

生物炭修复重金属污染土壤对农作物生长影响机制研究进展

李 璞, 盛红坤, 阮佳琪, 谭字江, 李国东*

南开大学滨海学院环境科学与工程系, 天津

收稿日期: 2023年6月19日; 录用日期: 2023年7月20日; 发布日期: 2023年7月27日

摘 要

随着农业生产的不断发展, 土壤重金属污染问题日益严重, 影响着农作物的生长和发展。生物炭修复重金属污染是一种新兴的生态修复技术, 近年来引起了广泛关注。生物炭可以有效改善土壤结构, 增加土壤肥力, 有助于农作物产量质量的提升。本文主要就生物炭修复重金属污染土壤后对于土壤肥力和农作物的影响进行研究综述, 探究具体影响, 以期后续相关学术研究提供理论依据。

关键词

生物炭, 重金属, 土壤肥力, 农作物

Research Progress on the Mechanism of Biochar Remediation of Heavy Metal Contaminated Soil on Crop Growth

Pu Li, Hongkun Sheng, Jiaqi Ruan, Zijiang Tan, Guodong Li*

Department of Environmental Science and Engineering, Nankai University Binhai College, Tianjin

Received: Jun. 19th, 2023; accepted: Jul. 20th, 2023; published: Jul. 27th, 2023

Abstract

With the continuous development of agricultural production, the problem of soil heavy metal pollution is becoming more and more serious, which affects the growth and development of crops. Biochar remediation of heavy metal pollution is an emerging ecological restoration technology,

*通讯作者。

文章引用: 李璞, 盛红坤, 阮佳琪, 谭字江, 李国东. 生物炭修复重金属污染土壤对农作物生长影响机制研究进展[J]. 土壤科学, 2023, 11(3): 146-156. DOI: 10.12677/hjss.2023.113019

which has attracted wide attention in recent years. Biochar can effectively improve soil structure, increase soil fertility, and contribute to the improvement of crop yield and quality. This paper mainly reviews the effects of biochar on soil fertility and crops after remediation of heavy metal-contaminated soil, and explores the specific effects, in order to provide theoretical basis for subsequent academic research.

Keywords

Biochar, Heavy Metal, Soil Fertility, Crop

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

近年来,随着经济和社会的发展,我国土壤重金属污染问题日益受到关注。2014年生态环境部发布的全国土壤污染状况调查公报显示,全国土壤总污染超标率为16.1%,主要为无机型污染类型,其中Pb点位超标率为1.5%。我国农田土壤综合污染率为22.1%,其中重金属污染占绝大部分。我国土壤重金属污染形势严峻,且主要为无机型污染,镉、汞、砷、铜、铅、铬、锌、镍8种无机污染物点位超标率分别为7.0%、1.6%、2.7%、2.1%、1.5%、1.1%、0.9%、4.8% [1]。重金属污染的土壤肥力较差,生长的植物体内重金属含量高,人或动物摄入后,重金属通过食物链进入人体,可能会引发骨密度降低、骨折、机体免疫力下降等症状。

生物炭是含碳生物质在相对低温、有限氧或无氧环境下热解产生的材料,具有比表面积大、含氧官能团丰富、孔隙结构发达、导电性良好等特点[2]。生物炭既能改善土壤性质,影响土壤微生物的丰度和活性,又能降低包括重金属在内的多种污染物的生物有效性,并且在土壤环境中稳定存在,具体影响如表1所示。这些特性使生物炭成为一种廉价高效的土壤修复剂。另一方面,经过生物炭修复后的重金属污染土壤,通过增加土壤持水能力和阳离子交换等使土壤肥力得到改良,促进物质与能量的循环利用[3]。除此之外,通过添加生物炭来改善土壤化学性质与物理特性,引起土壤微生物群落、酶活性变化改善生物体生存环境等,对农作物的生长具有显著影响[4]。

Table 1. Effects of different types of biochar on heavy metals

表 1. 不同类型生物炭对重金属的影响

不同类型土壤	重金属种类	不同种类生物炭	生物炭修复重金属影响
普通重金属污染土壤	Cd	松木生物炭	Cd 的生物有效性降低
酸性土壤	Cd、Cu	杂木生物炭	提高土壤对 Cd 的吸附作用,降低作物中 Cu 的浓度
水稻土	Cd、Zn	稻草生物炭	降低稻谷中 Cd、Zn 浓度
农田土壤	As	水稻秸秆生物炭	提高了 As 的生物有效性
温室土壤	Cd	水稻秸秆生物炭	降低了土壤中 Cd 浓度
酸性红土	Cd	动物粪便生物炭	降低了土壤中 Cd 的可利用率
农业土壤	Pb	蔬菜垃圾生物炭	对 Pb 固定效果好,增加土壤微生物群落
工业土壤	Cu、Pb、Cd	橄榄油废物生物炭	累计去除 Cu、Pb、Cd 等重金属离子的能力超过 50%

