文章编号：1000-8608(2009)02-0193-06

气升式一体化 A/O 生物膜反应器脱氮研究

郭 海 燕[1,2]， 周 集 体*[1]， 张 秀 红[1]

（1. 大连理工大学 环境与生命学院，辽宁 大连　116024；
2. 大连交通大学 环境与化学工程学院，辽宁 大连　116028）

摘要：构建了新型气升式一体化 A/O 生物膜反应器用于生活污水的脱氮处理，考察了进水碳氮比和曝气速率对反应器硝化和反硝化的影响. 试验结果表明，一定曝气速率条件下，反应器硝化效果随着进水碳氮比的提高而下降；提高曝气速率可以增加反应器好氧区和缓冲区的 DO 浓度，降低有机物氧化对硝化作用的影响；低进水碳氮比条件下，进水中的有机碳源能在缺氧区作为反硝化反应的电子供体被有效利用；在进水 TN 负荷为 0.01 kg/(m^3·d)、有机物负荷为 0.26～0.76 kg/(m^3·d)、进水碳氮比为 2.7～5.3 条件下，反应器 COD 和 TN 去除率分别达到 96.0%和 80.0%.

关键词：一体化生物膜反应器；硝化；反硝化；碳氮比；曝气速率
中图分类号：X505　　**文献标志码**：A

0 引 言

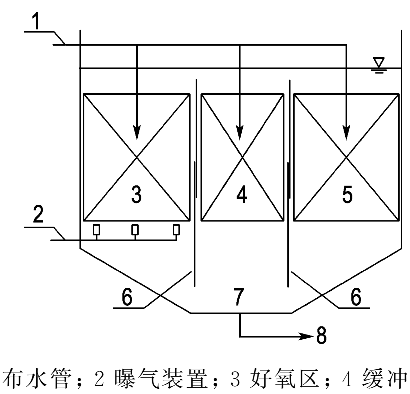
目前，我国大中城市的生活污水和工业污水造成的污染已受到重视，采取了一定的治理措施，但中小城镇污水的处理情况不容乐观，这不仅对当地的水环境造成了污染，而且严重阻碍了经济发展. 因此，发展既能有效处理污水，又符合小城镇经济实力的实用污水处理技术显得尤为必要. 本课题组开发的气升式一体化 A/O 生物膜污水处理工艺，在总结现有的污水处理方法和脱氮原理的基础上，将“气升实现硝化液循环”和“生物膜分区固定各类微生物”进行了有机结合，通过独特的反应器结构在单体反应器内实现好氧、缺氧分区，采用生物膜法将硝化菌和反硝化菌分区固定，利用曝气给氧动力进行硝化液循环，在单体反应器中同时实现除碳、硝化、反硝化过程，不仅节约占地，而且节省外加碳源和碱度补偿，从而减少了运行费用[1,2].

在该一体化反应器中，由于反应器不同分区之间存在着液体回流现象，好氧区内不可避免地存在有机物的氧化. 一般认为，有机物异养氧化对硝化作用有明显的抑制作用，进水有机物浓度过高，会导致硝化效果的下降；另一方面，进水有机物浓度过低，反硝化反应会缺乏电子供体，造成反硝化过程不完全. 所以在保持进水 TN 浓度基本不变的条件下，本文考察不同进水碳氮比和曝气速率条件下反应器脱氮和脱碳情况.

1 装置与方法

1.1 试验装置

试验装置由有机玻璃制成（见图 1），反应器



1 布水管；2 曝气装置；3 好氧区；4 缓冲区；
5 缺氧区；6 阻水板；7 泥斗；8 排泥管

图 1　一体化生物膜反应器

Fig. 1　Sketch of the combined biofilm reactor

收稿日期：2007-03-04；　**修回日期**：2009-01-04.
作者简介：郭海燕(1977-)，女，博士；周集体*(1956-)，男，教授，博士生导师.

底部一侧设曝气装置,内设置物理隔板(阻水板)以形成不同DO浓度分区:好氧区、缓冲区和缺氧区,其有效容积分别为135、90和135 L,三区均设置弹性填料.进水口位于填料中部,缓冲区溢流出水.硝化反应和反硝化反应主要在好氧区和缺氧区完成,硝化液在两区间的循环利用了好氧曝气压缩空气的推动力,不需外加水泵.缓冲区的存在不仅保证了缺氧区较低的DO浓度,而且增强了反应器对进水水质波动的抗冲击能力,当进水氨氮负荷增加时,可通过增加曝气量和减小阻水板面积来提高好氧区和缓冲区的液体循环量,以此提高缓冲区DO浓度、增加硝化区容积.

