

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.16.019

金属表面处理园区污水厂尾水深度处理工程设计

周 呈¹, 周宇翔¹, 孙慧频¹, 李 祥^{2,3}, 徐 婧¹, 郭云琨¹,
陈雨曦¹

(1. 江苏省环保集团南通有限公司, 江苏 南通 226001; 2. 苏州科技大学 环境科学与工程学院, 江苏 苏州 215009; 3. 苏州科技大学 环境生物技术研究, 江苏 苏州 215009)

摘 要: 采用臭氧接触氧化+生态组合滤池+复合垂直流湿地组合工艺处理某金属表面处理园区污水处理厂尾水,考察了该工艺在夏季与冬季的处理效果。实际运行结果表明,夏季平均进水COD、NH₃-N、TN及TP分别为39.3、1.44、8.61、0.38 mg/L,平均总去除率分别为46.3%、91.7%、55.2%、71.1%;冬季平均进水COD、NH₃-N、TN及TP分别为43.5、1.80、10.14、0.34 mg/L,平均总去除率分别为29.2%、93.9%、58.6%、76.5%。除COD与总氮指标外,其余出水指标均达到地表水Ⅳ类标准。冬季COD、铜、锌、总铬、六价铬及镍的总去除率均低于夏季,且湿地植物大量死亡(花叶芦竹除外),污染物的去除主要依靠臭氧接触氧化、滤池过滤与反硝化、湿地基质填料吸附与截留作用。

关键词: 金属表面处理园区污水处理厂; 电镀废水; 臭氧氧化; 复合垂直潜流湿地

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2025)16-0120-07

Tail Water Advanced Treatment Project Design of a Metal Surface Treatment Park Wastewater Treatment Plant

ZHOU Cheng¹, ZHOU Yu-xiang¹, SUN Hui-pin¹, LI Xiang^{2,3}, XU Jing¹,
GUO Yun-kun¹, CHEN Yu-xi¹

(1. Jiangsu Environmental Protection Group Nantong Co. Ltd., Nantong 226001, China;

2. College of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and

Technology, Suzhou 215009, China; 3. Institute of Environmental Biotechnology, Suzhou

University of Science and Technology, Suzhou 215009, China)

Abstract: The combined process of ozone oxidation, ecological combination filter, integrated vertical-flow constructed wetland was adopted to treat the tail water of a metal surface treatment park wastewater treatment plant. The treatment effects of this process were investigated in summer and winter. The operation results show that the average influent concentrations of COD, NH₃-N, TN, and TP in summer were 39.3 mg/L, 1.44 mg/L, 8.61 mg/L, and 0.38 mg/L, respectively, with average total removal rates of 46.3%, 91.7%, 55.2%, and 71.1%, respectively. In winter, the average influent concentrations of COD, NH₃-N, TN, and TP were 43.5 mg/L, 1.80 mg/L, 10.14 mg/L, and 0.34 mg/L, respectively, while the average total removal rates were 29.2%, 93.9%, 58.6%, and 76.5%, respectively. In addition to COD and TN, the other indexes of the effluent quality reached the surface water level Ⅳ standard. The total removal

基金项目: 江苏省环保集团南通有限公司科研支撑项目(JSEPNT-KY-2023-002)

通信作者: 周呈 E-mail: 853407833@qq.com

rates of COD, Cu, Zn, total Cr, hexavalent chromium, and Ni in winter were lower than those in summer. And a large number of wetland plants died in winter except *Arundo donax*. The removal of pollution factors mainly depended on ozone oxidation, filter filtration and denitrification, and adsorption and interception of wetland matrix fillers.

