

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2022.05.008

人工湿地对农村污水处理的工程监测研究

唐宁远^{1, 2, 3}, 沈亮³, 付峥嵘⁴, 陈鑫⁵, 黎源⁵, 张帆⁴

(1. 株洲华晟环保技术有限公司, 湖南 株洲 412007; 2. 湖南大辰环保股份有限公司, 湖南 株洲 412007;
3. 湖南泰华科技检测有限公司, 湖南 株洲 412007; 4. 湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007;
5. 湖南智谋规划工程设计咨询有限责任公司, 湖南 株洲 412007)

摘要: 采用“隔油/厌氧/微动力 A²O 一体化设备/潜流人工湿地”组合工艺设施处理农村生活污水, 设施运行稳定且展现了较好的水质净化效果。在监测期间, 组合工艺设施对 SS、COD、NH₃-N、TN 和 TP 的平均去除率分别为 94.7%, 92.9%, 70.5%, 64.8%, 84.7%。A²O 一体化设备对 SS、COD、NH₃-N、TN 的去除贡献率最大, 而人工湿地对 TP 的去除贡献率最大。除 SS 外, 污染物的去除均受到季节变化的影响, 夏季去除效果好于冬季去除效果。监测结果表明: 组合工艺设施对农村生活污水有良好的去除污染物能力和抗冲击负荷能力, 适合在农村地区推广应用。

关键词: 水污染防治工程; 农村生活污水处理; 厌氧池; 一体化设备; 人工湿地

中图分类号: U664.9⁺2

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2022)05-0056-07

引文格式: 唐宁远, 沈亮, 付峥嵘, 等. 人工湿地对农村污水处理的工程监测研究 [J]. 湖南工业大学学报, 2022, 36(5): 56-62.

Engineering Monitoring of Rural Sewage Treatment from Constructed Wetland

TANG Ningyuan^{1, 2, 3}, SHEN Liang³, FU Zhengrong⁴, CHEN Xin⁵, LI Yuan⁵, ZHANG Fan⁴

(1. Zhuzhou Huasheng Environmental Protection Technology Co. Ltd., Zhuzhou Hunan 412007, China; 2. Hunan Dachen Environmental Protection Co. Ltd., Zhuzhou Hunan 412007, China; 3. Hunan Taihua Technical Testing Co. Ltd., Zhuzhou Hunan 412007, China; 4. College of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China; 5. Hunan Zhimou Planning Engineering Design Consultation Co. Ltd., Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: A combined processes facility of “oil separation, anaerobic tanks, A²O integrated equipment and subsurface constructed wetland” has been adopted for rural sewage treatment. The facility operates stably with a good water purification effect. During the monitoring period, the average removal rates of SS, COD, NH₃-N, TN and TP by the combined process facility are 94.7%, 92.9%, 70.5%, 64.8% and 84.7%, respectively. The A²O integrated equipment has the largest contribution rate to the removal of SS, COD, NH₃-N and TN, while the constructed wetland contributes the most to the removal of TP. Except for SS, the removal of pollutants is affected by seasonal changes, with a better removal effect in summer than in winter. The monitoring results show that the combined process facility is characterized with a good pollutant removal capacity and a high shock load resistance efficiency, which makes it suitable for popularization and application in rural areas.

收稿日期: 2022-05-02

基金项目: 中央引导地方科技发展专项基金资助项目 (2017FW5019); 湖南省株洲市科技计划基金资助项目 (2021-019)

作者简介: 唐宁远 (1983-), 男, 湖南湘潭人, 株洲华晟环保技术有限公司工程师, 博士, 主要研究方向为海绵城市, 农村面源污染治理和环境影响评价, E-mail: 649378075@qq.com

通信作者: 付峥嵘 (1974-), 男, 湖南安化人, 湖南工业大学副教授, 博士, 主要研究方向为绿色建筑, 海绵城市生物滞留技术和室内环境评价, E-mail: 441680332@qq.com

Keywords: water pollution control; rural sewage treatment; anaerobic tank; integrated equipment; constructed wetland

0 引言

当前, 各级政府正在积极推进“乡村振兴”战略, 农村生活污水污染问题已成为美丽乡村建设的难点之一。厨房、洗涤、沐浴和冲厕用水是农村生活污水主要来源, 具有排放不均匀, 水量变化系数较大, 废水中有机物、氮和磷含量比较高, 不含其他有毒有害物质, 可生化性较好等特点。我国农村生活污水常用的处理技术包括厌氧、好氧生物处理技术、自然生态处理技术^[1-4]。单一的厌氧、好氧生物处理和生态处理技术往往存在一些缺陷, 难以长期稳定运行并达到日益严格的排放要求。其中, 厌氧和好氧生物处理可较好去除农村生活污水中的有机物, 但存在氮、磷去除能力较差, 容易引发农村水体的富营养化问题; 生态处理技术虽能较好地脱氮除磷, 但存在占地面积和运行不稳定等缺点。将厌氧和好氧生物处理与生态处理技术结合在一起的组合工艺具有占地较少、能耗低、抗冲击负荷能力强等特点, 是解决上述问题的一种优选工艺。

