



应用化工
Applied Chemical Industry
ISSN 1671-3206, CN 61-1370/TQ

《应用化工》网络首发论文

题目： 污泥处理处置技术的生命周期评价研究进展
作者： 纪龙涛，顾敦罡，陆嘉麒，蔡斌，车磊，李光辉
DOI： 10.16581/j.cnki.issn1671-3206.20240029.001
收稿日期： 2023-07-20
网络首发日期： 2024-01-30
引用格式： 纪龙涛，顾敦罡，陆嘉麒，蔡斌，车磊，李光辉. 污泥处理处置技术的生命周期评价研究进展[J/OL]. 应用化工.
<https://doi.org/10.16581/j.cnki.issn1671-3206.20240029.001>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

污泥处理处置技术的生命周期评价研究进展

纪龙涛¹, 顾敦罡¹, 陆嘉麒¹, 蔡斌², 车磊², 李光辉¹

(1.上海工程技术大学 化学化工学院, 上海 201620; 2.浙江宜可环保科技有限公司, 浙江 湖州 313000)

*通信作者 顾敦罡 (1990—), 男, 博士, 讲师。E-mail: dgu@sues.edu.cn

摘要 污泥来源广泛, 产量大, 危害环境, 但也是一种错位的资源, 需要得到适当的处理处置。综述了目前应用较多的污泥处理处置技术, 对生命周期评价的定义和技术框架进行了介绍, 并对国内外污泥处理处置技术的生命周期评价研究进展进行了归纳、对比与探讨, 分析了不同技术对环境影响的特点, 总结并提出了污泥处理处置技术的生命周期评价研究现阶段的不足及未来的发展方向。

关键词 污泥; 生命周期评价; 环境影响; 技术改进

中图分类号 X 705; TQ 037

Research progress on life cycle assessment of sludge treatment and disposal

Ji Long-tao¹, Gu Dun-gang¹, Lu Jia-qi¹, Cai Bin², Che Lei², Li Guang-hui¹

(1.School of Chemistry and Chemical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China; 2.Zhejiang Eco Environmental Technology Co., Ltd., Huzhou 313000, China)

Abstract Sludge poses a threat to the environment due to its wide range of sources and huge amount, but it is also a misplaced resource, which needs to be properly treated. The commonly used sludge treatment and disposal technologies were reviewed. The definition and technical framework of life cycle assessment was introduced, and the research progress on the life cycle assessment of sludge treatment and disposal technologies was summarized, compared, and discussed. The environmental impact of different sludge treatment technologies were analyzed. The current deficiency and the development direction of the life cycle assessment studies on sludge treatment and disposal were summarized and put forward.

Key words sludge; life cycle assessment; environmental impact; technical improvement

污泥来源广泛, 既包括城镇污水处理厂净化污水所产生的市政污泥, 也包括油气开采、石化、印染、电镀等工业所产生的工业污泥, 以及河湖疏浚清淤所转移出的底泥。污泥中通常含有大量有机物、致病微生物, 以及难降解的有毒有害物质等, 若处置不当, 会占用大量土地, 造成二次污染, 破坏生态环境, 危害人类健康^[1]。近年来, 污泥产量随着污水处理能力的提升不断增长, 潜在环境风险也不断加大。如何妥善处理处置这类体量巨大的废弃物已成为环境污染治理攻坚中的隘口。

生命周期评价 (life cycle assessment, LCA) 为量化产品或技术对环境的影响提供了有效的方法框架。本文综述了目前常见的一些污泥处理处置技术及有关的 LCA 研究, 重点关注与碳排放等环境影响相关的内容, 并对未来的研究方向进行展望, 以为污泥处理处置技术的低碳发展提供参考。

1 污泥处理处置技术概述

目前国内外常用的污泥处理处置技术包括填埋、焚烧、热解、厌氧消化、好氧堆肥等。实际应用时应综合考虑污泥特性、技术的经济成本和环境影响、当地的资源条件、国家的政策导向等因素, 合理地做出选择。

收稿日期: 2023-07-20

基金项目: 上海市科委地方院校能力建设项目 (21010501400)

作者简介: 纪龙涛 (1999—), 男, 安徽蚌埠人, 在读硕士, 师从李光辉教授, 主要从事生命周期评价研究。电话: 021-67795965, E-mail: 1053655080@qq.com

