

聚磷菌和聚糖菌的竞争影响因素研究进展

郭春艳¹ 王淑莹¹ 李夕耀¹ 袁志国² 彭永臻^{1*}

(1. 北京工业大学环境与能源工程学院 北京 100124)

(2. 澳大利亚昆士兰大学 高级废水管理中心)

摘要: 目前, 强化生物除磷工艺(EBPR)以其经济有效而得到广泛的应用, 该工艺关键在于聚磷菌的富集。然而已经发现, 有一类细菌—聚糖菌(GAOs)能够和聚磷菌(PAOs)竞争, 导致除磷效果恶化。关于 PAOs-GAOs 的竞争, 研究已经很多, 但是其结论有趋同也有矛盾, 有必要对此进行分析讨论。根据近年来国内外的相关报道, 阐述了聚磷菌与聚糖菌的竞争影响因素, 其中碳磷比、碳源种类、温度、pH 值是关键因素, 而污泥龄、溶解氧以及水力停留时间等因素对于 PAOs 和 GAOs 的竞争也起一定的作用。此外, 在 EBPR 系统中, 缺氧条件下, 存在反硝化聚磷菌(DPB)和反硝化聚糖菌(DGAO)也会对聚磷菌富集和系统除磷产生影响。最后对 EBPR 系统未来的发展方向进行了展望。

关键词: 强化生物除磷, 聚磷菌, 聚糖菌, 竞争, 反硝化聚磷菌, 反硝化聚糖菌

Review on the Factors Affecting the Enrichment Culture of PAOs and GAOs

GUO Chun-Yan¹ WANG Shu-Ying¹ LI Xi-Yao¹ YUAN Zhi-Guo² PENG Yong-Zhen^{1*}

(1. Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

(2. Advanced Wastewater Management Center (AWMC), University of Queensland, Australia)

Abstract: At present, the enhanced biological phosphorus removal (EBPR) process has been widely used for its cost-effective, but a type of bacteria-glycogen accumulating organisms(GAOs) which can compete with phosphate accumulating organisms (PAOs) and lead to the deterioration of EBPR. There have been many studies about PAOs-GAOs, the conclusions have both convergences and contradictions however, so it is necessary to discuss and analysis. According to the relevant reports at home and abroad in recent years, the factors affecting the enrichment culture of PAOs and GAOs are expounded, including P/C ratio, carbon type, temperature, pH value which are more important in the system. In addition, sludge age, dissolved oxygen, etc. also played a role for the competition of PAOs and GAOs. In EBPR system, denitrifying phosphate accumulating organisms and denitrifying glycogen accumulating organisms which also have impact on the enrichment of PAOs and dephosphorization were observed in anoxic condition. Finally, the future direction of the EBPR system for the future is viewed.

Keywords: EBPR, PAOs, GAOs, Competition, DPB, DGAO

目前,随着水体富营养化的加剧,世界各国对控制水体中的磷含量都愈加重视。在避免磷对水体的污染的生物处理技术方面则主要是强化生物除磷工艺(EBPR)。EBPR 工艺不需要投加化学药物,经济有效,因而在目前被广泛接受和应用。它通过厌氧段和好氧段交替运行,依靠好氧段末的排泥达到除磷的目的。在此过程中,对除磷起到重大贡献的一类微生物是聚磷菌(PAOs)。它通过厌氧放磷,然后好氧过度吸磷而达到除磷的效果。然而近年很多研究都报道即使在有利于 PAOs 生长的条件下运行,也出现 EBPR 系统恶化的现象,对系统中微生物进行观察发现,有一类微生物—GAOs,能够与 PAOs 竞争碳源和营养,而没有除磷能力,从而使除磷效果下降,因此,探讨 PAOs 和 GAOs 的竞争因素,抑制 GAOs 的生长并使 PAOs 取得竞争优势,具有十分重大的意义,这也因此成为许多研究的焦点。

1 PAOs 和 GAOs 的代谢机理

近几十年来国内外许多专家学者都对 PAOs 和 GAOs 的代谢模型进行大量研究,认为 PAO 与 GAO 代谢机理基本类似,主要区别在于能量来源的不同和是否释放/吸收磷。这两种微生物代谢机理如下。

1.1 PAOs 的代谢机理

如图 1 所示,在厌氧条件下,PAOs 吸收挥发性脂肪酸(VFAs)作为碳源,并以碳的聚合物—聚 β 羟基烷酸(PHA)的形式贮存于胞内。这个生物转化过程所需的能量主要靠聚磷的分解和磷的释放产生。所需的还原力来自胞内贮存的糖原的酵解。在好氧条件下,由于存在最终电子受体 O_2 ,同时环境中缺乏碳源,聚磷菌利用厌氧贮存的 PHA 作为能源和碳源,通过氧化磷酸化产生 ATP。产生的能量用于聚磷菌好氧生长、聚磷合成、糖原合成以及聚磷菌自身维持^[1]。好氧吸磷量大于厌氧释磷量,通过剩余污泥排放可实现高效除磷。

1.2 GAOs 的代谢机理

GAOs 与 PAOs 的机理大部分类似,见图 2,其显著性差异是:吸收基质时的能量来源不同。在 GAOs 的代谢机理中:厌氧阶段 GAOs 分解体内的糖原以提供能量和还原力,用于吸收有机基质并在胞内合成 PHA,但并不释放磷;好氧阶段,分解胞内厌氧阶段所贮存的 PHA 以用于糖原的合成、微生物的生长以及细胞维持,但不聚集磷,其细胞体内

