

粪便污水与城市污水同步脱氮的优化控制

石明岩¹, 莫东华¹, 冯兆继¹, 余建恒², 王少林², 夏耿东²

(1.广州大学土木工程学院, 广州 510006; 2.广州市大坦沙污水处理厂, 广州 510163)

摘要: 采用倒置 A²/O 工艺, 以实际粪便污水与城市污水同步脱氮为目标进行试验。试验条件下得到, 混合污水同步脱氮的临界氨氮污泥负荷为 0.019 8 kg·kg⁻¹·d⁻¹; 水力停留时间是混合污水脱氮的限制因素; 污泥回流比对硝化和反硝化影响最弱; 水温 28~35℃ 时, 混合污水同步脱氮最佳工况氨氮污泥负荷为 0.018 kg·kg⁻¹·d⁻¹、水力停留时间为 8 h、溶解氧浓度为 2.0 mg·L⁻¹、污泥回流比为 80%、混合液回流比为 150%、泥龄为 20 d。此时, NH₄⁺-N 和 TN 去除率分别为 97.0%~99.4% 和 61.4%~68.7%, 出水可达标排放。

关键词: 倒置 A²/O 工艺; 粪便污水; 城市污水; 脱氮; 水力停留时间; 最佳工况

中图分类号: X799.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2011)01-0095-06

Characteristics of nitrogen removal by consolidated treatment of nightsoil sewage and municipal wastewater

SHI Ming-yan¹, MO Dong-hua¹, FENG Zhao-ji¹, YU Jian-heng², WANG Shao-lin², XIA Geng-dong²

(1.School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006;

2.Guangzhou Datansha Sewage Treatment Plant, Guangzhou 510163)

Abstract: With inverted A²/O process, We tried to remove the nitrogen from the actual fecal sewage and urban sewage simultaneously. Under optimal experimental conditions, nitrogen load for simultaneous removal of the critical mixture from the sewage sludge is 0.019 8 kg·kg⁻¹·d⁻¹. Hydraulic retention time is the controlling factor for mixed sewage removal. Sludge recycle ratio affects the nitrification and denitrification is weakest. In the water temperature of 28—35℃, the best condition for synchronized denitrification from the mixture of sewage nitrogen is as follow: Ammonia sludge load 0.018 kg·kg⁻¹·d⁻¹; HRT, 8 h; dissolved oxygen, 2.0 mg·L⁻¹; returned sludge ratio, 80%; return ratio of mixed liquor, 150%; sludge retention time, 20 d. In this condition, ammonia and nitrogen removal rate are 97.0%—99.4% and 61.4%—68.7%, respectively. The discharged effluent could be fully treated and reached the standard.

Key words: inverted A²/O process; fecal sewage; municipal wastewater; nitrogen removal; HRT; optimum condition

粪便污水属高氨氮废水^[1], 以粪便处理厂独立处理或纳入城市污水厂合并处理为主^[2-4]。较独立处理, 合并处理可节省一次性投资, 简化工艺流程, 利用城市污水对粪便污水高浓度污染物的稀释作用和粪便污水对城市污水营养物质的补充, 实现二者同时处理同时达标^[5-8]。特别在南方地区城市污水碳源普遍缺乏的情况下, 与粪便污水合并处理则不失为补充城市污水碳源、改善城市污水可生化性的一条有效途径。但是, 广州市大坦沙污水厂等单位的

运行实践表明, 合并处理后因氨氮的冲击, 脱氮效率下降^[9]。为此, 作者以实际混合污水为进水, 采用大坦沙污水厂处理工艺的模拟反应器, 对主要运行参数对脱氮的影响及其优化控制进行初步研究。

1 材料与方法

1.1 反应器构造

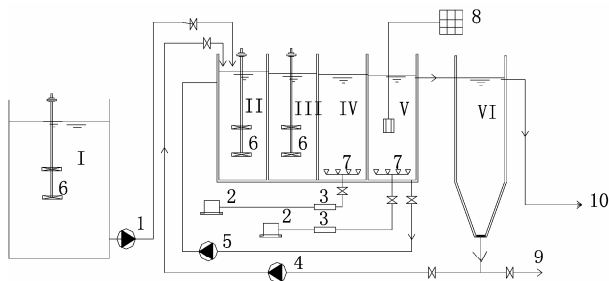
反应器模拟大坦沙污水厂倒置 A²/O 工艺设计, 由调节池、生化反应池和二沉池构成, 如图 1。调

