

研究论文

活性污泥法脱氮除磷工艺优化 设计的灵敏度分析

胡茂冬¹, 周雪飞², 张亚雷², 施 炜²

(¹ 上海大学环境与化学工程学院, 上海 200444;

² 同济大学环境科学与工程学院长江水环境教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 以 ASM2D 为机理模型对活性污泥法脱氮除磷工艺进行优化设计, 在满足出水水质标准的前提下, 使总设计费用达到最低, 对优化模型中的各种参数进行灵敏度分析。结果表明, 不同种类参数的灵敏度差别很大, 其中目标函数中各参数对结果影响最大, 最大灵敏度达到 -99.02%; 进水组分、化学计量系数和动力学参数的最大灵敏度分别为 16.06%、11.9% 和 7.60%。随着排放标准的下降, 系统的总费用也随之减少。对优化设计中参数进行灵敏度分析可以得出一些重要参数对结果的影响程度, 为参数校正和结果输出提供理论依据。

关键词: 活性污泥; 总费用; 优化设计; 灵敏度分析

中图分类号: X 524

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157 (2009) 12-3130-07

Sensitivity analysis on optimization design of activated sludge nutrient removal process

HU Maodong¹, ZHOU Xuefei², ZHANG Yalei², SHI Wei²

(¹ School of Environment and Chemical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

² Key Laboratory of Yangtze Water Environment of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: ASM2D was used as mechanism model for optimizing the activated sludge nutrient removal process. For minimizing the total design cost under the premise of meeting emission standards, the sensitivity of each parameter in the optimization model was analysed. The sensitivity of different parameters varies greatly, in which the objective function has the largest impact on the design results with a sensitivity value of -99.02%. The maximum sensitivities of influent components, stoichiometric parameters and kinetic parameters are 16.06%, 11.9% and 7.60%, respectively. With the decline of emission standards, the total cost also will be reduced. Through sensitivity analysis in optimization design, the influence extent of important parameters on the optimization results can be obtained, which also provide theoretical bases for parameters calibrating and results outputting.

Key words: activated sludge; total cost; optimization design; sensitivity analysis

2009-05-31 收到初稿, 2009-07-05 收到修改稿。

联系人: 周雪飞。第一作者: 胡茂冬 (1985—), 男, 硕士研究生。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (20876117); 国家科技支撑计划项目 (2006BAJ08B10, 2008BAJ08B21)。

Received date: 2009-05-31.

Corresponding author: ZHOU Xuefei, associate professor, zhouxuefei@tongji.edu.cn

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (20876117) and the National Key Technology R&D Program (2006BAJ08B10, 2008BAJ08B21).

引 言

在活性污泥法工艺的设计中主要采用污泥负荷法、泥龄法等经验和半经验设计方法^[1]，这些传统设计法未能反映出活性污泥工艺中生物反应机理，一些关键工艺参数的取值仍然建立在经验积累上，缺少理论支持。近年来，活性污泥数学模型（activated sludge model, ASM）系列的机理模型得到开发并在工艺设计中广泛应用^[2]，利用活性污泥机理模型对工艺进行模拟、仿真，可以预测出水情况，并且可作为工艺选择的理论依据，为有效处理污水提供了良好的基础。但在优化设计模型中，模拟结果往往与实际出水有差距。在模型的设计中分析参数的影响是一项重要任务，从中可以得出工艺运行结果的有效性^[3-5]。为了使模拟结果更接近于实际值，需要对模型参数进行校正^[6]。而优化模型中参数对系统目标的影响性和影响程度还未能准确表达出，而且模型中含有大量的参数，对各项参数进行调整是很烦琐也是不现实的。

针对以上问题，本研究利用活性污泥 2D 模型构建城市污水脱氮除磷工艺的优化模型，对某污水厂进行优化设计，根据模拟结果对模型中的参数进行灵敏度分析，得出参数对结果的影响程度。为优化设计模型中的参数调整提供依据，还可以通过灵敏度分析结果作可靠性分析及系统简化等^[7-9]。

