

李欣格, 洪永远, 周雪飞. 灰水处理与资源化技术应用综合分析[J]. 净水技术, 2024, 43(6):29-43,88.

LI X G, HONG Y Y, ZHOU X F. Comprehensive analysis of application in grey water treatment and recycling technology[J]. Water Purification Technology, 2024, 43(6): 29-43,88.

灰水处理与资源化技术应用综合分析

李欣格, 洪永远, 周雪飞*

(同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘要 灰水在生活污水中占有较大比重,且污染负荷和致病因子含量较低,因此,对灰水进行处理并实现资源化回用对于实现水资源持续供给,保障水资源安全具有重要意义。文章基于灰水的水质和水量特点,介绍了目前主流的灰水处理技术,对其作用原理、技术特点、应用条件进行了系统论述,并且综合对比了不同处理技术的优劣势。其中,生态处理法建设成本低,运维简单,具有一定的抗水质水量冲击能力,具有较好的推广应用价值。在此基础上,进一步总结了国内外再生水回用标准,分析灰水资源化回用的经济和生态效益,明确了处理灰水资源回用的可行性。最后,针对目前面临的问题和挑战,提出了未来的发展方向,即开发多种技术耦合、低成本的集成规模化灰水处理回用系统。

关键词 生活污水 水资源安全 灰水处理 生态效益 回用

中图分类号: X703 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-0177(2024)06-0029-16

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2024.06.004

Comprehensive Analysis of Application in Grey Water Treatment and Recycling Technology

LI Xinge, HONG Yongyuan, ZHOU Xuefei*

(College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract Grey water occupies a large proportion of domestic wastewater, with low pollution load and less pathogenic factor concentration. Therefore, it is of great significance to treat grey water and realize resource reuse to ensure the sustainable supply of water resources and the security of water resources. Based on the quality and quantity characteristics of grey water, this paper introduces the current grey water treatment technology, and the removal mechanism, technical characteristics are discussed systematically. In addition, the advantages and disadvantages of different treatment technologies are also compared comprehensively. Among them, the ecological treatment method has advantages of low construction cost, convenient maintenance, and ability to resist water quality and quantity variation which has high value in popularization and application. On this basis, this paper further summarizes the domestic and foreign recycled water reuse standards, analyzes the economic and ecological benefits of grey water reuse, and clarifies the feasibility of treating grey water reuse. Finally, according to the current problems and challenges, the multi-technology coupling, low-cost integrated scale grey water treatment and reuse system are proposed as the future development direction.

Keywords domestic wastewater security of water resource grey water treatment ecological benefit reuse

近几十年来,水资源短缺已成为一个日益严重的问题。《2018年世界水资源开发报告》预测,到2050年,全球将有50多亿人面临缺水^[1]。我国人均水资源占有量为2100 m³,仅为全球平均水平的

28%,是世界上缺水的国家之一^[2]。除了人均水资源占有量低,我国还面临着污水排放量大的问题,2015年我国污水排放量达735亿m³^[3]。2021年6月国家发改委印发《“十四五”城镇污水处理及资源化利用发展规划》的通知,全面提升污水收集处理及资源化利用能力水平^[4]。生活污水在我国的污水排放总量中占据了相当大的比例,实现生活污水的回用对保障我国的水资源安全具有重要的战略意义。

[收稿日期] 2023-04-28

[基金项目] 国家重点研发计划项目(2022YFD1601000)

[作者简介] 李欣格(2000—),女,硕士,研究方向为污水处理及资源化,E-mail:2232848@tongji.edu.cn。

[通信作者] 周雪飞,女,教授,研究方向为污水处理及资源化,E-mail:zhouxuefei@tongji.edu.cn。

灰水是指生活污水中未被粪便污染且污染程度较低的污水,其主要成分是易生物降解的有机物、氮磷营养盐、微生物、药物和个人护理品(PPCPs)以及重金属成分^[5-6]。目前,包括物理、化学、生物、生态以及耦合技术等多种方法已被用于灰水的处理(图1),每种方法都有其优点和局限性。灰水的处理回用技术研究仍然处于发展阶段,现有的技术方法仍然停留在实验室以及中试规模,缺乏可应用于实践场景的成套化系统范式。因此,需要对灰水的处理回用技术进行系统总结,以明确其处理效果、生态与经济效益,形成可以应对实践工程的系统模式。

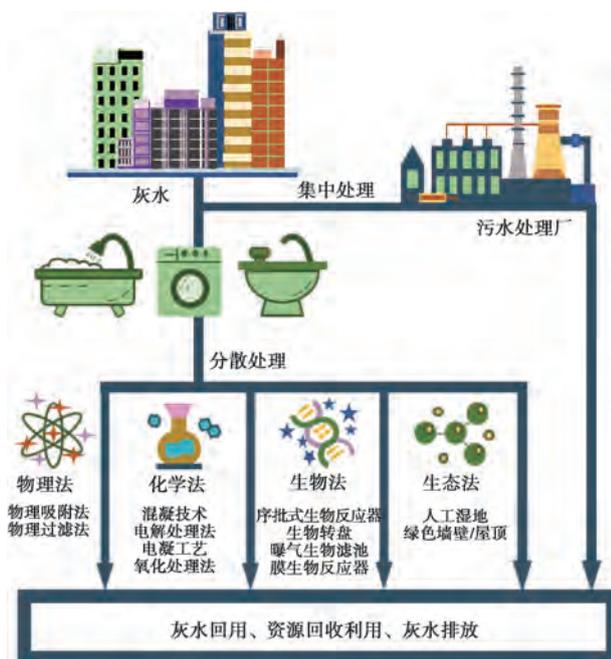


图1 分散收集和集中收集的灰水处理方法

Fig. 1 Treatment Methods for Decentralized and Centralized Collection of Grey Water

1 灰水水量水质特征

发达国家和发展中国家居民产生的灰水水量和水质具有一定差别,这主要与地理位置、生活方式、人口结构、基础设施建设情况、生活习惯以及气候条件有关。就水量而言,大部分国家灰水占生活污水总量的比例为42.9%~89.1%,如表1所示,其中瑞士、以色列、澳大利亚发达国家的居民灰水排放量在98~113 L/(人·d),高收入国家的灰水排放量明显高于低收入国家^[7]。灰水水量还受时间和空间等因素的影响,夏季由于居民洗澡用水增多,灰水产量较大;夜间的灰水产量起伏也相对较大,主要系夜间

居家的人数较多,生活用水增多。同时,在水资源丰富沛地区灰水产量明显多于干旱地区,表1中的马来西亚水资源丰富,灰水产生量达到200 L/(人·d)以上,而约旦地处干燥地区,水资源短缺,灰水产生量在50 L/(人·d)左右。

表1 不同国家灰水产生量

Tab. 1 Grey Water Output in Different Nations

国家	产生量/(L·人 ⁻¹ ·d ⁻¹)	参考文献
马来西亚	225	[8]
尼泊尔	72	[9]
约旦	50	[10]
马里共和国	30	[11]
澳大利亚	113	[12]
瑞士	110	[12]
越南	80~110	[13]
以色列	98	[14]
阿曼苏丹国	161	[15]
英国	96	[15]
中国	112~129	[15-16]

灰水的水质主要取决于所洗涤的物品以及洗涤剂。如表2所示,灰水的浑浊度通常为19~559 NTU,固体悬浮物(SS)质量浓度可以达到4.3~670 mg/L,化学需氧量(COD_{Cr})和五日生化需氧量(BOD₅)分别可以达到76~1461 mg/L和33~296 mg/L。这主要是因为厨房和洗衣房产生的灰水含有大量SS,在洗涤蔬菜或衣服的过程中,引入了食物颗粒、油、沙、黏土和织物纤维等。此外,灰水中含有高浓度的氮、磷及表面活性剂等营养盐。其中,TN可达0.5~54 mg/L,氨氮可达到1.58~100 mg/L,主要来源于餐厨洗涤的食材;TP的质量浓度可以达到0.3~11 mg/L,主要源于使用的肥皂、洗衣粉等^[17]。研究发现,灰水中还含有PPCPs以及染料成分,家庭清洁和洗涤产品的使用,导致灰水中可能存在900多种潜在的有机污染物^[18],例如苯胺、羟苯甲酮、苯氧乙醇等^[19]。上述物质的存在表明了灰水组成的复杂性,直接排放的灰水会对生态环境产生危害。

2 灰水处理技术

2.1 灰水物理处理技术

灰水物理处理技术主要包括吸附法和物理过滤法。吸附法效率较低,因此,主要通过与其他工

表2 不同国家灰水的物理、化学和生物性质

Tab. 2 Physical, Chemical and Biological Properties of Grey Water in Different Countries

地区	COD _{Cr} / (mg·L ⁻¹)	BOD ₅ / (mg·L ⁻¹)	SS/ (mg·L ⁻¹)	浑浊度/ NTU	TN/ (mg·L ⁻¹)	氨氮/ (mg·L ⁻¹)	TP/ (mg·L ⁻¹)	总大肠菌群数/ [个·(100 mL) ⁻¹]	参考文献
美国	205~600	45~144	4.3~50.3	19~156	0.5~5.3	34~100	11	4×10 ⁷ ±5×10 ⁷	[20]
西班牙	158±112	116±67	63±114	68.4±39.8	10.4±9.3	4.88±2.92	0.34±0.76	-	[21]
伊朗	80~90	-	-	65~80	-	-	-	-	[20,22]
希腊	466	-	95	162	33	-	1.3	3.6	[20,23]
葡萄牙	209	65	307	-	-	<1	0.8	-	[20,24]
印度	194±17.6	157±11	355±33	143±54	12±1.5	-	1.33±0.15	496±230	[21]
中国	263~434	-	158~318	-	38~54	31~47	3.7~5.2	-	[25]

