

中国人群暴露参数研究进展

杨彦^{1,2,3}, 张梦迪¹, 陈浩佳^{1,3}, 麦碧娴⁴, 徐建^{5*}

1. 广东工业大学环境健康与污染控制研究院, 环境科学与工程学院, 广东 广州 510006
2. 化学与精细化工广东省实验室, 广东 汕头 515041
3. 汕头广工大协同创新研究院, 广东 汕头 515041
4. 中国科学院广州地球化学研究所, 有机地球化学国家重点实验室, 广东 广州 510630
5. 中国环境科学研究院, 环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012

摘要: 暴露参数作为描述人体暴露和环境介质中特征和行为的重要参数和量化指标, 其准确性决定了环境健康风险评估结果的准确性, 暴露参数本土化是我国环境健康风险评估的重要工作之一. 本文介绍了人体在呼吸、摄入和皮肤暴露途径下的暴露参数以及各国和地区暴露参数手册收录情况, 提出目前尚未收录的生物可给性亦是重要的暴露参数. 对比分析了暴露参数的主要研究方法及其优缺点, 重点比较呼吸速率、土壤/尘摄入量、皮肤黏附系数、皮肤渗透系数等参数的研究方法与适用条件, 推荐适宜本土化的研究方法. 对近 20 年中国暴露参数论文进行文献计量分析发现, 中国暴露参数论文发文量与政策导向密切相关, 2012 年和 2018 年是相关研究成果发表的高峰期. 通过分析现行的中国人群暴露参数手册在全面性、代表性和时效性上存在的不足, 建议“十四五”期间开展精细化暴露研究, 充分收录国内最新研究成果, 对暴露参数手册进行更新和完善, 加强暴露参数相关基础科学的研究工作, 建立制定相关标准、规范和指南, 为我国人群本土化暴露参数研究和应用提供参考.

关键词: 环境污染; 健康风险; 暴露参数; 暴露途径; 中国人群

中图分类号: X3

文章编号: 1001-6929(2022)09-2205-11

文献标志码: A

DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2022.06.13

Research Progress in Environmental Exposure Factors of Chinese Population

YANG Yan^{1,2,3}, ZHANG Mengdi¹, CHEN Haojia^{1,3}, MAI Bixian⁴, XU Jian^{5*}

1. School of Environmental Science and Engineering, Institute of Environmental Health and Pollution Control, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China
2. Chemistry and Chemical Engineering Guangdong Laboratory, Shantou 515041, China
3. Synergy Innovation Institute of GDUT, Shantou 515041, China
4. State Key Laboratory of Organic Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510630, China
5. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

Abstract: Exposure factors are important parameters and quantitative indicators of human behaviour characteristics under various environmental exposures. The accuracy of exposure factors determines the accuracy of environmental health risk assessment results. The localization of exposure factors is one of the important development directions of environmental health risk assessment in China. In this review, the exposure factors under breathing, ingestion, and skin exposure pathways were introduced, and exposure factor handbooks in different countries were reviewed. The advantages, disadvantages and applicability of the main research methods of exposure factors were compared and analyzed. Based on the bibliometric analysis of papers on Chinese exposure factors in the past 20 years, the research and development direction of exposure factors in China was prospected. From the review, bioaccessibility is also the important exposure

收稿日期: 2022-03-15

修订日期: 2022-06-09

作者简介: 杨彦 (1984-), 女, 江苏淮安人, 副教授, 博士, 主要从事环境健康研究, yangyan1209@gdut.edu.cn.

* 责任作者, 徐建 (1978-), 男, 安徽来安人, 研究员, 博士, 博导, 主要从事新污染物环境行为、效应及风险评估研究, xujian@craes.org.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No.2018YFC1801102); 广东省科技专项资金 (No.190807115560881); 化学与精细化工广东省实验室科研启动项目 (No.2032008)

Supported by National Key Research and Development Program of China (No.2018YFC1801102); Science and Technology Planning Project of Guangdong Province, China (No.190807115560881); Chemistry and Chemical Engineering Guangdong Laboratory, China (No.2032008)

factors. The advantages, disadvantages and applicability of different research methods of inhalation rate, soil/dust ingestion rate, skin adhesion coefficient and the skin permeability were pointed out. The shortcomings in comprehensiveness, representativeness and timeliness of exposure factors handbook of Chinese population were pointed out and some suggestions for improvement were put forward. Bibliometric analysis shows that the number of articles published on exposure factors in China was closely related to policy orientation. 2012 and 2018 were the peak years for the publication of relevant research results. Refined exposure study during the '14th Five-Year Plan' period is recommended. Fully absorbing the existing domestic research achievements to update and improve exposure factors handbook of Chinese population, strengthening exposure factors related to basic science research work, and establishing the relevant standards, rules and guidelines will provide reference for the study and application of population localization exposure factors in China.

Keywords: environmental pollution; health risk; exposure factor; exposure pathway; Chinese population

环境健康风险评估通过对危害识别、剂量-效应关系和暴露信息进行评估,表征健康不利影响发生的概率^[1],定量评价人体暴露于特定剂量环境化学物质受到损害的可能性及程度高低^[2]。暴露参数是环境健康风险定量评估的重要参数,环境介质中污染物浓度定量准确时,其选取越接近于目标人群的实际暴露状况,评价结果越准确^[3]。

近年来,世界各国结合本国国情、所处地域、本土人群特征、生活方式等特点,不断完善和发展本国暴露参数研究。美国环境保护局(US EPA)最先出版了《暴露参数手册(1987年)》^[4],并先后两次进行了修订(分别在1997年和2011年)。日本、欧盟、加拿大、韩国、澳大利亚、德国等国家或地区也于2001—2014年相继出版了各自的暴露参数手册。我国环境健康风险研究起步于20世纪90年代,近年来发展迅速并取得一系列成果。2007年国家科学技术部将“环境污染的健康风险评估与技术研究”列入“十一五”科技支撑计划重点研究项目,同年11月原卫生部等18个部委联合发布《国家环境与健康行动计划(2007—2015年)》。2011年《国家环境保护“十二五”环境与健康工作规划》将“环境与健康调查和风险评价技术与方法和中国人群暴露参数调查”研究作为主要任务。2013年原环境保护部根据我国人群暴露参数研究数据与调查结果,发布《中国人群暴露参数手册(成人卷)》^[5]、《中国人群暴露参数手册(儿童卷:0~5岁)》^[6]与《中国人群暴露参数手册(儿童卷:6~17岁)》^[7](统称“《手册》”),为我国环境健康风险评估工作提供了基础数据。然而,2017年《国家环境保护“十三五”环境与健康工作规划》仍提出环境与健康问题基础数据缺乏、技术支撑等不足等问题依然突出。

