

Sustainable Environmental Protection: The Critical Role of Biochar

Jie Liu Hengwu Ding

Wuhan Zhihuiyuan Environmental Technology Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430000, China

Abstract

Sustainable environments aim to achieve a balance between economic benefits and environmental protection. In contrast to the environmentally destructive behaviors often associated with rapid development in the past, sustainable environments strive to explore and implement a series of protective environmental practices to mitigate the negative impacts of resource overexploitation. As an efficient and easily accessible resource, biochar plays a crucial role in sustainable environments. Firstly, biochar can increase soil surface area and porosity, thereby enhancing soil aeration and water-holding capacity. Secondly, through its high cation exchange capacity and anion exchange capacity, biochar improves the soil's adsorption and retention of nutrients, regulates soil pH. Besides soil improvement, biochar can effectively immobilize heavy metals in the soil, reducing plant uptake of these metals. More importantly, biochar can alleviate both biotic and abiotic stresses faced by plants. With the deepening of research, biochar will play an increasingly important role in the development of sustainable environments.

Keywords

biochar; soil improvement; immobilization; biotic and abiotic stresses

可持续性环境保护：生物炭的关键作用

刘杰 丁恒兀

武汉智汇元环保科技有限公司，中国·湖北 武汉 430000

摘要

可持续环境旨在实现经济效益与环境保护的平衡，过去快速发展伴随着诸多环境损害行为，而可持续性环境则致力于探索和实施一系列保护性环境实践，以减轻资源过度利用带来的负面影响。生物炭作为一种高效且易于获取的资源，在可持续环境中扮演着重要角色。首先，生物炭能够增加土壤表面积和孔隙度，进而提升土壤的通气性和水分保持能力。其次，生物炭通过高阳离子交换量和阴离子交换量，增强土壤对营养元素的吸附能力，调节土壤酸碱度。除土壤改良作用外，生物炭还能钝化重金属，降低植物对重金属的吸收。更重要的是，生物炭能够缓解植物的生物和非生物胁迫。随着研究的深入，生物炭将在可持续环境的发展中发挥更加重要的作用。

关键词

生物炭；土壤改良；钝化；生物和非生物胁迫

1 引言

在当今世界，环境可持续性已经成为一个全球性的话题，引发了社会各界的深度关注。面对不断加剧的气候变化、土壤退化、水资源短缺以及生物多样性丧失等多重环境压力，需要寻找并实施具有创新性和实效性的环境保护策略。在这个探索过程中，生物炭作为一种具有广阔应用前景的环保材料，正逐渐崭露头角，成为可持续性环境保护领域的新星。

生物炭，这一由生物质在缺氧环境下热解而成的炭材料，以其独特的物理和化学性质，为环境保护和农业可持续

发展带来了新的希望。它的多孔结构、高比表面积和良好的吸附性能，使其在土壤改良、水污染治理和温室气体减排等方面表现出色。特别是在土壤改良方面，生物炭的添加不仅能提高土壤的保水保肥能力，还能为微生物提供良好的生存环境，从而有助于提高土壤的生态功能和农作物的产量。研究表明，添加生物炭可以改善土壤肥力、保水能力和养分吸收，同时固定碳并减少温室气体排放^[1]。此外，生物炭还能增加作物产量，并缓解与干旱^[2]、盐碱^[3]和重金属相关的植物胁迫。此外，生物炭的生产和使用也符合循环经济的理念。通过将农业废弃物、林业废弃物等生物质资源转化为生物炭，我们不仅可以减少废物的排放，还可以将这些废物转化为有价值的资源，实现废物的减量化和资源化利用。这种转化过程不仅有助于缓解环境压力，还能为农民提供一种新的收入来源，促进农村经济的可持续发展。

【作者简介】刘杰（1990-），男，苗族，硕士，工程师，从事环境咨询研究。

鉴于此, 论文深入探讨生物炭在可持续性环境保护中的关键作用。我们将从生物炭在土壤改良、生物炭对重金属的钝化作用以及生物炭缓解植物生物和非生物胁迫等方面的应用进行全面阐述。

