

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.03.013

基于LCA的MBfR污水深度脱氮应用潜力分析

牛子帆¹, 傅慧俊², 赵和平^{1,2}

(1. 浙江大学 环境与资源学院, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江大学 总务处, 浙江 杭州 310058)

摘要: 作为目前应用较广泛的污水深度脱氮工艺,深床反硝化滤池(下流式)操作简单且具有良好的脱氮效果,但该工艺需要外加碳源,这会增加能耗和碳排放量。氢基质膜生物膜反应器(MBfR)是一种新兴的水处理技术,因具有能耗低、碳排放量少、脱氮效率高等优点而受到了广泛关注。为了进一步评估MBfR在污水深度脱氮中的应用潜力,采用生命周期评价(LCA)方法,对两种深度脱氮工艺进行情景模拟和评价,分析两种工艺在应用过程中的能源消耗和碳排放情况。结果表明,相比深床反硝化滤池,MBfR工艺可降低43%的能耗,减少约47%的CO₂排放量,在实现相同处理效果的情况下对环境的影响更小,在二级出水深度脱氮处理中占有较明显的优势,可为推进污水处理厂提标改造和实现污水处理碳中和目标提供新思路。

关键词: 污水深度脱氮; 氢基质膜生物膜反应器(MBfR); 深床反硝化滤池; 生命周期评价; 碳中和

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)03-0088-06

Application Potential Analysis of MBfR in Advanced Nitrogen Removal of Wastewater Based on Life Cycle Assessment

NIU Zi-fan¹, FU Hui-jun², ZHAO He-ping^{1,2}

(1. College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Department of General Affairs, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Deep bed denitrification filter (downflow) is widely used in advanced nitrogen removal of wastewater due to its simple operation and high nitrogen removal efficiency. However, this process requires additional carbon sources, which will increase energy consumption and carbon emissions. Hydrogen based membrane biofilm reactor (MBfR) is an emerging wastewater treatment technology, which has drawn worldwide attention due to its advantages of low energy consumption, low carbon emission and high nitrogen removal efficiency. To further evaluate the application potential of MBfR in advanced nitrogen removal of wastewater, the life cycle assessment (LCA) method was used to simulate and evaluate the performances of the two advanced nitrogen removal processes, and the energy consumption and carbon emissions of the two processes were analyzed. Compared with the deep bed denitrification filter, the MBfR reduced energy consumption by 43% and CO₂ emission by approximately 47%, which had less impact on the environment under the condition of achieving the same treatment performance. It has obvious

基金项目: 浙江省重点研发计划项目(2021C03171); 国家自然科学基金中欧国际合作重大项目(NSF32061133002)
通信作者: 赵和平 E-mail: zhaohp@zju.edu.cn

advantages in advanced nitrogen removal of the effluent from the secondary treatment process, which provides a new idea for promoting the upgrading and reconstruction of wastewater treatment plants and realizing the goal of carbon neutralization in wastewater treatment.

Key words: advanced nitrogen removal of wastewater; hydrogen based membrane biofilm reactor (MBfR); deep bed denitrification filter; life cycle assessment; carbon neutralization

随着污水处理标准的提高,深度脱氮成了新需求。目前广泛应用的深床反硝化滤池工艺虽然可以达到良好的脱氮效果,但是需要额外添加碳源,增加了能耗和碳排放量,不符合当前可持续发展的理念与碳中和的方向。氢基质膜生物膜反应器(MBfR)是一种以氢气作为电子供体的新型生物处理工艺,不仅可以实现高效脱氮,同时具有节能减排的优点。笔者采用生命周期评价(LCA)方法对以上两种深度脱氮工艺进行评估和对比,分析MBfR在未来市政污水深度处理中的应用潜力。

