

组合表面流湿地处理化工区污水厂尾水的工艺设计

陈 功

(同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司, 上海 200092)

[摘要] 采用“配水曝气区-砾石滩-芦苇区 1-水生植物区-芦苇区 2”的组合表面流湿地处理化工区污水厂尾水。工程正式运行以来,水质净化效果方面,湿地出水中化学需氧量(COD)、氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)、总氮(TN)、总磷(TP)分别为 (28.9 ± 5.82) 、 (0.195 ± 0.093) 、 (2.83 ± 1.00) 、 (0.145 ± 0.055) mg/L,去除率分别为 $(12.62\pm 12.74)\%$ 、 $(20.70\pm 21.11)\%$ 、 $(49.53\pm 13.05)\%$ 、 $(44.52\pm 14.55)\%$;COD主要在砾石滩去除, $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN、TP主要在芦苇区 2 去除;氯化物质量浓度 3 200 mg/L 时,湿地仍能正常运行。生态效应方面,人工湿地昆虫种类超过 60 种,鸟类种数接近 35 种,生物多样性显著提高。

[关键词] 组合表面流湿地;化工区;污水厂尾水;工艺设计

[中图分类号] X703 **[文献标识码]** B **[文章编号]** 1005-829X(2022)05-0169-07

Process design of combined surface flow wetland to treat tail water from wastewater treatment plant in chemical industry park

CHEN Gong

(Tongji Architectural Design <Group> Co., Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: The treatment of tail water from wastewater treatment plant in chemical industry park was carried out using combined surface flow wetland of “water distribution and aeration zone-gravel zone-No. 1 reed zone-aquatic plant zone-No. 2 reed zone”. Since formal operation, in terms of water purification effects, the average concentration of COD, $\text{NH}_3\text{-N}$, TN and TP in the effluent water were (28.9 ± 5.82) mg/L, (0.195 ± 0.093) mg/L, (2.83 ± 1.00) mg/L and (0.145 ± 0.055) mg/L respectively, the average removal rates were $(12.62\pm 12.74)\%$, $(20.70\pm 21.11)\%$, $(49.53\pm 13.05)\%$ and $(44.52\pm 14.55)\%$ respectively. COD was mainly removed in the gravel zone, while $\text{NH}_3\text{-N}$, TN, TP were mainly removed in the No. 2 reed zone. Wetland could run normally when the chloride concentration was 3 200 mg/L. In terms of biological effect, there were more than 60 species of insects, and close to 35 species of birds in the wetland. The biodiversity was significantly improved.

Key words: combined surface flow wetland; chemical industry park; tail water; process design

化工园区污水厂尾水难降解物质多、水质和水量波动大,要进一步提升水质,采用膜处理、高级氧化等深度处理工艺需要面临投资和运行成本高的问题。人工湿地因其投资低、运维成本低、生态环境效益高的特点,受到越来越多的关注和研究^[1-2]。

人工湿地主要是利用基质-微生物-植物的物理、化学和生物协同作用,通过过滤、吸附、共沉、离子交换、植物吸收和微生物分解来实现对废水的净化^[1]。我国人工湿地的型式变化大致历经表面流湿地-潜流湿地-复合人工湿地三个阶段^[2]。相比潜流湿地和复合湿地,表面流湿地的污染物负荷低,相同

处理能力下的占地面积更大,因此在利用湿地处理污水的工程中,单独利用表面流湿地的应用案例较少,更多采用潜流湿地和复合湿地^[3-4]。但也有学者认为,表面流湿地水体面积大,能更大程度地利用紫外光降解有机物,同时具有较好的复氧能力,加速难降解有机物的转化,加快微生物生长^[5]。

表面流湿地最接近自然湿地,湿地植被类型与形态多样,生物多样性高,结合大范围水面,景观效果更好。化工区经历多年发展,逐渐往生态化方向转型发展,在化工区设置表面流湿地,能大大提高园区生物丰度,改善生态环境质量,具有重要意义。

东南沿海某化学工业区对现有人工湿地进行改造,通过组合工艺对表面流湿地进行设计优化,结合科学合理的运维方式,提高湿地对化工污水厂尾水的处理效果,为化工区污水厂尾水深度处理提供湿地处理经验和借鉴。

