文章编号:1000-7601(2022)05-0081-07 doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2022.05.09

鼠李糖脂改性生物炭对盐渍土小白菜抗性及氮素吸收的影响

王敏鸽[1],刘艺文[1],张丹丹[1],许均泽[1],苟 聪[1],古一鸣[1],王旭东[1,2]

(1.西北农林科技大学资源环境学院,陕西 杨凌 712100;2.农业部西北植物营养与农业环境重点实验室,陕西 杨凌 712100)

摘 要:为探究鼠李糖脂改性生物炭对盐渍土的改良效果,通过小白菜盆栽试验,以盐渍土壤为材料,按照占土壤质量 1%和 2%比例各添加 4 种浓度的鼠李糖脂改性生物炭(浓度为 250 mg·L^{-1}的鼠李糖脂体积(V)占生物炭质量(m)比分别为 15%、10%、5%、0%),研究了鼠李糖脂改性生物炭对盐渍土性质、氮素养分吸收以及小白菜生长和酶活性的影响。结果表明,与对照相比,鼠李糖脂改性生物炭提高了土壤有机碳含量和土壤铵态氮、硝态氮含量,但对土壤 pH 值无显著影响,其中,施加鼠李糖脂改性生物炭的处理与对照相比有机碳含量显著增加了 55.05%~142.67%,施加鼠李糖脂改性生物炭比例为 10%的处理平均与对照相比铵态氮含量显著提高了 156.69%,施加鼠李糖脂改性生物炭比例为 15%、10%的处理与对照相比硝态氮含量平均分别显著增加了 37.94%、41.46%。施用鼠李糖脂改性生物炭显著增加了小白菜生物量和吸氮量,其中,改性比例为 10%的处理平均分别比单施生物炭的处理增加了 47.13%和 43.64%。施用鼠李糖脂改性生物炭提高了叶片谷氨酰胺合成酶和过氧化物酶的活性,提高了可溶性蛋白含量,降低了丙二醛含量,其中,施加鼠李糖脂改性生物炭比例为 10%的处理平均与对照相比叶片谷氨酰胺酶活性显著提高了 113.64%、过氧化物酶活性显著提高了 30.87%,施加鼠李糖脂改性生物炭比例为 10%和 5%的处理平均分别与对照相比可溶性蛋白含量提高了 7.59%和 37.60%,施加鼠李糖脂改性生物炭比例为 10%的处理平均与对照相比丙二醛含量显著降低了 80.60%。总体看来,采用鼠李糖脂改性的生物炭可以提高盐渍土小白菜的抗性,促进其对氮素的吸收,且以改性比例为 10%效果最佳。

关键词:鼠李糖脂改性生物炭;盐渍土;小白菜;抗逆性;氮吸收

中图分类号:S156.4;Q945.78;S634.3 **文献标志码**:A

Effects of rhamnolipid modified biochar on resistance and nitrogen absorption of Chinese cabbage in saline soil

WANG Minge[1], LIU Yiwen[1], ZHANG Dandan[1], XU Junze[1],
GOU Cong[1], GU Yiming[1], WANG Xudong[1,2]

(1. *College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*;
2. *Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agro-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: To explore the effects of rhamnolipid modified biochar on saline soil, a pot experiment of Chinese cabbage was set up. Four different treatments of rhamnolipid modified biochar (rhamnolipid volume (V) with concentration of 250 mg·L^{-1} accounts for 15%, 10%, 5% and 0%) were added to saline soil according to the proportion of 1% and 2% to soil mass. The effects of rhamnolipid modified biochar on the properties of saline soil, nitrogen nutrient absorption, growth and enzyme activity of Chinese cabbage were studied. The results showed that compared with the control, rhamnolipid modified biochar increased the content of soil organic carbon, ammonium nitrogen and nitrate nitrogen, but had no significant effect on soil pH. Among them, the content of organic carbon in the treatment with rhamnolipid modified biochar was significantly increased by 55.05%~142.67% compared with the

收稿日期:2021-10-20 **修回日期**:2022-06-20

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFD0200405)