1 脱氮工艺的可持续发展需求

2015年我国发布了《水污染防治行动计划》,要求“敏感区域”的城镇污水处理厂在2017年底前全面达到一级A排放标准;2019年我国又发布了《城镇污水处理提质增效三年行动实施方案(2019—2021年)》,许多地方开始实行更加严格的“准IV类”标准,其中对总氮的要求尤其严格。例如,浙江省在2018年发布了地方标准《城镇污水处理厂主要水污染物排放标准》(DB 33/2169—2018),其中规定新建污水处理厂的总氮排放限值为10(12) mg/L;此外,北京、天津、南京等地方标准中也提高了对总氮的排放要求,规定总氮排放限值为10 mg/L,昆明的总氮排放限值更是降至5 mg/L。氮排放标准的提高同时意味着污水处理系统能耗和碳排放量的增加。图1统计了近10年来我国污水处理行业的电耗和二氧化碳排放情况^[1-2]。2000年我国共有污水处理厂481座,污水处理能力只有 $2\,213 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$;而截至2019年,我国已拥有污水处理厂4 140座,污水处理能力达到了 $20\,248 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ^[1]。据估算,目前我国每年污水处理厂的电耗已经达到了 $190 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$,占居民生活消费总电耗的2%^[2]。根据GaBi数据库中国混合电网流程数据,平均每生产1 kW·h的电就会产生约830 g二氧化碳的温室效应当量,据此估算仅因污水处理电耗排放的二氧化碳温室效应当量在2019年已高达 $1\,500 \times 10^4 \text{ t}$ 。在第75届联

国大会上,习近平总书记提出“要力争在2030年前达到二氧化碳排放峰值,努力争取在2060年前实现碳中和”,而开发低碳低耗的污水处理新工艺是实现污水处理“碳中和”的关键。

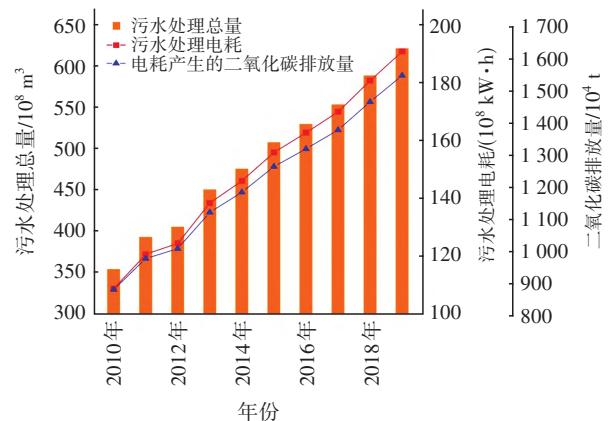


图1 中国污水处理行业的碳排放现状

Fig.1 Carbon emission status of wastewater treatment industry in China

2 污水深度脱氮工艺

2.1 深床反硝化滤池

深床反硝化滤池是在曝气生物滤池的基础上开发出来的新工艺,主要由滤料、砾层、滤砖、进气管、反冲洗泵、鼓风机等组成,对水中的悬浮物和总氮具有良好的去除效果,是目前我国市政污水处理中应用较广泛的深度脱氮工艺,常与二级污水处理工艺联用。深床反硝化滤池以特殊的石英砂作为滤料和生物挂膜介质。在缺氧环境下,滤料上会富集大量的反硝化菌群。二级处理出水在重力流的作用下进入深床滤池进行物理过滤和生物降解,水中的固体悬浮物被滤料截留,同时水中的硝酸盐和亚硝酸盐也被滤料中的反硝化菌群转化为氮气,从而实现固体悬浮物的去除和深度脱氮。与普通曝气生物滤池相比,深床反硝化滤池不需要曝气设备,只需要配备气水联合反冲洗的设备,具有占地面积小、易于操作等优点。然而,该工艺也存在一

些缺陷,例如因需要额外投加碳源而增加了二氧化碳的排放量、易残留电子、易造成污泥堵塞等^[3]。

2.2 氢基质膜生物膜反应器

美国亚利桑那州立大学的 Rittmann 教授团队首次将生物膜技术与中空纤维膜技术结合,开发出了 MBfR^[4]。该工艺通过中空纤维膜将电子供体氢气传递给附着在膜上的氢自养型反硝化菌,从而驱动硝酸盐和亚硝酸盐的还原,原理见图 2^[5]。MBfR 采用无泡曝气,与有泡曝气相比提高了气体传质效率和氢气利用率,从而保障了氢气使用的安全性,降低了运行成本,可以实现良好的脱氮效果^[6-7]。