1.2 运行参数

试验用水采用模拟生活污水,由蔗糖、尿素、磷酸氢二钾、碳酸氢钠等配制而成,在保持配水中尿素浓度一定的条件下,通过改变配水中蔗糖含量,使进水碳氮比(ρ_{in}(COD):ρ_{in}(TN))呈梯度变化.如表1所示,根据进水碳氮比和曝气速率,试验过程可分为6个阶段,前5个试验阶段旨在考察进水碳氮比对硝化和反硝化效果的影响,试验阶段Ⅵ考察曝气速率对硝化和反硝化效果的影响.整个试验过程中反应器缺氧区进水,进水流量20 L/h,水力停留时间18 h,水温20～25 ℃,进水碱度350～400 mg/L,进水pH 7.0～8.0.

表1 各试验阶段运行参数

Tab.1 Operational conditions for each experimental phase

试验阶段(运行时间)	曝气速率/(L·h^{-1})	ρ_{in}(COD)/(mg·L^{-1})	ρ_{in}(TN)/(mg·L^{-1})	ρ_{in}(COD):ρ_{in}(TN)
Ⅰ(1～23 d)	1 800	169～246	73～87	2.7
Ⅱ(24～50 d)	1 800	281～319	66～78	4.0
Ⅲ(51～80 d)	1 800	368～421	72～87	5.3
Ⅳ(81～119 d)	1 800	369～528	71～87	6.7
Ⅴ(120～144 d)	1 800	538～663	68～87	8.0
Ⅵ(145～175 d)	2 400	500～674	69～88	8.0

1.3 硝化活性测定

不同试验阶段当反应器运行稳定时,采用批式试验方法,从反应器不同分区取出污泥进行硝化活性测定,以污泥比基质消耗速率来表征.具体测定方法是:从不同分区取出生物膜后,在8 000 r/min下离心10 min,去掉上清液,放入250 mL锥形瓶中,并加入无机培养基.无机培养基中含有NH_4Cl、$NaHCO_3$、K_2HPO_4及其他微量元素.将锥形瓶在28 ℃、150 r/min摇床上振荡,定时取样测定NH_4^+-N浓度.反应初始NH_4^+-N浓度约100 mg/L,ρ(COD)为30 mg/L,在反应过程中pH维持在7.5左右.

1.4 分析方法

COD分析方法采用微波消解重铬酸钾法;NH_4^+-N测定采用纳氏试剂光度法;NO_2^--N测定采用N-(1-萘基)-乙二胺光度法;NO_3^--N测定采用酚二磺酸光度法;TN测定采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法[3];pH测定采用PHS-25型酸度计;DO测定采用JPSJ-605型溶解氧分析仪.

2 结果和讨论

2.1 反应器对有机物去除情况

在试验不同阶段,出水COD浓度始终保持在30 mg/L左右.COD去除率随进水浓度的提高而提高,进水COD浓度由200 mg/L提高至600 mg/L、进水碳氮比由2.7提高至8.0时,COD去除率由89.6%提高至95.3%左右,最高去除负荷达到0.76 kg/(m^3·d).随着试验的进行和进水有机物浓度的提高,反应器内微生物浓度逐渐增加,好氧区、缓冲区、缺氧区微生物浓度在试验阶段Ⅴ分别达到了7 905、9 752和9 250 mg/L,从而保证了有机物良好的去除效果.

2.2 进水碳氮比对硝化效果和微生物硝化活性的影响

整个试验过程中没有排放剩余污泥,微生物同化作用对TN的去除可以忽略,TN去除主要是硝化和反硝化反应的结果,硝化率η和反硝化率η_{de}按照下式计算:

$$\eta=(\rho_{in}(TN)-\rho_{out}(NH_4^+\text{-N}))/\rho_{in}(TN)\times100\%$$

$$\eta_{de}=(\rho_{in}(TN)-\rho_{out}(TN))/(\rho_{in}(TN)-\rho_{out}(NH_4^+\text{-N}))\times100\%$$

不同试验阶段反应器出水中NH_4^+-N、NO_2^--N和NO_3^--N浓度随时间变化如图2所示.可以看出,在曝气速率为1 800 mg/L下,随着进水碳氮比的增加,出水NH_4^+-N浓度逐渐提高.进水碳氮比为2.7时,出水NH_4^+-N浓度约为3.3 mg/

L，反应器硝化率达到 95.7%；进水碳氮比提高至 5.3，出水 NH_4^+-N 浓度升高至 13.0 mg/L，反应器硝化率降为 82.4%；进一步提高进水碳氮比至 8.0，出水 NH_4^+-N 浓度增加至 43.3 mg/L，反应器硝化率仅为 41.9%.