目前,我国对本土暴露参数的研究依然持续,但由于起步晚、研究方式单一,存在试验性数据积累不足且具有一定的不确定性和偏差。因此,该研究通过

总结国内外主要暴露参数研究方法,回顾国内暴露参数研究进展,以期为进一步研究我国人群暴露参数提供参考。

1 暴露参数

1.1 暴露参数分类

暴露参数是量化人体暴露于环境污染物剂量的行为和特征参数^[5],包括身体特征参数、摄入量参数、时间-活动模式参数和其他参数。暴露参数可按呼吸道、消化道和皮肤暴露3种暴露途径进行分类(见图1)。呼吸道暴露以人体吸入空气中污染物为主,可通过呼吸速率等暴露参数计算评估。消化道暴露以摄入食物、水源或土壤中污染物为主,可通过饮食、饮水和土壤/尘摄入量等暴露参数计算评估,但我国不同地区人群的饮食、饮水量存在较大差异,膳食结构随时间变化较大^[8]。皮肤暴露指污染物接触并通过皮肤进入人体,可通过皮肤黏附系数和渗透系数计算评估。各国家和地区将暴露参数研究成果编纂成暴露参数手册;除此以外,非洲部分国家也对本国时间-活动模式等参数展开研究^[9-10],但并未形成暴露参数手册。各国暴露参数手册收录参数基本一致,但与美国和欧盟相比,中国暴露参数手册缺少土壤/尘皮肤黏附系数等皮肤暴露相关参数。

近年来,生物可给性(bioaccessibility)被认为是暴露评估的重要参数,其使评估结果更准确^[11]。生物可给性可评价污染物被人体吸收的相对量。污染物种类和暴露途径不同,生物可给性也存在差异,确定该参数能极大地提高暴露评估的准确性。中国《建设用地土壤修复技术导则》^[12]和美国《健康风险评估导则》^[13]中提及消化道吸收因子、皮肤吸收效率因子、土壤颗粒物在体内滞留比例等与生物可给性相关的参数均来源于美国生态毒性数据库(ECOTOX)。我国研究人员围绕环境污染物的生物可给性研究主要集中于重金属和有机污染物的经口和呼吸暴露途径,对皮肤暴



图1 不同环境介质的人群暴露途径

Fig.1 The exposure pathways in different environmental media

露途径研究有限. 在经口途径下, 通过胃肠模拟测定多环芳烃 (PAHs)^[14]、多溴联苯醚 (PBDEs)^[15]、重金属^[16]在肠胃的生物可给性分别为 3.4%~60.5%、36.1%~43.3%、33.0%~84.0%; 在经呼吸途径下, 通过肺液模拟测定重金属^[17]、气相多环芳烃^[18]在肺部的生物可给性分别为 6.77%~57.32%、45.5%~99.8%, 但这部分数据未被考虑作为暴露参数进行收录. 农药唾液提取

因子是通过评估唾液对环境农药提取率从而获得的农药有效摄入量, 该参数被收录于加拿大暴露参数手册. 各国暴露参数手册具体收录情况如表1所示.

1.2 暴露参数研究方法

暴露参数的准确度与研究方法密切相关, 不同暴露途径的暴露参数主要研究方法及特点如图2所示. 暴露参数中行为模式参数主要采用问卷调查^[29]、视

表1 各国家或地区暴露参数手册中收录的暴露参数

Table 1 Exposure factors in each national (region) exposure factors book

国家或地区	暴露参数	数据来源
美国	呼吸速率、饮水摄入量、饮食摄入量、土壤/尘摄入量、皮肤表面积、室内/外活动时间、在沙地/泥土/草地上玩耍时间、洗澡时间、游泳时间、手口/物口接触频率及持续时间、皮肤黏附系数、职业流动性、人口流动性、建筑物面积、空气交换率、期望寿命、体质量	文献[4]
加拿大	呼吸速率、饮水摄入量、饮食摄入量、土壤/尘摄入量、皮肤表面积、唾液提取因子、手口/物口接触频率、物体表面积、期望寿命、体质量	文献[19]
欧盟	呼吸速率、饮水摄入量、饮食摄入量、土壤/尘摄入量、皮肤表面积、室内/外活动时间、每周工作时间、在家/在外时间、上课时间、在校室内/外活动时间、户外娱乐时间、洗澡时间、工作任职时长、居住时间、在校任职时长、土壤皮肤黏附系数、期望寿命、体质量	文献[20]
中国	呼吸速率、饮水摄入量、饮食摄入量、土壤/尘摄入量、皮肤表面积、室内/外活动时间、洗澡时间、游泳时间、土壤接触时间、与电脑/手机/电视接触时间、口/物口接触频率及时间、居住面积、开窗通风时间、取暖时间、期望寿命、体质量	文献[5-7]
日本	呼吸速率、饮水摄入量、饮食摄入量、土壤/尘摄入量、皮肤表面积、室内/外活动时间、洗澡时间、游泳时间、交通出行方式、居住面积、期望寿命、体质量	文献[21]
韩国	特定场所活动时间、交通出行时间、洗脸时间、洗澡时间、游泳时间、职业流动性、人口流动性、期望寿命、体质量	文献[22-25]
澳大利亚	饮水摄入量、饮食摄入量、特殊职业工作时长、室内/外活动时间、洗澡时间、游泳时间、交通出行方式、体质量	文献[26]
德国	饮水摄入量、饮食摄入量、室内/外活动时间、洗澡时间、游泳时间、交通出行方式、居住面积、土壤/尘摄入量、体质量、身高	文献[27]
法国	饮食摄入量、室内/外活动时间、洗澡时间、游泳时间、交通出行方式、居住面积、体质量、身高	文献[28]



图 2 各暴露途径下暴露参数种类及研究方法

Fig.2 Types of exposure factors and investigation methods under various exposure pathway

频^[30]、日志记录^[29]等方法调查研究.摄入量参数中饮水量、饮食量等可通过问卷调查法获得^[31-32].然而,呼吸速率、土壤/尘摄入量、皮肤黏附系数、皮肤渗透系数等无法根据研究人群的主观行为和感受进行计量,多采用动物试验或体外试验等方法测定.

