

陈文亮,姚重华,吕锡武. 2013. 活性污泥工艺的多目标优化分析[J]. 环境科学学报, 33(7): 1918-1925

Chen W L, Yao C H, Lü X W. 2013. Analysis of activated sludge process by multi-objective optimization[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 33(7): 1918-1925

活性污泥工艺的多目标优化分析

陈文亮^{1,2}, 姚重华^{1,*}, 吕锡武^{2,*}

1. 华东理工大学, 资源与环境工程学院, 上海 200237

2. 东南大学, 能源与环境学院, 南京 210096

收稿日期: 2012-10-29 修回日期: 2013-01-01 录用日期: 2013-01-04

摘要: 研究了多目标优化方法在活性污泥工艺优化中应用的可行性, 以国际水协(IWA)发布的基准仿真模型 BSM1 的工艺流程为对象, 以出水水质、过程能耗和反应池体积的指标为优化目标, 以反应池池容(5个)、混合液回流量、污泥回流量、污泥排放量、反应池氧气传质系数(3个)等 11 个变量为决策变量, 构建了基于 BSM1 的多目标优化模型, 并利用 MatLab 非支配排序遗传算法 NSGA-II 进行求解, 获得了 BSM1 多目标优化模型的 Pareto 解。研究表明, 在 Dry 进水条件下, 通过将体积指标增大 4.1%, 可以明显改善出水水质指标(降低 81.5%), 能耗指标也能得到一定改善(降低 13.3%); 在 3 种进水条件(Dry, Rain, Storm)下, 相对于 BSM1 工艺参数的缺省值, 利用本研究的优化解作为工艺参数, 均能不同程度改善出水水质、降低能耗。研究结果显示, 在活性污泥过程不同目标之间进行权衡可以通过多目标优化方法来实现。

关键词: 多目标优化; 活性污泥; BSM1; 权衡

文章编号: 0253-2468(2013)07-1918-08 中图分类号: X703 文献标识码: A

Analysis of activated sludge process by multi-objective optimization

CHEN Wenliang^{1,2}, YAO Chonghua^{1,*}, LÜ Xiwu^{2,*}

1. School of Resources and Environment Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237

2. School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096

Received 29 October 2012; received in revised form 1 January 2013; accepted 4 January 2013

Abstract: The feasibility of applying the method of multi-objective optimization in analysis of the activated sludge process was studied. A benchmark process in BSM1 issued by IWA was taken as a target process. Three indexes of effluent quality, energy consumption, and total volume of reactors were the objectives. The volumes (for each of 5 reactors), mixed liquor return rate, sludge return rate, excess sludge wasting rate, oxygen transfer coefficients (in each of 3 reactors) were the decision variables. The model of multi-objective optimization was solved by the non-dominated sorting genetic algorithm II (NSGA-II) in MatLab, and the Pareto solutions were obtained. Results show that under the condition of Dry weather influent, increasing the volume index by 4.1% may enhance the effluent quality index by 81.5% and the energy consumption index by 13.3%. Under all influent conditions (Dry, Rain, Storm), taking Pareto solutions as process parameters, all performance indexes are better than with the default process parameters of BSM1. The results indicate that the trade-offs among different objectives of the activated sludge process may be achieved by using the method of the multi-objective optimization.

Keywords: multi-objective optimization; activated sludge process; BSM1; trade-offs

1 引言 (Introduction)

随着公众对水环境关注的提高以及节能减排政策的实施, 污水处理厂如何在使出水水质达标排放的前提下尽量减小能源(电耗和药剂)的消耗是其面临的主要困难, 因此, 作为被大多数城镇污水处理厂采用的活性污泥工艺是近年研究的重点(段

连钧等, 2010; 吕锡武等, 2000; 王荣昌等, 2011; 姚重华等, 2010a; 张代钧等, 2002; 周霄等, 2001)。

活性污泥处理系统是一个非常复杂的动态系统(姚重华等, 2010b; 赵麟菱, 2007)。主要因为: ①活性污泥工艺涉及到各种物理、化学、生物反应以及物理流态的问题; ②进水的水量水质不稳定, 变化幅度较大; ③系统相对开放, 受外界环境的影响

基金项目: 教育部科学研究重大项目(No. 308010); 江苏省科技支撑计划(No. BS2008667); 国家“十二五”重大专项(No. 2012ZX07101-005)

Supported by the Major Program on Scientific Research of Ministry of Education(No. 308010), the Key Technology R&D Program of Jiangsu Province (No. BS2008667) and the National Twelfth Five-year Major Projects (No. 2012ZX07101-005)

作者简介: 陈文亮(1987—), 男, 博士生, E-mail: supercliang@163.com; * 通讯作者(责任作者), E-mail: chhyao@ecust.edu.cn(姚重华), E-mail: xiwulu@seu.edu.cn(吕锡武)

Biography: CHEN Wenliang(1987—), male, Ph. D. candidate, E-mail: supercliang@163.com; * **Corresponding author**, E-mail: chhyao@ecust.edu.cn(YAO Chonghua), E-mail: xiwulu@seu.edu.cn(LÜ Xiwu)

