

生命周期评价体系的开发及其在生物质资源化领域的应用进展^{*}

刘 蔚¹ 毛开伟² 张廷军¹ 马宗虎¹ 傅国志¹ 王 雯²

(1. 中国华电科工集团有限公司, 北京 100160; 2. 北京化工大学 生物质能源与环境工程研究中心, 北京 100029)

摘要: 生命周期评价体系是用于全面评估“生产—使用—废弃”整个过程的方法, 可以科学地评估经济效益、能源消耗以及环境影响。本文结合生命周期评价体系的发展, 综述了生命周期评价体系的局限性、改进方向及目前在国内外生物质资源化利用方面的应用情况。在此基础上, 结合能值分析法进一步完善评估效果, 并且与产品开发过程进行集成分析, 为生产可持续性产品提供科学的参考依据。生命周期评价具有巨大的应用前景, 但仍需要进一步与新的评价方法结合, 开发后续评估工具、补充数据库、修正评估模型。

关键词: 生命周期评价; 生物质资源化; 能值分析法; 产品集成分析

DEVELOPMENT OF LIFE CYCLE ASSESSMENT AND APPLICATION IN BIOMASS RESOURCE RECOVERY

Liu Wei¹ Mao Kaiwei² Zhang Tingjun² Ma Zonghu¹ Fu Guozhi¹ Wang Wen²

(1. China Huadian Engineering Co., Ltd, Beijing 100160, China; 2. Biomass Energy and Environmental Engineering Research Center, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: Life cycle assessment (LCA) system is a method to comprehensively assess the whole process, including "production-use-waste". It can scientifically analysis economic benefits, energy consumption and environmental impact. This paper reviewed the development of LCA, limitation, improvement direction and the research progress of LCA in application. The main developing directions of LCA in biomass resource utilization and treatment were analyzed. The evaluation results were further enriched and improved with combining energy analysis. And a scientific reference for the production of sustainable products could be provided based on the integrated analysis with product development process. LCA has shown great application prospects, however, developing tools for follow-up assessment, databases supplement, modified models and new evaluation methods combination should be further studied to improve the overall performance and advance practical application in LCA assessment.

Keywords: life cycle assessment; biomass recycling; energy analysis; product integration analysis

0 引 言

随着社会经济的发展, 环境、经济、能源之间的协调和评估得到了越来越多的重视。如何科学系统地评价某个系统生产过程中产出的有效能及其能源消耗之间的比例是目前亟待解决的问题^[1]。

就评价体系而言, 相比于简单直接评价某一生产阶段的能值分析法, 生命周期评价(Life cycle assessment,

LCA) 体系可以更加具体全面地评估“生产—使用—废弃”整个过程。生命周期评价目前被广泛应用于废弃物管理及回收技术的评估, 包括评估各种处理方法对废弃物等级的潜在影响^[2]; 评估一种方法或一种设施在不同工程规模上的应用效率^[3]; 评估针对某一类废弃物的各种处理方法^[4]等等。作为一种重要的环境能源管理工具, 生命周期评价体系框架下发展的各类分析模型, 针对不同系统的技术及能源生产消耗状况, 定性定量地评价环境、经济、能源三者之间的平衡关系, 从而为正确评价系统的能源可持续性提供科学

^{*} 中国华电集团有限公司重点科技项目(CHDKJ17-01-21); 北京市自然科学基金(8182040)。

收稿日期: 2018-11-24

可靠的参考依据。

1 生命周期评价体系的起源

生命周期评价体系起源于1969年美国中西部研究所受可口可乐公司的委托对饮料容器从原材料采掘到废弃物最终处理的全过程进行的跟踪与定量分析。20世纪90年代,第一篇有关于生命周期评价的科学论文发表^[5,6],引起了学术界和工程界的高度重视,但其评价结果也饱受争议。在不断的争议和完善过程中,生命周期评价得到了飞速发展。经过大量的条例、补充文件和验证结果的丰富,最终形成了相对稳定成熟的国际标准ISO14040^[7]和ISO14044^[8]。

