

基于 BioWin 仿真软件的污水处理系统的优化

陈勇, 杜小兵, 敖志鹏

(中交一航局武汉建设投资有限公司)

摘要:为解决某污水处理工艺运行效率低、出水水质稳定性不足问题,引入 BioWin 仿真建模技术开展系统优化研究。全面收集进水水质、工艺流程、设备运行参数等基础数据,完成 BioWin 仿真模型构建与校准;设置多组平行模拟试验,探究溶解氧浓度、水温等关键参数对脱氮除磷效果的影响规律;结合 AAO 工艺脱氮除磷优势,依托 BioWin 软件仿真优化功能,对原工艺核心环节进行参数调整与流程重构;针对工艺运行中氨氮、硫化氢等有害因素的产生机制与风险水平,提出针对性管控措施。优化后的污水处理系统氨氮、总磷等指标稳定达标,实现水质提升与成本控制双重目标,为类似污水处理厂工艺优化提供技术路径与实践参考。

关键词: BioWin 仿真;污水处理;系统优化;安全评价;工艺模拟

0 引言

近年来,我国社会经济指标达成率较高,城镇化进程成效显著,但水环境污染问题始终是一个关键议题^[1]。我国生活污水排放量呈日益增长态势,生活污水中蕴含大量日常生活产生的污染物质。当前污水处理工艺在反应条件以及对重金属、危险气体、氨氮、有机污染物等污染物质的控制方面,存在处理效果不显著的弊端,且在工艺流程中对操作人员的健康存在安全隐患。

相关数据表明,普通污水处理厂出现出水水质难以稳定达标的情况,是由于在处理过程中诸多工艺单元的参数设置不合理,且无法及时进行调整^[2]。若污水处理厂的某一个或多个工艺单元长期处于参数不适宜的状态,整个企业的运行将无法正常运转。若企业能够合理运用相关仿真软件,便可以在较为经济、安全的条件下针对上述问题制定更优的解决方案^[3]。

针对污水处理厂的一系列仿真软件通常以其内置的生物数学模型为基础,可将污水处理过程中的一些生化反应进行数据化与直观化处理,从而较为精准地模拟包括厌氧消化在内的多种反应过程。鉴于仿真软件的特性,合理运用模拟软件,既能获得工艺流程的优化方案,又能最大程度降低人力、物力和财力的投入。同时,可从理论层面预测各种方案的预期结果,筛选出最优的参数设置与反应条件,提升污水处理厂优化改造的效率与可行性^[4]。

1 BioWin 软件概述

1.1 BioWin 仿真软件

BioWin 仿真模拟软件基于活性污泥法构建,活性污泥法作为一种常见的污水处理生物处理技术,主要借助在有氧环境下培养活性污泥,以实现污水中有机污染物的净化^[5]。其核心为活性污泥,通过吸附、凝聚以及氧化分解等作用去除污水中的污染物,完整的活性污泥系统还涵盖回流、曝气以及污泥处置等辅助设施^[6]。

在软件模拟进程中,针对水体中的各类污染物质,设置了多达 60 余个监测指标,主要涵盖化学需氧量(COD)浓度、悬浮固体浓度、pH 值等。同时,该软件具备模拟各类生物化学反应的能力,在污水处理企业的提标改造、参数优化、运行管理等诸多方面均有应用。鉴于此,软件可以应用于企业的日常运行项目,为企业创造可观的经济效益^[7]。

1.2 BioWin 仿真软件的建模过程

1) 明确建模目的,本研究建立模型旨在优化现有工艺运行;2) 收集基础数据,包括目标污水厂的进水水量、水质、组分等参数及工艺运行条件与参数;3) 根据目标污水厂的工艺在软件中选择相应的工艺单元模块,建立工艺数学模型;4) 依据收集和试验测定的基础数据输入模型参数,并通过软件内部校正功能剔除波动较大的数据,以避免对模拟结果产生显著影响;5) 进行工艺优化研究^[8]。

