

DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2024111305

CSTR:32061.14.hjhx.2024111305

宗艺晶, 李焘, 郭兴洲, 等. 消费品化学风险物质暴露评估研究进展[J]. 环境化学, 2025, 44(3): 1133-1142.

ZONG Yijing, LI Tao, GUO Xingzhou, et al. Research progress on exposure assessment of chemical risk substances in consumer products[J]. Environmental Chemistry, 2025, 44 (3): 1133-1142.

消费品化学风险物质暴露评估研究进展*

宗艺晶¹ 李 焘¹ 郭兴洲¹ 刘 霞^{2**} 吕 庆^{1**}

(1. 中国检验检疫科学研究院, 国家市场监督管理总局重点实验室(消费品质量安全检测与风险评估), 北京, 100176;
2. 中国标准化研究院, 质量研究分院, 北京, 100191)

摘 要 日常使用的消费品是普通人群接触化学污染物的重要来源之一, 在消费者使用产品的过程中, 化学污染物可能通过直接或间接接触对人体产生危害. 与空气、水、土壤、膳食等其他来源的环境污染物相比, 消费品类型多种多样, 消费者接触消费品的行为具有个体差异性和不确定性, 来源于消费品中的化学物质转移、摄入过程也较为复杂. 本文综述了消费品暴露评估研究的发展历程及国内外研究发展现状, 重点从“人-物-场”的角度对影响消费品暴露评估的消费者特征、消费品特征和暴露场景进行深入分析阐述, 归纳了 8 种主要的消费品暴露行为模式, 可为开展消费品中化学风险物质暴露评估及其对人体健康的影响研究提供参考.

关键词 消费品安全, 暴露评估, 暴露场景, 消费者行为, 化学风险物质.

中图分类号 TS01; X820.4; O6 文献标识码 A

Research progress on exposure assessment of chemical risk substances in consumer products

ZONG Yijing¹ LI Tao¹ GUO Xingzhou¹ LIU Xia^{2**} LYU Qing^{1**}

(1. Key Laboratory of Consumer Product Quality Safety Inspection and Risk Assessment, State Administration for Market Regulation, Chinese Academy of Inspection and Quarantine, Beijing, 100176, China; 2. Quality Research Branch, China National Institute of Standardization, Beijing, 100191, China)

Abstract Consumer products represent a significant source of exposure to chemical pollutants for the general population. The potential for harm from these pollutants is heightened by the fact that humans may be exposed to them directly or indirectly during the course of consumer use. In comparison to other sources of environmental pollutants, such as air, water, soil and diet, consumer products are of diverse types. Furthermore, consumer exposure to consumer products is characterised by individual variability and uncertainty. Additionally, the transfer and intake process of chemical substances originating from consumer products is more complex. This paper provides a summary of the development of consumer product exposure assessment research and reviews the development of domestic and international research. It focuses on the consumer characteristics, consumer product characteristics and exposure scenarios that affect the exposure assessment of consumer products from the perspective of "human-object-field", and presents eight major exposure patterns of consumer

2024 年 11 月 13 日收稿(Received: November 13, 2024).

* 国家重点研发计划项目(2022YFF0606204)和中央基本科研业务费项目(552024Y-11401)资助.

Supported by the National Key Research and Development Program of China(2022YFF0606204) and the Science Research Program of the China National Institute of Standardization (552024Y-11401).

** 通信联系人 **Corresponding author**, Tel: 010-53897468, E-mail: Lvqing2009@126.com; liuxia@cnis.ac.cn

products, which are useful for the study of exposure assessment of chemical risk sources in consumer products and their impacts on human health.

Keywords Consumer product safety, Exposure assessment, Exposure scenario, Consumer behavior, Chemical risk substances.

化学污染物会以一定的浓度和状态存在于空气、水、土壤、食物以及日常消费品中,经过人体的吸收和代谢对健康产生影响.与其他环境暴露行为模式相比,消费品的类型和人体接触消费品的行为复杂且多样,来源于消费品中的污染物转移、摄入过程也更为复杂.消费品中的化学污染物主要来源于原材料或者生产加工过程有意或无意引入的添加剂,如玩具中的增塑剂、服装中的染料和整理剂、仿真饰品中的重金属等.在消费品使用过程中,这些化学污染物可能通过直接或间接接触危害人体健康.为保护消费者人身健康和生命安全,暴露评估作为化学风险的主要评估手段,在消费品安全评估领域不断应用和发展.

本文综述了消费品暴露评估研究的发展历程,以及国内外研究发展状况.借鉴事故致因系统理论,将消费者、消费品、消费品暴露场景及其之间的交互关系概括为“人-物-场”系统.基于该系统,深入分析了消费者特征、消费品特征和消费暴露场景,并系统总结了消费品暴露行为模式和途径,旨在为消费品安全和环境健康相关领域研究人员和管理人员提供参考.

1 消费品暴露评估研究的发展状况 (Development of consumer product exposure assessment researches)

1.1 国外消费品暴露评估研究发展状况

暴露评估最早出现在 20 世纪初,应用于流行病学、劳动卫生学以及保健物理学领域,自 20 世纪 70 年代起,被广泛用于化学品污染问题的相关研究^[1].1980 年联合国国际化学品安全规划署成立,其主要任务为开展化学品对人体健康及环境的风险评估^[2].1983 年美国国家科学院提出了健康风险评估四步法:危害鉴定、剂量-反应关系评估、暴露评估和风险表征.之后,美国环保署(EPA)发布了消费者使用消费品时的化学物质暴露估计标准场景和评估方法,并陆续发布了《暴露评估指南》、《暴露参数手册》、《风险评估指南》等技术性文件^[3],并在 90 年代的技术文件修订中将消费品及居住暴露参数加入其中^[4].

