

生物质炭对马铃薯农田土壤养分及产量的影响

林鹭军¹, 蔡立群^{1,2*}, 潘占东¹

¹甘肃农业大学资源与环境学院, 甘肃 兰州

²甘肃农业大学甘肃省干旱生境作物学国家重点实验室, 甘肃 兰州

收稿日期: 2023年10月17日; 录用日期: 2023年12月20日; 发布日期: 2023年12月29日

摘要

为探究生物质炭对马铃薯农田土壤养分及产量的影响, 试验地位于陇中黄土高原地区, 以连作马铃薯农田为研究对象, 设置5个施肥处理: 不添加有机肥(CK)、常规施肥(F)、添加生物质炭2250 kg·hm⁻² (BC1)、添加生物质炭4500 kg·hm⁻² (BC2)、添加生物质炭6750 kg·hm⁻² (BC3)。采集马铃薯块茎膨大期和成熟期两个时期土壤样品, 测定0~5 cm、5~10 cm和10~30 cm土层的土壤有机质、全量氮磷钾、有效态氮磷钾和pH等土壤指标, 结合方差分析, 探究马铃薯产量显著提高时最佳生物质炭施肥量。结果表明: 施用6750 kg·hm⁻²的生物质炭时, 10~30 cm土层中有机质、碱解氮含量最高, 较CK分别显著增加49.51%、34.34%; 0~5 cm土层有效磷、全钾含量最高, 分别显著增加38.40%、38.49%; 5~10 cm土层速效钾含量最高, 显著增加14.98%, 马铃薯产量达最高, 为4359.62 kg·hm⁻²。因此, 施用生物质炭不但可以提高土壤养分, 亦能促产增收。

关键词

生物质炭, 马铃薯, 土壤理化性状, 产量

Effects of Biochar on Soil Nutrients and Yield in Potato Fields

Lujun Lin¹, Liqun Cai^{1,2*}, Zhandong Pan³

¹College of Resources and Environmental Sciences, Gansu Agricultural University, Lanzhou Gansu

²Gansu Provincial Key Laboratory of Arid Land Crop Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou Gansu

Received: Oct. 17th, 2023; accepted: Dec. 20th, 2023; published: Dec. 29th, 2023

Abstract

To explore the effects of biochar on soil nutrients and yield of potato farmland. In the experiment, the potato continuous cropping model was adopted, and the semi-arid potato farmland in the

*通讯作者。

Longzhong Loess Plateau was taken as the research object, and 5 fertilization treatments were set: Do not add organic fertilizer (CK), conventional fertilization (F), add biochar 150 kg.C/mu (BC1), add biochar 300 kg¹C/mu (BC2), add biochar 450 kg.C/mu (BC3). Soil samples were collected at two periods of potato tuber expansion stage and maturity stage. Many soil indexes in 0~5 cm, 5~10 cm and 10~30 cm soil layers were determined. Combined with variance analysis, the optimal biomass charcoal fertilizer amount was explored when potato yield was significantly increased. The results showed that when 450 kg.C/mu of biochar was applied, the contents of organic matter and alkali-hydrolyzed nitrogen in 10~30 cm soil layer were the highest, which significantly increased by 49.51% and 34.34% compared with CK, respectively. The content of available P and total K in 0~5 cm soil layer was the highest, which increased significantly by 38.40% and 38.49%, respectively. The content of available potassium in 5~10 cm soil layer was the highest, which increased significantly by 14.98%, and the potato yield was the highest, which was 4359.62 kg·hm⁻². Therefore, the application of biochar can not only improve soil nutrients, but also promote yield and income.

Keywords

Biomass Charcoal, Potato, Soil Physical and Chemical Properties, Output

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

生物质炭是由生物质经热解产生的一种高度芳香化含碳固体化合物[1] [2]。其中, 碳含量占 50%~90%, 水分约 1%~15%, 挥发性物质约 40%, 矿物质约 5%, 灰分中存在植物生长所需的多种元素[3]。元素含量的高低由生物质原料的类型决定[4], 一般的生物质如木材、农田农作物残余物或动物骨骼等。生物质炭具有大的孔隙度和比表面积, 表面负电荷较多, 电荷密度高[5], 使其能够有稳定性良好、吸附性较强的特性, 可以提高土壤离子交换量, 增强土壤养分的吸附作用, 减少养分淋溶, 提高肥料利用率[6]。改善土壤结构能够为微生物提供良好的生存环境。另外, 提高土壤有机碳含量, 降低土壤容重。通过增加通气性和土壤持水率, 减小水分渗透速度, 增强土壤保墒、中和土壤酸化, 为提升地上部分生产力和作物产量。