较大,例如温度、天气等.显然,活性污泥系统作为一种复杂的系统,其需要满足的目标不止一个(Flores-Alsina *et al.*, 2008):①出水水质达标是其首要目标,也是满足其它目标的前提;②污水处理厂的基建投资和运行费用要尽量小,主要与占地面积和曝气能耗、泵能耗等有关;③污水处理系统要运行稳定,能够经受一定的水量水质冲击.要想同时满足这几个目标,就需要根据不同的条件调整合适的工艺运行参数.先前的研究主要集中在单目标的优化上面(Hernández-Suárez *et al.*, 2004; Holenda *et al.*, 2007; Rivas *et al.*, 2008),往往是针对污水处理工艺进行的能耗分析(Machado *et al.*, 2009; 吴杰等, 2012).这种方法虽然可行,但不能反映出各个目标之间的权衡关系.近几年有学者对污水处理工艺进行了多目标的分析研究(Biswas *et al.*, 2007; Flores-Alsina *et al.*, 2008; 2010; Hakanen *et al.*, 2011),不过这些研究主要侧重于污水处理工艺的控制策略上面(Beraud *et al.*, 2008; Flores-Alsina *et al.*, 2010),而且涉及到工艺中的设计参数较少.

以国际水协(IWA)发布的基准仿真模型 BSM1 的工艺流程为对象进行了多目标的优化分析,选取了出水水质指标、过程能耗指标和生化反应池的体积指标作为 3 个优化目标,各个生化反应池的容积(5 个)、氧气传质系数(3 个)、污泥回流量、混合液回流量、污泥排放量作为决策变量.在不同进水条件下将优化后的结果与采取缺省值的结果进行比较,说明多目标优化在活性污泥工艺优化中的应用性问题.

2 实验材料与方法(Materials and methods)

2.1 BSM1 模型

为了对不同工艺参数下系统性能的好坏进行对比分析,选取基准仿真模型 BSM1 的工艺流程(Copp, 2002)作为研究的对象,流程如图 1 所示. BSM1 工艺比较简单,包括 5 个生化反应池和 1 个沉淀池,容积分别为: 1000m^3 、 1000m^3 、 1333m^3 、 1333m^3 、 1333m^3 、 6000m^3 .其中前 2 个生化池作为缺

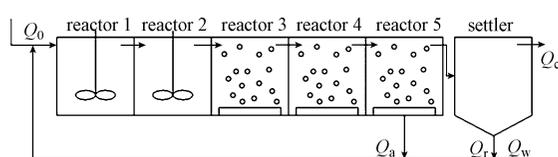


图 1 BSM1 中工艺流程图
Fig. 1 Schematic diagram of BSM1

氧池,主要将 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 转化为 N_2 ,进行反硝化作用;后 3 个作为好氧池,主要将 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 转化为 $\text{NO}_3^- - \text{N}$,进行硝化作用. BSM1 工艺流程具有除碳脱氮的功能.

2.2 进水数据

BSM1 中包含 3 种天气(Dry, Rain 和 Storm)各 14 天的动态进水数据,取样间隔为 15min,首先用 Dry 天气下的进水数据对 BSM1 工艺流程进行多目标优化的求解分析,然后用 Rain 和 Storm 天气下的进水数据对求解结果和缺省值作进一步分析比较. Dry 天气下进水的组分浓度变化如图 2 所示.

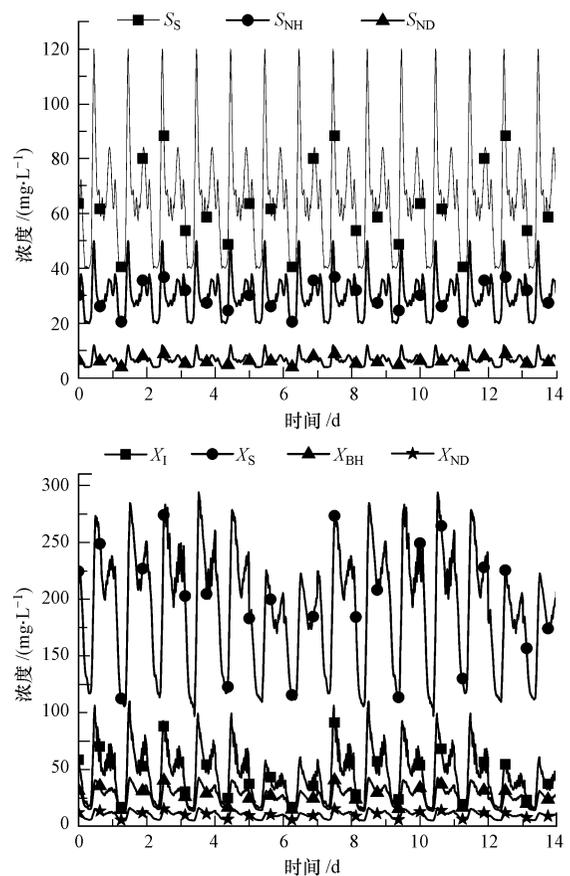


图 2 Dry 天气下的进水数据(易降解有机碳 S_s , 缓慢降解有机碳 X_s , 可溶性降解有机氮 S_{ND} , 颗粒状降解有机氮 X_{ND} , 溶解氧 S_0 , 氨氮 S_{NH} , 硝态氮 S_{NO} , 碱度 S_{ALK} , 异养菌 X_{BH} , 自养菌 X_{BA} , 可溶性有机碳 S_1 , 颗粒惰性有机碳 X_1 , 微生物衰减产物 X_p)

Fig. 2 Dry weather influent

BSM1 中工艺的生化反应池采用 ASM1 模型,共包含 13 种组分,其浓度符号为:易降解有机碳 S_s , 缓慢降解有机碳 X_s , 可溶性降解有机氮 S_{ND} , 颗粒状降解有机氮 X_{ND} , 溶解氧 S_0 , 氨氮 S_{NH} , 硝态氮 S_{NO} ,

碱度 S_{ALK} , 异养菌 X_{BH} , 自养菌 X_{BA} , 可溶性有机碳 S_1 , 颗粒性有机碳 X_1 , 微生物衰减产物 X_P ; 二沉池采用固体通量模型 (Takács *et al.*, 1991).