2. 重金属污染土壤现状、成因及其危害

2.1. 重金属污染土壤现状

近年来,随着社会经济的快速发展,以及工业和农业相关行业的进步,我国土壤环境面临日益严重的重金属污染问题。根据相关数据,我国每年约有1200万t粮食直接或间接受到重金属污染,导致年均1000多万t粮食减产,经济损失在300亿元以上[5]。2014年《全国土壤污染状况调查公报》显示,土壤中主要的重金属污染元素为汞、镉、铅、砷、铬、镍、铜、锌8种,其点位超标率分别为1.6%、7.0%、1.5%、2.7%、1.1%、4.8%、2.1%、0.9%,说明我国农田土壤重金属污染对农业生态环境安全已经构成了严重威胁。

2.2. 重金属污染土壤成因

人为活动是土壤重金属污染的主要成因。来源可分为三大类,即工业源、农业源和城市生活源。工业源指在燃煤发电、开采冶炼等工业生产过程中的废气、废水和废渣直接或间接进入土壤环境中,以及大部分废弃矿场在雨水冲刷以及自然风化过程中向土壤环境释放矿物质,造成土壤重金属污染。农业源即在部分农业生产活动中,使用含有重金属的水灌溉农田,使得污水中的重金属被转移到土壤中;除此之外,农业生产活动中过量使用化肥和农药以及牲畜排泄物中也含有部分的重金属,长期的不合理使用以及不清洁的卫生情况也会造成土壤重金属污染。城市生活源指含汞电光源、铅酸电池、温度计等常见废弃物中含有重金属,由于这些废弃物被随意丢地,处理不到位,会加重土壤的重金属污染[6](图1)。

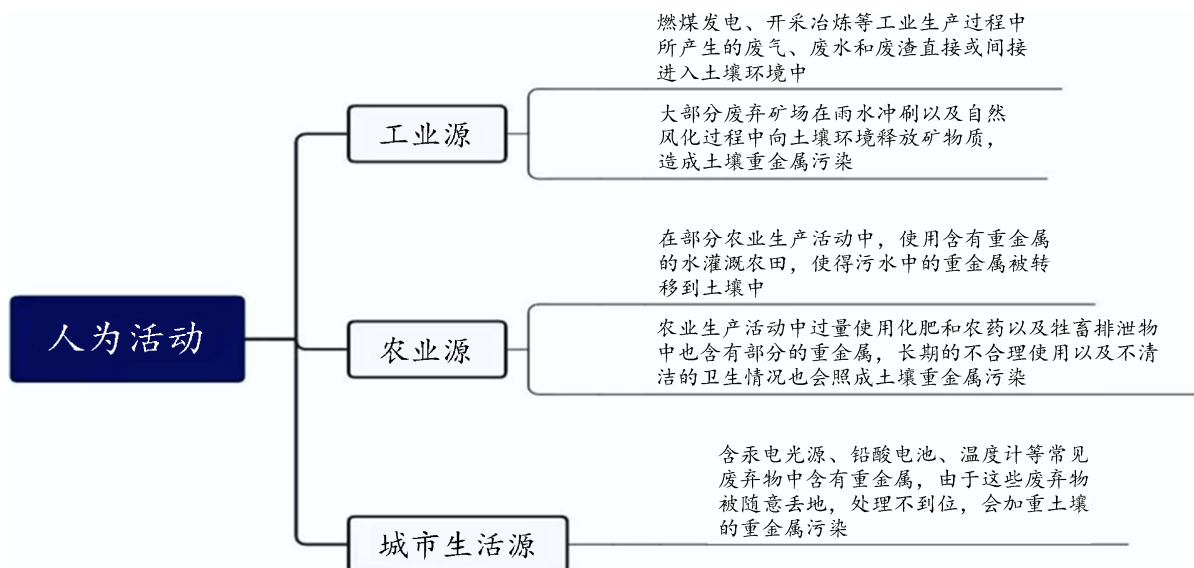


Figure 1. Causes of heavy metal polluted soil
图1. 重金属污染土壤成因

2.3. 重金属污染土壤的危害

众多研究表明,重金属污染物毒性大。一般重金属元素浓度在1~10 mg/L范围内即可产生生物毒性[7],重金属容易随土壤、水体迁移等手段进入农田土壤中,并在土壤中逐渐富集,当土壤中的重金属含量富集到一定浓度时,会造成农田土壤的活性下降,肥力丧失,进而影响到农作物的生长和发育,导致农作物产量与质量下降。重金属污染超标的农作物被食用后,重金属随之进入人体,在人体器官中慢性

