

城市污水处理工艺:生命周期评价

沈耀良^{1,2,3,4}

(1.苏州科技大学 环境科学与工程学院,江苏 苏州 215009; 2.城市生活污水资源化利用技术国家地方联合工程实验室,江苏 苏州 215009; 3.江苏省水处理技术与材料协同创新中心,江苏 苏州 215009; 4.江苏省环境科学与工程重点实验室,江苏 苏州 215009)

摘 要: 生命周期评价(LCA)作为环境管理中行之有效的工具,可对城市污水处理工艺技术的运行管理、能源资源利用及其环境影响等进行综合的评价,提供能源资源回收利用和削减(除)对环境不利影响的有效途径和方法,并为污水处理工艺技术的改进和优化提供重要依据。笔者旨在促进城市污水处理技术更好更快地向效能型和产能型及环境友好型方向发展,并结合 LCA 的主要内容和特点,重点评述了 LCA 在城市污水处理工艺,尤其是对基于高效厌氧处理技术实现有效水质处理和有效能源资源回收的关键性工艺的 LCA 研究和发展现状。

关键词: 城市污水处理;生命周期评价;环境污染控制;能源资源利用

中图分类号: TU992.3

文献标识码: A

文章编号: 2096-3270(2019)01-0001-09

随着可持续发展理念的深入人心以及循环经济实践的不断推进,社会公众对城市污水处理系统的能耗及其所产生的生态环境问题日益关注。以污染物去除、处理出水达标排放为目标的传统城市污水处理厂,不仅因采用耗能性处理工艺而浪费了污水中潜在的大量有价值的资源和能源,而且因有机物和氮、磷等资源转化失散而导致温室气体(GHG)排放、水体富营养化以及地表地下水及土壤污染等环境问题。事实上,污水中各种有机物所含有的能量超过对其采用传统方法处理时所需能源的 10 倍,若采用节能降耗、回收利用的污水处理工艺并对资源、能源加以有效合理利用,则可获得满足其运行的能耗需求。目前,全球日产城市污水超过 9 亿 m^3 ,若对其中资源加以利用,则一个 1 000 万人口的城市所产生的污水中所含营养物足以满足 50 万公顷农田的施肥所需^[1],且当污水的有机物浓度(COD)高于 5 000 mg/L 时,采用厌氧消化(AD)工艺所产生的沼气可满足城市污水处理厂自身的热能需求^[2-3]。有研究表明,采用高转化效率的水源热泵对某进水 COD 浓度为 400 mg/L 的实际污水处理厂污水中潜能转化的计算显示,采用高效水源热泵转换热能并折算为电当量后,其总潜能值可达到 1.97 kWh/m^3 ^[4]。

随着城市的扩张和人口的增长,不仅资源、能源的紧张已成为世界各国的普遍性问题,而且均面临着气候环境恶化、水资源匮乏、水环境卫生问题突出、污水处理技术和管理落后等一系列问题。例如,欧洲仅在 1992 年至 2005 年之间,其污水量增长量超过 62%,而预计到 2030 年,用水量将继续增长 16%,届时将有 11% 的欧洲人口和 17% 的欧洲土地面临严重的缺水问题^[5]。因而,世界各国均面临着可持续发展进程中社会、环境和经济的挑战。可持续发展的最低要求是“不危害支撑地球生命的自然系统”,以“确保技术的使用减缓对自然的压力,并提高自然资源基础的承载力”^[6]。循环经济则以清洁生产模式,将经济活动组织为“资源-产品-再生资源”的“摇篮到摇篮”的闭环流程,以源头预防和全过程控制为原则,实现低投入、低污染、高效益和能源、资源的良性循环,并使环境影响降到最低程度^[7-8]。

因而,基于循环经济理念下的城市污水处理厂,必须将其生命周期间的 GHG 排放控制、能源资源的回收利用、高品质处理出水等作为关键内容综合纳入其中,使城市污水处理向环境友好的可持续方向发展。生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)作为环境管理中确定工艺或产品“摇篮到坟墓”的环境可行性的行

[收稿日期] 2018-12-03

[基金项目] 国家自然科学基金项目(51578353)

[作者简介] 沈耀良(1961-),男,江苏无锡人,教授,博士,主要从事污水处理技术研究,Email: ylshen@mail.usts.edu.cn。

之有效的方法和十分重要的工具,可对城市污水处理工艺技术的设计、运行管理决策以及资源投入、能耗需求、GHG 排放、水体富营养化、生态毒性和水体酸化以及资源能源的回收利用等所有潜在的正、负环境影响进行系统和综合的评价和分析,加深对污水处理运行管理过程中所产生的环境影响的全面理解,提供能源资源回收利用和削减(除)对环境不利影响的有效途径和方法,从而为污水处理工艺技术的改进和优化提供重要依据^[9-11]。此外,循环经济理念下的城市污水的低碳处理、高效控制、资源回收和能源开发和应用,无疑将成为其发展的新方向,即:将由单纯的污染物削减转向保障水质和资源能源利用的综合集成,相关政策、技术标准和应用实践将随之发生深刻的变化,从而使城市污水处理技术的优选和污水处理厂的建设向能源工厂、资源工厂乃至肥料工厂,进而成为互利共生的城市基础设施的方向发展^[12]。

