MSBR 工艺强化生物脱氮生产性试验研究

邓仁健[1,2]，　张金松[2,3]，　曲志军[3]，　吕　伟[3]，　杨靖波[3]，　熊　晔[3]
(1. 湖南科技大学 土木工程学院，湖南 湘潭 411201；2. 哈尔滨工业大学深圳研究生院 环境科学与工程研究中心，广东 深圳 518055；3. 深圳市水务<集团>有限公司，广东 深圳 518030)

摘　要： 针对城镇污水处理厂 MSBR 工艺提标改造时出水氮、磷指标很难同时达到一级 A 标准的情况，提出了强化生物脱氮措施，包括提高污泥龄(SRT)、提高污泥内回流比 r、调整混合液回流比 R、延长 SBR 池缺氧时间、合理控制溶解氧等，并在 SRT = 12 ~ 15 d、污泥外回流比 $r' = 1.5$、$r = 0.6$、$R = 1$、SBR 池缺氧时间为 50 min 的强化条件下进行生产性试验研究。结果表明，试验组的 TN 去除率比对照组高了 16.06%，出水 TN 和氨氮浓度均能稳定达到一级 A 标准，缺氧池、好氧池和 SBR 池缺氧阶段的 TN 去除率分别为 14.1%、26.3% 和 24.8%，微生物协同作用和后置反硝化是 MSBR 工艺的主要脱氮途径，强化后置反硝化是提高 MSBR 工艺脱氮效果的主要方法；但强化脱氮措施对系统除磷有一定影响，试验组的 TP 去除率比对照组低 6.10%。

关键词： MSBR 工艺；　强化生物脱氮；　运行参数优化；　后置反硝化；　厌氧吸磷
中图分类号： X703　　**文献标识码：** A　　**文章编号：** 1000 - 4602(2014)07 - 0009 - 05

Full-scale Experiment of Enhanced Biological Nitrogen Removal in MSBR Process

DENG Ren-jian[1,2]，　ZHANG Jin-song[2,3]，　QU Zhi-jun[3]，　LYU Wei[3]，
YANG Jing-bo[3]，　XIONG Ye[3]
(1. *School of Civil Engineering*, *Hunan University of Science and Technology*, *Xiangtan* 411201, *China*; 2. *Environmental Science and Engineering Research Center*, *Graduate School at Shenzhen*, *Harbin Institute of Technology*, *Shenzhen* 518055, *China*; 3. *Shenzhen Water* <*Group*> *Co. Ltd.*, *Shenzhen* 518030, *China*)

Abstract: A modified sequencing batch reactor(MSBR) process could not ensure the effluent TN and TP to meet the first level A criteria in the municipal wastewater treatment plant. Enhanced biological nitrogen removal measures were put forward, including improving the SRT and the sludge recycle ratio (r), adjusting mixed-liquor return ratio (R), increasing SBR tank anoxic time, controlling dissolved oxygen in the aerobic tank, and so on. The experiment was carried out under following operating conditions: SRT = 12 to 15 d, external sludge recycle ratio was 1.5, $r = 0.6$, $R = 1$, SBR tank anoxic time was 50 min. The experimental results showed that the nitrogen removal rate in the experimental group increased by 16.06% compared to the control group, meeting the standard requirement. The nitrogen removal rates in the anoxic tank, aerobic tank and anoxic phase of SBR tank were 14.1%, 26.3% and 24.8%, respectively. This implied that post-denitrification and assimilation were the main methods for nitrogen removal. However, the phosphorus removal rate in the experimental group decreased by 6.10% compared to the control group, showing that enhanced biological nitrogen removal had a negative impact

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

on phosphorus removal.

Key words: modified sequencing batch reactor(MSBR) process; enhanced biological nitrogen removal; optimization of operation parameter; post-denitrification; anaerobic phosphorus uptake

MSBR 工艺能够实现连续进水、恒水位运行，是集约化程度较高的污水处理工艺之一，近年来在我国应用较多，但对该工艺的原理、设计方法、优化运行控制等方面的研究目前还处于发展阶段，缺乏成熟的科学设计依据、运行经验及优化控制方法[1]。设置预缺氧是 MSBR 工艺的特点之一，但该池的运行管理还缺少研究；该工艺可实现外碳源反硝化、同步硝化反硝化、后置反硝化和内源反硝化等多种脱氮途径[2,3]，但何种脱氮方式占主要地位、工艺优化可以提高哪种脱氮效果均缺少系统研究。基于此，笔者以某污水厂 MSBR 工艺为研究对象，系统分析了该工艺生物脱氮存在的问题，提出了强化脱氮措施并给予验证，可为该工艺的升级改造提供参考。

