

基于ASM1的活性污泥处理能力判定方法

张润强¹, 韩杏², 唐姚辉², 刘宗余², 刘焕², 李志华²

(1. 西安工程大学 环境与化学工程学院, 陕西 西安 710048; 2. 西安建筑科技大学
环境与市政工程学院 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710055)

摘要: 研究尝试用呼吸图谱中现场呼吸速率与总呼吸速率比值(OUR_s/OUR_T)评价活性污泥处理能力。建立污泥碳氧化与硝化模型,以 OUR 为基准拟合曲线,对进水组分参数进行识别。依照城镇污水处理厂污染物排放一级A标准,计算进水中底物降解完全时间点,并将水力停留时间 HRT 与底物降解完全时间 t_{ss} 、 t_{xs} 、 t_{nh} 相比较,判断出水水质是否达标;同时,参考模型计算的 OUR_s/OUR_T 值,从水质特性和污泥特性两方面判定活性污泥处理能力。结果表明,当 X_s/COD 值 $>40\%$ 时, X_s 的水解对活性污泥处理能力影响较大;当 NH_3-N/COD 值 $>9\%$ 时, NH_3-N 降解影响较大; OUR_s/OUR_T 值 $<38\%$ 时,处理能力较好。

关键词: 活性污泥; ASM1; 降解时间; 进水组分; 数据拟合

中图分类号: X705 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2017)09-0109-05

Estimation of Treatment Capacity of Activated Sludge System Based on ASM1

ZHANG Run-qiang¹, HAN Xing², TANG Yao-hui², LIU Zong-yu², LIU Huan²,
LI Zhi-hua²

(1. School of Environmental and Chemical Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China; 2. Key Laboratory of Northwest Water Resource, Environment and Ecology <Ministry of Education>, School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: The ratio of the in situ respiratory rate to the total respiration rate (OUR_s/OUR_T) was applied to estimate the treatment capacity of activated sludge system. Models of sludge carbon oxidation and nitrification processes were established to identify key components in the influent, based on the fitting of OUR data. According to the *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant*, the time required for complete degradation of organics was calculated as t_{ss} , t_{xs} , t_{nh} , and compared with HRT , to determine if the effluent had met the standard. Meanwhile, referring to the ratio of OUR_s/OUR_T in the model, the sewage treatment capacity was evaluated based on influent parameters and sludge characteristics. The results showed that: ① when the ratio of X_s/COD was over 40% , the treatment capacity was governed by hydrolysis; while, if the ratio of NH_3-N/COD was greater than 9% , the capacity was determined by NH_3-N degradation; ② when the ratio of OUR_s/OUR_T was below 38% , the water quality of effluent could meet the standard, and the capacity of sewage treatment was sufficient.

Key words: activated sludge; ASM1; degradation time; water components; data fitting

一般情况下,根据污泥负荷或者容积负荷判断活性污泥处理能力,二者与水力停留时间 HRT、污泥沉降性能、曝气池的耗氧量、曝气池的体积、污泥龄等密切相关^[1~3]。因为污水厂运行工况受多种因素影响,如进水流量与水质的波动、反应池内存在污水流动死区等,很难计算其实际污泥负荷或容积负荷。所以需要提出较直观准确的方法评估活性污泥处理能力。

笔者针对活性污泥处理能力评估难的特点,基于 ASM1,结合污泥特性与水质特性分析处理效果。ASM1 参数识别与估计需要通过试验设计获得。

表1 碳氧化与氨氮硝化模型矩阵描述

Tab. 1 Description of carbon oxidation and nitrification model matrix

项 目	组分1	组分2	组分3	组分4	组分5	组分6	组分7	组分8	工艺过程
反应过程	S_0	S_s	X_s	X_p	S_{NH}	X_H	X_A	S_{NO}	无相关定义
异养生长	$-\frac{1-Y_H}{Y_H}$	$-\frac{1}{Y_H}$	—	—	$-i_{XB}$	1	—	—	$\mu_H = \frac{S_s}{K_s + S_s} X_H$
自养生长	$-\frac{4.57-Y_A}{Y_A}$	—	—	—	$-i_{XB} - \frac{1}{Y_A}$	—	1	$\frac{1}{Y_A}$	$\mu_A = \frac{S_{NH}}{K_{NH} + S_{NH}} X_A$
衰减分解	—	—	$1-f_p$	f_p	—	-1	—	—	$b_H X_H$
自养分解	—	—	$1-f_p$	f_p	—	—	-1	—	$b_A X_A$
水解	—	1	-1	—	—	—	—	—	$K_h \frac{X_s/X_H}{K_x + X_s/X_H} X_H$

