

污泥与生物质共热解处置及其在水处理中的应用研究进展

李箫宁^{1,2*}, 余波^{1,2}, 马娇^{1,2}, 廉珂^{1,2}, 严寒^{1,2}, 张楠^{1,2}, 沈鹏飞^{2,3}

(1. 中铁水务集团有限公司, 陕西 西安 710000; 2. 中国铁工投资建设集团有限公司, 北京 101300;
3. 中国中铁生态环境专业研发中心, 北京 100000)

摘要:系统综述了近5年来国内外研究学者对污泥与生物质共热解的研究成果,明确了在共热解过程中,原料配比、热解温度和升温速率等因素对共热解的协同作用机制以及产物分布和产品性能的影响,并阐述了共热解生物炭在水处理方面的应用,以期对污泥与生物质共热解工艺优化及共热解产品资源化应用提供相关启示和借鉴。

关键词:污泥; 生物质; 共热解; 生物炭; 水处理应用

中图分类号: X705

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2026)07-0073-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.07.014

Research progress on the co-pyrolysis disposal of sludge and biomass and its application in water treatment

LI Xiao-ning^{1,2*}, YU Bo^{1,2}, MA Jiao^{1,2}, LIAN Ke^{1,2}, YAN Han^{1,2},
ZHANG Nan^{1,2}, SHEN Peng-fei^{2,3}

(1. China Railway Water Group Co., Ltd., Xi'an 710000, China;

2. China Railway Engineering Investment and Construction Group Co., Ltd., Beijing 101300, China;

3. Eco-Environmental Research and Development Center of China Railway Group, Beijing 100000, China)

Abstract: In this review, the research achievements of domestic and foreign scholars on the co-pyrolysis of sludge and biomass in the past five years are reviewed. It clarifies the influence of factors such as feedstock ratio, pyrolysis temperature, and heating rate on the synergistic mechanism of co-pyrolysis, as well as the product distribution and product performance during the co-pyrolysis process. Additionally, it expounds on the application of co-pyrolysis biochar in water treatment. It is expected to provide relevant inspiration and references for the optimization of the co-pyrolysis process of sludge and biomass and the resource-based application of co-pyrolysis products.

Key words: municipal sludge; biomass; co-pyrolysis; biochar; application in water treatment

随着城市化进程的加快,污水处理规模日益增加,污泥产生量也随之急剧上升^[1]。污水污泥中主要含有蛋白质、脂类、碳水化合物等有机成分,黏土质、水分、灰分等无机成分,以及病毒、细菌、重金属、多氯联苯等有害物质,若不进行合理的处理处置,会对生态环境和人身健康造成严重威胁^[2]。传统的污泥处置方式,如填埋、堆肥发酵和土地利用等,由于受到占地、成本较高和二次污染等因素限制,在应用中逐渐显示出许多弊端^[3]。污泥热解技术通过无氧或缺氧环境下将污泥加热到一定温度,经过热分解将有机成分转化为生物油、热解气和热解渣,具有占地面积小、附加值高、重金属稳定化程度高、二次污染小等优势,在污泥处置中被广泛应用^[4]。然而,污泥在进行单独热解时,由于高含水量、高灰分、低热值以及易挥发、有机物含量较低等特性,造成热解时出现挥发分析出性较差、产出品质不高、能

耗高等问题。

在全球能源结构多元化发展的背景下,生物质凭借可再生性与环境友好性,成为第四大能源,主要包括农业废弃物、林业剩余物和动物粪便等,具有碳含量高、灰分高、热值高等特点^[5]。但是,研究发现生物质进行单独热解时也伴随着产油率低和焦炭密度小等缺点。为了弥补两者不足,国内外学者将市政污泥与生物质进行共热解处置,通过污泥与生物质的协同效应,不仅优化了污泥热解过程,提高了热解效率,同时有效改善了热解产物品质,实现废弃物的资源化与高值化利用^[3]。目前,国内外学者基于热重结合动力学模型对污泥与生物质共热解特性进行了大量研究,然而对于不同影响因素条件下的相互作用及相关水处理应用的系统总结还很少。

