

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.18.011

某再生水厂两期脱氮除磷工艺设计及效能分析

曾超¹, 刘影¹, 陈圆¹, 陈积义¹, 徐菡玲¹, 刘阳¹,
文宇鸿¹, 杨淇棕², 古伟², 王文明²

(1. 湖南省建筑设计院集团股份有限公司, 湖南长沙 410011; 2. 湖南先导洋湖再生水有限公司, 湖南长沙 410208)

摘要: 某再生水厂一期采用“7池型MSBR+反硝化生物滤池+高效气浮”工艺,二期采用“10池型MSBR+深度脱氮V型滤池”工艺,设计出水水质均要求达到地表水准Ⅳ类标准($TN \leq 10$ mg/L)。根据2022年1月—2023年7月的运营数据,一期平均出水TN为6.50 mg/L,TP为0.16 mg/L,平均吨水电耗为 $0.236 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$,浓度为10%的液体PAC用量为28.97 mg/L,浓度为20%的液体碳源乙酸钠用量为63.17 mg/L,运行时的平均单位污染物碳排放强度为 $(4.59 \pm 0.98) \text{ kgCO}_2\text{-eq}/\text{kg}$,吨水碳排放为 $(0.319 \pm 0.075) \text{ kgCO}_2\text{-eq}/\text{m}^3$;二期平均出水TN为5.37 mg/L,TP为0.19 mg/L,平均吨水电耗为 $0.273 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$,浓度为10%的液体PAC用量为42.99 mg/L,浓度为20%的液体碳源乙酸钠用量为21.98 mg/L,运行时的平均单位污染物碳排放强度为 $(4.75 \pm 0.67) \text{ kgCO}_2\text{-eq}/\text{kg}$,吨水碳排放为 $(0.328 \pm 0.050) \text{ kgCO}_2\text{-eq}/\text{m}^3$ 。

关键词: 再生水厂; 脱氮除磷; MSBR工艺; 反硝化生物滤池; 高效气浮; V型滤池; 碳排放

中图分类号: TU992 文献标识码: B 文章编号: 1000-4602(2024)18-0064-07

Process Design and Efficiency Analysis of Nitrogen and Phosphorus Removal in Two Phases of a Reclaimed Water Plant

ZENG Chao¹, LIU Ying¹, CHEN Yuan¹, CHEN Ji-yi¹, XU Han-ling¹, LIU Yang¹,
WEN Yu-hong¹, YANG Qi-liang², GU Wei², WANG Wen-ming²

(1. Hunan Architectural Design Institute Group Co. Ltd., Changsha 410011, China; 2. Hunan Xiandao Yanghu Regenerated Water Co. Ltd., Changsha 410208, China)

Abstract: A reclaimed water plant adopts the process of 7-tank MSBR, denitrification biological filter and high-efficiency air flotation in phase I, and the process of 10-tank MSBR, deep denitrification V-type filter in phase II. The design effluent quality is required to meet level quasi-IV criteria of *Environmental Quality Standard for Surface Water* (GB 3838-2002), i.e., $TN \leq 10$ mg/L. According to relevant operation data from January 2022 to July 2023 in phase I, the average effluent TN and TP were 6.50 mg/L and 0.16 mg/L, respectively. The corresponding average unit power consumption was $0.236 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$, the dosage of 10% content liquid PAC was 28.97 mg/L, and the dosage of 20% content liquid carbon source sodium acetate was 63.17 mg/L. The average carbon emission intensity per unit pollutant during operation was $(4.59 \pm 0.98) \text{ kgCO}_2\text{-eq}/\text{kg}$, and the average carbon emission in tensy per ton of

通信作者: 王文明 E-mail: w.m.wang@126.com

wastewater was (0.319 ± 0.075) $\text{kgCO}_2\text{-eq/m}^3$. In phase II, the average effluent TN was 5.37 mg/L, TP was 0.19 mg/L, the average unit power consumption was $0.273 \text{ kW}\cdot\text{h/m}^3$, the dosage of 10% content liquid PAC was 42.99 mg/L, and the dosage of 20% content liquid carbon source sodium acetate was 21.98 mg/L. The average unit carbon emission intensity was (4.75 ± 0.67) $\text{kgCO}_2\text{-eq/kg}$, and the average carbon emission in intensity per ton of wastewater was (0.328 ± 0.050) $\text{kgCO}_2\text{-eq/m}^3$.

