

AAOA-MBR 工艺污水脱氮特性及脱氮机制

周元^{1,2} 金腊华^{1,2*} 张一凡^{1,2} 黄志伟^{1,2}

(1. 暨南大学环境学院, 广州 510632;

2. 广东省高校水土环境毒害性污染防治与生物修复重点实验室, 广州 510632)

摘要 为了提高污水脱氮效果, 在传统 A²O 工艺的基础上, 增加后置缺氧段并与膜生物反应器相结合, 构建了 AAOA-MBR 污水处理中试装置, 进行了中试实验。实验结果表明, 在进水 COD 浓度为 100.00 ~ 280.00 mg/L、TN 浓度为 18.32 ~ 31.86 mg/L、NH₄⁺-N 浓度为 12.78 ~ 24.44 mg/L 时, COD、TN 和 NH₄⁺-N 的平均去除率分别达到了 90.0%、72.1% 和 99.0%, 出水水质达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002) 中的一级 A 标准; 通过多点进水优化了内源配置, 节约了碳源, 强化了脱氮效果; 采用膜池回流供氧, 可在节能的同时保证缺氧池 1 的缺氧环境, 提高了反硝化效果。本文的研究成果为实际污水处理工程市场提供了一套高效脱氮的新工艺。

关键词 AAOA-MBR 工艺 脱氮 多点进水 膜池回流供氧

中图分类号 X703.1 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2015)08-3739-06

Sewage nitrogen removal characteristics and mechanism by AAOA-MBR technology

Zhou Yuan^{1,2} Jin Lahua^{1,2} Zhang Yifan^{1,2} Huang Zhiwei^{1,2}

(1. School of Environment, Jinan University, Guangzhou 510632, China;

2. Key Laboratory of Water/Soil Toxic Pollutants Control and Bioremediation, Department of Education of Guangdong Province, Guangzhou 510632, China)

Abstract In order to improve the effect of nitrogen removal from sewage, a rear anoxic pond was added after a traditional A²O process, and followed by MBR, which constructed a pilot sewage treatment device with AAOA-MBR technology. Pilot experiments was accomplished with the device. The experimental results showed that when the influent concentrations of COD, TN, NH₄⁺-N were 100.00 to 280.00 mg/L, 18.32 to 31.86 mg/L, 12.78 to 24.44 mg/L, respectively, the average removal rates of COD, TN and NH₄⁺-N were 90.0%, 72.1% and 99.0%, the effluent quality met the first level A criteria specified in Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant (GB 18918-2002). Through step feeding, inner carbon configuration can be optimized, and carbon source can be partially saved, and the effect of nitrogen removal can be improved. By backflow from MBR, oxygen can be provided to oxidation pond, which can decrease aeration quantity for saving energy and ensure anoxic pond in hypoxia environment for increasing denitrification effect. The experiment results may provide a new technology for nitrogen removal in actual practice.

Key words AAOA-MBR technology; nitrogen removal; step feeding; backflow from MBR

我国地表水污染主要表现为有机污染和以氮、磷等为主的营养性污染, 生活污水的不达标排放是地表水污染的主要成因之一。我国城镇污水处理厂大多采用活性污泥法, 其中 A²/O 工艺以其构造简单、运行成本低、水力停留时间短、操作简单等优点成为城市污水处理的主要工艺^[1-3], 但是 A²O 工艺存在污泥龄不协调和基质竞争这两个问题, 主要表现为脱氮污泥龄时间较长, 而除磷污泥龄时间较短, 反硝化和聚磷菌厌氧释磷会争夺碳源^[4,5], 这些问题导致 A²O 工艺脱氮除磷效果不佳, 污水排放时

N、P 时有超标, 不能满足日益严格的污水排放要求, 迫切需要开发具有高效脱氮除磷效果的工艺。

膜生物反应器(MBR)是膜分离技术与传统活性污泥法有机结合而形成的新型污水处理工艺, 具有出水水质好、占地面积小和产泥率低等特点, 在污

基金项目: 东莞市高校科研机构科技计划项目(2012108101002)

