
FASE 优化生物炭生产：木质纤维素生物质热解研究进展综述

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/32707.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

FASE 优化生物炭生产：木质纤维素生物质热解研究进展综述。论文标题：Optimizing biochar production: a review of recent progress in lignocellulosic biomass pyrolysis

期刊：Frontiers of Agricultural Science Engineering

作者：Nguyen Xuan LOC1, Do Thi My PHUONG

发表时间：15 Mar 2025

DOI：10.15302/J-FASE-2024597

微信链接：[点击此处阅读微信文章](#)

Dec 2025, Volume 12 Issue 1

· 第十一篇 ·

论文ID

Optimizing biochar production: a review of recent progress in lignocellulosic biomass pyrolysis

优化生物炭生产：木质纤维素生物质热解研究进展综述

文章类型：Review

发表年份：2025年

第一作者：Nguyen Xuan LOC1

通讯作者：Do Thi My PHUONG2

Email: dtmphuong@ctu.edu.vn

作者单位：1. 越南芹苴大学环境科学系；2. 越南芹苴大学环境工程系

Cite this article :

Nguyen Xuan LOC, Do Thi My PHUONG. Optimizing biochar production: a review of recent progress in lignocellulosic biomass pyrolysis. *Front. Agr. Sci. Eng.*, 2025, 12(1): 148 – 172 <https://doi.org/10.15302/J-FASE-2024597>

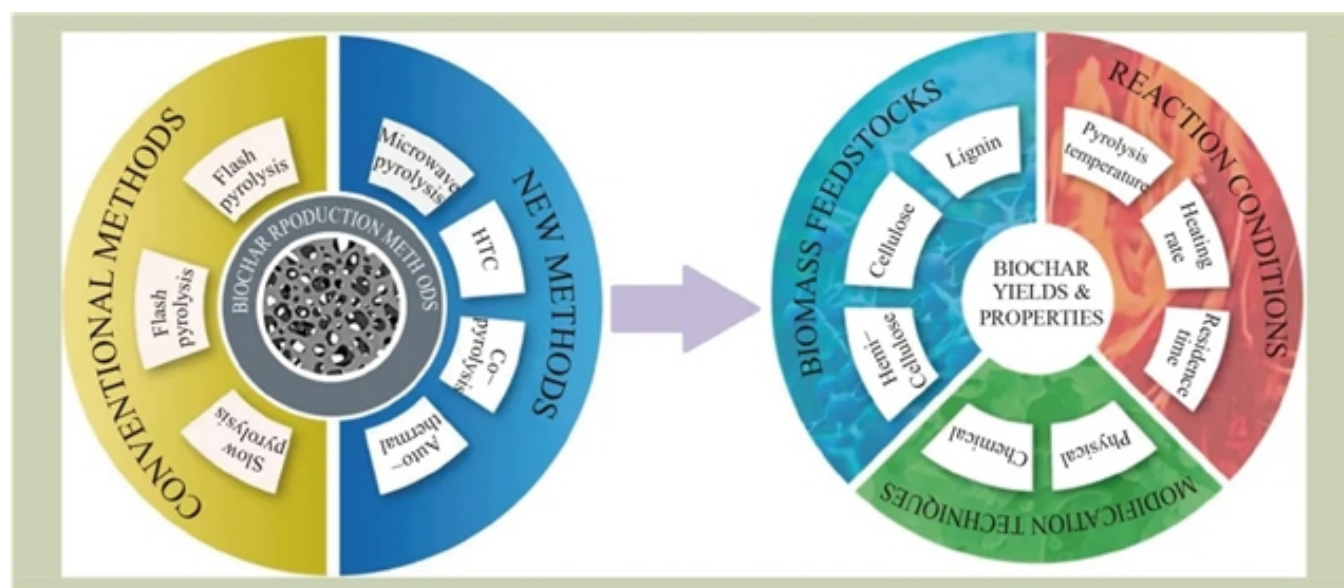
· 文章摘要 ·

生物炭是一种在有限氧环境下通过生物质热解产生的碳含量丰富的材料，可用于土壤改良、碳固存和环境修复。优化生物炭生产需要了解原料特性、热解条件及改性方法等关键因素。本文综述了从传统到新兴的多种热解技术，分析了其机制、优势与局限性，以期实现大规模生产。文章重点探讨了原料选择、热解条件和改性方法对生物炭产量及性质的影响。通过整合当前研究成果，本文旨在为木质纤维素生物质资源的可持续利用提供优化生物炭生产的见解。

