

工业技术

可调容积型多级 AO 工艺模拟仿真系统的构建及其稳定调控研究

吕志超^{1,2}, 宋秀兰¹, 席玉鹤², 苏小莉², 董文艺², 孙飞云^{2*}

(1. 太原理工大学环境科学与工程学院, 山西 太原 030024;

2. 哈尔滨工业大学(深圳)土木与环境工程学院, 广东 深圳 518000)

摘要:针对污水生化处理过程中关键水质参数难以实时监测,进水冲击负荷变化下难以及时稳定调控等问题,在中试水平下连续运行可调容积型多级 AO 工艺,探究瞬时监测的各单元工艺参数(DO、ORP、pH)与延时水质参数(COD、氨氮、总氮)的相关性与转换性以及 ASM2d 模型仿真数据,通过构建模拟仿真系统,确保中试水平的多级 AO 工艺稳定运行与调控。结果表明,工艺运行过程中不同单元的瞬时 pH、氧化还原电位(ORP)、温度(T)、溶解氧(DO)等参数与工艺各阶段的关键水质指标(COD、TN、TP、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 等)具有较高的相关性,通过仿真软件数据库优化拟合获得实时的工艺调控指导方案,实现工艺的及时地调控与参数修正,优化运行工艺保证出水水质稳定,达到地方排放标准的目标。

关键词:多级 AO; 在线监测; 水质指标; 污水处理厂

中图分类号: X703.1

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2021)04-0194-06

DOI: 10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2021.04.041

Construction and stable control of simulation system for volume-adjustable multi-stage AO process

LV Zhi-chao^{1,2}, SONG Xiu-lan¹, XI Yu-he², SU Xiao-li², DONG Wen-yi², SUN Fei-yun^{2*}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Taiyuan University of Technology,

Taiyuan 030024, China; 2. School of Civil and Environmental Engineering, Harbin Institute of

Technology (Shenzhen), Shenzhen 518000, China)

Abstract: In order to monitor key water quality parameters in the biochemical treatment of sewage in real time and to adjust the stability in time under the impact of the influent load, a multi-stage AO process with adjustable volume runs continuously at a pilot scale. The correlation and conversion between the process parameters (DO, ORP and pH) of each unit monitored instantaneously and the delayed water quality parameters (COD, ammonia nitrogen and total nitrogen, etc.) are explored, and ASM2d model simulation data are investigated. A simulation system is constructed to ensure the stable operation and regulation of multi-stage AO process at a pilot level. Results show that instantaneous parameters such as pH, ORP, T, DO of different units in the process are highly correlated with key water quality indexes (COD, total nitrogen, total phosphorus, ammoniacal-nitrogen and nitrate-nitrogen etc.) in each stage of the process. Through simulation software database optimization and fitting, a real-time process control guidance scheme can be obtained, real-time process control and parameter correction can be achieved, and the optimized operation process ensures the quality of the effluent water quality to meet the local discharge standards.

Key words: multi-level AO; online monitoring; water quality indicators; sewage treatment plant

随着我国经济的飞速发展,环境保护越来越受到人们的重视,污水处理是水环境保护的重要一环,对提高水的利用率、恢复良好的水环境、降低排放物对环境的危害起到至关重要的作用。多级 AO 工艺是对传统缺氧(A)、好氧(O)工艺的进一步改进,由一系列缺氧段和好氧段串联而成的新工艺^[1-3],是近年来兴起的一种加强脱氮除磷的高效生物处理技术。

一些大型的污水处理厂将 COD、TN、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 和 TP 作为污水处理系统运行状况的直接监测参数^[4-5]。直接监测所涉及到的仪器设备,购买价格高昂,维护烦琐,多用于大型污水处理厂。因此,为了提高中小型污水处理厂的自动化控制,本文中将在线传感器测得的 ORP、pH、DO 以及 MLSS 作为污水处理系统的直接监测参数,通过参数间相关性得到其他水质指标,监测这些参数所需的仪器设

收稿日期:2020-04-20;修回日期:2021-02-02

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2015ZX07306001)

作者简介:吕志超(1995-),男,硕士生;孙飞云(1982-),男,博士,副教授,研究方向为污水处理和资源化、饮用水深度处理、城市雨水利用技术、膜分离技术及其过程开发等,通讯联系人,shzhhit@163.com。