1　MSBR 工艺原理及脱氮影响因素

1.1　MSBR 工艺原理

图 1 为七池 MSBR 工艺流程。

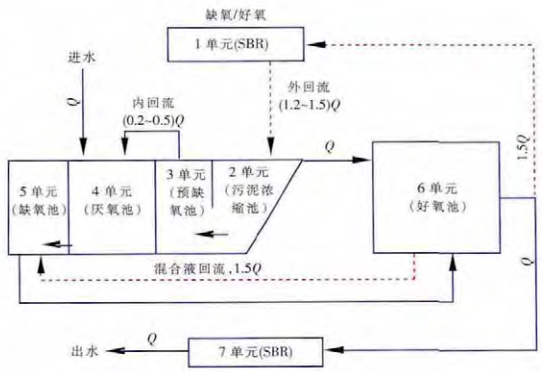

图 1　MSBR 工艺流程

Fig. 1　Schematic diagram of MSBR process

七池 MSBR 工艺由污泥浓缩池(2 单元) 、预缺氧池(3 单元) 、厌氧池(4 单元) 、缺氧池(5 单元) 、好氧池(6 单元) 和两个 SBR 池(1、7 单元) 组成，其主要功能如下：2 单元通过浓缩提高 3 单元的污泥浓度；3 单元主要是利用内碳源进行反硝化；4 单元为厌氧功能；根据运行方式 5 单元可作为厌氧池或缺氧池；6 单元为好氧功能；1、7 单元为 SBR 池，间歇式交替运行[1]。由此可知，4、5、6 单元串联在一起为典型的 A^2/O 工艺，1、7 单元为连续式进水、恒水位运行的 SBR 工艺，因此，MSBR 工艺为 A^2/O 和 SBR 工艺的组合，可实现多种不同的运行模式[2]，如 MUCT、倒置 A^2/O、五段式 Bardenpho、改良 A^2/O 等，具有较好的脱氮除磷功能，但各种运行模式的最佳运行参数和适用条件还不明确。

1.2　MSBR 工艺脱氮的影响因素

MSBR 工艺脱氮除磷的影响因素有很多[3~5]，如进水水质、HRT、污泥龄(SRT) 、回流比、SBR 池的运行方式、好氧池的 DO 浓度等。本研究的污水厂进水水温常年处于 18 ~ 25 ℃，进水 pH 值为 7.1 ~ 7.6，水温和 pH 值均适宜微生物生长；进水碳氮比为 5.0 ~ 11.2，能够满足脱氮要求。因此，本研究主要讨论 SRT、碳源分配、DO 浓度、回流比、SBR 池的运行方式等对 MSBR 工艺脱氮效果的影响。

1.2.1　污泥龄

污水生物脱氮主要包括氨化、硝化和反硝化过程，由于自养硝化菌的比增长速率较低，为了达到好的脱氮效果，要求较长的 SRT，且 SRT 与环境温度有关。该污水厂的设计 SRT 为 8 ~ 12 d，但该污水厂的 MLVSS/MLSS 值较小(0.35 ~ 0.45) ，为了提高生物量、强化生物脱氮，可提高污泥浓度；此外，提高污泥浓度也可增强后置反硝化脱氮效果[6]。

1.2.2　碳源分配

MSBR 工艺有多种运行模式，也可实现不同的碳源分配方式。后置反硝化脱氮碳源缺乏是“A/O + SBR”运行模式脱氮效果差的关键所在[4]，有以下几种方法可缓解该问题：第一，将 5 单元按照缺氧池运行[2]；第二，将部分原水［0.2 ~ 0.3) Q］分流至污泥浓缩池，以提高预缺氧池的反硝化速率[7]，但此方法应用较少；第三，提高整个工艺的污泥浓度，增加后置反硝化可利用的内碳源[8]。因此，强化生物脱氮主要可从第一和第三种方法考虑。