的糖原即可提供能源(ATP)又可维持体内氧化还原代谢的平衡(提供还原力)^[2]。

由于 GAOs 消耗 VFAs 而没有除磷的作用,所以必须有效控制 GAOs,建立不利于 GAOs 的生长环境,同时促进 PAOs 的生长和对碳源的利用,使 PAOs 在与 GAOs 的竞争中取得优势地位,从而提高 EBPR 系统运行的稳定性和磷的处理效率,降低运行成本。

2 影响 PAOs 和 GAOs 的竞争因素

众所周知,影响 PAOs-GAOs 竞争的一个因素是进水中有机碳和磷的比率,或者所谓的 COD/P 比。许多研究都发现废水进水中高 COD/P 比有利于 GAOs 生长而不利 PAOs^[1,3,4]。因此,低 COD/P 比有利于 PAOs 生长。这一点在此不再赘述。在 EBPR 系统中,其它因素也可能影响微生物的竞争,比如碳源, pH 值和温度等。

2.1 碳源

近来有很多研究表明,碳源的类型对 PAOs-GAOs 竞争有很大影响。在 EBPR 系统中,最普遍的 VFA 是乙酸,在以前对 EBPR 系统的研究中,大多数使用乙酸作为单一的碳源。在有些情形下,以乙酸作为单一碳源时,得到大量的 *Accumulibacter*,少量或者没有 GAOs,并且除磷效果很好^[5]。尽管有很多研究结果表明在 EBPR 系统中乙酸作为碳源会产生高效而稳定的除磷效果,但是也有报道认为由于 GAOs 与 PAOs 竞争乙酸而导致除磷的恶化。在有些情况下,在相似的运行条件下,以乙酸为碳源,却观测到大量的 GAOs^[6]。因此对于 EBPR 的性能,近年来人们开始更多的关注丙酸以及其它底物的影响。

Oehmen^[7]等人比较了乙酸和丙酸对富集培养 PAOs 的影响。他们发现以乙酸为碳源时, SBR 很少得到较好的除磷效果,且 FISH 检测发现,污泥中存在大量的 *Competibacter*(一种已知的 GAO)。然而,当以丙酸为碳源时,得到稳定的除磷效果,只有个别时候的波动。FISH 检测发现,污泥中含有大量的 *Accumulibacter*(一种已知的 PAO)而没有 *Competibacter*。故他认为把丙酸作为进水碳源可能对 PAOs 比对 GAOs 有利。尽管如此, Oehmen 等人^[8]在另外的实验中发现,另一类 *Alphaproteobacteria*-GAO,能够高效的大量吸收丙酸,并且能够和 PAOs

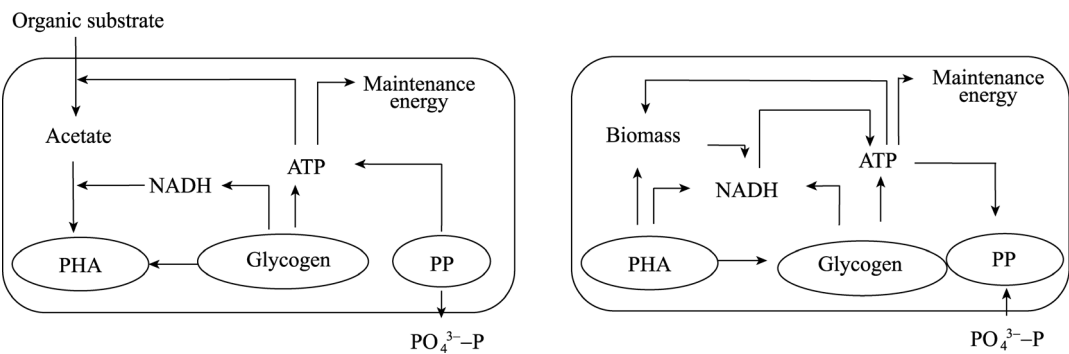


图 1 PAOs 厌氧/好氧代谢模式
Fig. 1 Anaerobic/aerobic metabolisms of acetate by PAOs

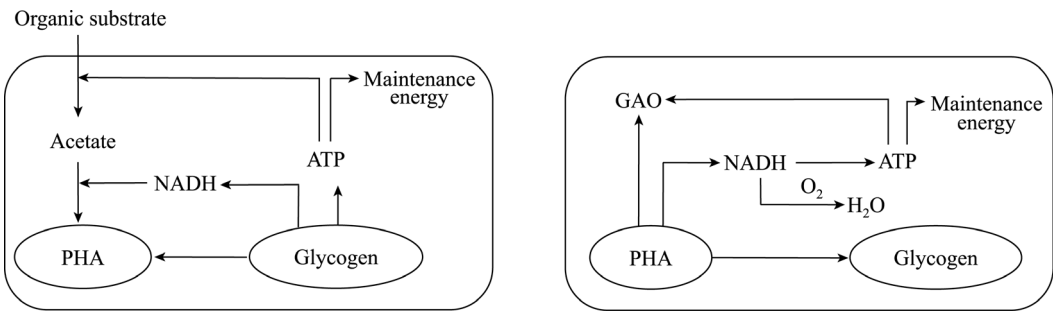


图 2 GAOs 的厌氧/好氧代谢模式
Fig. 2 Anaerobic/aerobic metabolisms of acetate by GAOs

竞争丙酸，导致除磷效果的恶化，*Alphaproteobacteria* 也能吸收乙酸，但是相对于乙酸的吸收，它吸收丙酸的效果更好。就是说，*Alphaproteobacteria*-GAO 比 *Competibacter* 更难去除。针对乙酸为碳源引起 *Accumulibacter* 和 *Competibacter* 的竞争，丙酸为碳源引起 *Accumulibacter* 和 *Alphaproteobacteria* 的竞争的问题，该学者^[9]采用在进水中周期性交互使用乙酸和丙酸，使得 *Competibacter* 和 *Alphaproteobacteria* 几乎被完全从生物群中排除，并且重复得到了 *Accumulibacter* 的富集培养，从而达到稳定高效的除磷效果。由此可见，有规律的交通

