

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.10.005

我国农村污水处理现状综述

杨亮, 马军, 陈志强

(哈尔滨工业大学 城市水资源与水环境国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨
150090)

摘要: 从污水收集处理模式、排放标准和处理工艺三个方面介绍了我国农村污水的处理现状,总结了当前收集处理模式即分散收集分散处理、分散收集集中处理、集中收集集中处理和纳管收集处理的优缺点及适用范围,讨论了当前排放标准的现状和不足,并给出了相关的建议。同时,探讨了几种代表性污水处理工艺的处理效果、优缺点和适用范围,生物处理工艺如A²O和MBR等,生态处理工艺如人工湿地等,联合处理工艺如A²O-MBR。最后提出了对未来的展望,以期为我国农村污水处理的后续工作提供一定的参考。

关键词: 农村污水; 收集处理模式; 排放标准; 处理工艺

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)10-0028-08

Current Situation of Rural Sewage Treatment in China: A Review

YANG Liang, MA Jun, CHEN Zhi-qiang

(State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology,
Harbin 150090, China)

Abstract: This paper introduced the current situation of rural sewage treatment in China from three perspectives: sewage collection and treatment mode, discharge standard, and treatment technology. It summarized the advantages and disadvantages of current collection and treatment modes, including decentralized collection and decentralized treatment, decentralized collection and centralized treatment, centralized collection and centralized treatment and incorporation into municipal pipe network and treatment, along with their application scope. The current situation and shortcomings of existing discharge standards were discussed, along with some suggestions. The effects, advantages and disadvantages of several representative processes: biological treatment technology such as A²O and MBR process, ecological treatment technology such as constructed wetland process, combined treatment technology such as A²O-MBR process were discussed. Finally, a vision for the future is presented, aiming to provide some reference for the ongoing efforts in rural sewage treatment in China.

Key words: rural sewage; collection and treatment mode; discharge standards; treatment process

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFD1100204-03); 黑龙江头雁计划项目(AUEA5640201520-01)

通信作者: 陈志强 E-mail: czqhit@163.com

农村污水包括生活污水、养殖废水和企业废水等,其中占比最高的为生活污水。与城镇污水相比,农村生活污水具有以下特征:①间歇排放、分散程度高、收集难度大;②量小且波动大;③水质不稳定、可生化性好,几乎无有毒有害物质等。大量农村污水若得不到有效处理,不仅对农村水环境造成严重污染,还会危及农村生产生活用水安全。制约农村污水处理的因素多种多样,如当地经济状况、技术水平、收集处理模式、排放标准等^[1]。由于农村地区缺乏排水渠道和污水处理系统,因此大量污水直接无序排放,导致污水收集率较低^[2]。此外,部分农村生活污水系统存在处理工艺和模式不合理、缺乏专业的运营维护等问题,处理效果难以保证^[3]。处理工艺和模式的选择不仅与当地的经济状况、地理条件等因素有关,还与排放标准相关。目前,我国各省市排水标准大多参照《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)制定,因该标准较为严格,故农村污水系统存在达标率低和超标排放的问题^[1]。可见,我国农村污水处理效果及评价与收集率的高低、处理工艺的合适程度和排放标准的合理性息息相关。

介绍了我国农村污水的收集处理模式和常用的污水处理工艺,分析了各自的优缺点和适用范围,探讨了当前各省市农村污水排放标准现状和问题,以期为我国农村污水处理的后续工作提供一定的参考。

1 收集处理模式

我国农村地区人口分散,村庄数量多,故污水收集困难,其处理难度较大。结合农村污水的排放特点及地方经济发展等多种因素,各地区因地制宜,选用适宜的收集处理模式,在降低成本的同时尽可能提高收集处理率。当前,农村生活污水的收集处理模式较多元化,主要有以下4种模式:①分散收集、分散处理。将单户或几户的生活污水收集至小型污水处理设施进行处理。②分散收集、集中处理。使用吸污车收集农户排入化粪池或集污池的污水,并将其运至小型污水处理站点进行集中处理。③集中收集、集中处理。利用管网收集并输送污水至乡镇污水处理站处理。④纳管收集处理。将生活污水纳入城市污水系统,污水经城市污水厂处理后排放。各种收集处理模式均有各自的特征,