20 世纪 90 年代,荷兰国家公共卫生与环境研究所(RIVM)、欧洲生态毒理学和化学品毒理学中心(ECETOC)、欧盟健康与消费品保护研究所(IHCP)、世界卫生组织(WHO)等机构和组织开始在消费品暴露评估领域开展研究工作,并发布了一系列消费者暴露评估的原则和方法文件^[5-7],在此基础上,欧洲通过 Exopfacts 计划建立了关于暴露参数相关资料的数据库.2000 年之后,欧美等发达国家开发出适用于部分领域的消费品暴露模型和相关计算软件,并不断完善.如, RIVM 最新版本的 ConsExpo Web 包括了空气清新剂、清洁和洗涤用品等 7 种产品的暴露场景和模型,建立了蒸发模型、喷雾模型、固体材料排放模型等不同应用范围和复杂程度的模型^[7]; ECETOC 的 TRA 工具中针对消费者的评估工具,涵盖了 46 种产品和物品类型,并对不同暴露途径提供不同算法^[8]; EPA 的 ExpoBox 则提供了丰富的暴露评估资料资源,包括方法、介质、暴露途径、评估层次和类型、生命阶段和人群,以及化学分类 6 个工具集,为暴露评估人员提供了实用的工具箱^[9].此外, Huang 等^[10]深入总结了消费品在近场化学释放及相关的多种人体暴露模型,其将化学物质的传递分为从产品到近场空间和从近场空间到人体界面两个阶段,分别阐述了不同释放模式、不同暴露途径的建模方法,为消费品暴露评估提供了系统且精细化的视角.

在理论研究方面,虽然欧美等国外机构目前已开发并提供了 ConsExpo、TRA 等消费品暴露评估软件和工具,但相关工具相对较为复杂,用户必须熟悉每种可选模型的工作原理及其包含的固有假设或限制,并了解大量输入参数,才能做出适当的模型选择决定.在暴露评估方法应用方面,欧美早期涉及消费品化学物质暴露的相关研究主要集中于清洁用品、家用溶剂、杀虫剂等日用化学品.在 2011 年韩国加湿器杀菌剂致死事件引发关注后,韩国学者对空气清新剂、喷雾剂等消费品的吸入暴露健康风

险开展了一系列研究^[11-13].

1.2 我国消费品暴露评估研究发展状况

我国在消费品暴露评估方面起步较晚,但近年来有所进展.在“十二五”期间,环境保护部组织了儿童、青少年和成人群体的环境暴露行为模式研究,发布了中国人群暴露参数手册,其中收录了与手机、电脑等产品使用相关的时间-活动模式参数,反映目标人群在日常生活中的电磁辐射的暴露时间或暴露强度^[14].2021 年,GB/T 41005-2021《消费品安全 化学危害风险评估通则》和 GB/T 41007-2021《消费品安全 化学危害表征和暴露评估指南》发布,提供了针对消费品化学危害暴露评估的过程和方法指导,参照 IHCP、RIVM 等机构开发的暴露模型涵盖 6 种类型消费品暴露场景^[15].

通过中国知网期刊数据库(CNKI)对我国近 5 年(2020 年 1 月至 2024 年 9 月)开展的与消费品暴露评估的相关研究进行关键词系统性检索,再对明确涉及消费品的文献进行人工筛选,获得相关文献 72 篇,结果如图 1 所示.

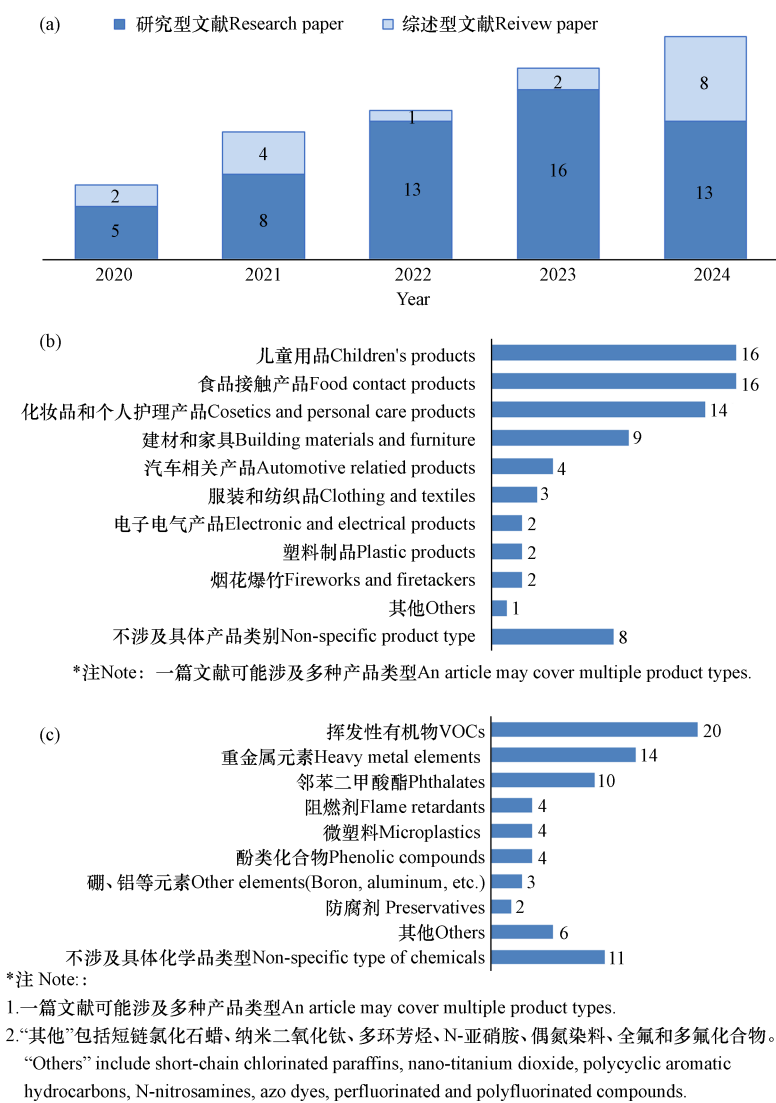


图 1 近五年我国消费品暴露评估研究状况

(a)消费品暴露评估研究趋势图.(b)消费品暴露评估涉及产品类型分布图.(c)消费品暴露评估涉及化学风险物质分布图

Fig.1 Research status of consumer product exposure assessment in the past five years

(a)Research trends of exposure assessment of consumer products. (b)Types of consumer products in exposure assessment researches. (c) Types of chemical risk substances in exposure assessment researches.