作者简介:王敏鸽(1995-),女,陕西渭南人,硕士研究生,研究方向为土壤化学。E-mail:WANGMINGEmg@163.com

通信作者:王旭东(1965-),男,河南南阳人,教授,博士生导师,主要从事土壤化学研究。E-mail:wangxudong01@126.com

control, and the content of ammonium nitrogen in the treatment with rhamnolipid modified biochar of 10% was significantly increased by 156.69% compared with the control. Compared with the control, the content of nitrate nitrogen increased significantly by 37.94% and 41.46% in the treatment with 15% and 10% of rhamnolipid modified biochar. The biomass and nitrogen uptake of Chinese cabbage were significantly increased. The treatment with 10% modified ratio increased by 47.13% and 43.64% respectively compared with the treatment with biochar alone. The activity of glutamine synthetase and peroxidase in leaves were increased, the content of soluble protein was increased, and the content of malondialdehyde was reduced. The best effect was from the 10% modification ratio since the treatment significantly increased the activities of glutamine synthetase and peroxidase by 113.64% and 30.87% respectively compared with the control, and the soluble protein content of 10% and 5% treatment was increased by 7.59% and 37.60% respectively. The malondialdehyde content for the 10% treatment with rhamnolipid modified biochar was significantly reduced by 80.60% compared with the control. In general, the biochar modified by rhamnolipid improved the resistance of Chinese cabbage in saline soil and promoted its absorption of nitrogen, and the modified ratio of 10% was the best.

Keywords: rhamnolipid modified biochar; saline soil; Chinese cabbage; stress resistance; nitrogen absorption

盐渍土在我国分布广泛,西北、华北、东北及沿海是我国盐渍土的主要集中分布地区[1],受盐分的影响,盐渍土严重影响作物对水分和养分离子的吸收,制约着作物出苗率和发育生长,导致作物产量和品质下降[2]。盐渍土的改良有水利工程[3-4]、物理[5]、化学[6-7]、生物[8]等多种措施,在工程、物理措施下,通过一些化学改良剂或新型材料施用来降低盐害是一种行之有效的方法,能起到事半功倍的效果。

鼠李糖脂是一种阴离子表面活性剂,不仅具有乳化、增溶、降低表/界面张力等功能,而且毒性小、易于生物降解,因而在众多领域具有极大的应用潜力[9]。在农业应用中,鼠李糖脂作为一种良好的碱性土壤改性添加剂,其碱溶性较好,在碱性条件下,可电离出 Rh^+ 与 H^+ 离子,中和碱性土壤中的 OH^-,改善土壤的碱性,且具有改良土壤结构、避免土壤板结的作用。生物炭是生物有机质在缺氧或低氧条件下高温裂解产生的固体产物,含碳量高、具有多孔性、比表面积大、吸附能力强等特点,能改善土壤理化性质,降低土壤容重,从而达到保水保肥的效果,利用生物炭改良盐渍土已经有一些研究[2,10-11],但由于生物炭本身偏碱性及其不同来源生物炭的性质差异,效果稳定性不一。采用鼠李糖脂改性的生物炭探究盐渍土性状变化及其对植物生长的影响是一种新的思路。本研究通过盆栽试验,研究不同配比的鼠李糖脂与生物炭制成的改性生物炭对盐渍土的改良效果,以小白菜的抗盐性及生长状况为指标,寻找鼠李糖脂与生物炭用于改良盐渍土的最佳配比,以期为盐渍土的改良提供一定的理论和实践依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤于2020年7月采自于甘肃省高台县巷道镇红联村0~20 cm耕层土样,土壤为灌淤土。供试生物炭由陕西谷佳现代有机农业科技有限公司提供,是由苹果树枝条在厌氧条件下高温(650℃)裂解制备,供试土壤与生物炭的理化性质见表1。鼠李糖脂是由西安瑞捷生物科技有限公司提供,浓度为250 $g \cdot L^{-1}$。

表1 供试土壤与生物炭的基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of tested soil and tested biochar

项目 Item	pH	有机碳 Organic C /(g·kg⁻¹)	全氮 Total N /(g·kg⁻¹)	全磷 Total P /(g·kg⁻¹)	硝态氮 Nitrate N /(mg·kg⁻¹)	铵态氮 Ammonium N /(mg·kg⁻¹)	速效磷 Available P /(mg·kg⁻¹)	全盐量 Total salt content /(g·kg⁻¹)	C/%	N/%
土壤 Soil	7.64	8.20	0.85	0.81	105.95	53.48	25.88	2.593		
生物炭 Biochar	9.28	55.64			2.37	1.58			74.75	0.81

1.2　试验方法

1.2.1　改性生物炭配制　鼠李糖脂改性生物炭的制备:称取 200 g 生物炭(过 2 mm 筛),与浓度为 250 g·L^{-1}的鼠李糖脂按 4 种比例混合并充分搅匀,在室温下平衡 24 h,然后晾干即得到鼠李糖脂改性生物炭。具体配制比例见表 2。

1.2.2　盆栽试验　盆栽试验设置两种改性生物炭的施用量,分别为 30 g(2%土壤质量比)和 15 g(1%土壤质量比),各改性生物炭施用量下分别设 4 个鼠李糖脂的配比浓度,即 15%、10%、5%和 0%(表 2),另加空白对照处理(不添加改性生物碳),共计 9 个处理。每盆装土 1.5 kg,4 个重复。盆栽土壤浇水量为田间持水量的 75%,化肥作基肥一次性施入,以 $CO(NH_2)_2$、KCl 和 $NH_4H_2PO_4$为肥源,施用量按 N、P_2O_5计均为 0.2 g·kg^{-1}、K_2O 施用量为 0.1 g·kg^{-1}。于 2020 年 9 月 20 号将消毒、提前浸泡 8 h 的籽粒饱满、大小均匀的小白菜种子点种到盆中,每盆 60 个种子,出苗后定苗为 12 株。

