

戴畅,何志琴,李云,等.生物炭材料特征及其在灰水处理中应用研究进展[J].环境工程技术学报,2024,14(1):268-277.

DAI C,HE Z Q,LI Y,et al.Research progress on the characteristics of biochar material and its application in greywater treatment[J].Journal of Environmental Engineering Technology, 2024, 14(1): 268-277.

生物炭材料特征及其在灰水处理中应用研究进展

戴畅^{1,2},何志琴^{1,2},李云^{2,3*},王斌^{2,3*},陈晓冬⁴,方菲^{2,3},秦晓鹏^{2,3},李志涛^{2,3}

1.中国环境科学研究院

2.生态环境部土壤与农业农村生态环境监管技术中心

3.土壤中心嘉善双碳创新研究院

4.临沂市园林环卫保障服务中心

摘要 生物炭具有比表面积大、孔隙度高、表面官能团丰富等优点,在灰水处理方面有一定的应用潜力。介绍了灰水的水质水量特点及常见处理技术,重点对生物炭的性质、改性方法以及生物炭基质在灰水处理方面的国内外应用研究进展进行了综述,并分析了生物炭的再生性能。结果表明:目前应用于灰水处理的生物炭大多是木质源生物炭,木质源生物炭 pH 处于碱性范围,具有大比表面积、高孔隙度等优点,其比表面积和孔隙度大多数在 0~520 m²/g 和 48%~83%;众多改性方法中,金属盐生物炭改性的研究较多,采用该方法改性后提高了生物炭的吸附能力,并使其磁化从而方便后期的分离回收;生物炭基质多应用于人工湿地、绿墙等生态处理系统进行灰水处理,在最优运行条件下对灰水中有机物、营养物质的去除率均能达到 90%,具有良好的应用前景。最后对生物炭在灰水处理应用中存在的问题进行了总结,并从加强新污染物去除、生物炭再生及节能降耗 3 个方面对未来研究进行了展望。

关键词 灰水处理;基质;生物炭;改性;再生

中图分类号:X703 文章编号:1674-991X(2024)01-0268-10 doi: 10.12153/j.issn.1674-991X.20230301

Research progress on the characteristics of biochar material and its application in greywater treatment

DAI Chang^{1,2}, HE Zhiqin^{1,2}, LI Yun^{2,3*}, WANG Bin^{2,3*}, CHEN Xiaodong⁴, FANG Fei^{2,3},
QIN Xiaopeng^{2,3}, LI Zhitao^{2,3}

1.Chinese Research Academy of Environmental Sciences

2.Technical Centre for Soil, Agriculture and Rural Ecology and Environment, Ministry of Ecology and Environment

3.Innovation Institute of Carbon Peaking and Carbon Neutrality, TCARE & Jiashan

4.Linyi Garden Sanitation Guarantee Service Centre

Abstract Biochar has the advantages of large specific surface area, high porosity and abundant surface functional groups, and has large potential for application in greywater treatment. The water quality and quantity characteristics of greywater and common treatment technologies were introduced, the properties of biochar, modification methods and the progress of domestic and international applications of biochar substrates in greywater treatment were mainly reviewed, and the regeneration performance of biochar was analyzed. The results showed that most of the biochar currently applied in greywater treatment was wood-derived biochar which has an alkaline range of pH and the advantages of large specific surface area and high porosity, and its specific surface area and porosity were mostly in the range of 0-520 m²/g and 48%-83%. Among numerous modification methods, there were many studies on the modification of metal salt biochar. This method could improve the adsorption capacity of biochar and make it magnetized, making it convenient for later separation and recovery. The biochar matrix was mostly used in constructed wetlands, green walls and other ecological treatment systems for greywater treatment, and the removal rate of organic matter and nutrients in greywater could reach 90% under optimal operating conditions, which had

收稿日期:2023-04-17

基金项目:科技基础资源调查专项(2021FY101004)

作者简介:戴畅(2000—),女,硕士研究生,主要从事农村生活污水处理研究,daichang202222@163.com

* 责任作者:1.李云(1987—),女,副研究员,博士,主要从事水处理技术及资源化利用研究,liyunliyun1234567@163.com

2.王斌(1991—),男,工程师,主要研究方向为农村生态环境治理技术,wangbin@tcare-mee.cn

good application prospects. Finally, the problems in the application of biochar in greywater treatment were summarized, and an outlook on three aspects of the research was provided, including strengthening the removal of new pollutants, the regeneration of biochar and the energy saving and consumption reduction.

Key words greywater treatment; substrate; biochar; modification; regeneration

随着社会生产力的持续进步与人类生活质量的日益提高,水资源的消耗量不断增长,水资源短缺问题成为关注的重点。相比于厕所黑水,洗衣洗菜等生活灰水因具有污染物浓度低且水量大的特点,是一种理想的再生水源,对灰水进行适当处理后,灰水的可重复使用性可以较好地解决非饮用水源的缺水问题。在灰水的众多处理技术中,生态类技术由于处理效果好、使用成本低、维护简单方便等而受到广泛关注。而基质是生态类技术中的关键组成之一,不同基质的污染物去除性能差异显著。其中生物炭材料以其原料来源广泛、比表面积大、吸附处理效果好、可重复再生、对环境友好等特点,成为灰水生态类处理的首选基质之一。因此,笔者对灰水排放特征、灰水处理方法、生物炭材料的特点和改性、生物炭材料在国内外灰水处理中的应用及生物炭再生等进行了全面梳理研究,以期为基于生物炭材料的灰水治理技术应用提供参考。

1 灰水排放特征及常见处理技术

1.1 灰水排放特征

灰水是指除厕所污水以外的生活污水,具体包括居民日常生活产生的来自洗衣房、洗脸盆、洗衣机、洗碗机、浴室和厨房水槽的污水^[1]。灰水水量一般占生活污水总量的 70% 左右^[2]。根据居民的生活方式、经济水平、风俗习惯和供水状况的不同,灰水水量也呈现较大差异。典型的灰水产量为 90~120

L/(人·d),在缺水的低收入国家,灰水产生量可能低至 20~30 L/(人·d)^[3]。由于不含尿液、粪便和厕纸等,灰水的污染程度比生活污水低得多。

灰水中主要含有一定量的固体物质、有机物、营养物质、油脂、表面活性剂和微生物等^[4]。灰水水质因地区、家庭的不同而存在较大差异,一些发展中国家灰水中的有机物浓度非常高,比如 Biruktawit^[5]测出埃塞俄比亚某地灰水的化学需氧量(COD)为 2 004 mg/L,这是由于发展中国家用水量较少,水重复使用率高,导致灰水中有机物浓度相对较高。此外,不同来源的灰水,其污染物浓度也有显著差异。由表 1 可知,与洗浴灰水相比,厨房和洗衣灰水的有机物含量更丰富,可能的原因是厨房和洗衣灰水中含有大量洗涤剂和富含油脂的食物残渣,导致有机物浓度增大^[4];但洗衣灰水和混合灰水相较其他灰水氮浓度较低,浴室灰水缺乏氮和磷,而厨房灰水中这 2 种元素含量相对丰富;厨房和洗衣灰水中因洗涤剂使用量更多,导致其表面活性剂的浓度更高^[6];而相较于其他灰水,洗浴灰水中被发现含有最高浓度的总大肠菌群,这归因于洗浴灰水中存在部分人体死皮、汗液和微量尿液,导致总大肠菌群浓度增大^[7]。

