

高洁. 污泥水热碳化特性对燃料性能的影响及关联[J]. 净水技术, 2026, 45(6): 106-115, 131.

Gao J. Influence and correlation of hydrothermal carbonization characteristics of sludge on fuel performance[J]. Water Purification Technology, 2026, 45(6): 106-115, 131.

污泥水热碳化特性对燃料性能的影响及关联

高洁*

(上海漾沁环境科技有限公司, 上海 201712)

摘要 【目的】针对我国城市化进程中污泥产量激增、现有处理技术能耗高且资源化效率低的问题,探究水热碳化(HTC)技术对污泥转化为水热炭的处理效果,明确关键影响因素,为优化污泥资源化利用工艺、降低处理能耗、助力“双碳”目标实现提供理论支撑与实践依据。【方法】本文以上海市某典型污水处理厂的污泥为研究对象,采用 HTC 技术生产水热炭,通过分析污泥碳化程度和燃料比评估其价值。【结果】随反应温度从 170 °C 升至 220 °C,水热炭低位热值从 11.91 MJ/kg 提升至 13.59 MJ/kg(增幅约为 14.0%),H/C、O/C 原子比从 1.47、0.36 降至 1.04、0.23;固体产率从 77.5%降至 55.4%,200 °C 后急剧下降。干污泥碳化度均值为 0.52、燃料比均值为 0.16;水热炭碳化度均值为 0.61(最高提升 30.77%)、燃料比均值为 0.22(最高提升 93.75%),燃料比提升使水热炭燃烧性能改善。当灰分与可燃分质量分数比 <0.45 时,水热炭热值最高提升 12%~14%,碳化效果显著。能量平衡分析显示,在最优工况下(200 °C、灰分与可燃分质量分数比为 0.30),工艺净能量收益为正[净收益为 1.28 MJ/(kg 干污泥)]。【结论】HTC 可显著提升污泥的碳化度、燃料比及低位热值,优化燃料品质,200 °C 为最佳反应温度;污泥灰分与可燃分比例 ≥ 0.45 是制约碳化效果的关键临界值,其核心机理涉及灰分中金属氧化物的催化副反应与 pH 改变;实际应用中需针对合流制排水系统雨季污泥特性进行预处理调控,并配套滤液处理工艺。本文为污泥资源化利用工艺优化提供关键参数配置与技术方向。

关键词 水热碳化; 污泥; 碳化程度; 燃料比; 水热炭

中图分类号: X703 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2026)06-0106-11

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.06.012

Influence and Correlation of Hydrothermal Carbonization Characteristics of Sludge on Fuel Performance

Gao Jie*

(Shanghai Yangqin Environmental Technology Co., Ltd., Shanghai 201712, China)

Abstract [Objective] Addressing the challenges of surging sludge production in China's urbanization, high energy consumption, and low resource utilization efficiency of existing treatment technologies, this paper investigates the effectiveness of hydrothermal carbonization (HTC) in converting sludge into hydrochar. It identifies key influencing factors to optimize sludge energy utilization processes, reduce treatment energy consumption, and support the achievement of "dual carbon" goals. [Methods] Using sludge from a typical wastewater treatment plant in Shanghai, hydrochar was produced via HTC. The carbonization degree and fuel ratio were analyzed to evaluate its value. [Results] As the reaction temperature increased from 170 °C to 220 °C, the low heating value of hydrochar increased from 11.91 MJ/kg to 13.59 MJ/kg (an approximately increase of 14.0%), and the H/C and O/C atomic ratios decreased from 1.47 and 0.36 to 1.04 and 0.23 respectively; the solid yield decreased from 77.5% to 55.4%, with a sharp decline after 200 °C. The average carbonization degree of dried sludge was 0.52, and the average fuel ratio was 0.16; the average carbonization degree of hydrochar was 0.61 (with a maximum increase of 30.77%), and the average fuel ratio was 0.22 (with a maximum increase of 93.75%). The improvement of fuel ratio enhanced the combustion performance of hydrochar. When the ash-combustible mass fraction ratio was less than 0.45, the calorific value of hydrochar could be increased by up to 12%–14%, showing a

[收稿日期] 2025-11-27

[通信作者] 高洁(1993—),女,工程师,主要从事水污染防治理论与技术、污泥处理处置技术研究工作,E-mail:610740284@qq.com。

significant carbonization effect. Energy balance analysis indicated a positive net energy gain [1.28 MJ/(kg dry sludge)] under optimal conditions (200 °C, ash-combustible mass fraction ratio was 0.30). [Conclusion] HTC significantly improves sludge carbonization, fuel ratio, and lower heating value, with 200 °C as the optimal temperature. The critical threshold for ash-to-combustible ratio (≥ 0.45) limits carbonization efficiency, mainly due to catalytic side reactions and pH changes caused by metal oxides in ash. Pre-treatment adjustments for wet-season sludge characteristics in combined sewer systems and supporting liquid treatment processes are necessary. This paper provides key parameters and technical directions for optimizing sludge energy utilization.

Keywords hydrothermal carbonization(HTC); sludge; degree of carbonization; fuel ratio; hydrochar

在城市化进程加快的当下,我国污泥产量呈现逐年递增的态势。据相关测算,到2025年,我国污泥年产量预计将突破1亿t。随着国家生态环境保护标准的持续升级,市政污水治理领域已从“重水轻泥”的传统模式向“泥水并重”的系统治理范式转变^[1]。“十四五”时期明确以降碳为战略重点,强调减污降碳协同增效。在此背景下,现有污泥处理技术的局限性日益凸显:预处理环节的浓缩脱水仅能将含水率控制在60%~80%,后续处置能耗居高不下;厌氧消化存在甲烷产率低、周期长(20~30 d)及沼渣污染风险等问题^[2];好氧发酵受温度波动影响显著,易引发氮素流失与恶臭污染^[3]。

将污泥隔绝空气进行无氧热解制备生物炭的碳化技术契合“减污降碳”协同要求,为污泥资源化提供了高附加值路径,成为当前研究的重要方向。污泥碳化技术主要分为干法碳化(热解碳化)与湿法碳化[水热碳化(HTC)]两大类。当前研究^[4]中,热解碳化技术的应用探索已取得较多进展,其产物在吸附材料制备及土壤改良剂开发等领域展现出应用潜力。然而,热解碳化对原料含水率存在严格限制,通常需将污泥脱水干化至含水率低于20%,不仅消耗大量能源,还会显著增加碳排放强度。与热解碳化技术相比,HTC具有显著优势:其一,不受初始含水率影响,无需复杂脱水干化预处理,能有效规避传统污泥预处理的能耗与成本瓶颈,为突破我国污泥处置困境提供了潜在技术路径;其二,反应条件温和,设备要求较低且易于控制;其三,炭产物收率较高,且表面官能团丰富,为后续高值化利用奠定基础。这些特性使HTC成为处理高含水率有机废弃物的优选技术,应用前景广阔^[5]。

