文章编号:1000-7601(2020)01-0086-06 **doi**:10.7606/j.issn.1000-7601.2020.01.12

生物炭对谷子幼苗生长及光合特性的影响

刘慧敏[1],张圣也[1],郭怀刚[1],林俊俊[1],李佐同[1],
闫凤超[2],朱广石[2],徐晶宇[1],赵长江[1]

(1.黑龙江八一农垦大学农学院,黑龙江省秸秆资源化利用工程技术研究中心/黑龙江省现代农业栽培技术与作物种质改良重点实验室,黑龙江 大庆 163319; 2.黑龙江省农垦科学院,黑龙江 哈尔滨 150000)

摘　要:为揭示生物炭在谷子种植中的应用潜力和价值,以祥谷 3 号为材料,采用室内盆栽试验的方式,在土壤中添加 3 种不同比例的生物炭(10、50、90 g · kg^{-1}),于播种后 30 d 对谷子幼苗进行生物量、根系形态和地上形态及叶片光合的测定分析。结果表明:与未施用生物炭(BC0)对照相比,不同剂量的生物炭均显著改善了谷子幼苗地上和地下生物量、形态指标以及除胞间 CO_2浓度以外的其他光合参数指标,且以中等剂量生物炭(50 g · kg^{-1})对谷子生长和光合指标的影响效果最为明显。与对照相比,中等剂量生物炭(50 g · kg^{-1})处理谷子幼苗地上部分和地下部分鲜重、干重分别提高了 220%、181%和 500%、350%,根冠比增加 41.7%;谷子幼苗地下部分主根长、总根长、总根表面积、根尖数、分枝数分别提高 124%、215%、323%、86.4%、279%;谷子地上部分幼苗株高、茎粗和叶面积分别提高 48.28%、50%、159%;叶片相对叶绿素含量和净光合速率分别提高 21.01%和 167%。研究表明,生物炭添加可以改善地下根系和地上茎叶形态,改善叶片光合和根系对水分和矿质元素的吸收能力,从而促进谷子生物量的积累,可为后期产量的形成奠定基础。

关键词:谷子;生物炭;幼苗生长;根系形态;光合特性
中图分类号:S515　　**文献标志码**:A

Effects of biochar supplement in soil on growth and photosynthetic characteristics of millet seedlings

LIU Huimin[1], ZHANG Shengye[1], GUO Huaigang[1], LIN Junjun[1], LI Zuotong[1],
YAN Fengchao[2], ZHU Guangshi[2], XU Jingyu[1], ZHAO Changjiang[1]

(1. *College of Agriculture*, *Heilongjiang Bayi Agricultural University*, *Heilongjiang Engineering Technology Research Center for Crop Straw Utilization/Key Laboratory of Modern Agricultural Cultivation Technology and Crop Germplasm Improvement of Heilongjiang Province*, *Daqing*, *Heilongjiang* 163319, *China*;
2. *Heilongjiang Agricultural Reclamation Academy of Sciences*, *Herbin*, *Heilongjiang* 150000, *China*)

Abstract: To reveal the potential application and value of biochar in millet cultivation, the Setaria italica variety, Xianggu 3, was planted in the soil pots with three biochar rates (10, 50, and 90 g · kg^{-1}) were supplemented. The seedlings biomass, the morphology of underground roots, aboveground, and the photosynthetic characteristics of millet seedlings were analyzed after sowing 30 days. The results showed that compared with the untreated control (BC0), the different doses of biochar significantly promoted the aboveground and underground biomass and phenotype indicators of millet seedlings, as well as other photosynthetic parameters except the intercellular CO_2 concentration. And the effect of 50 g · kg^{-1} biochar treatment on growth and photosythesis of millet was most obious. Compared with the control (0 g · kg^{-1}), the fresh weight and the dry weight of both the aboveground and the un-

