

SBR 无厌氧段实现生物除磷

王冬波, 李小明*, 杨麒, 张杰, 刘依磷, 柳娴, 贾斌, 曾光明, 廖德祥

(湖南大学环境科学与工程学院, 长沙 410082)

摘要:研究了 SBR 在模拟城市生活污水处理中的除磷效果. 结果表明, SBR 在进水后未经过传统除磷理论认为所必须的厌氧段而直接好氧曝气, 废水中磷的浓度仍下降较快. 在曝气时间为 4 h, 进水 COD 浓度为 $400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 反应过程中 pH 值 7.0 ± 0.2 时, 进水中 TP 浓度由 $15 \sim 20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降到 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, 磷的去除效率达到 90% 以上. 反应过程中传统的储能物质多 β -羟基烷酸盐(PHA)基本保持不变且含量较低(PHA 浓度在 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右), 聚合磷酸盐(聚磷)在 4 h 好氧阶段呈先下降后上升的趋势(好氧开始时聚磷含量为 $83.034 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 好氧 1h 时污泥中聚磷含量为 $79.980 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 好氧结束时聚磷含量为 $83.086 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$), 在 0.5 h 沉淀和 3.5 h 静置期内聚磷没有明显的水解现象. 此研究表明在无厌氧段、无 PHA 合成而直接好氧曝气, 聚磷菌亦能将废水中磷酸盐合成聚磷, 通过排除富磷污泥而达到除磷目的, 这和传统的理论与研究有所区别.

关键词: SBR; 多 β 羟基烷酸盐; 聚磷

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)07-1867-07

Biological Phosphorus Removal in Sequencing Batch Reactor Without Anaerobic Phase

WANG Dong-bo, LI Xiao-ming, YANG Qi, ZHANG Jie, LIU Yi-lin, LIU Xian, JIA Bin, ZENG Guang-ming, LIAO De-xiang

(College of Environmental Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The performance of phosphorus removal with a sequencing batch reactor was investigated by simulated municipal wastewater. The experimental results showed that phosphorus removal could be achieved in sequencing batch reactor without anaerobic phase, which was conventionally considered as a key phase for phosphorus removal. Phosphorus concentration in the effluent was $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ below after 4 h aeration, during which pH was 7.0 ± 0.2 . Which indicated the removal rate of phosphorus was above 90% when the COD and phosphorus concentration of influent were about $400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $15\text{-}20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively. Intracellular storage of poly-phosphate (poly-P) was increasing in the aeration after decreasing in first hour aeration (the content of poly-P was $83.034 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ at the beginning of aerobic phase, $79.980 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ in first aeration and $83.086 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ in end), but the energy storage poly- β -hydroxyalkanoates (PHA) was constant nearly and the content was very low (PHA concentration was about $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$). The researches indicated that phosphate could be transformed to poly-P by poly-phosphate-accumulating organisms without anaerobic zone and PHA, biological phosphorus removal was obtained by removing sludge with rich phosphorus, and this phenomenon could not be explained by conventional theory.

Key words: SBR; poly- β -hydroxyalkanoates (PHA); poly-phosphate

传统的生物除磷理论^[1]认为, 生物除磷主要通过聚磷菌在厌氧条件下水解细胞原生质中聚合磷酸盐(poly-P)释放磷, 在有氧的条件下过量摄取磷, 并排除富磷污泥的途径达到除磷的目的. 聚磷菌属于兼性异养细菌, 在厌氧环境中且没有 DO 和大量 NO_3^- 存在的前提下, 聚磷菌将细胞中聚磷水解成正磷酸盐以获得能量, 并利用污水中易降解的有机物, 如挥发性脂肪酸(VFAs), 合成储能物质 PHA 存于细胞中; 在好氧环境中, 聚磷菌以游离氧为电子受体, 氧化细胞内储存的 PHA, 并利用该反应产生的能量, 过量的从污水中摄取磷酸盐, 合成高能物质 ATP, 其中一部分转化为聚磷, 作为能量物质储存于细胞中. 由于好氧环境下摄取的磷远大于厌氧环境下释放的磷, 因此通过排放富磷污泥可以达到高效的生物除

磷. 国内外很多学者都是在此生物除磷理论的基础上研究除磷工艺. 如 Pastoreli 等^[2]在移动床生物膜 SBR 反应器(MBSBBR)中, 经过厌氧段的充分释磷后, 硝化、反硝化、除磷和 COD 的降解可同时发生在好氧段; Cassidy 等^[3]利用 SBR 工艺培养出好氧颗粒污泥具有同步脱氮除磷的能力; Obaja 等^[4]在 SBR 反应器中利用 AOA 工艺处理屠宰场废水实现了同步脱氮除磷. 近年来, 生物除磷理论有了新发展, 发现了反硝化聚磷菌(denitrifying phosphate-accumulating