2 污水处理厂的建模与应用

2.1 研究对象

2.1.1 工程概况

本研究选取辽宁某污水处理厂为研究对象,其处理流程主要采用氧化沟工艺,污水日处理量约为 1.2 万 t。

氧化沟处理方法虽然基本原理仍为活性污泥法,但其处理工艺相较于传统方法有所改进。从处理单元的构筑物形式而言,氧化沟是一种沟渠

状的反应流程,待处理污水在相对闭合的沟渠中流动,以实现各类生化反应,从而在一定程度上简化了整个处理流程^[9]。

2.1.2 进水水质参数

通过收集相关数据资料,得到了该企业连续 10 d 内进水的各类污染物组分的含量,选取了 4 个比较具有代表性的水质指标: COD(化学需氧量)、TN(总氮)、TP(总磷)、NH₃-N(氨氮),各组分浓度变化如图 1 所示。

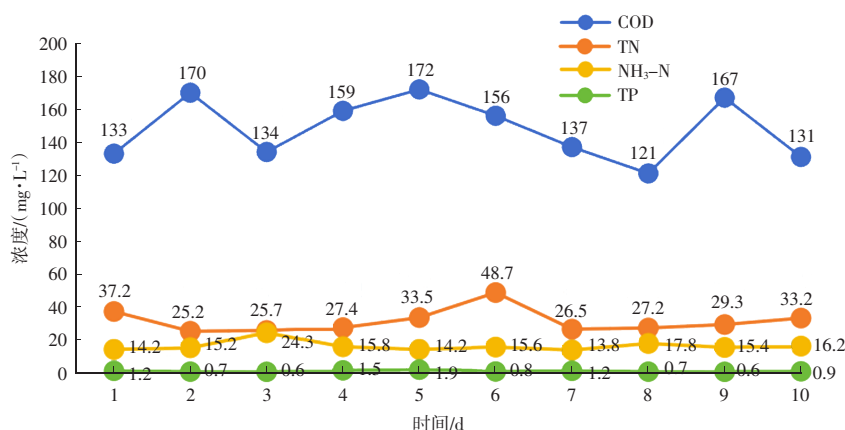


图 1 每天进水组分浓度

为了进行稳态计算,需要得到一个确定的进水数据,采用 10 d 进水数据的平均值作为稳态模拟的输入值, COD(142.0 mg/L)、TN(32.0 mg/L)、NH₃-N(16.2 mg/L)、TP(1.5 mg/L)。

根据有关规定与企业排放标准,该企业所处理的污水排放浓度标准为: COD(40 mg/L)、TN(15 mg/L)、NH₃-N(5 mg/L)、TP(0.5 mg/L)。

2.2 现有工艺试验模拟

在模拟软件 BioWin 中,借助其内置数据构建整个污水处理工艺模型。该模型涵盖进水端、厌氧池、氧化沟、二沉池、出水端以及剩余污泥排放端。通过一系列生物反应器,控制曝气程度以模拟氧化沟中的厌氧与好氧段。随后设置二沉池,用于沉淀污水中的污泥。将部分污水回流至进水端,以维持整个工艺流程中污染物的浓度;同时,将大部分污染物质以剩余污泥的形式排放,进入后续的污泥稳定等处理流程。二沉池中的上清液则通过出水口排出,得到初步处理后的出水。

构建完成整个污水处理厂的运行模型后,将前期收集的参数输入模型。输入完成后,软件会自动检查模型搭建完成度以及各项数据的合理性,并给出反馈。

依次对出水的 COD、TN、无机氮、硝态氮、TP 等指标进行统计。得出统计结果,其中 COD 浓度为 59.7 mg/L, TN 浓度为 20.4 mg/L, 无机氮浓度为 16.5 mg/L, 硝态氮浓度为 15.3 mg/L, TP 浓度为 1.2 mg/L。与出水水质要求进行对比分析。

