

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.07.009

容积比和HRT对A²/O低氧脱氮除磷的影响

云玉攀¹, 丁金蝶¹, 薛世玉¹, 王晓磊², 侯成林³, 李洪瑞³,
苗志加¹

(1. 河北地质大学 河北省高校生态环境地质应用技术研发中心, 河北 石家庄 050031;
2. 河北粤海水务集团有限公司 河北省污水治理与资源化技术创新中心, 河北 石家庄
050031; 3. 北方工程设计研究院有限公司, 河北 石家庄 050011)

摘要: 考察了A²/O低氧运行时(DO为0.5~1.0 mg/L),系统厌氧、缺氧、好氧区的容积比和水力停留时间(HRT)对去除低C/N污水中氮、磷效果的影响。结果表明,在没有外部碳源投加情况下,合理控制系统厌氧、缺氧、好氧区容积比和HRT,污水中的COD、NH₄⁺-N、TN和PO₄³⁻-P等均能被高效去除。当HRT为12 h、V_{厌氧}:V_{缺氧}:V_{好氧}为3:4:7时,COD被有效去除,且去除率高达91.2%,出水COD低于20 mg/L。进水中的COD主要在厌氧区被去除,其被聚磷菌(PAOs)和聚糖菌(GAOs)用于合成细胞内碳源PHA。当HRT为9 h、V_{厌氧}:V_{缺氧}:V_{好氧}为4:4:6时,系统可以达到稳定的脱氮除磷效果,TN、PO₄³⁻-P出水分别小于11、0.5 mg/L,去除率分别为81%、89.2%。系统对磷的去除主要通过缺氧反硝化除磷和好氧吸磷过程来实现,其中反硝化除磷是主要途径。系统脱氮以缺氧区的内源反硝化、反硝化除磷作用为主,并且伴随好氧区的短程硝化、同步硝化反硝化过程。另外,对系统进行菌群丰度和多样性分析发现,系统中起脱氮除磷作用的微生物主要为聚糖菌(*Candidatus* *Competibacter*)、反硝化细菌(*Azospira*、*Terrimonas*和*Dechloromonas*)、硝化细菌(*Nitrospira*、*Nitrosomonas*)及反硝化聚磷菌(*Hyphomicrobium*)。

关键词: A²/O工艺; 低氧; 脱氮除磷; 容积比; 水力停留时间

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)07-0058-07

Effect of Volume Ratio and HRT on Nitrogen and Phosphorus Removal in Low-oxygen A²/O Process

YUN Yupan¹, DING Jindie¹, XUE Shiyu¹, WANG Xiaolei², HOU Chenglin³,
LI Hongrui³, MIAO Zhijia¹

(1. Hebei Center for Ecological and Environmental Geology Research, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, China; 2. Wastewater Treatment and Resource Reusing Technology Innovation Center of Hebei Province, Hebei Yuehai Water Group Co. Ltd., Shijiazhuang 050031, China; 3. Norendar International Ltd., Shijiazhuang 050011, China)

Abstract: This study investigated the effect of the volume ratio of anaerobic, anoxic, and aerobic

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(21971054); 河北省高等学校科学研究项目(CXZX2025052); 石家庄市科技领军人物项目(248790126A); 河北省高校生态环境地质应用技术研发中心开放基金资助项目(JSYF-202401); 河北省产业技术研究院众筹科研项目(CYZZKY2025003); 河北地质大学博士科研启动基金资助项目(BQ2024027)

