

污水处理厂污泥减量技术路线的生命周期评价

李 冰¹ 邱 勇¹ 李 激^{1,2} 施汉昌¹

(1. 清华大学环境学院 北京 100084;

2. 江南大学环境科学与工程学院 江苏 无锡 214000)

摘 要 随着市政污泥处理处置需求的增加,污泥减量和资源化技术不断发展,要求对技术路线的进行定量比较和基准分析。本文提出使用生命周期评价的方法来评价污泥减量技术路线。首先根据常见的污水处理工艺、污泥减量和资源化技术建立了相关技术路线,然后采用 IMPACT 2002 + 的方法,对污泥减量化技术路线的环境影响进行了评价和比较。结果表明采用减量技术和制肥等资源化技术,可以有效减少污泥的环境影响,同时污水处理工艺、运行负荷状况等均对整体的环境影响也有贡献。

关键词 生命周期评价 污水处理厂 污泥减量技术 IMPACT 2002 +

引 言

我国的污水处理能力快速增长,截至 2010 年底,我国已建成城镇污水处理厂 2832 座,设计污水处理能力 1.25 亿 m^3/d 。“十二五”期间,预计每年新增污水集中处理能力 1500 万 m^3/d 。污水处理能力的提高,带来了污泥处理处置方面的挑战。按污泥(含水率 80%)占污水质量比例 0.06%,新增污水处理能力运行负荷 75% 计算,我国剩余污泥将以 246 万 t/a 的速度逐年递增。剩余污泥通常含有大量有毒有害物质及未稳定化的有机物,需要经过浓缩、稳定、消化、脱水及无害化处置等工艺步骤,以便降低对人类和环境的直接或潜在的污染风险。因此,污泥量大、处置麻烦等已经成为迫切需要解决的问题。

随着公众环保和健康意识的提高,以及污水污泥处理技术的不断创新,污泥处理处置工艺已经从过去污水处理的一个单元发展成了污水处理工艺需要优先考虑的重要环节。在污水处理厂内部实现污泥减量、对剩余污泥实现资源化,成为解决上述难题、减少污泥环境影响的基本思路。

目前,国内已有多种比较成熟的污水处理工艺和污泥减量及处理技术,比如采用 MBR、延时曝气等低污泥产量工艺,或者采用 OSA 工艺或者投加菌剂的污泥减量技术,以及填埋、焚烧和堆肥等资源化技术等。在不同的污水处理工艺下,选择哪种污泥减量及处理工艺最优,成为污水处理厂决策者面临的一个问题。

因此,本文采用 LCA 的方法分析了常见的三种污水处理工艺(AAO、MBR、OD)条件下的污泥减量路线,对比了不同技术路线的环境影响,从而为污泥减量技术路线的选择提供一个思路。

一、污水和污泥处理的 LCA 评价研究

(一) LCA 的评价方法介绍

根据 ISO 定义,LCA 可分为评价目标和范围的确定、清单分析、影响评价和结果解释四个阶段^[1]。

LCA 方法首先需要确定评价目标和评价范围,即系统定义和边界、假设条件、数据要求和限制条件等。确定评价的目标和范围后,需要选择用于评价的功能单位^[2]。比如 Machado 等^[3]采用“每人”,Pasqualino 等^[4]采用“每立方米污水”;Houillon 等^[5]采用“每吨干污泥”;Vlasopoulos 等^[6]采用“每天处理的污水”。

清单分析(Life Cycle Inventory, LCI)需要列出一份与研究系统相关的投入与产出清单,关键是收集系统输入和输出的数据,如物质和能量的消耗量、排入环境的废弃物总量等。本文的清

单分析包括污水处理、污水排放及污泥处理处置阶段的输入和输出^[7]。

生命周期影响评价（Life Cycle Impact Assessment，LCIA）根据清单分析过程中列出的要素对环境的影响进行定性和定量分析，研究系统的输入输出对环境产生的潜在影响^[8]。污水处理过程的环境影响主要包括酸雨、气候变化、富营养化、光化学氧化、非生物资源的消耗、臭氧消耗潜能及生态毒性等方面。本研究采用 IMPACT2002 + 评价方法。