Key words: reclaimed water plant; nitrogen and phosphorus removal; MSBR process; denitrification biological filter; high-efficiency air flotation; V-type filter; carbon emission

随着国家对水环境质量越来越关注及水环境治理工作的全面开展,对污水处理厂出水水质标准提出了更高的要求,特别是在功能重要、水质要求严格、生态脆弱、容易受到外源污染影响的敏感水体,如重点湖泊、重要封闭或半封闭的水体,其接纳的污水处理厂尾水主要污染物指标应达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的Ⅲ类或Ⅳ类标准(以下简称“地表水准Ⅳ类标准”)。由于水环境容量不足,对排入上述水体的污水处理厂尾水营养

物质氮磷指标的考核更为严格^[1]。以某再生水厂一、二期工程为研究对象,开展脱氮除磷设计及效能方面的对比分析。

1 项目概况

该再生水厂工程规划总规模为 $30.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 已建规模为 $22.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 其中一期 $4.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 二期 $8.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 三期 $10.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。该再生水厂纳污范围包括岳麓科技产业园、洋湖垸和大王山旅游度假区,厂区总图布局及规划如图1所示。



图1 厂区总图布局及规划

Fig.1 General layout and planning of the plant

目前一、二期工程均运行良好,尾水水质达到地表水准Ⅳ类标准($\text{TN} \leq 10 \text{ mg/L}$),一期和二期部分尾水经过消毒处理后排入洋湖自然湿地作为生态补水。

洋湖湿地公园总面积为 4.85 km^2 ,为国家4A级景区,属于半封闭敏感水体。为保证洋湖湿地公园水体水质,该再生水厂主要污染物去除效果要求如表1所示。

一期工程于2009年开始设计,2012年8月投产,采用MSBR+人工湿地工艺,出水水质达到《城镇

污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准后排入人工湿地,采用紫外消毒后最终排入洋湖湿地公园。由于一级A标准出水TN仍有 15 mg/L ,TP为 0.5 mg/L ,可能导致接纳水体局部流动性较差的区域出现富营养化现象。为进一步改善接纳水体水质,2019年一期工程开始进行提标改造施工,以确保出水水质达到地表水准Ⅳ类标准。一期提标改造工程深度处理采用反硝化生物滤池+高效气浮工艺。

二期工程于2017年开工建设,2018年9月建成

通水,采用MSBR+深度脱氮V型滤池工艺,出水水质达到地表水准Ⅳ类标准,大部分尾水经紫外消毒后排入洋湖湿地公园作为生态补水,另有部分尾水经消毒后作为中水回用。

表1 再生水厂一、二期工程主要污染物设计去除效果

Tab.1 Requirements for the removal efficiency of main pollutants in phase I and phase II of the reclaimed water plant

项目	进水/(mg·L ⁻¹)	出水/(mg·L ⁻¹)	去除率/%
COD	250	≤30	88.00
BOD ₅	120	≤6	95.00
SS	220	≤10	95.45
氨氮	30	≤1.5(3.0)	95.00
TN	40	≤10	75.00
TP	3	≤0.3	90.00

