

HITNP 同步除磷脱氮新工艺

任南琪, 王秀衡, 董晶颖

(哈尔滨工业大学环境生物技术研究中心, 哈尔滨 150090)

摘要: HITNP 同步除磷脱氮新工艺采用复合式活性污泥生物膜系统, 避免了硝化菌和聚磷菌的污泥龄矛盾。利用反硝化除磷的“一碳两用”缓解原水碳源不足的矛盾。通过独特的硝化液回流方式, 使全部污泥经历了释磷和聚磷循环, 厌氧池污泥浓度是缺氧池污泥浓度的 1.5~2 倍, 对进水中的大分子有机物降解效果好, 厌氧池 COD 的去除率高, 强化系统的除磷能力。以低碳氮比的生活污水为处理对象, 长期的运行结果表明, 该工艺出水中的总磷、氨氮、总氮和 COD 的去除率分别为 91.1%、88.7%、58.1% 和 88.6%。出水水质平均值为磷 0.27 mg/L, 氨氮 1.74 mg/L, 总氮 17.30 mg/L 和 COD 24.38 mg/L。HITNP 同步除磷脱氮新工艺具有稳定的同步除磷脱氮效果, 出水达到国家城市污水厂污染物排放标准 GB18918-2002 一级 B 标准要求。

关键词: HITNP; 复合式反应器; 活性污泥; 生物膜; 反硝化除磷; 硝化

中图分类号: X703.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2007)01-0108-05

Simultaneous Phosphorus and Nitrogen Removal in Novel HITNP System

REN Nan-qi, WANG Xiu-heng, DONG Jing-hao

(Research Center of Environment & Biotechnology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: Simultaneous fixed-film nitrification, denitrification and enhanced phosphorus uptake were investigated in a lab-scale HITNP (Harbin Initiative Technology of Nitrogen and Phosphorus removal) configuration. This innovative nutrient removal process was a combined activated sludge and fixed-film process, worked with supernatant recycle regime. Hybrid activated sludge-biofilm reactor was applied in the experiment unit to solve the problem of overgrowing of slow growing nitrifiers by faster heterotrophs. High anaerobic sludge concentration originated from supernatant recycle and total anaerobic/aerobic sludge recycle of HITNP other than part sludge recycle of traditional A²/O configuration contributed to high phosphorus removal efficiency. The purpose of the experiment was to examine phosphorus and nitrogen removal capacity of urban sewage by the HITNP system. Results of long term operation of HITNP working with low TKN/COD ratio domestic wastewater show effective phosphorus and nitrogen removal efficiency because it maximizes the utilization of organic substrate for phosphorus and nitrogen removal by simultaneous anoxic phosphorus uptake and denitrification. The removal efficiency and effluent concentration of TP, NH₄⁺-N, TN and COD are 91.1%, 88.7%, 58.1%, 88.6% and 0.27 mg/L, 1.74 mg/L, 17.30 mg/L and 24.38 mg/L in average, respectively.

Key words: HITNP process; hybrid system; activated sludge; biofilm; anoxic phosphorus uptake; nitrification

氮和磷去除需涉及硝化、反硝化、释磷和吸磷等过程, 每一个过程对微生物组成、基质类型及环境条件的要求不一样, 在同一污水处理工艺系统中就不可避免地产生各过程间的矛盾关系^[1]。主要问题是:

只有单一的活性污泥系统, 系统中硝化菌与聚磷菌间存在污泥龄矛盾, 硝化菌世代周期较长, 而聚磷菌多为短世代微生物; 缺氧反硝化、厌氧释磷过程对 COD 的需求量大, 要同时达到氮磷的去除目的, 要求进水有较高的碳氮比和碳磷比, 一般而言, 城市污水中碳氮比至少为 9^[2]; 前置反硝化脱氮模式使回流污泥中的硝酸盐进入厌氧区对聚磷菌释磷产生不利影响^[3]; 由于存在内循环, 所排放的剩余污泥中只有少部分经历了完整的释磷、吸磷过程, 其余则基本上未经厌氧状态而直接由缺氧区进入好氧区, 除磷效果不好^[4]。实际应用中脱氮效果和除磷效果很难同时达到最佳^[5], 运行效果不稳定且能耗高。在污水处理工艺的系统设计及运行中采用以下的方