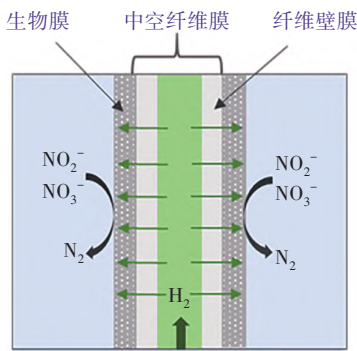


图 2 MBfR 的工作原理示意
Fig.2 Principle of MBfR

目前 MBfR 在国外已有成功的中试案例。Zhao 等人^[8]将 2 个 MBfR 串联处理地下水中的 NO₃⁻,去除率高达 98%;Tang 等^[9]利用总膜丝面积为 36.4 m²的 MBfR 将进水中的硝酸盐从 12 mg/L 降至 1 mg/L 以下,硝酸盐的最大表面负荷达到 5.9 g/(m²·d)。美国 APT Water 公司针对地下水污染开发出的 MBfR 可以将地下水中的硝态氮处理至美国环保署规定的饮用水标准。MBfR 具有脱氮效率高、占地面积小、安全性高、节能减排等优点,在污水深度脱氮处理领域具有良好的应用前景。

3 脱氮工艺的生命周期评价

生命周期评价(LCA)是评估产品、服务或工艺在整个生命周期内产生的全部环境影 响的有效工具,在评价环境影响时可以避免污染物的转移,近些年来已经被广泛应用于污水处理行业。LCA 通过综合考虑污水处理工艺中物质和能源的消耗以及污染物的排放等因素,将评价结果统一量化为资源消耗、环境变化、毒性等影响指标,从而指导污水处理工艺的可持续发展^[10]。为了科学评判污水处理厂提标改造工艺的合理性与可行性,本研究基于

LCA 的理论和方法,对以上两种污水深度脱氮工艺的运行过程进行环境影响评价。根据国际标准 ISO 14040 中 LCA 的框架,LCA 方法主要有 4 个步骤,依次为目的和范围的确定、清单分析、影响评估、结果解释,如图 3 所示。

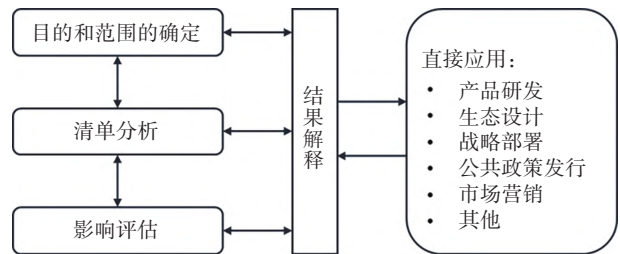


图 3 生命周期评价的框架

Fig.3 Framework of life cycle assessment

3.1 功能单位和系统边界的确定

曹冰^[11]曾对西安市第三水厂的建设、运行和拆除阶段进行生命周期评价,结果显示运行阶段的能耗影响占全部影响的 90%。本研究中 MBfR 工艺采用的是日本帝人株式会社的聚丙烯(PP)膜,寿命周期长达 10 年,按照污水处理厂 30 年的寿命计算,期间需要更换两次膜组件,该装置为模块化的反应器,更换膜组件过程简单,只需将膜组件取出换上新的膜组件即可,不需要大规模建设和拆除,该过程不会产生较大的环境影响,因此本研究不计算更换 PP 膜所造成的影响。由于污水处理厂运行阶段的环境影响远远大于建设施工阶段的环境影响,故本研究只考虑深度脱氮工艺运行阶段对环境产生的影响。以处理规模为 1×10⁴ m³/d 的污水处理厂的深度脱氮工艺为研究系统,将功能单位设定为 1×10⁴ m³污水中氮浓度由 15 mg/L 降至 10 mg/L,即以污水处理厂中 1×10⁴ m³二级出水中 5 mg/L 氮的脱除过程为功能单位进行生命周期评价的分析,系统边界的选择如图 4 所示^[12]。

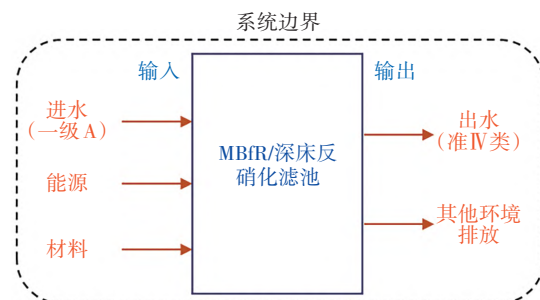


图 4 系统边界

Fig.4 System boundary

深床反硝化滤池的系统边界如图5所示,系统包括整个深度脱氮过程。进水为污水处理厂的二级出水,先与额外添加的碳源进行混合,随后经滤池过滤和滤料上微生物反硝化脱氮,出水进入消毒池。系统运行过程还包括气反冲洗、水反冲洗、气水联合反冲洗以及废水池的搅拌和反洗。

