

梁玲燕, 汤兵, 杨康华, 等. 2013. 纳米磁粉协同邻氨基苯酚优化活性污泥工艺运行效能研究[J]. 环境科学学报, 33(6):1616-1623

Liang L Y, Tang B, Yang K H, et al. 2013. Optimization of the operation efficiency of an activated sludge process by the synergistic effects of nano-magnetic particles and *o*-aminophenol[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 33(6):1616-1623

纳米磁粉协同邻氨基苯酚优化活性污泥工艺运行效能研究

梁玲燕, 汤兵*, 杨康华, 黄绍松, 付丰连, 罗建中

广东工业大学环境科学与工程学院, 广州 510006

收稿日期: 2012-09-28

修回日期: 2012-12-09

录用日期: 2012-12-09

摘要: 在纳米磁粉(NMPs)和邻氨基苯酚(OAP)的协同作用下,可以达到优化活性污泥工艺的运行效能和从源头上减少剩余污泥产量的目的. 纳米磁粉和邻氨基苯酚被分别和同时投加到序批式反应器(SBR)中来实验研究. 实验结果表明:在OAP的单独作用和二者协同作用下污泥产量分别减少了31%和25%. NMPs与OAP协同作用下对COD和TP的去除率比OAP单独作用下分别增加了8%和5%,出水 NH_4^+ -N的浓度和平均SVI值分别下降了58%和10%. 连续运行36d后,OAP和NMPs协同作用下的脱氢酶活性比对照增加了6%,镜检发现:生物反应器中活性污泥絮体结构紧密,并且存在大量种类繁多的原生和后生动物. 研究表明,在纳米磁粉和OAP的协同作用下可有效地实现剩余污泥减量化、改善污泥的沉降性能,并能抑制仅加入解耦联剂(OAP)对活性污泥工艺效能产生的不良影响.

关键词: 邻氨基苯酚; 纳米磁粉; 工艺运行效能; 污泥减量

文章编号: 0253-2468(2013)06-1616-08

中图分类号: X703

文献标识码: A

Optimization of the operation efficiency of an activated sludge process by the synergistic effects of nano-magnetic particles and *o*-aminophenol

LIANG Lingyan, TANG Bing*, YANG Kanghua, HUANG Shaosong, FU Fenglian, LUO Jianzhong

School of Environmental Science and Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006

Received 28 September 2012;

received in revised form 9 December 2012;

accepted 9 December 2012

Abstract: This study was focused on optimizing the operation efficiency of an activated sludge process and minimizing the production of the excess sludge from its sources by utilizing the synergistic effects of nano-magnetic particles (NMPs) and *o*-aminophenol (OAP). The production of the excess sludge was reduced by 31% with OAP added into the sequence batch reactor (SBR), and by 25% with the co-addition of NMPs and OAP. In comparison with OAP addition only, the co-addition of NMPs and OAP elevated the removal of COD and P by 8% and 5%, respectively, while decreased the concentration of NH_4^+ -N in effluent and the average SVI by 58% and 10%, respectively. After operation for 36 days, the activity of dehydrogenase in an experimental bioreactor was found to increase 6% under the synergistic action of NMPs and OAP in comparison with the control bioreactor. By using an optical microscope, it was observed that diversified protozoan and metazoan existed in the experimental bioreactor with compact sludge floc. Such results demonstrated that the combination of NMPs and OAP has an obvious synergistic effect in effectively restricting the production of excess sludge, improving the settling property of sludge, and reducing the negative effect to the operation of an activated sludge process with adding OAP only.

Keywords: OAP; nano-magnetic particles; process performance; volume-reduction of the excess sludge

1 引言(Introduction)

活性污泥工艺因具有处理效果好、基建投资费用少等优点,成为当前污水处理技术领域中应用最为广泛的技术之一,但其具有一个重大的弊端——

运行过程中会产生大量的剩余污泥(Ye and Li, 2010). 剩余污泥中含有很多有毒有害的物质,若得不到妥善处理,会给人类健康和环境安全造成威胁,因此,剩余污泥的减量化势在必行,而从源头上减少剩余污泥的产量则是关键的步骤之一.

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 51178120)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(No. 51178120)

作者简介: 梁玲燕(1988—),女, E-mail: llyzhf1029@126.com; * 通讯作者(责任作者), E-mail: renytang@163.com

Biography: LIANG Lingyan(1988—), female, E-mail: llyzhf1029@126.com; * Corresponding author, E-mail: renytang@163.com

20 世纪 90 年代开始,投加解偶剂法作为一种新颖的从源头上使污泥减量化的工艺开始得到人们的关注.国内外的学者(Tian *et al.*, 2010; Zheng *et al.*, 2007; Chen *et al.*, 2002; 唐琼等, 2012; Ricco *et al.*, 2004; Sahinkaya *et al.*, 2005) 对此有很多的研究.结果表明:在活性污泥中添加解偶联剂,可以有效的减少剩余污泥产量.虽然解偶联剂可以有效减少污泥的产量,但是解偶联剂的加入,会对工艺运行效能和污泥沉降性能等造成一定的负面影响,如对 COD、 NH_4^+ -N、TP 的去除率下降、污泥沉降性能变差、原生和后生动动物减少等(Xie, 2002; 顿米娜等, 2009; Zheng *et al.*, 2008). 因此,寻求到一种可以减少这些影响的方法,对于解偶联剂在工程上的应用是至关重要的.