收稿日期:2019-03-16　　**修回日期**:2019-05-22
基金项目:中央引导地方科技发展专项(ZY16A06);黑龙江农垦总局科技项目(NKKY190210-01);黑龙江农垦总局科技攻关项目(HNK135-02-05);黑龙江省应用技术研究与开发计划项目(GZ13B018);黑龙江省优势特色学科建设项目(2017)
作者简介:刘慧敏(1995-),女,黑龙江伊春人,硕士,研究方向为作物逆境生理。E-mail:15765962029@163.com
通信作者:赵长江,男,副教授,主要从事作物逆境生理与分子生物学研究。E-mail:zhaocj15@126.com
徐晶宇,女,教授,主要从事作物逆境生理与分子生物学研究。E-mail:xujingyu2003@hotmail.com

derground were significantly promoted to 220% and 181%, 500% and 350%, respectively, and the root-shoot ratio increased by 41.7%. The 5 phenotype indicators of the underground, including the root length, the total root length, the total root surface area, the root tip number, and the branch number increased by 124%, 215%, 323%, 86.4%, and 279%, respectively. While the 3 phenotype indexes of the aboveground, including the seedling height, the stem diameter, and the leaf area increased by 48.28%, 50%, and 159%, respectively. The photosynthetic indicators, for example, the leaf relative chlorophyll content and the net photosynthetic rate increased by 21.01% and 167%, respectively. These results suggested that the biochar addition in soil could promote the biomass of millet seedlings through improving the phenotype construction of the underground roots and the aboveground stems and leaves, and enhancing the photosynthetic capacity of leaves. This can lay a foundation for the formation of later crop yield.

Keywords: millet; biochar; seedling growth; root morphology; photosynthetic characteristics

秸秆作为农作物生产伴生的副产品,因其种类多、数量大、分布广,成为生物质能资源的重要来源之一。以秸秆等农业废弃物生物质资源为原料,在无氧或低氧环境下通过高温裂解产生生物质炭,为呈碱性非石墨化碳结构,不仅具有多孔性、高比表面积和丰富表面官能团的特点,而且含少量矿物质和挥发性有机化合物,不易被微生物分解[1]。近年来,生物炭已被广泛应用于环境、农业、能源等各个领域[2-3]。生物质炭的广泛应用,一方面可以节约利用资源、提高农业生产效益,另一方面还可以将碳封存在土壤中有效地减少 CO_2 气体的排放,同时作为很好的土壤改良剂,提高土壤肥力和生产力[4-5]。

近年来,已有大量研究表明,生物炭可改善土壤孔隙结构,降低土壤容重[6],增加土壤比表面积[7-8],提高土壤的 C/N 比[9],提高土壤持水能力[10]等,生物炭对贫瘠土壤改良效果尤为显著。然而,土壤中生物炭的施用对作物生产的影响存在一定的变异,尽管多数研究表明生物炭对植物具有显著的促进作用,但也有抑制作用或基本无任何影响的报道[11]。通过对大豆、豇豆、萝卜、番茄和水稻的研究,发现生物炭对上述作物具有显著的促生和增产作用[12-17]。其中,生物炭不仅能够促进 C4 作物玉米出苗,显著促进玉米株高、茎粗[18];而且生物炭对轻度盐碱种植的 C3 作物小麦幼苗生长具有显著的促生作用[19]。

谷子(*Setaria italica*)因其营养价值高而成为重要的杂粮作物,而且谷子具有较好的抗旱、节水、耐瘠薄能力,在干旱贫瘠的土壤上种植,具有良好的稳产性[20]。在中国北方常年大面积种植,效益显著[21-22]。但是,关于生物炭对谷子幼苗生长影响相关的研究鲜见报道。本研究通过盆栽试验中不同比例生物炭的添加,测试分析了谷子幼苗植株地上部和地下部生物量和形态以及叶片光合性能相关指标,初步揭示生物炭对谷子幼苗生长的影响及光合调控机制,旨在明确生物炭在谷子有机种植中的应用前景。

1　材料与方法

1.1　试验材料

谷子品种为祥谷 3 号,购买自黑龙江省肇源县农资市场。生物炭材料采购于大连兴龙垦有限公司,用立式炭化炉烧制,原材料为花生壳炭,制备温度为 400℃ ~ 500℃。基本性质:pH 8.34,含碳 53.64%、氮 1.23%、磷 0.89%、钾 1.56%。