1 城市污水处理生命周期评价的研究应用现状

作为环境管理工具之一的生命周期评价方法,其在污水处理系统中的应用,目的是根据污水处理系统的功能,对其运行管理中资源的投入、生产运行和能源资源的回收利用及最终处理出水、产生的污泥等副产品的处理、处置的整个生命周期内进行全面的评价。虽然 LCA 技术在污水处理中的应用已有 20 多年的时间,但到目前,大多数污水处理的 LCA 研究报道来自欧美等发达国家。发达国家开展的污水处理 LCA 研究,其主要关注的影响评价内容和指标是能源、资源的投入、资源的回收利用、GHG 排放的气候变化影响、土地资源的影响、水体生态毒性等,并更多地从支撑污水处理系统的整体社会、经济和环境的角度进行全方位的评估。而在发展中国家,其城市污水的 LCA 研究则更多地以污水处理工艺的选择、工艺优化、节能降耗等为主要内容和目标,因而更多地围绕污水处理工艺系统本身的运行和管理效能开展评价研究。有统计表明,自 2000 年至今,发展中国家研究者在国际刊物发表的有关污水处理生命周期评价的文献报道仅有 39 篇,而其中 37 篇则是 2010 年以后发表的。2011 年以后,年均均为 5~7 篇。在这些文献中,我国学者发表的论文最多,达 11 篇。但笔者以“生命周期评价+城市污水处理”为关键词,查询相关中文数据库,截至目前,却发现仅有凤毛麟角的 3 篇涉及城市污水处理(厂)LCA 的相关报道,说明我国研究者在此方面的研究成果更多是产生了国际影响。因而,如何更好地将“论文写在中国大地上”,还值得我们深入思考。但无论如何,这也说明我国在此方面的研究,不仅已经起步,而且已有相关的成果并引起国际关注。

此外,城市污水处理 LCA 的研究和应用,由于国情的不同所导致的评价范围、目标、清单分析内容等的不同,其评价结果的解释尚不能从发达国家直接简单地应用于发展中国家,不仅因为许多发展中国家在其地理位置、能源使用的结构类型、社会经济的发展程度方面与发达国家不同甚或大相径庭,而且存在财政限制、城市化进程加速以及专业技术人员缺乏等差异,因而城市污水处理 LCA 的研究和应用必须充分考虑不同国家和地区支撑污水处理系统(运行和管理)的不同社会状况和时代特征。而且,即使同属于发展中国家,也有不同的区别。例如,金砖国家(BRICS)巴西、俄罗斯、印度、中国和南非,它们的能源使用结构也有明显的不同。巴西的能源以水力发电为主,其他国家则以矿物能为主。而以矿物燃料为主的国家中,我国虽正在大力研发和推进使用可再生新能源,并取得了有目共睹的成就,但目前仍主要以燃煤为主,而俄罗斯则以天然气为其主要能源^[5,13]。再者,巴西和俄罗斯的气候特征截然不同,而气候对污水的管理政策、途径和方法有直接的影响。迄今为止,LCA 的方法学和基准体系仍处于不断的发展之中,尚没有被广泛的接受的统一标准。对现有城市污水处理技术 LCA 研究成果的分析也表明,不同的研究其边界的确定、功能单位的定义、影响评价方法的选择、对结果解释的过程等均产生不同的评价功能和结果,原因是目前尚无适用于不同地区和国家、不同情形的统一的标准化的方法,以保证 LCA 的应用质量和效果^[14]。因而,在 LCA 中,必须充分根据不同的国情,因地因时制宜考虑,确定不同的目标范围、功能单位和清单资料。

2 城市污水处理生命周期评价的内容与过程

在 LCA 方法的研究方面,由国际标准化组织(ISO)制定的环境管理标准 ISO14040 和 ISO14044 中的相关研究最有影响,体现了世界范围内的 LCA 研究的共识。根据 ISO 的定义,LCA 的基本内容和过程包括:评价对象的目标和范围的确定、生命周期评价的清单分析(LCI)、生命周期影响评价(LCIA)以及评价结果的解

释(ISO14040),如图 1 所示^[5]。2006 年,ISO 对 LCA 的核心内容作了明确的要求,并提出了相关导则,即《环境管理生命周期评价要求与指南》(ISO14044)^[15]。目前 LCA 的主要研究方法包括清单分析方法和生命周期评价方法。其中,清单分析的理论方法趋于完善,侧重于结合工业应用要求而对数据采集及其处理进行规范化。生命周期环境影响评价方法研究包括评价指标体系研究、影响评价特征化模型研究以及评价结果的规范化等,主要体现在环境损害类型的提出和寿命损害数学模型的建立,以及污染物对人体健康和生态系统毒性的衡量与确定。

2.1 城市污水处理 LCA 的目标和范围

目标和范围的确定是城市污水处理 LCA 最重要的第一步,它包括开展 LCA 工作的目的、范围和主要假定等基本要素,而正确选择其功能单位(Functional Unit, FU),即评价对象中涉及所有物质流动、能耗物耗、资源利用、污染排放的定量参考值,是极其重要的前提。城市污水处理的 LCA 功能单位通常有 1 kgCOD、1 t 污泥、污水或污泥的人口当量以及 1 m³ 污水等。因而,功能单位选择的不同,评价结果也不同。为此,须首先对评价对象的详细情况、各个细节、评价目标,加以清晰而详尽的说明,以正确选择 FU 和所需评价生命周期的阶段。对城市污水处理技术和系统而言,其系统边界通常包括一级处理和二级处理(在某些情况下,也可包括深度处理,甚至污水的收集输送以及污水处理设施的报废等),以及能源、物料的投入、污染物的排放等(见图 2)^[14,16]。

