

生命周期评价研究及其在我国土壤修复领域的应用进展

杨宗帅^{1,2}, 魏昌龙², 宋 昕², 王生晖^{2,3}, 熊勤学¹, 李燕丽^{1*}

(1. 长江大学 农学院, 湖北 荆州 451199; 2. 中国科学院 土壤环境与污染修复重点实验室/南京土壤研究所, 江苏 南京 210008;
3. 西北师范大学 地理与环境科学学院, 甘肃 兰州 730070)

摘 要: 生命周期评价 (Life Cycle Assessment, LCA) 能够定量评估产品或技术造成的环境影响, 并且识别关键环节从而优化工艺, 是资源利用、能源消耗和可持续评估的重要工具。本文系统分析了国内外 LCA 研究现状和发展趋势, 探讨了 LCA 的标准、数据库、模型和计算工具等内容, 并详述了 LCA 在我国土壤修复领域的研究进展。LCA 经历了萌芽、探索、快速发展和完善四个阶段, 且已融入各行业领域。Web of Science 数据库中有关 LCA 的发文量在 1990 年后迅速增多, 截至 2021 年底, 共计发表 33114 篇论文, 其中环境领域为 26254 篇, 占总发文量的 79.3%; 我国在 LCA 研究方面已有初步进展, 相关年发文量由 2000 年的 5 篇增长至 2021 年的 935 篇, 但尚未构建本土化完整的 LCA 基础数据库和研究模型, 现阶段应统筹尽快建立具有我国特色的 LCA 体系。土壤修复作为国内碳减排工作的重要组成部分, 加强 LCA 的相关研究和应用将促进低碳可持续修复技术和装备的研发。我国土壤修复领域的 LCA 研究多涉及复合污染场地、异位协同修复技术。原位修复技术渐成土壤修复主流, 未来应加强对原位修复技术的 LCA 研究, 以促进绿色可持续修复技术研发和碳减排任务的落实。

关 键 词: 生命周期评价; 土壤污染; 碳减排; 可持续修复

中图分类号: X53;X82 **文献标识码:** A **文章编号:** 0564-3945(2023)04-0966-12

DOI: [10.19336/j.cnki.trtb.2022040808](https://doi.org/10.19336/j.cnki.trtb.2022040808)

杨宗帅, 魏昌龙, 宋 昕, 王生晖, 熊勤学, 李燕丽. 生命周期评价研究及其在我国土壤修复领域的应用进展 [J]. 土壤通报, 2023, 54(4): 966 - 977

YANG Zong-shuai, WEI Chang-long, SONG Xin, WANG Sheng-hui, XIONG Qin-xue, LI Yan-li. Development of Life Cycle Assessment and Its Applications in Soil Remediation in China[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2023, 54(4): 966 - 977

随着全球制造产品和技术日益多样化, 可持续发展理念在资源开采、利用和最终处置方面不断深化, 促使相关部门的环境管理者和决策者重点审视产品和技术从摇篮到坟墓的对资源环境影响, 对能够全面评估资源环境影响工具的需求越来越高^[1]。产品和技术的环境影响评价涉及资源能源消耗、温室气体排放和环境污染等多个复杂的过程^[2]。因此, 基于生命周期评价 (Life Cycle Assessment, LCA) 而延伸出的概念及工具应运而生。LCA 被用于识别产品或技术造成的资源环境问题, 是能够定量分析所用物料从原材料开采、生产运输、使用到废弃阶段的资源消耗和环境排放, 识别重大影响过程以改进产品或技术的一种方法^[3]。在目前全球节能减碳的背景下, LCA 作为切实可行的环境可持续性评价工具已被广泛应用。如在产品包装领域, 美国中西部资

源研究所早在 1971 年就评估了可口可乐产品包装从生产到废弃的全生命周期过程的环境影响, 结果发现塑料瓶比玻璃瓶的环境影响更低^[4]。建筑工程领域, 有学者运用 LCA 方法评估了混凝土建筑、木结构建筑、交叉层压木材结构建筑及对现有建筑改造翻新 4 种不同建筑方式潜在的环境影响, 结果表明现有建筑改造翻新的环境影响相对较小, 为绿色建筑的发展提供了依据^[5,6]。农业工程领域, 具有时空特征的 GIS-LCA 模型实现了对全球分散式农业残渣、生物质发电厂的精准定位, 并利用 LCA 定量计算了农业残渣转换为生物质能源所造成的环境影响, 初步揭示了 GIS-LCA 在农业残留物转化生物质能源项目可持续规划中的应用潜力^[7]; 适用于评估作物生产的开源的 Crop-LCA 模型因其能针对不同时空特点的农业系统灵活改变评估方法及边界也受到广泛关注^[8]。在

收稿日期: 2022-04-08; 修订日期: 2022-09-03

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2019YFC1805700) 和江苏省重点研发计划项目 (BE2019624) 资助

作者简介: 杨宗帅 (1998-), 男, 河南禹州人, 在读硕士研究生。主要从事污染场地可持续修复研究。E-mail: zsyang@issas.ac.cn

*通讯作者: E-mail: yanli1082@gmail.com

可持续生产和消费领域，也涌现出低碳、绿色、生态环保和节能的理念^[9]。有统计表明近些年来 LCA 应用于碳中和领域的文献发表量呈不断上升的趋势，并在最近几年涨幅明显^[10]。

在环境修复领域，随着对绿色可持续修复技术的需求不断增强，“碳达峰”“碳中和”作为我国“十四五”污染防治攻坚战的重要目标，也被首次写入经济和社会发展的五年规划。我国已出台的多项政策文件中也涉及 LCA 的相关内容。如 2015 年中共中央国务院印发的《生态文明体制改革总体方案》，要求建立统一的绿色产品标准、认证和标识等体系；同年国务院印发的《中国制造 2025》中，共有 6 次提到生命周期评价的相关内容；2016 年国务院印发的《“十三五”国家科技创新规划》中提及构建基于产品全生命周期的绿色制造技术体系；2021 年工业和信息化部印发的《“十四五”工业绿色发展规划》中要求“强化产品全生命周期绿色管理”。

虽然 LCA 研究经历了几十年的发展，但是目前

针对其发展历程、研究体系以及在土壤修复领域的应用进展总结尚不足。本文通过分析 Web of Science (WoS) 数据库中关于 LCA 的国内外研究文献，总结了 LCA 的发展历程、研究现状并分析了 LCA 的发展趋势，同时重点探讨了 LCA 在我国土壤修复领域的应用进展，为我国污染土壤修复碳减排研究提供指导和建议。

1 LCA 发展历程及现状分析

以 LCA or “Life cycle assessment” or “Life cycle analysis” 为主题检索了 WoS 数据库中 1950 ~ 2021 年的相关研究论文，图 1 展示了该领域国内外的年发文章量和关键时间点的大事件。世界范围内 LCA 发文章量在 1990 年后迅速增多，且目前仍保持上升趋势。我国在 2000 年以前的每年相关发文章量不足 5 篇，2000 年后的年发文章量逐渐增多，截至 2021 年 12 月的年总发文章量已达 935 篇。

