

多点循环的厌氧/缺氧并联+好氧工艺脱氮除磷

赫俊国¹, 魏文涛¹, 邱 微^{1,2}, 胡惠秩¹, 刘明超¹

(1. 哈尔滨工业大学 市政环境工程学院, 150090 哈尔滨;

2. 哈尔滨工业大学 城市水资源与水环境国家重点实验室, 150090 哈尔滨)

摘要: 针对传统 A²/O 工艺脱氮除磷过程存在的营养源竞争、污泥龄等矛盾, 提出一种多点循环的厌氧/缺氧并联+好氧工艺。通过分析污泥回流至厌氧段、好氧段的量和磷的释放与吸收的相关关系及其对处理效果的影响, 考察工艺在缺氧段的脱氮效果, 研究厌氧段与缺氧段的营养源分配及其对处理效能的影响, 确定工艺的最佳运行参数, 同时利用 PCR-DGGE 技术分析工艺各段中功能菌群的生理特性。结果表明, 在厌氧段污泥回流比为 15%、好氧段污泥回流比为 30%、硝化液回流比为 300%、厌氧/缺氧进水比例为 1:1 的条件下, 系统 COD、氨氮、TN、TP 去除率分别为 92.27%、97.54%、87.52%、96.66%, 脱氮除磷效果优于 A²/O 工艺, 有效地解决了由碳源不足引起的营养物竞争以及各种功能菌群间污泥龄的矛盾等问题。

关键词: 多点循环; 厌氧/缺氧; 并联; 营养源; 生物固体平均停留时间

中图分类号: TU992.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2013)12-0026-06

Study on the phosphorus and nitrogen removal by parallel of anaerobic/anoxic+oxic process controlled by multi-point cycle

HE Junguo¹, WEI Wentao¹, QIU Wei^{1,2}, HU Huizhi¹, LIU Mingchao¹

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China;

2. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China)

Abstract: Considering the competition of carbon source and sludge age contradictions of sludge age among the various functional bacteria in traditional A²/O process, parallel of anaerobic/anoxic+oxic process controlled by multi-point cycle was introduced. The relevant relationships between return sludge ratio of anaerobic/oxic and release/absorption of phosphorus and its impact on the treatment effect were analyzed, the influence of internal recycle ratio on nitrogen removal was also studied. Moreover, the distribution of the nutrients between anaerobic and anoxic with its impact on the treatment effect was researched, then the optimum parameters of the process was finally found. After calculating the solid retention time under the best conditions of process, physiological characteristics of various functional bacteria were investigated by PCR-DGGE and 16SrRNA sequence. The results showed that the optimum parameters of the process as following, the anaerobic sludge recycle ratio was 15%, aerobic sludge recycle ratio was 30%, nitrification liquid recycle ratio was 300%, anaerobic/anoxic influent ratio was 1:1. With the optimum parameters, the removal rates of COD and ammonia were 92.27% and 97.54%, the removal rates of TN and TP were 87.52% and 96.66%. Nitrogen and phosphorus removal was better than the A²/O process. The parallel of anaerobic/anoxic + oxic process controlled by multi-point cycle could solve the problems of the competition of carbon source and contradictions of sludge age among the various functional bacteria efficiently.

Key words: multi-point cycle; anaerobic/anoxic; parallel process; nutrients; solid retention time

收稿日期: 2013-03-01.

基金项目: “十二五”国家重大科技专项(2012ZX07201002-7; 2013ZX07201007-002-002); 中国工程院咨询项目: 城市水系统植物营养源循环战略与农业可持续发展(2013.1-2014.12); 黑龙江省博士后启动金资助项目(LBH-Q12074, LBH-Q12072).

作者简介: 赫俊国(1970—), 男, 教授, 博士生导师.

通信作者: 邱 微, qwxnh@163.com.