基于这一背景,本文中综述了近5年污泥与生物质共热解的研究成果,重点分析了污泥与生物质

收稿日期: 2025-09-02; 修回日期: 2026-05-07

作者简介: 李箫宁(1992-),女,博士,高级工程师,研究方向为水污染控制研究,通讯联系人,lixiaoning92@163.com。

的掺杂比例、热解温度和升温速率等因素对污泥与生物质共热解特性和热解产物的影响,同时总结了污泥与生物质共热解生物炭对水中污染物的去除效能。通过分析上述各关键因素对共热解过程影响的研究现状,明确污泥与生物质在不同工况下的热解机理、产物分布和产品品质,从而为热解工艺节能降碳和资源化处置提供理论依据。

1 污泥-生物质共热解因素分析

在污泥与生物质共热解过程中会受到多种因素的共同作用与影响,如掺杂比例、热解温度和升温速率等(图 1)。通过深入探究这些影响因素,对优化污泥-生物质共热解工艺、提升产物品质和降低生产能耗具有重要意义。



图 1 污泥与生物质共热解处置

1.1 掺杂比例的影响

在共热解过程中,污泥与生物质的掺杂比例是研究最多的因素之一,对热解特性和产物分布具有显著影响。随着生物质比例的增加,污泥与生物质间出现明显的协同效应,同时有效改善热解产物的品质,促进热解可燃气体的产生。但是,当生物质掺杂比例过低或过高时均会对共热解过程产生抑制作用。

郭世鹏等^[6]分析了污泥与花生壳在不同比例下共热解特性。当花生壳的比例由 80% 降至 20% 时,可以发现共热解的初始温度降低,而热解终止温度逐渐由 705.59℃ 增加至 719.28℃,这表明适当比例生物质的添加可有效促进共热解的发生。同时,在同一温度下,发现协同作用指数随着污泥占比的增加呈现先增加后降低趋势,在污泥与花生壳比例为 4:6 时,两者协同作用达到最强。这主要是由于当花生壳占比过低时,较低含量的花生壳无法提供足够的受体与污泥中的自由基进行反应,从而降低了两者的相互作用。为了进一步说明污泥与生物质间的比例作用关系,Song 等^[7]采用 Friedman、FWO、KAS 和 DAEM 模型系统研究了污泥与小球藻在不同掺杂比例下的共热解动力学特性。研究结果显示,当小球藻的比例为 20%,转化率为 50% 时,热

解反应的平均活化能最低可达 100 kJ/mol,仅为原反应的 50%,促使热解反应更容易进行。上述结果也进一步说明污泥与生物质在合适比例下共热解可降低热解反应强度,使热解更容易发生。

污泥与生物质间的掺杂比例对混合物的三相产物的占比和品质也具有明显影响^[8]。Xu 等^[9]研究了污泥和麦秸(WS)在不同混合比例下对生物油和气体产量的影响。研究发现,随着 WS 比例的增加,生物油产量呈现先增加后下降的趋势,当 SS:WS=1:3 时,产量可达到最大值 66.2 g/kg,较之 SS 的生物油产量提高了约 58%。同时,合成气产率也随着 WS 比例的增加呈现先增加后降低,在 SS:WS=1:1 时,产量可达到 0.202 7 m³/kg,与 SS 和 WS 相比增加了 53.9%。此外,随着 WS 比例的增加,氢气产率呈现相同趋势,当 SS:WS=1:3 时,产量可达 0.032 7 m³/kg。Zhu 等^[10]研究也发现随着生物质的增加,热解焦炭的芳香性增加,随之质量也提高,与此同时挥发物与焦炭的相互作用促使挥发物中的大分子裂解成小分子气体,进而提升了混合物共热解产气率。

