

DOI: 10.7524/AJE.1673-5897.20240401001

李潍, 涂铿, 陈希超, 等. 化学品替代评估框架及方法[J]. 生态毒理学报, 2024, 19(6): 152-162

LI W, TU K, CHEN X C, et al. Framework and methodology of chemical alternative assessment [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2024, 19(6): 152-162 (in Chinese)

化学品替代评估框架及方法

李潍^{1,2}, 涂铿^{1,2}, 陈希超^{1,2}, 赵旭^{1,2}, 刘芸^{1,2,*}, 于云江^{1,2,#}

1. 生态环境部华南环境科学研究所, 广州 510655

2. 国家环境保护环境污染物健康风险评估重点实验室, 广州 510535

收稿日期: 2024-04-01 录用日期: 2024-07-28

摘要: 随着全球环境管理法规愈发严格, 企业需要不断寻找被管控有毒有害化学品的替代品, 替代也成为源头减少环境污染, 实现绿色发展的重要途径。为减少“遗憾替代”, 提高替代品的环境友好性, 各国政府、非政府组织和学者研究开发了化学品替代评估方法。本文首先分析梳理了化学品替代评估发展的3个阶段, 综述了国内外现有替代评估技术方法, 总结替代评估中比较评估和决策评估2个关键步骤。其次, 以美国环境保护局、德国联邦环境署和经济合作与发展组织等政府和非政府组织的替代评估方法为主, 结合已有研究进展, 介绍和比较了化学品分级评估和决策评估的框架、指标体系以及评估方法, 可为我国有毒有害原料替代品的分级、评估和决策提供方法基础。最后, 基于现有方法, 针对我国化学品替代评估方法体系建设和替代工程示范提出建议和展望。

关键词: 化学品; 替代评估; 指标体系; 绿色替代

文章编号: 1673-5897(2024)6-152-11 中图分类号: X171.5 文献标识码: A

Framework and Methodology of Chemical Alternative Assessment

LI Wei^{1,2}, TU Keng^{1,2}, CHEN Xichao^{1,2}, ZHAO Xu^{1,2}, LIU Yun^{1,2,*}, YU Yunjiang^{1,2,#}

1. South China Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Guangzhou 510655, China

2. State Environmental Protection Key Laboratory of Environmental Pollution Health Risk Assessment, Guangzhou 510535, China

Received 1 April 2024 accepted 28 July 2024

Abstract: As global environmental regulations become more and more stringent, companies must continuously search for and develop alternatives to regulated toxic and hazardous chemicals to comply with these regulations and avoid using harmful chemicals. To reduce “regrettable substitutions” and improve the environmental friendliness of alternatives, various institutions, including governmental organizations, non-governmental organizations (NGO) and researchers, have developed methods for the chemical alternative assessment. This study first summarizes the three stages in the development of chemical alternative assessment, reviews existing frameworks both domestic and international, and divides the alternative assessment into two key steps: the grading assessment and the decision-making assessment. Secondly, based on the methods used by governmental organizations and NGOs such as the U.S.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3902200); 广西重点研发计划(桂科AB2499047); 中央级公益性科研院所基本科研业务专项(PM-zx703-202406-179)

第一作者: 李潍(1997—), 女, 硕士, 研究方向为化学品替代评估与化学品风险评估, E-mail: liwei@scies.org

* 通信作者(Corresponding author), E-mail: liuyun@scies.org

共同通信作者(Co-corresponding author), E-mail: yuyunjiang@scies.org

Environmental Protection Agency, the German Federal Environmental Agency, and the Organization for Economic Co-operation and Development, and incorporating progress from existing research, this study introduces and compares the indices and methods used in the chemical grading and the decision-making assessments. This comparison provides a methodological foundation for grading, assessing, and making decisions about toxic and hazardous raw material alternatives in China. Finally, based on existing methods, this study offers suggestions and prospects for constructing a system of alternative assessment methods for chemicals and demonstrating alternative projects in China.

Keywords: chemicals; alternatives assessment; index system; green alternatives

引言 (Introduction)

随着近年来工业的快速发展,化学品种类、数量和用途均急剧增加,工业生产使用的有毒有害化学品广泛存在于空气、水、土壤和食物链中,通过不同途径进入人体及动植物体内,对人体健康和生态环境构成极大威胁^[1-3]。20世纪70年代,为应对环境保护法监管,美国化工行业企业通过安装污染控制和废物处理装置等末端减排途径减少污染物排放,但随着美国环境保护局(United States Environmental Protection Agency, US EPA)发布的《清洁水法案》(Clean Water Act, CWA)^[4]和《清洁大气法案》(Clean Air Act, CAA)^[5]管控措施愈发严格,仅靠末端减排已无法达到监管要求,企业不得不寻找危害更小的化学品取代产品或工艺过程中的有毒有害化学品^[6-7]。为减少有毒有害化学品对人体健康和生态环境的危害,世界各地都引入了“替代”的概念,提出各类政策、管控措施和可持续化学品的行业管理倡议^[8-9]。欧盟化学品注册、评估、许可和限制(Registration, Evaluation and Authorization of Chemicals, REACH)法规^[10]、US EPA^[11]和职业安全与健康管理局(National Institute of Occupational Safety and Health Administration, OSHA)均将替代有毒有害化学品作为化学品管理政策的核心内容之一^[12]。

开展有毒有害化学品的替代工作,其核心是要选择1种既“更安全”,又不会影响最终产品和/或工艺性能的替代品。然而在企业自主替代过程中“遗憾替代”事件频发^[13-14],即替代品被发现同样具有毒性甚至具有更高毒性。在19世纪初,Thomas Midgley发明了1种不易燃、无毒的制冷剂氯氟烃(chlorofluorocarbons, CFC),极大程度提高了现有空调系统的安全性,但几十年后由于该物质被发现对臭氧层具有破坏作用而被列入《蒙特利尔议定书》限制清单。随后,氢氟碳化物(hydrofluorocarbons, HFCs)成为CFC制冷剂最常见的替代品,但不久后

