



移动扫码阅读

顾浩, 梁文伯, 李永木, 等. 农村生活污水处理与资源化利用及新污染物控制探讨[J]. 能源环境保护, 2024, 38(1): 181-190.

GU Hao, LIANG Wenbo, LI Yongmu, et al. Situation of treatment and resource utilization of rural domestic sewage and discussion of emerging contaminants[J]. Energy Environmental Protection, 2024, 38(1): 181-190.

# 农村生活污水处理与资源化利用及新污染物控制探讨

顾浩<sup>1</sup>, 梁文伯<sup>2</sup>, 李永木<sup>1</sup>, 杨小丽<sup>2</sup>, 宋海亮<sup>1,\*</sup>

(1. 南京师范大学环境学院, 江苏南京 210023; 2. 东南大学土木工程学院, 江苏南京 211189)

**摘要:** 推动农村生活污水治理资源化利用是实现我国农村人居环境整治提升的重要举措。近年来,我国农村生活污水治理越来越关注到农村实际情况,并开始将治理思路由污水治理向资源化利用转变,追求简单高效可持续的治理模式。然而,农村生活污水中新污染物的出现也给资源化利用过程带来了一些风险和问题。基于此背景,总结了当前我国农村生活污水资源化利用的三种模式,分别是尾水灌溉模式、经济作物种植模式和灰黑分离模式。重点介绍了人工湿地技术中的种植模式中以及湿地经济作物的选择。针对农村地区不同的人居环境和农田消纳面积,提出了不同类型的灰黑分离模式。根据农村生活污水中微塑料和抗生素等新污染物的出现,讨论分析了农村生活污水资源化利用的发展方向。

**关键词:** 农村生活污水; 资源化利用; 人工湿地; 灰黑分离; 新污染物

中图分类号: X703

文献标识码: A

文章编号: 1006-8759(2024)01-0181-10

## Situation of treatment and resource utilization of rural domestic sewage and discussion of emerging contaminants

GU Hao<sup>1</sup>, LIANG Wenbo<sup>2</sup>, LI Yongmu<sup>1</sup>, YANG Xiaoli<sup>2</sup>, SONG Hailiang<sup>1,\*</sup>

(1. School of Environment, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China;

2. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

**Abstract:** Promoting the resource utilization of rural domestic sewage is an important measure to improve the living environment in rural areas in China. In recent years, there has been an increasing focus on addressing the actual conditions in rural domestic sewage treatment. The treatment approach has shifted from sewage treatment to resource utilization, aiming for a simple, efficient, and sustainable treatment model. However, the emergence of new contaminants in rural domestic sewage poses risks and challenges to the process of resource utilization. Against this background, this study summarizes three current modes of resource utilization in rural domestic sewage treatment in China: Effluent irrigation, economic crop cultivation, and gray-black separation. The planting modes and the selection of wetland economic crops in the artificial wetland technology are highlighted. Various types of gray-black separation techniques are proposed based on variations in living environments and absorption capacities in rural areas. Furthermore, the presence of emerging contaminants such as microplastics and antibiotics in rural domestic sewage is considered. The study discusses and analyzes the development direction of resource utilization in light of these contaminants.

**Keywords:** Rural domestic sewage; Resource utilization; Gray black separation mode; Constructed wetland; Emerging contaminants

收稿日期: 2023-11-28

DOI: 10.20078/j.eep.20231208

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52070101); 江苏省生态环境科研资助项目(2022005)

作者简介: 顾浩(1999—), 男, 江苏泰州人, 硕士研究生, 主要研究方向为农村生活污水处理技术和理论。E-mail: guhao990724@163.com

通讯作者: 宋海亮(1979—), 男, 江苏泰兴人, 教授, 主要研究方向为水污染控制和水环境生态修复。E-mail: hlsong@njnu.edu.cn

## 0 引言

根据《2021 城乡建设统计年鉴》的数据显示,我国 2021 年对生活污水进行处理的乡村仅占 36.94%。大量未经处理的生活污水无序排放到农村地表水中,给当地生态环境和村民身体健康带来了严重威胁<sup>[1]</sup>。随着乡村振兴战略和建设宜居宜业乡村目标的持续推进,农村生活污水治理已经成为了农村人居环境整治提升的突出短板,亟待解决。《“十四五”推进农业农村现代化规划》中重点提出“以乡镇政府驻地和中心村为重点梯次推进农村生活污水治理,积极探索资源化利用方式”<sup>[2]</sup>。

农村生活污水主要来源于村民日常生活中的厨房用水、厕所用水、洗涤用水和沐浴用水<sup>[3]</sup>。与城市生活污水不同,农村生活污水的特殊性在于排放来源多且分散、水质水量波动较大、收集难度大<sup>[4]</sup>等。这些特殊性导致农村生活污水的治理更加困难,传统的污水处理模式没有针对农村的实际情况,处理效果不稳定,远不能达到预期效果。随着实践的深入,越来越多的人意识到农村生活污水的治理不能简单套用城镇污水处理厂的工艺和方法,要拓展更加细化、适应性更强的污水治理模式,要按照简单、经济、可持续运行的原则去规划,因地制宜,利用为先。

近年来,就地就近资源化利用的理念被不断提出且得到广泛认可。农村生活污水的处理目的逐渐从减少污染物负荷过渡到资源化利用,污水回用等资源化利用方式已经成为了很多地区污水治理的最佳选择。国家发展改革委和生态环境部等十部委联合印发了《关于推进污水资源化利用的指导意见》(发改环资〔2021〕13号),其中明确提到“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”<sup>[5]</sup>。因此,资源化利用已经成为了农村生活污水治理的有效举措和未来发展的必然趋势。然而现阶段我国农村生活污水资源化利用的模式才刚刚起步,资源化利用路径尚不清晰,综合利用率不高,还难以实现全面推广和落实<sup>[6]</sup>。另外,近些年的研究中,农村生活污水中也检测到一些新污染物,如抗生素和微塑料等,对其资源化利用存在潜在的生态风险。在资源化利用过程中,有关新污染物的研究还相对缺乏,新污染物产生的具体影响还需要进一步分析。因此,本文梳理

