

农村生活污水治理技术的比较评价及应用现状

倪洁, 郎杭, 徐东昱, 张盼伟, 万晓红, 吴文强*

中国水利水电科学研究院, 北京

收稿日期: 2022年7月19日; 录用日期: 2022年8月19日; 发布日期: 2022年8月30日

摘要

本文概述了农村生物污水及其特点, 农村生活污水治理技术按照处理单元分为生物处理技术、生态处理技术和联合处理技术三大类, 并分别介绍了各个技术的应用情况; 从经济效益、技术性能、环境影响三方面对生物处理技术及生态处理技术进行比较分析评价。以北京、浙江为例介绍了我国不同地区农村生活污水处理技术的实际应用现状, 充分考虑当地经济社会状况、农村人口分布及污水排放标准等因素, 因地制宜选用适宜的治理技术实现农村生活污水的良性治理。

关键词

农村生活污水, 治理现状, 治理技术

Comparative Evaluation and Application Status of Rural Domestic Sewage Treatment Technology

Jie Ni, Hang Lang, Dongyu Xu, Panwei Zhang, Xiaohong Wan, Wenqiang Wu*

China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing

Received: Jul. 19th, 2022; accepted: Aug. 19th, 2022; published: Aug. 30th, 2022

Abstract

This paper summarizes the rural domestic sewage and its characteristics, and introduces the application of each rural domestic sewage treatment technology from three categories: biological

*通讯作者。

文章引用: 倪洁, 郎杭, 徐东昱, 张盼伟, 万晓红, 吴文强. 农村生活污水治理技术的比较评价及应用现状[J]. 环境保护前沿, 2022, 12(4): 858-865. DOI: 10.12677/aep.2022.124108

treatment technology, ecological treatment technology and combined treatment technology according to the treatment unit; comparative analysis and evaluation are carried out from the aspects of economic benefits, technical performance, environmental impact. Taking Beijing and Zhejiang as examples, this paper introduces the actual application status of rural domestic sewage treatment technology in different regions of China, that is, taking full account of local economic and social conditions, rural population distribution, sewage discharge standards and other factors, and selecting appropriate treatment technology according to local conditions, so as to realize the benign treatment of rural domestic sewage.

Keywords

Rural Domestic Sewage, Management Status, Treatment Technology

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着社会主义新农村建设, 自来水的普及、厕所革命地不断推进, 农村生活条件持续改善, 使得农村人均生活用水量和污水排放量显著增加。据《2020年水资源公报》[1]显示, 2020年我国农村居民人均用水量达 100 L/d, 大量农村生活污水未经治理排出, 对水生生态系统和农村环境造成了沉重负担。虽然我国从 2008~2018 年全国农村环境综合整治工作累计投入 1200 多亿元, 依托农村环境综合整治开展的农村生活污水治理项目累计建设污水管网近 160 万千米, 建成农村生活污水处理设施 30 多万套, 处理能力近 1000 万吨/天, 农村生活污水处理率得到显著提升。但依然存在很多问题, 如治理比例偏低、治理地域分布不均、治理强度分散、资金筹措力度不够等, 因此今后一段时间内农村生活污水治理仍将是农村人居环境改善工作中的短板[2]。农村生活污水治理区别于城市污水治理, 受地理位置、环境等影响较大, 其治理模式不能生搬硬套, 并且农村污水处理规模小、分布广, 建设和运行成本相对较高, 连续运行有很大困难。选择合适的技术对农村生活污水进行无害化处理和资源化利用, 探索研究低成本、低排放的农村生活污水处理工艺流程, 以满足我国“十四五”规划氨氮排放[3]及“双碳”目标要求[4]。

