

[医学荟萃]

环境低水平镉暴露与母婴健康危害流行病学研究进展

向郑婷彦¹, 王苏苏², 颜崇淮²

(1.上海交通大学医学院公共卫生学院, 上海 200025; 2.上海交通大学医学院
附属新华医院环境与儿童健康教育与上海市重点实验室, 上海 200092)

[摘要] 镉是一种广泛存在于环境中的重金属污染物, 由于其慢性暴露的效应, 可能会对人体健康造成严重危害, 特别是对妇女和儿童。本文综述了近年来有关环境低水平镉暴露与妇女儿童健康危害的流行病学研究进展。其中, 重点探讨了镉对女性生殖系统、胎儿生长发育、儿童智力和行为等方面的影响, 并总结了人群镉暴露的来源、途径及防控措施。本文旨在为镉污染的环境治理和健康风险评估提供参考。

[关键词] 镉; 健康危害; 流行病学研究; 妇女; 儿童

Doi: 10.3969/j.issn.1673-5293.2024.07.010

[中图分类号] R173

[文献标识码] A

[文章编号] 1673-5293(2024)07-0061-06

Advances in epidemiological studies on environmental low-level cadmium exposure and maternal and child health hazards

XIANG Zhengtingyan¹, WANG Susu², YAN Chonghuai²

(1. School of Public Health, Shanghai Jiao Tong University School of Medicine, Shanghai 200025, China;

2. MOE-Shanghai Key Laboratory of Children's Environmental Health, Xinhua Hospital Affiliated to Shanghai Jiao Tong University School of Medicine, Shanghai 200092, China)

[Abstract] Cadmium is a heavy metal pollutant widely present in the environment and may cause serious health hazards, especially to women and children, due to its chronic exposure effects. This article reviewed the advances of epidemiological studies in recent years on environmental low-level cadmium exposure and maternal and child health hazards. It focused on the effects of cadmium on female reproductive system, fetal growth and development, and children's intelligence and behavior, and summarized the sources, pathways, and preventive and control measures of cadmium exposure in the population. This paper aims to provide reference for environmental management and health risk assessment of cadmium pollution.

[Key words] cadmium; health hazards; epidemiological studies; women; children

1 前言

镉是一种常见的环境重金属污染物, 由于其广泛存在于大气、水、土壤和食品中, 人类普遍受到镉的慢性暴露。与此同时, 镉还被广泛应用于农业、工业、建筑和医疗等领域, 进一步增加了人类对镉的暴露风险。由于镉具有长期潜伏期和积累性, 它可能会对人体健康造成慢性危害, 妇女和儿童更为敏感。

近年来, 越来越多的流行病学研究关注环境低水平镉暴露与妇幼健康危害之间的关系, 在揭示镉危害人体健康的机制、评估镉暴露对不同人群健康的影响、制定镉污染的防控措施等方面发挥了重要

作用。本文综述了近年来有关环境低水平镉暴露与妇女儿童健康危害的流行病学研究进展, 以期为镉污染的环境治理和健康风险评估提供参考。

2 环境镉分布和人群暴露

2.1 环境镉污染

2.1.1 环境镉污染源

镉广泛存在于水体、土壤和空气。工业生产中, 采矿、有色金属生产、电镀工艺、染料等工业活动排放含镉污水, 含镉污水进入地表水环境, 污染河流和灌溉农田土地, 空气镉污染来自烟草烟雾和粉尘颗

[收稿日期] 2023-03-08

[基金项目] 十三五国家重点研发计划《食品安全关键技术研发》重点专项(2017YFC1600500)

[作者简介] 向郑婷彦(1997—), 女, 硕士研究生, 主要从事重金属镉与妇幼健康相关研究。

[通讯作者] 颜崇淮, 教授。

粒中携带的镉。农牧业中含镉磷酸盐肥料的大量、长期的不当使用也会造成土壤镉污染。

2.1.2 我国环境镉污染现状

我国的水环境存在广泛的镉检出,并且很多达到了中、重度污染^[1]。水中的镉进入水产品中,通过食物链的富集放大作用进入人体并长期、慢性的蓄积。在中国,水生动植物中常进入膳食中的鱼类、甲壳类、软体类、头足类以及水产干制品等食品均有检出镉元素超标的文献报告,且藻类、蟹类、贝类等甲壳类的食品镉含量最高^[2-4]。

