



农村灰水收集-处理-回用系统现状及应用建议

李文凯^{1,2}, 郑天龙², 刘俊新²

(1. 陕西建工第十二建设集团有限公司, 陕西安康 725000;
2. 中国科学院生态环境研究中心水污染控制实验室, 北京 100085)

[摘要] 目前农村灰水系统在技术和管理上存在问题, 不利于灰水资源化。农村灰水收集系统分为管道系统和沟渠系统; 处理系统主要采用生物转盘、曝气生物滤池、膜生物反应器等生物处理工艺, 人工湿地等生态处理工艺和物理过滤等物化处理工艺; 回用系统以加氯消毒和紫外消毒较为常见。农村灰水系统的工程应用中, 管道系统造价高、处理系统冬季运行效果差是常见问题, 技术上应优化灰水收集管道管径以降低造价, 改进处理与回用技术以提升运行效果, 并在回用前进行科学消毒, 结合管理提升和制度优化协同推进农村灰水资源化。分析了农村灰水收集-处理-回用系统的现状及问题, 从技术、管理和制度层面提出建议并展望了发展趋势。未来应研究灰水系统中物质和微生物的迁移转化规律, 研发低温适用的灰水处理技术, 并科学评估灰水管道和沟渠的综合效益, 推进农村灰水有关理论和技术的进一步发展。

[关键词] 农村灰水; 收集; 处理; 回用

[中图分类号] X52 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2022)04-0001-06

Current status and application suggestions of the rural greywater collection-treatment-reuse system

LI Wenkai^{1,2}, ZHENG Tianlong², LIU Junxin²

(1. SCEGC No. 12 Construction Engineering Group Company Ltd., Ankang 725000, China;

2. Department of Water Pollution Control Technology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: Current rural greywater system has problems in technology and management, which are not conducive to its resourceization. Rural greywater collection system includes sewer system and ditch system. Treatment system mainly adopts biological treatment process such as rotating biological contactor, biological aerated filter, membrane bioreactor, ecological treatment process such as artificial wetland, and physical and chemical treatment process such as filtration. Chlorine disinfection and ultraviolet disinfection are more common in reuse systems. The high cost of sewers and poor operational effect of treatment system in winter are common problems in the engineering application of rural greywater systems. Some measures should be taken, such as optimizing the diameter of greywater sewers to reduce cost, improving treatment and reuse technologies to enhance operation, and disinfecting scientifically before reuse, which could combine management improvement and optimization to promote the reuse of rural greywater. The status and problems of rural greywater collection-treatment-reuse systems were analyzed, and the recommendations and development trends were proposed at the technical, management and institutional levels. In the future, migration and transformation rules of substances and microorganisms in greywater systems should be studied. Low-temperature greywater treatment technologies should be developed, and the comprehensive benefits of greywater sewers and ditches should be scientifically evaluated to advance the further development of rural greywater theories and technologies.

Key words: rural greywater; collection; treatment; reuse

[基金项目] 国家重点研发计划(2020YFD1100500)

随着农村污水治理工作的推进和污水资源化理念的推广,农村生活污水的分质收集与资源化成为重要的研究和应用方向。农村灰水的收集-处理-回用模式逐渐受到重视。农村灰水是指除厕所污水以外的农村生活污水,具体包括农户日常生活产生的洗浴污水、洗漱污水、洗涤污水及餐厨污水等^[1]。灰水水量占生活污水总量的70%左右^[2],开展灰水收集、处理与回用不仅可降低污水收集和处理系统的水量负荷,还可减少水资源消耗^[3]。灰水基本不含粪污,污染物浓度较低且致病菌较少,适宜在收集处理后进行资源化利用^[2,4]。与农村生活污水的收集处理模式不同^[5],为便于回用,农村灰水的收集-处理-回用模式以村落集中收集处理和分散收集处理为主,很少采用纳入城镇污水管网的模式^[3]。常用的回用方式包括农业灌溉、室外冲洗、景观用水及室内冲厕等^[3]。

