

李学瑞, 贾建伟, 康鹏亮, 等. 多段多级 AO 工艺碳排放分析及设计优化探讨[J]. 净水技术, 2025, 44(6): 182-187,195.

LI X R, JIA J W, KANG P L, et al. Analysis of carbon emission and optimized design of multi-stage and multi-level AO process [J]. Water Purification Technology, 2025, 44(6): 182-187,195.

多段多级 AO 工艺碳排放分析及设计优化探讨

李学瑞¹, 贾建伟^{1,*}, 康鹏亮¹, 武占飞², 商潘路¹

(1. 中国市政工程西北设计研究院有限公司, 甘肃兰州 730000; 2. 榆林市第三污水厂筹建处, 陕西榆林 719300)

摘要 【目的】在减污降碳背景下,为充分挖掘多段多级缺氧/好氧(AO)工艺处理潜能,实现污水厂节能降耗与碳减排目标,探讨其低碳设计优化策略。【方法】结合碳排放分析,对案例污水多段多级 AO 工艺进行研究,从低碳减排运行及效能提升角度,分析探讨曝气系统、进水流量分配、配水方式、池型结构等方面的设计优化策略。【结果】案例污水厂多段多级 AO 工艺段碳排放强度为 0.39 kg CO₂-eq/m³,占全厂污水处理碳排放总量的 55.84%;好氧区曝气系统宜采用渐减布置,并设置脱气变形区,选择合适的多点进水配水控制方式,优化进水流量分配,重视池型与推流器、搅拌器的选型以及各区域联通洞口的开法,保证生物池流态良好;应用精确曝气系统、精确碳源投加控制系统,可使该工艺碳排放强度降低至 0.35 kg CO₂-eq/m³,总体实现碳减排 10.3%。【结论】上述设计优化建议能有效降低多段多级 AO 工艺碳排放强度,对污水厂低碳运行意义重大,可为同类工程设计提供借鉴,助力污水厂更好地衔接生产运行,实现节能降碳目标。

关键词 多段多级 AO 工艺 碳排放分析 曝气及加药控制 配水方式 池型与搅拌

中图分类号: TU992 **文献标志码:** B **文章编号:** 1009-0177(2025)06-0182-07

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.06.022

Analysis of Carbon Emission and Optimized Design of Multi-Stage and Multi-Level AO Process

LI Xuerui¹, JIA Jianwei^{1,*}, KANG Pengliang¹, WU Zhanfei², SHANG Panlu¹

(1. CSSEC Aecom Consultant Co., Ltd., Lanzhou 730000, China;

2. The Preparatory Office of Yulin No. 3 Sewage Treatment Plant, Yulin 719300, China)

Abstract [Objective] Under the background of pollution reduction and carbon emission reduction, in order to fully tap the treatment potential of the multi-stage and multi-level anoxic/oxic (AO) process and achieve the goals of energy conservation, consumption reduction and carbon emission reduction in wastewater treatment plants (WWTPs), the low-carbon design optimization strategy of the process is explored. [Methods] Combined with the analysis of carbon emissions, the multi-stage and multi-level AO process of a case WWTP is studied. From the perspectives of low-carbon emission reduction operation and efficiency improvement, the design optimization strategies of aspects such as the aeration system, influent flow distribution, water distribution mode, and tank structure are analyzed and discussed. [Results] The carbon emission intensity of the multi-stage and multi-level AO process section of the case WWTP is 0.39 kg CO₂-eq/m³, accounting for 55.84% of the total carbon emissions of the wastewater treatment in the whole WWTP. The aeration system in the aerobic zone should preferably adopt a gradually decreasing layout, and a degassing deformation zone should be set up. An appropriate multi-point influent distribution control mode should be selected, the influent flow distribution should be optimized, and attention should be paid to the selection of the tank type, propellers, mixers, and the opening method of the connecting holes in each area to ensure a good flow pattern in the biological tank. By applying the precise aeration system and precise carbon source dosing control system, the carbon emission intensity of this process can be reduced to 0.35 kg CO₂-eq/m³, and a total carbon emission reduction of 10.3% can be achieved. [Conclusion] The above design optimization suggestions can effectively reduce the carbon emission intensity of the multi-stage and multi-level AO process, which is of great significance for the low-

