

连续施用农用玉米芯炭的马铃薯生物学响应

张伟明, 吴迪, 张鉉贵, 黄玉威, 管学超, 陈温福

引用本文:

张伟明, 吴迪, 张鉉贵, 等. 连续施用农用玉米芯炭的马铃薯生物学响应[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(8): 1843–1853.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0138>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

玉米芯生物炭对大豆的生物学效应

张伟明, 管学超, 黄玉威, 孙大荃, 孟军, 陈温福

农业环境科学学报. 2015(2): 391–400 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.02.025>

施用生物炭对重金属污染农田土壤改良及玉米生长的影响

李衍亮, 黄玉芬, 魏岚, 黄连喜, 黄庆, 许桂芝, 刘忠珍

农业环境科学学报. 2017, 36(11): 2233–2239 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0522>

玉米秸秆生物炭对稻油轮作农田磷流失风险的影响

华玲玲, 王洪媛, 翟丽梅, 付斌, 盖霞普, 胡万里

农业环境科学学报. 2016, 35(7): 1376–1383 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016.07.021>

小麦秸秆生物质炭对旱地土壤铅镉有效性及小麦、玉米吸收的影响

左静, 陈德, 郭虎, 王静波, 隋凤凤, 李恋卿, 潘根兴, 张旭辉

农业环境科学学报. 2017, 36(6): 1133–1140 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1655>

施用生物炭对干旱区玉米农田碳足迹的影响

王冠丽, 孙铁军, 刘廷玺, 程功

农业环境科学学报. 2019, 38(11): 2650–2658 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0533>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

张伟明, 吴迪, 张鉉贵, 等. 连续施用农用玉米芯炭的马铃薯生物学响应[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(8): 1843–1853.

ZHANG Wei-ming, WU Di, ZHANG Hong-gui, et al. Biological effects of consecutive application of corncob biochar to potato plants[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(8): 1843–1853.



开放科学 OSID

连续施用农用玉米芯炭的马铃薯生物学响应

张伟明, 吴迪, 张鉉贵, 黄玉威, 管学超, 陈温福*

(沈阳农业大学农学院/辽宁省生物炭工程技术研究中心, 沈阳 110866)

摘要:为进一步探明不同材质生物炭在马铃薯生产上的应用效果及潜力,利用玉米芯制备生物炭,测定其结构及主要理化特性变化,并采用大田试验方法,研究该玉米芯炭对马铃薯生长发育、产量、品质及病害发生等生物学特征的影响。结果表明:玉米芯炭具有富碳、多微孔特征,含有多养分元素及阳离子交换量(CEC),总孔体积、比表面积分别比炭化前提高了4.37倍和3.89倍,适于农业应用。在连作砂质土壤施用玉米芯炭后,马铃薯株高及叶、茎干物质积累明显提高,利于促进马铃薯早发快长,连续2 a施炭的马铃薯中、大薯比例和小区产量分别比对照平均提高44.67%和29.01%,其中以C2处理(按4 500 kg·hm⁻²标准施用生物炭)的产量最高。同时,马铃薯块茎干物质、淀粉、可溶性蛋白、还原糖含量分别比对照平均提高7.78%、14.59%、19.53%、15.38%,商品、食用及营养品质有一定提升。此外,玉米芯炭处理的马铃薯疮痂病、晚疫病发生率显著降低,分别比对照平均降低93.43%和87.77%,抑制效应明显。研究表明,玉米芯生物炭对马铃薯具有“促长、增产、提质、抗病”的生物学作用特征,适于马铃薯生产应用。

关键词:玉米芯;生物炭;马铃薯;产量

中图分类号:X712 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2020)08-1843-11 doi:10.11654/jaes.2020-0138

Biological effects of consecutive application of corncob biochar to potato plants

ZHANG Wei-ming, WU Di, ZHANG Hong-gui, HUANG Yu-wei, GUAN Xue-chao, CHEN Wen-fu*

(College of Agronomy, Shenyang Agricultural University/Biochar Engineering Technology Research Center of Liaoning Province, Shenyang 110866, China)

Abstract: To determine the effect and application potential of biochar with different materials on potato production, biochar was made from corncob. The structure and main physical and chemical characteristics of the biochar after carbonization were determined, and its effect on potato plant growth, yield, quality, and disease occurrence was studied via field experiments. The results showed that the corncob biochar was rich in carbon with a good microporous structure, various nutrient elements, and cation exchange capacity. The total pore volume and specific surface area were respectively 4.37 and 3.89 times higher than before carbonization, making the biochar appropriate for agricultural application. Furthermore, when the corncob biochar was applied to sandy soil with continuous cropping, the plant height and leaf and stem dry matter accumulation increased significantly, which promoted early growth development of the plant. The proportion of medium and large potatoes and plot average yield increased by 44.67% and 29.01%, respectively, compared with that of the control for two

收稿日期:2020-02-08 录用日期:2020-03-27

作者简介:张伟明(1981—),男,辽宁铁岭人,博士,从事生物炭与土壤改良、作物高产研究。E-mail:biochar_zwm@syau.edu.cn

*通信作者:陈温福 E-mail:wfchen5512@126.com

基金项目:国家重点研发计划生物炭基复合肥料研制与示范(2017YFD0200802-02);国家重点研发计划稻田生物炭基培肥产品的研制与施用技术(2016YFD0300904-4);辽宁省高校重大科技创新平台项目(生物炭工程技术研究中心);院士专项基金项目

Project supported: The State Key Special Program of Biochar-Fertilizer Technology Research and Industrialization demonstration (2017YFD0200802-02); The State Key Special Program of Biochar-based Fertilizer Development and Application Technology for Soil Fertility Improvement in Rice (2016YFD0300904-4); Liaoning Province Major Science and Technology Platform for University (Biochar Engineering and Technical Research Center); Special-funds Project for Academician

consecutive years, and the yield of the C2 treatment ($4500 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) was the highest. At the same time, the average dry matter, starch, soluble protein, and reducing sugar content of potato tubers increased by 7.78%, 14.59%, 19.53%, and 15.38%, respectively, compared with that of the control, and the commodity, food, and nutrition quality improved to some extent. In addition, the incidence of potato scab and late blight in the corncob biochar treatment declined significantly with 93.43% and 87.77% on average, respectively, compared to that of the control. Generally, corncob biochar had the biological characteristics of “promoting growth, increasing yield, improving quality and disease resistance” and was therefore suitable for potato production.

Keywords: corncob; biochar; potato; yield

玉米是我国主要粮食栽培作物之一,覆盖区域广、种植面积大,为保障我国粮食安全作出了重要贡献。近年来,我国玉米等粮食产量一直处于增产状态,且东北是玉米重要主产区之一。但在玉米等粮食作物增产的同时,也产生了大量秸秆、玉米芯等农业废弃物,每至秋末春初“烽火漫天、遍地狼烟”的秸秆焚烧现象屡禁不止,造成了严重的环境污染和资源浪费,这已成为政府、专家和学者们普遍关注的热点问题^[1]。在现阶段,秸秆一般通过“五料化”方式处理,而玉米芯一般以制备糠醛、化工原料或燃料等工业化、能源化利用为主^[2-4]。但在工业化处理过程中,不可避免地产生了糠醛渣等工业固体废弃物,二次处理的难度大、成本高,且极易造成次生环境污染^[4-5]。玉米芯已成为当前东北地区常见且资源量较大的农业废弃物之一,目前尚缺乏“低廉、环保、高效”的处理措施。