我国农村灰水资源化工作仍处于起步阶段,灰水收集-处理-回用系统技术及运行方面仍存在许多问题。为推进农村灰水的高效收集处理和安全回用,提升灰水收集-处理-回用系统的集成科学性和可靠性,笔者对农村灰水收集-处理-回用系统的研究及应用现状进行分析,剖析农村灰水系统存在的问题,提出针对性的优化建议并对未来农村灰水系统的发展趋势进行展望。

1 农村灰水系统现状

根据子系统功能的不同,农村灰水系统可分为收集系统、处理系统及回用系统3部分,如图1所示。

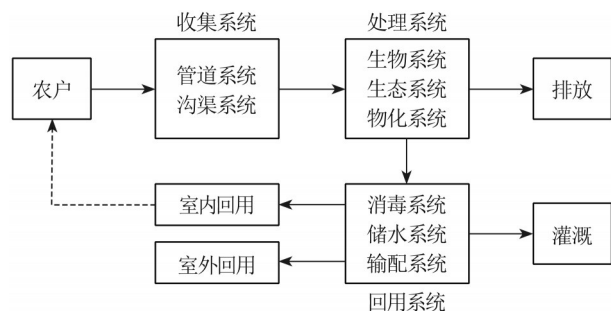


图1 农村灰水系统

Fig. 1 Rural greywater systems

1.1 收集系统

灰水收集是灰水处理与回用的前提,也是整个农村灰水系统建设成本最高、运维问题最多的环

节。常用的收集系统分为管道系统和沟渠系统两大类^[4,6-7]。

(1)管道系统。管道系统由多级灰水管道、检查井、隔油池、沉泥井等设施组成,以重力流管道为主。与沟渠系统相比,灰水管道系统在收集效率、污染控制、防止致病菌扩散及提升村容村貌等方面具有明显优势,但其建设和运行过程存在成本较高、堵塞频发、乱接错接的问题。排水管道的建设成本一般占排水系统总投资的70%以上^[8],目前农村灰水管道设计过程中往往套用城镇排水系统的经验数据,导致设计管径过大,增加了管道建设成本。同时过大的管径致使开挖道路面积增大,给农村狭窄街道的施工造成困难,也严重影响居民正常生活。在灰水管道运行过程中,有的农户自行拆除下水道滤网,将菜叶、湿巾、包装袋等杂物冲入下水道,易造成管道堵塞。个别农户自行改造接户管道,将化粪池黑水接入灰水管道,影响末端处理与回用。

(2)沟渠系统。沟渠系统是低收入农村地区普遍采用的灰水收集系统。排水沟渠建设成本低廉,具有一定污染物去除效果^[9],且对水力条件、异物的适应能力高于管道系统。但沟渠内的灰水直接暴露在空气中,夏季易散发异味,且流速较低易滋生蚊虫,冬季易结冰。灰水沟渠在雨季汇入大量泥沙和雨水,一方面泥沙会堵塞灰水处理设施,另一方面雨水稀释了污染物,造成进水浓度过低,影响处理设施的正常运行。

1.2 处理系统

灰水处理工艺复杂多样,生物、生态及物化等工艺均有广泛研究和应用。常用的灰水处理系统如表1所示。

(1)生物处理系统。生物处理系统是农村污水的主流处理系统,在灰水处理中也有广泛应用,主要分为厌氧系统和好氧系统两大类。常用的厌氧系统包括厌氧沉淀池、厌氧滤池等,由于对有机物去除能力有限且异味明显,通常作为好氧生物处理或生态处理的预处理系统,不单独使用。好氧系统对有机物去除率高、出水水质好,根据处理原理不同分为生物膜法和活性污泥法。

