

A/O 脱氮工艺影响因素及其控制策略的研究

彭永臻^{1,2}, 王晓莲², 王淑莹²

(1. 哈尔滨工业大学 市政与环境工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090, E-mail: pyz@bjpu.edu.cn;

2. 北京工业大学 水质科学与环境恢复重点实验室, 北京 100022)

摘要: 为有效提高 A/O 工艺脱氮效率, 以淀粉废水为研究对象, 系统考察了 DO、硝化液回流量、污泥回流量、SRT、进水 COD 与 TN 质量浓度比和 HRT 等因素对脱氮效率的影响, 并建立了相应的控制策略, 如以出水氨氮质量浓度来控制好氧区 DO 值, 以缺氧区硝酸盐质量浓度来控制内循环回流量, 以进水 COD 与 TN 质量浓度比或出水总氮质量浓度来控制外碳源投量。最后根据上述分析建立了 A/O 工艺硝化与反硝化反应专家控制系统。

关键词: A/O 脱氮工艺; 淀粉废水; 硝化反硝化

中图分类号: X506

文献标识码: A

文章编号: 0367-6234(2005)08-1053-05

Study on influence factors and control strategies of A/O nitrogen removal process

PENG Yong-zhen^{1,2}, WANG Xiao-lian², WANG Shu-ying²

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China, E-mail: pyz@bjpu.edu.cn; 2. Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: How to effectively improve A/O process nitrogen removal efficiency is always a concerned problem. Nitrogen removal influence factors: DO, internal recirculation flow rate, sludge recycle flow rate, SRT, influent COD/TN and HRT, were clearly studied using starch wastewater, and corresponding control strategies were established, such as, using effluent ammonia concentration control DO; using nitrate concentration at the end of anoxic zone control internal recirculation flow rate; using influent COD/TN or effluent total nitrogen concentration control external carbon dose rate. Based on the above analysis, improving A/O nitrification and denitrification rate expert control system was established.

Key words: A/O nitrogen removal process; starch wastewater; nitrification and denitrification

生物脱氮需要自养菌和异养菌两种不同类型微生物参与, 在生物硝化和反硝化过程中存在以下矛盾: ①硝化反应要求低有机物质量浓度, 反硝化反应要求高有机物质量浓度; ②硝化要求高 DO, 反硝化要求低 DO; ③硝化过程为反硝化过程提供硝酸盐, 但硝化过程产生的硝酸盐积累过多时, 又对硝化反应产生抑制; ④硝化过程产酸耗

碱, 反硝化过程产生碱度。A/O 工艺合理地解决了上述矛盾, 是目前应用最广泛的一种脱氮工艺, 然而 A/O 工艺脱氮效率一般为 50%~70%, 很难进一步提高^[1], 如何有效提高 A/O 工艺硝化反硝化效率, 降低出水氨氮和总氮质量浓度以及系统运行费用, 具有重要的意义。

1 材料与方法

1.1 试验装置与运行条件

反应器为聚氯乙烯塑料制作, 装置见图 1。反应器分为 6 个隔室(体积为 48 L), 前 2 个隔室缺氧运行, 后 4 个隔室好氧运行, 二沉池采用竖流式

收稿日期: 2003-11-21。

基金项目: 国家高技术研究发展基金资助项目(2003AA601010);
北京市教委重点资助项目(KZ200310005003); 北京市
重点实验室开发基金资助项目。

作者简介: 彭永臻(1949-), 男, 博士, 教授, 博士生导师。

(体积为 20 L). 试验进水、回流污泥和硝化液回流量采用蠕动泵控制, 温度由温控仪控制在 $21 \pm 1^\circ\text{C}$, 试验正常运行条件: 进水量为 144 L/d, HRT 为 8 h, SRT 为 12 ~ 13 d, 反应器中 MLSS 为 $2\,500 \pm 200\text{ mg/L}$, 进水碱度为 360 mg/L, 好氧区 DO 为 2 mg/L, 污泥回流比为 0.8, 内循环回流比为 2.5,

进水 COD、BOD 和氨氮质量浓度分别为 350 mg/L、200 mg/L 和 55 mg/L. 分别改变 DO、硝化液回流量、污泥回流量、SRT、进水 COD 与 TN 质量浓度比和 HRT 研究不同因素对系统脱氮效率的影响.

