

李昀婷, 石玉敏, 王俭. 农村生活污水一体化处理技术研究进展[J]. 环境工程技术学报, 2021, 11(3): 499-506.

LI Y T, SHI Y M, WANG J. Research progress on integrated treatment technologies of rural domestic sewage[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2021, 11(3): 499-506.

农村生活污水一体化处理技术研究进展

李昀婷¹, 石玉敏^{1,2*}, 王俭¹

1. 辽宁大学

2. 辽宁省环保集团有限责任公司

摘要 我国农村生活污水具有污水量大且分散的特点,难以实现集中处理,选择处理效率高、经济性好、实用性强、便于运行维护与管理的农村生活污水处理技术和设备非常重要。综述了农村生活污水一体化处理技术,阐明一体化活性污泥衍生工艺、生物膜处理工艺、膜生物反应器工艺及其组合工艺的适用范围和优缺点,分析了适宜分散式污水处理的技术模式,即小型一体化装置处理与集中收集处理相结合。以处理量为5 t/d的小型污水处理一体化设备为基础,综合农村生活污水排放特点,对比分析了各处理工艺的污染物去除性能和经济指标,提出一体化生物接触氧化工艺、改进型生物膜与活性污泥混合工艺及在厌氧-缺氧-好氧工艺段后端增加缺氧沉淀段工艺等是我国农村生活污水一体化处理技术的发展趋势。

关键词 水污染;农村生活污水;一体化工艺;技术进展

中图分类号:X799.3 文章编号:1674-991X(2021)03-0499-08 doi:10.12153/j.issn.1674-991X.20200146

Research progress on integrated treatment technologies of rural domestic sewage

LI Yunting¹, SHI Yumin^{1,2*}, WANG Jian¹

1. Liaoning University

2. Liaoning Environmental Protection Group

Abstract Rural domestic sewage in China has the characteristics of large amount and dispersion, so it is difficult to achieve centralized treatment. Therefore, it is very important to select rural domestic sewage treatment technologies and equipment with high treatment efficiency, good economy, strong practicability, and easy operation, maintenance and management. The processes of integrated rural domestic sewage treatment technologies were reviewed, and the applicable range, advantages and disadvantages of integrated activated sludge derived process, biofilm treatment process, membrane bioreactor (MBR) process and their combination and integration process were illustrated. The appropriate decentralized sewage treatment technology mode was analyzed, namely small integration device processing combined with centralized collection treatment. Based on the small integrated sewage treatment equipment with a treatment capacity of 5 t/d, and combined with the discharge characteristics of rural domestic sewage, the pollutant removal performance and technical and economic indexes of each treatment process were compared and analyzed. It was proposed that the integrated biological contact oxidation technology, the improved biofilm and activated sludge mixed technology and the addition of anoxic precipitation section at the end of the anaerobic-anoxic-aerobic (AAO) process were the development trends of the integrated treatment technologies of rural domestic sewage in China.

Key words water pollution; rural domestic sewage; integrated process; technical progress

收稿日期:2020-06-09

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2018ZX07601-004);辽宁省“兴辽英才计划”项目(XLYC1902018)

作者简介:李昀婷(1995—),女,硕士研究生,研究方向为水环境工程,963566108@qq.com

* 责任作者:石玉敏(1968—),女,教授级高级工程师,博士,主要从事水污染控制技术研究,Shiy2005@hotmail.com

按行政村比例计,2016年我国农村生活污水治理率仅为22%^[1],2017年提高至25%;若以自然村计,2019年统计数据表明全国有250万个自然村、6.7亿农村人口,但污水治理率不到10%^[2]。2018年9月,生态环境部、住房和城乡建设部联合印发《关于加快制定地方农村生活污水治理排放标准的通知》,之后我国很多省、自治区、直辖市等制订了适合本省(区、市)的农村生活污水处理排放标准,其中以北京市制订并发布的DB 11/1612—2019《农村生活污水处理设施水污染物排放标准》最为严苛,其一级A排放标准COD为50 mg/L、NH₃-N浓度为5 mg/L、TP浓度为0.5 mg/L,还增加了动植物油等指标。可见,国家层面和地方政府都很重视农村生活污水治理问题,各地区均在积极有效地采取防治措施和技术升级手段,以提高农村生活污水处理能力和水平。

农村生活污水若得不到有效治理,会影响村镇饮用水安全,造成土壤肥力下降,粮食产量降低,也会对地下水、湖泊、流域的水质产生影响^[3-5]。因此,深入探讨与研究、选择和应用农村分散式污水处理技术与模式,使其因地制宜、有效运行,是解决农村生活污水污染问题的有效途径。笔者从分析农村生活污水一体化技术特点出发,综述了一体化技术适用范围和优缺点,分析了适宜分散式污水处理的技术模式,旨在为技术模式选择、推广和应用提供理论支撑,进而促进农村水资源环境的健康、可持续发展。