2. 农村生物污水及其特点

农村生活污水指农村居民生活产生的污水, 主要包括厕所污水(人排泄及冲洗粪便产生高浓度生活污水)和生活杂排水(农村居民家庭厨房、洗衣、清洁和洗浴污水产生的污水), 即黑水和灰水[5]。农村居民的排水水质因排水类型不同而差异较大。实际调查与监测结果表明: 厕所污水污染物浓度最高, 同时有臭味产生; 洗衣第一遍污水和厨房洗碗刷锅水 COD 也很高, 可高达 10,000 mg/L 以上; 对 TP 贡献最大的是厨房的淘米水, 其次是含磷洗衣洗涤水; 而洗浴、洗澡水相对较干净, 各项指标值都较低。根据 2010 年住房城乡建设部发布的《农村生活污水处理技术指南(试行)》, 农村生活污水中水质参考取值见图 1, SS 约为 100~300 mg/L, COD_{Cr} 约为 100~450 mg/L, BOD₅ 约为 50~450 mg/L, NH₄⁺-N 约为 3~90 mg/L, 可生化性较好[6]。除此以外, 农村生活污水具有污染物浓度低、碳氮比较低、来源分散[7]、夜间排放量小[8]、进水负荷率变化大、污染事故风险大的特点[9][10]。

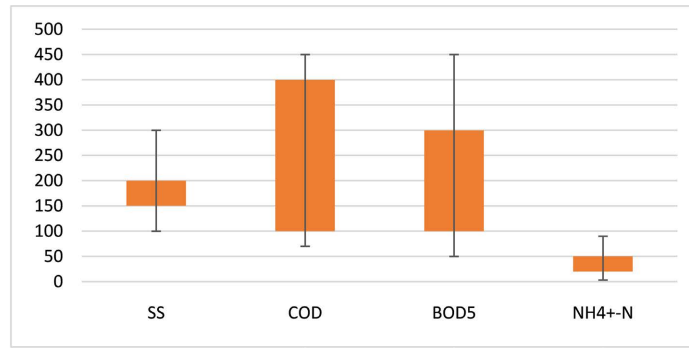


Figure 1. Reference values for domestic sewage water quality of rural residents in different areas of China
图 1. 我国不同地区农村居民生活污水水质参考取值

3. 农村生活污水治理技术概述

国内外应用了很多农村污水处理技术，按作用原理分为物理法、化学法和生物法三种方法。物理方法包括重力、离心、过滤等；化学方法包括混凝、吸附、电解等；生物方法包括活性污泥法和生物膜法等[11]。按主要技术单元组成分类，主要分为三类：生物处理技术、生态处理技术、联合处理技术，见图 2。2000~2016 年可核实的 119 例农村生活污水工程案例可分为生物处理、生态处理和联合处理 3 种技术模式，分别占 5.88%、14.29%和 79.83% [12]。

