

匡荣凯, 刘宝震, 马彬, 等. 农村生活污水生态处理技术研究进展[J]. 净水技术, 2024, 43(9): 25-34.

DUN R K, LIU B Z, MA B, et al. Research progress of ecological technology for rural domestic sewage treatment[J]. Water Purification Technology, 2024, 43(9): 25-34.

农村生活污水生态处理技术研究进展

匡荣凯¹, 刘宝震¹, 马彬², 安呈泰³, 王永磊^{1,*}, 王欣妍⁴

(1. 山东建筑大学市政与环境工程学院, 山东济南 250101; 2. 新泰市新汶自来水有限公司, 山东泰安 271219; 3. 山东建筑大学设计集团有限公司, 山东济南 250013; 4. 青岛理工大学环境与市政工程学院, 山东青岛 266033)

摘要 生态型处理技术是农村生活污水处理常用工艺, 可依据农村地区的水质、地理特征和社会经济条件选择最佳的生态型技术, 是农村水环境治理的迫切需求。文章归纳了近年来广泛应用于我国农村生活污水处理的各类生态型技术, 介绍了多种生态技术组合工艺, 以及生物强化生态处理工艺的研究进展, 阐述了各种工艺类型的适用水质条件和对污染物的去除效果。中国的农村地区普遍存在经济薄弱问题, 通过对比各种生态工艺的实际工程效能, 以及其建设成本、技术特点、运维管理等指标, 为我国广大农村地区选择适用于当地生活污水处理的生态处理技术时提供经验和指导。

关键词 农村生活污水 多生态技术 组合工艺 强化生物技术 生态处理工艺

中图分类号: X799 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-0177(2024)09-0025-10

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2024.09.004

Research Progress of Ecological Technology for Rural Domestic Sewage Treatment

DUN Rongkai¹, LIU Baozhen¹, MA Bin², AN Chengtai³, WANG Yonglei^{1,*}, WANG Xinyan⁴

(1. School of Municipal and Environment, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China;

2. Xintai Xinwen Water Co., Ltd., Taian 271219, China;

3. Shandong Jianzhu University Design Group Co., Ltd., Jinan 250013, China;

4. School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, China)

Abstract Eco-type treatment technology is a common process for rural domestic sewage treatment. The best eco-type technology can be selected according to the water quality, geographical characteristics and social and economic conditions in rural areas, which is an urgent need of rural water environment treatment. This paper summarizes various ecological technologies widely used in rural domestic sewage treatment in recent years, and introduces a variety of ecological technology combination processes, as well as the research progress of enhanced biotechnology ecological treatment processes, and expounds the applicable water quality conditions of each process type and the removal effect of pollutants. Economic weakness is common in rural areas of China. By comparing the actual engineering efficiency of various ecological processes, their construction costs, technical characteristics, operation and maintenance management and other indices, it can provide experience and guidance in the selection of ecological treatment technologies suitable for local domestic sewage treatment in rural areas of China.

Keywords rural domestic sewage multi-ecological technology combined processes enhanced biotechnology ecological treatment process

继续全面推进乡村振兴, 推动美丽乡村建设是

我国“十四五”的重点任务之一。提高农村生活污水的处理能力, 保护水环境与水生态已成为美丽乡村建设的研究热点。但是, 我国农村规模大, 人口居住密集且分布广, 经济发展不平衡, 部分地区污水处理设施不到位, 导致农村地区污水处理率低。2019年农村生活污水的处理比例仅达到 31.50%, 是城

[收稿日期] 2023-08-24

[基金项目] 济南市水务科技项目(JNSWKJ202208)

[作者简介] 匡荣凯(1998—), 男, 硕士, 研究方向为水处理理论与技术, E-mail: 799502981@qq.com。

[通信作者] 王永磊(1977—), 教授, 博士, E-mail: wyl1016@sina.com。

市污水处理率的 32%^[1]。

生态型处理技术是将农村景观建设与污水处理相结合,利用土壤、植物、动物、微生物组成的生态系统对污水中的污染物进行降解和净化的工艺^[2]。文章围绕生态型处理工艺,综合分析不同工艺形式对有机物、TN、氨氮、TP 等污染物的去除效果,综述了影响各工艺处理效果的因素和研究进展,以期为研究和从业人员提供全面的工艺了解,为未来的研究提供方向,揭示尚不成熟的工艺领域和解决当前挑战的新方法,为推动生态处理工艺的创新技术和在实际工程中的应用提供经验。

1 生态处理工艺

1.1 人工湿地

人工湿地是一种通过填料基质、植物和微生物共同作用去除污染物的农村污水处理技术,主要包含表面流、垂直流等工艺形式(图 1)。表面流人工湿地虽然投资费用低,但土地需求大,受季节温度影响对污染物的平均去除率较低,仅适用于处理微污染水^[3-4]。垂直流人工湿地能够有效去除氨氮,但反硝化作用非常有限^[4]。在垂直流人工湿地的基础上种植柳树构建小型家庭人工湿地,能克服我国北方地区冬季低温抑制,保持较高污染物去除率^[5]。水平潜流人工湿地在冬季低温条件下仍保持较好的净化效果,可承受较大的污染物负荷,有机物去除率较高,但对氨氮的去除能力较差^[6]。Salah 等^[7]探究了人工湿地对药品和个人护理产品(PPCP)的去除机制,发现底物基质的吸附、植物的吸收、微生物群落的降解是保证去除率的关键因素。以上人工湿地主要以单一的形式组成,又被称作单级人工湿地。因无法同时提供好氧和厌氧条件,以及仅依靠基质、植物吸附除磷的作用,单极人工湿地对 TN 和 TP 的去除率不理想,分别达到 40%~55% 和 40%~60%^[6],仍需进一步强化提高。Parei 等^[8]利用两个串联的新型垂直流人工湿地系统去除灰水,结果表明,BOD₅、COD_{Cr} 和总悬浮固体(TSS)的去除效率分别为 90%、90%和 92%。多级人工湿地能综合发挥不同单级工艺的优势,显著提高了农村污水的整体处理效率。Decezaró 等^[9]研究了用于农村分散生活废水的全尺寸处理系统,包括化粪池(ST)和种植蝎尾蕉的垂直流人工湿地,结果表明,该系统在巴西的分散式农村废水处理中取得良好的

