

水热处理畜禽粪便产物分析及资源化利用研究进展

付尹宣^{1,2}, 蒋海伟^{1,2*}, 邓同辉^{1,2}, 石金明^{1,2}, 文震林^{1,2}, 艾仙斌^{1,2}, 阙志刚^{1,2}, 蒋龙波^{1,2,3}

(1.江西省科学院能源研究所, 温室气体核算与碳减排江西省重点实验室, 江西 南昌 330096;
2.江西省碳中和研究中心, 江西 南昌 330096; 3.湖南大学环境科学与工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 鉴于水热处理技术能够直接将高含水率的畜禽粪便转化为绿色低碳燃料, 同时可解决恶臭、水污染等环境问题。聚焦水热炭化(HTC)与水热液化(HTL)2种核心工艺, 深入解析反应温度、停留时间、溶剂、催化剂、水相循环等关键参数对产物分布的影响机制, 着重探讨水热过程的反应机理及产物特性、重金属分布, 以及氮、磷的资源化利用情况, 并分析水热处理畜禽粪便的环境可行性与经济可行性。通过总结水热处理畜禽粪便过程中存在的问题, 对水热处理技术未来的研究方向进行展望。

关键词: 水热处理; 畜禽粪便; 水热炭; 生物原油; 重金属

中图分类号: X713; TQ35

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2026)05-0026-06

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.05.005

Research progress on products analysis and resource utilization of livestock manure by hydrothermal treatment

FU Yin-xuan^{1,2}, JIANG Hai-wei^{1,2*}, DENG Tong-hui^{1,2}, SHI Jin-ming^{1,2}, WEN Zhen-lin^{1,2}, AI Xian-bin^{1,2}, QUE Zhi-gang^{1,2}, JIANG Long-bo^{1,2,3}

(1. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Greenhouse Gas Accounting and Carbon Reduction, Institute of Energy Research, Jiangxi Academy of Sciences, Nanchang 330096, China; 2. Jiangxi Carbon Neutralization Research Center, Nanchang 330096, China; 3. College of Environmental Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Given that hydrothermal treatment technology can directly convert livestock manure with high-moisture content into green and low-carbon fuels, while simultaneously addressing environmental issues such as odor and water pollution, this paper focuses on two core processes: hydrothermal carbonization (HTC) and hydrothermal liquefaction (HTL). It delves into the mechanisms by which key parameters such as reaction temperature, residence time, solvents, catalysts, and aqueous phase circulation affect product distribution. The study primarily explores the reaction mechanism and product characteristics, heavy metal distribution, and resource utilization of nitrogen and phosphorus during the hydrothermal process. Additionally, it analyzes the environmental and economic feasibility of hydrothermal treatment of livestock manure. By summarizing the existing issues in the hydrothermal treatment of livestock manure, this paper provides an outlook on future research directions for hydrothermal treatment technology.

Key words: hydrothermal treatment; livestock manure; hydrochar; biocrude oil; heavy metals

随着全球能源需求不断上升, 能源安全危机与气候变暖问题日益严峻, 开发清洁能源技术已成为全球能源转型的关键战略方向。近年来, 我国畜牧业发展态势平稳, 2023年总产值约达3.89万亿元, 畜禽粪便集中产出量呈持续增长态势, 已突破38亿t/a^[1]。畜禽粪便中含有多种有机物质, 具有产量大、有机质含量高的特点, 在特定条件下可转化为绿色生物燃料, 是一种具有较高开发潜力的资源。畜禽粪便的处理方式主要分为生物化学法和热化学法, 例如厌氧消

化、热解、直接燃烧等。在厌氧发酵处理过程中, 重金属和抗生素会抑制微生物活性, 导致可燃气体产率较低; 热解和燃烧处理则需要进行干燥预处理, 存在能耗高、效率低的问题。基于畜禽粪便的高含水率和高有机质特性, 水热处理技术是实现畜禽粪便高效资源化处置与利用的优选途径, 该技术可避免干燥需求, 能够灭活病原微生物, 并将有机质转化为生物质燃料或高值化产物^[2]。目前, 关于畜禽粪便水热反应的系统性综述相对较少, 对水热炭化和水

