

网络出版时间:2018-09-27 09:46

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2019.04.010

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20180927.0945.020.html>

有机肥对混合盐碱胁迫甜菜光合特性及产量的影响

杨芳芳,李彩凤,刘 丹,邹春雷,王玉波,武沛然,刘 磊

(东北农业大学 农学院,黑龙江 哈尔滨 150030)

【摘 要】 【目的】研究有机肥施用水平对混合盐碱胁迫甜菜生长、光合作用和叶绿素荧光特性的影响,为应用有机肥改良盐碱土壤及提高作物产量提供参考。【方法】以甜菜品种 KWS0143 为材料,采用盆栽模拟盐碱土胁迫,将 NaCl 、 Na_2SO_4 、 NaHCO_3 、 Na_2CO_3 以物质的量比 2 : 1 : 4 : 2 混合后拌入盆栽桶中的 12 kg 风干土壤中,使混合物中 Na 占土壤质量的 0.88%。试验共设 6 个处理,分别为 CK(不施肥对照)、S(加盐碱)、SF1(盐碱+1 500 kg/hm² 有机肥)、SF2(盐碱+2 250 kg/hm² 有机肥)、SF3(盐碱+3 000 kg/hm² 有机肥)和 SF4(盐碱+3 750 kg/hm² 有机肥),待第 3 对真叶完全展开后采样测定各处理甜菜叶片光合色素含量、光合特性指标、叶绿素荧光参数及植株干质量、根冠比和产量等指标。【结果】盐碱胁迫下施有机肥能有效改善甜菜叶片的气体交换参数(P_n 、 G_s 、 E 和 C_i),提高叶片的叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素及 F_v/F_m 、Yield(II)、 qP 和表现电子传递速率(ETR),降低非光化学淬灭系数(NPQ)。随有机肥施肥量的增加,甜菜叶片除 NPQ 呈先降后升趋势外,上述其余指标及干物质量、根冠比、块根产量和产糖量均呈先增后降趋势,其中以施用 3 000 kg/hm² 有机肥处理的表现最佳。【结论】施加有机肥可明显提高甜菜叶片叶绿素含量,改善甜菜的光合特性和叶绿素荧光特性,缓解盐碱胁迫的伤害,增加干物质积累量,提高产量与产糖量,且以 3 000 kg/hm² 有机肥处理效果最佳。

【关键词】 甜菜;盐碱胁迫;有机肥;光合特性;叶绿素荧光参数

【中图分类号】 S566.306.2

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2019)04-0074-09

Effects of organic fertilizer on photosynthetic characteristics and yield of sugar beet under mixed saline alkali stress

YANG Fangfang, LI Caifeng, LIU Dan, ZOU Chunlei,

WANG Yubo, WU Peiran, LIU Lei

(College of Agronomy, Northeast Agricultural University, Harbin, Heilongjiang 150030, China)

Abstract: 【Objective】 The effects of different levels of organic fertilizer on growth, photosynthesis and chlorophyll fluorescence characteristics of sugar beet under mixed salt and alkali stress were studied to provide references for improving saline alkali soil. 【Method】 The sugar beet cultivar KWS0143 was selected and saline alkali soil environment was simulated by a pot experiment. NaCl , Na_2SO_4 , NaHCO_3 and Na_2CO_3 were mixed with the proportion of 2 : 1 : 4 : 2 and Na percentage in soil mass was 0.88%. There were 6 treatments including CK (no fertilizer), S (saline alkali), SF1 (saline alkali+1 500 kg/hm² organic fertilizer), SF2 (saline alkali+2 250 kg/hm² organic fertilizer), SF3 (saline alkali+3 000 kg/hm² organic fertilizer), and SF4 (saline alkali+3 750 kg/hm² organic fertilizer). The photosynthetic pigment content, photo-

【收稿日期】 2018-02-02

【基金项目】 国家自然科学基金项目(31671622)

【作者简介】 杨芳芳(1990—),女,云南红河人,在读硕士,主要从事甜菜栽培生理研究。E-mail: yang1578390612@163.com

【通信作者】 李彩凤(1965—),女,黑龙江哈尔滨人,教授,主要从事作物栽培与生理研究。E-mail: licaifeng@neau.edu.cn

synthesis, chlorophyll fluorescence parameters, dry weight, root/shoot ratio and yield of sugar beet were measured and analyzed. 【Result】 Under saline alkali stress, the application of organic fertilizer could significantly ($P < 0.05$) improve gas exchange parameters of blade (P_n , G_s , E and C_i), chlorophyll content, F_v/F_m , Yield (t/hm^2), qP , ETR , dry biomass, root shoot ratio, root yield and sugar content, while decrease NPQ of sugar beet. With the increase of organic fertilizer concentration, above indexes of leaves firstly increased and then decreased, except for NPQ . Dry biomass, root shoot ratio and yield also increased followed by decrease. All indicators performed the best with the $3\,000\text{ kg/hm}^2$ organic fertilizer treatment. 【Conclusion】 Applying organic fertilizer could significantly increase chlorophyll content, improve photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence characteristics, ease stress injury, and increase dry matter accumulation, yield and sugar content of sugar beet. The treatment of $3\,000\text{ kg/hm}^2$ was the best.