[收稿日期] 2024-11-23

[作者简介] 李学瑞(1988—),女,高级工程师,主要从事市政给排水及水质净化工程设计与研究的工作,E-mail:694312955@qq.com。

[通信作者] 贾建伟(1985—),男,正高级工程师,研究方向为市政给排水、工业园区污水处理工程设计,E-mail:1441930851@qq.com。

carbon operation of WWTPs. It can provide references for the design of similar projects, help WWTPs better connect with production operations, and achieve the goals of energy conservation and carbon emission reduction.

Keywords multi-stage and multi-level AO process carbon emission analysis aeration and dosing control water distribution mode pool type and stirring

2020年,为应对气候变化我国明确提出2030年“碳达峰”与2060年“碳中和”的“双碳”目标。污水处理是水污染防治的重要环节,同时也是温室气体减排的重要领域。2023年12月国家发展改革委等多部委共同印发了《关于推进污水处理减污降碳协同增效的实施意见》,提出要协同推进污水处理污染物削减与温室气体减排,处理过程节能降碳,全面提高污水处理综合效能。在此背景下,污水厂应改变“以能消能”的运行方式,注重设计细节优化与精细化运行管理,而核心二级生物处理工艺的选择和潜能挖掘是落实以上要求的关键。

多段多级缺氧/好氧(AO)工艺能够充分利用污水中碳源、无污泥内回流,具有脱氮效率高、所需池容小、外加碳源少、建设投资及运行费用较省的低碳特点,在污水减污降碳背景下,具有广泛的应用前景。但由于多点进水、功能分区较多,其工程应用在溶解氧(DO)控制、碳源投加、进水分配、池型及搅拌器选型等方面设计需引起重视。通过对西北某污水厂多段多级AO工艺段进行碳排放分析,提出了设计优化策略,并进行了碳减排潜力分析,可为污水厂精细化低碳运行管理提供先决条件,以期同类工程提供借鉴。

1 工艺特点

多段多级AO工艺是传统厌氧-缺氧-好氧(AAO)基础上发展的改良工艺之一,该工艺段碳排放主要以硝化和反硝化过程产生的 N_2O 直接碳排放及能耗药耗产生的间接碳排放为主,工艺原理及碳排放分析如图1所示。污水分段进入生物池厌氧区和多个缺氧区,依次经历缺氧/好氧交替的环境,形成多级厌氧-好氧串联,工艺原理及碳排放示意如图1所示。通过多点进水和多级AO串联可形成较大的污泥梯度,增大生物池容积负荷,相比于传统生物处理AAO工艺,多段多级AO为常规生物池容积的75%^[1],可节省工程投资,降低建设期的碳排放。理论上生物池分级数越多,脱氮率越高。但当分级数大于5级时,管道阀门、仪表数量增加,给投资及运行管理带来不便,工艺

优势不再明显。工程设计中分级多为4级,理论最高脱氮率可达87.5%。多点进水,生化反应可充分利用污水中的碳源,降低外加碳源消耗;多级AO串联,无硝化液内回流,可降低运行能耗;从而降低运行期间碳排放。该工艺在污水减污降碳背景下,具有广泛的应用前景。但由于多点进水、功能分区较多,其在DO控制、碳源投加、进水分配、池型及搅拌器选型等方面需引起重视,拟结合碳排放分析探讨其优化策略,充分挖掘处理效能。