的研究发现HFCs具有全球变暖潜力,因而2016年的《蒙特利尔议定书》最新修正案又要求逐步淘汰HFCs制冷剂^[15]。自20世纪初到现在,国际化学品替代评估经历了构建评估方法框架、细化评估指标体系、发展配套评估工具3个阶段(图1),随着对化学品危害的认知不断提升,替代评估关注的各类指标也在不断发展和完善^[16-18]。

为了防止“遗憾替代”再次发生,保障人体健康和生态安全,以美国和欧盟为主的发达国家和地区政府组织、非政府组织和高校均研究并提出评估化学替代品的办法^[19-21]。化学品替代评估可以帮助选择和确定更安全的替代品^[22],本文主要综述目前国内外化学品替代评估方法,梳理替代评估框架及方法,对比指出我国目前替代评估方法的不足,对我国后续替代评估和替代工作发展提出展望和建议。

1 国外化学品替代评估发展历程与框架 (History and frameworks for the global development of the chemical alternative assessment)

2006年6月,美国马萨诸塞州减少有毒物质使用研究院(Toxics Use Reduction Institute, TURI)发布《替代品评估程序指南》(*Alternatives Assessment Process Guidance*),首次提出化学品替代评估中需考虑的多项指标类型与安全等级判定方法框架^[23],并依照指南中的方法,开展了铅、甲醛、过氯乙烯、六价铬和邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯5种化学品的替代评估^[24]。随后,2006年7月,美国洛厄尔可持续生产中心发布《洛厄尔可持续生产中心的替代评估框架》(*Alternatives Assessment Framework of the Lowell Center for Sustainable Production*),这一框架得到广泛认可,结合了清洁生产、风险评估、绿色化学、可持续材料和产品绿色设计等领域的关键要素,为替代评估发展奠定良好基础^[25]。2009年12月,《斯德哥尔摩公约》将替代评估写入附件VIII中,明确要求确定和评估《斯德哥尔摩公约》附件中所列或

拟列入化学品的替代品,指导禁用和限制化学品的替代工作,替代评估的约束力得到进一步提升^[26],国际替代评估框架性指南见表1所示。

2010年起,替代评估进入快速发展阶段,美国、德国、欧盟、联合国环境规划署、经济合作与发展组织(Organization for Economic Co-operation and Development, OECD)等一起组织研究并提出较为完

善的替代评估方法,开始构建评估指标体系,其中US EPA和德国联邦环境署(Federal Environmental Agency, FEAs)的指标体系和评估方法具有较强的代表性。2011年,US EPA环境设计(Design of Environment, DfE)项目^[27]提出《替代品评估指南——危害评估》(*Alternatives Assessment Criteria for Hazard Evaluation*)^[28],这一指南将化学品对人体

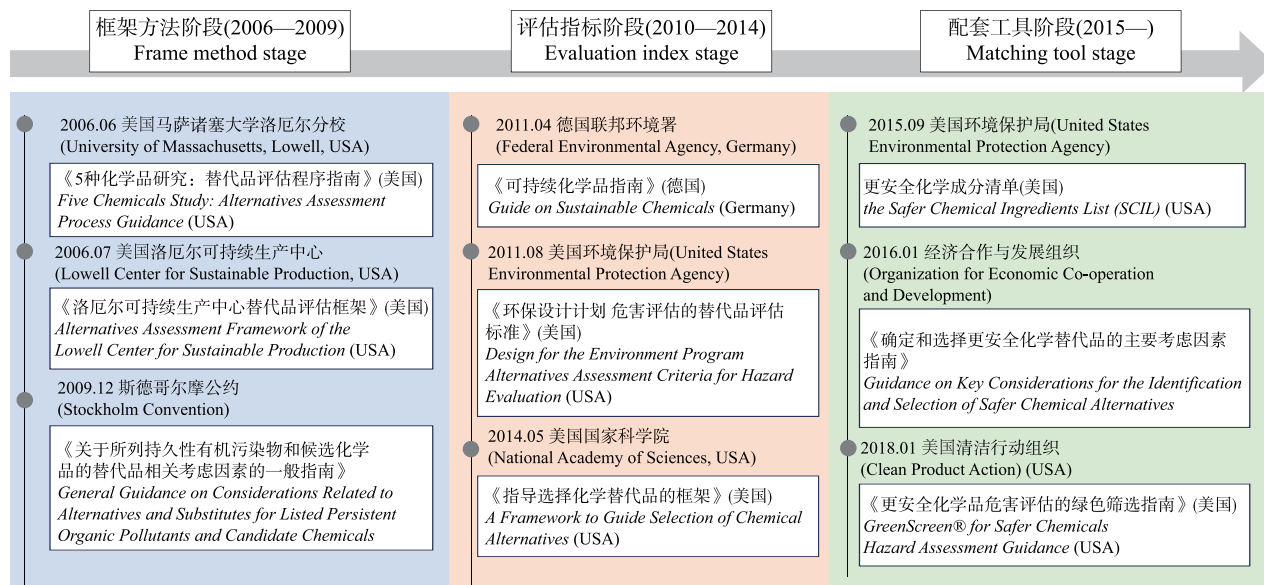


图1 国际化学替代评估发展阶段

Fig. 1 Stage of the development of the international chemical alternative assessment

表1 国际化学品替代评估框架性指南

Table 1 Framework guide for the international alternative assessment of chemicals

