

· 论 著 ·

# 婺城区大气 PM<sub>2.5</sub> 金属元素污染的慢性健康风险评估

何晓庆, 罗进斌, 王祚懿, 盛微

金华市疾病预防控制中心环境与职业卫生科, 浙江 金华 321002

**摘要:** **目的** 评估金华市婺城区大气 PM<sub>2.5</sub> 中金属元素污染的慢性健康风险。**方法** 于 2015—2017 年在婺城区开展大气 PM<sub>2.5</sub> 采样, 采用电感耦合等离子体质谱法 (ICP-MS) 测定样品中 12 种金属元素含量, 并采用美国国家环境保护局推荐的环境健康风险评估“四步法”评估 PM<sub>2.5</sub> 中金属元素的慢性健康风险。**结果** 婺城区 2015—2017 年 PM<sub>2.5</sub> 平均浓度为 (53.42 ± 26.95) μg/m<sup>3</sup>, 不同季节和年份 PM<sub>2.5</sub> 平均浓度差异均有统计学意义 ( $P < 0.05$ )。PM<sub>2.5</sub> 中金属元素浓度的  $M(Q_R)$  为 136.66 (117.14) ng/m<sup>3</sup>, 其中铝、铅、锰、镉和硒浓度较高; 2016—2017 年, 镉平均浓度均超过参考限值 (5.00 ng/m<sup>3</sup>)。冬季 PM<sub>2.5</sub> 中金属元素浓度最高,  $M(Q_R)$  为 175.12 (132.45) ng/m<sup>3</sup>; 夏季最低,  $M(Q_R)$  为 92.55 (52.81) ng/m<sup>3</sup>。PM<sub>2.5</sub> 中 9 种金属元素对成人总非致癌健康风险系数 (HQ) 为 2.90 (>1), 除镉外, 砷、铍、镍、硒、汞、铝、锰和锑的 HQ 均 <1; 5 种金属元素对成人总致癌风险  $R > 10^{-6}$ , 其中砷和镉的致癌风险  $R > 10^{-6}$ , 铍、铅和镍的致癌风险均  $R < 10^{-6}$ 。**结论** 婺城区大气 PM<sub>2.5</sub> 中金属元素铝、铅、锰、镉和硒含量较高; 其中镉的浓度超过参考限值, 其非致癌风险和致癌风险均较高; 砷的致癌风险较高。

**关键词:** PM<sub>2.5</sub>; 金属元素; 致癌; 风险评估

**中图分类号:** R122.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-5087 (2019) 01-0023-05

## Chronic health risk assessment on metal elements in atmospheric PM<sub>2.5</sub> in Wucheng District

HE Xiao-qing, LUO Jin-bin, WANG Zuo-yi, SHENG Wei

Department of Environmental and Occupational Health, Jinhua Center for Disease Control and Prevention, Jinhua, Zhejiang 321002, China

**Abstract: Objective** To investigate the characteristics and the chronic health risks of metals in fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) of Wucheng District, Jinhua. **Methods** The PM<sub>2.5</sub> samples were collected in Wucheng District of Jinhua from the year 2015 to 2017. Chromium (Cr), manganese (Mn), nickel (Ni), arsenic (As), selenium (Se), cadmium (Cd), antimony (Sb), lead (Pb), beryllium (Be), aluminum (Al), thallium (Tl) and mercury (Hg) were measured by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). The health risks of the metals were assessed based on the standard method recommended by United States Environmental Protection Agency. **Results** From 2015 to 2017, the average concentration of PM<sub>2.5</sub> in Wucheng District was (53.42 ± 26.95) μg/m<sup>3</sup>, and the average concentration of PM<sub>2.5</sub> in each season and each year were significantly different ( $P < 0.05$ ). The median (interquartile range) concentration of metal elements in PM<sub>2.5</sub> was 136.66 (117.14) ng/m<sup>3</sup>, with higher concentration of Al, Pb, Mn, Cd and Se. From 2016 to 2017, the average concentration of Cd exceeded the reference limit (5.00 ng/m<sup>3</sup>). The median (interquartile range) concentration of metal elements in PM<sub>2.5</sub> in winter was 175.12 (132.45) ng/m<sup>3</sup>, the highest, and in summer was 92.55 (52.81) ng/m<sup>3</sup>, the lowest. The total hazard quotient (HQ) of nine kinds of metal elements in PM<sub>2.5</sub> was 2.90; the HQ of As, Be, Ni, Se, Hg, Al, Mn and Sb were all less than 1, except Cd. The total carcinogenic risk of five kinds of metal elements in PM<sub>2.5</sub> was more than 10<sup>-6</sup>, among which the carcinogenic risk of As and Cd were more than 10<sup>-6</sup>, and the carcinogenic risk of Be, Pb and Ni were less than 10<sup>-6</sup>. **Conclusion** The concentrations of