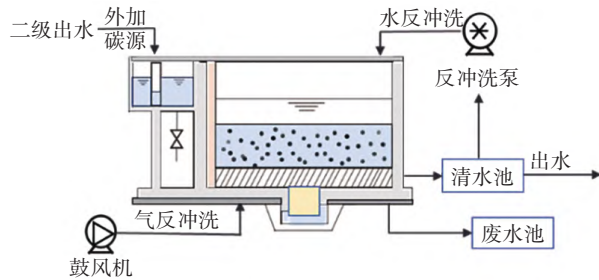


图5 深床反硝化滤池的系统边界

Fig.5 System boundary of deep bed denitrification filter

MBfR的系统边界如图6所示,系统同样是包括整个深度脱氮过程。采用氢气供给系统将氢气通过中空纤维膜输送提供给膜上附着的微生物。污水处理厂二级出水经膜上微生物反硝化处理后,进入消毒池。系统运行过程还包括水体内部循环和空气的冲洗。

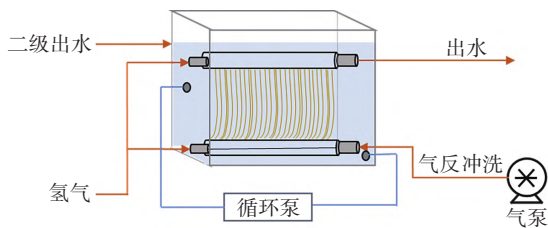


图6 MBfR的系统边界

Fig.6 System boundary of MBfR

3.2 清单分析

以功能单位为 $1 \times 10^4 \text{ m}^3$ 污水中 5 mg/L 氮去除过程的整个运行阶段进行清单分析。清单分析主要针对目标过程中输入和输出的所有物质和能量进行统计。输入的物质和能量主要有电耗、水质、药剂。本评价模型中的电耗主要是工艺配套设备的运行电耗;水质主要是输入的总氮浓度;药耗主要是污水处理过程中额外投加的碳源。输出的物质主要是水质、污泥。

3.2.1 深床反硝化滤池的清单分析

① 电耗分析

整个深床反硝化滤池分为4格,每天运行时长

为24 h(按最不利工况计算),运行过程包括气单独反冲洗、气水联合反冲洗和水单独反冲洗。滤池每天的气反冲洗时长为0.4 h(每格滤池需6 min)、水反冲洗时长为0.5 h(每格滤池需7.5 min);每天需要通过水反冲洗进行驱氮6次,总时长为0.8 h(每格滤池每次需2 min)。除此之外,还需对废水池中的废水进行反洗和搅拌,每天工作时长分别为2.05 h和2 h。设备的功率及运行情况见表1,数据来源于深床反硝化滤池设计计算书和实际工程运行数据。根据计算,整个过程的电耗为 $137.38 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。

表1 深床反硝化滤池工艺设备清单

Tab.1 Equipment list of deep bed denitrification filter

项目	轴功率/ kW	运行台 数/台	用电时间/ ($\text{h} \cdot \text{d}^{-1}$)	电耗/ ($\text{kW} \cdot \text{h} \cdot \text{d}^{-1}$)
反洗水泵	30.00	2	1.30	78.00
反洗风机	90.00	1	0.40	36.00
反洗废水泵	7.50	1	2.05	15.38
废水搅拌机	4.00	1	2.00	8.00

② 水质分析

以功能单位为 $1 \times 10^4 \text{ m}^3$ 污水中 5 mg/L 氮去除过程的整个运行阶段作为研究对象,因此输入的总氮为 150 kg ,输出的总氮为 100 kg 。

③ 药剂分析

深床反硝化滤池想要达到良好的脱氮效果往往需要额外投加碳源来进行强化,常用的外加碳源有甲醇、乙酸和乙酸钠等,由于甲醇和乙酸是危险管控品,对于其存储、投加、运输等都有严格的限制,目前在污水处理厂使用较少,所以工程上常采用乙酸钠作为外加碳源。去除 $1 \text{ g NO}_3^- \text{-N}$ 需投加乙酸钠(含量为60%) 10.17 g ,据此计算 $1 \times 10^4 \text{ m}^3$ 污水中去除 5 mg/L 氮共需投加乙酸钠 508.50 kg 。