收稿日期: 2007-07-12; 修订日期: 2007-08-30

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCENT-0770); 国家自然科学基金项目(50478054); 国际科技合作重点项目(2004DFA06200); 长沙市科技计划重点项目(K051132-72)

作者简介: 王冬波(1981~), 男, 博士, 主要研究方向为水污染处理技术与控制, E-mail: wwww44339745@yahoo.com.cn

* 通讯联系人, E-mail: xmli@hnu.cn; xmli121x@hotmail.com

organisms, DNPAOs), 这类聚磷菌不仅能够以氧气作为电子受体聚磷, 而且在缺氧条件下能够以硝酸盐代替溶解氧作为电子受体进行聚磷, 同时将硝酸盐还原成 N_2 或氮化物, 进而出现了 DEPHANOX^[5] 和 BCFS^[6] 等反硝化除磷工艺, 但反硝化聚磷菌的发现与传统的除磷理论并不矛盾^[7,8], 硝酸盐对生物除磷的影响取决于硝酸盐出现的场合, 如果硝酸盐出现在厌氧区, 必定会因为争夺碳源而影响聚磷菌释磷; 硝酸盐出现在聚磷菌充分释磷合成 PHA 之后, 则能为聚磷菌氧化 PHA 合成聚磷提供电子受体.

无论是传统的除磷工艺还是最新的除磷研究, 在反应过程中都设立了厌氧段, 聚磷菌在厌氧段水解聚磷, 以磷酸盐的形式释放到水中, 同时获得能量将污水中易降解的挥发性脂肪酸合成 PHA 以作为后续好氧段的能源物质. 传统的研究^[9]表明, 厌氧段是生物除磷必不可少的阶段, 厌氧段合成的 PHA 越多, 好氧出水磷浓度越低; 反应过程中没有厌氧段, 没有 PHA 的大量生成, 就不能实现生物除磷. 即使以除磷菌偏爱的挥发性有机酸作为营养物, 许多研究者^[10-13]均不能在单级好氧活性污泥工艺中实现磷的有效去除, 且采用传统活性污泥工艺的大多数城市污水处理厂磷的去除率仅在 20% ~ 30%^[14,15], 除微生物正常生长和新陈代谢所摄取的磷外, 几乎没有磷的过量吸收. 本研究小组于 2005 年 10 月在对内循环 SBR 反应器进行同步脱氮除磷的实验中发现, 在采用内循环 SBR 反应器处理模拟城市生活污水的脱氮除磷的过程中, 进水后未经过厌氧段而直接曝气, 仍能达到良好的除磷效果^[16], 进而于 2006 年 5 月取新泥于普通 SBR 反应器进行后续研究, 普通 SBR 反应器在反应条件相同, 进水浓度相当的情况下仍能达到较好的除磷效果.

1 材料与方法

1.1 实验装置及运行方法

PHA: 气相色谱法^[19,20]. 取活性污泥混合液约 50 mL 离心后用磷酸盐缓冲溶液清洗并再次离心, 样品在 -54℃、0.1 mbar 条件下冷冻干燥 20 h, 称取约 20 mg 冷冻泥加 1,2-二氯乙烷 2 mL、含有浓盐酸的丙醇 2 mL(容积比为 1:4), 在 100℃ 下加热 4 h, 萃取完后

SBR 反应器外形为圆柱体, 采用有机玻璃制作, 直径为 12 cm, 高约 100 cm, 有效体积约为 12 L(图 1). 实验运行方式: 进水→曝气(4 h)→沉淀出水(0.5 h)→静置(3.5 h), 不设厌氧段, 好氧采用鼓风机曝气, 曝气开始时 DO 浓度为 $6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右. 接种活性污泥取自长沙市第一污水处理厂, 最初反应器中接种活性污泥浓度为 $3\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右, 按上述方式进行驯化培养, 约 7 d 后污泥外观呈黄褐色, 活性及沉淀效果均较好, 第 15 d 开始试运行.



图 1 SBR 实验装置
Fig.1 Sequencing batch reactor

1.2 污水水质

进水采用合成废水, 碳源主要采用葡萄糖, 以磷酸二氢钾模拟水中溶解性磷酸盐, 并在反应过程中加 NaHCO_3 与 0.5 mol/L HCl 调节 pH 值, 使反应过程中 pH 值控制在 7.0 ± 0.2 , 具体成分如表 1 所示.

1.3 分析方法

COD: 重铬酸钾法^[17]; TP: 钼锑抗分光光度法^[17]; MLSS: 标准方法^[18].