1 模型构建和分析方法

1.1 优化设计模型的构建

1.1.1 费用函数构建 本优化设计的目标是在保证出水水质满足需求的前提下，寻求总费用最小的工艺系统设计，因此选取总费用函数为目标函数。采取庞子山^[10]建立的活性污泥脱氮除磷方法 A²/O 工艺系统优化设计模型的费用函数，数学表达式为

$$f(x) = \omega_1 \sum C_i + \tau \omega_2 \sum C_j \tag{1}$$

式中 C_i 为第 i 种基建费用，本函数定义为： $C_i = a_i(X_i)^{b_i}$ ， X 表示影响单元构筑物或系统性能的关键变量， a 、 b 为回归常数， a_i 表示第 i 种基建费用所对应的回归常数； C_j 为第 j 种运行费用； τ 为综合折现因子； ω_1 、 ω_2 表示对工艺系统初始投资费用和运行维护费用不同重要性认识的权重系数， $\omega_1 + \omega_2 = 1$ 。

1.1.2 优化模型构建 根据 A²/O 工艺的反应机理，本模型主要对生物反应池模型和沉淀池模型两部分进行构建，根据活性污泥 ASM2D（activated sludge model No. 2D）的建模原则，对反应池模型中的 19 个水质组分建立相应平衡方程，求解得到每个反应池的组分浓度。对于二沉池，列出其一维浓度分布模型的方程，进行固相物料平衡计算^[11]。

1.1.3 优化模型求解 Matlab 提供的优化工具箱在求解大型系统最优化问题时，比传统的求解方法要优越^[12]；1stOpt 软件是一款国内自主研发的拥有完全自主知识产权的数学优化分析综合工具软件，在非线性回归、曲线拟合、非线性复杂工程模型参数估算求解等领域居世界领先地位。本研究利用 Matlab 语言进行程序主体编制，最后采用 1stOpt 软件进行求解。对优化设计模型进行了计算，得出模拟结果。

1.2 污水厂优化设计实例

利用上述构建的优化模型对某污水厂进行设计，输入数据后，通过运行计算得出污水厂各反应池优化设计值以及最小费用函数值。

所设计污水厂位于华东地区，流量为 $57 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ，采用 A²/O 工艺，工作水温 15℃；进出水水质要求如表 1，以污水综合排放标准（GB 18918—2002）中的一级 B 标准作为设计出水标准，模型组分与常规进水指标转换采用表 1 所划分的标准。

表 1 污水厂常规进出水指标
Table 1 Routine influent and effluent parameters of WWTP/mg · L⁻¹

Parameter	Experiment value	Average value	Influent quality of design	Effluent quality of design
BOD ₅	18.8—299.8	74.2	120	—
COD _{Cr}	102.8—991.7	249	250	<60
SS	17—608	86	150	—
TN	12.6—58.9	33.3	38	<20
NH ₃ -N	—	—	25	<8
TP	1.8—9.05	3.31	4.0	<1.5

所采用的优化方法为麦夸特法+通用全局优化法,输入进水数据和流量后进行优化计算,设计最终优化函数值为 14684.49 万元,厌氧池、缺氧池和好氧池体积分别为 17592、23056、71284 m³,二沉池表面积为 17263 m²,混合液回流比 60%,污泥回流比 25%。

在模型校正前,需要对很多重要参数进行灵敏度分析^[13-14]。校正中主要参数的取值取决于模型输出这些参数时它们的灵敏性^[15],以本污水厂优化设计案例为基准,对整个优化设计过程中涉及的重要参数进行灵敏度分析。

1.3 灵敏度分析方法

灵敏度的定义方法一般有两种:一种为函数输出的绝对差值和输入因子绝对差值的比值,其值相当于曲线绝对斜率;另一种为函数输出变化百分比与输入因子变化百分比的比值,其值相当于曲线单位标准化之后的转换斜率。本文采用第二种方法进行分析。计算公式为

$$s = \frac{[f(x_2) - f(x_1)]/f(x_1)}{(x_2 - x_1)/x_1} \tag{2}$$

当对某一参数进行灵敏度分析时,首先假设其他参数固定不变,然后利用公式求取该参数的灵敏度,如果取值恰当,这个局部的灵敏度关系能够反映优化设计模型的输入输出对应关系,满足应用要求。