马铃薯在食品、工业等领域有着广泛应用。随着马铃薯主粮化战略的推进,其将逐渐成为我国第四大主粮作物,在粮食生产和人民生活中占有重要地位^[6]。东北地区是我国马铃薯主产区之一,在品质、产量等方面具有一定优势。但在马铃薯连作生产条件下,由于化肥、农药等大量、不适当施用和过度连作耕种,使土壤酸化、板结、有机质下降、病害加重,导致马铃薯生长发育受限,产量、品质下降等现象频繁发生,成为制约马铃薯生产可持续发展的重要问题^[7-9]。

生物炭(Biochar)是近年新兴的研究热点之一,得到了专家、学者的普遍关注和一致研究认可^[1]。利用生物炭技术可将玉米芯等农林废弃物在 $<700 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下通过热裂解炭化过程制备为生物炭^[10-11],实现废弃物资源化“环保、高效”利用。同时,诸多研究表明生物炭具有改良土壤理化特性、促进作物生长发育、提高作物产量与品质,以及固碳减排、消减污染等多重效应^[11-12],这为解决马铃薯连作生产问题提供了重要基础和条件。生物炭功效作用的发挥与其材质、

炭化工艺条件等密切相关^[13],但目前炭化工艺条件,特别是原材料来源、结构、内含物等的不同,决定了不同材质生物炭的特性与功能差异很大,相关研究结果也很难进行有效、共性比对,对农业生产的指导意义和价值有限。因此,适时、适地开展适合我国农业发展实情的不同材质生物炭特性及应用研究,就显得尤为必要^[11]。一般情况下,常见农业废弃物中的果实芯类材料比秸秆类材料含有更高的木质素、纤维素,炭化后形成的多微孔碳架结构更为稳定、丰富,结构及理化特性更好^[14-15],因此,利用玉米芯制备生物炭,既可解决玉米芯废弃物“环保、高效”利用难题,又为针对性解决土壤酸化、板结、养分失衡、病害加重等造成的马铃薯生长缓慢、地下块茎发育不良,以及产量与品质下降等马铃薯连作生产问题提供了新途径。

研究发现,在不同材质、炭化温度、用量及施用方式条件下生物炭对马铃薯生长、产量等作用效应不同。在炭化温度 550 、 $700 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下制备小麦秸秆和芒草秆生物炭,并分别以 1.5% 、 2.5% 炭剂量施用于低磷砂壤土,发现高温($700 \text{ }^{\circ}\text{C}$)制备的生物炭降低了马铃薯植株生长生物量和块茎产量,且表现为随施炭量增加而降低,而在土壤中接种丛枝菌根真菌(AMF)后,生物炭不同处理均有效刺激了马铃薯植株各器官生长^[16]。在盆栽试验条件下,马铃薯在受到干旱胁迫时,秸秆生物炭可提高马铃薯叶片净光合速率,增强马铃薯初花期的光合能力,提高马铃薯植株、主茎数等各器官干物质积累,促进马铃薯生长^[17]。生物炭亦可提高马铃薯对盐胁迫环境的抗逆性。在盆栽试验条件下,施用 5% 生物炭(硬木炭 80% 和软木炭 20% 混合)处理的马铃薯茎秆生物量,根长、根体积,块茎产量以及叶片、木质部汁液中的植物激素脱落酸浓度均有所提高,生物炭可通过吸附 Na^{+} 来降低木质部 Na^{+} 含量和 $\text{Na}^{+}/\text{K}^{+}$ 值,并提高其 K^{+} 含量,从而改善马铃薯植株的盐胁迫效应^[18]。而在我国宁南山区,通过大田试验发现,施用树木残枝生物炭($20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)可提高马铃薯单株结薯个数、单株块茎质量、单薯质量及商

品薯率,产量提高49.04%^[19]。也有研究认为,某些材质的生物炭不利于马铃薯生长,研究发现木材生物炭与丛枝菌根真菌(AMF)、磷肥及灌水交互作用条件,不利于马铃薯植株对磷、氮养分吸收,对马铃薯生长具有一定负效应^[20]。施炭量及施用年限也会对马铃薯生长、产量等产生影响。研究发现,以20 t·hm⁻²标准施用水稻秸秆生物炭可显著提高马铃薯产量,但在第二年无增产效果,随着施炭量增至40 t·hm⁻²,马铃薯增产效果消失^[21],说明生物炭对马铃薯调控存在剂量、时间阈值效应;生物炭对马铃薯生长发育和产量的影响与其对土壤理化特性的调控有关。一方面,生物炭可改善土壤物理特性,施炭后土壤田间持水量提高,土壤容重降低,毛管孔隙度增加,土壤水分利用效率提高48.14%^[19];另一方面,生物炭可显著提高土壤有机碳、有效磷、速效钾含量,提高土壤C/N和电导率,亦可提升土壤pH、全氮含量,且与施炭年限有关^[22-23]。此外,生物炭对土壤微生物也有一定影响。施炭后的土壤真菌丰度降低,其中以添加生物炭(20 t·hm⁻²)处理的丰度最低,有利于抑制土壤病害发生^[23]。上述研究表明,生物炭介导的土壤结构及理化特性变化有利于马铃薯生长发育,但不同材质生物炭对马铃薯的作用效应存在很大差异,特别在马铃薯连作生产条件下生物炭的调控作用如何,是否与生物炭材质、施炭量及施用年限等有关,目前还尚不明确,有待进行深入研究探索^[24-25]。

本试验以玉米芯为原料制备农用生物炭,在明确其结构及主要理化特性的基础上,进一步应用于马铃薯大田连作生产,研究在连续2 a施炭条件下,马铃薯的生长发育、产量、品质及病害发生等生物学特征响应,明确玉米芯生物炭对马铃薯生物学的“质-效”和“量-效”作用,探明其在马铃薯连作生产上的应用效果及潜力,为生物炭的农业生产应用提供参考和依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验在辽宁岫岩县郊进行。供试马铃薯品种为黄麻子(Huang Mazi)。土壤为马铃薯连作的砂质土壤,其基本理化性质:pH 5.92,有机质15.80 g·kg⁻¹,全氮0.91 g·kg⁻¹,碱解氮110.00 mg·kg⁻¹,有效磷12.18 mg·kg⁻¹,速效钾85.26 mg·kg⁻¹。生物炭的原材料为玉米芯,粒径3~5 cm,采用新型炭化工艺技术制备农用生物炭^[26](缺氧干馏炭化技术,温度500℃左右,炭化

停留时间2~3 h,升温速率平均3~5℃·min⁻¹),生物炭粒径为0.8~1.0 mm,由辽宁金和福农业科技开发股份有限公司生产。

1.2 试验设计

采用大田试验方法,随机区组设计。试验设4个处理:处理1为常规施肥,不添加生物炭,设为对照(CK);处理2为按2 250 kg·hm⁻²标准施用生物炭,设为C1;处理3为按4 500 kg·hm⁻²标准施用生物炭,设为C2;处理4为按9 000 kg·hm⁻²标准施用生物炭,设为C3。

试验小区行长6 m,宽3 m,小区面积18 m²。每小区5行,行距0.6 m,株距0.2 m,每穴1株。各处理间总养分量相等,每个处理3次重复,共12个小区。连续2 a种植,第1年于2011年5月2日播种、7月24日收获,第2年于2012年5月4日播种、7月24日收获。生物炭处理按相应施炭量标准,于2011、2012年连续施用,生物炭以“基施”形式与土壤混合,种植方式、栽培管理措施等按当地常规方式进行。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 玉米芯生物炭的结构及主要理化特性