1.2　试验设计

试验设 4 个处理,即生物炭含量分别占风干土质量 0 $g \cdot kg^{-1}$(BC0),10 $g \cdot kg^{-1}$(BC1),50 $g \cdot kg^{-1}$(BC5),90 $g \cdot kg^{-1}$(BC9),每个处理 5 次重复。将大庆地区田间草甸黑钙土和生物炭全部过 2 mm 筛,与化肥混匀后等量装入 11 cm×7.5 cm×10 cm 的花盆中,每盆装土 1 kg,浇透水待播种。基肥用量分别为 N150 $mg \cdot kg^{-1}$、$P_2O_5$100 $mg \cdot kg^{-1}$、K_2O 70 $mg \cdot kg^{-1}$。

播前先用蒸馏水清洗 2 遍去除秕谷,再用 10% 次氯酸钠溶液消毒 10 min,最后用蒸馏水冲洗 5 遍。每盆均匀摆放 30 粒种子置于黑龙江八一农垦大学农学院植物生长室内,培养 30 d 后用于指标测定。培养条件:昼夜温度为(25±2)℃/(20±2)℃,每天光照 12 h,光强为 1 000 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$,相对湿度为 60%~80%。

1.3　生长指标的测定

随机选取各处理代表性幼苗 10 株,测定地上株高和茎粗以及叶面积(托普 YMJ-B 叶面积仪);然后用自来水冲洗根系周围土壤获得完整植株,在蒸馏水中测定根长,吸干植株表面水分,测定鲜重,地

上和地下部分置于干燥箱中,105℃杀青 30 min 后 80℃烘至恒重,称取干重。

1.4 根系形态的测定

利用根系扫描仪(Epson Perfection V800photo)对上述代表性植株根系进行扫描成像,并用 WinRHIZO 根系分析软件对主根长、根总长度、根总表面积、根总体积、根尖数、分枝数进行分析。

1.5 叶片光合相关指标的测定

随机选取各处理代表性幼苗 10 株,于播种后第 30 天用便携式光合仪(Li6400)测定倒数第 2 位叶的最大叶片净光合速率(*Pn*)、气孔导度(*Gs*)、胞间 CO_2浓度(*Ci*)与蒸腾速率(*Tr*),并依据 *Pn*/*Tr* 计算叶片水分利用效率(*WUE*)。同时,采用叶绿素仪(SPAD-502 Plus)测定相对叶绿素含量。

1.6 数据统计

用 Excel 对试验数据进行整理和相关图表的制作,用 SPSS 软件对数据进行显著性分析。

2 结果与分析

2.1 生物炭对谷子幼苗生物量累积的影响

与未施用生物炭(BC0,对照)相比,施入不同剂量(10、50、90 g·kg^{-1})生物炭的处理都显著促进谷子幼苗生物量的积累,无论地上部分鲜重和干重,还是地下部分鲜重和干重(表 1)。而且,随着生物炭施入量的增加,谷子幼苗的地上部与地下部重量均呈现先增加后下降的趋势。与未施用生物碳(BC0)相比,BC5 处理谷子幼苗地上和地下部生物量积累达到最高值,地上鲜重和干重、地下鲜重和干重分别增加 220%、181%和 500%、350%;高剂量生物炭 BC9 处理谷子幼苗生物量增加幅度低于中剂量的 BC5 处理,表明中等剂量生物炭更有利于谷子幼苗生物量积累。

根冠比能够反映出作物地上和地下部分的协调性,根冠比越大表明其根系发育越好,植株因此会具有较强的吸收水分和矿物质的能力。施入不同剂量生物炭处理谷子幼苗的根冠比较对照高 36.9%~41.7%,均达到显著水平;随着生物炭施入量的增加,谷子幼苗的根冠比与生物量变化趋势一致,但是不同剂量间差异不显著(表 1)。结果表明,土壤中生物炭的添加可促进谷子幼苗地上和地下部分生物量的积累,对地下部分根系的促进效果更为显著。