收稿日期: 2026-01-09; 修回日期: 2026-03-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(22308136); 江西省赣鄱俊才支持计划-主要学科学术和技术带头人项目(20243BCE51126); 江西省技术创新引导类计划项目(20244BDF60009); 江西省碳中和研究中心新型研发机构项目(20233BCA01002); 江西省科学院包干制试点示范项目重点研发计划项目(2022YBSG21013, 2022YBSG50001, 2023YRCS002); 温室气体核算与碳减排江西省重点实验室开放课题(2024JXKLCOP010)

作者简介: 付尹宣(1988-), 女, 硕士, 助理研究员, 研究方向为畜禽粪便热裂解, fuyinxuan_2007@126.com; 蒋海伟(1989-), 男, 博士, 助理研究员, 研究方向为生物质热化学转化与污染控制, 通讯联系人, haiweij@126.com。

热液化进行对比,以及对重金属分布、氮磷资源化利用和经济效益进行归纳的研究则更为匮乏。

本文中旨在探讨低温和中温过程的水热处理中工艺参数对液化产物的影响,对比分析参数对反应机理和主产物的作用,剖析重金属分布和毒性形态以评估其安全性与有效性,研究氮、磷两相分布及资源化利用潜力,展望水热技术在畜禽粪便处理领域的应用前景并进行技术经济分析,提出实现广泛高效应用的可能途径,为畜禽粪便资源化利用的高质量发展提供思路。

1 水热处理概述

水热处理指在特定温度与压力条件下,将畜禽

粪便置于水或适宜溶剂中进行加热,转化为有用资源的过程^[3]。依据温度范围以及目标产品,可划分为3个阶段:温度处于180~250℃时为水热炭化(HTC),该阶段的主要产物为清洁固体燃料水热炭;温度在250~400℃时为水热液化(HTL),此过程会产生不溶于水的生物原油、高有机碳含量水相以及含CO₂等的气体;当温度高于水临界点(374℃、22 MPa)时为水热气化(HTG)或超临界水气化(SCWG),该阶段以自由基机制反应为主导,生成富含H₂或CH₄的合成气以及少量CO₂和CO,此时水作为反应介质,有助于生物质分解为气态产物,通过消除相边界使生物质高效分解为合成气。3种处理方式的异同详见表1。

表1 畜禽粪便的3种不同水热处理方式

水热处理	水热炭化(HTC) ^[4]	水热液化(HTL) ^[5]	水热气化(HTG) ^[6]
反应温度/℃	180~250	250~374	>374
反应压力/MPa	2~10	10~22	>22
反应时间	较长	中等	极短
反应机理	脱水、缩聚、芳构化	分解、脱水、脱氨、脱羧	气化、重整、水煤气变换
主产物	水热炭	生物原油	水热气
副产物	液相(富含有机酸、糖类)	水相(含氨、磷废水)、固体残渣	CO ₂ 、少量有机酸
水的状态	热压缩水	亚临界水	超临界水
优点	能耗低,可处理高含水率废物,产物易储存	能量密度高,产物可直接作为运输燃料	气体热值高,可制氢,反应速度快
缺点	产物中氧含量较高,热值低于传统煤炭	生物油成分复杂、腐蚀性强,需后续提质	设备要求极高(耐高温高压),能耗大,危险系数高
产物典型应用	土壤改良剂、固体燃料、吸附剂	替代化石燃料、化工原料,运用在航运或航空燃油领域	氢能生产、合成气制备、燃料电池

鉴于水热气化需要较高的能量输入,并且要求反应器材料具备高强度以耐受极端条件,导致其资源化利用水平受限;同时,水热炭化和水热液化的工艺参数相近,产品存在重叠,容易造成混淆。因此,本研究不深入探究水热气化,而是着重分析水热炭化和水热液化的差异以及各参数对二者的影响。