何占飞^[5]、古腾^[6]、聂发辉^[7]和熊仁等^[8]分别报道了人工湿地不同的组合工艺对配置的农村生活污水处理实验结果, 结果显示组合工艺能较好地去除污水中的有机物、氮和磷, 但是国内对组合工艺在农村实际应用缺乏长期监测评估研究, 不利于该技术在农村的推广应用。农村生活污水污染物种类

多、水质多变, 且组合工艺运行效果受气候及环境影响较大^[2, 6]。但是, 鲜有文献报道基于监测的组合工艺设施现场运行综合评估, 而这对解决农村生活污水污染问题具有重要的指导意义。本研究将以某农村人口集中区的“隔油 / 厌氧 / 微动力 A²O (anaerobic-anoxic-oxic, 厌氧 - 缺氧 - 好氧脱氮除磷工艺) 一体化设备 / 人工湿地”生物生态组合工艺现场设施为例, 对其性能进行长期的监测研究, 充分评估其污染物处理效果, 分析可能的潜在限制因素, 以期为农村生活污水处理提供借鉴, 更好地服务中南地区美丽乡村建设。

1 人工湿地组合工艺应用及监测

1.1 人工湿地组合工艺设计

项目位于湖南省某市城乡结合部农村人口集中区, 污水处理设施用于处理来自村委会及村人口集中区的生活污水, 设计处理能力为 50 m³/d。设施出水间接排入敏感水体, 出水水质应稳定且达到《湖南省农村生活污水处理设施水污染物排放标准》(DB 43/1665—2019) 一级排放标准要求^[9]。方案设计阶段对比了农村生活污水处理组合工艺的主要特征, 如表 1 所示。农村经济、技术水平低于城市, 污水处理设施要求降低日常运行维护费用。通过对组合工艺处理效果、稳定性和能耗等角度的综合考虑, 选择厌氧 + 好氧 + 生态系统的组合工艺。

表 1 农村生活污水处理组合工艺特征
Table 1 Characteristics of combined process for rural sewage treatment

工 艺 类 型	工 艺 形 式	工 艺 原 理	工 艺 特 点
厌氧 + 生态系统	ABR+ 人工湿地、ABR+ 氧化塘、ABR+ 土壤渗滤等	厌氧去除有机物, 生态系统去除氮、磷	占地面积大, 能耗低, 难以稳定达标排放
好氧 + 生态系统	接触氧化 + 人工湿地、SBR+ 人工湿地、MBR+ 人工湿地等	好氧去除有机物和进行硝化, 生态系统进行硝化、反硝化和除磷	占地面积较大, 能耗高, 费用高, 去除效果较好且系统较稳定
厌氧 + 好氧 + 生态系统	厌氧水解池 + 微动力 A ² O 一体化设备 + 人工湿地	厌氧和好氧去除有机物和脱氮除磷, 生态系统深度去除有机物、氮和磷	占地面积较大, 能耗较低, 费用高, 去除效果最好, 系统很稳定

注: ABR 为厌氧折流板反应器 (anaerobic baffled reactor), SBR 为序批式反应器 (sequencing batch reactor), MBR 为膜生物反应器 (membrane bio-reactor)。

结合现场踏勘, 本项目采用提篮格栅 / 隔油池 / 厌氧酸化池 / 微动力 A²O 一体化设备 / 潜流人工湿地组合工艺, 组合工艺流程如图 1 所示。因为农村生

活污水中混杂餐厨垃圾和纸屑等有机固体废物, 增设提篮格栅和隔油设备, 去除污水中大颗粒漂浮物、悬浮物及动植物油脂, 以保证后续生物生态处理单元

的正常运行。该工艺有效整合厌氧水解酸化、微动力 A²O 一体化设备,设备各生化单元内均装弹性填料,通过泥膜耦合系统高效处理污水中的有机物、氮和磷;设备间歇运行,间隔时间为 1 h,采用太阳能和市电双模供电系统,能耗较低。后续人工湿地能强化有机物、氮和磷去除,既降低了湿地基质堵塞风险,又稳定提高了出水水质。