1 农村生活污水来源与特征

农村生活污水主要来源于厨房污水、生活洗涤污水和冲厕水等^[6],另外我国大部分农村地区农户家中普遍散养牲畜(猪、羊和禽类等),牲畜的洗涤用水、粪水等含有大量污染物的污水也常被纳入农村生活污水进行统一收集与处理。农村生活污水具有排放点分散、水量小、时段性和季节性强等特点,污水中氮、磷浓度高且含有大量的营养盐、细菌和病毒^[6-7],上述特点均给农村生活污水处理带来挑战。

农村生活污水在处理与排放方面有以下特点^[8-9]:1)污水产生量小、分散且成分不同。农村地区总用水量较少且污染物成分单一,极少有毒有害成分。2)污水排放量时空分布变化大。由于农村居民生活作息习惯的特点,用水高峰时段集中,夜间基本不外排水,且用水量与季节、气候变化关联性

高,生活用水呈现冬季少夏季多的特点。3)具有可生化处理性。农村生活污水中的氮、磷及有机物的浓度较高,且不含有毒、有害物质,易生化处理。4)污水分散、难集中。现阶段大部分农村生活污水直接排放或经化粪池简单处理后排放,污水处理程度低,对附近流域水质以及土壤土质具有较大影响^[10-11]。总体来说,我国不同地区、不同经济水平的农村生活污水成分特征和排放规律可以概括为:中部地区的污水中污染物浓度较高,治理方式以设施处理和农田排放为主;南部沿海地区人均生活污水排放量较大,因经济发达,污水处理率较高;北方地区污水排放量较少,污染物浓度较低,但污水处理率也相对较低^[12]。

因此选择农村生活污水处理工艺、处理设施时,首先应考虑当地生活污水收集、处理及排放情况,确保出水水质稳定达标的同时能耗费用低、易管理维护;同时农村生活污水处理需遵循生态化、节能化、景观化的原则,以实现污水回用及氮、磷资源化利用,并提高农业经济效益。

2 农村生活污水一体化处理技术

农村分散式生活污水可采用自然净化技术进行处理,如人工湿地污水处理、污水土地处理、稳定塘处理等技术,其特点为利用自然水体或土壤中植物、微生物的自净作用实现对污染物的吸收与降解,但其具有受环境条件限制,出水水质不稳定等缺点。一体化处理技术是指对传统污水处理工艺各功能模块进行优化设计、组合,减少工艺复杂度,满足不同规模、成本、进水水质等要求的污水处理工艺,其优势包括方便运输、现场安装简单及占地面积较小等,一体化处理技术为现阶段农村生活污水处理技术研究的热点。结合我国农村生活污水处理技术的主要进展,一体化处理技术依据技术原理主要可分为一体化活性污泥衍生工艺、一体化生物膜处理工艺、一体化膜生物反应器(MBR)工艺以及一体化组合工艺等类型。

2.1 一体化活性污泥衍生工艺

2.1.1 一体化AAO工艺

AAO工艺即为厌氧-缺氧-好氧污水处理工艺,污水经厌氧区释磷、缺氧区脱氮以及好氧区硝化和除磷3个阶段,可达到较好的脱氮除磷效果,且总水力停留时间(HRT)少于其他工艺。该工艺设备结构简单,污水处理工作中的运营成本较低,适合于在大多数农村地区推广使用。AAO工艺中,缺氧池体

积对污水处理效率影响显著,当缺氧池体积发生变化时,化学需氧量(COD)去除率随缺氧池体积的增加而增大,氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)去除率随缺氧池体积的增大而减小,总氮(TN)与总磷(TP)去除率随缺氧池体积的增大呈先增大后减小的趋势^[13]。

整合工艺流程、缩小占地面积是一体化 AAO 工艺亟待解决的问题。肖焯圻等^[14]设计了竖流式一体化反应器(图 1)处理农村生活污水,该反应器将常规 AAO 工艺中单独设置的厌氧区、缺氧区、好氧区和沉淀区整合为一体,考察了 HRT 和好氧区溶解氧(DO)浓度对处理效果的影响。结果表明,HRT 为 8 h,DO 浓度为 2.5 mg/L 时,出水 COD 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN、TP 浓度均可以满足 GB 18918—2002《城镇污水处理厂污染物排放标准》一级 A 标准。针对一体化工艺中污泥处理处置问题,任宏洋等^[15]将 AAO 系统中剩余污泥臭氧化处理,研究了处理后污泥减量效果和污水处理效能,考察了污泥全部回流至厌氧区、等比例回流至厌氧区和缺氧区、全部回流至缺氧区 3 种回流方式下累积排放量,发现耦合后的 AAO 系统排放量分别下降了 51.3%、49.8%、47.6%;另外研究发现,臭氧化污泥回流提高了污泥沉降性和系统的脱氮能力,且污泥回流区域对 TP 的去除率有较大影响,确定等比例回流臭氧化污泥至厌氧区和缺氧区为最佳回流方式。

