净水技术前沿与热点综述

徐子斌. 基于源分离收集-分质净化-资源化利用的农村生活污水处理新模式[J]. 净水技术, 2023, 42(4):4-13,51.
XU Z B. New mode for rural domestic wastewater treatment based on source-separation-collection, separate purification and resource utilization[J]. Water Purification Technology, 2023, 42(4):4-13,51.

基于源分离收集-分质净化-资源化利用的农村生活污水处理新模式

徐子斌[1,2,*]
(1. 上海勘测设计研究院有限公司,上海 200335;2. 中国长江三峡集团有限公司,长江生态环境工程研究中心<上海>,上海 200335)

摘 要 针对目前农村生活污水处理存在的未因地制宜、资源化利用不足等问题,同时农村黑水与灰水水质差异巨大,黑水的化学需氧量、总氮、总磷的平均值分别是灰水的3.8、5.0、8.1倍左右,文章提出一种基于源分离收集-分质净化-资源化利用的农村生活污水处理新模式。农村生活污水通过厨房、浴室排水管道与厕所排水管道的分离来实现黑水、灰水的源分离收集,黑水通过化粪池或沼气池净化处理,灰水通过生物、生态和生物与生态组合等技术净化处理,最终结合水资源状况、水环境禀赋、用水需求和经济发展水平等因素进行资源化利用。新模式具有因地制宜、绿色低碳、环保、可创造收益等优势,然而存在工程实施案例少、部分标准和规范缺乏、源分离管道易错接、适用范围有限等问题,有待进一步解决。

关键词 农村生活污水 源分离收集 分质净化 资源化利用 污水处理模式
中图分类号:X799 **文献标识码**:A **文章编号**:1009-0177(2023)04-0004-11
DOI:10.15890/j.cnki.jsjs.2023.04.002

New Mode for Rural Domestic Wastewater Treatment Based on Source-Separation-Collection, Separate Purification and Resource Utilization

XU Zibin[1,2,*]
(*1. Shanghai Investigation, Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200335, China*;
2. Yangtze Eco-Environment Engineering Research Center <Shanghai>, China Three Gorges Corporation, Shanghai 200335, China)

Abstract Current rural domestic wastewater treatment suffers from poor adaptation to local conditions and low resource utilization ratio, and black water and grey water differ in water quality. In particular, the average value of chemical oxygen demand, total nitrogen, and total phosphorus of black water are about 3.8, 5.0, 8.1 times of grey water, respectively. Herein, a new rural domestic wastewater treatment mode that is based on source-separation-collection, separate purification and resource utilization is proposed. The source separation of black water and grey water is achieved by the separation of drainage pipe of kitchen, bathroom and toilet. Then black water is purified by septic tank or biogas digester, and grey water is purified by biological or ecological or biology-ecology combination treatment. Finally, resource utilization way is determined by factors such as water resource situation, water endowment, water demand, and economic development. This new mode has advantages of good adaption to local conditions, green low carbon, environmental protection and making profits. However, rare implement cases, lack of partial standard and regulation, easy to make cross-connection mistake in source separation, and limited range of application are the major problems to be resolved in the future.

[收稿日期] 2021-10-18
[基金项目] 中国长江三峡集团有限公司科研项目:长江中游地区村镇污水处理模式研究(202003082);无为县农村污水治理扶贫试点项目农村污水处理技术跟踪评估
[通信作者] 徐子斌(1993—),男,博士,研究方向为农村污水净化技术,E-mail:xuzibin@sidri.com。

Keywords rural domestic wastewater source-separation-collection separate purification resource utilization wastewater treatment mode

我国农村人口众多,2019 年常住人口数量高达 6.9 亿[1]。《农村生活污水处理工程技术标准》[2]中,居民用水量参考平均值为 80 L/(人·d),排放系数为 0.6,估算我国农村每年可产生高达 120 亿 t 的生活污水。然而,2019 年处理农村生活污水的乡仅有 3 156 个,约占总数的 33.3%[1],这意味着近 70%的乡产生的生活污水未得到处理,可导致水环境的严重污染,因此,处理农村生活污水迫在眉睫。目前针对农村生活污水的处理模式普遍照搬城镇生活污水的处理模式,即混合收集至污水处理厂(站)进行处理。然而该处理模式存在下述问题。

(1)处理效率低。农村居民普遍具有利用使用过的自来水和周边河流洗菜洗衣、灌溉庄稼等习惯,导致污水收集量少。且污水的化学需氧量(COD)和五日生化需氧量(BOD_5)低[3-4],导致处理效率低。

(2)氮、磷等营养盐损失量大。该模式普遍采用生物处理技术,污水中大部分氮、磷等营养盐被水处理微生物同化吸收,微生物死亡后转化为污泥成为固体废物。而农村地区有大量作物,其生长也需要氮、磷等营养盐,该模式不能促进营养盐的有效利用。