生物膜法的有机物处理效果好、运维便利且一般无需二沉池,占地面积和建设成本均较低,以生物转盘(RBC)、曝气生物滤池(BAF)和移动床生物膜

表 1 常用农村灰水处理系统

Table 1 Commonly used rural greywater treatment systems

项目	处理系统	技术优势	应用问题	不建议应用的情景
生物法	厌氧沉淀池	造价低廉,施工简易,运行无能耗	处理效果差,异味明显	处理要求高且无后续处理设施的地区
	厌氧滤池	处理效果优于厌氧沉淀池, 造价低廉,运行无能耗	处理效果差,异味明显	处理要求高且无后续处理设施的地区
	生物转盘	无需曝气,动力消耗低,污泥量少	低温时处理效果差	严寒地区
	曝气生物滤池	处理效果好,无需设置二沉池和污泥回流系统	进水颗粒物浓度要求高,反冲洗要求高	运维资金和技术人员保障能力不足的地区
	移动床生物膜反应器	处理效果好,无需反冲洗,设施占地小	曝气量和搅拌强度控制要求高	运维资金和技术人员保障能力不足的地区
	膜生物反应器	处理效果好,无需设置二沉池和污泥回流系统,病原菌控制效果好	膜污染和膜堵塞控制要求高,运维费用高	运维资金和技术人员保障能力不足的地区,没有高标准回用水质要求的地区
	序批式活性污泥反应器	处理效果好,无需设置二沉池和污泥回流系统,运行灵活	自动化控制要求高	运维资金和技术人员保障能力不足的地区
生态法	人工湿地	造价低廉,运维简单,景观良好	低温条件处理效果下降,易冻结	严寒地区
	生态滤池	造价低廉,施工简易,运维简单	进水颗粒物浓度要求高,低温易冻结	严寒地区
	土地渗滤	造价低廉,对地表景观影响小	处理效果不稳定,可能影响地下水	易造成地下水污染的地区
物化法	物理过滤	造价低廉,运维简单	对可溶性污染物去除能力有限	在联户处理、村落集中处理的地区单独使用

反应器(MBBR)应用较多^[10-12]。上述3种工艺正常运行时的出水水质基本可达到或优于当地农村污水处理设施的排放标准要求,可满足农田灌溉、室外冲洗及景观用水等回用需求。但RBC因直接暴露在空气中不易采用地理等方式有效保温,冬季其生物膜活性降低,处理效果下降^[13],在北方冬季甚至因结冰而无法正常运行。BAF及MBBR可以地理,对低温承受力相对较好,但BAF需定期反冲洗避免堵塞^[14],而MBBR好氧段的曝气机需长期运行^[15],运维成本较高。

农村灰水系统采用的活性污泥法基本为无需建设二沉池的系统,如膜生物反应器(MBR)和序批式活性污泥反应器(SBR)^[16]。其中MBR处理效果好、出水水质优良且对病原微生物的去除效果显著^[10],适合在以室内回用为主要资源化利用方式的地区应用。MBR成本较高且运维复杂,不适合经济条件较差的地区。SBR工艺运行时为间歇进水,适于处理农村灰水等排水量有明显时间变化特征的污水^[10]。SBR工艺对灰水的处理效果稳定,但常需要配套自控装置以适应农村灰水排放特征,建设和运维成本相对较高。灰水基本没有高效脱氮除磷的需求,混合生活污水处理中常用的A/A/O、氧化沟等工艺在农村灰水处理中应用较少。

(2)生态处理系统。生态处理系统具有造价低廉、运维便利、能耗低的优势,逐渐成为农村灰水处理的主流工艺。当灰水回用方式为农田灌溉时,处

理设施出水水质仅需满足《农田灌溉水质标准》(GB 5084—2021)的要求,无需深度处理,适合采用生态处理系统。人工湿地(CW)、生态滤池和土地渗滤是常用的灰水生态处理系统,其中以CW应用最为广泛。CW可通过土壤和滤料的吸附过滤、微生物的代谢以及湿地植物的吸收作用去除灰水中的悬浮物、有机物、氮、磷等污染物,分为表面流CW、水平潜流CW及垂直流CW^[17],其中垂直流CW对污染物的综合去除效果较好^[18]。因大部分CW为露天运行,其在北方地区的冬季容易冻结,导致处理效果下降,因此冬季严寒地区不适合采用CW等生态工艺作为核心灰水处理工艺。