1.2 灰水常见处理技术

现有灰水处理技术可以分为物理类、化学类、生物类和生态类。物理类主要有过滤和膜分离技术,过滤技术对环境友好,但对有机物和微生物的处理效果有限^[17],为了用水安全往往与消毒系统联用,

表 1 不同来源灰水水质
Table 1 Water quality analysis of greywater from different sources

灰水来源	地区	年份	COD/(mg/L)	浊度/NTU	氨氮浓度/ (mg/L)	TN浓度/ (mg/L)	TP浓度/ (mg/L)	表面活性剂 浓度/(mg/L)	总大肠菌群数/ (MPN/mL)
洗浴灰水	中国北京 ^[8]	2017	80.4~145.6	50.3~80.7	12.3~17.8	5.2~13.3	1.3~1.9	6.2~9.5	4×10 ³
	中国成都 ^[9]	2021	70.2~182.5		3.5~8.7		0.8~3.7	4.1~12.6	
	巴西圣保罗州 ^[7]	2017	273			50.3	5.3		
洗衣灰水	韩国首尔 ^[10]	2022		139.2±5.5		4.2±0.4	0.1±0.0		
	中国宿迁 ^[11]	2022	286		2.06		0.083	33.4	
	中国南方某村庄 ^[6]	2021	503±234		4.3±3.9	11.4±5.9	0.5±0.3	45.4±26.9	
厨房灰水	意大利帕多瓦市 ^[12]	2021	855	139	6.89		15.7		
	印度卡拉格普尔 ^[13]	2022			30±3		13±2		
	中国南方某村庄 ^[6]	2021	478±110		4.7±2.1	14.3±4.4	1.1±0.4	14.1±8.5	
混合灰水	希腊克里特岛 ^[14]	2016	466	162		33	1.3		4.8×10 ³
	印度乌塔拉汗省 ^[15]	2020	554	150		14	8		
	中国重庆 ^[16]	2016	39~251		2.8~16.8	3.4~23.2	0.3~3.8	5.7~44	

如氯化或紫外线辐射^[18]。膜分离是一种高效的水处理方法,但存在膜更换频繁、使用成本高、操作复杂等缺点^[19]。化学法主要包括混凝/絮凝、光催化氧化和紫外照射等技术。混凝/絮凝可以显著降低废水中总悬浮固体(TSS)和有机物浓度^[20],常用絮凝剂有硫酸铝、氯化铁和聚合氯化铝(PACl)等,但使用絮凝剂成本往往较高,且容易产生难降解的副产物^[21];光催化氧化是一种新兴的废水处理技术,用于去除水体中各种污染物,具有高效、绿色安全、无二次污染、反应条件温和等优点,具有广泛的应用前景^[22]。生物类技术主要依靠微生物作用来完成对各类污染物的去除,代表工艺包括膜生物反应器(MBR)、序批式生物反应器(SBR)和曝气生物滤池等^[23]。以MBR为例,其通过将活性污泥法和膜分离技术有机结合,用膜技术来代替传统固液分离工艺,不仅提高了分离效率还节省了占地面积,但存在膜污染和运行成本高等问题^[24]。

生态类处理技术是以基质为载体,结合微生物和植物作用,耦合基质过滤吸附、植物吸收富集、微生物降解同化等多种机制来实现灰水中污染物的降解,比较典型的生态类处理技术有人工湿地^[25]、生态滤池^[26]和绿墙技术^[27]等。由于具有处理效果好、使用成本低、维护简单方便等特点,生态类处理技术在灰水处理领域有广泛的研究与应用^[20]。基质的选择对系统整体运行效果有至关重要的作用^[28],生态类处理技术中基质可以分为天然材料、废物材料和人工材料^[29]。生物炭是废物材料中富含碳的一类基质,具有较大的比表面积、高孔隙度、复杂的表面官能团,对污染物去除效果优异;生物炭可改性处理,提高对目标污染物的去除效果,且便于从处理溶液中分离;另外,生物炭作为基质成本低,可再生回收,有显著的环境意义。基于以上优点,近年来生物炭逐渐成为灰水处理领域最具应用潜力的基质之一。笔者重点介绍了生物炭的特点、生物炭改性方法及其处理效果和国内外利用生物炭处理灰水方面的研究进展,以期生物炭材料未来在灰水处理领域的发展提供理论依据。

2 生物炭特点及其改性处理

2.1 生物炭特点

生物炭是生物质原料在无氧或缺氧条件下热解生成的一类富含碳且高度芳香化的多孔材料^[30]。生物炭原料来源广泛^[31],主要包括农林废物、动物粪便和污泥等,其中秸秆、树木、草叶等农林废物是制备生物炭最常用的原材料。生物炭可通过慢速热解、

快速热解、气化法、水热碳化法、烘焙等方法进行制备,其中热解是目前最常用的制备方法^[32]。生物炭具有较大的比表面积、复杂的多孔结构和丰富的表面官能团^[33],对污染物有很强的吸附性能,可以为微生物提供生长繁殖的场所,增强处理过程中的生物作用^[34-35],所以其对水中有机物、营养元素和病原体等均有较好的去除效果。近年来,生物炭在灰水处理领域的研究受到了广泛关注^[36]。

表2列出了已有研究中应用于灰水处理的生物炭基质的原料和性质对比。由表2可知,较多研究都使用木质源生物炭作为灰水处理的基质,该类生物炭基质的粒径多为1~5 mm, pH一般处于碱性范围,生物炭中的无机矿物成分和表面含氧官能团是造成其pH偏碱性的原因^[37]。比表面积是影响生物炭灰水处理性能的一个重要指标,它可以决定基质材料是否适合生物膜附着生长,影响生物降解过程,从而影响污染物去除效果^[38]。生物炭的比表面积大多处于0~520 m²/g^[39],远大于沙子的比表面积(0.152 m²/g)^[40],故生物炭基质更适合生物膜附着生长,具有优异的污染物去除能力。此外,生物炭比表面积还与制备温度密切相关,在不同温度下制备的生物炭比表面积随温度升高而变大,但若温度过高也会出现不利影响,比如生物炭产率均随温度的升高而下降,大部分表面含氧官能团(如羟基、羧基、羰基)也逐渐消失^[41]。总孔隙度反映了生物炭的孔隙状况,孔隙度越大,生物炭上生物膜的形成能力越好。表2中列出的生物炭的总孔隙度为48%~83%,远高于沙子的总孔隙度(34%)^[40],说明生物炭有更好的生物膜形成能力^[42]。