利用上述公式分别对 ASM2D 优化模型中的化学计量系数、动力学参数、进水参数和目标函数中参数进行灵敏度分析。以模型取值为基准,通过上下变动各参数值来观察总费用函数值的增减。

1.4 优化模型参数说明

在优化模型中化学计量系数、动力学参数和进水组分的各符号定义及单位在表 2 中列出。

2 结果与讨论

模型中 μ_A 和 Y_H 取模型校正后的值,其他化学计量系数、动力学参数和进水组分均取自典型值^[16]。

2.1 ASM2D 模型中参数灵敏度分析

本文根据国际水协多年的经验,对一些经过验证对于多种情况都相对恒定的模型参数不作灵敏度分析,因为低灵敏性参数很难对其赋唯一值。对于其他重要参数,则在优化设计模型下进行灵敏度分析。

表 2 化学计量系数、动力学参数、进水组分的定义

Table 2 Definition of stoichiometric parameters, kinetic parameters, influent components

Parameter	Definition
stoichiometric parameters	
$Y_H/\text{g COD} \cdot (\text{g COD})^{-1}$	heterotrophic bacteria yield
$Y_A/\text{g COD} \cdot (\text{g COD})^{-1}$	autotrophic bacteria yield
$Y_{\text{PAO}}/\text{g COD} \cdot (\text{g COD})^{-1}$	PAO yield
$Y_{\text{PHA}}/\text{g COD} \cdot (\text{g COD})^{-1}$	PHA needed while depositing PP
$Y_{\text{PO}_4}/\text{g P} \cdot (\text{g COD})^{-1}$	PP needed while depositing PHA
$f_{\text{XI,H}}/\text{g COD} \cdot (\text{g COD})^{-1}$	inertia COD fraction(heterotrophic)
$f_{\text{XI,P}}/\text{g COD} \cdot (\text{g COD})^{-1}$	inertia COD fraction(PAO)
$f_{\text{XI,A}}/\text{g COD} \cdot (\text{g COD})^{-1}$	inertia COD fraction(autotrophic)
$i_{\text{N,XI}}/\text{g N} \cdot (\text{g COD})^{-1}$	nitrogen content of COD _{XI}
kinetic parameters	
μ_A/d^{-1}	maximum growth rate of A
$\eta_{\text{NO}_3,\text{s}}/\text{g N} \cdot \text{m}^{-3}$	saturated coefficient of nitrate
K_h/d^{-1}	rate constant of hydrolysis
η_e	revising gene
μ_H	maximum growth rate(substrate)
$q_{\text{fe}}/\text{g S}_F \cdot (\text{g X}_H)^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$	maximum rate of ferment
$\eta_{\text{NO}_3,\text{h}}/\text{g N} \cdot \text{m}^{-3}$	saturated coefficient of nitrate
b_h/d^{-1}	rate constants of lysozy
$q_{\text{PHA}}/\text{g X}_{\text{PHA}} \cdot (\text{g X}_{\text{PAO}})^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$	rate constants of PHA imbursement
$q_{\text{PP}}/\text{g X}_{\text{PP}} \cdot (\text{g X}_{\text{PAO}})^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$	rate constants of PP imbursement
$\mu_{\text{PAO}}/\text{d}^{-1}$	maximum rate of PAO
$\eta_{\text{NO}_3,\text{p}}/\text{g N} \cdot \text{m}^{-3}$	saturated coefficient of nitrate
$b_{\text{PAO}}/\text{d}^{-1}$	rate constants of lysozy of X_{PAO}
$b_{\text{PP}}/\text{d}^{-1}$	decomposing rate constants of X_{PP}
$b_{\text{PHA}}/\text{d}^{-1}$	reduced rate constants of X_{PHA}
$b_{\text{AUT}}/\text{d}^{-1}$	reduced rate constants of X_{AUT}
influent components	
$S_F/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	readily biodegradable substrate
$S_A/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	volatile acid
$S_{\text{NH}_4}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	ammonia
$S_{\text{NO}_3}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	nitrate and nitrite
$S_{\text{PO}_4}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	phosphate
$S_{\text{ALK}}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	alkalinity
$X_H/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	heterotrophic bacteria
$X_S/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	slowly biodegradable substrate
$X_I/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	inertia particle substrate
$X_{\text{TSS}}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	total suspend solids
$X_{\text{PAO}}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	phosphorus accumulating organism
$X_{\text{PP}}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	polyphosphate in PAO
$X_{\text{PHA}}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	imbursement PHA
$X_{\text{AUT}}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	autotrophic bacteria
$X_{\text{MEOH}}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	metal hydroxide
$X_{\text{MEP}}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	metal phosphate

