

污泥生物炭的制备及其应用研究进展

张婉婷,李飞跃

(安徽科技学院 资源与环境学院,安徽 凤阳 233100)

摘要:我国市政污泥处置量大且逐年递增,而传统污泥处理处置方法面临稳定化率低、处置能耗高和二次污染等问题,亟需开发绿色、生态、安全的资源化利用新途径。热解炭化技术被认为是污泥处理的一种有前景的方法,通过该法制备的污泥生物炭在废水处理、土壤改良等方面具有重要作用。然而,对污泥热解炭化过程中的影响因素、污泥生物炭改性方法及其在污水处理和土壤改良中的具体应用尚缺乏系统综述。本文系统介绍了污泥生物炭的制备原理和方法(包括传统热解、水热炭化和微波炭化),分析了热解温度、时间、升温速率和添加剂等因素对污泥生物炭性质的影响,并探讨了改性方法对生物炭性能的影响。此外,本文还综述了污泥生物炭在废水处理和土壤改良中的应用,并对未来研究方向进行了展望。

关键词:市政污泥;污泥生物炭;改性;污染治理;土壤改良

中图分类号:X705 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-8020(2024)04-0370-08

随着城镇化进程加快,我国城镇污水处理规模持续加大,市政污泥的年产量处于稳步增长状态。数据显示,我国市政污泥的年产量以每年约7%的速率增长,预计到2025年我国污泥年产量将突破9000万t。然而,国内污泥处置能力仍达不到要求,亟待妥善解决^[1]。国家发展改革委和住房城乡建设部联合印发的《“十四五”城镇污水处理及资源化利用发展规划》对污泥处理处置提出了新的要求。

传统的污泥处理处置方式主要有卫生填埋、建材利用、掺烧、焚烧、消化及堆肥等。我国污泥处置仍面临稳定化率低、处置能耗高和二次污染等问题,此外,还缺乏科学的处理处置、运行维护和监督管理标准^[2-3]。为更好地将市政污泥由污染物转化为稳定且无害的可利用资源,近几年污泥热解炭化技术在污泥处理方向是值得深入探索的课题。该技术将污泥在缺氧或无氧条件下通过高温热解制得污泥生物炭,能杀死污泥中的病原微生物,显著降低污泥中重金属、抗生素等污染物对环境的危害,在改变其结构的同时,保留污泥中的营养成分和矿物质等^[4]。

市政污泥经热解炭化制备的生物炭可应用范围广泛(图1),主要在两方面:一是其具备高炭、疏松多孔、比表面积大、官能团丰富等优势,可有

效改善土壤理化性质、提高土壤保水保肥能力、增加作物产量;二是其丰富的表面吸附位点和阳离子交换能力,可有效吸附重金属、农药残留物等污染物。因此将市政污泥生物炭应用于废水处理和土壤改良领域污染物的吸附,具有较高的经济和生态价值。本文综述了污泥生物炭制备过程中的影响因素和改性方法,以及不同制备方法对生物炭性能的影响,重点探讨了污泥生物炭在土壤改良中的应用,最后对市政污泥生物炭在基质改良中的研究方向及应用进行了展望,为市政污泥资源化利用提供支撑。

1 污泥生物炭的制备

1.1 污泥生物炭制备原理及其产物

将干燥后的污泥在无氧或惰性气体条件下高温加热,使其内部有机物发生热解反应。该过程使得污泥中有机物以及难以被分离和去除的新兴污染物如抗生素、微塑料等物质完全热解,产生热解气和裂解油,同时由于水分蒸发和热解气体的产生,形成了具有表面积大、孔隙结构发达、富碳固碳的污泥生物炭,再通过冷却和分离将热解气、裂解油和污泥生物炭分离^[5]。

收稿日期:2024-05-17;修回日期:2024-07-05

基金项目:安徽省高校杰出青年科研项目(2022AH020089);安徽省市政污泥处置与资源化利用工程研究中心开放课题(TYKF202302)

