



文章栏目：工程创新与行业动态

DOI 10.12030/j.cjee.202012044

中图分类号 X703

文献标识码 A

张纬尧, 袁宏林, 卢金锁, 等. 西安市第五污水处理厂生物反应池强化脱氮工艺的比选生产实验[J]. 环境工程学报, 2021, 15(9): 3158-3167.

ZHANG Weiyao, YUAN Honglin, LU Jinsuo, et al. Comparative in-process study on enhanced nitrogen removal processes in biological reaction tank in Xi'an No.5 wastewater treatment plant[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(9): 3158-3167.

西安市第五污水处理厂生物反应池强化脱氮工艺的比选生产实验

张纬尧^{1,2}, 袁宏林^{2,*}, 卢金锁², 王兵³, 孙红芳³, 刘小鹏³, 马明华³, 卢迪³, 石鑫³, 刘珣⁴

1. 西安市水务(集团)有限责任公司, 西安 710061

2. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710054

3. 西安市污水处理有限责任公司, 西安 710024

4. 陕西科技大学文理学院, 西安 710021

第一作者: 张纬尧(1989—), 男, 硕士, 工程师。研究方向: 污水处理理论与技术。E-mail: 284393530@qq.com

*通信作者: 袁宏林(1965—), 男, 博士, 教授。研究方向: 污水处理理论与技术。E-mail: 498821968@qq.com

摘要 为筛选强化脱氮工艺, 利用城镇污水处理厂不同系列的 AAO+MBBR 工艺、五段式多模式 Bardenpho 工艺、原有 AAO 工艺, 在生物反应池中进行了比选生产性实验。结果表明: 在同工况、同时间、同负荷、不外加碳源情况下, AAO+MBBR 工艺与原有 AAO 工艺相比, 出水氨氮相近, 总氮降低 $0.49 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 有一定除氮优势; Bardenpho 工艺与原有 AAO 工艺相比, 出水氨氮稳定低于 $1.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 出水总氮降低 $1.14 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 在不投加碳源情况下, 第二缺氧区出现明显的二次反硝化过程。本研究结果可为城镇污水处理厂提标改造工艺的路线选择提供参考。

关键词 提标改造; 准 IV 类; MBBR 工艺; Bardenpho 工艺; 强化脱氮; 生产实验

随着污水厂尾水排放标准的不断提高, 化学辅助除磷、介质过滤、臭氧氧化等^[1-15] 技术被用在深度处理中, 以进一步削减污染物, 降低出水水质指标。在城镇污水处理厂提标改造新标准要求下, 氨氮和总氮的削减成为重点, 强化脱氮技术也备受重视。目前普遍采取以下 2 种措施: 一是改造生物反应池强化除氮, 再增加深度处理工艺进一步降低氨氮、总氮等指标; 二是依靠深度处理技术改造脱氮工艺^[14-20]。而针对生物反应池不同改造工艺运行情况开展现场对比实验的研究报道较少, 以不同工艺并联运行, 进行同时间、同规模现场生产实验的研究几乎未见报道。

本研究在西安市第五污水处理厂进行。在该厂未满载运行、先后具备多种工艺的有利条件下, 分批次开展了同时间、同规模、不同工艺的现场生产性实验, 对几种工艺的运行情况进行了对比研究。西安市第五污水处理厂总设计污水处理规模为 $40 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, 设计出水水质执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918-2002)^[21] 中的一级 A 标准, 采用“预处理+AAO(A 系列生物

收稿日期: ; 录用日期:

池采用 MBBR 投加填料)+纤维转盘滤池+次氯酸钠消毒处理”工艺, 现状处理水量约 $30 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, 全厂分为 A、B、C、D 四个系列生物反应池并联运行, 单系列设计规模 $10 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 。2018 年进行了 B 系列 AAO 工艺与 A 系列“AAO+MBBR”工艺的生产性对比实验, 2019 年 A、B 系列Ⅳ类提改造后进行了 C、D 系列 AAO 工艺与 B 系列五段式 Bardenpho 工艺的生产性对比实验。分析比选了不同工艺在强化除氮方面的优缺点, 以期为国内城镇污水处理厂准Ⅳ类水质提标改造工程应用提供参考。

1 生产性实验方案

1.1 污水处理厂工艺概况

该厂一期工程(A、B系列)AAO工艺于2010年建成投产,于2013年进行了生物池一级A水质标准提标改造。改造后A系列生物反应池采用“AAO+MBBR工艺”,即在原AAO工艺的基础上,在好氧区中后段增加MBBR悬浮填料区,投加MBBR悬浮填料比例约17%,并增设填料专用推进器、拦网等辅助设施设备;B系列生物池沿用原有AAO工艺,并未进行改造。该厂二期工程(C、D系列)AAO工艺于2018年建成投产。A、B、C、D四个系列AAO工艺生物反应池的水力停留时间均为16.59h。

2019年,该厂以准Ⅳ类水质标准提标改造为目的,改造为多模式五段式Bardenpho工艺。具体实施内容包括:对A、B系列生物反应池先后进行了工程改造,同时去除A系列MBBR填料;在生物池缺氧区中后段增加隔墙,在好氧区增加2道隔墙;将A、B系列生物反应池均改造为5个区域,即厌氧区、缺氧区、好氧区、第二缺氧区、第二好氧区;C、D系列未进行改造。