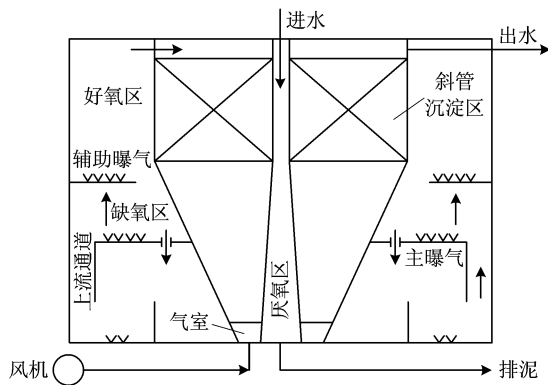


图 1 竖流式 AAO 一体化反应器^[14]

Fig. 1 Vertical-flow AAO integrated reactor

2.1.2 一体化 SBR 工艺

序批式活性污泥(SBR)工艺,即污水在装置中按时间顺序依次反复进行曝气、反应沉淀、排水闲置等过程。该工艺优点为占地面积小、运行方式灵活、脱氮除磷效率高,适用于经济条件好但水资源、土地紧缺的地区^[16]。该工艺也有较多不足,如间歇排水时,需要设置专门的排水设备(滗水器),且易产生

浮渣^[17]。由于工艺的要求高,需要专业人员定期维护,运维费用较高,因此不适用于在经济落后的农村地区推广使用,常用于度假区、高速公路休息区等的分散式污水处理。

为降低工艺装置复杂度,张冰等^[18]设计了无复杂出水装置的一体化空气提升 SBR 反应器,用于处理低碳氮比(C/N)的农村生活污水,在 DO 浓度为 3 mg/L、曝气 3 h、沉淀 1.5 h 时,可保证出水水质指标 COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN、TP 均满足 GB 18918—2002 二级标准,且装置能耗较低、剩余污泥产量少、维护管理方便,具有较强的抗冲击负荷能力。针对传统 SBR 工艺污泥絮体结构松散、沉降速率低问题,薛晨楠等^[19]考察了磁粉(微米 Fe_3O_4)对系统活性污泥和污水处理效果的影响,结果表明,磁化污泥 SBR 系统处理率较高,综合经济和处理效率因素,确定最佳磁粉投加量为 0.5 g/L,此时出水 COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN、TP 去除率分别为 95.30%、91.48%、70.83% 和 92.80%,满足 GB 18918—2002 一级标准。

2.2 一体化生物膜处理工艺

2.2.1 一体化生物接触氧化工艺

生物接触氧化工艺由厌氧和好氧 2 个反应器组成,内置附着生物膜的填料,通过生物膜的代谢分解作用去除水体污染物。该工艺在农村地区使用较为普遍,主要特点是出水水质稳定可靠、占地面积较小、安装简便。通过地理式等简单保暖措施,可适用于北方寒冷地区农村生活污水的处理。日本净化槽是以水解+接触氧化为基础工艺的分散式生活污水处理一体化工艺,主要通过絮凝沉降、物理沉淀及微生物的降解等作用去除水体中污染物,按用途不同可分为单独处理净化槽、合并处理净化槽、深度处理净化槽 3 类^[20-21],日本净化槽是我国众多一体化装置设计和借鉴的原型,对推动国内一体化技术发展起到一定作用^[22-23]。

填料是生物接触氧化工艺的核心组件,由于填料在运行过程中易发生老化、板结等问题,影响系统的处理效率,加大运行维护难度,因此选择挂膜能力好和可操作性强的填料是重中之重。Xie 等^[24]采用铁、活性炭和沸石制作复合过滤器(Fe/C-ZACID),将材料以不同比例混合后将大小不同的 2 个过滤器分别放入好氧和厌氧反应区。结果表明,该装置的生物反硝化过程复杂,脱氮和抗冲击能力强,在 HRT 为 6 h,DO 浓度约 3 mg/L,进水 C/N 为 3,硝酸盐循环比为 100% 条件下, $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 TN 的去除率可高达 95% 和 85%。沈波等^[25]采用一体化生物活性

炭中试装置,以柱状活性炭为载体进行人工挂膜,发现 4.0 mm 的柱状炭挂膜成功后,气水体积比为 2:1 时,装置对污染物的去除率最高,但活性炭使硝化细菌生长受限,氨氮去除率较低。从成本控制上看,微生物可提高活性炭吸附能力,延长使用周期,降低装置运行成本^[26]。合续环境研发的 CHtank 污水净化罐^[27]采取分户/联户处理、自由组合的设计理念,采用固液分离+多级厌氧好氧(A/O)和固液分离+同步硝化反硝化(SND)2种工艺,使用软性固定填料作为过滤模块,满足不同水量的处理要求,该系列产品具有工艺简单、运行稳定、运行成本低及安装灵活等特点。

