

两级 SBR 工艺去除磷、氮及有机物效能分析

龙北生¹, 刘红波¹, 肖国拾², 任何军³, 聂熹¹

(1. 长春工程学院水利与环境工程学院, 长春 130012; 2. 吉林大学测试科学实验中心, 长春 130026; 3. 吉林大学环境与资源学院, 长春 130026)

摘要:以模拟生活污水为处理对象,在常温条件下,采用对比试验与机制分析方法,研究了两级 SBR 工艺分级除磷、去除有机物及脱氮的特性,分析了工艺的效能优势.结果表明,通过控制泥龄(除磷级 5~7 d,脱氮级约 50 d),可以将异养的 PAOs 与硝化菌分别控制在 2 个反应器中优势生长,在出水水质更优的情况下,系统的处理效率可比单级 SBR 提高 1 倍以上;两级 SBR 系统可以有效地缓解有机负荷对硝化过程的冲击影响,在进水 COD 浓度较高的情况下,能够保持其脱氮级(SBS2)具有稳定的硝化速率,且系统的最终出水可以容易并稳定地达到 $TP \leq 0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的国家标准;另外,两级 SBR 的脱氮级(SBS2)除具有优势的硝化菌种外,还能培养出适合降解难降解有机物的异养菌,使其好氧硝化结束时 COD 浓度较单级 SBR 系统更低.

关键词:两级 SBR; 泥龄; 聚磷菌; 硝化菌; 优化除磷脱氮

中图分类号:X703.1 **文献标识码:**A **文章编号:**0250-3301(2009)09-2609-06

Efficiency Analysis of Two-Stage SBR for Phosphorus Nitrogen and Organic Substrate Removal

LONG Bei-sheng¹, LIU Hong-bo¹, XIAO Guo-shi², REN He-jun³, NIE Xi¹

(1. School of Water Conservancy and Environment Engineering, Changchun Institute of Technology, Changchun 130012, China; 2. Test Science Experiment Center, Jilin University, Changchun 130026, China; 3. College of Environment and Resources, Jilin University, Changchun 130026, China)

Abstract: Taking simulated domestic sewage as treatment object, the characteristics of separate-stage phosphorus, organic substrate and nitrogen removal were studied in two-stage SBR by contrast experiment and mechanism analysis under the normal temperature, its efficiency-predominance was analyzed. The results indicate that the heterotrophic PAOs and nitrobacteria can be dominant growth in individual reactor respectively, under the effluent quality is more superior, the treatment efficiency is one time higher than that in the single SBR by controlling the sludge age (the phosphorus removal stage 5-7 d, the nitrogen removal stage about 50 d). The two-stage SBR can relieve the attack of organic load to nitrification process effectively, its nitrogen removal stage(SBR2) can still maintain stable nitrification rate under the higher COD concentration and the final effluent of the system is easy and stable to reach national standards ($TP \leq 0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$). In addition, the nitrogen removal stage (SBR2) of two-stage SBR not only can maintain nitrobacteria predominant, but also can cultivate heterotrophic bacteria which can remove difficult degraded organic substrate, that results in lower COD concentration than in the single's at the end of nitrification.

Key words: two-stage SBR; sludge age; polyphosphate accumulation organisms (PAOs); nitrobacteria; optimization phosphorus and nitrogen removal

目前,城市污水处理厂中广泛应用的生物除磷脱氮工艺仍然是建立在传统生物除磷脱氮理论基础上的组合工艺,如以 A^2/O 为代表的空间顺序连续流工艺和以 SBR 为代表的时间顺序间歇流工艺等^[1]. 在这些工艺中,由于功能不同的微生物在同一系统中混合生长,尤其是世代时间长的自养硝化菌与异养细菌的混合生长,不可避免地存在着硝化菌与聚磷菌(PAOs)之间泥龄的不协调、反硝化与释磷过程对碳源的竞争和厌氧区硝酸盐成分对释磷的影响等系统本身固有的矛盾,使系统往往很难获得同步高效除磷和脱氮的效果^[1~4]. 另一方面,采用沉淀方式进行固液分离的生物除磷系统,由于其在出水前富磷污泥的释磷作用和出水中不可避免地存在少量富

磷污泥颗粒,其出水 TP 不可能达到现行《城市污水处理厂污染物排放标准(GB 18918-2002)》中的一级 A 标准($TP \leq 0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)^[5],同时传统的生物除磷系统常常因进水 C/P 值波动等因素影响,造成除磷效果不够稳定^[6,7].

