

生物炭对土壤修复改良应用

施文菁¹ 李同庆²

1 重庆三峡学院

2 长江水利委员会水文局长江上游水文水资源勘测局

DOI:10.12238/eep.v8i3.2631

[摘要] 随着工业化和城市化的推进,我国土壤污染问题日益严重,严重威胁着农业生产和生态环境。生物炭作为一种新兴的土壤修复材料,因其优异的吸附特性和环保特性,逐渐成为土壤污染治理的重要技术之一。生物炭通过其多孔结构、丰富的表面化学性质以及促进微生物降解等机制,能够有效修复土壤中的重金属、有机污染物,并改善土壤质量。然而,生物炭在实际应用中仍面临一些挑战,特别是多污染物竞争吸附位点可能导致修复效果的不稳定,以及其在土壤中的长期稳定性和可能引发的二次污染问题。未来的研究应着重探讨不同原料生物炭的作用机制,并寻找出在对环境压力最小的前提下,能有效去除污染物的生物炭类型,以促进生物炭技术在土壤污染治理中的广泛应用。

[关键词] 生物炭; 土壤修复; 热解; 污染物

中图分类号: X-652 **文献标识码:** A

Application of biochar for soil remediation and improvement

Wenjing Shi¹ Tongqing Li²

1 Chongqing Three Gorges university

2 Upper Yangtze River Hydrology and Water Resources Survey Bureau, Hydrology Bureau of Yangtze River Water Resources Commission

[Abstract] With the advancement of industrialisation and urbanisation, the problem of soil pollution in China is becoming more and more serious, seriously threatening agricultural production and ecological environment. As an emerging soil remediation material, biochar has gradually become one of the important technologies for soil pollution treatment due to its excellent adsorption properties and environmental protection characteristics. Biochar can effectively remediate heavy metals and organic pollutants in soil and improve soil quality through its porous structure, rich surface chemistry, and promotion of microbial degradation. However, biochar still faces some challenges in practical application, especially the competition of multiple pollutants for adsorption sites that may lead to unstable remediation effects, as well as its long-term stability in the soil and possible secondary pollution problems. Future research should focus on exploring the mechanism of action of biochar from different feedstocks and finding the type of biochar that can effectively remove pollutants with minimal pressure on the environment, in order to promote the widespread application of biochar technology in soil pollution management.

[Key words] biochar; soil remediation; pyrolysis; pollutants

1 引言

1.1 我国土壤污染现状

土壤是地球上极为重要的自然资源之一,是生态系统的基本组成部分,它不仅对农业生产至关重要,还对维持生态平衡、支持生物多样性、调节气候等方面起着不可替代的作用^[1]。快速的工业化和城市化导致新出现的污染物进入环境,对土壤健康和构成重大威胁^[2]。中国约占全球人口的18%,但中国的耕

地资源仅占全球耕地总面积的10.9%,农业用地对中国的重要性不言而喻^[3]。联合国环境规划署2018年报告指出,全球大约有33%的土地受到污染,尤其是在发展中国家和新兴市场经济体。我国土壤污染问题已日渐成为制约农业可持续发展和生态环境保护的重要因素。土壤污染不仅影响农业生产、降低农作物质量,还可能通过食物链影响人类健康,带来生态和经济损失。

1.2 土壤污染修复技术

土壤修复技术是针对受污染土壤进行处理、恢复其生态功能的技术体系。目前的土壤污染修复技术主要可以分为三类,分别为物理修复、化学修复和生物修复^[4]。土壤修复技术中的物理修复技术主要是通过物理手段来去除或隔离污染物,恢复土壤的功能。但该技术虽然有高效、较少化学污染、适用性广等优点,但也存在一些明显的缺点,如高能耗、高成本、二次污染的风险以及技术适用范围的限制。土壤修复中的化学修复技术主要通过添加化学物质或使用化学反应来转化、去除或稳定土壤中的污染物^[5]。然而,该技术可能会引发二次污染,且处理过程中的成本和技术要求较高。土壤修复中的生物修复技术通过利用微生物、植物或其代谢产物来降解、吸收或转化土壤中的污染物^[6]。但生物修复的修复速度较慢,且受土壤条件和污染物浓度的限制,往往需要较长时间才能见效。