了农村生活污水资源化利用的理念,总结了当前我国农村生活污水资源化利用的模式,介绍了其中相关的工艺技术和应用模式。最后,本文分析了新污染物带来的生态风险和资源化利用未来发展方向,以期为推动农村生活污水治理实现资源化利用提供参考思路。

## 1 农村生活污水资源化利用理念

污水资源化利用理念不同于传统意义上污水处理思路,它将污水视作一种可再生资源,将污水处理的目的由减少污染负荷转变为资源回收,体现可持续和循环利用的理念<sup>[7]</sup>。目前,污水处理中常见的资源化利用方式集中在回收能源、水和营养物质三个方面。在能源方面,厌氧消化技术可以生产沼气燃料。在水回收方面,雨水可以收集回用,再生水可以作为工业、农业、林业和景观用水等,不同类型的水回用需要达到不同的水质标准<sup>[8]</sup>。污水中氮、磷、钾等营养物质,可通过堆肥等方式重新利用到种植业中。

在农村地区,生活污水资源化利用的方式更加简单,可以和当地农业紧密结合。吕锡武<sup>[9]</sup>提出,农村生活污水治理应该结合农业生产,将污水中氮、磷资源变废为宝,作为农田肥料实现资源化利用。侯怀恩等<sup>[10]</sup>认为农业灌溉是农村生活污水资源化利用的适宜途径。这种将污水处理和农业生产结合的农村生活污水资源化利用模式,在我国具有较高的可行性。首先,我国农村地区有丰富的土地资源和发达的种植业,具备强大的氮、磷营养盐接纳能力。其次,农村生活污水成分简单,氮、磷浓度较高<sup>[4]</sup>,处理后的尾水满足灌溉的水质条件,更易实现资源化利用。将生活污水的治理和农村当地农业种植业相融合,可以更好地实现污水就地就近处理和资源化利用,紧密结合当地的生态环境,达到人与自然可持续的良性循环。

目前我国农村生活污水资源化利用的研究和工程实践仍然处在探索和起步阶段。董丽伟等<sup>[11]</sup>统计了 1999—2019 年农村生活污水治理的相关论文发表情况,资源化利用相关论文只占其中的 5.5%。梁文伯等<sup>[12]</sup>对 2001—2021 年主题为农村生活污水的核心期刊进行了数据分析,显示资源化、保氮保磷等关键词在 2018—2021 年才频繁出现。这说明与农业生产相结合的农村生活污水资源化利用虽然得到不少的关注,但相关的研

究还十分匮乏,资源化利用的模式和技术还有待完善和创新。

## 2 农村生活污水资源化利用模式

目前,常见的农村生活污水资源化利用模式主要分为三类:尾水灌溉模式、经济作物种植模式、灰黑分离模式。

### 2.1 尾水灌溉模式

尾水灌溉模式是指农村生活污水经过简单处理后,尾水达到《农田灌溉水质标准》(GB 5084—2021),作为农业灌溉用水使用,典型工艺流程如图1所示。这种模式通过尾水灌溉的方式将生活污水转变为农业生产需要的灌溉水和肥料,实现

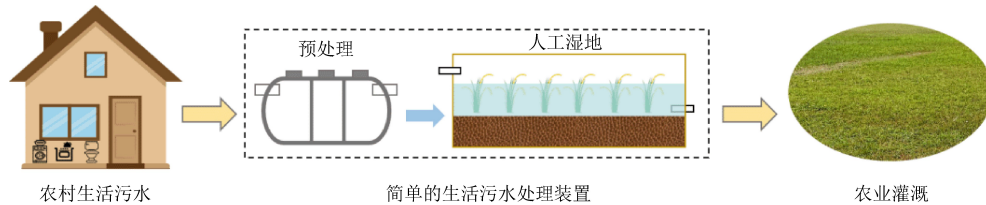


图1 尾水灌溉模式流程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of tail water irrigation mode

### 2.2 经济作物种植模式

经济作物种植模式的核心是将污水处理中生态单元的植物用经济作物替代,构建污染净化型农业,典型工艺流程如图2所示。前段的生物处理单元主要承担去除农村生活污水中有机物和氨氮等还原性污染物,后段的生态处理单元可以利用上一阶段保留的氮磷资源种植蔬菜和花卉等多种经济作物。在处理生活污水的同时,也能产生经济效益,一定程度上降低了农村生活污水处理设施运行的成本。陶昱明等<sup>[16]</sup>研究的“AO滤池+人工湿地”生物生态组合工艺,在湿地种植水生蔬菜的方式同步实现污水处理和资源化利用。这种

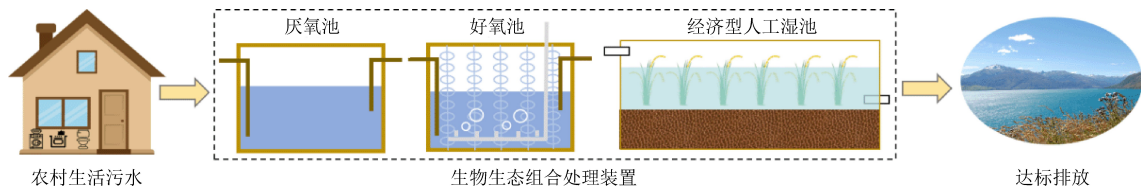


图2 经济作物种植模式流程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of cash crop planting mode

#### 2.2.1 生态处理单元

农村生活污水处理的生态单元通常有人工湿地、稳定塘、生态沟渠和土壤渗滤等,其中应用最广泛的是人工湿地技术。ZHONG等<sup>[19]</sup>对农村生活污水的文献进行可视化关键词分析时发现,人

了变废为宝的过程,符合资源化利用的要求。美国、日本和俄罗斯等国家,很多乡村地区污水处理后的尾水都应用在农业灌溉领域。在我国北方缺水干旱地区,污水灌溉也已经被大面积采用。张佳杰等<sup>[13]</sup>在安徽农村地区构建资源化示范工程,处理装置的尾水就用于农田灌溉。马如龙等<sup>[14]</sup>通过尾水灌溉的田间试验,发现尾水灌溉可以改良土壤,增加土地肥力。然而尾水灌溉也存在一些问题,如污水连续产生和间歇农业灌溉形成的时间差异。另外,尾水灌溉对农田环境安全性的影响还不明确,张丹丹等<sup>[15]</sup>研究发现尾水中的盐分会影响土壤水分的有效性和微生物群落的多样性。

