

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.1
第41卷 第1期

目次

近20年来中国PM _{2.5} 污染演变的时空过程	时燕, 刘瑞梅, 罗毅, 杨昆 (1)
2007~2016年上海颗粒物浓度特征与气候背景异同分析	郑庆峰, 史军, 谈建国, 段玉森, 林燕芬, 徐卫忠 (14)
夏季大气PM _{2.5} 中元素特征及源解析:以华中地区平顶山-随州-武汉为例	刘威杰, 石明明, 程敏, 黎莹, 朱戈昊, 邢新丽, 孔少飞, 张家泉, 祁士华 (23)
呼包鄂地区冬季、夏季PM _{2.5} 污染特征	李伊明, 刘佳媛, 史国良, 皇甫延琦, 张昕, 杨奕, 冯银厂 (31)
2019年元旦前后石家庄市重污染过程PM _{2.5} 污染特征及来源解析	周静博, 段青春, 王建国, 杨鹏, 刘煥武, 李梅, 靳伟 (39)
基于模型模拟的成都市PM _{2.5} 污染来源解析	许艳玲, 易爱华, 薛文博 (50)
北京市PM _{2.5} 中砷污染特征	石绍萱, 杨艳蓉, 秦娟娟, 周雪明, 段青春, 谭吉华, 陈荣志 (57)
夏秋季宁波市气态元素汞(GEM)污染特征及潜在源区贡献分析	易辉, 林佳梅, 蔡秋亮, 王克强, 陈进生, 佟磊, 李建荣, 肖航 (65)
安阳市大气PM _{2.5} 中水溶性离子季节特征及来源解析	孙有昌, 姜楠, 王申博, 段时光, 张瑞芹 (75)
新乡市夏冬季节PM _{2.5} 稳定碳同位素特征分析	闫广轩, 宋鑫, 张靖雯, 张朴真, 王力鹏, 张佳羽, 杨争, 曹治国, 樊静, 王跃思, 刘子锐 (82)
基于颗粒物化学组分粒径分布特征的源解析方法构建与评估	梁永莉, 田瑛泽, 刘童, 冯银厂 (90)
超低排放改造后燃煤电厂细颗粒物排放特征	王润芳, 马大卫, 姜少毅, 朱仁斌, 何军, 张本耀 (98)
京津冀地区城市臭氧污染趋势及原因探讨	余益军, 孟晓艳, 王振, 周崑, 于红霞 (106)
安阳市近地面臭氧污染特征及气象影响因素分析	杨健, 尹沙沙, 于世杰, 王丽娟, 张瑞芹, 郝建尤, 苏方成, 齐艳杰 (115)
长江三角洲2017年机动车IVOCs排放清单构建及其对SOA的生成影响	王倩, 黄凌, 王杨君, 殷司佳, 张琪, 易鑫, 李莉 (125)
华东典型城市非道路移动机械排气烟度	鲁君, 胡馨遥, 杨强, 唐伟, 夏阳, 井宝莉, 陈昀, 黄成 (133)
国内外储油库VOCs排放现状与标准分析	胡玮, 任碧琪, 黄玉虎, 秦建平, 卞吉玮, 吴清柱 (139)
四乙基愈创木酚液相·OH氧化SOA产率及特征分析:初始浓度的影响	庄雨, 陈彦彤, 李旭东, 马帅帅, 赵竹子, 叶招莲, 盖鑫磊 (146)
乌鞘岭南、北坡降水稳定同位素特征及水汽来源对比	徐秀婷, 贾文雄, 朱国锋, 马兴刚, 张昱, 袁瑞丰, 张志远, 石阳 (155)
长江源多年冻土区地下水氢氧稳定同位素特征及其影响因素	汪少勇, 何晓波, 丁永建, 常福宣, 吴锦奎, 胡召富, 王利辉, 杨贵森, 邓明珊 (166)
巴尔喀什湖流域水化学和同位素空间分布及环境特征	沈贝贝, 吴敬禄, 吉力力·阿不都外力, A. S. Saparov, Gulnura Isanova (173)
城市湖泊水环境整治对改善水质的影响:以蠡湖近30年水质变化为例	田伟, 杨周生, 邵克强, 潘辉, 胡洋, 白承荣, 姜星宇, 高光, 汤祥明 (183)
典型药物及个人护理品在黄东海海域水体中的检测、分布规律及其风险评估	陈贤, 张彩杰, 杨桂朋, 张婧, 刘梦 (194)
长江南京段水源水中有机磷酸酯的污染特征与风险评估	李栋, 张圣虎, 张芹, 王博, 卜元卿, 赵欣, 李辉, 宋宁慧, 郭瑞昕 (205)
雄安新区-白洋淀冬季冰封期水体溶解性有机物的空间分布、光谱特征及来源解析	周石磊, 孙悦, 张艺冉, 蒋永丰, 尹璐, 黄廷林, 李再兴, 罗晓, 战江, 王函 (213)
白洋淀表层沉积物元素的空间特征、风险评价及来源分析	汪敬忠, 刘卓, 魏浩, 吴玉会, 占水娥, 朱迟, 张益森 (224)
松花江表层沉积物PAEs分布特征及生态风险评价	王欢, 杨永哲, 王海燕, 董伟丰, 闫国凯, 常洋, 李泽文, 赵远哲, 凌宇 (232)
鄱阳湖湖口-长江段沉积物中微塑料与重金属污染物的赋存关系	李文华, 简敏菲, 刘淑丽, 江玉梅, 邓艳彬, 朱琳 (242)
臭氧对生物活性炭中微生物及出水消毒副产物的影响	刘宝明, 王夕希, 张晓夏, 顾艳芳, 李雨平, 阮文权, 缪恒峰, 潘杨 (253)
兰州市西固区儿童饮水重金属暴露与健康风险精细化评估	陈月芳, 孙善伟, 段小丽, 许锦荣, 王娟, 康艺瑾, 梁为纲, 曹素珍 (262)
镁铁层状双金属氢氧化物对磷酸盐的吸附作用及对内源磷释放的控制效果及机制	吴俊麟, 林建伟, 詹艳慧, 程永前, 柏晓云, 辛慧敏, 常明玥 (273)
一硫代磷酸盐在介质上的吸附特征及机制	廖丹雪, 单慧媚, 彭三曦, 潘敖然, 黄健, 陈辉, 赵超然 (284)
酸碱复合改性海泡石亚结构特征及其对Cd(II)吸附性能	谢厦, 徐应明, 闫翠侠, 罗文文, 孙约兵 (293)
脱氮菌剂在低溶解氧黑臭水体中氮代谢特征	赵志瑞, 刘硕, 李铎, 李海萍, 李方红, 张佳瑶, 白志辉 (304)
宏基因组方法分析医药化工废水厂中抗生素耐药菌及抗性基因	陈红玲, 张兴桃, 王晴, 姚沛琳 (313)
淀粉废水处理系统中活性污泥的微生物群落结构及多样性分析	赵婷婷, 乔凯, 王蕾, 张伟, 竺建荣, 唐一, 胡滨, 王香莲, 杨静, 景在涛 (321)
基于SBR-ABR实现PN-SAD耦合工艺的运行与优化调控	陈重军, 张敏, 姜滢, 郭萌蕾, 谢嘉玮, 谢军祥, 沈耀良 (330)
基于间歇饥饿的SNAD工艺运行	李冬, 刘志诚, 徐贵达, 王玉颖, 张杰 (337)
反硝化-高效部分亚硝化-厌氧氨氧化工艺处理老龄垃圾渗滤液	陈小珍, 汪晓军, Karasuta Chayangkun, 周松伟, 钟中, 陈振国, 陈晓坤 (345)
硝化微颗粒污泥快速培养及其亚硝化功能快速实现	刘文如, 宋家俊, 王建芳, 沈耀良 (353)
高频曝停下曝时间对亚硝化颗粒污泥性能的影响	张杰, 劳会妹, 李冬, 魏子清 (360)
中国东北沈抚地区土壤中PBDEs的残留、来源及风险评价	向鑫鑫, 鲁垠涛, 阮起扬, 赖偲, 孙绍斌, 姚宏, 张战胜 (368)
某焦化场地非均质包气带中多环芳烃(PAHs)来源及垂向分布特征	孟祥帅, 吴萌萌, 陈鸿汉, 岳希, 陶抒远 (377)
北京蔬菜地土壤中抗生素抗性基因与可移动元件的分布特征	张汝凤, 宋渊, 高浩泽, 程首涛, 孙艳梅, 王旭明 (385)
长期施肥和耕作下紫色土坡耕地土壤C、N、P和K化学计量特征	杜映妮, 李天阳, 何丙辉, 贺小容, 付适 (394)
亚热带稻田土壤碳氮磷生态化学计量学特征	宋佳龄, 盛浩, 周萍, 段良霞, 周清, 张杨珠 (403)
宛山荡农田土壤氮迁移过程反硝化与厌氧氨氧化	陈志浩, 覃云斌, 丁帮琛, 胡优优, 陈湜, 李正魁 (412)
秸秆炭化还田对滴灌棉田土壤微生物代谢功能及细菌群落组成的影响	王晶, 马丽娟, 刘泽华, 陆伟, 侯振安 (420)
基于PMF模型的九龙江流域农田土壤重金属来源解析	黄华斌, 林承奇, 胡恭任, 于瑞莲, 郝春莉, 陈枫桦 (430)
塔里木盆地东南缘绿洲区土壤钾空间分布及农作物钾富集特征	陈云飞, 周金龙, 曾妍妍, 王松涛, 杜江岩, 孙英, 顾思博 (438)
广西典型碳酸盐岩区农田土壤-作物系统重金属生物有效性及迁移富集特征	马宏宏, 彭敏, 刘飞, 郭飞, 唐世琪, 刘秀金, 周亚龙, 杨柯, 李括, 杨峥, 成杭新 (449)
不同钝化剂对微碱性土壤镉、镍形态及小麦吸收的影响	张静静, 朱爽阁, 朱利楠, 柳海涛, 杨金康, 化党领 (460)
不同钝化剂对鸡粪堆肥重金属钝化效果及其腐熟度指标的影响	栾润宇, 高珊, 徐应明, 纪艺凝, 闫翠侠, 孙约兵 (469)
黄土丘陵区退耕草地土壤呼吸及其组分对氮磷添加的响应	周俊杰, 陈志飞, 杨全, 赖帅彬, 王智, 徐炳成 (479)
炉渣与生物炭施加对福州平原水稻田温室气体排放的后续影响	蓝兴福, 王晓彤, 周雅心, 金强, 许旭萍, 王维奇 (489)
《环境科学》征订启事(89)	
《环境科学》征稿简则(97)	
信息(303, 329, 344)	