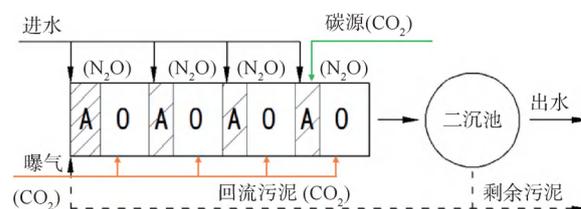


图1 多段多级AO工艺原理及碳排放

Fig. 1 Principle and Carbon Emmission of Multi-Stage and Muti-Level AO process

2 碳排放分析

以西北某污水厂为例,分析其全厂及二级生物处理段碳排放。污水厂建设规模为 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,出水标准执行《陕西省黄河流域污水综合排放标准》(DB61/224—2018)A标准。进水水质具有TN高、碳氮比(C/N)低、冬季低温的特点,预处理采用格栅、曝气沉砂池及速沉池工艺,二级生物处理采用多段多级AO工艺,深度处理采用磁混凝沉淀+反硝化深床滤池工艺。项目平均进水量达产率为90.63%,接近满负荷运行,全年出水水质稳定达标,且全面优于出水标准,进、出水水质如表1所示。选取2023年度运行数据(表2)进行碳排放核算分析,碳排放核算计算方法和公式参考《城镇污水处理厂碳减排评估标准》(以下简称《标准》),碳排放核算排放因子及关键参数取标准推荐值,污水处理阶段碳排放核算如表3所示。

由表3可知,污水处理全过程碳排放强度为 $0.69 \text{ kg CO}_2\text{-eq}/\text{m}^3$ 。直接碳排放强度为 $0.26 \text{ kg CO}_2\text{-eq}/\text{m}^3$,占比为37.68%,其中以硝化和反硝化反应产生的 N_2O 碳排放量为主,与进水水质和工

表 1 全年进、出水水质年平均值 (单位:mg/L)

项目	COD	BOD ₅	SS	氨氮	TN	TP
进水水质	427	189.0	216.0	45.0	54.0	5.30
出水水质	12	2.4	1.7	0.4	9.4	0.05

艺类型有关。间接碳排放强度为 0.43 kg CO₂-eq/m³,占比为 62.32%,其中以电力消耗产生的碳排放为主,是全厂污水处理碳排放主要因素。

二级生物反应段是污水厂直接碳排放(N₂O)和间接碳排放(电耗、药耗)的主要贡献点,根据碳排

表 2 污水厂运行数据

名称	单位	数值
处理水量	m ³ /a	1 654.12 万
耗电量 E	kW · h/a	788.75 万
乙酸钠(质量分数为 25%)	t/a	659.25
聚合氯化铝(PAC) (氧化铝质量分数为 10%)	t/a	782.75
聚丙烯酰胺(PAM) (固体粉末,污水用)	t/a	46.90
次氯酸钠(质量分数为 10%)	t/a	550.85

表 3 运维年度污水处理阶段碳排放分析

Tab. 3 Analysis of Carbon Emission during the Wastewater Treatment Stage of Annual Operation

项目	碳排放量/(t CO ₂ -eq · a ⁻¹)	碳排放强度/(kg CO ₂ -eq · m ⁻³)	碳排放占比	
直接碳排放	化石源 CO ₂	356.18	0.02	2.88%
	CH ₄	892.05	0.06	8.65%
	N ₂ O	3 051.67	0.18	25.94%
	合计	4 299.90	0.26	37.47%
间接碳排放	电力消耗	4 997.53	0.30	43.80%
	碳源乙酸钠	477.95	0.03	4.32%
	PAC	384.76	0.02	2.88%
	PAM	133.66	0.01	1.44%
	次氯酸钠	1 098.02	0.07	10.09%
	合计	7 091.92	0.43	62.53%
总计	-	11 391.82	0.69	100.00%

放点位分析,多段多级工艺段碳排放强度为 0.39 kg CO₂-eq/m³,如表 4 所示,对比其他工艺呈现出良好的低碳特点^[1-2]。但二级生化系统碳排放依然占全厂污水处理碳排放总量的 55.84%,其低碳优化设计对全厂的低碳运行尤为重要,碳减排潜力较大。优化生化反应环境,一定程度上可降低直接碳排放,现阶段对生物处理阶段 N₂O 排放因子的研究差异较大^[3],本次暂不做重点讨论。间接碳排放中曝气风机及搅拌系统电力消耗占比最大,碳源乙酸钠次之。可见,基于碳减排的多段多级 AO 的优化设计应优先考虑曝气系统优化,多途径控制生化系统各分区 DO,其次为碳源精确投加控制,同时为保证多段多级工艺运行效果,还需重视进水流量分配及不同池型搅拌器的选型。

