

A/O 生物脱氮工艺内循环回流和外碳源投加综合控制的优化

马勇, 彭永臻*, 孙洪伟

(北京工业大学北京市水质科学与水环境恢复工程重点实验室, 北京 100022)

摘要: 为了提高 A/O 工艺反硝化效果, 应用 COST/IWA-Benchmark 基准对 5 种内循环回流量和外碳源投加综合控制策略进行了比较. 结果表明, 控制策略 1 无论从外碳源消耗量、出水水质, 还是从控制器稳定性上都是最优的控制策略, 它有 2 个反馈回路组成, 一个环路控制外碳源投加量, 从而维持缺氧区出水硝酸氮浓度处于最优设定值 2 mg/L, 另外一个环路控制内循环回流量, 维持好氧区出水硝酸氮浓度 (根据排放标准确定, 一般为 8 ~ 12 mg/L). 该策略在低负荷时可以高效利用缺氧区反硝化容量, 而在高负荷时通过控制外碳源投量保证出水硝酸氮满足排放标准.

关键词: 内循环回流; 外碳源投加; 综合控制策略; A/O 工艺

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)05-1203-07

Optimization of Nitrate Recirculation Flow and External Carbon Dosage Integrated Control for A/O Biological Nitrogen Removal Process

MA Yong, PENG Yong-zhen, SUN Hong-wei

(Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environmental Recovery Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: In order to improve A/O process denitrification efficiency, five integrated control strategies of nitrate recirculation flow and external carbon dosage for denitrification were proposed and evaluated using the COST/IWA simulation Benchmark. Results show that control strategy No.1 is the best integrated control strategies from both external carbon consumption, effluent quality, and the stability of controller. It comprises two feedback control loops: one is to determine the flow rate of external carbon source, keeping the nitrate concentration at the end of anoxic zone at a pre-specified level 2 mg/L, and the other is to adjust the flow rates of the nitrate recirculation to keep the nitrate concentration at the end of the aerobic zone at a pre-specified level based on the effluent quality (usually 8-12 mg/L). This strategy can guarantee highly effective use of anoxic denitrification capacity in the low-load condition, and meet effluent discharge standards through carbon dosage in the high-load condition.

Key words: nitrate recirculation flow; external carbon dosage; optimization; A/O process

生物脱氮需要 2 个过程: 硝化过程和反硝化过程. 硝化过程只是控制氮的转化形式, 并不能实现氮的有效去除, 反硝化过程才实现氮的真正去除. 与此同时, 城市污水处理厂排放标准对出水氮的要求逐渐严格, 因此对反硝化过程提出了越来越高的要求. 众所周知, 内循环回流量和外碳源投加量是 A/O 工艺反硝化反应重要的控制变量, 通过内循环把好氧区生成的硝态氮回流到缺氧区, 反硝化才会顺利进行. 但是内循环回流量过高和过低都不能实现系统的优化, 过低会造成缺氧区的反硝化潜力不能充分利用, 同时部分碳源流到好氧区, 增大系统耗氧量; 而回流量过高, 一方面增加回流所需费用, 同时会使好氧区大量的溶解氧进入缺氧区从而破坏反硝化环境^[1,2]. 然而当进水碳源不足时, 单独采用内循环回流量控制策略, 所起到的作用很有限, 并不能保证出水硝酸氮达标, 此时应外投碳源, 由于碳源费用较

高, 应严格控制其投量, 避免外碳源投加过量, 以及由此造成后续好氧池负荷和污泥处理费用增加^[3~5]; 当然单独控制外碳源也是不可取的, 一方面并不能保证硝化液充分回流到缺氧区, 另外当进水水质变化时, 造成出水总氮的波动^[6]. 由于上述 2 个控制变量对反硝化反应都具有重要的影响, 都以缺氧区出水硝酸氮浓度作为控制目标, 为了实现反硝化过程相对最优控制, 需要联合控制这 2 个变量, 进行内循环回流量和外碳源投加量的综合控制^[7,8]. 然而上述 2 个控制变量不能简单地组合在一起, 至今关于内循环回流和外碳源投加变量单独控制的研究

收稿日期: 2007-05-31; 修订日期: 2007-07-30

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金项目 (20060005002); 国家“十一五”科技支撑计划项目 (2006BAC19B03); 北京工业大学博士科研启动基金项目 (52005013200702)

作者简介: 马勇 (1976 ~), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为污水生物处理及其过程控制, E-mail: mayong@bjut.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: pyz@bjut.edu.cn

很多,但对其综合控制策略的研究很少,只有 Yuan 等^[7]和 Singman^[8]在该方面进行了一定研究.

1 内循环回流-外碳源投加综合控制策略

根据实际运行需要和控制的可能性,建立了以下 5 种综合控制策略.