模式优势明显,可以根据农村生活污水资源化利用需求将多种处理技术组合,因地制宜,形成一套生态效益和经济效益完善结合的污水处理流程<sup>[17-18]</sup>。另外,这种模式还可以将组合工艺和农业灌溉相结合,更加安全且可以精确满足农业需求的灌溉用水。目前,这种模式下面临的普遍问题是生态单元冬季运行效果较差,一般解决方法是添加保温措施,搭建塑料暖棚可以有效地保证出水达到处理标准。另外,组合工艺中生物单元和生态单元如何更高效地耦合以及生态处理单元中经济作物的选择,都值得进一步探索。

工湿地是处理技术中使用频率最高的。人工湿地技术基于农村当地的自然环境处理生活污水,在资源化利用模式中可以与农业相结合,用农村当地的经济作物代替传统湿地植物,实现污水中氮、磷资源化利用的同时获得一定经济效益。环境效



益和经济效益充分融合的人工湿地技术与农村简单、经济和可持续的技术需求高度契合。

人工湿地主要通过湿地植物、微生物和基质三者的共同作用实现污水的处理净化<sup>[20]</sup>。根据湿地中水流的分布和流动形式,人工湿地主要分为表面流人工湿地、水平潜流湿地、垂直潜流湿地和复合人工湿地等。表面流人工湿地发展最早,有较浅的自由水面。水平潜流人工湿地中添加了多孔透水基质,污水在基质中水平方向流动,植物在表面生长。垂直潜流人工湿地从表面进水,底部排水,纵向上增加深度,延伸了污水处理流程。单一形式的湿地处理污水存在一定的局限性,因此探索出了多种形式人工湿地联合的复合人工湿地,如硝化较好的下行潜流湿地和反硝化较好的上行潜流湿地串联组合形成的复合垂直流人工湿地,使用简单,脱氮效果具有明显优势<sup>[21]</sup>。

### 2.2.2 人工湿地经济作物的选择

人工湿地经济作物的选择在资源化利用中有至关重要的作用,决定了一部分的生态效益和大部分的经济效益。湿地中经济作物可以直接吸收利用污水中的氮、磷营养盐,也可以通过根系影响微生物的群落结构<sup>[22]</sup>,主要的经济效益就是收割的经济作物。人工湿地经济植物的选择可以从多个方面进行考虑,如营养盐吸附能力、植物的环境适应力、根系发达程度和作物经济价值等。筛选出具有高氮磷吸附能力和高经济价值的湿地植物

是提高经济作物种植模式资源化利用效率的关键。何俊乐等<sup>[23]</sup>研究指出,筛选湿地植物时,在考虑一定生态效应的基础上,应优先挑选生物量大、根系发达、收获次数多、经济效益高的作物。徐丽等<sup>[24]</sup>在研究种植型人工湿地时发现,由于潜流湿地内污染物的去除集中在湿地前端,可以将粮食作物如水稻、小麦等种植在湿地前端来保证粮食作物的收成,而将根系发达、生物量大的其他植物种植于湿地后端,保证出水水质达标。结合农村当地的实际情况,在土地资源丰富的地区,湿地内适宜种植生物量大、经济效益高的水生蔬菜,而在耕地较为紧张的地区,湿地植物可以更多地选择粮食作物。

种植水生蔬菜型的人工湿地,可种植水芹、韭菜、番茄、茼蒿、空心菜等。研究者们对水生蔬菜的氮磷吸收效果进行研究,以期在湿地中得到更好的植物搭配。陶昱明等<sup>[16]</sup>研究发现,生菜、水芹、韭菜、番茄为喜硝类植物,小叶茼蒿、空心菜、菠菜为喜铵类植物。另外,湿地植物也可以选择经济性花卉。檀香逸等<sup>[25]</sup>在用人工湿地处理农村生活污水时,选择了种植绿萝、白掌、观音竹和发财树,污水处理效果良好。饲草型作物在近年来也被选择用于人工湿地,如菌草、皇竹草、甜象草等<sup>[26]</sup>。本文对长三角地区种植不同湿地植物类型的人工湿地进行了梳理,比较了氮磷处理效果和经济收益,见表1。

表1 不同植物类型湿地的比较

Table 1 Comparison of wetlands with different plant types

湿地植物类型	代表植物	湿地去除效果		湿地收益(元/亩)
		TN	TP	
水生蔬菜	空心菜、水芹等	一级 A	一级 B	14 352~15 496
禾草	水稻、黑麦草等	一级 A	一级 B	828~936
观赏型植物	观音竹、发财树等	一级 A	一级 B	48 333
饲草型植物	巨菌草、皇竹草等	一级 A	一级 B	2 753~15 520
芳香型植物	薄荷、香根草等	一级 B	一级 A	24 000~72 000

### 2.3 灰黑分离模式

农村生活污水中黑水主要来自农户厕所的冲厕水,包含尿液、粪便等污染物的混合液,灰水则是黑水之外的其他生活排水,包含厨房、洗衣、淋浴等日常产生的生活污水<sup>[27]</sup>。黑水、灰水的水质水量特征对比见表2。黑水部分水量较小,却是生活污水中有机物和氮磷的主要来源,还含有大量病原微生物,而灰水部分受污染程度较轻,水量占

生活污水总量的70%以上<sup>[28-29]</sup>。农村生活污水黑灰分离后,单独收集的黑水可因地制宜的进行资源化利用。通过厌氧发酵无害化的处理方式,将黑水转化成高效有机肥,实现化肥的部分替代,起到改良土壤和农业增产的作用。受污染程度较轻的灰水则可以进入简单的污水处理设施,再进行灌溉或回用。

表 2 黑水、灰水水质水量特征

Table 2 Water quality and quantity characteristics of black water and gray water

水质类别	来源	特点	COD	TN	TP
黑水	厕所粪便、尿液及冲厕水	有机物和氮磷浓度高,水量较小,约占 10%~30%	50%~70%	80%~90%	70%~80%
灰水	厨房、洗衣、淋浴用水	受污染程度轻,易于处理和再生,水量较大,约占 70%~90%	30%~50%	10%~20%	20%~30%

