

王道涵,杨婷赟,于令令,等.生物炭改良风沙土对植物生长及养分的影响[J].沈阳农业大学学报,2024,55(1):29-36.

WANG Daohan, YANG Tingyun, YU Lingling, et al. Effects of biochar on plant growth and nutrients in aeolian sandy soil[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2024, 55(1):29-36.

生物炭改良风沙土对植物生长及养分的影响

王道涵, 杨婷赟, 于令令, 许端平

(辽宁工程技术大学 环境科学与工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要:为探究经不同浓度和不同种类生物炭改良后的风沙土中植物生长状况及养分含量变化情况,以辽宁省彰武台风沙地改良利用研究所试验基地风沙土为试验对象,进行了田间试验。以燕麦草为供试植物,分别施加秸秆炭、木炭、草炭,且每种生物炭设置5个不同的浓度梯度,均匀的施加到风沙土中,燕麦草经12周生长后,采集样品进行室内试验。主要通过分析燕麦草在不同改良条件下的株高、产量、叶绿素及氮磷钾含量,从而了解添加不同因素水平的生物炭对风沙土中植物生长及养分的影响。结果表明:不同生物炭与风沙土中燕麦草生长及养分含量均呈现极显著相关性($p < 0.05$),且施加浓度为 $4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 的秸秆炭对燕麦草株高、产量及养分含量均有明显提高,株高为 109.242 cm ,产量为 $229.25 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,叶绿素a和叶绿素b分别达到 $2.941 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $0.991 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,氮磷钾含量分别为 $3.411, 0.927, 28.766 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。因此,施加合适的生物炭,不仅可以对土壤进行改良,还可有效提高植物产量与养分含量,实现土壤有效利用的同时提高作物产量。

关键词:生物炭;风沙土;燕麦草;叶绿素;氮磷钾

中图分类号:S5-3;X53

文献标识码:A

文章编号:1000-1700(2024)01-0029-08

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Biochar on Plant Growth and Nutrients in Aeolian Sandy Soil

WANG Daohan, YANG Tingyun, YU Lingling, XU Duanping

(College of Environmental Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin Liaoning 123000, China)

Abstract: In order to investigate the plant growth and nutrient content changes in aeolian sandy soil improved by different concentrations and species of biochar, a field experiment was carried out on the aeolian sand soil of Zhangwu typhoon sand land improvement and utilization research institute in Liaoning province. In that experiment, oat grass was used as the test plant, and straw char, charcoal and grass char were applied to the aeolian sandy soil evenly with 5 different concentration gradients of each biochar. Oat grass was grown for 12 weeks and samples were collected for laboratory test. By analyzing plant height, yield, chlorophyll content, nitrogen, phosphorus and potassium content of oat grass under different improved conditions, the effects of biochar on plant growth and nutrient in aeolian sandy soil were studied. The results showed that the growth and nutrient content of oat grass in aeolian sandy soil were significantly correlated with different biochar ($p < 0.05$), and the plant height, yield and nutrient content of oat grass were significantly increased by the application of straw charcoal with a concentration of $4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, and the plant height was 109.242 cm , the plant height was 109.242 cm , the

收稿日期:2023-10-04

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2019YFC1803801)

第一作者:王道涵(1971-),男,博士,教授,博士生导师,从事污染生态学和土壤学等方面的研究, E-mail:wangdaohan@sian.com

yield was $229.25 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, chlorophyll a and b were $2.941 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ and $0.991 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ respectively, and the contents of nitrogen, phosphorus and potassium were $3.411, 0.927, 28.766 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ respectively. Therefore, the application of appropriate biochar can not only improve soil, but also increase plant yield and nutrient content, and improve crop yield at the same time of effective soil utilization.

Key words: biochar; sandy soil; oat grass; chlorophyll; nitrogen, phosphorus, potassium

氮磷钾是植物生长发育所必需的三大营养元素。氮对作物产量贡献率达 40%~50%^[1],在细胞分裂、作物的生长速度、产量及品质方面都有很好的促进作用^[2],是作物生产中最重要营养物质之一。磷是植物生长必须的第二大养分元素,占植物总干重的 0.2%~1.1%,在植物细胞生长、促进植物根系生长方面发挥重要作用^[3-4]。钾可促进作物内部碳水化合物的代谢,提高作物蛋白质含量^[5],进而提高作物产量和品质^[6]。同时,氮磷钾在提高植物抗寒、抗旱能力,调节细胞渗透压、调节气孔及促进光合作用等诸多方面有重要作用^[7-10]。研究表明,氮磷钾的合理施配对作物的产量和品质都产生不同程度的影响^[11-12],过多或过少的添加量都会对作物产量和品质不利。自然界中土壤的氮磷钾含量较低,是限制植物生长的主要因素,也影响着作物的产量和品质^[13]。此外,植物叶绿素可促进作物光合作用,对作物生长及品质产生影响。而生物炭的施加,可改善土壤状况^[14],从而影响植物对营养物质的吸收,增加作物产量^[15-16],生物炭类型及其施加量对土壤影响各不相同,不可避免地对作物长势及养分的量也会有所影响^[17]。因此,寻找合适的生物炭、探究最佳施加量对增加作物产量及养分含量有重要意义。

