

工业水处理

羌金凤, 周文明, 赵海洲, 等. 光伏企业废水对工业园区废水厂运行的影响[J]. 净水技术, 2026, 45(1): 117-125.

QIANG J F, ZHOU W M, ZHAO H Z, et al. Impact of discharged wastewater of photovoltaic enterprise on WWTP operation in the industrial park[J]. Water Purification Technology, 2026, 45(1): 117-125.

光伏企业废水对工业园区废水厂运行的影响

羌金凤¹, 周文明¹, 赵海洲¹, 王啸天², 孙永军^{2,*}

(1. 中机国际工程设计研究院有限责任公司华东分院, 江苏南京 210023; 2. 南京工业大学城市建设学院, 江苏南京 211816)

摘 要 【目的】 文章旨在系统分析光伏企业废水排入园区废水厂后引发的运行问题及其影响机理, 为优化处理工艺提供依据。【方法】 以某工业园区废水厂(规模为 1 万 m³/d, 主要采用“水解酸化+厌氧-缺氧-好氧(AAO)+膜生物反应器(MBR)”组合处理工艺)为案例, 分阶段监测调试期与稳定运行期的水质水量参数, 包括化学需氧量(COD)、总氮(TN)、氨氮、总磷(TP)、盐分、钙离子(Ca²⁺)、硅离子(Si⁴⁺)、氟离子(F⁻)及悬浮物质(SS)等指标, 并结合膜污染电镜扫描、污染物元素分析和设备锈蚀状态评估, 量化对处理单元的运行影响; 同时, 基于监测结果设计并实施短期工艺改造方案。【结果】 光伏废水达废水厂进水总量的 95%~99%, 其典型特征为盐分高、硬度高和低碳氮比(C/N), 通过短期改造[增设除硬沉淀池、超越运行水解酸化池、工艺调整为“厌氧-好氧(AO)+二沉池+精密过滤”], 现阶段出水 COD、氨氮、TN、F⁻和 TP 已达到排放标准, SS 仍需进一步过滤, 盐分去除效果不明显, 但针对后续处理和区域排放限值, Ca²⁺与 Si⁴⁺需考虑针对性强化处理。【结论】 阶段性改造通过工艺简化与针对性单元调整, 能有效提升脱氮效率并缓解设备及处理单元污染问题; 但需进一步解决高盐腐蚀, Si⁴⁺、Ca²⁺残留及盐分去除难题, 考虑选用耐蚀材料设备并增设强化处理工艺以适应长期运行需求。

关键词 光伏废水 园区废水处理厂 膜生物反应器 碳氮比(C/N) 工艺调控

中图分类号: TU992 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2026)01-0117-09

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.01.014

Impact of Discharged Wastewater of Photovoltaic Enterprise on WWTP Operation in the Industrial Park

QIANG Jinfeng¹, ZHOU Wenming¹, ZHAO Haizhou¹, WANG Xiaotian², SUN Yongjun^{2,*}

(1. East China Branch of China Machinery International Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Nanjing 210023, China;

2. College of Urban Construction, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

Abstract [Objective] The purpose of this paper is to systematically analyze the operation problems and their influencing mechanisms caused by the discharge of wastewater from photovoltaic enterprises into the park wastewater treatment plant (WWTP), and to provide a basis for optimizing the treatment process. [Methods] Taking an industrial park WWTP [scale of 10 000 m³/d, mainly using "hydrolysis acidification + anaerobic-anoxic-oxic (AAO) + membrane bioreactor (MBR)" combined treatment process] as a case, the water quality and quantity parameters during the commissioning period and stable operation period were monitored in stages, including chemical oxygen demand (COD), total nitrogen (TN), ammonia nitrogen, total phosphorus (TP), salt, calcium ion (Ca²⁺), silicon ion (Si⁴⁺), fluorine ion (F⁻) and suspended matter (SS). Combined with membrane pollution electron microscope scanning, pollutant element analysis and equipment corrosion status assessment, the impact on the operation of the

[收稿日期] 2025-05-09

[基金项目] 国家重点研发计划(2024YFB4105500)

[作者简介] 羌金凤(1986—), 女, 高级工程师, 主要从事废水收集与处理等工作, E-mail: 390193199@qq.com。

[通信作者] 孙永军, E-mail: sunyongjun@njtech.edu.cn。

treatment unit was quantified. At the same time, a short-term process modification scheme was designed and implemented based on the monitoring result. [Results] The photovoltaic wastewater accounted for 95%–99% of the total influent of the WWTP, and its typical characteristics were high salinity, high hardness and low carbon nitrogen ratio (C/N). Through short-term transformation (adding hard sedimentation tank, exceeding the operation of hydrolysis acidification tank, adjusting the process to "anaerobic-oxic (AO) + secondary sedimentation tank + precision filtration"), the effluent COD, ammonia nitrogen, TN, F⁻ and TP had reached the discharge standard, SS still needed further filtration, and the salt removal effect was not obvious. However, for the follow-up treatment and regional emission limits, Ca²⁺ and Si⁴⁺ need to consider targeted strengthening treatment. [Conclusion] The staged transformation could effectively improve the nitrogen removal efficiency and alleviate the pollution of equipment and treatment units through process simplification and targeted unit adjustment. However, it is necessary to further solve the problems of high salt corrosion, silicon-calcium ion residue and salt removal, and consider the selection of corrosion-resistant material equipment and the addition of enhanced treatment process to meet the long-term operation requirements.