备价格相对便宜,运行维护比较简单。根据监测参数识别系统的控制变量,作为后续构建模拟仿真系统的基础框架。

人工神经网络模型(artificial neural network, ANN)是对污水处理过程输入输出表达的典型黑箱模型,根据系统营养物质输入输出建立的物料核算平衡微分方程的活性污泥模型(activated sludge model, ASM),是典型的白箱系统^[6-7]。本文中基于ANN与ASM2d的耦合,通过在线监测与实时预测数据组建数据库,利用瞬时参数与延时参数之间的内部关系,反映水质处理状况。构建一个模拟改良型多级AO工艺的仿真模型,达到运行工艺的实时监测与调控,以保证处理工艺的稳定运行与出水的稳定达标。本文中选用ASM2d模型为核心开发的GPS-X软件进行模拟仿真建立数据库^[8-9]。

1 研究方法 with 数据处理

1.1 研究方法

采用前置厌氧两级AO工艺,如图1所示,主要优势是在厌氧区合成的内聚物可以快速被缺氧区反硝化细菌利用从而达到良好的脱氮效果^[10-11]。工艺采取两段进水的方式,将进水按照比例分别进入厌氧区及二级缺氧区,在保证前端厌氧释磷的有机物需求同时,增加后半段碳源,提高脱氮效率。在每一级的缺氧区-好氧区之间设置硝化液回流来促进反硝化作用。工艺的厌氧区,聚磷菌利用进水中的有机物转化为内聚物聚羟基烷酸酯(PHA)等有机颗粒的形式储存在胞内,并释放磷,为后续好氧区吸收水体中的磷提供有利条件^[12-13]。在单级内通过移动活动板来调节缺氧区与好氧区的不同的容积比,达到最佳的脱氮效率。

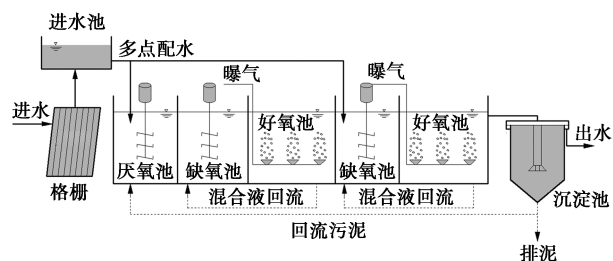


图1 多级AO工艺流程

工艺运行采用中央控制系统调控,瞬时参数通过在线传感器测定并记录,延时参数COD、 NH_4^+-N 、TP、TN等常规指标的检测详见第四版《水和废水监测分析方法》。检测方法和使用的仪器如表1

所示。

表1 常规水质检测分析方法

指标	检测方法	使用仪器
COD	重铬酸钾法	烘箱(DHG-9030A)
NO_3^--N	紫外分光光度法	紫外分光光度计(UV2600)
TN	过硫酸钾氧化紫外分光光度法	紫外分光光度计(UV2600)
NH_4^+-N	纳氏试剂光度法	紫外分光光度计(UV2600)
TP	钼锑抗分光光度法	紫外分光光度计(UV2600)
pH	在线传感器	上海诺博 DTD-9100
ORP	在线传感器	上海诺博 DTD-9100
DO	在线传感器	上海诺博 DTP-9600
MLSS	在线传感器	上海诺博 ZS-600

1.2 数据处理

通过装置的长时间连续运行,得到足够的数据库支撑,探究瞬时参数与延时参数之间的内在联系,分析讨论不同参数之间是否具有统计学上的关联性,包括线性关系与非线性关系。考虑到数据测定的波动性,在本文中,不同参数之间的判定系数 ≥ 0.8 ,即认定该组参数之间具有相关性。

通过GPS-X对实际工艺运行效果的模拟拟合,设定组分变化、改变计量系数、调整动力学参数使关键水质指标拟合程度 $\geq 95\%$,之后再通过改变进水量、进水配比、进水水质、缺氧/好氧比HRT、SRT、DO等运行工况,模拟出不同运行状况下的出水水质以及调控策略,为构建即时性多级AO工艺模拟仿真系统组建满足需求的数据库作支撑。

