

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.11.015

基于灵敏度分析的ASM2d数学模型参数集校核方法

邓仁健¹, 宋雨佳¹, 任伯帜¹, 周赛军¹, 张金松²

(1. 湖南科技大学 土木工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 深圳市水务<集团>有限公司, 广东 深圳 518030)

摘要: 针对ASM2d模型应用过程中需校核的参数多、数据量大、各参数之间相互影响等问题,提出了以灵敏度分析、参数集识别和目标函数求解为一体的模型参数集校核方法,并利用该方法对MSBR工艺的ASM2d模型参数进行了校核。结果表明,18个模型参数会对模拟预测结果产生影响,其中12个参数需要校核,包括3个化学计量数(Y_{PAO} 、 Y_H 和 Y_{PO4})、9个动力学参数(μ_{AUT} 、 b_{AUT} 、 K_{NH4} 、 b_H 、 η_{NO3} 、 μ_{PAO} 、 b_{pp} 、 b_{PAO} 和 q_{pp})。对参数校核以后的模型进行动态模拟检验发现,出水SS、COD、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、TP和TN的模拟值与实测值之间的平均相对偏差分别为6.0%、9.0%、15.7%、9.6%、14.9%和7.0%,但 NH_4^+-N 和TP的平均绝对误差仅为0.21和0.13 mg/L,模型具有较高的预测精度,证明该参数校核方法可行。

关键词: ASM2d; 数学模型; 参数集; 校核; 灵敏度分析

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)11-0083-08

Check Method of ASM2d Mathematical Model Parameter Set Based on Sensitivity Analysis

DENG Ren-jian¹, SONG Yu-jia¹, REN Bo-zhi¹, ZHOU Sai-jun¹, ZHANG Jin-song²

(1. School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 2. Shenzhen Water <Group> Co. Ltd., Shenzhen 518030, China)

Abstract: There are many parameters to check, large amount of data and mutual influence among parameters in the application of ASM2d model. To solve these problems, a model parameter set check method, which integrated sensitivity analysis, parameter set identification and objective function solution, was proposed and applied to check the parameters of MSBR process in ASM2d model. Eighteen model parameters affected the simulation prediction results, of which 12 parameters needed to be checked, including 3 stoichiometric parameters (Y_{PAO} , Y_H and Y_{PO4}) and 9 kinetic parameters (μ_{AUT} , b_{AUT} , K_{NH4} , b_H , η_{NO3} , μ_{PAO} , b_{pp} , b_{PAO} and q_{pp}). The model was tested by dynamic simulation after checking the parameters. The average relative deviations between the simulated values and measured values of SS, COD, NH_4^+-N , NO_3^--N , TP and TN were 6.0%, 9.0%, 15.7%, 9.6%, 14.9% and 7.0%, respectively, but the average absolute errors of NH_4^+-N and TP were only 0.21 mg/L and 0.13 mg/L, indicating that the model has high prediction accuracy and the parameter check method is feasible.

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(2018M632961); 国家自然科学基金资助项目(41672350); 湖南省教育厅科学研究项目(18A184)

通信作者: 邓仁健 E-mail: 800912deng@sina.com

Key words: ASM2d; mathematical model; parameter set; check; sensitivity analysis

国际水协(IWA)推出的ASM2d数学模型在污水处理工艺的脱氮除磷机理、设计、运行优化和升级改造等方面具有显著优势,已成为出水仿真预测、工艺优化和节能控制的有效辅助工具^[1]。IWA虽然给出了其化学计量学和动力学参数的默认值,但工程中若应用默认值则难以模拟实际过程,所以需要校核。ASM2d模型中需校核的参数较多,各参数具有不确定性且参数变化是非线性的^[2-3],具有参数集的特征^[2]。采用传统呼吸测量法对这些参数进行逐一校核往往费时又耗力,而且还不能反映各参数之间的相互影响效应。因此,如何对ASM2d模型的参数集进行识别与校核是模型构建和应用过程中需要首先解决的问题。

基于此,笔者以ASM2d模型为基础,在GPS-X仿真软件平台上构建了MSBR工艺数学模拟模型^[4],利用灵敏度分析方法筛选出该工艺需要校核的动力学参数和化学计量数,借助生产运行数据以均方敏感性分析方法对需要校核的参数集进行识别和重要等级排序^[5];然后以COD、NH₄⁺-N、TN和TP等4个指标的加权误差平方和为目标函数,对参数集进行求解;最后,利用污水厂的实际运行数据对校核结果进行检验,评估参数集校核的可行性和合理性,以期活性污泥数学模型提供一种新的参数校核方法。

1 ASM2d参数集校核方法的构建

1.1 实验条件及基本情况

研究对象为深圳YT污水处理厂,该污水厂采用MSBR工艺,由A²/O和SBR工艺串联而成,可实现连续进水、恒水位运行,能够创造较好的厌氧、缺氧和好氧环境,具有较好的脱氮除磷效果^[6-7]。邓仁健等^[4]采用A²/O+推流反应器+矩形沉淀池对MSBR工艺进行静态模拟,但未对相关模型参数进行校核,导致动态模拟误差较大。因此,在文献^[7]所构建模型的基础上,以加拿大Hydromantis公司的GPS-X软件作为仿真软件,对模型的动力学参数和化学计量数进行校核,并利用YT污水厂2011年11月—12月的实际进水水质和运行工况对校核结果进行了检验。