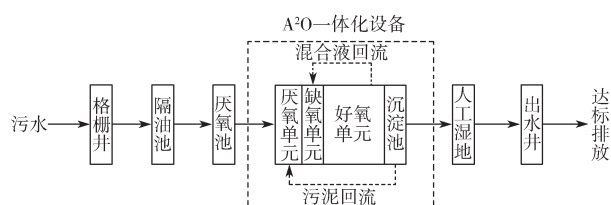


图 1 隔油/厌氧/微动力 A²O 一体化设备/潜流人工湿地组合工艺流程

Fig. 1 Combined process flow of oil separation/anaerobic/micro-power A²O integrated equipment/subsurface constructed wetland

1.2 组合工艺主要构筑物和设备参数

考虑到提高组合工艺设施在冬季的处理效果和稳定出水水质,同时融入农村良好生态景观环境,隔油池、厌氧池、一体化 A²O 设备均埋在地下。提篮格栅为不锈钢材质,栅孔孔径为 3 mm,隔油和一体化 A²O 设备采用碳钢防腐材质,厌氧池为玻璃钢材质。上述设备均设有 0.50 m×0.50 m 的人孔,便于后期的维护管理。组合工艺设施各处理单元的工艺参数见表 2。

表 2 组合工艺设施各处理单元工艺参数

Table 2 Process parameters of each treatment unit of the combined process facilities

项 目	尺寸 (长宽深度)/m	有效容 积/m ³	水力停留时间/d
提篮格栅	0.60×0.60×0.40	—	—
隔油设备	2.00×1.00×1.25	1	0.03
厌氧池	Φ2.80×5.00	25	0.50
微动力 A ² O 一体化设备	6.2×2.8×2.8	43.4	厌氧 0.08、缺氧 0.17、好氧 0.63
潜流人工湿地	12.0×10.0×2.3	96	1.92

潜流人工湿地为砖和砼梁结构,为了防止渗漏对地下水的污染,湿地床底、四周砖墙均铺设了防渗膜,湿地基质从下至上依次为厚为 0.50 m 卵石(Φ20~50 mm)、厚为 1.2 m 碎砖块(Φ10~30 mm)、厚为 0.3 m 重质陶粒(Φ5~10 mm),湿地植物为美人蕉,种植密度为 25 株/m²。沿湿地长度方向设置挡墙将湿地均分为 4 个分室,废水沿长度侧向进入第一个分

室,第一个分室自上而下入渗,经挡墙底部开孔向上流入第 2 个分室,如此交替,形成折流和上下流耦合波形流动进入湿地出水端,在人工湿地出水端设置集水槽,集水槽底部布设穿孔集水管与出水管连接,出水管可上下移动调节以控制湿地床内水位。

1.3 组合工艺运行与监测

项目于 2020 年 9 月正式完工即开始运行调试,11 月初正式运行,进水监测时段为 11 月初至 2021 年 8 月底的大半年时间,监测频率为 1 次/周,其中 2021 年 2 月份春节期间两周没有监测。工艺流程中共设置 5 个监测取样点,分别位于进水提升井、隔油池、厌氧调节池、一体化 A²O 设备内和湿地出水端。

长期监测水质指标包括:悬浮物(suspended solid, SS)、化学需氧量(chemical oxygen demand, COD)、氨氮(NH₃-Nitrogen, NH₃-N)、总氮(total nitrogen, TN)和总磷(TP, total phosphorus),水质分析方法参照相关标准进行,其中 SS 采用称量法, COD 采用重铬酸钾法, NH₃-N 采用纳氏试剂分光光度法, TN 采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法, TP 采用钼酸铵分光光度法^[10]。

2 监测结果与分析

2.1 污染物的去除效果

组合工艺设施经调试且稳定运行后,委托具有污水水质检测资质的第三方水质检测机构对出水进行了 5 次取样检测,结果如表 3 所示。表 3 结果显示出水水质均满足 DB 43/1665—2019 一级排放标准。

表 3 组合工艺设施的进、出水水质

Table 3 Inlet and outlet water quality of the combined process facilities

水质参数	进水数据		出水数据	
	范围	平均值	范围	平均值
pH	6.7~8.5	7.7	6.9~7.8	7.3
SS	96.7~188.5	157.4	5.4~20.8	8.7
COD	134.5~254.7	191.5	8.9~25.7	15.4
NH ₃ -N	13.8~24.7	20.4	4.8~12.8	6.3
TN	28.4~42.5	33.4	11.7~19.4	15.7
TP	1.4~3.1	2.7	0.2~0.8	0.4
动植物油	15.5~47.5	30.8	0.2~1.3	0.5