收稿日期: 2015-03-17; 修订日期: 2015-04-13

作者简介: 周元(1991-), 女, 硕士研究生, 主要从事水污染控制理论与方法研究工作。E-mail: 15521370803@163.com

* 通讯联系人, E-mail: profjin@163.com

水处理及回用中发挥着越来越重要的作用^[6-8]。目前研究比较多的 A²/O-MBR 形成的组合工艺具有良好的脱氮除磷效果,并且能解决 A²O 工艺存在的污泥龄问题^[9-11]。但大量实验证明仍有缺陷,主要表现为反硝化不彻底,NO₃-N 含量高,通过好氧池回流液携带而进入缺氧池的溶解氧不利于反硝化反应的进行;同时膜池回流液会携带硝酸盐进入厌氧池,影响除磷效果;TN 去除率低等^[12]。

在 A²/O-MBR 的基础上增设一个缺氧段,形成 AAOA-MBR 组合工艺,即由厌氧池(A)、缺氧池1(A)、好氧池(O)、缺氧池2(A)与膜生物反应器(MBR)组成的污水处理系统。在无外加碳源的情况下增强系统的反硝化能力,分析探讨该工艺的脱氮除磷效果,以便 AAOA-MBR 工艺在城市污水处理中得到更广泛有效的应用,对 AAOA-MBR 污水处理工艺应用到实际工程中具有重要的意义。

1 实验材料与方法

1.1 实验装置

中试装置采用焊接钢板制备,外观尺寸长 3.9 m、宽 2.0 m、高 2.0 m,用开孔钢板分割成厌氧池、缺氧池1、好氧池1、好氧池2、缺氧池2和膜池,共6个处理单元。AAOA-MBR 中试装置平面布置如图1所示。

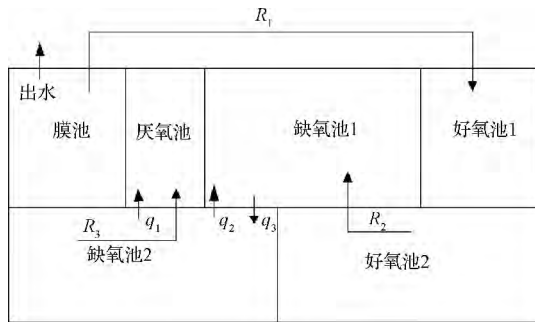


图1 AAOA-MBR 实验装置平面布置

Fig. 1 Plane layout of AAOA-MBR experimental installation

在中试实验中,水力停留时间 HRT 为 13.66 h,其中厌氧池为 1.05 h,缺氧池1为 3.15 h,好氧池1和好氧池2为 4.20 h,缺氧池2为 3.68 h,膜池为 1.58 h;活性污泥取自某市第四污水处理厂的生化池,经过一周的驯化培养,厌氧池、缺氧池1、好氧池1、好氧池2、缺氧池2、膜池的污泥浓度分别为 6 128、6 230、6 376、6 376、6 530 和 7 564 mg/L。污泥龄为 15 d。实验装置设置了3套污泥回流系统:好氧池污泥回流到缺氧池1,旨在更好地实现反硝化脱氮;缺氧池2污泥回流到厌氧池,用来保证厌氧池中微生物的数量,经过反硝化后的回流液中 NO₃-N 含量少,减少了 NO₃-N 对厌氧释磷的影响;膜池污泥回流到好氧池1,旨在在保证好氧池微生物数量的同时也为好氧池提供溶解氧。