2 工艺参数的影响

2.1 反应温度

反应温度作为水热反应的关键控制变量,对水热炭、生物原油以及可燃气体的产率和品质具有显著影响,在工艺的安全性和经济效益方面起着决定性作用。在水热处理过程中,当反应温度低于150℃时,畜禽粪便中不稳定的蛋白质会发生水解反应生成氨基酸,此时生物原油的生成量极少;当温度从150℃开始升高,胺含量随温度的上升而增加,在

200℃时生物原油产量显著提升。李飞跃等^[7]以猪粪、牛粪和鸡粪为研究对象开展水热炭化实验,发现随着反应温度的升高,水热炭的产率和H/C比值降低,而芳香性、稳定性以及重金属含量增加。何思蓉^[8]研究显示,当反应温度从280℃升高至360℃时,牛粪的产油率提高了1.7%,生物原油的热值也有所提高。温度升高时,牛粪中的大分子物质首先水解为单体,随后经过分解、解聚和异构化等一系列过程生成生物原油。综上所述,在低温条件下,畜禽粪便水热反应的主要产物为水热炭;随着温度升高,生物原油的产率增加,同时还能促进N、P的溶解,增强水热炭的稳定性。

2.2 停留时间

停留时间是水热转化工艺的关键参数。若停留时间不足,反应体系难以达到热力学平衡,从而对水热产物的生成形成制约;若过度延长停留时间,则会

加剧二次裂解反应,促使气相和水相产物生成,导致水热炭过度炭化,降低生物原油的提质效率。Liu 等^[9]研究发现,在 240℃ 条件下对牛粪进行水热炭化,处理时间从 1 h 延长至 3 h 时,水热炭的比表面积由 2.79 m²/g 增加至 3.76 m²/g,而延长至 4 h 时比表面积出现下降;在 260℃ 进行水热炭化时,随着停留时间的延长,水热炭产率的下降幅度较小,维持在 31%~37%。Xiu 等^[10]研究表明,在 340℃ 下对猪粪进行水热液化,15 min 时生物原油产量达到峰值 24%,90 min 时降至 12.5%;15 min 时生物原油的炭含量和高位热值最高,表明较短的停留时间有利于高品质生物原油的生成。由于水热炭化和水热液化对产物的需求存在差异,所选择的停留时间也有所不同,在实际生产中可依据反应类型选择合适的停留时间。

2.3 溶剂

溶剂的选择对水热炭和生物原油的产率、化学组成以及性质起着决定性作用。水是最为常用的反应介质,纯有机溶剂具有临界温度较低、反应条件较为温和的特点。Yan 等^[11]系统地研究了 10 种有机溶剂对生物原油分离效能的影响机制。实验结果显示,当以二氯甲烷与异丙醇作为溶剂时,生物原油的产率最高可达 42.3%,氮元素的保留率为 17.6%;当以二氯乙烷与乙酸乙酯作为溶剂时,会导致生物原油中的氮含量升高,这可能与溶剂极性和分子间作用力的差异所导致的氮杂环化合物选择性萃取有关。

由于溶剂性质、畜禽粪便特性以及反应条件之间的相互作用较为复杂,因此选择最佳的溶剂体系对生物原油进行提纯仍然是一项具有挑战性的任务。

2.4 催化剂

催化剂在提升转化效率、优化产物分布以及改善生物原油品质方面具有关键作用。畜禽粪便水热转化催化剂主要可分为 2 类:均相催化剂,例如可溶性无机酸、有机酸、金属盐等;非均相催化剂,如沸石分子筛、离子交换树脂等。鉴于水热反应处于高温高压条件,均相催化剂活性相对更高,常被用于提高水热炭的质量与产率。Sun 等^[12]探究原位合成的 MgFe₂O₄ 对猪粪水热炭化的影响,结果显示该催化剂能够促进脱水和脱羧反应,提高炭化程度,增强对重金属的稳定化作用,P 元素滞留率最高可达 88%。Tang 等^[13]研究不同碱性催化剂对猪粪发酵残渣制备生物原油的影响,结果表明 KOH 可提高生物原油产率且最高为 45.24%;CaO 催化液化生物原油的高