处理效果,COD_{Cr} 的平均去除率为 78%,TSS 的平均去除率为 84%。

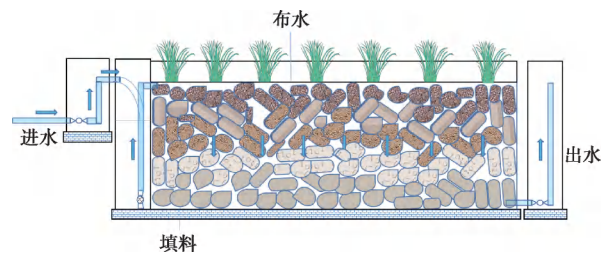


图 1 人工湿地结构

Fig. 1 Structure of Constructed Wetland

Munir 等^[10]研究了一种以玉米秸秆和绿色金属氧化物为原料合成绿色纳米生物炭的复合材料,该复合材料作为人工湿地的基质后,对纺织染料的去除率可达到 95%。Wang 等^[11]采用硫-菱铁矿填料和滴式曝气相结合,设计了一种新型混合人工湿地(SS-HCW),对 TN 去除率提高了 37.74%,脱氮过程中产生的 S 和 Fe 可作为微量元素,提高湿地植物的生长速率和叶绿素含量。García-ávila 等^[12]探究了观赏植物(美人蕉、鸢尾花、向日葵和绣球花)在人工湿地的应用情况,结果发现,观赏植物的纤维根能够积累和降解污染物,相比传统植物具有较高的污染物去除效率。Herazo 等^[13]探究了藜蒿、芦苇、莎草和观赏植物在单独种植和混合种植下对磷的去除效果,结果发现单独种植对磷的去除率分别为 12%、1%、5%和 23%,而混合种植的观赏植物对磷的去除率为 27%。

1.2 生态沟渠

生态沟渠因所需土地较少,污染物去除率较高以及建设和维护运营的成本较低,已成为一种受欢迎的农村生活污水处理方法。生态沟渠的每个单元均采用特定的处理工艺,各自具有不同的处理功能,其中植被沟渠单元对氮和磷的去除效果明显,分别占总去除率的 30.82%和 33.53%^[14]。生态沟渠对氮磷去除效率受季节变化的影响较大,全年 TN 去除率为 14.84%~84.24%,TP 去除率为 13.93%~86.22%^[15]。为了降低季节温度变化对脱氮除磷的影响,Kumwimba 等^[16]在生态沟渠种植了去污能力强的耐寒植物,减小了生态沟渠在冬季对氮磷去除率的波动幅度。Liu 等^[17]采用秸秆和黏土作为生态沟渠的沉积物来处理农村生活污水,发现秸秆可以延长脱氮持续时间,在冬季,黏土可以从水中增大对

磷的捕获作用。

1.3 土壤渗滤技术

土壤渗滤技术是将好氧-厌氧相结合的一种土地处理技术,适用于农村分散式污水处理,具有成本低、处理效果明显、运行管理简单等优点。Zeng等^[18]使用锰砂-黄铁矿为填料的土壤渗滤系统处理农村生活污水,通过长时间的现场试验发现,使用该填料的土壤渗滤系统不仅能有效去除生活污水中的污染物,而且大幅降低了温室气体的排放。Jiang等^[19]建立以脱水污泥作为微生物接种物的土壤渗滤系统,经过运行一段时间后,系统中细菌、硝化细菌和反硝化细菌的数量远高于传统土壤渗滤系统,脱氮除磷效率得到大幅提高。土壤渗滤系统存在脱氮能力差的缺点,主要是因为水中溶解氧含量低,为了提高氮的去除率,确保出水稳定,Yang等^[20]采用间歇运行和污水分流的方法,间歇运行方式提高了水中溶解氧的含量,优化了系统的脱氮能力,在最佳分流比为1:3时,TN、氨氮的去除率分别提高到56.53%、54.97%。

1.4 蚯蚓生态滤池

蚯蚓生态滤池是在基质滤料、蚯蚓及微生物的

协同作用下对污水中污染物进行处理的新型生态处理工艺。李洁等^[21]采用该工艺对贵州农村生活污水进行处理,运行试验结果表明,蚯蚓生态滤池稳定运行后,生活污水中COD_{Cr}、BOD₅、SS、TP、TN、氨氮的去除率可以分别达到79.53%、86.89%、92.26%、68.21%、50.52%、86.79%,降碳脱氮除磷的效果明显。Cheng^[22]研发了蚯蚓与微生物组合的复合蚯蚓生态滤池,其对BOD₅、COD_{Cr}、总溶解固体(TDS)、总有机碳(TOC)的去除率分别为75%、85%、90%、30%。为了解决单级蚯蚓生态滤池对污水水量的抗冲击负荷能力差的问题,提出了塔式蚯蚓生态滤池工艺,该滤池通过将多个蚯蚓生态池串联叠层,形成了缺氧、好氧、厌氧复合环境,出水TN和TP的去除率分别提高到了82.1%和96.7%^[23]。此外,蚯蚓生态滤池无需供氧且运行费用较低,在经济较落后且具有可利用地形的农村污水处理中将具有一定优势。蚯蚓的活动可以防止滤池填料堵塞,同时蚯蚓排泄物可进行资源化利用,创造经济效益。

上述4种农村生活污水典型生态处理工艺比较如表1所示。

表1 农村生活污水典型生态处理工艺比较

Tab. 1 Comparison of Typical Ecological Treatment Processes for Rural Domestic Sewage

工艺名称	工艺优点	工艺缺点	适用地区/条件	参考文献
人工湿地	土地需求小,建设运行成本低,氮磷去除效果好	占地面积大,冬季操作困难,易造成二次污染	地域辽阔、地势平坦的地区	[10]
生态沟渠	操作维护方便,管理简单,建设运行成本低	植物生长需求高,受季节变化影响	经济条件差,湖泊、沟渠塘坝众多的村庄	[16]
土壤渗滤技术	建设运行成本低,管理简单,出水效果好,抗冲击负荷能力强	占地面积大,受季节变化影响	土地资源丰富,温度适宜的农村地区	[18]
蚯蚓生态滤池	建设运行成本低,污染物去除效率高,占地面积小	易受低温影响,滤池填料要求高	人口密度小、土地资源紧缺、经济条件一般的农村地区	[23]