表1中,水质组分参数: S_0 为溶解氧, S_{NH} 为铵与氨氮, S_{NO} 为硝酸盐氮与亚硝酸盐氮, S_s 为易降解有机物, X_s 为慢速可降解有机物, X_p 为生物衰减颗粒性产物;污泥参数: X_H 为异养菌生物量, X_A 为自养菌生物量;动力学参数: μ_H 、 K_s 、 b_H 为异养菌生长与衰减参数, μ_A 、 K_{NH} 、 b_A 为自养菌生长与衰减参数, K_x 、 K_h 为水解参数;化学计量参数: Y_H 、 Y_A 分别为异养菌、自养菌产率系数, i_{XB} 表示N在生物量COD中所占比例, f_p 为颗粒性衰减产物比例。其中,各参数取值为ASM1典型值。

1.2 试验材料

试验采用WBM400型污水处理智慧运行工作站测量微生物好氧呼吸曲线OUR,该工作站便于试验条件的改变,能保持恒温 and 调节pH值;用户可自行组合各种操作模块和计算模块,实现自动化测量。试验污泥来自于各城市污水厂曝气池内活性污泥,进水来源于相应的污水厂原水。各污水厂概况:A厂采用氧化沟工艺,流量为 $(0.28 \sim 0.45) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,MLSS为2000~4000 mg/L;B厂采用奥贝尔氧化沟工艺,流量为 $3.75 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,MLSS为6000~

COD组分的好氧降解(碳氧化)与氨氮硝化是ASM1s的首要模块,好氧呼吸速率OUR是估计其参数的首选外部可测变量^[4]。根据城镇污水厂污染物排放一级A标准,将HRT与底物降解完全时间相比较,分析不同进水组分对污水处理效果的影响;最后通过 OUR_s/OUR_T 值评价活性污泥处理能力,为污水厂的合理运行和节能降耗提供指导性意见。

1 试验设计

1.1 试验理论模型

根据ASM1中碳氧化与氨氮硝化基质降解建立模型^[5],见表1。

7000 mg/L;C厂采用DE氧化沟工艺,流量为 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,MLSS为7000~8000 mg/L;D厂采用改进A²/O工艺,流量为 $(1 \sim 1.5) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,MLSS为3500~4600 mg/L;E厂采用A²/O工艺,流量为 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,MLSS为3000~3500 mg/L;F厂采用倒置A²/O工艺,流量为 $6.25 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,MLSS为3000~4500 mg/L;G厂采用CAST工艺,流量为 $0.36 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,MLSS为3000~3800 mg/L。

1.3 试验方法

① 呼吸曲线OUR测量

取0.6 L浓缩污泥(与各污水厂曝气池污泥浓度相同)至反应器,再取对应污水厂的0.6 L进水至反应器,打开测量软件开始记录。间歇曝气控制DO浓度在4~6 mg/L之间,以DO浓度下降梯度作为该时段反应器中的OUR值,然后监测好氧呼吸速率直至进入内源呼吸。控制pH值为7.5~8.5,试验温度为25℃。