机构 Organizations	名称 Name	参考文献 Reference
美国环境保护局 US Environmental Protection Agency	《更安全成分主标准》 <i>Master Criteria for Safer Ingredients</i>	[33]
欧洲化学品管理局 European Chemicals Agency	《授权替代品分析》 <i>Authorization Analysis of Alternatives</i>	[34]
美国加州有毒物质控制机构 California Department of Toxic Substance Control, USA	《通过创新促进替代更安全化学品的战略》 <i>Strategy to Promote Substitution to Safer Chemicals through Innovation</i>	[35]
美国洛厄尔可持续生产中心 Lowell Center for Sustainable Production, USA	《加州安全消费产品法规》 <i>California Safer Consumer Products Regulation</i>	[36]
美国减少有毒物质使用研究院 Toxics Use Reduction Institute, USA	《洛厄尔中心替代品评估框架》 <i>Lowell Center Alternatives Assessment Framework</i>	[25]
联合国环境规划署 United Nations Environment Programme	《替代品评估程序指南》 <i>Alternatives Assessment Process Guidance</i>	[23]
	《5种化学品替代品评估研究》 <i>Five Chemicals Alternatives Assessment Study</i>	[24]
	《持久性有机污染物审查委员会关于替代品的一般指南》 <i>Persistent Organic Pollutants Review Committee General Guidance on Alternatives</i>	[26]

健康和生态环境的危害终点分别划分为“极高关注”、“高关注”、“中关注”和“低关注”4个等级,以联合国全球化学品分类和标签协调系统(Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals, GHS)^[29]和 US EPA 标签计划为分类依据,提供每个化学品及其替代品的危害终点评估结果。2012年,德国 FEA 发布《可持续化学品指南》(Guide on Sustainable Chemicals)^[30],该指南提供区分可持续物质和非可持续物质的标准和方法,帮助企业选择更安全、更可持续的化学品。联合国环境规划署和美国洛厄尔可持续生产中心的评估指标体系和评估方法与 US EPA 较为类似,而欧盟和 OECD 的替代评估方法所考虑的指标大部分与德国 FEA 相似。

2015年起,以非政府组织(non-governmental organizations, NGOs)为主开始开发替代评估的配套工具。美国清洁生产行动组织(Clean Product Action, CPA)发布《更安全化学品危害评估的绿色筛选指南》(GreenScreen[®] for Safer Chemicals Hazard Assessment Guidance)^[31],辅助 US EPA 筛选绿色替代品,补充指标评估标准,已成为 US EPA 认证的危害评估方法。US EPA 也依据已有方法对 1 879 种化学品开展替代评估,形成“安全化学品成分清单(safer chemical ingredients list, SCIL)”^[32],指导企业选择更安全的替代品。

2 国外化学品替代评估方法(Methodology for chemical alternative assessment abroad)

国外现有化学品替代评估方法总结在表 2 中,根据开展替代评估的目标不同,可以将替代评估工作分为 2 类,第 1 类是化学品分级评估。针对目前

广泛使用的、可作为替代品的化学品,采用最敏感指标法结合专家评审,判断化学品的绿色分级,主要以 US EPA 的《替代品评估指南——危害评估》^[27]和德国 FEA 的《可持续化学品指南》^[30]为代表。第 2 类是替代品决策评估。针对高风险物质潜在的、确定的替代品,在第 1 类方法的基础上进一步考虑性能、经济、社会等因素,得到更安全替代品,主要以 OECD《确定和选择更安全化学替代品的主要考虑因素指南》^[37]为代表。在替代品的评估与选择中,化学品绿色分级可以提供低风险化学品清单供企业选择,替代品决策评估可以更全面、更科学的比较实际使用场景下的替代品优劣,2 类方法相辅相成,共同组成替代评估。

2.1 化学品分级评估

化学品分级评估是基于化学品固有属性(包括健康毒性、生态毒性、环境归趋和环境影响等),开展绿色分级评估,其分级结果不会随着化学品的使用场景不同而变化^[39]。化学品分级评估的核心技术包括确定分级方法、构建指标体系和明确指标评价标准 3 点,目前较为典型和常用的分级方法为 US EPA 和德国 FEA 的现有指南。

2.1.1 美国化学品分级评估方法

US EPA 在《替代品评估指南——危害评估》^[27]中构建了 1 套包含 9 个大类人体健康效应(急性毒性、致癌性、致畸/致突变性、生殖/发育毒性、神经毒性、重复剂量毒性、呼吸和皮肤致敏性、眼部和皮肤刺激性/腐蚀性、内分泌干扰效应)、3 个大类环境归趋和生态毒性(水生毒性、环境持久性、生物蓄积性)和附加终点的指标体系,具体指标如图 2 所示。针对指标体系中的每一个 2 级指标,US EPA 定义了危害终点关注度判断标准。在赋予每个指标终点关

表 2 国外化学品替代评估方法文件

Table 2 Methodology documents for chemical alternative assessment abroad

机构 Organization	名称 Name	参考文献 Reference
美国环境保护局 US Environmental Protection Agency	《替代品评估指南——危害评估》 <i>Alternatives Assessment Criteria for Hazard Evaluation</i>	[27]
德国联邦环境署 German Federal Environmental Agency	《可持续化学品指南》 <i>Guide on Sustainable Chemicals</i>	[30]
美国州际化学品交流中心 the Interstate Chemicals Clearinghouse, USA	《替代品评估指南》 <i>Alternatives Assessment Guide</i>	[38]
经济合作与发展组织 Organization for Economic Co-operation and Development	《确定和选择更安全化学替代品的主要考虑因素指南》 <i>Guidance on Key Considerations for the Identification and Selection of Safer Chemical Alternatives</i>	[37]

