

田海成, 杨红红, 焦文海, 等. 低碳源污水深度脱氮除磷工艺的经济性分析及优化策略[J]. 净水技术, 2024, 43(7): 56-62, 110.

TIAN H C, YANG H H, JIAO W H, et al. Economic analysis and optimization strategy of advanced denitrification and dephosphorization for low carbon source wastewater treatment[J]. Water Purification Technology, 2024, 43(7): 56-62, 110.

低碳源污水深度脱氮除磷工艺的经济性分析及优化策略

田海成^{1,*}, 杨红红¹, 焦文海¹, 王磊¹, 梁瑜海², 吕育锋³

(1. 济南市市政工程设计研究院<集团>有限责任公司, 山东济南 250001; 2. 华南农业大学资源环境学院, 广东广州 510642; 3. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘要 我国污水处理厂普遍面临进水低碳源问题, 同时各地区越来越严格的污水深度脱氮除磷排放标准也使得碳源投加成本日益增加。AAO 工艺中的生物除磷与反硝化脱氮之间存在碳源争夺矛盾, 采用生物除磷方式去除 1 mg/L 磷所消耗的 BOD₅ 药剂成本为 0.154 元/(m³ 污水), 反硝化脱氮去除 1 mg/L 氮所消耗的 BOD₅ 药剂成本为 0.038 元/(m³ 污水)。因此, 采用生物除磷方式去除 1 mg/L 磷所消耗的 BOD₅ 可供反硝化去除 4 mg/L 的氮。而采用化学除磷方式去除 1 mg/L 磷所消耗的混凝剂药剂成本以及污泥增加量产生的处理与处置成本合计为 0.040 元/(m³ 污水), 因此, 采用生物除磷的成本相当于化学除磷成本的 3.85 倍。对于低碳源污水的深度脱氮除磷, 采用化学除磷代替生物除磷的 AOA+化学除磷工艺具有运行成本低的优势。

关键词 低碳源 深度脱氮除磷 生物除磷 化学除磷 AOA 运行成本

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-0177(2024)07-0056-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2024.07.006

Economic Analysis and Optimization Strategy of Advanced Denitrification and Dephosphorization for Low Carbon Source Wastewater Treatment

TIAN Haicheng^{1,*}, YANG Honghong¹, JIAO Wenhai¹, WANG Lei¹, LIANG Yuhai², LÜ Yufeng³

(1. Jinan Municipal Engineering Design & Research Institute <Group> Co., Ltd., Jinan 250001, China;

2. College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;

3. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract The wastewater treatment plants (WWTPs) are facing the problem of low carbon source at home, and the cost of adding carbon source is increasing due to the increasingly strict discharge standard of deep nitrogen and phosphorus removal from wastewater in different regions. In AAO process, there is competition for carbon source between biological phosphorus removal and denitrification nitrogen removal. The cost of BOD₅ reagent to remove 1 mg/L phosphorus by biological phosphorus removal is 0.154 yuan/m³, the BOD₅ cost of denitrifying nitrogen removal is 0.038 yuan/m³, so the BOD₅ consumption of biological phosphorus removal can be used for denitrifying nitrogen removal of 4 mg/L. The total cost of coagulant reagent and the treatment and disposal cost of the increased amount of sludge for chemical phosphorus removal is 0.040 yuan/m³, therefore, the cost of biological phosphorus removal is 3.85 times of that of chemical phosphorus removal. For advanced nitrogen and phosphorus removal from low carbon source wastewater, AOA + chemical phosphorus removal process, which uses chemical phosphorus removal instead of biological phosphorus removal, has the advantage of low operation cost.

Keywords low carbon source advanced denitrification and dephosphorization biological phosphorus removal chemical phosphorus removal AOA process operation cost

据统计,我国 56.6% 的污水处理厂进水 BOD₅

质量浓度低于 100 mg/L, 14.9% 的污水处理厂进水 BOD₅ 质量浓度甚至低于 50 mg/L, 进水 BOD₅/TP 为 19.72~46.45, BOD₅/TN 仅为 2.06~3.83^[1]。由此可见,我国的污水处理厂普遍面临低碳源问题,各

[收稿日期] 2023-06-17

[通信作者] 田海成(1991—),男,硕士,工程师,主要从事城镇给排水设计、咨询工作,E-mail: shjythc@jnszy.com。

地污水处理厂进水水质如图 1 所示。另据统计,我国 45.5% 的污水处理厂采用厌氧-缺氧-好氧法(AAO)工艺,显著高于氧化沟、序批式反应器(SBR)等其他脱氮除磷工艺^[1],而 AAO 工艺取得同步脱氮除磷效果的进水水质要求为 $BOD_5/TP > 17$, $BOD_5/TN > 4$ ^[2]。因此,低碳源污水并无法充分发挥 AAO 工艺同步脱氮除磷的功能。同时,AAO 工艺的 TN 去除率一般为 60%~85%,TP 去除率一般为 70%~80%,显然无法满足各地日益严格的深度脱氮除磷要求^[2]。各地污水处理厂深度脱氮除磷标准如表 1 所示。为解决低碳源情况下的深度脱氮除磷问题,污水处理厂不得不投加碳源,但相关研究^[3-5]