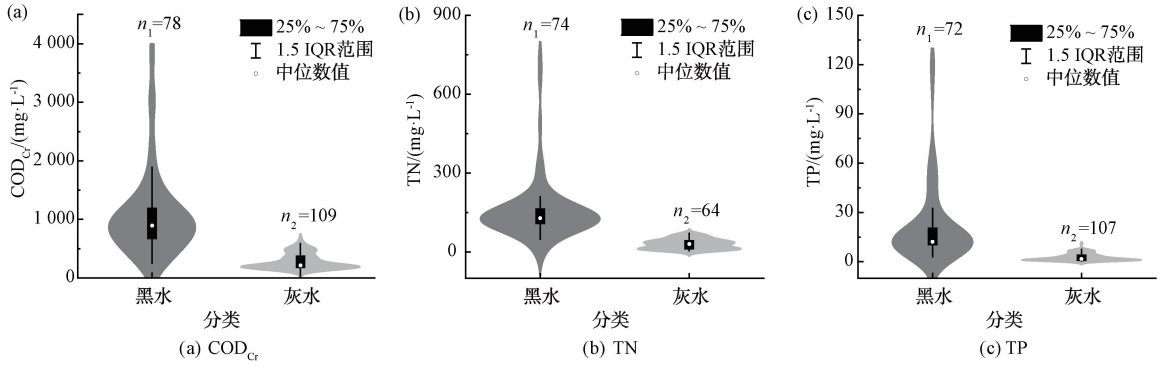
(3)产生污泥量大,需要后续运维,且需为污泥找到合理的处置途径。

(4)不符合农村居民的实际需求。现有处理模式不能帮助农村居民解决农田灌溉等需求,同时处理污水还需农村居民交纳排污费,导致农村居民不支持该处理模式。

上述问题均说明现有处理模式不适用农村生活污水的处理,亟需提出适宜农村生活污水的处理新模式。

1 基于源分离收集-分质净化-资源化利用的农村生活污水处理新模式的提出

农村生活污水分为厕所污水(亦称“黑水”)和生活杂排水(亦称“灰水”)两大类[2]。文献调研结果[5-28]表明,黑水和灰水的水质差异巨大,结果如图 1 和表 1 所示。黑水 COD_{Cr} 浓度的平均值和中位数值分别约是灰水的 3.8 倍和 4.1 倍,总氮(TN)浓度的平均值和中位数值分别是灰水的 5.0 倍和 4.1 倍左右,总磷(TP)浓度的平均值和中位数值分别约是灰水的 8.1 倍和 7.1 倍。除水质差异外,黑水和灰水的人均排放量也有显著差异。董瑞海等[29]研究表明,每人每天约排放黑水量为 42 L,而排放灰水量为 68~272 L。故不宜采用同一种技术处理黑水和灰水。本研究提出在农村污水收集侧采用黑水与灰水分开收集的方式,即源分离的收集方式。



注:n 为调研样本数量。

图 1 黑水和灰水的进水水质

Fig. 1 Influent Water Quality of Black Water and Grey Water

黑水和灰水在源头处通过源分离的方式收集后,根据水质差异,选择相应的处理技术进行净化。基于农村居民对农田灌溉等方面的需求,两类污水经过净化处理后,结合当地的实际需求再进行资源化利用。综上,整理得到如图 2 所示的处理模式。

2 基于源分离收集-分质净化-资源化利用处理新模式的组成单元

图 2 所示的处理模式的核心理念是污水源分离

表 1　黑水和灰水进水水质的平均值和中位值
Tab. 1　Average and Median Value of Influent Water Quality of Black Water and Grey Water

指标	平均值/(mg·L^{-1})	中位值/(mg·L^{-1})
黑水 COD_{Cr}	1 077	896
灰水 COD_{Cr}	281	216
黑水 TN	155	128
灰水 TN	31	31
黑水 TP	22.0	12.0
灰水 TP	2.7	1.7

收集、分质净化和资源化利用。污水源分离收集是污水分质净化的前提,其目的是污水分质净化;而污水分质净化和资源化利用之间是双向决定的关系,即以用定质、以质定用。该模式可分为 3 个组成单元,分别是污水源分离收集单元、污水分质净化单元和资源化利用单元,下面针对每一个组成单元进行详细阐述。

2.1　污水源分离收集单元

污水源分离收集单元的关键是灰水与黑水分离,有条件的地区还可将黑水中的粪便和尿液加以

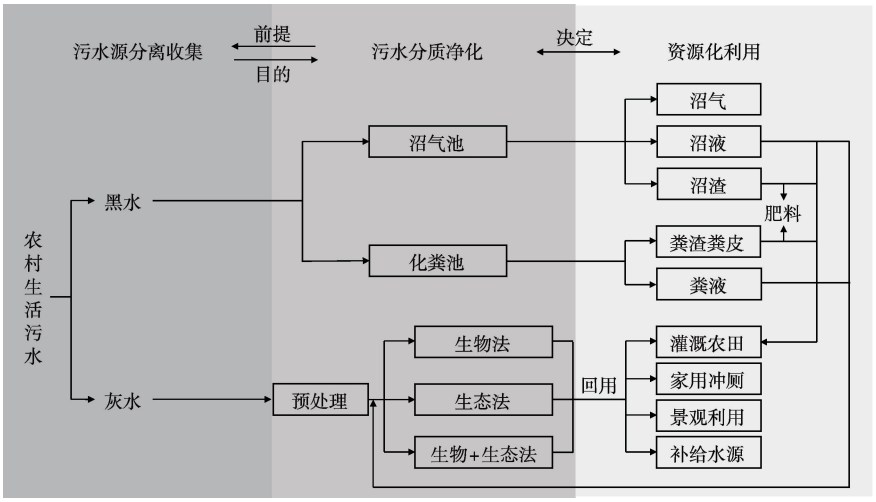


图 2　基于源分离收集-分质净化-资源化利用的农村生活污水处理新模式
Fig. 2　New Mode for Rural Domestic Wastewater Treatment Based on Source-Separation-Collection, Separate Purification and Resource Utilization

分离。将粪便和尿液分离的意义在于:一方面,尿液中细菌少,但营养物质含量丰富,可单独制备优质肥料;另一方面,粪便在低湿度条件下(即粪尿分离后)生物降解效率较高,无害化处置的负担减轻,臭味小[30]。

灰水与黑水分离主要是通过厨房、浴室排水管道和厕所排水管道的分离得以实现,两种排水管道收集到的污水分别进入不同的净化单元进行净化处理。粪便和尿液的分离可通过源分离厕所得以实现[30-32]。

源分离收集单元是后续分质净化污水的前提,此单元的目的是将不同水质的污水分开,有助于提升污水的净化及后续资源化利用的效率,节约成本,降低能耗,符合我国目前的资源形势,对改善我国农村生态环境具有重大意义。同时,设立源分离收集单元符合我国农村现状,根据《农村公共厕所建设与管理规范》(GB/T 38353—2019)[33]的要求,每个建制村至少设置 1 处农村公厕,公厕的设置使黑水与灰水的排放口分开,为推行源分离收集系统提供了良好的天然条件。基于该条件及农村的经济水平,农村生活污水的源分离应以黑灰分离为主,后续讨论亦基于该前提进行展开。

2.2　污水分质净化单元

将源分离收集单元收集到的黑水和灰水,通过污水分质净化单元进行净化处理。此单元的核心是与不同污水相对应的净化技术。净化技术的选择一方面取决于来水的水质和水量,另一方面取决于后续资源化利用的需求。下面针对不同的污水介绍常用的净化技术。

2.2.1　黑水净化技术

我国农村普遍有施肥、利用燃气烧水做饭等需求,而黑水中具有大量的氮、磷等营养物质及有机物。

以上述需求为条件筛选常见的污水处理技术，不难发现，厌氧生物处理法较适合黑水的净化处置。其中，沼气池和化粪池在农村污水处理设施中应用最广。

(1)沼气池

黑水净化沼气池采用厌氧发酵技术与兼性生物过滤技术相结合的方法，在厌氧和兼氧条件下将黑水中的有机物分解转化为 CH_4、CO_2 和水，以净化黑水。其优势在于有机物降解率高、污泥产生量少、管理方便、投资少、见效快等。

