第23卷 第5期	中国给水排水	Vol. 23 No. 5
2007年3月	CHINA WATER & WASTEWATER	Mar. 2007



采用TUD联合模型模拟倒置A²/0工艺的运行工况

郝晓地¹, 宋虹苇^{1,2}, 胡沅胜¹, 郝二成³, 周 军³, 甘一萍³, 王洪臣³

(1.北京建筑工程学院 可持续环境生物技术研发中心,北京 100044; 2.内蒙古工业 大学 土木工程学院,内蒙古 呼和浩特 010051; 3.北京城市排水集团有限公司,北京 100063)

摘 要: 结合北京某大型市政污水处理厂倒置 A²/O 工艺的运行实践,应用 TUD 联合模型及 其缺省参数对该厂进行了数学模拟,以演示国际通用数学模型对我国污水处理厂模拟的有效性、准 确性和简单性,为今后模拟技术在我国的推广应用起到示范作用。在完全使用缺省参数时模拟预 测出水 COD 和 TSS 与实测值十分吻合,出水 TP 模拟结果与历史数据亦存在较小误差,而对 N 的 模拟预测效果不甚理想。针对存在的 N 模拟误差,结合专家法和灵敏度分析法,对模型中有关 N 的个别组分参数和硝化细菌半饱和动力学参数进行修正(*i*_{NSF} = 6%, *i*_{NXS} = 6%, *K*_{NH4} = 1.5 gN/m³) 后,获得了令人满意的模拟预测结果。随后用 2 组不同季节的运行数据进行模拟验证,也得到了与 实测数据十分吻合的模拟结果。

关键词: 倒置 A²/O 工艺; 数学模拟; TUD 联合模型; AQUASIM 中图分类号: X703.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000 - 4602(2007)05 - 0001 - 04

Modeling Operation Condition of Reversed A²/O Process with TUD Model

HAO Xiao-di¹, SONG Hong-wei^{1,2}, HU Yuan-sheng¹, HAO Er-cheng³, ZHOU Jun³, GAN Yi-ping³, WANG Hong-chen³

(1. R & D Center for Sustainable Environmental Biotechnology, Beijing Institute of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China; 3. Beijing Urban Drainage Group Co. Ltd., Beijing 100063, China)

Abstract: Combined with the practical operation of reversed A^2/O process of a large municipal

wastewater treatment plant in Beijing, the mathematical simulation of the plant working conditions was conducted using TUD model and the default parameters. The aim of the study is to demonstrate the effectiveness, accuracy and simplicity of global current models for simulating China's WWTPs and then to promote the application of simulative techniques in China. With default parameters, the predicted COD and TSS concentrations in the effluent are consistent with the measured data, and TP is also reasonable.

基金项目:北京市可持续水与废物循环利用技术"学术创新团队"项目(BJE10016200611);北京市自然科学基金资助 项目(8052011); 国家高技术研究发展计划(863)项目(2006AA06Z320)

• 1 •

However, N concentrations are not satisfactory. With minor adjustment of some N components and affinity constants of nitrifiers ($i_{NSF} = 6\%$, $i_{NXS} = 6\%$, $K_{NH4} = 1.5$ gN/m³), the predicted results for COD, N and P reach to a quite good level. With two sets of operational parameters at different seasons, the simulations give also good results approaching to measured data.

Key words: reversed A^2/O process; mathematical simulation; TUD model; AQUASIM

在过去三十多年中,建立在活性污泥微生物动 力学基础上的有关数学模型的研究、开发和应用已 成为污水处理实践的一个重要环节。其中有代表性 的模型有:国际水协推荐的活性污泥系列模型 (ASMs)及荷兰代尔夫特理工大学生物除磷代谢模 型(Delft 模型)或 TUD 联合模型等^[1-6]。这些模型 借助于许多计算机软件已广泛用于活性污泥系统工 艺设计、运行优化/自控、试验定向等领域,成为污水

倒置 A²/O 工艺由平行 6 组曝气池组成。每组 曝气池分3条廊道,每条廊道长为96.2 m,宽为 9.28 m,水深为6 m,有效容积为5 356.4 m³;3 条廊 道的总有效容积为16 069.2 m³。第1条廊道中缺 氧区长为17 m, 厌氧吸附区长为15 m, 厌氧区长为 32 m, 好氧区长为 32.2 m, 第 2、3 廊道均为好氧状 态。缺氧区的水力停留时间(HRT)为16 min(按 100% 污泥回流量的实际 HRT 计算), 厌氧区的总 HRT为45 min(在厌氧区进水端又分出一个实际 HRT为15 min 的强化吸附区),好氧区的 HRT 为 3.6 h。每组曝气池对应1座二沉池,池直径为50 m,有效水深为4m,有效容积为7854m³。 采用在缺氧区首端及厌氧吸附区首端两点进水 方式,平均进水量约18×10⁴ m³/d,每组曝气池的处 理水量为 3.03×10^4 m³/d。曝气池污泥浓度保持在 1500~2500 mg/L,夏季污泥龄(SRT)平均为6 d, 冬季的平均为10 d。最高水温出现在7月,为25.6 ℃,最低出现在1月,为13.7℃;年平均水温为18 ℃。其他工艺设计参数见表1,进、出水水质见表2。