均表明,AAO 工艺在进水低碳源情况下存在着碳源投加大、运行成本高的问题。据统计全国 56.6% 的污水处理厂需要投加碳源,碳源投加量平均值为 $54.6 \text{ g COD}_{Cr}/\text{m}^3$,乙酸钠理论当量按照 0.78 计算,乙酸钠(25%商品液)单价为 1 500 元/t 测算,碳源投加成本平均高达 0.42 元/ m^3 。为提高进水内碳源利用率、降低外碳源投加量,目前优化策略的研究主要集中在初沉污泥水解发酵、反硝化除磷、厌氧-好氧-缺氧(AOA)工艺等方面,均处于理论研究阶段而尚未工程化应用,本文将对目前广泛应用的 AAO 工艺在低碳源情况下深度脱氮除磷的经济性进行充分分析并提出优化策略。

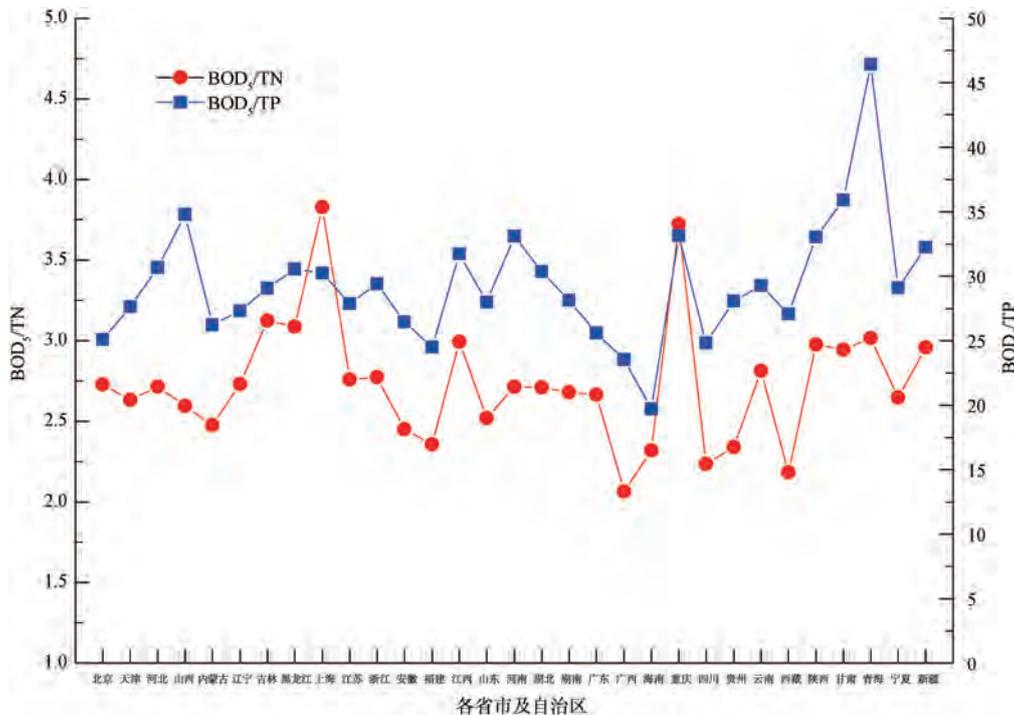


图 1 各地污水处理厂的进水水质

Fig. 1 Influent Water Quality of Various WWTPs

表 1 各地污水处理厂的深度脱氮除磷标准

Tab. 1 Standards for Advanced Nitrogen and Phosphorus Removal of Various WWTPs

序号	要求深度脱氮除磷的地方标准	出水 TP/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	出水氨氮/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	出水 TN/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
1	北京市《城镇污水处理厂水污染物排放标准》(DB 11/890—2012) A 标准	0.2	1.0(1.5)	10
2	天津市《城镇污水处理厂污染物排放标准》(DB 12/559—2015) A 标准	0.3	1.5(3)	10
3	《四川省岷江、沱江流域水污染物排放标准》(DB 51/2311—2016) 城镇污水处理厂	0.3	1.5(3)	10
4	安徽省《巢湖流域城镇污水处理厂和工业行业主要水污染物排放限值》(DB 34/2710—2016) 新建城镇污水处理厂	0.3	2(3)	10(12)
5	浙江省《城镇污水处理厂主要水污染物排放标准》(DB 33/2169—2018) 现有城镇污水处理厂	0.3	2(4)	12(15)

(续表1)

