

厌氧氨氧化工艺影响因素及其耦合工艺研究进展

罗安腾^{1,2}, 吴莉娜^{1,2*}, 和书航³, 贾春芳^{1,2}, 张瑜麟^{1,2}, 尹鉴^{1,2}

1. 北京建筑大学环境与能源工程学院, 北京 100044

2. 北京建筑大学城市雨水与水环境教育部重点实验室, 北京 100044

3. 北京大学深圳研究生院环境与能源学院, 深圳 518055

摘要 厌氧氨氧化(anaerobic ammonia oxidation, Anammox)工艺作为一种经济、环保的废水脱氮工艺,受到广泛关注。然而,Anammox工艺在现有废水处理中的应用仍然面临困难,主要问题包括厌氧氨氧化细菌(Anammox bacteria, AnAOB)对环境因素的敏感性及反应体系中亚硝酸盐的供应不足。结合国内外Anammox工艺的研究,从宏观角度(实验室研究、工程应用等)和微观角度(AnAOB群落特征、AnAOB群体感应等),针对Anammox工艺特征、影响因素、耦合工艺及其应用等方面,分析了Anammox工艺运行条件、处理效果和稳定性,概述了Anammox工艺在实际应用中的进展,并指出其阻碍因素,展望了Anammox工艺在废水处理中值得研究的方向及调控策略。

关键词 厌氧氨氧化;厌氧氨氧化细菌;群落特征;群体感应;影响因素;耦合工艺

高浓度氨氮会造成水中溶解氧浓度下降、富营养化污染等危害,因此去除高浓度氨氮是废水处理面临的一大问题^[1-2]。污水脱氮方法主要包括物理法(如增加曝气量)、化学法(如离子交换法)和生物法(如硝化-反硝化工艺)。相比于物理法和化学法,生物法适用范围较广、过程较为简单、成本较

低、效果稳定、不造成二次污染,目前已成为污水常用脱氮处理方法^[3]。传统生物脱氮工艺以硝化-反硝化工艺为主,该工艺首先在好氧条件下,氨氮在硝化细菌的作用下硝化为亚硝态氮和硝态氮;然后在缺氧条件下,亚硝态氮和硝态氮在反硝化细菌的作用下被还原为氮气,从而达到脱氮的效果^[4]。近

收稿日期:2022-11-16;修回日期:2023-07-23

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51978031, 51678057);北京自然科学基金面上项目(8192010);北京市属高校基本科研业务费专项(X20074)

作者简介:罗安腾,硕士研究生,研究方向为水污染控制、垃圾渗滤液和厌氧氨氧化,电子信箱:7610849528@163.com;吴莉娜(通信作者),教授,研究方向为水污染控制、垃圾渗滤液和厌氧氨氧化,电子信箱:wulina@bucea.edu.cn

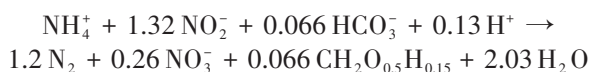
引用格式:罗安腾, 吴莉娜, 和书航, 等. 厌氧氨氧化工艺影响因素及其耦合工艺研究进展[J]. 科技导报, 2024, 42(4): 40-51; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2024.04.004

年来,氮排放标准日益严格,传统生物脱氮工艺的去氮效果和运行成本存在局限,促进了氮污染物去除技术的发展^[5]。1990年,厌氧氨氧化(anaerobic ammonia oxidation, Anammox)工艺被提出,并被认为是最高效的生物脱氮工艺之一^[6]。该工艺主要是氨氮和亚硝态氮在厌氧或缺氧条件下反应生成氮气,从而达到脱氮的效果。相比于传统生物脱氮工艺,Anammox工艺简化了处理流程、降低了成本,从而得到广泛关注。

1 Anammox工艺机理及特征

1.1 Anammox反应机理

Anammox是指厌氧或缺氧条件下,Anammox细菌(Anammox bacteria, AnAOB)利用 NH_4^+ 和 NO_2^- 作为底物生成氮气的过程^[7]。目前普遍认可的Anammox反应化学计量方程为^[8]



根据反应方程式可知,Anammox反应中只消耗了 CO_2 和 HCO_3^- ,不需外加碳源,能够有效的节约成本;不产生 N_2O 和碱性物质,能够防止温室气体的产生和中和试剂的加入^[9]。

1.2 Anammox工艺运行特征

使用Anammox工艺进行生物脱氮,只需要一个单一的厌氧反应池即可。相比于传统的硝化-反硝化生物脱氮工艺,这种新型工艺的优势在于曝气量大量减少,占地面积小,施工费用低廉。与此同时,使用该工艺无需额外购买碳源,碳源费用可以节省100%。此外,该工艺的污泥产量相对较低,工艺流程简短,运行维护也较为简单^[10]。

Anammox工艺运行时主要功能菌为AnAOB,其直径约为 $1 \mu\text{m}$,为球菌,因胞内存在很高的“细胞色素”而呈现橙色,生长缓慢,通常倍增时间为10~14 d^[11]。不同于其他细菌,其具有“细胞内分隔化”和“厌氧氨氧化体”的特征。AnAOB的理想生存条件在pH为6.7~8.3,温度为20~43℃^[12-13]。此外,AnAOB是化能自养厌氧菌,对生长环境要求严格,工艺启动速度缓慢,是Anammox工艺实际工程应用的最显著障碍^[14]。

1.3 Anammox工艺细菌群落特征及群体感应

1.3.1 Anammox工艺细菌群落特征

目前为止,已经鉴定和命名的AnAOB有6个菌属以及19个物种,6个属分别为*Candidatus Scalindua*、*Candidatus Brocadia*、*Candidatus Kuenenia*、*Candidatus Anammoxglobus*、*Candidatus Anammoximicrobium*和*Candidatus Jettenia*^[15]。每个属或种都有不同的生理特征,并适应于特定的生态位。研究表明,氧气耐受性、盐度、聚合能力等条件对AnAOB存在显著影响^[16]。AnAOB不是严格的厌氧菌,而是微耐氧菌,但氧气耐受性因物种而异。盐度被认为是控制AnAOB地理分布的最重要的鉴别因素。*Ca. Scalindua*在咸水环境(多为海洋)中占主导地位,其他属多为淡水环境^[17]。AnAOB倾向于形成聚集体,研究表明*Ca. B. sinica*(*Candidatus Brocadia*属)拥有最佳的聚集能力,使其成为较为适合进行废水处理的细菌^[18]。

1.3.2 Anammox工艺细菌群体感应

群体感应(quorum sensing, QS)是一种细菌交流方式,它通过合成和释放特定的化学信号分子来调控细菌细胞,作为对高胁迫条件(更高的细胞密度/不利的过程条件)的反应^[13]。具有QS系统的细菌产生群体信号分子,并将其释放到周围环境中。当细胞群体密度增加到一定值时,信号浓度达到阈值,信号分子与调控蛋白结合,激活QS调控基因,从而激活相关显性性状^[19]。近年来,QS在Anammox工艺中的应用越来越受到关注^[20-23]。