Keywords photovoltaic wastewater park WWTP membrane bioreactor (MBR) carbon nitrogen ratio (C/N) process control

光伏产业作为可再生能源的重要组成部分,其发展在促进环境保护和可持续经济增长方面发挥了显著作用。随着光伏发电技术的不断进步和市场需求的快速增长,光伏企业的数量逐年增加^[1],这导致伴生的生产废水处理问题愈发突出。光伏企业在生产过程中会产生各种废水,主要包括清洗、切割、酸蚀、镀膜等环节产生的废水,这些废水通常含有大量的酸性废液、碱性废液、高浓度含氟废液、高浓度含氮废液等无机污染物^[2]和难降解的聚乙二醇等有机污染物^[3],如果处理不当,将对环境造成严重影响。园区废水厂作为工业废水的集中处理单元,其处理效能直接影响区域水环境质量,然而随着光伏企业废水的排入,给园区废水处理厂的运行和处理能力带来了新的挑战。首先,光伏废水的成分复杂多样,含有的化学物质及其浓度往往超出废水处理厂的设计处理负荷;其次,光伏企业废水中通常含有重金属离子,如铅、铬和镉等,具有显著的毒性,会对生态系统和人类健康构成威胁;废水处理厂在面对这些特定污染物时,其常规生物处理工艺可能难以有效去除,导致处理后出水水质达不到环保标准,进而可能引发二次污染^[4-5]。此外,光伏企业废水的排入不仅影响废水处理的效率,还可能对废水厂的设备运行产生负面影响,重金属和钙离子(Ca²⁺)等污染物的沉积可能导致设备腐蚀、结垢,从而影响整体处理能力和服务寿命^[6]。现有研究多聚焦于光伏废水的单一处理技术(如化学沉淀、膜分离等),而对其排入园区废水厂后引发的系统性影响(如生物处理单元抑制、污泥特性改变、生态风险传递等)的研究尚显不足。本文旨在通过某园区废水厂光伏企业废水排放实例,研究光伏废水排入园区

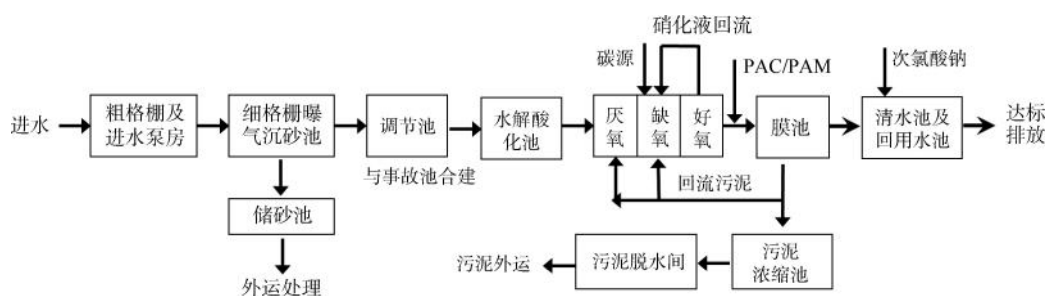
废水厂的进水水量及水质情况,分析探讨光伏企业废水排放对园区废水处理设施和设备的影响,进而为光伏废水排入园区废水厂管理和处理工艺的优化提供参考。

1 工程概况

某工业园区配套建设废水处理厂1座,用于处理园区内生产及生活污水,设计总规模为4万m³/d,一期建成规模为1万m³/d,由于建设用地限制,废水厂采用“水解酸化+厌氧-缺氧-好氧(AAO)+膜生物反应器(MBR)”为主体处理工艺,出水氨氮及总磷(TP)2项指标满足《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅳ类水质要求,其余执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)表1中一级A标准。废水厂建成后,园区引入某光伏企业,其废水排放量大,占废水厂进水总量的95%以上,随着光伏废水的排入,废水厂开始出现MBR中空纤维膜堵塞、碳源投加量大、设备锈蚀等问题,给废水厂运营带来严重影响。

1.1 废水厂工艺流程

鉴于废水厂服务区域以工业企业为主,为实现水量水质的有效调节,厂区除设置了常规预处理设施外,还配置了调节设施。尽管设计初期工业废水性质存在一定不确定性,但针对工业园区内工业废水占比高、难降解有机物浓度大的特性,且由于深度处理环节受到用地条件限制,废水厂设计采用“水解酸化+AAO+MBR”为主处理工艺,通过提升废水五日生化需氧量(BOD₅)/化学需氧量(COD)(B/C)改善可生化性,从而降低后续生化处理单元的负荷压力,最后采用膜处理工艺以满足出水达标的要求。具体设计处理工艺流程如图1所示。



注:PAC—聚合氯化铝;PAM—聚丙烯酰胺。

图 1 园区废水厂设计工艺流程

Fig. 1 Designed Process Flow of Park WWTP

1.2 废水厂设计进出水水质

园区废水厂设计进出水水质如表 1 所示,设计出水执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)表 1 中一级 A 标准,且氨氮及 TP 2 项指标满足《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅳ类水质要求。

表 1 原设计进出水水质 (单位:mg/L)

Tab. 1 Original Design of Influent and Effluent Quality (Unit: mg/L)

项目	COD	BOD ₅	氨氮	总氮 (TN)	TP	悬浮物 (SS)
进水水质	≤400	≤150	≤35.0	≤45	≤3.0	≤200
出水水质	≤50	≤10	≤1.5	≤15	≤0.3	≤10