我国是世界上土地受到沙化危害最严重的国家之一^[18],沙化土地面积占国土面积的 17.9%^[19]。沙化治理逐年加强,但由于沙化面积大、涉及地域广,我国被侵蚀土地治理鲜有成效。我国耕地资源短缺,风沙土作为我国的一种边际土壤,存在土壤颗粒大、吸附性能小、结构松散等问题,导致土壤持水保肥能力弱、生产能力低下等^[20-21],但其作为我国实施“藏粮于地、藏粮于技”战略的重要耕地资源补充,不仅是生态系统的重要载体,更应是未来粮食增量的主要来源^[22]。科尔沁沙地是我国四大沙地之首^[23],该类土对当地及周边居民的收支状况产生较大影响^[24]。因此,改善风沙土理化性质对实现沙化地区生态修复及人民经济发展具有很大的现实意义。

生物炭作为一种优良的土壤改良材料备受关注。生物炭是生物有机质在少氧或缺氧的条件下,经高温裂解产生的一类高度芳香化、稳定性强的富碳固态物质,具有较大的比表面积、多孔结构和很好的吸附能力,含有丰富的养分^[25]。有研究表明,生物炭作为一种土壤改良剂,可提高土壤持水保肥能力^[26-27],降低土壤容重,提高风沙土含水量和孔隙度,增加土壤有机质及有效元素的含量^[28-31],改变土壤 pH 及酶活性^[31-33],同时提高植物养分含量,增加作物产量^[34-36]。

综上所述,生物炭作为改良剂改良土壤已被国内外学者广泛认可。但不同的生物炭对于不同类型的土壤改良效果各不相同,对不同作物的影响程度也各有所长。因此,本试验以燕麦草为研究对象,在风沙土中施加不同因素水平的生物炭,以探究不同生物炭对风沙土中植物生长及养分的影响。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

研究区地处科尔沁沙地东南方彰武县,于辽宁省风沙地改良利用研究所实验基地进行。该地坐标为 $42^{\circ}41'39.3''\text{N}$ $122^{\circ}33'11.5''\text{E}$,海拔 345.10 m,经对当地多年的气候观察得出,全年降雨量较少,多集中在 6~8 月,且蒸发量大,季节更替明显,阳光充沛,温差大,属于温带亚湿润半干旱季风气候区^[37]。目前彰武县北部沙荒现象明显,其土壤类型为风沙土(GB/T 17296-2009),同时风沙大且多,主要种植抗旱较强的沙生植物。

1.2 试验设计

试验总占地为 $18 \text{ m} \times 27 \text{ m}$,每个样方为 $3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$,共 54 个样方。从西向东分 3 类,分别添加秸秆炭(A)、木炭(B)和草炭(C),各生物炭理化性质如表 1,从北向南设置不同的添加量,分别为 CK(空白) $1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ (T1)、 $2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ (T2)、 $3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ (T3)、 $4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ (T4)、 $5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ (T5)(表 2),试验重复 3 次,试验田种植燕麦草,为供试植物。于 2021 年 5 月中旬播种燕麦草种,人工进行地下水浇灌,生长周期为 12 周,在 2021 年 8 月中旬对燕麦草进行样品采集。采集时,在样方对角线上随机选 5 点取样,分别于每点随机采集 3~4 株完整的燕麦草。取回后,于通风处将植株风干,把植株的地上部分和地下部分用剪刀

表1 风沙土及各生物炭理化性质

Table 1 Physicochemical properties of aeolian sand soil and biochar

名称 Name	pH	碱解氮/(mg·kg ⁻¹) Available N	有效磷/(mg·kg ⁻¹) Available P	有效钾/(mg·kg ⁻¹) Available K
风沙土 Sandy soil	6.43	13.63	10.03	52.56
草炭 Peat	7.06	153.74	40.67	3 015.52
木炭 Charcoal	8.77	314.23	77.40	4 118.84
秸秆炭 Straw charcoal	7.88	350.53	101.85	4 246.93