1.2.3　DO 浓度

七池 MSBR 工艺的 6 单元和 1、7 单元曝气阶段的 DO 浓度均对处理效果有重要影响。一方面，硝化和吸磷反应需要在较高 DO 浓度下进行，提高 6 单元的 DO 浓度有利于硝化和吸磷反应的进行；但过高的 DO 浓度会对反硝化、后置反硝化、污泥沉降性能等造成负面影响；并且 DO 浓度越高则能耗越高，运行成本会增加。另一方面，6 单元的 DO 浓度

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

太低会限制硝化菌的生长,不利于硝化和好氧吸磷,同时 DO 浓度过低易发生污泥膨胀,影响出水水质。为保证系统的稳定运行,6 单元的 DO 宜控制在 2 ~ 4 mg/L[8]。SBR 池曝气的作用不仅是好氧降解污染物,更主要是吹脱缺氧反硝化阶段所产生的氮气,防止出水阶段污泥上浮而影响出水水质[3],因此,SBR 池曝气阶段的曝气量太小则不足以吹脱氮气;但若曝气量过大,大量 DO 会被回流至 3 单元而影响内源反硝化效果。一般 SBR 池的曝气时间宜控制在 30 min 左右,DO 可控制在 2 ~ 3 mg/L。

1.2.4　污泥回流比和混合液回流比

MSBR 工艺的污泥内回流比 r 对脱氮除磷有重要影响。一方面,r 值过大则预缺氧池的硝酸盐浓度会偏高,影响厌氧池的释磷效果;另一方面,r 值过小则预缺氧池的硝酸盐浓度会很低,使聚磷菌无效释磷,也会影响除磷效果,同时过度的内源反硝化会产生氨氮[8],降低系统的脱氮效率。

混合液回流的作用是向缺氧池提供硝酸盐电子受体,进而实现脱氮,同时可回收碱度防止系统 pH 值变化过大。混合液回流比 R 的大小直接关系到反硝化脱氮效果: R 值偏小,则缺氧池的反硝化潜力发挥不充分,不能提高系统的脱氮效果; R 值偏大,则混合液携带的大量溶解氧会首先消耗优质碳源,此外也会缩短缺氧池的实际停留时间,降低脱氮效果。因此,在强化生物脱氮时,应该根据缺氧池的反硝化潜力和好氧池的 DO 浓度来控制 R 值。

1.2.5　SBR 池的运行方式

MSBR 工艺中 SBR 池的运行方式对脱氮效果影响较大[4,9]。缺氧时间过短,则反硝化效果不好;缺氧时间过长,则曝气时间短,缺氧段产生的氮气不能吹脱,影响出水水质。强化生物脱氮过程中应尽量延长缺氧时间,利用后置反硝化提高脱氮效率。根据有关研究[9]和经验,SBR 池的缺氧时间为 50 min 时可获得较好的脱氮效果。

2　试验材料与方法

2.1　试验装置

南方某污水处理厂采用七池 MSBR 工艺,处理规模为 12×10^4 m^3/d,分 3 组,每组规模为 4×10^4 m^3/d,受进水量的限制,一组停用、一组进行试验、另外一组作为对照。各单元的参数如下: 1、7 单元为 SBR 池,有效容积为 5 033 m^3,设计停留时间为 3.02 h,功能为后置反硝化、沉淀、出水; 2 单元为污泥浓缩池,有效容积为 1 015 m^3,设计停留时间为 0.61 h; 3 单元为预缺氧池,有效容积为 1 094 m^3,设计停留时间为 0.65 h,主要用于内碳源反硝化; 4 单元为厌氧池,有效容积为1 647 m^3,设计停留时间为 0.99 h; 5 单元为缺氧或厌氧池,有效容积为 1 367 m^3,设计停留时间为 0.82 h; 6 单元为好氧池,有效容积为 8 670 m^3,设计停留时间为 5.2 h。

2.2　试验方法

试验前的运行参数: 污泥外回流比 $r' = 1.5$,$r = 0.3 \sim 0.5$,$R = 0$; 6 单元的 DO 为 2 ~ 6 mg/L; SBR 池的运行周期为 4 h,即曝气 90 min、预沉淀 30 min、出水 120 min。试验前的进、出水水质见表 1。可见,出水 SS、TN 和 TP 不能稳定达到一级 A 标准。由于 SS 和 TP 等指标拟在三级深度处理中去除,二级生化处理的首要任务是提高系统的脱氮能力,降低出水 NO_3^- - N 和 TN 浓度,使其达到一级 A 标准。