DOI: 10.19485/j.cnki.issn2096-5087.2019.01.006

**基金项目:** 浙江省科学技术厅重大科技专项重点社会发展项目 (2014C03025); 金华市社会发展类研究项目 (2015-3-069)

**作者简介:** 何晓庆, 硕士, 副主任医师, 主要从事环境与职业卫生工作

**通信作者:** 何晓庆, E-mail: jhedehxq@163.com

Al, Pb, Mn, Cd and Se in PM<sub>2.5</sub> of Wucheng District were higher and the concentration of Cd exceeded the reference limit. The non-carcinogenic and carcinogenic risk of Cd were both higher, the carcinogenic risk of As was also higher.

**Key words:** Fine particulate matter; Metal element; Carcinogenicity; Risk assessment

金华市是浙江省内空气污染较严重的城市之一<sup>[1]</sup>,特别是秋冬季节,更容易发生雾霾。大气细颗粒物(PM<sub>2.5</sub>)污染浓度上升,可使心脑血管系统疾病和呼吸系统疾病的发病风险增加<sup>[2-4]</sup>。PM<sub>2.5</sub>污染危害人群健康的重要物质基础之一是重金属元素。重金属元素能够在气溶胶上富集,尤其在PM<sub>2.5</sub>中的富集能力更强,经呼吸进入人体肺部和血液,导致机体功能性障碍和不可逆性损伤,产生较大健康危害<sup>[5]</sup>。目前国内相关研究主要集中在PM<sub>2.5</sub>中金属元素的来源和时空分布特征<sup>[6]</sup>,较少关注人群的慢性健康风险。本研究对2015—2017年婺城区大气PM<sub>2.5</sub>中金属元素的慢性健康风险进行评估,现报道如下。

## 1 材料与方法

**1.1 样品采集** 2015—2017年,在金华市婺城区明月街458号设置1个PM<sub>2.5</sub>采样点,距离地面高度12 m,附近无工业区及局部污染源。采样周期为10:00—9:00,每月10—16日连续采样7 d;其他时间若遇到雾霾天则连续采样,每次采样时间为23 h(流量为2.3 m<sup>3</sup>/h)。共采集有效样品554份。仪器为QZ47DMCAN石英纤维滤膜(购自美国MLT公司),MVS6颗粒物采样器和LVS3颗粒物采样器(均购自德国LECKEL公司)。

**1.2 PM<sub>2.5</sub>浓度测定** 根据每天采样前、后滤膜的质量差和采样体积计算PM<sub>2.5</sub>质量浓度,计算公式<sup>[7]</sup>为:

$$\rho = [(w_2 - w_1) \times 1000] / v \quad (1)$$

式(1)中, $\rho$ 为PM<sub>2.5</sub>质量浓度( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ); $w_2$ 为采样后滤膜的重量(g); $w_1$ 为空白滤膜的重量(g); $v$ 为换算成标准状态(101.325 kPa, 273 K)下的采样体积( $\text{m}^3$ )。

**1.3 金属元素含量测定** 采用电感耦合等离子体质谱法(inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS)测定样品中12种金属元素含量,包括锑(Sb)、铝(Al)、砷(As)、铍(Be)、镉(Cd)、铬(Cr)、汞(Hg)、铅(Pb)、锰(Mn)、镍(Ni)、硒(Se)和铊(Tl)。

