

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.08.004

## AOA-AGS 内源同步脱氮除磷技术研究进展

何秋来<sup>1,2,3</sup>, 李金峰<sup>1,2,3</sup>, 严小汇<sup>1,2,3</sup>, 刘亮<sup>1,2,3</sup>, 毕鹏<sup>1,2,3</sup>,  
吉亚宁<sup>1,2,3</sup>, 徐鹏<sup>1,2,3</sup>, 马晶伟<sup>1,2,3</sup>

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 湖南大学 建筑安全与节能教育部重点实验室, 湖南 长沙 410082; 3. 湖南大学 水安全保障技术及应用湖南省工程研究中心, 湖南 长沙 410082)

**摘要:** 活性污泥法是目前使用最广泛和最经济的污水处理工艺,但是传统脱氮除磷工艺中存在碳源竞争、污泥龄矛盾、污泥沉降性能不佳、占地面积大和处理效能低等问题。基于厌氧/好氧/缺氧运行模式的好氧颗粒污泥(AOA-AGS)技术,通过高效利用污水中的有机物实现内碳源脱氮除磷,是一种极具潜力的污水深度处理新技术。简要论述了AOA和AGS的技术特点,并探讨了二者基于“丰盛-饥饿”假说和厌氧内碳源储存结合的理论基础及优势,总结了AOA-AGS中关键功能微生物种群及其相对含量,重点综述了氧气供给、周期时间设置及碳源等因素对系统处理效能的影响,提出了该技术目前尚存的问题及未来的主要研究方向。

**关键词:** 好氧颗粒污泥; 厌氧/好氧/缺氧; 丰盛-饥饿; 同步硝化反硝化除磷; 功能微生物

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)08-0014-08

## Advances in Anaerobic/Oxic/Anoxic-Aerobic Granular Sludge (AOA-AGS) for Simultaneous Endogenous Nitrogen and Phosphorus Removal

HE Qiu-lai<sup>1,2,3</sup>, LI Jin-feng<sup>1,2,3</sup>, YAN Xiao-hui<sup>1,2,3</sup>, LIU Liang<sup>1,2,3</sup>, BI Peng<sup>1,2,3</sup>,  
JI Ya-ning<sup>1,2,3</sup>, XU Peng<sup>1,2,3</sup>, MA Jing-wei<sup>1,2,3</sup>

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. Key Laboratory of Building Safety and Energy Efficiency, Ministry of Education, Hunan University, Changsha 410082, China; 3. Hunan Engineering Research Center of Water Security Technology and Application, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** Activated sludge is the most widely utilized approach for cost-efficient wastewater treatment at present. However, There are some problems in the traditional nitrogen and phosphorus removal process, such as competition for carbon sources, contradictions in sludge retention time, poor settle ability of activated sludge, huge land occupation and low operational efficiency. The anaerobic/oxic/anoxic-aerobic granular sludge (AOA-AGS) is a promising technology for wastewater treatment, effectively utilizing carbon sources within the wastewater for endogenous nitrogen and phosphorus removal. This paper discussed the distinct characteristics of AOA and AGS technologies, exploring their

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(2020JJ5057、2023JJ30132)

通信作者: 何秋来 E-mail: qiulaihe@hnu.edu.cn

synergistic foundation and advantages through the “feast-famine” theory and anaerobic endogenous carbon sources transformation. It summarized the structures and abundances of functional groups within AOA-AGS, and reviewed the effects of key operational factors, such as oxygen supply, time configuration, and carbon sources on treatment performances. Finally, it proposed the remained concerns and future directions of this promising technology.

**Key words:** aerobic granular sludge; anaerobic/oxic/anoxic; feast-famine; simultaneous nitrification, denitrification and phosphorus removal; functional microorganisms

随着工农业发展和人们生活水平的提高,我国污水排放量和处理量逐年增加,提高污水处理效能和降低氮磷排放水平是预防水体富营养化的关键,活性污泥脱氮除磷工艺因成本低、效率高及无二次污染等优势得到了广泛应用。传统生物营养物去除(BNR)过程中,生物脱氮分为好氧硝化和缺氧反硝化两个步骤,生物除磷则依靠聚磷菌(PAOs)厌氧释磷和好氧吸磷完成,因此脱氮和除磷被分成两个独立的过程,不同处理过程的微生物对氧气( $O_2$ )及碳源的竞争、硝酸盐残留以及污泥龄(SRT)的矛盾导致其无法同时维持高效脱氮和除磷<sup>[1]</sup>。为提高污水处理效率,往往需要额外补充碳源<sup>[2]</sup>和维持较长的水力停留时间(HRT),既提高了处理成本,增加了剩余污泥产量,又额外占用了土地。