网络首发时间: 2024-01-30 09:53:40 网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1370.TQ.20240129.1113.002>

1.1 填埋

填埋是最传统，使用范围最广的一种污泥处理处置技术。填埋操作简单，费用低，适应性强，但占用大量宝贵的土地资源。由于填埋场通常远离城市，导致污泥运输成本较高。填埋前需对污泥进行稳定化处理，使其符合相关的填埋标准^[1]。

1.2 焚烧

焚烧可以最大限度减小污泥体积，减量率可达 95%左右，能完全氧化有机物，杀灭病原体，除汞以外的重金属几乎都被截留在灰渣中。但焚烧会产生有害烟气，尤其在燃烧不充分时，对环境造成的破坏很大。当前污泥焚烧处置的费用相对较高，一定程度上限制了该技术的推广使用。为了降低焚烧处置的能耗，通常要对污泥进行脱水、热干化等预处理。焚烧过程产生的热量经回收后可用于供热或发电^[1, 2]。

1.3 热解

热解是指在高温、无氧或缺氧的条件下，利用污泥中有机物的热不稳定性引起热分解的过程，使污泥中的重质组分热分解为可燃气、焦油、半焦油等轻质组分的过程^[3, 4]。热解得到的气态和液态产物具有比原始污泥更高的热值^[5]。热解技术具有较高的经济价值和较好的应用前景，但设备投资较高，加热过程需要大量燃料或电力投入。

1.4 厌氧消化

厌氧消化是利用厌氧菌在特定环境下分解污泥中的有机物，从而达到污泥减量化、稳定化、资源化的一种技术。经厌氧消化后的污泥性质稳定，有利于后续脱水，可以减少脱水剂的使用量。厌氧生化反应产生的大量沼气经回收后可用于发电或供热，但沼气的安全存储要求高，存在安全风险。目前，包含厌氧消化的污泥处理处置组合路径有“厌氧消化+脱水+土地利用”等^[1, 6]。

1.5 好氧堆肥

堆肥是利用好氧微生物在有氧条件下将污泥中的有机物转化为腐殖质的一种技术。堆肥简单易行，但存在占地面积大、周期长、易产生臭气等缺点。随着封闭仓式发酵系统等新型堆肥设备的研发，堆肥的缺点正在逐渐被克服，综合效益得到提升。堆肥还可以与其它技术联合，形成污泥处理处置组合路径，如“脱水+堆肥+土地利用”等^[7, 8]。

2 污泥处理处置技术 LCA 方法

生命周期评价（LCA）起源于 20 世纪 60 年代末美国可口可乐公司对饮料瓶从原料开采到废物最终处理的全过程跟踪和定量分析。90 年代末，国际标准化组织发布了 ISO 14040 系列标准，对 LCA 的定义、框架、步骤等进行了明确的界定，成为了 LCA 工作的指南^[9]。LCA 在对产品或技术“从摇篮到大门”或“从摇篮到坟墓”的全过程进行综合评价时备受推崇。

2.1 目标和范围确定

目标和范围确定是 LCA 的基础环节，该阶段需要明确评价的内容和功能单位，划定评价的系统边界等^[10]。如图 1 所示，一般情况下，对污泥处理处置开展 LCA 的范围是包括污泥产生后，经收集、运输、处理、直至最终废物处置和回收利用的整个过程。根据具体情况，系统边界的划定可能会有所不同，有些研究只针对污泥进入处理厂后的过程，不包括收集和运输过程。污泥处理厂厂房等固定设施的建设和拆除一般不予考虑。功能单位方面，在以往的研究中，质量是最常见的功能单位，大多数研究选取的功能单位为处理 1 t 污泥，既可以是含水湿污泥^[11, 12]，也可以是污泥干物质^[13-15]。若研究污泥与其它废弃物共同处理，功能单位通常为处理总量为 1 t 的污泥与其它物质。以体积作为功能单位在污泥处理处置的 LCA 研究中也较为常见^[16]，除了质量和体积之外，还可以选取能量单位（如 MWh）作为功能单位^[17]。