通信作者: 苗志加 E-mail: Zhijia_miao@163.com

zones and hydraulic retention time (HRT) on the removal of nitrogen and phosphorus from low C/N wastewater when the A²/O process was operated under low dissolved oxygen conditions (DO: 0.5–1.0 mg/L). The results showed that, without the addition of external carbon sources, COD, NH₄⁺-N, TN and PO₄³⁻-P in the wastewater could be efficiently removed by reasonably controlling the volume ratio of the anaerobic, anoxic, and aerobic zones and the HRT. When the HRT was 12 h and $V_{\text{anaerobic}} : V_{\text{anoxic}} : V_{\text{aerobic}}$ was 3:4:7, COD was effectively removed, with the removal rate reaching as high as 91.2%, and the effluent COD concentration was below 20 mg/L. The influent COD was mainly removed in the anaerobic zone, where it was utilized by phosphorus-accumulating organisms (PAOs) and glycogen-accumulating organisms (GAOs) to synthesize the intracellular carbon source PHA. When the HRT was 9 h and $V_{\text{anaerobic}} : V_{\text{anoxic}} : V_{\text{aerobic}}$ was 4:4:6, the system achieved stable nitrogen and phosphorus removal. The effluent TN and PO₄³⁻-P concentrations were below 11 mg/L and 0.5 mg/L, with removal rates of 81% and 89.2%, respectively. Phosphorus removal in the system was mainly achieved through anoxic denitrifying phosphorus removal and aerobic phosphorus uptake, with denitrifying phosphorus removal being the primary pathway. Nitrogen removal was primarily accomplished through anoxic endogenous denitrification and denitrifying phosphorus removal, accompanied by aerobic partial nitrification and simultaneous nitrification and denitrification. An analysis of the microbial abundance and diversity of the system revealed that the main microorganisms responsible for nitrogen and phosphorus removal were glycogen-accumulating organisms (*Candidatus_Cometibacter*), denitrifying bacteria (*Azospira*, *Terrimonas* and *Dechloromonas*), nitrifying bacteria (*Nitrospira* and *Nitrosomonas*), and denitrifying phosphorus-accumulating organisms (*Hyphomicrobium*).

Keywords: A²/O process; low dissolved oxygen; nitrogen and phosphorus removal; volume ratio; hydraulic retention time (HRT)

A²/O工艺由于流程简单、运行灵活、投资费用低等优点,在国内外工程中得到了广泛应用。然而,随着污水排放标准的日益严格,工艺脱氮除磷效率不足、能耗巨大及碳排放量较高等问题日益凸显^[1]。我国城市生活污水呈现出低碳氮比趋势,开发能耗少的低碳源污水脱氮除磷技术迫在眉睫^[2]。

有科研人员进行了低氧条件下A²/O工艺对城市污水脱氮处理中试研究^[3],发现当DO为0.5 mg/L时,水中的氮被有效去除,出水达到一级A标准。罗亚红等^[4]对A²/O工艺进行了改良,探究其在低氧运行下的脱氮除磷效果,发现NH₄⁺-N、TP和TN的平均去除率可分别达到99.20%、93.77%和89.52%。以上研究侧重于A²/O或其改良工艺在低氧条件下,对污水中氮或磷的去除,虽然能够取得较好的处理效果,但工艺改良后结构较为复杂,难以在实际工程中应用,且较难实现对氮、磷的同步高效去除等。另外,通过低氧运行改变工艺水力停留时间(HRT)及各反应区的容积比,同步实现低碳氮比污水中

氮、磷高效去除方面的研究相对较少。

基于此,笔者对A²/O工艺低氧运行处理低碳氮比污水进行了系统研究,重点考察厌氧、缺氧、好氧区容积比和HRT对系统脱氮除磷效果的影响,以期探究工艺低氧强化脱氮除磷的运行参数,为实际工程中A²/O工艺低氧稳定运行提供参考。

1 材料与amp;方法

1.1 实验装置

A²/O实验装置由有机玻璃制作而成,尺寸为1 440 mm×200 mm×400 mm,有效容积为58 L。按功能不同,装置被依次分成厌氧区、缺氧区、好氧区三部分,各部分体积可根据实验需要进行调整。好氧区出水进入后续沉淀池,经沉淀后排出。实验进水流量为4.8~6.4 L/h, HRT为9~12 h,污泥龄(SRT)为15 d。装置各反应区均设有搅拌器,以实现系统内良好的混合效果。通过PLC自控系统控制曝气量,并在好氧区设置探头对DO进行实时监测及控制。实验装置接种的污泥来自某污水处理厂二沉

池污泥,污泥浓度在 3 000 mg/L 左右。实验装置如图 1 所示。

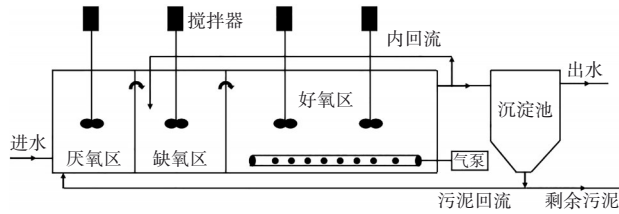


图 1 A²/O 装置示意

Fig.1 Schematic diagram of A²/O device

1.2 装置运行方式

实验用水为人工配水,通过向去离子水中添加

一定量的乙酸钠、氯化铵及磷酸二氢钠等分析纯试剂来模拟进水中不同浓度的有机物、氨氮及磷等。为强化装置反硝化除磷性能,将 A²/O 装置缺氧区用隔板等分成缺氧 1 和缺氧 2。装置分别设置内回流和污泥回流,回流比分别为 200%、100%。内回流是好氧出水部分回流到缺氧 1,污泥回流是沉淀池污泥回流到厌氧区。好氧区 DO 浓度控制在 0.5~1.0 mg/L。实验共运行 185 d,分为 6 个阶段(I~VI)。实验重点探讨在低氧条件下,容积比($V_{\text{厌氧}}:V_{\text{缺氧}}:V_{\text{好氧}}$)及 HRT 对 A²/O 处理低 C/N 污水脱氮除磷效果的影响。实验进水水质及装置运行工况见表 1。