一、二期工程的污泥处理均采用离心机械脱水工艺,泥饼(含水率≤80%)外运至长沙市污泥处置中心。

2 一、二期全流程设计参数对比及分析

2.1 二级生化工艺

一、二期二级处理均采用MSBR,该工艺是一种节地且高效的生化工艺。进厂污水经预处理后直接进入MSBR的厌氧池,与来自预缺氧池的浓缩回流污泥混合,富含磷的污泥在厌氧池进行释磷反应后进入缺氧池,缺氧池主要用于强化整个系统的反硝化效果,由主曝气池至缺氧池的回流系统提供硝态氮。缺氧池出水进入主曝气池经有机物降解、硝化、吸磷反应后,再进入序批池Ⅰ或序批池Ⅱ。如果序批池Ⅰ作为沉淀池出水,则序批池Ⅱ首先进行缺氧反应,再进行好氧反应,或交替进行缺氧、好氧反应。为强化除磷效果,在缺氧、好氧反应阶段序批池的污泥通过回流泵提升至泥水分离池,浓缩池上清液进入缺氧池及好氧池,浓缩污泥进入预缺氧池。浓缩污泥消耗掉其携带的溶解氧,并通过内源缺氧反硝化脱氮去除硝酸盐后,再次提升进入厌氧池与进厂污水混合释磷,依次循环。

一期7单元池型核心工艺实质为AAO串联SBR,二期10单元池型则为AAO-AO串联SBR。一、二期MSBR系统流程分别如图2、3所示。

为了强化反硝化脱氮效果,二期设计时在原有MSBR 7个单元格的基础上增加了3个缺氧单元,单座MSBR池共分10个单元,单元1和单元7是

SBR池,1A、7A单元是缺/好氧池(后缺氧单元),可接收来自单元4的原水碳源,单元2是泥水分离池,单元3是预缺氧池,单元4是厌氧池,单元5和5A是串联式两级缺氧池,单元6是主曝气好氧池。二期MSBR池增加了第二级前缺氧池、后缺氧池,同时充分考虑了进水碳源分配及污泥回流,硝化液回流效果比较好,应对水质和水量变化能力较强,总氮去除保障度相对较高。

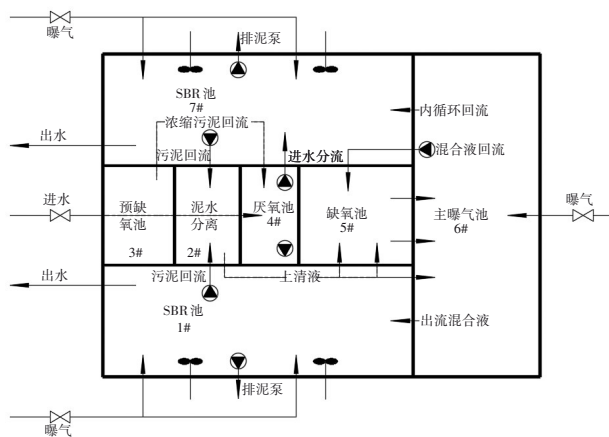


图2 一期7池型MSBR系统流程

Fig.2 Flow diagram of the phase I 7-tank MSBR system

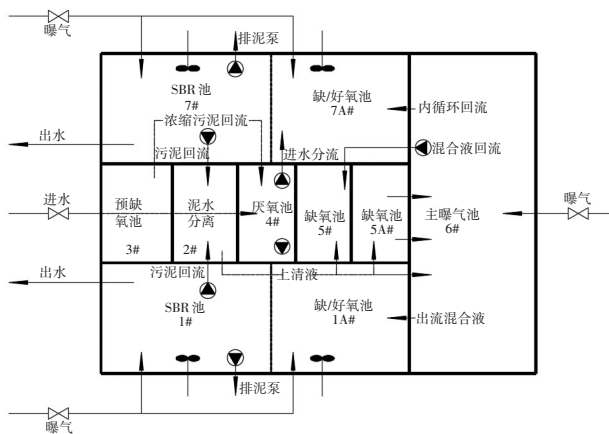


图3 二期10池型MSBR系统流程

Fig.3 Flow diagram of phase II 10-tank MSBR system

一、二期MSBR生物池参数对比如表2所示。

由表2可知,一期污泥龄较短,产生的剩余污泥较多,有利于除磷。二期污泥龄较长,保证硝化池中有足够数量的硝化菌,向反硝化区提供更多硝态氮作为反硝化反应的电子受体,有利于脱氮。从总氮保障度的角度出发,二期10单元池型设计总氮去除率的冗余度较高。

表2 一、二期MSBR生物池设计参数对比
Tab.2 Comparison of design parameters of MSBR biological tanks in phase I and phase II

