

某污水厂 Bardenpho – MBBR 准Ⅳ类水提标改造分析

滕良方¹, 吴迪², 郑志佳², 周家中², 孙庆花²

(1. 宁波市城市排水有限公司, 浙江 宁波 315000; 2. 青岛思普润水处理股份有限公司, 山东 青岛 266555)

摘 要: 浙江某污水处理厂设计规模为 $16 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 采用 Bardenpho – MBBR 工艺进行升级改造, 使出水水质由一级 B 标准提升至地表准Ⅳ类水质标准。针对采用 A/A/O 工艺的生化池, 保持总容积不变且不改变厌氧及缺氧段, 通过对好氧段功能重新划分, 增加后置缺氧区和后置好氧区, 并在好氧区投加悬浮载体, 将生化池改造为 Bardenpho – MBBR 工艺, 强化脱氮除磷效果; MBBR 区采用微动力混合池型, 无需使用推流器, 节约投资和运行成本, 利于系统运行维护。改造后, 生化段出水 COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN 均值分别为 18.80、0.27、8.43 mg/L, 在未投加碳源的情况下稳定达到了准Ⅳ类水质标准, 生化段出水 TP 均值为 0.48 mg/L, 大大减轻了后续深度处理工艺的除磷负荷; TN 去除率较改造前提高了近 1 倍, 这得益于前置缺氧区脱氮效率的提高、填料区的同步硝化反硝化 (SND) 作用及后置缺氧区的脱氮作用; 对系统中微生物进行高通量测序, 结果表明, 填料对系统的硝化贡献率达到 85%, 并且填料上附着的反硝化菌占比达到 6.46%, 证明好氧区悬浮载体上存在 SND 过程。Bardenpho – MBBR 工艺能耗低、容积效率高、运行效果稳定, 突破了常规工艺对 TN 去除的限制, 适用于对出水 TN 要求严格的准Ⅳ类等高标准水质要求的污水处理厂新建及改造工程。

关键词: MBBR; Bardenpho 工艺; 准Ⅳ类水; 同步硝化反硝化; 提标改造; 微动力混合; 悬浮载体

中图分类号: TU992.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-4602(2019)11-0033-07

Upgrading and Reconstruction to Meet Quasi Class IV Standard of Surface Water by Bardenpho-MBBR in a Wastewater Treatment Plant

TENG Liang-fang¹, WU Di², ZHENG Zhi-jia², ZHOU Jia-zhong²,
SUN Qing-hua²

(1. Ningbo Municipal Sewerage Co. Ltd., Ningbo 315000, China; 2. Qingdao Spring Water Treatment Co. Ltd., Qingdao 266555, China)

Abstract: A wastewater treatment plant (WWTP), designed treatment capacity of $16 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ in Zhejiang Province, was upgraded the effluent quality from the first class B criteria specified in GB 18918-2002 to quasi class IV standard of surface water through Bardenpho-MBBR process. By repartitioning the function of aerobic area, increasing post-anoxic & post-aerobic area and adding suspended carriers to aerobic area in biochemical reaction zone, the original biochemical tanks were upgraded to Bardenpho-MBBR process without changing the anaerobic and anoxic area and the total

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07106005-04); 青岛市民生科技计划项目(18-6-1-100-nsh)

通信作者: 吴迪 E-mail: hitwudi@126.com

volume to enhance nitrogen and phosphorus removal effect. The micro-power mixing pool was adopted by the MBBR area, and there was no need to use pushers, which saved the investment and operation cost and was conducive to the system operation and maintenance. After retrofitting, the average effluent COD, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and TN of biochemical area were 18.80 mg/L, 0.27 mg/L and 8.43 mg/L respectively, which steadily met quasi class IV standard of surface water without adding carbon source. The effluent TP was 0.48 mg/L after biochemical reaction, which extremely reduced the advanced wastewater treatment load. The TN removal rate was nearly double that before the modification, which was attributed to the improvement of denitrification efficiency in the pre-anoxic area, simultaneous nitrification and denitrification (SND) effect in MBBR, and the denitrification ability in the post-anoxic area. High-throughput sequencing of microorganisms in the system showed that the contribution rate of suspended carriers to nitrification of the system reached 85%. In addition, the proportion of denitrifying bacteria attached to the fillers accounted for 6.46%, which proved that SND took place on the suspended carriers in the aerobic zone. The Bardenpho-MBBR process has low energy consumption, high volumetric efficiency, stable operating results and breaks the limitations of conventional processes on TN removal, which is applicable to new construction and reconstruction of WWTP with strict requirements on effluent TN to meet quasi class IV standard of surface water.