黑水净化沼气池的工艺流程如图 3 所示，一般由前处理区和后处理区两部分组成。前处理区包括沉砂池和两级厌氧消化池(厌氧Ⅰ池和厌氧Ⅱ池)，其中，厌氧Ⅰ池用于厌氧消化有机物，厌氧Ⅱ池通过软填料等微生物载体进一步降解有机物。厌氧消化池内会产生大量沼气。后处理区一般设置填料和滤料，发挥兼性过滤作用，净化水质[34]。

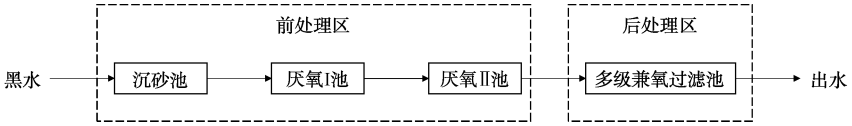


图 3 黑水净化沼气池工艺流程

Fig. 3 Flow of Black Water Purification through Biogas Digester Process

黑水净化沼气池适用于一家一户或联户的分散处理，如果农村有畜禽养殖、蔬菜种植和果林种植等产业，可针对不同产业设置不同的资源化利用模式。

(2)化粪池

化粪池是通过沉淀和厌氧微生物发酵来去除污水中悬浮物、有机物和病原微生物的初级处理构筑物，在农村普遍被使用。最常见的类型是三格式化粪池，其结构如图 4 所示。

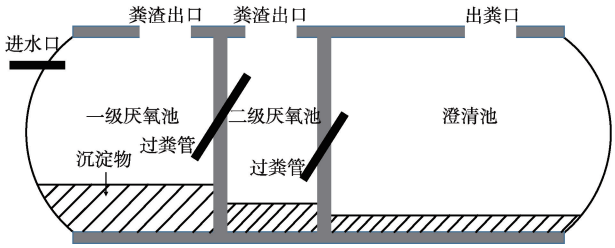


图 4 三格化粪池示意图

Fig. 4 Schematic Diagram of Three-Compartment Septic Tank

三格化粪池的第一格为一级厌氧池，其功能为接纳黑水，并通过厌氧发酵和沉淀作用使黑水分解分层。黑水经过该池后可分为 3 层，从上至下分别为浮渣层、水流层和污泥层，其中水流层中的污水通过过粪管进入第二格。第二格为二级厌氧池，其作用为继续通过沉淀作用对污水分层，并对黑水进行深度厌氧发酵，杀菌杀卵，使游离氨浓度上升。同样地，经过分层后，第二格中水流层的污水通过过粪管进入第三格。第三格为澄清池，其功能为进一步沉淀污水，并储存污水。

化粪池具有结构简单、造价及运行费用低、施工和维护管理容易、无能耗、卫生效果好等优势。但化粪池易渗漏，从而污染地下水。地下水是我国农村宝贵的水源之一，因此，化粪池被应用于农村黑水处理时，应充分重视渗漏问题，采用玻璃钢、PVC 塑料等材料可有效避免化粪池的渗透[35]。

2.2.2 灰水净化技术

农村产生的灰水主要包括洁具冲洗、洗衣、洗菜、洗浴等产生的污水。与黑水相比，灰水中污染物浓度低，氮、磷等营养盐的含量低。灰水中往往存在着表面活性剂类的物质，此类物质对植物生长发育有一定的毒害作用[36]，因此，需要针对灰水净化后再回用。灰水净化的步骤一般为：先经过预处理单元，一般为格栅和调节池，去除较大的悬浮物和漂浮物，降低后续处理的负荷，并调节水量后，再经过污水净化单元处理。选择农村灰水净化技术的主要原则为抗冲击负荷能力强、出水水质好且稳定、基建投资少、运行费用低且管理简单等。基于上述原则，灰水净化技术通常选择生物净化技术、生态净化技术以及生物与生态联用的净化技术。

(1)生物净化技术

好氧生物处理技术是生物处理中使用最广的处理技术之一，从原理上可分为活性污泥法和生物膜法两大类。以活性污泥法为原理的污水净化技术包括厌氧-缺氧-好氧技术、氧化沟技术和序批式活性污泥法等。以生物膜法为原理的污水净化技术包括生物滤池、生物转盘、生物接触氧化等。表 2 总结了上述技术的原理、优缺点、适用范围及应用于农村生活污水处理的案例。

表 2　常见生物净化技术的原理、优缺点、适用范围及在农村生活污水处理中的应用案例
Tab. 2　Principles, Advantages, Disadvantages, Scope and Applications of Common Biological Purification Technologies in Rural Domestic Wastewater Treatment

净化原理	具体技术	技术的优势及不足	技术适用范围	应用案例文献
活性污泥法	厌氧-缺氧-好氧	优势:有机物、氮、磷的去除效果好 不足:占地面积较大	适用于对出水氮、磷浓度要求较高的农村	[37-39]
	氧化沟	优势:节省初沉池,结构与设备简单,运行管理简便,投资较省,耐冲击负荷强,剩余污泥少,处理效果好 不足:长污泥龄运行下有时出水中悬浮物浓度较高,占地面积大,耗电高	适用于处理规模较大、进水污染物浓度高、对出水水质要求较高的镇级及以上生活污水处理工程	[40]
	序批式活性污泥法	优势:占地面积小,无需设置调节池、二沉池和污泥回流设备,易维护管理,出水水质优于连续式,易实现自动化控制 缺点:自动化控制要求高,对操作、管理、运维人员素质要求较高,对排水设备要求高,浮渣难处理	适用于缺少土地资源的农村	[41]
生物膜法	生物滤池	优势:处理效果好,出水水质稳定 缺点:占地面积大,易堵塞,灰蝇较多,影响环境卫生	适用于用地面积少、水质水量波动大、不同气温和海拔的分散点源污染等场景	[42]
	生物转盘	优势:能耗低,管理方便,产泥量少,固液分离效果好,不易发生堵塞 不足:容积负荷较小,在寒冷地区需采取保温措施	适用于进水污染物浓度波动较大的场景	[43]
	生物接触氧化	优势:占地面积小,污泥产量少,无污泥回流、污泥膨胀,对水质、水量波动的适应性强,操作简便,较活性污泥法动力消耗少,对污染物去除效果好 不足:建造费用高,可调控性差,对磷的去除效果较差	适用于有一定经济承受能力的农村,可用于单户、多户污水处理设施或村级的污水处理站	[44]

