

养殖废水处理设施自动化智能化运营与管控

冯文谦, 史金才, 练植婵, 廖劲松, 廖新梯

引用本文:

冯文谦, 史金才, 练植婵, 等. 养殖废水处理设施自动化智能化运营与管控[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(11): 2355–2360.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1153>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

畜禽养殖废水处理技术动态与发展趋势

张静妮, 韩志刚, 郑丹, 王文国, 邓良伟

农业环境科学学报. 2021, 40(11): 2320–2329 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1102>

三类抗生素在两种典型猪场废水处理工艺中的去除效果

周婧, 支苏丽, 宫祥静, 杨凤霞, 谷艳茹, 丁飞飞, 张克强

农业环境科学学报. 2019, 38(2): 430–438 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1092>

果壳种类对生物膜特性及废水处理效果的影响

胡小兵, 汪坤, 沈翼军, 张琳, 姚友长, 林睿, 顾娴静

农业环境科学学报. 2020, 39(12): 2887–2894 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0601>

同步硝化反硝化菌(*Alcaligenes faecalis* WT14)养殖污水脱氮效果研究

陈均利, 张树楠, 戴桂金, 张苗苗, 吴金水, 刘锋

农业环境科学学报. 2020, 39(8): 1811–1817 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0325>

规模化猪场废水常规生化处理的效果及原因剖析

韩伟铖, 颜成, 周立祥

农业环境科学学报. 2017, 36(5): 989–995 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1508>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

冯文谦, 史金才, 练植婵, 等. 养殖废水处理设施自动化智能化运营与管控[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(11): 2355-2360.

FENG W Q, SHI J C, LIAN Z C, et al. Automatic and intelligent operation of livestock breeding wastewater treatment facilities[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(11): 2355-2360.



开放科学 OSID

养殖废水处理设施自动化智能化运营与管控

冯文谦¹, 史金才¹, 练植婵¹, 廖劲松¹, 廖新倮^{1,2*}

(1. 温氏食品集团股份有限公司, 广东 云浮 527400; 2. 华南农业大学动物科学学院, 广州 510642)

摘要:为实现养殖废水处理设施自动化智能化运营与管控,本文以日产废水250 m³的某规模化养殖场废水处理设施为例,通过配置视频监控系统 and 在线监控设备,并设置预警预报功能,来展示自动化智能化运营与管控效果。实时监控结果表明,污泥浓度、DO、pH值等关键运行参数均控制在合理范围,分别为4 000~7 000 mg·L⁻¹、1.5 mg·L⁻¹(一级好氧池)和3~5 mg·L⁻¹(二级好氧池)、6.5~8.5;两级AO出水水质COD、氨氮均达标,分别为70 mg·L⁻¹以下和10 mg·L⁻¹以下,保障了设施运行效果,出水水质稳定达标,规避了环境风险。通过视频监控、在线监测、预警预报等功能,可有效监控废水处理设施每个处理环节运行状态,做到及时发现问题和解决问题,从而提高设施的管控效果和效率,并降低运营人员的投入,有效降低运营费用。实际运营结果表明,废水处理设施实施自动化智能化运营与管控,既能有效提高管控效果和效率,最大程度规避环境风险,又能降低运营成本,从而实现降本增效。

关键词:养殖场;废水处理设施;智能监控;降本增效

中图分类号:TP29-AF;X713 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2021)11-2355-06 doi:10.11654/jaes.2021-1153

Automatic and intelligent operation of livestock breeding wastewater treatment facilities