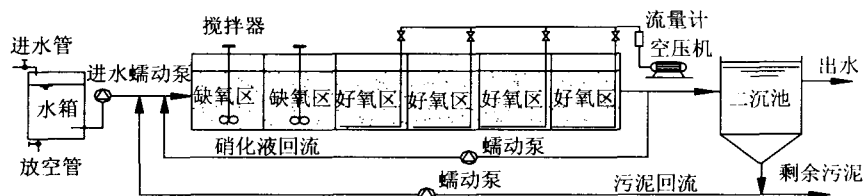


图1 A/O工艺试验模型图

1.2 试验用水与测试方法

采用模拟生活污水为考察对象, 通过控制不同的淀粉投量达到不同 COD 值, 投加 NaHCO_3 控制进水 pH 值为 6.5 ~ 8. 人工合成废水配方为 (g/L): 淀粉 (0.2 ~ 0.6), 氯化铵 (0.1 ~ 0.30), KH_2PO_4 (0.02 ~ 0.033), NaHCO_3 (0.05 ~ 0.15), $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (0.09), $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (0.03), $\text{FeSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (0.003).

试验中当系统达到稳定状态, 采用国家规定的标准方法分别测定 COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 、pH、总碱度、DO、ORP、MLSS, 水样值经过滤后测定. DO 测定采用 WTW-300i 溶解氧仪, pH 和 ORP 均采用 HANNA 测定仪.

2 结果与分析

2.1 DO 对脱氮效果的影响

如图2所示, 随着 DO 增加, 出水氨氮质量浓度逐渐降低, 当 DO 增至 1.5 mg/L 时, 出水氨氮质量浓度降为 3 mg/L, 氨氮去除率达到 94.5%, 硝化反应速率增加到 $0.057\text{ mg}/(\text{mgMLSS} \cdot \text{d})$, 出水总氮达到最低. 然而 DO 继续增加, 出水氨氮质量浓度降低有限, 硝化速率增加也不明显, 出水总氮质量浓度反而有轻微升高; 由于内循环不可避免带入 DO 进入缺氧区, 高 DO 会影响反硝化发生, 也意味着高能耗. 所以, 在出水氨氮满足系统排放标准的情况下, 尽可能降低污水厂曝气能耗^[2].

传统观点认为进行硝化反应须保持好氧区 DO 在 2.0 mg/L 以上, 而图2中 DO 增为 1.5 mg/L 时, 就可实现出水氨氮质量浓度达到 GB18918-2002 的一级排放标准, 可节约 25% 的曝气能耗, 所以需要根据进水氨氮质量浓度和排放标准来控制好氧区 DO. 根据上述分析获得 A/O 工艺

DO 控制策略: 以出水氨氮质量浓度来确定 DO 大小, 相应调节鼓风机阀门的开启度, 避免在进水氨氮质量浓度高时, 由于好氧区 DO 质量浓度较低, 造成出水氨氮质量浓度太高不能达标排放; 同时避免当进水氨氮质量浓度较低时, 由于好氧区 DO 质量浓度太高, 造成大量能量浪费.