注度分级后,采用最敏感指标法结合专家评审判断化学品的最终分级,如有 1 个指标终点为极高关注度,则化学品分级直接划分为极高关注度。

美国 DfE^[27]按照上述方法评估了不同功能用途下的 1 879 种化学品分级,主要包括杀菌剂、螯合剂、着色剂、消泡剂等 16 种用途,将化学品分为 4 级,分别表示为绿色圆圈、绿色半圆、黄色三角和灰色矩形,具体含义见表 3。这一清单既可以指导企业使用更安全化学品,帮助消费者选择含有更安全化学品的产品,也可以通过评估结果指导绿色化学

品分子设计。以表面活性剂为例,当其具有较高水生毒性时,需要具备快速生物降解特性且其降解产物毒性较低才符合更安全化学品标准,US EPA 发现列入 SCIL^[32]的更安全表面活性剂均是包含具有不同链长、分支以及不同乙氧基(EO)和丙氧基(PO)基团数量的混合物,说明这类结构特征决定了化学品水生毒性低、生物降解速度高。这一化学品分级评估方法一定程度上推进了美国替代评估的进程,并为下一步不同场景下的有毒有害化学品替代提供初步筛选基础。

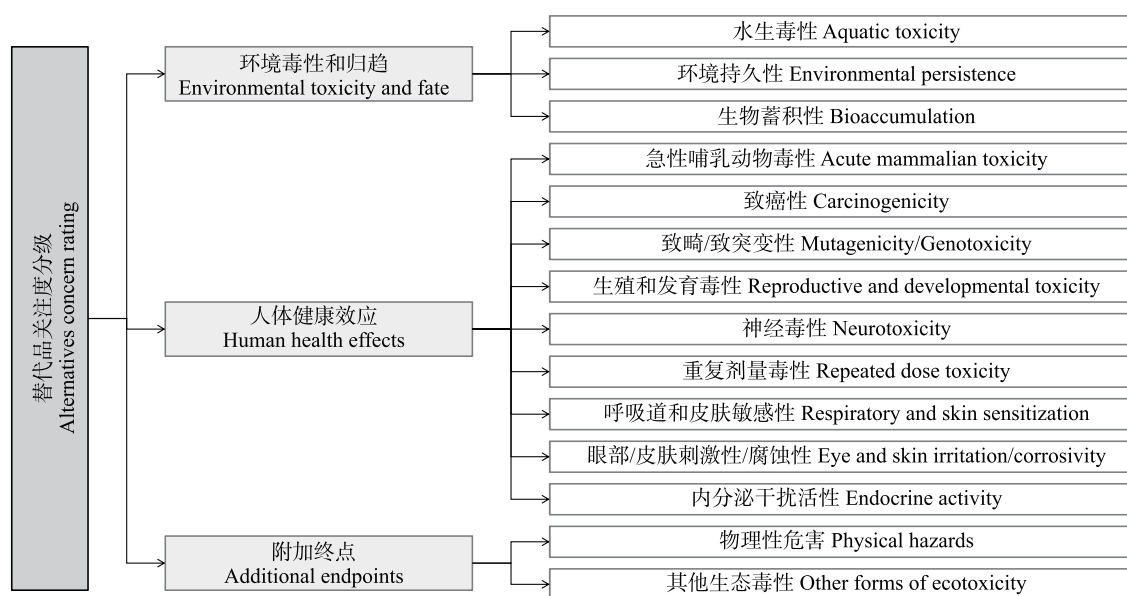






图 2 美国化学品分级评估指标体系

Fig. 2 American index system for chemical grading assessment

表 3 美国更安全化学成分清单 (SCIL) 中的分级方法

Table 3 Grading methods in the US EPA's safer chemical ingredients list (SCIL)

分级符号 Level marking	分级含义 Meaning of the level
 绿色圆圈 Green circle	根据实验和建模数据,该化学品已被验证为低关注度 The chemical has been verified to be of low concern based on experimental and modeled data
 绿色半圆 Green half-circle	根据实验和建模数据,该化学品预计关注度较低,需要额外数据进一步证实 The chemical is expected to be of low concern based on experimental and modeled data; additional data would strengthen confidence in the chemical's safer status
 黄色三角 Yellow triangle	该化学品符合其功能成分类别的更安全选择标准,但存在一些危害特性 The chemical has met Safer Choice Criteria for its functional ingredient-class, but has some hazard profile issues
 灰色矩形 Grey square	这种化学品可能不是“更安全选择”标签候选的产品,需要向 US EPA 提供进一步信息,否则该替代品将在 12 个月后从清单中删除 This chemical may not be acceptable for use in products that are candidates for the Safer Choice label; unless information provided adequately justifies continued listing, this chemical will be removed 12 months later

2.1.2 德国化学品分级评估方法

德国 FEA 为了系统指导、支持企业推行可持续化学,发布了《可持续化学品指南》(*Guide on Sustainable Chemicals*)^[30],基于化学品分级标准,帮助企业选择可持续化学品。德国使用“绿”、“黄”、“红”、“白”4种颜色表征分级结果,含义如表4所示,绿色代表没有迹象表明化学品有关键危害属性,不需要采取替代行动;黄色代表存在一些问题属性,有必要根据用途开展进一步分析;红色代表存在明显问题,应优先寻找替代品;白色代表现有信息不足以得出结论。德国可持续化学品分级是根据8项具体指标开展,包括(1)在“问题清单”中提及;(2)危险的物理化学特性;(3)人体毒性;(4)与环境问题相关的可能性质;(5)迁移性;(6)原料来源;(7)温室气体排放;(8)资源消耗,综合评价的结果来源于所有2级指标的最敏感结果,敏感顺序为红色>白色>黄色>绿色。德国 FEA 还强调,当产品为了实现特定功能而必须具备“不太可持续”的性质时(如防腐剂用于防止微生物滋生,需要具有生物杀灭活性),可以单独接受这些问题指标,并针对其余指标开展评估。相比 US EPA 的方法而言,德国 FEA 的方法更全面的评估化学品属性,将生产化学品的生命周期纳入考量,综合考虑了资源、能耗、碳排放等指标。

