

农村生活污水生态综合治理技术现状与研究进展

赵以国^{1,2}, 张靖雨^{1,2}, 汪邦稳^{1,2}, 龙昶宇^{1,2}, 张卫^{1,2}, 张世杰^{1,2}, 赵黎明^{1,2}

(1.安徽省水利部淮河水利委员会水利科学研究院, 安徽 合肥 230088;
2.水利水资源安徽省重点实验室, 安徽 蚌埠 233000)

摘要: 随着经济社会的发展和水平的提高,农村水环境恶化和水生态功能退化趋势仍未得到有效遏制,对于探索因地制宜、应用高效、经济可行的农村生活污水处理技术的需求更加迫切。通过归纳总结不同典型处理工艺及不同生物生态组合处理技术的特点、生态处理措施中的典型挺水、沉水植物及不同类型植物组合的净化效果及优化选择等多个角度,系统阐述了农村生活污水生态综合治理措施的主要技术现状及研究进展,分析了各项工艺及植被选择的适用性和应用前景,提出了区域污水处理技术优化筛选的科学参考与选择依据。对农村生态环境综合整治提供思路借鉴,为乡村振兴战略提供技术支撑,对促进我国美丽乡村建设和人居环境改善具有重要的意义。

关键词: 农村生活污水; 生态综合治理; 应用进展; 植物选择

中图分类号: X5

文献标识码: A

文章编号: 1674-4829(2020)04-0074-05

Status and Research Progress on Sewage Ecological Treatment Technology in Rural Areas

ZHAO Yi-guo^{1,2}, ZHANG Jing-yu^{1,2}, WANG Bang-wen^{1,2}, LONG Chang-yu^{1,2},
ZHANG Wei^{1,2}, ZHANG Shi-jie^{1,2}, ZHAO Li-ming^{1,2}

(1. Anhui and Huaihe River Institute of Hydraulic Research, Hefei 230088, China; 2. Anhui Province Key Laboratory of Water Conservancy and Water Resources, Bengbu 233000, China)

Abstract: With the development of society and the improvement of living standards, the trend of rural water environment deterioration and water ecological function degradation has not under effective control, the requirement of explore an economically feasible and technically reliable sewage treatment technology becomes more and more insistent. Different typical treatment processes and bio-ecological combinations were summarized, the selection of typical emergent plants, submerged plants and different types of aquatic plants combination in ecological management was used. This paper made a systematic exposition of the present situation and the research progress of ecological control measures for sewage in rural areas, analyzed the applicability of processes and plant selection, and finally put forward a scientific reference of regional sewage treatment technology optimization. It can provide a guide for the comprehensive improvement of rural environment and technical support for rural revitalization, furthermore, it shows an important significance in promoting the beautiful countryside construction and human settlements.

Key words: Rural domestic sewage; Ecological treatment; Application progress; Plant selection

DOI:10.19824/j.cnki.cn32-1786/x.2020.0064

0 引言

农业面源污染是水体富营养化的主要原因,其

收稿日期: 2020-03-27

基金项目: 安徽省重点研发计划项目(1804b06020346);安徽省水利科技项目(slkj2019-06);安徽省水利部淮河水利委员会水利科学研究院科技创新基金项目(KY201908).

作者简介: 赵以国(1962-),男,安徽霍邱人,大专,高级工程师,主要研究方向为水生态、水工建筑。

通讯作者: 汪邦稳, E-mail: bangwenbest@126.com.

贡献率大大超过城市、工业的点源污染。与城市不同,农村污水排放日变化系数大^[1],农忙时水量大、农闲时水量小;大多不含重金属或有毒有害物质,有机物含量高、可生化性较强;农村污水管网布设不健全,难以运行管理复杂技术工艺。此外不同区域污水排放特征差异很大,远高于城市之间的差异水平。安徽省淮北平原区农村数量多、土地利用率较低,COD与TP浓度波动性较大^[2]。目前各地农村环境综合整治和美丽乡村建设已大力开展,但局部地区不考虑

地域特征实际,存在形象工程、面子工程,设施处理效果不佳,造成资源浪费。因此系统总结国内外农村生活污水处理经验,对比不同处理模式的优缺点,积极探索符合当地区域实际的生态综合治理技术与方法变得尤为迫切。

