

邹茂君, 杨雪晶, 张锦杨. 前瞻性全生命周期评价在水处理领域的发展与应用[J]. 净水技术, 2026, 45(2): 22-32.

Zou M J, Yang X J, Zhang J Y. Development and application of prospective life cycle assessment in water treatment field[J]. Water Purification Technology, 2026, 45(2): 22-32.

前瞻性全生命周期评价在水处理领域的发展与应用

邹茂君^{1,2,3}, 杨雪晶^{2,3}, 张锦杨^{2,4,*}

(1. 东方电气集团东方锅炉股份有限公司, 四川自贡 643000; 2. 上海工业水系统精益运营工程技术研究中心, 上海 200237; 3. 华东理工大学机械与动力工程学院, 上海 200237; 4. 麦王环境技术有限公司, 上海 200082)

摘要 【目的】随着我国“30·60”“双碳”目标的推进, 低碳、零碳及负碳技术不断涌现, 准确评估这些新兴技术的发展前景并优化其发展路径则显得至关重要。前瞻性全生命周期评价(LCA)已被证实能有效评估新兴技术并指导其早期开发, 可以被用于水处理领域新兴技术的评估与分析。【方法】本文对前瞻性LCA在水处理领域的现有案例进行选取梳理, 主要分析了前瞻性LCA的建模过程, 包括功能单位、系统边界、前景和背景数据的建立以及数据的不确定性与敏感性分析。【结果】水处理领域前瞻性LCA的功能单位和系统边界可与传统LCA保持一致。前景数据现有建立方法可以分为情景预测和放大, 但尚无适合所有情景的方法, 需根据研究需求进行选择。背景数据可通过对电力数据的预测, 使评估结果更加准确。前瞻性LCA数据不确定性会显著加剧, 必须进行严格的不确定性 & 敏感性分析, 以保障评估结果的可靠性。【结论】前瞻性LCA通常聚焦于未来时间点的建模, 功能单位定义、系统边界划定以及前景与背景数据的获取, 均需依据技术在未来时间点进行预测。此外, 现有前瞻性LCA研究通常沿用传统LCA的评估框架, 缺乏可靠的评估系统, 未来亟需更适合前瞻性LCA的框架和方法。

关键词 前瞻性 全生命周期评价(LCA) 新兴技术 水处理 放大方法

中图分类号: X703 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-0177(2026)02-0022-11

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.02.003

Development and Application of Prospective Life Cycle Assessment in Water Treatment Field

Zou Maojun^{1,2,3}, Yang Xuejing^{2,3}, Zhang Jinyang^{2,4,*}

(1. Dongfang Boiler Co., Ltd., Dongfang Electric Corporation, Zigong 643000, China;

2. Shanghai Engineering Laboratory of Lean Operational Technologies for Industrial Water System, Shanghai 200237, China;

3. School of Mechanical and Power Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China;

4. McWong Environmental Technology Co., Ltd., Shanghai 200082, China)

Abstract [Objective] With the advancement of China's "30·60" "dual carbon" goals, low-carbon, zero-carbon, and negative-carbon technologies continue to emerge. Accurately assessing the development prospects of these emerging technologies and optimizing their development pathways is crucial. Prospective life cycle assessment (LCA) has been proven effective in evaluating emerging technologies and guiding early-stage development, making it applicable for assessing and analyzing emerging technologies in water treatment. [Methods] In this paper, the existing cases of prospective LCA in the water treatment field are selected and summarized, including functional unit definition, system boundary delimitation, foreground and background data establishment, and uncertainty and sensitivity analyses. [Results] In the water treatment field, functional units and system boundaries in prospective LCA can generally maintain consistency with conventional LCA. Foreground data establishment methods are categorized into scenario projection and scaling effect models. However, no universally applicable approach yet exists, so selection depends on the research objective. Background data can be enhanced through electricity mix projections to improve assessment accuracy. Prospective LCA exhibits

[收稿日期] 2025-06-04

[基金项目] 中节能集团重大科技创新项目(cccep-zdkj-2021-006)

[作者简介] 邹茂君(1998—), 男, 研究方向为污水处理和生命周期评价, E-mail: muffin1998@163.com。

[通信作者] 张锦杨(1997—), 女, 研究方向为工业废水处理及资源化综合利用相关技术, E-mail: zhangjinyang@mcwongtech.com。

significantly heightened data uncertainty, necessitating rigorous uncertainty and sensitivity analyzes to ensure result reliability. [**Conclusion**] Prospective LCA typically focuses on modeling a future time, requiring projections of functional units, system boundaries, foreground and background data based on anticipated technological states. Furthermore, existing prospective LCA studies predominantly adopt traditional LCA frameworks, lacking dedicated assessment systems. There is an urgent need to develop specialized prospective LCA frameworks and method ologies.

Keywords prospectiveness life cycle assessment (LCA) novel technology water treatment scale-up method

实现“30·60”“双碳”目标,迫切需要准确评估方法用于引导低碳新兴技术的发展^[1]。全生命周期评价(LCA)是评估技术环境影响的权威工具,但其主要面向已商业化的成熟技术[技术准备水平(TRL)为7~9级],其建模基于当前或近期的

稳定数据^[2]。当评估对象转向处于研发早期(TRL为2~5级)的新兴技术时,传统LCA因无法有效应对技术未来规模化和背景系统演变带来的不确定性而面临严峻挑战^[3-4],两者的区别如表1所示。

表1 前瞻性LCA和传统LCA的区别
Tab. 1 Differences between Prospective LCA and Conventional LCA

项目	传统 LCA	前瞻性 LCA
定义	在当前或接近时间建模	在将来的时间建模
技术	研究目前正在使用的技术	研究与未来相关的新兴技术
前景数据	对当前系统进行了建模,可靠的数据源包括:生命周期清单(LCI)数据库;已有的LCA研究	对系统和生产规模的未来场景进行了建模,可靠的数据源包括:实验室或中试数据;LCI数据库;科学文章;专利;专家访谈过程模拟
背景数据	对当前背景系统进行建模	对背景系统的未来场景进行了建模;尽量避免原始和背景系统之间的时间不匹配;有可能根本不对背景系统进行建模