1.2 水样的采集

1) 实验进水。即厂区进水原水。进水采样使用自动采样器(sigma900型,哈希公司),每2h进行自动取样。取样点位于第五污水处理厂进厂市政管网末端10#井。

2) 实验出水。即对应实验系列二沉池出水汇流井内或总出水口水样。采样使用取样桶(1000mL塑料桶)。取样点位于水下30cm。每日上午10点取样。

3) MBBR工艺实验用水。该组实验的样品包括A、B系列生物池厌氧区进、出口处混合液,A、B系列生物池缺氧区进、出口处混合液,A、B系列生物池好氧区中段处混合液,以及A、B系列生物池好氧区出口处混合液。采样使用取样桶(1000mL塑料桶),取样点位于液面下方1m处,每日上午10点取样。所有过程样品均使用定量滤纸过滤后,取清液进行检测。

4) Bardenpho工艺实验用水。该组实验的样品包括B系列生物池厌氧区进、出口处混合液,B系列生物池缺氧区进、出口处混合液,B系列生物池好氧区出口处混合液,B系列生物池第二缺氧区出口处混合液,以及B系列生物池第二好氧区出口处混合液。采样使用取样桶(1000mL塑料桶),取样点位于液面下方1m处,每日上午10点取样。所有过程样品均使用定量滤纸过滤后,取清液进行检测。C、D系列未取过程样。

5) 分析指标:COD(HJ 828-2017重铬酸钾法)、 $\text{NH}_3\text{-N}$ (HJ 535-2009纳氏试剂分光光度法)、 $\text{NO}_3\text{-N}$ (HJ/T 346-2007紫外分光光度法)、TN(HJ 636-2012碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法)、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ (钼锑抗分光光度法(A))^[22]、TP(GB 11893-89钼酸铵分光光度法)、MLSS(CJ/T221-2005重量法)、DO(HJ 506—2009电化学探头法)。

1.3 运行方案及参数

1.3.1 MBBR生产性实验运行方案及参数

MBBR生产性比选实验在A、B系列同等工况下进行。不投加碳源,在生物池混合液出水口投加除磷药剂。实验的检测日期安排在2018年6月至10月。在这段时间内,随机抽取连续稳定运

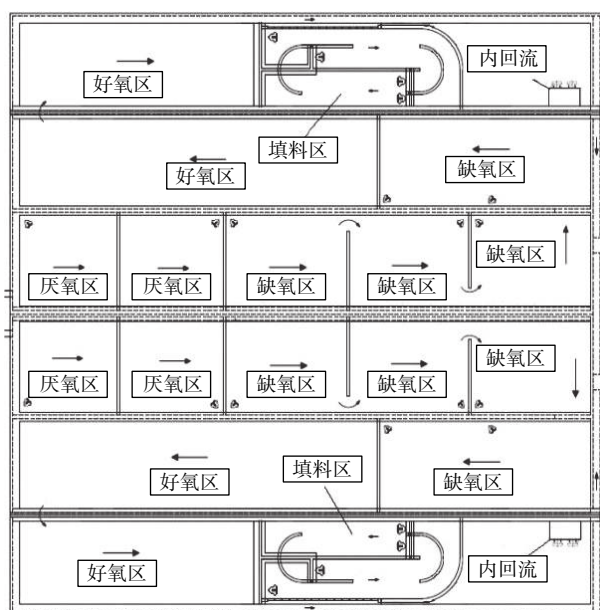


图1 一期A系列平面示意图

Fig. 1 Plan of A series in phase 1

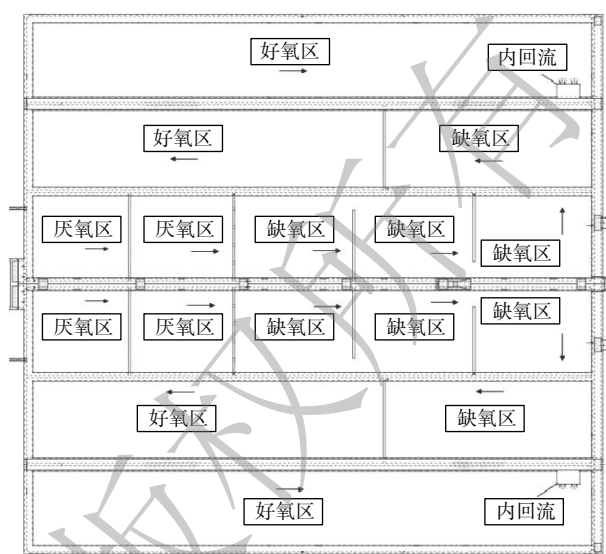


图2 一期B系列平面示意图

Fig. 2 Plan of B series in phase 1

行 11 d 的数据。B 系列工艺流程图如图 1 和 2 所示。实验期间运行水量均为 $7.5 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 。A、B 系列生物池的 MLSS 控制在 $5 \sim 6 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ；生物池末端 DO 远程控制在 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ；污泥回流比为 80%；内回流比为 200%；除磷药剂的投加量为 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