2014年发布的全国土壤污染状况调查公报显示,我国土壤污染率为16.1%,所有污染物中镉超标率最高(7%)。有研究整合了2006至2016年的土壤污染数据,显示在我国镉是严重的土壤重金属污染物,许多省份土壤都受到了不同程度的镉污染,最显著的大部分位于长江以南^[5]。由于植物本身特性,谷物类、根茎类和部分叶菜类容易富集镉,其中大米及其制品、食用菌等镉含量最高^[6-7],食用受污染地区种植的大米是镉暴露最主要原因^[8]。

我国室内空气粉尘镉浓度平均值为2.29mg/kg,北方高于南方,灰尘和墙漆是主要来源^[9]。街道粉尘镉浓度在2.4~1754mg/kg,东南部到西北部逐渐下降,工业活动和交通排放是主要原因^[10]。靠近工业区空气(12.4ng/m³)镉浓度高于普通地区(2.69ng/m³)^[11]。

2.2 人群镉暴露途径

2.2.1 吸入和接触

PM_{2.5}是重金属的载体,儿童的PM_{2.5}暴露与血

液镉水平之间存在显著关联^[12]。烟草是重要的镉暴露来源,直接吸烟或吸入二手烟是引起孕妇和儿童镉水平升高的相关因素^[13-14],烟草烟雾中的镉沉淀于房屋粉尘和地板家具,对儿童造成二次暴露^[15]。

2.2.2 消化道

消化道吸收食物中镉的吸收率受膳食因素和生理因素的影响。镉在小肠上皮细胞通过二价金属载体1(divalent metal transporter 1,DMT1)吸收,此载体主要功能是吸收和转运铁离子,同时也是许多二价金属离子进入的通道,如果膳食中钙含量低,或者机体铁储存量低及妇女怀孕期间,DMT1对镉的吸收增加。粮农组织/世界卫生组织食品添加剂联合专家委员会(Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives,JECFA)在2010年提出的每月镉耐受摄入量(provisional tolerable monthly intake,PTMI)调整为25μg/(kg·bw),2019年一项研究总结了我国受污染地区大米镉浓度,某些受污染地区的农民食用当地生产的大米,所估计的膳食镉摄入量为46.7~74.9μg/(kg·bw),与日本地区首次报告痛痛病的摄入量58.9μg/(kg·bw)相当甚至更高^[8]。张磊等人2000年的中国总膳食研究表明,中国非污染区各性别年龄组人群的膳食镉摄入量相较90年代有升高趋势,但均处于安全水平。

2.2.3 胎盘途径

孕妇孕晚期的全血、脐带血和胎盘的镉浓度中位数如表1所示。沙特利雅得的研究中母血镉比脐带血镉高0.28μg/L,其余研究母体血镉浓度是脐带血镉的2~15倍,说明胎盘可能对镉有屏障作用。

表1 不同地区孕妇全血、脐带血和胎盘镉水平

Table 1 Cadmium levels in whole blood, cord blood and placenta of pregnant women in different regions

日期	地区	研究对象 (n)	方法	母体血液 采集时间	样本 类型	母血 (μg/L)	脐带血 (μg/L)	胎盘 (μg/g dry wt)
2019 May	日本东北地区(TSCD队列)	594	ICP-MS	孕晚期	全血	1.18(0.74~1.79)	0.53(0.10~1.25)	0.017 ^b
2018 Jan.	克罗地亚	278	ICP-MS	分娩时	全血	0.40(0.30~0.51)	0.05(0.03~0.07)	0.008 ^b
2011 Mar.	沙特利雅得	1578	原子吸收光谱法	分娩时	全血	0.98(0.77~1.21)	0.70(0.59~0.85)	0.035
2015 Jan.	瑞典斯德哥尔摩	80	ICP-MS	孕晚期	全血	0.37(0.14~0.90)	0.03(0.02~0.06)	0.004
2015 Oct.	韩国釜山	79	ICP-MS	孕中期	全血	0.59(0.45~0.84)	0.04(0.02~0.06)	—
2009 Jul.	南非	62	ICP-MS	分娩时	全血	0.15(0.10~0.20)	0.02(0.01~0.21)	—
2019 Sept.	埃及	100	ICP-MS	分娩时	血清	1.35(0.35~7.10)	0.60(0.15~1.60)	—
2019 Jun.	中国北京	84	ICP-MS	分娩时	全血	0.52	0.12	—
2014 Nov.	荷兰	235	ICP-MS	分娩时	全血	0.31 ^a	0.07 ^a	—