· 文章亮点 ·

1. 本文综述了通过热解优化木质纤维素生物质生物炭生产的最新进展，包括传统和新热解技术。
2. 原料组成、热解条件 (温度、加热速率、停留时间) 和改性方法是影响生物炭产量和性质的关键因素。
3. 选择可再生、易得的原料有助于减少资源依赖、再利用废物、减轻环境影响并增强可持续性。
4. 需精心优化关键热解参数 (如温度和加热速率)，以在最大化生物炭产量和质量的同时，最小化能耗和环境足迹。
5. 改性方法对于调整生物炭的性质以适应特定应用、克服原始生物炭的局限性、提高其有效性以及促进资源效率和可持续性具有重要意义。

· Graphical abstract ·



· 研究内容 ·

1.引言

生物炭是生物质在300 – 800 °C有限氧环境下热解产生的碳丰富材料，广泛用于土壤改良、碳固存和环境修复。热解过程中，生物质分解并释放水分和挥发性化合物，形成具有较大孔隙和易接触孔网络的生物炭。木质纤维素生物质因丰富可再生而备受青睐，其主要组分纤维素、半纤维素和木质素在不同温度下分解，影响生物炭性质。富含纤维素和半纤维素的原料生产的生物炭氧官能团多，吸附性能好；富含木质素的原料生产的生物炭孔隙率和比表面积高，稳定性强。

生物炭生产已从实验室规模发展到试点和商业规模。实验室规模研究基本过程和优化参数；试点规模扩大生产测试经济可行性；商业规模则使用大型反应器进行工业生产。热解技术包括传统和新方法，传统方法有慢速、快速和闪速热解，新方法如微波辅助热解、共热解等，可提高生物炭产量和质量。

尽管已有许多综述讨论了生物炭生产技术，但它们通常忽略了对大规模生产优势和局限性的详细分析，以及实现最佳生物炭产量和性质的关键因素。因此，本文旨在全面研究生物炭生产的所有方面，包括原料选择、热解条件和改性方法，以帮助研究人员更好地理解 and 优化生产策略，提高效率，并为各种应用定制生物炭。

2.数据收集与处理

研究通过Web of Science数据库收集了2014年至2024年间使用关键词biochar production筛选的4671篇相关研究论文和综述，排除了非研究性材料。使用CiteSpace软件对这些论文进行分析，设置一年的时间切片，默认参数，重点关注关键词网络。图1展示了关键词共现网络，节点大小表示关键词出现频率，颜色表示不同关键词组，节点间的连线强度表示关键词之间的关联强度，显示biochar是出现频率最高的关键词，表明其在研究中的核心地位，其他重要关键词包括bio-oil、microalgae和plastic waste。自2019年以来，关于生物炭热解的研究论文数量显著增加。