由图 2 可见,城市污水处理的 LCA 研究,因污水处理工艺的类别、资源和能源使用情况以及相关政策和立法的不同而有不同的范围和边界。目前,大多研究都基于对不同处理工艺的比较为目标而进行的定量评价,并通常将传统活性污泥法(CAS)工艺作为参考,与其它“非传统工艺”进行比较。例如,常将 CAS 与节能型(自然)污水处理系统(如人工湿地、慢速渗滤等)以及其它物化和高级(强化)处理工艺作为比较对象。一般认为,节能型工艺所产生的环境影响要低于 CAS,但若以用水、占地作为评价指标时,其情形则相反,原因是它们的低处理能力对生态环境质量的环境影响大于 CAS。此外,也已将污水处理作为“供水-污水处理”整体的城市水循环系统的组成部分进行 LCA 研究(见图 3)^[16-17]。

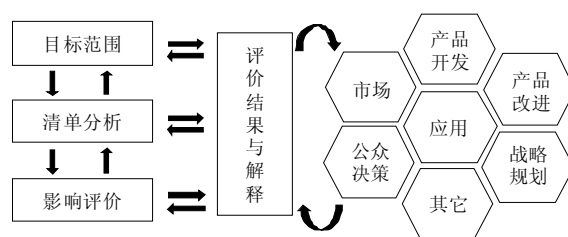


图 1 生命周期评价(LCA)的基本框架及其应用

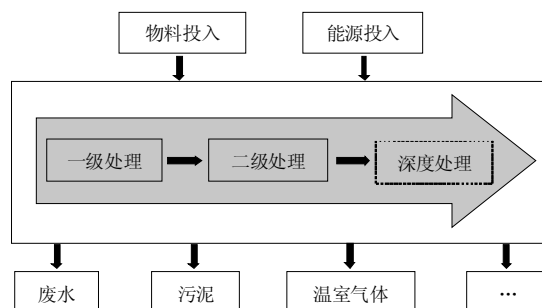


图 2 城市污水处理系统 LCA 基本框架

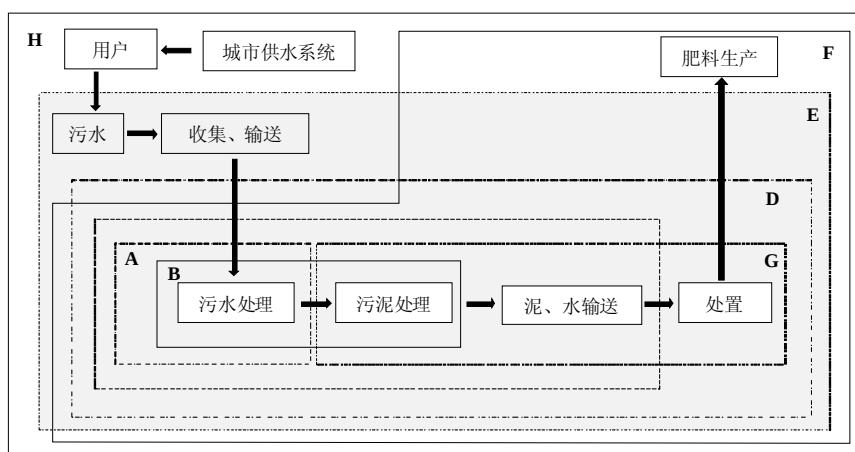


图 3 城市污水处理系统 LCA 边界的不同类型

城市污水处理 LCA 的研究中,功能单位的确定对评价的最终结果具有重要的影响。对不同进水水质、不同处理要求的污水处理工艺进行 LCA 比较研究时,尤其如此。典型的例子是,有研究采用两种功能单位(一是基于处理能力的单位处理水量, $1 \text{ m}^3/\text{d}$;二是基于富营养化问题的单位磷去除量, 1 kgPO_4^{3-})对 6 种不同的城市污水处理厂工艺系统进行了以环境影响为评价目标的 LCA 比较分析表明,当以单位处理水量为功能单位时,处理工艺的富营养化潜势得到缓解,但其相应的处理成本将提高,从而使温室效应潜势增强,而当以单位除磷量为功能单位时,则可获得改善环境的正向结果。研究表明,功能单位的确定,若基于目标影响的消除,则将强化污水处理系统的污染控制效果。此外,有研究采用 IPCC 2007 100 年、生态足迹和 ReCiPe 2008 H 三种不同的影响评价方法对 CAS 与人工湿地的 LCA 研究表明^[18],绝大多数情况下,尤其对发展中国家和土地资源丰富的国家,人工湿地系统是最佳的环境选择,但对发达国家以及土地资源紧张的国家,活性污泥系统将是最佳的环境选择。尤其是,当采用可再生资源能源时,则采用 ReCiPe 2008 H 方法评估的结果表明,CAS 的总影响要小于人工湿地系统。此外,城市污水处理系统的运行寿命参数的变化对人工湿地系统影响较大,人工湿地系统在建设阶段能耗和资源消耗最大。研究还表明,不同评价方法所得到的结果有明显的不同。因此,在生命周期评估研究中,宜采用不同的方法和功能单位(FU)进行多角度的综合评价和验证^[19]。