FENG Wenqian¹, SHI Jincai¹, LIAN Zhichan¹, LIAO Jinsong¹, LIAO Xindi^{1,2*}

(1. Wens Foodstuff Group Company Limited, Yunfu 527400, China; 2. College of Animal Science, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: To explore the effects of the automated and intelligent operation of livestock breeding wastewater treatment facilities, a large-scale farm wastewater treatment facility with a daily production of 250 m³ of wastewater was investigated in this study. This wastewater treatment facility was equipped with a video surveillance system and online monitoring equipment. It was also equipped with early warning and forecasting functions to show the effect of the automated and intelligent operations. It was found that the sludge concentration, DO, and pH values were all controlled within a reasonable range of 4 000~7 000 mg·L⁻¹, 1.5 mg·L⁻¹ (first-stage aerobic tank) and 3~5 mg·L⁻¹ (second-stage aerobic tank), and 6.5~8.5, respectively. The concentrations of COD and ammonia nitrogen in the effluent of the two-stage AO treatment tank were all up to the standard concentrations, that was, lower than 70 mg·L⁻¹ and 10 mg·L⁻¹, respectively. This showed that the automated operation of the facility was stable and that the facility could effectively treat wastewater from breeding farms. Through functions such as video monitoring, online monitoring, early warning, and forecasting, the operation status of each wastewater treatment stage could be effectively monitored to detect and solve potential issues on time, thereby improving the efficiency of the facility operation and reducing the input of operators to reduce operating expenses. The actual operation results showed that implementing automation and intelligence in wastewater treatment facilities can effectively improve the overall operation and efficiency, avoid environmental risks to the greatest extent, and reduce operating costs.

Keywords: breeding farm; wastewater treatment facility; intelligent monitoring; cost reduction and efficiency increase

收稿日期:2021-10-07 录用日期:2021-10-12

作者简介:冯文谦(1986—),男,广东清远人,工程师,主要从事养殖废弃物污染防治相关研究。E-mail:2380883575@qq.com

*通信作者:廖新倮 E-mail:xdliao@scau.edu.cn

畜禽养殖场未经处理的废水中含有大量污染物质,其污染负荷很高,这种高浓度有机废水直接排入或随雨水冲刷进入江河湖库,会大量消耗水体中的溶解氧,使水体变黑发臭^[1],鉴于此,国家逐渐加大对养殖业的环保监管力度。目前国内很多规模化养殖场已配套废水处理设施,但存在处理出水水质不能稳定达到国家相关标准的问题^[2-4],其中废水处理设施现场管理人员配备不足或专业性不强是导致出水水质不能稳定达标的重要原因之一。国内很早就有学者提出将先进的控制技术和计算机技术应用于水处理,其能够根据系统运行过程中相关参数的变化,适时自动地调整系统的运行状态,从而确保水处理设施处于最佳的工作状态,以提高处理效果,确保出水水质稳定达标^[5-7]。本文以某规模化养殖场为例,探讨自动化智能化运营和管控技术在养殖场废水处理设施中的应用效果,通过配置自动化智能化管控设施来实现视频监控、在线监测和预警预报等功能,进一步提高废水处理设施管控效果和效率,降低运营管控成本,确保出水水质稳定达标。

1 材料与方法

1.1 自动化智能化运营和管控方案

1.1.1 视频监控

通过配套监控摄像头、球机、硬盘录像机、交换机等设备,从而实现视频监控,并具备24 h实时监控、移动监测、红外夜视监控等功能。视频摄像头安装于养殖场环保区的各处理环节,如固液分离区、厌氧池、一级AO(缺氧池+好氧池)和二级AO处理池体、沉淀池、清水池,以及配药房、电控房、设备房等。将各摄像头采集的实时视频信号在监控电脑或电视墙进行展示,以便各级环保管理人员实时观察废水处理设施各环节的现场运行状况。

1.1.2 在线监测运行参数和出水指标数据

在废水处理设施相关监控点(如进水口、一级AO和二级AO处理池体、系统出水口等)安装在线监测探头,实时监控废水处理设施运行参数(如污泥浓度、DO、pH等)和出水水质指标数据(如COD、氨氮等),并通过环保数据采集仪采集在线监测仪表数据,然后在监控电脑或电视墙进行展示,以便各级环保管理人员实时监控环保处理设施运行状态。

