

# 土壤中添加生物炭对盐碱胁迫下绿豆生长的影响

张圣也<sup>1</sup>, 付东波<sup>2</sup>, 刘慧敏<sup>1</sup>, 王 柏<sup>1</sup>, 廖梅芳<sup>1</sup>, 李佐同<sup>1</sup>, 赵长江<sup>1</sup>

(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. 黑龙江省八五零农场, 黑龙江 虎林 158422)

**摘要:** 以绿丰二号绿豆品种为试验材料, 以不添加生物炭土壤为对照(0%, CK), 设置生物炭含量分别占盆栽土壤质量的10%、20%, 共3个生物炭梯度处理, 采用3种碳酸氢钠碱溶液(0、100、200 mmol/L)进行灌根处理, 于开花结荚期取样测定绿豆生长和理化指标, 研究盐碱胁迫下施用不同比例生物炭对绿豆生长的影响, 为盐碱地的修复、开发和利用以及盐碱地绿豆的优质高产栽培提供依据。结果表明, 在不添加生物炭条件下, 盐碱胁迫导致绿豆植株生物量、株高、叶面积、叶绿素含量、Fv/Fm和根系形态指标均显著下降, 且绿豆植株中Na<sup>+</sup>含量显著增加, K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>含量显著降低。添加生物炭处理对盐碱胁迫下绿豆植株生长和体内离子含量有着积极影响, 尤其在生物炭添加比例20%处理下, 200 mmol/L碳酸氢钠胁迫处理绿豆地下干质量、地上干质量、株高和叶面积分别增加75.00%、19.72%、54.82%和123.10%, 根长、总根表面积、根尖数分别增加57.85%、488.50%、227.83%, 而根系平均直径无显著变化。此外, 添加生物炭提高了绿豆叶片叶绿素含量和Fv/Fm, 同时提高了植株K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>含量, 降低了Na<sup>+</sup>含量。可见, 添加生物炭可以改善盐碱胁迫下绿豆植株地下根系和地上茎叶形态, 改善叶片光合性能和根系功能, 从而促进绿豆生物量的积累, 为后期产量形成奠定基础。总体而言, 20%生物炭处理效果优于10%生物炭处理。

**关键词:** 绿豆; 生物炭; 盐碱胁迫; 根系; 离子含量

**中图分类号:** S522 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-3268(2020)02-0068-06

## Effects of Biochar Addition in Soil on the Growth of Mung Bean under Salt-Alkali Stress

ZHANG Shengye<sup>1</sup>, FU Dongbo<sup>2</sup>, LIU Huimin<sup>1</sup>, WANG Bai<sup>1</sup>,  
LIAO Meifang<sup>1</sup>, LI Zuotong<sup>1</sup>, ZHAO Changjiang<sup>1</sup>

(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 163319, China;  
2. Eight Five Zero Farm of Heilongjiang Province, Hulin 158422, China)

**Abstract:** In the study, mung bean cultivar Lüfeng 2 was used as test material, and no biochar treatment was regarded as control group (0%, CK). And the other two were 10% and 20% biochar treatments. Three different kinds of sodium bicarbonate solution (0, 100, 200 mmol/L) were used for root treatment, and then the growth and physical and chemical indicators of mung bean were determined at flowering and pod-forming stage, in order to study the effects of different proportions of biochar on the growth of mung bean seedlings under salt-alkali stress, which would provide a basis for the restoration, exploitation and utilization of saline-alkali land and the high-quality and high-yield cultivation of mung bean in saline-

收稿日期: 2019-09-20

基金项目: 国家“十三五”重点研发项目(2017YFD0200803); 中央引导地方科技发展专项(ZY16A06); 黑龙江省农垦总局科技攻关项目(HNK135-02-05); 黑龙江省农垦总局重点科研计划项目(HKKY190210)