1 项目概况

东南沿海某化学工业区以生产石油和精细化工产品为主,园区内污水处理厂接纳排水用户产生的工业废水和生活污水,将污废水处理至《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准后排放,少量尾水进入原表面流湿地进行深度处理。为了进一步提高原表面流湿地的处理能力,提升污水厂尾水水质和园区生态环境,设计采用组合表面流湿地对原表面流湿地进行改造。

组合表面流湿地处理对象由污水厂尾水和园区某河道河水组成,设计处理规模 25 000 t/d,其中污水厂尾水 10 000 t/d,河水 15 000 t/d。湿地设计进水水质见表 1。

表 1 组合表面流湿地设计进出水指标

Table 1 Design values of influent and effluent quality

项目	COD/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	氯化物/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	TDS/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	TN/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	TP/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	水量/ ($\text{t}\cdot\text{d}^{-1}$)
河水	35	330	827	2.1	0.5	15 000
污水厂尾水	40	1 000	2 500	12	0.5	10 000
混合进水	40	600	1 500	6	0.6	25 000
出水	32	—	—	4.2	0.4	25 000

2 项目难点与解决方案

2.1 项目难点

本项目中化工区污水厂尾水具有以下特点:

(1)水质波动较大。化工区各企业的每日排水量根据生产情况不同而变化,且各企业排水水质差异较大,因此化工区污水厂每日接收的进水水质水量波动范围大,导致尾水中 COD、氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)、TN、TP、氯化物等指标波动范围较大,很可能会影响湿地的稳定运行。

(2)可生化性差。根据水质监测数据,污水厂尾水中 BOD_5/COD 平均值仅 0.18 左右(一般认为 $\text{BOD}_5/\text{COD}>0.45$ 时可生化性较好),有机污染物很难通过微生物降解的方式快速高效地降解。

(3)反硝化能力差。污水厂尾水中碳源匮乏,而总氮较高,碳氮比(BOD_5/TN)低,平均值仅 1.232(理论上碳氮比 >2.86 时反硝化才能进行),且尾水溶解氧(DO)4~16 mg/L ,厌氧环境可能只有在水生植物根系处出现,微生物的反硝化作用过程将受到限制。此外,张超等^[6]研究表明, DO 超过 4 mg/L 时,利于硝化却不利于聚磷菌(PAOs)好氧吸磷,总磷去除率也会有所降低。

(4)含盐量较高。污水厂尾水中氯化物平均质量浓度约 1 500 mg/L ,短时高峰值可达约 7 200 mg/L ,抑制部分水生植物的生长,因此,选取耐盐且具有较高污染物去除能力的水生植物就至关重要。

2.2 解决方案

针对化工区污水厂尾水的上述特点,湿地设计主要从污染物去除能力和耐盐植物选择两方面着手,同时考虑节约工程投资,提高生态效益。

2.2.1 污染物去除能力

从湿地净化机理来看,人工湿地对 COD 的去除主要是通过湿地基质和植物根系上的生物膜与微生物的降解作用,以及植物的吸附、吸收等共同作用^[7]。氮的去除则主要有两种方式,一是植物的吸收作用;二是硝化-反硝化的微生物去除作用过程^[8]。总磷的去除方式主要有底泥吸附、微生物转化、植物吸收等。

污水厂尾水的特点影响了微生物对有机质、氮和磷的分解与转化,因此,项目设计中,一是设置了砾石滩,通过砾石颗粒的挂膜和吸附作用,将污染物吸附停留在砾石表面形成的生物膜中,提高了污染物停留时间,促进微生物的降解作用。二是增加湿地植物量,提高植物对污染物的吸附、吸收作用,弥补微生物降解作用的降低。很多研究表明,植物吸收是去除污水中污染物的重要机制。徐德福等^[9]研究发现美人蕉、菩提子、凤眼莲和芦苇的生物量大,对氮、磷的吸收能力较高;刘剑彤等^[8]的研究表明,当选用吸收氮、磷能力强又具有高生物质产量的植物构成土地-植物系统时,植物对氮、磷的吸收作用将成为系统去除污水中氮、磷的主要或重要机制;蒋跃平等^[10]研究了人工湿地植物对氮磷去除的贡献,研究表明在处理轻度富营养化水的人工湿地中,植物吸收对氮磷的去除起着主要作用,贡献率分别为

