



文章栏目：工程创新与行业动态

DOI 10.12030/j.cjee.202305110

中图分类号 X703

文献标识码 A

齐笑言, 李响, 佟勃霖, 等. 多级 A/O-电解除磷-生态净化组合工艺在变电站生活污水处理中的工程应用[J]. 环境工程学报, 2023, 17(9): 3100-3107. [QI Xiaoyan, LI Xiang, TONG Bolin, et al. Engineering application of multi-stage A/O-electric dephosph-oration-ecological purification combined process treatment domestic wastewater in transformer substation[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(9): 3100-3107.]

多级 A/O-电解除磷-生态净化组合工艺在变电站生活污水处理中的工程应用

齐笑言[✉], 李响, 佟勃霖, 吴松羽, 李成俊

国家电网辽宁省电力有限公司电力科学研究院, 沈阳 110006

摘要 辽宁省某变电站生活污水处理工程为研究对象, 采用多级 A/O-电解除磷-生态净化池组合工艺用于变电站实际生活废水处理; 同时分析该组合系统在污染物去除、运行维护等方面的特点。实际运行情况表明: 该工艺对 COD、SS、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 的平均去除率均达到了 90% 以上的较好效果, 各项出水指标均满足辽宁省地方排放标准 (DB 21/1627-2008《污水综合排放标准》) 中的排放要求; 电解除磷最优技术参数为电压 24 V、极板间距 4 cm、电解时间 12 h。此外, 该组合工艺运行成本低, 吨水成本仅为 0.62 元, 且自动化程度高, 安装方式灵活, 同样适用于北方寒冷地区。本研究结果可为变电站生活污水处理工程提供设计经验与工程案例参考。

关键词 变电站生活污水; 生化处理; 生态处理; 电解除磷

目前我国大部分变电站通常建设在远离城市的市政设施较差的城市郊区或农村地区, 导致生活污水无法接入城市污水管网统一收集处理^[1], 多数变电站污水处理设施陈旧, 弃用现象严重, 造成污水随意排放, 污染环境^[2-3]。随着我国变电站智能化建设工作的深入推进, 站内工作人员数量锐减, 导致全天用水量较少、不稳定, 且污染物浓度变化较大, 传统污水处理工艺难以满足新形势下污水处理达标排放和节约能源的需求^[4-5], 基于此, 急需研发出一种适用于小水量、分散式生活污水高效处理的新型工艺。

结合文献查阅与实际调研结果, 目前我国已建变电站污水处理工艺主要有 3 种形式: 1) 生物处理, 代表工艺为化粪池、MBR 等, 优点为经济效益高、易于安装、操作简单等; 2) 生态处理, 代表工艺为人工湿地、土地渗滤等, 优点为运行成本低、景观效应强、资源化利用程度高等; 3) 生物+生态组合处理, 代表工艺为生物接触氧化+人工湿地、厌氧+稳定塘等, 优点为出水稳定性强、去除效率高^[6-7]。然而, 随着美丽乡村工程的深入推进以及污水排放标准的日渐严格, 单一使用生物或生态处理的弊端凸显出来, 受温度影响大、处理效率降低、膜污染、滤料饱和等, 因此, 组合处理工艺受到了越来越多研究学者们的关注。国外对于小水量生活污水处理技术的研究, 同样以组合工艺为主, SAEED 等^[8]将生物反应器化粪池与浮动人工湿地相结合, 应用于孟加拉国当地农村生活污水处理工程中; BILGIN 等^[9]将活性污泥法和垂直潜流人工湿地处理工艺相结合, 用以处理土耳其某村生活污水。经前期对水质检测后的结果显示, 污染物 TP 的浓度较高, 故要选择合适的 TP 强化去除技术, 电解除磷技术因其处理效率高, 无需外加药剂, 无需考虑温度的影响, 几乎不产生有害副产物, 适用于分散式生活污水中 TP 的去除。

因此, 为了满足变电站生活污水排放管理要求, 借鉴农村分散式生活污水处理的经验^[10-11], 创新设计出了一种效果明显、操作简单、管理方便、造价和能耗低的污水组合处理工艺。该新型组合工艺具有出水稳定性强、处理效率高、无人值守、运行成本低、安装方式灵活等特点, 不仅为北方低温地区小水量、分散式变

收稿日期: 2023-05-28; 录用日期: 2023-07-31

基金项目: 国网辽宁省电力有限公司科技项目 (2022YF-77)