位热值最高为 44.18 MJ/kg。在畜禽粪便水热过程中,均相催化剂应用广泛,所有碱性催化剂均能降低生物原油的活化能,其中 Na₂CO₃ 的降幅最大,达 18.73%。

2.5 水相循环

水相循环是指将水热过程中的液相产物进行回收,再与原料混合后重新进行水热处理。水热转化过程会产生大量水相副产物,不仅对生态安全构成威胁,还造成了资源的浪费。同时,高昂的处理成本限制了工艺的经济性,成为水热技术规模化应用的关键制约因素。Lang 等^[14]在对猪粪与木屑共水热炭化的研究中发现,水相循环能够促进脱水脱羧反应,进而提高水热炭的产率和反应活性。蒋海伟等^[15]在乙醇-水体系水热液化研究中指出,当乙醇浓度为 60%、水相循环次数达到 3 次时,生物原油产率最高可达 51.08%,热值为 29.15 MJ/kg。此外,水相循环有助于提高生物原油产率和能量回收率,降低油相中重金属砷的含量。综上所述,在水热处理过程中,水相循环能够提高水热炭和生物原油的产率,实现重金属的回收,减少水资源的消耗,降低废液处理成本,从而提高经济效益。

3 水热反应产物性质

3.1 水热炭

温度对水热炭元素组成的影响最为显著。李勇丽^[16]研究猪粪水热炭燃烧特性,发现 180~210℃ 时,水热炭产率在 50%~67%,碳保留率 54%~69%,能量回收率 56%~72%。随着反应温度升高,水热炭 H/C 和 O/C 递减,脱羧基和脱羟基反应生成 CO₂。水热炭作为固体燃料,热值高,固定碳含量、能量密度等均达到褐煤标准,点火和燃烧温度与褐煤相近。李勇丽^[16]探讨猪粪不同温度下水热炭特性,结果表明,温度升高,水热炭产率、pH 和有机质含量递减,灰分含量和可溶性盐浓度递增。Cu、Zn、Mn 等金属元素生物可利用度总体降低,总量在 180℃ 最低。水热炭表面含氧官能团丰富,在 160~200℃ 比表面积和总孔隙结构较好,比表面积随温度升高减小,孔径增大,220℃ 时比表面积最大、孔隙结构最优。低温制备的水热炭在改善土壤保水性、增加有机质含量和提升微生物活性方面表现更优。未来,水热炭在农业土壤改良、环境修复和可持续发展等方面应用前景广且研究价值大。

3.2 生物原油

生物原油是水热液化的主产物,含醛类、酸类、

酚类化合物等。Long 等^[17]开发 ST-HTL 工艺,制备出高产率低氮的生物原油,含氮率 26.04%,能量回收率 68.47%,比常规 HTL 含更高比例脂肪酸且含氮化合物少。在该工艺中,第一阶段去除部分物质,减弱美拉德反应活性,减少有机氮向油相转移;后续阶段脂肪酸与氨或有机酸发生酰化反应,胺类物质含量下降,降低氮元素分配效率。这些变化减少了有机氮向生物油迁移,提升生物原油品质,为畜禽粪便处置与增值提供参考。生物原油经化学处理升级可转化为更高质量燃料,提质后的生物燃料有望用于船运和航空领域,提供与传统化石燃料相似甚至更优性能,减少对化石燃料依赖,助力能源可持续利用。