a.几何平均数;b.单位为μg/g wet wt。

3 镉对母婴的健康危害

镉作为一种蓄积性很强的重金属元素,在人体内的半衰期长达 20~40 年。人群健康危害表现为低剂量暴露、长期接触的慢性中毒反应,可对身体多个系统产生慢性损伤,肾脏和骨骼是镉作用特异性靶器官,19 世纪三十年代日本因摄食被镉污染的水源引起的“痛痛病”是慢性镉中毒的典型表现,其他系统表现出慢性疾病并造成死亡风险增大,这种效应并没有特异性表现,随着人群队列长期观察可能出现癌症和慢性疾病患病率增高。目前环境低水平镉暴露对妇女和儿童健康的研究,主要围绕女性生殖系统、胎儿生长发育、儿童智力和行为等方面开展。

3.1 镉对妇女的健康影响

3.1.1 镉对女性生殖的影响

镉对妇女生殖影响研究大多集中于雌激素的相关性研究。2022 年美国一项对于绝经前妇女的研究显示血镉水平升高使雌二醇激素水平升高。丹麦一项研究提供环境接触镉和抗缪勒管激素水平变化的证据^[16]。浙江一项病例对照研究首次报告了镉暴露与原发性卵巢功能不全风险的阳性结果,促卵泡生成激素、促黄体生成素与镉暴露呈正相关,抗缪勒氏管激素和雌二醇与镉暴露呈负相关^[17]。上海的横断面研究显示镉暴露与月经初潮提前有关,生活在镉污染区的女孩初潮年龄显著低于对照区,但是两地区间人群的更年期时间没有差异^[18]。2008 年瑞典一项 3 万人以上的前瞻性队列研究发现绝经后妇女的膳食镉摄入量显著增加子宫内膜癌发生的风险。上述研究表明镉暴露不仅与妇女生殖激素的变化有关,还可能是某些疾病的危险因素。对于环境镉暴露对女性生殖健康的影响,仍需要长期大规模的人群队列观察,追踪不同的效应终点,探究镉污染对女性生殖的影响。

3.1.2 镉对女性的其他健康影响

意大利一项荟萃分析对镉暴露与乳腺癌发病率与死亡率的关系进行了系统回顾,发现膳食镉摄入量与乳腺癌发病率呈正相关,尿镉没有关联,在绝经后的妇女中没有发现镉暴露与乳腺癌发病率和死亡率的关联^[19]。骨质疏松是绝经后妇女常见问题,葡萄牙一项镉暴露与骨质疏松的 meta 分析研究认为

即使是在低水平暴露镉($U-Cd < 0.5 \mu g/g$ 肌酐)的情况下,镉也可能是绝经后妇女骨质疏松症的风险因素^[20]。瑞典一项大规模前瞻性队列,评估尿镉与绝经后妇女骨折、心肌梗死、心力衰竭、缺血性中风和死亡率的关系,尿镉最高三分位数(中位数 $0.54 \mu g/g$ 肌酐)与最低(中位数 $0.20 \mu g/g$ 肌酐)相比,骨折和全因死亡率的风险均会升高,与心血管结局没有关联^[21]。澳大利亚一项研究显示当尿镉每增加一个 ln 转换单位,心力衰竭死亡风险增加 36%^[22]。中国的一项大型横断面调查只在女性中发现血镉水平与甲状腺功能减退有关^[23]。这些研究说明镉可能是妇女骨质疏松、骨折、心血管疾病、乳腺癌和全因死亡率的危险因素,绝经后妇女更为显著。