注：“-”表示未查到相关数据。

艺复合使用,物理过滤法主要包含过滤介质过滤和膜过滤,过滤介质可以是砂、砾石、细网等多种材料^[26-27]。

根据填料的入渗速率将吸附法常用的滤料分为慢滤和快滤两类,其中椰壳、岩棉和塑料为慢滤,珍珠岩、二氧化硅、河砂、膨胀黏土和蛭石为快滤。椰壳与岩棉的多孔结构提供了大量的表面积,从而使其容易达到吸附杂质的目的。塑料的吸附原理主要涉及其分子结构和表面特性,分子中含有苯环和乙烯基团,这些基团在分子结构中排列有序,形成了一定的空隙和孔隙结构,同时塑料分子表面也具有一定的极性和表面能,能够吸附一些极性分子。珍珠

岩是一种由火山岩熔融后迅速冷却形成的玄武岩玻璃,具有均匀的结构和多孔性,使得珍珠岩具有较强的吸附性能。膨胀黏土和蛭石具有较大的比表面积,由于分子间引力的作用,形成较强的物理吸附能力,同时晶体边缘带正电荷,阴离子基团可以靠静电引力吸附在材料的边面上,产生化学吸附。二氧化硅存在多孔结构和较大的比表面积,同时其表面含有大量的羟基,可与多种有机物反应,因此,可以吸附多种微粒。河砂的吸附原理是因为砂中含有黏土矿物,水分子易进入层间,且层间离子易被低价金属离子取代,呈现出强吸附性^[28]。常见的灰水物理过滤技术如表3所示。

表3 常见的灰水物理过滤技术

Tab. 3 Common Physical Filtration for Common Grey Water

填料分类	处理前的灰水水质	物理介质分类	去除率				
			TSS	COD _{Cr}	总大肠菌群数	TN	TP
慢滤	总悬浮固体(TSS)为100 mg/L; COD _{Cr} 为250 mg/L; 总大肠菌群数为1500 MPN/(100 mL); TN为5.5 mg/L; TP为3.0 mg/L	塑料	91%	78%	99%	30%	17%
		椰壳	92%	75%	72%	77%	17%
		岩棉	84%	59%	75%	76%	30%
快滤		珍珠岩	34%	21%	41%	19%	9%
		二氧化硅	40%	27%	50%	22%	-
		蛭石	29%	21%	19%	30%	10%
		膨胀黏土	-	8%	35%	8%	2%
		河砂	24%	15%	30%	20%	8%

在常见的物理过滤填料中,松树皮等天然滤料有很多细小的空隙,使得污染物附着于其表面,可用于湖泊、河流等水域的生态修复工程。砂的颗粒表面为凹凸不平的锯齿状,互相咬合联接形成粗糙的滤隙,其中有许多内联通道,可以阻挡杂质,但同时

又具有一定的空隙率,保留有较高的连续渗透力,适用于生活饮用水过滤和其他水质净化处理,可用于石油、化工等生产用水的前期处理。活性炭的过滤原理是由于其空隙结构发达,有较大的比表面积,可以达到吸收杂质的目的,适用于水处理中的脱色、脱

氯,去除细菌、放射性等污染物质,常用于废水的三级处理。陶粒比表面积大,富含钙、铁、铝等元素,与污水中的磷酸盐形成不溶物,利于氮、磷的去除,适用于单层滤池、双层滤池、双层滤器、离子交换器等过滤设备中作过滤介质及垫层,处理各种工业污水等。塑料滤料由于其内部骨架分子或功能基团与吸附质之间的范德华引力或氢键作用产生吸附,较大

的比表面积为塑料与吸附质之间提供了良好的接触面,便于吸附有机分子,适用于处理以 SS 污染物为主、溶解性物质较少的污水;椰子壳通过形成强弱不一的化学键,进行化学吸附,通过范德华力进行物理吸附,通过孔隙进行离子交换,主要应用于高度自动控制注水过滤器、污水过滤器、入井过滤器等。常见的灰水物理过滤技术如表 4 所示。

表 4 常见的灰水物理过滤技术

Tab. 4 Treatment Technology of Common Grey Water Physical Filtration

填料分类	物理介质分类	去除率	参考文献
天然滤料	松树皮	BOD ₅ 去除率为 98%,表面活性剂去除率>90%,TP 去除率>90%	[29]
	砂滤(5 cm 有机玻璃柱)	浑浊度去除率为 20%,COD _{Cr} 去除率为 25%	[30]
人工滤料	活性炭	BOD ₅ 去除率为 97%,表面活性剂去除率>90%,TP 去除率>90%	[31]
	以多孔陶粒作为载体,用纳米零价铁作为改性剂	磷酸盐的去除率为 95.7%	[32]
复合滤料	第一层:2 cm 碎白云石+石灰石,平均直径为 2.5 cm 第二层:12 cm 的大空隙塑料滤料	TSS 去除率为 93.48%,氨氮去除率为 16.67%,阴离子型表面活性剂去除率为 98.37%,NO ₂ ⁻ -N 去除率为 96.92%,NO ₃ ⁻ -N 去除率为 48.57%,TP 去除率为 73.68%,总大肠菌群数去除率为 97.5%	[33]
	第一层:椰子壳 20 cm 第二层:锯末 15 cm 第三层:木炭 20 cm,砖块 10 cm,沙子 15 cm	TSS 去除率为 82.61%,总溶解固体物(TDS)去除率为 69.98%,COD _{Cr} 去除率为 82.26%,油脂去除率为 96.97%,氨氮去除率为 73.42%,NO ₃ ⁻ -N 去除率为 68.66%,PO ₄ ³⁻ -P 去除率为 100%	[34]

如图 2 所示,Al-hamaiedeh 等^[35]设计了一套 4 个桶密闭沟槽装置用于处理 5 个家庭产生的灰水,4 桶均为高密度聚乙烯制成的塑料桶,第 1 个桶用于去除灰水中的油脂和可沉淀固体,在第 2 个桶和第 3 个桶中填入直径为 2~3 cm 的砾石过滤介质去除灰水中的其他污染物,如 TSS、COD_{Cr}、BOD₅ 等,在第 4 个桶安装了一个小型电动潜水泵和浮子开关,将处理过的灰水输送到滴灌系统。

此方法 COD_{Cr}、TSS、BOD₅、TN 的去除效率为 72%、53%、89%、79%,装置成本低,结构紧凑,操作方便,处理后的灰水符合约旦林木灌溉标准,常用于灌溉家庭花园。

2.2 灰水化学处理技术

灰水化学处理技术主要基于混凝、氧化还原等化学反应,去除灰水中的污染物,或将其转化为无害物质的污水处理方法。例如混凝-絮凝、光催化等技术,或投加双氧水、臭氧等药剂,表 5 总结了常见的灰水化学处理技术。

混凝法在废水中加入混凝剂,因混凝剂为电解质,在废水里形成胶团,与废水中的胶体物质发生电中和,形成沉降;光催化燃料电池法的技术原理主要是将有机污染物作为燃料,在阳极处被光激活分解;电凝法通过借助外加高压电作用产生电化学反应,对废水中的有机物或无机物进行氧化还原反应,进而将污染物从水体中分离;臭氧的技术氧化分解水中的大分子有机物,同时将难以生物降解的有机物氧化成小分子有机物;紫外技术可以切断有机物分子中的共价键,使有机物分子活化,分解成离子、游离态原子、受激分子。

