

间歇曝气脱氮系统的影响因素研究

金春姬¹, 杨海², 高京淑³, 金秀生³

(1. 中国海洋大学 环境科学与工程学院, 山东 青岛 266003; 2. 佳木斯市自来水公司, 黑龙江 佳木斯 154002; 3. 韩国东亚大学, 韩国 釜山 604-714)

摘要: 通过观察间歇曝气生物脱氮系统在不同水温、C/N值下的脱氮效率以及好氧/缺氧一周期的硝化和反硝化过程, 分析了温度和缺氧期 C/N 值对硝化和反硝化速度的影响, 探讨了冬季所需外加碳源量。试验结果表明, 秋、冬季提高缺氧期 C/N 值是保障间歇曝气脱氮系统运行效率的有效措施; 在 TN 负荷为 $0.034 \text{ kg}/(\text{kgMLVSS} \cdot \text{d})$, 水温为 15°C 时最适 C/N 值为 7, 10°C 时最适 C/N 值为 9。为了降低冬季运行费用, 有必要寻找廉价的外碳源。

关键词: 低 C/N; 生物脱氮; 间歇曝气; 外碳源; 温度

中图分类号: X703.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2005)06-0016-04

Influence of Temperature and External Carbon Source on Intermittent Aeration Biological Nitrogen Removal System

JIN Chun-ji¹, YANG Hai², KO Kyong-suk³, KIM Soo-saeng³

(1. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266003, China; 2. Jiamusi Water Supplier, Jiamusi 154002, China; 3. Department of Environmental Engineering, Dong-A University, Busan 604-714, Korea)

Abstract: Through the observation on the nitrogen removal efficiency of intermittent aeration biological nitrogen removal system at different water temperature, C/N ratios and the nitrification and denitrification process in the aerobic/anoxic period, the influence of temperature and anoxic C/N ratio on the nitrification and denitrification rate was evaluated, and external carbon demand in winter was discussed. The result shows that upgrading the anoxic C/N ratio in autumn and winter is an effective measure to ensure operating efficiency of the system; under TN loading of $0.034 \text{ kg}/(\text{kgMLVSS} \cdot \text{d})$, the optimum C/N ratio is 7 and 9 respectively at water temperature of 15°C and 10°C . It is necessary to look for low-cost external carbon sources for reducing the operating cost in winter.

Key words: low C/N ratio; biological nitrogen removal; intermittent aeration; external carbon sources; temperature

近年来,为满足韩国环境部新颁布的氮排放标准,韩国大部分污水处理厂对原有的活性污泥系统进行改建或扩建,增设了生物脱氮工艺。

进水的 C/N 值和温度是影响生物脱氮工艺效

率的最关键因素。由于历史原因,韩国大部分污水处理厂进水有机物浓度普遍较低,不能满足反硝化阶段对有机物的需求。为保证出水中的氮达标,需要投加外碳源。因此,选择符合实际的工艺,探讨各

季节的运行策略,从而确定不同季节的最适外碳源
量,将有助于降低处理费用。

1 试验方法

1.1 原水

原水是韩国蔚山市某污水处理厂进水与从该市
收集的粪便混合的污水。由于该厂进水 BOD₅ 浓度
低(平均为 25.5 mg/L,最高约 90 mg/L),很难维持
曝气池中足够的污泥量。因此把该市由于粪便处理
设施容量不足而未能处理的化粪池粪便,经过前处
理后以一定比例投入调节池,混合后的水质见表 1。
混合污水的 TN 浓度波动大,BOD₅/TN < 2。

表 1 混合污水水质
Tab.1 Mixed wastewater quality mg · L⁻¹

项目	BOD ₅	COD	TN	NH ₄ ⁺ - N	TSS	TP
范围	30.4 ~ 128.1	88.9 ~ 495.6	20.8 ~ 131.4	6.7 ~ 67.8	51 ~ 432	0.5 ~ 4.7
平均值	71.7	234.9	54.2	29.4	157.5	1.8