如何处理好这些矛盾关系,探索在常温条件下运行的经济高效的同步除磷脱氮方法,挖掘传统生物除磷脱氮技术的潜力,以适应污水排放标准不断

收稿日期:2008-10-08;修订日期:2009-01-09

基金项目:吉林省科技发展计划项目(20070560);建设部研究开发项目(2007-k7-6);长春工程学院科研基金项目(32007011)

作者简介:龙北生(1959~),男,博士,教授,主要研究方向为污水生物处理技术, E-mail: beishengl@yahoo.com.cn

提高的要求,是目前亟待解决的重要课题.在全面分析国内外除磷脱氮工艺技术现状及其存在问题的基础上,综合考虑生物除磷与脱氮对环境条件的要求,并结合 SBR 工艺运行操作灵活的特点,构想了两级 SBR 反应器串联运行的优化除磷脱氮工艺.

本试验以模拟生活污水为处理对象,在常温条件下,采用对比试验与机制分析的方法,研究了两级 SBR 工艺分级优化除磷、去除有机物及脱氮的特性,分析了工艺的效能优势.

1 材料与方法

1.1 试验装置

两级 SBR 系统由 2 个相同的 SBR(SBR1 和 SBR2)反应器串联组成.2 个 SBR 反应器均由有机玻璃制成,高 55 cm,内径 19 cm,底部为圆台形,试验中的有效容积为 12 L.反应器以小型粘砂头作为微孔曝气头,采用小型气泵曝气充氧.2 个反应器中均设有搅拌与温控装置.

为使两级 SBR 工艺处理效果具有更好的可比性和借鉴性,本试验还进行了单级 SBR 工艺去除氮、磷和有机物的对比试验.单级 SBR 采用与两级 SBR 反应器相同的单个 SBR 反应器.

1.2 工艺流程

两级 SBR 的 2 个反应器均为生物悬浮生长系统,其工艺流程如图 1 所示.

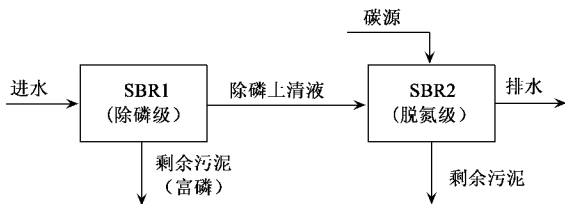


图 1 两级 SBR 工艺流程
Fig.1 Process flow of two-stage SBR

SBR1 级:高负荷低泥龄运行,以除磷为主要目的,同时去除大部分有机物,并注意控制系统在好氧段不发生硝化作用,构成系统的除磷级.

SBR2 级:以 SBR1 的出水为处理对象,低负荷高泥龄运行,以脱氮为主要目的,同时进一步降低进水中的有机物,构成系统的脱氮级.

1.3 试验水质与分析方法

试验采用模拟生活污水.模拟生活污水主要以可溶性淀粉、蛋白胨和牛肉膏为有机成分,NaHCO₃ 调节碱度和 pH 值,投加定量的 NH₄Cl 和 KH₂PO₄ 调

节水中 N 和 P 的含量.模拟生活污水的主要水质指标:COD 480 ~ 640 mg•L⁻¹,TN 80 ~ 102 mg•L⁻¹,NH₄⁺-N 65 ~ 86 mg•L⁻¹,NO_x⁻-N 约 0 mg•L⁻¹,TP 6.5 ~ 11.9 mg•L⁻¹.试验过程中,以甲醇溶液为反硝化碳源.