其优缺点和适用范围^[4-5]见表1。

表1 农村污水收集处理模式优、缺点及适用范围

Tab.1 Advantages, disadvantages and application scope of various collection and processing modes for rural sewage treatment

收集处理模式	适用范围	优点	缺点
分散收集、分散处理	人口分散或污水排放分散、集中处理难度大和地形复杂的村庄	处理效果好、出水水质高、占地小、管道建设成本低,管理简单	分散处理设施的建设成本较高和运维复杂
分散收集、集中处理	村庄布局分散、自然村较多且距离较远、地形条件复杂、污水不易集中收集的村庄	项目投资少,无需铺设管网,周期短,管理简单方便,出水有保障	运营费用高
集中收集、集中处理	人口集中、规模大且有污水管网或能够建设管网但距离市政管网较远的地区	污染小,收集率高	投资高,附属设施多
纳管收集处理	距城区市政管网较近的片区	处理效果好、总体投资低、运营有保障、管理方便	前期管网建设较复杂

2 排放标准

2.1 现状

农村生活污水排放标准至关重要,是监督管理农村污水的重要保障,是水处理工艺与技术确立的重要依据之一,且与基本设施建设和后期运维成本相关^[6-7]。目前,各省市根据实际情况,已经发布了各自排放标准的正式稿或征求意见稿。

我国处理规模在500 m³/d以内的农村污水处理设施占比超过92%,各地农村污水排放标准也仅适用于500 m³/d以内规模。当处理规模超过该值时,出水执行GB 18918—2002标准^[6]。大部分省市依据自身特征对处理规模做了进一步划分,如湖北以100 m³/d和5 m³/d作为界限,河南以10 m³/d作为界限,黑龙江以30 m³/d作为界限;不同的规模执行不同的标准,规模大则执行的标准较严格,规模小则较宽松^[8],如湖北省处理规模<5 m³/d时出水执行当地三级标准,超过100 m³/d时出水则执行当地一级标准。此外,水体功能分区分类也在各省市标准中有所体现,如陕西增加了对作为饮用水源湖岸延伸2 km的污水特殊排放限制要求;江苏省采用的等级比较细致,分级要求由当地水功能区划确定^[9]。

全国各地标准中控制项目主要有pH、悬浮物、化学需氧量、氨氮、总氮、总磷和动植物油类,河北、

安徽、山东、海南和新疆等省份标准中还包含粪大肠菌群数指标,而青海和上海等省份标准中则包含了阴离子表面活性剂指标,宁夏的控制项目最多,共计12个。在福建和山西的标准中,总氮、总磷和动植物油类为选择性控制指标,即:当有农村餐饮污水时,动植物油应纳入控制指标;当出水排入湖泊或氮磷不达标的水体时,总氮和总磷应纳入控制指标。

各地农村生活污水排放标准的指标限值也有所差异,大部分省市一级标准的指标限值与GB 18918—2002的一级B标准限值一致。北京的农村生活污水排放标准最为严格,其一级A标准限值达到了地表水Ⅳ类标准;天津、河北和山西的一级标准与GB 18918—2002的一级A标准一致;而陕西的一级标准则低于GB 18918—2002的一级B标准。

2.2 存在问题与建议

部分省市农村污水排放标准过于严格,特别是氮、磷标准限值低,加之处理设施运行效率较低,出水不达标率较高。北京、天津、河北和山西等省市排放标准相对严格,标准高则会导致工艺复杂,运维成本和难度提高,农村地区较难负担,造成部分设施停止运行,污染加剧^[8];氮、磷是植物营养元素,出水在满足相关回用标准时可优先考虑回用(如农业灌溉等)^[10];当出水未排入湖泊或氮磷不达标的水体时,可适当放宽氮磷的排放标准限值。王丽君等^[6]对河南、广西和云南等地区农村污水达标情况进行了分析,发现执行GB 18918—2002一级A标准的达标率为23.08%,执行GB 18918—2002一级B标准的达标率为40.63%,执行GB 18918—2002二级标准的达标率为100%。由此可见,处理效果的评价与排放标准直接相关,过高的排放标准不利于对处理效果客观、准确的评价。