1.2 试验装置及运行

在该污水处理厂进水渠旁建造了中试装置,它
由粪便贮存罐(5 m³)、混合池(1.5 m³)、间歇曝气
池(4.6 m³)、沉淀池(2.2 m³)组成。间歇曝气池内
安装了曝气器和搅拌叶轮,利用定时器和 Solenoid
valve 控制曝气与搅拌的转换,而且安装了 pH 和
ORP 探头,自动调节 pH 值为 7.2。为了考察温度的
影响,在中试装置旁制作安装了曝气池容积为 100
L 的小型装置,其结构与中试装置相同,只是增加了
保温、控温部件。在曝气池内接种附近污水处理厂的
剩余污泥,进行连续曝气,培养活性污泥约 1 个月
以后开始间歇曝气。当水温 > 20 ℃ 时,设定 60 min
曝气/60 min 搅拌的间歇曝气周期;水温 < 20 ℃ 时
根据池内 DO 和 ORP 的变化幅度,调整一周期(120
min)中好氧期和缺氧期的比例。搅拌期间投加了
甲醇(99%)作为有机碳源。根据进水溶解性 COD
浓度和设定的 C/N 值(指缺氧期溶解性 COD 与进
水 TN 之比)计算缺氧期的甲醇投量。

1.3 测试项目和方法

取混合池、间歇曝气池和沉淀池出水,依照美国
APHA 的 *Standard Methods For the Examination of
Water and Wastewater* 以及韩国《水质污染公定试验
方法》,分析了 TCOD、溶解性 COD、TN、NH₄⁺ - N、
NO₂⁻ - N、NO₃⁻ - N、TSS、VSS、SV₃₀ 等项目,同时监测
pH、ORP、DO 和水温。

2 试验结果及分析

2.1 水温对运行结果的影响

根据中试装置的运行结果^[1],水温 > 23 ℃、
HRT 为 7.7 h 时满足 TN 排放标准的最适 C/N 值确
定为 5。因此利用小试装置,在维持缺氧期 C/N = 5
的条件下,设定 30、25、20、15、10 ℃ 五个温度水平进
行试验。运行时根据温度和进、出水氮浓度变化,调
整了 TN 负荷和污泥龄(SRT)。表 2 显示系统处理
性能稳定且出水 TN < 20 mg/L 时的运行情况。

表 2 不同温度条件下的运行情况
Tab.2 Operating results at different temperatures

指标		温度/℃				
		30	25	20	15	10
TN 负荷/(kg · kg ⁻¹ MLVSS · d ⁻¹)		0.062	0.054	0.044	0.033	0.024
SRT/d		7.5	10.3	16.7	24.1	31.4
TN	进水/ (mg · L ⁻¹)	59.8	55.5	62.1	64.8	69.7
	出水/ (mg · L ⁻¹)	10.2	12.4	15.0	14.7	16.4
	去除率/%	82.9	77.7	75.8	77.3	76.5
NH ₄ ⁺ - N/ (mg · L ⁻¹)	进水	30.2	29.4	31.8	30.7	34.6
	出水	0.6	0.9	2.2	3.7	2.7

由表 2 可见,水温 > 25 ℃ 时系统能够承受高于
0.054 kg/(kgMLVSS · d) 的 TN 负荷,出水 TN 和
NH₄⁺ - N 都能达标。水温从 25 ℃ 降至 10 ℃,在出
水 TN < 20 mg/L 的前提下 TN 负荷从 0.054 kg/
(kgMLVSS · d) 下调至 0.024 kg/(kgMLVSS · d),
SRT 则从 10.3 d 逐渐延长至 31.4 d。水温 < 20 ℃
时出水 NH₄⁺ - N 浓度 > 1 mg/L。TN 负荷降低 50%
意味着如果不提高曝气池污泥浓度则需要延长
HRT 一倍。若现有曝气池容量不充足则冬季很难
保证出水达标。另外,20 ℃ 以下时系统硝化反应也
不彻底,有必要寻求冬季能提高硝化和反硝化反应
速度的措施。