将所得数据与企业所处理污水的排放浓度标准进行比较,结果显示,出水水质中的 COD 浓度、TP 与 TN 浓度均未达到排放要求,超标比例分别为 49%、140%和 36%。

分析 COD 在工艺流程中流经各个工艺单元时的含量,可发现有机污染物随着反应的进行呈逐渐减少的趋势, COD 的浓度从初始的 142 mg/L 降至 59.7 mg/L,表明活性污泥法对 COD 的去除效果较为显著。

2.3 平行试验的设计

2.3.1 溶解氧含量影响试验

首先对 DO(溶解氧)含量的影响进行考量。在该工艺流程中,仅氧化沟后半段需要 DO 参与反应,工艺流程中其初始值设定为 3 mg/L。因此,在确保其他条件保持恒定的前提下,在初始值附近选取 1 mg/L、2 mg/L、4 mg/L 三个不同的 DO 含量分别进行模拟试验并获取结果,见表 1 与图 2。

表 1 溶解氧变化模拟结果

DO 含量	物质种类含量				
	COD	TN	无机氮	硝态氮	TP
4	78.0	15.4	11.1	11.1	2.1
3	59.7	20.4	16.5	15.3	1.2
2	62.0	18.8	14.7	10.2	1.2
1	97.0	24.3	17.2	11.3	1.2

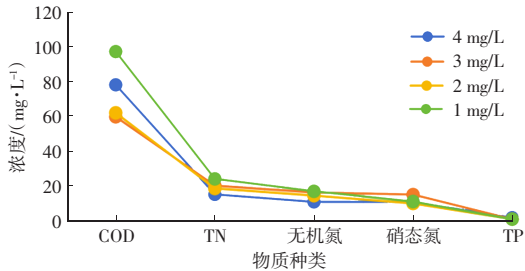


图 2 DO含量对出水浓度的影响

表 1 呈现了不同 DO 含量下的出水水质指标。结果显示：当 DO 含量为 2~3 mg/L 时，COD 浓度分别为 62 mg/L 和 59.7 mg/L，显著低于 1 mg/L 时的 97 mg/L 和 4 mg/L 时的 78 mg/L，表明中等溶解氧水平更利于有机污染物降解；DO 含量为 4 mg/L 时，TN 浓度最低(15.4 mg/L)，且硝态氮占无机氮比例达 100%(11.1 mg/L)，说明高 DO 含量可促进硝化反应，但可能抑制反硝化过程，导致 TN 去除率与 COD 去除存在权衡关系。

由图 2 可知，当 DO 含量在 2~3 mg/L 时，出水组分中 COD 的浓度将会达到一个较低的水平，但是 DO 含量在 4 mg/L 时污水处理系统对总氮的去除率较高。

2.3.2 温度影响试验

中温消化一般的温度范围是 35~40 ℃，将试验条件依次设置为 30 ℃、35 ℃、40 ℃、45 ℃，每次试验在保证其他因素不变的情况下改变温度参数的取值，之后统计每次改变条件后的出水水质各指标。模拟结束后将结果在模拟软件中的图表库中生成统计图，记录了温度在 30 ℃、35 ℃、40 ℃、45 ℃时的出水水质状况，相关数据见表 2 与图 3。

表 2 温度变化模拟结果

温度/℃	物质种类含量				
	COD/ (mg·L ⁻¹)	TN/ (mg·L ⁻¹)	无机氮/ (mg·L ⁻¹)	硝态氮/ (mg·L ⁻¹)	TP/ (mg·L ⁻¹)
30	59.7	20.4	16.5	15.3	1.2
35	26.8	12.8	11.0	11.0	1.3
40	44.5	13.7	11.1	11.1	1.6
45	62.0	14.6	11.1	11.1	1.8