收稿日期: 2010-01-11

基金项目: 住房和城乡建设部研究开发项目 (2009-K7-17), 广州市番禺区科技计划项目 (2009-Z-69-1), 广州市属高校科技计划项目 (08C058) 和广东省科技计划重点引导项目 (2010B010900038) 共同资助。

作者简介: 石明岩, 女, 博士, 副教授。E-mail: mingyanshi@163.com

节池设搅拌机,保证粪便污水与城市污水混合均匀,有效体积 500 L。反应池尺寸为 80 cm×60 cm×60 cm,用隔板均分成缺氧区、厌氧区、好氧 1 区和好氧 2 区,各区之间水力连通。缺/厌氧区设搅拌机慢速搅拌,保证泥水完全混合。好氧区底部设微孔曝气器,根据在线 DO 仪的监测值,通过调整阀门开启度来控制曝气量。二沉池尺寸为 60 cm×20 cm×50 cm,泥斗高 25 cm,底部设排泥管和污泥回流管。



1. 进水泵; 2. 空气压缩机; 3. 转子流量计; 4. 污泥回流泵; 5. 混合液回流泵; 6. 电动搅拌机; 7. 曝气设备; 8. 在线DO仪; 9. 排泥管; 10. 出水管; I. 调节池; II. 缺氧区; III. 厌氧区; IV. 好氧1区; V. 好氧2区; VI. 沉淀池

1. Water pump; 2. Air compressor; 3. Flowmeter; 4. Water pump of returned sludge; 5. Water pump of returned mixed liquor; 6. Dynamoelectric beater; 7. Air sparger; 8. Apparatus of DO; 9. Sludge pipe; 10. Outlet pipework; I. Adjusting tank; II. Anoxic zone; III. Anaerobic zone; IV. Aerobic zone 1; V. Aerobic zone 2; VI. Sedimentation basin

图 1 倒置 A²/O 反应器

Figure 1 Inverted A²/O process reactor

1.2 原水水质

粪便污水取自广州市白沙河无害化处理厂初级处理出水,城市污水取自大坦沙厂沉砂池出水,根据需要在调节池以不同体积比混合,水质见表 1。试验期间水温为 28~35℃。

1.3 测试项目与方法

COD: 重铬酸钾法; NH₄⁺-N: 纳氏试剂光度法; TN: 碱性过硫酸钾消解—紫外分光光度法; MLSS: 滤纸重量法; DO: HACH sc100 型溶氧仪; pH: CYBERSCAN510 型 pH 计。

2 结果与分析

2.1 氨氮污泥负荷的控制

控制试验条件:水力停留时间(HRT)为 8 h、好氧区溶解氧(DO)浓度为 1.5 mg·L⁻¹、污泥回流比(R)为 100%、混合液回流比(r)为 200%、泥龄(SRT)为 15 d,改变粪便污水与城市污水体积混合比,考察不同氨氮污泥负荷下的脱氮效果,结果如图 2。

图 2 显示,氮去除率随氨氮污泥负荷加重而下降。当氨氮污泥负荷不超过 0.019 8 kg·kg⁻¹·d⁻¹ (此

时粪便污水:城市污水=1:150)时,可充分利用城市污水处理系统的硝化容量同步处理粪便污水,保障出水 NH₄⁺-N 和 TN 的达标排放。当氨氮污泥负荷进一步提高到 0.024 kg·kg⁻¹·d⁻¹ 时,平均出水 NH₄⁺-N 浓度上升至 10.7 mg·L⁻¹,超过一级 B 标准中对 NH₄⁺-N 的最高允许排放浓度,平均出水 TN 浓度为 15.1 mg·L⁻¹,对达标排放则不构成威胁,说明粪便污水的混入主要对硝化构成压力,对硝化的抑制性影响比反硝化更为严重。试验条件下确定临界氨氮污泥负荷为 0.019 8 kg·kg⁻¹·d⁻¹。

2.2 HRT 的控制

控制运行条件:DO 为 1.5 mg·L⁻¹、R 为 100%、r 为 200%、SRT 为 15 d、氨氮污泥负荷为 0.018 kg·kg⁻¹·d⁻¹,变化 HRT,处理效果见图 3。