参数		一期	二期
设计流量/(10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹)		4	8
生物池分组/组		2	2
单组池容/m ³		13 558	31 920
平均污泥浓度/(mg·L ⁻¹)		4 000	3 500
污泥负荷/(kgBOD ₅ ·kg ⁻¹ MLSS·d ⁻¹)		0.051	0.043
污泥龄/d		13.43	19.82
最大干泥产量/(kg·d ⁻¹)		7 800	11 790
水力停留时间/h	总水力停留时间	16.27	19.20
	厌氧池(4#)	1.22	1.34
	第一/第二缺氧池(5#/5A#)	1.27	1.47/1.47
	主曝气池(6#)	6.39	6.51
	泥水分离池(2#)	0.54	0.30
	预缺氧池(3#)	0.48	0.43
	第一/第二缺/好氧池(1A#/7A#)	无	0.78/0.78
回流比/%	第一/第二序批池(1#/7#)	3.18	3.04/3.04
	进水碳源分流(4#→1A#, 7A#)/%	/	10
	硝化液内回流(6#→5#)	400~450	350~400
	污泥外回流(1#, 7#→2#)	150~200	150~200
浓缩污泥回流(3#→4#)		50~80	50~80

2.2 深度处理工艺

① 一期深度处理工艺:上向流反硝化生物滤池+高效气浮池。反硝化生物滤池:1座4格,单格滤池面积45.03 m²,正常运行时平均滤速11.2 m/h、最大滤速13.8 m/h,一格反洗时最大滤速18.3 m/h,滤料粒径4.2~5 mm,滤层厚度2.7 m,容积负荷0.52~0.67 kgNO₃⁻-N/(m³·d)。高效气浮池:自反硝化生物滤池处理后的出水经加压提升后由管道引入高效气浮池。气浮池设1座,分3格,单格气浮区面积42 m²,平均负荷13.2 m³/(m²·h)、最大负荷17.2 m³/(m²·h),溶气水回流比10%,溶气水泵采用变频控制,可根据出水水质进行适当调整。

② 二期深度处理工艺:深度脱氮V型滤池(下向流)。深度脱氮V型滤池:1座,分6格,最大设计水量4 334 m³/h,单格面积97.3 m²,滤速7.4 m/h,采用球形陶粒滤料,单层滤料有效粒径2.5 mm,滤层厚度1.80 m。

该再生水厂深度处理一期提标及二期设计采用不同的处理工艺,一期工程深度处理各池功能相对单一,因而处理效能更高且更稳定,可实现较低的出水SS及TP浓度。相关研究表明,采用高效气浮池可实现极限除磷^[1]。二期深度处理仅设1座下

向流反硝化滤池,以实现一池多功能。从设计角度考虑,一期深度处理更为稳妥可靠。

2.3 用地及工艺投资

从总图布置来看,一、二期均为用地紧凑型工艺,仅深度处理用地指标有差异。一、二期总用地为6.87 hm²(103.1亩,不含人工湿地部分),远低于《城市污水处理工程项目建设标准》(建标198—2022)中最低建设用地控制指标的计算值[12.6 hm²(189亩)],仅为最低标准的54.50%。从一、二期核心工艺段投资对比(见表3)来看,二期工艺投资低于一期,这与建设时序及深度处理工艺有关。

表3 一、二期工程核心工艺段投资对比
Tab.3 Comparison of investment in the core process section of phase II project

项目	一期核心工艺段投资/万元	一期核心工艺段单位水量投资/(元·m ⁻³)	二期核心工艺段投资/万元	二期核心工艺段单位水量投资/(元·m ⁻³)
生化池	3 427.86	856.97	7 139.03	892.38
深度处理段	3 961.47	990.36	2 988.01	373.50
总计	7 389.33	1 847.33	10 127.04	1 265.88

注:一、二期工程处理规模分别为4×10⁴、8×10⁴ m³/d。

3 脱氮除磷运行效能分析

3.1 一、二期进、出水水质对比分析

2022年1月—2023年7月一、二期进、出水水质变化见表4。

表4 实际进、出水水质及去除率比较
Tab.4 Comparison of actual influent and effluent quality and removal rate