为克服此局限,前瞻性LCA作为面向未来的LCA方法应运而生。前瞻性LCA被明确界定为“对新兴技术在未来某一特定时间点进行建模的LCA研究”^[2]。其核心特征在于其建模时间点设定于技术预计规模化的未来,而非当前^[2,5]。这意味着其评估框架必须同时应对大量的挑战,如前景数据的预测(如何将实验室尺度的数据可靠地放大至未来工业规模)、背景数据的更新(如何反映未来能源结构、材料生产等背景系统的变化)^[2,6]。前瞻性LCA通过在技术路线可塑性最强的研发阶段介入,能够及早识别环境瓶颈,为“绿色化”技术路径选择提供决策支持^[7-8],从而以最小成本获得最大环境效益^[1]。其方法论自1999年概念初现^[9]以来不断演进,特别是2014年后进入快速发展期(图1),应用已拓展至纳米材料^[10-11]、新能源^[12]等多个前沿领域。

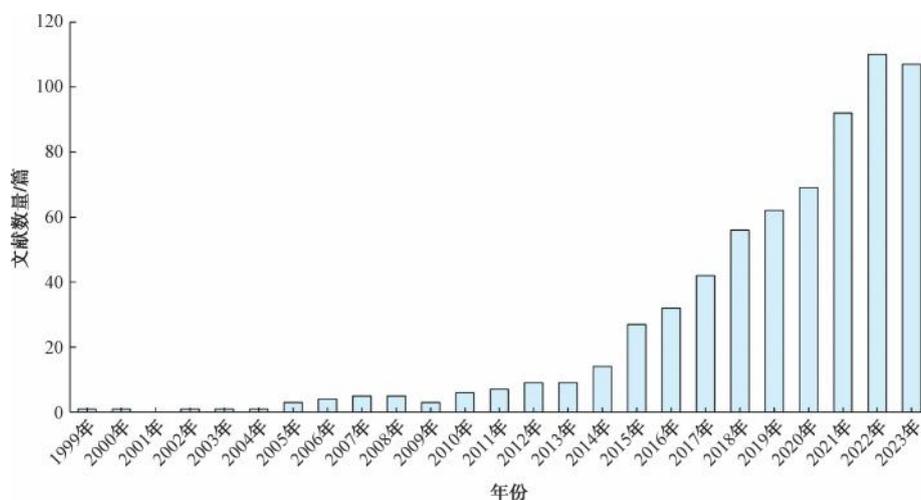
水处理行业是能源与资源消耗的重要部门,在提质增效与碳减排的双重压力下,其绿色转型高度依赖新兴技术的突破^[13]。前瞻性LCA为评估这些技术(如能源回收、资源回收、低碳工艺)的潜在环境绩效提供了前瞻性视角,有助于避免高碳排放技

术路线被锁定,引导行业向可持续发展方向演进。然而,前瞻性LCA方法本身仍存在数据不确定性高、标准化框架缺失等挑战^[3-4],其在水处理领域的应用尚处于发展阶段,亟需系统性的方法总结与探讨。

因此,本文旨在系统梳理前瞻性LCA在水处理领域的发展与应用现状。通过分析代表性案例(表2),重点探讨其建模过程中的核心方法问题,包括功能单位与系统边界的界定、前景与背景数据的获取与预测方法,以及关键的不确定性与敏感性分析策略,以为推动前瞻性LCA在水处理领域的规范应用提供参考,助力行业低碳技术创新与“双碳”目标实现。

1 前瞻性LCA案例选取

本文选择对一些废水处理相关领域的前瞻性LCA案例进行深入研究(表2^[6,8,14-29]),选择的案例都符合对前瞻性LCA的定义。由于前瞻性LCA的技术框架尚不完善,部分文章对于前瞻性LCA的描述并不清晰,希望通过对这些案例进行研究总结以促进前瞻性LCA研究的发展。



注:数据来源于 Web of Science,共 667 篇文献,以“life cycle assessment”或“life-cycle assessment”或“LCA”和“prospective”或“ex-ante”或“anticipatory”为主题进行检索。

图 1 前瞻性 LCA 年发文量

Fig. 1 Annual Publications of Prospective LCA

表 2 前瞻性 LCA 案例研究^[6,8,14-29]

Tab. 2 Cases Study of Prospective LCA^[6,8,14-29]

案例	功能单位和系统边界	建模方法	前景数据来源	未来时间点模型建立方法	背景数据来源	不确定性和敏感性分析	参考文献
新型和传统多层硅/聚乙烯亚胺化合物合成路线对比	去除 1 mg Cu ²⁺ ; A ^{1,2}	归因	实验室	比例放大	Ecoinvent 数据库	蒙特卡洛分析	[14]
纳米吸附材料去除污水中的汞	去除 1 kg Hg; A ^{1,2}		实验室	—	Ecoinvent 数据库	敏感性分析	[8]
序批式生物滤池颗粒反应器耦合太阳能热泵系统与传统活性污泥污水处理系统对比	处理 1 m ³ 污水; G	归果	中试	—	Ecoinvent 数据库、预测电力结构	敏感性分析	[15]
利用阳极镁沉淀磷酸铵镁并产生氢气的新型电化学回收技术电化学	处理 1 m ³ 污水; D ²	归果	实验室、文献	情景预测	Ecoinvent 数据库	—	[16]
对比未来污泥处置方案对环境的影响	处理 1 t 污水; F ^{1,2}	归果	文献	情景预测	Ecoinvent 数据库	蒙特卡洛分析、全局敏感性分析	[17]
炼油厂废水回收用于不同的工业用途与现有废水处理对比	处理 1 m ³ 废水; E	归果	中试	比例放大	Ecoinvent 数据库、预测电力结构	对电力进行敏感性分析	[18]
零排放盐水处理回收系统	处理 1 m ³ 盐水; A ^{1,2}	归果	实验室	—	Ecoinvent 数据库	Clavreul 等 ^[19] 的敏感性分析	[20]
微藻处理废水回用系统	处理 1 m ³ 废水; B ²		中试	比例放大	—	敏感性分析	[21]
悉尼水务公司在 2021 年升级改造后总体运营	输送 1 m ³ 水; H ²		实际运行数据、文献、估算	未来情景预测	—	定性评价	[22]
西班牙钢铁工业海水淡化	处理 1 t 水; A ²	归因	实际运行数据	—	Ecoinvent 数据库、预测电力结构	—	[6]
城市污水回用于林木灌溉	生产 1 kg 油桃; A ²	归果	实验室、文献	—	Ecoinvent 数据库	蒙特卡洛分析	[23]

(续表2)