近年来,国内外学者围绕污泥HTC技术开展了大量研究并取得诸多成果。Silva等^[6]在100~200 °C的温度和0~60 min的保持时间对污泥进行了碳化试验。结果表明,在150 °C和30 min的条件

下,质量收率达到89.01%,产品的所有性能指标都很好。Oliveira等^[7]研究了170 °C和230 °C温度下污泥的HTC特性,结果表明,提高温度会降低质量、产量,但会提高热值,这表明更高的温度会改变污泥的物理性质。Wang等^[8]研究了不同温度(170~350 °C)下高灰分城市污泥中的HTC,讨论了不同温度下的成分差异,并确定了制备高质量燃料的最佳温度。Wilk等^[9]分别在200 °C和220 °C下探索了污泥衍生的碳氢化合物作为燃料的潜力,发现在220 °C制备的样品表现出更高的碳化程度和更稳定的燃烧性能。

尽管HTC技术在污泥处理领域展现出显著优势,但现有研究仍存在三大关键缺口:一是长周期研究相对匮乏,多数文献基于实验室短期(1~3个月)批次试验,但针对我国合流制排水系统雨季泥质剧烈波动(灰分激增)的长周期连续监测研究仍较为缺乏,难以全面反映技术的工程适应性;二是机理研究碎片化,现有成果多聚焦水热炭的热值、吸附性能等应用指标,对“反应温度-泥质特性-碳化产物理化性质”的关联机制研究不足,尚未明确关键调控参数^[10-11];三是临界条件不清晰,未系统分析污泥中灰分、有机质等组分对碳化效果的制约阈值,导致工程应用中易出现“碳化效率不稳定”问题。基于此,本文以上海市某典型污水处理厂(服务老城区合流制排水系统,雨季泥质波动显著)为研究现场,开展30个月的月度连续取样,通过多温度梯度试验,系统探究HTC技术的碳化特性,明确温度、灰分-可燃分比例对水热炭性能的影响规律,确定技术适用临界条件。研究成果可为污泥HTC工程的工艺设计(如反应温度调控、预处理工艺选择)提供关键参数,推动该技术从实验室走向实际应用,对实现污泥能源化利用与“双碳”目标具有重要现实意义。

本文涉及的核心评价指标及关键阈值定义

如下。

碳化度:反映固体物料碳化程度的核心指标,表征除水分与灰分外,C元素在可燃组分(固定碳+挥发分)中的占比,数值越高说明碳化程度越深、碳富集效果越好,该指标参考《固体生物质燃料工业分析方法》(GB/T 28731—2012)相关原理制定。

燃料比:指固体燃料中固定碳与挥发分的比值,是评价燃料燃烧特性的关键参数,参考《煤的工业分析方法》(GB/T 212—2008)中的定义与测试方法。燃料比越高,着火温度越高,燃烧过程越稳定,不易产生黑烟,但点火难度略有增加;燃料比越低,燃烧反应越剧烈,易出现火焰高、燃烧不充分的问题。

灰分激增:指污泥中灰分含量在短时间内(如雨季)出现显著上升的现象,通常定义为灰分含量较正常工况(如冬季)增长50%以上,该定义参考《城镇污水处理厂污泥处置 分类》(GB/T 23484—2009)中关于污泥特性波动的界定标准。灰分主要来源于泥沙、矿物质等惰性组分,其激增会直接影响碳化反应效率。

灰分与可燃分质量分数比:指污泥中空干基灰分质量分数与可燃组分(固定碳+挥发分)质量分数的比值,是反映泥质对碳化效果影响的关键参数,无明确行业统一标准,本文基于试验数据界定其临界值。

低位热值(LHV):指单位质量燃料完全燃烧后,其燃烧产物中的水蒸气仍以气态存在时所放出

的热量,是评价燃料能量价值的核心指标,测试方法参考《固体生物质燃料 低位热值测定方法》(GB/T 30727—2014)。

1 试验材料和方法

1.1 污泥泥质

本文选取上海市某市政污水处理厂作为取样点,该污水厂采用厌氧-缺氧-好氧(AAO)工艺处理市政污水,污泥(含水率为80%)日均产量为150 t。取样时间为2020年1月—2022年6月,共30个月,每月采集一次,采样质量为5 kg,采用密封聚乙烯桶(内衬防腐膜)盛装,24 h内完成基础特性分析,避免样品变质影响测试结果。参照国家标准与行业规范,对污泥样品的物理化学特性进行全面测试,结果如表1所示。工业分析显示,空干基固定碳、灰分、挥发分质量分数均值分别为3.14%、2.520%、9.77%,说明污泥有机组分以挥发分为主,固定碳含量较低;元素分析中,干燥基C、H、O质量分数均值分别为27.64%、3.64%、17.55%,粒径均值为285 μm ,无明显大颗粒杂质;LHV(干燥基)均值为11.93 MJ/kg,基本符合市政污泥热值的范围。值得注意的是,污泥灰分含量存在显著季节波动:冬季(12月—2月)灰分质量分数均值为1.85%,夏季(6月—8月)为3.87%,波动幅度达110%,这主要是夏季暴雨导致管网泥沙流入,印证了市政污泥泥质波动的典型性,为后续研究灰分影响提供了数据基础。

表1 污泥的物理化学特性

Tab. 1 Physical and Chemical Properties of Sludge

项目	含水率	固定碳 (空干基)	灰分 (空干基)	挥发分 (空干基)	C (干燥基)	H (干燥基)	O (干燥基)	N (干燥基)	S (干燥基)	粒径/ μm	LHV/ ($\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)
最小值	78.20%	2.87%	1.850%	8.95%	26.15%	3.41%	16.23%	3.15%	0.65%	256	11.36
最大值	81.50%	3.42%	3.875%	10.52%	29.08%	3.89%	18.77%	3.68%	0.81%	312	12.50
均值	79.85%	3.14%	2.520%	9.77%	27.64%	3.64%	17.55%	3.42%	0.73%	285	11.93

1.2 HTC 试验装置及流程

本文采用自主搭建的3 L间歇式HTC反应系统,装置结构如图1所示,主要由反应主体、控温系统、搅拌系统、冷却系统与产物收集系统五部分组成。反应主体采用316L不锈钢材质,设计压力为15 MPa,耐受温度为300 $^{\circ}\text{C}$ 。采用电加热套(功率为3 kW)包裹反应器外壁,配备智能温度控制器,温度控制精度为 ± 1 $^{\circ}\text{C}$,升温速率通过调节加热功率实