Key words: metal surface treatment park wastewater treatment plant; electroplating wastewater; ozone oxidation; integrated vertical-flow constructed wetland

1 项目概述

江苏某金属表面处理园区污水处理厂建于2010年,设计处理能力为3 500 m³/d,2012年投入试运行,主要接纳并处理园内多家企业的电镀废水。企业电镀废水按污染特性分为含铜锌废水、含铬废水、含镍废水、含氰废水等,经分类收集后通过“一企多管”的方式接入园区污水处理厂对应的废水收集池,进行预处理。

进水及预处理工艺见表1。

表1 园区污水处理厂进水类型及预处理工艺
Tab.1 Influent type and pre-treatment process of the wastewater treatment plant in the industrial park

废水类型	预处理工艺
含锌废水	电化学氧化还原反应+离子交换
含铜废水	电化学氧化还原反应+离子交换
含铬废水	还原反应+混凝沉淀+电化学+离子交换
含镍废水	混凝沉淀+电化学氧化还原反应+离子交换
酸碱废水	
含氰废水	破氰反应
络合废水	破络反应+电化学氧化还原反应+离子交换

预处理后的综合废水通过A²/O+MBR工艺进行处理,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,排入周边水体。由于接纳水体在该工程建设前为劣V类水质,为实现尾水深度减排,同时改善接纳河流水质,按照生态环境主管部门的相关要求,园区组织建设了污水处理厂尾水深度处理工程。设计处理规模为3 500 m³/d,设计进水为符合一级A标准的污水处理厂出水,设计出水指标中COD执行《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的V类标准、TN执行5 mg/L标准,其余指标(包括重金属)执行地表水Ⅳ类标准,具体水质情况见表2。由于园区污水处理厂出水中相关重金属浓度都远低于地表水Ⅳ类标准,因此尾水深度处理工艺未单独设计重金属去除

工段。

表2 尾水处理设施的设计进、出水水质
Tab.2 Design influent and effluent quality of tail water treatment facilities mg·L⁻¹

项目	COD	BOD ₅	NH ₃ -N	TN	TP
设计进水	50	10	5	15	0.5
设计出水	40	6	1.5	5	0.3

2 工艺路线

该园区产生的废水水质复杂,经现场调研得知,企业排水中含有大量重金属、氰化物、酸、碱以及各种有机添加剂,相关企业生产过程中通常使用络合剂、稳定剂、光亮剂等作为添加剂,既有含胺和其他含氮的杂环有机物,又有含磷的有机络合物,如三异丙醇胺、氨基三甲叉膦酸、羟基乙叉二膦酸等。废水按不同水质类型分别收集后输送至园区污水处理厂对应集水池,进行“分类收集、分质处理”,由于企业来水水质变化较大,因此园区污水处理厂出水水质也存在一定波动,且可生化性较差。为提高污水处理厂尾水的可生化性、氧化降解部分COD以及去除尾水中残留的络合物,决定采用臭氧氧化进行破络处理、提高B/C值,并为后续反硝化段提供碳源。相关研究表明,臭氧氧化可将部分难降解的有机磷转化成无机磷,以及将部分有机氮氧化为无机氮^[1],同时臭氧催化氧化电镀废水还能实现较高的COD去除率^[2]。对尾水进行臭氧氧化试验,发现臭氧氧化出水稳定,产生少量絮状体。由于目前人工湿地处理效果受季节变化影响较大^[3],相关学者也开展了低温下提高人工湿地脱氮效率的研究^[4]。该工程为降低低温对人工湿地脱氮功能的影响,同时有效缓解尾水中残留的SS及臭氧工段产生的絮体对后续人工湿地造成堵塞的现象,在人工湿地前端设置组合滤池,通过接种反硝化菌,利用臭氧氧化产生的小分子有机物及必要时投加的乙酸钠作为碳源实现对总氮的去除,同时利用滤料