**1.4 健康风险评估** 采用2015—2017年婺城区大气PM<sub>2.5</sub>中金属元素监测数据,按照经典的健康风险评

估模型“四步法”<sup>[8]</sup>和有关参数,分别计算各金属元素的致癌健康风险和非致癌健康风险。由于我国目前尚缺乏在暴露参数研究方面的基础数据支持<sup>[9]</sup>,本次健康风险评估的暴露参数均引用自美国国家环保局综合风险信息查询系统(Integrated Risk Information System, IRIS)、加利福尼亚州环保局(The California Environmental Protection Agency, CALEPA)、毒性物质与疾病登记局毒理资料(Agency for Toxic Substances and Disease Registry toxicological profiles, ATSDR)和美国国家环保局暂行同行评议毒性值(The Provisional Peer Reviewed Toxicity Values, PPRTVs)。本研究仅对成人的健康风险进行评估。

**1.4.1 暴露评估** 计算公式<sup>[10]</sup>为:

$$\text{ADD}_{\text{inh}} = (C \times \text{EF} \times \text{ED} \times \text{ET}) / \text{AT} \quad (2)$$

$$\text{LADD}_{\text{inh}} = (C \times \text{EF} \times \text{ED} \times \text{ET}) / \text{LT} \quad (3)$$

式(2)中,ADD<sub>inh</sub>(average daily doses)为吸入途径慢性非致癌日均暴露量( $\text{ng}/\text{m}^3$ );C(concentration)为污染物浓度( $\text{ng}/\text{m}^3$ );EF(exposure frequency)为暴露频率(取值为365 d/a);ED(exposure duration)为暴露周期(取值为30 a);ET(exposure time)为暴露时间(取值为24 h/d);AT(average time)为平均时间(取值为30 a)。式(3)中,LADD<sub>inh</sub>(life-time average daily doses)为吸入途径致癌终生日均暴露量( $\text{ng}/\text{m}^3$ );LT(life time)为终生时间(取值为70 a)。

**1.4.2 风险特征** 计算公式<sup>[11]</sup>为:

$$\text{HQ} = \text{ADD}_{\text{inh}} / (\text{RfC} \times 10^6) \quad (4)$$

$$\text{R} = \text{LADD}_{\text{inh}} \times \text{IUR} \times 10^{-3} \quad (5)$$

式(4)中,HQ(hazard quotient)为慢性非致癌效应的危害系数(HQ $\geq 1$ 表示非致癌风险较高;HQ $< 1$ 表示非致癌风险较低);RfC(reference concentration)为慢性非致癌效应吸入途径参考剂量( $\text{mg}/\text{m}^3$ )。式(5)中,R(risk)为致癌效应的风险(R $\geq 10^{-6}$ 表示致癌风险较高;R $< 10^{-6}$ 表示致癌风险较低);IUR(inhalation unit risk)为致癌效应吸入途径的单位风险因子[( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )<sup>-1</sup>]。

**1.5 统计分析** 采用SPSS 21.0软件统计分析。PM<sub>2.5</sub>浓度服从正态分布,以均数 $\pm$ 标准差( $\bar{x} \pm s$ )描述,

不同年份或不同季节组间均数比较采用单因素方差分析；PM<sub>2.5</sub>中金属元素含量分布不服从正态分布，以中位数和四分位数间距 [M (Q<sub>R</sub>)] 描述。检验水准 α=0.05。

## 2 结果

**2.1 2015—2017年婺城区PM<sub>2.5</sub>浓度** 2015—2017年婺城区PM<sub>2.5</sub>平均浓度为 (53.42 ± 26.95) μg/m<sup>3</sup>，其中春季为 (55.21 ± 23.36) μg/m<sup>3</sup>，夏季为 (35.75 ± 13.30) μg/m<sup>3</sup>，秋季为 (50.77 ± 20.95) μg/m<sup>3</sup>，冬季为 (71.00 ± 33.27) μg/m<sup>3</sup>，不同季节PM<sub>2.5</sub>平均浓度差异有统计学意义 (F=25.493, P<0.05)。2015年