控制策略 1[图 1(a)]:它有 2 个反馈控制环路组成,一个通过控制外碳源投加量(Q_{carbon}),维持缺氧区出水硝酸氮浓度 $S_{\text{NO,AN}}$ 处于设定值 $S_{\text{NO,AN,SP}}$;另外一个通过控制内循环回流量(Q_R),维持好氧区出水硝酸氮浓度($S_{\text{NO,AE}}$)处于设定值 $S_{\text{NO,AE,SP}}$.

控制策略 2[图 1(b)]:它也有 2 个反馈控制环路组成,一个环路控制外碳源投加量,把缺氧区出水硝酸氮浓度 $S_{\text{NO,AE}}$ 维持在设定值 $S_{\text{NO,AE,SP}}$.另外一个控制内循环回流量,维持缺氧区出水硝酸氮浓度($S_{\text{NO,AN}}$)处于设定值 $S_{\text{NO,AN,SP}}$.

控制策略 3[图 1(c)]:它有 3 个控制器组成,控制器 A 控制内循环回流量,从而维持缺氧区出水硝酸氮浓度 $S_{\text{NO,AN}}$ 处于设定值 $S_{\text{NO,AN,SP}}$,该控制环启动时,停止外碳源投加,随控制器 B 的关/开而开/关,它可保证在低负荷运行状态下最大程度的利用进水 COD 进行反硝化.控制器 B 控制内循环回流量,从而好氧区出水硝酸氮浓度 $S_{\text{NO,AE}}$ 维持在设定值 $S_{\text{NO,AE,SP}}$, $S_{\text{NO,AE,SP}}$ 的确定由排放标准确定,该控制器只有在出水 $S_{\text{NO,AE}}$ 超过设定值 $S_{\text{NO,AE,SP}}$ 时启动,同时控制器 C 也启动.PID 控制器 C 控制外碳源的投加量,从而缺氧区出水硝酸氮浓度 $S_{\text{NO,AN}}$ 维持在设定值 $S_{\text{NO,AN,SP}}$,它随 PID 控制器 B 的开/关而开/关.PID 控制器 A 控制进水负荷低时出水硝酸氮达标,PID B 和 PID C 控制进水负荷高时出水硝酸氮浓度达标,二者之间通过继电器 relay 调整.