实现对SS的高效截留。

人工湿地是落实污染减排、生态增容的重要手段之一^[5]。人工湿地系统由人工设计建造,对污染物具有很好的选择性和针对性。湿地系统包括5个主要组成部分:植物、微生物、动物、基质与水体,在天然湿地净化功能基础上,通过种植特定植物使得污染物通过物理、化学和生物作用被净化^[6]。近些年相关单位和学者将人工湿地工艺用于相关工业废水(包括电镀废水)的尾水深度处理和科学研究^[7-8]。陈柯沁等^[8]采用4组不同的垂直潜流人工湿地研究对复合重金属废水的处理效果,结果表明湿地植物菖蒲生长良好,5种重金属(铜、锌、铅、铬、镉)在菖蒲体内积累量均较少,且主要富集在地下部分,地下部分重金属的质量浓度高于地上部分。而游少鸿等^[9]研究了李氏禾人工湿地对模拟电镀废水的处理效果,在Cr、Cu、Ni质量浓度分别为100、40、40 mg/L的情况下,李氏禾仍然能够存活,该植物对Cr、Cu、Ni表现出很强的富集能力,对Cu和Ni也有较强的转运能力。可见,不同植物的选择对相关重金属的去除能力影响较大;由于设计进水中相关重金属浓度都远低于地表水Ⅳ类标准,因此未采用李氏禾这种能够实现对重金属高富集的植物,而以菖蒲、香蒲等植物为主。

根据人工湿地填料和水的位置关系以及水流方向,分为表流人工湿地、潜流人工湿地(包含水平流与垂直流)以及复合垂直流人工湿地。传统的表面流人工湿地常因复氧能力不足和有机碳源匮乏而脱氮效果欠佳^[10],复合垂直流人工湿地具有占地面积小、有机物去除能力强的特点,其中复合垂直流湿地的下行池硝化能力强、反硝化能力一般,上行池功能则相反,但系统易堵塞^[11]。结合该项目可用面积紧凑、脱氮能力需求较高、预处理工段已设置滤池的现场情况,拟采用复合垂直流人工湿地实现对尾水的深度处理。

3 工程设计

3.1 工艺流程

工艺流程见图1。园区污水处理厂尾水通过管网接入生态调节塘进行均质均量,随后通过潜污泵送入臭氧接触氧化池进行氧化处理,提高可生化性,再自流进入生态组合滤池,截留废水中的SS和臭氧氧化产生的胶体状物质,同时根据进出水总氮

情况在滤池内适量投加乙酸钠作为碳源,利用滤池内培养的反硝化菌实现总氮的去除。滤池出水进入产水池,产水池出水一部分作为生态组合滤池的反冲洗来水,另一部分进入后续的复合垂直潜流湿地系统,利用植物、微生物及基质填料的共同作用实现深度减排。湿地系统出水一部分经集水渠自流排入周边河流,另一部分进入中水池通过水泵回流至园区污水处理厂进行中水回用。在尾水水质较好和植物生长状态良好的春夏季节,园区尾水可通过设置的超越管直接进入生态湿地进行处理,以降低运行能耗。

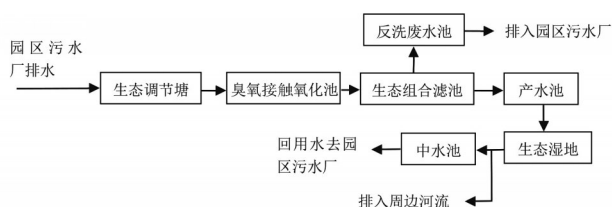


图1 尾水深度处理工艺流程

Fig.1 Flow chart of tail water advanced treatment process

3.2 工艺单元设计

3.2.1 生态调节塘

生态调节塘1座,收集园区污水处理厂尾水进行均质均量。生态调节塘开挖完成后用素土夯实,表面设置“两布一膜”(300 g/m²土工布+2 mm HDPE膜)进行防渗处理,在防渗系统上铺设200 mm厚的袋装沙土,沙袋顶部标高-1.5 m。种植部分挺水植物,种植密度为美人蕉10株/m²、再力花12株/m²、梭鱼草10株/m²,生态塘占地面积108 m²,有效容积128 m³。

主要设备:潜污泵2台(1用1备), $Q=150\text{ m}^3/\text{h}$, $H=150\text{ kPa}$, $N=15\text{ kW}$;超声波液位仪1台。