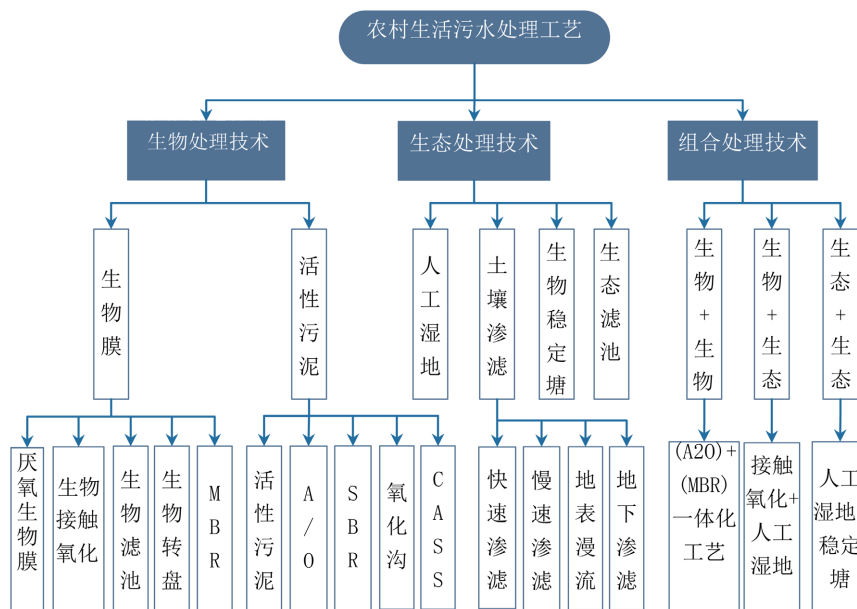


Figure 2. Rural domestic sewage treatment process
图 2. 农村生活污水处理工艺

3.1. 生物处理技术

生物处理技术对农村生活污水的净化主要依靠微生物的代谢。该技术占地面积少，产生污泥少，冲击负荷能力强的优点，主要包括生物膜法和活性污泥法。活性污泥法包括普通活性污泥法、序列间歇式活性污泥法(SBR)、改良工艺 CASS 法、氧化沟法等。生物膜法又分为厌氧生物膜法和好氧生物膜法。厌氧生物膜反应池是通过在厌氧池内填充生物填料强化厌氧处理效果的一种厌氧生物膜技术。污水中大分子有机

物在厌氧生物膜反应池中被分解为小分子有机物,能有效降低后续处理单元的有机污染负荷,有利于提高污染物的去除效果。正常运行时,厌氧生物膜反应池对 COD 和 SS 的去除效果一般能达到 40%~60%。好氧生物膜法分为生物滤池、生物转盘、生物接触氧化和生物流化床[13],其比表面积见表 1,生物膜的比表面积越大,对水质的净化效果越强。

Table 1. Representative processes and specific surface area of aerobic biofilm method

表 1. 好氧生物膜法的代表工艺及比表面积

处理技术	代表工艺	比表面积(m ² /m ³)
生物滤池	生物滤池	40~120
生物转盘	生物转盘	120~180
生物接触氧化	MBR	130~1600
生物流化床	MBBR	3000~5000

王铭源等[14]采用一体化复合生物滤池处理农村污水, COD、NH₃-N、TN 能稳定达到污水综合排放标准 GB 8978-1996 的一级 A 标准。张尊举[15] [16]等采用填料生物转盘对农村家庭生活污水的处理, 稳定运行期间对 COD、NH₄⁺-N、TN、TP 的平均去除率分别稳定在 75%、85%、65%和 75%以上,出水 COD、NH₄⁺-N、TN 优于城镇污水处理厂污染物排放标准 GB 18918-2002 一级 A 标准,出水 TP 达到一级 B 标准。生物接触氧化池是在池体中填充填料,污水浸没全部填料,氧气、污水和填料三相接触过程中,通过填料上附着生长的生物膜去除污水中的悬浮物、有机物、氨氮、总氮等污染物的一种好氧生物技术,以生物膜反应器(MBR)为代表。MBR 在过去的 10~15 年中受到欢迎,因为其占地面积更小,能够满足严格的排放限制和高工艺可靠性[17],该技术在华北地区应用最多。唐舒雯[18]等探讨了 MBR 反应器中以陶瓷膜代替有机膜处理农村生活污水的效果,研究发现 TP 的去除率达到 90.90%。生物流化床以 MBBR 为代表,赵文斌[19]应用 MBBR 工艺在低温下(8℃~10℃)处理农村厕所废水, COD、NH₄⁺-N、TN 和 TP 的去除率分别为 82.85%、83.43%、47.31%和 46.12%,四个水质指标的出水水质可达到农田灌溉水的标准。生物处理技术具有出水水质好,占地面积小,抗冲击负荷能力强的优点,适合处理较大水量、经济条件很好的农村地区。

3.2. 生态处理技术

生态处理技术是利用微生物、土壤、动物和植物产生的一系列物理、化学和生物效应降解农村污水中的污染物的污水处理技术[20]。生态处理技术主要包括人工湿地、土壤渗滤、稳定塘、生态滤池等。其中人工湿地、土壤渗滤和稳定塘的比例分别为 72.22%, 16.67%和 11.11% [12]。

