厌氧/缺氧/好氧生物接触氧化处理低碳氮比污水的物料平衡

王　聪，王淑莹※，张　淼，唐裕芳，曾　薇，彭永臻
（北京工业大学 北京市水质科学与水环境恢复工程重点实验室，北京 100124）

摘　要：为了提高低碳氮比污水的治理效果，提出了厌氧/缺氧/好氧-生物接触氧化脱氮除磷工艺（anaerobic anoxic oxic- biological contact oxidation，A^2/O-BCO），研究了该工艺处理生活污水的脱氮除磷性能，建立了该系统处理过程的碳（以化学需氧量计，chemical oxygen demand，COD）、氮、磷的物料衡算公式，同时分析评价了不同硝化液回流比（100%，200%，300%，400%）下各指标的物料平衡情况。结果表明，该工艺在充分利用原水碳源、深度脱氮除磷方面具有较强的优势，系统 COD 主要在 A^2/O 中厌氧段被利用，通过反硝化聚磷菌反硝化除磷脱氮；系统 COD 的物料衡算公式平衡百分比分别为 96.4%、99.6%、98.7%和 98.3%，氮的物料衡算公式平衡百分比分别为 99.7%、98.2%、99.2%和 96.5%，磷的物料衡算公式平衡百分比分别为 92.0%、98.1%、93.3%和 90.4%；荧光原位杂交表明生物膜中有厌氧氨氧化菌存在，且其数量占全菌比例的 0.6%~2.7%，生物接触氧化的氮损失可能是由于发生了厌氧氨氧化反应；在硝化液回流比为 300%时，系统氮、磷去除效果最好，出水达到国家城镇污水处理厂污染物排放标准一级 A 标准。该研究有助于更好地理解和分析工艺系统有机物、氮和磷的分布及变化情况，并且为评价试验数据的可靠性以及数学模型的建立提供了理论依据和指导，能更好地推广到分散型、量小且日变化系数较大的农村生活污水的治理事业中。

关键词：污水；脱氮；污水处理；A^2/O-生物接触氧化工艺；脱氮除磷；物料平衡；硝化液回流比
doi：10.3969/j.issn.1002-6819.2014.19.033
中图分类号：X703.1　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1002-6819(2014)-19-0273-09

王　聪，王淑莹，张　淼，等. 厌氧/缺氧/好氧生物接触氧化处理低碳氮比污水的物料平衡[J]. 农业工程学报，2014，30(19)：273－281.
Wang Cong, Wang Shuying, Zhang Miao, et al.　Material balance of anaerobic-poor oxygen-aerobiotic biological contact oxidation process treating sewage with low carbon/nitrogen ratio[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(19): 273－281. (in Chinese with English abstract)

0　引　言

对于中国目前面临的分散型、处理量小且日变化系数较大的农村生活污水的治理难题，最好的解决办法是实行分散处理[1-4]，从而控制农村生活污水中营养物质氮和磷的含量，缓解水体富营养化，减轻对水体的污染[5-7]。

传统厌氧/缺氧/好氧（anaerobic anoxic oxic，A^2/O）工艺在中国有广泛的应用，这是一个顺次为厌氧、缺氧和好氧的单污泥悬浮生长系统，但这种工艺已经达不到日益严格的污水排放标准。本研究将 A^2/O 工艺与生物接触氧化（biological contact oxidation, BCO）工艺组合，成为新型的双污泥系统，不仅能获得深度脱氮除磷效果，而且能够有针对性的解决传统 A^2/O 工艺[8]上存在的问题，实现了硝化菌与聚磷菌（phosphorus accumulating organisms，PAOs）长短泥龄的分离，避免了传统工艺回流污泥中携带的 NO_3^--N 对 PAOs 在厌氧区释磷[9]的影响，充分利用原水中的碳源，获得高效的同步脱氮除磷效率[10]。在该系统中，A^2/O 反应器主要作用是利用反硝化除磷技术来实现同步脱氮除磷，BCO 系统用于完成硝化作用。BCO 反应器中产生的 NO_3^--N 回流至 A^2/O 反应器的缺氧段，为 PAOs 释磷提供一个相对严格的厌氧环境[11-12]。另外，进水的低 C/N 也会促进反硝化聚磷菌（denitrifying phosphorus accumulating organisms，DPAOs）的生长，DPAOs 可以利用 NO^{3-}-N 作为电子受体同时去除污水中的氮和磷[13]，大量的化学需氧量（chemical oxygen demand，COD）在 A^2/O 反应器的厌氧段被去除，降低了进入 BCO 反应器上清液中的 C/N，这为在生物膜上生长的硝化菌提供了有利条件，进而可以提升硝化效果[14]。

收稿日期：2014-07-16　　修订日期：2014-10-10
基金项目：国家 863 计划项目（2012AA063406）
作者简介：王　聪，女，河北抚宁，主要从事污水生物处理理论与应用研究。北京　北京工业大学 北京市水质科学与水环境恢复工程重点实验室，100124。Email：wangcongcong@emails.bjut.edu.cn
※通信作者：王淑莹，女，黑龙江大庆，博士生导师，研究员，主要从事水质科学与水环境恢复工程、城市污水生物处理技术与应用及污水脱氮除磷新技术研究。北京工业大学 北京市水质科学与水环境恢复工程重点实验室，100124。Email：wsy@bjut.edu.cn

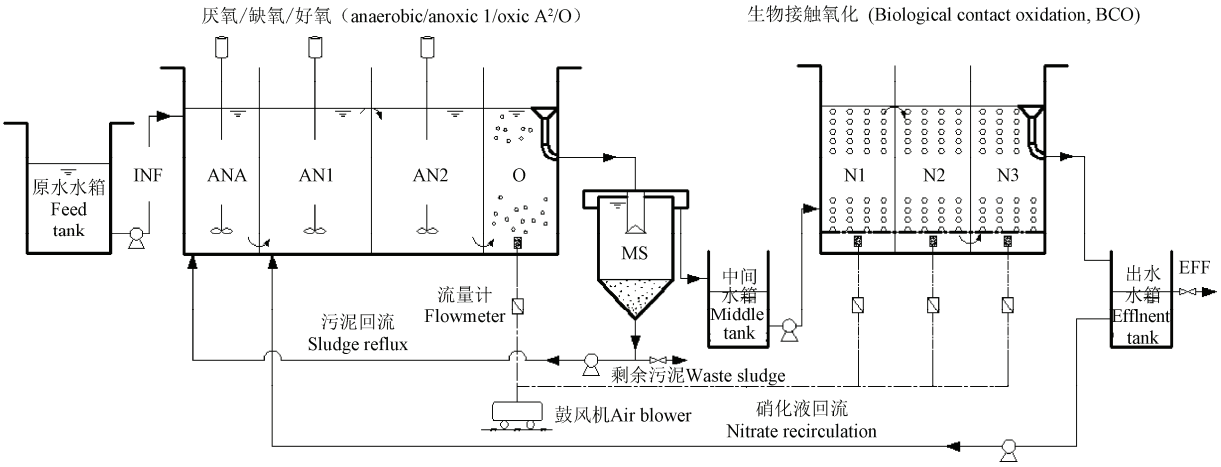
?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