法来调和除磷和脱氮矛盾: 兼顾硝化菌与聚磷菌的需要, 将泥龄控制在较窄的范围内; UCT、JHB 采用污泥与混合液的多重回流减小硝酸盐对厌氧释磷的影响; 近年来广泛研究的反硝化除磷脱氮工艺 DEPHONOX, 通过“一碳两用”减小碳源竞争^[6, 7], 但工艺流程较长, 系统复杂, 需要控制的参数多; 采用生物膜与活性污泥结合工艺可以使不同的菌类生长在各自最佳环境条件下, 脱氮和除磷效果同时达到最佳, 而且工艺的可控性增强。刘俊新的研究表明, 采用生物膜与活性污泥结合工艺处理城市污水, 氨氮去除率达 99% 以上, TN、TP 和 COD 的去除率分别达到 85%、95% 和 95%^[8, 9]。

我国目前的江河湖库富营养化的限制因子多为

收稿日期: 2005-11-23; 修订日期: 2006-02-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(50508011); 哈尔滨工业大学市政环境工程学院青年研究基金项目(2004)

作者简介: 任南琪(1959~), 男, 教授, 主要研究方向为高浓度难降解有机废水处理技术, 生物制氢理论与技术, 微生物生理生态学及分子生态学和生物脱氮除磷技术。

磷,城市污水处理厂的国家排放标准对磷的要求更严格,排入地表 Ⅲ类水体的污水达到 GB18918-2002 一级 B 标准,即 $TN < 20 \text{ mg/L}$ 、 $NH_4^+-N < 8 \text{ mg/L}$ (水温低于 $12 \text{ }^\circ\text{C}$ 时 15 mg/L)、 $TP < 1 \text{ mg/L}$ 。我国现行工艺的氮磷同步去除效果不佳多表现为除磷效果更差,开发具有更稳定除磷效果的工艺势在必行。HITNP (Harbin Initiative Technology of Nitrogen and Phosphorus removal) 同步除磷脱氮工艺应用活性污泥与生物膜复合式反应器和独特的回流方式,将制约和影响因素分解,使脱氮和除磷效果同时达到最佳。通过反硝化除磷脱氮“一碳两用”减小碳源竟,尤其适用于低碳氮比的城市污水处理,而且具有流程简单、效果稳定和低耗高效的特点。

1 工艺概述

HITNP 同步除磷脱氮工艺流程如图 1 所示,由接触池、厌氧池、缺氧池、生物膜-活性污泥复合式好氧池和沉淀池组成。原水先进入接触池,与沉淀池回

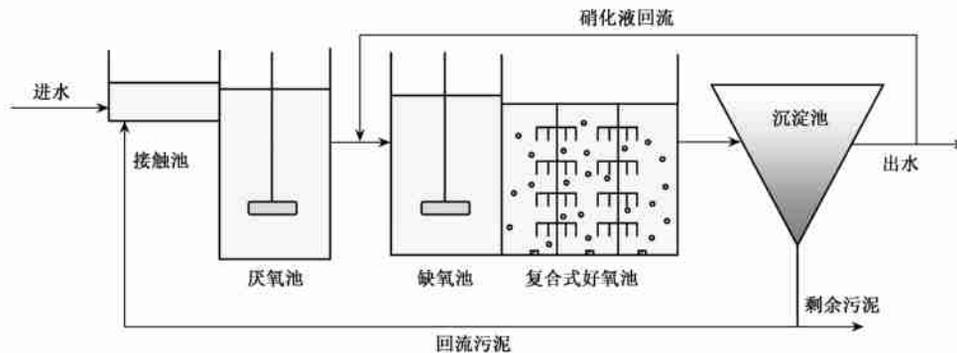


图 1 HITNP 同步除磷脱氮工艺流程

Fig. 1 Configuration of HITNP system

HITNP 同步除磷脱氮工艺具有以下优点: 通过设立厌氧接触池,将污泥中携带的少量硝酸盐迅速反硝化,避免对释磷造成影响; 以沉淀后的硝化液回流代替了 A^2/O 工艺和 UCT 工艺的混合液回流,因此全部污泥经历了厌氧、缺氧和好氧的循环。厌氧区污泥浓度高,可以达到 1.5~2 倍缺氧池污泥浓度,对进水中的大分子有机物降解效果好,释磷充分,工艺除磷效率高; 好氧硝化池采用复合式活性污泥与生物膜反应器,是微生物附着生长和悬浮生长的组合构筑物,可以提高生物量,有效地防止生物固体从系统中流失,提高了生物处理系统抗冲击负荷和有毒有害物质的能力,改善二沉池固液分离效果^[10, 11]。同时硝化菌可栖息于填料表面固着于生物膜上,不参与污泥回流,一定程度上将污泥龄长且不