作者简介: 张圣也(1995-), 男, 黑龙江伊春人, 在读硕士研究生, 研究方向: 作物逆境生理。E-mail: byndzsy@163.com

通信作者: 李佐同(1962-), 男, 黑龙江海伦人, 教授, 博士, 主要从事寒地作物逆境生理及秸秆炭化利用研究。

E-mail: lxxg6401999@163.com。赵长江同为通信作者

alkali land. The results indicated that the mung bean biomass, plant height, leaf area, chlorophyll content, Fv/Fm and root morphological indexes decreased significantly in CK group under salt-alkali stress, and the Na<sup>+</sup> content in mung bean plants increased markedly while the contents of K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> and Mg<sup>2+</sup> significantly reduced. The addition of biochar had a positive effect on the growth and ion accumulation of mung bean plants under salt-alkali stress, especially the 20% biochar treatment in which the root dry mass, aboveground dry weight, plant height and leaf area increased by 75.00%, 19.72%, 54.82% and 123.10%, and the root length, total root surface area and root tip number increased by 57.85%, 488.50% and 227.83% under 200 mmol/L sodium bicarbonate solution, while the average diameter of the roots did not change significantly. In addition, the addition of biochar increased the chlorophyll content and Fv/Fm value of mung bean leaves, and increased the contents of K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> and Mg<sup>2+</sup>, and decreased the Na<sup>+</sup> content. Obviously, the addition of biochar can improve the morphology of the roots, shoots and leaves of mung bean plants, improve the leaf photosynthesis and root functions, and promote the accumulation of mung bean biomass, which will lay a foundation for later mung bean yield under saline-alkali stress. Overall, 20% biochar treatment was better than 10% biochar treatment.

**Key words:** Mung bean; Biochar; Saline-alkali stress; Root system; Ion content

盐碱土作为重要的土地资源,具有很大的开发潜力。据报道,全世界盐碱地分布 10 余亿 hm<sup>2</sup>,除南极洲以外,其余五大洲及大多数岛屿的滨海地区和干旱、半干旱地带都有不同类型的盐碱土分布<sup>[1]</sup>。同时,现有耕地的不合理使用也会导致次生盐渍化,所以土壤盐碱化已经成为世界范围内影响农作物产量的关键因素<sup>[2]</sup>。

生物炭是农林废弃物等生物质在限氧、高温下热裂解形成的稳定的富碳产物<sup>[3-4]</sup>。生物炭因具有孔隙多、比表面积较大、稳定性好等特点,在提高土壤保水持水能力、增加土壤通气性、改善土壤温度、吸附铵态氮和磷酸根离子等提高土壤有效养分方面具有明显的正向效应,在农业生产中的应用越来越受到重视<sup>[5-9]</sup>。ASAI 等<sup>[10]</sup>研究表明,通过施用生物炭,水稻与豇豆的生物量分别增加 20% 和 50%。STEINER 等<sup>[11]</sup>研究发现,在正常条件、盐分和干旱等胁迫条件下,施用生物炭均可提高作物的生产力。根据 GLASER 等<sup>[12]</sup>研究结果,当生物炭施用量为 10 t/hm<sup>2</sup> 时,马铃薯产量可增加 50% 以上。

绿豆是主要的经济作物,同时具有一定的抗盐碱能力,在北方尤其是中国黑龙江松嫩平原大面积盐碱土的修复、开发及利用方面具有较好的发展潜力。但目前缺乏进一步提高绿豆耐盐碱能力的有效栽培措施,限制了绿豆在盐碱地上的种植以及盐碱地的开发和利用。生物炭可以改良和培肥土壤,促进土壤的可持续利用及作物增产,对探索盐碱地绿豆高产优质栽培具有重要的理论和实践意义。鉴于此,研究了添加不同比例生物炭对盐碱胁迫下绿豆植株表型和生理生化特性的影响,为盐碱土的利用提供理论指导和技术支持。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验材料

供试绿豆品种为绿丰二号,种子由黑龙江省农业科学院提供。

供试生物炭材料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 °C。基本性质:pH 值 8.34、碳 53.64%、氮 1.23%、磷 0.89%、钾 1.56%。