2.2 城市污水处理 LCA 的生命周期清单

由于城市污水处理的生命周期清单分析(LCI)数据的收集应在综合考虑各方面影响因素的前提下确定。一般而言,污水处理工艺系统 LCA 的清单数据包括污水收集阶段的清单数据、污水处理阶段的清单数据、污水排放及污泥处理和处置阶段的清单数据。如废水水质、工艺运行条件、能耗物耗、化学品的使用、污泥的生产、沼气生产和发电以及固体废物的运输等^[20-21]。由于其 LCA 的范围和边界以及影响类别选择的不同,将导致其评价研究的难度和复杂性也将相应不同,因而也很难进行整体的定量分析。因而,清单分析是开展 LCA 的重要前提和组成部分。研究表明,将污水处理作为“供水-污水处理”整体的城市水循环系统的组成部分进行 LCA 研究时(如图 3, H 所示),污水处理系统(厂)的环境影响是相当明显的。由此说明,LCA 的范围和边界以及目标不同,其所开展的评价的影响类别也应不同,而影响类别的确定是其核心内容。

城市污水处理工艺典型的影响类别/指标主要有:富营养化问题、温室效应问题、生态毒性问题、酸化问题、光化学氧化问题、臭氧层破坏问题、能源资源利用问题以及用地和用水问题等。鉴于 LCA 研究具有明显的因时因地性特征,随评价方法和模式以及所在地区国家的不同而不同。因而,加之对一些特殊工艺的清单数据的整理收集的难度和不确定性或缺乏可比性,常使评价的结果难以作出合理的解释,因而缺乏良好的确定性。目前,对污水处理工艺的富营养化和温室气体排放问题是最受关注的 LCA 研究的环境影响评价指标,但对污水处理工艺系统的用水和占地作为 LCA 的环境影响指标的研究,在近年来已得到快速的发展。其中,对富营养化问题的研究,可通过采用高级(深度)污水处理技术强化对营养物的去除而实现,但如果仅从强化处理技术的角度考虑,则无疑将引起其它环境影响问题。因而,当今的污水处理工艺技术系统的设计、建设和运行管理,必须由目前的“何种污染物需要被去除”的单维度目标思维模式向“何种物质可加以回收利用”的全方位目标思维模式转变,如通过生物固体的利用和源头分离等方法,并结合适当的工艺技术和先进的管理模式,以获得两者的协同效益^[5,16]。

2.3 城市污水处理 LCA 的结果解释

研究表明,污水处理工艺技术 LCA 结果的解释,作为 LCA 重要的环节,要做到明确清晰并非易事。原因是,如前所述 LCA 范围和边界、功能单位、影响评价的因子等确定的不同,将导致对评价结果的解释的不同。因而,当其 LCA 主要目标是污水处理工艺技术的优选时,仅基于 LCA 的评价结果,尚难以做出最优的判断。例如,对溶气气浮、澄清、活性污泥、超滤和反渗透以及 UASB 反应器等不同工艺应用于造纸废水处理的 LCA 研究结果表明,就 GHG 排放、水回用、生态毒性及富营养化等方面的环境影响而言,尚无一种最优的工艺可选,但可为工艺技术的改进提供较为明确的方向。如当将 UASB 反应器作为活性污泥处理工艺的预处理单元加以应用,则可使处理工艺的 GHG 排放和富营养化潜势大大降低^[22]。如对 CAS、高速率曝气法、延时曝气、A/O 工艺、曝气塘和 UASB 反应器工艺等基于 GHG 排放和能源消耗的 LCA 研究表明,UASB 反应器工艺因其高生物量浓度、无需供氧等特点,其运行最为经济、GHG 排放最少。上述 LCA 综合了对污水处理系统的

经济和环境问题两个维度的评价和解释,但要更好地满足可持续发展的需要,则还应将社会的维度纳入其中,以体现和强化 LCA 的整体性和全面性。将污水处理系统的 LCA、净能量平衡计算、整个运行周期内成本的分析等不同方法相结合,将经济、环境和社会等维度相互联系在一起,以确定成本-效益(投入-产出)最优的污水处理系统。事实上,如前所述,LCA 作为一种十分有用的工具,对其结果的解释,可在城市污水处理工艺技术的选择、设计、运行管理等决策过程中,发挥重要的作用,尤其是将 LCA 与经济评估相结合时,对污水处理系统中相互制约、互为关联的每个环节、各项技术进行生命周期评价时,可在污水处理工艺系统工艺优选、CHG 排放消减、回收甲烷能量中发挥重要的作用,从而可更好地在清洁生产模式下,更好地体现循环经济的理念,实现污水处理运行、污水处理技术和污水处理管理的整体协同性和持续性^[23-24]。