2.2 曝气池中氮浓度和ORP 的变化

为了观察低温、不同 C/N 值条件下 60 min 好
氧/60 min 缺氧一周期的硝化和反硝化过程,在水
温为 20、15 和 10 ℃ 时对曝气池中 NH₄⁺ - N 和 NO₃⁻
- N 每隔 15 min 进行一次动态监测,同时记录曝气
池内的 ORP。TN 负荷在 0.033 ~ 0.036 kg/(kgM-
LVSS · d) 范围波动。试验结果见图 1、2。

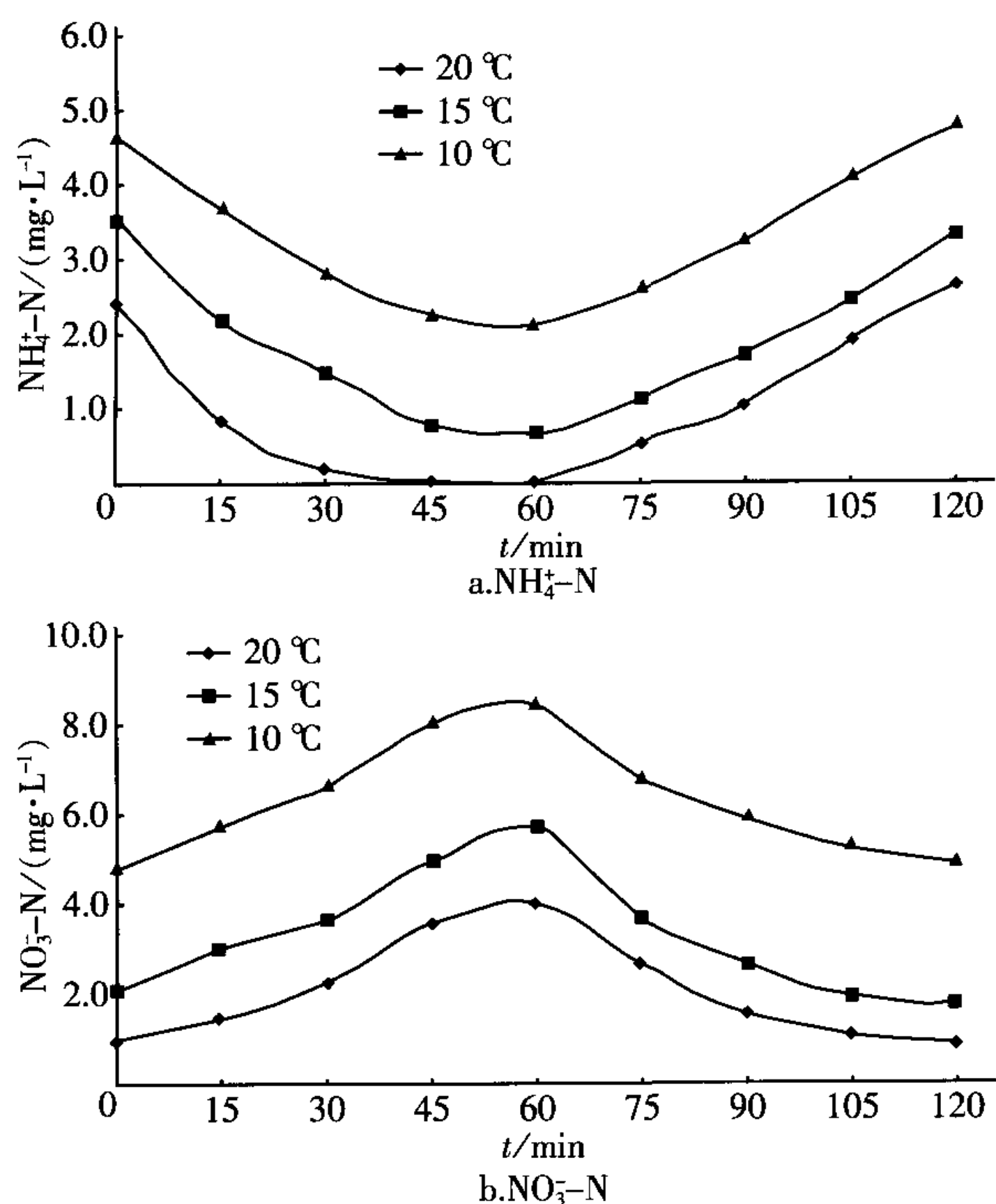


图1 C/N = 7 时好氧/缺氧一周期内曝气池中 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 的变化