水质分析方法:硝酸盐氮采用麝香草酚分光光度法;COD 采用重铬酸钾加压消解法;其他水质指标均参考文献[8].

2 结果与讨论

试验结果表明,在常温条件下,通过控制泥龄(除磷级 5 ~ 7 d,脱氮级约 50 d)完全可以将异养的 PAOs 与自养的硝化菌分别控制在 2 个反应器中优势生长,达到优化去除磷、氮和有机物的目的.关于单级和两级 SBR 系统的启动与运行方式参见文献[9],在这里主要结合两系统在稳定条件下典型周期的试验结果进行分析与讨论.

2.1 典型周期试验结果

基本运行条件:单级和两级 SBR 系统 3 个反应器的排水比均为 0.5(进 6 L、排 6 L),反应器在好氧过程中均保持气量充足,单级和两级系统脱氮级(SBR1)的硝化段碱度与反硝化段碳源均充足,反应器温度均维持在 24℃ 左右,单级系统的泥龄约 15 d,两级系统的除磷级(SBR1)和脱氮级(SBR2)的泥龄分别约为 6 d 和 50 d.

单级 SBR 典型周期的试验结果如图 2 所示.该周期厌氧 180 min、好氧 422 min、缺氧 163 min(反应 148 min,以基质浓度开始基本不再降解的时间为反应时间,下同),累计运行 765 min(反应 750 min),反应器内 MLSS 初始值为 4 360 mg•L⁻¹.

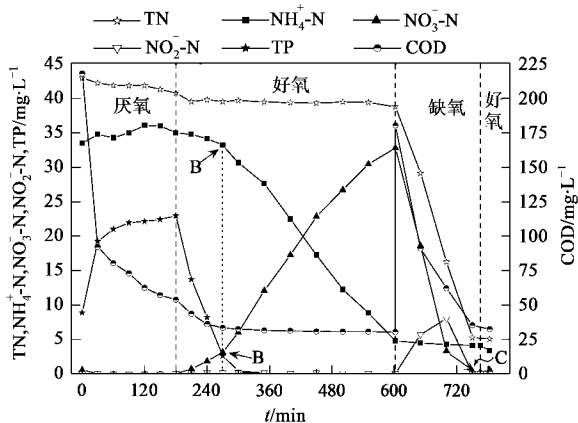


图 2 单级 SBR 典型周期试验结果
Fig.2 Experimental results of single-stage SBR in typical cycle

图 3 和图 4 分别为两级 SBR 的除磷级(SBR1)和脱氮级(SBR2)典型周期试验结果(该周期进水中没有投加蛋白胨成分,水中 $TN \approx NH_4^+-N$,所以图中没有表示 TN 参数,进水的其他成分与单级基本相同)。

除磷级(SBR1)典型周期厌氧 180 min(反应 150 min)、好氧 90 min,累计运行 270 min(反应 240 min),反应器内 MLSS 初始值为 $3\,360\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

脱氮级(SBR2)典型周期好氧/缺氧运行均为 60 min,累计运行 120 min,反应时间依次为 58 min、50 min 和 108 min,反应器内 MLSS 初始值为 $7\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右。