### 2.3.1 灰黑分离模式的典型工艺流程

灰黑分离模式是指农村生活污水中灰水和黑水通过源分离方式收集后,再根据水质差异和村民不同的实际需求选择相应的净化处理技术,最后进行合适的资源化利用,典型的工艺流程如图 3 所示。农村生活污水源分离后,污染物浓度较高的黑水一般采用厌氧生物处理法,如进入沼气池后可以产生沼气、沼液和沼渣,进入化粪池后可以转化为肥料;污染物浓度较低的灰水部分进行相对简单的生物或生态处理后可以补充水源,也可以作为农、林、牧、渔业用水<sup>[30]</sup>。这种模式在污染

源头进行了分离收集,根据资源化利用的需求选择相对应的污水处理净化技术,既符合农村生活污水的实际特征,又提高了污水处理效率,可以科学高效地完成资源化利用目标,符合可持续发展的理念。目前这种基于资源化利用的农村生活污水源分离处理模式的研究还不够深入,存在问题,如实际工程案例匮乏,标准和规范不够完善,对当地污水源头的管道收集系统要求较高等,导致该模式适用范围有限,然而随着我国“厕所革命”的开展,黑灰分离资源化利用模式将有较大的应用前景。

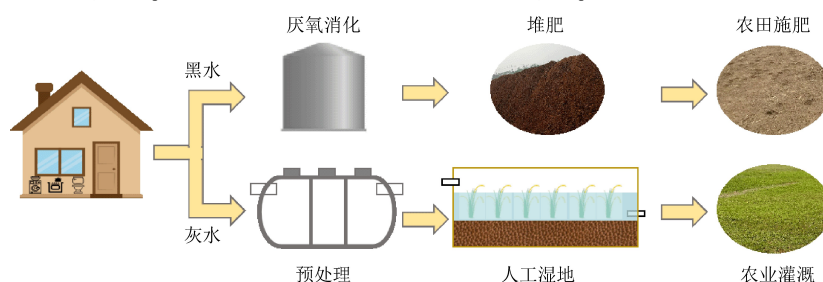


图 3 灰黑分离模式流程示意图

Fig. 3 Schematic diagram of gray black separation mode

### 2.3.2 灰黑分离模式的应用

灰黑分离模式可以同步实现黑水无害化后资源化利用和简化灰水处理工艺,有利于农村生活污水的高效处理与资源化利用。针对目前农村实际情况,考虑住宅分布特性以及有无消纳利用土地,可以分成三种应用模式,如图 4 所示。

#### (1) 单户自用

针对人口密度较低,居住相对分散的村落,这一模式不需要修建集中式污水管网,如图 4(a)所示。黑水经过高效厌氧发酵后沼液还田进行资源化利用,而灰水可以简单沉淀后,直接采用人工湿地或生态沟渠进行处理,大幅简化了污水处理设施。

#### (2) 集中生态处理(有消纳用地)

针对村民居住相对集中,并且有一定消纳土地的村落,黑灰分离资源化利用模式应用如图 4(b)所示。黑水可以进行无害化处理,用于自留地或菜地的施肥。灰水则集中收集,进入村庄的污

水处理设施,统一进行排放或者再利用。

#### (3) 集中收集处理(无消纳土地)

针对村民居住集中密集,房屋前后缺乏消纳用地的村落,黑灰分离资源化利用模式应用如图 4(c)所示。黑水和灰水分别进行集中收集处理,黑水进行堆肥发酵后可以回用到农业或者林业,灰水经过组合工艺处理后可以达标排放或再利用。

## 3 新污染物的产生与去除

目前,农村生活污水的治理主要关注 COD 和氮磷等常规污染物和病原体的去除,而对新污染物的研究较少。近年来,随着农村生活水平提高,各种药物、抗生素和化妆品等物品的使用增多,部分农村生活污水中有检测到抗生素和微塑料等新污染物<sup>[31-32]</sup>。虽然这些新污染物在污水中含量不高,但是当它们随污水排放入湖泊河流或回用至农田时,可能会对生态环境和人类身体健康构成威胁。YANG 等<sup>[33]</sup>研究发现,污水处理厂排水