一些研究表明,Anammox污泥由基于酰基高丝氨酸内酯(Acyl-homoserine lactone, AHL)的QS系统调节^[24]。AHL是革兰氏阴性菌常见的信号分子,参与生物膜形成和其他特性的调节^[25],目前研究的主要参与Anammox反应的AHL如表1所示。Tang等^[19]通过Anammox培养证实了3种AHL(C6-HSL、C8-HSL、C12-HSL)的释放,发现外源C6-HSL和C8-HSL的引入可以显著提高AnAOB的活性。同时,C6-HSL显著提高了生长速度,外源C12-HSL明显促进了群落中异养细菌的生长。Zhang等^[24]研究了基于AHL的群体感应对高负荷反应器中Anammox颗粒特性的长期影响,发现C8-

表1 参与 Anammox 反应的 AHL 名称及缩写表达

中文名称	英文名称	缩写表达	文献
己酰基-DL-高丝氨酸内酯	N-Hexanoyl-DL-homoserine lactone	C6-HSL	[26]
辛酰基-DL-高丝氨酸内酯	N-octanoyl-DL-homoserine lactone	C8-HSL	[24]
十二烷酰基-DL-高丝氨酸内酯	N-Hexanoyl-DL-homoserine lactone	C12-HSL	[19]
3-氧代己酰基-高丝氨酸内酯	3-oxo-hexanoyl-homoserine lactone	3OC6-HSL	[26]
癸酰基-DL-高丝氨酸内酯	N-decanoyl-DL-homoserine lactone	C10-HSL	[21]

HSL 显著降低了胞外聚合物 (extracellular polymeric substances, EPS) 中松散结合型 EPS 的含量, 是污泥颗粒沉降性和稳定性变化的主要原因, 由于添加了 C8-HSL, 污泥颗粒的沉降性得到了显著改善。Tang 等^[26]在序批式反应器 (sequencing batch reactor, SBR) 中加入合成废水, 与微生物和代谢组学分析相结合, 发现 3OC6-HSL、C6-HSL 和 C8-HSL 控制着影响 AnAOB 活性的电子传递载体, 且 3OC6-HSL 调节溶血磷脂酰胆碱 (20:0) (lysophosphatidylcholine, LysoPC) 代谢, 从而影响 AnAOB 的生长速率和 EPS 的合成。尽管越来越多的证据表明 AnAOB 可能具有 QS 调节系统, 但 QS 系统是否对 AnAOB 存在直接影响仍需要进一步的验证^[19]。

在应用的方面, Sun 等^[27]对进水氨氮浓度为 110 mg/L 和 50 mg/L 的 2 个 Anammox 生物膜反应器进行了研究, 发现进水氨氮浓度为 110 mg/L 的反应器存在更活跃的 QS 过程。Liu 等^[22]探讨了 Anammox 系统对 Zn(II) 暴露的毒性反应机制, 结合 Pearson 网络分析, Zn(II) 暴露会干扰 QS, 减少负责调节细胞外电子转移和微生物代谢的 AHL 分泌, 从而干扰 Anammox 系统的性能。综上所述, QS 的研究对优化 Anammox 工艺具有重要意义。

2 Anammox 工艺影响因素

2.1 温度

AnAOB 自身代谢的酶的活性与 Anammox 工艺的最佳温度相关, AnAOB 生长繁殖的最佳温度决定 Anammox 反应的最佳温度^[28]。研究指出, 废水中 AnAOB 生长的最佳温度为 30~40℃, 由于中国冬季温度较低, AnAOB 在低温条件下生长速度缓慢, 使得目前主流 Anammox 工艺的应用受到极大限制^[29]。

对此, 有大量研究证明通过改进工艺, AnAOB 可以适应温度变化, 在低温下工艺依旧可以维持正常运行。Wang 等^[30]提出在 Anammox 固定化填料反应器中, 通过合理地调控水力停留时间, 可以使得 AnAOB 群落适应季节性温度变化对其丰度带来的影响, 从而使得反应器能够在低温环境下稳定运行。Wu 等^[31]通过构建上流式厌氧污泥床-好氧/厌氧反应器-厌氧氨氧化反应器-SBR 耦合工艺, 能够富集并驯化 AnAOB, 使得 Anammox 工艺在低温下仍然可以稳定运行, 并且处理效果依旧良好。就微观层面而言, AnAOB 也可以通过伴侣蛋白、膜成分改变等广泛的适应性机制来适应低温环境^[32]。因此, 宏观上通过对工艺参数的控制和工艺的组合改良, 微观上对 AnAOB 进行富集驯化和适应性机制的研究, 都可以为 Anammox 工艺克服低温稳定运行提供理想可行的方案。

2.2 pH 和溶解氧

AnAOB 对 pH 变化很敏感, 其生长和繁殖最佳 pH 为 6.7~8.3, 故在工艺操作中对 pH 控制十分重要^[33]。Daverey 等^[34]研究表明, 相比于温度, pH 对 Anammox 工艺的影响更显著, 低温对 Anammox 反应活性的负面影响可以通过维持较高的 pH 来克服。Li 等^[35]研究了不同 pH 条件下 Anammox 颗粒污泥的脱氮性能, 证明了 Anammox 过程在酸性 (pH ≤ 6.5) 或碱性 (pH ≥ 8.5) 下受到抑制, 且对碱性环境更敏感, 碱性环境对 AnAOB 的抑制作用对工艺影响更大。

AnAOB 作为专性厌氧菌, 受到溶解氧 (dissolved oxygen, DO) 的抑制, DO 浓度是 Anammox 过程稳定运行的关键参数^[36]。Cema 等^[37]通过实验证明, 当 DO 浓度较高时, 反应器中亚硝酸盐浓度增加, 导致无机氮去除率降低, 从而抑制 Anammox 过

程。Yan 等^[38]在转录组学层面研究了 AnAOB 对 DO 抑制的反应和随后的恢复机制,发现 DO 浓度过高,会降低参与 AnAOB 中枢代谢的基因转录水平,并将能量转移到鞭毛组装和运输模块,从而抑制 AnAOB 的生存。

近年来,有较多研究探讨了 pH 和 DO 对 Anammox 工艺的联合影响。Yin 等^[39]证明当反应器的 pH 超过 AnAOB 的最佳范围时,AnAOB 代谢活性受到抑制,与此同时 DO 浓度也发生了暂时性的变化,且耗氧菌(硝化菌)被低 pH 抑制,使对 DO 的利用减少。Bagchi 等^[40]通过实验表明,进水碱度和 DO 浓度是 Anammox 工艺中关键的控制参数。针对联合抑制问题,Jiang 等^[41]通过在线 pH-DO 连锁控制策略对亚硝酸盐氧化菌(nitrite oxidizing bacteria, NOB)进行筛选控制,使部分硝化-Anammox 生物滤池实现了稳定的部分硝化。综上所述,合理地控制 pH 和 DO 浓度是稳定 Anammox 工艺的关键因素。