供试土壤为大庆地区田间草甸黑钙土,基础理化性质为有机质含量 28.59 g/kg、碱解氮含量 121 mg/kg、有效磷含量 13.25 mg/kg、速效钾含量 132 mg/kg, pH 值为 8.06。

### 1.2 试验设计

试验采取随机区组设计,设置 3 个生物炭梯度,即生物炭含量分别占土壤质量的 0%、10%、20%。将土壤和生物炭全部过 2 mm 筛,与化肥混匀后等量装入 11.0 cm×7.5 cm×10.0 cm 的花盆中,每盆装土 1.0 kg。基肥用量为 N 150 mg/kg、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 100 mg/kg、K<sub>2</sub>O 70 mg/kg。置于温室培养,培养条件:昼/夜温度为(25±2) °C/(20±2) °C,每天光照 11 h,光强为 1 000 μmol/(m<sup>2</sup>·s),相对湿度为 60%~80%。绿丰二号播种后,每盆定植 9 株,生长期间每 3 d 定量浇水 1 次。在绿豆生长 14 d 后,用碳酸氢钠碱溶液(100、200 mmol/L) 300 mL 进行灌根处理,以蒸馏水为对照,共 9 个处理,各处理 18 盆,4 次重复。在开花结荚期取样,进行表型和理化指标测定。

### 1.3 测定指标及方法

1.3.1 生长指标 各处理随机选取 10 株植株,采用便携式叶面积仪(托普 YMJ-B 叶面积仪)测量叶面积,将植株地上和地下部分剪开,用直尺测量绿豆

株高和根长。将样品在 105 ℃ 烘箱杀青 15 min 后 75 ℃ 烘干至恒质量,测定样品的生物量。

1.3.2 根系形态 利用根系扫描仪(Epson Perfection V800)对植株根系进行扫描成像,并用 WinRHIZO 根系分析软件对根长度、总根表面积、总根体积、根尖数进行分析。

1.3.3 叶绿素含量和叶绿素荧光参数 叶绿素含量测定采用 80% 丙酮浸提法,在 645、652、470 nm 波长下测定吸光值;叶绿素荧光仪(OS30P)测定 Fv/Fm。

1.3.4 离子含量 将植株地上部分在 105 ℃ 烘箱中杀青 30 min,然后在 80 ℃ 下烘干至恒质量。样品研细后精密称取 0.1 g 置于消解管中,加入 10 mL 硝酸加盖放置过夜,盖紧盖子,按照石墨消解仪操作步骤进行消解,冷却至室温,去离子水定容至 50 mL,使用电感耦合等离子体发射光谱仪(Optima8000)进行测定。

#### 1.4 数据统计

采用 Excel 2007 对试验数据进行整理和相关图表的制作,用 SPSS 21.0 软件对数据进行差异显著性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 生物炭处理对盐碱胁迫下绿豆生长指标的影响

由表 1 可知,100、200 mmol/L 盐碱胁迫使绿豆

地下干质量、地上干质量和叶面积均显著下降,降幅分别为 36.74%、60.60%、31.86%、47.41% 和 42.48%、62.74%,株高下降分别为 8.60%、26.75%。无盐碱胁迫时,土壤中添加 10%、20% 的生物炭,绿豆地下干质量、地上干质量和叶面积均显著增加,增幅分别为 23.11%、25.76%、17.66%、15.74% 和 9.28%、6.21%,株高只在 20% 处理时与 CK 达到显著差异,增幅为 22.43%。盐碱胁迫下,土壤中添加生物炭对绿豆生长起到显著促进作用,在 20% 添加比例时尤为显著。100、200 mmol/L 盐碱胁迫下,生物炭 20% 添加比例的绿豆地下干质量、地上干质量、株高和叶面积较不添加生物炭处理分别增加 41.32%、75.00%、19.34%、19.72%、26.39%、54.82% 和 51.61%、123.10%。