结果解释是指通过对评价结果的分析得出结论，从而指导生产和实践。当采用 LCA 对不同的污水或污泥工艺进行对比时，可通过评价结果优化工艺。

（二）污水处理过程的 LCA 评价

LCA 主要应用于评价整厂、污水处理工艺、污泥处理工艺等的环境影响。

Roeleveld 等^[9]分析了污水处理厂的四种不同工艺，发现污水处理可持续性的关键是降低出水污染物和减少污泥排放量；Hospido 等^[10]对四座大型污水处理厂的 LCA 分析得出污水二级处理和污泥厌氧消化必不可少。国内研究人员韩进光等^[11]对北石桥污水处理厂生命周期全过程资源消耗、能耗和环境影响进行了识别和量化分析，并与典型活性污泥法处理工艺进行了对比；杨健等运用 LCA 比较三种不同活性污泥法处理工艺^[12]、生物滤池法与普通活性污泥法的比较^[13]等。

LCA 还可以广泛应用于传统的或新型的污水处理工艺的评价。比如 Foley 等^[14]比较了高效厌氧处理、MFC 及 MEC 处理同种污水的环境影响；Lundin^[15]和 Tillman^[16]的研究比较了生活污水源分离技术和传统工艺的环境影响；Vlasopoulos 等^[6]对石油废水的不同处理工艺进行比较；Kohler 等^[12]对两种工业废水处理工艺进行了 LCA 评价等。

（三）污泥处理工艺的 LCA 评价

污泥处理工艺的 LCA 分析有助于筛选环境影响较小的工艺，如填埋、焚烧、厌氧消化、堆肥等。

Suh 等^[10]比较了欧洲五种污泥处理方法（焚烧、堆肥、厌氧消化、填埋及土地应用）的环境影响进行；Johansson 等^[17]对比了四种污泥处理方法（矿山地区的修复、与其他生物质混合堆肥用于高尔夫球场、卫生存储后用于农业及超临界水氧化同时磷回收）；Petersd 等^[18]分析了一个 4 万人口小镇的污水厂剩余污泥的 8 种可能的处理方法及最终用途；Hospido 等^[19]比较了厌氧消化及热解两种污泥处理方法的环境影响；Uggetti 等^[20]评价了一种污泥处理湿地的新方法；Peregrina 等^[21]分析了一种污泥干化新方法。

二、污泥减量技术路线

目前的污泥减量技术可以分为工艺选择、工艺减量和后处理。选择低污泥工艺会明显影响到污泥的产量。工艺减量技术主要分为操作优化和回流污泥处理等两类。后处理主要包括热处理、化学处理、消化和资源化等技术。

本文建立了如图 1 所示的污泥减量技术路线。工艺选择包括常见的 AAO、氧化沟和 MBR 等工艺，AAO 工艺作为基准。工艺减量方面包括 OSA 型工艺、投加菌剂减量等。后处理方面包括常见的填埋、焚烧和堆肥技术。通过顺序组合，即可形成相应的技术路线。

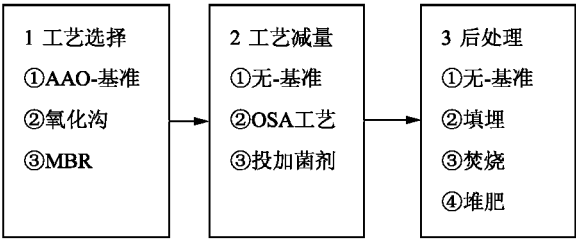


图 1 污水处理厂的污泥减量技术路线

三、基准情景分析

在图 1 所示技术路线中, 以某 AAO 污水处理厂作为基准, 采用 LCA 方法分析其对环境的影响。评价目标为污水处理厂运营期的环境影响, 评价范围如图 2 所示, 功能单位为每立方米处理污水。