2.3 盐度

在 Anammox 工艺中,AnAOB、氨氧化细菌(ammonia oxidizing bacteria, AOB)和 NOB 之间存在协同与竞争关系,其中,AnAOB 和 AOB 是 Anammox 反应发生的必要功能菌群,而 NOB 则会抑制 Anammox 反应的发生,所以调控菌群之间的关系是实现 Anammox 工艺的关键性因素^[42]。研究表明,在盐度胁迫下,AOB 的活性显著高于 NOB^[43];加入 NaCl 进行盐度驯化后,AnAOB 表现出了耐盐性^[44]。因此,通过控制水体盐度,使其满足适合 AOB 和 AnAOB 生长繁殖的同时,对 NOB 起到抑制效果,是提升工艺稳定性的一种思路。Liu 等^[44]通过添加 NaCl 来创造盐度梯度,发现当盐度为 10 g/L 时,Anammox 系统运行稳定,证明了盐度可以为 Anammox 工艺的稳定运行提供基础。Meng 等^[45]采用 16S rRNA 测序分析结合基于同位素标记相对和绝对定量(isobaric tags for relative and absolute quantification, iTRAQ)的定量蛋白质组学对 AnAOB 在不同盐度下进行分析,揭示了微生物群落和功能蛋白对盐度的响应,证明了 AnAOB 在盐度增加时有很强的蛋白质组可塑性,发现其可能在高盐度条件下进行呼吸和 ATP 合成,同时能量代谢增加,以克服盐度增

加的不利影响。由此可见,Anammox 适应盐度条件对工艺稳定性有着巨大的影响,是一个具有前景的研究领域^[46]。

2.4 碳源

根据物质组成元素可将碳源分为有机碳源和无机碳源。有机碳源有利于反硝化细菌(denitrifying bacteria, DNB)等异养微生物的活性和生长,导致 DNB 的生长速率高于 AnAOB,从而增加异养 DNB 的丰度,限制 AnAOB 的丰度。在有机碳源含量较高的条件下,AnAOB 对亚硝酸盐(电子受体)和生存空间的竞争弱于 DNB,受到 DNB 群落的显著抑制^[47]。而无机碳源对 Anammox 反应活性有着积极的促进作用^[48]。Kimura 等^[49]通过实验证明 Anammox 反应活性随着进水无机碳浓度的降低而降低,并且可通过向进水中添加无机碳来恢复其活性。控制适当的有机碳源浓度、C/N 比值和选择合适的碳源对维持高效的 Anammox 性能至关重要。Li 等^[50]研究表明,化学需氧量(chemical oxygen demand, COD)浓度为 100 mg/L 时,氨氮和总氮(total nitrogen, TN)的去除率较高。Miao 等^[51]通过将 Anammox 系统的进水 C/N 比值从 1.1 逐步提高到 2.5,研究了 C/N 比值对 Anammox 系统的影响,发现随着 C/N 比值的增加,系统 TN 去除率升高,当 C/N 比大于 2.5 时,系统 TN 去除率下降。且当 C/N 比从 1.1 增加到 2.0 时,AnAOB 的活性和丰度都有所增加;C/N 比从 2.0 增加到 2.5 时,AnAOB 的生长速率逐渐降低;增加到 2.5 时,AnAOB 活性停止增加。Sheng 等^[52]通过对比不同碳源对 Anammox 影响,证明 C/N 为 1.2 时,葡萄糖具有较好的脱氮效果;而当 C/N 为 0.8 时,醋酸盐具有较好的脱氮效果。且葡萄糖驱动的反应器比醋酸盐驱动的反应器更稳定,更能抵抗较高的 C/N 比。综上所述,控制有机碳源浓度、进水 C/N 比值,选择合适的碳源,对 Anammox 工艺处理效率的提升至关重要。

2.5 其他因素

除上述影响因素以外,Anammox 工艺还有一些其他影响因素,包括底物浓度、环境污染物(重金属、抗生素等)、污泥形态等。

在底物浓度方面, Ma 等^[53]采用上流式厌氧污

泥床-Anammox反应器,研究了进水TN对于Anammox系统性能的影响,发现当进水TN浓度低于451.1 mg/L时,所构建的反应器性能稳定,去除效率高。Jin等^[54]采用不同底物配比的上流式生物滤池,研究了底物比对Anammox工艺脱氮性能的影响,发现Anammox工艺可耐受游离氨浓度为 17 ± 2 mmol/L,小于此浓度时,游离氨对Anammox生物量没有显著抑制作用。

在环境污染物方面,Gutwiński等^[55]研究了重金属Cr(Ⅲ)、Zn(Ⅱ)和Cd(Ⅱ)对于Anammox工艺性能的长期影响,发现Zn(Ⅱ)对AnAOB存在毒性,是导致系统处理效率下降的最主要原因。但是Fe(Ⅲ)、Ni(Ⅱ)、Cu(Ⅱ)等重金属的存在可能会促进Anammox反应,Chen等^[56]研究了重金属离子的添加对于Anammox活性的影响,发现适当浓度的Fe(Ⅲ)、Ni(Ⅱ)、Cu(Ⅱ)均能促进Anammox活性,其中Fe(Ⅲ)的影响最为显著,且当3种离子浓度分别为6.61 mg/L、1.11 mg/L、1.18 mg/L时,Anammox活性最佳。在抗生素方面,Xu等^[57]研究了赤霉素(gibberellin, GA)对AnAOB活性的增强作用,发现

当GA剂量为0.1~1.5mg/L时,GA对提高AnAOB活性起着重要作用,且在浓度为1 mg/L时,AnAOB活性达到最大值。Phanwilai等^[58]研究表明,添加浓度5~100 mg/L的氯霉素(chloramphenicol, CAP)对AnAOB培养物有短期抑制作用,且6 mg/L CAP浓度的长期效应可显著影响AnAOB活性。Bi等^[59]研究发现Anammox系统对10 mg/L的磺胺嘧啶(sulfadiazine, SDZ)有较强的抗性,而1 mg/L的金霉素(chlortetracycline, CTC)在无需任何特殊处理的情况下对脱氮性能和Anammox活性均产生了不可恢复的抑制作用。

在污泥形态方面,Wu等^[60]在混合生物反应器中比较了AnAOB的3种形态,即悬浮污泥、生物膜和嵌入凝胶珠的悬浮污泥。发现悬浮污泥表现出最高的Anammox能力,其次是生物膜,最后是嵌入凝胶珠的悬浮污泥。