2 水质参数的监测

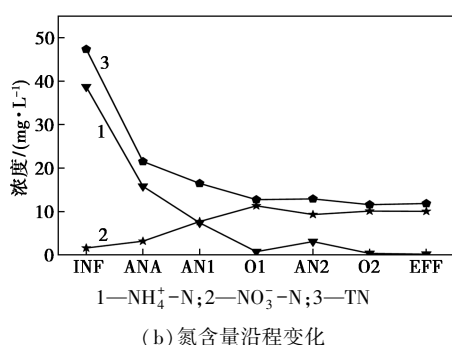
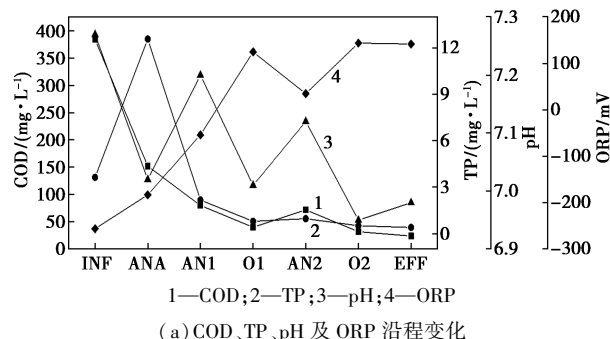
2.1 监测参数的识别

相关研究表明^[14-15]:污水处理系统中,COD、 NH_4^+-N 、TP浓度等进水水质参数,工艺运行过程中的T、ORP、pH、MLSS、DO浓度等过程监测参数,水力停留时间(HRT)、污泥停留时间(SRT)、碳源分配方式、碳源分配比、硝化液回流比、污泥回流比等工艺参数都会影响污水处理工艺的出水水质。通过这些参数的直接监测或间接获取构建一个能够对污水处理工艺进行实时监测和指导的仿真模拟系统。

2.2 水质参数的沿程变化规律

中试规模($50 \text{ m}^3/\text{d}$)多级AO工艺连续运行超过200d,记录每个功能单元的水质参数和运行条件参数。污水处理过程中的关键水质参数有COD、

TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 TP 等,以及 pH、ORP 等监测参数,在不同的处理阶段呈现出不同的变化,参数主要变化规律如图 2 所示。



INF—进水; ANA—厌氧池; AN1—第一缺氧池; O1—第一好氧池;
AN2—第二缺氧池; O2—第二好氧池; EFF—出水

图 2 沿程变量监控

2.3 瞬时参数变化特征分析

2.3.1 ORP 变化特征分析

氧化还原电位 (ORP) 是水质中一个重要指标,能够综合其他水质指标来反映水体系统中的生态环境^[16]。如图 2(a) 所示,生活污水的 ORP 值一般介于 $-400 \sim -200$ mV。在厌氧区,有机物充分,主要进行还原反应及污泥回流,使得 ORP 值略有升高,维持在 $-200 \sim -100$ mV,进水 COD 与厌氧区的 ORP 值呈反相关,厌氧释磷量也会因有机物充足供应而增加;ORP 在第一缺氧区进一步上升,维持在 $-80 \sim -30$ mV,与 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的浓度呈正相关;在第一好氧阶段,由于硝化作用、好氧吸磷以及有机物的降解,水体中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 及有机物不断被氧化,还原性物质不断减少,氧化性物质不断增加,从而导致 ORP 上

升;在第二缺氧阶段,二段进水的补充,本区的 ORP 会有大幅度下降。在第二好氧阶段 ORP 值会有一定程度的上升,维系在 $120 \sim 200$ mV,若是系统内 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量过高会致使 ORP 含量超高,则出水中 TN 超标。综合分析后,ORP 可以作为系统监测参数反映工艺运行状况是否良好。

2.3.2 pH 变化特征分析

pH 反映了水体的酸碱性,影响系统内生物活性,是水处理过程中最重要的指标之一^[16]。如图 2(a) 所示,在厌氧区,主要反应包括厌氧释磷、COD 的降解以及微弱的反硝化作用,有机物降解过程也会产生一定的酸度,反硝化作用产生一定的碱度使 pH 上升,在本阶段,主要反应是厌氧释磷,会产生部分 H^+ 致使 pH 下降;在第一缺氧区,反硝化作用会使 pH 略微上升,若本阶段 pH 下降或是上升微小,说明反硝化过程不足,可能是因为该段 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度过低或是碳源不充分,可以通过调节硝化液回流或进水端进行解决;在第一好氧阶段由于硝化作用产生 $\text{NO}_3^-\text{-N}$,致使 pH 迅速下降;在第二缺氧区和第二好氧区又分别有一定程度的上升和下降。综合分析得到,可以用 pH 的升降反映工艺各功能区运行状况是否良好。