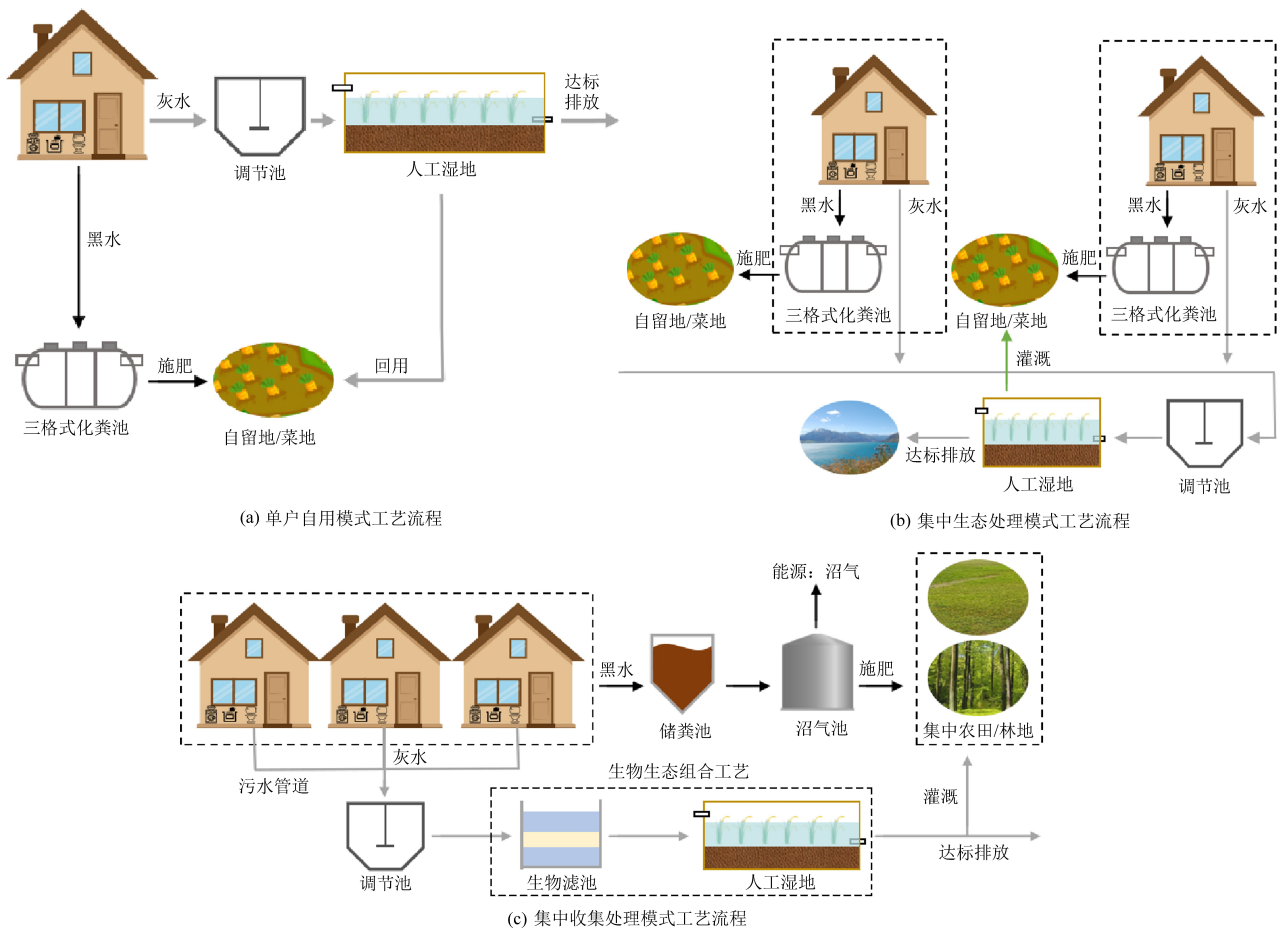


图4 灰黑分离模式应用示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the application of gray black separation mode

口附近的卡马西平、氧氟沙星和红霉素等污染物会对大多数水生生物(如藻类、鱼类和植物)造成较高的生态风险。

在我国很多农村地区,三格式化粪池和沼气池被广泛应用于处理个人住宅的生活污水或粪便污水,但是它们对污染物的处理效果较差,会成为污染物、病原体、抗生素和抗生素耐药基因(ARGs)的潜在来源<sup>[34-35]</sup>。人体中未被利用的抗生素会通过粪便和尿液排出体外进入污水处理系统,导致处理系统中 ARGs 的累积<sup>[36]</sup>。农村生活污水中抗生素类型与城市污水中的差异不大,但各种类型丰度不同,这可能是污水中抗生素来源不同导致的。城市污水中有较多氟喹诺酮类药物,多数来源于医院。对畜禽养殖业发达的农村地区来说,生活污水中用作饲料添加剂和抗菌药物的四环素和磺胺类抗生素含量较多<sup>[35]</sup>。当农村生活污水进行资源化利用(农业肥料或灌溉用水)时,ARGs 会一起被释放到农田环境中,并通过食物链传递,给人类和动物带来健康风险。因此,农村生活污水或化粪池出水应该避免直接用于农

业灌溉。目前,很多农村生活污水处理设施都能对 ARGs 有一定去除能力,如曝气生物滤池和人工湿地等。CHEN 等<sup>[37]</sup>研究发现,人工湿地系统可以有效去除抗生素和抗性基因,去除率可以达到 73%~94%,并且,人工湿地系统在去除污水中类固醇激素和杀虫剂方面也非常有效,微生物、基质和植物是湿地去除污染物的主要贡献者<sup>[38]</sup>。湿地中每个植物根系都被认为是一个微好氧/缺氧生物处理系统,可以促进 ARGs 的去除<sup>[39]</sup>。然而,湿地系统去除农村生活污水中 ARGs 的机理有待进一步研究。MA 等<sup>[35]</sup>对农村生活污水中 ARGs 的影响因子进行相关性分析发现,总有机碳(TOC)与多数 ARGs 呈显著相关。因此,尽可能消除生活污水中 TOC 可能是降低 ARGs 污染风险的有效途径。

微塑料在我国水体环境中广泛存在,不论是海洋还是内地城市和乡村地区的湖泊河流<sup>[40]</sup>。部分塑料材料本身就含有毒性,并且微塑料吸附污水中有毒有害的化学物质,导致微塑料不仅是有毒有害物质的运输介质,还是潜在的污染



源<sup>[41-42]</sup>。当微塑料进入自然水体后,很容易被水生生物食用,严重危害其生长繁殖,甚至微塑料还可以通过食物链威胁人类身体健康<sup>[43-44]</sup>。微塑料对农作物也会造成很大危害。LI 等<sup>[45]</sup>对聚苯乙烯微塑料在小麦幼苗中进行跟踪试验,发现微塑料会在根的木质部进行积累,然后沿茎部向上移动,并且微塑料还会降低小麦根系的水导率,抑制小麦根茎的生长,降低小麦的光合活性,造成严重的氧化损伤。因此,微塑料会对农业灌溉造成很大影响,提高微塑料的去除效率是农村生活污水资源化利用的必然要求。农村生活污水中微塑料主要来源是粪便污水和洗衣水,显微镜下的形状多是纤维和片状,颜色倾向于白色和蓝色,颗粒

尺寸偏小(<1 mm)<sup>[46]</sup>。微塑料的形状、尺寸和类型在很大程度上影响污水处理设施对它的去除效率。大尺寸微塑料在厌氧工艺中去除效果最好,片状微塑料更容易被去除,纤维状则较难被去除。农村地区微塑料的去除效率远低于城市污水处理厂,两者差异见表3。对于农村分散式生活污水处理设施,微塑料的去除效果更差。农村地区的人工湿地系统对微塑料的去除率只在50%左右<sup>[41]</sup>。同时,微塑料的存在还会影响湿地系统中的微生物和植物,导致湿地系统对污染物去除效果变差。目前,微塑料和抗生素在农村生活污水治理中还未得到足够的关注,这些新污染物的生态毒性和去除机制可能是未来研究方向之一。