(2)生态净化技术

生态净化技术主要包括湿地处理技术、稳定塘和土地过滤技术 3 种。

a)湿地处理技术

湿地处理技术是将污水投放到土壤经常处于水饱和状态,且长有芦苇、香蒲等耐水植物的沼泽地上,在耐水植物和土壤联合作用下净化污水的一种处理技术。净化原理包括物理沉降作用、植物根系的阻截作用、化学沉淀作用、土壤及植物表面的吸附与吸收作用、微生物的代谢作用等。湿地处理技术具有缓冲容量大、处理效果好、工艺简单、投资省、运行费用低等优点,通过选择合适的植物品种,还可以起到美化环境、改善景观的作用,适用于人口密度较低、土地资源充足的地区。但也存在污染负荷低、占地面积大、设计不当易堵塞、处理效果受季节影响、随运行时间延长除磷能力逐渐下降等问题。

b)稳定塘技术

稳定塘技术是指污水经过人工适当修整、并设有围堤和防渗地的池塘,在自然生物净化原理作用下得到处理的一种污水净化技术。污水在塘内缓慢流动、复氧及较长时间的贮留,在微生物和水生植物的综合作用下得到净化。稳定塘具有一系列较为显著的优点:首先,能充分利用地形,工程简单,建设投资省;其次,能实现污水资源化,使污水处理与利用相结合;最后,可降低污水处理能耗,方便维护,成本低廉。然而,亦存在负荷低、占地面积大、处理效果受季节影响、污染物浓度过高时会产生臭气和滋生蚊虫等缺点。

c)土地处理技术

土地处理技术是指在人工控制的条件下,将污水投配在土地上,污水通过土壤-植物系统,在经历一系列物理、化学和生物化学过程后得到净化的一种污水处理技术。净化原理主要包括过滤、吸附、化学沉淀,以及微生物的分解作用等。其优势是投资费用省、无能耗、运行费用很低、维护管理简便,然而也存在污染负荷低、占地面积大、设计不当易堵塞、易污染地下水等不足。

(3)生物与生态组合净化技术

处理农村灰水时,若单独采用生物净化技术可能出现氮、磷脱除能力差等问题,若单独采用生态净化技术会出现有机物去除率不高等问题。因此,有学者提出采用生物与生态净化技术组合的方法来净

化灰水。目前已有利用膜生物反应器-人工湿地组合技术[45]、生物滤池-人工湿地组合技术[46]、生物接触氧化一体化设备-人工湿地组合技术[47]等来净化农村生活污水的工程案例。组合技术相对于单一技术,其出水中有机物、氮、磷浓度更低。

选择灰水净化技术时,除了考虑技术的稳定性和经济性等因素外,还要充分考虑水量及当地的实际情况。如灰水产生量较小时,可优先选择生态净化技术;相反灰水产生量较大时,可优先选择生物净化技术。同时,农村附近有合适的废地、荒地、洼地或沼泽地、池塘等,应优先考虑选择生态净化技术净化灰水。同时,要结合当地资源化利用的需求来调整净化技术的选择或操作条件等。

2.3 资源化利用单元

2020 年 7 月,农业农村部等三部委办公厅共同印发了《农村厕所粪污无害化处理与资源化利用指南》和《农村厕所粪污处理及资源化利用典型模式》,提出要“以就地处置、源头控污减排为原则,促进农村厕所粪污无害化处理与资源化利用”[48]。2021 年 1 月,发改委、科技部、工业和信息化部等十部门印发了《关于推进污水资源化利用的指导意见》,提出要“稳妥推进农业农村污水资源化利用,积极探索符合农村实际、低成本的农村生活污水治理技术和模式,推动农村生活污水就近就地资源化利用”[49]。污水资源化利用符合我国高质量发展的要求,更符合农村居民的实际需求。

经过分质净化的黑水和灰水中仍然包含着大量的水资源和营养元素,具有应用潜力。而农村具有广袤的土地和丰富的作物,有施肥及用水需求,因此,两种污水可在净化后进入资源化利用单元进行回用。此单元的设立有助于切实改善农村人居环境,提升农村居民的获得感与幸福感。

污水资源化利用的途径不仅要考虑实际需求,更要结合来水的水质状况,按照“按需定供,低水低用,高水高用”的原则[50]。各农村应根据自身的水资源状况、水环境禀赋、用水需求和经济发展水平等因素,科学地制定污水资源化利用的途径。下面分别介绍农村黑水和灰水净化后可能的资源化利用途径。

2.3.1 黑水的资源化利用

(1)沼气池出水的资源化利用

黑水经沼气池净化后可产生沼气、沼液和沼渣。沼气的热值较高,适合用作燃料,可用于农村家庭生火做饭、照明和取暖。沼液和沼渣中含有丰富的有机质,考虑到农户对作物灌溉的需求,以及灌溉用水对有机物浓度要求较低且对氮、磷浓度没有限制要求[51],可用作作物的水肥和固体肥料。当沼气池产生的沼液过多而供施肥灌溉的地较少时,过剩的沼液可进一步通过灰水净化技术净化后进行其他类型的资源化利用。四川省成都市蒲江县通过此种资源化利用的方式,促进了现代农业提质增效,实现经济、社会、生态效益共赢[48]。

(2)化粪池出水的资源化利用

黑水经化粪池净化后转化为粪渣、粪皮和粪液。其中粪渣和粪皮可与畜禽粪污、秸秆、有机生活垃圾等有机废弃物一起堆沤成农家肥,或转运至有机肥企业用于肥料生产。产生的粪液根据水质可直接或经过适当处理(利用灰水净化技术)后用来灌溉农田、果园、菜地、花园等,或进行其他类型的资源化利用。目前,湖北省襄阳市枣阳市南城街道的 17 个村或社区,河南省焦作市孟州市的 6 个乡镇、10 个行政村,浙江省衢州市衢江区的 10 个乡镇、20 个行政村和福建省宁德市周宁县泗桥乡的 12 个行政村等采用了此方式[48],人居环境得到极大改善。