按照国际标准化组织(ISO)对生命周期评价的定义“汇总和评估一个产品(或服务)体系在其整个寿命周期中的所有投入及产出对环境造成的潜在影响的方法”^[9],可以看出,生命周期评价主要是通过确定和量化研究能量和物质利用及废弃物的环境排放来评估一种产品、工序和生产活动造成的环境负载;评价能源材料利用和废弃物排放的影响以及评价环境改善的方法。迄今为止,LCA的方法学和基准体系仍处于不断的发展之中,尚没有被广泛接受的统一标准。

目前,LCA已应用于意大利、丹麦、巴西、澳大利亚、中国等许多国家废物管理和回收技术的工程研究^[4]。阚士亮等^[10]采用生命周期法,从能源效益、环境效益和经济效益等方面对我国大中型沼气工程进行评估;Singh S等^[11]基于生命周期评价对环境生态系统进行了量化评价;Gunady等^[12]基于生命周期评价对西澳大利亚草莓、莴苣和蘑菇等新鲜农产品供应链的全球变暖潜力进行评估。

2 生命周期评价体系的局限性及改进方向

生命周期评价体系的评估内容是某一产品从“摇篮”到“坟墓”的全过程,具体包括“生产—供应—安装—利用—回收”整个循环过程(图1)。实施步骤分为4个部分:目标和范围的定义、生命周期清单分析(LCI)、生命周期影响评价(LCIA)和结果解析。目标和范围的定义包括进行研究的原因、预期的应用过程和受众,从而定义研究中的系统边界和功能单元。LCI是汇总对产品生命周期中与功能单元相关的输入(资源)和输出(排放)。LCIA是了解和评估研究系统潜在环境影响的程度。在结果解析中,综合前几个阶段的结果,得出合适的结论和建议^[7]。

传统的LCA分析方法在实际应用过程中存在一

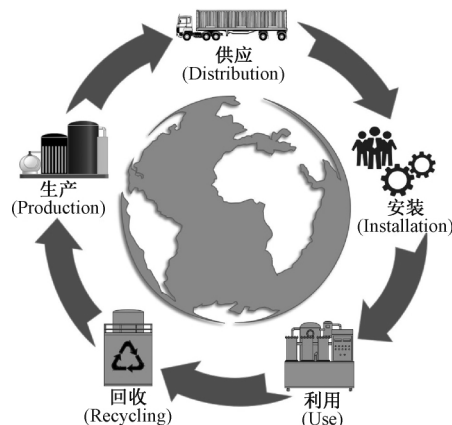


图1 产品“生产—供应—安装—利用—回收”的循环体系

定的局限性。第一个限制是边界设置,包括上下游系统边界、多输入分配、时间系统边界等问题^[13]。第2个限制是指标的选择。从地球环境的角度出发,可以通过选择各种指标进行评估。但在实际工程中,经营者通常更看重政策限制和经济利益,这就导致了LCA评估过程中在指标的选择上会产生一定的矛盾^[14-15]。

国内外很多研究针对LCA的局限性进行了深入地探讨:

1) LCA在评估体系中的不确定性。

在环境影响评价和环境管理中应用LCA存在着很多的不确定性,主要表现在数据收集、系统边界设置、模型构建等。目前,大多数研究人员通过统计年鉴、技术水平估计或专业判断来获取数据。此外,LCA的假设和选择是相对主观的,这些都会不同程度地降低最终结果的准确性^[4]。

2) 全面系统的LCA数据库尚未构建。

尽管LCA的发展迅速,但在我国仍有许多缺陷,如大量研究案例有待积累,生命周期库建设尚不成熟,缺乏年际LCA数据库等等。目前,针对LCA的研究基本上是由高校和科研院所来完成,企业研究的参与度较低。这使得我国LCA实际应用过程中的现场数据缺乏。

3) 对潜在环境问题的预测能力不足。

LCA是一种有效的评估工具,它可以有效系统地连接功能单元,但不能预测潜在的环境问题。污染物或固体废物的实际环境影响是取决于它们何时、何地、以及如何释放到环境中,所以不能只依赖LCA来预测实际影响、进行安全评估和风险评估等,有必要与其他评估工具结合起来进行分析。

4) 对评估模型时空上的变化考虑不充分。

传统的 LCA 是一种静态评价方法。LCA 中的大量数据是全局平均值,缺乏区域特征,从而导致影响评价难以客观。为了构建一个比较完善的模型,需要重点探究以下几方面:①何时、何处消耗资源及产生废物;②废物如何进入环境;③受影响的环境在不同时间和空间条件下的敏感性^[16]。国外学者^[4,17-18]提高了 LCA 作为决策支持工具的可用性,将时间动态变化纳入传统 LCA 的考虑范围,强调区域化特征因