Key words: MBBR; Bardenpho process; quasi class IV standard of surface water; simultaneous nitrification and denitrification; upgrading and reconstruction; micro-power mixing; suspended carrier

随着水环境质量要求的提高,部分地区提出了准IV类水质概念,即在国家一级A标准的基础上,对污水处理厂的污染物排放标准进一步限定。多数污水厂在进行一级A升级改造中已增加了深度处理工艺以强化去除TP和SS,通过增加投药量或降低运行负荷的优化运行方式可以实现出水TP和SS达到准IV类水质标准,但对于氨氮和TN缺乏明确的升级改造路线。污水处理厂历经几次提标,整体工艺流程基本定型,难有扩建用地,也难以改换工艺。生化池是污水厂池容最大的构筑物,自然也是潜力最多的构筑物;从污水处理的整体布局上,应当建立科学的改造观,氮磷处理也应当回归生化。生化工艺的强化本质上多是增加生物量,途径上区分为强化泥水分离以富集更高污泥浓度的膜工艺(MBR)和增加悬浮载体以提高污泥性能的生物膜工艺(MBBR)。由于MBBR可直接与已有活性污泥法镶嵌,改造灵活,能最大化利用现有池容和工艺流程,受到了广泛关注。自2008年无锡芦村污水处理厂成功进行了MBBR升级改造后,近10年来,国内采用MBBR工艺的污水处理厂已超过 $800 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,涵盖各类污(废)水、工艺、池型、标准的改造^[1-6]。笔者以浙江省某污水处理厂准IV类水升级改造工程

为例,分析了MBBR工艺改造方案的应用效果,旨在为污水厂准IV类水提标改造项目提供参考。

1 项目概况

浙江省某污水处理厂的设计规模为 $16 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,原生化段采用A/A/O工艺,尾水执行国家一级B标准。2016年该污水厂进行提标改造,要求在设计进水水量不变的情况下,尾水水质达到地表准IV类水质标准。设计进、出水水质如表1所示。

表1 污水厂升级改造的设计进、出水水质

Tab.1 Design water quality of influent and effluent

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

项 目	BOD ₅	COD	SS	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	TN	TP
设计进水	130	320	300	30	40	6
二沉池出水	10	35	—	1.5(3)	10	1.5
设计出水	6	30	5	1.5(3)	10	0.3

2 技术路线与设计方案

2.1 改造难点

提标改造所面临的主要问题有:①升级改造难度大,出水水质由一级B标准直接升级至准IV类,跨度较大;②出水水质标准高,出水总氮、总磷和SS等指标都需大幅提升,对改造工艺要求更高;③原池改造,厂内用地有限,无生化池扩建用地,需充分挖

潜现有生化池的处理能力;④生化池为全封闭结构,施工难度较大。

2.2 技术路线选择

综合考虑进、出水水质及预留用地等情况,先后提出两条技术路线:技术路线Ⅰ, A/A/O + 高效沉淀池 + 反硝化深床滤池;技术路线Ⅱ, Bardenpho - MBBR + 高效沉淀池 + 反硝化深床滤池。