表 1 生物炭对谷子幼苗生物量的影响

Table 1 Effects of biochar on the biomass of the millet seedling

处理 Treatment	鲜重 Fresh weight/g		干重 Dry weight/g		根冠比 Root to crown ratio
	地上 Above-ground	地下 Underground	地上 Above-ground	地下 Underground	
BC0	0.20±0.01d	0.01±0.00c	0.027±0.002d	0.002±0.000c	0.084±0.01b
BC1	0.52±0.02b	0.05±0.01ab	0.064±0.005b	0.007±0.001ab	0.117±0.01a
BC5	0.64±0.03a	0.06±0.00a	0.076±0.003a	0.009±0.001a	0.119±0.01a
BC9	0.38±0.02c	0.04±0.01b	0.048±0.004c	0.006±0.001b	0.115±0.01a

注:BC0、BC1、BC5、BC9 代表生物炭的施入量分别为 0、10、50、90 g·kg^{-1}。不同字母表示处理间差异达 $P<0.05$ 显著水平。下同。

Note: BC0, BC1, BC5, BC9 represents the amount of biochar applied to 0, 10, 50 g·kg^{-1} and 90 g·kg^{-1}. Different letters indicate a significant difference at $P<0.05$ level between treatments. The same below.

2.2 生物炭对谷子幼苗地上部生长的影响

与未施用生物炭(BC0)对照相比,施入不同剂量生物炭的处理都显著促进谷子幼苗的株高、茎粗、叶面积及叶片宽(表 2)。而且,随着生物炭施入量的增加,谷子幼苗的地上部生长指标均呈现先增加后下降的趋势。其中 BC5 处理谷子幼苗株高、茎粗、叶面积及叶片宽度达到最高值,分别增加 48%、50%和 159%、39%;BC9 处理谷子地上部生长低于 BC5 处理。上述研究表明,适量生物炭能增加谷子幼苗株高和茎粗,而且增加谷子叶面积。叶面积的增加为谷子幼苗的高效光合作用提供了物质基础,秸秆加粗不仅有助于有机物和矿物质的运输,而且加强了谷子的抗倒伏能力。

表 2 生物炭对谷子幼苗地上部生长的影响

Table 2 Effects of biochar on above-grouud growth of millet seedlings

处理 Treatment	株高/cm Plant height	茎粗/cm Stem thickness	叶面积/cm^2 Leaf area	叶片宽度/cm Blade width
BC0	19.43±0.40d	0.14±0.00c	3.95±0.05b	0.79±0.02b
BC1	26.39±0.58b	0.20±0.05ab	8.60±1.30a	1.07±0.07a
BC5	28.81±0.38a	0.21±0.00a	10.23±1.96a	1.10±0.09a
BC9	23.17±0.84c	0.19±0.01b	7.20±0.71ab	0.85±0.02b

2.3 生物炭对谷子幼苗光合参数的影响

光合作用是植物生长和物质积累的基础,对植物生长发育具有重要意义[23]。与未施用生物炭(BC0)对照相比,施入不同剂量生物炭的处理均提高谷子幼苗叶片的净光合速率(*Pn*)、叶片气孔导度

(*Gs*)、蒸腾速率(*Tr*);同时不同程度地降低了胞间 CO_2浓度(*Ci*)(图 1)。而且,随着生物炭施入量的增加,谷子幼苗的净光合速率(*Pn*)、叶片气孔导度(*Gs*)、蒸腾速率(*Tr*)均呈现先增加后下降的趋势。其中 BC5 处理对谷子净光合速率(*Pn*)、叶片气孔导度(*Gs*)、蒸腾速率(*Tr*)的促进效果最好,分别增加 167%、47%、45.5%,达显著水平($P<0.05$);而胞间 CO_2浓度(*Ci*)显著降低。研究表明,中剂量生物炭可促进谷子幼苗光合,而且,适合剂量生物炭对作物净光合的促进具有非气孔性因素的影响,其中最大净光合受原料 CO_2 供应影响。

2.4　生物炭对谷子幼苗叶绿素含量和水分利用效率的影响

叶绿素含量是反映植物叶片光合能力及植株健康状态的重要指标。与未施用生物炭(BC0)对照相比,施入不同剂量生物炭的处理均促进谷子幼苗叶绿素含量(图 2)的增加。而且,随着生物炭施入量的增加,谷子幼苗的叶绿素含量均呈现先增加后下降的趋势。其中 BC5 处理谷子幼苗叶绿素含量最高,与对照相比增加 21.01%,差异达显著水平($P<0.05$);BC9 处理高剂量生物炭引起谷子幼苗叶绿素含量增加幅度低于中剂量的 BC5 处理。表明低、中剂量生物炭可促进谷子幼苗叶绿素含量的增加,从而促进光合,促进幼苗生物量的积累。