PM<sub>2.5</sub>平均浓度为 (61.84 ± 32.34) μg/m<sup>3</sup>，2016年为 (50.60 ± 21.57) μg/m<sup>3</sup>，2017年为 (45.90 ± 21.27) μg/m<sup>3</sup>，不同年份PM<sub>2.5</sub>平均浓度差异有统计学意义 (F=9.586, P<0.05)。

**2.2 PM<sub>2.5</sub>中金属元素浓度** 2015—2017年婺城区PM<sub>2.5</sub>金属元素浓度 M (Q<sub>R</sub>) 分别为 162.82 (127.82)、137.71 (104.42) 和 113.60 (115.61) ng/m<sup>3</sup>；年均浓度 M (Q<sub>R</sub>) 为 136.66 (117.14) ng/m<sup>3</sup>。Al、Pb、Mn、Cd和Se浓度较高。2016—2017年，Cd平均浓度均超过参考限值 (5.00 ng/m<sup>3</sup>)，M (Q<sub>R</sub>) 分别为 9.45 (26.97) 和 9.07 (24.11) ng/m<sup>3</sup>；As、Pb和Hg年均值均未超过参考限值。见表1。

表1 2015—2017年PM<sub>2.5</sub>中金属元素浓度[M(Q<sub>R</sub>),ng/m<sup>3</sup>]

金属元素	浓度限值	2015年	2016年	2017年	2015—2017年
As	6.00	5.24 (5.30)	3.17 (2.27)	3.05 (2.39)	3.73 (3.45)
Be <sup>a</sup>		0.01 (0.02)	0.06 (0.00)	0.06 (0.00)	0.06 (0.05)
Cd	5.00	4.30 (6.23)	9.45 (26.97)	9.07 (24.11)	6.17 (13.86)
Pb	500.00	53.93 (50.80)	33.58 (21.01)	30.60 (19.80)	36.60 (31.20)
Ni <sup>a</sup>		1.21 (1.70)	1.24 (1.42)	1.23 (1.40)	1.22 (1.55)
Se <sup>a</sup>		8.25 (3.93)	4.88 (3.54)	5.22 (3.92)	6.05 (4.55)
Hg	50.00	0.02 (0.08)	0.04 (0.08)	0.05 (0.12)	0.03 (0.08)
Al <sup>a</sup>		53.17 (58.56)	41.55 (30.21)	31.30 (49.00)	42.52 (43.81)
Mn <sup>a</sup>		22.44 (14.97)	17.42 (15.68)	18.30 (13.70)	20.30 (14.60)
Sb <sup>a</sup>		3.96 (2.75)	2.72 (2.53)	2.56 (1.42)	3.19 (2.38)
Cr <sup>a</sup>		1.44 (2.84)	1.13 (1.99)	1.13 (2.43)	1.13 (2.06)
Tl <sup>a</sup>		0.52 (0.35)	0.38 (0.34)	0.37 (0.30)	0.46 (0.35)

注：a表示GB 3095—2012《环境空气质量标准》<sup>[12]</sup>中未规定该金属元素参考限值。

**2.3 不同季节PM<sub>2.5</sub>中金属元素浓度变化** 2015—2017年婺城区春季PM<sub>2.5</sub>中金属元素浓度 M (Q<sub>R</sub>) 为 173.78 (95.87) ng/m<sup>3</sup>，夏季为 92.55 (52.81) ng/m<sup>3</sup>，秋季为 114.38 (69.40) ng/m<sup>3</sup>，冬季为 175.12 (132.45) ng/m<sup>3</sup>；冬季PM<sub>2.5</sub>中金属元素浓度最高，夏季最低，四季浓度较高的均为Al、Pb、Mn、Cd和Se。见表2。

**2.4 健康风险评估** PM<sub>2.5</sub>中9种金属元素对成人总非致癌健康风险HQ为2.90，其中Cd的HQ为2.05 (>1)，占总非致癌风险的70.69%；As、Be、Ni、Se、Hg、Al、Mn和Sb的HQ均<1。PM<sub>2.5</sub>中5种金属元素对成人总致癌风险R>10<sup>-6</sup>，其中As和Cd的致癌风险R>10<sup>-6</sup>，Cd占总致癌风险的61.67%；Be、Pb和Ni的致癌风险R<10<sup>-6</sup>。见表3。