本研究应用的 A^2/O-BCO 组合工艺，充分利用了原水中的碳源，且占地面积小，运行费用低，管理方便，尤其适用于分散、处理量小、日变化系数较大的农村生活污水处理，是农村生活污水实现生物脱氮除磷的理想选择[11-13]，在污水处理领域有重要意义。但是，该系统的碳、氮、磷的物料平衡情况尚不明确，进行物料衡算有助于更好地理解和分析系统有机物、氮和磷的分布及变化情况[15]，本文在 Barker 等[16]对活性污泥系统进行的碳、氮物料平衡的研究基础上，首次建立了 A^2/O-BCO 组合工艺的碳、氮、磷的物料衡算公式，并且以不同硝化液回流比稳态运行条件下的试验数据为基础，分析了 A^2/O-BCO 组合工艺碳、氮和磷的物料平衡情况，以期为评价试验数据的可靠性以及数学模型的建立提供理论依据和指导。

1 材料与方法

1.1 试验装置

A^2/O-BCO 工艺系统流程见图 1。A^2/O 反应池内为活性污泥法，厌氧段完成有机物的吸附转化同时释磷，缺氧段以 BCO 反应池回流过来的硝化液为电子受体进行反硝化除磷反应，好氧段进一步吸磷并吹脱氮气；BCO 反应池内为生物膜法，主要完成氨氮的氧化。主体反应器材质均为有机玻璃，其中 A^2/O 反应池有效容积为 40 L，厌氧区、缺氧区和好氧区容积比为 1∶3∶1。BCO 反应池有效容积为 24 L，均分为 3 格室（分别记为 N1 段、N2 段和 N3 段），每个格室均填充聚丙烯材质环形悬浮填料，填充率为 45%，填料尺寸为 D25 mm×10 mm，中心有网格结构，密度为 0.96 g/cm^3，孔隙率为 95%，有效比表面积为 500 m^2/m^3。



注：INF 为进水，ANA 为厌氧区，AN1 为缺氧区 1，AN2 为缺氧区 2，O 为好氧区；MS 为中间沉淀，N1 为第一格室，N2 为第二格室，N3 为第三格室，EFF 为出水，下同。
Note: INF-influence, ANA- anaerobic, AN1- anoxic 1, AN2- anoxic 1, O- oxic, MS-middle settler, N1-first compartment, N2- second compartment, N3-third compartment, EFF-effluent, the same as below.

图 1 厌氧/缺氧/好氧-生物接触氧化系统（A^2/O - BCO）流程图
Fig.1 Schematic diagram of A^2/O-biological contact oxidation biological system

1.2 试验水质

采用北京工业大学教工住宅区化粪池生活污水为试验水源，属于典型的低 C/N 实际生活污水，水质特点具体如下：COD 质量浓度为 97.62～318.20 mg/L；总氮（total nitrogen，TN）以氨氮为主，质量浓度为 53.21～74.64 mg/L；总磷（total phosphorus，TP）质量浓度为 3.74～7.38 mg/L，NO_3^--N 质量浓度为 0～0.54 mg/L；NO_2^--N 质量浓度为 0～0.23 mg/L。

1.3 试验运行条件

试验连续运行 5 个月，考察了硝化液回流比对 A^2/O-BCO 系统同步脱氮除磷效果的影响。A^2/O 进水流量为 5 L/h，A^2/O 反应池内水力停留时间（hydraulic retention time，HRT）为 8 h，污泥龄（sludge retention time，SRT）控制在 12 d，污泥回流比为 100%，待系统性能稳定后，依次将硝化液回流比分别控制在 100%、200%、300%和 400%进行试验比较，分别记为 Run1、Run2、Run3 和 Run4，基本每个工况都运行 1 个月左右，污泥浓度（mixed liquor suspended solids，MLSS）维持在 3 500 mg/L 左右，好氧段溶解氧（dissolve oxygen，DO）控制在 1.0～2.0 mg/L；BCO 的 HRT 为 1.9 h，DO 均控制在 3.0～4.5 mg/L。

1.4 分析方法

每天用 50 mL 取样器从 A^2/O-BCO 工艺系统每格室中采集 50 mL 水样，水样采用 0.45 μm 中速滤纸过滤，MLSS、挥发性污泥浓度（mixed liquor volatile suspended solids，MLVSS）、COD 等指标

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

采用标准方法测定[17]，PO_4^{3-}-P，NH_4^+-N，NO_2^--N，NO_3^--N 由 Lachat Quikchem8500 型流动注射仪（lachat instrument，milwaukee，wiscosin）测定；采用 WTW，Multi 340i pH/DO 仪测定 pH 值和 DO。

分子荧光原位杂交（fluorescence in situ hybridization，FISH）技术，固定、杂交的操作步骤见文献[18-19]。采用的寡核苷酸探针为 EUB mix（Eub338，碱基序列为 GCTGCCTCCCGTAGGAGT；Eub338Ⅱ，碱基序列为 GCAGCCACCCGTAGGTGT；Eub338Ⅲ，碱基序列为 GCTGCCACCCGTAGGTGT）、Amx368（碱基序列为 CCTTTCGGGCATTGCGAA）。通过 OLYMPUS BX-61 荧光显微镜和 Image-pro plus 6.0 软件对污泥种群进行拍摄和定量分析。

2　A^2/O-BCO 反应池中各污染物物料衡算理论分析

2.1　碳平衡计算分析方法

一般用 COD 间接表示活性污泥系统中的碳指标，因此以整个系统为研究对象计算碳的物料平衡，可以用系统中 COD 的质量变化情况描述，具体流程见图 2。根据进入系统的 COD 总量（$M_{inf.COD}$，mg/d）等于系统出水（$M_{eff.COD}$，mg/d）、系统 A^2/O 中厌氧段利用（$M_{ANA.COD}$，mg/d）、缺氧好氧段利用（$M_{(AN1-S).COD}$，mg/d）、BCO 段利用（$M_{(S-eff).COD}$，mg/d）及剩余污泥（$M_{W.COD}$，mg/d）中的 COD 之和的关系，得出 COD 的平衡方程式（1）－式（7）。

$$M_{inf.COD}=M_{eff.COD}+M_{ANA.COD}+M_{(AN1-S).COD}+M_{(S-eff).COD}+M_{W.COD} \quad (1)$$

$$M_{inf.COD}=Q_{in}\cdot C_{in.COD} \quad (2)$$

$$M_{ANA.COD}=(Q_{in}+Q_R)\cdot[Q_{in}/(Q_{in}+Q_R)\cdot C_{in.COD}-C_{ANA.COD}] \quad (3)$$