由图 3 发现,在范围内,除污效果随 HRT 延长而提高。HRT 为 5.6 h 时, NH₄⁺-N 平均去除率为 73.9%;HRT 为 8 h 时, NH₄⁺-N 平均去除率达 96.9%,去除接近完全;TN 平均去除率也在 HRT 由 5.6 h 延长至 8 h 的过程中获得了 12.3% 的增幅,以 6.6~8 h 区间段变化最为明显,增幅达 10.3%。分析原因是 HRT 越长,混合污水的处理周期越长,反应越完善,这与现有的研究一致^[10-12]。由处理效果确定试验条件下 HRT 至少应控制在 8 h。

2.3 好氧区 DO 的影响

好氧区 DO 主要消耗在硝化反应、对有机污染物的去除、对部分还原型物质的去除等方面。保持其他参数不变,控制好氧区 DO 浓度在不同的数值,观察其对脱氮的影响,试验结果见图 4。

由图 4 可知,当 DO 浓度由 1.0 mg·L⁻¹ 升至 1.5 mg·L⁻¹ 时, NH₄⁺-N 平均去除率由 88.5% 上升到 96.3%, DO 浓度提升在一定程度上强化了 NH₄⁺-N 的去除;硝化率的提高促使硝态氮产量增多,反硝化效果亦得到增强,脱氮率由 58.7% 提高至 63.7%。当 DO 浓度由 1.5 mg·L⁻¹ 升高至 2 mg·L⁻¹ 时, NH₄⁺-N 平均去除率仅增加了 0.4%,说明工艺对氨氮的去除能力已接近极限,1.5 mg·L⁻¹ 的 DO 浓度已能满足硝化菌对氧的需要,此时 DO 不再是硝化反应的限制因素;TN 的去除在该过程中则出现下滑,平均去除率下降了 5.8 个百分点。分析是此时曝气已过度,有多余的 DO 随回流污泥进入了缺氧区,反硝化因此受到了负面影响^[13]。

2.4 污泥回流比的影响

在 HRT 为 8 h、DO 为 1.5 mg·L⁻¹、r 为 200%、SRT 为 15d、氨氮污泥负荷为 0.018 kg·kg⁻¹·d⁻¹ 时,分别考察了污泥回流比为 60%、80% 和 100% 的处

理结果, 如图 5 所示。

表 1 原水水质
Table 1 Influent quality

项目 Project	COD/mg.L ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N/mg.L ⁻¹	TN/mg.L ⁻¹	pH
粪便污水 Nightsoil wastewater	13 500~20 600	664~1 200	835~1 500	7.5~8.5
城市污水 Municipal wastewater	50~200	10~30	12~33	7.0~8.0
粪便污水与城市污水混合水 Mixed sewage	63~250	11~32	14~37	7.4~8.0