2020 年以来,消费品暴露评估相关研究数量逐年增长,显示出该领域正在逐步得到关注和重视.其中,综述型文献 17 篇(23.3%),王志娟等^[16-17]综述了国内外现有的暴露模型和参数设置研究概况,

建立适用我国消费者使用行为特点的多种暴露模型;宗艺晶等^[18-19]对消费品暴露评估中消费者生理和行为暴露参数的研究方法及其数据可用性进行了分析评述;李淮等^[20]对比了欧盟及美国的化学品健康风险评估中数据质量评估方法,提出我国的暴露评估数据质量评估技术建议.从研究对象来看,儿童用品^[21-23]、食品接触产品^[24-26]、化妆品和个人护理用品^[27-29]相关研究较多;从化学污染物来看,主要涉及重金属、挥发性有机化合物、邻苯二甲酸酯等.这些研究为我国消费品暴露评估领域的发展提供了应用和实践支撑.

近年来,高通量非靶向筛查技术与暴露评估相结合的研究成为新兴研究方向,通过对某类消费品中含有的未知风险物质进行筛查,识别判断出有毒有害需要管控的物质,再进一步开展暴露评估和风险评估,判断其风险是否处于可接受水平.该类研究不再局限于重金属、邻苯二甲酸酯、苯系物等研究较为成熟的化合物,对关注度较低的新型有害化学物质暴露评估作出积极探索.中国检验检疫科学研究院在此方面开展了大量工作,例如刘雅慧等^[30]对新型儿童驱蚊产品中经识别筛选的28种优先控制化合物开展了吸入和皮肤暴露途径的暴露风险评估;邵亚男等^[31]对婴幼儿牙胶产品中20种有害物质进行筛查,并对3—12个月和12—24个月两个年龄组的儿童开展了暴露风险评估.

在理论研究方面,我国的消费品暴露评估研究还未对各种产品和使用场景进行精细开发,开展暴露评估时主要引用国外成熟模型,对消费品使用行为相关暴露参数未开展过大规模调查,因此还不具备形成应用工具和参数数据库的条件.在暴露评估方法应用方面,国内研究者主要聚焦儿童用品、食品接触产品等特定消费品的特定化学物质开展暴露评估应用.上述应用研究侧重于使用暴露评估作为评价化学物质健康风险的方法和手段,选择合适的暴露评估模型,通过估计暴露参数代入公式计算特定化学物质的暴露剂量,仍然缺乏对消费品暴露行为系统性、全面性的梳理和构建.

2 暴露评估中的消费者特征(Consumer characteristics in exposure assessment)

消费者是使用消费品的主体,也是化学物质暴露过程的受体.在分析消费品暴露行为模式时,既要考虑消费者的生理特征,也要考虑消费者行为特征.

2.1 消费者生理特征

与普通成年人群相比,儿童和老人由于认知和避险能力较低,一般被认为是弱势消费者.儿童生理发育不完全,同样暴露剂量的化学危害可能造成更严重的健康风险,除身高、体重存在明显差异之外,儿童体表面积与体重之比大于成人;有较高的基础代谢率和能量消耗;皮肤渗透率、肺泡表面积、胃酸pH值、胃肠吸收和渗透性也与成人有所差异^[32].此外不同发育阶段的特性与暴露于风险源的状况相结合,决定了儿童遭受伤害风险的方式不同于成年人,如婴幼儿的活动方式决定了他们会更多接触空气中和周围物品表面的化学物质,而在学会行走跑跳后活动范围扩大,在地板上玩耍并接触可能被污染的表面的时间随之减少.老年人的能力缺陷主要体现在感官、机体反应和认知三方面^[33].随着年龄增长,老年人能力缺陷发生频率及严重性也随之增加,尤其是对风险的认知和规避能力下降,使老年人可能面临更大的风险.

2.2 消费者暴露行为特征

在环境健康风险评估中,人的行为以时间-活动模式体现,常见参数包括室内外停留、游泳和洗浴及土壤接触时间等.但是由于消费品使用行为更为复杂,上述时间-活动模式参数对消费品暴露行为的指导有限.我们可以将消费者对于消费品的暴露行为分为三类:预期使用行为、可预见的合理滥用行为和防范行为(图2).

预期使用,即正常使用行为,是按照产品制造商提供的操作说明,或按传统或习惯的、明显的产品使用方式使用^[34].开展研究时,需要考虑到不同消费者使用和接触方式形成的多种预期使用情况,如室内杀虫气雾剂的施药者和施药后居民暴露^[35],驱蚊帐的洗涤者和睡眠者暴露^[36].

可预见的合理滥用是在制造商非推荐的条件下,或不按制造商推荐的用途来使用产品,但又有可能发生的情况,如常见误操作、变更用途使用或儿童的故意拆卸、跌落、舔舐、啃咬等.以玩具为例,国家标准要求考虑跌落、扭力、拉力、挠曲测试等可预见的合理滥用情况^[37],也有学者关注儿童口部与物体接触行为,分析综述了物口接触暴露参数及其采集方法^[38].