1.1.3 预警预报

智能监控报警系统主要是通过现场PLC工控系统和人机操作界面提前设定各项报警指标的阈值,当

系统判定相关的指标超过阈值时,云端数据会自动把相关报警信息发送到终端用户手机或监控电脑,并提供相关的解决措施,从而实现预警预报功能。

1.1.4 自动联动运作控制系统

自动联动控制系统主要是先设定废水处理设施运行参数(如污泥浓度、DO、pH值等)的目标值,系统自动将在线监测设备的实测数据与目标值进行对比,并根据对比的结果自动调整阀门开关、水泵流量、鼓风机频率等执行设备,从而实现废水处理设施自动联动运作,免于人工调节。

1.2 养殖场总体情况

1.2.1 养殖场废水处理设施配置情况

养殖场位于广东省某市,养殖类型为种鸭,种鸭饲养量18万羽,鸭舍32栋,占地面积约9.87 hm²,其中环保区占地面积0.255 hm²,清粪方式为全自动刮粪,废水产生量约为250 m³·d⁻¹,养殖场配套了废水处理设施,设计处理量为270 m³·d⁻¹,处理工艺流程:固液分离→厌氧池→一级AO池→中间沉淀池→二级AO池→二沉池→混凝/絮凝池→终沉池→消毒池→清水池→出水达标排放。其中核心处理环节为总池容1 712 m³的两级AO池体,因此本文主要阐述两级AO池体的自动化智能化控制技术。两级AO池体进水水质检测结果见表1,废水排放执行广东省地方标准《水污染物排放限值》(DB 4426—2001)第二时段一级标准,主要排放指标数值要求见表2。

表1 两级AO池体进水水质

Table 1 Inlet water quality of two-stage AO tank

项目 Item	pH值 pH value	COD/ (mg·L ⁻¹)	氨氮 NH ₃ -N/ (mg·L ⁻¹)	BOD ₅ / (mg·L ⁻¹)
数值 Value	6.5~9.0	1 200~2 000	800~1 100	514~723

表2 废水排放标准要求

Table 2 Requirements of wastewater discharged standard

项目 Item	pH值 pH value	COD/ (mg·L ⁻¹)	氨氮 NH ₃ -N/ (mg·L ⁻¹)
数值 Value	6~9	≤70	≤10

1.2.2 养殖场废水处理设施在线监控设备配置情况

该养殖场废水处理设施在线监控设备配置情况如下:各处理环节配置摄像头;一级和二级好氧池配置污泥浓度检测仪、DO仪、pH计;清水池配置COD在线监测仪、氨氮在线监测仪。

2 结果与讨论

2.1 运行参数的实时监控效果

2.1.1 污泥浓度控制

本项目养殖场废水处理设施中的两级AO反应池均采用运行方式灵活、运行管理相对容易、运行费用较低的活性污泥法。相关研究表明,好氧池污泥浓度控制在 $5\,000\sim 8\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,活性污泥法的微生物处于连续稳定的状态,可实现在较短时间内对有机物的降解^[8-9]。如图1所示,一级和二级好氧池污泥浓度均在 $4\,000\sim 7\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,基本控制在适宜范围。可见,通过在线监测设备可实现实时监测一级和二级好氧池污泥浓度,当污泥浓度过低或过高时,通过自动联动控制系统,联动中间沉淀池、二沉池的排泥系统及污泥回流系统,可将一级和二级好氧池的污泥浓度控制在合适范围,从而有效保障对废水中污染物质的去除效果。