近来,磁性污泥法受到大家的广泛关注,这是因为加入纳米磁粉(NMPs)后具有可以强化活性污泥对 COD、 NH_4^+ -N 和 TP 的去除、提高污泥的沉降性能及活性等(林永波等, 2007; Yavuz *et al.*, 2000; 任月明等, 2008; 潘涌璋等, 2011) 优点. NMPs 之所以可以给活性污泥带来这些影响,主要原因有以下 3 方面:第一, NMPs 表面带有电荷并且具有很大的比表面积,因此具有很强的吸附能力,可以吸附大量的有机物和微生物,并在 NMPs 表面形成生物膜,为世代时间长的细菌提供了合适的栖息地,从而强化了活性污泥氧化分解有机物和脱氮除磷的能力;第二, NMPs 很容易吸附菌胶团,形成菌胶团粒,增大了污泥絮体比重,加速污泥沉降,从而提高活性污泥的沉降性能;第三,加入 NMPs 的活性污泥中的微生物会因为受磁作用而产生正的磁生物效应,从而成为生物催化剂,提高了生物酶的活性进而提高微生物的活性.上述特点为解决引入解偶联剂对活性污泥运行效能的负面影响提供了解决方案.

笔者所在的研究团队尝试了用 TCP 协同 NMPs 对活性污泥性能影响进行了研究,污泥减量化效果明显,但对 C、N、P 去除效能及污泥沉降性能无明显影响.目前国内外研究较多的是氯酚和硝基酚类解偶联剂对污泥产量的减量化和工艺效能的影响研究,但对氨基酚类对活性污泥的影响及如何减小解偶联剂给工艺运行效能带来的这些负面影响的研究很少.所以为了达到在尽量发挥解偶联剂污泥减量化作用的同时减少解偶联剂的应用给工艺运行效能带来的负面影响的目的,本文研究了在 NMPs 协同作用下,解偶联剂 OAP 对剩余污泥产量、工艺

运行效能、污泥沉降性能、污泥活性及微生物结构的影响,以期为优化解偶联污泥的运行效能提供参考.

2 材料与方法(Materials and methods)

2.1 材料和仪器

接种污泥:广州市沥滘污水处理厂二沉池回流污泥.

试剂:邻氨基苯酚(OAP)为分析纯,购自天津市光复精细化工研究所;纳米磁粉(NMPs)为本实验室利用酸洗废液中回收制备(Tang *et al.*, 2009),粒径在 13.49 ~ 22.89 nm 之间, NMPs 比表面积为 $30.42 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$,饱和磁化率 $67.77 \text{ emu} \cdot \text{g}^{-1}$.

实验采用人工模拟废水,按照 C:N:P = 100:5:1 (质量浓度比)来进行配制,进水 COD 为 $800 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,葡萄糖、尿素、磷酸二氢钾分别提供碳、氮、磷源,同时补充铁、镁、锰等微量元素.

2.2 实验仪器

离心机:型号 TDL-60B,上海安亭科学仪器厂;恒温振荡器:型号 SHA-B,常州澳华仪器有限公司;紫外可见分光光度计:型号 UV-752N,上海佑科仪器仪表有限公司.

2.3 实验方法

本文实验分为两个阶段,第一阶段是为了确定 OAP 和 NMPs 最合适的投加量进行的摇瓶实验,第二阶段是在第一阶段确定的条件下,为了探讨 OAP 协同 NMPs 作用下对剩余污泥产量和工艺运行效能的影响进行的模拟 SBR 实验.

摇瓶实验:用人工模拟废水驯化污泥,待活性污泥驯化成功后,曝气以稳定污泥活性,向 250 mL 的锥形瓶中分别加入 50 mL 的活性污泥和人工模拟废水,不同浓度的 OAP 和 NMPs,最后用蒸馏水补足到 120 mL.锥形瓶在 $25 \text{ }^\circ\text{C}$, $170 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的(陈志英等, 2006)摇床中振荡培养 4 h,静置沉降 1 h,取样测定 MLSS,上清液离心测 COD、 NH_4^+ -N 和 TP.

SBR 实验:在 4 个有效容积为 15 L 的圆柱形反应器(R1、R2、R3、R4)中接种已经驯化成功的活性污泥,初始浓度约为 $3000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,注入人工模拟废水,连续曝气 9 h,静止沉淀 3 h,排出上清液,再重新注入新废水,12 h 为一个周期,每天运行两个周期.4 个反应器的溶解氧维持在 $4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上, pH 维持在 7 左右,连续运行 36 d,当 MLSS 超过 $3000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,开始排出剩余污泥,使反应器中的 MLSS

维持在 $3000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右. 其中在 R2、R3 中以固体的形式投加 OAP, 每天两次, 每次投加 0.152 g , 相当于 OAP 浓度为 $15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 在 R3 和 R4 中以补充排出 NMPs 量的方式投加 NMPs 固体, 维持反应器中的 NMPs 浓度为 $0.8 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, R1 为对照.

2.4 测定项目与方法

常规分析项目测定采用标准方法: COD 采用重铬酸钾法测定; $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 采用纳氏试剂分光光度法; TP 采用钼锑抗分光光度法测定; MLSS 采用重量法测定; 污泥容积指数 (SVI) 采用烘干沉重法测定 (国家环保局, 2002), 每个常规指标的测定均做了 2 个平行实验, 取平均值作为最终的实验结果.