2.1.1 化学计量系数灵敏度分析 从图 1 可以看出对化学计量系数的灵敏度分析结果,分析中步长取值均为 10% (图中左边为系数或参数符号,括号中数值为各参数在优化模型中的取值,图框中的代数值为各系数和参数值在优化值时及优化值改变

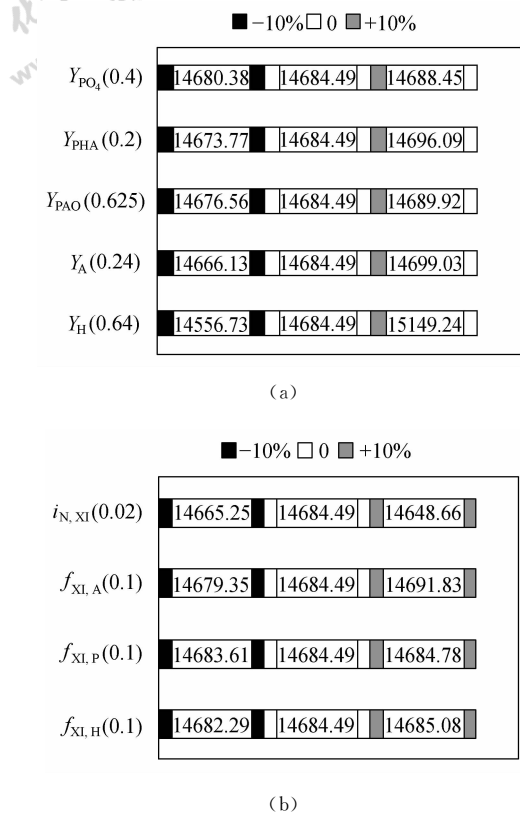


图 1 化学计量系数灵敏度分析结果

Fig. 1 Sensitivity analysis results of stoichiometry parameters (units: 10^4 CNY)

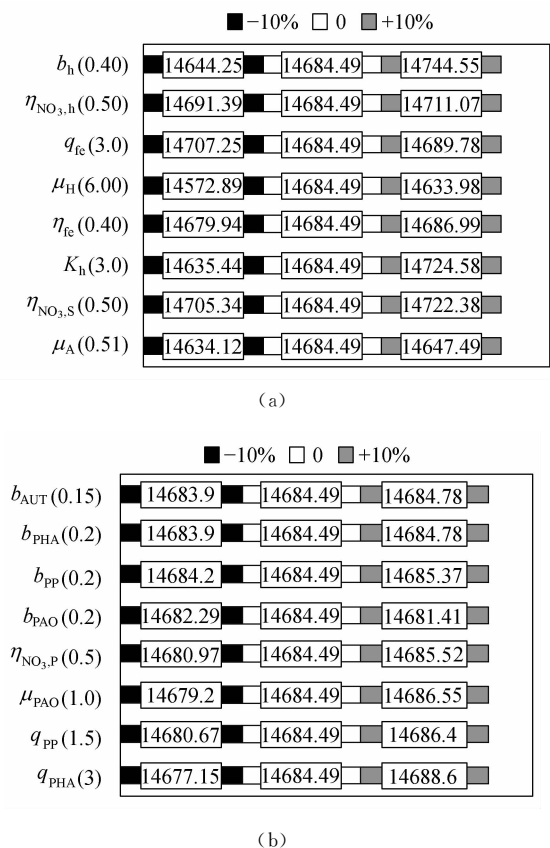


图 2 动力学参数灵敏度分析结果

Fig. 2 Sensitivity analysis results of kinetic parameters (units: 10^4 CNY)