目前, 我国污水厂普遍采用同步脱氮除磷工艺, 如 A²/O、SBR、氧化沟等. SBR 工艺对自控设备要求较高, 且生化反应均在同一空间中进行, 脱氮和除磷相互影响; 氧化沟工艺处理效果稳定, 但

占地面积大而难以在大中型城市中使用,且不适于北方寒冷地区的污水处理^[3-4];A²/O 工艺是南北方、大中小规模污水处理厂广泛采用的工艺^[5-6],具有流程简单、总水力停留时间短等优势^[7],已成为我国尤其是北方地区污水厂的主要处理工艺。然而传统 A²/O 工艺中,由于各种功能菌群对环境、营养物和生存空间的竞争,及脱氮菌群与除磷菌群之间污泥龄的矛盾,脱氮除磷的效果难以达到更高要求^[8]。针对以上问题,提出了多点循环的厌氧/缺氧并联+好氧工艺,将厌氧/缺氧工艺并联设置,出水在好氧段混合,采取控制进水和污泥、硝化液多点循环的运行方式,以期有效解决各种功能菌群间污泥龄的矛盾以及营养物竞争等问题,从而为污水厂对氮、磷污染物的深度削减提供技术支持。

1 实验

1.1 实验装置及方法

实验装置如图 1 (a)、(b) 所示,可在并联、串联两种条件下运行。处理流量为 5 L/h,总容积为 40 L。其中厌氧段、缺氧段均为 5 L;好氧段分为 3 格,有效容积为 30 L;二沉池为 13 L。通过冷水机控制反应器内部温度维持在 (22±1)℃,装置进水及各回流系统均采用 BT100-2J 型蠕动泵,在反应器各段均设有多个取样口。厌氧段和缺氧段设有 JJ-1 型增力电动搅拌器。好氧段风机选用 ACO-004 型电磁式空气泵,通过 LZB-4 型转子流量计调节曝气量,控制溶解氧在厌氧段小于 0.2 mg/L、缺氧段为 0.2~0.5 mg/L、好氧段为 1.5~2.5 mg/L。前期研究表明,当厌氧段与缺氧段进水量分别达总处理量的 30% 以上时,可满足厌氧段释磷与缺氧段反硝化的营养物需求,使营养物不成为限制因素。因此,首先固定厌氧段、缺氧段进水比例为 1:1,确定污泥回流至厌氧段的最佳范围,在此基础上确定污泥回流至好氧段的最佳范围,再考察硝化液的最佳回流量,确定厌氧/缺氧最佳进水比例,最终得到系统的最优工况点。

实验用水取自哈尔滨市某家属区的生活污水,水质指标如下 (mg/L): COD 250~380, NO₃-N 0.2~2.0, NH₃-N 30~50, TN 50~70, TP 3.5~5.5, SS 100~200。接种污泥取自正常运行污水厂的二沉池污泥,污泥指标如下: MLSS 6.5 g/L, MLVSS 4.8 g/L, SV₃₀ 50%, SVI 77。