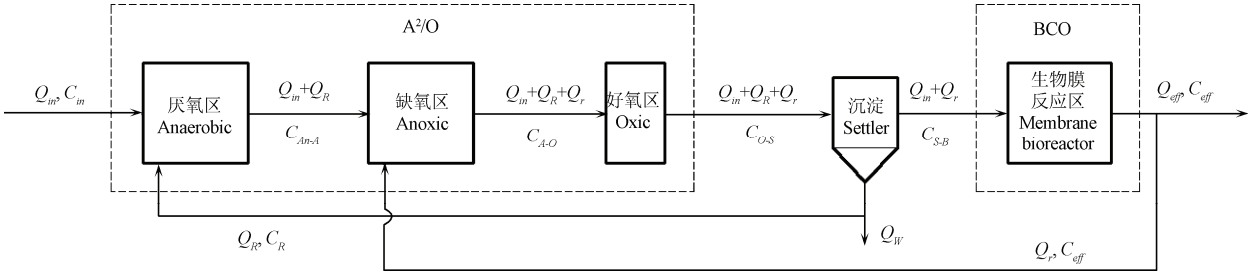
$$M_{(AN1-S).COD}=(Q_{in}+Q_R+Q_r)\cdot(C_{ANA.COD}-C_{S.COD}) \quad (4)$$

$$M_{(S-eff).COD}=(Q_{in}+Q_r)\cdot(C_{S.COD}-C_{eff.COD}) \quad (5)$$

$$M_{eff.COD}=Q_{eff}\cdot C_{eff.COD} \quad (6)$$

$$M_{W.COD}=Q_W\cdot X_W\cdot f\cdot f_{CV} \quad (7)$$

式中：Q_{in} 为进水流量，L/d，Q_R 为回流污泥流量，L/d，Q_r 为回流硝化液流量，L/d，Q_W 为剩余污泥排放量，L/d，Q_{eff} 为出水流量，L/d，$C_{in.COD}$ 为进水 COD 浓度，mg/L，$C_{ANA.COD}$ 为厌氧段 COD 浓度，mg/L，$C_{S.COD}$ 为中间沉淀池 COD 浓度，mg/L，$C_{eff.COD}$ 为出水 COD 浓度，mg/L，X_W 为剩余活性污泥浓度，mg/L，f 为挥发性活性污泥浓度与剩余活性污泥浓度的比值，f_{CV} 为活性污泥中有机物 COD 的化学计量系数，以每 mg 挥发性活性污泥浓度中含有 1.48 mg COD 计[20]。



注：Q_{in} 为进水流量，(L·d^{-1})；Q_R 为回流污泥流量；(L·d^{-1})；Q_r 为回流硝化液流量，(L·d^{-1})；Q_W 为剩余污泥排放量，(L·d^{-1})；Q_{eff} 为出水流量，(L·d^{-1})）；C_{in} 为进水浓度，(mg·L^{-1})；C_{AN-A} 为厌氧区流入缺氧区浓度，(mg·L^{-1})；C_{A-O} 为缺氧区流入好氧区浓度，(mg·L^{-1})；C_{O-S} 为好氧区流入沉淀区浓度，(mg·L^{-1})；C_{S-B} 为沉淀区流入 BCO 浓度，(mg·L^{-1})；C_R 为回流污泥浓度，(mg·L^{-1})；C_{eff} 为出水浓度，(mg·L^{-1})，下同。

Note: Q_{in}-flow of influence,(L·d^{-1}); Q_R- flow of sludge recycle,(L·d^{-1}); Q_r- flow of nitrate recycle,(L·d^{-1}); Q_W-flow of waste sludge,(L·d^{-1}); Q_{eff}- flow of effluent,(L·d^{-1}); C_{in}- concentration of influence，(mg·L^{-1}); C_{AN-A}- concentration of anaerobic to anoxic，(mg·L^{-1}); C_{A-O}- concentration of anoxic to oxic，(mg·L^{-1}); C_{O-S}- concentration of oxic to settler，(mg·L^{-1}); C_{S-B}- concentration of settler to BCO(mg/L); C_R- concentration of sludge recycle，(mg·L^{-1}); C_{eff}- concentration of effluent, (mg·L^{-1}), the same as below.

图 2　A^2/O - BCO 系统的平衡分析

Fig.2　Mass balance of A^2/O-BCO biological system

2.2　磷平衡计算分析方法

生物处理系统中的磷主要是通过剩余污泥的排放来实现除磷目的，因此以整个系统为研究对象计算磷的物料平衡，具体流程见图 3。磷的平衡方程式为（8）－式（11）。

$$M_{inf.P}=M_{eff.P}+M_{W.P} \quad (8)$$

$$M_{inf.P}=Q_{in}\cdot C_{in.P} \quad (9)$$

$$M_{eff.P}=Q_{eff}\cdot C_{eff.p} \quad (10)$$

$$M_{W.P}=Q_W\cdot X_W\cdot f_P \quad (11)$$

式中：$M_{inf.P}$ 为进入系统的磷酸盐中磷的质量，mg/d，$M_{eff.P}$ 为系统出水磷酸盐中的磷质量，mg/d，$M_{W.P}$ 为剩余污泥中磷酸盐中的磷质量，mg/d，$C_{in.P}$ 为进水 TP 浓度，mg/L，$C_{eff.P}$ 为出水 TP 浓度，mg/L，f_P 为剩余污泥中 TP 占污泥干重的比例[21]。