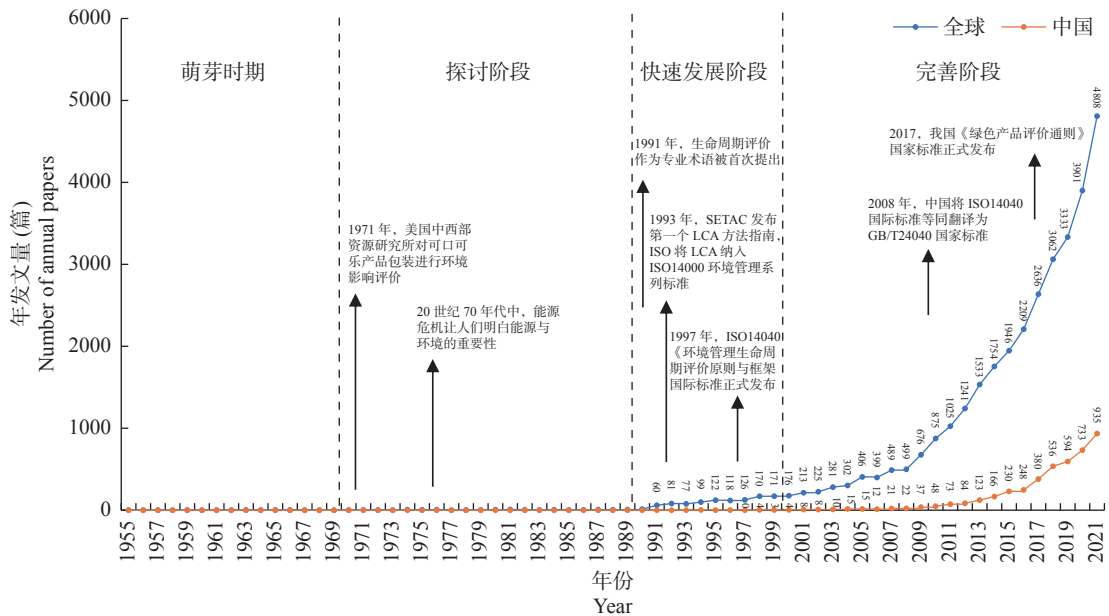


图 1 WoS 数据库中 LCA 的年发文章量及发展历程
Fig.1 Number of annual papers and LCA development in WoS database

LCA 的发展历程总体可分为四个阶段：① 萌芽阶段：该阶段发生在 20 世纪 70 年代以前，当时尚未有 LCA 的概念，主要是美国开展资源与环境状况分析的研究方法，且大部分研究存在于工业企业中，研究结果仅用于支撑企业内部产品或技术的研发^[4]。② 探索阶段：该阶段主要发生在 20 世纪 70 年代至 90 年代，20 世纪 70 年代中期的石油能源危机促使

人们认识到化石能源和环境保护的重要性；20 世纪 80 年代中期的全球固废问题使部分发达国家认识到资源合理利用的必要性^[11]。这一时期不再局限于的企业内部研究，部分国家也积极参与制定相应政策。但是因为缺乏规范的方法框架，对于产品和技术的资源环境影响研究一直没有取得重大进展^[4]。③ 快速发展阶段：该阶段介于 20 世纪 90 年代至 21 世纪初，

随着人们对环境问题日益关切,环保意识越来越强,可持续发展思想愈加深入人心。1990年,国际环境毒理学和化学学会组织召开了首届LCA研讨会,并率先提出LCA的概念^[12],随后几年与多个国家地区的研究人员交流完善LCA方法论和评估框架;在此背景下,1993年国际标准化组织(International Standard Organization, ISO)起草了ISO14000环境管理系列标准,并为LCA体系预留了ISO14040-ISO10049共10个位置;1997年,ISO14040《环境管理生命周期评价原则和框架》标准发布^[13],标志着LCA方法正式成为国际标准,是LCA的里程碑事件。④完善阶段:该阶段为21世纪初至今,ISO14040标准虽然明确了LCA的原则和框架,但并未对每个生命周期阶段做详细的要求和具体的实施方法。因此宏观层面上遵循ISO标准,微观层面上探索更加完善的LCA方法成为近年来的发展需求。比如我国基于国际标准ISO14040、ISO14041、ISO14042、ISO14043、ISO14044,先后制定了系列标准:《环境管理 生命周期评价 原则与框架》

(GB/T 24040-1999)、《环境管理 生命周期评价 目的与范围的确定与清单分析》(GB/T 24041—2000)、《环境管理 生命周期评价 生命周期影响评价》(GB/T 24042—2002)、《环境管理 生命周期评价 生命周期解释》(GB/T 24043—2002)、《环境管理 生命周期评价 原则与框架》(GB/T 24040—2008)、《环境管理 生命周期评价 要求与指南》(GB/T 24044—2008)、《绿色产品评价通则》(GB/T 33761—2017);欧盟于2013年也制定了更为详细的《产品环境足迹指南》。

由图2可知,LCA研究已被应用于化工、土木、农业、材料科学和生物科学等领域,这表明LCA作为一种全生命周期评价工具的适用性。同时图2展示了WoS数据库中不同领域LCA研究的发文量,其中环境科学、环境工程和绿色可持续技术是主要研究方向。截至2021年12月,关于LCA研究共计发表文章33114篇,其中环境领域(包括环境工程和环境科学)有26254篇,占总发文量的79.3%。

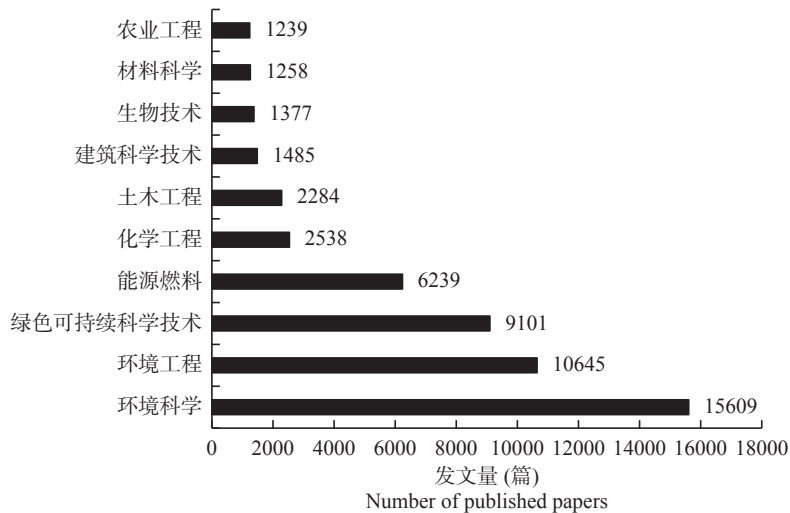


图2 不同研究领域中LCA发文量

Fig.2 Number of published papers on LCA in different research fields

2 LCA体系

虽然LCA方法经过了不同应用需求的探索发展,但其框架是相对稳定的^[14]。ISO14040标准规定了LCA工作主要包括4个部分^[13]:①目标与范围定义:明确所研究的主要生命周期过程和资源环境影响类型两个维度的目标与范围边界;②生命周期清单分析(Life Cycle Inventory Analysis, LCI):收集所需数据,并利用数据库建立完整的LCA模型,是