生物炭修复技术是一种复合型修复技术,巧妙结合了物理、化学和生物三种作用机制。近年来,生物炭修复技术因其环保、经济和可持续的特点,成为土壤修复领域的重要研究方向,广泛应用于重金属、有机污染物和土壤改良等多个方面。

1.3 生物炭原料类型及对土壤的应用

生物炭是一种通过在缺氧或低氧环境下加热有机物制成的高碳、稳定的固体物质^[7]。其具有高度的比表面积和多孔结构,能够有效吸附和固定土壤中的污染物,改善土壤质量,同时通过化学反应稳定重金属和有机污染物,减少其生物可利用性。将生物炭用于土壤既可以有效解决固体废物资源化利用的问题,又可以实现土壤修复改良,从而实现环境修复与农业增产的双重效果。现有研究中,生物炭的原料种类非常丰富,主要包括农业废弃物、林业废料、动物粪便、城市有机废弃物、以及一些工业副产物^[8]。这些原料经过热解转化为生物炭后,具有不同的物理和化学特性,可以根据土壤污染的类型和修复需求,选择合适的原料用于土壤改良、污染治理和碳封存等多种应用。

Aurangzeib等^[9]证明由秸秆制备的生物炭在提高酸性土壤pH值、土壤电导率(SEC)、土壤有效磷(SAP)和土壤有机质(SOM)方面效果显著。Wu等^[10]研究证明玉米秸秆衍生的生物炭可有效提高降解土壤对镉的吸附能力。Li等^[11]研究表明木制生物炭添加提高了土壤有机碳含量,而老化后的木制生物炭则显著提高了C/N比与微生物丰度。滑石粉-生物炭复合材料对多种重金属表现出优异的固定化效果,显著降低了芸苔属植物中的Cu、Zn、Cr和Cd的浓度^[12]。Chen等^[13]探究了生物炭和微塑料对土壤的联合作用,研究表明生物炭和PE微塑料对微生物坏死量积累以及CO₂和N₂O排放的交互作用主要基于微生物(尤其是细菌)坏死量、DOM分解以及聚集体破坏。生物炭对土壤治理作用广泛,可以增加土壤有机质,促进微生物活性,提高土壤肥力,增强植物养分吸收,促进植物生长,具有改善土壤质量、提高农作物产量和环境修复的潜力。

2 生物炭对土壤的修复改良作用

2.1 生物炭作为缓释肥在土壤中的作用

全球的化肥施用量逐年增加,而我国是世界上最大的化肥

生产国和消费国^[14]。但是未被作物吸收的过量氮肥还可能会造成土壤酸化、盐渍化、板结以及重金属污染等环境问题。为了解决这一问题,学者们研究出了可以延缓养分释放速度的生物炭基缓释肥。Chen等^[15]开发了一种由稻壳生物炭和尿素过氧化氢(UHP)组成的新型生物炭基肥料,该新型肥料累积氮释放率为17.63%,显著低于普通肥料。Li等^[16]以烤烟茎为原料制备了一种生物炭基肥料,在烟草种植土壤中该生物炭基肥料的添加能有效减少养分浸出。Barbosa等^[17]利用磷酸、氧化镁富集家禽粪便制备生物炭基肥料,该生物基肥料可以有效提高植物的剩余效应和氮利用效率。