序号	要求深度脱氮除磷的地方标准	出水 TP/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	出水氨氮/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	出水 TN/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
6	浙江省《城镇污水处理厂主要水污染物排放标准》(DB 33/2169—2018)新建城镇污水处理厂	0.3	1.5(3)	10(12)
7	河北省《大清河流域水污染物排放标准》(DB 13/2795—2018)核心控制区	0.2	1.0(1.5)	10
8	《湖南省城镇污水处理厂主要水污染物排放标准》(DB 43/T 1546—2018)一级标准	0.3	1.5(3)	10
9	昆明市《城镇污水处理厂主要水污染物排放限值》(DB 5301/T43—2020)A级	0.05	1.0(1.5)	5(10)
10	昆明市《城镇污水处理厂主要水污染物排放限值》(DB 5301/T 43—2020)B级	0.3	1.5(3)	10(15)
11	《河南省黄河流域水污染物排放标准》(DB 41/2087—2021)一级	0.4	3(5)	12
12	《山东省城市排水“两个清零,一个提标”工作方案》(鲁建发[2022]3号)新建污水处理厂	0.3	1.5(3)	10(12)
13	江苏省《城镇污水处理厂污染物排放标准》(DB 32/4440—2022)A标准	0.3	1.5(3)	10(12)
14	江苏省《城镇污水处理厂污染物排放标准》(DB 32/4440—2022)B标准	0.3	3(5)	10(12)

注:根据各地区排放标准要求的不同,氨氮括号内限值为水温 $\leq 12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的控制指标;TN括号内限值为11月1日—次年3月31日或12月1日—次年3月31日的控制指标。

1 AAO工艺的脱氮除磷原理及经济性分析

1.1 AAO工艺的脱氮除磷原理

在厌氧状态下,兼性厌氧细菌首先将溶解性 BOD_5 转化为低分子的挥发性脂肪酸(VFA)。聚磷菌(本身为好氧菌)在不利的厌氧条件下,聚磷水解获得能量,同时吸收VFA并以聚- β 羟基-丁酸(PHB)形式储存,同化了低分子有机物,实现了相对于其他好氧菌的生存优势。在缺氧条件下,反硝化菌利用厌氧池出水剩余有机物对好氧池混合液回流中的硝酸盐进行去除。在好氧条件下,聚磷菌体内储存的PHB以 O_2 为电子受体,被氧化产生能量,用于磷的吸收和聚磷的合成,从而实现磷的过量吸收,磷通过剩余污泥排出。同时,硝化细菌在好氧池中将氨氮氧化为硝酸盐,如缺氧池有剩余有机物进入好氧池也将被氧化去除。AAO工艺流程如图2所示。

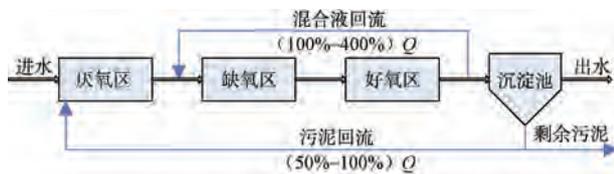


图2 AAO工艺流程

Fig. 2 AAO Process Flow

1.2 AAO工艺的脱氮除磷经济性分析

(1)当进水 $\text{BOD}_5/\text{TP}>17$ 时,AAO工艺可实现较好的厌氧释磷及后续过度吸磷的效果,生物除磷去除率可达70%~80%。从我国的污水处理厂实际进水水质看,进水 BOD_5 基本满足生物除磷所需,但

由于深度除磷的要求,后续仍需采用化学除磷方式辅助除磷。据统计,全国86.4%的污水处理厂需要投加混凝剂,其中,58.6%的污水处理厂采用聚合氯化铝作为混凝剂化学除磷^[1],执行一级A及以上标准的污水处理厂投加除磷药剂的摩尔当量为 $2.3\text{ }^{[6]}$, Al_2O_3 (10%商品液)按单价500元/t测算,则每去除 1 mg/L 的TP,化学除磷药剂成本为 $0.019\text{ 元}/\text{m}^3$ 。化学除磷的药剂成本计算如表2所示。

表2 化学除磷的药剂成本计算
 Tab. 2 Cost List of Phosphorus Removal Chemicals

序号	项目	数值	单位
1	化学除磷量	1	mg/L
2	理论需Al量	0.87	mg/L
3	投加摩尔比	2.3	-
4	实际需Al量	2.00	mg/L
5	Al_2O_3 中Al有效质量分数	53%	-
6	实际需 Al_2O_3 量	3.78	mg/L
7	Al_2O_3 (10%商品液)量	37.84	mg/L
8	吨水投加 Al_2O_3 (10%商品液)量	37.84	g/m^3
9	Al_2O_3 (10%商品液)单价	500	元/t
10	化学除磷药剂成本	0.019	元/ m^3