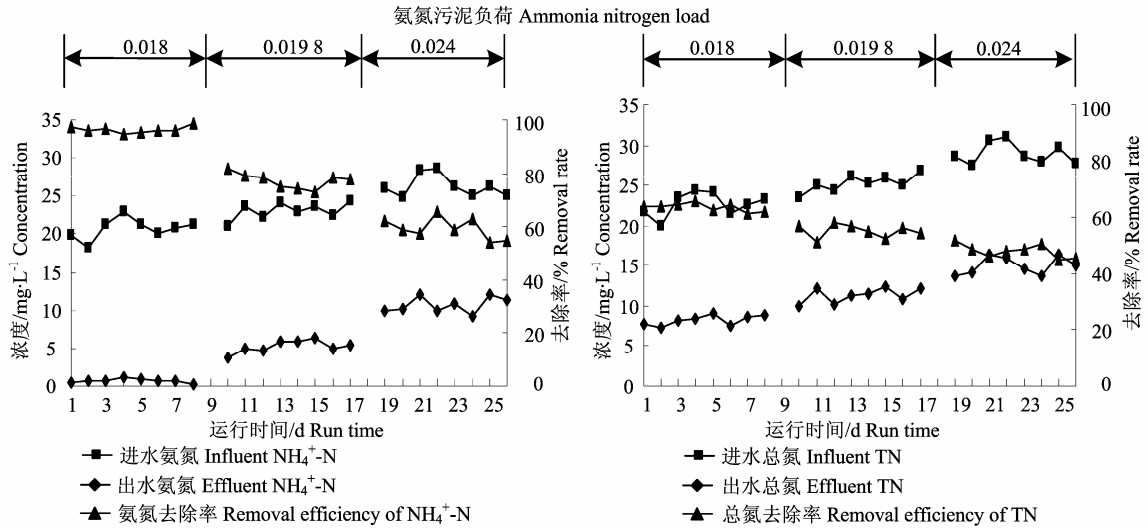


图 2 氨氮污泥负荷对脱氮的影响

Figure 2 Influence of ammonia nitrogen load on nitrogen removal

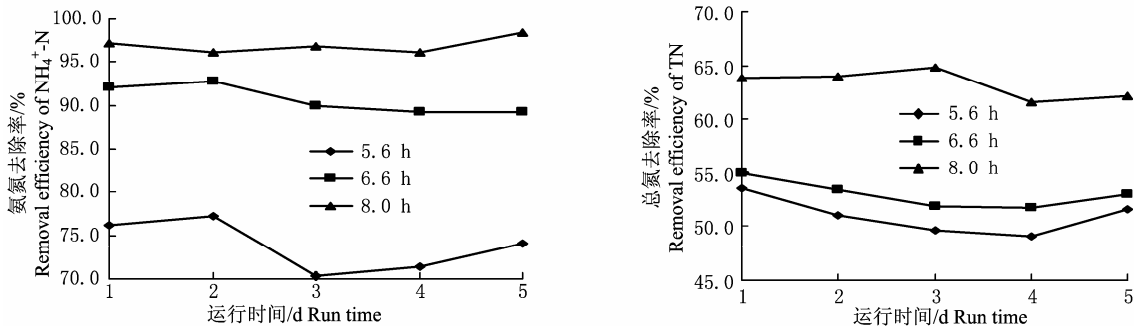


图 3 HRT 对脱氮的影响

Figure 3 Influence of HRT on nitrogen removal

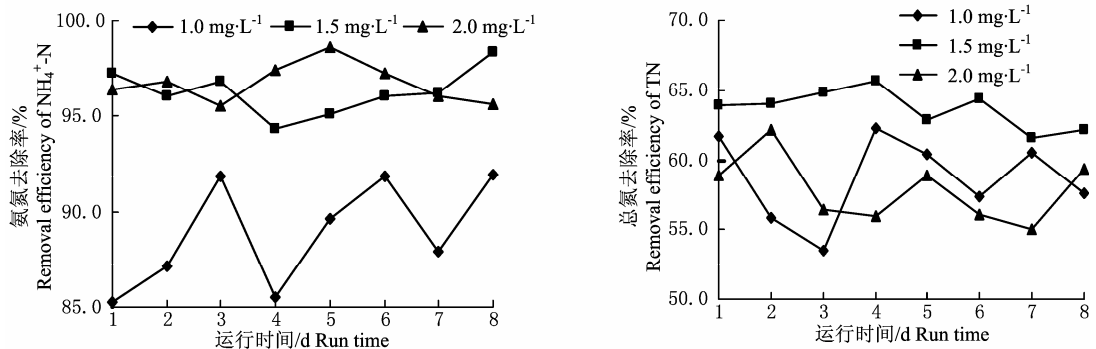


图 4 好氧区 DO 对脱氮的影响

Figure 4 Influence of DO on nitrogen removal

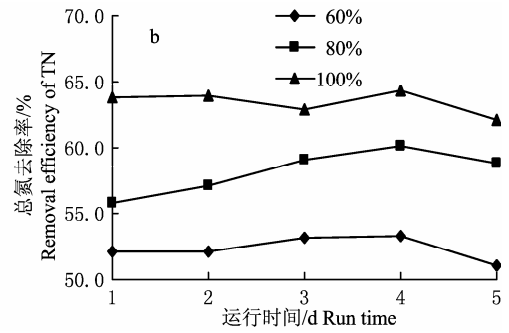
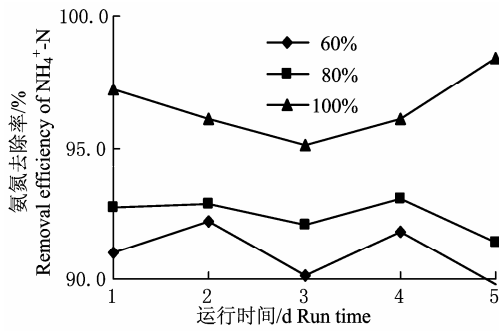