1.2 分析方法

COD、NO₃-N、NH₃-N、TN、TP、MLSS、MLVSS、SV₃₀、DO 和 pH 均采用 2002 年国家环保

局发布的水和废水检测分析方法^[9]。实验数据均由系统稳定后采集 3 组数据取平均值得到。

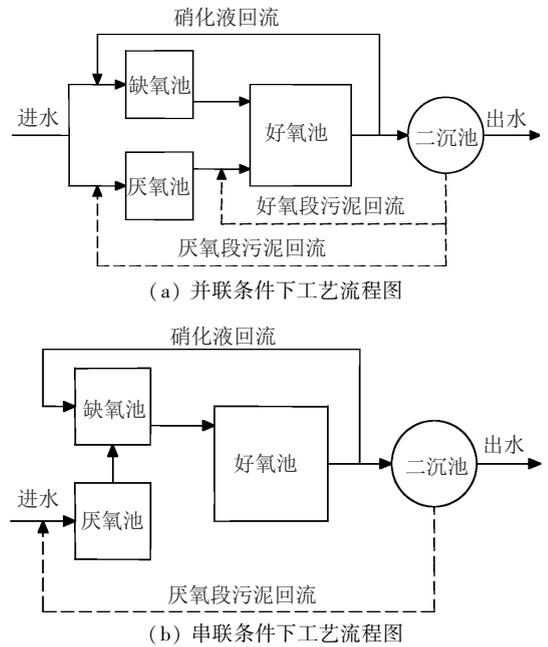


图 1 实验工艺流程图

2 结果与讨论

2.1 污泥回流比对处理效能的影响

2.1.1 厌氧段污泥回流比对除磷效果的影响

传统 A²/O 工艺中,由于聚磷菌在厌氧段释磷后先经过缺氧段,导致在好氧段吸磷动力无法充分释放,除磷效果受到影响^[10]。本实验工艺将厌氧段与好氧段直接相连,最大程度利用了厌氧段积累的吸磷动力。设置 8 组厌氧段污泥回流比,即 5%、10%、15%、20%、40%、60%、80%、100%,研究厌氧段不同污泥回流比对系统除磷效果的影响。

厌氧段释磷倍数 ($n_{\text{释}}$) 与好氧段吸磷比例 ($1:n_{\text{吸}}$) 分别定义如下:

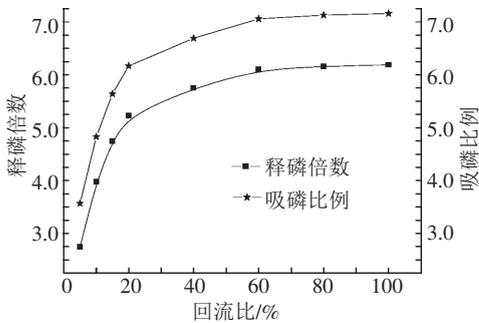
$$n_{\text{释}} = \frac{\rho_{\text{厌}}(\text{TP}) - \rho_{\text{进}}(\text{TP})}{\rho_{\text{进}}(\text{TP})}$$

$$1:n_{\text{吸}} = 1 : \frac{\rho_{\text{厌}}(\text{TP}) - \rho_{\text{好}}(\text{TP})}{\rho_{\text{进}}(\text{TP})}$$

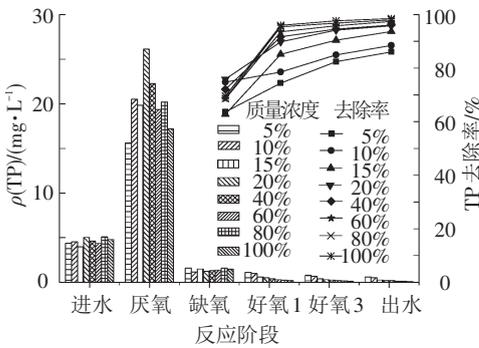
式中: $\rho_{\text{进}}(\text{TP})$ 、 $\rho_{\text{厌}}(\text{TP})$ 、 $\rho_{\text{好}}(\text{TP})$ 分别为进水、扣除稀释作用后厌氧段及好氧段 TP 质量浓度, mg/L。

由图 2(a) 可知,随着厌氧段污泥回流比的逐渐增大, $n_{\text{释}}$ 与 $1:n_{\text{吸}}$ 均随之增大,最大 $n_{\text{释}}$ 达 6.20 倍,最大 $1:n_{\text{吸}}$ 为 1:7.16, $1:n_{\text{吸}}$ 与 $n_{\text{释}}$ 有较强的相关性。当回流比低于 15% 时, $n_{\text{释}} < 4$, $1:n_{\text{吸}} < 1:5$, 主要是回流至厌氧段的聚磷菌生物量较少,造成聚磷菌的释磷量受限,因而好氧

段的吸磷量也受到影响.当回流比高于 60% 时, $n_{\text{释}}$ 维持在 6.10 ~ 6.20 倍, $1:n_{\text{吸}}$ 处于 1:7.06 ~ 1:7.16, 增大的趋势并不明显,这是因为厌氧段水力停留时间的缩短使得聚磷菌未能充分释磷,吸磷能力得不到最大程度的利用.由图 2(b)可知,随着厌氧段污泥回流比的增大,出水 TP 质量浓度逐渐降低,TP 去除率逐渐升高.当厌氧段污泥回流比低于 15% 时,系统出水 TP 质量浓度大于 0.5 mg/L,去除率低于 90%;当回流比大于等于 15% 时,去除率均高于 93% 且变化并不明显,出水 TP 均可达到国家一级 A 排放标准^[11].考虑到污泥回流比越大,动力消耗也相应增大,确定厌氧段污泥最佳回流比为 15%.