1 农村生活污水处理技术研究进展

农村生活污水处理技术分类见图 1。自然与生态相结合的 NEWS 处理工艺由化粪池-厌氧生物滤池-上下流人工湿地组成,在韩国公州市、忠清南道已经得到了较多的推广应用^[3]。我国关于农村生活污水处理研究上世纪 80 年代开始起步,目前常见的方法主要包括厌氧发酵-接触氧化法、人工湿地、膜生物反应器(MBR)、稳定塘等。

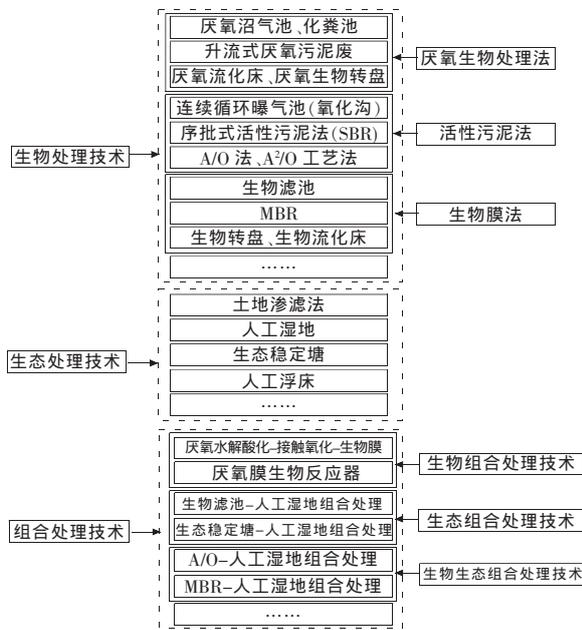


图 1 农村生活污水处理技术分类

1.1 常见处理技术

厌氧发酵-接触氧化将厌氧水解技术用为活性

污泥的前处理,对 COD, NH₄⁺-N, TP 具有较好的去除效果,耐冲击负荷、污泥量少、反硝化作用强,适用于日处理能力 100 000 m³ 以下的中小型污水处理设施,但需机械曝气充氧,能耗及经济费用较高。人工湿地 DO 浓度较低,生物作用以兼性细菌和厌氧菌分解为主^[4-5],适合处理污染物浓度低特别是含氮量低的生活污水,但单一运行局限性大,且应用过程易受气候温度、基质堵塞问题影响。MBR 工艺将活性污泥法与膜分离技术相结合,以膜组件取代二沉池,在生物反应器中保持高活性污泥浓度,实现了水力停留时间与污泥停留时间完全分离,减少占地和污泥量。但 TP 的去除主要依靠前端投加药剂化学除磷,且成本高、管理繁琐,膜易发生堵塞或污染。稳定塘利用设置防渗层后的天然池塘中的微生物降解、吸附作用达到净化水质目的,处理后出水可直接用于农田灌溉,但同时存在效果不稳定、水力停留时间长、有气味等缺点。

本文结合各项工艺的特点和处理成本,通过查阅大量研究经验,梳理了几种常见的农村生活污水处理工艺的实际应用效果,见表 1。由表 1 可知,实际应用中 MBR 工艺平均去除率能达到 90% 以上,但能耗高,膜易发生堵塞、维护成本高等缺点使推广具有局限性。而人工湿地、氧化塘及生物滤池等生态型处理技术的去除效果从 10% ~ 90% 不等,波动性较大,与温度、水生生物季节性变化、基质填料选择等因素有直接关系。横向对比来看,不同类型处理技术均对 TN, NH₄⁺-N 及 COD 去除效果较好,但由于人工湿地、氧化塘等有限的溶解氧和碳源缺乏,TP 去除率普遍较低,单依靠某种工艺往往需对尾水投放药剂以满足排放标准要求。因此往往需要因地制宜选择不同生物组合、生态组合或生物生态组合等多种模式以提高处理效率,切实解决“建得起、用不起”、处理设施晒太阳的困难局面。