流的富含聚磷菌 PAO (包括反硝化聚磷菌 DPAO) 的活性污泥短暂混合,将污泥中携带的少量硝酸盐迅速反硝化,然后进入厌氧池,在厌氧池中 PAO 吸收大量的简单低分子量的有机物以聚- β -羟基烷酸酯 (PHA) 形式贮存在体内,同时释放磷。含有氨氮、磷、少量剩余有机物和已释放磷的聚磷菌的泥水混合液进入缺氧池,与沉淀后回流的含有硝酸盐的上清液混合, DPAO 以硝酸盐为电子受体进行反硝化聚磷; 受硝酸盐量的限制,反硝化聚磷可能不完全。缺氧池出水进入固定安装有半软性填料的生物膜活性污泥复合式好氧池中,好氧池具有 2 个污泥系统,硝化菌固着生长于填料表面生物膜上不参与污泥回流,聚磷菌悬浮生长并在整个系统中循环。生物膜完成硝化反应,聚磷菌完成剩余有机物的降解和将反硝化聚磷后残余磷吸收完全。好氧池出水含有硝酸盐和残余的难降解有机物,经沉淀池泥水分离后,沉淀浓缩的含聚磷菌污泥返回至接触池降解有机物和释磷,上清液回流至缺氧池为 DPAO 提供硝酸盐。

耐受低温的硝化菌与聚磷菌分开,实现了微生物相分离,避免了污泥龄的矛盾^[12]。这种作法的优点是既达到了分离不同生态位微生物的目的,又维持了常规 A^2/O 工艺的简捷特点; 通过缺氧反硝化除磷“一碳两用”,缓解反硝化和释磷对 COD 的需求矛盾,减少剩余污泥产量和好氧量,其所需的 C/N 较低,尤其适用于高氨氮含量工业废水和低碳氮比的城市污水处理。

2 材料与方法

实验装置由有机玻璃制作。进水由电磁计量泵定量投加,回流硝化液和回流污泥采用蠕动泵控制。厌氧池和缺氧池用搅拌器混合。好氧池装填半软性盾式纤维填料,装填密度为 25%,该填料由变性聚

乙烯塑料圆盘骨架支撑多层腈纶丝的薄片串联组成,比表面积 $62 \text{ m}^2/\text{m}^3$,比容积 $1.8 \sim 2.2 \text{ L}/\text{m}^3$,池底部安装有粘砂微孔曝气条,用电磁空气压缩机通过空气流量计供氧,溶解氧控制在 $3 \sim 5 \text{ mg}/\text{L}$ 。

试验从 2004-05 开始,约 1 个月分别完成聚磷污泥驯化和硝化生物膜挂膜,然后将填料整体安装在好氧池内,将聚磷污泥投入到厌氧池,开始启动 HITNP 同步除磷脱氮连续流反应器。本工艺的最初运行参数参考其他工艺确定,因此各反应池的容积可调,用人工合成污水进行参数调整与优化,历时 2 个月确定最终的运行参数。最初可调与最终选用的各反应池容积与运行参数见表 1。然后以哈尔滨工业大学校园生活污水为试验用水,考察 HITNP 处理城市污水的效果和影响因素,污水水质见表 2。进水量 $2.5 \text{ L}/\text{h}$,生物反应池水力停留时间 12.7 h ,水温随室温变化,在 $18 \sim 24$ 之间。硝化液和污泥回流比通过试验和计算确定为 120% 和 80% 。

表 1 HITNP 工艺运行操作参数

Table 1 Technological parameter of lab-scale HITNP system

反应池	可调容积/L	选用容积/L	HRT/h
厌氧接触池	0.5 ~ 1.5	0.5	0.2
厌氧池	7.2	7.2	2.9
反硝化除磷池	7.2 ~ 14.4	9.6	3.8
复合式好氧池	14.4	14.4	5.8
生物反应池总计	29.3 ~ 36.6	31.7	12.7
沉淀池	9.0 ~ 12.0	9.0	3.6