替使用碳源是实验室研究中排除 GAOs 的有效的方法。总结 Oehmen 的结论如下表 1(采用 FISH 法检测)。

其它碳源，包括 VFAs(比如丁酸、乳酸、戊酸和异戊酸)和非 VFAs(葡萄糖)也能够被 PAOs 和或 GAOs 吸收，但是大多数研究认为它们在被吸收之前都已经转化为乙酸或者丙酸，所以归根结底，起作用的碳源还是乙酸与丙酸的问题，此外，其它 VFAs 在实际污水中并不常见，而以葡萄糖为碳源，又常常出现除磷系统恶化的现象，所以今后研究的重点还应该在乙酸与丙酸上。

表 1 在不同碳源下富集的微生物比较							
Table 1 The biomass comparison under different carbon sources							
References	<i>Accumulibacter</i> (PAO)(%)	<i>Competibacter</i> (GAO)(%)	<i>Alphaproteobacteria</i> (GAO)(%)	Carbon source	Temperature (°C)	pH	
						Anaerobic	Aerobic
[7]	3~64	33~70	尚未报道	乙酸	20~24	7.0±0.1	
[7]	51~69	< 1	可检测出	丙酸	20~24	7.0±0.1	
[8]	8	< 1	可检测出	丙酸	20~24	7.0±0.1	
[8]	33	< 1	可检测出	丙酸	20~24	7~7.5	7.5~8.0
[8]	14	54	尚未报道	乙酸	20~24	7.0±0.1	
[8]	15	23	尚未报道	乙酸	20~24	7.8±0.1	8.0±0.1
[9]	91.9±1.3	未检测出	未检测出	乙/丙	20~24	7.0~8.0	

2.2 pH

很多研究表明在富集 PAO 的污泥中, 较高的 pH 值导致较高的厌氧释磷, 除磷效果相对提高(见表 2)。Smolders^[10]发现当 pH 值从 5.5 上升到 8.5 时, 厌氧释磷和乙酸吸收的比率呈现从 0.25P-mol/C-mol~0.75 P-mol/C-mol 的线性变化。Filipe^[11]在 pH6.5, 7.0, 7.5 下进行实验, 发现在低 pH(6.5)下, 吸磷速率、PHA 利用速率和细胞生长速率分别是 pH 为 7.0 时的 42%, 70%, 和 53%。与此对应, GAOs 的化学计量比与 pH 关系不大。这个结果说明 EBPR 系统的温度性大大依赖于好氧段的 pH。如果 pH 低, PAOs 的生长将受抑制, GAOs 的生长影响不大, 导致系统中 GAOs 占优势使除磷效果恶化。Filipe^[12]在另一次研究中发现, 当厌氧 pH 点从 6.8 增加到 7.25 时, 除磷水平提高了。尽管如此, 结果显示厌氧 pH 值以 7.25 为临界点, 当 pH 值低于 7.25 时, GAOs 厌氧吸收 VFA 的速度大于 PAOs, 当 pH 值高于 7.25 时, PAOs 吸收乙酸的速度高于 GAOs, 还发现此时两种细菌的生长速率相似, 吸收乙酸产生的 PHA 量也相似。这表明较高的 pH 不仅导致对乙酸吸收的较高的能量需求, 还影响了 GAOs 吸收乙酸的能力。

Chen Y^[13]以乙酸和丙酸的混合液作为碳源, 研究了不同 pH 下(6.6~8.6)PAOs 在厌氧和好氧段的转变。观察到酸性 pH 对于 MLSS 浓度和微生物的影响大于碱性 pH 对其的影响, pH 为 7.6 时得到最高的细胞增长。实验的各个 pH 下, 丙酸的吸收速率都快于乙酸吸收速率, 且二者都受 pH 的影响。厌氧段, 随着 pH 从 6.6 升到 8.6, PHA 和糖原的转化线性降低。进一步研究显示, pH 在 6.6 和 8.6, 厌氧释磷和好氧吸磷都很低, 没有净磷的去除。pH 控制在 7.1 和 7.6 时, 除磷效率分别达到 97.0%和 96.43%, 高于不控制 pH 时的 87.46%。该实验表明 pH 过高或过低都不利于除磷, 控制 pH 在一定范围是优化除磷效果的有效途径。

有研究认为除磷效果提高是由于微生物竞争从 GAOs 到 PAOs 的转变。Oehmen^[9]曾对实验室的两个反应器进行研究, 分别以乙酸和丙酸作为碳源, 当 pH 维持在 7 时, 进乙酸的反应器显示 *Competibacter* 占主导, 进丙酸的反应器 *Alphaproteobacteria* 占主导。当 pH 值增加到 8 时, 两个系统中 PAOs/GAOs 的比例都大大增加了, 同时两个反应器的除磷率都提高了。下图 3 是以乙酸为碳源的 SBR 反应器不同 pH 下的除磷效果。

此外, Zhang^[14]发现伴随着 pH 从 7.0 降到 6.5, 除磷效果恶化, 除磷率从 99.9%降到 14%, 污泥中磷含量从 8.8%降到 1.9%。同时, 通过 16S rDNA 分析发现, pH 为 6.5 时, 污泥中的微生物比 pH 为 7.0 时减少了 64.8%, 并且微生物群落结构发生了转变, 减少的微生物包括 *β-Proteobacteria*, *Actinobacteria*, *Bacteroidetes/Chlorobi* 种群, 光合细菌和 *α-Proteobacteria* 属的 *Deftluvicoccus*。从以上研究中可以发现, pH 对 PAO-GAO 的竞争有很大的影响, pH 增加能够选择 PAOs 淘汰 GAOs 而使除磷效果提高。

