

特约专栏

人工纳米材料的生命周期评价研究进展

陈莎¹, 刘瑞芳¹, 孙天印^{2,3}, 陈云¹

(1. 北京工业大学环境与能源工程学院, 区域大气复合污染防治北京市重点实验室, 北京 100124)

(2. 瑞士联邦材料科学与技术实验室, 瑞士圣加伦 CH-9014)

(3. 苏黎世联邦理工学院化学和生物工程研究所, 瑞士苏黎世 CH-8093)

摘要: 人工纳米材料(Engineering Nano Materials, ENMs)因具有优越的磁性、导电性、光学性质等被广泛应用于微电子学、催化、燃料电池、材料科学、生物技术和医药等领域,其带来优良性能与卓越功能的同时,其资源能源效率以及对生态环境、人体健康的潜在影响也越来越受到重视。尽早识别这些利弊对材料科学的发展、环境保护以及 ENMs 的可持续性发展均具有重要意义。而生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)作为一种综合而全面的评价理论与方法,也是评价 ENMs 以及其工艺、产品的生命周期资源能源消耗和环境行为的有效方法。对生命周期理论与方法应用于 ENMs 及其产品的资源能源消耗分析、环境影响评价和环境释放分析三方面的研究进展进行了总结和综述,对目前研究中存在的问题进行了分析总结,对今后 LCA 应用于 ENMs 的发展方向进行了展望。

关键词: 人工纳米材料; 生命周期评价; 环境释放

中图分类号: X131 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2016)10-0783-07

A Review of Life Cycle Assessment Research on Engineering Nanomaterials

CHEN Sha¹, LIU Ruifang¹, SUN Tianyin^{2,3}, CHEN Yun¹

(1. Environment and Energy Engineering College, Key Laboratory of Beijing on Regional Air Pollution Control, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

(2. Swiss Federal Laboratory for Materials Science and Technology, St. Gallen CH-9014, Switzerland)

(3. Institute for Chemical and Bioengineering, ETH Zürich, Zürich CH-8093, Switzerland)

Abstract: Due to their superior magnetism, electric conductivity, reaction activities, optical properties and so on, engineering nanomaterials are widely applied in microelectronics, catalysis, fuel cell technology, materials science, biotechnology & medicine and other fields. However, combining with their excellent function and outstanding feature, their potential impacts on the resources, energy, environment and human health are becoming concerns. It is of great significance for material science development, environmental protection and sustainable development of ENMs to identify these impacts. As an integrated and comprehensive evaluation method, life cycle assessment (LCA) is highly recommended to evaluate not only their efficiency of resource and energy, but also their environmental impacts, which includes the various techniques, processes and productions of ENMs. The aim of this paper is to review the existing research on life cycle energy consumption analysis, environmental impact assessment and environmental release analysis of ENMs based on LCA methodology. The challenges and issues in the research are summarized and the perspective of future research is also put forward.

Key words: engineering nanomaterials; life cycle assessment; environmental release

1 前言

纳米材料是指含有一维尺寸在 0~100 nm 之间且具有小尺寸效应、表面效应、宏观隧道效应等特殊性质的材

料^[1-3]。近年来,纳米材料因其具有优越的磁性、导电性、反应活性、光学性质被广泛应用到如微电子学、催化、燃料电池、新能源与生物技术和医药等众多领域。为此,人工纳米材料(Engineering Nano Materials, ENMs)随之得到迅速发展,成为推动新材料发展的重要力量。根据其化学组成,ENMs 分为:碳纳米材料,包括单壁碳纳米管、多壁碳纳米管、富勒烯、炭黑、碳纳米纤维等;金属及其氧化物纳米材料,如纳米银、纳米金、纳米二氧化钛、纳米

收稿日期: 2016-01-04

第一作者: 陈莎,女,1968年生,副教授,硕士生导师, Email: chensha@bjut.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2016.10.04

二氧化硅等; 纳米金属盐类, 如纳米硅酸盐、陶瓷等; 量子点, 如硒化镉、碲化镉等; 纳米聚合物, 如聚苯乙烯等^[4]。据伍德罗威尔逊国际中心统计, 截止到 2015 年 7 月底, 经厂家确认的、进入全球商业市场的纳米产品已达 1824 种, 且预期在 2020 年会达到 3400 种^[5]。