1.3 光伏企业废水预处理及排放情况

现状该光伏企业主要为年产 1.8 GW 高效晶硅电池和 2.2 GW 高效晶硅组件项目,产生的废水按照分质处理的原则进行分质收集、分质处理,废水种类主要分为 2 种,即含氟废水、含氮废水,其中含氟废水主要包括工艺废水、酸雾洗涤塔废水,含氮废水

主要包括硅烷洗涤塔废水、清洁废气洗涤塔废水、废水处理区废气吸收废水、生活污水、初期雨水、地面冲洗水。

废水主要污染因子是 COD、SS、氨氮、TN、TP、氟化物、动植物油、盐分、Ca²⁺。其中氟化物主要来自生产工序中使用的氢氟酸;有机污染成分主要来自制绒槽使用制绒添加剂和抛光添加剂;酸碱 pH 主要来自生产中使用的氢氟酸、盐酸、硝酸以及氢氧化钠等;氯离子主要来自酸洗中使用的盐酸;Ca²⁺主要来自企业废水预处理阶段投加的除氟药剂[氯化钙 (CaCl₂)、石灰]。

企业内产生的废水已进行预处理,达到《废水综合排放标准》(GB 8978—1996)表 1 后排入园区废水厂,其预处理分为除氟系统及脱氮系统 2 条线,如图 2 所示:①除氟系统采用双钙法两级化学反应除氟工艺,通过投加大量石灰溶液及 CaCl₂ 溶液,生成氟离子 (F⁻) 沉淀物继而达到除氟目的;②脱氮系统采用厌氧氨氧化系统+厌氧-好氧 (AO) 工艺进行脱氮。

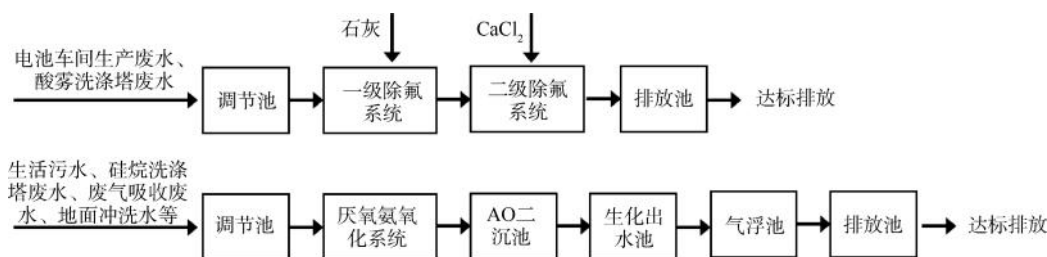


图 2 光伏企业预处理流程

Fig. 2 Pretreatment Flow of Wastewater Photovoltaic Enterprise

2 光伏废水接入后废水厂水量及进出水水质情况

2.1 废水厂进水量情况

废水厂自光伏企业排水接入后,最高水量约为

7 868 m³/d,最低进水量约为 979 m³/d,平均进水量约为 3 684 m³/d,水量波动较大。前期由于企业刚生产,废水处理站处于调试阶段,水量波动大,后续运行阶段达到稳定。根据各企业排入水量情况看,

目前废水厂进水中光伏废水占比为 95%~99%,其余企业废水量占比非常小。

2.2 废水厂进水水质情况

废水厂运行以来,由于受光伏企业预处理单元调试及废水厂影响,废水厂进出水水质可分为 2 个阶段分析。

第一阶段:光伏企业排水处于调试阶段,由图 3 可知,进水 COD 平均质量浓度为 29.77 mg/L;进水氨氮平均质量浓度为 6.46 mg/L;进水 TN 平均质量浓度为 21.88 mg/L;进水 TP 平均质量浓度为 0.92 mg/L。该阶段 COD、氨氮、TN、TP 进水浓度最高值和最低值差异悬殊,除企业预处理单元调试外,光伏企业生产量、清洗水占比和药剂间歇式投加也可能会造成该现象;而进水 SS 浓度低且稳定,表明企业预处理单元对 SS 去除效果显著或者原水本身 SS 含量极低,与光伏废水以溶解性污染物为主的特性一致。另外,这段时期检测废水厂进水氯离子质量浓度高达 5 000 mg/L, Ca^{2+} 质量浓度高达 3 000 mg/L,呈现出高盐分和高硬度的特征。

第二阶段:光伏企业排水进入稳定排放阶段,图 4

和表 2 显示,进水 COD 最高质量浓度为 63.9 mg/L,最低质量浓度为 8.65 mg/L,平均质量浓度为 21.12 mg/L,累积频率为 90%时,进水 COD 质量浓度为 34.90 mg/L;进水氨氮最高质量浓度为 22.84 mg/L,最低质量浓度为 0.18 mg/L,平均质量浓度为 6.13 mg/L,累积频率为 90%时,进水氨氮质量浓度为 9.18 mg/L;进水 TN 最高质量浓度为 47.05 mg/L,最低质量浓度为 12.19 mg/L,平均质量浓度为 24.22 mg/L,累积频率为 90%时,进水 TN 质量浓度为 31.17 mg/L;进水 TP 最高质量浓度为 0.96 mg/L,最低质量浓度为 0.03 mg/L,平均质量浓度为 0.18 mg/L,累积频率为 90%时,进水质量浓度为 0.24 mg/L;进水 SS 最高质量浓度为 4.64 mg/L,最低质量浓度为 0.01 mg/L,平均质量浓度为 1.29 mg/L,累积频率为 90%时,进水质量浓度为 2.58 mg/L。由表 3 可知,光伏企业废水稳定排放后,氯离子、盐分、 Ca^{2+} 等指标均有所下降。该阶段进水水质较第一阶段呈现出“波动收窄、高频浓度集中”等特点,COD 90%累积频率浓度较低,表明企业生产过程中有机药剂投加量稳定;TP 进水浓度下