微观结构采用表面扫描电镜(日本,TM-1000)测定;比表面积、孔容、孔径等采用比表面积分析仪(PS2-0003)测定。主要元素组成:N、C、S采用元素分析仪(德国,Vario Macro Cube)测定,P采用钒钼黄比色法^[27],K采用火焰光度法^[27],Mg、Zn、Cu、Fe等矿质元素采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定。pH参照木质活性炭标准测定方法(GB/T 12496.7—1999)测定。灰分、挥发分、固定碳含量参照木炭标准试验方法(GB/T 17664—1999)测定。阳离子交换量(CEC)参照乙酸铵法测定^[27]。

1.3.2 马铃薯生物学性状

于马铃薯苗期(5月24日)、花期(6月28日)、结薯期(7月16日),分别在每小区选择代表性植株3株,测量株高(最高主茎基部至生长点的高度)^[28],每小区连续取代表性植株5株,分离叶、茎,杀青、烘干后采用电子天平测定叶、茎干物质质量^[28],并记录有关株高、干物质积累数据;于收获期(7月24日)进行马铃薯测产,每小区取代表性植株10株测产^[28],折算理论实际产量。同时,对全部收获马铃薯单个称质量,按小薯(<75 g)、中薯(≥75 g, <150 g)、大薯(≥150 g)分级,分别记录,并计算各级结薯所占百分比^[28]。块茎干物质含量^[28]、还原糖含量^[29]、淀粉含量^[29]、可溶性蛋白含量^[30]、维生素C含量^[31]等品质指标于收获后3 d内

测定。马铃薯疮痂病、晚疫病发生率根据其发病生物学特征进行调查,并记录每小区病薯数量,计算其所占百分比。

两年试验结果趋势一致,采用2011年与2012年数据统计分析产量相关指标,采用2011年数据统计分析生物学性状相关指标。利用Excel和SPSS 17.0软件处理、分析数据,采用Duncan's差异显著分析方法多重比较各处理。

2 结果与分析

2.1 玉米芯生物炭结构及主要理化特性

2.1.1 微观结构

如图1所示,在炭化前,玉米芯的薄壁细胞、维管束等组织结构完整,构架清晰。如图2所示,在经过升温、热解、挥发等炭化过程后,玉米芯原有薄壁细胞等部分组织逐渐消失或形成微小孔隙,其余维管束等主体结构特征保留明显,外围轮廓清晰、层次分明、孔隙丰富,形成了以炭化木质素为主体的多微孔碳架结构。本试验所采用的炭化技术属于亚高温热解,升

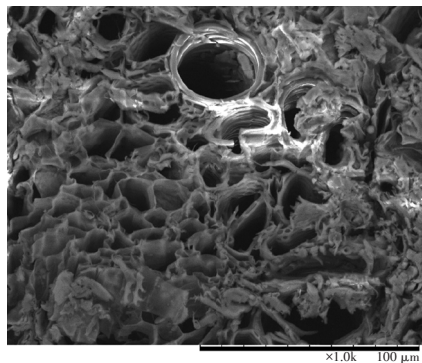


图1 玉米芯微观结构(炭化前)

Figure 1 Micrographs of the corncob (SEM, before carbonized)

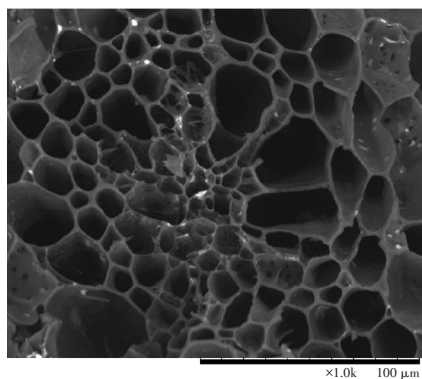


图2 玉米芯生物炭微观结构(炭化后)

Figure 2 Micrographs of the corncob-biochar (SEM, after carbonized)

温、热解过程和速率相对缓慢,因此部分不稳定、易受热挥发的组织在热解过程中逐渐消失并形成微孔,从而形成保留原有主体结构特征,且多微孔丰富的碳架结构。以上可见,炭化后的玉米芯生物炭具有非常丰富的多微孔结构,使其具有比表面积大、吸附力强等特性。因而,可在改良土壤结构、吸持养分、提高土壤肥力等农业生产中发挥重要潜在作用。

2.1.2 孔容、孔径表征

玉米芯的孔容、孔径在炭化前、后发生了显著变化(图3)。玉米芯在炭化后的总孔体积比炭化前提高了4.37倍。不同孔形中,中、大型孔体积在炭化后提高了3.84倍,而微孔体积则提高了4.86倍。玉米芯平均孔径在炭化后比炭化前提高了66.45%,孔径变大。可见,玉米芯在炭化后的总孔体积,特别是微孔体积大幅提升,这有利于提高其整体吸附能力。

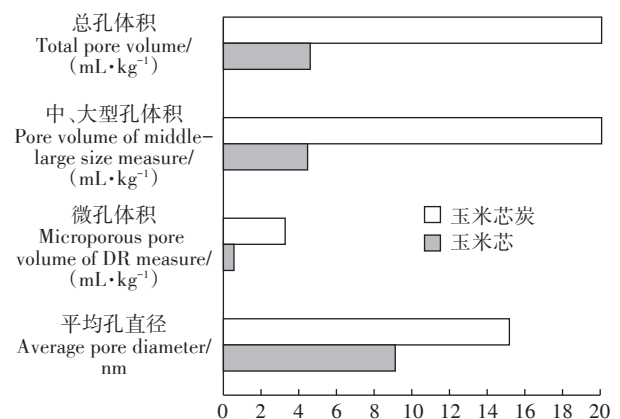


图3 玉米芯在炭化前、后的孔容、孔径表征

Figure 3 The pore volume and aperture characterization of corncob changed in charring process

2.1.3 主要理化特性

玉米芯在炭化后其主要理化性质也发生了明显变化(表1)。酸碱性方面,从炭化前、后的pH变化可以看出,玉米芯炭呈碱性,pH比炭化前增加4.54。玉米芯的比表面积、固定碳、灰分含量在炭化后也有大幅提高,分别比炭化前提高了3.89、4.64、0.48倍。但是,挥发分含量比炭化前减少75.07%,与玉米芯在热解炭化过程中易受热分解、挥发组织等大量损失有关。同时,玉米芯炭还具有一定阳离子交换量,表明其具有较为活跃的表面官能团及电荷离子。

此外,本试验条件下测定的玉米芯生物炭含有较高的C元素(70.6%)、作物生长发育所必需的大量元素(N、P、K)和一些中、微量元素(Mg、Ca、Zn、Fe)等丰

表1 玉米芯在炭化前、后的主要理化性质变化

Table 1 The main physical and chemical properties of corncob changed at before and after charring

材料 Materials	pH	比表面积 BET surface area/(m ² ·g ⁻¹)	固定碳 Fixed-carbon content/%	挥发分 Volatile content/%	灰分 Ash content/%	阳离子交换量 Cation exchange capacity/(cmol·kg ⁻¹)
玉米芯	5.22	0.71	12.18	80.16	7.66	—
玉米芯炭	9.76	3.47	68.68	19.98	11.34	21.20

富元素种类(图4)。不同养分元素中,K元素含量最高,P、N元素含量次之,S、Mg、Ca、Zn等元素含量也相对较高。从元素种类来看,该玉米芯炭基本包含了马铃薯生长发育所必需的养分元素。生物炭所含养分元素可在一定条件下释放,进而为土壤提供一定外源养分,有利于促进马铃薯生长发育。玉米芯炭的高含C量及高度羧酸酯化、芳香化结构,使其在土壤中不易被分解,从而成为土壤“碳库”的一部分,利于保持、提升土壤肥力。