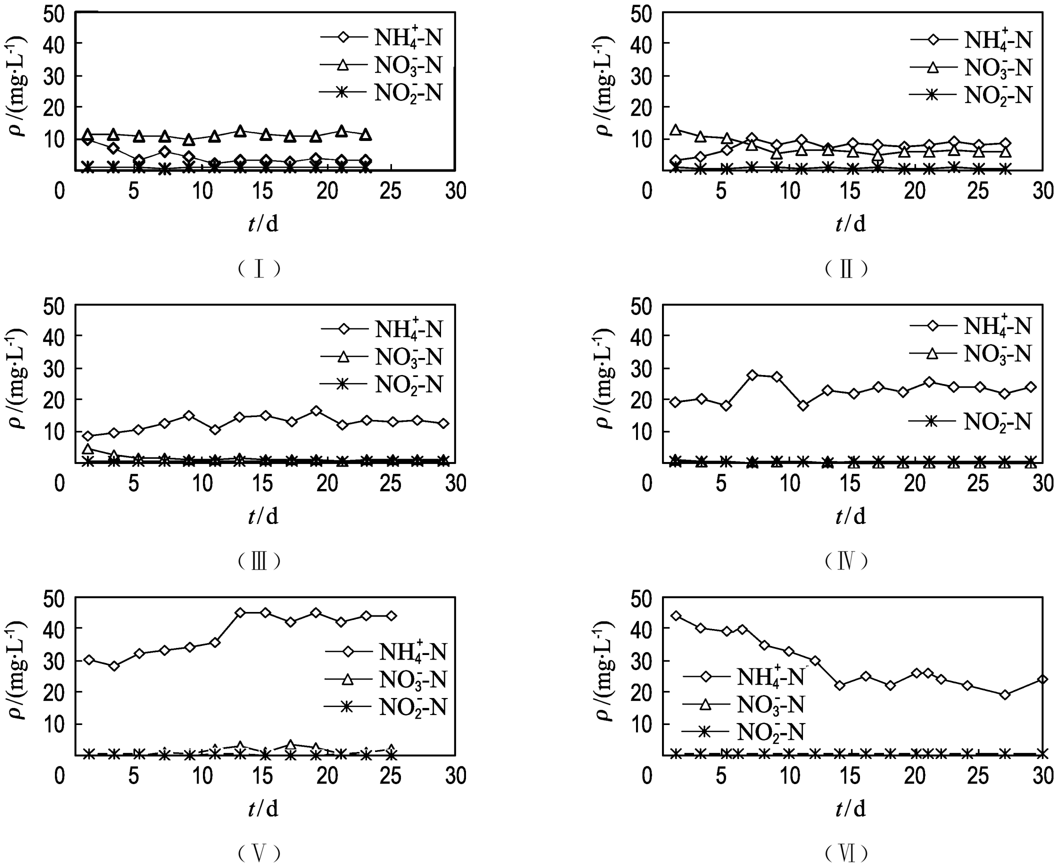


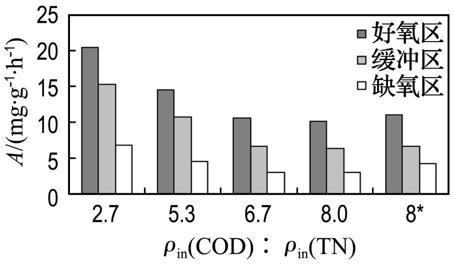
图 2　不同试验阶段反应器出水 NH_4^+-N、NO_2^--N 和 NO_3^--N 随时间变化

Fig. 2　Time courses of effluent NH_4^+-N, NO_2^--N and NO_3^--N concentrations under different experimental phases