积累, 难以排出, 破坏人体生理功能, 对身体健康造成严重危害[8] (图 2)。

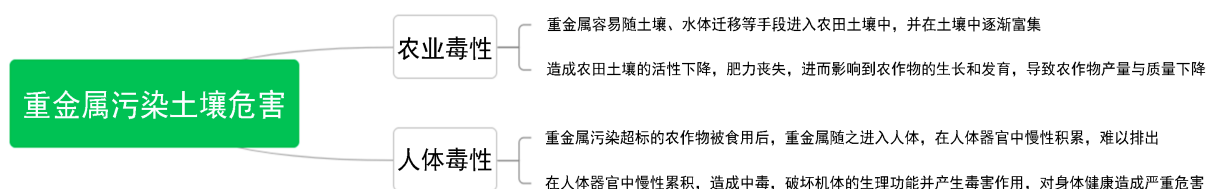


Figure 2. The hazards of heavy metal polluted soil

图 2. 重金属污染土壤的危害

3. 生物炭修复重金属污染土壤

3.1. 生物炭来源及性质

生物炭原料来源广泛, 可采用多种原材料, 一般可分为农业废弃物、木质纤维素两大类。农业废弃物中常见的有农作物秸秆, 如小麦秸秆、水稻秸秆和玉米秸秆等[9], 木质纤维素中常见的有油橄榄、松针和锯末等。生物炭的制备方法包括热裂解、水热炭化、气化以及化学处理。其中, 有研究表明, 改变炭化温度, 不同温度下制备得到的生物炭的吸附、固定重金属能力也各不相同, 其中高温下制备得到的生物炭效果更好[10]。

生物炭主要由芳香烃或具有石墨结构的碳组成, 主要元素有 K、Ca、Na、Mg 等(表 2), 是在缺氧条件下经高温热解将生物质碳化而产生的一种高度芳香化固体物质。其孔隙结构发达、含碳量高、具有较大的比表面积、离子交换能力强和丰富表面含氧官能团, 并且可以在环境中稳定存在[11]。这些特性使生物炭成为了修复重金属污染土壤的一种廉价有效的土地修复剂。近年来多项研究表明, 在农田土壤中添加生物炭后, 不仅作为一种修复重金属污染的修复剂, 还可提高土壤对营养元素的截留, 为农作物提供大量营养, 有益于良性微生物的生长, 进而提高了土壤的有机质含量, 减少了农田土壤肥力的丧失, 并且通过改善土壤持水性, 提高了农作物的产量和质量[12]。

Table 2. Basic properties of biochar

表 2. 生物炭基本性质

生物炭来源	热解温度(°C)	K (g·kg ⁻¹)	Ca (g·kg ⁻¹)	Na (g·kg ⁻¹)	Mg (g·kg ⁻¹)	CEC (cmol·kg ⁻¹)	酸性官能团(mmol·g ⁻¹)
小麦秸秆	450	24	4	-	2	23.7	-
玉米秸秆	450	30.65	2.28	-	0.48	46.3	-
动物粪便	400	26.43	17.25	4.10	10.7	22.19	8.08
柳桉木	550	2.36	21.26	0.73	1.09	9.12	1.49
桉树叶	400	1.74	5.55	1.04	0.76	-	3.05
废水污泥	550	0.09	13.2	0.12	0.36	35	-

3.2. 生物炭修复重金属污染土壤机理

生物炭的比表面积较大, 孔隙结构发达, 拥有丰富的官能团, 可以通过离子交换、静电作用对土壤中的重金属元素进行吸附固定, 降低重金属污染物在土壤中的扩散速度和有毒物质的迁移。生物炭表面具有丰富的含氧官能团, 通过官能团中的氧原子孤电子与重金属离子相结合形成稳定的络合物, 从而对重金属离子进行固定作用。相关研究表明, 生物炭可以和 Cu、Pb、Ag、Al 等发生络合反应进行固定[13]。

3.3. 生物炭对重金属污染土壤的影响

由于土壤环境复杂, 重金属污染稳定性强, 迁移难度大, 生物炭吸附治理土壤中的重金属污染具有突出的优势。

3.3.1. 生物炭对土壤 pH 值的影响

生物炭制备时温度高低的差异, 以及本身灰分中致碱矿物与碳酸盐的影响, 使得生物炭一般呈碱性, 且生物炭本身持有的碱性会直接影响到土壤的 pH 值。尹小红等实验研究表明, 在稻田土壤中施加生物炭会让土壤本身的 pH 值得到极大的提升, 来到了 7.16 [14]。刘元等实验研究发现, 在 pH 值 = 8.30 的潮湿土壤中加入秸秆生物炭后, 土壤本身 pH 值无明显变化[15]。张伟明研究表明, 在土壤中加入生物炭后, 土壤的 pH 值明显降低, 但增加生物炭的浓度, 土壤的 pH 值会明显升高[16]。

3.3.2. 生物炭对土壤养分和有机碳的影响

土壤养分是农作物生长的必备营养元素, 是农作物获得养分的重要途径之一, 包括氮、磷、钾等多重元素。李明等实验研究发现, 在农田土壤中施加生物炭后, 土壤中的有机碳、速效磷和速效钾含量明显提高, 说明土壤养分随生物炭的施加而明显提高[17]。曾爱等实验研究表明, 在农作物生长过程中, 施加生物炭, 土壤中的速效钾含量明显提高[18]。顾美英等实验研究发现, 在低养分的农田土壤中, 加入生物炭, 土壤养分含量得到了显著提升。另外相关研究表明, 在土壤中施加生物炭, 可以有效增加土壤有机碳含量[19]。