3 设计优化

3.1 曝气控制

过高的曝气量不仅带来能量浪费,同时削弱了

生化工艺脱氮除磷的能力。低 DO 曝气可降低能耗,同时避免进水碳源在好氧区的过度消耗,提升碳源利用率,提高反硝化效率。多段多级工艺好氧缺氧交替进行,各功能区对 DO 的要求更为严格。各好氧区供气 DO 宜控制为 0.5~1.5 mg/L,为避免影响下一级缺氧区环境,好氧区末端应尽量降低 DO 值,曝气器宜根据水流方向由密到稀渐减布置;根据池型在好氧区末端增加脱气区(变形区),增加运行灵活性。除上述措施外,好氧区 DO 值的控制宜采用精确曝气系统。每格好氧池设置独立的曝气干管,设置电动菱形刀闸阀(调节阀)和热式气质流量计。根据进水流量、水质(COD、氨氮等)前馈信号,以及生化池 DO、水温、污泥浓度(MLSS)、液位等作为反馈信号,通过模型计算出各控制区的需气量,并将总气量(或压力)信号发送至风机主控柜,实现风机总输出的调节。对于各个 DO 控制区,通过调节阀快速精确调节,完成总气量到分区的气量合理分

表4 多段多级AO工艺碳排放分析
Tab. 4 Analysis of Carbon Emission for Multi-Stage and Multi-Level AO Processes

项目		碳排放量/(t CO ₂ -eq·a ⁻¹)	碳排放强度/(kg CO ₂ -eq·m ⁻³)	碳排放占比
直接碳排放	合计	3 051.67	0.18	46.45%
间接碳排放	鼓风机电耗	2 126.12	0.13	33.37%
	搅拌电耗	520.32	0.03	8.17%
	污泥回流电耗	272.12	0.02	4.27%
	碳源乙酸钠	477.95	0.03	7.74%
	合计	3 396.51	0.21	53.35%
总计	-	6 448.18	0.39	100.00%

配。精确曝气调节阀建议采用电动菱形阀门,当水深大于6 m时,阀门的调节性能可能发生畸变,建议变径安装,阀门安装尺寸为管道的60%~80%为宜。精确曝气系统产生的背压较大,风机要考虑背压上限和可调空间。根据应用调研,精确曝气系统可节约能耗为15%~20%^[4],核算工艺段可实现碳减排7.5%。

3.2 碳源投加控制

多段多级AO工艺碳源各级缺氧区投加量各不相同,通常以第三、四缺氧区投加为主。为避免过量投加及末端碳源穿透,提高运行智能水平,建议在设计阶段设置基于前馈+模型计算+后馈的精确碳源投加系统。为实现精确调节,投加泵组、管道及投加点宜一对一设置。对于4段多段多级AO工艺,考虑到缺氧区格数较多,为减少投加泵组及管道数量,对于并行的生物池系列可在同一缺氧区采用一组投加泵组,共用管道。根据应用调研,精确加药系统应用可节约碳源药耗为10%~40%^[4],核算工艺段可实现碳减排3.4%。

3.3 配水方式

进水流量分配是多段多级AO工艺重要参数,直接影响生物池各级硝化容量的充分利用和各级缺氧区反硝化效果。根据工程经验,对于4级多段多级AO工艺,一般情况进水流量配水比多采用30%~40%、25%~40%、20%~30%、10%~20%。当冬季低温导致硝化受限制时,可以减小最后一段或两段的进水量,延长硝化时间,从而达到系统较好的硝化效果。

配水方式对精细化运行管理较为重要。根据工程经验多点进水配水方式通常多为2种:一种为管道+流量计+阀门的精确控制方式;另一种为渠道+可调堰的模糊控制方式。2种模式各有利弊,工程