2.1.2 DO控制

活性污泥法工艺以曝气池为核心处理设备,曝气

池中DO浓度的稳定控制是提高运行效率、保证出水水质、降低曝气系统能耗的必要条件,直接影响有机物的去除效率^[10-11],而对DO浓度的准确监测是实现稳定控制的前提,具有重要的实际意义^[12]。一般来说,好氧池的DO浓度应控制在 $2.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,DO浓度高($>2.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)时,有机物降解反应很快完成,DO对有机物降解速率的影响较小;相反,DO浓度较低($<0.8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)时,有机物的降解则需较长时间,DO对有机物降解速率有明显的影响,DO浓度越低,有机物降解速率越小^[13]。同时,DO浓度过高或过低都会影响同步脱氮除磷的效果,当DO浓度控制在 $1.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右时,系统的脱氮除磷效果最佳^[14]。为确保两级AO池体对有机物的去除和脱氮除磷效果,应控制好一级和二级好氧池的DO浓度,为微生物活动提供足够的溶解氧。如图2所示,本项目整个3月份一级好氧池的DO浓度维持在 $1.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,二级好氧池的DO浓度维持在 $3\sim 5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。一般厌氧出水COD在 $1\,500\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,然后进入一级AO反应池,由于一级好氧池废水中有机物浓度较高,因此,异养微生物降解

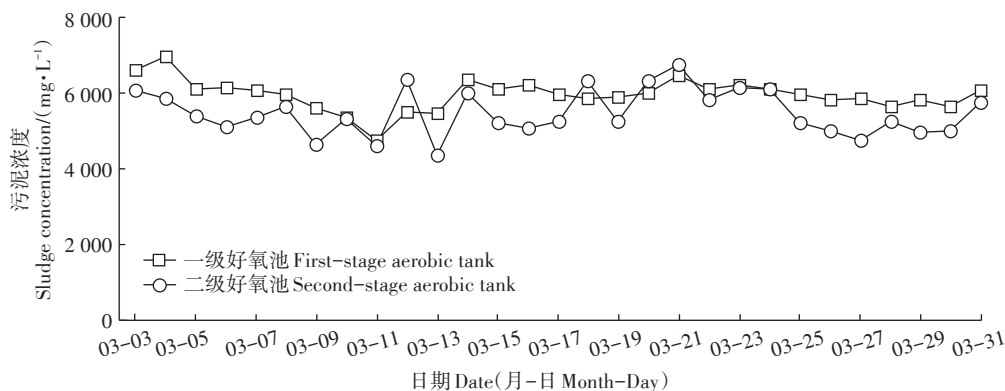


图1 污泥浓度变化曲线

Figure 1 The graph of sludge concentration

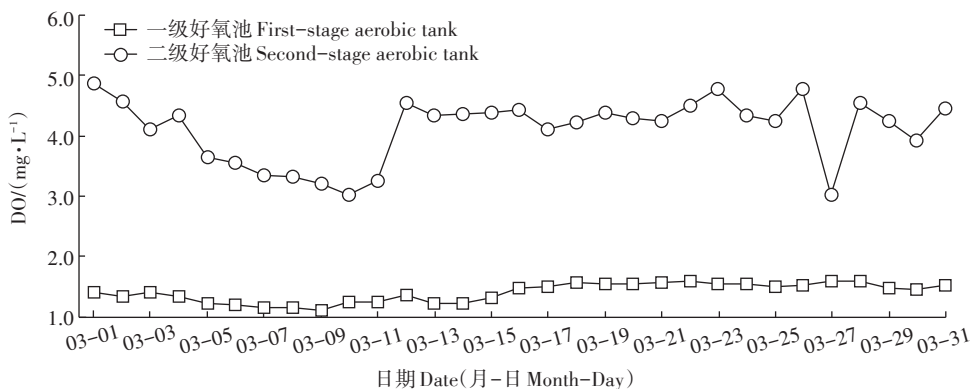


图2 DO浓度曲线

Figure 2 The graph of DO concentration

有机物时大部分DO被利用,造成一级好氧池中的DO浓度较低;当废水进入二级好氧池,此时的COD仅为 $300\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,由于大部分有机物已被降解,所以对DO的消耗较少,因此,二级好氧池的DO浓度较高。可见,通过在线监测DO浓度,可根据一级和二级好氧池对DO的实际需求合理调整供氧量,从而有效确保一级好氧池和二级好氧池的DO维持在适宜范围,为微生物生长繁殖提供足够的DO。

