

新型城市污水脱氮除磷工艺的试验研究与优化设计

张冰¹, 周雪飞^{2*}, 任南琪¹

(1. 哈尔滨工业大学市政与环境工程学院, 哈尔滨 150090; 2. 同济大学长江水环境教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要:提出了一种改进型 A²/O 脱氮除磷工艺(MMAO), 通过工艺试验和活性污泥 2D 模型对其进行运行和设计优化. 结果表明, 系统对 COD、TN、NH₄⁺-N 和 TP 的平均去除率分别为 85.7%、66.8%、97.35% 和 78.1%; 当 COD 在 300 mg/L 以上时, 脱氮除磷效果均较好, 可分别达到 70% 和 90% 以上. 基于试验结果建立的 MMAO 工艺数学模型仿真效果良好, 可对各单元组合进行优化, 校核预测不利工况下的工艺运行效果, 实现工艺不同工况下的运行参数优化, 较好地实现新工艺的机理性优化设计和运行. MMAO 稳定运行出水可达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002) 一级 B 标准. 由于工艺省去内回流, 增加厌氧混合液部分超越提供反硝化碳源, 使得运行费用明显降低; 系统总停留时间比目前传统的以去除有机污染物为主的生物处理工艺略低, 该工艺非常适用于对不具有脱氮除磷功能污水厂的改造.

关键词:城市污水; 脱氮除磷; 改进型 A²/O 工艺; 活性污泥 2D 模型; 优化设计

中图分类号: X505 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)06-1518-08

Novel Phosphorus and Nitrogen Removal Process for Municipal Sewage Treatment: Performance Evaluation and Design Optimization

ZHANG Bing¹, ZHOU Xue-fei², REN Nan-qi¹

(1. School of Municipal & Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 2. Key Laboratory of Yangtze Water Environment of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: A novel modified A²/O process (MMAO) was developed for nitrogen and phosphorus removal of municipal sewage. Bench-scale study was conducted to evaluate the performance of the MMAO process treating practical municipal sewage at normal temperature. Activated sludge model (ASM2D) was used to simulate the MMAO process and optimize its design and operation. It was found that the average treatment efficiency of COD, TN, NH₄⁺-N and TP achieved by MMAO were up to 85.7%, 66.8%, 97.35% and 78.1%, respectively. When influent COD concentration of the system was more than 300 mg/L, a better nitrogen and phosphorus removal efficiency of 70% and 90% were achieved. After being calibrated and validated by the experimental results, the activated sludge model of MMAO could simulate the biological reactions occurred in the systems excellently. Optimization design and operational parameters could be accomplished by the mechanical activated sludge modeling. Furthermore, the model could also evaluate the process performance under peak load and low temperature and presented a whole scheme toward the unit combination and operation control. The effluent quality of MMAO process under stable operating could reach the first (B) standard of Municipal Sewage Treatment Plant Pollutants Discharge Standards (GB 18918-2002). The effluent of anaerobic unit was pumped directly into the anoxic unit to supply carbon source for denitrification instead of internal recirculation of mixture liquid, which would save operation cost significantly. The total hydraulic retention time of MMAO was lower than traditional biological organic removal system, so it was very suitable for the improvement of existing plant.

Key words: municipal sewage; phosphorus and nitrogen removal; modified A²/O process; activated sludge models No. 2D; design optimization

生物脱氮除磷是城市污水处理的重点课题, 经过多年研究、设计和运行实践, A²/O 工艺已成为一种较为成熟的污水脱氮除磷工艺, 我国许多污水处理厂都采用该工艺, 特别是大型污水处理厂^[1]. 但 A²/O 面临着诸多问题, 如在脱氮与除磷之间存在碳源竞争^[2], 而城市污水的碳源浓度普遍较低, 难以满足同时高效脱氮除磷的要求, 南方城市污水低碳高氮磷的特点使这个矛盾更加突出; 其次, A²/O 工艺为了达到较高的脱氮率, 需要很高的内回流比(200% ~ 500%), 运行费用较高. 为了提高传统脱氮除磷工艺的处理效果, 一些改进型工艺如 DEPHANOX、BCFS

工艺, 被相继提出. 这些工艺虽然改善了脱氮除磷效果, 但也存在着流程较为复杂、内循环系统较多、反应器体积增加、投资和运行费用高等缺点^[3].

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^[4]. 传统设计方法缺乏对系统动态过程的认识, 一般只能采用增大

收稿日期: 2007-06-16; 修订日期: 2007-09-24

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50138010); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(G2000026402)

作者简介: 张冰(1973~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为污水生物处理技术的数值模拟与工艺优化, E-mail: always7321@163.com

* 通讯联系人, E-mail: zhouxuefei@mail.tongji.edu.cn

安全系数的办法克服动态变化造成的影响,设计偏于保守且工艺流程不一定是最佳的,没有反映出活性污泥工艺中生物反应机制,缺少理论支持.随着活性污泥机制模型的发展,数学模拟已广泛应用于生物处理工艺的仿真、预测,更进一步用于工艺的优化设计和运行控制^[5~10].