表 1　试验前的进、出水水质

Tab. 1　Influent and effluent quality before experiment

项目	COD/ (mg·L^{-1})	BOD_5/ (mg·L^{-1})	SS/ (mg·L^{-1})	TN/ (mg·L^{-1})	NH_3 - N/ (mg·L^{-1})	TP/ (mg·L^{-1})	pH 值	碱度(以 $CaCO_3$ 计) /(mg·L^{-1})
进水	229 ~ 471	80 ~ 240	120 ~ 448	18.5 ~ 33.5	16.5 ~ 27.2	2.2 ~ 8.7	7.1 ~ 7.6	130 ~ 180
出水	18.0 ~ 38.4	2.0 ~ 6.5	5 ~ 16	13.4 ~ 16.9	0.8 ~ 3.7	0.3 ~ 1.6	6.3 ~ 6.9	30 ~ 60

针对该污水厂进水碱度低、出水 NO_3^- - N 和 TN 浓度偏高的特点,根据 MSBR 工艺的原理和上述分析,对试验组采取如下强化措施: 增大污泥内回流比和混合液回流比、提高污泥浓度、延长 1 和 7 单元的缺氧时间、合理控制 6 单元的 DO 浓度等; 具体运行参数如下: SRT = 12 ~ 15 d,$r' = 1.5$,$r = 0.6$,$R = 1$,SBR 池的周期为 4 h,其中缺氧 50 min、曝气 40 min、预沉淀 30 min、出水 120 min。对照组的运行参数不变。6 单元的 DO 浓度在 2 ~ 4 mg/L,因此本试验暂不考虑 DO 的影响。系统稳定 15 d 后开始取样,每两天取进水以及试验组和对照组的出水水样,测定 COD、pH 值、TN、氨氮、TP 等; 每隔 4 d 取试验组各单元的 12 h 混合样,在 3 500 r/min 下离心 3 min 后测定 COD、TN、氨氮、TP、硝酸盐氮等,所有指

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

标均采用国家标准方法进行测定。

3　试验结果与讨论

3.1　系统对污染物的总体去除效果

试验期间，进水 COD 为 200 ~ 410 mg/L，试验组和对照组的出水 COD 分别为(17.0 ~ 34.4) 和(19.2 ~ 28.5) mg/L，平均去除率分别为 90.26% 和 90.92%，出水 COD 都能达到一级 A 标准，可见强化生物脱氮措施未对 COD 的去除产生明显影响。

进水氨氮为(22.46 ± 2.52) mg/L，试验组和对照组的出水氨氮浓度分别为(1.16 ± 0.50) 和(1.99 ± 1.03) mg/L，硝化率分别为(94.42 ± 3.50) % 和(91.05 ± 4.72) %，出水氨氮浓度均能达到一级 A 标准。与对照组相比，试验组的硝化效果略有提高，原因可能为：①延长 SRT 有利于硝化反应；②该污水厂的进水碱度较低，5 单元反硝化可回收碱度，减小了 6 单元的 pH 值变化，这也有利于硝化过程。

试验组和对照组对 TN 的去除效果见图 2。

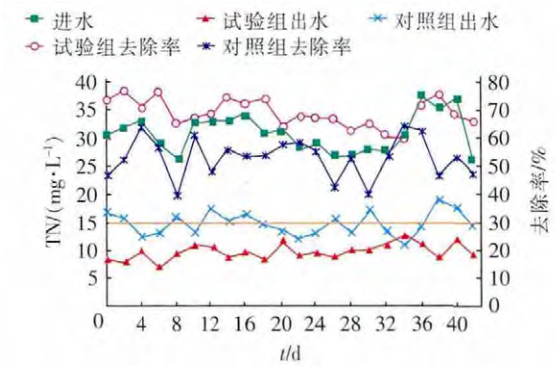

图 2　系统对 TN 的去除效果

Fig. 2　Removal of TN

由图 2 可知，进水 TN 为(30.98 ± 2.40) mg/L，试验组和对照组的出水 TN 分别为(9.48 ± 1.35) 和(14.52 ± 2.13) mg/L，去除率分别为(68.86 ± 4.88) % 和(52.80 ± 7.21) %。试验组的出水 TN 浓度比对照组降了约 5 mg/L，去除率提高了 16.06%，出水 TN 可稳定达到一级 A 标准。由此证明试验组的强化脱氮措施是有效的，即利用 5 单元的外碳源反硝化、1 和 7 单元的后置反硝化、3 单元的内源反硝化等协同作用可以有效降低出水 TN 浓度，类似的结果在文献 [6] 中也得到了证实。

