

葛士建, 彭永臻. 2009. 连续流分段进水工艺生物脱氮除磷技术分析及优化控制[J]. 环境科学学报, 29(12): 2465–2470

Ge S J, Peng Y Z. 2009. Analysis and optimization control of the continuous step feed biological nitrogen and phosphate removal process[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 29(12): 2465–2470

连续流分段进水工艺生物脱氮除磷技术分析及优化控制

葛士建, 彭永臻*

北京工业大学 北京市水质科学与水环境恢复重点实验室, 北京 100124

收稿日期: 2009-05-14 修回日期: 2009-08-28 录用日期: 2009-11-05

摘要: 连续流分段进水工艺可最大程度利用污水碳源, 对低 C/N 城镇生活污水及工业废水具有深度脱氮除磷特性. 详述了连续流分段进水工艺生物脱氮除磷原理和工艺特性, 重点分析了段数、流量分配比、各段缺氧区和好氧区容积分配比、溶解氧、污泥回流比、原水水质等对工艺运行性能的影响因素. 并结合国内外研究现状和工程应用实例, 概述了工艺的过程控制的研究情况和应用前景. 开展针对中国污水水质的工艺设计试验研究和相应的工艺过程控制研究是加快分段进水工艺应用于中国污水处理行业的两大技术突破点.

关键词: 分段进水; 生物脱氮除磷; 优化控制; 城市污水

文章编号: 0253-2468(2009)12-2465-06 中图分类号: X703 文献标识码: A

Analysis and optimization control of the continuous step feed biological nitrogen and phosphate removal process

GE Shijian, PENG Yongzhen*

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

Received 14 May 2009 received in revised form 28 August 2009; accepted 5 November 2009

Abstract The continuous step feed biological nitrogen and phosphate removal (CSFBNR) process can make good use of influent COD as the carbon source required in denitrification. It can achieve high removal efficiencies of nitrogen and phosphate when treating municipal or industrial wastewater with low C/N ratio. In this review, the operational principle and characteristics of CSFBNR are discussed and significant factors influencing operation performance are highlighted, including the step numbers, influent flow distribution, anaerobic zone to aerobic zone volume distribution ratio, dissolved oxygen, sludge return ratio and influent characteristics. Based on the state of the art and application examples, process control techniques and application prospects are discussed and areas in which further research is urgently required are identified. Establishing design criteria and developing relevant process control systems are two critical points for promoting and broadening the application of CSFBNR in China.

Keywords step feed; biological nitrogen and phosphate removal; optimization control; municipal wastewater

1 引言 (Introduction)

鉴于国内外氮磷等营养物排放标准的日益严格, 在传统生物脱氮除磷工艺的基础上, 研究者相继开发了多种新型生物脱氮除磷新技术新工艺, 如

完全自养脱氮工艺 (CANNON)、限氧自养硝化反硝化工艺 (OLAND)、厌氧氨氧化工艺 (ANAMMOX)、连续流分段进水工艺 (CSFBNR) 等. 连续流分段进水多段厌氧/缺氧/好氧 (An/A/O) 工艺是一种基于传统 A/O 工艺而发展起来的工艺, 它最早由国外研究人员于 20 世纪 90 年代初提出并试验研究, 目前

基金项目: 国家“十一五”重大科技专项课题 (No. 2008ZX07317-007-105; 2008ZX07314-008-01); 2008 年中韩环境共同技术研究项目; 北京工业大学第七届研究生科技基金项目 (No. ykj-2009-2619)

Supported by the National Key Technologies Special Program of China during the Eleventh Five-year Plan Period (No. 2008ZX07317-007-105; 2008ZX07314-008-01), the Korea-China Joint Research Project on Environmental Technology and the Seven S&T Program for the Graduate Students of BJUT (No. ykj-2009-2619)

作者简介: 葛士建 (1987—), 男, 博士研究生, E-mail: g1-222@tom.com; * 通讯作者 (责任作者), E-mail: py@bjut.edu.cn