中可结合项目实际条件选择。管道+流量计+阀门配水方式即采用管道配水,每个进水点设置流量计及调节阀,可实现流量的精确分配并全过程监控各段实际进水流量。当生物池系列大于2个时,可在2组生物池中间修建管廊,集中布置进水管、曝气管、回流污泥管、加药管及控制阀门^[5]。该配水方式设备数量较多,对阀门的质量要求较高,建议采用带调节功能的偏心半球阀。值得注意的是,当管道内流速较低(≤ 0.3 m/s)时,流量计精准性将下降甚至存在采集不到数据的情况,失去了其精准计量的优势,对于可能存在初期水量规模较小的新建水厂需谨慎采用,适用于精细化管理要求较高、进水水质变化较大(运行调节较频繁)的污水厂及改造项目(对土建的改动最小)。渠道+可调堰配水方式即采用中间进水渠道配水,设计中采用不等堰长分配流量,根据设计配水比及堰流公式计算堰长。运行中通过调整堰板高度对水量进行现场调节。该配水方式对进水流量的分配较为精确,实际过水流量易于观察较直观,但无实际进水计量措施。考虑到实际上污水厂往往在调试运行稳定后,后续很少再去调节,仅当水量或水质阶段性发生较大变化时,根据实际出水水质再进行调整。

3.4 池型与搅拌

多段多级AO工艺,生物池分格较多,受规模及用地形状等约束因素影响,池型也存在较大差异,其搅拌/推流器的设置应充分结合池型,应用计算流体力学(CFD)模拟技术优化搅拌器数量及选型。同时应注意各区域联通洞口开法,避免短流及浮渣累积。潜水推流器适合细长型的廊道,应用池型推荐长度为廊道宽度的3倍,推流器安装位置应保证其在弯道前 ≥ 2 倍廊道宽度、弯道后 ≥ 1 倍廊道宽度。

潜水搅拌机、双曲面搅拌器主要通过搅拌达到创建水流作用,有效阻止悬浮物沉降。双曲面搅拌机适用较为方正的池型,长宽比不宜超过 1.5,潜水搅拌机适用于矩形池型以减少设备数量^[6]。

多段多级 AO 生物池厌氧区、缺氧区主要由原

水与污泥进行充分混合,推荐以完全混合流态为主。主要存在以下 2 种形式:结合池型在较方正的池型中布置双曲面搅拌机(图 2),在廊道式池型布置推流器(图 3),同时应尽量在每级好氧区末端设置脱气变形区,停留时间为 40 min 左右。