3.3.3. 生物炭对土壤中阳离子交换量的影响

土壤肥力的一种体现指标就是土壤阳离子交换量, 阳离子交换量越高, 说明土壤肥力越好。张新帅等和蒋少军等实验研究同时表明, 在施加生物炭之后的土壤与对照土壤相比, 施加生物炭的土壤其阳离子交换量至少增加 50% 以上, 并且生物炭施加量越多, 其阳离子交换量越高[20]。陈红霞等实验研究表明, 在耕层土壤中施加生物炭, 阳离子交换量明显增加, 且效果高于施加化肥的耕层土壤。陈心想等实验研究也表明, 土壤阳离子交换量随生物炭的施加而有所提高, 具体提高幅度为 1.5%~58.2% [21]。

3.3.4. 生物炭对土壤容重的影响

土壤容重可以体现出土质的疏松程度和土壤结构, 以及土壤孔隙的大小, 是表现土壤理化性质的重要指标之一, 土壤容重和疏松程度成反比, 及土壤容重越小土壤越疏松。生物炭的容重很小, 在土壤中施加生物炭, 可以有效降低土壤容重。李玉梅等实验研究很好的证明了这一观点, 在土壤中施加生物炭, 可以有效减小土壤容重, 且施加生物炭越多, 土壤容重降低越平缓[22]。陈红霞等研究也验证了这一观点, 在耕层土壤中施加生物炭, 对于土壤容重具有良好的降低作用, 且生物炭施加量越多, 土壤容重减少的程度越低。

3.3.5. 生物炭对土壤团粒结构和水分的影响

土壤的通气性和保水能力是农作物生长的重要因素。而团粒结构是反映土壤通气性、保水能力的一个关键指标。团粒结构较好的土壤具有多级孔隙, 对于农作物的生长具有良性影响。生物炭比表面积大、孔隙高、容重小的特点, 可以更好优化土壤团粒结构, 进而促进农作物生长。多项研究表明, 添加生物炭可以改善土壤的透水性和保水能力, 进而提升土壤的通透性和保水能力。此外, 张皓钰等实验研究表明, 土壤的持水能力随生物炭的施加而增强, 且持水能力随生物炭的施加而增强, 同时土壤的含水量也随之增加[23]。付玉荣等实验研究表明, 生物炭的施加能够使土壤团粒结构变得更加良好, 提升土壤肥力和含水率, 同时也促进农作物的生长[24] (表 3)。

Table 3. Effect of biochar on heavy metal polluted soil
表 3. 生物炭对重金属污染土壤的影响

影响方面	处理	影响原因	影响效果
土壤 pH 值	稻田土壤中 加入生物炭	生物炭本身灰分中含有致碱矿物与碳酸盐使生物炭一般呈碱性，直接影响到土壤的 pH 值	土壤 pH 值增加，且生物炭浓度增加，土壤 pH 值随之增加
土壤养分和有机碳	农田土壤中 施加生物炭	生物炭可以提高土壤中碱解氮、速效磷和速效钾含量；生物炭可以在不增加土壤中 CO ₂ 释放量的情况下提高土壤有机碳含量	氮、磷、钾等土壤养分增加，土壤有机碳含量增加
土壤中阳离子交换量	耕层土壤中 施加生物炭	生物炭可以增加土壤的阳离子交换量，使土壤保肥能力得到提升	阳离子交换量随生物炭的施放量增加而升高
土壤容重	土壤中施加 生物炭	生物炭本身容重小，在土壤中施加生物炭可以有效降低土壤容重	土壤容重有效降低，降低量随生物炭的施放量逐渐降低
土壤团粒结构和水分	添加生物炭	生物炭孔隙率高、比表面积大、容重小的特点，可以优化土壤团粒结构，提高土壤的透水和通气性。	土壤团粒结构更加良好，含水率升高，提高土壤肥力，促作物生长

4. 施加生物炭后对于土壤肥力和农作物生长的影响

土壤肥力是土壤的重要功能体现，也是土壤的本质属性之一。对于土壤肥力的评价，需要综合考虑土壤的物理、化学和生物指标，其中包括有机碳、氮磷钾含量、微生物生物量和酶活性等。这些指标反映了土壤的营养状况和生物活性水平。根据土壤肥力的综合评价结果，可以得出相应的土壤管理措施，以保证作物的正常生长和高产高质的产量。作物的生长效果与土壤肥力有着密不可分的关系，同时也是评估土壤质量的重要指标。土壤肥力对作物的产量、养分吸收和群体质量等有着直接影响。因此，维持土壤肥力是保证农业生产的重要措施。生物炭的施加被广泛认为是一种有利的提升土壤肥力的方法。通过生物炭的施加，可以充分利用生物质作为生物炭的原料，在保持土壤养分的同时，改善土壤结构和增强土壤通透性。这些改善措施有助于提升土壤肥力和减少养分流失，同时提高作物的养分利用率和生产效益。通过评估土壤肥力的综合指标，采取相应的管理措施，并结合先进的技术手段，可以实现土壤肥力的提升和农业生产水平的不断提高(表 4)。