基于上述问题,提出以下建议,为我国农村污水排放标准的制定或修改提供参考:①制定标准时,不仅要考虑处理规模和水体功能分区,也要考虑出水的最终用途、环境容量和环境敏感度^[9]。②制定标准时应因地制宜,不能简单实行统一的标准或者一味的高标准。

3 处理技术

农村生活污水处理技术可分为生物处理、生态处理和联合处理三大类,其中,生物处理指A²O、

MBR、SBR、生物接触氧化、生物接触滤池和生物转盘等工艺,生态处理指人工湿地和稳定塘等工艺,联合处理指生态-生态、生物-生物和生态-生物等组合处理工艺。

3.1 生物处理技术

3.1.1 A²O工艺

A²O工艺较为成熟,主要应用于城镇污水处理厂,近些年来广泛用于农村污水处理,并取得了较好的处理效果。肖焯圻等^[11]采用A²O工艺对贵州某地农村污水(设计规模1000 m³/d)进行处理,发现该工艺具有成本低、脱氮除磷效果好的优点,对化学需氧量、氨氮、总氮、总磷的去除率分别为78.39%、88.36%、80.16%、72.75%,出水水质达到了GB 18918—2002一级A标准。张吉库等^[12]使用空气提升式A²O工艺处理农村污水也取得了很好的效果,对氨氮、TP和COD的去除率都在85%以上,但易受DO浓度和硝化液回流比的影响,需把控适宜的条件。然而,当水质、水量差异性较大时,A²O工艺的污水处理效能下降,部分污染物的去除率较低。陈江杰等^[13]采用A²O工艺处理长三角平原地区农村污水时发现,污染物的去除率波动较大,对COD的去除效果较好,而对氮、磷的去除效果较差。

3.1.2 MBR工艺

MBR工艺不仅出水水质优良,而且稳定性和抗冲击性也较好,但该工艺在长期运行后会产生膜污染问题,使膜通量下降,须进行膜清洗。乔馨丹^[14]采用MBR工艺处理氨氮、COD、和TP浓度分别为43、74.4和3.79 mg/L的农村污水,短期内测得其出水氨氮、COD、和TP分别为0.61、17和0.86 mg/L,水质较优;后期因气候等因素的干扰,出水水质出现小幅度的波动。刘微微^[15]采用平板膜-MBR技术处理上海奉贤区的农村污水,测定了COD、SS、TN、TP、NH₄⁺-N、动植物油和阴离子表面活性剂7项指标,结果表明7项出水指标均满足上海农村污水一级B排放标准。张勇等^[16]采用AAO+陶瓷膜-MBR工艺处理冬季水质水量差异较大的污水,当设备稳定运行时,出水主要污染物浓度较低(COD为17.54 mg/L, NH₄⁺-N为1.35 mg/L, TP为0.19 mg/L),但需要定期检查维护和膜清洗。

3.1.3 SBR工艺

SBR工艺简单,抗冲击负荷好且能稳定运行,费用低,经济性好,可实现自动化控制,便于管理,适

于农村污水处理。马凯^[17]考察了SBR+人工湿地系统对分散式农村生活污水的处理效果,研究表明,工艺运行第15天时SBR对COD和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效果趋于稳定,去除率均在80%以上;研究还发现,改变曝气时间可改善污染物的去除效果。彭杰等^[18]研究表明,地理式一体化SBR工艺对SS的去除率达到90%,对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率超过80%。但SBR控制过程复杂,操作不当时,可能会造成出水水质不达标。文艳^[19]的研究表明,曝气时间、污泥停留时间(SRT)、温度和溶解氧浓度等对SBR工艺的除污效果有较大的影响,SRT较短或较长时,对污染物的去除效果较差;曝气时间较短,污染物去除率较低。

3.1.4 生物接触氧化工艺

生物接触氧化工艺具有负荷高、受季节影响小、处理效果好和管理简单等优点,但其除磷效果欠佳,需通过改良填料或结合物化处理来改善处理效果,导致成本增加,故仅适用于部分地区。Zheng等^[2]通过气升回流技术强化生物接触氧化,发现系统对TN和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率明显提高,且污泥量减少。胡军福等^[20]采用二级AO生物接触氧化技术对农村生活污水进行处理,发现该工艺对TP、TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和COD的去除率分别为98.2%、65.2%、95.5%、92.1%,并且还能减少污泥量、有效应对负荷冲击。张克等^[21]基于实验室规模研究了AO生物接触氧化-微生物燃料电池(MFC)耦合工艺对农村生活污水的处理效果,与单一AO生物接触氧化相比,耦合工艺能够提高SS、COD和TN的去除率,提升脱氮除磷部分相关微生物的丰度。