项目		COD	BOD ₅	氨氮	TN	TP	SS
进水/(mg·L ⁻¹)	最小值	29.0	18.8	1.65	6.35	0.48	12.0
	最大值	1 211.0	370.0	26.60	59.30	26.00	4 216.0
	平均值	187.2	100.8	14.03	22.08	3.03	218.0
一期出水/(mg·L ⁻¹)	最小值	4.0	18.8	0.03	2.80	0.02	1.0
	最大值	28.0	3.6	0.90	9.59	0.24	10.0
	平均值	9.9	0.8	0.16	6.50	0.16	3.8
一期去除率均值/%		93.67	99.03	98.74	67.94	94.72	97.58
二期出水/(mg·L ⁻¹)	最小值	4.0	0.5	0.04	1.53	0.02	1.0
	最大值	22.0	2.4	0.75	8.95	0.28	8.0
	平均值	10.6	1.0	0.20	5.37	0.19	3.5
二期去除率均值/%		93.13	98.82	98.44	73.91	93.73	97.79

由表4可知,一、二期出水COD、BOD₅、SS和NH₃-N均100%达标,两期出水TN均稳定达到10 mg/L以下。从统计数据看,二期出水TN均值低于一期,同时去除率高于一期,因此脱氮效果优于一期。一、二期出水TP均稳定达到0.3 mg/L以下,从

统计数据看,一期出水TP均值低于二期,同时去除率高于二期,因此除磷效果优于一期。从实际污水厂运行调试看,一期具备一定的极限除磷潜力,通过调整气浮段投药量,出水TP可控制在0.05 mg/L以下。二期PAC投药点设在主曝气区和微絮凝池,实际运行投药量较大时,滤池反洗频繁、电耗较高。

3.2 一、二期物耗分析

为保证出水能够稳定达到地表水准Ⅳ类标准,需要投加部分碳源和化学除磷药剂以提高脱氮除磷效果^[2]。2022年1月—2023年7月,该厂一、二期工程外加碳源均为浓度20%的液体乙酸钠,除磷药剂均为浓度10%的液体PAC,投加量如图4所示。

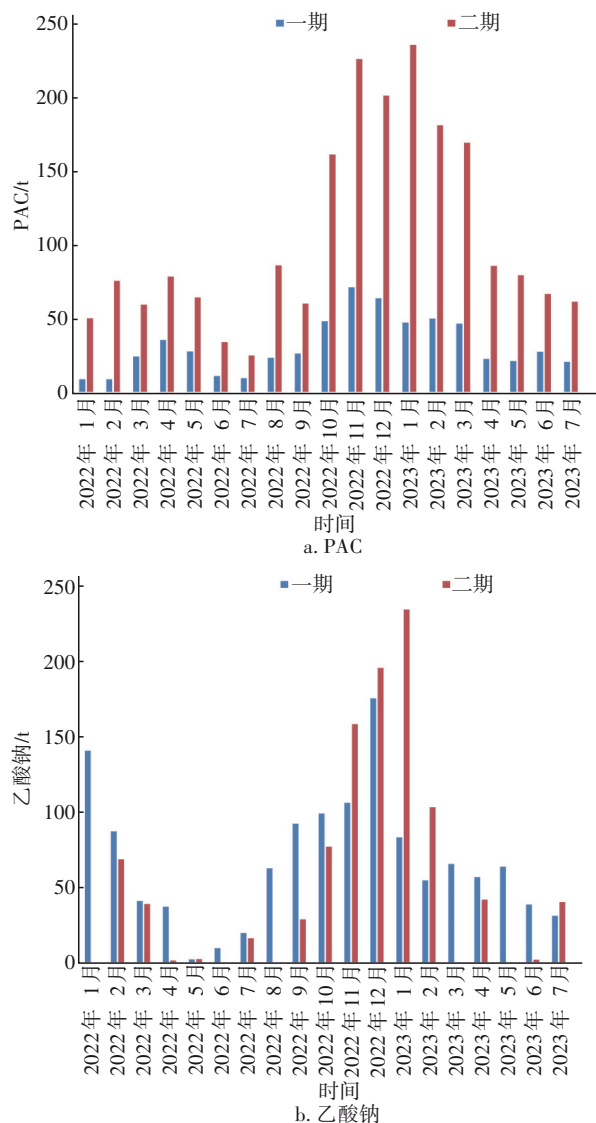


图4 一、二期工程的碳源、除磷药剂投加量

Fig.4 Carbon source and phosphorus removal agent dosage during operation of phase I and phase II project

