

The Application of Biochar on Soil Improvement and Heavy Metal Remediation in Red Soil

Qiaohong Zhu^{1,2}, Ming Li^{1,2}, Zhongyi An^{1,2}

¹MCC Huatian Nanjing Engineering & Technology Corporation, Nanjing Jiangsu

²MCC Huatian Engineering & Technology Corporation, Ma'anshan Anhui

Email: zqh1004@163.com

Received: Jan. 18th, 2019; accepted: Feb. 8th, 2019; published: Feb. 15th, 2019

Abstract

Red soil is one of the most important soil types in China, which plays an important role in the development of agriculture and the improvement of people's living standards. But red soil is characterized by acidity, stickiness, slab and thinness, while soil erosion and heavy metal pollution are also serious in red soil region. Biochar, as a research hotspot in recent years, is considered as an effective soil amendment and soil remediation agent. The research progress of biochar in red soil in recent ten years was reviewed, and the effects of biochar on red soil improvement and heavy metal remediation were discussed. The application of biochar in red soil has great potential and positive effect, but long-term research and ecological risk should be seriously considered before large-scale application.

Keywords

Biochar, Red Soil, Improvement, Heavy Metal, Remediation

生物质炭在红壤改良与重金属污染治理中的应用

朱巧红^{1,2}, 李明^{1,2}, 安忠义^{1,2}

¹中冶华天南京工程技术有限公司, 江苏 南京

²中冶华天工程技术有限公司, 安徽 马鞍山

Email: zqh1004@163.com

收稿日期: 2019年1月18日; 录用日期: 2019年2月8日; 发布日期: 2019年2月15日

摘要

红壤是我国重要的土壤类型之一, 对我国农业发展和人民生活水平的提高有极其重要的意义。红壤呈现酸、黏、板、瘦等特征, 且红壤区域水土流失问题和重金属污染问题也日趋严重。生物质炭作为近几年的研究热点, 被认为是有效的土壤改良剂及土壤修复剂。综述了近十年生物质炭在红壤上的研究进展, 并探讨了生物质炭对于红壤改良和重金属污染治理的作用。生物质炭在红壤上的应用具有巨大的潜力和积极的作用, 但在大规模应用之前需要做长期的研究, 并警惕其潜在的生态风险。

关键词

生物质炭, 红壤, 改良, 重金属, 污染治理

Copyright © 2019 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

红壤是我重要的土壤类型之一, 主要分布在长江以南的广东、海南、广西、云南、贵州、福建、浙江、江西、湖南、台湾 10 省(区), 以及安徽、湖北、江苏、重庆、四川、西藏和上海等 7 省(区、市)的部分区域[1]。在红壤地区, 由于土壤贫瘠和丰沛的水热资源, 红壤表现出酸、黏、板、瘦的特点, 不利于作物生长。随着国家“土十条”等系列文件的出台, 土壤污染防治工作引起了极大的关注[2]。而我国重金属污染区主要分布在湖南、江西和浙江等地, 与中国 3 大酸雨之一的华东地区重叠。因此, 对红壤的有效治理与恢复成为国内外研究的热点。

生物质炭(biochar)是富含碳的生物质通过热裂解的方式, 在缺氧或者无氧条件下制成的一种富含孔隙结构、含碳量高的炭化物质[3]。由于碳组分发生了高度芳香化而具有很强的化学和热稳定性, 生物质炭可广泛存在于全球陆地环境以及水环境中。生物质炭碳含量高, 在土壤中的保留时间长, 且能有效提高土壤肥力, 另外, 其具有多孔性、较大的表面积和电荷密度, 能够吸附水分和营养元素, 在重金属修复方面有着十分广阔的应用前景[4][5]。本文结合国内外近几年关于生物质炭在红壤中的最新研究进展, 总结生物质炭在红壤改良与重金属污染治理上的应用。