(2)研究表明,生物除磷过程中每去除 1 mg/L 的TP大约需要消耗 20 mg/L 的 BOD_5 ^[7],而反硝化细菌每去除 1 mg/L 的TN需要消耗 $5\sim 6\text{ mg/L}$ 的 BOD_5 ^[8-12]。对于低碳源污水,经厌氧释磷后剩余 BOD_5 已无法满足反硝化脱氮,因此,不得不在缺氧池补充大量碳源,尤其对于有深度脱氮要求的地区,

碳源投加量更大。据统计全国 56.6% 的污水处理厂需要投加碳源,其中 65.3% 的污水处理厂采用乙酸钠作为外加碳源^[1],按投加质量比为 5:1,乙酸钠(25%商品液)单价为 1 500 元/t 测算,反硝化脱氮药剂成本为 0.038 元/m³。反硝化脱氮的药剂成本计算如表 3 所示。

表 3 反硝化脱氮的药剂成本计算

Tab. 3 Cost List of Denitrification

序号	项目	数值	单位
1	反硝化脱氮量	1	mg/L
2	每去除 1 mg/L N 需要 COD _{Cr} 量	5	mg/L
3	乙酸钠 COD _{Cr} 理论当量	0.78	-
4	需要投加的乙酸钠量	6.41	mg/L
5	乙酸钠(25%商品液)投加量	25.64	mg/L
6	乙酸钠(25%商品液)价格	1 500	元/t
7	反硝化脱氮药剂成本	0.038	元/m ³

(3)实际上反硝化脱氮除发生在缺氧池外,厌氧池也会对污泥回流液中的硝酸盐进行反硝化去除,且反硝化作用优先于厌氧释磷过程,优先消耗低分子有机物。只有硝酸盐被还原之后,在既没有硝酸盐也没有 O₂ 的厌氧条件下,磷的释放才能进行。改良 AAO 工艺、倒置 AAO 工艺、UCT 工艺与改良 UCT 工艺等 AAO 变形工艺(图 3)均对污泥回流液进行反硝化后再进入厌氧池,一定程度上降低了污泥回流液中硝酸盐对厌氧释磷效果的影响。但对于低碳源污水,污泥回流液反硝化消耗进水碳源后又会导致厌氧释磷所需碳源不足,如按照污泥回流液中硝酸盐质量浓度为 10 mg/L,碳源投加质量比为 5:1 测算,则污泥回流液反硝化需要消耗 50 mg/L 的进水 BOD₅。如聚磷水解时无充足的 VFA 在菌体内储存,则聚磷菌在进入好氧环境中并不吸磷,此时厌氧池为取得有效释磷仍然需要补充碳源。

(4)AAO 工艺的 TN 去除率受制于污泥回流比和混合液回流比,通常 TN 去除率难以突破 85%,无法满足深度脱氮要求。改良巴顿甫工艺、七段式 AAO 工艺通过增加后置缺氧区的方式进一步提高了 TN 去除率。由于各地区污水处理厂出水 TN 要求的日益严格,改良巴顿甫工艺又逐渐被广泛采用^[13-17];七段式 AAO 工艺在改良巴顿甫工艺的基础上,增设污泥回流液反硝化区和消氧区,进一步降低了污泥回流液中硝酸盐对厌氧释磷的影响和混合

液回流中溶解氧对缺氧区反硝化的影响^[18-20]。反硝化菌是兼性菌,既可以有氧呼吸也可以无氧呼吸,当同时存在分子态氧和硝酸盐时,优先利用 O₂ 进行有氧呼吸。因此,为保证反硝化的顺利进行,需要保持缺氧状态。

综上,AAO 工艺适合于进水碳源充足且出水 TN、TP 要求不高的情况。而我国污水处理厂面临的主要问题是低碳源污水的深度脱氮除磷,为此近年来工程中常在 AAO 工艺后端增加一级 AO 以实现深度脱氮,但是仍然面临反硝化外加碳源消耗量大、处理成本高的问题。

2 低碳源污水深度脱氮除磷工艺的优化策略

由 1.2 小节分析可知,采用化学除磷方式每去除 1 mg/L 的 TP 所需的药剂成本为 0.019 元/m³,而采用生物除磷方式每去除 1 mg/L 的 TP 需要消耗的 BOD₅ 约为 20 mg/L,如将 BOD₅ 折算为乙酸钠(25%商品液),相当于生物除磷的药剂成本为 0.154 元/m³,即采用生物除磷折算的碳源药剂成本相当于化学除磷药剂成本的 8.1 倍。生物除磷的药剂成本计算如表 4 所示。

对于低碳源污水,进水 BOD₅ 尚不足以满足反硝化脱氮所需,此时可采用化学除磷方式代替生物除磷,将进水碳源优先用于反硝化脱氮。采用化学除磷方式每去除 1 mg/L 的 TP 所节约的 BOD₅ 可以满足大约 4 mg/L 的 TN 去除。采用化学除磷后会造深度处理污泥产量增大,按照每投加 1 kg Al 产生 4 kg 污泥测算^[21],铝盐投加摩尔比为 2.3 测算^[6],每去除 1 mg/L TP 产生 8.01 mg/L 污泥。按照“污泥脱水+干化+焚烧”的总成本为 2 663 元/(t DS)测算^[22],污泥处理与处置成本增加 0.021 元/m³,化学除磷增加的药剂与污泥处理处置总成本合计 0.040 元/m³。此时,生物除磷折算的药剂成本仍然相当于化学除磷总成本的 3.85 倍。因此,对于低碳源污水采用化学除磷代替生物除磷具有明显的经济效益。化学除磷的运行总成本计算如表 5 所示。