1.2.1 呼吸速率研究方法

呼吸速率研究方法包括直接测量法、双标记水法、心率-呼吸速率回归法及人体能量代谢估算法.直接测量法可直接获得人群的实时呼吸速率,准确性高,但仪器操作复杂、效率低,适用于小样本人群研究.心率-呼吸速率回归法通过测量心率和心率-呼吸速率回归模型间接获得呼吸速率,相对直接测量法更方便,适用于中小样本人群研究.这两种方法主要用于测量短期呼吸速率,且研究人群采用小样本量^[33].双标记水法和人体能量代谢估算法均通过计算人体能量代谢间接获得呼吸速率,不同之处在于双标记水法通过测量饮用同位素水的受试者尿液中同位素含量估算;而人体能量代谢估算法根据人体身高、体质

量、年龄等结合人体能量代谢模型获得.这两种方法主要用于测量长期呼吸速率,适用于大样本人群研究^[34],双标记水法更准确,但费用也更高.中国人口基数大,因此人体能量代谢估算法是快速测定我国人群呼吸速率的有效方法^[35].梁洁等^[36]研究发现,Schofield公式更适用于我国居民基础代谢估算,其能提高人体能量代谢估算法的准确性.

1.2.2 土壤/尘摄入量研究方法

土壤/尘摄入量研究方法包括示踪元素法、生物动力学模型对照法(IEUBK)及行为模式法,这3种方法的研究对象均为未成年人,但适用于不同暴露情景和不同年龄人群.行为模式法通过观察或录像记录人群行为,以手口接触频率、时间等来估算土壤/尘摄入量,需对每个样本进行观察和记录,耗费较多人力和时间,适用于活动范围较为固定的情景和小规模调查研究. IEUBK法通过测量人体生物指示物(如血铅),结合模型推算土壤/尘摄入量,适用于不考虑暴露情景的0~6岁儿童长期土壤/尘摄入量研究.我国

研究人员发现,直接引用美国默认系数获得的儿童血铅含量偏低 61.39%,对 IEUBK 模型系数本土化处理^[37]后,在一定程度上适用于中国调查研究。示踪元素法通过测定人摄入食物、水和土壤/尘以及排出粪便和尿液中示踪元素含量来计算土壤/尘摄入量。示踪元素法适用不同暴露情景下短期土壤/尘摄入量评估,寻找最佳示踪元素是提高其准确性的关键,食物中摄取示踪元素质量与每克土壤中示踪元素质量的比值越低,由摄取食物引起的误差就越小^[38]。我国原环境保护部颁布了《儿童土壤摄入量调查技术规范示踪元素法》(HJ 876—2017),对示踪元素法实施过程进行规范。

1.2.3 皮肤黏附系数、皮肤渗透系数研究方法

皮肤黏附系数可通过测定单位面积皮肤上黏附的灰尘或沙砾的质量获得。人体不同部位(如脸部、手掌、手臂等)皮肤黏附系数存在差异,且受到不同灰尘理化性质的影响,测定时需要区别不同暴露情景和不同人体部位。人体皮肤黏附系数主要采用直接测量法和示踪元素法进行测量。直接测量法通过采集称量研究对象体表黏附的土壤/尘样本,从而测量颗粒物-皮肤黏附系数,如 Shoaf 等^[39]通过儿童在潮汐滩地活动后身体黏附泥沙估算儿童皮肤黏附系数。示踪元素法通过分别测定环境灰尘或沙砾中示踪元素含量、人皮肤上黏附环境灰尘或沙砾中示踪元素总量,计算获得颗粒物-皮肤黏附系数,如 Voica 等^[40-41]通过测定手黏附灰尘中示踪金属浓度从而测定该参数。

皮肤渗透系数研究方法包括动物试验法、体外试验法和模型计算法。动物试验法使用动物接触污染物,从而测量化学品被皮肤的吸收量,由于该方法会对动物造成伤害,一些国家或地区(如欧盟、以色列等)提倡使用其他方法以减少、优化、代替动物试验。体外试验法是采用离体人体皮肤或动物皮肤、人造皮肤取代动物活体与化学品接触开展研究,体外试验法中人体离体皮肤难以大量获得,选取最接近人体皮肤的动物皮肤成为试验关键。研究发现,猪和猴子皮肤渗透性通常更接近人类皮肤^[42],是研究人体表皮渗透系数最常用模型材料,如 Zhang 等^[43]用离体猪皮测定合成麝香的皮肤吸收率为 11%。环境介质中化学品(污染物)种类繁多,皮肤渗透系数各有差别^[11],动物试验法和体外试验法耗时耗力。模型计算法通过数学模型简化化学品渗透皮肤过程从而获得渗透系数,如 Toropova 等^[44]用毒理学定量构效模型(QSAR)模拟预测了 186 种有机化合物的皮肤渗透系数。模型计算法只要模型构建合适,即可低成本、高效地获得