分离,取地上部分用于试验。

1.3 方法

1.3.1 燕麦草株高测量 燕麦草的株高为现场测量,在8月中旬采样时,对每个试验样方随机取5个取样点采样并用米尺测量株高,取平均值作为各个样方之间的株高对比。

1.3.2 燕麦草消毒——H₂SO₄-H₂O₂法 将植株烘干磨碎并过0.50 mm筛,称取0.50 g(准至0.000 2 g)于容积为100 mL的开氏瓶中,加入1 mL水进行润湿,后加入4 mL浓H₂SO₄摇匀,随后分两次各加入2

mL H₂O₂,每次加入后都要摇匀。在经过一系列反映之后,放置在电炉上加热消煮,直到固体全部成为液体且H₂SO₄发白烟,溶液呈褐色时停止加热,这个过程大约10 min。待冷却后,向溶液中加入2 mLH₂O₂,再次加热消煮5~10 min,冷却,再加入H₂O₂消煮,如此反复直到溶液呈现出无色或清亮。整个过程中,在加入H₂O₂的总量大约为8~10 mL时,要再继续加热5~10 min,以便将剩余的H₂O₂除尽。取下冷却后,要将溶液用蒸馏水进行定容。

1.3.3 燕麦草中氮磷钾的测定 试验中燕麦草氮磷钾含量依据《NY/T 2017-2011,植物中氮、磷、钾的测定》测定方法测定^[38]。

1.3.4 燕麦草叶绿素测定方法——分光光度法 将采集的植株置于通风处风干,之后用剪刀将其地上部分和地下部分剪开,地上部分用以测定叶绿素含量。采用分光光度法对燕麦草中叶绿素进行测定,叶绿素a和叶绿素b的含量计算公式为:

$$\text{叶绿素 a 含量}(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}) = \frac{C_A \times 25 \text{ mL} \times 1 \text{ mL}}{1\ 000 \text{ L} \times 0.5 \text{ g}} = 0.1C_A$$

$$\text{叶绿素 b 含量}(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}) = 0.1C_B$$

式中:C_A为分光光度计下测出的叶绿素 a 的色素浓度(mg·L⁻¹);C_B为分光光度计下测出的叶绿素 b 的色素浓度(mg·L⁻¹)。

1.3.5 数据统计与分析 本试验采用Excel 2019 对数据进行整理计算,用SPSS 27.0 软件对数据进行统计学分析,运用Origin 2021 软件作图。

2 结果与分析

2.1 生物炭对燕麦草生长的影响分析

由图 1 可知,风沙土在添加不同类型生物炭后,无论是株高还是产量,均呈现上升的趋势,其中添加秸秆炭对燕麦草株高和产量影响最为明显。由图 1 a 可知,草炭组随着草炭添加量的增加,株高于起初呈现缓慢增长的趋势,在 T5 水平下,发生显著变化,明显高于其他处理组;木炭组中由于添加木

表2 试验设计方案

Table 2 Test design scheme

序号 Serial number	因素水平/(kg·m ⁻²) Factor level		
	秸秆炭(A) Straw charcoal	木炭(B) Charcoal	草炭(C) Peat
CK	0	0	0
T1	1	1	1
T2	2	2	2
T3	3	3	3
T4	4	4	4
T5	5	5	5

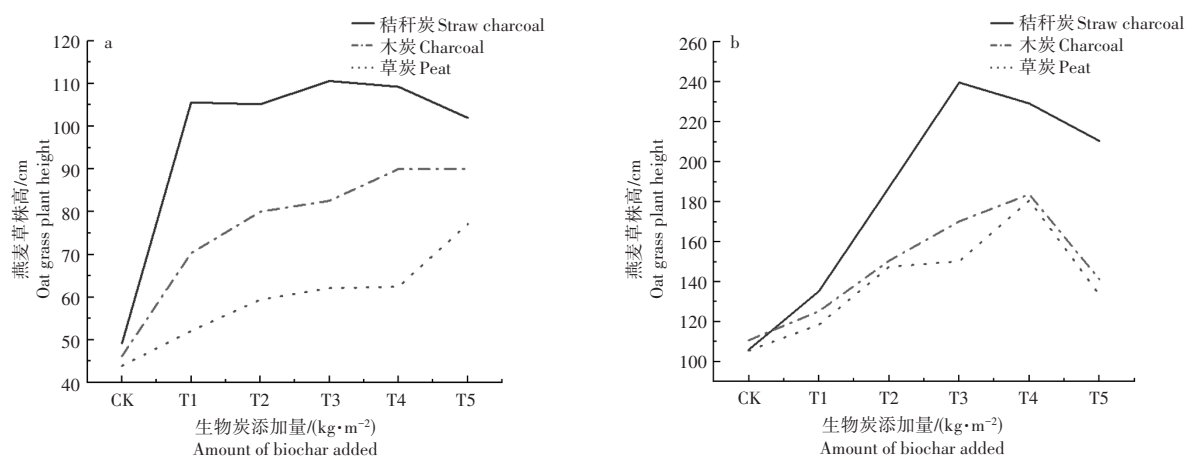


图1 不同因素水平下燕麦草株高产量变化图

Figure 1 Variation of plant height and yield of oat grass under different factors