3.1.3 镉对孕妇健康影响

(1) 先兆子痫

美国一项研究显示怀孕期间高血压疾病风险增高与镉暴露有关^[24]。2008 年一项来自土耳其的横断面研究发现先兆子痫妇女的平均血镉浓度明显高于健康孕妇。而伊朗、南非^[25]的研究没有发现先兆子痫病例和对照组的血镉浓度差异,这类研究存在的不同需要更多长期队列观察。

(2) 早产

武汉一项纳入 5 364 例受试者的研究显示,产妇产前尿液中的镉浓度与早产风险升高有关^[26]。安徽一项队列研究发现,孕妇孕早期和孕中期血清高镉水平($\geq 0.95 \mu g/L$)与早产呈正相关^[27]。在纳入 14 847 名孕妇进行研究的日本队列中,孕妇血液镉水平 $> 0.902 ng/g$ 会增加早期早产的风险^[28]。一些研究报告了不同结果,缅甸的出生队列研究显示孕晚期的尿镉水平与早产没有关联^[29]。山西省的一项出生队列研究表明,孕早中期的血清镉浓度与早产可能性没有关联^[30]。人种、样本种类及采集时间可能是这些研究结果的影响因素,因此未来需要长期的大规模队列观察。

3.2 镉暴露对儿童的健康影响

3.2.1 镉对胎儿生长发育的影响

2013 年尼日利亚一项研究表示孕期镉暴露与婴儿低出生体重有关。安徽一项队列研究母体血清镉水平与小于胎龄儿风险之间的关系,显示在妊娠中期接触镉会增加子代发生小于胎龄儿风险^[31]。

2011 年中国台湾的出生队列研究发现,脐带血镉的增加与新生儿头围的减少有关,并与 3 岁以下的身高、体重和头围的减少显著相关。同时更多研究显示镉暴露对出生结局的影响可能具有性别差异,2012 年瑞士一项前瞻性出生队列研究发现孕期镉暴露仅会使女孩的出生体重和头围减小。南非一项研究同时测量了孕期母体血、脐带血和孕期母体尿的镉水平,结果显示产前镉暴露仅与女婴出生体重呈负相关^[32]。美国一项前瞻性出生队列发现孕期镉暴露与女婴的出生身长呈负相关,与男婴的出生身长呈正相关^[33]。日本一项队列研究显示出生体重随着母体血镉水平的四分位数增加而下降,对身长、头围和胸部周长的影响存在性别差异^[34]。武汉一项研究探究了镉暴露对出生结局造成影响的窗口期,结果显示孕早期尿镉水平与女孩出生体重之间呈负相关,孕中期和孕晚期则没有关联,且三个时期均对男孩没有影响^[35]。江苏省一项农业人口队列研究结果显示孕期镉暴露与男婴体重下降有关,但在女婴中没有发现^[36]。广东一项研究显示环境镉污染区比对照区女婴的出生体重、身长和头围都显著降低^[37]。孟加拉农村一项长期母子队列中提示孕期镉暴露可能与男孩 10 岁时的生长发育不良相关^[38]。此类研究结果的性别差异是需要关注的问题,基于金属暴露具有相关性,镉与其他金属混合暴露对儿童的影响可能是新的方向。

3.2.2 镉对儿童的神经发育影响

一项自闭症谱系障碍的荟萃研究表明,头发与尿液的镉含量都与自闭症谱系障碍呈高度相关^[39]。日本环境与儿童健康研究的一个大型队列研究显示,孕产妇血液镉浓度升高降低男孩的运动能力,怀孕期间吸烟的孕妇血液镉浓度影响儿童的运动、语言和认知能力^[40]。2014 年西班牙西南部采矿工业地区的一项研究发现,尿液镉与男孩总智商分数降低有关,在女孩中只与言语能力有关。江苏的队列研究发现儿童接触镉会对认知能力产生不利影响^[41]。孟加拉的一项前瞻性队列研究中,女孩的行为能力受到镉显著影响^[42]。然而其他研究如美国、韩国^[43]、江苏^[44]等地区的流行病学调查均显示镉暴露与儿童智力发育没有关联。各研究测量儿童的智力和行为的量表不同或经过本土化改编,这可能是