3.1.5 生物滤池工艺

生物滤池及其改进工艺具有运行负荷高、二次污染小和不受季节干扰等特点,在农村污水处理过程中取得了较好的效果。李桥龙等^[22]研究了塔式生物滤池对农村污水的处理效果,对TP、TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、COD、 BOD_5 、SS的去除率分别为68.7%、63.7%、68.6%、87.0%、93.0%、91.5%;当进水水力负荷过高时,因污水与滤料接触时间较短,故污染物去除效果差。吴亚慧等^[23]采用一体化生物滤池工艺处理农村生活污水,测得出水TN、TP、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和COD分别为9.32、0.85、0.57和13.57 mg/L,符合GB 18918—2002的一级B标准;但运行过程存在滤料堵塞的问题,需适时清洗。朱帅^[24]采用改进的生物滤池——AO生物滤池对河南省某地区农村污水

进行了处理试验,结果表明,AO生物滤池对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN和COD的去除率分别为77.60%、57.98%、80.1%,处理效果较好,出水水质达到了地方一级排放标准。

3.1.6 生物转盘工艺

生物转盘工艺依靠转动盘片上的生物膜降解污染物,在工程应用中具有处理效果好、二次污染小、泥量少、能耗低等优点,受到了广泛关注。但该工艺也存在有异味产生、投资成本高、生物膜易脱落和寒冷时需做保温措施等不足。周金波等^[25]调查了宁波农村地区68个生物转盘工艺样本的污水处理情况,结果如下:COD、 BOD_5 、SS、TN的平均去除率分别为64.5%、67.0%、67.5%、57.2%,排放达标率分别为98.5%、97.1%、95.6%、97.1%,4项指标的综合达标率(执行标准为GB 18918—2002的二级标准,其中地方规定 $\text{TN} \leq 25 \text{ mg/L}$)为95.6%,工艺处理效果较好。张尊举等^[26]研究了填料生物转盘对农村家庭污水的处理效果,连续6个月的监测结果表明,系统对COD、TP的平均去除率均在75%以上,对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的平均去除率在85%以上,对TN的平均去除率在65%以上,出水水质优于GB 18918—2002的一级B标准。

3.2 生态处理技术

3.2.1 人工湿地

人工湿地通过土壤、基质、微生物和植物的共同作用去除污染物,在处理农村污水时不仅经济性好,而且抗冲击负荷强、二次污染小、景观效果好,但单一的人工湿地技术对部分污染物的去除有限。Sheng等^[27]研究发现,垂直流人工湿地对TN、TP、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和COD的平均去除率分别为13.89%、18.53%、80.2%和51.94%,未达到预期效果。在工程应用中,人工湿地一般作为后续处理单元并与其他工艺组合以加强对污染物的去除效果。丁仁伟等^[28]采用一体化悬浮填料床-人工湿地工艺处理农村污水,在进水TN为51.65 mg/L、TP为3.26 mg/L、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为33.75 mg/L、COD为216.9 mg/L的条件下,各指标出水浓度依次为6.11、0.087、1.35、5.14 mg/L,符合GB 18918—2002一级A标准的要求。不足的是,该工艺受季节变化和病虫害影响较大,出水水质不稳定。

3.2.2 稳定塘

稳定塘工艺的建设和运行费用均较低,对COD

和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效果较好,但对总氮和总磷的去除效果欠佳。张巍等^[29]用生态稳定塘处理北方农村生活污水,调试期对COD和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的平均去除率分别为76.25%和91.4%,稳定期对COD和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率分别为85%和90.6%。郑志伟等^[30]用生态沟渠-稳定塘工艺处理山区农村生活污水,对COD和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率均在70%以上,而对TN和TP的去除率则不到50%。除此之外,稳定塘在运行过程中可能会有臭味和蚊蝇产生,存在占地大、易受气候和环境的影响等不足。