2 生物炭作为土壤改良剂的作用

2.1 物理效应

土壤表面积是一个关键的土壤特性, 对于控制土壤的各项基本肥力功能, 如水分和养分的保持能力、通气性, 以及微生物活性等, 都起着至关重要的作用。砂质土壤由于其颗粒表面积相对较小, 因此在水分和养分的保持能力上有所限制。而富含粘土的土壤, 尽管可能具有较高的总水分和养分保持力, 但往往通气性不佳。生物炭的表面积通常优于砂质土壤, 甚至可与粘土相媲美或更高。因此, 当作为改良剂添加到土壤中时, 它能有效地增加土壤的总比表面积。此外, 生物炭的高孔隙度特性对于提升生物炭改良土壤的物理品质起到了关键作用。在贫瘠土壤中应用生物炭, 可以通过其多孔的内部结构以及特有的颗粒大小和形状来增加土壤的孔隙度。随着时间的推移, 生物炭、粘土和土壤有机质之间的相互作用可能会形成微团聚体, 从而进一步改善土壤的孔隙结构。生物炭的孔隙度和表面积的增加也可能使其具有更强的水分保持能力。值得一提的是, 生物炭的低容重(约为 $300\text{kg}/\text{m}^3$)以及高度稳定的有机碳成分, 具有降低土壤容重和渗透阻力、增加土壤总孔隙度的潜力^[4]。

另一方面, 生物炭也因其能够改善改良土壤的水文特性而广受推崇, 这些特性包括持水能力、含水量、水力传导性、保水能力和水分入渗率等。生物炭能够提高土壤的持水能力, 这主要归功于其内部孔隙度和颗粒间的相互作用, 而这些因素又高度依赖于土壤类型和生物炭的生产条件。具有高表面积和大孔体积($> 50\text{nm}$)的生物炭往往具有更强的持水能力。同样地, 水力传导性和孔隙度的提升, 以及土壤容重的降低, 都可能是生物炭高度多孔结构的直接结果。这种结构在生物炭与土壤基质之间创造了间隙空间, 从而优化了土壤的物理性质

2.2 化学效应

生物炭以其高表面积和高孔隙度的特性, 展现出对植物营养元素的强大保留和吸附能力, 进而有效提升了土壤肥力。近期众多研究均指出, 生物炭改良后的土壤具有多种优势, 例如增加了阳离子交换量(CEC)、降低了氮素流失、促进了微生物增殖、调节了土壤酸碱度等^[5]。土壤阳离子交换量(CEC)作为衡量土壤保留正电荷离子(例如 Ca^{2+} 、 K^{+})能力的重要指标, 与土壤的肥力密切相关。相应地, 阴离子交换量(AEC)则反映了土壤对负电荷离子(如 NO_3^-)的保留能力。生物炭对于阳离子和阴离子的营养保留能力, 很可能受其自身的阳离子交换量和阴离子交换量的影响。生物炭改良后土壤阳离子交换量的提升, 可能源于生

物炭表面的氧化功能基团(例如羧基团)以及生物炭吸收的有机酸所暴露的羧基团, 这些基团为生物炭表面带来了负电荷^[6], 此外, 生物炭表面阳离子的释放到土壤中也可能是一个重要因素。

生物炭被报道能够改变土壤营养物质的可用性和循环利用, 生物炭的添加对土壤营养物质可利用性的影响是一个复杂的问题。它可能因生物炭的质量和施用量的不同而有所变化, 导致营养物质的吸收和生物量的产生出现增减不一的情况。生物炭既可以直接为植物提供营养物质以促进土壤肥力, 也可以通过改善土壤质量来间接提高肥料的利用率。将生物炭添加到土壤中会引起土壤pH值、电导率(EC)以及植物可获取的养分含量的变化。植物对养分的可获取性受到微生物分解和依赖于pH值的非生物反应的共同影响, 这些反应会改变土壤中可溶性养分与不可溶性养分的比例。多项研究指出, 在农业土壤中添加生物炭可以通过提高酸性土壤的pH值来诱导土壤碱化, 这与生物炭中碱性金属氧化物(如 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 K^{+})的浓度增加有关。此外, 生物炭的加入可以提高某些养分(如N、P、K、Ca、Mg和Mo)的植物可获取性, 特别是在酸性土壤中^[7]。同时, 它还可以降低植物生长所需的其他可能有毒的元素(如Al、Cu、Fe、Ni、Co、Pb和Mn)的可用性, 这可能是通过表面吸附和沉淀作用实现的。