马铃薯(*Solanum tuberosum*)是陇中黄土高原常见的农作物, 其耐寒旱、耐贫瘠, 适应性强。目前马铃薯产业链带动当地农业农村发展, 促进农民增收, 获得较好的经济效益。但马铃薯扩大生产后, 存在连作障碍减产、马铃薯枯萎病的发生、化肥的不合理配施以及土壤肥力降低等诸多问题, 严重影响到该产业的稳定可持续发展。众多学者发现马铃薯的生长发育水平降低[7]、物质代谢与能量转化失衡[8]都会导致连作模式下的马铃薯产量下降[9]。此外, 马铃薯长期连作种植会导致土壤养分减少、土壤结构发生变化、微生物群落多样性降低, 致使作物对养分的吸收利用率较低, 继而对马铃薯生长发育产生不良影响[10]。生物质炭作为一种土壤改良剂, 能够提高养分含量, 进而提高土壤肥力利用率。本实验通过分析生物质炭施肥对陇中黄土高原地区马铃薯农田土壤养分及产量的影响, 探究生物质炭对马铃薯农田土壤肥力的改善作用, 旨在为寻求生物质炭合理施用与马铃薯增产提供技术支持和理论支撑。

2. 材料与方法

2.1. 试验区概况

试验地位于陇中黄土高原半干旱丘陵沟壑区, 在甘肃省定西市李家堡镇麻子川村进行。该地区平均

海拔为 2000 m, 年平均日照时间 2476.6 h, 年平均气温 6.5°C, 近年降雨量 390.9 mm。土壤为黄绵土, 土层绵软深厚, 质地均匀, 储水性能较好。试验地土壤基本理化性状见表 1。

Table 1. Basic indexes of soil before sowing

表 1. 播前土壤基本指标

pH	有机质/g·kg ⁻¹	全氮/g·kg ⁻¹	全磷/g·kg ⁻¹	全钾/g·kg ⁻¹	碱解氮/mg·kg ⁻¹	有效磷/mg·kg ⁻¹	速效钾/mg·kg ⁻¹
8.22	12.15	0.83	0.71	17.86	35.62	14.38	100.40

2.2. 试验设计

试验于 2022 年 5 月开展, 随机区组设计 5 种施肥处理 3 次重复, 共 15 个小区, 小区面积为 $6 \times 8 = 48 \text{ m}^2$, 具体处理方式见表 2。供试作物为‘陇薯 11 号’, 遵循定西当地传统耕作生产方式, 种植前用定桩和量尺等工具规划小区, 并以起垄的方式间隔, 于 5 月上旬在播种前施肥, 全部作底肥, 撒施后再覆膜耕作, 并以点作方式种植, 起播量为 $187.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 行距 50 cm, 株距为 25 cm, 于 10 月上旬收获, 收获后三耕两耨。供试生物质炭为秸秆生物质炭, 购于商丘三汇贸易有限公司, 其碳含量为 45.68%, 氮含量为 1.04%。

Table 2. Fertilization treatment methods

表 2. 施肥处理方式

处理(代码)	有机物料添加方法
CK	不添加有机物料
F	常规施肥: 每年施纯氮($180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 纯 P_2O_5 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)
BC1	添加生物质炭: 每年添加 $2250 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 根据生物质炭中的碳含量计算施用量。
BC2	添加生物质炭: 每年添加 $4500 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 根据生物质炭中的碳含量计算施用量。
BC3	添加生物质炭: 每年添加 $6750 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 根据生物质炭中的碳含量计算施用量。

2.3. 土壤样品采集、制备

依次在 2022 年 7 月中旬和 10 月初采样。于每一块实验小区的块茎膨大期采集 0~30 cm (分别是 0~5、5~10、10~30 cm) 土壤样品, 成熟期采集 0~30 cm (分别是 0~5、5~10、10~30 cm) 土壤样品, 在室温下风干过筛后测定土壤养分。并在成熟期称量马铃薯产量。

2.4. 测定方法

土壤测定方法见表 3。

Table 3. Soil measurement methods

表 3. 土壤测定方法

测定项	实验方法	测定项	实验方法
pH	pH 计(水土比为 2.5:1)	有机质	$\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7\text{-H}_2\text{SO}_4$ 外加热法
全氮	浓 H_2SO_4 消煮 - 半微量凯氏定氮法	碱解氮	碱解氮扩散法
全磷	NaOH 熔融 - 钼锑抗比色法	有效磷	$0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{NaHCO}_3$ 钼锑抗比色法
全钾	火焰光度计法	速效钾	火焰光度计法

