

doi :10.3969/j.issn.1005-3026.2016.05.020

# 基于 Petri 网与 BAT 的造纸行业排放限值仿真

姜秋俚<sup>1,2</sup>,王鹏飞<sup>1</sup>,韩天放<sup>1</sup>,胡筱敏<sup>1</sup>

( 1. 东北大学 资源与土木工程学院,辽宁 沈阳 110819 ;2. 辽宁省环境监测实验中心,辽宁 沈阳 110161 )

**摘 要:**以 OPMSE 仿真计算造纸污水中 COD ,BOD<sub>5</sub> ,NH<sub>3</sub>-N 排放质量浓度为研究对象,查询及调研清河流域典型造纸行业产生的污水中 COD ,BOD<sub>5</sub> ,NH<sub>3</sub>-N 质量浓度范围,通过 OPMSE 仿真计算,结果表明,置信水平为 99% 时,COD 置信区间为( 34.09 ,41.84 ),BOD<sub>5</sub> 置信区间为( 6.65 ,8.40 ),NH<sub>3</sub>-N 置信区间为( 6.28 ,7.34 );最佳出水各指标为  $\rho(\text{COD})=12.79\text{ mg/L}$  , $\rho(\text{BOD}_5)=2.62\text{ mg/L}$  , $\rho(\text{NH}_3-\text{N})=3.33\text{ mg/L}$  ,最差出水各指标为  $\rho(\text{COD})=70.47\text{ mg/L}$  , $\rho(\text{BOD}_5)=14.51\text{ mg/L}$  , $\rho(\text{NH}_3-\text{N})=10.22\text{ mg/L}$  .将仿真结果与现有排放标准对比,拟定造纸行业的污染物直接排放限值为  $\rho(\text{COD})=45\text{ mg/L}$  , $\rho(\text{BOD}_5)=9\text{ mg/L}$  , $\rho(\text{NH}_3-\text{N})=8\text{ mg/L}$  .

**关 键 词:**最佳可行技术,排放限值,造纸行业,仿真,Petri 网

中图分类号:X 522      文献标志码:A      文章编号:1005-3026(2016)05-0702-05

## Simulation of Emission Limits for Paper-Making Industry Based on Petri Net and BAT

JIANG Qiu-li<sup>1,2</sup>,WANG Peng-fei<sup>1</sup>,HAN Tian-fang<sup>1</sup>,HU Xiao-min<sup>1</sup>

( 1. School of Resources & Civil Engineering ,Northeastern University ,Shenyang 110819 ,China ;2. Environment Monitoring Test Center in Liaoning Province ,Shenyang 110161 ,China. Corresponding author :HU Xiao-min , professor ,E-mail :hxmin\_jj@163.com )

**Abstract :**Through the simulation and calculation of object Petri net modeling and simulation environment ( OPMSE ) for the emission mass concentrations of COD ,BOD<sub>5</sub> and NH<sub>3</sub>-N in waste water from paper-making industry ,the range of COD ,BOD<sub>5</sub> and NH<sub>3</sub>-N mass concentrations in typical paper-making industry were inquired and investigated in Qinghe basin. The results show that when the confidence level is 99% ,the confidence interval of COD is ( 34.09 ,41.84 ) ,the confidence interval of BOD<sub>5</sub> is ( 6.65 ,8.40 ) ,and the confidence interval of NH<sub>3</sub>-N is ( 6.28 ,7.34 ) . The mass concentration of the optimum effluent is  $\rho(\text{COD})=12.79\text{ mg/L}$  , $\rho(\text{BOD}_5)=2.62\text{ mg/L}$  , $\rho(\text{NH}_3-\text{N})=3.33\text{ mg/L}$  ,while the mass concentrations of the worst effluent are  $\rho(\text{COD})=70.47\text{ mg/L}$  , $\rho(\text{BOD}_5)=14.51\text{ mg/L}$  , $\rho(\text{NH}_3-\text{N})=10.22\text{ mg/L}$  . Then making a comparison between the emission standards and simulation results are got. The direct emission limits of the paper-making industry are  $\rho(\text{COD})=45\text{ mg/L}$  , $\rho(\text{BOD}_5)=9\text{ mg/L}$  , $\rho(\text{NH}_3-\text{N})=8\text{ mg/L}$  .