一期投加的除磷药剂PAC月均值为31.70 t,最大值为71.54 t。二期投加的除磷药剂PAC月均值为105.66 t,最大值为235.82 t。相比之下,一期投加的PAC比二期少,更加节省药剂。一期投加的碳源乙酸钠月均值为66.98 t,最大值为175.34 t。二期投加的碳源乙酸钠月均值为53.33 t,最大值为234.00 t。相比之下,一期投加的碳源乙酸钠比二期多。总体而言,为保障出水水质稳定达标,冬季药耗比夏季更高。

2022年1月—2023年7月,该厂一、二期工程平均电耗、药剂平均用量对比如表5所示。可以看出,一期PAC用量均值低于二期,而二期碳源用量低于一期。一期吨水电耗均值低于二期,这与一、二期的装机运行功率有关,还与一期工程在保证尾水达标情况下,气浮池运行时间较短有关。

表5 一、二期工程电耗、药剂平均用量的对比

Tab.5 Comparison of average electricity consumption and average dosage of chemicals for phase I and phase II project

项目	一期吨水电耗/(kW·h·m ⁻³)	二期吨水电耗/(kW·h·m ⁻³)	一期PAC用量/(mg·L ⁻¹)	二期PAC用量/(mg·L ⁻¹)	一期碳源用量/(mg·L ⁻¹)	二期碳源用量/(mg·L ⁻¹)
最小值	0.158	0.229	6.48	9.13	1.53	0.17
最大值	0.305	0.302	68.33	97.13	167.48	96.38
平均值	0.236	0.273	28.97	42.99	63.17	21.98

在尾水达标情况下,药剂投加的差异往往与工艺设计侧重点有关。

一、二期总氮去除效果存在差异的原因:①二期MSBR泥龄为19.82 d,一期MSBR泥龄为13.43 d,二期属于长泥龄工艺,低污泥负荷及长泥龄往往有利于脱氮^[3];②二期MSBR设置了进水碳源分流系统,可充分利用进水中的碳源^[4];③二期MSBR采用前后两段缺氧池,二期前缺氧区停留时间为2.94 h,比一期(1.27 h)长,同时二期还设置了后缺氧池,停留时间为0.78 h,作为后置生化池的脱氮保障分区;④一期硝化液最大回流比为450%,大于二期的400%,回流比过大对总氮去除效益不明显,反而带入大量溶解氧,影响缺氧区反硝化反应^[5];⑤反硝化池的差异主要体现在滤速,二期滤速为7.4 m/h,比一期的11.2 m/h低,有利于陶粒负载的反硝化菌群进行脱氮反应。基于设计工艺参数及实际运行效

果,二期工艺比一期更节省碳源,脱氮效果更优。

一、二期总磷去除效果存在差异的原因:①一期MSBR池的泥龄比二期短,短泥龄更有利于生物除磷;②一期深度处理采用单独气浮池进行除磷,药剂投加的灵活性及控磷的冗余度较高。基于设计工艺参数及实际运行效果,一期比二期节省PAC,除磷效果更优。

3.3 一、二期脱氮除磷过程低碳效能分析

由于比较脱氮除磷综合效能需采用统一基准分析,因此借鉴碳排放当量核算分析方法,对一、二期实际运行的脱氮除磷过程碳排放强度进行核算。

① 指标及参数选取

碳排放总量核算参考现有研究^[6],仅考虑运行阶段污水处理厂界内因生产活动产生的碳排放(未考虑污泥处置过程中的碳排放),包括:a. 消耗的电能和处理药剂(PAC和碳源)引起的间接碳排放量;b. 去除TN产生的 N_2O ;c. 去除有机物产生的 CH_4 直接碳排放。为进一步对COD、BOD、 NH_4^+-N 、TN、TP污染物综合削减碳排放当量进行量化分析,参照文献研究选取单位污染物碳排放强度作为参考指标^[7],对一、二期实际运行的脱氮除磷过程碳排放运行效能分析。