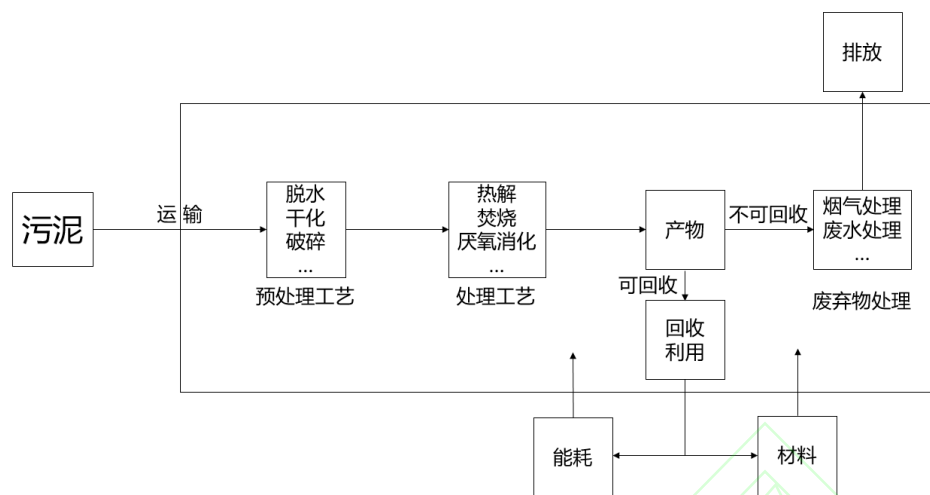


图1 污泥处理处置 LCA 常见的系统边界
Fig.1 Common system boundary for LCA of sewage treatment and disposal

2.2 清单分析

清单分析是 LCA 的关键环节, 需要梳理出研究范围内包括物质和能量在内的系统输入和输出, 并对它们进行量化^[18]。根据 ISO14041, 清单分析中主要进行数据收集整理、分配计算、建模等工作。清单数据的来源有实地调研、文献、数据库、统计年鉴或环评报告等。污泥处理处置技术的生命周期清单分析是针对系统内各种活动中的物质输入输出(水、氢氧化钠、石灰石、活性炭、生物炭等)、能量输入输出(电、天然气、煤炭等提供的热能, 产物回收的电和热能等)、以及环境排放物(CH_4 、 NH_3 、 SO_2 、 NO_x 等)数据进行量化分析。同时, 清单分析还需要收集污泥的特性参数数据(如含水量、干物质、热值等)。在收集数据时, 要注意数据来源的时间和地点, 尽可能选择同一地点, 时间相近的数据, 以提高评价的准确性。

2.3 影响评价

影响评价是 LCA 的核心环节, 该过程是根据生命周期清单分析数据与环境的相关性, 量化产品、工艺或活动在整个生命周期内对环境的潜在影响^[10]。这种评估可考虑对生态系统、人体健康以及其他方面的影响。根据目标定义和范围界定所确定的系统边界及清单分析阶段所提供的数据清单, 对污泥处理处置技术的全生命周期过程所带来的环境影响进行分类评价。按照影响类别来划分, 整个工艺所产生的环境影响一般可分为全球变暖、酸化、臭氧消耗、富营养化、光化学氧化、人类健康毒性(包括致癌效应、非致癌效应、呼吸效应等)、生态毒性(包括陆地、淡水、海洋等)、化石燃料消耗、土地利用等类别。国际上广泛使用 ReCiPe、Eco-indicator 99、IMPACT 2002+、CMLCA、ILCD 等 LCA 模型对产品、工艺或活动的环境影响进行量化分析, 包括特征化和归一化两步, 将清单分析数据通过中间点方法模型或终结点方法模型计算出影响值^[19-21]。

2.4 结果解释

结果解释是 LCA 的最后一步, 通常包括不确定性分析和灵敏度分析, 可从生命周期的角度识别出给定系统边界内环境影响较大的环节、以及每个环节对环境贡献较大的物质、能源或污染物^[10]。对于污泥处理处置的 LCA 研究, 在结果解释部分可以讨论通过改变工艺路径、改进运行参数、寻找替代能源或材料等方式, 降低系统边界内的生命周期环境影响。通过对 LCA 结果进行解释分析, 可以找出最佳的污泥处理处置路径, 为决策者提供建议和指导。

3 污泥处理处置技术的 LCIA 结果

随着 LCA 体系框架的发展以及软件与数据库的完善, 生命周期影响评估(LCIA)愈发成为系统

科学的资源环境评价方法。继污水处理后，污泥处理处置对生态环境和人类健康的影响也愈发受到关注。在我国“双碳”战略目标的大背景下，从全生命周期角度对污泥处理处置技术的环境影响和资源使用效率进行评价可为工艺选择和改进、相关政策制定等提供数据支撑与决策参考，对促进行业的减污降碳协同大有裨益。