影响研究结果的重要原因。

3.2.3 镉对儿童的骨、肾影响

二价镉离子与钙离子物理性状相近,镉可与钙竞争,直接抑制细胞对钙的主动转运,以及肾脏的损伤引起尿钙的排泄增加,低剂量镉暴露引起破骨细胞增加打破破骨和成骨过程的平衡,造成成骨过程及正常骨代谢过程的紊乱,对骨骼造成直接损伤。肾脏是镉富集的器官,镉的长期累积引起的肾小管和肾小球损伤。肾脏中的镉积累是成人时期观察到的肾毒性和骨质疏松症等影响的原因。

有观点认为儿童时期接触镉对肾脏和骨骼的损害也许持续到成人时期才会显现,该类研究调查对象以成人人居多,然而近来一些研究表明镉的骨肾损伤在生命早期便有所体现,孟加拉的一项队列研究评估早期镉暴露(4.5 岁)对骨骼相关生物标志物影响,在 9 岁儿童中观察到男性尿镉、尿脱氧吡啶啉和骨钙素减少,提示在儿童阶段镉即对骨骼造成了损伤,在女性中该效应不明显^[45]。根据 2009~2014 年美国国家健康与营养调查(national health and nutrition examination survey, NHANES)调查,有研究联合铅、镉、汞和砷与肾脏指标进行横断面分析,发现镉浓度与肾小球滤过率和尿白蛋白的升高有显著关联^[46]。相关研究数量较少,需要更多人群研究和实验证明儿童环境暴露镉对骨骼和肾脏的影响。

4 结语

环境中镉污染严重且对妇女和儿童健康造成严重危害,女性生殖系统、胎儿生长发育、儿童智力行为等方面均受到镉暴露影响,环境镉污染已经成为亟待重视的公共卫生问题。

首先应积极从污染源头进行治理,减少镉排放,杜绝未经处理的镉污水进入河道水源,对已经污染的土壤相应治理,减少环境镉进入食物链。其次,对生产到食用其中每个环节严格监管,确保食品安全质量,将镉含量控制在国家标准内,从而达到控制镉对人群健康危害的目的。加强相关研究,流行病学研究评估环境镉暴露人体健康风险,制定血、尿镉水平标准限值,寻找早期特异的生物标志物和调查可能增强或减轻镉毒作用的潜在因素可能是有效干预手段。最后,应提高对镉的安全意识,倡导营养物质如钙、铁、锌的摄入,从而减少镉摄入和因此导致的

健康风险。

[参考文献]