表2为Anammox工艺影响因素及最适条件,可见Anammox影响因素众多且难以控制,故今后对其影响因素的深入研究是十分必要的。

表2 Anammox工艺影响因素及最适条件

影响因素	最适条件	文献
温度	30~40°C	[29]
pH	6.7~8.3	[33]
溶解氧	<1%的空气饱和和氧量水平	[13]
盐度	10 g/L	[44]
碳源	COD=100 mg/L	[50]
	C/N=2.5	[51]
	葡萄糖比乙酸更稳定	[52]
底物浓度	进水TN浓度低于451.1 mg/L	[53]
	游离氨浓度为 17 ± 2 mmol/L	[54]
	锌对Anammox细菌是有毒的	[55]
重金属	适当浓度的 Fe^{3+} 、 Ni^{2+} 、 Cu^{2+} 均能促进Anammox活性 $c(Fe^{3+})=6.61$ mg/L、 $c(Ni^{2+})=1.11$ mg/L、 $c(Cu^{2+})=1.18$ mg/L,活性最佳	[56]
抗生素	添加1.0 mg/LGA时,活性提高	[57]
	长期添加6 mg/L的CAP浓度可显著影响Anammox活性	[58]
	1 mg/L的CTC在无需任何特殊处理的情况下有不可恢复的抑制作用	[59]
污泥形态	Anammox能力:悬浮污泥>生物膜>嵌入凝胶珠的悬浮污泥	[60]

3 耦合工艺及其应用

3.1 短程硝化-厌氧氨氧化工艺

短程硝化-厌氧氨氧化 (partial nitrification Anammox, PNA) 工艺是一种新型且经济高效的生物脱氮工艺,与传统生物脱氮工艺相比,该工艺有无需外加碳源,污泥产量低且节省能源等优点^[61]。研究表明,合理控制 PNA 工艺操作参数即可对高浓度氨氮废水产生良好的去除效果^[62]。PNA 工艺在高浓度氨氮废水中的应用主要分为一段式 PNA 工艺 (one-stage PNA process) 和两段式 PNA 工艺 (two-stage PNA process)。

3.1.1 一段式 PNA 工艺

如图 1 所示,一段式 PNA 工艺是在特定 DO 等条件下 AOB 将部分 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 氧化为 $\text{NH}_2\text{-N}$,之后剩余 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和氧化后的 $\text{NH}_2\text{-N}$ 在 AnAOB 的代谢作用下进行 Anammox 反应,转化为 N_2 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ^[63]。

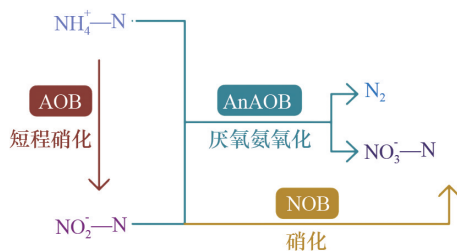


图1 一段式 PNA 工艺反应机理

在目前的工程运用中,一段式 PNA 工艺应用十分广泛,调查表明,截至 2014 年,大约 88% 的全规模 Anammox 工艺采用一段式 PNA 工艺^[5]。该工艺有 TN 去除率高、占地面积小、 N_2O 排放量小等优点^[64]。Yang 等^[65]采用荧光激发-发射矩阵测量与平行因子分析相结合的方法对一段式 PNA 工艺处理高浓度氨氮废水中有机物的过程进行观察,证明了该工艺具有同时去除氨氮和有机物的潜力。

在此工艺中,DO 浓度是一个关键参数,其既是部分硝化的限制因素,也是控制温室气体 N_2O 排放量的重要因素。Sultana 等^[66]研究表明,通过控制 DO 浓度,控制 AOB 氨氧化速率并抑制 NOB 活性对工艺处理效果的提升有着显著影响。Wan 等^[67]通

过构建污泥反应器的数学模型,证明了通过控制 DO 的浓度可以使一段式 PNA 工艺满足低 N_2O 排放的同时达到高氨氮去除。因此,选择合适的方法控制一段式 PNA 工艺中 DO 浓度是目前工艺面临主要问题。

3.1.2 两段式 PNA 工艺

两段式 PNA 工艺是按两阶段运行,先进行短程硝化反应,之后进行 Anammox 反应^[68]。相较于一段式 PNA 工艺,两段式 PNA 工艺可以分别为 AOB 和 AnAOB 创造适宜的条件,消除了 AOB 和 AnAOB 之间的竞争,最大程度地刺激它们的活性^[69]。研究表明,两段式工艺脱氮性能比一段工艺提高 5%,具有脱氮性能更好、启动速度更快的优点^[70]。但是其有一个关键性问题是 N_2O 排放量大,而且两段式 PNA 工艺还有占地面积大、运行成本高的缺点^[64]。因此,两段式 PNA 工艺在高浓度氨氮废水中的工程应用还需进一步研究。

3.2 短程反硝化-厌氧氨氧化工艺

为了解决 PNA 工艺运行中 $\text{NH}_2\text{-N}$ 不可避免地被氧化为 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、亚硝酸盐积累不稳定导致部分硝化长期运行不稳定的问题,研究开发了短程反硝化-厌氧氨氧化 (partial denitrification-Anammox, PDA) 工艺^[71]。如图 2 所示,在部分反硝化过程中, $\text{NH}_2\text{-N}$ 与碳源结合产生关键底物 -N ,然后 $\text{NH}_2\text{-N}$ 作为 AnAOB 的电子受体,氧化原废水中剩余的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 。与传统的硝化-反硝化工艺相比,PDA 工艺降低了碳源需求,污泥产量较低,耗氧量节约 60%^[72]。在 PDA 过程中,主要是自养和异养 DNB 参与反应:自养过程被称为反硝化氨氧化 (denitrifying ammonium oxidation, Deamox),以硫化物为电子供体;异养过程电子供体为废水 COD,故异养 PDA 在污水处理中比自养 PDA 更可行^[73]。

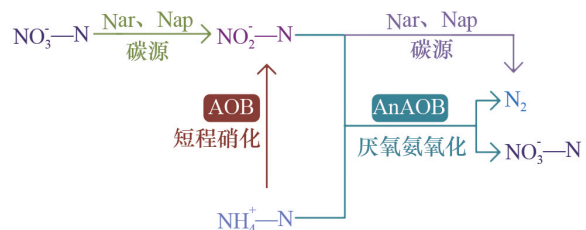


图2 PDA 工艺反应机理

相比于PNA工艺,PDA工艺不稳定且经济效益低,研究还处于初期阶段^[73],因此大量学者通过研究对工艺进行改进,为其能在工程上得到稳定运用提供思路。在工艺稳定性上,Han等^[74]启动一段式PDA工艺处理同时含 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的污水,发现PDA反应器通过短程反硝化细菌与AnAOB的生态位协同作用进行脱氮且PDA工艺具有较强的抗冲击负荷能力。在启动阶段,Jiang等^[75]利用固定化细胞技术富集和保留功能性细菌,将残渣污泥和Anammox污泥分别固定在聚乙烯醇/海藻酸钠凝胶中进行PD培养和AnAOB接种,保护微生物免受低温的影响,实现了PDA的快速启动。在碳源问题上,Du等^[76]对系统中碳源进行研究,证明乙酸盐作为碳源时PDA工艺脱氮效率更高且能够在PD阶段还原硝态氮产生大量的亚硝酸盐。在运行阶段,Wang等^[77]采用PDA工艺处理富硝酸盐的高浓度氨氮废水,在SBR上成功启动并稳定运行,通过实时控制证明氧化还原电位(oxidation-reduction potential, ORP)和pH可以作为控制参数来保持组合工艺的稳定性。综上所述,调节合适的参数使PDA工艺快速启动和维持PDA工艺的稳定运行是其在工程中得以应用的关键因素。