表 1 进水水质及装置运行工况

Tab.1 Influent quality and reactor operating conditions

阶段	时间/d	COD/(mg/L)	NH ₄ ⁺ -N/(mg/L)	TP/(mg/L)	TN/(mg/L)	DO/(mg/L)	容积比	HRT/h	C/N
I	1~15	187	48.4	5.01	49.0	0.5~1.0	3:4:7	12	3.86
II	16~38	203	49.8	4.93	50.0	0.5~1.0	3:5:6	12	4.08
III	39~97	227	46.2	5.12	46.6	0.5~1.0	4:6:4	9	4.91
IV	98~117	208	44.2	4.82	44.8	0.5~1.0	4:5:5	9	4.71
V	118~140	206	50.6	5.36	51.0	0.5~1.0	4:4:6	9	4.07
VI	141~185	260	52.8	5.47	53.1	0.5~1.0	4:4:6	9	4.92

1.3 分析项目及方法

定期从实验装置特定位置采集进出水水样,经 0.45 μm 滤纸过滤后对 COD、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、NO₂⁻-N、TN、TP、pH、DO 及污泥功能菌微生物丰度和多样性等指标进行测定。COD 采用重铬酸钾快速密闭消解法测定,NH₄⁺-N 采用纳氏试剂分光光度法测定,NO₃⁻-N 采用紫外分光光度法测定,NO₂⁻-N 采用 N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法测定,TN 采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定,TP 采用过硫酸钾消解钼酸铵分光光度法测定,pH、DO 由 pH 计及便携式溶氧仪测定,微生物丰度及多样性由 16S rRNA 高通量测序法测定。

2 结果与讨论

2.1 容积比和 HRT 对 COD 去除效果的影响

容积比和 HRT 对 COD 去除效果的影响如图 2 所示。由图 2(a)可知,阶段 I 的 COD 去除效果最好,出水 COD 均值为 19.7 mg/L,去除率高达 91.2%。阶段 II 出水 COD 有轻微波动,但整体去除趋势未发生显著变化,其原因为增加缺氧区容积能有效增强系统内源反硝化脱氮和反硝化除磷能力。当降低 HRT 为 9 h 时,适当调整装置各部分的容积比,对 COD 的去除效果有一定波动,但也能实现有

效去除。阶段 III 中,缺氧容积比增加进一步强化了内碳源的缺氧代谢能力,前期有机物去除能力变化不大,在运行 2 个污泥龄后,出水 COD 浓度有明显波动,平均值为 67 mg/L,这主要是因为 HRT 改变后,长缺氧比例的内源代谢(反硝化及反硝化除磷)使得污泥出现膨胀现象,污泥回流变差,整体系统内污泥浓度降低,同时二沉池中部分堆积污泥分解并随出水流出,导致 COD 浓度上升。此时,逐步增加系统好氧区比例,随着好氧区容积的增加,有效保证了 COD 在好氧区的充分降解,COD 去除率稳步提高。当调整容积比为 4:4:6 时,COD 平均去除率达到 88%,平均出水 COD 浓度为 32 mg/L,实现了系统对有机物的有效去除。

从图 2(b)可以看出,进水 COD 在系统厌氧区被明显去除,其中约 70%~90% 被厌氧菌(主要为聚磷菌 PAOs 和聚糖菌 GAOs)用于合成细胞内碳源 PHA,以供后续反硝化除磷脱氮使用。剩余的 COD 少量在缺氧区通过反硝化作用被进一步降解,部分在好氧区继续被好氧分解。通过以上过程,水体中有机物被有效降解,进水 COD 平均为 156~260 mg/L (C/N<4),出水 COD 平均浓度低于 50 mg/L,满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)

