

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.06.020

AO-MBR+人工湿地用于村镇分散式污水处理

朱良升¹, 罗 煥², 马泽宇¹, 王汉斌³, 侯振兴⁴, 冯进华²

(1. 北京碧水源科技股份有限公司, 北京 102206; 2. 北京顺政碧水源环境科技有限责任公司, 北京 101399; 3. 北京碧水京良水务有限公司, 北京 102400; 4. 北京恒泽美顺环境科技有限公司, 北京 101300)

摘 要: 北京市平谷区王辛庄镇、马昌营镇、东高村镇区域新建27座村镇级污水处理站,采用埋地式AO-MBR一体化设备+垂直潜流人工湿地工艺对三镇区26个村庄的生活污水进行处理,总处理规模为2 580 m³/d。2023年1月—12月进水量、水质及AO-MBR出水水质监测结果表明,除湿地TN去除率(18.60%)较低外,AO-MBR生化段及后续湿地对COD、NH₃-N、TP及BOD₅均具有较好的去除率。系统出水水质满足北京市《水污染物综合排放标准》(DB11/307—2013)的新(改、扩)污水处理站中A排放限值。系统建成后,污水负荷率为74.67%,污水收集处理率达到83.34%。在全系统建设投资中,场站部分为12 421.17元/m³,配套收集管网部分为68 739.29元/m³(690.07元/m)。污水处理站直接运行成本为2.56元/m³,膜更新成本为0.213元/m³;管网运行成本为1.052元/m³(2.88元/m)。

关键词: 村镇污水; AO-MBR工艺; 一体化设备; 人工湿地; 分散式污水处理

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2026)06-0121-08

Application of AO-MBR+Constructed Wetland Process in Decentralized Sewage Treatment in Villages and Towns

ZHU Liangsheng¹, LUO Huan², MA Zeyu¹, WANG Hanbin³, HOU Zhenxing⁴,
FENG Jinhua²

(1. Beijing Originwater Technology Co. Ltd., Beijing 102206, China; 2. Beijing Shunzheng Originwater Environmental Technology Co. Ltd., Beijing 101399, China; 3. Beijing Bishui Jingliang Water Co. Ltd., Beijing 102400, China; 4. Beijing Hengze Meishun Environmental Technology Co. Ltd., Beijing 101300, China)

Abstract: Twenty-seven village-level sewage treatment stations were built in Wangxin Zhuang Town, Machangying Town and Donggaocun Town of Pinggu District, Beijing. The domestic sewage from 26 villages in the three towns was treated by buried AO-MBR integrated equipment and vertical subsurface flow constructed wetland process, with a total treatment capacity of 2 580 m³/d. The monitoring results of influent quantity, water quality and AO-MBR effluent quality from January to December in 2023 showed that the removal rates of COD, NH₃-N, TP and BOD₅ in the biochemical section of AO-MBR and the subsequent wetlands were good, except that the removal rate of TN in the wetland was low (18.60%). The effluent quality of the system meets the discharge limit A in the new (modified, expanded)

通信作者: 朱良升 E-mail: 372413999@qq.com

sewage treatment station in the *Integrated Discharge Standard of Water Pollutants*(DB11/307-2013) of Beijing. After the completion of the system, the sewage load rate is 74.67%, and the sewage collection and treatment rate is 83.34%. In the construction investment of the whole system, the stations is 12 421.17 CNY/m³, and the supporting collection pipe network is 68 739.29 CNY/m³(690.07 CNY/m). The direct operation cost of the sewage treatment station is 2.56 CNY/m³, the membrane renewal cost is 0.213 CNY/m³, and the operation cost of the pipe network is 1.052 CNY/m³(2.88 CNY/m).

Keywords: village and town sewage; AO-MBR process; integrated equipment; constructed wetland; decentralized sewage treatment

目前我国许多村镇没有污水集中处理设施,污水随意排入水体,给区域环境带来严重污染^[1]。因此,采用分散式污水治理方法日益成为保护当地水环境的重要措施。北京市平谷区的水资源匮乏、排水设施不完善,已经严重制约了该地区的经济发展。根据《北京市平谷区总体规划(2005—2020)》的要求,平谷区将在全区范围内逐步开展农村水环境治理工作,创建良好的人居环境。

该区境内河流隶属海河流域蓟运河水系,属于独立水系。洳河为主要河道,横穿平谷境内,沿途有大小11条支流汇入,其中洳河、金鸡河、龙河为常年性河流。王辛庄镇、马昌营镇、东高村镇区位于洳河上半段流域,为地表Ⅲ类水功能区,污水处理站设计出水水质执行北京市《水污染物综合排放标准》(DB11/307—2013)新(改、扩)污水处理站中A排放限值,即除总氮(TN)外,主要指标达到地表Ⅳ类水要求^[2]。在处理工艺方面,人工湿地因建设和运行成本较低、运营简单方便、生态环境效益较好等在分散式村镇污水处理中广泛应用^[3],且已发展成为一种具有较好经济效益和环境效益的污水处理技术,适合农村污水处理^[4]。经综合考虑,该项目确定采用AO-MBR+垂直潜流人工湿地组合工艺。