生物处理技术中一种强有力的辅助工具。

污水生物处理数学模型在我国总体上仍处于学术认知阶段,工程界对数学模型辅助工艺设计、诊断运行问题、优化运行策略似乎知之较少。这主要是受传统观念的影响,认为数学模拟技术不过是一种"数学游戏",难以与传统试验技术相提并论。更有甚者认为,数学模型参数大多源于国外,肯定不适合中国的污水水质特征,因此要使用数学模型就需要针对中国污水水质情况进行各种模型参数测定,进行这样的工作显然费时、费力,以至于工程界对数学模型的应用望而生畏。针对目前我国工程界对数学模型在工程应用方面的看法和有限的应用现状,笔者采用TUD联合模型对北京某大型污水处理厂倒置A²/O工艺进行了数学模拟,以期为推动数学模拟技术在我国的工程应用提供技术支持。

- 1 倒置 A²/0 工艺模型的建立
- 1.1 工艺参数及运行数据

北京某大型污水处理厂采用倒置 A²/O 工艺, 其设计处理水量为 25 × 10⁴ m³/d。具体工艺流程见

表1 曝气池的设计参数

Tab. 1	Designed	parameters	of	aeration	tank
--------	----------	------------	----	----------	------

单元	容积/m ³	$DO/(g \cdot m^{-3})$	HRT/h			
R1	946.6	0.5	0.27			
R2	835.2	0.2	0.25			
R3	1 781.8	0.2	0.5			
R4	12 505.7	2,1.5,0.8	3.6			
注: R4 的 DO 是指好氧第1、2 和3 廊道的溶解氧浓 度。						

图1。



图1 北京某大型污水厂倒置 A²/0 工艺流程 Fig. 1 A reversed A²/0 process in a Beijing WWTP 表 2 2004 年 4 月 — 6 月进、出水水质实测数据的平均值

Tab. 2 Measured average influent and effluent data from

April to June 2004 $\operatorname{mg} \cdot \operatorname{L}^{-1}$

项目	COD	TN	NH_4^+ + N	NO_3^- - N	TP	TSS	BOD ₅
进水	221	50	38.1	0.2	5.3	122	108
出水	42	31	15	12.3	3.2	12	9.5

1.2 倒置A²/0工艺模型

本研究利用已嵌入TUD联合模型的AQUASIM

• 2 •

2.0 软件^[7],结合实际运行工艺,建立工艺模拟模型,也就是在 AQUASIM 软件平台上编辑反应器单元、连接单元和输入变量单元的一些运行参数和进水水质参数。由于 AQUASIM 软件预先设定反应器 类型为完全混合式(CSTR),所以需先将污水处理厂的推流式(PF)曝气池运行流态转化为 CSTR 流态。 除曝气池外,还需将二沉池分为澄清区(CL)和污泥 区(SC)两部分。AQUASIM中的几个模块单元编辑 完成后,倒置 A²/O 工艺的模拟模型即初步建立,可 以进行初始化测试和随后的模拟运算。

2 初步模拟、组分参数修正与模拟再验证

利用已建立的工艺模型,分别采用表2中数据 以及2004年夏、冬季运行数据(见表3)进行水质模 拟。根据初步模拟结果(使用表2中数据),对工艺 模型组分参数进行修正,然后采用表3中夏、冬两季 数据进行第2次、第3次模拟验证。

表3 2004 年夏季(7、8 月) 与冬季(1、2 月) 出水水质平均数据

ास म	CO	DD	S	S	Т	'N	NH ₄ ⁺	– N	$NO_3^ N$	TP	PO_4^3	– P
	初沉	二沉	初沉	二沉	初沉	二沉	初沉	二沉	二沉	初沉	初沉	二沉
夏季	200	39.6	117	12.5	46.3	30	33.2	19.3	8.2	5.1	4.4	2.7
冬季	218	37.7	122	11.2	49.3	29.1	39.1	8.6	19.4	5.1	4.6	3.5