1.2.3　样品采集与处理　盆栽小白菜在露天网室生长 45 d 后进行采收,分别采集土壤样品、小白菜地上部样品和地下部根系样品。土壤样品保留一定鲜样,其余样品进行风干;小白菜样品留一部分鲜样,剩余部分进行烘干(先 105℃杀青 30 min,而后在 70℃烘干 24 h)、保藏,备用于相关指标的分析测定。

1.2.4　指标测定　土壤 pH 值采用水土比 2.5∶1 浸提液,用 pH 计(梅特勒 FiveEasy Plus™ FE28)测定;土壤有机碳采用重铬酸钾容量法[12];土壤硝、铵态氮含量采用 1 mol·L^{-1}KCl 浸提(水土比为 10∶1),AA3 型连续流动分析仪测定[12]。

植株全氮含量采用半微量凯氏定氮法测定;谷氨酰胺合成酶(GS)活性参照中国科学院上海植物生理研究所[13]的方法;丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸法测定[14];过氧化物酶(POD)活性的测定采用愈创木酚法[15]。

小白菜氮素吸收量(mg·株$^{-1}$)= 植株全氮含量×植株干物质量[16]。

1.3　数据处理

采用 Excel 2019 和 SPSS 25.0 软件对数据进行统计分析。采用单因素(One-way ANOVA)和 Duncan 法进行方差分析和多重比较(P=0.05)。

2　结果与分析

2.1　施用鼠李糖脂改性生物炭对土壤性质的影响

不施加生物炭的处理的土壤 pH 值为 7.66(见表 3),属于弱碱性水平,施加鼠李糖脂改性生物炭对土壤 pH 值没有显著影响。随着改性生物炭中鼠李糖脂配施比例的提高,土壤 pH 值略有上升的趋势,但和对照土壤间未出现显著差异。施加鼠李糖脂改性生物炭的处理显著提高了土壤有机碳含量,且随着改性生物炭用量的增加而增加;在施加生物炭 2%的水平下,随着鼠李糖脂比例的增加,土壤有机碳含量呈现增加的趋势。

表 2　改性生物炭的配制比例

Table 2　Preparation of modified biochar with different ratios

配比/% Mixture ratio	生物炭/g Biochar	加入 250g·L^{-1}鼠李糖脂体积 Rhamnolipid/mL	加入蒸馏水体积 Distilled water/mL
15	200	30	70
10	200	20	80
5	200	10	90
0	200	0	100

表 3　不同处理下土壤的性质和养分变化

Table 3　Changes of soil properties and nutrients under different treatments

改性生物炭施用量 Application amount of modified biochar/g	鼠李糖脂比例 Rhamnolipid ratio/%	土壤 pH Soil pH	土壤有机碳含量 Organic carbon /(g·kg^{-1})	土壤铵态氮含量 Ammonium nitrogen /(mg·kg^{-1})	土壤硝态氮含量 Nitrate nitrogen /(mg·kg^{-1})
30	15	7.84±0.04a	20.19±2.02a	2.87±0.36cd	213.1±17.1a
	10	7.80±0.17a	18.60±0.39b	4.70±0.59a	207.4±21.4a
	5	7.69±0.13ab	18.51±0.99b	3.21±0.40c	199.1±46.7a
	0	7.58±0.12b	18.57±0.61b	2.18±0.27ef	176.4±28.1ab
15	15	7.84±0.07a	13.66±0.79d	2.52±0.32de	191.3±27.5a
	10	7.70±0.18ab	15.11±0.63c	4.13±0.52b	207.3±8.8a
	5	7.56±0.10b	13.65±0.31d	2.98±0.37cd	179.4±28.9ab
	0	7.58±0.11b	12.90±1.04d	1.95±0.24ef	172.5±12.0ab
0	0	7.66±0.08ab	8.32±0.18e	1.72±0.22f	146.6±37.8b

注:同列不同小写字母表示各处理间差异显著(P<0.05)。

Note:Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among the treatments (P<0.05).