采用的碳排放因子如表6所示。

表6 碳排放因子选取

Tab.6 Selection of carbon emission factors

项目	数值	参考文献
乙酸钠(含量≥99%)排放因子	2.9 kgCO ₂ -eq/kg	[6]
PAC(以Al ³⁺ 质量计)排放因子	6.19 kgCO ₂ -eq/kg	
全国电网排放因子	0.581 kgCO ₂ -eq/(kW·h)	[8]
N ₂ O排放因子	0.016 kgN ₂ O/kgN	
N ₂ O的全球变暖潜能	265 kgCO ₂ -eq/kgN ₂ O	[9]
CH ₄ 排放因子	0.008 5 kgCH ₄ /kgBOD ₅	[10]
CH ₄ 的全球变暖潜能	28 kgCO ₂ -eq/kgCH ₄	[9]

② 单位污染物碳排放强度核算结果

2022年1月—2023年7月,一、二期工艺单位污染物碳排放强度的逐月变化见图5。由图5可知,一、二期工艺碳排放强度变化趋势相似,二期工艺平均单位污染物碳排放强度为(4.75±0.67) kgCO₂-eq/kg,整体高于一期工艺对应值(4.59±0.98) kgCO₂-eq/kg。另外,二期工艺单位吨水碳排放强度为(0.328±0.050) kgCO₂-eq/m³,略高于一期工艺对

应值(0.319±0.075) kgCO₂-eq/m³。这主要是由于二期工艺综合电耗要高于一期,由此可见一期工艺组合在去除等量污染物、处理等量污水的情况下更具备低碳处理的潜质。

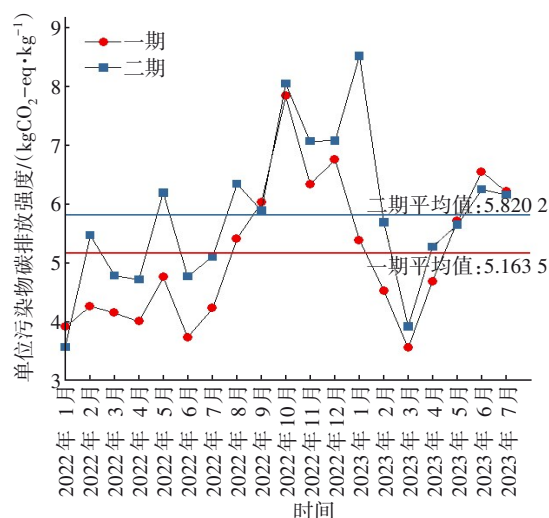


图5 一、二期工程单位污染物碳排放强度的对比

Fig.5 Comparison of carbon emission intensity of unit pollutant removal of phase I and phase II project

从上述分析可知,二期工艺虽脱氮效能优于一期,但从脱氮除磷实际运行综合效能比较,反而一期更具优势,这主要与一期吨水电耗较低有关。但从建设和运行全生命周期的脱氮除磷综合效能比较,还有待进一步分析。

4 结论

① 综合考虑再生水厂两期不同工艺设计参数选择及运行效果,发现在保障氮磷达标方面,一、二期工艺各有所侧重,脱氮除磷运行效能也有差异。一期除磷药剂投加量较少,除磷保障度较高;二期碳源投加量较少,脱氮效果较好。

② 高排放标准再生水厂不同生产线氮磷的去除效果与碳源和除磷药剂投加量有关。实际投加量应根据各自工艺边界条件,在运行中再结合出水水质确定,力求精确投加。

③ 针对现状再生水厂不同生产线的脱氮除磷效能进行分析,可为后续工艺参数优化设计提供依据。

④ 核算分析同一厂区不同生产线实际脱氮除磷运行过程中的碳排放强度,可作为一种客观定量分析方法。综合比较相同边界条件下不同工艺的低碳处理效能,可为有效遴选低碳型污水工艺提