2.2.2 一体化生物转盘工艺

生物转盘工艺通过转盘交替与空气和污水相接触,使盘片附着生物膜,利用水的自然落差使生物膜连续吸氧、吸附和氧化分解,以净化水体。生物转盘工艺是生物膜处理技术的一种^[28],该工艺具有污染物处理能力较强,微生物浓度较高,无需泥水分离设备,出水悬浮物(SS)浓度较低^[13]等优点;其缺点在于盘片的材质、形状、质量及有效面积等直接影响转盘的处理效率,但盘片面积过大或材质过重会使设备占地面积和运行成本增加。

盘体结构优化是生物转盘工艺当下的研究热点之一。Han等^[29]开发了新型可自动回流旋转的一体化生物转盘装置(NISRRBC),试验发现自动回流硝化液和污泥可提高污染物去除率。在转速为 5 r/min, HRT 为 8 h, 浸没直径为 40%, 回流比为 200% 条件下,出水 COD、SS、NH₃-N 和 TN 浓度可达 (37.41 ± 9.40)、(6.27 ± 1.28)、(4.99 ± 0.95) 和 (18.67 ± 1.46) mg/L。另外,盘片优化升级的新式生物转盘技术,如采用空间立体结构转盘盘片的“3D-RBC 立体结构生物转盘技术”^[30]、盘片添加碳黑素防止老化的“KEE 一体化低碳生物转盘”^[31]等改良型一体化生物转盘主体工艺也同样值得关注^[10]。

2.2.3 一体化生物滤池工艺

曝气生物滤池(BAF)是一种污水固定床生物膜处理技术^[32],该工艺将生物氧化和 SS 截留结合在一起,空气经压缩曝气供给挂膜的颗粒状悬浮填料,通过反冲洗再生实现周期运行^[33]。BAF 工艺具有占地面积小、有机负荷高、不产生污泥膨胀等优点^[34-35],但在进水 SS 浓度较大时,该工艺运行周期缩短,导致反冲洗不完全,易出现堵塞、同步生物除磷效果差等问题。

生物滤池的滤速决定 BAF 的处理能力,同时也决定设备运行参数和造价。王铭源等^[36]考察滤速对一体化复合三级生物滤池污水处理效果的影响,结果表明,一体化复合生物滤池对 COD、NH₃-N、TN 的去除效果整体随滤速增大而减小,其中 TN 对滤速变化最敏感。吴亚慧等^[37]考察了一体化生物滤池中硝化液回流比对污染物的去除效果,发现增大回流比时,系统对 COD、NH₃-N 和 TN 的去除率先增大后降低;回流体积比控制在 100% 时,一体化生物滤池对 COD、NH₃-N 去除率较高,分别达到 86.08%、90.01%。

2.3 一体化 MBR 工艺

一体化 MBR 工艺是指膜分离与生物膜处理有机结合的新型污水处理技术^[38],其通过膜分离的原理提高活性污泥的浓度,从而强化生物反应器的功能并省去二沉池,保证在发生污泥膨胀时也可稳定运行。但该工艺易产生膜污染,出现膜通量下降、膜分离阻力增加、膜分离特性改变等问题;另外膜组件及施工成本投入较高,且运行维护困难,适用于对污水处理质量要求较高同时对水体环境比较敏感的农村污水处理项目^[39]。根据膜组件和生物反应器的不同组合方式,可将 MBR 分为分置式、一体式及复合式,其中分置式 MBR 较常见^[40]。

为减少膜污染、提升膜寿命,王阳等^[41]发明了一种旋转膜生物气升式循环反应器,其中膜过滤装置包括旋转接头和曝气管,膜组件可通过旋转接头驱动旋转,该发明降低了设备能耗,减少了维护成本。为验证工艺在北方寒冷地区的适用性,晁雷等^[42]在辽宁省某村生活污水处理中采用兼氧 MBR 分散式污水处理与回用一体化工艺(图 2),工程试运行发现,采用地下埋置保温方式,在温度低的北方冬季该工艺能正常运行,兼性厌氧菌可适应含氧量变化,适用于进水量波动大的农村地区的生活污水处理,出水能稳定达到 GB 18918—2002 一级 B 标准。