兰州市西固区儿童饮用水重金属暴露及健康风险精细化评估

陈月芳, 孙善伟, 段小丽, 许锦荣, 王娟, 康艺瑾, 梁为纲, 曹素珍*

(北京科技大学能源与环境工程学院, 北京市工业典型污染物资源化重点实验室, 北京 100083)

摘要: 饮用水是人体暴露重金属的重要途径之一, 准确评估人体经饮用水暴露重金属的健康风险对其采取针对性地健康风险防范措施具有重要意义. 为探索并准确识别兰州市西固区人群经饮用水途径对重金属暴露的健康风险, 本研究于 2015 年 7~9 月(非采暖期)和 2015 年 12 月~2016 年 1 月(采暖期)开展现场入户调查, 采集当地 0~5 岁和 6~17 岁儿童的饮水和用水样品, 并开展人群饮用水行为模式问卷调查. 通过饮水和用水中 Cd、Cr、Pb 和 As 的浓度分析, 结合儿童饮用水暴露行为模式特征, 采用美国环保署推荐的暴露和健康风险评价模型开展儿童饮水和用水重金属暴露的健康风险研究. 结果表明, 两种水体中 Cd、Cr、Pb 和 As 的浓度均未超过国家生活饮用水卫生标准限值, 用水重金属的浓度受季节性影响较大, 而饮水较小. 饮水和用水中 4 种重金属的非致癌和致癌风险水平范围分别为 $2.82\text{E}-08 \sim 2.43\text{E}-02$ 和 $7.55\text{E}-09 \sim 3.62\text{E}-05$, 均处于可接受风险水平; 但饮水中重金属的致癌和非致癌健康风险均高于用水. 同一时期 0~5 岁儿童用水重金属暴露的致癌和非致癌风险均低于 6~17 岁; 而 0~5 岁儿童饮水中重金属暴露的致癌风险低于 6~17 岁, 非致癌风险却高于 6~17 岁. 研究表明该地区饮水/用水重金属暴露不会对人体健康产生明显危害, 精细化的暴露评估方法可减少健康风险评估的不确定性.

关键词: 健康风险; 重金属; 饮水; 用水; 儿童

中图分类号: X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)01-0262-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.201904229

Refined Assessment of Exposure and Health Risks of Heavy Metals in Water for the Children in Xigu District, Lanzhou

CHEN Yue-fang, SUN Shan-wei, DUAN Xiao-li, XU Jin-rong, WANG Juan, KANG Yi-jin, LIANG Wei-gang, CAO Su-zhen*

(Beijing Key Laboratory of Resource Oriented Treatment of Industrial Pollutants, School of Energy and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Water is an important pathway for human exposure to heavy metals. Accurate assessment of the health risks that are related to exposure to heavy metals in drinking and household water are required for the preparation of targeted health risk prevention measures. This study explores and identifies the health risks related to exposure to heavy metals via drinking and household water pathways in Xigu District, Lanzhou, northwestern China, using household water samples and survey data obtained during July-September 2015 (wet season) and December 2015-January 2016 (dry season). During each period, drinking water and household water that were available for use by children aged 0-5 and 6-17 years were sampled and a questionnaire on water-related behavior patterns was completed for each household. Cd, Cr, Pb, and As concentrations were analyzed in all water samples, and were used along with water-related exposure factors from the questionnaires to estimate exposure doses and associated health risks using models recommended by the United States Environmental Protection Agency (US EPA). The results showed that the concentrations of Cd, Cr, Pb, and As in both drinking and household water samples did not exceed the relative thresholds defined in China's national water quality standards. The concentrations of heavy metals in household water were more affected by seasonal factors than of those of drinking water. The non-cancer and cancer risks were in the ranges of $2.82 \times 10^{-8} \sim 2.43 \times 10^{-2}$ and $7.55 \times 10^{-9} \sim 3.62 \times 10^{-5}$, respectively, which are within acceptable levels, although the non-cancer and cancer risks from drinking water were both higher than of those determined for household water. Furthermore, the non-cancer and cancer risks from household water for children aged 0-5 years were lower than of those for children aged 6-17 years in each period. However, the cancer risk from drinking water for children aged 0-5 years was lower than of that for children aged 6-17 years, whereas the reverse was found for non-cancer risks. This study indicates that Cd, Cr, Pb, and As in drinking and household water did not pose significant detrimental effects to human health, and that the refined exposure assessment used could reduce uncertainties in health risk assessments.

Key words: health risk; heavy metal; drinking water; household water; children

随着社会经济和工业的快速发展,水环境污染 特别是水体重金属污染问题日益突出,饮用水健康

收稿日期: 2019-04-24; 修订日期: 2019-08-13

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项(FRF-TP-17-064A1); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07301005-003)

作者简介: 陈月芳(1973~),女,博士,副教授,主要研究方向为废水的处理与回用、环境材料和设备的研发, E-mail: chen Yuefang@ustb.edu.cn

* 通信作者, E-mail: love-lmd@163.com

已经成为全球关注的重点^[1]。重金属作为饮用水中一类重要的污染物,其来源主要是自然因素和人为活动,如矿石风化、工业活动、城市废水排放、农药污染以及交通污染等^[2,3]。饮用水中重金属的长期暴露可对身体健康造成严重危害^[4,5],如摄入过量的 Cd,会造成人体的肾脏损害、骨骼损伤甚至对神经产生毒害作用^[6,7];饮用水 As 的长期暴露,会严重影响胃肠道、皮肤、神经、肾脏、肝脏、血液、心血管系统,甚至诱发皮肤癌、膀胱癌和肝癌等^[8,9];饮用水 Cr 的暴露会带来较高的致癌风险^[10];而 Pb 的暴露可对儿童的神经系统造成不可逆的损害^[11],并随着暴露量的增加引发失眠,注意力和记忆力受损等问题^[12]。而 Cd、As、Cr 和 Pb 这 4 种元素也被列入我国第一批优先控制化学品名录之中,作为重点管控对象。

中国城镇居民饮用水一般来自市政自来水厂,然而其采用的净化水工艺过程在大多数情况下并不能完全有效地去除无机和有机污染物^[13],且市政自来水输送过程受输水管网的影响可能对饮用水造成重金属的二次污染^[14]。相关研究表明,我国水源地水体存在不同程度的重金属污染现象^[15-17],虽然经自来水厂处理的饮用水中重金属浓度基本满足我国饮用水水质标准,但已有研究表明自来水中重金属的健康风险也不容忽视^[18]。此外,管网末梢水与直接饮用水还存在着加热或过滤等人为处理的差异性^[19],管网末梢水重金属暴露的健康风险并不能等同于直接饮用水重金属暴露的健康风险。因此,基于人群实际的饮用水暴露特征,精细化评价并探究饮用水重金属暴露的健康风险具有重要的现实意义。然而,目前我国关于饮用水中重金属暴露健康风险评价的研究主要集中于水源地^[15,16]或者自来水厂水源水和市政管网末梢水^[20],或管网末梢水的季节性影响^[21],鲜见基于人体饮用水的实际暴露行为开展精细化的健康风险研究,人体经饮水和用水暴露的健康风险特征亟待科学研究的支撑。此外,儿童作为重金属等环境污染物暴露的敏感人群,其生长发育可能受重金属铅等严重损害,其经饮用水重金属暴露的健康风险目前也缺少科学研究,不利于其环境健康风险的防范^[22]。

兰州市西固区是我国典型的工业地区,以生产石油、化工为主,其经济快速发展的同时给环境也带来一定压力。黄河作为该地区唯一的饮用水源,其水体中 Cd、Cr 和 Pb 存在不同程度的污染,As 虽低于国家相关标准,但仍有增加态势^[23,24]。然而,目前关于该地区重金属健康风险的研究主要集中于大气环境^[25,26],针对饮用水中重金属暴露的健康风险

研究甚少。

因此,本研究从儿童经饮用水重金属暴露健康风险防范的角度出发,采集该地区采暖期和非采暖期儿童的饮水(直接饮用的水)和用水(主要来自市政管网末梢水),基于不同时期两种水体中重金属的分布特征及儿童饮用水暴露行为模式特征,开展儿童饮水和用水重金属暴露的精细化评估及其健康风险研究,以期为该地区儿童的饮用水安全做出科学地评估,为饮水水质健康管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 采样地点和人群

兰州市西固区地处黄河河谷盆地,紧邻黄河中上游,海拔 1 500 m,该区属于温带半干旱大陆性气候,年最高气温 35℃ 以上,最低 -23℃,年降雨量 200~300 mm,年蒸发量 1 300~2 100 mm。此外,兰州曾开展八项国家重点建设工程,其中七项在西固区,涉及石油、化工、机械和冶炼这四大产业,经过多年发展,已经形成了电力、化学和冶炼等门类齐全的工业体系,是我国西北地区典型的工业区,也是甘肃省和兰州市的核心工业区、中国西部最大的石油化工基地。黄河是该研究地区的主要饮用水源,居民的日常用水为经过自来水厂处理的自来水。

本研究在西固区随机抽选当地土生土长的 30 名 0~17 岁儿童为调查对象,开展饮用水暴露行为模式问卷调查,及儿童的饮水和用水样品采集分析,以开展人群饮用水重金属暴露及其健康风险的精细化评估,最终抽选的儿童中,男生占 16 人,女生占 14 人;0~5 岁儿童为 13 人,6~17 岁儿童为 17 人。

1.2 饮用水行为模式问卷调查

在获取知情同意的前提下,对所选的 30 名儿童开展饮用水暴露行为模式问卷调查。问卷调查内容包括饮水行为,基本信息和生活方式等,以期获取相关暴露参数信息和关键风险因素。饮水行为调查内容包括日常饮用水的类型、饮用频次和摄入量等;基本信息调查内容包括年龄、体重等;生活方式调查内容包括日常洗澡、游泳等用水行为和频次等信息。饮用水暴露行为模式问卷调查通过一对一、面对面询问儿童家长或监护人的形式开展。

1.3 样品采集及分析测定

依据《水质采样技术指导(HJ 494-2009)》和《生活饮用水标准检验方法-水样的采集与保存(GB/T 5750.2-2006)》,针对每名儿童均开展一对一的入户样品采集,分别采集不同时期儿童饮水和用水样品,并设置采集 10% 的平行双样,每批样品带一个全程序空白和一个运输空白。儿童用水样品

一般来自家庭自来水,而饮水均是采集儿童直接经口摄入的水,如凉开水、桶装水、瓶装水等.样品采集时,需将水样注满经过酸洗处理的聚乙烯采样瓶至溢流,立即滴加浓硝酸,盖紧瓶塞并摇匀,密封保存,4℃冷藏运输至实验室.

取一定量的水样过 0.45 μm 微孔滤膜后,用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)(Agilent 7500a)测定采暖和非采暖期 Cd、Cr 和 Pb 的浓度,利用原子荧光分光光度计(AFS)(ThermoFisher)测定采暖期 As 的浓度.样品测定过程中,每 10 个样品测 1 次空白样和 1 次水质标准品.