2.3.3 相关性分析方案

利用 ORP 传感器、pH 传感器实时监测各阶段水体中的 ORP、pH,探究 ORP、pH 作为工艺运行过程中控制参数的可行性,分析工艺系统内部参数变化规律,并对系统运行过程中的关键水质参数变化与 ORP、pH 进行相关性分析。

2.4 GPS-X 仿真构建

ASM2d 很好地描述了硝化反硝化以及生物除磷现象。ASM2d 中包含了 19 种组分、21 种反应过程、22 个化学计量系数以及 45 个动力学参数,将污水分为可溶性组分与颗粒性组分,应用理论建立生物反应过程或化学反应过程(基于莫诺特方程式)^[17]。

利用 GPS-X 仿真软件构建如图 3 所示的前置厌氧多级 AO 仿真系统,按照中试实际水质参数与

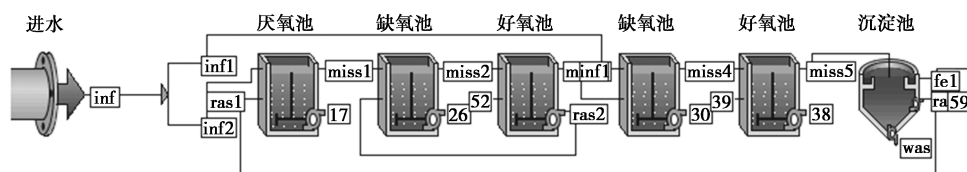


图 3 GPS-X 仿真工艺

工艺尺寸调整仿真参数,根据实际监测到的稳定运行数据对软件进行数据拟合,同时探究温度、水质、溶解氧、泥龄等因素对出水水质的影响。通过调节这些参数的变化,为软件的构建提供足够的支撑。

3 结果与讨论

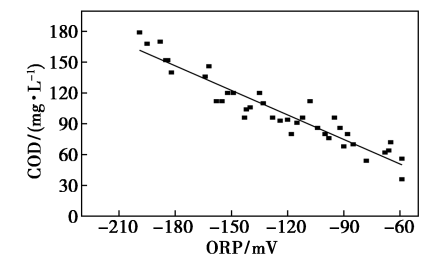
3.1 相关性探究

由于多级AO工艺功能区较多,检测难度相对较大,故本次试验针对工艺不同功能区的关键水质指标和监测参数探究它们之间的相关性,选择相关性最高的监测参数进行监测,减小监测操控的复杂程度以及投入成本。本文中主要探究厌氧区与缺氧区参数之间的相关性。

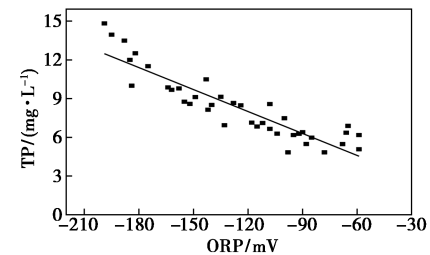
厌氧区主要进行厌氧释磷和复杂有机物的降解作用,探究监测参数与COD、TP之间的相关性。如图4(a)所示,从图中可以看出,COD与ORP之间有较好的相关性,进水中的有机物浓度越高,ORP值越低,因此可用ORP反映进水的有机物浓度。如图4(b)所示,TP与ORP之间有较好的相关性,这主要是因为厌氧释磷需要足够的有机物的支撑,ORP值越低,有机物浓度越高,释磷量就越高,TP浓度也就越高。因此,通过实验与综合分析发现,在厌氧区将ORP控制在 $-200 \sim -100$ mV,可以为该段的厌氧释磷过程提供充足的有机物,当不满足需求时可以通过调节进水量和污泥回流量来调控。

在第一缺氧区主要进行的是反硝化作用,会消耗有机物产生一定的碱度,从而引起ORP和pH的变化。因此在本阶段主要探究 NO_3^- -N与ORP、pH之间的相关性。如图4(c)、(d)所示,在第一缺氧阶段,随着 NO_3^- -N浓度的升高,相应的ORP会升高,同时pH也会随之下降,因此 NO_3^- -N与ORP、pH之间具有良好的相关性。将ORP值控制在 $-80 \sim -40$ mV,pH控制在 $6.6 \sim 7.4$,可以维持第一缺氧区良好的运行状况,满足出水水质的要求。当不满足需求时可以通过调节缺/好容积比与硝化液回流量来调控。