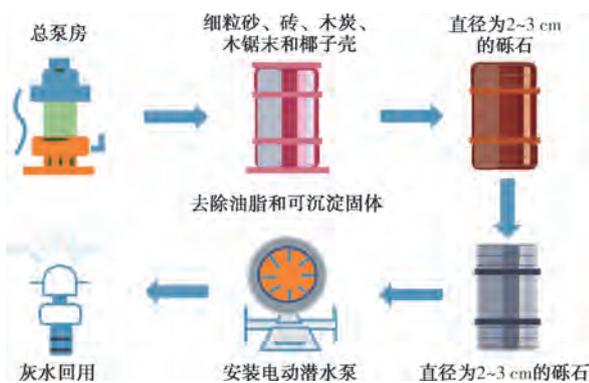


图 2 4 桶过滤灰水处理装置流程

Fig. 2 Flow of Four Filter Columns Unit for Grey Water Treatment

表 5 常见的灰水化学处理技术

Tab. 5 Chemical Treatment Technology for Common Grey Water

灰水化学处理技术	处理前的灰水水质	技术参数	去除率	参考文献
混凝法	BOD ₅ 为 280 mg/L, COD _{Cr} 为 525 mg/L, NO ₃ ⁻ -N 为 0.375 mg/L, TN 为 11.1 mg/L, TP 为 1.07 mg/L	FeSO ₄ (体积分数为 13%) 为 0.79 mmol/L, Al ₂ (SO ₄) ₃ (体积分数为 48%) 为 0.89 mmol/L	BOD ₅ 去除率为 85.37%, COD _{Cr} 去除率为 63.59%, NO ₃ ⁻ -N 去除率为 8.96%, TN 去除率为 0.56%, TP 去除率为 96.39%	[36]
光催化燃料电池法	COD _{Cr} 为 2 266 mg/L, BOD ₅ 为 253.15 mg/L, 浑浊度为 238.75 NTU, 氨氮为 27.55 mg/L	ZnO/Zn 光阳极, CuO/Cu 光阴极, 发光面积为 6 cm ² , 光电极距离为 4cm, 光源为 365 nm 汞紫外线灯	COD _{Cr} 去除率为 55%, BOD ₅ 去除率为 55%, 浑浊度去除率为 88%, 氨氮去除率为 75%	[31]
电凝法	COD _{Cr} 为 229 mg/L	电极组合 Al-Fe-Fe-Al, pH 值为 7.62, 电流密度为 1 mA/cm ²	COD _{Cr} 去除率为 90%~95%	[37]
电凝法/臭氧	COD _{Cr} 为 460 mg/L, 总有机碳 (TOC) 为 185 mg/L	pH 值为 7.0, 臭氧为 47.4 mg/L, 电流密度为 15 mA/cm ²	COD _{Cr} 去除率为 85%, TOC 去除率为 70%	[38]
电凝法/臭氧/紫外	COD _{Cr} 为 460 mg/L, TOC 为 185 mg/L, 总大肠杆菌群为 2.4 CFU/(100 mL)	pH 值为 7.0, 臭氧为 47.4 mg/L, 电流密度为 15 mA/cm ²	COD _{Cr} 去除率为 95%, TOC 去除率为 87%, 总大肠杆菌群去除率为 96%	[38]

Antonopoulou 等^[39]采用混凝技术处理 4 户家庭产生的灰水, 试验表明在去除 TSS 和 COD_{Cr} 方面, 采用 FeCl₃ 比 Al₂(SO₄)₃ 的处理效率更高, 且灰水类型和混凝剂投加量都会对混凝技术的处理效率产生影响。其中, 采用 800 mg/L Al₂(SO₄)₃ · 14 H₂O 进行联合处理的效果最佳, 总 COD_{Cr} 去除率达 96%, TSS 去除率达 97%。

2.3 灰水生物处理技术

灰水生物处理技术主要包括序列间歇式活性污泥法 (SBR)、升流式厌氧污泥床 (UASB)、综合固定膜活性污泥 (IFAS) 和膜生物反应器 (MBR) 等技术, 其原理主要是基于活性污泥对灰水中的污染物进行吸附和氧化降解等。图 3 展示了 MBR 处理灰水的流程, 表 6 总结了常见的灰水生物处理技术^[15]。

表 6 常见的灰水生物处理技术

Tab. 6 Biological Treatment Technology for Common Grey Water

灰水化学处理技术	处理前的灰水水质	反应参数	去除率	参考文献
SBR	氨氮为 251.38 mg/L, COD _{Cr} 为 508.30 mg/L, 氰化物为 1.096 mg/L	周期为 6 h, 进水时间为 2 h, 反应时间为 3 h (曝气 30 min, 搅拌 30 min, 曝气 1 h, 搅拌 30 min, 曝气 30 min), 沉淀时间为 1 h, 滗水时间为 2 h	氨氮的去除率为 96.15%, COD _{Cr} 的去除率为 94.47%, 氰化物的去除率为 98.18%	[40]
UASB	COD _{Cr} 为 298 mg/L, pH 值为 6.8	采用北京酒仙桥污水厂双层沉淀池的厌氧污泥接种, 接种量为 55.96 g SS, 质量浓度为 5.6 g SS/L, 污泥挥发性物质的含量 (VSS/SS) 为 0.37, 温度为 26.4 °C, 水力停留时间 (HRT) 为 8.1 h	COD _{Cr} 的去除率为 82.9%	[41]
生物膜与活性污泥复合系统	COD _{Cr} 为 638.46 mg/L, TN 为 20.53 mg/L, TP 为 5.43 mg/L	进水流量为 4 L/h, 系统的厌氧、缺氧、好氧区空床 HRT 分别为 3.385、1.708、6.23 h; 3 个反应池的溶解氧质量浓度分别保持在 0.007、0.01、(6.35 ± 0.40) mg/L; pH 值分别为 7.7 ± 0.2、7.9 ± 0.3、8.01 ± 0.3	COD _{Cr} 的去除率为 94.8%, TN 的去除率为 84.9%, TP 的去除率为 90.8%	[42]

(续表6)

灰水化学处理技术	处理前的灰水水质	反应参数	去除率	参考文献
MBR	氨氮为 3 mg/L, TN 为 10 mg/L, TP 为 5 mg/L	温度为 20 ℃, 压力为 5 kPa, 单位膜面积曝气量为 1 000 L/(m ² ·h), 曝气量为 60 L/h, 溶解氧质量浓度为 6.0~6.5 mg/L, 运行时间为 120 d, 系统不接种外源污泥, 而是系统自身驯化污泥, 此外整个试验期间不排泥	氨氮去除率为 98%, TN 去除率为 90%, TP 去除率为 60%	[43]
生物转盘	COD _{Cr} 为 134 mg/L, 氨氮为 9.1 mg/L, TN 为 142 mg/L	驯化后的污泥和人工配置的生活污水比例为 2 : 1, 不进污水的情况下, 调整转速为 4 r/min, 连续转动 2 d, 开始小流量进水(HRT 为 4 h), 维持 COD _{Cr} 浓度为 100 mg/L 左右, 逐渐增大进水流量至 HRT 为 3 h, pH 值为 7.5, 水温为 22 ℃	COD _{Cr} 去除率为 63.27%, 氨氮去除率为 13.15%, TN 去除率为 9.6%	[44]
生物活化膜反应器(BAMB)	有机碳为 34 mg/L	曝气速率为 20 L/min, 容积为 42 L, 运行天数为 100 d, 流量为 75 L/d	有机碳去除率为 95%	[45]
移动床生物膜反应器(MBBR)	浑浊度为 40.23 NTU, TSS 为 87.3 mg/L, TP 为 6.59 mg/L, BOD ₅ 为 44.37 mg/L, COD _{Cr} 为 246.63 mg/L	日流量为 302 L/d, HRT 为 4 h, 反应器体积为 83.3 L, 充填率为 14%, 生物膜表面积为 490 m ² /m ³ , Q _{max} 为 31.2 L/h, Q _{max air} 为 110 L/min	浑浊度去除率为 66%; TSS 去除率为 87.07%, TP 去除率为 12%, BOD ₅ 去除率为 59%, COD _{Cr} 去除率为 70%	[46]

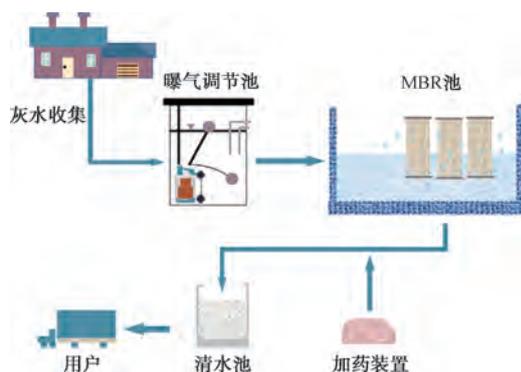


图3 MBR处理灰水流程

Fig. 3 Technical Flow of Biological Treatment of MBR for Grey Water

Atanasova 等^[47]在灰水和黑水分离的酒店实施 MBR 试点, 并对该方案进行经济可行性的评价, 其主要的工艺流程包括灰水分离、MBR 处理、清洁水储存和消毒。结果表明, 该系统在出水质量方面表现优异, 且当系统规模为 5 m³/d 时具有经济可行性。

2.4 灰水生态处理技术

灰水生态处理回收技术指基于生物链来处理灰水中的污染物, 主要包括人工湿地、绿色墙壁和绿色屋顶等, 此类技术成本低, 维护简便。既能达到平衡生态的作用, 又兼顾净化和环保, 因此在城市和农村

中被推广应用^[26]。本文列举了常见的灰水生态处理技术(表 7^[48-51])。

Dewi 等^[52]在芝利翁河河岸建造了人工湿地, 通过种植香根草来降低污水中的氮、磷含量, 当水力 HRT 为 2 d 时, 灰水中 10% 的氨和 30% 的磷酸盐可以被去除。同时, 试验证明通过增加 HRT, 或者联合曝气等方式, 能够有效提升灰水的处理效果, 其中污水中氨氮含量的降低主要是通过硝化作用将氨氮转化为硝酸盐氮。人工湿地主要采用天然材料, 且电能耗用量低, 建造和运行成本较低, 同时在美学方面, 人工湿地也具有较大优势, 因此, 可将其广泛应用于庭院和公园等场所(图 4)。

2.5 灰水组合工艺处理技术

单一的灰水处理技术不能全面去除灰水中的污染物, 而采用物理、化学和生物的组合工艺, 不仅可以充分发挥各个工艺之间的优势, 使得出水水质更加优良, 还可以减少处理设备的体积, 达到节约成本的作用。表 8 列举了常见的灰水组合工艺处理技术。