同步硝化内源反硝化除磷技术基于微生物储存内碳源并以此为能源进行脱氮除磷的原理,通过内碳源利用方式提高了污水中有限有机物的利用效率,减少了碳源投加量和污泥产量,如反硝化聚磷菌(DPAOs)已被证实厌氧/好氧(AO)<sup>[3]</sup>、厌氧/好氧/缺氧(AOA)<sup>[4]</sup>、厌氧/微好氧(AmO)<sup>[5]</sup>等运行模式中“一碳两用”进行反硝化除磷。同步硝化内源反硝化除磷技术对温度、碳氮比(C/N)、溶解氧(DO)等都有良好的适应性,可确保稳定的污染物去除效率<sup>[2,4]</sup>。然而,传统的活性污泥系统对这些微生物的持留能力有限,硝化菌和聚磷菌等生长缓慢,微生物易流失,从而限制了处理效果。

好氧颗粒污泥(AGS)是一种结构密实且形状规则的微生物聚集体,因其具有高生物截留量和良好的微生物生长环境,被认为是一项极具潜力的污水处理技术。相比于传统生物处理,AGS具有剩余污泥量少、节省占地等优点<sup>[6]</sup>。从20世纪90年代开始,针对AGS工艺优化(启动速度、稳定性、处理效果)、资源回收及新型的藻菌好氧颗粒污泥(A-

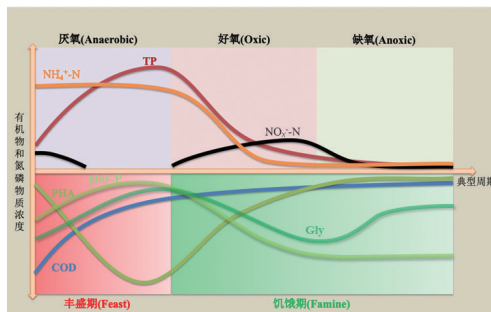
AGS)等进行了密集的理论和技术研究,但是目前对于污泥颗粒化及其稳定运行机理仍不甚清晰,启动周期长和稳态维持难仍是该技术面临的主要问题。

近年来,一些研究者发现AOA模式的AGS技术(AOA-AGS)通过强化碳源利用效率可实现同步硝化内源反硝化除磷,具有节省占地、提高处理效率并减少剩余污泥等优势,是一种极具潜力的新兴污水深度处理技术。目前,该技术的研究主要集中在对颗粒污泥培养、同步脱氮除磷效果及影响因素等方面,虽然研究者对AOA-AGS工艺的优越性具有一定的共识,但对其除污过程和机理、微生物群落及其相互关系等方面尚缺乏系统认识和总结,因此对AOA-AGS技术脱氮除磷机理、关键功能微生物、主要影响因素及其未来发展方向进行了全面综述,以为污水脱氮除磷新工艺提供理论和技术支撑。

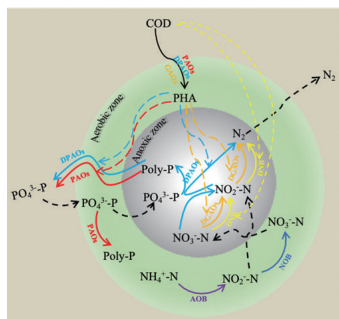
## 1 AOA-AGS技术优势及脱氮除磷原理

AGS是微生物自凝聚成的形状规则、结构密实、沉降性能强和生物截留量高的聚集体,由于 $O_2$ 传质限制造成的浓度梯度,其形成了由外及内的好氧、缺氧和厌氧环境,为各种微生物提供了良好的生态位和同步脱氮除磷的微环境<sup>[7]</sup>。AOA工艺是一种基于厌氧快速吸收污水中有机物并转化储存为内碳源,供给后续好氧和缺氧段内源反硝化和除磷的新技术,实现了脱氮除磷在时间和空间上的统一,提高了污水中有限碳源的利用效率<sup>[8-9]</sup>。AOA-AGS技术即是通过颗粒污泥高效持留的微生物实现高效碳源利用,完成同步硝化内源反硝化除磷过程:厌氧阶段胞内聚磷颗粒(ploy-P)和聚糖(Gly)水解,细胞吸收挥发性脂肪酸(VFAs)产生聚羟基烷酸酯(PHA);在随后的好氧和缺氧阶段,PHA分解产生能量,细胞合成ploy-P和Gly;在缺氧末期,PHA消耗殆尽,Gly分解产生能量。AOA-AGS中PAOs和聚糖菌(GAOs)高度富集,污水COD集中在厌氧