 $mg \cdot L^{-1}$

Tab. 3 Average effluent quality in summer and winter 2004

 $mg \cdot L^{-1}$

2.1 初步模拟结果

2.3 动力学参数修正

利用表 1 与表 2 中的数据, 在使用 TUD 联合模型中缺省参数的情况下进行初步模拟, 结果见表 4。

表 4 使用缺省值的初步模拟结果

Tab. 4 Initial simulated results with default parameters

项目	COD	TN	$NH_4^+ - N$	$NO_3^ N$	TP	TSS
实测值	42	31	15	12.3	3.2	12
模拟值	44.4	23.6	8.03	14.5	3.28	13.6

表4显示,出水 COD 的模拟预测值与历史数据 吻合较好,误差 <2.5 mg/L;出水 TSS 的模拟结果与 历史数据的误差 <2.0 mg/L;出水 TP 的模拟结果 与历史数据几乎一致。而对氮的模拟预测效果不够 理想,如 TN 和 NH_4^+ – N 的模拟值均比历史数据低 约7.0 mg/L, NO_3^- – N 的模拟值比历史数据高约 2.0 mg/L。

初步模拟结果表明,在没有对系统进行物料平 衡检查和使用 TUD 联合模型缺省参数的情况下,模 拟预测结果可以接受,但应对模型中有关氮的一些 化学组分参数进行适当修正。

2.2 氮组分参数修正

针对模拟出水 NH⁺₄ – N 值过低和 NO⁻₃ – N 值 稍高的初步模拟情况,如果核实不是运行条件(如 DO 或碱度)所致,则需要对模型中的相关动力学参 数作适当调整。在确定所需调整的最少参数后,通 过专家法或灵敏度分析法调整参数值。本研究结合 这两种方法,首先根据活性污泥系统动力学模型应 用协议^[10],锁定修正硝化反应,即降低出水 NH₄⁺ - N 所需要调整的参数范围,然后再利用灵敏度分析法 确定对出水 $NH_4^+ - N$ 和 $NO_3^- - N$ 浓度影响较大的 两个参数——硝化菌生长中 NH⁺ – N 的半饱和常 数(K_{NH4})和硝化菌生长中 O₂ 的半饱和常数($K_{\text{N,O2}}$) 的值。根据模拟经验, $K_{N,02}$ 的微小变化会引起出水 $NH_4^+ - N$ 和 $NO_3^- - N$ 浓度的剧烈变化,为慎重起见, 最终选择调整 K_{NH4} 来修正模型。由于出水 NH₄⁺ – N 模拟值随着 K_{NH4} 的增大而升高, 而出水 NO₃⁻ – N 值 则随着 K_{NH4}的增大而降低,所以结合模拟结果与历 史数据的偏差情况,适当增大 K_{NH4} (从 1.0 gN/m³ 调整到 1.5 gN/m³)。表 5 为参数调整后(即 i_{NSF} = 6%, $i_{NXS} = 6\%$, $K_{NH4} = 1.5 \text{ gN/m}^3$)利用表 2 数据进

根据模型中 TN 的计算公式,对 TN 模拟结果有 影响的 N 组分参数有 i_{NBM} 、 i_{NSF} 、 i_{NSI} 、 i_{NXS} 和 i_{NXI} 。其 中,生物体内 N 的质量分数(i_{NBM})基本上是固定的 (7%)^[8]。至于其他 4 个 N 组分参数,根据 Meijer 的研究经验^[8],应首先调整 i_{NSF} 和 i_{NXS} 。根据《荷兰 污水特性描述指南》中所列出的关于 N 特性的变化 系数以及典型范围值^[9],将 i_{NSF} 从 3% 调整到 6%, 将 i_{NXS} 从 4% 调整到 6%。 行模拟所得结果。

表 5 参数修正后对 N 的再次模拟结果

Tab. 5 Resimulated results with calibrated parameters



项目	TN	$NH_4^+ - N$	$NO_3^ N$
模拟值	28	12.5	14.1

表5显示,进、出水TN的模拟误差已降至3.0 mg/L以下,出水NH₄⁺ - N、NO₃⁻ - N的模拟误差 <

• 3 •

2.5 mg/L,说明对上述参数的修正较为合理。

参数修正后的工艺模型验证 3

根据活性污泥系统动力学模型应用协议,模型 验证最好采用与修正模型参数所用数据差异较大的 数据,例如,模型验证与模型校正可分别采用不同季 节的运行数据^[10]。为此,分别采用 2004 年夏、冬两 季的平均运行数据进行模型验证。