一级A标准,达到出水排放要求。

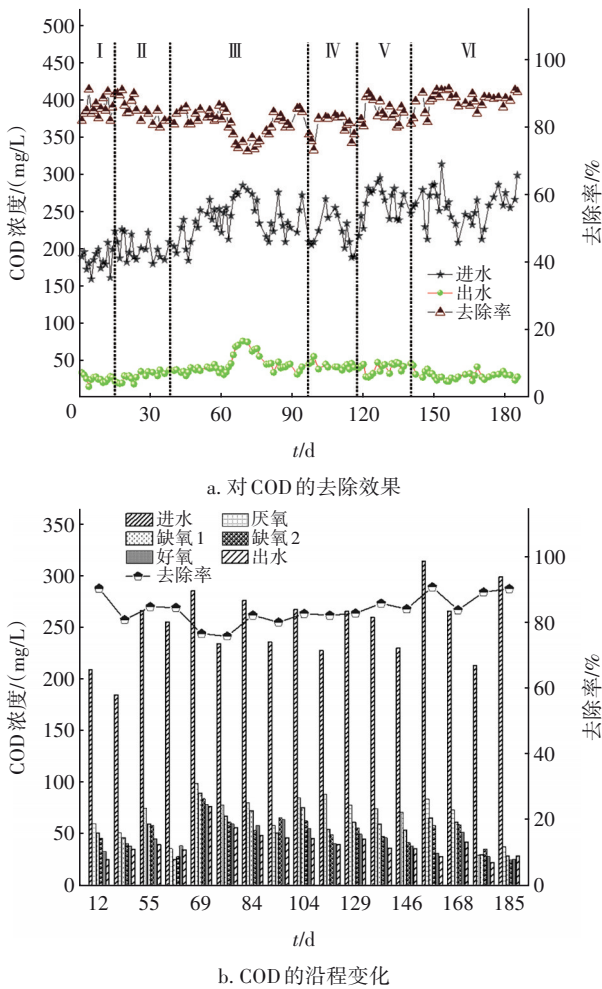


图2 容积比和HRT对COD去除效果的影响

Fig.2 Effect of volume ratio and HRT on COD removal

2.2 容积比和HRT对磷酸盐去除效果的影响

容积比和HRT对磷酸盐去除效果的影响如图3所示。从图3(a)可以看出,阶段I、II的出水磷酸盐浓度不稳定,平均去除率分别为76.7%和77.2%。这两个阶段HRT均为12h,平均进水COD分别为187、203 mg/L,系统整体硝化效果较好,回流的硝酸盐影响聚磷菌厌氧合成PHA,导致厌氧段不能充分释磷,同时系统中聚磷菌浓度偏低。从图3(b)可知,阶段I、II的厌氧释磷量分别为3.53、5.38 mg/L,这与相关研究的A²/O厌氧释磷量可达20~40 mg/L差距较大^[5]。增大进水量至6.4 L/h, HRT缩短至9h,改变容积比为4:6:4,系统运行稳定后磷酸盐去除率有明显提升,平均去除率高达93.62%,厌氧段释磷量也明显增加,第76天的释磷量达到15.3 mg/L。分析原因,增加厌氧和缺氧容积

更有利于厌氧合成PHA,进而高效实现系统缺氧段的反硝化除磷,增强对磷酸盐的去除效果。在本阶段后期,系统反硝化除磷(缺氧吸磷)占比提升至90%以上,成为系统除磷的主要途径。有学者发现^[6],反硝化聚磷菌可在缺氧条件下,利用NO₂⁻-N或NO₃⁻-N为电子受体,通过分解厌氧阶段储存于体内的PHA提供能量,实现氮磷同步去除。该过程可实现“一碳两用”,相比于传统生物除磷脱氮技术,其能够有效节省50%碳源和30%曝气能耗,同时减少50%污泥产量。综上可见,提升系统厌氧、缺氧容积可以强化反硝化除磷性能,使出水磷酸盐平均浓度稳定达到0.5 mg/L的排放要求。