虽然 ENMs 较之传统材料性能优异, 在众多领域得到了很好的应用, 促进了材料科学的极大发展, 但是其在提高材料性能、应用于诸多领域的同时, 较之传统材料在生命周期范围内对资源能源的消耗到底如何? 同时 ENMs 和相应纳米产品的生产、使用和处理过程中, 是否会通过各种途径进入环境, 其独特的物理化学属性是否会对生态环境和人体健康造成潜在的影响? 2003 年, Colvin 在《Nature》发表的文章指出纳米材料和纳米技术对人体健康、生态环境存在潜在的负面影响^[6]。因此, ENMs 和其产品在大量开发和应用的同时, 其对生态和环境可能存在的影响也受到了越来越多的关注。2005 年, 美国、英国等国的环保部门制订并启动了纳米材料环境行为、生态效应的研究计划^[7, 8]。国内南开大学朱小山等人对纳米金属氧化物的研究表明纳米颗粒的生态毒性和环境效应不容忽视^[9]。因此, 利用生命周期方法 (Life Cycle Assessment, LCA) 对 ENMs 进行系统的评价成为 LCA 应用的重要领域^[10, 11]。

本文总结和综述了生命周期理论与方法应用于 ENMs 及其产品的资源能源消耗分析、环境影响评价和环境释放分析三方面的研究进展, 对目前研究中存在的问题进行分析总结。

2 资源能源消耗分析

毋庸置疑, ENMs 提高了材料在诸多方面的性能, 如纳米粘土复合材料大大改善了传统材料在强度、易燃性、热稳定性等方面的性能^[12]。但是 ENMs 在其生产、使用以及处理处置过程中的资源能源效率是决定其是否可以进一步应用与发展的重要方面, 也是生命周期理论与方法评价 ENMs 的主要领域。表 1 列举了采用 LCA 方法对 ENMs 的能源消耗分析开展的主要研究工作, 其中涉及的纳米材料有纳米二氧化钛^[13]、碳纳米管 (Carbon Nanotubes, CNT)^[14]、碳纳米纤维 (Carbon Nanofiber, CNF)^[15]、石墨纳米片^[16]等; 涉及的纳米产品有纳米量子点光伏模块^[17, 18]、纳米二硫化钼润滑剂^[18]、锂电池^[19]等。

为使分子和原子变为纳米级以使材料得到功能性的改善, 纳米制造技术要求具有很高精确性的操作流程, 因此在同等质量的基础上, 纳米制造技术往往比传统制造技术消耗更多的材料和能源, 但也不尽然。Khanna 在同等质量的基础上, 经基于流程的 LCA 分析, 对比了合

成 CNF 与合成传统材料铝、钢和聚丙烯的能源使用情况^[15]。2009 年, 他又在机械强度和刚度相等的前提下研究了在生产和使用阶段用 CNF 或碳纳米纤维-玻璃纤维增强的纳米复合材料的能源消耗情况^[20]。据 Khanna 的研究, 无论是在同等质量还是在同等强度或刚度条件下, 碳纳米材料的使用都将带来消极的影响。相反, 当 Dahlben 采用基于流程的 LCA 方法详细追踪了用于移动电话闪存的碳纳米管转换器在制造阶段的输入与输出情况^[21]时, 发现在同样达到 16 GB 存储量的情况下, CNT 转换器的能源使用量要比传统材料少 30%。

同一种纳米材料往往具有多种不同的制造工艺或生产方式, 生产方式不同导致消耗的能源和资源也各不相同, LCA 方法对于选择纳米材料的制造工艺与技术方面可以说是具有无比的优越性。如 Osterwalder 从经典的二氧化钛制造到复杂的氧化物纳米颗粒制造, 依次比较了每种纳米颗粒在不同生产方式下的能源消耗, 涉及的生产方式有电力密集型等离子体过程等^[13]。其研究结果表明, 高价轻质元素的纳米氧化物颗粒如二氧化钛适合用传统的湿法制造法, 相反, 结构复杂、重质或低价元素的纳米材料如二氧化锆则适合用新兴的干法制造法。总体来说, 干法制造的能源消耗强度更大。

如表 1 所示, 基于流程的 LCA 模型是目前用于 ENMs 资源能源分析的主要模型^[15-23], 个别研究采用了投入产出模型与流程 LCA 的混合模型^[24]; 其中制造阶段是主要评价阶段^[13, 14, 18, 21-23], 少数研究涉及了使用阶段^[17, 19, 20, 24]或处理处置阶段^[16, 19]。在功能单位的选取上, 关于 ENMs 生产阶段能源消耗的研究均以质量为功能单位, 其他研究则多以产品相应功能为单位, 如 Kushnir 以 1 kWh 存储电量为功能单位, 研究含纳米材料锂电池在生命周期各个阶段的能源需求量; Fthenakis 以 1 m² 光伏单元为功能单位, 将三种基于纳米技术的光伏设计与传统技术的累积能源需求进行对比^[22]。由于目前人工纳米材料大多处于研究与开发阶段, 工业生产规模的较少, 所以 LCA 评价中的数据大多来自文献, 个别研究数据来源于实验室数据^[16]或软件数据库等^[24], 带来的评价结果不确定性高。