(a) 释磷倍数、吸磷比例与回流比的关系



(b) TP 沿程变化

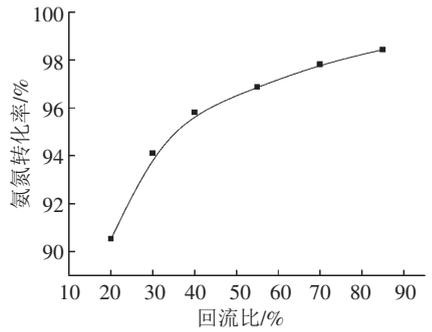
图 2 厌氧段污泥回流比与除磷效果的关系

2.1.2 好氧段污泥回流比对硝化效果的影响

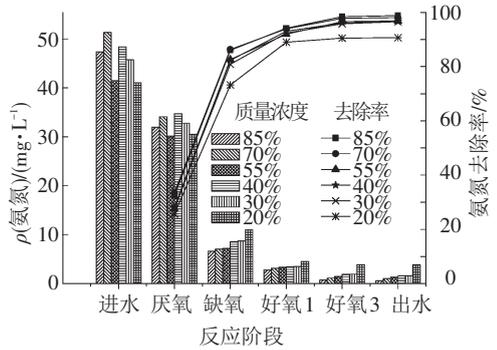
增设好氧段污泥回流可以增加好氧段的生物量,有利于系统中硝化细菌的繁殖与保持,保证好氧段的硝化效果^[12].此外,并联进水使得回流至好氧段的硝化细菌不必经过厌氧段,避免了传统 A²/O 工艺中厌氧段过低的溶解氧对硝化细菌的抑制作用.设置 6 组好氧段污泥回流比,即 85%、70%、55%、40%、30%、20%,研究好氧段不同污泥回流比对系统硝化效果的影响.

如图 3(a) 所示,随着好氧污泥回流比的逐渐增大,好氧段氨氮的转化率也随之增大,最高可达 98.44%.当回流比为 20% 时,氨氮的转化率仅为 90.52%,低于其他 5 种回流比条件下 95% 以上的氨氮转化率,这说明回流比降至 20% 时,硝化效

果已受到影响.由图 3(b) 可知,随着好氧段污泥回流比的减小,出水氨氮质量浓度由 0.57 mg/L 增至 3.82 mg/L,均能达到国家一级 A 排放标准^[11],但回流比为 20% 时出水氨氮已接近 5 mg/L 的限值,而在其他 5 组回流比条件下出水氨氮均在 1.7 mg/L 以下,因此,为保证系统对氨氮具有稳定的去除率,同时考虑回流能耗的影响,确定好氧污泥最佳回流比为 30%.



(a) 氨氮转化率与回流比的关系



(b) 氨氮沿程变化

图 3 好氧段污泥回流比与硝化效果的关系

2.2 硝化液回流比对反硝化效果的影响

研究表明^[13-15],当缺氧段的反硝化碳源充足时,系统的脱氮效率与硝化液回流比密切相关.硝化液回流量过低会直接降低氨氮转化率以及 TN 去除率,而回流量过高则会破坏缺氧环境,影响反硝化效果^[16].实验设置 5 组硝化液回流比,即 200%、250%、300%、350%、400%,研究不同硝化液回流比对反硝化效果的影响.

图 4 表明,当硝化液回流比为 200%、250%、300%、350%、400% 时,对应的系统出水 TN 质量浓度分别为 14.38、11.42、8.20、8.69、10.33 mg/L,均能满足国家一级 A 排放标准^[11],TN 去除率分别为 77.60%、81.88%、87.52%、86.60%、83.15%.随着回流比的增加,TN 去除率呈现先增加后减少的趋势.与之前的分析一致,当回流比为 300% 时脱氮效果最佳,因此,确定硝化液最佳回流比为 300%.