1 项目概况

该项目涉及平谷区3个乡镇(王辛庄镇、马昌营镇、东高村镇)、26个村庄、8 763户,总人口(根据乡村中旅游人口、常住人口、外来人口折合成的设计人口)34 772人。工程建设主要内容为在上述村庄内建设污水处理设施27座,其中,东高镇4座,王辛庄镇11座,马昌营镇12座,场站设计规模为30~350 m³/d,总建设规模为2 580 m³/d。

① 村庄排水现状

王辛庄镇合计12个村庄,共17 300人,大部分

村庄淋浴卫生设施齐全,但排污边沟不完善且破损严重,现状多为雨污合流,大部分污水通过排污边沟排入下游河流,严重影响河道水质,同时污水横流现象明显。马昌营镇合计10个村庄,共9 920人,大部分村庄主街道有排水边沟,沟内污水淤积严重,胡同内有污水横流现象;雨污合流,通过边沟或散流汇入附近河流,污染严重。东高村镇合计4个村庄,共2 490人,村中主要道路自建雨水排水暗沟,企业及工业废水较少,生活污水排入附近暗沟。

② 进水水质

农村污水相对于城镇污水,在水量 and 水质上均具有明显的波动性。项目区域农业、工业及个体经济均有较快的发展,农业以果品生产为主,其他小工业生产并存,生活污水及加工废水混杂的情况较为普遍。各村镇目前排水情况复杂,差异较大,大部分村庄污水散排,村内没有完整的排水边沟。污水横流现象明显,目前对服务范围内的村镇污水现状进行调查具有一定的困难,同时,缺乏有针对性的污水水质统计资料,因此准确预测污水处理厂的进水水质难度较大。

结合平谷区村镇生活污水及加工废水混杂排放的现状,参照周边村镇级污水处理厂进水水质,同时合理权衡近远期需求,确定了污水处理站的进水水质。

③ 出水水质要求

平谷区辛庄镇、马昌营镇、东高村镇区位于洳河上半段流域。根据北京市地表水水质分类,洳河上段为饮用水源区,为地表Ⅲ类水功能区,污水处理站设计出水水质执行北京市《水污染物综合排放标准》(DB11/307—2013)的新(改、扩)污水处理站中A排放限值(除TN外,主要指标达到地表Ⅳ类水要求)。

2 工艺路线

2.1 水质分析

设计进、出水水质见表1。

表1 设计进、出水水质

Tab.1 Design influent and effluent quality

水质指标	BOD ₅ / (mg/L)	COD/ (mg/L)	SS/ (mg/L)	NH ₃ -N/ (mg/L)	TN/ (mg/L)	TP/ (mg/L)	pH
进水	135	360	300	35	55	5	6~9
出水	6	30	5	1.5(3)	15	0.3	6~9

本工程进水主要为村镇生活污水,实际可能掺杂部分养殖、加工废水;BOD₅/COD=0.375,整体可生化性不高;碳氮比(BOD₅/TN)=2.45<4,碳源不足,需额外投加碳源;碳磷比(BOD₅/TP)=36>17,采用生物除磷可以取得较好效果。

对于有机物的去除,可采用传统处理+深度处理的组合工艺。对于NH₃-N,可通过好氧单元的适度高曝气保证完全硝化;对于TN,可采用生物脱氮工艺,考虑缺氧池前置、取消厌氧池,同时设置碳源投加设施;对于SS,考虑设置初沉池,并在深度处理时选择可靠的过滤工艺,防止COD和TP超标;对于TP,单独采用生物除磷不能满足出水要求,需要设置化学除磷,且北方冬季水温低,脱氮效果难以保证,故考虑不设置厌氧段,只设置化学除磷。

2.2 工艺路线

预处理选用常规机械格栅+初沉池+调节池,生物处理部分推荐AO-MBR工艺,深度处理选择人工湿地工艺。格栅池、初沉池、调节池及储泥池采用合建的地下钢筋混凝土结构形式。AO-MBR采用地埋式一体化处理设备建设形式,整体集成生化处理单元、膜处理单元、控制及设备间单元,保证检修和工期要求。工艺流程如图1所示。