针对上述问题,本研究提出了改进型A²/O工艺(Modified A²/O, MAAO),该工艺理论上可以节省碳源,缓解脱氮和除磷之间的碳源竞争,减少曝气量和污泥产量;该工艺通过后置反硝化取消了内回流,代之以厌氧池部分碳源超越提供反硝化碳源,节约了运行成本;在试验研究的基础上,利用活性污泥2D模型对该工艺进行了机理性的仿真模拟和优化设计.

1 材料与方法

1.1 MAAO 工艺试验

MAAO 系统试验装置见图 1.装置用有机玻璃做

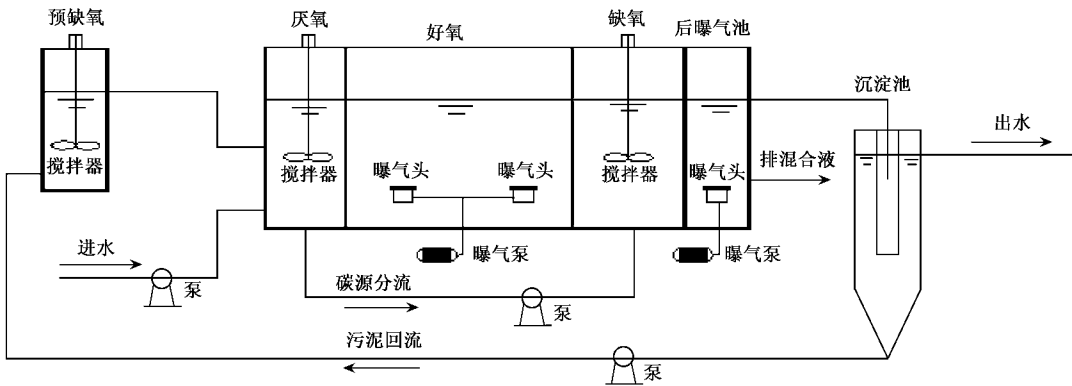


图1 MAAO 工艺流程
Fig.1 Scheme of the MMAO process

试验污水取自上海市曲阳污水厂曝气沉砂池出水,主要水质指标为:COD 200~550 mg/L, TN 30~45 mg/L, TP 2.5~5.5 mg/L. 试验污泥取自上海市长桥污水净化中心污泥回流池,污泥经 2 个月的驯化培养,对 COD 及营养物质的去除效果基本稳定后,进入试验研究阶段.试验研究期间,SVI 值保持在 100 左右,污泥沉降性能良好.

COD、混合液悬浮固体(MLSS)、氨氮(NH₄⁺-N)、总氮(TN)、总磷(TP)等指标采用国家标准方法测定^[11],pH、DO 用 WTW 公司的便携式 DO/pH 测定仪测定.

1.2 数学建模

以国际水协推出的 ASM2D 模型为模拟平台,利

成,由预缺氧池、厌氧池、好氧池、缺氧池和后曝气池以及沉淀池构成,各池有效容积分别为 1.2、3.0、6.2、3.2、2.4 和 6.0 L. 厌氧池、好氧池、缺氧池和后曝气池由一个整体反应池加隔板构成,这是该工艺的一个特点,它对于在不改变老污水厂的水力停留时间前提下,将旧工艺改为具有脱氮除磷效果的新工艺具有很好的指导意义.预缺氧池、厌氧池和缺氧池内安装搅拌器,进水、厌氧池碳源分流和污泥回流分别用 3 台兰格 BT-300 蠕动泵控制流量,实际工程中厌氧池部分碳源可自流至缺氧池.

试验期间,系统进水流量为 2 L/h,混合液悬浮固体 MLSS 在 3 000 mg/L 左右,好氧池溶解氧 DO 控制在 2~4 mg/L 之间,泥龄约为 10~15 d,反应器内温度控制在 20~25℃.自 2006-03-01~2006-07-01,系统稳定运行,基本分为 2 个试验阶段,第 1 阶段即从 3 月 1 日~4 月 12 日,污泥回流比为 50%,厌氧池超越至缺氧池流量为 0.40Q;第 2 阶段从 4 月 15 日~7 月 1 日,污泥回流比为 30%,超越流量为 0.35Q.

用 EFOR 软件进行模拟,建模过程包括:①根据污水处理厂的工艺形式、规模,构建数字化工艺;②确定工艺运行控制条件,如回流比、曝气池内溶解氧、混合液浓度、剩余污泥排放量等;③进水水质和温度数据的输入;④根据实际情况划分模型组分,设定化学计量系数和动力学参数.研究中关键性水质组分划分和可估测参数取值采用课题组以往的研究结果^[12,13],具体见表 1;⑤运行模拟程序,对污水处理过程进行仿真.

1.3 模型校验

在工艺数学建模过程中,很多参数不是基于实际情况确定的,这往往会造成模拟结果与运行数据之间的差异,为了使模型能够模拟准确,必须经过参

数校正过程.模型校正遵循以下基本原则:①非敏感性参数根据模型推荐取典型值,大多数参数随着工况的变化具有相对的稳定性,这些参数不必改变;②敏感性参数根据经验逻辑定向改变,仅仅基于数学

计算结果进行参数调整,可能会导致模型明显偏离实际情况;③每次仅改变一个参数,通常参数间具有很大的关联性,很难估计多参数共同变化的情况,只要改变影响较大的参数即可.