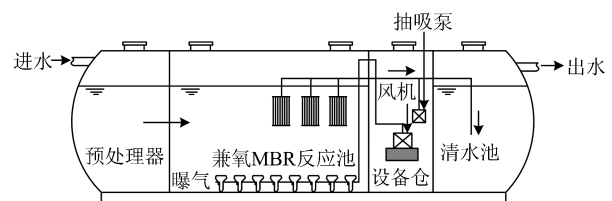


图 2 兼氧 MBR 一体化工艺

Fig. 2 Facultative MBR integrated equipment

2.4 一体化组合工艺

污水处理工艺往往非由单一处理工艺组成,而多采用组合工艺或多级工艺,以提高污水处理能力,使生活污水达标排放。如在我国南方大部分地区,分散式生活污水常采用结构简单的一体化处理工艺与氧化塘、人工湿地联用,利用自然中的微生物和植物的净化作用,使污水高效达标并降低成本。如付丽霞等^[43]设计了水解酸化-接触氧化-MBR生物反应器,MBR膜采用中空纤维膜,系统运行90 d,出水COD为35 mg/L, $\text{NH}_3\text{-N}$ 为3.7 mg/L, TP为0.3 mg/L,去除率较高且设备运行稳定可靠;陈永志等^[44]考察了AAO-曝气生物滤池生化系统的脱氮除磷特性,以低C/N生活污水为研究对象,通过缩短AAO的泥龄分离硝化过程,在曝气生物滤池进行硝化反应,实现硝化菌和聚磷菌的分离,解决了硝化菌和聚磷菌泥龄之间的矛盾。马来西亚某填海人工岛的污水处理厂采用固定化好氧生物膜(BioAX)与嵌入式固定化硝化菌(MBS)载体(图3)流化床反应器组合的新工艺^[45], BioAX为改进型生物膜、活性污泥混合工艺(IFAS)^[46], MBS是指用一种包埋固定化菌载体填料取代常规塑料多孔圆形填料^[47],该新型污水处理工艺具有较高的处理效率且节省占地空间,在节能减排、污泥减量和维护管理上具有明显优势,出水可达到GB 18918—2002一级A标准。

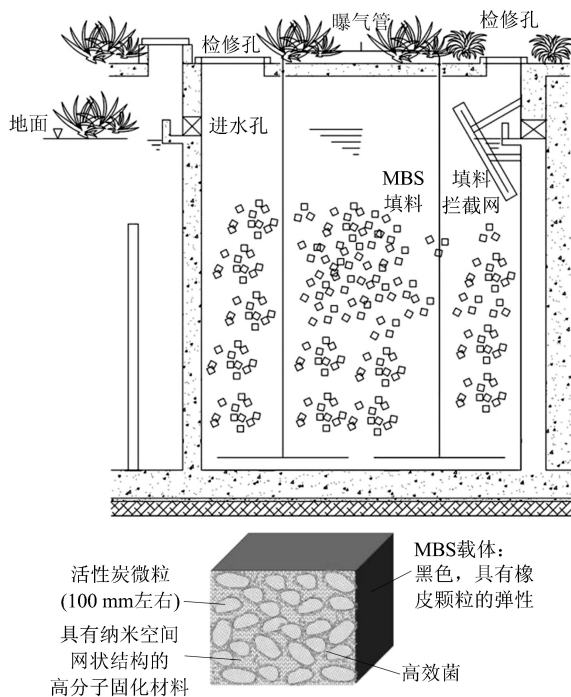


图3 MBR池和生物膜载体^[45]

Fig. 3 MBR tank and membrane biocarrier

3 农村生活污水一体化处理技术发展趋势

农村分散式生活污水处理技术发展趋势是在保证出水水质的前提下,最大限度地缩短和简化工艺流程^[48]。在全国各地农村生活污水处理标准和技术标准不断出台、要求不断提高的背景下,农村生活污水处理技术宜采取分散处理与集中收集相结合的模式,不同农村地区采用的处理技术应具有经济性和环境适应性。

3.1 农村生活污水一体化处理技术发展要求

目前一些农村地区采用的污水处理技术设施建设和运行成本高、运营能力不足,尚存在不能达标排放或与农村地区经济发展水平不适应的现象,因此建议农村生活污水一体化技术的发展满足以下要求:1)创新不同规模型号与模块化的一体化污水处理设备。分户处理需考虑设施的需求处理量,以合理确定设计处理规模;集中污水处理站处理则需考虑管网铺设难度,根据不同处理需求,可采用模块化的处理设备。2)依据地理地貌及气候差异、受纳水体的环境污染负荷,因地制宜地选择和优化处理技术。如在北方地区,应选择适合冬季寒冷气候的污水处理技术,采取地理式方法以及保温措施,考虑生物生长、生活条件与活性对处理效率和出水水质的影响。在南方地区,可考虑使用组合技术如一体化设备与人工湿地或氧化塘联用,以提高工艺适配度。3)使用智能化污水处理操作系统,以可编程控制器(PLC)为控制核心实现自动控制^[49]。农村生活污水一体化处理缺少专业人员的维护和管理,可使用互联网与在线设备联用,以实现远程控制、无人值守、精准加药和曝气、问题诊断功能等,确保水质稳定达标排放。4)降低制作、安装、运行和维护成本。针对地方出台的排放标准,选择经济适用的污水处理技术,在水质达标的前提下,降低工艺复杂度,减少管路和阀门,降低设备投资和运行维护的成本,使一体化处理技术在经济落后的农村地区也能适用。

3.2 农村生活污水一体化处理技术发展趋势

以处理量为5 t/d的小型污水处理一体化设备为基础指标,综合小型农村生活污水的排放特点,以9~10户三口之家每日的污水排放量为例,规定生活污水日平均排污量COD为100~400 mg/L, $\text{NH}_3\text{-N}$ 为20~80 mg/L, TP为1.5~6 mg/L,对比几种一体化技术的污染物去除性能和经济指标,结果如表1所示。由表1可知,一体化AAO工艺、一体化SBR工艺结构简单,设备建成和运行费用少,适合对出水