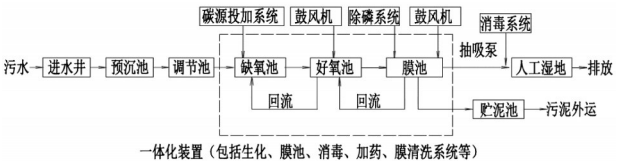


图1 污水处理工艺流程

Fig.1 Process flow chart of sewage treatment

3 工艺设计

以西杏园污水处理站(100 m³/d)为例进行工艺介绍。

① 预处理单元

预处理设施合建,主要由进水井、格栅渠、预沉池、调节池组成,为完全地下式钢筋混凝土结构。格栅渠内安装粗细两道格栅,定期进行人工清理。粗格栅采用人工格栅,栅隙20 mm;细格栅采用机械格栅,栅隙5 mm,功率0.55 kW。预沉池采用平流沉淀池,沉淀时间0.5 h,表面水力负荷1.0 m³/(m²·d)。调节池水力停留时间8 h,设置潜水搅拌机1台,功率0.55 kW。

② AO-MBR一体化处理设备

AO-MBR一体化处理设备主要由反应箱体和设备间组成。反应箱体由缺氧区、好氧区、膜区组成,尺寸(L×B×H)=10.48 m×2.82 m×3.75 m。设备间尺寸(L×B×H)=2.52 m×2.32 m×2.12 m,包含膜吹扫及曝气风机、产水及在线清洗泵、化学除磷加药系统、反洗水池及电气自控系统等。缺氧区水力停留时间6.7 h,污水在缺氧区内通过与好氧区回流混合液(400%)充分混合进行硝化反应,去除NH₃-N和部分有机物^[5]。此外,在缺氧区投加碳源,满足出水TN要求。好氧区水力停留时间5.3 h,在曝气条件下对BOD₅进行降解,同时进行硝化反应,并对磷进行过量吸收去除。采用膜片式微孔曝气器,设计气水比14:1。好氧区出水自流进入MBR膜区,实现泥水分离;中空纤维微滤膜组件浸没于膜区内,将菌胶团和游离细菌全部截留在膜池内,抽吸过滤出水进入人工湿地,各种悬浮颗粒、细菌、藻类、浊度、COD及有机物均得到有效去除。膜区平均污泥浓度8~12 g/L,水力停留时间1.5 h,采用碧水源聚偏氟乙烯(PVDF)中空纤维帘式带衬膜,膜平均孔径0.1 μm,膜通量11.13 L/(m²·h),吹扫气水比12:1;膜区设置回流泵将污泥500%回流至好氧区,剩余污泥定期排放至污泥池。好氧区前端投加除磷药剂(聚合硫酸铁)。

③ 垂直潜流人工湿地

湿地尺寸20.54 m×10.48 m×1.30 m,水力负荷0.5 m³/(m²·d),水力停留时间1.25 d。湿地从上到下依次为:保温层,粒径Ø8~16 mm陶粒,厚度200 mm;过滤层,粒径Ø16~32 mm砾石,厚度400 mm;过渡层,粒径Ø32~80 mm砾石,厚度500 mm;排水层,粒径Ø80~100 mm砾石,厚度200 mm;防渗层,高密度聚乙烯(HDPE)材质,厚度1.2 mm。表层种植景观性水生植物,主要为芦苇、香蒲和菖蒲,种植密度为9株/m²。

④ 污泥处理单元

27座污水处理站规模均较小,故每座场站只设置储泥池,污泥混合液至少存储7 d。这些污泥定期由罐车运至附近较大规模污水处理厂脱水处理后,再运至污泥处置中心处置。西杏园污水处理厂储泥池尺寸6.0 m×1.7 m×3.8 m,可以存贮至少14 d的污泥量。

4 运行效果分析

4.1 水量分析

各污水处理站规模较小,主要接收村镇生活污水,受居民生活习惯、排水器具以及污水收集系统的影响,日排水量可能存在较大波动。2023年西杏园污水处理站日进水量情况如图2所示。

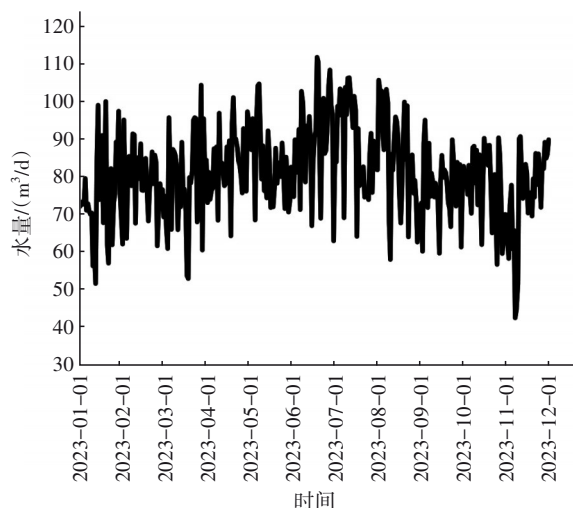


图2 2023年西杏园污水处理站水量变化曲线

Fig.2 Annual water quantity change curve of Xixingyuan sewage treatment station in 2023