2 基于生态技术的组合工艺

虽然生态处理技术在农村污水处理中应用广泛,但也存在处理效能季节性波动等问题。因此,研究人员^[24]研发了生态组合型处理工艺,常见的工艺形式如图2所示。

2.1 多生态技术组合工艺

2.1.1 人工快渗-人工湿地

人工快渗和人工湿地的组合具有较强的抗冲击负荷能力,在人工快渗的淹水和落干相互交替的运行方式和人工湿地中基质、植物的共同作用下对污染物实现去除^[25]。该组合工艺适合在中国南方农

村地区运行,在北方运行时易受到冬季低温影响,需加设保温措施,投入相对提高。该组合工艺流程如图3所示。

人工快渗普遍存在TN、TP去除率偏低的问题,为了提高TN、TP的去除率,孙鹏等^[26]在此组合工艺的基础上添加生态浮床工艺,并对百二河流域的农家乐生活污水进行处理,结果发现出水COD_{Cr}去除率提高了12%、TP去除率提高了20%。因受各种因素影响,人工湿地存在出水不稳定的问题。喻阳等^[27]将预处理系统与快滤池组成人工快渗一体化设备,并用于人工湿地出水后的深度处理,结果表

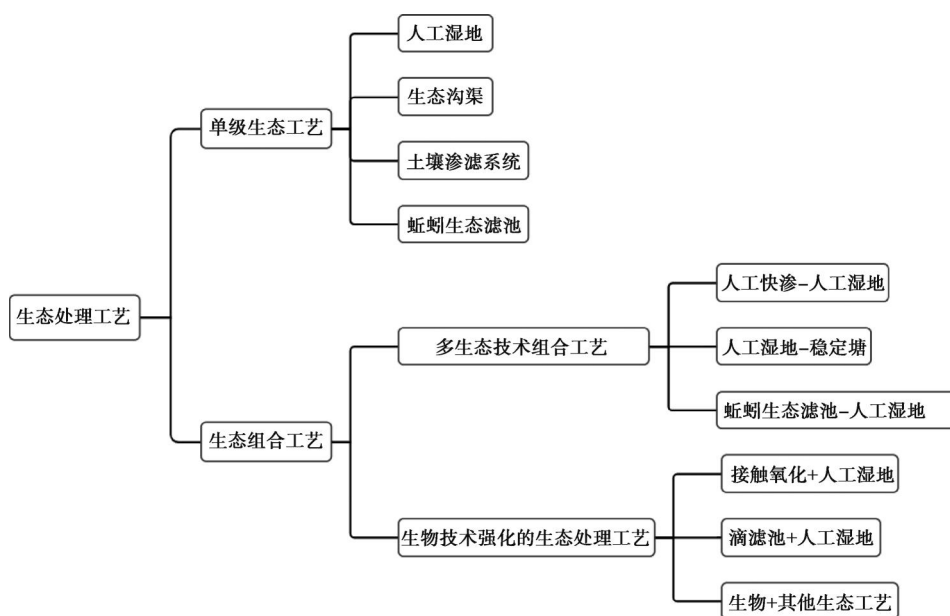


图2 生态处理工艺流程^[24]

Fig. 2 Process of Ecological Treatment^[24]

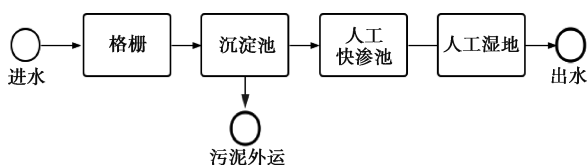


图3 人工快渗-人工湿地工艺流程

Fig. 3 Process of Artificial Fast Permeation-Constructed Wetland

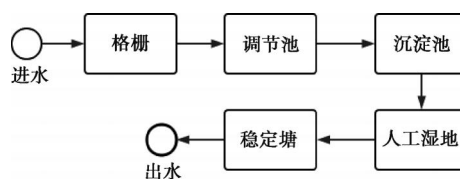


图4 人工湿地-稳定塘工艺流程

Fig. 4 Process of Constructed Wetland-Stabilized Pond

明,在人工湿地出水污染物浓度较高时,人工快渗一体化设备对 COD_{Cr} 、氨氮、TP 的去除贡献率分别为 70%、50%、85%。

2.1.2 人工湿地-稳定塘

人工湿地与稳定塘的组合系统,在高、中、低 3 种水力负荷及污染负荷下均能稳定出水^[28]。当稳定塘作为前处理单元时,可对污水中的 SS 进行去除,有效避免了人工湿地基质堵塞^[29]。因稳定塘和人工湿地需要大量土地建设,可利用现有的池塘或洼地来建设,所以该组合工艺适宜土地资源丰富的分散式农村污水处理。该组合工艺流程如图 4 所示。

李松等^[30]在淳安县农村地区运用该组合系统处理生活污水,因受季节及水质水量变化的影响,该工艺对 COD_{Cr} 、TN、氨氮、TP 的去除率出现一定范围的波动,分别为 75.1%~87.3%、50.2%~67.8%、65%~75.3%、70.6%~85.9%。研究^[31]发现,当农

村污水中含有大量人畜排泄物时,该组合系统对氨氮的去除率会持续降低,为了克服人工湿地-稳定塘组合系统出水不稳定缺点,在此基础上增加生物滤池单元,以南方地区农村分散式生活和养殖混合污水为处理对象,生物滤池单元对 COD_{Cr} 、氨氮、TN 和 TP 的去除贡献了 63.9%、52.7%、44.3% 和 46.3%,组合工艺平均去除率稳定在 86.0%、93.8%、93.4% 和 90.2%。

2.1.3 蚯蚓生态滤池-人工湿地

蚯蚓生态滤池-人工湿地在我国南方地区优势明显,但在北方冬季,蚯蚓活动能力降低,极大影响了整个组合工艺的处理能力。蚯蚓生态滤池和人工湿地的组合工艺可以有效解决这个问题,蚯蚓生态滤池中污染物浓度得到大幅降低,人工湿地在低温下能保持较好的净化效果,该组合工艺流程如图 5 所示。通过实地运行,组合工艺在低温时对 COD_{Cr} 、氨氮、TN、TP 的去除率为 72.12%、87.43%、43.60%、87.07%^[32]。