综上所述,灰水处理常使用木质源生物炭作为基质,其pH处于碱性范围、具有大比表面积、高孔隙度等特点。选择木质源生物炭作为基质,首先是由于其成本低、原料易获取和广泛可用性;其次,高木质素原料制备出的木质源生物炭具有与活性炭相似的分子结构,可作为高成本活性炭的取代方案。与其他来源的生物炭相比,木质源生物炭在灰水处理方面更具优势。

2.2 生物炭改性及其处理效果

尽管生物炭是一种理想的灰水处理基质,但传统生物炭仍然存在许多不足,比如对灰水中重金属离子(例如Cr⁶⁺、Pb²⁺)的吸附容量较低、含有少量污染物、使用后难以从环境中分离等,这些因素限制了生物炭的推广与应用^[50]。为了改善生物炭的特性,以获得对灰水中目标污染物更高的去除能力,可对生物炭进行物理或化学改性,使其功能化或活化。

表 2 相关研究中应用于灰水处理的生物炭性质对比

Table 2 Comparison of the properties of biochar applied in greywater treatment in related studies

制备原料	制备温度/℃	粒径/mm	孔体积/(cm ³ /g)	比表面积/(m ² /g)	总孔隙度/%	容重/(kg/m ³)	pH
柳树 ^[43]	450	1~1.4、2.8~5		170~200	63.3	270	
木材 ^[44]		1.4、2.8、5			48~53		
硬木 ^[45]	450	1.4~5	0.171 6	170~200	72~74	800.2	9.46
硬木 ^[40]						187	
椰壳 ^[46]	450	0.15	0.171 6	130.5	71~83	296~307	
牛油果树 ^[47]		2~4.7、2					
木材 ^[48]		1~5					
柳树和松树 ^[49]		1~1.4和2.8~5			63.3	270	9

常见的生物炭改性方式有酸改性、碱改性、蒸汽活化改性、有机试剂改性和金属氧化物/金属盐改性(表 3)。

表 3 生物炭不同改性方法原理

Table 3 Principles of different modification methods for biochar

改性方法	常用改性试剂	改性原理
酸改性 ^[51]	HCl、H ₃ PO ₄ 、HNO ₃ 等	引入酸性官能团, 改变生物炭的多孔结构
碱改性 ^[52]	NaOH、KOH等	引入含氧官能团, 增加生物炭的比表面积
蒸汽活化改性 ^[53]	蒸汽	使高温蒸汽通过生物炭的孔隙, 以增加比表面积; 引入多孔结构
有机试剂改性 ^[54]	壳聚糖、甲醇、尿素等	增加生物炭表面的官能团和吸附位点
金属氧化物/金属盐改性 ^[55]	FeSO ₄ 、FeCl ₃ 、KMnO ₄ 等	改变表面结构和性质, 提高吸附能力, 增强磁性

金属氧化物/金属盐改性是生物炭最常见的化学改性方法之一。对生物炭进行金属氧化物或金属盐改性, 可以改变其表面结构和性质, 增大比表面积和孔体积, 以此改变其吸附特性。Patel 等^[56]将木屑生物炭经 ZnCl₂ 浸渍后, 在 500 ℃ 环境中热解 1 h 制备金属改性生物炭, 并使用砂柱和生物炭吸附联合处理灰水, 结果表明, 改性后生物炭比表面积为 748 m²/g, 对 COD、生化需氧量(BOD)、总溶解性固体的去除率分别为 93.4%、82.7% 和 96.5%。Patel 等^[15]以木屑、甘蔗渣、松针为原料, 在 ZnCl₂ 溶液中浸泡 1 h 后, 在 500 ℃ 充满 N₂ 的环境中热解 1 h, 制备出 3 种改性生物炭应用于灰水处理, 结果表明, 3 种改性生物炭的比表面积分别为 750、730、650 m²/g, 相较于原生物炭都有不同程度的增加, 对 COD、BOD 的去除率均大于 90%, 其中木屑改性生物炭对 COD 去除效果最好, 去除率达 97.47%。引入金属盐还可以对生物炭进行磁改性, 磁改性不仅能提高生物炭对污染物的去除效果, 还便于后期从环境中分离回收。Basnet 等^[45]以白杨木为原料制备硫酸铁改性生物炭用于处理灰水中的氮和磷, 结果表明, 富硫

酸铁的生物炭对氮、磷养分均有极显著的吸附效果, 使灰水中磷酸盐总量降低了 39%~41%。且硫酸铁改性后的生物炭具有磁性, 很容易通过外部磁铁将其从处理后的溶液中分离出来。

除金属改性外, 酸碱改性也是比较常见的方法。对生物炭进行酸碱改性主要通过增加比表面积和表面含氧官能团来优化其处理性能, 常见的改性剂有 H₃PO₄、HNO₃、NaOH 和 KOH。Carolina 等^[57]研究了沙子、沸石、H₃PO₄ 酸改性生物炭(AAC)和 KOH 碱改性生物炭(BAC)对灰水中有机物的去除效果, 结果表明, AAC 和 BAC 的最大平均吸附容量分别为 107.7 和 77.5 mg/g, 远超过沙子和沸石的吸附容量(低于 20 mg/g)。元素检测发现, 改性后生物炭氧元素含量均有不同程度的上升, 推测是在改性过程中生物炭表面形成了含氧官能团, 导致其处理性能增强。

综上所述, 目前在灰水处理领域对生物炭进行改性主要目的在于提高生物炭对灰水中有机物的去除效果, 但改性后的生物炭处理灰水的潜力远不止于此, 比如改性可以增加生物炭表面含氧官能团, 而羧基、羟基和羰基等官能团可以有效积累水中的重金属^[58], 从而使改性生物炭具有去除重金属的潜力。有研究发现, 经 H₃PO₄ 预处理的生物炭, 其比表面积和总孔体积明显高于未处理的生物炭, 试验证明该磷酸改性生物炭对铅的吸附能力远高于未改性生物炭^[59]。Ding 等^[60]以山核桃为原料制备 NaOH 改性生物炭, 发现生物炭对铅的最大吸附量由改性前的 11.2 mg/g 提高 53.6 mg/g。由于清洁剂、染料、洗涤剂和个人护理产品等家用化学品的广泛使用, 在灰水中经常检测出微污染物和外源性有机物, 如微塑料、双酚 a 和二乙基甲苯酰胺等^[61], 但目前关于改性生物炭去除灰水中此类污染物的报道较少。Jing 等^[62]用甲醇对稻壳生物炭进行改性, 结果显示改性后的生物炭在 12 h 内对四环素的吸附量比原始