1.4 饮用水暴露及健康风险评价

1.4.1 重金属暴露剂量评价

本研究采用美国环保署(USEPA)推荐的暴露评价模型对儿童经饮用水途径暴露重金属的量进行评价.在饮用水暴露评价中,一般考虑经口摄入、经呼吸和经皮肤接触这 3 种暴露途径,其中呼吸途径主要针对特殊情景下(如洗澡)有机污染物的暴露^[27],本研究主要关注饮用水中的重金属暴露特征,故仅考虑经口摄入(饮水-口摄入暴露)和经皮肤接触(用水-皮肤暴露)暴露途径,其评价模型分别见式(1)和式(2)^[28].其中,非致癌物质的暴露量通常用日均暴露剂量(average daily dose,ADD)表征,致癌物质的暴露量用终生日均暴露剂量(life-time average daily dose,LADD)表征.

饮水-经口摄入重金属的日均暴露剂量计算模型:

$$\text{ADD}_{\text{oral}}/\text{LADD}_{\text{oral}} = \frac{c \times \text{IR} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT}} \quad (1)$$

式中,ADD_{oral}/LADD_{oral}为饮水中非致癌和致癌性污染物经口摄入的日均暴露剂量,μg·(kg·d)⁻¹;c为饮水中污染物的浓度,μg·L⁻¹;IR为日均饮水摄入量,L·d⁻¹;EF为暴露频率,d·a⁻¹;ED为暴露持续时间,a;BW为体重,kg;AT为平均暴露时间,d.

用水-经皮肤摄入重金属的日均暴露剂量计算模型:

$$\text{ADD}_{\text{dermal}}/\text{LADD}_{\text{dermal}} = \frac{c \times \text{SA} \times \text{PC} \times \text{ET} \times \text{EF} \times \text{ED} \times \text{CF}}{\text{BW} \times \text{AT}} \quad (2)$$

式中,ADD_{dermal}/LADD_{dermal}为用水中非致癌和致癌性污染物经皮肤暴露的日均吸收剂量,μg·(kg·d)⁻¹;SA为涉水活动过程中与水接触的皮肤表面积,cm²;PC为污染物皮肤渗透常数,cm·h⁻¹;ET为暴露时间,h·d⁻¹;CF为体积转换因子(1 L·1 000 cm⁻³);c、EF、ED、BW 和 AT 同公式(1).

本研究中饮水的摄入量参数(IR)、涉水活动的

时间(ET)、暴露持续时间(ED)和体重(BW)等参数基于本研究现场行为模式问卷调查获取;其他参数如涉水活动过程中与水接触的皮肤表面积(SA)等参数基于中国人群暴露行为模式调查获取^[29,30],污染物皮肤渗透常数等取自相关公开报告^[31].各相关参数的详细取值见表 1.

表 1 儿童饮用水重金属暴露评价相关参数

Table 1 Factors of the exposure assessment of heavy metals in water for children

参数类型	0~5 岁 儿童	6~17 岁 儿童	数据来源
非采暖期饮水量 IR/mL·d ⁻¹	529.26	1423.75	本研究
采暖期饮水量 IR/mL·d ⁻¹	279.75	979.75	本研究
采暖期暴露频率 EF/d·a ⁻¹	152	152	本研究
非采暖期暴露频率 EF/d·a ⁻¹	213	213	本研究
暴露持续时间 ED/a	0~5	6~17	本研究
体重 BW/kg	11.56	41.29	本研究
致癌物平均暴露时间 AT/d	22 500	22 500	[29,30]
皮肤表面积 SA/m ²	0.54	1.33	[29,30]
皮肤暴露时间 ET/h·d ⁻¹	0.078 76	0.208 7	本研究

1.4.2 健康风险评价模型

化学物质的健康风险根据其毒理学性质分为非致癌性化合物(即有阈)和致癌性化合物(即无阈)两类.非致癌物的健康风险以危险熵(hazard quotient, HQ)作为衡量指标,可通过每个暴露途径的 ADD 除以特定暴露途径的参考剂量(reference dose, RfD)来计算,推荐模型见式(3)^[32].

污染物非致癌风险评估模型:

$$\text{HQ} = \text{ADD}/\text{RfD} \quad (3)$$

式中,ADD 为非致癌物质的日均暴露剂量,mg·(kg·d)⁻¹;RfD 为不同暴露途径的日均参考暴露剂量,mg·(kg·d)⁻¹.当 HQ<1 时,表明污染物经该暴露途径的非致癌风险可接受,可能带来的健康风险较小;而当 HQ≥1 时,认为可能存在潜在的非致癌风险^[33].如果同一介质有多种暴露途径,USEPA 假定污染物不产生协同的健康风险,可加和不同暴露途径下的风险来表征个体综合暴露风险,用危险指数(hazard index, HI)来表示,计算模型见式(4)^[34]:

$$\text{HI} = \sum_i \text{HQ} \quad (4)$$

式中,HI 为个体同一介质多种暴露途径下的综合暴露风险.当 HI<1 时,表明污染物经多途径综合暴露的非致癌风险可接受;而当 HI≥1 时,认为可能存在潜在的综合非致癌风险,则需再细分每种暴露途径的风险,分别评价其潜在危害^[33].

致癌物以终生增量致癌风险(incremental lifetime cancer risk, ILCR)来表征人群致癌发生的

概率,通常以单位数量人口出现癌症患者的比例表示,即风险值(risk)或者个体因接触潜在致癌物而在一生中患癌的增量概率^[35],计算见式(5)^[36],

$$ILCR = LADD \times SF \tag{5}$$

式中,ILCR 为发生某种特定有害健康效应而造成等效死亡的终身危险度,无量纲;LADD 为致癌污染物的日均暴露剂量, $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$;SF 为由动物推算出来的某致癌物的致癌斜率因子(slope factor), $\text{kg} \cdot \text{d} \cdot \text{mg}^{-1}$. 若评价多种无阈化学物质的综合致癌风险,可假设各无阈化合物之间无相互作用,将每种无阈化合物的致癌风险相加即可评价其综合致癌风险. 当 $ILCR \leq 10^{-6}$ 时,认为不存在致癌风险或致癌

风险很小; $1.0 \times 10^{-6} \sim 1.0 \times 10^{-4}$ 设为可接受的风险水平;当 $ILCR \geq 10^{-4}$ 时,认为可能存在潜在致癌风险^[32].

根据国际癌症研究机构(IARC)对化合物毒性的定义和分类^[37],本研究将 Cr、As 和 Cd 视为可经口产生致癌效应的致癌物,但是目前仍未发现 Cd 经水体暴露可产生致癌效应;Cr 虽经水体暴露可产生致癌效应,但缺乏水经皮肤暴露途径的致癌斜率因子,因此,本研究考虑 Cr、As、Cd 和 Pb 经口和经皮肤暴露的非致癌风险,同时考虑 As 和 Cr 经口,As 经皮肤暴露的致癌风险. 各化合物相应地 RfD^[39,40] 和 SF^[40] 值如表 2 所示.

表 2 重金属的参考剂量和癌症斜率因子

Table 2 Reference doses and cancer slope factors of heavy metals

重金属	PC ^[38] / $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$	RfD/ $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$		SF/ $\text{kg} \cdot \text{d} \cdot \text{mg}^{-1}$	
		经口	经皮肤	经口	经皮肤
As	0.001 8	0.000 3	0.000 3 ¹⁾	1.5	3.66
Cd	0.002	0.000 5	0.000 5 ¹⁾	—	—
Cr	0.002	0.003	0.003 ¹⁾	0.5	—
Pb	0.000 004	0.001 4	0.001 4 ¹⁾	—	—

1) 表示暂无经皮肤暴露的数值,所以用经口暴露的替代

1.5 数据的处理分析

本研究主要借助统计分析软件 SPSS 21,制图软件 Origin 8 等对数据进行统计分析. 为反映人群经饮用水重金属暴露的分布特征及不确定性,本研究使用 Crystal Ball 软件(16.0)进行蒙特卡罗模拟 10 000 次迭代,研究儿童经饮用水途径对重金属暴露的分布特征及其可能的不确定性.

2 结果与讨论

2.1 饮水和用水中重金属浓度

兰州市西固区采暖期和非采暖期儿童饮用水中不同重金属的浓度结果如图 1 所示. 采暖期,儿童饮水中 Cd、Cr、Pb 和 As 的浓度分别为 (0.02 ± 0.01) 、 (1.54 ± 0.51) 、 (0.52 ± 0.40) 和 $(1.14 \pm 0.83) \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$. 用水中 4 种金属元素的浓度分别为 (0.02 ± 0.02) 、 (1.96 ± 0.82) 、 (0.38 ± 0.43) 和 $(1.07 \pm 0.67) \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$;而非采暖期,儿童饮水中 Cd、Cr 和 Pb 的浓度分别为 (0.01 ± 0.00) 、 (1.59 ± 0.92) 和 $(0.27 \pm 0.16) \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$. 用水中这 3 种重金属的浓度分别为 (0.11 ± 0.09) 、 (2.26 ± 0.58) 和 $(1.94 \pm 2.57) \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$. 与《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2006)中 As、Cd、Cr 和 Pb 的浓度限值(As $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、Cd $0.005 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、Cr $0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 Pb $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)对比发现,不同时期儿童饮用水中 4 种重金属的平均浓度均未超过国家标准浓度限值. 采暖期,饮水和用水中重金属的平均

浓度大小为 $\text{Cr} > \text{As} > \text{Pb} > \text{Cd}$;非采暖期,两种水中重金属的平均浓度大小为 $\text{Cr} > \text{Pb} > \text{Cd}$. 两时期水体中 Cr 浓度较高,这与其他研究结论一致^[41],主要与该地区石油化工行业的生产排放相关.

从不同时期来看,非采暖期用水中 Cd、Cr 和 Pb 的浓度高于采暖期,主要因为重金属可通过该地区的工业生产活动被释放至大气^[42],附着在大气降尘^[43]或累积于土壤^[44];相比采暖期,非采暖期雨量较大,水源水周围土壤和大气中的重金属易被冲刷或通过雨水携带进入水源水或渗透至地下水^[45],该因素相比于雨水的稀释作用更加显著. 此外,水体中重金属的浓度还受其他因素的影响,如人类活动,管网污染等^[46]. 与用水不同,采暖期饮水中 Pb 的浓度约为非采暖期的 2 倍,而 Cd、Cr 的浓度接近于非采暖期,故季节性变化对饮水中 Pb 浓度的影响较大,这可能主要与饮水的类型相关^[47]. 本研究行为模式问卷调查发现采暖期饮用生水 and 开水的量与非采暖期存在明显差异,采暖期饮用开水的比例明显升高,这与他人的研究发现一致^[48];自来水的含 Pb 化合物虽不易溶解且加热条件也比较稳定,基本不发生反应^[49,50],但本研究发现采暖期不锈钢材质的加热容器占比较高,而不锈钢材质加热容器的使用会显著增加水体中 Pb 的浓度^[51].