控制策略 4[图 1(d)]:它有 2 个控制环路组成,

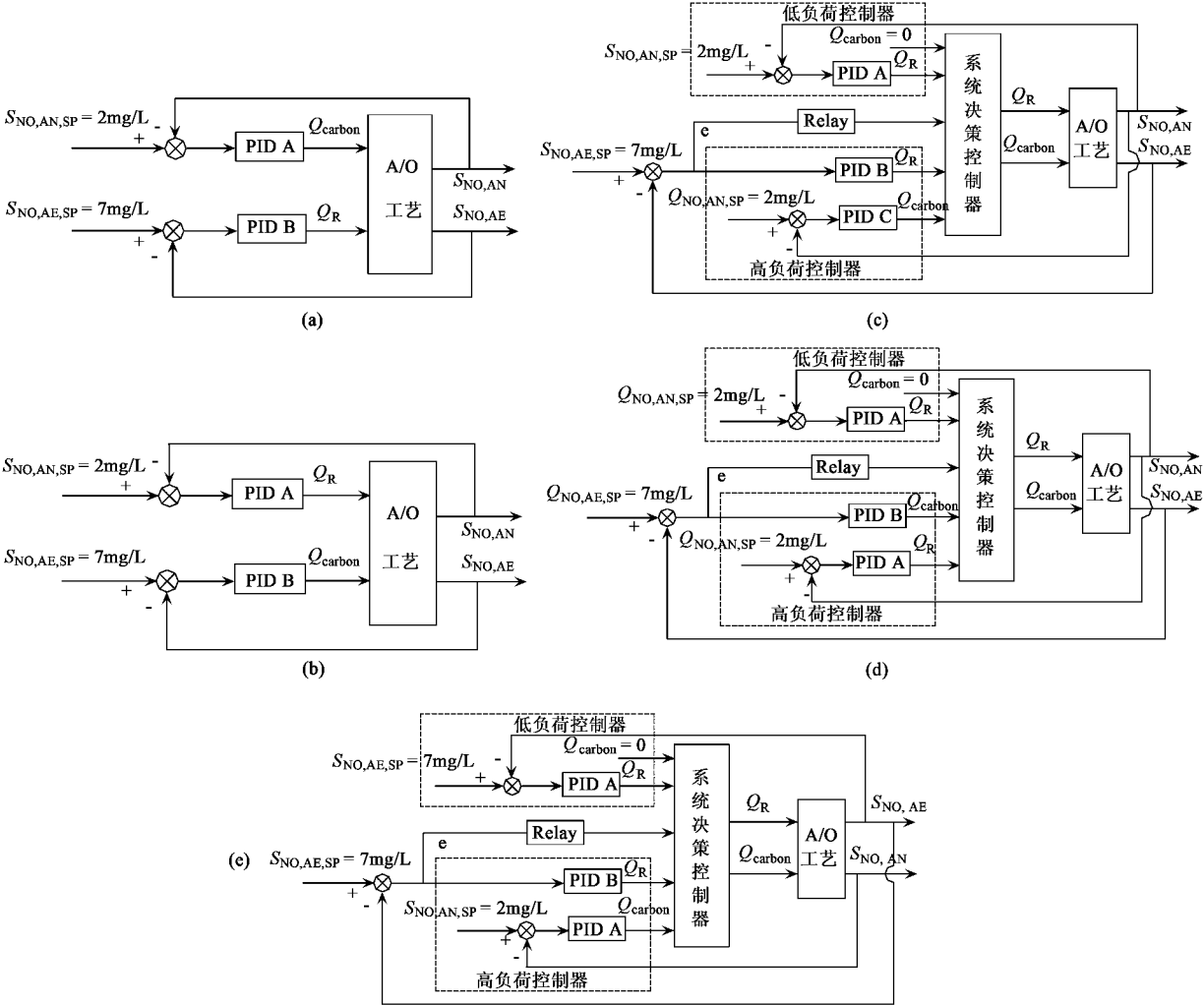


图 1 内循环回流量和外碳源投加量综合控制策略

Fig. 1 Integrated control strategies of nitrate recirculation and external carbon addition

无论高负荷还是低负荷控制器 A 都开启,通过控制内循环回流量,维持缺氧区出水硝酸氮浓度 $S_{\text{NO}, \text{AN}}$ 处于设定值 $S_{\text{NO}, \text{AN}, \text{SP}}$. 在低负荷条件 $S_{\text{NO}, \text{AE}}$ 低于设定值 $S_{\text{NO}, \text{AE}, \text{SP}}$ 时,关闭控制器 B;而在高负荷时,当出水 $S_{\text{NO}, \text{AE}}$ 浓度超过设定值 $S_{\text{NO}, \text{AE}, \text{SP}}$ 时打开控制器 B. 控制器 B 控制外碳源投加量,维持好氧区出水硝酸氮浓度 $S_{\text{NO}, \text{AE}}$ 处于设定值 $S_{\text{NO}, \text{AE}, \text{SP}}$, 控制器 B 的开关通过继电器 relay 调整.

控制策略 5[图 1(e)]: 也有 2 个控制环路组成,无论高负荷还是低负荷控制器 A 都开启,通过控制内循环回流量,维持好氧区出水硝酸氮浓度 $S_{\text{NO}, \text{AE}}$ 处于设定值 $S_{\text{NO}, \text{AE}, \text{SP}}$. 在低负荷 $S_{\text{NO}, \text{AE}}$ 低于设定值 $S_{\text{NO}, \text{AE}, \text{SP}}$ 时,关闭控制器 B 停止投加碳源;而在高负荷时,当出水 $S_{\text{NO}, \text{AE}}$ 浓度超过设定值 $S_{\text{NO}, \text{AE}, \text{SP}}$ 时打开控制器 B,控制器 B 控制外碳源投加量,维持缺氧区出水硝酸氮浓度 $S_{\text{NO}, \text{AN}}$ 处于设定值 $S_{\text{NO}, \text{AN}, \text{SP}}$, 控制器 B 的开关通过继电器 relay 调整.

图 1 中 PID A、PID B 和 PID C 都是具有反馈控制回路的 PID 控制器,继电器(relay)的设置为了避免控制器之间迅速转换,造成系统剧烈地振动.

2 材料与方法

试验中以 COST/IWA 提供的控制策略仿真平台作为基准(见文献[9]),应用 Matlab/Simulink 仿真工具对控制策略进行了研究,并以 BSM1 标准平台获

得的模拟结果作为基准和建立的 5 种综合控制策略进行比较,从而获得最优控制策略. BSM1 平台的基准运行条件为:好氧区前 2 个格室曝气量 K_{La} 为 240 d^{-1} ,最后好氧区 DO 浓度控制在 2.0 mg/L ,污泥回流量为 $18\,446 \text{ m}^3/\text{d}$,污泥排放量为 $385 \text{ m}^3/\text{d}$,控制内循环回流量维持缺氧区末端硝酸氮浓度为 1 mg/L [10].

外碳源投加 COD 浓度为 $1\,200 \text{ g/L}$,规定最大外碳源投加量不能超过 $3 \text{ m}^3/\text{d}$. 试验中采用旱季进水负荷(dryinfluent),以最后 7 d 的运行结果来评价和比较不同的控制策略. 仿真过程中为了简化估计和比较,假设在线传感器不存在噪音和滞后. 大量研究获得单独控制内循环回流量和外碳源投加量维持缺氧区出水硝酸氮浓度为 $1 \sim 2 \text{ mg/L}$ [11],基本上可实现它们的优化,为了比较所提出的控制策略,统一控制缺氧区末端的硝酸氮浓度维持在设定值 ($S_{\text{NO}, \text{AN}, \text{SP}}$) 2 mg/L ,而好氧区末端的硝酸氮浓度维持在设定值 ($S_{\text{NO}, \text{AE}, \text{SP}}$) 7 mg/L ,除对内循环回流量和外碳源投加量进行综合控制外,其它变量采用 BSM1 平台的设定值. 为避免系统剧烈地振动,设计继电器[如图 1(c)~(e)]以便在高负荷($e < 0$)和低负荷($e > 0.5 \text{ mg/L}$)之间稳定转换.