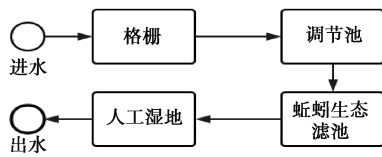


图5 蚯蚓生态滤池-人工湿地工艺流程

Fig. 5 Process of Earthworm Ecological Filter-Constructed Wetland

采取在蚯蚓生态滤池滤料层间铺设导热管或者在蚯蚓生态滤池的周围固定玻璃和塑料膜的保温措施,也可以保证整个处理工艺在冬季的处理效果和可持续运行^[33-34]。郭飞宏等^[23]对采取保温措施的多级蚯蚓生态滤池进行试验,结果表明在冬季气温为2℃下,对COD_{Cr}、氨氮、TN、TP均有较好的处理效果,出水达到了《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准。

2.2 生物技术强化的生态处理工艺

生物技术可以有效地去除污染物,但单纯生物处理技术的建设、运营和维护成本高昂,我国大多数农村地区经济条件较差,无法负担生物处理技术。将生物技术与生态技术进行有机结合,充分发挥两者的优势,可达到既节约成本又高效去除的效果。

2.2.1 接触氧化-人工湿地

接触氧化-人工湿地组合工艺的结构如图6所示。接触氧化池对COD_{Cr}的去除贡献率较大,而人工湿地是TN、TP的主要去除单元。该组合工艺适用于山地、丘陵地区的农村,可借助地势差建设池体,利用势能减少工艺能量的输入,既可以减少设备投资又降低运行费用^[35]。匡武等^[36]采用接触氧化+人工湿地组合工艺处理农村生活污水,COD_{Cr}、氨氮等污染平均去除率均能达到87%以上。为了提升工艺的整体性能和出水水质稳定,钟秋爽等^[37]研发了厌氧-接触氧化渠-垂直潜流型人工湿地组合工艺,出水水质整体可达到GB 18918—2002二级标准。

唐晶等^[38]研发了接触氧化池和人工湿地交替运行工艺,COD_{Cr}和氨氮的去除效率分别提升了15.8%和18.7%。刘晋^[39]研究一级池体高度为50cm,其他后四级池体高度为40cm,并采用石膏为填料的接触氧化-人工湿地组合工艺,通过连续运行发现,池中生物膜的氨氧化速率常数为3.39×10²mg/(h·kg),硝化、反硝化脱氮具有很大的潜力,添加石膏的人工湿地对磷的去除率占总去除率的75%。

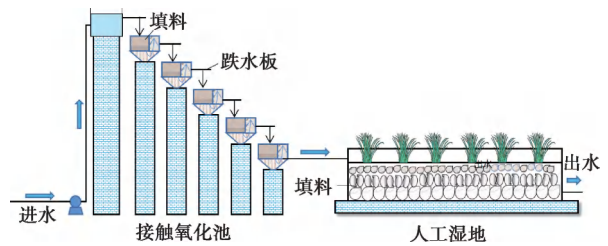


图6 接触氧化-人工湿地工艺结构

Fig. 6 Structure of Contact Oxidation-Constructed Wetland

2.2.2 滴滤池-人工湿地

滴滤池-人工湿地组合工艺的结构如图7所示。滴滤池也称脉冲多层复合滤料过滤器,滴滤池将陶粒、焦炭等填料分层放置,利用其中多种填料的特点,提高氮磷的去除率。王康萍^[40]研究了斜发沸石、生物陶粒、红砖、焦炭4种填料在不同组合下的处理效果,结果表明斜发沸石+红砖+焦炭的组合不仅对TN、TP的去除效果较好,而且挂膜速度快,可以快速启动滴滤池反应器。然而,正是由于多种填料的差异,传统的滴滤池存在冲洗难的问题,黄媛媛等^[41]使用了比表面积大、孔隙率高、材质轻的立体网状材料作为滴滤池填料,不仅解决了难冲洗问题还保证了滴滤池对污染物的去除率,改进的滴滤池对COD_{Cr}、氨氮的平均去除率分别为75.75%、86.08%。

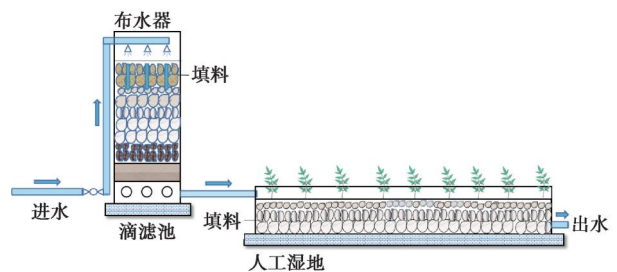


图7 滴滤池-人工湿地工艺结构

Fig. 7 Structure of Trickling Filter-Constructed Wetland

滴滤池-人工湿地是农村生活污水处理的主要工艺之一,但其存在出水稳定性较差的缺点。因此,为了探索最佳工艺条件,吴磊等^[42]构建了中试规模的试验研究,经过运行发现在水力负荷为7.0m³/(m²·d)、回流比为200%时,该组合工艺对TN和TP的去除率均超过90%。

上述典型生态组合工艺经济及运行指标比较如表2所示。

2.3 新型生态工艺

农村生活污水的生态处理工艺经过多年的运

表 2 典型生态组合工艺经济及运行指标比较
Tab. 2 Comparison of Economic and Operational Indices of Typical Combined Ecological Processes

项目	人工快渗-人工湿地	人工湿地-稳定塘	蚯蚓生态滤池-人工湿地	接触氧化-人工湿地	滴滤池-人工湿地
出水标准	《污水综合排放标准》(GB 8978—2002)二级标准	GB 18918—2002 二级标准	GB 18918—2002 一级 A 标准	GB 18918—2002 一级 A 标准	GB 18918—2002 一级 A 标准
出水稳定性	一般	一般	稳定	稳定	稳定
抗负荷能力	较强	一般	强	强	强
建设成本	低	低	较低	填料成本高	较低
操作管理	工艺简单,操作管理方便	工艺简单,操作管理方便	工艺简单,操作管理方便	工艺简单,操作管理方便	工艺简单,操作管理方便
维护工作	易堵塞,需定期维护	维护方便	工艺设备少,维护方便	工艺设备少,维护方便	易堵塞,需定期维护
污泥产量	-	-	较少	较少	较少