生物炭提升了 45.6%。因此,未来可以加强对改性生物炭在去除灰水中重金属、微污染物、外源性有机物等方面的研究。

3 不同生物炭材料处理灰水的效果

3.1 国内研究与应用及效果

国内采用生物炭处理灰水的研究并不多,通常将其作为基质应用于人工湿地进行灰水处理。由于潮汐流人工湿地不需要外加曝气设备也能较好地控制湿地内溶解氧量,在改善湿地供氧的同时降低能耗需求,因此常对其填充生物炭基质进行灰水处理。如 Zhou 等^[25]以核桃壳生物炭为基质建立了潮汐流人工湿地来处理灰水,发现该系统对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TP 的去除率分别为 $69.6\%\pm 8.2\%$ 和 $36.2\%\pm 9.1\%$, 优于以砾石作为基质的湿地系统。此外,该生物炭基质湿地系统对阴离子表面活性剂十二烷基硫酸钠(SDS)的去除效果也较好,最大去除率达 79.3%。Liao 等^[63]建立了一个玻璃圆柱模拟潮汐流人工湿地进水,在柱内填料中间铺设 10 cm 生物炭,从上而下注入模拟灰水,该系统在不同的淹水时间/排水时间下均表现出良好的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 去除性能,去除率均在 90% 左右,对 COD 去除率均大于 90%,其中 COD 最高去除率达 99.84%。近年来,由于各类洗涤剂的用量逐渐增多,在灰水中也检测到越来越多的直链烷基苯磺酸钠(LAS)、SDS 等表面活性剂,所以有部分研究集中在探究生物炭对以 LAS 为特征污染物的灰水的处理效果。如操家顺等^[46]构建了一个吸附-催化材料反应器,其中主要填充了椰壳生物炭和酸改凹凸棒土,处理以 LAS 为特征污染物的洗衣灰水,结果显示反应器对 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TP、LAS 的去除率分别大于 88%、75%、75%、66%、88%。李婉妮^[8]用生物炭柱处理某高校洗浴废水,结果显示,生物炭比表面积高达 $800\sim 900\text{ m}^2/\text{g}$,系统稳定运行阶段,对 COD、LAS 和 TP 的最大去除率分别为 80.4%、90% 和 80%。陈欢欢^[16]以沸石、砾石、椰壳生物炭作为基质构建过滤柱来净化农村灰水,结果表明生物炭系统中 LAS 的进出水浓度分别为 (19.2 ± 2.89) 和 1.16 mg/L ,远低于沸石组和砾石组的 LAS 出水浓度 $(13.3$ 和 $9.68\text{ mg/L})$ 。此外,该生物炭系统对 COD、TN 去除率分别为 87.6% 和 56.5%,TP 的去除率在 48 d 后急剧下降,这可能与系统中未种植植物有关。综上,生物炭基质人工湿地对灰水中有有机污染物有较好的去除效果,COD 和 LAS 的去除率均大于 80%,SDS 的最大去除率也较高,但对 TP 的去除效果稍弱,由于 TP 去除效果与植物作用密切,

建议后续研究在系统中种植植物,以增强系统对 TP 的去除效果。

目前以生物炭基质人工湿地处理灰水的研究多处于实验室研究阶段,在实际灰水处理中的应用尚较少,仅检索到几篇相关文献。如兰淑澄^[64]采用絮凝过滤-BAC 工艺处理上海宝钢钢管厂区洗浴污水,BAC 装置采用降流式生物炭塔,炭层高度为 2 m,稳定运行 3 年,SS、COD 和合成洗涤剂的去除率分别为 74.5%~97.9%、57.7%~94.2% 和 81.8%~96.6%,出水达到中水标准,可作为厂区绿化及冲厕用水。

3.2 国外研究与应用及效果

国外采用生物炭对灰水进行处理的研究较多,尤其是人工湿地工——绿墙和绿色屋顶的应用近年发展迅速,已被广泛应用于灰水处理^[65]。Boano 等^[27]建立了灰水给料的绿墙,发现添加了 20% 木屑生物炭的试验组在 BOD、COD、凯式氮(TKN)和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的去除方面表现优秀,平均去除率分别为 85.0%、50.7%、46.8% 和 49.6%,可能是由于生物炭作为基质具有良好的污染物去除能力且有助于绿墙内植物生长。Lakho 等^[66]也使用绿墙处理灰水,发现在基质中添加 25% 的生物炭,TSS、COD 和 BOD_5 去除率分别为 67%、43% 和 83%。

近年来国外对生物炭处理灰水的研究主要集中在探究以冲厕、灌溉等非饮用用途为目标时单独生物炭处理或生物炭与其他材料联用时处理灰水效果的差异。如 Niwagaba 等^[67]建立了一个以生物炭作为主要层的过滤器,运行 36 h 后,系统对 COD 和 BOD 的去除率分别达到 $90.8\%\pm 5.4\%$ 和 $96.1\%\pm 3.0\%$,处理后的灰水可用于蔬菜的地下灌溉。Wurochekke 等^[68]以砾石、生物炭、沙粒作为基质,建立了一个微型人工湿地模型进行灰水处理,结果表明,所建小型湿地对污水中污染物的去除效果良好,对 BOD、COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和浊度的去除率分别为 81.42%、84.57%、39.83 和 45.01%。Biruktawit^[5]比较了使用香蕉皮生产的生物炭和沙子去除实际灰水污染物的效果,结果表明细粒生物炭(1 mm 以下)对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的平均去除率为 81%,远高于沙子(仅为 19%)。Berger^[42]建立了一个高 50 cm 的生物炭柱,参照缺水国家农村家庭灰水特征(高有机物浓度),设定进水 COD 为 $1\ 389\text{ mg/L}$,评价生物炭的灰水处理性能,结果表明生物炭柱对灰水中 COD、TP 和 TN 的去除率达 99%、89% 和 91%。Dalahmeh^[40]在试验初始阶段(3 个月)观察到不同类型的生物炭都能有效去除灰水中的 TN(>90%),尽管 TN 去除率随时间的推移而逐渐降低,但仍远高于沙子过滤床,其中柳树

生物炭对灰水中 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、TP 的去除效率最佳, 分别为 $89\%\pm 7\%$ 和 $86\%\pm 9\%$ 。Susilawati 等^[69] 以沸石和可可壳生物炭为基质制备过滤器用来去除灰水中的铵, 结果表明, 75% 沸石加上 25% 的生物炭组合对铵有最佳去除效果, 可将灰水中铵浓度降低 75.95%。综上可知, 生物炭在去除有机污染物、营养物质方面均表现出很高的效率, 对 BOD 和 COD 去除率分别在 81%~96% 和 43%~99%, 出水水质符合灌溉、冲厕等非饮用水回用标准。