阶段去除,  $COD_{intra}/COD_{consume}$  (转化为内碳源而消耗的 COD 与厌氧阶段消耗总 COD 的比值) 达到 80% 以上<sup>[6]</sup>, PHA、Gly 作为主要的脱氮除磷内源物其含量增加, 实现了更高的氮、磷去除率<sup>[10-11]</sup>。AOA 通过厌氧内碳源储存和好氧/缺氧内源反硝化除磷运行模式, 营造了适宜的“丰盛-饥饿”(feast-famine) 条件, 有利于 PAOs/GAOs 的富集生长和颗粒污泥的形成<sup>[8,12]</sup>与稳定运行<sup>[7,13]</sup> (见图 1)。此外, 后置缺氧节省了曝气能耗, 也为强化反硝化除磷提供了条件<sup>[14]</sup>。因此, AOA-AGS 有望根据“丰盛-饥饿”假说和厌氧快速内碳源储存的特点, 有效结合两者优势, 成为一种低碳源污水深度处理新技术。



a. 有机物和氮磷变化曲线



b. 内源同步脱氮除磷原理

图 1 AOA-AGS 有机物和氮磷变化曲线及内源同步脱氮除磷原理

Fig.1 Profiles of carbon, nitrogen and phosphorus concentrations over a typical operational cycle and proposed mechanisms of SNEDPR via AOA-AGS process

## 2 AOA-AGS 关键功能微生物

AGS 独特的层状结构为各种微生物提供了良好的生态位, 长 SRT 使其具有良好的生物滞留效率, 这些微生物共同作用完成 AGS 形成、稳定维持和污染物去除。对 AOA-AGS 中的主要脱氮除磷微生物及其相对含量进行了总结<sup>[7,15-27]</sup>, 结果如表 1 所示。

表 1 AOA-AGS 中主要功能微生物(属水平)

Tab.1 Putative functional groups within AOA-AGS (at the genus level)

功能微生物	属	相对丰度/%	
		最小	最大
AOB	<i>Nitrosomonas</i>	0.01	1.06
	<i>norank_f_Nitrosomon</i>	0.003	0.91
NOB	<i>Nitrospira</i>	0.03	7.52
	<i>Candidatus_Nitortoga</i>	0	4.24
DNB	<i>Arcobacter</i>	0.01	1.956
	<i>Azospira</i>	0.02	8.54
	<i>Comamonas</i>	0	1.04
	<i>Flavobacterium</i>	0.007	16.53
	<i>Novosphingobium</i>	0	1.74
	<i>Thauera</i>	0.02	5.07
	<i>Zoogloea</i>	0.003	27.14
PAOs	<i>Candidatus_Accumulibacter</i>	0.01	3.782
DPAOs	<i>Dechloromonas</i>	0.01	6.40
	<i>Pseudomonas</i>	0.01	2.05
GAOs	<i>Candidatus_Competibacter</i>	3.31	73.18
	<i>Defluviicoccus</i>	0.1	4.89
	<i>Defluviimonas</i>	0.01	0.1

AOA-AGS 系统主要功能微生物有 (D)PAOs、GAOs、氨氧化菌 (AOB)、亚硝酸盐氧化菌 (NOB)、反硝化菌 (DNB), 改变外部条件 (如 DO、C/N、pH 等) 会影响微生物群落。例如, 曝气强度、时间减少不利于 GAOs 的生长, 但有利于 DNB、PAOs、DPAO 的生长繁殖<sup>[15]</sup>; 提高 DO 浓度, NOB 的增长幅度比 AOB 更大; 降低 C/N 可以实现 GAOs 与 PAOs 的竞争优势<sup>[16]</sup>; 控制系统 pH>7.5 会提高 PAOs 的竞争能力<sup>[7]</sup>; 添加盐度会对 PAOs 和 GAOs 产生抑制, 但是 GAOs 耐受性更强<sup>[17]</sup>, 适宜的盐度可以促进 AOB 的生长而抑制 NOB, 为短程硝化提供了研究思路<sup>[18]</sup>; 不同的碳源对微生物群落也有显著影响。

除此之外, 与基于活性污泥或 AGS 的其他脱氮除磷工艺相比, AOA-AGS 技术具有鲜明的微生物组成特征, 主要体现在以下几个方面: ①典型 GAOs 中 *Candidatus\_Competibacter* 属在不同工况下占据绝对优势地位, 其相对含量最高可达 73.18%<sup>[19]</sup>, *Defluviicoccus* 也有检出 (0.007%~4.89%)<sup>[20-21]</sup>; ② PAOs 中 *Candidatus\_Accumulibacter* 通常出现, 还有一些被认为具有反硝化除磷功能的菌属如 *Dechloromonas* 和 *Pseudomonas*, 但其含量比 GAOs 低<sup>[7,22]</sup>; ③大部分研究中 AOB 的典型菌属 *Nitrosomonas* 相对丰度