行,工艺发展的重点主要集中在对传统工艺进行改进和优化。这些改进涵盖了研发新型材料和优化工艺系统结构等多方面的内容,以提高处理过程的稳定性和可持续性。

Li 等^[43]设计了一种适用于我国西北地区分散式农村生活污水的生态渗滤井(ESW),将进水持续时间调整为 9 h 时,对 COD_{Cr}、TP、TN 和氨氮的去除率分别达到 88.58%、65.60%、92.94% 和 93.65%,出水符合灌溉水质标准,可用于庭院灌溉。Zheng 等^[44]设计了一种落水增强潮汐人工湿地(F-TFCW),采用自然落水和潮汐往复运行的方式,自然落水有效地对人工湿地进行了复氧,显著提高了 COD_{Cr} 去除效果;潮汐作用可筛选出降解有机质更强的微生物,显著增强了 COD_{Cr} 和氨氮的去除率。Wang 等^[45]提出了一种包括缺氧过滤器(ANF)、新型集成导板旋转生物接触器(NIGPRBC)和人工湿地的新型生物生态组合系统。在最佳运行参数下运行 90 d 后,对 COD_{Cr}、TN、氨氮、TP 的平均去除分别为 95.14%、79.07%、93.42%、83.39%。Liu 等^[46]基于我国农村污水水质和水量特点,研制了一种新型的强化水解-复合介质生态滤床(EH-CMEFB)。强化水解(EH)装置以厌氧挡板反应器为基础,采用改进的填料式多室增强厌氧水解工艺,在每个隔室放置悬浮填料,有效聚集微生物,促进大分子污染物的分解;复合介质生态滤床(CMEFB)是基于人工湿地的改进型生态处理反应器,具有抗负荷高、占地面积小的特点。

3 工程应用

目前,大多数农村生活污水的处理工艺多采用

生态组合工艺,在保持生活污水高效处理能力的同时,应加强对建设、运行成本的关注。在示范推广农村生活污水处理工艺时,工艺方案不仅要考虑处理工艺的有效性,还要考虑处理工艺的经济性和对特定农村地区的适用性。依据农村地区的水质特征、自然地理特征和社会经济条件来选择最佳的农村污水处理工艺,是农村污水处理工程的迫切需要。比如:在太湖流域的农村地区,该地区的农村经济较为发达、人口密集,对出水水质要求高,可采用自动化程度高且管理运行方便的塔式蚯蚓生态滤池-人工湿地的组合工艺^[34]。四川省绵阳市盐亭县林山村处于山地丘陵地带,海拔高低落差明显,且当地农村经济实力较差,对出水水质要求低,因此可以利用自然地形建设生态沟渠进行污水处理^[14]。在广西、云南等地区,可利用气候温和、冬季气温较高、全年宜植物生长的特点,建设种植观赏植物的人工湿地,一方面种植的观赏植物对污染物具有更出色的处理效果,另一方面可用于进行旅游景观建设,增加农村地区收入^[12]。生态处理工艺实际工程及处理效果如表 3 所示。

同时,农村地区在选择生态处理工艺时,经济问题是确保可行性、可持续性的重要因素。农村地区经济较差,所以工艺的选择需要在经济投入和治理效果之间取得平衡。因此,本段以较典型的人工湿地工艺为例,对成本投入和处理费用进行详细介绍。单级人工湿地基建投资为 1 000~2 800 元/t,处理费用为 0.05~0.20 元/t,运行成本约为传统污水处理厂成本的 1/10~1/5^[47]。刘超翔等^[48]利用表面流和潜流串联组成的复合人工湿地处理滇池流域农村生活污水,处理规模为 80 m³/d,工程总投资

仅为 5.2 万元,水处理投资为 650 元/m³,运行成本仅为 0.03 元/m³。吴磊等^[49]对水解池-滴滤池-人工湿地的经济性展开深度研究,该工艺在对

当地 80%以上的污水进行合理处置时,工程总投资仅为原有的 70%左右,且其运维费用也能节约 66.9%左右。

表 3 生态处理工艺实际工程及处理效果
Tab. 3 Practical Engineering and Treatment Effect of Ecological Treatment Processes