从不同水体类型来看,用水中 Cd 和 Cr 的浓度高于饮水,As 的浓度低于饮水,这与儿童的饮水方式及类型相关. 该研究饮用水行为模式问卷调查表

明,当地居民对饮水的处理方式主要包括加热和安装过滤装置等,其中绝大部分儿童以烧开的自来水作为饮水. 据研究表明,加热过程对水中 Cd、Cr、Pb 和 As 浓度具有较大的影响,随着温度的升高,自来水中的 Cd 和 Cr 的浓度最终降低,而 As 的浓度会随着温度的升高而逐渐增加^[49]. Pb 的沉降具有季

节性变化,主要是降雨对大气颗粒物的去除作用^[52]. 在非采暖期,降雨过程向市政自来水厂水源水输入 Pb 的浓度远高于其加热条件下 Pb 的变化量;而采暖期降雨量减小,空气和土壤向水源水输入 Pb 的浓度显著降低,从而表现出非采暖期用水中 Pb 浓度远高于饮水中铅浓度,而采暖期规律相反.

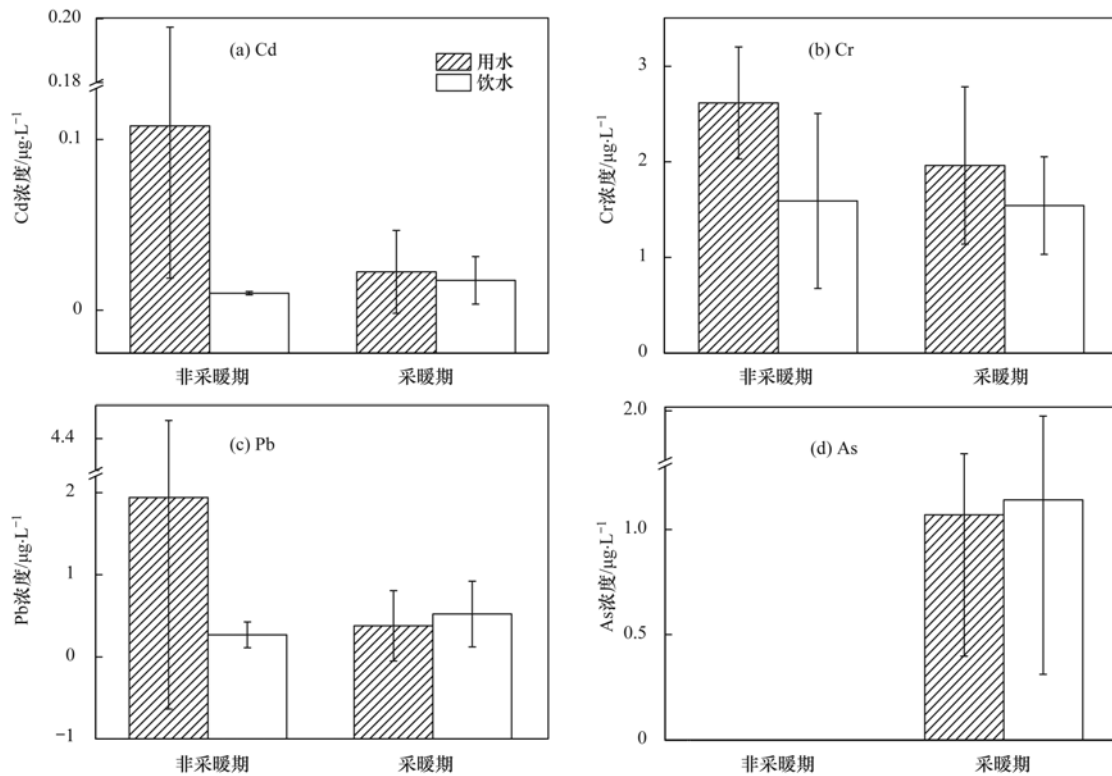


图 1 不同时期不同水体中重金属的浓度

Fig. 1 Concentrations of heavy metals in different water samples in different periods

2.2 儿童饮水和用水重金属暴露量

2.2.1 饮水暴露量

0~5 岁儿童与 6~17 岁儿童在饮食习惯和行模式上存在较大差异,故其经饮用水的重金属暴露量也存在较大差异. 儿童经饮水途径的重金属暴露水平如图 2 所示. 采暖期和非采暖期儿童经饮水中重金属的暴露量均为 Cr 最高, Cd 最小. 不同人群来看, 0~5 岁儿童饮水途径的重金属摄入量高于 6~17 岁儿童, 根据本研究人群饮用水暴露行为模式调查可知, 该地区 6~17 岁儿童的饮水摄入量随体重的增加而增加, 其总饮水量高于 0~5 岁儿童, 但单位体重饮水量低于 0~5 岁儿童, 故当暴露于同一重金属污染水平的饮水时, 0~5 岁儿童经饮水途径重金属的暴露量高于 6~17 岁儿童, 说明开展饮用水污染物的暴露评估时, 单位体重饮水摄入量对其暴露评估的结果影响更大. 此外, 饮水中重金属摄入量存在季节性差异, 饮水中 Cr 浓度在不同时期差异性不显著, 而非采暖期饮水摄入量高于采暖期^[53], 致使饮水中 Cr 暴露量的季节性差异明显.

2.2.2 用水暴露量

采暖期和非采暖期儿童经用水途径对重金属的暴露量均表现为 Cr 最高, Pb 最小 (如图 2), 这主要与水体中较高的 Cr 浓度有关. 此外, 不同年龄儿童的用水暴露行为模式不同, 儿童经用水-皮肤途径的重金属暴露量受污染物浓度、暴露时间、与水接触皮肤表面积等因素的影响, 本地区 6~17 岁儿童的用水暴露时间 ($0.2087 \text{ h} \cdot \text{d}^{-1}$) 约为 0~5 岁儿童的 ($0.07876 \text{ h} \cdot \text{d}^{-1}$) 2.64 倍, 在其他因素差异不明显的情况下, 0~5 岁儿童用水途径的重金属暴露量低于 6~17 岁儿童, 这与他人的研究结果一致^[54]. 从不同时期来看, 采暖期儿童用水中 Cd、Cr 和 Pb 暴露量低于非采暖期, 主要由于采暖期水体的浓度和儿童与水接触皮肤表面积及暴露水体的时间均低于非采暖期所致, 这与我国其他地方人群用水暴露行为模式特征相似^[48,55].

2.2.3 饮水和用水综合暴露量

重金属 As、Pb、Cd 和 Cr 的每日耐受摄入量 (provisional tolerated daily intake, PTDI) 分别 (以 BW

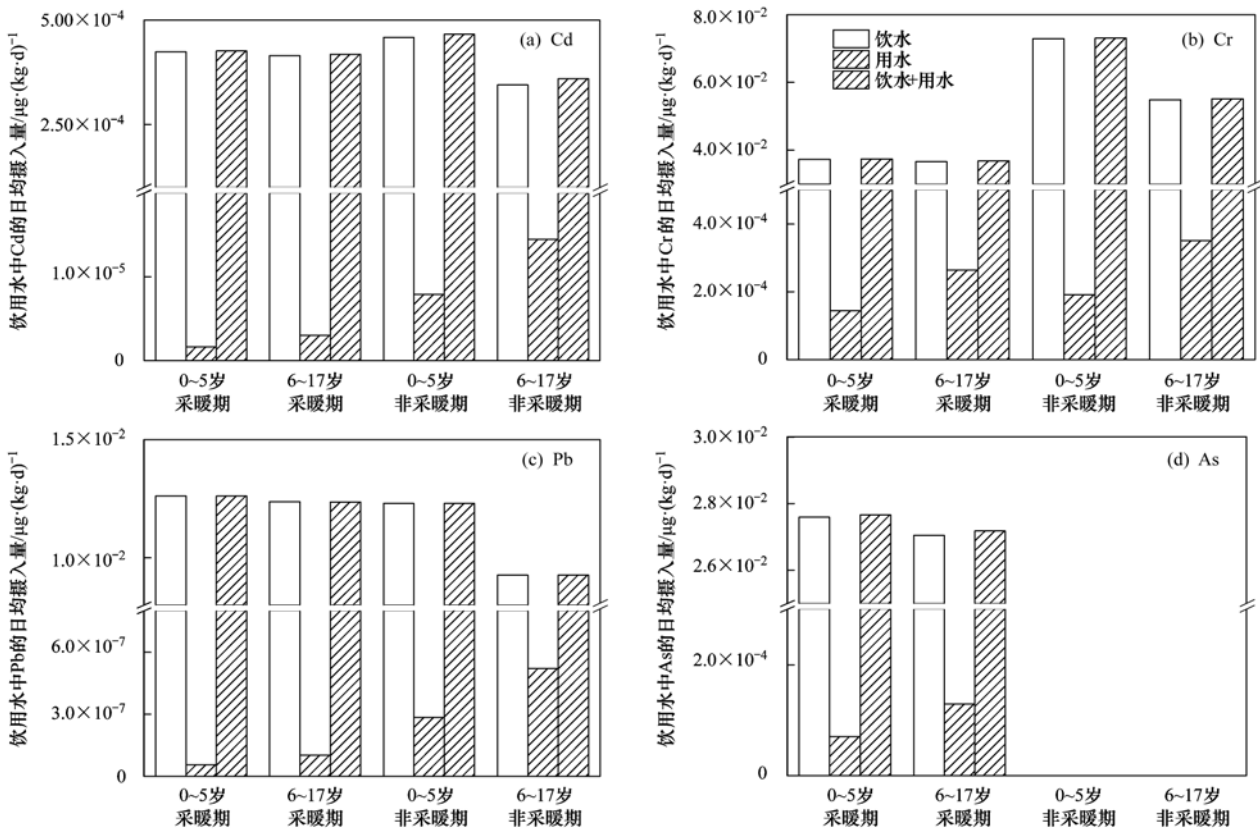


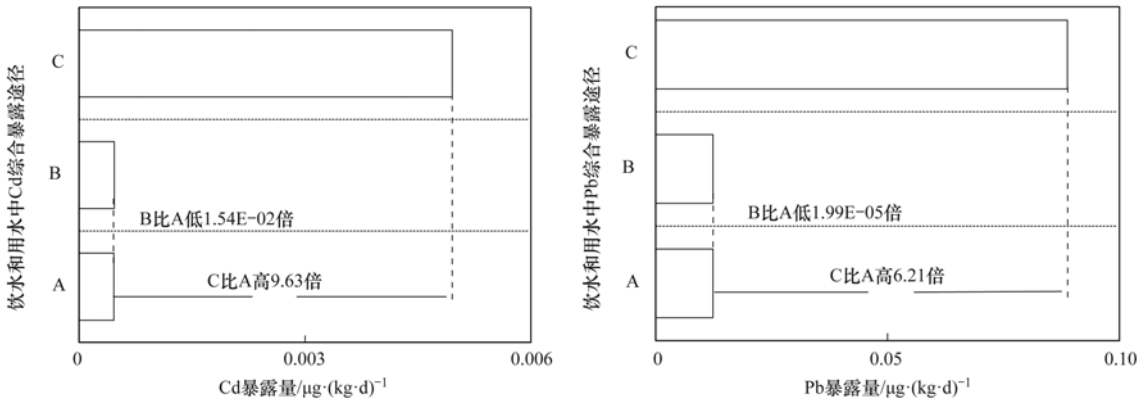
图2 儿童饮水和用水途径的重金属暴露量
Fig. 2 Exposure doses of heavy metals via drinking and household water for children