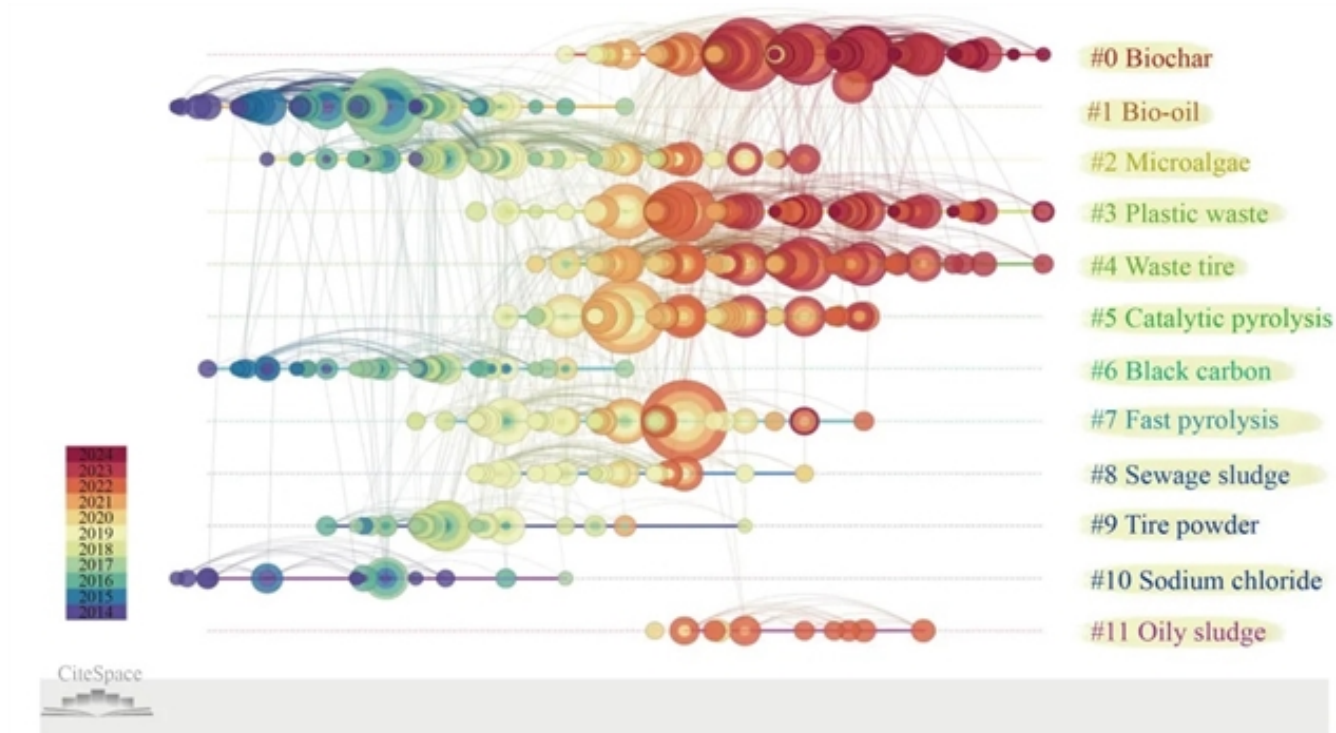


图1 生物炭生产领域关键词共现网络。

3.生物炭生产

3.1 木质纤维素生物质原料

生物质是来自自然和人为来源的复杂生物有机-无机材料，可分为天然成分(如光合作用和食物消化产物)和技术产物(如天然材料加工产品)。生物质主要分为木质纤维素生物质和非木质纤维素生物质两大类。木质纤维素生物质广泛用于生物炭生产，主要由纤维素、半纤维素和木质素组成。纤维素是D-葡萄糖单元通过 β -1,4-糖苷键连接形成的线性多糖，半纤维素是由多种糖和糖酸组成的复杂异多糖，木质素是由苯丙烷单元通过不同类型的连接形成的无定形杂聚体。此外，生物质通常含有少量的碱和碱土金属(如K、Na、Ca和Mg)，这些金属在热解过程中可作为自激活剂促进生物炭孔隙形成。

3.2 热解机制

木质纤维素组分(半纤维素、纤维素和木质素)的热解行为因组成和结构差异而不同。半纤维素和纤维素由简单的糖单元组成，在相对较低的温度(通常为220–315 °C和315–400 °C)下容易热分解，释放挥发性化合物。木质素因其复杂的芳香聚合物结构，在350–500 °C的较高温度下分解，是生物炭形成的主要前体。图2展示了木质纤维素组分和有机提取物在热解过程中的降解路径，突出了各种产物和副产物的产生。