现(本试验设定为5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$)。反应器顶部安装机械搅拌器,搅拌转速为0~500 r/min(可调),本试验设定为300 r/min,确保污泥在反应过程中均匀受热,避免局部过热。反应结束后,通过反应器外壁的螺旋冷却夹套通入循环冷却水,使反应器内温度在30 min内降至室温,避免后续产物氧化。

1.2.1 试验操作参数设计

为探究反应温度对HTC效果的影响,设置6个

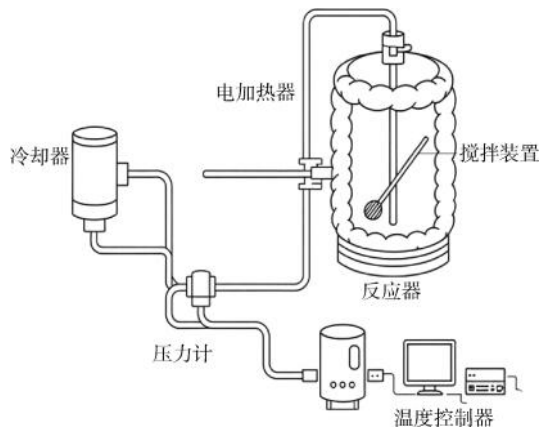


图1 HTC反应器
Fig.1 HTC Reactor

温度梯度:170、180、190、200、210、220 ℃,其他参数保持一致。污泥(含水率为80%计,干物质质量为200 g)投加量为1 kg;反应时间为30 min(从温度升至设定值开始计时);搅拌转速为300 r/min;升温速率为5 ℃/min。

重复试验:每个温度梯度重复试验3次,取平均值作为最终结果,同时计算标准差以反映数据离散程度,用于绘制误差棒。

对照试验:以未经过HTC处理的干污泥作为对照样,同步进行碳化度、燃料比、热值等指标测试,用于对比分析HTC技术的处理效果。

1.2.2 试验操作步骤

样品准备:取新鲜污泥样品,搅拌均匀后准确称量1 kg,倒入反应器内,检查反应器密封状态(确保无泄漏)。升温阶段:启动加热套与搅拌器,设定升温速率为5 ℃/min,通过比例-积分-微分(PID)控制器实时监控温度,当温度升至设定值时,开始计时(反应时间为30 min)。保温阶段:维持设定温度与搅拌转速,期间记录压力变化(通常压力随温度升高至2~8 MPa,温度稳定后压力保持恒定)。冷却阶段:反应结束后,关闭加热套,开启循环冷却水,待反应器内温度降至25 ℃左右,关闭搅拌器与冷却水。产物分离:打开卸料口,将固液混合物导入真空过滤装置,抽滤分离水热炭与水相;水热炭用去离子水洗涤3次(去除表面残留盐分与小分子有机物),然后置于105 ℃烘箱烘干至恒重(2次称量质量差≤0.001 g)。样品保存:将烘干的水热炭粉碎,过100目标标准筛,装入密封样品袋,置于干燥器中保存,用于后续碳化度、燃料比、元素分析与热值测定。

1.3 碳化度及燃料比评价方法

碳化度是反映固体物料碳化程度的核心指标,表征除水分与灰分外,碳元素在可燃组分(固定碳+挥发分)中的占比,值越高说明碳化程度越深、碳富集效果越好。本文采用式(1)计算碳化度(以干燥基计)。燃料比是固定碳与挥发分的比值,反映固体燃料的燃烧特性,燃料比越高,着火温度越高,燃烧过程越稳定,不易产生黑烟,但点火难度略有增加;燃料比越低,燃烧反应越剧烈,易出现火焰高、燃烧不充分的问题。本文采用式(2)计算燃料比(以空干基计)。表2比较了不同固体燃料的碳化度和燃料比特性^[12],结果可知,干污泥的碳化度(0.52)、燃料比(0.16)远低于煤类燃料,热值仅为烟煤的1/3左右,而水热炭的相关指标需通过试验验证是否接近或达到劣质煤(如褐煤)水平。

$$\theta = \frac{C}{F_C + V_M} \quad (1)$$

$$R = \frac{F_C}{V_M} \quad (2)$$

其中: θ ——碳化度;

C ——样品总碳含量;

F_C ——固定碳含量;

V_M ——挥发分含量;

R ——燃料比。

表2 固体燃料的碳化程度和燃料比特性的比较

Tab.2 Comparison of Carbonization Degree and Fuel Ratio Characteristics for Solid Fuel

项目	热值/(MJ·kg ⁻¹)	碳化度	燃料比	用途
烟煤	≥35.56	0.85~0.90	≥2.52	燃料
次烟煤	33.91~35.15	0.80~0.83	—	煤气化
褐煤	24.27~28.45	0.70~0.78	—	燃料转化
干污泥	13.39~14.64	0.52	0.16	辅助燃料

1.4 固体产率与热值提升率计算

固体产率反映HTC过程中干物质的保留比例,计算如式(3)。

$$Y = \frac{m_h}{m_s} \times 100\% \quad (3)$$

其中: Y ——固体产率;

m_h ——水热炭质量,kg;

m_s ——污泥干基质量,kg。

热值提升率反映 HTC 对污泥热值的改善效果, 计算如式(4)。

$$\eta = \frac{Q_h - Q_s}{Q_s} \times 100\% \quad (4)$$

其中: η ——热值提升率;

Q_h ——水热炭 LHV, MJ/kg;

Q_s ——干污泥 LHV, MJ/kg。

1.5 能量平衡计算方法

为评估 HTC 工艺的能量可行性, 建立简化能量平衡模型, 仅考虑主要能量输入与输出项, 忽略散热损失(反应器采用保温材料包裹, 散热损失 $\leq 5\%$), 计算如式(5)~式(7)。

$$Q_{in} = Q_{sludge} + Q_{water} + Q_{reaction} \quad (5)$$

其中: Q_{in} ——能量输入, MJ/kg;

Q_{sludge} ——污泥从室温(25 °C)升温至反应温度所需热量, MJ/kg;

Q_{water} ——污泥中水分从室温(25 °C)升温至反应温度所需热量, MJ/kg;