3.2.2 臭氧接触氧化池

臭氧接触氧化池1座,钢混结构,通过池底布设的臭氧曝气盘释放臭氧与来水逆流接触,氧化分解废水中COD并提高可生化性。池体内部采用3格上下折流结构防止短流,实现充分接触反应,设计尺寸9.5 m×5.0 m×7.0 m,水力停留时间2.04 h。根据进水水质、水量的变化,变频控制臭氧投加量以节约能源,臭氧投加量为10~34 mg/L。

主要设备:臭氧曝气盘12台,直径150 mm,钛合金材质;臭氧发生器2台(1用1备),单台发生量5 kg/h, $N=104\text{ kW}$;尾气破坏器2台, $N=5.2\text{ kW}$;内循

环冷却水系统 2 套(含板换、循环泵等), $Q=20\text{ m}^3/\text{h}$, $H=150\text{ kPa}$, $N=1.5\text{ kW}$;气源处理系统 1 套(含空压机、储气罐、油水分离器、冷干机等),气体流量 $5.2\text{ m}^3/\text{min}$, $N=30\text{ kW}$ 。

3.2.3 生态组合滤池(滤池+反冲洗废水池)

生态组合滤池 1 座,钢混结构,通过滤料实现对 SS 与胶体状物质的充分截留,同时在园区尾水总氮较高时投加乙酸钠实现对总氮的去除。滤池分 2 格,单格尺寸为 $4\text{ m}\times 2\text{ m}\times 4\text{ m}$,反冲洗废水池尺寸为 $4.8\text{ m}\times 4.0\text{ m}\times 4.0\text{ m}$,滤速为 9.1 m/h 。滤池的承托层采用级配砾石结构,填充高度为 400 mm ,自上而下分 4 层,每层 100 mm ,粒径分别为 $2\sim 4$ 、 $4\sim 8$ 、 $8\sim 16$ 、 $16\sim 32\text{ mm}$ 。采用石英砂滤料,填充高度为 700 mm ,粒径为 $0.5\sim 1.2\text{ mm}$ 。

主要设备:长柄滤头 600 套,闸板阀 2 套。

3.2.4 产水池

产水池 1 座,钢混结构,临时存储滤池出水,一部分自流进入后续生态湿地布水渠,另一部分作为滤池反冲洗用水,设计尺寸为 $6.6\text{ m}\times 6.4\text{ m}\times 3.8\text{ m}$,水力停留时间为 0.96 h 。

主要设备:反冲洗水泵 2 台(1 用 1 备), $Q=300\text{ m}^3/\text{h}$, $H=100\text{ kPa}$, $N=18.5\text{ kW}$;超声波液位仪 1 台。

3.2.5 复合垂直流湿地

复合垂直流湿地 1 座,钢混结构,利用植物、微生物及基质填料的作用实现对污染物的去除。

该湿地系统分为 12 组并联单元,每组单元又同时由下行池和上行池串联而成,湿地布水采用穿孔布水管及预留过水孔。穿孔布水管开孔方式为两排 45° 交错向下的长圆形孔。湿地出水进入出水渠道,采用可拆卸短管调节水平流湿地内的水位。有效处理区域前段为布水区,宽 0.6 m ;末端为集水区,宽 0.6 m 。

池底铺设 2 mm 厚 HDPE 膜,其中单元下行池设计尺寸为 $16.0\text{ m}\times 5.0\text{ m}\times 2.1\text{ m}$,单元上行池设计尺寸为 $16.0\text{ m}\times 11.0\text{ m}\times 1.7\text{ m}$,湿地有效处理总面积 $3\,072\text{ m}^2$,水力停留时间 0.86 d ,水力负荷 $1.14\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 。在湿地表层种植具有较高耐污与净化能力的植物,种植密度为鸢尾 $14\text{ 株}/\text{m}^2$ 、香蒲 $16\text{ 株}/\text{m}^2$ 、花叶芦竹 $18\text{ 株}/\text{m}^2$ 、菖蒲 $16\text{ 株}/\text{m}^2$ 、灯芯草 $14\text{ 株}/\text{m}^2$ 、水葱 $16\text{ 株}/\text{m}^2$ 。