3 结果与分析

图 2~图 6 分别是控制策略 1~5 的仿真结果. 从中可知,应用控制策略 1、3、4 和 5,好氧区出水硝

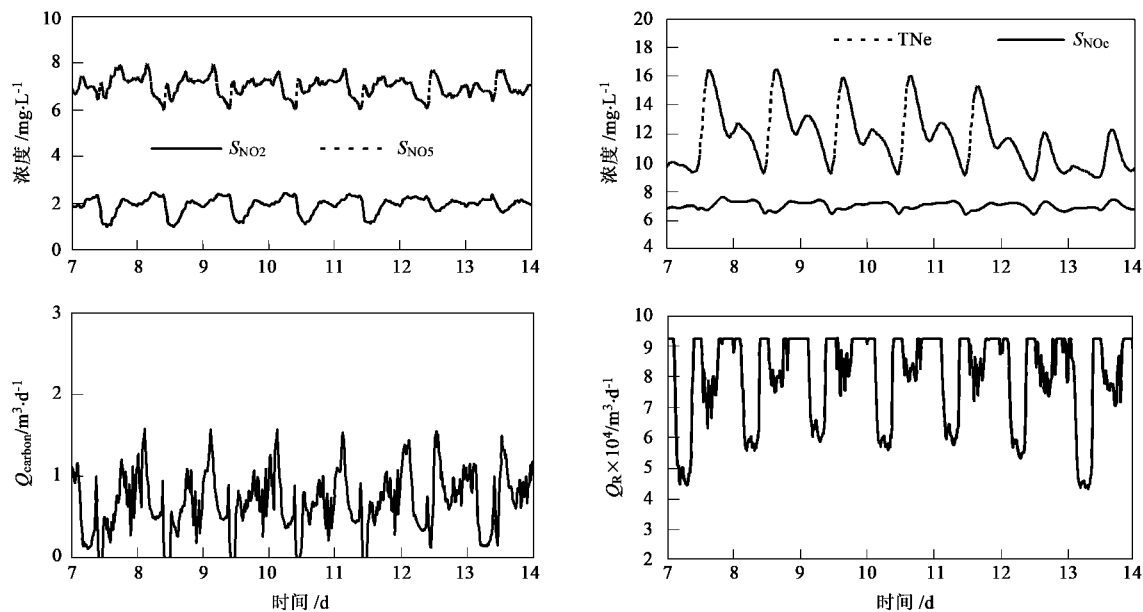


图 2 控制策略 1 的模拟结果
Fig.2 Simulation results of control strategy No.1

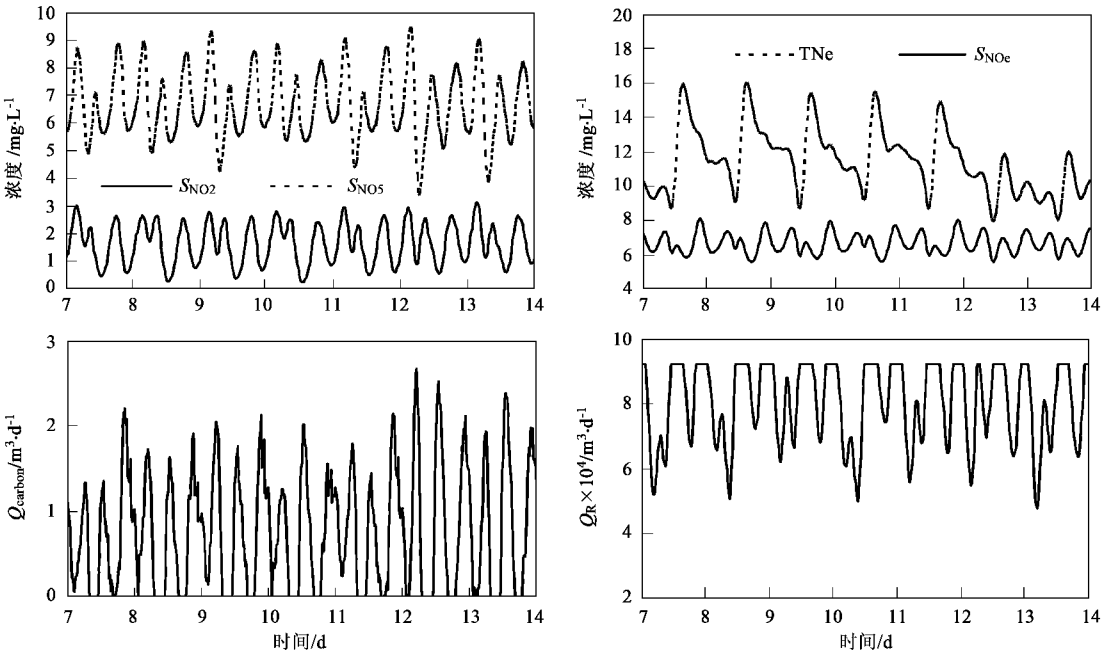


图 3 控制策略 2 的模拟结果
Fig.3 Simulation results of control strategy No. 2

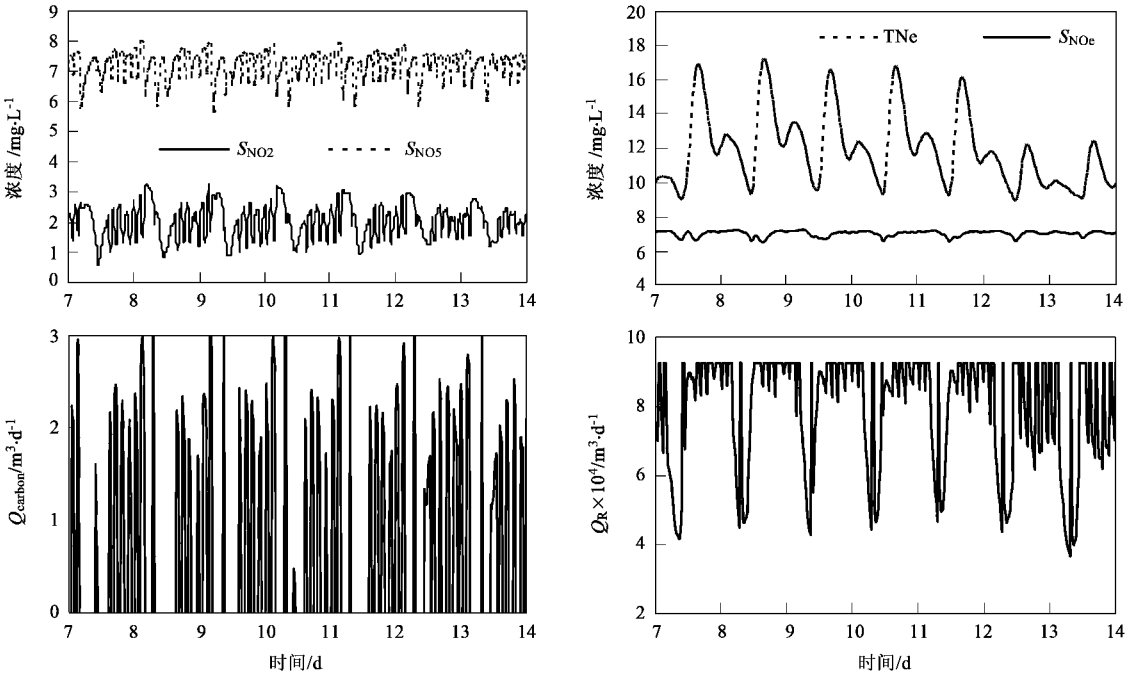


图 4 控制策略 3 的模拟结果
Fig.4 Simulation results of control strategy No. 3

酸氮浓度成功地维持在设定值 7 mg/L 附近. 虽然控制策略 5 出水硝酸氮浓度的标准偏差很高, 但是平均出水硝酸氮浓度为 7 mg/L. 而控制策略 2 的标准偏差和平均出水硝酸氮浓度分别为 1.22 mg/L 和

6.66 mg/L. 应用控制策略 1、3 和 4, 缺氧区出水硝酸氮浓度可成功控制在设定值 2 mg/L 附近. 应用控制策略 2, 缺氧区出水硝酸氮浓度的平均值为 1.66 mg/L. 应用控制策略 5 虽然缺氧区出水硝酸氮浓度