3.1 环境影响

目前，国内外学者主要将 LCA 方法用于对比分析不同的污泥处理处置工艺，大部分研究着重关注污泥处理的环境影响，只有少数结合了经济成本分析。王琳等研究了填埋、焚烧、热解、好氧堆肥、湿式空气氧化、厌氧消化六种污泥处理工艺的碳排放量，结果表明填埋属于高水平碳排放工艺，焚烧、热解和好氧堆肥属于中-低水平碳排放工艺，厌氧消化和湿式空气氧化工艺属于低-负水平碳排放工艺^[22]。刘洪涛等人发现填埋造成的温室效应高于好氧发酵和焚烧，好氧发酵最低^[23]。Barry 等的研究表明，在全球变暖潜能方面，市政污泥热解的影响小于焚烧，将污泥热解产生的生物炭作为水泥窑的替代燃料可使污泥处理处置对全球变暖的影响进一步降低^[24]。Li 等利用 LCA 方法研究了厌氧消化、热解两种单一技术以及厌氧消化耦合热解组合技术处理市政污泥对环境产生的影响，其中与碳足迹有关的指标为气候变化，结果表明厌氧消化对气候变化的影响较热解小^[25]。在 Li 等的另一篇论文中也报道了类似的结果^[26]。Wang 等评价了几种市政污泥处理方案的环境影响，其中在气候变化方面，由大到小依次为填埋、焚烧、热解^[27]。Xiao 等将水热-热解联合技术（hydrothermal-pyrolysis technology, HPT）与其它传统处理技术进行了对比，在对气候变化的影响方面，HPT 仅次于堆肥，优于填埋和焚烧^[28]。Lombardi 等的研究显示，在以机械脱水为预处理的基础上，污泥处理工艺的全球变暖潜值（GWP）由大到小依次是填埋、焚烧，湿式氧化、堆肥、土地利用^[29]。Hu 等研究了四种技术处理含油污泥的环境影响，GWP 由大到小依次是焚烧、热解、溶剂萃取、填埋；而通过归一化因子方法计算得出四种技术的综合环境影响，由大到小依次是焚烧、填埋、热解、溶剂萃取^[30]。Zhuang 等不仅研究了污泥处置技术的环境影响，还对比了生命周期成本（life cycle cost, LCC），结果表明厌氧消化-农业利用和热解的 GWP 小于厌氧消化-填埋、焚烧和堆肥，而堆肥和热解具有较低的 LCC^[31]。

除此以外，还有一些学者利用 LCA 方法研究了同一技术在不同外界条件下的污泥处理处置生命周期影响。例如，Luo 等研究了市政污泥有机物含量和含水率，以及热解系统的规模和能量分布对污泥热解的环境影响，结果表明污泥含水率越低、有机物含量越高，热解系统规模越大，污泥热解的 GWP 越低，而热解系统能量分布对 GWP 的影响不大^[32]。王琳等人的研究中还探讨了不同含水量以及不同有机质含量的污泥对不同工艺的影响，结果显示，污泥中有机质含量对不同污泥处理工艺的碳排放影响较大，会改变所研究的六种工艺的碳排放量的大小顺序^[22]。Li 等研究指出，污泥中有机质含量越高，热解、厌氧消化、厌氧消化耦合热解三种工艺对气候变化的影响均越小^[25]。