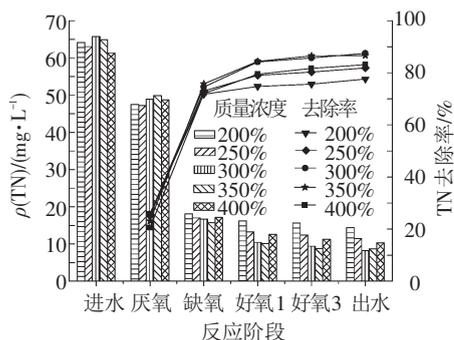


图 4 硝化液污泥回流比与反硝化效果的关系

2.3 进水比例对处理效能的影响

当进水碳源不足时, 由于反硝化细菌缺乏足够的营养物, 传统 A²/O 工艺往往会出现脱氮效果变差的情况^[17-18]. 倒置 A²/O 工艺解决了低碳源条件下的脱氮问题, 却难以实现对磷的同步去除^[19]; 外投碳源会增加系统运行费用^[20]; 利用剩余污泥发酵的上清液作为补充碳源, 受温度的影响较大^[21]. 为此, 实验工艺通过控制厌氧段、缺氧段的进水比例, 调整分配到厌氧段与缺氧段的碳源量, 为解决 A²/O 工艺中营养物竞争问题提供了新的思路. 设置 4 种进水比例, 分别为 1:3、1:1、3:1 及反应器串联, 研究不同进水比例对系统处理效果的影响.

2.3.1 进水比例对有机物去除效果的影响

由图 5 可知, 在 4 种条件下, COD 去除率分别为 92.58%、92.27%、91.02% 及 90.48%, 出水质量浓度均达到国家一级 A 排放标准^[11]. 并联条件的 COD 去除率均高于串联条件, 这是因为并联条件下进水被分流, 原水中碳源的利用率更高. 4 种条件下, 厌氧段的 HRT 分别为 4、2、1.3 及 1 h, 缺氧段的 HRT 分别为 1.3、2、4 及 1 h, 可见并联进水增加了厌氧段与缺氧段的 HRT, 生化反应进行得更为充分. 因此, 并联进水可增强系统对有机物的去除效果.

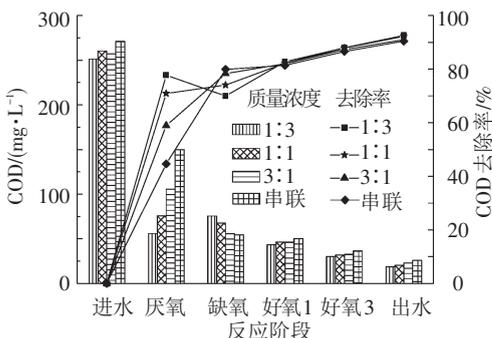
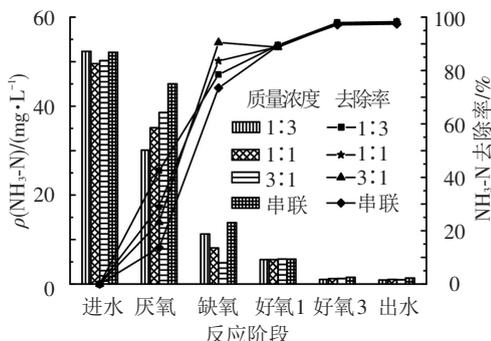