自从脱氮工艺应用以来，有机物的氧化作用对硝化作用的影响很明显，而有关两者之间的关系问题一直较为模糊，异养氧化作用对硝化作用的影响机理也存在争议. 异养菌优势生长说认为，异养氧化菌和硝化菌相比，对环境条件变化忍耐性好，生长率高，在反应器中极易占优势. 当系统中含有机物较多时，异养氧化菌大量生长，和系统中的硝化菌竞争溶解氧和营养，使硝化菌的增殖受到抑制，减弱硝化作用. 有学者提出的竞争性抑制假说认为[4]，异养氧化菌对氨的同化作用速率远大于硝化菌对氨的氧化速率，并且随着有机物的增加，硝化作用的饱和常数也随之增加. 但也有实验结果表明，在高有机负荷条件下，只要保证硝化菌有良好的作用环境，有充足的氨供给，同样能保证硝化作用的快速进行. Chandravathanam 等[5]在上向流的生物滤池中发现，$\rho_{\rm in}$(COD)/$\rho_{\rm in}$(NH_4^+-N) = 15 条件下，硝化率仍能达到 100%；Radwan 等[6]采用生物转盘处理合成废水，进水中 ρ(COD)/ρ(NH_4^+-N)在 23～44，系统的硝化效果没有受到影响. 此外，有学者在研究低氧和有机物对硝化反应共同作用时提出，在无有机物时，低溶解氧(ρ(DO) = 0.5 mg/L)对硝化作用无任何影响，而当增加有机物时，低溶解氧将强化有机物对硝化作用的影响[7].

从考察反应器不同分区微生物硝化活性的批式试验结果来看(见图 3)，在较低的有机负荷条件下(碳氮比为 2.7)，反应器好氧区和缓冲区污泥的硝化活性 A 分别达到 20.4 和 15.3 mg/(g·h)，远高于活性污泥脱氮工艺中好氧段污泥的硝化活性(1～2 mg/(g·h))[8,9]. 随着进水碳氮比的提

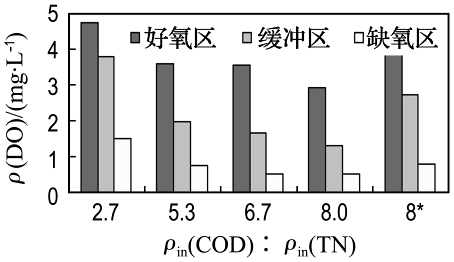
高，反应器各区污泥硝化活性降低. 进水碳氮比为6.7时，反应器好氧区和缓冲区污泥硝化活性降至10.6和6.7 mg/(g·h). 批式试验结果一定程度上反映了反应器宏观硝化效果的变化. 但是，当进水碳氮比提高至8.0、反应器硝化效果持续下降时，好氧区和缓冲区微生物硝化活性变化不大. 其原因可能是批式试验时微生物所处的溶解氧环境和反应器内实际的溶解氧环境有差异. 批式试验时，锥形瓶中溶解氧接近饱和，而反应器中的溶解氧浓度在曝气速率恒定的条件下，随着进水有机物浓度的增加，各区混合液中DO浓度都有所下降(见图4). 进水碳氮比为2.7时，好氧区和缓冲区DO浓度分别为4.7和3.8 mg/L；进水碳氮比为8.0时，好氧区DO浓度降至2.9 mg/L，缓冲区DO浓度降至1.3 mg/L.



注：* 曝气速率2 400 L/h

图3 不同进水碳氮比条件下反应器内各区硝化活性

Fig. 3 Nitrifying activities of microorganisms in different zones of the reactor under different influent ratio of carbon to nitrogen



注：* 曝气速率2 400 L/h

图4 不同进水碳氮比条件下反应器内DO分布

Fig. 4 DO distribution in the reactor under different influent ratio of carbon to nitrogen

可以分析，当进水碳氮比增加时，通过液体循环至反应器好氧区的有机物增加，使得异养氧化菌大量生长，异养菌和硝化菌竞争营养和溶解氧，使硝化菌的增殖受到抑制. 采用荧光原位杂交技术(FISH)对反应器各区硝化菌检测的实验结果表明，在保持曝气速率不变的条件下，随着进水碳氮比的提高，各区硝化菌数量呈下降趋势. 在进水碳氮比为2.7时，反应器好氧区、缓冲区和缺氧区硝化菌占全菌数比例分别为22%、16%和3%；进水碳氮比为8.0时，反应器好氧区、缓冲区和缺氧区硝化菌占全菌数比例分别下降为5.5%、2.3%和0.9%. 另据研究报道[10,11]，硝化菌往往聚集在生物膜的内部. 在反应器运行过程中，随着进水碳氮比的提高，各区生物膜厚度有所增加，好氧区生物膜厚度达到0.2～1.4 mm，缓冲区生物膜厚度达到0.5～2.0 mm. 好氧区和缓冲区混合液中溶解氧浓度的降低使得部分DO在扩散至生物膜内部之前可能被异养菌所消耗，从而抑制了硝化反应的顺利进行.