注:表中除 pH 以外的参数单位为 mg/L。

为详细监测组合工艺设施的性能,如 1.3 节所示对组合工艺设施中各处理单元内水质进行了 38 次取样分析,各污染物浓度监测结果在 2.2~2.6 节中讨论。

2.2 SS 去除效果

运行期间组合工艺设施对 SS 的去除效果、去除率和各处理单元沿程变化见图 2。

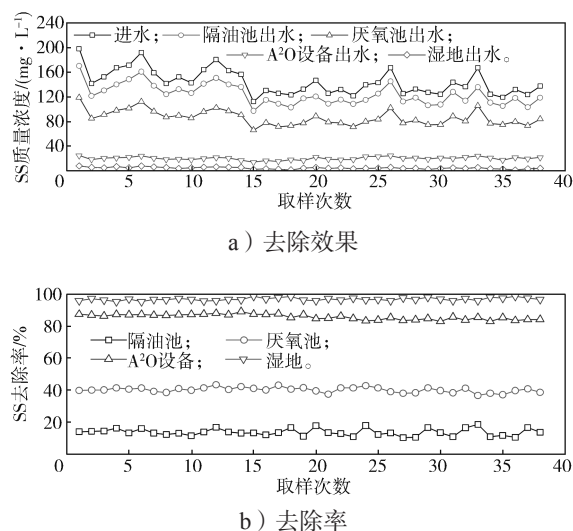


图2 组合工艺设施对SS的去除效果和去除率

Fig. 2 Removal effect and removal rate of combined process facilities on SS

从图2中可以看出,在监测期间,进水中SS质量浓度的变化范围为112.4~198.1 mg/L,平均质量浓度为144.2 mg/L;人工湿地出水SS质量浓度的变化范围为4.7~11.3 mg/L;平均质量浓度为7.8 mg/L;组合工艺设施对SS平均去除率为94.7%,达到DB 43/1665—2019一级排放标准,这表明组合设施能有效且稳定去除污水中的SS。其中隔油池、厌氧池、微动力A²O一体化设备和人工湿地的去除率分别为12.7%, 26.5%, 45.6%和12.1%。隔油池水力停留时间较短,主要通过沉降去除废水中大颗粒污染物;厌氧池则利用大颗粒有机物的水解酸化成可溶性物质,同时较长的水力停留时间也提高了沉降效果,这些使厌氧池出水中SS降低;微动力A²O一体化设备为泥膜耦合系统,提高了污泥的沉降性能,极大降低了出水SS,废水中的大部分SS在微动力A²O一体化设备中被去除;人工湿地中基质对进水中小颗粒物有较好的过滤作用,进一步降低了污水中SS浓度。监测期间,组合工艺设施出水中SS浓度较低且稳定,季节性变化和冲击负荷对组合设施SS去除性能没有影响。

2.3 COD去除效果

运行期间组合工艺设施对COD的去除效果、去除率和各处理单元沿程变化见图3。

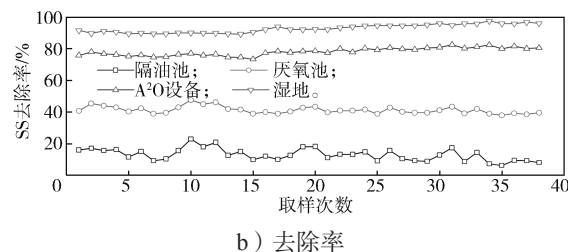
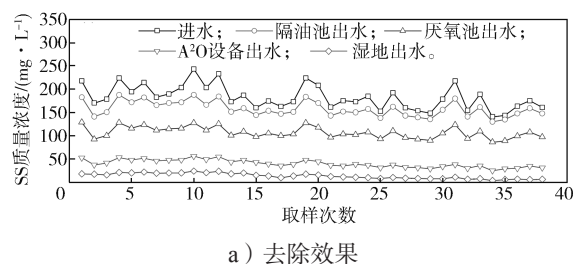