单叶水分利用效率是瞬时水分利用效率,它反映了作物光合作用状况[24]。施入不同剂量生物炭处理谷子幼苗的水分利用效率均显著高于对照(图 2)。尽管不同剂量间生物炭施用对水分利用效率影响差异不显著,最高值仍为中等剂量 BC5 处理。表明生物碳可协调气孔导度和蒸腾,提高水分利用效率,减少损耗,而且叶片蒸腾作用的增强促进作物根部吸收更多的水分和养分,促进作物生长。

2.5　生物炭对谷子幼苗根系形态的影响

与未施用生物炭(BC0)对照相比,施入不同剂量生物炭处理均显著促进谷子根系发育,主根长、总根长、根系表面积、根尖数以及分枝数均有提高(表 3)。随着生物炭施入量的增加,谷子的根系各项指标均呈现先增加后下降的趋势。其中 BC5 处理

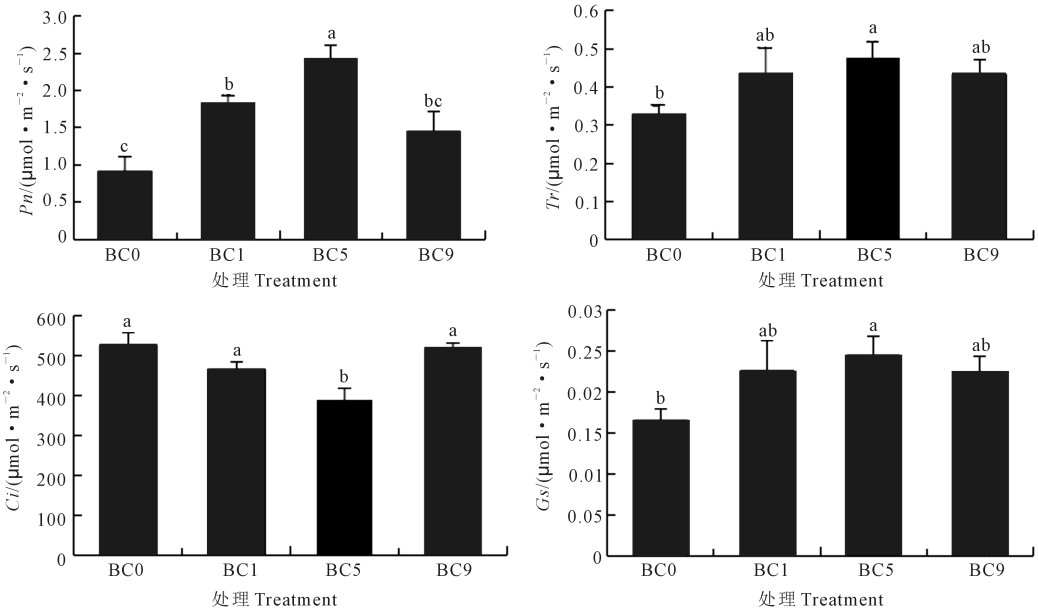

图 1　生物炭对谷子幼苗叶片光合参数的影响

Fig.1　Effects of biochar on photosynthetic parameters of millet seedlings

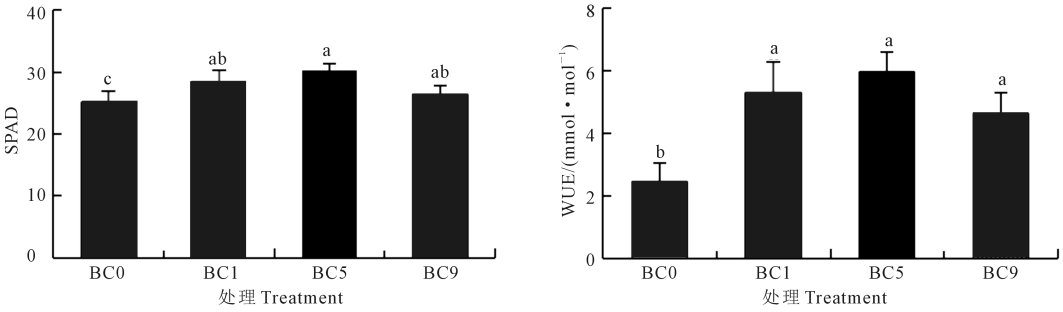

图 2　生物炭对谷子叶片叶绿素含量(SPAD 值)和水分利用率(WUE)的影响

Fig.2　Effects of biochar on chlorophyll content (SPAD) and water use efficiency of millet seedlings leaves