3.3 同时部分硝化-厌氧氨氧化-反硝化工艺

有研究表明,PNA工艺中硝态氮的累积会影响处理效果,导致出水TN浓度较高^[78],因此,一种通过后续反硝化过程将硝态氮去除,使出水进一步达到要求的同时部分硝化-厌氧氨氧化-反硝化(simultaneous partial nitrification Anammox and denitrification, SNAD)工艺应运而生。SNAD工艺作为一种新兴脱氮技术,主要依靠AOB、AnAOB、DNB之间的协同作用^[79],该工艺首先通过AOB将进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 转化为 $\text{NO}_2^-\text{-N}$,之后AnAOB将剩余的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 转化为 N_2 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$,最后DNB再将 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 转化为 N_2 ^[80]。Zhang等^[81]采用SNAD工艺处理高浓度氨氮废水,通过调节缺氧期时间和实时控制pH使其达到稳定运行,通过实验证明了SNAD工艺可通过DNB提高脱氮效率,并缓解有机物对AnAOB的抑制作用,发现充分利用碳源和高效Anammox反应是SNAD工艺的2个重要因素,证明

了SNAD工艺可同步脱氮除碳并可稳定用于处理高浓度氨氮废水。

SNAD工艺突破了传统脱氮工艺曝气要求高、碳源多等缺点^[82],因此其在高浓度氨氮废水处理中的应用得到了广泛关注。Wang等^[83]在低温条件下采用SNAD工艺处理高浓度氨氮废水,分阶段证明了SNAD工艺可以逐步适应低温条件且去除效果较好,可以稳定且高效的处理高浓度氨氮废水。Liu等^[84]针对高浓度氨氮废水中的腐植酸(humic acid, HA)对SNAD工艺的影响进行研究,发现HA最初由于对AnAOB的抑制作用而抑制了氨氮的去除率(从100%下降到90.89%),但在SNAD系统适应后,这种抑制作用被降低,证明了SNAD系统中具有高效的HA生物降解、更快的电子传递效率和更好的微生物群落代谢分工,可以有效降低HA的抑制作用,使SNAD系统更耐HA胁迫。由此可知,SNAD工艺系统稳定性及其对高浓度氨氮废水的处理效果均较好,在工程化应用中有广阔前景。

3.4 新型耦合工艺

为了让Anammox工艺对高浓度氨氮废水的处理效果达到最佳且系统保持高强度的稳定性,大量的学者对此进行研究并提出各种新型耦合工艺。首先,Wu等^[85]采用上流式厌氧污泥床-好氧/厌氧反应器-厌氧氨氧化反应器-SBR对高浓度氨氮废水进行PNA和PDA联合处理,证明了该系统可以高效去除氨氮且能够稳定运行。之后,Jiang等^[86]指出3个以上的反应器在实际应用中难以控制,增加了占地面积和处理成本,故其将PNA和PDA工艺结合到单个序批式生物膜反应器中,采用单个反应器实现了对生物可降解性较低的高浓度氨氮废水的高效深度脱氮。2022年,Qiu等^[87]指出PNA和PDA在单个反应器中结合需要频繁地转换缺氧和好氧环境,会对氮去除率产生不利影响,操作策略不可行或不适合实际应用,故其采用两级SBR建立PNA和PDA耦合工艺,通过污泥发酵液来驱动PD过程,对高浓度氨氮废水进行处理,发现该系统降低了外加碳源的成本且处理效果良好。Wen等^[88]将SNAD工艺和反硝化除磷工艺耦合,为同步脱氮除磷、降低曝气能耗提供了一种新的途径。综合所

述,新型耦合工艺的发现可以为 Anammox 工艺的广泛应用提供理论和技术支持。

4 结论

Anammox 工艺作为一种绿色、节能的脱氮工艺,近年来备受关注。在厌氧或缺氧条件下,它可以不使用外部碳源生成氮气,比传统硝化-反硝化生物脱氮工艺更经济环保。AnAOB 是 Anammox 工艺的主要功能菌,不同 AnAOB 菌属具有不同的生理特征,如氧气耐受性、盐度耐受性、聚合能力等,使其适应不同生态位。群落 QS 调节系统能够通过信号分子调节 AnAOB 活性。因此,调控理化参数和群落 QS 系统可以提升 Anammox 工艺效果。Anammox 工艺的主要影响因素包括温度、pH、DO、盐度、碳源、底物浓度、环境污染物、污泥形态等。这些因素可以通过影响 AnAOB 群落结构及代谢活性来进一步影响 Anammox 去除效率。耦合工艺的运用扩展了 Anammox 的应用场景,一段式 PNA 工艺能够有效处理高浓度氨氮废水,两段式 PNA 工艺通过消除 AOB 和 AnAOB 之间的竞争提高了脱氮性能,PDA 工艺解决了亚硝酸盐积累不稳定的问题,SNAD 工艺解决了硝酸盐积累导致出水 TN 浓度较高问题,为 Anammox 工艺的广泛应用提供理论和技术支持。但该工艺仍面临如下问题:①在处理抗生素、重金属等工业废水时,需要对其兼容性进行深入研究,以及在大规模废水处理工厂适用的可行性;②Anammox 工艺的稳定性低、厌氧氨氧化菌生长速率缓慢、C/N 比高、难以抑制 NOB 活性等问题限制了其应用规模,仍需采取有效策略提高其去除效率。

针对上述问题,未来可从宏观、微观两个角度对 Anammox 工艺进行研究和优化。宏观角度可以通过控制变量、批量实验等方法研究工艺的处理效果和稳定性,并运用新型分析方法(模型预测、激发-发射矩阵荧光光谱等)分析 Anammox 反应体系。微观角度可以运用生物信息学方法(16S rRNA、宏基因、qPCR 等)对 AnAOB 的纯培养、群落分析和群体感应(信号机制)等方面进行分析,探究内部机制并提供改进方法。此外,未来还可以研究