通信作者简介:李飞跃(1983—),男,教授,硕士研究生导师,博士,研究方向为土壤修复与固废资源化。E-mail:lifeyue0523@163.com

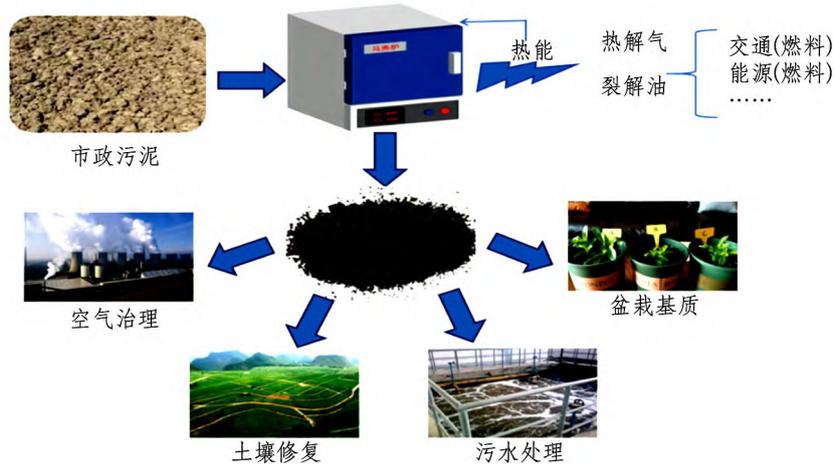


图 1 污泥热解炭化流程及产物应用

Fig.1 Sludge pyrolysis carbonization process and product application

1.2 污泥生物炭制备方法

污泥热解炭化主要分为传统热解、水热炭化和微波炭化^[6]。传统热解能保证生物炭的质量和产量,该过程受到热解温度影响,据此将传统热解分为低温炭化、中温炭化和高温炭化^[7]。低温炭化(250~350 ℃)系统稳定安全,但有机物热解不彻底(需加压或借助催化剂);中温炭化(350~600 ℃)应用较广泛,蛋白质和脂肪被热解,表面官能团数量损失少,最大保留污泥中的热值和营

养元素;高温炭化(600 ℃以上)可有效降低固体产物有害性,但成本高且生物炭附加值低。不同热解方法也会影响生物炭的质量,水热炭化的生物炭碳含量高且含氧含氮官能团丰富,其芳香性和含氧官能团数量随热解温度升高而降低。微波热解的生物炭比表面积大且孔隙丰富,其 pH 值、比表面积和总磷含量随热解温度和加热速率的增加而增大。不同热解方法的条件及优缺点如表 1 所示。

表 1 热解炭化技术分类
Tab.1 Pyrolytic carbonization technology classification

方法	条件	优缺点
传统热解	限氧条件下高温直接加热,温度一般在 300~700 ℃	产率低、能耗大,产生大量烟气和焦油
水热炭化	水作为介质,密闭加热、低温,一般在 180~260 ℃	节约脱水成本,系统温度低,产生大量水热液
微波炭化	微波能量转化,常添加微波吸收剂	产率高、环保节能,但系统成本高,有一定辐射

1.3 污泥生物炭制备的影响因素

污泥生物炭的制备受热解温度、热解时间、升温速率、添加剂等多种因素的影响。污泥生物炭理化性质会随着热解条件的改变而受到影响。

1.3.1 热解温度的影响

热解温度是影响污泥热解炭产率和性质的关键因素。热解温度升高,污泥生物炭芳香化程度和石墨化程度提高,比表面积孔隙度增加,热稳定性及固碳作用增强。李昊宇等^[8]发现随着热解温度的升高,污泥中重金属由不稳定态转变为稳定态,但过高的热解温度会改变重金属的稳定性和固化效果。孙东晓等^[9]发现随着热解温度的

升高,污泥中水分和有机酸性物质挥发,大分子有机物裂解成气,使得污泥生物炭的含氧官能团减少,比表面积、pH 值和孔隙度显著增加,亲水性和持水能力增强。王瑞峰等^[10]发现随热解温度的升高,污泥中水分蒸发,产生挥发性物质,导致产物 C、H、N 含量降低,Ca、K、P 等含量增大。

1.3.2 热解时间的影响

热解时间通常与热解温度和升温速率共同作用,随热解时间的延长,污泥生物炭有机组分含量降低,灰分增加。龚幸等^[11]发现热解温度为 400~450 ℃,热解时长为 20~30 min 是热解的最优条件,炭化温度越高,炭化时间越长,污泥减量率越大,挥发分略降低。程俊等^[12]发现随热解时间

