

网络出版时间:2020-07-08 09:36 DOI:10.13207/j.cnki.jnwfufu.2021.01.013
网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20200707.1537.013.html

盐碱胁迫下施加生物炭和减少氮肥用量对甜菜光合特性的影响

刘新宇,武沛然,李彩凤,王玉波,张树友,陈婧婷

(东北农业大学 农学院,黑龙江 哈尔滨 150000)

[摘 要] **【目的】**研究盐碱胁迫下施加生物炭和减少氮肥用量对甜菜光合特性的影响,为甜菜抗盐碱栽培及其生理研究提供理论依据。**【方法】**采用桶栽试验,共设 7 个处理,其中 3 个正常施肥处理(各施纯 N 180 kg/hm²),分别为黑钙土处理(CK)、盐碱胁迫处理(ALK)及盐碱胁迫下施加 3%生物炭处理(N180);4 个盐碱胁迫下施加 3%生物炭并减少氮肥用量处理,施肥量分别为 162 kg/hm² (N162)、144 kg/hm² (N144)、126 kg/hm² (N126)、108 kg/hm² (N108),在甜菜 6 叶期开始取样,随后每隔 20 d 取样 1 次,共取样 5 次,分析盐碱胁迫下施加生物炭与减少氮肥用量对甜菜叶绿素含量、RuBP 羧化酶活性、净光合速率、气孔导度、叶绿素荧光参数和干物质质量的影响。**【结果】**盐碱胁迫处理显著抑制了甜菜的光合作用和干物质累积,施加 3%生物炭能显著缓解盐碱胁迫对甜菜的影响。N162 处理甜菜叶绿素含量较 ALK 处理高 36.9%,N180 处理甜菜 RuBP 羧化酶活性较 ALK 处理提高 16.6%。盐碱胁迫下施加生物炭处理中,甜菜净光合速率、气孔导度、光系统Ⅱ最大光能转换效率(F_v/F_m)、光系统Ⅱ实际光能转换效率($Y(II)$)、光系统Ⅱ相对电子传递速率(ETR)、光化学淬灭系数(qL)、叶片干质量均以 N180 处理下最大,且随氮肥施用量的减少逐渐减低,但 N162 处理甜菜的 RuBP 羧化酶活性、净光合速率、 F_v/F_m 和 $Y(II)$ 与 N180 处理相比差异不显著。**【结论】**结合试验结果和生产成本认为,在盐碱胁迫条件下施加 3%生物炭和 162 kg/hm² 氮肥能有效提高甜菜的光合作用。

[关键词] 甜菜;盐碱胁迫;生物炭;氮肥;光合特性
[中图分类号] S566.306.2 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1671-9387(2021)01-0108-09

Effects of biochar and reduced nitrogen application on photosynthetic characteristics of sugar beet under saline-alkali stress

LIU Xinyu, WU Peiran, LI Caifeng, WANG Yubo,
ZHANG Shuyou, CHEN Jingting

(College of Agriculture, Northeast Agriculture University, Harbin, Heilongjiang 150000, China)

Abstract: **【Objective】** This study investigated the effects of biochar and reduced nitrogen application on photosynthetic characteristics of sugar beet under saline-alkali stress to provide basis for saline-alkali resistant cultivation and physiological research of sugar beet. **【Method】** A total of seven treatments were set up in the bucket planting experiment, among which three were normal fertilization treatments of normal chernozem soil (CK), saline-alkali stress treatment (ALK) and 3% biochar normal fertilization under saline-alkali stress (N180). In addition, under saline-alkali stress the 3% biochar and reduced nitrogen application with fertilizer rates of 162, 144, 126 and 108 kg/hm² were applied to treatments N162, N144, N126

[收稿日期] 2019-12-26
[基金项目] 国家自然科学基金项目(31671622);国家糖料现代农业产业技术体系项目(CARS-170201)
[作者简介] 刘新宇(1996—),男,黑龙江绥化人,在读硕士,主要从事甜菜栽培生理研究。E-mail:631645879@qq.com
[通信作者] 李彩凤(1965—),女,河北武安人,教授,博士生导师,主要从事作物生理研究。E-mail:licaifeng@neau.edu.cn

and N108, respectively. Samples were taken at the beginning of the six-leaf period, and every twenty days for a total of five times in the growth period. Then, the effects of biochar and nitrogen fertilizer application on chlorophyll content, RuBP carboxylase activity, net photosynthetic rate, stomatal conductance, chlorophyll fluorescence parameters and dry matter of sugar beet under saline-alkali stress were analyzed. 【Result】 Saline-alkali stress significantly reduced photosynthesis and dry matter accumulation of sugar beet. The effect of saline-alkali stress on sugar beet was alleviated significantly by applying 3% biochar. Compared with the treatment of ALK, the chlorophyll content in N162 treatment increased by 36.9%, and the RuBP carboxylase activity in N180 treatment increased by 16.6%. The net photosynthetic rate, stomatal conductance, PSⅡ maximum light energy conversion efficiency (F_v/F_m), PSⅡ actual light energy conversion efficiency ($Y(Ⅱ)$), PSⅡ relative electron transfer rate (ETR), photochemical quenching coefficient (qL) and dry weight of leaves reached the maximum values under N180 treatment and decreased gradually with the decrease of nitrogen fertilizer application rate under five saline-alkali stress treatments. There was no significant difference in RuBP carboxylase activity, net photosynthetic rate, F_v/F_m and $Y(Ⅱ)$ between treatments N162 and N180. 【Conclusion】 Combined with experimental results and production cost, the application of 3% biochar and 162 kg/hm² nitrogen fertilizer under saline-alkali stress could improve effectively the photosynthesis of sugar beet.