2.3 多目标优化模型的建立

2.3.1 优化目标 a. 出水指标超标次数 (Number of

Effluent Violation, NEV): BSM1 对出水 COD、BOD₅、NH₄⁺-N、TN (总氮)、TSS (总悬浮颗粒物) 进行了限定, 具体数值如表 1 所示. 从 BSM1 最后 7 天的出水数据中查看超过该标准的次数, 所有组分超标次数的总和作为该目标的值.

表 1 BSM1 对出水组分浓度的限定

Table 1 Effluent limits in BSM1				
COD	BOD ₅	NH ₄ ⁺ -N	TN	TSS
100	10	4	18	30

b. 能耗指标 (Overall Cost Index, OCI, 单位: kWh·d⁻¹): 选取 BSM1 工艺中的曝气能耗、各种泵能耗和污泥处理能耗的总和作为该目标的值. 具体的计算公式见公式 (1) ~ (7):

曝气能耗 (Aeration Energy, AE, 单位: kWh·d⁻¹):

$$AE = \frac{24}{T} \int_{t_0}^{t_7} \sum_{i=1}^5 [0.4032 \cdot K_L a_i(t)^2 + 7.8408 \cdot K_L a_i(t)] \cdot dt \quad (1)$$

式中, $K_L a_i(t)$ 为曝气池中的氧气传质系数.

泵能耗 (Pumping Energy, PE, 单位: kWh·d⁻¹):

$$PE = \frac{0.04}{T} \int_{t_0}^{t_7} [Q_a(t) + Q_r(t) + Q_w(t)] \cdot dt \quad (2)$$

式中, $Q_a(t)$ 为混合液回流速率 (m³·d⁻¹), $Q_r(t)$ 为污泥回流速率 (m³·d⁻¹), $Q_w(t)$ 为排泥量 (m³·d⁻¹).

污泥排放量 (Sludge Production to be disposed, SP, 单位: kg·d⁻¹):

系统中的污泥量

$$TSS(t) = TSS_a(t) + TSS_s(t) \quad (3)$$

其中, $TSS_a(t)$ 是生化反应池中的污泥量:

$$TSS_a(t) = 0.75 \cdot \sum_{i=1}^n (X_{S,i} + X_{I,i} + X_{BH,i} + X_{BA,i} + X_{P,i}) \cdot V_i \quad n=5 \quad (4)$$

$TSS_s(t)$ 是沉淀池中的污泥量:

$$TSS_s(t) = 0.75 \cdot \sum_{j=1}^m (X_{S,j} + X_{I,j} + X_{BH,j} + X_{BA,j} + X_{P,j}) \cdot z_j \cdot A \quad m=10 \quad (5)$$

污泥排放量 SP:

$$SP = \frac{1}{T} (TSS(14) - TSS(7) + 0.75 \cdot \int_{t=7}^{14} (X_{S,w} + X_{I,w} + X_{BH,w} + X_{BA,w} + X_{P,w}) \cdot Q_w(t) \cdot dt) \quad (6)$$

则 OCI = AE + PE + 5 · SP (7)

c. 体积指标 (Total Volume, TV, 单位: m³): 该目标就是 BSM1 工艺中 5 个生化反应池体积的总和, 它一定程度决定着基建费用和水力停留时间. 计算公式见公式 (8):

$$TV = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5 \quad (8)$$

上述公式中的参数值取自文献 (Copp, 2002).

2.3.2 决策变量 决策变量的取值直接或间接影响着优化目标的值, 选取了 BSM1 工艺流程中的 11 个工艺参数作为多目标优化模型的决策变量.

a. 每个生化反应池的体积 V_i (单位: m³): 这 5 个决策变量的取值主要反映了缺氧段和好氧段的水力停留时间, 影响到了优化目标 TV 的值.

b. 混合液回流速率 $Q_a(t)$ 、污泥回流速率 $Q_r(t)$ 、排泥量 $Q_w(t)$ (单位: m³·d⁻¹): 这 3 个决策变量对生化反应池中的污泥浓度的维持和氮的去除非常重要, 同时影响到泵能耗的计算结果.

c. 氧气传质系数 $K_L a$ (单位: d⁻¹): 决定后 3 个曝气池中的溶解氧浓度大小以及曝气能耗的大小.

这 11 个决策变量的取值范围以及缺省值如表 2 所示. 它们的变化范围构成 BSM1 多目标优化模型的可行域.