从图2可以得出,西杏园污水处理站年平均水量为28 501.87 m³/a,日最小进水量为42.47 m³/d,日最高进水量为111.62 m³/d,日平均进水量为81.43 m³/d,年平均负荷率为81.43%。2023年月均水量变化如图3所示。从图3可以看出,月均水量变化范围为75~95 m³/d,其中7月最高,月均水量较高主要集中在5月—9月,1月最低,月均水量较低主要集中在1月、11月及12月。从以上分析得出,西杏园污水处理站月均水量变化不大且整体负荷率较高,说明污水收集率已处于较高水平。较高水量主要集中在夏季汛期,主要原因是夏季居民洗浴用水量较高,以及并未完全实现雨污分流;较低水量主要集中在冬季,符合居民生活习惯。

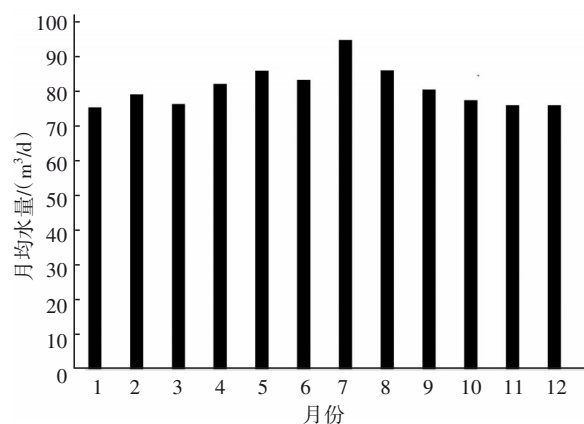


图3 2023年西杏园污水处理站月均水量变化曲线

Fig.3 Monthly average water quantity change curve of Xixingyuan sewage treatment station in 2023

统计可知,27座污水处理站2023年的总处理水量为703 167.39 m³,日均处理水量为1 926.49 m³/d,总体负荷率为74.67%。2023年是各污水处理站进入正式运营的第4年,此负荷率在分散式村镇治污中处于较高水平^[4]。2023年27座污水处理站涉及的村镇及相应街道的自来水使用总量为843 733.37 m³,污水总收集率为83.34%,所有污水处理站尾水排入洳河,成为重要补充水源。

4.2 对主要污染物去除效果的分析

对西杏园污水处理站进、出水水质进行跟踪监测,每月15日取水样分析2023年1月—12月进水水质、AO-MBR出水水质、潜流湿地出水水质情况。

① COD去除效果

西杏园污水处理站主要处理单元COD监测结果如图4所示。

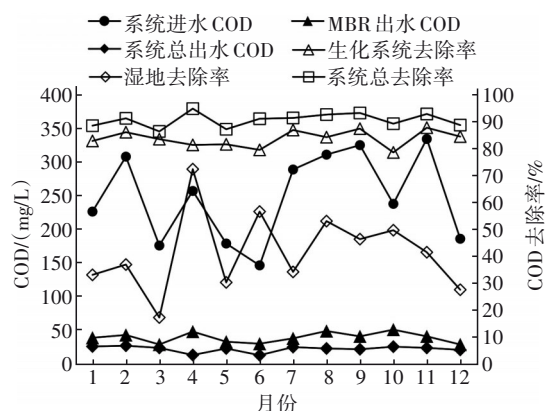


图4 2023年各单元COD检测值及去除率

Fig.4 Monthly COD detection value and corresponding removal rate of each unit in 2023

2023年1月—12月,进水COD为146.45~334.39 mg/L,MBR出水COD为28.98~49.12 mg/L,垂直潜流湿地出水COD为13.03~27.12 mg/L。AO-MBR系统COD平均去除率为83.67%,垂直潜流湿地COD平均去除率为41.57%,系统COD平均总去除率为90.59%。可以发现,湿地系统COD去除率低于《人工湿地污水处理工程技术规范》(HJ 2005—2010),负荷相对较低,且全年所有月份出水COD均达到北京市《水污染物综合排放标准》(DB11/307—2013)的新(改、扩)污水处理站中A排放限值。

② $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除效果

西杏园污水处理站主要处理单元 $\text{NH}_3\text{-N}$ 监测结果如图5所示。

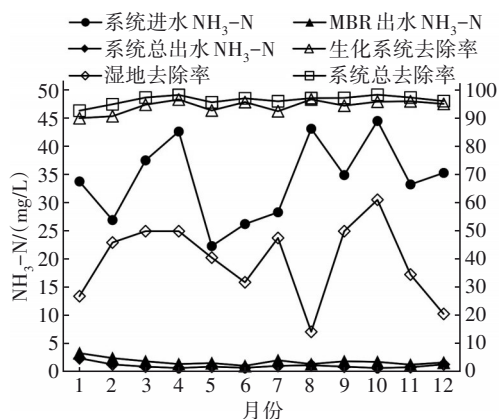


图5 2023年 $\text{NH}_3\text{-N}$ 检测值及去除率

Fig.5 Monthly $\text{NH}_3\text{-N}$ detection value and corresponding removal rate of each unit in 2023