图 5 进水比例与有机物去除效果的关系

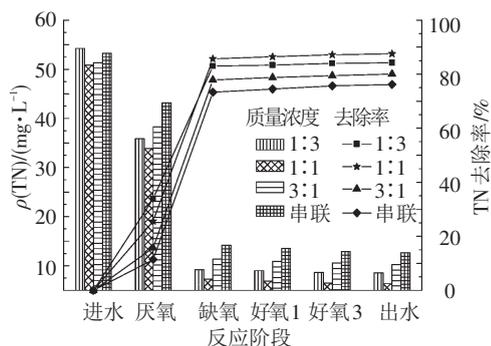
2.3.2 进水比例对脱氮效果的影响

由图 6(a)、(b) 可知, 在 4 种条件下, 氨氮去除率分别为 98.01%、97.54%、97.25% 及

96.83%, TN 去除率分别为 84.53%、87.52%、80.18% 及 76.75%, 氨氮与 TN 的出水质量浓度均达到国家一级 A 排放标准^[11]. 并联条件的氨氮与 TN 去除率均高于串联条件, 除因并联条件下缺氧段的 HRT 较长外, 还由于大部分硝化细菌与反硝化细菌不经过无意义的厌氧阶段, 生存条件更为适宜, 活性更高. 并联条件下, 系统对氨氮与 TN 去除率最高的进水比例分别为 1:3 和 1:1. 这是因为进水比例为 1:3 时好氧段首段 COD 质量浓度最低, 氨氮的去除率也最高; 而缺氧段的进水比例越低, 回流硝化液的比例越高, 在碳源充足的条件下, TN 去除率也越高. 但随着缺氧段进水比例的降低, 碳源也随之减少, 因此, 进水比例为 1:1 时, 系统对 TN 的去除效果最好.



(a) 氨氮沿程变化



(b) TN 沿程变化

图 6 进水比例与脱氮效果的关系

2.3.3 进水比例对除磷效果的影响

由图 7 可知, 在 4 种条件下, TP 去除率分别为 94.35%、96.66%、96.23% 及 95.19%, TP 出水质量浓度均达到国家一级 A 排放标准^[11]. 并联进水比为 1:3 时, TP 的去除率及厌氧段 TP 质量浓度 (16.38 mg/L) 均最低, 此时进入厌氧段的碳源量已经不能满足聚磷菌释磷所需. 在串联条件下, 厌氧段 TP 质量浓度高达 29.50 mg/L, 释磷效果最好, 但由于缺氧段的干扰, 在好氧段聚磷菌的吸磷动力无法得到充分释放. 在并联进水比为 3:1 条件下, 碳源量充足, 但厌氧段 HRT 较短, 厌氧段 TP 质量浓度为 19.36 mg/L, 未能充分发挥聚磷

菌的释磷潜能.而当并联进水比为 1:1 时,厌氧段 TP 的质量浓度为 22.56 mg/L,此时碳源量及水力停留时间等条件俱佳,因此,TP 的去除率最高.

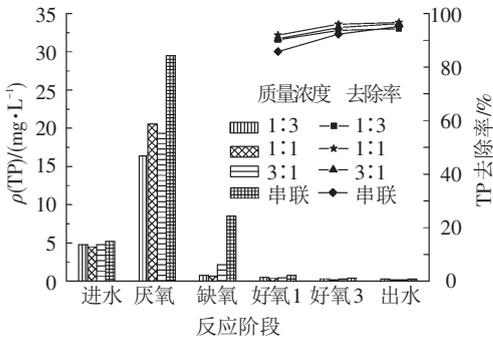


图 7 进水比例与除磷效果的关系

2.3.4 最佳进水比例的确定

由上述分析可知,并联进水比为 1:3 时,COD 及氨氮的去除率最高;而并联进水比为 1:1 时,TN 及 TP 的去除率最高,COD 及氨氮的去除率略低于进水比为 1:3 时的去除率.因此,确定厌氧/缺氧并联进水的最佳比例为 1:1.

2.4 最佳工况点条件下反应器特性

实验表明,本工艺系统的最佳运行工况点:厌氧段污泥回流比为 15%,好氧段污泥回流比为 30%,硝化液回流比为 300%,厌氧/缺氧进水比例为 1:1.此时,系统 COD 去除率为 92.27%,氨氮去除率为 97.54%,TN 去除率为 87.52%,TP 去除率为 96.66%.

2.4.1 生物固体平均停留时间的计算

实验分别测定了按传统 A²/O 工艺运行的串联工况以及厌氧/缺氧并联最佳运行工况点条件下系统内各段的 MLSS 值,结果见表 1.