Key words: sugar beet; saline-alkali stress; biochar; nitrogen fertilizer; photosynthetic characteristics

随着地球环境的持续恶化,各种问题应运而生,土壤盐碱化现已成为全球性的环境问题,日益侵占并威胁着人类有限的生活空间。如何改良和利用盐碱地已经成为当前农业面临的主要问题。我国东北地区的盐碱地面积为 7.66×10^6 hm², 约占全国盐碱地面积的 7.9%^[1]。光合速率下降是导致盐碱胁迫植物生长缓慢的主要原因之一。盐碱胁迫能破坏植物的叶绿体结构^[2], 叶片中盐分的积累导致植物叶绿素含量下降, 影响植物的光系统, 降低植物接收光能的能力^[3], 使植物生长发育缓慢甚至死亡。

甜菜 (*Beta vulgaris* L.) 是世界两大糖料作物之一, 也是我国北方地区重要的经济作物, 本身具有一定的抗盐碱能力。目前有关盐碱胁迫对甜菜生长影响的研究较多, 有研究表明, 低盐环境可以促进甜菜生长, 高盐环境下甜菜生长则会受到抑制^[4]。盐碱胁迫会显著抑制甜菜的光合作用^[5], 施加有机肥能有效缓解盐碱胁迫对甜菜光合作用的抑制, 并提高甜菜的产量^[6]。

生物炭是在缺氧或绝氧条件下, 将生物有机材料在高温下热裂解产生的固体^[7]。在农业生产中, 可以将生物炭按一定比例与市场上的氮磷钾肥混合, 形成新型的炭基有机、无机复合肥。生物炭与化肥混合成粒后, 两者紧密结合, 可以使肥效缓慢释放并减少化肥的流失, 从而提高化肥利用率, 减少环境污染^[8]。由于生物炭能提高土壤的腐殖质和有机质含量, 具备“锁”碳能力, 从而使土壤肥力和二氧化碳

含量提高^[9], 间接提高植物的光合能力。如果在逆境 (盐碱或渍害) 条件下施加生物炭, 则能降低土壤体积质量, 增加土壤营养成分含量, 同时提高作物产量^[10-11]。另外, 在施加生物炭的条件下同时减少施肥量, 也能显著提高玉米产量^[12]。

中国黑龙江松嫩平原盐碱土面积大, 对其进行修复及开发利用具有十分重要的实际意义, 但是目前在甜菜栽培上尚缺乏进一步有效提高其耐盐碱能力的技术措施, 从而限制了甜菜在该地区的种植、开发和利用。为此, 本试验在盐碱胁迫条件下, 通过生物炭与氮肥配施, 研究甜菜叶绿素含量、RuBP 羧化酶活性、净光合速率及叶绿素荧光参数的变化规律, 探索盐碱胁迫下施加生物炭和减少氮肥用量对甜菜光合特性的影响, 以期对甜菜抗盐碱栽培及其生理研究提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试甜菜品种为 KWS0143, 由德国 KWS 公司生产。生物炭由玉米秸秆在 500 °C 高温低氧下制成, pH 值为 9.29, 碳含量为 67.08%, 由东北农业大学资源与环境学院提供。

1.2 试验设计

试验于 2018 年在黑龙江省哈尔滨市东北农业大学试验站 (126°63'W, 45°10'N) 进行。供试土壤为本地自然黑钙土, 土壤基础肥力 (0~20 cm) 为: 有机

质含量 35.66 g/kg,碱解氮含量 176.27 mg/kg,速效磷含量 83.30 mg/kg,速效钾含量 153.20 mg/kg,土壤土水比 1:5 浸提液的电导率($EC_{1:5}$)为 12.2 mS/m,pH 值为 7.65。

将供试土壤与中性盐($Na_2SO_4:NaCl=1:2$ (物质的量比,下同))和碱性盐($Na_2CO_3:NaHCO_3=1:2$)混合,此时土壤中 Na^+ 含量为 3 g/kg, $EC_{1:5}$ 为 33.2 mS/m,pH 值为 9.15。

试验共设 7 个处理,其中 3 个正常施肥处理,分别为黑钙土(CK)、盐碱胁迫处理(ALK)及盐碱胁迫下施加 3%生物炭(N180);4 个盐碱胁迫下施加 3%生物炭并同时减少氮肥用量处理,其施肥量分别为 162 kg/hm² (N162)、144 kg/hm² (N144)、126 kg/hm² (N126)和 108 kg/hm² (N108),其中生物炭施用量为风干土壤质量(每桶 10 kg)的 3%,正常施肥的施用量比例为 N:P₂O₅:K₂O=180:90:90,减少氮肥施用处理的磷、钾肥施用量与正常施肥处理相同。肥料分别使用尿素、磷酸二胺和硫酸钾。将各处理的盐碱、化肥和生物炭与过筛后的土壤混匀后装入桶中,桶的直径为 30.0 cm,高为 26.5 cm。播种前每桶浇水 2 L(浇透),4 月 31 日进行人工播种,每桶播 5 穴,每穴播 10 粒种子,每个处理 40 桶。待第 2 对真叶展开时间苗,每桶留 1 株。生育期内浇水、除草同大田管理。

在甜菜整个生育期内,分别在 06-22,07-11,08-05,08-25 和 09-15,随机选择各处理长势相同的 3 株甜菜进行取样。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 叶绿素含量的测定 取甜菜的第 3 对真叶,采用乙醇提取法^[13]测定甜菜叶片中的叶绿素含量。

1.3.2 RuBP 羧化酶活性的测定 RuBP 羧化酶活

性测定采用酶联免疫分析法,并使用上海酶联生物科技有限公司提供的试剂盒进行测定。

1.3.3 净光合速率和气孔导度的测定 在取样前后的晴朗天气,使用便携式光合作用-荧光测量系统(GFS-3000,上海泽泉),于 09:00—11:00 测定甜菜的净光合速率和气孔导度。控制光合有效辐射为 1 500 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,叶室 CO_2 浓度为 390 $\mu\text{mol}/\text{mol}$ 。

1.3.4 叶绿素荧光参数的测定 在取样前后的晴朗天气,于 09:00—11:00 使用便携式叶绿素荧光仪(PAM-2500,上海泽泉)测定叶绿素荧光参数,包括光系统 II 最大光能转换效率(F_v/F_m)、光系统 II 实际光能转换效率($Y(\text{II})$)、光系统 II 相对电子传递速率(ETR)、光化学淬灭系数(qL)和非化学淬灭系数(NPQ)。

1.3.5 干物质量的测定 每处理取 3 株长势相同植株,用蒸馏水冲洗干净,将地上部与地下部分开后,在烘箱中杀青 30 min (105 $^{\circ}\text{C}$),80 $^{\circ}\text{C}$ 烘干至恒质量后进行测定,取平均值为植株的干物质量。

1.4 数据分析

图表中数据均为 3 次重复的“平均值±标准误差”。用 Excel 2016 进行数据处理和制图,采用 SPSS 23.0 软件进行相关性分析和 5%水平的差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 盐碱胁迫下施加生物炭和减少氮肥用量对甜菜叶绿素含量的影响

由表 1 可见,就整个生育期而言,各处理甜菜叶绿素含量均呈先升高后降低趋势,CK 处理的叶绿素含量在整个生育期均显著高于各盐碱胁迫处理。

表 1 盐碱胁迫下施加生物炭和减少氮肥用量对甜菜叶绿素含量的影响
Table 1 Effects of biochar and reduced nitrogen application on chlorophyll content of sugar beet under saline-alkali stress