炭浓度不同,株高呈现稳步上升的趋势,于T5水平达到最高;与对照组相比,添加秸秆炭后,秸秆炭组燕麦草株高出现明显变化,株高是原来高度的两倍,之后随着秸秆生物炭浓度的增加,呈现缓慢增长的趋势,在T3水平达到最高,但在T5水平时出现骤降,T1~T5水平下显著优于木炭组合草炭组,经分析,与CK之间具有显著性差异。综上可知,生物炭的施加对燕麦草生长均有促进作用,且添加浓度为 $3\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 的秸秆生物炭,对植株生长的促进作用最为明显。由图1b可知,草炭组在添加不同浓度草炭后,燕麦草产量呈现上涨的趋势,在T4水平时产量达到最高,但总体来说增量不是很大;木炭组燕麦草产量变化趋势及变化量与草炭组大致相同,也于T4水平下达到产量最大值;较草炭组和木炭组,秸秆炭组对燕麦草产量的影响更明显,产量是对照组产量的两倍,于T3水平时达到最大产量 $239.75\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,虽随着浓度的增加,产量有所下降,但产量变化不大且均优于对照组。3种生物炭对燕麦草的产量均有促进作用,其产量结果表现为:秸秆炭>(优于)木炭>草炭。

试验结果表明,不同因素水平下生物炭添加量与燕麦草的株高和产量均呈现极显著相关性($p<0.01$),生物炭的添加对燕麦草株高和产量均有促进效果,结果均表现为:秸秆炭>(优于)木炭>草炭。

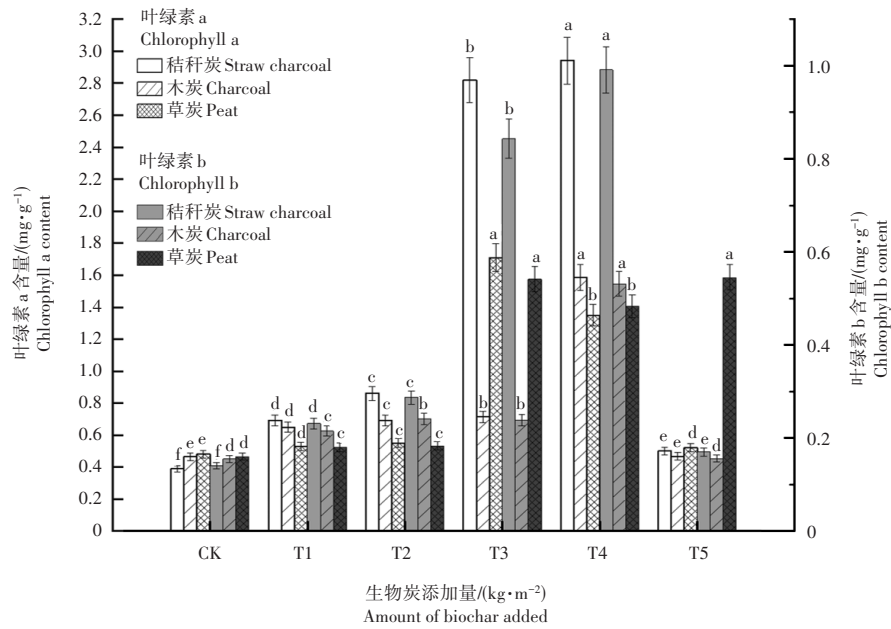
2.2 生物炭对燕麦草中叶绿素含量的影响分析

叶绿素是植物吸收光能,进行光合作用的重要物质基础。由图2可知,与对照组相比,无论添加何种生物炭,随着生物炭浓度的增加,燕麦草中叶绿素a含量都呈现先增加后减少的变化趋势,秸秆炭和木炭在T4因素水平时,叶绿素a含量达到最高,分别为 $2.941\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $1.585\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,而草炭在T3因素水平时已经达到最高,为 $1.71\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$;施加秸秆炭和木炭的燕麦草中叶绿素b含量变化情况同叶绿素a变化情况相似,但施加草炭的燕麦草中叶绿素b含量在T4因素水平发生下降又上升的趋势,但这一变化趋势没有很大。