表 1 模型中关键性参数取值
Table 1 Values of key model parameters

进水组分	占总 COD 比例/%	模型参数	取值(20℃)
溶解性有机物(S_1)	5.52	异养菌产率系数(Y_H)	0.71
易生物降解有机物(S_S)	22.06	自养菌的衰减系数(b_H)	0.48
颗粒性惰性有机物(X_1)	31.03	自养菌产率系数(Y_A)	0.24
缓慢生物降解有机物(X_S)	33.66	自养菌的衰减系数(b_A)	0.10
异养菌(X_{BH})	7.44	异养菌最大比增长速率(μ_{mH})	5.70
		自养菌最大比增长速率(μ_{mA})	0.449

模型校正成功后,模拟结果与试验数据基本吻合.接下来,需要采用另外的试验运行数据对校正后模型的有效性进行验证.如果模型验证结果与试验数据达到良好的匹配,则模型校验成功,可用于实际工艺的仿真模拟;否则,应该重新进行模型的校验工作.

模型校正采用第 2 阶段试验数据,共 20 组;模型验证采用第 1 阶段试验数据,共 17 组.

1.4 优化设计

新工艺研究开发过程中,需要基于不同的物理模型,对单元设计、不同单元之间的组合进行大量的试验研究,这种工艺开发过程既耗费大量时间和精力,也难以实现工艺的最佳匹配.为此,本研究提出试验与数学模拟相结合的工艺开发路线,即将试验数据校验过的活性污泥模型用于工艺单元组合和运行模式的优化.工艺优化方法如下:①确定进水水质、水量和出水排放标准,以试验研究的污水为设计进水水质,设计流量50 000 m³/d,出水达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002)一级 B 标准,具体设计指标见表 2;②设定运行参数,其中污泥回流比 $R = 50\%$,厌氧池至缺氧池超越流量 $0.4Q$,好氧池 $DO = 2$ mg/L,混合液 $MLSS = 3\ 000$ mg/L,设计温度 20℃,泥龄 10 d 左右;③按照试验研究的工艺单元容积比例,根据流量实行等比放大,确定各单元的初始容积;④改变各单元容积,在保证出水达标的情况下,优化单元容积;⑤对优化后的工艺进行高峰负荷(1.2*Q*)和低温(10℃)2 种不利情况下

的模拟验证,保证不利工况下出水稳定达标;⑥优化污泥回流比、超越流量和溶解氧等运行参数,从而确定优化运行模式.

2 结果与讨论

2.1 工艺运行结果

2.1.1 COD 的去除

图 2 是 MMAO 工艺对 COD 的去除效果,COD_{in}、COD_{out}分别表示进水 COD、试验出水 COD,其他指标下标同此.进水 COD 在 153 ~ 641 mg/L 之间变化时,出水 COD 为 27 ~ 60 mg/L,平均去除率 85.7%.虽然进水 COD 波动较大,但系统 COD 的去除效果较为稳定,出水 COD 低于 60 mg/L.

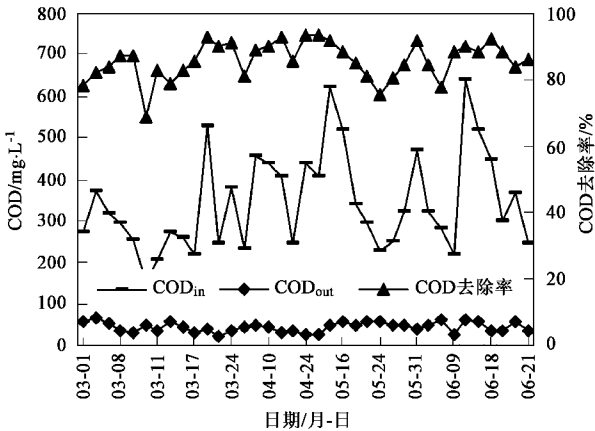


图 2 MMAO 工艺对 COD 的去除效果
Fig.2 COD removal of MMAO

2.1.2 TN 的去除

进水 TN 在 32.2 ~ 51.07 mg/L 之间变化时,出水总氮 TN 为 2.69 ~ 18.19 mg/L,平均去除率为 66.8% (图 3).出水 NO₃⁻-N 平均占出水 TN 的 93.4%.氮的

表 2 设计进出水水质/mg·L⁻¹

项目	COD	BOD ₅	SS	TN	NH ₄ ⁺ -N	TP
进水	338	155	91	40	27.3	5
出水	≤60	≤20	≤20	≤20	8(15)	1

去除主要发生在缺氧段,缺氧段的反硝化效果与超越混合液带入缺氧段的碳源量有关,而碳源量又与进水 COD 及进入厌氧段的 NO_x^- -N量有关,如果进水 COD 过低,反硝化脱氮就不足,出水 NO_x^- -N过高,又会使进入预缺氧段和厌氧段的 NO_x^- -N增加,加剧 COD 过低带来的影响,形成恶性循环^[14].