表3 不同地区城市与农村污水处理中微塑料去除差异

Table 3 Differences of microplastic removal in urban and rural wastewater treatment in different regions

城市	地区	进水/(个/升)	出水/(个/升)	去除效率/%
南京 <sup>[47]</sup>		41.00	3.000	92.60
北京 <sup>[48]</sup>		12.03±1.29	0.590±0.200	95.16
西安 <sup>[49]</sup>	城市	288.50±32.80	22.900±7.200	92.10
无锡 <sup>[50]</sup>		5.60	0.168	97.00
哈尔滨 <sup>[51]</sup>		126.00±14.00	30.600±7.800	75.70
杭州 <sup>[41]</sup>		—	—	65.20~82.30
长沙 <sup>[32]</sup>	农村	70.00±18.67	19.330±1.250	72.38

#### 4 结论与展望

因地制宜,推进农村生活污水减量化、资源化、循环利用是必然趋势。农村生活污水资源化利用的最佳途径是与农村农业生产相结合,把污水治理和实际农业紧密结合,实现人与自然的良性循环。基于农村生活污水处理和资源化利用模式分析,本文归纳了如下的结论与展望。

(1)农村生活污水资源化利用的三种模式:尾水灌溉模式、经济作物种植模式、灰黑分离模式。尾水灌溉模式工艺简单,适用于农田广阔的地区。经济作物种植模式依赖于农村地区的自然生态,适用于气候宜人,出水水质要求较高的地区。灰黑分离模式需要源分离的管道,适合基础设施的建设较为完善的地区。

(2)灰黑分离模式与乡村“厕所革命”相契合,可能成为农村高效低耗资源化治理的破题之策。黑水和灰水分离后,不仅可以简化工艺,降低污水处理难度,还可以针对性进行资源化利用,提高利用效率。随着我国农村改厕的进行,未来农村生活污水资源化利用可能优先采取灰黑分离这

种模式。在灰黑分离模式下,前端如何对黑水进行更加高效的收集,降低黑水水量,终端资源化利用方式和产品处理都有必要进一步探索。

(3)抗生素和微塑料等新污染物的出现可能给生活污水资源化利用带来了一些困难,特别是在尾水灌溉时。在对农村生活污水进行资源回收和废水回用的过程中,新污染物对自然环境和人体健康的影响还需要长时间观测和深层次研究。农村污水处理设施对新污染物的去除效果还有待优化,去除机制也需要进一步探索。

#### 参考文献(References):

- [1] 赵兵,王玉云,杨平,等.农村生活污水治理的现状、难点及对策研究——以四川省雅安市为例[J].环境与可持续发展,2021,46(6):91-97.  
ZHAO Bing, WANG Yuyun, YANG Ping, et al. Current situation, difficulties and countermeasures of rural domestic sewage treatment: Case study of Ya'an City, Sichuan province[J]. Environment and Sustainable Development, 2021, 46(6): 91-97.
- [2] 中华人民共和国中央人民政府.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].(2021-3-13)[2022-03-19].<https://www.gov.cn>