±10%时所对应的总费用值，单位为万元。下文中其他参数的灵敏度分析图均用此方法）。

由分析结果得出，异氧菌产率系数 Y_H 最敏感，最大灵敏度为 11.9%；其次为惰性物质 COD_{XI} 的 N 含量，最大灵敏度为 -2.44%，所以在进行优化设计时， Y_H 值需要实测， $i_{N,XI}$ 在条件允许的情况下，也应该进行实测，其他数据则可以直接采用国际水协推荐的典型值。

2.1.2 动力学参数灵敏度分析 动力学参数会影响模型中各生物化学反应的速度，其取值范围较之计量学参数也更为宽泛，因此，有必要对模型中所涉及的主要动力学参数进行灵敏度分析，分析结果见图 2。

从上述分析结果可以得出，基于基质的最大生长速率 μ_H 对优化设计结果最敏感，当步长取值为 10%时，灵敏度值为 7.60%，自养菌的最大生长速率 μ_A 、水解速率常数 K_h 、溶菌和衰减的速率常数 b_h 、硝酸盐的饱和系数 $\eta_{NO_3,s}$ 、发酵的最大速率 q_{fe} 、硝酸盐的饱和系数 $\eta_{NO_3,h}$ 灵敏度的最大值分别为 3.43%、3.34%、4.09%、2.58%、1.55%、

1.81%，而其余参数最大灵敏度均小于 1%，灵敏度不高，对设计结果影响有限，而对 μ_H 值需要在较高的测量精度下采取实际水样进行实测，其余灵敏度影响较大的动力学参数值在条件允许的情况下也应该进行实测。

2.1.3 进水组分灵敏度分析 ASM2D 模型把污水水质划分为 19 种组分，而目前污水水质监测指标主要为传统指标，因此需要通过经验和理论将常规水质指标转化为组分，由于各地水质差距很大，这种转化存在一定误差，因此，通过对进水组分的灵敏度分析，可以了解哪些组分灵敏度高，对优化结果有较大的影响，从而可以对灵敏度高的进行实际测量，而对那些灵敏度低的可以按照经验和理论的方法直接选取。分析结果见图 3。

从图 3 可以看出各进水组分对系统均有较大影响，其中影响最显著的进水污染物组分是 S_F ，最大灵敏度达到 16.06%，其次是 S_A ，最大灵敏度为 12.14%，污染组分磷酸盐的设计浓度 S_{PO_4} 较氨氮设计浓度 S_{NH_4} 相对于系统总费用的灵敏度高，

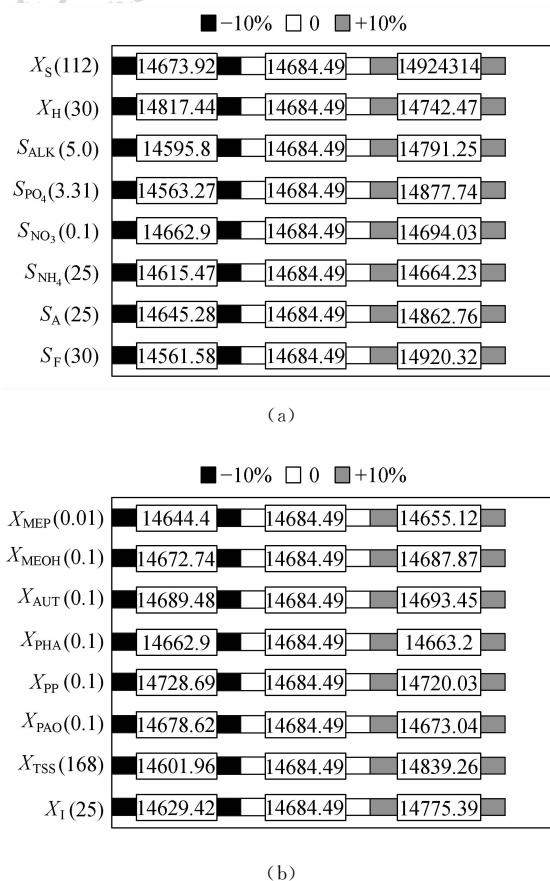


图 3 进水组分灵敏度分析结果

Fig. 3 Sensitivity analysis results of input components (units: 10^4 CNY)