3 城市污水厌氧处理工艺技术的生命周期评价

虽然 LCA 在城市污水处理中的应用已有 20 多年的时间,但在污水厌氧生物处理中尚较少,主要是因 LCA 评价之目的不同所致。有的基于沼气生产(以单位污水的沼气产量为能量单位),有的基于水处理规模(日处理水量或人口当量);另一方面,由于缺乏统一的评价方法和选择标准,对评价结果的解释尚较困难^[18,24-26]。因而,在污水厌氧生物处理生命周期评价中,常采用不同的影响评价(LCIA)方法模型,其中较为常用的是 CML 和 ReCiPe 模型。但目前,污水厌氧处理,尤其是高效厌氧处理技术已成为城市污水处理中实现有效能源资源的回收利用乃至产能的关键性工艺,因而对厌氧生物处理过程进行深入的 LCA 研究和分析,可有效促进城市污水处理技术更好更快地向效能型和产能型及环境友好型方向发展^[27]。

3.1 污水厌氧生物处理生命周期评价

众所周知,污水厌氧生物处理与好氧生物处理相比,具有产生可作为能源利用的沼气、污泥产率低(仅有10%左右的底物转化为污泥生物量)及其对处理出水中无机营养物加以利用的优点。由于厌氧微生物生长速率缓慢,因而需要更长的泥龄(SRT)方可实现有效的处理功能。近十年来,随着污水分散性处理方式得到不断重视及对处理出水质量要求的日益严格,膜生物反应器技术(MBR)的应用如雨后春笋般得到快速发展,尤其是厌氧膜生物反应器(A_n MBR),不仅比CAS等工艺具有良好的竞争优势,而且多作为节能型工艺与其它高效厌氧处理工艺进行LCA比较研究。但研究表明,厌氧膜生物反应器工艺的能源回收尚难充分补偿因膜件维护所需的能耗需求。如前所述,与其它厌氧处理工艺相比, A_n MBR工艺可在中低温(15~30℃)或高温(55℃)条件下运行,有研究表明,基于循环经济理念,淹没式厌氧膜生物反应器(SA_n MBR)工艺作为城市污水处理的低耗型新工艺,对其加以研究开发,极具良好的应用前景^[11]。但其存在的主要问题是膜污染。膜污染导致膜的破坏及产水能力的下降,需要对其采取相应的措施进行清理修复,而增加能耗和运转费用^[28]。与此同时,需要考虑对处理过程中产生的沼气及出水中氮、磷的回收利用,以改善其应用的环境可行性。据此理念,Smith等研究表明^[29], A_n MBR工艺对能源的消耗是其可资回收能源的5倍,即其全球气候变暖潜势(Global Warming Potential,GWP)高于其他污水生物处理工艺,但其能源回收系统的生命周期成本则要低于常规的污水生物处理工艺。

图 4 所示为 Pretel 等人提出的 SA_nMBR 工艺 LCA 的概念模型^[30-31]。该系统由一个厌氧反应器与两个超滤膜 SA_nMBR 池构成。其运行的固体停留时间(SRT)为 70 d, 温度为 20~30 ℃。如图 4 所示, 对该工艺进行生命周期评价时, 首先确定其系统边界: (1) 污水处理系统运行期间各处理单元的环境影响 (不包括工艺建设期、预处理、膜生产和停产之后); (2) 出水水质的监测分析, 评价营养物回收的可行性。不考虑处理出水潜在的热影响; (3) 处理工艺系统的温室效应(GWP)。即, 将

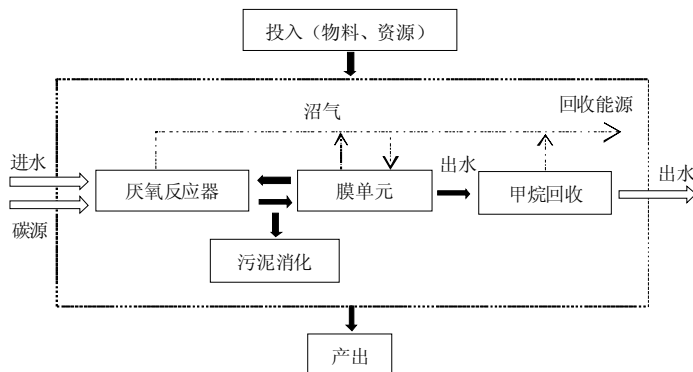


图 4 淹没式厌氧 MBR(SA-MBR)工艺 LCA 的边界

工艺系统的电耗作为 GHG 排放评价的主要因子。并在此基础上,确定单位污水处理量(即,1 m³ 污水)作为其功能单位(FU),并以能耗、原料、空气、占地和排放等作为其清单分析内容,采用 CML2 baseline 2000 模型对能源消耗、资源回收、出水水质和污泥处理等进行生命周期环境影响评价(LCIA)。结果表明,SA_mMBR 工艺处理处理中等浓度污水时,与其它工艺相比,其GWP 值最高,说明其能耗引起的排放是值得关注的重大问题。同时表明,其能量消耗需求在中温(33 ℃)运行时极高,而在环境温度下运行时,则明显下降。但温度下降并非是其减少排放的关键。并认为,回收污水中的营养物质和处理出水中的甲烷是重要的解决途径,处理过程中损失的甲烷将大大增加该工艺的碳足迹。因为,厌氧消化液中溶解态的甲烷,如不加回收,则其损失量可占污水处理系统甲烷产量的 30%~40%。另外,Krzeminski 等^[32]报道了 AnMBR 工艺与传统膜工艺的 LCA 比较研究的结果表明,后者主要体现为对淡水和海水的富营养化影响,而前者则主要体现为较高的与能耗有关的排放问题(即 GWP)。