3.3 联合处理技术

当单一处理技术不能满足要求时,可以使用联合处理技术,联合处理能弥补单一处理的一些不足,对农村污水有更好的处理效果。王晓云等^[31]使用曝气氧化塘-人工湿地(生态-生态)组合工艺处理农村污水时,测得出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN和TP的平均去除率分别为82.21%、67.88%和71.31%,总体处理效果优于单一处理工艺。Li等^[32]通过多级表流人工湿地处理湖南某地农村生活污水,对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN和TP等污染物的去除效率均在90%以上。杨凤飞等^[33]用生物滤池-人工湿地-稳定塘(生物-生态)

工艺对农村分散污水进行处理,在环境(如温度等)条件和进水负荷变化时,对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、COD、TP和TN的平均去除率分别高达93.55%、85.3%、90.9%和92.9%,处理效果显著,克服了单一处理技术出水不稳定等问题;Gao等^[34]研究了生物接触氧化-温室结构湿地系统在寒冷地区农村污水回用中的应用,发现该组合工艺不仅改善了寒冷气候下对污染物的去除效果(对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、COD、TP的去除率分别为70.98%、85.01%、36.48),并且还为民灌溉提供了再生水。谢晴等^[35]采用 A^2O -MBR组合工艺处理四川农村散户污水,对有机物和氮磷的去除显著,出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、COD、TP和 BOD_5 分别为0.24、21.4、0.42和4.6 mg/L,稳定达到城镇一级A标准。综上, A^2O -MBR工艺具有较强的脱氮除磷功能,此外其产泥量也少^[36],但费用和技术要求高。

3.4 不同处理工艺的特征总结

工艺的选择直接影响农村污水的处理效果,在选择工艺时要遵循“费用低、技术简便、效果好”的原则,并充分考虑不同工艺的优缺点和适用范围。当前各种处理工艺在实际中都有或多或少的应用,其具体特征^[11-36]见表2。

表2 各种处理工艺特征

Tab.2 Characteristics of various treatment processes

处理工艺	优点	缺点	适用范围
A^2O	脱氮除磷效果好,避免污泥膨胀,占地小	易受水质、水量变化的影响	水质、水量波动小的区域
MBR	稳定,出水好,抗冲击性好,占地小	费用高,存在膜污染问题	经济状况好、标准严格的农村地区
SBR	稳定,费用少,抗冲击负荷好	控制较复杂	污水间歇排放或水量、水质波动大以及土地有限的区域
生物接触氧化	负荷高,受季节影响小,处理效果好,管理简单	有一定经济要求	经济较好、土地宽广区域
生物滤池	高负荷,效果好,二次污染小,不受季节干扰,占地小	对经济和技术有一定要求	经济状况较好、人口分散的农村地区
生物转盘	二次污染小,能耗低,泥量少,运行成本低	投资高,占地大	经济较好、土地宽广区域
人工湿地	抗冲击负荷强,二次污染小,经济性好,有景观效果	占地大,受季节和病虫害影响大	土地广阔、温暖潮湿地区
稳定塘	建设和运行费用低,对氮、磷有一定的去除	有臭味和蚊蝇产生,占地大,易受气候环境影响	经济差、土地广、人口分散的地区
生物-生态	抗冲击强,处理效果好,可适应环境变化	技术要求较高	污水组分复杂、经济状况较好的区域
生物-生物	对有机物、氮、磷的去除更加显著	技术要求高,费用高	经济条件好且出水严格地区
生态-生态	费用少,出水水质好	占地大	经济一般、土地充足地区

4 总结与展望

当前,农村污水处理问题主要集中在收集、处理和排放三个方面:①有效的污水收集是基本保障,我国常用的收集处理模式可分为四种,但由于农村地区分散等特征,污水的收集工作见效甚微。②当前的处理工艺对污水具有较好的处理效果,不

同的工艺有不同的特征,能满足不同地区的需求;但运行上存在无人管理维护、闲置现象严重、标准过高导致“晒太阳”等问题。③各地农村污水排放标准大多参照GB 18918—2002制定,标准较严且没有考虑出水的最终用途和接纳水体的环境容量,在一定程度上阻碍了我国农村污水的治理。因此,需