1.2 参数灵敏度分析方法

采用过程工程灵敏度分析法对ASM2d模型的化学计量学及动力学参数进行分析,进而筛选出需要校核的参数。模型参数的灵敏度 $s_{i,j}$ 是指参数 x_i 变化对系统状态变量 y_j 的影响程度,具体计算方法见式(1)^[5]。

$$s_{i,j} = \frac{dy_j/y}{dx_i/x} = \frac{(y_2 - y_1)/y_1}{(x_1 - x_2)/x_1} \quad (1)$$

式中: x_1, x_2 分别为参数的典型值及调整后的值; y_1, y_2 分别为目标指标在 x_1, x_2 下的对应预测值。

Liwerska-Bizukojc等^[8]认为,当 $|s_{i,j}| \leq 0.25$ 时,表明参数 x_i 变化对系统状态变量 y_j 的影响很小,参数不需校核;当 $0.25 < |s_{i,j}| \leq 1.0$ 时,有影响,参数可能需要校核;当 $1.0 < |s_{i,j}| \leq 2.0$ 时,有较大影响,参数需要校核;当 $|s_{i,j}| \geq 2.0$ 时,有显著影响,参数必须校核。

1.3 参数集识别方法

为了提高模型参数校核效率和准确性,利用可辨识性分析方法对模型的参数集进行了识别^[2]。可辨识性分析方法包括计算敏感性 δ_j^{msqr} 、共线性指数 γ_k 和可识别程度 ρ_k 等3个参数。这3个参数均与灵敏度 $s_{i,j}$ 相关, $s_{i,j}$ 的计算过程见式(2)。

$$\begin{aligned} S &= \{s_{i,j}\} \\ \tilde{S}_k &= \{\hat{s}_{i,j}\} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: S 为无量纲的灵敏度矩阵; \tilde{S}_k 为 S 的标准化矩阵; $s_{i,j}$ 为灵敏度; $\hat{s}_{i,j} = s_{i,j} / \|s_{i,j}\|$, $\|s_{i,j}\|$ 为矩阵 S 第 j 列的范德华模数。

δ_j^{msqr} 按式(3)计算。

$$\delta_j^{\text{msqr}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n s_{i,j}^2} \quad (3)$$

γ_k 按式(4)计算。

$$\gamma_k = \frac{1}{\min_{\|\beta\|=1} \|\tilde{S}_k \beta\|} = \frac{1}{\sqrt{\tilde{\lambda}_k}} \quad (4)$$

式中: \tilde{S}_k 为参数集 K 中所包含的 $n \times k$ 标准化矩阵或归一化矩阵,其列等于参数集 K 的矢量 s_j ; β 为长度为 k 的矢量系数; $\tilde{\lambda}_k$ 为矩阵 $\tilde{S}_k^T \tilde{S}_k$ 的最小特

征值。

参数集的可识别程度 ρ_k 按式(5)计算。

$$\rho_k = \det(S_k^T S_k)^{1/(2k)} = \left(\prod_{j=1}^k \lambda_j \right)^{1/(2k)} \quad (5)$$

式中: λ_j 为矩阵 $S_k^T S_k$ 的第 j 个特征值。

一般认为, δ_j^{msqr} 越大表明参数 j 对模型的模拟结果影响程度越大,且重要等级越高^[2]。当 δ_j^{msqr} 为0时表示参数 j 对模型的预测结果不会产生影响,无需校核。 γ_k 表示模型参数集中各参数的关联程度,也代表了 \tilde{S}_k 列的线性程度,当 γ_k 为无穷大时,则 \tilde{S}_k 列是线性的,表明参数集 K 中的参数 θ_j 的微小变化对预测结果的影响可以通过调整参数集 K 中其他参数进行补偿;一般认为,当 $\gamma_k \geq 9$ 时,参数集 K 共线性较好,参数集可识别性差。 ρ_k 代表了模型参数集的可识别程度,包含了由 δ_j^{msqr} 和 γ_k 提供的信息,当 δ_j^{msqr} 很大且 γ_k 很小时,则 ρ_k 很大; γ_k 越小且 ρ_k 越大表示参数集 K 的可识别程度越高。当 $\rho_k \geq 10$ 时,认为参数集可被识别。

1.4 参数集目标校核函数

模型参数校核的目标是使模拟值尽可能与实测值相吻合。考虑到YT污水厂出水水质要达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准,同时尽量降低出水TP浓度,可采用COD、 NH_4^+-N 、TN和TP等污染物指标的加权误差平方和的最小值作为目标函数,见式(6)。

$$J(\theta) = \sum_{i=1}^n \left[\frac{Y_{i,\text{COD}} - \hat{Y}_{i,\text{COD}}(\theta)}{\hat{Y}_{\text{COD}}} \right]^2 + \sum_{i=1}^n \left[\frac{Y_{i,\text{NH}_4^+-\text{N}} - \hat{Y}_{i,\text{NH}_4^+-\text{N}}(\theta)}{\hat{Y}_{\text{NH}_4^+-\text{N}}} \right]^2 + \sum_{i=1}^n \left[\frac{Y_{i,\text{TN}} - \hat{Y}_{i,\text{TN}}(\theta)}{\hat{Y}_{\text{TN}}} \right]^2 + \sum_{i=1}^n \left[\frac{Y_{i,\text{TP}} - \hat{Y}_{i,\text{TP}}(\theta)}{\hat{Y}_{\text{TP}}} \right]^2 \quad (6)$$

