

# 改良型一体化氧化沟工艺在低碳源条件下脱氮除磷

王涛 何怡郎 建刘霞 白洁颖  
(重庆大学三峡库区生态环境教育部重点实验室,重庆 400045)

**摘要** 针对在低碳源条件下脱氮除磷效果不佳,将倒置 A<sup>2</sup>/O 工艺的思想运用于一体化氧化沟工艺中,构建一种新型污水处理系统,即改良型一体化氧化沟工艺。实验考查了系统在低碳源条件下的脱氮除磷能力;结果表明:当缺氧区进水分分配比  $r = 0.8$ ,泥龄 SRT = 10 d,好氧区水力停留时间 HRT = 12 h 时,该系统对 COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 TP 的去除率分别达 70.8%、89.3% 和 72.1%,出水 NO<sub>x</sub><sup>-</sup>-N 为 1.65 mg/L,同时处理效果稳定,出水水质达到了《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002)一级 B 标准的要求。

**关键词** 改良型一体化氧化沟工艺 低碳源 脱氮除磷 影响

中图分类号 X703 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2012)05-1489-06

## Nitrogen and phosphorus removal by process of improved integrated oxidation ditch under low-carbon resource condition

Wang Tao He Yi Lang Jian Liu Xia Bai Jieying

(Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

**Abstract** In allusion to the poor nitrogen and phosphorus removal results under low-carbon resource condition, a new wastewater treatment system, improved integrated oxidation ditch process, was formed, which applied the inverse A<sup>2</sup>/O progress in integrated oxidation ditch process. The capacity of biological denitrification and phosphorus removal was studied in the experiment. The results showed that the removal rates of COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N and TP were 70.8%、89.3% and 72.1%, respectively, the effluent NO<sub>x</sub><sup>-</sup>-N was 1.65 mg/L under the following conditions: the influent ratio of anoxic area of 0.8, SRT of 10 days, HRT of 12 hours. When the treatment effect was steady, the effluent quality met the first level B criteria specified in the Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant(GB 18918-2002).

**Key words** improved integrated oxidation ditch process; low-carbon resource; nitrogen and phosphorus removal; influence

随着城镇化进程的加快,城镇生活污水排放量的增加,造成城镇污水氮、磷污染日益加剧,确保良好的脱氮除磷效果已成为城镇污水处理厂的重要问题。虽然目前生物脱氮除磷工艺层出不穷,但生物脱氮除磷技术存在着碳源不足、菌群竞争、污泥龄难以控制等诸多问题<sup>[1-5]</sup>,致使污水处理厂很难获得优异的脱氮除磷效果,这种现象在低碳源条件下表现得尤为突出<sup>[6,7]</sup>。随着生活水平的提高,采用合流制排水管网的污水出现低碳源的现象越来越严重,常常实际进水 COD 只有 100 ~ 200 mg/L<sup>[8]</sup>,因此如何在低碳源条件下提高脱氮除磷效果,尽可能达到排放标准,是现在所要研究的重要问题。在碳源缺乏的问题上,国内外学者做过许多研究,在时间

或空间上对脱氮除磷工艺进行改造,或是寻找可代替的有机碳源,或是开发新工艺<sup>[9-12]</sup>。这些工艺在一定程度上解决了脱氮除磷对基质的竞争问题,提高了脱氮除磷效果,但是这些工艺大多以增加反应器数量、容积与回流系统为代价,操作繁琐,运行管理复杂。

一体化氧化沟技术开发至今发展迅速,并在实际生产中得到应用。具有代表性的有船式沉淀器(BOAT)、BMTS 系统、Carrousel 渠内分离器、边墙分

基金项目:国家“水体污染控制与治理”科技重大专项(2009ZX07315-002)

收稿日期:2011-01-25; 修订日期:2011-05-16

作者简介:王涛(1964~),男,副教授,主要从事水污染控制理论与技术研究。E-mail:wang-tao99@163.com

离器以及边渠沉淀分离器和导管式曝气内渠。我国与美国几乎同步进行了一体化氧化沟的开发与研究,并取得了大量的成果,一体化氧化沟技术在我国已有多处在建和已建工程。目前对一体化氧化沟的研究主要集中在脱氮除磷效果和节能方面的改良。本研究采用的改良型一体化氧化沟工艺是将倒置A<sup>2</sup>/O工艺的思想运用于一体化氧化沟工艺中,并采用分区进水的方式,形成一种新型的污水处理系统。实验主要考察改良型一体化氧化沟工艺在低碳源条件下对氮磷的去除并提出优化的工艺设计运行参数,以为脱氮除磷的实际应用提供理论依据和设计