要进一步加强我国农村污水收集处理新方式和运营模式的探索,开发出“费用低、技术简便、效果好”的高效农村污水处理工艺,完善与改进农村污水排放标准。

随着社会的发展,农村污水中的污染物也日趋多样化,一些新污染物已被检测出来,着眼于未来,应加强对农村污水中抗生素、抗性基因、杀菌剂、类固醇和微塑料等污染物的去除研究。此外,我国的水资源也极其短缺,所以在对农村污水处理排放的同时,也应考虑再生水的利用,以缓解水资源压力。

参考文献:

- [1] XIE Y D, ZHANG Q H, DZAKPASU M, *et al.* Towards the formulation of rural sewage discharge standards in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 759: 143533.
- [2] ZHENG T, XIONG R, LI W, *et al.* An enhanced rural anoxic/oxic biological contact oxidation process with air-lift reflux technique to strengthen total nitrogen removal and reduce sludge generation [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 348: 131371.
- [3] SHEN J, HUANG G, AN C, *et al.* Biophysiological and factorial analyses in the treatment of rural domestic wastewater using multi-soil-layering systems [J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 226: 83-94.
- [4] 胡章清. 农村生活污水收集难点及解决措施[J]. *江西建材*, 2021(10): 305-306.
HU Zhangqing. Difficulties in the collection of rural domestic sewage and solutions [J]. *Jiangxi Building Materials*, 2021(10): 305-306 (in Chinese).
- [5] 李鹏峰,孙永利,隋克俭,等. 我国农村污水处理现状问题分析及治理模式探讨[J]. *给水排水*, 2021, 47(12): 65-71.
LI Pengfeng, SUN Yongli, SUI Kejian, *et al.* Analysis on the present situation and discussion on its treatment mode of rural sewage treatment in China [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2021, 47(12): 65-71 (in Chinese).
- [6] 王丽君,夏训峰,朱建超,等. 农村生活污水处理设施水污染物排放标准制订探讨[J]. *环境科学研究*, 2019, 32(6): 921-928.
WANG Lijun, XIA Xunfeng, ZHU Jianchao, *et al.* Discussion on the drafting of water pollutants discharge standard for rural domestic sewage treatment facilities [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, 32(6): 921-928 (in Chinese).
- [7] 时珍宝,吴伟峰,严寒,等. 上海市《农村生活污水处理设施水污染物排放标准》解读[J]. *净水技术*, 2019, 38(9): 1-5, 11.
SHI Zhenbao, WU Weifeng, YAN Han, *et al.* Explanation of *Discharge Standard of Water Pollutants for Rural Sewage Treatment Facilities of Shanghai* [J]. *Water Purification Technology*, 2019, 38(9): 1-5, 11 (in Chinese).
- [8] 徐文江,刘芳,李安峰. 农村生活污水排放标准的探讨[J]. *环境保护*, 2021, 49(22): 61-65.
XU Wenjiang, LIU Fang, LI Anfeng. Discussion on discharge standard of rural domestic sewage [J]. *Environmental Protection*, 2021, 49(22): 61-65 (in Chinese).
- [9] XIE Y D, ZHANG Q H, DZAKPASU M, *et al.* Towards the formulation of rural sewage discharge standards in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 759: 143533.
- [10] 陈康康,刘莎. 关于农村生活污水排放标准的建议[J]. *中国资源综合利用*, 2020, 38(10): 174-176.
CHEN Kangkang, LIU Sha. Suggestions on discharge standards of rural domestic sewage [J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2020, 38(10): 174-176 (in Chinese).
- [11] 肖忻圻,陈鑫,周伟,等. 喀斯特地区乡镇污水一体化处理技术效果分析[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(9): 12-16.
XIAO Xinqi, CHEN Xin, ZHOU Wei, *et al.* Performance of integrated bioreactor treating rural domestic sewage in karst area [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(9): 12-16 (in Chinese).
- [12] 张吉库,孙冕. 空气提升式A²O处理农村生活污水[J]. *环境工程*, 2021, 39(1): 18-23.
ZHANG Jiku, SUN Mian. Treatment of rural domestic sewage by an air lifting A²O process [J]. *Environmental Engineering*, 2021, 39(1): 18-23 (in Chinese).
- [13] 陈江杰,贺雷蕾,刘锐,等. A²O设施处理长三角平原地区农村生活污水的效果[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(9): 75-82.
CHEN Jiangjie, HE Leilei, LIU Rui, *et al.* Performance of A²O facilities for rural domestic sewage treatment in Yangtze River Delta Plain [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(9): 75-82 (in Chinese).
- [14] 乔馨丹. MBR工艺与人工湿地技术处理农村生活污水效果的探究[J]. *低碳世界*, 2021, 11(7): 63-64.