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

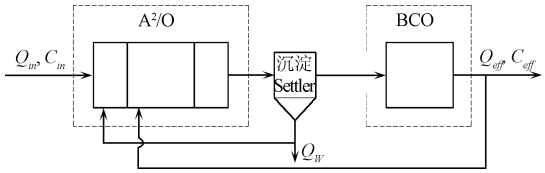


图 3 A^2/O-BCO 系统的整体平衡

Fig.3 Mass balance of A^2/O-BCO biological system

2.3 氮平衡计算分析方法

A^2/O-BCO 工艺系统的平衡分析如图 2 所示。公式（12）－式（14）用来确定 A^2/O - BCO 工艺系统进水中的氮质量。

$$INPUT\ \mathrm{N} = M_{in.\mathrm{NH4}} + M_{in.\mathrm{NOx}} \quad (12)$$

$$M_{in.\mathrm{NH4}} = Q_{in} \cdot C_{in.\mathrm{NH4}} \quad (13)$$

$$M_{in.\mathrm{NOx}} = Q_{in} \cdot C_{in.\mathrm{NOx}} \quad (14)$$

式中：*INPUT* N 为进入系统氮的质量，mg/d，以氨氮和硝态氮之和计，$M_{in.\mathrm{NH4}}$ 为进水氨氮，mg/d，$M_{in.\mathrm{NOx}}$ 为进水硝态氮，mg/d，$C_{in.\mathrm{NH4}}$ 为进水氨氮浓度，mg/L，$C_{in.\mathrm{NOx}}$ 为进水硝态氮浓度，mg/L。

进入到 A^2/O-BCO 系统中的氮一部分流出反应器（$M_{eff.\mathrm{N}}$），一部分通过反硝化去除（$M_{DE.\mathrm{N}}$），剩余部分随剩余污泥排放（$M_{W.\mathrm{N}}$），BCO 处存在的氮损失（$M_{loss.\mathrm{N}}$，即进入 BCO 池前后的 TN 之差）。出水中的总氮（$M_{eff.\mathrm{N}}$）以出水中的氨氮（$M_{eff.\mathrm{NH4}}$）和硝态氮（$M_{eff.\mathrm{NOx}}$）之和计算，此处忽略 BCO 出水悬浮物（平均悬浮物为 10.0～20.0 mg/L）中的氮。出水中氮的质量按照下述公式（15）－式（18）计算。

$$OUTPUT\ \mathrm{N} = M_{eff.\mathrm{N}} + M_{DE.\mathrm{N}} + M_{W.\mathrm{N}} + M_{loss.\mathrm{N}} \quad (15)$$

$$M_{eff.\mathrm{NH4}} = Q_{eff} \cdot C_{eff.\mathrm{NH4}} \quad (16)$$

$$M_{eff.\mathrm{NOx}} = Q_{eff} \cdot C_{eff.\mathrm{NOx}} \quad (17)$$

$$M_{eff.\mathrm{N}} = M_{eff.\mathrm{NH4}} + M_{eff.\mathrm{NOx}} \quad (18)$$

式中：*OUTPUT* N 为流出系统氮的质量，mg/d，$C_{eff.\mathrm{NH4}}$ 为出水氨氮浓度，mg/L；$C_{eff.\mathrm{NOx}}$ 为出水硝态氮浓度，mg/L。

要排放一定数量的污泥来维持 SRT，MLSS 和运行特性，公式（19）用来计算随剩余污泥排放的氮质量（$M_{W.\mathrm{N}}$，mg/d）。

$$M_{W.\mathrm{N}} = Q_W \cdot X_W \cdot f \cdot f_N \quad (19)$$

$$f = X_V / X_W \quad (20)$$

式中：X_V 为挥发性活性污泥浓度，mg/L，f_N 为活性污泥中氮的质量分数，以每 mg 挥发性活性污泥浓度中含有 0.1 mg N 计[21]。

反硝化氮去除量（$M_{DE.\mathrm{N}}$）是由缺氧区 1 和缺氧区 2 的反硝化量来计算的（公式 21）

$$M_{DE.\mathrm{N}} = M_{DE.\mathrm{AN1}} + M_{DE.\mathrm{AN2}} \quad (21)$$

出水中氮质量与进水中氮质量的比例（记为 %N mass balance），可以由公式（22）计算

$$\%\mathrm{N\ mass\ balance} = (OUTPUT\ \mathrm{N} / INPUT\ \mathrm{N}) \times 100\ \% \quad (22)$$

3 A^2/O-BCO 工艺各污染物物料情况

3.1 A^2/O-BCO 工艺运行性能

系统连续稳定运行 5 个月的进出水水质见表 1。A^2/O-BCO 工艺的脱氮除磷效果随着硝化液回流比的增加呈现增加趋势，但当增加到 400%时，TN 却出现了降低趋势。在本试验运行条件下，当硝化液回流比为 400%时，一方面回流污泥中携带的硝酸盐破坏了 A^2/O 中的厌氧环境，严重影响 ANA 段的释磷情况和系统碳源的利用情况，继而影响缺氧段反硝化除磷反应；另一方面回流过来的大量硝酸盐，使得缺氧条件下硝酸盐负荷过高，并携带了大量溶解氧，导致缺氧段有效反应时间严重缩短，A^2/O 出水中硝态氮开始积累，导致 TN 去除效果变差。当运行条件为 Run3 时，系统平均出水 TN 和 TP 浓度分别为 14.96 和 0.49 mg/L，达国家城镇污水处理厂污染物排放标准一级 A 标准。选用系统 Run1～Run4 这 5 个月稳定运行数据作为下文物料衡算的依据。

表 1 不同硝化液回流比工况下各污染物平均进出水浓度

Table 1 Mean concentration of various pollutants in influent and effluent under different nitrate recycling ratios

mg·L^{-1}

参数 Parameters		化学需氧量 Chemical oxygen demand	氨氮 Ammonia	硝态氮 Nitrate	总氮 Total nitrogen	总磷 Total phosphorus
Run 1	进水 Influent	244.32±47.03	65.77±5.05	0.14±0.13	65.93±5.00	6.12±0.55
	出水 Effluent	45.75±8.89	5.77±4.44	27.58±4.48	33.78±3.95	0.86±0.39
Run 2	进水 Influent	231.16±50.92	63.91±4.34	0.28±0.08	64.30±4.55	5.34±0.99
	出水 Wffluent	40.94±7.70	4.89±4.75	15.89±4.88	21.57±3.15	0.52±0.24
Run 3	进水 Influent	187.64±49.10	60.03±3.7	0.05±0.06	61.23±3.7	5.47±0.86
	出水 Wffluent	41.26±14.24	3.95±4.71	10.09±6.96	14.96±1.81	0.49±0.25
Run 4	进水 Influent	240.42±34.98	62.55±4.43	0.02±0.07	62.96±4.46	5.61±0.69
	出水 Effluent	37.31±6.51	3.24±3.49	20.10±2.98	23.61±6.00	0.28±0.21

注：Run1～Run 4 分别对应硝化液回流比为 100%、200%、300%和 400%，下同。

Note: Run1～Run 4 represented nitrifying liquid reflux ratios were 100% 、200%、300% and 400%, the same as below.