素的重要性,逐步将现有的 LCA 影响评估扩展到更高级的可持续评估。

3 生命周期评价体系的应用及发展

3.1 生物质资源化利用

随着社会经济的发展,能源短缺及环境污染问题日益严重,对替代能源的需求使生物质的资源化利用成为全球热点。如表 1 所示,我国生物质资源极为丰富,其资源化利用的方向包括:制备燃料乙醇、发电、生产沼气等。

表 1 LCA 体系评估生物质资源化利用途径及技术

原料	地区	技术/反应器	产品	参考文献
甜高粱茎秆	内蒙古	固体发酵(ASSF 技术)	燃料乙醇	[19],[20]
甜高粱茎秆	黑龙江	发酵蒸馏	燃料乙醇	[19]
木薯	广西	发酵蒸馏	燃料乙醇	[19],[21]
玉米基	吉林	发酵蒸馏	燃料乙醇	[19]
玉米	吉林、黑龙江、安徽、山东	膜生物反应器	燃料乙醇	[28]
秸秆(水稻、小麦、玉米)	—	燃烧	直燃发电	[22]
秸秆(小麦)	—	燃烧	直燃发电	[23]
秸秆(小麦)	—	气化	气化发电	[24]
粪便、养殖场污水等	北京、内蒙古、浙江、海南、广东	完全混合式、上流式厌氧污泥床反应器	沼气	[25]

我国生物质燃料乙醇经历了漫长的发展过程,从最初的以陈化粮为原料到目前“非粮”生物质为原料,燃料乙醇的制备技术越来越成熟,但我国“非粮”燃料乙醇的开发正处于前期阶段,在大规模推广的过程中,其能源消耗、经济成本 and 环境影响等方面是否比粮基燃料乙醇更有优势,还需要进行科学系统地评估。张艳丽等^[19]基于 LCA,针对国内 4 家燃料乙醇生产示范工程进行全面评价,对其经济性、环境影响和能量平衡给出定量的评价结果。田宜水等^[20]针对甜高粱茎秆先进固体发酵技术,构建 LCA 模型,对能耗、温室气体排放及其影响因素进行分析。胡志远等^[21]利用 LCA 理论,建立了木薯燃料乙醇生命周期能源效率评价模型,进行生命周期能源效率评价。这些系统的可行性分析为推进燃料乙醇的发展及制定相关政策提供科学依据和重要参考。

生物质发电技术是目前我国比较成熟的技术,主要包括直燃发电和气化发电。在实际工程应用过程中,仍存在很多问题。因而生物质发电技术需要系统地对经济性以及对环境和人体的影响进行分析预测。冯超等^[22]应用 LCA,以秸秆直燃发电项目为研究对象,对秸秆的种植、运输、粉碎干燥和燃烧发电等 4 个过程进行分析。刘俊伟等^[23]以小麦秸秆为例,采用 EDIP 方法(即采用政策目标距离法确定标准化基准和不同环境潜质的重要性权重),利用 LCA 分析秸秆

直燃发电过程中的能量消耗及造成的环境影响。崔和瑞等^[24]基于 LCA 对秸秆气化发电系统进行评价,辨别秸秆气化发电过程中不同的排放物和能源消耗对环境的影响,并指出要注意对排放物的处理。

我国沼气工程产业正在步入一个新的发展时期,一方面规模化畜禽养殖业的迅速发展、市政餐厨垃圾集中处理等等都为沼气工程提供稳定的原料来源;另一方面国家对沼气工程逐步加大资金支持力度^[25]。目前我国沼气工程正处于产业化前期发展阶段,虽然配套设备已达到或接近国际先进水平,但沼气工程建设运行及管理问题很大程度上制约了其健康持续发展。对不同工艺和技术模式的沼气工程进行综合评价,筛选出优化工艺模式进行推广,成为目前最亟待解决的问题。张艳丽等^[25]基于 LCA,在通过对国内典型沼气工程建立详细的经济清单、能效清单等,对沼气工程运行过程进行定量分析,通过评估不同工艺的综合指标,从中优化出适宜大范围推广的最优化沼气工程模式。刘黎娜等^[26]对北方“四位一体”沼气生态农业模式的沼气系统在整个生命周期中对农业生态环境的影响进行了简要的分析,对其生命周期的环境影响和环境效益进行了量化评价。陈豫等^[27]采用 LCA 对户用沼气池全生命周期的环境影响和经济效益进行了客观和定量的评价,从而考虑如何在户用沼气池全生命周期内节约资源、保护环境,使系统降低