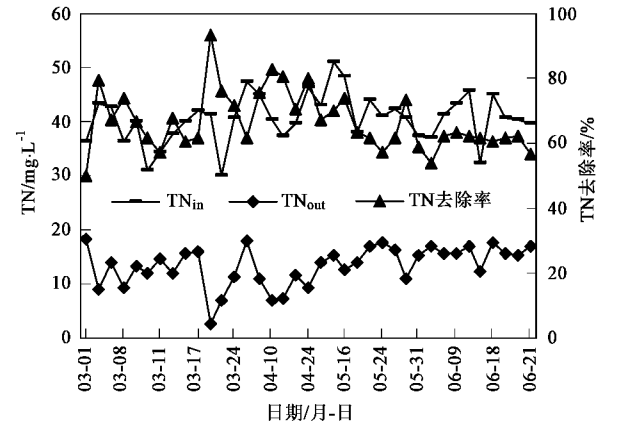


图3 MMAO 工艺对 TN 的去除效果

Fig.3 TN removal of MMAO

2.1.3 NH_4^+ -N 的去除

试验结果表明:无论进水水质如何, NH_4^+ -N 的去除率总在 97.35% 以上,出水浓度平均值为 0.87 mg/L(图 4),这说明系统中的硝化效果一直保持在最佳状态.

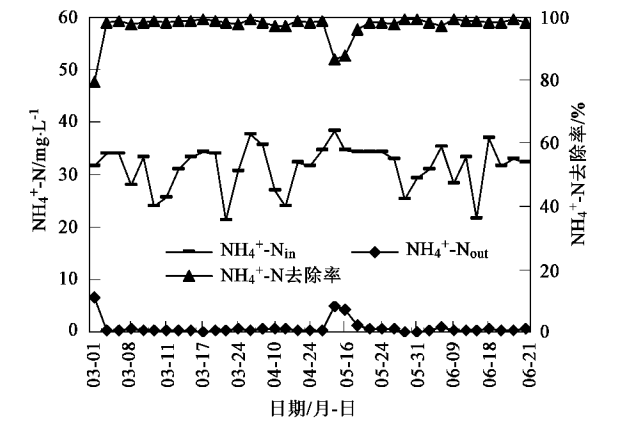


图4 MMAO 对 NH_4^+ -N 去除效果

Fig.4 NH_4^+ -N removal of MMAO

2.1.4 TP 的去除

进水 TP 为 2.73 ~ 8.41 mg/L 时,TP 平均去除率为 78.1%(图 5),系统大部分时间除磷效果良好.3 月 10 ~ 20 日及 5 月 23 ~ 29 日期间,由于持续降雨,进水 COD 浓度偏低,磷去除率有所下降,但进水

COD 浓度提高后,磷去除效果迅速恢复.研究表明,影响生物除磷的影响因素有污水组成、挥发性脂肪酸、DO、pH 等^[15],对本系统除磷影响较大的是 COD 浓度,当进水 COD > 300 mg/L 时,磷的去除率都在 90% 以上.

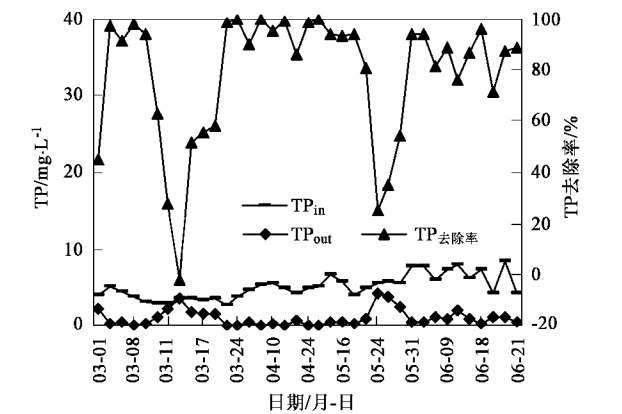


图5 MMAO 对 TP 去除效果

Fig.5 TP removal of MMAO

2.2 模型校正结果

由于前期研究过程中,对进水水质组分和关键性参数进行了测定,在不改变其他参数的条件下,工艺除碳、脱氮效果模拟良好,而除磷模拟较差,这可能与试验未对生物除磷组分和参数进行测定有关.模型校正主要针对聚磷微生物的动力学参数进行调整,校正结果见图 6 ~ 9,其中 COD_{out1} 和 COD_{out2} 分别表示模型校正前后的模拟出水 COD,其他指标下标同此.