2.3 进水碳氮比对反硝化效果和TN去除效果的影响

由图2可以看出，曝气速率为1 800 L/h的条件下，进水碳氮比由2.7提高至8.0的过程中，反应器出水NO_3^--N浓度逐渐由11.3 mg/L减小至0.1 mg/L左右，出水NO_2^--N浓度由0.9 mg/L降至0.2 mg/L左右. 出水硝酸盐浓度的降低，一方面是由于反应器硝化效果逐渐下降，另一方面，进水有机物浓度的提高也改善了反应器的反硝化效果. 理论上，将1 g NO_3^--N还原为N_2，需要碳源有机物(以BOD_5计)2.86 g. 一般认为，污水中$\rho(BOD_5)/\rho(TN)$大于3～5时才能满足反硝化对碳源的需求[12]. 可以计算，在反应器进水碳氮比为2.7和4.0的条件下，反应器反硝化率分别达到了83.4%和89.7%. 表明在进水有机物浓度较低的条件下，水中的有机碳源绝大多数在缺氧区作为反硝化反应的电子供体被有效利用.

反应器内TN的脱除是好氧的硝化菌和兼性的反硝化菌共同作用的结果. 不同进水碳氮比条件下反应器出水TN浓度及出水中各态氮的组成如图5所示. 可以看出，当进水碳氮比为2.7，出水NO_3^--N比例占TN的70.6%，反硝化反应成为

脱氮过程的限制步骤. 随着进水有机物浓度的提高，出水总氮中 NH_4^+-N 比例大幅度上升，当进水碳氮比为 5.3 时，出水中 NH_4^+-N 比例为86.8%；进水碳氮比大于 6.7 时，出水总氮中 NH_4^+-N 比例超过了 95%，硝化反应成为脱氮过程的限制步骤. 值得注意的是，保持曝气速率为 1 800 L/h、进水碳氮比为 2.7～5.3 时，出水 TN 浓度维持在 15 mg/L 左右，TN 去除率为 80%，去除负荷为 0.08 kg/(m^3 · d)，达到常规 A/O 脱氮工艺去除效果.

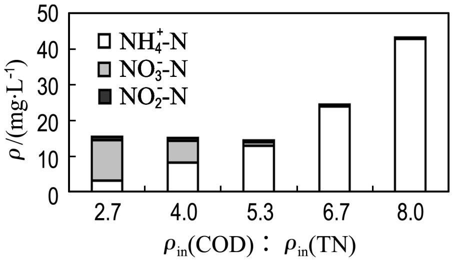


图 5　不同进水碳氮比条件下出水中各态氮的组成

Fig. 5　Nitrogen components in the effluent under different influent ratio of carbon to nitrogen

2.4　曝气速率对反应器脱氮效果的影响

如前所述，随着进水碳氮比的增加，反应器好氧区和缓冲区 DO 浓度降低、生物膜过厚是造成反应器硝化效果下降的一个原因. 所以在试验阶段Ⅵ，在保持进水碳氮比为 8.0 的条件下，将曝气速率由 1 800 L/h 提高至 2 400 L/h 以提高好氧区和缓冲区液体循环速率和 DO 浓度. 如图 4 所示，反应器曝气速率提高后，各区 DO 浓度随之增加，好氧区和缓冲区 DO 浓度分别由 2.9、1.3 mg/L 提高至 4.2 和 2.7 mg/L，缺氧区 DO 浓度由 0.3 mg/L 提高至 0.7 mg/L. 该试验阶段，反应器出水 NH_4^+-N 浓度由试验阶段Ⅴ的 43.0 mg/L 下降至 28.6 mg/L（见图 2），硝化率由 41.9%提高至 62.4%.

批式试验结果表明，曝气速率提高后，反应器好氧区和缓冲区的硝化活性分别为 11.0 和 6.7 mg/(g · h)，较之曝气速率提高前的硝化活性没有太大的变化. 曝气前后硝化菌的数量并没有发生太大的变化，而好氧区和缓冲区 DO 浓度的提高，尤其是缓冲区 DO 的增加，增强了混合液中溶解氧向生物膜内部的渗透作用，为该区硝化反应的顺利进行创造了条件. 另一方面，反应器的反硝化效果并没有因为缺氧区 DO 浓度的提高而受到太大的影响，出水硝酸盐浓度约为 0.5 mg/L，反应器反硝化率达到 99.2%，表明生物膜内部，包括好氧区和缓冲区生物膜的内部，依然存在着有效的缺氧区.