膜分离单元中置入 PVDF 中空纤维帘式膜组件,总膜面积 86.4 m²,膜孔径 0.1 μm。在膜组件下方设穿孔曝气管,通过曝气为活性污泥提供溶解氧并实现对膜面污染物的吹扫。平均抽吸过滤周期为 8 min,其中抽水 7 min,反冲洗 1 min。采取在线清洗方式,定期设定清洗时间进行清洗,一周进行一次低浓度的“小洗”,每月进行一次高浓度的“大洗”;清洗用药液采用次氯酸钠溶液。小洗:1周进行一次:300~1 500 mg/L 的次氯酸钠水溶液。大洗:1月进行一次:3 000~5 000 mg/L 的次氯酸钠水溶液。

实验采用的原水来自市政管网收集的城市生活污水,原水水质见表1。

1.2 实验方案

拟采用3套实验方案,各方案具体运行控制参数见表2,其中:方案3设置了多点进水方式,旨在优化内源分配和提高脱氮除磷效果;方案1与方案3是单点进水与多点进水的对比实验;方案1和方案2是单点进水方式下,溶解氧不同供给方式下的对比实验。

表1 原水水质

Table 1 Raw water quality

(mg/L)

	方案1			方案2			方案3			
	COD	TN	NH ₄ ⁺ -N	COD	TN	NH ₄ ⁺ -N	COD	TN	NH ₄ ⁺ -N	TP
最大值	280.00	31.86	24.44	168.00	31.49	24.72	259.00	44.69	27.50	2.28
最小值	100.00	18.32	12.78	65.70	19.76	14.72	73.20	15.07	11.94	1.02
平均浓度	159.58	22.77	19.95	132.2	24.35	19.33	108.85	27.41	20.90	1.72

表 2 各方案运行控制参数
Table 2 Operation control parameters of each scheme

	进水量 (m ³ /h)			回流比 (%)			曝气量 (m ³ /h)			好氧池
	q ₁	q ₂	q ₃	R ₁	R ₂	R ₃	好氧 1	好氧 2	膜池	搅拌
方案 1	1	0	0	400	300	200	15		20	无
方案 2	1	0	0	800	300	200	0		20	有
方案 3	0.4	0.4	0.2	400	300	200	15		20	无

注: q₁、q₂、q₃ 分别代表厌氧池的进水量, 缺氧池 1 的进水量, 缺氧池 2 的进水量; R₁、R₂、R₃ 分别代表膜池到好氧池 1 的回流量, 好氧池 2 到缺氧池 1 的回流量, 缺氧池 2 到厌氧池的回流量。

1.3 实验步骤

在方案 1 和方案 2 中, 经预处理的污水首先流入到厌氧池, 然后与缺氧池 2 的回流液一起流入缺氧池 1, 再与好氧池 2 的回流液一起流入好氧池 1, 随后与膜池回流液一起流入到好氧池 2, 依次经过缺氧池 2 和膜池后, 利用抽吸泵抽吸出水。在方案 3 中, 除经预处理的污水以 4:4:2 的比例分配到厌氧池、缺氧池 1、缺氧池 2 外, 其他与方案 1、2 相同。

为保证监测数据的可比性, 每次的取样时间、位置保持一致。从各反应池的出口采取样品, 样品沉淀后, 倾取上清液, 用 2 层定性中速滤纸抽滤, 至少抽取 1 000 mL 滤液。滤液用于 COD、TN、NH₄⁺-N、TP 和 NO₃-N 各指标的测定, 其他指标利用便携式仪器直接在反应池内测定。

1.4 实验分析方法

COD 测定采用重铬酸钾法, NH₄⁺-N 测定采用纳氏试剂分光光度法, TN 测定采用过硫酸钾氧化分光光度法, TP 测定采用过硫酸钾消解-钼锑抗分光光度法, NO₃-N 测定采用酚二磺酸分光光度法, MLSS、DO: 便携测定仪测定法。