技术路线Ⅰ,生化池保持不变,深度处理工艺新增高效沉淀池、反硝化深床滤池和加氯接触池,前者可以强化 TP 的去除,而后者可强化 TN 和有机物的去除,保证各项出水指标稳定达标。但是,该路线存在一系列问题:①升级改造仅通过新建“高效沉淀池 + 反硝化深床滤池”完成,将所有出水指标达标压力放在了深度处理构筑物上。②高效沉淀池仅用于化学除磷和过滤,去除 TP 和 SS,而反硝化深床滤池则需承担剩余指标的去除,导致反硝化深床滤池承担负荷高,并且去除指标多,工艺控制复杂。③深度处理工艺对氨氮没有降解作用,如果前端生化池对氨氮的降解不完全则会导致出水氨氮浓度不达标;此外,硝化不足也会影响反硝化效果,导致出水 TN 浓度不达标。④反硝化深床滤池的外加碳源利用率、需要脱除的硝态氮量、进水 COD 浓度、出水 COD 浓度,四者相互制约,工程上反硝化深床滤池一般可去除 3 ~ 5 mg/L 的硝态氮,若去除更多,则面临出水 COD 超标的风险,而且容易产生较多的污泥,出水 SS 较高,需要频繁反洗,而频繁反洗又不利于反硝化菌群富集,最终将导致系统运行不稳定。⑤在设计过程中,反硝化深床滤池承担去除的 TN 越多,投资和运行成本就越高。

技术路线Ⅱ,生化池由 A/A/O 三段式改为五段 Bardenpho 工艺以强化 TN 的去除,好氧段投加填料形成 MBBR 工艺用以弥补五段式分隔带来的好氧硝化池池容不足,新建反硝化深床滤池作为出水水质达标的保障。

考虑到技术路线Ⅰ在总投资和运行费用上均较高,运行稳定性也较为欠缺,最终确定将技术路线Ⅱ作为本项目的升级改造方案。技术路线Ⅱ的工艺优势表现在:①工艺流程设置合理,充分发挥了二级生化处理的作用, Bardenpho - MBBR 工艺可以保证出水 COD、BOD₅、氨氮及 TN 指标的达标,深度处理工艺只要确保 TP 及 SS 指标达标即可。②采用 Bardenpho - MBBR 工艺在确保出水 TN 达标的前提

下,可以充分利用原水碳源,减少外投碳源用量。③ MBBR 工艺具有较强的抗冲击性,在进水水质和水量波动较大的情况下,也能很快恢复系统的稳定性。④在设计中反硝化滤池无需考虑大量的 TN 去除,仅考虑在极端条件下的情况即可,进一步降低了占地面积;在保证 TP 及 SS 指标达标的前提下,控制指标较少,操作运行简单,且无碳源泄漏等风险。⑤投资及运行成本较低。

2.3 生化段改造方案

生化段原有厌氧池和缺氧池不变,根据设计方案将好氧池重新划分为 O/A/O,将原 A/A/O 工艺改造为 A/A/O + A/O (Bardenpho 工艺);第 1 级好氧池投加 SPR - 2 型悬浮载体形成 MBBR 泥膜复合工艺,填料直径为 (25 ± 0.5) mm、高为 (10 ± 1) mm,挂膜后密度与水接近,有效比表面积 > 620 m²/m³,符合国家标准《水处理用高密度聚乙烯悬浮载体填料》(CJ/T 461—2014)^[7];好氧 MBBR 区域采用微动力混合池型,该池型具有水力条件好、无水力死角、无需推流器等特点,在本项目中,采用该池型可节省 16 台专用推流器以及每年 84.096 万元的电费,大大降低了投资和运行能耗。采取逐池改造的方式,不影响污水厂的正常生产。改造前后生化段的工艺流程如图 1 所示。

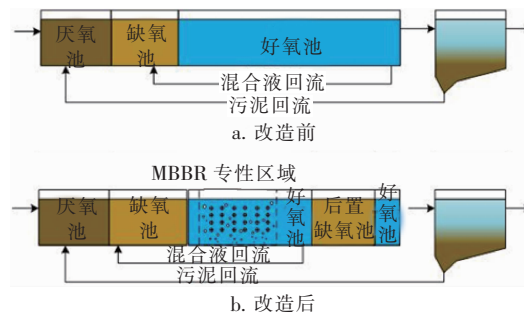


图 1 改造前后生化段的工艺流程

Fig. 1 Flow chart of biochemical treatment process before and after reconstruction

3 改造后运行效果分析

升级改造工程于 2017 年 6 月 17 日开始,到 8 月中旬,处理水量达到设计规模,所投加的悬浮载体挂膜完成。分析 2017 年 8 月 20 日—2018 年 4 月 10 日的进出水水质(包含整个冬季运行阶段),并与改造前上一年同期运行数据进行对比。