- QIAO Xindan. Study on the effect of MBR process and constructed wetland technology in treating rural domestic sewage [J]. *Low Carbon World*, 2021, 11 (7): 63-64 (in Chinese).
- [15] 刘微微. MBR 以及 MBR+人工湿地组合工艺在农村生活污水中的应用[J]. *水利科技与经济*, 2021, 27(3): 59-64.
- LIU Weiwei. Application of MBR and MBR and constructed wetland combined process in rural domestic sewage treatment [J]. *Water Conservancy Science and Technology and Economy*, 2021, 27 (3): 59-64 (in Chinese).
- [16] 张勇,秦玉兰,樊晓丽,等. 平板陶瓷膜MBR工艺在农村污水处理中的应用[J]. *中国给水排水*, 2021, 37 (10): 120-125.
- ZHANG Yong, QIN Yulan, FAN Xiaoli, *et al.* Application of flat ceramic MBR process in rural sewage treatment [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37 (10): 120-125 (in Chinese).
- [17] 马凯. SBR+人工湿地系统处理分散式农村生活污水 [D]. 兰州:兰州交通大学, 2020.
- MA Kai. The Combined Process of SBR and Constructed Wetland System for Decentralized Rural Domestic Sewage Treatment [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2020 (in Chinese).
- [18] 彭杰,黄天寅,曹强,等. 一体化SBR农村生活污水处理设施设计[J]. *水处理技术*, 2015, 41(1): 132-134.
- PENG Jie, HUANG Tianyin, CAO Qiang, *et al.* Design of integrated SBR facility for rural domestic sewage treatment [J]. *Technology of Water Treatment*, 2015, 41 (1): 132-134 (in Chinese).
- [19] 文艳. 改良SBR法同步硝化反硝化处理农村生活污水研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2017.
- WEN Yan. The Research of Rural Domestic Sewage Treatment with Simultaneous Nitrification and Denitrification by Modified SBR [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2017 (in Chinese).
- [20] 胡军福,周树美,刘东方,等. 二级A/O生物接触氧化工艺处理农村生活污水[J]. *水处理技术*, 2021, 47 (12): 95-98.
- HU Junfu, ZHOU Shumei, LIU Dongfang, *et al.* Application of two-stage A/O biological contact oxidation process in rural domestic sewage treatment [J]. *Technology of Water Treatment*, 2021, 47(12): 95-98 (in Chinese).
- [21] 张克,田双超,窦雪雁,等. 厌氧/好氧生物接触氧化工
- 艺耦合微生物燃料电池技术处理农村生活污水[J]. *环境工程*, 2022, 40(3): 139-146.
- ZHANG Ke, TIAN Shuangchao, DOU Xueyan, *et al.* Anaerobic/aerobic biological contact oxidation process coupled with microbial fuel cell to treat rural domestic wastewater [J]. *Environmental Engineering*, 2022, 40 (3): 139-146 (in Chinese).
- [22] 李桥龙,潘学军,刘旭军,等. 塔式生物滤池在农村生活污水中的应用研究[J]. *工业水处理*, 2017, 37 (7): 43-46.
- LI Qiaolong, PAN Xuejun, LIU Xujun, *et al.* Research on the application of tower-type biological filter to rural domestic sewage treatment [J]. *Industrial Water Treatment*, 2017, 37(7): 43-46 (in Chinese).
- [23] 吴亚慧,陆少鸣,王铭源,等. 一体化生物滤池处理农村污水应用研究[J]. *水处理技术*, 2018, 44(8): 107-109.
- WU Yahui, LU Shaoming, WANG Mingyuan, *et al.* Research on the application of integrated biological filter for rural sewage treatment [J]. *Technology of Water Treatment*, 2018, 44(8): 107-109 (in Chinese).
- [24] 朱帅. A/O生物滤池处理农村生活污水中试研究 [D]. 郑州:华北水利水电大学, 2021.
- ZHU Shuai. Pilot Study on Treatment of Rural Domestic Sewage by A/O Biological Filter [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2021 (in Chinese).
- [25] 周金波,包薇红,罗艳,等. 宁波地区4种典型农村生活污水处理工艺污染物去除率比较分析[J]. *农业资源与环境学报*, 2017, 34(5): 492-498.
- ZHOU Jinbo, BAO Weihong, LUO Yan, *et al.* Comparison and analysis of pollutant removal efficiency of four kinds of typical rural domestic sewage treatment technology in Ningbo area, China [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2017, 34 (5): 492-498 (in Chinese).
- [26] 张尊举,董亚荣,王朦,等. 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.
- ZHANG Zunju, DONG Yarong, WANG Meng, *et al.* Treatment of rural domestic sewage by packing rotating biological contactor [J]. *Technology of Water Treatment*, 2020, 46(2): 120-123 (in Chinese).
- [27] SHENG X, QIU S, XU F, *et al.* Management of rural domestic wastewater in a city of Yangtze delta region: performance and remaining challenges [J]. *Bioresource*