工艺名称	运行地点	原水水质/(mg·L ⁻¹)	出水水质/(mg·L ⁻¹)	平均去除率	出水标准	参考文献
人工湿地	重庆市通南区某村庄	COD _{Cr} :499.30 氨氮:11.68 TP:4.04	COD _{Cr} :2.50 氨氮:1.66 TP:0.49	COD _{Cr} :99.50% 氨氮:87.16% TP:88.43%	GB 18918—2002 一级 B 标准	[44]
生态沟渠	四川省绵阳市盐亭县林山村	COD _{Cr} :71.29~640.00 氨氮:6.83~85.05 TN:8.35~109.11 TP:0.56~8.38	COD _{Cr} :27.73 氨氮:12.6 TN:15.43 TP:0.95	COD _{Cr} :77.05% 氨氮:44.63% TN:47.97% TP:49.79%	GB 18918—2002 一级 B 标准	[14]
土壤渗滤系统	江苏省宜兴市分水村	COD _{Cr} :97~240 氨氮:20~31 TN:25~36 TP:2.0~3.7	COD _{Cr} <50 氨氮<5 TN<15 TP<0.5	COD _{Cr} :92.7% 氨氮:95.8% TN:76.4% TP:76%	GB 18918—2002 一级 A 标准	[18]
蚯蚓生态滤池	江苏省无锡市大浦镇毛旗村	COD _{Cr} :180~450 氨氮:17~33 TN:24~39 TP:1.0~3.0	COD _{Cr} :65 氨氮:3.1 TN:8.2 TP:0.3	COD _{Cr} :81% 氨氮:82% TN:66% TP:89%	GB 18918—2002 一级 A 标准	[50]
人工快渗-人工湿地	南水北调中线工程淅川县移民安置点	COD _{Cr} :19.54~169.63 氨氮:10.62~36.88 TN:12.75~44.53 TP:1.52~5.89	COD _{Cr} :24.1 氨氮:3.4 TN:5.9 TP:0.3	COD _{Cr} :79% 氨氮:86% TN:78% TP:92%	GB 18918—2002 一级 B 标准	[25]
人工湿地-稳定塘	浙江省淳安县千岛湖畔某村	COD _{Cr} :500~800 氨氮:40~60 TN:50~70 TP:0.5~1.0	COD _{Cr} :83.75 氨氮:12.2 TN:22.7 TP:0.085	COD _{Cr} :81.2% 氨氮:72% TN:59% TP:85.07%	《污水综合排放标准》(GB 8978—1996) 一级标准	[30]
蚯蚓生态滤池-人工湿地	南京大学	COD _{Cr} :261~396 TN:38~75 TP:2.2~5.4	COD _{Cr} :23~49 TN:5~12 TP:0.11~0.28	COD _{Cr} :90% TN:85% TP:96%	GB 18918—2002 一级 A 标准	[32]
接触氧化-人工湿地	江苏省无锡市丁蜀镇漳北村	COD _{Cr} :88.21~345.92 氨氮:6.02~77.19 TN:3~33 TP:0.7~2.9	COD _{Cr} :30.42 氨氮:2.76 TN:5.68 TP:0.19	COD _{Cr} :82.55% 氨氮:91.27% TN:82.98% TP:87.86%	GB 18918—2002 一级 A 标准	[38]
滴滤池-人工湿地	江苏省无锡市大浦镇河滨南村	COD _{Cr} :100~600 氨氮:0~150 TN:40~100 TP:1.8~10.0	COD _{Cr} <50 氨氮≈0 TN<5 TP<0.5	COD _{Cr} :91% 氨氮:95% TN:95% TP:95%	GB 18918—2002 一级 A 标准	[51]

4 结论与展望

生态处理技术因其投资、运行维护费用低等特点,是农村生活污水治理常用的工艺形式。单级生态处理工艺多适用于土地资源丰富、出水水质要求偏低的农村,多生态技术组合工艺能够发挥各工艺

的优势,弥补单级生态处理工艺的缺点,适用于经济条件较好、出水水质要求高的农村。通过对比分析可知,人工湿地组合工艺适合在我国南北方农村中进行推广,我国南北方农村地区的气候、地形和水质等存在明显差异,但人工湿地工艺可以根据当地的

环境条件进行相应的设计、调整和组合,可实现最佳的污水处理效果。此外,它不需要复杂的设备和高能耗,维护和操作也相对简单,这非常适合农村地区的经济条件和人力资源。

然而,生态处理工艺还面临着占地积较大、处理效能季节性波动大等问题。因此,除不断探索研究新工艺,还应在以下方面进行加强。

(1)提高农村污水的收集率。对农村地区现有的污水管网、雨污合流制管网的运行情况进行调查,根据村庄位置制定不同的收集方案。

(2)加强污水处理工艺的技术研究。进一步开发适合于农村的操作简单、运行维护方便、成本低的运行模式和处理工艺。

(3)农村污水处理后可进行资源回用或回补自然水体。由于农村生活污水中污染物主要为氮、磷等营养元素,经处理后可就近用于农业灌溉或农村绿化。

(4)提高农民生态环保意识。推动农村“厕所革命”,建立健全无害化卫生厕所长效管理保护机制。在农业中,积极推广使用生物有机肥、微生物菌剂,引导农民减少化学肥料使用。

(5)逐步建立相应的法律法规。根据我国农村实际情况,制定适合于我国的相关技术标准和规程,将农村水污染的治理纳入法制化的轨道。

参考文献

[1] 郭芳,陈永,王国田,等.我国农村生活污水处理现状、问题与发展建议[J]. 给水排水, 2022, 48(s1): 68-72.
GUO F, CHEN Y, WANG G T, et al. Present situation, problems and development suggestions of rural domestic sewage treatment in China[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2022, 48(s1): 68-72.

[2] 赵以国,张靖雨,汪邦稳,等.农村生活污水生态综合治理技术现状与研究进展[J]. 环境科技, 2020, 33(4): 74-78.
ZHAO Y G, ZHANG J Y, WANG B W, et al. Status and research progress on sewage ecological treatment technology in rural areas[J]. *Environmental Science and Technology*, 2020, 33(4): 74-78.

[3] 杨思敏.农村污水治理技术研究进展[J]. 环境保护科学, 2020, 46(6): 76-82.
YANG S M. Progress on wastewater treatment technologies in rural area[J]. *Environmental Protection Science*, 2020, 46(6): 76-82.

[4] LIU S T, ZHANG Y C, FENG X J, et al. Current problems and countermeasures of constructed wetland for wastewater treatment;

A review[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2024, 57: 104569. DOI: 10.1016/j.jwpe.2023.104569.

[5] VYMAZAL J, LÁSKA J, HNÁTKOVÁ T. The retention of nitrogen and phosphorus in aboveground biomass of plants growing in constructed wetlands treating agricultural drainage [J]. *Ecological Engineering*, 2023, 194: 107044. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2023.107044.

[6] CAI Y, LIANG J, ZHANG P, et al. Review on strategies of close-to-natural wetland restoration and a brief case plan for a typical wetland in northern China [J]. *Chemosphere*, 2021, 285: 131534. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.131534.

[7] SALAH M, ZHENG Y, WANG Q, et al. Insight into pharmaceutical and personal care products removal using constructed wetlands: A comprehensive review [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 885: 163721. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.163721.

[8] PAREI A N, NAEENI S T O, AKBARI Z. Application of hybrid vertical flow constructed wetland systems to treatment of greywater for their use to irrigation in rural areas [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 412: 137368. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.137368.

[9] DECEZARO S T, WOLFF D B, ARAUJO R K, et al. Vertical flow constructed wetland planted with *Heliconia psittacorum* used as decentralized post-treatment of anaerobic effluent in southern Brazil [J]. *Journal of Environmental Science and Health*, 2018, 53(13): 1131-1138.