2023年1月—12月,进水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 为22.35~44.57 mg/L,AO-MBR出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 为1.10~3.35 mg/L,垂直潜流湿地出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 为0.70~2.45 mg/L。AO-MBR系统 $\text{NH}_3\text{-N}$ 平均去除率为94.36%,垂直潜流湿地 $\text{NH}_3\text{-N}$ 平均去除率为39.46%,系统 $\text{NH}_3\text{-N}$ 平均总去除率为96.60%。可以发现,湿地系统 $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除率低于《人工湿地污水处理工程技术规范》(HJ 2005—2010),负荷相对较低。全年所有月份出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 均达到北京市《水污染物综合排放标准》(DB11/307—2013)的新(改、扩)污水处理站中A排放限值。

③ TN 去除效果

西杏园污水处理站主要处理单元TN监测结果如图6所示。2023年1月—12月进水TN为29.8~

49.6 mg/L,MBR出水总氮为13.11~18.99 mg/L,垂直潜流湿地出水TN为8.98~13.99 mg/L。生化系统TN平均去除率为64.46%,垂直潜流湿地TN平均去除率为18.60%,系统TN平均总去除率为71.16%。可以发现,去除TN主要依靠生化系统,后续湿地系统对TN去除率较低。系统全年所有月份出水TN均达到北京市《水污染物综合排放标准》(DB11/307—2013)的新(改、扩)污水处理站中A排放限值。

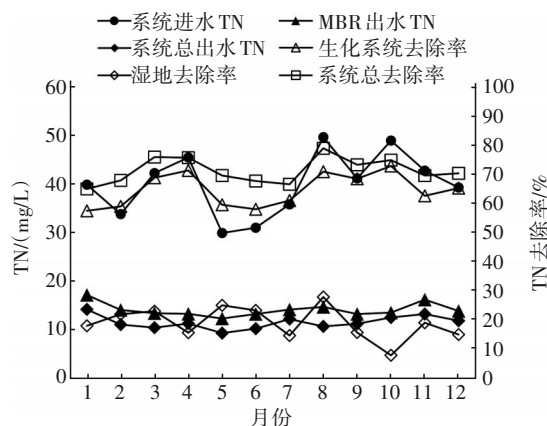


图6 2023年TN检测值及去除率

Fig.6 Monthly TN detection value and corresponding removal rate of each unit in 2023

④ TP 去除效果

西杏园污水处理站主要处理单元TP监测结果如图7所示。

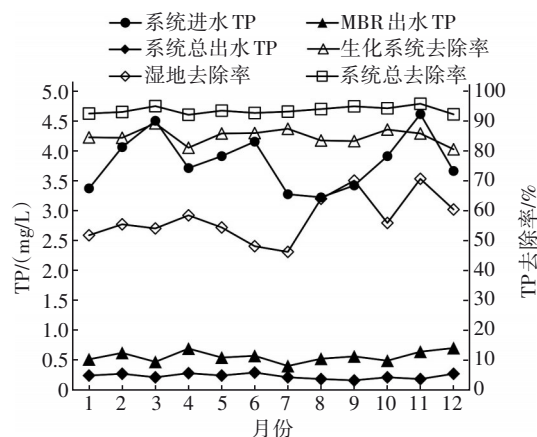


图7 2023年TP检测值及去除率

Fig.7 Monthly TP detection value and corresponding removal rate of each unit in 2023

2023年1月—12月进水TP为3.23~4.62 mg/L,AO-MBR出水TP为0.41~0.71 mg/L,垂直潜流湿地出水TP为0.17~0.30 mg/L。AO-MBR系统TP

平均去除率为85.00%,垂直潜流湿地TP平均去除率为57.59%,系统TP平均总去除率为93.71%。可以发现,湿地系统TP去除率略低于《人工湿地污水处理工程技术规范》(HJ 2005—2010)中表2人工湿地系统污染物去除率。所有月份出水TP均达到北京市《水污染物综合排放标准》(DB11/307—2013)的新(改、扩)污水处理站中A排放限值。

⑤ BOD₅去除效果

西杏园污水处理站主要处理单元的BOD₅监测结果如图8所示。2023年1月—12月,进水BOD₅为49.10~120.90 mg/L, AO-MBR出水BOD₅为7.97~12.60 mg/L,垂直潜流湿地出水BOD₅为2.40~5.98 mg/L。AO-MBR系统BOD₅平均去除率为88.47%,垂直潜流湿地BOD₅平均去除率为60.90%,系统BOD₅平均总去除率为95.52%。可以发现,湿地系统出水BOD₅满足《人工湿地污水处理工程技术规范》(HJ 2005—2010)中表2人工湿地系统污染物去除率要求。所有月份出水BOD₅均达到北京市《水污染物综合排放标准》(DB11/307—2013)的新(改、扩)污水处理站中A排放限值。