表 2 中各个研究的最佳 pH 值并不全都相同, 这可能是因为其它运行条件或控制参数的不同造成的, 但是总的趋势是相似的, 即随着 pH 的增加, 除磷效果提高, 最佳 pH 在 7.0~8.0 之间, 而当 pH 高于 8.0 时, 大部分研究表明除磷效果下降, 即存在一个 pH 的上限, 此时这个控制策略不再起作用。因此, 对于实际污水处理厂的有效运行, 优化 pH 值这个控制策略将起到重大作用。

2.3 温度

温度也是影响 PAO-GAO 竞争的重要因素之一。在 EBPR 系统中, 如同大多数生物反应一样, 低温导致生化反应速度下降(比如释磷/吸磷, 乙酸吸收, PHA 氧化, 生长)。尽管如此, 在非常低的温度, 甚至 5°C 下, EBPR 成功运行^[15], 但是在低温下, 需要较高的污泥龄。另外, Panswad^[16]研究发现, 当温度从 20°C 升高到 30°C, 再升高到 35.5°C 时, 主导细菌从 PAO(44%~70%)变化到 GAO(64%~75%), 再到普通的异养菌(90%)。此外, 随着温度升高, 释磷率增大了, 然而吸磷率下降了, 如图 4 所示。这些结果表明 PAOs 是嗜低温菌, 随着温度升高, 用于维持细胞生存的能量增加了, 导致用于细胞繁殖的能量减少, 从而引起 PAOs 数量的减少, 最后被淘汰, 系统恶化。

Carlos MLV 等人^[17]对两个 A/O-SBR 系统在 10°C~40°C 之间进行短期试验, 研究发现温度高于 20°C 时, GAO 在吸收基质方面比 PAO 占有明显的优势。低于 20°C, 两种菌的最大乙酸吸收速率相似(具体见表 2)。然而, 当温度低于 30°C 时, PAO 的维持能量需求低于 GAO, 使得 PAO 在竞争中取得优势。这些发现可以帮助解释为什么低温天气下污水处理厂除磷效果稳定, 而高温气候或者处理高温废水时,

表 2 pH 对除磷效果的影响 Table 2 Effects of pH on the EBPR								
References	pH						Carbon source	Temperature (℃)
	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5		
[8]		很差	差	较好	最好	较差	乙或丙	20
[10]	差				好		乙酸	20
[13]		差	最好	好		差	乙加丙	22
[14]		差	好				乙酸	20

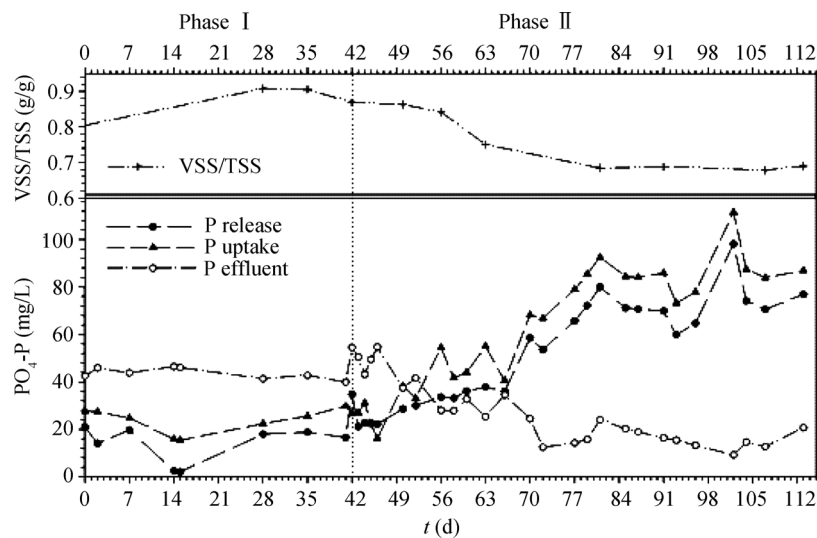


图 3 pH 从 7(I 段)到 8(II 段)以乙酸为碳源的 SBR 除磷效果

Fig. 3 Phosphorus removal performance for SBR (acetate-fed) during the transition from phase I (pH=7) to phase II (pH=8)

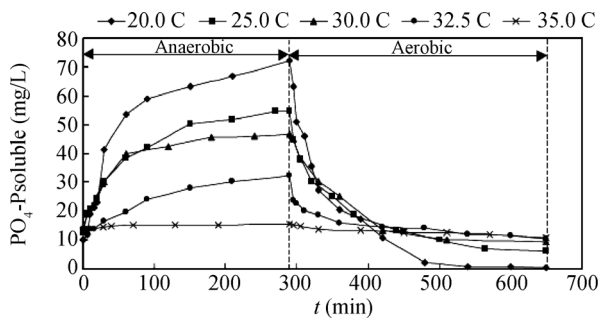


图 4 不同温度下磷的变化情况

Fig. 4 Effects of temperature on the phosphorus

除磷效果恶化。Whang 和 Park^[18]通过两组 SBR 反应器考察了温度对 PAOs 与 GAOs 的影响,发现当温度达到 30℃ 时,系统的除磷效率急剧下降(此时进

水磷浓度为 10 mg/L,出水磷浓度为 8.8 mg/L),同时污泥含磷量小于 1%,但是厌氧阶段仍然出现乙酸的大量吸收和 PHA 的合成,经镜检发现微生物大多成四分体排列(TFOs),表明该系统中富集了 GAOs。该学者进一步比较了在 10℃、20℃ 和 30℃ 时 GAOs 与 PAOs 对乙酸的吸收速率结果,见表 3。同时,根据实验结果认为在 20℃、污泥泥龄 10 d 时,在 A/O-SBR 系统中 PAOs 占优势;而在 30℃、污泥龄 10 d 时,则是 GAOs 占优势,原因可能是高温下,GAO 的厌氧乙酸吸收占动力学优势。