图3 组合工艺设施对COD的去除效果和去除率

Fig. 3 Removal effect and removal rate of combined process facilities on COD

由图3可知,在稳定运行阶段,进水中COD质量浓度的变化范围为140.4~243.2 mg/L,平均质量浓度为182.5 mg/L;人工湿地出水COD质量浓度的变化范围为3.3~23.7 mg/L,平均质量浓度为13.3 mg/L;组合工艺设施对COD的平均去除率为92.9%,满足且优于DB 43/1665—2019一级排放标准,进水中COD浓度存在一定波动,出水中COD浓度比较平稳,这表明组合工艺设施能稳定有效去除废水中的COD,这些归因于隔油池、厌氧池、微动力A²O一体化设备和人工湿地生态组合工艺设施对进水中COD有着缓冲、调节和降解的作用,能有效抗击冲击负荷,稳定出水水质。其中隔油池、厌氧池、A²O一体化设备和人工湿地的去除率分别为13.1%, 28.2%, 37.0%, 14.6%,组合工艺设施中微动力A²O一体化设备对COD去除贡献要明显高于其他处理单元,归因于泥膜耦合系统能高效去除进水中的COD^[11]。监测期间,季节性变化对组合工艺设施COD去除存在一定的影响,图3显示,冬季组合工艺设施出水中COD浓度高于其他季节,归因于低温气候下,微生物活性降低,因而降低了组合设施对COD的降解能力,导致出水中COD浓度上升。

2.4 NH₃-N去除效果

运行期间组合工艺设施对NH₃-N的去除效果、去除率和各处理单元沿程变化见图4。由图4可知,在组合工艺设施稳定运行阶段,进水中NH₃-N质量浓度的变化范围为14.0~24.6 mg/L;平均质量浓度为18.4 mg/L,人工湿地出水NH₃-N质量浓度的变化范围为1.8~8.6 mg/L,平均质量浓度为5.3 mg/L;组合工艺设施对NH₃-N平均去除率为70.5%,达到DB 43/1665—2019一级排放标准。其中隔油池的去除率仅为4.7%,主要依靠吸附在颗粒物上的少量NH₃-N而得到沉降去除。而厌氧反应池的去除率为-17.4%,在厌氧池内污水中有机氮通过水解、氨化作用转化为NH₃-N,导致了厌氧池出水中NH₃-N增加。微动力A²O一体化设备的去除率为65.2%,人工湿地的去除率为17.9%。组合工艺设施对NH₃-N

具有较好的去除效果,这主要是依靠微动力 A²O 一体化设备的泥膜耦合系统中微生物的硝化作用,同时,在人工湿地中交替出现的好氧环境中,基质膜上微生物的硝化作用及植物根系吸收则进一步强化了对进水中 NH₃-N 的去除。监测期间,季节性变化影响了组合工艺设施对 NH₃-N 的去除,在冬季低温环境下,组合设施出水中 NH₃-N 浓度高于其他季节,归因于低温气候下微生物硝化活性降低,影响了组合工艺设施对 NH₃-N 的去除效果。