此外,沈晓芳等^[11]研究了农林废弃物(文旦皮)添加比例对污泥中重金属含量及环境风险的影响。研究表明,在文旦皮添加 50% 时,污泥与文旦皮共热解发生“稀释效应”,两者的共热解作用可有效促进重金属稳定晶体矿物的形成。同时,共热解合成生物炭的多孔隙结构和高比表面积进一步增强了重金属的稳定化,降低重金属风险。因此,在污泥与生物质共热解过程中可根据不同生物质种类选择不同掺杂比例,达到最佳的协同作用。

1.2 热解温度影响

热解温度是影响污泥与生物质共热解过程中的关键因素,主要分为水分损失、挥发分分解和难降解有机物分解 3 个阶段。Wang 等^[12]系统分析了污泥与稻壳生物质共热解在不同温度下的热解特性。在 30~150℃ 之间,主要进行水分的蒸发;在 166~580℃ 范围内,主要进行半纤维素、纤维素、多糖、羧酸、脂质和蛋白质的热解,并且伴随着稻壳的加入,可促进挥发性组分的分解;在 580~679℃ 之间,主要是进行木质素和剩余碳氢化合物的炭化作用,最终达到热解。同时,热解特性指数也进一步表明稻壳的加入可以有效提高热解反应特性。

热解温度对共热解产物的分布、产量与品质具有显著影响,主要涉及气体、液体和固体 3 类产物。随着热解温度的升高,混合样品依次经历脱水、挥发分析出、有机物降解和焦炭形成等阶段,在此过程

中,焦炭和生物油的产率逐渐降低,而气体产率则呈现逐渐增加的趋势。Babayigit 等^[13]探究了污泥和稻草(RS)共热解温度对生物油、产气率和焦炭产率的影响。当热解温度由 750℃ 增加到 850℃ 时,污泥热解产油率可由 44.6% 降至 36.8%,焦炭产率降至 20% 左右,而产气率从 34.2% 增加到 44.5%,这主要与挥发分的快速释放及二次裂解有关,使得大量有机物转化为气态产物逸出;在掺杂稻草共热解后,产油率降至 32.74%,产气率增加至 47.43%,焦炭产率基本未发生变化,这一现象主要是由于污泥和 RS 两者挥发物含量差别不大导致,分别为 50.80% 和 60.62%。同时,中试规模连续试验热解系统在 850℃ 温度下,具有 75.06% 的气体总产率,且氢气含量高达 32.35%,这也进一步说明高温热解有利于混合样品中有机物的断键、开环和解聚反应,进而促进可燃气体的产生。

同时,热解温度对共热解产物中重金属含量、形态和潜在风险具有显著影响,Xiao 等^[14]以污泥和空心莲子草为原料共热解制备生物炭(SABC),分析产物在 300~800℃ 下重金属总量、BCR 形态和浸出毒性。研究发现,随着热解温度的升高,Zn、Cu、Pb、Ni、Cr、Cd 6 种重金属的不稳定态比例和浸出毒性降低,稳定态总量和比例增加。这主要是由于在高温状态下有机物分解和生物炭的多孔结构为重金属提供了丰富的吸附位点,促进其向更稳定的形态转化。在热解温度为 800℃ 时,SABC 的重金属环境风险指数值为 51.69,属于低风险等级,较污泥单独热解可降低 94.8%。

