

工艺优化诊断技术

在上海曲阳/松江污水处理厂达标改造中的应用

朱石清¹，唐建国¹，周骅²，张善发²，高允础³，姚彬³，George Lee⁴，尚爱安⁵，徐鸿德⁵

(1. 上海市水务局，上海 200003；2. 上海市城投总公司排水公司，上海 200070；3 上海松江区水务局，上海 松江 201600；4. BioChem Technology Inc, PA19406 USA；5. 美商生化科技公司上海代表处，上海 200336)

摘要：随着污水排放标准不断提高，污水处理厂老厂需改造处理工艺以满足稳定、达标排放要求，同时还需进行工艺优化以降低运行成本，节省基建费用和运行费用。在美国贸易发展署/上海水务局的资金支持和人员的大力配合下，美商生化科技公司对上海市曲阳、松江污水厂的现有处理工艺进行了优化诊断。本项目主要采用系统分析方法，经过现场考察、大规模的数据收集、利用国际水协活性污泥法模型 ASM2D 等工具，建立了符合中国实际运行状况的水质模型，全面评价了两厂目前的工艺状况和瓶颈口，对两厂数种可能的设计改造工艺方案进行了定量模拟预测，提供能确保达标的改造设计工艺和优化方案。本项目为老厂工艺改造，提供了一套完整的技术方案和工作流程，使老厂改造的工艺能达到脱氮除磷，稳定达标，并可节省一次性基建费用和 15%-40%运行费用的目的。

关键词：工艺优化诊断；活性污泥模型 ASM2D；过程控制系统；脱氮除磷

前言

国家环保总局在 2002 年 12 月 27 日发布了《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002)，该标准为强制性标准，并于 2003 年 7 月 1 日正式实施。同已颁布的《污水综合排放标准》(GB8978-1988, GB8978-1996) 相比，新标准对城镇污水厂的尾水排放目标提出了更为明确的要求，而且排放指标也更为严格，尤其是对于氮磷污染物排放标准变化较大。新标准的出台不但对污水厂的工艺设计提出了新的挑战，而且对我国目前污水处理厂的运行提出了更高的要求。

我国目前正在运行的污水处理厂大都建于二十世纪，新标准的出台对于这些污水厂提出了新的达标要求，尤其是对于我国 20 世纪 90 年代以前建造的污水厂，由于当时没有对氮、磷污染物的要求，生物处理工艺大都采用普通的曝气池，无生物脱氮除磷功能。因此，新标准的出台后，这些已建的污水厂大都面临着为满足新标准的要求而进行的工艺优化及达标改造等问题。

城市污水厂工艺模型的发展，尤其是活性污泥模型发展为污水厂工艺优化改造、工艺设计提供了一个很好的平台。利用成熟的活性污泥模型可以对各种污水处理工艺方案进行比较，对现有的运行工艺进行优化，指导污水厂的运行，从而能达到预期的排放目标并可以节省曝气量，减少运行能耗费用。活性污泥模型由国际水协 IAW 开发，分为 ASM1、ASM2、ASM2D

及ASM3, 其中ASM2D是目前最为完善、最为复杂的模型, 可以用于模拟生物反应池的脱氮除磷工艺, 非常适合目前新的排放标准要求^[1~4]。但是任何模型的模拟, 都必须以丰富、详实、全面的数据为基础, 因此使用系统的取样及分析方法来确定工艺参数显得非常重要。

美商生化科技公司是一家专业水科研和工程咨询公司, 总部位于美国宾夕法尼亚州费城。美商生化科技公司在美国做过 60 多家污水厂的老厂工艺优化诊断工作, 在污水厂老厂改造方面具有丰富经验, 形成了自己独特的工艺优化诊断系统分析方法。美商生化科技公司通过收集污水厂的数据来建立污水处理工艺过程模型, 然后通过该模型对污水厂的处理效果进行模拟和分析, 找出存在的问题, 找出最佳的工艺方案和控制策略。美商生化科技公司是污水厂工艺优化诊断专家。

在 2004 年 5 月~11 月, 美商生化科技公司承担了美国贸易发展署和上海水务局的合作项目《上海市水务局曲阳和松江污水处理厂改造工艺优化项目可行性研究》, 本文是该项目研究过程和部分成果的介绍, 以期推动我国的污水处理厂老厂工艺优化改造的进行, 期望通过工艺优化诊断技术和活性污泥模型 ASM2D 的应用, 为污水厂老厂改造设计更为合理的工艺方案和工艺过程控制系统。

1 污水厂介绍

上海市目前有 30 多座城市污水处理厂正在运行, 按照区域可划分为市区和郊县两部分, 其中市区的污水厂一般建于 20 世纪 90 年代前, 如曲阳污水厂, 郊县污水厂则建于 20 世纪末期, 如松江污水厂。这些城市污水厂都面临着为满足新标准的需求而进行工艺优化和达标改造的问题。