式中: θ 为校核的参数集; Y_i 、 \hat{Y}_i 分别为第 i 个实测值和模拟值; n 为实测值个数。

1.5 参数集的检验方法

利用污水厂实际进水及工艺运行工况对参数校核后的模型进行预测,并采用平均相对偏差ARD对校核后模型的预测精度进行评价。ARD的计算

方法见式(7)^[9]。

$$\text{ARD} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{x_i - y_i}{x_i} \right| \times 100\% \quad (7)$$

式中:ARD为平均相对偏差,%; N 为实测数据数目; x_i 和 y_i 分别为实测值和模拟值,mg/L。

2 检验与应用

2.1 模型需校核参数的筛选

在文献[7]所建模型的基础上,利用GPS-X软件自带的灵敏度分析库,将ASM2d模型中化学计量学及动力学参数在原有基础上+10%后^[8,10],计算出各个参数(j)对出水SS、COD、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、TN、TP及泥龄(SRT)的灵敏度 $|s_{i,j}|$,结果见图1。

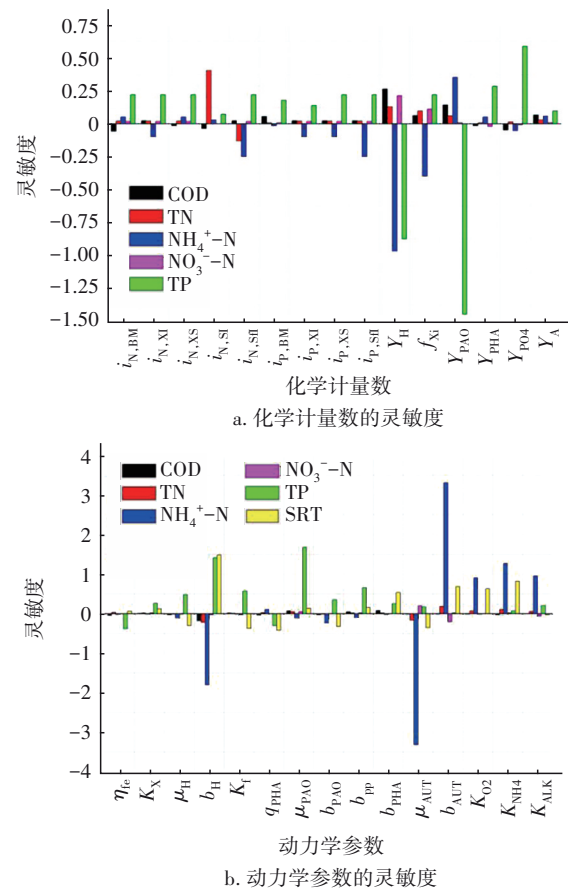


图1 ASM2d模型的化学计量数和动力学参数灵敏度分析

Fig.1 Sensitivity analysis results of stoichiometric parameters and kinetic parameters of ASM2d model

由图1(a)可知,不同化学计量数对应的各参数灵敏度 $|s_{i,j}|$ 在0~1.45之间;对TN、 NH_4^+-N 和TP的影响较大,其中 Y_H 、 Y_{P04} 、 Y_{PAO} 等化学计量数的灵敏度 $|s_{i,j}|$ 均超过0.5,可能需要校核;此外,根据文献[11]

和文献[12], Y_{PHA} 和 f_{Xi} 等化学计量数也建议校核。由图1(b)可知,不同动力学参数对应的灵敏度 $|s_{i,j}|$ 在0~3.32之间;对TP、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和SRT的影响较大,其中 μ_{H} 、 μ_{PAO} 、 μ_{AUT} 、 b_{H} 、 b_{pp} 、 b_{PHA} 、 b_{AUT} 、 K_{f} 、 K_{O_2} 、 K_{NH_4} 和 K_{ALK} 等动力学参数的灵敏度 $|s_{i,j}|$ 均超过0.5,需要校核。

2.2 模型参数重要等级排序

根据式(3)计算出MSBR工艺需要校核参数(灵敏度 $|s_{i,j}| > 0.5$)的 δ_j^{msqr} 值,其中 $\delta_j^{\text{msqr}} > 0.2$ 的排序见表1。