Erdal 等人^[19]利用 5 个实验室规模的 UCT 工艺来研究短期温度改变对 PAOs 与 GAOs 竞争的影响,发现随着温度从 20℃ 逐渐降到 5℃,系统的除磷效

表 3 不同温度下 PAOs 与 GAOs 的厌氧乙酸吸收速率 Table 3 Anaerobic acetate uptake rate of PAOs and GAOs under different temperatures												
References	PAOs					GAOs					Unit	pH
	10	20	30	35	40	10	20	30	35	40		
[17]	0.07	0.17	0.17	0.17	0	0.07	0.20	0.27	0.30	0	C-mol/C-mol/h	7.0
[19]	0.75	1.49	1.34			0.42	0.72	1.08			mgC/L/minute	7.0

率下降,在温度达到 5℃ 时,一开始几乎没有观测到净磷的去除,另外,乙酸吸收也不完全。PHA 在厌氧区的产生量在 10℃ 和 5℃ 分别下降了 49.8% 和 62%(与 20℃ 比较),糖原在厌氧区的降解和好氧区的合成随温度下降而急剧减少。而当系统在 5℃ 稳定之后,系统磷的去除量可达 74 mg/L,比 20℃ 时要多出 50 mg/L,同时污泥中的磷含量占 VSS 含量的 37%,PHA 的生成量要比 20℃ 时高出 23.9%;污泥中 PHV 的含量则由 20℃ 时的 18% 降低到 5℃ 时的 4%。通过以上实验结果,Erdal 等人得出以下结论:1) 温度影响 EBPR 的反应速率,在一定的 SRT,稳定状态下,低温导致活性污泥微生物群落中更加富含 PAOs,系统除磷效果升高。2) 在 20℃ 时,污泥中较高的糖原(13% VSS)和 PHV 的含量的现象表明了有 GAOs 存在的可能性(因为在 5℃ 时,污泥中的糖原和 PHV 的含量均较低)。但是受 COD 的限制,较高的温度不一定使 GAOs 在系统中占优势。3) 低温(5℃)下,经过一段时间后,PAO 能够通过改变代谢途径在系统中占主导,证实 PAOs 是耐寒性微生物,温度低于 10℃ 时,使它相对于其它非聚磷微生物具有竞争优势。

以上研究结果,尽管数据方面存在差异(可能由各研究的试验条件和水质有差别引起),但是有一个共同的趋势,就是随温度的升高,GAOs 将取代 PAOs 而在系统中占据优势,成为 PAOs 更强大的竞争者。这意味着在 EBPR 中,在温暖的气候和夏天,或者处理高温工业废水时,排出 GAOs 对 PAOs 的竞争可能更加困难。

2.4 污泥龄(SRT)

一般认为低污泥龄有利于除磷。Brdjanovic 等人^[20]发现,降低系统的泥龄可以提高除磷效果。但泥龄过短可能会使出水的 BOD₅ 和 COD 达不到要求。Whang 和 Park^[21]研究认为,污泥龄是影响 PAO-GAO 竞争的重要因素。在 30℃,污泥龄为 10 d,由于 GAO 的厌氧乙酸吸收速率高于 PAO,而在污泥中占主导。当 SRT 降为 5 d,GAO 和 PAO 共存于 SBR 反应器中,产生不稳定的除磷现象。当 SRT 由 5 d 减到 3 d 后,EBPR 的效能大大提高了,且除磷效果很稳定。另外,污泥龄的改变并没有对 GAO 的比乙酸吸收速率产生多大影响,PAO 的比乙酸吸收速率却随着 SRT 的降低而提高了。有资料表明,以除

磷为目的的生物处理工艺污泥龄一般控制在 3.5 d~7 d。如果 SRT 过高,剩余污泥排放量较小,污泥“夹带”排出系统的磷的总量不多,系统的除磷效率就会大大降低,同时,聚磷菌多为短泥龄微生物,SRT 较高时,污泥的活性和沉降性能均会下降;但 SRT 也不能过低,这会导致混合液污泥大量流失,对降解 BOD₅ 和除磷反而不利,所以降低系统的 SRT,必须以保证 BOD₅ 的有效去除为前提。SRT 的一般范围不是绝对的,应根据进水水质、BOD₅(或 SBOD₅)/TP 的值、系统的 MLSS 值的波动做相应的调整,总的应着眼于总除磷量。

Filipe 等人^[22]通过对 GAOs 和 PAOs 在厌氧条件下的热力学参数的理论研究发现,若将厌氧区的固体停留时间超过吸收挥发性脂肪酸所必须的时间,将迫使 GAOs 和 PAOs 分解胞内聚合物以满足细胞的维持生长,由于 PAOs 是通过聚磷的水解以提供 ATP 用于维持细胞的生长,而 GAOs 则是通过贮存糖原的分解以提供 ATP,在好氧阶段恢复聚磷浓度比恢复聚糖相对容易一些,故而通过延长厌氧区的固体停留时间,将给 PAOs 一定的竞争优势。尽管如此,需要进行进一步的调查以确认这些结果。

2.5 其它因素

2.5.1 溶解氧(DO): 在许多的实际污水处理中,调节 DO 浓度,导致除磷效果的变化。DO 浓度非常高时,常常出现差的除磷效果和大量的 TFOs。Lemaire 等人^[23]观察到 SBR 在低溶解氧(大约 0.5 mg/L)运行条件下, *Accumulibacter* 增加, *Competibacter* 下降,除磷效果良好。陈滢^[24]等人研究发现在平均溶解氧浓度为 0.35 mg/L,最大溶解氧浓度为 0.55 mg/L 时,在连续低氧曝气的 SBR 系统内,聚磷菌可得到富集,出现了快速释磷和过量吸磷现象,如图 5 所示。并且低氧除磷系统在低负荷条件下运行时污泥沉降性