第一作者: 齐笑言 (1986—), 男, 硕士, 高级工程师, qxymbdky@163.com; ✉通信作者

电站生活污水的高效处理及回用提供了理论指导和技术支撑,而且对践行乡村振兴战略、实现偏远地区水环境的全面治理具有重大的现实意义。

1 工程及工艺概况

1.1 工程案例概述

辽宁省某 220 kV 有人值守变电站位于城市郊区,周边有居住的村民和农田,附近无污水管网系统和自然沟渠,站内常住值守人员 3~7 人,生活污水产生量约为 300~500 L·d⁻¹。本工程采用一体化多级 A/O 生化+沉淀组合池(生化处理池)为主的处理工艺,在生化处理部分将传统单级 A/O 改进为多级 A/O 工艺,厌氧和好氧生化部分增加悬浮填料;为减少化学药剂添加,解决污水中 TP 浓度较高的问题,引入电解除磷系统和生态净化池。生化处理与生态处理有机结合,不仅可以保证出水水质稳定达标,还可以实现处理后污水资源化利用,同时通过小型生态净化池上层种植水生景观植物发挥其景观效应;为保证北方地区冬季低温情况下的正常运行,该一体化装置可采用地理或半地理的安装方式。

1.2 工程设计与实验方法

(1) 设计规模及进、出水水质

工程设计处理规模为 500 L·d⁻¹。由于每天在站人员不稳定,因此站内生活污水具有产生量不稳定、不连续,且水量较少、水质变化较大等特点,站内污水主要由厕所废水、厨房废水、淋浴废水、洗涤废水等构成,主要污染物为 COD、SS、NH₄⁺-N、TP 等,其中以冲厕用水居多,导致 NH₄⁺-N 和 TP 含量较高,可生化性好,基本不含难降解有机物和重金属^[12-13];根据要求,出水水质参照执行辽宁省地方排放标准(DB 21/1627-2008《污水综合排放标准》)中表 1 的限值标准,进、出水主要指标限值如表 1 所示。

表 1 设计进、出水水质

Table 1 Design water quality of influent and effluent

指标	COD/ (mg·L ⁻¹)	NH ₄ ⁺ -N/ (mg·L ⁻¹)	SS/ (mg·L ⁻¹)	TP/ (mg·L ⁻¹)
进水	≤400	≤75	≤300	≤6
出水	≤50	≤8(10)	≤20	≤0.5

注:括号外数值为水温>12℃时的控制指标,括号内数值为水温≤12℃时的控制指标。

(2) 污染物的检测分析方法

各指标检测方法均采用现行国标方法。COD 采用重铬酸钾法;NH₄⁺-N 采用纳氏试剂分光光度法;SS 采用重量法;TP 采用过硫酸钾消解钼酸铵分光光度法;pH 采用电极法。

1.3 污水处理工艺

污水经排水管道汇集到收集井中,收集井中的上清液进入调节池,调节池内的污水通过提升泵进入生化处理组合池,为控制水力停留时间,多余的进水通过回流管回流至调节池;污水依次流经生化处理组合池中所有缺氧区和好氧区,通过在缺氧区和好氧区中增加悬浮填料以强化污水中 NH₄⁺-N 的去除,最终进入沉淀区,沉淀区底部的污泥和硝化液通过混合液回流管至缺氧 1 区实现反硝化脱氮,上清液自然溢流进入中间水池+生态净化一体池;来自生化系统的出水经设置有电解除磷装置的中间水池后,进入由砾石层、砂石层、陶粒层和水生植物层组成的生态净化池,通过吸附、过滤、沉淀、微生物转化等作用,进一步强化了污染物的去除效果,保证出水符合标准要求,出水可以用于周边绿地灌溉和清洗厂区路面等。具体工艺流程如图 1 所示。

1.4 主要构筑物和设备

1) 配电控制箱:1 个,箱体材质为 SMC 材料,安装方式为地上式,运行电压 AC220 V,尺寸 L×W×H 为 0.45 m×0.3 m×0.45 m。控制箱内的电子控制系统实现对调节池底的提升泵和电解除磷系统的启停,其中开关 1 对应提升泵、开关 2 对

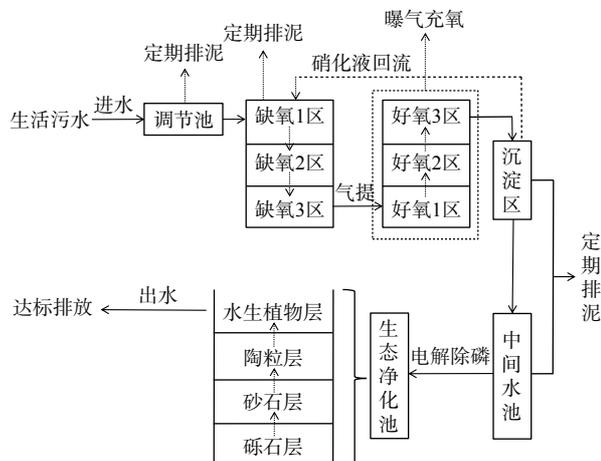


图 1 工艺流程

Fig. 1 Flow chart of process

应曝气泵、开关3对应电解除磷装置,设备正常运行时,所有开关均需保持开启状态;曝气泵JDK-60P安装于控制箱内,运行功率45 W,空气量 $60\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