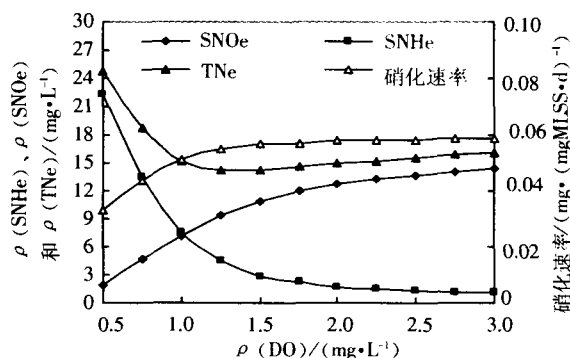


图2 DO 对出水氨氮、硝酸氮和总氮质量浓度的影响

2.2 混合液回流比 R 的影响

图3为连续改变内循环回流量时出水氨氮、硝酸氮和总氮质量浓度的变化情况. 当内循环回流比增至 1.75 时, 系统出水硝酸氮质量浓度达到最低, 系统总氮去除率也达到最高, 这与传统资料总回流比 R 与脱氮效率 R_N 呈 $R_N = R/(R+1)$ 的关系相矛盾. 试验证明回流比过低、过高均会使出水硝酸氮质量浓度过高, 并且内循环给系统带来一个不可忽视的问题, 因为硝化液中的 DO 对缺氧环境具有破坏作用, 当存在 DO 时, 反硝化菌总是优先利用 DO 作为电子受体氧化有机物, 反硝化过程因而被阻碍, 试验过程中, 发现进水中大量有机碳源被硝化液中 DO 所消耗. 另外内循环加大, 会造成系统出现短流, 增大动力消耗, 所以, 从总氮去除率和动力消耗两方面都应加强内循环的控制. 通过以上研究结果, 建立如下控制策略: 实时调整硝化液回流量的大小维持缺氧区末端硝氮

氮质量浓度处于 2 ~ 3 mg/L, 保证缺氧区硝酸氮充分, 高效利用缺氧区反硝化潜力, 同时避免过高的内循环回流量带来的问题。

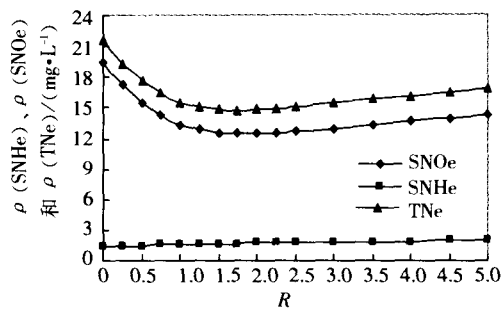


图 3 内循环对出水氨氮、硝酸氮和总氮质量浓度的影响

2.3 污泥回流比 r 的影响

图 4 为连续改变污泥回流比出水氨氮、硝酸氮和总氮质量浓度变化情况, 当污泥回流比 < 0.4 时, 系统硝化效果很差, 出水氨氮质量浓度很高, 当污泥回流比达到 0.6 后, 出水氨氮质量浓度为 3.2 mg/L, 氨氮去除率达到 94.2%, 总氮去除率达到 75%, 随着 r 的增加, 总氮去除率、氨氮和硝酸氮逐渐增加, 但变化不明显。最后根据试验获得, A/O 工艺的污泥回流比 r 取 60% ~ 100% 为宜, 最低也应在 40% 以上。

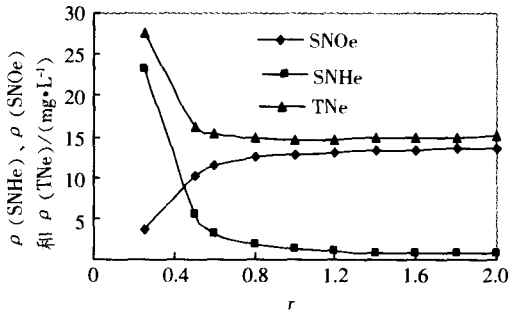


图 4 污泥回流比对出水氨氮、硝酸氮和总氮质量浓度影响

2.4 SRT 的影响

图 5 是连续改变 SRT 出水氨氮、硝酸氮和总氮质量浓度的变化情况, 当 SRT 为 8 d 时, 系统已达到较高的氨氮去除率, 随后逐渐减少污泥排放量增大 SRT, 总氮的去除率、氨氮和硝酸氮并没有明显增加, 相反系统的耗氧量增加。为了保证系统适量的硝化菌, 应合理控制 SRT 的大小, 在常温条件下, A/O 工艺的 SRT 一般取 8 ~ 12 d 为宜, 同时根据进水氨氮质量浓度进行合理的调整, 当进水氨氮质量浓度高时, 应减少污泥排放量, 增加硝化菌数量, 提高硝化速率, 降低出水氨氮质量浓度。