主要配置:下行垂直流湿地滤料层采用粒径为 $10\sim 20\text{ mm}$ 砾石,厚度为 $1\,200\text{ mm}$,滤料表层布设土工布,土工布上设置种植层,厚度为 300 mm ,将粒径为 $5\sim 8\text{ mm}$ 的陶粒与石英砂混合布置;上行垂直流湿地滤料层采用粒径为 $10\sim 20\text{ mm}$ 砾石,厚度为 750 mm ,滤料层上布置 250 mm 厚的排水层,选用粒径为 $30\sim 50\text{ mm}$ 的砾石,排水层表层布设土工布,土工布上设置 300 mm 厚种植层,将粒径为 $5\sim 8\text{ mm}$ 的陶粒与石英砂混合布置。

湿地结构见图 2。

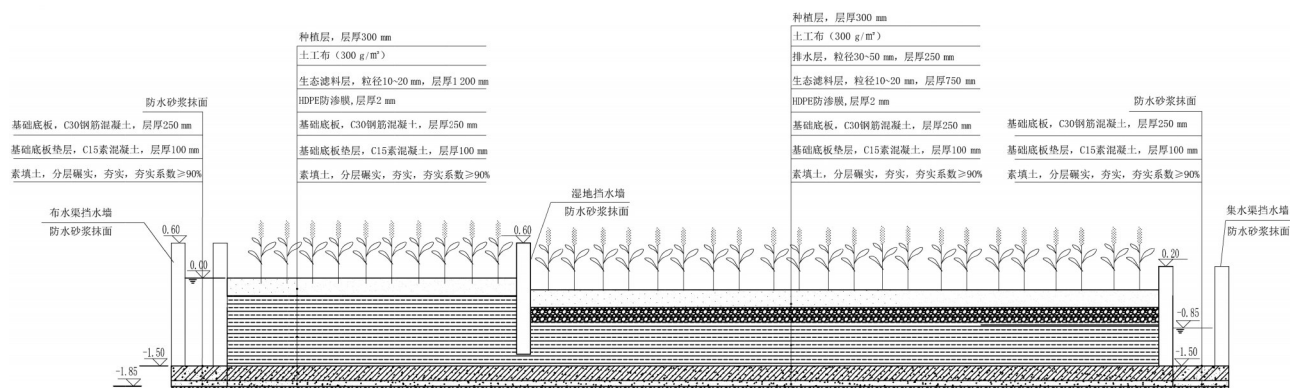


图 2 复合垂直流湿地结构示意

Fig.2 Structural representation of the integrated vertical-flow constructed wetland

3.2.6 中水池

中水池 1 座,钢混结构,将 25% 的湿地出水临时存储,随后泵送污水处理厂回用,设计尺寸 $6.6\text{ m}\times 1.5\text{ m}\times 3.8\text{ m}$,水力停留时间 0.91 h 。

主要设备:回用水泵 2 台(1 用 1 备), $Q=45\text{ m}^3/\text{h}$,

$H=150\text{ kPa}$, $N=5.5\text{ kW}$;超声波液位仪 1 台。

3.2.7 综合用房

综合用房 1 座,砖混结构,设置配电自控室、加药间及臭氧发生设备间,设计尺寸为 $18.0\text{ m}\times 10.0\text{ m}\times 4.2\text{ m}$ 。

主要设备:臭氧发生系统(5 kg/h)2套;碳源投加系统1套;电控柜1台,自控柜2台。

4 运行结果及分析

该尾水深度处理工程于2021年2月开工建设,2021年8月完工后进行调试,因园区企业生产负荷削减造成排水量较少,园区污水处理厂及后续深度处理工程处于低负荷运行状态,至2022年4月开始水量恢复至正常状态。为比较该工程夏季与冬季的运行效果,取2022年6月1日—28日与2022年12月3日—30日的常规污染物平均进、出水数据(见表3)进行分析。