表2 不同季节PM<sub>2.5</sub>中金属元素浓度[M(Q<sub>R</sub>),ng/m<sup>3</sup>]

金属元素	春季	夏季	秋季	冬季
As	4.22 (3.55)	2.92 (3.55)	3.23 (2.70)	4.49 (3.59)
Be	0.06 (0.05)	0.06 (0.04)	0.06 (0.06)	0.06 (0.04)
Cd	7.75(25.55)	3.29 (4.91)	7.16(17.55)	9.07(22.20)
Pb	40.17(30.09)	24.38(22.95)	35.56(17.85)	51.90(39.49)
Ni	1.60 (1.43)	1.00 (1.51)	1.37 (1.64)	1.17 (1.67)
Se	6.47 (3.68)	4.79 (4.34)	6.18 (4.17)	6.05 (5.29)
Hg	0.03 (0.08)	0.01 (0.01)	0.06 (0.09)	0.09 (0.18)
Al	52.91(46.13)	30.75(32.70)	30.95(25.20)	63.32(53.50)
Mn	24.60(16.82)	15.52(11.06)	19.55(10.70)	22.20(19.40)
Sb	3.42 (1.99)	2.34 (1.60)	3.17 (2.23)	3.79 (2.95)
Cr	1.13 (1.98)	1.13 (5.50)	1.13 (0.13)	2.30 (3.05)
Tl	0.47 (0.22)	0.25 (0.26)	0.51 (0.38)	0.55 (0.47)

表3 PM<sub>2.5</sub> 中金属元素的成人健康风险评估结果

金属	致癌效应			慢性非致癌效应		
	IUR ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) <sup>-1</sup>	参数 来源	R	RfC ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	参数 来源	HQ
As	$4.3 \times 10^{-3}$	IRIS	$8.32 \times 10^{-6}$	$1.5 \times 10^{-5}$	CALEPA	$3.41 \times 10^{-1}$
Be	$2.4 \times 10^{-3}$	IRIS	$4.54 \times 10^{-8}$	$2.0 \times 10^{-5}$	IRIS	$2.5 \times 10^{-3}$
Cd	$1.8 \times 10^{-3}$	IRIS	$1.40 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-5}$	ATSDR	2.05
Pb <sup>a</sup>	$1.2 \times 10^{-5}$	CALEPA	$2.20 \times 10^{-7}$			
Ni	$2.6 \times 10^{-4}$	CALEPA	$1.91 \times 10^{-7}$	$9.0 \times 10^{-5}$	ATSDR	$2.16 \times 10^{-2}$
Se <sup>b</sup>				$2.0 \times 10^{-2}$	CALEPA	$3.38 \times 10^{-4}$
Hg <sup>b</sup>				$3.0 \times 10^{-4}$	IRIS	$2.6 \times 10^{-3}$
Al <sup>b</sup>				$5.0 \times 10^{-3}$	PPRTVs	$1.04 \times 10^{-2}$
Mn <sup>b</sup>				$5.0 \times 10^{-5}$	IRIS	$4.62 \times 10^{-1}$
Sb <sup>b</sup>				$3.0 \times 10^{-4}$	ATSDR	$1.18 \times 10^{-2}$
Cr <sup>c</sup>						
Tl <sup>c</sup>						
总风险			$2.27 \times 10^{-5}$			2.90