供一种新思路。

参考文献:

- [1] 隋克俭,李家驹,李鹏峰,等. 溶气气浮工艺用于城镇污水处理厂二级出水的深度除磷研究[J]. 环境工程, 2020,38(7):66-70,65.
SUI Kejian, LI Jiaju, LI Pengfeng, *et al.* Study on deep dephosphorization of effluent from urban sewage treatment plant by dissolved air floatation process [J]. Environmental Engineering, 2020, 38 (7) : 66-70, 65 (in Chinese).
- [2] 马玉萍,胡香,刘怡心,等. 某污水处理厂类IV类标准提标前后的运行效能对比[J]. 中国给水排水,2019,35(3):96-100.
MA Yuping, HU Xiang, LIU Yixin, *et al.* Comparison of operation efficiency before and after upgrading to meet quasi class IV standard of surface water in a WWTP[J]. China Water & Wastewater, 2019, 35 (3) : 96-100 (in Chinese).
- [3] 鲍任兵,高廷杨,宫玲,等. 污水生物脱氮除磷工艺优化技术综述[J]. 净水技术,2021,40(9):14-20.
BAO Renbing, GAO Tingyang, GONG Ling, *et al.* Review of process optimization of biological denitrification and phosphorus removal in wastewater treatment[J]. Water Purification Technology, 2021, 40 (9):14-20(in Chinese).
- [4] 司文曦,李辰,马庆. 污水处理厂强化生物脱氮措施探析[J]. 中国给水排水,2015,31(16):21-25.
SI Wenxi, LI Chen, MA Qing. Discussion and analysis of enhanced biological denitrification measures in wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(16):21-25(in Chinese).
- [5] 刘雷斌,高守有,李艺. 脱气池控制回流混合液溶解氧技术研究[J]. 中国给水排水,2022,38(16):52-56.
LIU Leibin, GAO Shouyou, LI Yi. Study on the technology of controlling dissolved oxygen in reflux mixed liquid by deoxy tank [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(16):52-56(in Chinese).
- [6] 中国城镇供水排水协会. 城镇水务系统碳核算与减排路径技术指南[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022: 34-54.
China Urban Water Association. Technical Guidelines for Carbon Accounting and Emission Reduction Pathways in Urban Water System [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2022: 34-54 (in Chinese).
- [7] 胡香,陈孔明,李涛. 城镇污水处理厂低碳运行评价指标体系的构建及应用[J]. 工业用水与废水,2023,54(2):39-44.
HU Xiang, CHEN Kongming, LI Tao. Construction and application of low-carbon operation evaluation index system for sewage treatment plant [J]. Industrial Water & Wastewater, 2023,54(2):39-44 (in Chinese).
- [8] 生态环境部. 关于做好2022年企业温室气体排放报告管理相关重点工作的通知 [EB/OL]. (2024-04-12) [2024-06-25]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk06/202203/t20220315_971468.html. Ministry of Ecology and Environment. Notice on the key work related to the management of corporate greenhouse gas emissions reporting in 2022 [EB/OL]. (2024-04-12) [2024-06-25]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk06/202203/t20220315_971468.html (in Chinese).
- [9] IPCC. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories [R]. Switzerland: IPCC, 2019.
- [10] 蔡博峰,高庆先,李中华,等. 中国城市污水处理厂甲烷排放因子研究[J]. 中国人口·资源与环境,2015,25(4):118-124.
CAI Bofeng, GAO Qingxian, LI Zhonghua, *et al.* Study on the methane emission factors of wastewater treatment plants in China [J]. China Population, Resources and Environment, 2015,25(4):118-124(in Chinese).

作者简介:曾超(1986-),男,江西萍乡人,硕士,高级工程师,主要从事市政给水排水设计及科研工作。

E-mail:243435075@qq.com

收稿日期:2023-09-11

修回日期:2023-11-08

(编辑:衣春敏)