3.3 不同生物炭灰水处理系统效果对比

表 4 列出了国内外不同生物炭处理灰水的效果。由表 4 可知, 生物炭在去除灰水中 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP、表面活性剂等污染物方面表现出一定的优越性。生物炭对 COD 的去除主要依赖于其强大的吸附能力和微生物的生物降解作用。在大多数研究中, 生物炭对 COD 的去除率均能达到 80%, 最高能达到 99.84%。生物炭对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效果较好, 最

高去除率达 99%, 可能是因为生物炭上微生物增殖使生物膜厚度增加, 在膜的里外两侧形成了厌氧/好氧 2 种环境, 可同时进行硝化和反硝化, 促进了 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除。此外, 不同生物炭系统对 TP 的去除效果差异显著, 从表 4 可以看出, 不同生物炭系统对 TP 的去除率为 16.7%~89.3%。大量研究表明, 依靠单一除磷机制对磷的去除难度较大^[16], 建议在系统表层种植植物, 以加强对 TP 的去除。表面活性剂是一种有机污染物, 生物炭作为基质对其也有较好的去除效果, 去除率均超过 70%, 最高可达 90%。此外, 从表 4 还可以发现, 制备生物炭的原材料以木材居多, 其次是果壳类。木质源生物炭对污染物的去除能力略高于果壳类, 其中柳树生物炭去除效果最优, 对 COD 和 TP 去除率分别达到 99.1%和 89.3%。总体来说, 生物炭作为一种灰水处理材料具有来源广泛、处理效果好和对环境无污染等优点, 在灰水处理领域具有广泛的应用前景。

表 4 国内外不同生物炭工艺处理灰水效果对比
Table 4 Comparison of the effects of different biochar processes at home and abroad in treating greywater

生物炭工艺	生物炭原料	进水浓度/(mg/L)				去除率/%			
		COD	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	TP	表面活性剂	COD	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	TP	表面活性剂
潮汐流人工湿地	核桃壳 ^[25]	185	30	5	50		69.6±8.2	36.2±9.1	79.3
吸附-生物处理系统	果壳、木材等 ^[8]	80.4~145.6	12.3~17.8	1.3~1.9	6.2~9.5	80.4		80	90
	椰壳 ^[16]	169~332		1.7~2.8		87.6			1.16 ¹⁾
吸附-催化体系	椰壳 ^[46]	120~180	20~50	2.5~4	5~25	88	75	66	88
绿墙	木屑 ^[27]	250~300		4.36±6.33		50.7±28.5		16.7±33.9	71.4±21.7
	香蕉 ^[5]	2 004		16.9		71	99		
	硬木 ^[40]	332±103	7±3	19±6		95			
	柳树 ^[42]	1 389	3.7	3.6		99.1		89.3	

1) 为出水浓度, mg/L。

4 生物炭再生研究

生物炭长时间用于灰水处理可能会出现对污染物去除率降低或基质堵塞等情况, 这时应更换新基质, 以恢复系统的污染物处理效率。废弃的生物炭中往往含有丰富的氮、磷等营养元素, 可以应用到土壤中, 改善土壤肥力, 提高农作物产量和品质。但考虑到废弃生物炭中可能含有微污染物和病原体等会造成二次污染^[70], 也可以将其通过燃烧直接处理, 用于产生能源^[71]。其中, 将废弃生物炭进行再生, 重新应用于灰水处理也是一种具有潜力的处理方案。

生物炭是一种可再生材料, 相较于其他材料需要定期更换、丢弃, 生物炭材料经再生处理后可重复使用, 这不仅降低了应用时的成本, 而且还具有防止

环境二次污染等显著意义, 使其在众多水处理材料中更具竞争性。生物炭再生技术多种多样, 主要包括热再生、生物再生、超临界流体再生、溶剂再生和微波辐射再生(表 5)。生物再生是一种低成本、环保的再生方式, 通常利用微生物降解吸附质来达到再生目的。Liao 等^[63] 建立潮汐流人工湿地用于灰水处理, 在系统排水的休息期, 空气通过间隙进入生物炭进行有机物的降解, 促进生物炭再生, 结果表明原始生物炭在再生过程前后对 COD 的吸附能力分别为 (1.5 ± 0.03) 和 (2.0 ± 0.06) mg/g, 虽相对原始吸附能力 $[(3.3\pm 0.04)\text{mg/g}]$ 有明显下降, 但生物炭的再生率达 $75.03\%\pm 1.00\%$, 表明生物炭的吸附能力能够长期保持。

热再生法是目前工业领域发展最成熟、应用最

表 5 不同生物炭再生技术特点对比

Table 5 Comparison of the characteristics of different biochar regeneration technologies

生物炭再生方法	特点
微波辐射再生 ^[72]	再生时间短,降低污染风险,成本高
热再生 ^[73]	再生效率高,应用广泛,再生损失大
生物再生 ^[63]	成本低,设备简单,再生周期长
溶剂再生 ^[72]	设备简单,再生时间长,可能存在环境污染
超临界流体再生 ^[74]	生物炭损失大,操作维护成本高,仅处于实验室阶段

广泛的生物炭再生方法之一^[73]。Zeng 等^[75]对吸附饱和的生物炭进行 4 次吸附-热再生循环,结果显示生物炭的再生时间短,再生率极高,均为 99%~100%,但同时也具有再生过程中生物炭损耗大和能耗高等缺点。溶剂再生的原理是使用 NaOH、KOH、HNO₃、HCl 等化学试剂来扰乱生物炭吸附平衡,使吸附质从中解吸^[72]。Huang 等^[76]以 HCl 为解吸剂,对生物炭进行连续 5 次的吸附-解吸循环试验,虽然吸附和解吸速率到最后均略有下降,但仍分别达到 71.7% 和 65.92%,表明生物炭是一种经济的、可循环利用的吸附材料。Hu 等^[77]使用 KOH 作为解吸剂,发现吸附的铈离子从生物炭中解吸率超过 92%,可能是因为 OH⁻可以很容易地取代吸附位点上的铈离子。

微波辐射再生即使用微波将极性分子诱导到生物炭中,该工艺可在较短再生时间内,降低环境污染风险^[72]。Shen 等^[78]通过吸附-微波辐射再生循环试验评估了生物炭的可重复使用性,结果表明,经 4 次循环后,生物炭保留了大部分吸附能力,再生率超过 81%,对目标污染物去除率仍超过 64%。超临界流体再生使用萃取剂,如 CO₂ 和水,通过调节操作压力将吸附质和生物炭分离^[72]。该工艺在具有高耐压性的同时操作和维护成本极高,目前仍处于实验室研究阶段,现实应用较少。