表1 ASM2d模型参数重要等级排序结果

Tab.1 Parameter importance ranking of ASM2d model

序号	参数	δ_j^{msqr}
1	μ_{AUT}^*	1.361
2	b_{AUT}^*	1.358
3	b_{H}^*	0.961
4	μ_{PAO}^*	0.684
5	Y_{PAO}^*	0.614
6	$Y_{\text{H好氧}}^*$	0.554
	$Y_{\text{H缺氧}}^*$	0.554
7	$K_{\text{NH}_4}^*$	0.396
8	K_{ALK}	0.379
9	K_{O_2}	0.308
10	k_{p}	0.289
11	$\eta_{\text{NO}_3}^*$	0.275
12	b_{pp}^*	0.268
13	b_{PAO}^*	0.268
14	$Y_{\text{PO}_4}^*$	0.247
15	K_{f}	0.247
16	q_{pp}^*	0.245
17	μ_{H}	0.218
18	f_{Xi}	0.206

注: *表示可利用实际生产数据进行校核的参数。

由表1可以看出,对模型输出结果影响最大的参数是 μ_{AUT} 和 b_{AUT} , K_{NH_4} 、 K_{ALK} 和 K_{O_2} 等与自养菌相关的参数也进入了前18位;异养菌 b_{H} 的 δ_j^{msqr} 值为0.961,排序第三,对模拟结果具有重要影响。与异养菌相关的化学计量数(Y_{H} 、 f_{Xi})和动力学参数(k_{p} 、 μ_{H} 和 η_{NO_3})等对模型的预测结果有较大影响。与聚磷菌(PAOs)相关的参数 μ_{PAO} 对模型的结果输出也有较大影响。在这18个参数中有4个参数(Y_{PAO} 、 Y_{PO_4} 、 Y_{H} 、 f_{Xi})与化学计量数有关,有5个参数(μ_{AUT} 、 b_{AUT} 、 K_{NH_4} 、 K_{ALK} 和 K_{O_2})与自养菌有关,有5个参数(b_{H} 、 k_{p} 、

η_{NO_3} 、 K_{f} 和 μ_{H})与异养菌有关,有4个参数(μ_{PAO} 、 b_{pp} 、 b_{PAO} 和 q_{pp})与PAOs^[11]有关。从参数的重要等级和分布情况来看,硝化菌、异养菌和PAOs等微生物种群相对均衡,反映了MSBR工艺的功能特点,即脱氮除磷功能相对均衡。

综上,MSBR工艺模型中共有18个化学计量数和动力学参数对模型的预测结果有影响。为了避免共线性作用对模拟结果的干扰^[2],根据式(4)和(5)计算出参数集K分别为2~18时的 γ_k 和 ρ_k ,见表2。可知,当参数集K>16时, γ_k 均达到9以上,表明当K>16时的参数集共线性较好,不能同时校核;同时, γ_k 越小且 ρ_k 越大表明参数集K的可识别程度越高。一般认为,当 $\rho_k > 10$ 时,参数集K才能识别。因此,模型能够同时校核的最大参数集K=12,即同时识别的参数为12个。根据经验和调研结果^[12],选取表1中带*的12个参数进行校核,其中 Y_{PAO} 、 Y_{H} 、 Y_{PO_4} 等3个参数为化学计量数; μ_{AUT} 、 b_{AUT} 、 K_{NH_4} 等3个参数与自养菌相关; b_{H} 、 η_{NO_3} 两个参数与异养菌有关; μ_{PAO} 、 b_{pp} 、 b_{PAO} 、 q_{pp} 等4个参数与PAOs有关。

表2 ASM2d模型参数集的识别结果

Tab.2 Identifiability analysis results of parameter set of ASM2d model

参数集 K值	$\gamma_{k,\min}$	$\gamma_{k,\max}$	$\rho_{k,\min}$	$\rho_{k,\max}$	$\gamma_{k,\min} < 9$ 的百分率/%
2	1.0	11.6	0.2	45.1	99.3
3	1.0	15.7	0.3	30.3	98.0
4	1.2	22.7	0.3	28.9	95.1
5	1.5	25.6	0.4	25.0	93.4
6	1.7	32.1	0.4	18.7	86.5
7	1.8	32.5	0.4	16.4	75.4
8	2.0	35.4	0.4	14.6	59.4
9	2.3	37.5	0.5	11.5	53.5
10	2.4	45.2	0.5	10.9	41.1
11	2.7	45.9	0.5	10.3	37.7
12	2.9	52.1	0.6	10.1	26.9
13	3.1	53.7	0.6	6.3	11.7
14	3.8	54.6	0.6	5.9	6.5
15	4.5	55.1	0.6	4.6	1.5
16	6.7	55.8	0.6	2.0	1.3
17	9.1	56.1	0.7	1.5	0.0
18	10.5	56.2	0.7	1.3	0.0

2.3 参数集的校核分析

表3为GPS-X软件优化模块对目标函数式(6)的参数集K优化求解结果。由表3可以看出,化学

计量数 Y_H 无论是在缺氧还是好氧条件下均比默认值0.625要低,原因可能是MSBR工艺中存在后置内源反硝化^[13]降低了异养菌的产率系数;化学计量数 Y_{PAO} 的校核值仅为0.075 mgP/mgCOD,远低于默认值0.40 mgP/mgCOD。