LCA工作最重要和最有挑战的环节;③生命周期影响评价(Life Cycle Impact Assessment, LCIA):将LCI阶段的成百上千种资源消耗和环境排放影响合并在一起,转换成十几类人们常见的、最为关心的资源环境影响类型指标;④生命周期解释:对LCA结果进行分析得出结论,并说明主要影响和改进方法及重点。

目前LCA工作的开展和推广主要依赖于基础通

用的 LCA 工作指南, 指导 LCA 基础数据库和 LCA 计算模型的开发, 并利用专业计算工具定量获取 LCA 结果 (图 3)。ISO14040 标准对开展 LCA 工作仅制定了基本的步骤和框架, 目前尚缺乏具体到某一行业的实施规范或指南, 造成许多看似相同的产品或技术的 LCA 结果不一致^[1]。Beltran 等人认为行业工作指南的缺乏导致专业术语和表示符号不一致、缺乏 LCA 工具支持和数据不全面是造成 LCA 研究结果具有较大不确定性和不可比较性的重要原因^[15]。Curran 认为缺乏公开透明的基础数据库是 LCA 发展的主要障碍, 大多数公开的数据库通常由政府资助, 且由于这类数据库针对性强, 很难大范围推广使用^[1]。同时, LCA 作为一种数据密集型方法, 大量基础数据库和 LCIA 计算模型的地域性差异会导致研究结果出现偏差^[16]。在 LCIA 阶段通过各类模型将数据库数据转换为产品技术的十几类环境影响, 这涉及到对潜在环境影响的建模, 并计算每类数据可以整合到各类环境影响中的百分比^[17], 是环境影响可视化的重要步骤之一; 而专业的计算工具是得到 LCA 结果的重要支撑和载体。综上所述, 通用的工作指南、基础数据库、计算模型和专业的计算工具是得到准确可信的 LCA 结果不可缺少的部分。

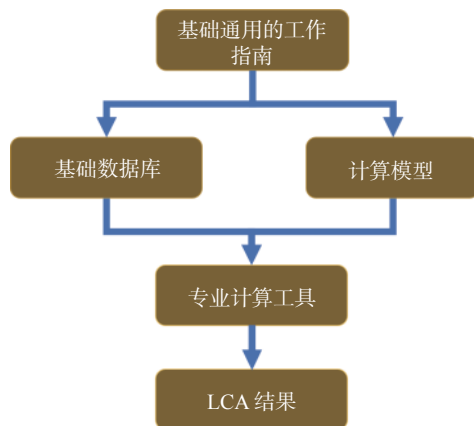


图 3 LCA 工作基本程序
Fig.3 Basic procedure for LCA

2.1 LCA 工作指南

基于 ISO14040 国际标准规定的 LCA 框架, 目前多个国家和地区制定了适合本国的 LCA 工作指南。如联合国环境署 (UNEP) 于 2009 年发布的《Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products》工作指南, 指导全球各行业的 LCA 研究, 介绍了完成各类产品 LCA 应遵循的基本原则和如何完整系统地完成产品的 LCA 工作。欧盟于 2013 年

制定的《产品环境足迹指南》为欧洲区域内产品的 LCA 研究提供了更精细的评价体系, 如提供了 14 种环境影响类型、数据质量要求达到 70%、对产品分配问题做了说明以及对 LCA 评审规范和评审员资质提出要求等。日本生命周期评价协会 (JLCA) 在 2003~2005 年完成了国内产品生命周期碳排放的评价认证体系和框架, 并建立了统一的绿色采购网络。韩国环境工业与技术协会 (KEITI) 建立了基于 ISO14040 国际标准的 LCA 碳足迹认证体系方法。我国近几年在科研机构和合作企业的合作下也尝试制定适合我国的 LCA 工作指南。

在我国“双碳”背景下, LCA 作为定量计算资源环境影响的工具, 在多个行业领域也都有更加精细的工作指南发布, 如中国标准化研究院与宝钢公司在 2012 年联合起草了钢铁制造领域的《钢铁产品制造生命周期评价技术规范》, 规定了钢铁产品制造过程中生命周期评价和可持续性的基本规则和要求; 清华大学和河南红旗渠建设集团有限公司联合编制了建筑工程领域的《建筑工程生命周期可持续性评价标准》将建筑工程生命周期可持续性评价分为确定评价对象和范围、采集数据、生命周期影响评价和编制评价报告 4 个步骤, 并客观评价了建筑工程生命周期的资源消耗和污染排放造成的环境影响; 2020 年, “中国纺织服装行业全生命周期评价工作组”正式成立, 致力于建立纺织品产业的全生命周期评价体系和基础产品数据库, 推动纺织产业绿色低碳发展。

2.2 LCA 基础数据库

基础数据库的开发与建设是 LCA 工作能否顺利完成的重要支撑^[18, 19]。任何一个产品或技术的 LCA 过程往往包含成百上千的子过程, 其中大部分数据都来自于基础数据库。表 1 对比了目前国内外应用较多的数据库, 其中德国 Thinkstep 公司的 Gabi 数据库、瑞士的 Ecoinvent 数据库、欧盟的 ELCD 数据库和美国的 USLCI 数据库应用较为广泛^[20]。Ecoinvent 数据库包括了多个国家的 7000 多种产品单元过程和一万多种工艺流程, 是目前应用最为广泛的 LCA 数据库之一。虽然多个国家致力于数据库的开发工作, 但欧盟在《产业环境足迹指南》中指出不同地域间使用相同的基础数据库进行 LCA 研究不符合数据质量要求^[21]。以电力结构为例, 我国目前 66.7% 的电力来自于煤炭, 电力行业在 2020 年排放的 CO₂ 达

表 1 国内外 LCA 基础数据库对比
Table 1 Comparison of LCA databases at domestic and abroad

类别 Category	数据库 Database	开发单位 Developer	数据库简介 Introduction
国外	Ecoinvent	瑞士Ecoinvent中心	涵盖了全球不同区域的包括7000多种产品单元过程及1万多种工艺流程, 包含了基础工业和农业的数据信息。
	USLCI	美国国家再生能源实验室	包括了美国重要农业、化工、金属等行业的能源和运输数据, 有超过900多种单元过程。
	ELCD	欧盟环境研究总署	包括了欧盟超过400多类基础大宗原材料和能源数据集。
	GaBi数据库	德国Thinkstep公司	包括超过4000条LCI数据, 涵盖了有机物、无机物、钢铁、能源、金属、电子等行业数据库。
国内	中国LCA数据库	中国科学院生态环境研究中心	包括数百种中国本土的基础能源、材料和交通运输等数据。主要涵盖钢材、化石能源、省级火电能源的基础数据。
	CLCD数据库	四川大学&成都亿科环境科技	包括600多种本土大宗能源、原材料和运输数据, 涵盖煤炭、电力、运输等基础工业, 能够提供中国本土化的资源环境特征化因子和归一化基准值。
	MLCD数据库	北京工业大学	基于材料环境协调性评价基础数据库(Sino Center)平台, 包含了约12万条材料生命周期分析基础数据。