图 5 R 对脱氮的影响

Figure 5 Influence of R on nitrogen removal

由图 5 可以看出:当 R 在 60%~100% 范围内变化时, NH_4^+-N 平均去除率由 91.0% 变化到 96.6%, 受 R 的影响不甚明显。TN 平均去除率由 52.3% 升至 63.4%, 但从 TN 去除率实际值与理论值^[14]的比较(表 2)发现, R 的增加理论上对反硝化的影响极其微弱, TN 去除率实际值低于理论值 14.4%~24.8%, 工艺的反硝化作用还不完全, 若严格控制操作条件, TN 的去除还有较大的提升空间。

2.5 水温的影响

温度是影响微生物代谢活力重要因素之一^[15-16]。在 HRT 为 8 h、DO 浓度 1.0~1.5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、内回流比 200%、外回流比 100% 和 SRT 为 15 d 的条件下进行试验, 得到水温对脱氮的影响, 如图 6。

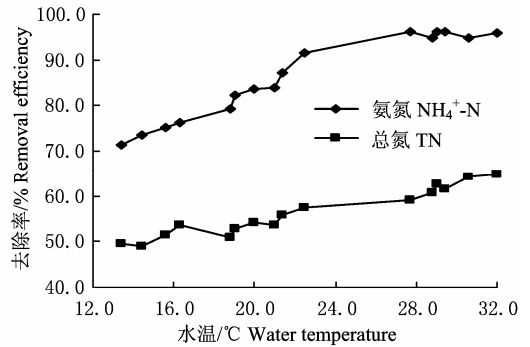


图 6 水温对脱氮的影响

Figure 6 Influence of temperature on nitrogen removal

表 2 TN 去除率实际值与理论值的比较

Table 2 Comparison of experimental value with theoretical value on TN removal efficiency

	R/%		
	60	80	100
实际值/% Experimental value	51.1~53.2	55.8~60.2	62.1~64.4
理论值/% Theoretical value	75.9~76.7	77.3~77.6	78.2~78.8

结果发现, 水温的升高对脱氮有明显的促进作用, 硝化受到的影响最为突出。在 13~20°C 的常温范围内, 硝化率提高了 12.2%, 脱氮率提高了 4.6%。这是由于在 5~30°C 时, 温度每升高 10°C 则硝化菌的比增长速率增加一倍, 硝化率的提高导致反硝化反应底物的增多, 促进了总氮的去除。在 21~32°C 的高温范围内, 硝化率提高了 12.0%, 较常温下略有降低, 分析是当温度 >30°C 时, 蛋白质的变性降低了硝化菌的活性, 硝化反应速率降低所致。同时发现, 脱氮率提高了 11.3%, 说明高温对反硝化更为有利。

表 3 正交试验设计

Table 3 Design of multifactor test

水平 Level	因素 Factor			
	HRT/h	DO/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	R/%	r/%
1	8	1	60	100
2	6	2	80	150
3	4	3	100	250

2.6 最佳运行参数的确定

在水温为 28~35°C、氨氮污泥负荷为 0.018 $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 、泥龄约为 20 d 时进行正交试验, 比较不同因素对处理效果影响的权重, 确定最佳运行参数。根据实际运行经验, 选择 HRT、DO、R 和 r 为考察因素, 每个因素取 3 种水平, 设计方案如表 3。

在每个工况下进行平行试验, 稳定运行后, 取多次试验结果的平均值, 见表 4。

2.6.1 直观分析 从表 3 的极差运算结果可知, HRT 的极差最大, 即 HRT 为工艺脱氮的限制因素, 工艺参数优化的重点在于 HRT。好氧区 DO 浓度和混合液回流比分别为 NH_4^+-N 和 TN 去除的次要影响因素。R 的极差最小, 对硝化和反硝化的影响最弱。