2. 红壤的基本特性

红壤产生于热带和亚热带雨林、季雨林或常绿阔叶林植被下, 是发生脱硅富铝过程和生物富集作用而发育成的红色呈酸性且盐基高度不饱和的铁铝土[1]。红壤受其成土母质, 自然环境, 人为活动等的影响, 主要呈现以下特点: 1) 土壤酸化。红壤形成的关键成土过程即脱硅富铝化是一个较缓慢的酸化过程, 且酸雨的发生加速了红壤酸化进程。文献统计的结果, 红壤的 pH 值最低可达 2.0 [6]; 2) 红壤肥力下降。红壤是我国重要的耕地资源, 由于过度开发和不合理的开发利用, 土壤养分贫瘠, 肥力水平愈发低下。1995 年土壤普查资料显示, 红壤区域农田中 68% 为中低产田, 耕地普遍缺少有机质和氮素, 其次为磷、钾、硼、钼、锌、镁等元素[7]; 3) 水土流失严重。红壤地区由于地形起伏大, 坡度陡, 同时伴随雨量多, 强度大的强降雨, 且降雨集中, 极易发生水土流失。红壤结构水稳定性差, 抵抗暴雨侵蚀的能力差, 无有效措施保护下, 每年雨季红壤的侵蚀量可达 24.9 t/ha [8]; 4) 重金属污染严重。近年来, 南方地区大量

开采金属矿导致酸性废水和废渣排放,使重金属污染的红壤面积叠加,对生态环境和人体健康产生极大危害[9]。“镉大米”、“重金属蔬菜”等事件的曝光使红壤的重金属问题得到广泛关注。

3. 生物质炭的基本特征

生物质炭(Biochar, BC)是由各种动植物残体,城市污泥以及生物垃圾等,在缺氧的条件下高温热解所产生的。经过裂解作用后,生物质炭的组成元素主要为碳、氢、氧、氮等,主要以高分子、高密度碳水化合物化合物的形态存在[4]。生物质炭一般呈碱性,pH 一般都在 8 以上,主要由单环和多环的芳香族化合物组成,具有很高的化学和生物学稳定性,不易被微生物分解。生物质炭表面含大量的有机官能团如羟基、羧基(-COO⁻、-COOH、-O⁻、-OH 等),其具有较高的阳离子交换量。不同生物质形成的生物质炭通常是粉状颗粒,且是一种多孔体,通气性和透水性较好,容重小,表面积大,大约介于 200~400 m²/g 之间[10]。受制备原材料的组成和裂解条件的影响,生物质炭的元素组成、孔隙结构、比表面积和灰分含量等特点也会有一定的差异性。

生物质炭的这些特性对改良红壤酸性,保持土壤养分、控制水土流失,改善土壤结构,降低土壤中重金属的毒性等均有其积极作用。

4. 生物质炭对红壤改良和重金属污染治理的作用

4.1. 生物质炭对红壤酸化的改善作用

由于生物质炭中含有较多的盐基离子,如 K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺等,这些离子可以交换土壤中的 H⁺和 Al³⁺,从而降低其浓度。同时,生物质炭本身含有一定的碱性物质,能够提高土壤的 pH 值,减缓土壤酸度。室内比较了不同添加量的生物质炭对红壤 pH 的影响,其结果表明,强酸性红壤施用生物质炭能明显提高 pH 而降低酸度,且随着生物质炭施用量的增加,改良效果不断加强[11]。卢再亮等采用厌氧热解方法获得不同温度(300℃、500℃和 700℃)下制备的污泥制生物质炭并施入南方红壤中,发现生物质炭碱性随着裂解温度的升高而增加,红壤的 pH 和土壤交换性盐基阳离子含量也相应的增加[12]。袁金华等室内研究表明向酸性红壤中添加秸秆制生物质炭不仅能提高土壤 pH,还显著提高土壤的阳离子交换量[13]。红壤 pH 低,土壤中的可溶性铝和总单核铝含量高,威胁植物根系生长,导致红壤地区作物生长不良,生物质炭添加后使酸性土壤中有毒形态铝含量显著降低,从而缓解铝对植物的毒害。Zhu 等的研究成果也证实生物质炭能降低红壤铝毒,提高土壤 pH [14]。