人工湿地(CWs)作为一种综合生态系统,主要由水生植物、种植基质和微生物组成。它可以通过底物吸附、植物吸附、微生物硝化和反硝化等物理、化学和生物作用,有效去除进水中的有机物、氮和磷[21]。人工湿地的特点是建设成本低,维护和管理方便,环境友好。它们已成为农村地区分散式污水处理的有前途的技术[22]。程铭等[23]采用多级垂直流人工湿地处理北方农村生活污水,结果表明, COD、NH₃-N、TN、TP 最佳出水浓度范围分别为 18~30 mg/L、9~25 mg/L、0~6 mg/L、0.4~0.5 mg/L,其出水达到城镇污水厂污染物排放标准 GB 18918-2002 一级 A 排放标准。人工湿地技术受气温影响较大,适宜南方气候温暖地区,以及对生态环境要求较高的风景名胜区、饮用水源地以及自然保护区。

土壤渗滤是在人工控制条件下将污水投配在土地上,通过土壤-植物系统,经物理、化学和生物等一系列的净化过程,使污水得到净化的污水处理方法。土地处理根据污水的投配方式及处理过程的不同,可以分为慢速渗滤、快速渗滤、地表漫流和地下渗滤系统四种类型。土壤渗滤技术具有成本低、操作简

单、占地较大, 适合处理污水浓度不高的生活污水, 适用于土地较丰富的村镇地区。

稳定塘又名氧化塘或生物塘, 是一种利用水体自然净化能力处理污水的生物处理设施, 主要利用菌藻共同作用、微生物降解、有机颗粒沉降、有机物吸附等处理污水中的有机污染物和其他营养物质。该工艺受自然条件影响较大, 具有水力停留时间较长、易孳生蚊虫、处理不当容易造成二次污染等问题。

3.3. 组合处理技术

组合处理技术是充分利用并结合单一技术的优点, 以节能、低成本、高去除率为最终目的。组合技术因其结合各种单一技术的优点, 其良好的运行效果优于单一运行。组合处理技术中, 生物+生态处理组合所占比例最大, 占 71.28%, 生物 + 生物和生态 + 生态处理组合分别占 19.15%和 9.57% [12]。生物处理利用微生物去除有机物及一些营养物质, 降低生态治理技术的进水负荷, 保证长期稳定运行; 生态治理技术可进一步提升水质, 弥补生物技术除磷效果差的缺点。例如生物 + 生态组合——SBR-人工湿地处理技术, SBR 间歇式运行可以有效解决农村分散式污水排放的特点, 其运行费用主要为曝气时产生的电费, 缺点是 N、P 处理效果不佳; 而人工湿地进一步的脱磷和反硝化, 运行费用低, 管理维护简单等特点, 两者串联, 优势互补。张国珍、亢瑜等[24] [25]采用一体化 ABR-生物滴滤池系统处理农村生活污水, 对 COD、NH₃-N、TN 和 TP 的平均去除率可达 88.93%、84.75%、48.47%和 50.44%, 优于单独运行 ABR 反应器和生物滴滤池。由于组合处理技术的综合性优势, 在实际运用中占比也较高。

3.4. 农村生活污水治理技术比较评价

目前, 我国农村地区的污水治理技术有较多的选择方案, 多数技术的出水水质都可满足农村污水治理的要求, 但单一的污水治理技术都有各自的优点及局限性。分别从经济效益、技术性能、环境影响等方面进行比较分析评价可知(见表 2), 生物处理技术, 占地小, 受季节影响小、进水负荷大, 出水水质好, 但是生物膜水治理技术除磷效果较弱、活性污泥法运行管理复杂、能耗高、运行费用高、维护困难。传统生态处理技术单位投资及运行成本低、环境友好, 但进水负荷小、占地面积大、受季节、地域气候影响较大、处理效果不稳定[26]。因此, 我国南北方地区可根据农村实际情况以及当地农村污水治理排放标准, 选取合适的技术或可将多种技术进行组合, 形成一套较为完善的污水治理流程。