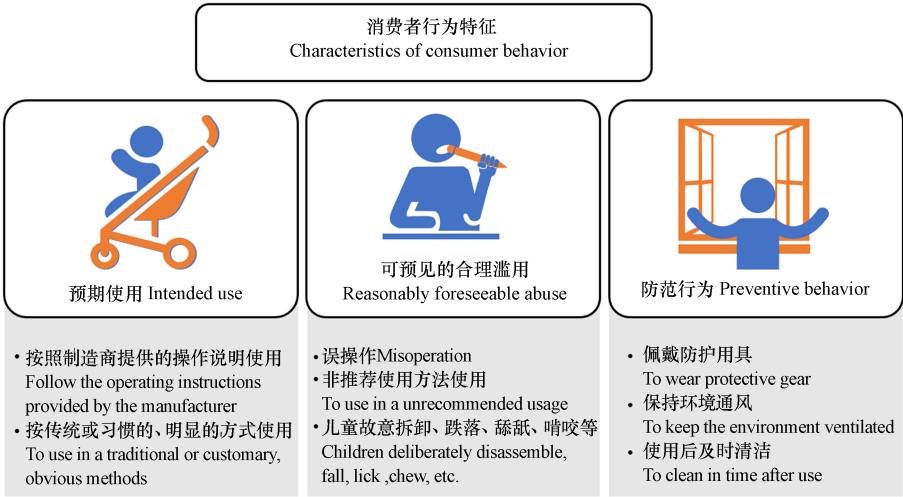


图 2 消费者行为特征分类

Fig.2 Classification of consumer behavior characteristics

防范行为是消费者意识到产品或环境中可能存在危险, 主动采取防范措施的行为. 在消费品的使用过程中佩戴防护用具、保持环境通风, 在使用后及时清洗等, 都是可以降低对化学物质暴露程度的有效防范行为. 如美国一些家庭清洁和室内涂料产品使用调查研究中, 包含是否戴橡胶手套、帽子、口罩或是否通风等防范行为的内容^[39-41].

3 暴露评估中的消费品特征(Consumer product characteristics in exposure assessment)

由于消费品涵盖的范围较广, 对消费品进行合理的分类, 既有助于在产品所包含的化学风险源和消费品使用行为之间建立桥梁, 也能够更好地反映与消费品暴露场景相关的其他因素.

3.1 消费品的物理属性

消费品种类繁多, 按物理属性可以分为气体或气溶胶型(如喷雾类)、液体型(如清洁剂、油漆等)、半固体型(如粉末、凝胶等)和固体型消费品(表 1)^[42]. 不同物理属性消费品中化学物质的逸散性存在差异, 影响其在生物系统中的可用性. 人体与不同物理属性消费品的接触方式也不同, 如气体或气溶胶型消费品主要通过吸入暴露; 液体型消费品则通过皮肤暴露和蒸发后的吸入暴露; 固体型消费品以皮肤暴露和物-口接触、意外摄入等非饮食暴露为主.

表 1 消费品物理属性分类示例

Table 1 Examples of physical attributes of consumer products		
属性类型 Attribute type	属性 Attribute	说明 Definition
气体或气溶胶型	气体	直接使用的灌装气体型产品, 如野营设备燃料等气体产品.
	气溶胶喷雾	产品在装有一种或多种推进剂的加压容器中出售. 产生的喷雾可能由比泵喷雾器产生的喷雾更小的液滴组成, 并且可能更易于吸入.
	泡沫喷雾	产品在使用过程中被喷成泡沫.
液体	泡沫	产品在使用过程中与空气或其他气体混合.
	液体	产品很容易从容器中倒出, 但也可以使用刷子或其他器具取用.
	凝胶	产品是一种粘稠的液体, 不容易从容器里倒出来. 该材料由单相组成, 所有组分都溶解在一种溶剂中.
半固体	糊状物	产品是粘稠的液体或半固体, 不容易从瓶中倒出. 该材料由机械混合的多种相(油、水、固体)组成.
	浸渍片材	产品是浸渍固体的纤维片(例如, 干燥片).
	粉末	粉状产品是自由流动的, 由小颗粒的固体产品组成.
固体	固体	产品具有固定形状.

3.2 消费品的使用寿命

从暴露行为角度, 消费品的使用寿命也是暴露风险的影响因素之一. 按使用寿命, 消费品可分为耐

用、非耐用和消耗型消费品。参考宏观经济领域的定义,耐用消费品是指使用时间在一年以上,持续提供服务或者效用的物品^[43],例如家具、家电等;非耐用消费品指使用时间在一年以下^[44],但产品数量不会随着使用次数而减少的物品,例如童装、牙刷、毛巾等;消耗性消费品是指只能使用一次或多次的可消耗的物品,例如纸巾、纸尿裤、洗涤剂、胶水等。对持续提供服务和效用的耐用消费品和非耐用消费品,在暴露评估时主要关注产品使用持续时间和使用频率,而对消耗性消费品,则主要关注单次使用量和使用频率。

4 消费品暴露场景(Exposure scenario of consumer product)

化学物质在消费品与消费者之间的转移过程,需要通过环境介质来实现。在大多暴露评估中,呼吸道吸入、消化道摄入和皮肤接触三种是最常见的暴露路径,此外还有眼部、黏膜等较少涉及的暴露路径。

4.1 经呼吸道暴露场景

经呼吸道暴露场景可以考虑消费品使用后吸入和消费品使用时直接吸入两类暴露场景。一是消费品使用后吸入型,是在相对长的一段时间内,消费品中的化学物质通过挥发、蒸发等方式逸散到空气中,并相对均匀地分散在消费品和消费者共同所在的微环境中。在该场景中,一般考虑的环境介质范围即为房间体积大小范围内的空气。二是消费品使用时直接吸入型,一般是在消费品使用过程中或使用后相对较短时间内直接吸入体内。例如,喷雾类消费品使用时,靠近人的空气中产品浓度会高于房间其他位置的浓度。一些模型在评估喷雾类消费品的暴露剂量时,假设喷雾云的分布为一个高为 1 m,直径为 0.5 m 的锥体,体积近似默认值为 0.0625 m^3 ^[10]。