土壤 NH_4^+-N 含量变化显示,施加鼠李糖脂改性生物炭与对照相比提高了土壤 NH_4^+-N 含量,且随着改性生物炭施加量的增加,土壤 NH_4^+-N 含量增加。在施加 30 g 和 15 g 改性生物炭的条件下,随着改性生物炭中鼠李糖脂比例的增加,土壤 NH_4^+-N 含量都呈现先增加后降低的趋势(但仍高于对照)。施用鼠李糖脂改性生物炭增加了土壤 NO_3^--N 含量且随着改性生物炭施加量的增加而增加。在施加 30 g 改性生物炭的条件下,随着改性生物炭中鼠李糖脂比例的增加,土壤 NO_3^--N 含量呈现增加的趋势;但在施加 15 g 改性生物炭的条件下,随着鼠李糖脂比例的增加,土壤 NO_3^--N 含量呈现先增加后降低的趋势,但仍高于对照。

2.2 鼠李糖脂改性生物炭施用下小白菜的生长

不同处理小白菜生物量变化显示(图 1),与对照相比,施加生物炭显著提高了小白菜生物量,且随着生物炭施加量的增加而增加。在施加 30 g 和 15 g 生物炭的条件下,在鼠李糖脂添加比例为 10% 的情况下小白菜的生物量均达最大值,平均比单独施加生物炭的处理增加了 47.13%。

2.3 鼠李糖脂改性生物炭施用下小白菜的氮吸收

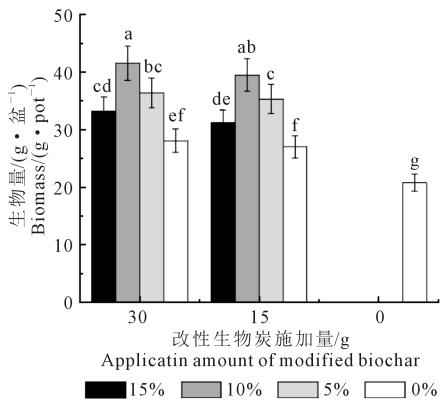
与对照相比,施加生物炭的处理均显著提高了小白菜的吸氮量(图 2A),在施加生物炭的条件下,随着鼠李糖脂添加比例的增加,植物吸氮量都呈现先增加后减少的趋势。以添加比例为 10% 鼠李糖脂处理小白菜的吸氮量最高,平均比单独施加生物炭的处理增加了 43.64%。

施加生物炭提高了叶片谷氨酰胺合成酶(GS)活性(图 2B),与对照相比,差异达显著性水平。在施加生物炭的条件下,施用鼠李糖脂改性生物炭进一步提高了叶片谷氨酰胺合成酶活性,其中以改性比例为 10% 鼠李糖脂处理小白菜的谷氨酰胺合成酶活性最高。

2.4 鼠李糖脂改性生物炭施用下小白菜生理学指标变化

过氧化物酶(POD)活性变化显示(图 3A),不施加生物炭的处理过氧化物酶(POD)活性最低,施加生物炭显著提高了过氧化物酶(POD)活性。随改性生物炭中鼠李糖脂改性比例增加,过氧化物酶(POD)活性呈现先增加后减少的趋势,其中以添加比例为 10% 鼠李糖脂处理过氧化物酶(POD)活性最高。

小白菜可溶性蛋白含量变化显示(图 3B),各处理小白菜可溶性蛋白含量值有差异,在施用鼠李糖脂改性生物炭的不同施用量下,施用鼠李糖脂改性生物炭 15%、10%、5%、0%的2%水平(即30 g)比1%



注:不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$),下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P<0.05$). The same below.

图 1 不同处理下小白菜的生物量

Fig.1 Biomass of Chinese cabbage under different treatments

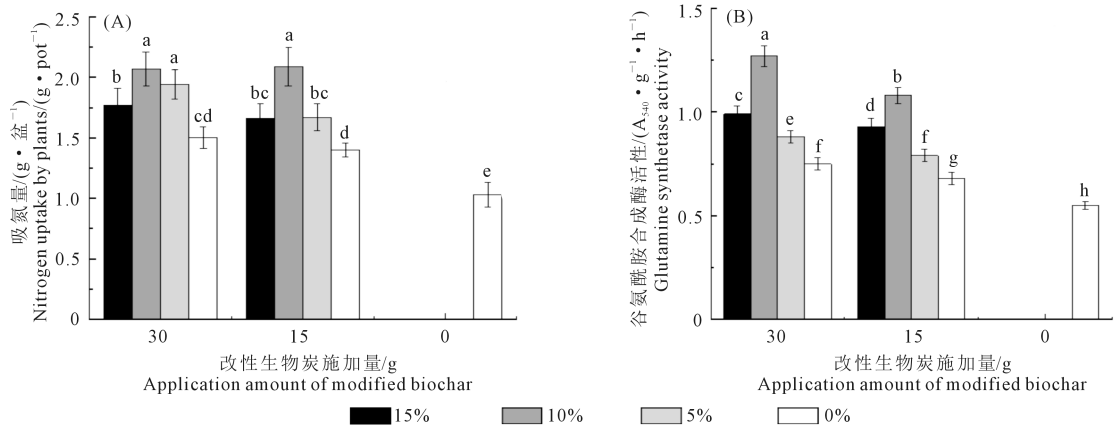


图 2 不同处理下小白菜的吸氮量和谷氨酰胺合成酶活性

Fig.2 Nitrogen uptake and glutamine synthetase activity of Chinese cabbage under different treatments