Table 2. Comparative evaluation of rural domestic sewage treatment technologies

表 2. 农村生活污水治理技术比较评价

	比较指标	活性污泥法	生物膜法	生态处理法
经济效益指标	单位投资	一般	高	低
	运行成本	一般	高	低
	建设面积与服务人口比(m ² /人)	低	低	高
技术性能指标	COD 去除率(%)	好	很好	好
	氨氮去除率(%)	一般	很好	一般
	技术成熟度	好	好	好
	工艺流程简便性	复杂	一般	简便
	出水达标稳定性	一般	很好	一般
	管理和操作难易	复杂	复杂	简便

Continued

环境影响指标	恶臭气体影响	无	无	有点味道
	噪声水平	正常	正常	安静
	对附近居民影响	轻微影响	轻微影响	轻微影响
适用范围		北方地区	北方地区	南方地区

4. 农村生活污水处理技术的应用现状

2010年,住房和城乡建设部发布的《农村生活污水处理技术指南(试行)》,主要将12种技术列入了农村生活污水处理技术指南,我国不同区域(东北、华北、西北、西南、中南、华南)根据各自的经济、环境及气候条件而选用不同的农村生活污水处理技术。其中化粪池、沼气池、厌氧生物膜反应器作为污水预处理技术,在各个地区广泛应用。生物接触氧化、A/O、氧化沟、序批式生物反应器、土地渗滤、人工湿地、生态滤池、稳定塘由于其成熟的技术及较好的出水水质也分别被各个地区广泛应用,见图3。

在实际应用中,生物接触氧化、A/O或 A_2O 、人工湿地等生态技术占比较大。赵高晖[27]对北京市除西城区、东城区、石景山以外的13个区域,总计676个农村生活污水处理终端统计分析知,采用 A_2O +MBR、人工湿地、生化+人工湿地、生物接触氧化这四种处理技术占总数一半以上(53.69%) (见图4)。袁平等[28]调研了浙江省数十个县市区内共计300个农村生活污水处理终端,具体的工艺与占比如图5所示,浙江省农村污水应用比例最高的分别是厌氧+人工湿地工艺(34.3%)和 A_2O 工艺(32.7%)、 A_2O +人工湿地(10%)。

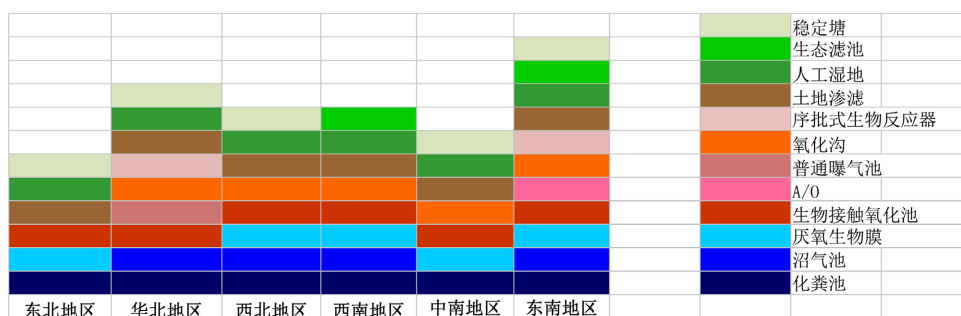


Figure 3. Rural sewage treatment technology selected in different regions of China

图3. 我国不同地区选用的农村污水处理技术

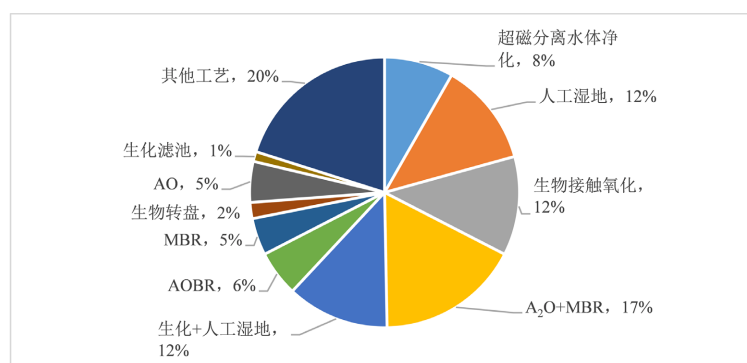


Figure 4. Proportion of rural sewage treatment processes in the survey area of Beijing