表 2 污水水质统计表

Table 2 Average influent characteristics

项目	范围	平均值
COD/ mg L^{-1}	117.13 ~ 262.5	218.65
$\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{mg L}^{-1}$	16.68 ~ 38.75	29.37
TN/ mg L^{-1}	28.67 ~ 49.52	41.31
TP/ mg L^{-1}	3.60 ~ 8.42	5.08
pH	6.80 ~ 7.34	7.05
COD/TN	4.35 ~ 6.58	5.39
COD/TP	30.31 ~ 64.65	46.58

经过一段时间调整,污泥系统逐渐从人工合成污水适应实际生活污水。系统稳定运行期间(2004-10 ~ 2004-12),每周 2 次采集原水和各反应池出水的水样,过滤后采用国家标准方法分析 COD、TP、TN、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、 NO_2^--N 、MLSS 等。

3 结果与讨论

3.1 氮的去除

城市污水的总氮主要由有机氮和氨氮组成。试

验原水的总氮为 $28.67 \sim 49.52 \text{ mg}/\text{L}$,平均 $41.31 \text{ mg}/\text{L}$,氨氮 $16.68 \sim 38.75 \text{ mg}/\text{L}$,平均 $29.37 \text{ mg}/\text{L}$,原水还有少量的硝态氮 $0.41 \sim 2.71 \text{ mg}/\text{L}$,平均 $1.17 \text{ mg}/\text{L}$ 。除第 56 ~ 63 d 运行故障期间,本试验系统出水总氮为 $13.20 \sim 19.40 \text{ mg}/\text{L}$,去除率保持在 $51.60\% \sim 63.54\%$,出水氨氮 $0.14 \sim 3.22 \text{ mg}/\text{L}$,平均为 $1.74 \text{ mg}/\text{L}$,去除率 $87.92\% \sim 99.33\%$,如图 2 和图 3 所示。

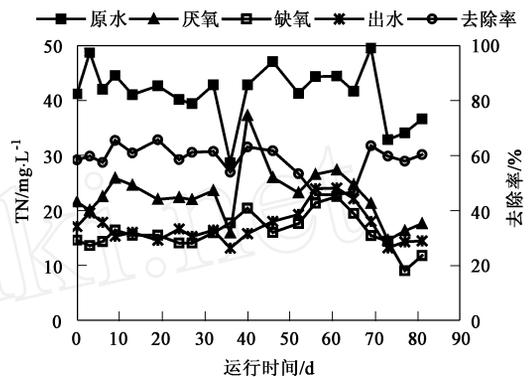


图 2 总氮的去除效果

Fig. 2 Daily variation of TN removal

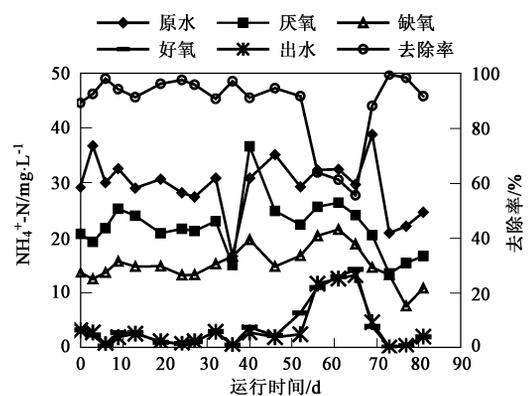


图 3 氨氮的去除效果

Fig. 3 Daily variation of ammonia removal

原水中的总氮和氨氮浓度进入接触池后被回流污泥稀释,污泥中携带的少量硝酸盐迅速反硝化,在厌氧池有机氮氨化为氨氮,进入缺氧池后氨氮再次被回流消化液稀释,但总量没有变化。

由图 4 可知,氨氮在好氧池被转化为硝酸盐氮,生物膜系统的硝化效果很稳定,进水总氮在 $28.67 \sim 49.52 \text{ mg}/\text{L}$ 之间较大波动时,出水硝酸盐氮为 $12.43 \sim 17.09 \text{ mg}/\text{L}$,氨氮在 $3.22 \text{ mg}/\text{L}$ 以下,原水氨氮硝化率大于 88% 。各反应阶段也没有出现亚硝酸盐积累,缺氧池亚硝酸盐小于 $0.1 \text{ mg}/\text{L}$,出水小于 $0.5 \text{ mg}/\text{L}$ 。