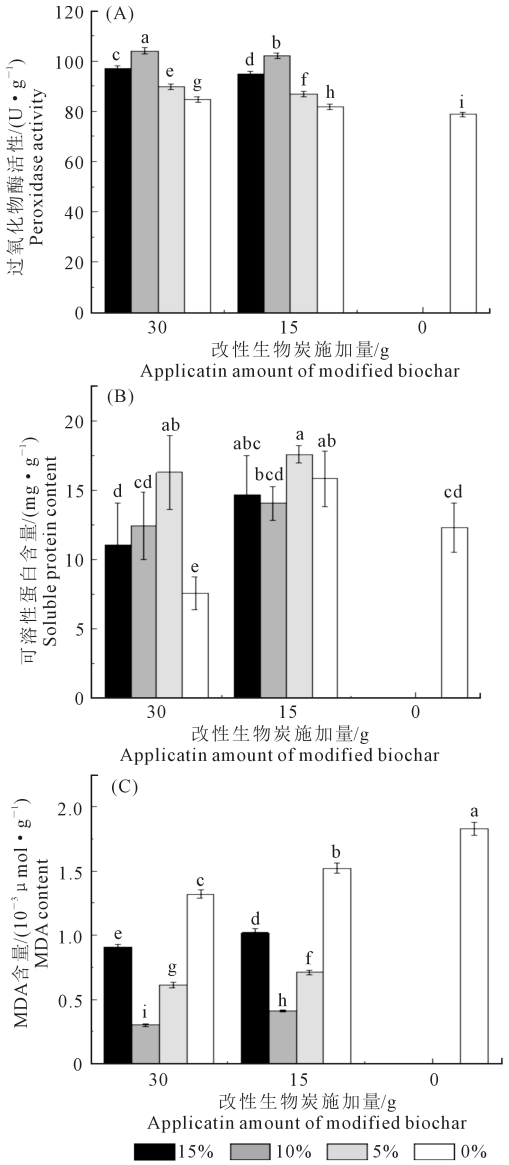


图 3　不同处理下小白菜的生理学指标变化

Fig.3　Changes of physiological indexes of Chinese cabbage under different treatments

施用水平(即 15 g)的可溶性蛋白含量分别减少了 24.58%、11.69%、7.37%、52.20%,且处理 15%和 0%间达到差异显著水平(P<0.05)。在施用 30 g 改性生物炭条件下,小白菜可溶性蛋白含量随着鼠李糖脂比例的增加呈现先增加后减少的变化趋势,施用鼠李糖脂改性生物炭 10%、5%的处理与对照相比可溶性蛋白含量分别增加了 0.91%、32.33%,且处理 5%与对照处理间达到差异显著水平(P<0.05),施用鼠李糖脂改性生物炭 15%、0%的处理与对照相比可溶性蛋白含量分别减少了 10.17%、38.54%,且处理 0%与对照处理间达到差异显著水平(P<0.05),不同鼠李糖脂添加比例下可溶性蛋白含量从大到小次序为 5%>10%>15%>0%,处理 5%可溶性蛋白含量为 16.3033 mg·g^{-1}。在施用 15g 改性生物炭条件下,施用鼠李糖脂改性生物炭 15%、10%、5%、0%的处理与对照相比可溶性蛋白含量分别增加了 19.12%、14.27%、42.86%、28.59%,且处理 5%、0%与对照分别达到差异显著水平(P<0.05),其可溶性蛋白含量由大到小排序为 5%>0%>15%>10%,处理 5%可溶性蛋白含量为 17.6008 mg·g^{-1}。

不施加生物炭的处理丙二醛(MDA)含量最高(图 3C),施加生物炭的处理均显著降低了丙二醛(MDA)含量。鼠李糖脂改性生物炭施用,进一步降低了 MDA 含量,其中以改性比例为 10%鼠李糖脂处理丙二醛(MDA)含量最低。