对环境的危害,提高经济效益。

除此之外,LCA在生物质资源化其他相关领域也有应用。如通过鸟粪石来回收污水中的N、P^[29],厌氧降解污水技术,电化学系统降解污水技术^[30]等。

3.2 与能值分析法结合

从生命周期的角度评价环境技术有两个目的。一个是理解实践中的“过去”,另一种是通过分析“预测”场景来支持决策。前者探究物质以及能量的走向趋势,为系统建立一个基准场景;后者用来评估某些决定的可能后果,描述物质和能量如何响应由于决策而发生的变化^[31]。为了更加精准科学地达到这两个目的,需要结合新的角度来丰富完善LCA体系。

能值分析法是综合分析系统中各种生态流(能量流、货币流、人口流和信息流),得出一系列能值综合指标,用来定量分析系统的结构功能特征与生态经济效益,被广泛应用于评价能源生态经济系统^[32]。其应用主要体现在对其能源效率、环境效率和可持续性等方面的评价。如图2所示,将两者进行结合,利用生命周期能值分析法来对某一系统或某几种工艺技术进行能值评估、经济评估、环境影响评估,从而筛选出针对某一系统的最优工艺。

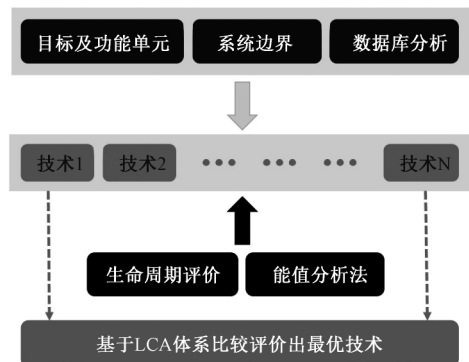


图2 结合生命周期评价和能值分析法评价最优技术

国内很多学者基于生命周期能值分析法对工艺技术进行评估优化。张军等^[33]在生命周期理论框架下,引入能值分析方法,对燃料乙醇系统进行了能耗分析;把燃料乙醇生命周期过程中社会、经济、自然有机统一起来,定量分析自然和人类社会经济的真实价值;以木薯燃料乙醇为例,评估木薯燃料乙醇生命周期能值转换率、生命周期能值产出率、生命周期能值环境负载率、生命周期能值投资率以及生命周期能值可持续值。李欣等^[34]在生命周期的理论框架下,采用能值分析方法对2种秸秆能源化利用方式(秸秆直燃发电与秸秆燃料乙醇)的能值消耗、环境影响和

经济效益进行了对比评价。总体而言,国内的生命周期能值分析,“理论-方法-应用”整个研究体系仍旧比较薄弱,系统性研究有待提高。

3.3 与产品开发过程的集成

可持续性发展已经逐渐成为一个全球共识,对于可持续性的讨论不仅仅局限于能源、环境,还包括产品的开发。从这个意义上考虑,LCA被视为支撑可持续生产开发决策过程中最有力的工具之一,它可以通过评估产品在开发阶段的环境影响来确保足够的可持续性,可以了解产品整个生命周期中最有问题的阶段,并且科学量化地评估改进措施。LCA与产品开发过程的集成主要包括三个宏观阶段:预整合(Pre-integration)、整合(Integration)和后整合(Post-integration)。这些宏观阶段包括四个阶段:参考产品的选择、参考产品的生命周期评价、产品开发过程中的LCA集成(PDP)以及产品开发过程中的生命周期评价集成分析。在PDP阶段的LCA集成中,通过考虑环境、经济、能源等方面影响和评估矩阵来对集成结果进行分析^[35]。