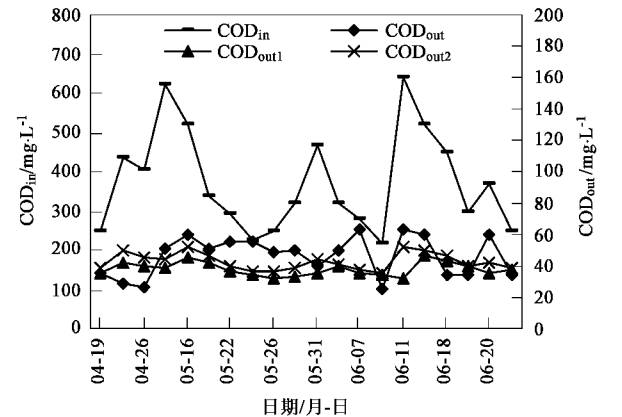


图6 试验和模型校正的出水 COD

Fig.6 Effluent COD by experiment and calibrated model

由图 6 ~ 8 看出,模型校正前后,对系统出水 COD、TN、 NH_4^+ -N 指标的模拟效果差别不大,模拟结果的变化趋势与试验研究出水的变化趋势基本相

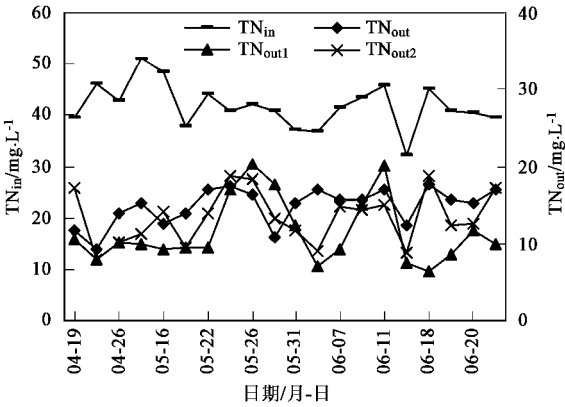


图 7 试验和模型校正的出水 TN

Fig.7 Effluent TN by experiment and calibrated model

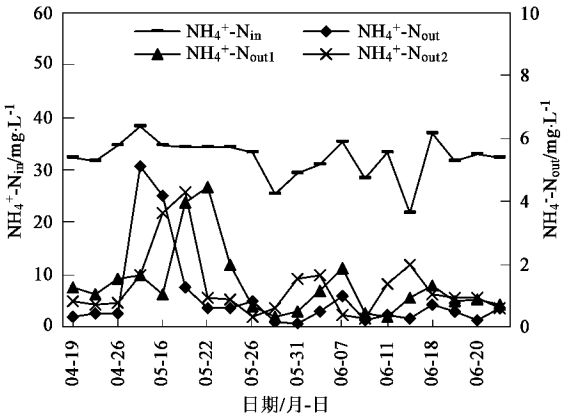


图 8 试验和模型校正的出水 NH₄⁺-N

Fig.8 Effluent NH₄⁺-N by experiment and calibrated model

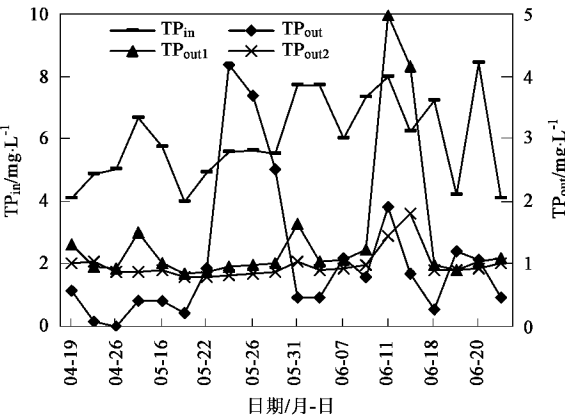


图 9 试验和模型校正的出水 TP

Fig.9 Effluent TP by experiment and calibrated model

较小的缘故. COD、TN、NH₄⁺-N 等指标校正后模拟结果和试验结果平均值的相对误差分别为 -7.9%、-9.37% 和 34.4%, 因为试验出水和模拟出水的中 NH₄⁺-N 浓度都比较低, 平均浓度分别为 0.92 mg/L 和 1.24 mg/L, 试验测定因素或模拟条件的微小变化均可能导致 NH₄⁺-N 平均值变化较大, 因此, 该项指标的模拟效果基本符合要求.

由图 9 可知, 模型校正前后对出水 TP 模拟结果变化趋势基本相同, 但校正前模拟结果与试验结果偏差相对较大, 二者平均值的相对误差达到 50% 左右; 未能较好模拟 5 月 24 日出水的剧烈波动, 由此判断这一天试验操作可能存在问题. 校正过程中调整了聚磷微生物动力学参数最大生长速率 μ_{mp} 和聚磷吸收速率 Q_{pp} 等参数取值, 校正后模型的模拟结果与试验结果平均值的相对误差仅为 -8.7%.

经过初步的参数调整后, 排除试验因素对出水指标的影响及模拟的纯机理化, 校正后模型的模拟结果与试验结果吻合较好, 由此模型校正完成.

2.3 模型验证结果

利用校正后的 MMAO 工艺数学模型, 对试验第 1 阶段的数据进行模拟, 结果见图 10 ~ 13 所示. COD、TN、NH₄⁺-N 和 TP 等指标模型验证结果和试验结果平均值的相对误差分别为 2.4%、5.2%、22.9% 和 3.8%, 验证结果非常良好, 而 NH₄⁺-N 指标的模拟效果也有很大改善. 由模型校验结果可知, 通过对敏感性动力学参数的调整, MMAO 工艺的数学模型能够很好地表达工艺内的生化反应过程, 较好地模拟了城市污水厂的出水水质情况.