2.5 COD 与 TN 的质量质量浓度比的影响

试验中维持进水 COD 不变, 改变进水氨氮质量浓度以调整进水 COD 与 TN 质量质量浓度比,

图 6 是不同 COD 与 TN 质量质量浓度比时系统的硝化速率、总氮去除率以及对应的氮负荷。由图 6 可见, 随着 COD 与 TN 质量质量浓度比增加, 污水中可降解有机物质量浓度提高, 反硝化速率和总氮去除率逐渐提高, 按理论计算, COD 与 TN 质量质量浓度比在 4 左右基本可满足反硝化对碳源的需要, 但实际总氮去除率只能达到 50% 左右, 这是因为城市污水成分较复杂, 常常只有一部分快速生物降解 BOD 可以作为反硝化碳源, 为了使总氮去除率达到 80%, 应保持进水中 $\rho(\text{COD})/\rho(\text{TN}) > 8$ 。氮负荷增加总氮去除率下降, 当氮负荷 $> 0.05 \text{ kg}/(\text{kgMLSS} \cdot \text{d})$, 脱氮效率随着负荷增大直线下降。因此, 在城市污水脱氮处理中氮负荷值应 $< 0.05 \text{ kg}/(\text{kgMLSS} \cdot \text{d})$ 。另外随着 COD 与 TN 质量质量浓度比的增大可发现系统硝化速率降低, 当 COD 与 TN 质量质量浓度比由 3 增加到 10 时, 硝化速率也由 $0.103 \text{ kg}/(\text{kgMLSS} \cdot \text{d})$ 降到 $0.042 \text{ kg}/(\text{kgMLSS} \cdot \text{d})$ 。

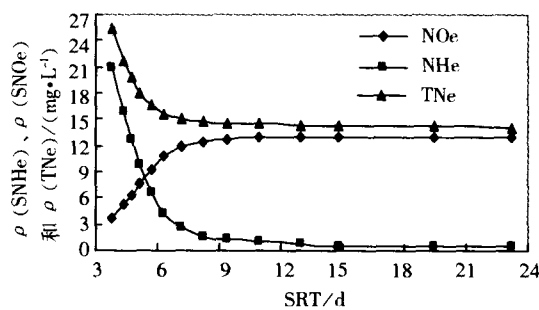


图 5 SRT 对出水氨氮、硝酸氮和总氮质量浓度的影响

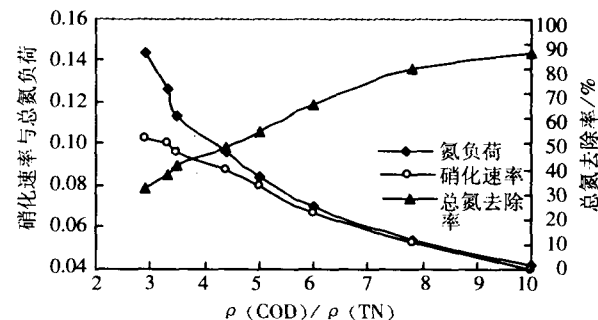


图 6 COD 与 TN 质量质量浓度比对硝化速度、总氮去除率和氮负荷影响

根据以上分析, 当进水 COD 与 TN 质量质量浓度比低时, 硝化速率增大, 当进水 COD 与 TN 质量质量浓度比高时, 反硝化速率增大, 应根据系统要求合理控制。当进水 COD 与 TN 质量质量浓度比很低时, 为提高 A/O 工艺反硝化速率, 应合理控制外碳源投量, 以尽可能少的外碳源投量最大程度地降低出水硝酸氮和总氮质量浓度^[4], 通过对内循环回流量的试验研究, 获得以下综合控制策略: 由于内循环回流动力能耗所需费用相对

