

有机固废热解残渣对土壤生态化学性质的改良研究

韩雨晖 陈祥树

北京航天石化技术装备工程有限公司 北京 100176

摘要:为实现有机固废资源化利用与土壤质量提升的协同发展,本研究探讨有机固废热解残渣对土壤生态化学性质的改良效应。系统分析热解残渣的理化特性与环境风险,探究其养分供给、结构改良及化学调节潜力,重点研究残渣对土壤理化性质、酶活性、微生物群落结构及重金属形态转化的影响。结果表明,热解残渣可通过多途径优化土壤生态化学环境,降低重金属迁移4风险,但需控制合理施用量。本研究为热解残渣在土壤改良中的科学应用提供理论依据与技术参考。

关键词:有机固废;热解残渣;土壤改良;生态化学性质

引言:随着有机固废产量激增与土壤退化问题加剧,寻求固废资源化与土壤改良协同方案成为研究热点。有机固废热解技术可实现减量化处理,其产物热解残渣因富含碳源与养分,具备土壤改良潜力。当前关于热解残渣改良土壤的研究尚未形成系统认知,尤其对土壤生态化学核心性质的综合影响机制尚不明确。基于此,本研究系统开展热解残渣改良土壤的相关研究,旨在揭示其改良效应与机制,为解决固废处置难题和提升土壤质量提供新路径。

1 有机固废热解技术概述

1.1 热解原理与工艺

有机固废热解是在无氧或缺氧环境下,通过热能驱动有机物发生热分解、聚合及重整反应,最终转化为燃气、生物油和热解残渣三相产物的资源化处理技术,广泛应用于畜禽粪便、农林废弃物、市政污泥等固废的减量化与资源化利用。该技术的核心控制参数直接影响产物分布与品质,其中温度范围通常稳定在400-800℃:低温区间(400-550℃)更易生成生物油,高温区间(600-800℃)则倾向于提高燃气产量。停留时间与加热速率同样关键,工业应用中停留时间一般控制在10-60分钟,快速加热(100-1000℃/s)可促进轻质油生成,慢速加热则利于残渣碳结构稳定。目前主流工艺包括固定床热解、流化床热解和旋转窑热解,其中流化床热解因传热效率高、物料混合均匀,在规模化处理中应用较广。

1.2 有机固废热解残渣特性

热解残渣作为热解过程的固相产物,其特性随原料种类与热解参数差异存在波动,但整体具备鲜明的物理化学特征及明确的环境风险属性。(1)物理性质方面,残渣多呈黑色或深褐色颗粒状,无明显光泽,粒径主要分布在0.1-5mm,孔隙率可达30%-60%,堆积密度

约0.8-1.2g/cm³,发达的孔隙结构使其具备良好的吸附性能。(2)化学性质上,残渣富含碳元素(含量通常30%-70%),同时含有H、O、N、S等元素及少量矿物相,如石英、伊利石、长石等,灰分含量受原料影响较大,农林废弃物热解残渣灰分约5%-20%,市政污泥残渣则可达30%-50%,且可能伴随Cr、Cd、Pb等重金属富集。(3)环境风险方面,部分残渣存在重金属浸出超标风险,尤其当原料为工业有机固废时,此外热解过程可能产生多环芳烃等持久性有机污染物残留,需通过预处理或后续稳定化处理降低环境危害^[1]。

2 热解残渣的土壤改良潜力分析

2.1 养分供给能力

热解残渣具备一定的土壤养分供给潜力,其养分供给能力主要取决于自身携带的矿质养分含量及有效性。残渣中普遍含有钾、磷等微量元素,这些养分经土壤环境中的风化、溶解作用可逐步释放,为土壤补充速效养分储备。碳氮比是影响残渣养分供给效率及土壤微生物活性的关键指标,适宜的碳氮比能够为土壤微生物提供均衡的碳源与氮源,促进微生物代谢与繁殖,进而提升土壤养分转化效率;若碳氮比过高,易导致土壤氮素固定,短期抑制养分供应,需通过调控热解参数优化残渣碳氮比,以匹配土壤养分循环需求。

2.2 物理结构改良

热解残渣对土壤物理结构的改良作用核心体现在孔隙结构优化与团粒结构构建两方面。残渣自身具备发达的孔隙结构,施入土壤后可直接增加土壤孔隙数量,同时其颗粒可作为骨架支撑土壤孔隙,减少孔隙塌陷,改善土壤孔隙分布特征,为团粒结构的形成提供基础条件。残渣的粒径分布直接影响土壤通气性与透水性,合理的粒径组成能够填充土壤原有孔隙间隙,协调土壤大