以上研究表明,实际上,传统的厌氧生物处理工艺虽然就其以污水中污染物的去除而言,具有明显的相对优势,但当考虑其资源回收及其对外部的环境影响时,则并不总是具有绝对的优势,即就其整体的 LCA 而言,其产生的环境效益并不总是能与其潜在的环境影响相平衡的。如对传统的厌氧生物处理工艺应用于处理玉米淀粉生产废水并考虑从其中回收生物柴油的生产系统前后的 LCA 表明,其生物柴油回收的能耗(大量电能的消耗)及其导致的 GWP 可达 233%。虽然通过发酵生产生物柴油,可同时提高对废水中有机污染物的去除率并降低处理出水对受纳水体的环境影响,但需要进一步强化和优化作为可再生资源的生物柴油回收生产的效率,以降低其 GWP^[33]。

3.2 污泥厌氧消化(AD)工艺的生命周期评价

污泥处理作为整个城市污水处理系统不可分割的重要组成部分,对其及时、合理有效的处理和处置是消除环境影响、促进资源利用的不可或缺的重要内容。LCA 业已较多地应用于污水污泥处理工艺系统,而其研究分析的最基本目标是对不同的处理工艺或单元进行环境经济的可行性和影响度进行比较,从而优选处理工艺、乃至处置技术。其 LCA 的范围和边界通常仅包括污泥处理单元工艺,而不涉及污水处理单元(如图 3, G 所示),而纳入 LCA 的污泥处理单元主要有厌氧消化、(沼气)能源回收和无机营养物的利用等,有的研究也将污泥的调节预处理纳入其中^[34-35]。目前,大多的污泥处理 LCA 研究与分析都是基于中温(35 ℃)和含固率为 3%~6%的厌氧消化(固体停留时间 SRT 为 12~30 d)^[5,36]。在 LCA 研究分析过程中,将污水污泥始于看作“废物”,但通过将其中的能源和营养加以回收利用,而将其看作“产品”,实现“废物”至“产品”的转化。当污泥看作“废物”时,其所产生的环境影响应纳入污水处理系统的 LCA,当将其看作“产品”时,则可按图 5 所示的系统边界加以评价。这样的评价方法和思路可应用于不同污水处理和污泥处理工艺的比较分析。但由于目前针对厌氧生物处理的 LCIA 尚未有可资利用的系统完整的清单参考值,尤其是污水污泥厌氧消化处理系统的功能(污泥稳定化工能、沼气能源产生功能、消化液中营养物质利用功能等)尚较难以通过统一的系统因子建立相互的联系。因为,在 LCA 研究分析中的清单分析数据的来源和质量对 LCA 评价的结果及其解释的影响至关重要,虽然获得此类数据资料的途径方法较多,但最合适的途径还是

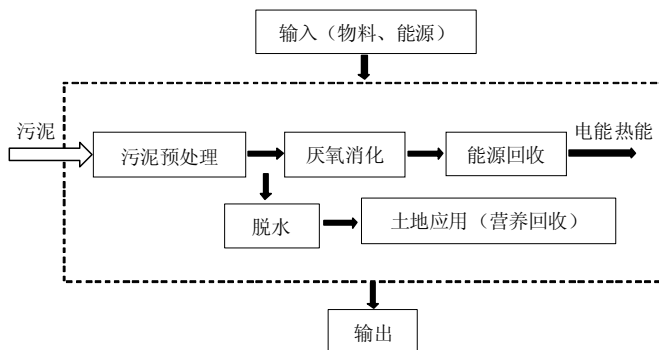


图 5 污水污泥厌氧消化处理 LCA 的边界

采用实际污水处理工艺(厂)、污泥处理系统的运行控制、分析检测和操作管理等实际数据,或通过实验室研究分析获得数据。对特殊的 LCA 研究要求而言,污泥厌氧消化工艺的清单分析数据资料必须全面详尽。

污水污泥工艺环境影响的 LCA 方法尚在不断完善和改进之中。其中最常用的方法是 CML 法。目前,ReGiPe(模型)法因其综合了中间类型(mid-point)和终点类型(end-point)而逐渐得到研究者的青睐。基于循环经济理念和清洁生产模式下的污水污泥处理和管理系统具有多种功能,需要对其相应的各种影响加以综

合评价。因而,气候变化、酸化、富营养化、光化学氧化、臭氧耗竭、人体危害、生态毒性以及非生物资源耗竭等,亦是其基本的评价指标。如目前,已有对城市固体废弃物与城市污水污泥联合处理实现能源、资源利用的环境、能源和经济的综合分析的研究^[36]。相关研究表明,须将污泥的预处理(包括贮存、化学调节、淘洗等)纳入污水污泥 LCA 的整体过程,对污泥预处理的化学药剂使用和用水、污泥消化效率、沼气生产、氮磷资源回收及其环境影响进行综合评价^[37-38]。据此,对中温和高温条件下的污泥厌氧消化处理系统的 LCA 研究表明,高温消化因其沼气产量高、氮磷资源价值高而产生的环境影响将更小。此外,通过以污水处理与 CO₂ 捕集相集成的方法从污水生产微生物柴油材料的研究也已经有了较好的起步^[39],这种实现污染物去除和资源回收的污水处理清洁生产模式,无疑将成为今后的发展方向,也为 LCA 在污水处理中的应用中的清单分析内容提出了更严格的要求。