4.2 经消化道暴露场景

在环境暴露评估中,经消化道暴露主要考虑饮食(食物、饮料)和非饮食(土壤、灰尘及其他)摄入,而在消费品暴露评估中,经消化道暴露的场景除了通过饮食摄入之外,在非饮食摄入中可细分为物-口接触、手-口接触、意外摄入等暴露场景。

饮食摄入场景。主要考虑食品接触制品(如餐饮具、厨具等)中的化学物质在长期与盛装的食物、饮料接触过程中容易发生迁移,进入到饮食介质中,再摄入人体。我国对食品接触制品的分类主要按材质分为纸、竹、木、金属、搪瓷、塑料、橡胶等,而美国根据接触食品的几率将其分为长期接触(最终包装)、接触媒介(临时盛放食物的容器)、短期或伴随接触(食品加工中所用的传送带等)^[45],后者的分类方式从暴露评估的角度更具有借鉴意义。

物-口接触场景。部分食品接触制品(如勺、叉、筷子、吸管、奶嘴等)在使用时与口腔产生直接接触。此外,儿童在发育过程中会将物品体触及口唇、舌或放入口中,进行舔、吮吸、咀嚼或啃咬等行为,尤其婴幼儿会用口吸吮物品。在消费品与口腔直接接触的过程中,消费品中的化学物质可能迁移到唾液中并摄入人体。李冠苇等^[38]基于国内外儿童物-口接触行为的研究,深入分析了儿童口部与玩具等物件接触持续时间、接触频率、口咬力度、口腔尺寸、唾液成分等重要的儿童口部行为参数,总结了儿童物-口接触行为规律,为物-口接触暴露风险评估、制定检测方法及标准提供依据。

手-口接触场景。手-口接触与物-口接触相似,也是儿童特定发育时期的行为模式之一,儿童会将手指放入嘴部进行舔、吮吸、咀嚼或啃咬等行为^[46]。消费品中的化学物质以微尘或其他残留物形式,经手到口,再进入消化道。如田勇等^[23]在评估玩具水晶泥中硼对儿童暴露健康风险时,针对水晶泥为半流动泥状物、具有一定黏性等特点,认为儿童在玩要过程中水晶泥会黏附在手上,或残留于指甲缝隙,在儿童手-口接触时,会经口摄入,因此将手-口接触暴露作为经消化道暴露的主要暴露途径。

意外摄入场景。由于儿童的物-口、手-口接触行为,有可能将一些小体积的消费品或零部件含在口中,并导致意外摄入。在临床上,儿童常见的消化道异物类型包括硬币、纽扣电池、磁性异物、棒棒糖棒、发夹等^[47-48]。目前国内外研究更多关注纽扣电池、磁性异物等高伤害异物^[49-51],对一般消费品意外摄入的化学物质危害研究较少,但意外摄入也是不可忽视可能导致消费品化学物质危害的途径之一。

4.3 经皮肤暴露场景

相对于经呼吸道暴露和经消化道暴露,皮肤吸收过程较为复杂,且影响因素众多,包括水合性、温

度、皮肤表面状态(如皮肤角质层是否损伤等情况)、皮肤的局部差异(不同部位皮肤吸收率不同)、其他进入途径、个体差异、化合物的理化特性、载体和媒介物质、协同效应等多种因素混合影响^[52]。消费者在产品使用过程中,对 产品中的化学物质有很广泛的皮肤接触或暴露,可能发生在不同环境介质的行为活动中,包括水(洗澡、洗漱、洗衣等)、日化产品等其他液体的使用、固体直接接触、蒸汽或气体沉降、微尘或残渣沉降等^[14]。此外,产品接触皮肤的频率和强度,以及化学物质从产品中释放的情况都会影响皮肤暴露情况。

5 总结与展望(Summary and prospect)

由于消费品种类差异大,使用行为复杂等原因,国内消费品暴露评估研究主要集中于特定产品类别的暴露评估,缺乏对消费品暴露行为系统性、全面性的梳理和构建。本文从“人-物-场”角度综述了消费品暴露行为模式和特征。在“人”的方面,部分研究关注儿童在生理特征和行为特征方面的差异性,但少有讨论消费者预期使用行为、可预见的合理滥用行为以及防范行为等在暴露评估中的影响。在“物”的方面,研究多聚焦于具体产品,但目前尚未形成对消费品暴露评估具有指导意义或达成共识的产品分类,有待学者在这一领域继续开展系统性研究和探讨。在“场”的方面,国内外研究已形成基本共识,主要暴露途径为经呼吸道、消化道和皮肤暴露,三种暴露途径的细分场景在不同研究中也均有涉及。

根据对消费者、消费品以及暴露场景特征的分析,构建了消费品暴露行为模式框架(图 3)。消费品类型和消费品中的化学物质共同作用,影响消费品暴露行为模式以及暴露途径,主要包括呼吸道暴露、消化道暴露和皮肤暴露 3 种途径,一般有空气吸入、喷雾剂吸入、饮食摄入、物-口接触、手-口接触、意外摄入、液态介质皮肤接触和固态介质皮肤接触 8 种模式。未来研究可基于此消费品暴露行为模式框架,在宏观层面开展消费品暴露系统性和共性的影响因素、暴露模型构建、暴露参数研究方法等方面的研究,在微观层面深入挖掘不同消费品、不同化学危害物通过特定暴露行为导致的健康影响机理,从而加强消费品暴露风险评估研究水平,为制定更为科学、有效的消费品质量安全政策提供依据。