污泥表观增长系数 (Y_{obs}) 是指每去除 1 g COD 所新增加的污泥量, 是反应活性污泥合成代谢的主要参数, $Y_{\text{obs}} = \Delta \text{MLSS} / \Delta \text{COD}$.

脱氢酶活性的测定方法按照文献 (周春生等, 1996) 提供的方法进行, 取 10 mL 经过超声破碎后的活性污泥于 15 mL 的离心管中, 于 $4000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的转速下离心反复洗涤 3 次, 取 2 mL 洗涤后的污泥混合液于 15 mL 离心管中, 先后加入 1.5 mL Tris-HCl 缓冲溶液, 0.5 mL 0.36% Na_2SO_3 溶液, 0.5 mL $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的葡萄糖溶液, 0.5 mL 0.4% 氯化三苯基四氮唑 (TTC) 溶液, 置于 $37 \text{ }^\circ\text{C}$ 恒温水浴振荡仪内培养 2 h , 取出后加入 0.5 mL 甲醛, 5 mL 丙酮, 充分摇匀, 放入 $37 \text{ }^\circ\text{C}$ 恒温水浴振荡萃取 10 min , 之后在 $4000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 下离心 10 min , 取上清液于 485 nm 处测定三苯基甲 (TF) 的生成量.

3 结果 (Results)

3.1 OAP 对 Y_{obs} 及常规污染物去除的影响

本实验采用摇瓶实验, 共做两组平行实验, 取平均值作为最终实验结果. OAP 对活性污泥表观增长系数 (Y_{obs}) 及对常规污染去除的影响结果见图 1 和图 2.

从图 1 可知未投加 OAP (对照) 的活性污泥的表观增长系数为 0.58 , 随着 OAP 浓度的增加, Y_{obs} 迅速降低, 当投加浓度为 $15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, Y_{obs} 为 0.41 , 比对照下降了 31% , 当浓度为 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, Y_{obs} 均在 0.30 左右, 比对照下降了 49% , 这说明 OAP 可以有效的减少剩余污泥量的产生.

从图 2 可以看出, OAP 浓度为 $15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, COD 去除率为 91% , 比对照仅下降了 4% , 在浓度为 $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, COD 去除率为 85% , 比对照减少了

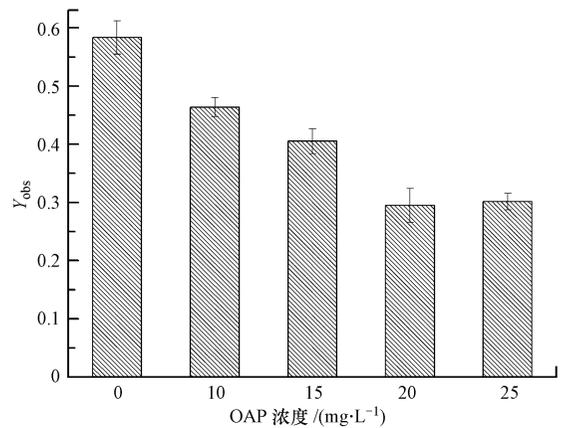


图 1 OAP 对污泥表观增长系数 Y_{obs} 的影响

Fig. 1 Effect of OAP on observed growth yields

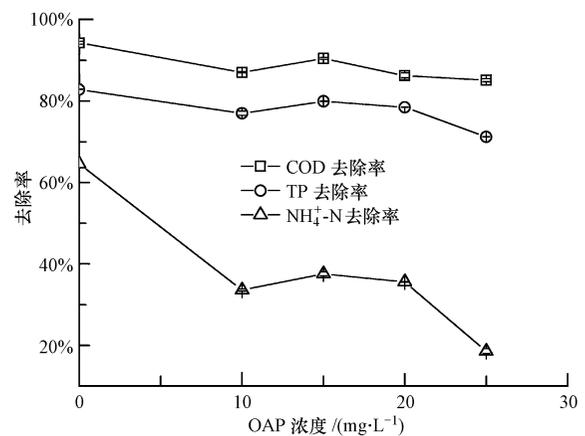


图 2 OAP 对 COD、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 TP 去除率的影响

Fig. 2 Effect of OAP on removal rates of COD, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ and TP

9% , 与顿米娜等 (2009) 的研究结果类似, 这可能是因为解偶联剂的加入减少了活性污泥产量, 所以对 COD 的降解能力有一定程度的下降 (Chen *et al.*, 2006). 当 OAP 浓度为 $15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 去除率与对照相比, 分别下降了 27% 和 46% , 即 OAP 对 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的去除有较大的影响, 这可能是因为解偶联剂的加入, 使活性污泥的新细胞合成量减少, 而用来合成这些新细胞的氮素释放到了水中. OAP 浓度为 $15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 对 TP 的去除率达到最大, 比对照仅下降 3% . 从以上分析可以看出 OAP 可以有效的减少活性污泥产量但是也对污水处理效果造成了影响, 所以要在实现活性污泥产量减少的同时保证工艺运行效能, 这就需要找到解偶联剂 OAP 最合适的投加浓度. 综合考虑 OAP 对污泥表观增长系数和运行效能的影响, 当浓度大于 $15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 对于系统的稳定性可能会有影响, 小于