参考。

## 1 实验材料与方 法

### 1.1 工艺流程及设备

实验流程图如图1所示。改良型一体化氧化沟模型示意图如图2所示。模型的相关尺寸见表1。

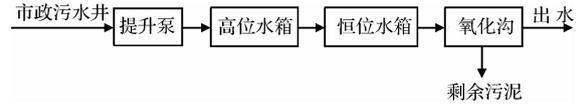


图1 实验流程图

Fig. 1 Flow chart of experiment

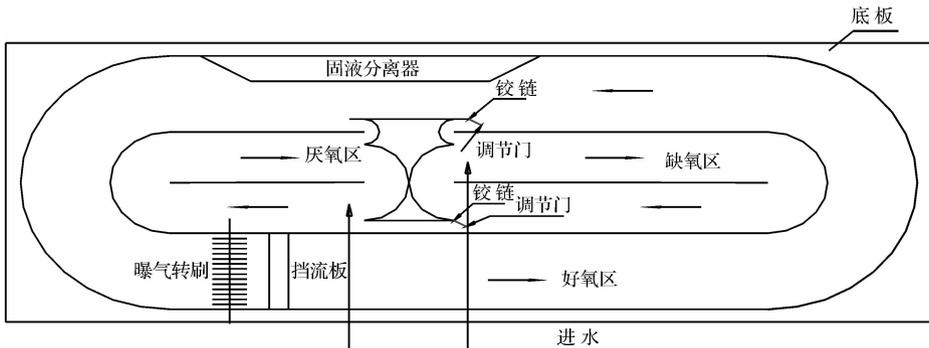


图2 改良型一体化氧化沟模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of improved integral oxidation ditch

表1 模型构筑物尺寸表

Table 1 Dimension of model building

名称	总尺寸(L×B×H) (mm)	有效水深 (mm)	有效容积 (m <sup>3</sup> )
好氧区	3 000 × 1 000 × 500	400	0.76
缺氧区	1 400 × 400 × 500	400	0.21
厌氧区	1 000 × 400 × 500	400	0.14

### 1.2 实验设备

#### 1.2.1 水平轴卧式曝气转刷

改良型一体化氧化沟的曝气转刷为水平轴Kenssener转刷。其有效长度为0.14 m,直径0.42 m。转刷共有12个轴片固定在两端圆盘上,与轴有1.5 cm的空隙,轴片沿轴向以18 mm的间距排列成3或4个矩形齿片,齿片长50 mm,宽18 mm。相邻轴片上的齿片错开排列。

#### 1.2.2 固液分离器

设置固液分离器主要目的是为了配合脱氮除磷的实验,对系统的出水进行固液分离,同时观察实验

期间污泥回流及泥水分离的情况,为后续实验提供依据。固液分离器的材质是硬质聚氯乙烯,组件是按照原件1:5的比例缩小的,固液分离器的平面形状犹如一个倒梯形,较长的一个底边长为1 140 mm,较短的一个底边长为800 mm,高为100 mm。

### 1.3 原水水质

实验用水取自某县老城区下水道,主要是生活污水。实验期间进水COD为112.61~213.08 mg/L,平均值为146.35 mg/L;BOD<sub>5</sub>为46.71~105.60 mg/L,平均值为64.40 mg/L;NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N为13.64~32.55 mg/L,平均值为22.68 mg/L;NO<sub>x</sub><sup>-</sup>-N为0.11~0.20 mg/L,平均值为0.17 mg/L;TP为1.16~6.20 mg/L,平均值为2.97 mg/L。

### 1.4 实验方法

本实验主要考察好氧区水力停留时间HRT、污泥龄SRT和缺氧区进水在总进水中的比例 $r$ 这三个控制参数对系统脱氮除磷的影响,并以进出水的NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>x</sub><sup>-</sup>-N和TP作为考察指标,确定系统脱氮

除磷性能和系统的最佳运行工况。本实验设计处理量为 2 m<sup>3</sup>/d,好氧区 HRT 每增加 2 h 为一组工况,分为 3 组,分别为 8、10 和 12 h,相应的缺氧区 HRT 分别为 2.5、3.1 和 3.8 h,厌氧区 HRT 分别为 1.5、1.9 和 2.3 h。实验设定好氧区 SRT 为 10、15 和 20 d,缺氧区进水量占总进水量的比例  $r$  为 1.0、0.8 和 0.6。根据以上安排,实验共设计了 8 种工况,具体工况安排见表 2。