表 1 进水成分/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
Table 1 Synthetic wastewater/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

药品名称	葡萄糖	氯化铵	磷酸二氢钾	硫酸镁	氯化钙	硫酸铁
浓度	350 ~ 400	20 ~ 25	15 ~ 20	5	2	2

加入 2 mL 的去离子水, 剧烈振荡 20 ~ 30 s, 使其分相, 下层为含有 PHA 的有机相, 中间为活性污泥残渣, 上层为水相; 取下层 PHA 相用无水硫酸钠干燥. 取 $1\text{ }\mu\text{L}$ 含有 PHA 的有机相用色谱柱为 DB-5(30 m Length $\times$ 0.2 mm ID $\times$ 0.25 μm film) 的气相色谱仪测

定,气相色谱测定时氮气为载气,流速 1.5 mL/min;分流比为 1:15;FID 为探测器;柱子温度变化程序为初始温度 80℃,维持 1 min,后以 45 ℃/min 的速度增加到 270℃,维持 3 min;检测器温度为 250℃,注射器温度为 180℃.

2 结果与分析

2.1 长期运行中 TP 的去除效果

通过约 14 d 的驯化培养后,反应器内活性污泥的驯化基本完成, SBR 反应器在长期运行过程中 TP

的变化见图 2 所示.

由图 2 可以看出,反应器在长期运行中 TP 的去除效率基本稳定. 尽管 TP 的进水浓度浮动较大(15 ~ 20 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$),但出水浓度大都能稳定在 0 ~ 1.5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,去除效率能达到 90% 以上. 经过重复取泥于普通 SBR 中对比实验并长期运行,证明在 SBR 运行过程中,进水后无传统生物除磷理论认为所必需的厌氧段而直接曝气,仍能实现磷的去除,这和传统除磷理论有所不同.

2.2 典型周期内 TP 及 PHA 的积累

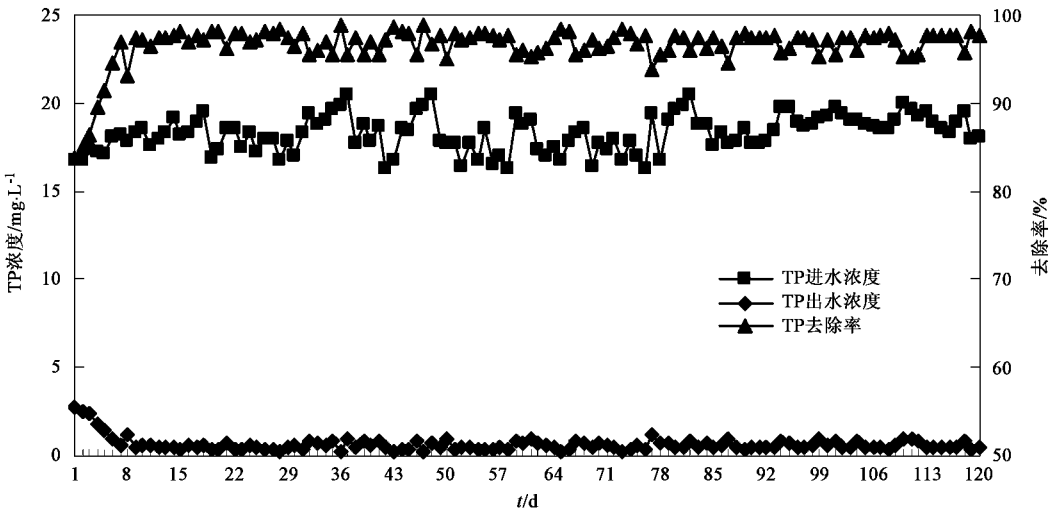


图 2 SBR TP 浓度变化及去除率

Fig.2 Variety of concentration and the efficiency of removal of TP in sequencing batch reactor

经过约 90 d 的运行,得到 SBR 在 1 个典型运行周期中 TP 及 PHA 的变化(图 3).