到 40 亿吨, 占全国 CO₂ 排放量的 42.4%^[22], 而欧洲的电力则主要来自可再生能源^[23], 那么在开展我国本土 LCA 工作时, 运用非本国的数据库计算资源环境影响会造成较大的误差。因此, 需要构建符合我国国情的基础数据库。

虽然我国的 LCA 工作起步较晚, 但在基础数据库建设方面取得了一些进展。如中国科学院生态环境研究中心杨建新团队开发的中国 LCA 数据库^[24]、北京工业大学聂祚仁团队开发的材料环境数据库 (MLCD)^[25] 以及四川大学王洪涛团队开发的中国生命周期评价核心数据库 (CLCD-China)^[26]。其中 CLCD 数据库被纳入了欧盟的数据库网络中。但是这些数据库存在产品过程较少、领域相对单一的问题, 如 MLCD 数据库仅专注于材料环境数据的开发, 而 CLCD 数据库仅包含 600 多种大宗基础原材料。所以我国学者在进行 LCA 研究时依然要借助国外基础数据库。另外, 我国当前 LCA 研究是由高校和科研院所主导, 企业参与力度不够, 造成基础数据收集困难, 这也是我国 LCA 发展缓慢的重要原因之一^[20]。目前我国 LCA 基础数据库建设有两点挑战: (1) LCA 研究依赖于基础数据库的完整性, 构建本土完整的基础数据库需要研究人员调查至少上百个行业、几百种基础能源和材料, 然而不同行业之间存在数据壁垒以及共享机制不完善, 使得构建完整的本土数据库具有很大挑战性; (2) 明确原始数据的收集渠道, 建立统一的数据收集类型和标准, 保

持数据库中上游数据和下游数据的一致性, 如上游数据库的电力来源应与下游数据库的电力来源相同, 这样才能保证 LCA 结果的准确性和可比性。

在全球“碳中和”的背景下, 我国 LCA 基础数据库开发也存在以下优势: (1) 我国具有建立全行业 LCA 基础数据库的资源优势, 因为国内拥有联合国产业分类中的全部工业门类, 这表明所有产品或技术的上游生产数据, 都能够在我国获取原始数据; (2) 作为世界上最大的发展中国家, 我国制造业规模巨大, 技术发展迅速, 我国有信心有能力走在绿色可持续评估的前列。因此国家高度重视绿色低碳的可持续发展道路, 这也为国内 LCA 发展创造了契机。随着“双碳行动”计划的不断发展, LCA 研究将成为定量计算碳排放的关键手段。

2.3 LCIA 计算模型

LCIA 是对生命周期数据展开定性或定量评估的过程, 是连接生命周期清单和生命周期影响的桥梁^[16]。GB/T 24040 标准规定 LCIA 应包括 3 个过程: ① 选择特征化模型、影响类别和参数; ② 将生命周期清单结果划分到所选的影响类型中; ③ 在特征化类型中计算参数结果。所以 LCIA 特征化计算模型对 LCA 结果至关重要。LCA 研究依托于 CML2001、ReCiPe2016、IMPACT World + 等多个 LCIA 特征化计算模型, 表 2 对比了主流的 LCIA 模型。这些模型包含中点指标法和终点指标法^[27], 其中中点指标法将技术或产品的环境影响转化为人们关注的一系列指

表 2 主要 LCIA 计算模型的对比
Table 2 Comparison of main LCIA models

模型名称 Model	开发国家 Country	类型 Type	适用区域 Area	模型简介 Introduction
CML2001	荷兰	中点值模型	欧洲	将环境影响分为能源消耗、污染和人体损害三大类, 是一种面向问题的环境分析方法, 能够降低模型的复杂程度。
EDIP 97	丹麦	中点值模型	欧洲	包含全球变暖、酸化、人体毒性、生态毒性、臭氧消耗等环境潜在影响
EDIP2003	丹麦	中点值模型	全球	影响类别包括环境影响和资源消耗, 特征化模型中包括了导致非全球影响的毒性暴露, 并将空间异质性与特征化因子关联, 无论考不考空间区别都可以使用该模型。
Eco-indicator99	荷兰	中点值模型与终点值模型	欧洲	基于对环境损害的原理进行环境影响评价, 可以将环境影响归纳为如全球变暖、土地利用、生态毒性等中点值影响。也可以将环境影响分类为人体健康损害、资源损耗和生态系统损害三大类的终点损害类型
ReCiPe 2016	荷兰	中点值模型与终点值模型	全球	基于CML和Eco-indicator模型而开发的适用于全球的模型方法, 有18种人们关注的中间点影响模型; 并能将这些模型归类为人体健康、生态系统和资源消耗三大类。
IMPACT 2002 +	瑞士	中点值模型与终点值模型	欧洲	能够将14个中间点环境影响模型归类到人体健康、生态系统质量、气候变化和资源消耗四大类, 并能重点评估对人体毒性和生态毒性的影响
IMPACT World +	瑞士	中点值模型与终点值模型	全球	适用于全球的计算模型, 降低了区域性的环境类别影响, 基于IMPACT 2002 + 模型的改进模型。
TRACI	美国	中点值模型	美国	基于美国国家政策而建立的评估模型, 增加了人体损害和人体毒性的评估, 并区分了人体致癌因子和人体非致癌因子。

标, 如温室效应、一次能源消耗和水资源消耗等。终点指标法将中点指标进一步归一化, 生成具有统一单位的、可比的环境影响指标, 主要包括生态系统、人体健康和资源消耗三大类。在 LCIA 计算模型的选择上要有充分的考虑^[28-29], 有学者运用不同的计算模型分析了石油炼制过程中的环境影响, 发现由于不同模型或方法对于某种污染物的特征化因子不同或缺失, 导致计算结果具有明显差异^[16]。Chen 等人也证明采用其他国家地区的 LCIA 计算模型评价我国的产品时会出现误差, 特别是对于人体健康损害和生态毒性影响差别较大^[30]; Li 等人采用毒理学实验验证全球化特征因子的适用性, 结果显示在污染物环境浓度较低条件下, 当前国际通用的人体毒性生命周期评价理论在我国并不适用^[31]; Liu 等人发现由于全球各国家或地区生产技术水平 and 资源能源质量存在差异是区域性排放因子不适用的重要原因, 从而导致运用相同计算方法结果会使我国能源碳足迹比国外偏高约 15%^[32]。

此外, LCIA 计算模型还有地理区域的影响^[33-34], 目前欧美国家都先后建立了适合本国的 LCIA 模型, 主要包括适用于欧洲的模式 (CML2001^[35]、ReCiPe2008^[36])、适用于美国的模型 (TRACI^[37])

和全球模型 (IMPACT World + ^[38]、ReCiPe2016^[39]) 等。在我国的 LCA 研究中, 多采用基于 ReCiPe 和 IMPACT 的全球模型, 但是该模型参数的不确定性较高^[40]。因此, 有学者探索符合我国实际的 LCIA 模型, 如杨建新等^[41] 建立的中国产品生命周期影响评价方法, 包括了环境影响类别选择、数据标准化、加权评估和计算环境影响负荷 4 部分; 陈莎等^[42] 从时空变化角度评述了动态生命周期建模路径及解决方案; 李雪迎等^[43] 开展的 LCIA 模型本地化研究, 构建了适用于我国的终点损害值评价模型, 结果表明该模型不仅能通过归一化将不同资源能耗核算成具体数值来表征环境影响, 还能实现产品之间的互相比。但目前我国尚未建立完整适用的 LCIA 模型, 为了科学精准定量研究我国产品或技术的资源环境影响, 亟需开发建立本土化的 LCIA 模型。