表 2 实验工况及对应控制参数

Table 2 Working conditions and control parameters of experiment

工 况	缺氧区	好氧区	污泥龄(d)
	进水分配比	水力停留时间(h)	
1	1.0	8	10
2	1.0	10	15
3	1.0	12	20
4	0.8	8	15
5	0.8	10	20
6	0.8	12	10
7	0.6	8	20
8	0.6	10	10

## 2 实验结果分析

### 2.1 实验结果

各工况实验结果的平均值见表 3。由表 3 可知,在实验期间进水 COD 比较低,平均值为 156.7 mg/L,有机物碳源明显不足,但系统的脱氮效果仍然较好,各工况的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 去除率均保持在 80% 以上,出水硝氮平均在 5 mg/L 以下。虽然系统除磷效果不够稳定,但通过调节 SRT 和  $r$ ,系统的磷去除率仍可达 70% 左右,并且系统出水的 COD 也比较稳定。系统的回流都是从好氧区到缺氧区,再从缺氧区到厌氧区,通过对缺氧区和厌氧区作微生物的物料平衡,并假设进水中没有微生物,经计算得出,系统中缺氧区和厌氧区的污泥浓度与好氧区的污泥浓度基本一致。实验数据说明,本工艺在低碳源条件下具有强化脱氮除磷的能力和稳定去除 COD 的能力,系统具有较高的可靠性和稳定性。

表 3 实验结果平均值汇总表

Table 3 Summary of average experimental results

工 况	进水		出水		厌氧区		好氧区		(mg/L)	
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	NO <sub>x</sub> <sup>-</sup> -N	NO <sub>x</sub> <sup>-</sup> -N	TP	TP	TP	COD	COD	MLSS
1	26.19	3.31	0.19	1.46	2.93	1.39	6.90	151.43	53.24	1 543
2	27.21	2.32	0.16	1.36	2.93	1.72	9.51	195.5	50.28	1 739
3	21.53	2.10	0.63	1.06	2.60	1.79	7.62	135.32	49.34	1 067
4	24.03	1.70	0.71	1.58	2.59	1.72	10.59	135.79	52.16	1 848
5	23.63	3.64	0.56	0.78	3.96	1.64	14.23	152.04	49.58	1 837
6	22.94	2.46	1.01	1.65	3.59	1.00	8.93	180.82	52.77	1 448
7	17.30	1.85	2.02	4.07	2.47	1.25	3.57	170.75	51.63	2 017
8	16.38	1.84	1.74	4.74	1.97	0.76	5.51	132.18	55.53	1 479

### 2.2 脱氮实验结果分析

#### 2.2.1 缺氧区进水分配比对脱氮实验结果的影响

实验期间进水的 C/N 比均值为 6,能够满足脱氮需求,但当  $r=0.8$  时,C/N 比已成为脱氮的限制性因素,再降低  $r$  已明显不利于反硝化,因此本实验设定  $r=0.6、0.8$  和 1.0。缺氧区进水分配比  $r$  对出水硝氮的影响如图 3 所示。从图 3 可知, $r=1.0$  时,系统出水硝氮平均值为 1.29 mg/L,从表 3 的工况 3

可以看出,回流进厌氧区的硝氮约为 1 mg/L,由此可见缺氧区反硝化比较彻底。当  $r=0.8$  时,从图 3 和表 3 的工况 4~6 可知,其脱氮情况与  $r=1.0$  时差不多。但是,当  $r=0.6$  时,系统出水硝氮的含量明显增加,在 4 mg/L 以上,同时回流到厌氧区的硝氮浓度也大幅增加。这说明在该实验条件下,系统脱氮主要受缺氧区碳源多少的影响。