表 1 几种常见的农村生活污水处理技术比较

处理工艺	污染因子去除比例				运行费用	适用地区/条件	缺点
	TN	NH ₄ ⁺ -N	TP	COD			
厌氧发酵-接触氧化	65% ~ 75% ^[6] ; > 80.5% ^[4]	80% ^[5]	86.7% ^[5] ; 75% ^[6]	> 95.5% ^[7]	高	中小型污水处理设施	需机械曝气充氧,能耗及经济费用较高;除磷效果欠佳
MBR	平均 90% ^[8]	87.2% ^[9]	93.4% ^[8]	85%左右 ^[9]	较高	经济条件好,对出水水质要求较高的地区	能耗较高、膜易发生堵塞、维护成本高
人工湿地	28% ^[10] ; 80% ^[11]	11% ^[10] ; 70% ^[11]	10% ^[10] ; 90% ~ 94% ^[11]	80% ~ 90% ^[12]	低	地域辽阔、地势平坦的地区	对地形要求高、占地面积大
生态氧化塘	14.5% ~ 70% ^[12]	87.7% ^[13]	84.1% ^[14]	91.5% ^[14] ; 75% ^[13]	低	经济条件差、湖泊、沟渠塘坝众多的村庄	占地大、水力停留时间长、处理效果不稳定等
生物滤池	80%以上 ^[15]	80%以上 ^[15] ; 45.9% ^[16]	76.2% ^[16]	70% ~ 95% ^[17]	低	分散式生活污水处理	水力停留时间长、处理效果不稳定、受季节影响明显等

1.2 生物生态组合处理技术

生物生态组合技术中前段生物处理主要负责去除有机物和部分营养物,可以克服生态工艺易堵塞的问题,后段生态处理进一步对污水脱氮除磷,解决生物处理技术复杂和建造费用高的难题,从而提高出水水质,保证系统运行的稳定性。目前人工湿地、稳定塘等生态处理技术和其他生物处理技术的组合被越来越多地应用在农村生活污水的处理上。

1.2.1 A/O-人工湿地组合处理工艺

A/O-人工湿地组合污水处理技术作为一种设计合理、操作简单、工艺成熟的工艺,已经普遍用于在我国多个地区的农村污水处理工程中。组合工艺前置的生物接触氧化反应器大大减小了人工湿地的污染负荷与堵塞的可能,同时后置的人工湿地能够很好弥补生物接触氧化工艺对氮、磷去除能力的不足。熊仁等^[18]采用厌氧+跌水曝气+人工湿地组合工艺实现对COD、TN、TP、 NH_4^+-N 、SS这5个常规指标的平均去除率分别达到74.5%、57.2%、59.5%、59.0%和91.6%,且厌氧反应池对SS去除贡献率最大。崔鹏^[19]发现低温8~12℃时,A/O+垂直流人工湿地组合工艺对去除COD、 NH_4^+-N 、TN和 PO_4^{3-} 的平均贡献能够达到88.4%、72.9%、58.7%和75.4%。

1.2.2 膜生物反应器-人工湿地组合处理工艺

MBR工艺为前置反硝化提供兼氧环境,具有良好的脱氮效果。兼氧MBR工艺通过污泥中的兼性厌氧菌作用来实现有机物的降解,由于没有对溶解氧浓度的要求从而降低了能耗。通过适当增加曝气量保证兼性厌氧菌低温状态下活性,兼氧MBR工艺在北方低温农村地区长期运行出水各污染指标平均去除率在60%以上^[20]。许得雨等^[21]构建了以不锈钢丝网作为膜材料的新型厌氧膜生物器,使COD去除率稳定在93%以上的同时有效缓解了膜污染问题。张跃峰^[22]多年探索形成了多级串联大深径比厌氧反应器+跌水接触氧化装置+水生蔬菜滤床和浸润度可控型人工湿地组合工艺,在内部形成整体推流流态,处理效率和耐冲击负荷能力更高。该工艺技术应用在宜兴市、常州市武进区等农村污水处理项目,节能60%以上,节地60%以上,并能产生22.5元/ m^2 以上的经济效益。

1.2.3 其他生物-生态组合处理工艺

其他常见的生物生态组合工艺还包括生态氧化塘、生物滤池与人工湿地的组合等。生物滤池是一种利用生物膜附着生长的硝化菌、异氧菌等的代谢活动在自然通风条件下将污染物去除的生物处理形

式。由于滤池内难以形成好、缺氧的交替环境,常与人工湿地组合后提高TN、TP去除效率。SAMAL等^[23]从不同水力负荷、蚯蚓密度、有机碳源等多方面总结探讨了蚯蚓微生物生态滤池与水生植物滤床组合处理不同生活污水的效果;肖雨涵等^[24]分析了多级串联表面流库塘-湿地的水质净化效果及污染物沿程变化规律,发现其对营养盐净化作用主要在于前两级表流湿地,而对TP的去除效果尚需进一步完善。ARPIT等^[25]认为人工湿地和稳定塘工艺技术中对溶解性有机物的处理作用是通过生物不稳定组分同化和植物衍生的陆地物质浸出共同影响完成的。