新型 Anammox 技术,如硫酸盐型厌氧氨氧化(sulfate-reducing anaerobic ammonium oxidation, SRAO)使 Anammox 工艺实现同步脱氮除硫,提高其应用潜力。这些研究将为 Anammox 工艺在废水处理工程中的应用提供新的方向和支持,进一步提高其效率和稳定性。

参考文献(References)

- [1] Wu L, Jia C, Huang S, et al. Nitrite oxidation in oxygen-deficient conditions during landfill leachate treatment[J]. *Environmental Research*, 2022, 214: 114090.
- [2] 李巍. 废水同步生物脱氮除磷特性与效能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- [3] 侯金良, 康勇. 城市污水生物脱氮除磷技术的研究进展[J]. *化工进展*, 2007(3): 366-370.
- [4] 刘鹏, 陈银广. 污水脱氮除磷新工艺研究进展[J]. *化工进展*, 2013, 32(10): 2491-2496.
- [5] Lackner S, Gilbert E M, Vlaeminck S E, et al. Full-scale partial nitritation/anammox experiences: An application survey[J]. *Water Research*, 2014, 55: 292-303.
- [6] Ren Z Q, Wang H, Zhang L G, et al. A review of anammox-based nitrogen removal technology: From microbial diversity to engineering applications[J]. *Bioresource Technology*, 2022, 363: 127896.
- [7] Kartal B, de Almeida N M, Maalcke W J, et al. How to make a living from anaerobic ammonium oxidation[J]. *FEMS Microbiology Reviews*, 2013, 37(3): 428-461.
- [8] Strous M, Heijnen J J, Kuenen J G, et al. The sequencing batch reactor as a powerful tool for the study of slowly growing anaerobic ammonium-oxidizing microorganisms[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 1998, 50(5): 589-596.
- [9] 魏彩蓉. 厌氧氨氧化污水处理技术及实际应用[J]. *中国环保产业*, 2017(2): 64-66.
- [10] 夏凡, 任龙飞. 新型厌氧氨氧化工艺在高含氮废水处理中的应用[J]. *水处理技术*, 2020, 46(9): 19-23.
- [11] Pereira A D, Cabezas A, Etchebehere C, et al. Microbial communities in anammox reactors: A review[J]. *Environmental Technology Reviews*, 2017, 6(1): 74-93.
- [12] Lotti T, Kleerebezem R, Abelleira-Pereira J M, et al. Faster through training: The anammox case[J]. *Water Research*, 2015, 81: 261-268.
- [13] Wu P, Chen J, Garlapati V K, et al. Novel insights into Anammox-based processes: A critical review[J]. *Chemistry*

- cal Engineering Journal, 2022, 444: 136534.
- [14] Wen R, Jin Y, Zhang W. Application of the anammox in China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, 17(3): 144: 1090.
- [15] Meng H, Yang Y C, Lin J G, et al. Occurrence of anammox bacteria in a traditional full-scale wastewater treatment plant and successful inoculation for new establishment[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2017, 120: 224–231.
- [16] Zhang L, Okabe S. Ecological niche differentiation among anammox bacteria[J]. Water Research, 2020, 171: 115468.
- [17] Sonthiphand P, Hall M W, Neufeld J D. Biogeography of anaerobic ammonia-oxidizing (anammox) bacteria[J]. Frontiers in Microbiology, 2014, 5: 399.
- [18] Ali M, Shaw D R, Zhang L, et al. Aggregation ability of three phylogenetically distant anammox bacterial species [J]. Water Research, 2018, 143: 10–18.
- [19] Tang X, Liu S, Zhang Z, et al. Identification of the release and effects of AHLs in anammox culture for bacteria communication[J]. Chemical Engineering Journal, 2015, 273: 184–191.
- [20] Choi D, Sim B O, Jung J. Activation of N-acyl-homoserine lactone-mediated quorum sensing system improves long-term preservation of anammox microorganisms by vacuum lyophilization[J]. Chemosphere, 2022, 301: 134743.
- [21] Feng Z, Wu G. Start-up of anammox systems with different feeding patterns: System performance, microbial community and potential microbial interactions[J]. Journal of Water Process Engineering, 2021, 39: 101694.
- [22] Liu Y, Han Y, Guo J, et al. New insights of simultaneous partial nitrification, anammox and denitrification (SNAD) system to Zn(II) exposure: Focus on affecting the regulation of quorum sensing on extracellular electron transfer and microbial metabolism[J]. Bioresource Technology, 2022, 346: 126602.
- [23] Sun Y, Guan Y, Wang H, et al. Autotrophic nitrogen removal in combined nitrification and Anammox systems through intermittent aeration and possible microbial interactions by quorum sensing analysis[J]. Bioresource Technology, 2019, 272: 146–155.
- [24] Zhang J, Li J, Zhao B H, et al. Long-term effects of N-acyl-homoserine lactone-based quorum sensing on the characteristics of ANAMMOX granules in high-loaded reactors[J]. Chemosphere, 2019, 218: 632–642.
- [25] Galloway W R, Hodgkinson J T, Bowden S, et al. Applications of small molecule activators and inhibitors of quorum sensing in Gram-negative bacteria[J]. Trends in Microbiology, 2012, 20(9): 449–458.
- [26] Tang X, Guo Y, Wu S, et al. Metabolomics uncovers the regulatory pathway of acyl-homoserine lactones based quorum sensing in anammox consortia[J]. Environmental Science & Technology, 2018, 52(4): 2206–2216.
- [27] Sun Y, Guan Y, Zeng D, et al. Metagenomics-based interpretation of AHLs-mediated quorum sensing in anammox biofilm reactors for low-strength wastewater treatment[J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 344: 42–52.
- [28] 韩黎明, 苏本生, 刘广青, 等. 厌氧氨氧化工艺的影响因素及应用进展[J]. 工业水处理, 2018, 38(2): 12–17.
- [29] Wang L, Gu W, Liu Y, et al. Challenges, solutions and prospects of mainstream anammox-based process for municipal wastewater treatment[J]. Science of the Total Environment, 2022, 820: 153351.
- [30] Wang X, Yang H. Nitrogen removal performance of anammox immobilized fillers in response to seasonal temperature variations and different operating modes: Substrate utilization and microbial community analysis [J]. Science of the Total Environment, 2022, 829: 154574.
- [31] Wu L, Yan Z, Huang S, et al. Rapid start-up and stable maintenance of partial nitrification-anaerobic ammonium oxidation treatment of landfill leachate at low temperatures[J]. Environmental Research, 2020, 191: 110131.
- [32] Kouba V, Bachmannova C, Podzimek T, et al. Physiology of anammox adaptation to low temperatures and promising biomarkers: A review[J]. Bioresource Technology, 2022, 349: 126847.
- [33] Tomaszewski M, Cema G, Ziembinska-Buczynska A. Influence of temperature and pH on the anammox process: A review and meta-analysis[J]. Chemosphere, 2017, 182: 203–214.
- [34] Daverey A, Chei P C, Dutta K, et al. Statistical analysis to evaluate the effects of temperature and pH on anammox activity[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2015, 102: 89–93.
- [35] Li J, Zhu W, Dong H, et al. Performance and kinetics of anammox granular sludge with pH shock in a sequencing batch reactor[J]. Biodegradation, 2017, 28(4): 245–259.
- [36] Oshiki M, Satoh H, Okabe S. Ecology and physiology of anaerobic ammonium oxidizing bacteria[J]. Environmen-