(3)物化处理系统。农村灰水物化处理系统可分为物理过滤系统、混凝过滤系统、电絮凝系统、膜分离系统及高级氧化系统等^[19-21]。物理过滤系统在实际工程中应用较多,其他物化处理系统因建设成本和运维费用高,实际应用少。物理过滤系统主要以石英砂、碎石、活性炭等作为过滤介质^[22],通过滤料的物理过滤作用及活性炭等多孔材料的吸附作用拦截灰水中的污染物。物理过滤系统对悬浮物的去除效果良好,但滤料需反冲洗,活性炭需定期更新,一般在单户或联户灰水处理装置中应用较多,在村集中灰水处理工艺中一般不作为主体工艺,而是设置在生物或生态处理设施之后,作为深度处理设施进一步去除悬浮物,保障消毒工艺的可靠运行。

1.3 回用系统

农村灰水回用系统主要分为消毒系统、储水系统和输配系统,其中以消毒系统最为关键。灰水中含有大量致病微生物^[23],因此回用时应关注致病风险。相关研究证实,CW等常用灰水处理工艺对致病菌的去除效果有限^[24],为实现灰水回用安全应消毒处理^[25]。消毒系统分为加氯消毒系统、紫外消毒系统和臭氧消毒系统等,其中加氯消毒系统和紫外消毒系统应用较多^[20]。加氯消毒系统主要采用次氯酸盐消毒剂^[18],成本低廉且余氯可持续保持消毒效果^[26],缺点在于会产生消毒副产物以及氯元素在农业灌溉时可能对土壤和植物造成不利影响^[24]。紫外消毒不产生消毒副产物且不会增加灰水盐分,但不具有持续消毒效果,易造成消毒不彻底^[18]。加氯消毒和紫外消毒对进水的悬浮物浓度和浊度要求较高^[26-27],需在消毒前降低进水的悬浮物浓度和浊度,才能实现稳定可靠的消毒效果。

2 优化建议

农村灰水收集-处理-回用系统的技术类型多样,应结合当地特点与需求,科学设计、规范建设并保障运维效果,从技术、管理和制度层面科学推进农村灰水的资源化利用,如图2所示。

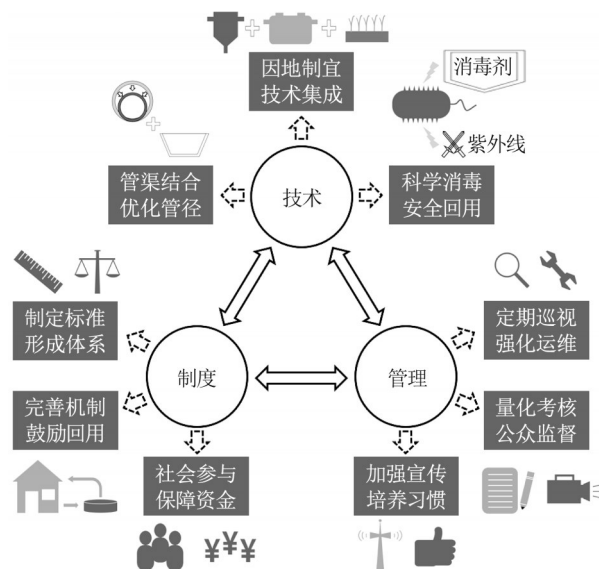


图2 农村灰水系统优化建议

Fig. 2 Optimization suggestions of the rural greywater system

2.1 技术层面

在有条件的地区优先推行管道排水,条件尚不充分的地区推行管渠结合的排水系统,利用管道卫

生条件较好和沟渠成本低廉的优势,提高灰水收集系统的经济可行性。合理优化灰水管径,优先采用小管径排水系统(干管管径 $<200\text{ mm}$ 的重力流排水管道系统)^[28],其成本低廉、开挖道路面积小,适合现行条件下的农村灰水收集^[29],且在优化管道运维和削减处理设施污染负荷方面有积极意义^[30]。因地制宜,合理集成生物、生态和物化处理工艺,避免盲目追求MBR等先进处理工艺,造成资金浪费。避免在冬季严寒地区使用生态处理工艺为主的处理系统,集成生物处理和物化处理系统保障冬季的灰水处理效果。在条件允许的地区利用风能和太阳能等清洁能源为灰水处理设施供能,降低运行能耗和费用。灰水回用灌溉时进行低剂量加氯或紫外消毒处理,随后采用滴灌等非喷洒型输配系统,避免形成微生物气溶胶。再生水灌溉可能造成土壤盐分的累积^[31],消毒时应控制含氯消毒剂的用量。灰水回用于冲洗和景观时,在生物/生态处理后采用砂滤+加氯消毒方式进行消毒,保证储水和输配水系统含有适宜浓度的余氯。