2) 调节池:1座,池体材质为PVC,尺寸为高1 m、半径0.4 m,有效容积 0.45 m^3 。调节池底安装有提升泵以实现进水操作,提升泵 $Q=1\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$, $N=40\text{ W}$, $H=2\text{ m}$,通过球阀和流量计控制水力停留时间,调节进水量;提升泵功率固定,为防止进水量大导致进水管中压力过大,通过设置回流管道控制多余的进水回流至调节池,且在回流管道处安装有球阀调节回流量;为防止污泥过多造成的提升泵堵塞现象发生,污水需经过初筛过滤后方可进入调节池。

3) 生化处理组合池:1座,池体材质为HDPE,尺寸为高1.2 m、半径0.6 m,有效容积 1.1 m^3 。为强化污水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效果及充分满足污染物浓度的变化,将传统单级A/O工艺改进为多级A/O工艺,并在缺氧区和好氧区增加悬浮填料,组合池内部设有通过隔板划分为缺氧1、2、3区,好氧1、2、3区及沉淀区,主要目的是利用不同段内填料形成各自优势菌种生物膜,并通过延长污染物在各级中的停留时间,实现各污染物的高效降解与去除;每个缺氧区中均添加若干个直径约50~80 mm的多面空心球填料,体积占比50%,每个好氧区中均设有若干个球形填料组件,每个组件由一个直径约50~80 mm球和5~6个内置海绵填料构成,体积占比50%;沉淀区底部污泥和硝化液通过气提式回流装置至缺氧1区,实现反硝化脱氮,且设置有1~10不同档位的独立阀门控制回流量,整体生化停留时间为24 h;为应对进水中污染物的浓度变化,好氧1、2、3区池均设有1~10不同档位的独立阀门控制曝气量,曝气量保持 $30\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$;为防止污泥堵塞,沉淀区设置有气提式反冲洗管道,开启周期约每2个月1次,每次10~15 min,可根据实际污泥产生量适当调整。

4) 中间水池及生态净化一体池:1座,材质为不锈钢防腐材料,尺寸 $L\times W\times H$ 为 $1.2\text{ m}\times 0.5\text{ m}\times 0.8\text{ m}$,有效容积为 0.4 m^3 。生化处理组合池处理后的水通过自然溢流的方式进入中间水池及生态净化系统一体池,依次通过中间水池和生态净化池。中间水池安装有电解除磷装置强化污水中TP的去除,通过控制箱内开关3控制装置的启停,基于PC001型电解除磷控制器组成的电解除磷系统EP-Fe1,铁板间距4 cm,极板厚度5 mm,电解电压24 V,有效电解区域尺寸 $500\text{ mm}\times 200\text{ mm}$;生态净化池采用下进水上部溢流水的进出水方式,中间水池的出水依次流经各级过滤层,由下至上分别为砾石层、砂石层、陶粒层和水生植物层,砾石层、砂石层和陶粒层各占15 cm,水生植物采用当地的水生植物和花卉,根据实际情况需定期更换,生态处理过程通过吸附、过滤、沉淀、微生物转化等作用,进一步强化了污染物的去除效果,保证出水符合标准要求;出水可根据实际需要进行回用,或厂区内绿地灌溉或者路面清洗等。

2 组合工艺下电解除磷效果影响因素探究

变电站生活污水中TP浓度较高,单一A/O工艺对TP的去除效果无法达到标准要求,因此寻找一种处理效率高、易于维护管理、出水稳定、适合于北方地区分散式生活污水处理的除磷工艺是本工程的研究重点之一。目前TP的去除工艺主要包括生物、化学、电解除磷,但生物除磷技术需要通过大量排泥实现除磷,化学除磷技术需要人工外加药剂,同时增加了人工成本和药剂成本,因此,结合本工程污泥产生量较少、污水停留时间较长、自动化要求程度高的实际情况,选择电解除磷工艺用于强化污水中TP的去除。双铁电极具有成本低廉、处理效果显著等特点,在实际工程中应用较为广泛^[14],基本原理为,铁电极在电解过程中,污水中的磷酸根和阳极释放出的 Fe^{2+} 以及溶液中的 Fe^{3+} 反应生成铁盐沉淀,此外, Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 会与 OH^- 反应生成难溶的铁羟基化合物,发生胶体絮凝沉淀,最终达到除磷的作用^[15]。