3.1 改造后对 COD、TP 和氨氮的去除效果

COD 不是本项目的难点,改造前出水 COD 浓

度已基本能达到准Ⅳ类水质标准。改造后,生化池进、出水 COD 均值分别为 197.12、18.80 mg/L, COD 去除率均值为 90.46%,出水 COD 浓度稳定达到了准Ⅳ类水质标准。

改造后,生化池的除磷效果显著增加,生化池并未投加混凝剂,均为生物除磷过程。改造前生化池进、出水 TP 均值分别为 4.20、1.04 mg/L,去除率均值为 75.24%;改造后生化池进、出水 TP 均值分别为 4.00、0.48 mg/L,去除率均值为 88.00%。生物除磷效果的提升,主要是 MBBR 工艺对生物除磷效果提升的间接体现。污泥龄是生物除磷的重要影响因素之一,聚磷菌需要短泥龄。改造前,为了保障氨氮去除效果,一般运行中污泥浓度较高、泥龄较长,以确保硝化菌群在污泥中的占比;改造后,在好氧区投加悬浮载体,实现了硝化菌群的固定富集,保证了硝化菌群所需的长泥龄,这样在一定程度上可以降低悬浮态污泥龄,强化生物除磷,特别是对溶解性 TP 的去除作用^[8]。仅靠生物降解作用就可使生化段出水 TP < 0.5 mg/L,大大减轻了后续深度处理工艺的负荷,节省了运行费用。

改造前后对氨氮的处理水平相当,改造后生化池进、出水氨氮均值分别为 16.02、0.27 mg/L,去除率均值为 98.31%,如图 2 所示。

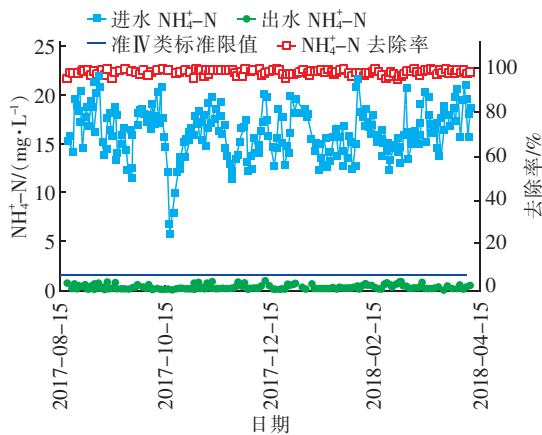


图2 改造后生化系统对氨氮的去除效果

Fig. 2 Ammonia removal efficiency after reconstruction

改造前,由于好氧池容积较大,水力停留时间长达 7.8 h,对氨氮的去除效果较好,但是当进水水质和水量存在冲击时,对氨氮的去除效果较差,系统的抗冲击能力较弱,此外,冬季低温时也经常出现氨氮波动的情况。改造后,在好氧区投加悬浮载体,保证了好氧区附着态污泥龄 > 30 d,有利于硝化菌群的

富集。填料的挂膜过程与胞外聚合物(EPS)密不可分,微生物活性越强,则 EPS 分泌越旺盛,就越容易挂膜;微生物活性减弱时, EPS 分泌量减少,在流化水力剪切作用下脱离老化的生物膜,实现生物膜的自然动态更新,保证了填料上的微生物一直处于较高的活性^[9]。

3.2 系统改造前后对 TN 的去除效果

改造前,系统进、出水 TN 均值分别为 21.55、13.91 mg/L,平均去除率为 35.45%,出水 TN 浓度波动较大、不稳定;改造后,系统进、出水 TN 均值分别为 24.73、8.43 mg/L,平均去除率为 65.91%,具体如图 3 所示。可以看出,系统经过 Bardenpho - MBBR 工艺改造后,在进水 TN 负荷升高的情况下,出水 TN 依然能够稳定达标,平均去除率比改造前高出近 1 倍。