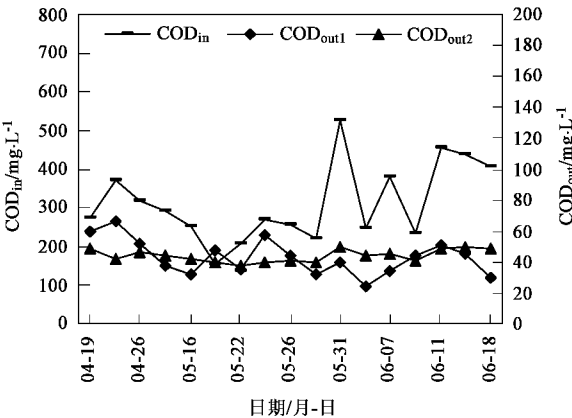


图 10 试验和模型验证的出水 COD

Fig.10 Effluent COD by experiment and validated model

同, 但有各别点误差较大, 这是由于实测出水指标浓度受试验条件的影响导致变化幅度较大, 而模拟结果只受进水条件和模型参数的影响, 所以变化幅度

2.4 优化设计结果

2.4.1 单元优化

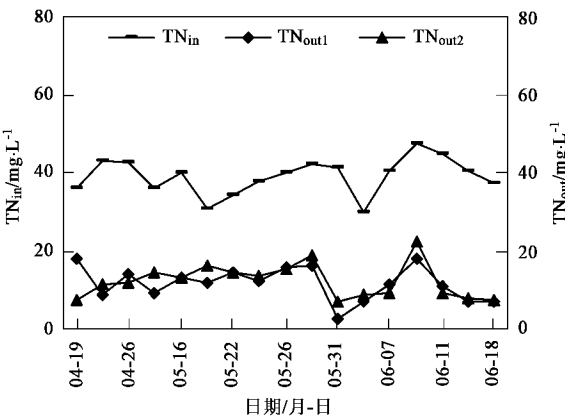


图 11 试验和模型验证的出水 TN

Fig. 11 Effluent TN by experiment and validated model

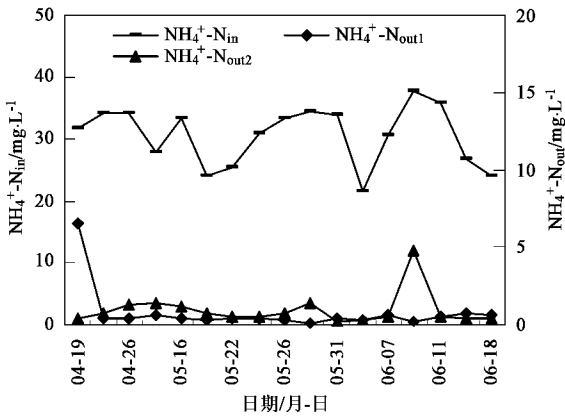


图 12 试验和模型验证的出水 NH₄⁺-N

Fig. 12 Effluent NH₄⁺-N by experiment and validated model

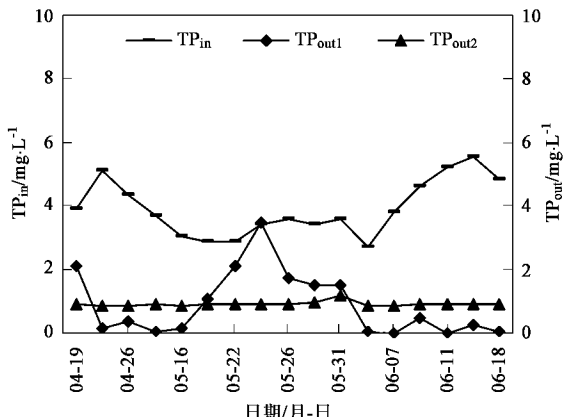


图 13 试验和模型验证的出水 TP

Fig. 13 Effluent TP by experiment and validated model

通过 MMAO 工艺数学模型对各单元容积进行优化,结果见表 3 和表 4。整个工艺的优化设计路线是遵循除碳、硝化、反硝化、聚磷和释磷这一反应路

线来调整相应的单元容积。

表 3 MMAO 工艺的不同优化设计方案/ m^3					
Table 3 Different design optimization schemes of MMAO process/ m^3					
设计方式	厌氧段	好氧段	缺氧段	后曝气段	预缺氧段
试验设计	3 125	6 458	3 350	2 500	1 250
优化设计 1	3 125	5 500	3 350	2 500	1 250
优化设计 2	3 125	5 000	3 350	2 500	1 250
优化设计 3	3 125	5 500	2 500	2 500	1 250
优化设计 4	3 125	5 500	2 000	2 500	1 250
优化设计 5	3 125	5 500	2 500	2 000	1 250
优化设计 6	3 125	5 500	2 500	2 500	600
优化设计 7	3 125	5 500	2 500	2 500	400
优化设计 8	3 000	5 500	2 500	2 500	600
优化设计 9	2 500	5 500	2 500	2 500	600
优化设计 10	3 000	5 500	2 500	2 500	600