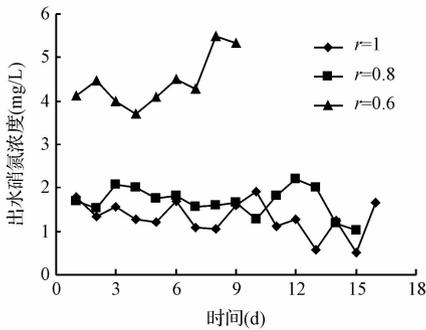


图3 缺氧区进水分比对出水硝氮的影响

Fig. 3 Effect of influent ratio of anoxic area on effluent NO<sub>x</sub>-N

### 2.2.2 泥龄对脱氮实验结果的影响

污泥龄与氨氮去除率的关系如图4所示。从图4可以看出,当SRT从10 d增大到15 d时,氨氮的去除率随之增大,当SRT从15 d继续增加到20 d时,氨氮的去除率有所下降。SRT为10、15和20 d时的氨氮平均去除率依次为87.4%、91.5%和90.3%。SRT与氨氮的去除关系与前期在生产性规模的一体化氧化沟上的实验结论相一致,前期研究的结论是当SRT增大到25 d时,氨氮的去除效果下降<sup>[13]</sup>。分析其原因是在低碳源条件下,缺氧区和厌氧区中的反硝化和厌氧释磷消耗了较多的有机物,使好氧区中的微生物所需代谢营养物质不足,出现“溶菌”现象从而使氨氮的去除效果降低。因此,通过研究认为,低碳源条件下,连续流工艺为保持较高的硝化效果,SRT不宜取得过长。

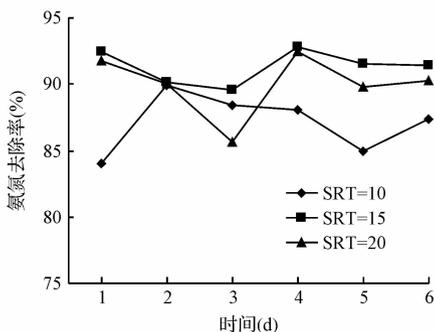


图4 污泥龄对氨氮去除效果的影响

Fig. 4 Effect of SRT on removal efficiency of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N

### 2.2.3 好氧区水力停留时间(HRT)对硝化实验结果的影响

HRT与氨氮去除率的关系如图5所示。从图5可以看出,当HRT在8~12 h时,氨氮的去除效果

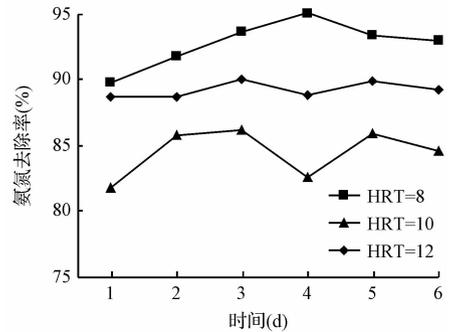


图5 HRT对氨氮去除效果的影响

Fig. 5 Effect of HRT on removal efficiency of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N

均较好,氨氮的去除率均在84%以上,实验数据表明系统的硝化效果较好。当HRT=12 h时,氨氮去除率变化幅度较小,去除效果较为稳定,氨氮平均去除率为89.3%。但当HRT为8 h和10 h时,氨氮去除率波动较大,去除效果不稳定,其氨氮去除率分别为92.9%和84.6%。因此,HRT对系统硝化反应的影响是很明显的,当HRT取得较小时,在低碳源条件下,系统的氨氮去除效果不稳定。在实验条件下,HRT=12 h时,系统可以取得较好且稳定的氨氮去除效果。

### 2.3 除磷实验结果分析

#### 2.3.1 厌氧区进水分比对除磷效果的影响

当厌氧区进水分配比从0增大到0.2时,SRT为10 d和20 d时的TP去除率都逐渐增大,但当厌氧区进水分配比增大到0.4时,2种SRT下的TP去除率稍有下降的趋势。在不同厌氧区进水分配比下,SRT=15 d的TP去除效果均不理想,TP去除率均在50%以下。对应于SRT为10 d和20 d,当厌氧区进水分配比为0.2时,系统除磷效果都较好,这说明系统除磷效果与厌氧区进水分配比密切相关。以SRT为10 d为例进行分析,当 $r=1$ 时,TP的平均去除率为52.6%,系统出水TP均值为1.39 mg/L;当 $r=0.8$ 时,系统TP的平均去除率为72.1%,出水TP的均值为1 mg/L。这一结果与前期的研究结论一致,前期研究的结论是当系统SRT一定时,适当地加大厌氧区进水分配比(1-r)能改善系统的除磷效果<sup>[14]</sup>。但当厌氧区进水分配比增加到40%时,系统的除磷效果并没有随之提高,反而有所降低,实验数据说明在缺氧区和厌氧区之间协调碳源分配是很重要的。在实验条件下,系统缺氧区和厌氧区进水量之比为8:2时,可以取得较好的除磷效果。