2.1 电解电压对除磷效果的影响

电压是影响电解除磷反应速率的主要影响因素,电压增大,反应速率随之加快,产生的 Fe^{2+} 越多,电絮凝效果越好,但电压过大会导致能耗增加,出水含铁过多造成出水色度增加,因此,选择合适的电压控制铁离子浓度至关重要。在进水pH值7.2~7.6、极板间距4 cm、TP平均浓度约 $1.40\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 条件下,分别考察电解电压为12、18、24、30 V时的除磷效果,结果如图2所示。

TP的去除率随电解电压的增大而逐步增加,电压为12 V时,去除率仅为43.75%,电压提升到24 V时,去除率升高到89.13%,此时出水TP浓度为 $0.15\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,当电压增大到30 V时,去除率虽提升到90.85%,但能耗增大,TP去除率已经接近饱和状态。由此可见,电压增大,反应速率随之加快, Fe^{2+} 的释放

速率也相应提高,随着 TP 去除率接近饱和,当电压增大到某一固定值后,去除效果增长缓慢。因此,在保证 TP 高去除率的前提下,考虑经济节能成本,电压值 24 V 为该组合工艺下的最优电解电压。

2.2 极板间距对除磷效果的影响

极板间距的大小对整个电解过程中电子和离子的迁移速率产生影响,间距过大会导致迁移难度增大,增加电解过程的阻力,间距过小会导致电流过载引起短路^[16]。在进水 pH 值 7.2~7.6、电解电压 24 V、TP 平均浓度约 $1.41\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 条件下,分别考察极板间距 2、4、6、8 cm 时的除磷效果,结果如图 3 所示。

随着极板间距的增大,TP 去除率呈现先增长后降低的趋势,在极板间距为 4 cm 时去除率最高,达到 89.63%,此时出水 TP 浓度为 $0.14\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。极板间距越小,极板间的电流密度越大,释放出的 Fe^{3+} 也越多,但过小的极板间距会造成难溶性物质的堆积,容易产生电极钝化和浓差极化等问题^[17],过大的极板间距会造成电阻增大,释放出的 Fe^{3+} 减少,与磷酸根相遇发生反应的概率也随之减小,导致电解时间增加,能耗增加,效率降低。综合以上因素考虑,选择 4 cm 为该组合工艺下的最优极板间距。

2.3 电解时间对除磷效果的影响

电解时间的长短直接影响 Fe^{2+} 的析出量,以往研究表明,电解时间越长, Fe^{2+} 的析出量越多,除磷效率越高,但时间过长会造成能耗增加, Fe^{2+} 过量导致水体颜色加深。在进水 pH 值 7.2~7.6、电解电压 24 V、极板间距 4 cm、TP 平均浓度约 $1.42\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 条件下,分别考察电解时间 4、8、12、16 h 时的除磷效果,结果如图 4 所示。

由图 4 可以看出,TP 的去除率随电解时间的延长而增大,4~12 h 期间去除率增长较快,电解时间为 12 h 时,去除率达到 86.52%,此时出水 TP 浓度为 $0.19\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,当电解时间延长至 16 h 时,去除率虽有提升,但出水中 TP 含量已经相对较低,使得进一步延长电解时间对污水中 TP 的去除影响贡献不大,且水体颜色已经出现加深的现象。因此,在保证 TP 高去除率的前提下,考虑经济节能成本,12 h 为该组合工艺下的最优电解时间。

3 实际工程运行情况

3.1 总体运行效果

该多级 A/O-电解除磷-生态净化组合工艺与传统污水处理工艺相比具有明显优势。在传统 A/O 处理工艺的基础上加以改良,设置为 3 级缺氧/好氧系统,使得微生物更加充分的利用水中有有机质,针对高 NH_4^+-N 生活污水具有良好的处理效果;引入电解除磷工艺消除了生物除磷工艺处理效率低、化学除磷工艺需要外加药