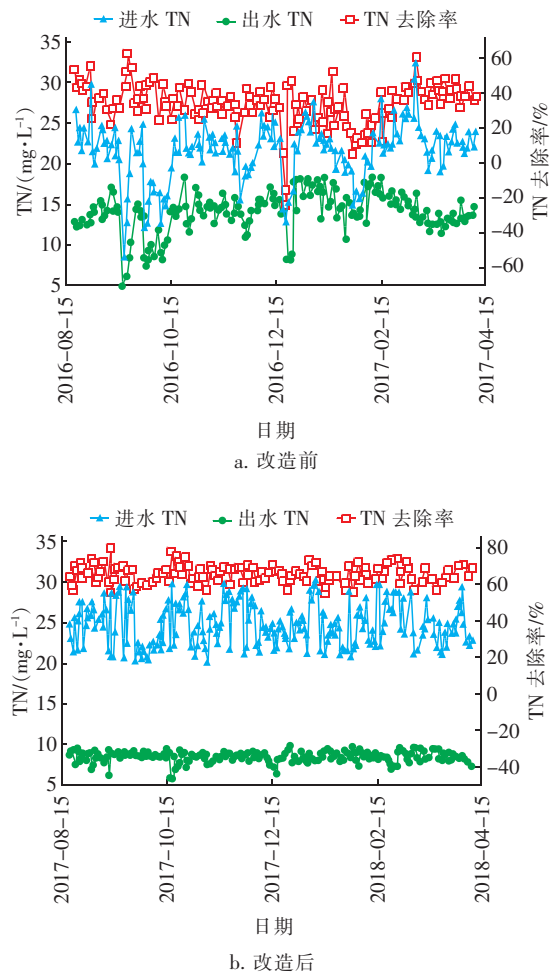


图3 改造后系统对 TN 的去除效果

Fig. 3 TN removal efficiency after reconstruction

为进一步探索改造后系统对 TN 去除效果改善

的原因,在 2017 年 12 月底对系统各工艺段进行了 TN 去除分析。系统内各区域均有 TN 去除,厌氧区、前置缺氧区、好氧 MBBR 区、后置缺氧区和后置好氧区对 TN 的去除率分别为 9.57%、29.92%、9.02%、11.31% 和 3.62%,系统对 TN 的总去除率为 63.44%,如图 4 所示。

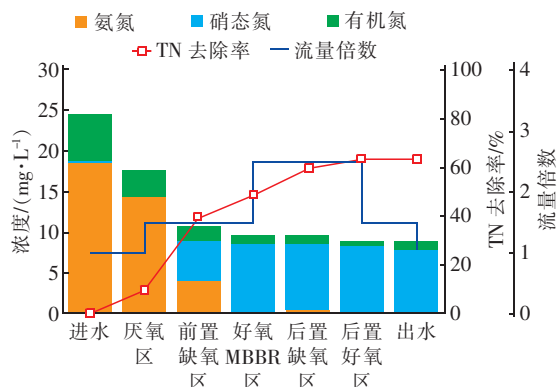


图 4 沿程断面氮素变化

Fig. 4 Change of nitrogen along the process

改造前后系统的总回流比均为 150%,厌氧区和前置缺氧区的 TN 去除率合计为 39.49%,略优于改造前,原因在于系统的污泥浓度不再受硝化菌群长泥龄要求的限制,整个系统内的污泥活性较改造前有明显提升。

在好氧区发生了明显的 TN 去除现象,好氧段的同步硝化反硝化(SND)作用对 TN 的去除率为 12.64%,合计去除 3.08 mg/L 的 TN,占总去除率的 20.0%。生物膜上典型的缺/好氧微环境,以及对功能微生物的富集作用,促进了 SND 作用的进行,使得在好氧区仍能进一步去除 TN。在众多采用 MBBR 的污水处理厂,均在好氧填料区发现了显著的 SND 现象^[1-3],TN 去除量在 3~8 mg/L 不等,而且基质浓度较高的污水处理厂,SND 效果更加显著。由于好氧填料区的有机物含量已经很低,进一步推测 SND 的碳源可能与生物膜的内碳源相关。关于生物膜、泥膜复合系统 SND 的研究有待进一步深化,但对于进水 TN 为 50 mg/L、出水 TN 要求在 10 mg/L 以下的污水处理厂,TN 去除率要求达到 80%,总回流比至少需要 400%;当 SND 作用去除 5 mg/L 的 TN 时,总回流比可降至 350%,且可减少 25 mg/L 的碳源(以 BOD₅ 计)投加,节能降耗显著。而对于进水基质浓度不高的污水处理厂,甚至可以完全省去外投碳源,使得 MBBR 除了在池容做到深度