传统生物除磷理论及研究均认为要实现生物除

磷,反应器在进水后必须设厌氧段以便聚磷菌在厌氧环境下水解聚磷,同时将污水中外碳源合成 PHA 作为后续好氧段的能量物质,若反应过程中没有厌

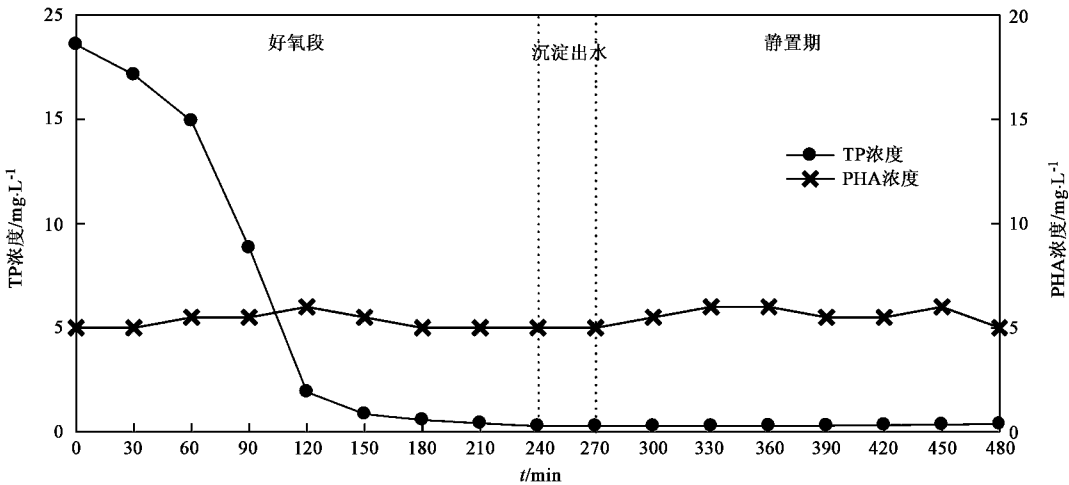


图 3 典型周期内 TP 与 PHA 的变化

Fig.3 Variety of TP and PHA in the representative cycle

氧段,没有 PHA 的大量生成,就不能实现生物除磷。在本研究中反应器在图 3 中 0 min 进水并开始曝气,在 240 min 时结束好氧曝气并沉淀出水,整个过程在进水后没有设厌氧段,反应器对磷的去除效果仍非常良好,进水中 TP 浓度为 $18.86 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,随着曝气时间的增加,TP 浓度逐渐降低,出水中 TP 浓度降到 $0.28 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,TP 去除率达到 98.52%;在整个过程中 PHA 的浓度基本保持不变且含量较低(PHA 浓度在 $5 \sim 6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右),这说明在没有厌氧段、没有 PHA 大量生成的情况下,系统仍能将溶解性磷酸盐从污水中去除。图 3 中 240 ~ 480 min 为 2 个周期之间的沉淀、静置期,在此期间反应器内虽然处于厌氧状态,但此时水中碳源绝大多数已经在好氧段被微生物降解消耗,因此没有 PHA 的生成。

2.3 本研究中磷的去向

关于本研究中磷的去向,一种推测是由于微生物的吸附,使磷酸盐附着在污泥里,从而从水中去除。由于反应器在长期运行中均有较高的除磷效果,如果是污泥的单纯吸附作用,则很快会发生磷的饱和点,不可能长期稳定运行。因此,笔者排除了这种假设。

磷在活性污泥中以 3 种形式存在:生物磷、物理化学沉淀的磷、聚磷酸盐^[21]。生物磷是指微生物生长和新陈代谢所必需的磷;物理化学沉淀的磷是指通过物理化学方式固定的磷,金属络合的磷;聚磷酸盐是指产生并最终储存在聚磷菌体内的能量物质。因此,对本研究中磷的去向,另一种推测是微生物自身正常生长和新陈代谢的结果。微生物研究表明,磷是微生物生长和新陈代谢所必需的元素,在正常的情况下磷的含量占活性污泥细胞干重的 1% ~ 2%。这说明微生物自身生长和新陈代谢所摄取的磷不是无限的。有研究表明,微生物正常生长和新陈代谢所摄取的磷的量与污水中 COD 的浓度有关,COD 的浓度与微生物摄磷量比为 200:1,而本研究中 COD 与 TP 浓度比约为 20:1,远小于正常的 COD/TP,因此,笔者认为本研究中出现的除磷现象并不是微生物正常生长和新陈代谢的结果,即主要不是合成生物磷。磷酸盐能与镁、钙、铁等金属离子反应分别形成磷酸氢镁及磷酸氨镁(MgHPO_4 和 MgNH_4PO_4)、羟磷灰石 $[\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}]$ 、磷酸铁(FePO_4)等金属磷沉淀物,但本研究中镁、钙、铁等金属离子的浓度很低(见表 1),其主要作用是保证微生物正常生长及作为磷酸盐的反价离子,且上述金属沉淀均在 $\text{pH} > 7.5$ 的条件下形成^[21],而本研究中 pH 值仅在 7.0 左右,所