低于1%,但NOB中*Nitrospira*相对含量较高<sup>[7,23-24]</sup>;  
④AOA-AGS中DNB种类繁多,相对丰度差异较大,一些DNB如*Thauera*、*Zoogloea*还能分泌胞外聚合物(EPS)。此外,一些丝状菌如*Thiothrix*也有检出,它们为颗粒形成和结构稳定提供了基础框架,但另外一些丝状菌如*Sphaerotilus*丰度升高会增加污泥膨胀的风险。

总的来说,AOA-AGS中富集了大量利于颗粒形成和稳定的慢速生长微生物(如GAOs、PAOs、DPAOs、AOB、NOB等),其中GAOs和PAOs/DPAOs又是AOA中具有内碳源储存和内源脱氮除磷作用的主要功能微生物,因此从微生物角度来看,AOA-AGS技术有利于系统结构稳定和功能维持。

虽然AOA-AGS表现出稳定和良好的脱氮除磷效果,但其背后机理仍有待进一步研究。例如,已有研究报道的GAOs占据绝对优势<sup>[19]</sup>,PAOs/DPAOs含量较低,而有研究认为*Candidatus\_Competibacter*具有反硝化功能<sup>[18]</sup>,即反硝化聚糖菌DGAOs(见图1),因此传统认为存在竞争作用的GAOs/DGAOs与PAOs/DPAOs在AOA-AGS中的关系值得探究;AOB菌属的*Nitrosomonas*含量极低,近年来有研究发现*Nitrospira*中的部分微生物具有完全氨氧化功能<sup>[25]</sup>,AOA-AGS中优异的氨氧化效率背后机理也还有待探索。

### 3 影响因素

#### 3.1 DO

DO是影响AOA-AGS处理效率的关键因素之一。一般认为较高的曝气强度有利于AGS形成并维持颗粒沉降能力和活性,较强的水力剪切力也可抑制丝状菌的过度生长,保持颗粒稳定性<sup>[28]</sup>;相反,低曝气强度会减少EPS产生,且颗粒生物量与沉降性能降低,甚至会导致颗粒破碎解体<sup>[3]</sup>。另一方面,曝气过量(DO过高或时间过长)有利于硝化反应完全进行,但反硝化和反硝化除磷过程会受到抑制,并增加处理能耗。He等<sup>[6]</sup>发现,降低曝气强度,运行初期部分颗粒发生破碎,粒度有所减小,但PAOs和AOB得到富集,好氧同步硝化反硝化(SND)比例和总氮去除率升高。Zhang等<sup>[8]</sup>在低曝气(表观气速SGV=0.6 cm/s)和低负荷污水中完成了AOA-AGS启动,除磷率达90%以上。此外,曝气强度和时间也可统筹控制,如高曝气强度下减少曝气时间<sup>[15]</sup>或

控制气体总量同时调节DO和时长<sup>[26]</sup>均可达到调控颗粒污泥生长和沉降以及提高总氮去除效率的作用。

#### 3.2 厌氧/缺氧时间

适宜的厌、缺氧时间是保证AOA-AGS内碳源储存量和效能的重要前提。厌氧时间过短会使污水中的大量有机物在好氧段被异养菌利用进行增殖,污泥结构变松散且沉降性能变差;但过长的厌氧时间不仅会导致PHA消耗而对其积累产生不利影响,还会导致EPS异常积累,增大传质阻力<sup>[29]</sup>。缺氧时间过短易受前段曝气的影响而不利于后置反硝化,过长则可能出现二次释磷。从现有研究来看,厌氧时间维持在2 h以上可保障充分释磷和PHA转化,缺氧时间的设置取决于残留氮磷负荷和好氧段残留DO浓度等,通常较长的缺氧时间更利于营造缺氧微环境<sup>[30]</sup>。此外,延长厌氧时间或缩短好氧/缺氧时间会提高丰盛/饥饿比,从而影响颗粒污泥的稳定性。

#### 3.3 碳源

##### 3.3.1 C/N

C/N代表了进水中碳源与氮的相对含量,也是影响AOA-AGS效能的重要因素之一。虽然AOA-AGS可强化碳源利用效率,对低负荷污水处理效果也较好,但过低的C/N比限制了微生物可转化的内碳源<sup>[31]</sup>,不利于内源反硝化。Wang等<sup>[16]</sup>发现降低C/N比(20、10、4)导致硝酸盐积累,反硝化率降低,GAOs和DPAOs得到积累,但这可能与DO浓度过高导致硝酸盐残留浪费有机物以及缺氧微环境的破坏有关。C/N比过高则可能刺激普通异养菌的过度生长,不利于GAOs/PAOs等缓慢生长微生物的代谢<sup>[32]</sup>。颗粒污泥在过高的C/N比下沉降性能也较差,降低C/N比有利于刺激生物活性和保持良好的沉降性能,但要注意颗粒解体的问题。