2 生态处理技术中植物筛选研究进展

水生植物的恢复与重建在淡水生态系统的稳态转化中具有重要作用,除本身能吸收同化污染物外,还能提高湿地、河道生态系统的微生物数量,调整其组成类型等。据调查统计,我国水生植物资源丰富,共有61科、168属、741种^[26]。根据生活方式一般分为挺水植物、浮叶植物、沉水植物和漂浮植物以及湿生植物,目前用于湿地、河道修复等生态处理技术的主要有芦苇、香蒲、菖蒲等挺水植物以及苦草、菹草、金鱼藻等沉水植物。

2.1 水生植物的主要功能与作用

水生植物根系具有沁氧功能,剩余未被利用的氧气由根系直接释放到外界环境。发达的根系具有较大的表面积,易在根区土壤形成好氧环境,而在距根区较远的区域形成缺氧和厌氧环境,为微生物的硝化、反硝化作用及其他吸附代谢作用提供适宜的环境,扩大了水质净化的有效空间。其次,发达根系能够穿透介质层,提高基质孔隙度,增强透水性能和水力传导作用,有效避免土壤板结、水力流通不畅等问题,有研究认为^[27],植物的去污效果除了随根系发达程度递增外,还随着水力负荷减小逐渐升高。另外,相较于植物吸收,微生物的反硝化脱氮是氮素脱除的主要途径^[28],根系细胞在生长过程中向周围环境释放的大量无机离子、糖类和有机酸等分泌物,为微生物代谢提供了多种易降解的有机碳源,而充足的有机碳源是保证反硝化过程顺利进行的前提。

2.2 典型挺水植物净化效果

挺水植物生命周期比藻类、浮水植物长,氮磷储存稳定,易通过收割去除,并且依靠发达的根系和较强的输氧能力进一步提高氮磷去除率。选择适当的挺水植物是构建湿地环境和污水深度处理的关键。CRISTINA等^[29]研究了在水平潜流湿地中种植美人

蕉、马蹄莲等观赏性开花植物对旅游景区类进水负荷变化较大地区生活污水的处理效果。EZZAHRI 等^[30]比较了 9 种湿地植物的氮、磷积累量,证实芦苇具有适应能力强、生长稳定、抗逆性好、去污能力强等特点。国内研究方面,杨林等^[31]发现通过收割可以去除整个植株总氮和总磷含量的 60%~80%;余雪花等^[32]研究发现常见挺水植物对 NH_4^+-N 均有明显的去除作用,但对 NO_3^--N 不稳定。

2.3 典型沉水植物净化效果

沉水植物扎根于水底淤泥中,根、茎、叶与水体接触面积大,对水体中营养物质的吸收充分,同时能在水体中通过光合作用提供氧分环境,在湿地生态、河道修复中独具优势。金鱼藻、狐尾藻、苦草等多种沉水植物对 TP, TN, NH_4^+-N 的去除率平均达到 60%~80%之间^[33],且具有良好的抗负荷、抗寒能力。SU 等^[34]对长江流域 97 个浅水湖泊的取样发现,低内稳性(金鱼藻、穗状狐尾藻和轮叶黑藻)群落临界磷浓度较低,且有较快的响应和恢复能力,可作为湖泊生态修复的先锋物种。MARYAM 等^[35]认为沉水植物表面附着细菌如假单胞菌属(*Pseudomonas*)、芽孢杆菌属(*Bacillus*)等 10 余种菌属的脱氮作用明显,其反硝化能力可以在高营养条件下得到极大提高。李琳等^[36]认为苦草、黑藻等对氮磷的去除以植增效作用为主,吸收富集作用较低。

2.4 不同类型植物组合净化效果

过度单一的植物类型净化能力有限、受季节的影响更明显以及存在抗逆性和抗虫性等问题,水质处理效果不稳定。合理的多种生活型水生植物群落比单一水生植物净化效果更稳定,缓冲能力更强,还能控制藻类生长,降低叶绿素 a 密度,提高水体透明度。混合群落中植被相对生长速率和累积生物量显著高于独自种植时期。然而,不同的植物选种组合和种植条件对试验结果影响差异显著。周玥等^[37]研究表明高浓度污水中单种挺水植物对 TP 的净化效果较好而多种植物组合对 TN 的净化效果更好,其原因可能与群落生物量、多种植物组合的选种优化有关。RODRIGUEZ 等^[38]发现芦苇根际氧化条件增强了硝化和氨化过程,而藜草反而增强了反硝化作用和硫酸盐还原作用,因此认为植物组合可以维持高效去污和低硝酸盐浓度之间的稳定关系。