在混凝+MBBR 技术复合技术中, 混凝预处理的作用是去除部分 COD_{Cr} 和阴离子表面活性剂(LAS), 减少处理设备的体积, MBBR 的作用是去除大部分的 COD_{Cr}、LAS 和氨氮; 在软化澄清+生化脱

表 7 常见的灰水生态处理技术

Tab. 7 Common Grey Water Ecological Treatment Technology

灰水生态处理技术	处理前的灰水水质	反应参数	去除率	参考文献
人工湿地	COD _{Cr} 为 78 mg/L, TN 为 32 mg/L	选用两个上口直径为 50 cm、下口直径为 40 cm、高为 65 cm 的塑料桶,连接方式为两级串联,水力负荷保持在 0.1 m ³ /(m ² ·d),种植植物为滴水观音	COD _{Cr} 去除率为 70%, TN 去除率为 99%	[48]
绿色墙壁	COD _{Cr} 为 250 mg/L, TSS 为 100 mg/L, TN 为 5.5 mg/L, TP 为 3 mg/L, 总大肠杆菌群为 1 500 MPN/(100 mL)	采用直径为 100 mm 的聚氯乙烯(PVC)柱,总深度为 300 mm。共构建 24 列,每种培养基类型重复 3 次;珍珠岩、生长石、蛭石和河砂的粒径在 2~4.75 mm,膨胀黏土的粒径小于 9.5 mm;每天两次分别添加 1.5 L 灰水,每周 5 d	TSS 去除率为 90%, TN 去除率为 50%, TP 去除率为 30%, COD _{Cr} 去除率为 70%, 总大肠杆菌群去除率为 80%	[49]
生态浮床	氮为 10 000 mg/kg, 磷为 2 000 mg/kg	采用 PVC 管作为框架,利用给水管用的 PVC 管(50 mm 直径)作为浮床载体,用 12 孔穴苗盆(32 cm×42 cm)作为植物载体,串联固定,浮岛浮在水面上植物的最大质量 3.85 kg	氮去除率为 101.16 g/(m ² ·a), 磷去除率为 25.22 g/(m ² ·a)	[50]
生态塘	COD _{Cr} 为 295.49 mg/L, 氨氮为 178.77 mg/L, TN 为 185.48 mg/L, TP 为 8.00 mg/L	生态塘的表面面积为 8.5 m×11 m,深度为 1.0 m,冬季和春季种植水芹菜,夏季秋季种植空心菜,水量为 100 L/h,水力负荷为 0.026 m ³ /(m ² ·d),水温为 15~25 °C	COD _{Cr} 去除率为 55%, 氨氮去除率为 70%, TN 去除率为 80%, TP 去除率为 75%	[51]

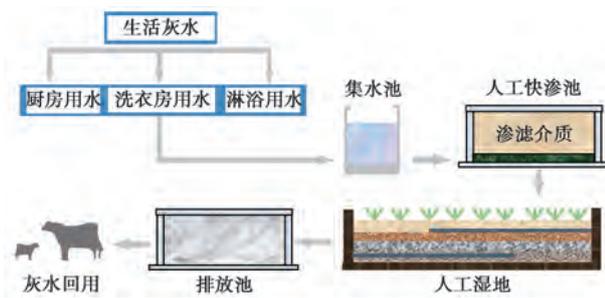


图 4 人工湿地处理灰水流程

Fig. 4 Process Flow of Constructed Wetland for Grey Water Treatment

TN 复合技术中,软化澄清的作用主要是脱除 SS、硬度,而生化脱 TN 技术的作用是去除 COD_{Cr}、氨氮;在电絮凝+重力流膜过滤技术中,电絮凝技术主要通过产生 OH⁻,去除出水中的污染物,重力过滤技术主要通过重力水头克服滤料阻力过滤灰水。

2.6 各类灰水处理技术对比

通过对比各类灰水处理技术的应用效果,仅仅采用物理介质过滤很难达到再生水回用标准,而各种膜材料在处理污水方面表现出良好的性能,但运行膜过滤模块的能源需求很高,且膜污染和膜堵塞的维护费用较高,因此,难以广泛应用在无法稳定供应电力的地区或低收入社区^[5]。灰水处理技术对

比如表 9 所示。

化学方法处理灰水中的污染物,对于污染物浓度低的灰水可以有效降低污水中的 COD_{Cr} 和浑浊度,但化学方法采用的混凝剂和絮凝剂以氯化铁和明矾为主,虽然氯化铁可以在很宽的 pH 范围内发挥作用,但其本质上具有较强的腐蚀性,而且混凝剂和絮凝剂很少单独使用,通常与其他处理方法如沉降、砂过滤或消毒搭配使用。此外,絮凝作用产生的絮凝体是二次废物,如果处理不当将会造成环境问题。而电凝工艺通过与膜过滤、臭氧化和电消毒等不同化学处理工艺集成,可以实现更高的水处理效果和效率,但其广泛应用需要提供持续的电力支持,同时需要足够的人力和专家维护系统,因此,工艺在农村等地区难以维持。

相比物理和化学类处理技术,生物和生态类处理技术在处理高浓度灰水时效率更高。但生物处理系统在处理灰水时对外界变化非常敏感,需要经常由技术人员进行操作和监测,技术水平和专业知识要求较高。且常见的 SBR、MBR 和生物曝气过滤器可能具有比传统工艺更高的灰水处理效率,但这些方法将会耗用大量的能源和资金成本,因此,并不适合在中低收入国家或发展中国家广泛应用。

对于生态类方法,其应用受制于气候变化,即位

表 8 常见的灰水组合工艺处理技术
Tab. 8 Combined Process for Common Grey Water Treatment

灰水生态处理技术	处理前的灰水水质	反应参数	去除率	参考文献
混凝+MBBR	COD _{Cr} 为 497 mg/L, LAS 为 35.8 mg/L, 氨氮 为 3.77 mg/L	混凝反应:投加聚合氯化铝为 60 mg/L,投加聚合硫酸铁为 0.5 mg/L MBBR 反应:HRT 为 3~4.5 h, 填料投配比为 60%	COD _{Cr} 的去除率为 90.3%, LAS 的去除率为 98.9%, 氨氮的去除率为 97.4%	[53]
软化澄清+生化脱 TN	COD _{Cr} 为 250 mg/L, 氨氮为 125 mg/L, TN 为 110 mg/L	软化澄清:一级混凝池设计处理能力为 200 m ³ /h, 单池有效容积为 12 m ³ , 设计 HRT 为 3.6 min 生化脱 TN: 进水速率为 400 m ³ /h	COD _{Cr} 的去除率为 84.00%, 氨氮的去除率为 96.00%, TN 的去除率为 81.82%	[54]
电絮凝+重力流膜过滤	LAS 为 13.4 mg/L, COD _{Cr} 为 223.5 mg/L, 浑浊度为 49.6 mg/L, 氨氮 为 8.95 mg/L, TP 为 6.2 mg/L	容积为 4 200 mL, 跨膜压差为 8 kPa, 连通管内径为 20 mm, 滤膜孔径 < 0.22 μm, 滤膜有效过滤面积为 60 mm×50 mm	LAS 的去除率为 93.1%, COD _{Cr} 的去除率为 62.8%, 浑浊度的去除率为 97.6%, 氨氮的去除率为 32.4%, TP 的去除率为 92.5%	[55]

表 9 灰水处理技术对比
Tab. 9 Comparison of Grey Water Treatment Processes

类别	技术名称	技术优势	技术劣势
物理法	物理吸附法	造价低廉	效率较低, 无法去除大肠杆菌
	物理过滤法	成本低, 技术含量低	对溶解的污染物去除能力低
化学法	混凝技术	可以有效降低污水中的 COD _{Cr} 和 浑浊度	TN 和 氨氮去除能力较弱, 混凝剂有较强的腐蚀性, 处理不当将会造成环境问题
	电解处理法	在常温常压下操作, 使用低压直流电源, 不必大量耗费化学药剂, 对于 浑浊度处理效果较好	在处理大量废水时电耗和电极金属的消耗量较大, 分离的沉淀物不易处理利用, COD _{Cr} 和 BOD ₅ 处理效果一般
	电凝工艺	水处理效果好, 可以有效降低污水中的 COD _{Cr}	需要持续的电力供应, 同时需要足够的人力和专家维护系统
	氧化处理法	氧化剂价格便宜, 常温反应速度较快, 处理废水中难以被生物降解的有机物效果好, 可以有效降低污水中的 COD _{Cr} 、TOC 和 总大肠杆菌群	费用相对较高
生物法	SBR	水处理效果好, 适用于处理低流量污水, 不需要设置二沉池和污泥回流系统	自动化控制要求高
	生物转盘	水处理效率高, 占地小	制作盘片的价格较高
	曝气生物滤池	占地面积小, 水处理效率高	耗用大量的能源和资金成本
	MBR	水处理效率高, 占地面积小, 不需要设置二沉池和污泥回流系统	膜污染和膜堵塞的维修费用较高
生态法	人工湿地	技术成本低, 维护简便, 美观	受制于适宜的水、营养物质和光照条件。占地面积大, 不适用于城市污水处理
	绿色墙壁/屋顶	技术成本低, 管理费用低, 美观	受制于适宜的水、营养物质和光照条件
	生态浮床	载体材料来源广, 成本低, 无污染、耐腐蚀, 浮体结构新颖, 不会造成河道淤积	植物不易栽培且难以过冬, 施工周期长
	生态塘	工程简单, 污水处理能耗少, 维护方便, 成本低廉	占地面积大, 污水净化效果受季节影响大, 防渗处理不当, 可能污染地下水
组合法	混凝+MBBR	出水水质可以达到城市杂用水水质标准, 投资小, 运行稳定	除污染负荷率较大, 占地面积较大
	软化澄清+生化脱 TN	高效去除硬度、氨氮、TN 等污染物	气化灰水中 SS 的处理仍属于技术难点, 需要进一步研究提升其处理效果
	电絮凝+重力流膜过滤	低能耗、低维护	灰水中氨氮的去除效果不佳, 有可能带浮渣、污泥等二次污染