说明设计中进水组分 S_{PO_4} 比 S_{NH_4} 对系统总费用方案的影响更为显著, X_s 、 X_H 、 S_{NH_4} 、 X_{TSS} 等灵敏度也较大, 对设计结果均有重要的影响, 而其他组分浓度值较低, 灵敏度也不高, 对设计结果影响很小。

2.2 目标函数中参数灵敏度分析

优化设计模型中总目标函数是由各个构筑物的费用函数组合而成, 每一种费用函数都有两个回归常数, 利用综合折现因子及权重系数把各个费用函数结合起来构成优化设计模型的总目标函数。

2.2.1 回归常数 由于目前国内还没有能在工程中直接应用的表征单元构筑物或系统功能费用的费用函数模型, 回归常数的确定是引用国外研究成果中单元构筑物费用函数模型中的缺省值的方法, 并根据国内现有的少量基础资料作修正, 因此, 研究回归常数的灵敏性, 探讨不同回归常数值对目标函数值有多大程度影响, 有助于结合国内资料对灵敏度较大回归常数值进行修正, 使其更加准确。对费用模型中回归常数灵敏性分析的结果见图 4。图中

$a_1 \sim a_6$ 、 $b_1 \sim b_6$ 依次为 A^2/O 工艺基建费用中 6 项基本组成变量每项所对应的两个回归常数, 即厌氧池体积回归常数、缺氧池体积回归常数、好氧池体积回归常数、二沉池体积回归常数、混合液内回流比回归常数和污泥外回流比回归常数; $a'_1 \sim a'_6$ 、 $b'_1 \sim b'_6$ 则为运行费用中 6 项基本组成变量每项所对应的两个回归常数。

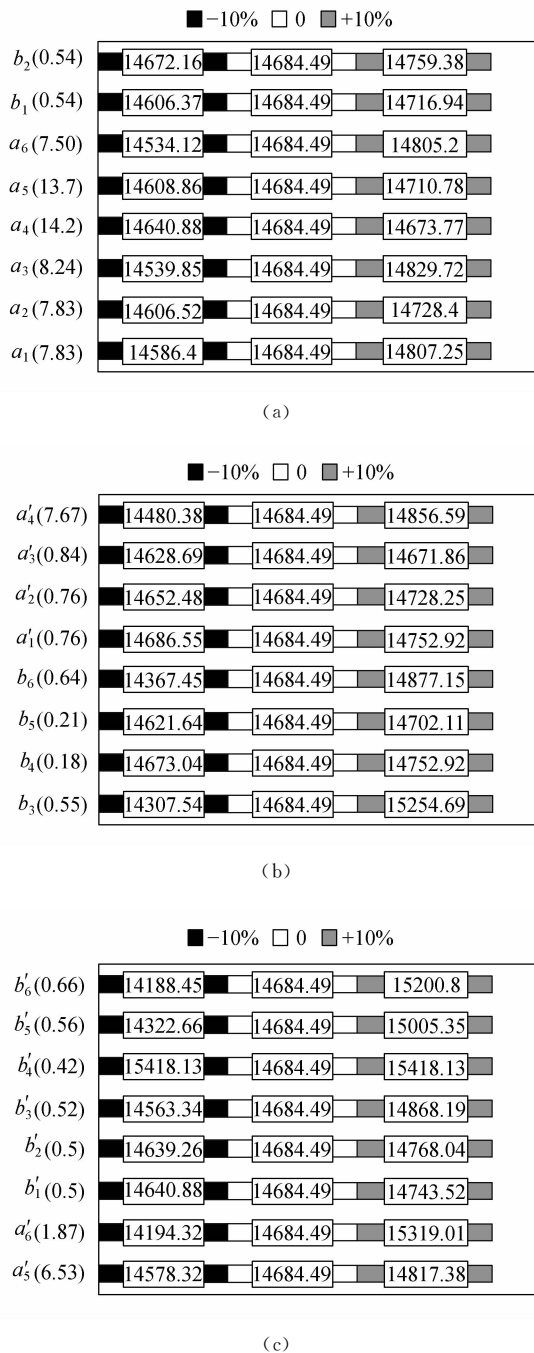


图 4 费用模型参数灵敏度分析结果

Fig. 4 Sensitivity analysis results of expense model parameters (units: 10^4 CNY)