**Key words :** best available technology ( BAT ); emission limits ; paper-making industry ; simulation ; Petri net

目前由于国内造纸产业布局、原料结构、企业规模不合理,生产工艺、技术设备的过时,碱回收率的低下和污染物排放标准偏低等问题,造纸废水治理已成为工业污染防治的焦点、热点和难点。

造纸行业废水排放量大、色度高、纤维悬浮物多、耗氧量及可生化性差,是浓度较高的有机废水,排出的废水对整个水体造成了严重的污染,对生态环境造成了极大的破坏,对人们的健康和生态

环境的保护构成极大的威胁。所以,造纸行业废水的治理是当前水处理领域急需解决的问题之一,造纸行业排放限值的制定对该行业污染物的减排具有关键性的作用。随着清河流域经济的迅速发展,清河流域面临的污染问题日益严峻,由于缺少成熟的污染物排放控制体系,水质污染治理任务十分紧迫,通过清河流域总量控制管理是解决此问题的一种有效手段。本文选取清河流域沿岸的典型造纸厂,结合其排污特点,采用基于 Petri 网理论的 OPMSE 软件,对造纸厂水污染物 BAT (best available technology)处理工艺的削减能力进行了仿真计算,探讨研究制定造纸行业污染物排放限值的方法,从而严格控制造纸行业排放的水污染物对清河流域水质的影响,以期改善清河流域水质。

# 1 实验方法

## 1.1 BAT 技术

自欧盟执行委员会提出 IPPC 指令至今,欧盟已有能源、钢铁、有色、化工和造纸等 27 个行业的最佳可行技术(BAT)参考文件(BREF)被相继颁布实施,此外 6 个跨行业的 BREFs 也提出了相应的 BAT<sup>[1]</sup>。

## 1.2 Petri 网

Jensen<sup>[6]</sup>引入了着色 Petri 网,将标识赋予多种颜色以示区分,将系统的层次关系通过不同颜色来表示,减少了 Petri 网模型的状态空间数量,增加了建模的灵活性。Wang 等<sup>[7]</sup>将 Petri 网与面向对象的思想相融合,提出了面向对象 Petri 网(OOPN),从而使建模的灵活性和模型的模块化能力得到提高。Meng<sup>[8]</sup>在面向对象 Petri 网的基础上对企业的可重构制造系统进行了探究,并将时间约束与分层次建模相结合。面向对象技术的引入使模型的可重用性得到了保障,便于企业应对快速变化的市场需求。

## 1.3 Petri 网仿真

在柔性制造系统方面,Petri 网被用于建立 FMS 模型,成为当今研究热点之一<sup>[2]</sup>。以 Petri 网的初始标识作为树根,通过变迁的触发所产生的标识作为树枝,通过变迁的逐步触发得到最终的标识,从而搜索 Petri 网模型的可达树<sup>[3]</sup>。利用 A\*算法来搜索 Petri 网的可达树,通过估价函数来决定应该触发的变迁,以此类推,直到出现最终标识,可避免 Petri 网模型整个可达树的产生<sup>[4]</sup>。对全局搜索采用回溯搜索方法,对局部搜索采用 A\*算法,

从而避免在寻优过程中陷入局部收敛的问题<sup>[5]</sup>。

## 1.4 OPMSE

使用 OPMSE 的分析技术可以得到系统的结构特征和性能特征,借助 OPMSE 强大的描述能力可以描述一个复杂系统,结合其他技术可以形成系统的、不同层次的描述。OPMSE 使用图形化的建模方式,具有严密的理论基础和强大的描述能力<sup>[9]</sup>。

## 1.5 具体方法

在面向对象 Petri 网的理论上,通过使用 OPMSE 对开原造纸厂水污染物的 BAT 处理工艺进行模拟仿真。主要研究了基于 OPMSE 的仿真算法,在结合开原造纸厂 BAT 技术的基础上,通过设定 BAT 处理工艺中各个处理工段对污染物去除率的区间范围,对开原造纸厂水污染物的 BAT 处理工艺进行多次仿真计算。在使用 OPMSE 进行仿真计算时,用区间计算方法替代传统的单一数值计算方法,即对区间范围内的数字进行随机选取并代入计算,然后经过多次仿真计算,并将所有计算结果作为样本,估计总体均值的置信区间,使得出的结果更具有科学性。在经过仿真计算之后,根据计算结果分析开原造纸厂经过 BAT 削减处理后的水污染物排放质量浓度,从而确定造纸行业水污染物直接排放限值。主要分为以下几步:

- 1) 典型污染行业具体企业调研、统计。
- 2) 仿真系统的分析。仿真系统包括仿真软件、仿真模型、数据库等方面。首先,采用 OPMSE 软件,利用编程加图示逻辑的过程建立仿真模型。数据则采用独立计算方式,即单个模型仅采用本模型所需的数据。
- 3) 仿真系统的建模。根据开原造纸厂具体的生产流程,结合具体的排污特性,确定污水处理 BAT 工艺流程,通过计算机绘制流程图、编程等确定污染物处理工艺的仿真计算过程,从而得到开原造纸厂经过 BAT 削减处理后的污染物排放质量浓度。
- 4) 仿真系统的计算和数据分析。基于 OPMSE,通过区间计算的方法,进行模拟仿真,并对计算出的数据进行分析,依据仿真结果得出结论,从而制定造纸行业水污染物的直接排放限值。

# 2 结果与讨论

2.1 基于 OPMSE 造纸行业废水处理工艺仿真  
纸张生产过程中,废水主要来源:制备工段废液、蒸煮废液、筛选工段废液、漂白工段废液。在该

工艺模拟流程图中,主要对污水 COD ,BOD<sub>5</sub> , NH<sub>3</sub> - N 三种物质的质量浓度进行模拟. 由于实际生产过程中,每日所产生污染物的量不同,导致污水的初始污染指标不尽相同,经历史监测数据查找,模拟中设置污水的 COD 质量浓度为 1 000 ~ 5 000 mg/L ,BOD<sub>5</sub> 质量浓度为 500 ~ 1 500 mg/L ,NH<sub>3</sub> - N 质量浓度为 5 ~ 15 mg/L ,历史监测数据显示污水经处理后 COD 的质量浓度为 15. 17 ~ 30. 55 mg/L ,BOD<sub>5</sub> 的质量浓度为 5. 12 ~ 8. 19 mg/L ,NH<sub>3</sub> - N 的质量浓度为 4. 03 ~ 7. 95 mg/L. 造纸废水处理工艺基本流程为:粗格栅过滤—细格栅过滤—沉淀池—冷却池—均衡池—调制池—上流式厌氧污泥反应器—曝气池—二沉池—混合反应池—终沉池. 废水处理工艺模拟流程图,即造纸生产工艺中废水处理工段细化如图 1 所示.

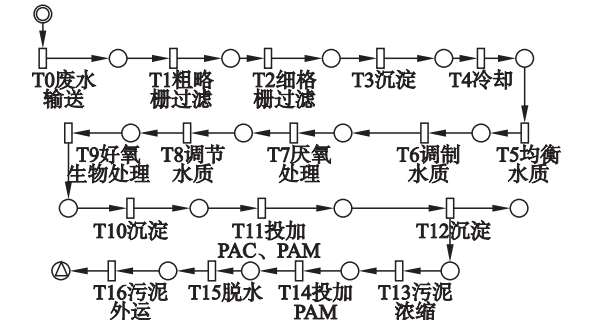


图 1 造纸厂废水处理工艺

Fig. 1 The waste water treatment process in paper mill

由于实际处理过程中,处理效率不可能为一个固定的数值,因此,模拟中设定沉淀池对 NH<sub>3</sub> - N 的处理效率为 0 ~ 5% ;上流式厌氧污泥反应器对 COD 的处理效率为 75% ~ 80% ,对 BOD<sub>5</sub> 的处理效率为 85% ~ 88% ;设定曝气池对 COD 的处理效率为 65% ~ 70% ,对 BOD<sub>5</sub> 的处理效率为 92% ~ 97% ,对 NH<sub>3</sub> - N 的处理效率为 30% ~ 35% ;设定混合反应池对 COD 的处理效率为 80% ~ 85% . 对于含有多个随机变量的系统而言,其统计结果的方法是非常前沿的. 选取开原造纸厂其中某一次仿真,从开始到结束如表 1 所示.

表 1 单次模拟仿真结果

Table 1 A single simulation results

mg · L <sup>-1</sup>					
初始质量浓度			仿真最终结果		
COD	BOD <sub>5</sub>	NH <sub>3</sub> - N	COD	BOD <sub>5</sub>	NH <sub>3</sub> - N
2 118. 1	620. 5	6. 94	69. 51	12. 73	3. 30

## 2. 2 造纸行业 BAT 水处理组合仿真结果分析

通过对清河流域的开原造纸厂分析研究,对

基于 OPMSE 的 BAT 水处理组合进行了模拟仿真,且通过模拟仿真得到了最终排放污染物 COD ,BOD<sub>5</sub> ,NH<sub>3</sub> - N 的质量浓度. 图 2 ~ 图 4 给出了计算仿真系统的结果.