综上,本试验条件下制备的玉米芯生物炭,具有丰富的多微孔结构和元素种类,呈碱性,C含量高,比表面积大,结构及理化特性良好,适于农业生产应用。

2.2 施用农用玉米芯生物炭对马铃薯生物学特征的影响

2.2.1 对马铃薯株高的影响

由图5可见,在马铃薯主要生育期,玉米芯炭处理的马铃薯株高均显著高于CK。在苗期,株高表现为随施炭量增加而提高。在开花期与结薯期,玉米芯炭处理与苗期表现相似,各生物炭处理均高于CK,且与CK差距持续增大,表现为C2>C3>C1>CK。在全生育期内,玉米芯炭对马铃薯株高均有一定促进作用,且表现出一定的可持续性。以上表明,生物炭对马铃薯植株生长发育具有促进效应。

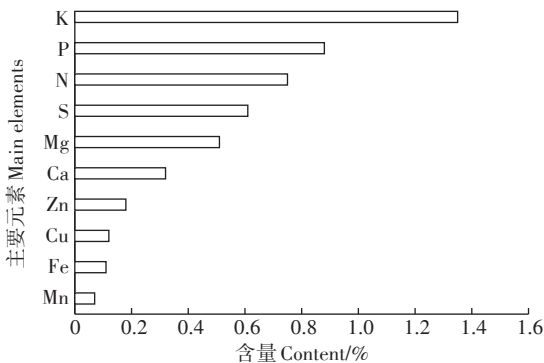


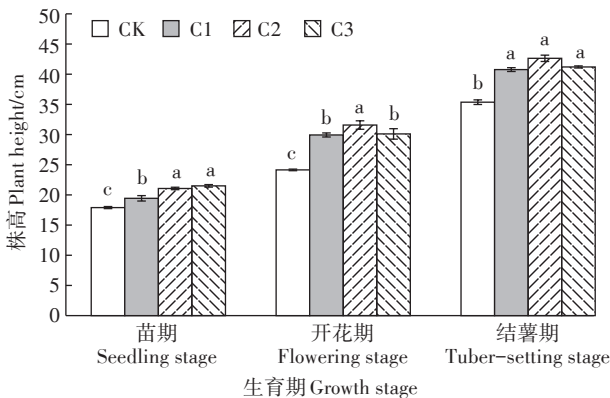
图4 玉米芯炭的主要元素组成

Figure 4 Main elements of corncob-biochar

2.2.2 对马铃薯地上部干物质积累的影响

2.2.2.1 叶干质量

如图6所示,在苗期,玉米芯炭处理的马铃薯叶干质量均显著高于CK,且随施炭量增加而增大。在开花期,生物炭处理亦高于CK,但表现为随施炭量减少而增大,C1、C2、C3分别比CK提高了45.45%、23.08%、13.64%,平均提高了27.39%。到结薯期,玉



不同小写字母表示不同处理间在0.05水平上差异显著。下同
Different lowercase letters indicate significant difference among treatments at 0.05 level. The same below

图5 玉米芯炭对马铃薯主要生育期株高的影响

Figure 5 Effect of corncob-biochar on plant height at main growth stages of potato

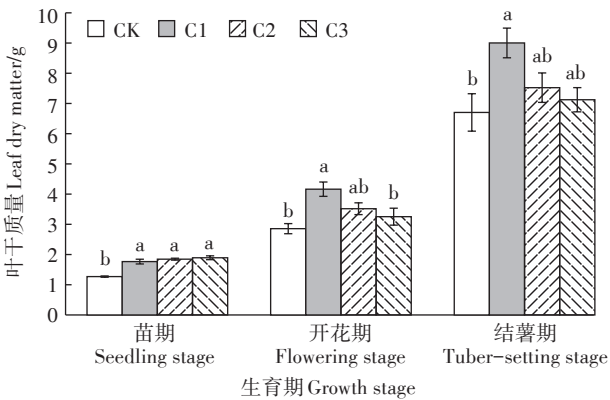


图6 玉米芯炭对马铃薯主要生育期叶干物质积累的影响

Figure 6 Effect of corncob-biochar on leaf dry matter accumulation of potato at main growth stages

米芯炭处理表现与开花期相同,且与CK差距增大,其中C1处理与CK差异显著。从不同生育期来看,在马铃薯生长前期,较高施炭量的作用明显,而在生育后期,较低施炭量的作用相对明显。以上研究表明,玉米芯炭可在一定程度上促进叶片干物质积累,利于马铃薯植株早发快长。

2.2.2.2 茎干质量

由图7可见,在苗期,玉米芯炭处理的马铃薯茎干质量均高于CK,其中C2处理与CK差异显著。在开花期,玉米芯炭处理亦高于CK,表现为随施炭量减少而增大,C1、C2处理与CK差异显著。而至结薯期,玉米芯炭处理的茎干质量明显高于CK,且差距增大,

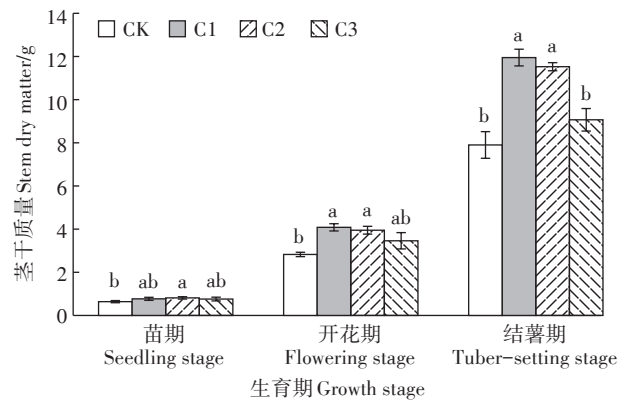


图7 玉米芯炭对马铃薯主要生育期茎干物质积累的影响

Figure 7 Effect of corn cob-biochar on stem dry matter accumulation of potato at main growth stages

其中C1、C2处理与CK差异显著。与叶干物质积累表现相似,在马铃薯生长前期,较高施炭量对茎干质量的促进作用明显,而在生育后期,较低施炭量的作用相对明显。可见,玉米芯炭对马铃薯茎干物质积累具有一定的促进作用,有利于增强其抗倒伏能力,加速营养物质积累、转运与分配,从而促进植株生长。

2.2.3 玉米芯炭对马铃薯产量及不同结薯比例的影响

连续2 a施用玉米芯炭的马铃薯小区产量表现基本一致(表2)。在2011年,小区产量表现为C2>C3>C1>CK, C2、C3、C1处理分别比CK提高了37.37%、24.93%、23.93%,平均提高28.74%。在2012年,小区产量表现为C2>C1>C3>CK, C2、C1、C3处理分别比CK提高了39.04%、26.57%、22.13%,平均提高29.25%;在年际间,不同处理的马铃薯小区产量呈上升趋势,生物炭处理的增幅明显高于CK,表现为随施炭量减少而提高。与CK相比,C1、C2处理的年际增长率高于C3处理,增产潜力较大;2 a平均数据结果表明,玉米芯炭处理的小区产量均显著高于CK, C2、C1、C3处理分别比CK提高了38.25%、25.27%、23.51%,平均增产29.01%,其中C2处理的产量最高,且与其他处理差异显著。可见,适宜的玉米芯炭施用量(C2处理,4 500 kg·hm⁻²)对马铃薯增产具有重要促进作用。

连续2 a施炭间,马铃薯不同结薯比例也发生了明显变化。小薯比例表现为玉米芯炭处理均显著低

表2 玉米芯炭对马铃薯产量和不同结薯比例的影响

Table 2 Effect of corn cob-biochar on yield and vary level proportion size of potato