15 mg·L⁻¹时,对于污泥的减量化作用不是很明显,所以确定 OAP 的投加浓度为 15 mg·L⁻¹。

3.2 NMPs 对 Y_{obs} 及常规污染物去除的影响

NMPs 的投加量确定实验的方法与 OAP 投加浓度确定实验的方法一致,NMPs 对 Y_{obs} 及常规污染物去除的影响结果见图 3 和图 4。从图 3 中可知,NMPs 的投加量小于 0.7 g·L⁻¹时, Y_{obs} 增长速率很快,当投加量大于 0.7 g·L⁻¹后, Y_{obs} 的增加速度缓慢, Y_{obs} 均在 0.84 左右。从图 4 中可知,当投加量大于 0.7 g·L⁻¹时,COD 的去除率均可以维持在 90% 以上;在投加量为 0.7 g·L⁻¹和 0.8 g·L⁻¹时,NH₄⁺-N 的去除率分别为 84% 和 86%;在投加量为 0.8 g·L⁻¹和 1.0 g·L⁻¹时,TP 的去除率分别为 78% 和 83%,比对照分别增加了 6% 和 12%,即投加 NMPs 在短时间内对 COD、NH₄⁺-N 和 TP 的去除有促进作用,这可能是

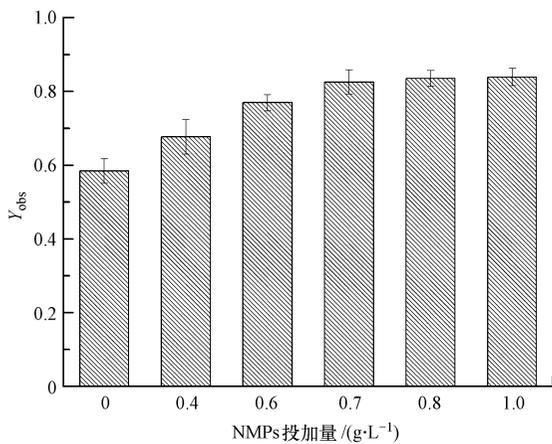


图 3 NMPs 对污泥表观增长系数 Y_{obs} 的影响

Fig. 3 Effect of nano-sized magnetic particles on observed growth yields

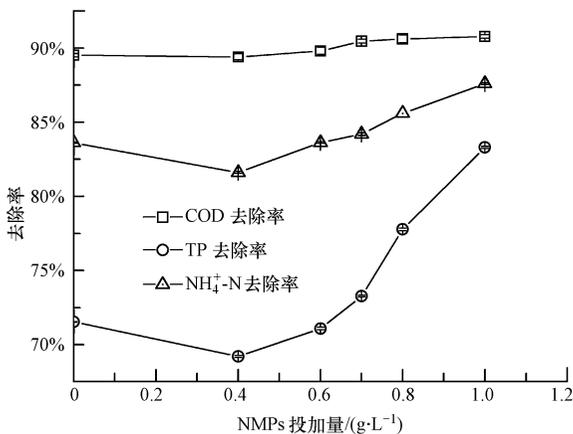


图 4 NMPs 对 COD、NH₄⁺-N 和 TP 去除率的影响

Fig. 4 Effect of nano-sized magnetic particles on removal rates of COD, NH₄⁺-N and TP

由 NMPs 所具有的特性决定的,如 NMPs 具有大的比表面积、表面带有电荷等,这些特性提高了活性污泥的浓度、使微生物种类更加多样化,提高了污泥活性,从而促进了对 COD、NH₄⁺-N 和 TP 的去除(代科林等,2010)。

综合考虑 NMPs 对污泥表观增长系数和出水水质的影响,当投加量大于 0.8 g·L⁻¹时, Y_{obs} 增长很缓慢,如果继续增加投加量,效果不但不明显而且增加了处理成本;随着投加量的增加,出水水质逐渐变好,在投加量为 1.0 g·L⁻¹和 0.8 g·L⁻¹时,对 COD 的去除率已经相差不大,所以确定 NMPs 的投加量为 0.8 g·L⁻¹。

3.3 NMPs 协同 OAP 作用下对剩余污泥产量的影响

在序批式反应器中投加由 3.2 节确定的最适合投加量的 OAP 和 NMPs 来进行实验研究,用平均剩余污泥产量来表示 OAP、NMPs 对剩余污泥产量的影响。36 d 连续运行期间,4 个反应器累计排放的剩余污泥量见图 5。

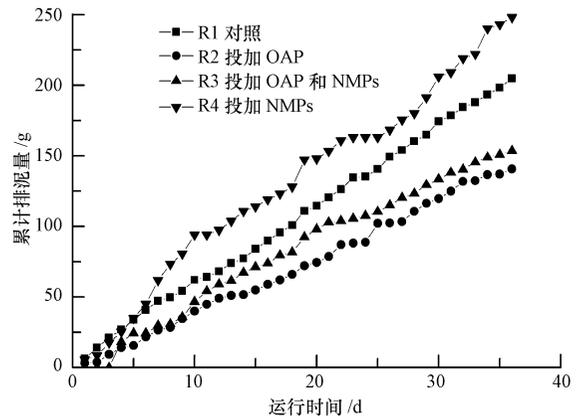


图 5 运行 36 d 期间 4 个反应器累计排放的剩余污泥产量

Fig. 5 Cumulative excess sludge production in the 36-day operation of the four reactors

R2 和 R3 平均剩余污泥产率分别为 3.9 g·d⁻¹、4.3 g·d⁻¹,比对照分别减少 31% 和 25%,R4 平均剩余污泥产量比空白高 21%,说明 NMPs 会促进活性污泥产量的增长,虽然 NMPs 对活性污泥的产量是有促进作用的,但 R3 与 R2 相比,仅减少了 6%,所以无论是在 OAP 单独作用下,还是在 OAP 与 NMPs 协同作用下,都能有效的减少剩余污泥的产量。从 R2 和 R3 累计剩余污泥排泥量和时间的趋势曲线,可以看出,在 36 d 的连续运行期间内,活性污泥并没有对 OAP 产生抗药性,因此可以考虑联合投加