$Q_{reaction}$ ——维持反应 30 min 所需热量, MJ/kg。

$$Q_{out} = m_{hc} \times L_{hc} \quad (6)$$

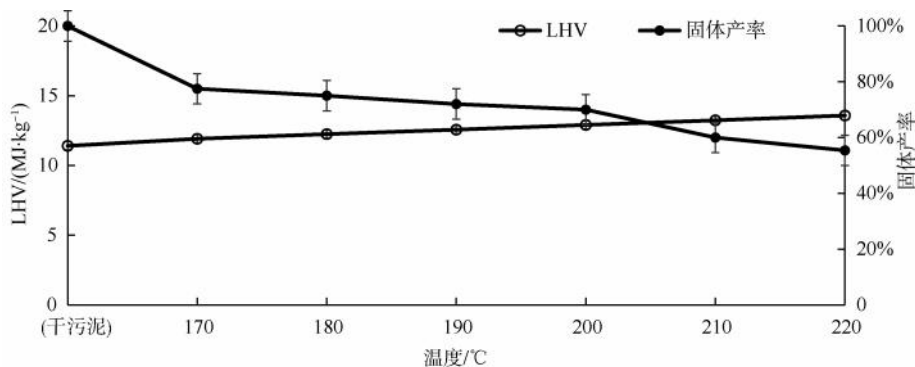


图2 不同 HTC 温度下水热炭的 LHV 和固体产率

Fig. 2 LHV and Solid Yield of Hydrochar at Different HTC Temperatures

固体产率随温度升高呈现显著下降趋势: 170 °C 时固体产率最高(77.5%), 190 °C 时降至 72.0%, 200 °C 后下降速率加快, 220 °C 时降至 55.4%, 较 170 °C 下降 22.1%。这是因为高温条件下, 污泥中易挥发有机组分(如小分子脂肪酸、挥发性烃类)的生成量增加, 部分有机碳转化为液体产物(如乙酸、丙酮)或气态产物(如 CO₂、CH₄), 导致固体产物质量减少。值得注意的是, 200 °C 是固体产率的“拐点”——200 °C 前产率下降平缓(每升高

其中: Q_{out} ——能量输出, MJ/kg;

m_{hc} ——水热炭质量, kg;

L_{hc} ——水热炭 LHV, MJ/kg。

$$Q_{net} = Q_{in} - Q_{out} \quad (7)$$

其中: Q_{net} ——净能量收益, MJ/kg。

2 结果和讨论

2.1 反应温度对水热炭固体燃料特性的影响

2.1.1 LHV 与固体产率的变化规律

不同反应温度下水热炭的 LHV 与固体产率变化如图 2 所示, 干污泥的 LHV 为 11.40 MJ/kg, 随着反应温度从 170 °C 升至 220 °C, 水热炭 LHV 呈现持续上升趋势: 170 °C 时为 11.91 MJ/kg, 200 °C 时达到 12.90 MJ/kg, 220 °C 时升至 13.58 MJ/kg, 累计提升 2.18 MJ/kg, 增幅约为 14.0%。这一现象的原因是: 温度升高促进污泥有机组分的水解、脱水与脱羧反应, 碳水化合物(如淀粉、纤维素)水解生成小分子糖, 进一步脱水生成呋喃类化合物; 蛋白质水解生成氨基酸, 脱羧反应释放 CO₂, 使 C 元素在固体产物中富集, 从而提升 LHV(C 元素是决定燃料 LHV 的核心组分, 每增加 1% 的 C, LHV 提升 0.42 ~ 0.63 MJ/kg)。

10 °C 固体产率下降 4%~5%), 200 °C 后下降剧烈(每升高 10 °C 固体产率下降 8%~10%), 这可能是由于 200 °C 以上时, 污泥中难降解有机组分(如木质素类物质)开始大量分解, 进一步加剧固体产率损失。

综合 LHV 与固体产率的变化规律, 200 °C 是兼顾高 LHV 与较高固体产率的最佳反应温度, 此时水热炭 LHV 已达 12.90 MJ/kg(较干污泥提升 13.2%), 而固体产率仍保持在 70.0%, 若继续升温

至 210、220 ℃, LHV 提升幅度仅为 3%~5%, 但固体产率损失达 8%~10%, 经济性降低。因此, 后续试验均以 200 ℃ 作为反应温度。

2.1.2 元素组成变化规律及范氏图分析

不同反应温度下水热炭的 C、H、O 元素含量及 H/C、O/C 原子比变化如表 3 所示。由表 3 可知, 随着温度升高, 水热炭的 C 含量呈现持续上升趋势, 170 ℃ 时为 31.25%, 220 ℃ 时升至 36.89%, 累计增

加 5.64%; H 含量与 O 含量则呈现持续下降趋势, H 质量分数从 170 ℃ 的 3.82% 降至 220 ℃ 的 3.21%, O 质量分数从 170 ℃ 的 15.28% 降至 220 ℃ 的 11.56%。这一变化进一步印证了温度升高促进脱水、脱羧反应的机理——脱水反应($\text{—OH} + \text{—H} \rightarrow \text{H}_2\text{O}$)导致 H、O 元素流失, 脱羧反应($\text{—COOH} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{—H}$)导致 O 元素大量流失, 从而使 C 元素相对富集。

表 3 不同温度下水热炭的元素组成与原子比

Tab. 3 Elemental Composition and Atomic Ratios of Hydrochar at Different Temperatures

分类	反应温度/℃	C(干燥基)	H(干燥基)	O(干燥基)	H/C 原子比	O/C 原子比
水热炭	170	31.25%	3.82%	15.28%	1.47	0.36
	180	32.87%	3.71%	14.56%	1.36	0.33
	190	34.15%	3.58%	13.24%	1.26	0.29
	200	35.62%	3.45%	12.18%	1.17	0.26
	210	36.21%	3.33%	11.95%	1.10	0.24
	220	36.89%	3.21%	11.56%	1.04	0.23
干污泥	—	27.64%	3.64%	17.55%	1.57	0.46

H/C 与 O/C 原子比的变化更能直观反映碳化历程: H/C 原子比从 170 ℃ 的 1.47 降至 220 ℃ 的 1.04, O/C 原子比从 170 ℃ 的 0.36 降至 220 ℃ 的 0.23, 两者均随温度升高而降低, 且变化趋势与 LHV 呈正相关(C 含量越高、H/C 与 O/C 越低,

LHV 越高)。这与范氏图(图 3)的结果一致, 随着温度升高, 水热炭的坐标点沿左下方向移动, 且移动轨迹逐渐平缓, 表明碳化程度随温度升高而加深, 且 200 ℃ 后碳化速率减缓(坐标点移动距离缩短)。