A 系列生物反应池为“MBBR+AAO 工艺”，总水力停留时间 16.59 h。其中，厌氧区 2.02 h，缺氧区 5.53 h，好氧区 9.04 h。好氧区 MBBR 填料区位于好氧段中后段，为循环跑道式填料。填料区的停留时间 1.74 h，由 4 台潜水推流搅拌器进行搅拌及循环推流。B 系列生物反应池为 AAO 工艺，总水力停留时间 16.59 h，其中厌氧区 2.02 h，缺氧区 5.53 h，好氧区 9.04 h。

1.3.2 Bardenpho 生产性实验运行方案及参数

2019 年，该厂进行准 IV 类提标改造，在 A、B 系列生物反应池中开展 Bardenpho 工艺的生产性实验，对比 B 系 Bardenpho 生物反应池与 C、D 系列生物反应池的污水处理情况。实验在同等工况下进行，不投加碳源，在生物池混合液出水口投加除磷药剂。实验的检测日期安排在 2019 年 11 月至 12 月。在这段时间内，随机抽取连续稳定运行 9 d 的数据进行分析。实验期间，B、C、D 系列均保持连续稳定运行，工艺流程如图 3 所示。

本次改造后，B 生物池系统总停留时间为 16.59 h。其中，厌氧区 2.02 h，缺氧区 4.10 h，好氧区 7.30 h(可调节区好氧运行)，第二缺氧区 1.92 h，第二好氧区 1.25 h。为增强搅拌效果，加强反硝化速率，基于原有搅拌器，在厌

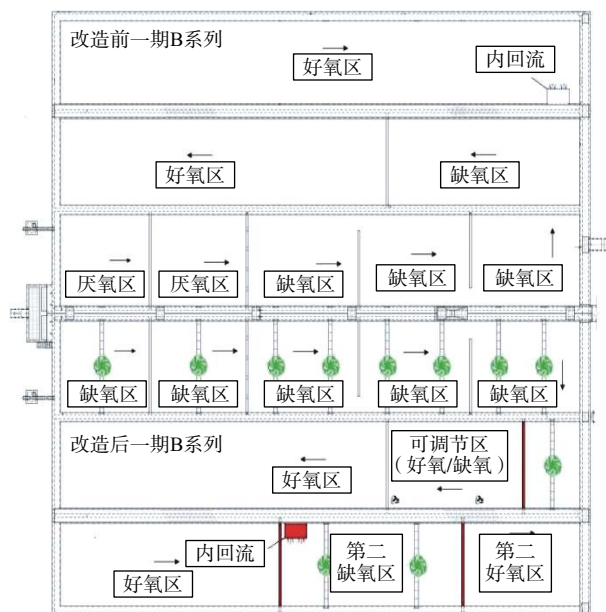


图3 一期B系列改造前后平面示意图

Fig. 3 Diagrams of before and after the reconstruction at the plan of B series in phase 1

氧区、缺氧区、第二缺氧区增加双曲面搅拌器。另外,将生物池混合液回流泵由原好氧区末端移动至第二缺氧区前端,新增回流泵安装隔墙,走道板、回流管道等。

Bardenpho 生产性比选实验在 B、C、D 系列同等工况下运行,不投加碳源,期间一期 A 系列全部停运。B 系列按照 Bardenpho 模式运行,以区别于 C、D 系列原有 AAO 工艺的出水水质。实验期间,B 系列与 C、D 系列均满负荷运行,即 B 系列运行水量为 $10 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$,C、D 系列运行水量为 $20 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 。B 系列及 C、D 系列生物池的污泥浓度均控制在 $5 \sim 6 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$;生物池末端的 DO 远程控制控制在 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;外回流比为 70%;内回流比为 200%;使用厂家专利除磷药剂,投加量稳定为 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。同时,加强对好氧段末端 DO 的控制,确保第二缺氧段缺氧状态。

2 结果与讨论

2.1 MBBR 工艺生产实验结果

实验中进出水水质见表 1 和 2。A 系列的出水平均 COD 较 B 系列略低,平均值相差不大。计算 COD 数据的方差,得到 A 系列方差为 6.611, B 系列方差为 14.049,说明 A 系列出水的 COD 指标更稳定。A 系列出水平均 $\text{NH}_3\text{-N}$ 较 B 系列略高。除 10 月 19 日,由于当天控制 DO 偏低,导致 $\text{NH}_3\text{-N}$ 升高,其余样品的出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 均稳定在 $1.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下。计算 $\text{NH}_3\text{-N}$ 数据的方差,得到 A 系列方差为 0.252, B 系列方差为 0.772,说明 A 系列出水的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 指标更稳定。A 系列的出水平均 TN 较 B 系列低, A 系列的 TN 去除率略高于 B 系列,去除效果较好。计算 TN 数据的方差,得到 A 系列方差为 5.796, B 系列方差为 6.651,说明 A 系

表 1 MBBR 实验进水水质指标
Table 1 Influent quality of the MBBR experiment

采样日期	COD	$\text{NH}_3\text{-N}$	TN	$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$
2018-06-24	370	36.35	54.8	4.66
2018-06-25	609	39.55	60.8	3.42
2018-06-26	555	42.88	55.6	4.34
2018-06-27	455	31.22	55.5	4.76
2018-07-19	369	32.76	42.5	4.30
2018-07-24	551	40.06	54.1	7.87
2018-08-26	250	33.27	43.9	4.38
2018-09-23	438	37.49	47.9	5.06
2018-10-17	562	35.01	41.9	4.20
2018-10-18	757	27.72	72.7	7.80
2018-10-19	761	29.88	54.5	6.50
平均值	516.09	35.11	53.11	5.21