Biography: GE Shijian (1987—), male, Ph. D. candidate, E-mail: g1-222@tom.com; * Corresponding author, E-mail: py@bjut.edu.cn

已在美国、日本、新西兰等国污水处理厂投入生产应用. 工程实例表明, 该工艺脱氮效率高、无需内循环、所需池容和水力停留时间较小, 适用于各种规模污水厂的升级改造和新厂建设. 我国对分段进水生物除磷脱氮工艺的发展情况、工艺介绍和应用前景; Wang 等 (2006) 以四级分段进水 A/O 工艺为研究对象, 对 COD 、 NH_4^+-N 、 TN 和 TP 的去除率分别为 89.5%, 97.8%, 73.0% 和 75.0%. Peng 等 (2009; 2007a) 在污水碳源充足和不足两种条件下, 考察了四级分段进水 A/O 工艺生物脱氮运行情况, 同时建立了工艺的稳态模型和运行控制策略. 本文结合现有试验结果和工程应用情况, 对连续流分段进水生物脱氮除磷工艺进行较为系统的总结阐述.

2 连续流分段进水工艺原理及特性 (The principle and characteristics of CSFBNR)

2.1 工艺原理

连续流分段进水生物脱氮除磷工艺一般有多个 A²/O 或 A/O 段串联组合而成, A 区和 O 区可设 在同一池体, 也可分建 (如图 1 以三段式为例). 工 艺采用各段缺氧区或厌氧区多点进水的方式, 一般 不设置硝化液内回流设施, 只需将二沉池污泥回流 至反应器首段. 在第一段的厌氧区 (若设置) 聚磷菌

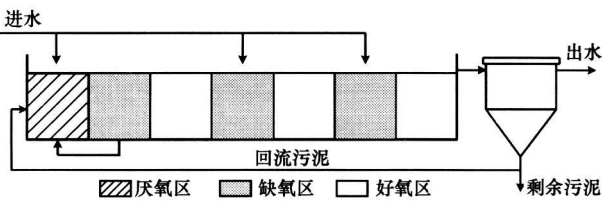


图 1 连续流分段进水工艺示意图

Fig 1 Schematic diagram of the step feed biological nitrogen and phosphate removal process

利用部分进水易生物降解有机物充分的释磷, 缺氧 区反硝化菌只需将污泥回流液中的硝态氮还原, 聚 磷菌以硝态氮为电子受体发生部分反硝化吸磷反 应, 好氧区进行硝化菌的硝化反应和聚磷菌的生物 吸磷反应, 反应后的混合液和部分进水进入第二段 的缺氧区, 后续各段反应功能同第一段.

2.2 工艺特性

该工艺由于采用分段多点进水方式, 因此具有一 些特定工艺优势: ①有机物沿反应器均匀分布, 负 荷均衡, 一定程度上缩小了供氧速率与耗氧速率 之间的差距, 降低能耗, 更能充分发挥活性污泥微 生物的降解能力. ②污泥回流至反应器首段, 污泥 浓度沿反应器梯度排列, 而且梯度变化随污泥停留 时间的延长而增大, 在暴雨季节可通过改变各段进 水流量分配比, 以减少活性污泥被冲刷流失的危 险. ③在二沉池相同固体浓度负荷的前提下, 系统 主反应池中具有较高的污泥浓度, 处理能力高.

工艺结构排列形式本身的优势: ①硝化液从各 段好氧区直接进入下一段缺氧区, 不用设置硝化液 内回流设施, 简化了工艺流程, 节省了动力费用. ② 各段厌氧区或缺氧区只进入部分原水, 反硝化菌优 先利用原水中易降解有机物进行反硝化反应, 减少 了好氧区异养菌对有机物的竞争, 因此反硝化可以 最大程度地利用原水碳源, 尤其适用于解决低 C/N 城镇生活污水生物处理中碳源不足的问题. ③反硝 化出水直接进入好氧区, 在一定程度上弥补了硝化 反应对碱度的需求, 减少碱度物质投加量. ④缺氧 好氧环境交替存在, 有效抑制了丝状菌的繁殖生 长, 防止丝状菌污泥膨胀的发生. ⑤对现有水厂的 升级改造相对简单, 只需将污水改为分段进入主体 反应池体, 部分池体改为缺氧运行, 其它设施无需 改动.