3.3 副产物

水相作为水热反应副产物,常被当废水排放造成资源浪费。水相富含 N、P 等营养元素及脂肪酸和甘油类物质,有刺激性气味和生物毒性。水相典

型增值方法有:用营养物质培养微藻等;分离营养物质及化学物质;转化为能源燃料或化学品。Yuan 等^[18]研究表明,猪粪水热液化处理后残液中可溶性 N、P、K 浓度高于原料,副产物能提高土壤营养成分、促进植物发芽。目前,学者专注用膜分离或吸附-脱附技术分离水相中有价值组分,未来有望实现水热处理副产物高效利用。

4 重金属的分布与毒性形态

畜禽粪便中重金属的持久性和迁移能力威胁人类健康,限制资源化利用潜力,因此研究重金属在不同产物中的分布和化学形态很重要。环境中重金属的生物有效性和生态毒性取决于其浓度和化学形态,可通过选择性连续提取分析确定,最常用的 2 种连续提取方法是 Tessier 和 BCR(图 1)。不同化学形态的重金属对环境毒性影响不同,掌握其含量和形态分布对降低土壤环境风险意义重大。

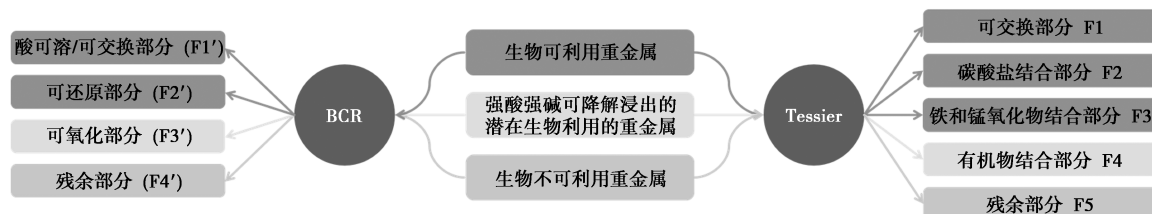


图 1 重金属化学形态

4.1 重金属在不同产物中的分布

水热处理促使畜禽粪便发生裂解,进而使重金属的迁移与分布呈现出显著特征。重金属的迁移主要遵循 2 条路径:60%~75%的重金属通过离子交换和矿相重构过程,富集于水热炭的孔隙之中;25%~40%的重金属则以可溶性盐的形式留存于液相。水热炭的比表面积及表面官能团对重金属的固定效果具有影响,然而液相中残留重金属的浓度与反应体系的 pH 呈负相关关系。陈绪昊^[19]研究显示,鸡粪随着水热炭化温度的升高,液相中 Mg 和 Fe 的浓度上升,Ca 和 Cu 的浓度降低。水热炭的主要金属元素 Ca、K、Mg、Na、Cd、Cr、Ni 含量较低。Li 等^[20]研究发现,70%~98%的 Cu、Zn、Pb 分布于畜禽粪便水热液化的固体残渣中,仅有 20%~75%的 As 存在于固体残渣。Cu、Zn、Pb 由于化学沉淀作用,在碱性环境中分布到固体残渣,其活形态转变为稳定形态,从而降低了污染风险。与 Cu、Zn、Pb 和 Cd 较低的释放率(均小于 1%)不同,8%~34%的 As 释放到水相。猪粪中的 As 主要为水溶性砷酸盐 As(V) 和硝酚砷酸,水热液化后水相中的 As 主要是水溶性碱金