由于 HITNP 同步除磷脱氮工艺采用复合式活

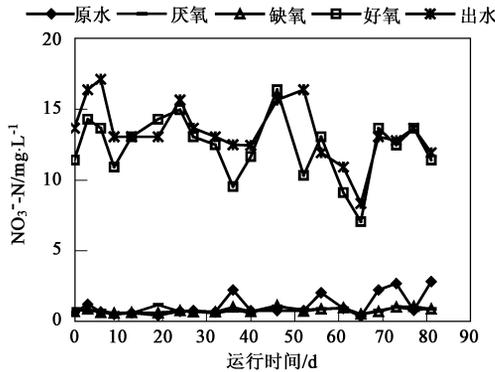


图4 硝酸盐氮在各反应阶段的变化

Fig.4 Course of nitrate concentration

性污泥与生物膜反应器,硝化效果受到了填料类型和布置方式的制约,应满足以下条件^[3]: 投放填料后必须给悬浮性活性污泥以充分的增殖机会,防止生物膜越来越多而悬浮污泥越来越少的情况发生;

要保证足够的搅拌强度,防止因填料截留作用致使污泥在填料表面间大量结团; 填料投放量必须适中,太少难以发挥作用,太多则难免出现对污泥的截留.因此,试验采用半软性盾式纤维填料,装填密度为 25%,同时控制曝气量与曝气方式,保证足够的搅拌强度.

本试验模型较小,有时系统运行不畅而导致各反应池污泥循环不平衡,有时甚至出现缺氧池污泥浓度超过厌氧池的现象,此时对处理效果有影响.运行的第 56~61 d,由于曝气砂条故障,搅拌强度降低,污泥堆积在硝化池,生物膜增厚导致供氧不足,部分污泥上浮随出水流失,硝化效果减弱,氨氮和总氮的去除率都下降.通过增大曝气量,加大剩余污泥排放量,5 d 以后硝化能力开始恢复.

HITNP 工艺采用的经过沉淀分离后硝化上清液回流,只有一部分硝酸盐进入缺氧池为 DPAO 提供电子受体进行反硝化聚磷,转化为氮气从污水中逸出实现脱氮,因此总氮去除率不高.当提高硝化液回流比时,可以提高总氮的去除率,但回流比的提高与总氮去除率的提高是非线性关系,回流动力消耗和沉淀池容积都要增加,以达到排放标准要求为目标,计算初选为 100%~200%,通过试验确定为 120%.

3.2 磷的去除

原水的总磷为 3.60~8.42 mg/L,平均 5.07 mg/L,正常运行时出水总磷在 0.86 mg/L 以下,平均 0.27 mg/L,平均去除率 91.1%,如图 5 所示.

厌氧池中聚磷菌吸收原水中有有机物同时释放磷,厌氧池总磷浓度达 18~33 mg/L;磷的释放较好,

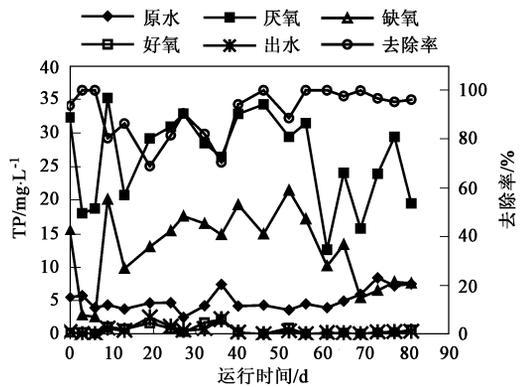


图5 总磷的去除效果

Fig.5 Daily variation of TP removal

主要由于全部污泥经历了厌氧、缺氧和好氧的循环,厌氧池污泥浓度高,沉淀池污泥回流携带的少量硝酸盐在接触池迅速反硝化,也为厌氧释磷扫清障碍.总磷进入缺氧池后被回流硝化液稀释,同时 DPAO 以硝酸盐为电子受体进行反硝化聚磷.