2 实验结果与讨论

2.1 多点进水工艺的 COD 去除效果

AAOA-MBR 工艺对 COD 的去除效果见图 2。

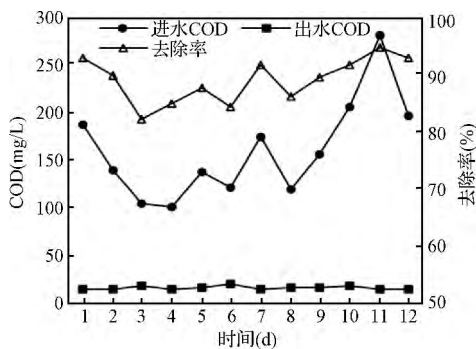


图 2 COD 的去除效果

Fig. 2 Removal effect of COD

从图 2 可知, 在实验条件下, 经 AAOA-MBR 工艺处理后出水 COD 浓度为 13.80 ~ 19.20 mg/L, 出水 COD 平均浓度为 16.00 mg/L, COD 去除率为 90.0%, 出水水质稳定且均满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918-2002) 一级 A 标准 (COD < 50 mg/L)。而相关中试规模的 A²O-MBR 工艺的 COD 平均去除率为 87.42%^[9]。这表明, AAOA-MBR 工艺具有很好的 COD 去除效果, 原因在于 MBR 超滤膜具有高效截留的作用, 保证了系统中的微生物量, 污泥浓度高且稳定, 从而降低了单位污泥负荷, 有利于有机物的高效降解以及系统耐冲击负荷能力的提高; 另外膜池的强曝气有利于污泥与有机物的充分混合, 有利于有机物的降解。

2.2 多点进水工艺的脱氮效果

AAOA-MBR 工艺对 TN、NH₄⁺-N 的去除效果见图 3。

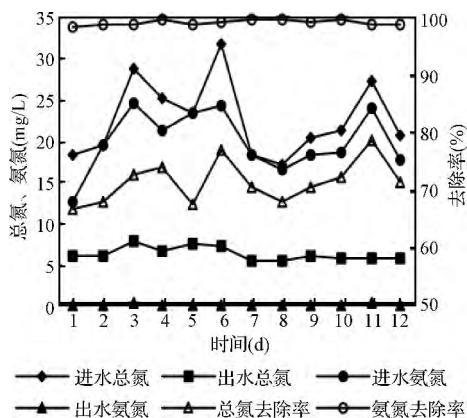


图 3 TN、NH₄⁺-N 的去除效果

Fig. 3 Removal effect of TN, NH₄⁺-N

从图 3 可知, 在实验条件下, AAOA-MBR 工艺取得了很好的硝化和反硝化效果。出水 TN 浓度为 5.36 ~ 7.84 mg/L, 平均浓度为 6.35 mg/L, TN 平均去除率达 72.1%; 出水 NH₄⁺-N 浓度为 0.04 ~ 0.31 mg/L, 平均浓度为 0.16 mg/L, NH₄⁺-N 平均去除率达 99.0%。据曹斌等^[13]研究表明, 中试规模的

A²O-MBR 工艺的出水 TN 平均浓度为 14.3 mg/L, 出水 NH₄⁺-N 平均浓度为 0.68 mg/L。这表明 AAOA-MBR 工艺的脱氮效果要优于 A²O-MBR 工艺的脱氮效果。根据硝化反应的机理, 决定硝化反应效果的主要因素是硝化菌、溶解氧、氨氮和温度; 决定反硝化效果的主要因素是反硝化菌、有机碳源、硝酸盐、溶解氧^[14]。MBR 能实现水力停留时间和污泥龄的分离, 并且膜的高效截留作用将微生物完全截留在系统内, 保证了系统中的硝化菌和反硝化菌的数量, 有利于硝化与反硝化的进行。好氧池采用正常曝气, 加上膜池回流液携带的溶解氧, 好氧池的溶解氧能达到 2.00 mg/L, 膜池的溶解氧可达 6.23 mg/L, 好氧池与膜池的好氧环境有利于硝化反应的进行^[15, 16]。溶解氧对反硝化反应起抑制作用, MBR 中高达 6 128 ~ 7 564 mg/L 的污泥浓度会使氧传递效率下降, 在由污泥形成的菌胶团和生物膜中形成溶氧梯度, 使内部缺氧, 促进反硝化作用的发生^[17]。多点进水能优化碳源配置, 使有机碳源得到充分利用, 在缺氧池 2 处设置进水点, 能为反硝化反应补充碳源, 从而提高反硝化效率。