注: a 表示未查到非致癌效应系数 RfC; b 表示未查到致癌效应系数 IUR; c 表示未查到相关毒理学参数。

### 3 讨论

研究显示 2015—2017 年婺城区大气 PM<sub>2.5</sub> 的平均浓度为  $(53.42 \pm 26.95) \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 高于 GB 3095—2012 《环境空气质量标准》<sup>[12]</sup> 中规定的 PM<sub>2.5</sub> 年平均浓度二级标准, 提示婺城区空气污染较为严重, 但 PM<sub>2.5</sub> 平均浓度低于 2015 年浙江省的 PM<sub>2.5</sub> 平均浓度 ( $58.83 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )<sup>[13]</sup>, 也低于 2013—2015 年成都市的 PM<sub>2.5</sub> 平均浓度 ( $63 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )<sup>[14]</sup>。PM<sub>2.5</sub> 浓度冬季最高, 春季和秋季次之, 夏季最低, 与上海市研究结果<sup>[15]</sup> 一致, 可能由于夏季气压较低, 大气混合层高度最大, 降水集中, 细颗粒物湿沉降量大, 有利于污染物稀释和扩散; 而春秋季节逆温频率高, 大气扩散能力差, 导致空气中 PM<sub>2.5</sub> 浓度较高, 冬季天气寒冷, 以下沉气流为主, 颗粒物稀释和扩散慢, 造成冬季 PM<sub>2.5</sub> 污染严重。

重金属健康风险不仅与暴露剂量有关, 也与重金属毒性有关<sup>[16]</sup>。婺城区 PM<sub>2.5</sub> 中 Al、Pb 和 Mn 浓度明显高于其他金属元素浓度, 这与天津市<sup>[17]</sup> 和包头市<sup>[18]</sup> 的情况相似, 不同的是婺城区 Cd 的浓度更高。婺城区 Cd 浓度为  $6.17 (13.86) \text{ng}/\text{m}^3$ , 超过 GB 3095—2012 《环境空气质量标准》<sup>[12]</sup> 二级标准 ( $5 \text{ng}/\text{m}^3$ ) 的 1.2 倍。不同季节 Al、Pb、Mn 和 Cd 四种主要污染物浓度的排序变化不大。

本研究选取慢性效应进行人群健康风险评估, 是由于长期低剂量暴露的慢性效应与短期高浓度暴露的

急性效应相比对人群健康影响更大<sup>[19]</sup>。婺城区 PM<sub>2.5</sub> 中 9 种金属元素的总非致癌风险 HQ 为 2.9, 高于沈阳市的非致癌风险 ( $\text{HQ} < 1$ )<sup>[20]</sup> 和成都市的非致癌效应 ( $\text{HQ}=1.2$ )<sup>[19]</sup>, 说明婺城区金属元素的非致癌风险较高, 其中 Cd 的非致癌风险为 2.05, 占总非致癌风险的 70.69%, 其他金属元素的非致癌风险均较低。As、Be、Cd 和 Pb 四种重金属总致癌健康风险  $\text{Risk} > 10^{-6}$ , 说明婺城区大气 PM<sub>2.5</sub> 中重金属存在一定程度的致癌风险。根据 IARC 分类标准<sup>[21]</sup>, As、Be 和 Cd 是 1 类致癌物, Pb 是 2B 类致癌物, As 和 Cd 致癌风险均高于人群可接受的风险水平, Cd 的致癌风险占总致癌风险的 61.67%。

由于我国没有暴露参数的数据库, 本研究使用的参数均参考美国环保局的推荐值, 未考虑人种的差异, 仍有部分化合物致癌系数和参考剂量等资料不全, 可能给结果带来一定的误差<sup>[22]</sup>。本研究的采样点只有 1 个, 对于整个婺城区的代表性不足, 未来可增设采样点全面评估空气污染对人群的健康风险。

综上所述, 2015—2017 年婺城区 PM<sub>2.5</sub> 污染较为严重, PM<sub>2.5</sub> 中 Cd 的非致癌风险和致癌风险均较高, 大气 PM<sub>2.5</sub> 中 Cd 和 As 对人体健康的潜在危害最大, 应对 Cd 和 As 相关污染企业进行重点督查, 控制 PM<sub>2.5</sub> 污染。