处理 Treatment	06-22	07-11	08-05	08-25	09-15
CK	1.36±0.05 a	1.49±0.09 a	1.52±0.04 a	1.06±0.04 a	1.01±0.01 a
ALK	0.72±0.02 d	0.80±0.03 d	0.94±0.01 d	0.76±0.04 bc	0.64±0.01 bc
N180	0.96±0.02 b	1.18±0.03 b	1.22±0.00 b	0.86±0.00 b	0.71±0.03 b
N162	0.90±0.03 bc	1.27±0.00 b	1.21±0.02 b	0.84±0.01 bc	0.70±0.02 b
N144	0.91±0.02 bc	1.19±0.01 b	1.18±0.02 b	0.82±0.01 bc	0.67±0.03 b
N126	0.81±0.01 c	1.00±0.01 c	1.09±0.03 c	0.77±0.04 bc	0.63±0.04 bc
N108	0.77±0.01 cd	0.80±0.01 d	0.92±0.00 d	0.74±0.03 c	0.63±0.02 c

注:同列数据后标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 difference at the 5% level. The same below.
表 1 显示,在 6 月 22 日,N180、N162、N144 和 N126 处理甜菜叶绿素含量显著高于 ALK 处理,说

明盐碱胁迫下施加生物炭能显著增加甜菜的叶绿素含量。在 7 月 11 日,N180、N162、N144 和 N126 处理甜菜叶绿素含量较 ALK 处理分别提高了 31.9%,36.9%,32.4%和 19.8%,是各处理叶绿素含量较 ALK 处理增幅最大的时期。与 7 月 11 日相比,N162 和 N144 处理甜菜叶绿素含量在 8 月 5 日略有下降,其他处理则仍呈上升趋势。在 8 月 25 日,ALK 处理甜菜的叶绿素含量与除 CK 外的其他处理差异不显著,但各处理甜菜叶绿素含量均有明显下降。在 9 月 15 日,各处理甜菜叶绿素含量均达到最低值。

2.2 盐碱胁迫下施加生物炭和减少氮肥用量对甜菜 RuBP 羧化酶活性的影响

由表 2 可知,CK 处理甜菜 RuBP 羧化酶活性在

各取样时期分别较 ALK 处理高 1.8%(06-22),6.7%(07-11),24.6%(08-05),24.7%(08-25)和 19.7%(09-15),说明盐碱胁迫会降低甜菜 RuBP 羧化酶的活性。6 月 22 日,ALK 处理甜菜的 RuBP 羧化酶活性与其他处理无显著差异。8 月 5 日,在盐碱胁迫条件下随施氮量的降低甜菜 RuBP 羧化酶活性均逐渐降低,其中 N180 和 N162 处理均高于 ALK 处理,而 N108 处理显著低于 ALK 处理。在 8 月 25 日,ALK 处理甜菜的 RuBP 羧化酶活性显著低于其他处理。在 9 月 15 日,CK、ALK、N180、N162、N144、N126 处理甜菜的 RuBP 羧化酶活性均高于 8 月 25 日,其中 N180、N162、N144、N126 处理甜菜的 RuBP 羧化酶活性分别较 ALK 处理高 16.6%,11.9%,6.3%和 3.2%。

表 2 盐碱胁迫下施加生物炭和减少氮肥用量对甜菜 RuBP 羧化酶活性的影响

Table 2 Effects of biochar and reduced nitrogen application on RuBP carboxylase activity in sugar beet under saline-alkali stress U

处理 Treatment	06-22	07-11	08-05	08-25	09-15
CK	28.97±0.21 a	30.16±0.01 a	35.38±0.13 a	34.01±0.15 a	37.12±0.04 a
ALK	28.43±0.13 ab	28.14±0.30 c	26.67±0.24 cd	25.61±0.16 g	29.79±0.14 c
N180	29.06±0.15 a	29.94±0.03 ab	29.06±0.40 b	33.00±0.26 b	36.21±0.30 a
N162	28.92±0.28 a	30.01±0.12 ab	27.76±0.55 bc	32.46±0.02 c	33.57±0.25 b
N144	28.61±0.44 ab	29.43±0.03 b	25.71±0.66 d	30.72±0.30 d	31.76±0.02 b
N126	28.25±0.27 ab	28.49±0.04 c	25.67±0.73 d	30.17±0.06 e	30.99±0.16 c
N108	27.98±0.03 b	28.20±0.37 c	23.36±0.75 e	27.60±0.14 f	26.43±0.30 d

2.3 盐碱胁迫下施加生物炭和减少氮肥用量对甜菜叶片光合特性的影响

2.3.1 净光合速率 表 3 显示,随着生育期的推进,甜菜叶片净光合速率呈先升高后降低的趋势,CK 处理的净光合速率在整个生育时期均显著高于 ALK 处理,说明盐碱胁迫使甜菜叶片净光合速率显著降低。随着施氮量的降低,甜菜叶片净光合速率

也逐渐降低,除 7 月 11 日外,N180 和 N162 处理均显著高于其他减氮处理;除 8 月 5 日外,N108 处理甜菜的净光合速率在其余各取样时期均低于 ALK 处理。在 6 月 22 日,N180、N162 和 N144 处理甜菜叶片的净光合速率显著高于 ALK 处理。各处理甜菜的净光合速率均在 7 月 11 日达到峰值,此时各处理间净光合速率的变化趋势与 6 月 22 日基本相同。

表 3 盐碱胁迫下施加生物炭和减少氮肥用量对甜菜叶片净光合速率的影响

Table 3 Effects of biochar and reduced nitrogen application on net photosynthetic rate of sugar beet leaves under saline-alkali stress μmol/(m² · s)

处理 Treatment	06-22	07-11	08-05	08-25	09-15
CK	23.71±0.12 a	32.03±0.08 a	22.03±0.16 a	14.63±0.04 a	13.53±0.20 a
ALK	15.90±0.07 d	26.15±0.41 d	12.75±0.03 e	7.62±0.13 d	7.09±0.05 cd
N180	22.38±0.12 b	28.68±0.03 b	21.58±0.25 ab	11.21±0.04 b	9.71±0.18 b
N162	22.21±0.22 b	28.31±0.14 bc	21.13±0.19 b	10.89±0.10 b	9.46±0.26 b
N144	18.23±0.07 c	27.95±0.17 c	18.61±0.15 c	8.81±0.10 c	7.47±0.23 c
N126	15.73±0.25 d	26.31±0.17 d	15.56±0.10 d	7.90±0.05 d	6.84±0.08 d
N108	14.35±0.10 e	23.04±0.23 e	12.85±0.04 e	7.06±0.20 e	6.70±0.04 d