Key words: sugar beet; saline alkali stress; organic fertilizer; photosynthetic characteristics; chlorophyll fluorescence parameters

土壤盐碱化是国内外广为关注的重大生态环境问题,由于人为因素的干扰,土壤盐碱化程度加剧,且全球盐碱地以每年 $1.0 \times 10^6 \sim 1.5 \times 10^6\text{ hm}^2$ 的速度在扩大,严重制约着世界农业生产的可持续发展^[1-2]。黑龙江省盐碱地主要分布在松嫩平原西部地区,以苏打盐碱为主,土壤板结、坚硬,透气、透水性差^[3]。有研究表明,盐碱胁迫主要通过渗透胁迫、离子毒害或高 pH 直接阻碍植物对矿物质营养元素的吸收,损伤细胞结构,使细胞生理代谢紊乱,对植物生长发育产生严重危害^[4-6],也能通过抑制植物光合作用而间接影响其生长^[7],且高浓度盐碱胁迫会破坏光合机构,降低 PS II 原初光能转换效率,抑制 PS II 潜在活性,最终产生光破坏,导致植物整株死亡^[8]。

甜菜 (*Beta vulgaris* L.) 是我国最重要的糖料作物之一,主要在我国西北、东北和华北等干旱和半干旱地区种植,因其耐盐碱性较强而成为北方盐碱地重要的轮作作物^[9]。前人研究发现,甜菜在低水平(体积分数 0.5% 以下)盐碱条件下也能正常出苗、生长,并维持较高的产量和较好的品质,而在高水平(体积分数 0.8% 以上)盐碱条件下发芽出苗率低,生长迟缓,产量和品质严重下降^[10-11]。有机肥含有丰富的营养元素,不仅能为作物生长提供所需养分,还含有大量的有机质,可经微生物分解、转化形成腐殖质,促进团粒结构形成,使土壤孔隙度增加,透水、通气性增强。并且分解后产生的有机酸还能中和土壤的碱性,降低土壤 pH^[12-14]。高亮等^[15]研究表明,盐碱地施用有机肥能增加土壤微生物数量和生物量碳,提高土壤的呼吸作用和酶活性,同时提高作物产量。然而,国内外对有机肥的研究大多集中在其对土壤理化性质的影响上,有关有机肥对盐碱胁迫作物生

理指标的影响研究多集中在蓖麻^[16]、向日葵^[17]、春玉米^[18]等作物上,尚未见针对甜菜的研究报道。本研究旨在分析不同水平有机肥对混合盐碱胁迫下甜菜生长发育、光合作用和叶绿素荧光特性的影响,以期对盐碱土壤的改良及甜菜产量的提高提供理论和技术参考。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤为黑钙土,土壤基本养分含量为碱解氮 176.27 mg/kg ,速效磷 83.30 mg/kg ,速效钾 153.24 g/kg ,有机质 35.66 g/kg ,可溶性镁 75.28 mg/kg ,可溶性钠 28.25 mg/kg ,可溶性钾 6.02 mg/kg ,pH 为 7.65。

1.2 试验材料

供试甜菜品种为 KWS0143。供试有机肥由黑龙江省五常市润农科技有限公司提供,其养分含量(均为体积分数)为:有机质 45.6%,全氮 3.65%,全磷 3.38%,全钾 2.29%。

1.3 试验设计

试验于 2017 年在东北农业大学进行,采用室外盆栽种植。所用盆栽桶直径为 30 cm,高 25 cm,每个塑料桶装 12 kg 风干土壤,将 NaCl 、 Na_2SO_4 、 NaHCO_3 、 Na_2CO_3 (均无结晶水,分析纯度 99.8%)按物质的量比 2:1:4:2 混合制成盐碱混合物(以下简称“盐碱”),其中 Na 占土壤质量的 0.88%,将以上 4 种盐均匀拌于盆栽桶土壤中。试验共设 6 个处理:CK(不施肥不加盐碱)、S(加盐碱)、SF1(盐碱+ $1\,500\text{ kg/hm}^2$ 有机肥)、SF2(盐碱+ $2\,250\text{ kg/hm}^2$ 有机肥)、SF3(盐碱+ $3\,000\text{ kg/hm}^2$ 有机肥)、SF4(盐碱+ $3\,750\text{ kg/hm}^2$ 有机肥),6 个处理土壤 pH 值分