NMPs 和 OAP 来减少剩余污泥的产量。

3.4 NMPs 协同 OAP 作用下对工艺运行效能的影响

工艺运行效能是衡量一个工艺是否具有可行性的重要指标,而活性污泥工艺的运行效能可以通过对 COD、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、TP 的去除效果来体现. 36 天连续运行期间 4 个反应器中活性污泥对 COD 的去除率如图 6a 所示,R1 中 COD 平均去除率为 94%,R2

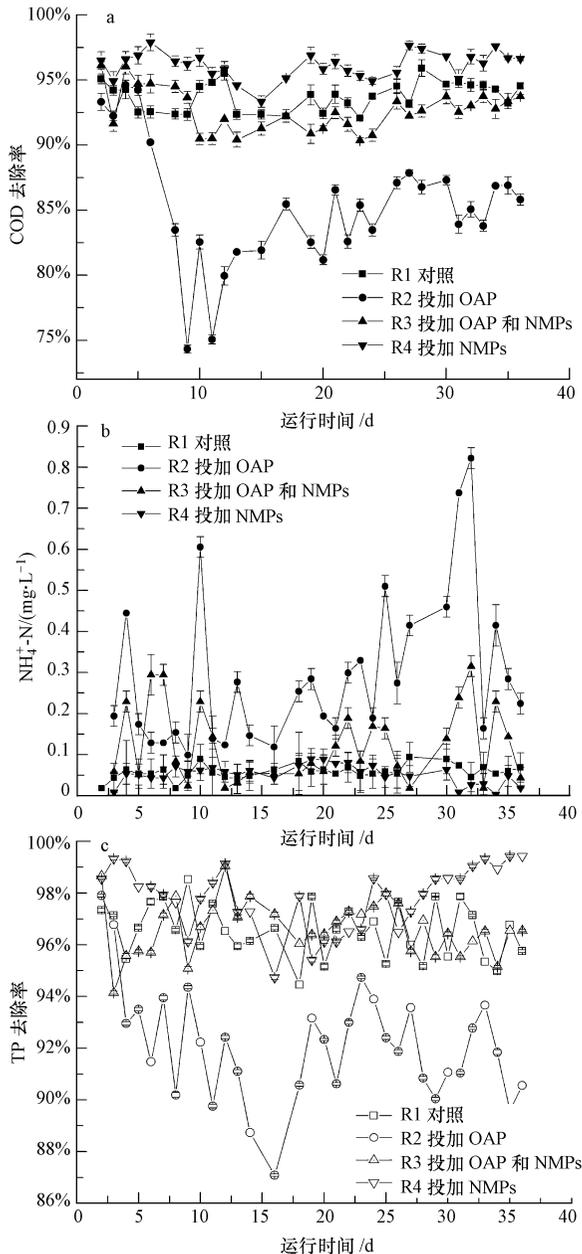


图 6 运行 36 d 期间 4 个反应器中 COD (a)、TP (c) 的去除率及出水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ (b) 的浓度

Fig. 6 Removal efficiencies of COD (a) and TP (c) and effluent $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ (b) concentrations in the 36-day operation of the four reactors

由于受 OAP 的影响,前期对 COD 的去除波动较大,后期趋于稳定,COD 平均去除率为 85%,比 R1 下降了 9%,该结果与国内外学者研究 2,6-二氯苯酚 (DCP) (Tian *et al.*, 2010)、TCP (Strand *et al.*, 1999)、TCS (叶芬霞等,2005) 等所得的结论相符. R4 中 COD 的平均去除率为 96%,比对照增加了 2%;R3 中 COD 的平均去除率为 93%,比 R2 增加了 8%,这说明在 NMPs 存在时,可以提高解耦联污泥对 COD 的去除率. 这是因为 NMPs 的加入,可以使活性污泥絮体均匀,有利于有机物和微生物充分接触并且污泥中的微生物因为受磁作用促进了微生物新陈代谢的提高,从而氧化分解有机物的能力也得到了提高.

36 d 连续运行期间,4 个反应器中 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度和 TP 的去除效果见图 6b 和图 6c,从图 6b 中可知,4 个反应器中出水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度都较低,这是因为本实验采用的是连续曝气然后沉淀的方式,造成了好氧-缺氧-厌氧的循环模式,从而发生了硝化和反硝化作用所致. R1 和 R2 中 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的出水浓度分别为 $0.058 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.29 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,这说明 OAP 对出水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 有显著的影响,叶芬霞等 (2003) 在研究 TCS 作为解耦联剂时也发现了类似情况,Low 等 (2000) 从理论上给出了解释,由于解耦联剂的加入使减少的那部分剩余污泥中的氮元素释放到水中,并且污泥产率的下降也会减少氮的去除. R3 的出水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度为 $0.12 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,比 R2 下降了 58%,R4 中 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 出水浓度为 0.052 ,比对照小 10%,表明 NMPs 有助于活性污泥硝化反硝化作用并且在纳米磁粉和 OAP 的协同作用下,可以提高解耦联污泥对 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的去除能力. 这是因为 NMPs 的加入使絮体颗粒均匀,有利于有机物和微生物充分接触并向絮体内扩散,而且磁粉附着在成熟的污泥上,使得污泥结构紧密,可为繁殖速度慢、世代时间长的硝化和亚硝化细菌提供合适栖息场所,使之不易流失并逐渐富集,增强了反应器内的生物同化和硝化反硝化作用 (任月明等,2008).