- [1]范成新,刘敏,王圣瑞,等.近 20 年来我国沉积物环境与污染控制研究进展与展望[J].地球科学进展,2021,36(4):346-374.
- [2]孙婷,刘铁诚,杨丽,等.济南市居民水产品中常见重金属含量监测及风险评估[J].食品安全质量检测学报,2020,11(11):3720-3725.
- [3]潘柳波,刘威,王舟,等.深圳市售贝类镉的污染与健康风险评价[J].职业与健康,2019,35(20):2777-2781.
- [4]陈超瑜,王晶,陈理.2015 年-2019 年绍兴地区鲜冻水产品中镉的监测结果及分析[J].中国卫生检验杂志,2021,31(8):1014-1018.
- [5]Duan Q, Lee J, Liu Y, et al. Distribution of heavy metal pollution in surface soil samples in China: a graphical review[J]. Bull Environ Contam Toxicol, 2016, 97(3): 303-309.
- [6]张小红,赵青,路兴乐.滨州市谷物及蔬菜中铅、镉、总砷暴露量及风险评估[J].中国卫生检验杂志,2021,31(7):877-879,883.
- [7]闫兆凤,姜兆刚.2016-2018 年威海市市售蔬菜铅、镉污染及其健康风险分析[J].职业与健康,2020,36(11):1485-1487.
- [8]Wang P, Chen H, Kopittke P M, et al. Cadmium contamination in agricultural soils of China and the impact on food safety[J]. Environ Pollut, 2019, 249: 1038-1048.
- [9]Liu B, Huang F, Yu Y, et al. Heavy metals in indoor dust across China: occurrence, sources and health risk assessment[J]. Arch Environ Contam Toxicol, 2021, 81(1): 67-76.
- [10]Hou S, Zheng N, Tang L, et al. Pollution characteristics, sources, and health risk assessment of human exposure to Cu, Zn, Cd and Pb pollution in urban street dust across China between 2009 and 2018[J]. Environ Int, 2019, 128: 430-437.
- [11]梁林涵,钟格梅,黄林,等.广西环境镉污染重点地区居民饮用水食物和空气镉暴露量调查[J].实用预防医学,2018,25(11):1340-1343.
- [12]Wu Y, Yang X, Wang H, et al. Relationship between ambient PM_{2.5} exposure and blood cadmium level in children under 14 years in Beijing, China[J]. J Hazard Mater, 2021, 403: 123871.
- [13]Mérida-Ortega Á, López-Carrillo L, Rangel-Moreno K, et al. Tobacco smoke exposure and urinary cadmium in women from northern Mexico[J]. Int J Environ Res Public Health, 2021, 18(23): 12581.
- [14]Rahmani R, Nakhaee S, Sharafi K, et al. Association of environmental tobacco smoke (ETS) with lead and cadmium concentrations in biological samples of children and women: systematic review and meta-analysis[J]. Rev Environ Health, 2022, 39(1): 13-25.
- [15]Matt G E, Quintana P J E, Hoh E, et al. Tobacco smoke is a likely source of lead and cadmium in settled house dust[J]. J Trace Elem Med Biol, 2021, 63: 126656.
- [16]Christensen P S, Bonde J P, Bungum L, et al. Environmental cadmium and lead exposure and anti-Müllerian hormone in pregnant women[J]. Reprod Toxicol, 2016, 61: 114-119.
- [17]Pan W, Ye X, Zhu Z, et al. Urinary cadmium concentrations and risk of primary ovarian insufficiency in women: a case-control study[J]. Environ Geochem Health, 2021, 43(5): 2025-2035.
- [18]Chen X, Zhu G, Jin T. Effects of cadmium exposure on age of menarche and menopause[J]. Toxics, 2017, 6(1): 6.
- [19]Filippini T, Torres D, Lopes C, et al. Cadmium exposure and risk of breast cancer: a dose-response meta-analysis of cohort studies[J]. Environ Int, 2020, 142: 105879.
- [20]Kunioka C T, Manso M C, Carvalho M. Association between environmental cadmium exposure and osteoporosis risk in postmenopausal women: a systematic review and meta-analysis[J]. Int J Environ Res Public Health, 2022, 20(1): 485.
- [21]Tägt J, Helte E, Donat-Vargas C, et al. Long-term cadmium exposure and fractures, cardiovascular disease, and mortality in a prospective cohort of women[J]. Environ Int, 2022, 161: 107114.
- [22]Deering K E, Callan A C, Prince R L, et al. Low-level cadmium exposure and cardiovascular outcomes in elderly Australian women: a cohort study[J]. Int J Hyg Environ Health, 2018, 221(2): 347-354.
- [23]Nie X, Chen Y, Chen Y, et al. Lead and cadmium exposure, higher thyroid antibodies and thyroid dysfunction in Chinese women[J]. Environ Pollut, 2017, 230: 320-328.
- [24]Padula A M, Ma C, Huang H, et al. Drinking water contaminants in California and hypertensive disorders in pregnancy[J]. Environ Epidemiol, 2021, 5(2): e149.
- [25]Maduray K, Moodley J, Soobramoney C, et al. Elemental