3 环境影响评价

ENMs 在生产、使用与处理处置过程中由于其特殊的物理化学性能可能对生态环境与人体健康带来潜在的影响, 如气候变化、臭氧损耗、酸化、富营养化、生态毒性等。表 2 总结了采用 LCA 方法对 ENMs 及其产品的环境影响进行评价的主要研究工作, 其中多数是关于纳米产品的评价, 如纳米晶体染料电池^[25]、玻璃涂层^[26]、医疗绷带^[27]等。

表 1 ENMs 能源消耗分析研究工作汇总
Table 1 Cases of energy consumption analysis on ENMs

Authors	ENMs / Nano material products		Life cycle phases				Methods	Functional unit	Comparison with TM	Data sources	Main evaluation content
			E	M	U	EOL					
Lloyd ^[24] (2005)	Nanoscale platinum-group metal (PGM)		✓	✓	✓	-	Hybrid LCA (I/O and process LCA)	Total PGM demand for the US vehicle fleet	✓	National statistics (USA), literatures, GaBi data base	Analysis of energy consumption, economic cost and environmental benefit
Osterwalder ^[13] (2006)	Oxide nanoparticles		✓	✓	-	-	Cradle to-gate energy analysis	1 t nano materials	-	Public literatures	Energy analysis of wet-chemistry or dry processes
Kushnir ^[14] (2008)	CNT, Fullerene (C ₆₀)		✓	✓	-	-	Cradle to-gate energy analysis	1 kg carbon nanoparticle	-	Public literatures	Energy analysis in different production systems
Khanana ^[15, 20] (2008 \ 2009)	Carbon nanofiber polymer composite		✓	✓	✓	-	Cradle-to-gate energy analysis and LCA	The same quality or equivalent stiffness strength	✓	Literatures, engineering information	Cumulative energy demand
Fthenakis ^[22] (2009)	Nano cadmium telluride, nano silver		✓	✓	-	-	Process LCA	1 m ² PV cell	✓	Literatures, estimations, based on assumptions	Cumulative energy demand
Kushnir ^[19] (2011)	Nanomaterials for lithium vehicle batteries		✓	✓	✓	✓	Cradle-to-grave energy analysis	1 kWh storage capacity	-	Manufacturing claims, testing data, reaction chemistry, etc.	Energy analysis in each life cycle stage
Sengül ^[17] (2011)	Quantum dot photovoltaics (QD-PV)		✓	✓	✓	-	Process LCA	Unit area of PV module	✓	Available literature and patent information	Energy consumption, greenhouse gas emissions
Deorsonla ^[18] (2012)	Nanosized MoS ₂ particles for lubricants		✓	✓	-	-	Process LCA	1 g nanosized MoS ₂ particles	-	SimaPro 7 Eco-invent data base	Energy consumption and greenhouse gas emissions
Dahlben ^[21] (2013)	Carbon nanotubes		✓	✓	-	-	Process LCA	A single wafer	✓	Literatures, LCA data base	Energy consumption with traditional materials
Pizza ^[16] (2014)	Graphite nanoplatelets		✓	✓	-	✓	Process LCA	1 kg epoxy-based composites	-	Data in laboratory, literature	Energy consumption
Pati ^[23] (2014)	Gold nanoparticle		✓	✓	-	-	Process LCA	1 mg gold nanoparticles	✓	Data in laboratory	3 conventional reducing agents and 13 green reducing agents energy demand

Note: E: extraction, M: manufacturing, U: use, EOL: end-of life, TM: traditional materials

与资源能源消耗分析的方法一样，目前用于 ENMs 环境影响评价的主要模型是基于流程的 LCA 模型^[12, 25-27, 33-35]，个别研究采用 EIO-LCA 混合模型^[28]或基于流程的 LCA 与生命周期成本分析模型^[29-31]，如 Roes 使用 EIO-LCA 混合模型研究了纳米粘土复合材料与三种传统材料相比的环境影响与经济成本^[29]。该部分对产品的评价较多，因此很多研究不仅对纳米材料的生产制造阶段进行评价，还进一步考虑了产品在使用或处置阶段的环境影响^[25-29, 34, 35]。如 Li 对电动车中的硅纳米线阳极高容量锂电池进行了全生命周期评价研究^[35]。该研究把