2.3.2 气孔导度 由表 4 可知,甜菜叶片气孔导度随甜菜的生长呈先升高后降低的趋势,在整个生育期内 ALK 处理均显著低于 CK 处理,在各取样时期

较 CK 分别下降了 28.5%(06-22)、21.0%(07-11)、40.3%(08-05)、31.2%(08-25)和 43.6%(09-15),说明甜菜叶片气孔导度在盐碱胁迫下显著下降。在

各取样时期,N180、N162 和 N144 处理甜菜叶片气孔导度均显著高于 ALK 处理;随氮肥施用量的减少,气孔导度逐渐降低,其中 N180 处理显著高于 N162、N144、N126 和 N108 处理。

表 4 盐碱胁迫下施加生物炭和减少氮肥用量对甜菜叶片气孔导度的影响

Table 4 Effects of biochar and reduced nitrogen application on stomatal conductance of sugar

		beet leaves under saline-alkali stress				mmol/(m ² · s)
处理 Treatment	06-22	07-11	08-05	08-25	09-15	
CK	297.12±3.02 a	381.53±1.81 a	308.41±1.45 a	126.07±0.62 a	132.77±1.89 a	
ALK	212.44±0.44 d	301.55±9.02 d	184.08±1.26 de	86.79±2.10 c	74.89±0.69 e	
N180	294.68±3.79 a	338.15±1.55 b	303.62±3.09 a	119.44±5.48 a	107.70±1.73 b	
N162	245.77±1.10 b	326.43±0.92 c	245.32±3.33 b	106.51±0.22 b	97.64±2.24 c	
N144	240.48±6.57 bc	324.41±1.53 c	228.40±1.65 c	98.81±3.89 b	84.84±3.29 d	
N126	234.35±4.40 c	322.66±0.69 c	187.93±3.28 d	88.12±0.50 c	79.23±0.62 e	
N108	185.56±0.69 e	311.14±2.29 d	178.92±1.22 e	77.76±1.36 d	73.91±0.64 e	

2.4 盐碱胁迫下施加生物炭和减少氮肥用量对甜菜叶片叶绿素荧光参数的影响

2.4.1 F_v/F_m 由表 5 可知,甜菜的 F_v/F_m 随生育期的推进呈无规律变化,N180,N162 和 CK 处理在整个生育期均显著高于 ALK 处理,说明盐碱胁迫

显著减低了甜菜的 F_v/F_m ,生物炭的加入显著增加了甜菜叶片的 F_v/F_m 。总体上而言,随着氮肥施用量的减少,甜菜叶片 F_v/F_m 呈逐渐下降趋势,除 6 月 22 日外,其余取样时期 N180 与 N162 处理相比无显著差异。

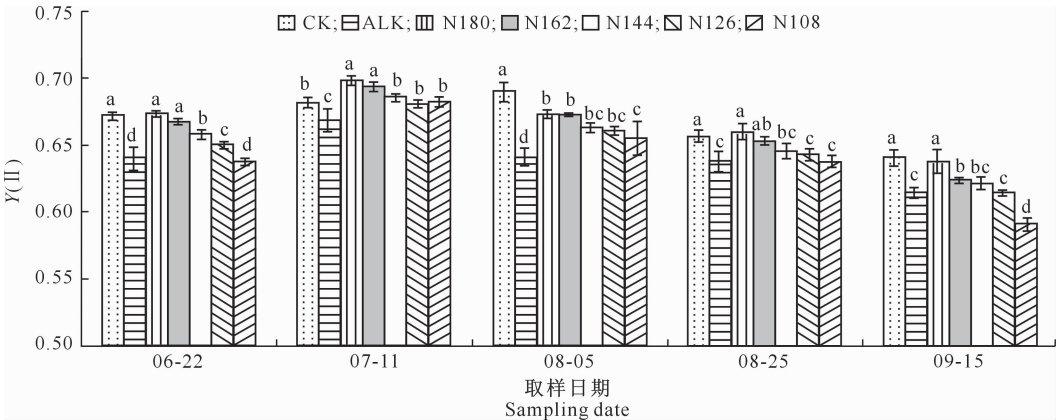
表 5 盐碱胁迫下施加生物炭和减少氮肥用量对甜菜 F_v/F_m 的影响

Table 5 Effects of biochar and reduced nitrogen application on F_v/F_m of sugar beet under saline-alkali stress

处理 Treatment	06-22	07-11	08-05	08-25	09-15
CK	0.808±0.002 a	0.809±0.003 a	0.805±0.003 a	0.796±0.002 a	0.801±0.003 a
ALK	0.771±0.002 c	0.775±0.003 c	0.776±0.002 c	0.778±0.002 d	0.775±0.012 d
N180	0.800±0.004 a	0.801±0.003 ab	0.795±0.002 b	0.789±0.003 b	0.797±0.003 a
N162	0.791±0.003 b	0.800±0.001 ab	0.794±0.001 b	0.787±0.002 bc	0.797±0.003 a
N144	0.787±0.003 b	0.790±0.003 b	0.790±0.002 bc	0.785±0.001 bc	0.788±0.002 b
N126	0.779±0.004 bc	0.787±0.002 b	0.786±0.002 c	0.783±0.001 c	0.785±0.001 bc
N108	0.771±0.001 c	0.777±0.002 c	0.778±0.002 d	0.779±0.005 d	0.783±0.002 c

2.4.2 $Y(II)$ 由图 1 可知,随着生育期的推进,各处理甜菜叶片的 $Y(II)$ 均呈先升高后下降的趋势,ALK 处理的 $Y(II)$ 在各取样时期较 CK 处理分别下降了 4.7%(06-22),2.0%(07-11),7.1%(08-

05),2.7%(08-25)和 4.1%(09-15),且差异均达到显著水平,说明盐碱胁迫使甜菜的 $Y(II)$ 显著降低。N180 和 N162 处理甜菜的 $Y(II)$ 在各取样时期均显著高于 ALK 处理。



同一取样日期下不同小写字母表示各处理间在 0.05 水平差异显著。下同

Different lowercase letters indicate significant differences at the 0.05 level between treatments. The same below