从图 6c 可知,R2 的 TP 去除率为 92%,与 R1 相比仅下降 5%,说明 OAP 对 TP 的去除影响不是很大;R3 的 TP 去除率为 97%,比 R2 增加了 5%;运行后期 R4 对 TP 的去除率增大并表现出一定的时间累积效应,说明 NMPs 有助于活性污泥对磷的去除并且可以减轻解耦联剂带来的负面影响. 这可能是因为一方面 NMPs 具有很强的吸附能力 (Peng

et al., 2004), 可以与菌胶团形成紧密的菌胶团粒, 增强了对磷酸盐的吸附; 另一方面 NMPs 的加入会改变污泥中微生物菌落 (Liu *et al.*, 2008), 污泥中可能含有更多对磷的去除有促进作用的微生物如聚磷菌等。

从图 6 的信息可知, OAP 对 COD、 NH_4^+-N 和 TP 的去除率均有不同程度的影响, NMPs 协同 OAP 作用下, 这些影响均可以得到改善, 这也为在活性污泥中加入解偶联剂和纳米磁粉来处理城市污水, 提供了进一步可行性的依据。

3.5 NMPs 协同 OAP 作用下对污泥沉降性能的影响

在生物系统中, 良好的沉降性能是发育正常的活性污泥所应具有的特性之一, 可用 SVI 值来进行衡量。36 d 连续运行期间 4 个反应器中的 SVI 值如图 7a 所示, 4 个反应器中的 SVI 值均在 $80 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 以下, 说明 4 个反应器中的污泥均保持着良好的沉降性能。R2 中 SVI 的平均值比 R1 增加了 10%, 说明 OAP 对活性污泥的沉降性能有一定的影响, Tian

等(2007)在研究 DCP 作为解偶联剂时, 也发现了类似的现象。R3 的平均 SVI 值比 R2 下降了 10%, R4 中的 SVI 值比对照下降 9%, 这说明 NMPs 有助于提高活性污泥的沉降性能, 任月明等(2008)在 SBR 反应器中加入 NMPs, 发现加了 NMPs 的活性污泥完全沉淀只要 12 min, 而普通的活性污泥完全沉淀则需要 24 min。R3 中 SVI 的平均值相对于 R2 下降了 10%, 表明在 NMPs 存在时, 可以改善解偶联污泥的沉降性能, 这与本课题组(高丽英等, 2012)在研究纳米磁粉和 TCP 的协同作用时得到的结果一致, 这是因为 NMPs 极易吸附菌胶团, 形成菌胶团粒, 加大了污泥絮体比重, 从而沉降速率加快。

3.6 NMPs 协同 OAP 作用下对脱氢酶活性的影响

活性污泥脱氢酶是存在于活体微生物体内的胞内酶, 参与从有机物到分子氧化的电子得失的整个过程, 生物体的脱氢酶活性在很大程度上反映了生物体的活性。连续运行 36 d, 4 个反应器的脱氢酶活性见图 7b, 由图可知 R1 的脱氢酶活性平均值为 $108.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$, R2 中的污泥一直保持较高的脱氢酶活性, 平均值为 $122.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$, 比 R1 增加了 13%, 这说明 OAP 可以提高污泥的活性, 马宗凯等(2007)研究发现, 单独投加 DCP 使得活性污泥的脱氢酶活性比对照增加了 8%, 叶芬霞等(2003)认为这是因为有些解偶联剂对活性污泥微生物有活化作用。从图 7d 可知, R4 中的污泥的脱氢酶活性最高, 其值为 $137 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$, 比 R1 增加了 27%, 说明 NMPs 可以显著的提高污泥的脱氢酶活性。麻海珍等(1995)也观察到类似的现象, 这是因为 NMPs 中 Fe 元素在很多情况下呈现出顺磁性, 因而可能通过磁场的作用来影响生物体中顺磁原子从而影响脱氢酶的活性(代科林等, 2010), 并且磁粉对污泥菌胶团的吸附作用, 形成了紧密的磁粉团粒结构, 从而减少了游离细菌的流失, 生物量增加, 从而提高了脱氢酶活性(陈志英等, 2006)。R3 中脱氢酶活性为 $114 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$, 比 R1 增加了 6%, 说明 NMPs 和 OAP 共同作用下可以提高活性污泥的脱氢酶活性。

3.7 NMPs 协同 OAP 作用下对污泥结构及生物相的影响

运行期间, R2 反应器中的活性污泥由黄褐色逐渐变为黄色, 污泥结构相对于对照稍微有些松散, R3 和 R4 中的活性污泥由黄褐色逐渐变黑, 成颗粒状, 结构紧实, 沉降速度快。在连续运行 36 d 后, 在