2.3.2 灰水的资源化利用

灰水经过 2.2.2 小节的净化技术后,出水水质得到明显改善,结合各农村的实际需求进行资源化利用,其可能利用的途径可参照《城市污水再生利用 分类》(GB/T 18919—2002)[52],如表 3 所示。灰水在进行不同途径的资源化利用前需达到相应的再生水回用标准,根据该标准来选择或调整相应的灰水处理单元。

3 新模式的优势与不足

与现有农村污水处理模式相比,基于源分离收集-分质净化-资源化利用的处理新模式的优势有以下几点。

(1)因地制宜,符合农村污水实际特征

首先,农村地区的建筑以散居为主,大多为独门独户的低层建筑,导致其排水分布广且分散,适合建设分散式的污水处理系统。其次,农村公共厕所的排水系统与农户厨房的排水系统相分离,为源分离收集系统的推行提供了较好的实施条件。最后,农村生活污水中黑水和灰水水质差异较大,采用源分

表 3　净化后灰水的可能利用途径[52]

Tab. 3　Possible Utilization Ways of Grey Water after Purification[52]

用途分类	细目名称	范围	执行标准
补充水源	补充地表水	河流、湖泊	《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)
	补充地下水	水源补给、防止海水入侵、防止地面沉降	《城市污水再生利用　地下水回灌水质》(GB/T 19772—2005)
农、林、牧、渔业用水	农田灌溉	种籽与育种、粮食与饲料作物、经济作物	《农田灌溉水质标准》(GB 5084—2021)
	造林育苗	种籽、苗木、苗圃、观赏植物	
	农、牧场	兽药与畜牧、家畜、家禽	/
	水产养殖	淡水养殖	《渔业水质标准》(GB 11607—1989)
景观环境用水	娱乐性景观环境用水 观赏性景观环境用水 湿地环境用水	娱乐性景观河道、景观湖泊及水景 观赏性景观河道、景观湖泊及水景 恢复自然湿地、营造人工湿地	《城市污水再生利用 景观环境用水水质》(GB/T 18921—2019)

离收集-分质净化的系统可提高污水净化设施对污水的净化效率。

(2)就地回用,践行污水资源回用理念

根据当地农村居民的实际需求,对经过分质净化后的农村生活污水进行资源化利用,体现了“绿色、低碳、环保”的未来污水处理技术理念,促进了水资源及氮、磷等营养元素在自然界中的循环,是我国高质量发展的必然选择。

(3)创造收益,有效降低污水运维成本

农村地区经济力量有限,部分农村污水处理设施的运行效果不佳,是由于缺少相应的运维人员及资金。通过该模式净化后的污水部分用于居民灌溉农田、果园等,给污水处理带来收益,使污水处理变成了一项“正资产”,可极大地鼓舞居民对污水处理设施运维的热情,保障污水净化设施的长期稳定运行,有效降低污水处理的运维成本。

然而目前该模式仍存在一定不足:首先是相关研究仍停留在顶层设计阶段,实际工程案例较少,部分标准和规范尚未建立;其次是源分离单元将排水管道分为两路,施工过程中可能存在管网错接等问题,从而使黑水进入灰水的处理系统,或灰水进入黑水的处理系统,导致出水水质不达标或处理效率低等问题;最后是该模式适用范围有限,仅适用于农户较少且周边有资源化利用需求的地区,一旦农户较多或周边资源化利用需求不足,经该模式处理后的出水可能达不到相应的排放标准,具有一定的环境风险。

4　结论

(1)针对现有处理模式处理农村生活污水的诸多问题,考虑到黑水和灰水水质差异巨大,本研究提出一种基于源分离收集-分质净化-资源化利用的农村生活污水处理新模式。该模式具有因地制宜、绿色低碳、环保、可创造收益等优势。

(2)受农村天然条件和经济条件所限,污水源分离收集单元的核心是黑灰分离,可通过厨房、浴室排水管道与厕所排水管道的分离来实现。

(3)污水分质净化单元按照黑水和灰水水质的不同及后续资源化利用的需求选择对应的净化技术:黑水可通过化粪池或沼气池进行净化处理;灰水可通过生物法、生态法或生物与生态组合的方法净化处理。

(4)污水资源化利用单元将净化后的污水与农村的实际需求相结合,主要的资源化方式有生产肥料、生火照明、补充水源、农业、林业、牧业、渔业回用和景观回用等。

(5)新模式目前处于顶层设计阶段,工程实施案例少,缺乏部分标准和规范,适用范围有限,同时源分离管道易错接,上述问题仍有待进一步解决。

参考文献

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 2019 年城乡建设统计年鉴[EB/OL]. (2020-12-31)[2021-09-14]. http://www.mohurd.gov.cn/xytj/tjzljsxytjgb/jstjnj/.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Statistical yearbook of urban and rural development in 2019[EB/OL]. (2020-12-31)[2021-09-14]. http://www.mohurd.gov.cn/xytj/tjzljsxytjgb/jstjnj/.

[2] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. 农村生活污水处理工程技术标准: GB/T 51347—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the

People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. Technical standard for domestic wastewater treatment engineering of rural area: GB/T 51347—2019[S]. Beijing: China Standards Press, 2019.

[3] 张静, 石小峰, 侯红勋. 村镇生活污水处理偏大设计问题分析与对策[J]. 工业用水与废水, 2018, 49(2): 44-47.
ZHANG J, SHI X F, HOU H X. Analysis and countermeasures of overlarge problem in design of villages and towns domestic sewage treatment project[J]. Industrial Water & Wastewater, 2018, 49(2): 44-47.

[4] 余运红. 人居环境综合整治背景下农村生活污水处理工艺的选择[J]. 中国资源综合利用, 2019, 37(5): 61-63.
YU Y H. Selection of rural domestic sewage treatment process under the background of comprehensive improvement of human settlements environment[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2019, 37(5): 61-63.

[5] 张超. 基于铁基质生物载体的新型化粪池处理黑水[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
ZHANG C. Fecal sewage treatment by a novel functional septic tank strengthed by iron-based bio-carrier[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.

[6] 赵华. 两级厌氧-潜流湿地工艺处理南方丘陵地区农村庭院污水研究[D]. 北京: 中国环境科学研究院, 2013.
ZHAO H. The two stage anaerobic digestion-subsurface flow wetland process for the countyard sewage treatment in south hilly area[D]. Beijing: Chinese Research Academy of Environmental Sciences, 2013.