连续流分段进水工艺与其它生物脱氮除磷工 艺的对比如表 1 所示.

表 1 几种脱氮除磷工艺特性比较

Table 1 Comparison of characteristics of several nitrogen and phosphate removal processes

工艺	进水水质	运行方式	温度范围 /℃	菌种	除磷功能	应用范围	功能
SBR	城市污水	缺氧、好氧	18~ 25	硝化菌、反硝化菌、聚磷菌、异养菌	有	小型污水处理厂	工艺简单, 运行方式灵活, 生化反应推动力大, 脱氮除磷效果好, 但一般只适用于日处理量较小的污水处理厂
分段进水	城市污水	厌氧、缺氧、好氧	18~ 25	硝化菌、反硝化菌、聚磷菌、异养菌	有	大中小型污水处理厂	利用污水碳源能力强, 对低 C/N 污水脱氮除磷效果好, 无需硝化液内回流设施, 对原水厂升级改造简单, 但进水量分配优化控制难

续表 1

工艺	进水水质	运行方式	温度范围 /℃	菌种	除磷功能	应用范围	功能
A/A/O	城市污水	厌氧、缺氧、好氧	18~ 25	硝化菌、反硝化菌、聚磷菌、异养菌	有	大中型污水处理厂	同步脱氮除磷, 构造简单, 总水力停留时间短, 应用范围广, 但氮磷去除率不高, 运行费用高
SHARON	高氨氮废水 (污泥硝化液或浓缩液)	缺氧、低氧	30~ 36	氨氧化菌、异养菌	没有	实际应用	节约 23% 曝气和 40% 碳源, 污泥产量减少 50% (与全程工艺相比), 但高温条件限制主要应用于处理污泥消化上清液等高氨氮废水
ANAMMOX	高氨氮废水 (含亚硝酸盐)	厌氧	30~ 40	厌氧氨氧化菌	没有	实际应用	无需外加碳源和曝气, 污泥产量少, 但对进水氮化合物比例要求高, 启动周期长
CANON	高氨氮废水	低氧	20~ 43	氨氧化菌、厌氧氨氧化菌	没有	实验室研究	无需外碳源, 需氧少, 污泥产量少, 但脱氮率不高, 效果易受氧气和亚硝酸盐影响
OLAND	高氨氮废水	低氧	20~ 35	自养氨氧化菌	没有	实验室研究	节约 23% 曝气和 40% 碳源, 污泥产量减少 50% (与全程工艺相比), 但长期低溶解氧, 易发生污泥丝状菌膨胀, 更适用于生物膜法

3 连续流分段进水工艺影响因素 (The influencing factors of CSFBNR)

3.1 分段段数

连续流分段进水生物脱氮除磷工艺的段数对系统的脱氮除磷效率影响很大. 随段数增多, 各段流量分配比例减少, 反硝化反应利用的原水碳源更充分, 脱氮效率得以提高, 而且经过反复的好氧吸磷过程, 系统的除磷率也随之改善. 但从系统的运行控制角度, 段数越多, 系统混合液越趋近于完全混合. 与传统生物工艺相比 (Johnson *et al*, 2005), 在相同反应器容积和二沉池固体负荷的情况下, 分段进水工艺的处理容量会增加 100% ~ 140%, 而且随着段数的增加工艺的处理容量逐渐提高, 但当段数 $n > 5$ 时分段进水工艺体现的性能优势将不再明显. G^L_{rg n}等 (1996)采用数学模型模拟分段进水工艺, 发现三段式工艺运行效果最佳. 综合考虑工艺技术效果和经济性分析, 试验研究和工程应用一般以 2~ 5段为主.