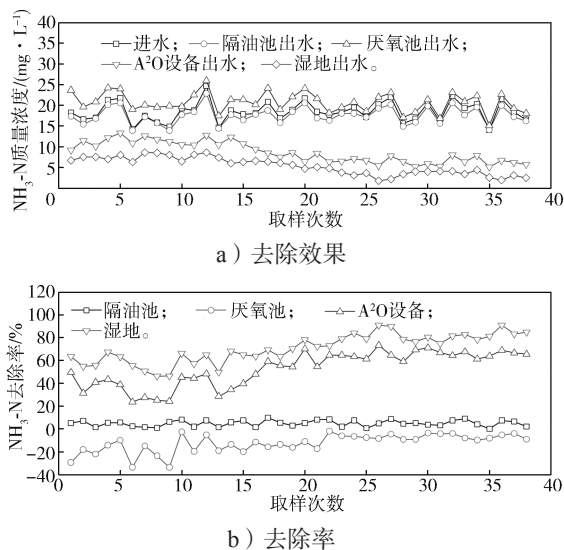


图4 组合工艺设施对 NH₃-N 的去除效果和去除率

Fig. 4 Removal effect and removal rate of combined process facilities on NH₃-N

2.5 TN 去除效果

运行期间组合工艺设施对 TN 的去除效果、去除率和各处理单元沿程变化见图 5。

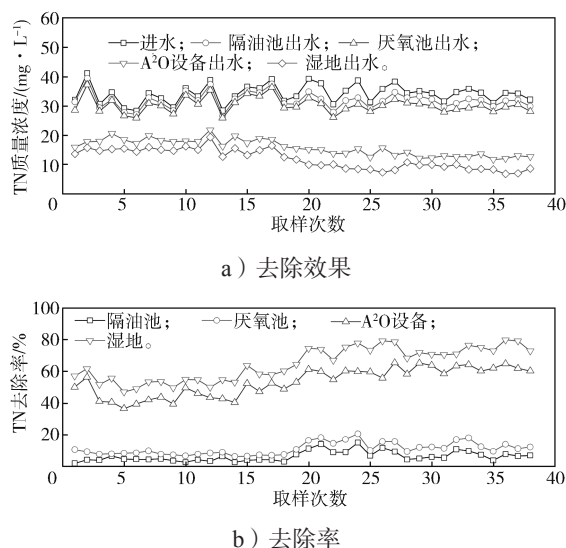


图5 组合工艺对 TN 的去除效果和去除率

Fig. 5 Removal effect and removal rate of combined process facilities on TN

由图 5 可知,在组合工艺设施稳定运行阶段,进水中 TN 质量浓度的变化范围为 28.4~41.2 mg/L,平均质量浓度为 34.2 mg/L;人工湿地出水 TN 质量浓度的变化范围为 6.9~19.4 mg/L,平均质量浓度为 12.0 mg/L;组合设施对 TN 平均去除率为 64.8%,出水水质比较稳定,达到 DB 43/1665—2019 一级排放标准。其中隔油池的去除率仅为 6.5%,归因于污水中颗粒态有机氮或吸附在颗粒物上 NH₃-N 的沉降。厌氧池的去除率为 4.8%,在厌氧环境下,微生物增值的吸收对氮的去除非常有限。微动力 A²O 一体化设备的去除率为 40.4%,人工湿地的去除率为 13.2%,A²O 一体化设备对废水中氮的去除发挥了主导作用。而人工湿地则依靠不断交替好氧、缺氧环境中基质膜上微生物的硝化和反硝化作用及植物根际的吸收作用,强化了废水中 TN 的去除,桂双林等^[12]在厌氧/生物滴滤塔/人工湿地组合工艺处理农村生活污水的研究中也报道了类似现象。监测期间,季节性变化影响了组合设施对 TN 的去除,图 5 显示,在冬季低温环境下,组合设施出水中的 TN 浓度高于其他季节,这是因为低温气候下微生物硝化、反硝化活性降低,植物对氮素吸收能力也降低导致的。

2.6 TP 去除效果

运行期间组合工艺设施对 TP 的去除效果、去除率和各处理单元沿程变化见图 6。

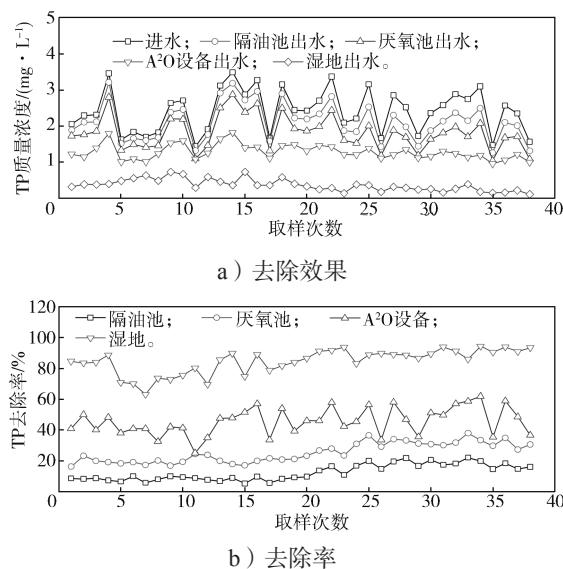


图6 组合工艺对 TP 的去除效果和去除率

Fig. 6 Removal effect and removal rate of combined process facilities on TP

由图 6 可知,在组合工艺设施稳定运行阶段,进水中 TP 质量浓度变化范围为 1.4~3.5 mg/L,平均质量浓度为 2.4 mg/L;人工湿地出水 TP 质量浓度的变化范围为 0.1~0.7 mg/L,平均质量浓度为 0.4 mg/L,

达到 DB 43/1665—2019 一级排放标准。组合工艺设施对 TP 平均去除率为 84.7%。其中,人工湿地对 TP 去除的贡献最大,达到 39.1%,而 A²O 一体化设备只贡献了 24.8%,厌氧池贡献了 8.4%,隔油池贡献了 12.4%。主要原因是由于湿地介质中采用了碎砖粒,可较好地吸附去除进入湿地中的磷,此外,湿地中植物根系可在湿地介质中形成好氧环境,利于介质对磷的吸附和沉淀,同时植物也可以吸收部分磷^[8,13]。微动力 A²O 一体化设备对磷的处理效果弱于人工湿地,归因于 A²O 一体化设备中装设了弹性填料,形成了泥膜耦合环境,排泥量较少,且泥龄较长,难以通过排泥去除污水中的磷,导致 A²O 一体化设备除磷效果不佳,杨卫等^[14]在倒置 A²O 一体化装置的运行中报道了类似结论。而隔油设备主要通过沉降去除了进水中颗粒态的磷。监测期间,组合工艺设施运行稳定,冲击负荷对设施的 TP 去除几乎没有影响,组合工艺设施具有较好的抗冲击负荷能力。冬季组合设施出水中 TP 浓度高于夏季,可能归因于低温环境下,微生物活性降低,因而降低了微生物过量吸磷、增值排泥除磷效果,导致冬季低温环境下组合设施出水中 TP 浓度高于夏季。