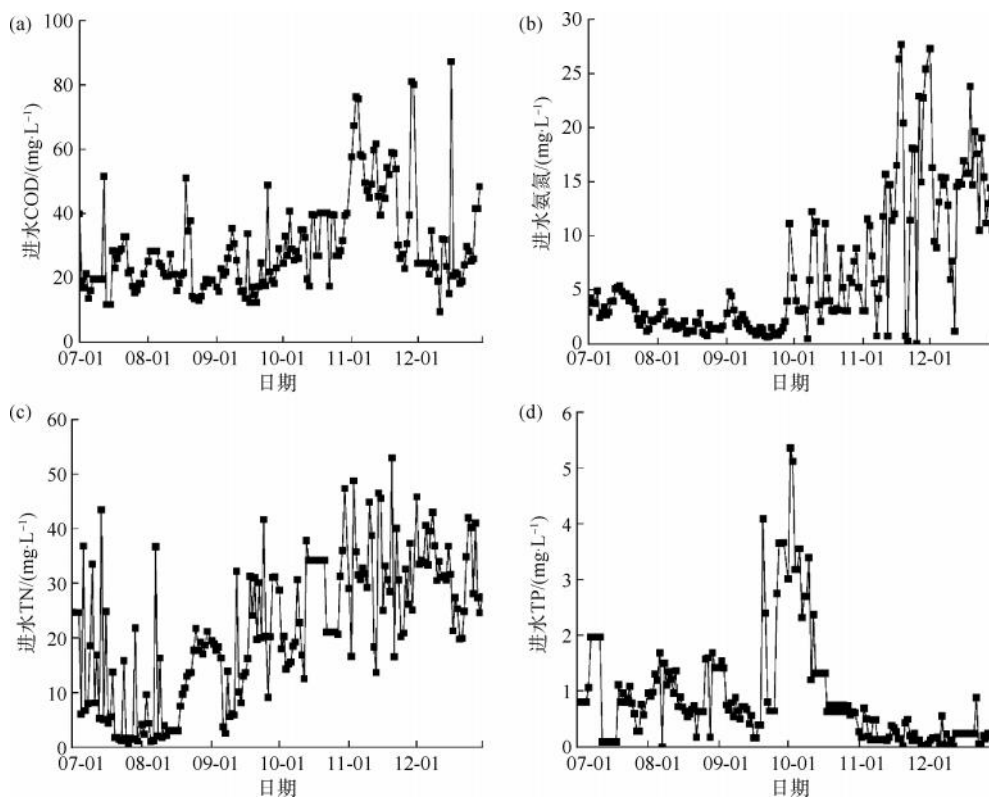


图 3 调试阶段进水水质

Fig. 3 Influent Quality in Commissioning Stage

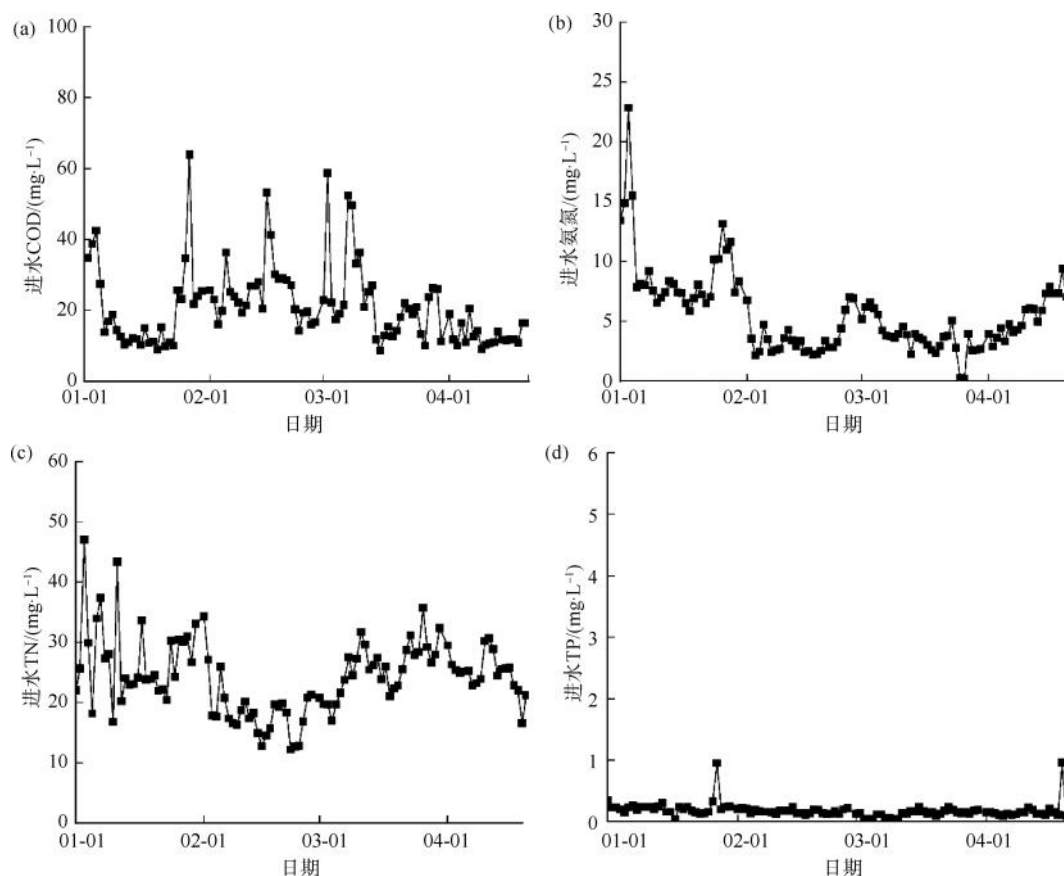


图 4 稳定运行阶段进水水质

Fig. 4 Influent Quality of Stable Operation Stage

表 2 现状进水水质累积频率浓度(正常运行阶段)
(单位:mg/L)

Tab. 2 Cumulative Frequency Concentration of Existing Influent Quality (Normal Operation Stage) (Unit: mg/L)

累积频率	项目				
	COD	氨氮	TN	TP	SS
95%	42.60	11.62	33.95	0.26	3.15
90%	34.90	9.18	31.17	0.24	2.58
85%	28.85	8.01	30.13	0.23	2.33

表 3 进水特征因子水质数据(单位:mg/L)

Tab. 3 Water Quality Data of Influent Characteristic Factors (Unit: mg/L)

项目	盐分	F ⁻	Ca ²⁺	Si ⁴⁺
水样 1	5 000	8.00	3 000.00	85
水样 2	3 110	6.87	317.6	53

降显著,表明企业生产过程含磷药剂管控或预处理除磷阶段效果稳定;值得注意的是,稳定排放后氨氮进水平均浓度下降,大多数工况下维持在中低水平,但存在偶发高负荷,TN 进水平均浓度却相对地升

高,90%累积频率下质量浓度为 31.17 mg/L,表明硝态氮累积风险增加;SS 进水浓度变化不大,验证了企业预处理单元对颗粒态污染物的高效截留能力或原水以溶解性污染物为主的特性未发生改变。

通过各阶段废水厂进水水质数据可以看出:光伏废水的进水 COD、TP、SS 浓度均较低,其中 COD 质量浓度基本低于 50 mg/L,但进水中 TN、氨氮浓度相对较高,可见其进水碳氮比严重不足,TN、氨氮为光伏废水的处理重点;同时进水中盐分、硅离子(Si⁴⁺)和 F⁻ 浓度较高,且与原有水体(以生活污水为主)Ca²⁺ 质量浓度(75 mg/L)相比,光伏废水的接入显著提高了进水硬度,对废水厂的运行影响较大。

2.3 废水厂出水水质情况