3 研究展望

农村地区经济相对落后,污水收集难度大,缺乏

资金和技术人员。应根据实际区域及地形条件合理选择处理技术。如安徽省内淮北平原区村落分布较为集中、COD 与 TP 波动性较大,可采用脱除有机物及抗冲剂负荷能力强的处理工艺;江淮丘陵区应充分利用已有的沟渠塘坝构建多级联动的组合式生态处理模式,并选择轮金鱼藻、狐尾藻等当地土著种作为主要水生植物;皖南山区坡度较陡、污水季节性显著,宜采用跌水曝气氧化+湿地或氧化塘等无动力生态综合治理模式。

现阶段我国农村生活污水处理尚存在许多问题,如农村污水排放标准尚未规范,各地参考尺度不一,实际效果也各有优劣;管网建设薄弱、工艺选择主观性和随意性较大,设备管理和维护能力更加匮乏。因此在污水处理技术提质增效方面还有广阔的发展空间,例如低温胁迫条件下的植物抗寒性^[39]、合理选择湿地填料、蚯蚓生态滤池填料种类和配比,提高脱氮除磷能力;目前对湿地中抗生素和抗性基因去除机制的研究还不深入;微生物群落的功能、相互作用机理、抗逆性等方面的研究也亟待优化完善。

[参考文献]