- tal Microbiology, 2016, 18(9): 2784–2796.
- [37] Cema G, Plaza E, Trela J, et al. Dissolved oxygen as a factor influencing nitrogen removal rates in a one-stage system with partial nitrification and anammox process[J]. Water Science and Technology, 2011, 64(5): 1009–1015.
- [38] Yan Y, Wang W, Wu M, et al. Transcriptomics uncovers the response of anammox bacteria to dissolved oxygen inhibition and the subsequent recovery mechanism[J]. Environmental Science & Technology, 2020, 54(22): 14674–14685.
- [39] Yin Z, Santos C E D d, Vilaplana J G, et al. Importance of the combined effects of dissolved oxygen and pH on optimization of nitrogen removal in anammox-enriched granular sludge[J]. Process Biochemistry, 2016, 51(9): 1274–1282.
- [40] Bagchi S, Biswas R, Nandy T. Alkalinity and dissolved oxygen as controlling parameters for ammonia removal through partial nitrification and anammox in a single-stage bioreactor[J]. Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology, 2010, 37(8): 871–876.
- [41] Jiang H, Liu G-h, Ma Y, et al. A pilot-scale study on start-up and stable operation of mainstream partial nitrification-anammox biofilter process based on online pH-DO linkage control[J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 350: 1035–1042.
- [42] 吴莉娜, 闫志斌, 李进, 等. 厌氧氨氧化在城市生活污水中的应用[J]. 北京工业大学学报, 2020, 46(4): 421–430.
- [43] Li J, Ye W, Wei D, et al. System performance and microbial community succession in a partial nitrification biofilm reactor in response to salinity stress[J]. Bioresource Technology, 2018, 270: 512–518.
- [44] Liu C, Yu D, Wang Y, et al. A novel control strategy for the partial nitrification and anammox process (PN/A) of immobilized particles: Using salinity as a factor[J]. Bioresource Technology, 2020, 302: 122864.
- [45] Meng Y, Yin C, Zhou Z, et al. Increased salinity triggers significant changes in the functional proteins of anammox bacteria within a biofilm community[J]. Chemosphere, 2018, 207: 655–664.
- [46] Dsane V F, An S, Oh T, et al. Saline conditions effect on the performance and stress index of anaerobic ammonium oxidizing (anammox) bacteria[J]. Chemosphere, 2021, 267: 129227.
- [47] Tang C J, Zheng P, Wang C H, et al. Suppression of anaerobic ammonium oxidizers under high organic content in high-rate anammox UASB reactor[J]. Bioresource Technology, 2010, 101(6): 1762–1768.
- [48] Yang J, Zhang L, Fukuzaki Y, et al. High-rate nitrogen removal by the anammox process with a sufficient inorganic carbon source[J]. Bioresource Technology, 2010, 101(24): 9471–9478.
- [49] Kimura Y, Isaka K, Kazama F. Effects of inorganic carbon limitation on anaerobic ammonium oxidation (anammox) activity[J]. Bioresour Technol, 2011, 102(6): 4390–4394.
- [50] Li Y, Huang Z, Ruan W, et al. Anammox performance, granulation, and microbial response under COD disturbance[J]. Journal of Chemical Technology & Biotechnology, 2015, 90(1): 139–148.
- [51] Miao Y, Peng Y, Zhang L, et al. Partial nitrification-anammox (PNA) treating sewage with intermittent aeration mode: Effect of influent C/N ratios[J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 334: 664–672.
- [52] Sheng S, Liu B, Hou X, et al. Effects of different carbon sources and C/N ratios on the simultaneous anammox and denitrification process[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2018, 127: 26–34.
- [53] Ma H, Niu Q, Zhang Y, et al. Substrate inhibition and concentration control in an UASB-anammox process[J]. Bioresource Technology, 2017, 238: 263–272.
- [54] Jin R C, Xing B S, Yu J J, et al. The importance of the substrate ratio in the operation of the anammox process in upflow biofilter[J]. Ecological Engineering, 2013, 53: 130–137.
- [55] Gutwiński P, Cema G, Ziemińska-Buczyńska A, et al. Long-term effect of heavy metals Cr(III), Zn(II), Cd(II), Cu(II), Ni(II), Pb(II) on the anammox process performance[J]. Journal of Water Process Engineering, 2021, 39: 101668.
- [56] Chen H, Yu J J, Jia X Y, et al. Enhancement of anammox performance by Cu(II), Ni(II) and Fe(III) supplementation[J]. Chemosphere, 2014, 117: 610–616.
- [57] Xu X, Liu G H, Fan Q, et al. Effects of gibberellin on the activity of anammox bacteria[J]. Journal of Environmental Management, 2018, 225: 104–111.
- [58] Phanwilai S, Piyavorasakul S, Noophan P L, et al. Inhibition of anaerobic ammonium oxidation (anammox) bacteria by addition of high and low concentrations of chloramphenicol and comparison of attached- and suspended-growth[J]. Chemosphere, 2020, 238: 124570.
- [59] Bi Z, Song G, Sun X. Deciphering antibiotic resistance genes and microbial community of anammox consortia under sulfadiazine and chlortetracycline stress[J]. Ecotox-