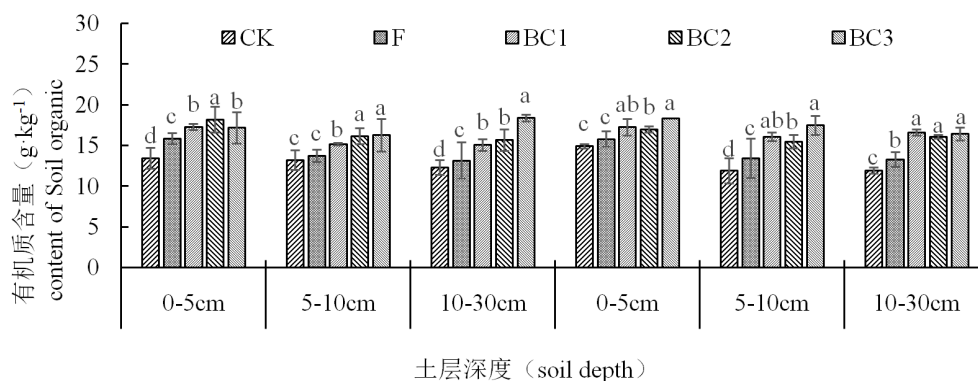
2.5. 数据处理

试验数据的整理和图表的绘制用 Excel 2016 软件处理, 用 SPSS16.0 软件对土壤养分含量数据进行方差分析。

3. 结果与分析

3.1. 生物质炭对土壤有机质含量的影响

生物质炭对两个时期不同土层土壤有机质含量的影响见图 1。在马铃薯块茎膨大期, 随着施用生物质炭量的增加, 0~5 cm 土层有机质变化规律呈现先升高后降低的趋势, 而在 5~10 cm 和 10~30 cm 土层中, 有机质含量则呈现持续增加的趋势。在 0~5 cm 土层中, BC2 施肥处理的土壤有机质含量最高, 相较于 CK 有机质含量显著增加 35.12%; 在 5~10 cm 和 10~30 cm 土层中, 施用 BC3 处理的土壤有机质含量最高, 相比 CK 分别显著增加 23.07%、49.51%; 然而当进入马铃薯成熟期时, 不同土层的有机质含量随着生物质炭施肥量的增加, 均呈现先下降后上升的趋势。在 0~5 cm 和 5~10 cm 土层中, 施用 BC3 处理的土壤有机质含量最高, 相比于 CK 分别显著增加 22.97%、46.89%; 在 10~30 cm 土层中, 则是 BC1 处理下的土壤有机质含量最高, 较 CK 显著增加 39.31%。



注: 图中柱子高度表示平均值±标准差(n = 3)。小写字母表示土壤养分在同一土层不同生物质炭施肥处理间的差异显著($p < 0.05$), 下同。

Figure 1. Effects of biochar on soil organic matter content in different soil layers in two periods

图 1. 生物质炭对两个时期不同土层土壤有机质含量的影响

3.2. 生物质炭对土壤全氮含量的影响

生物质炭对两个时期不同土层土壤全氮含量的影响见图 2。在马铃薯块茎膨大期, 不同土层全氮含量随着生物质炭施肥量增加而增加。不同土层中均是 F 处理下的土壤全氮含量最高, 较 CK 分别显著增加 30.63%、25.00%和 24.24%。而在马铃薯成熟期, 随生物质炭施肥量增加, 0~5 cm 土层土壤全氮含量随之增加, 5~10 cm 和 10~30 cm 土层土壤全氮含量呈现先降低后增高的趋势。不同土层中依旧是 F 处理下的土壤全氮含量最高, 较 CK 分别显著增加 30.77%、31.63%和 32.61%。

3.3. 生物质炭对土壤碱解氮含量的影响

生物质炭对两个时期不同土层土壤碱解氮含量的影响见图 3。在马铃薯块茎膨大期, 不同土层碱解氮含量与生物质炭施肥量呈现正相关关系。在 0~5 cm 和 5~10 cm 土层中, 都是施用 BC3 处理的土壤碱解氮含量最高, 相较于 CK 分别显著增加 31.19%、28.44%; 在 10~30 cm 土层中, BC1 施肥处理的土壤碱解氮含量最高, 较 CK 显著增加 28.52%。马铃薯成熟期时, 不同土层碱解氮含量随生物质炭施肥量的

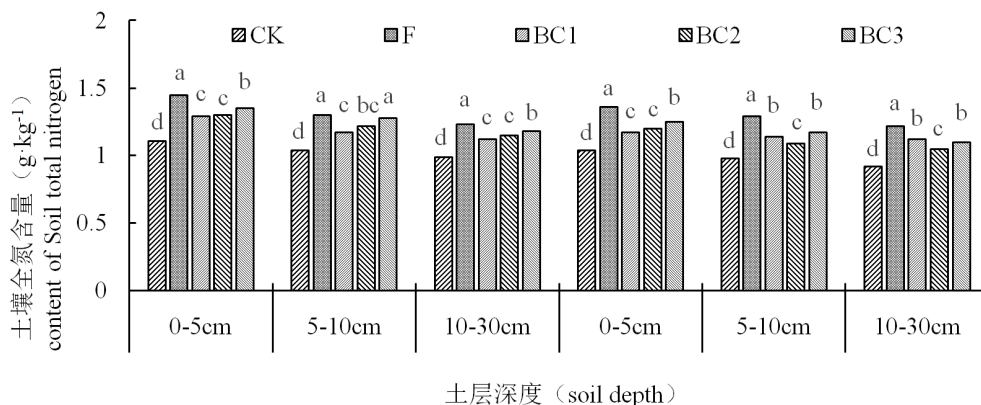


Figure 2. Effects of biochar on soil total nitrogen content in different soil layers in two periods