##### 3.3.2 碳源种类

不同微生物利用碳源的能力不同,在不同碳源下生长的颗粒具有不同的表现。乙酸盐是生物脱氮除磷的适宜碳源,而乙醇和甲醇作为许多污水厂的外加碳源,可以增强反硝化作用,且对生物除磷的影响较小。Rollemberg等<sup>[33]</sup>对比了乙酸、乙醇和葡萄糖作为碳源时对颗粒污泥的影响,发现乙酸作为碳源时对氮、磷的去除效果最好,并且沉降性能良好,EPS含量最高,而葡萄糖对氮磷去除效果差且

其所形成的 AGS 稳定性最差;该研究还发现乙酸有利于 PAOs、AOB 和 NOB 的生长,而乙醇有利于反硝化菌生长,葡萄糖则有利于丝状菌生长。He 等<sup>[22]</sup>将乙酸钠和葡萄糖以不同比例混合作为碳源,也发现随着葡萄糖占比的增大,出水残留的硝酸盐和磷浓度也随之增加,同时 EPS 产量增加、生物群落多样性降低。

3.4 其他因素

低温通常被认为不利于保持 AGS 的处理效果<sup>[34]</sup>,但 AOA-AGS 在冬季低温条件下却表现出较

强的稳定性<sup>[13]</sup>,这可能与 GAOs/PAOs 储存 PHA 及分泌 EPS 的能力有关<sup>[35]</sup>。额外添加适量的碱度物质有利于调节微生物的多样性和结构,提高脱氮效率<sup>[7]</sup>。此外,盐度<sup>[13,18]</sup>、碳磷比(C/P)<sup>[36]</sup>、有机负荷(OLR)<sup>[37]</sup>、弱磁场<sup>[19]</sup>等均会对 AOA-AGS 系统产生不同的影响,但具体效应和内在机制仍有待进一步明确。

基于国内外相关文献报道总结了 AOA-AGS 影响因素的研究状况<sup>[6-7,13,16,19,22,26,36-37]</sup>,具体情况如表 2 所示。

表 2 不同影响因素下 AOA-AGS 的表现

Tab.2 Performances of AOA-AGS under different influencing factors

因素		粒径/mm	MLSS/ (mg·L <sup>-1</sup> )	SVI/ (mL·g <sup>-1</sup> )	EPS/ (mg·g <sup>-1</sup> )	污染物去除率/%		
						COD	TN	TP
SVG/(cm·s <sup>-1</sup> )	0.17	1.54±0.64	4 535±236	27.55±2.03	≈21	94.64	63.71	96.63
	0.11	1.69±0.59	≈4 600	29.79±2.15	≈49	>90	76.87	>95
	0.04	1.76±0.85	4 618±398	33.17±3.81	≈68	>90	94.42	>95
曝气强度与时间	1.5 L/min, 90 min	0.724	<3 000	≈75	≈12	≈80	<60**	>90
	0.9 L/min, 120 min	0.816	>4 000	<45	≈12		>80**	
	0.6 L/min, 150 min	0.786	>4 000	≈45	≈13		>80**	
C/N	20			36.41±0.91	66.19	95.23	94.92**	97.66
	10			40.82±0.32	60.85	94.01	84.42**	98.66
	4			41.73±0.11	63.23	94.06	74.79**	98.18
C/P	50	1.5±0.5	4 400±500	22.58±0.69		>95	>85**	95.98
	25							96
	16							86.26
乙酸钠:葡萄糖*	3:1		4 720±136	≈24	19.5±0.36	92.04	94.44**	94.94
	1:1		≈5 200	≈25	17.7±0.72	88.31	84.71**	84.21
	1:3		5 760±188	≈26	32.65±2.03	80.95	81.36**	69.95
盐度(<15 °C)/%	0.5		≈8 100	≈20	≈41	≈90	≈80**	>95
外加碱度/(mg·L <sup>-1</sup> )	0		2 752			92.80	60.46**	97.65
	250					85.75	82.84**	94.68
	500					93.57	98.62**	92.19
	750					95.39	88.44**	95.26
OLR/(gCOD·L <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup> )	1	0.70	6 300	36.74	81.04	92	93.04	92
	1.18	0.74	6 732	34.84	109.46	91.52	92.24	93.35
	1.48	0.98	6 968	33.68	115.28	92.45	92.06	95.10
	2	0.52	5 582	≈48	139.56	92.52	85.32	61.01
磁场磁感应强度/mT	0		2 487.89	42.81	25		75.89	93.5
	10		2 146.12	19.93	23		96.99	93.4
	20		2 426.47	28.65	22.5		78.16	93.4
	40		2 909.98	32.98	30		79.45	93.9