表3 夏冬季平均进、出水水质

Tab.3 Average influent and effluent quality in summer and winter $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

项目		COD	$\text{NH}_3\text{-N}$	TN	TP
夏季	进水	39.3	1.44	8.61	0.38
	出水	21.1	0.12	3.86	0.11
冬季	进水	43.5	1.80	10.14	0.34
	出水	30.8	0.11	4.20	0.08

由表3可知,尾水深度处理工程夏季(6月)平均进水COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN及TP分别为39.3、1.44、8.61、0.38 mg/L ,平均总去除率分别为46.3%、91.7%、55.2%、71.1%,冬季(12月)平均进水COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN及TP分别为43.5、1.80、10.14、0.34 mg/L ,平均总去除率分别为29.2%、93.9%、58.6%、76.5%。夏季未使用臭氧接触氧化系统,冬季启用臭氧接触氧化系统,臭氧投加量为12~16 mg/L 。臭氧接触氧化广泛用于园区污水处理厂尾水深度处理^[12-13],相比类似案例的去除情况,该项目冬季投加臭氧后,COD去除率仍比夏季未投加臭氧时下降26%,但其余指标去除率未下降,冬季相关指标的去除基本依靠臭氧接触氧化、滤池过滤及反硝化、湿地填料吸附与截留作用,冬季植物的吸收与根系的吸附作用相对较弱。

为了解该尾水深度处理工程对部分重金属的去除效果,各取2022年6月、12月的一次进、出水数据(见表4)进行分析。由表4可知,尾水深度处理工程进水中相关重金属浓度较低,远低于地表Ⅳ类水质标准;冬季重金属的去除率普遍低于夏季,其中铜的总去除率由66.7%降到42.9%,锌的总去除率由27.3%降到15.4%,总铬的总去除率由55.6%降到53.8%,六价铬的总去除率由61.5%降到

41.7%,镍的总去除率由50.0%降到28.6%。相关研究表明^[14],重金属在基质中的积累量最大,其次是出水与植物,植物可通过根系吸收并积累离子态的重金属,茎以上部分随植物的收割最终从湿地去除,而该系统由于未及时开展植物收割,冬季除花叶芦竹外的湿地植物大批量枯萎死亡,已无法有效去除重金属,因此冬季去除率低于夏季。此外,湿地系统运行一段时间后,由于基质活性吸附点位逐渐饱和,加上酸化与腐化现象,可能使重金属释放回到水体,后期处理效果下降^[8];该工程后期相关重金属去除率同步下降可能同时存在此原因。因进水中相关重金属浓度较低,湿地选配以菖蒲、香蒲等重金属吸附能力一般的植物为主,按设计的收割周期,植物体内重金属处于低位值可直接送往再生资源回收公司进行处理和利用。为避免环境与生态风险,设计要求收割的植物应开展危废鉴定。该项目在研究周期内运维单位未开展植物收割,进而造成相关重金属去除受到一定影响。

表4 夏冬季进、出水重金属指标对比

Tab.4 Comparison of heavy metal in influent and effluent between summer and winter $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

项目		铜	锌	总铬	六价铬	镍
夏季	进水	0.06	0.11	0.018	0.013	0.08
	出水	0.02	0.08	0.008	0.005	0.04
冬季	进水	0.07	0.13	0.013	0.012	0.07
	出水	0.04	0.11	0.006	0.007	0.05

5 投资及直接运行成本

该工程设计处理规模为3 500 m^3/d ,直接投资约1 700万元,吨水投资约4 860元/ m^3 。

直接运行成本主要由人工费、电费、药剂费及植物维护费组成,以2022年6月及12月的运行成本分别代表夏季与冬季运行成本。该工程夏季日均水量为2 600 m^3/d ,冬季日均水量为2 800 m^3/d 。此外,夏季未开启臭氧接触氧化系统,也未投加药剂,冬季根据水质情况变频调控臭氧投加量,并常态化投加碳酸钠。