[10] MUNIR R, ALI K, NAQVI S A Z, et al. Green metal oxides coated biochar nanocomposites preparation and its utilization in vertical flow constructed wetlands for reactive dye removal: Performance and kinetics studies [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2023, 256: 104167. DOI: 10.1016/j.jconhyd.2023.104167.

[11] WANG R, ZHANG X, YANG S, et al. Enhanced nitrogen removal driven by S/Fe²⁺ cycle in a novel hybrid constructed wetland [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 426: 139113. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.139113.

[12] GARCÍA-ÁVILA F, AVILÉS-AÑAZCO A, CABELLO-TORRES R, et al. Application of ornamental plants in constructed wetlands for wastewater treatment: A scientometric analysis [J]. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 2023, 7: 100307. DOI: 10.1016/j.csee.2023.100307.

[13] HERAZO L C S, MARÍN-MUÑIZ J L, ALVARADO-LASSMAN A, et al. Full-scale constructed wetlands planted with ornamental species and PET as a substitute for filter media for municipal wastewater treatment: An experience in a mexican rural community [J]. *Water*, 2023, 15(12): 2280. DOI: 10.3390/w15122280.

[14] WANG T, ZHU B, ZHOU M. Ecological ditch system for nutrient removal of rural domestic sewage in the hilly area of the central Sichuan Basin, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 570: 839-849. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.01.034.

- [15] CHEN L, LIU F, WANG Y, et al. Nitrogen removal in an ecological ditch receiving agricultural drainage in subtropical central China[J]. *Ecological Engineering*, 2015, 82: 487-492. DOI: 10.1016/j.ecoeng.2015.05.012.
- [16] KUMWIMBA M N, MENG F G, ISEYEMI O, et al. Removal of non-point source pollutants from domestic sewage and agricultural runoff by vegetated drainage ditches (VDDs): Design, mechanism, management strategies, and future directions[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 639: 742-759. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.05.184.
- [17] LIU F, WANG Y, XIAO R, et al. Influence of substrates on nutrient removal performance of organic channel barriers in drainage ditches[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 527: 380-386. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.04.049.
- [18] ZENG M, LI Z, LIU Y, et al. Efficient rural sewage treatment with manganese sand-pyrite soil infiltration systems: Performance, mechanisms, and emissions reduction [J]. *Bioresource Technology*, 2024, 393: 130021. DOI: 10.1016/j.biortech.2023.130021.
- [19] JIANG Y Y, SUN Y F, PAN J, et al. Use of dewatered sludge as microbial inoculum of a subsurface wastewater infiltration system: Effect on start-up and pollutant removal [J]. *Environmental Science*, 2017, 43(4): 595-601.
- [20] YANG P, HOU R R, YUAN R F, et al. Effect of intermittent operation and shunt wastewater on pollutant removal and microbial community changes in subsurface wastewater infiltration system[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2022, 165: 255-265. DOI: 10.1016/j.psep.2022.07.020.
- [21] 李洁, 安霖钰. 蚯蚓生态滤池工艺处理农村生活污水的设计与运行试验[J]. *环保科技*, 2023, 29(3): 18-22.
- LI J, AN L Y. Design and operational test of earthworm ecological filter process for treating rural domestic sewage[J]. *Environmental Protection Technology*, 2023, 29(3): 18-22.
- [22] CHENG P. Performance of purifying synthetic high-strength chemical fertilizer wastewater by earthworm eco-filter system[J]. *Asian Journal of Chemistry*, 2013, 25(18): 10050-10056.
- [23] 郭飞宏, 汪龙眠, 张继彪, 等. 蚯蚓生态滤池对农村生活污水的深度净化效果[J]. *环境工程学报*, 2012, 6(3): 714-718.
- GUO F H, WANG L M, ZHANG J B, et al. Study of earthworm ecology filter for rural sewage purification[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2012, 6(3): 714-718.
- [24] 姚庆丰, 王金岩, 左长安. 山东省农村低成本污水处理工艺探讨[J]. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 2017, 48(6): 911-917.
- YAO Q F, WANG J Y, ZUO C A. Discussion on low-cost rural sewage treatment technology in Shandong province[J]. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2017, 48(6): 911-917.
- [25] 姜廷亮, 汪翠萍, 刘晓吉, 等. 人工快渗-人工湿地处理农村生活污水[J]. *水处理技术*, 2017, 43(8): 87-89.
- JIANG T L, WANG C P, LIU X J, et al. Pilot-scale study on rural domestic wastewater treatment by constructed rapid infiltration and constructed wetland [J]. *Technology of Water Treatment*, 2017, 43(8): 87-89.
- [26] 孙鹏, 崔康平, 许为义, 等. 人工快渗-人工湿地-浮岛工艺处理农家乐生活污水[J]. *江苏农业科学*, 2016, 44(6): 519-521.
- SUN P, CUI K P, XU W Y, et al. Artificial fast infiltration-artificial wetland-floating island process for treating rural tourism domestic sewage[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2016, 44(6): 519-521.
- [27] 喻阳, 冯旭, 李珊珊, 等. 人工快渗一体化设备用于人工湿地出水深度处理的应用研究[J]. *广东化工*, 2019, 46(2): 99-101.
- YU Y, FENG X, LI S S, et al. Application of constructed rapid infiltration integrated equipment for constructed wetlands wastewater treatment[J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2019, 46(2): 99-101.
- [28] 王全金, 朱平, 宋嘉骏. 不同水力负荷下人工湿地-稳定塘组合系统的净化效果[J]. *环境工程*, 2014, 32(11): 37-40.
- WANG Q J, ZHU P, SONG J J. Removal efficiency using wetland-constructed pond combined system under different hydraulic loadings [J]. *Environmental Engineering*, 2014, 32(11): 37-40.
- [29] KOTSIA D, DELIGIANNI A, FYLLAS N M, et al. Converting treatment wetlands into "treatment gardens": Use of ornamental plants for greywater treatment [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 744: 140889. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140889.
- [30] 李松, 单胜道, 曾林慧, 等. 人工湿地/稳定塘工艺处理农村生活污水[J]. *中国给水排水*, 2008, 24(10): 67-69.
- LI S, SHAN S D, ZENG L H, et al. Treatment of rural domestic sewage by constructed wetland/stabilization pond process [J]. *China Water & Wastewater*, 2008, 24(10): 67-69.
- [31] 杨凤飞, 刘锋, 李红芳, 等. 生物滤池-人工湿地-稳定塘组合生态系统处理南方农村分散式污水[J]. *环境工程*, 2018, 36(12): 70-74.
- YANG F F, LIU F, LI H F, et al. Application of integrated process of biofilters-constructed wetland-stabilization pond in decentralized rural wastewater treatment system in south China [J]. *Environmental Engineering*, 2018, 36(12): 70-74.
- [32] 邓玉, 何聪, 倪福全, 等. 蚯蚓生态滤池-人工湿地组合装置低温下处理畜禽废水[J]. *水处理技术*, 2018, 44(7): 90-94.
- DENG Y, HE C, NI F Q, et al. Livestock wastewater treatment by the combined device of vermifilter and constructed wetland at low temperature [J]. *Technology of Water Treatment*, 2018, 44(7): 90-94.
- [33] 王宇飞. 保温型塔式蚯蚓滤池: 2015207610978 [P]. 2015-09-29.