2.2 管理层面

关注灰水收集和回用系统的维护,定期巡视灰水管道和沟渠,及时排查检修淤积和堵塞问题,强化消毒系统和储水系统的运行维护,以保证灰水回用安全。建立考核机制、健全考核体系、明确责任到人,应用物联网技术将灰水集中处理及回用系统的运行和水质数据联网公示,建立公众监督与投诉平台,鼓励农村居民参与灰水收集-处理-回用系统的运行监督。加强宣传教育,号召农村居民养成良好的排水习惯,避免大块异物进入灰水管道,杜绝将黑水接入灰水管道的行为,并引导居民积极采取相应防护措施,接触灰水后勤洗手,降低室外灰水回用的风险。

2.3 制度层面

拓展融资渠道,创新收益模式,采用多种方式鼓励社会资本参与农村灰水系统的建设和运维。在经济条件允许的地区对农村灰水系统的建设运维提供专项资金支持。在有条件开展灰水回用的地区建立灰水回用经济补偿机制,对优先开展灰水回用的农村在财政支持上予以倾斜,定期组织灰水回用优秀案例评选并进行推广。在推进乡村振兴的过程中,逐步在地方规划和各项行动计划中对灰水回用率提

出要求。目前我国尚无针对农村灰水收集-处理-回用的技术标准,各地在灰水系统设计时缺乏有效参考,应推进相关标准的制定工作。市场上灰水设备类型多样,选型困难,应推进标准化认证工作,保障设施质量与运行效果,形成规范化的灰水技术系统和设备体系。

3 发展趋势

农村灰水系统的科学研究、技术开发和工艺应用发展趋势可总结为4个方面:(1)在物质迁移转化及调控方面,研究灰水系统中持久性有机污染物等新兴污染物的迁移转化规律,以保障回用安全,同时研究盐分及氮、磷元素的迁移转化规律以提升农业灌溉回用效益。(2)在微生物特征解析及风险控制方面,探明灰水系统是否具有致病微生物的传播和富集风险,并开发相应的微生物风险控制技术。(3)在低温处理可靠性提升及配套技术研发方面,研发能够适应低温的灰水处理技术及设备,并提出系统低温运行解决方案。(4)在管道和沟渠收集系统决策方面,基于我国农村复杂多样的地理环境和社会经济现状,通过全生命周期的效益评估实现灰水收集系统选型的科学决策。

4 结论

(1)农村灰水收集系统分为管道系统和沟渠系统,处理系统以RBC、BAF、MBR等生物处理工艺、CW等生态处理工艺、物理过滤等物化处理工艺为主,回用系统的消毒方式以加氯消毒和紫外消毒应用较多。

(2)灰水管道造价过高和处理设施冬季运行效果差是常见问题。技术上应因地制宜,优化灰水收集管道管径,强化处理与回用技术集成并推进科学消毒;管理上应强化运维、量化考核并加强宣传;制度上应保障资金、鼓励回用并制定标准,统筹推进农村灰水的资源化利用。

(3)应开展新兴污染物、盐分、致病微生物等在灰水系统中的迁移转化规律和环境影响研究,研发能够适应低温环境的农村灰水处理技术和设备,并科学评估管道系统和沟渠系统的综合效益。

参考文献

[1] 王凯军,陈世朋,董娜,等.微型复合垂直流人工湿地处理农村灰水试验研究[J].中国给水排水,2008,24(17):40-43.