以,排除了本研究中磷的去除主要是形成金属磷的推测。

为考察本研究中磷的去向,笔者进一步研究了典型周期内 TP、聚磷、COD 与 MLSS 的变化,结果如图 4 所示。

由图 4 知,在好氧段前 30 min, COD 迅速降解(COD 浓度从 $396 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降到 $96 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), MLSS 浓度增长较快(MLSS 浓度从 $4156 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加到 $4310 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),这是因为微生物在经过静置期后处于“饥饿”状态,在好氧段碳源充足的条件下迅速生长繁殖,处于微生物生长的指数期。30 ~ 60 min COD 浓度下降和 MLSS 浓度增长相对缓慢(60 min 时 COD 浓度为 $52 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ MLSS 浓度为 $4340 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),这是由于污水中易降解的有机物大部分已在好氧段前 30 min 消耗,微生物生长处于静止期。但污水中 TP 浓度在好氧段前 60 min 下降缓慢(进水 TP 浓度为 $18.86 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 60 min 时 TP 浓度为 $14.91 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),聚磷含量明显降低(污泥中聚磷含量从 $83.034 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 降到 $79.98 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$),这是由于好氧段前 60 min 系统中存在大量的碳源,按照传统的除磷理论^[22,23],碳源(电子供体)和氧化剂(电子受体)同时存在会对除磷有不利影响,即好氧阶段存在碳源会抑制好氧吸磷,此时污水中 P 的减少量主要为微生物提供自身生长繁殖所需的 P 元素,即主要生成有机磷,而微生物在好氧段前 60 min 内的大量生长繁殖导致聚磷含量的降低。好氧段 60 min 后, COD 与 MLSS 浓度均变化不大, MLSS 浓度在 120 min 时达到最大值(约为 $4356 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),在好氧结束时有少量减少(约为 $4350 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),这可能是由于碳源消耗完后过量曝气的结果。污水中 TP 的浓度在 60 ~ 120 min 内下降很快(60 min 时 TP 浓度为 $14.91 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 90 min 时 TP 浓度为 $8.83 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 120 min 时 TP 浓度为 $1.92 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),同时污泥中聚磷含量增加非常明显(60 min 时聚磷含量为 $79.98 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$; 90 min 时聚磷含量为 $81.175 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$; 120 min 时聚磷含量为 $82.65 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)。120 min 后污水中 TP 的浓度逐渐降低,污泥中聚磷含量也逐渐增加,好氧结束时污水中 TP 浓度仅为 $0.28 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,污泥中聚磷含量达到 $83.086 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。在好氧结束时排除约 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的增长污泥以稳定反应器中污泥浓度,即排出约 2.4 g 污泥,污泥龄约为 7 d,由于好氧结束时污泥中聚磷含量为 $83.086 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,污泥中有机磷的含量按污泥自重的 1% 计算,则排出的磷的总量约为 200 mg。