- WANG Y F. Insulated tower earthworm filter; 2015207610978 [P]. 2015-09-29.
- [34] 汪龙眠,张毅敏,高月香,等.一种具有升温作用的塔式蚯蚓生态滤池;2013205146320[P].2013-08-21.
WANG L M, ZHANG Y M, GAO Y X, et al. A tower type earthworm ecological filter with warming effect; 2013205146320 [P]. 2013-08-21.
- [35] LIAO Q Y, YOU S H, CHEN M H, et al. The application of combined sewage treatment technology in rural polluted water prevention and control [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 507: 782-785. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.507.782.
- [36] 匡武,王翔宇,张斯思.跌水充氧接触氧化+人工湿地组合工艺在山地、丘陵地区农村生活污水处理中的应用[J].环境科技,2015,28(5):33-37.
KUANG W, WANG X Y, ZHANG S S. Application of waterfall aeration contact oxidation combined with constructed wetland technology in rural sewage treatment [J]. Environmental Science and Technology, 2015, 28(5): 33-37.
- [37] 钟秋爽,王俊玉.厌氧—接触氧化渠—垂直潜流型人工湿地处理农村生活污水研究[J].给水排水,2012,48(4):40-44.
ZHONG Q S, WANG J Y. Study on anaerobic-contact oxidation ditch-vertical subsurface constructed wetland to treat rural domestic sewage [J]. Water & Wastewater Engineering, 2012, 48(4): 40-44.
- [38] 唐晶,吕锡武,吴琦平,等.生物、生态组合技术处理农村生活污水研究[J].中国给水排水,2008,24(17):1-4.
TANG J, LÜ X W, WU Q P, et al. Study on bio-ecological combined process for treatment of rural domestic sewage [J]. China Water & Wastewater, 2008, 24(17): 1-4.
- [39] 刘晋.生物生态组合技术处理农村生活污水研究[D].南京:东南大学,2006.
LIU J. Study on the process combined with bio-ecological technology for rural sewage treatment [D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [40] 王康萍.组合填料生物滴滤池处理生活污水强化脱氮除磷工艺优化研究[D].西安:西安建筑科技大学,2016.
WANG K P. Optimization of mixed packing bio-trickling filter process in treating domestic sewage-enhanced nitrogen and phosphorus removal [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2016.
- [41] 黄媛媛,许东阳,纪荣平.改进生物滴滤池-人工湿地处理农村生活污水研究[J].水处理技术,2018,44(5):93-97.
HUANG Y Y, XU D Y, JI R P. Study on rural sewage treatment by improved biological trickling filter-artificial wetland [J]. Technology of Water Treatment, 2018, 44(5): 93-97.
- [42] 吴磊,吕锡武,吴浩汀,等.水解/脉冲滴滤池/人工湿地工艺处理农村生活污水[J].东南大学学报(自然科学版),2007,37(5):878-882.
WU L, LÜ X W, WU H T, et al. Use of combined process of hydrolysis, pulse trickling filter and constructed wetland for rural sewage treatment [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2007, 37(5): 878-882.
- [43] LI K Q, REN W, WANG Q L, et al. Onsite treatment of decentralized rural greywater by ecological seepage well (ESW) [J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 393: 136180. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.136180.
- [44] ZHENG H, LIAO Y, CHAI H, et al. Performance and mechanism of falling water enhanced tidal flow constructed wetlands (F-TFCW) for rural grey water treatment [J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 404: 136969. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.136969.
- [45] 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. DOI: 10.1016/j.jwpe.2022.103380.
- [46] LIU J W, WEI Z R, XU S, et al. A novel enhanced bio-ecological combined reactor for rural wastewater treatment: Operational performance and microbial communities [J]. Biochemical Engineering Journal, 2023, 198: 108991. DOI: 10.1016/j.bej.2023.108991.
- [47] LIU D, GE Y, CHANG J. Constructed wetlands in China: Recent developments and future challenge [J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2009, 7(5): 261-268.
- [48] 刘超翔,胡洪营,黄霞,等.滇池流域农村污水生态处理系统设计[J].中国给水排水,2003,19(2):93-94.
LIU C X, HU H Y, HUANG X, et al. Design for ecological treatment system of rural sewage in the Dianchi Valley [J]. China Water & Wastewater, 2003, 19(2): 93-94.
- [49] 吴磊,吕锡武,李先宁,等.厌氧/跌水充氧接触氧化/人工湿地处理农村污水[J].中国给水排水,2007,23(3):57-59.
WU L, LÜ X W, LI X N, et al. Combined process of anaerobic/waterfall aeration contact oxidation/constructed wetland for rural sewage treatment [J]. China Water & Wastewater, 2007, 23(3): 57-59.
- [50] 梁建军,彭俊,侯淑媛.蚯蚓生态滤池处理农村生活污水试验研究[J].中国给水排水,2016,32(11):16-19.
LIANG J J, PENG J, HOU S Y. Vermifilter process for treatment of rural domestic sewage [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(11): 16-19.
- [51] 余浩.水解池—滴滤池—人工湿地处理农村生活污水研究[D].南京:东南大学,2006.
YU H. Study on the treatment of rural domestic wastewater by hydrolysis tank dripping filter artificial wetland [D]. Nanjing: Southeast University, 2016.