3.2 污泥处理处置技术的改进

廖艳芬等人通过 LCA 方法对污泥干化焚烧、污泥与煤混燃发电、污泥与生活垃圾掺烧发电三种焚烧处理方式进行了研究，发现污泥与垃圾或与煤混烧发电的全球变暖潜值小于污泥单独填埋和焚烧，并指出通过收集和利用填埋过程中产生的部分气体和渗滤液可有效降低环境影响^[11]。Mills 等的研究表明，在英国，污泥热水解-厌氧消化-干化组合工艺在全球变暖潜值方面的表现最好；此外，使用厌氧消化得到的甲烷代替处理过程中所需燃料可减少碳排放^[33]。Gourdet 的研究结果表明，通过提高厌氧消化效率、开发污泥回流液的替代处理方法可改善污泥处理的环境影响^[34]。Li 等研究指出，厌氧消化与热解的联合工艺对气候变化的影响介于厌氧消化和热解两种单一工艺之间，并且由于污泥脱水过程中，将污泥脱至不同的含水率会影响电能及热能的输入输出，进而影响整个过程的能量平衡，因此降低污泥脱水过程的环境影响是改善热解及其与厌氧消化组合的关键^[25]。类似地，Cao 等研究发现，在温室气体排放方面，厌氧消化与热解的组合工艺要优于单一热解^[35]。Luo 等的研究发现，强化脱水和提高污泥有机质含量可降低污泥后续处理的环境影响，但污泥脱水和无机-有机质分离也会产生相应的环境负担，所以只有在负担低于收益的情况下才可行^[32]。在 Mayer 等的研究中，

各工艺对气候变化产生的影响从大到小依次为厌氧消化>厌氧消化-焚烧≈厌氧消化-水热碳化-焚烧>厌氧消化-热解-焚烧；除了使用可再生能源替代化石能源外，还可以通过优化工艺温度以减少污泥燃烧和热解的 N_2O 排放，如果能改善滞留物中的燃料质量，或者以其他方式利用一部分工艺用水，则可以进一步提高 HTC 工艺的环境性能^[36]。Wang 等认为未来污泥处理的重点应放在污染物的固定上，以减少对环境的影响^[37]。王琳等人认为厌氧消化可以通过前端耦合热水解工艺进行优化，这样既能发挥厌氧消化低碳节能的优势，还能进一步提高污泥资源化效率，是未来的发展趋势^[22]。Xu 等研究显示，重力浓缩-厌氧消化-脱水-焚烧组合工艺处理污泥产生的 GWP 最小^[38]。Chen 等^[39]，Wang 等^[27]均发现污泥与固体废物共同焚烧时对气候变化的影响要小于污泥单独焚烧。Zhou 等研究发现，污泥与木质废弃物共气化的 GWP 最小，其次是污泥与厨余垃圾共消化、焚烧、填埋、污泥与废油共燃、厌氧消化-焚烧^[40]。Ramachandran 等的研究表明，污泥与木质生物质共气化的温室气体排放量相比污泥焚烧大大降低^[41]。Chiu 等的研究表明，污泥与厨余垃圾共同厌氧消化的碳足迹最低，环境效益最大^[42]。Tong 等的研究表明，为确保污泥和厨余垃圾共消化过程中产生协同作用，有必要精细调整和优化运行参数^[43]。

总的来看，污泥有多种方式进行回收利用，包括生产热能和电能、农业利用、建材利用等。通过循环利用可以在一定程度上抵消污泥处理过程中产生的不利环境影响。不同污泥处理技术的耦合是未来减污降碳的重点发展方向。此外，污泥的相关特性参数（含水率、有机质含量等）以及处理规模也与生命周期环境影响有关。大多数污泥处理处置路径都将脱水作为预处理工艺，多项研究均发现脱水是碳排放的主要贡献过程之一，未来应关注污泥脱水的改进。另一个降低碳排放的有效路径是将污泥与其它固体废物共同处理，如厨余垃圾、废木屑等，多个研究也证实了这一点。

值得注意的是，不同研究的结论之间也存在一些相互矛盾的地方。在研究过程中，系统边界的确定、LCI 和 LCIA 模型的选择往往存在较大差异，LCA 各阶段都存在数据可用性和数据质量不确定性的问题。此外，污泥处理处置 LCA 研究的数据来源也不尽相同，有的是基于实验室小试规模的数据，有的是实际工业规模的数据，有的则引用自文献，这进一步造成了研究结果间的差异。

4 结论与展望

通过梳理和分析近年来污泥处理处置技术生命周期评价相关研究，笔者对该研究方向有以下几点看法：

(1) LCA 是评估污泥处理处置技术的一种重要且灵活的方法，但 LCA 方法也存在一些缺陷。基于不同的系统边界、功能单位、技术假设、建模方法等得出的 LCA 结果可能存在很大差异，难以直接比较和应用。未来，需要将污泥处理处置的 LCA 方法规范化、标准化，以提高结果的准确性和可比性。