### 2.3.2 泥龄对除磷实验结果的影响

生物除磷系统的除磷效果主要取决于系统剩余污泥的排放量。SRT的长短对污泥的释磷吸磷以及剩余污泥的排放量有着直接的影响。一般来说, SRT越短, 污泥含磷量越高, 剩余污泥排放量越多, 系统除磷效果越好。有资料表明<sup>[15]</sup>, 生物除磷工艺, SRT一般控制在3.5~7 d之间。但系统的SRT也不能过短, SRT过短会增大系统排泥量, 系统中的MLSS将会减少, 污泥量得不到保证就会影响系统的处理效果。对于同时脱氮除磷的工艺来说, SRT一般控制在15 d以上。实验数据表明, 当 $r$ 一定时, SRT是影响系统除磷效果的重要因素, 总体显示出随着SRT的增大, TP去除率降低。如图6所示,  $r=1.0$ , SRT=10 d时, TP去除率为52.6%; SRT=20 d时, TP去除率只有31.1%,  $r=0.6$ 的试验曲线也反映了这一规律。 $r=0.8$ , SRT=15 d的曲线对应于工况4, 在这个工况下, TP的去除效果异常偏低。分析其原因是, 在工况4的实验期间, 厌氧区混合搅拌水泵出现故障, 致使厌氧区泥水混合出现问题, 系统处于非正常运行状态, 很难获得较好的处理效果, 因此这条曲线不能用来解释实验结果所反映的总体规律, 应被剔除。去除坏值,  $r=0.8$ 时的其它实验曲线均正常。在实验条件下, 当SRT=10 d, 厌氧区进水分配比为0.2时, 系统的除磷效果最好。

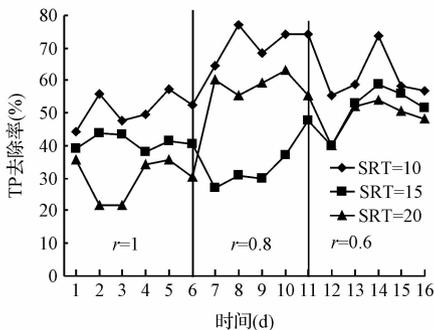


图6 SRT对TP去除效果的影响

Fig. 6 Effect of SRT on removal efficiency of TP

## 3 结论

(1) 实验条件下, 系统脱氮主要受缺氧区碳源多少的影响。当 $r > 0.8$ 时, 系统的脱氮效果较好, 出水硝氮约为1.5 mg/L; 当 $r < 0.6$ 时, 氮的去除率明显下降, 出水硝氮在4.0 mg/L以上。

(2) 系统的SRT从10 d增大到15 d时, 氨氮

的去除率随之增大, 但当SRT从15 d继续增加到20 d时, 氨氮的去除率有所下降。因此, 低碳源条件下, 连续流工艺为保持较高的硝化效果, SRT不宜取得过长。

(3) HRT对系统硝化反应的影响是很明显的, 当HRT取得较小时, 在低碳源条件下, 系统的氨氮去除效果不稳定。在实验条件下, HRT=12 h时, 系统可以取得较好且稳定的氨氮去除效果。

(4) 当系统的 $r$ 一定时, SRT是影响系统除磷效果的重要因素。随着SRT的增大, TP去除率有所降低。在实验条件下, 系统缺氧区和厌氧区进水量之比为8:2时, 相应的SRT=10 d时, TP去除率达70%以上, 出水TP均值为1.0 mg/L。

(5) 在本实验条件下, 最佳的工艺控制参数为:  $r=0.8$ , SRT=10 d, HRT=12 h。在上述控制参数下, COD的去除率为70.8%,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 的去除率为89.3%, 出水 $\text{NO}_x^--\text{N}$ 为1.65 mg/L, TP的去除率为72.1%, 系统取得了较稳定的脱氮除磷和COD去除效果, 出水水质达到了《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002)一级B标准的要求, 这一运行控制参数可作为类似低碳源条件下的污水处理厂设计和运行参考。