图 4 中 240 ~ 480 min 为 2 个周期之间的沉淀、

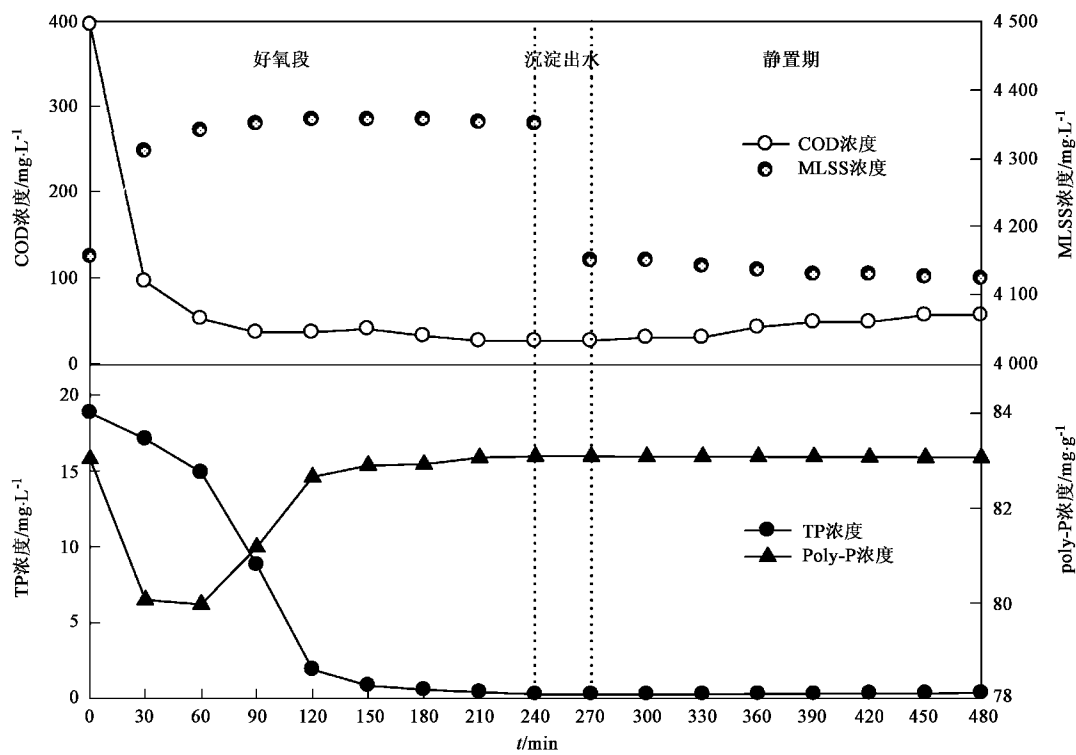


图 4 典型周期内 TP、poly-P、COD 及 MLSS 的浓度变化

Fig.4 Variety of TP, poly-P, COD and MLSS in the representative cycle

静置期,由于系统处于厌氧水解状态,导致 MLSS 浓度有少量减少(MLSS 浓度从 $4\,150\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降到 $4\,124\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), COD 浓度有少量上升(COD 浓度从 $26\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 升到 $56\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$).但在此厌氧状态下,未观察到聚磷明显的水解现象,水相中 TP 浓度亦未有明显的增加(480 min 时聚磷含量为 $83.057\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,水相中 TP 浓度为 $0.46\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),这也与传统的除磷研究有所不同.

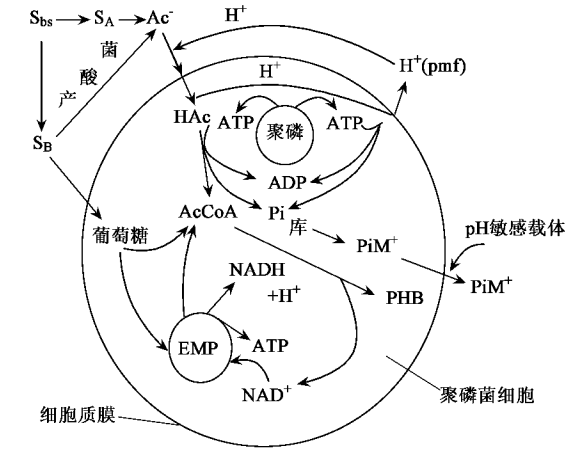
3 讨论

由于本研究中没有设立传统除磷理论认为所必需的厌氧段,也没有储能物质 PHA 的大量合成,且聚磷在静置期没有明显的水解现象,因此本研究中磷的去除不属于传统聚磷菌释磷/过量吸磷的结果,相反,可能是另外的聚磷微生物,如不动杆菌和放线菌属,这些微生物在厌氧条件下不进行释磷,也不吸收有机底物,而只在好氧条件下以聚磷酸盐形式贮存磷^[21],这与本研究中观察到的实验结果十分相似.由于本研究中没有设立厌氧段而直接好氧曝气,没有为传统的聚磷菌提供适应的生长环境,而与本研究中出现这类聚磷微生物所需的环境条件相符,导致这类聚磷微生物在与其他菌种,包括传统聚

磷菌的竞争处于优势.

在传统聚磷菌新陈代谢的过程中,3 种贮存的化合物,即聚磷酸盐(poly-P)、糖原(Glycogen)和多 β -羟基酸盐(PHA)起非常重要的作用.

在厌氧条件下,污水中的有机物在厌氧发酵产酸菌的作用下转化为挥发性脂肪酸(VFAs),而活性污泥中的聚磷菌在厌氧的不利状态下处于压抑状态,将贮积在菌体内的聚磷分解,以磷酸盐的形式溶于污水中,在此过程中释放出的能量可供聚磷菌在厌氧压抑环境下存活之用;另一部分能量可供聚磷菌主动吸收乙酸、 H^+ 和 e^- ,使之以聚- β -羟基丁酸(poly- β -hydroxybutyrate, PHB)的形式贮存在菌体内,(PHB 属于 PHA 范畴),并使发酵产酸过程得以继续进行.聚磷分解后的无机磷酸盐释放至溶液中,这就是观察到的聚磷菌厌氧放磷现象.图 5 所示为传统聚磷细菌厌氧放磷生化模式^[24].在厌氧条件下,聚磷菌吸收有机碳源进行转化并以 PHB 的形式储存于细胞内.由于 PHB 相对于醋酸盐具有更低的还原状态物,所以在此转化过程中必须有以 NADH_2 形式存在的还原能力. NADH_2 是在聚磷菌体内通过转换储存的糖原质为 PHB 时形成的,所需的能量(ATP,三磷酸腺苷)来源于聚磷酸盐的水解.