AAO 工艺反硝化脱氮的前提是硝化,AAO 工艺的 BOD₅ 负荷必须小于 0.18 kg BOD₅/(kg MLSS·d)。而 AAO 工艺生物除磷是依靠大量排泥实现的,AAO 工艺的 BOD₅ 负荷又必须大于 0.10 kg BOD₅/(kg MLSS·d)。因此,AAO 工艺适用的 BOD₅ 负荷

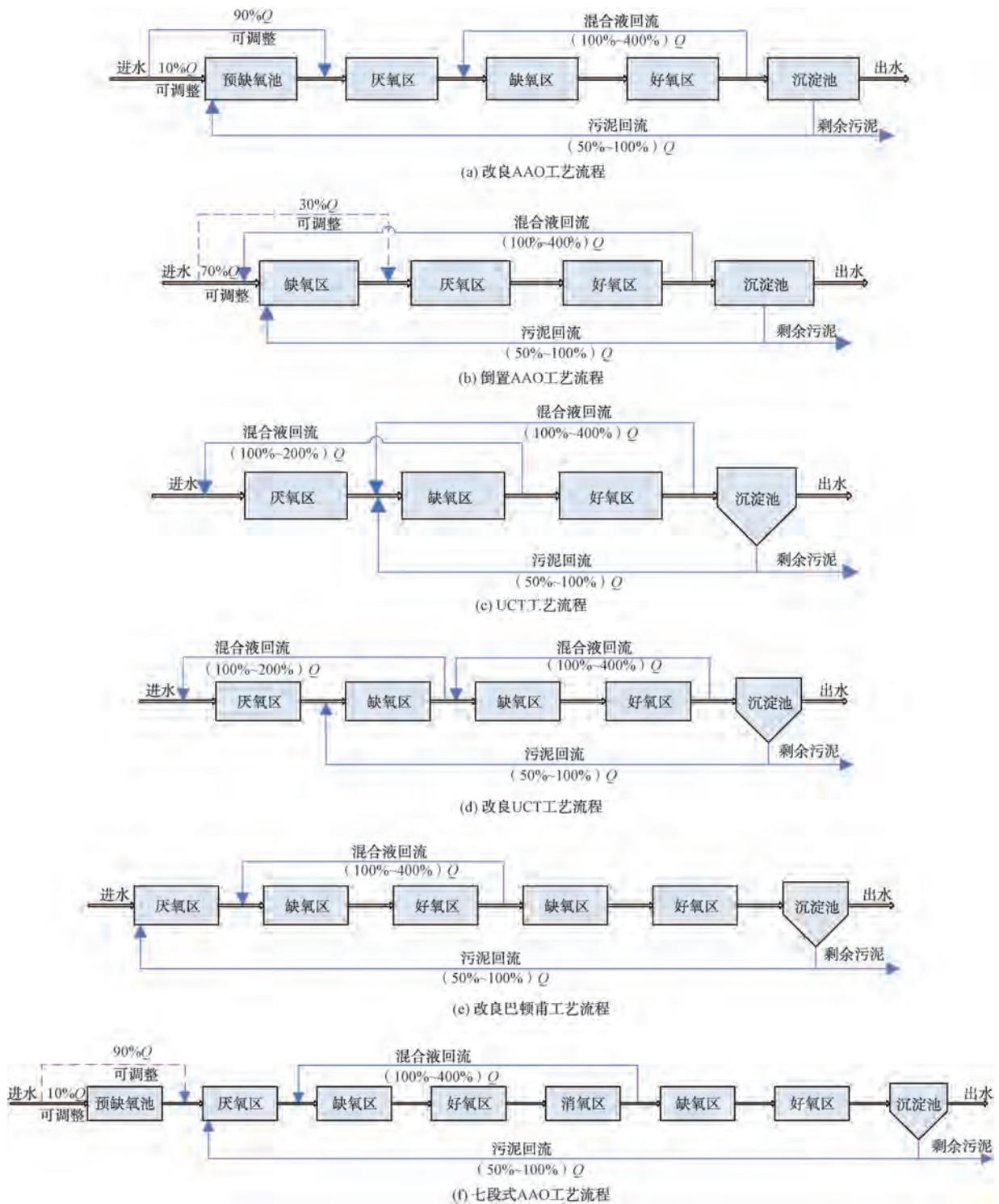


图3 AAO变形工艺流程

Fig. 3 Process Flow of AAO Deformation Processes

范围较小。采用化学除磷代替生物除磷后,可以进一步拓宽生物处理单元的 BOD_5 负荷适用范围。同时可以解决厌氧池内污泥回流液反硝化脱氮与厌氧

释磷的碳源争夺问题,进水小分子有机物直接用于反硝化脱氮而不再用于厌氧释磷,也可进一步提高反硝化速率。

表 4 生物除磷的药剂成本计算

Tab. 4 Cost List of Biological Phosphorus Removal Chemicals

序号	项目	数值	单位
1	生物除磷量	1	mg/L
2	BOD ₅ 消耗量	20	mg/L
3	乙酸钠 COD _{Cr} 理论当量	0.78	-
4	折算的乙酸钠量	25.64	mg/L
5	折算的乙酸钠(25%商品液)量	102.56	mg/L
6	乙酸钠(25%商品液)价格	1 500	元/t
7	生物除磷的药剂成本	0.154	元/m ³

表 5 化学除磷的运行总成本计算

Tab. 5 Total Operation Cost List of Phosphorus Removal Chemicals

序号	项目	数值	单位
1	化学除磷量	1	mg/L
2	理论需 Al 量	0.87	mg/L
3	投加摩尔比	2.3	-
4	实际需 Al 量	2.00	mg/L
5	每投加 1 kg Al 增加污泥量	4.00	kg
6	化学除磷增加的干污泥量	8.01	mg/L
7	污泥处理与处置单价	2 663	元/t
8	化学除磷增加的污泥处理与处置成本	0.021	元/m ³
9	化学除磷增加的药剂成本	0.019	元/m ³
10	化学除磷处理成本合计	0.040	元/m ³