表3 模型参数集的默认值和校核值

Tab.3 Default and calibrated values of model parameter set

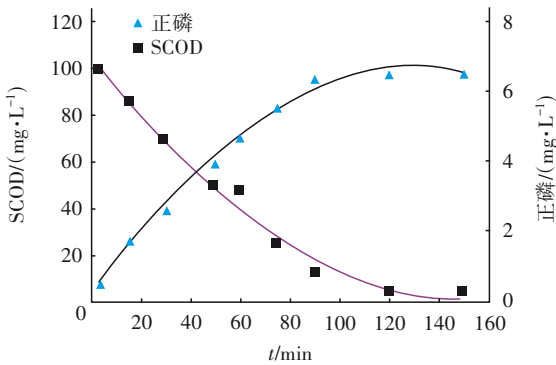
序号	参数	默认值	校核值
1	μ_{AUT}/d^{-1}	1.0	1.15
2	b_{AUT}/d^{-1}	0.15	0.16
3	μ_{PAO}/d^{-1}	1.0	1.15
4	$Y_{PAO}/(mgP \cdot mg^{-1} COD)$	0.40	0.075
5	$K_{NH4}/(mgN \cdot L^{-1})$	1.0	1.2
6	$Y_{H缺氧}/(mgCOD \cdot mg^{-1} COD)$	0.625	0.55
	$Y_{H好氧}/(mgCOD \cdot mg^{-1} COD)$	0.625	0.60
7	b_H/d^{-1}	0.40	0.45
8	η_{NO3}	0.80	0.65
9	b_{PP}/d^{-1}	0.2	0.3
10	b_{PAO}/d^{-1}	0.2	0.15
11	$Y_{PO4}/(mgP \cdot mg^{-1} COD)$	0.4	0.3
12	$q_{PP}/(mgX_{PP} \cdot mg^{-1} X_{PAO} \cdot d^{-1})$	1.25	0.75

为此,利用厌氧序批式实验法^[14]对 Y_{PAO} 进行验证,如图2所示。当乙酸初始浓度为100 mg/L时,厌氧90 min后COD浓度较低,释磷结束,但总释磷量只有6.5 mg/L,计算得到 Y_{PAO} 为0.0625 mgP/mgCOD,与优化求解得到的 Y_{PAO} 接近,这与Makinia等人的结果一致^[15]。由于 Y_{PAO} 值越小厌氧释磷量越低,这与案例污水厂厌氧池的释磷量(2~6 mg/L)相吻合。可见,参数集识别后校核得到的 Y_{PAO} 值是可信的。

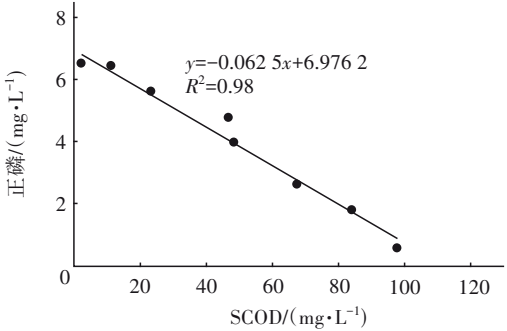
有关硝化菌中的 μ_{AUT} 、 b_{AUT} 和 K_{NH4} 校核值分别为1.15 d⁻¹、0.16 d⁻¹和1.2 mgN/L,均高于默认值。与模型建立的实验相比,实际污水厂中由于湍流强度小且污泥颗粒尺寸大等原因,校核后的参数值往往会大于小试得到的默认值,这与Makinia等^[15]的研究结论相似。此外,虽然 K_{ALK} 和 K_{O2} 两个参数的排序较高,但根据文献^[16]的结果,结合该污水厂好氧停留时间长(5.6 h)且进水 NH_4^+-N 低等原因,未对其进行校核。

异养菌衰减系数 b_H 的校核值为0.45 d⁻¹,大于默认值0.40 d⁻¹,与文献^[16]的0.48 d⁻¹接近。相关研究^[16]均对反硝化速率降低修正因子 η_{NO3} 进行了校核,表明 η_{NO3} 是模型着重需要校核的动力学参数之

一。由于 $Y_{H缺氧}$ 校核后减小至0.55 mgCOD/mgCOD,依据缺氧生长(反硝化)化学计量学系数 $= (1 - Y_{H缺氧}) / 2.86 Y_{H缺氧}$ ^[12],校核后的 η_{NO3} 由0.80减小至0.65,与文献^[16]校核后的0.60接近,主要原因是好氧曝气时间过长,微生物体内的聚羟基脂肪酸酯(PHA)贮存量下降^[17],导致 η_{NO3} 减小。这些参数调整后,模型预测的出水 $NO_3^- - N$ 值与实测值吻合较好。



a. SCOD与正磷浓度的变化



b. SCOD与正磷浓度的线性关系

图2 厌氧序批式实验法对参数 Y_{PAO} 的校核结果

Fig.2 Checking result of Y_{PAO} by anaerobic sequencing batch experiment

PAOs最大生长速率 μ_{PAO} 校核后由1.0 d⁻¹增加到1.15 d⁻¹;PAOs的溶菌速率常数 b_{PAO} 校核后由0.2 d⁻¹减小至0.15 d⁻¹;Poly-P贮存速率常数 q_{PP} 校核后由1.25 mg X_{PP} /(mg $X_{PAO} \cdot d$)减小至0.75 mg X_{PP} /(mg $X_{PAO} \cdot d$)。这些动力学参数的校核变化趋势与Makinia等^[9]利用具有预缺氧反硝化的JHB工艺得到的研究结果相同,但与强化除磷工艺中得到的结论不同,这在一定程度上反映了MSBR工艺并不是专门强化除磷的工艺^[18]。