根冠比能够反映作物地上和地下部分的协调性。无盐碱胁迫及 100、200 mmol/L 盐碱胁迫下,添加生物炭后绿豆植株的根冠比均显著高于不添加生物炭处理,且均在 20% 添加比例时根冠比最大。上述结果表明,添加生物炭改善了盐碱胁迫下绿豆的生物量积累,土壤添加生物炭对绿豆具有耐逆促生效果,且 20% 添加比例优于 10% 添加比例。

表 1 生物炭处理对盐碱胁迫下绿豆生长指标的影响

Tab. 1 Effect of biochar treatment on growth index of mung bean under saline-alkali stress

盐碱浓度/(mmol/L) Saline concentration	生物炭比例/% Biochar ratio	地下干质量/g Underground dry weight	地上干质量/g Dry weight above the ground	株高/cm Plant height	叶面积/mm <sup>2</sup> Leaf area	根冠比 Root shoot ratio
0	0	0.264±0.005b	0.521±0.009b	23.63±0.79bc	920.15±23.46b	0.502±0.008c
	10	0.325±0.011a	0.613±0.012a	26.07±1.42b	1005.53±32.35a	0.559±0.004a
	20	0.332±0.003a	0.603±0.008a	28.93±0.17a	977.32±57.94a	0.561±0.003a
100	0	0.167±0.003d	0.355±0.015d	21.60±0.98c	529.26±41.35d	0.435±0.011d
	10	0.215±0.021c	0.433±0.010c	24.50±0.29bc	783.48±29.85c	0.527±0.005b
	20	0.236±0.009c	0.425±0.006c	27.30±0.77b	802.64±29.86c	0.528±0.001b
200	0	0.104±0.001f	0.274±0.014e	17.31±0.19d	342.81±21.19e	0.368±0.014e
	10	0.126±0.012e	0.337±0.009d	21.89±0.18c	602.92±53.99d	0.472±0.026d
	20	0.182±0.003d	0.327±0.011d	26.80±0.29b	763.71±36.06cd	0.522±0.004b

注:同列不同小写字母表示不同处理间差异达 5% 显著水平,下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference at 5% between different treatments, the same below.

### 2.2 生物炭处理对盐碱胁迫下绿豆根系生长的影响

由表 2 可知,100、200 mmol/L 盐碱胁迫使绿豆根长、总根表面积和根尖数分别显著下降 28.36%、27.08%、4.49%、8.16% 和 25.88%、30.74%。无盐碱胁迫时,土壤中添加 10%、20% 的生物炭,根长和总根表面积均显著增加,增幅分别为 19.94%、33.03% 和 24.49%、112.96%。根尖数在 20% 添加比例时显著增加,增幅为 148.44%。而平均根系直

径在添加生物炭与盐碱胁迫下均无显著差异。盐碱胁迫下,土壤中添加生物炭对绿豆根系生长起到显著促进作用,尤其是 20% 添加比例。100、200 mmol/L 盐碱胁迫下,生物炭 20% 添加比例的绿豆根长、总根表面积和根尖数分别较不添加生物炭处理增加 43.53%、57.85%、233.38%、488.50% 和 106.82%、227.83%。可见,添加生物炭改善了盐碱胁迫下绿豆的根系发育,从而增强了根系的功能。且 20% 添加比例优于 10% 添加比例。

表 2 生物炭处理对盐碱胁迫下绿豆根系的影响

Tab. 2 Effect of biochar treatment on roots of mung bean under saline-alkali stress

盐碱浓度/(mmol/L) Saline concentration	生物炭比例/% Biochar ratio	根长/cm Root length	平均根系直径/mm Average root diameter	总根表面积/cm <sup>2</sup> Total root surface area	根尖数 Number of root tips
0	0	10.93±0.76c	0.245±0.024a	59.48±9.24c	1 503±322c
	10	13.11±0.89b	0.247±0.014a	74.05±22.52b	1 621±512c
	20	16.32±0.82a	0.270±0.032a	126.67±17.86a	3 734±658a
100	0	7.83±0.33d	0.234±0.018a	29.42±3.65d	1 114±216c
	10	11.87±0.45bc	0.213±0.190a	60.69±11.07c	2 550±412ab
	20	12.36±0.28b	0.237±0.022a	98.08±36.75a	3 652±427a
200	0	7.97±0.76d	0.225±0.053a	13.31±1.52d	1 041±317d
	10	8.42±0.16d	0.218±0.025a	29.31±3.76d	1 800±538b
	20	11.44±0.71bc	0.263±0.011a	78.33±23.01b	2 153±813b