废水厂运行 1 年以来,出水 COD 的平均质量浓度为 12.68 mg/L,出水 COD<50 mg/L 的保证率为 100%;出水氨氮质量浓度均低于 1.5 mg/L,平均出水质量浓度为 0.18 mg/L,达标率为 100%;出水 TN 质量浓度最大为 15.4 mg/L,平均质量浓度为 6.63

mg/L,出水达到设计出水水质的保证率为 99.30%,仅个别数据超出设计值。出水 TP 质量浓度基本低于 0.3 mg/L,出水达到设计出水水质的保证率为 99.65%,仅个别数据超出设计值;出水 SS 质量浓度均低于 10 mg/L,平均出水质量浓度为 0.44 mg/L,达标率为 100%。由表 4 可知,废水厂出水水质基本能满足出水标准,仅在调试期,个别数据有波动超标。但从出水数据看出,TN 是废水厂需要重点关注的指标。

表 4 现状出水水质累积频率浓度(正常运行阶段)
(单位:mg/L)

Tab. 4 Existing Cumulative Frequency Concentration of Effluent Quality (Normal Operation Stage) (Unit: mg/L)

累积频率	项目				
	COD	氨氮	TN	TP	SS
95%	34.87	0.57	11.71	0.11	0.51
90%	23.36	0.43	10.38	0.07	0.47
85%	16.86	0.31	9.67	0.06	0.46

表 5 现状进水水质与设计进水水质对比(单位:mg/L)

Tab. 5 Comparison of Existing Influent Quality and Design Influent Quality (Unit: mg/L)

类型	项目								
	COD	氨氮	TN	TP	SS	盐分	F ⁻	Ca ²⁺	Si ⁴⁺
实际进水水质(95%累积频率)	42.60	11.62	33.95	0.26	3.15	3 110	6.87	317.6	53
原设计进水水质	400.00	35.00	45.00	3.00	200.00				

MBR”,但实际进水 COD 指标 95% 累积频率仅为 42.6 mg/L,因此水解酸化对于该光伏废水处理意义不大,同时,由于原设计采用的“AAO+MBR”工艺^[7],该工艺主要通过微生物进行脱碳以及脱氮除磷,微生物生长的基本营养需求碳氮磷比约为 100:5:1;而生物脱氮时,废水中必须有足够的有机物(碳源),才能保证反硝化的顺利进行,一般认为,BOD₅/TN>4,可认为废水有足够的碳源供硝化菌利用;而废水厂进水中明显碳氮磷比不足,微生物营养不足,不利于微生物生长,也不利于生物脱氮,因此对生化池的稳定运行较不利。