年份 Year	处理 Treatments	小区产量 Potato yield of per plant/g	每公顷产量 Potato yield of per hectare/kg	增产率 Yield increased extent/%	小薯比例 Small potato proportion/%	中薯比例 Intermediate potato proportion/%	大薯比例 Big potato proportion/%	中、大薯比例 Intermediate and big potato proportion/%	中、大薯比例提高 幅度 Intermediate and big potato increased extent/%
2011年	CK	18.97c	10 530.20	—	65.19a	30.82b	4.00b	34.81	—
	C1	23.51b	13 048.05	23.93	55.23b	31.02b	13.75a	44.77	28.61
	C2	26.06a	14 465.15	37.37	47.06d	40.47a	12.47a	52.94	52.08
	C3	23.70b	13 151.65	24.93	51.25c	42.70a	6.05b	48.75	40.05
2012年	CK	19.57c	10 861.35	—	66.16a	30.02b	3.82b	33.84	—
	C1	24.77ab	13 747.35	26.57	53.44b	32.73b	13.83a	46.56	37.59
	C2	27.21a	15 103.40	39.04	45.24c	42.32a	12.44a	54.76	61.82
	C3	23.90b	13 266.35	22.13	49.78bc	43.43a	6.79b	50.22	48.40
平均	CK	19.27c	10 695.78	—	65.67a	30.42b	3.91b	34.33d	—
	C1	24.14b	13 397.70	25.27	54.34b	31.88b	13.79a	45.67c	33.03
	C2	26.64a	14 784.28	38.25	46.15d	41.39a	12.46a	53.85a	56.86
	C3	23.80b	13 209.00	23.51	50.52c	43.06a	6.42b	49.48b	44.13

注:同一列中标以不同小写字母的值表示在0.05水平上差异显著。下同。

Note: Means within a column followed by the different lowercase letters are significantly different at the 0.05 probability level. The same below.

于CK。其中,2011年C1、C2、C3处理分别比CK降低15.28%、27.81%、21.38%,平均降低22.41%。2012年C1、C2、C3处理分别比CK降低19.23%、31.62%、24.76%,平均降低25.20%。在年际间,CK处理的小薯比例呈提高趋势,而玉米芯炭处理呈降低趋势。2 a平均数据结果表明,玉米芯炭处理的小薯比例显著降低,C1、C2、C3处理分别比CK降低了17.25%、29.72%、23.07%,平均降低23.35%。中薯、大薯比例,在2 a间玉米芯炭处理均高于CK,表现为C2>C1>C3>CK。其中,中薯比例表现为随施炭量增加而提高,较高施炭量处理(C2、C3)与CK差异显著。而大薯比例则表现为随施炭量减少而提高,较低施炭量处理(C1、C2)与CK差异显著。在年际间,CK处理的中薯和大薯比例呈降低趋势,而玉米芯炭处理呈提高趋势。与CK相比,玉米芯炭处理的中、大薯比例年际增长率明显提高,表现为C2>C1>C3>CK。2 a平均数据结果表明,C1、C2、C3处理的中、大薯比例分别比CK提高了33.03%、56.86%、44.13%,平均提高44.67%。

连续2 a施炭结果表明,玉米芯炭对马铃薯具有明显的增产效应,尤其对提升中、大薯比例的作用明显,且表现一定累积、可持续性作用特征,这对促进马铃薯连作增产、增收具有重要现实意义。

2.2.4 玉米芯炭对马铃薯块茎干物质含量的影响

如图8所示,玉米芯炭处理的块茎干物质含量均显著高于CK,表现为C2>C3>C1>CK,平均比CK提高7.78%。其中,C2处理的块茎干物质含量最高,比CK提高10.40%。可见,玉米芯炭对提高马铃薯块茎干物质含量具有明显促进效应,表明玉米芯炭有利于促进马铃薯生长“源”-“库”的积累与转化,提高块茎干物质含量,提升马铃薯商品、食用价值。

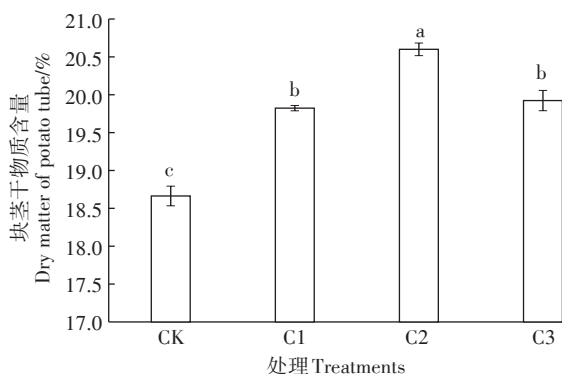


图8 玉米芯炭对马铃薯块茎干物质含量的影响

Figure 8 Effect of corn cob-biochar on dry matter accumulation of potato tuber

2.2.5 玉米芯炭对马铃薯品质的影响

如表3所示,玉米芯炭处理的马铃薯品质指标均有不同程度提高。淀粉含量,玉米芯炭处理均显著高于CK,其中C2处理最高,比CK提高22.48%。可溶性蛋白,玉米芯炭处理显著高于CK,其中低施炭量处理(C1)最高,比CK提高27.51%。还原糖含量,玉米芯炭处理显著高于CK,且表现出随施炭量增加而提高。维生素C,玉米芯炭处理均高于CK,其中C1处理与CK差异显著。总体上,施用玉米芯炭后,马铃薯块茎淀粉、可溶性蛋白、还原糖含量分别比CK平均提高14.59%、19.53%、15.38%。可见,玉米芯炭对提高马铃薯食用、营养品质具有一定促进作用。

表3 玉米芯炭对马铃薯品质的影响

Table 3 Effect of corn cob-biochar on potato quality

处理 Treatments	淀粉含量 Starch content/%	可溶性蛋白含量 Soluble protein content/(mg·g ⁻¹)	还原糖含量 Soluble sugar content/%	维生素C含量 Vitamin C content /(mg·100 g ⁻¹)
CK	14.10c	3.38c	0.26d	23.00b
C1	15.73b	4.31a	0.28c	24.38a
C2	17.27a	3.89b	0.30b	24.01ab
C3	15.47b	3.92b	0.32a	24.05ab

2.2.6 玉米芯炭对马铃薯病害发生的影响

疮痂病是一种较为常见的马铃薯病害,其发生后严重降低马铃薯商品、食用品质,而晚疫病则是当前马铃薯生产中最普遍、严重的病害,其发生后在一般年份马铃薯减产20%~30%,严重年份可在50%以上^[24]。疮痂病和晚疫病是影响马铃薯产量、品质的常见、主要病害。

如图9所示,施用玉米芯炭后,马铃薯疮痂病发生率显著降低,C1、C2、C3处理分别比CK降低了90.54%、94.01%、95.74%,平均降低93.43%。而晚疫病发生率,C1、C2、C3处理分别比CK降低了86.2%、88.12%、89.0%,平均降低87.77%。由此可见,玉米芯炭对马铃薯疮痂病、晚疫病发生具有明显抑制效应。玉米芯炭不同处理间,马铃薯病害发生率表现出一定规律性,即随施炭量增加而降低,高施炭量对抑制病害发生的作用更明显。以上表明,玉米芯炭对马铃薯常见、主要病害发生具有明显抑制效应,对提高马铃薯产量、品质具有重要现实意义。