挖潜外,真正实现了基质利用上的深度挖潜,应用前景广阔。

后置缺氧区对 TN 的去除量为 2.76 mg/L,由于该区域无碳源投加,且原水中的碳源基本已在前端消耗殆尽,分析该段内可能是发生了内碳源的水解而被微生物利用。另外,该区域内出现了氨氮的少量溶解,进一步证明了内碳源水解现象的存在。

改造前,系统出水 COD 和氨氮指标已基本可达到准Ⅳ类水质标准,COD、氨氮和 TP 指标都不是改造难点,效果与经济的核心矛盾在 TN 指标上。通过采用 Bardenpho 工艺,有效开发了系统的内碳源,增加了后置反硝化区,强化了对 TN 的去除效果;而 MBBR 的采用,是系统实现原池改造为 Bardenpho 工艺的前提,在大幅削减好氧池容积的前提下,系统对氨氮的去除效果并未受到影响,在好氧池泥龄大幅缩短的前提下未影响到硝化菌群的活性,悬浮载体上 SND 的出现,更为节省外投碳源、降低回流比创造了条件。

在实际运行过程中,对 TN 的去除基本上在生化段就可以完成,深度处理中的反硝化深床滤池作为保障性工艺,正常状态下按普通滤池运行,保证 SS 及 TP 指标达标即可。

4 MBBR 工艺对功能微生物的选择作用

为进一步探究悬浮载体的作用,对本项目(XZ)悬浮填料上的生物膜和悬浮态污泥进行了高通量测序分析,并同期检测了其他两个采用 MBBR 工艺的污水处理厂进行对比,结果如图 5、6 所示。对于本项目,分析发现,系统中主要的硝化菌群为 *Nitrosomonas*(AOB)和 *Nitrospira*(NOB),在悬浮填料和污泥中的占比分别为 2.5% 和 27.8%、0.5% 和 3.8%。结合生物量测定,系统中 85% 的硝化过程来自填料,15% 来自污泥,因此在去除氨氮的过程中,填料发挥着重要作用。最新研究表明,*Nitrospira* 兼具 AOB 和 NOB 功能,其比生长速率低,对基质的亲和力更大,在氨氮浓度较低的环境中更具优势^[10-12]。对比多个稳定达标的污水处理厂发现,*Nitrospira* 是否为硝化菌群的优势菌种及其占比是系统是否稳定的良好指示性微生物。另外,在填料上也检出大量的反硝化菌,如 *Simplicispira*、*Terrimonas*、*Hyphomicrobium* 等,在填料上的占比分别为 1.47%、0.18%、0.17%,尤其是 *Simplicispira* 在填料上的占比高于污泥系统,说明该类反硝化菌更适

合以附着态形式存在。反硝化菌群在填料上的占比达到 6.46%,从微观角度证明了好氧区填料上 SND 作用的存在。同时发现,MBBR 系统内,酸杆菌门 (*Acidobacteria*) 占比往往显著高于活性污泥系统,如优势种群 Gp4、Gp6、Gp10 等也基本来源于填料。酸杆菌门多嗜酸^[13],其存在可能与 SND 现象有关。进一步推测,生物膜中的 EPS 若作为碳源供给 SND,则 EPS 可被利用的前提即存在相关菌群能够将其水解转化为低碳有机物,酸杆菌门可能具有相关的作用。

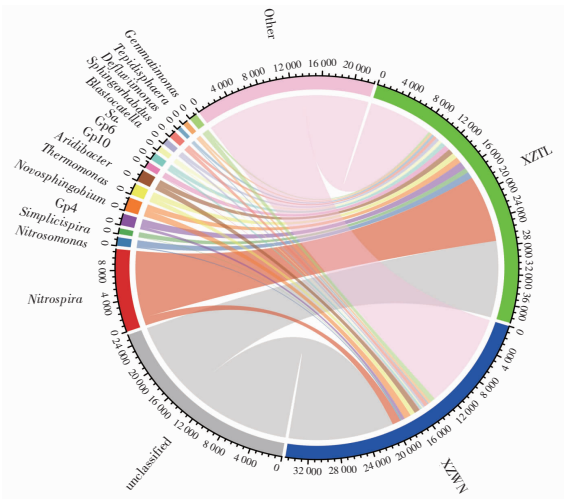


图 5 功能菌群在悬浮态污泥与填料上的占比

Fig. 5 Distribution proportion of functional bacteria in suspended sludge and carrier