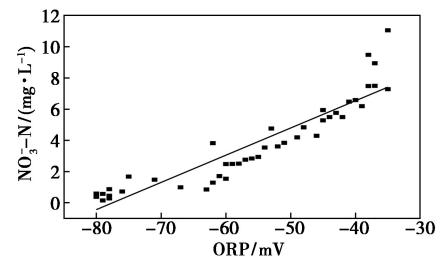
第二缺氧区与第一缺氧区相似,不同点在于本段有二级进水补充COD。如图4(e)、(f)所示,规律与第一缺氧段相似,随着 NO_3^- -N浓度的升高,相应的ORP会升高,pH随之下降。故将ORP值控制在 $20 \sim 60$ mV,pH控制在 $6.6 \sim 7.4$,可以维持第一缺氧



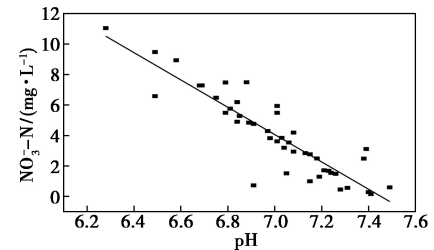
(a) 厌氧区 ORP 与 COD 的相关性



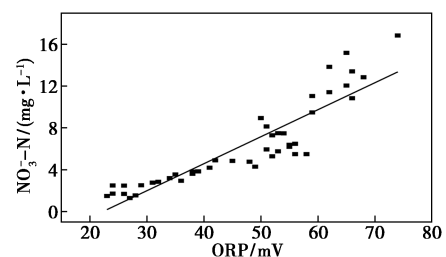
(b) 厌氧区 ORP 与 TP 的相关性



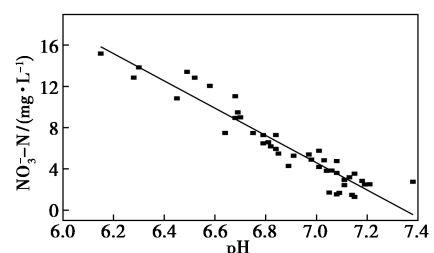
(c) 第一缺氧区 NO_3^- -N 与 ORP 的相关性



(d) 第一缺氧区 NO_3^- -N 与 pH 的相关性



(e) 第二缺氧区 NO_3^- -N 与 ORP 的相关性



(f) 第二缺氧区 NO_3^- -N 与 pH 的相关性

图4 厌氧区、缺氧区参数间的相关性

区良好的运行状况,满足出水水质的要求。当不满足需求时可以通过调节缺/好容积比、第二级的硝化液回流量或者进水配比来调控。

3.2 模型构建

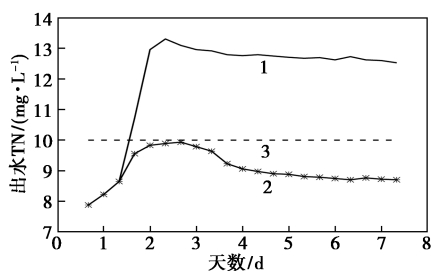
耦合 ANN 与 ASM2d 模型、以数据库为基础、以瞬时参数与延时参数的相关性为基本框架,构建“可调容积型改良多级 AO 工艺”模拟与仿真模型。仿真模型操作界面与中控系统链接,可以通过操控界面直接控制电机的运行以及电动阀门的开启等基础操作;同时包括数据汇总、趋势曲线、报警反馈、报表等主要功能界面。通过人机交互达到信息反馈与调控的功能,保证工艺的的稳定运行与出水的稳定达标。

3.3 中试水平验证

结合污水厂年度实际进水,通过改变进水水质(C/N 比、C/N/P 比),验证仿真软件的可行性与可靠性。

3.3.1 低 C/N 比进水条件下的工艺调控

结合夏季污水进水 COD 浓度低于 200 mg/L,停止投加碳源,使进水 C/N 比由 6 降低到 4.2,满足低 C/N 比的水质要求。在进水水质改变的条件下,仿真系统导入进水数据,快速识别水质异常,软件生成未来 1 周的出水数据,如图 5 所示,同时报警反馈界面给出对应的应对方案,同时记录实际出水状况。