- [1] 张曼雪,邓玉,倪福全. 农村生活污水处理技术研究进展[J]. 水处理技术, 2017, 43(6): 5-10.
- [2] 刘晓慧. 安徽省农村生活污水成分特征与排放规律研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2016.
- [3] SON Y, RHEE H, YOON C G, et al. Feasibility study of ecological wastewater treatment system for decentralized rural community in South Korea[J]. Desalination and water treatment, 2016, 57(44): 20 766-20 773.
- [4] 谢敏,熊仁,冯传禄,等. 新型接触氧化工艺处理农村污水的研究[J]. 给水排水, 2018, 54(9): 56-61.
- [5] KARAKASHEV D, SCHMIDT J E, ANGELIDAKI I. Innovative process scheme for removal of organic matter, phosphorus and nitrogen from pig manure[J]. Water research, 2008(42): 4 083-4 090.
- [6] VAIPOULOU E, AIVASIDIS A. A modified UCT method for biological nutrient removal: configuration and performance[J]. Chemosphere, 2008, 72(7): 1 062-1 068.
- [7] 谢文玉,沈豪祥,钟华文,等. 一体化 A/O 工艺对生活污水除碳脱氮效果研究[J]. 环境工程学报, 2011, 5(7): 1 576-1 580.
- [8] PRIETO A L, FTSELAAR H, LENS P N L, et al. Development and start up of a gas-lift anaerobic membrane bioreactor (GI-AnMBR) for conversion of sewage to energy, water and nutrients[J]. Journal of membrane science, 2013, 441: 158-167.
- [9] 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.
- [10] VERGELESY, VYSTAVNA Y, ISHCENKO A, et al. Assessment of treatment efficiency of constructed wetlands in east Ukraine[J]. Ecological engineering, 2015, 83: 159 - 168.
- [11] 姚 远. 农村生活污水垂直流人工湿地一体化处理研究[D]. 成都:西南交通大学, 2017.
- [12] 王沛芳, 王 超, 徐海波. 自然水塘湿地系统对农业非点源氮的净化截留效应研究[J]. 农业环境科学学报, 2006(3): 782 - 785.
- [13] RODRIGO M A, MARTIN M, ROJO C, et al. The role of eutrophication reduction of two small man-made Mediterranean lagoons in the context of a broader remediation system: effects on water quality and plankton contribution[J]. Ecological engineering, 2013, 61(8): 371 - 382.
- [14] 孙 楠, 田伟伟, 李晨洋. 凹凸棒土-稳定塘工艺提高严寒地区农村生活污水处理效果[J]. 农业工程学报, 2014, 30(24): 209 - 215.
- [15] KMAR T, RAJPAL A, BHARGAVA R, et al. Performance evaluation of vermifilter at different hydraulic loading rate using river bed material[J]. Ecological engineering, 2014, 62: 77 - 82.
- [16] 李星星, 刘俊良, 张铁坚, 等. 塔式生物滤池处理农村生活污水研究[J]. 水处理技术, 2015, 41(8): 96 - 98.
- [17] WANG L, LUO X, ZHANG Y, et al. Community analysis of ammonia-oxidizing Betaproteobacteria at different seasons in microbial-earthworm ecofilters[J]. Ecological engineering, 2013, 51: 1 - 9.
- [18] 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): 81 - 85.
- [19] 崔 鹏. A/O 生物接触氧化-垂直流人工湿地组合工艺处理生活污水试验研究[D]. 兰州:兰州交通大学, 2017.
- [20] 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 - 103.
- [21] 许得雨, 李正浩, 盛国平, 等. 厌氧膜生物反应器处理低浓度废水的运行效能及膜污染特性[J]. 环境工程学报, 2019, 54(12): 2 - 6.
- [22] 张跃峰. 生物生态组合型农村生活污水处理系统污染物去除特性及工艺模拟研究[D]. 南京:东南大学, 2018.
- [23] SAMAL K, DAH R R, BHUNIA P. Treatment of wastewater by vermifiltration integrated with macrophyte filter: A review [J]. Journal of environmental chemical engineering, 2017, 5(3): 2 274 - 2 289.
- [24] 肖雨涵, 项 颂, 李 丹, 等. 多级串联表面流库塘-湿地净化农田径流效果评价[J]. 环境科学研究, 2019, 32(11): 1 886 - 1 894.
- [25] ARPIT S, BARBARA C, DAVID S, et al. Dissolved organic matter processing and photo reactivity in a wastewater treatment constructed wetland[J]. Science of the total environment, 2019, 648: 923 - 934.
- [26] 陈耀东, 马欣堂, 杜玉芬, 等. 中国水生植物[M]. 郑州:河南科学技术出版社, 2012: 1 - 2.
- [27] 梁奇奇, 沈耀良, 吴 鹏, 等. 植物种类与水力负荷对人工湿地去除污染物的交互作用[J]. 环境工程学报, 2016, 10(6): 2 975 - 2 980.
- [28] 王 昱, 王 浩. 不同生态修复手段对硝态氮和铵态氮脱除机制的影响[J]. 环境科技, 2017, 30(5): 1 - 5.
- [29] CRISTINA S C C, VANIA S B, RAQUEL B R M, et al. Constructed wetland with a polyculture of ornamental plants for wastewater treatment at a rural tourism facility [J]. Ecological engineering, 2015(79): 1 - 7.
- [30] EZZAHRI J, ENNABILI A, RADOUX M. Artificial ecosystems for wastewaters treatment under Mediterranean conditions (Morocco)[J]. Biological diversity & conservation, 2010, 3(2): 145 - 150.
- [31] 杨 林, 伍 斌, 赖发英, 等. 7 种典型挺水植物净化生活污水中氮磷的研究[J]. 江西农业大学学报, 2011, 33(3): 616 - 621.
- [32] 余雪花, 陈 垚, 任萍萍, 等. 生物滞留系统植物筛选与综合评价[J]. 环境工程学报, 2019, 13(7): 1 634 - 1 644.
- [33] 朱 平, 王全金, 宋嘉骏. 沉水植物塘对生活污水的净化效果[J]. 工业水处理, 2013, 33(11): 33 - 37.
- [34] SU H, WU Y, XIA W, et al. Stoichiometric mechanisms of regime shifts in freshwater ecosystem [J]. Water research, 2019, 149(1): 302 - 310.
- [35] MARYAM S, MUHAMMAD A, MUHAMMAD U K, et al. Enhanced degradation of textile effluent in constructed wetland system using typha domingensis and textile effluent-degrading endophytic bacteria[J]. Water research, 2014, 58(3): 152 - 159.
- [36] 李 琳, 岳春雷, 张 华, 等. 不同沉水植物净水能力与植株体细菌群落组成相关性[J]. 环境科学, 2019, 40(11): 4 962 - 4 970.
- [37] 周 玥, 韩玉国, 张 梦, 等. 4 种不同生活型湿地植物对富营养化水体的净化效果[J]. 应用生态学报, 2016, 27(10): 3 353 - 3 360.
- [38] RODRIGUEZ M, BRISSON J. Does the combination of two plant species improve removal efficiency in treatment wetlands[J]. Ecological engineering, 2016(91): 302 - 309.
- [39] 林 海, 薛宇航, 董颖博, 等. 低温下湿地植物修复微污染水体技术研究进展[J]. 环境科技, 2019, 32(3): 68 - 72.

(责任编辑 王 敏)