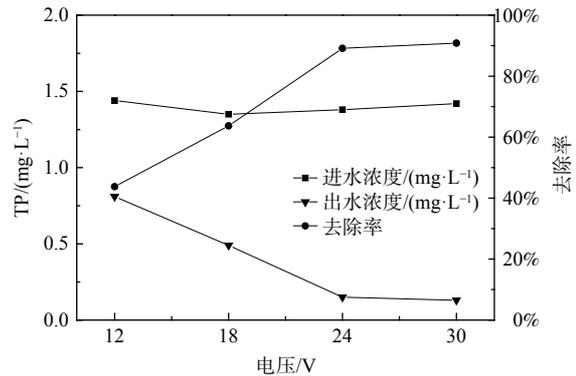


图 2 电压对 TP 去除效果的影响

Fig. 2 Effect of voltage on TP removal

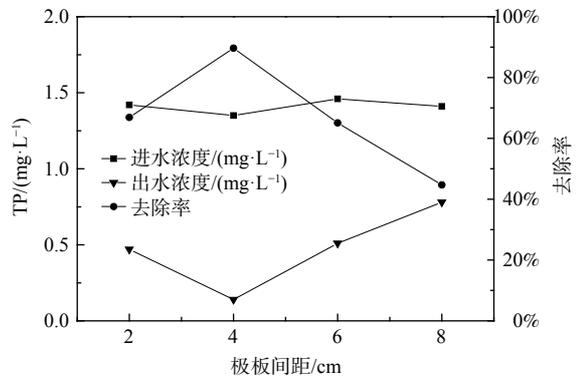


图 3 极板间距对 TP 去除效果的影响

Fig. 3 Effect of plate spacing on TP removal

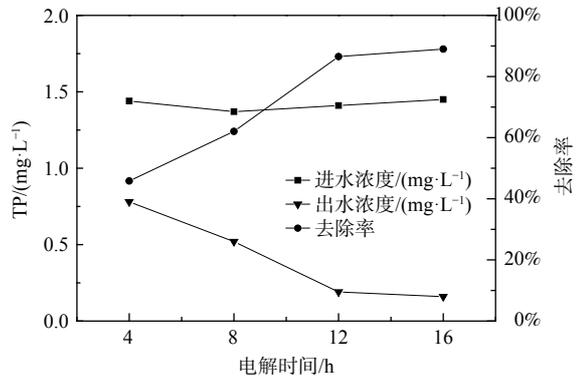


图 4 电解时间对 TP 去除效果的影响

Fig. 4 Effect of electrolysis time on TP removal

剂的弊端,运行过程中无需考虑温度的影响更加满足寒冷地区实际运行的条件,且通过第2节对电解除磷工艺优化后得出,电解电压24 V、极板间距4 cm、电解时间12 h为该组合工艺的最优参数组合;系统末端的生态处理不仅对出水水质提供进一步保障,而且生长期的水生植物可以美化变电站环境,发挥景观效应。本节通过该组合工艺在实际工程应用中的运行效果、经济分析、北方地区安装使用方法等方面进行介绍与分析。

3.2 实际运行数据

变电站生活污水每日排放时间相对固定,早8点到下午5点,夜间几乎不产生污水,所收集实际污水产生量不稳定、不连续、水质变化大。每天上午及下午各取样监测一次进水浓度,主要污染物检测结果为COD 160~220 mg·L⁻¹、SS 220~280 mg·L⁻¹、NH₄⁺-N 45~74 mg·L⁻¹、TP 4.5~6.0 mg·L⁻¹等,废水可生化性较好,但是NH₄⁺-N和TP含量较高。

该分散式生活污水处理系统具有启动快、适应性强等特点,安装、试水完成后,将取自城市污水处理厂的剩余污泥加入生化系统,通过一系列进水调试操作,约7 d实现稳定运行。设备投入正常运转后,于10—11月(东北地区10月平均温度<12℃)对各项指标进行采样监测,进、出水pH均稳定在7.2~7.6, COD、SS、NH₄⁺-N、TP的去除效果如下图5~图8所示,其中图5(a)表示生化处理组合池单元出水沉淀后各指标运行效果,图5(b)表示生态净化池出水各指标运行效果。

通过图5~图8可以看出,在气温较低的东北地区(平均温度<12℃),该组合工艺对COD、SS、NH₄⁺-N、TP均有较好的处理效果,系统进水水质虽存在波动,但出水水质保持稳定。生化处理过程中,污染物COD、SS和NH₄⁺-N的去除效果十分显著,平均去除率均达到90%以上,其中NH₄⁺-N的去除率达到