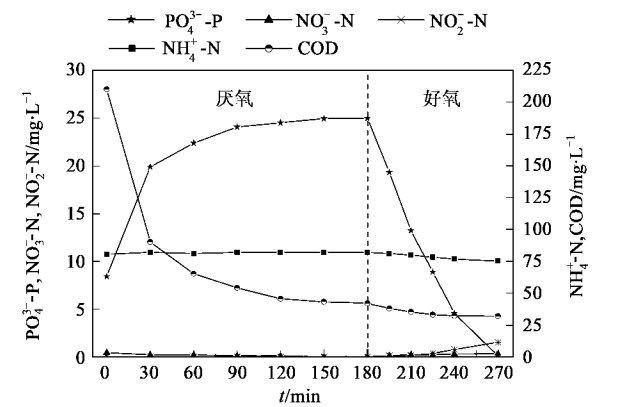


图 3 除磷级(SBR1)典型周期试验结果

Fig.3 Experimental results of phosphorus removal stage (SBR1) in typical cycle

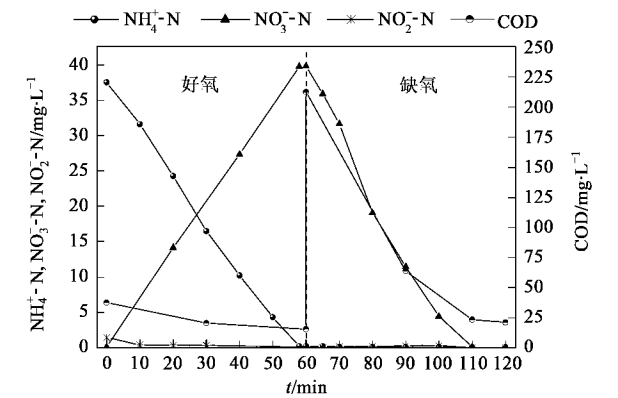


图 4 脱氮级(SBR2)典型周期的试验结果

Fig.4 Experimental results of nitrogen removal stage (SBR2) in typical cycle

从图 3 可见,两级系统的除磷级(SBR1)在好氧段基本没有发生硝化现象, NH_4^+-N 仅有少量($< 7\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)被同化去除,好氧结束时 $NO_x^--N < 2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。在夜晚到次日早晨的运行周期里,偶尔有

因运行失控而过度曝气现象,有时曝气长达 5h 以上,但此时系统内的 NO_x^--N 含量仍然很低($< 3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),这表明 SBR1 系统内几乎不存在硝化菌,很好地实现了 PAOs 与硝化菌的分离。

结合上述试验结果,对两系统去除有机物和磷、氮情况对比分析如下[讨论中涉及的进水 COD 负荷(表 2),进水 N 负荷与平均硝化、反硝化速率(表 3)和各反应阶段历时(表 4)均按反应时间计算]。

2.2 底物去除特性与效能分析

2.2.1 去除有机物过程分析

生物除磷与脱氮过程都是消耗碳源的生化反应过程,因此污水生物除磷脱氮系统对有机物的去除效果,一般应主要表现在其对最后的难生物降解有机物的去除情况。在稳定阶段,单级和两级系统 COD 去除情况统计结果见表 1。

表 1 COD 去除效果统计结果				
Table 1 Statistical results of COD removal				
项目	进水 /mg·L ⁻¹	厌氧结束 /mg·L ⁻¹	硝化结束 /mg·L ⁻¹	去除率 ¹⁾ /%
单级	480 ~ 640	50.8 ~ 65.5	30 ~ 45	85.9 ~ 87.5
两级	480 ~ 640	35.6 ~ 43.8	15 ~ 25	92.2 ~ 93.8

1) 以进水混合后反应器内 COD 浓度为基准计算的结果

尽管两级 SBR 系统的累计反应时间、特别是好氧反应时间明显小于单级 SBR 系统(图 2,单级好氧时间为 422 min;图 3 和图 4,两级累积好氧时间仅为 150 min),但从图 2 ~ 4 和表 1 可以看到,在进水 COD 浓度相同的条件下,两级系统厌氧搅拌和好氧硝化结束时都相对于单级系统有更低的 COD 浓度,两级系统好氧硝化结束时 COD 的去除率要较单级系统高约 6 个百分点,COD 浓度值大约仅为单级系统的一半。