2.3 多点进水工艺的除磷效果

AAOA-MBR 工艺对 TP 的去除效果见图 4。

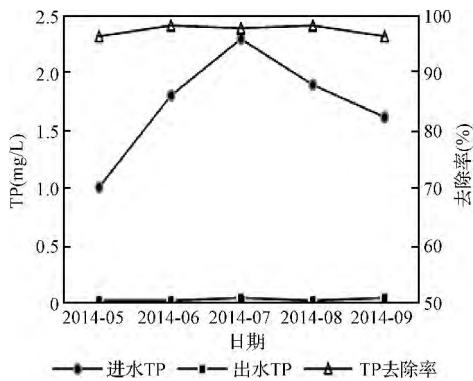


图4 TP 的去除效果

Fig. 4 Removal effect of TP

从图 4 可知, 在实验条件下, 经 AAOA-MBR 工艺处理后出水 TP 浓度为 0.04 ~ 0.06 mg/L, 平均浓度为 0.05 mg/L, TP 平均去除率达 97.3%; 出水水质稳定且远远小于《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918-2002) 一级 A 排放标准。据朱宁伟等^[9]研究表明, 中试规模的 A²O-MBR 工艺的出水 TP 平均浓度为 0.21 mg/L。这表明在 A²O-MBR 上增设后置缺氧段能提高系统的除磷效果。COD/TP 越大, 厌氧释磷越多, 越有利于除磷, 当 COD/TP >

20 时, 反应器出水磷浓度 < 0.5 mg/L; 当 COD/TP ≈ 20 时, 出水磷浓度略高^[18]。本系统 COD/TP ≈ 52 ~ 183, 远远满足了生物除磷对碳源的需求。膜将 SS 截留在系统内, 使出水中无颗粒性的磷并且系统内有足够的聚磷菌。系统设置了从缺氧池 2 到厌氧池的回流, 经过反硝化后的回流液中 NO₃-N 含量少, 减少了 NO₃-N 对厌氧释磷的影响。后置缺氧与膜池又构成了一个厌氧释磷-好氧摄磷^[19, 20]的循环, 于是整个系统相当于实现了两次除磷。