系统对 TP 的去除效果见图 3。可知，进水 TP 为(4.21 ± 0.50) mg/L，试验组和对照组的出水 TP 分别为(1.28 ± 0.27) 和(1.06 ± 0.30) mg/L，对 TP 的去除率分别为(68.60 ± 9.64) % 和(74.70 ± 7.87) %，两者的出水 TP 浓度均未达到一级 A 标准。试验组对 TP 的去除率比对照组降了 6.10%，说明所采取的强化生物脱氮措施对系统除磷有一定的负面影响，其主要原因是：①延长 SRT 不利于除磷；②强化脱氮措施使设计厌氧停留时间由 1.81 h 缩短至 0.99 h，对除磷也会产生不利影响。

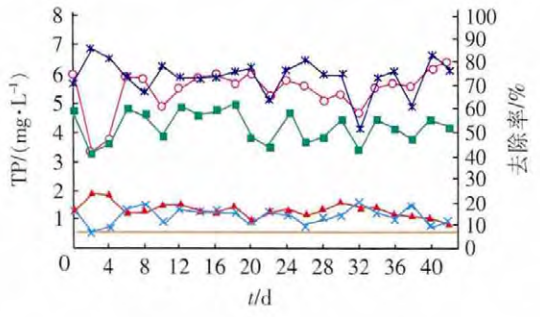

图 3　系统对 TP 的去除效果

Fig. 3　Removal of TP

3.2　各单元对污染物的去除效能

试验组各单元对污染物的去除情况见图 4。可知，79.5% 的 COD 在 4 单元被去除(指测得的 COD 降低情况)，这与吴昌永 [10] 得到的结论一致。另外，4.5% 和 4.2% 的 COD 分别在 5 单元和 SBR 池缺氧段被去除。值得注意的是，3 单元的 COD 浓度比回流污泥的平均高 8.8 mg/L，这表明高污泥浓度内源反硝化反应会产生难降解有机物 [8]。

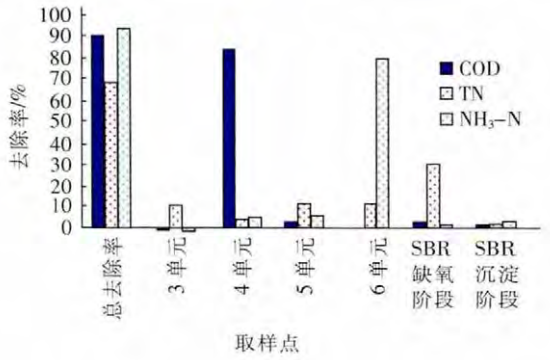

图 4　MSBR 工艺各单元对污染物的去除情况

Fig. 4　Removal of pollutants in different units

由图 4 可知，1、7 单元和 6 单元对氨氮的去除率分别为 3.7% 和 82.6%，说明氨氮主要在 6 单元被去除，1 和 7 单元对氨氮的去除贡献较小，另外也暗示 DO 控制在 2 ~ 4 mg/L 完全能够满足硝化反应。3 单元对氨氮的去除率为负值，表明内源反硝化会产生氨氮 [7,8]，对系统脱氮有不利的影响。

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

3 单元、5 单元、6 单元及 SBR 池缺氧阶段的脱氮率分别为 10. 9%、14. 1%、11. 7% 和 24. 8%。3 单元、4 单元的总脱氮率只有 15. 1%,远低于计算值(37. 5%),其原因可能是内源反硝化会产生氨氮,降低了该区域的总脱氮率。当 5 单元按照缺氧池运行($R=1$)时,其脱氮率达到了 14. 1%,表明该措施可有效提高脱氮效率。6 单元的 DO 浓度较高(2 ~ 4 mg/L),但依靠微生物协同作用或同步硝化反硝化作用也能得到较好的脱氮效果; SBR 池缺氧阶段对 COD 的去除量很少,但脱氮率却有 24. 8%,表明后置反硝化效果明显。综上可知,脱氮过程主要在 6 单元及 SBR 池缺氧阶段进行,这与文献[3]的结论一致,即微生物协同作用和后置反硝化是 MSBR 工艺的主要脱氮途径。由于 5 单元容积偏小,反硝化潜力也小,可去除的 TN 量有限; 微生物协同作用去除的 TN 量也是有限的,因此,要进一步提高脱氮率只能依靠强化后置反硝化,其中提高污泥浓度和延长 SBR 池的缺氧时间是有效措施[7,9]。