(2) 对目前正处于实验室研究阶段的新型污泥处理处置技术进行事前 LCA 研究，以预测其在实际工业应用时产生的环境影响；将 LCA 方法与过程集成技术相结合，克服传统 LCA 无法给出具体改进方案的短板，指导工艺的开发和改进。

(3) 目前污泥处理处置 LCA 研究大多使用 Ecoinvent 等外国数据库，针对中国的数据较少，数据质量也难以保证。在开展特定国家或区域的 LCA 研究时应尽可能使用本土数据，并结合当地的法律法规，否则可能造成环境影响评价的不准确。因此，亟需发展较为完整的国内 LCA 数据库体系。

参考文献

- [1] 周跃男, 王硕. 浅析城市污水污泥的特性及处理处置方式[J]. 石油化工, 2021, 50: 74-78.
- [2] 李辉, 吴晓美, 蒋龙波, 等. 城市污泥焚烧工艺研究进展[J]. 环境工程, 2014, 32: 88-92.
- [3] 詹咏, 张领军, 谢加才, 等. 热解终温对含油污泥三相产物特性的影响[J]. 环境工程学报, 2021, 15: 2409-2416.
- [4] 李昊宇, 李金灵, 李彦, 等. 热解条件对污泥中重金属形态分布的影响综述[J]. 应用化工, 2022, 51: 2991-2996+3000.
- [5] ZHANG S, YAN Y, LI T, et al. Upgrading of liquid fuel from the pyrolysis of biomass [J]. *Bioresour Technol*, 2005, 96(5): 545-550.
- [6] 陈思思, 杨殿海, 庞维海, 等. 我国剩余污泥厌氧转化的主要影响因素及影响机制研究进展[J]. 化工进展, 2020, 39: 1511-1520.
- [7] 李思莹, 贾学斌, 张军. 污水厂污泥堆肥有机污染物降解及土地利用生态风险[J]. 中国给水排水, 2023, 39(4): 18-23.