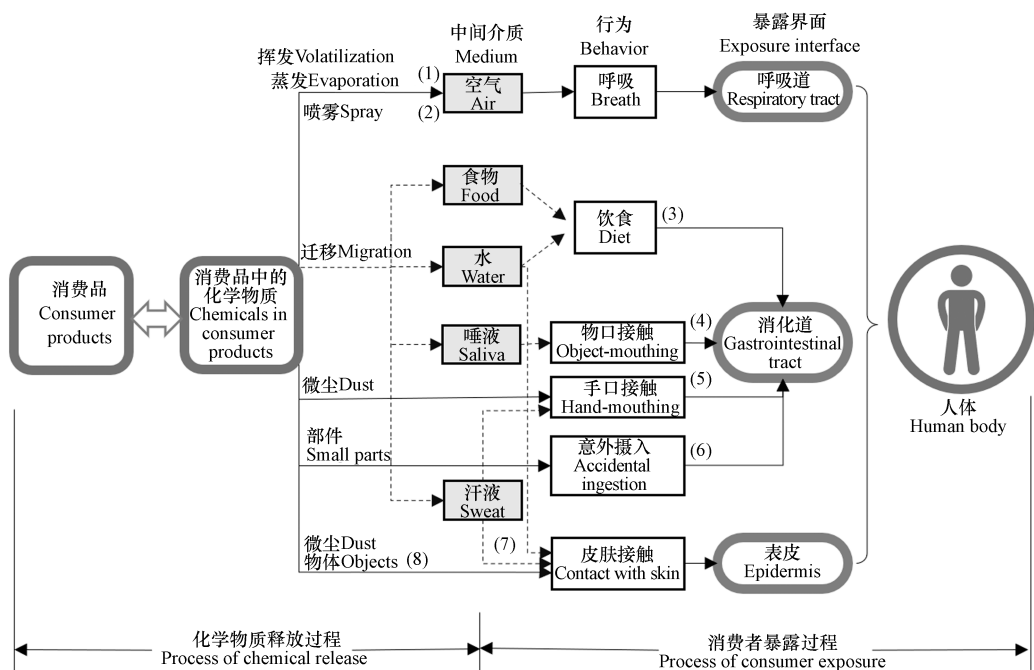


图 3 消费品暴露行为模式框架图

Fig.3 Framework of consumer product exposure behavior pattern

参考文献 (References)

[1] 美国环境保护署. 暴露评估指南 [M]. 陈会明, 李晞, 译. 北京: 中国标准出版社, 2014.
U. S. Environmental Protection Agency. Guidelines for exposure assessment[M]. CHEN H M, LI X. Beijing: China Standards Press,

- 2014(in Chinese).
- [2] WHO. Dermal exposure[R/OL]. (2014-2-1)[2023-9-6].
- [3] C. J. 范莱文, T. G. 韦梅尔. 化学品风险评估 [M]. 《化学品风险评估》翻译组译. 北京: 化学工业出版社, 2010.
VAN LEEUWEN C J, VERMEIRE T G. Risk assessment of chemicals: An introduction [M]. Chemical Risk Assessment Translation Team. Beijing: Chemical Industry Press, 2010(in Chinese).
- [4] U. S. EPA. Exposure Factors Handbook[R/OL]. Washington DC, 1997[2024-10-20].
- [5] ECETOC. Nickel, Cobalt and Chromium in Consumer Products: Allergic Contact Dermatitis[R/OL]. 1992 [2024-10-20].
- [6] WHO. Principles for the assessment of risks to human health from exposure to chemicals[EB/OL]. (1999-02-01)[2023-8-20].
- [7] RIVM, ConsExpo Web Consumer Exposure models model documentation, update for ConsExpo Web 1.0. 2[R/OL]. [2024-10-20].
- [8] European Food Safety Authority. Overview of existing methodologies for the estimation of non-dietary exposure to chemicals from the use of consumer products and via the environment[J]. EFSA Journal, 2016, 14(7): 4525.
- [9] U. S. EPA. Guidelines for Human Exposure Assessment[R/OL]. 2019 [2023-6-5].
- [10] HUANG L, ERNSTOFF A, FANTKE P, et al. A review of models for near-field exposure pathways of chemicals in consumer products[J]. Science of the Total Environment, 2017, 574: 1182-1208.
- [11] PARK D. Review of humidifier lung cases caused by use of humidifier - focusing on probable environmental causal agents[J]. Korean Journal of Environmental Health Sciences, 2013, 39(2): 105-116.
- [12] LEE H, LEE K, PARK J Y, et al. Korean Ministry of Environment's web-based visual consumer product exposure and risk assessment system (COPER)[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24(14): 13142-13148.
- [13] SHIN H, JANG Y, LIM M, et al. Characteristics of exposure factors and inhalation exposure to selected spray consumer products in Korean population[J]. Regulatory Toxicology and Pharmacology, 2020, 110: 104513.
- [14] 段小丽. 中国人群暴露参数手册 (儿童卷) 概要 [M]. 北京: 中国环境出版社, 2016.
DUAN X L. Highlights of the Chinese exposure factors handbook (Children)[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2016(in Chinese).
- [15] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 消费品安全 化学危害表征和暴露评估指南: GB/T 41007-2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
State Administration of Market Regulation, National Standardization Administration. Consumer product safety—Guidelines for characterization and exposure assessment of chemical hazard: GB/T 41007-2021[S]. Beijing: China Standards Press, 2021(in Chinese).
- [16] 王志娟, 张庆, 白桦, 等. 我国消费品中化学物质暴露模型研究 [J]. 质量安全与检验检测, 2020, 30(4): 85-89.
WANG Z J, ZHANG Q, BAI H, et al. Research on exposure model of chemical substances in consumer products in China[J]. Quality Safety Inspection and Testing, 2020, 30(4): 85-89(in Chinese).
- [17] 王志娟, 吕庆, 王婉, 等. 消费品中化学物质暴露模型研究概况 [J]. 中国口岸科学技术, 2021, 3(2): 19-26.
WANG Z J, LV Q, WANG W, et al. A review of researches on chemical exposure models in consumer products[J]. China Port Science and Technology, 2021, 3(2): 19-26(in Chinese).
- [18] 宗艺晶, 郭兴洲, 李文雅, 等. 消费者生理和行为暴露参数研究进展 [J]. 质量安全与检验检测, 2024, 34(2): 50-57.
ZONG Y J, GUO X Z, LI W Y, et al. Research progress on physiological and behavioral exposure factors of consumers[J]. Quality Safety Inspection and Testing, 2024, 34(2): 50-57(in Chinese).
- [19] 宗艺晶, 郭兴洲, 操卫, 等. 消费品化学危害暴露行为参数研究: 基于儿童吸管杯的实证分析 [J]. 质量安全与检验检测, 2024, 34(4): 52-57.
ZONG Y J, GUO X Z, CAO W, et al. Exposure behavioral factors to chemical hazards in consumer products: An empirical analysis based on children's sippy cups[J]. Quality Safety Inspection and Testing, 2024, 34(4): 52-57(in Chinese).
- [20] 李潍, 周崇胜, 于相毅, 等. 化学品健康风险评估过程中的数据质量评估技术概述 [J]. 环境化学, 2021, 40(2): 416-426.
LI W, ZHOU C S, YU X Y, et al. Overview of data quality assessment techniques during chemical health risk assessment[J]. Environmental Chemistry, 2021, 40(2): 416-426(in Chinese).
- [21] 田勇, 戴洁, 罗瑾, 等. 泡泡水玩具儿童玩耍行为特征分析及防腐剂暴露健康风险评估 [J]. 环境化学, 2025, 44(1): 299-308.
TIAN Y, DAI J, LUO J, et al. The analysis of the behavioral characteristics of children playing with soap bubble toys and health risk assessment of preservative content exposure[J]. Environmental Chemistry, 2025, 44(1): 299-308(in Chinese).
- [22] 李桂晓, 尉立华, 贺祥珂, 等. 儿童地垫产品中 5 种 VOCs 暴露及健康风险评估 [J]. 生态毒理学报, 2024, 19(4): 360-367.
LI G X, YU L H, HE X K, et al. Exposure and health risk assessment of 5 VOCs in children's play mats[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2024, 19(4): 360-367(in Chinese).
- [23] 田勇, 戴洁, 霍炜强, 等. 玩具水晶泥中的硼含量特征及中国儿童暴露健康风险评价 [J]. 安全与环境学报, 2022, 22(4): 2056-2063.
TIAN Y, DAI J, HUO W Q, et al. Assessment of Chinese children exposure health risks and characteristics of boron content in toy