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3.2　COD 的去除特性和物料平衡

进入系统的 COD 主要在 A^2/O 反应器中厌氧段被聚磷菌利用来合成体内贮能物质，用于后续缺氧段的反硝化除磷反应，后续 COD 降幅较小，此时 COD 主要用于维持好氧异养菌的新陈代谢[22]，COD 在 BCO 中也得到部分去除，可能原因是其中除了自养型的硝化菌之外，还存在好氧异养菌；另外一部分通过出水流出系统，还有一部分通过剩余污泥排出系统。根据公式（1）－式（7）计算 4 个运行条件下 COD 的物料平衡如表 2。可见 4 个运行条件下，COD 平衡百分比均在 95.0%以上，系统在 A^2/O 反应器中厌氧段用于释磷而被利用的 COD 值占总去除量的百分比分别为 78.5%、71.8%、57.9%和 71.1%。Run 3 下的 57.9%是由于当时正值夏季，进水 COD 值较低，出水 COD 值均小于 50.0 mg/L。

表 2　化学需氧量物料平衡

Table 2　Material balance for chemical oxygen demand(COD)

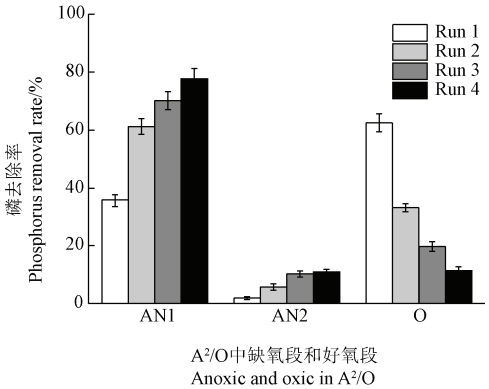
参数 Parameters	$M_{inf.COD}$/(mg·d^{-1})	$M_{eff.COD}$/(mg·d^{-1})	$M_{ANA.COD}$/(mg·d^{-1})	$M_{(AN1-S).COD}$/(mg·d^{-1})	$M_{(S-eff).COD}$/(mg·d^{-1})	$M_{W.COD}$/(mg·d^{-1})	COD 平衡百分比 COD balance/%
Run1	29318.4±5643.6	5490.0±1066.8	7233.7±2626.2	1512±731.8	468±232.5	13559.2±449.3	96.4
Run2	27739.2±6110.4	4912.8±924.0	6000.5±2161.4	1952.4±971.7	402.2±180.5	14354.2±668.4	99.6
Run3	22516.8±5892.0	4951.2±1228.8	2405.6±1001.3	1427.2±771.1	322.2±179.2	13110.4±449.3	98.7
Run4	28850.4±4197.6	4477.2±781.2	7813.8±3727.6	2885.4±1025.3	288.7±155.6	128897.3±533.3	98.3

注：$M_{inf.COD}$ 为进水中 COD 质量，$M_{eff.COD}$ 为出水中 COD 质量，$M_{ANA.COD}$ 为厌氧段利用的 COD 质量，$M_{(AN1-S).COD}$ 为缺氧好氧段利用的 COD 质量，$M_{(S-eff).COD}$ 为 BCO 段利用的 COD 质量，$M_{W.COD}$ 为剩余污泥中的 COD 质量。

Note: $M_{inf.COD}$ - mass of COD in influent, $M_{eff.COD}$ - mass of COD in effluent, $M_{ANA.COD}$ - mass of COD used by anaerobic, $M_{(AN1-S).COD}$ - mass of COD used by anoxic and anoxic, $M_{(S-eff).COD}$ - mass of COD used by BCO, $M_{W.COD}$ - mass of COD in waste sludge.

3.3　磷的去除特性和物料平衡

进入系统的 P 通过厌氧段释磷、缺氧段反硝化吸磷和好氧吸磷，一部分通过出水流出系统，一部分通过剩余污泥排出系统。本工艺有很好的 P 去除效果，缺氧段反硝化吸磷和好氧吸磷占磷总去除量的百分比见图 4，在 Run1 时，反硝化除磷反应受到电子受体的限制，主要发生好氧吸磷反应，随着硝化液回流比增大，在电子受体充足的情况下，缺氧段反硝化除磷反应越彻底。根据公式（8）－式（11）计算 4 个运行条件下 P 的物料平衡如表 3。可以看出 4 个运行条件下通过排放剩余污泥去除的 P 分别占总量的 78.0%、88.4%、84.3%和 85.4%。P 的平衡百分比均在 90.0%以上，可能是由于污泥磷含量选取经验值 3%而造成的磷平衡有部分余差存在。



注：Run1~Run4 分别对应硝化液回流比为 100%、200%、300%和 400%，下同。

Note: Run1~Run 4 represented nitrifying liquid reflux ratios were 100%、200%、300% and 400%, the same as below.

图 4　A^2/O-BCO 系统吸磷情况分布图

Fig.4　Phosphate uptake distribution in A^2/O-BCO biological system

表 3　磷物料平衡

Table 3　Material balance for phosphate

参数 Parameters	$M_{inf.P}$/(mg·d^{-1})	$M_{eff.P}$/(mg·d^{-1})	$M_{W.P}$/(mg·d^{-1})	磷平衡百分比 Phosphate balance/%
Run1	734.4±66.0	103.2±46.8	572.6±9.1	92.0
Run2	640.8±118.8	62.4±28.8	566.2±13.5	98.1
Run3	656.4±103.2	58.8±30.0	553.7±9.1	93.3
Run4	673.2±82.8	33.6±25.2	544.7±10.8	90.4

注：$M_{inf.P}$ 为进水中磷质量，$M_{eff.P}$ 为出水中磷质量，$M_{W.P}$ 为剩余污泥中磷质量。

Note: $M_{inf.P}$ - mass of P in influent, $M_{eff.P}$- mass of P in effluent, $M_{W.P}$ - mass of P in waste sludge.