- icology and Environmental Safety, 2022, 234: 113343.
- [60] Wu N, Zeng M, Zhu B, et al. Impacts of different morphologies of anammox bacteria on nitrogen removal performance of a hybrid bioreactor: Suspended sludge, biofilm and gel beads[J]. *Chemosphere*, 2018, 208: 460–468.
- [61] 张良茂, 周童, 聂剑文, 等. 渗滤液短程硝化-厌氧氨氧化工艺深度脱氮及机理研究[J]. *环境卫生工程*, 2021, 29(1): 77–82.
- [62] Hassan G K, El-Gohary F A. Evaluation of partial nitrification/anammox process for reduction of pollutants from sanitary landfill leachate[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2021, 232(4): 134.
- [63] 尼马泽郎, 穆永杰, 薛晓飞, 等. 一段式短程硝化-厌氧氨氧化耦合缓释碳源滤柱深度去除总氮[J]. *环境工程学报*, 2021, 15(7): 2468–2479.
- [64] Guo Y, Chen Y, Webeck E, et al. Towards more efficient nitrogen removal and phosphorus recovery from digestion effluent: Latest developments in the anammox-based process from the application perspective[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 299: 122560.
- [65] Yang Y, Shao C, Guo Y, et al. Removal of nitrogen components, bulk organics, and fluorophores during one-stage partial nitrification-Anammox treatment of landfill leachate[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021, 9(5): 106181.
- [66] Sultana R, Plaza E, Wilén B-M. Influence of dissolved oxygen concentration on one stage deammonification operated at different temperatures[C]//Proceedings of global challenges: sustainable wastewater treatment and resource recovery, Kathmandu: Proceedings from IWA specialist conference, 2014: 26–30.
- [67] Wan X, Baeten J E, Volcke E I P. Effect of operating conditions on N₂O emissions from one-stage partial nitrification-anammox reactors[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2019, 143: 24–33.
- [68] 李博洋, 王少坡, 李权, 等. 一段式短程硝化-厌氧氨氧化生物脱氮技术与工艺[J]. *环境工程*, 2017, 35(4): 15–19.
- [69] Zhang D, Wang G, Dai X. Operation of pilot-scale nitrification-anammox reactors for the treatment of reject-water produced from the anaerobic digestion of thermal hydrolysis-treated sludge[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 314: 123717.
- [70] Wu P, Zhang X, Wang X, et al. Characterization of the start-up of single and two-stage anammox processes with real low-strength wastewater treatment[J]. *Chemosphere*, 2020, 245: 125572.
- [71] Chen H, Tu Z, Wu S, et al. Recent advances in partial denitrification-anaerobic ammonium oxidation process for mainstream municipal wastewater treatment[J]. *Chemosphere*, 2021, 278: 130436.
- [72] Li Y, Zhang W, Dai Y, et al. Effective partial denitrification of biological effluent of landfill leachate for Anammox process: Start-up, influencing factors and stable operation[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 807: 150975.
- [73] Zhang M, Wang S, Ji B, et al. Towards mainstream deammonification of municipal wastewater: Partial nitrification-anammox versus partial denitrification-anammox[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 692: 393–401.
- [74] Han Y, Qian J, Guo J, et al. Feasibility of partial denitrification and anammox for removing nitrate and ammonia simultaneously *in situ* through synergetic interactions[J]. *Bioresource Technology*, 2021, 320: 124390.
- [75] Jiang H, Wang Z, Ren S, et al. Enrichment and retention of key functional bacteria of partial denitrification-anammox (PD/A) process via cell immobilization: A novel strategy for fast PD/A application[J]. *Bioresource Technology*, 2021, 326: 124744.
- [76] Du R, Cao S, Li B, et al. Performance and microbial community analysis of a novel DEAMOX based on partial-denitrification and anammox treating ammonia and nitrate wastewaters[J]. *Water Research*, 2017, 108: 46–56.
- [77] Wang Z, Zhang L, Zhang F, et al. Enhanced nitrogen removal from nitrate-rich mature leachate via partial denitrification (PD)-anammox under real-time control[J]. *Bioresource Technology*, 2019, 289: 121615.
- [78] Ma Y, Sundar S, Park H, et al. The effect of inorganic carbon on microbial interactions in a biofilm nitrification-anammox process[J]. *Water Research*, 2015, 70: 246–254.
- [79] Xu Z Y, Zeng G M, Yang Z H, et al. Biological treatment of landfill leachate with the integration of partial nitrification, anaerobic ammonium oxidation and heterotrophic denitrification[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(1): 79–86.
- [80] Singh V, Ormeci B, Mishra S, et al. Simultaneous partial nitrification, anammox and denitrification (SNAD)-A review of critical operating parameters and reactor configurations[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 433: 133677.
- [81] Zhang F, Peng Y, Miao L, et al. A novel simultaneous

- partial nitrification Anammox and denitrification (SNAD) with intermittent aeration for cost-effective nitrogen removal from mature landfill leachate[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 313: 619–628.
- [82] Chen D, Gu X, Zhu W, et al. Denitrification- and anammox-dominant simultaneous nitrification, anammox and denitrification (SNAD) process in subsurface flow constructed wetlands[J]. *Bioresource Technology*, 2019, 271: 298–305.
- [83] Wang Y, Gong B, Lin Z, et al. Robustness and microbial consortia succession of simultaneous partial nitrification, anammox and denitrification (SNAD) process for mature landfill leachate treatment under low temperature[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2018, 132: 112–121.
- [84] Liu Y, Han Y, Zhang J, et al. Deciphering effects of humic acid in landfill leachate on the simultaneous nitrification, anammox and denitrification (SNAD) system from performance, electron transfer and microbial community [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 809: 151178.
- [85] Wu L, Li Z, Huang S, et al. Low energy treatment of landfill leachate using simultaneous partial nitrification and partial denitrification with anaerobic ammonia oxidation[J]. *Environment International*, 2019, 127: 452–461.
- [86] Jiang H, Yang P, Wang Z, et al. Efficient and advanced nitrogen removal from mature landfill leachate via combining nitrification and denitrification with anammox in a single sequencing batch biofilm reactor[J]. *Bioresource Technology*, 2021, 333: 125138.
- [87] Qiu J, Li X, Peng Y, et al. Advanced nitrogen removal from landfill leachate via a two-stage combined process of partial nitrification-Anammox (PNA) and partial denitrification-anammox (PDA)[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 810: 151186.
- [88] Wen X, Zhou J, Li Y, et al. A novel process combining simultaneous partial nitrification, anammox and denitrification (SNAD) with denitrifying phosphorus removal (DPR) to treat sewage[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 222: 309–316.

Research progress on influencing factors and coupling process of anaerobic ammonia oxidation technology

LUO Anteng^{1,2}, WU Lina^{1,2*}, HE Shuhang³, JIA Chunfang^{1,2}, ZHANG Yulin^{1,2}, YIN Jian^{1,2}

1. School of Environment and Energy Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China
2. Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment (Ministry of Education), Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China
3. School of Environment and Energy, Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen 518055, China

Abstract In recent years, anaerobic ammonia oxidation (Anammox), as an economical and eco-friendly nitrogen removal technology for wastewater, has been widely concerned. However, the application of this technology in existing wastewater treatment still faces difficulties, primarily due to the sensitivity of Anammox bacteria (AnAOB) to environmental factors and the insufficient nitrite supply in the reaction system. This article delves into the operating conditions, treatment performance, and stability of Anammox process from both macro (laboratory research, engineering applications, etc.) and micro (AnAOB community characteristics, AnAOB quorum sensing, etc.) perspectives. The analysis focuses on the features, influencing factors, coupling processes, and application of Anammox technology based on domestic and foreign research. Additionally, the article identifies the progress and obstacles of Anammox technology in practical applications. Finally, the article summarizes and proposes research directions and regulation strategies that merit further study to improve and create new coupling processes of Anammox technology for wastewater treatment.

Keywords Anammox; AnAOB; community characteristics; quorum sensing; influencing factors; coupling process



(责任编辑 王丽娜)