曲阳污水厂位于上海市中心城区, 建于 1984 年, 设计处理能力为 75,000m³/d, 采用典型的活性污泥法生物处理工艺, 污水经格栅井, 进入进水泵房, 经提升后, 进入曝气沉砂池、初沉池、曝气池、二沉池及加氯接触池。曝气系统采用鼓风曝气, 曝气池内曝气装置采用穿孔管。曲阳污水厂的工艺诊断优化、工艺改造设计达标排放标准为二级 (GB18918-2002)

松江污水厂位于上海市郊县, 一期于 1985 年建成投产, 设计处理能力为 27,000m³/d, 二期于 2000 年 4 月建成投产, 设计处理能力为 50,000m³/d, 本次研究为松江二期, 其工艺诊断优化、工艺改造设计排放标注为一级B (GB18918-2002)。松江二期采用的污水处理工艺基本同曲阳污水厂, 但两厂的活性污泥法处理工艺不同。曲阳厂的活性污泥工艺为接触稳定工艺, 松江厂为A/O工艺。活性污泥工艺是大多数污水处理厂的核心, 也包括这两个选定污水厂, 因此本研究技术评估重点在于活性污泥处理工艺。

2 工艺优化诊断系统分析步骤

在曲阳污水厂和松江污水厂采取的系统分析步骤是相同的，系统分析步骤主要分成 5 个阶段：

(1) 污水厂设备评估和分析

本阶段的工作是对两个污水处理厂设备的现有运行操作、在线仪器设备和土建工程的检查和评价，收集所有可以获得的处理过程参数，比如日流量，污染物浓度，设备操作参数设定的范围和精度。本阶段工作的关键是根据污水厂扩建升级改造的目标和目前技术发展的状况，对现有的设施提出评估和建议。

(2) 数据收集

本阶段的工作主要是通过对两个污水厂的现场取样分析，获得污水厂的一些基本运行参数，主要工作内容集中在活性污泥处理工艺部分，现场分析的水质指标有COD（总量、可溶性）、BOD₅（总量、可溶性）、TN（总量、可溶性）、TKN（总量、可溶性）、SS、VSS、NH₃-N、NO₃-N、NO₂-N、总磷TP、磷酸盐PO₄-P、挥发性脂肪酸VFA、碱度等，另外，还包括对活性污泥活性的分析，包括耗氧速率OUR、SOUR，硝化速率NR、SNR、NUR、SNUR，反硝化速率DNR、SDNR，磷的释放及吸收情况等。



采用的数据收集分析手段包括有：

- 安装在线仪表，获得实时的进水水质数据，包括在线氨氮&硝酸盐分析仪、在线溶解氧&悬浮物分析仪，分析周期持续 5 个月；
- 进行日常的取样分析，在污水处理工艺的各个断面进行混合取样，分析以上提及的各种水质指标，主要的分析断面有总进水、格栅、沉砂池、沉淀池、生物反应池各个点、二沉出水、浓缩池出水、污泥脱水滤液等。分析周期持续 1 个月
- 进行密集取样分析，主要指进行瞬时样品的分析，大约每 2~3 小时取一次样，然后立即分析，未能及时分析的样品需立即放入冰箱保存。分析样品的取样断面同日常取样分析点，分析水质指标同上，持续时间 3 天；
- ABAM测试活性污泥的性能。ABAM (Advanced Biological Activity Meter) 是美商生化科技公司专有的活性污泥性能分析工具，有一个电脑操控的控制箱和反应器组成，如图所示。通过ABAM可以定量描述污水厂的运行状况，确定活性污泥降解污染物的各种基本参数，如异养菌 μ_{max} 、硝化速率NR、磷的释放及吸收等等；

- 该阶段还包括对污水厂历史运行数据的分析和调查
- 数据收集部分是污水厂进行系统评价的基石，是污水厂活性污泥工艺建模的基础，数据的好坏直接影响建模的成功与否。美商生化科技公司通过数十年的经验来确定污水取样分析断面和分析水质指标，利用大量的人工及先进的仪器分析工作来获得可靠详实的数据，这奠定了两个污水厂工艺诊断优化改造方案的成功。在曲阳/松江污水厂，共获得和分析了 2 万 5 千多个数据，并建立了数据库。据检索，如此大规模数据收集在中国尚属首次。

(3) 污水厂活性污泥工艺模型的建立和校正

利用在任务 2 获得数据来设计两个污水厂的工艺模型，该计算机模型的基础为国际水质协会推荐的活性污泥模型 (ASM2D)。然后，利用收集的数据（包括在线仪器、集中取样、实验室分析、历史数据）来对设计的工艺模型进行校正，另外反应计量学、污泥产率及氨氮同化速率等整合在建立的 ASM2D 模型中。