计,下同)是 2.14 、 3.57 、 1.0 和 $3 \mu\text{g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ [56,57]。本研究非采暖期0~5岁儿童经饮水和用水的各重金属综合暴露量分别为 $2.77\text{E}-02$ 、 $1.26\text{E}-02$ 、 $4.25\text{E}-04$ 和 $3.75\text{E}-02 \mu\text{g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$,6~17岁儿童分别为 $2.72\text{E}-02$ 、 $1.24\text{E}-02$ 、 $4.18\text{E}-04$ 和 $3.69\text{E}-02 \mu\text{g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$;采暖期0~5岁儿童Pb、Cd和Cr的综合暴露量分别为 $1.23\text{E}-02$ 、 $4.66\text{E}-04$ 和 $7.30\text{E}-02 \mu\text{g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$,6~17岁儿童分别为 $9.27\text{E}-03$ 、 $3.59\text{E}-04$ 和 $5.52\text{E}-02 \mu\text{g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$,均远低于推荐的重金属每日耐受摄入量,说明本研究人群经饮用水暴露重金属的风险可能处于安全水平。

从图2看出,经饮水和用水的重金属综合暴露量与经饮水的重金属暴露量基本接近,而儿童经饮水途径的重金属暴露量高于用水的重金属暴露量,证明饮水的经口暴露是人体暴露水体重金属的主要途径,这与他人的研究结果相同 [58,59]。

2.2.4 饮用水精细化暴露评估

以非采暖期0~5岁儿童饮水和用水中Cd和Pb精细化综合暴露为例(如图3),对于Cd和Pb,基于用水开展的经口和经皮肤的综合暴露量远高于饮水经口和用水经皮肤的综合暴露量,而饮水经口和饮水经皮肤的综合暴露量略低于饮水经口和用水经



A: 饮水经口 + 用水经皮肤; B: 饮水经口 + 饮水经皮肤; C: 用水经口 + 用水经皮肤

图3 非采暖期0~5岁儿童饮水和用水Cd和Pb的精细化综合暴露量

Fig. 3 Expose doses of Cd and Pb in drinking and household water for children aged 0-5 years using the refined assessment

皮肤的综合暴露量。结合 2.2.1、2.2.2 和 2.2.3 节可知,饮水暴露是儿童水体暴露的主要方式,故饮水经口和饮水经皮肤的综合暴露与饮水经口和用水经皮肤的综合暴露差异较小,但不能忽视。而用水经口和用水经皮肤的综合暴露与饮水经口和用水经皮肤的综合暴露存在较大差异,故在饮用水综合暴露评估中,应结合人体实际暴露的主要途径,展开精细化暴露评估,如受条件限制无法开展精细化暴露评估,一定程度上可参考饮水暴露来反映饮用水综合暴露,以降低结果的不确定性;而如果将人体用水暴露等同于饮水暴露或饮用水综合暴露可能会过高(如 Cd)或过低(如 As)估算人体的真实暴露水平,容易导致在饮用水健康管理中出现“过保护”或“欠保护”的现象,不利于管理决策的实施,因此建议开展精细化暴露评估以反映人群实际的暴露水平,并以此开展人群健康风险研究。

2.3 非致癌风险

儿童经饮水和用水途径重金属暴露的非致癌健康风险如图 4 所示。采暖期,经饮水和用水暴露的非致癌风险均为 As 最高,其次为 Cr 暴露的风险,各重金属暴露的非致癌风险均处于可接受的风险水平。较高的 As 暴露非致癌风险与 As 来源众多、工业和生活采暖中的煤燃烧释放有关^[60,61]。非采暖期,经饮水和用水暴露的非致癌风险均为 Cr 最高,Pb 和 Cd 的风险较低。从不同时期来看,非采

暖期用水中 Cd、Cr 和 Pb 的非致癌风险均高于采暖期,故需从用水类型、方式及暴露时间等方面着手以降低健康风险。从不同途径来看,与不同暴露途径的重金属暴露量分布特征相似,重金属经饮水暴露的非致癌风险高于经用水途径的非致癌风险。从不同人群来看,0~5 岁儿童经饮水途径重金属暴露的非致癌风险高于 6~17 岁儿童,而经用水暴露的非致癌风险低于 6~17 岁儿童,主要由于水体污染物暴露的非致癌风险不仅与污染物毒性相关,还与暴露方式以及单位体重摄入量等因素相关^[54],由此说明该地区 0~5 岁儿童的饮水健康更值得关注,且不能忽视 6~17 岁儿童用水暴露的健康风险。

不同重金属经饮水和用水的综合非致癌风险分布特征,与经饮水暴露途径的非致癌风险分布特征一致,饮水暴露对综合非致癌风险的贡献相对较大(大于 99%)。结合图 3,说明开展饮用水重金属暴露的健康风险评估时应重点关注饮水暴露途径,且不能直接将用水替代饮水开展单一途径的风险或多途径的综合致癌风险分析,否则影响结果的科学性。

2.4 致癌风险

儿童经水暴露重金属致癌风险的计算结果见表 3。饮水和用水中 Cr 和 As 的致癌风险均处于可接受水平。从采暖期 As 的健康风险看出,儿童经饮水

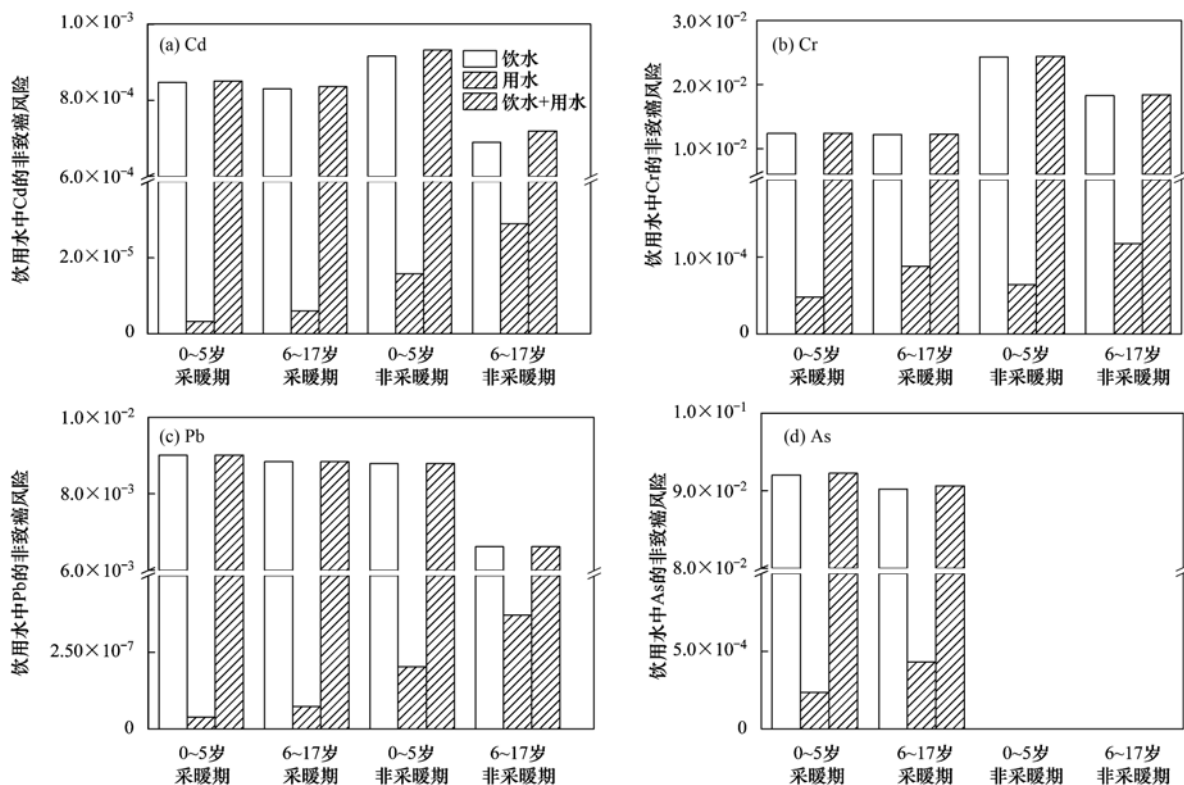


图 4 儿童饮水和用水中重金属暴露的非致癌风险

Fig. 4 Non-cancer risks due to exposure to heavy metals via drinking and household water for children

摄入重金属的致癌风险高于经用水暴露的风险,这与他人的研究结果相似^[54]。从不同年龄看,6~17岁儿童饮水和用水及综合暴露的致癌风险高于0~5岁儿童,故从致癌风险角度应重点关注6~17岁

儿童的饮用水健康问题。从不同季节,非采暖期饮水中Cr致癌风险高于采暖期,与Cr的非致癌风险分布规律相似,说明非采暖期饮水的健康安全更应该得到重视。

表3 儿童饮水和用水中重金属暴露的致癌风险

Table 3 Carcinogenic risks due to exposure to heavy metals via drinking and household water for children

组别	重金属	采暖期		非采暖期
		Cr	As	Cr
饮水-经口 ILCR	0~5岁	1.12E-05	3.00E-06	2.19E-05
	6~17岁	2.42E-05	6.38E-06	3.62E-05
用水-经皮肤 ILCR	0~5岁	—	7.55E-09	—
	6~17岁	—	3.04E-08	—
总 ILCR	0~5岁	1.12E-05	3.01E-06	2.19E-05
	6~17岁	2.42E-05	6.41E-06	3.62E-05