高晶硅组件生产中需采用硝酸盐^[8],导致废水中总氮偏高,硝态氮占比高,且废水中 COD 含量低,BOD₅ 基本无,不利于硝化反硝化的进行,需要大量投加外碳源作为微生物的营养物质,运行成本高,同时可能造成出水 TN 超标。根据目前废水厂运行下来,生化池污泥质量浓度仅为 1.5 g/L,废水碳源缺乏严重,每日投加乙酸钠碳源量约为 3 t,平均投加

3 光伏废水接入对废水厂的影响及分析

3.1 水质水量对废水厂的影响

光伏企业光伏废水自进入废水厂处理后,其平均进水量约为 3 650 m³/d,约占目前总进水量的 99%,其他企业废水占比很少,这直接导致现状废水厂进水水质已不是设计之初的综合废水,近似于单一光伏企业的工业废水,与现状废水厂的进水水质设计发生偏离。

根据水质监测情况,分析其废水厂进水水质,与原设计进水水质区别很大,如表 5 所示,实际废水厂进水有机物浓度偏低,COD 远远低于设计进水水质,进水 TN 相对较高,以硝态氮为主,进水碳氮比严重不足;另外进水 Ca²⁺、F⁻、盐分均较高,而废水厂原设计没有针对上述特征污染物的去除控制单元,这些特征均对废水厂的运行产生较大影响。

3.2 对水解酸化池、生化池的运行影响

原废水厂设计主工艺采用“水解酸化+AAO+

量约为 250 mg/L,直接碳源药剂费约为 2.5 元/t。此外由于进水 COD 低,生化池运行过程中曝气量、排泥量均大大减少,原设计曝气风机风量偏大,不适应现状废水运行。

3.3 对膜池运行的影响

光伏废水^[9-10]中含有的 Ca²⁺、Si⁴⁺,水中硬度较高,且高含量钙会导致水质无机物、有机物钙化,从而影响生化系统的运行,而水中硅也会形成含硅氧化物,联合钙化物,在 MBR 膜丝的表层结垢、堵塞,从而影响膜的寿命,现场 MBR 膜丝内外钙化情况如图 5 所示。本工程原设计膜组件为 40 320 m²,设计膜通量为 13 L/(m²·h),废水厂运行以来 1 年内,膜通量已下降了约 70%。

根据废水厂送检的膜丝检测报告,如图 6(a)所示,膜丝外表面已经被污染,基本看不到膜原来的孔结构;如图 6(b)所示,内表面也有被污染的痕迹。如表 6 所示,膜丝外表面污染物中硅含量较高,分析是光伏废水中含硅氧化物堵塞了膜表面;如表 7 所

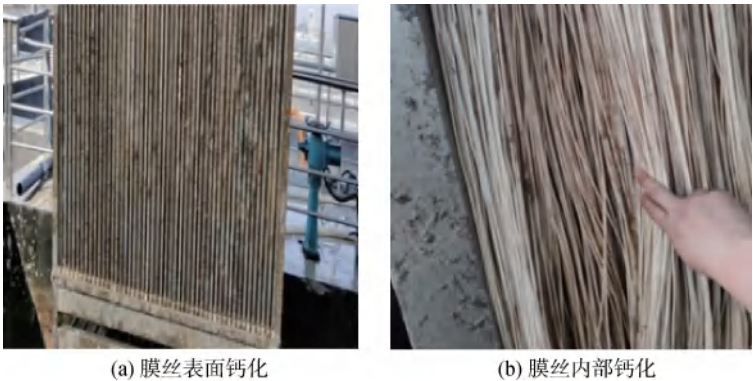


图 5 膜丝运行并反冲洗后表面钙化实物

Fig. 5 Surface Physical Calcification after Membrane Running and Backwashing

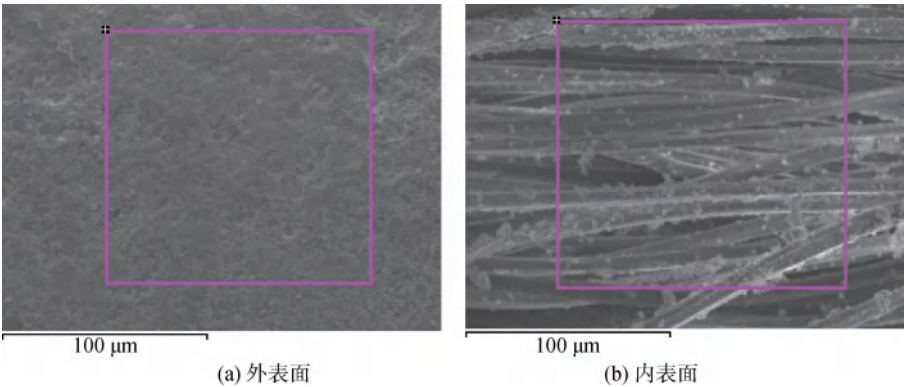


图 6 污染中空纤维膜结构电镜图

Fig. 6 Electron Microscopy of Contaminated Hollow Fiber Membrane Structure

示,膜丝内表面碳(C)污染物元素占比最高,表明内表面可能受到更多碳基污染。

表 6 外表面污染物元素分析

Tab. 6 Analysis of Pollutant Elements on Outer Surfaces

污染物元素	质量分数	原子含量
C K	8. 82%	13. 80%
O K	51. 20%	60. 10%
Al K	1. 02%	0. 71%
Si K	34. 60%	23. 14%
S K	1. 34%	0. 79%
Cl K	0. 85%	0. 45%
Ca K	2. 16%	1. 01%