2.1.3 化学品分级方法的应用

基于上述化学品分级方法综述结果可知,国际替代评估方法发展相对我国较早,且已有完善的评估指标体系和评估标准^[40-41],Zheng 等^[42]和 Zheng 等^[43]基于多指标体系和计算机工具,开展了十溴二苯醚的17种化学品的替代评估,结果表明17种替代品均存在着极高关注度/高关注度的危害终点,无法完全满足监管需求,但基于更安全替代原则,认为

十溴二苯基乙烷(decabromodiphenylethane, DBDPE)、双(2-乙基己基)-3,4,5,6-四溴苯甲酸酯(bis(2-ethylhexyl) tetrabromophthalate, BEH-TEBP)和三聚氰胺是目前较好的替代品,同时建议继续研发更安全的十溴二苯醚替代品。目前由于数据缺失较为严重,因此针对有毒有害化学品和替代品的分级评估较少,但这一方法可为有毒有害原料替代提供初筛,有效避免“遗憾替代”事件,指导企业选择更安全化学品,协助管理部门更科学的推出建议替代品清单。

2.2 替代品决策评估

替代决策评估也被称为多指标替代评估,已逐步成为1种指导决策更安全和更可持续替代方案的比较方法^[44],作为多指标、整体性的替代评估方法,替代决策评估包括了成本、性能、危害和暴露等多个模块^[45],同样的在替代品绿色分级中,美国和德国都强调对于非绿色级别的替代品,需要进一步开展用途评估,以确定其在特定情况下的可用性,建议基于排放潜力、社会经济、性能等模块开展替代品决策评估^[46-48]。德国《可持续化学品指南》^[30]严格规定了排放潜力的定义和评估方法,工作场所的排放和暴露可能是由于替代品挥发、粉尘挥发或直接与工人皮肤接触造成的,暴露的程度取决于加工类型和使用条件。消费者生活环境的排放和暴露来自化学混合物(如空气清新剂、油漆)的使用,通过形成气溶胶或粉尘排放至环境中。目前发布的各类方法中,也分别规定了性能、经济等方面的影响。替代品的性能影响是指使用替代品是否会对产品规定条件下的功能产生影响,通常情况下使用者希望替代后产品的性能保持不变甚至更好,因此在替代品被使用并投入生产之前,需要基于公认标准方法测试产品,如国际标准化组织(International Organization for Standardization,

表4 德国可持续化学品的分级方法

Table 4 Grading methods for sustainable chemicals in Germany

分级符号 Level marking	分级含义 Meaning of the level
绿色 Green	没有迹象表明化学品有关键属性,不需要采取替代行动 There are no indications of critical properties, no action needed
黄色 Yellow	有迹象表明存在一些问题属性,有必要根据用途标准进行进一步分析 There are indications of problematic properties; further analysis with use-specific criteria is necessary
红色 Red	化学品存在明显问题,应高度优先评估替代可能性 The substance is obviously problematic; substitution possibilities should be assessed with high priority
白色 White	信息不足,无法做出评价,需要收集更多资料 Information is not sufficient for an evaluation; further information should be gathered

ISO)等组织发布的标准。替代品的经济影响是特定于被评估的替代品以及其应用的实际情景的,美国州际化学品交流中心、欧洲 REACH、美国洛厄尔可持续生产中心等组织发布的框架明确要求在替代评估中需要考虑使用替代品可能会对经济造成的影响。大多数已有的产品供应链已经优化到最小成本,因此替代品最可能产生的经济影响集中在材料成本的增加或制造设备的改造,材料成本、人工成本、直接能源成本、设备成本和其他直接成本共同构成产品成本,这些都应纳入到经济影响分析中。2014年,美国国家科学院发布题为《化学品替代评估为政府和行业决策提供信息》的专题文章,其中发表的公开出版物《化学品替代品选择的指导框架》^[49]中将替代品的经济分析总结为以下4个方面:(1)直接与业务相关的影响;(2)市场分析,包括替代品可用性的潜在变化等;(3)其他实体成本;(4)成本-效益分析。

目前已有部分学者开展了替代决策评估的方法学研究,探究如何权衡不同评估组成模块(成本、性能、危害和暴露等)的结果。现有替代决策评估的决策框架包括顺序决策框架^[50]、并列决策框架^[51]和混合决策框架^[52]3种。顺序决策框架是最早出现的评估方法,按照危害、性能、成本、暴露的顺序对每部分模块中不可接受的替代品进行排除,其优势是在1个模块下替代品间的比较更为容易,同时减轻了后续数据收集的压力,但存在着缺少模块间权衡的问题,导致可能错误的排除掉更优替代品。与顺序决策框架较为不同的是并列决策框架,这一方法是将所有模块结果共同考虑,通过权衡(如多属性效用理论^[51])选择最优替代品。相比于顺序决策框架和并列决策框架,混合决策框架在替代决策评估中更常使用,在进行并列决策之前使用顺序决策,将在危害和性能等重要模块上得分较低的替代品进行早期排除,以防止对不太可能被选为最优替代品的物质进行不必要的数据收集。替代决策评估已被用于消费电子产品中的焊料^[51]、配方清洁产品^[53]和防污船漆^[45]等,例如利用混合决策评估筛选了脱漆剂中二氯甲烷的替代品,发现顺序模块和并列模块的选择和权重对于最终的结果有着较大影响^[54],因此在开展替代决策评估时,既要保证各模块之间的一致性,又要调整决策方法以满足实际需求。