图 2. 生物质炭对两个时期不同土层土壤全氮含量的影响

增加而增加，并且不同土层均在 BC3 处理下表现出土壤碱解氮含量最高的结果，较 CK 分别显著增加 31.04%、32.53%和 34.34%。

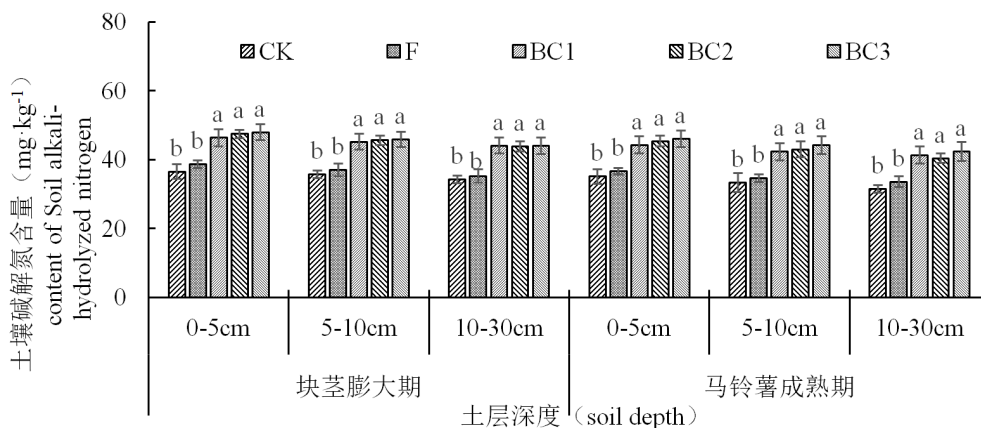


Figure 3. Effects of biochar on soil alkali-hydrolyzed nitrogen content in different soil layers in two periods

图 3. 生物质炭对两个时期不同土层土壤碱解氮含量的影响

3.4. 生物质炭对土壤全磷含量的影响

生物质炭对两个时期不同土层土壤全磷含量的影响见图 4。在马铃薯块茎膨大期，随着生物质炭施肥量增加，0~5 cm 土层全磷含量变化规律呈现先减少后增加的趋势，5~10 cm 土层表现为增加趋势，10~30 cm 土层呈现为先升高后降低的趋势，不同土层均为 F 处理下的土壤全磷含量最高，较 CK 分别显著增加 34.12%、36.84%和 37.93%；马铃薯成熟期时，不同土层全磷含量均随生物质炭施肥量增加而增加。不同土层都是 F 处理下全磷含量最高，较 CK 分别显著增加 45.16%、32.79%和 35.59%。

3.5. 生物质炭对土壤有效磷含量的影响

生物质炭对两个时期不同土层土壤有效磷含量的影响见图 5。在马铃薯块茎膨大期，随着施用生物质量的增加，0~5 cm 土层有效磷含量随之增加，而 5~10 cm、10~30 cm 土层有效磷含量表现为先增加后减少的变化趋势。在 0~5 cm 土层中，施用 BC3 处理的土壤有效磷含量最高，较之于 CK 显著增加 38.40%。在 5~10 cm 和 10~30 cm 土层中，BC2 施肥处理下的土壤有效磷含量最高，相比于 CK 分别显著增加 31.86%、24.28%；马铃薯成熟期时，不同土层有效磷含量均随生物质炭施肥量增加而增加，均在施用 BC3

处理下表现为土壤有效磷含量最高, 相对于 CK 来说, 分别显著增加 31.34%、31.13% 和 31.88%。

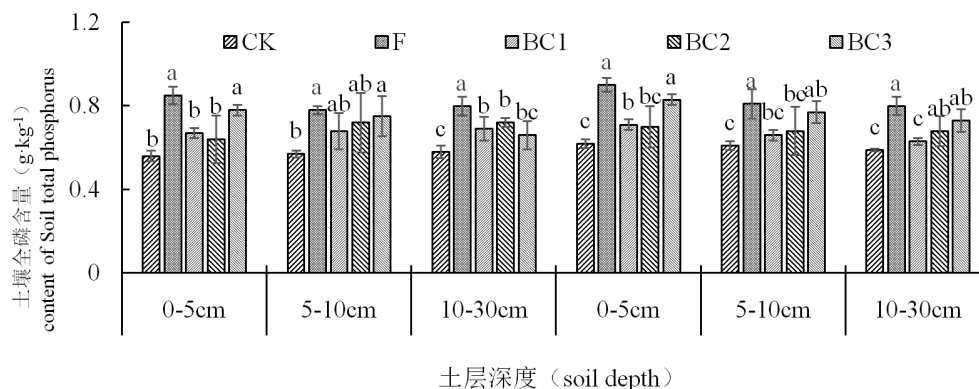


Figure 4. Effects of biochar on soil total phosphorus content in different soil layers in two periods