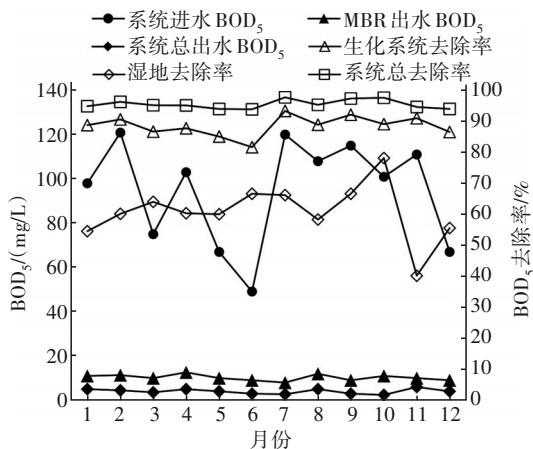


图8 2023年BOD₅检测值及去除率

Fig.8 Monthly BOD₅ detection value and corresponding removal rate of each unit in 2023

4.3 技术及经济效益分析

4.3.1 技术适用性

通过对2023年西杏园污水处理站的进、出水水质跟踪检测分析发现,其出水水质可稳定达到北京市《水污染物综合排放标准》(DB11/307—2013)的新(改、扩)污水处理站中A排放限值(除TN外,主要指标达到地表Ⅳ类水要求),表明地理式AO-MBR一体化设备+垂直潜流人工湿地工艺适用于平谷区

村镇分散式污水处理,且除湿地系统对TN去除率较低外,对于COD、NH₃-N、TN、TP及BOD₅, AO-MBR生化段一体化设备及后续垂直潜流湿地工艺均具有较好的去除率。

4.3.2 投资成本

西杏园污水处理站工程投资为1 388 045.26元,包含预处理、绿化、湿地、工艺、电气、自控、总图。27座污水处理站总投资为32 046 624.69元,单位投资为12 421.17元/m³,配套污水收集管网总长度为257 km,总投资为177 347 362.78元,平均投资为690.07元/km,单位水量投资为68 739.29元/m³,在小规模分散式区域性地埋式一体化设备污水处理中处于适中水平^[6]。

4.3.3 运行成本

① 药剂费

该工程投加药剂主要包括除磷药剂(液体聚合硫酸铁)、MBR膜清洗药剂[次氯酸钠(10%液体溶液)和固体柠檬酸]。西杏园污水处理站进水碳氮比充足,基本不需投加碳源。部分场站碳氮比不足,需要补投碳源。污泥采用先转运混合液至附近较大规模污水处理厂进行脱水、再集中处置的方式,因此无需投加聚丙烯酰胺(PAM)等污泥脱水药剂,只需统一支付混合液转运、脱水及处置费用。

西杏园污水处理站除磷药剂用量为2.1 t/a,单价540元/t,费用为1 134元/a;按照设计水量计算,成本为0.031 0元/m³;按照实际水量计算,成本为0.038 2元/m³。27座场站合计除磷药剂使用量为78.7 t/a,总费用为42 498元,按照设计水量平均除磷药剂成本为0.045 1元/m³,按照实际水量则为0.060 4元/m³。

MBR膜清洗采用在线清洗和离线清洗结合的方式,在线清洗分为维护性清洗和恢复性清洗。维护性清洗1周1次,次氯酸钠浓度为500 mg/L;恢复性清洗1月1次,次氯酸钠浓度为2 000 mg/L;离线清洗1年2次,将27座场站的MBR膜组器全部运至附近较大规模污水处理厂集中清洗,每天清洗4~5座场站。碱洗采用次氯酸钠进行浸泡,浸泡液浓度为3 000 mg/L。酸洗采用柠檬酸,浸泡液浓度为30 g/L。西杏园污水处理站在线清洗次氯酸钠用量为0.513 t/a,费用为425.8元/a。27座场站全年在线清洗次氯酸钠使用量为14.78 t/a,费用为12 267.4元/a。27座场站离线清洗次氯酸钠使用量为2.6 t/a,柠檬

酸固体为2.7 t/a,次氯酸钠费用为2 158元/a,柠檬酸费用为12 960元/a。各场站平摊离线清洗费用。综上,西杏园污水处理站设计规模为 $100\text{ m}^3/\text{d}$,清洗药剂成本为 $0.027\text{ 0元}/\text{m}^3$,按照实际水量则成本为 $0.033\text{ 2元}/\text{m}^3$ 。27座场站总清洗药剂费用为27 385.4元,按设计水量平均成本为 $0.029\text{ 0元}/\text{m}^3$,按照实际水量则为 $0.038\text{ 9元}/\text{m}^3$ 。

部分场站碳源不足,需要投加复合碳源,价格1 550元/t,使用量5.8 t/a,费用8 990元/a。按设计水量平摊到27座场站,成本为 $0.009\text{ 55元}/\text{m}^3$,按照实际水量则为 $0.012\text{ 8元}/\text{m}^3$ 。