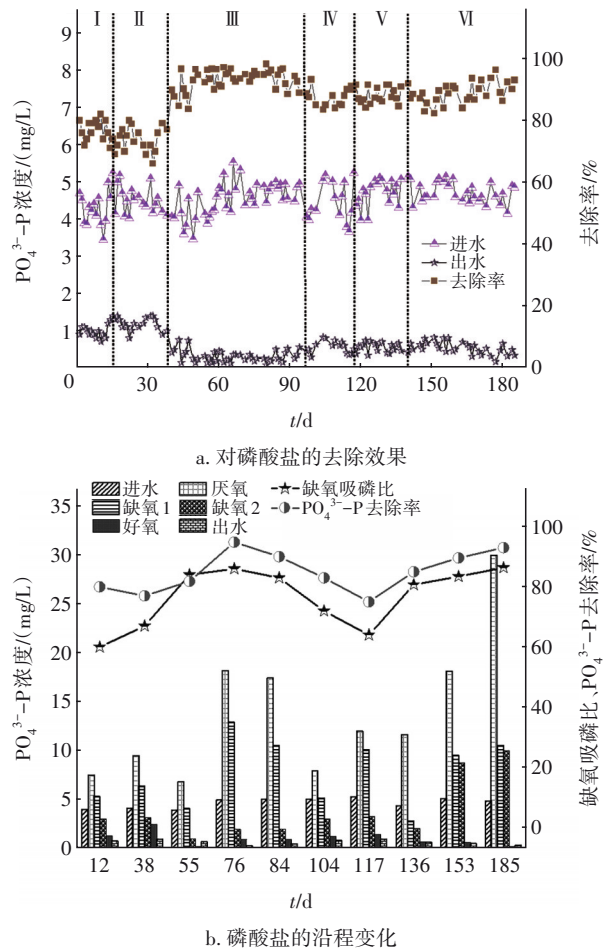


图3 容积比和HRT对磷酸盐去除效果的影响

Fig.3 Effect of volume ratio and HRT on phosphate removal

调整容积比为4:5:5,将外加碳源工业乙酸钠换成分析纯乙酸钠,系统污泥沉降性能变差,二沉池污泥不能及时回流至厌氧区,致使系统污泥浓度降低、厌氧释磷效果不明显,除磷效果下降,104 d磷

酸盐去除率为83%,在后半段除磷效果逐渐恢复,去除率达到90%以上。当容积比调整至4:4:6时,除磷效果持续提升,平均去除率为89.2%,185 d释磷量达到25.13 mg/L,出水磷酸盐浓度为0.35 mg/L。对系统污泥情况进行分析发现,反硝化聚磷菌占比达到69.38%,反硝化除磷成为系统除磷的主要途径。综上所述,系统低氧运行时(好氧段DO为0.5~1.0 mg/L),好氧吸磷作用有一定减弱,但通过加强缺氧段反硝化除磷过程(如增加厌氧和缺氧容积),能够有效实现水体磷酸盐的高效去除,还能有效降低系统能量消耗,实现污水处理厂节能降耗的目标。