图 4. 生物质炭对两个时期不同土层土壤全磷含量的影响

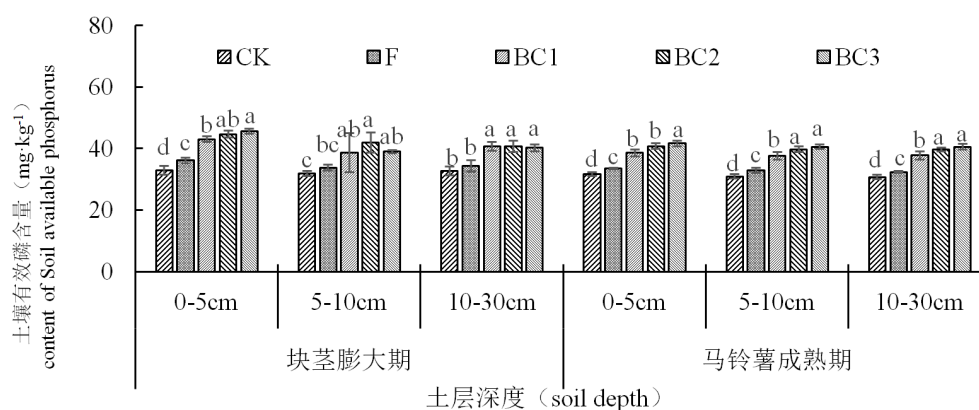


Figure 5. Effects of biochar on soil available phosphorus content in different soil layers in two periods

图 5. 生物质炭对两个时期不同土层土壤有效磷含量的影响

3.6. 生物质炭对土壤全钾含量的影响

生物质炭对两个时期不同土层土壤全钾含量的影响见图 6。在马铃薯块茎膨大期, 不同土层土壤全钾含量均随生物质炭施肥量增加而增加。不同土层均在 BC3 处理下土壤全钾含量最高, 较 CK 分别显著

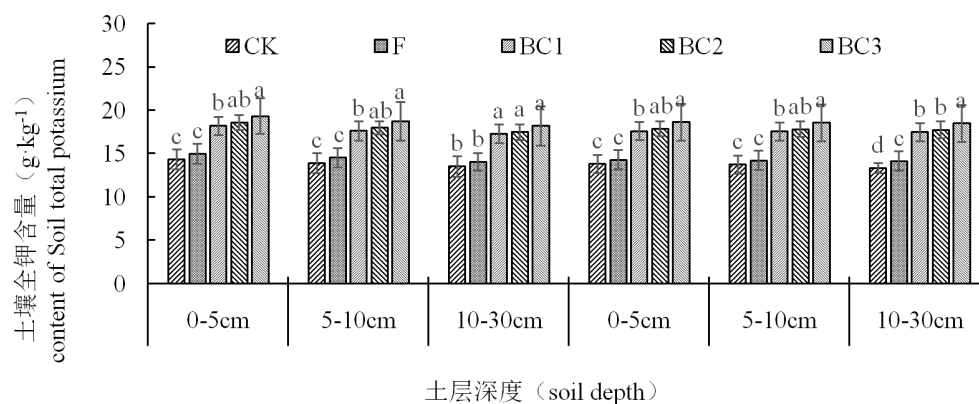


Figure 6. Effects of biochar on soil total potassium content in different soil layers in two periods

图 6. 生物质炭对两个时期不同土层土壤全钾含量的影响

增加 34.44%、34.38%和 34.44%；马铃薯成熟期时，同样是不同土层土壤全钾含量均随生物质炭施肥量增加而增加。在 BC3 施肥处理下不同土层均表现出土壤全钾含量最高的结果，较 CK 处理分别显著增加 34.83%、35.08%、38.49%。

3.7. 生物质炭对土壤速效钾含量的影响

生物质炭对两个时期不同土层土壤速效钾的影响见图 7。在马铃薯块茎膨大期，不同土层土壤速效钾含量随生物质炭施肥量的增加而增加。施用 BC3 处理时，不同土层的土壤速效钾含量最高，较 CK 分别显著增加 13.81%、13.14%和 9.20%。马铃薯成熟期时，不同土层速效钾含量随生物质炭施肥量增加而增加。在 0~5 cm 和 5~10 cm 土层中，在 BC3 施肥处理下土壤速效钾含量最高，相比于 CK，速效钾含量分别显著增加 12.03%、14.68%。在 10~30 cm 土层中，土壤速效钾含量变化差异不显著。