表 2 MBBR 实验出水水质指标

Table 2 Comparison of effluent quality of the MBBR experiment of A and B series

取样日期	A系列				B系列			
	COD	$\text{NH}_3\text{-N}$	TN	$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$	COD	$\text{NH}_3\text{-N}$	TN	$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$
2018-06-24	18	0.847	7.505	1.75	19	0.708	3.450	0.600
2018-06-25	16	1.35	2.758	1.10	17	0.431	4.711	0.430
2018-06-26	21	0.458	5.991	1.25	22	0.347	5.380	0.890
2018-06-27	20	0.347	5.964	3.03	21	0.722	9.172	2.02
2018-07-19	21	0.236	3.394	1.65	19	0.458	5.616	1.71
2018-07-24	18	0.747	8.447	2.48	17	0.347	7.047	0.090
2018-08-26	18	0.458	10.958	4.08	18	0.458	4.825	1.13
2018-09-23	21	0.553	2.973	0.219	27	0.220	8.070	0.108
2018-10-17	15	0.980	6.988	0.044	15	0.520	7.916	0.137
2018-10-18	24	0.270	6.727	0.209	27	0.270	5.788	0.034
2018-10-19	22	1.97	8.06	0.310	22	3.46	13.18	0.024
平均值	19.45	0.747	6.342	1.466	20.36	0.722	6.832	0.652

列出水的 TN 指标更稳定。在除磷药剂投加量相同的情况下, A 系列的出水平均 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 值较 B 系列高 $0.814 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 但 A 系列的去除率明显低于 B 系列, 除磷效果无明显优势。通过计算方差, 发现 A 系列方差为 1.554, B 系列方差为 0.453, 说明 B 系列出水的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 指标更稳定。

2.2 MBBR 生产实验中 NO_3^- -N 的过程样分析

由于 A、B 系列工艺的除氮效果存在差异, 因此, 通过 A、B 系列 NO_3^- -N 过程样数据 (见图 4 和 5) 来分析存在差异的原因。A、B 系列的缺氧段均发生了反硝化过程, 使得 NO_3^- -N 的质量浓度降低。其中, A 系列缺氧段 NO_3^- -N 平均质量浓度降低了 $2.020 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, B 系列缺氧段 NO_3^- -N 平均质量浓度降低了 $1.136 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。A 系列好氧段中段到末段, 部分 NO_3^- -N 的质量浓度有所下降, 这可能是好氧区中后段 MBBR 填料中同步脱氮反硝化反应的体现^[23]。并且, A 系列缺氧段反硝化效果更佳, 可能是由于 MBBR 工艺悬浮填料中脱落的反硝化细菌等长泥龄微生物部分附着在活性污泥中, 经混合液回流至缺氧区, 提高了反硝化速率, 致使 A 系列出水硝氮更低。