3.2 各段流量分配

该工艺脱氮除磷效果高, 应满足 3 个条件: ①各段缺氧区进水能够提供将上一段的硝酸盐完全反硝化掉的足够碳源, 不产生硝酸盐的积累; ②第一段进水碳源同时满足释磷反应需求; ③最后一段进水量尽量小. 因此针对不同的生活污水水质特性, 存在不同的最佳流量分配比. 此外, 流量分配的变化会直接导致其它运行参数的改变, 如缺氧区和好氧区的容积分配、活性污泥浓度、SRT 等. Chang 等 (2000)采用人工配水在 3 种流量分配比 (7/3

8/2, 9/1)下对两段 A/O 分段进水工艺脱氮除磷性能进行了比较试验. Kayse 等 (1992)根据二沉池出水硝态氮含量的高低调节进水流量分配, 结果表明, 最佳的分配比例为 40%、20%、20%. 而 Vaipoulou 等 (2008)将 UCT 工艺和分段进水策略结合起来处理希腊某城市生活废水, 水力停留时间 9h 进水流量 $4\text{L}\cdot\text{h}^{-1}$, 研究发现当各段进水比例为 60%、25%、15% 时, 系统对各污染物去除效率最高, 达到欧盟污水排放标准. Daigger 等 (2000)通过改变段数和各段进水流量比例, 使得系统平均污泥浓度较普通 BNR 系统提高 35% ~ 70%, 在相同二沉池污泥负荷情况下, 大大增加了工艺对污染物的处理能力. 因此, 各段的流量分配的选择和控制是优化运行分段进水工艺的重要参数.

目前连续流分段进水工艺进水流量分配, 一般有两种情况. 一种是采取各段等量进水但池容不等的运行方式. 日本 20 家左右污水处理厂采用这种方式运行 (Takao *et al*, 2008). 另一种是采用不同的进水流量分配而且各段池容不定的运行方式. 美国、新加坡等国污水处理厂一般采用这种方式, 因而探讨流量分配方法对工艺运行性能显得尤为重要. 北京工业大学王伟等 (2008)提出, 分段进水 A/O 工艺的 3 种流量分配思想: 等负荷流量分配法、流量分配系数法及末端集中进水, 建立流量分配专家决策系统, 根据不同水力负荷及出水水质, 优化选择合适的流量分配方法, 保证系统硝化效果, 优先利用原水碳源进行反硝化, 且能避免洪峰流量期间污泥的冲刷流失.

3.3 各段缺氧区 $V_{\text{缺氧}}$ 、好氧区 $V_{\text{好氧}}$ 容积分配

分段进水工艺中各段 $V_{\text{缺氧}}/V_{\text{好氧}}$ 容积比对系统除磷影响不大,但兼顾工艺脱氮除磷性能,必须首先保证各段硝化效果,尤其是前几段,而缺氧区容积大小直接影响反硝化反应的彻底与否。因此,工程设计和实际运行中必须选择合理的 $V_{\text{缺氧}}/V_{\text{好氧}}$ 容积比,使得各段硝化和反硝化效果充分发挥。

各段 $V_{\text{缺氧}}/V_{\text{好氧}}$ 容积比主要受进水水质特性影响。对于低 C/N 比且可生化性较差的生活污水,因进水可利用的有机物少且反硝化速率小,要适当增加 $V_{\text{缺氧}}/V_{\text{好氧}}$,以保证缺氧区水力停留时间,反之,减少 $V_{\text{缺氧}}/V_{\text{好氧}}$ 。

3.4 溶解氧

分段进水工艺中涉及两个溶解氧(DO)浓度问题:一是各段好氧区中 DO 浓度,一是从好氧区到缺氧区携带 DO 浓度。

在保证各段硝化效果所需 DO 前提下,尽量减少曝气量有利于实现同步硝化反硝化和短程硝化反硝化,从而减少对进水 C/N 比的要求和曝气能耗。Zhu 等(2007b)从氨氮和硝态氮的物料平衡及硝化反硝化反应过程中碱度变化两方面证实了四段式分段进水 A/O 工艺中发生明显的同步硝化反硝化现象,并得出 DO 浓度与同步硝化反硝化发生及发生程度的量化关系。Ma 等(2008)维持连续流 A/O 工艺($DO\ 0.4\sim 0.7\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),逐步淘洗亚硝酸氧化菌(NOB, Nitrite Oxidation Bacteria)实现亚硝酸盐的积累,稳步实现短程脱氮,提高了系统脱氮效率,降低了曝气能耗。