3 结论

通过对人工湿地组合工艺设施处理农村生活污水效果的长期监测,可得到以下结论:

1) 采用隔油/厌氧/微动力 A²O 一体化设备/潜流人工湿地组合工艺设施处理农村生活污水,组合工艺设施对 SS、COD、NH₃-N、TN 和 TP 的平均去除率分别达 94.7%, 92.9%, 70.5%, 64.8%, 84.7%, 出水水质达到 DB 43/1665—2019 一级排放标准。

2) 组合工艺设施各处理单元中, A²O 一体化设备对 SS、COD、NH₃-N、TN 的去除贡献率最大,而人工湿地对 TP 的贡献率最大。

3) 除 SS 外,其他污染物的去除均受到季节变化的影响,夏季处理效果好于冬季处理效果。

4) 组合工艺设施运行稳定,对农村生活污水具有良好的净化处理效果,具有较好的抗冲击负荷能力,适合在农村地区推广应用。

参考文献:

- [1] 诸刚,蒋晓,杨学坤.北京市农村污水处理反应器研究进展分析[J].中国农机化学报,2016,37(7): 277-280.
- [2] 贾小宁,何小娟,韩凯旋,等.农村生活污水处理技术研究进展[J].水处理技术,2018,44(9): 22-26.
- [3] 柳君侠,李明月.浅谈人工湿地在我国农村污水处理中的应用现状[J].能源与环境,2010(2): 64-65.
- [4] 付丽霞,崔宁,刘世虎,等.水解酸化-接触氧化-MBR 一体化装置处理农村生活污水[J].环境工程,2018,36(11): 49-52.
- [5] 何占飞,陈园园,荀方飞.混合工艺处理农村生活污水试验研究[J].水资源与水工程学报,2012,23(6): 158-159, 162.
- [6] 古腾,吴勇,王橹橹.曝气生物滤池-模块化人工湿地组合工艺处理农村生活污水[J].环境工程,2018,36(1): 20-24.
- [7] 聂发辉,黄敏峰,鲁秀国,等.生物接触氧化-潜流型人工湿地组合工艺处理农村生活污水的试验研究[J].应用化工,2018,47(10): 2162-2164, 2168.
- [8] 熊仁,谢敏,冯传禄,等.厌氧+跌水曝气+人工湿地组合工艺处理农村生活污水[J].环境工程学报,2019,13(2): 327-331.
- [9] JIA Xiaoning, HE Xiaojuan, HAN Kaixuan, et al. Research Progress of Sewage Treatment Technology in Rural Areas[J]. Technology of Water Treatment, 2018, 44(9): 22-26.
- [10] LIU Junxia, LI Mingyue. Discussion on the Research and Application of Constructed Wetland in Rural Sewage Treatment in China[J]. Energy and Environment, 2010(2): 64-65.
- [11] FU Lixia, CUI Ning, LIU Shihu, et al. Treatment Performance of Rural Domestic Wastewater by "Hydrolytic Acidification-Biological Contact Oxidation-MBR" Integrated Treatment Equipment[J]. Environmental Engineering, 2018, 36(11): 49-52.
- [12] HE Zhanfei, CHEN Yuanyuan, XUN Fangfei. Experiment of Comprehensive Technology in Treatment of Rural Domestic Wastewater[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2012, 23(6): 158-159, 162.
- [13] GU Teng, WU Yong, WANG Xiaotong. Treatment of Rural Domestic Sewage by Using Biological Aerated Filter and Modular Constructed Wetland Combined Process[J]. Environmental Engineering, 2018, 36(1): 20-24.
- [14] NIE Fahui, HUANG Minfeng, LU Xiuguo, et al. Experimental Study on Treatment of Rural Domestic Sewage by Biological Contact Oxidation-Subsurface Flow Constructed Wetland Combined Process[J]. Applied Chemical Industry, 2018, 47(10): 2162-2164, 2168.