Table 4. The impact of biochar on crops
表 4. 生物炭对于农作物的影响

作物	土壤类型	生物炭类型	生物炭改良效果
小麦	黑土	松木生物炭	生物质增加，小麦产量增加
小番茄	红壤土	污泥生物炭	番茄果实数量增加，番茄平均株高增加，番茄产量增加
青菜	酸性红壤土	竹竿生物炭	青菜产量提高，株高增加
水稻	水稻土壤	秸秆生物炭	水稻产量逐年增加
玉米	黑土	锯末生物炭	玉米株高、径粗增加，生物量增加
胡椒	凝灰岩混合物土壤	柑橘木生物炭	果实产量相对增加

4.1. 施加生物炭对于土壤中有机碳的影响

有机碳是土壤中至关重要的组成部分，对土壤质量和功能具有核心的影响，对土壤肥力和作物生长有着决定性的条件。而生物炭，作为一种具有丰富有机碳含量的物质，施加到土壤中后能够显著提高土壤有机质含量，从而对土壤产生良好的效果。实验研究表明，在土壤中加入生物炭后，土壤内的有机碳

含量将随着生物炭的加入而逐渐升高,并且达到了显著的线性相关[25]。此外, Park 等人的研究也表明,生物炭在加入土壤后具有固碳作用,同时土壤内的养分也得到了保存,土壤肥力也得到了提升[26]。值得注意的是,研究表明,在不同的土壤中加入不同的生物炭后,有机碳含量增加的幅度也有所不同,并且达到了显著的差异。有时,有机碳增加量能够从 40%到 240%不等,因此应根据具体情况来选择适合的生物炭进行施用,以达到最优的效果。

4.2. 施加生物炭对于土壤中氮磷钾含量的影响

土壤的氮含量是作物生长和发育所需要的营养元素之一,也是作物可以从土壤中吸收量最大的矿质元素。相关研究表明在土壤中施加生物炭可以吸附土壤中的氮元素,减少土壤中氮元素的损失量。许超等的实验研究表明,随土壤中的生物炭含量增加,土壤中氮元素的损失量大幅减少,能够有效固定土壤中的氮元素[27]。李敏等实验研究发现,与对照植株相比,加入生物炭之后的植株中氮元素含量均有不同程度的提高[28]。

磷是作物生长发育所需要的必要营养元素之一,是作物生长代谢过程中不可缺少的一环。Zhang 等实验研究表明在土壤中加入生物炭后,磷的吸附量有所提升,作物可吸收利用的磷含量也随之增高。相关研究表明,土壤中施加生物炭,土壤对磷的吸附有所增加,磷的有效性也得到加强,且有效磷的浓度随之增加[29]。Wang 等实验研究发现,通过不同的生物炭加入土壤后,生物炭基本完全回收了原料中的磷元素,土壤中总磷的含量随之增加[30]。

钾是土壤中含有最高的营养元素,且作物生长发育所需要的钾元素主要来自于土壤。相关研究表明生物炭较高的阳离子交换能力让土壤中钾元素的浸出大大减少,从而提高了土壤中钾元素的含量。彭启超等实验研究证明了施加生物炭可以有效促进速效钾的转换,使得土壤中的钾含量得到提升。Jassal 等研究表明生物炭可以让阳离子的吸附量远远超过其阳离子交换量,达到增加土壤中钾含量的目的[31]。

因此,生物炭的施加可以对土壤中的氮、磷、钾元素的吸附、固定及有效性产生积极影响,有助于提高农作物的生长发育和产量。

4.3. 施加生物炭对于土壤中微生物生物量的影响

土壤微生物是土壤生态系统中不可或缺的重要组成部分,它们在作物的生长发育和土壤内部营养循环中起着至关重要的作用,直接或间接地影响着作物的生长。近年来,经过众多的研究表明,在不同类型的土壤中加入生物炭可以显著增加土壤微生物生物量。一项由张又驰等人进行的实验研究表明,在土壤中加入生物炭,生物炭通过改变土壤的理化性质,使得土壤微生物生物量得到了增加[32]。而另一项由李会丹等人进行的实验则证实了,加入生物炭可以通过生物炭自身的多孔隙结构和较大的比表面积直接或间接增加土壤中微生物的生物量。综合这些实验结果可以发现,加入生物炭可以显著增加土壤中微生物的数量和活性。这是因为生物炭能够改善土壤的化学性质和物理性质,提高土壤的通气性和保水性,从而创造更有利于微生物生存和活动的生态环境。此外,生物炭的多孔隙结构和大比表面积也能够增加微生物在土壤中的栖息空间和吸附表面,提高土壤微生物的生物量和生物多样性。