### 参考文献

- [1] 王未来, 李明艳, 过伟军, 等. 浙江省 11 个城市 2014—2015 年空气质量分析 [J]. 预防医学, 2017, 29 (2): 194—197.
- [2] 梁肖, 闫英洁, 张迪, 等. PM<sub>2.5</sub> 污染与呼吸系统疾病门诊量关系的 Meta 分析 [J]. 环境与职业医学, 2016, 33 (9): 874—879.
- [3] 刘帅, 宋国君. PM<sub>2.5</sub> 日平均浓度与死亡率“剂量—反应”关系 meta 分析 [J]. 中国公共卫生, 2017, 33 (1): 14—17.
- [4] 赵凤敏, 吴一峰, 吴峰. 大气污染物浓度与上呼吸道疾病门诊就诊的关联性研究 [J]. 预防医学, 2016, 28 (2): 165—167.
- [5] 刘英莉, 孟春燕, 钱庆增, 等. 某市秋冬季大气 PM<sub>2.5</sub> 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.
- [6] 赵朕, 罗小三, 索晨, 等. 大气 PM<sub>2.5</sub> 中重金属研究进展 [J]. 环境与健康杂志, 2017, 34 (3): 273—277.
- [7] 中华人民共和国环境保护部. 环境空气颗粒物 (PM<sub>2.5</sub>) 手工监测方法 (重量法) 技术规范: HJ 656—2013 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2013: 6.
- [8] 李滔滔. 环境健康风险评估方法第一讲环境健康风险评估概述及其在我国应用的展望 [J]. 环境与健康杂志, 2015, 32 (3): 266—268.
- [9] 段小丽, 黄楠, 王贝贝, 等. 国内外环境健康风险评估中的暴露参数比较 [J]. 环境与健康杂志, 2012, 29 (2): 99—104.
- [10] 杜艳君, 莫杨, 李滔滔. 环境健康风险评估方法第四讲暴露评估

- (续三)[J]. 环境与健康杂志, 2015, 32 (6): 556-559.
- [11] 孙庆华, 杜宗豪, 杜艳君, 等. 环境健康风险评估方法第五讲风险特征 (续四)[J]. 环境与健康杂志, 2015, 32 (7): 640-642.
- [12] 中华人民共和国环境保护部. 环境空气质量标准: GB 3095—2012 [S]. 2012: 6.
- [13] WANG X, HE S, CHEN S, et al. Spatiotemporal characteristics and health risk assessment of heavy metals in PM<sub>2.5</sub> in Zhejiang province [J]. International Journal of Environmental Research & Public Health, 2018, 15 (4): 583.
- [14] LIU R, ZENG J, JIANG X, et al. The relationship between airborne fine particle matter and emergency ambulance dispatches in a southwestern city in Chengdu, China [J]. Environmental Pollution, 2017, 229: 661-667.
- [15] 赵金镗, 李丽, 钱春燕, 等. 上海市居民区大气细颗粒物污染水平及时空分布特征研究 [J]. 卫生研究, 2012, 41 (1): 37-41.
- [16] LI P, XUE L Y, WANG S L, et al. Pollution evaluation and health risk assessment of heavy metals from atmospheric deposition in Lanzhou [J]. Environmental Science, 2014, 35 (3): 1021-1028.
- [17] CHEN P, BI X, ZHANG J, et al. Assessment of heavy metal pollution characteristics and human health risk of exposure to ambient PM<sub>2.5</sub> in Tianjin, China [J]. Particology, 2015, 20: 104-109.
- [18] LI K, LIANG T, WANG L. Risk assessment of atmospheric heavy metals exposure in Baotou, a typical industrial city in northern China [J]. Environ Geochem Health, 2015, 38 (3): 843-853.
- [19] 杜艳君, 张翼, 刘睿聪, 等. 成都市 PM<sub>2.5</sub> 中金属元素吸入暴露的慢性健康风险评估 [J]. 环境与健康杂志, 2016, 33 (12): 1061-1064.
- [20] 聂莉, 李延升, 华正罡, 等. 辽宁沈阳地区大气 PM<sub>2.5</sub> 中重金属污染特征及健康风险评估 [J]. 中国公共卫生, 2018, 34 (4): 574-576.
- [21] World Health Organization, International Agency for Research on carcinogenic. Agents Classified by the IARC Monographs, vol.1-116 [EB/OL]. (2015-10-31)[2018-05-21]. [http://monographs.iarc.fr/ENG/Classification/latest\\_classif.php](http://monographs.iarc.fr/ENG/Classification/latest_classif.php).
- [22] 李天昕, 王叶晴, 段小丽, 等. 环境健康风险评估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.
- 收稿日期: 2018-06-21 修回日期: 2018-10-26 本文编辑: 陆璟璇