2.5 不确定性分析

饮用水重金属暴露健康风险评估结果的准确性受样品的代表性、样品的均质性、人群抽样、暴露参数的准确性、模型稳定性等因素的影响。首先本研究的样本量相对较小,可能导致结果存在一定的偶然性;其次,由于儿童饮食习惯,居住环境以及生理体质特征的差异,通过问卷调查获取的暴露参数不一定完全适合本地区儿童,可能增加健康风险评估结果的偏差;饮用水样品采集和实验室检测过程虽按照国家相关标准进行,但仍存在许多干扰因素,使得重金属的浓度结果存在一定的不确定性;此外,人群样本抽样过程以及健康风险评估模型本身也存在一定的不确定性;而本研究的健康风险仅考虑了饮水中Cd、Cr、Pb和As这4种元素,其计算结

果可能低于实际的健康风险值。为评估本研究儿童饮用水重金属暴露风险评价结果的不确定性^[62],以Cd饮水暴露途径的非致癌风险为例,考虑儿童饮水摄入量、体重、饮水Cd浓度等因子的分布特征,采用蒙特卡洛模拟对采暖期6~17岁儿童饮水经口Cd暴露的非致癌风险重复计算10 000次,绘制非致癌风险的累积频率分布,如图5所示。结果表明儿童饮水途径Cd暴露非致癌风险的均值和中位值分别为8.31E-4和8.06E-4,与利用USEPA推荐的健康风险评价模型评估的结果8.30E-4较为接近,说明本研究开展的儿童经饮水和用水途径的重金属暴露健康风险评估结果的偏差较小,当地儿童通过目前的饮水和用水途径暴露重金属的风险确实不足以引起显著危害。

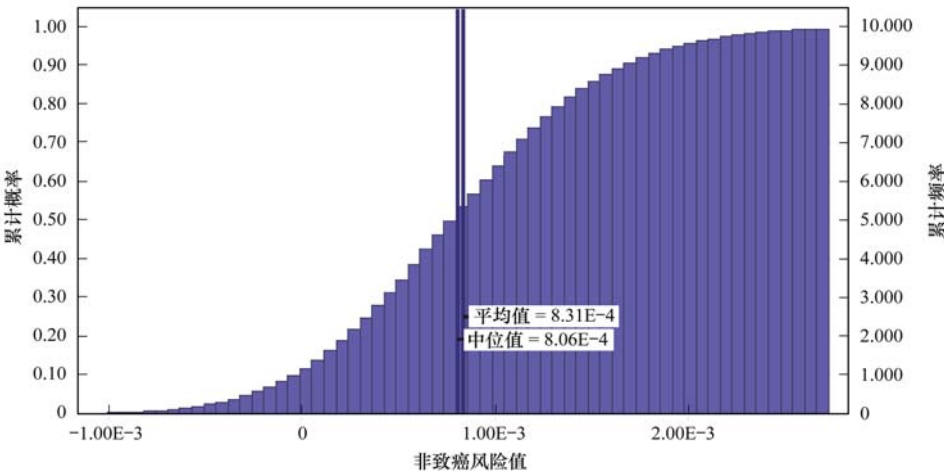


图5 采暖期6~17岁儿童饮水Cd暴露非致癌风险累积频率概率分布

Fig. 5 Cumulative frequency and probability distribution of non-cancer risk of Cd exposure through water intake for children aged 6-17 years

3 结论

(1)研究区域内,采暖期和非采暖期儿童饮水和用水中Cd、Cr、As和Pb的浓度均低于国家《生活饮用水卫生标准》相应的限值。总体上,饮水和用

水的重金属水平非采暖期高于采暖期,用水高于饮水,且用水中重金属的浓度变化受季节影响较大。

(2)各时期各重金属经饮水和用水途径的日均综合暴露量均低于其每日耐受摄入量。儿童经饮水途径的重金属暴露量远高于经用水途径,饮水是儿

童暴露水体重金属的主要途径。0~5岁儿童经饮水摄入的重金属暴露量高于6~17岁儿童,而经用水途径的暴露量低于6~17岁儿童。

(3)该地区儿童经饮水暴露的非致癌健康风险高于经用水途径的健康风险。0~5岁儿童经饮水途径的非致癌风险高于6~17岁儿童,其致癌风险低于6~17岁儿童;而0~5岁儿童经用水途径的非致癌风险低于6~17岁儿童。各重金属经饮水和用水途径的综合非致癌风险均在可接受范围之内。由于本研究仅考虑了饮用水中部分重金属的健康风险,因此不能说明该地区的重金属污染对儿童健康不存在影响,仍需要长期重点关注儿童饮用水中重金属如As和Cr的健康风险。

(4)评价人体经水暴露的健康风险时,将用水的经口暴露量等同于人体饮水经口的暴露量,与人体真实暴露水平存在一定的差别。建议采用精细化暴露评估方法开展人体饮用水的健康风险评估。

致谢:中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所分析测试中心陕红老师在前期实验室分析方面提供了极大帮助,闫芳芳及其他课题组成员共同参与了现场入户调查和行为模式问卷调查,在此一并致谢!

参考文献:

- [1] Yan M T, Nie H Y, Wang W J, *et al.* Occurrence and toxicological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons and heavy metals in drinking water resources of southern China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, **15**(7): 1422.
- [2] Withanachchi S S, Ghambashidze G, Kunchulia I, *et al.* Water quality in surface water: a preliminary assessment of heavy metal contamination of the Mashavera River, Georgia [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, **15**(4): 621.
- [3] Qu L Y, Huang H, Xia F, *et al.* Risk analysis of heavy metal concentration in surface waters across the rural-urban interface of the Wen-Rui Tang River, China [J]. *Environmental Pollution*, 2018, **237**: 639-649.
- [4] Geng M H, Qi H J, Liu X L, *et al.* Occurrence and health risk assessment of selected metals in drinking water from two typical remote areas in China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, **23**(9): 8462-8469.
- [5] Rahman M A, Kumar S, Mohana A A, *et al.* Coliform bacteria and trace metals in drinking water, southwest Bangladesh: Multivariate and human health risk assessment [J]. *International Journal of Environmental Research*, 2019, **13**(2): 395-408.
- [6] Chakraborty S, Dutta A R, Sural S, *et al.* Ailing bones and failing kidneys: a case of chronic cadmium toxicity [J]. *Annals of Clinical Biochemistry: International Journal of Laboratory Medicine*, 2013, **50**(5): 492-495.
- [7] Yu D M, Zhang L E, Yu G Q, *et al.* Association of liver and kidney functions with Klotho gene methylation in a population environment exposed to cadmium in China [J]. *International Journal of Environmental Health Research*, 2019, **29**(6), doi: 10.1080/09603123.2019.1572106.
- [8] Gunduz O, Bakar C, Simsek C, *et al.* The health risk associated with chronic diseases in villages with high arsenic levels in drinking water supplies [J]. *Exposure and Health*, 2017, **9**(4): 261-273.
- [9] States J C, Srivastava S, Chen Y, *et al.* Arsenic and cardiovascular disease [J]. *Toxicological Sciences*, 2009, **107**(2): 312-323.
- [10] Naz A, Mishra B K, Gupta S K. Human health risk assessment of chromium in drinking water: a case study of Sukinda Chromite Mine, Odisha, India [J]. *Exposure and Health*, 2016, **8**(2): 253-264.
- [11] Pan S X, Lin L F, Zeng F, *et al.* Effects of lead, cadmium, arsenic, and mercury co-exposure on children's intelligence quotient in an industrialized area of southern China [J]. *Environmental Pollution*, 2018, **235**: 47-54.
- [12] Robson M. Methodologies for assessing exposures to metals: human host factors [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2003, **56**(1): 104-109.
- [13] Lu S Y, Zhang H M, Sojinu S O, *et al.* Trace elements contamination and human health risk assessment in drinking water from Shenzhen, China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, **187**(1): 4220.
- [14] Liu Q L, Han W Q, Han B J, *et al.* Assessment of heavy metals in loose deposits in drinking water distribution system [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2018, **190**(7): 388.
- [15] 张清华, 韦永著, 曹建华, 等. 柳江流域饮用水源地重金属污染与健康风险评价 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(4): 1598-1607.
- [16] 王若师, 许秋瑾, 张炯, 等. 东江流域典型乡镇饮用水源地重金属污染健康风险评价 [J]. *环境科学*, 2012, **33**(9): 3083-3088.
- [17] 余葱葱, 赵委托, 高小峰, 等. 陆浑水库饮用水源地水体中金属元素分布特征及健康风险评价 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(1): 89-98.
- [18] 薛鸣, 金铨, 张力群, 等. 杭州市生活饮用水健康风险评价 [J]. *预防医学*, 2019, **31**(1): 28-32.
- [19] Wu J H, Man Y, Sun G Y, *et al.* Occurrence and health-risk assessment of trace metals in raw and boiled drinking water from rural areas of China [J]. *Water*, 2018, **10**(5): 641.
- [20] 耿雅妮, 董洁, 张军, 等. 宝鸡市区生活饮用水重金属空间分布及风险评价 [J]. *环境科学与技术*, 2019, **42**(2): 231-236.
- [21] Geng Y N, Dong J, Zhang J, *et al.* Heavy metal spatial distribution and risk assessment of drinking water in Baoji city [J]. *Environmental Science and Technology*, 2019, **42**(2): 231-236.