(4) 方案评估及改造建议

利用阶段 3 中已校正好的活性污泥工艺模型来评估设计条件下的各种工艺的处理效果，然后筛选出最佳的处理工艺，及最佳工艺的最佳运行条件，并考虑到处理工艺的效率、稳定性、可靠性、运行费用及将来需求等因素，提出设计工艺及改造建议方案。

(5) 技术总结和报告

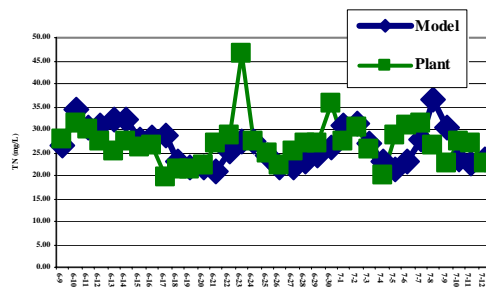
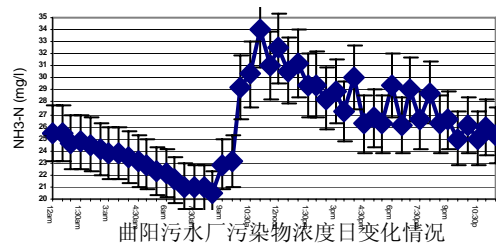
根据历史数据、实时数据的分析总结以及模型模拟等结果，提交一个最终的技术总结报告。

3. 项目结论的初步介绍

(1) 进水污染物浓度变化因子

根据安装在污水厂前端的在线仪器长达 5 个月的分析结果，得到污水厂的进水污染物浓度变化因子（以曲阳厂的氨氮为例）。

可以看出，曲阳厂的氨氮浓度在一天内是不断变化的，且趋势非常明显，在早晨 8~9 点存在一个低谷，而在中午 12 点左右达到峰值。污水厂污染物浓度的剧烈变



化对污水厂的工艺设计、运行及自控系统的都提出了很大的挑战。

另外，与松江污水厂的对比看出，不同污水厂的污染物浓度变化情况是不一致的。因此针对特定的污水厂，进行升级改造时，必须考虑污染物浓度（负荷）的变化情况。

（2）模型建立及校正

首先应根据工艺设计的目的选择合适的模型，然后根据污水厂现有的设施构建一个虚拟污水厂，定义其物理特性。污水厂的处理核心通常为活性污泥工艺，因此本模型的建立以活性污泥模型为主，不包括格栅、沉砂池、初沉池及消毒等设施。另外，建立的工艺模型中还包括原有一个一维、十层、无反应的二沉池模型。

模型建立后，必须利用污水厂的原始数据进行校正，本项目中，校正时间长达 34 天。部分模型模拟结果如图所示（曲阳厂为例）。总氮TN模拟结果表明，模型预测结果同水厂实际出水TN浓度相当一致，其它水质指标如氨氮、硝态氮、COD、总磷TP、BOD₅及悬浮物SS的模拟结果也非常一致。

另外也对松江厂的模型进行校正。

（3）设计方案预测

在模型校正成功的基础上，进行设计方案预测。在本项目中，对曲阳污水厂的三种可能设计处理工艺进行了预测，包括A²/O工艺、5段Bardenpho工艺以及设计院正在设计的硝化滤池工艺进行了研究和预测；而对松江污水厂，则选择了A²/O工艺、5段Bardenpho工艺和5段Bardenpho+甲醇工艺进行模拟预测。每个模拟工艺预测又分为不同的运行条件，如回流量IRQ、温度、进水量等条件。下表是对曲阳厂的改造工艺—硝化滤池工艺的部分模拟结果情况对照表。

表 1 曲阳污水厂硝化滤池设计工艺的模拟结果对照

条件	出水水质	COD (mg/L)	CBOD ₅ (mg/L)	TSS (mg/L)	TKN (mg/L)	NH ₃ -N (mg/L)	NO ₃ -N (mg/L)	TP (mg/L)	PO ₄ -P (mg/L)
模型 #1 20,000m ³ /d, 12°C IR=0%	平均值	39.1	4.9	9.5	28.5	26.9	0	0.9	0.2
	标准偏差	5.1	0.2	0.3	4	3.9	0	0.1	0.1
模型 #2 20,000m ³ /d, 25°C IR=0%	平均值	38.7	3.9	9.2	2.8	1.2	15.4	1.8	1.2
	标准偏差	5.1	0.1	0.3	1.6	1.5	2	1.1	1.1
模型 #3 30,000m ³ /d, 12°C IR=0%	平均值	43.8	7.7	13.8	28.4	26.5	0	1	0.1
	标准偏差	5.6	0.3	0.6	4.4	4.2	0	0.1	0
模型 #4	平均值	44.1	7.9	13.8	28.4	26.5	0	1.1	0.2