综上,按设计水量计,西杏园污水处理站药剂成本为 $0.058\text{ 元}/\text{m}^3$,27座污水处理站药剂成本为 $0.083\text{ 65元}/\text{m}^3$ 。按实际水量计,西杏园药剂成本为 $0.071\text{ 4元}/\text{m}^3$,27座污水站药剂成本为 $0.112\text{ 1元}/\text{m}^3$ 。

② 电费

主要耗电设备为水泵和风机。西杏园污水处理站进水提升泵功率 0.75 kW ,1用1备,24 h交替运行。风机功率 0.4 kW ,24 h连续运行,产水自吸泵功率 0.6 kW ,基本24 h连续运行,运行7 min,停1 min。回流泵1功率 0.75 kW ,回流泵2功率 0.45 kW ,24 h连续运行。缺氧池搅拌器1台,功率 0.37 kW ,调节池搅拌器1台,功率 0.55 kW ,均按照24 h连续运行计。电价按 $0.65\text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 计。西杏园污水处理站电费为46.44元/d,按设计水量计,成本为 $0.464\text{ 元}/\text{m}^3$,按实际水量计则为 $0.570\text{ 元}/\text{m}^3$ 。27座污水处理站费用为559 949.308元/a,按照设计水量计算成本为 $0.595\text{ 元}/\text{m}^3$,按实际水量计则为 $0.796\text{ 元}/\text{m}^3$ 。

③ 污泥处理处置费

27座污水处理站产生的污泥混合液全部通过罐车运至附近较大规模污水处理厂进行集中脱水,脱水后统一运送指定污泥处置中心进行处置,其中,处理处置费用为 $40\text{ 元}/\text{m}^3$ 混合液,运输费用为 $25\text{ 元}/\text{m}^3$ 混合液。西杏园污水处理站处置混合液 $308\text{ m}^3/\text{a}$,处理处置费用为12 320元,运输费用为7 700元,合计20 020元,按照设计水量计算成本为 $0.548\text{ 元}/\text{m}^3$,按实际水量计则为 $0.674\text{ 元}/\text{m}^3$ 。27座污水处理站处置混合液合计 $8\text{ 169 m}^3/\text{a}$,处置费用为326 760元/a,运输费用为204 225元/a,按照设计水量合计总费用为 $0.564\text{ 元}/\text{m}^3$,按实际水量计则为

$0.755\text{ 元}/\text{m}^3$ 。

④ 人工成本

27座污水处理站涉及3个镇,设置运行班组3组,每镇1组,每组2人,工资7 000元/(月·人)(含工资保险),巡视车辆3辆。日常维护工作主要包括每天1次的日常巡检抄表、定期格栅渣垃圾清运、设备保养维修、植物收割,油费为78 900元/a,车辆维修及保养费为3 500元/辆,因此人工成本为593 400元/a。27座污水处理站均摊 $21\text{ 977.78元}/(\text{座}\cdot\text{a})$,按照设计水量计算成本为 $0.630\text{ 元}/\text{m}^3$,按实际水量计则为 $0.844\text{ 元}/\text{m}^3$ 。

⑤ 设备日常维检及大修费

27座污水处理站主要采用设备委外维修的方式进行设备设施维护和技改大修,费用合计12 800元/a,按设计水量计算成本为 $0.013\text{ 6元}/\text{m}^3$,按实际水量计则为 $0.018\text{ 2元}/\text{m}^3$ 。

⑥ 膜更新成本

一体化设备内部MBR膜采用碧水源中空纤维帘式膜,膜更换周期5~8年,设计膜通量较低,按照8年计算膜更新成本。西杏园污水处理站采用1套膜组器,单套膜片 10.7 m^2 ,膜片数量35片,总膜面积为 374.5 m^2 ,膜更换单价为 $120\text{ 元}/\text{m}^2$,更换成本为 $0.154\text{ 元}/\text{m}^3$ 。27座村镇级污水处理站总膜面积为 9 961.7 m^2 ,按照设计水量计算,更换成本为 $0.159\text{ 元}/\text{m}^3$,按实际水量计则为 $0.213\text{ 元}/\text{m}^3$ 。更新成本相对较高,主要原因是减少膜元件的清洗频率,设计膜通量较低。

⑦ 水质检验费

水质检验费用主要包括两部分:第三方检测费用15.8万元/a和化验室耗材费用8.4万元/a,合计24.2万元/a,按照设计水量计算成本为 $0.025\text{ 7元}/\text{m}^3$,按实际水量计则为 $0.034\text{ 4元}/\text{m}^3$ 。