3 国内替代评估框架及方法 (Current status and outlook of alternative assessment in China)

我国替代评估还处在相对初期的阶段^[55-58]。替

代评估框架与国外框架较为类似,现行的国家标准《产品生态设计通则》(GB/T 24256—2009)^[59]和《生态设计产品评价通则》(GB/T 32161—2015)^[60]概括性的提供绿色产品和生态设计产品的指标体系。《产品生态设计通则》目的在于减少产品对环境的污染,提高产品的可再生利用率,以减少产品整个生命周期中产生的不良环境影响,开发更生态、更经济、可持续发展的产品系统^[60]。产品生态设计中需要综合考虑成本、环境影响、产品性能、法规要求、最佳可行技术以及客户需求等方面,其中环境要求包括产品对环境的影响和对人类健康与安全的风险,主要包括原材料消耗、能源消耗、废物产生、健康和安全的风险以及生态破坏。《生态设计产品评价通则》较《产品生态设计通则》进一步规定了评价指标要求,明确由1级指标和2级指标组成,其中1级指标包括资源属性、能源属性、环境属性和产品属性,2级指标则要求标明所属的生命周期阶段,即产品设计、原材料获取、产品生产、产品使用和废弃后回收处理等阶段。《生态设计产品评价通则》强调环境属性重点选取生产过程中污染物排放、使用过程中有毒有害物质释放以及产品废气后回收利用等方面的指标,包括但不限于以下2点:(1)污染物排放应提出严于国家污染物排放标准的要求;(2)产品废弃后回收利用应提出回收利用率等指标。这2项框架性国家标准考虑与国外标准基本一致,均是从环境危害、性能、成本、资源能源等方面进行评估,但评价指标较多集中在产品中含有的或使用过程中会排放的一些常规污染物量,并未考虑化学品本身的毒害属性,尤其是生态与健康毒性。

上述2项标准仅能作为替代评估框架,无法作为替代评估的方法学参考,我国目前开展替代评估多采用风险评估策略,暂未有替代品分级评估和替代品决策评估方法。生态环境部于2020年发布《化学物质环境与健康危害评估技术导则(试行)》《化学物质环境与健康暴露评估技术导则(试行)》和《化学物质环境与健康风险表征技术导则(试行)》3项技术导则,用于指导和规范化学物质环境风险评估工作,也被用于评估替代品是否存在风险,但这类传统方法相比国外替代评估方法存在着工作量大、针对性不强等问题,无法满足我国替代评估需要。

4 我国替代评估展望 (Outlook of alternative assessment in China)

目前国内外化学品管控形势严峻,以全氟烷基

和多氟烷基化合物(per- and polyfluoroalkyl substances, PFAS)为例,PFAS类物质广泛应用于涂料、电镀等行业,由于其具有持久性、生物蓄积性和毒性,近年来国内外关注度不断提高,全氟辛酸等的使用已被不同程度禁止和限制,2023年2月欧洲化学品管理局初步提案严格限制1.2万种以上的PFAS生产。因此为了既提升相关企业行业竞争力,又保证替代品不存在潜在环境和健康风险,PFAS等国外已管控和重点关注化学物质的更安全替代品研发和绿色替代评估技术研究迫在眉睫。因此为支撑我国行业竞争力,推进生态环境和人类健康高质量暴露,针对我国替代评估发展提出以下建议。

(1)建立替代评估方法体系。基于前述的国际方法总结和分析,结合我国国情,建议从3个方面开展替代评估方法研究。一是替代品固有属性评估,研究替代品固有危害属性的评估方法,从健康毒性、生态毒性、环境归趋和环境影响4个方面构建多指标评估体系,基于我国已有的化学品分类标签制度,形成适用性更强的指标评估标准,为我国替代品分级和准入提供技术方法,避免“遗憾替代”;二是替代品暴露属性评估,针对有毒有害化学品的实际用途,结合固有属性评估结果,从暴露场景入手,考虑三废排放、暴露途径等方面,形成替代品风险打分体系,建立不同替代品之间的比较方法,筛选掉对环境和健康存在不可接受风险的替代品;三是替代品性能属性评估,结合替代品的风险打分结果,针对不存在潜在环境和健康风险的替代品,从性能、经济社会、能源资源等方面入手,形成替代品定量打分方法,建立全方面的替代评估技术,得出针对特定用途、特定行业、特定情境的管控物质最优替代品选择。

(2)构建替代评估配套工具。目前替代评估过程中还存在着数据大量缺失的问题,目前动物实验、体外测试和计算机模拟都是较好的数据补充方法,而从投入的时间、成本和动物伦理的角度看,基于人工智能和大数据分析的替代品预测软件的开发是更优的选择。基于本课题组前期的替代评估分级,发现健康危害终点中的呼吸道致敏性和神经毒性缺失严重,并且神经毒性目前暂无较好的数据填补方法,结合机器学习和大数据分析技术,开发替代品的高通量毒性预测和分类方法,有助于进一步推动替代评估的进程。

(3)开展有毒有害化学品替代工程试点示范。

目前国际化学品公约(如斯德哥尔摩公约、鹿特丹公约等)的管理日趋严格,为了紧跟国际发展趋势,加强我国国际地位,应针对纳入和计划纳入公约管控的化学品,尽快开展替代研究,自主开发替代品,掌握主动性。针对原料有毒有害、过程高能耗等工艺,明确关键行业(如电子行业、电镀行业等)开展替代试点工程,通过替代原料、减少有毒中间产物和三废、降低能耗等措施实现绿色生产,并在行业推广,为行业标准的构建和验证提供经验。

通信作者简介:刘芸(1983—),女,硕士,正高级工程师,主要研究方向为化学品替代评估和化学品环境健康风险评估。

共同通信作者简介:于云江(1964—),男,博士,研究员,主要研究方向为环境与健康。

参考文献(References)