综上所述,目前生物炭再生技术比较常用的有生物再生和溶剂再生,再生溶剂主要有 HCl、HNO₃ 和 KOH 等。对处理过灰水的生物炭进行再生处理具有显著的可持续意义,不仅降低了处理成本还防止了环境污染。虽然目前灰水处理试验中对生物炭再生的研究还较少,但通过类似领域的研究发现,生物炭具有再生能力,通过处理可实现循环使用。未来可以加强对该方向的探索,丰富灰水处理领域生物炭再生方面的研究。

5 结语

应用于灰水处理中的生物炭多以木质材料为原

料,其比表面积和孔隙度明显大于砾石、沸石等常见基质,对污染物的去除能力也显著优于此类基质,故生物炭在灰水处理中具有良好的应用前景。为了获得对目标污染物更高的去除能力,可对生物炭进行改性处理,目前对灰水中生物炭的改性多以金属盐改性为主,金属改性生物炭不仅可以提高吸附能力,还可以使其磁化,方便后期的分离回收。通过对国内外相关文献的调查发现,国内研究者习惯将生物炭作为基质应用到潮汐流人工湿地中进行灰水处理,尤其关注生物炭对灰水中新型有机物的去除效果;而国外研究者多将生物炭与绿墙联用来处理灰水,出水往往用于菜地灌溉、厕所冲水等,而关于饮用水源的回用研究较少。最后,经灰水处理后的废弃生物炭可以应用于土壤增强肥力、直接燃烧生产能源或进行再生处理,其中再生处理是一种很有潜力的处理方法。

生活灰水的处理可根据处理要求选择合适的生物炭基质,必要时可添加曝气、潮汐流等操作或种植植物、与其他工艺联用等方法来实现灰水处理效果最大化。未来,生物炭基质在灰水处理方面的研究可从以下方面进行探索:1)目前关于生物炭去除灰水中新型有机物、重金属、病原体等物质的研究有限,涉及的机理及生物炭的潜在除污能力还有待进一步探索和阐明;2)目前在灰水处理领域,对废弃生物炭再生的研究较少,未来可以加强对灰水处理过程中老旧生物炭的再生研究,这不仅可以降低成本,还具有显著的环境意义;3)已有研究较少涉及对灰水处理能耗和建造运行成本的系统性研究,未来可以加强在降低处理过程中的能耗、运行维护成本等方面的研究,这对农村灰水处理的现实应用具有重要意义。

参考文献

- [1] ORON G, ADEL M, AGMON V, et al. Greywater use in Israel and worldwide: standards and prospects[J]. Water Research, 2014, 58: 92-101.
- [2] PIDOU M, MEMON F A, STEPHENSON T, et al. Greywater recycling: treatment options and applications[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Engineering Sustainability, 2007, 160(3): 119-131.
- [3] 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(4/5): 428-432.
- [4] SHAIKH I N, AHAMMED M M. Quantity and quality characteristics of greywater: a review[J]. Journal of Environmental Management, 2020, 261: 110266.

- [5] BIRUKTAWIT G. Greywater treatment using banana peel biochar and sand filtration[D]. Addis Ababa: Addis Ababa University, 2019.
- [6] LI Y H, ZHU S K, ZHANG Y, et al. Constructed wetland treatment of source separated washing wastewater in rural areas of Southern China[J]. Separation and Purification Technology, 2021, 272: 118725.
- [7] 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: 290-296.
- [8] 李婉妮. 过滤吸附和生物活性炭技术处理洗浴废水的研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- [9] 李洋涛, 陈佼, 陆一新, 等. 基于双池人工快渗系统的洗浴废水处理效果研究 [J]. 成都工业学院学报, 2021, 24(1): 60-63.
- LI Y T, CHEN J, LU Y X, et al. Study on the treatment effect of bathing wastewater based on double pool constructed rapid infiltration systems[J]. Journal of Chengdu Technological University, 2021, 24(1): 60-63.
- [10] KIM S, PARK C. Fouling behavior and cleaning strategies of ceramic ultrafiltration membranes for the treatment and reuse of laundry wastewater[J]. Journal of Water Process Engineering, 2022, 48: 102840.
- [11] 田川, 刘江, 陈诗扬, 等. 宿迁市西南片区阳台洗衣废水处理模式研究 [J]. 中国给水排水, 2022, 38(12): 68-75.
- TIAN C, LIU J, CHEN S Y, et al. Research on treatment mode of balcony laundry wastewater in southwest downtown of Suqian[J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(12): 68-75.
- [12] NICOLA D F, CHIARA D M, ANDRES G M, et al. Green walls to treat kitchen greywater in urban areas: performance from a pilot-scale experiment[J]. Science of the Total Environment, 2021, 757: 144189.
- [13] SHEKHAR B R, ZAKARIA BASEM S, RANJAN D B, et al. Effect of salinity and surfactant on volatile fatty acids production from kitchen wastewater fermentation[J]. Bioresource Technology Reports, 2022, 18: 101017.
- [14] FOUNTOULAKIS 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, 551/552: 706-711.
- [15] PATEL P, MUTEEN A, MONDAL P. Treatment of greywater using waste biomass derived activated carbons and integrated sand column[J]. Science of the Total Environment, 2020, 711: 134586.
- [16] 陈欢欢. 农村灰水污染特性及吸附-生物处理系统对其净化效能研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2021.
- [17] WINWARD G P, AVERY L M, STEPHENSON T, et al. Chlorine disinfection of grey water for reuse: effect of organics and particles[J]. Water Research, 2008, 42(1/2): 483-491.
- [18] EKEREN K M, HODGSON B A, SHARVELLE S E, et al. Investigation of pathogen disinfection and regrowth in a simple graywater recycling system for toilet flushing[J]. Desalination and Water Treatment, 2016, 57(54): 26174-26186.
- [19] DING A, LIANG H, LI G B, et al. A low energy gravity-driven membrane bioreactor system for grey water treatment: permeability and removal performance of organics[J]. Journal of Membrane Science, 2017, 542: 408-417.
- [20] MAHMOUDI A, MOUSAVI S A, DARVISHI P. Greywater as a sustainable source for development of green roofs: characteristics, treatment technologies, reuse, case studies and future developments[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 295: 112991.
- [21] NAUTIYAL R, ULIANA S, RAJ I, et al. Decentralized treatment of grey water by natural coagulants in the presence of coagulation aid[C]//Proceedings of the 2nd World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering", "World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering. April 2-4, 2017. Avestia Publishing, 2017.
- [22] PRIYANKA K, REMYA N, BEHERA M. Greywater treatment using modified solar photocatalyst- degradation, kinetics, pathway and toxicity analysis[J]. Separation and Purification Technology, 2020, 251: 117319.
- [23] KHALIL M, LIU Y. Greywater biodegradability and biological treatment technologies: a critical review[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2021, 161: 105211.
- [24] 何志琴, 陈盛, 李云. MBR 技术在农村生活污水处理中的研究进展 [J]. 环境工程技术学报, 2022, 12(1): 137-144.
- HE Z Q, CHEN S, LI Y. Research progress of MBR in rural domestic wastewater treatment[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2022, 12(1): 137-144.
- [25] ZHOU Y, JI B H, JIANG M, et al. Performance and microbial community features of tidal-flow biochar-amended constructed wetlands treating sodium dodecyl sulfate (SDS)-containing greywater[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 396: 136545.
- [26] BARRON N J, HATT B, JUNG J, et al. Seasonal operation of dual-mode biofilters: the influence of plant species on stormwater and greywater treatment[J]. Science of the Total Environment, 2020, 715: 136680.
- [27] BOANO F, COSTAMAGNA E, CARUSO A, et al. Evaluation of the influence of filter medium composition on treatment performances in an open-air green wall fed with greywater[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 300: 113646.
- [28] 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 greywater treatment technology at home and abroad[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2021, 11(5): 935-941.
- [29] WANG H X, XU J L, SHENG L X, et al. A review of research on substrate materials for constructed wetlands[J]. Materials Science Forum, 2018, 913: 917-929.
- [30] YAASHIKAA P R, KUMAR P S, VARJANI S, et al. A critical review on the biochar production techniques, characterization, stability and applications for circular bioeconomy[J]. Biotechnology Reports, 2020, 28: e00570.
- [31] 郭彦秀, 李旭光, 侯太磊, 等. 生物炭基材料活化过一硫酸盐降