② 呼吸图谱的测定

在测定过程中,污泥呼吸图谱主要包括5个耗氧速率,即现状 OUR_s 、准内源 OUR_{me} 、内源 OUR_{en} 、

加入氨氮后呼吸速率 OUR_N 、总耗氧速率 OUR_T , 具体过程详见文献[6,7]。

2 分析方法

2.1 进水底物降解时间计算

建立模型,以试验所测好氧呼吸速率为基准,以拟合与实测 OUR 差值的平方作为目标函数,通过 MATLAB 软件全局优化数学分析方法,估计进水组分初始值:易降解有机物 S_s 、慢速可降解有机物 X_s 、 NH_3-N 。根据污染物排放一级 A 标准:出水 $COD < 50 \text{ mg/L}$, $NH_3-N < 5 \text{ mg/L}$ 。一般情况下,在曝气沉淀池出水中, X_s 占出水 COD 的比例为 15% ~ 20%, S_s 所占比例为 10% ~ 15%。所以, S_s 浓度为 5 mg/L 时,认为其降解完全,记为 t_{ss} ; X_s 浓度为 10 mg/L 时,认为其降解完全,出水 COD 达标,记为 t_{xs} ; 进水 NH_3-N 为 5 mg/L 时,认为其降解完全,记为 t_{nh} 。

以上拟合求解工作通过 MATLAB 软件实现。HRT 为各污水厂的曝气池水力停留时间经换算后(控制容积负荷相同)的实验室水力停留时间。典型的模型拟合结果如图 1 所示。

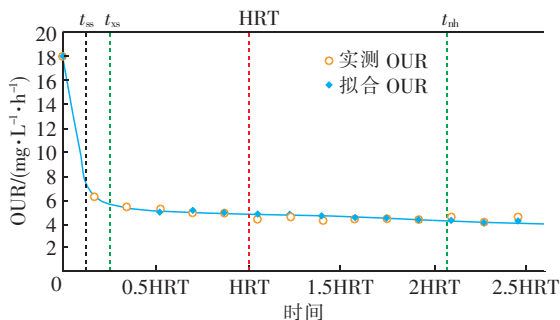


图 1 污水厂 OUR 曲线拟合结果

Fig. 1 Fitting results of OUR curve of WWTP

在 $0 \sim t_{ss}$ 阶段, OUR 曲线下落速度明显快于后续阶段,说明微生物主要利用底物 S_s 生长;进入 $t_{ss} \sim t_{xs}$ 阶段, OUR 曲线下落速度平缓,可认为此阶段主要由 X_s 的水解控制,此阶段微生物利用底物增长速度缓慢,好氧呼吸速率 OUR 较小且无明显变化;而在 $0 \sim t_{nh}$ 全阶段, NH_3-N 被微生物持续利用。

2.2 进水组分比例影响分析

假设模型进水组分 COD 以及生物量不变,通过调整组分中 S_s 、 X_s 、 NH_3-N 浓度,观察底物降解时间 t_{ss} 、 t_{nh} 与 HRT 的关系变化,估计 NH_3-N/COD 值、 X_s/COD 值对污泥降解底物速度的影响。

现场呼吸速率 OUR_s 理论意义为在污水厂出水状态下污泥降解底物的能力;总呼吸速率 OUR_T 表示污泥降解 COD 和 NH_3-N 的能力。根据 ASM1 中,底物降解与好氧呼吸速率求解 OUR_s 与 OUR_T 并计算其比值。

$$OUR = \frac{1 - Y_H}{Y_H} \mu_H \frac{S_s}{K_S + S_s} X_H + \frac{4.57 - Y_A}{Y_A} \mu_A \frac{S_{NH}}{K_{NH} + S_{NH}} X_A \quad (1)$$

计算 OUR_s 时进水组分参数按照出水一级 A 标准取值,计算 OUR_T 时进水组分为模型假设的初始值,其他参数对应模型中参数取值。

3 结果与讨论

3.1 进水组分影响模拟结果

活性污泥处理能力与进水水质以及污泥活性状态密切相关。通过控制进水 X_s/COD 值、 NH_3-N/COD 值,以底物降解时间 t_{ss} 、 t_{nh} 判断其在不同区间对污泥降解底物速度的影响。模型分析结果见表 2。