3　讨　论

3.1　鼠李糖脂改性生物炭的施用对土壤有机碳和氮素的影响

生物炭本身是一种富含有机碳的物质,且具有较高的稳定性。土壤中施用生物炭对提高土壤有机碳含量具有重要作用[17]。本研究表明,土壤有机碳含量随着生物炭用量的增加而增加。鼠李糖脂作为一种生物表面活性剂,除了能降低表面张力等作用外,还具有耐盐性和热稳定性,在盐渍土中可以更好地发挥作用且对环境友好[18]。本研究发现,施用鼠李糖脂改性的生物炭能进一步提高土壤铵态氮、硝态氮的含量。大量研究表明,土壤含盐量和 pH 值是影响硝化作用的重要因素[19]。在土壤 pH 值为 5.6~8.0 的范围内,硝化作用随着土壤 pH 的升高而增强[20]。Mcclung 等[21]研究表明,土壤含盐量增加对硝化作用的抑制程度可达 8%~83%。生物炭的施用一方面可以吸附 NH_4^+-N [22-23],并可以加强对土壤盐分的吸附[24-25],从而降低盐分对氮素硝化作用的影响,因此可以提高土壤 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 的含量。另外,土壤 pH 值升高会造成氨挥发增强,导致无机氮(NH_4^+-N 和 NO_3^--N)减少[26-28]。鼠李糖脂改性生物炭的施用,增加了土壤中的有机碳源,从而提高了土壤微生物的数量,既有利于土壤氮素被微生物吸收利用从而减少氨挥发损失,也有利于土壤有机氮向无机氮转化,从而增加土壤铵态氮,进一步硝化转化为硝态氮。

3.2　鼠李糖脂改性生物炭的施用对小白菜生长、氮吸收和抗盐性的影响

土壤环境存在盐分、水分等胁迫常常导致植物体内活性氧积累[29],造成细胞膜氧化损伤,膜质过氧化产生丙二醛(MDA)。因此,MDA 含量是细胞膜结构损伤的重要指标[30-31],而过氧化物酶(POD)是植物抗氧化保护酶之一,维持体内活性氧产生和

清除的动态平衡,反映出作物的自动保护和适应机制[32]。本研究发现,施用鼠李糖脂改性生物炭可以提高小白菜的 POD 含量,在适宜的改性比例下(10%),进一步提高了 POD 含量,反映出了小白菜抗性的增强。另外,施用鼠李糖脂改性生物炭情况下小白菜的丙二醛(MDA)含量下降,说明植物受盐分胁迫引起的细胞伤害减小,而且在 10%的改性比例下丙二醛(MDA)含量最低,也进一步说明了鼠李糖脂改性生物炭的施用对提高植物抗性的增效作用。鼠李糖脂增效作用与浓度有关,在一定浓度时效果较大,但浓度过高,增效作用减弱,其作用机制还需要深入研究。

谷氨酰胺合成酶(GS)是植物体内硝态氮同化的调节酶和限速酶,增强谷氨酰胺合成酶的活性对作物吸收利用氮素有着非常重要的促进作用[33]。谷氨酰胺合成酶(GS)可以催化铵离子与谷氨酸合成谷氨酸,进一步合成蛋白质,从而促进氮素的吸收、转运和合成[29,34]。而本试验发现,施用鼠李糖脂改性生物炭,叶片谷氨酰胺合成酶有所提高,且在鼠李糖脂改性比例为 10%情况下谷氨酰胺合成酶活性最高,反映出鼠李糖脂在一定施用浓度下可以提高小白菜在盐渍土中对氮素吸收的促进效应,这与前述施用鼠李糖脂在一定浓度下可提高小白菜过氧化物酶(POD)活性、降低丙二醛(MDA)含量相呼应。

渗透调节作用是植物抵御逆境的重要生理机制,生物体在其正常的代谢过程中可通过有机渗透调节物质(可溶性蛋白) 的积累、合成来调节细胞渗透平衡,从而缓解逆境胁迫对植物造成的伤害[35-36]。肖强等[37]研究表明,互花米草叶片中可溶性糖、可溶性蛋白及脯氨酸含量随盐度增加总体呈上升趋势,在盐胁迫下,渗透调节物质的积累是互花米草对盐胁迫的主要响应过程。方志红等[38]研究表明,随盐胁迫浓度的增加,碱蒿可溶性糖和可溶性蛋白含量呈先升高后低的趋势,这可能是碱蒿对高盐胁迫的一种生理反应或适应机制。本研究表明鼠李糖脂改性生物炭的施入有利于提高小白菜的可溶性蛋白含量。本试验中是施用鼠李糖脂改性生物炭的施入增加了小白菜可溶性蛋白含量,这与鼠李糖脂可以缓解植物盐胁迫有关。

4 结 论

施用生物炭提高了土壤有机碳含量,同时也增加了土壤铵态氮和硝态氮的含量;鼠李糖脂改性生物炭的施用,进一步提高了土壤铵态氮和硝态氮的含量。其中,施加鼠李糖脂改性生物炭的处理与对照相比有机碳含量增加了 55.05%~142.67%,施加鼠李糖脂改性生物炭比例为 10%的处理平均与对照相比铵态氮含量显著提高了 156.69%,施加鼠李糖脂改性生物炭比例为 15%和 10%的处理与对照相比硝态氮含量平均分别显著增加了 39.94%和 41.46%。