由图 6 总磷在各反应池的变化规律可知,当硝化液回流比 120%,污泥回流比 80%时,厌氧池总磷浓度 26.29 mg/L,进入缺氧池后降低为 10.49 mg/L.受回流硝酸盐量的限制,反硝化聚磷可能不完全;残余的磷在好氧池内通过好氧聚磷去除,出水磷浓度为 0.54 mg/L.

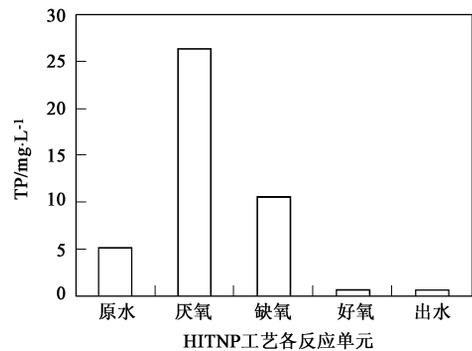


图6 TP在各反应池的变化规律

Fig.6 Variation of TP concentration in different reactor stage

试验过程中出现 2 次出水磷含量超标.第 19 d 由于污泥回流泵故障导致污泥没及时回流到厌氧池造成.第 36 d 由于原水氨氮含量显著下降而磷含量却增加,导致进入缺氧池硝酸盐含量不足,反硝化聚磷不充分,后续的好氧聚磷的能力也有限,出水磷含量高达 2.24 mg/L.说明当进水 N/P 过低时单独应用反硝化聚磷工艺会引起除磷不完全,应强化好氧聚磷的调节能力.

受模型的边界条件和蠕动泵对污泥絮体结构的

影响,小试系统不能保持过高的污泥浓度. 试验中保持厌氧池悬浮污泥浓度(VSS) 1.79 ~ 2.10 g/L, 缺氧池悬浮污泥浓度(VSS) 1.04 ~ 1.18 g/L, SVI 为 110 ~ 125 mL/g. 由于总磷去除与悬浮污泥浓度有关, 实际应用可以提高悬浮污泥浓度, 取得更好的处理效果.

3.3 COD 的去除

试验生活污水的 COD 含量较低, 为 117.13 ~ 262.50 mg/L, 平均 218.65 mg/L, 正常运行时出水 COD 为 14.66 ~ 33.60 mg/L, 平均 24.38 mg/L. 此时系统对 COD 的去除率为 82.99 % ~ 93.09 %, 平均去除率为 88.6 %, 如图 7 所示. 可见 HITNP 系统对 COD 的去除是稳定且高效的.

从图 7 还可以看出 HITNP 工艺处理生活污水 COD 在各反应池的变化规律. 经厌氧池后, COD 有大幅度的下降, 平均值从进水的 218.65 mg/L 降至 58.31 mg/L, 原水中能被聚磷菌吸收的挥发酸(VFA)即简单低分子量的有机物含量约为 21.0 % ~ 25.3 %, 厌氧池污泥(VSS) COD 负荷 0.500 ~ 1.122 g/(g·d), 但厌氧池 COD 的去除率却高达 73.33 % 以上, 主要因为 HITNP 工艺以沉淀后的硝化液回流代替了 A²/O 工艺的混合液回流, 厌氧池污泥浓度高, 可以达到 1.5 ~ 2 倍缺氧池污泥浓度, 对进水中的大分子有机物降解效果好, 降解产生的低分子有机物可以被聚磷菌利用. 同时通过厌氧段大量利用有机物来贮存 PHB 和充分释磷, 可以确保缺氧段聚磷菌体内有足够的贮存物作为电子供体实现反硝化吸磷. 厌氧段对 COD 的去除率越大, 对后续的缺氧反硝化聚磷和膜法硝化就越有利. 大部分 COD 在厌氧段去除, 降低了需要好氧氧化的有机物量, 较传统活性污泥法节省了供氧量.