综上所述,传统 AAO 工艺以及为改善生物除磷效果而衍生的改良 AAO 工艺、倒置 AAO 工艺、UCT 工艺、改良 UCT 工艺等,并非低碳源污水深度脱氮除磷成本最低的工艺。对传统 AAO 工艺进行优化,取消厌氧区以及回流污泥反硝化区,同时为提高 TN 去除率而增加第二缺氧区和好氧区,优化后的 AOA+化学除磷工艺(图 4)对于低碳源污水深度脱氮除磷运行成本更低。

优化后的 AOA+化学除磷工艺中,第一级缺氧池根据进水 BOD₅ 浓度能够去除的最大 TN 量进行

设计,此时,由于进水 BOD₅ 直接被反硝化菌利用,反硝化速率可进一步提高。研究^[23]表明,直接采用进水低分子有机物作为反硝化碳源时,反硝化速率可提高至 2.5 倍。鉴于各地区出水氨氮要求也日益提高,第一级好氧池按照完全硝化进行设计;第二级缺氧池进水端设置消氧区,以避免混合液回流中 O₂ 对第一级缺氧池反硝化的影响。根据《江苏省太湖地区城镇污水处理厂 DB32/1072 提标技术指引》,消氧区水力停留时间宜为 0.5~1.0 h;第二级缺氧池可结合第一缺氧池出水剩余硝酸盐以及最终出水 TN 要求进行设计,碳源投加在第二级缺氧池以提高碳源利用率,同时第二级缺氧池反硝化速率也可明显提高;为进一步去除氨氮以及过量投加的有机物,同时避免二沉池浮泥,第二级好氧池水力停留时间宜为 0.5 h。第二缺氧池氨氮氧化能力有限,同时各地区对于出水氨氮要求也日益严格,因此, AOA+化学除磷工艺流程中进水点只设置在第一级缺氧池,避免第二缺氧池进水造成出水氨氮超标。

对于污水处理厂的初始设计,通常按照 90%~95% 涵盖率确定进水水质,对设计的进水水质或实际运行后的进水水质可能存在 BOD₅/TN 较低的情况的污水处理厂设计,从节约运行成本角度考虑建议预留切换为 AOA+化学除磷工艺的条件(预留第一好氧池至生物池首端的回流点)。对于进水碳源不足的现状污水处理厂 AAO 工艺,建议将内回流点由缺氧池改为生物池首端以节约运行总成本。

污水处理厂的碳排放包括直接碳排放和间接碳排放。间接碳排放包括电耗和药耗产生的碳排放,而对于低碳源污水的深度脱氮除磷,间接碳排放中的药剂碳排放比重将显著提高。根据表 2,化学除磷每去除 1 mg/L 情况下,实际需 Al₂O₃ 量为 3.78 mg/L,根据《2019 年度中国区域化学药剂基准线排放因子》,Al₂O₃ 的碳排放当量为 1.62,即化学除磷每去除 1 mg/L 的碳排放量为 6.13 mg CO₂/L。采