注: \*表示物质比例以 COD 折算;\*\*表示总无机氮(TIN)去除率。

综上所述,通过调整外部条件(碳源、曝气、循环时间等)可提升 AOA-AGS 的运行效能,但如何进一步优化菌群结构、维持系统稳定、构建可持续的

脱氮除磷系统仍是未来的主要研究方向。前文已讨论过 AOA-AGS 富集了缓慢生长的微生物有利于维持颗粒稳定,对碳源可进行高效利用,对低负荷

的生活污水具有良好的适用性。研究表明,微生物长期对内碳源的消耗可能会对其生长产生不良影响。例如,侧流磷回收引起的poly-P消耗导致PAOs受到抑制而GAOs优势生长,虽有利于反硝化脱氮,但对AGS系统生物除磷和长期稳定性具有不良影响<sup>[38]</sup>;PAOs代谢类型从聚磷代谢(PAM)转化为聚糖代谢(GAM),使反应器pH升高,反过来又会抑制GAOs的活性<sup>[39]</sup>。由于目前对微生物的特性缺乏进一步了解,AOA-AGS脱氮除磷背后机理仍有待进一步探索。

#### 4 结论与展望

AOA-AGS工艺基于AGS的“丰盛-饥饿”假说和AOA厌氧快速存储碳源特性可有效结合两者优势,形成同步硝化内源反硝化除磷新技术,对于解决原水碳源不足、占地面积大和处理效率低等问题有重要的应用价值,具有较广阔的应用前景。当前初步探索了AOA模式下AGS的培养过程及可能机制,主要研究了成熟颗粒污泥在不同水质、曝气、时间配置、盐度、温度及新污染物和群体感应信号分子等影响因素下的处理效率,以及污泥特性和生物群落等,表明AOA-AGS具有良好的适应性和稳定性,现有结果初步明确了工艺适用条件和优化策略。

与传统工艺相比,AOA-AGS中关键功能微生物种群和脱氮除磷机理有较大差异,特别是AGS形成和稳定机制尚不明确增加了该工艺构建和应用的复杂程度,未来仍需结合“丰盛-饥饿”和其他假说进行更深入研究。目前,对于AOA-AGS中氮磷去除机制仍不清晰,如已知的AOB相对丰度过低但硝化效果良好,除磷过程中GAOs和PAOs的关系等,已有的AOA-AGS研究中尚未发现厌氧氨氧化(Anammox)现象,未来需结合先进的分子生物学工具明确氮磷去除机制。同时现有的AOA-AGS研究多采用SBR反应器,亟须开展连续流试验和应用。此外,现有处理工艺过分强调对污染物的去除,未来可从资源回收角度探索其中生物塑料(PHA)、EPS和磷等物质的回收和利用,为污水处理厂(WWTPs)向资源回收工厂(WRRFs)的转变提供支撑。

#### 参考文献:

[1] DAI H L, HAN T, SUN T S, *et al.* Nitrous oxide emission during denitrifying phosphorus removal

process: a review on the mechanisms and influencing factors [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 278(Part 1): 111561.

[2] ZAMAN M, KIM M, NAKHLA G. Simultaneous nitrification-denitrifying phosphorus removal (SNDPR) at low DO for treating carbon-limited municipal wastewater [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 760: 143387.

[3] DE ROLLEMBERG S L S, FERREIRA T J T, FIRMINO P I M, *et al.* Impact of cycle type on aerobic granular sludge formation, stability, removal mechanisms and system performance [J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 256: 109970.

[4] BAI X Y, MCKNIGHT M M, NEUFELD J D, *et al.* Simultaneous nitrification, denitrification, and phosphorus removal from municipal wastewater at low temperature [J]. *Bioresource Technology*, 2023, 368: 128261.

[5] CAMEJO P Y, OWEN B R, MARTIRANO J, *et al.* *Candidatus* accumulibacter phosphatis clades enriched under cyclic anaerobic and microaerobic conditions simultaneously use different electron acceptors [J]. *Water Research*, 2016, 102: 125-137.

[6] HE Q L, ZHANG W, ZHANG S L, *et al.* Enhanced nitrogen removal in an aerobic granular sequencing batch reactor performing simultaneous nitrification, endogenous denitrification and phosphorus removal with low superficial gas velocity [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 326: 1223-1231.