要求不高的大多数农村地区;一体化生物接触氧化工艺、一体化生物转盘工艺、一体化生物滤池工艺 3 种生物膜工艺设备规模小、耐冲击的能力强,可在水质、水量、气候环境变化大,不稳定的农村地区使用;一体化 MBR 工艺出水水质稳定、污染物去除率高,

但工艺设备复杂、成本高,对运行维护有较高的要求,建议在我国东部经济条件较好的农村地区使用。各地区可以此为参考,根据地方经济水平和环境特征选择最适宜的处理技术加以应用和推广。

表 1 生活污水一体化处理技术经济对比

Table 1 Techno-economic comparison of domestic sewage integrated treatment

项目	一体化 AAO 工艺	一体化 SBR 工艺	一体化生物接触氧化工艺	一体化生物转盘工艺	一体化生物滤池工艺	一体化 MBR 工艺
工艺类型	活性污泥法	活性污泥法	生物膜法	生物膜法	生物膜法	生物膜法
出水水质 ¹⁾	一级 A 标准	一级 B 标准	一级 A 标准	一级 B 标准	一级 A 标准	一级 A 标准
进水水质抗冲击性	较差	较差	较好	较好	较好	很好
水质稳定性	具有一定稳定性	具有一定稳定性	较稳定	较稳定	较稳定	稳定
污泥产量	较多	较多	较少	较少	较少	很少
管理维护	简单	要求较高	要求较高	简单	要求较高	要求较高
建设成本	工艺设备简单、成本很低	工艺设备简单、成本较低	工艺设备简单、填料成本较高	工艺设备简单、盘片成本较高	工艺设备较复杂、成本较低	工艺设备复杂、膜组件成本高
运行成本	较低	较高	较低	较低	较高	高
适用条件	进水水质稳定、经济基础一般的大多数农村地区	进水水质稳定,要求灵活使用与管理的农村地区	进水水质水量变化,经济基础较好的大多数农村地区	进水水质水量变化,经济基础较好的大多数农村地区	进水水质水量变化,配备专业运行维护人员的农村地区	出水水质要求高,配备专业运行维护人员,经济发达的东部农村地区

1) GB 18918—2002 中的排放标准。

4 结语

结合我国农村分散式污水排放现状,建议采用小型一体化装置处理与集中收集处理相结合的技术模式。其中,一体化生物接触氧化工艺、改进型生物膜与活性污泥混合工艺及在 AAO 工艺段后端增加缺氧沉淀段工艺等可较好地满足我国大多数农村污水处理排放要求,具有适用性广、可操作性强的特点,与我国农村地区现有经济条件相适应,是我国农村生活污水一体化处理技术的发展趋势。

参考文献

- [1] 中国水网. 2016 年全国农村污水治理率仅为 22% 掘金农村污水处理新蓝海 [EB/OL]. (2018-01-22) [2020-05-20]. <http://www.h2o-china.com/news/252683.html>.
- [2] 前瞻网. 2018 年农村污水处理行业发展现状与市场前景分析迎来历史性发展机遇 [EB/OL]. (2019-05-30) [2020-05-20]. <https://www.qianzhan.com/analyst/detail/220/190528-3d41af4b.html>.
- [3] 骆其金,钟昌琴,谌建宇,等. 农村生活污水治理技术评估方法与案例研究 [J]. 环境工程技术学报, 2016, 6(2): 105-110.
- [4] LUO Q J, ZHONG C Q, CHEN J Y, et al. Evaluation method of best available technologies for rural domestic wastewater treatment and case study [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2016, 6(2): 105-110.
- [5] 刘俊新. 我国不同区域分散型污水处理技术与应用 [J]. 水工业市场, 2012(9): 20-25.
- [6] 吕锡武. 小型分散式农村污水处理的理论与实践 [J]. 水工业市场, 2012(9): 26-34.
- [7] 马建锋. 苏南地区农村生活污水治理现状研究 [J]. 科技资讯, 2009, 7(34): 103.
- [8] 陈燕. 崇明县庙镇农村生活污水处理站简例分析 [J]. 绿色科技, 2013(8): 239-240.
- [9] 杨春. 分散式生活污水处理过程反硝化脱臭技术与机理研究 [D]. 南京: 东南大学, 2016.
- [10] 姜云芳. 农村生活污水处理工艺比较研究 [J]. 环境与发展, 2018, 30(9): 61.
- [11] JIANG Y F. Comparative study on rural domestic sewage treatment technology [J]. Environment and Development, 2018, 30(9): 61.
- [12] 高立洪, 蒋滔, 杨小玲, 等. 农村生活污水常见处理技术及设备现状分析 [J]. 农业技术与装备, 2017(9): 81-85.