1—预测出水 TN;2—实际出水 TN;3—TN 达标线

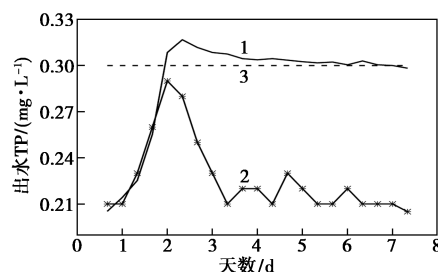
图 5 低 C/N 比进水工艺调控出水 TN

从进水未进行调控,系统给出的预测出水水质可以看出,出水 TN 远高于标准要求;在通过系统给出的反馈(投加 100 mg/L 的碳源)的指导下,实际监测到的出水水质在经过一定的波动起伏后会逐渐趋于稳定,满足出水标准要求。

3.3.2 进水总磷负荷变化影响

在维系其他水质参数不变的情况下,在进水端投加 2 mg/L 的磷酸盐(磷酸二氢钾, KH_2PO_4) 溶液,使进水的 TP 发生突变。在进水水质改变的条

件下,仿真系统导入进水数据,快速识别水质异常,生成接下来 1 周的出水数据,如图 6 所示,同时报警反馈界面会给出对应的应对方案,同时记录实际出水状况。



1—预测出水 TN;2—实际出水 TN;3—TN 达标线

图 6 进水总磷负荷变化调控出水 TP

从进水未进行调控,系统给出的预测出水水质可以看出,出水 TP 不满足标准要求;在通过系统给出的反馈(厌氧池投加 50 mg/L 的碳源/增加好氧池曝气量/减小 SRT)的指导下,实际监测到的出水水质在经过一定的上升后会逐渐降低并保持稳定,满足出水标准要求。

4 结论

通过对模拟实验条件下的改良多级 AO 工艺装置连续运行,探究瞬时参数与延时参数之间的相关性,构建即时性模拟仿真系统,对实际运行提出相应的优化调节方法。得出以下结论。

(1)模拟工艺运行过程中的 pH、氧化还原电位(ORP)、温度(T)、溶解氧(DO)等监测指标与工艺各阶段的关键水质指标(COD、TN、TP、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 等)具有较高的相关性,采用其中判定系数 ≥ 0.8 的参数,建立相应的映射关系进行优化调控,为仿真模型的构建提供了理论基础。

(2)利用 GPS-X 软件的模拟拟合,通过对内部组分调控与自动模拟,结合实际运行数据,对关键性影响因素进行调控,各项出水指标拟合度 $\geq 95\%$,构建数据库,为即时性模拟仿真系统的构建奠定基础。

(3)通过数据库的构建、ANN 与 ASM2d 模型的耦合、参数之间的内部相关性以及预设的调控策略等步骤,构建出针对改良型多级 AO 工艺的模拟与仿真系统,在水质发生突变的情况下,能够及时、准确地给出水质预估和应对方案,对水厂的运行与工况优化具有良好的指导性作用。