3.4　氮的去除特性和物料平衡

根据公式（12）计算输入系统氮的质量，4 个运行条件下差别不大，分别是(7 911.6±600.0)、(7 716.0±546.0)、(7 347.6±444.0)和(7 555.2±535.2) mg/d。根据公式（15）计算输出系统氮的质量，流出系统的氮的含量分布情况见表 4，各个途径所占百分比见图 5。

从表 4 和图 5 中可以看出，从 Run1～Run4，随出水流走的氮的质量呈现先减少后增加的趋势，通过反硝化去除的氮却呈现先增加后减少的趋势，在 Run3 时随出水流走的氮达到最少，通过反硝化去除的氮达到最大值；而通过剩余污泥排出的氮和在 BCO 损失的氮的质量相差不大。分析原因，硝化液回流比的增大，为反硝化除磷反应提供了充足的电子受体，使得反硝化除磷反应能够进行的更加充分，但当增加到 Run4 时，硝酸盐负荷过高，导致反硝化去除的氮减少，随出水流走的氮增加。反

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

硝化除磷脱氮是本工艺系统中最主要脱氮方式，4 个运行条件下反硝化除磷脱氮量占总去除量的百分比分别为 28.0%、35.7%、48.5%和 33.9%，只有将硝化液回流比控制在最合适的条件下才能获得最高的脱氮效率，本试验中最合适的硝化液回流比是 300%。

表 4 不同硝化液回流比工况下流出系统的氮

Table 4 Nitrogen output system under different nitrate recycling ratios

mg·d^{-1}

参数 Parameters	$M_{eff.N}$		$M_{DE.N}$		$M_{W.N}$	$M_{loss.N}$
	$M_{eff.NH4}$	$M_{eff.NOx}$	$M_{DE.AN1}$	$M_{DE.AN2}$		
Run1	692.4±532.8	3 361.2±537.6	1 855.9±424.5	403.2±410.5	916.2±30.4	706.0±163.2
Run2	586.8±570.0	2 001.6±585.6	2 518.4±326.5	189.3±155.0	969.9±45.2	1 310.4±198.0
Run3	558.0±565.2	1 237.2±835.2	2 312.8±804.2	717.8±375.8	885.8±30.4	1 075.2±211.2
Run4	388.8±418.8	2 444.4±357.6	1 361.8±620.4	1 112.7±442.2	871.4±36.0	1 113.6±366.0

注：$M_{eff.N}$-出水中 N 质量，$M_{eff.NH4}$-出水 NH_4 中 N 质量，$M_{eff.NOx}$-出水 NOx 中 N 质量，$M_{DE.N}$ -反硝化的 N 质量，$M_{DE.AN1}$-缺氧区 1 反硝化的 N 质量，$M_{DE.AN2}$-缺氧区 2 反硝化的 N 质量，$M_{W.N}$-剩余污泥中的 N 质量，$M_{loss.N}$-损失的 N 质量。

Note: $M_{eff.N}$-mass of N in effluent, $M_{eff.NH4}$-N mass of NH_4 in effluent, $M_{eff.NOx}$ -N mass of NOx in effluent, $M_{DE.N}$ -mass of N used by denitrification, $M_{DE.AN1}$-mass of N by anoxic 1 denitrification, $M_{DE.AN2}$-mass of N by anoxic 2 denitrification, $M_{W.N}$-mass of N in waste sludge, $M_{loss.N}$- lost mass of N.

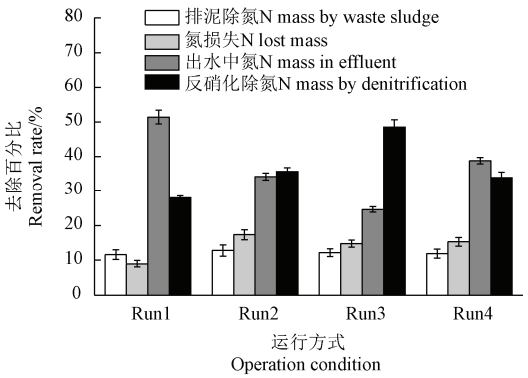


图 5 氮流出 A^2/O-BCO 系统分布图

Fig.5 Nitrogen output distribution in A^2/O-BCO biological system

图 6 为不同硝化液回流比下系统中 NO_x^- -N 浓度的变化情况，可以更清楚地看出，从 Run1～Run3，系统出水中 NO_x^--N 含量逐渐降低，说明反硝化除磷脱氮情况越来越好，反硝化除磷反应受限于电子受体的浓度；在 Run4 时，缺氧段 NO_x^--N 含量显著高于其他 3 个运行条件，过高的电子受体浓度并没有改善系统脱氮情况，在本试验条件下，Run3 时系统达到一个较好的脱氮效果。排泥中的氮按照公式（19）计算，通过剩余污泥的排放去除的氮均占流出系统氮的 12%左右。BCO 损失的氮是通过计算 BCO 池前后的 TN 之差得到的，从 Run1～Run4，氮损失占流出系统氮的百分比分别为 9.0%、17.3%、14.8%和 15.3%，这部分氮损失，可能是被微生物用来进行同化作用，也有可能通过同步硝化反硝化作用被去除。考虑到整体运行工艺特点，生活污水中可降解 COD 基本在 A^2/O 中被去除，为 BCO 反应器中自养微生物的优势生长创造了条件，加之 BCO 反应器为生物膜硝化反应器，推测可能在生物膜内部有厌氧氨氧化菌的存在，进行厌氧氨氧化反应，导致了一部分 N 损失。针对此推断，取运行 105 d 生物膜进行 FISH 试验，验证了该推断的正确性，且厌氧氨氧化菌占全菌比例为 0.6%～2.7%，图 7a 和 7b 为全菌，7c 和 7d 分别为与 7a 和 7b 对应的目标菌。

从 Run1～Run4 每个运行条件下氮平衡百分比以流出系统的氮除以进入系统的氮计算，结果见表 5。可以看出，氮平衡百分比均在 95.0%以上，对该系统的氮物料平衡分析公式做了很好的论证。

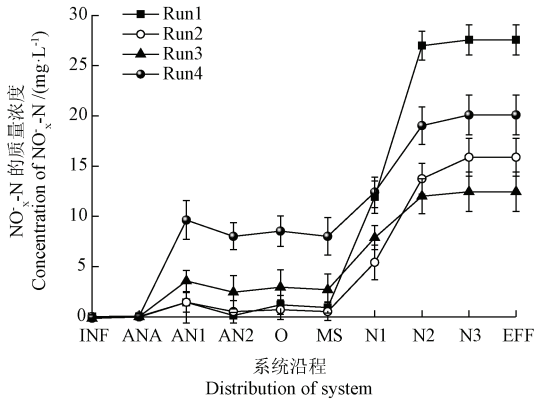
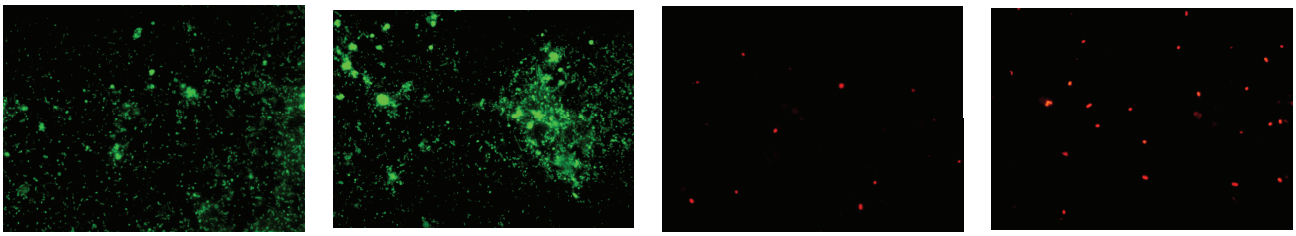