### 2.3 生物炭处理对盐碱胁迫下绿豆叶片叶绿素含量及荧光参数的影响

叶绿素含量是反映植物叶片光合能力及植株健康状况的主要指标。分析表 3 可知,盐碱胁迫和生物炭对绿豆叶绿素含量和荧光参数的影响显著。盐碱胁迫使绿豆叶片 Fv/Fm、叶绿素 a 含量、叶绿素 b

含量、叶绿素总量显著降低,使叶绿素 a/b 显著增加。无盐碱胁迫下,土壤中添加生物炭使叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量、叶绿素总量、叶绿素 a/b 和 Fv/Fm 增加。盐碱胁迫下,添加生物炭对绿豆叶片叶绿素含量提高起到显著促进作用,20%生物炭添加比例处理优于 10%生物炭添加比例处理。

表 3 生物炭处理对盐碱胁迫下绿豆叶片叶绿素含量及荧光参数的影响

Tab. 3 Effect of biochar treatment on chlorophyll content and fluorescence parameters of mung bean leaves under saline-alkali stress

盐碱浓度/ (mmol/L) Saline concentration	生物炭比例/% Biochar ratio	叶绿素 a 含量/ (mg/kg) Chlorophyll a content	叶绿素 b 含量/ (mg/kg) Chlorophyll b content	叶绿素总量/ (mg/kg) Total chlorophyll content	叶绿素 a/b Chlorophyll a/b	Fv/Fm
0	0	1.134±0.021b	0.614±0.062ab	1.748±0.042b	1.852±0.006c	0.724±0.005b
	10	1.381±0.073a	0.738±0.054b	2.119±0.012a	1.890±0.052bc	0.755±0.008a
	20	1.376±0.005a	0.772±0.061a	2.148±0.029a	1.863±0.008b	0.766±0.005a
100	0	0.726±0.085d	0.361±0.035c	1.087±0.032d	2.011±0.015b	0.679±0.013c
	10	0.812±0.024c	0.393±0.091c	1.205±0.061c	2.066±0.071b	0.733±0.005ab
	20	0.935±0.013c	0.457±0.041c	1.392±0.008c	2.139±0.017b	0.749±0.003a
200	0	0.235±0.061f	0.112±0.035e	0.347±0.072f	2.098±0.002b	0.553±0.014c
	10	0.357±0.051ef	0.161±0.022e	0.518±0.006e	2.217±0.019a	0.635±0.004cd
	20	0.452±0.061e	0.201±0.034d	0.653±0.072e	2.248±0.023a	0.667±0.005c

### 2.4 生物炭处理对盐碱胁迫下绿豆植株离子含量的影响

由表 4 可知,随盐碱胁迫浓度增加,绿豆植株 Na<sup>+</sup> 含量显著升高。无盐碱胁迫下,添加 10% 生物炭与不添加生物炭处理间 Na<sup>+</sup> 含量无显著差异,但与 20% 添加比例之间差异显著。同一盐碱浓度胁迫下,与不添加生物炭相比,添加生物炭显著降低了植株的 Na<sup>+</sup> 含量,但生物炭添加比例 10% 与 20% 处理间差异不显著。同时, K<sup>+</sup> 在植株体内含量较大。随盐碱胁迫浓度增加,绿豆植株 K<sup>+</sup> 含量显著下降,而在同一盐碱浓度胁迫下,添加生物炭与不添加生物炭相比显著增加了植株 K<sup>+</sup> 含量,但生物炭添加比

例 10% 和 20% 处理间差异不显著。盐碱胁迫和添加生物炭对植株 K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup> 影响较大,随盐碱胁迫浓度增加,绿豆植株的 K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup> 显著降低,而添加生物炭则显著提高了 K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup>。无盐碱胁迫下,添加 20% 生物炭处理绿豆植株 K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup> 最高。