WANG Kaijun, CHEN Shipeng, DONG Na, et al. Experimental study on treatment of grey water by mini-integrated vertical-flow constructed wetland [J]. China Water & Wastewater, 2008, 24(17):40-43.

[2] PANIKKAR A K, OKALEBO S A, RILEY S J, et al. Total treatment of black and grey water for rural communities [M]. Environmental Bioengineering. Totowa, NJ:Humana Press, 2010:523-554.

[3] MOHAMED R M S R, AL-GHEETHI A A S, KASSIM A H M. Management of greywater in developing countries; alternative practices, treatment and potential for reuse and recycling [M]. Cham: Springer, 2019.

[4] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Using graywater and stormwater to enhance local water supplies [M]. Washington, D. C.: National Academies Press, 2016.

[5] 刘俊新.因地制宜,构建适宜的农村污水治理体系[J].给水排水,2017,53(6):1-3.

LIU Junxin. Treatment in accordance with local conditions and construction of suitable rural sewage treatment system [J]. Water & Wastewater Engineering, 2017, 53(6):1-3.

[6] DWUMFOUR-ASARE B, NYARKO K B, ESSANDOH H M K, et al. Greywater in the drains of a sewer community in Ghana [J]. Water Practice and Technology, 2018, 13(4):965-979.

[7] OTENG-PEPRAH M, DE VRIES N K, ACHEAMPONG M A. Greywater characterization and generation rates in a peri urban municipality of a developing country [J]. Journal of Environmental Management, 2018, 206:498-506.

[8] 范彬,胡明,顾俊,等.不同农村污水收集处理方式的经济性比较[J].中国给水排水,2015,31(14):20-25.

FAN Bin, HU Ming, GU Jun, et al. Economic comparison of different rural sewage treatment patterns [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(14):20-25.

[9] 朱木兰,黄永福,李地金,等.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.

ZHU Mulan, HUANG Yongfu, LI Dijin, et al. Water quality survey for different drainage ways of sewage and new strategy for pollution control in rural areas [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(2):245-252.

[10] 刘玲花,张盼伟,李昆,等.灰水处理及回用技术研究综述[J].水利水电技术,2019,50(8):146-153.

LIU Linghua, ZHANG Panwei, LI Kun, et al. Review on grey water treatment and recycling technology [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(8):146-153.

[11] 张燕燕,程拥,陈洪斌. MBR和BAF用于以家庭回用为目的的灰水净化研究[J].环境工程学报,2016,10(2):623-630.

ZHANG Yanyan, CHENG Yong, CHEN Hongbin. Research on gray water purification using MBR and BAF for domestic toilet Flushing [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(2):623-630.