表 2 X_s/COD 值和 NH_3-N/COD 值的影响分析

Tab. 2 Influence of X_s/COD ratio and NH_3-N/COD ratio on fitting results

进水组分输入值		模型计算结果		出水水质判定	
$NH_3-N : COD / \%$	$X_s : COD / \%$	降解时间	$OUR_s : OUR_T / \%$	COD	NH_3-N
0 ~ 9	0 ~ 40	$< HRT$	< 34	达标	达标
0 ~ 9	40 ~ 60	$t_{nh} \leq t_{xs} < HRT$	34 ~ 38	达标	达标
0 ~ 9	60 ~ 100	$t_{nh} < HRT \leq t_{xs}$	> 38	超标	达标
9 ~ 15	0 ~ 40	$t_{ss} \leq t_{nh} < HRT$	34 ~ 38	达标	达标
9 ~ 15	40 ~ 60	$t_{ss} \leq t_{nh} < HRT$	34 ~ 38	达标	达标
9 ~ 15	60 ~ 100	$t_{nh} < HRT \leq t_{xs}$	> 38	超标	达标
15 ~ 100	0 ~ 40	$t_{ss} < HRT \leq t_{nh}$	> 38	达标	超标
15 ~ 100	40 ~ 60	$t_{ss} < HRT \leq t_{nh}$	> 38	达标	超标
15 ~ 100	60 ~ 100	$> HRT$	> 38	超标	超标

结果说明:当 NH_3-N/COD 值 $> 9\%$ 时,氨氮将代替 X_s ,呈现出难被污泥降解利用的性质,成为底物降解速度的主要限制组分,以底物降解时间表示即 $t_{ss} < t_{nh}$;当 X_s/COD 值 $> 40\%$ 时, X_s 的水解为限制反应速度的主要因子。

3.2 活性污泥处理能力分析

将建立的模型及其估算结果应用于各污水厂,计算底物降解时间,判断处理效果;拟合进水组分初始值,分析进水组分 NH_3-N/COD 值、 X_s/COD 值以

及 OUR_s/OUR_T 值,从水质特性与污泥特性两方面解释试验测量的各污水厂 OUR 曲线并判定其处理能力。出水时有机物浓度越低,则 OUR_s 值越小,所以 OUR_s 值在一定程度上可以表征污水厂出水状况。理论上 OUR_T 值越大,表示污泥所能承担的有机负荷越大。所以,通过 OUR_s/OUR_T 值不仅可以表征出水时污泥状态,也说明了其所能利用底物的能力。 OUR_s/OUR_T 值越小,认为微生物降解污染物的能力越强,代谢效率高。

① 进水组分中主要为 S_s , X_s 占比较小,根据模型估算当 X_s/COD 值 $<40\%$ 时, X_s 的水解不会限制微生物降解底物的速度, $t_{xs} < HRT$, 出水 COD 值能达标。进水中 X_s/COD 值 $<40\%$ 的拟合结果见图2。