3 讨论

生物炭是近年新兴的研究热点之一,得到了国内外专家的普遍关注和一致研究认可。本试验利用新

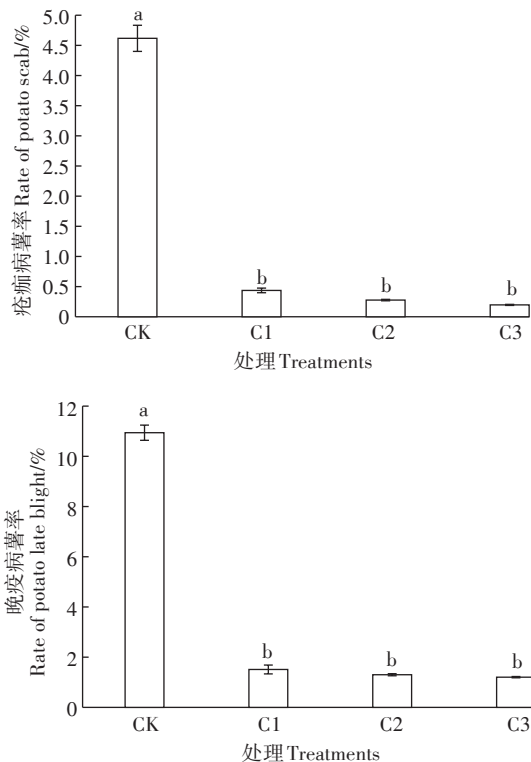


图9 玉米芯炭对马铃薯疮痂病和晚疫病发生的影响

Figure 9 Effect of corncob-biochar on the incidence of potato blight and scab

型炭化工艺制备玉米芯生物炭,测定表明其具有多微孔结构,呈碱性,比表面积大、富含C及其他多种养分元素,且具有一定阳离子交换能力,适于农业应用。进一步在连续2 a施用该玉米芯炭条件下,研究了马铃薯的生物学特征响应,结果表明玉米芯炭对马铃薯株高、干物质积累、产量、品质等具有不同程度的促进作用,同时对马铃薯疮痂病、晚疫病发生具有明显抑制效应。

玉米芯炭的作用体现,与其所具有的结构及理化特性密切相关。本试验中,玉米芯炭具有丰富多微孔结构,在施入土壤后可对容重、孔隙度等土壤物理特性产生直接影响。研究表明,生物炭施用可明显降低土壤容重,提高土壤孔隙度,为马铃薯块茎生长提供良好的物理空间及条件^[19,22,32],利于中、大薯形成。而土壤容重、孔隙度等物理性状改善则有助于协调土壤水、气、热条件,促进马铃薯根系生长发育^[33-35],推动地上部植株生长和干物质积累。另外,对于砂质土壤而言,其持水、保肥、供肥性能对作物生长尤为重要。玉米芯炭的多微孔结构及不同类型孔隙,可在土壤中发挥类似“海绵”作用,增加对水分的吸持,进而提高土壤田间持水量^[19],为马铃薯生长提供充足水分供

应。同时,玉米芯炭大的比表面积,使其具有强吸附力,可增加对土壤N、P、K等养分离子的吸持^[10-11,22],从而减少养分流失,提高砂质土壤保肥能力,而生物炭所含有的丰富N、P、K等多种养分元素则可在土壤中释放,直接增加土壤有效养分供应量^[36]。生物炭可使马铃薯在生长期获得更多充足、有效的水、肥供应,从而利于其株高增长、干物质积累增加,也为最终产量形成奠定了重要物质基础。

玉米芯炭不同处理间的叶、茎干物质积累在马铃薯前、后生长阶段表现不同,其主要原因可能与炭作用强度及养分的转移、输出等有关。研究表明,生物炭对土壤水、肥、气、热等微生态环境的调控效应与施炭量正相关^[22,37],施炭量越大、作用效应越强。在马铃薯生长初期,对土壤水、气、热、肥的需求和变化较为敏感,高施炭量的作用强度更大,可为马铃薯生长提供更多水分、养分等生长条件,因而干物质积累量相对较高,而随着生育期推进,马铃薯由“营养生长”转向“生殖生长”,地上部累积的营养物质更多转移至地下块茎生长点,因此在其生育后期表现有所下降。

连续2 a施炭结果表明,玉米芯炭对马铃薯具有明显增产和一定提质效应,这可能与玉米芯炭对马铃薯产量、品质形成条件的调控有关:(1)玉米芯炭输入土壤后,其丰富的多孔结构将直接改变土壤结构及物理特性条件(水、气、热等),为马铃薯根系生长乃至后期块茎形成创造良好的物理空间及条件,特别是其自身养分释放^[36]及对养分离子的吸持作用^[22,38-39],将直接增加土壤有效养分供给,为马铃薯生长提供充足养分保障,利于其产量与品质形成;(2)本试验制备的玉米芯炭,含有丰富K、P、N、S、Mg、Ca、Zn、Fe、Cu、Mn等马铃薯生长所必需的大量及中、微量养分元素,这些为马铃薯产量及品质形成提供了更多、更丰富的外源养分供应,尤其是Mn、Cu、Zn等微量元素,有利于促进马铃薯细胞分裂、叶绿素合成,以及碳水化合物、蛋白质、淀粉及还原糖形成^[40-42],提升马铃薯产量与品质;(3)生物炭可促进土壤微生物生长、繁殖,并增强其对土壤养分矿化、有机质分解等的作用过程^[23,43],促使土壤向肥力型结构演变,从而为作物产量、品质形成提供持续、良好的土壤肥力及微生态环境条件;(4)从作物学“源-库”理论角度,玉米芯炭对马铃薯营养生长期干物质积累——“源”的促进效应,将为后期产量、品质——“库”的形成奠定重要物质基础,利于促进马铃薯产量与品质形成;(5)生物炭含有较高C素(本试验的玉米芯炭为70.6%),高度羧酸酯化、芳

香化的结构使其更具生物化学和热稳定性,因而可在土壤中中长期存在,并持续发挥对土壤、作物的调控效应^[1,10,44],从而表现一定累积性、可持续性作用特征,利于为马铃薯产量和品质形成创造持久、良好的外界环境条件。

生物炭对作物生长、产量及品质的影响,存在“量-效”差异和阈值效应,具有合理的用量区间范围^[11,21,45]。在本试验中,玉米芯炭不同用量处理间也表现一定的差异性。由于玉米芯炭呈碱性,高炭量输入必然引起土壤pH发生变化,从而影响或改变其他土壤理化性状及某些微生物的生长、群落结构变异等^[43,46-47],从而对马铃薯不同生育期(如开花期、结薯期)植株生长产生一定影响。同时,由于生物炭具有较高含C量,高施炭量输入必然提高土壤C/N,这可能激发、诱导某些C、N源代谢相关的微生物发生变异,且可能由于种间拮抗或竞争而对某些微生物种群产生一定抑制效应^[48],从而改变土壤微生态环境。此外,高施炭量对土壤养分的吸附会更强,可能会与根系产生养分竞争,减少根系对养分的吸收利用^[49-50]。上述高施炭量作用影响,直接反馈于其处理的马铃薯地上部干物质积累及淀粉含量降低,与其他炭处理相比产量有所下降。同时,高施炭量会在土壤中释放更多的Mg、Ca、Zn、Fe、Cu、Mn等中、微量元素,对还原糖等物质合成影响增大,使其在品质方面表现有所不同。而从剂量效应角度,C2、C1处理对土壤及作物生长的作用强度要小于高施炭量处理,其中C2处理既可避免高炭输入的某些负面影响,又可弥补低炭处理的作用不足,对马铃薯生长相对适宜,这种作用在马铃薯长势(株高)、块茎干物质积累、淀粉含量、中薯及大薯比例等方面均有所体现,因而其最终产量最高。