- Technology Reports, 2020, 11: 100507.
- [28] 丁仁伟,徐行,纪荣平. 一体化悬浮填料床-人工湿地处理农村污水研究[J]. 水处理技术, 2020, 46(8): 116-120.
DING Renwei, XU Xing, JI Rongping. Study on the integrated suspended filler bed-artificial wetland for rural sewage treatment [J]. Technology of Water Treatment, 2020, 46(8): 116-120 (in Chinese).
- [29] 张巍,路冰,刘峥,等. 北方地区农村生活污水生态稳定塘处理示范工程设计[J]. 中国给水排水, 2018, 34(6): 49-52.
ZHANG Wei, LU Bing, LIU Zheng, *et al.* Demonstration project design of ecotypic stabilization pond for rural domestic sewage treatment in northern China [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(6): 49-52 (in Chinese).
- [30] 郑志伟,胡莲,邹曦,等. 生态沟渠+稳定塘系统处理山区农村生活污水的研究[J]. 水生态学杂志, 2016, 37(4): 42-47.
ZHENG Zhiwei, HU Lian, ZOU Xi, *et al.* Treatment of rural sewage in mountain areas by a combined ecological trench and stabilization pond system [J]. Journal of Hydroecology, 2016, 37(4): 42-47 (in Chinese).
- [31] 王晓云,付爱民,李启明. 曝气氧化塘+人工湿地组合工艺处理农村污水[J]. 中国给水排水, 2021, 37(21): 64-68.
WANG Xiaoyun, FU Aimin, LEE Kingming. Combined process of aeration pond and constructed wetland for treatment of rural sewage [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(21): 64-68 (in Chinese).
- [32] LI X, LI Y, LU D, *et al.* Nitrogen and phosphorus removal performance and bacterial communities in a multi-stage surface flow constructed wetland treating rural domestic sewage [J]. Science of the Total Environment, 2020, 709: 136235.
- [33] 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 Fengfei, LIU Feng, LI Hongfang, *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 (in Chinese).
- [34] GAO D, HU Q. Bio-contact oxidation and greenhouse-structured wetland system for rural sewage recycling in cold regions: a full-scale study [J]. Ecological Engineering, 2012, 49: 249-253.
- [35] 谢晴,张静,麻泽龙,等. A²O-MBR工艺在农村生活污水处理中的示范[J]. 环境工程, 2016, 34(7): 38-41, 87.
XIE Qing, ZHANG Jing, MA Zelong, *et al.* Demonstration of A²O-MBR process in rural sewage treatment [J]. Environmental Engineering, 2016, 34(7): 38-41, 87 (in Chinese).
- [36] XIONG J, ZHENG Z, YANG X, *et al.* Mature landfill leachate treatment by the MBBR inoculated with biocarriers from a municipal wastewater treatment plant [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2018, 119: 304-310.

作者简介:杨亮(2000-),男,湖北鄂州人,硕士研究生,研究方向为污水处理。

E-mail: yangl420@163.com

收稿日期:2022-04-26

修回日期:2022-06-24

(编辑:丁彩娟)

珍惜地下水,珍视隐藏的资源