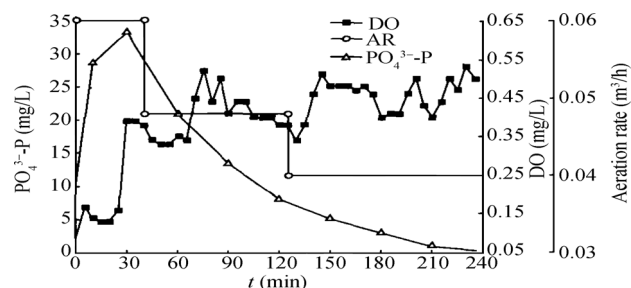


图 5 溶解氧、曝气量、PO₄³⁻-P 浓度的变化
Fig. 5 The changes of DO, aeration rate and PO₄³⁻-P

能良好。由此可见, 在低溶解氧下, 不仅节省了曝气成本, 还可以获得良好的除磷效果。

2.5.2 水力停留时间(HRT):在 SBR 反应器中, HRT 分为厌氧 HRT 和好氧 HRT, Wang^[25]研究认为如果厌氧 HRT 时间较长, 将导致系统二次释磷, 好氧 HRT 较长导致细胞内能源减少, 而较低的胞内能源, 将使 PAOs 失去与 GAOs 竞争的能力, 而 GAOs 成为优势种群。他认为最佳厌氧 HRT 由 VFA 吸收速率或者发酵速率决定; 最佳好氧 HRT 则由厌氧时细胞内部合成的能源量和出水磷浓度要求决定。

另外催化剂, 抑制剂的存在也可能对 PAO-GAO 竞争存在潜在的影响, 并且需要进一步的研究。

3 其它微生物与 PAOs 的竞争

以上讨论的是影响 PAOs 和 GAOs 竞争的影响因素, 随着对微生物种群结构和胞内代谢机制研究的深入, 人们开始关注 EBPR 系统中其它与 PAO 竞争的微生物种群, 其中已知的主要包括反硝化聚磷菌和反硝化聚糖菌。

3.1 反硝化聚磷菌

最近的研究表明, 至少存在一部分聚磷菌可以在缺氧条件下利用硝酸盐为电子受体进行吸磷, 这一类微生物被称为反硝化聚磷菌(DPB)。DPB 具有和好氧聚磷菌非常相似的代谢特征。Kuba^[26]等从动力学性质上对这两类聚磷菌进行了比较, 认为以硝酸盐作为电子受体的反硝化聚磷菌有着和好氧聚磷菌同样高的强化生物除磷性能。因为反硝化聚磷菌可在缺氧环境吸磷, 这就使得吸磷和反硝化(脱氮)这两个生物化学过程借助同一种细菌在同一种环境下一并完成。虽然反硝化聚磷菌吸磷速率低于传统的生物吸磷, 但是其吸磷和脱氮过程的结合不仅节省了对碳源的需要, 而且吸磷在缺氧内完成可节省曝气所需要的能源。此外, 由此带来的另外一个好处就是, 产生的剩余污泥量大为降低。

对于以硝态氮为电子受体进行反硝化吸磷的报道已经有很多, 而且国外已经有成功的应用实例, 而对以 NO_2^- 为电子受体的反硝化聚磷菌的研究较少, 尚处于初探、有争议的阶段。有研究表明好氧和缺氧吸磷在亚硝态氮存在下受到抑制^[27], 研究结果表明 *Competibacter* 数量的增加与缺氧段亚硝态

氮的积累相一致, 并且表明亚硝态氮是提供给 GAOs 优势的一个因素。他们还发现当亚硝态氮存在时, PAOs 的增长速度也受到了抑制。因此, 亚硝态氮的存在和积累抑制 PAOs, 从而有利于 GAOs 的生长。然而我国学者李捷等人^[28]研究认为, 在一定的浓度范围内, 亚硝态氮对除磷无抑制作用; 相反, 它可以作为除氧气, 硝态氮之外的另一电子受体, 参与聚磷菌的除磷, 同时实现脱氮。另有研究^[29]发现, 当 NO_2^- 质量浓度在 31.25 mg/L 以下时, 反硝化聚磷菌可以利用 NO_2^- 为电子受体完成反硝化吸磷; 在高于 37.50 mg/L 时, NO_2^- 对缺氧吸磷有明显的抑制作用。但是反硝化聚磷菌经过驯化之后, 即使 NO_2^- 质量浓度达到很高(75.00 mg/L), 仍然可以利用 NO_2^- 作为电子受体完成反硝化吸磷, 而没有发现抑制吸磷的现象, 而且 NO_2^- 的浓度对吸磷速率没有明显影响。

尽管对于反硝化聚磷菌的研究还有很多值得深思的地方, 但是由于反硝化除磷工艺提高了碳源的利用效率, 降低了污泥产率, 可以有效地降低运行成本, 具有广阔的应用前景。