2.3 容积比和HRT对氮去除效果的影响

容积比和HRT对氮去除效果的影响见图4。

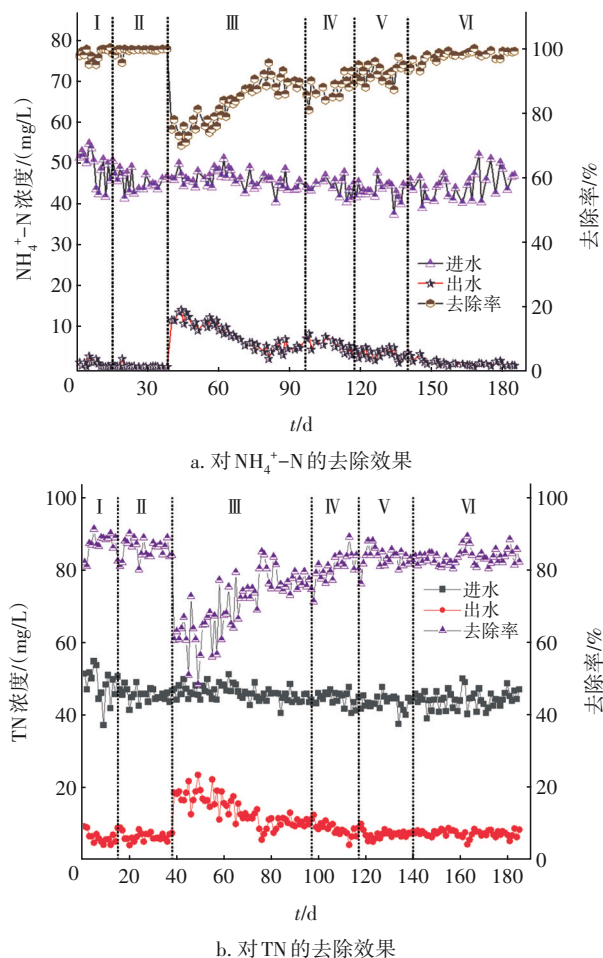


图4 容积比和HRT对氮去除效果的影响

Fig.4 Effect of volume ratio and HRT on nitrogen removal

从图4可以看出,容积比和HRT对去除氨氮和TN影响显著。阶段I、II较长HRT有效保证了

氨氮去除效果(氨氮去除率均保持在95%以上),有利于系统对TN的去除,TN平均去除率达到85.88%,平均TN出水浓度为6.61 mg/L,远低于《城镇污水处理厂污染物排放标准》一级A标准。阶段III中,好氧区容积及曝气时间都降低,导致系统对氮的去除效果急剧下降,氨氮平均去除率为85.67%,平均出水浓度为6.53 mg/L,高于一级A标准;系统对TN的平均去除率为70.66%,出水TN平均浓度为13.57 mg/L。逐步提高系统好氧区容积,对氨氮及TN的去除效果均有提升,当容积比为4:4:6时,系统对氨氮和TN的去除效果趋于稳定,氨氮和TN出水平均浓度分别为1.94、7.25 mg/L。

阶段I、II中,氨氮在缺氧1内基本全部降解,且缺氧2的硝酸盐和亚硝酸盐浓度明显升高,尤其是第38天,缺氧2内 NO_3^--N 升高至5.26 mg/L,且缺氧2基本不存在氨氮。因此,系统低氧运行并不需要很长的好氧HRT(5.14 h),可考虑缩短好氧区容积和整体停留时间,以减少 NO_3^--N 生成,逐渐形成 NO_2^--N 积累,进行短程硝化,以减少好氧段曝气量^[7]。阶段III~VI,当各反应区容积比为4:6:4时,发现氨氮去除率出现明显波动,平均去除率为85.67%,且TN去除率明显下降(70.66%)。为提高去除效果,阶段IV将容积比调整为4:5:5,通过增加好氧区容积,脱氮效果得到较大提升,亚硝态氮积累显著,出水TN平均浓度为8.5 mg/L,亚硝态氮平均积累率为40.89%。当容积比调整为4:4:6时,氨氮去除率逐渐升高,阶段V、VI的氨氮平均去除率分别为92.46%、97.72%,出水氨氮平均浓度分别为3.28、1.02 mg/L。系统亚硝态氮积累率提高显著,这两个阶段亚硝态氮积累率分别为43%、45%,如第185天,亚硝态氮积累率高达47%。系统整体脱氮效果良好,出水TN浓度稳定在11 mg/L以下,平均去除率达81%。

实际工程中,受各种不利因素的影响,难以实现亚硝态氮的高积累,从而达到稳定的短程硝化效果^[8]。本实验在不添加外碳源的情况下,通过合理控制DO、反应区容积比及HRT,利用半短程硝化(积累率约为50%),也能够达到有效脱氮的目的,这为实际工程中高效脱氮提供了一种新的思路。从原理上分析,系统在低氧条件下运行时,好氧区可能主要通过短程硝化及同步硝化反硝化(SND)过程实现对氨氮的分解和转化,好氧部分出水回流到

缺氧1,回流液中大部分的NO₃⁻-N、NO₂⁻-N通过内源反硝化和反硝化除磷得到有效去除。

综上所述,在低氧条件下,A²/O系统主要通过缺氧段内源反硝化、反硝化除磷及好氧段短程硝化、同步硝化反硝化等途径实现对TN的有效去除。若想保持适宜的脱氮效率,需保持合适的HRT(12 h),当HRT较小时(9 h),可适当增加系统好氧区容积,使出水氨氮及TN满足排放要求。

2.4 系统菌群结构与脱氮除磷的关系

为深入分析系统内微观菌群结构和系统脱氮除磷关系,有必要对系统好氧区活性污泥进行菌群丰度和多样性分析。分别选取阶段I(12 d)、III(84 d)、IV(117 d)、VI(185 d)的好氧区污泥进行高通量测序,与脱氮除磷相关的菌属见表2。

表2 脱氮除磷菌属相对丰度的变化

Tab.2 Change in relative abundance of nitrogen and phosphorus removal bacterial genera %

项目		12 d	84 d	117 d	185 d
聚糖菌	<i>Candidatus_Competibacter</i>	3.14	2.82	6.62	7.12
	<i>Defluviococcus</i>	0.28	0.19	0.26	0.25
聚磷菌	<i>Hyphomicrobium</i>	1.27	1.23	0.25	1.35
	<i>Candidatus_Accumulibacter</i>	0.00	0.00	0.03	0.49
硝化细菌	<i>Nitrosomonas</i>	0.02	0.89	0.42	0.59
	<i>Nitrospira</i>	1.27	4.63	1.26	2.12
反硝化菌	<i>Azospira</i>	9.02	1.90	1.68	4.59
	<i>Terrimonas</i>	1.60	1.70	0.50	0.80
	<i>Dechloromonas</i>	1.40	0.35	0.22	0.94
	<i>Defluviimonas</i>	0.72	0.24	0.07	0.08
SND菌	<i>Denitratisoma</i>	0.38	0.08	0.37	0.42
	<i>Acinetobacter</i>	0.05	0.31	0.00	0.32
丝状菌	<i>Thiothrix</i>	0.00	0.00	0.49	1.04