案例	功能单位和系统边界	建模方法	前景数据来源	未来时间点模型建立方法	背景数据来源	不确定性和敏感性分析	参考文献
利用电渗析从氯离子和乙二醇混合物中回收氯离子和乙二醇	回收 1 kg NaCl; A ^{1,2}		实验室、中试	软件模拟	Ecoinvent 数据库	—	[24]
电化学氧化处理废水	处理 250 mL 污水; A ²	归果	实验室、文献	热力学和动力学模拟、经验规则计算以及类似的技术估算	Ecoinvent 数据库	蒙特卡洛分析	[25]
乳制品废水生产挥发性脂肪酸	生产 1 kg 挥发性脂肪酸; A ²		实验室	Piccinno 等 ^[26] 的放大方法	Ecoinvent 数据库	敏感性分析	[27]
香蕉皮生产活性炭去除废水中的亚甲基蓝	生产 1 kg 活性炭		实验室	对电力消耗进行优化	Ecoinvent 数据库	—	[28]
印染废水处理与回用系统	处理 1 m ³ 水或 1 kg COD; B ^{1,2}		实际运行数据	情景预测	Ecoinvent 数据库、电力结构预测	敏感性分析、蒙特卡洛分析	[29]

注: ¹—不包含污水厂建设, ²—不包含污水厂生命终期处置; COD—化学需氧量; A—废水处理不包括污泥管理; B—废水和污泥处理不包括运输; C—包括运输在内的废水和污泥处理; D—废水处理直至污泥处置; E—整个废水处理包含废水收集过程; F—污泥处理; G—整个废水处理过程, 包括能源、肥料和水的替代; H—污水处理厂作为城市供水系统的组成部分; 下同。

2 前瞻性 LCA 案例研究

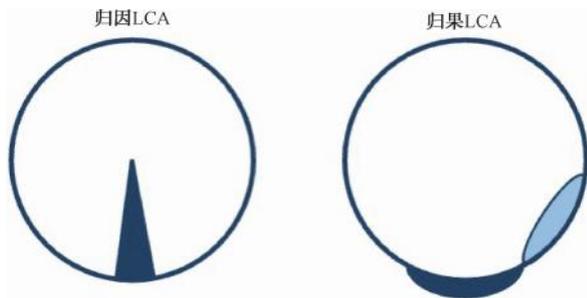
2.1 功能单位及系统边界

在研发早期阶段, 新兴技术的功能单位和系统边界都可能会随着对该技术了解程度的不同而发生变化, 导致前瞻性 LCA 出现可比性问题。处于早期阶段的系统在扩大规模时很容易发生变化, 随着产品的成熟, 其功能也会随之发生变化^[30]。案例中功能单位的选择, 都是和研究对象的功能直接相关的。例如, 在量化用于去除污水中重金属离子的新型有机/无机复合材料的设计、合成和测试过程中的潜在环境影响中, 功能单位选择为移除 1 mg Cu²⁺^[14], 另一种新型纳米吸附材料的研究中的功能单位选择为去除 1 kg Hg^[8]; 在评估离网太阳能辅助热泵从序批式生物滤池颗粒反应器的废水中回收热能的环境影响时, 其功能单位为处理 1 m³ 的污水^[15]; 在对电化学处理污水的回收技术进行评估时, 其功能单位为处理 1 m³ 的污水^[16]; 在评估电化学氧化处理污水装置的环境影响时, 其功能单位为处理 250 mL 污水^[25]。可以发现, 污水处理系统的功能单位选择仍然是处理 1 m³ 的污水、特定体积的污水或是处理一定量的污染物^[13]。在污水资源化案例中, 则是以获得 1 kg 的资源物作为功能单位。由于前瞻性污水处理系统的功能并不容易随着技术的成熟而发生变化, 这些功能单位大多与实验室阶段采用的相同。

目前, 废水处理领域的大部分前瞻性 LCA 的研究目标在于评估其替代现有技术的潜力, 这种前瞻性 LCA 可以被称作“替代型”, 那么功能单位的定义就可以和被替代技术的功能单位相同。这类“替代型”的优势在于可以减少模型的不确定性。但这类 LCA 研究也可能产生不准确的结果, 其在规模上存在不确定性, 可能导致功能的改变^[31]。Simon 等^[32]创建的方法可以对实验室规模工艺进行功能分析, 这对系统功能的定义非常有用。还需要注意, 当实验室规模新兴技术的功能尚不明确时, 定义功能单位需要更加谨慎。可以将功能单位定义在一个合理的范围内, 以避免新兴技术的功能变化对结果的影响^[33]。

归因 LCA 和归果 LCA 的区别: 归因模型用于估计全球环境负担的哪一部分属于研究对象, 归果模型可用于定量评估特定决策或变化对环境的影响^[34]。污水处理系统的前瞻性 LCA, 大部分都选择了归果 LCA 进行建模^[15-17, 23]。归果 LCA 被用于描述决策对环境造成的影响^[35], 而归果 LCA 和归因 LCA 都可以是前瞻性或回顾性的^[36], 因此归因 LCA 也是可行的^[6, 14]。对于归果 LCA, 本文推荐采用 4 步法进行建模^[35], 但需要注意系统拓展 (SE) 法的正确用法, 还需区分使用平均数据和边际数据。此外, 使用 SE 法建立的系统边界可以公平地比较有 2

种产物和 1 种产物的系统^[17]。当 SE 也无法妥善解决多功能问题时再采用其他的分配方法,这适用于多功能系统无法进行简单分割的情形^[35]。Azapagic 等^[37]提出了一种边际分配的方法用于解决系统的多功能问题。当前,废水的资源化利用已成为未来污水处理行业的趋势,如电解处理后的废水或劣质水制氢^[38],废水直接回用^[23],这些情景下的污水资源化会因再利用方式多样而出现多功能问题,ISO 14044: 2006 中也提倡采用 SE 方法解决这类问题。图 2^[39]为归因 LCA 和归果 LCA 的示意图。



注:圆圈代表世界的总负担。

图 2 归因 LCA 与归果 LCA^[39]

Fig. 2 Attributional LCA and Consequential LCA^[39]

在水处理领域,前瞻性 LCA 的功能单位与传统 LCA 基本一致。但需要注意,污水处理技术在实验

室阶段和商业阶段可能因目标污染物的改变,而发生功能性变化。系统边界需要明确规定哪些单元过程属于产品系统的一部分。最全面的系统边界定义是从“摇篮”到“坟墓”。确定系统边界的难点在于使用和报废阶段的详细数据在早期阶段是未知的,而系统边界的选择可能会影响结果的影响贡献^[40]。因此,选择错误的系统边界可能会导致错误的结论,从而影响产品的优化方向。在 LCA 研究中忽略某些阶段可能会影响结果的可比性^[4],但大多研究都没有提及系统边界确定时涉及的问题。在 LCA 研究中,通常会假设组装阶段和报废阶段是相同的,而前瞻性 LCA 不应假设存在完全相同的阶段^[41]。前瞻性 LCA 系统边界划定仍然可以沿用传统 LCA 在污水处理系统的边界划分方法,将污水处理的系统边界划分为 A~H(图 3),在时间边界内还可以进一步地划分为建设、运行和生命终期处置 3 个阶段。此外,当新工艺生产的产品质量会直接影响下游加工的质量时,需要将下游工艺纳入系统边界^[42]。对于可能受影响的上游活动,可以根据市场变化改变系统边界,将相关活动纳入已定义的情景中^[7]。存在系统边界不确定性时,可对多个系统边界进行不同的建模。