1.3 升温速率影响

此外,升温速率作为共热解过程的关键参数之一,对共混物热解过程和热解特性具有明显影响。同时,研究发现较高的升温速率会促使共热解气体和液体产物的产生,降低热解炭的产率^[15]。徐期勇等^[16]分析了污泥和木屑随升温速率由 10℃/min 增加到 50℃/min 的热解变化。可以发现,污泥和木屑的初始热解温度随着升温速率的升高,向高温方向偏移。在升温速率为 10℃/min 时,热解质量损失率最高,这也表明较低的升温速率有助于热解焦固化和芳香烃稠化结焦。霍建宝^[17]也发现了相似的规律,在 10、20、30、40℃/min 4 种不同升温速率下,污泥与秸秆混合物的质量损失逐渐向右偏移,并且 DTG 最大热解温度向高温区偏移,这是因为在加热速率较低时会使得挥发物降解缓慢而充分,而加热速率升高时使得温度梯度越大,出现了明显的热滞

后效应。韩莹莹等^[18]对污泥共热解制备生物炭的综述也表明,升温速率的增加会改变样品热解初始温度和减重速率,同时会使得生物炭的产率降低,气体产率逐渐升高。针对上述结果,Shen 等^[19]系统研究了升温速率对样品共热解影响的主要机理。研究表明,随着升温速率的增加,系统温度呈现加速上升趋势,进而提升了分子动能,增加了高能碰撞概率,促使反应物中化学键更易断裂,反应分子更容易跨越反应的活化势垒,进而有效降低混合物共热解的反应活化能。

2 水污染治理

目前,污泥与生物质共热解产物的研究应用主要集中在生物炭的合成及应用,凭借高孔隙率和丰富的表面官能团(如羟基、羧基、铁配合物等),成为去除水中有机染料、重金属、药物、农药等多种污染物的理想材料(表 1)。

表 1 污泥与生物质共热解生物炭污染物去除性能

序号	污染物	机理
1	有机染料:亚甲基蓝、茜素红 S、直接红 23 等 ^[20-22]	物理吸附、化学吸附、静电吸引等
2	药物:环丙沙星、四环素、抗生素呋喃妥英等 ^[23-25]	络合作用、静电吸附、孔隙填充、 π - π 相互、氢键作用等
3	农药:阿特拉津、磷酸盐、新烟碱类杀虫剂等 ^[26-27]	π - π 相互作用、静电吸附、孔隙填充、化学吸附、配体交换等
4	重 金 属: Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Cr^{6+} 、 Ni^{2+} 、 Zn^{2+} 等 ^[28-30]	化学吸附、静电吸附、物理吸附等

2.1 染料去除

研究发现,污泥与生物质共热解合成生物炭已被广泛用于水中染料的去除。Dai 等^[20]研究发现在污泥与木质素质量比为 1:4 时,共热解对生物炭的孔隙形成有促进作用,比表面积可由 62.53 m^2/g 提高到 243.22 m^2/g ,对亚甲基蓝(MB)的吸附容量从 12.48 mg/g 提高到 154.06 mg/g ,显示出巨大的水处理潜能。为了进一步提升生物炭的吸附效果,Mustapha 等^[21]研究了金属氧化物负载的 HZSM-5 催化剂对微藻和污泥合成生物炭的影响。研究发现,催化剂的添加可使烃类和含氧化合物的组成更加平衡,对 MB 的吸附量可达 90 mg/g ,同时该生物炭经过 6 次再生循环后,去除率仅略有下降(约 5%),显示出优异的实际应用潜力。此外,共热解合

成生物炭对其他染料 also 具有很好的吸附效果, Rezvani 等^[22]发现在污泥与稻壳比为 0.8:0.2、热解温度为 400℃ 时,合成生物炭对茜素红 S 的最大吸附容量可达 1 466.38~1 524.18 mg/g。吸附动力学和等温吸附模型试验表明该吸附过程以化学吸附为主。