2.3 土壤生物活性

土壤中包含一个错综复杂的生物群落, 涵盖了细菌、真菌、线虫、原生动物等多种无脊椎动物。这些生物的存在与数量随着土壤特性和管理策略的改变而动态变化, 尤其受到有机物质添加的重大影响。现有的研究文献揭示, 向土壤中添加生物炭可以显著激发土壤微生物的活性, 进而对土壤微生物学特性产生影响。一项meta分析的结果显示, 生物炭的添加使得微生物生物量碳以及脲酶、碱性磷酸酶和脱氢酶的活性分别提升了22%、23%、25%和20%, 且这种效果在酸性细质土壤中尤为突出^[8]。酶活性以及微生物群落的多样性和活性的改变, 主要受到以下因素的影响: ①生物炭添加后土壤pH值的提升, 因为土壤酸度是影响微生物组成的关键因素; ②增加了微生物的栖息地, 为真菌、需氧细菌和氧化酶提供了更适宜的生长环境; ③土壤中疏水性化合物的明显增加, 这对真菌的活动是有利的。然而, 值得注意的是, 生物炭的添加也可能对土壤微生物产生潜在的毒性作用, 这主要取决于生物炭的原料类型和生产条件。

当生物炭的施用率超过 $50\text{Mg}/\text{ha}$ 时, 可能会对微生物多样性产生不利影响。可能的原因包括: ①引入了某些对某些物种具有抑制作用的有毒成分; ②土壤有机质的碳氮比增加, 限制了微生物对碳的利用, 但这种情况可能仅在短期内出现, 并且只发生在有机碳被代谢的情况下; ③破坏了微生物的微环境。值得注意的是, 碳氮比的变化并不影响微生物对生物炭的代谢。真菌和细菌栖息在生物炭中营养丰富的较

大孔隙 ($> 2\mu\text{m}$) 内, 它们不仅开采生物炭中的营养物质, 还吸收来自肥料的养分。根系分泌物、微生物代谢物和残留物的吸附作用提升了土壤有机质的水平, 从而增加了土壤有机碳的含量。此外, 小的生物炭颗粒能够迁移到根系表面, 并可能改变特定与根系相关的细菌丰度^[9]。生物炭表面能够吸附微生物的信号分子 (特别是酰基高丝氨酸内酯), 这会干扰土壤微生物之间的通讯, 可能会降低病原体的影响。同时, 生物炭还能吸附土壤传播的病原体所排出的致病酶和有毒代谢物, 进而降低根区毒力因子的浓度, 减轻病害的严重程度。

3 生物炭对土壤重金属的钝化作用

生物炭在减少植物对重金属的吸收方面已得到广泛研究证实。根据一项荟萃分析的结果, 向土壤中添加生物炭能够显著降低植物组织中镉、铅、铜和锌的浓度, 平均降幅分别为 38%、39%、25% 和 17%^[10]。这一成效主要归因于生物炭表面的氧官能团, 它们能够通过多种机制如离子交换、沉淀、阳离子和阴离子金属的吸引、还原、电子穿梭以及物理吸附来固定重金属^[11]。此外, 生物炭的碱性特质 (即石灰效应) 可以提升酸性土壤的 pH 值, 进而增加粘土颗粒的负电荷交换位点, 有效吸引阳离子金属。特别是, 粪便生物炭中较高的钙含量使其能够通过离子交换固定如 Cd^{2+} 和 Cu^{2+} 等阳离子重金属。同时, 富磷生物炭能形成稳定沉淀物, 例如 $\beta\text{-Pb}_3(\text{PO}_4)_6$ 来固定铅, 而其较高的碱度和方解石成分则有利于不溶性水白铅矿 $\text{Pb}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$ 的形成^[12]。生物炭颗粒表面的碳涂层矿物在降低重金属的生物利用度方面表现出显著效果^[13]。通过与还原铁、有机化合物和自由基的相互作用, 生物炭还可以将 $\text{Cr}(\text{VI})$ 还原为 $\text{Cr}(\text{III})$, 进一步减少植物对其的利用。高温核桃壳生物炭已被研究发现能够通过物理吸附等机制从污水中吸附重金属^[14]。值得注意的是, 即使原料中含有高量的重金属, 某些生物炭仍能减少特定土壤中某些重金属的生物利用度。例如, 污泥生物炭能够降低酸性水稻土中砷、铬、钴、铜、镍和铅的生物积累, 但对镉和锌的影响则相反^[15]。此外, 生物炭可能通过减少带正电的点来增加如砷、铬等阴离子类金属的流动性, 但随着土壤 pH 值的上升, 砷的结合位点可能会减少。为应对这一问题, 可以通过铁氧化物改性生物炭来增加 AEC, 进而增强对砷的吸附能力。