2.4 LCA 专业计算工具

LCA 的定量评估通过定量计算工具实现, 表 3 对比了国内外应用较为广泛的 LCA 计算工具。目前 LCA 计算普遍采用两种方式: 专业计算软件和 Microsoft Excel 表格。国际上应用较多的 LCA 专业计算软件有荷兰的 Simapro 和德国的 Gabi^[44], 这两款商业软件均为单机版, 会定期更新软件中所链接

表 3 主流 LCA 专业计算工具对比
Table 3 Comparison of main LCA tools

工具 Tool	开发单位 Developer	国家 Country	工具简介 Introduction
Simapro	莱顿大学	荷兰	单机收费软件, 通过不同层级的数据库管理使操作更加便捷, 其中涵盖了包括Ecoinvent、IDEMAT2001在内的多个数据库; 拥有CML、ReCiPe、Eco-indicator等多个计算模型; 并拥有包括人体健康、温室气体、光化学烟雾等在内的多个环境评价指标
GaBi	Thinkstep公司	德国	单机收费软件, 专注于产品工艺研究; 内置了完整的ELCD数据库并扩展了Ecoinvent等十几个数据库; 包含CML、EDIP、ReCiPe等多个计算模型; 由方案 (Plans)、流程 (Processes) 和基础流 (Flows) 组成的独立化模块, 具有清晰的结构。
OpenLCA	GreenDelta公司	德国	单机免费软件, 可以免费使用多种数据库, 是开源的LCA软件, 许多功能都实现了模块化, 并且能够根据用户实际需求改进源代码。
e-Footprint	亿科环境公司	中国	基于互联网的在线平台, 适用于所有工艺、产品技术的LCA分析、碳足迹分析和生态设计; 包含了全部的CLCD数据库并内置了ELCD数据库和Ecoinvent数据库; 提供了中国本土化的资源特征因子和节能减排权重因子。

的数据库, 并且费用都较为昂贵。在如今万物互联的时代, 相关研发人员也开发了线上 LCA 联机平台, 如四川大学开发了 e-Footprint 线上 LCA 研究平台, 一定程度上促进了 LCA 线上计算工具的发展。

部分组织机构使用 MICROSOFT EXCEL 表格进行 LCA 计算, 如美国环保署开发了基于 EXCEL 的 Spreadsheets for Environmental Footprint Analysis (SEFA) 电子表格, 可用于量化污染修复过程中的各环境影响指标^[45]。然而, 电子表格不能进行 ISO14040 标准中规定生命周期解释重大问题识别、数据完整性、敏感性和一致性检查等关键环节, 存在一定的局限性。而通过成熟的 LCA 软件开展 LCA 分析能够约束和落实 ISO14040 标准中规定的 LCA 方法和要求, 引导用户规范进行 LCA 操作, 并在建模完成后检查数据完整性和一致性, 从而保证分析结果的规范化和可信度。

3 我国土壤修复领域 LCA 研究进展

LCA 能够从全生命周期的角度定量计算土壤修复全过程产生的环境影响, 成为国内外污染土壤环境可持续性评价的有力工具^[46]。世界范围内的文献计量分析表明 LCA 作为污染场地修复的关键突现词, 在近些年拥有最高突现强度且持续至今仍未有下降趋势^[47]。国外的污染场地修复起步较早, Volkwein 等^[48]于 1999 年首次将生命周期的概念引入污染土壤修复中, 并构建了污染场地修复近域排放区和远程排放区的 LCA 模型。随后有关污染土壤修复 LCA 评估框架和边界的研究越来越多, 有学者将污染场地修复的 LCA 边界定义为原材料及能源消耗、污染

场地修复过程和废弃物管理 3 个部分^[49]。2011 年美国可持续修复论坛发布的《修复行业足迹分析和生命周期评估导则》规范了污染场地 LCA 评价步骤, 构建了包括污染场地内操作管理、场地外输入输出环境影响的模型图, 为利用 LCA 进行环境可持续评估提供了技术方法^[50]。2013 年美国材料试验协会发布的《绿色修复标准导则》进一步明确要求采用 LCA 的方法定量评估污染土壤修复过程中的环境影响^[51]。经过近 30 多年的污染场地修复经验和实践, 国外场地修复体系已经从起初仅关注成本, 到技术可行性评估与比较, 进入目前的绿色可持续修复阶段^[52]。

我国土壤修复行业起步较晚, 市场竞争激烈, 初期与 20 世纪 80 年代的美国相似^[53], 修复技术多以高能耗、见效快的异位修复技术为主, 修复工程更关注是否实现了修复目标, 而较少关注修复过程造成的二次污染、资源能源消耗和人体健康损害^[48]。近些年来, 随着“双碳”计划的实施和对“绿色可持续修复”理念的认识, 我国污染土壤修复技术的可持续性和碳减排措施越来越受到重视。在我国, 面积大于 10000 m² 的污染场地超过 50 万块^[54], 根据已有研究表明每修复 1 kg 地下水中的污染物, 平均排放 1.3 t CO₂; 每修复 1 kg 土壤中污染物, 平均排放 0.015 t CO₂^[55], 据此估算污染土壤修复的整体 CO₂ 排放量巨大, 因此土壤修复碳减排是我国实现“双碳”目标的重要组成部分之一。我国自 2010 年以来, 陆续发布了一系列标准法规来促进我国土壤修复行业发展, 如 2014 年环境保护部发布《污染场地土壤修复导则》; 2016 年国务院印发《土壤污染防治行动计

划》；2018 年环境保护部发布《中华人民共和国土壤污染防治法》等，提高了人们土壤环境保护意识的同时规范了土壤修复产业链。2020 年中国环境保护协会发布的《污染地块绿色可持续修复通则》，明确指出将 LCA 作为定量评价修复过程环境可持续性的重要工具，并通过实际案例指导如何完成污染场地修复技术的可持续研究。同时，我国科技部积极部署土壤污染防治项目，设立了“场地土壤污染成因与治理技术”国家重点专项。在 2019 年执行的“污染场地绿色可持续修复评估体系与方法”重点研发项目中，要求提出与国际接轨的污染场地绿色可持续修复发展战略，研究适合我国国情的绿色可持续修复评估方法和体系，这表明我国对污染土壤修复业碳减排的关注和行动。

虽然我国土壤修复领域已开展 LCA 相关研究，但目前尚处于起步阶段。实际污染土壤修复技术的环境影响研究并不仅包括 LCA，还包括污染地块的场地调查和风险评估、确定场地污染特征和未来规划、筛选合适的修复技术并制定修复方案等环节，这些都可能会对环境造成较大影响，在进行 LCA 研究时要选择合适的 LCA 评估模型并充分考虑上述环节的输入输出排放。以“Contaminated soil remediation” and (LCA or “Life cycle assessment” or “Life cycle analysis”) 为主题词在 WoS 数据库检索，检索结果国家地区栏选择“China”，共得到 36 篇相关文献，其中，Wan 等^[56]通过低风险—高环境价值—低成本的耦合模型比较了重金属污染土壤的