2.2 药物类污染物去除

污泥与生物质共热解合成生物炭对各类药物也表现出了优异的去除能力。Chen 等^[23]发现污泥和竹子经 KOH 活化后热解合成生物炭对四环素的吸附容量可达 111.39 mg/g。结合动力学模型和量子化学计算,合成生物炭主要通过孔隙填充、静电相互作用、 π - π 相互作用、氢键和疏水相互作用完成对四环素的高效去除。Zhao 等^[24]利用污泥和水葫芦共热解合成了氮掺杂生物炭,该石墨 N 结构有效促进了自由基的产生,增强了催化剂和四环素之间的电子转移,去除效率可达 93%。近期,Yoon 等^[25]将污泥和牛粪共热解合成生物炭用于抗生素呋喃妥英(NFT)的氧化和吸附。基于该生物炭的催化和吸附双重性能,在光降解过程中通过产生自由基($\text{SO}_4^{\cdot-}$ 和 $\cdot\text{OH}$)和非自由基($^1\text{O}_2$)有效降解 NFT,吸附效率为 80.9%。同时,该生物炭在经过 5 次循环使用后,吸附效率仍在 50% 以上,显示出潜在的实际应用潜能。

2.3 农药类污染物去除

基于共热解生物炭的强吸附性、高稳定性等特性,国内外研究学者对其在农药类污染物去除方面也展开了一系列研究工作。Irfan 等^[26]将小麦秸秆和污泥按照 1:1 的比例在 550℃ 共热解合成了铁改性生物炭(Fe@CBC),并分析了磷酸盐去除机理。在投加量为 2 g/L 条件下,Fe@CBC 对 PO_4^{3-} 的吸附效果可以达到 90% 以上。研究表明,这一优异的吸附结果主要与 Fe@CBC 的纳米多孔结构、较高的零电荷点和表面富集的铁配合物(Fe-OH 和 FeC)有关,通过配体交换和化学吸附作用实现对污染物的高效去除。Cui 等^[27]针对生物炭去除新烟碱类杀虫剂的综述阐明了污泥与生物质共热解合成生物炭对污染物的吸附机理。研究发现,生物炭具有独特的吸附和催化双重性能,一方面通过 π - π 相互作用、静电相互作用和孔隙填充等实现了对污染物的吸附,另一方面通过产生自由基(如 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 、 $\cdot\text{OH}$ 、 $\cdot\text{O}_2$ 等)和非自由基(如 $^1\text{O}_2$ 和电子转移),促进了对污染物的催化降解,最终实现对污染物的高效去除。

2.4 重金属去除

此外,共热解生物炭还可用于污水中重金属离子的吸附。当采用污泥与秸秆比例为 3:7,在温度为 400℃、热解 4 h 条件下制备的生物炭,具有丰富的含氧官能团和 π 共轭芳香结构,对水中 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Cr^{6+} 的吸附量分别可达 21.38、17.65、21.07 mg/g^[28]。Fu 等^[29]发现将污泥和香蕉皮在 400℃ 共热解 2 h 条件下合成的生物炭(MWBC)比表面积高达 3.539 m^2/g ,对 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 吸附量分别为 40.1、40.0、39.6 mg/g,均接近 100% 的吸附效率。结合动力学模型和红外表征分析,MWBC 同时具有亲水性和疏水性,在吸附过程中以化学吸附为主,物理吸附为辅。为了进一步提高重金属的吸附性能,Wang 等^[30]利用富含铁的污泥焚烧残渣与木质素在 1 050℃ 温度下共热解,通过将污泥残渣中的含铁氧化物转化为零价铁,合成了一种高效磁性吸附材料(LR-1050)。基于 LR-1050 中零价铁与 Cr^{6+} 的氧化还原作用,针对 10 mg/L 的 Cr^{6+} 表现出近 100% 的去除效率。同时,固定床柱试验表明 LR-1050 对 Cr^{6+} 、 Cu^{2+} 和 Ni^{2+} 均具有优异的去除性能,展现出很好的实际应用潜能。