表 2 决策变量的缺省值及取值范围

Table 2 The default, lower and upper values for decision variables											
决策变量	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	Q_a	Q_r	Q_w	$K_L a_3$	$K_L a_4$	$K_L a_5$
	/m ³	/(m ³ ·d ⁻¹)	/(m ³ ·d ⁻¹)	/(m ³ ·d ⁻¹)	/d ⁻¹	/d ⁻¹	/d ⁻¹				
缺省值	1000	1000	1333	1333	1333	55338	18446	385	240	240	84
下限	300	300	300	300	300	0	0	0	0	0	0
上限	1500	1500	2000	2000	2000	70000	25000	700	300	300	300

2.3.3 多目标优化模型

$$\text{Minimize } f = (\text{NEV}, \text{OCI}, \text{TV})^T$$

Subject to $X \in S$,

Where $X = (V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, Q_a, Q_r, Q_w, K_L a_3, K_L a_4, K_L a_5)^T$. X 为 11 个决策变量, S 为可行域.

2.4 多目标优化模型的仿真平台、求解方法及流程

多目标优化模型的程序使用 MatLab 中的 M-文件来编写,多目标求解方法采用非支配排序遗传算法 II (non-dominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II) (Deb *et al.*, 2002), 具体计算的流程如图 3 所示:首先 NSGA-II 算法产生 11 个决策变量的值,通过参数传递系统传到 BSM1 模型里面;模型在该组值情况下进行计算,得到 3 个优化目标的值,由

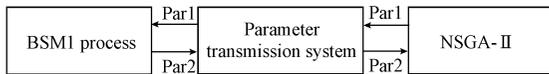


图 3 BSM1 多目标优化模型的计算流程 (Par1 代表 11 个决策变量的值, Par2 代表 3 个优化目标值)

Fig. 3 Calculation-flow for the Multi-Objective Optimization model of BSM1 (Par1 represents values of decision variables, Par2 is values of objectives)

参数传递系统传给 NSGA-II 算法进行分析比较,产生父代,进而产生子代,然后进行下一循环的计算.

NSGA-II 算法的参数设置如表 3 所示.

表 3 MatLab 中 NSGA-II 算法参数设置

参数	值
种群大小	165
迭代次数	100
变异概率	0.1
交叉概率	1.0

3 结果 (Results)

3.1 建立模型的准确性

BSM1 工艺模型中的动力学参数和化学计量系数采用缺省值 (Copp, 2002), 用 14 天 Dry 天气下动态的进水数据对模型进行验证, 与文献中基于流量的出水数据进行对比, 如表 4 所示. 由表 4 可以看出, 所建立模型的计算值与文献值基本一致, 慢速可生物降解物质 X_s 的相对误差最大, 仅为 0.37%, 说明模型基本正确.

表 4 模型计算值与文献值的对比

Table 4 Calculated values with the literature values

组分	S_0 /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	S_1 /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	S_s /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	S_{NO} /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	S_{NH} /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	S_{ND} /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	S_{ALK} /($\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)
计算值	0.74	30.00	0.97	8.82	4.78	0.73	4.46
文献值	0.75	30.00	0.97	8.82	4.76	0.73	4.46
相对误差	-0.24%	0	0.04%	-0.03%	0.29%	0.04%	0.01%
组分	X_1 /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	X_s /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	X_{BH} /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	X_{BA} /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	X_p /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	X_{ND} /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	Q_e /($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)
计算值	4.59	0.22	10.24	0.54	1.76	0.02	18061.36
文献值	4.58	0.22	10.22	0.54	1.76	0.02	18061.33
相对误差	0.31%	0.37%	0.14%	0.16%	0.18%	0.31%	0

3.2 多目标优化模型的解及分析

图 4 是该优化模型的 Pareto 解, 从图中可以看出, 3 个目标的取值范围非常广: NEV 为 88 ~ 3360, TV 为 2592 ~ 6242 m^3 , OCI 为 42 ~ 22277 $\text{kWh} \cdot \text{d}^{-1}$, 为了分析方便, 将其拆分为 2 张二维图, 即图 5 所示. 图中黑色方块代表决策变量为缺省值情况下的 3 个目标值. 从这 2 张图上, 可以比较清晰地看到这 3 个目标之间的权衡关系, TV 和 OCI 取值越大, NEV 值越小, 这表示反应池体积和能耗越大, BSM1 中工艺的处理效果就越好. 每张图仅仅反映 2 个目标之间的权衡关系, 由于还有第 3 个目标的存在, 变化趋势不太明显.

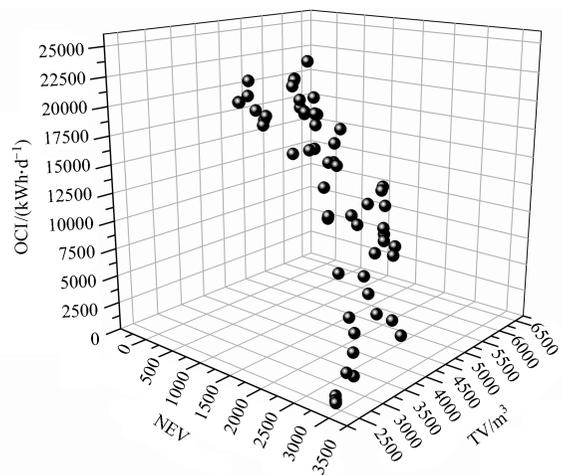


图 4 多目标优化模型的 Pareto 解

Fig. 4 Pareto solutions for the Multi-Objective Optimization model

从图 5a 中右下角可以看出,所求出的 Pareto 解与缺省值比较:当 TV 取值近似时,存在一些解的 NEV 值比缺省值要小很多;这表明在反应池体积不变的情况下,出水水质能够得到比较大的改善. 类似的情况也可以从图 5b 中右下角观察得到:一些解

的 NEV 值和 OCI 值都要比缺省值小,表明 BSM1 的运行能耗和处理效果都能有所改善. 另外,绝大部分解的 NEV 值较大,说明出水水质指标超标次数太多,在实际中是不可应用的.