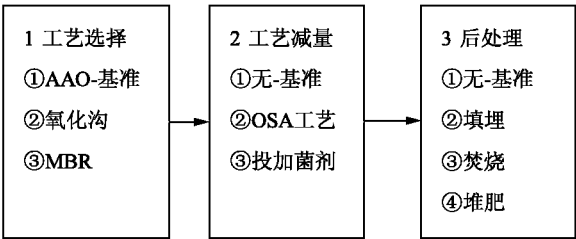


图 2 生命周期评价的范围

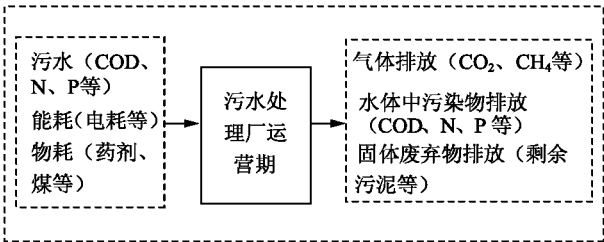


图 3 污水处理厂（基准 AAO）的标准中点影响评价结果

确定评价目标、范围及功能单位后, 对污水处理厂的运营期进行了清单分析。清单分析的数据主要来自污水处理厂的实地调研及文献数据^[19,22]。

在完成清单分析后, 采用 IMPACT2002 + 的中点影响评价方法对污水处理厂基准情形进行影响评价。影响评价的结果既可采用中点影响评价, 也可采用损害影响评价^[23]。图 3 采用了标准中点系数的方法。可以看到, 影响最大的是重金属引起的人体毒性和水生、陆生毒性, 影响次之的是出水营养盐带来的富营养化和酸化影响, 其他因素影响都很小, 可以忽略。

四、污泥减量技术路线的 LCA 评估分析

(一) LCA 评估的工艺条件

在基准情况以及其他技术路线的清单分析中, 根据工程运行经验, 给出如表 1 所示的工艺条件, 用于各项指标分解和计算。

表 1 污泥减量技术的工艺选择和运行参数

	负荷率	AAO	氧化沟	MBR
吨水电耗/ (kWh/m ³)	高负荷	0.35	0.45	0.70
	中负荷	0.30	0.40	0.60
	低负荷	0.25	0.35	0.50
污泥产率/ (kg/m ³)	高负荷	0.203	0.146	0.106
	中负荷	0.163	0.114	0.089
	低负荷	0.122	0.081	0.065

续表 1

	负荷率	AAO	氧化沟	MBR
OSA 工艺 减量/%	高负荷	45	30	35
	中负荷	36	24	28
	低负荷	27	18	21
投加菌剂 减量/%	高负荷	40	20	30
	中负荷	32	16	24
	低负荷	24	12	18

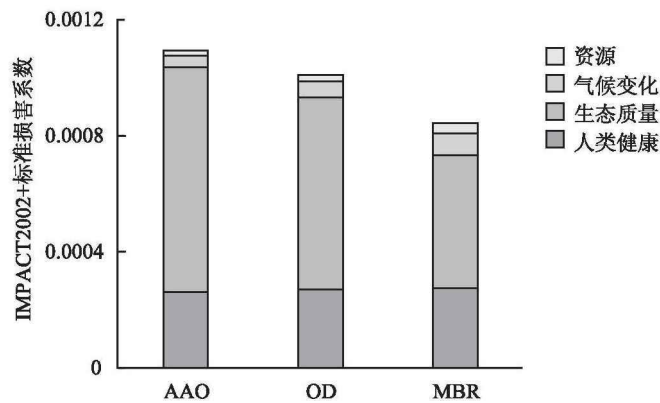


图 4 工艺选择对环境的影响

(二) 工艺选择的影响

对技术路线中工艺选择和工艺减量部分的环境影响进行平均，得到图 4 所示的工艺类型对损害评价的影响。可以看到，生态质量影响最大，次之为人体健康，均为重金属引起。工艺污泥产率对评估影响大，MBR 产泥量低，因此损害也较小，氧化沟次之，AAO 较差。