的增加,污泥生物炭 C、N 含量降低,P 含量微量增加,K 含量增加,Mn、Fe、Ni、Zn 和 Cu 含量略降低,Cr、As、Cd 和 Pb 含量均明显富集但无显著差异。

1.3.3 升温速率的影响

污泥热解炭化根据升温速率分为快速热解(加热速率 $10\sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$)和慢速热解(升温速率 $<10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$)。快速热解加快分子间化学键断裂,慢速热解可显著增加生物炭比表面积,因此慢速热解更利于生物炭的生产。戴财胜等^[13]通过低温快速热解,在降低能耗的同时还提高了污泥生物炭的产率和热值。升温速率过低时,产物堵塞孔隙结构阻止物质的挥发,升温速率过高时,分子间化学键更易断裂,生物炭的产率会降低^[14]。

1.3.4 添加剂的影响

通过添加剂对污泥生物炭进行改性可改善其性质、增加表面官能团数量并且提升对污染物的吸附性能。李昊宇等^[15]通过添加无机氯和有机氯来增加重金属挥发反应,添加碳酸钙或者将污

泥与一些生物质共热解来增强重金属稳定性。Xia 等^[16]通过添加氯化剂使得污泥生物炭中重金属含量降低,为土壤提供营养元素。

1.4 改性方法

污泥生物炭可通过物理或化学改性来优化其结构性能(如比表面积、孔隙结构和体积等)和内部成分(如官能团种类、数量、极性、疏水性等)。主要通过酸碱改性、金属改性、非金属掺杂和 H_2O_2 改性等化学方式,增加污泥生物炭丰富的吸附位点或相互作用,也可使用球磨、蒸汽活化和充氮气及 CO_2 等物理方式来提高生物炭吸附性。改性的目的主要用来增强污泥生物炭的吸附和催化性能,更好地应用于土壤改良和环境修复。改性可增加污泥基生物炭芳香化程度和热稳定性,降低重金属含量,提高对土壤营养元素的固持能力和对重金属的吸附能力^[17]。常见改性方法如表 2 所示。

表 2 污泥生物炭的改性方法
Tab.2 Modification methods of sludge biochar

方法	改性剂/载体	目的	参考文献
酸碱改性	HNO_3 、 HClO 、 HCl 、 NaOH 和氨水等	去除生物炭中杂质,改变官能团种类和数量,改变生物炭比表面积和孔隙结构,固定重金属	[18]
金属改性	Mg、Fe、Al、Mn 等	提高生物炭的吸附性能,使得污泥生物炭磁性化、利于生物炭的回收	[19—20]
非金属掺杂	N、S、P、B 等	降低制炭成本,增大生物炭比表面积、促进官能团间转化,增强离子交换能力	[21]
球磨改性	机械球磨	改变炭骨架,提高比表面积,引入丰富的含氧官能团,增加吸附性能	[22]
气体改性	N_2 、Ar、 CO_2 等	利于孔隙扩张和新微孔的形成,增大生物炭比表面积	[23]
蒸汽活化	蒸汽	增强离子交换量,不增加表面官能团种类,促进挥发性和非结构性成分分解,扩张孔隙	[24]
UV/ H_2O_2 改性	紫外光、 H_2O_2	H_2O_2 可净化生物炭内部孔隙,丰富生物炭孔隙结构,增大其比表面积,增加含氧官能团数量,但高浓度 H_2O_2 导致孔隙内部塌陷堵塞会减小其比表面积	[25]

2 污泥生物炭的应用

污泥生物炭不仅实现了污泥的无害化、减量化、资源化,还在土壤改良和污水处理中具有较高的研究意义和应用价值。

2.1 污泥生物炭在废水处理中的应用

污泥生物炭因具备发达的孔隙结构、较大的比表面积、较强的离子交换能力、丰富的活性位点和表面沉淀作用等吸附性能,在污水处理中的应用主要是对重金属、有机污染物和 N、P 等的吸附,其对水体污染物吸附的主要作用机理如图 2