小孔隙比例,既保障空气流通,又能提升土壤保水能力,降低土壤板结风险,增强土壤物理稳定性。良好的物理结构还能促进土壤微生物活动,为养分转化营造有利微环境。

2.3 化学性质调节

热解残渣对土壤化学性质的调节主要表现为pH值调控与阳离子交换量提升。多数热解残渣呈碱性,施入酸性土壤后可通过酸碱中和反应调节土壤pH值,缓解土壤酸化程度,改善土壤化学环境。同时,残渣富含的有机质与矿物表面官能团能够增加土壤吸附位点,提升土壤阳离子交换量,增强土壤对养分离子的吸附与保留能力,减少养分流失,同时促进土壤中重金属离子的稳定化,降低其生物有效性,进一步优化土壤化学肥力与环境安全性^[2]。

3 有机固废热解残渣改良对土壤生态化学核心性质的影响

3.1 热解残渣改良对土壤理化性质的影响

热解残渣施入土壤后,通过自身理化特性与土壤组分的相互作用,对土壤理化性质产生多维度调控效应,其影响程度与残渣施用量、土壤原始属性密切相关。

(1) 土壤质地与结构调控。热解残渣的颗粒特性可优化土壤质地构成,通过颗粒填充与搭接调整颗粒级配,降低黏重土壤致密性与砂质土壤松散度。同时,残渣自带的孔隙结构可补充土壤孔隙系统,增加总孔隙度,协调大小孔隙比例,改善通气孔隙与毛管孔隙分布,提升土壤结构稳定性。(2) 土壤酸碱环境调节。热解残渣的pH值特征是调控土壤酸碱环境的关键,多数残渣因热解过程灰分富集呈碱性,施入酸性土壤可通过酸碱中和降低酸度,缓解氢离子对养分有效性的抑制;对中性或碱性土壤,适宜施用量的残渣可借助表面官能团的缓冲作用,维持pH值稳定,避免酸碱失衡。(3) 土壤养分库演变。热解残渣中的有机质及矿质养分是土壤养分库的重要补充,残渣分解释放的碳元素可提升土壤有机质含量,增强养分吸附与储备能力。其中,钾、磷等矿质养分经风化、溶解逐步转化为有效形态参与循环;同时,残渣可通过影响土壤通气性与微生物活性,间接调控氮素矿化、硝化与反硝化进程,进而影响氮素储备与供应状态。(4) 土壤电导率变化。热解残渣中的可溶性盐类进入土壤后,会改变土壤溶液离子浓度,进而影响电导率。低施用量下,释放的离子可补充缺失营养离子,维持电化学平衡;高施用量时,若残渣可溶性盐含量较高,可能导致电导率过高引发盐渍化风险,需控制合理施用量范围。

3.2 热解残渣改良对土壤酶活性的影响机制

土壤酶活性直接反映土壤养分转化与物质循环强度,热解残渣通过多途径调控酶活性,核心机制围绕底物供给、微环境优化及酶-底物结合效率展开。(1) 底物供给调控。热解残渣中的有机质、氨基酸、糖类等可作为酶催化反应的底物或辅酶,为酶促反应提供物质基础;其分解释放的养分可满足微生物生长需求,促进微生物合成分泌更多土壤酶,间接提升酶总量与活性。此外,残渣碳源可调节土壤碳氮比,为微生物介导的酶合成提供均衡营养,避免碳氮失衡抑制酶活性。(2) 土壤微环境优化。热解残渣对土壤pH值、通气性、含水量的调控,可改善酶的生存环境。适宜pH值能保证酶空间构象稳定,避免蛋白变性失活;优化后的孔隙结构可提升通气性,为微生物及酶代谢提供充足氧气,促进酶与底物接触扩散;残渣保水特性可维持适宜含水量,规避干旱或过湿对酶活性的抑制。(3) 酶-底物结合效率提升。热解残渣发达的比表面积与丰富表面官能团,可吸附土壤酶与底物,增加二者接触概率,提升酶促反应速率;同时能吸附固定抑制酶活性的物质,降低其对酶的抑制效应。此外,残渣矿物组分可通过离子交换调节土壤金属离子浓度,部分金属离子可作为酶激活剂,进一步提升酶活性。(4) 酶活性的动态调控特征。热解残渣对酶活性的影响具有时间动态性:施入初期因底物补充与微环境改善,酶活性多呈上升趋势;残渣逐步分解后,底物供应稳定,酶活性趋于动态平衡;若施用量过高,可能因孔隙堵塞、通气性下降导致酶活性阶段性降低。因此,酶活性变化是残渣特性、土壤条件与时间因素共同作用的结果。

3.3 热解残渣改良对土壤微生物群落结构的调控

土壤微生物群落结构决定生态功能发挥,热解残渣通过改变土壤微环境与营养条件,对微生物群落组成、多样性及功能产生系统性调控,进而影响土壤生态化学过程。

(1) 微生物多样性调控。热解残渣为微生物提供丰富碳源、氮源及矿质营养,可提升物种丰富度与均匀度。残渣输入能改变微生物间竞争关系,促进优势功能菌群繁殖,同时为稀有微生物提供生存条件;其优化的土壤微环境可降低极端环境抑制,扩大微生物生态位宽度,进一步提升群落多样性。(2) 群落组成结构演变。热解残渣特性决定群落组成演变方向:富含有机质的残渣可促进异养微生物生长,提升其群落占比;氮、磷等养分可调控固氮菌、磷溶解菌等功能微生物数量;pH值调节作用可改变群落酸碱适应性组成;矿物组分与表面官能团可吸附微生物细胞,改变其空间分布,进而影响群落结构。(3) 功能微