于干旱地区,绿色墙壁和绿色屋顶上的植物可能面临许多生存挑战,植物需要足够的水、营养物质和非常特殊的光照条件才能生长。因此,在干旱地区,寻找到合适的耐热植物,以及能持续提供营养物质和水的循环系统是建设绿色墙壁和绿色屋顶的必要条件。

3 处理灰水资源化可行性

3.1 不同国家污水回用标准对比

在许多国家,处理后的灰水被认为是一种重要

的新资源,可以用于农业灌溉、非接触的景观与洗涤用水,在实现资源节约的同时,也可以带来一定的经济效益。表 10 和表 11 列出了国内外处理废水再利用的法规和标准,这些标准关注的指标主要有总溶解固体、BOD₅、pH、浑浊度、TN、TP 等,以及病原微生物含量,如总大肠菌群、粪大肠菌群等,且大多数国家主要关注的应用领域为农业灌溉利用、消防、车辆清洗和厕所用途等,如图 5 所示。

表 10 国外污水回用标准^[5]
Tab. 10 Wastewater Reuse Standards Abroad^[5]

国家	pH 值	浑浊度/ NTU	SS/ (mg·L ⁻¹)	BOD ₅ / (mg·L ⁻¹)	COD _{Cr} / (mg·L ⁻¹)	TN/ (mg·L ⁻¹)	总大肠菌群/ (个·L ⁻¹)	粪大肠菌群/ (个·L ⁻¹)
美国	6~9	2	5~30	5~30	-	-	-	-
加拿大	7~9	2	100	50	150	-	1 000	2~200
澳大利亚	6~9	-	-	30	20	-	1	4
德国	6~9	较清澈	基本没有	20	-	-	100	-
日本	6~9	清澈	-	20	-	-	1×10 ⁵	-
印度	6~9		200	30	250	50	-	-

表 11 我国污水回用标准^[5]
Tab. 11 Wastewater Reuse Standards at Home^[5]

标准	pH 值	浑浊度/ NTU	SS/ (mg·L ⁻¹)	BOD ₅ / (mg·L ⁻¹)	COD _{Cr} / (mg·L ⁻¹)	TN/ (mg·L ⁻¹)	总大肠菌群/ (个·L ⁻¹)	粪大肠菌群/ (个·L ⁻¹)
《农田灌溉水质标准》(GB 5084—2005)	6.0~9.0	-	80	150	60	-	-	4 000
《城市污水再生利用 工业用水水质》(GB/T 19923—2005)	6.5~9.0	5	30	10~30	60	-	-	2 000
《城市污水再生利用 绿地灌溉水质》(GB/T 25499—2010)	6.0~9.0	5~10	-	20	-	-	-	200~1 000
《城市污水再生利用 城市杂用水水质》(GB/T 18920—2002)	6.0~9.0	5~10	-	10~15	-	-	3	-
《城市污水再生利用 景观环境用水水质》(GB/T 18921—2002)	6.0~9.0	5	10~20	6~10	-	15	-	500~1 000
《城市污水再生利用 地下水回灌水质》(GB/T 19772—2005)	6.5~8.5	5~10	-	4~10	15~40	-	-	3~1 000
《城市污水再生利用 农田灌溉用水水质标准》(GB 20922—2007)	5.5~8.5	-	60~100	40~100	100~200	-	-	20 000~40 000



图 5 灰水资源化途径

Fig. 5 Recycling Utilization Routes for Grey Water

为了分析和了解各个国家污水回用标准的严格程度,本文采用层次分析法对国内外污水回用标准进行评价,评价因子为回用标准的各个指标^[56]。

(1) 构建层级结构。将污水回用标准评价体系作为层次分析法的目标层(A),将理化指标、营养盐及有机污染综合指标和生物指标作为层次分析法的准则层(B_i),将 pH、浑浊度、SS、BOD₅、COD_{Cr}、TN、总大肠菌群和粪大肠菌群等评价因子作为指标层(C_j) (图 6)。

(2) 建立判断矩阵。根据相关文献,得到各指

标重要性之间的关系,采用 9 标度法得到判断矩阵^[57-59]。

(3) 计算特征值并进行一致性检验。

最大特征根计算如式(1)。

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{Bw}{nw} (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

其中: λ_{\max} ——矩阵的最大特征值;

n ——矩阵阶数(参数个数);

w ——标准化后的权重;

B ——判断矩阵。

对于 n 阶判断矩阵,其最大特征根为单根,且 $\lambda_{\max} \geq n$ 。当 $\lambda_{\max} = n$,其余特征根均为 0 时,则 B 具有完全一致性。如果 $\lambda_{\max} > n$,而其余特征根接近于 0 时,则 B 具有满意的一致性。

一致性指标 C_1 和一致性比例 C_R 计算如式(2)~式(3)。

$$C_R = \frac{C_1}{R_1} \quad (2)$$

$$C_1 = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (3)$$

其中: C_R ——一致性比例;

C_1 ——一致性指标;

R_1 ——随机生成的成对比较矩阵一致性的随机指标。

当 $C_R < 0.10$ 时,判断矩阵具有满意的一致性,否则需要对判断矩阵进行调整。

(4) 在此基础上得到污水回用标准评价因子的权重。

(5) 将原始数据归一化。评价因子数量级和单位不同,不具有可比性和加和性,因此,需要将数据进行归一化处理,如式(4)^[60]。

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} (i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n) \quad (4)$$

其中: x_{ij} ——原始数据;

r_{ij} ——归一化的指标数据。

(6) 计算国外污水回用标准综合评价指数。

综合指数计算如式(5)。

$$P_1 = \sum r_{ij} W_{ij} \quad (5)$$

其中: P_1 ——归一化的指标数据;

W_{ij} ——指标因子对应的权重。

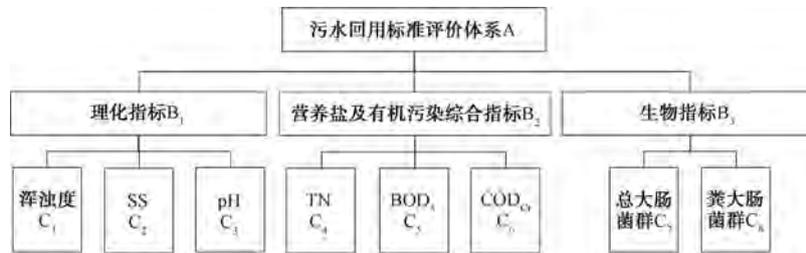


图6 污水回用标准综合评价层次结构体系

Fig. 6 Hierarchical Structure System for Comprehensive Evaluation of Wastewater Reuse Standard

通过计算国内外污水回用标准综合评价指数,得到国内外污水回用标准综合评价指数得分,如图7所示,得分越低,说明污水回用标准越严格,结果显示,德国、澳大利亚和美国的污水回用标准最为严格。其中,德国污水回用技术的快速发展,主要是基于其在环保领域的管理体制和法律法规,根据《德国水行业概貌 2008》资料显示,德国几乎按照欧盟的最高标准进行污水处理回用,在常规领域和敏感领域都实现了 100% 的达标,是欧洲国家污水回用的典范^[61];澳大利亚地广人稀,且降水量少,同时人口增速较快为 1.5%,导致澳大利亚城市缺水问题

严峻,因此,澳大利亚采取了较为严格的污水回用标准;二战后美国经济高速发展,水环境破坏严重,在 19 世纪末颁布了《河流及港口法案》,充分说明美国对污水回用标准的高度重视。

而我国城镇化率仅为 49.7%,仍然处于发展中阶段,需要新增污水处理设施。同时,我国污水回用标准的范围正在逐渐拓宽,已经从 COD_{Cr} 、 BOD_5 和 SS 等扩展到 TN 、总大肠杆菌群等指标,但是从指标的限值来说,对比美国,我国污水回用标准限值较为宽松,存在着提升的空间。相较于德国、澳大利亚等国家,我国还面临着技术发展路



图7 各国污水回用标准综合评价得分

Tab. 7 Comprehensive Evaluation Scores of Wastewater Reuse Standards in Various Countries

线滞后、污水回用标准制定起步晚、缺乏相应的法律法规支持、再生水处理工艺复杂、受制于成本及其规模等问题。

加拿大和日本的污水回用标准得分较高,表明其标准设置较为宽松,主要是受到大肠杆菌指标的影响,原因主要是该国对于大肠杆菌的净化去除技术较差,或者政府没有制定相关的惩罚政策和制度,导致对大肠杆菌指标不够重视,且相关的安全事件频发。2020年东京奥运会游泳场地大肠杆菌指标严重超标,达到国际铁人三项联盟规定标准的21倍,大肠杆菌超过国际旅游联合会标准7倍。印度的水环境问题积累已久,印度始终无法平衡好发展和环保之间的关系,联邦制制度导致中央政府的水环境政策难以渗透到地方邦,水环境治理的经费也被地方邦挪为他用,同时低下的污水治理能力难以支撑庞大的污水排放量。