2.4 模型预测精度检验

2.4.1 模拟出水水质检验

利用YT污水厂2011年11月—12月进水水质和运行工况(曝气量、排泥量、污泥及浓缩污泥回流

比等)对校核后模型的预测结果进行了检验,结果如图3所示。可知,出水SS实测值为7.0~16.0 mg/L,比模拟值8.4~15.5 mg/L略微低一些,见图3(a)。原因是沉淀模型无法模拟SBR池底挡板对出水沉淀的促进效果,但预测出水SS的ARD仅为6.0%。此外,模拟出水的SS有微小波动,原因是采用了间歇式污泥回流控制,使沉淀池的负荷出现波动,导致出水COD模拟值有微小波动,见图3(b)。校核后模型能够预测出水COD的波动变化,且模拟值与实测值的ARD仅为9.0%。可见,模型校核后对出水SS和COD的预测是可行的。校核后 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 及 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的模拟值与实测值的动态变化趋势基本一致,见图3(c)。这也使出水TN模拟值与实测值吻

合较好,见图3(d)。模拟出水的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和TN的ARD仅分别为15.7%、9.6%和7.0%,但 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的模拟值与实测值的平均绝对误差仅为0.21 mg/L。可见,对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 以及TN的预测结果是可以接受的。出水TP的模拟值与实测值总体上变化趋势是一致的,如图3(e)所示。出水TP的ARD为14.9%,但是模拟值与实测值的平均绝对误差只有0.13 mg/L,可见,模型对TP的预测是可以接受的。根据好氧池中MLSS的模拟值与实测值的变化情况,参数校核后模型对好氧池MLSS的模拟值与实测值较吻合,如图3(f)所示,其ARD仅为7.0%,说明模型能够反映MSBR工艺系统内污泥浓度的变化情况。