2.4 进水方式对脱氮效果的影响及其机制

方案 1 和方案 3 沿程 TN、NH₄⁺-N 和 NO₃-N 的浓度平均值变化情况如图 5 所示。

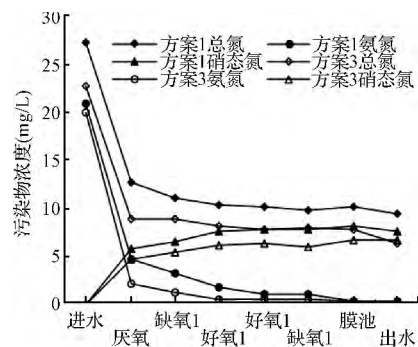


图5 方案 1 和方案 3 的 TN、NH₄⁺-N 和 NO₃-N 浓度的沿程变化

Fig. 5 Variation of TN, NH₄⁺-N, NO₃-N along Option I and Option III

方案 1 采用单点进水方式, 即只在厌氧池设置一个进水点。方案 3 采用多点进水方式, 即在厌氧池、缺氧池 1、缺氧池 2 分别以 4:4:2 的比例进水。从图 5 可知, 方案 1 出水 TN、NH₄⁺-N、NO₃-N 平均浓度分别为 9.39、0.36 和 7.63 mg/L, TN 和 NH₄⁺-N 的去除率分别为 65.8% 和 98.3%。方案 3 的出水水质以及 TN、NH₄⁺-N 去除率均高于方案 1。反硝化以硝酸盐为电子受体, 以有机物为电子供体, 使硝酸盐中的氮转变为氮气从废水中释放出来, 在生物脱氮的反硝化过程中, 需要一定数量的碳源以保证一定的碳氮比, 而使反硝化反应能顺利地进行^[21]。方案 3 缺氧池 2 的反硝化效果明显优于方案 1 缺氧池 2 的反硝化效果。方案 3 在缺氧池 1、缺氧池 2 分别设置进水点, 可以给缺氧池补给碳源, 避免碳源在好氧池被无效消耗, 有利于反硝化反应的进行。

方案 1 出水 COD、TP 平均浓度分别为 15.3 mg/L、0.1 mg/L。相对于方案 3, 方案 1 的出水 COD

平均浓度略低,说明多点进水方式对 COD 的去除效果没有提高作用。但方案 1 和方案 2 出水 TP 平均浓度大约是方案 3 出水 TP 平均浓度的 2 倍,这表明多点进水方式有利于系统除磷。在生物除磷过程中,聚磷菌吸收厌氧池的 COD 并以 PHB 的形式储存在体内,用于好氧吸磷,高浓度的有机物有利于聚磷菌的厌氧释磷。在厌氧池设置进水点,为厌氧池补给碳源,有利于提高系统的除磷效果。

2.5 供氧方式对脱氮效果的影响及其机制

方案 1 和方案 2 沿程 TN、 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 的浓度平均值变化情况如图 6 所示。

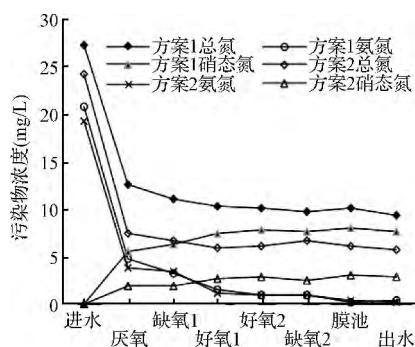


图 6 方案 1 和方案 2 的 TN、 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 浓度的沿程变化

Fig. 6 Variation of TN, NH_4^+-N , NO_3^--N along Option I and Option II

实验方案从好氧池的供氧方式上可以分为:好氧池鼓风曝气供氧和膜池回流供氧。从图 6 可知,方案 2 出水 TN、 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 平均浓度分别为 5.08、0.20 和 2.85 mg/L, TN 和 NH_4^+-N 的去除率分别为 76.2% 和 98.9%。在单点进水的情况下,膜池回流比从 4:3:2 增加至 8:3:2 时,系统对含氮污染物的去除效果有所提高;从两方案运行出水 TN 浓度来看,方案 2 的出水 TN 浓度低于方案 1 的出水 TN 浓度,但是两方案出水中 NH_4^+-N 浓度很低且基本相同,两方案的硝化效果没有显著差异,出水中 NO_3^--N 浓度远高于 NH_4^+-N 浓度,说明出水 TN 浓度高主要是因为 NO_3^--N 浓度高;观察 NO_3^--N 沿程趋势,在硝化效果基本相同的情况下,方案 1 的 NO_3^--N 浓度一直高于方案 2 的 NO_3^--N 浓度,说明方案 2 的反硝化效果要优于方案 1。原因在于方案 1 鼓风曝气使得溶解氧均匀、衡量、连续地供给到好氧池,回流液又会将未利用的溶解氧携带进入缺氧池 1,影响缺氧池 1 的缺氧环境,不利于反硝化反应的进行;