表 3 生物炭对谷子幼苗根系特征参数的影响

Table 3 Effects of biochar on the root characteristic parameters of millet seedlings

处理 Treatment	主根长/cm Main root length	总根长/cm Total rootlength	平均根系直径/mm Average root diameter	总根表面积/cm^2 Total root surface area	根尖数 Number of root tips	分枝数 Number of branches
BC0	4.59±0.48c	14.32±2.52b	0.29±0.05a	1.02±0.10c	191±33b	100±21b
BC1	9.73±0.61b	41.69±6.78a	0.27±0.02a	3.71±0.36ab	313±57a	367±54a
BC5	10.30±1.01a	45.15±5.16a	0.36±0.04a	4.23±0.49a	356±40a	379±59a
BC9	6.86±0.80b	33.63±6.39a	0.31±0.02a	3.07±0.46b	346±27a	270±48a

谷子主根长和总根长、根系表面积、根尖数以及分枝数均达到最高,分别提高 124%、216%、323% 和 86.4%、279%。总体来说,BC9 处理高剂量生物炭促进根系发育的幅度低于中剂量的 BC5 处理,表明中等剂量的生物炭更有利于根系生长发育,尤其是根系与土壤接触面积显著增加,吸收水分和矿质营养的能力显著增强,而且有助于谷子抗倒伏和耐旱等逆境耐受能力提升。

3 讨 论

本研究采用室内盆栽试验的方式,分析土壤中添加 3 种不同量的生物炭(10、50、90 g · kg^{-1})对谷子幼苗生长的影响,研究发现生物炭添加可以改善幼苗期谷子地下根系和地上茎叶形态以及叶片光合能力,从而促进谷子幼苗地上和地下部分生物量的积累,其中以中等剂量生物炭(50 g · kg^{-1})对谷子供试指标的影响最为明显。当然,由于本试验采用的是温室盆栽试验,与自然的田间环境有所差异,所以本研究结果对于谷子田间种植应用仍需进一步深入验证探讨。

3.1 施用生物炭对谷子地上部分生长的影响

植株生物量或产量能够直接反映出作物的生长状况,不仅与地上部分光合能力密切相关,而且与地下部分与地上部分生长协调性密切相关。本研究得出不同剂量生物炭的添加使谷子幼苗的光合能力显著提高,主要通过对胞间 CO_2 同化能力的提升实现,表明光合能力提升的限制并非气孔因素,而是 CO_2 供应限制,还存在较大的提升潜力。结合在玉米、水稻和烟草等作物的研究[25-29],生物炭可显著提高玉米叶片的净光合速率、叶绿素含量和叶面积指数,不仅有助于提高叶片光合效率,而且增加的植株光合作用面积和叶绿素含量有助于维持后期光合性能,促进干物质的积累,为后期产量的形成奠定基础。可能与生物炭添加提高植物叶片 PSII 反应中心的光能转换效率有关[30]。同时,生物炭添加促进谷子幼苗株高和茎粗,也与对玉米的研究结论一致[15]。

另外,基于叶片蒸腾速率和气孔导度的水分利用效率的显著增大,则促使谷子吸收土壤养分向地上部分进行营养物质运输,从而有助于增强谷子地上部分的快速生长。一方面是生物炭改善土壤理化性质和根际周围环境,调控作物对养分的吸收、运转,使根系有较高的活力和较强的生理功能,延缓叶片衰老,增强“源-库”关系,保障了地上部光合产物的形成、积累与转化,逐步释放养分供谷子利用。另一方面是生物炭促使叶面积增大,单位面积叶绿素含量得到提高,进而为更高效的光合作用提供了物质基础。