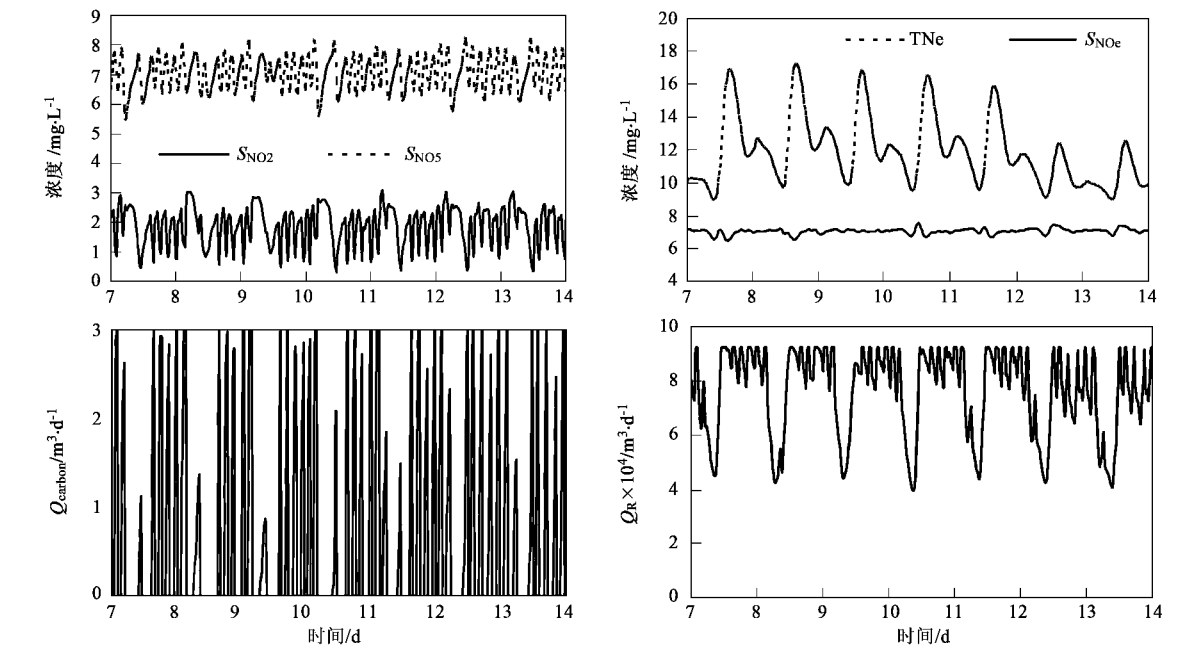


图 5 控制策略 4 的模拟结果

Fig.5 Simulation results of control strategy No. 4

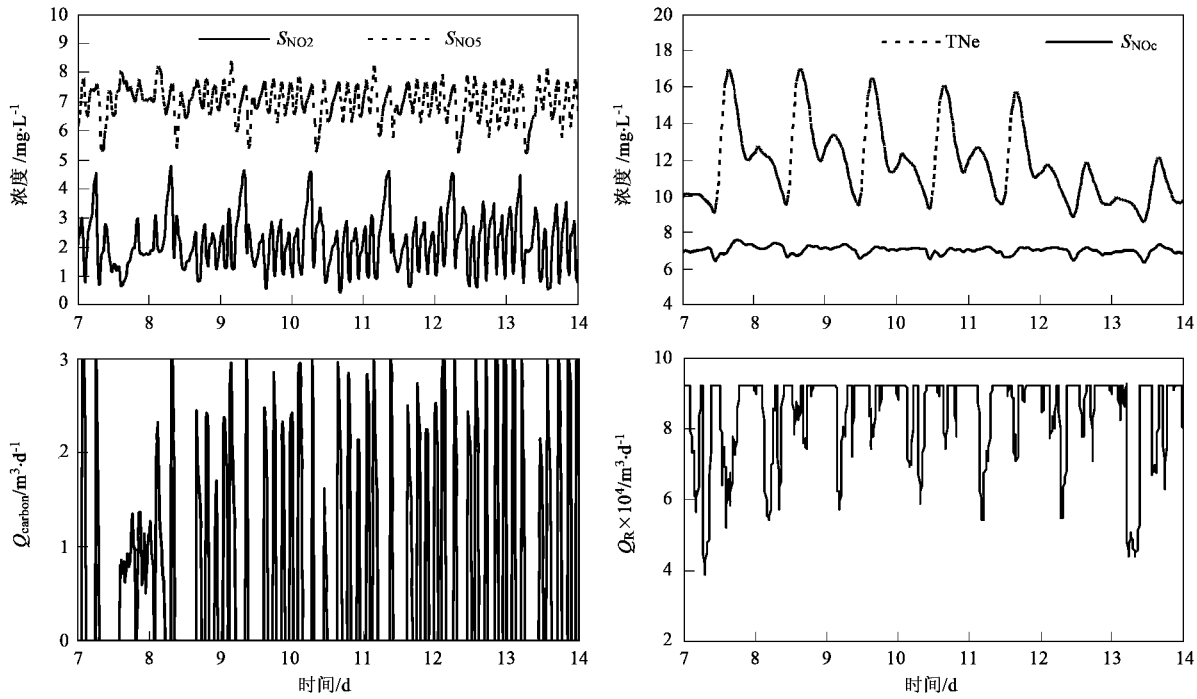


图 6 控制策略 5 的模拟结果

Fig.6 Simulation results of control strategy No. 5

平均值为 2.14 mg/L, 接近于设定值 2 mg/L, 但其标准偏差最大为 0.9. 对于缺氧区 2 格室硝酸氮控制器 (S_{NO2}), 应用控制策略 1 其标准偏差最小为 0.34. 实际运行表明应用上述 5 个控制策略在整个运行期间