Fig. 1 Variation of NH_4^+-N and NO_3^--N with temperatures at C/N ratio 7

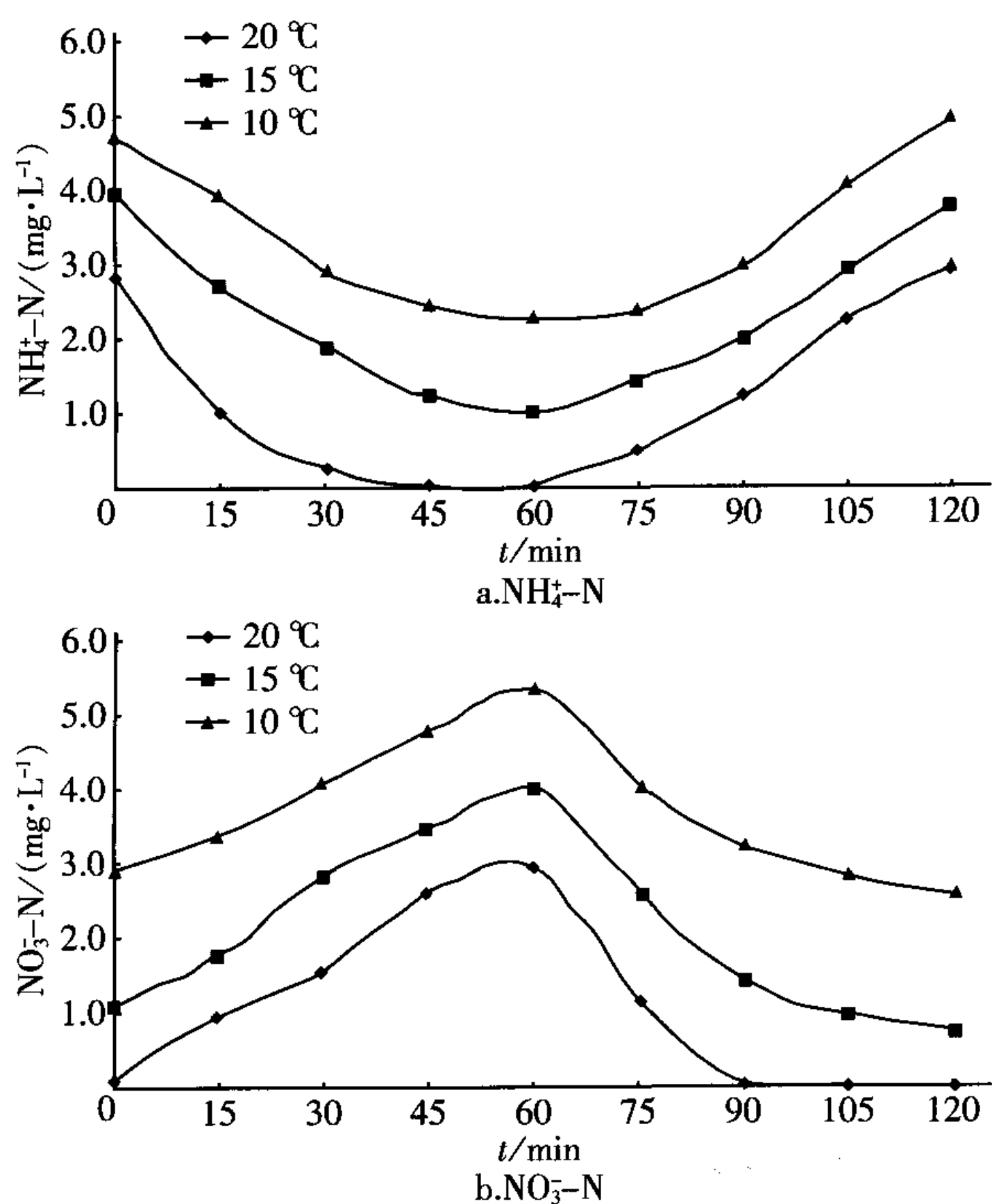