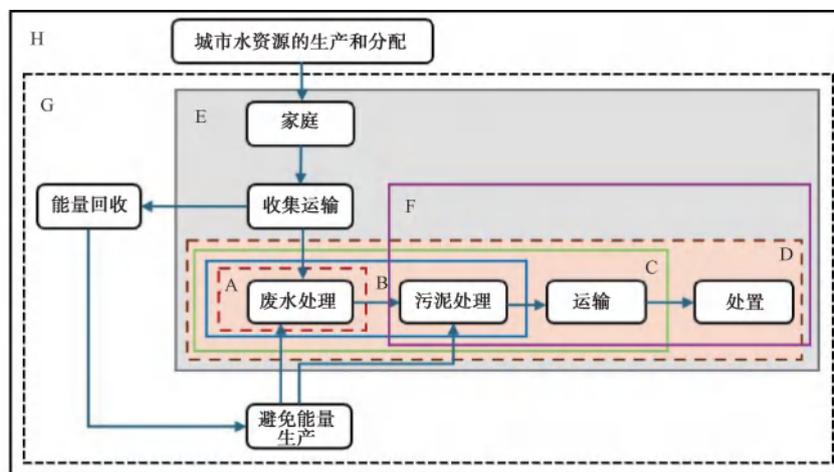


图 3 污水处理厂 LCA 的系统边界示例

Fig. 3 Examples of Physical System Boundaries for LCA of WWTP

2.2 前景数据

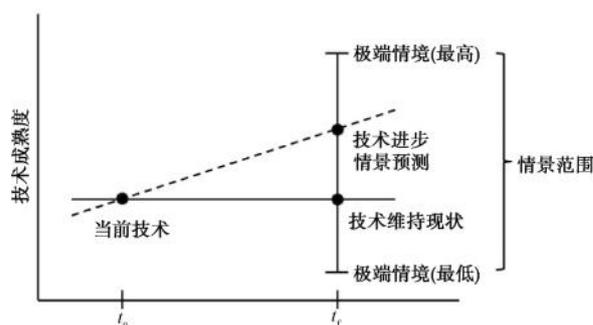
一旦选定了研究的目标,如何对相关问题进行建模就成为关键的问题,主要难点包括如何获得可靠的数据清单,以及如何将低 TRL 的清单数据进行放大。前瞻性 LCA 研究中较为有价值的数据来源,

包括实验室或中试数据、LCI 数据库、科学文章、专利、专家访谈和过程模拟,但使用这些数据源构建的前瞻性 LCI 数据质量通常不高。可以采用 Spreafico 等^[43]提出的从专利中收集数据以构建高质量的前瞻性 LCI 方法,或是使用 Wickerts 等^[44]提出的 8 步

法构建生产过程尚未成熟材料的前瞻性 LCI。根据案例 LCI 放大的方法,可以将方法分为尺度放大以及预测,这 2 种方法的区别在于,尺度放大是指将实验室或小规模技术的参数扩展到工业化规模的过程;预测则是构建多种未来可能的情景,评估不同外部条件下技术的环境影响,忽略技术的发展过程。这 2 种方法也可以同时使用。

在传统的 LCA 研究中,原始数据和模型是按照现在时间点(t_0)建立的,如图 4 所示。但是在前瞻性 LCA 研究中,建模时间点是处于未来时间点(t_f)。新兴技术的规模在 t_f 时相较于 t_0 时已经扩大,在 t_f 时刻的建模需要考虑该技术在未来的情景^[45],特别是该技术在未来的生产规模。技术性能参数与材料和能源的输入相关,是时间和未来生产规模的函数。例如,20 世纪 40 年代—21 世纪初,计算机所需的能量减少了多个数量级。由此可见,技术在未来的变化并不容易估计。预测方法可以有效地预测技术在未来的系统和规模,可以分为情景预测和情景范围预测 2 种方法。在早期的 LCA 研究中,情景预测就已被用于预测技术对环境的影响^[46],该方法通过构建未来情景,用于评估技术在不同外部条件下受到的环境影响,并分析技术在不同外部驱动因素下的环境表现。而情景范围预测方法是对未来的情景进行一个范围的预测,这种方法可以解决对未来情景预测不准确的问题,但是在实际研究中却很少被使用,这是因为前瞻性 LCA 研究开展大多是为了进行对比性研究,其目标是用于替代目前的商业规模的技术,采用情景范围预测方法则很难开展对比类型的研究。情景预测大多采用结果模拟^[47]、文献结论、专家意见^[48]、建模数据^[49]和学习曲线^[50]等方法建立未来情景;情景范围预测一般采用假设、模拟和建模数据等来实施情景范围。Spielmann 等^[51]通过确定技术和社会经济变量后,再利用这些变量确定其中的关键变量来构建情景。

当需要评估技术规模化对资源和环境造成的影响时,通常使用尺度放大的方法,将处于实验室规模的新兴技术放大到商业规模。在此过程中,新兴技术的性能可能会发生变化,需要使用合适的放大方法。例如,Elginoz 等^[27]使用 Piccinno 等^[26]提出的 5 步放大法估算商业规模的数据,这类方法更倾向于描述技术从 t_0 到 t_f 间的变化,能更加准确地描述技



注:虚线为情境预测。

图 4 前瞻性 LCA 中 2 种情景类型

Fig. 4 Schematic Illustration of 2 Different Scenarios Types in Prospective LCA

术在未来的参数;Piccinno 等^[51]在随后的研究中,也使用了 5 步放大法来预测未来工业规模纳米纤维素生产的环境影响。在目前的研究中,废水领域的前瞻性 LCA 大多没有考虑放大过程或是做出相关的假设^[17],而是选择直接对试验数据进行线性等比放大^[14-15],这是因为大部分的研究都是在实验室阶段开展相关研究,缺少相关技术或类似技术的放大过程提供参考。在废水零排放和资源回收技术的实验室尺度和中试尺度的前瞻性 LCA 对比研究中,发现实验室和中试尺度的数据清单变化并不是线性的^[20],因此直接使用线性等比放大的方式将技术尺度进行放大并不可靠。研究发现,放大后的技术产生的环境影响大多会变小^[47],也会存在技术开发阶段环境影响较低情况^[52]。总之,技术在未来的变化并不是那么容易估计的。