- 解有机污染物的研究进展[J]. 环境科学研究, 2021, 34(4): 936-944.
- GUO Y X, LI X G, HOU T L, et al. Review of biochar-based materials for catalyzing peroxymonosulfate degradation of organic pollutants[J]. Research of Environmental Sciences, 2021, 34(4): 936-944.
- [32] ENAIME G, BAÇAOUI A, YAACOUBI A, et al. Biochar for wastewater treatment: conversion technologies and applications[J]. Applied Sciences, 2020, 10(10): 3492.
- [33] 彭成法, 肖汀璇, 李志建. 热解温度对污泥基生物炭结构特性及对重金属吸附性能的影响[J]. 环境科学研究, 2017, 30(10): 1637-1644.
- PENG C F, XIAO T X, LI Z J. Effects of pyrolysis temperature on structural properties of sludge-based biochar and its adsorption for heavy metals[J]. Research of Environmental Sciences, 2017, 30(10): 1637-1644.
- [34] 洪亚军, 徐祖信, 冯承莲, 等. 水葫芦/污泥共热解法制备生物炭粒及其对 Cr^{3+} 的吸附特性[J]. 环境科学研究, 2020, 33(4): 1052-1061.
- HONG Y J, XU Z X, FENG C L, et al. Co-pyrolysis of water hyacinth and sewage sludge for preparation of biochar particles and its adsorption properties for Cr^{3+} [J]. Research of Environmental Sciences, 2020, 33(4): 1052-1061.
- [35] 郑永昕, 魏东宁, 余学, 等. 氧化石墨烯改性污泥基生物炭对培氟沙星的去理机理研究[J]. 环境科学研究, 2020, 33(12): 2879-2887.
- ZHENG Y X, WEI D N, YU X, et al. Removal mechanism of pefloxacin by graphene oxide modified sludge biochar[J]. Research of Environmental Sciences, 2020, 33(12): 2879-2887.
- [36] GAYATHRI R, GOPINATH K P, KUMAR P S. Adsorptive separation of toxic metals from aquatic environment using agro waste biochar: application in electroplating industrial wastewater[J]. Chemosphere, 2021, 262: 128031.
- [37] SILBER A, LEVKOVITCH I, GRABER E R. pH-dependent mineral release and surface properties of cornstraw biochar: agronomic implications[J]. Environmental Science & Technology, 2010, 44(24): 9318-9323.
- [38] BAUTISTA QUISPE J I, CAMPOS L C, MAŠEK O, et al. Use of biochar-based column filtration systems for greywater treatment: a systematic literature review[J]. Journal of Water Process Engineering, 2022, 48: 102908.
- [39] 袁帅, 赵立欣, 孟海波, 等. 生物炭主要类型、理化性质及其研究展望[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(5): 1402-1417.
- YUAN S, ZHAO L X, MENG H B, et al. The main types of biochar and their properties and expectative researches[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2016, 22(5): 1402-1417.
- [40] DALAHMEH S S. Capacity of biochar filters for wastewater treatment in onsite systems[D]. Uppsala: Swedish University of Agricultural Sciences, 2016.
- [41] SULIMAN W, HARSH J B, ABU-LAIL N I, et al. Influence of feedstock source and pyrolysis temperature on biochar bulk and surface properties[J]. Biomass and Bioenergy, 2016, 84: 37-48.
- [42] BERGER C M. Biochar and activated carbon filters for greywater treatment: comparison of organic matter and nutrients removal [D]. Uppsala: Swedish University of Agricultural Sciences, 2012.
- [43] SIDIBÉ M. Comparative study of bark, bio-char, activated charcoal filters for upgrading grey-water from a hygiene aspect[D]. Uppsala: Swedish University of Agricultural Sciences, 2014.
- [44] PEREZ-MERCADO L F, LALANDER C, JOEL A, et al. Biochar filters as an on-farm treatment to reduce pathogens when irrigating with wastewater-polluted sources[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 248: 109295.
- [45] BASNET M. Application of ferric enriched biochar to capture N and P from greywater[D]. Helsinki: Helsinki Metropolia University of Applied Sciences, 2015.
- [46] 操家顺, 赵宇杰, 薛朝霞, 等. 吸附-催化材料的制备及对生活洗衣废水的处理[J]. 水处理技术, 2019, 45(5): 116-120.
- CAO J S, ZHAO Y J, XUE Z X, et al. Preparation of adsorption-catalytic material and its performance on laundry wastewater treatment[J]. Technology of Water Treatment, 2019, 45(5): 116-120.
- [47] SAMUEL S W. Comparative studies of the performance of filter media made using biochar and activated carbon in greywater remediation[D]. Zaria: Ahmadu Bello University, 2017.
- [48] DALAHMEH S S, LALANDER C, PELL M, et al. Quality of greywater treated in biochar filter and risk assessment of gastroenteritis due to household exposure during maintenance and irrigation[J]. Journal of Applied Microbiology, 2016, 121(5): 1427-1443.
- [49] MOLAEI R. Pathogen and indicator organisms removal in artificial greywater subjected to aerobic treatment[D]. Uppsala: Swedish University of Agricultural Sciences, 2014.
- [50] 孙建财, 周丹丹, 王薇, 等. 生物炭改性及其对污染物吸附与降解行为的研究进展[J]. 环境化学, 2021, 40(5): 1503-1513.
- SUN J C, ZHOU D D, WANG W, et al. Research progress on modification of biochar and its adsorption and degradation behavior[J]. Environmental Chemistry, 2021, 40(5): 1503-1513.
- [51] JIN J, LI S W, PENG X Q, et al. HNO_3 modified biochars for uranium (VI) removal from aqueous solution[J]. Bioresource Technology, 2018, 256: 247-253.
- [52] FENG Z J, ZHU L Z. Sorption of phenanthrene to biochar modified by base[J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2018, 12(2): 1.
- [53] BANERJEE S, MUKHERJEE S, LAMINKA-OT A, et al. Biosorptive uptake of Fe^{2+} , Cu^{2+} and As^{5+} by activated biochar derived from *Colocasia esculenta*: Isotherm, kinetics, thermodynamics, and cost estimation[J]. Journal of Advanced Research, 2016, 7(5): 597-610.
- [54] SIZMUR T, FRESNO T, AKGÜL G, et al. Biochar modification to enhance sorption of inorganics from water[J]. Bioresource Technology, 2017, 246: 34-47.
- [55] BAO Z J, SHI C Z, TU W Y, et al. Recent developments in modification of biochar and its application in soil pollution