## (上接第 22 页)

- 08-01]. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0009912018302200>. DOI: 10.1016/j.clinbiochem.2018.03.012.
- [3] 江元元, 徐望明. 影响男性精液质量的因素分析 [J]. 中国生育健康杂志, 2018, 29 (2): 178-182.
- [4] CARLSEN E, GIWERCMAN A, KEIDING N, et al. Evidence for decreasing quality of semen during past 50 years [J]. BMJ, 1992, 305 (6854): 609-613.
- [5] SENGUPTA P, NWAGHA U, DUTTA S, et al. Evidence for decreasing sperm count in African population from 1965 to 2015 [J]. Afr Health Sci, 2017, 17 (2): 418-427.
- [6] ZHOU N, JIANG C, CHEN Q, et al. Exposures to atmospheric PM<sub>10</sub> and PM<sub>10-2.5</sub> affect male semen quality: results of MARHCS Study [J]. Environ Sci Technol, 2018, 52 (3): 1571-1581.
- [7] CARRE J, GATIMEL N, MOREAU J, et al. Does air pollution play a role in infertility?: a systematic review [J]. Environ Health, 2017, 16 (1): 82.
- [8] DENG Z, CHEN F, ZHANG M, et al. Association between air pollution and sperm quality: a systematic review and meta-analysis [J]. Environ Pollut, 2016, 208 (Pt B): 663-669.
- [9] HANSEN C, LUBEN T J, SACKS J D, et al. The effect of ambient air pollution on sperm quality [J]. Environ Health Perspect, 2010, 118 (2): 203-209.
- [10] 谷翊群, 陈振文, 卢文红. 世界卫生组织人类精液检查与处理实验室手册 [M]. 5版. 北京: 人民卫生出版社, 2011.
- [11] PATEL A S, LEONG J Y, RAMASAMY R. Prediction of male infertility by the World Health Organization laboratory manual for assessment of semen analysis: a systematic review [J]. Arab J Urol, 2018, 16 (1): 96-102.
- [12] WU L, JIN L, SHI T M, et al. Association between ambient particulate matter exposure and semen quality in Wuhan, China [J]. Environ Int, 2017, 98: 219-228.
- [13] RADWAN M, JUREWICS J, POLANSKA K, et al. Exposure to ambient air pollution—does it affect semen quality and the level of reproductive hormones? [J]. Ann Hum Biol, 2016, 43 (1): 50-56.
- [14] SANTI D, VEZZANI S, GRANATA A R, et al. Sperm quality and environment: a retrospective, cohort study in a Northern province of Italy [J]. Environ Res, 2016, 150: 144-153.
- [15] HAMMOUD A, CARRELL D T, GIBSON M, et al. Decreased sperm motility is associated with air pollution in Salt Lake City [J]. Fertil Steril, 2010, 93 (6): 1875-1879.
- [16] CAO X N, YAN C, LIU D Y, et al. Fine particulate matter leads to reproductive impairment in male rats by overexpressing phosphatidylinositol 3-kinase (PI3K)/protein kinase B (Akt) signaling pathway [J]. Toxicol Lett, 2015, 237 (3): 181-190.
- [17] 蔡文伟, 江楠. 男性不育患者精液活性氧与精子参数的关系研究 [J]. 预防医学, 2017, 29 (3): 264-265.
- [18] 赵凤敏, 吴一峰, 吴峰. 大气污染物浓度与上呼吸道疾病门诊就诊的关联性研究 [J]. 浙江预防医学, 2016, 28 (2): 165-167.
- [19] 张世鑫, 伍立志, 陈尚, 等. 大气细颗粒物及其水提取物对支气管上皮细胞的氧化损伤效应 [J]. 浙江预防医学, 2016, 28 (4): 332-335.
- 收稿日期: 2018-08-01 修回日期: 2018-10-23 本文编辑: 徐文璐