表 1 两种工况下系统内各段 MLSS 值 mg·L⁻¹

工况	厌氧池	缺氧池	好氧 1	好氧 3
反应器串联	2 512	3 208	3 289	3 494
最佳工况点	1 757	3 244	3 626	3 813

由生物固体平均停留时间 t_{sr} 的计算公式

$$t_{c总} = \frac{\sum V \cdot X}{\Delta X},$$

$$t_c = \frac{V \cdot X}{\Delta X},$$

可推得

$$t_{c灰} = \frac{V_{灰} \cdot X_{灰}}{\sum V \cdot X} \cdot t_{c总},$$

$$t_{c缺} = \frac{V_{缺} \cdot X_{缺}}{\sum V \cdot X} \cdot t_{c总},$$

$$t_{c好} = \frac{V_{好} \cdot X_{好}}{\sum V \cdot X} \cdot t_{c总}.$$

式中: $t_{c总}$ 、 t_c 、 $t_{c灰}$ 、 $t_{c缺}$ 、 $t_{c好}$ 分别为系统内、各段、厌氧段、缺氧段及好氧段生物固体平均停留时间, d ; V 为各段的容积, L ; X 为各段的 MLSS, mg/L ; ΔX 为各段每日排出的活性污泥量, mg/d .

当控制系统内 t_{sr} 为 15 d 时,按传统 A²/O 工艺运行的串联工况条件下,聚磷菌和硝化细菌均需依次经历厌氧段、缺氧段及好氧段,因此,聚磷菌和硝化细菌的生物固体平均停留时间均为 15 d.而在厌氧/缺氧并联最佳运行工况点条件下,聚磷菌和硝化细菌只是分别经历厌氧段、好氧段以及缺氧段、好氧段.经计算,厌氧段、缺氧段及好氧段的 t_{sr} 分别为 0.96、1.78 及 12.26 d,可知聚磷菌的生物固体平均停留时间缩短,有利于提高除磷效率.通过回流污泥的分流控制,解决了厌氧段回流污泥中的 $NO_3^- - N$ 对聚磷菌的不利影响,除磷效率进一步加强.另一方面,虽然硝化细菌的泥龄缩短,但由于增设污泥回流至好氧段的比例较大,且大部分硝化细菌未经历厌氧段,硝化细菌的污泥质量浓度及活性均较串联工况条件下高,弥补了硝化泥龄变短的不利影响,由前面的结果可知,实验工艺的硝化效果优于传统 A²/O 工艺.

2.4.2 微生物群落结构特性分析

采用 PCR-DGGE 技术对系统中微生物群落结构特性进行分析,结果表明:除磷菌群主要分布在厌氧段与好氧段,包括纤维单胞菌属等;脱氮菌群主要分布在缺氧段与好氧段,包括 *Brachymonas* 菌属、假单胞菌属等.

3 结 论

1) 实验工艺的最佳工况点为:厌氧段污泥回流比为 15%,好氧段污泥回流比为 30%,硝化液回流比为 300%,厌氧/缺氧进水比例为 1:1.在实际应用中,若进水水质发生变化,工艺参数可按实际进行调整.

2) 在最佳工况点条件下,系统 COD 去除率为 92.27%,氨氮去除率为 97.54%,TN 去除率为 87.52%,TP 去除率为 96.66%,脱氮除磷效果优于传统 A²/O 工艺,说明通过对厌氧段和缺氧段碳源的合理分配,可以有效地解决反硝化细菌与聚磷菌对营养物的竞争问题.