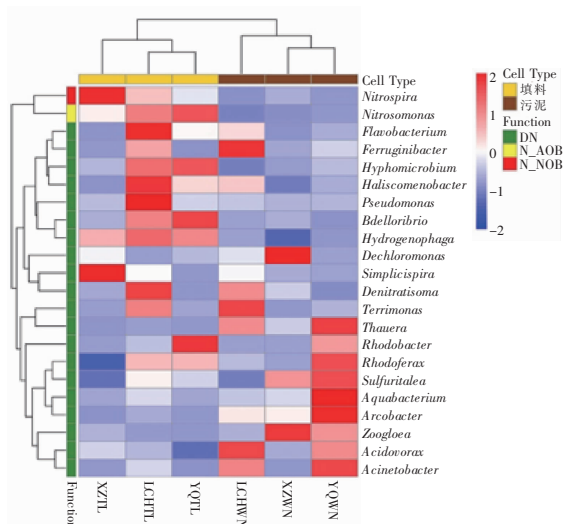


图 6 不同污水厂功能菌群在悬浮态污泥与填料上的分布热图

Fig. 6 Distribution heat map of functional bacteria in suspended sludge and carrier in different WWTPs

不同 MBBR 系统内,悬浮载体上硝化菌群 (*Nitrospira*、*Nitrosomonas*) 的数量均远高于污泥,而反硝化菌群则呈现出 3 类情况,即主要在污泥中、污泥与填料占比相当、主要在填料上,这与各类菌群的生化特性相关。另外,不同污水厂优势硝化菌种存在一定的差异。以硝化菌群为例,*Nitrospira* 在 XZ、LCH、YQ 这 3 个项目中,XZ 最高、LCH 次之、YQ 最低;而 *Nitrosomonas* 却相反,YQ 最高、LCH 次之、XZ 最低。差异性可能与出水水质标准要求、运行控制等有关,仍需要进一步研究探索。

5 结论

① 采用 Bardenpho - MBBR 工艺对某污水厂进行提标改造,生化段出水 COD、氨氮、TN 均值分别为 18.80、0.27、8.43 mg/L,稳定达到了地表准 IV 水质标准,生化段出水 TP 均值为 0.48 mg/L,大大减轻了后续深度处理工艺的除磷负荷。

② 采用 Bardenpho - MBBR 工艺强化了系统对 TN 的去除作用,TN 去除率达到 65.91%,较改造前提高了近 1 倍;TN 去除效果的提升,主要得益于前置缺氧区脱氮效果的提高、好氧区的 SND 作用以及后置缺氧区的内源反硝化作用,好氧区 SND 作用所去除的 TN 占 TN 总去除率的 20.0%。

③ 悬浮填料对硝化菌的筛选和富集具有重要作用,填料上微生物对硝化过程的贡献率达到 85%;填料上反硝化菌的占比约为 6.46%,填料本身的缺氧/好氧分层为 SND 过程提供了微观环境,有效降低了外碳源的投加量,提高了 TN 去除率。

④ MBBR 工艺采用微动力混合池型,相比循环流动池型,可以节省 16 台专用推流器以及每年 84.096 万元的电费。

⑤ Bardenpho - MBBR 工艺采用“镶嵌”原理实现对原池的改造,处理效果稳定,适用于地表准 IV 水质标准尤其是对 TN 有严格排放要求的污水厂升级改造。

参考文献:

- [1] 杨晓美,宋美芹,吴迪,等. 新型悬浮载体强化脱氮除磷技术用于高标准污水处理[J]. 中国给水排水, 2017,33(16):97-102.
- Yang Xiaomei, Song Meiqin, Wu Di, et al. Application of new style suspended carriers enhancing nitrogen and phosphorus removal in wastewater treatment for high