3.2 灰水资源化项目

本文将灰水资源化项目按照规模划分为分散式项目(排水量 $<10\text{ m}^3/\text{d}$)、半集中式项目(排水量为 $10\sim 1\,000\text{ m}^3/\text{d}$)和集中式项目(排水量 $>1\,000\text{ m}^3/\text{d}$),如表12^[40,46,62-68]所示。其中,由于排水量的约束,分散式项目建设在小城镇较多,主要将絮凝技术、活性炭/砂滤技术和氯化技术等进行复合,进行污水处理回用;半集中式项目主要建设在中小城市和大城市郊区,主要采用AAO、MBR、超滤等技术,AAO工艺流程和操作管理较为简单,MBR系统出水水质稳定且占地面积小,超滤技术污染物去除率较高;集中式项目主要建设在较大城市中,主要采用AO、SBR和传统活性污泥法,因为这些方法对比于

超滤等工艺,能耗相对较低且运营费用较低,但是操作复杂、处理单元多,管理水平有待加强。

在公众认知方面,公众可能会认为灰水回用具有健康风险,担心因使用经过处理的灰水而生病。经相关问卷调查,公众更偏向于接受将再生水应用于很少或不需要人类接触的领域,例如冲厕所和灌溉。通过在约翰内斯堡大学应用灰水冲洗厕所系统,表示担忧的受访者比例从2009年64%降低至2010年50%,数据显著下降可能归因于经使用该回收系统后,公众对项目团队的信心水平提高,为灰水回收系统的进一步推广和优化提供了条件^[69]。

经济效益分析,推广灰水资源化回用,将处理后的灰水作为新的水资源进行开发和利用,应用于冲厕、洗车和灌溉等。灰水资源化利用之前,灌溉和洗车用水常采用就近湖泊引水使用,水质质量差,存在安全隐患,同时还受到季节性的影响,导致水量波动起伏,影响当地人的日常生活和务农。采用灰水资源化利用后,不仅保证了丰富的水源,也提供了安全的生活灌溉用水,有利于社会的供水安全,也有利于生态城市和绿色农村的建设及可持续发展。例如,在研究灰水再利用的经济性方面,通过考虑较高的饮用水关税和灰水回用补贴等多种因素,计算得到当废水量为 $360\text{ m}^3/\text{d}$,每年节水1314万t,净收入为69.38万元,静态投资回收期为1.3年,与处理饮用水的费用相比,灰水处理的成本较低,可以为公众带来持续性的经济效益^[70]。另一方面,Surendran等^[71]将回收灰水应用于酒店和高层建筑,进行厕所冲水,并确定了该项目回收期为8~14年。

表 12 国内外污水回用项目
Tab. 12 Wastewater Reuse Projects at Home and Abroad

形式	处理技术	处理水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	污水来源	去除率	国家/标准/ 用途	参考文献
分散式	混凝-絮凝技术+活性炭过滤器+臭氧发生器(原理:混凝剂与胶体物质发生电中和,形成沉降)	0.52	洗车设施	TDS 的去除率为 15%,有机物的去除率>70%,色度的去除率>90%,浑浊度的去除率>90%	美国	[62]
	絮凝-浮选柱(FCF)+砂滤+氯化(原理:电荷中和与架桥)	1.2	洗车设施	粪大肠菌群的去除率<99%,总大肠菌群的去除率<95%, COD_{Cr} 的去除率为 62.8%, BOD_5 的去除率为 60.3%	巴西	[63]
	旋转生物接触器+过滤+氯化(原理:微生物在圆盘表面生长,轴旋转将全部微生物与液体接触,去除液体中的有机物)	7.2	洗车设施	COD_{Cr} 的去除率为-52.7%, BOD_5 的去除率为-85.8%,浑浊度的去除率为-82.1%	巴西	[64]
	MBBR	84	学生宿舍	浑浊度的去除率为 66%,TSS 的去除率为 87.07%,TP 的去除率为 12%, BOD_5 的去除率为 59%, COD_{Cr} 的去除率为 70%	巴西	[46]
半集中式	AAO-MBR	130	商场废水	BOD_5 的去除率为 97.66%,氨氮的去除率为 99.51%	《城市污水再生利用 城市杂用水水质》(GB/T 18920—2020)	[65]
	超滤+反渗透工艺	250	经污水处理厂深度处理后的污水	COD_{Cr} 的去除率为 83%,二氧化硅的去除率为 95%,总硬度的去除率为 95%	回用于化工生产	[66]
	SBR	1 680	工业煤气化灰水	氨氮的去除率为 96.15%, COD_{Cr} 的去除率为 94.47%,氰化物的去除率为 98.18%	《合成氨工业水污染物排放标准》(GB 13458—2001)	[40]
集中式	载体生物流化床技术+超滤+反渗透	34 000	市政污水处理厂二级出水	Cl^- 的去除率为 99%, COD_{Cr} 的去除率为 93%,硬度的去除率为 74%,SS 的去除率为 93%	将城市污水处理成为炼油厂循环冷却补充水和一级除盐水	[67]
	电化学氧化处理法+氧化型杀菌剂次氯酸钠+生物剥离剂	720 000	炼油污水	总铁的去除率为 86.1%, COD_{Cr} 的去除率为 50%	作为工业循环冷却水系统的补水水源	[68]

环境效益分析,将再生灰水代替 1 m^3 传统生产用水,可以节能 $0.357 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 的能源,灰水回用系统温室气体排放量为 $0.22 \text{ kg CO}_2 \text{ eq}/\text{m}^3$,均低于传统系统,表明灰水回用对于减少运行阶段的温室气体排放具有较好的效果。同时,利用再生水冲洗河流,可以保护城市水源地水质,减少排入污染物总量,例如福州市污水处理厂建成后,污染负荷在 1995 年基础上减少 40.3%,径污比上升至 47:1,改善了河水质的黑臭问题,达到《景观娱乐用水水质标准》(GB 12941—1991)^[72-73]。

因此,灰水资源化回用在经济、社会、环境效益方面都具有现实和长远意义,改善了城市卫生,提高城市整体环境水平,同时以较低的成本节省了大量的洁净水,缓解了城市水资源紧缺的问题。

4 结论与展望

本文基于灰水的水质和水量特点,将生活污水中的灰水单独处理回用,提高了水资源利用率。目前国内外对于灰水处理的研究已经有了一定的进展。总体而言,生态处理法建设成本低,运维简单,具有一定的抗水质水量冲击能力,具有较好的推广

应用价值,但需要考虑特殊地区观念、管理水平、生活习惯、气候等差异,需要将技术进行改进,因地制宜制定不同的运行方式。

针对目前灰水处理回用的问题和挑战,本文提出以下研究展望:(1)目前国内外研究者主要关注了灰水单一处理的效果,而单一的处理工艺通常难以满足处理灰水中复杂成分的去除要求,因此,针对不同灰水回用的目标,如洗车、灌溉、冲厕等可以制定不同的复合灰水处理对策;(2)探索更加有效、更加便捷和经济实用的灰水处理技术,需要将市场推广的建设运行成本考虑其中;(3)同时,针对特殊地区灰水处理技术面临的挑战,例如高寒、干旱和半干旱地区,应该研发相应的灰水处理技术辅助设备,例如保温设备以及水量水质调节设备等,进而形成灰水处理和资源化集成系统,拓宽灰水处理技术应用场景。