- 231-236.
- [21] 谢许情, 赖肖, 章英. 南昌市城市饮用水水质健康风险评价[J]. 环境卫生学杂志, 2016, **6**(1): 51-59.
Xie X Q, Lai X, Zhang Y. Health risk assessment of drinking water supply in Nanchang [J]. Journal of Environmental Hygiene, 2016, **6**(1): 51-59.
- [22] Rodríguez-Barranco M, Lacasaña M, Aguilar-Garduno C, *et al.* Association of arsenic, cadmium and manganese exposure with neurodevelopment and behavioural disorders in children: a systematic review and meta-analysis [J]. Science of the Total Environment, 2013, **454-455**: 562-577.
- [23] 汪文琦, 廉耀康, 段辉, 等. 黄河兰州段污染因子变化趋势研究[J]. 上海环境科学, 2018, **37**(5): 219-223.
Wang W Q, Lian Y K, Duan H, *et al.* A study on the variation tendency of water pollution factors in Lanzhou reach of the Yellow River [J]. Shanghai Environmental Sciences, 2018, **37**(5): 219-223.
- [24] Zuo H, Ma X L, Yang K, *et al.* Distribution and risk assessment of metals in surface water and sediment in the upper reaches of the Yellow River, China [J]. Soil and Sediment Contamination: An International Journal, 2016, **25**(8): 917-940.
- [25] 王新, 聂燕, 陈红, 等. 兰州城区大气 PM_{2.5} 污染特征及来源解析[J]. 环境科学, 2016, **37**(5): 1619-1628.
Wang X, Nie Y, Chen H, *et al.* Pollution characteristics and source apportionment of PM_{2.5} in Lanzhou city [J]. Environmental Science, 2016, **37**(5): 1619-1628.
- [26] 李盛, 王金玉, 王宇红, 等. 兰州市西固区大气污染对小学生肺通气功能的影响[J]. 环境与健康杂志, 2015, **32**(9): 820-823.
Li S, Wang J Y, Wang Y H, *et al.* Effects of air pollution on pulmonary ventilation function of pupils in Xigu district of Lanzhou [J]. Journal of Environment and Health, 2015, **32**(9): 820-823.
- [27] 王少鹏, 李静, 毕伟, 等. 饮用水风险暴露评价中的暴露途径研究[J]. 地下水, 2016, **38**(2): 102-103.
Wang S P, Li J, Bi W, *et al.* Route of exposure for drinking water exposure assessment [J]. Ground Water, 2016, **38**(2): 102-103.
- [28] USEPA. Exposure factors handbook [R]. Washington: Office of Research and Development, 1997.
- [29] 环境保护部. 中国人群暴露参数手册(儿童卷: 6~17岁) [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2016.
Ministry of Environmental Protection. Exposure factors handbook of Chinese population, children (6~17 years) [M]. Beijing: China Environmental Press, 2016.
- [30] 环境保护部. 中国人群暴露参数手册(儿童卷: 0~5岁) [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2016.
Ministry of Environmental Protection. Exposure factors handbook of Chinese population, children (0~5 years) [M]. Beijing: China Environmental Press, 2016.
- [31] EPA/600/8-91/011B, Dermal exposure assessment: Principles and applications [S].
- [32] EPA/600/R-09/052A, Exposure factors handbook 2011 Edition (Final) [S].
- [33] Al-Saleh I, Nester M, Devol, *et al.* Determinants of Blood Lead Levels in Saudi Arabian Schoolgirls [J]. International Journal of Occupational and Environmental Health, 1999, **5**(2): 107-114.
- [34] EPA 540-I-86 060, Superfund public health evaluation manual [S].
- [35] USEPA. Regional screening levels (RSLs) [R]. Washington, DC: United States Environmental Protection Agency, 2011.
- [36] 董婷, 李天昕, 赵秀阁, 等. 某焦化厂周边大气 PM₁₀ 重金属来源及健康风险评价[J]. 环境科学, 2014, **35**(4): 1238-1244.
Dong T, Li T X, Zhao X G, *et al.* Source and health risk assessment of heavy metals in ambient air PM₁₀ from one coking plant [J]. Environmental Science, 2014, **35**(4): 1238-1244.
- [37] IARC. Agents classified by the IARC Monographs, Volumes 1-124 [R]. International Agency for Research on Cancer, 2019.
- [38] Cao S Z, Duan X L, Zhao X G, *et al.* Health risks from the exposure of children to As, Se, Pb and other heavy metals near the largest coking plant in China [J]. Science of the Total Environment, 2014, **472**: 1001-1009.
- [39] U.S. Department of Energy. The risk assessment information system [EB/OL]. https://rais.ornl.gov/tools/rais_chemical_risk_guide.html, 2010-08-23.
- [40] U.S. Environmental Protection Agency's. Integrated risk information system [EB/OL]. <https://www.epa.gov/iris>, 2011-01-15.
- [41] Zhitkovich A. Chromium in drinking water: sources, metabolism, and cancer risks [J]. Chemical Research in Toxicology, 2011, **24**(10): 1617-1629.
- [42] 魏巧珍, 李盛, 贾清, 等. 兰州市大气 PM_{2.5} 中重金属的污染特征及健康风险评价[J]. 中华预防医学杂志, 2018, **52**(6): 601-607.
Wei Q Z, Li S, Jia Q, *et al.* Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in PM_{2.5} in Lanzhou [J]. Chinese Journal of Preventive Medicine, 2018, **52**(6): 601-607.
- [43] 李萍, 薛粟尹, 王胜利, 等. 兰州市大气降尘重金属污染评价及健康风险评价[J]. 环境科学, 2014, **35**(3): 1021-1028.
Li P, Xue S 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.
- [44] Wang B, Xia D S, Yu Y, *et al.* Magnetic records of heavy metal pollution in urban topsoil in Lanzhou, China [J]. Chinese Science Bulletin, 2013, **58**(3): 384-395.
- [45] Ewa E E, Iwara A I, Offiong V E, *et al.* Seasonal variations in heavy metal status of the Calabar River, Cross River State, Nigeria [J]. Journal of Natural Sciences Research, 2013, **3**(11): 78-83.
- [46] 陈艳华, 王非, 黄涛, 等. 湖南省湘资沅澧四大流域管网末梢水中重金属的健康风险评价[J]. 实用预防医学, 2018, **25**(2): 171-175.
Chen Y F, Wang F, Huang T, *et al.* Health risk assessment of heavy metals in tap water from the Xiang, Zi, Yuan and Li river in Hunan province [J]. Practical Preventive Medicine, 2018, **25**(2): 171-175.
- [47] 任珺, 陶玲, 杜忠. 兰州市家庭饮用水状况的调查[J]. 环境与健康杂志, 2017, **24**(5): 320-322.
Ren J, Tao L, Du Z. Investigation of household drinking water in Lanzhou city [J]. Journal of Environment and Health, 2017, **24**(5): 320-322.
- [48] 黄春华, 丁新良, 张岚, 等. 无锡地区居民饮用水暴露情况分析[J]. 环境卫生学杂志, 2017, **7**(2): 95-101.
Huang C H, Ding X L, Zhang L, *et al.* Analysis on drinking water exposure in Wuxi residents [J]. Journal of Environmental Hygiene, 2017, **7**(2): 95-101.
- [49] 薛峰峰. 加热对饮用水水质的影响及其机理研究[J]. 河北工程技术高等专科学校学报, 2005, (2): 1-4.
Xue F F. Influence of heating on drinking water quality as well as

- its principles[J]. Journal of Hebei Engineering and Technical College, 2005, (2): 1-4.
- [50] Liu J, Wang H L, Lü C X, *et al.* Remove of heavy metals (Cu^{2+} , Pb^{2+} , Zn^{2+} and Cd^{2+}) in water through modified diatomite [J]. Chemical Research in Chinese Universities, 2013, **29**(3): 445-448.
- [51] 匡步肖, 马国军, 毛振威, 等. 不锈钢厨具材料中重金属元素的迁移行为[J]. 武汉科技大学学报, 2015, **38**(5): 336-340.
- Kuang B X, Ma G J, Mao Z W, *et al.* Migration behavior of heavy metals from stainless steel utensils[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2015, **38**(5): 336-340.
- [52] 张六一, 刘源, 乔保清, 等. 三峡库区腹地大气微量金属干湿沉降特征[J]. 环境科学, 2016, **37**(2): 466-474.
- Zhang L Y, Liu Y, Qiao B Q, *et al.* Characteristics of atmospheric dry and wet deposition of trace metals in the hinterland of the Three Gorges reservoir, China [J]. Environmental Science, 2016, **37**(2): 466-474.
- [53] 徐幽琼, 张晓阳, 刘小华, 等. 福州市 6~18 岁儿童青少年饮水暴露参数的研究[J]. 环境与健康杂志, 2014, **31**(9): 780-783.
- Xu Y Q, Zhang X Y, Liu X H, *et al.* Study on drinking water exposure factors among children and teenagers aged 6-18 years in Fuzhou[J]. Journal of Environment and Health, 2014, **31**(9): 780-783.
- [54] 段小丽, 王宗爽, 李琴, 等. 基于参数实测的水中重金属暴露的健康风险研究[J]. 环境科学, 2011, **32**(5): 1329-1339.
- Duan X L, Wang Z S, Li Q, *et al.* Health risk assessment of heavy metals in drinking water based on field measurement of exposure factors of Chinese people[J]. Environmental Science, 2011, **32**(5): 1329-1339.
- [55] 段小丽, 张文杰, 王宗爽, 等. 我国北方某地区居民涉水活动的皮肤暴露参数[J]. 环境科学研究, 2010, **23**(1): 55-61.
- Duan X L, Zhang W J, Wang Z S, *et al.* Water-related activity and dermal exposure factors of people in typical areas of northern China[J]. Research of Environmental Sciences, 2010, **23**(1): 55-61.
- [56] JECFA. Reports of the 53rd meeting of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives [R]. JECFA/53/TRS. Rome, Italy. 1999.
- [57] JECFA. Summary and conclusions of the 61st meeting of the Joint FAO/WHO expert committee on food additives [R]. Rome, Italy: JECFA, 2003.
- [58] Duggal V, Rani A. Carcinogenic and non-carcinogenic risk assessment of metals in groundwater via ingestion and dermal absorption pathways for children and adults in Malwa region of Punjab[J]. Journal of the Geological Society of India, 2018, **92**(2): 187-194.
- [59] Li R, Kuo Y M, Liu W W, *et al.* Potential health risk assessment through ingestion and dermal contact arsenic-contaminated groundwater in Jiangnan Plain, China [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2018, **40**(4): 1585-1599.
- [60] Wang C B, Liu H M, Zhang Y, *et al.* Review of arsenic behavior during coal combustion: Volatilization, transformation, emission and removal technologies[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2018, **68**: 1-28.
- [61] Duan J C, Tan J H. Atmospheric heavy metals and arsenic in China: Situation, sources and control policies[J]. Atmospheric Environment, 2013, **74**: 93-101.
- [62] 佟瑞鹏, 杨校毅. 基于蒙特卡罗模拟的土壤环境健康风险评估: 以 PAHs 为例[J]. 环境科学, 2017, **38**(6): 2522-2529.
- Tong R P, Yang X Y. Environmental health risk assessment of contaminated soil based on Monte Carlo method: a case of PAHs [J]. Environmental Science, 2017, **38**(6): 2522-2529.