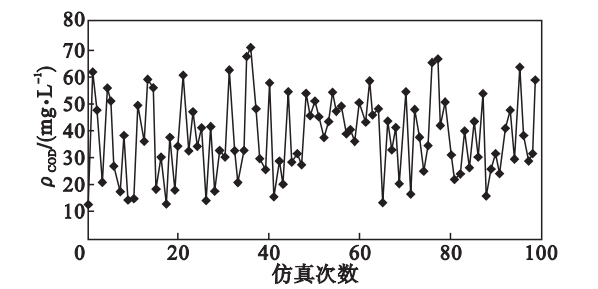


图 2 出水 COD 质量浓度仿真结果

Fig. 2 Simulation results of mass concentration of COD

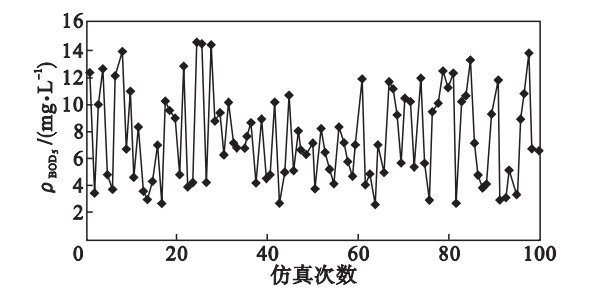


图 3 出水 BOD<sub>5</sub> 质量浓度仿真结果

Fig. 3 Simulation results of mass concentration of BOD<sub>5</sub>

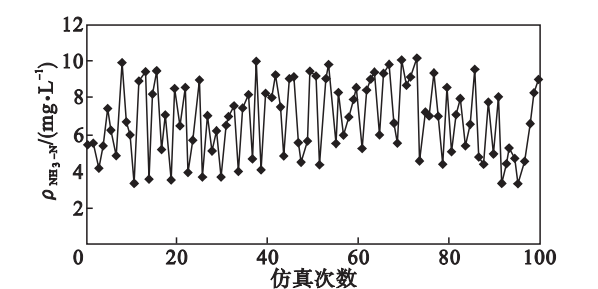


图 4 出水 NH<sub>3</sub> - N 质量浓度仿真结果

Fig. 4 Simulation results of mass concentration of NH<sub>3</sub> - N

对于开原造纸厂 100 次的仿真结果,对其均值、标准差、最大值以及最小值进行了统计,结果见表 2.

表 2 造纸厂 BAT 水处理计算仿真模型的仿真数据分析表

Table 2 Data analysis of paper mill's BAT water treatment calculation simulation model

mg · L <sup>-1</sup>					
指标	仿真次数	均值	标准差	最大值	最小值
COD	100	37. 965	14. 74	70. 47	12. 79
BOD <sub>5</sub>	100	7. 53	3. 33	14. 51	2. 62
NH <sub>3</sub> - N	100	6. 81	2. 01	10. 22	3. 33

根据表 2 的数值 ,可以得出开原造纸厂不同污染指标在用正态分布统计时不同置信水平的置信区间 ,如表 3 所示.

表 3 造纸厂 BAT 水处理出水污染物质量浓度置信区间 Table 3 Confidence interval of pollutants mass concentration of paper mill 's BAT water treatment			
		mg·L <sup>-1</sup>	
置信水平/%	90	95	99
COD	( 35. 52 40. 41 )	( 35. 04 40. 89 )	( 34. 09 41. 84 )
BOD <sub>5</sub>	( 6. 97 8. 08 )	( 6. 87 8. 19 )	( 6. 65 8. 40 )
NH <sub>3</sub> - N	( 6. 48 7. 15 )	( 6. 41 7. 21 )	( 6. 28 7. 34 )

从表 3 可以看出 ,BAT 水处理组合对该厂的污染物去除的总体效果较好 ,出水水质满足《辽宁省地方标准污水综合排放标准》( DB21/1627—2008 )直接排放的水质要求<sup>[ 10 ]</sup>. 表 2 仿真结果中的最小值指出了通过最大化处理效率所能达到的水质 ,即通过人为提高水处理的效率和去除率之后 ,所能达到的出水污染指标质量浓度. 建议所有造纸行业在采用该 BAT 处理组合的基础上 ,提高各处理方法的工作效率 ,达到更好的污染物减排效果和最低的出水污染指标质量浓度. 表 4 给出了理想状况下最佳和最差的出水水质的污染指标质量浓度.