采用适合的方法和方式,可以有效地对未来技术进行预测。方法包括,基于观察技术链的学习曲线^[50],机器学习算法^[53],基于流程设计的方法^[26],根据中试工厂 LCI 数据的商业规模工厂影响预测法^[54],融合中试数据、参考商业数据以及化学计量比的放大函数法^[55],用于规模缩放的比例因子开发法^[56]以及基于代理技术与情景估计数据的前瞻性 LCA 未来尺度放大应用法^[57]。同时,还有研究^[25]结合热力学和动力学模拟、经验公式和相似技术估算,实现对试验数据的放大。随着人工智能(AI)技术的发展,已有研究^[58]将 AI 技术引入 LCI 数据库的建立中,可以提高 LCA 结果的准确性。

技术规模化评估需考虑实验室到商业规模放大过程中的非线性性能变化,摒弃直接线性等比放大试验数据的简化做法。当前,废水领域前瞻性 LCA

常因技术早期数据缺失而产生预测偏差。对此,应优先采用分阶段动态放大方法,并结合中试与商业数据构建非线性函数或比例因子模型。同时,可以结合多种放大方法,如机器学习、AI 增强数据库预测技术、热力学模拟以及流程设计方法,建立高精度数据库。

2.3 背景数据

由于缺少前瞻性的背景数据库,废水领域的大部分研究仍直接沿用现有的数据库^[14,16-17]。目前 LCI 较为成熟的数据库有瑞士的 Ecoinvent 数据库、德国的 Gabi 数据库、英国的 Boustead 数据库、美国的 USLCI 数据库、澳大利亚的 LCI 数据库等^[59];国内的数据库有四川大学的 CLCD 数据库、中国科学院生态环境研究中心的 RCESS 数据库等。但这些数据库都是回顾性的,其所包含的技术和新兴技术在时间尺度上存在显著差距。根据 Weidema 等^[60]提出的谱系矩阵,这类数据通常处于第 4 级或第 5 级,且时间尺度通常是该矩阵 5 个指标中最主要的不确定性来源。电力在大多数污水处理系统的环境影响中贡献占比较高^[15],为实现将全球温升控制在 1.5 °C 以内的目标,提高可再生能源在电力结构中的占比已成为必然趋势。为更准确地预测环境影响,可构建面向 t_i (如 2030 年)的能源结构清单作为电力背景数据集。在炼油厂废水回收用于不同的工业用途与现有废水处理对比的研究中,也采用了相同的方法^[18];基于 Ecoinvent 数据库电力清单,结合国际能源署的电力结构预测数据,构建了 2030 年的预测电力清单。也有研究^[6]基于 Ecoinvent 数据库电力清单,结合全球环境综合评估模型(IMAGE)对电力结构的预测,构建了未来电力背景清单。

对新兴技术进行前瞻性研究时,应采用面向同一目标时间点的背景数据库,即前瞻性背景数据库。构建前瞻性背景数据库的主要难题在于如何确定背景数据库所包含的技术在某个 t_i 的关键参数。这些参数高度依赖技术发展,正如风力或光伏发电技术在过去所经历的变化一样,因此需要将技术发展趋势纳入考虑。因此,为开展可靠的前瞻性 LCA,还需对背景技术的进步进行建模。然而,在商业规模上对背景系统进行未来建模并非易事,例如,未来电力供应的数据可通过预测模型获得^[15],但未来热能供应的数据则较为匮乏。这种未来数据的缺失将导致时间不匹配、数据质量较差等问题。前瞻性的

背景数据的构建方法同样可以参考前景数据建立过程中提到的途径。

有 LCA 研究^[20]表明,能源和化学品仍是影响前瞻性 LCA 结果准确性的关键因素,其中化学品的大部分环境影响主要源于其生产国的能源结构。因此,可采用情景预测的方法对当地能源结构进行预测,构建前瞻性的电力背景数据清单。将现有背景数据(Ecoinvent 数据库数据)根据电力结构预测进行调整,构成前瞻性电力背景数据库以及影响评估模型用于评估 t_i 的新兴技术,可以减少电力带来的不确定性^[6]。此外,还可基于国际能源机构提供的情景模拟数据,预测未来的基准能源生产情景,进而构建相关的背景数据库^[61]。在前文提及的情景分析方法中,则是采用了一组代表不同温室气体强度的电力组合:挪威(低碳排放)、北欧(低碳排放)、中欧(中碳排放)、美国(中碳排放)和中国(高碳排放)电力组合,以评估饮用水膜过滤系统的环境影响^[62],类似的方法也被用于电动车前瞻性 LCA 的研究中^[12]。Arvidsson 等^[10]在其纳米纤维素研究中,设定了当地电力结构为 50%水电和 50%核电作为基线情景,同时将 100%燃煤发电方案作为极端情景。

2.4 不确定性和敏感性分析

前瞻性 LCA 研究中的前景数据集通常来自科学文章、专利、专家访谈、未发表的试验数据、流程建模。对新型和传统多层硅/聚乙烯亚胺化合物合成路线对比的研究中的数据为实验室数据^[14]。序批式生物滤池颗粒反应器耦合太阳能热泵系统与传统活性污泥污水处理系统对比研究中的数据为中试数据^[15]。尽管中试数据放大后得到的数据会更加可靠,但技术已经相对成熟,其可变化程度降低,因此前瞻性 LCA 研究开展时间点需要权衡。还有些数据来自文献或估算^[22],这些数据的质量会更差,传统 LCA 的数据问题在前瞻性 LCA 的研究中会进一步恶化。此外,前景和背景系统都会随时间发生变化,这会导致结果的不确定程度随时间加剧^[52],因此需要开展不确定性或敏感性分析,这对于决策驱动的生命周期评估至关重要^[63]。

敏感性分析的一个定义是,研究如何将模型输出(数值或其他)中的不确定性分配至模型输入中的不同不确定性源^[64]。而不确定性分析是为了确

定结果的不确定性大小^[65],即,当选定的输入假设和参数在其存在范围内自由变化时,模型会产生什么结果,这和敏感性分析是相似的。因此,在大部分的研究中,将敏感性分析和不确定性分析都称作敏感性分析。而本文会将敏感性分析和不确定性分析分开描述。