分段进水工艺交替的好氧缺氧方式,导致好氧区携带部分 DO 流入下一段缺氧区,与缺氧区的硝酸盐氮争夺有限的电子供体(有机物),抑制硝酸盐还原酶的合成及活性,降低反硝化速率,因此需控制缺氧区的携带 DO 浓度。纽约市某污水厂通过控制好氧区末端 DO 浓度,降低出水总氮。Cumberland 污水厂在各段好氧区设置脱氧区,减少好氧区携带 DO 对缺氧区反硝化反应的影响(Christine *et al*, 2002)。

3.5 污泥回流比

一般情况下分段进水工艺可省去内回流,只设置外回流系统。污泥回流比大小主要影响系统污泥浓度、污泥龄以及对总氮、总磷的去除率。Nobert 等(2003)研究发现,三段等量进水工艺系统的平均污泥浓度比完全混合式工艺高 27%。此外,分段进水

工艺出水总氮主要由硝酸盐组成,污泥回流比大小直接决定第一段缺氧区硝酸盐浓度。在保证系统硝化效果的前提下,通过加大污泥回流比可充分利用首段缺氧区反硝化能力,提高系统总氮去除率。但污泥回流比过大,过多的硝态氮破坏首段厌氧区的厌氧环境,而且反硝化菌与聚磷菌竞争进水碳源,减少有机颗粒 PHA 合成量和多聚磷酸盐(Poly-P)释放量,从而影响后续好氧区的吸磷能力(Funmai *et al*, 1999)。Garzon 等(1996)研究表明,3.6L SBR 运行周期末剩余 $25\text{ mg}\cdot\text{NO}_3^-/\text{N}$,将会导致下一周期厌氧段减少 30% 的释磷量。因此,选择合适的污泥回流比才能兼顾系统总氮和总磷去除效果。实际运行控制中,污泥回流比由水质水量、污泥活性等具体情况确定,其值不宜过大。

3.6 原水水质

原水水质(COD 组分和 $C/N/P$)是影响分段进水工艺脱氮除磷的重要因素。根据 Doh 等(Doh *et al*, 1986; Grady *et al*, 1986; Henze *et al*, 1987)的研究,普通城市生活污水中的 COD 可划分为 4 种组分:①溶解性可快速生物降解 COD;②颗粒性可慢速生物降解 COD;③溶解性不可生物降解 COD;④颗粒性不可生物降解 COD。COD 各组分含量决定着污水可生化性程度以及系统微生物可利用的碳源量,在污水生物处理过程中微生物只能利用前两种 COD。生物脱氮技术是通过反硝化菌以 NO_3^-/N 为电子受体,原水碳源为电子供体,将 NO_3^-/N 还原成氮的气态物质。生物除磷是通过聚磷菌利用原水碳源完成厌氧释磷和好氧吸磷过程,将水中的磷转移至污泥排出系统。文献(Katarzyna *et al*, 1999)认为,在理论上还原 $1\text{ mg}\cdot\text{NO}_3^-/\text{N}$ 需消耗 $2.86/(1-Y_H)\text{ mg COD}$ (Y_H 为产率系数)。因此原水的 $C/N/P$ 是影响系统脱氮除磷的重要因素。

在实际设计和运行过程中必须根据原水水质,合理调整缺氧区和好氧区的水力停留时间,充分利用原水可生物降解 COD。对于低 C/N 碳源不足的污水水质可考虑投加外碳源,分段进水工艺的碳源投加点有别于传统生物脱氮除磷工艺,常常选择在后几段缺氧区投加或设置单独的后置反硝化区。Peng 等(2004)研究了 C/N 比对四段式分段进水工艺脱氮率的影响。Christine 等(2002)在进水比例为 25/25/25/25 的情况下,对比 4 种投加点(不投加、初沉池出水、第 3 段和第 4 段、第 4 段)的出水总氮浓度和需要碳源量进行比较发现,选择最后一段投加

为最佳方案.