表 4 BAT 水处理出水最佳及最差水质 Table 4 Best and worst water quality of BAT water treatment			
		mg·L <sup>-1</sup>	
污染指标	COD	BOD <sub>5</sub>	NH <sub>3</sub> - N
最佳质量浓度	12. 79	2. 62	3. 33
最差质量浓度	70. 47	14. 51	10. 22

2. 3 模型分析

OPMSE 模型是含有多个随机变量的仿真系统 ,纵观历史监测数据与模拟仿真结果 ,可以验证该模型灵敏度较高、稳定性较强 ,通过输入变量的改变 ,能及时得到相应的反馈 ,较好地控制该模型 ,进一步证明了该模型较为实用.

2. 4 造纸行业排放限值研究

历史监测数据均在 99% 置信区间范围内 ,根据仿真结果的置信区间、历史监测数据以及现有的标准进行对比<sup>[ 10 ]</sup> ,结果见表 5.

表 5 结果与现有排放限值的对比 Table 5 Comparison between results and existing emission limits			
		mg·L <sup>-1</sup>	
污染指标	COD	BOD <sub>5</sub>	NH <sub>3</sub> - N
99% 置信区间	( 34. 09 41. 84 )	( 6. 65 8. 40 )	( 6. 28 7. 34 )
历史监测数据	( 15. 17 30. 55 )	( 5. 12 8. 19 )	( 4. 03 7. 95 )
直接排放标准	50	10	8

综合上述仿真结果、历史监测数据以及和现有标准的对比 ,初步拟定基于 BAT 的清河流域造纸行业污染物排放限值一份 ,见表 6.

表 6 基于 BAT 的清河流域造纸行业污染物排放限值 Table 6 Emission limits of the paper-making industry in Qinghe basin based on BAT			
		mg·L <sup>-1</sup>	
污染指标	COD	BOD <sub>5</sub>	NH <sub>3</sub> - N
直接排放限值	45	9	8

3 结 论

1 ) 对 BAT 削减能力的仿真计算得出了造纸行业污水经过 BAT 处理之后 COD , BOD<sub>5</sub> , NH<sub>3</sub> - N 的质量浓度正态分布均值在不同置信水平下的置信区间.

2 ) 经过仿真可以得到 BAT 处理之后的最佳出水质量浓度和最差出水质量浓度 ,最佳出水的各指标质量浓度可以为污染物削减潜力和企业减排的空间给出指导意义 ,而最差出水质量浓度也可以为污染源预警提供指导.

3 ) 仿真结果表明 ,造纸行业 BAT 对于 BOD<sub>5</sub> 的去除效果较好 ,COD 的去除效果相对较差 ,企业在现有基础上应该适当改进处理工艺来提高处理工艺对 COD 的去除. 根据仿真结果并结合现有的排放限值 ,拟定清河流域造纸行业污染物排放限值 ,直接排放限值为 ρ( COD ) = 45 mg/L , ρ( BOD<sub>5</sub> ) = 9 mg/L , ρ( NH<sub>3</sub> - N ) = 8 mg/L.

参考文献：

[ 1 ] 王之晖 ,宋乾武 ,冯昊 ,等. 欧盟最佳可行技术( BAT )实施经验及其启示[ J ]. 环境工程技术学报 ,2013 ,3( 3 ) : 266 - 270.  
( Wang Zhi-hui ,Song Qian-wu ,Feng Hao ,et al. The best available technology ( BAT ) implementation experience and its enlightenmen[ J ]. *Journal of Environmental Engineering Technology* ,2013 ,3( 3 ) 266 - 270. )  
[ 2 ] Kim Y W ,Suzuki T ,Narikiyo T. FMS scheduling based on timed Petri net model and reactive graph search[ J ]. *Applied Mathematical Modelling* 2007 ,31( 6 ) 955 - 970.  
[ 3 ] Zhang H ,Gu M ,Song X. A deadlock-free scheduling with sequence-dependent setup times[ J ]. *International Journal of Advanced Manufacturing System* 2009 ,45( 5/6 ) 593 - 602.  
[ 4 ] Yu H ,Reyes A ,Cang S ,et al. Combined Petri net modeling and AI based heuristic hybrid search for flexible manufacturing system—part1 : Petri net modeling and heuristic research[ J ]. *Computer & Industrial Engineering* , 2003 ,44( 4 ) 527 - 543.