[12] 于凤.半集中式处理系统灰水处理技术研究[D].上海:同济大

- 学, 2007.
- YU Feng. Study on the greywater treatment technology of semi-centralized treatment system [D]. Shanghai: Tongji University, 2007.
- [13] CORTEZ S, TEIXEIRA P, OLIVEIRA R, et al. Rotating biological contactors: A review on main factors affecting performance[J]. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 2008, 7(2):155-172.
- [14] 邓征宇, 杨春平, 曾光明, 等. 曝气生物滤池技术进展[J]. *环境科学与技术*, 2010, 33(8):88-93.
- DENG Zhengyu, YANG Chunping, ZENG Guangming, et al. Progress on biological aerated filter technique[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 33(8):88-93.
- [15] 魏维利, 刘金泉, 王俊安, 等. MBBR废水处理工程应用关键问题探讨[J]. *现代化工*, 2013, 33(1):9-12.
- WEI Weili, LIU Jinquan, WANG Junan, et al. Discussion on key problems of engineering application of wastewater treatment for MBBR[J]. *Modern Chemical Industry*, 2013, 33(1):9-12.
- [16] 郝晓地, 宋虹苇. 生态卫生: 可持续、分散式污水处理新概念[J]. *给水排水*, 2005, 31(6):42-45.
- HAO Xiaodi, SONG Hongwei. New concept of sustainable, decentralized wastewater treatment[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2005, 31(6):42-45.
- [17] 周玮, 缪佳辉, 孟娜. 人工湿地处理农村污水研究进展[J]. *农业与技术*, 2020, 40(2):125-129.
- ZHOU Wei, MIAO Jiahui, MENG Na. Research progress of artificial wetland treatment of rural wastewater[J]. *Agriculture and Technology*, 2020, 40(2):125-129.
- [18] ARDEN S, MA X. Constructed wetlands for greywater recycle and reuse: A review[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 630:587-599.
- [19] GASSIE L W, ENGLEHARDT J D. Advanced oxidation and disinfection processes for onsite net-zero greywater reuse: A review[J]. *Water Research*, 2017, 125:384-399.
- [20] OH K S, LEONG J Y C, POH P E, et al. A review of greywater recycling related issues: Challenges and future prospects in Malaysia[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 171:17-29.
- [21] 杨淘, 钟成华, 王晓雪, 等. 灰水处理与回用的研究进展[J]. *环境科学与技术*, 2018, 41(3):134-140.
- YANG Tao, ZHONG Chenghua, WANG Xiaoxue, et al. Research progress on treatment and reuse of greywater[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 41(3):134-140.
- [22] SAMAYAMANTHULA D R, SABARATHINAM C, BHANDARY H. Treatment and effective utilization of greywater[J]. *Applied Water Science*, 2019, 9(4):1-12.
- [23] O'TOOLE J, SINCLAIR M, MALAWARAARACHCHI M, et al. Microbial quality assessment of household greywater[J]. *Water Research*, 2012, 46(13):4301-4313.
- [24] MAIMON A, GROSS A. Greywater: limitations and perspective[J]. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 2018, 2:1-6.
- [25] 马伟辉, 陈洪斌, 屈计宁. 生活污水源分离、分质处理与资源化[J]. *中国沼气*, 2008, 26(4):15-19.
- MA Weihui, CHEN Hongbin, QU Jining. Progress in domestic wastewater source separation, separated treatment and resourceization[J]. *China Biogas*, 2008, 26(4):15-19.
- [26] SCHOEN M E, ASHBOLT N J, JAHNE M A, et al. Risk-based enteric pathogen reduction targets for non-potable and direct potable use of roof runoff, stormwater, and greywater[J]. *Microbial Risk Analysis*, 2017, 5:32-43.
- [27] 符家瑞, 周艾珈, 刘勇, 等. 我国城镇污水再生利用技术研究进展[J]. *工业水处理*, 2021, 41(1):18-24.
- FU Jiarui, ZHOU Aijia, LIU Yong, et al. Research progress of urban sewage reclamation technology in China[J]. *Industrial Water Treatment*, 2021, 41(1):18-24.
- [28] US EPA. Decentralized systems technology fact sheet small diameter gravity sewers[R]. Washington, D.C.: Office of Water, 2000.
- [29] 李文凯, 郑天龙, 刘俊新. 农村小管径重力流灰水管道中生物膜细菌群落特征[J]. *环境工程学报*, 2020, 14(3):691-700.
- LI Wenkai, ZHENG Tianlong, LIU Junxin. Characteristics of bacterial communities in the biofilms of rural gray water small diameter gravity sewer systems[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2020, 14(3):691-700.
- [30] ZHENG Tianlong, LI Wenkai, MA Yingqun, et al. Sewers induce changes in the chemical characteristics, bacterial communities, and pathogen distribution of sewage and greywater[J]. *Environmental Research*, 2020, 187:109628.
- [31] 陈卫平, 吕斯丹, 张炜铃, 等. 再生(污)水灌溉生态风险与可持续利用[J]. *生态学报*, 2014, 34(1):163-172.
- CHEN Weiping, LÜ Sidan, ZHANG Weiling, et al. Ecological risks and sustainable utilization of reclaimed water and wastewater irrigation[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(1):163-172.
- [作者简介] 李文凯(1993—), 博士, 工程师, E-mail: liwenkai-
kkk@163.com。通讯作者: 郑天龙, 博士, 助理研究员,
E-mail: tlzheng@rcees.ac.cn。
- [收稿日期] 2022-03-08(修改稿)