46.8%和51.0%。

2.2.2 耐盐植物选择

高含盐量的废水对植物具有离子毒害和渗透胁迫等作用,会影响植物根系周围微生物的活性,从而影响污染物的去除效果^[11]。王琴等^[11]研究表明,在进水氯离子质量浓度为1 000~3 000 mg/L范围内,芦苇、睡莲、狭叶香蒲、宽叶香蒲和水葱这5种人工湿地植物可以正常生长,而在植物的生长旺期和末期,氯离子质量浓度分别在4 500 mg/L和2 500 mg/L以内才能发挥较好的污染物去除效果。

针对化工区尾水高含盐量的特点,项目设计上一是考虑就近引进部分河水进行盐度稀释,二是严格筛选耐盐且具有较高污染物去除能力的湿地植物。王卫红等^[12]比较了9种沉水植物的耐盐性,从高到低依次为川蔓藻>篦齿眼子菜>狐尾藻>金鱼藻>菹草>线叶眼子菜>马来眼子菜>黑藻>苦草;王琴等^[11]研究发现芦苇、睡莲和狭叶香蒲在高盐条件下净化效果优于水葱和宽叶香蒲。结合生物量、园区的适应性以及植物形态,本项目中选择芦苇为主要的挺水植物,金鱼藻为主要的沉水植物,睡莲为主要的浮叶植物,另选择千屈菜、水葱、眼子菜、菹草、苦草等增加生物多样性。

3 工艺设计

3.1 工艺流程

污水厂尾水和河水首先汇入配水曝气区,利用曝气产生的动力进行充分混合并充氧;混合水首先进入砾石滩处理区,利用砾石和植物的吸附、拦截和生物膜去除部分污染物;随后进入湿地主处理区——芦苇区1,通过不同水深的变化结合挺水植物-浮叶植物-沉水植物的组合净化水质,处理后的水再进入水生植物区;水生植物区设计成以沉水植物为主的净化池,进行水质深度净化和透明度提升;水生植物池的出水通过中间提升泵房提升后进入芦苇区2,进一步改善出水水质后排入园区内水系。湿地从砾石滩开始分为2条流线,并联运行,通过砾石滩前端的2道溢流堰,将来水平均分配到2条流线。工艺流程见图1。

3.2 工艺单元设计

(1)配水曝气区。主要功能是对污水厂尾水和河水进行充分混合,并提高湿地进水中的溶解氧量。配水曝气区平面尺寸21.1 m×14.6 m,水深1.35 m,充氧方

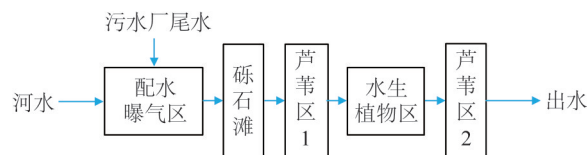


图1 组合湿地工艺流程

Fig. 1 Flow chart of combined surface flow wetland

式采用机械曝气,功率1.5 kW,间歇运行。

(2)砾石滩。砾石滩主要由碎石和芦苇组成,碎石能够增加吸附比表面积,提高对污染物的吸附拦截能力,芦苇不仅能提高处理能力,还能阻挡主流线,增加砾石滩的水力停留时间,为微生物的大量繁衍提供适宜的生存条件。

砾石滩设置2组(S1、S2),并联运行。砾石滩单元铺设碎石,厚度250 mm,粒径3~10 cm为宜,S1平面尺寸383.6 m×16,水深0.3 m,砾石滩S2平面尺寸391 m×14.9 m,水深均为0.3 m。芦苇规格3~5芽/丛,4丛/m²。

(3)芦苇区1。芦苇区1分为12个单元(S3~S14),6个单元为1组,2组并联运行。单元池间以闸门连接,通过营造不同的水深0.3~0.9 m,构造适合挺水植物(芦苇)、沉水植物(眼子菜、苦草、菹草)以及浮叶植物(睡莲)的生存条件。同时在单元池内设置若干导流坝,延长水力路径,改善流态,减少死角,提高湿地运行效率和污染物处理效果。

每个芦苇区单元分成浅水区和深水区两部分,面积比约4:1~5:1。浅水区设于前端,水深0.3 m,种植芦苇,规格3~5芽/丛,4丛/m²;深水区设于后端,水深0.9 m,种植单一沉水植物(眼子菜、苦草或菹草)和睡莲,其中眼子菜规格3~4芽/丛、30丛/m²、苦草6芽/丛、15丛/m²、菹草6株/丛、12丛/m²、睡莲2头/m²。