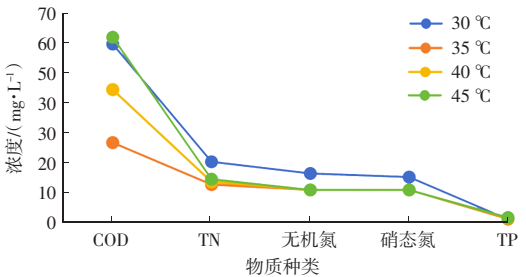


图 3 厌氧消化温度对出水浓度的影响

表 2 探究了温度对出水水质的影响，结果表明：35 ℃时 COD 浓度最低，为 26.8 mg/L，显著优于 30 ℃时的 59.7 mg/L、40 ℃时的 44.5 mg/L 和 45 ℃时的 62 mg/L，印证了中温(35 ℃左右)为微生物代谢的最适温度，温度过高或过低温度均会降低酶活性；35 ℃时 TN 浓度(12.8 mg/L)和无机氮浓度(11.0 mg/L)最低，而 TP 浓度(1.3 mg/L)随温度升高呈上升趋势(45 ℃时达 1.8 mg/L)，提示温度对脱氮菌(如硝化菌)和聚磷菌的影响存在差异，需兼顾温度对不同功能菌群的适配性。

由图 3 中可知，温度的变化对污水中有机污染物的除去率有较大的影响，例如当厌氧消化温度为 30 ℃时，出水 COD 浓度达到 59.7 mg/L，当温度变化为 35 ℃时，出水 COD 浓度直接下降到 26.8 mg/L，而当温度变化为 40 ℃、45 ℃时，出水 COD 浓度又分别上升到 44.5 mg/L、62 mg/L。综合上述分析可知，厌氧消化温度控制在 35 ℃左右时，系统各指标均能达到更优水平。

2.4 工艺流程的优化

2.4.1 AAO 工艺

可以考虑采用 AAO 工艺流程进行模拟优化从而改善出水水质。AAO 工艺是厌氧、缺氧、好氧工艺流程的缩写，其主要的反应构筑物由厌氧反应器、缺氧反应器、好氧反应器构成，是目前最为常用的污水处理工艺。AAO 处理工艺具有同时除去污水中有机污染物以及氮、磷的优势，而且整个流程水流流动性更好，曝气程度好，在一定程度上有效地避免了一般的活性污泥法常见的污泥膨胀问题^[10]。

2.4.2 BioWin 模型的构建

依据 AAO 工艺流程图以及所收集的进水数据，可在 BioWin 软件中通过对各类工艺单元进行组合并设定参数，进而构建模拟模型。

AAO 工艺的 3 个部分均包含众多反应构筑物。为简化计算，在建立模型时可将厌氧流程、

缺氧流程、好氧流程均简化为一个大体积的生物反应器^[1]。输入数据进行稳态模拟后,依次统计出水的 COD、TN、无机氮、硝态氮、TP 浓度数据,其数值分别为 7.3 mg/L、8.2 mg/L、7.5 mg/L、7.5 mg/L、0.9 mg/L,基本达到污水排放标准。通过无机氮浓度与硝态氮浓度可知,出水的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 值近乎为 0,达到了出水水质指标的基本要求。