⑧ 管网运维费

27座污水处理站总设计规模为 $2\text{ 580 m}^3/\text{d}$,配套污水收集管网257 km,配套化粪池5 498座,维护成本主要包含化粪池清掏、管网及检查井疏通、地面塌陷维修维护等,总费用合计739 840元/a,成本 $2.88\text{ 元}/\text{m}$ 。按照设计水量计算成本为 $0.786\text{ 元}/\text{m}^3$,按实际水量计则为 $1.052\text{ 元}/\text{m}^3$ 。

综合以上药剂费用、电费、污泥处理处置及运输费用、人工成本、设备日常维检及大修费用、水质检验费用,按设计水量计,污水处理站直接运行成

本为1.898元/m³,膜更新成本为0.159元/m³,管网运行成本为0.786元/m³。按实际水量计,污水处理站直接运行成本为2.56元/m³,膜更新成本为0.213元/m³,管网运行成本为1.052元/m³。另外,污水收集管网257 km,核算成本为2.88元/m。

5 结论

采用地理式AO-MBR一体化设备+垂直潜流人工湿地工艺,新建分散式27座村镇级污水处理站,总设计规模2580 m³/d,对三镇区26个村庄的生活污水进行处理。结果表明,系统出水水质稳定满足北京市《水污染物综合排放标准》(DB11/307—2013)的新(改、扩)污水处理站中A排放限值。2023年实际污水处理量为1926.49 m³/d,污水负荷率为74.67%,总污水收集处理率为83.34%。所有污水处理站尾水排入洳河。27座污水处理站的投资为12421.17元/m³,配套污水收集管网投资为68739.29元/m³(690.07元/m),整体投资水平适中。污水处理站直接运行成本为2.56元/m³,膜更新成本为0.213元/m³;管网运行成本为1.052元/m³(2.88元/m),在分散式村镇污水处理中处于较低水平。

实践表明:①采用地理式一体化设备工艺和垂直潜流人工湿地的结合,对村镇分散式污水进行处理,出水水质优良且稳定。②在经济性和适用性方面,污水处理站及管网全系统建设成本适中,综合运行成本在较高出水要求时,处于较低水平,因此更适用于水环境要求较高的流域或者村镇污水治理。③所有污水处理站尾水排入洳河,成为洳河重要的补充水源,在改善村镇人居环境以及保护平谷区水环境特别是洳河流域发挥了重要作用。

参考文献:

- [1] 贺阳,祝年俊,白华清,等. 村镇污水处理厂提标改造的对策分析及工程实践[J]. 水处理技术,2023,49(12):152-155.
- HE Y, ZHU N J, BAI H Q, et al. Countermeasure analysis and engineering practice of upgradation and reconstruction in rural sewage treatment plant [J]. Technology of Water Treatment, 2023, 49(12): 152-155 (in Chinese).
- [2] 钱成龙,卢原,潘静,等. AO/MBR/VFCW联用处理分散式农村生活污水[J]. 中国给水排水,2024,40(6):113-117.
- QIAN C L, LU Y, PAN J, et al. AO/MBR/VFCW combined project for treatment of decentralized rural domestic sewage[J]. China Water & Wastewater, 2024, 40(6):113-117(in Chinese).
- [3] 李媛,孙捷,张永来,等. AO与后置生物滤池工艺在村镇污水处理中的应用[J]. 净水技术,2021,40(10):86-93.
- LI Y, SUN J, ZHANG Y L, et al. Application of anoxic-aerobic and post-biofilter processes in town sewage treatment [J]. Water Purification Technology, 2021, 40(10):86-93(in Chinese).
- [4] 杨亮,马军,陈志强. 我国农村污水处理现状综述[J]. 中国给水排水,2024,40(10):28-35.
- YANG L, MA J, CHEN Z Q. Current situation of rural sewage treatment in China: a review[J]. China Water & Wastewater, 2024, 40(10):28-35(in Chinese).
- [5] 沈晓铃,程方奎. AAO/A-MBR工艺在乡镇污水处理厂中的设计应用[J]. 给水排水,2024,50(8):45-50.
- SHEN X L, CHENG F K. Design and application of AAO/A-MBR process in township WWTP [J]. Water & Wastewater Engineering, 2024, 50(8):45-50 (in Chinese).
- [6] 蒋皓,马志鹏,叶龙,等. 农村污水处理技术在我国不同区域的应用探讨[J]. 山西建筑,2022,48(8):109-112.
- JIANG H, MA Z P, YE L, et al. Discussion on the applications of rural sewage treatment technologies in different regions of China [J]. Shanxi Architecture, 2022, 48(8):109-112(in Chinese).
- [1] 贺阳,祝年俊,白华清,等. 村镇污水处理厂提标改造的对策分析及工程实践[J]. 水处理技术,2023,49(12):152-155.
- 作者简介:朱良升(1989—),男,安徽宿州人,硕士,中级工程师,主要研究方向为MBR膜生物反应器在市政污水中的应用。
- E-mail:372413999@qq.com
- 收稿日期:2024-12-25
- 修回日期:2025-01-13

(编辑:衣春敏)