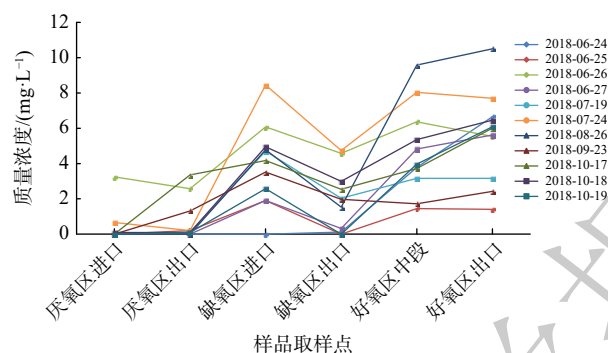


图 4 A 系列生产性实验 NO_3^- -N 过程样

Fig. 4 NO_3^- -N Process samples of A series MBBR in-process experiments

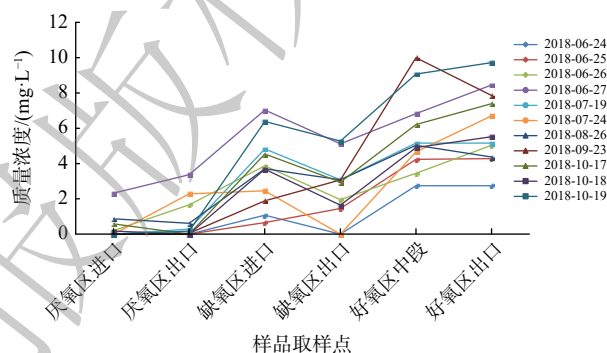


图 5 B 系列生产性实验 NO_3^- -N 过程样

Fig. 5 NO_3^- -N Process samples of B series MBBR in-process experiments

2.3 Bardenpho 生产实验的结果

Bardenpho 生产实验的进出水水质见表 3 和 4。B 系列的出水平均 COD 较 C、D 系列略低, 去除率相近。计算 COD 数据的方差, 得到 B 系列方差为 8.599, C、D 系列方差为 22.122, 说明 Bardenpho 工艺中 B 系列出水的 COD 指标更稳定。B 系列的出水平均 $\text{NH}_3\text{-N}$ 较 C、D 系列略高, 但 B 系列 $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除率较低。计算 $\text{NH}_3\text{-N}$ 数据的方差, 得到 B 系列方差为 0.1647, C、D 系列方差为 0.0437。就去除效果而言, C、D 系列具有微弱优势, 且出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 指标更稳定, 但 B 系列出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 稳定低于 $1.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。B 系列的出水平均 TN 与 C、D 系列相比略低, 且 B 系列 TN 去除率较高。计算 TN 数据的方差, 得到 B 系列方差为 1.369, C、D 系列方差为 0.599。就去除效果而言, B 系列具有一定优势, 但 C、D 系列出水的 TN 指标更稳定。在除磷药剂投加量相同的情况下, B 系列出水的平均 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 较 C、D 系列略高, 去除率接近。计算 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 数据的方差, 得到发现 B 系列方差为 0.0062, C、D 系列方差为 0.0004,

表 3 Bardenpho 实验进水水质
Table 3 Influent quality of the Bardenpho experimental

取样日期	COD	$\text{NH}_3\text{-N}$	TN	$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$
2019-11-19	387	40.42	48.0	6.37
2019-11-20	372	42.00	47.1	8.52
2019-11-21	399	57.79	67.9	10.9
2019-11-26	466	43.58	56.3	5.38
2019-11-27	477	42.79	54.2	9.99
2019-11-28	823	33.97	48.4	7.53
2019-12-05	259	40.55	50.9	5.61
2019-12-17	323	40.82	49.2	6.77
2019-12-20	253	45.55	55.3	5.21
平均值	417.7	43.05	53.03	7.36

表 4 Bardenpho 实验出水水质情况对比表

Table 4 Comparison of effluent quality of Bardenpho experiment $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

取样日期	B系列				C、D系列			
	COD	$\text{NH}_3\text{-N}$	TN	$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$	COD	$\text{NH}_3\text{-N}$	TN	$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$
2019-11-19	14	0.137	3.56	0.084	16	0.111	7.00	0.132
2019-11-20	21	0.768	4.55	0.044	33	0.400	6.85	0.132
2019-11-21	16	0.347	4.47	0.264	17	0.268	7.45	0.100
2019-11-26	22	1.321	5.75	0.070	19	0.821	6.27	0.132
2019-11-27	21	0.584	5.49	0.120	20	0.295	7.69	0.153
2019-11-28	25	1.421	7.34	0.264	15	0.216	6.61	0.111
2019-12-05	19	0.611	3.90	0.224	21	0.716	5.28	0.163
2019-12-17	19	0.216	6.93	0.064	20	0.295	5.19	0.163
2019-12-20	15	1.350	7.30	0.244	22	0.189	7.21	0.163
平均值	19.11	0.751	5.477	0.153	20.33	0.368	6.617	0.139
最大值	25	1.421	7.340	0.264	33	0.821	7.690	0.163
最小值	15	0.216	3.900	0.044	15	0.189	5.190	0.100

说明 B 系列与 C、D 系列出水水质指标 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的稳定性接近。

2.4 Bardenpho 生产实验中脱氮过程分析

由于 Bardenpho 工艺第二缺氧区停留时间较短，B 系列好氧区与第二好氧区的曝气会影响第二缺氧区的缺氧状态，进而影响第二缺氧区的反硝化效果。为确保实验效果，Bardenpho 生产性实验中加强了 DO 控制，以确保第二缺氧段处于缺氧状态。结果亦表明污水处理过程中 TN 明显降低。在前文关于 MBBR 实验部分，已对原有 AAO 工艺中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的过程样数据进行分析，且 Bardenpho 工艺比 AAO 工艺分段多 (AAO 为 3 段，Bardenpho 为 5 段)，不具备全流程横向比较条件，因此，后面重点分析 B 系列的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、DO 过程样。B 系列 Bardenpho 实验期间 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、DO 过程样如图 6~8 所示。

分析 Bardenpho 生产性实验期间 B 系列生物池过程样的检测结果，发现厌氧区进口至厌氧区出口水样指标 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的平均值下降了 $2.078 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ；缺氧区进口至缺氧区出口 (剔除 11 月 19 日的异常数据) $\text{NH}_3\text{-N}$ 的平均值下降了 $0.327 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ；缺氧区进口至缺氧区出口 $\text{NO}_3\text{-N}$ 平均值下降了 $2.274 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，但缺氧区进口水样指标 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的平均值仅为 $3.295 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。这说

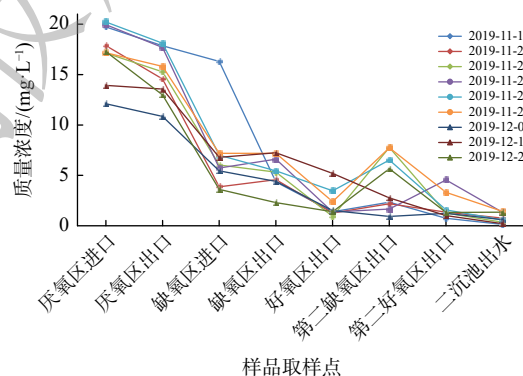


图 6 B 系列 Bardenpho 生产性实验过程样 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的质量浓度

Fig. 6 $\text{NH}_3\text{-N}$ Process samples of B series Bardenpho production experiments