## 参考文献

- [1] 沈耀良, 赵丹. 强化SBR工艺脱氮除磷效果的若干对策. 中国给水排水, 2000, 16(7): 23-25  
Shen Yaoliang, Zhao Dan. Several countermeasures on nitrogen and phosphorus removal with enhanced SBR process. China Water & Wastewater, 2000, 16(7): 23-25 (in Chinese)
- [2] 吉芳英, 罗固源, 杨琴, 等. 活性污泥外循环SBR系统的生物除磷能力. 中国给水排水, 2002, 18(5): 1-5  
Ji Fangying, Luo Guyuan, Yang Qin, et al. Biological phosphorus removal capability in SBR system using external recycle of activated sludge. China Water & Wastewater, 2002, 18(5): 1-5 (in Chinese)
- [3] 万金保, 王建永. 反硝化除磷理论及运用现状. 水处理技术, 2008, 34(3): 7-10  
Wang Jinbao, Wang Jianyong. Theory of denitrifying dephosphorization and its usage progress. Technology of Water Treatment, 2008, 34(3): 7-10 (in Chinese)
- [4] 彭轶, 彭永臻, 吴昌永, 等.  $\text{A}^2/\text{O}$ 工艺中的反硝化除磷. 环境工程学报, 2008, 2(6): 752-756  
Peng Yi, Peng Yongzhen, Wu Changyong, et al. Denitrifying phosphorus removal in  $\text{A}^2/\text{O}$  process. Chinese Journal

- of Environmental Engineering, **2008**, 2(6):752-756 (in Chinese)
- [5] 邓靖, 吕锡武, 徐微, 等.  $A_2N$ 反硝化脱氮除磷工艺厌氧释磷的影响因素. 中国给水排水, **2009**, 25(7):26-29  
Deng Jing, Lv Xiwu, Xu Wei, et al. Factors influencing anaerobic phosphorus release in  $A_2N$  denitrifying phosphorus and nitrogen removal process. China Water & Wastewater, **2009**, 25(7):26-29 (in Chinese)
- [6] Daekeun Kima, Tae-Su Kima, Hong-Duck Ryua, et al. Treatment of low carbon-to-nitrogen wastewater using two-stage sequencing batch reactor with independent nitrification. Process Biochemistry, **2008**, 43(4):406-413
- [7] Katarzyna Bernat, Irena Wojnowska-Barylaa, Adriana Dobraynska. Denitrification with endogenous carbon source at low C/N and its effect on P(3HB) accumulation. Biore-source Technology, **2008**, 99(7):2410-2418
- [8] 许劲. 关于城市污水处理厂设计的若干问题讨论. 给水排水, **2001**, 27(7):15-18  
Xu Jin. Discussion on design of urban wastewater treatment plant. Water & Wastewater Engineering, **2001**, 27(7):15-18 (in Chinese)
- [9] Shijian Ge, Yongzhen Peng, Shuying Wang, et al. Enhanced nutrient removal in a modified step feed process treating municipal wastewater with different inflow distribution ratios and nutrient ratios. Biore-source Technology, **2010**, 101(23):9012-9019
- [10] Xiong Zheng, Juan Tong, Hongjing Li, et al. The investigation of effect of organic carbon sources addition in anaerobic-aerobic (low dissolved oxygen) sequencing batch reactor for nutrients removal from wastewaters. Biore-source Technology, **2009**, 100(9):2515-2520
- [11] Monclús H., Sipma J., Ferrero G., et al. Optimization of biological nutrient removal in a pilot plant UCT-MBR treating municipal wastewater during start-up. Desalination, **2010**, 250(2):592-597
- [12] 王建芳, 涂宝华, 陈荣平, 等. 生物脱氮除磷新工艺的研究进展. 环境污染治理技术与设备, **2003**, 4(9):70-73  
Wang Jianfang, Tu Baohua, Chen Rongping, et al. Application and development of new biological nutrient removal technology. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, **2003**, 4(9):70-73 (in Chinese)
- [13] 许俊仪. 规模型合建式一体化氧化沟生产性试验研究. 重庆: 重庆大学硕士学位论文, **2000**  
Xu Junyi. Research on production in scale combined and integrated oxidation ditch. Chongqing: Master Dissertation of Chongqing University, **2000** (in Chinese)
- [14] 郎建. MIOD脱氮除磷及侧沟式固液分离器机理研究. 重庆: 重庆大学硕士学位论文, **2002**  
Lang Jian. Study on denitrification and phosphorus removal in MIOD and mechanism of separator. Chongqing: Master Dissertation of Chongqing University, **2002** (in Chinese)
- [15] 郑兴灿, 李亚新. 污水除磷脱氮技术. 北京: 中国建筑工业出版社, **1998**