2.2 生物炭对土壤中重金属的修复作用

我国重金属污染问题日益严峻,尤其在土壤和水体中表现突出。目前,生物炭在土壤重金属污染治理中的研究多以农业废弃物为原料,并采用改性等方法来提高其修复能力。Duan等^[18]制备了生物炭负载的纳米铁零价材料,将其用于修复受重金属污染的土壤,其中纳米零价铁添加量为3%的改性生物炭效果最好,Cu、Zn、As、Cd和Pb残留状态的相对百分比含量分别增加了10.28%、7.81%、7.44%、9.26%和12.75%。Wang等^[19]分别用三氯化铁制备水稻、小麦和玉米秸秆改性生物炭将其用于受到镉-砷共污染的土壤中,该研究表明,施用氯化铁改性玉米秸秆衍生生物炭在培养10天后对Cd(II)(63.21%)和As(V)(95.10%)的固定化效率最高。Vuong等^[20]利用花生壳和玉米芯制备生物炭,研究结果表明玉米芯生物炭在减少铅和锌的可交换态方面的效果略好于花生壳生物炭。

2.3 生物炭对土壤中有机污染物的修复作用

根据全国土壤污染状况调查报告,我国土壤样本中存在有机污染物超标现象,如六六六、滴滴涕和多环芳烃等。目前生物炭已经广泛被应用于修复被有毒化合物污染的土壤,尤其是有机污染物。Losacco等^[21]设计了在土壤中施用氮肥和杀虫剂以及不同类型的生物炭的盆栽实验,实验结果证明与未改良的土壤相比,添加木材生物炭能显著减少了杀虫剂的浸出。Singh等^[22]探究了蒸馏废料(薄荷)衍生生物炭在淤泥质粘土和砂质壤土中对毒死蜱的固定作用。在土壤中施用生物炭后,毒死蜱的浸出量明显减少。Sun等^[23]研究表明土壤的吸附能力随混合生物炭含量的增加呈指数级增加,可释放的3,5,6-三氯-2-吡啶醇呈递增-下降模式,在5%生物炭含量时观察到最大值。

2.4 生物炭对土壤CO₂的影响

生物炭除了可以充当土壤调理剂,改善物理、化学和生物特性,提高土壤肥力和作物产量之外,还能通过封存CO₂来帮助缓解气候变化^[24]。Sun等^[25]进行了铵态氮和玉米秸秆衍生生物炭添加的70天孵育实验,结果表明生物炭可以通过中和氮诱导的酸性来减少土壤衍生的总CO₂。Park等^[26]研究了秸秆和畜禽粪便生物炭在不同土壤中的碳矿化和CO₂排放情况。实验结果表明,施用生物炭后,所有土壤的总碳含量均显著增加,其中施用秸秆生物炭的CO₂排放量高于施用畜禽粪便生物炭的排放量。Fidel等^[27]探究了混合木材气化生物炭对黄土衍生土壤中CO₂和N₂O排

放的影响,实验结果证实与玉米种植系统相比,草地和草地-沼泽种植系统中的土壤排放更多的CO₂和更少的N₂O。

3 挑战与展望

目前,学界对生物炭用于土壤修复的研究较为广泛,但大多数研究集中于某一特定原料制备的生物炭或其改性生物炭在土壤修复中的作用,而针对不同原料类型生物炭的对比研究仍较为有限。通过比较不同原料生物炭对土壤的修复效果,可以明确哪些原料在特定污染类型下更为有效,从而为实际应用提供更具有针对性的选择。

多项污染物相互竞争生物炭的吸附位点,可能导致某些污染物的吸附能力下降,修复效果不稳定,进而降低其对污染物的长期修复能力。然而,目前关于这一问题的研究仍较为有限。因此,解决多污染物竞争吸附问题,优化生物炭的吸附特性和修复效果,或许是提高其修复效率和长期效果的关键之一。

除此之外,生物炭修复技术通常将生物炭粉末直接与土壤混合,但已有学者指出,生物炭长期存在于土壤中可能引发二次污染问题。这可能会影响其在土壤中的长期修复能力和持久性。Lin等^[28]将生物炭装载于亚克力小管中使得生物炭能够在修复周期结束后取出,避免造成二次污染。但目前该方案小管的作用范围、适用条件与长期效果尚不清晰。