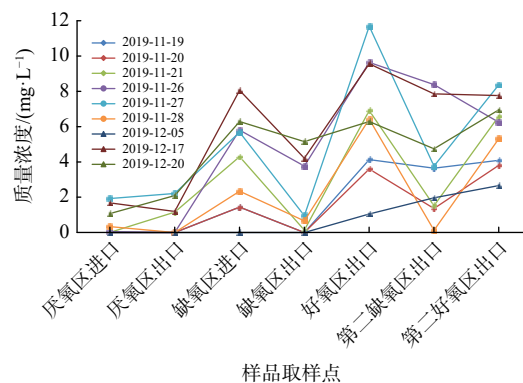


图 7 B 系列 Bardenpho 生产性实验过程样 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的质量浓度

Fig. 7 $\text{NO}_3\text{-N}$ Process samples of B series Bardenpho production experiments

明,系统通过反硝化过程转化了69.01%的 $\text{NO}_3\text{-N}$,效果良好,在部分缺氧区出口的样品中已检测不到 $\text{NO}_3\text{-N}$ 。由此可判断,厌氧区和缺氧区的厌氧、缺氧状态良好,处理效果明显。

好氧区出口至第二缺氧区出口平均 $\text{NO}_3\text{-N}$ 下降了 $2.882\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,说明第二缺氧段存在明显的反硝化过程;第一段好氧区出口水样 $\text{NH}_3\text{-N}$ 指标的平均值为 $2.106\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,而第二缺氧区出口水样比第二好氧区出口水样的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 指标有所上升,这可能是由于采集个别样品时第二缺氧区出口水样中DO高于 $0.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,此时部分 $\text{NH}_3\text{-N}$ 在第二好氧区发生了硝化反应。然而,即使考虑该原因的影响,好氧区出口水样比第二好氧区出口水样中平均 $\text{NO}_3\text{-N}$ 仍下降了 $0.836\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,故可确定在未投加碳源的情况下,第二缺氧区仍存在一定的反硝化反应。

2.5 Bardenpho 生产实验运行参数分析

与原有C、D系列AAO工艺相比,B系列Bardenpho工艺的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除效果略差,去除率略降低。进一步分析设计参数后发现,B系列Bardenpho工艺好氧区总水力停留时间较C、D系列AAO工艺减少了0.49 h;同时,由于B系列一段、二段好氧区末端的DO明显低于C、D系列AAO工艺好氧区末端的DO,因此,DO可能对出水的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 指标产生较大影响,具体数据如表4所示。

对比原有AAO工艺与Bardenpho工艺,结合实验数据和过程分析,采用硝化、反硝化动力学计算缺氧区容积计算公式(1)进行计算,以核算AAO工艺与Bardenpho工艺的反硝化速率是否符合设计要求。

$$V_n = \frac{0.001Q\Delta N - 0.12\Delta X_v}{K_{de}X} \quad (1)$$

式中: V_n 为缺氧区(池)容积, m^3 ; Q 为生物反应池设计流量, $\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$; X 为生物反应池内混合液悬浮固体平均浓度, $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; ΔX_v 为排除生物反应池系统的微生物量, $\text{kg}\cdot\text{d}^{-1}$; K_{de} 为脱氮速率, $\text{kg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$,根据实验资料确定。无实验资料时,一般 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 时 K_{de} 经验值为 $0.03\sim 0.06\text{ kg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$,并按相关公式进行温度修正,若温差不大可忽略。

Bardenpho生产性实验中C、D系列具体相关数据及计算结果见表5和6。

在计算中,C、D系列AAO工艺的反硝化速率以全段水力停留时间计算,B系列五段式Bardenpho工艺的反硝化速率以前3段AAO水力停留时间计算。由于Bardenpho工艺第一缺氧区水力停留时间小于原有AAO工艺缺氧区停留时间,表现为计算中 V_n 不同。另外,

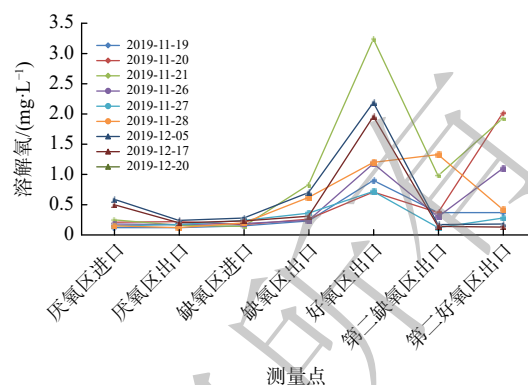


图8 B系列Bardenpho生产性实验过程样
取样点DO测量值

Fig. 8 measurement value of dissolved oxygen at sampling points of series B Bardenpho production experiments

表5 Bardenpho生产性实验中各好氧区末端的DO
Table 5 Measured values of dissolved oxygen at the end of aerobic zone of the Bardenpho production experiment

采样日期	B系列一段好氧区	B系列二段好氧区	C好氧区	D好氧区
2019-11-19	0.900	0.370	3.615	2.315
2019-11-20	0.710	2.020	3.595	2.985
2019-11-21	3.240	1.930	4.275	2.895
2019-11-26	1.180	1.100	3.725	1.560
2019-11-27	0.720	0.280	3.935	4.360
2019-11-28	1.200	0.420	4.390	2.720
2019-12-05	2.190	0.180	3.255	1.420
2019-12-17	—	—	4.190	1.940
2019-12-20	1.960	0.130	3.770	2.275