AcCoA 为乙酰辅酶 A; H^+ 为质子; S_{bs} 为溶解性可快速生物降解 COD; S_A 为低级脂肪酸如甲酸、乙酸、丙酸等; S_B 为葡萄糖、甲醇、乙醇等; M^+ 为金属阳离子; NADH 为辅酶 I; PHB 为聚- β -羟基丁酸; EMP 为酵解; pmf 为质子推动力,下同

图 5 聚磷细菌厌氧放磷生化模式

Fig. 5 P release pattern in the anaerobic condition by PAO

在好氧阶段,聚磷菌以氧(NO_x^-)为电子受体,分解储存的 PHB 和外源基质以提供能量供细胞生长、繁殖,同时一部分能量可供聚磷菌主动吸收磷酸盐,并以聚磷酸盐的形式贮积在体内以用于生长需要,这就是聚磷菌的好氧(缺氧)吸磷现象,图 6 所示为聚磷细菌好氧(缺氧)吸磷生化模式^[24],PHB 被氧化成 CO_2 ,而 $NADH_2$ 被释放并转化为 ATP.ATP 产生能量用于聚磷菌的生长、在细胞体内以聚磷酸盐的形式储存磷和合成糖原质.糖原质的形成和恢复是非常重要的.因为在厌氧条件下将醋酸盐转化为 PHB 所需要的还原能力主要来源于糖原质.

由于本研究中没有贮能/供能物质 PHA 的大量

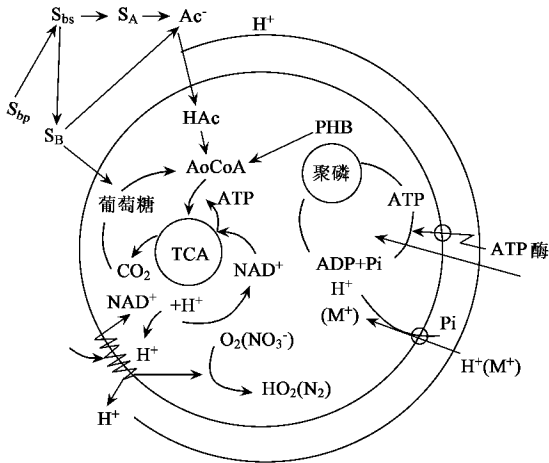


图 6 聚磷细菌好氧吸磷生化模式

Fig. 6 P uptake pattern in the aerobic condition by PAO

合成,因此,本研究中聚磷微生物在好氧段的供能物质值得关注.有研究表明^[25],在传统生物除磷系统中,相对低 pH 值条件下(6.5~7.0)聚糖菌将在与聚磷菌的竞争中处于优势地位,本研究中反应系统的 pH 值在 7.0 左右,在好氧段将会合成大量的糖原质;另有研究表明^[26],在传统生物除磷过程中,在好氧段 PHA 消耗完后,糖原质将作为能量物质维持聚磷菌生命.因此,本研究小组推测:本研究中出现的聚磷微生物在好氧段前 60 min 内迅速降解污水中的有机物,并在此过程中大量生成糖原质,待污水中有机物大部分消耗完后,聚磷微生物利用前阶段合成的糖原质作为能量,将水相中的聚磷酸盐迅速合成聚磷酸盐贮存于体内,通过排除剩余污泥达到除磷目的,这有待进一步研究证实.

虽然本研究中出水磷浓度最高达到 $1.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,未达到国家排放标准,但这是研究者为研究磷的最大摄取量而提高进水磷浓度所致,目前国内城市生活污水中进水磷浓度大多在 10 mg/L 左右甚至只有 $5\sim 7.5\text{ mg/L}$ ^[21],用本工艺处理上述进水磷浓度的模拟废水时,出水磷浓度是能够达到排放标准的.因此,本研究对于实际工程特别是城市生活污水的处理有较大意义.

4 结论

(1)SBR 在进水后未经过传统除磷理论认为所必须的厌氧段而直接好氧曝气,仍有较好的除磷效果.在曝气时间为 4 h, pH 值 7.0 左右时,进水中 TP 浓度由 $15\sim 20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降到 $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下,磷的去除效率达到 90% 以上.

(2)反应过程中储能物质多 β -羟基烷酸盐(PHA)基本保持不变且含量较低(PHA 浓度在 $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右).

(3)聚合磷酸盐(聚磷)在 4 h 好氧阶段呈先下降后上升的趋势(好氧开始时聚磷含量为 $83.034\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,好氧 1 h 时聚磷含量为 $79.980\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,好氧结束时聚磷含量为 $83.086\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$),在 0.5 h 沉淀和 3.5 h 静置期内聚磷没有明显的水解现象.

(4)研究表明在无厌氧段、无 PHB 合成而直接好氧曝气,聚磷菌亦能将废水中磷酸盐合成聚磷,通过排除富磷污泥而达到除磷目的,这和传统的理论与研究有所区别.