另外,随着盐碱浓度的增加,绿豆植株 Ca<sup>2+</sup> 和 Mg<sup>2+</sup> 含量均显著下降。在无盐碱胁迫条件下,生物炭不同添加比例间 Ca<sup>2+</sup> 含量与 Mg<sup>2+</sup> 含量无显著差异;100 mmol/L 盐碱胁迫下,添加生物炭与无生物炭处理之间 Ca<sup>2+</sup> 含量和 Mg<sup>2+</sup> 含量差异均不显著;200 mmol/L 盐碱胁迫下,只有添加 20% 生物炭处理绿豆植株 Ca<sup>2+</sup> 含量和 Mg<sup>2+</sup> 显著高于无生物炭处理。

表 4 生物炭处理对盐碱胁迫下绿豆植株离子含量的影响

Tab. 4 Effect of biochar treatment on ion content of mung bean plants under salt-alkali stress

盐碱浓度/ (mmol/L)	生物炭比 例/%	Na <sup>+</sup> /(mg/kg)	K <sup>+</sup> /(mg/kg)	Ca <sup>2+</sup> /(mg/kg)	Mg <sup>2+</sup> /(mg/kg)	K <sup>+</sup> /Na <sup>+</sup>
Saline concentration	Biochar ratio					
0	0	5.95±0.87d	16.89±0.18b	11.52±0.78a	3.51±0.25b	2.43±0.31c
	10	5.61±0.24d	17.36±0.29ab	11.64±0.65a	3.69±0.63ab	3.09±0.53b
	20	5.02±0.41e	18.76±0.45a	12.29±0.52a	3.95±0.18a	3.52±0.14a
100	0	10.99±0.76b	11.22±0.42d	9.01±0.72b	2.21±0.36cd	1.02±0.52e
	10	8.15±0.65c	13.04±0.36c	8.62±0.12b	2.29±0.11cd	1.60±0.25d
	20	6.51±0.49cd	13.96±0.52c	9.04±0.23b	2.69±0.39c	2.14±0.75c
200	0	14.59±0.69a	7.46±0.11e	5.04±0.12d	1.81±0.35e	0.51±0.12f
	10	8.86±0.12bc	10.85±0.34d	5.13±0.52d	1.79±0.63e	1.22±0.29d
	20	9.97±0.55b	10.72±0.13d	5.97±0.41c	2.51±0.57cd	1.07±0.41e

### 3 结论与讨论

植物对盐碱胁迫的共同反应是生长受到抑制<sup>[13]</sup>。在不添加生物炭条件下,盐碱胁迫使绿豆植株根干质量、根长、根表面积和根尖数显著减少;地上生物量的累积也受到显著抑制,叶片叶绿素含量显著降低,这与 LIU 等<sup>[14]</sup>的研究结果一致。当然也有研究指出,一定低浓度的盐碱胁迫能促进植株叶绿素的合成,而高浓度的盐碱胁迫致使叶绿素合成受阻<sup>[15]</sup>。这可能是根系中高 pH 值破坏了离子的吸收和转运,限制了叶片对 Mg<sup>2+</sup> 的吸收和利用,打破叶绿素代谢的动态平衡<sup>[16]</sup>。另外,根据 Fv/Fm 的变化可推断 PS II 反应中心的变化情况和可能的光保护机制<sup>[17]</sup>。本研究发现,随着盐碱浓度的增大,绿豆叶片的 Fv/Fm 逐渐下降,并显著低于对照,表明盐碱胁迫可能破坏了光合系统,抑制了光合电子传递活性,从而使绿豆植株产生了生长抑制。