参考文献

- [1] 徐靖. 联合国公布《2018 年世界水资源开发报告》[J]. 水处理技术, 2018, 44(4): 35-35.
XU J. *World water development report 2018* released by the United Nations[J]. *Technology of Water Treatment*, 2018, 44(4): 35-35.
- [2] HSIEH J C, MA L H, CHIU Y H. Assessing China's use efficiency of water resources from the resampling super data envelopment analysis approach [J]. *Water*, 2019, 11(5): 1069. DOI: 10.3390/w11051069.
- [3] 吴戈. 多目标导向下中国重点城市污水处理绩效评价研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2023.
WU G. *Research on performance evaluation of wastewater treatment in key cities in China under multi-objective guidance* [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2023.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 两部委发布“十四五”城镇污水处理及资源化利用发展规划到 2025 年县城污水处理率达到 95% 以上 [EB/OL]. (2021-06-17) [2023-04-28]. www.mohurd.gov.cn/xinwen/gzdt/202106/20210617_250488.html.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. *Urban sewage treatment and resource utilization development plan to 2025 county sewage treatment rate to reach more than 95%* [EB/OL]. (2021-06-17) [2023-04-28]. www.mohurd.gov.cn/xinwen/gzdt/202106/20210617_250488.html.
- [5] 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 L H, ZHANG P W, LI K, et al. Review on grey water treatment and recycling technology [J]. *Water Resources and Hydropower Technology*, 2019, 50(8): 146-153.
- [6] 王少勇, 陈洪斌. 灰水处理与回用进展 [J]. *中国沼气*, 2007, 24(6): 5-9, 24.
WANG S Y, CHEN H B. Review on grey water treatment and reuse [J]. *China Biogas*, 2007, 24(6): 5-9, 24.
- [7] ARNI S A, ELWAHEIDI M, SALIH A, et al. Greywater reuse: An assessment of the Jordanian experience in rural communities [J]. *Water Science and Technology*, 2022, 85(6): 1952-1963.
- [8] SOREN D, BARMAN J, ROY K C, et al. Evaluation of groundwater quality of South Bengal, India [J]. *Natural Resources and Environment Board*, 2008, 85(6): 1952-1963.
- [9] SHRESTHA R, HABERL R, LABER J. Constructed wetland technology transfer to Nepal [J]. *Water Science and Technology*, 2001, 43(11): 345-350.
- [10] FARUQUI N, AL-JAYYOUSI O. Greywater reuse in urban agriculture for poverty alleviation [J]. *Water International*, 2002, 27(3): 387-394.
- [11] ALDERLIESTE M C, LANGEVELD J G. Wastewater planning in Djenné, Mali. A pilot project for the local infiltration of domestic wastewater [J]. *Water Science and Technology*, 2005, 51(2): 57-64.
- [12] DIENER S, MOREL A. Greywater management in low and middle-income countries, review of different treatment systems for households or neighbourhoods [J]. *Turkish Journal of Fisheries & Aquatic Sciences*, 2006, 45(4): 428-432.
- [13] BÜSSER S, PHAM T N, ANTOINE M, et al. Evaluation of groundwater quality of South Bengal, India [J]. *Journal of Earth System Science*, 2013, 132(3): 28-30.
- [14] FRIEDLER E. Quality of individual domestic greywater streams and its implication for on-site treatment and reuse possibilities [J]. *Environmental Technology*, 2004, 25(9): 997-1008.
- [15] 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 T, ZHONG C H, WANG X X, et al. Research progress on treatment and reuse of greywater [J]. *Environmental Science and Technology*, 2018, 41(3): 134-140.
- [16] 连小鹰, 何晶晶, 张期鑫, 等. 居民住宅区灰水回用的可行性分析 [J]. *给水排水*, 2001, 11(3): 67-70.
LIAN X Y, HE P J, ZHANG Q L, et al. Feasibility analysis of grey-water reuse in residential area [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2001, 11(3): 67-70.
- [17] BOANO F, CARUSO A, COSTAMAGNA E, et al. A review of nature-based solutions for greywater treatment: Applications, hydraulic design, and environmental benefits [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 711: 134731. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.134731.

- [18] MANIAM G, ZAKARIA N A, LEO C P, et al. An assessment of technological development and applications of decentralized water reuse: A critical review and conceptual framework[J]. *WIREs Water*, 2022, 9(3): e1588. DOI: 10.1002/wat2.1588.
- [19] 项磊, 杨黎彬, 陈家斌, 等. 碳中和背景下微藻技术对 PPCPs 的污染控制[J], *净水技术*, 2021, 40(11): 6-15, 27.
XIANG L, YANG L B, CHEN J B, et al. Pollution control of PPCPs by microalgae technology in the context of carbon neutrality [J]. *Water Purification Technology*, 2021, 40(11): 6-15, 27.
- [20] GHAITIDAK D M, YADAV K D. Characteristics and treatment of greywater—A review[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, 20(5): 2795-2809.
- [21] PATIL Y M, MUNAVALLI G R. Performance evaluation of an integrated on-site greywater treatment system in a tropical region [J]. *Ecological Engineering*, 2016, 95(3): 492-500.
- [22] NAHID H, AYOUB K J. Comparison of photo-Fenton, $O_3/H_2O_2/UV$ and photocatalytic processes for the treatment of gray water[J]. *Ecotoxicology & Environmental Safety*, 2018, 161(2): 683-690.
- [23] FOUNTOLAKIS M S, MARKAKIS N, PETOUSI I, et al. Single house on-site grey water treatment using a submerged membrane bioreactor for toilet flushing[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 38(4): 551-552.
- [24] SANTOS C, TAVEIRA-PINTO F, CHENG C Y, et al. Development of an experimental system for greywater reuse[J]. *Desalination*, 2012, 285(1): 301-305.
- [25] 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.
- [26] 李云, 何志琴, 夏训峰, 等. 国内外灰水处理技术研究进展[J]. *环境工程技术学报*, 2021, 11(5): 935-941.
LI Y, HE Z Q, XIA X F, et al. Research progress of grey water treatment technology at home and abroad [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2021, 11(5): 935-941.
- [27] 李文凯, 郑天龙, 刘俊新. 农村灰水收集-处理-回用系统现状及应用建议[J]. *工业水处理*, 2022, 42(4): 1-6.
LI W K, ZHENG T L, LIU J X. Current status and application suggestions of the rural greywater collection-treatment-reuse system[J]. *Industrial Water Treatment*, 2022, 42(4): 1-6.
- [28] 邹婷. 生物吸附剂改性松树皮吸附水溶液中 Cu^{2+} 的性能研究[D]. 南京: 南京大学, 2012.
ZOU T. Study on adsorption of Cu^{2+} in aqueous solution of pine bark modified by biological adsorbents [D]. Nanjing: Nanjing University, 2012.
- [29] DALAHMEH S S, PELL M, VINNERAS B, et al. Efficiency of bark, activated charcoal, foam and sand filters in reducing pollutants from greywater [J]. *Water, Air & Soil Pollution*, 2012, 223(7): 3657-3671.
- [30] 王振, 李化建, 黄法礼, 等. 典型岩性机制砂的吸附行为研究[J]. *建筑材料学报*, 2023, 26(3): 251-258.
WANG Z, LI H J, HUANG F L, et al. Adsorption behavior of typical lithological manufactured sands [J]. *Journal of Building Materials*, 2023, 26(3): 251-258.
- [31] KEE M W, SOO J W, LAM S M, et al. Evaluation of photocatalytic fuel cell (PFC) for electricity production and simultaneous degradation of methyl green in synthetic and real greywater effluents [J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 228(6): 383-392.
- [32] 唐伟博. 改性多孔陶粒在水处理中的应用研究[D]. 景德镇: 景德镇陶瓷大学, 2020.
TANG W B. Application research of modified porous ceramics in water treatment [D]. Jingdezhen: Jingdezhen Ceramic University, 2020.
- [33] GROSS A, SHMUELI O, RONEN Z, et al. Recycled vertical flow constructed wetland (RVFCW)—A novel method of recycling greywater for irrigation in small communities and households[J]. *Chemosphere*, 2006, 66(5): 916-923.
- [34] PARJANE S B, SANE M G. Performance of grey water treatment plant by economical way for Indian rural development [J]. *International Journal of ChemTech Research*, 2011, 3(4): 123-125.
- [35] AL-HAMAEDEH H, BINO M. Effect of treated grey water reuse in irrigation on soil and plants [J]. *Desalination*, 2010, 256(1): 115-119.
- [36] PIDOU M, AVERY L. Chemical solutions for greywater recycling [J]. *Chemosphere*, 2008, 71(1): 147-155.
- [37] BARIŞCI S, TURKAY O. Domestic greywater treatment by electrocoagulation using hybrid electrode combinations [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2016, 10(2): 56-66.
- [38] BARZEGAR G, WU J, CHANBARI F. Enhanced treatment of greywater using electrocoagulation/ozonation: Investigation of process parameters [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2018, 121(3): 125-132.
- [39] ANTONOPOULOU G, KIRKOU A, STASINAKIS A S. Quantitative and qualitative greywater characterization in Greek households and investigation of their treatment using physicochemical methods[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 454(1): 426-432.
- [40] 李海曙. SBR 法处理煤气化灰水[J]. *工业水处理*, 2007, 19(1): 69-72.
LI H S. Application of SBR process to the treatment of the coal gasification ash water [J]. *Industrial Water Treatment*, 2007,