2.1.3 pH值控制

废水中有机物的去除主要通过异养微生物的代谢作用,异养微生物把有机碳源作为电子供体,用于产能和合成细胞物质,进而实现对COD的去除。研究表明,当pH值在6.5以下时,异养微生物活性受抑制,从而影响其对有机物的去除^[15],而当pH值在10以上时,同样不利于异养微生物数量的增加^[16]。在硝化反应中,一般认为,自养微生物硝化过程对pH值高度敏感,其最佳pH值范围为7~8^[17]。如图3所示,在线监测数据表明,本项目整个3月份一级好氧池和二级好氧池的pH值均能保持在6.5~8.5,基本属于正常

范围,因此,无需对pH值进行调节。若在线监测的pH值过低(<6.5)或过高(>10.0),则需进行调节。

2.2 出水水质的实时监控效果

2.2.1 COD监控效果

如图4所示,2021年3月份两级AO的进水COD浓度在 $1\ 200\sim 1\ 400\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,出水标准要求COD为 $70\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,通过对废水处理设施有效的运营管控,COD去除率均在95%以上,两级AO出水COD均在 $70\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下,达到了标准控制要求。

2.2.2 氨氮监控效果

如图5所示,2021年3月份两级AO的进水氨氮浓度在 $800\sim 1\ 100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,出水标准要求氨氮为 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,通过对废水处理设施有效的运营管控,氨氮去除率基本达到99%,两级AO出水氨氮均在 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下,达到了标准控制要求。