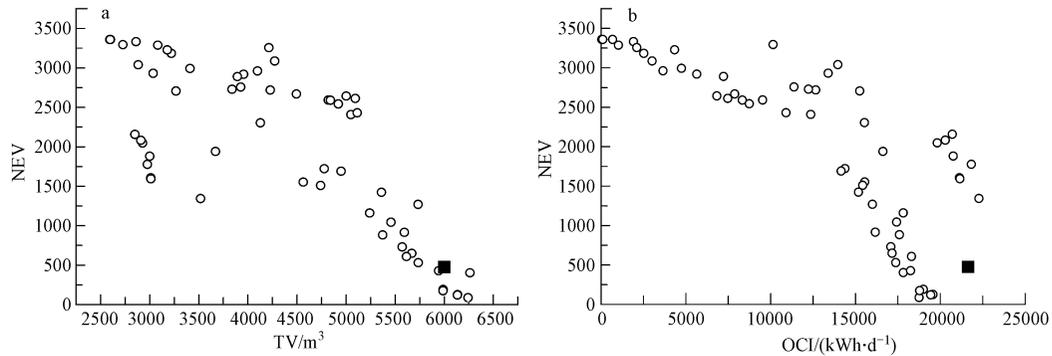


图 5 Pareto 解各目标之间的关系

Fig. 5 Relationship between different objectives in Pareto solution

3.3 多目标优化解在 Dry 天气进水条件下的对比分析

为了进一步对多目标优化的效果进行分析,表 5 列出了挑选的 4 组解的决策变量值,表 6 列出了这 4 组解的优化目标值,这 2 个表中还给出了决策变量在 BSM1 中的缺省值及其优化目标值. 从表 5 可以看出,选出的 4 组解作为多目标优化模型的解,

彼此之间是没有可比性的,例如 solution1 和 solution2, solution1 的 NEV 值比 solution2 小,但是 OCI 值和 TV 值都要比后者大,它们各有优劣,即在一个目标更优的同时必然会劣化其它的部分或全部目标,因此 Pareto 解在数学层面上是同等优秀的.

表 5 选取的 4 组解的决策变量值和缺省值

Table 5 Values of decision variable for default and the selected four solutions

解	V_1 /m ³	V_2 /m ³	V_3 /m ³	V_4 /m ³	V_5 /m ³	Q_a /(m ³ ·d ⁻¹)	Q_r /(m ³ ·d ⁻¹)	Q_w /(m ³ ·d ⁻¹)	$K_L a_3$ /d ⁻¹	$K_L a_4$ /d ⁻¹	$K_L a_5$ /d ⁻¹
缺省值	1000	1000	1333	1333	1333	55338	18446	385	240	240	84
Solution 1	982	853	1310	1476	1368	43868	16745	206	217	233	84
Solution 2	1055	815	1292	1490	1292	44390	16443	218	190	220	73
Solution 3	1094	879	1314	1479	1370	47638	17982	230	227	239	88
Solution 4	1193	675	1524	1452	1398	54468	17809	189	232	233	73

在 Dry 天气下,所有解的 COD、BOD₅ 和 TSS 这 3 个指标全部满足排放标准的要求. 相对于缺省值,所有优化组的 NEV 值和 OCI 值都小,TV 值基本一致或稍有增加,表明经过多目标的优化,通过稍微增大反应池体积,出水水质超标次数和运行能耗可以得到一定程度地降低. 在选取的 4 组解中:solution1 和 solution2 的 3 个优化目标值都要比缺省值要小,因此这 2 组解比缺省值更优;solution4 的 NEV 值是最小的,相对于缺省值降低了 81.5%,同时该解的第二个目标 OCI 值也降低了 13.3%,虽然

该解的 TV 值是最大的,但也仅仅相对于缺省值增加了 4.1%,solution4 表明在稍微增加总体积的情况下,可以大幅度改善出水水质和能耗;solution3 的出水水质仅次于 solution4,但是在总体积方面表现更优.