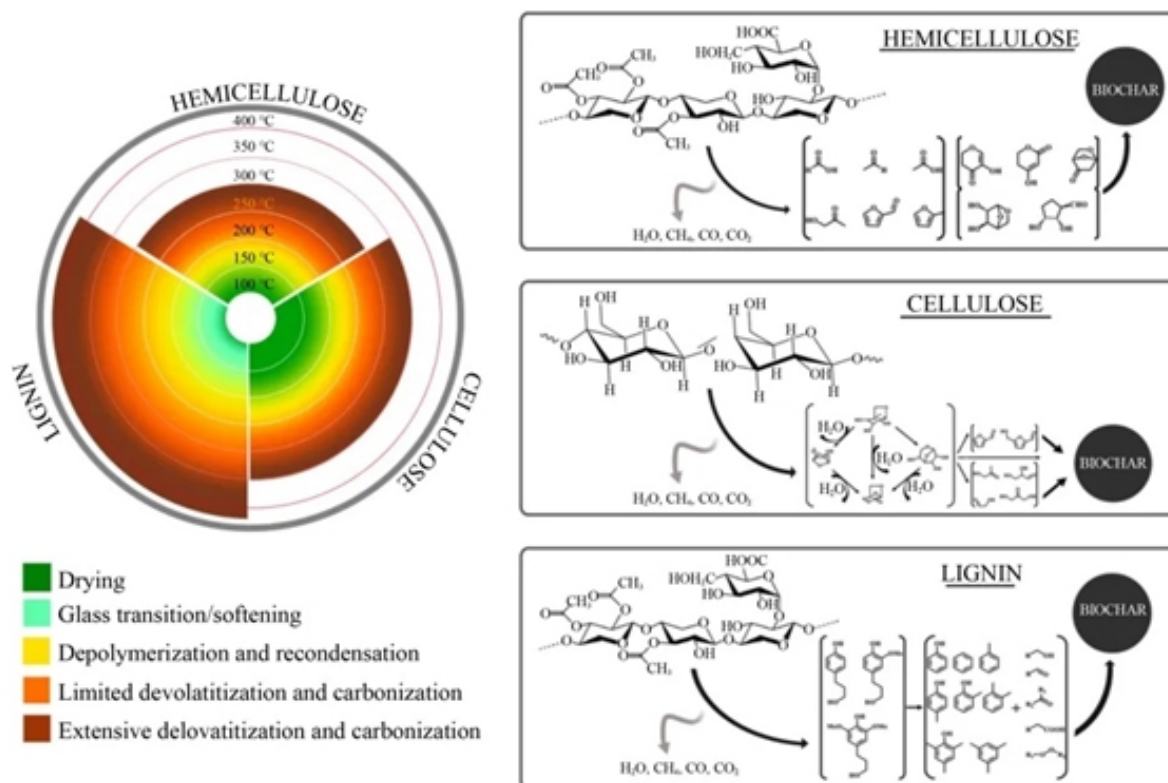


图2 半纤维素、纤维素和木质素的分解。

3.3 热解技术

热解是将木质纤维素材料在高温下无氧加热的过程，是气化和燃烧的初始阶段。热解过程中，热量从外部产生并通过传导、对流和热辐射传递到反应器中的生物质。热解产生富含碳的固体材料生物炭，以及可冷凝和不可冷凝的挥发性副产物。

传统的热解方法通常分为三类：慢速热解、快速热解和闪速热解。慢速热解以较低的加热速率 ($1-10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$) 和较长的蒸汽停留时间 (超过1小时) 在 $300-700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下进行，主要产生固体产物生物炭。快速热解和闪速热解则以较高的加热速率和较短的蒸汽停留时间进行，有利于液体产物 (生物油) 的生成。新兴的热解技术旨在克服传统方法的局限性，提高产品的产量和质量，并实现更精确的过程控制。这些新技术包括微波辅助热解、共热解、水热碳化和自热热解等。

4. 生物炭产量和性质的关键因素

4.1 生物质原料

生物炭的性质受所用生物质类型的影响，不同生物质含有不同水平的有机化合物，如木质素、纤维素和半纤维素。在热解过程中，这些化合物以不同的方式分解和转化，导致具有独特化学组成的生物炭。富含纤维素和半纤维素的原料，如甘蔗渣，通常生产的生物炭固定碳含量和芳香性较低，但含氧官能团较多，增强了其吸附性能。相反，富含木质素的生物质原料，如棕榈壳，生产的生物炭具有更多孔的结构、更高的比表面积、芳香性、稳定性和固定碳含量，适用于土壤改良和环境修复。