综上,叶绿素a和叶绿素b含量随施加量的增减而发生变化,其中,添加浓度为 $4\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 秸秆炭对燕麦草叶绿素含量影响最为明显。分析表明,燕麦草中叶绿素a和叶绿素b含量与生物炭添加量均呈现极显著相关性($p<0.01$),生物炭添加后,叶绿素含量较CK组均增加。此外,对于叶绿素a,秸秆炭与木炭和草炭呈现极显著相关性($p<0.01$),相关系数分别为0.761和0.965,而木炭与草炭只呈现显著相关($0.01<p<0.05$),相关系数为0.567;对于叶绿素b,只有秸秆炭与木炭和草炭呈现出极显著相关性,而木炭与草炭相关系数只有0.311,无法得出显著性差异的结论。

2.3 生物炭对燕麦草养分含量的影响分析

施加不同因素水平的生物炭对燕麦草养分含量均有不同程度的影响,由图3A可知,T1~T4水平下,随着生物炭的施加,燕麦草中全氮单位含量均有所增加,在T4水平时达到最大,T5水平时均出现下降,但全氮单位含量仍优于对照组。3种生物炭中,秸秆炭的添加使燕麦草中全氮单位含量呈现最大限度的增长,燕麦草全氮单位含量达 $3.411\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,其含量为对照组的2倍多;木炭与秸秆炭添加后



不同小写字母表示同种生物炭各处理之间的显著性差异($p < 0.05$), 下同
 Different lowercase letters indicate the significant difference between different treatments of the same kind of biochar ($p < 0.05$), the same below

图2 不同因素水平下燕麦草叶绿素含量

Figure 2 Chlorophyll content of Oat grass under different factor levels

的变化趋势相似, T4水平为最佳施放量; 施加草炭后, T1~T3水平时燕麦草中全氮单位含量的影响并不是很大, 但在T4水平时含量突然增大, 达 $2.89 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 较对照组增加 76.8%。

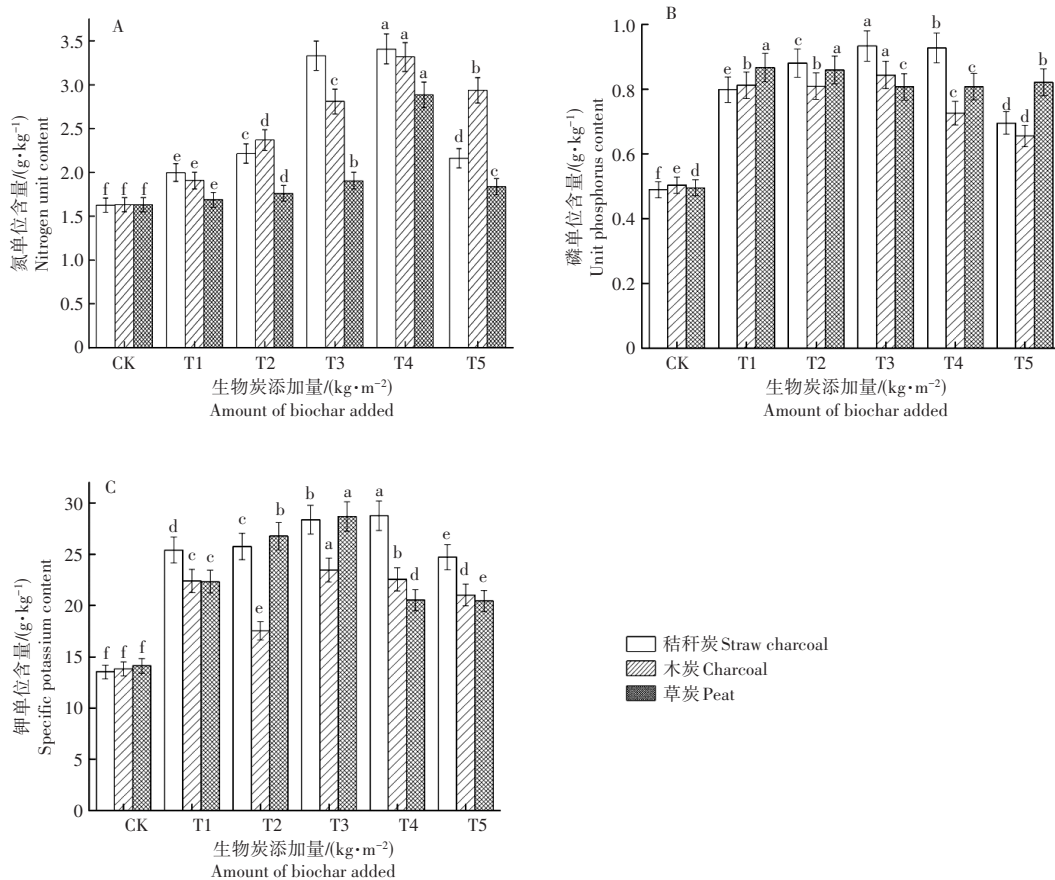


图3 不同因素水平下燕麦草氮磷钾单位含量

Figure 3 Ammonium phosphate potassium unit content of oat grass under different factors