NEV 值是出水 COD、BOD₅、TN、NH₄⁺-N、TSS 超标次数的总和. 从表 6 中可以看到,在 4 组优化解中,唯独 NH₄⁺-N 有超标的现象. 图 6 是所有解最后 7 天 COD(a)、NH₄⁺-N(b)、TN(c)、TSS(d) 的出水变化图,每个图中的横线代表该组分规定的出水浓度

值(见表 1)。

表 6 Dry 天气下选取的 4 组解的目标值和缺省目标值

Table 6 Values of objectives for default and the selected four solutions under Dry-weather

解	水质指标超标次数						能耗指标				体积指标 TV/m ³
	COD	BOD ₅	TN	NH ₄ ⁺ -N	TSS	NEV	AE /(kWh·d ⁻¹)	PE /(kWh·d ⁻¹)	SP /(kg·d ⁻¹)	OCI /(kWh·d ⁻¹)	
缺省值	0	0	55	421	0	476	6476	2967	2437	21630	5999
Solution 1	0	0	0	176	0	176	6008	2433	2068	18779	5988
Solution 2	0	0	0	429	0	429	5280	2442	2104	18241	5944
Solution 3	0	0	0	121	0	121	6297	2634	2101	19435	6136
Solution 4	0	0	0	88	0	88	6124	2899	1945	18748	6242

从图 6a 中可以看到,所有解出水的 COD 浓度均在规范值 100mg·L⁻¹ 以下,其中缺省值的出水 COD 浓度值最小,而 solution4 出水浓度值最大, solution1、2、3 的浓度值差别不大;另外 solution4 的 COD 值随时间的变化幅度是最大的,反映出系统对进水 COD 变化的反应较剧烈.图 6d 是最后 7 天出水 TSS 浓度变化曲线,对比这 2 个图发现:所有组出水 COD 和 TSS 的大小关系一致,从大到小排序 solution4、solution1、solution2、solution3、缺省组,说明

出水的 COD 浓度受颗粒态组分的影响较大.在不考虑污泥膨胀这种问题下,出水 TSS 的升高是由于沉淀池的负荷增加引起的,也就是进入沉淀池的污泥浓度升高的原因.生化池中的污泥浓度主要与排泥量有关,而排泥量正是该多目标优化模型中的决策变量.对比表 3 中 Q_w 的值,发现出水的 TSS 值与 Q_w 值呈负相关性,因此排泥量 Q_w 对出水的 COD 和 TSS 浓度值有非常重要的影响.

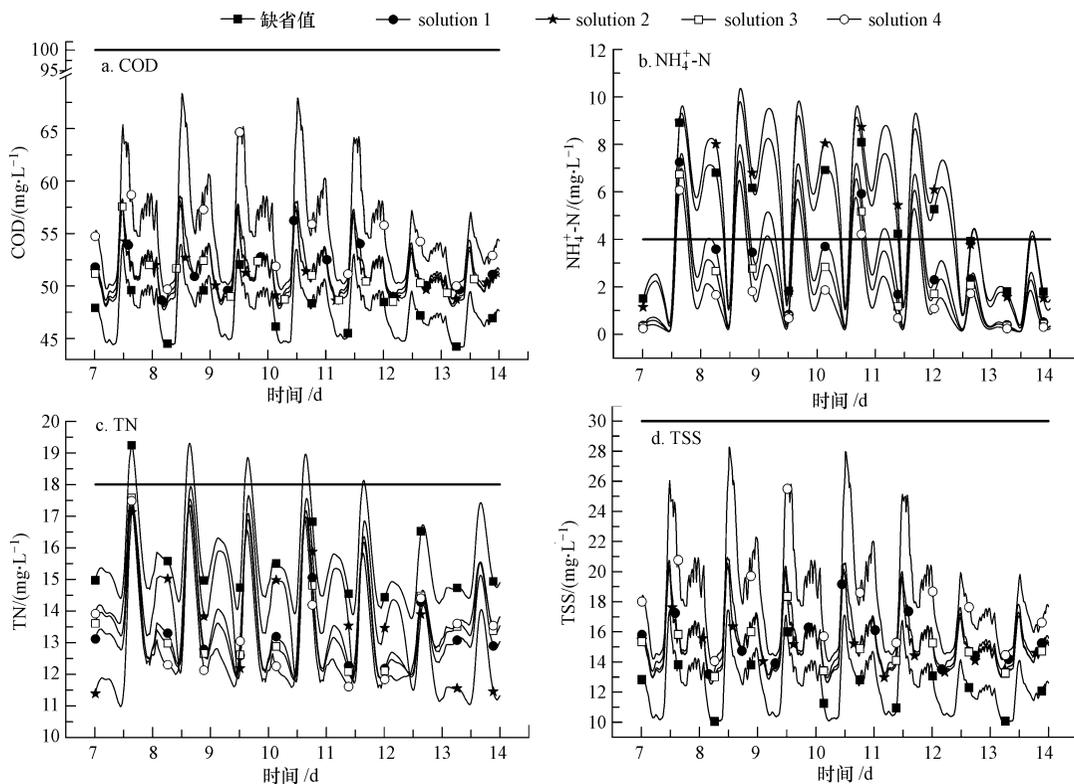


图 6 最后 7 天出水中 COD(a)、NH₄⁺-N(b)、TN(c) 和 TSS(d) 的变化图

Fig. 6 Variation of effluent COD(a), NH₄⁺-N(b), TN(c) and TSS(d) in the last seven days

图 6b 是所有解最后 7 天 NH₄⁺-N 的出水变化

图,横线是出水中 NH₄⁺-N 浓度的限定值(4

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$). 从图中可以看出: 出水中的 NH_4^+-N 浓度变化范围很大, 不过优化解中 NH_4^+-N 的最大值基本都小于缺省值 (solution2 除外); solution2 的出水 NH_4^+-N 浓度较高, 可能与较小的 $K_L a$ 值有关 (如表 3). Solution4 的 NH_4^+-N 值始终处于同期的最低水平, solution1、3、4 在图 6b 中的位置关系也与表 4 中 NH_4^+-N 超标值的大小关系完全吻合. 另外, 从图中还可以明显观察到相对于缺省值, solution1、3、4 的变化幅度也减小了很多, 这说明经过优化后的 BSM1 系统具有更好的抗 NH_4^+-N 干扰能力.