都能保证出水 TN 浓度满足设定的排放标准 18 mg/L, 另外发现有些时间缺氧区和好氧区出水硝酸氮浓度都远远低于它们的设定值, 主要是进水负荷低的缘故, 此时内循环回流量已经达到最大设定值

(5 倍的平均进水量). 一般来说, 在低负荷运行期间(基本出现在夜间)应该增加内循环回流量, 维持缺氧区充足的硝酸氮, 从而最大程度的利用进水 COD. 而在高负荷运行期间(一般出现在白天), 降低内循环回流量, 维持缺氧区出水硝酸氮处于设定值. 因此在低负荷降低外碳源投量, 而在高负荷运行期间增加外碳源投加量, 高效利用外碳源.

表 1 总结了 5 个综合控制策略的试验结果. 正如前面所述, 为了比较不同控制策略, 应用 Benchmark 最初的设定平台作为基准, 显然所有综合

策略都可以大大提高出水水质. 和基准相比, 投加外碳源后, 平均出水硝酸氮浓度和总氮浓度分别降低了 42% ~ 47% 和 29% ~ 33%. 然而出水氨氮浓度增加了 3% ~ 12%, 主要原因是外投碳源后不可避免导致部分 COD 溢流到好氧区, 而溢流的碳源不可避免的消耗部分溶解氧, 一定程度上限制硝化反应. 通过对控制策略的比较可知, 控制策略 1 的出水氨氮浓度增加的较少, 而控制策略 3 和 4 出水氨氮浓度增加的较多.

由表 1 可知, 控制策略 3 和 4 所需外碳源投加

表 1 内循环-外碳源投加综合控制策略模拟结果
Table 1 Simulation results of integrated control strategies and reference control

评价标准 ¹⁾	基准	策略 1	策略 2	策略 3	策略 4	策略 5
EQ/kg·d ⁻¹	7 556.5	5 716.8	5 640.8	5 793.3	5 798.0	5 753.9
PE/(kW·h)·d ⁻¹	1 488.1	3 955.8	3 965.6	3 929.1	3 805.4	4 139.6
AE/(kW·h)·d ⁻¹	7 241.0	7 415.6	7 442.3	7 410.1	7 410.5	7 413.0
PS _{disp} /kg·d ⁻¹	2 440.6	2 677.6	2 715.8	2 673.6	2 677.9	2 688.9
PS _{total} /kg·d ⁻¹	2 675.5	2 924.7	2 962.5	2 918.9	2 923.4	2 934.8
平均出水硝酸氮/mg·L ⁻¹	12.44	7.0	6.65	7.04	7.06	7.0
平均出水氨氮/mg·L ⁻¹	2.53	2.65	2.79	2.87	2.84	2.76
平均出水 TN/mg·L ⁻¹	16.93	11.70	11.45	11.96	11.94	11.82
平均出水 COD/mg·L ⁻¹	48.22	49.15	49.16	49.03	49.04	49.07
平均外投碳源/m ³ ·d ⁻¹	0	0.689	0.774	0.656	0.668	0.712
出水超标时间 ²⁾	S _{NH} /%	18.30	18.46	19.19	21.13	20.68
	TN/%	17.26	0	0	0	0
S _{N02} 控制器	2 室硝酸氮/mg·L ⁻¹	1.0	1.95	1.66	1.99	1.88
	最大值/mg·L ⁻¹	1.54	2.36	3.13	3.29	3.05
	最小值/mg·L ⁻¹	0.11	1.09	0.4	0.72	0.32
	误差标准偏差	0.29	0.34	0.74	0.57	0.64
	误差的变化	0.09	0.11	0.55	0.32	0.40
S _{N05} 控制器	5 室平均硝酸氮/mg·L ⁻¹	—	7.0	6.66	7.01	7.05
	最大值/mg·L ⁻¹	—	7.91	9.42	8.06	8.26
	最小值/mg·L ⁻¹	—	6.00	3.48	5.61	5.45
	误差标准偏差	—	0.39	1.22	0.47	0.56
	误差的变化	—	0.15	1.49	0.22	0.31

1) EQ: 出水水质指标, PE: 泵能耗指标, AE: 曝气能耗指标, PS_{disp}: 平均污泥处置量, PS_{total}: 平均污泥的总产量; 2) 系统运行过程中出水氨氮浓度 > 4 mg/L 或出水 TN > 18 mg/L 的时间占总运行时间的百分比

量较少(控制策略 3 所需的外碳源量最少), 控制策略的中心思想是在低负荷运行期间最大程度利用进水 COD, 使出水硝酸氮浓度尽可能降低, 而在高负荷运行期间维持出水硝酸氮浓度在允许的设定值处. 在所有控制策略中, 控制策略 2 和 6 的外碳源消耗量较高(策略 2 外碳源消耗量最大). 控制策略 2 消耗外碳源量大的原因是不管在低负荷运行期间还是高负荷运行期间一直投加外碳源, 并且以维持好氧区出水硝酸氮浓度为 7 mg/L 来对外碳源投加进行控制, 因此有一定的滞后, 不可避免导致外碳源溢流到好氧区. 对应于控制策略 5, 为了维持好氧区出水

硝酸氮浓度处于设定值 7 mg/L, 必须提高内循环回流量来保证缺氧区硝酸氮浓度充足, 因此较多的外碳源溢流到好氧区, 导致外碳源消耗较多.