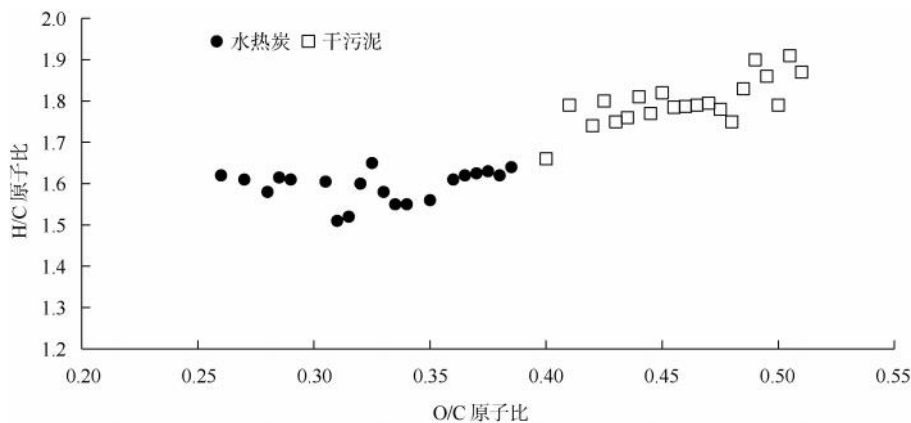


图 3 干污泥和水热炭的范氏图

Fig. 3 Van Krevelen Diagram of Dried Sludge and Hydrochar

2.2 水热炭的碳化度与燃料比特性

2.2.1 碳化度的季节变化与提升效果

以 200 ℃ 为反应温度, 对 30 个月的污泥样品进行 HTC 处理, 得到水热炭与干污泥的碳化度变化如图 4 所示(横坐标为取样月份, 时间段为 2020 年 1 月—2022 年 6 月; 图 4 中数据为 3 次重复试验的

平均值, 误差棒表示标准差)。由图 4 可知, 干污泥的碳化度呈现季节波动: 冬季(12 月—2 月)碳化度较高(0.50~0.54), 夏季(6 月—8 月)碳化度较低(0.49~0.51), 这与夏季污泥灰分含量高(C 元素占比)有关; 干污泥碳化度为 0.49~0.54, 均值为 0.52, 整体稳定性较差。

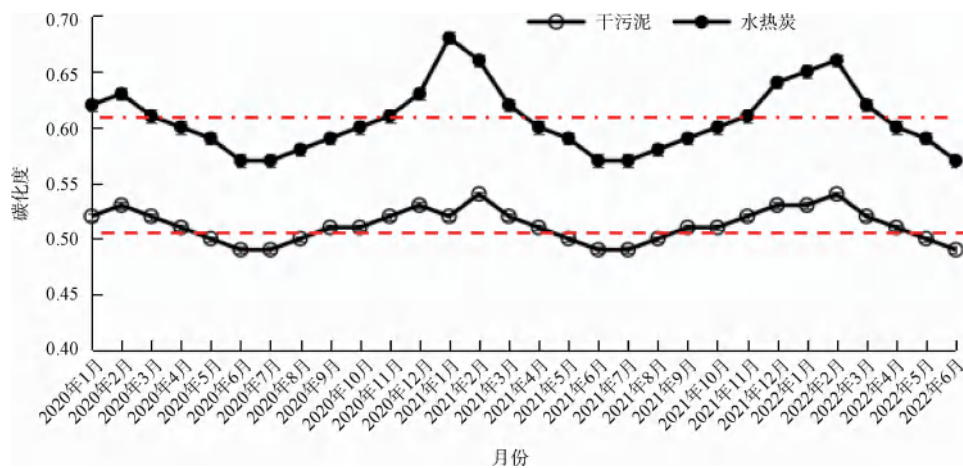


图4 干污泥和水热炭的碳化度

Fig. 4 Carbonization Degree of Dried Sludge and Hydrochar

水热炭的碳化度则显著高于干污泥,且波动范围更小;水热炭碳化度为0.57~0.68,均值为0.61,较干污泥平均提升0.09,最高提升0.16(2021年1月,干污泥碳化度为0.52,水热炭为0.68,增幅约为30.77%)。从季节差异看,冬季水热炭碳化度(0.10~0.12)提升更为显著,夏季(0.05~0.08)提升幅度较小,这一现象与夏季污泥灰分含量高有关,灰分作为惰性组分,不仅占据反应空间,其含有的金属氧化物还会影响碳化反应进程,从而削弱碳化度提升效果^[13]。高灰分对HTC反应的抑制作用是多重机理共同作用的结果:(1)灰分中富含的 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 等金属氧化物具有催化活性,在HTC高温高压环境下, Fe_2O_3 会与 H_2O 反应生成 $\text{Fe}(\text{OH})_3$,进一步分解产生 Fe^{3+} ,加速有机组分向液相(如小分子有机酸、酮类)和气相(CO_2 、 CH_4)转化,导致固体

产物中C元素流失,热值下降;(2)灰分中的 CaO 、 MgO 等碱性氧化物会改变反应体系的pH,碱性环境会促进污泥中蛋白质的水解和脱氨基反应,生成更多的 NH_3 和小分子含氮化合物,这些产物易溶于水进入液相,导致固体产物中N元素流失,同时也会抑制碳水化合物的脱水碳化反应,进一步削弱碳富集效果;(3)灰分中的 SiO_2 等惰性组分虽然不参与化学反应,但会在污泥颗粒表面形成包裹层,阻碍反应介质(H_2O)与有机组分的接触,降低反应速率,导致碳化不充分。

2.2.2 燃料比的变化与燃烧性能关联

干污泥与水热炭的燃料比变化如图5所示。干污泥的燃料比为0.12~0.20,均值为0.16,夏季(6月—8月)燃料比(0.12~0.15)更低,冬季(0.18~0.20)更高,夏季污泥挥发分含量高(灰分稀释固定

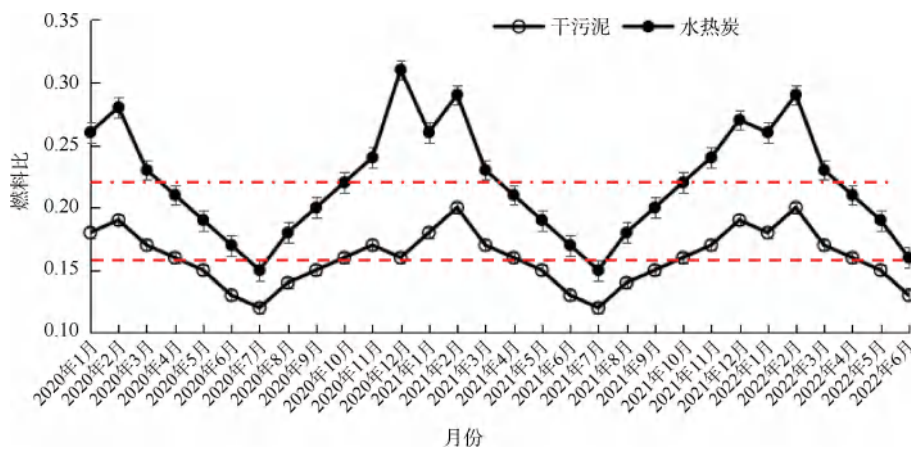


图5 干污泥和水热炭的燃料比

Fig. 5 Fuel Ratio of Dried Sludge and Hydrochar

碳占比),导致燃料比降低。水热炭的燃料比则显著提升,为 0.18~0.31,均值为 0.22,较干污泥平均提升 0.06,最高提升 0.15(2020 年 12 月,干污泥燃料比为 0.16,水热炭为 0.31,增幅约为 93.75%)。