- analysis of serum and hair from pre-eclamptic south African women[J].*J Trace Elem Med Biol*, 2017, 43: 180-186.
- [26] Yang J, Huo W, Zhang B, et al. Maternal urinary cadmium concentrations in relation to preterm birth in the healthy baby cohort study in China[J].*Environ Int*, 2016, 94: 300-306.
- [27] Wang H, Liu L, Hu Y F, et al. Association of maternal serum cadmium level during pregnancy with risk of preterm birth in a Chinese population[J].*Environ Pollut*, 2016, 216: 851-857.
- [28] Tsuji M, Shibata E, Morokuma S, et al. The association between whole blood concentrations of heavy metals in pregnant women and premature births: the Japan environment and children's study (JECS)[J].*Environ Res*, 2018, 166: 562-569.
- [29] Wai K M, Mar O, Kosaka S, et al. Prenatal heavy metal exposure and adverse birth outcomes in Myanmar: a birth-cohort study[J].*Int J Environ Res Public Health*, 2017, 14(11): 1339.
- [30] Yu Y, Gao M, Wang X, et al. Recommended acceptable levels of maternal serum typical toxic metals from the perspective of spontaneous preterm birth in Shanxi province, China[J].*Sci Total Environ*, 2019, 686: 599-605.
- [31] Wang H, Liu L, Hu Y F, et al. Maternal serum cadmium level during pregnancy and its association with small for gestational age infants: a population-based birth cohort study[J].*Sci Rep*, 2016, 6: 22631.
- [32] Röllin H B, Kootbodien T, Channa K, et al. Prenatal exposure to cadmium, placental permeability and birth outcomes in coastal populations of south Africa [J].*PLoS One*, 2015, 10(11): e0142455.
- [33] Romano M E, Enquobahrie D A, Simpson C, et al. Maternal body burden of cadmium and offspring size at birth[J].*Environ Res*, 2016, 147: 461-468.
- [34] Inadera H, Takamori A, Matsumura K, et al. Association of blood cadmium levels in pregnant women with infant birth size and small for gestational age infants: the Japan environment and children's study [J].*Environ Res*, 2020, 191: 110007.
- [35] Cheng L, Zhang B, Zheng T, et al. Critical windows of prenatal exposure to cadmium and size at birth[J].*Int J Environ Res Public Health*, 2017, 14(1): 58.
- [36] Guo J, Wu C, Qi X, et al. Adverse associations between maternal and neonatal cadmium exposure and birth outcomes[J].*Sci Total Environ*, 2017, 575: 581-587.
- [37] Zhang Y, Xu X, Chen A, et al. Maternal urinary cadmium levels during pregnancy associated with risk of sex-dependent birth outcomes from an e-waste pollution site in China[J].*Reprod Toxicol*, 2018, 75: 49-55.
- [38] Malin Igra A, Warnqvist A, Rahman S M, et al. Environmental metal exposure and growth to 10 years of age in a longitudinal mother-child cohort in rural Bangladesh[J].*Environ Int*, 2021, 156: 106738.
- [39] Sulaiman R, Wang M, Ren X. Exposure to aluminum, cadmium, and mercury and autism spectrum disorder in children: a systematic review and meta-analysis [J].*Chem Res Toxicol*, 2020, 33(11): 2699-2718.
- [40] Ma C, Iwai-Shimada M, Nakayama S F, et al. Association of prenatal exposure to cadmium with neurodevelopment in children at 2 years of age: the Japan environment and children's study [J].*Environ Int*, 2021, 156: 106762.
- [41] Ding L J, Zhou X Y, Zhu Y G. Microbiome and antibiotic resistome in household dust from Beijing, China[J].*Environ Int*, 2020, 139: 105702.
- [42] Gustin K, Tofail F, Vahter M, et al. Cadmium exposure and cognitive abilities and behavior at 10-years of age: a prospective cohort study[J].*Environ Int*, 2018, 113: 259-268.
- [43] Lee K S, Kim K N, Ahn Y D, et al. Prenatal and postnatal exposures to four metals mixture and IQ in 6-year-old children: a prospective cohort study in south Korea [J].*Environ Int*, 2021, 157: 106798.
- [44] Sun H, Chen W, Wang D, et al. Inverse association between intelligence quotient and urinary retinol binding protein in Chinese school-age children with low blood lead levels: results from a cross-sectional investigation [J].*Chemosphere*, 2015, 128: 155-160.
- [45] Malin Igra A, Vahter M, Raqib R, et al. Early-life cadmium exposure and bone-related biomarkers: a longitudinal study in children [J].*Environ Health Perspect*, 2019, 127(3): 37003.
- [46] Sanders A P, Mazzella M J, Malin A J, et al. Combined exposure to lead, cadmium, mercury, and arsenic and kidney health in adolescents age 12-19 in NHANES 2009-2014[J].*Environ Int*, 2019, 131: 104993.

[专业责任编辑:于学文]

[中文编辑:孙兰迪;英文编辑:牛惠]