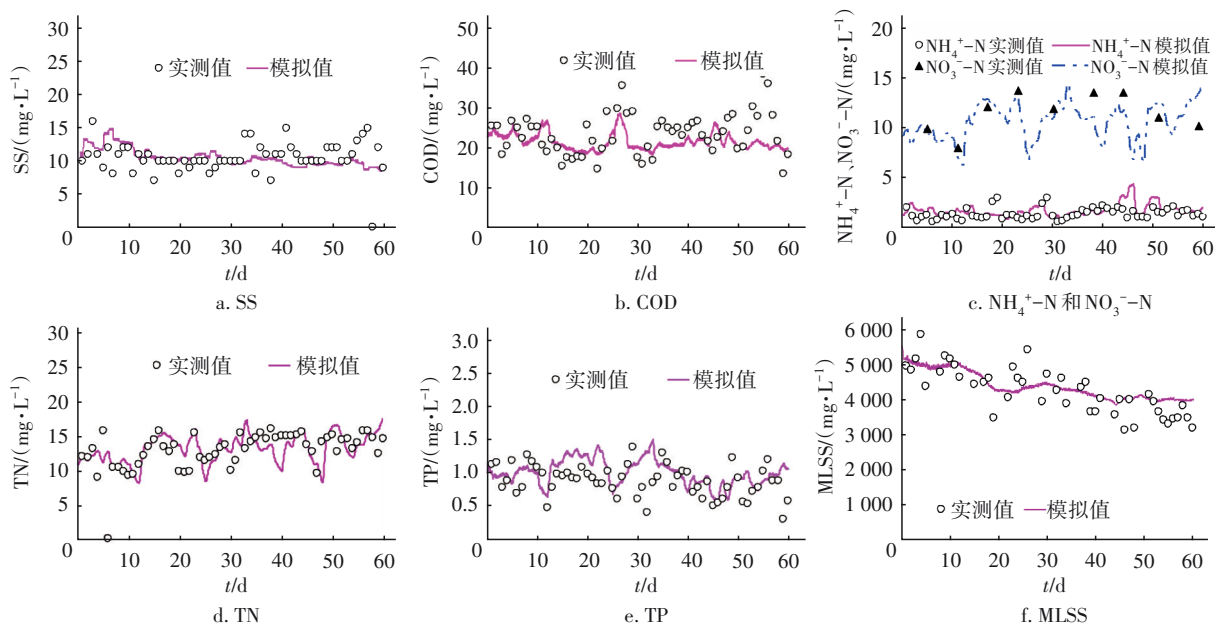


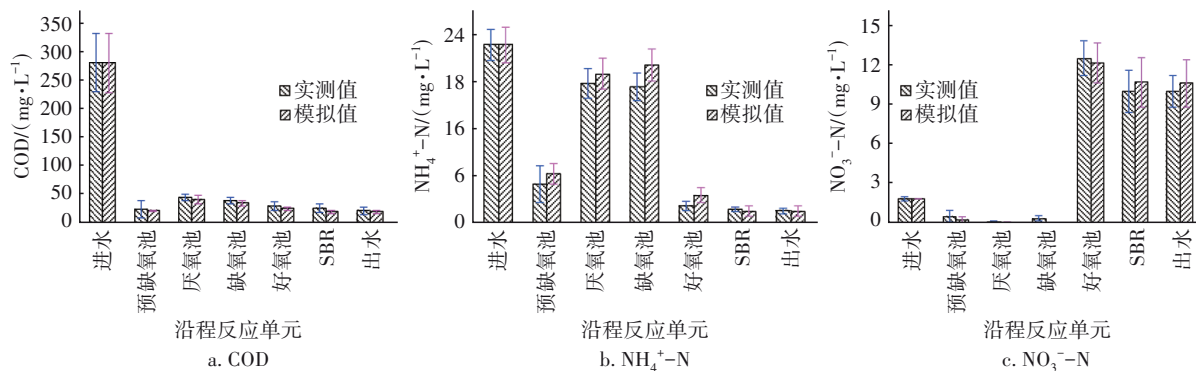
图3 MSBR工艺出水模拟值与实测值的对比

Fig.3 Comparison between simulated values and measured values

2.4.2 模拟沿程浓度分布的检测

从出水污染物浓度来判断模型的预测精度是不够全面的,不能反映污染物的沿程变化和去除机

理。为此,进一步分析了模型模拟的COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TN和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度的沿程分布情况,如图4所示。



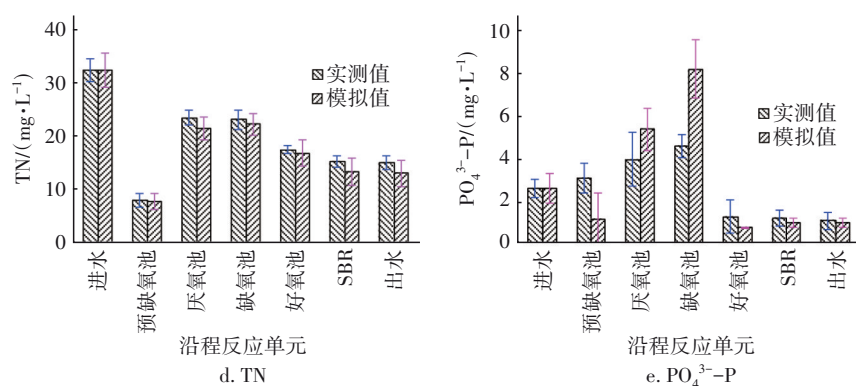


图4 污染物沿程模拟值与实测值的对比

Fig.4 Comparison of simulated values and measured values along the process

由图4可知,模拟的COD、 NO_3^- -N、TN、 NH_4^+ -N、 PO_4^{3-} -P在各反应单元的浓度分布情况与实测值接近,其对应的最大相对误差RE分别为6.6%、8.9%、9.8%、16.6%和41.8%,但 NH_4^+ -N的最大绝对误差只有0.29 mg/L。厌氧池、缺氧池和预缺氧池的 PO_4^{3-} -P模拟值与实测值有一定差别,原因可能是实际运行过程中会不定期投加少量的除磷药剂,而模拟过程中未包含化学除磷过程。综上所述,模型预测的反应单元浓度分布情况与实测值均接近。

3 结论

① 基于灵敏度分析、参数集识别和目标函数求解为一体的模型参数集校核方法可以对ASM2d模型众多参数同时进行校核,有效解决了传统参数校核方法费时费力且精准度不高等问题。

② 模型参数集校核方法对YT污水厂的校核结果表明,有18个参数会对模型的预测结果产生影响,其中 Y_{PAO} 、 Y_{H} 、 Y_{PO4} 、 μ_{AUT} 、 b_{AUT} 、 K_{NH4} 、 b_{H} 、 η_{NO3} 、 μ_{PAO} 、 b_{pp} 、 b_{PAO} 、 q_{pp} 等12个参数需要校核。需要校核参数的等级及分布表明MSBR工艺中硝化菌、异养菌和PAOs等微生物种群相对均衡。可见,利用该方法对模型参数集进行识别及重要等级排序是可行的。

③ 对模型参数进行校核后,YT污水厂动态模拟检验结果表明,出水SS、COD、 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N、TP和TN模拟值和实测值之间的ARD分别为6.0%、9.0%、15.7%、9.6%、14.9%和7.0%,但 NH_4^+ -N和TP的平均绝对误差仅分别为0.21和0.13 mg/L,表明模型预测精度较高,该参数校核方法可行。

参考文献:

[1] 周军. 工艺仿真模型在城市污水处理厂的应用[J]. 净水技术, 2018, 37(5): 20-24, 38.

ZHOU Jun. Application of simulation model for technological process in municipal wastewater treatment plant [J]. Water Purification Technology, 2018, 37 (5): 20-24, 38 (in Chinese).

[2] KESKITALO J, LEIVISKA K. Application of evolutionary optimisers in data-based calibration of activated sludge models [J]. Expert Systems with Applications, 2012, 39(7): 6609-6617.