- 191(1): 69-72.
- [41] 周琪, 袁嗣兵, 竺建荣, 等. 升流式厌氧污泥床处理生活污水[J]. 中国给水排水, 1992(4): 45-47.
ZHOU Q, YUAN S B, ZHU J R, et al. Treatment of domestic sewage by upflow anaerobic sludge bed [J]. China Water & Wastewater, 1992 (4): 45-47.
- [42] 张佩瑶. IFAS-MBR 工艺灰水处理及回用优化研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2016.
ZHANG P Y. Study on optimization of ash water treatment and reuse in IFAS-MBR process [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2016.
- [43] 丁安. 重力流膜生物反应器处理灰水效能及膜通量稳定特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
DING A. Study on gray water treatment efficiency and membrane flux stability of gravity flow membrane bioreactor [D]. Harbin: Harbin Industry University, 2015.
- [44] 李丹. 基于灰黑分离式农村生活污水新型生物转盘性能的研究[D]. 南京: 东南大学, 2020.
LI D. Research on performance of a new biological turntable for rural domestic sewage based on gray and black separation [D]. Nanjing: Southeast University, 2020.
- [45] CHRISTOPHER C, LARIVE O, REYNAERT E, et al. Chemical composition, nutrient-balancing and biological treatment of hand washing greywater[J]. Water Research, 2018, 34(7): 128-130.
- [46] CHRISPIM M C, NOLASCO M A. Greywater treatment using a moving bed biofilm reactor at a university campus in Brazil[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 142(4): 290-296.
- [47] ATANASOVA N, DALMAU M, COMAS J, et al. Optimized MBR for greywater reuse systems in hotel facilities[J]. Journal of Environmental Management, 2017, 193(2): 503-511.
- [48] 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 K J, CHEN S P, DONG N, 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.
- [49] PRODANOVIC V, HATT B, MCCARTHY D, et al. Green walls for greywater reuse: Understanding the role of media on pollutant removal[J]. Ecological Engineering, 2017, 102(2): 625-635.
- [50] 郑洁敏, 牛天新, 陈煜初, 等. 三十九种观赏挺水植物应用于人工浮岛水质净化潜力的比较[J]. 北方园艺, 2013, 38(6): 72-76.
ZHENG J M, NIU T X, CHEN Y C, et al. Comparison of the potential water purification by 39 usually used ornamental emerged plants in the artificial floating island [J]. Northern Horticulture, 2013, 38(6): 72-76.
- [51] 吉祝美, 李通林, 吕锡武, 等. 生态塘处理农村生活污水的效果分析[J]. 江苏环境科技, 2007, 23(5): 39-41.
JI Z M, LI T L, LÜ X W, et al. The effect analysis of sewage treatment by ecotypic bed [J]. Jiangsu Environmental Science and Technology, 2007, 23(5): 39-41.
- [52] DEWI N R, HADISOEBROTO R, FACHRUL M F. Removal of ammonia and phosphate parameters from greywater using *Vetiveria zizanioides* in subsurface-constructed wetland [C]. Indonesia: Annual Applied Science and Engineering Conference, 2019.
- [53] 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. Research on gray water treatment technology of semi-centralized treatment system [D]. Shanghai: Tongji University, 2007.
- [54] 薛旭, 王雪清. 气化灰水预处理及生化脱氮工艺的研究与应用[J]. 石油化工安全环保技术, 2021, 37(6): 42-47.
XUE X, WANG X Q. Study and application of gasification ash-water pretreatment and biochemical denitrification process [J]. Petrochemical Safety and Environmental Protection Technology, 2021, 37(6): 42-47.
- [55] 杨洵. 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, 2019.
YANG T. Study on the treatment of gray water by electroflocculation-gravity flow membrane filtration (EC-GDM) [D]. Chongqing: Chongqing University, 2019.
- [56] 谢林花, 吴德礼, 张亚雷. 中国农村生活污水治理技术现状分析及评价[J]. 生态与农村环境学报. 2019, 34(10): 865-870.
XIE L H, WU D L, ZHANG Y L. Analysis and evaluation of China's rural domestic sewage treatment technology[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2019, 34(10): 865-870.
- [57] 张凤翔. 基于改进 AHP 方法的沂沭泗地区水环境安全评价[J]. 水利规划与设计, 2013, 38(2): 27-29.
ZHANG F X. Evaluation of water environment security in Yishu District based on improved AHP method [J]. Water Resources Planning and Design, 2013, 38(2): 27-29.
- [58] 郭彦英, 邓云峰, 任珺. AHP 法在地表水水质综合评价指标权重确定中的应用[J]. 兰州交通大学学报, 2006, 45(3): 70-72, 76.
GUO Y Y, DENG Y F, REN J. Application of analytic hierarchy process(AHP) method in comprehensive assessment of surface water quality [J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2006, 45(3): 70-72, 76.
- [59] 周梦雪. 基于层次分析法的乡村景观环境综合评价——以成都市铁牛村为例[J]. 现代园艺, 2023, 46(7): 56-58.
ZHOU M X. Comprehensive evaluation of rural landscape environment based on analytic hierarchy process: A case study of Tienu Village in Chengdu [J]. Contemporary Horticulture, 2023, 46(7): 56-58.

(下转第 88 页)

- based on the analysis of urban parks [J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2023, 82: 127875. DOI: 10.1016/j.ufug.2023.127875.
- [12] 闫明, 敖嫩, 陈利顶, 等. 城市生态品质公众感知与现状的定量指标研究[J]. *生态学报*, 2023, 43(12): 4920-4927.
YAN M, AO N, CHEN L D, et al. Research on the quantitative indicators of public perception and status of urban ecological quality[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(12): 4920-4927.
- [13] 曾正荣, 袁永坤, 孙建国. 淀山湖生物资源调查研究[C]. 北京: 上海市湿地利用和保护研讨会论文集, 2002.
ZENG Z R, YUAN Y K, SUN J G. Investigation of biological resources in Dianshan Lake [C]. Beijing: Proceedings of Shanghai Wetland Utilization and Protection Seminar, 2002.
- [14] 谭永洁, 王雪琪, 叶晓, 等. 上海市黄浦江河网氮污染输入负荷分析和量化计算[J]. *环境污染与防治*, 2014, 36(10): 13-17.
TAN Y J, WANG X Q, YE X, et al. The analysis and calculation of nitrogen input load in Shanghai Huangpu River network [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2014, 36(10): 13-17.
- [15] 苏芬芬, 韩帅, 顾嘉嘉, 等. 典型河流的水质评价及影响因素分析: 以深圳龙西河和丁山河为例[J]. *净水技术*, 2023, 42(4): 62-72.
SU F F, HAN S, GU J J, et al. Water quality evaluation and influence factors analysis of typical rivers: A case study of Longxi River and Dingshan River in Shenzhen [J]. *Water Purification Technology*, 2023, 42(4): 62-72.
- (上接第 43 页)
- [60] 庞振凌, 常红军, 李玉英, 等. 层次分析法对南水北调中线水源区的水质评价[J]. *生态学报*, 2008, 54(4): 1810-1819.
PANG Z L, CHANG H J, LI Y Y, et al. Analytical hierarchy process (AHP) evaluation of water quality in Danjiangkou reservoir-source of the middle line project to transfer water from south to north, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 54(4): 1810-1819.
- [61] 董一麟, 周凯迪, Marius Mohr. 基于半集中式理念的城市污水处理与回用——德国 DEUS 21 示范项目介绍[J]. *农业工程*, 2018, 8(1): 43-47.
DONG Y L, ZHOU K D, MOHR M. Semi-centralised urban wastewater treatment and reuse introduction of DEUS 21 [J]. *Agricultural Engineering*, 2018, 8(1): 43-47.
- [62] CANALES F A, PLATA-SOLANO D, RODELO R C, et al. Assessment of carwash wastewater reclamation potential based on household water treatment technologies [J]. *Water Resources and Industry*, 2021, 26(4): 23-26.
- [63] ZANETI R, ETCHEPARE R, RUBIO J. Car wash wastewater reclamation. Full-scale application and upcoming features [J]. *Resources Conservation and Recycling*, 2011, 55(11): 953-959.
- [64] RUBÍ-JUÁREZ H, BARRERA-DÍAZ C, LINARES-HERNÁNDEZ I, et al. A combined electrocoagulation-electrooxidation process for carwash wastewater reclamation [J]. *International Journal of Electrochemical Science*, 2015, 10(8): 6754-6767.
- [65] 张栋. 一体式平板膜生物反应器在商场污水回用中的应用研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2022.
ZHANG D. Application of integrated flat membrane bioreactor in wastewater reuse in shopping malls [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2022.
- [66] 董雄文. 采用双膜法作为炼油及化工污水回用系统工艺的应用分析[J]. *当代化工研究*, 2020, 61(8): 103-104.
DONG X W. Application and analysis of double membrane method as recycling system of oil refining and chemical wastewater [J]. *Contemporary Chemical Research*, 2020, 61(8): 103-104.
- [67] 黄代存. 城市污水回用炼油厂工程应用[J]. *中外能源*, 2021, 26(9): 89-95.
HUANG D C. Engineering application of municipal sewage reuse in refineries [J]. *China and Foreign Energy*, 2021, 26(9): 89-95.
- [68] 龚卓仪, 吕骏腾, 杨帆. 新无磷方案在炼油污水回用循环水系统成功应用[J]. *广东化工*, 2021, 48(16): 202-206.
GONG Z Y, LÜ J T, YANG F. New generation non-phosphorous treatment application in refinery plant recirculation cooling water system with reused water as make-up water [J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2021, 48(16): 202-206.
- [69] ILEMOBADE A, OLANREWAJU O, GRIFFIOEN M. Greywater reuse for toilet flushing at a university academic and residential building [J]. *Water S A*, 2013, 39(3): 123-125.
- [70] MISRA R K, PATEL J H, BAXI V R. Reuse potential of laundry greywater for irrigation based on growth, water and nutrient use of tomato [J]. *Journal of Hydrology*, 386(1/2/3/4): 95-102. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2010.03.010.
- [71] SURENDRAN S, WHEATLEY A D. Grey-water reclamation for non-potable re-use [J]. *Water and Environment Journal*, 1998, 12(6): 406-413.
- [72] 叶晓燕, 王菲凤, 王珊珊. 城市中水回用环境经济效益分析——以福州市洋里污水处理厂出水回用为例[J]. *环境科学与管理*, 2006, 3(8): 51-55.
YE X Y, WANG F F, WANG S S. The analysis on the environmental economic of intermediate water recycle in city-To take water recycle out of Yangli sewage treatment plant in Fuzhou for example [J]. *Environmental Science and Management*, 2006, 3(8): 51-55.
- [73] CHANG J, LEE W, YOON S. Energy consumptions and associated greenhouse gas emissions in operation phases of urban water reuse systems in Korea [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 141(3): 728-736.