在整个 AAO 工艺流程中,进水单元、厌氧段、缺氧段、好氧段以及出水端单元各项水质参数呈现出一定的数值变化趋势,见图 4。

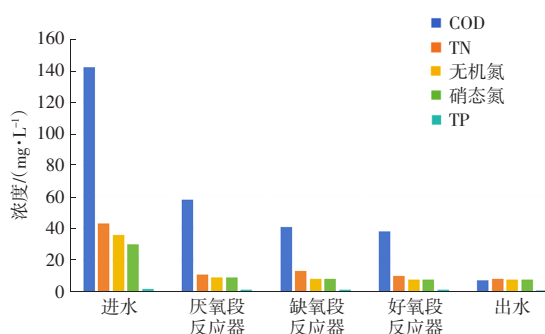


图 4 各工艺单元水质参数

由图 4 可知,进水中的 COD 浓度,即有机污染物浓度,经过厌氧消化池后,由 142 mg/L 降至 58.3 mg/L,表明厌氧消化对有机污染物的去除效果较为显著;同时,从变化趋势可看出,此阶段污水中的 TN 量也显著下降, TN 浓度由 43 mg/L 降至 11 mg/L;随后,在缺氧反应器内, COD 浓度由 58.3 mg/L 降至 41.2 mg/L,有机物去除效率不高;最终到好氧段,该反应单元 DO 含量充足,此阶段主要处理剩余的有机污染物,具体表现为 COD 浓度由 39.4 mg/L 降至 7.3 mg/L。

3 危险因素

3.1 危险因素种类

在实际污水处理厂的工作流程中,因工艺单元种类繁多,如毒物、粉尘、噪声等风险因素产生的概率随之增加。操作人员在日常工作中易接触到这些危险有害因素,进而对其身心健康造成损害。若长期处于危险因素环境且未采取相应防范措施,极有可能罹患一系列职业病。对于一般生活污水处理厂而言,常见的危险有害因素包括氨氮、硫化氢、污泥气(以甲烷、二氧化碳为主)、化学药剂(铁盐、铝盐)等。

3.2 危害因素的风险

1) 氨氮

氨气具有强烈的刺激作用,尤其对眼睛及呼吸道有极强的灼烧作用,可导致受害者眼睛无法睁开、短暂失明,同时呼吸道有灼烧感、呼吸困难,严重时可导致死亡。长期处于有氨气的工作环境中,可能引发支气管哮喘、阻塞性肺疾病等职业病。

2) 硫化氢

硫化氢中毒通常会对身体造成诸多危害,主要表现为中枢神经系统、呼吸神经系统和其他多脏器受损的全身系统疾病。呼吸系统会出现肺水肿、肺炎、喉头痉挛、呼吸麻痹、严重呼吸困难等症状,大量吸入硫化氢还会导致呼吸衰竭而迅速死亡。此外,吸入过量硫化氢会导致心动过速、心律失常,造成患者胸闷、气短、心悸等一系列循环系统危害。

3) 污泥气

污泥气中主要成分包含甲烷与二氧化碳。甲烷属于易燃易爆气体,当污泥气中甲烷浓度处于爆炸极限范围内时,遇明火、高热或静电火花极易发生爆炸燃烧,会造成设备损坏、厂房损毁甚至人员伤亡。二氧化碳本身虽不可燃,但在封闭空间内浓度过高时,会挤占空气中的氧气空间,引发人员缺氧窒息,短时间内就会导致昏迷甚至死亡。

4) 化学药剂

处理过程中不可避免会使用铝盐、铁盐等化学物质,这类药剂若投加过量,会导致出水余铝、余铁浓度超标,还会增加污泥产生量,多余的金属离子排入水体后,会对水生生物造成慢性毒性,破坏水生态平衡。部分用于消毒、氧化处理的化学药剂,如次氯酸钠,本身具有强腐蚀性 with 挥发性,操作过程中若发生泄漏,挥发出的刺激性气体会灼伤人体呼吸道黏膜,接触皮肤会造成化学性灼伤。

3.3 可行性与措施

结合本文所考虑的危险因素的性质、产生原理以及现有的处理经验,可有计划地对这些气体类危险因素进行有效控制与预防。

1) 在好氧单元内尽量减少厌氧状况发生

根据气体产生机理,其大量生成与扩散通常需要相对厌氧的环境条件。因此,最基本的防治措施是减少局部厌氧情况的发生,可通过增强通风量与曝气程度来加快空气流通,营造厌氧微生