由分析结果可知，灵敏性超过 10% 的回归常数有 9 个，其中灵敏度最大的回归常数为二沉池运行费用模型中幂数回归常数，其值达到 49.96%。

2.2.2 综合折现因子及权重系数 传统的设计方法中，折现率 i 和系统设计生命周期 n 的取值是在方案的财务评价分析中靠经验选取，很难定量地分析两个经济参数对系统总费用的影响趋势。在优化模型的研究中，将折现率 i 和系统设计生命周期 n 通过综合折现因子 τ 来反映对系统设计方案的总费用的影响，因此研究综合折现因子 τ 的灵敏度，对分析参数对设计结果的影响有重要的作用。

图 5 中， τ 为综合折现因子； $\omega_1(\omega_2)$ 为权重系数。从分析结果可以得出权重系数和综合折现因子对目标函数非常敏感，最大灵敏度达到 -99.02% 和 43.18%。

2.2.3 设计标准对系统总费用的影响分析 设计经验表明，不同的出水设计标准将导致工艺系统单

元工艺设计参数的不同，进而引起设计方案中系统总费用的变化。同理，对于优化设计模型，选择不同的设计出水排放标准，就等于给定了不同的系统边界条件，更改了优化问题的约束集合，构成一个新的设计优化问题。选择 3 种设计标准进行优化比较，结果如表 3 所示。

从表 3 可知，随着排放标准的降低，系统内各单元构筑物的设计尺寸相应减小，系统的总费用也随之减少，减少的额度分别为 917.46 万元和 625.91 万元，排放标准越严格，则系统所需的投资及运行费用越高，这个趋势符合经验设计中的通常道理。系统优化模型中建立了有关出水水质约束的边界条件，因此，尽管各个出水水质随标准的降低而略有上升，但均能保持在相应的出水标准要求之内。

3 结 论

(1) 对 ASM2D 优化模型中的 9 个重要的化学计量系数和 16 个关键动力学参数进行灵敏度分析，步长取值为 10%，其中，异氧菌产率系数 Y_H 最大灵敏度为 11.9%，基于基质的最大生长速率 μ_H 灵敏度值为 7.60%；对 16 个进水组分进行了灵敏度分析，其中对系统设计目标影响最显著的进水污染物组分是 S_F ，最大灵敏度达到 16.06%。

(2) 目标函数中参数对结果影响最大：24 个回归常数中灵敏度超过 10% 的回归常数有 9 个，其中灵敏度最大的回归常数为二沉池运行费用模型中幂数回归常数，其值达到 49.96%；综合折现因子和折现率对目标函数敏感性很强，最大灵敏度达

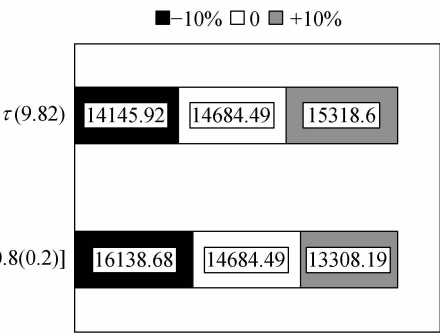


图 5 综合折现因子和权重系数灵敏度分析
Fig. 5 Sensitivity analysis results of integration discount factor and weight coefficient (units: 10⁴CNY)

表 3 设计标准灵敏度分析结果
Table 3 Sensitivity analysis results of design standard

Parameter	Design standard		
	First-level A standard	First-level B standard	Second-level standard
volume of anaerobic tank/m ³	17989	17592	16141
volume of anoxic tank/m ³	24384	23056	21875
volume of aerobic tank/m ³	82699	71284	58541
area of settle tank/m ²	17887	17263	16665
interior circumfluence rate/%	65	60	50
sludge circumfluence rate/%	35	25	25
concentration of effluent quality parameters/mg · L ⁻¹			
COD	48.38	53.44	77.58
TN	13.35	17.38	18.12
NH ₃ -N	4.04	6.15	14.56
TP	0.79	1.37	1.95
total cost × 10 ⁻⁴ /CNY	15601.95	14684.49	14058.58