于外碳源药剂投加费用低,首先以内循环控制策略控制内循环回流量,提高系统反硝化速率,如果无法实现出水总氮达标排放,需外投碳源到缺氧区,直至出水总氮满足排放标准。

2.6 水力停留时间的影响

图 7 为连续改变 HRT 时出水氨氮、硝酸氮和总氮质量浓度的变化情况,当 HRT 为 4 h 时,可以发现硝化效果很差,仅为 54.5%,出水氨氮质量浓度很高,相应总氮去除率也很低。当 HRT 增至 8 h 时,出水氨氮质量浓度已经很低,仅为 1.86 mg/L,氨氮去除率高达 96.6%,此时总氮去除率也达到 74.54%。进一步降低进水量,增大 HRT,虽然可以进一步提高硝化率和总氮去除率,降低出水氨氮的质量浓度,但增加有限。从本试验中发现维持 A/O 工艺 HRT 为 8 h 比较合理,相应反硝化和硝化反应的 HRT 分别为 2.6 h 和 5.4 h。对于不同的水质,由于硝化和反硝化速率不同,取得最佳脱氮效果的好氧区和缺氧区的体积比不同,根据试验结果建立如下控制策略:由于 GB18918-2002 排放标准对氨氮要求较高,系统设计和控制时,一般以首先满足系统硝化效果为主,如果提高好氧区 DO 达到规定的上限值,出水氨氮仍然高于排放标准,这时应增大好氧区容积,以调节参与硝化的硝化菌数量,直至出水氨氮质量浓度达标;当进水氨氮质量浓度很低时,系统很容易实现 100% 的硝化,但没有必要把出水氨氮质量浓度维持在很低甚至为 0,只需满足排放标准即可(可节约大量曝气能耗,减少污水厂运行费用),这时应减少好氧区容积大小,增大缺氧区容积,提高总氮去除率,还可以用一部分缺氧区进行厌氧放磷,增加系统除磷效果。

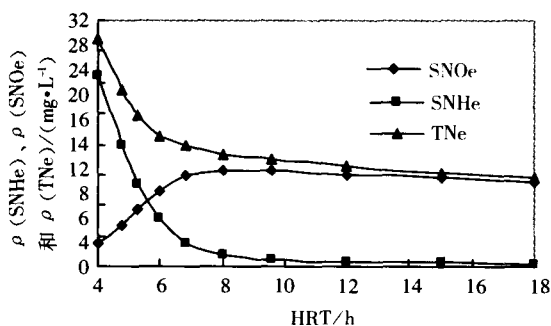


图 7 HRT 对出水氨氮、硝酸氮和总氮质量浓度的影响

3 A/O 工艺硝化反硝化专家系统

为了将各影响因素有机地联系起来,进行综合管理和控制,提高系统硝化和反硝化效率^[5],降低运行费用,建立了综合专家控制规则(如图 8 所示),随着氨氮、硝酸氮等在线仪的应用及普

及,建立基于在线仪信息基础上的智能控制是可行且必要的。假定 A/O 工艺设计出水氨氮为 1 mg/L,最大允许出水氨氮为 5 mg/L;缺氧区最后格室出水硝酸氮质量浓度为 2 mg/L(内循环控制试验获得,此时可以最大程度提高系统反硝化效率,降低出水总氮质量浓度),最大允许出水硝酸氮质量浓度为 10 mg/L,最大允许出水总氮质量浓度为 15 mg/L。图中数字符号代表不同的运行情况及采用的对策。

硝化控制过程:

① 表示系统硝化效果不好,原因是供氧不足,故控制系统提高 DO 质量浓度。

② 表示系统硝化和反硝化效果均不好,硝化不足的原因可能是硝化区容积不够,故加大好氧硝化区的体积。反硝化不足的原因可能是进水碳源不足,在此情况下,转到反硝化控制过程。

③ 表示反硝化较好,而硝化效果不好,其原因是硝化区容积偏小,故加大好氧硝化区的体积,增加硝化菌数量,提高系统硝化率。

④ 硝化效果即使在供氧充足,硝化区容积增至最大的条件下仍达不到要求。此时应采取增大污泥回流量,减小污泥排放量,提高曝气池污泥质量浓度;采用调节池减轻进水氨氮负荷对工艺的冲击等措施。

⑤ 表示硝化效果良好,运行状态维持不变。

⑥ 表示硝化已远远满足要求,进一步降低曝气强度,降低系统运行费用。

⑦ 表示在曝气强度降至最小时,系统仍能满足所要求硝化效果,运行状态维持不变。

⑧ 表示硝化已远远满足要求,应减小硝化区的容积,加大反硝化区容积。

⑨ 表示在硝化区的容积和 DO 质量浓度均已经降至最小条件下,硝化仍能远远满足要求,运行状态维持不变。

反硝化控制过程:

① 表示在缺氧区末端硝酸氮质量浓度没有维持在设定值 2 mg/L 处,试验证明在该设定值可以获得最高反硝化速率,出水总氮质量浓度也最低,所以应调整内循环回流量维持缺氧区末端硝酸氮质量浓度为 2 mg/L。