所示。

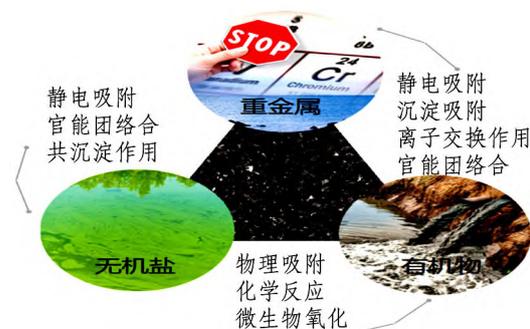


图 2 污泥生物炭对水中污染物吸附的主要机理

Fig.2 Adsorption mechanism of pollutants in water by sludge biochar

2.1.1 污泥生物炭对水中有毒有害重金属的吸附

污泥生物炭可以通过静电吸附、沉淀吸附、离子交换作用和官能团络合等方式去除废水中的重金属,其吸附效果不仅与污泥生物炭的制备温度、共热解原料和改性剂种类等有关,还与溶液 pH 值、生物炭投加量、添加剂、重金属浓度和吸附时间等有关,其吸附效果如表 3 所示。

2.1.2 污泥生物炭对水中有机污染物的吸附

污泥生物炭可以吸附水中污染物及异味,保障水体及周围空气质量。污泥生物炭可以通过物理吸附、化学反应和微生物氧化等物理化学反应

去除水中有机污染物。梅家龙^[33]研究发现铁基污泥生物炭可有效去除硝基苯和 2,4-二氯苯酚。杨洪等^[34]发现中磁性污泥基生物炭投加量为 $0.8 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时对甲基橙的去除效率可达 90% 以上。Diao 等^[35]通过新型异相超声提高了污泥生物炭对双酚 A 的降解作用。Liu 等^[36]将新型的污泥基生物炭激活过氧化氢,增强了对水中诺氟沙星的去除效果。因此,不同改性条件可增强污泥生物炭去除水中有机污染物的能力,有效降低医药、农药、造纸、染料等工业对水体生态和人类带来的危害。

表 3 影响污泥生物炭吸附效果的因素
Tab.3 Factors influencing the adsorption effect of sludge biochar

影响因素	条件	重金属	最大吸附率/%	最大吸附量/($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	参考文献
共热解原料	桉树叶	Cu^{2+}	99.7		[26]
改性剂种类	KOH	Cd^{2+}		140.78	[27]
热解温度	500 °C	Cr^{6+}		7.93	[28]
生物炭投加量/溶液初 pH 值	$25 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}/7$	$\text{Zn}^{2+}, \text{Cu}^{2+}$	75.51, 87.12		[29]
改性和添加剂	酸性	$\text{Cr}^{6+}, \text{Pb}^{2+}$	90, 82		[30]
重金属浓度		$\text{Pb}^{2+}, \text{Zn}^{2+}, \text{Cd}^{2+}$		42.55, 35.78, 6.73	[31]
吸附时间	3 h	Pb^{2+}		34.5	[32]

2.1.3 污泥生物炭对水中 N、P 的吸附

水中高浓度的无机盐,易造成水体富营养化,污泥生物炭可通过静电吸附、配体交换、官能团络合和共沉淀等作用吸附水中磷酸盐、硝酸盐和铵盐等。马锋锋等^[37]研究发现污泥生物炭投加量为 $5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、pH 值为 5 时对磷具有较好的吸附性能。彭广飞^[38]将磁性污泥基生物炭通过鸟粪石结晶法作用,在投加量为 $5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、pH 值为 5、吸附时间约 5 h 时对氮磷的吸附量可达 103.12 和 $205.07 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