④ 污泥分析

脱氮过程中会产生污泥,根据工程经验数据,深床反硝化滤池工艺的污泥产量为 0.03 kg/m^3 ,据此可计算出整个过程的污泥产量为 300 kg 。

综上,深床反硝化滤池工艺的生命周期清单如下:①输入,TN为 150 kg ,电耗为 $137.38 \text{ kW} \cdot \text{h}$,乙酸钠(含量为60%)为 508.50 kg ;②输出,TN为 100 kg ,污泥为 300 kg 。

3.2.2 MBfR的清单分析

① 电耗分析

整个工艺每天运行时长为24 h(按最不利工况计算),其中氢气输出系统每天工作24 h,循环泵每天工作24 h。MBfR每天需要用空气进行一次冲洗,以去除膜组件表层松散附着的多余生物膜,每次耗时10 min(0.17 h)。设备的具体功率及运行情况如表2所示,数据参考美国APT Water公司2014年出具的工程报告。根据计算,整个过程的总电耗为78.90 kW·h。

表2 MBfR工艺设备清单

Tab.2 Equipment list of MBfR

项目	轴功率/ kW	运行台 数/台	用电时间/ (h·d ⁻¹)	电耗/(kW· h·d ⁻¹)
氢气输出系统	0.15	1	24	10.80
反冲洗风机	90.00	1	0.17	15.30
循环泵	2.20	1	24	52.80

② 水质分析

同深床反硝化滤池,输入的总氮为150 kg,输出的总氮为100 kg。

③ 药剂分析

MBfR工艺所需电子供体氢气由氢气发生器电解水提供。根据Lee等人^[13]的研究结果,中空纤维膜的氢气利用效率可达99.9%,由微生物反硝化计算公式可得,1×10⁴ m³污水中去除5 mg/L氮需要电子供体氢气体积为21.4 kg。

④ 污泥分析

MBfR目前还没有实际应用过程的污泥产生量数据,根据《环境生物技术:原理与应用》^[14]书中的反硝化细菌典型的计量学和动力学参数($T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$),计算可得MBfR的污泥产量为0.012 g,据此计算整个过程产生的污泥总量为120 kg。

综上,MBfR工艺的生命周期清单如下:①输入,TN为150 kg,氢气为21.4 kg,电耗为78.90 kW·h;②输出,TN为100 kg,污泥为120 kg。

3.3 生命周期评价模型构建

本研究利用GaBi10.0软件构建生命周期评价模型,采用荷兰莱顿大学环境研究中心2001年发表的CML计算方法。该计算方法基于传统生命周期清单分析特征和标准,采用中间点分析,从而减少了假设的数量和模型的复杂性^[15]。CML 2001方法评估的环境影响类别包括全球变暖潜势(GWP)、酸化潜势(AP)、水体富营养化潜势(EP)、人体潜在毒性(HTP)、光化学毒性潜势(POCP)、海洋生态毒性(MAETP)、淡水生态毒性(FAETP)、臭氧层消耗潜势(ODP)和陆地生态毒性(TETP)^[12](分别以CO₂、SO₂、PO₄³⁻-P、DCB、C₂H₄、DCB、DCB、R11、DCB当量计)。评价所需数据均来自GaBi数据库,其中电力数据选用中国混合电网流程数据。生命周期评价结果见表3。

表3 生命周期评价结果

Tab.3 Results of life cycle assessment

项目	GWP	AP	EP	HTP	POCP	MAETP	FAETP	ODP	TETP
深床反硝化滤池	274	0.51	21	10.8	0.05	11 200	0.17	9.42×10 ⁻¹³	3.59
MBfR	145	0.32	21	10.2	0.05	10 100	1.27	6.31×10 ⁻¹³	0.31

3.4 结果分析

通过清单分析可以发现,MBfR工艺相比深床反硝化滤池工艺能耗减少了约43%,并且深床反硝化滤池工艺需要额外添加大量碳源,污泥产量较高易造成污泥堵塞。对比生命周期评价模型计算结果发现,提标改造工程中要使1×10⁴ m³污水中的氮排放由一级A标准提升为准IV类标准,深床反硝化滤池工艺会产生约274 kg的CO₂,而MBfR工艺只产生约145 kg的CO₂,MBfR工艺相比深床反硝化滤池工艺的CO₂排放量减少了约47%。同时,在酸化、人体潜在毒性、海洋生态毒性、臭氧层消耗、陆地生态毒性等方面,MBfR相比深床反硝化滤池对环境的影响更小。