单级 SBR 系统,由于运行过程的生物选择器作用,反应器中主要是具有除磷、硝化与反硝化功能的 3 类菌群混合生长。进水中的绝大部分易生物降解的有机物首先在厌氧段被 PAOs 同化为其胞内的聚-β-羟基丁酸(PHB)^[10](图 2 中厌氧段 COD 的变化说明了这一点)。进入好氧环境后,PAOs 会利用这一 PHB 作为碳源及能源进行好氧增殖、超量吸磷(图 2)与合成糖原等代谢活动^[10、11]。当这一过程完成后,继续延长曝气时间,混合液中剩余的生物难降解有机物的降解速率极慢,甚至不再被降解,使最终硝化结束时的 COD 浓度相对较高。这是由于在单级系统中,微生物利用有机物时出现了类似“葡萄糖效应”的现象。所谓葡萄糖效应是当微生物利用了大量的

非常易于降解的底物(葡萄糖)后,对其他较难降解有机物的利用能力就会大大下降,即葡萄糖抑制和排斥了微生物对其他底物的降解^[12].单级 SBR 系统中微生物(PAOs)在好氧吸磷过程中,首先主要利用的是胞内有机物 PHB,当降解 PHB 过程结束后,需经过较长时间的驯化培养才能使微生物适应降解难降解有机物^[12].但 SBR 的好氧反应时间不可能太长,而且下一个运行周期又会出现新一轮的 PAOs 合成 PHB 和利用 PHB 增殖、超量吸磷等过程,因此在系统中很难混合培养出对易、难生物降解底物都能充分适应的生物相.

对于两级 SBR 系统,大部分易生物降解有机物已在 SBR1 中被去除(图 3),SBR2 系统中可供微生物利用的有机物只有少量的难降解有机物(图 4),经过反复的周期性驯化培养,可以在 SBR2 反应器内培养出适应于难降解有机物的异养菌^[12].这部分难降解有机物浓度较低,不会影响硝化反应的进行,因此 SBR2 级在好氧过程中,硝化菌在进行高效率硝化反应的同时,异养菌又可有效地代谢这部分难降解的有机底物,使最终硝化结束时 COD 浓度较低.

不难理解,两级 SBR 工艺在处理水质较复杂、尤其是底物降解的难易程度相差较大的含氮磷工业废水时,会有更广阔的应用前景.

2.2.2 除磷过程分析

在两级 SBR 中,由于含氮磷的污水要经过除磷级(SBR1)和脱氮级(SBR2)两级处理运行后才排出系统,而且最终出水端为非除磷的 SBR2 级.因此,①由于微生物对磷的同化作用,SBR1 级的除磷水再经过 SBR2 级的脱氮处理运行后,可以消除 SBR1 级出水磷浓度的波动对系统最终出水磷的影响;②不存在泥水分离过程中富磷污泥的释磷作用和出水中所含有的富磷污泥颗粒对系统除磷效果的影响.这种双保险作用,在试验条件下,两级 SBR 工艺可以容易并稳定地实现出水 $TP < 0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的标准^[9].这是目前采用沉淀分离方式的常规生物除磷系统无法达到的^[5].

两级 SBR 系统除了可以获得很低且稳定的出水磷浓度外,还具有很高的除磷效率.表 2 列出了单级 SBR 和两级 SBR 除磷级(SBR1)典型周期(图 2 和图 3)除磷过程主要特征参数及其对比情况.

表 2 典型周期除磷过程主要特征参数及其对比 ¹⁾				
Table 2 Main feature parameters of phosphorus removal process and their comparison in typical cycle				
项目	进水 COD 负荷 /kg·(m ³ ·d) ⁻¹	快速释磷段释磷速率(P/MLSS·t) /mg·(g·h) ⁻¹	平均吸磷速率(P/MLSS·t) /mg·(g·h) ⁻¹	磷去除率 /%
单级	0.48	4.77 (厌氧 0.5 h)	2.58(好氧 2.0 h)	96
SBR1	1.44	6.83 (厌氧 0.5h)	4.93(好氧 1.5h)	99
SBR1/单级	3	1.43	1.91	