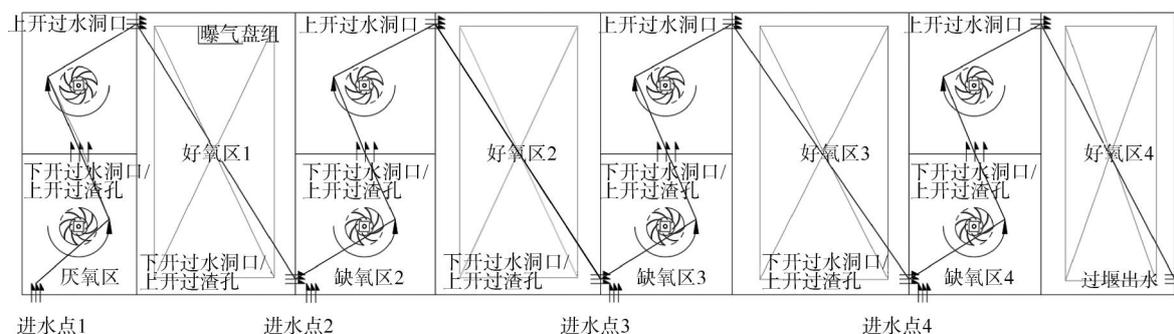


图 2 池型布置一

Fig. 2 Layout 1 Pool Type

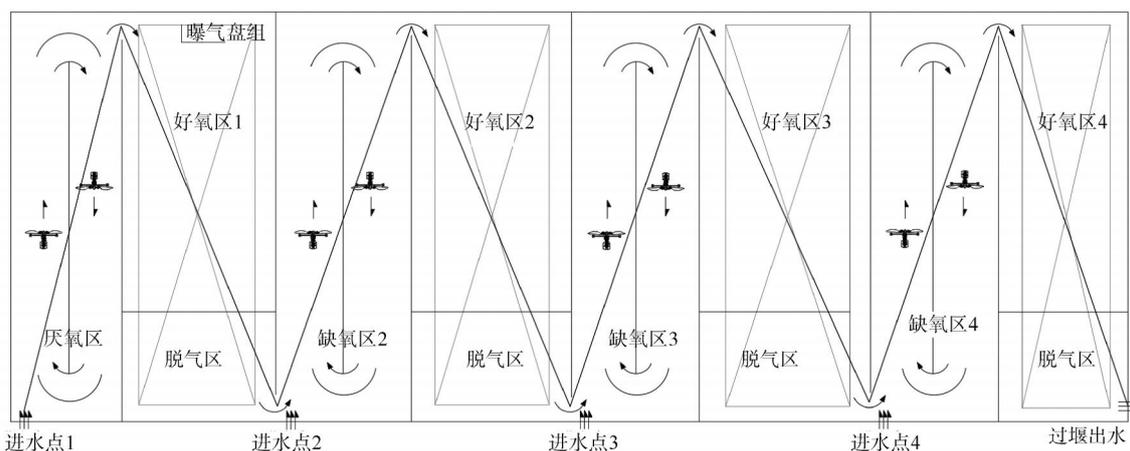


图 3 池型布置二

Fig. 3 Layout 2 of Pool Type

在规模较小、用地宽度方向受限时,生物池分格多为短矩形,图 2 为其中一个系列。厌氧区及各级缺氧区采用双曲面搅拌机,主要实现进水和活性污泥完全混合。池内整体为推流,局部为完全混合的流态。图 2 虚线为水流路线示意,设计中应注意搅拌器的旋转方向,确保水流顺畅;各区过水洞口在平面及竖向应交错开洞,避免短流,过水洞口下开时,应在上方开扁平的过渣孔,避免浮渣累积。

在规模较大、用地长度方向受限时,生物分格多为长矩形(廊道式),图 3 所示为其中一个系列。为避免设备数量过多,对廊道式厌氧及缺氧区,推荐采用潜水推流器,推动水流在单格池形成完全混合流态,单组系列生物池内仍为推流式。缺氧区采用氧

化沟池型布置,可降低搅拌器能耗^[5]。图 3 虚线为水流主线,可以看出短流发生的可能性较小,因此建议厌氧/缺氧与好氧区之间的联通采用通开断面而非洞口,相比之下断面过水在竖向流速均衡,对于正常运行工况的生物池不易发生污泥沉积及浮渣累积。同时,为增加运行灵活性,在好氧区末端增设变形区,停留时间为 40~60 min,变形区内同时布置曝气器及搅拌机。打开曝气器,关闭搅拌机,可按照好氧区状态运行,强化硝化功能;关闭曝气器,打开搅拌机,可按照缺氧区或脱气区状态运行,强化反硝化功能。