- [1] Li D S, Suh S. Health risks of chemicals in consumer products: A review [J]. *Environment International*, 2019, 123: 580-587
- [2] Geueke B, Groh K, Muncke J. Food packaging in the circular economy: Overview of chemical safety aspects for commonly used materials [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 193: 491-505
- [3] 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
- [4] United States Government Printing Office. The Clean Water Act [S]. Washington, DC: Office of the Law Revision Counsel of the United States House of Representatives, 2023
- [5] United States Government Printing Office. The Clean Air Act [S]. Washington, DC: Office of the Law Revision Counsel of the United States House of Representatives, 2023
- [6] Tao M Y, Li D S, Song R S, et al. OrganoRelease—A framework for modeling the release of organic chemicals from the use and post-use of consumer products [J]. *Environmental Pollution*, 2018, 234: 751-761
- [7] Fantke P, Illner N. Goods that are good enough: Introducing an absolute sustainability perspective for managing chemicals in consumer products [J]. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 2019, 15: 91-97
- [8] de Boer J, Stapleton H M. Toward fire safety without chemical risk [J]. *Science*, 2019, 364(6437): 231-232

- [9] Jhamb S, Liang X D, Gani R, et al. Systematic model-based methodology for substitution of hazardous chemicals [J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2019, 7(8): 7652-7666
- [10] European Parliament and the Council of the European Union. Concerning the Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH), establishing a European Chemicals Agency, amending Directive 1999/45/EC and repealing Council Regulation (EEC) No 793/93 and Commission Regulation (EC) No 1488/94 as well as Council Directive 76/769/EEC and Commission Directives 91/155/EEC, 93/67/EEC, 93/105/EC and 2000/21/EC [S]. Brussels: European Commission, 2006
- [11] Li M, Harten P F, Cabezas H. Experiences in designing solvents for the environment [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2002, 41(23): 5867-5877
- [12] Occupational Safety and Health Administration. Transitioning to safer chemicals: A toolkit for employers and workers [EB/OL]. (2021-05-29) [2024-11-18]. http://www.osha.gov/dsg/safer_chemicals/why_transition.html
- [13] Fantke P, Weber R, Scheringer M. From incremental to fundamental substitution in chemical alternatives assessment [J]. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 2015, 1: 1-8
- [14] Blum A, Behl M, Birnbaum L, et al. Organophosphate ester flame retardants: Are they a regrettable substitution for polybrominated diphenyl ethers? [J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2019, 6(11): 638-649
- [15] McMullan J T. Refrigeration and the environment: Issues and strategies for the future [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2002, 25(1): 89-99
- [16] Arnold S M, Greggs B, Goyak K O, et al. A quantitative screening-level approach to incorporate chemical exposure and risk into alternative assessment evaluations [J]. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 2017, 13(6): 1007-1022
- [17] Geiser K, Tickner J, Edwards S, et al. The architecture of chemical alternatives assessment [J]. *Risk Analysis*, 2015, 35(12): 2152-2161
- [18] Kwiatkowski C F, Andrews D Q, Birnbaum L S, et al. Scientific basis for managing PFAS as a chemical class [J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2020, 7(8): 532-543
- [19] Fantke P, Huang L, Overcash M, et al. Life cycle based alternatives assessment (LCAA) for chemical substitution [J]. *Green Chemistry*, 2020, 22(18): 6008-6024
- [20] Oguzcan S, Dvarioniene J, Tugnoli A, et al. Environmental impact assessment model for substitution of hazardous substances by using life cycle approach [J]. *Environmental Pollution*, 2019, 254(Pt A): 112945
- [21] Phillips K A, Yau A, Favela K A, et al. Suspect screening analysis of chemicals in consumer products [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(5): 3125-3135
- [22] Zimmerman J B, Anastas P T. Chemistry toward substitution with no regrets [J]. *Science*, 2015, 347(6227): 1198-1199
- [23] The Massachusetts Toxics Use Reduction Institute. Five chemicals study: Alternatives assessment process guidance [R]. Massachusetts: University of Massachusetts Lowell, 2006
- [24] The Massachusetts Toxics Use Reduction Institute. Five chemicals alternatives assessment study [R]. Massachusetts: University of Massachusetts Lowell, 2006
- [25] Rossi M, Tickner J, Geiser K. Alternatives assessment framework of the Lowell Center for Sustainable Production [R]. Massachusetts: University of Massachusetts Lowell, 2006
- [26] Ad Hoc Working Group on Substitution and Alternatives of the Persistent Organic Pollutants Review Committee of the Stockholm Convention. Report of the persistent organic pollutants review committee on the work of its fifth meeting. Addendum: General guidance on considerations related to alternatives and substitutes for listed persistent organic pollutants and candidate chemicals [R]. Geneva: United Nations Environment Program, 2009
- [27] United States Environmental Protection Agency (US EPA). Design for the environment alternatives assessments [EB/OL]. (2015-08-15) [2024-11-18]. <https://www.epa.gov/saferchoice/design-environment-alternatives-assessments>
- [28] California Department of Toxic Substances Control. Developing regulatory alternatives analysis methodologies for the California green chemistry initiative [R]. State of California: California Department of Toxic Substances Control, 2015
- [29] GHS Sub-Committee. Globally harmonized system of classifications and labeling of chemicals (GHS) [R]. New York: United Nations, 2023
- [30] Federal Environmental Agency. Guide on Sustainable Chemicals: A Decision Tool for Substance Manufacturers, Formulators and End Users of Chemicals [S]. Berlin: Federal Environmental Agency, 2011
- [31] Clean Production Action (CPA). Promote safer chemicals and products with GreenScreen[®] [EB/OL]. (2024-05-10)