当进水碳源充足(COD = 338 mg/L,COD/TP = 80. 5)、回流污泥的硝酸盐浓度为 0. 62 mg/L 时,厌氧池的 TP 平均浓度只有 3. 82 mg/L,低于进水 TP 浓度(4. 2 mg/L),这与该污水厂长达 2 年的监测结果一致(无论 5 单元是厌氧池还是缺氧池),但除磷率却有 68. 6%,可见该工艺的厌氧释磷效果极差(或者说发生厌氧吸磷反应),而除磷效果却相对较好,这有悖于传统的除磷理论。其原因可能与聚磷菌在 3 单元进行明显的无效释磷有关,即与 3 单元特殊的工况有关,其除磷机理需要进一步研究。另外,5 单元发生明显的反硝化除磷反应,但 SBR 池缺氧阶段却未观察到,而相关的小试研究发现了较好的反硝化除磷现象[4,5],表明要进行后置反硝化除磷,该污水厂的工艺运行还有待进一步优化。

4　结论

MSBR 工艺采用强化生物脱氮措施后,对 COD 的去除未产生明显影响,出水 COD 能够稳定达到一级 A 标准; 试验组的脱氮率比对照组高了 16. 06%,出水氮指标可稳定达到一级 A 标准,微生物协同作用和后置反硝化是 MSBR 工艺的主要脱氮途径,其中提高污泥浓度和延长 SBR 池缺氧时间是强化后置反硝化的有效方法; 强化生物脱氮措施对除磷有一定影响,试验组的除磷率比对照组降低了6. 10%,MSBR 工艺的厌氧释磷效果极差(或者说发生厌氧吸磷反应),而除磷效果却相对较好,这有悖于传统的除磷理论,其除磷机理需要进一步研究。

参考文献:

[1] 严晨敏,张代钧,唐然,等. 一种改进的 MSBR 工艺脱氮除磷性能的仿真模拟与试验研究[J]. 环境科学学报,2005,25(3):391 - 395.

[2] 杜英豪. MSBR 工艺的运行管理实践[J]. 中国给水排水,2006,22(2):90 - 92.

[3] 任洁,顾国维. MSBR 系统的特点及其除磷脱氮的机理分析[J]. 给水排水,2002,28(1):22 - 24.

[4] 汪林. 反硝化同步除磷动力学原理及其在改善 MSBR 性能中的应用[D]. 重庆: 重庆大学,2010.

[5] 杨幸,冷寒,胡林龙,等. MSBR 7 池工艺除磷影响因素的试验研究[J]. 环境工程学报,2008,2(8):1053 - 1056.

[6] 李春鞠,顾国维,杨海真. 改善 MSBR 系统脱氮效果的试验研究[J]. 中国给水排水,2001,17(1):9 - 14.

[7] Chung C M,Cho K W,Kim Y J,*et al*. Enhanced biological nitrogen removal in MLE combined with post-denitrification process and EF clarifier[J]. Bioprocess Biosyst Eng,2012,35(4):503 - 511.

[8] Henze M,van Loosdrecht M C M,Ekama G A,等. 污水生物处理——原理、设计与模拟[M]. 施汉昌,胡志荣,周军,等译. 北京: 中国建筑工业出版社,2011.

[9] 李茂材. MSBR 法小型试验系统处理生活污水[J]. 昆明理工大学学报: 理工版,2009,34(3):75 - 78.

[10] 吴昌永. A^2/O 工艺脱氮除磷及其优化控制的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学,2010.

作者简介: 邓仁健(1980 -), 男, 湖南郴州人, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向为污水处理理论及资源化利用。

E - mail: 800912deng@ sina. com

收稿日期: 2013 - 10 - 15

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