物难以生存的条件。若处于厌氧段,可考虑在厌氧部分上部搭建好氧层(利用绿色植物或其他特殊材料),以限制气体扩散,同时吸收已逸散出厌氧段的气体^[12]。

2) 遏制特定微生物的活动

从上述对硫化氢气体的介绍可知,硫化氢气体产生的根源是水中特定的厌氧微生物利用硫酸根作为电子最终受体的过程。因此,可考虑投入能够抑制特定微生物呼吸的药剂,定向切断这一过程,从而减少其源头产生,也可使用能够替代硫酸根作为电子受体的药剂来实现^[13]。

4 结语

本研究以特定污水处理系统为研究对象,通过构建研究对象主要工艺流程的模型,在软件中模拟其不同条件下的运行状态。重点研究了厌氧消化段温度与好氧反应段 DO 含量对出水水质的影响,旨在探寻适合该系统的参数条件,以提升污水排放环境的生态安全性。同时,针对进水参数,更换其他工艺流程模拟处理效果,得出以下主要结论:

1) 该污水处理系统适宜的厌氧消化温度为 35 ℃,好氧段 DO 含量为 3 mg/L。运用仿真模拟软件 BioWin 对某污水处理厂现有的氧化沟工艺流程进行模拟,通过改变处理单元参数,如厌氧段温度 and 好氧段 DO 含量,分别开展试验模拟,并依据软件输出数据判断处理效果。结果显示,在适宜条件下,系统对 TN、NH₃-N 和有机污染物的去除率均有所提高。

2) AAO 工艺流程在处理效果方面更具优势。在深入了解 AAO 工艺原理后,选用该工艺替代污水处理厂原有的工艺,同样在 BioWin 中建立系统

模型进行试验模拟。软件输出数据表明,新选择的处理工艺对出水质量,尤其是 COD 的处理效果有显著提升。

3) 对于工艺流程中氨气、硫化氢等有毒有害气体逸散问题,可通过在好氧单元尽量减少厌氧状况的发生、抑制特定微生物的活动、改进工艺设备等措施,降低对操作人员和环境的影响。

参考文献:

- [1] 杜明虹,李启蓝.水环境污染现状及治理对策分析[J].化工管理,2021(6):129-130.
- [2] 张璐怡.新形势下我国污水处理行业发展现状分析[J].环境保护,2021,49(2):32-36.
- [3] 沈童刚,邱勇,应启锋,等.污水处理厂模拟软件 BioWin 的应用[J].给水排水,2009,45(增刊1):459-462.
- [4] 王醒,房婷婷,丁彬彬,等. BioWin 仿真软件在污水处理中的应用研究[J].广东化工,2020,47(3):128-132.
- [5] 柏小家. BioWin 模拟软件在污水处理厂运行过程中的优化研究[D].昆明:昆明理工大学,2016.
- [6] 高红伟. Biowin 软件对污水处理厂运行的模拟优化研究[D].北京:北京建筑大学,2013.
- [7] 陆谢娟,陈慧,谢仕君,等.基于 BioWin 的改良 AAO 工艺模拟与优化[J].给水排水,2020,56(增刊1):552-557.
- [8] 张行.基于 BioWin 的污水厂运行优化及达标改造技术研究[D].北京:北京建筑大学,2016.
- [9] 解东,胡锋平.氧化沟工艺在污水处理中的应用研究进展[J].江苏科技信息,2010(1):29-32.
- [10] 赵铮.改良型 AAO 工艺脱氮效果评价及优化研究[D].桂林:桂林理工大学,2017.
- [11] 周国强.基于 Biowin 和 GPS-X 的污水厂运行模拟及综合评价[D].武汉:华中科技大学,2017.
- [12] 邹博源,陈广.城镇污水处理厂臭气污染与除臭技术研究进展[J].净水技术,2020,39(5):109-115.
- [13] 孔国栋.城市生活污水处理过程中职业病危害探讨[D].青岛:中国海洋大学,2008.