在所有控制策略中, 控制策略 6 的内循环回流能耗较高[4 139.6 (kW·h)/d]. 而所有控制策略的曝气能耗基本上一致. 控制策略 2 的出水水质最好(5 640.8 kg/d), 但是所需的外碳源投量也最大(平均外碳源投量为 0.774 m³/d). 和控制策略 1 和 2 相比较, 控制策略 3 和 4 的平均出水 TN 浓度较高. 但是控制策略 2 和控制策略 1 相比, 外碳源消耗量增加了 12%. 所有控制策略对出水 COD 的影响很小.

结合综合控制目标(最大值、最小值、标准偏差和偏差变化量)控制策略 1 的 S_{NO2} 控制器和控制策略 5 的 S_{NO5} 控制器(好氧区第 5 室硝酸氮控制器)都优于其它控制策略。

基于以上分析,无论从外碳源消耗量、出水水质,还是控制器的稳定性上,控制策略 1 是所有综合策略中对内循环回流量和外碳源投加量的最优控制策略.该控制策略在低负荷时可以高效利用缺氧区反硝化容量,最大程度的利用进水 COD 进行反硝化,而在高负荷时通过控制外碳源投量可以较准确地维持出水硝酸氮满足排放标准。

4 结论

内循环回流和外碳源投加是 A/O 工艺反硝化反应重要的控制变量,为了提高 A/O 工艺脱氮效果,降低系统运行费用,需要综合控制内循环回流量和外碳源投加量.根据实际需要建立了 5 个综合控制策略,应用 COST/IWA Benchmark 模型标准对其进行了模拟仿真研究.研究获得控制策略 1 是所有综合策略中最好的,采用该策略外碳源消耗量最大可以降低 12%、出水 TN 去除率提高了 31%,另外被控制变量可以稳定的维持在设定值附近,系统鲁棒性强.它有 2 个反馈控制环路组成,一个环路用来确定外碳源投加量,维持缺氧区出水硝酸氮浓度处于设定值 2 mg/L,另外一个环路用来控制内循环回流量,维持好氧区出水硝酸氮浓度(该设定值根据出水排放标准的要求确定,一般取 8~12 mg/L).该控制策略在低负荷时可以高效利用缺氧区反硝化容量,最大程度的利用进水 COD 进行反硝化,而在高负荷时

通过控制外碳源投量可以保证出水硝酸氮满足排放标准。

参考文献:

[1] Yuan Z G, Addrian O, Pernille I. Control of nitrate recirculation flow in predenitrification systems [J]. Wat Sci Tech, 2002, 45(4/5), 29-35.

[2] 彭永臻, 马勇, 王洪臣, 等. A/O 脱氮工艺内循环控策略的建立与研究[J]. 北京工业大学学报, 2004, 30(2):201-206.

[3] 马勇, 彭永臻, 王淑莹. A/O 脱氮工艺外碳源投加控制器及其仿真研究[J]. 高技术通讯, 2004, 14(9):106-110.

[4] Yuan Z, Bogaert H, Vanrolleghem P. Control of external carbon addition to predenitrifying systems [J]. J Environ Engr, 1997, 123(11): 1080-1086.

[5] Samuelsson P, Carlsson B. Feedforward control of the external carbon flow rate in an activated sludge process [J]. Wat Sci Tech, 2001, 43(1):115-122.

[6] Wang X L, Peng Y Z, Ma Y, et al. Simulation of Integrated Control Strategies for Improving Nitrogen Removal and Reducing External Carbon Dosage [A]. The 2nd International Conference on Instrumentation, Control and Automation[C]. Korea, Busan, 2005.

[7] Yuan Z, Keller J. Integrated Control of Nitrate Recirculation and External Carbon Addition in a Pre-denitrification System [J]. Wat Sci Tech, 2003, 48(11/12): 345-354.

[8] Singman J. Efficient control of wastewater treatment plant-a benchmark study [D]. Uppsala University, 1999.

[9] Copp J B. Defining a simulation benchmark for control strategies [J]. Water, 2000, 21: 44-49.

[10] Copp J B. The COST Simulation Benchmark-Description and Simulator Manual [M]. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 2000.

[11] Ma Y, Peng Y Z, Wang S Y, et al. Fuzzy Control of Nitrate Recirculation and External Carbon Addition in A/O Nitrogen Removal Process [J]. Journal of Chinese Chemical Engineering, 2005, 13(2): 244-249.