国内一些学者也针对LCA在产业集群过程中的集成进行了讨论,Wang等^[36]认为在PDP中使用LCA是识别和减少整个产品生命周期对环境影响的一个重要因素。孙辉等^[37]根据生命周期理论,探讨产业集群在不同运行模式下应采取的战略,进而提升产业集群的核心竞争力。这些探讨为将来的研究方向提供了更多的可能,比如评估产品生产方案的创新等。

4 结论与展望

生命周期评价旨在从生命周期的角度对产品和服务的环境影响进行全面评估。在进一步研究产品和服务的环境影响时,必须从生命周期的角度出发,对环境问题进行综合评价,以避免问题的转移。LCA将来还需要从以下几个方面寻求突破。

1) LCA需要进一步发展完善开发用于LCA后续评估的工具、用于评估土地利用和水使用对生态系统服务的影响的方法和加权方法等。除此以外,数据库的进一步开发和维护、影响评估模型的进一步修正也应是重点优先发展的内容。

2) 建立模型和影响分析的过程中,需要与新的评价方法进行结合,从而优化现有的LCA体系,使其可以多角度评价经济效益及能源消耗,并在此基础上构建多能源的通用模型和生命周期能值分析综合模

型,更科学可靠地筛选出最适合大范围推广实施的新技术。

3) 产品开发过程中的 LCA 集成分析还不够完善和成熟,需要进一步结合生命周期成本和社会生命周期评估方法,同时考虑到可持续发展的重要性,还应与产品“开发-生产-运输-回收”体系进行紧密结合。

总体而言,LCA 评估的深度和高度依赖于最初对反应环境、设施等条件的基本假设,因而选择和开发环境友好的材料为进一步减小环境影响、提高经济效益开辟了一条新的量化评价体系。