对于提标改造项目,将二级生物处理工艺改造为多段多级工艺,可在不增加池容的条件下强化生物池脱氮除磷功能。以常见的氧化沟池型为例,改

造较易实现。根据水流方向在原氧化沟廊道内增设隔墙依次将其分割为多个缺氧区及好氧区,形成多点进水、缺氧/好氧多级串联的处理模式。进水采用

管道+流量计+调节阀的方式分段配水。在缺氧区布置潜水搅拌机,改表曝机为底曝,在好氧区敷设曝气器。氧化沟改造如图4所示。

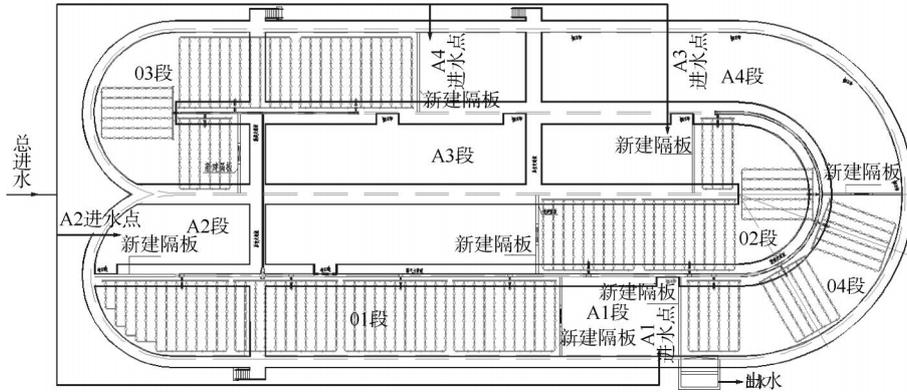


图4 氧化沟改造

Fig. 4 Reconstruction of Oxidation Ditch

4 碳减排潜力分析

曝气及碳源投加控制优化可定量核算间接碳排放减排量;配水方式、池型与搅拌优化对生化环境优化,处理效能提升至关重要,理论上这也有助于降低直接碳排放,但减排效果需要长期碳排放监测反馈,尚无法定量核算,因此,暂

不纳入本次碳减排定量对比分析。统筹精确曝气、精确加药按照前述优化策略优化后,测算案例项目多段多级工艺碳排放强度可降低至 $0.35 \text{ kg CO}_2\text{-eq/m}^3$,其中间接碳排放降低至 $0.17 \text{ kg CO}_2\text{-eq/m}^3$,具体如表5所示,整体可实现碳减排 10.3%。

表5 多段多级AO工艺碳减排潜力分析

Tab. 5 Analysis of Potential Carbon Emission Reduction for Multi-Stage and Multi-Level Processes

项目	碳排放量/(t CO ₂ -eq·a ⁻¹)	碳排放强度/(kg CO ₂ -eq·m ⁻³)	碳排放占比
直接碳排放合计	3 051.67	0.18	51.48%
间接碳排放合计	2 780.10	0.17	48.52%
间接碳排放			
鼓风机	1 700.90	0.10	29.59%
搅拌	520.32	0.03	9.05%
污泥回流	272.12	0.02	4.73%
碳源乙酸钠	286.77	0.018	5.15%
合计	5 831.77	0.35	100.00%

5 结语

多段多级AO工艺具有显著的节能降碳特点,符合当前污水处理厂减污降碳政策导向,应用前景广泛。通过碳排放分析,案例污水厂多段多级工艺段碳排放强度为 $0.39 \text{ kg CO}_2\text{-eq/m}^3$,对比其他工艺呈现出良好的低碳特点。其优化设计应结合精确曝气及碳源投加智能控制,同时重视配水方式、池型及搅拌器选型,实现精细化管理运行,确保各功能分区稳定高效,总体实现碳减排 10.3%。

在优化生化反应环境,对直接碳排放也有正向减排影响。随着生化反应碳排放产生机理及排放因子本地化的进一步研究,将在设计优化基础上提出更低碳的运行管控策略,促进污水处理更加智慧、低碳。

参考文献

[1] 王子龙. 多段多级AO工艺处理低碳氮比污水的效能及碳排放分析[J]. 净水技术, 2023, 42(s1): 146-153.
WANG Z L. Efficiency and carbon emission analysis of step-feed multistage AO process in low C/N wastewater treatment [J] Water Purification Technology, 2023, 42 (s1): 146-153.