- cn/xinwen/2021-03/13/content\_5592681.html.
- [3] 程方奎, 巩子傲, 汪思宇, 等. 农村生活污水低耗资源化处理工艺应用[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2020, 50(6): 1076-1083.  
CHENG Fangkui, GONG Ziao, WANG Siyu, et al. Application of low-consumption resource-recovery process for rural domestic sewage treatment[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2020, 50(6): 1076-1083.
- [4] 张鸣鸣, 于法稳. 农村生活污水治理多元主体参与路径及对策研究——以河南省为例[J]. 生态经济, 2023, 39(5): 196-203.  
ZHANG Mingming, YU Fawen. Research on the path and countermeasures of multi subject participation in rural domestic sewage treatment: A case study of Henan province[J]. Ecological Economy, 2023, 39(5): 196-203.
- [5] 国家发展和改革委员会, 科学技术部, 工业和信息化部, 等. 关于推进污水资源化利用的指导意见: 发改环资[2021]13号[EB/OL]. (2021-01-04) [2021-12-09]. [https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202101/t20210111\\_1264795\\_ext.html](https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202101/t20210111_1264795_ext.html).
- [6] 付浩, 闫海, 邱长浩. 人口密集地区农村生活污水治理若干问题探讨[J]. 给水排水, 2020, 56(9): 9-14.  
FU Hao, LYU Hai, QIU Changhao. Discussion on several problems of rural domestic sewage treatment in densely populated areas[J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 56(9): 9-14.
- [7] DIAZ ELSAYED N, REZAEI N, GUO Tianjiao, et al. Wastewater-based resource recovery technologies across scale: A review[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2019, 145: 94-112.
- [8] MONTWEDI M, MUNYARADZI M, PINOY L, et al. Resource recovery from and management of wastewater in rural South Africa: Possibilities and practices[J]. Journal of Water Process Engineering, 2021, 40: 101978.
- [9] 吕锡武. 可持续发展的农村生活污水生物生态组合治理技术[J]. 给水排水, 2018, 54(12): 1-5.
- [10] 侯怀恩, 王子强, 赵风兰. 农村生活污水适度处理与资源化利用[J]. 地域研究与开发, 2012, 31(6): 119-122.  
HOU Huaien, WANG Ziqiang, ZHAO Fenglan. Moderate treatment and resourcing utilization of rural moderate water[J]. Areal Research and Development, 2012, 31(6): 119-122.
- [11] 董丽伟, 张伟, 白璐, 等. 我国农村生活污水资源化利用现状及模式分析[J]. 环境工程技术学报, 2022, 12(6): 2089-2094.  
DONG Liwei, ZHANG Wei, BAI Lu, et al. Analysis on current situation and model of resource utilization of rural sewage in China[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2022, 12(6): 2089-2094.
- [12] 梁文伯, 徐佳莹, 杨小丽, 等. 农村生活污水研究热点及主题演进的可视化分析[J]. 净水技术, 2023, 42(4): 14-22, 78.  
LIANG Wenbo, XU Jiaying, YANG Xiaoli, et al. Visualization analysis of research hotspots and thematic evolution for rural domestic wastewater treatment [J]. Water Purification Technology, 2023, 42(4): 14-22, 78.
- [13] 张佳杰, 吴磊, 李先宁, 等. 氮磷无机化反应器应用于农村生活污水资源化预处理工程示范[J]. 净水技术, 2019, 38(11): 112-118.  
ZHANG Jiajie, WU Lei, LI Xianling, et al. Engineering project demonstration of nitrogen-phosphorus inorganic reactor applied in pretreatment for reclamation of domestic sewage[J]. Water Purification Technology, 2019, 38(11): 112-118.
- [14] 马如龙, 段婧婧, 于建光, 等. 生活污水尾水回用对稻田土壤微生物量碳氮和土壤酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(1): 216-226.  
MA Rulong, DUAN Jingjing, YU Jianguang, et al. Effects of domestic sewage tail water reuse on soil microbial biomass carbon and nitrogen contents and soil enzyme activities in paddy fields[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2023, 42(1): 216-226.
- [15] 张丹丹, 郑向群, 李厚禹, 等. 含盐农村生活污水灌溉对土壤微生物的影响[J]. 环境科学研究, 2022, 35(8): 1873-1884.  
ZHANG Dandan, ZHENG Xiangqun, LI Houyu, et al. Effects of rural domestic sewage irrigation with different salinity on soil microorganisms [J]. Research of Environmental Sciences, 2022, 35(8): 1873-1884.
- [16] 陶昱明, 孙芸, 徐佳莹, 等. 农村分散生活污水的AO滤池与人工湿地组合处理工艺及资源化再利用[J]. 净水技术, 2021, 40(3): 99-105.  
TAO Yuming, SUN Yun, XU Jiaying, et al. Combined processes of AO filter and constructed wetland and resourceful reuse for decentralized rural wastewater treatment [J]. Water Purification Technology, 2021, 40(3): 99-105.
- [17] 吕锡武. 经济作物型组合生态系统深度净化农村生活污水的特性研究[C]. 2015年中国环境科学学会学术年会论文集. 北京: 中国环境科学出版社, 2015: 5036-5042.
- [18] 沈中心. 农村生活污水的生物生态组合治理研究[J]. 中国资源综合利用, 2021, 39(7): 201-204.  
SHEN Zhongxin. Study on bio-ecological combination treatment of rural domestic sewage [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2021, 39(7): 201-204.
- [19] ZHONG L, DING J, WU T, et al. Bibliometric overview of research progress, challenges, and prospects of rural domestic sewage: Treatment techniques, resource recovery, and ecological risk [J]. Journal of Water Process Engineering, 2023, 51: 103389.
- [20] GROSSMANN M. Economic value of the nutrient retention function of restored floodplain wetlands in the Elbe River basin [J]. Ecological Economics, 2012, 83: 108-117.
- [21] 陈军亮, 许凤玲, 陈家颖, 等. 向日葵复合垂直流人工湿地脱氮除磷效果分析[J]. 环境生态学, 2022, 4(6): 63-68.  
CHEN Junliang, XU Fengling, CHEN Jiaying, et al. Analysis on treatment effects of nitrogen and phosphorus removal by integrated vertical-flow constructed wetland with sunflowers [J].