4 结束语

本文介绍了不同生物炭在不同土壤污染中的修复应用以及面临的一些挑战,这些总结为不同类型生物炭更好的应用于土壤污染修复提供了新思路。其中农业废弃物在土壤修复中的应用最多,且效果要优于林业废弃物和畜禽粪便生物炭。本文还指出了当前研究中存在的一些问题,例如对于不同原料类型生物炭的对比研究较少、生物炭对于多项污染物共存下吸附机理的研究以及生物炭长期停留土壤中可能引发的二次污染问题。通过本文归纳阐述,为生物炭修复技术成为土壤污染治理有效治理技术提供了理论支持。

[参考文献]

- [1] Nord E A, Lynch J P. Plant phenology: a critical controller of soil resource acquisition[J]. JOURNAL OF EXPERIMENTAL BOTANY, 2009, 60(7): 1927-37.
- [2] Kimáková T, Nasser B, Issa M, et al. Mercury cycling in the terrestrial, aquatic and atmospheric environment of the Slovak Republic—an overview[J]. ANNALS OF AGRICULTURAL AND ENVIRONMENTAL MEDICINE, 2019, 26(2): 273-9.
- [3] Turup A, Zhang J, Ma W C, et al. China's Well-Facilitated Farmland distribution dataset[J]. SCIENTIFIC DATA, 2025, 12(1).
- [4] Xu L, Zhao F F, Xing X Y, et al. A Review on Remediation Technology and the Remediation Evaluation of Heavy Metal-Contaminated Soils[J]. TOXICS, 2024, 12(12).
- [5] Luo Y M. Current Research and Development in Soil Remediation Technologies[J]. PROGRESS IN CHEMISTRY, 2009, 21(2-3): 558-65.

[6] Cheng C H, Chen L Y, Guo K X, et al. Progress of uranium-contaminated soil bioremediation technology[J]. JOURNAL OF ENVIRONMENTAL RADIOACTIVITY, 2022, 241.

[7] Nadarajah K, Asharp T, Jeganathan Y. Biochar from waste biomass, its fundamentals, engineering aspects, and potential applications: an overview[J]. WATER SCIENCE AND TECHNOLOGY, 2024, 89(5): 1211-39.

[8] Tomczyk A, Sokołowska Z, Boguta P. Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects[J]. REVIEWS IN ENVIRONMENTAL SCIENCE AND BIO-TECHNOLOGY, 2020, 19(1): 191-215.

[9] Aurangzeib M, Zhang S L, Yan S H, et al. Biochar Application Can Improve Most of the Chemical Properties of Acidic Soils: A Global Meta-Analysis [J]. ACS AGRICULTURAL SCIENCE & TECHNOLOGY, 2024, 4(3): 292-306.

[10] Wu C X, Li Y G, Chen M J, et al. Adsorption of Cadmium on Degraded Soils Amended with Maize-Stalk-Derived Biochar [J]. INTERNATIONAL JOURNAL OF ENVIRONMENTAL RESEARCH AND PUBLIC HEALTH, 2018, 15(11).

[11] Li K, Yin G C, Xu Q Y, et al. Influence of Aged Biochar Modified by Cd²⁺ on Soil Properties and Microbial Community [J]. SUSTAINABILITY, 2020, 12(12).

[12] Lyu H H, Cheng K, He L L, et al. Efficiency of talcum-biochars in immobilization of heavy metals and promotion of the growth of Brassica chinensis in contaminated agricultural soil [J]. PLANT STRESS, 2025, 16.

[13] Chen Y L, Wang Z B, Sun K, et al. Biochar and Microplastics Affect Microbial Necromass Accumulation and CO₂ and N₂O Emissions from Soil [J]. ACS ES&T ENGINEERING, 2023, 4(3): 603-14.

[14] Yan Z J, Liu P P, Li Y H, et al. Phosphorus in China's Intensive Vegetable Production Systems: Overfertilization, Soil Enrichment, and Environmental Implications [J]. JOURNAL OF ENVIRONMENTAL QUALITY, 2013, 42(4): 982-9.