(4)水生植物区。水生植物区共2个单元(S15、S16),并联运行,面积分别为7 090 m²和5 770 m²,设计水深1.3 m,同时沿驳岸设置不同标高的浸没式堤坝,用于提高来自上游单元池植物颗粒的沉积。区域内种植金鱼藻,规格6株/丛、10丛/m²,初始种植密度约50%。岸边间种水葱、千屈菜、纸莎草等挺水植物。

(5)芦苇区2。芦苇区2在原湿地的景观湿地区域基础上,清理淤泥,补种芦苇和川蔓藻,使该单元在景观功能之外,承担更多的净化水质功能。芦苇区2总面积约1.09×10⁵ m²。

4 工程实施效果

4.1 污染物处理效果

分析湿地正式运行约24个月以来的污染物数据, COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN、TP进出水浓度的累积概率分布分别见图2、图3。

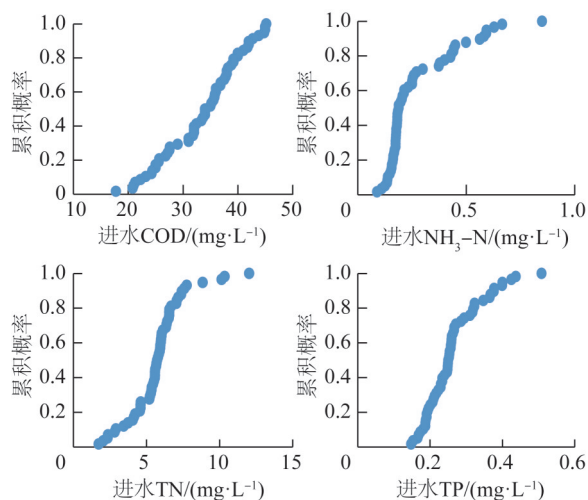


图2 组合表面流湿地进水主要污染物浓度的累积概率

Fig. 2 Cumulative probability of main pollutants in influent of combined surface flow wetland

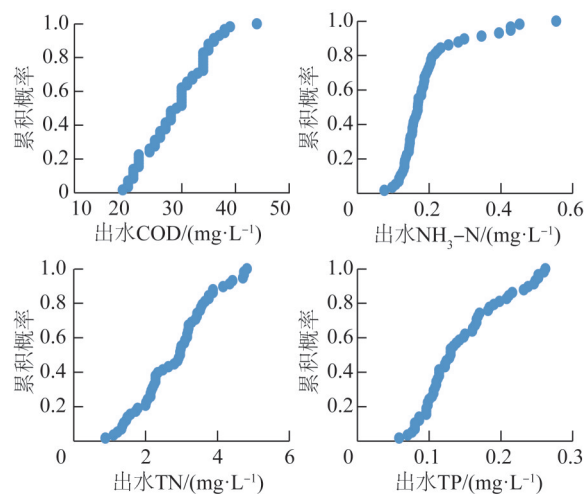


图3 组合表面流湿地出水主要污染物浓度的累积概率

Fig. 3 Cumulative probability of main pollutants in effluent of combined surface flow wetland

由图2可知,湿地进水的COD、TN、TP低于设计进水水质要求的概率,分别为81%、62%、100%,说明进水中COD和TN超出设计值的概率较大,波动较大;进水中TP能稳定在设计值以下,保证率高;进水中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 低于1.0 mg/L的概率为100%,即优于地表Ⅲ类水标准。

由图3可知,湿地出水的COD、TN、TP达到设计出水水质目标的概率分别为67%、90%、100%,说明COD的去除效果波动较大,TN、TP的去除效果较稳定。出水中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 低于0.5 mg/L的概率为99%,即优于地表Ⅱ类水标准,可见在进水中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 较低的情况下,湿地对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 仍然有稳定的去除能力。

湿地进出水水质的汇总结果分别见表2、图4。

表2 组合表面流湿地水质处理效果

Table 2 Water quality treatment effect of combined surface flow wetland

项目	COD	$\text{NH}_3\text{-N}$	TN	TP
[进水平均值±标准差(SD)]/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	33.6±7.08	0.276±0.168	5.75±1.89	0.264±0.077
(出水平均值±SD)/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	28.9±5.82	0.195±0.093	2.83±1.00	0.145±0.055
(去除率平均值±SD)/%	12.62±12.74	20.70±21.11	49.53±13.05	44.52±14.55