表6 Bardenpho 生产性实验 C、D 系列相关参数

Table 6 Experimental parameters of C and D series Bardenpho in-process experiments

采样日期	进水温度/℃	V_N/m^3	进水TN/(mg·L ⁻¹)	出水TN/(mg·L ⁻¹)	$\Delta X_v/(kg·d^{-1})$	VSS比例	$X/(g·L^{-1})$	$K_{de}/(kg·(kg·d)^{-1})$
2019-11-19	19.9	23 041	48	7.00	2 413	0.5	5 458	0.021
2019-11-20	19.9	23 041	47.1	6.85	2 445	0.5	5 885	0.019
2019-11-21	19.5	23 041	67.9	7.45	2 493	0.5	6 090	0.032
2019-11-26	18.9	23 041	56.3	6.27	1 972	0.5	6 445	0.026
2019-11-27	18.8	23 041	54.2	7.69	2 774	0.5	6 465	0.020
2019-11-28	18.8	23 041	48.4	6.61	3 593	0.5	6 380	0.014
2019-12-05	18.4	23 041	50.9	5.28	3 748	0.5	6 190	0.016
2019-12-17	18.1	23 041	49.2	5.19	1 963	0.5	6 140	0.023
2019-12-20	18.0	23 041	55.3	7.21	1 990	0.5	5 920	0.027

Bardenpho 工艺的 TN 取样点在一段好氧区出口, AAO 工艺在好氧区出口。根据表 6 和 7, Bardenpho 工艺有 2 d 高于设计下限, AAO 工艺有 1 d 高于设计下限, 2 种工艺反硝化速率平均值的区别较小, 且均低于理论设计负荷 $0.03\sim 0.06 kg·(kg·d)^{-1}$ 。分析 2 种工艺的结构, 由于 Bardenpho 工艺有第二缺氧区和第二好氧区进行二次反硝化, 且该区域无混合液回流影响, 故若进一步增加实际反硝化水力停留时间, 可进一步降低出水水样中的 TN、NH₃-N。

表7 Bardenpho 实验 B 系列相关参数

Table 7 Experimental parameters of B series Bardenpho in-process experiments

采样日期	进水温度/℃	V_N/m^3	进水TN/(mg·L ⁻¹)	出水TN/(mg·L ⁻¹)	$\Delta X_v/(kg·d^{-1})$	VSS比例	$X/(g·L^{-1})$	$K_{de}/(kg·(kg·d)^{-1})$
2019-11-19	19.9	17 083	48	5.530	2 268	0.5	5 995	0.028
2019-11-20	19.9	17 083	47.1	4.870	4 460	0.5	6 160	0.015
2019-11-21	19.5	17 083	67.9	7.840	4 463	0.5	5 695	0.034
2019-11-26	18.9	17 083	56.3	11.010	2 163	0.5	5 995	0.032
2019-11-27	18.8	17 083	54.2	15.160	2 879	0.5	6 135	0.021
2019-11-28	18.8	17 083	48.4	8.820	3 363	0.5	6 355	0.018
2019-12-05	18.4	17 083	50.9	2.560	3 906	0.5	6 490	0.022
2019-12-17	18.1	17 083	49.2	14.750	4 260	0.5	6 740	0.008
2019-12-20	18.0	17 083	55.3	7.690	3 657	0.5	6 875	0.022

3 结论与建议

1) 在同工况、不投加碳源情况下, “AAO+MBBR”工艺相较原有 AAO 工艺对系统 NH₃-N 的去除效果无明显提升, 但对 TN、NO₃-N 有一定的降低效果, 且“AAO+MBBR”工艺出水水样中 TN 更稳定性, 对 PO₄³⁻-P 的去除效果弱于原有 AAO 工艺。

2) 在同工况、不投加碳源情况下, 五段式 Bardenpho 工艺较原有 AAO 工艺对 TN、NO₃-N 的去除效果有明显提升, 出水水样的平均 TN 降低 $1.14 mg·L^{-1}$, 就去除效果而言, B 系列去除效果更优。此外, 同样条件下五段式 Bardenpho 工艺对 NH₃-N 的去除效果较差, 但指标能稳定低于 $1.5 mg·L^{-1}$, 达到准 IV 类水质对出水 NH₃-N、TN 的要求。

3) 在 Bardenpho 工艺生产实验期间, DO 数据不稳定, 多次出现第二缺氧段无法稳定处于缺氧状态的情况, 在一定程度上影响了出水水质指标。建议使用精确曝气系统代替人工远程调控以加

强生物池中 DO 的控制, 以进一步确保 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN 的出水稳定性。五段式 Bardenpho 工艺可加强除氮效果, 保障出水水质指标 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN 的稳定达标, 在第二缺氧段投加碳源还可加强反硝化效果。