污泥生物炭对水中 N、P 的吸附效果受到生物炭投加量、溶液 pH 值和吸附时间的影响。

2.2 污泥生物炭在土壤改良与修复中的应用研究

将污泥生物炭施用于土壤,可有效改善土壤物理、化学、生物等性质,达到增加作物产量和提高作物品质的效果,其对土壤改良的主要作用如图 3 所示。



图 3 污泥生物炭的土壤改良作用

Fig.3 Soil improvement effects of sludge biochar

2.2.1 污泥生物炭对土壤理化性质的影响

污泥生物炭可改善土壤理化性质,其 pH 值一般大于 7,呈碱性,可用于调节土壤酸碱度。Plaza 等^[39]发现污泥生物炭可长期改善土壤理化性质,去除土壤中的部分污染物,降低重金属生物利用度。王旭东等^[40]发现污泥生物炭丰富的孔隙度有利于降低土壤容重,提高土壤通气性和透水性;丰富的表面官能团可提高土壤阳离子交换能力和养分利用率。总之,污泥生物炭可通过提升土壤肥力、改善土壤孔隙结构、增强土壤透气保水性、增强土壤阳离子交换能力、改善土壤容重等来起到改良土壤的作用。张世杰等^[41]研究发现污泥基生物炭可调节土壤有机质,还对碳、氮、磷、钾等营养元素起到调节作用。张秀霞等^[42]发现通过污泥生物炭固定微生物提高了对总石油烃的降解率。薛洋等^[43]发现污泥生物炭对土壤微生物环境和营养元素组成有良好的改善作用。因此,污泥生物炭不仅自身营养元素含量较高,可有效调节土壤有机质和养分的适宜度,还可以改善微生物繁殖环境,促进土壤微生物生长。

2.2.2 污泥生物炭对土壤重金属的固定

污泥生物炭具有较强的吸附性能,其含氧官能团丰富、高比表面积和丰富孔隙度利于降低土壤重金属的有效性和迁移性,减少其对植物生长的危害。邢佳^[44]发现施用污泥生物炭后降低了土壤有效态和可交换态 Pb 和 Cd 的含量,提高了固定态 Pb 和 Cd 的含量。苏加强等^[45]研究发现市政污泥和凹凸棒石粘土共热解的生物炭降低了土壤中 Cd、Cu、Zn、Ni 等重金属的危害。王秋利等^[46]研究发现 500 °C 的污泥基生物炭可更好地降低矿山土壤中镉、铅、汞的含量。陈晴空等^[47]研究发现 300 °C 的山地城市污泥生物炭对 Cu(II) 的吸附能力最高。因此,污泥生物炭的添加可通过离子交换和官能团络合作用等固定吸附土壤中的重金属,且污泥共热解生物炭对土壤重金属钝化修复效果优于单一材料。

2.2.3 污泥生物炭对土壤农药的吸附

农药的使用对土地造成不可逆的危害,并且可能进一步危害环境和人类健康,而污泥生物炭可通过分配作用、表面吸附作用等达到降低农药残留的效果。污泥生物炭可对土壤多种有机污染物进行有效修复,同时,通过污泥生物炭的改性可以达到强化污泥生物炭的吸附性能。邹意义

等^[48]研究发现通过 FeCl₃ 改性的污泥生物炭可提高对吡虫啉的吸附效果。黄拓^[49]研究发现污泥生物炭在热解温度越高和添加量越大时,对土壤中多菌灵的降解越好。杨雪^[50]发现污泥基生物炭可有效抑制莠去津和麦草畏在土壤中的迁移。

2.2.4 污泥生物炭对作物生长的影响

在栽培基质中添加一定比例的污泥生物炭可以改善基质理化性质,促进植物生长。陆洁等^[51]发现污泥生物炭可有效提升土壤质量,显著降低有效态重金属含量,更好地促进园林植物的生长。房献宝等^[52]通过在上海青的盆栽实验中添加污泥生物炭,增加了上海青的生物量。恽壮志等^[53]研究发现污泥生物炭对多肉植物根系和植株生长的促进作用明显高于营养土和复配基质。王军等^[54]研究发现随着污泥基生物炭添加量的增加,黑麦草生长呈先增后减的趋势。王君等^[55]研究发现炭化 3 h、温度 > 350 °C 的污泥生物炭最利于玉米生物量的积累。污泥生物炭可缓解园林基质的土壤酸性,降低基质容重,提高基质总孔隙度和通气孔隙度,增加基质有机质、总氮、有效磷等养分含量,可有效提高园林植物的生长效果,这一过程会受到污泥生物炭的性质和添加量的影响。

3 总结与展望

污泥的处理处置和资源化利用需要综合考虑其环保价值、经济价值和社会价值等。污泥热解炭化制备成污泥生物炭是污泥处理处置最具优势的途径,更符合经济化、减量化、无害化、资源化的处置目标。

从环境保护角度出发,污泥的处理处置需避免污泥对水体和土壤的二次污染危害,传统的污泥处理处置需要投入大量人力和资源成本,而污泥生物炭的制备产物利用率高、处置简单彻底、处置成本可控。此外,污泥生物炭还具有水体污染的吸附剂、土壤改良剂等多方面的应用价值。