1) 括号中的厌氧和好氧时间为计算采用的相应时间段

根据图 2、图 3 和表 2 可知,在排水比相同和进水水质基本相同的情况下,较长污泥龄的单级 SBR 系统与较短污泥龄的 SBR1 系统具有相似的厌氧释磷和好氧吸磷过程.但缩短泥龄、提高有机负荷后,SBR1 的除磷效率较单级系统明显提高,其快速释磷段的比释磷速率和好氧段的平均比吸磷速率分别是单级系统的 1.43 倍和 1.91 倍,总的好氧吸磷时间较单级系统缩短了 0.5 h.这主要是因为较高的有机负荷和较短的泥龄抑制了硝化菌在 SBR1 系统中生存,为 PAOs 提供了优势生长的环境,使 PAOs 活性和比例明显地高于较长泥龄的单级系统.两级系统厌氧结束时较单级系统具有更低的 COD 浓度(表 1)也说明了这一特性.

2.2.3 脱氮过程分析

两系统典型周期脱氮过程特征参数及其对比见表 3.

在出水氮浓度更低的情况下(图 2 和图 4),从表 3 可知,两级系统脱氮级(SBR2)的进水氮负荷是单级 SBR 系统进水氮负荷的 6.23 倍,现从系统的硝化速率和反硝化速率 2 个方面对比分析.

表 3 典型周期脱氮过程特征参数及其对比			
Table 3 Features parameters of nitrogen removal process and their comparison in typical cycle			
项目	平均硝化速率 /mg·(L·h) ⁻¹	平均反硝化速率 /mg·(L·h) ⁻¹	进水 N 负荷 /g·(m ³ ·d) ⁻¹
单级	4.30	13.19	83.83
SBR2	38.55	47.54	522.46
SBR2/单级	8.97	3.60	6.23

(1)硝化速率

SBR2 级的平均容积硝化速率是单级 SBR 系统的 8.97 倍(表 3).这是因为在单级系统中,虽然厌氧结束时,反应器中 COD 浓度已经很低(在图 2 中为

53.86 mg•L⁻¹),但前面已指出,被去除的 COD 主要以 PHB 的形式储存于 PAOs 细胞内,进入好氧环境时,生长速率明显高于硝化菌的 PAOs 会优先以氧为电子受体,利用胞内的 PHB 作为碳源及能源进行好氧增殖和超量吸磷等代谢活动.这一方面使硝化菌得不到足够的氧而活性受到抑制,这一抑制过程由强到弱,大约持续了 1.5 h(到图 2 中的 B 点),从而使硝化速率出现了先慢后快的现象;另一方面 PAOs 旺盛的好氧代谢增殖,也相对减少了活性污泥中硝化菌的比例;同时为了兼顾除磷的要求,相对较短的污泥龄(15 d)对生长缓慢的自养硝化菌也有一定的淘洗作用.在这些因素共同作用下,使生长缓慢的硝化菌无法优势生长,因此在单级 SBR 系统中硝化速率不可能很高.

在两级 SBR 系统中,由于进水中的大部分 COD 已在 SBR1 中被去除,在 SBR2 中解除了较高的 COD 浓度对硝化菌的抑制作用,使该级可以实现长泥龄低有机负荷运行,保证了系统从好氧开始到结束,硝化速率几乎是恒定的常数(图 4),同时长泥龄运行也保证了 SBR2 系统内较高的污泥浓度,从而可获得很高的NH₄⁺-N氧化速率^[13].因此,SBR2 级的硝化速率稳定且明显高于单级 SBR.

(2)反硝化速率

SBR2 级平均容积反硝化速率是单级 SBR 的 3.60 倍(表 3).其原因分析如下:

①在单级系统中,虽然异养菌所占的比例较高,但该系统的厌氧好氧交替环境,对 PAOs 具有“生物选择器”作用,使异养菌中 PAOs 相对占优势^[14],而反硝化菌比例相对较低.