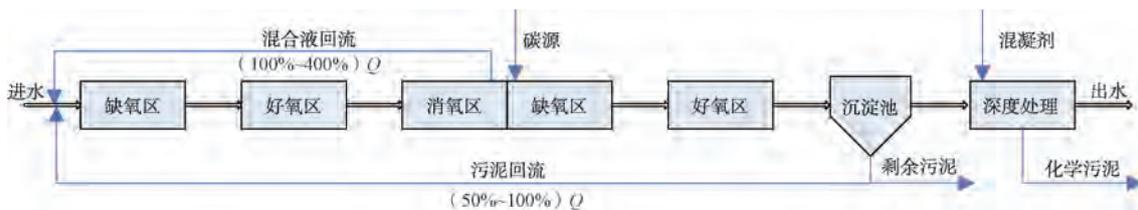


图 4 AOA+化学除磷工艺流程

Fig. 4 Process Flow of AOA+Chemical Phosphorus Removal Process

用生物除磷每去除 1 mg/L 情况下,所消耗的 BOD₅ 折算为乙酸钠为 25.64 mg/L。根据《2019 年度中国区域化学药剂基准线排放因子》,乙酸钠的碳排放当量为 1.6,即生物除磷每去除 1 mg/L 的碳排放量为 41.03 mg CO₂/L,约是化学除磷碳排放量的 6.69 倍。因此,对于低碳源污水的深度脱氮除磷,AAO+化学除磷工艺不仅具有运行成本的经济性,更有利于降低污水处理厂的碳排放。

3 结论

(1) 对于低碳源污水,采用生物除磷方式消耗的碳源成本相当于采用化学除磷所增加的混凝剂成本和污泥处理处置成本总和的 3.85 倍,因此采用化学除磷代替生物除磷具有明显的经济效益。

(2) 对于低碳源污水处理厂设计,建议采用 AAO 工艺优化后的 AAO+化学除磷工艺或预留相应切换条件,既可以提高脱氮效率还可以节约运行成本。

参考文献

- [1] 胡洪营. 中国城镇污水处理与再生利用发展报告(1978—2020)[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2021.
HU H Y. Development report on municipal wastewater treatment and reuse in China (1978—2020) [M]. Beijing: China Architecture Publishing, 2021.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 室外排水设计标准: GB 50014—2021[S]. 北京:中国计划出版社,2021.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for design of outdoor wastewater engineering: GB 50014—2021 [S]. Beijing: China Planning Press, 2021.
- [3] 刘超,刘运东,王志刚,等. 低碳氮比条件下生物脱氮成本控制方法分析应用[J]. 给水排水,2022,58(12): 37-41.
LIU C, LIU Y D, WANG Z G, et al. Analysis and application of cost control methods for biological nitrogen removal under the condition of low C/N ratio[J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 58(12): 37-41.
- [4] 周政,李怀波,王燕,等. 低碳氮比进水 AAO 污水处理厂低碳运行[J]. 中国环境科学,2022,42(11): 5088-5099.
ZHOU Z, LI H B, WANG Y, et al. Research on low-carbon operation mode in AAO-based wastewater treatment plants with low C/N influent[J]. China Environmental Science, 2022, 42(11): 5088-5099.
- [5] 李惠平,庞维海,谢丽,等. 低 C/N 污水处理过程中有机碳源的特性及转化分析[J]. 中国给水排水,2022,38(7): 69-74.
LI H P, PANG W H, XIE L, et al. Characteristics and conversion of organic carbon sources during treatment of municipal wastewater with low carbon to nitrogen ratio[J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(7): 69-74.
- [6] 中国城镇供水排水协会. 城镇水务 2035 年行业发展规划纲要[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2021.
China Urban Water Association. Outline of urban water industry development plan 2035 [M]. Beijing: China Architecture Publishing, 2021.
- [7] 彭永臻,王晓莲. A²O 法污水生物脱氮除磷处理技术与应用[M]. 北京:科学出版社,2017.
PENG Y Z, WANG X L. Technology and application of biological nitrogen and phosphorus removal from wastewater by A²O process[M]. Beijing: China Science Publishing, 2017.
- [8] 王逸飞,吉芳英,许晓毅,等. 重庆城镇污水处理厂生物脱氮优化调控措施[J]. 中国给水排水,2019,35(15): 1-6.
WANG Y F, JI F Y, XU X Y, et al. Optimization and control measures for biological nitrogen removal in Chongqing urban wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(15): 1-6.
- [9] 余琴芳,章诗璐,杜敬,等. 反硝化生物滤池碳源选择与运行方式优化研究[J]. 水处理技术,2022,48(9): 113-117.
YU Q F, ZHANG S L, DU J, et al. Study on the carbon source selection and operation optimization of denitrification biofilter [J]. Technology of Water Treatment, 2022, 48(9): 113-117.
- [10] 周圆,支丽玲,郑凯凯,等. 城镇污水处理厂活性污泥反硝化速率的影响因素及优化运行研究[J]. 环境工程,2020,38(7): 100-108.
ZHOU Y, ZHI L L, ZHENG K K, et al. Influencing factors and optimization analysis of denitrification rate in urban wastewater treatment plants[J]. Environmental Engineering, 2020, 38(7): 100-108.
- [11] 周丹,周霏. 污水脱氮工艺中外部碳源投加量简易计算方法[J]. 给水排水,2011,47(11): 38-41.
ZHOU D, ZHOU B. A simple method for calculating the input amount of external carbon source in wastewater denitrification process[J]. Water & Wastewater Engineering, 2011, 47(11): 38-41.
- [12] 郭小春. 污水脱氮工艺外部碳源投加量计算方法探讨[J]. 中国给水排水,2019,35(13): 97-100.
GUO X C. Discussion on calculation method of external carbon source dosage in sewage denitrification process [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(13): 97-100.
- [13] 王胤,吴嘉利,姚翔,等. 五段 Bardenpho/生物滤池在氧化沟提标改造中的应用[J]. 中国给水排水,2022,38(10): 74-78.
WANG Y, WU J L, YAO X, et al. Application of five-stage bardenpho/biological filter in upgrading and reconstruction of oxidation ditch process[J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(10): 74-78.