目前,污泥生物炭在园林基质中的应用研究不足,如污泥生物炭对基质理化性质的影响、污泥生物炭在园林基质应用中适宜比例的研究、污泥生物炭复配基质对园林植物生长的影响等,亟需在未来开展更多研究。

参考文献:

- [1] 刘鑫,惠秀娟,唐凤德.我国典型城市污泥产生量处理处置现状及经济学趋势分析[J].环境保护与循环经济,2021,41(4):88-93.
- [2] 张宁.污泥协同处理处置国内外现状及发展趋势分析[J].城市道桥与防洪,2023(10):23-27.
- [3] 刘尚铭.国内外污泥处理处置技术现状探讨[J].中国设备工程,2020(3):209-210.
- [4] IBERAHIM N, SETHUPATHI S, BASHIR M J K. Optimization of palm oil mill sludge biochar preparation for sulfur dioxide removal [J]. Environmental Science & Pollution Research, 2018, 25(26):25702-25714.
- [5] 刘程,汪军,徐汝民,等.城镇污水处理厂污泥高干脱水炭化处置技术[J].环境卫生工程,2022,30(4):104-105.
- [6] 张萌,冯丹,祁宝川,等.城市污泥生物炭的制备及应用研究进展[J].广州化工,2022,50(21):27-29.
- [7] 宋玉,李亚攀,倪纯威.炭化技术在污泥处理处置领域的应用[J].净水技术,2020,39(S1):147-150.
- [8] 李昊宇.含油污泥中的重金属在热解过程中的迁移转化规律研究[D].西安:西安石油大学,2023.
- [9] 孙东晓,董志强,刘学明,等.污泥基生物炭的制备技术及环境应用与研究热点[J].净水技术,2021,40(8):16-25.
- [10] 王瑞峰,赵立欣,沈玉君,等.生物炭制备及其对土壤理化性质影响的研究进展[J].中国农业科技导报,2015,17(2):126-133.
- [11] 龚幸,何光亚.市政污泥热解技术工艺优化研究及其节能效益评估[J].工业用水与废水,2018,49(1):79-82.
- [12] 程俊,何光亚,周盈盈,等.市政污泥炭化时间与温度研究[J].安徽建筑,2018,24(4):256-257.
- [13] 戴财胜,侯俊威,樊文帅,等.低温快速热解条件下城市污泥热解炭的燃烧性能及其影响因素研究[J].环境工程,2023,41(S2):558-561.
- [14] 武舒娅,周涛,赵由才.市政污泥热解技术及其影响因素研究进展[J].山东化工,2020,49(6):85-87.
- [15] 李昊宇,李金灵,李彦,等.热解条件对污泥中重金属形态分布的影响综述[J].应用化工,2022,51(10):2991-2996.
- [16] XIA Y X, TANG Y Y, SHIH K, et al. Enhanced phosphorus availability and heavy metal removal by chlorination during sewage sludge pyrolysis [J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 382:121110.
- [17] XU L J, LI L, LU W, et al. The modified properties of sludge-based biochar with ferric sulfate and its effectiveness in promoting carbon release from particulate organic matter in rural household wastewater [J]. Environmental Research, Section A, 2023, 231:116109.
- [18] MA Y F, LI P, YANG L, et al. Iron/zinc and phosphoric acid modified sludge biochar as an efficient adsorbent for fluoroquinolones antibiotics removal [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020, 196:110550.
- [19] 荆慧娟.市政污泥生物质炭改性及其对水中磷的吸附研究[D].重庆:重庆大学,2021.
- [20] YIN G G, SONG X W, TAO L, et al. Novel Fe-Mn binary oxide-biochar as an adsorbent for removing Cd(II) from aqueous solutions [J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 389:124465.
- [21] 李晶.污泥生物炭改性材料制备及除磷机理研究[D].燕山:燕山大学,2021.
- [22] 张霞,王宗跃,陈静,等.改性生物炭吸附废水中抗生素的研究进展[J].应用化工,2024,53(2):469-473.
- [23] 龙良俊,张晓娅,罗晶晶,等.生物炭材料的制备与改性及其在土壤修复中的应用[J].应用化工,2021,50(12):3510-3514.
- [24] 赵伟繁,戴亮,王刚,等.污泥生物炭重金属吸附剂的制备及改性研究进展[J].功能材料,2020,51(11):11083-11088.
- [25] 刘磊.紫外光/双氧水、类芬顿废液改性玉米秆生物炭脱除烟气中单质汞的研究[D].镇江:江苏大学,2023.
- [26] 陈晴空,王欢,范剑平,等.农林废弃物共热解对污泥生物炭Cu(II)吸附性能的影响[J].应用化工,2024,53(4):774-780.
- [27] 马清晨,陈建,龚明杰,等.不同改性污泥生物炭对Cd²⁺的吸附特性[J].安徽农业科学,2023,51(23):54-58.
- [28] 陈林,平巍,闫彬,等.不同制备温度下污泥生物炭对Cr(VI)的吸附特性[J].环境工程,2020,38(8):119-124.
- [29] 徐昊,史广宇,田晓庆,等.颗粒状污泥生物炭对锌铜共污染水体的吸附效应分析[J].环境科学学报,2024,44(3):95-104.
- [30] DIAO Z H, DU J J, JIANG D, et al. Insights into the simultaneous removal of Cr⁶⁺ and Pb²⁺ by a novel sewage sludge-derived biochar immobilized nanoscale zero valent iron: coexistence effect and mechanism [J]. Science of the Total Environment, 2018, 642:505-515.
- [31] 聂振江.城市污泥生物炭的制备及其在环境修复中应用研究[D].广州:广州大学,2023.
- [32] 丁文川,杜勇,曾晓岚,等.富磷污泥生物炭去除水中Pb(II)的特性研究[J].环境化学,2012,31(9):