最佳修复技术，结果表明植物富集具有最高的环境价值，自然衰减具有最低的经济成本；Li 等^[57]对比了间接热脱附和直接热脱附修复有机污染土壤造成的环境影响，结果表明间接热脱附技术的环境影响相对较低；Chen 等^[58]认为不仅要关注污染土壤修复过程造成的环境影响，公众参与和看法对与修复整体可持续性同样重要。

通过筛选 36 篇中涉及 LCA 模型、LCA 计算工具和方法的文章，梳理出近些年我国土壤修复领域中关于 LCA 研究的相关文章 10 篇。由表 4 可知，其中研究对象为重金属污染土壤、有机污染土壤和复合污染土壤，修复技术以异位联合修复技术为主。我国目前污染土壤修复领域应用较多的 LCA 基础数据库、LCA 计算模型和 LCA 计算软件仍以国外的为主，但国内相关研究也已初见成效，如 e-Footprint 平台、CLCD 数据库和各种计算模型的开发。在 LCA 基础数据库方面，应用较多的是瑞士的 Ecoinvent 数据库，使得 LCA 结果的不确定性较高^[21]。有研究应用了我国的 CLCD 数据库，但依然要辅以 Ecoinvent 数据库。在 LCA 计算模型方面多选用的是 IMPACT 和 ReCiPe 全球模型，这两类模型虽然在一定程度上具有较大不确定性^[59]，但目前国内的 LCA 模型并不成熟，对国外的模型具有依赖性。也有研究者开发了 LCA 与其他模型相结合的评估方法，比如 Hou 等^[60]将经济输入输出表与 LCA 结合生成的 Input-Output LCA 模型（IO-LCA 模型），能够同时评估污染土壤修复过程的经济可持续性和环境可

表 4 我国污染土壤修复领域 LCA 研究相关文章
Table 4 Publications related to LCA research in the field of contaminated soil remediation in China

第一作者 First author	年份 Year	修复技术 Technology	污染物 Pollutant	LCA 计算工具 LCA professional tool	LCA 计算模型 LCA model	LCA 数据库 LCA database
Hu Xintao ^[63]	2011	红外高温焚烧和碱催化分解	多氯联苯	Simapro7.2	IMPACT2002 +	Ecoinvent
Hong Jinglan ^[64]	2012	生物修复	五氯苯胺	Simapro	IMPACT2002 +、ReCiPe	Ecoinvent
Hou Deyi ^[60]	2014	异位淋洗和填埋	重金属和石油烃	/	ReCiPe、USES-LCA	/
Hou Deyi ^[65]	2016	土壤淋洗、固化稳定化、异位热脱附和植物修复	汞污染	Simapro8.0	ReCiPe	Ecoinvent3.1
Hou Deyi ^[61]	2017	挖掘填埋、固化稳定化	铅污染	Simapro8.0	ReCiPe、HRA	Ecoinvent3.1
Song Yinan ^[62]	2018	土壤淋洗、固化稳定化和异位热脱附	重金属和PAHs	Simapro8.0	ReCiPe、USES-LCA	Ecoinvent3.1
Ni Zhuobiao ^[66]	2020	热处理和生物修复	氯代挥发性有机污染物	e-Footprint	/	CLCD、Ecoinvent3.1
Chen Chang ^[67]	2020	原位热脱附、异位热脱附和固化稳定化	汞污染和多种有机污染物复合污染	/	IO-LCA	China's environmental statistics annual report
Hu Guangji ^[68]	2021	低温热脱附	/	Simapro8.5.2	ReCiPe 2016 (H)、Impact2002 +	Ecoinvent3.3
Jin Yuanliang ^[69]	2021	植物富集、固化稳定化和替代植物种植	镉污染	/	ReCiPe	Ecoinvent v2.3

注：按年份排序

持续性；同时 Hou 等^[61]还建立了基于健康风险评估（Health Risk Assessment, HRA）的 LCA 模型（HRS-LCA 模型），能够定量计算污染土壤修复过程对人体的健康损害值。这说明国内有相关人员已开始探索开发新的 LCA 计算模型。从 LCA 专业计算工具来讲，大部分采用了 Simapro 软件^[61-65]，也有学者使用 e-Footprint 在线平台以土壤修复技术的 LCA 评估为主题在 *Environmental Science and Technology* 期刊上发表论文^[66]。

4 结论与展望

4.1 结论

（1）全球 LCA 的发展经历萌芽阶段、探讨阶段和快速发展阶段，现已进入完善阶段，正在建立更加精细的行业标准，且政府部门的支持力度不断增强。

（2）“双碳”背景下的 LCA 研究热度凸显，已融入各行业领域，其中环境科学、环境工程和绿色可持续技术是研究较多的方向，也已拓展到化工、土木、农业、材料科学和生物科学等领域，表明 LCA 研究正走向多元化和专业化。

（3）基础数据库、计算模型和专业计算工具是影响 LCA 研究能否顺利开展的重要因素，我国在这些方面的研究较薄弱。国内学者虽已取得部分进展，但尚未构建统一完整的、符合国情的、数据质量较高的本土化基础数据库和计算模型，也缺乏可推广使用的 LCA 计算工具。

（4）现阶段我国土壤修复的 LCA 评估多涉及复合污染土壤，修复技术多以异位协同修复技术为主，原位修复技术涉及较少，且在 LCA 方法体系上仍需加强研究。

4.2 展望

（1）建立统一的工作指南和数据质量规则。规范 LCA 的应用流程和 LCIA 模型的构建方法，并建立更加精细可行的行业标准，推动我国各行业 LCA 的快速发展。

（2）构建高质量的 LCA 数据库。充分发挥我国拥有全工业门类的优势，加强跨部门跨行业的联动协调，建立密切的产学研政合作关系，尽快推动我国基础数据库的开发工作。

（3）推动公共 LCA 平台和数据共享机制建设。通过构建权威的交流平台和知识产权保护机制，使

国内研究机构、企业的数据可交流、能共享，并使国内 LCA 研究能够真正应用于实际工程。

（4）我国土壤修复产业规模较大，是实现碳减排目标的重要组成。土壤修复结合 LCA 的研究将有助于促进研发更多符合低碳绿色可持续修复的新技术和新装备。鉴于目前我国污染土壤修复技术呈现逐渐从异位修复向原位修复发展的趋势，应加强对原位修复技术的 LCA 研究，并尝试建立具有时空属性的 LCA 评估体系。