[7] GAO S X, HE Q L, WANG H Y. Research on the aerobic granular sludge under alkalinity in sequencing batch reactors: removal efficiency, metagenomic and key microbes [J]. *Bioresource Technology*, 2020, 296: 122280.

[8] ZHANG H M, DONG F, JIANG T, *et al.* Aerobic granulation with low strength wastewater at low aeration rate in A/O/A SBR reactor [J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 2011, 49(2): 215-222.

[9] TSUNEDA S, OHNO T, SOEJIMA K, *et al.* Simultaneous nitrogen and phosphorus removal using denitrifying phosphate-accumulating organisms in a sequencing batch reactor [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2006, 27(3): 191-196.

[10] LI D Y, GUO W, LIANG D B, *et al.* Rapid start-up and advanced nutrient removal of simultaneous nitrification, endogenous denitrification and phosphorus removal

- aerobic granular sequencing batch reactor for treating low C/N domestic wastewater[J]. *Environmental Research*, 2022, 212(Part D): 113464.
- [11] HE Q L, YAN X H, FU Z D, *et al.* Rapid start-up and stable operation of an aerobic/oxic/anoxic simultaneous nitrification, denitrification, and phosphorus removal reactor with no sludge discharge [J]. *Bioresource Technology*, 2022, 362: 127777.
- [12] HE Q L, ZHOU J, WANG H Y, *et al.* Microbial population dynamics during sludge granulation in an A/O/A sequencing batch reactor [J]. *Bioresource Technology*, 2016, 214: 1–8.
- [13] HE Q L, WANG H Y, CHEN L, *et al.* Robustness of an aerobic granular sludge sequencing batch reactor for low strength and salinity wastewater treatment at ambient to winter temperatures [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 384: 121454.
- [14] KISHIDA N, KIM J, TSUNEDA S, *et al.* Anaerobic/oxic/anoxic granular sludge process as an effective nutrient removal process utilizing denitrifying polyphosphate-accumulating organisms [J]. *Water Research*, 2006, 40(12): 2303–2310.
- [15] HE Q L, CHEN L, ZHANG S J, *et al.* Simultaneous nitrification, denitrification and phosphorus removal in aerobic granular sequencing batch reactors with high aeration intensity: impact of aeration time [J]. *Bioresource Technology*, 2018, 263: 214–222.
- [16] WANG H Y, SONG Q, WANG J, *et al.* Simultaneous nitrification, denitrification and phosphorus removal in an aerobic granular sludge sequencing batch reactor with high dissolved oxygen: effects of carbon to nitrogen ratios [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 642: 1145–1152.
- [17] WANG Z W, VAN LOOSDRECHT M C M, SAIKALY P E. Gradual adaptation to salt and dissolved oxygen: strategies to minimize adverse effect of salinity on aerobic granular sludge [J]. *Water Research*, 2017, 124: 702–712.
- [18] HE Q L, WANG H Y, CHEN L, *et al.* Elevated salinity deteriorated enhanced biological phosphorus removal in an aerobic granular sludge sequencing batch reactor performing simultaneous nitrification, denitrification and phosphorus removal [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 390: 121782.
- [19] LYU W L, SONG Q, SHI J, *et al.* Weak magnetic field affected microbial communities and function in the A/O/A sequencing batch reactors for enhanced aerobic granulation[J]. *Separation and Purification Technology*, 2021, 266: 118537.
- [20] HE Q L, ZHANG J, GAO S X, *et al.* A comprehensive comparison between non-bulking and bulking aerobic granular sludge in microbial communities [J]. *Bioresource Technology*, 2019, 294: 122151.
- [21] ZHANG C Y, GAO F, WU Y H, *et al.* Small-sized salt-tolerant denitrifying and phosphorus removal aerobic granular sludge cultivated with mariculture waste solids to treat synthetic mariculture wastewater [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2022, 181: 108396.
- [22] HE Q L, SONG Q, ZHANG S L, *et al.* Simultaneous nitrification, denitrification and phosphorus removal in an aerobic granular sequencing batch reactor with mixed carbon sources: reactor performance, extracellular polymeric substances and microbial successions [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 331: 841–849.
- [23] HE Q L, ZHANG W, ZHANG S L, *et al.* Performance and microbial population dynamics during stable operation and reactivation after extended idle conditions in an aerobic granular sequencing batch reactor [J]. *Bioresource Technology*, 2017, 238: 116–121.
- [24] SHUAI J, HU X L, WANG B, *et al.* Response of aerobic sludge to AHL-mediated QS: granulation, simultaneous nitrogen and phosphorus removal performance [J]. *Chinese Chemical Letters*, 2021, 32(11): 3402–3409.
- [25] 高复云, 李雅颖, 姚槐应. 完全氨氧化菌的分子生态学研究进展[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(8): 2831–2840.
- GAO Fuyun, LI Yaying, YAO Huaiying. Research progress on primers and molecular ecology of comammox *Nitrospira* [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(8): 2831–2840 (in Chinese).
- [26] HE Q L, CHEN L, ZHANG S J, *et al.* Hydrodynamic shear force shaped the microbial community and function in the aerobic granular sequencing batch reactors for low carbon to nitrogen (C/N) municipal wastewater treatment [J]. *Bioresource Technology*, 2019, 271: 48–58.
- [27] HE Q L, GAO S X, ZHANG S L, *et al.* Chronic responses of aerobic granules to zinc oxide nanoparticles in a sequencing batch reactor performing simultaneous nitrification, denitrification and phosphorus removal [J]. *Bioresource Technology*, 2017, 238: 95–101.
- [28] LIU Y Q, TAY J H. Fast formation of aerobic granules