②已有研究指出^[15],在好氧过程中,异养菌可利用的有机物量越少,缺氧反硝化过程中异养菌利用有机物的能力就越强,即反硝化速率越高.这正是碳氧化菌的饱食-饥饿(feast-famine)特性^[16,17]的表现,即微生物经历了一定时间段的贫营养饥饿后,一旦进入富营养条件时,将具有更高的降解基质能力,并在其细胞内储存一部分碳源(如 PHB),供其在贫营养条件下利用.在两级系统中,大部分有机物是在 SBR1 中被去除的,SBR2 中异养菌在好氧过程中可利用的有机物量非常有限(图 4),这使得处于饥饿状态的反硝化菌进入缺氧段后具有更高的活性.但如果这种对生物不利的贫营养环境在反应周期中所占的比例过大,就会使生物在生存的过程中过度耗损自身物质来维持其基础代谢^[17],这必将影响生物活性.在单级系统中,反硝化菌首先要经历较长时间

的厌氧压抑过程,接着由于硝化菌的活性和所占的比例较低,反硝化菌还要经历较 SBR2 系统相对更长时间贫营养的好氧过程,这使得在反应周期中适合反硝化菌代谢增殖的缺氧反硝化时间所占的比例相对很小(这一比例在图 2 中仅为 0.20,而在图 4 中则达 0.5).这种连续长时间段对反硝化菌的双重压抑作用(厌氧段和好氧段),将会使其正常生长和活性受到很大的影响.

综合以上的讨论可知,在两级系统的 SBR2 级内,反硝化菌的比例和活性与单级 SBR 系统相比较都占有明显的优势,所以 SBR2 级的反硝化速率要高于单级 SBR.

两级 SBR 系统的长期运行结果还表明,在试验条件下,不论进水有机物的类型和 COD 浓度的高低,SBR1 级在除磷的同时,都能将进水中的大部分 COD 有效去除,在反硝化碳源一定的条件下,SBR2 级的硝化与反硝化速率都基本稳定,且都明显高于单级 SBR 系统.因此,两级 SBR 可以有效地缓解高有机负荷对硝化过程的冲击影响,在高效率除磷的同时,实现高效率脱氮.

2.2.4 总处理效率对比

表 4 列出了上述单级和两级 SBR 典型周期各阶段的反应时间及其对比情况.

表 4 典型周期反应时间及其对比				
Table 4 Reaction time and their comparison in typical cycle				
项目	厌氧 /min	好氧 /min	缺氧 /min	总反应时间 /min
单级	180	422	148	750
SBR1	150	90		240
SBR2		58	50	108
合计	150	148	50	348
单级/两级	1.2	2.85	2.96	2.16

可以看出,单级系统的总周期反应时间为两级系统的 2.16 倍,其中厌氧时间比为 1.2,好氧时间比为 2.85,缺氧时间比为 2.96.可见,两级工艺的处理效率是单级工艺的 2 倍以上,而且主要表现在好氧与缺氧反应过程的时间差异上.这些数据也表明,对于相同的进水,若采用两级工艺处理,反应器总容积可较单级工艺减小一半以上,而且由于曝气过程的比能耗明显高于非曝气搅拌过程的比能耗^[18],因此两级工艺运行过程的节能优势更大.两级工艺不仅处理效率高,在前 2.2.1 和 2.2.2 中已经指出,其对 COD 与磷的去除效果也是单级工艺所无法达到的.

3 结论

(1)在常温条件下,通过控制泥龄(除磷级 5~7

d, 脱氮级约 50 d) 可以将异养的 PAOs 与自养的反硝化菌分别控制在 2 个反应器中优势生长, 从而将除磷(同时去除有机物)与脱氮这 2 个相互矛盾的生化处理过程分别控制在 2 个反应器中优化完成. 在出水水质更优的情况下, 两级 SBR 工艺的处理效率可较单级 SBR 工艺提高 1 倍以上.