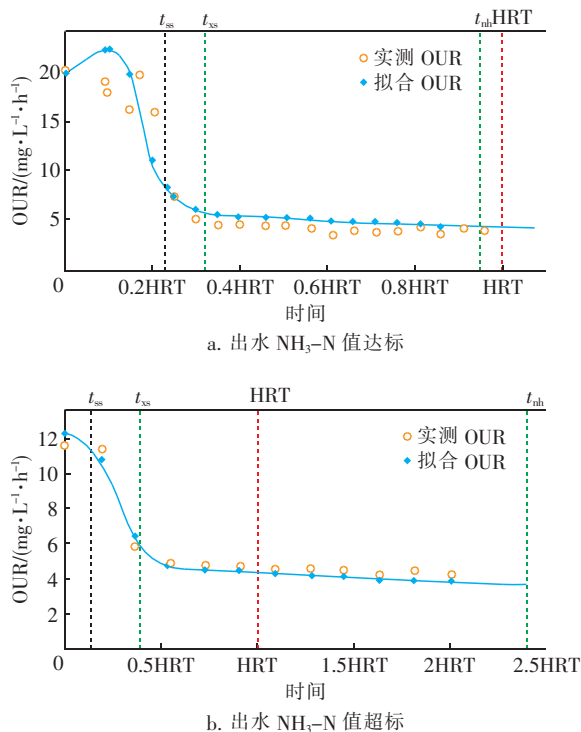


图2 进水中 X_s/COD 值 $<40\%$ 的拟合结果

Fig. 2 Fitting results with influent X_s/COD ratio $<40\%$

a. 当 $NH_3 - N/COD$ 值 $<9\%$, 即进水中 $NH_3 - N$ 浓度较低,微生物有足够能力降解利用,说明活性污泥处理能力很好;b. 当 $NH_3 - N/COD$ 值 $>9\%$, 此时相对于 X_s 的水解, $NH_3 - N$ 降解会限制反应速度, $t_{xs} < t_{nh}$, 说明出水 $NH_3 - N$ 值有可能超标,此时,应考虑 OUR_s/OUR_T 值,若其小于 38% , 能保证 $t_{xs} < t_{nh} < HRT$, 则出水 $NH_3 - N$ 值达标,如图2(a)所示, X_s/COD 值 $=36\%$, $NH_3 - N/COD$ 值 $=12\%$;反之超标,微生物降解底物效率较低,活性污泥处理能力较

差,如图2(b)所示, X_s/COD 值 $=24\%$, $NH_3 - N/COD$ 值 $=34\%$ 。

② 进水组分中 X_s 所占比重较大,当 X_s/COD 值 $>40\%$ 时, X_s 的水解会影响底物降解速度,底物降解时间为 $t_{nh} < t_{xs}$, 所以污水厂出水水质达标与否主要观察 X_s 的降解率。若 OUR_s/OUR_T 值 $>38\%$, 进水负荷超过污泥所能降解范围, $t_{xs} > HRT$, 出水 COD 浓度超标,如图3(a)所示, X_s/COD 值 $=53\%$, $NH_3 - N/COD$ 值 $=11\%$;若 OUR_s/OUR_T 值 $<38\%$, 出水 COD 值能达标,可能是因为未水解的 X_s 吸附于污泥表面随之进入内回流,并未随出水流出,活性污泥处理能力较好,如图3(b)所示, X_s/COD 值 $=66\%$, $NH_3 - N/COD$ 值 $=2\%$ 。

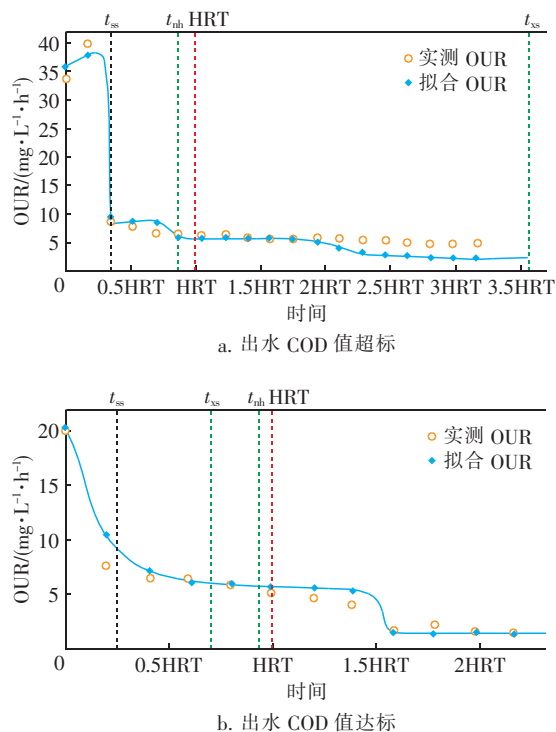


图3 进水中 X_s/COD 值 $>40\%$ 的拟合结果

Fig. 3 Fitting results with influent X_s/COD ratio $>40\%$

各污水厂数据分析结果见表3。将各污水厂试验测量 OUR 数据代入模型,求解进水初始值得进水组分比例,与表2中比例区间比较,分析影响底物降解速度主要因素;根据拟合的组分初始值计算底物降解时间及 OUR_s/OUR_T 值,判断污水厂出水水质与处理能力。

通过多组试验结果分析,得出不考虑进水组分 X_s/COD 值高低与否,当计算 OUR_s/OUR_T 值 $<38\%$ 时,出水水质达标,活性污泥处理能力较好。