大量数据,适用于皮肤渗透系数大范围研究,但其需要动物试验法或体外试验法提供建模数据与结果验证。

2 中国暴露参数研究现状

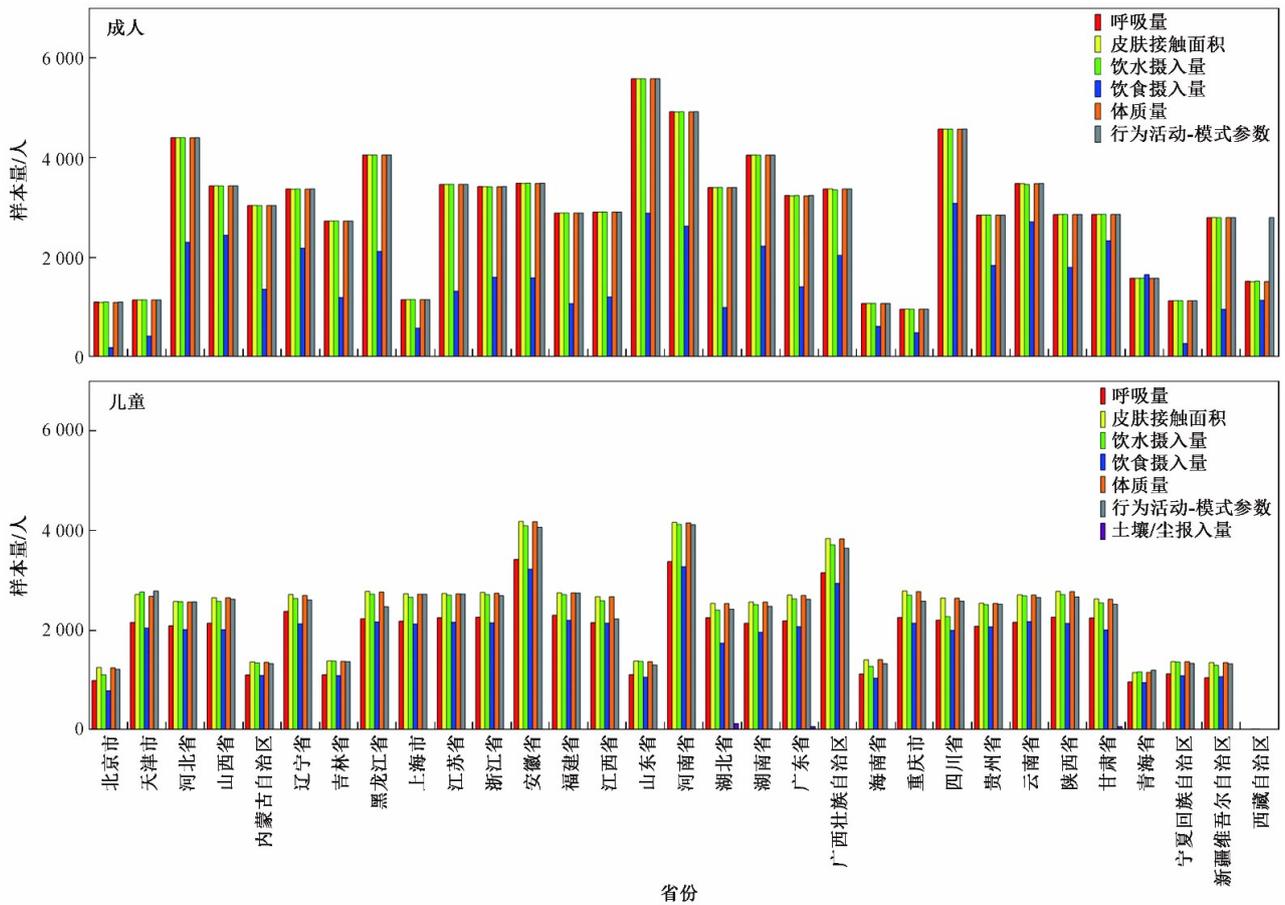
2.1 暴露参数手册

《国家环境保护“十二五”环境与健康工作规划》将发布中国人群暴露参数手册列为重点工作,同时原环境保护部科技标准司组织中国环境科学研究院开展中国人群暴露参数调查。该调查以问卷调查法和模型估算法为主要研究手段,并参考《中国居民营养与健康状况调查成果》《US EPA Exposure Factors Handbook》内容及相关研究成果^[33,45],编纂出版《中国人群暴露参数手册(成人卷)》《中国人群暴露参数手册(儿童卷:0~5岁)》与《中国人群暴露参数手册(儿童卷:6~17岁)》。

《手册》是我国环境健康风险评估研究进程的里程碑式成果,为我国本土暴露评估提供了坚实的数据支撑。但从全面性而言,目前《手册》收录不完全,未收录环境健康风险评估所有暴露参数,如皮肤渗透系数、生物可给性系数、母乳摄入量等。此外,《手册》中行为模式参数数据以时间数据为主,缺乏《暴露参数调查基本数据集》(HJ 968—2019)规定的行为模式参数数据元中的频次数据。由于我国未开展成人土壤/尘摄入量相关研究,《手册》中土壤/尘摄入量引用了 US EPA 推荐值,收录的相关研究仅在广东省、湖北省和甘肃省的未成年人中开展。

代表性上,经加权后的《手册》数据可代表全国水平^[5-7]。《手册》中各地区人群调查量如图 3 所示。我国东南地区调查人数高于西北地区,但由于不同地区常住人口数存在较大差异,参照第六次全国人口普查数据中各省份常住人口数,青海省调查比例达 0.044%,广东省仅 0.005%,西藏自治区儿童暴露参数未被收录。并且《手册》收录的部分参数如皮肤黏附系数、土壤/尘摄入量等直接引自 US EPA 暴露参数手册,但美国人群的人种、环境、生活方式等与中国不同,US EPA 的暴露参数不适用于中国人群的暴露评估。

时效性上,《手册》调查数据存在一定滞后性,与现行技术规范要求存在差距,如《暴露参数调查技术规范》(HJ 877—2017)要求问卷二次复核率在 5% 以上,《手册》仅对 3% 调查问卷进行抽检复测,并且《手册》中饮食摄入量主要参考 2002 年中国居民营养与健康状况调查结果,2013—2014 年原国家卫生和计划生育委员会在全国设点监测的居民营养摄入数据^[46],



注: 不包含港澳台地区数据。

图 3 我国各省份暴露参数成人及儿童样本量

Fig.3 The sample size of adult and children exposure factors in China

以及湖南省、福建省人群暴露参数调查数据^[47-48]均未被收录。

国家对污染防治和风险评估的精准化要求越来越高,也给暴露参数更新提出更高的要求。“十四五”期间,在开展全国层面的人群暴露参数调查时,应充分考虑不同的暴露情景和暴露途径,开展精细化暴露参数研究。《手册》暴露参数的更新和完善,应充分吸收国内最新研究成果,如国家卫生和计划生育委员会开展的“中国居民营养与健康监测”、科学技术部开展的国家重点研发计划“场地土壤污染成因与治理技术”重点专项、中国疾病预防控制中心开展的“化学污染物暴露评估技术研究”等项目,均对暴露参数本土化提出要求;同时,需加强暴露参数相关的基础科学研究工作,对呼吸速率、土壤/尘摄入量、皮肤黏附系数、皮肤渗透系数、生物可给性等参数进行深入研究。

2.2 中国暴露参数文献计量分析

选取 2010—2021 年中国知网 (CNKI) 与 Web of

Science 数据库,分别以暴露参数、呼吸速率/呼吸量、饮水饮食、活动时间、土壤/尘摄入以及 China/Chinese、exposure factors、inhalation rate、activity factor、soil ingestion 等暴露参数相关关键词进行文献检索和筛选。在关键词筛选结果基础之上再根据文章摘要进行进一步精细选择,最终选择中国暴露参数研究成果相关论文 171 篇 (中英文文献数量分别为 107 和 64 篇),基于 Citespace 软件中 keyword、reference 功能对关键词及引用关系进行分析,获得可视化结果如图 4、5 所示。

由图 4 可见:关键词中“健康风险评价”“成人”“太湖流域”与“暴露参数”“皮肤暴露参数”“体表面积”“饮水率”等出现频次较高且密切相关,表明我国近年来暴露参数研究集中于成人,特别是太湖流域人群,对儿童相关研究较少;“城区”也是高频关键词之一,由于生活场景不同会引起暴露参数的差别,城镇、乡村也应分别纳入调查,从而提高参数代表性。由图 5 可见:“health risk assessment”是英文文献的