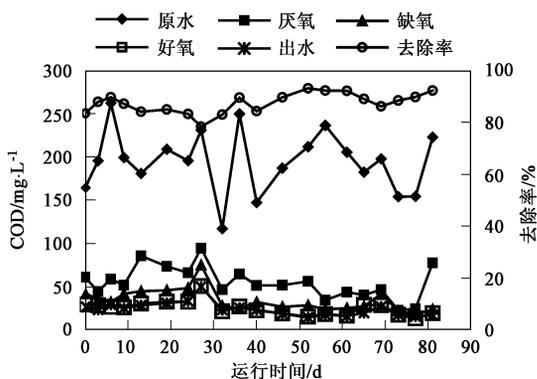


图 7 COD 的去除效果

Fig. 7 Daily variation of COD removal

4 结论

(1) HITNP 同步除磷脱氮工艺采用复合式活性

污泥生物膜系统, 避免了硝化菌和聚磷菌的污泥龄矛盾; 利用反硝化除磷的“一碳两用”缓解原水碳源不足的缺陷; 硝化液回流代替 A²/O 工艺的混合液回流, 厌氧池污泥浓度是缺氧池污泥浓度的 1.5 ~ 2 倍, 对进水中的大分子有机物降解效果好, 是厌氧池 COD 去除率高的主要原因. 同时使全部污泥经历了释磷和聚磷循环, 强化系统的除磷能力, 工艺除磷效果稳定.

(2) 长期的运行结果表明, 该工艺具有稳定的同步除磷脱氮效果, 高效低耗. 在本试验条件下, 以低碳氮比的生活污水为处理对象, 正常运行时出水的总氮为 13.20 ~ 19.40 mg/L, 去除率保持在 51.60 % ~ 63.54 %, 出水的氨氮 0.14 ~ 3.22 mg/L, 平均为 1.74 mg/L, 去除率 87.92 % ~ 99.33 %. 出水总磷在 0.86 mg/L 以下, 平均 0.27 mg/L, 平均去除率 91.1 %, 其中部分是以反硝化聚磷的形式去除的. 出水 COD 为 14.57 ~ 33.60 mg/L, 平均为 24.92 mg/L, 去除率为 82.99 % ~ 93.09 %, 平均 88.6 %, 厌氧池 COD 的去除率高达 73.33 % 以上. HITNP 工艺系统对生活污水的处理是稳定且高效的, 出水已经达到国家《污水综合排放标准》(GB18918-2002) 一级 B 排放标准.

参考文献:

- [1] 全恩丛, 郭会杰, 赵福信. 保定市污水处理总厂 A²/O 工艺运行管理[J]. 给水排水, 2000, 26(2): 18 ~ 21.
- [2] Metcalf, Eddy Inc. Wastewater engineering, treatment and reuse (4th edition) [M]. New York: McGraw-Hill, 2003. 810 ~ 815.
- [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] 张波, 高廷耀. 倒置 A²/O 工艺的原理与特征研究[J]. 中国给水排水, 2000, 16(7): 11 ~ 15.
- [5] 冯生华, 姚念民. 生物除磷脱氮工艺的探讨[J]. 给水排水, 1994, 20(2): 18 ~ 21.
- [6] Bortone G, Saltarelli R, Alonso V, et al. Biological anoxic phosphate removal—the DEPHONOX process [J]. Wat. Sci. Tech., 1996, 34(1-2): 119 ~ 128.
- [7] Bortone G, Libelli S, Tiche A, et al. Anoxic phosphate uptake in the DEPHONOX process [J]. Wat. Sci. Tech., 1999, 40(4-5): 177 ~ 185.
- [8] 刘俊新, 丛丽, 王宝贞, 等. 生物膜与活性污泥结合工艺脱氮除磷研究[J]. 中国给水排水, 2000, 16(12): 1 ~ 5.
- [9] Liu J, Li W, Wang X, et al. Removal of nitrogen from coal gasification wastewater by nitrification and denitrification [J]. Wat. Sci. Tech., 1998, 38(1): 39 ~ 46.
- [10] Park TJ, Lee KH. Dyeing wastewater treatment by activated sludge process with a polyurethane fluidized bed biofilm [J]. Wat. Sci. Tech., 1996, 34(5-6): 193 ~ 200.
- [11] Su J, Ouyang C. Nutrient removal using a combined process with activated sludge and biofilm [J]. Wat. Sci. Tech., 1996, 34(1-2): 477 ~ 486.
- [12] Chuang S H, Ouyang C F, Yuang H C, et al. Effects of SRT and DO on nutrient removal in a combined AS-Biofilm process [J]. Wat. Sci. Tech., 1997, 36(12): 19 ~ 27.