图 1 盐碱胁迫下施加生物炭和减少氮肥用量对甜菜叶片 $Y(II)$ 的影响

Fig. 1 Effects of biochar and reduced nitrogen application on $Y(II)$ of sugar beet under saline-alkali stress

2.4.3 ETR 由表 6 可知,随生育期的推进,各处理甜菜的 ETR 总体均呈先升高后降低的趋势。总体而言,盐碱胁迫使甜菜 ETR 明显降低,适量氮肥条件下施加生物炭可以显著提升甜菜的 ETR。6 月 22 日,N180 和 N162 处理甜菜的 ETR 显著高于除

CK 外的其他处理。7 月 11 日,各处理甜菜的 ETR 均达到最大值,此时 N180 和 N162 处理显著高于其他处理。8 月 5 日,CK 处理甜菜的 ETR 显著高于其他处理。至 8 月 25 日,N180 处理甜菜的 ETR 显著高于其他处理。

表 6 盐碱胁迫下施加生物炭和减少氮肥用量对甜菜叶片 ETR 的影响
Table 6 Effects of biochar and reduced nitrogen application on ETR of sugar beet leaves under saline-alkali stress

处理 Treatment	06-22	07-11	08-05	08-25	09-15
CK	55.47±0.03 b	57.57±0.52 b	57.43±0.20 a	55.70±0.12 b	54.43±0.29 ab
ALK	53.17±0.49 de	57.07±0.32 bc	54.17±0.32 c	54.30±0.38 cd	52.77±1.00 bc
N180	56.80±0.06 a	59.17±0.17 a	56.40±0.09 b	56.63±0.23 a	54.97±0.35 a
N162	54.90±0.12 bc	58.57±0.39 a	56.13±0.15 b	55.50±0.20 b	54.43±0.25 ab
N144	53.80±0.38 c	57.47±0.49 b	55.50±0.15 b	54.63±0.40 c	53.00±0.35 bc
N126	52.87±0.66 de	57.27±0.26 bc	55.40±0.26 b	54.43±0.29 c	52.60±0.17 c
N108	52.37±0.49 e	56.60±0.44 c	53.90±0.38 c	53.90±0.17 d	52.47±0.13 c

2.4.4 qL 表 7 显示,盐碱胁迫下加入生物炭后,随着生育期的推进,各处理甜菜的 qL 均呈先升高后降低的趋势,在各取样时期 ALK 处理的 qL 较 CK 处理分别降低了 14.6% (06-22),14.6% (07-11),5.2% (08-05),10.1% (08-25) 和 14.3% (09-

15),且差异均达到了显著水平。随着氮肥施用量的减少,甜菜 qL 逐渐降低。N162 和 N180 处理甜菜的 qL 在 6 月 22 日、7 月 11 日和 8 月 5 日无显著差异,而在 8 月 25 日和 9 月 15 日,以 N180 处理显著高于 N162。

表 7 盐碱胁迫下施加生物炭和减少氮肥用量对甜菜 qL 的影响
Table 7 Effects of biochar and nitrogen application on qL of sugar beet under saline-alkali stress

处理 Treatment	06-22	07-11	08-05	08-25	09-15
CK	0.781±0.021 a	0.768±0.002 a	0.668±0.010 a	0.654±0.002 a	0.618±0.001 a
ALK	0.667±0.006 e	0.656±0.008 c	0.634±0.004 b	0.588±0.010 c	0.529±0.004 c
N180	0.745±0.003 b	0.766±0.029 a	0.671±0.002 a	0.640±0.003 a	0.602±0.003 a
N162	0.722±0.003 bc	0.737±0.001 ab	0.666±0.006 a	0.621±0.003 b	0.573±0.006 b
N144	0.708±0.014 cd	0.715±0.002 b	0.657±0.004 ab	0.602±0.004 c	0.557±0.006 b
N126	0.682±0.005 de	0.700±0.006 b	0.640±0.003 b	0.568±0.008 d	0.532±0.005 c
N108	0.653±0.002 e	0.699±0.008 b	0.589±0.016 c	0.541±0.003 e	0.488±0.015 d

2.4.5 NPQ 从表 8 可以看出,随生育期的推进,各处理甜菜的 NPQ 均呈先减小后增大的趋势,盐碱胁迫显著增加了甜菜的 NPQ,施加生物炭能显著降低 NPQ。CK 处理与 N180 处理、N180 处理与 N162 处理相比,甜菜 NPQ 在各取样时期均无显著差异。在 7 月 11 日,除 CK 处理外其他处理的

NPQ 均达到最低值,此时 ALK 和 N126 处理甜菜的 NPQ 显著高于其他处理,随后又开始逐渐升高;8 月 25 日,ALK、N144、N126 和 N108 处理甜菜的 NPQ 显著高于 CK、N180 和 N162 处理;至 9 月 15 日,N144、N126 和 N108 处理甜菜的 NPQ 显著高于其他处理。

表 8 盐碱胁迫下施加生物炭和减少氮肥用量对甜菜 NPQ 的影响
Table 8 Effects of biochar and nitrogen application on NPQ of sugar beet under saline-alkali stress

处理 Treatment	06-22	07-11	08-05	08-25	09-15
CK	0.283±0.006 c	0.192±0.002 d	0.168±0.004 c	0.272±0.002 b	0.314±0.017 c
ALK	0.344±0.008 b	0.239±0.004 a	0.288±0.032 a	0.356±0.019 a	0.374±0.005 b
N180	0.273±0.003 c	0.184±0.002 d	0.208±0.001 bc	0.256±0.001 b	0.352±0.008 bc
N162	0.286±0.002 c	0.191±0.003 d	0.244±0.005 ab	0.276±0.003 b	0.374±0.032 b
N144	0.331±0.004 b	0.210±0.004 c	0.264±0.004 a	0.342±0.023 a	0.436±0.017 a
N126	0.358±0.002 a	0.237±0.002 a	0.287±0.001 a	0.357±0.009 a	0.444±0.007 a
N108	0.363±0.001 a	0.223±0.002 b	0.290±0.018 a	0.360±0.004 a	0.458±0.017 a

2.5 盐碱胁迫下施加生物炭和减少氮肥用量对甜菜干物质量的影响

2.5.1 叶片干物质量 由图 2 可知,各处理甜菜叶片干物质量总体均随生育期的推进呈先增加后减小趋势。盐碱胁迫显著降低了甜菜叶片的干物质量,ALK 处理甜菜叶片干物质量在各取样时期较 CK 处理分别降低了 67.5%(06-22),22.3%(07-11),