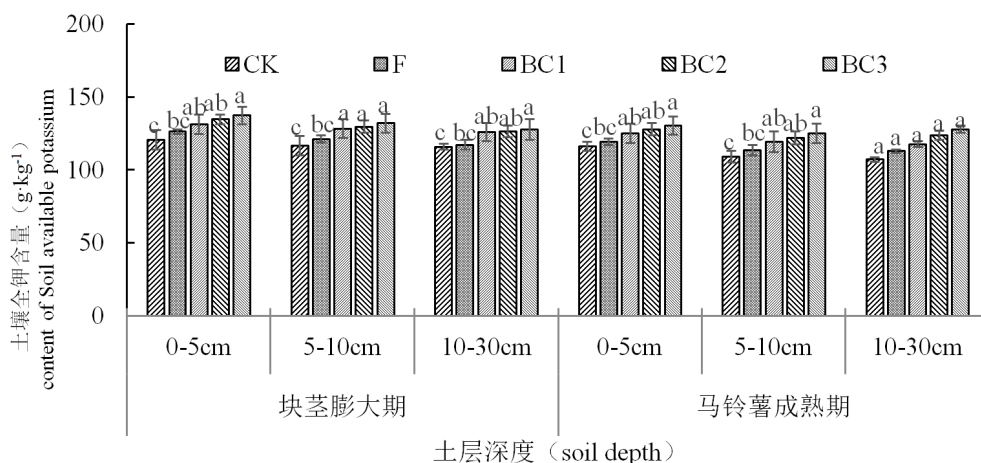


Figure 7. Effects of biochar on soil available potassium in different soil layers in two periods

图 7. 生物质炭对两个时期不同土层土壤速效钾的影响

3.8. 生物质炭施肥对土壤 pH 的影响

生物质炭对两个时期不同土层土壤 pH 的影响见图 8。生物质炭施肥对两个时期不同土层土壤 pH 的影响如图所示。生物质炭处理下，两个时期的土壤 pH 均无明显差异。

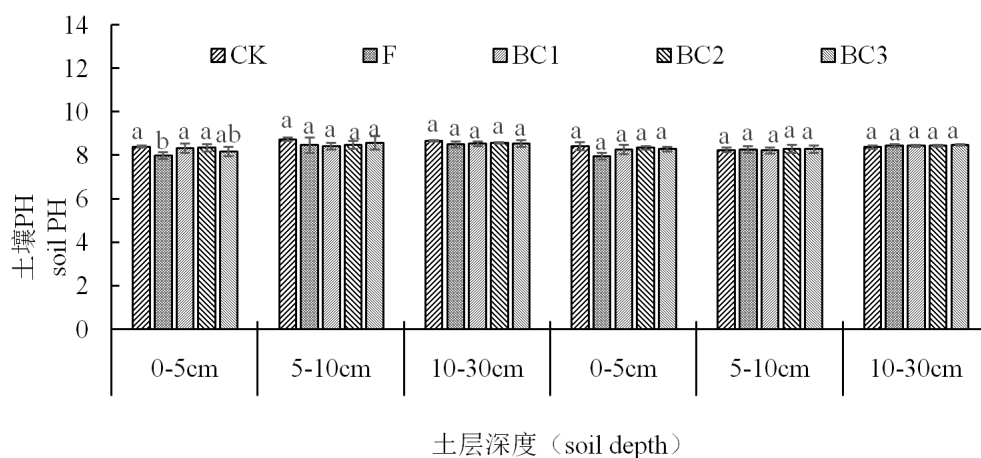


Figure 8. Effects of biochar on soil pH of different soil layers in two periods

图 8. 生物质炭对两个时期不同土层土壤 pH 的影响

3.9. 生物质炭对马铃薯产量的影响

生物质炭对马铃薯产量的影响见图9。马铃薯产量与生物质炭施肥量呈正相关关系。F、BC1、BC2、BC3处理较CK处理马铃薯产量分别显著增加8.96%、11.94%、22.29%、30.15%。在BC3处理时，马铃薯产量最高为4359.62 kg·hm⁻²。