(下转第 110 页)

- 2013.00249.
- [34] ZHANG L L, SONG Y D, ZUO Y, et al. Integrated sulfur- and iron-based autotrophic denitrification process and microbial profiling in an anoxic fluidized-bed membrane bioreactor [J]. *Chemosphere*, 2019, 221: 375 - 382. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2018.12.168.
- [35] TAN X, YANG Y L, LIU Y W, et al. Quantitative ecology associations between heterotrophic nitrification-aerobic denitrification, nitrogen-metabolism genes, and key bacteria in a tidal flow constructed wetland [J]. *Bioresource Technology*, 2021, 337: 125449. DOI: 10.1016/J.BIORTECH.2021.125449.
-
- (上接第 62 页)
- [14] 姚伟涛,肖社明,张永祥. 改良 Bardenpho 工艺处理低 BOD₅/TN 混合污水工程设计[J]. *中国给水排水*, 2018, 34(14): 67-70.
YAO W T, XIAO S M, ZHANG Y X. Project design of modified bardenpho process for treatment of low BOD₅/TN mixed wastewater[J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34(14): 67-70.
- [15] 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.
SUN X, CUI H S. Design of semi-underground wastewater treatment plant with bardenpho & deep bed filter process [J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33(16): 82-85.
- [16] 刘娟,项绪文,沈军,等. Bardenpho+MBBR+磁絮凝沉淀用于污水厂升级改造[J]. *中国给水排水*, 2023, 39(4): 70-74.
LIU J, XIANG X W, SHEN J, et al. Application of Bardenpho, MBBR and magnetic flocculation and precipitation process in the upgrading and reconstruction of a wastewater treatment plant[J]. *China Water & Wastewater*, 2023, 39(4): 70-74.
- [17] 宋田翼. Bardenpho +生物滤池(DN+CN)用于污水厂准IV类出水提标[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(22): 106-109.
SONG T Y. Bardenpho+biofiltration(DN+CN) process used in wastewater treatment plant with effluent of quasi - IV water standard[J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(22): 106-109.
- [18] 吴云生. 基于“七段式”生化组合工艺的城镇污水厂提标改造技术[J]. *中国给水排水*, 2021, 37(18): 20-24.
WU Y S. Upgrading and reconstruction technology of WWTPs based on “seven-segment” biochemical combined process [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(18): 20-24.
- [19] 刘冰玉,吴云生,张宝林,等. “七段式”生化组合工艺在污水处理厂提标改造工程中的应用[J]. *水处理技术*, 2021, 47(1): 137-140.
LIU B Y, WU Y S, ZHANG B L, et al. Application of “seven-stage” biochemical combination process in upgrading and reconstruction of WWTPs [J]. *Technology of Water Treatment*, 2021, 47(1): 137-140.
- [20] 刘雷斌,高守有. 七段 Bardenpho 工艺在污水处理厂中的实践及效果分析[J]. *给水排水*, 2021, 47(9): 21-25.
LIU L B, GAO S Y. Technology practice and analysis on the seven-stage Bardenpho process in WWTP [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2021, 47(9): 21-25.
- [21] 北京市市政工程设计研究总院有限公司. 给排水设计手册: 城镇排水[M]. 3版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
Beijing General Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd. *Water supply and drainage design manual: Urban drainage* [M]. 3rd ed. Beijing: China Architecture Publishing, 2017.
- [22] 郝晓地,陈奇,李季,等. 污泥干化焚烧乃污泥处理/处置终极方式[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(4): 35-42.
HAO X D, CHEN Q, LI J, et al. Ultimate approach to handle excess sludge: Incineration and drying [J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(4): 35-42.
- [23] 周菡. 活性污泥工艺简明原理及设计计算[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
ZHOU B. *Brief principle and design calculation of activated sludge process* [M]. Beijing: China Architecture Publishing, 2005.