- [8] 张树艳, 刘佳欣, 耿继光, 等. 基于堆肥的污泥预处理方法研究进展[J]. 应用化工, 2021, 50: 2008-2013.
- [9] 刘涛, 刘颖昊, 周焯. 生命周期评价方法在钢铁企业低碳发展规划中的应用[J]. 中国冶金, 2021, 31: 130-134.
- [10] 栗卓新, 祝静, 李红. 增材制造技术环境影响及其生命周期评价的研究进展[J]. 材料导报, 2021, 35: 11174-11179.
- [11] 廖艳芬, 漆雅庆, 马晓茜. 城市污水污泥焚烧处理环境影响分析[J]. 环境科学学报, 2009, 29: 2359-2365.
- [12] LARSEN J D, HOEVE M T, NIELSEN S, et al. Life cycle assessment comparing the treatment of surplus activated sludge in a sludge treatment reed bed system with mechanical treatment on centrifuge [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 185: 148-156.
- [13] SVANSTRÖM M, HELMERSSON S, PETERS G, et al. Life cycle assessment of sludge management with phosphorus utilisation and improved hygienisation in Sweden [J]. *Water Science and Technology*, 2017, 75(9): 2013-2024.
- [14] ALYASERI I, ZHOU J. Handling uncertainties inherited in life cycle inventory and life cycle impact assessment method for improved life cycle assessment of wastewater sludge treatment [J]. *Heliyon*, 2019, 5(11): e02793.
- [15] YANG X, MU H, ZHAO H, et al. Environmental impact and economic benefit evaluation of sewage sludge treatment technologies [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, 446(3): 32078.
- [16] PRADEL M, AISSANI L, VILLOT J, et al. From waste to added value product: towards a paradigm shift in life cycle assessment applied to wastewater sludge – a review [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 131: 60-75.
- [17] WIELGOSIŃSKI G, CICHOWICZ R, TARGASZEWSKA A, et al. The use of LCA method to assess environmental impact of sewage sludge incineration plants [J]. *Ecological Chemistry and Engineering S*, 2017, 24(2): 263-275.
- [18] 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: 1232-1242.
- [19] 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*, 2016, 22(2): 138-147.
- [20] YOSHIDA H, TEN HOEVE M, CHRISTENSEN T H, et al. Life cycle assessment of sewage sludge management options including long-term impacts after land application [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 174: 538-547.
- [21] MOHAMMADI A, SANDBERG M, VENKATESH G, et al. Environmental performance of end-of-life handling alternatives for paper-and-pulp-mill sludge: Using digestate as a source of energy or for biochar production [J]. *Energy*, 2019, 182: 594-605.
- [22] 王琳, 李德彬, 刘子为, 等. 污泥处理处置路径碳排放分析[J]. *中国环境科学*, 2022, 42: 2404-2412.
- [23] 刘洪涛, 郑海霞, 陈俊, 等. 城镇污水处理厂污泥处理处置工艺生命周期评价[J]. *中国给水排水*, 2013, 29: 11-13.
- [24] BARRY D, BARBIERO C, BRIENS C, et al. Pyrolysis as an economical and ecological treatment option for municipal sewage sludge [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2019, 122: 472-480.
- [25] LI H, FENG K. Life cycle assessment of the environmental impacts and energy efficiency of an integration of sludge anaerobic digestion and pyrolysis [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 195: 476-485.
- [26] LI H, JIN C, ZHANG Z, et al. Environmental and economic life cycle assessment of energy recovery from sewage sludge through different anaerobic digestion pathways [J]. *Energy*, 2017, 126: 649-657.
- [27] WANG N Y, SHIH C H, CHIUH P T, et al. Environmental Effects of Sewage Sludge Carbonization and Other Treatment Alternatives [J]. *Energies*, 2013, 6(2): 871-883.
- [28] XIAO L S, LIN T, WANG Y, et al. Comparative life cycle assessment of sludge management: A case study of Xiamen, China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 192: 354-363.
- [29] LOMBARDI L, NOCITA C, BETTAZZI E, et al. Environmental comparison of alternative treatments for sewage sludge: An Italian case study [J]. *Waste Management*, 2017, 69: 365-376.
- [30] HU G, FENG H, HE P, et al. Comparative life-cycle assessment of traditional and emerging oily sludge treatment approaches [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 251: 119594.
- [31] ZHUANG Z, MOHAMED B A, LI L Y, et al. An economic and global warming impact assessment of common sewage sludge treatment processes in North America [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 370: 133539.
- [32] LUO H, CHENG F, YU B, et al. Full-scale municipal sludge pyrolysis in China: Design fundamentals, environmental and economic assessments, and future perspectives [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 795: 148832.
- [33] MILLS N, PEARCE P, FARROW J, et al. Environmental & economic life cycle assessment of current & future sewage sludge to energy technologies [J]. *Waste Management*, 2014, 34(1): 185-195.
- [34] GOURDET C, GIRAULT R, BERTHAULT S, et al. In quest of environmental hotspots of sewage sludge treatment combining anaerobic digestion and mechanical dewatering: A life cycle assessment approach [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 143: 1123-1136.
- [35] CAO Y, PAWLOWSKI A. Life cycle assessment of two emerging sewage sludge-to-energy systems: evaluating energy and greenhouse gas emissions implications [J]. *Bioresour Technol*, 2013, 127: 81-91.
- [36] MAYER F, BHANDARI R, GATH S A. Life cycle assessment of prospective sewage sludge treatment paths in Germany [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 290: 112557.
- [37] WANG X, YU F, FAN Q. Life cycle assessment of sewage sludge treatment in China [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, 300(3): 032057.
- [38] XU C, CHEN W, HONG J. Life-cycle environmental and economic assessment of sewage sludge treatment in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 67: 79-87.
- [39] CHEN G, WANG X, LI J, et al. Environmental, energy, and economic analysis of integrated treatment of municipal solid waste and sewage sludge: A case study in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 647: 1433-1443.
- [40] ZHOU X, LI J, ZHAO X, et al. Resource recovery in life cycle assessment of sludge treatment: Contribution, sensitivity, and uncertainty [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 806: 150409.
- [41] RAMACHANDRAN S, YAO Z, YOU S, et al. Life cycle assessment of a sewage sludge and woody biomass co-gasification system [J]. *Energy*, 2017, 137: 369-376.
- [42] CHIU S L H, LO I M C. Identifying key process parameters for uncertainty propagation in environmental life cycle assessment for sewage sludge and food waste treatment [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 174: 966-976.
- [43] TONG H, TONG Y W, PENG Y H. A comparative life cycle assessment on mono- and co-digestion of food waste and sewage sludge [J]. *Energy Procedia*, 2019, 158: 4166-4171.