图4. 北京市调研地区农村污水处理工艺占比

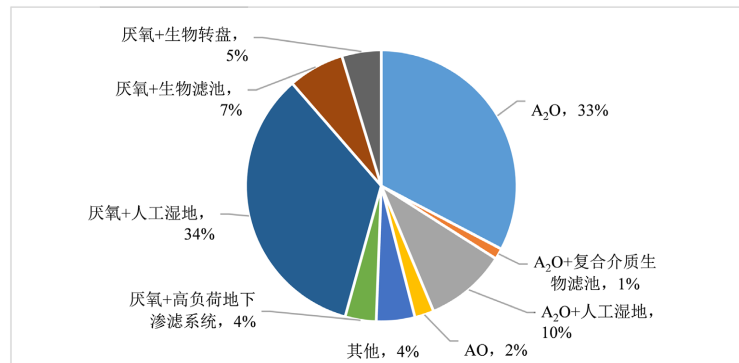


Figure 5. Proportion of rural sewage treatment processes in the survey area of Zhejiang Province
图 5. 浙江省调研地区农村污水处理工艺占比

5. 结语

目前,我国农村生活污水治理得到国家政策的大力支持,发展趋势较好。各个地区在遵循生态环保的原则基础上,充分考虑当地经济社会状况、农村人口分布及当地污水排放标准等因素,因地制宜选用适宜的污染治理技术。针对京津冀、长江经济带、粤港澳大湾区、黄河流域及水质需改善控制单元等区域,重点整治水源保护区,城乡结合部,其水排放标准要求较高,可采用生物处理技术或生物+生态的组合处理技术;对于东北、西北、西南地区,应结合当地地理及气候条件,选取适宜的生态处理技术。通过污染治理与资源利用相结合、工程措施与生态措施相结合、集中与分散相结合的建设模式和处理工艺,最终实现农村生活污水的良性治理。

基金项目

国家重点研发计划子课题:农村黑臭水体截源治污生态景观一体化关键技术及集成示范(2019YFD1100205)。

参考文献

- [1] 水利部. 2020年水资源公报[R]. 北京:水利部, 2021.
- [2] 贾小梅, 于奇, 王文懿, 赵芳, 董旭辉. 关于“十四五”农村生活污水治理的思考[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(5): 623-626.
- [3] 新华社. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要[EB/OL]. http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm, 2021-03-13.
- [4] 新华社. 中共中央国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见[EB/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/2021-10/24/content_5644613.htm, 2021-10-24.
- [5] 住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. GB/T 51347-2019. 农村生活污水处理工程技术标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [6] 住房和城乡建设部. 农村生活污水处理技术指南(试行)[Z]. 北京: 住房和城乡建设部, 2010.
- [7] Li, P., Zheng, T., Li, L., Ma, Y., Sun, X. and Liu, J. (2020) An Appropriate Technique for Treating Rural Wastewater by a Flow Step Feed System Driven by Wind-Solar Hybrid Power. *Environmental Research*, **187**, Article ID: 109651. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109651>
- [8] Mahmoud, N. and van Lier, J.B. (2011) Enhancement of a UASB-Septic Tank Performance for Decentralised Treatment of Strong Domestic Sewage. *Water Science & Technology*, **64**, 923-929. <https://doi.org/10.2166/wst.2011.690>
- [9] Igbinsola, E.O. and Okoh, A.I. (2009) Impact of Discharge Wastewater Effluents on the Physico-Chemical Qualities of a Receiving Watershed in a Typical Rural Community. *International Journal of Environmental Science & Technology*, **6**, 175-182. <https://doi.org/10.1007/BF03327619>
- [10] Fan, Z., Liang, Z., Luo, A., Wang, Y., Ma, Y., Zhao, Y., et al. (2021) Effect on Simultaneous Removal of Ammonia,