电池组的生命周期分为材料的提取、材料加工、组件制造、电池制造、电池使用和最终处置 6 个阶段。经分析，电池工作时产生的环境影响占总体影响的 50%^[35]。影响评价阶段往往借助商用软件进行处理，如表 2 所示，目前研究中使用最多的为 SimaPro 软件^[30-34]，也有 GaBi 软件^[35]和 BEES 软件^[26]，而 Ecoinvent 数据库^[27, 33, 34]为使用较多的数据库。

环境影响识别是生命周期评价中的核心部分，纳米技术代替传统技术是否可行，二者环境影响的比较必不可少，从表 2 可以看出，很多研究把 ENMs 与传统材料

表 2 ENMs 环境影响分析研究工作汇总
Table 2 Cases of environmental impact assessment on ENMs

Authors	ENMs / Nano material products	Life cycle phases				Method	Functional unit	Data sources		Environmental impact categories
		E	M	U	EOL					
Greijer ^[25] (2001)	Nanocrystalline dye sensitized solar cell	✓	✓	✓	✓	Process LCA	1 kWh electricity output from the solar cell system	Public literatures		GW
Lloyd ^[28] (2003)	Clay-polypropylene nanocomposite	✓	✓	✓	-	Hybrid LCA (I/O and process LCA)	16.9 Mio cars produced annually, 210 Mio cars on the road, 15,000 miles/a, 10 years life-span of a car	National statistics (USA), literatures		Carbon dioxide emission and toxic release
Roes ^[29] (2007)	Polypropylene/layered silicate nanocomposite	✓	✓	✓	✓	Process and LCCA	LCA eg: Amount of packaging film for 1000 bags for 200 g candies	A pilot plant producing polymer nanocomposite and literature		Climatic change, ODP, AP, EP, etc.
Healy ^[30, 31] (2006, 2008)	Single wall carbon nanotube (SWNT)	✓	✓	-	-	Process and LCCA	LCA 1 g SWNT	Technical cost model, SimaPro data base, literatures		Airborne inorganics, climate change, acidification
Singh ^[32] (2008)	Carbon nano tubes (CNT)	✓	✓	-	-	Process LCIA	Production of 595 kg CNT per hour	Production simulation, SimaPro data base		GWP, AP, ET, etc.
Joshi ^[12] (2008)	Nanoclay	✓	✓	-	-	Process LCA	1 kg Nanoclay	Expert judgment and estimations, assumptions		Greenhouse gas emissions
Meulen ^[33] (2011)	Nano-crystalline silicon	✓	✓	-	-	Process LCA	1 m ² solar module area	Literatures, SimaPro 7.1 eco-invent data base		Greenhouse gas emissions, especially Fluor gas emissions
Tellaetxe ^[34] (2012)	Nanoclay-reinforced polymer wire coatings	✓	✓	-	✓	Process LCA	1 kg polymeric pellets	Manufacturer data, literature, ecoinvent data base		GW, OD, carcinogenic effects, acidification, eutrophication, etc.
Babaizadeh ^[26] (2013)	Nano-sized titanium dioxide coating	✓	✓	✓	✓	Process LCA	1 m ² of titanium dioxide coated glass	Literatures, internet resource, BEES 4.0 data base		GWP, ADP, EP, ODP, ETP, Human toxicity potential
Li ^[35] (2014)	Silicon nanowires	✓	✓	✓	✓	Process LCA	One average kilometer driven by an EV powered by the LIB pack	Laboratory data, GaBi 6 data base		ADP, GWP, AP, EP, ODP, POP, ETP, HTP
Pourzahedi ^[27] (2015)	Nanosilver-enabled bandages	✓	✓	✓	✓	Process LCA	1 kg silver nanoparticles	Literatures, simulated data, ecoinvent data base		OD, GW, Photochemical smog, AP, EP, ET, human health and fossil fuel depletion

Note: E: extraction, M: manufacturing, U: use, EOL: end-of life, TM: traditional materials, LCCA: Life Cycle Cost Analysis, I/O-LCA: input-output LCA, LCIA: life cycle impact assessment, ADP: abiotic depletion potential, GW(P): global warming (potential), AP: acidification potential, EP: eutrophication potential, OD(P): ozone depletion (potential), POP: photochemical oxidation potential, ET(P): ecological toxicity (potential).