- [2024-11-18]. <http://www.greenscreenchemicals.org/>
- [32] United States Environmental Protection Agency (US EPA). Safer chemical ingredients list (SCIL) [EB/OL]. (2024-01-10) [2024-11-18]. <https://www.epa.gov/safer-choice/safer-ingredients>
- [33] United States Environmental Protection Agency (US EPA). EPA's Safer Choice Program Master Criteria for Safer Ingredients [S]. Washington, DC: Office of Pollution Prevention & Toxics, 2012
- [34] European Chemical Agency. Guidance on the preparation of an application for authorization [R]. Helsinki: European Chemical Agency, 2011
- [35] European Chemical Agency. Strategy to promote substitution to safer chemicals through innovation [R]. Helsinki: European Chemical Agency, 2018
- [36] California Department of Toxic Substances Control. Safer consumer products [R]. Sacramento: California Department of Toxic Substances Control, 2013
- [37] Organization for Economic Co-operation and Development (OECD). Guidance on key considerations for the identification and selection of safer chemical alternatives [R]. Paris: Environment, Health and Safety, Environment Directorate, OECD, 2021
- [38] Technical Alternative Assessment Guide Team. Interstate chemicals clearinghouse alternatives assessment guide [R]. Washington, DC: Interstate Chemicals Clearinghouse, 2017
- [39] Gauthier A M, Fung M, Panko J, et al. Chemical assessment state of the science: Evaluation of 32 decision-support tools used to screen and prioritize chemicals [J]. Integrated Environmental Assessment and Management, 2015, 11(2): 242-255
- [40] Tickner J, Jacobs M, Malloy T, et al. Advancing alternatives assessment for safer chemical substitution: A research and practice agenda [J]. Integrated Environmental Assessment and Management, 2019, 15(6): 855-866
- [41] Blum A, Behl M, Birnbaum L, et al. Organophosphate ester flame retardants: Are they a regrettable substitution for polybrominated diphenyl ethers? [J]. Environmental Science & Technology Letters, 2019, 6(11): 638-649
- [42] Zheng Z Y, Peters G M, Arp H P H, et al. Combining *in silico* tools with multicriteria analysis for alternatives assessment of hazardous chemicals: A case study of decabromodiphenyl ether alternatives [J]. Environmental Science & Technology, 2019, 53(11): 6341-6351
- [43] Zheng Z Y, Arp H P H, Peters G, et al. Combining *In silico* tools with multicriteria analysis for alternatives assessment of hazardous chemicals: Accounting for the transformation products of decaBDE and its alternatives [J]. Environmental Science & Technology, 2021, 55(2): 1088-1098
- [44] London R L, Gluge J, Scheringer M. Are hazard assessment methods in the assessment of chemical alternatives suitable for REACH? [J]. Environmental Science & Technology, 2024, 58(42): 18811-18821
- [45] London R L, Gluge J, Scheringer M. Multiple-criteria decision analysis for assessments of chemical alternatives (MCDA-ACA) [J]. Environmental Science & Technology, 2024, 58(43): 19315-19324
- [46] Arnold S M, Greggs B, Goyak K O, et al. A quantitative screening-level approach to incorporate chemical exposure and risk into alternative assessment evaluations [J]. Integrated Environmental Assessment and Management, 2017, 13(6): 1007-1022
- [47] Brown L A, Fisk G, Cohen M A, et al. Using an alternatives assessment framework to evaluate waterborne versus solventborne basecoats used in automotive refinishing [J]. Integrated Environmental Assessment and Management, 2022, 18(4): 1101-1113
- [48] van Dijk J, Figuière R, Dekker S C, et al. Managing PMT/vPvM substances in consumer products through the concepts of essential-use and functional substitution: A case-study for cosmetics [J]. Environmental Science Processes & Impacts, 2023, 25(6): 1067-1081
- [49] National Academy of Sciences of United States. A framework to guide selection of chemical alternatives [R]. Washington, DC: National Academy of Sciences of United States, 2014
- [50] Eliason P, Morose G. Safer alternatives assessment: The Massachusetts process as a model for state governments [J]. Journal of Cleaner Production, 2011, 19(5): 517-526
- [51] Malloy T F, Sinsheimer P J, Blake A, et al. Use of multicriteria decision analysis in regulatory alternatives analysis: A case study of lead free solder [J]. Integrated Environmental Assessment and Management, 2013, 9(4): 652-664
- [52] Malloy T F, Zaunbrecher V M, Batteate C M, et al. Advancing alternative analysis: Integration of decision science [J]. Environmental Health Perspectives, 2017, 125(6): 066001
- [53] McFadden R D. The business case for transitioning to safer chemicals [J]. New Solutions, 2011, 21(3): 403-416
- [54] Jacobs M M, Malloy T F, Tickner J A, et al. Alternatives assessment frameworks: Research needs for the informed substitution of hazardous chemicals [J]. Environmental

- Health Perspectives, 2016, 124(3): 265-280
- [55] Gerst M D, Kenney M A, Howard B E, et al. A decision-analytic approach to screening in chemical alternatives assessment [J]. *Business Strategy and the Environment*, 2020, 29(3): 1597-1604
- [56] Malloy T F, Zaunbrecher V M, Batteate C M, et al. Advancing alternative analysis: Integration of decision science [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2017, 125(6): 066001
- [57] Tickner J A, Schifano J N, Blake A, et al. Advancing safer alternatives through functional substitution [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(2): 742-749
- [58] Lavoie E T, Heine L G, Holder H, et al. Chemical alternatives assessment: Enabling substitution to safer chemicals [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(24): 9244-9249
- [59] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 产品生态设计通则: GB/T 24256—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009
- [60] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 生态设计产品评价通则: GB/T 32161—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016 ◆