4 分段进水工艺的过程控制研究 (The process control of CSFBNR)

污水处理工艺的过程控制可大大提高工艺的运行性能、可靠性、灵活性和运行效率,降低污水厂改造或扩建所需的基建费用,在现有污水处理厂池容下,通过优化控制可以增大污水处理厂的处理负荷.国外关于污水处理厂的过程控制和运行优化研究已有大量报道,而国内对活性污泥法过程控制的研究很少,一般只限于数学模型的模拟,在模拟过程中只是针对特定的水质和工艺进行优化,并没有基于一个广泛认可的平台来建立通用的控制策略,国内对污水生物处理过程控制的研究仍然任重道远.目前关于污水处理系统过程控制的研究,主要体现在传统控制、智能控制及最优化控制 3 个方面(马勇等, 2007).

Serralta等 (2007)以氨氮、硝酸氮和 DO 浓度为控制参数,应用模糊控制策略研究 Bardenpho 工艺脱氮除磷性能,调节鼓风机的制动阀以控制好氧池的 DO 浓度,以 DO 浓度为控制参数优化硝化反硝化反应过程.西班牙 Galindo-Bilbao污水处理厂通过建立氨氮、内循环回流和剩余污泥排放 3 个控制环路的过程监控系统,提高了水厂处理能力、系统稳

定性和处理效果,曝气运行费用降低 15% ~ 20% (Ayesa *et al.*, 2006). 为保证系统硝化反应, Harry B (1998)和 Samuelsson P (2002)应用数学模型建立好氧区体积前馈控制策略. Yamanaka 等 (2004)建立了 A²/O 工艺的多变量控制策略,策略包括建立工艺的物理-生物模型,推导出建立 A²/O 工艺控制器所需要的简单模型,用 Kalman 过滤器建立基于模型预测控制的控制器.模拟结果表明生物脱氮除磷效果良好,满足排放标准,运行费用降低. Baeza 等 (2002)应用专家系统建立内循环回流量控制和曝气池内 DO 浓度的控制策略,使得 A²/O 工艺脱氮除磷效果得以改善,总氮的去除率提高 11%,出水总氮和氨氮的浓度分别降低 49% 和 64%.

5 分段进水工艺实际水厂应用实例 (The application examples of CSFBNR)

迄今为止,美国、日本等国家实际污水处理厂已经广泛应用分段进水脱氮除磷工艺,表 2 列举了几个实际工程的处理能力及运行效果,由此可见,分段进水工艺脱氮除磷效率高于传统 BNR 工艺.作者在国内某污水处理厂采用三段式分段进水工艺,经过半年多的运行时间出水水质达到国家城镇污水一级 A 排放标准,有望进行放大中试验证并实际工程运行.

表 2 连续流分段进水生物脱氮除磷工艺的工程实例

Table 2 The project application examples of the continuous step-feed biological nitrogen and phosphate removal process

水厂名称	处理能力 /(m ³ ·d ⁻¹)	出水氮磷浓度 /(mg L ⁻¹)	功能 段数	开始运行时间
日本琵琶湖流域东北部净化中心	31500	—	氮,三段	1998
美国 Rock Creek AWWTF	32680	NH ₄ ⁺ -N = 0.03	氮,三段	2001
加拿大 Lethbridge 污水处理厂	49000	NH ₄ ⁺ -N < 0.5 NO ₃ ⁻ -N < 5 TP = 0~1.0	氮磷,五段	1998
美国 South Austin Regional 污水处理厂	—	TN = 5.7; TP = 1.0	氮磷,四段	1997
美国 Piscataway 污水处理厂	—	TN = 2~7	氮,三段	2000
美国 Noman M. Cole 污染控制中心	254600	TN = 5~10	氮,三段	2002
新加坡 Changi WRP	2409200	—	氮,六段	—
新西兰 Mangere 污水处理厂	110 MGD	TN = 9.5 (夏季)	氮,四段	2002
美国 Vancouver Westside 污水处理厂	83600	NH ₄ ⁺ -N = 0~1; NO ₃ ⁻ -N = 5~10	氮,三段	2000
美国 Lander Street 污水处理厂	—	NH ₄ ⁺ -N = 0.05~1.25	氮,三段	1997