施用鼠李糖脂改性生物炭提高了小白菜的过氧化物酶活性,提高了小白菜可溶性蛋白含量,降低了小白菜的丙二醛含量,提高小白菜对盐分胁迫的抗性;提高了谷氨酰胺合成酶活性,促进了小白菜对氮素的吸收。其中,施加鼠李糖脂改性生物炭比例为 10%的处理叶片谷氨酰胺酶活性较对照平均显著提高了 113.64%,过氧化物酶活性显著提高了 30.87%,丙二醛含量显著降低了 80.60%。施加鼠李糖改性生物炭比例为 10%和 5%的处理平均分别与对照相比可溶性蛋白含量提高了 7.59%和 37.60%。

改性生物炭中鼠李糖脂适宜的改性比例为 10%,改性后施用在盐渍土中对小白菜的生长和氮素吸收促进作用最大。

参 考 文 献:

[1] 杨劲松.中国盐渍土研究的发展历程与展望[J].土壤学报,2008,45(5):837-845.
YANG J S. Development and prospect of the research on salt-affected soils in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 837-845.

[2] 杨懋,李燕妮,孙军娜,等.泥炭和生物炭深埋对滨海盐渍土水分入渗特性的影响[J].鲁东大学学报(自然科学版),2021,37(3):267-272.
YANG M, LI Y N, SUN J N, et al. Effects of peat and biochar application on water infiltration characteristics of coastal saline soil[J]. Journal of Ludong University(Natural Science Edition), 2021, 37(3): 267-272.

[3] 关胜超.松嫩平原盐碱地改良利用研究[D].长春:中国科学院大学(中国科学院东北地理与农业生态研究所),2017.
GUAN S C. The research of reclamation of saline-sodic soil in Songnen plain[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences (Northeast Institute of Geography and Agro-Ecology, Chinese Academy of Sciences), 2017.

[4] 刘雨红,李书雅.微咸水灌溉改良盐碱地的可行性研究[J].农业工程,2020,10(4):64-68.
LIU Y H, LI S Y. Feasibility study of improving saline alkali land by irrigation with brackish water[J]. Agricultural Engineering, 2020, 10(4): 64-68.

[5] 曾玉霞,李兴强.盐碱地改良技术探讨[J].吉林农业,2019,(13):80.
ZENG Y X, LI X Q. Discussion on improvement technology of saline alkali land[J]. Agriculture of Jilin, 2019,(13): 80.

[6] WANG J, YUAN G D, LU J, et al. Effects of biochar and peat on salt-affected soil extract solution and wheat seedling germination in the

Yellow River Delta[J]. Arid Land Research and Management, 2020, 34(3): 287-305.

[7] 李玉,田宪艺,王振林,等.有机肥替代部分化肥对滨海盐碱地土壤改良和小麦产量的影响[J].土壤,2019,51(6):1173-1182.
LI Y, TIAN X Y, WANG Z L, et al. Effects of substitution of partial chemical fertilizers with organic fertilizers on soil improvement and wheat yield in coastal saline and alkaline land[J]. Soils, 2019, 51(6): 1173-1182.

[8] ABDALLA M A, AWAD ELKARIM A H, TANIGUCHI T, et al. Phytoremediation of calcareous saline-sodic soils with mesquite (Prosopis glandulosa)[J]. Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil & Plant Science, 2017, 67(4): 352-361.

[9] 吴虹,汪薇,韩双艳.鼠李糖脂生物表面活性剂的研究进展[J].微生物学通报,2007,34(1):148-152.
WU H, WANG W, HAN S Y. Recent progress on rhamnolipid biosurfactant[J]. Microbiology, 2007, 34(1): 148-152.

[10] 石红蕾,周启星.生物炭对污染物的土壤环境行为影响研究进展[J].生态学杂志,2014,33(2):486-494.
SHI H L, ZHOU Q X. Research progresses in the effect of biochar on soil-environmental behaviors of pollutants[J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(2): 486-494.

[11] TANG J C, ZHU W Y, KOOKANA R, et al. Characteristics of biochar and its application in remediation of contaminated soil[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2013, 116(6): 653-659.

[12] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3 版.北京:中国农业出版社,2000: 39-69.
BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 39-69.

[13] 中国科学院土上海植物生理研究所,上海市植物生理学会.现代植物生理学实验指南[M].北京:科学出版社,1999:176-219.
Shanghai Institute of Plant Physiology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai Institute of Plant Physiology. Guide to modem plant physiology experiments[M]. Beijing: Science Press, 1999:176-219.