4.4. 施加生物炭对于土壤中酶活性的影响

土壤中的酶主要来自于土壤微生物,而酶活性可以很好地反映土壤中物质代谢的强弱,以及作物对土壤养分的吸收利用状况。最近的一些研究发现,添加生物炭可以显著地增加土壤中的酶活性。在一项实验研究中,黄剑等人发现,在土壤中添加生物炭可以显著增加土壤中的酶活性[33]。而另一项由朱倩等人进行的实验则表明,在施加生物炭后,土壤中的酶活性明显提高,这也证明了生物炭可以促进土壤中微生物的生长和代谢活动[34]。此外, Oleszczuk 等人的研究结果也显示,在土壤中施加生物炭后,过氧

化氢酶、脲酶、蛋白酶和酸性磷酸酶等酶活性均有所提升[35]。这些结果表明，在土壤中添加生物炭可以增强土壤微生物的活性，从而改善土壤的质量和营养成分，增加作物的产量和品质。

4.5. 施加生物炭对于作物产量的影响

作物产量是评估土壤质量和作物生长情况的重要指标之一，而添加生物炭可以有效地提高作物产量和品质。最新研究表明，土壤中添加生物炭可以显著提高作物的产量，同时提升作物质量。例如，Jeffery 等的研究证明，添加生物炭后的土壤可以提高作物的产量，平均增产可达到 10% [36]。Jin 等的研究也表明，随着生物炭施用量的增加，作物产量会相应地提高。此外，唐春双等在他们的实验中发现，添加生物炭处理后的土壤中，作物产量显著高于不添加生物炭的土壤，平均产量提高 25% [37]。综上所述，添加适量的生物炭是一种非常有效的方法，可以提高作物产量和质量，对于土壤的改良具有非常重要的意义。

4.6. 施加生物炭对于作物养分吸收的影响

作物的养分吸收是作物生长发育不可或缺的重要环节。添加生物炭是一种能够促进作物吸收氮、磷、钾等养分的有效方法。最新研究表明，加入生物炭可以显著提高土壤中氮、磷、钾等元素的含量，促进作物对于养分的吸收和利用。例如，Zheng 等的研究表明，添加生物炭可以提高作物对氮元素的利用效率，从而提高土壤中氮元素的生物利用度[38]。康日峰等的研究也证实了通过添加生物炭可以促进作物对磷元素的吸收，进而显著提高作物干重。此外，众多研究还表明，在缺乏养分的土壤中添加生物炭，能够显著提高作物对氮、磷、钾等元素的吸收量[39]。综上所述，添加适量的生物炭是一种非常有效的方法，可以提高土壤中养分含量，促进作物对养分的吸收利用，从而提高作物的产量和质量。

4.7. 施加生物炭对于作物群体质量的影响

通过施加生物炭可以显著促进作物的生长和发育，对作物的群体质量影响效果非常显著。最新的研究成果表明，通过在土壤中添加生物炭可以显著提高种子的萌发和存活率，最佳添加量为 0%~10% (W/W%) [40]。此外，在育苗阶段添加生物炭不仅可以显著提高作物的株高和干物质积累量，还可以增强

Table 5. Effects of applying biochar on soil fertility and crop growth

表 5. 施加生物炭后对于土壤肥力和农作物生长的影响

影响方面	处理	影响原因	影响效果
土壤中有 机碳	施加生 物炭	生物炭本身含有丰富有机碳含量，加入土壤中具有固碳作用	提高土壤有机质含量；固碳；提升土壤肥力；增加有机碳含量
土壤中氮 磷钾含量	施加生 物炭	生物炭减少土壤中氮元素的损失量；增加土壤中磷的吸附量；减少土壤中钾元素的浸出	土壤中有效固定氮元素增加，氮元素含量提高；土壤中磷的有效性增加，有效磷浓度增加；促进土壤中速效钾的转换，钾含量提升
土壤中微 生物量	施加生 物炭	生物炭自身的多孔隙结构和较大的比表面积直接或间接增加土壤中微生物的生物量	提高土壤微生物的生物量和生物多样性
土壤中酶 活性	施加生 物炭	生物炭可以促进土壤中微生物的生长和代谢活动	土壤中酶活性增加
作物产量	施加生 物炭	生物炭可以增强土壤微生物的活性，从而改善土壤的质量和营养成分	提高作物产量和品质
作物养分 吸收	施加生 物炭	生物炭可以提高土壤中氮、磷、钾等元素的含量	促进作物对养分的吸收利用，提高作物的产量和质量
作物群体 质量	施加生 物炭	生物炭可以显著提高种子的萌发和存活率，提高作物的株高和干物质积累量，增强作物的光合作用效率	帮助作物更好地生长和发育，同时提高作物的产量和质量