4 生物炭缓解植物生物和非生物胁迫

除了对植物生长和发育的直接影响外, 生物炭还被观察到能够在多个病原体系统中激发植物对疾病的系统抗性。生物炭能够迅速“刺激”植物, 上调防御相关基因。这种激活状态下的植物在遭遇生物胁迫时, 会展现出更快更强的细胞防御反应, 例如早期的氧化爆发和防御基因的上调^[16]。对于非生物环境压力, 如盐、热、冷、毒素和干旱等, 生物炭也展现出相似的影响^[17]。这一系列生物炭与根际之间的

机制可能涉及生物炭对土壤、根际、病原体、微生物群以及植物系统的多种直接和间接效应。具体而言, 生物炭 (特别是稻草和稻壳生物炭) 能够释放硅, 这有助于增加植物的疾病抵抗力和生长。生物炭还能吸附土壤病原体释放的细胞外致病酶和毒素, 降低它们在根部的浓度^[18]。此外, 生物炭能够诱导系统获得性抗性, 并通过吸附和灭活诱导寄生杂草种子萌发的植物信号分子来发挥作用。生物炭对植物病害的影响与生物炭的剂量和类型密切相关。通常, 在低剂量下影响不明显, 中等剂量下表现出积极影响, 而相对较高剂量则可能产生负面影响。这种反应模式在多种植物-土壤传播病原体和植物-叶面病原体系统中均有观察^[19]。然而, 值得注意的是, 抑制疾病的最佳剂量并不总是与促进生长的最佳剂量相吻合。在环境压力条件下, 生物炭对植物生长的影响也得到了深入研究。无论在水源充足还是干旱条件下, 生物炭处理均显著改善了藜麦和玉米的生长状况, 这主要归因于植物性状的改善而非根区含水量的增加^[20]。在极端环境压力下进行的多年试验中, 生物炭处理地块中的辣椒产量有所提高, 这归因于生物炭引发的植物适应反应。此外在拟南芥中进行的试验表明早期的微应激使植物能够更好地应对随后的急性热应激。这些研究结果表明生物炭能够诱导植物对基础微应激的早期适应状态并使植物为应对随后的急性应激做好准备这一能力被假定为解释生物炭通过除营养、水分或土壤结构以外的因素改善植物健康、开花和生长的原因^[21]。此外生物炭在根际环境中还发挥着多重作用。它能够缓冲 pH 值和平衡 Eh 为植物生长创造有利的根际条件并增强其对环境压力和疾病的恢复力。生物炭的迅速电荷转移能力也可能增强植物应对氧化应激的能力。总的来说生物炭在根际环境中能够增加养分的供应和吸收、固定或钝化对植物有毒的有机物和矿物质、释放刺激生长和发育的生物活性化合物、促进有益生物的生长以及抑制病原体。因此生物炭对于支持植物的生长、健康和对环境压力及疾病的恢复力具有重要作用。

5 结语

在当今环境保护的迫切需求下, 生物炭作为一种创新且功能多样的材料, 其在可持续性环境保护中的关键作用不容忽视。论文从多个角度探讨了生物炭在土壤改良、重金属钝化以及缓解植物生物和非生物胁迫方面的应用, 揭示了生物炭在环境保护和农业可持续发展中的巨大潜力。首先, 在土壤改良方面, 生物炭以其独特的物理和化学性质, 有效地改善了土壤的物理品质, 如增加土壤的比表面积、孔隙度和持水能力等。同时, 生物炭还能提高土壤的阳离子交换量, 降低氮素流失, 促进微生物增殖, 以及调节土壤酸碱度, 从而显著提升土壤肥力。这些改良效果有助于提高农作物的产量和品质, 实现农业可持续发展。其次, 在重金属钝化方面, 生物炭通过其表面的氧官能团和多种机制, 如离子交换、沉

淀、吸附等,有效地固定了土壤中的重金属离子。这不仅降低了重金属的生物利用度,还减少了植物对重金属的吸收,从而保护了生态环境和农产品安全。最后,在缓解植物生物和非生物胁迫方面,生物炭能够激发植物对疾病的系统抗性,提高植物对环境压力的抵抗力。通过上调防御相关基因和增强细胞防御反应,生物炭帮助植物更好地应对生物和非生物胁迫,保障植物健康生长。