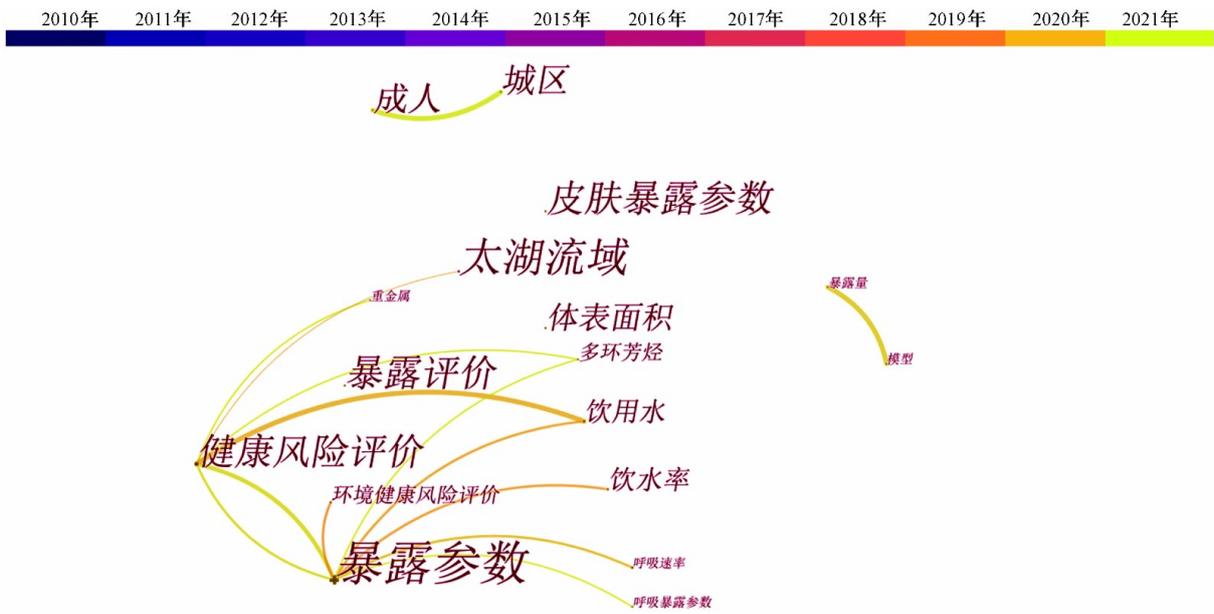


图 4 CNKI 数据库中暴露参数领域文章关键词的共现图谱

Fig.4 Keyword co-occurrence network map in field of exposure factors in CNKI

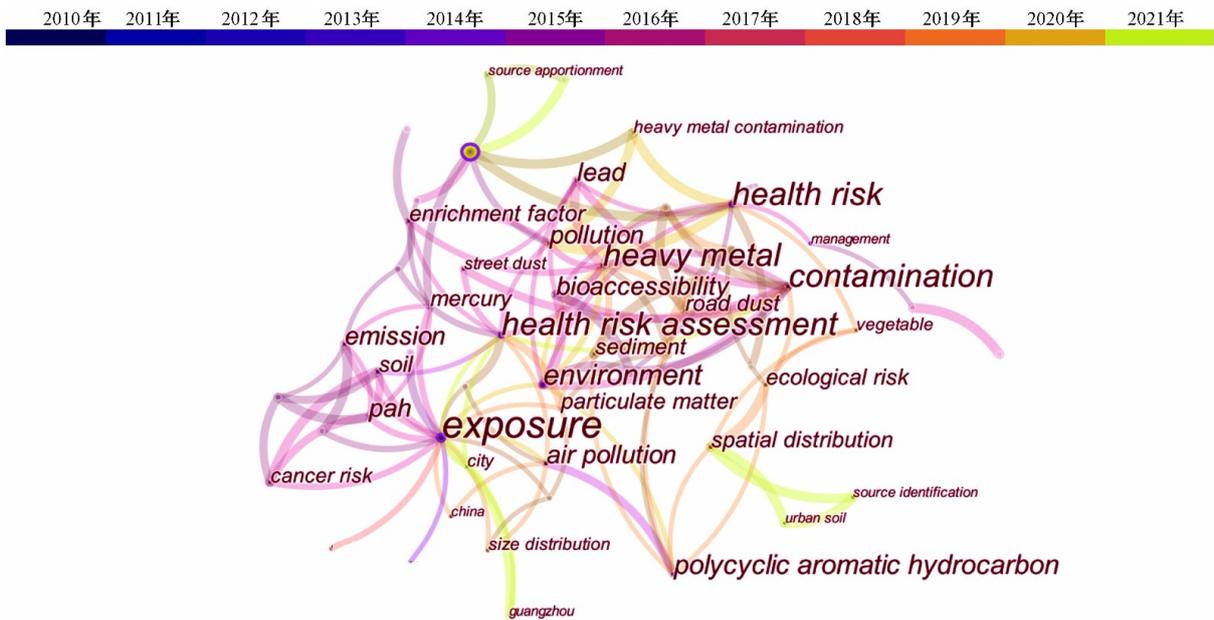


图 5 Web of Science 数据库中暴露参数领域文章关键词的共现图谱

Fig.5 Keyword co-occurrence network map in field of exposure factors in Web of Science database

关键节点,表明暴露参数与健康风险评估密切相关。其中,“heavy metal”“polycyclic aromatic hydrocarbon”等环境污染物关键词与暴露参数关联度高,表明暴露参数是环境污染物进行风险评价的重要参数,其准确性决定着环境污染物暴露评估和健康风险评估的准确性;“air pollution”“street dust”“road dust”等关键词频次高,表明呼吸暴露相关研究是我国在该领域的研究热点之一;“bioaccessibility”也是其中一个节点,表明生物可给性是暴露参数的重要组成。不同于中文

文献高频出现“饮用水”“饮水率”等关键词,英文文献中“vegetable”等与饮食相关关键词频次更高。中国暴露参数研究成果发表时间集中在近 10 年内,在 2013 年《手册》发布前达到一个峰值(见图 6)。2014 年我国持续深入研究,形成我国暴露参数体系及数据资源,但发文量有所下降。自 2017 年《国家环境保护“十三五”环境与健康工作规划》指出环境与健康问题的基础数据仍然缺乏以来,研究人员对行为模式参数^[27,49]、人群饮水率^[33,50-51]、呼吸速率^[35,52]、涉