6 结语 (Conclusion)

连续流分段进水工艺在国外实际污水厂的成功应用,以及工艺本身具有的优点,表明该工艺处理城市污水特别是中国低 C/N 的污水水质具有氮磷高去除率的竞争优势,因此可以考虑为我国新建

污水厂或老厂升级改造工程所用.目前该工艺推广应用的技术难点在于流程控制复杂,实现水厂高度自动化运行较为困难.因此,针对中国污水水质的工艺设计和运行控制研究,以及相应的工艺过程控制研究是加快分段进水工艺应用于中国污水处理中的两大技术突破点.



责任作者简介: 彭永臻, 工学博士、北京工业大学环境科学与工程学科首席教授、博士生导师, 全国模范教师。担任《环境科学学报》等 8 种杂志编委。领导的团队被评为全国首批“国家级教学团队”, “水质工程学”和“环境保护概论”获国家精品

课程。2 次获得国家科技进步二等奖; 已发表论文 400 余篇, 其中 SCI 检索的论文 90 余篇, 获得发明专利 30 余项。指导的 2 名博士生先后获“全国优秀博士学位论文”奖, 2 名获该项提名奖。

参考文献 (References):

- Ayasa E, Grau P, Sagama JM, *et al*. 2006 Supervisory control strategies for the new WWTP of Galindo-Bilbao: The long run from the conceptual design to the full-scale experimental validation [J]. *Water Science and Technology* 53(4-5): 193-201
- Baeza JA. 2002 Improving the nitrogen removal efficiency of an A²/O based WWTP by using an on-line knowledge based expert system [J]. *Water Research* 36(10): 2109-2123
- Brouwer H, Bollen M, Klapwijk B, *et al*. 1998 Feedforward control of nitrification by manipulating the aerobic volume in activated sludge plants [J]. *Water Science and Technology* 38(3): 245-254
- Chang H Y, Ouyang C F. 2000 Improvement of nitrogen and phosphorus removal in the anaerobic-oxic-anoxic-oxic (AOAO) process by stepwise feeding [J]. *Water Science and Technology* 42(6): 89-94
- Daigger G T, Parker D S. 2000 Enhancing nitrification in North American activated sludge plants [J]. *Water Science and Technology* 41(9): 97-105
- Dold P L, Ekama G A, Marais G V R. 1986 Evaluation of the general activated sludge model [J]. *Water Science and Technology* 18: 63-69
- Furumai H, Kazumi A A, Furuya Y, *et al*. 1999 Effect of sludge retention time (SRT) on nutrient removal in sequencing batch reactors [J]. *Journal of Environmental Science and Health* 34(2): 317-328
- Garzon-Zuniga M A, Gonzalez-Martinez S. 1996 Biological phosphate and nitrogen removal in a biofilm sequencing batch reactor [J]. *Water Science and Technology* 34(1-2): 293-301
- Gring N E, Artan N, Orhon D, *et al*. 1996 Evaluation of nitrogen removal by step feeding in large treatment plants [J]. *Water Science and Technology* 34(1-2): 253-260
- Grady C P L, Gujer W, Marais G V R, *et al*. 1986 A model for single sludge wastewater treatment system [J]. *Water Science and Technology* 18: 47-56
- Henze M, Grady C P L, Gujer W, *et al*. 1987. A general model for single sludge wastewater treatment system [J]. *Water Research* 21: 545-556
- Johnson B R, Goodwin S, Daigger G T, *et al*. 2005 A comparison between the theory and reality of full-scale step-feed nutrient removal systems [J]. *Water Science and Technology* 52(10-11): 587-596
- Katarzyna K, Bran K. 1999 A method to estimate denitrification potential for predenitrification systems using NUR batch test [J]. *Water Research* 33(10): 2291-2300
- Kayser R, Subbe G, Werner M, *et al*. 1992 Operational results of the Wolfsburg wastewater treatment plant [J]. *Water Science and Technology* 25(6): 203-209