进行了对比分析^[12, 23, 26, 28-31, 34]。Joshi 以纳米粘土复合材料为研究对象, 模拟了 1 kg 有机改良蒙脱土在生产过程中能源使用与二氧化碳排放情况, 并将其与生物聚合物、玻璃纤维、天然纤维进行对比分析^[12]。结果表明, 纳米粘土的生产过程要比其他材料排放更少的二氧化碳。而

Meulen 关于纳米晶体硅和非晶体硅制造的太阳能电池组件在使用时温室气体的排放研究表明, 纳米晶体硅的应用将会带来 60~85% 的温室气体增加量^[33]。

ENMs 产品使用后, 往往会在使用阶段及处置阶段造成新的环境影响。Babaizadeh 以 1 m² 二氧化钛涂层玻

璃为功能单位对纳米二氧化钛窗户涂层进行了从“摇篮”到“坟墓”的全生命周期评价^[26]。该研究采用 BE-ES 软件对生命周期数据清单进行处理。从模型输出结果来看,窗户上纳米二氧化钛的使用可以降低酸化、富营养化潜力及减少空气污染物及烟雾的形成,虽然总体上窗户上纳米二氧化钛的使用对环境的影响是积极的,但同时也会导致全球变暖、增加化石燃料和水的消耗甚至带来人体健康威胁等危害。Pourzahedi 关于纳米银医疗绷带的研究表明含纳米银粒子的绷带的生产过程的环境影响比处置阶段的影响大几倍^[27]。

目前采用 LCA 研究 ENMs 的环境影响类别主要集中在传统的全球气候变化、臭氧损耗、酸化、富营养化、光化学烟雾、人体毒性、生态毒性、资源消耗,几乎没有研究将纳米材料的特性结合起来考虑其特殊的环境影响与生态毒性。

4 环境释放分析

相对于其他传统材料,ENMs 因为其粒径大小以及特殊的性能,一旦进入环境中,也有可能对生态环境与人体健康造成影响。而众多研究表明,ENMs 在生产、使用、处理处置过程中会不可避免地释放到环境中,给人体健康和生态环境带来潜在的危害^[36-39]。David 针对纳米银袜子进行的 Screening-level 生命周期评价研究表明,纳米银袜子在使用阶段清洗过程中由于释放造成的环境影响远比其制造阶段的影响大^[40]。Piotrowska 在关于纳米粒子的浪费和环境管理的综述中强调了释放到环境中的纳米粒子的毒性及其将给环境带来的问题^[41]。但相对于其他传统材料或污染物质,对于 ENMs 在大气、水以及土壤中的浓度与形态的分析测定方法还相当欠缺,因此模拟预测 ENMs 在环境中的浓度对于研究 ENMs 的环境与健康影响具有重要意义。

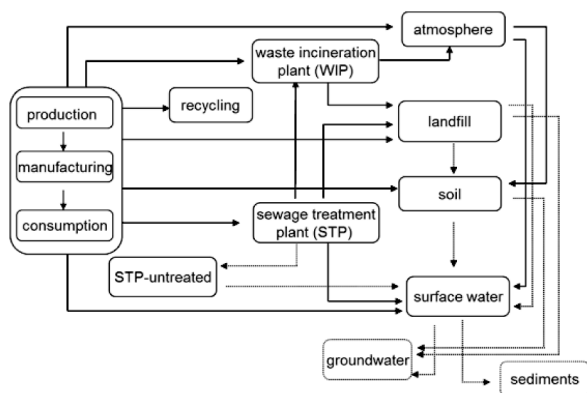


图 1 纳米材料物质流模型图

Fig. 1 Material flow model of ENMs

因为 ENMs 在环境中的行为极其复杂,不仅跟种类、制备工艺等相关,其使用情景以及环境因素等对其在环境中的行为与特性也有着重要影响。所以对于 ENMs 在整个生命周期过程中的释放、环境中的行为等进行建模分析也是关于其生命周期理论研究的热点,而其中物质流分析法为广为采用的方法之一(如图 1)。Mueller 等对纳米银、纳米二氧化钛、碳纳米管等产品进行物质流分析,预测了三种纳米材料最终在空气、水、土壤中的浓度并根据已有的生态毒理数据评价了三种纳米材料的环境风险^[42]。Blaser 采用同样方法估算了欧洲市场上塑料制品和纤维纺织品中总银释放到水体中的浓度,研究发现大部分的银都随着生活污水进入了污水处理厂中,进而排放到了底泥中^[43]。Keller 用物质流方法模拟了 2010 年全球纳米材料的释放情况,研究结果显示,按重量计算最终进入填埋场、土壤、水体、大气中的纳米材料分别占总产量的 63 ~ 91%, 8 ~ 28%, 0.4 ~ 7% 和 0.1 ~ 1.5%^[44]。Gottschalk 基于概率物质流方法定量估计美国、欧盟和瑞士 2008 年纳米银、纳米二氧化钛、纳米氧化锌等 5 种纳米材料在不同环境介质中的释放,并评价了 5 种纳米材料在这三个地区的地表水、污水处理厂等不同环境介质中的环境风险^[45]。Sun 在上述概率物质流模型的基础上,利用最新的 ENMs 生产量数据、ENMs 在废水处理厂和垃圾焚烧厂的更详尽的过程行为描述,基于生命周期的思想和步骤构建了更全面的概率性 ENMs 物质流分析模型,并针对欧盟和瑞士不同垃圾处理现状计算出了纳米银、纳米二氧化钛、纳米氧化锌等 5 种常见 ENMs 在环境介质中的浓度^[46]。