- slime[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2022, 22(4): 2056-2063(in Chinese).
- [24] 李宁, 肖海清, 王宏伟, 等. 不同塑料餐具中典型毒害物质的暴露评估 [J]. *现代食品科技*, 2022, 38(9): 321-332.
LI N, XIAO H Q, WANG H W, et al. Exposure assessment of typical toxic substances in different plastic tableware sets[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2022, 38(9): 321-332(in Chinese).
- [25] 梁潇戈, 郭睿瑶, 苏梦飞, 等. 瓶装水中微塑料与邻苯二甲酸酯的含量及健康风险 [J]. *环境科学*, 2024, 45(10): 6104-6111.
LIANG X G, GUO R Y, SU M F, et al. Content and health risks of microplastics and phthalate esters in bottled water[J]. *Environmental Science*, 2024, 45(10): 6104-6111(in Chinese).
- [26] 杨道远, 王晔茹, 白莉, 等. 我国食品用消毒剂风险评估方法的建立及其应用研究 [J]. *中国食品卫生杂志*, 2023, 35(6): 872-877.
YANG D Y, WANG Y R, BAI L, et al. Establishment of the risk assessment method for food disinfectants and its application in China[J]. *Chinese Journal of Food Hygiene*, 2023, 35(6): 872-877(in Chinese).
- [27] 陈攀金, 沈正超, 杜振霞. 美甲化妆品中 VOCs 臭氧贡献及其健康风险评价 [J]. *日用化学工业 (中英文)*, 2023, 53(4): 472-479.
CHEN P J, SHEN Z C, DU Z X. Ozone contribution of VOCs in nail cosmetics and its health risk assessment[J]. *China Surfactant Detergent & Cosmetics*, 2023, 53(4): 472-479(in Chinese).
- [28] 师曜, 王颖, 李垚, 等. 个人护理品中纳米二氧化钛调查及健康风险评价 [J]. *生态毒理学报*, 2022, 17(4): 533-544.
SHI Y, WANG Y, LI Y, et al. Titanium dioxide nanoparticles in personal care products and titanium health risk assessment to adult consumers[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2022, 17(4): 533-544(in Chinese).
- [29] 高川子, 廖浩麟, 王毅博, 等. 药物及个人护理用品的生态毒理 [J]. *化学进展*, 2024, 36(9): 1363-1379.
GAO C Z, LIAO H L, WANG Y B, et al. Research progress of ecotoxicology of PPCP pollutants[J]. *Progress in Chemistry*, 2024, 36(9): 1363-1379(in Chinese).
- [30] LIU Y H, JIN R, LV Q, et al. Screening and evaluation of children's sensitively toxic chemicals in new mosquito repellent products based on a nationwide investigation[J]. *Environmental Science & Technology*, 2024, 58(6): 2704-2715.
- [31] SHAO Y N, WANG Z J, SHI H Y, et al. Migration characteristics and risk assessment of chemical hazardous substances in infant teether toys[J]. *Journal of Chromatography A*, 2024, 1730: 465085.
- [32] COHEN HUBAL E A, SHELDON L S, BURKE J M, et al. Children's exposure assessment: A review of factors influencing Children's exposure, and the data available to characterize and assess that exposure[J]. *Environmental Health Perspectives*, 2000, 108(6): 475-486.
- [33] 国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. 标准中特定内容的起草 第 2 部分: 老年人和残疾人的需求: GB/T 20002.2-2008/ISO/IEC Guild 71: 2001[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine, National Standardization Administration. Drafting for special aspects in standards - Part 2: The needs of older persons and persons with disabilities: GB/T 20002.2-2008/ISO/IEC Guild 71: 2001[S]. Beijing: China Standards Press, 2008(in Chinese).
- [34] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 玩具及儿童用品术语和定义: GB/T 41530-2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
State Administration of Market Regulation, National Standardization Administration. Toys, child use and care articles' terms and definitions: GB/T 41530-2022[S]. Beijing: China Standards Press, 2022(in Chinese).
- [35] 李敏, 孟宇晰, 闫艺舟, 等. 室内杀虫气雾剂初级暴露评估方法评述 [J]. *农药学学报*, 2014, 16(3): 245-251.
LI M, MENG Y X, YAN Y Z, et al. Primary exposure assessment approaches of indoor used aerosol insecticide[J]. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 2014, 16(3): 245-251(in Chinese).
- [36] 李敏, 张丽英, 陶岭梅, 等. 驱蚊帐的暴露评估方法 [C]//中国毒理学会第四届中青年学者科技论坛论文集. 银川, 2014: 63.
LI M, ZHANG L Y, TAO L M, et al. Exposure assessment methods for treated mosquito nets[C]//Proceedings of the 4th Chinese Society of Toxicology Science and Technology Forum for Young and middle-aged scholars. Yinchuan, 2014: 63(in Chinese).
- [37] 国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. 玩具安全 第 2 部分: 机械与物理性能: GB 6675.2-2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine, Standardization Administration of China. Safety of toys—Part 2: Mechanical and physical properties: GB 6675.2-2014[S]. Beijing: China Standards Press, 2014(in Chinese).
- [38] 李冠苇, 田勇, 马彤梅, 等. 基于玩具及婴童用品安全风险评估的儿童口部行为参数研究进展 [J]. *分析测试学报*, 2022, 41(6): 947-954.
LI G W, TIAN Y, MA T M, et al. Research advances on children's mouthing behavior parameters based on the safety risk assessment of toys and baby products[J]. *Journal of Instrumental Analysis*, 2022, 41(6): 947-954(in Chinese).
- [39] U. S. EPA, Household solvent products: a national usage survey[R/OL]. Washington DC, 1987[2024-10-20].
- [40] U. S. EPA, National usage survey of household cleaning products[R]. Washington, DC. 1987.
- [41] U. S. EPA, National household survey of interior painters[R]. Washington DC. 1987.
- [42] ISAACS K K, DIONISIO K, PHILLIPS K, et al. Establishing a system of consumer product use categories to support rapid modeling of