本研究发现,土壤中添加生物炭对绿豆地上和地下生物量的积累和形态建成、叶片中叶绿素含量和 Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup> 含量产生明显影响,不仅促进了绿豆的生长,而且缓解了盐碱胁迫对植株的伤害。蒋健等<sup>[18]</sup>研究指出,生物炭可增加玉米根系的总根长、根体积和根干质量,提高玉米根系总吸收面积和活跃吸收面积,维持较为适宜的根冠比,增强根系的生理功能。周劲松等<sup>[19]</sup>研究也指出,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。生物炭对根系的促进得益于其丰富的微观孔隙结构和理化特性,可能因为生物炭直接向植物提供矿质营养,或生物炭多孔的结构施入对土壤结构产生直接影响,降低了土壤容重并增加土壤孔隙度,为根系生长提供了良好的空间,亦或是生物炭具有丰富的表面官能团和较强的吸附能力,以及比表面积较大的多孔结构产生了复杂的生物学反应。

植物对盐胁迫的耐受性与 K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup> 密切相关,本研究发现,随着盐碱浓度的增加,植株体 K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup> 显著降低,而且 Ca<sup>2+</sup> 和 Mg<sup>2+</sup> 含量亦显著下降。研究表明,高钠对植物极其有害,NaCl 增加会诱导植物中 Na<sup>+</sup> 增加及 K<sup>+</sup> 减少,过多的 Na<sup>+</sup> 会取代 K<sup>+</sup>,破坏细胞结构的稳定性<sup>[20]</sup>。此外, Ca<sup>2+</sup> 作为植物的营养物质和细胞膜的组分,对膜的结构和功能调控起重要作用,同时也有报道指出, Ca<sup>2+</sup> 影响植物对 Na<sup>+</sup> 的吸收,因此,适量离子比例对于维持细胞膜的完整性和正常代谢过程是必需的<sup>[21]</sup>。本研究发现,添加生物炭改善了盐碱胁迫下绿豆植株的离子含量,绿豆叶片中 Na<sup>+</sup> 含量显著降低,植物体内 K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup> 含量增加,可能是因为某些阳离子增强,导致植株对 Na<sup>+</sup> 的吸收利用减少造成的。

盐碱胁迫对绿豆地下和地上形态和生物量积累、叶绿素含量和 Fv/Fm 等光合生理指标以及 K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup> 产生明显抑制,土壤中添加生物炭则对绿豆上述指标增加产生明显的促进。土壤中添加生物炭主要通过改变植株体内 K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup> 以及叶绿素含量、Fv/Fm 等光合生理参数缓解盐碱胁迫对绿豆生长的伤害,其中 20% 生物炭添加比例效果较为明显。

#### 参考文献:

- [1] STEINER C, DAS K C, MELEAR N, *et al.* Reducing nitrogen loss during poultry litter composting using biochar [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2010, 39 (4): 1236-1242.
- [2] MUNNS R, TESTER M. Mechanisms of salinity tolerance [J]. *Annu Rev Plant Biol*, 2008, 59 (3): 651-681.
- [3] CHEN Y, SHINOBI 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.
- [4] 王成己, 郭学清, 曾文龙, 等. 生物质炭对烟草青枯病的防控作用及应用前景分析 [J]. *南方农业学报*,