属砷酸盐,其他金属砷酸盐以低溶解度沉淀物的形式存在于固体残渣。硝酚砷酸在丙酮中的溶解性为生物原油去除 As 提供了助力,为生物原油去除重金属的研究提供了支持。

4.2 重金属毒性形态

水热处理技术能够改变重金属的赋存状态,将活性态重金属转化为稳定的残渣态或有机结合态,具备环境风险调控能力。经累积指数和潜在生态风险指数评估模型验证,水热处理后产物的环境风险等级由“中度风险”降至“轻微风险”,为畜禽粪便的资源化利用提供了技术支持。盛聪^[21]对猪粪在不同水热炭化处理条件下的重金属状况进行分析,结果表明猪粪中的 Cu 和 Zn 是主要风险元素。在酸碱条件下,水热炭中的重金属含量降低,Cu 和 Zn 的生物可利用性提升;随着温度升高,重金属的生物可利用形态减少、不可利用形态增加,钝化效果显著。Zhou 等^[22]研究发现,畜禽粪便水热反应中硝酚砷酸转化为高毒性的 As(III) 和 As(V),超过 81.5%的 As 分布在液相中,水热产物促进了 As(V) 向 As(III) 的转化。综上所述,水热炭化有助于降低

Cu 和 Zn 的毒性,但水热液化存在 As 潜在风险。

5 N、P 循环利用

5.1 N、P 在两相中的分布

畜禽粪便水热处理所产生的水相产物中含有大量的氮、磷。由于富含氮、磷的废水直接排放会产生负面的环境效应,并且全球磷矿资源正逐渐枯竭,因此研究可持续的氮、磷回收技术成为了关注的焦点,水热处置过程中各元素物质循环如图 2 所示。Ochoa-Martinez 等^[23]研究发现水热炭中氮和磷的

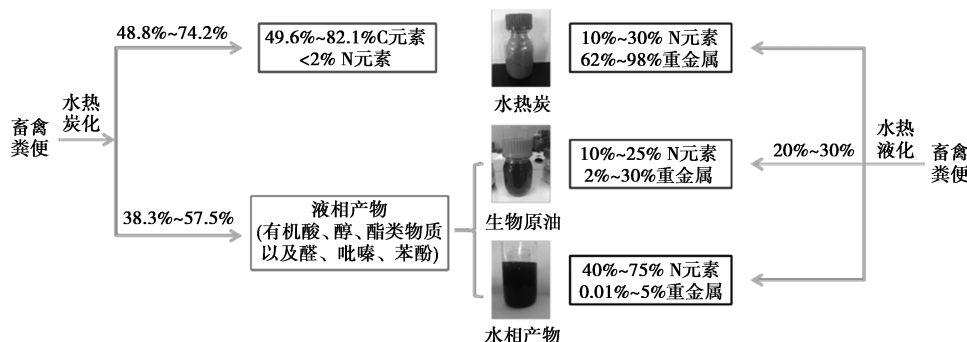


图 2 水热过程物质循环图

5.2 N、P 资源化利用

水热处理后的水相产物富含各类有机质以及氮、磷等肥料关键组分,对其进行回收再利用,有助于提高土壤有机质含量、激活生物群落、增强微生物活性与土壤肥力,进而减少无机肥料的施用量。Li 等^[25]针对动物粪便水热处理中磷的迁移转化开展研究,发现磷的形态发生显著转变,温度升高可促进有机磷向无机磷转化,这有利于磷元素在生态系统中的循环。Yuan 等^[18]探讨了水热处理对猪粪中氮、磷及有机物溶解性的影响,并对液态产物的毒性进行评估。研究发现,在 200℃ 条件下处理 60 min,可使 98% 的氮转化为可溶性形态;在 150℃ 条件下处理 60 min,可使可溶性磷含量达到未处理猪粪的 2.7 倍。在此条件下,液态产物及其稀释样品的发芽指数均超过 100%。将水相产物作为堆肥添加剂能够提高堆肥中的氮含量、促进腐殖质的生成、调节堆肥的 pH 以及促进营养元素的固定,为堆肥的资源化利用提供了新的思路。

6 水热处理的环境和技术经济分析

生命周期评估(LCA)方法可评估不同热化学转化的可行性。González-Arias 等^[26]评估水热炭经济效益,发现其最低售价 0.39 欧元/kg,远高于煤