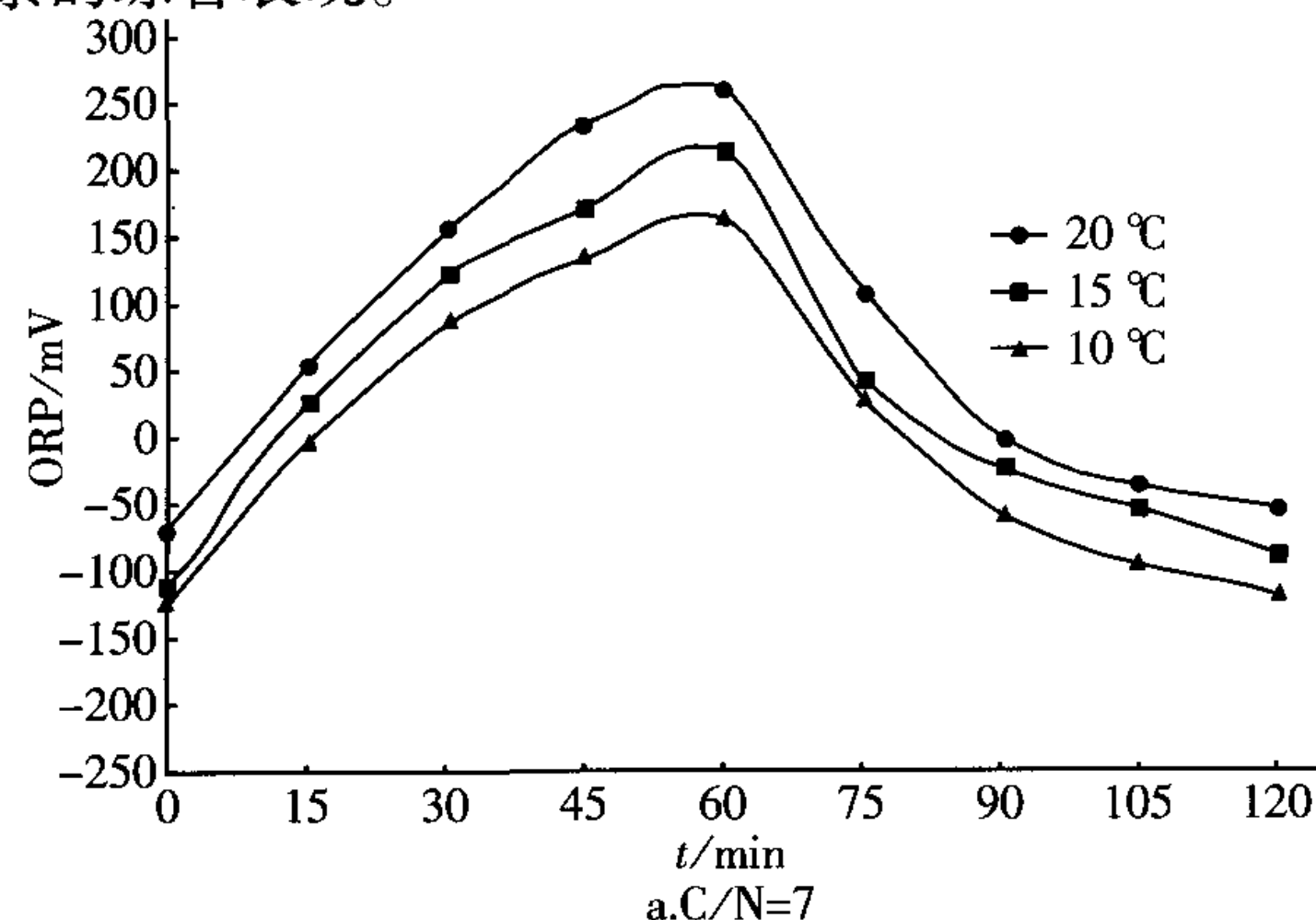
图2 C/N = 9 时好氧/缺氧一周期内曝气池中 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 的变化