- GAO L H, JIANG T, YANG X L, et al. Analysis of common treatment technology and equipment for rural domestic sewage [J]. *Agricultural Technology & Equipment*, 2017(9):81-85.
- [11] 王学文,曹少飞,王慧娟,等.我国农村水环境污染现状与治理措施的思考[J].*科技创新与生产力*,2018(6):58-60.
- WANG X W, CAO S F, WANG H J, et al. Thoughts on status quo and treatment measures of water environment pollution in rural areas [J]. *Sci-tech Innovation and Productivity*, 2018(6):58-60.
- [12] 刘晓慧.我国农村生活污水排放现状初析[J].*安徽农业科学*,2015,43(23):234-235.
- LIU X H. Analysis on emission status of rural domestic sewage in China [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2015, 43(23):234-235.
- [13] 王田天,周伟,刘兴,等.改良AAO一体化设备处理农村生活污水的研究[J].*中国给水排水*,2018,34(7):75-79.
- WANG T T, ZHOU W, LIU X, et al. Nitrogen and phosphorus removal from rural domestic sewage using modified AAO integrated process [J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34(7):75-79.
- [14] 肖圻圻,陈鑫,周伟,等.竖流式一体化反应器处理乡镇污水的影响因素[J].*水处理技术*,2019,45(8):116-119.
- XIAO X Q, CHEN X, ZHOU W, et al. Influencing factors of vertical flow integrated reactor for township sewage treatment [J]. *Technology of Water Treatment*, 2019, 45(8):116-119.
- [15] 任宏洋,彭磊,王兵,等.臭氧耦合A/A/O污泥减量及污水处理效能研究[J].*水处理技术*,2019,45(12):105-109.
- REN H Y, PENG L, WANG B, et al. Study on sludge reduction and wastewater treatment efficiency in combination of ozone and A/A/O process [J]. *Technology of Water Treatment*, 2019, 45(12):105-109.
- [16] 薛峰.跌水驱动生物转盘在分散式小型污水处理中的应用[D].南京:东南大学,2015.
- [17] 范江平,许少广,余琼虹,等.两种城镇生活污水处理工艺对比研究[J].*当代化工研究*,2018(7):8-9.
- FAN J P, XU S G, SHE Q H, et al. Comparison and research on two kinds of domestic sewage treatment processes in cities and towns [J]. *Modern Chemical Research*, 2018(7):8-9.
- [18] 张冰,贾晓竟,杨海真.一体化空气提升SBR处理低C/N农村生活污水研究[J].*水处理技术*,2014,40(10):63-66.
- ZHANG B, JIA X J, YANG H Z. The pilot study of an integrated system in treating low concentration domestic wastewater in rural area [J]. *Technology of Water Treatment*, 2014, 40(10):63-66.
- [19] 薛晨楠,孙晓杰,张红霞,等.磁粉投加量对SBR工艺污水处理效果的影响[J].*水处理技术*,2020,46(4):93-96.
- XUE C N, SUN X J, ZHANG H X, et al. Effect of magnetic powder dosage on sewage treatment effect by SBR process [J]. *Technology of Water Treatment*, 2020, 46(4):93-96.
- [20] 南洋,刘永.净化槽技术及其在国内外的应用进展和前景[J].*资源节约与环保*,2019(9):127-128.
- [21] 张巍,刘晋,王昊,等.净化槽处理污水的机理研究及应用研究进展[J].*环境保护与循环经济*,2017,37(7):36-40.
- [22] 寻勇.农村污水处理中一体化污水处理设备应用分析[J].*资源节约与环保*,2019(11):76.
- [23] 杨卫萍,陆天友.日本净化槽技术应用对农村污水处理的启示[J].*福建建设科技*,2014(5):86-88.
- YANG W P, LU T Y. Enlightenment of Japanese Johkasou technology application in treatment of rural sewage [J]. *Fujian Construction Science & Technology*, 2014(5):86-88.
- [24] XIE Y X, WAN A J, DONG H J, et al. An iron-carbon-activated carbon and zeolite composite filter, anaerobic-aerobic integrated denitrification device for nitrogen removal in low C/N ratio sewage [J]. *Water Science and Technology*, 2019, 80(2):223-231.
- [25] 沈波,顾超超,韩振波.船用一体化生物活性炭装置活性炭挂膜及运行优化[J].*水处理技术*,2020,46(4):102-105.
- SHEN B, GU C C, HAN Z B. Carbon-selective for biofilm forming and operation optimization of integrated marine biological activated carbon device [J]. *Technology of Water Treatment*, 2020, 46(4):102-105.
- [26] SBARDELLA L, COMAS J, FENU A, et al. Advanced biological activated carbon filter for removing pharmaceutically active compounds from treated wastewater [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 636:519-529.
- [27] 合续环境.合续环境:中国罐[EB/OL]. [2020-05-20]. <http://www.hexuhj.com>.
- [28] 王卓.高效好氧生物转盘—生物接触氧化一体化设备处理生活污水的研究[J].*环境保护与循环经济*,2013(8):35-37.
- [29] HAN Y P, MA J W, XIAO B Y, et al. New integrated self-refluxing rotating biological contactor for rural sewage treatment [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 217:324-334.
- [30] 尚永超.3D-RBC立体结构生物转盘助力青岛新机场工程[J].*中国给水排水*,2016,32(11):54.
- [31] KEE. KEE 一体化低碳生物转盘 [EB/OL]. [2020-05-20]. <http://www.keechina.com>.
- [32] 李军,刘伟岩,杨晓冬,等.曝气生物滤池应用和研究中的几个关键问题[J].*中国给水排水*,2008,24(14):10-14.
- LI J, LIU W Y, YANG X D, et al. Key problems in application and research of BAF [J]. *China Water & Wastewater*, 2008, 24(14):10-14.
- [33] 刘万杨,谷成国,郑大为.曝气生物滤池在小区生活污水处理中的应用[J].*环境保护与循环经济*,2009,29(2):35-36.
- [34] 李艳萍.城市中水用于电站循环冷却水的关键技术研究 and 应用[D].济南:山东大学,2013.
- [35] 曹大伟,李先宁,李孝安,等.地理式一体化生物滤池工艺处理农村生活污水[J].*中国给水排水*,2008,24(1):30-34.
- CAO D W, LI X N, LI X A, et al. Buried integrated biofilter process for treatment of rural domestic sewage [J]. *China Water & Wastewater*, 2008, 24(1):30-34.
- [36] 王铭源,陆少鸣,申华楠,等.一体化复合生物滤池处理农村污水滤速的优化[J].*水处理技术*,2019,45(3):102-105.
- WANG M Y, LU S M, SHEN H N, et al. Optimization of filtering speed of integrated composite biological filter in rural wastewater treatment [J]. *Technology of Water Treatment*, 2019, 45(3):102-105.
- [37] 吴亚慧,陆少鸣,胡勇,等.一体化生物滤池处理农村污水硝