作物的光合作用效率, 加强光能的转化和稳定性。最后, 添加生物炭还可以促进作物根系的生长, 提高根系的总吸收面积和活跃吸收面积, 同时延缓根系的衰老。总的来说, 施加适量生物炭是一种非常有效的方法, 可以帮助作物更好地生长和发育, 同时提高作物的产量和质量(表 5)。

5. 结论

生物炭具有吸附和固定养分、改善土壤质地、保水保肥、调节土壤温度、调节土壤 pH 值等多种作用。除了减少土壤中重金属污染物的含量, 生物炭还在促进土壤有机质和微生物的生长发挥着重要作用, 从而改善了土壤的肥力和土壤环境, 对农作物的生长和发展也产生了积极的影响。

1) 在生物炭修复重金属污染的土壤中, 生物炭可以吸附大多数的重金属离子, 从而降低土壤中重金属离子的浓度, 减轻重金属对农作物的毒害。同时, 有机质的存在可以促进土壤微生物群落的丰富和活跃, 增加有利菌株的数量, 改善土壤结构和物理性质, 提高土壤持水保肥能力, 为农作物的生长和生产提供了更为优良的土壤环境。

2) 生物炭对土壤养分的吸附、解吸、固定、交换和中和作用等产生显著影响。在生物炭的作用下, 土壤中的养分能够得到有效吸收利用并得以保持, 使得农作物实现优质高产的生长和发展。此外, 生物炭作为一种浅根农作物的良好生长介质, 能够增进土壤与根系间的互惠互利关系, 改善根系的生态环境, 增强农作物根系的吸收能力, 并提高养分利用效率, 有效地增加了农作物的产量和品质。

3) 生物炭是解决土壤肥力的重要途径之一, 提高土壤肥力、提高农作物产量质量, 具有广阔的行业前景。但也存在一些不足之处, 如生物炭的差异性不同, 导致应用在土壤中得到反馈也有所不同; 生物炭没有系统性的研究与应用技术, 反馈效果不能有所保障。因此, 需要进一步通过系统性和科学性对生物炭进行深入研究, 以及针对生物炭对于土壤肥力和农作物生长机制的影响效果研究。

基金项目

2022 年大学生创新创业训练计划项目, 项目编号: 202213663001。

参考文献

- [1] 中华人民共和国环境保护部和国土资源部. 《全国土壤污染状况调查公报》[R]. 2014.
- [2] 刘天, 云菲, 蒋伟峰, 等. 农田施用生物炭的固碳减排效应及其影响因素综述[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(18): 7-13.
- [3] 袁帅, 赵立欣, 孟海波, 等. 生物炭主要类型、理化性质及其研究展望[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(5): 1402-1417.
- [4] Zhang, J., Hu, H., Wang, M., et al. (2021) Land Application of Sewagesludge Biochar: Assessments of Soil-Plant-Human Health Risks from Potentially Toxic Metals. *Science of the Total Environment*, **756**, Article ID: 144137. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144137>
- [5] 罗玉虎, 孙婴婴, 王楠. 生物炭修复土壤重金属污染的研究进展[J]. 西部大开发(土地开发工程研究), 2019, 4(1): 28-35.
- [6] 串丽敏, 赵同科, 郑怀国, 等. 土壤重金属污染修复技术研究进展[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(120): 213-222.
- [7] 李威. 土壤重金属污染危害及微生物修复[J]. 现代农村科技, 2021(8): 99-100.
- [8] 周雄. 农田土壤重金属污染钝化修复技术研究进展[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2017(11): 224.
- [9] 李昌文, 等. 玉米芯的综合利用研究技术进展[J]. 食品研究与开发, 2015, 36(15): 139-142, 143.
- [10] 厉悦, 李湘洲, 刘敏. 稻壳基活性炭制备及表征[J]. 中南林业科技大学学报, 2007, 27(6): 183-186.
- [11] 陈志良, 袁志辉, 黄玲, 等. 生物炭来源、性质及其在重金属污染土壤修复中的研究进展[J]. 生态环境学报, 2016, 25(11): 1879-1884.
- [12] 马献发, 李伟彤, 孟庆峰, 等. 生物炭对土壤重金属形态特征及迁移转化影响研究进展[J]. 东北农业大学学报,