燃料比的提升直接改善了水热炭的燃烧性能,干污泥燃料比为 0.16,属于高挥发分、低固定碳燃料,燃烧时易出现点火快、火焰高、燃烧不充分、黑烟多的问题;水热炭燃料比为 0.22,挥发分与固定碳比例更均衡,燃烧时着火温度适中,较干污泥高 30~50℃,火焰稳定性好,黑烟排放量减少 40%~50%。

从季节差异看,夏季水热炭的燃料比(0.03~0.05)提升幅度最小,部分月份(如 2020 年 7 月、2021 年 8 月)水热炭燃料比(0.18~0.19)甚至低于 0.20,这与夏季污泥灰分高、固定碳生成量少有关,

进一步印证了灰分对 HTC 反应的制约作用。

2.3 污泥灰分与可燃分质量分数比对碳化效果的制约作用

2.3.1 灰分与可燃分质量分数比的季节波动

污泥中灰分与可燃分(固定碳+挥发分,空干基)质量分数的比例是反映泥质的关键指标,其季节变化如图 6 所示。由图 6 可知,比例呈现显著的季节波动:冬季(12 月—2 月)比例(0.28~0.35)最低,均值为 0.32;夏季(6 月—8 月)比例(0.45~0.52)最高,均值为 0.48;春秋两季(3 月—5 月、9 月—11 月)比例(0.38~0.42)介于两者之间。这一波动与合流制排水系统的特性直接相关:夏季暴雨时,雨水冲刷路面泥沙、建筑垃圾进入管网,随污水进入污水处理厂,导致污泥灰分含量激增;而冬季降水少,管网内泥沙沉积,污泥灰分含量降低^[14]。

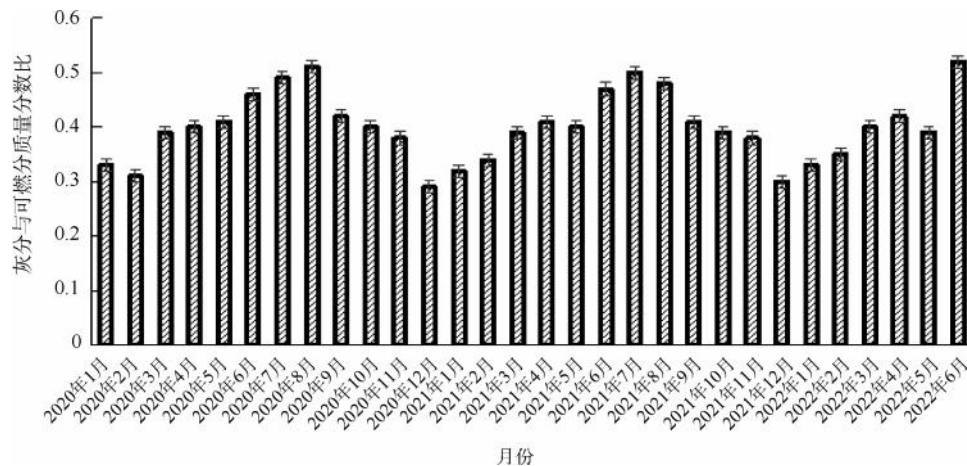


图 6 污泥中灰分与可燃分的比例

Fig. 6 Ratio of Ash to Combustible Matter in Sludge

2.3.2 灰分与可燃分质量分数比与碳化效果的临界关系

以灰分与可燃分质量分数比为横坐标,水热炭与干污泥的 LHV 差值为纵坐标,绘制两者的关系曲线如图 7 所示。由图 7 可知,LHV 差值和灰分与可燃分质量分数比呈现显著负相关:当灰分与可燃分质量分数比 <0.45 时,LHV 差值为正值,且随比例降低,LHV 差值逐渐增大,比例为 0.30 时,LHV 差值达 1.47~1.67 MJ/kg(LHV 提升 12%~14%);比例为 0.40 时,LHV 差值降至 0.63~0.84 MJ/kg(LHV 提升 5%~7%);当灰分与可燃分质量分数比 ≥ 0.45 时,LHV 差值转为负值,即水热炭 LHV 低于干污泥,此时 HTC 技术不仅无法提升燃料品质,

反而导致热值损失(损失幅度为 5%~8%)。

这一临界关系的机理在于:灰分作为惰性组分,会占据反应器内的反应空间,减少有机组分含量,降低有机组分与反应介质(H_2O)的接触效率,从而抑制水解、脱水等碳化反应的进行;当灰分与可燃分质量分数比 ≥ 0.45 时,灰分含量过高,有机组分含量过低,碳化反应生成的固定碳量不足以弥补挥发分损失(HTC 过程中部分挥发分转化为液体产物),导致水热炭的可燃组分总量减少,最终表现为 LHV 下降。

这一发现对工程应用具有重要指导意义:对于合流制排水系统的污水处理厂,夏季雨季需对污泥进行预处理(如沉淀除砂、筛分),降低灰分含量,使

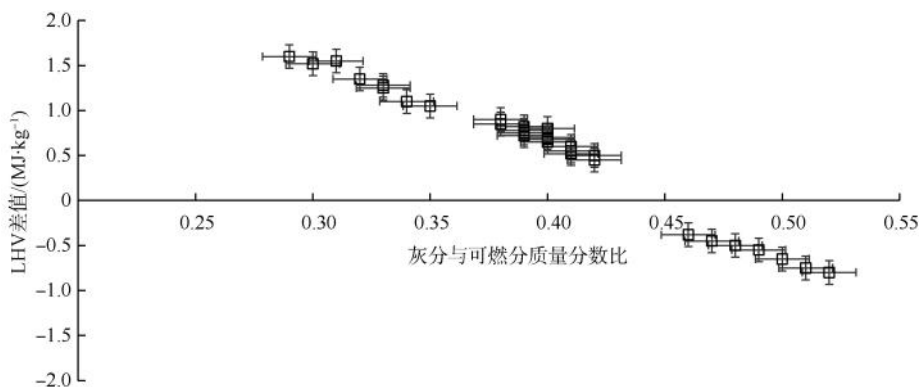


图7 灰分与可燃分质量分数比与 LHV 差值的关系

Fig. 7 Relationship between the Ash-Combustible Mass Fraction Ratio and the Difference in LHV