4.2. 生物质炭对提升红壤肥力水平的积极作用

最初被发现的生物质炭是生活在巴西亚马逊流域的人们长期使用的一种特殊肥料。这种肥料来源于当地,具有极强的恢复贫瘠土壤肥力的能力,当地人把它称为“印第安人的黑土壤”即“Terra Preta”[15]。生物质炭富含有机碳且其在土壤中分解速度慢,持留时间较长,不同来源的生物质炭,其周转周期为 300~1400 年。利用生物质炭不仅能减缓全球气候变化,而且能提高土壤肥力,增加作物产量,同步解决全球变暖和食品安全,是一种“双赢”的选择。研究进一步证实生物质炭对土壤肥力和作物生长的影响在强风化,贫瘠的热带土壤(红壤、氧化土、老成土)中效果最优。其作用的机理主要包括直接影响和间接影响两方面。直接影响是指生物质炭作为一种“土壤肥料”,其本身含碳水平高并含有多种养分元素如 N、P、K 等。间接影响是指生物质炭作为调节剂能改善土壤的环境促进作物的生长,其本身的多孔结构增加土壤的保水性,对土壤中的养分有较好的持留功能,能有效减少水冲刷造成的氮磷流失,提高肥料的利用率[15][16][17][18][19]。

尹云峰等通过 ¹³C 同位素标记的方法分析了生物质炭对红壤中有机碳的影响,研究表明施用生物质

炭后土壤碳库明显提高, 有机碳浓度为 10.25~1.66 mg/kg, 且有机碳的增加主要是因为提高了微团聚体和中团聚体中的有机碳含量[16]。Peng 等盆栽实验的结果指出在 1%的秸秆生物质炭添加量下, 秸秆的生物量提高了 30% [17]。连续 3 年的田间试验研究发现, 长期使用生物质炭能增加土壤有机碳、有效磷, 显著提高油菜和红薯的产量, 且随着种植年限的延长, 油菜和红薯的增产幅度均呈增加趋势[18]。但是 Hussain 等指出受制备原材料和制备工艺的影响, 生物质炭在制备过程中可能存在重金属积累的现象, 其施用需要符合相应的标准, 应警惕重金属超标的问题[20]。另外, 生物质炭施用对微生物的促进作用及其复杂的生态毒理反应, 可能会抑制的农药施用效果[21]。

4.3. 生物质炭对改善红壤结构、减少水土流失的作用

红壤区地处湿润地区, 土壤通透性良好, 下渗率大, 土壤团聚体易破碎, 且土壤坡面变化比较均匀, 水土流失频发。据报道, 侵蚀红壤区已达到 $2.5 \times 10^5 \text{ km}^2$, 约占亚热带区域土地的 20%, 成为我国第二大水土流失区域。土壤团聚体是指在干湿交替、冻融交替等自然物理过程作用下, 由有机物和矿物颗粒等土壤成分参与而形成的不同尺度大小的多孔单元。团聚体稳定性决定了土壤抵抗降雨溅蚀能力、入渗、土壤结皮形成、径流发生以及泥沙的颗粒特性等, 被认为是决定土壤抵抗分离和泥沙输移能力的关键因子[22]。野外长期试验的结果指出由于生物质炭促进了作物的生长, 提高了植物根系及其分泌物对红壤结构的影响, 促进了红壤的水稳定性团聚体, 尤其是 $< 0.25 \text{ mm}$ 的微团聚体的含量, 降低了水土流失[8]。Doan 等发现添加生物质炭(biochar)改善土壤孔隙, 增加入渗, 提高作物产量和增加植被覆盖度有效减缓水土流失[23]。何玉亭等在室内比较了烟秆炭和桑条炭制生物质炭对红壤团聚体结构稳定性和微生物群落的影响。研究表明, 烟秆炭和桑条炭均能促进大团聚体(0.25~1 mm)的形成, 提高红壤团聚体结构稳定性, 且以 2%~4%添加量为宜[24]。但是, 叶丽丽等利用盆栽实验研究秸秆制生物质炭对红壤团聚体稳定性的影响, 实验结果表明由于其分解速度慢, 周转周期为 1400 年[25]。短期施用没有有效的提高土壤结构稳定性[26]。尹云峰等通过 ^{13}C 同位素标记的方法进一步指出生物质炭显著提高了微团聚体和中团聚体中有机碳含量, 但是由于红壤地区 $< 0.25 \text{ mm}$ 团聚体的形成主要取决于粘粒和二氧化物的粘结作用, 所以短期物料投入不足以改变其环境, 显著提高红壤团聚体水稳定性[16]。