26.1%(08-05),26.1%(08-25)和 15.7%(09-15)。N180 和 N162 处理甜菜叶片干物质量在各生育时期也显著高于 ALK 处理。除 N108 处理外,其他处理甜菜叶片的干物质量均在 8 月 5 日达到最大值,其中以 N180 处理最大,为 11.14 g,较 ALK 处理高出 177%。在 8 月 25 日,N108 处理叶片干物质量较 8 月 5 日略有增长,其他处理则开始下降。

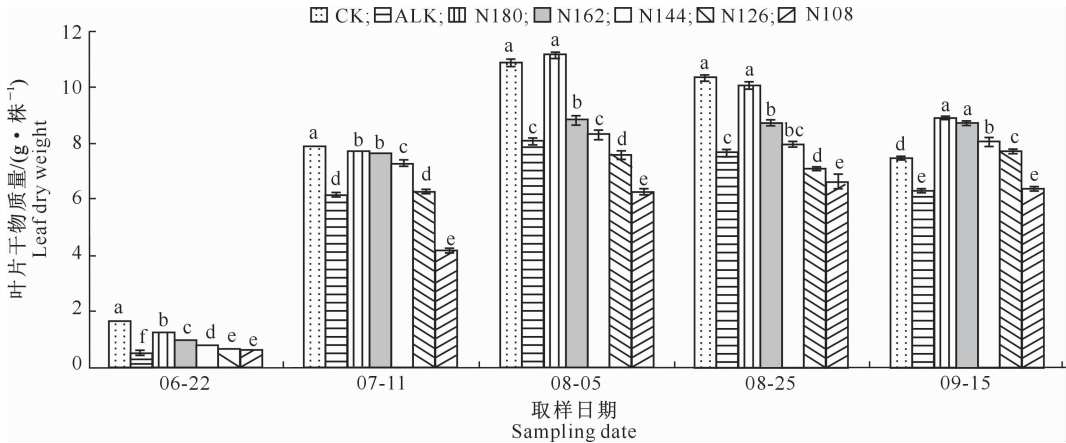


图 2 盐碱胁迫下施加生物炭和减少氮肥用量对甜菜叶片干物质量的影响

Fig. 2 Effects of biochar and reduced nitrogen application on the dry weight of sugar beet leaves under saline-alkali stress

2.5.2 根系干物质量 由图 3 可知,随生育期的推进,各处理甜菜根系干物质量均呈逐渐增大趋势,盐碱胁迫显著降低了甜菜根系的干物质量。在各取样时期,N180、N162、N144 处理甜菜根系干物质量均显著高于 ALK 处理;在 6 月 22 日、8 月 5 日和 8 月

25 日,N180 处理甜菜的根系干物质量均显著高于 N162 处理;在 7 月 11 日,N180 和 N162 处理甜菜的根系干物质量无显著差异,而在 9 月 15 日,N162 处理甜菜的根系干物质量较 N180 处理高 7.2%,且差异显著。

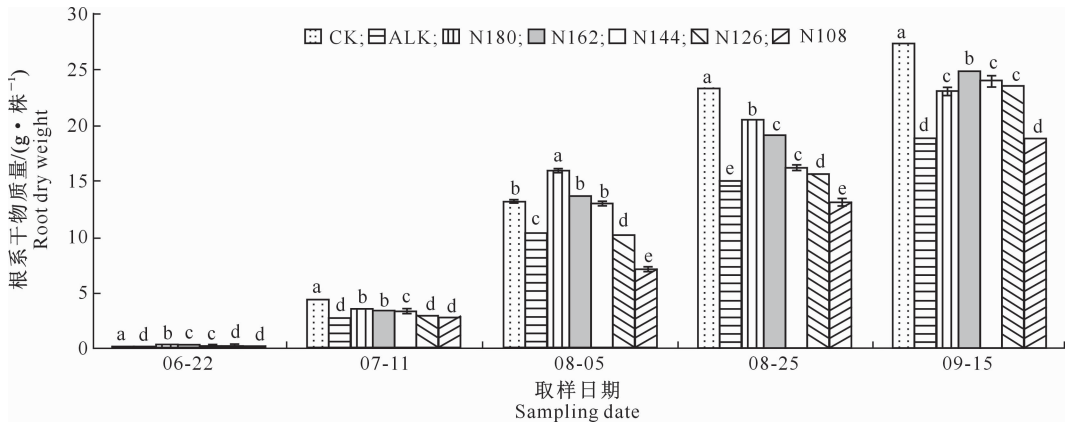


图 3 盐碱胁迫下施加生物炭和减少氮肥用量对甜菜根系干物质量的影响

Fig. 3 Effects of biochar and reduced nitrogen application on root dry weight of sugar beet under saline-alkali stress

2.6 甜菜叶片干质量与光合重要指标的相关性

在 8 月 5 日,除 N108 处理外,其他处理甜菜的叶片干物质量均达到最大值,说明此时甜菜处于叶丛快速生长期,因此选择 8 月 5 日时的各指标参数

进行相关分析。叶绿素含量和 RuBP 羧化酶活性均与甜菜的光合作用相关,甜菜叶片净光合速率、Y(II)和 qL 是光合作用速率与效率的直观表现。由表 9 可以看出,甜菜叶片的叶绿素含量、RuBP 羧化

酶活性、净光合速率、 $Y(II)$ 、 qL 和叶片干物质量之间均存在极显著的正相关关系。

表 9 甜菜叶片干物质量与光合重要指标的相关性

Table 9 Correlation of dry weight and photosynthesis-related indices in leaves

指标 Index	叶绿素含量 Chlorophyll content	RuBP 羧化酶活性 RuBP carboxylase activity	净光合速率 Net photosynthetic rate	$Y(II)$	qL	叶片干物质量 Leaf dry weight
叶绿素含量 Chlorophyll content	1	0.886**	0.875**	0.887**	0.734**	0.802**
RuBP 羧化酶活性 RuBP carboxylase activity		1	0.714**	0.732**	0.616**	0.836**
净光合速率 Net photosy-nthetic rate			1	0.838**	0.807**	0.848**
$Y(II)$				1	0.663**	0.690**
qL					1	0.770**
叶片干物质量 Leaf dry weight						1

注:表中 * 和 ** 分别表示两指标间显著相关($P<0.05$)和极显著相关($P<0.01$)。

Note: * and ** represent significant correlation ($P<0.05$) and extremely significant correlation ($P<0.01$), respectively.