3) 控制污泥分别回流到厌氧段和好氧段,可有效减少厌氧段回流污泥中 $NO_3^- - N$ 的干扰,并通过提高硝化细菌的污泥质量浓度及活性弥补硝

化泥龄变短的不利影响,提高了系统的同步脱氮除磷效果。

4) 分子生物学实验结果表明,纤维单胞菌属等除磷菌群主要分布在厌氧段与好氧段, *Brachymonas* 菌属、假单胞菌属等脱氮菌群主要分布在缺氧段与好氧段,实验工艺有效地解决了各种功能菌群对环境、营养物和生存空间的竞争问题。

参考文献

- [1] 彭赵旭, 彭永臻, 吴昌永, 等. 曝气量对 SBR 工艺同步脱氮除磷的影响研究[J]. 中国给水排水, 2008, 24(3): 13-16.
- [2] WANG Xiuheng, ZHANG Kun, REN Nanqi, *et al.* Monitoring microbial community structure and succession of an A/O SBR during start-up period using PCR-DGGE [J]. Journal of Environmental Sciences (China), 2009, 21(2): 223-228.
- [3] ZHANG Zhi, LI Bolin, XIANG Xinyi, *et al.* Variation of biological and hydrological parameters and nitrogen removal optimization of modified Carrousel oxidation ditch process [J]. Journal of Central South University of Technology, 2012, 19(3): 842-849.
- [4] PENG Yongzhen, HOU Hongxun, WANG Shuying, *et al.* Nitrogen and phosphorus removal in pilot-scale anaerobic-anoxic oxidation ditch system [J]. Journal of Environmental Sciences (China), 2008, 20(4): 398-403.
- [5] 李鹏峰, 郑兴灿, 孙永利, 等. A²/O 工艺污水处理厂的主要能耗点识别及节能途径[J]. 中国给水排水, 2012, 28(8): 6-10.
- [6] 吴昌永. A²/O 工艺脱氮除磷及其优化控制的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- [7] 徐志林. 邢台市污水厂升级改造工程的设计和运行 [J]. 中国给水排水, 2012, 28(8): 68-71.
- [8] 王晓莲, 彭永臻. A²/O 法污水生物脱氮除磷处理技术与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [9] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [10] 王振. 厌氧-缺氧生物脱氮除磷系统的稳定性及反硝化聚磷的强化研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2009.
- [11] GB18918-2002. 城镇污水处理厂污染物排放标准 [S]. 北京: 国家环境保护总局, 2002.
- [12] WU Lei, PENG Chengyao, PENG Yongzhen, *et al.* Effect of wastewater COD/N ratio on aerobic nitrifying sludge granulation and microbial population shift [J]. Journal of Environmental Sciences (China), 2012, 24(2): 234-241.
- [13] 马勇, 彭永臻, 孙洪伟. A/O 生物脱氮工艺内循环回流和外碳源投加综合控制的优化 [J]. 环境科学, 2008, 29(5): 1203-1209.
- [14] 徐伟锋, 顾国维, 张芳. 混合液回流比对 A/A/O 工艺反硝化除磷的影响 [J]. 化工学报, 2007, 58(10): 2619-2623.
- [15] BRDJANOVIĆ D, SLAMET A, LOOSDRECHT van M C M, *et al.* Impact of excessive aeration on biological phosphorus removal from wastewater [J]. Water Research, 1998, 34(1): 200-208.
- [16] WENTZEL M C, HU Z R, EKAMA G A. Anoxic growth of phosphate accumulating organism (PAOs) in biological nutrient removal activated sludge system [J]. Water Res, 2002, 36: 4927-4937.
- [17] BORTONE G, LIBELLI S M. Anoxic phosphate uptake in the dephnox process [J]. Wat Sci Tech, 1999, 40(4/5): 177-185.
- [18] MA Y, PENG Y Z, WANG X L. Improving nutrient removal of the AAO process by an influent bypass flow by denitrifying phosphorus removal [J]. Desalination, 2009, 246(1/2/3): 534-544.
- [19] 张智, 陈杰云, 李勇, 等. 处理低碳源污水的倒置 A²/O 工艺强化脱氮技术研究 [J]. 中国给水排水, 2009, 25(13): 7-12.
- [20] 杨巧林, 奚小英, 陈娜, 等. 外加碳源对污水厂异常进水时的强化脱氮效果 [J]. 中国给水排水, 2011, 27(3): 106-108.
- [21] 曹艳晓. 剩余污泥作为低碳氮比生活污水补充碳源的脱氮试验研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2010.

(编辑 刘 彤)