到-99.02%和 43.18%;不同设计标准对系统总费用有着重要的影响,随着排放标准由一级 A 下降到一级 B,最后降低到二级,系统的总费用也随之减少。

(3) 基于建立的优化设计模型对实际污水厂运行,通过参数的灵敏性分析,可以直接得出各项参数的改变对设计结果的影响,为模型参数的校正提供了理论依据,进一步优化模型输出结果,以应用于实际工艺的升级改造。

References

- [1] Zhou Bao (周雹), Zhou Dan (周丹), Zhang Liwen (张礼文). Discussion on design and calculation methods of activated sludge process. *China Water & Wastewater* (中国给水排水), 2001, **17** (5): 45-49
- [2] Henze M, Gujer W, Mino T, van Loosdrecht M C M. Activated sludge models ASM1, ASM2, ASM2d, and ASM3: IWA Scientific and Technical Report No.9 [R]. London, UK: IWA Publishing, 2000
- [3] Jolma A, Norton J. Methods of uncertainty treatment in environmental models. *Environ. Model. Softw.*, 2005, **20**: 979-980
- [4] Martin C, Cardona C M, Salterain A, Ayesa E, Eguinoa I, Garcia-Sanz M. Uncertainty based calibration of a new river water model//the Seventh International Conference on Hydroinformatics (HIC2006). Nice, 2006
- [5] Poch M, Comas J, Rodriguez-Roda I, Sanchez-Marre M, Cortes U. Designing and building real environmental decision support systems. *Environ. Model. Softw.*, 2004, **19**: 857-873
- [6] Ni Bingjie, Yu Hanqing. An approach for modeling two-step denitrification in activated sludge systems. *Chemical Engineering Science*, 2008, **63**: 1449-1459
- [7] Kleiber M, Antnez H, Hien T D, Kowalczyk P. Parameter Sensitivity in non-linear Mechanics: Theory and Finite Element Computations. New York: Wiley, 1997
- [8] Tekitek M M, Bouzidi M, Dubois F, Lallemand P. Adjoint lattice Boltzmann equation for parameter identification. *Comput. Fluids*, 2006, **35**: 805-813
- [9] Allen M, Weickum G, Maute K. Application of reduced order models for the stochastic design optimization of dynamic systems//Proceedings of the 10th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference. Albany, NY, 2004: 2004-4614
- [10] Pang Zishan (庞子山). Study and application on optimum design model for activated sludge system processes [D]. Chongqing: Chongqing University, 2004
- [11] Jiang Weigang (蒋卫刚), Gu Guowei (顾郭维), Yu Guoping (俞国平). Study on dynamic model of secondary settlers. *Chinese Journal of Environmental Engineering* (环境工程学报), 2007, **3** (1): 21-24
- [12] Lin Yupeng (林玉鹏). Study on optimal design model for city wastewater treatment plant considering the effect of uncertainty [D]. Changsha: Hunan University, 2000
- [13] Shahalam A B, Elsamra R, Ayoub G M, Acra A. Parametric sensitivity of comprehensive model of aerobic fluidized-bed biofilm process. *Environ. Eng.-ASCE*, 1996, **122**: 1085-1093
- [14] Abasaed A E. Sensitivity analysis on a sequencing batch reactor model (I): Effect of kinetic parameters. *Chem. Technol. Biotechnol.*, 1997, **70**: 379-383
- [15] Koch G, Kuhni M, Gujer W, Siegrist H. Calibration and validation of Activated Sludge Model No.3 for Swiss municipal wastewater. *Water Res.*, 2000, **34**: 3580-3590
- [16] Mogens Henze. Activited Sludge Mathematics Model (活性污泥数学模型). Zhang Yalei (张亚雷), Li Yongmei (李咏梅), trans. Shanghai: Tongji University Press, 2002: 99-104