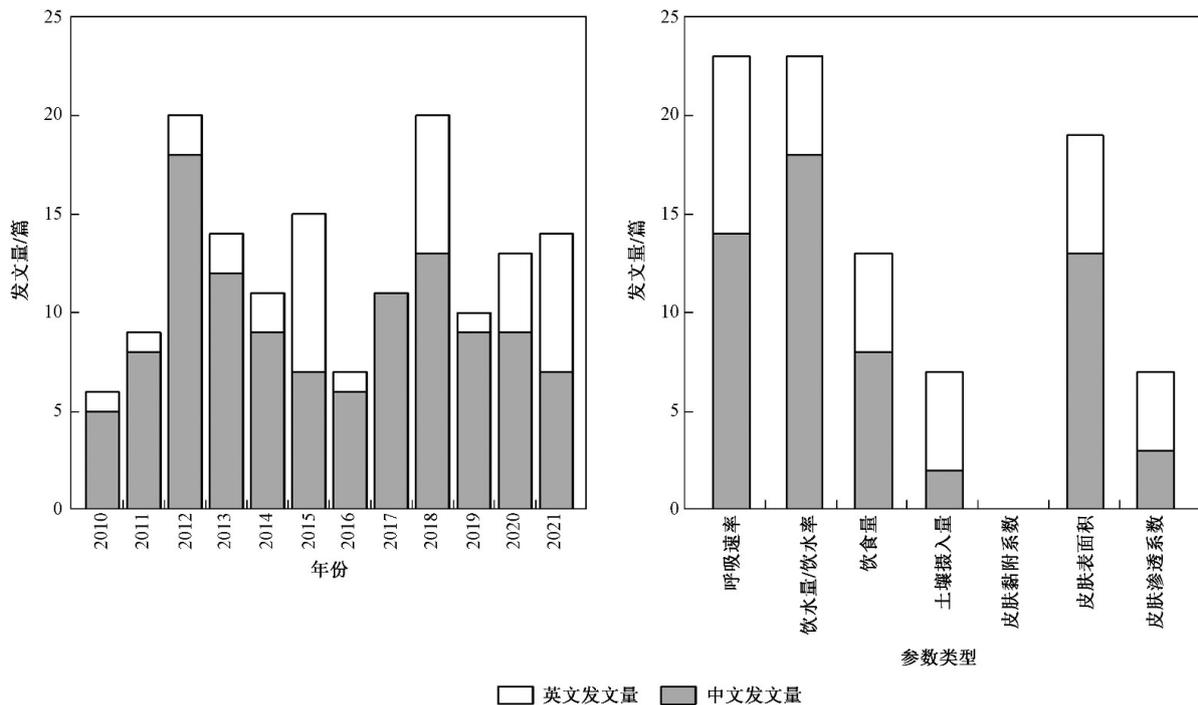


图6 我国暴露参数年际发文量及各暴露参数发文量

Fig.6 The annual publications of exposure factors and main specific parameters in China

水皮肤暴露^[53-54]、饮食摄入量^[31,55-56]、土壤/尘摄入量^[56]等暴露参数展开了深入研究,并结合新冠肺炎疫情进行特殊职业暴露参数研究^[57]。暴露参数调查与研究工作的持续开展为我国暴露参数体系提供更新的区域人群数据,为制定更精确的地区标准提供支撑^[58]。

3 结论与展望

a) 随着暴露评估和暴露参数研究的不断深入,除常规暴露参数外,有利于提高暴露评估结果准确性的参数(如生物可给性)应当纳入暴露参数研究范畴。我国对人群身高、体质量以及饮水、饮食等可通过问卷调查获取的暴露参数开展了大量调查与研究。然而,呼吸速率、土壤/尘摄入量、皮肤黏附系数、皮肤渗透系数等主要依靠试验等方法获取的暴露参数研究有限。暴露参数的研究方法各有特点,适应于不同情景的研究,其中心率-呼吸速率回归法、生物动力学模型对照法和模型计算法分别有望成为我国呼吸速率、土壤/尘摄入量、皮肤渗透系数研究的主流方法之一。

b) 我国暴露参数研究在近10年取得显著成果,《手册》的颁布对我国环境健康风险评估具有里程碑式意义。然而,随着国家经济发展加快、人民生活水平提升,暴露情景和暴露参数均会发生改变,使得《手册》在全面性、代表性和时效性上存在一定局限性。中国暴露参数研究与政策导向密切相关,在《手册》颁布前的2012年以及《国家环境保护“十三五”环境

与健康工作规划》发布后的2018年是相关研究成果发表的高峰期。目前,暴露参数人群研究对象集中于成人,儿童由于免疫力较差,往往是环境污染和暴露的高危人群,应加强儿童暴露参数研究。

c) 持续开展暴露参数研究工作及《手册》更新工作,拓宽《手册》内容来源,对于符合我国调查规范的成果应收尽收。鼓励高校和科研院所开展与暴露参数相关的科研工作,夯实我国的研究工作基础,建立制定相关的标准、规范和指南。

参考文献 (References):

- [1] WANG Z, SCOTT W C, WILLIAMS E S, et al. Identification of novel uncertainty factors and thresholds of toxicological concern for health hazard and risk assessment: application to cleaning product ingredients [J]. *Environment International*, 2018, 113: 357-376.
- [2] 于云江, 张颖, 车飞, 等. 环境污染的健康风险评估及其应用 [J]. *环境与职业医学*, 2011, 28(5): 309-313.
YU Y J, ZHANG Y, CHE F, et al. Health risk assessment of environmental pollution and the application [J]. *Journal of Environmental & Occupational Medicine*, 2011, 28(5): 309-313.
- [3] 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.
DUAN X L, HUANG N, WANG B B, et al. Development of exposure factors research methods in environmental health risk