- 1375-1380.
- [33] 梅家龙. 铁基污泥生物炭对水中硝基苯和 2,4-二氯苯酚吸附与降解性能研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2023.
- [34] 杨洪, 杨康, 聂玉琴, 等. 磁性污泥基生物炭的制备及对甲基橙的吸附[J]. 广州化工, 2022, 50(4): 59-61.
- [35] DIAO Z H, DONG F X, YAN L, et al. Synergistic oxidation of Bisphenol A in a heterogeneous ultrasound-enhanced sludge biochar catalyst/persulfate process: Reactivity and mechanism[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 384: 121385.
- [36] LIU J J, DIAO Z H, LIU C M, et al. Synergistic reduction of copper (II) and oxidation of norfloxacin over a novel sewage sludge-derived char-based catalyst: performance, fate and mechanism[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 182: 794-804.
- [37] 马锋锋, 郑旭东, 张建, 等. 污泥生物炭对水体中磷的吸附[J]. 中国环境科学, 2024, 44(3): 1347-1356.
- [38] 彭广飞. 改性污泥生物炭强化水中氮磷吸附性能的研究及其应用[D]. 常州: 常州大学, 2023.
- [39] PLAZA C, GIANNETTA B, FERNÁNDEZ J M, et al. Response of different soil organic matter pools to biochar and organic fertilizers[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2016, 225: 150-159.
- [40] 王旭东, 任雪冰, 汤舒, 等. 污泥生物炭在土壤改良中的应用研究[J]. 中国农业科技导报, 2023, 25(6): 165-173.
- [41] 张世杰, 顾卫华, 耿志鑫, 等. 污泥炭田间老化对土壤重金属及养分的影响[J]. 有色金属(冶炼部分), 2023(4): 131-139.
- [42] 张秀霞, 任文海, 丁明山, 等. 污泥生物炭固定化微生物强化石油污染土壤修复[J]. 石油学报(石油加工), 2023, 39(4): 892-899.
- [43] 薛洋, 杜春安, 王志朴, 等. 污泥生物炭对铜铅污染土壤的修复研究[J]. 清洗世界, 2022, 38(5): 131-132.
- [44] 邢佳. 污泥基生物炭的制备优化及其对重金属污染土壤的修复[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
- [45] 苏加强, 汪森, 曲自超, 等. 污泥/凹凸棒石共热解生物炭对土壤重金属的钝化效果研究[J]. 环境科学与管理, 2023, 48(9): 88-93.
- [46] 王秋利, 韩勇. 污泥基生物炭在矿区土壤重金属污染治理中的应用[J]. 能源与环保, 2023, 45(5): 43-48.
- [47] 陈晴空, 李佳瑛, 范剑平, 等. 热解温度对山地城市污泥生物炭吸附 Cu(II) 及其固碳作用的影响[J]. 应用化工, 2022, 51(12): 3469-3474.
- [48] 邹意义, 袁怡, 沈涛, 等. FeCl₃ 改性污泥生物炭对水中吡虫啉的吸附性能研究[J]. 环境科学学报, 2021, 41(9): 3478-3486.
- [49] 黄拓. 污泥生物炭的制备及对土壤中多菌灵吸附和降解的影响研究[D]. 深圳: 深圳大学, 2019.
- [50] 杨雪. 污泥基生物炭对农业土壤中典型除草剂迁移的影响[J]. 农业科技与装备, 2017(12): 10-13.
- [51] 陆洁, 冯嘉仪, 盛晗, 等. 生物炭对污泥混合基质性质和植物生长的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(5): 1082-1090.
- [52] 房献宝, 张智钧, 赖阳晴, 等. 新型污泥生物炭对土壤重金属 Cr 和 Cd 的修复研究[J]. 生态环境学报, 2022, 31(8): 1647-1656.
- [53] 恽壮志, 徐汝民, 朱正杰, 等. 污泥生物炭基质化应用对多肉植物生长性状的影响[J]. 现代园艺, 2023, 46(11): 11-13.
- [54] 王军, 刘程, 金鹏, 等. 污泥基生物炭对黑麦草生长特性及重金属累积的影响[J]. 安徽农业科学, 2022, 50(15): 79-82.
- [55] 王君, 陈娴, 桂丕, 等. 污泥炭化温度和时间对重金属形态及作物累积的影响[J]. 华南农业大学学报, 2015, 36(5): 54-60.