- 化液回流比影响[J]. 水处理技术, 2019, 45(4): 93-95.
- WU Y H, LU S M, HU Y, et al. Effect of nitrate reflux ratio on the rural sewage treatment by integrated biofilter[J]. *Technology of Water Treatment*, 2019, 45(4): 93-95.
- [38] 钟小凤. MBR 工艺的概述及应用[J]. 资源节约与环保, 2014(5): 117-118.
- [39] 刘宇. 分置式 MBR 工艺研究[J]. 资源节约与环保, 2014(7): 132.
- [40] 郭海林, 周宇松, 刘中亲, 等. 基于 MBR 的一体化装置处理生活污水实例[J]. 水处理技术, 2018, 44(11): 138-140.
- GUO H L, ZHOU Y S, LIU Z Q, et al. Project of integrated device for domestic sewage treatment based on MBR[J]. *Technology of Water Treatment*, 2018, 44(11): 138-140.
- [41] 王阳, 谷成国, 高旭, 等. 旋转膜生物气升式循环反应器: CN104876329A[P]. 2015-09-02.
- [42] 晁雷, 李婧男, 李亚峰. 兼氧 MBR 工艺在北方农村污水处理工程中的应用[J]. 工业水处理, 2019, 39(4): 97-99.
- CHAO L, LI J N, LI Y F. Application of facultative oxygen MBR process to rural sewage treatment projects in northern China[J]. *Industrial Water Treatment*, 2019, 39(4): 97-99.
- [43] 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.
- FU L X, CUI N, LIU S H, 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.
- [44] 陈永志, 彭永臻, 王建华, 等. A²/O-曝气生物滤池工艺处理低 C/N 比生活污水脱氮除磷[J]. 环境科学学报, 2010, 30(10): 1957-1963.
- CHEN Y Z, PENG Y Z, WANG J H, et al. Biological phosphorus and nitrogen removal in low C/N ratio domestic sewage treatment by a A²/O-BAF combined system [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(10): 1957-1963.
- [45] 张浩, 刘川, 李秋婷, 等. 马来西亚某人工岛集约型半埋式污水站的设计[J]. 水处理技术, 2020, 46(4): 136-140.
- ZHANG H, LIU C, LEE C, et al. Design of an intensive semi-buried sewage treatment plant for an artificial island in Malaysia [J]. *Technology of Water Treatment*, 2020, 46(4): 136-140.
- [46] TABASSUM S, JI Q, LI C, et al. Treatment of centrifugal mother liquid of polyvinyl chloride by internal circulation aerobic biofilm reactor: lab to plant scale system [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 200: 568-577.
- [47] TABASSUM S, LI Y, CHI L, et al. Efficient nitrification treatment of comprehensive industrial wastewater by using Novel Mass Bio System[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 172: 368-384.
- [48] 王莺莺. 组合式一体化污水处理设备性能研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2017.
- [49] 李耀中, 席北斗, 张波, 等. 分布式村镇有机污染物综合处置途径与建设模式[J/OL]. 环境工程技术学报, doi: 10.12153/j.issn.1674-991X.20200133. ⊗