由图 3B 可知,施加生物炭后,燕麦草中全磷单位含量立刻发生变化,出现明显的增长。T1 水平时,草炭对燕麦草中全磷单位含量影响最为明显,达到最大值,为 $0.867 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,随着草炭浓度的增加,全磷单位含量呈小幅的波动变化;木炭于 T1~T3 水平时,燕麦草全磷单位含量缓慢增长,T3 水平为最佳施加量,在 T4~T5 水平出现了下降趋势;秸秆炭随着浓度的增加,燕麦草全磷单位含量呈现增长的趋势,于 T3 水平时达到最佳,此时燕麦草全磷单位含量为 $0.933 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,较对照组增长 93.2%,但是在 T5 水平时出现骤降。

由图 3 C 可知,施加生物炭后燕麦草全钾单位含量发生骤然变化,秸秆炭组变化最为明显,在 T1~T4 水平,随着秸秆炭浓度增加,燕麦草全钾单位含量也呈现缓慢增长趋势,T4 水平效果最优,T5 水平出现下降;木炭组在 T1、T3、T4 水平时燕麦草全钾单位含量趋于稳定,T2 水平含量突然减少可能是由于误差引起,在 T3 时含量最高,为 $23.473 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$;草炭组在 T1~T3 水平时随着草炭浓度的增加燕麦草全钾含量缓慢增长,在 T4、T5 水平含量出现下降,T2、T3 水平时草炭组对燕麦草全钾单位含量的影响胜于秸秆炭组,在 T3 水平时含量最大,为 $28.76 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。但总体而言,秸秆炭在 T4 水平下燕麦草全钾单位含量最多。

分析表明,燕麦草中全氮、全磷、全钾含量与不同因素水平下生物炭呈显著相关($p < 0.05$),较 CK 组,不同生物炭对燕麦草含量均产生影响。不同类型生物炭添加下,燕麦草中全氮、全磷含量均表现为极显著相关($p < 0.01$),而全钾含量中,由于草炭和木炭相关系数为 0.573,只表现为显著相关($p < 0.05$)。

3 讨论与讨论

通过对 3 种生物炭进行分析对比,可知添加浓度为 $3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 的秸秆生物炭可有效提高植株株高、产量和燕麦草全磷单位含量,添加浓度为 $4 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 的秸秆生物炭可有效提高燕麦草全氮和全钾的单位含量。营养物质含量的提高可有效促进株高和产量,因此添加浓度为 $4 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 的秸秆生物炭对燕麦草的生长效果最佳,此浓度下植株的株高和产量与 $3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 水平下的效果基本一致。也可表明添加浓度为 $4 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 的秸秆生物炭对风沙土的改良效果最好。

叶绿素含量是植物营养胁迫、光合作用能力及生长状况的良好指标。本研究表明,不同生物炭类型对燕麦草叶绿素含量与株高和产量均有影响,施加浓度为 $4 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 的秸秆炭效果最佳。有研究表明,叶绿素含量和光合效率成正比^[39],叶绿素含量高,植物光合作用能力也越强,促使植物对养分的吸收加快,合成营养成分的能力增强,作物生长快,产量高品质好。陈艳妮等^[40]以芝麻蒴果为研究对象,表明蒴果皮叶绿素含量高时光合作用强,芝麻蒴果籽粒产量高,脂肪、蛋白质及淀粉含量大大提高。郭志顶等^[41]研究表明,在玉米的不同生育期,随着施氮量增加玉米叶片叶绿素含量和冠层 NDVI 也随之增加,追肥可显著提高叶绿素含量和冠层 NDVI 值。李智等^[42]将谷子大豆间作,表明间作时叶绿素含量提升,光合作用增强,两种作物的产量均提升,因此,对于不同的作物在不同的条件下,伴随叶绿素含量的变化,光合作用发生改变,对植物的产量和品质等都产生影响。