由表2可以看出,聚磷菌以*Hyphomicrobium*、*Candidatus_Accumulibacter*为主,聚糖菌以*Candidatus_Competibacter*、*Defluviococcus*为主。反硝化聚磷菌*Hyphomicrobium*在第117天的相对丰度由初期的1.27%降到0.25%,此时反硝化聚糖菌*Candidatus_Competibacter*的比例从3.14%升高至6.62%。聚糖菌不具有除磷能力,且会与系统中的聚磷菌竞争碳源,导致系统除磷效率降低^[9]。第185天,系统内*Hyphomicrobium*与*Candidatus_Accumulibacter*均有所增加,相对丰度分别为1.35%和0.49%,反硝化除磷能力增强。*Nitrosomonas*被认为属于氨氧化细菌

(AOB),*Nitrospira*属于亚硝酸盐氧化细菌(NO_B)^[10]。阶段I(12 d)中*Nitrospira*相对丰度为1.27%,*Nitrosomonas*仅为0.02%,此时系统基本未发生短程硝化。阶段III(84 d)、VI(185 d)中,这两类菌属均具有较高的丰度,*Nitrosomonas*分别为0.89%、0.59%,*Nitrospira*分别为4.63%、2.12%,随着菌属丰度的增加,系统表现出较高的硝化效率,且具有明显的亚硝酸盐积累。*Azospira*、*Terrimonas*、*Dechloromonas*、*Defluviimonas*属于典型的反硝化细菌,比较12和185 d两个阶段,这四类反硝化菌的相对丰度分别由9.02%、1.60%、1.40%、0.72%下降到4.59%、0.80%、0.94%、0.08%,这与系统主要通过内源反硝化和反硝化除磷实现TN去除的实验结果一致。*Denitratisoma*属于典型的好氧反硝化菌属。在阶段I(12 d)检测到*Denitratisoma*,其相对丰度为0.38%。在第84天,其相对丰度下降至0.08%,可能是缩短HRT和好氧区容积后,氨氮浓度较高,低氧条件下*Nitrosomonas*、*Nitrospira*基质竞争抑制了*Denitratisoma*的增殖,但需要注意的是,此时*Acinetobacter*由0.05%升至0.31%。*Acinetobacter*也属于异养硝化好氧反硝化菌属^[11],此时系统内缺氧2区也出现了NO₃⁻-N、NO₂⁻-N显著升高,该结果也验证了本工艺中可能存在异养硝化的过程。在第185天,*Denitratisoma*、*Acinetobacter*的相对丰度均有所升高,分别为0.42%、0.32%,存在一定的同步硝化反硝化现象。另外,污泥中检测到*Thiothrix*,其属于丝硫菌属^[12],其丰度升高可能会增加污泥膨胀的风险。

3 结论

① 当HRT为12 h、 $V_{\text{厌氧}}:V_{\text{缺氧}}:V_{\text{好氧}}$ 为3:4:7时,A²/O对COD的去除效果最好,出水COD浓度平均为19.7 mg/L。进水中的COD主要被系统中的反硝化聚磷菌和聚糖菌用于合成PHA。

② 当HRT为9 h、 $V_{\text{厌氧}}:V_{\text{缺氧}}:V_{\text{好氧}}$ 为4:4:6时,系统可以达到稳定的脱氮除磷效果,出水TN小于11 mg/L、出水TP小于0.5 mg/L,TN和PO₄³⁻-P去除率分别为81%、89.2%。系统通过缺氧反硝化和好氧吸磷过程除磷,其中反硝化除磷是主要途径。系统脱氮则主要通过缺氧内源反硝化、反硝化除磷及好氧短程硝化、同步硝化反硝化过程来实现。

③ 当系统HRT为9 h、 $V_{\text{厌氧}}:V_{\text{缺氧}}:V_{\text{好氧}}$ 为4:4:6

时, A²/O能够有效实现对水体中COD、NH₄⁺-N、TN、磷酸盐等的有效去除,出水满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准。