Walser 将生命周期评价与情景分析法结合起来对纳米银 T 恤进行了全生命周期评价,结果表明,在生产阶段,特别是大量开采银矿时候造成的释放毒性最大^[47]。Kohler 基于生命周期思想利用锂离子二次电池和合成纤维纺织品两个实例研究了碳纳米管在应用中的释放情况,研究表明,碳纳米管在生产阶段、使用阶段、处置阶段均有释放,其释放形态与添加到产品中的方式有关^[48]。

Asmatulu 等根据伍德罗威尔逊中心提供的 2010 年的纳米产品数据,把 1014 件纳米产品的最终去向分为回收、摄入、被皮肤吸收然后进入公共下水道、直接进入公共下水道或水体、燃烧后填埋、填埋、释放到空气、空气释放后进入公共下水道或水体及其他 9 类^[49]。O'Brien 模拟了涂料中的纳米二氧化钛、食品包装材料中的纳米银以及气体排放的二氧化铈释放到地表水及大气中的量^[50]。Boxall 基于不同产品的使用特点评估了英国多种 ENMs 的释放情景,用简单的对数函数预测估算了来自化妆品、颜料涂料、食品包装、医疗等领域纳米银、

富勒烯、纳米二氧化钛等 ENMs 释放到大气、土壤以及地表水中的浓度^[51]。

关于 ENMs 环境释放研究大多集中在欧美发达国家和地区,我国在这方面的报道相对较少,我国环境中 ENMs 的研究也刚刚起步不久。我们采用物质流分析方法定量模拟了我国含纳米银产品在生命周期过程中的潜在环境释放^[52]。在估算我国 2012 年人工纳米银的生产量以及大气、水和土壤中的释放量的基础上,根据纳米银在环境中的迁移转化行为、不同纳米银产品的使用情景以及我国固体废弃物处理处置现状,定量估算了 2012 年我国纳米银释放到填埋场、土壤、地表水及大气中的浓度分别为 $2.24 \times 10^5 \sim 4.06 \times 10^5$ ng/kg, $5.35 \sim 9.76$ ng/kg, $1.55 \sim 2.82$ ng/L, $1.68 \times 10^{-3} \sim 3.05 \times 10^{-3}$ ng/m³。

关于纳米材料环境释放的研究将为其生态毒性和环境风险的评价奠定基础,但是很多研究都未能考虑纳米材料的特殊性能。为此,Hischier 建议在模拟纳米材料生命周期释放时应将关于纳米材料特性的全面阐述放在所有工作的第一步^[53]。Gavankar 在他的研究中同样强调了纳米材料特性对其最终浓度释放、环境和人体健康毒性的重要性^[54]。

5 结 语

虽然 LCA 是目前综合评价 ENMs 及其产品性能、环境与健康影响最有效的方法,但其研究与应用才开始不久,不论是应用的 ENMs 种类,还是 LCA 本身的评价模型以及数据积累都有待进一步深入,以适应纳米技术与纳米材料的特点。总结目前研究现状,主要存在以下几个方面的问题:

(1) 纳米材料有优于传统材料的特殊性能,然而因其独特的性能也导致其有异于传统材料的环境行为、毒性机制及生态效应,为此,关于纳米材料的 LCA 研究不应忽略其特殊性能的影响^[55]。鉴于此,ENMs 的生命周期评价研究的功能单位选取不能仅仅为特定的质量单位,而应考虑其特殊的性能。

(2) 众所周知,生产数据对于生命周期评价至关重要,因为它直接决定能源消耗量、最大释放量以及环境影响等,但是由于纳米技术发展迅速,与 LCA 相关的 ENMs 及其产品的清单数据比较缺乏,能够采用最新的纳米产品生产数据进行分析评价的研究较少,因此造成评价结果不确定性高,所以迫切需要收集建立并随着 ENMs 技术的发展更新 ENMs 及其产品的 LCA 清单数据同时将其发表在相应的 LCA 数据库中。