30,000m ³ /d, 25°C IR=0%	标准偏差	5.6	0.3	0.6	4.3	4.1	0	0.1	0.1
模型 #5 20,000m ³ /d, 25°C IR=100%	平均值	38.5	3.9	9.2	7.9	6.4	9.6	1.3	0.7
	标准偏差	5	0.1	0.3	3.2	3	1.3	0.5	0.5
模型 #6 20,000m ³ /d, 25°C IR=200%	平均值	38.8	4	9.2	8.5	7.1	8.9	0.9	0.6
	标准偏差	5	0.1	0.3	3.2	3.1	1.3	0.5	0.5
模型 #7 20,000m ³ /d, 12°C IR=0%, 无缺氧区	平均值	38.9	4.6	9.5	28.6	26.9	1.8	1	0.4
	标准偏差	5.1	0.2	0.3	4	3.9	0.1	0.1	0.1

就曲阳污水厂来看，模拟方案结果表明，在三种工艺中，硝化滤池工艺能提供最佳污水处理性能。不但如此，工艺性能分析表明，污水厂处理容量可增加 20%，原设计处理容量可由 75,000m³/d 提高到 90,000m³/d (曲阳污水厂有三组活性污泥处理工艺)。

然而，松江污水厂的情况则相反，模拟方案结果表明，为了达到新的排放标准要求，处理容量应减少 10,000m³/d。这是因为冬季水温低，硝化速率及反硝化速率下降造成的。另外，松江厂模拟过程还发现，工业废水对处理效果影响很大。

(4) 污泥性能比较

曲阳污水厂/松江污水厂服务区域的差异，导致进水水质、水量差异，从而导致活性污泥的降解性能的差异，表 2 是用 ABAM 仪器对两厂的污泥分析结果的对比情况。

表 2 曲阳/松江污水厂活性污泥降解性能的差异 (部分)

	曲阳厂	松江厂	单位
硝化速率 NR, 25°C	4.05	1.57	mg NH ₃ -N/g SS hr
耗氧速率 OUR, 25°C	28.8	14.8	mg O ₂ /g SS hr

可以看出，不同污水厂的活性污泥降解性能存在明显的差异，尤其是存在较多的工业废水的情况下，降解性能较差。这种现象还表明，在设计污水厂的处理工艺时，必须测定相关的重要参数，不然会造成很大的误差。

(5) 节省运行费用

通过所提供的工艺优化方案计算，本项目实施工艺过程控制系统可降低能耗，节省运行费用 15-25%，根据方案中依照每度电 0.65 元计算，两厂每年可节省运行费用分别为：

(1) 曲阳厂每年大约可节省 60 万元；

(2) 松江厂每年大约可节省 80 万元；

4 优化诊断成果的执行和实现

美商生化科技公司拥有一套商业化的生物工艺智能优化控制系统 BIOS (Bio-process Intelligent Optimization System)，该系统核心是活性污泥模型，配备专有的在线仪表与污水厂中央控制系统 SCADA 接口，能将污水厂进水、出水的实时水质数据输入该实时模型进行模拟，然后输出污水厂处理工艺的各个控制目标参数，包括溶解氧、内回流比、外回流及排泥量等。以污水厂工艺优化诊断的结果为基础建立开发的 BIOS 系统，能很好的对设计工艺的处理效果进行模拟，反馈给中央控制系统，提供最佳的控制参数，从而达到既满足尾水的排放目标，又能达到节省能耗、降低运行费用的目的。

致谢

本项目得到了国家商务司、上海市水务局、松江区水务局、曲阳污水厂、松江污水厂的大力支持和协助，在此一并表示感谢。

- [1]Henze,M.,Grady,C.P.L.Jr,Gujer,W. et al. Activated sludge model No.1(IAWPRC Scientific and Technical Report No.1),London:IAWPRC.1987
- [2]Henze,M.,Gujer,W.,Mino,T., et al.Activated sludge model No.2(IAWPRC scientific and technical report No.3),London:IAWQ.1995
- [3]Henze,M.,Gujer,W.,Mino,T., et al. Activated sludge model No.2D.Wat.Sci.Technol.,1999,39(1):165-182
- [4]Gujer,W.,Henze,M.,Mino,T., et al. Activated sludge model No.3,Wat.Sci.Technol.,1999,39(1):183-193

电话： (021) 62362384

E-mail: charlesxu@biochemtech.com.cn