该工程在夏季与冬季的运行情况分开计算,夏季、冬季的综合直接运行成本分别为0.287、0.755元/ m^3 。

6 结论

① 金属表面处理园区污水处理厂尾水采用臭氧接触氧化+生态组合滤池+复合垂直流湿地组

合工艺进行处理,设计处理规模为3 500 m³/d。运行结果显示,夏季(6月)平均出水COD、NH₃-N、TN及TP分别为21.1、0.12、3.86、0.11 mg/L,平均总去除率分别为46.3%、91.7%、55.2%、71.1%,出水重金属铜、锌、总铬、六价铬及镍的浓度分别为0.02、0.08、0.008、0.005、0.04 mg/L,总去除率分别为66.7%、27.3%、55.6%、61.5%、50.0%,除总氮指标外,其余指标均达到地表水Ⅳ类标准。

② 冬季(12月)平均出水COD、NH₃-N、TN及TP分别为30.8、0.11、4.20、0.08 mg/L,平均总去除率分别为29.2%、93.9%、58.6%、76.5%,其中COD去除率和重金属(铜、锌、总铬、六价铬及镍)的总去除率都低于夏季相应指标的去除率,判断是除花叶芦竹外的大量湿地植物死亡及菌种活性下降所致,相关污染因子的去除主要依靠臭氧接触氧化、滤池过滤及反硝化、湿地基质填料吸附与截留作用。

③ 为保证金属表面处理园区污水处理厂尾水深度处理系统的高效稳定运行,首先需要严格控制进水水质;其次,选配具有发达的通气组织、耐水淹、缺氧能力较强的耐盐水生植物,如芦苇、盐角草、红树、大米草、蕉草等挺水植物。此外,可接种经驯化的耐盐菌并及时更换基质填料。

④ 由于湿地植物收割涉及重金属这一敏感因子,同时鉴于相关标准及规范的缺失,人工湿地基本未在重金属废水领域获得工程应用,但部分植物表现出较强的重金属去除潜力,建议制定标准与规范来明确重金属废水中相关因子进水浓度限值以及植物可资源利用的重金属含量限值,在现行情况下采用湿地处置工艺涉及植物收割与基质填料的更换,为避免生态环境风险,需进行危废鉴定。

参考文献:

- [1] 王成刚,陈铭,彭学良,等. AO-MBR-臭氧组合工艺处理电镀废水强化脱氮除磷[J]. 净水技术, 2021, 40(11): 75-78, 132.
- WANG Chengang, CHEN Ming, PENG Xueliang, et al. AO-MBR-ozone combined process of electroplating wastewater treatment for enhanced nitrogen and phosphorus removal[J]. Water Purification Technology, 2021, 40(11): 75-78, 132 (in Chinese).
- [2] 张耀辉,高柳,徐军,等. 臭氧催化氧化处理化学镀镍废水[J]. 环境工程学报, 2020, 14(2): 342-348.

ZHANG Yaohui, GAO Liu, XU Jun, et al. Treatment of electroless nickel-plating wastewater by ozone catalytic oxidation [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(2): 342-348 (in Chinese).