(三) 工艺减量技术的影响

由于生态质量损害最大，因此以其为指标探讨了 AAO、OD 和 MBR 工艺配合 OSA 和加药工艺的损害影响，将不同负荷情景进行平均，如图 5 所示。可以看到，MBR 配合 OSA 工艺或者投加药剂明显降低了环境影响，但是 OD 和 AAO 略差。

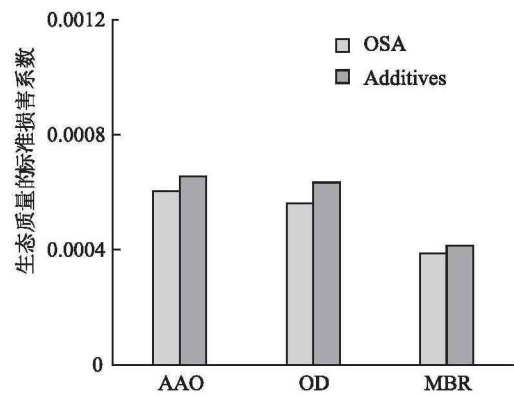


图 5 工艺减量技术对生态环境质量的影响

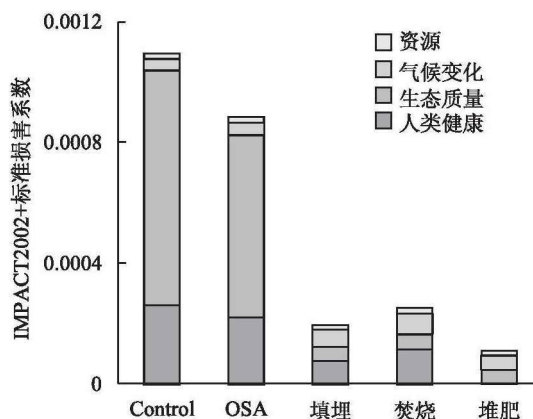


图6 污泥资源化技术对生态环境质量的影响

(四) 污泥后处理工艺的影响

图6所示为按照污泥后处理工艺平均后的损害情况。可以看到，堆肥的环境影响最小，填埋次之，焚烧较大，但三者均比基准情况或者AAO配合OSA工艺有明显改善。这说明采用必要的污泥资源化技术，可以明显减少污水和污泥处理工艺对环境的影响。

五、结 论

本文提出使用生命周期评价的方法来评价污泥减量技术路线，结论如下。

1. 根据常见的污水处理工艺、污泥减量和资源化技术建立了包含工艺选择、污泥减量、污泥后处理等环节的技术路线，以AAO工艺比较基准。
2. 采用IMPACT 2002+的评价方法，对基准情景的环境影响进行了评价和比较，重金属和出水营养盐的环境影响较大。
3. 分析和比较了工艺选择、减量技术、资源化技术对环境影响的贡献，结果MBR等低污泥工艺的环境影响小、污泥减量技术可以降低环境影响、资源化技术能明显和有效控制环境影响。因此，需要加大对污泥资源化技术的重视。

参 考 文 献

- [1] ISO 14040 International Standard. Environmental management - Life cycle assessment - principles and framework. International Organization for Standardization; Geneva, Switzerland, 2006.
- [2] Ahmed M. Life cycle analysis in wastewater: A sustainability perspective. In: Barceló D, Petrovic M, eds. *Waste Water Treatment and Reuse in the Mediterranean Region*; Springer Berlin/Heidelberg, 2011: 125.
- [3] Machado AP, Urbano L, Brito AG, Janknecht P, Salas JJ, Nogueira R. Life cycle assessment of wastewater treatment options for small and decentralized communities. *Water Science & Technology*, 2007, 56 (3): 15-22.
- [4] Pasqualino JC, Meneses M, Abella M, Castells F. LCA as a decision support tool for the environmental improvement of the operation of a municipal wastewater treatment plant. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43 (9): 3300-3307.
- [5] Houillon G, Jolliet O. Life cycle assessment of processes for the treatment of wastewater urban sludge: energy and global warming analysis. *Journal of Cleaner Production*, 2005, 13 (3): 287-299.
- [6] Vlasopoulos N, Memon FA, Butler D, Murphy R. Life cycle assessment of wastewater treatment technologies treating petroleum process waters. *Science of the Total Environment*, 2006, 367 (1): 58-70.
- [7] 陈郁, 郑洪波, 杨凤林, 张树深. 城市污水处理厂生命周期评价方法初探及应用案例 [J]. 大连理工大学学报, 2003, 43 (3): 292-297.