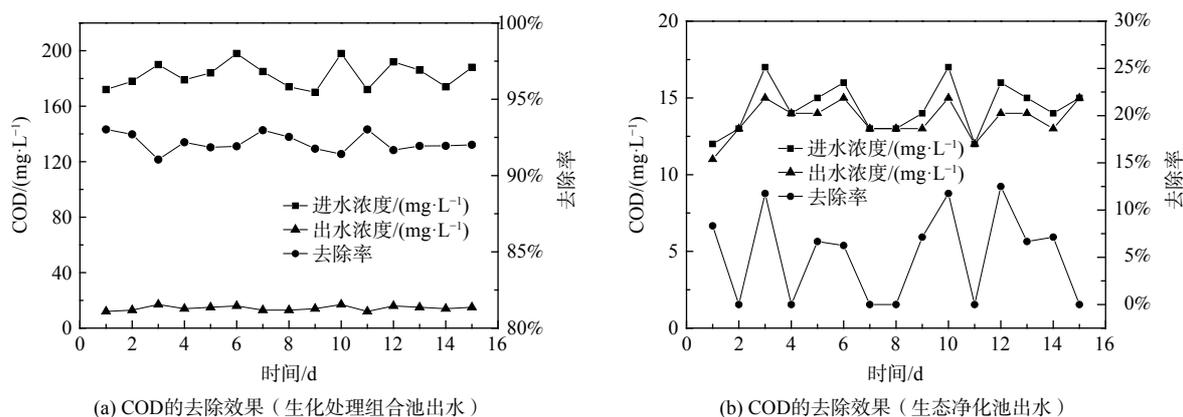


图5 COD的去除效果

Fig. 5 Removal efficiency of COD

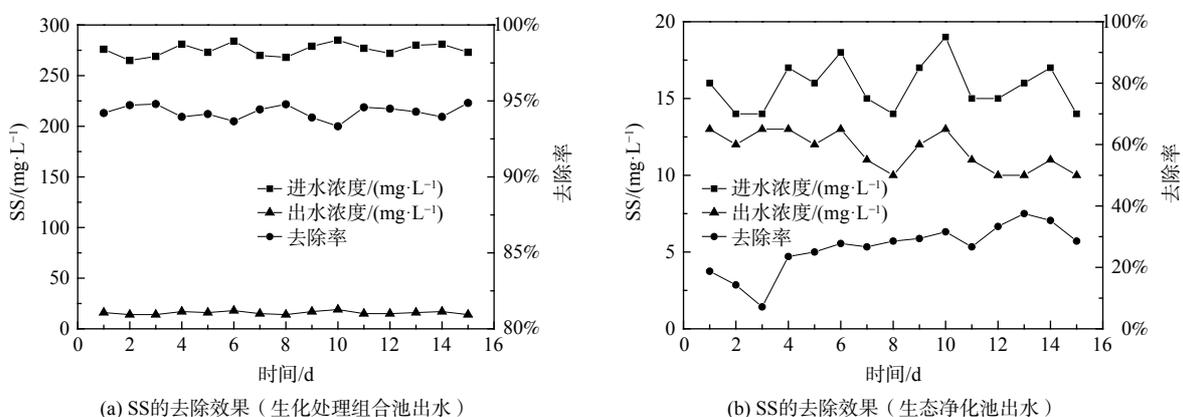


图6 SS的去除效果

Fig. 6 Removal efficiency of SS

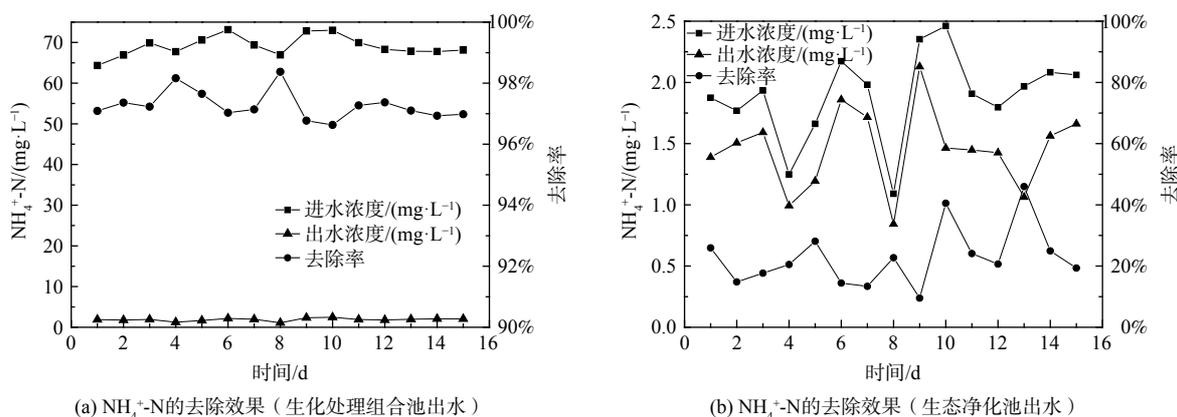
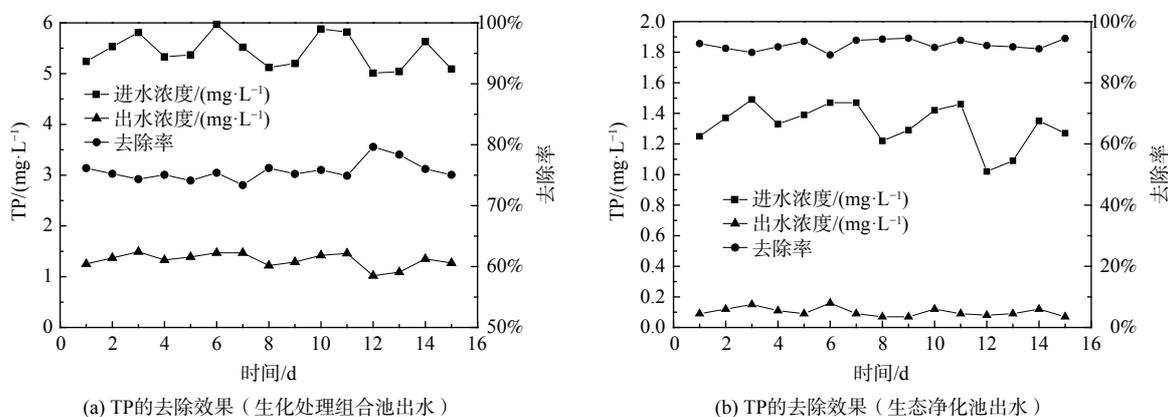
图 7 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效果Fig. 7 Removal efficiency of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 