表6为参数校正前、后,对2004年夏季平均出 水 TN、NH₄⁺ – N 和 NO₇⁻ – N 浓度的预测结果。

表 6 2004 年夏季出水的模拟结果

Simulated results of effluent in summer 2004 **Tab. 6**

Į	页目	TN	$NH_4^+ - N$	$NO_3^ N$
 实	测值	30	19.3	8.2
	校正前	22.5	12.2	9.2

动力学参数的情况下,TUD 联合模型可用于我国污 水处理厂的运行实践。

参考文献:

- Henze M, Gujer W, Mino T, et al. Activated sludge mod-| 1 | el No. 2d, ASM2d [J]. Water Sci Technol, 1999, 39 (1):165-182.
- Gujer W, Henze M, Mino T, et al. Activated sludge mod-[2] el No.3[J]. Water Sci Technol, 1999, 39(1):183 -193.
- Smolders G L F, van der Meij J, van Loosdrecht M C M, [3] et al. Structured metabolic model for anaerobic and aerobic stoichiometry and kinetics of the biological phosphorus removal process [J]. Biotechnol Bioeng, 1995, 47 (33):277-287.
- Kuba T, Murnleitner E, van Loosdrecht M C M, et al. A 4

	模拟值	校正后	27.2	18.1	7.8
--	-----	-----	------	------	-----

由表6可知,校正前同样存在着与表4类似的 问题,经校正后,出水 TN 模拟误差 < 3.0 mg/L, $NH_4^+ - N$ 和 NO₅⁻ - N 的模拟误差 <1.0 mg/L,再次证 明对模型参数的修正是恰当的。对 2004 年冬季平 均数据的模拟结果(见表7)同样证明了上述结论。

表7 2004 年冬季出水的模拟结果

Simulated results of effluent in winter 2004 Tab. 7

项目	TN	$NH_4^+ - N$	$NO_3^ N$
实测值	29.1	8.6	19.4
模拟值	28.1	7.4	19.4

4 结论

结合北京某大型市政污水处理厂的运行实践, 应用 TUD 联合模型及其缺省参数对该厂的倒置 A²/O 工艺进行了数学模拟。初步模拟的出水 COD 预测值与历史数据吻合较好(误差 < 2.5 mg/L),出 水 TSS 的模拟结果与历史数据的误差 < 2.0 mg/L, 出水 TP 的模拟结果与历史数据几乎一致。而对氮

metabolic model for biological phosphorus removal by denitrifying organisms [J]. Biotechnol Bioeng, 1996, 52 (6):685-695.

- [5] Murnleitner E, Kuba T, van Loosdrecht M C M, et al. An integrated metabolic model for the aerobic and denitrifying biological phosphorus removal [J]. Biotechnol Bioeng, 1997, 54(5): 434 - 450.
- van Veldhuizen H M, van Loosdrecht M C M, Heijnen J [6] J. Modeling biological phosphorus and nitrogen removal in a full scale activated sludge process [J]. Water Res, 1999,33(16):3459-3468.
- Reichert P. AQUASIM 2.0-Computer Program for the [7] Identification and Simulation of Aquatic Systems [M]. Switzerland: EAWAG, Dübendorf, 1998.
- [8] Meijer S C F. Theoretical and practical aspects of modeling activated sludge processes [D]. Delft, the Netherlands: Delft University of Technology, 2004.
- Roeleveld P J, van Loosdrecht M C M. Experiences with 9 guidelines for wastewater characterization in the Netherlands[J]. Water Sci Technol, 2002, 45(6):77-87.
- $\begin{bmatrix} 10 \end{bmatrix}$ Hulsbeek J J W, Kruit J, Roeleveld P J, et al. A practical protocol for dynamic modeling of activated sludge

 $mg \cdot L^{-1}$

 $mg \cdot L^{-1}$

的模拟预测效果不甚理想,出水 TN 及 NH₄ - N 模 拟值均比历史数据低约 7.0 mg/L, NO₃⁻ - N 的模拟 值比历史数据高约2.0 mg/L。针对TN及其他形式 N 的模拟误差,结合专家法和灵敏度分析法,对模型 中有关氮的一些组分参数和动力学参数进行了修 正。修正后的参数为: $i_{NSF} = 6\%$, $i_{NXS} = 6\%$, $K_{NH4} =$ 1.5 gN/m³。经修正后,模拟预测结果与历史数据的 吻合性很好。由此可见,在只调整个别组分参数及

systems [J]. Water Sci Technol, 2002, 45(6):127 -136.

作者简介:郝晓地(1960 -), 男, 山西柳林人, 博士, 教授, 研究方向为污水脱氮除磷技 术、污水处理数学模拟技术及可持续环境生 物技术。 E - mail: haoxiaodi@ bicea. edu. cn

收稿日期:2006-11-20