Fig. 2 Variation of NH_4^+-N and NO_3^--N with temperatures at C/N ratio 9

由图 1、2 可见,由于好氧期不投加外碳源,池内 NH_4^+-N 的变化曲线相似。在 20 °C 左右、曝气 30 min 后 NH_4^+-N 浓度就下降到 0.3 mg/L 以下; 15 °C 左右等到曝气结束时 NH_4^+-N 浓度才降到 1.0 mg/L 以下; 而 10 °C 左右时等到曝气结束,池内 NH_4^+-N 浓度仍残留了 2.3 mg/L, 可知低温时硝化进行得不完全。由于缺氧期投加的甲醇量不同,池内 NO_3^--N 浓度水平和变化幅度也有差别。C/N = 7 时好氧/缺氧一周期内 NO_3^--N 平均浓度在 20、15 和 10 °C 时依次为 2.0、3.3 和 6.4 mg/L; 而 C/N = 9 时依次为 1.4、2.1 和 3.6 mg/L, 可知低温时增加缺氧期的外碳源量对改善间歇曝气脱氮系统的反硝化效率起到较好的作用。

冬季脱氮效率低的主要原因是低温导致微生物活性下降,尤其是硝化菌活性受低温影响更大。不过在该试验中原进厂水 C/N 太低也是导致秋、冬季脱氮效率下降的一个原因。冬季反硝化反应速度显然没有夏季的高,因此进一步提高缺氧期的甲醇投量将有助于增加异养菌数量,从而提高反硝化效率。需要注意的是,通过提高外碳源量来促进异养菌增殖可能引起曝气池内微生物种群结构变化,使自养菌比例相对减少,从而导致硝化反应受阻。

ORP 可以间接地反映水中氧化性和还原性物质水平,在间歇曝气脱氮工艺中常被作为工艺控制指标。不同 C/N 值时好氧/缺氧一周期内曝气池内 ORP 的波动见图 3。由图 3 可见,温度越低,缺氧期结束时 ORP 最低值越低。Yasuji^[2] 对间歇曝气活性污泥法的研究中也报道过类似的现象,认为这是低温时 DO 增加、微生物活性降低和低负荷运行等因素的综合表现。