回收率分别超过了 56% 和 94%;随着温度升高或反应时间延长,反应水相中总溶解氮浓度上升至 6 000 mg/L 以上,铵态氮浓度下降至 2 000 mg/L 以下,水热炭中的磷含量从 15.4 mg/g 增加至 24.6 mg/g。吴可^[24]对牛粪水热处理的反应机制及产物进行研究,发现当温度从 150℃ 升高至 180℃ 时,牛粪蛋白质水解使得液体产物中总氮(TN)相对浓度增加 11.91%,然而当温度继续升高时,总氮相对浓度均出现下降,这可能是由于在恒定条件下牛粪水解蛋白质质量保持不变,添加量增加导致总氮相对浓度降低。

(0.065 欧元/kg),当前虽然缺乏竞争力,但因可再生,未来可能受益于化石燃料枯竭和减排政策。Alherbawi 等^[27]对小规模系统中干骆驼粪便水热液化生产生物原油进行经济性评估,升级后生物燃料最低售价 0.87~0.91 美元/kg,比当地汽油高约 0.6 美元/kg。此外,通过温室气体排放评估环境影响,骆驼粪便转化生物原油的 CO₂ 排放量为 84 g/MJ,较商用汽油减排 7%。Tang 等^[13]在乙醇溶剂中对猪粪发酵残余物碱催化液化制备生物原油,发现添加氧化钙产生的生物原油热值(44.18 MJ/kg)高于生物柴油标准热值(≥42.78 MJ/kg),生产成本约 1 132 美元/t,低于国际市场生物柴油平均价格(1 230 美元/t),表明采用廉价催化剂在大规模工业应用有成本优势和经济可行性。

未来要实现水热处理资源化利用,需要在产品下游转化等关键环节优化创新,提高副产物经济利用率和环境效益,将对工艺流程及系统经济性产生显著积极影响。

7 结论与展望

工艺参数的研究对畜禽粪便的水热炭化/液化技术具有重要的意义,不仅可以调节水热炭和生物原油的产率和组成,还能对畜禽粪便中的氮、磷迁移

和资源化利用实施调控,有效降低 Cu、Zn 等重金属的生态毒性。经济性分析显示,水热炭的生产成本相对较高,在当前市场中竞争力欠佳,但未来有望成为煤炭的替代资源;生物原油具有较高的热值,生产成本在市场上具备一定的竞争优势。

水热技术为畜禽粪便的高值化利用提供了理论支撑。未来,需突破产物提质、重金属钝化以及工艺集成等方面的技术壁垒,通过深入研究水热反应机理、优化条件参数,并结合厌氧消化等方式处理水相副产物,提高营养元素的利用效率,减轻 As 的毒害效应。此外,还需探寻降低产物成本的途径,提升与褐煤及石油类产品的市场竞争力。