表 3 污水厂拟合结果分析

Tab. 3 Fitting results of WWTP

项目	进水组分拟合		降解时间	控制变量	出水水质		OUR _s : OUR _T /%	
	NH ₃ - N : COD/%	X _S : COD/%			COD	NH ₃ - N	实测	计算
A 厂	12	36	$t_{xs} < t_{nh} < HRT$	NH ₃ - N	达标	达标	50	36
	10	32	$t_{xs} < t_{nh} < HRT$	NH ₃ - N	达标	达标	38	23
	13	39	$t_{xs} < t_{nh} < HRT$	NH ₃ - N	达标	达标	32	24
B 厂	28	23	$HRT < t_{xs} < t_{nh}$	NH ₃ - N	超标	超标	78	39
C 厂	26	54	$t_{xs} < HRT < t_{nh}$	NH ₃ - N	达标	超标	30	50
	10.5	35	$t_{xs} < t_{nh} < HRT$	NH ₃ - N	达标	达标	17	28
D 厂	6	72	$t_{nh} < HRT < t_{xs}$	X _S	超标	达标	60	40
	5	63	$t_{nh} < HRT < t_{xs}$	X _S	超标	达标	44	35
	2	65	$t_{nh} < HRT < t_{xs}$	X _S	超标	达标	50	40
E 厂	11	53	$t_{nh} < t_{xs} < HRT$	X _S	达标	达标	17	22
	6	41	$t_{nh} < t_{xs} < HRT$	X _S	达标	达标	12	23
F 厂	16	74	$HRT < t_{nh} < t_{xs}$	X _S	超标	超标	18	47
G 厂	42	10	$t_{xs} < HRT < t_{nh}$	NH ₃ - N	达标	超标	34	38
	32	25	$t_{xs} < HRT < t_{nh}$	NH ₃ - N	达标	超标	30	37
	2	66	$t_{nh} < HRT < t_{xs}$	X _S	超标	达标	56	42
	34	24	$t_{xs} < HRT < t_{nh}$	NH ₃ - N	达标	超标	81	40

4 结论

① 建立模型拟合 OUR 曲线,观察其形状及趋势,分析进水组分对微生物降解底物速度的影响,计算底物降解时间,并与水力停留时间 HRT 比较,分析污水厂出水水质。即当 $t_{ss} < t_{xs} < t_{nh} < HRT$,出水 COD 与 NH₃ - N 浓度均达标;若 $HRT < t_{xs}$ 或者 $HRT < t_{nh}$,出水水质超标; X_s /COD 值 > 40% 时, X_s 的水解主要影响其处理能力, $t_{xs} > t_{nh}$; 当 NH₃ - N/COD 值 > 9% 时, NH₃ - N 降解为主要影响因素, $t_{nh} > t_{xs}$ 。

② 结合呼吸图谱与 ASM1 模型,引入 OUR_s/OUR_T 参数对活性污泥处理能力进行表征。当 OUR_s/OUR_T 值 < 38% 时,其处理能力较好;当 OUR_s/OUR_T 值 > 38% 时,进水有机负荷超出污泥降解能力,出水水质达标有一定风险,处理能力较差。

参考文献:

[1] 钱静,高守有. 高标准污水处理厂提标改造工程的设计与调试运行[J]. 中国给水排水,2016,32(8):29 - 32.

[2] 孙广垠,张倬玮,李志丽. A²O 工艺用于北方某污水处理厂的升级改造[J]. 中国给水排水,2016,32(6):52 - 55.

[3] 李强,许运良,唐冰,等. 腾格里某污水处理厂改造工程设计[J]. 中国给水排水,2016,32(14):48 - 51.

[4] 卢培利,艾海强,张欣,等. 活性污泥模型碳氧化过程

参数的呼吸法估计[J]. 重庆大学学报,2009,32(2):187 - 191.

[5] 国际水协废水生物处理设计与运行数学模型课题组. 活性污泥数学模型[M]. 张亚雷,吴咏梅,译. 上海:同济大学出版社,2002.

[6] 李志华,孙垂猛,柴波. 不同类型活性污泥内源呼吸过程典型特征解析[J]. 中国给水排水,2015,31(7):25 - 28.

[7] 李志华,柴波,孙垂猛,等. 冲击与恢复条件下活性污泥 OUR 的变化规律[J]. 中国给水排水,2015,31(9):19 - 22,28.



作者简介:张润强(1997 -),男,陕西乾县人,本科,研究方向为废水生物处理技术。

E-mail: rabot@live.cn

收稿日期:2016 - 09 - 13