4 结论

在碳中和背景下,污水处理厂在提标改造的同时应该考虑到新增工艺对环境的影响,从而避免对环境造成更大的危害。根据本研究结果,MBfR作为一种新兴的工艺,不仅具有较高的脱氮效率,且在能耗、碳排放量和环境影响等方面比深床反硝化滤池更有优势,在市政污水深度脱氮中具有较大的应用潜力,同时随着我国氢能源利用技术的发展,该工艺在未来会更有优势。然而,MBfR工艺在实际的市政污水处理应用中还未完全成熟。未来应在MBfR膜丝的改进、生物膜的控制、运行条件的优化等方面进行更深入的研究和实际应用探索,争取

早日将该工艺应用于污水处理厂,以助力实现污水处理碳中和的目标。

参考文献:

- [1] 住房和城乡建设部. 2020年城乡建设统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社, 2020.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development. Statistical Yearbook of Urban and Rural Construction in 2020 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2020 (in Chinese).
- [2] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社, 2020.
National Bureau of Statistics. China Statistical Yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2020 (in Chinese).
- [3] 栗文明, 高敏, 周军, 等. 反硝化滤池污水处理工艺应用调研及设计要点[J]. 中国给水排水, 2020, 36(22): 100-105.
LI Wenming, GAO Min, ZHOU Jun, *et al.* Application survey and design points of the denitrification filter in wastewater treatment process [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(22): 100-105 (in Chinese).
- [4] RITTMANN B E. Biofilms, active substrata, and me [J]. Water Research, 2018, 132: 135-145.
- [5] 吕盘龙, 李子言, 赵和平. 膜生物膜法在水污染控制及资源回收中的研究进展[J]. 微生物学通报, 2020, 47(10): 3287-3304.
LÜ Panlong, LI Ziyang, ZHAO Heping. Advances in water pollution control and resource recovery by membrane-supported biofilm reactor [J]. Microbiology China, 2020, 47(10): 3287-3304 (in Chinese).
- [6] LV P L, SHI L D, DONG Q Y, *et al.* How nitrate affects perchlorate reduction in a methane-based biofilm batch reactor [J]. Water Research, 2020, 171: 115397.
- [7] ZHAO H P, ILHAN Z E, ONTIVEROS-VALENCIA A, *et al.* Effects of multiple electron acceptors on microbial interactions in a hydrogen-based biofilm [J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(13): 7396-7403.
- [8] ZHAO H P, ONTIVEROS-VALENCIA A, TANG Y N, *et al.* Using a two-stage hydrogen-based membrane biofilm reactor (MBfR) to achieve complete perchlorate reduction in the presence of nitrate and sulfate [J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(3): 1565-1572.
- [9] TANG Y N, ZIV-EL M, ZHOU C, *et al.* Bioreduction of nitrate in groundwater using a pilot-scale hydrogen-based membrane biofilm reactor [J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering in China, 2010, 4(3): 280-285.
- [10] LAM K L, L ZLATANOVIĆ L, VAN DER HOEK J P. Life cycle assessment of nutrient recycling from wastewater: a critical review [J]. Water Research, 2020, 173: 115519.
- [11] 曹冰. 污水处理工程能耗成本与环境效益生命周期评价[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2010.
CAO Bing. Life Cycle Assessment in Energy Costs and Environmental Benefits of Wastewater Treatment Project [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2010 (in Chinese).
- [12] 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.
- [13] LEE K C, RITTMANN B E. Applying a novel autohydrogenotrophic hollow-fiber membrane biofilm reactor for denitrification of drinking water [J]. Water Research, 2002, 36(8): 2040-2052.
- [14] RITTMANN B E, MCCARTY P L. 环境生物技术: 原理与应用[M]. 文湘华, 王建龙, 译. 北京: 清华大学出版社, 2012: 432.
RITTMANN B E, MCCARTY P L. Environmental Biotechnology: Principles and Application [M]. WEN Xianghua, WANG Jianlong, translated. Beijing: Tsinghua University Press, 2012: 432 (in Chinese).
- [15] 段宁, 程胜高. 生命周期评价方法体系及其对比分析 [J]. 安徽农业科学, 2008, 36(32): 13923-13925, 14049.
DUAN Ning, CHENG Shenggao. Outline and contrast analysis of life cycle assessment methodologies [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2008, 36(32): 13923-13925, 14049 (in Chinese).

作者简介: 牛子帆(1997-), 女, 河北邯郸人, 硕士研究生, 研究方向为污水处理、生命周期评价。

E-mail: zfnui@zju.edu.cn

收稿日期: 2021-05-31

修回日期: 2021-06-29

(编辑: 刘贵春)