2.3 自动化智能化技术提升管控效果和效率

2.3.1 预警预报作用

本项目废水处理设施配置的在线监控设备具备预警预报功能。当废水处理设施关键设备运行过程

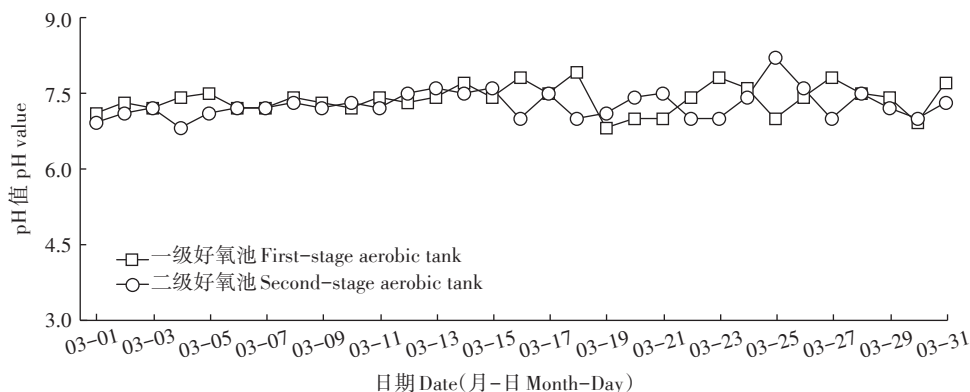


图3 pH值曲线

Figure 3 The graph of pH value

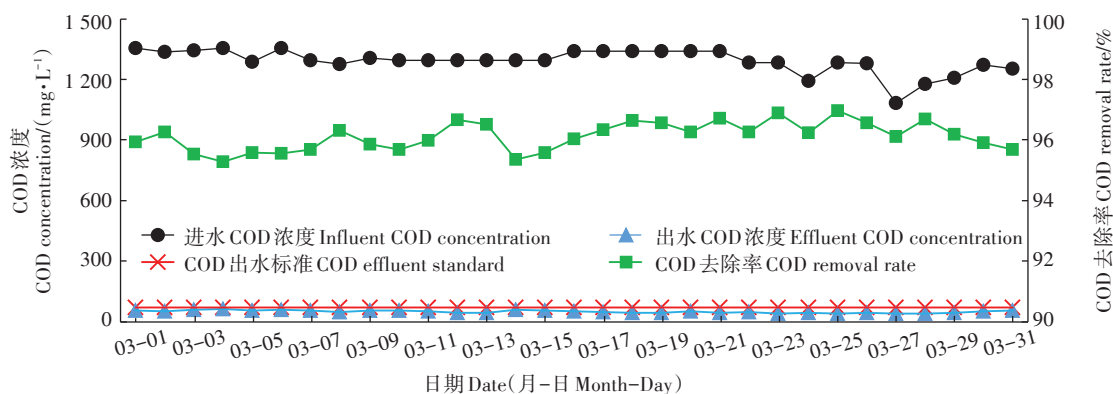


图4 COD去除率统计

Figure 4 The statistics for COD removal rate

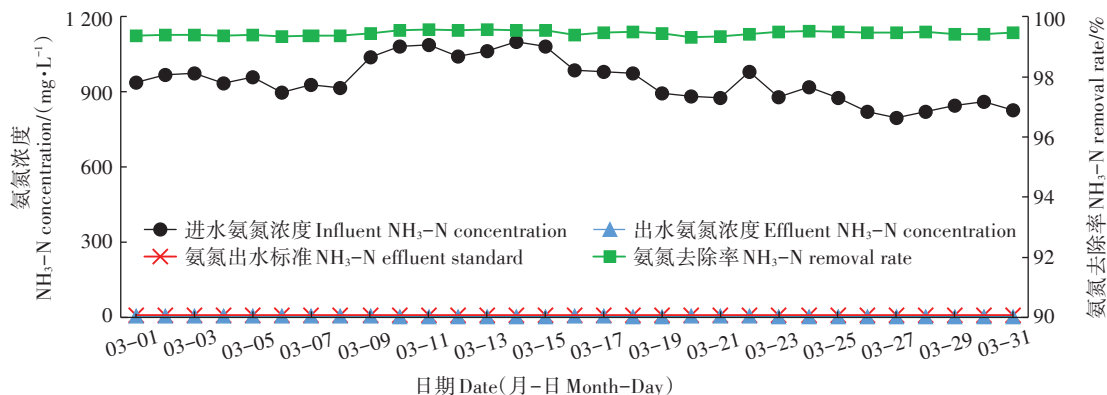


图5 氨氮去除率统计

Figure 5 The statistics for $\text{NH}_3\text{-N}$ removal rate

中出现异常,或者废水处理设施运行参数和出水水质指标数据出现偏离正常值等情况,报警系统会及时把相关的报警信息和解决方案通过物联网传送到现场环保操作人员的监控电脑和手机APP上,现场操作人员根据报警信息和提供的解决方案,及时排查和处理废水处理设施存在的问题,保障废水处理设施恢复有效运作,确保出水水质达标。周振联等^[18]也提到安徽金隆铜业有限公司于2016年建立环境预警系统,监控的对象包括烟气、水质等,当污染物排放指标达预警值时,系统以短信形式发送给相关人员,生产与环保岗位操作者能在第一时间采取相应的措施,最大程度地降低和消除环境风险。

2.3.2 视频监控和在线监测指标数据

视频与在线监控劳动强度低、效率高,能够有效保障环保安全。由于养殖场生物安全防护要求,环保技术员进场开展日常环保培训和巡查难度很大,而且环保区现场操作人员的技术水平普遍较低,从而严重影响环保设施处理效果。同时,环保工艺流程长,涉及的设施设备多且复杂,日常人工巡检费时费力,工作效率低。本项目养殖场环保区配置了视频监控系统,能实时监控整个环保区各处理环节的运行状态,出现问题时能及时采取有效措施进行解决,能够最大程度避免出现环保事故,同时有效降低现场操作人员的劳动强度。吕玉凤^[19]在污水处理厂自动化监控系统的设计与优化运行研究上,也提到视频监控的重要性。本项目配置了在线监测设备,可实现实时监测废水处理设施运行参数(如污泥浓度、DO、pH值等)和出水水质指标数据(如COD、氨氮等),操作人员可根据数据信息,及时发现问题,调整设施的运行状态,还可以通过自动联动控制系统自行联动水泵、阀门等设备,免于人工干预,克服了工作效率低且操作繁琐问