3　结　论

(1)反应器硝化效果随着进水碳氮比的提高而下降，当进水碳氮比由 2.7 提高至 8.0 时，硝化率由 95.7%下降至 41.9%.

(2)提高曝气速率可以增加好氧区和缓冲区的 DO 浓度，改善硝化效果，曝气速率由 1 800 L/h提高至 2 400 L/h 时，硝化率由 41.9%提高至 62.4%左右.

(3)进水中的有机碳源能作为反硝化反应的电子供体被有效利用，在进水碳氮比为 2.7 和4.0 的条件下，反硝化率达到了 83%和 89%.

(4)在进水 TN 负荷为 0.01 kg/(m^3 · d)、有机物负荷为 0.26～0.76 kg/(m^3 · d)的条件下，COD 和 TN 去除率分别达到 96.0%和 80.0%.

参考文献：

[1] GUO Hai-yan, ZHOU Ji-ti, SU Jiang, *et al*. Integration of nitrification and denitrification in airlift bioreactor [J]. **Biochemical Engineering Journal**, 2005, **23**(1):57-62

[2] GUO Hai-yan, ZHOU Ji-ti, WANG Jing, *et al*. Performance and microbial structure of a combined biofilm reactor [J]. **Bioprocess and Biosystem Engineering**, 2005, **27**(4):249-254

[3] 国家环保局. 水和废水监测分析方法(第三册)[M]. 北京：中国环境科学出版社，1998

[4] HANAKI K, WANTAWIN C, OBGAKI S. Effects of the activity of heterotrophs on nitrification in a suspended-growth reactor [J]. **Water Research**, 1990, **24**(3): 289-296

[5] CHANDRAVATHANAM S, MURTHY D V S.

Studies in nitrification of municipal sewage in an upflow biofilter [J]. **Bioprocess Engineering**, 1999, **21**(2):117-122

[6] RADWAN K H, RAMANUJAM T K. Influence of COD/NH_3-N ratio on organic removal and nitrification using a modified RBC [J]. **Bioprocess Engineering**, 1997, **16**(12):77-81

[7] HANAKI K, WANTAWIN C, OBGAKI S. Nitrification at low levels of dissolved oxygen with and without organic loading in a suspended-growth reactor [J]. **Water Research**, 1990, **24**(3): 297

[8] 张自杰. 废水处理理论与设计[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2003

[9] 陈金声,史家梁,徐亚同. 硝化速率测定和硝化细菌计数考察脱氮效果的应用[J]. 上海环境科学, 1996, **15**(3):18-20

[10] VAN LOOSDRECHT M C M, TIJHUIS L, WIJDIEKS A M S, *et al*. Population distribution in aerobic biofilms on small suspended particles [J]. **Water Science and Technology**, 1998, **31**(1):163-171

[11] OKAB S, HIRATIA K, OZAVA Y, *et al*. Spatial distributions of nitrifiers and heterotrophs in mixed-population biofilm [J]. **Biotechnology and Biosystem Engineering**, 1996, **50**(1):24-35

[12] 李 军,杨秀山,彭永臻. 微生物与水处理工程[M]. 北京:化学工业出版社, 2002

Nitrogen removal in an airlift combined A/O biofilm reactor

GUO Hai-yan[1,2], ZHOU Ji-ti*[1], ZHANG Xiu-hong[1]

(1. School of Environmental and Biological Science and Technology, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. College of Environmental and Chemical Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China)

Abstract: A novel airlift combined A/O biofilm reactor used for wastewater nitrogen removal was developed and the influence of influent ratio of carbon to nitrogen and aeration rate on nitrification and denitrification was studied. The experimental results demonstrate that nitrification efficiency drops with the increase of influent ratio of carbon to nitrogen. Increasing the aeration rate can improve the DO concentration in the aerobic and buffering zone and decrease the impact of organic carbon oxidization on nitrification. Organic carbon source can effectively be utilized as the electron donor of denitrification action in anaerobic zone under the conditon of low influent ratio of carbon to nitrogen. About 96.0% of COD and 80.0% of nitrogen removal are achieved when the influent nitrogen loading is 0.01 kg/(m^3 · d), organic carbon loading is 0.26 ~ 0.76 kg/(m^3 · d) and influent ratio of carbon to nitrogen is 2.7 ~ 5.3.

Key words: combined biofilm reactor; nitrification; denitrification; ratio of carbon to nitrogen; aeration rate