[7] 丁擎, 袁林江, 赵丙良, 等. 单室微生物燃料电池处理黑水产电试验研究[J]. 水处理技术, 2011, 37(12): 94-98.
DING Q, YUAN L J, ZHAO B L, et al. Electricity production of single chamber microbial fuel cell treating black water[J]. Technology of Water Treatment, 2011, 37(12): 94-98.

[8] PALMQUIST H, HANÆUS J. Hazardous substances in separately collected grey- and blackwater from ordinary Swedish households[J]. Science of the Total Environment, 2005, 348(1/2/3): 151-163. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2004.12.052.

[9] 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 F. Study on the greywater treatment technology of semi-centralized treatment system[D]. Shanghai: Tongji University, 2007.

[10] 李佳彬, 李路瑶, 刘雪, 等. 异位发酵床处理农村厕所黑水的效果研究[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(9): 1998-2005.
LI J B, LI L Y, LIU X, et al. Effect of ectopic microbial fermentation on the treatment of rural toilet black water[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2021, 40(9): 1998-2005.

[11] 杨本亮, 毕学军, 葛文杰, 等. 同步硝化反硝化强化黑水处理系统脱氮性能研究[J]. 水处理技术, 2017, 43(11): 116-120.
YANG B L, BI X J, GE W J, et al. Study on the enhancement of nitrogen removal in black water treatment system by simultaneous nitrification and denitrification[J]. Technology of Water Treatment, 2017, 43(11): 116-120.

[12] 陈洪斌, 陈伟华, 李辰, 等. 上流式厌氧污泥床反应器用于黑水预处理[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(6): 900-905.
CHEN H B, CHEN W H, LI C, et al. Anaerobic pretreatment of black water with up-flow anaerobic sludge blanket reactor[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2014, 42(6): 900-905.

[13] 刘阳春, 袁林江. 外循环 UASB 反应器处理黑水试验研究[J]. 中国给水排水, 2011, 27(21): 97-99, 104.
LIU Y C, YUAN L J. Research on blackwater treatment in external circulation UASB reactor[J]. China Water & Wastewater, 2011, 27(21): 97-99, 104.

[14] 陈伟华, 陈洪斌, 丁扣林. 悬浮填料生物膜反应器处理黑水的启动挂膜探讨[C]. 成都: 中国土木工程学会水工业分会全国排水委员会 2014 年年会论文集, 2014.
CHEN W H, CHEN H B, DING K L. Discussion on biofilm formation in black water treatment by suspended carrier biofilm reactor[C]. Chengdu: Proceedings of the 2014 Annual Meeting of the National Drainage Committee of the Water Industry Branch of China Civil Engineering Society, 2014.

[15] HOCAOGLU M S, INSEL G, COKGOR E U, et al. COD fractionation and biodegradation kinetics of segregated domestic wastewater: Black and grey water fractions[J]. Journal of Chemical Technology & Biotechnology, 2010, 85(9): 1241-1249. DOI: 10.1002/jctb.2423.

[16] VOORTHUIZEN E V, ZWIJNENBURG A, MEER V D W, et al. Biological black water treatment combined with membrane separation[J]. Water Research, 2008, 42(16): 4334-4340. DOI: 10.1016/j.watres.2008.06.012.

[17] JIN Z, LÜ C, ZHAO M, et al. Black water collected from the septic tank treated with a living machine system: HRT effect and microbial community structure[J]. Chemosphere, 2018, 210: 745-752. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2018.07.082.

[18] 张静, 唐贤春, 陈洪斌. 倒置 AAO-MBR 处理黑水[J]. 环境工程学报, 2016, 10(7): 3657-3663.
ZHANG J, TANG X C, CHEN H B. Black water treatment with process of reversed AAO-MBR[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(7): 3657-3663.

[19] 王明月. MBR 系统对黑水/灰水中污染物质处理效果研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2019.
WANG M Y. Study on the removal effect of contaminants in black water and gray water during MBR process[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2019.

[20] 杨淘. 电絮凝—重力流膜过滤(EC-GDM)对灰水的处理研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
YANG T. Electrocoagulation-gravity driven membrane system (EC-GDM) for greywater treatment[D]. Chongqing: Chongqing University, 2018.

[21] 吴昊. 宜兴市某小学雨灰水综合利用系统优化设计及处理效果研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2017.
WU H. Study on optimal design and treatment effect of comprehensive utilization system of rainwater and gray water in a primary school in Yixing [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2017.

[22] 潘伟亮, 李果, 秦宇, 等. 厌氧反应器/生态滤池处理农村生活灰水效果分析[J]. 中国给水排水, 2016, 32(11): 25-28.
PAN W L, LI G, QIN Y, et al. Treatment efficiency of rural grey wastewater by combined system of anaerobic reactor and vertical eco-filter[J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(11): 25-28.

[23] 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 Y Y, CHENG Y, CHEN H B. Research on gray water purification using MBR and BAF for domestic toilet flushing[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(2): 623-630.

[24] 陈建军, 席银, 廖再毅, 等. 水力负荷和气温对生态滤池处理农户灰水的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(10): 2012-2018.
CHEN J J, XI Y, LIAO Z Y, et al. Impacts of hydraulic loading rate and air temperature on eco-filter based treatment of greywater generated in a rural household[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2015, 34(10): 2012-2018.

[25] 陈建军, 雷玉新, 刘松, 等. 单个农户灰水的生态处理工艺设计与运行[J]. 中国给水排水, 2015, 31(5): 87-90.
CHEN J J, LEI Y X, LIU S, et al. Design and operation of ecological treatment process of gray water from industrial farmers[J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(5): 87-90.

[26] 唐世敏, 秦庆东, 钱元弟, 等. 水平潜流人工湿地处理住宅灰水技术研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2013, 35(s2): 146-150.
TANG S M, QIN Q D, QIAN Y D, et al. A study of residential grey water treated by subsurface horizontal constructed wetland [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2013, 35(s2): 146-150.

[27] 杨金刚. 三格厌氧池-垂直流人工湿地处理生活灰水技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2013.
YANG J G. The study of the combined three-chamber anaerobic reactor and vertical subsurface flow constructed wetland process for rural grey wastewater treatment [D]. Xi′an: Chang′an University, 2013.