参考文献

- [1] 高尚洁,刘杏认,李迎春,等.施用生物炭和秸秆还田对农田温室气体排放及增温潜势的影响[J].中国农业科学,2024,57(5):935-949.
- [2] 翟必宇,王娟.生物炭缓解作物干旱胁迫及其机理研究综述[J].节水灌溉,2024(3):75-82.
- [3] 赵维彬,王松,刘玲玲,等.生物炭改良盐碱地效果及其对植物生长的影响研究进展[J/OL].土壤通报:1-11.
- [4] 杨茂琪,郭晓雯,周永学,等.棉秆和生物炭还田对棉田土壤理化性质及棉花水氮利用率的影响[J].中国农学通报,2023,39(26):76-85.
- [5] 麦建军.外源有机物添加对侵蚀退化黑土水分特性及作物产量的影响[D/OL].中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心),2023[2024-04-12].
- [6] 李翠.土壤调理剂对重金属镉污染修复效应的Meta分析及实证研究[D/OL].东北农业大学,2022[2024-04-12].
- [7] 凌彩金,周巧仪,魏岚,等.施用不同调理剂对酸化茶园土壤化学性质及茶叶品质的影响[J].土壤与作物,2024,13(1):85-97.
- [8] POKHAREL P, MA Z, CHANG S X. Biochar increases soil microbial biomass with changes in extra- and intracellular enzyme activities: a global meta-analysis[J/OL]. Biochar, 2020,2(1):65-79.
- [9] 魏甲彬,李有清.生物炭添加对根际土壤微生物群落影响研究进展[J].湖南生态科学学报,2023,10(2):101-108.
- [10] Chen D, Liu X, Bian R, et al. Effects of biochar on availability and plant uptake of heavy metals – A meta-analysis[J/OL]. Journal of Environmental Management, 2018(222):76-85.
- [11] 梁慧,李如美,朱钰晓,等.生物炭在土壤重金属和有机物污染修复中的应用研究进展[J].安徽农业科学,2024,52(6):17-20.
- [12] GAO R, FU Q, HU H, et al. Highly-effective removal of Pb by co-pyrolysis biochar derived from rape straw and orthophosphate[J/OL]. Journal of Hazardous Materials,2019(371):191-197.
- [13] KUMAR A, ELAD Y, TSECHANSKY L, et al. Biochar potential in intensive cultivation of Capsicum annum L. (sweet pepper): crop yield and plant protection[J/OL]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2018,98(2):495-503.
- [14] 安焱,石晓磊,花静静,等.核桃壳生物炭对Pb²⁺、Zn²⁺的吸附特性及机制[J].有色金属工程,2024,14(3):177-187.
- [15] KHAN S, CHAO C, WAQAS M, et al. Sewage Sludge Biochar Influence upon Rice (Oryza sativa L) Yield, Metal Bioaccumulation and Greenhouse Gas Emissions from Acidic Paddy Soil[J/OL]. Environmental Science & Technology,2013,47(15):8624-8632.
- [16] CONRATH U, BECKERS G J M, FLORS V, et al. Priming: Getting Ready for Battle[J/OL]. Molecular Plant-Microbe Interactions®,2006,19(10):1062-1071.
- [17] 黄晶.生物炭对NaCl盐化土壤生化功能与水稻耐盐性能的影响[D/OL].中国农业科学院,2022[2024-04-13].
- [18] FRENKEL O, JAISWAL A K, ELAD Y, et al. The effect of biochar on plant diseases: what should we learn while designing biochar substrates?[J/OL]. Journal of Environmental Engineering and Landscape Management, 2017,25(2):105-113.
- [19] GRABER E R, FRENKEL O, JAISWAL A K, et al. How may biochar influence severity of diseases caused by soilborne pathogens?[J/OL]. Carbon Management,2014,5(2):169-183.
- [20] AHMED F, ARTHUR E, PLAUBORG F, et al. Biochar amendment of fluvio-glacial temperate sandy subsoil: Effects on maize water uptake, growth and physiology[J/OL]. Journal of Agronomy and Crop Science,2018,204(2):123-136.
- [21] ELAD Y, CYTRYN E, HAREL Y M, et al. The Biochar Effect: plant resistance to biotic stresses[J]. Phytopathologia Mediterranea, 2011,50(3):335-349.