表 4 正交试验结果
Table 4 Result of multifactor test

工况 Working condition	HRT /h	DO /mg.L ⁻¹	R /%	r /%	NH ₄ ⁺ -N 平均去除率/% Average removal efficiency of NH ₄ ⁺ -N	TN 平均去除率/% Average removal efficiency of TN	
1	8	1.0	60	100	95.9	59.3	
2	8	2.0	80	150	98.5	63.7	
3	8	3.0	100	250	99.4	68.7	
4	6	1.0	80	250	86.3	66.0	
5	6	2.0	100	100	95.0	54.9	
6	6	3.0	60	150	93.8	62.7	
7	4	1.0	100	150	70.1	50.3	
8	4	2.0	60	250	78.4	52.8	
9	4	3.0	80	100	83.6	46.9	
NH ₄ ⁺ -N 极差计算 Range of NH ₄ ⁺ -N	K ₁	97.94	84.10	89.37	91.51		
	K ₂	91.68	90.63	89.47	87.46		
	K ₃	77.36	92.25	88.14	88.00		
	极差 Range	20.58	8.15	1.33	4.05		
	主次顺序 Important order		A>B>D>C				
	最佳水平 Optimum level	A ₁	B ₃	C ₂	D ₁		
TN 极差计算 Range of TN	K ₁	63.93	58.54	58.28	53.46		
	K ₂	60.96	56.91	58.86	58.93		
	K ₃	50.00	59.43	57.74	62.50		
	极差 Range	13.93	2.53	1.12	9.04		
	主次顺序 Important order		A>D>B>C				
	最佳水平 Optimum level	A ₁	B ₃	C ₂	D ₃		

表 5 试验结果的方差分析
Table 5 Variance analysis

方差来源 Source of variance	离差平方和 Square deviations		自由度 Degrees of freedom	平均离差平方和 Average squared deviations		F		F 临界值 F critical value	显著性 Significance	
	NH ₄ ⁺ -N	TN		NH ₄ ⁺ -N	TN	NH ₄ ⁺ -N	TN		NH ₄ ⁺ -N	TN
A	667.5	326.9	2	333.8	163.5	203.8	274.9	F _{0.01(2,2)} =99.0	***	***
B	111.6	7.9	2	55.8	4.0	34.1	6.7	F _{0.05(2,2)} =19.0	**	
C	3.3	1.2	2	1.6	0.6	1.0	1.0	F _{0.1(2,2)} =9.0		
D	29.0	117.7	2	14.5	58.9	8.8	99.0	F _{0.05(2,2)} =19.0		**

注: ***代表具有高度显著影响, **代表具有显著影响

Note: *** represents significant difference at 0.01 level; ** represents significant different at 0.05 level.

据每个因素的最佳水平得到不同指标的最佳工艺参数组合: NH₄⁺-N 去除率指标为 HRT=8 h、DO=3 mg·L⁻¹、R=80%、r=100%; TN 去除率指标为 HRT=8 h、DO=3 mg·L⁻¹、R=80%、r=250%。

2.6.2 方差分析 对试验结果的方差分析见表 5。

由表 5 得出: 各因素对 NH₄⁺-N、TN 去除率影响排序依次为: HRT>DO>r>R 和 HRT>R>DO>r,

与直观分析一致。

按照 F 和 F 临界值的比较, 将不同因素对处理效果的影响程度分为高度显著影响(与 F_{0.01} 临界值比较)、显著影响(与 F_{0.05} 临界值比较)和一定影响(与 F_{0.1} 临界值比较) 3 个层次。分析得到, HRT 对 NH₄⁺-N 和 TN 去除均具有高度显著影响; 好氧区 DO 浓度对 NH₄⁺-N 去除具有显著影响, 对 TN

去除影响可以忽略；R 对除氮影响微弱；r 对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除基本没有影响，对 TN 去除影响显著。由直观分析可知， $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率和 TN 去除率指标最佳工艺参数的差异在于混合液回流比，因 r 仅对 TN 去除存在显著影响，因此从反硝化脱氮角度，确定 r 的最佳水平为 250%。

综合直观分析和方差分析，确定混合污水同步脱氮理论最佳工况为 $\text{HRT}=8\text{ h}$ 、 $\text{DO}=3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{R}=80\%$ 、 $\text{r}=250\%$ 。在该工况下试验，得到 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率为 95.1%~99.2%、TN 去除率为 65.3%~71.4%，与表 4 所列的工况 2 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率为 97.0%~99.4%、TN 去除率为 61.4%~68.7%) 处理效果接近。综合污染物降解率和经济性，选择工况 2 做为实际最佳运行工况，相应的参数设置是 $\text{HRT}=8\text{ h}$ 、 $\text{DO}=2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{R}=80\%$ 、 $\text{r}=150\%$ ，此时测得出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN 浓度分别为 $0.1\sim 0.7\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $5.3\sim 9.8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918-2002)一级 A 标准的要求。