方案 2 采用膜池回流供给溶解氧,回流液中有限的氧源在好氧池被尽量、高效地用于硝化菌的硝化作用,从好氧池回流至缺氧池 1 的溶解氧所剩无几,保证了缺氧池 1 的良好缺氧生境,相应地提高了反硝化细菌的脱氮效能。

方案 2 出水 COD、TP 平均浓度分别为 16.56 mg/L 和 0.11 mg/L。方案 1 的 COD 去除效果要优于方案 2 的 COD 去除效果。污水中的 COD 主要通过微生物的吸附与代谢作用得以去除,在有氧的条件下,活性污泥中的微生物将一部分有机物合成为新细胞,将另一部分有机物进行分解代谢获得能量,最终产生 CO_2 、 H_2O 等。鼓风曝气供氧比膜池回流供氧更加充分,更有利于微生物的吸附与代谢,从而提高 COD 的去除效果。膜池回流供氧与鼓风曝气供氧对 TP 的去除效果没有显著影响。

3 结 论

(1) AAO-MBR 工艺在无外加碳源的情况下,出水主要指标的平均浓度皆低于《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918-2002)的一级 A 标准。

(2) 多点进水方式的脱氮效果 (TN 去除率 72%) 优于单点进水的脱氮效果 (TN 去除率 65.8%), 多点进水方式能优化碳源配置,使碳源得到充分利用,为缺氧段补给碳源有利于反硝化反应的进行。

(3) 膜池回流供氧不仅能节能降耗,还能保证缺氧池 1 的缺氧环境,提高了反硝化细菌的脱氮效能,其脱氮效果优于鼓风曝气时的脱氮效果。

参 考 文 献

- [1] 彭轶,彭永臻,吴昌永. A^2/O 工艺中的反硝化除磷. 环境工程学报, 2008, 2(6): 753-756
Peng Yi, Peng Yongzhen, Wu Changyong. Denitrifying phosphorus removal in A^2/O process. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2008, 2(6): 753-756 (in Chinese)
- [2] Park H. O., Oh S., Bade R., et al. Application of A^2/O moving-bed biofilm reactors for textile dyeing wastewater treatment. Korean Journal of Chemical Engineering, 2010, 27(3): 893-899
- [3] Vocks M., Adam C., Lesjean B., et al. Enhanced post-denitrification without addition of an external carbon source in membrane bioreactors. Water Research, 2005, 39(14): 3360-3368