由表2、图4可知,组合表面流湿地进水中污染物浓度波动较大,出水中污染物平均浓度达到设计目标,波动相对进水小,但也不稳定。从去除率上看,湿地对COD和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除率不高,且波动较大,其中COD的平均去除率12.62%,最高可达51.11%, $\text{NH}_3\text{-N}$ 的平均去除率20.70%,最高可达75.38%;TN和TP的去除率较高且相对稳定,其中TN的平均去除率49.53%,最高可达73.47%,TP的平均去除率44.52%,最高可达72.32%。可见,进水负荷的变化会影响组合表面流湿地对污染物的去除稳定性,特别是影响COD和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除率。

4.2 污染物沿程处理效果

组合表面流湿地各单元的污染物去除效果见表3。

由表3可知,COD主要在砾石滩去除,可能是因为砾石滩中的砾石能够挂膜,增加对难生物降解COD的吸附拦截能力; $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN、TP主要在芦苇区2去除,芦苇区2的生物量最大,对氮、磷的吸收能力较强。

4.3 氯化物浓度的影响

氯化物浓度对湿地植物正常生长影响较大,是湿地常态监测指标之一。湿地进水中氯化物质量浓度的累积概率分布见图5。

由图5可知,湿地进水氯化物质量浓度低于设计值600 mg/L的概率为21%,波动较大,最大值约3 200

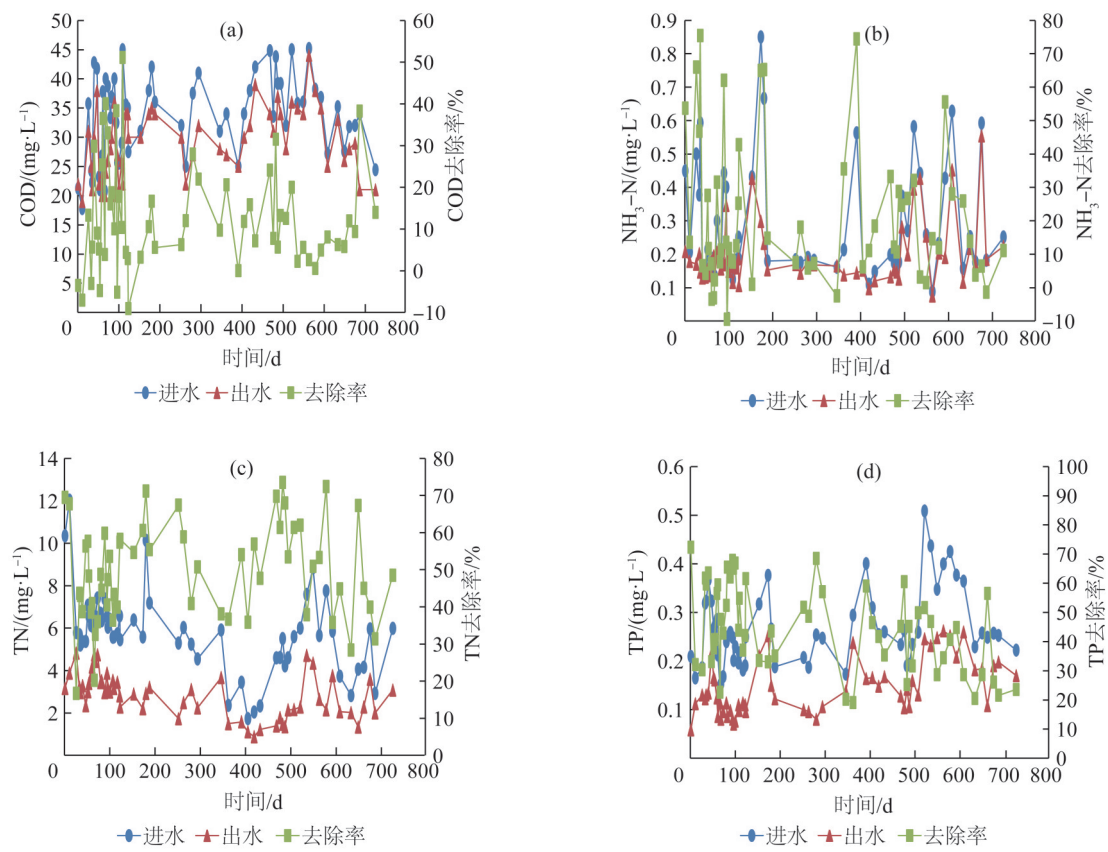


图4 组合表面流湿地对主要污染物的去除效果

Fig. 4 Major pollutants removal of combined surface flow wetland

表3 组合表面流湿地污染物沿程处理效果

Table 3 Treatment effect of pollutants in each unit of combined surface flow wetland