[28] 郑向勇, 梁盈盈, 潘苏丹, 等. 地下渗滤系统处理灰水的水力负荷研究[J]. 中国给水排水, 2012, 28(21): 61-65.
ZHENG X Y, LIANG Y Y, PAN S D, et al. Treatment of grey water by subsurface infiltration system with different hydraulic loading[J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(21): 61-65.

[29] 董瑞海, 顾宝群, 张博雄, 等. 基于源分离的农村污水生态治理模式与技术[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(6): 209-212.
DONG R H, GU B Q, ZHANG B X, et al. Analysis on ecological control model and technology of rural wastewater based on source separation[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(6): 209-212.

[30] 尹文俊, 于振江, 徐悦, 等. 新型厕所系统及技术发展现状与展望[J]. 环境卫生工程, 2019, 27(5): 1-7.
YIN W J, YU Z J, XU Y, et al. New-type toilet system and current status and prospects of technologies[J]. Environmental Sanitation Engineering, 2019, 27(5): 1-7.

[31] 张奇誉, 刘来胜. 农村分散式生活污水源分离技术现状与发展趋势分析[J]. 中国农村水利水电, 2020(8): 20-24.
ZHANG Q Y, LIU L S. An analysis on the current situation and development trend of rural decentralized domestic sewage based on source separation technology[J]. China Rural Water and Hydropower, 2020(8): 20-24.

[32] 原林, 王宏哲, 盛连喜. 生态卫生系统的开发与应用——浅谈生态厕所的发展[J]. 中国资源综合利用, 2007(2): 30-33.
YUAN L, WANG H Z, SHENG L X. Development and application of ecological sanitation——Research progress of ecological toilet[J]. China Resource Comprehensive Utilization, 2007(2): 30-33.

[33] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 农村公共厕所建设与管理规范: GB/T 38353—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration. Specification for construction and management of public toilets in rural area: GB/T 38353—2019[S]. Beijing: China Standards Press, 2019.

[34] 刘俊良, 马放, 张铁坚. 村镇污水低碳控制原理与技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2016.
LIU J L, MA F, ZHANG T J. Low carbon control principle and technology of rural wastewater[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2016.

[35] 瞿燕, 叶少帆, 李承铭, 等. 村镇住区低碳规划和污废处理及新能源应用技术[M]. 上海: 同济大学出版社, 2016.
QU Y, YE S F, LI C M, et al. Low-carbon planning, sewage treatment and new energy application technology in villages and towns[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2016.

[36] 王曼如, 闫湘, 李秀英. 表面活性剂在农业中的应用及对水环境的危害[J]. 中国土壤与肥料, 2018(6): 11-15.
WANG M R, YAN X, LI X Y. The application of surfactants in agriculture and harm to the water environment[J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2018(6): 11-15.

[37] 李建军. 多段进水一体化污水处理设备处理农村污水[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2020, 40(23): 132-134.
LI J J. Multi-stage influent integrated sewage treatment equipment for rural wastewater treatment[J]. China Petroleum Chemical Standard and Quality, 2020, 40(23): 132-134.

[38] 龙宇涵, 刘东方, 田雨, 等. 2 级 AO-电解除磷组合工艺处理农村生活污水[J]. 水处理技术, 2021, 47(4): 96-100.
LONG Y H, LIU D F, TIAN Y, et al. Rural domestic sewage treatment by two-stage AO-electric dephosphorization combined process[J]. Technology of Water Treatment, 2021, 47(4): 96-100.

[39] 陈江杰, 贺雷蕾, 刘锐, 等. A^2O 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 J J, HE L L, LIU R, et al. Performance of A^2O facilities for rural domestic sewage treatment in Yangtze River Delta Plain[J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(9): 75-82.

[40] 谷静丽, 洪军, 张帆, 等. 厌氧-氧化沟工艺处理某农村乡镇污水工程设计[J]. 环境工程, 2014, 32(7): 40-42, 104.
GU J L, HONG J, ZHANG F, et al. Engineering design of anaerobic-oxidation ditch process for a municipal sewage treatment[J]. Environmental Engineering, 2014, 32(7): 40-42, 104.

[41] 周凯, 邓帮武, 雷春元, 等. SBR 法在农村生活污水处理设施改造中的应用[J]. 建设科技, 2021(7): 112-114.
ZHOU K, DENG B W, LEI C Y, et al. Application of SBR method in reconstruction of rural domestic sewage treatment facilities[J]. Construction Science and Technology, 2021(7): 112-114.

[42] 赵远哲, 董伟羊, 王海燕, 等. 芦竹-砾石 A/O 生物滤池对农村污水强化脱氮效能的研究[J]. 环境工程技术学报, 2020, 10(3): 424-432.
ZHAO Y Z, DONG W Y, WANG H Y, et al. Study on advanced nitrogen removal efficiency of *Arudo donax*-gravel A/O biofilter for rural sewage treatment[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2020, 10(3): 424-432.

[43] 于海阔, 李婷, 陈云龙. 农村生活污水处理一体化设备运行分析[J]. 环境科学导刊, 2020, 39(2): 63-66.
YU H K, LI T, CHEN Y L. Process analysis of integrated equipment for rural domestic sewage treatment[J]. Environmental Science Survey, 2020, 39(2): 63-66.

[44] 李贵亮, 鄂正阳, 张赞萍, 等. A/O 生物接触氧化处理农村生活污水研究[J]. 能源与环保, 2020, 42(8): 50-54.
LI G L, E Z Y, ZHANG Z P, et al. Study on A/O biological contact oxidation treatment of rural domestic sewage[J]. China Energy and Environmental Protection, 2020, 42(8): 50-54.

[45] 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, 67.
QIAO X D. Study on the effect of MBR process and constructed wetland in rural domestic sewage treatment[J]. Low Carbon World, 2021, 11(7): 63-64, 67.

[46] 付津宇. 生物滤池-水平潜流人工湿地组合工艺对农村生活污水处理效果评价——以上海市某镇为例[J]. 绿色科技, 2021, 23(12): 57-60.
FU J Y. Evaluation of the effect of the combined process of biological filter and horizontal subsurface flow constructed wetland on rural domestic sewage treatment——A case study of a town in Shanghai[J]. Journal of Green Science and Technology, 2021, 23(12): 57-60.

[47] 洪日辉, 杜青平, 谭剑扬, 等. 一体化设备+人工湿地系统应用于农村生活污水处理[J]. 山东化工, 2021, 50(6): 265-267.
HONG R H, DU Q P, TAN J Y, et al. Application of integrated equipment + constructed wetland system in rural domestic sewage treatment[J]. Shandong Chemical Industry, 2021, 50(6): 265-267.