(3) 在目前发表的 LCA 用于评价纳米技术的研究中,绝大部分研究关注于 ENMs 或其产品的使用阶段,

或是其不同生产工艺或技术的环境影响比较分析,往往省去了对他们使用后的处理处置阶段的影响评价。但近期研究表明,ENMs 或其产品使用后处理处置过程对环境与人体健康影响不可忽视,如纳米银牙膏的使用、纺织品的清洗、空气过滤器的使用等,都会使纳米银进入到环境中,对人类及生物体造成伤害。所以纳米材料使用后的处理处置以及回收技术的评价也是十分重要。

(4) 目前,除个别研究采用定量或半定量方法对 ENMs 释放造成的特殊环境影响进行了研究外,大多数评价方法更多关注于资源能源消耗或温室气体排放等传统的环境影响类别,对 ENMs 或其产品在不同阶段可能的环境释放及其在各阶段的物化性能是否会有所改变等很少有实际数据的研究报道。今后的研究应当尽量将纳米产品的生命周期环境影响评价与其所包含的 ENMs 的生命周期释放结合起来,将 ENMs 的特殊物化性质与其环境行为、人体健康和生态毒性等相结合。

参考文献 References

- [1] Seybolt S E J. *Schizophrenia Research* [J], 2014, 160 (1-3): 222-223.
- [2] Bruchez M, Moronne M, Gin P, et al. *Science* [J], 1998, 281 (5385): 2013-2016.
- [3] Maynard A D. *Nature* [J], 2011, 475 (7354): 31.
- [4] Klaine S J, Alvarez P J, Batley G E, et al. *Environmental Toxicology and Chemistry* [J], 2008, 27 (9): 1825-1851.
- [5] 伍德罗威尔逊国际中心 [http://www. nanotechproject. org/cpi/](http://www.nanotechproject.org/cpi/).
- [6] Tolaymat T, El B A, Sequeira R, et al. *Journal of Hazardous Materials* [J], 2015, 298: 270-281.
- [7] USEPA. Nanotechnology. Whitepaper-External. Reviewdraft. [Http://Www. Epa. gov/osa/pdfs/EPA_ Nanotechnology _ White_ Paper_ External_ Review_ Draft_ 12-02-2005. Pdf](http://www.epa.gov/osa/pdfs/EPA_Nanotechnology_White_Paper_External_Review_Draft_12-02-2005.Pdf).
- [8] Nanotechnology Research Co-ordination Group Secretariat, 2005. Characterising the Potential Risks Posed by Engineered Nanoparticles: a First UK Government Research Report. [Http://Www. Defra. Gov. Uk/Environment/Nanotech/Research/Pdf/Nanoparticles-Rishreport. Pdf](http://www.Defra.Gov.Uk/Environment/Nanotech/Research/Pdf/Nanoparticles-Rishreport.Pdf)
- [9] Zhu Xiaoshan (朱小山), Zhu Lin (朱琳), Tian Shengyan (田胜艳), et al. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报) [J], 2008, 28 (8): 3507-3516.
- [10] Som C, Berges M, Chaudhry Q, et al. *Toxicology* [J], 2010, 269 (2-3): 160-169.
- [11] Bauer C, Buchgeister J, Hischier R, et al. *Journal of Cleaner Production* [J], 2008, 16 (8-9): 910-926.
- [12] Joshi S. *Journal of Industrial Ecology* [J], 2008, 12 (3): 474-489.