(下转第 195 页)

以上优化策略主要为针对间接碳排放减排的设计优化,可为低碳运行奠定基础。当然,设计优化旨

- reconstruction: Ensuring safe drinking water for the public [N]. Ningbo Daily, 2022-03-22 (A04).
- [7] 吴婷, 褚泽帆, 孙勇, 等. 基于嵌入式边缘计算的智能视频水位在线测量 [J]. 江苏水利, 2023(8): 55-60.
WU T, CHU Z F, SUN Y, et al. Research on intelligent video water level online measurement based on embedded edge computing [J]. Jiangsu Water Resources, 2023(8): 55-60.
- [8] 阚永庚, 邵莉, 孙明权, 等. 基于边缘计算的大中型泵站电气设备故障红外图像识别 [J]. 水利技术监督, 2023(1): 28-31.
KAN Y G, SHAO L, SUN M Q, et al. Infrared image recognition of electrical equipment faults in large and medium-sized pumping stations based on edge computing [J]. Technical Supervision in Water Resources, 2023(1): 28-31.
- [9] 霍伟亮. 数据监控系统整合及运用 [J]. 中国科技信息, 2021(24): 28-29.
HUO W L. Integration and application of data monitoring system [J]. China Science and Technology Information, 2021(24): 28-29.
- [10] 方婷婷. “智慧水务”理念在二次供水系统中的实践 [J]. 建筑技术开发, 2021, 48(9): 89-90.
FANG T T. Practice of "smart water affairs" concept in secondary water supply system [J]. Building Technology Development, 2021, 48(9): 89-90.
- [11] 周富林, 黄靖. AI 边缘计算在工业视觉识别系统中的应用 [J]. 现代传输, 2022(6): 54-56.
ZHOU F L, HUANG J. Application of AI edge computing in industrial vision identification system [J]. Modern Transmission, 2022(6): 54-56.
- [12] 朱亚东洋, 李心超, 魏文豪, 等. 基于边缘计算的实时目标检测系统的研究与实现 [J]. 北京石油化工学院学报, 2022, 30(2): 40-45.
ZHU Y D Y, LI X C, WEI W H, et al. Research and implementation of a real-time object detection system based on edge computing [J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology, 2022, 30(2): 40-45.

(上接第 187 页)

- [2] 张翔宇, 范业弘, 朱晗彬, 等. 城镇中小规模污水处理厂碳排放分析及碳削减对策 [J]. 环境科学, 2025, 46(1): 107-117.
ZHANG X, FAN Y H, ZHU H B, et al. Carbon emission analysis and carbon reduction strategy of small and medium-scale municipal wastewater treatment plants in cities and towns [J]. Environmental Science, 2025, 46(1): 107-117.
- [3] 吴珊, 李浩, 杜至力, 等. AAOAO 工艺的氧化亚氮排放及生成机理分析 [J/OL]. 工业水处理, 2024: 1-18 [2025-05-09]. <https://doi.org/10.19965/j.cnki.iwt.2024-0312>.
WU S, LI H, DU Z L, et al. Analysis of the emission and generation mechanism of oxidized ammonia in AAOAO process [J/OL]. Industrial water treatment, 2024: 1-18 [2025-05-09]. <https://doi.org/10.19965/j.cnki.iwt.2024-0312>.
- [4] 王拓, 严冰. 多级 A/O 工艺协同精确控制系统用于低 C/N 进水污水厂 [J]. 中国给水排水, 2021, 37(12): 65-69.
WANG T, YAN B. Application of multi-stage A/O process collaborative precise control system in wastewater treatment plant with low C/N influent [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(12): 65-69.
- [5] 王舜和, 李朦, 郭淑琴. 张贵庄污水处理厂分段进水多级 AO 工艺的设计与运行 [J]. 中国给水排水, 2018, 34(12): 53-56.
WANG S H, LI M, GUO S Q. Design and operation for the step-feed multi-stage AO process in Tianjin Zhangguizhuang wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(12): 53-56.
- [6] 赵红, 张建强, 杨自强, 等. 潜水推流器在矩形生物池节能降耗中的应用 [J]. 化学工程与装备, 2023(2): 265-267.
ZHAO H, ZHANG J Q, YANG Z Q. The application of submersible thrusters in energy conservation and consumption reduction of rectangular biological ponds [J]. Chemical Engineering & Equipment, 2023(2): 265-267.