- 2019,50(8):1756-1763.
- WANG C J, GUO X Q, ZENG W L, *et al.* The prevention and control effects of biochar on tobacco bacterial wilt and its application prospects[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2019, 50(8):1756-1763.
- [5] 宋亮,任天宝,李敏,等.不同生物炭用量对湘西植烟土壤养分的影响[J].*河南农业科学*, 2017, 46(2):43-48.
- SONG L, REN T B, LI M, *et al.* Effects of different amounts of biochar on soil nutrients of flue-cured tobacco in west Hunan[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2017, 46(2):43-48.
- [6] 刘宇娟,谢迎新,董成,等.秸秆生物炭对潮土区小麦产量及土壤理化性质的影响[J].*华北农学报*, 2018, 33(3):232-238.
- LIU L J, XIE Y X, DONG C, *et al.* Effects of straw biochar application on grain yield of wheat and physicochemical properties in fluvio-aquatic soil[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2018, 33(3):232-238.
- [7] 张婷,佟忠勇,张广才,等.添加稻草生物炭对水稻土壤磷含量和形态的影响[J].*华北农学报*, 2018, 33(1):211-216.
- ZHANG T, TONG Z Y, ZHANG G C, *et al.* Effects of rice straw-derived biochar on phosphorus content and form in paddy soil[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2018, 33(1):211-216.
- [8] 郭大勇,商东耀,王旭刚,等.改性生物炭对玉米生长发育、养分吸收和土壤理化性状的影响[J].*河南农业科学*, 2017, 46(2):22-27.
- GUO D Y, SHANG D Y, WANG X G, *et al.* Effects of modified biochar on growth, nutrients uptake of maize and soil physicochemical properties[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2017, 46(2):22-27.
- [9] 李少朋,陈咄圳,周艺艺,等.生物炭施用对滨海盐碱土速效养分和酶活性的影响[J].*南方农业学报*, 2019, 50(7):1460-1465.
- LI S P, CHEN P Z, ZHOU Y Y, *et al.* Effects of biochar application on available nutrients and enzyme activities in coastal saline-alkali soil[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2019, 50(7):1460-1465.
- [10] ASAI H, SAMSON B K, STEPHAN H M, *et al.* Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos: I. Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield[J]. *Field Crops Research*, 2009, 111(1/2):81-84.
- [11] STEINER C, GLASER B, GERALDES TEIXEIRA W, *et al.* Nitrogen retention and plant uptake on a highly weathered central Amazonian Ferralsol amended with compost and charcoal[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2008, 171(6):893-899.
- [12] GLASER B, LEHMANN J, ZECH W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal: A review[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 35(4):219-230.
- [13] GHOULAM C, FOURSRY A, FARES K. Effects of salt stress on growth, inorganic ions and proline accumulation in relation to osmotic adjustment in five sugar beet cultivars[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2002, 47(1):39-50.
- [14] LIU R, SUN W, CHAO M X, *et al.* Leaf anatomical changes of *Bruguiera gymnorhiza* seedlings under salt stress[J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2009, 17(2):169-175.
- [15] STEPIEN P, KLUBUS G. Water relations and photosynthesis in *Cucumis sativus* L. leaves under salt stress[J]. *Biologia Plantarum*, 2006, 50(4):610-615.
- [16] GUO R, YANG Z, LI F, *et al.* Comparative metabolic responses and adaptive strategies of wheat (*Triticum aestivum*) to salt and alkali stress[J]. *BMC Plant Biology*, 2015, 15(1):170-174.
- [17] 杨广东,朱祝军,计玉妹.不同光强和缺镁胁迫对黄瓜叶片叶绿素荧光特性和活性氧产生的影响[J].*植物营养与肥料学报*, 2002, 26(1):115-118.
- YANG G D, ZHU Z J, JI Y M. Effect of light intensity and magnesium deficiency on chlorophyll fluorescence and active oxygen in cucumber leaves[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2002, 26(1):115-118.
- [18] 蒋健,王宏伟,刘国玲,等.生物炭对玉米根系特性及产量的影响[J].*玉米科学*, 2015, 23(4):62-66.
- JIANG J, WANG H W, LIU G L, *et al.* Effect of biochar on root characteristics and yield in maize[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2015, 23(4):62-66.
- [19] 周劲松,闫平,张伟明,等.生物炭对东北冷凉区水稻秧苗根系形态建成与解剖结构的影响[J].*作物学报*, 2017, 43(1):72-81.
- ZHOU J S, YAN P, ZHANG W M, *et al.* Effect of biochar on root morphogenesis and anatomical structure of rice cultivated in cold region of Northeast China[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2017, 43(1):72-81.
- [20] SHABALA S, CUIN T A. Xylem ionic relations and salinity tolerance in barley[J]. *The Plant Journal*, 2010, 61(5):839-853.
- [21] WU G Q, WANG S M. Calcium regulates  $K^+/Na^+$  homeostasis in rice (*Oryza sativa* L.) under saline conditions[J]. *Plant, Soil and Environment*, 2012, 58(3):121-127.