3.2 施用生物炭对谷子根系建成的影响

根系既是水分和养分吸收的主要器官, 又是多种激素、有机酸和氨基酸合成的重要场所, 其形态和生理特性与地上部生长发育、产量和品质均有密切关[31-34]。蒋健等[35]研究得出生物炭可增加玉米根系的总根长、根体积和根的干物质质量,提高玉米根系总的吸收面积和活跃吸收面积,同时维持较为适宜的根冠比,增强根系的生理功能。周劲松[36]研究也得出适量的生物炭可改善水稻根系形态结构,显著提升水稻的生物量和产量。本研究结果与上述结论基本一致,不同生物炭处理后均使谷子幼苗植株根长增长、根表面积增大、根平均直径增粗、根尖数和分枝数增多,增加了谷子幼苗根系与土壤接触面积和生物量,尤其是地下生物量优于地上增长,为作物水分和矿质营养的供应提供了物质保障;另一方也增加了谷子幼苗的抗倒伏能力,甚至抗旱能力。关于生物炭对谷子幼苗根系的促进,可能涉及生物炭添加后土壤物理因素、化学因素和生物因素等单因素或多因素的改变,在本研究中,因为供试植物生长周期短,我们推论可能与生物炭添加造成的土壤物理结构改变密切相关,施入土壤后可以降低土壤容重、增大总孔隙度,改善土壤的持水和供水能力,从而为根系生长创造良好的条件。当然还可能与生物炭本身带来的营养元素等肥力因素有关。

在供试的 3 个生物炭剂量中,尽管都促进了谷子幼苗的地上和地下部分生长,但是在 50 g · kg^{-1} 添加量时生物炭对谷子幼苗的促生效果明显,90 g

· kg^{-1}生物炭的促生效果减弱。与周劲松[36]研究得出的高浓度生物炭对水稻生长抑制的结果不一致。抑制的原因,可能是土壤孔隙度过高,加速水分、养分流失,也会导致根系对养分吸收利用不足;也可能是添加过量生物炭导致土壤酸碱度发生较大改变[37-38],抑制根系生长和养分吸收;也可能是生物炭引起碳氮失调或者是部分生物炭导致氮的固定和吸附[39-41],降低了土壤中有效氮,一定程度上限制了植株对有效氮的吸收,从而对植物生长产生抑制作用。生物炭添加对于土壤的改良和作物的促生作用,不仅与生物炭的施入量有关,还与生物炭的特性和成分构成、土壤性质、作物的品种或生育期以及环境条件等因素有关,仍需后续研究进一步探讨。

4　结　论

1)谷子生物量累积和地上部生长随生物炭施入量的增加呈现先增加后减少的趋势,与对照相比,施用中量生物炭处理(50 g · kg^{-1}),谷子地上部和地下部鲜重、干重,茎粗、株高、叶面积及叶片宽度的增长达到最高。

2)谷子叶片叶绿素含量、光合参数随生物炭施入量的增加呈现先增加后减少的趋势,与对照相比,施用中量生物炭处理(50 g · kg^{-1}),叶绿素含量、叶片净光合速率(*Pn*)、叶片气孔导度(*Gs*)、蒸腾速率(*Tr*)含量最高,分别增加 21.01%、167%、47%、46%。

3)谷子根系形态随生物炭施入量的增加呈现先增加后减少的趋势,与对照相比,施用中量生物炭处理(50 g · kg^{-1}),主根长、总根长,根系表面积、根尖数以及分枝数增长效果均达到最高,分别提高 124%、215%、323%和 86%、279%,但对根系平均直径影响效果不显著。

参 考 文 献:

[1] 杨勇.生物炭对作物生长效应及机理研究进展[J]. 农业与技术,2017,37(14):57-58.

[2] Zsuzsa A M, Yousif E, Dwayne S, et al. Characterization of engineered biochar for soil management [J]. Environmental Progress & Sustainable Energy, 2014, 33 (2):490-496.

[3] Xu G, Lv Y C, Sun J N, et al. Recent advances in biochar applications in agricultural soils: Benefits and environmental implications [J]. Clean Soil Air Water, 2012, 40 (10):1093-1098.