生物菌群调控。热解残渣可定向调控功能微生物菌群生长与代谢,增强土壤特定生态功能:养分转化方面,促进氮、磷循环相关微生物活性,提升养分转化效率;有机物分解方面,富集纤维素、木质素分解菌等,加速有机质分解转化;土壤净化方面,促进重金属耐受菌、有机污染物降解菌生长,提升土壤自净能力。功能菌群变化直接影响生态化学过程强度与方向,是残渣调控土壤生态功能的核心途径。(4)微生物群落稳定性维持。热解残渣通过提升土壤环境缓冲能力与资源可利用性,增强群落稳定性。残渣有机质分解缓慢,可长期提供营养,避免资源匮乏导致的群落波动;其对土壤理化性质的调控可减少环境胁迫,维持群落结构稳定;同时能促进微生物间协同作用,提升群落抗干扰能力,降低外界环境变化对土壤生态功能的冲击^[3]。

3.4 热解残渣对土壤重金属形态转化及迁移风险的影响

热解残渣通过表面吸附、化学沉淀、离子交换等作用调控土壤重金属形态转化,进而影响其迁移性与生物有效性,降低环境风险,调控效果与残渣特性、重金属种类及土壤条件密切相关。(1)重金属形态转化调控。热解残渣可促进重金属活性形态向稳定形态转化,降低迁移能力:吸附作用方面,发达孔隙与丰富官能团可吸附土壤溶液中重金属离子,减少游离态含量;化学沉淀方面,释放的阴离子可与重金属结合形成难溶性沉淀物;离子交换方面,表面阳离子可与土壤吸附态重金属交换,将其固定在残渣表面;氧化还原方面,还原性物质可改变土壤氧化还原电位,影响重金属价态,提升形态稳定性。(2)迁移能力调控机制。热解残渣通过降低重金属溶解态含量与移动性,减少土壤剖面迁移与淋溶风险:一方面,固定作用可降低土壤溶液中重金属浓度,减少随水分下渗的淋溶量;另一方面,改良后的土壤结构可提升对重金属的截留能力,降低其在孔隙中的迁移速率。同时,残渣有机质可与重金属形成络合物,增强吸附固定效果,进一步抑制迁移扩散。(3)生物有效性影响。热解残渣通过调控重金属形态降低其生物有

效性,减少对土壤生物的毒害:稳定态重金属难以被植物根系吸收,可降低植物体内积累量;同时减少对微生物、土壤酶的抑制,维持生态系统正常功能。调控效果取决于残渣对重金属形态转化的效率,以及土壤中重金属总量与原始形态分布。(4)迁移风险评价维度。改良后土壤重金属迁移风险可通过多维度综合判断,包括土壤溶液重金属浓度、淋溶系数、形态分布比例等。监测这些指标变化可评估调控效果:若溶液中重金属浓度降低、淋溶系数减小、稳定态比例提升,表明风险有效降低;反之,施用量不当或残渣特性不匹配可能导致重金属向活性形态转化,增加风险,因此需明确合理施用量范围^[4]。

结束语:本研究系统阐明了有机固废热解残渣对土壤生态化学性质的改良效应及内在机制,证实了其在优化土壤理化结构、提升酶活性、调控微生物群落及降低重金属风险方面的积极作用。热解残渣资源化利用为有机固废处置与土壤改良提供了协同方案,但实际应用中需关注施用量适配性与残渣环境安全性。未来可进一步开展不同土壤类型与残渣类型的适配性研究,完善长效改良技术体系,推动该技术在农业与生态修复领域的规模化应用。

参考文献

- [1]唐雨菲,宋佳诚,郭宇航,瞿佳璐,熊健,乔怡娜,吕学斌.有机固废制备生物炭材料及应用[J].能源环境保护,2025,39(3):27-39.
- [2]程双煜,张博琳,康琦瑾,刘家佑,张武.生物炭施用对农田土壤改良的研究综述与展望[J].农业与技术,2025,45(18):100-105.
- [3]王丽萍,屈忠义,高平,任恩良,张如鑫,刘霞.工农业固废制备炭基土壤改良修复剂的技术集成[J].中国科技成果,2022,23(11):7-7.
- [4]兰玉顺,刘维娜,王丹,孙浩,黄红林,温蓓,吕继涛,罗磊,刘振刚.施用典型有机固废生物炭对土壤重金属生物有效性的影响[J].环境工程学报,2021,15(8):2701-2710.