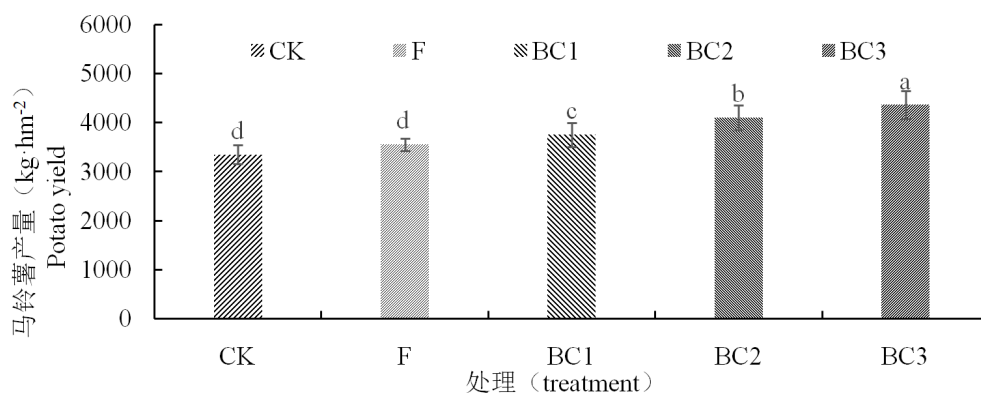


Figure 9. Effect of biochar on potato yield
图9. 生物质炭对马铃薯产量的影响

4. 讨论

4.1. 生物质炭对有机质的影响

本研究发现，土壤有机质含量变化趋势随着生物质炭施用量的增加而增加，这一结果与其他研究结果一致[11] [12]。可能是因为生物质炭作为一种化学惰性物质，具有稳定的性质，不容易被分解，而且生物质炭中含有较高的有机质[13] [14]。但在马铃薯成熟期，土壤有机质含量随着生物质炭施肥量的增加却呈现先减小后增加的趋势。这可能是因为施生物质炭4500 kg·hm⁻²时，生物质炭含有大量孔隙，比表面积接触大，抑制了土壤有机碳的矿化，导致有机质含量减小。本试验结果显示在马铃薯块茎膨大期，10~30 cm土层较0~5 cm、5~10 cm土层有机质含量最高，可能是因为马铃薯的根系一般在地下20~30 cm，受到马铃薯生长旺盛的影响，植物残留物和根系可以分解成有机质固定在深层土壤中，而在马铃薯成熟收获期，0~5 cm土层土壤有机质含量最高，可能是因为植物残体是土壤有机质的重要来源，收获马铃薯后缺少马铃薯分解产生的有机质进入土壤，导致深层土壤有机质含量少。研究还发现，不管是马铃薯块茎膨大期还是成熟收获期，均是生物质炭施肥在6750 kg·hm⁻²下有机质含量最高，可能是因为这一施肥量下促进了马铃薯生长，分解产生的有机质含量较多。

4.2. 生物质炭对全量氮磷钾的影响

本研究发现生物质炭施肥量增加能显著增加土壤全氮含量，与生物质炭施肥量呈正相关。这个结论与其他研究的结论相似[15]。可能是因为生物质炭能够有效地将矿物态氮转化为有机氮，对氮素吸附能力加强，减少了消耗，进而达到了巩固土壤氮储备的目的。研究还发现，随着生物质炭施用量的增加，其对土壤全磷含量仅仅在10~30 cm的土层中表现为先增加后减小的变化趋势[16]。生物质炭施肥在4500 kg·hm⁻²时，土壤全磷含量较不施肥显著增加了32.85%；但生物质炭施肥在6750 kg·hm⁻²，土壤全磷含量开始减少，说明在相同施肥条件下施加生物质炭量过多时会降低全磷含量，但有些学者认为施加生物质炭的量越多全磷含量越高，与本结果有所不同[17]。生物质炭施肥量增加能够显著增加全钾的含量，并且在生物质炭施用量增加的情况下，全钾含量依旧升高。不过相较而言，常规施肥比生物质炭施肥对土壤

全磷的增加更显著,这可能是因为氮磷肥在施加入土壤后,在分解过程中产生二氧化碳和无机酸,易于溶解被土壤吸收。

4.3. 生物质炭对有效态氮磷钾的影响

本研究发现生物质炭施肥能显著提高氮磷钾的有效含量,均随着生物质炭添加量的增加而增加。其变化规律与其他学者研究结果一致[18]。土壤碱解氮含量增加可能是因为低施肥量生物质炭下,把土壤中铵态氮和硝态氮吸附住,减少氮元素的淋溶损失,促进碱解氮的矿化[19]。土壤中有效磷含量增加的原因可能是生物质炭通过降低对磷的吸收,降低了对土壤中铁铝元素的交换量,促进有效态磷矿化[20]。土壤中速效钾含量的增加可能是因为,通过铝离子和氢离子的交换,间接提高速效钾含量[21];另外,高施用量的生物质炭能够吸附土壤中活化矿质钾的有机酸,进一步促进土壤中矿物质钾的活化。但不同生物质炭施肥量之间土壤速效钾含量不显著,这可能是因为试验年限较短,添加生物质炭对土壤钾素养分效果没有体现出来。随着土层深度的增加,有效态氮磷钾含量呈现为下降趋势,在表层土壤中施加 $4500\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的生物质炭时能够显著提高有效磷含量,当生物质炭施用量在 $6750\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,可明显增加土壤中碱解氮和速效钾的含量。在深层土壤中施加 $6750\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的生物质炭量可以显著提高有效磷和速效钾的含量,而施用 $2250\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的生物质炭时能够显著提升土壤中碱解氮的含量。这与部分研究结果不同[22]。不过在马铃薯成熟期,随着生物质施肥量的增加有效态氮磷钾均呈增加趋势。

4.4. 生物质炭对土壤 pH 的影响

本研究发现不同施肥处理间土壤 pH 差异未达到显著水平,这可能是因为通过马铃薯一季种植,试验时间较短,而且是第一年种植,土壤 pH 的变化未体现出来。

5. 结论

通过一季种植马铃薯,三种生物质炭施肥均能不同程度改善马铃薯农田土壤养分和产量,其中以 $6750\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 生物质炭施肥的效果最好。 $6750\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 生物质炭施肥下显著提高土壤有机质、速效养分,从而对马铃薯产量显著提高,实现增产增收,最高产量为 $4359.62\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;而常规施肥虽然对马铃薯农田土壤中全量养分提高较生物质炭施肥更显著,但对土壤有机质、速效养分无显著提升效果,产量也较低,综上所述, $6750\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 生物质炭施肥下是马铃薯农田土壤最适宜施肥量。