不确定性分析能够进行更深入的解释,并同时提高达成结论的透明度和稳健性^[66]。因此,进行不确定性分析是必要的,特别是对于不确定性很高的前瞻性 LCA。目前 LCA 的不确定性可分为 2 类,包括参数不确定性和情景不确定性。参数不确定性是由于不确定的输入数据,参数不确定性存在于每个阶段,技术开发初期的不确定性最高^[4]。情景不确定性是 LCA 的结果是基于建模过程中标准化选择导致的,在目标和范围阶段进行假设时会遇到情景不确定性^[30]。所有的不确定性都会在前瞻性 LCA 中产生,因此需要谨慎地对前瞻性 LCA 结果进行讨论,并对结果进行不确定性分析。这里主要探讨参数的不确定性。Marini 等^[67]通过使用 Sobol 指数来识别对前瞻性 LCA 中的整体不确定性有贡献的参数。案例中的研究大多开展了不确定性分析,但对其处理和讨论方式各不相同。Ravi 等^[17]采用蒙特卡洛分析法分析结果的不确定性,同时采用 Saltelli 等^[65]和 Borgonovo 等^[68]提出的方法进行全局敏感性分析,确定了输入的关键。Ravikumar 等^[69]介绍了一种统计检验方法,以发现新兴技术之间 LCA 结果的显著差异。谱系矩阵方法^[70]可用于解释分析数据不确定性,并强调了新兴技术 LCA 中沟通不确定性的重要性,但是该方法是一个半定量的方法。在谱系矩阵基础上产生的不确定因子法,可用于量化数据的不确定性^[71]。

国际标准化组织(ISO)和联合研究中心(JRC)建议进行蒙特卡洛分析解决 LCA 中的不确定性,以支持结论的严格性。蒙特卡洛分析的运行次数由研究者设定,通常为 1 000~10 000 次。案例中的研究在分析中都只考虑了前景数据的标准差以及参数分布,背景数据的不确定性则沿用 Ecoinvent 数据库中的默认值,因此本文只对前景数据的标准差和参数分布确定方法进行讨论,但一些研究^[23]并没有说明具体的标准差或参数分布确定方法,通常都是根据试验参数对其分布进行假设^[25]。Barjoveanu 等^[14]通过运行基于这些假设情景生成的均匀分布来估计

前景数据的标准差。但蒙特卡洛分析仅用于分析结果的不确定性,可以使用 Saltelli 等^[65]和 Borgonovo 等^[68]提出的方法对输入参数进行不确定性分析^[17]。同时还应该注意,归果 LCA 模型的背景数据库在进行蒙特卡洛分析中会发生“放大效应”,这会导致计算运行出现极高或极低的变化,SimaPro 软件发现,计算运行结果超出 15 个数量级范围时,将会直接报错。

从案例中也可以发现,采用归果 LCA 模型的研究中,大多是使用敏感性分析或全局敏感性分析等。敏感性分析的关键在于如何合理地选择对结果影响最大的输入参数,可以分析一个或多个输入参数。例如,Muñoz 等^[15]使用输入参数上下浮动 10% 的敏感性分析方法,对污泥的处置方式、电力构成等多个输入参数进行敏感性分析,或是仅对电力参数进行敏感性分析^[18]。废水污染物会影响藻类的分解能力,因此,El-Mekawi 等^[21]探究了废水污染物对结果的影响。对于新兴污水处理技术,因为并没有先例参考,Kazemi 等^[8]几乎对所有的输入参数进行了敏感性分析,其中,电力在气候变化中仍然是主要贡献,在 Elginoz 等^[20]的敏感性分析研究中也得到了相同的结论。在乳制品废水生产挥发性脂肪酸的研究中,敏感性分析的关键参数为加热设备的效率^[27]。Clavreul 等^[19]的方法通过计算参数上下浮动 10% 的敏感度比,以评估参数不确定性对特征化结果的影响。

3 结论和展望

本文通过对水处理领域前瞻性 LCA 案例的系统分析,得出以下结论。

(1)功能单位及系统边界:污水处理系统的前瞻性 LCA 功能单位多采用“处理 1 m³ 污水”或“去除单位污染物”,系统边界可沿用传统 LCA 的划分方式(如 A~H 类)。需注意技术从实验室向商业化推广过程中功能可能发生变化,建议采用合理的功能范围定义或系统扩展法以增强模型适应性。

(2)前景数据与背景数据:前景数据的建立主要依赖情景预测和尺度放大 2 类方法,但当前缺乏通用放大模型,建议采用结合中试数据、机器学习等方法提升预测精度。背景数据尤其电力结构的动态变化对结果影响显著,应基于权威能源预测[如国际能源机构(IEA)]构建区域化、时序匹配的前瞻性

背景数据库。

(3) 不确定性与敏感性分析: 前瞻性 LCA 数据不确定性显著高于传统 LCA, 必须开展系统的不确定性与敏感性分析。蒙特卡洛分析、全局敏感性分析等方法有助于识别关键参数, 提升结果可靠性, 但需注意背景数据在归果 LCA 模型中的“放大效应”。

总体而言, 前瞻性 LCA 为水处理新兴技术的早期环境评估提供了有力工具, 但其方法体系仍处于发展阶段, 未来需进一步构建统一的方法框架、整合人工智能技术、完善背景数据库, 并拓展适用于未来技术的新型影响评估类别, 以提升其在实际决策中的支持能力。