- [3] ZHAO Z, XU C, ZHANG X, et al. Addition of iron materials for improving the removal efficiencies of multiple contaminants from wastewater with a low C/N ratio in constructed wetlands at low temperatures [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26:11988-11997.
- [4] 何强,胡书山,向泽毅,等. 垂直流人工湿地系统净化污水厂尾水脱氮效果[J]. 中国环境科学, 2023, 43(8):3956-3965.
- HE Qiang, HU Shushan, XIANG Zeyi, et al. Study on the nitrogen removal ability of vertical flow constructed wetland treating tailwater of sewage plant [J]. China Environmental Science, 2023, 43(8): 3956-3965 (in Chinese).
- [5] 卢少勇,万正芬,康兴生,等. 《人工湿地水质净化技术指南》编制思路与体系[J]. 环境工程技术学报, 2021, 11(5):829-836.
- LU Shaoyong, WAN Zhengfen, KANG Xingsheng, et al. Idea and system of compiling *Technical Guidelines for Water Purification by Constructed Wetlands* [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2021, 11(5): 829-836 (in Chinese).
- [6] 吴晓磊. 人工湿地废水处理机理[J]. 环境科学, 1995(3): 83-86.
- WU Xiaolei. Mechanism of wastewater treatment in constructed wetlands [J]. Environmental Science, 1995(3): 83-86 (in Chinese).
- [7] 许明,谢忱,刘伟京,等. 组合湿地处理化工园区污水处理厂尾水工程示范[J]. 给水排水, 2019, 45(2): 75-81.
- XU Ming, XIE Chen, LIU Weijing, et al. Project example of chemical industrial park wastewater treatment plant tail water treatment through combined wetland [J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 45(2): 75-81 (in Chinese).
- [8] 陈柯沁,郝庆菊,戴仁钰,等. 人工湿地不同基质配置对复合重金属污水的长期处理效果[J]. 环境工程学报, 2023, 17(2): 497-506.
- CHEN Keqin, HAO Qingju, DAI Renyu, et al. Long term treatment effect of combined heavy metal wastewater by the constructed wetlands with different

- substrates [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(2): 497-506(in Chinese).
- [9] 游少鸿, 张学洪, 刘杰, 等. 李氏禾人工湿地对电镀废水的净化研究[J]. 工业水处理, 2014, 34(7): 23-26.
YOU Shaohong, ZHANG Xuehong, LIU Jie, *et al.* Study on the decontamination of electroplating wastewater by *Leersia hexandra* Swartz constructed wetland [J]. Industrial Water Treatment, 2014, 34(7): 23-26(in Chinese).
- [10] ZHENG Y, WANG Z, CAO T, *et al.* Enhancement effects and pathways of nitrogen removal by plant-based carbon source in integrated vertical flow constructed wetlands [J]. Journal of Water Process Engineering, 2022, 47: 102734.
- [11] JI Z, TANG W, PEI Y. Constructed wetland substrates: a review on development, function mechanisms, and application in contaminants removal [J]. Chemosphere, 2022, 286: 131564.
- [12] 张方方, 刘骁智, 张波. A²O+MBR+臭氧催化氧化用于化工园区污水厂升级改造[J]. 中国给水排水, 2020, 38(20): 61-64.
ZHANG Fangfang, LIU Xiaozhi, ZHANG Bo. Application of A²O/MBR/catalytic ozonation in upgrading and reconstruction of wastewater treatment plant in chemical industrial park [J]. China Water & Wastewater, 2020, 38(20): 61-64 (in Chinese).
- [13] 何锐, 张猛. 江苏省某化工园区污水处理厂技术改造工程设计[J]. 中国给水排水, 2016, 32(22): 82-84, 88.
HE Rui, ZHANG Meng. Design of technical transformation project of wastewater treatment plant in a chemical industrial park in Jiangsu Province [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(22): 82-84, 88 (in Chinese).
- [14] LIANG Y X, ZHU H, BAÑUELOS G, *et al.* Preliminary study on the dynamics of heavy metals in saline wastewater treated in constructed wetland mesocosms or microcosms filled with porous slag [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2019, 26(33): 33804-33815.
-
- 作者简介: 周呈(1988-), 男, 江苏南通人, 硕士, 高级工程师, 注册环保工程师, 注册环评工程师, 注册咨询工程师(投资), 主要从事工业废水和工业废气治理的咨询、设计和研究工作。
E-mail: 853407833@qq.com
收稿日期: 2024-04-12
修回日期: 2024-05-14

(编辑: 衣春敏)

复苏河湖生态
建设人水和谐美丽中国