② 表明通过内循环控制策略不能使出水总氮满足排放要求,为了进一步提高系统反硝化速率,应外投有机碳源并对其控制。

③ 反硝化效果不足,可能是由于反硝化区内溶解氧质量浓度过高所致,此时应适当降低曝气区溶解氧质量浓度,降低内循环回流量,以减少通

过内循环而带入反硝化区的 DO 量。

④ 表示尽管出水硝酸氮质量浓度较低,总氮质量浓度已达标,但是硝化程度过低,故应采取提高硝化效果的措施,转到硝化控制过程。

⑤ 反硝化效果很好,运行状态维持不变,如果内循环回流量很大,为了减少系统能耗,可适当

降低内循环回流量。

⑥ 虽然出水总氮质量浓度满足规定,但出水硝酸氮质量浓度不满足要求,为了进一步降低出水硝酸氮质量浓度,需进行内循环回流量和外碳源投加控制,提高缺氧区反硝化速率。

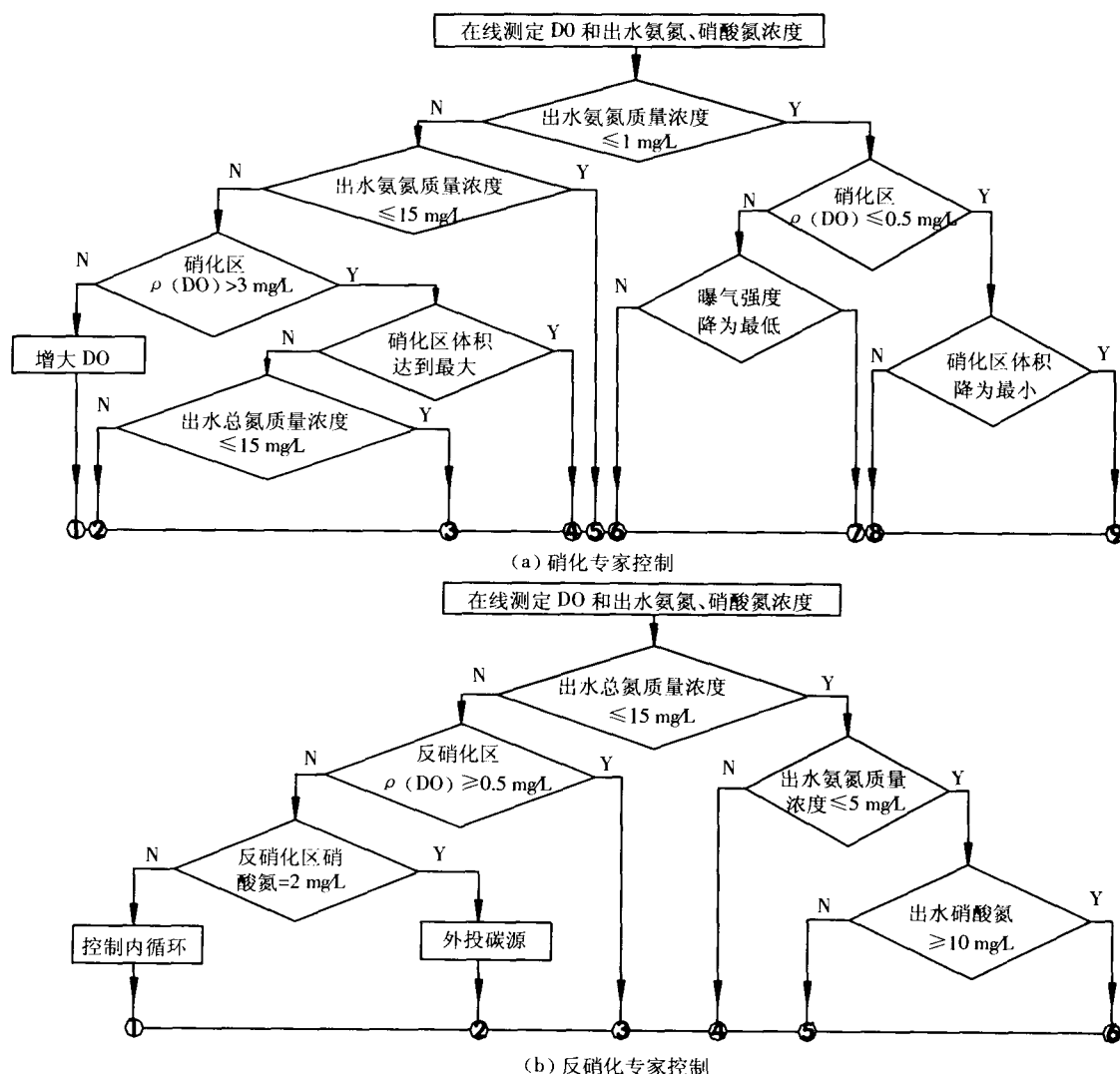


图8 A/O工艺硝化与反硝化专家控制策略

4 结 论

建立的提高污水厂硝化与反硝化反应效果的专家控制策略可以明显提高 A/O 工艺硝化和反硝化速率,提高系统总氮去除率,为解决当前大部分污水厂出水氨氮和总氮质量浓度不达标排放问题提供了有效的方法和思路。

参考文献:

- [1] OISSON G, NEWELL B. Wastewater Treatment System: Modeling, Diagnosis and Control [M]. London: IWA Publishing, 1999.
- [2] KALKER T J. Fuzzy control of aeration in an activated sludge wastewater treatment plant: Design, simulation and evaluation[J]. Wat Sci Tech, 1999, 39(4): 71 - 78.
- [3] ZHIGUO Y, ADRIAN O, INGLDSEN P. Control of nitrate recirculation flow in predenitrification systems[J]. Wat Sci Tech, 2002, 45(4-5): 29 - 36.
- [4] ZHIGUO Y, HERWIG B. Control of external carbon addition to predenitrifying systems[J]. Journal of Environmental Engineering, 1997, 123(11): 1080 - 1086.
- [5] MANESIS S A. Intelligent control of wastewater treatment plants[J]. Artificial Intelligence in Engineering, 1998, 12: 275 - 281.

(编辑 刘 彤)