图 6 不同硝化液回流比下系统中 NO_x^- -N 浓度的变化情况

Fig.6 Variation of NO_x^- -N concentration under different nitrate recycling ratios

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



a. 全菌
a. Total bacteria

b. 全菌
b. Total Eubacteria

c. 目标菌
c. Target bacteria

d. 目标菌
d. Target bacteria

图 7　生物接触氧化反应器中厌氧氨氧化菌的荧光原位杂交检测结果
Fig.7　FISH results of ANAMMOX bacteria in BCO reactor

表 5　氮物料平衡
Table 5　Material balance for nitrogen

参数 Parameters	进入系统氮的质量 *INPUT* N Mass of nitrogen input the system/(mg·d^{-1})	流出系统氮的质量 *OUTPUT* N Mass of nitrogen output the system/(mg·d^{-1})	氮平衡百分比 Nitrogen balance/%
Run1	7911.6±600.0	7884.8±573.8	99.7
Run2	7716.0±546.0	7576.4±614.2	98.2
Run3	7347.6±444.0	7286.9±529.5	99.2
Run4	7555.2±535.2	7292.7±641.6	96.5

4　结　论

本文以厌氧/缺氧/好氧-生物接触氧化（anaerobic anoxic oxic- biological contact oxidation，A^2/O-BCO）组合工艺不同硝化液回流比稳态运行条件下的试验数据为基础，对 A^2/O-BCO 组合工艺碳（COD）、氮和磷的物料平衡情况进行了分析，得出如下结论：

1）建立了 A^2/O-BCO 组合工艺的物料衡算公式，且通过硝化液回流比分别为 100%、200%、300%和 400%条件下的试验数据验证，碳（以化学需氧量计，chemical oxygen demand，COD）的物料衡算公式平衡百分比分别为 96.4%、99.6%、98.7%和 98.3%，氮的物料衡算公式平衡百分比分别为 99.7%、98.2%、99.2%和 96.5%，磷的物料衡算公式平衡百分比分别为 92.0%、98.1%、93.3%和 90.4%。

2）本工艺在充分利用原水碳源、深度脱氮除磷方面具有较强的优势。在硝化液回流比分别为 100%、200%、300%和 400%条件下，系统 COD 在 A^2/O 中厌氧段去除量占总去除量的百分比分别为 78.5%、71.8%、57.9%和 71.1%；通过反硝化除磷脱氮量占氮去除总量的百分比分别为 28.0%、35.7%、48.5%和 33.9%；通过排放剩余污泥除磷量占总量的百分比分别为 78.0%、88.4%、84.3%和 85.4%。当硝化液回流比为 300%时，系统同步氮磷去除效果最好，出水中 COD、总氮和总磷均达到国家城镇污水处理厂污染物排放标准一级 A 标准。

3）通过氮物料平衡的分析和荧光原位杂交表明生物膜中有厌氧氨氧化菌存在，且其数量占全菌的比例为 0.6%～2.7%，BCO 的氮损失可能是由于发生了厌氧氨氧化反应。

[参　考　文　献]

[1]　夏邦寿，胡启春，宋立. 村镇生活污水净化沼气池设计图例技术分析[J]. 农业工程学报，2008，24(11)：197－201.
Xia Bangshou, Hu Qichun, Song Li. Technical analysis of designs of biogas digesters for treating domestic sewage from ruralareas[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(11): 197－201. (in Chinese with English abstract)

[2]　段增强，段婧婧，耿晨光，等. 园林地慢速渗滤系统处理农村分散式生活污水[J]. 农业工程学报，2013，28(23)：192－199.
Duan Zengqiang, Duan Jingjing, Geng Chenguang, et al. Garden slow percolation system for processing rural distributed wastewater[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 28(23): 192－199. (in Chinese with English abstract)

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[3] Xu Defu, Xu Jianming, Wu Jianjun, et al. Studies on the phosphorus sorption capacity of substrates used in constructed wetland systems[J]. Chemosphere, 2006, 63(2): 344－352.

[4] Wu Shubiao, Austin David, Liu Lin, et al. Performance of integrated household constructed wetland for domestic wastewater treatment in rural areas[J]. Ecological Engineering, 2011, 37(6): 948－954.

[5] Dubber D, Gray N F. The effect of anoxia and anaerobia on ciliate community in biological nutrient removal systems using laboratory-scale sequencing batch reactors (SBRs)[J]. Water Research, 2011, 45(6): 2213－2226.

[6] 张文艺，姚立荣，王立岩，等. 植物浮岛湿地处理太湖流域农村生活污水效果[J]. 农业工程学报，2010, 26(8)：279－284.
Zhang Wenyi, Yao Lirong, Wang Liyan, et al. Effects of rural domestic sewage treatment in Taihu Lake Valley by wetland of plant floating island[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(8): 279－284. (in Chinese with English abstract)

[7] 龚灵潇，彭永臻，杨庆，等. 不同载体填充率下一体化 A/O 生物膜反应器的启动特性[J]. 中南大学学报：自然科学版，2013，44(3)：1275－1282.
Gong Lingxiao, Peng Yongzhen, Yang Qing, et al. Start-up characteristics of integrated A/O biofilm reactor with different carrier packing rates[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2013, 44(3): 1275－1282. (in Chinese with English abstract)

[8] Wang Xiaolian, Peng Yongzhen, Wang Shuying, et al. Influence of wastewater composition on nitrogen and phosphorus removal and process control in A^2O process[J]. Bioprocess and Biosystems Engineering, 2006, 28(6): 397－404.

[9] Barker P S, Dold P L. Denitrification behaviour in biological excess phosphorus removal activated sludge systems[J]. Water Research, 1996, 30(4): 769－780.

[10] Peng Yongzhen, Wang Xiaolian, Li Baikun. Anoxic biological phosphorus uptake and the effect of excessive aeration on biological phosphorus removal in the A^2O process[J]. Desalination, 2006, 189(1): 155－164.

[11] Kuba T, Van Loosdrecht M C M, Brandse F A, et al. Occurrence of denitrifying phosphorus removing bacteria in modified UCT-type wastewater treatment plants[J]. Water Research, 1997, 31(4): 777－786.

[12] Bortone G, Marsili Libelli S, Tilche A, et al. Anoxic phosphate uptake in the DEPHANOX process[J]. Water science and technology, 1999, 40(4): 177－185.