图 8 TP 的去除效果

Fig. 8 Removal efficiency of TP

97%，这说明改进后的多级 A/O 工艺与增加在缺氧、好氧区的悬浮填料对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的强化去除作用明显，而 TP 的去除率仅为 75%，未能达到标准要求。生态处理过程中，TP 的去除率迅速提升至 98%，这说明电解除磷装置对强化 TP 的去除发挥着重要作用。此外，系统对 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、SS 的去除效率虽有提升，但相比于 COD 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ，人工湿地工艺对 SS 的去除作用明显，这说明各级过滤层的吸附、过滤、沉淀等过程对 SS 的去除效果显著。最终出水指标均符合辽宁省地方排放标准 (DB 21/1627-2008《污水综合排放标准》) 中表 1 的限值标准，且满足进一步回用站区绿化和冲洗地面等方面需要。

3.3 经济性与适用性分析

由于变电站排水量不稳定，本工程每天上下午分 2 次将收集井污水送至调节池，控制系统进水量，维持系统 24 h 运行，特别是增设出水回流系统，确保设备 24 h 系统不缺水，保证了设备的稳定运行。该系统设备维护简单、无需加药、无水耗、平时运行无需安排专人值守 (可通过远程控制和定期巡检确保系统安全稳定)、运行成本低。系统用电设备只有曝气泵、提升泵 (间歇性使用) 与电解除磷装置，每处理一吨污水约耗电 0.2 kWh，电费以每 kWh 0.6 元计，合计约每吨水 0.12 元，仅产生少量人工费、折旧费及设备维护费，约每吨水 0.5 元，系统运行 3 个月仅产生少量剩余污泥，沉淀污泥清掏频率仅为每年 1 次，由于无重金属等污染物，清掏物可用作庭院植物肥料，也可定期运输至污水处理厂统一处理，实现全过程资源化利用。

针对北方地区冬季低温特点，本装置可采用埋地式或外加保温设施的半埋地式两种安装设计方式，若采用埋地安装方式，应将装置安装至冻土层以下，若采用半埋地安装方式，则冬季运行时需要在主要构筑物外加塑料薄膜或彩钢板等保温措施。电解除磷与生物、化学除磷最大的优势在于，无需考虑温度的影响，冬季可以实现出水 TP 达标排放，生态系统主要目的是进一步过滤水中悬浮物，春季到秋季种植水生植物在进一

步削减氮磷同时,主要是景观效果,冬季运行时,主要利用下层填料过滤、吸附等作用,此外,变电站生活污水具有污染物浓度变化较大的特点,在生物处理后连接生态处理池,可以应对高浓度负荷,最大程度的保证出水稳定达标,同时,各级过滤层对电解除磷中产生少量的铁离子存在一定的截留作用;经实际运行后结果显示(进水温度约为6~8℃),出水仍符合辽宁省地方排放标准(DB 21/1 627-2008《污水综合排放标准》)中表1的限值标准。针对北方地区部分变电站人员极少(仅2~3人)的问题,本系统可在出水后加回流装置,使出水回流至调节池以保证装置24 h运行。该装置无需外加药剂、用电设备自动化程度高、污泥清掏周期长,因此可以做到无需人工现场看守,采用定期巡检即可满足使用条件。同时,装置各单元具有较为灵活的组合和安装方式,使其在不同地形、不同进水水质条件下做到因地制宜安装使用。为解决北方地区变电站生活污水处理及回用提供了技术支撑。

4 结论

1) 为解决污水中TP浓度较高的问题,本工程引入电解除磷技术,并通过分析不同电解电压、极板间距以及电解时间对其进行参数优化,发现电解电压24 V、极板间距4 cm、电解时间12 h为该组合工艺的最优参数组合。

2) 进出水水质检测结果表明,多级A/O-电解除磷-生态净化池组合工艺与单一工艺相比,对北方地区变电站生活污水处理效果较好,出水水质满足辽宁省地方排放标准(DB 21/1 627-2008《污水综合排放标准》)中的限值标准。