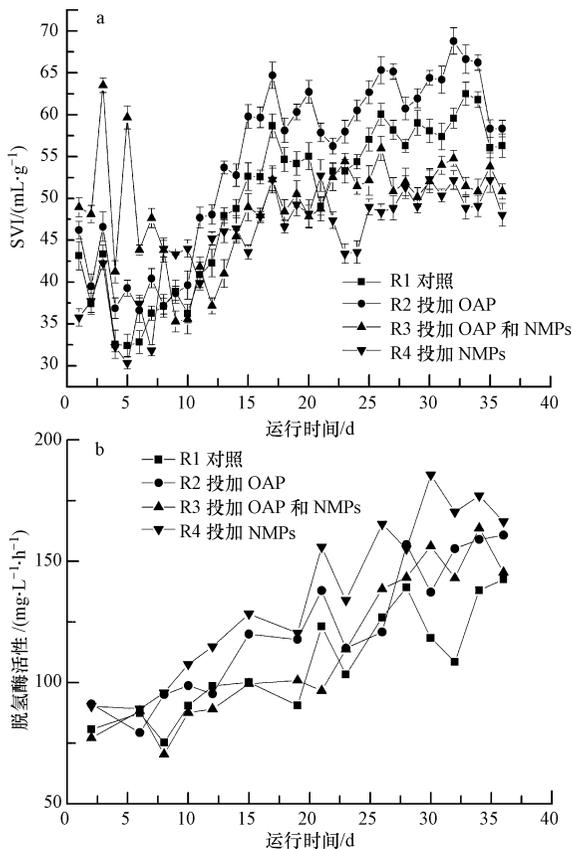


图 7 运行 36 d 期间 4 个反应器中 SVI 值 (a) 和脱氢酶活性 (b)

Fig. 7 SVI values (a) and dehydrogenase activities (b) in the 36-day operation of the four reactors

光学显微镜下观察 4 个反应器中活性污泥结构和生物相如图 8 所示, R3、R4 中的污泥絮体紧密厚实, 存在着大量种类繁多的原生动物和后生动物如钟虫、累枝虫、轮虫等, R1 中的原生和后生动物少于 R4, 且污泥絮体也不如其紧密, R2 中原生动物和后生动物较少, 污泥絮体也相对较松散, 这说明 OAP 和 NMPs 的存在均会改变污泥结构微生物的种类、数量从而改变了活性污泥的沉降性能和出水水质, 这也在一定程度上解释了 NMPs 和 OAP 协同作用下之所以可以强化解偶联污泥对 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 的去除能力和提高解偶联污泥沉降性能的原因。

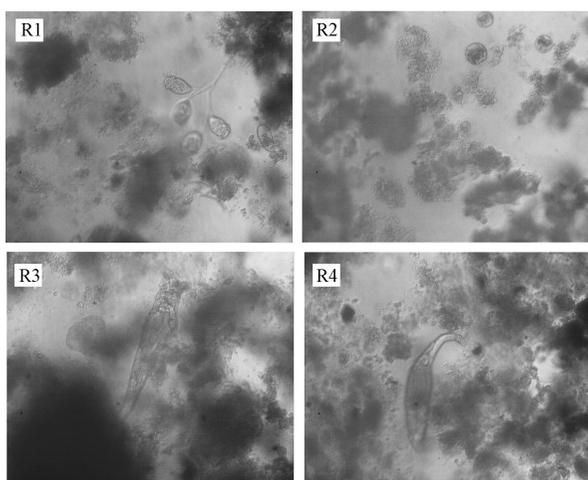


图 8 运行 36 d 后 10×20 倍光学显微镜下 4 个反应器中的污泥镜检照片

Fig. 8 Microscopic images of sludge after the 36-day continuous operation of four systems in the 10×20 x optical microscope

4 结论 (Conclusions)

1) 在 OAP 单独及协同 NMPs 作用下, 均可以有效地减少剩余污泥产量, 剩余污泥产量分别减少 31% 和 25%; 二者协同作用下 (相对于 OAP 单独作用下) 对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除影响最大, 出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的浓度降低了 58%, COD、TP 的去除率分别增加了 8% 和 5%, 平均 SVI 值下降了 10%. 在本实验条件下, OAP 最合适的投加浓度为 $15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, NMPs 最合适的投加量为 $0.8 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$.

2) OAP 和 NMPs 的存在均可以提高活性污泥活性, 脱氢酶活性比对照分别增加了 13% 和 27%, 但是两者协同作用下仅比空白增加 6%.

3) OAP 和 NMPs 的加入均会改变活性污泥中微生物的结构, 在 OAP 单独存在的情况下, 污泥结构松散, 原生和后生动物数量较少; 在 NMPs 和 OAP

共同存在的情况下, 污泥结构紧实, 存在大量的原生和后生动物, 这也进一步验证了在 NMPs 和 OAP 的作用下可以提高污泥的沉降性能. 以上这些结果表明在活性污泥反应器中添加解偶联剂 OAP 和 NMPs, 既可以有效减少污泥产量又能够保证工艺效能, 具有较强的工程应用前景.

责任作者简介: 汤兵 (1968—), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究领域为水污染控制中的传递现象及废水高效净化技术研究等, 在此领域获得国家自然科学基金面上项目、广东省科技计划及广州市科技攻关计划等多项科研项目立项支持. 在国内外期刊上发表论文 60 余篇, 三大索引收录 20 篇, 获得国家专利授权 3 项. E-mail: renytang@163.com.