- Lu S C, Fred S Kiehl M, *et al*. 2002. Practical considerations for design of a step feed biological nutrient removal system [J]. *Florida Water Resources Journal* (1): 18-35
- Ma Y, Peng Y Z, Wang S Y, *et al*. 2008 Achieving nitrogen removal via nitrite in a pilot-scale continuous predenitrification plant [J]. *Water Research* 43(3): 563-572
- 马勇, 彭永臻. 2007 城市污水处理系统运行及过程控制 [M]. 北京: 科学出版社
- Ma Y, Peng Y Z. 2007. Municipal Wastewater Treatment System Operation and Process Control [M]. Beijing: Science Press (in Chinese)
- Murkani T K. 2008. Improvement of BNR process performance by equalization of step inflow distribution [A]. *WA World Water Congress and Exhibition*. Vienna 23-28
- Nobert J, Harro B. 2003. Nutrient Upgrades to Meet European Requirements [M]. Poland: WA Publishing 53-55
- Peng Y Z, Zhu G B, Wang S Y. 2004. Use of C/N ratio as fuzzy control parameter for improved nitrogen removal in step-feed biological nitrogen removal process [J]. *Environmental Informatics Archives* 2: 806-813
- 邱慎初, 丁堂堂. 2003. 分段进水生物除磷脱氮工艺 [J]. *中国给水排水*, 19(4): 32-36
- Qi S C, Ding T T. 2003. The step-feed biological nitrogen and phosphate removal process [J]. *China Water & Wastewater* 19(4): 32-36 (in Chinese)
- Samuelsson P, Carlsson B. 2002. Control of the aeration volume in an activated sludge process for nitrogen removal [J]. *Water Science and Technology* 45(4-5): 45-52
- Seralta J R, Bes J, Seco A, *et al*. 2002 A supervisory control system for optimizing nitrogen removal and aeration energy consumption in wastewater treatment plants [J]. *Water Science and Technology* 45(425): 309-316
- Vaio pou E, Aivasidis A. 2008. A modified UCT method for biological nutrient removal: Configuration and performance [J]. *Chemosphere* 72(7): 1062-1068
- Wang S P, Yu L F, Han G H, *et al*. 2006 A pilot study on a step-feeding anoxic/oxic activated sludge system [J]. *Water Science and Technology* 53(9): 95-101
- 王伟, 王淑莹, 彭永臻, 等. 2008. 分段进水 A/O 工艺流量分配专家系统的建立与应用 [J]. *化工学报*, 59(10): 2608-2615
- Wang W, Wang S Y, Peng Y Z, *et al*. 2008. Establishment and application of influent flow distribution expert system in step-feed A/O process [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering* 59(10): 2608-2615 (in Chinese)
- Yamanaka K, Hatsushika Y. 2004. Biological nitrogen and phosphorus removal in activated sludge process applying a Kalman Filter based model predictive control [J]. *Water Intelligence Online* 1(2): 250-257
- Zhu G B, Peng Y Z, Wang S Y, *et al*. 2007a. Development and experimental evaluation of a steady-state model for the step-feed biological nitrogen removal process [J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering* 15(3): 411-417
- Zhu G B, Peng Y Z, Wang S Y, *et al*. 2007b. Simultaneous nitrification and denitrification in step-feed biological nitrogen removal process [J]. *Chemical Engineering Journal* 19(9): 1043-1048
- Zhu G B, Peng Y Z, Zhai L M, *et al*. 2009. Performance and optimization of biological nitrogen removal process enhanced by anoxic/oxic step feeding [J]. *Biochemical Engineering Journal* 43(3): 280-287