由表 4 可知,当好氧段容积降低到 $5\,000\,\text{m}^3$ 时,其硝化能力下降,导致出水中 NH_4^+ -N 浓度大幅上升,因此设定好氧段容积为 $5\,500\,\text{m}^3$;在此基础上调整缺氧段容积,当缺氧段容积降到 $2\,000\,\text{m}^3$ 时,出水 NH_4^+ -N 浓度上升为 $2.61\,\text{mg/L}$,考虑到工艺在高峰负荷和低温 2 种不利工况下的运行稳定性,设定缺氧段容积为 $2\,500\,\text{m}^3$;接着调整后曝气段,发现当其容积为 $2\,000\,\text{m}^3$ 时,工艺硝化能力严重受到影响,由此设定该段容积为 $2\,500\,\text{m}^3$;调整预缺氧段的容积,当容积降至 $400\,\text{m}^3$ 时,出水 TP 浓度接近排放限值,由此设定该段容积为 $600\,\text{m}^3$;最后调整厌氧段容积,当该段容积降至 $2\,500\,\text{m}^3$ 时,出水 TP 浓度为 $2.13\,\text{mg/L}$,为保证除磷效果,设定厌氧段容积为 $3\,000\,\text{m}^3$;最后对优化工艺进行模拟,结果表明,各项指标均能满足排放标准,并留有一定的波动空间。

表 4 MMAO 工艺的不同方法设计的模拟出水/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$						
Table 4 Effluent of MMAO predicted under different design optimization schemes/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$						
设计方式	COD	BOD ₅	SS	TN	NH ₄ ⁺ -N	TP
试验设计	32.2	10.82	14.23	9.93	0.94	0.47
优化设计 1	32.18	11.02	14.24	9.96	2.04	0.48
优化设计 2	32.3	11.78	14.25	11.12	4.35	0.48
优化设计 3	32.22	10.8	14.23	10.73	1.82	0.48
优化设计 4	32.27	10.13	14.24	11.2	2.61	0.48
优化设计 5	32.41	12.45	14.24	13.16	7.96	0.48
优化设计 6	32.19	10.5	14.24	10.11	1.12	0.5
优化设计 7	32.18	10.99	14.24	10.06	0.98	0.89
优化设计 8	32.24	11.2	14.24	10.17	1.12	0.48
优化设计 9	32.22	10.63	14.24	9.98	0.92	2.13
优化设计 10	32.29	10.32	14.24	10.17	1	0.5

2.4.2 高峰负荷和低温校核

在工艺优化设计的运行条件下,进行高峰负荷

和低温(10℃)2种不利条件下的工艺校核,结果见表5.校核结果表明,在高峰负荷下优化设计工艺能够实现污水达标排放;而温度降为10℃时,工艺的硝化效果非常差,出水TN、NH₄⁺-N浓度超标.

表5 高峰负荷和低温(10℃)2种情况下工艺模拟出水/mg·L⁻¹

Table 5 Effluent of MMAO predicted under peak load and low temperature (10℃)/mg·L⁻¹

项目	COD	BOD ₅	SS	TN	NH ₄ ⁺ -N	TP
高峰负荷校核	33.28	12.78	15.33	11.11	3.81	0.53
低温校核(10℃)	40.16	19.86	21.01	26.21	24.13	0.6

为了改善低温下工艺硝化效果,调整单元容积和运行参数对其进行再优化,结果见表6.当好氧段和后曝气段DO由2 mg/L上升为4 mg/L时,优化工艺出水可达标,但SS、TN和NH₄⁺-N等指标已接近排放标准.为了提高工艺运行稳定达标,将好氧段容积调整为6 000 m³,DO设为4 mg/L,则工艺出水各项指标均可达标,并留有一定的波动空间.至此,整个工艺的优化设计完成,单元组合为:厌氧段:好氧段:缺氧段:后曝气段:预缺氧段=3 000 m³:6 000 m³:2 500 m³:2 500 m³:600 m³;系统总水力停留时间约为7 h,

表7 不同溶解氧条件下的MMAO工艺模拟出水/mg·L⁻¹

Table 7 Effluent of MMAO predicted under different DO levels/mg·L⁻¹

项目	COD	BOD ₅	SS	TN	NH ₄ ⁺ -N	TP
DO ₁ = 2 mg/L, DO ₂ = 2 mg/L	32.16	10.53	14.12	10.33	1.09	0.5
DO ₁ = 1.5 mg/L, DO ₂ = 2 mg/L	32.23	9.51	14.24	9.74	1.03	0.49
DO ₁ = 2 mg/L, DO ₂ = 1.5 mg/L	32.3	10.34	14.23	10.29	1.01	0.51
DO ₁ = 1.5 mg/L, DO ₂ = 1.5 mg/L	32.23	9.65	14.24	9.74	1.2	0.62
DO ₁ = 1.0 mg/L, DO ₂ = 1.5 mg/L	32.17	10.01	14.24	8.95	1.47	1.14

(2)污泥回流比和超越比 在设计DO、流量超越比和温度条件下,改变优化工艺的污泥回流比,模拟结果表明,当R降至40%时,工艺出水TP浓度超标;R值升高,将增加系统能耗;适宜的R为45%~55%.在设计DO、污泥回流比和温度条件下,流量超越比0.35Q~0.4Q可满足反硝化需求.