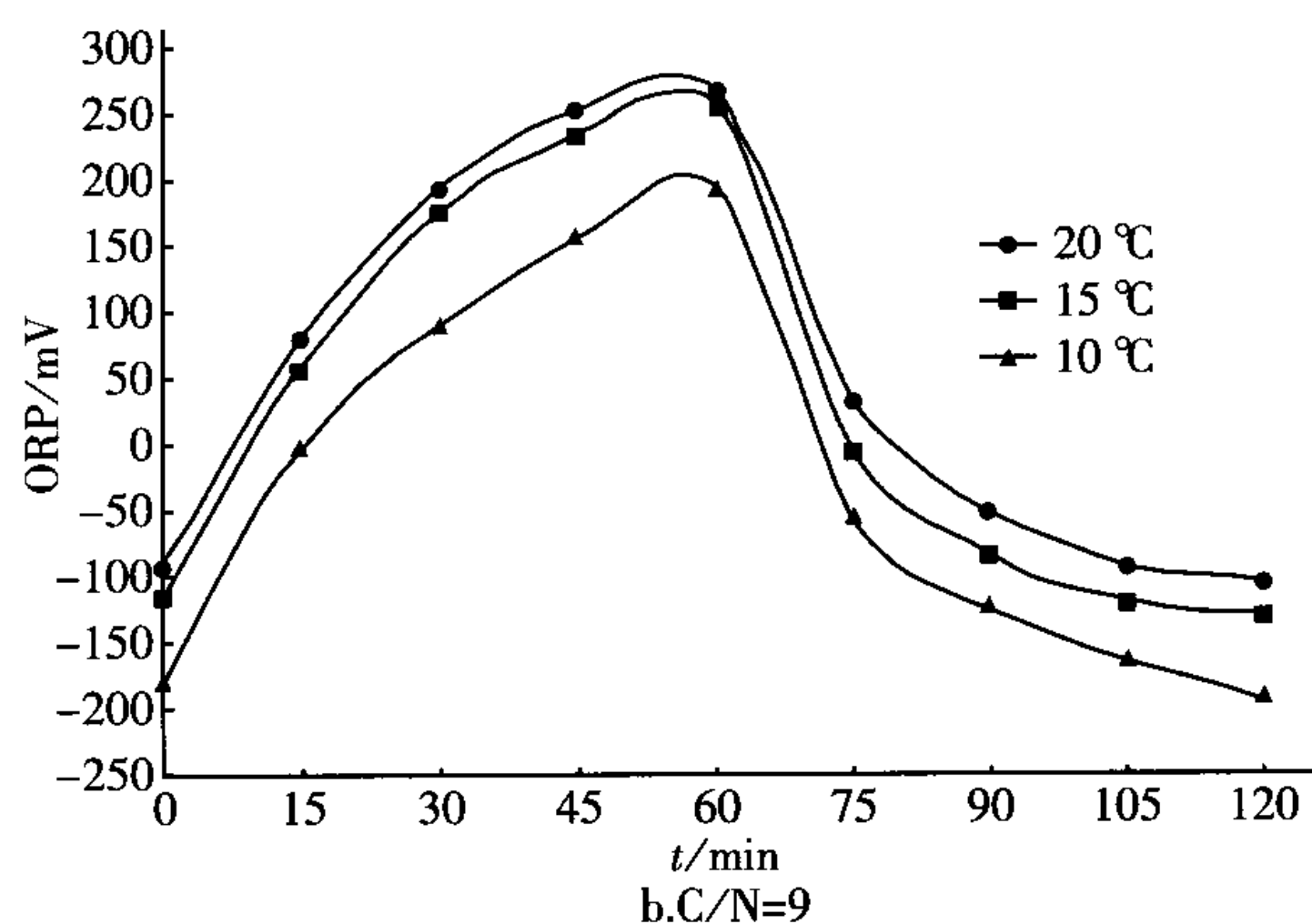


图3 不同 C/N 值时好氧/缺氧一周期内曝气池 ORP 的波动

Fig. 3 Variation of ORP with different C/N ratios

藤井等人和 Ben Koopmann, *et al*^[3] 曾报道反硝化进行得彻底而 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度接近零时 ORP 急剧下降,可以利用 ORP 变化的这个特点进行工艺自动控制。试验中缺氧期结束时池内残留的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度相对较高,因而 ORP 也未呈现急剧下降的现象。从以上 ORP 变化趋势来看,如果利用 ORP 进行工艺自动控制,则需要根据温度变化调整控制策略。