参考文献

- [1] 霍丽丽,田宜水,孟海波,等. 生物质固体成型燃料全生命周期评价[J]. 太阳能学报,2011,32(12):1875-1880.
- [2] Banar M, Cokaygil Z, Ozkan A. Life cycle assessment of solid waste management options for Eskisehir, Turkey [J]. Waste Management, 2009, 29(1): 54-62.
- [3] Wanichpongpan W, Gheewala S H. Life cycle assessment as a decision support tool for landfill gas-to energy projects[J]. Journal of Cleaner Production, 2007, 15(18): 1819-1826.
- [4] Qi Y, Chen X, Wang W. Improved life cycle assessment of recycling organic wastes for practice [J]. Journal of Cleaner Production, 2018(195): 1558-1571.
- [5] Guinée J B, Udo de Haes H A, Huppes G. Quantitative life cycle assessment of products: 1: Goal definition and inventory [J]. Journal of Cleaner Production, 1993, 1(2): 81-91.
- [6] Guinée J B, Heijungs R, Udo de Haes H A, et al. Quantitative life cycle assessment of products: 2. Classification, valuation and improvement analysis [J]. Journal of Cleaner Production, 1993, 1(2): 81-91.
- [7] ISO, 2006. ISO 14040 International Standard. In: Environmental Management-Life Cycle Assessment-Principles and Framework[S]. International Organisation for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [8] ISO, 2006. ISO 14044 International Standard. In: Environmental Management-Life Cycle Assessment-Requirements and Guidelines [S]. International Organisation for Standardisation, Geneva, Switzerland.
- [9] 肇倩莹. 两种污水厂碳足迹计算方法的介绍与比较[J]. 科技创新与应用, 2017(12): 21-21.
- [10] 阚士亮,张培栋,孙荃,等. 大中型沼气工程生命周期能效评价[J]. 可再生能源, 2015, 33(6): 908-914.
- [11] Singh S, Bakshi B R. Eco-LCA: A tool for quantifying the role of ecological resources in LCA [C]. IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology. IEEE Computer Society, 2009: 1.
- [12] Gunady M G A, Biswas W, Solah V A, et al. Evaluating the global warming potential of the fresh produce supply chain for strawberries, romaine/cos lettuces (Lactuca sativa), and button mushrooms (Agaricus bisporus) in Western Australia using life cycle assessment (LCA) [J]. Journal of Cleaner Production, 2012, 28(3): 81-87.
- [13] Zhang X, Shen L, Zhang L. Life cycle assessment of the air emissions during building construction process: a case study in Hong Kong [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2013, 17(1): 160-169.
- [14] Lu W, Peng Y, Chen X, et al. The S-curve for forecasting waste generation in construction projects [J]. Waste Manag, 2016, 56: 23-34.
- [15] Saxce M D, Pesnel S, Perwuelz A. LCA of bed sheets-some relevant parameters for life time assessment [J]. Journal of Cleaner Production, 2012, 37(4): 221-228.
- [16] Pennington D W, Potting J, Finnveden G, et al. Life cycle assessment Part 2: current impact assessment practice [J]. Environment International, 2004, 30(5): 721-739.
- [17] Levasseur A, Lesage P, Margni M, et al. Considering time in LCA: dynamic LCA and its application to global warming impact assessments [J]. Environmental Science & Technology, 2010, 44(8): 3169-74.
- [18] Rack M, Valdivia S, Sonnemann G. Life Cycle Impact Assessment—where we are, trends, and next steps: a late report from a UNEP/SETAC Life Cycle Initiative workshop and a few updates from recent developments [J]. International Journal of Life Cycle Assessment, 2013, 18(7): 1413-1420.
- [19] 张艳丽,高新星,王爱华,等. 我国生物质燃料乙醇示范工程的全生命周期评价[J]. 可再生能源, 2009, 27(6): 63-68.
- [20] 田宜水,李十中,赵立欣,等. 甜高粱茎秆乙醇全生命周期分析[J]. 农业机械学报, 2011, 42(6): 132-137.
- [21] 胡志远,戴杜,浦耿强,等. 木薯燃料乙醇生命周期能源效率评价[J]. 上海交通大学学报, 2004, 38(10): 115-118.
- [22] 冯超,马晓茜. 秸秆直燃发电的生命周期评价[J]. 太阳能学报, 2008, 29(6): 711-715.
- [23] 刘俊伟,田秉晖,张培栋,等. 秸秆直燃发电系统的生命周期评价[J]. 可再生能源, 2009, 27(5): 102-106.
- [24] 崔和瑞,艾宁. 秸秆气化发电系统的生命周期评价研究[J]. 技术经济, 2010, 29(11): 70-74.
- [25] 张艳丽,任昌山,王爱华,等. 基于 LCA 原理的国内典型沼气工程能效和经济评价[J]. 可再生能源, 2011, 29(2): 119-124.
- [26] 刘黎娜,王效华. 沼气生态农业模式的生命周期评价[J]. 中国沼气, 2008, 26(2): 17-20.
- [27] 陈豫,胡伟,杨改河,等. 户用沼气池生命周期环境影响及经济效益评价[J]. 农机化研究, 2012, 34(9): 227-232.
- [28] 丁文武,原林,汤晓玉,等. 玉米燃料乙醇生命周期能耗分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2010, 31(6): 773-779.
- [29] Madeline Sena, Andrea Hicks. Life cycle assessment review of struvite precipitation in wastewater treatment [J]. Resources, Conservation & Recycling, 2018, 139: 194-204.

(下转第 292 页)

学、清华大学、中国环境科学研究院、北京市农林科学院、北京林业大学均在污泥土地利用环境风险监测与控制上开展了前期工作,具备了一定的理论基础。建议深入、系统地开展污泥土地利用的环境风险识别与控制机理研究,在科技项目立项上给予重点关注和主持。

3) 重视对北京市污泥安全土地利用区域性规划。

以土地作为处置归宿的污泥消纳瓶颈问题在于环境效应与经济利益的平衡以及整体规划的缺失。污泥的最终出路在于回归土地,宜疏不宜堵,完全禁止污泥土地利用是不符合自然规律的。将污泥无害化处理到一定标准要求,安全合理科学地开展土地利用则是可行的。北京地区除北部、西部区域作为生态涵养区的定位外,东南部、西南部区域均可作为污泥土地利用适宜区域的备选,建议规划、市政、水务、环保、农业等管理部门联合开展北京地区污泥土地利用适宜区域规划。摸清区域内的历史型污泥施用累积量、土壤污染物(重金属、环境药物、持久性有机污染物、盐分)背景信息,结合不同部门的土地利用规划,开展系统化、分层次、有优先推荐序的污泥土地利用区域建议规划。

参考文献

- [1] 何绪文,房增强,王宇翔,等.北京某污水处理厂污泥重金属污染特征、潜在生态风险及健康风险评价[J].环境科学学报,2016,36(30):1092-1098.
- [2] Cheng M M, Wu L H, Huang Y J, et al. Total concentrations of heavy metals and occurrence of antibiotics in sewage sludges from cities throughout China [J]. Journal of Soils and Sediments, 2014, 14(6): 1123-1135.
- [3] Ruan T, Song S J, Wang T, et al. Identification and composition of

emerging quaternary ammonium compounds in municipal sewage sludge in China [J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48(8): 4289-4297.