4.2 热解条件

热解条件，包括温度、加热速率和停留时间，直接影响生物炭的性质。

热解温度：提高热解温度可以增加生物炭的固定碳含量、灰分、芳香性和比表面积，同时减少产量、氢、氧和极性。高温促进生物质中挥发性成分的释放，留下更多的固定碳。此外，高温增加灰分含量，将生物质中的挥发性矿物质转化为灰分残留物。芳香性通常随温度升高而增加，因为复杂的有机化合物分解成更简单的芳香结构。然而，过高的温度可能导致过度降解和碳化，降低生物炭的疏水性。

停留时间：停留时间与载气流速密切相关，影响生物质的碳化和生物炭的产量和性质。较长的停留时间通常确保更完全的转化，但可能增加能耗和成本。延长停留时间会增加生物炭的pH值和灰分含量，但会降低其氢、碳和氮含量。比表面积和孔隙体积随停留时间增加而提高，但超过一定时间后会下降。

加热速率：加热速率影响生物炭的性质，尤其是表面面积。较高的加热速率通常增加生物炭的表面面积，但存在一个最佳加热速率，超过该速率后表面面积会下降。例如，研究表明，随着加热速率从10增加到40 °C · min⁻¹，生物炭的比表面积显著增加。

5.生物炭改性技术

5.1 化学改性方法

化学改性通过各种处理改变生物炭的化学组成和表面性质：

氧化处理：利用过氧化氢或高锰酸钾等氧化剂在生物炭表面引入含氧官能团，增强其对重金属的吸附能力。

酸/碱浸泡：酸改性向生物炭引入酸性官能团，增强其通过表面络合和阳离子交换去除金属的能力；碱改性则增加含氧官能团并提高比表面积。

磁化：通过共沉淀或浸渍法将磁性纳米粒子掺入生物炭，实现磁性分离，提高水处理中生物炭的回收和再利用性。

掺杂碳纳米材料：将碳纳米管等沉积到生物炭上，提高其去除污染物的效率，促进其在环境修复中的可持续使用。

引入非金属元素：通过化学处理或前体材料向生物炭中引入氮、磷或硫等非金属元素，改变其电子特性，提高功能性和吸附能力。

层状双氢氧化物：将层状双氢氧化物与生物炭结合，利用其碱性和带正电表面，通过静电相互作用增强对阴离子污染物的吸附。

5.2 物理改性方法

物理改性通过调整生物炭的疏水性、极性和表面官能团来增强其功能：

气体和蒸汽处理：气体处理使生物炭暴露于二氧化碳或空气中，改变其表面化学和结构；蒸汽处理通过高温蒸汽增强生物炭的孔隙性和比表面积。

球磨：球磨是一种成本效益高且环保的技术，通过研磨球破碎生物炭颗粒，增加其比表面积和反应性。

6. 结论

本文综述了通过热解优化木质纤维素生物质生物炭生产的最新进展，揭示了影响生物炭产量和性质的关键因素。研究表明，原料选择、热解条件和改性方法对生物炭的特性和产量具有重要影响。选择可再生和易得的原料对实现生物炭的最终特性和性能至关重要，同时有助于减少对有限资源的依赖并再利用废物，从而减轻环境影响。优化热解参数（如温度、加热速率和停留时间）可平衡生物炭的产量和质量，同时降低能耗和环境影响。改性技术（包括化学和物理方法）可进一步增强生物炭的性能和功能性，以满足特定应用需求。

为推动生物炭生产的可持续发展，建议采用新型热解技术（如微波辅助热解、共热解和自热热解），优先选择木质纤维素组成优化的原料，调整热解参数以提高效率，并探索改性方法以增强生物炭的性能。此外，实施可持续实践（如使用可再生能源和优化副产品管理）可进一步减少环境影响，提高生物炭生产的整体可持续性。通过这些措施，可以充分发挥生物炭在木质纤维素生物质资源可持续利用中的潜力。

《前沿》系列英文学术期刊

由教育部主管、高等教育出版社主办的《前沿》（Frontiers）系列英文学术期刊，于2006年正式创刊，以网络版和印刷版向全球发行。系列期刊包括基础科学、生命科学、工程技术和人文社会科学四个主题，是我国覆盖学科最广泛的英文学术期刊群，其中12种被SCI收录，其他也被AHCI、Ei、MEDLINE或相应学科国际权威检索系统收录，具有一定的国际学术影响力。系列期刊采用在线优先出版方。

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发