注:摘自膜丝镜检报告,下同。

3. 4 高盐对废水厂设备的腐蚀影响

光伏企业在预处理中投加了大量的除氟剂,导致废水厂进水盐分高达 3 000~4 000 mg/L,长此以往,如图 7 所示,对废水厂现有碳钢、不锈钢材质的设备及管路均有腐蚀影响。且对本身就比较脆弱的

表 7 内表面污染物元素分析

Tab. 7 Analysis of Pollutant Elements on Internal Surfaces

污染物元素	质量分数	原子含量
C K	53. 53%	62. 25%
O K	34. 25%	29. 90%
F K	7. 41%	5. 45%
Si K	4. 82%	2. 40%

生物系统微生物产生一定影响,对生化系统也不利。

3. 5 废水厂短期运行改造建议

针对光伏废水对废水厂造成的影响,短期内运行提出以下改造建议。

1) 预处理——针对本工程的进水 COD、TP 和 SS 浓度均较低,TN 和氨氮浓度相对较高,且盐分、F⁻和 Ca²⁺浓度较高的特点,近期进水仍以光伏废水为主,预处理工艺保留现状预处理单元,同时设置除硬沉淀池,满足进水预处理除钙需求。另外,结合现

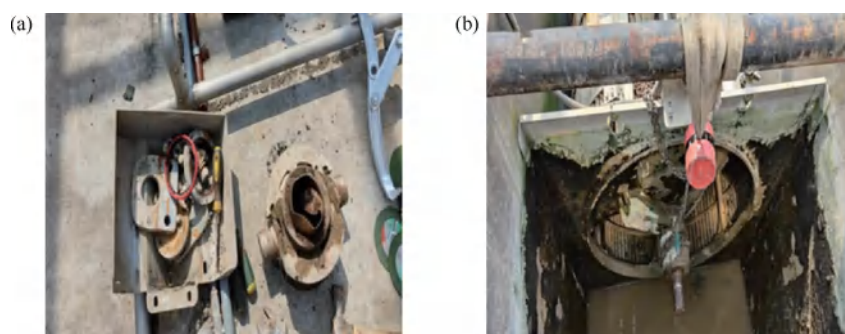


图7 现场设备锈蚀图

Fig. 7 Corrosion Diagram of Field Equipment

状进水 COD 低的水质特征,也避免硬度进入水解酸化池对填料产生堵塞,改造考虑近阶段对水解酸化池进行超越运行。

2) 二级处理及深度处理——二级处理段主要用于脱碳、脱氮、除磷,并去除 SS,由于近阶段进水 COD、TP 较低, TN 较高,因此近阶段二级处理段的重点是脱氮,而去除有机物及除磷不是难点,因此考虑在现有二级处理段进行适当改造,将原厌氧池改造为缺氧池,强化反硝化作用,同时结合现状进水硬

度高,对膜组件运行不友好的情况下,考虑膜组件近期暂停运行,利用现状好氧池的部分富余池容改造为矩形二沉池;同时由于膜组件暂停运行,为保障出水 SS 稳定达标,新增 1 套精密过滤设施使出水 SS 满足排放要求。综上,将废水厂内二级处理及深度处理阶段处理流程由“AAO+MBR”调整为“AO+二沉池+精密过滤”工艺,以适应近期光伏废水的水质需求。

废水厂阶段性调整的具体工艺流程如图 8 所示。

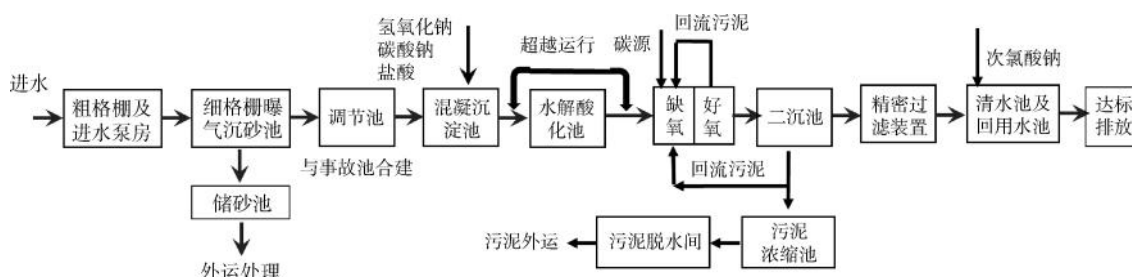


图8 阶段性调整工艺流程

Fig. 8 Process Flow of Phased Adjustment

目前废水厂改造已设置除硬沉淀池,并将水解酸化池停止运行,同时将好氧池末端停止曝气静置作为沉淀区使用,其余改造正在进行。目前测得生化池末端(改为静置沉淀池段)上清液出水水质指标如表 8 所示。可见膜池在现阶段发挥作用不大,在膜池前工艺段, COD、氨氮、TN、TP 均已达到排水标准,仅 SS 不满足排水标准,后续通过增设精密过滤可以实现达标排放。截至目前改造阶段,改造前后特征因子出水水质浓度如表 9 所示,可以看出相较于改造前出水水质浓度而言,改造工艺对 Si^{4+} 和 F^- 均有一定的去除效果[出水 F^- 浓度已达到《废水综合排放标准》(GB 8978—1996) 一级标准],对