ZHU Gang, JIANG Xiao, YANG Xuekun. Analysis

- XIONG Ren, XIE Min, FENG Chuanlu, et al. Rural Domestic Sewage Treatment by a Combined Process of Anaerobic Tank, Drop-Aeration and Constructed Wetland[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2019, 13(2): 327-331.
- [9] 湖南省市场监督管理局. 农村生活污水处理设施水污染物排放标准: DB43/1665—2019[S]. 长沙: 湖南省生态环境厅, 2019: 1-4.
- Administration for Market Regulation of Hunan Province. Discharge Standard of Water Pollutants for Rural Sewage Treatment Facilities: DB43/1665—2019[S]. Changsha: Ecology and Environment Department of Hunan, 2019: 1-4.
- [10] 国家环境保护总局, 水和废水监测分析方法编委会. 水和废水监测分析方法 [M]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 15-30.
- State Environmental Protection Administration, Editorial Board of Water and Wastewater Monitoring and Analysis Methods. Water and Wastewater Monitoring and Analysis Methods[M]. 4th ed. Beijing: China Environment Science Press, 2002: 15-30.
- [11] 郑俊, 余沛, 张德伟, 等. 新型一体化农村联户污水处理装置研制与应用 [J]. 中国给水排水, 2019, 35(18): 78-82.
- ZHENG Jun, YU Pei, ZHANG Dewei, et al. Development and Application of a New Integrated Device for Rural Domestic Sewage Treatment[J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(18): 78-82.
- [12] 桂双林, 王顺发, 吴永明, 等. 厌氧-生物滴滤塔-人工湿地组合工艺处理农村生活污水 [J]. 江西科学, 2013, 31(6): 788-791.
- GUI Shuanglin, WANG Shunfa, WU Yongming, et al. Combined Process of Anaerobic /Trickling Biofilter/ Constructed Wetlands for Treatmeat of Rural Domestic Sewage[J]. Jiangxi Science, 2013, 31(6): 788-791.
- [13] 李紫霞, 唐晓丹, 崔理华. 3 种负荷对模拟垂直流人工湿地去除氮、磷效果的影响 [J]. 环境工程学报, 2016, 10(2): 637-642.
- LI Zixia, TANG Xiaodan, CUI Lihua. Effects of Three Kinds of Loads on the Removal of TN and TP in a Simulated Vertical Flow Constructed Wetlands[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(2): 637-642.
- [14] 杨卫, 李孟. 一体化装置处理农村生活污水工程设计与调试运行 [J]. 中国给水排水, 2015, 31(20): 93-96, 100.
- YANG Wei, LI Meng. Design and Trial Operation of Integrated Device for Rural Domestic Sewage Treatment[J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(20): 93-96, 100.

(责任编辑: 申剑)

(上接第 55 页)

- [11] WANG Y C, YU B W, ZHANG Y Y, et al. TPLinker: Single-Stage Joint Extraction of Entities and Relations Through Token Pair Linking[EB/OL]. [2021-09-02]. <https://arxiv.org/abs/2010.13415>.
- [12] 陈仁杰, 郑小盈, 祝永新. 融合实体类别信息的实体关系联合抽取 [J]. 计算机工程, 2022, 48(3): 46-53.
- CHEN Renjie, ZHENG Xiaoying, ZHU Yongxin. Joint Entity and Relation Extraction Fusing Entity Type Information[J]. Computer Engineering, 2022, 48(3): 46-53.
- [13] LI S J, HE W, Shi Y B, et al. DuIE: A Large-Scale Chinese Dataset for Information Extraction[EB/OL]. [2021-09-02]. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-32236-6_72.
- [14] 鄂海红, 张文静, 肖思琪, 等. 深度学习实体关系抽取研究综述 [J]. 软件学报, 2019, 30(6): 1793-1818.
- E Haihong, ZHANG Wenjing, XIAO Siqi, et al. Learning[J]. Journal of Software, 2019, 30(6): 1793-1818.
- [15] 李冬梅, 张扬, 李东远, 等. 实体关系抽取方法研究综述 [J]. 计算机研究与发展, 2020, 57(7): 1424-1448.
- LI Dongmei, ZHANG Yang, LI Dongyuan, et al. Review of Entity Relation Extraction Methods[J]. Journal of Computer Research and Development, 2020, 57(7): 1424-1448.
- [16] 武小平, 张强, 赵芳, 等. 基于 BERT 的心血管医疗指南实体关系抽取方法 [J]. 计算机应用, 2021, 41(1): 145-149.
- WU Xiaoping, ZHANG Qiang, ZHAO Fang, et al. Entity Relation Extraction Method for Guidelines of Cardiovascular Disease Based on Bidirectional Encoder Representation from Transformers[J]. Journal of Computer Applications, 2021, 41(1): 145-149.

(责任编辑: 申剑)