出水的 TN 和 NH_4^+-N 有着密切的联系, 大小关系同 NH_4^+-N 的变化基本一致 (除了 solution2), 如图 6c 所示: 所有优化解的出水 TN 浓度都满足规定的排水要求 ($< 18\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), solution2 的出水 NH_4^+-N 浓度是最高的, 但是出水的 TN 浓度低于缺省组, 满足排水水质要求, 说明虽然 solution2 的硝化能力低于缺省值, 但优化后整体的脱氮能力还是比缺省值要好, 其它 3 组出水 TN 的表现更好, 其中 solution4 的脱氮能力最强.

3.4 多目标优化解在 Rain 和 Storm 进水条件下的对比分析

分别在 Rain 和 Storm 天气下检验优化解和缺

省值的处理性能, 各优化目标值如表 7 所示. 因为体积指标 TV 直接取决于 5 个池子的体积, 曝气能耗 AE 取决于 $K_L a$, 泵能耗 PE 取决于流量, 这三个指标与进水条件是无关系的, 因此值不变.

在 Rain 天气进水条件下, solution3 的处理效果最好, COD、BOD₅、TN 和 TSS 都满足排放标准的要求, 虽然 solution3 的能耗相对其它优化解最高, 但是考虑到良好的出水水质, 在 Dry 天气情况下 solution3 是表现最好的. Solution1、2、4 的 COD、BOD₅、TN、TSS 都有超标现象; 结合图 6 分析原因, 可能是因为在 Rain 天气下, 由于进水水量增大, 生化反应池和沉淀池的水力停留时间减少, 出水中的 TSS 浓度增大, 导致出水中颗粒性组分浓度增大, 使出水的 COD、BOD₅、TN 浓度增加.

在 Storm 天气进水条件下, 缺省值中出水 COD、BOD₅ 和 TSS 基本满足排放标准, 而所有优化解都有超标的情况发生, 这主要是由于缺省值排泥量 Q_w 较大, 活性污泥系统内污泥浓度较低, 出水的颗粒性组分浓度较低的原因. 在该种进水条件下, 从 NH_4^+-N 和 TN 的超标次数来看, 优化组的硝化和脱氮性能仍好于缺省组, 其中 solution3 的表现最为优秀. 同时优化组的运行能耗要比缺省组低.

表 7 Rain 和 Storm 天气下优化解及缺省值的各目标值

Table 7 Values of objectives for default and the selected four solutions under Rain and Storm-weather

天气	解	水质指标超标次数					能耗指标				体积指标 TV/ m^3	
		COD	BOD ₅	TN	NH_4^+-N	TSS	NEV	AE /($\text{kWh}\cdot\text{d}^{-1}$)	PE /($\text{kWh}\cdot\text{d}^{-1}$)	SP /($\text{kg}\cdot\text{d}^{-1}$)		OCI /($\text{kWh}\cdot\text{d}^{-1}$)
Rain	缺省值	0	0	29	428	0	457	6476	2967	2354	21214	5999
	Solution 1	21	11	18	209	136	395	6008	2433	1806	17470	5988
	Solution 2	0	0	4	418	28	450	5280	2442	1989	17669	5944
	Solution 3	0	0	0	144	0	144	6297	2634	2024	19052	6136
	Solution 4	129	124	76	93	171	593	6124	2899	999	14016	6242
Storm	缺省值	0	0	55	433	1	489	6476	2967	2602	22452	5999
	Solution 1	32	31	23	250	48	384	6008	2433	1803	17458	5988
	Solution 2	17	16	32	443	36	544	5280	2442	2188	18663	5944
	Solution 3	9	5	0	173	29	216	6297	2634	2251	20184	6136
	Solution 4	47	44	33	132	59	315	6124	2899	800	13022	6242

4 讨论 (Discussion)

从结果分析中可以看出, 多目标优化方法与活性污泥工艺的优化可以结合在一起的, 针对该研究中的 3 个优化目标, 多目标优化的方法不仅可以找到各个目标的优化值, 比如 NEV 最小值为 88; 更为重要的是该方法在优化某个目标的同时, 兼顾到对

其它目标值的影响, 分析各个目标之间的权衡关系, 让决策者根据实际情况和自己的偏好来选择最终的工艺参数.

另外, BSM1 中工艺的多目标优化过程中还存在 2 个问题: ①从图 4 中可以看出, 大部分 Pareto 解的 NEV 值较大, 代表出水水质非常差, 这在实际中是不可应用的, 很大程度影响了求解的效率; ②多

目标优化是在开环的情况下进行的,没有针对动态的进水实施一定的控制,这导致不同进水条件对优化结果产生较大的影响,比如:在 Dry 进水条件下表现最好的 solution4,在 Rain 进水时表现却是最差的.以后的研究中需要注意克服这 2 个问题.

5 结论(Conclusions)

1) Dry 进水条件下,通过对 BSM1 中工艺进行多目标优化分析,稍微增加反应池体积(增加 4.1%),能够让出水水质得到明显改善(降低 81.5%),同时降低了运行能耗(降低 13.3%).