(2) 两级 SBR 可以消除其除磷中间级(SBR1)出水磷浓度波动对系统最终除磷效果的影响, 在出水端不存在泥水分离过程中富磷污泥的释磷作用及出水中存在富磷污泥颗粒对其出水总磷的贡献, 可以轻松并稳定地达到《城市污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002)》中的一级 A 标准($TP \leq 0.5$ mg/L).

(3) 两级 SBR 可以有效地缓解有机负荷对硝化过程的冲击影响, 在进水 COD 浓度较高的情况下, 仍然能保持其脱氮级(SBS2)具有稳定的硝化速率.

(4) 两级 SBR 的脱氮级(SBS2)系统除具有优势的硝化菌种外, 还能培养出适合降解难降解有机物的异养菌, 使系统最终出水的 COD 浓度较单级 SBR 系统更低. 因此, 两级 SBR 工艺在处理水质较复杂、尤其是底物降解的难易程度相差较大的含氮磷工业废水时, 会有更广阔的应用前景.

参考文献:

- [1] 何文远, 杨海真. 城市污水脱氮除磷工艺的比较分析[J]. 华中科技大学学报(城市科学版), 2003, 20(1): 85-87.
- [2] 龙北生, 孙大群, 边德军, 等. 采用两级 SBR 工艺优化除磷脱氮[J]. 给水排水, 2003, 29(11): 34-37.
- [3] 华光辉, 张波. 城市污水生物除磷脱氮工艺中的矛盾关系及对策[J]. 给水排水, 2000, 26(12): 1-4.
- [4] 张杰, 臧景红, 杨宏, 等. A²/O 工艺的固有缺欠和对策研究[J]. 给水排水, 2003, 29(3): 22-26.
- [5] 邱慎初, 丁堂堂. 探讨城市污水生物处理出水的总磷达标问题[J]. 中国给水排水, 2002, 18(9): 23-25.
- [6] 马培舜, 王海玲, 成丽华, 等. 昆明的城市污水处理现状及发展[J]. 中国给水排水, 2003, 19(4): 19-22.
- [7] 张冰, 周雪飞, 任南琪. 新型城市污水脱氮除磷工艺的试验研究与优化设计[J]. 环境科学, 2008, 29(6): 1518-1525.
- [8] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [9] 龙北生. 两级 SBR 除磷脱氮工艺技术及其运行控制参数研究[D]. 长春: 吉林大学, 2005.
- [10] Arun V, Mino T, Matsuo T. Biological mechanism of acetate uptake mediated by carbohydrate consumption in excess phosphorus removal systems[J]. Water Research, 1988, 22(5): 565-570.
- [11] Smolders G J F, van der Meij J, van Loosdrecht M C M, *et al.* Stoichiometric model of the aerobic metabolism of the biological phosphorus removal process[J]. Biotechnology and Bioengineering, 1994, 44(7): 837-848.
- [12] 彭永臻, 高凯, 于哲哲. 两段 SBR 法处理石油化工废水[J]. 给水排水, 1996, 22(6): 26-28.
- [13] 张雁秋, 张洁, 许翱天, 等. 废水处理生物处理高效硝化新工艺[J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33(2): 197-199.
- [14] Filipe C D M, Daigger G T. Development of a revised metabolic model for the growth of phosphorus-accumulating organisms[J]. Water Environment Research, 1998, 70(1): 67-79.
- [15] Oh J, Silverstein J. Effect of air on-off cycles on activated-sludge denitrification[J]. Water Environment Research, 1999, 71(7): 1276-1282.
- [16] Carta F, Beun J J, van Loosdrecht M C M, *et al.* Simultaneous storage and degradation of PHB and glycogen in activated sludge cultures[J]. Water Research, 2001, 35(11): 2693-2701.
- [17] 王暄, 季民, 王景峰, 等. 厌氧-好氧周期循环条件下厌氧快速吸收有机物的研究[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(2): 322-327.
- [18] 马勇, 彭永臻, 王淑莹. 缺氧-好氧生物脱氮工艺曝气量在线控制策略分析[J]. 环境科学, 2008, 29(9): 2501-2506.