[3] 刘玉田. SBR工艺 N_2O 动力学模型构建及关键减排控制因子研究[D]. 济南: 济南大学, 2017.

LIU Yutian. Research on Establishment of N_2O Dynamics Model and Key Control Factors in Sequencing Batch Reactor Wastewater Treatment Process [D]. Jinan: University of Jinan, 2017 (in Chinese).

[4] 邓仁健, 张金松, 曲志军. MSBR工艺数学模拟的反应器构建方法研究[J]. 给水排水, 2013, 39(4): 114-120.

DENG Renjian, ZHANG Jinsong, QU Zhijun. Study on the constructing method of the reactor for MSBR process digital modeling [J]. Water & Wastewater Engineering, 2013, 39(4): 114-120 (in Chinese).

[5] 董姗燕, 姚重华. 单级活性污泥过程数学模型ASM2D参数的灵敏度分析[J]. 环境化学, 2005, 24(2): 129-133.

DONG Shanyan, YAO Chonghua. Sensitivity analysis for the parameters in ASM2D [J]. Environmental Chemistry, 2005, 24(2): 129-133 (in Chinese).

[6] GKOTSIS P, TSILOGEORGIS J, ZOUBOULIS A. Hydraulic performance and fouling characteristics of a membrane sequencing batch reactor (MSBR) for landfill leachate treatment under various operating conditions [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(13): 12274-12283.

[7] 武永爱. 厌氧分解+MSBR法处理某工业园生产废水

- [J]. 辽宁化工, 2019, 48(5): 467-469.
- WU Yong'ai. Application of anaerobic decomposition+MSBR process in treatment of wastewater from an industrial park [J]. Liaoning Chemical Industry, 2019, 48 (5): 467-469(in Chinese).
- [8] LIWARSKA-BIZUKOJC E, BIERNACKI R. Identification of the most sensitive parameters in the activated sludge model implemented in BioWin software [J]. Bioresource Technology, 2010, 101 (19): 7278-7285.
- [9] MAKINIA J, ROSENWINKEL K H, SPERING V. Comparison of two model concepts for simulation of nitrogen removal at a full-scale biological nutrient removal pilot plant [J]. Journal of Environmental Engineering, 2006, 132(4): 476-487.
- [10] 杨跃. 三沟式氧化沟工艺数值模拟与优化运行研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- YANG Yue. Numerical Simulation and Optimization of a Triple Oxidation Ditch Process [D]. Harbin: Harbin University of Technology, 2010(in Chinese).
- [11] GAO H, ZHAO X T, ZHOU L, *et al.* Distinctive nitrogen oxides reduction capabilities of a denitrifying polyphosphate accumulating organisms (DPAOs) enrichment in a long-term nitrite fed sequencing batch reactor [J]. Proceedings of the Water Environment Federation, 2017, 2017(10): 2565-2588.
- [12] 汪林. 反硝化同步除磷动力学原理及其在改善MSBR性能中的应用[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
- WANG Lin. The Dynamic Principles of Denitrifying Simultaneous Phosphorus Removal and Application to Improving the Performance of MSBR Operation [D]. Chongqing: Chongqing University, 2010(in Chinese).
- [13] DENG R J, SHAO R, ZHANG J S, *et al.* The effects of secondary-phosphorus release on biological-phosphorus removal in a pre-anoxic process[J]. Journal of Residuals Science and Technology, 2016, 13(4): 307-316.
- [14] GARCIA-USACH F, RIBES J, FERRER J, *et al.* Calibration of denitrifying activity of polyphosphate accumulating organisms in an extended ASM2d model [J]. Water Research, 2010, 44(5): 5284-5297.
- [15] MAKINIA J, ROSENWINKEL K H, SWINARSKI M, *et al.* Experimental and model-based evaluation of the role of denitrifying polyphosphate accumulating organisms at two large scale WWTPs in northern Poland [J]. Water Science & Technology, 2006, 54 (8): 73-81.
- [16] HAUDUC H, RIEGER L, OHTSUKI T, *et al.* Activated sludge modelling: development and potential use of a practical applications database [J]. Water Science & Technology, 2011, 63(10): 2164-2182.
- [17] CHENG X X, ZHANG M, WANG Z Q, *et al.* IR and kinetic study of sewage sludge combustion at different oxygen concentrations [J]. Waste Management, 2018, 74: 279-287.
- [18] 张淼, 何成达, 王淑莹, 等. A²/O+MBBR系统的快速启动及反硝化除磷特性[J]. 工程科学与技术, 2017, 49 (2): 240-247.
- ZHANG Miao, HE Chengda, WANG Shuying, *et al.* Rapid start-up and denitrifying phosphorus removal characteristics of A²/O+MBBR process [J]. Advanced Engineering Sciences, 2017, 49 (2): 240-247 (in Chinese).

作者简介: 邓仁健(1980-), 男, 湖南桂阳人, 博士, 教授, 主要研究方向为污水处理理论及资源化利用。

E-mail: 800912deng@sina.com

收稿日期: 2019-12-10

修回日期: 2020-04-10

(编辑: 任莹莹)