3.2 反硝化聚糖菌

随着研究者们对于微生物细胞内储存代谢研究的不断深入, Zeng 等人^[30]研究发现与聚磷菌类似, 聚糖菌(GAOs)也具有反硝化能力, 并且在厌氧/氧条件下成功富集了反硝化聚糖菌(DGAO)。在厌氧阶段, 反硝化聚糖菌以糖原酵解作为能量及还原力来源, 吸收有机物并以 PHAs(主要是 PHB)形式储存; 缺氧阶段, 反硝化聚糖菌以硝酸盐或亚硝酸盐为电子受体, 胞内 PHAs 进行缺氧代谢, 一方面提供能量用于菌体生长, 同时合成糖原为下一周期厌氧阶段提供能量储备, 这种细菌的代谢机制和聚糖菌类似, 由于厌氧条件下, 它吸收 VFA 从而成为 PAO 的竞争者。此外, 它反硝化产生的不是氮气, 而是 N_2O , 这个现象需要更深入的调查研究, 因为 N_2O 是一种温室气体。Zeng 认为这可能是由于亚硝的积累导致反硝化不完全而产生。

Wang X^[31]以乙酸为碳源, 采用厌氧/好氧富集培养 Cluster 1 *DvGAOs*, 认为 Cluster 1 *DvGAOs* 能够把硝态氮还原成亚硝态氮。然而, 这种细菌却没有还原亚硝的能力。当 Cluster 1 *DvGAOs* 刚刚处于硝态氮环境时, 出现 4 h 的停滞阶段, 可能是用于合成还原硝态氮所需的酶。Cluster 1 *DvGAOs* 的比硝氮

还原速率大大低于 *Competibacter* GAOs, 说明反硝化聚糖菌的竞争能力不如传统的聚糖菌。

目前对于反硝化聚糖菌的报道还很少, 对于这种细菌的代谢机制以及影响因素需要更进一步的探讨研究。

4 结论及展望

当前, EBPR 系统应用越来越广泛, 而在 EBPR 系统中, PAOs 和 GAOs 往往同时存在, 所以充分了解二者的竞争因素, 有助于优化运行条件, 达到最佳除磷效果。然而, 目前该领域仍有许多亟待研究的地方。如我们尚未得到 PAOs 和/或 GAOs 的纯种培养。仍然存在的问题是能否使 PAO 或 GAO 分离。PAOs 和 GAOs 详细的代谢途径还没有被完全揭示出来。根本的问题在于不同的 PAOs 和 GAOs 的种群利用哪种途径? 需要进一步研究污泥中微生物群落和发生再厌氧和好氧/缺氧条件下的生化途径的相关性。

此外, 尽管已经提出了很多改变 PAO-GAO 的竞争以促进 PAOs 生长的方法, 但是这些控制策略尚未在实际中得到应用。另外, 实现这些控制的成本效益也需要进一步的发展。由于工艺性能很可能受到微生物组成的影响, 所以需要更多的模型研究预测 EBPR 系统的微生物数量动力学。这也为广大科研工作者提供了更广阔的研究空间。

参考文献

- [1] Mino T, Van Loosdrecht MCM, Heijnen JJ. Microbiology and biochemistry of the enhanced biological phosphate removal process. *Water Res*, 1998, **32** (11): 3193–3207.
- [2] Zeng RJ, Van loosdrecht MCM, Yuan Z, *et al.* Metabolic model for glycogen-accumulating organisms in anaerobic/aerobic activated Sludge Systems. *Biotechnol Bioeng*, 2003, **81** (1): 92–105.
- [3] 郝王娟, 薛涛, 黄霞. 进水磷碳比对聚磷菌与聚糖菌竞争生长的影响. *中国给水排水*, 2007, **23** (17): 95–98
- [4] Panswad T, Tongkhammak N, Anotai J. Estimation of intracellular phosphorus content of phosphorus-accumulating organisms at different P : COD feeding ratios. *J Environ Manage*, 2007, **84** :141–145.
- [5] He S, Gu AZ, McMahon KD. Fine-scale differences between *Accumulibacter*-like bacteria in enhanced biological phosphorus removal activated sludge. *Water Sci Technol*, 2006, **54** (1): 111–117.
- [6] Saunders AM, Oehmen A, Blackall LL, *et al.* The effect of GAOs (glycogen accumulating organisms) on anaerobic carbon requirements in full-scale Australian EBPR(enhanced biological phosphorus removal) plants. *Water Sci Technol*, 2003, **47** (11): 37–43.
- [7] Oehmen A, Saunders AM, Vives MT, *et al.* Competition between polyphosphate and glycogen accumulating organisms in enhanced biological phosphorus removal systems with acetate and propionate as carbon sources. *J Biotechnol*, 2006, **123** (1): 22–32.
- [8] Oehmen A, Vives MT, *et al.* The effect of pH on the competition between polyphosphate accumulating organisms and glycogen-accumulating organisms. *Water Res*, 2005, **39** (15): 3727–3737.
- [9] Lu H, Oehmen A, Virdis B, *et al.* Obtaining highly enriched cultures of *Candidatus Accumulibacter* phosphates through alternating carbon sources. *Water Res*, 2006, **40**: 3838–3848.
- [10] Smolders GJF, Vander MJ, Van Loosdrecht MCM, *et al.* Model of the anaerobic metabolism of the biological phosphorus removal process-stoichiometry and pH influence. *Biotechnol Bioeng*, 1994, **43** (6): 461–470.
- [11] Filipe CDM, Daigger GT, Grady Jr CPL. Effects of pH on the rates of aerobic metabolism of phosphate-accumulating and glycogen accumulating organisms. *Water Environ Res*, 2001, **73** (2): 213–222.
- [12] Filipe CDM, Daigger GT, Grady Jr CPL. pH as a key factor in the competition between glycogen-accumulating organisms and phosphorus-accumulating organisms. *Water Environ Res*, 2001, **73** (2): 223–232.
- [13] Chen Y, Gu G. Effect of changes of pH on the anaerobic/aerobic transformations of biological phosphorus removal in wastewater fed with a mixture of propionic and acetic acids. *Chem Technol Biotechnol*, 2006, **81**: 1021–1028.
- [14] Zhang T, Liu Y, Fang HP. Effect of pH change on the performance and microbial community of enhanced biological phosphate removal process. *Biotechnol Bioeng*, 2005, **92** (2): 173–182.
- [15] Brdjanovic D, Logemann S, Van Loosdrecht MCM, *et al.* Influence of temperature on biological phosphorus removal: process and molecular ecological studies. *Water Res*, 1998, **32** (4): 1035–1048.
- [16] Panswad T, Doungchai A, Anotai J. Temperature effect on microbial community of enhanced biological phosphorus removal system. *Water Res*, 2003, **37**(2): 409–415.
- [17] Carlos MLV, Young S, Christine MH, *et al.* Short-term temperature effects on the anaerobic metabolism of glycogen accumulating organisms. *Biotechnol Bioeng*, 2007, **97** (3): 483–495.
- [18] Whang LM, Park JK. Competition between polyphosphate and glycogen-accumulating organisms in biological phos-