参考文献：

- [1] Curran M A. Life Cycle Assessment: a review of the methodology and its application to sustainability[J]. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 2013, 2(3): 273 - 277.
- [2] 聂祚仁. 生命周期方法与材料生命周期工程实践[J]. *科技导报*, 2021, 39(9): 1.
- [3] Hendrickson C, Horvath A, Joshi S, et al. Economic input-output models for environmental life-cycle assessment[J]. *Environmental Science & Technology*, 1998, 32(7): 184A - 191A.
- [4] 杨建新, 王如松. 生命周期评价的回顾与展望[J]. *环境科学进展*, 1998, (2): 22 - 29.
- [5] Erlandsson M and Borg M. Generic LCA-methodology applicable for buildings, constructions and operation services - today practice and development needs[J]. *Building and Environment*, 2003, 38(7): 919 - 938.
- [6] Nwodo M N, Anumba C J. A review of life cycle assessment of buildings using a systematic approach[J]. *Building and Environment*, 2019, 162: 106290.
- [7] Hiloidhari M, Baruah D C, Singh A, et al. Emerging role of geographical information system (GIS), life cycle assessment (LCA) and spatial LCA (GIS-LCA) in sustainable bioenergy planning[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 242: 218 - 226.
- [8] Goglio P, Smith W N, Worth D E, et al. Development of Crop. LCA, an adaptable screening life cycle assessment tool for agricultural systems: A Canadian scenario assessment[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 172: 3770 - 3780.
- [9] 张超, 刘蓓蓓, 李楠, 等. 面向可持续发展的资源关联研究: 现状与展望[J]. *科学通报*, 2021, 66(26): 3426 - 3440.
- [10] 李媛媛, 葛晓华, 王文静, 等. 技术生命周期评价进展及其在碳中和和领域应用趋势分析[J]. *环境工程技术学报*, 2022, 12(4): 1048 - 1057.
- [11] 矫旭东, 吴佳, 王韬, 等. 基于全生命周期管理的固体废物分类资源化利用研究[J]. *环境工程*, 2021, 39(10): 201 - 206, 170.
- [12] 徐湘博, 孙明星, 张林秀. 农业生命周期评价研究进展[J]. *生态学学报*, 2021, 41(1): 422 - 433.
- [13] International Organization for Standardization(ISO). ISO 14040 Environmental management life cycle assessment general principles and framework[S]. ISO, 2006.

- [14] 王长波, 张力小, 庞明月. 生命周期评价方法研究综述——兼论混合生命周期评价的发展与应用[J]. *自然资源学报*, 2015, 30(7): 1232 – 1242.
- [15] Beltran A M, Prado V, Vivanco D F, et al. Quantified uncertainties in comparative life cycle assessment: what can be concluded?[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(4): 2152 – 2161.
- [16] 翟一杰, 张天祚, 申晓旭, 等. 生命周期评价方法研究进展[J]. *资源科学*, 2021, 43(3): 446 – 455.
- [17] Hauschild M Z. Assessing environmental impacts in a life-cycle perspective[J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, 39(4): 81A – 88A.
- [18] 莫 华, 张天柱. 生命周期清单分析的数据质量评价[J]. *环境科学研究*, 2003, (5): 55 – 58.
- [19] 郑秀君, 胡 彬. 我国生命周期评价(LCA)文献综述及国外最新研究进展[J]. *科技进步与对策*, 2013, 30(6): 155 – 160.
- [20] 王玉涛, 王丰川, 洪静兰, 等. 中国生命周期评价理论与实践研究进展及对策分析[J]. *生态学报*, 2016, 36(22): 7179 – 7184.
- [21] Bach V, Lehmann A, Gormer M, et al. Product environmental footprint (PEF) pilot phase-comparability over flexibility?[J]. *Sustainability*, 2018, 10(8): 2898.
- [22] 黄 强, 郭 恂, 江建华, 等. “双碳”目标下中国清洁电力发展路径[J]. *上海交通大学学报*, 2021, 55(12): 1499 – 1509.
- [23] Bigerna S, D'Errico M C, Polinori P. Environmental and energy efficiency of EU electricity industry: An almost spatial two stages DEA approach[J]. *Energy Journal*, 2019, 40(S1): 29 – 54.
- [24] 杨 东, 刘晶茹, 杨建新, 等. 基于生命周期评价的风力发电机碳足迹分析[J]. *环境科学学报*, 2015, 35(3): 927 – 934.
- [25] 李小青, 龚先政, 聂祚仁, 等. 中国材料生命周期评价数据模型及数据库开发[J]. *中国材料进展*, 2016, 35(3): 171 – 178, 204.
- [26] 刘夏璐, 王洪涛, 陈 建, 等. 中国生命周期参考数据库的建立方法与基础模型[J]. *环境科学学报*, 2010, 30(10): 2136 – 2144.
- [27] Rashedi A, Khanam T. Life cycle assessment of most widely adopted solar photovoltaic energy technologies by mid-point and end-point indicators of ReCiPe method[J]. *Environmental science and pollution research international*, 2020, 27(23): 29075 – 29090.
- [28] Harding K G. A technique for reporting life cycle impact assessment (LCIA) results[J]. *Ecological Indicators*, 2013, 34: 1 – 6.
- [29] Chen X J, Matthews H S, Griffin W M. Uncertainty caused by life cycle impact assessment methods: Case studies in process-based LCI databases[J]. *Resources Conservation and Recycling*, 2021, 172: 105678.
- [30] Chen W, Zhang F F, Hong J L, et al. Life cycle toxicity assessment on deep-brine well drilling[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 112(S1): 326 – 332.
- [31] Li X Z, Yang Y, Xu X, et al. Air pollution from polycyclic aromatic hydrocarbons generated by human activities and their health effects in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 112(S2): 1360 – 1367.
- [32] Liu Z, Guan D B, Wei W, et al. Reduced carbon emission estimates from fossil fuel combustion and cement production in China[J]. *Nature*, 2015, 524(7565): 335 – 338.
- [33] Helias A, Esnouf A, Finkbeiner M. Consistent normalization approach for life cycle assessment based on inventory databases[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 703: 134583.
- [34] Esnouf A, Latrielle E, Steyer J-P, et al. Representativeness of environmental impact assessment methods regarding life cycle inventories[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 621: 1264 – 1271.
- [35] Dreyer L C, Niemann A L, Hauschild M Z. Comparison of three different LCIA methods: EDIP97, CML2001 and Eco-indicator 99[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2003, 8(4): 191 – 200.
- [36] Prasara-a J, Grant T. Comparative life cycle assessment of uses of rice husk for energy purposes[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2011, 16(6): 493 – 502.
- [37] Bare J C. TRACI 2.0: the tool for the reduction and assessment of chemical and other environmental impacts 2.0[J]. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2011, 13(5): 687 – 696.
- [38] Bulle C, Margni M, Patouillard L, et al. IMPACT World + : a globally regionalized life cycle impact assessment method[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2019, 24(9): 1653 – 1674.
- [39] Huijbregts M A J, Steinmann Z J N, Elshout P M F, et al. ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2017, 22(2): 138 – 147.
- [40] Zhang R R, Ma X T, Shen X X, et al. Life cycle assessment of electrolytic manganese metal production[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 253: 119951.
- [41] 杨建新, 王如松, 刘晶茹. 中国产品生命周期影响评价方法研究[J]. *环境科学学报*, 2001, (2): 234 – 237.
- [42] 陈 莎, 孙中梅, 李素梅, 等. 动态生命周期评价的研究与应用现状[J]. *中国环境科学*, 2018, 38(12): 4764 – 4771.
- [43] 李雪迎, 白 璐, 杨庆榜, 等. 我国终点型生命周期影响评价模型及基准值初步研究[J]. *环境科学研究*, 2021, 34(11): 2778 – 2786.
- [44] Herrmann I T, Moltesen A J J o C P. Does it matter which life cycle assessment (LCA) tool you choose? – a comparative assessment of SimaPro and GaBi[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 86: 163 – 169.
- [45] U. S EPA. The United States environmental protection agency spreadsheets for environmental footprint analysis (SEFA) [EB/OL]. 2019[2022-02-11]. <https://clu-in.org/greenremediation/SEFA/#supportingmethodology>.
- [46] Suer P, Nilsson-Paedal S, Norrman J. LCA for site remediation: A literature review[J]. *Soil & Sediment Contamination*, 2004, 13(4): 415 – 425.
- [47] 杨宗帅, 魏昌龙, 宋 昕, 等. 基于Web of Science数据库的污染场地可持续修复领域的文献计量分析[J]. *土壤通报*, 2022, 53(1): 221 – 233.