LCA 在污水污泥中的应用,始于本世纪初,最初多为基于对污水处理厂污水污泥的管理(处理和处置利用)方法的比较性研究,因而并非真正意义上的 LCA,仅着重于沼气的生产(如电能、热能)与处理过程中能耗平衡分析,但通过比较也反映了能源、资源回收利用对于可持续性污泥管理的重要性。因而随着对污水污泥厌氧处理 LCA 研究和应用的发展,更加注重清单资料的分析,以获得更加符合实际的评价结果,并由此可进一步促进城市污水污泥系统环境影响的定量化评价。

4 结语

目前,随着循环经济理念的深入人心,已将城市污水处理技术系统作为社会、经济和环境发展有机组成部分,由末端治理走向源头控制,以污染物去除、资源利用、能源生产向协同的发展之路,并越来越多地利用 LCA 分析,对城市污水处理技术进行了水质水量管理、资源能源利用、成本核算和经济分析以及环境影响等方面的综合评价研究,以更好地优化城市污水处理工艺技术、充分利用污水能源资源、有效消除水体富营养化、和温室效应等环境问题。

LCA 作为环境管理中确定工艺或产品“摇篮到坟墓”的环境可行性的行之有效的方法和十分重要的工具,通过不同目标和边界、功能单位以及清单分析评价等过程,可对城市污水处理工艺技术的设计、运行管理决策以及资源投入、能耗需求、GHG 排放、水体富营养化、生态毒性和水体酸化以及资源能源的回收利用等进行综合的评价,提供能源资源回收利用和削减(除)对环境不利影响的有效途径和方法,并为污水处理工艺技术的改进和优化提供重要依据。

但目前,我国城市污水处理技术的 LCA 研究的发展尚有待加强,尤其是根据 LCA 的基本特征,着力于围绕利用城市污水处理技术的优化和资源能源的利用,借鉴国外的先进技术与经验,对不同类别的城市污水处理技术和工艺,尤其是对基于高效厌氧处理技术实现有效能源资源的回收的关键性工艺的 LCA 研究和分析,可有效促进城市污水处理技术更好更快地向效能和产能型及环境友好型方向发展,不断完善清单分析资料库的建立,改进分析方法,从而提出符合我国国情的城市污水处理技术优化和节能降耗工艺技术,并真正发挥其优化和提升我国城市污水处理技术的应有作用。

参考文献:

- [1] JENKINS D, WANNER J. Activated sludge—100 years and counting[M]. London: IWA Publishing, 2014.
- [2] SANCHO I, LOPEZ-PALAU S, ARESPACOHAGA N, et al. New concepts on carbon redirection in wastewater treatment plants: a review[J]. Science of the Total Environment, 2019, 647:1373–1384.
- [3] MCCARTY P L, BAE J, KIM J. Domestic wastewater treatment as a net energy producer——can this be achieved?[J]. Environmental Science and Technology, 2011, 45(17):7100–7106.
- [4] 郝晓地, 方晓敏, 李季, 等. 污水碳中和运行潜能分析[J]. 中国给水排水, 2018, 34(10):11–16.
- [5] NAUSHAD M. Life cycle assessment of wastewater treatment[M]. Boca Raton: CRC Press, 2018.
- [6] The world commission on Environment and Development. Our Common Future[M]. Oxford: Oxford University press, 2009.
- [7] CHARTER M. Designing for the circular economy[M]. New York: Routledge Press, 2018.
- [8] LACY P, RURQVIST J. Waste to wealth: the circular economy advantage[M]. London: Palgrave Macmillan, 2015.