- phorus removal systems-effect of temperature. *Water Sci Technol*, 2002, **46** (1-2): 191-194.
- [19] Erdal UG, Erdal ZK, Randall CW. The competition between PAOs (phosphorus accumulating organisms) and GAOs (glycogen accumulating organisms) in EBPR (enhanced biological phosphorus removal) systems at different temperatures and the effects on system performance. *Water Sci Technol*, 2003, **47** (11): 1-8.
- [20] Brdjanovic D, Van Loosdrecht MCM, Versteeg P, *et al.* Modeling COD, N and P removal in a full-scale wwtp Haarlem Waarderpolder. *Wat Res*, 2000, **34** (3): 846-858.
- [21] Whang LM, Park JK. Competition between polyphosphate- and glycogen-accumulating organisms in enhanced biological phosphorus removal systems: Effect of temperature and sludge age. *Water Environ Res*, 2006, **78** (1): 4-11.
- [22] Grady Jr CPL, Filipe CDM. Ecological engineering of bioreactors for wastewater treatment. *Water Air Soil Pollut*, 2000, **123**: 117-132.
- [23] Lemaire R, Meyer R, Taske A, *et al.* Identifying causes for N₂O accumulation in a lab-scale sequencing batch reactor performing simultaneous nitrification, denitrification and phosphorus removal. *J Biotechnol*, 2006, **122** (1): 62-72.
- [24] 陈 滢, 彭永臻, 杨向平, 等. 低溶解氧 SBR 除磷工艺研究, 中国给水排水, 2004, **20** (8): 40-42.
- [25] Wang JC, Park JK. Effect of anaerobic-aerobic contact time on the change of internal storage energy in two different phosphorus-accumulating organisms. *Water Environ Res*, 2001, **73** (4): 436-443.
- [26] Kuba T, Smolders G, Van Loosdrecht MCM, *et al.* Biological phosphorus removal from wastewater by anaerobic/anoxic sequencing batch reactor. *Wat Sci Tech*, 1993, **27** (5-6): 241-252.
- [27] Saito T, Brdjanovic D, Van Loosdrecht MCM. Effect of nitrite on phosphate uptake by phosphate accumulating organisms. *Water Res*, 2004, **38** (17): 3760-3768.
- [28] 李 捷, 熊必永, 张 杰. 电子受体对厌氧/好氧反应其聚磷菌吸磷的影响. 哈尔滨工业大学学报, 2005, **37** (5): 619-622.
- [29] 李相昆, 周业剑, 高美玲, 等. 亚硝酸根作为电子受体的反硝化吸磷特性. 吉林大学学报(地球科学版), 2008, **38** (1): 117-120.
- [30] Zeng RJ, Yuan Z, Keller J. Enrichment of denitrifying glycogen-accumulating organisms in anaerobic/anoxic activated sludge system. *Biotechnol Bioeng*, 2003, **81**(4): 397-404.
- [31] Wang X, Zeng RJ, Dai Y, *et al.* The denitrification capability of Cluster 1 *Deffluviococcus Vanus*-related glycogen-accumulating organisms. *Biotechnol Bioeng*, 2008, **99** (6): 1329-1336.

征订启事

2009 年《腐植酸》杂志征订启事

《腐植酸》杂志于 1979 年创刊, 由中国腐植酸工业协会主办, 是全国唯一的腐植酸类专业科技期刊, 面向国内外公开发行人。本刊为国际标准大 16 开, 内设 60 页。《腐植酸》杂志为双月刊, 国际刊号: ISSN1671-9212; 国内刊号: CN11-4736/TQ。《腐植酸》杂志集学术性、专业性和实用性于一身, 内容广泛、指导性强、信息量大, 自 1979 年创刊以来, 深受广大读者的关注与好评。主要栏目包括: “卷首语” “专题评述” “研究论文” “译文” “腐植酸文摘” “腐植酸专利简介” “腐植酸环保应用” “协会(专业)标准讨论” “腐植酸质量检测” “‘两会’ 动态” “信息传真” “‘乌金杯’ 采风” 等。

在“腐植酸是关怀人类的新产业”主题思想的指引下, 我国腐植酸产业呈现了蓬勃发展的大好形势。《腐植酸》杂志在 2009 年将把更新的内容、更高的质量、更优的服务展现给广大读者。欢迎各位新老读者及时订阅! 如需要过刊, 请直接与编辑部联系。

2009 年《腐植酸》杂志每期定价 15.00 元(含邮费), 全年 6 期, 年定价 90.00 元(含邮费)。

《腐植酸》杂志订购时, 请从邮局汇款至编辑部。

地址: 北京市西城区六铺炕街 1 号《腐植酸》编辑部收 邮编: 100011
电话: 010-82784950 传真: 010-82784970
邮箱: chaia@126.com 网址: www.chinaha.org