- control and ecoregulation[J]. *Environmental Pollution*, 2022, 313: 120184.
- [56] PATEL P, GUPTA S, MONDAL P. Modeling of continuous adsorption of greywater pollutants onto sawdust activated carbon bed integrated with sand column[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2022, 10(2): 107155.
- [57] CAROLINA R, FERNANDA C, RAFAEL S, et al. Performance and treatment assessment of a pilot-scale decentralized greywater reuse system in rural schools of north-central Chile[J]. *Ecological Engineering*, 2022, 174: 106460.
- [58] SUN Y B, WU Z Y, WANG X X, et al. Macroscopic and microscopic investigation of U(VI) and Eu(III) adsorption on carbonaceous nanofibers[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(8): 4459-4467.
- [59] ZHAO L, ZHENG W, MAŠEK O, et al. Roles of phosphoric acid in biochar formation: synchronously improving carbon retention and sorption capacity[J]. *Journal Of Environmental Quality*, 2017, 46(2): 393-401.
- [60] DING Z H, HU X, WAN Y S, et al. Removal of lead, copper, cadmium, zinc, and nickel from aqueous solutions by alkali-modified biochar: batch and column tests[J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2016, 33: 239-245.
- [61] AbdURREHMAN H M, DELETIC A, ZHANG K, et al. The comparative performance of lightweight green wall media for the removal of xenobiotic organic compounds from domestic greywater[J]. *Water Research*, 2022, 221: 118774.
- [62] JING X R, WANG Y Y, LIU W J, et al. Enhanced adsorption performance of tetracycline in aqueous solutions by methanol-modified biochar[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2014, 248: 168-174.
- [63] LIAO Y, JIANG L, CAO X K, et al. Efficient removal mechanism and microbial characteristics of tidal flow constructed wetland based on *in situ* biochar regeneration (BR-TFCW) for rural gray water[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 431: 134185.
- [64] 兰淑澄. 过滤-生物活性炭技术处理洗浴废水 [J]. *环境保护*, 2002, 30(8): 16-17.
- LAN S C. Wash-bath wastewater treated by filtration-biological activated carbon technology[J]. *Environmental Protection*, 2002, 30(8): 16-17.
- [65] ADDO-BANKAS O, ZHAO Y Q, VYMAZAL J, et al. Green walls: a form of constructed wetland in green buildings[J]. *Ecological Engineering*, 2021, 169: 106321.
- [66] LAKHO F H, VERGOTE J, KHAN H I U H, et al. Total value wall: full scale demonstration of a green wall for grey water treatment and recycling[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 298: 113489.
- [67] NIWAGABA C B, DINNO P, WAMALA I, et al. Experiences on the implementation of a pilot grey water treatment and reuse based system at a household in the slum of Kyebando-Kisalosalalo, Kampala[J]. *Journal of Water Reuse and Desalination*, 2014, 4(4): 294-307.
- [68] WUROCHEKKE A A, HARUN N A, MOHAMED R M S R, et al. Constructed wetland of *Lepironia articulata* for household greywater treatment[J]. *APCBEE Procedia*, 2014, 10: 103-109.
- [69] SUSILAWATI, SIHOMBING Y A, RAHAYU S U, et al. Filter material based on zeolite-activated charcoal from cocoa shells as ammonium adsorbent in greywater treatment[J]. *South African Journal of Chemical Engineering*, 2023, 43: 266-272.
- [70] DENG S J, CHEN J Q, CHANG J J. Application of biochar as an innovative substrate in constructed wetlands/biofilters for wastewater treatment: performance and ecological benefits[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 293: 126156.
- [71] KAETZL K, LÜBKEN M, UZUN G, et al. On-farm wastewater treatment using biochar from local agroresidues reduces pathogens from irrigation water for safer food production in developing countries[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 682: 601-610.
- [72] ODEGA C A, AYODELE O O, OGUTUGA S O, et al. Potential application and regeneration of bamboo biochar for wastewater treatment: a review[J]. *Advances in Bamboo Science*, 2023, 2: 100012.
- [73] 叶华明, 王孝青, 王红萍. 活性炭的循环再生 [J]. *染料与染色*, 2018, 55(3): 56-57.
- YE H M, WANG X Q, WANG H P. The recycling method of activated carbon[J]. *Dyestuffs and Coloration*, 2018, 55(3): 56-57.
- [74] SALVADOR F, MARTIN-SANCHEZ N, SANCHEZ-HERNANDEZ R, et al. Regeneration of carbonaceous adsorbents: part II. chemical, microbiological and vacuum regeneration[J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2015, 202: 277-296.
- [75] ZENG S Q, KAN E. Adsorption and regeneration on iron-activated biochar for removal of microcystin-LR[J]. *Chemosphere*, 2021, 273: 129649.
- [76] HUANG A X, BAI W L, YANG S L, et al. Adsorption characteristics of chitosan-modified bamboo biochar in Cd(II) contaminated water[J]. *Journal of Chemistry*, 2022, 2022: 1-10.
- [77] HU H, SUN L L, JIANG B Q, et al. Low concentration Re(VII) recovery from acidic solution by Cu-biochar composite prepared from bamboo (*Acidosasa longiligula*) shoot shell[J]. *Minerals Engineering*, 2018, 124: 123-136.
- [78] SHEN T Y, WANG P, HU L M, et al. Adsorption of 4-chlorophenol by wheat straw biochar and its regeneration with persulfate under microwave irradiation[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021, 9(4): 105353. ⊗