项目	砾石滩	芦苇区 1	水生植物区	芦苇区 2
COD	进水/(mg·L ⁻¹)	33.59	30.30	29.77
	出水/(mg·L ⁻¹)	30.30	29.77	29.65
	去除率/%	9.80	1.76	0.39
NH ₃ -N	进水/(mg·L ⁻¹)	0.276	0.296	0.290
	出水/(mg·L ⁻¹)	0.296	0.290	0.271
	去除率/%	-7.18	2.04	6.57
TN	进水/(mg·L ⁻¹)	5.71	4.71	3.93
	出水/(mg·L ⁻¹)	4.71	3.93	3.71
	去除率/%	17.60	16.52	5.53
TP	进水/(mg·L ⁻¹)	0.264	0.262	0.215
	出水/(mg·L ⁻¹)	0.262	0.215	0.204
	去除率/%	0.49	18.01	5.19

mg/L,发生在运行第592 d,各污染物去除率并没有明显下降,湿地植物也没有出现明显的枯萎或死亡,表明进水氯化物质量浓度在3 200 mg/L时,组合表面流湿地仍然能够正常运行,这与王琴等^[11]的研究结论相符。

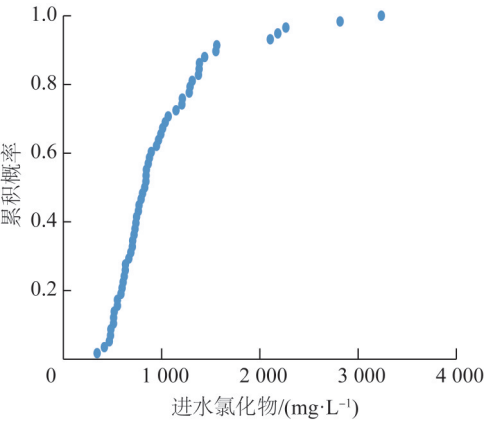


图5 组合表面流湿地进水氯化物质量浓度的累积概率

Fig. 5 Cumulative probability of chloride concentration in influent of combined surface flow wetland

4.4 生态效应

根据园区的绿化普查和生态调查评估,组合表面流湿地建成运行一年后昆虫种类超过60种,以摇蚊科昆虫为主,且有较多的划蝽科、负子蝽科水生昆虫。摇蚊幼虫是鱼类的主要饵料,能直接利用水体

中的有机物,净化水质。此外,湿地正式运行初期,人工湿地鸟类种数约20种,种类最多的科依次为鹭科(15.91%)、秧鸡科(11.36%)和扇尾莺科(6.82%);到建成运行一年后,鸟类种数已接近35种,以鹭科(11.7%)和鸬科(5.3%)为主,成为园区鸟类种数最多的区域,生物多样性提高显著。

5 运行管理和经济分析

5.1 运行管理

湿地的运行管理主要介绍水质监测和植物控制与管理。

水质监测是监控湿地运行效果,及时发现运行问题的必要措施,该项目设定了10处监测采样地点,共15项水质检测指标,其中温度、pH、浊度、电导率、溶解氧5项参数为在线监测,其他指标根据水质情况建立1周1次~2周1次的常态监测机制,由园区检测单位进行人工采样和实验室检验。为了控制氯化物浓度,保护湿地植物,实际运行中应持续监测氯化物浓度,以便及时调整进水中河水和污水厂尾水的配比。

生物控制与管理主要是针对湿地植物的维护。沉水植物包括修剪和补种,常规修剪保留植株的一半高度或收割至水面下0.5 m深度,再用捞网打捞掉落植物残体;当植物覆盖度超过80%,用水草夹“斑点式”绞住植株,然后连根拔起一部分植株。沉水植物出现大面积长势不良、濒死或死亡时,应进行补种,补种时间安排在春季(3~5月)和秋季(9~11月)。挺水植物以收割为主,该项目主要是芦苇收割。第一个生长季以平稳越冬为主,不进行植物整体割除。从第二年11月份开始,逐渐对开始落叶的挺水植物进行收割打捞,将茎秆以上部分割除,保留5~10 cm割茬及少量落叶,植物残体收割外运。