[14] 刘凤权,王金生.水杨酸对水稻叶片抗氧化酶系的影响[J].农业生物技术学报,2001,9(4):396-399.
LIU F Q, WANG J S. Influence of salicylic acid on antioxidant enzymes in rice leaves[J]. Journal of Agricultural Biotechnology, 2001, 9(4): 396-399.

[15] 时连辉,牟志美,姚健.不同桑树品种在土壤水分胁迫下膜伤害和保护酶活性变化[J].蚕业科学,2005,31(1):13-17.
SHI L H, MU Z M, YAO J. Cell membrance damage and change of protective enzymes´ activity in different mulberry varieties under soil water stress[J]. Acta Sericologica Sinica, 2005, 31(1): 13-17.

[16] 段文学,于振文,张永丽,等.施氮量对旱地小麦氮素吸收转运和土壤硝态氮含量的影响[J].中国农业科学,2012,45(15):3040-3048.
DUAN W X, YU Z W, ZHANG Y L, et al. Effects of nitrogen fertilizer application rate on nitrogen absorption, translocation and nitrate nitrogen content in soil of dryland wheat[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(15): 3040-3048.

[17] 刘振杰,李鹏飞,黄世威,等.小麦秸秆生物质炭施用对不同耕作措施土壤碳含量变化的影响[J].环境科学,2021,42(6):3000-3009.
LIU Z J, LI P F, HUANG S W, et al. Effects of wheat straw-derived biochar application on Soil carbon content under different tillage practices[J]. Environmental Science, 2021, 42(6): 3000-3009.

[18] ZHONG H, YANG X, TAN F, et al. Aggregate-based sub-CMC solubilization of n-alkanes by monorhamnolipid biosurfactant[J]. New Journal of Chemistry, 2016, 40(3): 2028-2035.

[19] 闵伟,侯振安,梁永超,等.土壤盐度和施氮量对灰漠土尿素 N 转化的影响[J].土壤通报,2012,43(6):1372-1379.
MIN W, HOU Z A, LIANG Y C, et al. Effects of soil salinity level and nitrogen rate on urea-N transformation in grey desert soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2012, 43(6): 1372-1379.

[20] 李良谟,潘映华,周秀如,等.太湖地区主要类型土壤的硝化作用及其影响因素[J].土壤,1987(6):289-293.
LI L M, PAN Y H, ZHOU X R, et al. Nitrification and its influencing factors of main types of soils in Taihu Lake area[J]. Soils, 1987(6): 289-293.

[21] MCCLUNG G, FRANKENBERGER W T, Jr. Soil nitrogen transformations as affected by salinity[J]. Soil Science, 1985, 139(5): 405-411.

[22] WEN B, LI R J, ZHANG S Z, et al. Immobilization of pentachlorophenol in soil using carbonaceous material amendments[J]. Environmental Pollution, 2009, 157(3): 968-974.

[23] VAN ZWIETEN L, KIMBER S, MORRIS S, et al. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility[J]. Plant and Soil, 2010, 327(1): 235-246.

[24] 李昌见,屈忠义,勾芒芒,等.生物炭对土壤水肥热效应的影响试验研究[J].生态环境学报,2014,23(7):1141-1147.
LI C J, QU Z Y, GOU M M, et al. The research of BioChar´s effect on soil humidity, fertility and temperature[J]. Ecology and Environment Sciences, 2014, 23(7): 1141-1147.

[25] 何绪生,耿增超,佘雕,等.生物炭生产与农用的意义及国内外动态[J].农业工程学报,2011,27(2):1-7.
HE X S, GENG Z C, SHE D, et al. Implications of production and agricultural utilization of biochar and its international dynamic[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(2): 1-7.

[26] DANCER W S, PETERSON L A, CHESTERS G. Ammonification and nitrification of N as influenced by soil pH and previous N treatments[J]. Soil Science Society of America Journal, 1973, 37(1): 67-69.

[27] SHAMMAS N K. Interactions of temperature, pH, and biomass on the nitrification process[J]. Journal (Water Pollution Control Federation), 1986, 58(1): 52-59.

[28] KYVERYGA P M, BLACKMER A M, ELLSWORTH J W, et al. Soil pH effects on nitrification of fall-applied anhydrous ammonia[J]. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68(2): 545-551.

[29] SINGH N, BHATLA S C. Nitric oxide and iron modulate heme oxygenase activity as a long distance signaling response to salt stress in sunflower seedling cotyledons[J]. Nitric Oxide, 2016, 53: 54-64.

[30] 王娜,马绍英,马蕾,等.肉桂酸和棕榈酸对豌豆种子萌发和幼苗生长的化感效应[J].植物生理学报,2021,57(8):1657-1667.
WANG N, MA S Y, MA L, et al. Allelopathy effects of cinnamic acid and palmitic acid on seed germination and seedling growth of pea[J]. Plant Physiology Journal, 2021, 57(8): 1657-1667.

(下转第 93 页)