氮磷钾是植物生长发育所必需的三大营养元素。试验表明,生物炭对燕麦草中全氮、全磷、全钾含量都产生显著的影响,且秸秆炭的影响最佳。研究表明植物养分来源有两种途径,其一就是植物可以通过对土壤所需养分的吸收来获取其生长所需的营养元素,植株的养分含量及株高和产量的增加可间接反应风沙土经过不同类型生物炭改良,其肥力、含水率、透气性等均有所改善,从而促使植株养分含量提高,进而促进株高,增加产量。刘鑫裕等^[43]通过生物炭与磷的不同施配,表明土壤各理化性质发生改变,酶活性提高,提高紫花苜蓿地上部分和地下部分氮磷含量。陶玥玥等^[44]对水生植物进行堆肥,表明堆肥可提高小麦产量,提高土壤养分含量和 pH,增加作物对磷钾养分的利用。同时,不同因素水平的生物炭对土壤有不同的改良效果,出现了生物炭浓度较低时,植株株高、产量及养分含量均呈现增长趋势,生物炭浓度较高时,植株株高及产量降低,养分含量减少的现象。徐彬等^[45]通过施加不同浓度生物炭,表明 $8.0 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 生物炭与化肥配施可有效提高土壤有机碳含量,显著提高水稻产量和品质。SAMIA 等^[46]通过添加不同浓度的生物炭,表明生物炭添加 $30 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,生菜株高、叶片数产量最大。

本研究结果表明,施加生物炭类型不同、浓度不同,对风沙土中燕麦草的株高、产量、叶绿素及养分含量均会产生不同程度的影响,表现为低浓度促进,高浓度抑制。秸秆炭较木炭和草炭对燕麦草的影响较为明显,且浓度为 $4\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 时效果最佳。也进一步说明秸秆炭相较于木炭和草炭来说,对本试验地风沙土的改良效果较好,增加了土壤中有效氮、有效磷和有效钾含量。

参考文献:

- [1] SYLVESTER-BRADLEY,ROGER,KINDRED,et al.Analysing nitrogen responses of cereals to prioritize routes to the improvement of nitrogen use efficiency[J].Journal of Experimental Botany,2009,60(7):1939-1951.
- [2] WANG C,ZHOU L,ZHANG GB,et al.Optimal fertilization for high yield and good quality of waxy *Sorghum*(*Sorghum bicolor* L.Moench)[J].Field Crops Research,2017,203:1-7.
- [3] SCHACHTMAN D P,REID R J,AYLING S M.Phosphorus uptake by plants:From soil to cell[J].Plant Physiology,1998,116(2):447-453.
- [4] VANCE C P,UHDE STONE C,ALLAN D L.Phosphorus acquisition and use:Critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource[J].New Phytologist,2003,157(3):423-447.
- [5] LI Z G,ZHANG R H,XIA S J,et al.Interactions between N,P and K fertilizers affect the environment and the yield and quality of satsumas[J].Global Ecology and Conservation,2019,19:e00663.
- [6] GAO J,THELEN K D,MIN D H,et al.Effects of manure and fertilizer applications on canola oil content and fatty acid composition[J].Agronomy Journal,2010,102(2):790-797.
- [7] 周德超.氮、磷、钾在植物体中的主要生理作用及植物对养分的吸收[J].生物学通报,1983(5):7-8.
- [8] KOLBERT Z.Strigolactone-nitric oxide interplay in plants:The story has just begun[J].Physiologia Plantarum,2018,165(3):487-497.
- [9] 王保明,陈永忠,王湘南,等.植物低磷胁迫响应及其调控机制[J].福建农林大学学报(自然科学版),2015,44(6):567-575.
- [10] 梁德印,徐美德.钾在植物生理中的作用[J].农业科技通讯,1986(9):31.
- [11] 冯嘉仪,谢婳婳,吴道铭,等.氮磷钾配施对银杏果实和外种皮产量及品质的影响[J].生态学杂志,2021,40(6):1650-1659.
- [12] 吴琪滢,郭志乾,李德明,等.马铃薯产量品质与氮磷钾吸收利用的关系[J].植物营养与肥料学报,2023,29(3):521-529.
- [13] 储成才,王毅,王二涛.植物氮磷钾养分高效利用研究现状与展望[J].中国科学(生命科学),2021,51(10):1415-1423.
- [14] DE SOUSA LIMA J R,DE MORAES SILVA W,DE MEDEIROS E V,et al.Effect of biochar on physicochemical properties of a sandy soil and maize growth in a greenhouse experiment[J].Geoderma,2018,319:14-23.
- [15] 庄晔,王娟.生物炭和肥料配施对土壤理化特性和作物生长影响的研究综述[J].水利与建筑工程学报,2021,19(4):186-193.
- [16] 张国发,侯朋福,章建伟,等.长江下游典型稻麦轮作农田作物生产的限制养分分析[J].南京农业大学学报,2022,45(3):465-473.
- [17] 李超,石晓华,樊明寿.有机肥施用对作物养分供需关系的作用及主要影响因素分析[C]//马铃薯产业与绿色发展(2021),2021:441-442.
- [18] 王硕.我国荒漠化、沙化、石漠化面积持续缩减[N].人民政协报,2021-6-24(005).
- [19] 屠志方,李梦先,孙涛.第五次全国荒漠化和沙化监测结果及分析[J].林业资源管理,2016(1):1-5,13.
- [20] 张微,孙海明,王晓江,等.生物质土壤改良剂对风沙土改良效果研究[J].内蒙古林业科技,2013,39(2):1-6.
- [21] 李智.辽西北风蚀荒漠化土地研究现状与利用前景分析[J].现代农业科技,2011(9):298-299.
- [22] 曹晓风,孙波,陈化榜,等.我国边际土地产能扩增和生态效益提升的途径与研究进展[J].中国科学院院刊,2021,36(3):336-348.
- [23] 赵珍珍.基于多源数据的科尔沁沙地生态环境变化研究[D].武汉:武汉大学,2017.
- [24] 温会武.关于加快彰武沙地经济发展的建议[J].农村经济与科技,2018,29(8):165,167.
- [25] WEBER K,QUICKER P.Properties of biochar[J].Fuel,2018,217:240-261.
- [26] 孙一博.生物炭和腐殖酸联合修复盐碱土的研究[D].包头:内蒙古科技大学,2020.
- [27] SARA DE JESUS DUARTE.Biochar and its influence on soil physical and hydraulic properties[D].Sao Paulo:Uni-