3 结论

本试验条件下，粪便污水与城市污水同步脱氮的临界氨氮污泥负荷为 $0.019\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ ，在此负荷内，可以充分利用城市污水处理系统的硝化容量同步处理粪便污水，保证出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN 的达标排放。水力停留时间是混合污水同步脱氮的限制因素。DO 为 $1.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、R 为 100%、r 为 200%、SRT 为 15 d、氨氮污泥负荷为 $0.018\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 的条件下，水力停留时间至少应维持在 8 h。污泥回流比对混合污水硝化和反硝化影响微弱。水温 $28\sim 35^\circ\text{C}$ 时，混合污水同步脱氮最佳工况氨氮污泥负荷 = $0.018\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 、SRT = 20 d、 $\text{HRT}=8\text{ h}$ 、 $\text{DO}=2.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{R}=80\%$ 、 $\text{r}=150\%$ 。此时， $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率为 97.0%~99.4%、TN 去除率为 61.4%~68.7%，出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN 浓度分别为 $0.1\sim 0.7\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $5.3\sim 9.8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918-2002)一级 A 标准的要求。

参考文献:

- [1] Zeeman G, Lettinga G G. The role of anaerobic digestion of domestic sewage in closing the water and nutrient cycle community level[J]. *Wat Sci Tech*, 1999, 39(5): 187-195.
- [2] 周彦, 濮文虹, 杨昌柱, 等. 动态膜-生物反应器对化粪池废水的处理[J]. *环境科学与技术*, 2007, 30(5): 75-77.
- [3] Magara Y, Nishimura K, Itoh M, et al. Biological denitrification system with membrane separation for collective human excreta treatment plant[J]. *Wat Sci Tech*, 1992, 25(10): 241-251.
- [4] But E P, Morse G K, Guy J A, et al. Co-recycling of sludge and municipal waste: a cost-benefit analysis[J]. *Environ Technol*, 1998, 19: 1163-1175.
- [5] 周磊, 魏好程, 陈朱蕾. 厌氧折流板反应器处理粪便污水的试验研究[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2006, 1(2): 88-91.
- [6] Metcalf & Eddy. *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 355-362.
- [7] 邓荣森. 氧化沟污水处理的理论与技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [8] 熊鸿斌, 张正, 谷良平. 城市粪便集中处理对合肥市污水处理厂的影响[J]. *中国给水排水*, 2009, 25(14): 17-21.
- [9] 何康生, 余建恒, 叶恒朋, 等. 粪便水对大坦沙污水厂生产运行的影响及控制措施[J]. *中国给水排水*, 2007, 23(24): 92-94.
- [10] 石明岩, 莫东华. 一体化活性污泥工艺特性[J]. *广州大学学报: 自然科学版*, 2008, 7(3): 55-59.
- [11] Ren N Q, Chen Z B, Wang A J, et al. Removal of organic pollutants and analysis of MLSS-COD removal relationship at different HRT in a submerged membrane bioreactor[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2005, 55: 279-284.
- [12] Shim J K, Yoo I K, Lee Y M. Design and operation considerations for wastewater treatment of municipal wastewater[J]. *Water Research*, 2002, 36: 413-420.
- [13] 余华堂. 水解酸化/Carrousel 氧化沟处理漂染废水的优化控制[J]. *中国给水排水*, 2009, 25(8): 32-34.
- [14] 冯兆继, 石明岩, 莫东华. 倒置 A^2/O 工艺氮平衡与脱氮效率的分析[J]. *化工环保*, 2008, 28(5): 388-390.
- [15] Lee D S, Jeon C O, Jong M P. Biological nitrogen removal with enhanced phosphate uptake in a sequencing batch reactor using single sludge system [J]. *Water Res*, 2001, 35(16): 3968-3976.
- [16] Zhao H W, Mavinic D S, Oldham W K, et al. Controlling factors for simultaneous nitrification and denitrification in a two stage intermittent aeration process treating domestic sewage[J]. *Water Res*, 1999, 33(4): 961-970.

[1] Zeeman G, Lettinga G G. The role of anaerobic digestion