- [4] 叶长兵,周志明,吕伟,等. A²O 污水处理工艺研究进展. 中国给水排水, 2014, 30(15): 135-138
Ye Changbing, Zhou Zhiming, Lyu Wei, et al. Research progress on A²O process for sewage treatment. China Water & Wastewater, 2014, 30(15): 135-138 (in Chinese)
- [5] 王荣昌,欧阳琛,司书鹏. 改良型 A²O-MBR 工艺的反硝化除磷性能研究. 环境工程学报, 2014, 8(2): 401-407
Wang Rongchang, Ouyang Chen, Si Shupeng. Performance of denitrifying phosphorus removal in modified A²O-MBR process. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, 8(2): 401-407 (in Chinese)
- [6] Banu J. R., Uan D. K., Yeom I. T. Nutrient removal in an A²O-MBR reactor with sludge reduction. Bioresource Technology, 2009, 100(16): 3820-3824
- [7] 董良飞,薛涛,郝晓敏,等. A²/O/A/MBR 中试装置的除污效能研究. 中国给水排水, 2009, 25(23): 6-9
Dong Liangfei, Xue Tao, Xi Xiaomin, et al. Study on pollutants removal efficiency of A²/O/A/MBR pilot device. China Water & Wastewater, 2009, 25(23): 6-9 (in Chinese)
- [8] Munz G., Gualtiero M., Salvadori L., et al. Process efficiency and microbial monitoring in MBR (membrane bioreactor) and CASP (conventional activated sludge process) treatment of tannery wastewater. Bioresource Technology, 2008, 99(18): 8559-8564
- [9] 朱宁伟,李激,郑晓英,等. A²O-MBR 组合工艺处理城市污水的试验研究. 中国给水排水, 2010, 26(15): 1-4
Zhu Ningwei, Li Ji, Zheng Xiaoying, et al. Combined process of A²O and MBR for treatment of municipal wastewater. China Water & Wastewater, 2010, 26(15): 1-4 (in Chinese)
- [10] Wang Xianbao, Jin Pengkang, Chen Rong, et al. A compact A²O MBR system for water reclamation in the northwestern China—a case study. Desalination and Water Treatment, 2014, 52(25-27): 5152-5157
- [11] Rosenberger S., Krüger U., Witzig R., et al. Performance of a bioreactor with submerged membranes for aerobic treatment of municipal waste water. Water Research, 2002, 36(2): 413-420
- [12] 凌玉成, MBR 脱氮除磷工艺在我国城市污水处理中的研究与应用. 北方环境, 2012, 25(3): 177-181
Ling Yucheng. Research and application of nitrogen and phosphorus removal process combined with membrane bioreactor in domestic municipal wastewater treatment. North Environment, 2012, 25(3): 177-181 (in Chinese)
- [13] 曹斌,黄霞,Kitanaka A., 等. A²/O-膜生物反应器强化生物脱氮除磷中试研究. 中国给水排水, 2007, 23(3): 22-26
Cao Bin, Huang Xia, Kitanaka A., et al. Pilot test on enhanced biological nitrogen and phosphorus removal by using A²/O-MBR. China Water & Wastewater, 2007, 23(3): 22-26 (in Chinese)
- [14] 祝君乔,蒋岚岚,程文,等. 后置缺氧 A²O/A-MBR 工艺脱氮除磷特性研究. 中国给水排水, 2014, 30(14): 10-13
Zhu Junqiao, Jiang Lanlan, Cheng Wen, et al. Study on nitrogen and phosphorus removal by A²O/A-MBR process. China Water & Wastewater, 2014, 30(14): 10-13 (in Chinese)
- [15] Luo Guozhi, Li Li, Liu Qian, et al. Effect of dissolved oxygen on heterotrophic denitrification using poly(butylene succinate) as the carbon source and biofilm carrier. Bioresource Technology, 2014, 171: 152-158
- [16] Lee H. J., Bae J. H., Cho K. M. Simultaneous nitrification and denitrification in a mixed methanotrophic culture. Biotechnology Letters, 2001, 23(12): 935-941
- [17] Muller E. B., Stouthamer A. H., van Verseveld H. W., et al. Aerobic domestic waste water treatment in a pilot plant with complete sludge retention by cross-flow filtration. Water Resource, 1995, 29(4): 1179-1189
- [18] 李捷,熊必永,张杰. An/O 生物除磷中两个主要控制因素的研究. 中国给水排水, 2004, 20(12): 9-11
Li Jie, Xiong Biyong, Zhang Jie. Study on two main factors influencing anaerobic/Oxic biological phosphorus removal process. China Water & Wastewater, 2004, 20(12): 9-11 (in Chinese)
- [19] Arun V., Mino T., Matsuo T. Biological mechanism of acetate uptake mediated by carbohydrate consumption in excess phosphorus removal systems. Water Resource, 1988, 22(5): 565-570
- [20] Smolders G. J. F., van der Meij J., van Loosdrecht M. C. M., et al. Model of the anaerobic metabolism of the biological phosphorus removal process: Stoichiometry and pH influence. Biotechnology and Bioengineering, 1994, 43(6): 461-470
- [21] 谢娟,章一丹. 污水除磷脱氮中几个关键问题及研究方向的探讨. 江苏环境科技, 2008, 21(2): 64-66
Xie Juan, Zhang Yidan. Discussion on key problems and research direction about N and P removal. Jiangsu Environmental Science and Technology, 2008, 21(2): 64-66 (in Chinese)