3 讨论与结论

光合作用是植物最基本也是最重要的生理代谢之一,其能制造植物所需的有机物,平衡大气中氧和二氧化碳的平衡,在自然界中具有重要意义。盐碱土中过量的 Na^+ 导致土壤水势降低,使植物从土壤中吸水困难;植物吸收大量的 Na^+ 后不仅使植物对其他养分难于吸收,而且还会导致植物的生理代谢紊乱,降低植物的光合作用。研究表明,高浓度的盐碱胁迫显著降低了植物叶片的叶绿素含量和光系统 II 的光化学效率^[14-17],这与本研究结果相一致,其原因可能是过量的盐分导致植物原生质凝聚,破坏了叶绿体的结构,抑制了光合作用的光反应^[18]。在盐碱胁迫下枸杞的 RuBP 羧化酶活性显著降低,使得枸杞的碳同化能力下降,光合作用速率减慢^[19],与本研究结果相同,这可能是由于能量供应被限制所致^[20]。李帅霖等^[21]研究表明,施加 2% 的生物炭和 0.2 g/kg 纯 N 的氮肥可使小麦叶片净光合速率显著提高。其原因可能是由于生物炭疏松多孔的结构能提高土壤的透气性,并使土壤的比表面积增大,有利于植物更容易地从土壤中交换营养物质,为植物提供了良好的生长环境。

本研究结果表明,盐碱胁迫能显著降低甜菜的叶绿素含量,减慢光合作用光反应和暗反应速率及干物质积累速率,而施加生物炭能有效缓解盐碱胁迫对甜菜生长的影响,这与武沛然等^[22]关于盐碱胁迫下施加生物炭对甜菜生长的影响研究结果相一致。同时,在减少 10% 氮肥施用量 (N162) 的情况下,甜菜的光合作用和干物质量与氮肥不减量处理 (N180) 无显著差异,这可能是由于施加生物炭和适

当减少氮肥用量增加了土壤微生物的多样性。有研究表明,生物炭与氮肥配施能使土壤中的微生物生物量碳提高 45.1%~208.6%,土壤脲酶活性提高 91.7%,还能显著增加土壤微生物数量^[23]。这可能是由于生物炭具有较强的吸附性,能吸附土壤中的营养元素和矿质元素^[24],有利于土壤中微生物的生长繁殖;土壤脲酶活性的提高和微生物多样性的增加能改善土壤结构,促进养分循环,从而提高了肥料在盐碱土中的利用效率^[25],间接提高甜菜的光合作用速率和干物质积累速率。

综上所述,施加 3% 生物炭能有效缓解盐碱胁迫对甜菜光合作用的抑制。结合施肥成本考虑,在盐碱胁迫条件下施加 3% 生物炭的同时减少 10% 氮肥 (N162) 最为合理,但关于盐碱胁迫下施加生物炭和减少氮肥用量对甜菜生长和土壤理化性质的影响及其机理仍需进一步研究。

[参考文献]

[1] 王春裕,王志杰,石元亮,等. 中国东北地区的盐渍土资源 [J]. 土壤通报,2004,35(5):643-647.
Wang C Y, Wu Z J, Shi Y L, et al. Saline soil resources in northeast China [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2004, 35 (5):643-647.

[2] Nii N, Watanabe T, Yamaguchi K, et al. Changes of anatomical features, photosynthesis and ribulose biphosphate carboxylase-oxygenase content of mango leaves [J]. Annals of Botany, 1995, 76(6):350-356.

[3] Parida A K, Das A B. Salt tolerance and salinity effects on plants: a review [J]. Ecotoxicol Environ Saf, 2005, 60(3):195-205.

[4] 刘磊,李彩凤,郭广昊,等. $NaCl+Na_2SO_4$ 胁迫对甜菜根际土壤微生物数量及酶活性的影响 [J]. 核农学报, 2016, 30 (10):2033-2040.
Liu L, Li C F, Guo G H, et al. Effects of $NaCl+Na_2SO_4$ stress