[15] Chen L, Chen Q C, Rao P H, et al. Formulating and Optimizing a Novel Biochar-Based Fertilizer for Simultaneous Slow-Release of Nitrogen and Immobilization of Cadmium [J]. SUSTAINABILITY, 2018, 10(8).

[16] Li Y L, Cheng J Z, Lee X, et al. Effects of biochar-based fertilizers on nutrient leaching in a tobacco-planting soil [J]. ACTA GEOCHIMICA, 2019, 38(1): 1-7.

[17] Barbosa C F, Correa D A, Carneiro J S D, et al. Biochar Phosphate Fertilizer Loaded with Urea Preserves Available Nitrogen Longer than Conventional Urea [J]. SUSTAINABILITY, 2022, 14(2).

[18] Chon H T, Lee J S, Lee J U. Heavy Metal Contamination of Soil, Its Risk Assessment and Bioremediation [J]. GEOSYSTEM ENGINEERING, 2011, 14(4): 191-206.

[19]Wang Y M,Wang S W,Wang C Q,et al.Simultaneous Immobilization of Soil Cd(II)and As(V) by Fe-Modified Biochar[J]. INTERNATIONAL JOURNAL OF ENVIRONMENTAL RESEARCH AND PUBLIC HEALTH,2020,17(3).

[20]Vuong T X,Pham T T H,Nguyen T T T,et al.Effects of Biochar and Apatite on Chemical Forms of Lead and Zinc in Multi-Metal-Contaminated Soil after Incubation: A Comparison of Peanut Shell and Corn Cob Biochar[J].SUSTAINABILITY,2023,15(15).

[21]Losacco D,Campanale C,Triozi M,et al.Application of Wood and Vegetable Waste-Based Biochars in Sustainable Agriculture: Evaluation on Nitrate Leaching, Pesticide Fate, Soil Properties,and Brassica oleracea Growth[J].ENVIRONMENTS,2024,11(1).

[22]Singh M,Yadav S K,Mishra D,et al.Distilled waste (Mentha) derived biochar for immobilization of chlorpyrifos in soil: Adsorption,leaching, and dissipation in two contrasting mesosphere[J].ENVIRONMENTAL SUSTAINABILITY,2025.

[23]Sun S G,Ren D X,Lei W J,et al.Experiment and Model Study on the Destination of 3,5,6-Trichloro-2-pyridinol in the Purple Soil of Southwestern China with a High Ratio of Biochar Applied[J].SUSTAINABILITY,2022,14(14).

[24]Tsolis V, Barouchas P. Biochar as Soil Amendment: The Effect of Biochar on Soil Properties Using VIS-NIR Diffuse Reflectance Spectroscopy, Biochar Aging and Soil Microbiology-A Review[J].LAND,2023,12(8).

[25]Sun Z A,Hao T X,Zhu B.Effects of nitrogen addition on carbonate-derived CO₂ emission after biochar addition[J].SOIL ECOLOGY LETTERS,2023,5(4).

[26]Park D, Lee J-M, Choi E-J, et al. Carbon Mineralization in different Soils Cooperated with Barley Straw and Livestock Manure Compost Biochars [J]. Journal of Korea Organic Resource Recycling Association,2022,30(4):67-83.

[27]Fidel R B,Laird D A,Parkin T B.Effect of Biochar on Soil Greenhouse Gas Emissions at the Laboratory and Field Scales[J].SOIL SYSTEMS,2019,3(1).

[28]Chen L, Ni Q, Wu Y, et al. Passivation and remediation of Pb and Cr in contaminated soil by sewage sludge biochar tubule[J].ENVIRONMENTAL SCIENCE AND POLLUTION RESEARCH, 2021,28(35):49102-11.

作者简介:

施文菁(1999--),女,汉族,浙江长兴人,硕士研究生,研究方向:土壤污染修复。