CONTENTS

Spatiotemporal Variations of PM _{2.5} Pollution Evolution in China in Recent 20 Years	SHI Yan, LIU Rui-mei, LUO Yi, <i>et al.</i> (1)
Characteristics of Aerosol Particulate Concentrations and Their Climate Background in Shanghai During 2007-2016	ZHENG Qing-feng, SHI Jun, TAN Jian-guo, <i>et al.</i> (14)
Characteristics and Sources of Elements in PM _{2.5} During Summer for Three Typical Cities in Pingdingshan-Suizhou-Wuhan, Central China	LIU Wei-jie, SHI Ming-ming, CHENG Cheng, <i>et al.</i> (23)
PM _{2.5} Pollution Characteristics During Winter and Summer in the Hohhot-Baotou-Ordos Region, China	LI Yi-ming, LIU Jia-yuan, SHI Guo-liang, <i>et al.</i> (31)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of PM _{2.5} During Heavy Pollution in Shijiazhuang City Around New Year's Day 2019	ZHOU Jing-bo, DUAN Jing-chun, WANG Jian-guo, <i>et al.</i> (39)
Modeling Studies of Source Contributions to PM _{2.5} in Chengdu, China	XU Yan-ling, YI Ai-hua, XUE Wen-bo (50)
Chemical Characteristics of Arsenic in PM _{2.5} in Beijing	SHI Shao-xuan, YANG Yan-rong, QIN Juan-juan, <i>et al.</i> (57)
Pollution Characteristics and Potential Source Contributions of Gaseous Elemental Mercury (GEM) During Summer and Autumn in Ningbo City	YI Hui, LIN Jia-mei, CAI Qiu-liang, <i>et al.</i> (65)
Seasonal Characteristics and Source Analysis of Water-Soluble Ions in PM _{2.5} of Anyang City	SUN You-chang, JIANG Nan, WANG Shen-bo, <i>et al.</i> (75)
Analysis of Stable Carbon Isotope Characteristics of PM _{2.5} in Summer and Winter Season in Xinxiang City	YAN Guang-xuan, SONG Xin, ZHANG Jing-wen, <i>et al.</i> (82)
Construction and Evaluation on Size Resolved Source Apportionment Methods Based on Particle Size Distribution of Chemical Species	LIANG Yong-li, TIAN Ying-ze, LIU Tong, <i>et al.</i> (90)
Fine Particulate Emission Characteristics of an Ultra-Low Emission Coal-Fired Power Plant	WANG Run-fang, MA Da-wei, JIANG Shao-yi, <i>et al.</i> (98)
Driving Factors of the Significant Increase in Surface Ozone in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, China, During 2013-2018	YU Yi-jun, MENG Xiao-yan, WANG Zhen, <i>et al.</i> (106)
Characteristic of Surface Ozone and Meteorological Parameters Analysis in Anyang City	YANG Jian, YIN Sha-sha, YU Shi-jie, <i>et al.</i> (115)
Emission Inventory of Intermediate Volatility Organic Compounds from Vehicles in the Yangtze River Delta in 2017 and the Impact on the Formation Potential of Secondary Organic Aerosols	WANG Qian, HUANG Ling, WANG Yang-jun, <i>et al.</i> (125)
Exhaust Smoke of Non-Road Vehicles in Typical Cities of Eastern China	LU Jun, HU Qing-yao, YANG Qiang, <i>et al.</i> (133)
Emission Status and Standards of Volatile Organic Compounds from Chinese and Foreign Bulk Petroleum Terminals	HU Wei, REN Bi-qi, HUANG Yu-hu, <i>et al.</i> (139)
Secondary Organic Aerosol Mass Yield and Characteristics from 4-ethylguaiaacol Aqueous ·OH Oxidation: Effects of Initial Concentration	ZHUANG Yu, CHEN Yan-tong, LI Xu-dong, <i>et al.</i> (146)
Stable Isotope Characteristics and Vapor Source of Precipitation in the South and North Slopes of Wushaoling Mountain	XU Xiu-ting, JIA Wen-xiong, ZHU Guo-feng, <i>et al.</i> (155)
Characteristics and Influencing Factors of Stable Hydrogen and Oxygen Isotopes in Groundwater in the Permafrost Region of the Source Region of the Yangtze River	WANG Shao-yong, HE Xiao-bo, DING Yong-jian, <i>et al.</i> (166)
Hydrochemical and Isotopic Characteristics of the Lake Balkhash Catchment, Kazakhstan	SHEN Bei-bei, WU Jing-lu, JILILI Abuduwali, <i>et al.</i> (173)
Effect of a Comprehensive Improvement Project on Water Quality in Urban Lakes: A Case Study of Water Quality Variation in Lihu Lake Over the Past 30 Years	TIAN Wei, YANG Zhou-sheng, SHAO Ke-qiang, <i>et al.</i> (183)
Detection Method, Distribution, and Risk Assessment of Pharmaceuticals and Personal Care Products in the Yellow Sea and the East China Sea	CHEN Xian, ZHANG Cai-jie, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (194)
Occurrence and Risk Assessment of Organophosphate Esters in Source Water of the Nanjing Section of the Yangtze River	LI Dong, ZHANG Sheng-hu, ZHANG Qin, <i>et al.</i> (205)
Spatial Distribution, Spectral Characteristics, and Sources Analysis of Dissolved Organic Matter from Baiyangdian Lake in Xiong'an New District During the Winter Freezing Period	ZHOU Shi-lei, SUN Yue, ZHANG Yi-ran, <i>et al.</i> (213)
Spatial Characteristics, Risk Assessment, and Source Analysis of Elements in Surface Sediments from the Baiyangdian Lake	WANG Jing-zhong, LIU Zhao, WEI Hao, <i>et al.</i> (224)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Phthalate Esters in Surface Sediments of the Songhua River	WANG Huan, YANG Yong-zhe, WANG Hai-yan, <i>et al.</i> (232)
Occurrence Relationship Between Microplastics and Heavy Metals Pollutants in the Estuarine Sediments of Poyang Lake and the Yangtze River	LI Wen-hua, JIAN Min-fei, LIU Shu-li, <i>et al.</i> (242)
Effect of Ozonation on Microorganism in the Biological Activated Carbon and Disinfection By-Products in the Effluent	LIU Bao-ming, WANG Xi-xi, ZHANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (253)
Refined Assessment of Exposure and Health Risks of Heavy Metals in Water for the Children in Xigu District, Lanzhou	CHEN Yue-fang, SUN Shan-wei, DUAN Xiao-li, <i>et al.</i> (262)
Adsorption of Phosphate on Mg/Fe Layered Double Hydroxides (Mg/Fe-LDH) and Use of Mg/Fe-LDH as an Amendment for Controlling Phosphorus Release from Sediments	WU Jun-lin, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (273)
Characteristics and Mechanism of Monothioarsenate Adsorption on Sand, Sediment, and Goethite	LIAO Dan-xue, SHAN Hui-mei, PENG San-xi, <i>et al.</i> (284)
Substructure Characteristics of Combined Acid-Base Modified Sepiolite and Its Adsorption for Cd(II)	XIE Sha, XU Ying-ming, YAN Cui-xia, <i>et al.</i> (293)
Characteristics of Nitrogen Metabolism by Denitrifying Bacterial Agents in Low Dissolved Oxygen Black Odor Water	ZHAO Zhi-rui, LIU Shuo, LI Duo, <i>et al.</i> (304)
Metagenomic Analysis of Antibiotic Resistant Bacteria and Resistance Genes in a Pharmaceutical and Chemical Wastewater Treatment Plant	CHEN Hong-ling, ZHANG Xing-tao, WANG Qing, <i>et al.</i> (313)
Measurements of Bacterial Community and Biodiversity from Activated Sludge for a Wastewater Treatment Containing Starch	ZHAO Ting-ting, QIAO Kai, WANG Lei, <i>et al.</i> (321)
Process Control and Operation Optimization of PN-SAD Coupling Process Based on SBR-ABR	CHEN Chong-jun, ZHANG Min, JIANG Ying, <i>et al.</i> (330)
Effects of Intermittent Starvation on the Operation of the SNAD Process	LI Dong, LIU Zhi-cheng, XU Gui-da, <i>et al.</i> (337)
Nitrogen Removal from Mature Landfill Leachate via Denitrification-Partial Nitrification-ANAMMOX Based on a Zeolite Biological Aerated Filter	CHEN Xiao-zhen, WANG Xiao-jun, Karasuta Chayangkun, <i>et al.</i> (345)
Rapid Achievement of Nitrifying Micro-granular Sludge and Its Nitrification Function	LIU Wen-ru, SONG Jia-jun, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (353)
Effect of On/Off Aeration Time Ratio Under High Frequency On/Off Aeration on Performance of Nitrosated Granular Sludge	ZHANG Jie, LAO Hui-mei, LI Dong, <i>et al.</i> (360)
Occurrence, Distribution, Source, and Health Risk Assessment of Polybrominated Diphenyl Ethers in Surface Soil from the Shen-Fu Region, Northeast China	XIANG Xin-xin, LU Yin-tao, RUAN Qi-yang, <i>et al.</i> (368)
Vertical Pollution Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Heterogeneous Unsaturated Zone Under a Coking Plant	MENG Xiang-shuai, WU Meng-meng, CHEN Hong-han, <i>et al.</i> (377)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes and Mobile Genetic Elements in Beijing Vegetable Base Soils	ZHANG Ru-feng, SONG Yuan, GAO Hao-ze, <i>et al.</i> (385)
Stoichiometric Characteristics of Purple Sloping Cropland Under Long-term Fertilization and Cultivation	DU Ying-ni, LI Tian-yang, HE Tian-hui, <i>et al.</i> (394)
Ecological Stoichiometry of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus in Subtropical Paddy Soils	SONG Jia-ling, SHENG Hao, ZHOU Ping, <i>et al.</i> (403)
Denitrification and Anaerobic Ammonium Oxidation in Soil Nitrogen Migration Process in a Farmland of Wanshangang Lake	CHEN Zhi-hao, QIN Yun-bin, DING Bang-jing, <i>et al.</i> (412)
Effects of Straw Biochar on Soil Microbial Metabolism and Bacterial Community Composition in Drip-irrigated Cotton Field	WANG Jing, MA Li-juan, LONG Ze-hua, <i>et al.</i> (420)
Source Appointment of Heavy Metals in Agricultural Soils of the Jiulong River Basin Based on Positive Matrix Factorization	HUANG Hua-bin, LIN Cheng-qi, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (430)
Spatial Distribution of Soil Arsenic and Arsenic Enrichment in Crops in the Oasis Region of the Southeastern Tarim Basin	CHEN Yun-fei, ZHOU Jin-long, ZENG Yan-yan, <i>et al.</i> (438)
Bioavailability, Translocation, and Accumulation Characteristic of Heavy Metals in a Soil-Crop System from a Typical Carbonate Rock Area in Guangxi, China	MA Hong-hong, PENG Min, LIU Fei, <i>et al.</i> (449)
Effects of Different Amendments on Fractions and Uptake by Winter Wheat in Slightly Alkaline Soil Contaminated by Cadmium and Nickel	ZHANG Jing-jing, ZHU Shuang-ge, ZHU Li-nan, <i>et al.</i> (460)
Effect of Different Passivating Agents on the Stabilization of Heavy Metals in Chicken Manure Compost and Its Maturity Evaluating Indexes	LUAN Run-yu, GAO Shan, XU Ying-ming, <i>et al.</i> (469)
Response of Soil Respiration and Its Components to Nitrogen and Phosphorus Addition in Farming-Withdrawn Grassland in the Semiarid Loess Hilly-Gully Region	ZHOU Jun-jie, CHEN Zhi-fei, YANG Quan, <i>et al.</i> (479)
Subsequent Effects of Slag and Biochar Application on Greenhouse Gas Emissions from Paddy Fields in the Fuzhou Plain	LAN Xing-fu, WANG Xiao-tong, ZHOU Ya-xin, <i>et al.</i> (489)