2.3 C/N、温度对硝化和反硝化反应速度的影响

为了掌握秋、冬季系统的最大脱氮反应速度,提高 TN 负荷至 $0.042 \sim 0.044 \text{ kg}/(\text{kgMLVSS} \cdot \text{d})$,在 20、15、10 °C 时改变缺氧期甲醇投量,比较了好氧期硝化反应速度 (SNR) 和缺氧期反硝化反应速度 (SDNR),试验期间好氧期和缺氧期时间比例为 (60 min/60 min) ~ (75 min/45 min)。试验结果见表 3。

表3 间歇曝气脱氮系统的 SNR 和 SDNR

Tab. 3 SNR and SDNR at different temperatures and C/N ratios $\text{kgN} \cdot \text{kg}^{-1} \text{MLVSS} \cdot \text{d}^{-1}$

缺氧期 C/N 值	好氧期的 SNR			缺氧期的 SDNR		
	20 °C	15 °C	10 °C	20 °C	15 °C	10 °C
5.1	0.073	0.064	0.047	0.070	0.053	0.034
6.8	0.071	0.060	0.043	0.076	0.063	0.044
9.1	0.070	0.062	0.042	0.084	0.072	0.052

从表 3 可知,SNR 随着温度下降而降低,10 °C 的 SNR 是 20 °C 时的 60% 左右。SNR 与 C/N 值增加没有明显的线性关系。而 SDNR 则随着缺氧期 C/N 值提高而上升,随着温度下降而降低。

以上研究结果再一次证明秋、冬季提高缺氧期的 C/N 值可作为提高系统反硝化速度的有效措施。

在 C/N 值较高时可延长曝气时间来提高硝化效率,从而降低出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度。若提高 C/N 值则需要增加外碳源量,这势必增加冬季运行费。因此,有必要寻找廉价的外碳源。

3 结论

① 缺氧期 C/N = 5 时随着水温从 25 °C 降至 10 °C,能保证出水 TN 浓度 $< 20 \text{ mg/L}$ 的 TN 负荷从 $0.054 \text{ kg}/(\text{kgMLVSS} \cdot \text{d})$ 下降 56% 左右,而且 20 °C 以下时系统硝化反应也不彻底。

② 好氧/缺氧一周期内曝气池氮浓度的动态检测结果表明:在 20、15 和 10 °C 条件下,C/N = 7 时 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 平均浓度依次比 C/N = 9 时高 0.6、1.2 和 2.8 mg/L,可知低温时增加缺氧期外碳源量对改善间歇曝气脱氮系统反硝化效率起到较好的作用。

③ 温度越低,缺氧期结束时 ORP 最低值越低。缺氧期结束时池内残留的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度相对较高,因而 ORP 未呈现急剧下降的现象,如果考虑利用 ORP 进行工艺自动控制,则需要根据 C/N 和温度变化调整控制策略。

④ 秋、冬季提高缺氧期 C/N 值可缩短反硝化时间,延长曝气时间可提高硝化效率,从而降低出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度。因增加外碳源量会增加冬季运行费用,故有必要寻找廉价的外碳源。

参考文献:

- [1] 金春姬,余宗莲,高京淑,等. 低 C/N 比污水生物脱氮所需外加碳源量的确定[J]. 环境科学研究,2003,16(5):37-40.
- [2] Yasuji Yamamoto. 間欠曝气活性污泥法における處理の高度化と管理[J]. 用水と废水,1991,33(10):21-26.
- [3] Koopman B, Thomas G P, Spyros A S. Optimization of a periodic biological process for nitrogen removal from wastewater[J]. KSEE,1995,17(6):499-516.

作者简介:金春姬(1968-),女,山东青岛人,副教授、博士,主要研究方向为污水深度处理和固体废弃物处置与资源化。

电话:(0532)2032571

E-mail:jinhou@mail.ouc.edu.cn

收稿日期:2005-02-04