基金项目

国家自然科学基金项目(41661049);甘肃省新型肥料创制工程实验室开放基金(GSXFL-2018-03)资助。

参考文献

- [1] Kwapinski, W., Byrne, C.M.P., Kryachko, E., *et al.* (2010) Biochar from Biomass and Waste. *Waste and Biomass Valorization*, **1**, 177-189. <https://doi.org/10.1007/s12649-010-9024-8>
- [2] 窦森,周桂玉,杨翔宇,等. 生物质炭及其与土壤腐殖质碳的关系[J]. 土壤学报, 2012, 49(4): 796-802.
- [3] Irfan, M. (2017) Potential Value of Biochar as a Soil Amendment: A Review. *Pure and Applied Biology*, **6**, 1494-1502. <https://doi.org/10.19045/bspab.2017.600161>
- [4] 白录顺,范茂攀,王自林,等. 间作模式下玉米/大豆的根系特征及其与团聚体稳定性的关系[J]. 水土保持研究, 2019, 26(1): 124-129.
- [5] 潘占东. 添加生物质炭对黄土高原旱作农田土壤温室气体排放及土壤理化性质的影响[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 甘肃农业大学, 2021.
- [6] 钟雪梅,朱义年,刘杰,等. 竹炭包膜对肥料氮淋溶和有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006(S1): 154-157.
- [7] 陈杰,郭天文,谭雪莲,等. 马铃薯连作地健康株与病株根区土壤微生态特性比较[J]. 作物学报, 2013, 39(11):

2055-2064.

- [8] 刘星, 张书乐, 刘国锋, 等. 连作对甘肃中部沿黄灌区马铃薯干物质积累和分配的影响[J]. 作物学报, 2014, 40(7): 1274-1285.
- [9] 胡新元, 孙小花, 柳永强, 等. 黄土高原半干旱区马铃薯连作对农田土壤生化性质及产量的影响[J]. 中国马铃薯, 2019, 33(6): 344-351.
- [10] Huang, L.F., Song, L.X., Xia, X.J., *et al.* (2013) Plant-Soil Feedbacks and Soil Sickness: From Mechanisms to Application in Agriculture. *Journal of Chemical Ecology*, **39**, 232-242. <https://doi.org/10.1007/s10886-013-0244-9>
- [11] 尚杰, 耿增超, 陈心想, 等. 施用生物炭对旱作农田土壤有机碳、氮及其组分的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(3): 509-517.
- [12] 孟雨田, 赵承森, 李晓庆, 等. 生物质炭对黑土有机碳组分的影响[J]. 江西农业大学学报, 2018, 40(6): 1340-1347.
- [13] 侯亚红, 王磊, 付小花, 等. 土壤碳收支对秸秆与秸秆生物炭还田的响应及其机制[J]. 环境科学, 2015, 36(7): 2655-2661.
- [14] 许桂苹, 王晓飞, 魏萌萌, 等. 蔗渣生物质炭对蔗田土壤理化性质的影响[J]. 甘蔗糖业, 2016(4): 16-22.
- [15] Reverchon, F., Flicker, R.C., Yang, H., *et al.* (2014) Changes in $\delta^{15}\text{N}$ in a Soil-Plant System under Different Biochar Feedstocks and Application Rates. *Biology and Fertility of Soils*, **50**, 275-283. <https://doi.org/10.1007/s00374-013-0850-2>
- [16] 葛顺峰, 彭玲, 任饴华, 等. 秸秆和生物质炭对苹果园土壤容重、阳离子交换量和氮素利用的影响[J]. 中国农业科学, 2014, 47(2): 366-373.
- [17] 刘遵奇, 兰宇, 杨铁鑫, 等. 减肥条件下生物炭施用方式对土壤肥力及酶活性的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(4): 544-551.
- [18] 韩召强, 陈效民, 曲成闯, 等. 生物质炭施用对潮土理化性状、酶活性及黄瓜产量的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(6): 272-278.
- [19] 高德才, 张蕾, 刘强, 等. 旱地土壤施用生物炭减少土壤氮损失及提高氮素利用率[J]. 农业工程学报, 2014, 30(6): 54-61.
- [20] Deluca, T.H., Gundale, M.J., Mac Kenzie, M.D., *et al.* (2009) Biochar Effects on Soil Nutrient Transformations. In: Lehmann, J. and Joseph, S., Eds., *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*, Earthscan Publications Ltd., London, 251-270.
- [21] Topoliantz, S., Ponge, J.F. and Ballof, S. (2005) Manioc Peel and Charcoal: A Potential Organic Amendment for Sustainable Soil Fertility in the Tropics. *Biology and Fertility of Soils*, **41**, 15-21. <https://doi.org/10.1007/s00374-004-0804-9>
- [22] Zhao, X., Wang, J., Xu, H., *et al.* (2015) Effects of Crop-Straw Biochar on Crop Growth and Soil Fertility over a Wheat-Millet Rotation in Soils of China. *Soil Use and Management*, **30**, 311-319. <https://doi.org/10.1111/sum.12124>