4.4. 生物质炭对重金属污染红壤的治理与修复作用

重金属污染是指由重金属或其化合物造成的环境污染, 主要由采矿、废气排放、污水灌溉和使用重金属制品等人为因素所致。随着经济的发展, 重金属污染问题日益突出。生物质炭具有多孔、高比表面积、大量的表面负电荷以及高电荷密度的特性, 对重金属离子(Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 等)有很好的吸附固定作用, 且去除率较高, 可降低土壤中重金属的移动性和生物有效性[27] [28]。佟雪娇等向江西和广西的红壤中添加了花生秸秆、大豆秸秆、稻草和油菜秸秆制备的 4 种生物质炭, 生物质炭的添加均提高了红壤对 $\text{Cu}(\text{II})$ 的吸附量, 并且随着生物质炭用量增加而增加。在 2%的添加量下, 吸附量能增加 51%~94% [29]。于志红等利用生物质炭-锰氧化物复合材料修复铜污染的红壤, 发现生物炭-锰氧化物复合材料提高了红壤对铜的吸附能力, 主要原因是复合材料加入后, 红壤表面-OH、Mg-O、Si-O 等活性官能团数量明显, 官能团与铜形成了 Mg-O-Cu-、Si-O-Cu-络合物, 增强吸附能力[30]。汪宜敏等通过污染红壤中添加玉米秸秆制生物质炭研究了其对镉吸附和养分含量的影响, 与对照相比, 生物质炭处理下红壤的 Cd^{2+} 吸附量增加了 2.94~6.62 mmol/kg, 其主要原因是 pH 升高导致土壤表面负电荷量增加。同时, 土壤较高的 pH 值能够促进玉米秸秆炭表面含氧官能团-COOH、-OH 等的解离, 从而增加土壤的表面负电荷量, 有效降低了南方酸性红壤重金属的生物有效性[31]。赵青青等比较了生物质炭添加后红壤中不同层级的团聚体中 Cd 形态和含量变化。研究结果显示, 在不同 Cd 污染程度下, 随着生物质炭施入量的增加, 根际、非根际土

壤不同粒级微团聚体中可交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态以及有机物结合态 Cd 占比趋于下降,残渣态 Cd 占比趋于上升, Cd 的污染和人体毒害显著降低[32]。

对诸多的研究结果总结分析可知生物质炭对重金属污染红壤的修复机理主要包括以下几方面:① 生物质炭的强碱性改善了土壤环境,增加了土壤的缓冲能力,提高了土壤对重金属离子的吸附能力;② 生物质炭由于其多孔性结构及巨大的比表面积,本身可作为吸附重金属的良好场所,减少污染物在土壤中的迁移性;③ 生物质炭的阳离子交换量可显著影响土壤中重金属的迁移转化,改变重金属的形态,从而修复重金属污染的土壤[29] [30] [31] [32] [33]。