④ 系统中起反硝化作用的微生物主要是聚糖菌 *Candidatus_Cometibacter*、反硝化菌 *Azospira*、*Terrimonas* 及 *Dechloromonas* 等;硝化作用主要是通过 *Nitrosomonas* 和 *Nitrospira* 来实现;反硝化聚磷菌以 *Hyphomicrobium* 为主。

参考文献:

- [1] RAHIMI S, MODIN O, MIJAKOVIC I. Technologies for biological removal and recovery of nitrogen from wastewater [J]. *Biotechnology Advances*, 2020, 43: 107570.
- [2] 赵钰莹, 李倍莹, 黄依锬, 等. 城镇污水高速率短程硝化厌氧氨氧化脱氮[J]. *中国给水排水*, 2024, 40(13): 1-6.
ZHAO Y Y, LI B Y, HUANG Y K, et al. High-rate nitrogen removal from urban wastewater using nitrification and anaerobic ammonium oxidation [J]. *China Water & Wastewater*, 2024, 40(13): 1-6 (in Chinese).
- [3] 李炳荣, 曹特特, 王林, 等. 低氧条件下 A²/O 工艺对城市污水脱氮处理的中试研究[J]. *中国环境科学*, 2019, 39(1): 134-140.
LI B R, CAO T T, WANG L, et al. A pilot-scale study on nitrogen removal of municipal wastewater by A²/O process under low dissolved oxygen condition [J]. *China Environmental Science*, 2019, 39(1): 134-140 (in Chinese).
- [4] 罗亚红, 李冬, 鲍林林, 等. 长泥龄改良 A²/O 工艺的短程硝化反硝化除磷[J]. *化工学报*, 2014, 65(12): 4985-4996.
LUO Y H, LI D, BAO L L, et al. Shortcut nitrification and denitrifying phosphorus removal in improved A²/O technique with long SRT [J]. *CIESC Journal*, 2014, 65(12): 4985-4996 (in Chinese).
- [5] ZHANG M, PENG Y Z, WANG C, et al. Optimization denitrifying phosphorus removal at different hydraulic retention times in a novel anaerobic anoxic oxic-biological contact oxidation process [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2016, 106: 26-36.
- [6] WU H, WANG J, CHEN J Y, et al. Advanced nitrogen and phosphorus removal by combining endogenous denitrification and denitrifying dephosphatation in constructed wetlands [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 294: 112967.
- [7] HU M X, ZHANG H M, TIAN Y. Achieving nitrogen removal with low material and energy consumption through partial nitrification coupled with short-cut sulfur autotrophic denitrification in a single-stage SBR [J]. *Bioresource Technology*, 2023, 380: 128999.
- [8] 杜睿, 彭永臻. 城市污水生物脱氮技术变革: 厌氧氨氧化的研究与实践新进展 [J]. *中国科学(技术科学)*, 2022, 52(3): 389-402.
DU R, PENG Y Z. Technical revolution of biological nitrogen removal from municipal wastewater: recent advances in Anammox research and application [J]. *Scientia Sinica(Technologica)*, 2022, 52(3): 389-402 (in Chinese).
- [9] RUBIO-RINCON F J, LOPEZ-VAZQUEZ C M, WELLES L, et al. Cooperation between *Candidatus Cometibacter* and *Candidatus Accumulibacter* clade I, in denitrification and phosphate removal processes [J]. *Water Research*, 2017, 120: 156-164.
- [10] GU X, LENG J T, ZHU J T, et al. Influence mechanism of C/N ratio on heterotrophic nitrification-aerobic denitrification process [J]. *Bioresource Technology*, 2022, 343: 126116.
- [11] LENG J T, LU J Y, HAI C, et al. Exploring influence mechanism of small-molecule carbon source on heterotrophic nitrification-aerobic denitrification process from carbon metabolism, nitrogen metabolism and electron transport process [J]. *Bioresource Technology*, 2023, 387: 129681.
- [12] 洪颖, 姚俊芹, 马斌, 等. 基于高通量测序的 SBR 反应器丝状膨胀污泥菌群分析 [J]. *环境科学*, 2018, 39(7): 3279-3285.
HONG Y, YAO J Q, MA B, et al. Filamentous sludge microbial community of a SBR reactor based on high throughput sequencing [J]. *Environmental Science*, 2018, 39(7): 3279-3285 (in Chinese).

作者简介: 云玉攀(1985—), 男, 河北石家庄人, 博士, 副教授, 主要研究方向为污水处理及资源化利用。

E-mail: yundzdx@126.com

收稿日期: 2025-08-14

修回日期: 2025-09-09

(编辑: 任莹莹)