- assessment[J].*Journal of Environment and Health*,2012,29(2):99-104.
- [4] United States Environmental Protection Agency,National Center for Environmental Assessment.Exposure factors handbook (2011 edition)[M].Washington DC:Immediate Office,2015.
- [5] 环境保护部.中国人群暴露参数手册(成人卷)[M].北京:中国环境出版社,2013.
- [6] 环境保护部.中国人群暴露参数手册(儿童卷:0~5岁)[M].北京:中国环境出版社,2016.
- [7] 环境保护部.中国人群暴露参数手册(儿童卷:6~17岁)[M].北京:中国环境出版社,2016.
- [8] 王志宏,孙静,王惠君,等.中国居民膳食结构的变迁与营养干预策略发展[J].*营养学报*,2019,41(5):427-432.
- WANG Z H,SUN J,WANG H J,et al.Dietary structure transition and development of nutrition intervention strategies in China[J].*Acta Nutrimenta Sinica*,2019,41(5):427-432.
- [9] MSIBI S S,CHEN C Y,CHANG C P,et al.High pesticide inhalation exposure from multiple spraying sources amongst applicators in Eswatini,southern Africa[J].*Pest Management Science*,2021,77(10):4303-4312.
- [10] MULLER E,DIAB R D,BINEDELL M,et al.Health risk assessment of kerosene usage in an informal settlement in Durban, South Africa[J].*Atmospheric Environment*,2003,37(15):2015-2022.
- [11] LATAWIEC A E,SIMMONS P,REID B J.Decision-makers' perspectives on the use of bioaccessibility for risk-based regulation of contaminated land[J].*Environment International*,2010,36(4):383-389.
- [12] 生态环境部.建设用土壤修复技术导则:HJ 25.3—2019[S].北京:中国环境出版社,2019.
- [13] United States Environmental Protection Agency,National Center for Environmental Assessment.Guidelines for exposure assessment[S].Washington DC:Risk Assessment Forum,2019.
- [14] TANG X Y,TANG L,ZHU Y G,et al.Assessment of the bioaccessibility of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils from Beijing using an *in vitro* test[J].*Environmental Pollution*,2006,140(2):279-285.
- [15] YU Y X,LU M,JIA W L,et al.Carbon isotope effects of DDTs in carrot during the digestion process using an *in vitro* test[J].*Rapid Communications in Mass Spectrometry*,2008,22(18):2803-2808.
- [16] YU Y J,LIU L T,CHEN X C,et al.Brominated flame retardants and heavy metals in common aquatic products from the Pearl River Delta,South China:bioaccessibility assessment and human health implications[J].*Journal of Hazardous Materials*,2021,403:124036.
- [17] HUANG M J,WANG W,CHAN C Y,et al.Contamination and risk assessment (based on bioaccessibility via ingestion and inhalation) of metal(loid)s in outdoor and indoor particles from urban centers of Guangzhou,China[J].*Science of the Total Environment*,2014,479/480:117-124.
- [18] YU Y X,JIANG Z A,ZHAO Z S,et al.Novel *in vitro* method for measuring the mass fraction of bioaccessible atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons using simulated human lung fluids[J].*Environmental Pollution*,2018,242:1633-1641.
- [19] Canada Pest Management Regulatory Agency.General exposure factor inputs for dietary,occupational,and residential exposure assessments[S/OL].Ottawa-Ontario:Health Canada,(2014-07-06) [2022-06-30].<https://publications.gc.ca/site/eng/476674/publication.html>.
- [20] CARMICHEAL N,RANDALL G,BRAUN C,et al.Exposure factors sourcebook for European populations (with focus on UK data)[R].Brussels:European Centre for Ecotoxicology and Toxicology of Chemicals,2001.
- [21] AIST Research Center for CRM.Japanese exposure factors handbook[S/OL].Tokyo:Ministry of the Environment,(2007-03-30) [2022-06-30].https://unit.aist.go.jp/riss/crm/exposurefactors/english_summary.html.
- [22] JANG J Y,JO S N,KIM S Y,et al.Overview of the development of the Korean exposure factors handbook[J].*Journal of Preventive Medicine and Public Health*,2014,47(1):1-6.
- [23] JANG J Y,KIM S Y,KIM S J,et al.General factors of the Korean exposure factors handbook[J].*Journal of Preventive Medicine and Public Health*,2014,47(1):7-17.
- [24] JANG J Y,JO S N,KIM S J,et al.Food ingestion factors of the Korean exposure factors handbook[J].*Journal of Preventive Medicine and Public Health*,2014,47(1):18-26.
- [25] JANG J Y,JO S N,KIM S Y,et al.Activity factors of the Korean exposure factors handbook[J].*Journal of Preventive Medicine and Public Health*,2014,47(1):27-35.
- [26] The Commonwealth Department of Health and Ageing and Environmental Health Council.Environmental health risk assessment:guidelines for assessing human health risks from environmental hazards[EB/OI].Canberra:Australian Institute of Environmental Health,(2020-06-01)[2022-06-30].<http://enheahh.nph.gov.au/council/pubs/pubs.Htm>.
- [27] German Environmental Health Council (AUH).Data for health-related exposure assessment[EB/OI].Cerman:Umwelt Bundesamt,(2007-05-01)[2022-06-30].<https://www.umweltbundesamt.de/en/www.uba.de/refxp>.
- [28] TARDY G,KAIRO C,DEREUMEUX C,et al.Human exposure factors in France:assessment of available data and prospects[J].*Environnement,Risques & Santé*,2013,12(1):54-67.