- on microbial quantity and enzyme activity in beetroot soil [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2016, 30 (10): 2033-2040.
- [5] 洪鑫. 盐碱胁迫对甜菜生长及光合特性的影响 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2014.
- Hong X. Effects of salinity stress on growth and photosynthetic characteristics of sugar beet [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2014.
- [6] 杨芳芳, 李彩凤, 刘丹, 等. 有机肥对混合盐碱胁迫甜菜光合特性及产量的影响 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(4): 80-88.
- Yang F F, Li C F, Liu D, et al. Effects of organic fertilizer on photosynthetic characteristics and yield of sugar beet under mixed salinity stress [J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition), 2019, 47(4): 80-88.
- [7] Lehmann J, Gaunt J, Rondon M. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems; a review [J]. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2006, 11(2): 395-419.
- [8] 李振科. 生物炭在农业生产中的应用研究进展 [J]. 山西农经, 2015(1): 94-96.
- Li Z K. Advances in the application of biochar in agricultural production [J]. Shanxi Agricultural Economy, 2015(1): 94-96.
- [9] 张忠河, 林振衡, 付娅琦, 等. 生物炭在农业上的应用 [J]. 安徽农业科学, 2010, 38(22): 220-222.
- Zhang Z H, Lin Z H, Fu Y Q, et al. Application of biochar in agriculture [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, 38(22): 220-222.
- [10] 冉成, 邵玺文, 朱晶, 等. 生物炭对苏打盐碱稻田土壤养分及产量的影响 [J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(5): 46-51.
- Ran C, Shao X W, Zhu J, et al. Effects of biochar on soil nutrient and yield in soda saline paddy fields [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(5): 46-51.
- [11] 高阳, 邵光成, 陈昌仁, 等. 渍害条件下土壤添加生物炭对番茄生长及产量的影响研究[J/OL]. 排灌机械工程学报, 2019: 1-9 [2020-04-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20190827.1040.014.html>.
- Gao Y, Shao G C, Chen C R, et al. Effects of biochar on tomato growth and yield under soil waterlogging conditions [J/OL]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2019: 1-9 [2020-04-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20190827.1040.014.html>.
- [12] 姜佰文, 许欣桐, 张迪, 等. 减量施肥条件下生物炭与耕作方式对玉米氮吸收及产量的影响 [J]. 东北农业大学学报, 2019, 50(10): 23-31.
- Jiang B W, Xu X T, Zhang D, et al. Effects of biochar and tillage on nitrogen uptake and yield of maize under reduced fertilization [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2019, 50(10): 23-31.
- [13] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 134-138.
- Li H S. Principles and techniques of plant physiological and biochemical experiments [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 134-138.
- [14] 李玉梅, 郭修武, 代汉萍, 等. 盐碱胁迫对牛叠肚幼苗渗透调节物质及叶绿素含量的影响 [J]. 经济林研究, 2015, 33(1): 9-16.
- Li Y M, Guo X W, Dai H P, et al. Effects of salt-alkali stress on osmotic regulation substances and chlorophyll content of trifolium sativa seedlings [J]. Non-Wood Forest Research, 2015, 33(1): 9-16.
- [15] 刘晓静, 张晓磊, 齐敏兴, 等. 混合盐碱对紫花苜蓿种子萌发及幼苗期叶绿素荧光特性的影响 [J]. 草地学报, 2013, 21(3): 501-507.
- Liu X J, Zhang X L, Qi M X, et al. Effects of mixed salt and alkali on germination of alfalfa seeds and chlorophyll fluorescence characteristics in seedling stage [J]. Acta Agrestia Sinica, 2013, 21(3): 501-507.
- [16] 王树凤, 陈益泰, 潘红伟, 等. 土壤盐胁迫下桉木 8 个无性系生理特性的变化 [J]. 浙江林学院学报, 2006(1): 19-23.
- Wang S F, Chen Y T, Pan H W, et al. Physiological characteristics of eight alnus clones under soil salt stress [J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2006(1): 19-23.
- [17] 金微微, 张会慧, 滕志远, 等. 盐碱互作胁迫对高丹草叶片叶绿素荧光参数的影响 [J]. 草业科学, 2017, 34(10): 2090-2098.
- Jin W W, Zhang H H, Teng Z Y, et al. Effects of salt-alkali interaction stress on chlorophyll fluorescence parameters in leaves of Sorghum-Sudangrass [J]. Pratacultural Science, 2017, 34(10): 2090-2098.
- [18] 牛锐敏, 许泽华, 沈甜, 等. 盐胁迫对葡萄砧木生长和叶绿素荧光特性的影响 [J]. 北方园艺, 2018(21): 85-89.
- Niu R M, Xu Z H, Shen T, et al. Effects of salt stress on growth and chlorophyll fluorescence of grape stock [J]. Northern Horticulture, 2018(21): 85-89.
- [19] 张潭, 唐达, 李思思, 等. 盐碱胁迫对枸杞幼苗生物量积累和光合作用的影响 [J]. 西北植物学报, 2017, 37(12): 2474-2482.
- Zhang T, Tang D, Li S S, et al. Effects of salinity stress on biomass accumulation and photosynthesis of medlar [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2017, 37(12): 2474-2482.
- [20] Vu J C V, Allen L H, Bowes G. Drought stress and elevated CO₂ effects on soybean ribulose biphosphate carboxylase activity and canopy photosynthetic rates [J]. Plant Physiology, 1987, 83(3): 573-578.
- [21] 李帅霖, 上官周平. 生物炭对不同水氮条件下小麦产量的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(2): 8-15.
- Li S L, Shangguan Z P. Effects of biochar on wheat yield under different water and nitrogen conditions [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(2): 8-15.

[18]

Dinuccio E,Gioelli F,Balsari P,et al. Ammonia losses from the storage and application of raw and chemo-mechanically separated slurry [J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2012,153(10):16-23.

[19]

Moset V,Cambra-López M,Estellés F,et al. Evolution of chemical composition and gas emissions from aged pig slurry during outdoor storage with and without prior solid separation [J]. Biosystems Engineering,2012,111(1):2-10.

[20]

陈 园.上海市典型规模化猪场氨排放特征研究 [D]. 上海:华东理工大学,2017.
Chen Y. Study on characteristics of ammonia emission from typical large scale pig farm in shanghai [D]. Shanghai:East China University of Science and Technology,2017.

[21]

周谈龙,尚 斌,董红敏,等. 低碳氮比条件下猪粪堆肥氨气和温室气体排放 [J]. 中国农业气象,2017,38(11):689-698.
Zhou T L,Shang B,Dong H M,et al. Emission characteristics of ammonia and greenhouse gas during the low C/N ratio swine manure composting [J]. Chinese Journal of Agrometeorology,2017,38(11):689-698.

[22]

Chowdhury M A,Neergaard A D,Jensen L S. Potential of aeration flow rate and bio-char addition to reduce greenhouse gas and ammonia emissions during manure composting [J]. Chemosphere,2014,97(1):16-25.

[23]

Tamura T,Osada T. Effect of moisture control in pile-type composting of dairy manure by adding wheat straw on greenhouse gas emission [J]. International Congress, 2006, 1293: 311-314.

[24]

Ouanlasy P,王 燕,廖新伟,等. 通风量对蛋鸡粪堆肥氨气排放的影响 [J]. 中国家禽,2015,37(15):23-30.
Ouanlasy P,Wang Y,Liao X D,et al. Effect of ventilation on ammonia emission in layer manure composting [J]. China Poultry,2015,37(15):23-30.

[25]

江 滔,Schuchardt F,李国学. 冬季堆肥中翻堆和覆盖对温室气体和氨气排放的影响 [J]. 农业工程学报,2011,27(10):212-217.
Jiang T,Schuchardt F,Li G X. Effect of turning and covering on greenhouse gas and ammonia emissions during the winter composting [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(10): 212-217.

(上接第 116 页)

[22]

武沛然,郭广昊,刘 磊,等. 盐碱胁迫下生物炭对甜菜生长的影响 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2018,46(11):31-38.
Wu P R,Guo G H,Liu L,et al. Effects of biochar on the growth of sugar beet under salinity stress [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition),2018,46(11):31-38.

[23]

袁晶晶,同延安,卢绍辉,等. 生物炭与氮肥配施改善枣区土壤微生物学特性 [J]. 植物营养与肥科学报,2018,24(4):1039-1046.
Yuan J J,Tong Y A,Lu S H,et al. The combination of bio-char and nitrogen fertilizer improved the soil microbiological characteristics in jujube area [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers,2018,24(4):1039-1046.

[24]

张又弛,李会丹. 生物炭对土壤中微生物群落结构及其生物地球化学功能的影响 [J]. 生态环境学报,2015,24(5):898-905.
Zhang Y C,Li H D. Effects of biochar on microbial community structure and biogeochemical functions in soil [J]. Ecology and Environment Ecol Environ,2015,24(5):898-905.

[25]

许欣桐. 减肥条件下生物炭与耕作方式对玉米养分吸收及产量影响 [D]. 哈尔滨:东北农业大学,2019.
Xu X T. Effects of biochar and tillage on nutrient uptake and yield of maize under the condition of reducing weight [D]. Harbin:Northeast Agricultural University,2019.