- standard [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33 (16): 97 - 102 (in Chinese).
- [2] 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.
- Yang Yuxing, Wu Di, Song Meiqin, *et al.* Application of new MBBR in WWTP upgrading to meet class Ⅳ surface water standard [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(14): 93 - 98 (in Chinese).
- [3] 吴迪, 李闯修. 北方某污水处理厂 Bardenpho - MBBR 改造运行分析[J]. 中国给水排水, 2018, 34(9): 106 - 110, 115.
- Wu Di, Li Chuangxiu. Operation analysis of Bardenpho-MBBR upgrading and retrofitting in a northern wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(9): 106 - 110, 115 (in Chinese).
- [4] 韩萍, 许斌, 宋美芹, 等. 团岛污水厂 MBBR 工艺的升级改造及运行效果[J]. 中国给水排水, 2014, 30(12): 110 - 114.
- Han Ping, Xu Bin, Song Meiqin, *et al.* Design features and operational effect of Tuandao WWTP upgrading by MBBR in Qingdao [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(12): 110 - 114 (in Chinese).
- [5] 刘宜龙, 吴迪, 刘飞, 等. MBBR 在工业园区废水处理升级改造中的应用[J]. 中国给水排水, 2017, 33(17): 14 - 18.
- Liu Yilong, Wu Di, Liu Fei, *et al.* Application of MBBR in industrial park WWTP upgrading [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(17): 14 - 18 (in Chinese).
- [6] 张晶晶, 吴迪. 新型 MBBR 一体化设备用于黑臭水体点源污染治理[J]. 中国给水排水, 2017, 33(22): 102 - 105.
- Zhang Jingjing, Wu Di. Application of MBBR in point source control of a black and odorous river [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(22): 102 - 105 (in Chinese).
- [7] 吴迪. 水处理用悬浮载体填料行业标准解读与投加量设计[J]. 中国给水排水, 2017, 33(16): 13 - 17.
- Wu Di. Interpretation of *High Density Polyethylene Suspended Carrier for Water Treatment* and calculation of added amount of suspended carrier [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(16): 13 - 17 (in Chinese).
- [8] 杨小梅, 张月, 潘丹华, 等. SRT 对 A^2/O - MBBR 工艺中聚磷菌特性的影响[J]. 安全与环境学报, 2017, 17(1): 256 - 261.
- Yang Xiaomei, Zhang Yue, Pan Danhua, *et al.* The effect of sludge age on the behaviors of phosphorus accumulating organisms in processing A^2/O - MBBR [J]. Journal of Safety and Environment, 2017, 17(1): 256 - 261 (in Chinese).
- [9] 刘翔. 活性污泥和生物膜的胞外聚合物性质及其对污泥性能影响的比较研究[D]. 上海: 复旦大学, 2009.
- Liu Xiang. A Comparative Study of Extracellular Polymeric Substance of Activated Sludge and Biofilm, and Their Effects on Sludge Characteristics [D]. Shanghai: Fudan University, 2009 (in Chinese).
- [10] Daims H, Lebedeva E V, Pjevac P, *et al.* Complete nitrification by *Nitrospira* bacteria [J]. Nature, 2015, 528 (7583): 504 - 509.
- [11] van Kessel M A H J, Speth D R, Albertsen M, *et al.* Complete nitrification by a single microorganism [J]. Nature, 2015, 528 (7583): 555 - 559.
- [12] 姚倩, 彭党聪, 赵俏迪, 等. 活性污泥中硝化螺菌 (*Nitrospira*) 的富集及其动力学参数[J]. 环境科学, 2017, 38(12): 5201 - 5207.
- Yao Qian, Peng Dangcong, Zhao Qiaodi, *et al.* Enrichment of *Nitrospira* in activated sludge and kinetic characterization [J]. Environmental Science, 2017, 38 (12): 5201 - 5207 (in Chinese).
- [13] Kuske C R, Barns S M, Busch J D. Diverse uncultivated bacterial groups from soils of the arid southwestern United States that are present in many geographic regions [J]. Appl Environ Microbiol, 1997, 63 (9): 3614 - 3621.



作者简介: 滕良方 (1976 -), 男, 浙江宁波人, 本科, 工程师, 主要研究方向为污水脱氮除磷。

E-mail: qdsprsch@163.com

收稿日期: 2018 - 11 - 25