此外,本试验发现玉米芯炭对马铃薯疮痂、晚疫病发生具有明显抑制效应,这可能与生物炭富C、多微孔、呈碱性以及对土壤微生态环境的调控等有关。生物炭的多微孔结构及丰富C、N源养分,在为土壤微生物提供良好物理生存空间的同时,也为其生命活动提供了一定养分来源,有利于促进微生物菌群生长,改变微生物有益/有害菌群比例,抑制真菌等某些有害微生物生长,从而减少病害发生^[23,43,46]。另外,本试验中玉米芯炭呈碱性且具有一定的阳离子交换能力,在输入土壤后会提高土壤pH^[22,51],从而抑制疫霉菌等某些病原微生物生长,减少病害发生^[52-53]。在此过程中,高施炭量对土壤pH的提升作用更大^[54],因此其对抑制病害发生的效应也更明显。此外,生物炭在

制备过程中可能含有一些挥发类物质,这会对某些病原菌、地下害虫等产生“趋避”效应,进而减少或切断马铃薯周围的某些病、虫“源”,从而阻抑病害发生,而高施炭量的作用表现也更明显。另外,从病害发生环境角度,生物炭有利于改善土壤“水、气、热、肥”等微生态环境条件,减少可能导致病害发生的不利环境条件因素,从而降低马铃薯病害发生率。

总体表明,玉米芯生物炭对马铃薯具有促长、增产、提质、抗病的作用效应,本文试验结果为相关系列研究中的一部分,为促进马铃薯连作生产可持续发展提供了新途径,对发展“低碳、绿色”农业具有较为重要的现实意义和价值,其长期效应、作用机理等将于后续研究揭示。

4 结论

(1)采用新炭化工艺制备的玉米芯生物炭,具有丰富多微孔结构及良好理化特性,是一种较为理想的农用生物炭材料,可用于马铃薯生产。

(2)玉米芯生物炭可促进马铃薯生长发育,在显著提升中、大薯比例的基础上,提高马铃薯产量,其中以4 500 kg·hm⁻²施用量的增产效果最好。同时,可在一定程度上提高马铃薯商品、食用及营养品质,对马铃薯疮痂病、晚疫病发生具有明显抑制效应。

(3)玉米芯生物炭对马铃薯具有“促长、增产、提质、抗病”的生物学作用特征,且表现一定累积性、可持续性效应,利于促进马铃薯生产“低碳、绿色”可持续发展。

参考文献:

- [1] 陈温福, 张伟明, 孟军. 生物炭与农业环境研究回顾与展望[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(5): 821-828.
CHEN Wen-fu, ZHANG Wei-ming, MENG Jun. Advances and prospects in research of biochar utilization in agriculture[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 33(5): 821-828.
- [2] 石祖梁, 贾涛, 王亚静, 等. 我国农作物秸秆综合利用现状及焚烧碳排放估算[J]. 中国农业资源与区划, 2017, 38(9): 32-37.
SHI Zu-liang, JIA Tao, WANG Ya-jing, et al. Comprehensive utilization status of crop straw and estimation of carbon from burning in China [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2017, 38(9): 32-37.
- [3] 李昌文, 张丽华, 纵伟, 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): 139-143.
LI Chang-wen, ZHANG Li-hua, ZONG Wei, et al. Research progress in comprehensive utilization of corn cobs[J]. *Food Research and Development*, 2015, 36(15): 139-143.

- [4] Xue X X, Di J H, He Y C, et al. Effective utilization of carbohydrate in corn cob to synthesize furfuralcohol by chemical-enzymatic catalysis in toluene-water media[J]. *Appl Biochem Biotechnol*, 2018, 185:42-54.
- [5] 荣春光. 糠醛生产工艺研究及糠醛废渣的综合利用[D]. 长春: 吉林大学, 2012.
RONG Chun-guang. Studies on prearation of furfural and comprehensive utilization of furfural residue[D]. Changchun: Jilin University, 2012.
- [6] 徐建飞, 金黎平. 马铃薯遗传育种研究: 现状与展望[J]. 中国农业科学, 2017, 50(6):990-1015.
XU Jian-fei, JIN Li-ping. Advances and perspectives in research of potato genetics and breeding[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(6):990-1015.
- [7] 魏丹, 杨谦, 迟凤琴. 东北黑土区土壤资源现状与存在问题[J]. 黑龙江农业科学, 2006(6):69-72.
WEI Dan, YANG Qian, CHI Feng-qin. The soil resource conditions and the problems in northeast black soil regions[J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2006(6):69-72.
- [8] 焦润安, 徐雪风, 杨宏伟, 等. 连作对马铃薯生长和土壤健康的影响及机制研究[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(4):94-100.
JIAO Run-an, XU Xue-feng, YANG Hong-wei, et al. Study on the effect and its mechanism of continuous cropping on potato growth and soil health[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2018, 36(4):94-100.
- [9] 杨雅伦, 郭燕枝, 孙君茂. 我国马铃薯产业发展现状及未来展望[J]. 中国农业科技导报, 2017, 19(1):29-36.
YANG Ya-lun, GUO Yan-zhi, SUN Jun-mao. Present status and future prospect for potato industry in China[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2017, 19(1):29-36.
- [10] Lehmann J. A handful of carbon[J]. *Nature*, 2007, 447(7141):143-144.
- [11] 陈温福, 张伟明, 孟军. 农用生物炭研究进展与前景[J]. 中国农业科学, 2013, 46(16):3324-3333.
CHEN Wen-fu, ZHANG Wei-ming, MENG Jun. Advances and prospects in research of biochar utilization in agriculture[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(16):3324-3333.
- [12] Marris E. Black is the new green[J]. *Nature*, 2006, 442:624-626.
- [13] Mašek O, Brownsort P, Cross A, et al. Influence of production conditions on the yield and environmental stability of biochar[J]. *Fuel*, 2013, 103:151-155.
- [14] Joseph S D, Downie A, Crosky A, et al. Biochar for carbon sequestration, reduction of greenhouse gas emissions and enhancement of soil fertility: A review of the materials science[J]. *Rend Circ Mat Palermo Suppl*, 2007, 48:101-106.
- [15] Cantrell K B, Hunt P G, Uchimiya M, et al. Impact of pyrolysis temperature and manure source on physicochemical characteristics of biochar[J]. *Bioresour Technol*, 2012, 107:419-428.
- [16] Yang Q, Ravnskov S A, Mathias N, et al. Nutrient uptake and growth of potato: Arbuscular mycorrhiza symbiosis interacts with quality and quantity of amended biochars[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soils*, 2020, 183(2). doi:10.1002/jpln.201900205.
- [17] 付春娜, 张丽莉, 石瑛, 等. 生物炭与干旱对马铃薯初花期生长特性的影响[J]. 贵州农业科学, 2016, 44(10):18-21.
FU Chun-na, ZHANG Li-li, SHI Ying, et al. Effects of biochar and drought on growth characteristics of potato at early flowering stage[J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2016, 44(10):18-21.
- [18] Akhtar S S, Andersen M N, Liu F. Biochar mitigates salinity stress in potato[J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2015, 201(5):368-378.
- [19] 张国辉, 张新学, 郭鑫年, 等. 生物炭对宁南山区马铃薯土壤理化性状及水分运移的影响[J]. 贵州农业科学, 2016, 44(11):73-76.
ZHANG Guo-hui, ZHANG Xin-xue, GUO Xin-nian, et al. Effect of biological carbon on soil physicochemical properties and moisture movement of potato in Ningnan mountainous region[J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2016, 44(11):73-76.
- [20] Liu C, Liu F, Ravnskov S, et al. Impact of wood biochar and its interactions with mycorrhizal fungi, phosphorus fertilization and irrigation strategies on potato growth[J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2017, 203(2):131-145.
- [21] 王贺东, 吕泽先, 刘成, 等. 生物炭施用对马铃薯产量和品质的影响[J]. 土壤, 2017, 49(5):888-892.
WANG He-dong, LÜ Ze-xian, LIU Cheng, et al. Effects of biochar on potato yield and quality[J]. *Soil*, 2017, 49(5):888-892.
- [22] 刘志华, 丛聪, 智嘉禾, 等. 干旱条件下生物炭施用量对马铃薯块茎形成期土壤速效养分含量的影响[J]. 中国马铃薯, 2015, 29(3):153-157.
LIU Zhi-hua, CONG Cong, ZHI Jia-he, et al. Effects of biochar application rate on available nutrient content under drought condition during potato tuber formation[J]. *China Potato*, 2015, 29(3):153-157.
- [23] 黄修梅, 李明, 戎素萍, 等. 生物炭添加对马铃薯根际土壤真菌多样性和产量的影响[J]. 中国蔬菜, 2019, 359(1):51-56.
HUANG Xiu-mei, LI Ming, RONG Su-ping, et al. Effects of biochar addition on fungal diversity of potato rhizosphere soil and yield of potato[J]. *China Vegetables*, 2019, 359(1):51-56.
- [24] Yu H W, Zou W X, Chen J J, et al. Biochar amendment improves crop production in problem soils: A review[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 232:8-21.
- [25] 张正艳, 胡海军, 吴亚男, 等. 生物炭对马铃薯生长发育和土壤环境影响的研究进展[J]. 黑龙江农业科学, 2017, 11:101-104.
ZHANG Zheng-yan, HU Hai-jun, WU Ya-nan, et al. Review about effect of biochar on potato growth and soil environment[J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2017, 11:101-104.
- [26] 陈温福, 刘金, 徐正进, 等. 一种组合式生物质颗粒炭化炉及其制炭方法:201110073104[P]. 2011-03-25.
CHEN Wen-fu, LIU Jin, XU Zheng-jin, et al. A combined biomass pellet carbonization furnace and its carbon production method: 201110073104[P]. 2011-03-25.
- [27] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 三版. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
BAO Shi-dan. Agricultural soil analysis[M]. 3th Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [28] 刘喜才, 张丽娟. 马铃薯种质资源描述规范和数据标准[M]. 北京:

- 中国农业出版社, 2006.
- LIU Xi-cai, ZHANG Li-juan. Descriptors and data standard for potato (*Solanum tuberosum* L.) [M]. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2006.
- [29] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版, 2000.
- LI He-sheng. Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [30] 刘祖祺, 张石城. 植物抗性生理学[M]. 北京: 农业出版社, 1994.
- LIU Zu-qi, ZHANG Shi-cheng. Plant hardness physiology[M]. Beijing: Agriculture Press, 1994.
- [31] 陈毓荃. 生物化学实验方法和技术[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- CHEN Yu-quan. Method and technology of biochemistry experiment [M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [32] Oguntunde P G, Abiodun B J, Ajayi A E, et al. Effects of charcoal production on soil physical properties in Ghana[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2008, 171: 591-596.
- [33] 付春娜. 生物炭对不同马铃薯品种生长及产量的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2016.
- FU Chun-na. Effects of biochar on the productivity and yield of different potato varieties[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2016.
- [34] Poormansour S, Razzaghi F, Sepaskhah A R. Wheat straw biochar increases potassium concentration, root density, and yield of Faba Bean in a sandy loam soil[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2019, 50(15): 1799-1810.
- [35] 张伟明, 孟军, 王嘉宇, 等. 生物炭对水稻根系形态与生理特性及产量的影响[J]. 作物学报, 2013, 39(8): 1445-1451.
- ZHANG Wei-ming, MENG Jun, WANG Jia-yu, et al. Effect of biochar on root morphological and physiological characteristics and yield in rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2013, 39(8): 1445-1451.
- [36] Agegnehu G, Srivastava A K, Bird M I. The role of biochar and biochar-compost in improving soil quality and crop performance: A review[J]. *Applied Soil Ecology*, 2017, 119: 156-170.
- [37] Ahmed A, Kurian J, Raghavan V. Biochar influences on agricultural soils, crop production, and the environment: A review[J]. *Environmental Reviews*, 2016, 24(4): 495-502.
- [38] Steiner C, Teixeira W G, Lehmann J, et al. Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered central Amazonian upland soil[J]. *Plant and Soil*, 2007, 291: 275-290.
- [39] 索桂芳, 吕豪豪, 汪玉瑛, 等. 不同生物炭对氮的吸附性能[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(6): 1193-1202.
- SUO Gui-fang, LÜ Hao-hao, WANG Yu-ying, et al. Adsorption of nitrogen by different biochars[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(6): 1193-1202.
- [40] Cheng L X, Zhang S M, Yang L L, et al. Comparative proteomics illustrates the complexity of Fe, Mn and Zn deficiency-responsive mechanisms of potato (*Solanum tuberosum* L.) plants in vitro[J]. *Plant*, 2019, 250(1): 199-217.
- [41] Burlingame B, Mouille B, Charrondiere R. Nutrients, bioactive non-nutrients and anti-nutrients in potatoes[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2009, 22(6): 494-502.
- [42] Robertson T M, Alzaabi A Z, Robertson M D, et al. Starchy carbohydrates in a healthy diet: The role of the humble potato[J]. *Nutrients*, 2018, 10(11): 1764.
- [43] Warnock D D, Lehmann J, Kuyper T W, et al. Mycorrhizal responses to biochar in soil concepts and mechanisms[J]. *Plant and Soil*, 2007, 300(1/2): 9-20.
- [44] 赵金凤, 陈静文, 张迪, 等. 玉米秸秆和小麦秸秆生物炭的热稳定性及化学稳定性[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(2): 458-465.
- ZHAO Jin-feng, CHEN Jing-wen, ZHANG Di, et al. Thermal stability and oxidation resistance of biochars derived from cob stalk and wheat stalk[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(2): 458-465.
- [45] Zhao X, Wang J W, Wang S Q, et al. Successive straw biochar application as a strategy to sequester carbon and improve fertility: A pot experiment with two rice/wheat rotations in paddy soil[J]. *Plant and Soil*, 2014, 378: 279-294.
- [46] Kim J S, Sparovek G, Longo R M, et al. Bacterial diversity of terra preta and pristine forest soil from the western Amazon[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(2): 684-690.
- [47] Kolb S E, Fermanich K J, Dornbush M E. Effect of charcoal quantity on microbial biomass and activity in temperate soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, 73: 1173-1181.
- [48] Peter P C. Biochar and conservation agriculture nexus: Synergy and research gaps for enhanced sustainable productivity in degraded soil-review[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2018, 49(3): 389-403.
- [49] Torabian S, Farhangi-Abri S, Rathjen J. Biochar and lignite affect H⁺-ATPase and H⁺-PPase activities in root tonoplast and nutrient contents of mung bean under salt stress[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2018, 129: 141-149.
- [50] Lian F, Xing B S. Black carbon(Biochar) in water/soil environments: Molecular structure, sorption, stability, and potential risk[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(23): 13517-13532.
- [51] Yuan J H, Xu R K, Zhang H. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(3): 3488-3497.
- [52] Wang G F, Govinden R, Chenia H Y, et al. Suppression of phytophthora blight of pepper by biochar amendment is associated with improved soil bacterial properties[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2019, 55(8): 813-824.
- [53] Wu H M, Qin X J, Wu H M, et al. Biochar mediates microbial communities and their metabolic characteristics under continuous monoculture[J]. *Chemosphere*, 2020, 246: 125835.
- [54] Dangi S, Gao S D, Duan Y H, et al. Soil microbial community structure affected by biochar and fertilizer sources[J]. *Applied Soil Ecology*, 2019, 150: 103452.