- Nitrate, and Phosphorus via Advanced Stacked Assembly Biological Filter for Rural Domestic Sewage Treatment. *Biodegradation*, **32**, 403-418. <https://doi.org/10.1007/s10532-021-09928-z>
- [11] 朱木兰, 黄永福, 李地金, 王思越, 陈恩. 农村不同排污方式水质调查与治污新策略[J]. 水利学报, 2020, 51(2): 245-252.
- [12] Zhang, Q.-Y., Liu, Z.-J., Liu, L.-S. and Li, N. (2021) Research on Comprehensive Evaluation Model of Rural Domestic Sewage Treatment Technology Based on Fuzzy Comprehensive Evaluation and Analytic Hierarchy Process Method. *Water Practice and Technology*, **16**, 452-471. <https://doi.org/10.2166/wpt.2021.003>
- [13] 马凯. SBR+人工湿地系统处理分散式农村生活污水[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州交通大学, 2020.
- [14] 王铭源, 陆少鸣, 申华楠, 胡勇, 吴亚慧. 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+110.
- [15] 张尊举, 董亚荣, 王滕, 李国会. 填料生物转盘对农村家庭生活污水的处理[J]. 水处理技术, 2020, 46(2): 120-123.
- [16] 张尊举, 金泥沙, 张仁志. 1种小型污水处理填料生物转盘的设计与实验[J]. 水处理技术, 2018, 44(12): 101-103.
- [17] Smith, A.L., Stadler, L.B., Love, N.G., Skerlos, S.J. and Raskin, L. (2012) Perspectives on Anaerobic Membrane Bioreactor Treatment of Domestic Wastewater: A Critical Review. *Bioresource Technology*, **122**, 149-159. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.04.055>
- [18] 唐舒雯, 纪婧, 王梦娴, 陈佳仪, 李旭东, 邱江平. 农村生活污水陶瓷膜-生物反应器处理工艺强化脱氮除磷研究[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(5): 1121-1129.
- [19] 赵文斌. 低温条件下 MBBR 工艺处理农村厕所废水研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 辽宁大学, 2021.
- [20] Liu, J., Qiu, J., Huang, A., et al. (2018) Analysis of the Distributed Ecological Treatment Technology for Domestic Sewage in Rural Areas. *Recyclable Resources and Circular Economy*, **11**, 37-39.
- [21] Wu, S., Lyu, T., Zhao, Y., Vymazal, J., Arias, C.A. and Brix, H. (2018) Rethinking Intensification of Constructed Wetlands as a Green Eco-Technology for Wastewater Treatment. *Environmental Science & Technology*, **52**, 1693-1694. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b00010>
- [22] Li, X., Yang, L., Xu, K., Bei, K., Zheng, X., Lu, S., et al. (2021) Application of Constructed Wetlands in Treating Rural Sewage from Source Separation with High-Influent Nitrogen Load: A Review. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, **37**, Article No. 138. <https://doi.org/10.1007/s11274-021-03105-3>
- [23] 程铭. 多级垂直流人工湿地对北方农村生活污水的处理分析[J]. 环境保护科学, 2019, 45(6): 64-70.
- [24] 张国珍, 亢瑜, 武福平, 闵芮. 一体化 ABR-生物滴滤池系统处理农村生活污水[J]. 水处理技术, 2020, 46(11): 108-112.
- [25] 亢瑜. 改良型 ABR-生物滴滤池一体化系统处理分散式农村生活污水[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州交通大学, 2020.
- [26] Lv, Z., Zhou, Z., Pan, R. and Ding, A. (2020) Pilot Scale Study on Combined Ultra Filtration and Other Technique to Treat Rural Domestic Sewage. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **508**, Article ID: 012015.
- [27] 赵高辉. 北京市典型农村污水处理技术适用性评估[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京建筑大学, 2019.
- [28] 袁平. 浙江省农村生活污水处理设施运行现状与诊断性评价研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2020.