[13] Lee D S, Jeon C O, Park J M. Biological nitrogen removal with enhanced phosphate uptake in a sequencing batch reactor using single sludge system[J]. Water Research, 2001, 35(16): 3968－3976.

[14] Lee H, Han J, Yun Z. Biological nitrogen and phosphorus removal in UCT-type MBR process[J]. Water Science and Technology, 2009, 59(11): 2093－2099.

[15] Nowak O, Franz A, Svardal K, et al. Parameter estimation for activated sludge models with the help of mass balances[J]. Water Science and Technology, 1999, 39(4): 113－120.

[16] Barker P S, Dold P L. COD and nitrogen mass balances in activated sludge systems[J]. Water Research, 1995, 29(2): 633－643.

[17] APHA. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 14ed[M]. Washington DC: APHA American Public Health Association, 1976.

[18] Guo Jinhua, Peng Yongzhen, Wang Shuying, et al. Effective and robust partial nitrification to nitrite by real-time aeration duration control in an SBR treating domestic wastewater[J]. Process Biochemistry, 2009, 44(9): 979－985.

[19] 曾薇，杨庆，张树军，等. 采用 FISH、DGGE 和 Cloning 对短程脱氮系统中硝化菌群的比较分析[J]. 环境科学学报，2006，26(5)：734－739.
Zeng Wei, Yang Qing, Zhang Shujun, et al. Analysis of nitrifying bacteria in short-cut nitrification-denitrification processes by using Fish, PCR-DGGE and Cloning[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2006, 26(5): 734－739. (in Chinese with English abstract)

[20] Chuang S H, Ouyang C F. The biomass fractions of heterotrophs and phosphate-accumulating organisms in a nitrogen and phosphorus removal system[J]. Water Research, 2000, 34(8): 2283－2290.

[21] Henze Mogens, Harremoës Poul, Jansen Jes La Cour, et al. Wastewater Treatment. Biological and Chemical Processes[M]. Berlin : Springer-Verlag, 1997.

[22] Chen Yongzhi, Peng Chengyao, Wang Jianhua, et al. Effect of nitrate recycling ratio on simultaneous biological nutrient removal in a novel anaerobic/anoxic/oxic (A^2/O)-biological aerated filter (BAF) system[J]. Bioresource Technology, 2011, 102(10): 5722－5727.

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Material balance of anaerobic-poor oxygen-aerobiotic biological contact oxidation process treating sewage with low carbon/nitrogen ratio

Wang Cong, Wang Shuying※, Zhang Miao, Tang Yufang, Zeng Wei, Peng Yongzhen

(*Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering, Beijing University of Technology, Beijing* 100124*, China*)

Abstract: Increasingly stringent discharge standards make it necessary to research and develop a new processes that have the advantages of relatively high efficiency, less land occupation, investigated savings, easy management, and maintenance for nutrient removal from the domestic sewage. An enhanced denitrifying phosphorus removal system was developed to treat domestic sewage, especially for the sewage with comparatively low carbon source and high nitrogen and phosphorus concentration. The system included an integrating anaerobic/anoxic/oxic (A^2/O) reactor and a biological contact oxidation (BCO) (A^2/O - BCO for short). The A^2/O unit consisted of four compartments in sequence with a working volume of 40L. It was mainly used for the removal of organic compounds and nutrients without ammonium oxidation, while the BCO unit was mainly responsible for nitrification. The BCO unit, with 24L working volume, consisted of three compartments in sequence, where suspended carriers were filled in it, with packing rates of 45% in each zone. The removal of biological nitrogen (N) and phosphorus (P) were investigated in an A^2/O - BCO nitrogen and phosphorus removal process when treating domestic sewage. The experiment was carried out with the influent flow at a rate of 5L/h, total hydraulic retention time (HRT) of A^2O about 8 h, sludge reflux ratio of 100%, sludge retention time (SRT) of 12d, MLSS maintained at 3500 mg/L, total HRT of BCO about 1.9 h, DO should be controlled within a reasonable range, and nitrate recycling ratios were set as 100%, 200%, 300%, and 400% respectively. Based on the experimental data under steady state operating conditions of different nitrate recycling ratios, the equations for calculating material balances of COD, nitrogen, and phosphate were established. These three material distributions in the system were also evaluated. The result indicated that the process has an advantage of making full use of the raw water carbon and removing biological nitrogen and phosphorus deeply. With the nitrate recycling ratios of 100%, 200%, 300%, and 400% conditions, the system COD was mainly utilized in the anaerobic stage in A^2/O reactor, and removal percentages of total COD were 78.5%, 71.8%, 57.9%, and 71.1% respsectively. Nitrogen removal was mainly achieved by denitrifying in the phosphorus removal process by denitrifying phosphorus bacteria. The denitrification removal ratios of the total amount were 28.0%, 35.7%, 48.5%, and 33.9%, respectively. Phosphorus removal was mainly achieved by the discharge of excess sludge, where the amount of phosphorus percentages of total were 78.0%, 88.4%, 84.3%, and 85.4% respectively. Under the different nitrate recycling ratios, COD balance ratios were 96.4%, 99.6%, 98.7%, and 98.3%, nitrogen balance ratios were 99.7%, 98.2%, 99.2%, and 96.5%, and phosphorus balance ratios were 92.0%, 98.1%, 93.3%, and 90.4%. Fluorescence in situ hybridization showed that the anammox bacteria existed in the biofilm of BCO, and its proportion of the total bacterial number was 0.6~2.7%. The nitrogen loss may be due to the occurrence of the anammox reaction. The amount of denitrifying phosphorus increased slightly with the nitrate recycling ratio improved. But it is essential to control nitrate recycling ratio in the appropriate range to ensure nitrogen removal efficiency. The system achieved the best removal efficiencies of nitrogen and phosphorus when the nitrate recycling ratio was set as 300%, in which the average concentrations of TN and TP were 14.96 mg/L and 0.49 mg/L respectively in the effluent, which met the class of a limit (GB18918-2002) of the discharge standards. This study not only contributes to a better understanding and analysis of distribution and changes about organics, nitrogen and phosphorus in process systems, but also provides a theoretical basis and guidance for the reliability evaluation of the of the experimental data by building a mathematical model. The combined A^2/O - BCO process will get a better promotion in treating domestic wastewater, especially the rural domestic wastewater with the universal features of small quantity, scattered distribution, and water fluctuation.

Key words: sewage; denitrification; sewage treatment; A^2/O-biological contact oxidation (BCO) combined process; nitrogen and phosphorus removal; material balance; nitrate recycling ratio

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net