3 结论与展望

污泥热解技术作为一项新兴处理技术,具有低污染、低能耗和可资源回收等特点,在固废领域展现了广阔的应用前景。研究表明,污泥与生物质共热解受掺杂比例、热解温度和升温速率等因素的影响。当污泥与生物质在最佳比例条件下时表现出明显的协同效应,有效降低热解反应活化能,提高热解效率。随着热解温度的升高,可有效改善热解产物品质,提高热解气产率。同时,共热解生物炭具有孔隙结构发达、环境风险小和吸附性能好等优势,在水污染治理领域展现了很好的应用前景。

但是,现阶段还存在一定问题需要进一步探索与研究。

(1)在污泥与生物质共热解项目实施过程中,共热解产物回收利用还存在实际困难。因此,在后续现场应用中,应同步考虑热解气、生物油的同步回收,通过资源回收利用,减少化石能源消耗,降低运行成本。

(2)目前,污泥-生物质共热解生物炭针对水处理应用研究已经较多,且对相关机理也进行了深入研究,但是大多只是针对单一污染物进行去除,针对复杂的污水环境,还需进一步探究。同时,目前热解

生物炭的应用还主要停留在试验室阶段,工程化应用亟需进一步探索,实现固体废弃物的资源化应用。

参考文献

- [1] Li L, Hua Y, Zhao S, *et al.* Worldwide research progress and trend in sludge treatment and disposal: A bibliometric analysis [J]. *ACS ES&T Engineering*, 2023, 3(8): 1083–1097.
- [2] Wu Y, Wang Y, Chen P, *et al.* Nitrogen fixation of municipal sewage sludge by co-pyrolysis with biomass and KH_2PO_4 -modified biochar addition [J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2023, 173: 106081.
- [3] Biney M A, Gusiati M Z, Trakal L, *et al.* Utilization of co-substrates in municipal sewage sludge co-pyrolysis: Yields and characterization of biochar, bio-oil, and syngas, with economic feasibility analysis [J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2025, 189: 107091.
- [4] 陆大川, 顾卫华, 赵静, 等. 城市污泥热解影响因素分析及残渣资源化研究进展 [J]. *无机盐工业*, 2023, 55(5): 8–15.
- [5] 王梦卓. 市政污泥与木质纤维素生物质共热解行为及热解焦结构演变规律研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2023.
- [6] 郭世鹏, 王云刚, 白彦渊, 等. 市政污泥与花生壳共热解协同效应及产物分布研究 [J]. *中国环境科学*, 2025, 45(4): 2016–2027.
- [7] Song K, Yin R, Hao B, *et al.* Synergistic effects during co-pyrolysis of microalgal residues and municipal sewage sludge in an H_2 -containing atmosphere: Pyrolysis characteristic and kinetics [J]. *Algal Research*, 2025, 88: 104013.
- [8] Wang Y, Liu Z, Deng H, *et al.* Study on the properties and components of solid-liquid products by co-pyrolysis of sludge and cotton stalk [J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2024, 182: 106712.
- [9] Xu G, Wang S, Cai X, *et al.* Study on characteristics, hydrogen-rich gas, bio-oil production, and process optimization of co-pyrolysis of sewage sludge and wheat straw [J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2023, 45: 102888.
- [10] Zhu Y, Liu D, Tan Z, *et al.* Volatile-char interactions during co-pyrolysis of sewage sludge and poplar wood [J]. *Journal of the Energy Institute*, 2024, 117: 101820.
- [11] 沈晓芳, 龚蕊燕, 袁娴, 等. 文旦皮-污泥共热解对市政污泥中重金属的稳定化 [J]. *环境科学*, 2025, 46(2): 944–955.
- [12] Wang T, Chen Y, Li J, *et al.* Co-pyrolysis behavior of sewage sludge and rice husk by TG-MS and residue analysis [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 250: 119557.
- [13] Babayigit E, Alper D, Cokgor E, *et al.* High temperature pyrolysis of sewage sludge: Synergistic effects of co-pyrolysis with rice straw and composite plastics wastes [J]. *Heliyon*, 2024, 10(21): e39737.
- [14] Xiao T, Zhou P, Liu Y, *et al.* Impact of pyrolysis temperature on heavy metals environmental risk in biochar derived from co-pyrolysis of alternanthera philoxeroides and sludge [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2024, 12(6): 114841.