Ca^{2+} 有显著的去除效果;而就现阶段改造而言对盐分的去除效果不佳,有赖进一步完善改造进行对比,但就现在出水水质数据可知水中盐分浓度偏高,易对设备产生腐蚀且对生化系统有一定影响;对比高频稳定进水阶段浓度而言,检测出水 Ca^{2+} 浓度和现阶段改造后出水含盐量还有所升高原因可能有:光伏废水/高盐工业废水进入比例突然增加、含钙设备腐蚀后 Ca^{2+} 进入水体和含钙/盐药剂投加等。综上需选取耐氯离子材质的设备管材以应对高盐腐蚀并考虑增设强化除盐工艺;针对现阶段出水 SiO_2 和 Ca^{2+} 浓度较高,结合后续精密过滤处理技术,需考虑增设强化除硅除钙工艺。

表 8 静置沉淀池段上清液出水水质指标(单位:mg/L)

Tab. 8 Effluent Quality Indices of Supernatant in Static Sedimentation Tank (Unit: mg/L)

指标	数值
COD	17
氨氮	0.155
TN	5.02
TP	0.28
SS	13

表 9 改造前后特征因子出水水质指标(单位:mg/L)

Tab. 9 Characteristic Factor Effluent Quality Indices before and after Reconstruction (Unit: mg/L)

项目	SiO ₂	Ca ²⁺	F ⁻	盐分
改造前	53	3 000	6.5	2 800
改造后	48	350	6.0	3 230

4 结 论

该工程实践表明,光伏废水排放量大,占园区废水厂进水总量的 95%~99%,具有盐分高、硬度高(富含 Ca²⁺、Si⁴⁺)及碳氮比低特征,会导致设备腐蚀、膜污染及 TN 去除效率波动等问题。针对此,实施阶段性工艺调整:保留预处理单元,增设除硬沉淀池并停用水解酸化池,将原“AAO+MBR”工艺调整为“AO+二沉池+精密过滤”,设备管材选用耐氯离子材质以应对高盐腐蚀。阶段性改造后检测结果表明,静置沉淀区上清液仅 SS 不满足排放标准,验证了改造后工艺对当前光伏废水水质(低 COD、TP、SS,高 TN、氨氮且低碳氮比)的适应性,有效强化了 TN 的去除并降低碳源投加的需求,针对现阶段出水水质盐分、SiO₂ 和 Ca²⁺ 浓度较高,还需考虑增设强化除盐、除硅和除钙工艺。

参考文献

[1] 袁玲雅,张滢.中国光伏产业发展及其资源环境影响[J].化工学报,2024,75(s1):14-24.
YUAN L Y, ZHANG Y. The growth of PV sector in China and its implications for the resource and environmental sustainability [J]. CIESC Journal, 2024, 75(s1): 14-24.
[2] 刘云洲,刘洁涛,宫徽.反硝化厌氧颗粒污泥技术处理光伏

废水[J].中国给水排水,2022,38(10):166-170.
LIU Y Z, LIU J T, GONG H. Treatment of photovoltaic wastewater by denitrification anaerobic granular sludge [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(10): 166-170.
[3] 陈良,张伟铭,沈玉娟,等.太阳能电池生产废水处理运行实践[J].工业水处理,2022,42(2):168-172.
CHEN L, ZHANG W M, SHEN Y J, et al. Practical operation of solar battery wastewater treatment plant [J]. Industrial Water Treatment, 2022, 42(2): 168-172.
[4] 杨伟球,史广宇.光伏企业生产废水处理工程实例[J].工业水处理,2024,44(11):172-176.
YANG W Q, SHI G Y. A project case on treatment of photovoltaic enterprise production wastewater [J]. Industrial Water Treatment, 2024, 44(11): 172-176.
[5] 徐亚慧,张燕,张勇,等.光伏行业单晶硅废水处理工艺技术研究[J].再生资源与循环经济,2020,13(6):38-40.
XU Y H, ZHANG Y, ZHANG Y, et al. Study on single crystal silicon wastewater treatment technology in photovoltaic industry [J]. Recyclable Resources and Circular Economy, 2020, 13(6): 38-40.
[6] 任梦娇.光伏企业生产废水处理工程实例[J].给水排水,2021,57(11):98-102.
REN M J. Wastewater treatment project for photovoltaic enterprise production wastewater [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 57(11): 98-102.
[7] JIANG L Y, LIU Y, GUO F J, et al. Evaluation of nutrient removal performance and resource recovery potential of anaerobic/anoxic/aerobic membrane bioreactor with limited aeration [J]. Bioresource Technology, 2021, 340: 125728. DOI: 10.1016/j.biortech.2021.125728.
[8] 卢兰兰,毕冬勤,刘壮,等.光伏太阳能电池生产过程中的污染问题[J].中国科学:化学,2013,43(6):687-703.
LU L L, BI D Q, LIU Z, et al. Pollution problems in the production process of solar cells [J]. SCIENTIA SINICA Chimica, 2013, 43(6): 687-703.
[9] GAO X L, WU Q, ZHOU B H, et al. Research status of typical wastewater treatment technology for photovoltaic cell production process [J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 499: 156523. DOI: 10.1016/j.cej.2024.156523.
[10] ZHENG Y, ZOU X Y, DONG S H, et al. Adaptation of the anammox process for high ammonium photovoltaic wastewater treatment [J]. Bioresource Technology, 2024, 410: 131298. DOI: 10.1016/j.biortech.2024.131298.