参考文献

- [1] 孙悦. 城镇污水处理厂尾水排放水环境影响及对策[J]. *资源节约与环保*, 2019(5): 70.
- [2] 解宇峰, 李文静, 李维新, 等. 江苏省城市污水处理厂尾水时空排放特征研究[J]. *环境工程*, 2014, 32(8): 33-37.
- [3] 汪锋, 钱庄, 张周, 等. 污水处理厂尾水对排放河道水质的影响[J]. *安徽农业科学*, 2016, 44(14): 65-68.
- [4] 许赟溢. 污水处理厂尾水排江环境影响研究[J]. *环境与发展*, 2014, 26(3): 37-39.
- [5] 杨国钰. 以拟建杨台子污水处理厂为例谈——污水处理厂尾水排放对受纳区域水环境的影响及对策[J]. *治淮*, 2009(6): 14-15.
- [6] 吴雪, 何佳, 徐晓梅, 等. 滇池流域污水厂尾水污染负荷特征分析[J]. *中国给水排水*, 2018, 34(17): 69-73.
- [7] 吴钦. 城镇污水处理厂尾水排放对水环境影响及对策[J]. *环境与发展*, 2019, 31(6): 29.
- [8] 环境保护部. 水污染防治行动计划: 中英文对照[M]. 北京: 人民出版社, 2015.
- [9] 崔朋, 章诗璐, 万年红, 等. 高效气浮工艺深度除磷试验研究[J]. *住宅产业*, 2019(11): 143-148.
- [10] 沈怡雯. 高效沉淀池在污水处理厂UNITANK工艺强化除磷中的应用[J]. *净水技术*, 2019, 38(S1): 139-142.
- [11] 洪铁. V型滤池基本构造及实际运用[J]. *科技风*, 2019(23): 201.
- [12] DINGP, CHUL, WANGJ. Advanced treatment of petrochemical wastewater by combined ozonation and biological aerated filter[J]. *Environmental Science & Pollution Research*, 2018, 25(4): 9673-9682.
- [13] LI XW, SHIH C, LI K X, et al. Combined process of biofiltration and ozone oxidation as an advanced treatment process for wastewater reuse[J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2015, 9(6): 1076-1083.
- [14] 戴仲怡, 王雪, 彭建国, 等. 曝气缺氧/多级AO工艺用于大型污水厂提标改造[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(18): 50-54.
- [15] 赖辉辉, 乐华斌, 胡雁新. 高浓度氨氮及总磷进水的污水厂准地表IV类提标改造工程[J]. *广东化工*, 2018, 45(17): 146-147.
- [16] 刘浩, 杨俊杰, 于宁. Bardenpho五段法/MBBR用于青岛李村河污水厂三期扩建[J]. *中国给水排水*, 2016, 32(24): 62-66.
- [17] 杨宇星, 吴迪, 宋美芹, 等. 新型MBBR用于类地表IV类水排放标准升级改造[J]. *中国给水排水*, 2017, 33(14): 93-98.
- [18] 孙欣, 崔洪升. Bardenpho+深床滤池工艺用于半地下污水处理厂工程[J]. *中国给水排水*, 2017, 33(16): 82-85.
- [19] 胡香, 张辉, 许光远, 等. 反硝化深床滤池深度脱氮效果研究[J]. *中国给水排水*, 2017, 33(21): 13-17, 24.
- [20] CHUDOBA P, PUJOL R. Technical solutions for upgrading high rate and mediumloaded activated sludge plants for nutrient removal[J]. *Water Science & Technology*, 2000, 41(9): 131-138.
- [21] 国家环境保护总局, 国家质量监督检验检疫总局. 城镇污水处理厂污染物排放标准: GB18918-2002[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [22] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [23] YANG X P, WANG S M, ZHANG D W, et al. Isolation and nitrogen removal characteristics of an aerobic heterotrophic nitrifying-denitrifying bacterium, *Bacillus subtilis* A1[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(2): 854-862.

(责任编辑: 靳炜)

Comparative in-process study on enhanced nitrogen removal processes in biological reaction tank in Xi'an No.5 wastewater treatment plant

ZHANG Weiyao^{1,2}, YUAN Honglin^{2,*}, LU Jinsuo², WANG Bing³, SUN Hongfang³, LIU Xiaopeng³, MA Minghua³, LU Di³, SHI Xin³, LIU Xun⁴

1. Xi'an Water Group Co.Ltd, Xi'an 710061, China

2. School of Environment and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710054, China

3. Xi'an Sewage Treatment Co.Ltd, Xi'an 710024, China

4. School of Arts and Science, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China

*Corresponding author, E-mail: 498821968@qq.com

Abstract To select an enhanced denitrification process in a biological reaction tank, the in-process experiments of biological reaction tank were carried out by using different series of AAO+MBBR processes, the five-stage multi-mode Bardenpho process and the original AAO processes in a urban sewage treatment plant. The experimental results show that compared with the original AAO process the AAO+MBBR process has similar effluent ammonia but low total nitrogen ($0.49\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ lower) under the same working conditions, load and time and without adding any carbon source. Compared with the original AAO process, the Bardenpho process can stabilize the effluent ammonia nitrogen below $1.5\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, and the total effluent nitrogen is reduced by $1.14\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. Without the additional of carbon source, the second anoxic zone shows an obvious secondary denitrification effect. Results in this study can provide reference for the selection of process routes for upgrading and reconstruction of urban sewage treatment plants.

Keywords upgrade and reconstruction; quasi-Class IV water quality standards; moving bed biofilm reactor process; bardenpho process; enhanced nitrogen removal; in-process experiments