- Environmental Ecology, 2022, 4(6): 63-68.
- [22] GAO D W, 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.
- [23] 何俊乐, 吕锡武, 杨子萱, 等. 经济植物型潮汐流人工湿地深度净化农村生活污水[J]. 水处理技术, 2017, 43(12): 105-110.  
HE Junle, LYU Xiwu, YANG Zixuan, et al. Characteristics of tidal flow constructed wetland with economic plants for domestic wastewater tertiary treatment [J]. Technology of Water Treatment, 2017, 43(12): 105-110.
- [24] 徐丽, 吕锡武, 杨子萱. 组合生态系统去除农村生活污水中氮磷效果研究[J]. 水处理技术, 2016, 42(7): 93-96.  
XU Li, LYU Xiwu, YANG Zixuan. Study on nitrogen and phosphorus removal characteristics of combined ecosystem treating rural domestic wastewater[J]. Technology of Water Treatment, 2016, 42(7): 93-96.
- [25] 檀香逸, 吕锡武, 杨子萱, 等. 不同水培观赏植物对氮素的吸收动力学特性分析[J]. 水处理技术, 2018, 44(6): 42-45+51.  
TAN Xiangyi, LYU Xiwu, YANG Zixuan, et al. Analysis on the kinetic characteristics of nitrogen absorption by different ornamental plants[J]. Technology of Water Treatment, 2018, 44(6): 42-45+51.
- [26] 于如海, 汪思宇, 王昀晨, 等. 饲草植物对农村生活污水尾水氮磷营养盐吸收特性[J]. 净水技术, 2022, 41(4): 66-74.  
YU Ruhai, WANG Siyu, WANG Yunchen, et al. Characteristics of absorption for nitrogen and phosphorus nutrients in tail water of rural domestic sewage by forage plants[J]. Water Purification Technology, 2022, 41(4): 66-74.
- [27] 左雨航, 宋明志, 骆辉, 等. 农村污水处理模式分析-以江苏省为例[J]. 环保科技, 2023, 29(4): 1-8+26.  
ZUO Yuhang, SONG Mingzhi, LUO Hui, et al. Analysis of rural sewage treatment mode in Jiangsu Province[J]. Environmental Protection and Technology, 2023, 29(4): 1-8+26.
- [28] 贺艺, 刘华林, 江海鑫, 等. 基于污水源分离的分散式处理系统应用探讨[J]. 水处理技术, 2019, 45(2): 1-6.  
HE Yi, LIU Hualin, JIANG Haixin, et al. Application of decentralized wastewater treatment system based on source-separation[J]. Technology of Water Treatment, 2019, 45(2): 1-6.
- [29] 张驰, 徐康宁, 苏冯婷, 等. 国内外源分离排水工程项目概述[J]. 中国给水排水, 2015, 31(2): 28-33+47.  
ZHANG Chi, XU Kangning, SU Fengting, et al. Review on pilot projects of source separation system[J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(2): 28-33+47.
- [30] 刘存辉, 杨文静, 张小玫, 等. 厕所黑水源分离及其资源化技术研究进展与展望[J]. 环境工程技术学报, 2023, 13(6): 2165-2173.  
LIU Cunhui, YANG Wenjing, ZHANG Xiaomei, et al. Research advances and prospects of source separation and recycling technologies of toilet black water[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2023, 13(6): 2165-2173.
- [31] TAN L, ZHANG C X, LIU F, et al. Three-compartment septic tanks as sustainable on-site treatment facilities? Watch out for the potential dissemination of human-associated pathogens and antibiotic resistance [J]. Journal of Environmental Management, 2021, 300: 113709.
- [32] LONG Y N, ZHOU Z Y, YIN L S, et al. Microplastics removal and characteristics of constructed wetlands WWTPs in rural area of Changsha, China: A different situation from urban WWTPs[J]. Science of the Total Environment, 2022, 811: 152352.
- [33] YANG L, WANG T Y, ZHOU Y Q, et al. Contamination, source and potential risks of pharmaceuticals and personal products (PPCPs) in Baiyangdian Basin, an intensive human intervention area, China[J]. Science of the Total Environment, 2021, 760: 10.
- [34] CHOPYK J, NASKO D J, ALLARD S, et al. Comparative metagenomic analysis of microbial taxonomic and functional variations in untreated surface and reclaimed waters used in irrigation applications [J]. Water Research, 2020, 169: 115250.
- [35] MA D C, CHEN H C, FENG Q G, et al. Dissemination of antibiotic resistance genes through fecal sewage treatment facilities to the ecosystem in rural area[J]. Journal of Environmental Management, 2023, 333: 117439.
- [36] 王锦, 刘珂, 梁柳玲, 等. 水环境中抗生素的分析检测技术研究进展[J]. 环境科学与管理, 2023, 48(6): 149-154.  
WANG Jin, LIU Ke, LIANG Liuling, et al. Research progress on analytical detection techniques of antibiotics in water[J]. Environmental Science and Management, 2023, 48(6): 149-154.
- [37] CHEN J, DENG W J, LIU Y S, et al. Fate and removal of antibiotics and antibiotic resistance genes in hybrid constructed wetlands[J]. Environmental Pollution, 2019, 249: 894-903.
- [38] 亓昕, 代嫣然, 王飞华, 等. 人工湿地去除特殊污染物的研究进展[J]. 环境科学与技术, 2017, 40(S1): 119-124.  
QI Xin, DAI Yanran, WANG Feihua, et al. Research progress of constructed wetlands for treatment of particular pollutants [J]. Environmental Science & Technology, 2017, 40(S1): 119-124.
- [39] CHEN H, ZHANG M M. Occurrence and removal of antibiotic resistance genes in municipal wastewater and rural domestic sewage treatment systems in eastern China [J]. Environment International, 2013, 55: 9-14.
- [40] 张子琪, 高淑红, 康园园, 等. 中国水环境微塑料污染现状及其潜在生态风险[J]. 环境科学学报, 2020, 40(10): 3574-3581.  
ZHANG Ziqi, GAO Shuhong, KANG Yuanyuan, et al. Current status of microplastics contamination in China's water environment and its potential ecological risks [J]. Acta

- Scientiae Circumstantiae, 2020, 40(10): 3574–3581.
- [41] WEI S, LUO H T, ZOU J T, et al. Characteristics and removal of microplastics in rural domestic wastewater treatment facilities of China [J]. Science of the Total Environment, 2020, 739: 139935.
- [42] 张桂芝, 杨清伟, 蹇徽龙, 等. 水环境中微塑料对典型污染物的吸附行为研究进展[J]. 应用化工, 2022, 51(1): 246–250+255.
- ZHANG Guizhi, YANG Qingwei, JIAN Huilong, et al. Research progress on the adsorption behavior of typical pollutants by microplastics in water environment [J]. Applied Chemical Industry, 2022, 51(1): 246–250+255.
- [43] 薛颖昊, 张明明, 徐志宇, 等. 水环境中微塑料的来源分布及对鱼类的生态毒性效应[J]. 水产科学, 2023, 42(6): 1081–1090.
- XUE Yinghao, ZHANG Mingming, XU Zhiyu, et al. Source and distribution of microplastics in aquatic environment and its ecological toxicity on fish [J]. Fisheries Science, 2023, 42(6): 1081–1090.
- [44] 邵媛媛, 张帆, 梁庆霞. 陆地–海洋生态系统微塑料污染现状研究[J]. 生态环境学报, 2020, 29(10): 2118–2129.
- SHAO Yuanyuan, ZHANG Fan, LIANG Qingxia. Research on microplastic pollution in terrestrial–marine ecosystems [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020, 29(10): 2118–2129.
- [45] LI R J, TU C, LI L Z, et al. Visual tracking of label-free microplastics in wheat seedlings and their effects on crop growth and physiology [J]. Journal of Hazardous Materials, 2023, 456: 131675.
- [46] ZHANG X, FENG Q G, LI X W, et al. Microplastics in household fecal sewage treatment facilities of rural China [J]. Journal of Hazardous Materials, 2023, 448: 130925.
- [47] HUANG J, TUO J, WANG L, et al. Abundance, characteristics and seasonal variation of microplastics in a domestic sewage treatment plant in Nanjing, China [J]. Journal of Water Process Engineering, 2023, 55: 104200.
- [48] YANG L B, LI K X, CUI S, et al. Removal of microplastics in municipal sewage from China's largest water reclamation plant [J]. Water Research, 2019, 155: 175–181.
- [49] YANG Z Y, LI S X, MA S R, et al. Characteristics and removal efficiency of microplastics in sewage treatment plant of Xi'an City, northwest China [J]. Science of the Total Environment, 2021, 771: 145377.
- [50] LYU X M, DONG Q, ZUO Z Q, et al. Microplastics in a municipal wastewater treatment plant: Fate, dynamic distribution, removal efficiencies, and control strategies [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 225: 578–586.
- [51] JIANG J H, WANG X W, REN H Y, et al. Investigation and fate of microplastics in wastewater and sludge filter cake from a wastewater treatment plant in China [J]. Science of the Total Environment, 2020, 746: 141378.