灰分与可燃分质量分数比 <0.45 ,才能确保 HTC 技术的碳化效果;而冬季污泥灰分低,可直接进行 HTC 处理,无需额外预处理,降低运行成本。

2.4 能量平衡分析

以最佳反应温度 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为例,计算不同灰分与可燃分质量分数比下的能量输入、输出及净收益,结果如表 4 所示。由表 4 可知,能量输入主要由污泥升温、水分升温 and 反应维持热量组成,其中水分升温

占比最大,为 $65\% \sim 70\%$ 。当灰分与可燃分质量分数比为 0.30 (冬季低灰分污泥)时,净能量收益为 1.28 MJ/kg ,净收益为正,工艺能量可行。当灰分与可燃分质量分数比为 0.40 (春秋污泥)时,净能量收益降至 0.35 MJ/kg ,仍为正,但收益显著降低。当灰分与可燃分质量分数比为 0.45 (夏季高灰分污泥)时,净能量收益为 -0.18 MJ/kg ,能量输入大于输出,工艺能量不可行。

表 4 不同灰分与可燃分质量分数比下的能量平衡计算结果

Tab. 4 Energy Balance Calculation Results in Different Ash-Combustible Mass Fraction Ratios

灰分与可燃分质量分数比	污泥干基质量/kg	水热炭产率	水热炭质量/kg	水热炭 LHV/($\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)	能量输出/MJ	能量输入/MJ	净能量收益/($\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)
0.30	0.2	72.5	0.145	13.60	2.00	0.72	1.28
0.40	0.2	65.3	0.131	12.85	1.68	1.33	0.35
0.45	0.2	58.7	0.117	11.20	1.31	1.49	-0.18
0.50	0.2	54.2	0.108	10.95	1.18	1.55	-0.37

这一结果表明,仅当灰分与可燃分质量分数比 <0.45 时,HTC 工艺才能实现正的能量收益,与前文得出的临界阈值一致。同时也说明,虽然 HTC 工艺需要消耗一定能量,但在优化工况下,水热炭燃烧产生的能量足以覆盖输入能量,且有剩余,具备工程应用的能量可行性。若考虑将反应产生的高温高压蒸汽回收利用,或对液相产物进行厌氧消化产甲烷,可进一步提升工艺的能量收益。

2.5 滤液特性及处理建议

HTC 工艺产生的滤液是主要的液相副产物,其特性直接影响工艺的环境可行性。本文对 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 反应条件下的滤液进行了检测,滤液呈深褐色,pH 值为 $7.2 \sim 8.5$,化学需氧量(COD)质量浓度为 $5\ 200 \sim$

$8\ 500\text{ mg/L}$,总氮(TN)质量浓度为 $850 \sim 1\ 200\text{ mg/L}$,总磷(TP)质量浓度为 $120 \sim 180\text{ mg/L}$,此外还含有一定量的小分子有机酸(如乙酸、丙酸)和氨氮。与原污泥脱水滤液(COD 质量浓度为 $3\ 000 \sim 4\ 000\text{ mg/L}$)相比,HTC 滤液的污染物浓度更高,处理难度更大。

从工程应用视角,滤液处理是 HTC 工艺不可或缺的环节。结合现有污水处理技术,提出以下处理建议:一是回流至污水处理厂前端进行协同处理,利用污水厂现有的生化处理系统降解有机物和氮磷,但需控制回流比例(建议 $\leq 10\%$),避免冲击生化系统;二是单独进行预处理后再回流,采用吹脱法去除氨氮(pH 值调至 $10.5 \sim 11.0$,温度为 $30 \sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$,吹脱时间为 60 min),氨氮去除率可达 85% 以上,预处

理后滤液回流不会对污水厂造成冲击;三是对滤液进行资源化利用,通过蒸馏回收小分子有机酸(如乙酸),或进行厌氧消化产甲烷,进一步提升工艺的资源回收效率。

3 结论

(1)反应温度是调控水热炭燃料性能的关键参数:随反应温度从 170 ℃ 升至 220 ℃,水热炭 LHV 从 11.91 MJ/kg 提升至 13.58 MJ/kg(增幅约为 14.0%),H/C、O/C 原子比从 1.47、0.36 降至 1.04、0.23;固体产率从 77.5%降至 55.4%,200 ℃ 后急剧下降。综合热值与产率,200 ℃ 为最佳反应温度,此时水热炭 LHV 为 12.90 MJ/kg、固体产率为 70.0%,性价比最高。

(2)HTC 可显著提升污泥的碳化度与燃料比:30 个月试验数据显示,干污泥碳化度均值为 0.52、燃料比均值为 0.16;水热炭碳化度均值为 0.61(最高提升 30.77%)、燃料比均值为 0.22(最高提升 93.75%)。燃料比提升使水热炭燃烧性能改善。

(3)污泥灰分与可燃分质量分数比 ≥ 0.45 是碳化效果的临界制约条件:夏季暴雨导致合流制管网泥沙流入,使污泥灰分与可燃分质量分数比 ≥ 0.45 ,此时 HTC 无法提升热值,反而导致 5%~8%的热值损失;当灰分与可燃分质量分数比 < 0.45 时,水热炭热值最高提升 12%~14%,碳化效果显著。能量平衡分析表明,在最优工况(200 ℃、灰分与可燃分质量分数比为 0.30)下,HTC 工艺净能量收益为 1.28 MJ/(kg 干污泥),能量可行;但当灰分与可燃分质量分数比 ≥ 0.45 时,净能量收益为负。

(4)工程应用建议:对于服务合流制排水系统的污水处理厂,夏季需增设污泥除砂预处理工艺(如旋流除砂器),将灰分与可燃分质量分数比控制在 0.45 以下;采用 200 ℃ 作为 HTC 反应温度,可兼顾燃料品质与经济性。HTC 滤液污染物质量浓度(COD 质量浓度为 5 200~8 500 mg/L)较高,建议采用吹脱等预处理后回流至污水厂,或进行资源化利用。本文为污泥资源化利用工艺优化提供了关键参数,助力“双碳”目标下污泥的减污降碳协同处置。

参考文献

[1] 朱羽廷,余斌,何婷. 污水厂污泥连续高速碳化及资源化全链条实证研究[J]. 中国给水排水, 2023, 39(8): 127-132.
Zhu Y T, Yu B, He T. Full chain empirical study on continuous

high-speed carbonization and recycling of sewage sludge[J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(8): 127-132.