参考文献

- [1] Schmincke E, Tischner U, Rubik F. How to do ecodesign?: A guide for environmentally and economically sound design [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2000.
- [2] Arvidsson R, Tillman A M, Sandén B A, et al. Environmental assessment of emerging technologies: Recommendations for prospective LCA [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2018, 22 (6): 1286–1294.
- [3] Giesen C V D, Cucurachi S, Guinée J, et al. A critical view on the current application of LCA for new technologies and recommendations for improved practice [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 259: 120904. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120904.
- [4] Hetherington A C, Borrión A L, Griffiths O G, et al. Use of LCA as a development tool within early research: Challenges and issues across different sectors [J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2014, 19(1): 130–143.
- [5] Spielmann M, Scholz R, Tietje O, et al. Scenario modelling in prospective LCA of transport systems. application of formative scenario analysis (11 pp) [J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2005, 10(5): 325–335.
- [6] Baustert P, Igos E, Schaubroeck T, et al. Integration of future water scarcity and electricity supply into prospective LCA: Application to the assessment of water desalination for the steel industry [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2022, 26 (4): 1182–1194.
- [7] Sampaio A P C, Filho M D S M D S, Castro A L A, et al. Life cycle assessment from early development stages: The case of gelatin extracted from tilapia residues [J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2017, 22(5): 767–783.
- [8] Kazemi A, Bahramifar N, Heydari A, et al. Life cycle assessment of nanoadsorbents at early stage technological development [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 174: 527–537. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.10.245.
- [9] Schmoekkel D, Wansel A, Schlothheim G F V. Evaluation of steel products as a base for environmentally sound product design [C] // *Proceedings First International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing*. February 1–3, 1999, Tokyo, Japan. IEEE, 2002: 427–431.
- [10] Arvidsson R, Kushnir D, Sandén B A, et al. Prospective life cycle assessment of graphene production by ultrasonication and chemical reduction [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(8): 4529–4536.
- [11] Walser T, Demou E, Lang D J, et al. Prospective environmental life cycle assessment of nanosilver T-shirts [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(10): 4570–4578.
- [12] Nordelöf A, Messagie M, Tillman A M, et al. Environmental impacts of hybrid, plug-in hybrid, and battery electric vehicles—What can we learn from life cycle assessment? [J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2014, 19(11): 1866–1890.
- [13] Corominas L, Byrne D M, Guest J S, et al. The application of life cycle assessment (LCA) to wastewater treatment: A best practice guide and critical review [J]. *Water Research*, 2020, 184: 116058. DOI: 10.1016/j.watres.2020.116058.
- [14] Barjoveanu G, Teodosiu C, Bucatariu F, et al. Prospective life cycle assessment for sustainable synthesis design of organic/inorganic composites for water treatment [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 272: 122672. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122672.
- [15] Muñoz I, Portillo F, Rosiek S, et al. Prospective environmental and economic assessment of solar-assisted thermal energy recovery from wastewater through a sequencing batch biofilter granular reactor [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 212: 1300–1309. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.12.074.
- [16] Morrissey K G, English L, Thoma G, et al. Prospective life cycle assessment and cost analysis of novel electrochemical struvite recovery in a U. S. wastewater treatment plant [J]. *Sustainability*, 2022, 14(20): 13657.
- [17] Ravi R, Beyers M, Bruun S, et al. Life cycle assessment of struvite recovery and wastewater sludge end-use: A Flemish illustration [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022, 182: 106325. DOI: 10.1016/j.resconrec.2022.106325.
- [18] Muñoz I, Aktürk A S, Ayyıldız Ö, et al. Life cycle assessment of wastewater reclamation in a petroleum refinery in Turkey [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 268: 121967. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121967.
- [19] Clavreul J, Guyonnet D, Christensen T H. Quantifying uncertainty in LCA-modelling of waste management systems [J]. *Waste Management*, 2012, 32(12): 2482–2495.
- [20] Elginöz N, Papadaskalopoulou C, Harris S. Using life cycle assessment at an early stage of design and development of zero discharge brine treatment and recovery [J]. *Water Resources and Industry*, 2022, 28: 100184. DOI: 10.1016/j.wri.2022.100184.
- [21] El-Mekkawi S A, Doma H S, Ali G H, et al. Case study: Effective use of Microphytes in wastewater treatment, profit

- evaluation, and scale-up life cycle assessment [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2021, 41: 102069. DOI: 10.1016/j.jwpe.2021.102069.
- [22] Lundie S, Peters G M, Beavis P C. Life cycle assessment for sustainable metropolitan water systems planning [J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, 38(13): 3465–3473.
- [23] Moretti M, Passel S V, Camposeo S, et al. Modelling environmental impacts of treated municipal wastewater reuse for tree crops irrigation in the Mediterranean coastal region [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 660: 1513–1521. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.01.043.
- [24] Lu J Q, Kumagai S, Fukushima Y, et al. Combined experiment, simulation, and ex-ante LCA approach for sustainable Cl recovery from NaCl/ethylene glycol by electrodialysis [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2020, 59(45): 20112–20122.
- [25] Sun Y, Bai S W, Wang X H, et al. Prospective life cycle assessment for the electrochemical oxidation wastewater treatment process: From laboratory to industrial scale [J]. *Environmental Science & Technology*, 2023 57(3): 1456–1466.
- [26] Piccinno F, Hirschier R, Seeger S, et al. From laboratory to industrial scale: A scale-up framework for chemical processes in life cycle assessment studies [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 135: 1085–1097. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.06.164.
- [27] Elginöz N, Atasoy M, Finnveden G, et al. Ex-ante life cycle assessment of volatile fatty acid production from dairy wastewater [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 269: 122267. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122267.
- [28] Pereira P H F, Maia L S, Silva A I C D, et al. Prospective life cycle assessment prospective (LCA) of activated carbon production, derived from banana peel waste for methylene blue removal [J]. *Adsorption*, 2024, 30(6): 1081–1101.
- [29] Mao J E, Chen H Y, Xu X Y, et al. Assessing greenhouse gas emissions from the printing and dyeing wastewater treatment and reuse system: Potential pathways towards carbon neutrality [J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 927: 172301. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.172301.
- [30] Miller S A, Keoleian G A. Framework for analyzing transformative technologies in life cycle assessment [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(5): 3067–3075.
- [31] Thonemann N, Schulte A, Maga D. How to conduct prospective life cycle assessment for emerging technologies? A systematic review and methodological guidance [J]. *Sustainability*, 2020, 12(3): 1192.
- [32] Simon B, Bachtin K, Kilig A, et al. Proposal of a framework for scale-up life cycle inventory: A case of nanofibers for lithium iron phosphate cathode applications [J]. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 2016, 12(3): 465–477.
- [33] Hirschier R, Salieri B, Pini M. Most important factors of variability and uncertainty in an LCA study of nanomaterials—Findings from a case study with nano titanium dioxide [J]. *NanoImpact*, 2017, 7: 17–26. DOI: 10.1016/j.impact.2017.05.001.
- [34] Weidema B P, Pizzol M, Schmidt J, et al. Attributional or consequential life cycle assessment: A matter of social responsibility [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 174: 305–314. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.10.340.
- [35] Hauschild M Z, Rosenbaum R K, Olsen S I. Life cycle assessment: Theory and practice [M]. Cham: Springer International Publishing, 2018.
- [36] Herrmann I T, Hauschild M Z, Sohn M D, et al. Confronting uncertainty in life cycle assessment used for decision support: Developing and proposing a taxonomy for LCA studies [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2014, 18(3): 366–379.
- [37] Azapagic A, Clift R. Allocation of environmental burdens in multiple-function systems [J]. *Journal of Cleaner Production*, 1999, 7(2): 101–119.
- [38] Chauhan D, Ahn Y H. Alkaline electrolysis of wastewater and low-quality water [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 397: 136613. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.136613.
- [39] Weidema B. Market information in life cycle assessment [M]. Odense: Danish Environmental Protection Agency, 2003.
- [40] Suh S, Lenzen M, Treloar G J, et al. System boundary selection in life-cycle inventories using hybrid approaches [J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, 38(3): 657–664.
- [41] Janssen M, Tillman A M, Cannella D, et al. Influence of high gravity process conditions on the environmental impact of ethanol production from wheat straw [J]. *Bioresource Technology*, 2014, 173: 148–158. DOI: 10.1016/j.biortech.2014.09.044.
- [42] Hospido A, Davis J, Berlin J, et al. A review of methodological issues affecting LCA of novel food products [J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2010, 15(1): 44–52.
- [43] Spreafico C, Landi D, Russo D. A new method of patent analysis to support prospective life cycle assessment of eco-design solutions [J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2023, 38: 241–251. DOI: 10.1016/j.spc.2023.04.006.
- [44] Wickerts S, Arvidsson R, Nordelöf A, et al. Prospective life cycle assessment of sodium-ion batteries made from abundant elements [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2024, 28(1): 116–129.
- [45] Frischknecht R. Life cycle inventory analysis for decision-making: Scope-dependent inventory system models and context-specific joint product allocation [J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 1998, 3(2): 67.
- [46] Fukushima Y, Hirao M. A structured framework and language for scenario-based life cycle assessment [J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2002, 7(6): 317–329.
- [47] Corona A, Ambye-Jensen M, Vega G C, et al. Techno-environmental assessment of the green biorefinery concept: Combining process simulation and life cycle assessment at an early design stage [J]. *Science of the Total Environment*, 2018,