Research Progress on the Preparation and Application of Sludge Biochar

ZHANG Wanting, LI Feiyue

(College of Resources and Environment, Anhui Science and Technology University, Fengyang 233100, China)

Abstract: China is facing substantial and growing challenges in municipal sludge disposal. The current conventional municipal sludge treatment and disposal methods suffer from low stabilization rates, high energy consumption, and secondary pollution, and there is an urgent need to develop environmentally friendly and safe resource utilization approaches. Pyrolytic carbonization technology represents a promising sludge treatment

method, and the resulting biochar has great potential for application in wastewater treatment and soil quality improvement. Despite the potential of sludge biochar, comprehensive reviews on the factors influencing its production, modification techniques, and specific applications in wastewater treatment and soil quality improvement are insufficient. This paper systematically presents the principles and methods of sludge biochar preparation, analyzes the impact of factors such as pyrolysis temperature, duration, heating rate, and additives on its properties, and explores modification methods to enhance its performance. This paper also reviews the applications of sludge biochar in soil amelioration and water pollutant adsorption, providing prospects for future research.

Keywords: municipal sludge; sludge biochar; modification; pollution control; soil improvement

(责任编辑 李维卫)

(上接第 324 页)

Abstract ID: 1673-8020(2024)04-0319-EA

The Advanced Treatment Technology of Citric Acid Wastewater Based on Ozone Oxidation

LEI Hong¹, LIU Guanghui², SONG Shumei³, LEI Jiaming⁴

(1. Ecological Environment Monitoring Center of Laiyang, Yantai 265299, China;

2. Environmental Enforcement Team of Laiyang, Yantai 265299, China;

3. Environmental Engineering Consulting and Design Institute Co. Ltd. of Yantai, Yantai 264010, China;

4. School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 265520, China)

Abstract: The wastewater from citric acid industry belongs to high concentration of organic pollutants, and the secondary effluent treated with biochemical method still contains certain level of COD and chroma. To eliminate their threats to the environment, this work tried to treat the secondary effluent of citric acid wastewater with ozone oxidation. The optimal technical parameters were determined through orthogonal experiment. The result showed that the COD removal rate of citric acid wastewater was 88.5%, and the decolourization ratio attained 96.0% under the optimized conditions of contact time of 30 min, pH of 10, and temperature of 27 °C.

Keywords: citric acid wastewater; ozone oxidation; orthogonal experiment; kinetics

(责任编辑 李维卫)