参考文献

- [1] 孟繁芹.多段多级AO工艺在污水处理厂升级改造中的应用[J].中国资源综合利用,2018,36(1):59-61.
- [2] 刘明超,赫俊国,辛晓东,等.改良A²/O对低C/N城市污水的脱氮除磷研究[J].水处理技术,2016,42(2):84-87.
- [3] Li Jun, Li Kunquan, Berns Erin, *et al.* Performance of nitrogen removal in an alternating activated sludge reactor for full-scale applications[J]. Environmental Technology, 2020, 41(5):627-637.
- [4] Chen Zhouwei, Shi Liangsheng, Ming Ye, *et al.* Global sensitivity analysis for identifying important parameters of nitrogen nitrification and denitrification under model uncertainty and scenario uncertainty[J]. Journal of Hydrology, 2018, 561(1):884-895.
- [5] Zhou Xueyang, Liu Xiuhong, Huang Siting, *et al.* Total inorganic nitrogen removal during the partial/complete nitrification for treating domestic wastewater: Removal pathways and main influencing factors[J]. Bioresource Technology, 2018, 256(1):285-294.
- [6] Massara T M, Solis B, Guisasaola A, *et al.* Development of an ASM2d-N₂O model to describe nitrous oxide emissions in municipal WWTPs under dynamic conditions[J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 335(1):185-196.
- [7] Mohammed Rusul Naseer, Xiwu L. Modeling of nitrification and denitrification in a novel PITSF-SEU process using an extension of ASM2d model[J]. Desalination and Water Treatment, 2015, 53(7):1862-1880.
- [8] 沈昌明.基于仿真的活性污泥功能菌群结构分析[J].城市道桥与防洪,2016,8(1):295-8,28.
- [9] 宋健健.污水处理活性污泥模型及GPS-X软件应用[J].石油化工安全环保技术,2011,27(1):43-47.
- [10] Xie Beizhen, Liu Bojie, Yi Yue, *et al.* Microbiological mechanism of the improved nitrogen and phosphorus removal by embedding microbial fuel cell in Anaerobic-Anoxic-Oxic wastewater treatment process[J]. Bioresour Technol, 2016, 207(1):109-117.
- [11] Jlabari P, Munz G, Yuan Q, *et al.* Free nitrous acid inhibition of biological phosphorus removal in integrated fixed-film activated sludge (IFAS) system[J]. Chemical Engineering Journal, 2016, 287(10):38-46.
- [12] 冯学静.基于不同厌氧历时条件下倒置A²/O工艺除磷机理的试验研究[D].青岛:青岛理工大学,2012.
- [13] Ji B Z, Xue Chun, Zhang Shufei. Insights into the bacterial species and communities of a full-scale anaerobic/anoxic/oxic wastewater treatment plant by using third-generation sequencing[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2019, 128(6):744-750.
- [14] 许世伟,张建新,付强.城市污水处理厂脱氮除磷调控参数的研究[J].给水排水,2007,34(3):7-11.
- [15] 周慧芳,陈文,李德豪,等.利用ORP和pH控制双侧沟式一体化OCO工艺污水处理过程[J].现代化工,2015,35(6):160-165.
- [16] Weißbach M, Drewes J E, Koch K. Application of the oxidation reduction potential (ORP) for process control and monitoring nitrite in a coupled aerobic-anoxic nitrous decomposition operation (CAN-DO)[J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 343(1):484-491.
- [17] 王秀兰,樊立萍,刘太元.序批式反应器污水处理系统仿真模型的建立[J].计算机仿真,2005,(5):101-103,28. ■

(上接第193页)

参考文献

- [1] Krister Holmberg. Natural surfactants [J]. Current Opinion in Colloid & Interface Science, 2001, 6(2):148-159.
- [2] Cordell G A. Natural products in drug discovery—Creating a new vision[J]. Phytochemistry Reviews, 2002, 1(3):261-273.
- [3] Tal-Figiel B. The Formation of Stable W/O, O/W, W/O/W Cosmetic Emulsions in an Ultrasonic Field [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2007, 85(5):730-734.
- [4] Nicolas A, Pierre B, Patrick S. Design and production of nonparties formulated from nan-emulsion templates-A review [J]. Journal of Controlled Release, 2008, 128:185-189.
- [5] 杨福廷. 脂肽类生物表面活性剂研究进展[J]. 精细化工, 2006, (2):121-125.
- [6] 丁立孝. 脂肽生物表面活性剂的发酵生产及其结构、性质研究[D]. 杭州:浙江大学,2004.
- [7] Brown M J. Biosurfactants for cosmetic applications [J]. International Journal of Cosmetic Science, 2007, 13(2):61-64.
- [8] 吴望波,赵莉,张华涛,等.表面活性剂的性能与应用(XXVI)——表面活性剂在化妆品中的应用[J].日用化学工业,2016,46(2):75-79.
- [9] 孙莉明.含AQUAXYL的化妆品配方优化和保湿机理研究[D].上海:华东理工大学,2015.
- [10] 中华人民共和国轻工行业标准.QB/T 4256—2011[S].北京:中国轻工业出版社,2011-12-20:1-3.
- [11] 黄旭.新型表面活性剂分子在溶液中的自聚集与气液界面吸附[D].北京:中国科学院研究生院,2008.
- [12] Alla Nesterenko, Audrey Drelich, Huiling Lu, *et al.* Influence of a mixed particle/surfactant emulsifier system on water-in-oil emulsion stability[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2014, 457:49-57.
- [13] 董志浩.聚合物/表面活性剂混合体系对水包油乳液形成和稳定性的影响[D].济南:山东大学,2017.
- [14] Pichot R, Spyropoulos F, Norton I T. Mixed-emulsifier stabilized emulsions: Investigation of the effect of monoolein and hydrophilic silica particle mixtures on the stability against coalescence[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2009, 329(2):84-91.
- [15] 陈皓生,陈大融,汪家道,等.一类特殊的非牛顿介质剪切稀化过程的实验研究[J].中国科学,2007,(3):339-343. ■