- [4] 王涛,杨明.北京市污水处理厂污泥处理处置的概况及问题[J].中国环保产业,2016,11:64-68.
- [5] 张莹.北京市污泥处理现状[J].中国资源综合利用,2013,31(6):29-32.
- [6] 周军.北京市污泥现状及处理处置技术策略[J].水工业市场,2011,4:30-32.
- [7] 邢永杰,马伟芳,陈国伟,等.北京市污泥处置现状及生态利用研究[J].中国给水排水,2012,28(4):31-34.
- [8] 刘洪涛,张悦.国情背景下我国城镇污水厂污泥土地利用的瓶颈[J].中国给水排水,2013,29(20):1-4.
- [9] 安琳,蒋海,邓茜,等.北京市污泥消纳无害化处置技术探讨[J].市政技术,2012,30(1):98-102.
- [10] Liu H T. Achilles heel of environmental risk from recycling of sludge to soil as amendment: a summary in recent ten years (2007—2016) [J]. Waste Management, 2016a, 56: 575-583.
- [11] Liu H T. Relationship between organic matter humification and bioavailability of sludge-borne copper and cadmium during long-term sludge amendment to soil [J]. Science of the Total Environment, 2016b, 566: 8-14.
- [12] Bergkvist P, Berggren D, Jarvis N. Cadmium solubility and sorption in a long-term sludge-amended arable soil [J]. Journal of Environmental Quality, 2005, 34: 1530-1538.
- [13] Brazauskienė D M, Paulauskas V, Sabienė N. Speciation of Zn, Cu, and Pb in the soil depending on soil texture and fertilization with sewage sludge compost [J]. Journal of Soil Sediment, 2008, 8(3): 184-192.
- [14] Stietiya M H, Wang J J. Effect of organic matter oxidation on the fractionation of copper, zinc lead, and arsenic in sewage sludge and amended soils [J]. Journal of Environmental Quality, 2011, 40: 1162-1171.

(上接第 388 页)

- [30] Foley J M, Rozendal R A, Hertle C K, et al. Life cycle assessment of high-rate anaerobic treatment, microbial fuel cells, and microbial electrolysis cells [J]. Environmental Science & Technology, 2010, 44(9): 3629-3637.
- [31] Hong J, Chen W, Qi C, et al. Life cycle assessment of multicrystalline silicon photovoltaic cell production in China [J]. Solar Energy, 2016, 133: 283-293.
- [32] 王红彦,毕于运,王道龙,等.生命周期能值分析法与生物质能源研究[J].中国农业资源与区划,2014,35(2):11-17.
- [33] 张军,夏训峰,席北斗,等.基于全生命周期评价的燃料乙醇能值分析——以木薯为例[J].国土与自然资源研究,2010(1):55-57.
- [34] 李欣,姜世玲,杨麒,等.基于生命周期能值分析的秸秆能源化利用方式的对比评价[J].环境工程学报,2016,10(8):4607-4614.

- [35] Luz L M D, Francisco A C D, Piekarski C M, et al. Integrating life cycle assessment in the product development process: A methodological approach [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 193: 28-42.
- [36] Wang X, Chan H K, Li D. A case study of integrated fuzzy methodology for green product development [J]. European Journal of Operational Research, 2015, 241(1): 212-223.
- [37] 孙辉,刘晓英,王国红.基于生命周期理论产业集群运行模式[J].技术经济,2005(12):22-24.

第一作者:刘蔚(1972-),男,高级工程师,主要研究方向新能源及生物质能源技术。Liuw@chec.com.cn

通信作者:王雯(1987-),女,博士,副教授,主要研究方向有机废弃物资源化处理。wangwen@mail.buct.edu.cn