[2] 卢怡清,许颖,董滨,等. 去除城市生活污泥中有机络合态金属强化其厌氧生物制气[J]. 环境科学, 2018, 39(1): 284-291.
Lu Y Q, Xu Y, Dong B, et al. Enhancement of anaerobic methane production by removal of organic-bonding metals from sewage sludge[J]. Environmental Science, 2018, 39(1): 284-291.

[3] 赵发敏,李兴杰,冯楠,等. 污泥处理处置技术的应用研究及进展[J]. 有色冶金节能, 2021, 37(6): 50-54.
Zhao F M, Li X J, Feng N, et al. Research and progress on application of sludge treatment & disposal technology[J]. Energy Saving of Nonferrous Metallurgy, 2021, 37(6): 50-54.

[4] 王航,刘阳生,王殿常,等. 城市污泥水热碳化影响因素研究[J]. 北京大学学报:自然科学版, 2024, 60(4): 745-757.
Wang H, Liu Y S, Wang D C, et al. Study on influencing factors of hydrothermal carbonization of sewage sludge[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2024, 60(4): 745-757.

[5] 赵博玮,牛宇锴,谢飞,等. 剩余污泥碳化裂解液的资源化中试研究[J]. 中国给水排水, 2021, 37(19): 1-6.
Zhao B W, Niu Y K, Xie F, et al. Pilot-scale study on resource recycling of excess sludge carbonized pyrolysis liquid[J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(19): 1-6.

[6] Silva R D V K, Lei Z F, Shimizu K, et al. Hydrothermal treatment of sewage sludge to produce solid biofuel: Focus on fuel characteristics[J]. Bioresource Technology Reports, 2020, 11: 100453. DOI: 10.1016/j.biteb.2020.100453.

[7] Oliveira A S, Sarrion A, Baeza J A, et al. Integration of hydrothermal carbonization and aqueous phase reforming for energy recovery from sewage sludge[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 442: 136301. DOI: 10.1016/j.cej.2022.136301.

[8] Wang R K, Wang C B, Zhao Z H, et al. Energy recovery from high-ash municipal sewage sludge by hydrothermal carbonization: Fuel characteristics of biosolid products[J]. Energy, 2019, 186: 115848. DOI: 10.1016/j.energy.2019.07.178.

[9] Wilk M, Śliz M, Lubieniecki B. Hydrothermal co-carbonization of sewage sludge and fuel additives: Combustion performance of hydrochar[J]. Renewable Energy, 2021, 178: 1046-1056. DOI: 10.1016/j.renene.2021.06.101.

[10] 袁道迎,徐振佳,陈中明,等. 水热碳化法强化印染污泥脱水及碳化产物高值化利用的研究[J]. 水处理技术, 2025, 51(2): 61-67.
Yuan D Y, Xu Z J, Chen Z M, et al. Enhancing dewatering performance of printing and dyeing sludge by hydrothermal
(下转第 131 页)

- Nanjing University of Technology: Natural Science Edition, 2024, 46(3): 338-344.
- [6] 瞿露, 付宏祥, 汪诚文, 等. 钙盐法处理太阳能电池生产含氟废水的污泥产量及成分研究[J]. 环境工程, 2014, 32(1): 147-152.
- Qu L, Fu H X, Wang C W, et al. Research on production and composition of sludge produced by the treatment of solar cell wastewater containing fluoride using calcium salt method[J]. Environmental Engineering, 2014, 32(1): 147-152.
- [7] 赵凯, 孔秀琴, 邢春霞, 等. 聚环氧琥珀酸(PESA)对高硬度废水生物处理系统的作用[J]. 土木建筑与环境工程, 2013, 35(3): 121-125.
- Zhao K, Kong X Q, Xing C X, et al. Performance of polyepoxysuccinic acid(PESA) in the biological treatment of high hardness wastewater [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2013, 35(3): 121-125.
- [8] Pulgar F, Ayala L, Jeldres M, et al. Lime/sodium carbonate treated seawater to improve flocculation and sedimentation of clay-based tailings[J]. Polymers, 2021, 13(23): 4108.
- [9] Chialvo A A, Simonson J M. The effect of salt concentration on the structure of water in CaCl₂ aqueous solutions[J]. Journal of Molecular Liquids, 2004, 112(1/2): 99-105. DOI: 10.1016/j.molliq.2003.11.001.
- [10] Shi Y X, Chen Z Q, Li Q, et al. Adsorption behavior of SiO₂ coatings on CaF₂ crystal planes: Molecular dynamics simulation and preparation [J]. Materials Today Communications, 2023, 36: 106510. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2023.106510.
- [11] 崔兵, 金怡, 杨泽坤. 钙盐-混凝法处理高氟废水的实验研究[J]. 工业水处理, 2023, 43(6): 150-155.
- Cui B, Jin Y, Yang Z K. Research on the treatment of high fluoride wastewater by calcium salt-coagulation method [J]. Industrial Water Treatment, 2023, 43(6): 150-155.

(上接第 115 页)

- carbonization method and high-value utilization of the derived carbonization products [J]. Technology of Water Treatment, 2025, 51(2): 61-67.
- [11] 许劲, 徐军, 吕秋颖, 等. 水热碳化技术用于污泥处理处置前景分析[J]. 中国给水排水, 2020, 36(16): 54-59.
- Xu J, Xu J, Lü Q Y, et al. Perspectives on hydrothermal carbonization technology for municipal sludge treatment and disposal[J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(16): 54-59.
- [12] 马文博. 污泥低碳化燃料化关键技术研究[J]. 中国资源综合利用, 2019, 37(2): 8-10.
- Ma W B. Research on key technologies of low temperature carbonization fuel sludge [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2019, 37(2): 8-10.
- [13] 牟晋铭, 耿晓洒. 上海典型合流制排水系统溢流污染控制策略[J]. 净水技术, 2024, 43(10): 154-159.
- Mou J M, Geng X S. Countermeasures of overflow pollution control for typical combined drainage system in Shanghai [J]. Water Purification Technology, 2024, 43(10): 154-159.
- [14] 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.
- Wang J, Chen X, Gui P, et al. Effects of pyrolysis temperature and time on the speciation and bioaccumulation of heavy metals derived from sludge [J]. Journal of South China Agricultural University, 2015, 36(5): 54-60.