5.2 经济分析

该项目设计规模25 000 m³/d,建安费投资约2 000万元,运维项目包括湿地水质监测、设备维护保养、人工费、基础设施养护管理、植物养护、底泥清淤及处置等,年运行费用约210万元,即单位处理成本约0.23元/m³。

6 结论

(1)针对化工区污水厂尾水水质波动较大、可生化性和反硝化性差、含盐量高的特点,该项目设计上

设置砾石滩增加污染物吸附能力,引入园区河水稀释高含盐量的尾水,选择耐盐且湿地生物量大的水生植物促进污染物吸收,形成由配水曝气区、砾石滩、芦苇区1、水生植物区、芦苇区2组成的组合表面流湿地,并结合常态化的运行管理机制,保障湿地运行效果。

(2)湿地设计处理规模25 000 t/d,其中污水厂尾水10 000 t/d,河水15 000 t/d。建安费投资约2 000万元,单位处理成本约0.23元/m³。

(3)近24个月的运行结果显示,湿地出水中COD、NH₃-N、TN、TP分别为(28.9±5.82)、(0.195±0.093)、(2.83±1.00)、(0.145±0.055) mg/L,去除率分别为(12.62±12.74)%、(20.70±21.11)%、(49.53±13.05)%、(44.52±14.55)%,均达到设计目标,其中COD和NH₃-N的去除率不高,受到进水负荷变化的影响去除率波动较大,TN和TP的去除率较高且相对稳定;COD主要在砾石滩去除,NH₃-N、TN、TP主要在芦苇区2去除;氯化物质量浓度3 200 mg/L时,湿地仍能正常运行,建议在实际运行中持续监测氯化物浓度,以便及时调整进水中河水和污水厂尾水的配比,控制进水氯化物浓度,保护湿地植物。

(4)组合表面流湿地形成了水中有机质-水中昆虫(摇蚊等)-鱼类-鸟类(鹭科、秧鸡科、扇尾莺科、鸬科等)的完整食物链,丰富了化工区的生物多样性,与周边的农田、林带、滩涂等形成园区特有的生态空间格局,展现了化工区绿色与发展和谐共荣的生态文明建设创新模式。

参考文献

- [1] 籍国东,孙铁珩,李顺.人工湿地及其在工业废水处理中的应用[J].应用生态学报,2002,13(2):224-228.
JI Guodong, SUN Tieheng, LI Shun. Constructed wetland and its application for industrial wastewater treatment [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(2): 224-228.
- [2] 赖长邈,孟庆杰.人工湿地处理工业废水研究进展综述[J].环境科学导刊,2018,37(5):75-83.
LAI Changmiao, MENG Qingjie. Review on the progress of industrial wastewater treatment by constructed wetland [J]. Environmental Science Survey, 2018, 37(5): 75-83.
- [3] 廖颖,刘迎云,陈小明.水平潜流人工湿地在工业废水处理中的应用[J].市政技术,2010,28(3):130-132.
LIAO Jie, LIU Yingyun, CHEN Xiaoming. Application of horizontal subsurface flow in artificial wetland for industrial wastewater treatment [J]. Municipal Engineering Technology, 2010, 28(3): 130-132.