5. 结论和展望

生物质炭的开发及其在红壤中的相关研究已取得一定的进展,但其中仍还有许多科学问题有待于系统深入的研究。现有的研究主要都是基于短期的实验总结,缺乏长期的田间监测数据。此外,生物质炭制备过程可能产生有毒物质,污泥制生物质炭存在重金属富集的现象,这些污染物质的释放周期、释放规律以及对作物或人体的毒害影响亟待进一步的研究。对此作者提出了一些在以后的工作和研究方面的建议:1) 增加红壤长期定位试验,建立生物质炭施用的长期评估机制;2) 结合各地实际情况,争取用当地主要的农业或工业废弃物来生产生物质炭,实现变废为宝;3) 重视二次污染的问题,适时的跟踪和评估生物质炭应用的潜在风险。

基金项目

江苏省自然科学基金资助项目(BK20160155)。

参考文献

- [1] 赵其国, 黄国勤, 马艳芹. 中国南方红壤生态系统面临的问题及对策[J]. 生态学报, 2013, 33(24): 7615-7622.
- [2] 王艳伟, 李书鹏, 康绍果, 等. 中国工业污染场地修复发展状况分析[J]. 环境工程, 2017, 35(10): 175-178.
- [3] Lehmann, J., Rillig, M.C., Thies, J., *et al.* (2011) Biochar Effects on Soil Biota—A Review. *Soil Biology and Biochemistry*, **43**, 1812-1836. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.04.022>
- [4] Uchimiya, M., Wartelle, L.H., Klasson, K.T., *et al.* (2011) Influence of Pyrolysis Temperature on Biochar Property and Function as a Heavy Metal Sorbent in Soil. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **82**, 1431-1437. <https://doi.org/10.1021/jf104206c>
- [5] Glaser, B., Lehmann, J. and Zech, W. (2002) Ameliorating Physical and Chemical Properties of Highly Weathered Soils in the Tropics with Charcoal—A Review. *Biology and Fertility of Soils*, **35**, 219-230. <https://doi.org/10.1007/s00374-002-0466-4>
- [6] 史志华, 蔡崇法, 张光远, 等. 鄂南红壤退化评价指标初探[J]. 科技进步与对策, 2000, 17(12): 11-13.
- [7] 孙波, 赵其国. 红壤退化中的土壤质量评价指标及评价方法[J]. 地理科学进展, 1999, 18(2): 118-128.
- [8] 朱巧红, 彭新华, 潘艳斌, 等. 添加有机物料对花生不同生育时期产流产沙的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(5): 29-34.
- [9] 林玉锁, 李波, 张孝飞. 我国土壤环境安全面临的突出问题[J]. 环境保护, 2004(10): 39-42.
- [10] Bird, M.I., Ascough, P.L., Young, I.M., *et al.* (2008) X-Ray Microtomographic Imaging of Charcoal. *Journal of Archaeological Science*, **35**, 2698-2706. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2008.04.018>
- [11] 张祥, 王典, 姜存仓, 等. 生物炭对我国南方红壤和黄棕壤理化性质的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(8): 979-984.
- [12] 卢再亮, 李九玉, 姜军, 等. 生活污水污泥制备的生物质炭对红壤酸度的改良效果及其环境风险[J]. 环境科学, 2013, 22(10): 3585-3591.
- [13] 袁金华, 徐仁扣. 稻壳制备的生物质炭对红壤和黄棕壤酸度的改良效果[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(5): 472-476.