- [29] MENG X, CAO S Z, LI S, et al. Household environmental factors and children's respiratory health: comparison of two cross-sectional studies over 25 years in Wuhan, China [J]. *Journal of Thoracic Disease*, 2021, 13(7): 4589-4600.
- [30] OZKAYNAK H, XUE J P, ZARTARIAN V G, et al. Modeled estimates of soil and dust ingestion rates for children [J]. *Risk Analysis: an Official Publication of the Society for Risk Analysis*, 2011, 31(4): 592-608.
- [31] 曹琦, 曹素珍, 康艺瑾, 等. 北京市居民膳食大米无机砷的暴露评估 [J]. *环境科学研究*, 2021, 34(5): 1258-1266.
- CAO Q, CAO S Z, KANG Y J, et al. Exposure assessment of inorganic arsenic in dietary rice of Beijing residents [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, 34(5): 1258-1266.
- [32] GUO Q, WANG B B, CAO S Z, et al. Patterns and sociodemographic determinants of water intake by children in China: results from the first national population-based survey [J]. *European Journal of Nutrition*, 2020, 59(2): 529-538.
- [33] YOON H, SEO J, KIM T, et al. Development of Korean exposure factors for children in Korea [J]. *Korean Journal of Environmental Health Sciences*, 2017, 43(3): 167-175.
- [34] BROCHU P, BOUCHARD M, HADDAD S. Physiological daily inhalation rates for health risk assessment in overweight/obese children, adults, and elderly [J]. *Risk Analysis: an Official Publication of the Society for Risk Analysis*, 2014, 34(3): 567-582.
- [35] GUO Q, ZHAO Y C, SHAO J, et al. Using heart rate to estimate the minute ventilation and inhaled load of air pollutants [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 763: 143011.
- [36] 梁洁, 蒋卓勤, 何玉敏, 等. 中国健康成人基础代谢率估算公式的探讨 [J]. *中国校医*, 2008, 22(4): 372-374.
- LIANG J, JIANG Z Q, HE Y M, et al. Estimated equations of basal metabolic rate in Chinese healthy adults [J]. *Chinese Journal of School Doctor*, 2008, 22(4): 372-374.
- [37] 蒋宝, 崔骁勇. 基于我国西南地区儿童行为模式的IEUBK模型本地化研究 [J]. *环境科学*, 2013, 34(11): 4473-4481.
- JIANG B, CUI X Y. Study on IEUBK model localization based on behavior parameters of children from southwestern China [J]. *Environmental Science*, 2013, 34(11): 4473-4481.
- [38] DOYLE J R, BLAIS J M, HOLMES R D, et al. A soil ingestion pilot study of a population following a traditional lifestyle typical of rural or wilderness areas [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 424: 110-120.
- [39] SHOAF M B, SHIRAI J H, KEDAN G, et al. Child dermal sediment loads following play in a tide flat [J]. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 2005, 15(5): 407-412.
- [40] VOICA C, IORDACHE A M, ROBA C, et al. Determination of toxic elements in facial cosmetics from the Romanian market and their health risk assessment [J]. *Analytical Letters*, 2022: 1-13.
- [41] RUAN F Y, ZHANG J J, LIU J, et al. Association between prenatal exposure to metal mixtures and early childhood allergic diseases [J]. *Environmental Research*, 2022, 206: 112615.
- [42] WESTER R C, MAIBACH H I. *In vivo* animal models for percutaneous absorption [J]. *Dermatology*, 1985, 6: 251-266.
- [43] ZHANG X L, YU Y L, GU Y, et al. *In vitro* determination of transdermal permeation of synthetic musks and estimated dermal uptake through usage of personal care products [J]. *Chemosphere*, 2017, 173: 417-424.
- [44] TOROPOVA A P, TOROPOV A A. The index of ideality of correlation: a criterion of predictability of QSAR models for skin permeability? [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 586: 466-472.
- [45] 杨彦, 于云江, 杨洁, 等. 浙江沿海地区居民环境健康风险评估中涉水和涉气活动的皮肤暴露参数研究 [J]. *环境与健康杂志*, 2012, 29(4): 324-327.
- YANG Y, YU Y J, YANG J, et al. Coastal residents' dermal exposure parameter in Zhejiang, China under water-related activity and air-related activity [J]. *Journal of Environment and Health*, 2012, 29(4): 324-327.
- [46] 赵丽云, 何宇纳. 中国居民营养与健康状况监测报告之一: 2010—2013年膳食与营养素摄入状况 [M]. 北京: 人民卫生出版社, 2018.
- [47] 李琴, 林海鹏, 秦娟, 等. 中国浏阳农村地区人群暴露参数 [J]. *环境科学研究*, 2013, 26(6): 658-665.
- LI Q, LIN H P, QIN J, et al. Exposure factors in rural areas of Liuyang in China [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2013, 26(6): 658-665.
- [48] 许新宇, 程斌, 王菲凤, 等. 福州市人群饮用水活动经口、皮肤暴露参数调查研究 [J]. *福建师范大学学报(自然科学版)*, 2014, 30(6): 77-84.
- XU X Y, CHENG B, WANG F F, et al. Drinking and using water-related exposure factors of Fuzhou City [J]. *Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition)*, 2014, 30(6): 77-84.
- [49] WANG G Y, WANG Y, YIN W J, et al. Seasonal exposure to PM_{2.5}-bound polycyclic aromatic hydrocarbons and estimated lifetime risk of cancer: a pilot study [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 702: 135056.
- [50] 陈月芳, 孙善伟, 段小丽, 等. 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 [J]. *环境科学*, 2020, 41(1): 262-272.
- CHEN Y F, SUN S W, DUAN X L, et al. Refined assessment of exposure and health risks of heavy metals in water for the children in Xigu District, Lanzhou [J]. *Environmental Science*, 2020, 41(1): 262-272.
- [51] 李盛, 王金玉, 冯亚莉, 等. 兰州市城区居民饮水暴露参数调查分

- 析[J].国外医学(医学地理分册),2019,40(2):108-112.
- LI S,WANG J Y,FENG Y L,et al.Drinking water exposure factors among urban residents in Lanzhou[J].Foreign Medical Sciences (Section of Medgeography),2019,40(2):108-112.
- [52] 乔飞杨,王丹璐,陈昱,等.基于呼吸量实测的儿童呼吸量估算方法比较研究[J].环境科学研究,2021,34(6):1489-1498.
- QIAO F Y,WANG D L,CHEN Y,et al.Comparative study of inhalation rate estimation methods in children[J].Research of Environmental Sciences,2021,34(6):1489-1498.
- [53] 高圣华,郑天柱,祝刚,等.郑州市成人涉水活动皮肤暴露参数调查分析[J].中国卫生工程学,2021,20(3):353-356.
- GAO S H,ZHENG T Z,ZHU G,et al.Investigation and analysis on the water exposure of adults in Zhengzhou City[J].Chinese Journal of Public Health Engineering,2021,20(3):353-356.
- [54] 王金玉,李盛,冯亚莉,等.兰州市城区成年居民涉水活动的皮肤暴露参数研究[J].中国预防医学杂志,2019,20(4):316-320.
- WANG J Y,LI S,FENG Y L,et al.Survey on the water exposure of adult urban residents in Lanzhou[J].Chinese Preventive Medicine, 2019,20(4):316-320.
- [55] WANG B B,CHENG H G,LIN C Y,et al.Arsenic exposure analysis for children living in central China:from ingestion exposure to biomarkers[J].Chemosphere,2022,287:132194.
- [56] WANG B B,DUAN X L,FENG W Y,et al.Health risks to metals in multimedia via ingestion pathway for children in a typical urban area of China[J].Chemosphere,2019,226:381-387.
- [57] 郑方圆,徐翔宇,曹素珍,等.新冠肺炎疫情期间医废收处人员防护措施及暴露风险调查研究[J].环境科学研究,2020,33(7):1705-1710.
- ZHENG F Y,XU X Y,CAO S Z,et al.Investigation on and protective measures and exposure risks for the people related to medical waste disposal during the COVID-19 epidemic[J]. Research of Environmental Sciences,2020,33(7):1705-1710.
- [58] 王晓南,崔亮,李霁,等.人体健康水质基准特征参数研究及应用[J].环境科学研究,2021,34(7):1553-1561.
- WANG X N,CUI L,LI J,et al.Study and recommendation on characteristic parameters of the water quality criteria for the protection of human health[J].Research of Environmental Sciences,2021,34(7):1553-1561.

(责任编辑:刘方)