- [9] GARFÍ M, FLORES L, FERRER I. Life cycle assessment of wastewater treatment systems for small communities: activated sludge, constructed wetlands and high rate algal ponds[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 161 :211–219.
- [10] HU W, GUO Y, TIAN J, et al. Eco-efficiency of centralized wastewater treatment plants in industrial parks: a slack-based data envelopment analysis[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, 141 :176–186.
- [11] GUVEN H, DERELI R K, OZGUN H, et al. Towards sustainable and energy efficient municipal wastewater treatment by up-concentration of organics[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2019, 70 :145–168.
- [12] 曲久辉,王凯军,王洪臣,等. 建设面向未来的中国污水处理概念厂[N]. *中国环境报*, 2014–01–07(10).
- [13] VOLKART K, MUTEL C L, PANOS E. Integrating life cycle assessment and energy system modelling: methodology and application to the world energy scenarios[J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2018, 16 :121–133.
- [14] COROMINAS L, FOLEY J, GUEST J S, et al. Life cycle assessment applied to wastewater treatment: state of the art[J]. *Water Research*, 2013, 47(15):5480–5492.
- [15] HAUSCHILD M Z, ROSENBAUM R K, OLSEN S I. Life cycle assessment: theory and practice[M]. Springer, 2017.
- [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] ZANNI S, CIPOLLA S S, DI FUSCO E, et al. Modeling for sustainability: Life cycle assessment application to evaluate environmental performance of water recycling solutions at the dwelling level[J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2019, 17 :47–61.
- [18] DE FEO G, FERRARA C. A procedure for evaluating the most environmentally sound alternative between two on-site small-scale wastewater treatment systems[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 164 :124–136.
- [19] ZANG Y, LI Y, WANG C, et al. Towards more accurate life cycle assessment of biological wastewater treatment plants: a review[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 107 :676–692.
- [20] 黄希望, 罗小勇, 李轶, 等. 污水处理厂生命周期评价及不同工艺污水处理系统的环境影响比较分析[J]. *水资源保护*, 2014, 30(1):90–94.
- [21] PIAO W, KIM Y, KIM H, et al. Life cycle assessment and economic efficiency analysis of integrated management of wastewater treatment plants[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 113 :325–337.
- [22] O'CONNOR M, GARNIER G, BATCHELOR W. Life cycle assessment comparison of industrial effluent management strategies[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 79 :168–181.
- [23] 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.
- [24] VALENTE A, IRIBARREN D, DUFOUR J. How do methodological choices affect the carbon footprint of microalgal biodiesel? A harmonised life cycle assessment[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 207 :560–568.
- [25] LI Y, MANANDHAR A, LI G, et al. Life cycle assessment of integrated solid state anaerobic digestion and composting for on-farm organic residues treatment[J]. *Waste Management*, 2018, 76 :294–305.
- [26] MELLINO S, DE ANGELIS G, LIU G, et al. Life cycle assessment indicators of urban wastewater and sewage sludge treatment[J]. *Elvira Buonocore, Ecological Indicators*, 2018, 94 :1–23.
- [27] 沈耀良. 城市污水处理技术:过去现在将来[J]. *苏州科技大学学报(工程技术版)*, 2018, 31(4):1–13.
- [28] ROBLESÁ, RUANO M V, CHARFI A, et al. A review on anaerobic membrane bioreactors (AnMBRs) focused on modelling and control aspects[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 270 :612–626.
- [29] SMITH A L, STADLER L B, CAO L, et al. Navigating wastewater energy recovery strategies: a life cycle comparison of wastewater energy recovery strategies: anaerobic membrane bioreactor and high rate activated sludge with anaerobic digestion[J]. *Environmental Science and Technology*, 2014, 48 :5972–5981.
- [30] PRETE R, ROBLES A, RUANO M V, et al. Environmental impact of submerged anaerobic MBR (SAnMBR) technology used to treat urban wastewater at different temperatures[J]. *Bioresource Technology*, 2013, 149 :532–540.
- [31] PRETE R, ROBLES A, RUANO M V, et al. Economic and environmental sustainability of submerged anaerobic MBR-based (AnMBR-based) technology as compared to aerobic-based technologies for moderate-/high-loaded urban wastewater treatment [J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 166 :45–54.

- [32] KRZEMINSKI P, LEVERETTE L, MALAMIS S, et al. Membrane bioreactors—a review on recent developments in energy reduction, fouling control, novel configurations, LCA and market prospects[J]. *Journal of Membrane Science*, 2017, 527 :207–227.
- [33] NAVAS-ANGUITA Z, CRUZ P L, MARTÍN-GAMBOA M, et al. Simulation and life cycle assessment of synthetic fuels produced via biogas dry reforming and Fischer–Tropsch synthesis[J]. *Fuel*, 2019, 235 :1492–1500.
- [34] BUONOCORE E, MELLINO S, DE ANGELIS G, et al. Life cycle assessment indicators of urban wastewater and sewage sludge treatment[J]. *Ecological Indicators*, 2018, 94(3) :13–23.
- [35] YOSHIDA H, 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.
- [36] CHEN G, WWANG 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.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] SUNDARRAJAN P, GOPINATH K P, GREETHAM D, et al. A review on cleaner production of biofuel feedstock from integrated CO₂ sequestration and wastewater treatment system[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 210 :445–458.

Municipal wastewater treatment processes: life cycle assessment (LCA)

SHEN Yaoliang^{1,2,3,4}

(1.School of Environmental Science and Engineering, SUST, Suzhou 215009, China; 2.National and Local Joint Engineering Laboratory of Municipal Sewage Resource Utilization Technology, SUST, Suzhou 215009, China; 3. Jiangsu Collaborative Innovation Center of Technology and Material of Water Treatment, SUST, Suzhou 215009, China; 4.Jiangsu Key Laboratory of Environmental Science and Engineering, SUST, Suzhou 215009, China)

Abstract: Life Cycle Assessment (LCA), as an effective and important tool in environmental management, can be applied to the comprehensive evaluation of operational management, utilization of energy and resources and their environmental impacts of municipal wastewater treatment technology, which will provide effective ways and means for recycling energy and resources, reducing or eliminating adverse environmental impacts and upgrading or optimizing the wastewater treatment processes as well. In order to promote the better and fast transformation of municipal wastewater treatment technology to the pattern of resource–utilization, energy–efficiency and production, a comprehensive review was made in this paper on the application of LCA in municipal wastewater treatment processes, especially in the key and high efficient anaerobic process and technologies characterized with high quality effluent and effective energy/resource use, based on the introduction to the main contents and characters of LCA.

Key words: municipal wastewater treatment; life cycle assessment; environmental pollution control; energy and resource utilization

(责任编辑: 经朝明)