3) 本工程运行成本低,吨水成本仅为0.62元,且自动化程度高,安装方式灵活,同样适用于北方寒冷地区。

参考文献

- [1] 蔡兴初,张捷. 变电站生活污水生态化处理工艺[J]. 电力勘测设计, 2011(6): 51-53.
- [2] 郭季璞,张欣宜,马悦红,等. 变电站污水竖管降膜蒸发性能研究[J]. 给水排水, 2022, 58(S1): 871-876.
- [3] 曾媛,严青,王琳杰. 农村变电站生活污水治理现状与探讨[J]. 环境与发展, 2020, 32(1): 43-44.
- [4] 刘克成,范辉,高燕宁. 好氧颗粒污泥MBR工艺处理变电站生活污水性能分析[J]. 环境工程, 2021, 39(9): 31-36.
- [5] POPA C. Impact of substations equipment to the environment[J]. International Journal of Global Warming, 2020, 21(2): 155-172.
- [6] 黄学平. 地理式一体化生物接触氧化工艺处理变电站生活污水[J]. 中国给水排水, 2010, 26(20): 113-115.
- [7] 何晓芳,李向阳,王小峰,等. MBR一体化工艺处理水源地农村生活污水应用实例[J]. 水处理技术, 2022, 48(10): 149-152.
- [8] SAEED T, AFRIN R, AL-MUYEED A, et al. Bioreactor septic tank for on-site wastewater treatment: Floating constructed wetland integration[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2021, 9: 105606.
- [9] BILGIN M, SIMSEK I, TULUN S. Treatment of domestic wastewater using a lab-scale activated sludge/vertical flow subsurface constructed wetlands by using *Cyperus altemifolius*[J]. Ecological Engineering, 2014, 70: 362-365.
- [10] 李怀正,金伟,张文灿,等. 我国农村生活污水综合治理研究[J/OL][J]. 中国工程科学, 2022, 24(5): 154-160.
- [11] WANG S Y, HU C Q, CHENG F K, et al. Performance of a combined low-consumption biotreatment system with cost-effective ecological treatment technology for rural domestic sewage treatment[J]. Journal of Water Process Engineering, 2023, 51: 103380.
- [12] 张体强. 变电站污水处理现状与展望[J]. 环境科学与管理, 2017, 42(6): 83-86.
- [13] 呼永锋,王坤,曹孟京,等. A/O+MBR工艺在分散式污水处理工程中的应用[J]. 水处理技术, 2022, 48(1): 150-152.
- [14] İRDEMEZ Ş, DEMIRCIÖGLÜ N, YILDIZ, Y Ş. The effects of pH on phosphate removal from wastewater by electrocoagulation with iron plate electrodes[J]. Journal of hazardous materials, 2006, 137(2): 1231-1235.
- [15] FENG Q, ZHANG K J, LIU X H, et al. An improved kinetic model for dephosphorization of laundry wastewater by electrocoagulation[J]. Journal of Water Process Engineering, 2021, 39: 101750.
- [16] SUN D Y, BIAN Y H, LIU P P, et al. Electricity enhances biological Fe(III) reduction and phosphorus recovery from FEP complex: Proof of concept and kinetic analysis[J]. ACS ES&T Engineering, 2021, 1(3): 523-532.
- [17] 高敏,张艺荣,赵景龙,等. 双铁电极电解除磷技术初探[J]. 水处理技术, 2014, 40(6): 39-42.

(责任编辑:金曙光)

Engineering application of multi-stage A/O-electric dephosphorization-ecological purification combined process treatment domestic wastewater in transformer substation

QI Xiaoyan*, LI Xiang, TONG Bolin, WU Songyu, LI Chengjun

Electrical Power Research Institute, State Grid Liaoning Electric Power Supply Co., Ltd., Shenyang 10006, China

*Corresponding author, E-mail: qxydbdky@163.com

Abstract This paper took a substation domestic wastewater treatment project in Liaoning Province as an example, adopting multi-stage A/O-electrolytic dephosphorization-ecological purification tank combination process for the actual domestic wastewater treatment of the substation; at the same time, analyzing the characteristics of this combination system in terms of pollutant removal, operation and maintenance. The operation results showed that the average removal rates of COD, SS, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and TP of the process were more than 90%, all effluent indicators met the discharge requirements of the local discharge standards of Liaoning Province (DB 21/1 627-2008 "Comprehensive Sewage Discharge Standards"). The voltage of 24 V, the plate spacing of 4 cm, and the electrolysis time of 12 h were the optimal parameter combinations of the electro phosphorus technology under this combined process. In addition, the combined process had low operating cost, the cost of a ton of water was only 0.62 yuan, and the degree of automation was high, the installation method was flexible, and it was also suitable for cold areas in the north. The results of this study can provide design experience and engineering case reference for substation domestic sewage treatment project.

Keywords transformer substations domestic sewage; biochemical treatment; ecological treatment; electric dephosphorization