- [13] Osterwalder N, Capello C, Hungerbühler K, *et al.* *Journal of Nanoparticle Research* [J], 2006, 8 (1): 1–9.
- [14] Kushnir D, Sandén B A. *Journal of Industrial Ecology* [J], 2008, 12 (3): 360–375.
- [15] Khanna V, Bakshi B R, Lee L J. *Journal of Industrial Ecology* [J], 2008, 12 (3): 394–410.
- [16] Pizza A, Metz R, Hassanzadeh M, *et al.* *The International Journal of Life Cycle Assessment* [J], 2014, 19 (6): 1226–1237.
- [17] Sengül H, Theis T L. *Journal of Cleaner Production* [J], 2011, 19 (1): 21–31.
- [18] Deorsola F A, Russo N, Blengini G A, *et al.* *Chemical Engineering Journal* [J], 2012, 195–196: 1–6.
- [19] Kushnir D, Sandén B A. *Journal of Cleaner Production* [J], 2011, 19 (13): 1405–1416.
- [20] Khanna V, Bakshi B R. *Environmental Science & Technology* [J], 2009, 43 (6): 2078–2084.
- [21] Dahlben L J, Eckelman M J, Hakimian A, *et al.* *Environmental Science & Technology* [J], 2013: 8471–8478.
- [22] Fthenakis V, *et al.* *IEEE* [J], 2009.
- [23] Pati P, McGinnis S, Vikesland P J. *Environmental Engineering Science* [J], 2014, 31 (7): 410–420.
- [24] Lloyd S M, Lave L B, Matthews H S. *Environmental Science & Technology* [J], 2005, 39 (5): 1384–1392.
- [25] Greijer H, Karlson L, Lindquist S, *et al.* *Renewable Energy* [J], 2001, 23 (1): 27–39.
- [26] Babaizadeh H, Hassan M. *Construction and Building Materials* [J], 2013, 40: 314–321.
- [27] Pourzahedi L, Eckelman M J. *Environmental Science & Technology* [J], 2015, 49 (1): 361–368.
- [28] Lloyd S M, Lave L B. *Environmental Science & Technology* [J], 2003, 37 (15): 3458–3466.
- [29] Roes A L, Marsili E, Nieuwlaar E, *et al.* *Journal of Polymers and the Environment* [J], 2007, 15 (3): 212–226.
- [30] Healy M L, Tanwani A, Isaacs J A. 2006: 412–415.
- [31] Healy M L, Dahlben L J, Isaacs J A. *Journal of Industrial Ecology* [J], 2008, 12 (3): 376–393.
- [32] Singh A, Lou H H, Pike R W, *et al.* *American Journal of Environmental Sciences* [J], 2008, 4 (5): 522–534.
- [33] Meulen V D R, Alsema E. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* [J], 2011, 19 (4): 453–463.
- [34] Tellaetxe A, Bl A Zquez M, Arteché A, *et al.* Life Cycle Assessment of the Application of Nanoclays in Wire Coating [C] // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2012: 40, 1–13.
- [35] Li B, Gao X, Li J, *et al.* *Environmental Science & Technology* [J], 2014, 48 (5): 3047–3055.
- [36] Hansen S F, Michelson E S, Kamper A, *et al.* *Ecotoxicology* [J], 2008, 17 (5): 438–447.
- [37] Maynard A D, Aitken R J, Butz T, *et al.* *Nature* [J], 2006, 444 (7117): 267–269.
- [38] Nowack B, Bucheli T. *Environmental Pollution* [J], 2007, 150 (1): 5–22.
- [39] Wiesner M R, Lowry G V, Jones K L, *et al.* *Environmental Science & Technology* [J], 2009, 43 (17): 6458–6462.
- [40] Meyer D E, Curran M A, Gonzalez M A. *Journal of Nanoparticle Research* [J], 2011, 13 (1): 147–156.
- [41] Bystrzejewska-Piotrowska G, Golimowski J, Urban P L. *Waste Management* [J], 2009, 29 (9): 2587–2595.
- [42] Mueller N C, Nowack B. *Environmental Science & Technology* [J], 2008, 42 (12): 4447–4453.
- [43] Blaser S A, Scheringer M, MacLeod M, *et al.* *Science of the Total Environment* [J], 2008, 390 (2–3): 396–409.
- [44] Keller A A, McFerran S, Lazareva A, *et al.* *Journal of Nanoparticle Research* [J], 2013, 15 (6): 1692–1709.
- [45] Gottschalk F, Sonderer T, Scholz R W, *et al.* *Environmental Science & Technology* [J], 2009, 43 (24): 9216–9222.
- [46] Sun T Y, Gottschalk F, Hungerbühler K, *et al.* *Environmental Pollution* [J], 2014, 185: 69–76.
- [47] Walser T, Demou E, Lang D J, *et al.* *Environmental Science & Technology* [J], 2011, 45 (10): 4570–4578.
- [48] Köhler A R, Som C, Helland A, *et al.* *Journal of Cleaner Production* [J], 2008, 16 (8–9): 927–937.
- [49] Asmatulu E, Twomey J, Overcash M. *Journal of Nanoparticle Research* [J], 2012, 14 (3): 720–728.
- [50] O'Brien N, Cummins E. *Journal of Environmental Science and Health Part A-Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering* [J], 2010, 45 (8): 992–1007.
- [51] Boxall A, Chaudhry Q, Sinclair C, *et al.* Current and Future Predicted Environmental Exposure to Engineered Nanoparticles [Z]. York, UK: 2007.
- [52] Chen S, Chen Y. *Environmental Engineering Science* [J], (Submitted).
- [53] Hischier R. *The International Journal of Life Cycle Assessment* [J], 2014, 19 (4): 838–849.
- [54] Gavankar S, Suh S, Keller A F. *The International Journal of Life Cycle Assessment* [J], 2012, 17 (3): 295–303.

(编辑 惠琼)