- human exposure[J]. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 2020, 30(1): 171-183.
- [43] 吕研. 中国城镇居民耐用消费品消费影响因素分析 [D]. 西南财经大学, 2012.
LV Y. An analysis of influencing factors of China's urban durable consumption[D]. *Southwestern University of Finance and Economics*, 2012(in Chinese).
- [44] 联合国. 按经济大类分类 [R/OL].[2024-8-28].
- [45] 隋海霞, 刘兆平, 李凤琴. 不同国家和国际组织食品接触材料的风险评估 [J]. *中国食品卫生杂志*, 2011, 23(1): 36-40.
SUI H X, LIU Z P, LI F Q. Risk assessment on food contact materials in different countries and organizations[J]. *Chinese Journal of Food Hygiene*, 2011, 23(1): 36-40(in Chinese).
- [46] 董婷, 李天昕, 王贝贝, 等. 儿童手口接触暴露参数调查研究方法的研究进展 [J]. *环境与健康杂志*, 2012, 29(8): 747-751.
DONG T, LI T X, WANG B B, et al. Research advance of children's hand-mouth exposure factors[J]. *Journal of Environment and Health*, 2012, 29(8): 747-751(in Chinese).
- [47] 杜敏, 商丽红, 向梅, 等. 980 例儿童消化道异物的临床特征、并发症危险因素及治疗方法 [J]. *山东医药*, 2020, 60(24): 60-62.
DU M, SHANG L H, XIANG M, et al. Clinical features, complication risk factors and treatment of 980 cases of digestive tract foreign body in children[J]. *Shandong Medical Journal*, 2020, 60(24): 60-62(in Chinese).
- [48] 方高潮, 黄开宇. 电子胃镜治疗儿童上消化道异物 756 例回顾性分析 [J]. *中国实用儿科杂志*, 2023, 38(10): 775-778.
FANG G C, HUANG K Y. Retrospective analysis of 756 cases of ingested foreign bodies in the upper gastrointestinal tract in children treated with electronic endoscopy[J]. *Chinese Journal of Practical Pediatrics*, 2023, 38(10): 775-778(in Chinese).
- [49] 徐庶钦, 盖敬慈, 张至轩, 等. 儿童误吞纽扣电池致消化道损伤的文献分析 [J]. *临床小儿外科杂志*, 2022, 21(6): 591-597.
XU S Q, GAI J C, ZHANG Z X, et al. Literature analysis of digestive tract injury caused by button batteries swallowed by mistake in children[J]. *Journal of Clinical Pediatric Surgery*, 2022, 21(6): 591-597(in Chinese).
- [50] ROSENFELD D, STRICKLAND M, HEPBURN C M. After the recall: Reexamining multiple magnet ingestion at a large pediatric hospital[J]. *The Journal of Pediatrics*, 2017, 186: 78-81.
- [51] MIDDELBERG L K, LEONARD J C, SHI J X, et al. High-powered magnet exposures in children: A multi-center cohort study[J]. *Pediatrics*, 2022, 149(3): e2021054543.
- [52] 赵秀阁, 黄楠, 段小丽, 等. 环境健康风险评估中的皮肤暴露参数 [J]. *环境与健康杂志*, 2012, 29(2): 124-126.
ZHAO X G, HUANG N, DUAN X L, et al. Dermal exposure factors in environmental health risk assessment[J]. *Journal of Environment and Health*, 2012, 29(2): 124-126(in Chinese).