- 2017, 48(6): 82-90.
- [13] Chen, J.Y., Zhu, D.Q. and Sun, C. (2007) Effect of Heavy Metals on the Sorption of Hydrophobic Organic Compounds to Wood Charcoal. *Environmental Science & Technology*, **41**, 2536-2541. <https://doi.org/10.1021/es062113+>
- [14] 尹小红, 陈佳娜, 雷涛, 等. 生物炭对土壤化学性质及水稻苗期生长的影响[J]. 中国稻米, 2021, 27(5): 90-92.
- [15] 刘园, Jamal Khan, M., 靳海洋, 等. 秸秆生物炭对潮土作物产量和土壤性状的影响[J]. 土壤学报, 2015, 52(4): 849-858.
- [16] 张伟明. 生物炭的理化性质及其在作物生产上的应用[D]: [博士学位论文]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2012.
- [17] 李明, 李忠佩, 刘明, 等. 不同秸秆生物炭对红壤性水稻土养分及微生物群落结构的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(7): 1361-1369.
- [18] 曾爱, 廖允成, 张俊丽, 等. 生物炭对壤土土壤含水量、有机碳及速效养分含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(5): 1009-1015.
- [19] 顾美英, 刘洪亮, 李志强, 等. 新疆连作棉田施用生物炭对土壤养分及微生物群落多样性的影响[J]. 中国农业科学, 2014, 47(20): 4128-4138.
- [20] 张新帅, 张红宇, 黄凯, 等. 石灰与生物炭对矿山废水污染农田土壤的改良效应[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(3): 481-491.
- [21] 陈红霞, 杜章留, 郭伟, 等. 施用生物炭对华北平原农田土壤容重、阳离子交换量和颗粒有机质含量的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(11): 2930-2934.
- [22] 李玉梅, 王根林, 李欣洁, 等. 生物炭对土壤物理现状及异噁草松消减的影响[J]. 生态学杂志, 2014, 33(3): 729-734.
- [23] 张皓钰, 刘竞, 易军, 等. 生物质炭短期添加对不同类型土壤水力性质的影响[J]. 土壤, 2022, 54(2): 396-405.
- [24] 付玉荣, 张衍福, 刘凯, 等. 生物炭对冬小麦土壤理化性质和产量的影响[J]. 济南大学学报, 2022, 36(1): 38-44, 55.
- [25] 邱建军, 王立刚, 李虎, 等. 农田土壤有机碳含量对作物产量影响的模拟研究[J]. 中国农业科学, 2009, 42(1): 154-161.
- [26] Park, J.H., Choppala, G.K., Bolan, N.S., *et al.* (2011) Biocharreduces the Bio-Availability and Phytotoxicity of Heavy metals. *Plant and Soil*, **348**, 439-451. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-0948-y>
- [27] 许超, 林晓滨, 吴启堂, 等. 淹水条件下生物炭对污染土壤重金属有效性及养分含量的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(6): 194-198.
- [28] 李敏, 韩上, 武际, 陈峰, 等. 农作物秸秆炭化后养分变化及还田效应研究[J]. 中国农学通报, 2019, 35(16): 95-99.
- [29] Zhang, C.S., Lin, Y., Tian, X.Y., *et al.* (2017) Tobacco Bacterial Wilt Suppression with Biochar Soil Addition Associates to Improved Soil Physicochemical Properties and Increased Rhizosphere Bacteria Abundance. *Applied Soil Ecology*, **112**, 90-96. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2016.12.005>
- [30] Wang, T., Camps-Arbestain, M., Hedley, M., *et al.* (2012) Predicting Phosphorus Bioavailability from High-Ash Biochars. *Plant and Soil*, **357**, 173-187. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1131-9>
- [31] Jassal, R.S., Johnson, M.S., Molodovskaya, M., *et al.* (2015) Nitrogen Enrichment Potential of Biochar in Relation to Pyrolysis Temperature and Feedstock Quality. *Journal of Environmental Management*, **152**, 140-144. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.01.021>
- [32] 张又弛, 李会丹. 生物炭对土壤中微生物群落结构及其生物地球化学功能的影响[J]. 生态环境学报, 2015(5): 898-905.
- [33] 黄剑. 生物炭对土壤微生物量及土壤酶的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国农业科学院, 2012.
- [34] 朱倩, 周之栋, 施毅, 等. 施用生物炭基肥对喀斯特石灰土磷元素特性的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(11): 4037-4044.
- [35] Oleszczuk, P., Joško, I., Kuśmierz, M., *et al.* (2014) Microbiological, Biochemical and Ecotoxicological Evaluation of Soils in the Area of Biochar Production in Relation to Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Content. *Geoderma*, **213**, 502-511. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.08.027>
- [36] Jeffery, S., Verheijen, F.G., Der Velde, M.V., *et al.* (2011) A Quantitative Review of the Effects of Biochar Application to Soils on Crop Productivity Using Meta-Analysis. *Agriculture Ecosystems and Environment*, **144**, 175-187. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.08.015>
- [37] 唐春双, 杨克军, 李佐同, 等. 生物炭对玉米茎秆性状及产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2016(3): 93-97.

- [38] Zheng, H., Wang, Z.Y., Den, X., *et al.* (2013) Impacts of Adding Biochar on Nitrogen Retention and Bioavailability in Agricultural Soil. *Geoderma*, **206**, 32-39. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.04.018>
- [39] 康日峰, 张乃明, 史静, 等. 生物炭基肥料对小麦生长、养分吸收及土壤肥力的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2014(6): 33-38.
- [40] Anyanwu, I.N., Alo, M.N., Onyekwere, A.M., *et al.* (2018) Influence of Biochar Aged in Acidic Soil on Ecosystem Engineers and Two Tropical Agricultural Plants. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **153**, 116-126. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.02.005>