参考文献 (References):

- Chen G W, Han Q Y, Peng G X. 2006. Influence of 2, 4-Dinitrophenol on the characteristics of activated sludge in batch reactors [J]. *Bioresource Technology*, 98(4): 729-733
- 陈志英, 王磊, 周琪. 2006. 高效代谢解偶联剂的筛选及对 SBR 系统综合运行效能的影响 [J]. *环境污染与防治*, 28(8): 575-579
- 代科林, 贺玉龙, 杨立中, 等. 2010. 磁效应对活性污泥法处理污水的作用机理及其应用 [J]. *资源节约与环保*, (2): 41-43
- 顿咪娜, 裴海燕, 胡文容. 2009. 氨基苯酚和四氯水杨酰苯胺对活性污泥产率的影响 [J]. *环境科学*, 30(5): 1481-1486
- 高丽英, 汤兵, 梁玲燕, 等. 2012. 纳米磁粉协同解偶联剂作用下活性污泥性能的研究 [J]. *环境科学*, 33(8): 2766-2772
- 国家环保局. 2002. 水与废水监测分析方法 [M] (第 4 版). 北京: 中国环境科学出版社. 105-538
- 蒋小龙, 叶芬霞. 2006. 化学解偶联剂对污泥产率的比较研究 [J]. *环境科学研究*, 19(4): 115-118
- 林永波, 张丹. 2007. 磁性活性污泥在废水处理中作用机理的探讨 [J]. *环境科学与管理*, 32(7): 80-82
- Liu S, Yang F, Meng F, et al. 2008. Enhanced anammox consortium activity for nitrogen removal: Impacts of static magnetic field [J]. *Journal of Biotechnology*, 138(3/4): 96-102
- Low E W, A. C H, G. M M. 2000. Uncoupling of metabolism to reduce biomass production in the activated sludge process [J]. *Water Research*, 34(12): 3204-3212
- 陆光立, 赵庆祥. 1998. 磁粉活性污泥法工艺技术研究 [J]. *城市环境与城市生态*, 11(2): 10-12
- 麻海珍, 吴国庆, 牛志卿. 1995. 磁场对紫色非硫光合细菌脱氢酶活性的影响 [J]. *环境科学*, 16(3): 4-7
- 马宗凯, 田禹, 程寒飞. 2007. 铜离子与解偶联剂协同下的污泥减量作用 [J]. *环境科学*, 28(8): 1697-1702
- 潘涌璋, 志永, 师波. 2011. 磁性载体生物膜反应器处理生活污水的试验研究 [J]. *中国环境科学*, 31(5): 734-739
- Peng Z G, Hidajat K, Uddin M S. 2004. Adsorption and desorption of lysozyme on nano-sized magnetic particles and its conformational changes [J]. *Colloids and Surfaces (B: Biointerfaces)*, 35(3/4): 169-174

- Ricco G, Tomei M C, Ramadori R, *et al.* 2004. Toxicity assessment of common xenobiotic compounds on municipal activated sludge: comparison between respirometry and Microtox [J]. *Water Research*, 38 (8): 2103-2110
- 任月明,魏希柱,马军,等. 2008. 纳米磁粉生物反应系统处理效能研究[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 40(8): 1247-1251
- Sahinkaya E, Dilek F B. 2005. Biodegradation of 4-chlorophenol by acclimated and unacclimated activated Sludge evaluation of biokinetic coefficients [J]. *Environmental Research*, 99 (2): 243-252
- Strand S E, Harem G N, Stensel H D. 1999. Activated-sludge yield reduction using chemical uncouplers [J]. *Water Environment Research*, 71 (4):454-458
- Tang B, Yuan L, Shi T, *et al.* 2009. Preparation of nano-sized magnetic particles from spent pickling liquors by ultrasonic-assisted chemical co-precipitation [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 163 (2/3): 1173-1178
- 唐琼,林松,成英,等. 2012. 4-硝基酚的污泥减量化作用及对污泥性质的影响[J]. *环境工程学报*, 6(10): 3651-3656
- Tian Y, Zhang J, Li Z, *et al.* 2010. Effect and distribution of a metabolic uncoupler 2, 6-dichlorophenol in activated sludge batch culture [J]. *Journal of Residuals Science and Technology*, 7(1): 43-50
- Xie M L. 2002. Utilization of 8 kinds of metabolic uncouplers to reduce excess sludge production from the Activated sludge process [J]. Beijing: Beijing Technol Business University, 3(2):11-15
- Yavuz H, Celebl S S. 2000. Effects of magnetic field on activity of activated sludge in wastewater treatment [J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 26 (1): 22-27
- Ye F X, Li Y. 2010. Oxidic-settling-anoxic (OSA) process combined with 3,3',4',5-tetrachlorosalicylanilide (TCS) to reduce excess sludge production in the activated sludge system[J]. *Biochem Eng J*, 49: 229-234
- 叶芬霞,陈英旭,冯孝善. 2003. 化学解耦联剂对活性污泥工艺中污泥产率的影响[J]. *环境科学*, 24(6):112-115
- 叶芬霞,陈英旭. 2005. 能量解耦联代谢对剩余污泥的减量化研究[J]. *环境科学与技术*, 28(4):4-5
- Zheng G H, Li M N, Wang L, *et al.* 2008. Feasibility of 2,4,6-trichlorophenol and metabolic acid as metabolic uncoupler for sludge reduction in the sequence batch reactor for treating organic wastewater[J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 144(2): 101-109
- Zheng G. H, Chen Z. Y, Wang L, *et al.* 2007. Treatment of municipal wastewater with batch reactor under uncoupling metabolic conditions [J]. *Journal of Environmental Science and Health-Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 42 (13): 2059-2064
- 周春生,尹军. 1996. TTC-脱氢酶活性检测方法的研究[J]. *环境科学学报*, 16(4):400-405