[4] Lehmann,J. Bio-energy in the black [J]. Frontiers in Ecology & the Environment,2011,5(7):381-387.

[5] Laird D A. The charcoal vision: A win-win cenario for simultaneously producing bioenergy, permanently sequestering carbon, while improving soil and water quality[J]. Agronomy Journal,2008,100 (1):178-181.

[6] Gundale M J, Deluca T H. Temperature and source material influenceecological attributes of ponderosa pine and Douglas-fir charcoal[J]. Forest Ecology & Management,2006, 231(1):86-93.

[7] Chen Y, Shinogi Y, Taira M, et al.Influence of biochar use on sugarcane growth, soil parameters,and groundwater quality [J]. Australian Journal of Soil Research, 2010, 48 (7):526-530.

[8] Chan K Y, Zwieten L, MeszarosI, et al. Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment[J].Australian Journal of Soil Research,2007, 45(8):629-634.

[9] Steiner C, Glaser B, Teixeira W G, et al.Nitrogen retention and plant uptake on a highly weathered central Amazonian Ferralsol amended with compost and charcoal [J].Journal of Plant Nutrition & Soil Science, 2008, 171(60):893-899.

[10] 高海英,何绪生,耿增超,等. 生物炭及炭基氮肥对土壤持水性能影响的研究 [J]. 中国农学通报,2011,27 (24):207-213.

[11] 谢祖彬,刘琦,许艳萍,等. 生物炭研究进展及其研究方向 [J]. 土壤,2011,43(6):857-861.

[12] Hossain M K, Strezov V, Chan K Y, et al. Nelsona agronomic properties of wastewater sludge biochar and bioavailability of metals in production of cherry tomato (*Lycopersicon Esculentum*)[J].Chemosphere,2010,78(9):1167-1171.

[13] Noguera D, Rondón M, Laossi K R, et al. Contrasted effect of biochar and earthworms on rice growth and resource allocation in different soils [J]. Soil Biolog & Biochemistry, 2010, 42(7):1017-1027.

[14] Graber E R, Meller-Harel Y, Kolton M, etal. Biochar impact on development and productivity of pepper and tomato grown in fertigated-soilless media [J]. Plant and Soil, 2010, 337 (1-2):481-496.

[15] 刘世杰,窦森.黑碳对玉米生长和土壤养分吸收与淋失的影响[J]. 水土保持学报,2009,23 (1):79-82.

[16] 张伟明.生物炭的理化性质及其在作物生产上的应用 [D]. 沈阳:沈阳农业大学,2012.

[17] 朱优矫,李文庆,田晓飞,等. 生物炭基质对番茄幼苗生长及光合特性的影响 [J]. 长江蔬菜,2016,22 (9):18-21.

[18] 杨刚,周威宇.生物炭对盐碱土壤理化性质、生物量及玉米苗期生长的影响 [J]. 江苏农业科学,2017, 45 (16):68-72.

[19] Wang G J, Xu Z W.The effects of biochar on germination and growth of wheat in different saline-alkali soil[J]. Asian Agricultural Research, 2013,5(11):116-119.

[20] 张海金.谷子在旱作农业中的地位和作用[J].安徽农学通报,2007,13 (10):169-170.

[21] 张超,张晖,李冀新.小米的营养以及应用研究进展[J].中国粮油学报,2001,22 (1):51-58.

[22] 王洋,周怀平,关春林,等.旱地谷子水肥高效调控技术研究进展[J].山西农业科学,2012,40 (5):540-542.

[23] 王薇,宋廷宇,王艳,等.番茄叶片 SPAD 值与叶绿素含量的相关性分析 [J]. 北方园艺,2013,(23):12-15.

[24] 冯冰,吴英,李磊,等.生物炭对土壤性质及黄瓜和生菜幼苗生长的影响 [J]. 现代农业科学,2017,(24):54-57.

[25] 刘国玲,王宏伟,蒋健,等. 生物炭对郑单 958 生理生化指标及产量的影响田 [J]. 玉米科学,2016,24 (4):105-109.

[26] 张娜,李佳,刘学欢,等. 生物炭对夏玉米生长和产量的影响 [J]. 农业环境科学学报,2014,33 (8):1569-1574.

(下转第 116 页)