等. 北京冬季PM_{2.5}中金属元素浓度特征和来源分析 [J]. *环境科学*, 2017, 38 (3) : 876-883.
- [12] 李拥军, 陈瑞, 刘小云, 等. 兰州市空气PM_{2.5}中十种金属和类金属浓度的季节性变化 [J]. *环境卫生学杂志*, 2017, 7 (2) : 90-94.
- [13] 李越洋, 姬亚芹, 张军, 等. 盘锦市冬季大气PM_{2.5}元素污染特征及来源解析 [J]. *环境化学*, 2019, 38 (8) : 1891-1898.
- [14] 刘英莉, 孟春燕, 钱庆增, 等. 某市秋冬季大气PM_{2.5}中金属元素的健康风险评价 [J]. *环境与职业医学*, 2018, 35 (7) : 602-606.
- [15] 高玉冰. 保定市热电联产扩大集中供热对大气污染物和温室气体的协同减排效果核算 [C] // 2018 中国环境科学学会科学技术年会论文集 (第二卷). 合肥: 中国环境科学学会, 中国环境科学学会, 2018 : 151-155.
- [16] 保定市大气污染防治条例 [N]. 保定日报, 2017-01-23 (A03).
- [17] 姜杰, 李瑞园, 丘红梅, 等. 深圳大气PM_{2.5}中重金属污染特征及健康风险评价 [J]. *实用预防医学*, 2019, 26 (7) : 781-785.
- [18] 李敏, 高燕红, 郭凌川, 等. 广州大气PM_{2.5}中重金属污染的健康风险评价 [J]. *环境与健康杂志*, 2016, 33 (5) : 421-424.
- [19] 聂莉, 李延升, 华正罡, 等. 辽宁沈阳地区大气PM_{2.5}中重金属污染特征及健康风险评价 [J]. *中国公共卫生*, 2018, 34 (4) : 574-576.
- [20] 于平, 孙家仁, 张烺, 等. 保定市室外环境大气PM_{2.5}中重金属的健康风险及PM_{2.5}来源分析 [J]. *现代预防医学*, 2019, 46 (16) : 2914-2920.
- [21] 陈泉. 株洲市住宅室内PM_{2.5}污染水平及来源解析研究 [D]. 株洲: 湖南工业大学, 2019.
- [22] 李天昕, 王叶晴, 段小丽, 等. 环境健康风险评价中的行为活动模式暴露参数 [J]. *环境与健康杂志*, 2012, 29 (2) : 118-123.
- [23] 杨克敌. 环境卫生学 [M]. 8版. 北京: 人民卫生出版社, 2017 : 77.
- [24] 石同幸, 杨轶戩, 蒋琴琴, 等. 广州市部分公共场所室内空气中PM_{2.5}成份及健康危害分析 [J]. *实用预防医学*, 2014, 21 (12) : 1412-1415.
- [25] 田佩瑶, 赵竹, 陶晶, 等. 室内空气PM_{2.5}颗粒物中24种金属元素ICP-MS测定 [J]. *中国公共卫生*, 2016, 32 (11) : 1580-1583.

(英文编辑: 汪源; 责任编辑: 丁瑾瑜)