- by combining strong hydraulic selection pressure with overstressed organic loading rate [J]. *Water Research*, 2015, 80: 256–266.
- [29] 王琪, 李冬, 李鹏焱, 等. 厌/缺氧时间对好氧颗粒污泥同步硝化内源反硝化和除磷的影响[J]. *中国环境科学*, 2022, 42(9): 4199–4206.
- WANG Qi, LI Dong, LI Pengyao, *et al.* Effects of anaerobic/anoxic time on simultaneous nitrification–endogenous denitrification and phosphorous removal from aerobic granular sludge [J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(9): 4199–4206 (in Chinese).
- [30] HE Q L, ZHANG S L, ZOU Z C, *et al.* Unraveling characteristics of simultaneous nitrification, denitrification and phosphorus removal (SNDPR) in an aerobic granular sequencing batch reactor [J]. *Bioresource Technology*, 2016, 220: 651–655.
- [31] ZHU G C, LU Y Z, XU L R. Effects of the carbon/nitrogen (C/N) ratio on a system coupling simultaneous nitrification and denitrification (SND) and denitrifying phosphorus removal (DPR) [J]. *Environmental Technology*, 2021, 42(19): 3048–3054.
- [32] PAN M, HENRY L G, LIU R, *et al.* Nitrogen removal from slaughterhouse wastewater through partial nitrification followed by denitrification in intermittently aerated sequencing batch reactors at 11 °C [J]. *Environmental Technology*, 2014, 35(4): 470–477.
- [33] ROLLEMBERG S L S, DE OLIVEIRA L Q, BARROS A R M, *et al.* Effects of carbon source on the formation, stability, bioactivity and biodiversity of the aerobic granule sludge [J]. *Bioresource Technology*, 2019, 278: 195–204.
- [34] BAO R L, YU S L, SHI W X, *et al.* Aerobic granules formation and nutrients removal characteristics in sequencing batch airlift reactor (SBAR) at low temperature [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 168(2/3): 1334–1340.
- [35] HE Q L, YAN X H, WANG H Y, *et al.* Towards a better understanding of the anaerobic/oxic/anoxic–aerobic granular sludge process (AOA–AGS) for simultaneous low-strength wastewater treatment and in situ sludge reduction from ambient to winter temperatures [J]. *Environmental Research*, 2023, 236: 116822.
- [36] HE Q L, ZHOU J, SONG Q, *et al.* Elucidation of microbial characterization of aerobic granules in a sequencing batch reactor performing simultaneous nitrification, denitrification and phosphorus removal at varying carbon to phosphorus ratios [J]. *Bioresource Technology*, 2017, 241: 127–133.
- [37] 李冬, 高飞雁, 解一博, 等. 高频交替 OLR 强化好氧颗粒污泥性能研究 [J]. *中国环境科学*, 2022, 42(8): 3635–3642.
- LI Dong, GAO Feiyan, XIE Yibo, *et al.* Enhancement of aerobic granular sludge by high-frequency alternating OLR [J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(8): 3635–3642 (in Chinese).
- [38] HE Q L, YAN X H, XIE Z Y, *et al.* Advanced low-strength wastewater treatment, side-stream phosphorus recovery, and in situ sludge reduction with aerobic granular sludge [J]. *Bioresource Technology*, 2023, 386: 129574.
- [39] DAN Q P, PENG Y Z, WANG B, *et al.* Side-stream phosphorus famine selectively strengthens glycogen accumulating organisms (GAOs) for advanced nutrient removal in an anaerobic–aerobic–anoxic system [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 420: 129554.

作者简介:何秋来(1991–),男,湖北咸宁人,工学博士,副教授,研究方向为污水生物处理及资源化。

E-mail:qiulaihe@hnu.edu.cn

收稿日期:2023-06-02

修回日期:2023-08-08

(编辑:丁彩娟)