[48] 农业农村部办公厅, 国家卫生健康委办公厅, 生态环境部办公厅. 关于印发《农村厕所粪污无害化处理与资源化利用指南》和《农村厕所粪污处理及资源化利用典型模式》的通知[EB/OL]. (2020-07-15)[2021-09-23]. http://www.moa.gov.cn/govpublic/ncshsycjs/202007/t20200715_6348652.htm.
General Office of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs, General Office of the National Health Commission, General Office of the Ministry of Ecology and Environment. Notice on printing and distributing the *Guidelines for the Innocent Treatment and Resource Utilization of Rural Toilet Manure* and the *Typical Model for the Treatment and Resource Utilization of Rural Toilet Manure*[EB/OL]. (2020-07-15)[2021-09-23]. http://www.moa.gov.cn/govpublic/ncshsycjs/202007/t20200715_6348652.htm.

[49] 国家发展改革委. 关于推进五水资源化利用的指导意见[EB/OL]. (2021-01-04)[2021-09-23]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202101/t20210111_1264794.html.
National Development and Reform Commission. Instruction on promoting the utilization of five water resources[EB/OL]. (2021-01-04)[2021-09-23]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202101/t20210111_1264794.html.

[50] 胡洪营. 聚焦矛盾 精准施策 全面提升污水资源化利用水平[J]. 给水排水, 2021, 57(2): 1-3.
HU H Y. Focusing on key issues and precise measures to comprehensively upgrade wastewater utilization[J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 57(2): 1-3.

(下转第 51 页)

purification of polluted water: Bridging fundamentals to applications [J]. Journal of Nanomaterials, 2013: 319637. DOI: 10.1155/2013/319637.

[67] FUJISHIMA A, HONDA K. Electrochemical photolysis of water at a semiconductor electrode[J]. Nature, 1972, 238: 37. DOI: 10.1038/238037a0.

[68] PRASAD A R, GARVASIS J, ORUVIL S K, et al. Bio-inspired green synthesis of zinc oxide nanoparticles using *Abelmoschus esculentus* mucilage and selective degradation of cationic dye pollutants[J]. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 2019, 127: 265-274. DOI: 10.1016/j.jpcs.2019.01.003.

[69] CHEN M, BAO C, HU D, et al. Facile and low-cost fabrication of ZnO/biochar nanocomposites from jute fibers for efficient and stable photodegradation of methylene blue dye[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2019, 139: 319-332. DOI: 10.1016/j.jaap.2019.03.009.

[70] QIU L, CUI Y, TAN X, et al. Construction of Ag_3PO_4/$Ag_4P_2O_7$ nanospheres sensitized hierarchical titanium dioxide nanotube mesh for photoelectrocatalytic degradation of methylene blue[J]. Separation and Purification Technology, 2019, 215: 619-624. DOI: 10.1016/j.seppur.2019.01.067.

[71] SERRÀ A, ZHANG Y, SEPÚLVEDA B, et al. Highly active ZnO-based biomimetic fern-like microleaves for photocatalytic water decontamination using sunlight[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2019, 248: 129 - 146. DOI: 10.1016/j.apcatb.2019.02.017.

[72] MAHANTHAPPA M, KOTTAM N, YELLAPPA S. Enhanced photocatalytic degradation of methylene blue dye using CuS-CdS nanocomposite under visible light irradiation [J]. Applied Surface Science, 2019, 475: 828 - 838. DOI: 10.1016/j.apsusc.2018.12.178.

[73] LI M, SONG C, WU Y, et al. Novel Z-scheme visible-light photocatalyst based on $CoFe_2O_4$/BiOBr/Graphene composites for organic dye degradation and Cr(Ⅵ) reduction [J]. Applied Surface Science, 2019, 478: 744 - 753. DOI: 10.1016/j.apsusc.2019.02.017.

[74] PRIYADHARSAN A, VASANTHAKUMAR V, SHANAVAS S, et al. Crumpled sheet like graphene based WO_3 - Fe_2O_3 nanocomposites for enhanced charge transfer and solar photocatalysts for environmental remediation[J]. Applied Surface Science, 2019, 470: 114-128. DOI: 10.1016/j.apsusc.2018.11.130.

[75] 肖雪峰, 张雁秋. 染料废水脱色方法[J]. 江苏环境科技, 2000, 13(3): 41-46.
XIAO X F, ZHANG Y Q. Decoloration method of dyeing sewage [J]. Jiangsu Environment Technology, 2000, 13(3): 41-46.

[76] 章飞芳. 化学氧化活性染料及其降解机理的研究[D]. 大连: 中科院大连化学物理研究所, 2003.
ZHANG F F. Chemical oxidation of azo reactive dye and investigation of the reaction mechanism [D]. Dalian: Dalian Institute of Chemical Physics Chinese Academy of Sciences, 2003.

[77] SAMSAMI S, MOHAMADIZANIANI M, SARRAFZADEH M H, et al. Recent advances in the treatment of dye-containing wastewater from textile industries: Overview and perspectives [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2020, 143: 138-163. DOI: 10.1016/j.psep.2020.05.034.

[78] 陈念娟, 雷铁军. 生物吸附+化学混凝法在处理印染废水中应用[J]. 山西建筑, 2010, 36(20): 166-167.
CHEN N J, LEI T J. On application of biological absorption and chemical coagulation process in treatment of printing and dyeing wastewater[J]. Shanxi Architecture, 2010, 36(20): 166-167.

[79] 蔡东倩, 张茜芸. 微电解-高级氧化-生物处理化工废水工程应用[J]. 广东化工, 2020, 47(20): 59-60.
CAI D Q, ZHANG X Y. Treatment of chemical wastewater by micro-electrolysis-advanced oxidation-biological process [J]. Guangdong Chemical Industry, 2020, 47(20): 59-60.

(上接第 13 页)

[51] 生态环保部, 国家市场监督管理总局. 农田灌溉水质标准: GB 5084—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
Ministry of Ecology and Environment, State Administration for Market Regulation. Standard for irrigation water quality: GB 5084—2021[S]. Beijing: China Standards Press, 2021.

[52] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 城市污水再生利用 分类: GB/T 18919—2002[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. The reuse of urban recycling water—Classified standard: GB/T 18919—2002 [S]. Beijing: China Standards Press, 2002.