- 635: 100–111. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.03.357.
- [48] Haupt G. Learning from experts: Fostering extended thinking in the early phases of the design process[J]. *International Journal of Technology and Design Education*, 2015, 25(4): 483–520.
- [49] Fang L L, Valverde-Pérez B, Damgaard A, et al. Life cycle assessment as development and decision support tool for wastewater resource recovery technology[J]. *Water Research*, 2016, 88: 538–549. DOI: 10.1016/j.watres.2015.10.016.
- [50] Bergesen J D, Suh S. A framework for technological learning in the supply chain: A case study on CdTe photovoltaics[J]. *Applied Energy*, 2016, 169: 721–728. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.02.013.
- [51] Piccinno F, Hischier R, Seeger S, et al. Predicting the environmental impact of a future nanocellulose production at industrial scale: Application of the life cycle assessment scale-up framework[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 174: 283–295. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.10.226.
- [52] Arvidsson R, Molander S. Prospective life cycle assessment of epitaxial graphene production at different manufacturing scales and maturity[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2017, 21(5): 1153–1164.
- [53] Sousa I, Wallace D, Eisenhard J L. Approximate life-cycle assessment of product concepts using learning systems[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2000, 4(4): 61–81.
- [54] Shibasaki M, Fischer M, Barthel L. Effects on life cycle assessment—Scale up of processes[M]//*Advances in life cycle engineering for sustainable manufacturing businesses*. London: Springer London, 2007: 377–381.
- [55] Tecchio P, Freni P, Benedetti B D, et al. Ex-ante life cycle assessment approach developed for a case study on bio-based polybutylene succinate[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 112: 316–325. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.07.090.
- [56] Caduff M, Huijbregts M A J, Koehler A, et al. Scaling relationships in life cycle assessment: The case of heat production from biomass and heat pumps[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2014, 18(3): 393–406.
- [57] Villares M, Işıldar A, Giesen C V D, et al. Does ex ante application enhance the usefulness of LCA? A case study on an emerging technology for metal recovery from e-waste[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2017, 22(10): 1618–1633.
- [58] Fnais A, Rezguy Y, Petri I, et al. The application of life cycle assessment in buildings: Challenges, and directions for future research[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2022, 27(5): 627–654.
- [59] 马逍天. 我国水足迹量化模型构建与应用研究[D]. 济南: 山东大学, 2020.
Ma X T. Construction and application of water footprint impact quantitative model in China[D]. Jinan: Shandong University, 2020.
- [60] Weidema B P, Wesnæs M S. Data quality management for life cycle inventories—An example of using data quality indicators[J]. *Journal of Cleaner Production*, 1996, 4(3/4): 167–174. DOI: 10.1016/S0959-6526(96)00043-1.
- [61] Gibon T, Wood R, Arvesen A, et al. A methodology for integrated, multiregional life cycle assessment scenarios under large-scale technological change[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(18): 11218–11226.
- [62] Manda B M K, Worrell E, Patel M K. Innovative membrane filtration system for micropollutant removal from drinking water—prospective environmental LCA and its integration in business decisions[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 72: 153–166. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.02.045.
- [63] Wender B A, Foley R W, Prado-Lopez V, et al. Illustrating anticipatory life cycle assessment for emerging photovoltaic technologies[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(18): 10531–10538.
- [64] Saltelli A. Sensitivity analysis for importance assessment[J]. *Risk Analysis*, 2002, 22(3): 579–590.
- [65] Saltelli A, Aleksankina K, Becker W, et al. Why so many published sensitivity analyses are false: A systematic review of sensitivity analysis practices[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2019, 114: 29–39. DOI: 10.1016/j.envsoft.2019.01.012.
- [66] Gargalo C L, Cheali P, Posada J A, et al. Assessing the environmental sustainability of early stage design for bioprocesses under uncertainties: an analysis of glycerol bioconversion[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 139: 1245–1260. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.08.156.
- [67] Marini C, Blanc I. Towards prospective life cycle assessment: How to identify key parameters inducing most uncertainties in the future? application to photovoltaic systems installed in Spain[M]//*Computational science and its applications-ICCSA 2014*. Cham: Springer International Publishing, 2014: 691–706.
- [68] Borgonovo E, Peccati L. Global sensitivity analysis in inventory management[J]. *International Journal of Production Economics*, 2007, 108(1/2): 302–313. DOI: 10.1016/j.ijpe.2006.12.027.
- [69] Ravikumar D, Seager T P, Cucurachi S, et al. Novel method of sensitivity analysis improves the prioritization of research in anticipatory life cycle assessment of emerging technologies[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(11): 6534–6543.
- [70] Gavankar S, Suh S, Keller A A. The role of scale and technology maturity in life cycle assessment of emerging technologies: A case study on carbon nanotubes[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2015, 19(1): 51–60.
- [71] Frischknecht R, Jungbluth N, Althaus H J, et al. The ecoinvent database: Overview and methodological framework (7 pp)[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2005, 10(1): 3–9.