- [48] 董璟琦, 张红振, 雷秋霜, 等. 污染场地修复生命周期评估程序与模型的研究进展[J]. *环境污染与防治*, 2016, 38(12): 89 – 95.
- [49] Diamond M L, Page C A, Campbell M, et al. Life-cycle framework for assessment of site remediation options: Method and generic survey[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1999, 18(4): 788 – 800.
- [50] Favara P J, Krieger T M, Boughton B, et al. Guidance for performing footprint analyses and life - cycle assessments for the remediation industry[J]. *Remediation Journal*, 2011, 21(3): 39 – 79.
- [51] 焦文涛, 方引青, 李绍华, 等. 美国污染地块风险管控的发展历史、演变特征及启示[J]. *环境工程学报*, 2021, 15(5): 1821 – 1830.
- [52] 谷庆宝, 侯德义, 伍 斌, 等. 污染场地绿色可持续修复理念、工程实践及对我国的启示[J]. *环境工程学报*, 2015, 9(8): 4061 – 4068.
- [53] 宋 昕, 林 娜, 殷鹏华. 中国污染场地修复现状及产业前景分析[J]. *土壤*, 2015, 47(1): 1 – 7.
- [54] Hou D Y, Al-Tabbaa A. Sustainability: A new imperative in contaminated land remediation[J]. *Environmental Science and Policy*, 2014, 39: 25 – 34.
- [55] 谷庆宝. 利用与修复, 孰先孰后?——从国外经验看中国土壤环境污染防治[J]. *中国生态文明*, 2019, (1): 39 – 42.
- [56] Wan X M, Lei M, Yang J, et al. Three-year field experiment on the risk reduction, environmental merit, and cost assessment of four in situ remediation technologies for metal(loid)-contaminated agricultural soil[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 266: 115193.
- [57] Li S, He L, Zhang B, et al. A comprehensive evaluation method for soil remediation technology selection: Case study of ex situ thermal desorption[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(6): 3304.
- [58] Li X N, Chen W P, Cundy A B, et al. Analysis of influencing factors on public perception in contaminated site management: Simulation by structural equation modeling at four sites in China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 210: 299 – 306.
- [59] Cavalett O, Chagas M F, Seabra J E A, et al. Comparative LCA of ethanol versus gasoline in Brazil using different LCIA methods[J]. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2013, 18(3): 647 – 658.
- [60] Hou D Y, Al-Tabbaa A, Guthrie P, et al. Using a hybrid LCA method to evaluate the sustainability of sediment remediation at the London Olympic Park[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 83: 87 – 95.
- [61] Hou D Y, Qi S Q, Zhao B, et al. Incorporating life cycle assessment with health risk assessment to select the ‘greenest’ cleanup level for Pb contaminated soil[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 162: 1157 – 1168.
- [62] Song Y N, Hou D Y, Zhang J L, et al. Environmental and socio-economic sustainability appraisal of contaminated land remediation strategies: A case study at a mega-site in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 610: 391 – 401.
- [63] Hu X T, Zhu J X, Ding Q. Environmental life-cycle comparisons of two polychlorinated biphenyl remediation technologies: Incineration and base catalyzed decomposition[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 191(1-3): 258 – 268.
- [64] Hong J L, Li X N. Life cycle assessment comparison of substrates for the bioremediation of pentachloroaniline under acidogenic/methanogenic conditions[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2012, 17(1): 79 – 88.
- [65] Hou D, Y Gu Q B, Ma F J, et al. Life cycle assessment comparison of thermal desorption and stabilization/solidification of mercury contaminated soil on agricultural land[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 139: 949 – 956.
- [66] Ni Z B, Wang Y, Wang Y F, et al. Comparative life-cycle assessment of aquifer thermal energy storage integrated with in situ bioremediation of chlorinated volatile organic compounds[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(5): 3039 – 3049.
- [67] Chen C, Zhang X M, Chen J A, et al. Assessment of site contaminated soil remediation based on an input output life cycle assessment[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 263: 121422.
- [68] Hu G J, Liu H, Rana A, et al. Life cycle assessment of low-temperature thermal desorption-based technologies for drill cuttings treatment[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 401: 123865.
- [69] Jin Y L, Wang L W, Song Y N, et al. Integrated life cycle assessment for sustainable remediation of contaminated agricultural soil in China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55(17): 12032 – 12042.

Development of Life Cycle Assessment and Its Applications in Soil Remediation in China

YANG Zong-shuai^{1,2}, WEI Chang-long², SONG Xin², WANG Sheng-hui^{2,3},
XIONG Qin-xue¹, LI Yan-li^{1*}

(1. College of Agriculture, Yangtze University, Jingzhou 451199, China; 2. CAS Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3. College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Life Cycle Assessment (LCA) can quantitatively assess the environmental impact caused by products or technologies and identify key links to optimize processes. It is an important tool for resource utilization, energy consumption and sustainable assessment. This study systematically analyzed the research status and development trend of LCA at home and abroad, discussed the content of LCA standards, databases, models and calculation tools, and detailed the research progress of LCA in the field of soil remediation in China. LCA has gone through four stages: germination, exploration, rapid development and improvement, and has been integrated into various industries and fields. The number of publications on LCA in the Web of Science database increased rapidly after 1990. By the end of 2021, a total of 33,114 papers had been published, among which 26,254 papers were published in the field of environment, accounting for 79.3% of the total publications. China has made preliminary progress in LCA research, with the annual number of articles increasing from 5 in 2000 to 935 in 2021. However, a localized and complete LCA database and research model have not yet been constructed in China. At present, it is necessary to establish a LCA system with Chinese characteristics as soon as possible. Soil remediation is an important part of carbon emissions reduction in China. Strengthening the research and application of LCA will promote the development of low-carbon sustainable remediation technologies and equipment. LCA research in soil remediation field in China mainly involves ex-situ remediation technologies. In-situ remediation technology has gradually become the mainstream of soil remediation. In the future, LCA research on in-situ remediation technology should be strengthened to promote green and sustainable remediation technology development and carbon emission reduction.

Key words: Life cycle assessment; Soil pollution; Carbon reduction; Sustainable remediation

[责任编辑: 韩春兰]