2) 在不同进水条件(Rain 和 Storm)下的分析表明,优化解在硝化和脱氮方面明显好于缺省值,对进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度变化的抵抗力也增强,由于排泥量的减少,出水 TSS 和 COD 表现稍差.

3) 活性污泥工艺中不同目标之间的权衡可以通过多目标优化方法来实现,让决策者根据实际情况和自己的偏好来选择最终的工艺参数.

责任作者简介:姚重华(1946—),男,博士、教授,华东理工大学资源与环境工程学院博士生导师,主要从事环境工程仿真与控制、水处理化学的教学和科研工作,涉及废水处理过程建模与控制、混凝过程絮体性状人工智能调控、天然水系统突发污染事故预警预报。发表论文 30 多篇,出版专著 6 部。

吕锡武(1954—),工学博士、教授、博士生导师、校学术委员会委员。研究方向为富营养化湖泊生态修复、饮用水安全保障、生活污水除磷脱氮技术和装备;主持完成国家自然科学基金 4 项、国家攻关和“863”课题各 1 项、省部级及江苏省重点项目 20 余项;获建设部和江苏省科技进步二等奖 2 项;获国家发明专利授权 5 项,发表论文 130 余篇。兼任教育部环境工程专业指导委员会委员、中国环境科学学会水环境分会副理事长等。

参考文献(References):

Alex J, Beteau J, Copp J, *et al.* 1999. Benchmark for evaluating control strategies in wastewater treatment plants [A]. European Control Conference [C]. Germany Karlsruhe

Beraud B, Steyer J P, Lemoine C, *et al.* 2008. Optimization of WWTP control by means of multi-objective genetic algorithms and sensitivity analysis [J]. *Computer Aided Chemical Engineering*, 25: 539-544

Biswas P, Bose P, Tare V. 2007. Optimal choice of wastewater treatment train by multi-objective optimization [J]. *Engineering Optimization*, 39(2): 125-145

Copp B. 2002. The COST simulation benchmark: description and simulator manual [M]. Luxembourg: Directorate-General for Research Office for Official Publication of the European Union

Deb K, Pratap A, Agarwal S, *et al.* 2002. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II [J]. *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on*, 6(2): 182-197

段连钧, 刘杰, 谷兆全, 等. 2010. 传统活性污泥工艺升级改造的设计优化研究 [J]. *中国给水排水*, 26(11): 43-46

Flores-Alsina X, Rodríguez-Roda I, Sin G, *et al.* 2008. Multi-criteria evaluation of wastewater treatment plant control strategies under uncertainty [J]. *Water Research*, 42(17): 4485-4497

Flores-Alsina X, Gallego A, Feijoo G, *et al.* 2010. Multiple-objective evaluation of wastewater treatment plant control alternatives [J]. *Journal of Environmental Management*, 91(5): 1193-1201

Hakanen J, Miettinen K, Sahlstedt K. 2011. Wastewater treatment: New insight provided by interactive multiobjective optimization [J]. *Decision Support Systems*, 51(2): 328-337

Hernández-Suárez R, Castellanos-Fernández J and Zamora JM. 2004. Superstructure decomposition and parametric optimization approach for the synthesis of distributed wastewater treatment networks [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 43(9): 2175-2191

Holenda B, Domokos E, Redey A, *et al.* 2007. Aeration optimization of a wastewater treatment plant using genetic algorithm [J]. *Optimal Control Applications and Methods*, 28(3): 191-208

吕锡武, 李峰, 稻森悠平, 等. 2000. 氨氮废水处理过程中的好氧反硝化研究 [J]. *给水排水*, 26(4): 17-20

Machado V C, Gabriel D, Lafuente J, *et al.* 2009. Cost and effluent quality controllers design based on the relative gain array for a nutrient removal WWTP [J]. *Water Research*, 43(20): 5129-5141

Rivas A, Irizar I and Ayesa E. 2008. Model-based optimisation of Wastewater Treatment Plants design [J]. *Environmental Modelling & Software*, 23(4): 435-450

Takács I, Patry GG and Nolasco D. 1991. A dynamic model of the clarification-thickening process [J]. *Water research*, 25(10): 1263-1271

王荣昌, 司书鹏, 郑翔, 等. 2011. 溶解氧浓度对连续流活性污泥工艺反硝化除磷的影响 [J]. *化工学报*, 62(6): 1708-1715

吴杰, 罗健旭, 张照生. 2012. 基于降维状态观测器的曝气量最优控制仿真研究 [J]. *环境科学学报*, 32(7): 1604-1611

姚重华, 王国华, 谭学军, 等. 2010a. 基于 Simulink 的倒置 A²/O 流程仿真程序 [J]. *给水排水*, 36(z1): 389-394

姚重华, 刘漫丹. 2010b. 环境工程仿真与控制(第三版) [M]. 北京: 高等教育出版社. 1-78

张代钧, 卢培利, 陈丹琴, 等. 2002. 传统活性污泥法 COD 去除及脱氮改造的模拟 [J]. *环境科学学报*, 22(4): 448-453

赵麟菱. 2007. 活性污泥模型 ASM2 的简化及优化控制策略研究 [D]. 杭州: 浙江大学. 9-11

周甯, 周丹. 2001. 活性污泥工艺的设计计算方法探讨 [J]. *中国给水排水*, 17(5): 45-49