- [4] 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, 55(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, 55(2): 75-81.
- [5] 段云霞, 石岩, 邵晓龙, 等. 高盐低温双胁迫下人工湿地稳定运行技术研究[J]. 城市环境与城市生态, 2016, 29(3): 37-41.
DUAN Yunxia, SHI Yan, SHAO Xiaolong, et al. Study on stable operation technology of constructed wetland under high salt and low temperature stress [J]. Urban Environment and Urban Ecology, 2016, 29(3): 37-41.
- [6] 张超, 王罗春. 溶解氧对反硝化除磷的影响[J]. 水处理技术, 2009, 35(12): 27-30.
ZHANG Chao, WANG Luochun. Effect of different dissolved oxygen on denitrifying phosphorus removal in the anaerobic/aerobic/anoxic/aerobic sequencing batch reactor [J]. Technology of Water Treatment, 2009, 35(12): 27-30.
- [7] 崔丽娟, 李伟, 张曼胤, 等. 北京翠湖人工湿地污水净化的效果分析[J]. 中国农学通报, 2012, 28(5): 278-282.
CUI Lijuan, LI Wei, ZHANG Manyin, et al. Analysis on the sewage purification effects of Cuihu constructed wetland, Beijing [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(5): 278-282.
- [8] 刘剑彬, 丘昌强, 陈珠金, 等. 复合生态系统工程中高效去除磷、氮植被植物的筛选研究[J]. 水生生物学报, 1998, 22(1): 1-8.
LIU Jiantong, QIU Changqiang, CHEN Zhujin, et al. Screening study of the vegetational plant species for N and P removal from domestic wastewater in the integrated eco-engineering system [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 1998, 22(1): 1-8.
- [9] 徐德福, 徐建民, 王华胜, 等. 湿地植物对富营养化水体中氮、磷吸收能力研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(5): 597-601.
XU Defu, XU Jianmin, WANG Huasheng, et al. Absorbability of wetland plants on N and P from eutrophic water [J]. Plant Nutrition and Fertilizing Science, 2005, 11(5): 597-601.
- [10] 蒋跃平, 葛滢, 岳春雷, 等. 人工湿地植物对观赏水中氮磷去除的贡献[J]. 生态学报, 2004, 24(8): 1720-1725.
JIANG Yueping, GE Ying, YUE Chunlei, et al. Nutrient removal role of plants in constructed wetland on sightseeing water [J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(8): 1720-1725.
- [11] 王琴, 张海涛, Jean-Pierre Arcangeli, 等. 高盐工业废水人工湿地处理中植物的筛选[J]. 环境工程学报, 2012, 6(1): 226-231.
WANG Qin, ZHANG Haitao, ARCANGELI J P, et al. Purification efficiency of different aquatic macrophytes wetland in high-salinity industrial wastewater [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2012, 6(1): 226-231.
- [12] 王卫红, 季民. 9种沉水植物的耐盐性比较[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(4): 1259-1263.
WANG Weihong, JI Min. Comparison on salt tolerance of nine submerged macrophytes [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2007, 26(4): 1259-1263.
- 【作者简介】 陈功(1988—), 硕士, 工程师。电话: 18801791345, E-mail: 953423368@qq.com。
- 【收稿日期】 2022-02-23(修改稿)

(上接第162页)

- [13] 周国娟, 秦芳玲, 屈撑囤, 等. 油田压裂废水的Fenton氧化-絮凝回注处理研究[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2009, 24(5): 67-70.
ZHOU Guojuan, QIN Fangling, QU Chengtun, et al. Reinjection treatment of oilfield fracturing wastewater by Fenton oxidation-Flocculation [J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2009, 24(5): 67-70.
- [14] 杜国勇. 次氯酸钠氧化去除气田水中COD研究[J]. 石油与天然气化工, 2003, 32(3): 185-186.
DU Guoyong. Removal of cod in gasfield water by sodium hypochlorite oxidation [J]. Chemical Engineering of Oil and Gas, 2003, 32(3): 185-186.
- [15] 刘嘉. 不同排采时期煤层气采出水处理方法研究[J]. 应用化工, 2019, 48(7): 1535-1539.
LIU Jia. Study on treatment method of CBM produced water in different drainage periods [J]. Applied Chemical Industry, 2019, 48(7): 1535-1539.
- [16] 刘波潮, 高俊斌, 曹宝升, 等. 超声辅助芬顿氧化降解油田压裂返排液[J]. 油田化学, 2020, 37(2): 358-362.
LIU Bochao, GAO Junbin, CAO Baosheng, et al. Degradation of the fracturing flowback fluid in the oil field using ultrasound-assisted Fenton oxidation [J]. Oilfield Chemistry, 2020, 37(2): 358-362.
- [17] 赵瑞玉, 洪美媛, 孙重祥, 等. 压裂返排液电催化氧化降解交联降黏分析[J]. 油田化学, 2021, 38(1): 168-172.
ZHAO Ruiyu, HONG Meiyuan, SUN Chongxiang, et al. Electrocatalytic oxidation decrosslinking and viscosity reduction of fracturing flowback fluid [J]. Oilfield Chemistry, 2021, 38(1): 168-172.
- [18] 付千也, 朱景义. 油田采出水处理技术全面升级[J]. 油气与新能源, 2021, 33(4): 74.
FU Qianye, ZHU Jingyi. Comprehensive upgrading of oilfield produced water treatment technology [J]. Petroleum and New Energy, 2021, 33(4): 74.
- 【作者简介】 彭杰(1987—), 副研究员, 硕士研究生。电话: 13837180062, E-mail: pengjie2004@163.com。
- 【收稿日期】 2022-03-21(修改稿)