- [8] 刘忠文. ISO 14040 生命周期评价概述 [J]. 环境导报, 1998, (1): 32 - 34.
- [9] Roeleveld PJ, Klapwijk A, Eggels PG, Rulkens WH, VanStarkenburgh W. Sustainability of municipal wastewater treatment. *Water Science & Technology*, 1997, 35 (10): 221 - 228.
- [10] Hospido A, Moreira MT, Feijoo G. A comparison of municipal wastewater treatment plants for big centres of population in Galicia (Spain). *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2008, 13 (1): 57 - 64.
- [11] 韩进光, 郑承军, 王毅. 西安市北石桥污水处理工程生命周期评价研究 [J]. 给水排水, 2009 (S1): 214 - 217.
- [12] 杨健, 吴敏. 3 种活性污泥法处理工艺的生命周期能耗分析 [J]. 上海环境科学, 2001, 20 (12): 582 - 585.
- [13] 杨健, 陆雍森, 施鼎方. 运用生命周期分析 (LCA) 评估和选择废水处理工艺 [J]. 工业用水与废水, 2000, 31 (3): 4 - 6.
- [14] Foley JM, Rozendal RA, Hertle CK, Lant PA, Rabaey K. Life Cycle Assessment of High - Rate Anaerobic Treatment, Microbial Fuel Cells, and Microbial Electrolysis Cells. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44 (9): 3629 - 3637.
- [15] Lundin M, Bengtsson M, Molander S. Life cycle assessment of wastewater systems: Influence of system boundaries and scale on calculated environmental loads. *Environmental Science & Technology*, 2000, 34 (1): 180 - 186.
- [16] Tillman AM, Svingby M, Lundstrom H. Life cycle assessment of municipal waste water systems. *Journal of Life Cycle Assessment*, 1998, 3 (3): 145 - 157.
- [17] Johansson K, Perzon M, Friling M, Mossakowska A, Svanström M. Sewage sludge handling with phosphorus utilization - life cycle assessment of four alternatives. *Journal of Cleaner Production*, 2008, 16 (1): 135 - 151.
- [18] Peters GM, Rowley HV. Environmental Comparison of Biosolids Management Systems Using Life Cycle Assessment. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43 (8): 2674 - 2679.
- [19] Hospido A, Moreira MT, Feijoo G. A comparison of municipal wastewater treatment plants for big centres of population in Galicia (Spain). *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2008, 13 (1): 57 - 64.
- [20] Uggetti E, Ferrer I, Molist J, Garcia J. Technical, economic and environmental assessment of sludge treatment wetlands. *Water Research*, 2011, 45 (2): 573 - 582.
- [21] Peregrina CA, Lecomte D, Arlabosse P, Rudolph V. Life cycle assessment (LCA) applied to the design of an innovative drying process for sewage sludge. *Process Safety and Environmental Protection*, 2006, 84 (B4Sp. Iss. SI): 270 - 279.
- [22] 谭国栋, 李文忠, 何春利. 北京市城市污水处理厂污泥处理处置技术研究探讨 [J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9 (2): 105 - 109.
- [23] Jolliet O, Margni M, Charles R, et al. IMPACT 2002 + : A new life cycle impact assessment methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2003, 8 (6): 324 - 330.