- [15] 俞存天. 园林垃圾与市政污泥共热解过程条件优化及含碳物质转化规律研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2024.
- [16] 徐期勇, 章佳文, 刘虎, 等. 市政污泥与木屑共热解特性及动力学分析 [J]. *可再生能源*, 2021, 39(9): 1150–1156.
- [17] 霍建宝. 污泥与秸秆共热解特性及固体产物的燃烧特性研究 [D]. 吉林: 东北电力大学, 2023.
- [18] 韩莹莹, 方乐, 孙宇晴, 等. 污泥共热解制备污泥基生物炭及其在土壤回用中的改良效益 [J]. *环境化学*, 2024, 43(5): 1670–1683.
- [19] Shen F, Wen X, Lu C, *et al.* Co-pyrolysis characteristics and kinetic analysis of sewage sludge and peanut shells by TG-MS [J]. *Journal of the Energy Institute*, 2024, 116: 101736.
- [20] Dai Q, Liu Q, Yilmaz M, *et al.* Co-pyrolysis of sewage sludge and sodium lignosulfonate: Kinetic study and methylene blue adsorption properties of the biochar [J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2022, 165: 105586.
- [21] Mustapha S I, Isa Y M. Co-pyrolysis of microalgae and sewage sludge over $\text{ZnO}/\text{MgO}/\text{CeO}_2/\text{HZSM-5}$ catalyst for energy and water treatment application [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2024, 12(6): 114955.
- [22] Rezvani B, Hallajisani A, Tavakoli O. Super-effective biochar adsorbents from co-pyrolysis of rice husk and sewage sludge: Adsorption performance, advanced regeneration, and economic analysis [J]. *Bioresource Technology Reports*, 2025, 29: 102046.
- [23] Chen L, Yang H, Hong R, *et al.* Tetracycline adsorption on sludge-bamboo biochar prepared by gradient modification and co-pyrolysis: Performance evaluation and mechanism insight [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2024, 12(5): 114121.
- [24] Zhao H, Lv M, Shang X, *et al.* High performance of heterogeneous catalytic ozonation for tetracycline removal by a N-doped biochar derived from co-pyrolysis of sludge and water hyacinth [J]. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 2024, 205: 110031.
- [25] Yoon K, Lee H, Kwon G, *et al.* Pyrolytic conversion of cattle manure and acid mine drainage sludge into biochar for oxidative and adsorptive removal of the antibiotic nitrofurantoin [J]. *Environmental Research*, 2025, 265: 120488.
- [26] Irfan I, Inam M A, Usmani W, *et al.* Adsorptive recovery of phosphate using iron functionalized biochar prepared via co-pyrolysis of wheat straw and sewage sludge [J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2023, 32: 103434.
- [27] Cui S, Lv J, Hough R, *et al.* Recent advances and prospects of neonicotinoid insecticides removal from aquatic environments using biochar: Adsorption and degradation mechanisms [J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 939: 173509.
- [28] 朱康健, 林梦婉, 曹燃, 等. 污泥秸秆生物炭的制备及其重金属吸附性能分析 [J]. *环境监测管理*与技术, 2025, 37(1): 87–91.
- [29] Fu Y, Hua S, Yang Y, *et al.* Characterization, efficiency, and mechanism in removing heavy metals by a mixed biochar derived from sludge and banana peel [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2022, 249: 232–245.
- [30] Wang Q, Li J S, Poon C S. Novel recycling of phosphorus-recovered incinerated sewage sludge ash residues by co-pyrolysis with lignin for reductive/sorptive removal of hexavalent chromium from aqueous solutions [J]. *Chemosphere*, 2021, 285: 131434. ■