- [14] Zhu, Q.H., Peng, X., Huang, T.Q., *et al.* (2014) Effect of Biochar Addition on Maize Growth and Nitrogen Use Efficiency in Acidic Red Soils. *Pedosphere*, **24**, 699-708. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(14\)60057-6](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(14)60057-6)
- [15] Glaser, B., Haumaier, L., Guggenberger, G., *et al.* (2001) The “Terra Preta” Phenomenon: A Model for Sustainable Agriculture in the Humid Tropics. *Naturwissenschaften*, **88**, 37-41. <https://doi.org/10.1007/s001140000193>
- [16] 尹云锋, 高人, 马红亮, 等. 稻草及其制备的生物质炭对土壤团聚体有机碳的影响[J]. 土壤学报, 2013, 50(5): 909-914.
- [17] Peng, X., Ye, L.L., Wang, C.H., *et al.* (2011) Temperature- and Duration-Dependent Rice Straw-Derived Biochar: Characteristics and Its Effects on Soil Properties of an Ultisol in Southern China. *Soil and Tillage Research*, **112**, 159-166. <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.01.002>
- [18] 李秋霞, 陈效民, 勒泽文, 等. 生物质炭对旱地红壤理化性质和作物产量的持续效应[J]. 水土保持学报, 2015, 29(3): 208-213.
- [19] Tsai, W.T., Liu, S.C., Chen, H.R., *et al.* (2012) Textural and Chemical Properties of Swine-Manure-Derived Biochar Pertinent to Its Potential Use as a Soil Amendment. *Chemosphere*, **89**, 198-203. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.05.085>
- [20] Hussain, M., Farooq, M., Nawaz, A., *et al.* (2017) Biochar for Crop Production: Potential Benefits and Risks. *Journal of Soil & Sediments*, **17**, 1-32. <https://doi.org/10.1007/s11368-016-1360-2>
- [21] Yang, X.B., Ying, G.G., Peng, P.A., *et al.* (2010) Influence of Biochars on Plant Uptake and Dissipation of Two Pesticides in an Agricultural Soil. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **58**, 7915-7921. <https://doi.org/10.1021/jf1011352>
- [22] 彭新华, 张斌, 赵其国. 土壤有机碳库与土壤结构稳定性关系的研究进展[J]. 土壤学报, 2004, 41(4): 618-623.
- [23] Doan, T.T., Henrydestureaux, T., Rumpel, C., *et al.* (2015) Impact of Compost, Vermicompost and Biochar on Soil Fertility, Maize Yield and Soil Erosion in Northern Vietnam: A Three Year Mesocosm Experiment. *Science of Total Environment*, **514**, 147-154. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.02.005>
- [24] 何玉亭, 王昌全, 沈杰, 等. 两种生物质炭对红壤团聚体结构稳定和微生物群落的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(12): 2333-2342.
- [25] 叶丽丽, 王翠红, 周虎, 等. 添加生物质黑炭对红壤结构稳定性的影响[J]. 土壤, 2012, 44(1): 62-66.
- [26] Wang, J., Xiong, Z. and Kuzyakov, Y. (2016) Biochar Stability in Soil: Meta-Analysis of Decomposition and Priming Effects. *Global Change Biology Bioenergy*, **8**, 512-523. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12266>
- [27] Yong, L., Zhu, Z.Q., He, Q.Z., *et al.* (2018) Mechanisms of Rice Straw Biochar Effects on Phosphorus Sorption Characteristics of Acid Upland Red Soils. *Chemosphere*, **207**, 267-277. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.05.086>
- [28] Park, J.H., Ok, Y.S., Kim, S.H., *et al.* (2016) Competitive Adsorption of Heavy Metals onto Sesame Straw Biochar in Aqueous Solutions. *Chemosphere*, **142**, 77-83. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.05.093>
- [29] 佟雪娇, 李九玉, 姜军, 等. 添加农作物秸秆炭对红壤吸附 Cu(II)的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2011, 27(5): 37-41.
- [30] 于志红, 谢丽坤, 刘爽, 等. 生物炭-锰氧化物符合材料对红壤吸附铜材料的影响[J]. 生态环境学报, 2014(5): 897-903.
- [31] 汪宜敏, 唐豆豆, 张晓辉, 等. 玉米秸秆炭对红壤镉吸附及养分含量、赋存形态的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(12): 2445-2452.
- [32] 赵青青, 王海波, 史静. 生物质炭对 Cd 污染土壤根基为团聚体 Cd 形态转化的影响[J]. 环境科学研究, 2018, 31(3): 555-561.
- [33] Li, H.B., Dong, X.L., da Silva, E., *et al.* (2017) Mechanisms of Metal Sorption by Biochars: Biochar Characteristics and Modifications. *Chemosphere*, **178**, 466-478.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2164-5485，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：aep@hanspub.org