- versity of Sao Paulo,2019.
- [28] 汤家喜,李 玉,朱永乐,等.生物炭与膨润土对辽西北风沙土理化性质的影响研究[J].干旱区资源与环境,2022,36(3):143-150.
- [29] 郑冬梅,王玉琦,毛 莹.桑树及桑枝生物炭对风沙土改良[J].高师理科学刊,2022,42(8):91-94.
- [30] 张 宁.生物炭、膨润土、有机肥改良风沙土中土壤生态化学计量特征研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2021.
- [31] BASSO A S.Effect of fast pyrolysis biochar on physical and chemical properties of a sandy soil[D].Lowa State University,Master of Science,2012.DOI:10.31274/etd-180810-1735.
- [32] 黄 怡.小麦秸秆生物炭对土壤改良效应的研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2022.
- [33] ERIC THOMAS NYSTROM.Biochar effect on soil physical and chemical properties and bermudagrass growth[D].Texas:Texas A&M University,2015.
- [34] 邓婷婷.生物炭、膨润土和有机肥对风沙地披碱草生长及生理特性的影响[D].阜新:辽宁工程技术大学,2022.
- [35] 丛孟菲.施用生物质炭对玉米生长调控效果及其长期效应[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2022.
- [36] CORNELISSEN,GERARD,MARTINSEN,et al.Biochar effect on maize yield and soil characteristics in five conservation farming sites in Zambia[J].Agronomy,2013,3(2):256-274.
- [37] SHU H Y.Characteristics of climate change in Zhangwu County,Liaoning from 1953 to 2010[J].Journal of Arid Land Resources and Environment,2012,26(8):148-152.
- [38] 中华人民共和国农业部.植物中氮、磷、钾的测定[S].北京:中国农业出版社,2011.
- [39] 杨文平,王春虎,王玉帅.两种筋型冬小麦旗叶叶绿素含量和衰老生理性状比较[J].广东农业科,2011,38(24):9-11.
- [40] 陈艳妮,徐鸿儒,赵云燕,等.芝麻蒴果发育过程中蒴果皮的光合作用及籽粒充实的变化研究[J].植物生理学报,2022,58(4):723-732.
- [41] 郭志顶,李志洪,李 辛,等.施氮水平及方式对玉米冠层NDVI、氮含量、叶绿素和产量的影响[J].玉米科学,2013,21(6):111-116,121.
- [42] 李 智,王宏富,王钰云,等.谷子大豆间作对作物光合特性及产量的影响[J].中国农业科技导报,2020,22(6):168-175.
- [43] 刘鑫裕,王冬梅,张泽洲,等.生物炭配施磷肥对土壤养分、酶活性及紫花苜蓿养分吸收的影响[J].环境科学,2023,44(7):4162-4169.
- [44] 陶玥玥,王海候,金梅娟,等.小麦产量与土壤养分对水生植物源有机氮替代率的响应[J].土壤学报,2019,56(1):156-164.
- [45] 徐 彬,王小利,段建军,等.生物炭投入对稻田土壤微生物量碳氮及水稻品质的影响[J].耕作与栽培,2023,43(1):1-6.
- [46] SAMIA M S D,JULIETH L S P,ROMARIO C M,et al.Lettuce production with rates of biochar from babassu palm rachis[J].International Journal of Vegetable Science,2022,28(4):395-405.

[责任编辑 亓 国]