参考文献:

[1] Pijuan M, Guisasaola A, Baeza J A, et al. Aerobic phosphorus release linked to acetate uptake: Influence of PAO intracellular

- storage compounds [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2005, **26**: 184-190.
- [2] Pastorelli G, Canziani R, Pedrazzi L, *et al.* Phosphorus and nitrogen removal in moving-bed sequencing batch biofilm reactors [J]. *Wat Sci Tech*, 1999, **40**(4): 169-176.
- [3] Cassidya D P, Beliab E. Nitrogen and phosphorus removal from an abattoir wastewater in a SBR with aerobic granular sludge [J]. *Water Res*, 2005, **39**: 4817-4823.
- [4] Obaja D, Mace S, Costa J, *et al.* Nitrification, denitrification and biological phosphorus removal in piggery wastewater using a sequencing batch reactor [J]. *Bioresource Technol*, 2003, **87**: 103-111.
- [5] Ekama G A, Wentzel M C. Difficulties and development in biological nutrient removal technology and modeling [J]. *Wat Sci Tech*, 1999, **39**(6): 1-11.
- [6] Kubat T, van Loosdrecht, Brandse M C M, *et al.* Occurrence of denitrifying phosphorus removing bacteria in modified UCT-type wastewater treatment plants [J]. *Water Res*, 1997, **31**(4): 777-786.
- [7] Ahn J, Daidou T, Tsuneda S, *et al.* Metabolic behavior of denitrifying phosphate-accumulating organisms under nitrate and nitrite electron acceptor conditions [J]. *J Biosci Bioeng*, 2001, **92**: 442-446.
- [8] Mino T, van Loosdrecht M C M, Heijnen J J. Microbiology and biochemistry of the enhanced biological phosphate removal process [J]. *Water Res*, 1998, **32**: 3193-3207.
- [9] Kerren-Jespersen J P, Henze M, Struber R. Biological phosphorus release and uptake under alternating anaerobic and anoxic conditions in a fix-film reactor [J]. *Water Res*, 1994, **28**: 1253-1255.
- [10] Harold F M, Harold R L. The role of anaerobic stage on biological phosphorus removal [J]. *Water Sci Tech*, 1965, **17**: 69-80.
- [11] Cech J S, Hartman P. Competition between polyphosphate and polysaccharide accumulating bacteria in biological phosphorus removal systems [J]. *Water Res*, 1993, **27**: 1219-1225.
- [12] Mat suo Y. Effect of the anaerobic SRT on enhanced biological phosphorus removal [J]. *Water Sci Technol*, 1994, **30**(6): 193-202.
- [13] Satoh H, Mino T, Matsuo T. Deterioration of enhanced biological phosphate removal by the domination of microorganisms without poly-P accumulation [J]. *Water Sci Technol*, 1994, **30**(6): 203-211.
- [14] 张国昌, 赵丙辰, 祝征圣, 等. 城市污水处理厂增加脱氮除磷功能的改造实践[J]. *青岛理工大学学报*, 2006, **27**(4): 68-71.
- [15] 丁超. 序批式活性污泥法脱氮除磷工艺的分析与改造[J]. *市政技术*, 2006, **24**(4): 231-235.
- [16] 王冬波, 李小明, 曾光明, 等. 内循环 SBR 反应器无厌氧段实现同步脱氮除磷[J]. *环境科学*, 2007, **28**(3): 534-539.
- [17] 国家环保局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. (第三版). 北京: 中国环境科学出版社, 1989.
- [18] 顾夏声, 黄铭荣. 水处理工程[M]. (第一版). 北京: 清华大学出版社, 1985. 4-26.
- [19] Takabatake H, Satoh H, Mizuno T, *et al.* PHA (polyhydroxyalkanoate) production potential of activated sludge treating wastewater [J]. *Wat Sci Tech*, 2002, **45**(12): 119-126.
- [20] Oehmen A, Keller-Lehmann B, Zeng R J, *et al.* Optimisation of poly- β -hydroxyalkanoate analysis using gas chromatography for enhanced biological phosphorus removal systems [J]. *J Chromatography A*, 2005, **1070**: 131-136.
- [21] 祝贵兵, 彭永臻, 译. 生物除磷设计与运行手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005. 11-20.
- [22] Kuba T, Wachameister A, van Loosdrecht M C M. Effect of nitrate on phosphorus release in biological phosphorus removal system [J]. *Wat Sci Tech*, 1994, **30**(6): 263-269.
- [23] 阮文权, 邹华, 陈坚. 乙酸钠为碳源时进水 COD 和总磷对生物除磷的影响[J]. *环境科学*, 2002, **23**(3): 49-52.
- [24] 周群英, 高廷耀. 环境工程微生物学[M]. (第二版). 北京: 高等教育出版社, 2001. 248-260.
- [25] Oehmen A, Vives M T, Lu H, *et al.* The effect of pH on the competition between polyphosphate-accumulating organisms and glycogen-accumulating organisms [J]. *Water Res*, 2005, **39**: 3727-3737.
- [26] Lopez C, Pons M N, Morgenroth E. Endogenous processes during long-term starvation in activated sludge performing enhanced biological phosphorus removal [J]. *Water Res*, 2006, **40**: 1519-1530.