3 结论

(1)MMAO工艺用厌氧段超越混合液至后置反硝化段提供反硝化碳源取得了较好的脱氮除磷效果.系统对COD、TN、NH₄⁺-N和TP的平均去除率分别为85.7%、66.8%、97.35%和78.1%,稳定运行出水可以达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002)一级B标准.但除磷效果受进水COD影响较大,当COD低于250 mg/L时,除磷效果会恶化,氮去除率也随之降低;当COD在300 mg/L以上时,

低于常规的AO工艺,因而可作为AO工艺升级为脱氮除磷工艺的适用工艺类型.改造过程中,将AO工艺的缺氧段(A段)改为厌氧段,好氧段(O段)中间分隔出缺氧段,改变原内回流方向,使碳源经过厌氧段分流至新设置的缺氧段,污泥回流不变.

表6 低温(10℃)改变单元容积和运行参数条件下的工艺模拟出水/mg·L⁻¹

Table 6 Modeling effluent of MMAO under the altered unit volume and operational parameters at 10℃/mg·L⁻¹

项目	COD	BOD ₅	SS	TN	NH ₄ ⁺ -N	TP
DO = 3 mg/L	40.21	19.12	21.01	24.18	21.79	0.97
DO = 4 mg/L	37.55	16.95	19.27	18.23	14.4	0.61
好氧段容积6 000 m ³	34.57	14.83	16.45	15.72	11.33	0.6

2.4.3 运行参数优化

(1)溶解氧 如表7所示,在设计条件下,优化工艺好氧段和后曝气段溶解氧(DO₁和DO₂)均为1.5 mg/L时,工艺处理出水可达标排放;高峰负荷和低温下好氧单元的溶解氧在前面已经讨论,即高峰负荷下DO₁和DO₂维持在2 mg/L,低温下DO₁和DO₂维持在4 mg/L左右.

脱氮除磷效果均较好,可分别达到70%和90%,且运行稳定.

(2)MMAO工艺省去大流量的内回流,增加小流量的混合液超越,运行费用明显降低;系统总停留时间比目前传统的以去除有机污染物为主的生物处理工艺的略低,该工艺适用于对现有不具有脱氮除磷功能污水厂的改造.

(3)基于试验结果建立的MMAO工艺数学模型仿真效果良好,可对各单元组合进行机理性优化,校核预测不利工况下的工艺运行效果,实现工艺不同工况下的运行参数优化,使工艺开发和设计有更好的理论支持.

参考文献:

[1] 何文远,杨海真.城市污水脱氮除磷工艺的比较分析[J].华中科技大学学报(城市科学版),2003,20(1):85-87.

[2] 张杰,臧景红,杨宏,等. A²/O工艺的固有缺欠和对策研究

- [J]. 给水排水, 2003, **29**(3): 22-25.
- [3] 高廷耀, 夏四清, 周增炎. 城市污水生物脱氮除磷工艺评述[J]. 环境科学, 1999, **20**(1): 110-112.
- [4] 周甌, 周丹, 张礼文, 等. 活性污泥工艺的设计计算方法探讨[J]. 中国给水排水, 2001, **17**(5): 45-49.
- [5] 张亚雷, 李咏梅. 活性污泥数学模型[M]. 上海: 同济大学出版社, 2002. 43-106.
- [6] 周传庭. 活性污泥工艺的模拟与优化设计[D]. 上海: 同济大学, 2006. 60-79.
- [7] 庞子山. 活性污泥法工艺系统优化设计模型及应用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2004. 119-143.
- [8] Makinia J, Wells S A. A general model of the activated sludge reactor with dispersive flow- II . model verification and application[J]. Water Research, 2000, **34**(16): 3997-4006.
- [9] 严晨敏, 张代钧, 唐然, 等. 一种改进的 MSBR 工艺脱氮除磷性能的仿真模拟与试验研究[J]. 环境科学学报, 2005, **25**(3): 391-395.
- [10] Coen F, Vanderhaegen B, Boonen I, *et al.* Improved design and control industrial and municipal nutrient removal plants using dynamic model[J]. Water Science Technology, 1997, **35**(10): 53-61.
- [11] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水的分析检测方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 354-360.
- [12] 刘芳. 城市污水厂活性污泥数学模型的参数测定及模拟研究[D]. 上海: 同济大学, 2004. 51-81.
- [13] 周雪飞, 顾国维. ASMs 中易生物降解有机物(S_s)的物化测定方法[J]. 给水排水, 2003, **29**(11): 23-26.
- [14] Kuba T, van Loosdrecht M C M, Heijnen J J. Phosphorus and nitrogen removal with minimal COD requirement by integration of denitrifying dephosphatation and nitrification in a two-sludge system[J]. Water Research, 1996, **30**(7): 1702-1710.
- [15] Mulkerrins D, Dobson A D W, Colleran E. Parameters affecting biological phosphate removal from wastewaters[J]. Environment International, 2004, **30**(2): 120-125.