题,避免环保事故发生。王伟贤^[20]也提到如果污水处理厂的控完全由操作工人现场控制,由于仪表的准确性差并且非连续性监测,设备运行状态调整慢,且人工操作劳动强度大,容易发生错误,使得设备不在最佳状态,工艺要求得不到可靠的保证,导致出水水质达不到要求。

2.4 自动化智能化技术降低管控成本

养殖场环保区配置了视频监控系统和在线监测设备,现场操作人员通过控制室的监控电脑或者移动手机APP即可实时查看各处理环节的运行状态及出水水质的指标数据,无需对环保处理设施逐一进行巡检、排查或采样检测等一系列繁琐操作。尤其是废水处理设施配置了自动联动控制系统,可根据运行参数的变化自动调整阀门开关、水泵流量、鼓风机频率等,免于人工操作。这样一方面无需配备手工检测设备,另一方面环保区人员配置可以减少,降低人力成本。据统计,本项目采用自动化智能化技术后每年可节省20万元以上的环保管理成本,并降低了环保事故的发生率,有效提高了养殖企业的环境效益和社会效益。

3 结论

(1)通过配置视频监控系统和在线监测设备,可实现实时监控规模化养殖场废水处理设施每个环节的运行状况、运行参数(污泥浓度、DO、pH)和出水水质指标数据(COD、氨氮),确保污泥浓度、DO、pH值等关键运行参数均控制在合理范围,分别为4 000~7 000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、1.5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (一级好氧池)和3~5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (二级好氧池)、6.5~8.5;两级AO出水水质COD、氨氮均达标,分别为70 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下和10 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下,保障了设施运行效果,确保出水水质稳定达标,有效规避了环境风险。

(2)在线监控设施还设有预警预报和自动联动运作等功能,当废水处理设施关键设备运行过程中出现异常时能进行报警,自动联动控制系统能根据运行参数的变化自动调整运行状态,做到及时发现问题和解决问题,最大程度避免环保事故发生。

(3)废水处理设施实施自动化智能化运营与管控,既可提高设施的管控效果和效率,又降低运营人员的投入和人员劳动强度,从而实现了降本增效。

参考文献:

- [1] 邓良伟, 王文国, 郑丹. 猪场废水处理利用技术理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2017. DENG L W, WANG W G, ZHENG D, et al. Theory and technology of pig farm wastewater treatment and utilization [M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [2] 邹艳艳, 梅荣武, 韦彦斐. 高氨氮养猪场废水治理工程实践研究[J]. 环境科学与管理, 2015, 40(12): 99-102. ZOU Y Y, MEI R W, WEI Y F. Study on treatment of highly concentrated ammonia-nitrogen wastewater from a hogger[J]. *Environmental Science and Management*, 2015, 40(12): 99-102.
- [3] 梁进, 李袁琴, 杨平. 畜禽养殖废水处理技术探讨[J]. 四川环境, 2011, 30(6): 139-143. LIANG J, LI Y Q, YANG P. Study on treatment of wastewater from livestock and poultry farms[J]. *Sichuan Environment*, 2011, 30(6): 139-143.
- [4] 冷守琴, 李康奎, 王文杰, 等. 组合工艺在养猪废水处理中的工程应用研究[J]. 环境科学与管理, 2015, 40(5): 70-73. LENG S Q, LI K K, WANG W J, et al. Combination technology applied in swine wastewater treatment engineering[J]. *Environmental Science and Management*, 2015, 40(5): 70-73.
- [5] 王洪臣. 城市污水处理厂运行控制与维护管理[M]. 北京: 科学出版社, 1997: 185-187. WANG H C. Control and management of wastewater treatment plant[M]. Beijing: Science Press, 1997: 185-187.
- [6] 张亚琴. 污水处理自动化控制系统研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2020. ZHANG Y Q. Research on automatic control system of sewage treatment[D]. Nanchang: Nanchang University, 2020.
- [7] 胡立鹏. 基于云平台的手机远程监控污水处理系统设计[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2019. HU L P. Design of mobile phone remote monitoring wastewater treatment system based on cloud platform[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2019.
- [8] RODRIGUES A C, BRITO A G, MELO L F. Posttreatment of a brewery wastewater using a sequencing batch reactor[J]. *Water Environment Research*, 2001(1): 45-51.
- [9] LI Y Y, HUANG X W, LI X Y, et al. Using anammox biofilms for rapid start-up of partial nitrification-anammox in integrated fixed-film activated sludge for autotrophic nitrogen removal[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 791.
- [10] HAN H G, QIAO J F, CHEN Q L. Model predictive control of dissolved oxygen concentration based on a self-organizing RBF neural network[J]. *Control Engineering Practice*, 2012, 20(4): 465-476.
- [11] CHI Y L, SHI X, JIN P K, et al. Enhanced nitrogen removal by partial nitrification-anammox process with a novel high-frequency micro-aeration (HFMA) mode: Metabolic interactions among functional bacteria[J]. *Bioresource Technology*, 2021, 342.
- [12] DONG-JIN CHOI. Heekyung Park I A hybrid artificial neural network as a software sensor for optimal control of a wastewater treatment process[J]. *Water Research*, 2001, 35(16): 3959-3967.
- [13] 高春娣, 王淑莹, 彭永臻, 等. DO对有机物降解速率及污泥沉降性能的影响[J]. 中国给水排水, 2001, 17(5): 12-15. GAO C D, WANG S Y, PENG Y Z, et al. Influence of DO on organic matter degradation rate and sludge settling property[J]. *China Water & Wastewater*, 2001, 17(5): 12-15.
- [14] 林良琨, 张朝升, 张可方, 等. DO对A/O同步脱氮除磷工艺的影响研究[J]. 中国给水排水, 2011, 27(3): 80-82. LIN L K, ZHANG C S, ZHANG K F, et al. Influence of DO on simultaneous nitrogen and phosphorus removal in A/O process[J]. *China Water & Wastewater*, 2011, 27(3): 80-82.
- [15] METCAHF E. Wastewater engineering: Treatment and reuse[M]. New York: McGraw-Hill, 2003: 432-435.
- [16] MAYO A W, NOIKE T. Effects of temperature and pH on the growth of heterotrophic bacteria in waste stabilization ponds[J]. *Water Research*, 1996(30): 447-455.
- [17] 王伸, 邓良伟, 徐则. pH值对好氧处理及污泥性能的影响[J]. 中国沼气, 2016, 34(5): 22-26. WANG S, DENG L W, XU Z. pH effect on the performance of aerobic treatment and sludge characteristics[J]. *China Biogas*, 2016, 34(5): 22-26.
- [18] 周振联, 谢中建. 环境预警系统在环保监管中的应用[J]. 铜业工程, 2021(2): 62-66. ZHOU Z L, XIE Z J. Application of environmental early-warning system in environmental protection supervision [J]. *Copper Engineering*, 2021(2): 62-66.
- [19] 吕玉凤. 污水处理厂自动化监控系统的设计与优化运行研究[D]. 济南: 山东大学, 2014: 59-62. LÜ Y F. Design and research of monitoring control system and optimization of operation for sewage treatment automation[D]. Jinan: Shandong University, 2014: 59-62.
- [20] 王伟贤. 污水处理过程的智能监控系统设计与实现[D]. 北京: 北京工业大学, 2014: 63-64. WANG W X. Design and implementation of intelligent monitoring system for wastewater treatment process [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2014: 63-64.