参考文献

- [1] 中华人民共和国统计局.中国统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2024.
- [2] Shah A A, Khan M I, Noonari A A, *et al.* Aqueous phase recirculation in hydrothermal liquefaction: A critical review[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2026, 207: 108612.
- [3] Qi J, Yin S, Bian H, *et al.* Hydrothermal treatment of pig manure for the catalytic production of nitrogen-phosphorus-potassium (NPK)-rich artificial humic acid and full utilisation of residue adsorption [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2024, 12 (6): 114793.
- [4] Cavali M, Dresch A P, Belli I M, *et al.* Hydrothermal carbonization- A critical overview of its environmental and economic sustainability [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2025, 491: 144838.
- [5] Dave A, Kumar P, Reddy S N. Hydrothermal liquefaction: Exploring biomass/plastic synergies and pathways for enhanced biofuel production[J]. *Science of the Total Environment*, 2025, 969: 178909.
- [6] Brown E, Njoka F, Osodo B, *et al.* Hydrothermal gasification of sisal wastes as an alternative to conventional gasification for hydrogen-rich gas production[J]. *Energy Conversion and Management*, 2025, 339: 119968.
- [7] 李飞跃, 吴旋, 李俊锁, 等. 温度对畜禽粪便水热炭产率及特性的影响[J]. *环境工程学报*, 2019, 13(9): 2270-2277.
- [8] 何思蓉. 牛粪热解/水热液化机理研究[D]. 天津: 天津大学, 2023.
- [9] Liu Z, Zhang Y, Liu Z. Comparative production of biochars from corn stalk and cow manure[J]. *Bioresource Technology*, 2019, 291: 121855.
- [10] Xiu S, Shahbazi A, Shirley V B, *et al.* Swine manure/crude glycerol co-liquefaction: Physical properties and chemical analysis of bio-oil product[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(2): 1928-1932.
- [11] Yan W H, Duan P G, Wang F, *et al.* Composition of the bio-oil from the hydrothermal liquefaction of duckweed and the influence of the extraction solvents[J]. *Fuel*, 2016, 185: 229-235.
- [12] Sun Z, Li J, Wang X, *et al.* Enhanced heavy metal stabilization and phosphorus retention during the hydrothermal carbonization of swine manure by in-situ formation of $MgFe_2O_4$ [J]. *Waste Management*, 2024, 174: 96-105.
- [13] Tang J, Zou J, Li Q, *et al.* Alkaline catalytic liquefaction of pig manure fermentation residue in ethanol solvent for the production of high-quality biocrude oil [J]. *Waste Management*, 2025, 197: 86-93.
- [14] Lang Q, Guo Y, Zheng Q, *et al.* Co-hydrothermal carbonization of lignocellulosic biomass and swine manure: Hydrochar properties and heavy metal transformation behavior [J]. *Bioresource Technology*, 2018, 266: 242-248.
- [15] 蒋海伟, 艾仙斌, 阙志刚, 等. 水相循环对乙醇-水体系液化蜈蚣草产油特性和砷富集影响[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(17): 244-249.
- [16] 李勇丽. 猪粪水热炭改良红壤机理研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2024.
- [17] Long S, Yu P, Huang J, *et al.* Sequential hydrothermal liquefaction of lignocellulose-rich livestock manure: A new perspective on enhancing the production and quality of low-phenolic biocrude [J]. *Bioresource Technology*, 2025, 430: 132556.
- [18] Yuan T, Cheng Y, Huang W, *et al.* Fertilizer potential of liquid product from hydrothermal treatment of swine manure [J]. *Waste Management*, 2018, 77: 166-171.
- [19] 陈绪昊. 反应温度和 EDTA 浓度对鸡粪水热碳化固、液相产物中养分和金属元素的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2024.
- [20] Li H, Lu J, Zhang Y, *et al.* Hydrothermal liquefaction of typical livestock manures in China: Biocrude oil production and migration of heavy metals [J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2018, 135: 133-140.
- [21] 盛聪. 猪粪水热炭重金属污染特性及其环境风险[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2019.
- [22] Zhou S, Shang H, Luo J, *et al.* Organoarsenic conversion to As(III) in subcritical hydrothermal reaction of livestock manure [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 402: 123571.
- [23] Ochoa-Martinez C, Barca C, Boutin O, *et al.* Influences of temperature and reaction time on nutrient conversion and metal interactions during hydrothermal treatment of pig manure [J]. *Science of the Total Environment*, 2025, 958: 177853.
- [24] 吴可. 牛粪水热处理反应机理及产物形成机制研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2020.
- [25] Li Y, Liu S, Ma X, *et al.* Transformation of phosphorus speciation during hydrothermal treatment of digestate of rural animal manure [J]. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 2024, 41: 101735.
- [26] González-Arias J, Baena-Moreno F M, Sánchez M E, *et al.* Optimizing hydrothermal carbonization of olive tree pruning: A techno-economic analysis based on experimental results [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 784: 147169.
- [27] Alherbawi M, Parthasarathy P, Al-Ansari T, *et al.* Potential of drop-in biofuel production from camel manure by hydrothermal liquefaction and biocrude upgrading: A Qatar case study [J]. *Energy*, 2021, 232: 121027. ■