别为 7.65,9.14,8.91,8.87,8.69 和 8.53,EC 值分别为 75,989,832,757,639 和 605 $\mu\text{s}/\text{cm}$;每个处理 20 桶,共 120 桶。2017 年 5 月 9 日进行播种,有机肥按施用量以基肥一次性拌入土中。

待甜菜第 1 对真叶完全展开时进行间苗,每盆留长势一致的甜菜幼苗 1 株,按大田栽培措施管理。待第 3 对真叶完全展开后,于晴朗天气的早晨 08:00—10:00 对整株甜菜进行取样,每隔 20 d 左右取样 1 次,整个生育期内共取样 5 次。每次取样时,将各处理植株装入冰盒带回实验室,迅速液氮处理后于 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱保存,用于各生理指标的测定。

1.4 测定项目及方法

1.4.1 光合色素含量 选取各处理叶片(相同朝向且刚完全展开的绿叶),避开主脉剪取 0.1 g,采用乙醇-丙酮比色法^[19]测定叶绿素 a(Chl a)、叶绿素 b(Chl b)及类胡萝卜素(Car)含量。每处理重复 3 次,结果取平均值。

1.4.2 光合指标 在测定光合色素指标的同时,用便携式光合仪(CI-340,美国)测定各处理叶片的净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)和蒸腾速率(E)。设定光合有效辐射(PAR)为 $1\,500\,\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,叶室温度为 $20\sim31\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。每处理 3 次重复,结果取平均值。

1.4.3 叶绿素荧光参数 在测定上述指标的同时,利用饱和脉冲式叶绿素荧光仪(PAM-2500,WALZ,Germany)进行叶绿素荧光参数的测定。测定前先夹住各处理叶片暗适应 30 min,同一处理选择 3 株,重复 3 次,叶绿素荧光参数包括初始荧光(F_o)、最大荧光(F_m)、PS II 实际量子产量(Yield(II))、表观电子传递速率(ETR)、光化学淬灭系数(qP)和非光化学淬灭系数(NPQ)。计算最大光化

学效率(F_v/F_m): $F_v/F_m=(F_m-F_o)/F_m$ 。

1.4.4 植株干物质量及产量和含糖率 每处理取 5 株,用水冲洗干净,擦干水分后分为地上、地下两部分,称鲜质量,然后于 $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 杀青 30 min, $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘至恒质量,分别称质量,并计算根冠比(R/T)。用折光仪(WYT,泉州)测定含糖率,并计算产糖量:产糖量=块根鲜质量 $\times$ 含糖率。

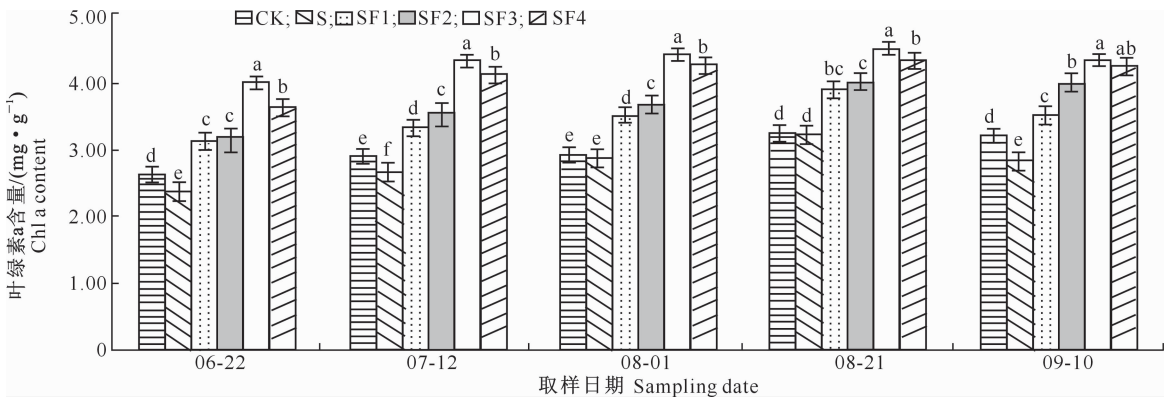
1.5 数据分析

用 Excel 2016 进行数据处理和绘图,利用 SPSS 22.0 软件采用 Duncan 新复极差法比较不同处理间的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 有机肥对混合盐碱胁迫甜菜光合色素含量的影响

由图 1~3 可以看出,在甜菜整个生长期,叶片叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素含量均表现为先升后降。其中,叶绿素 a 和类胡萝卜素含量的降幅较小,基本保持稳定;而叶绿素 b 含量下降幅度较大。在甜菜生长发育的不同时期,混合盐碱胁迫处理(S)甜菜叶片的叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素含量总体显著低于 CK,说明混合盐碱胁迫抑制了甜菜叶片中光合色素的合成。混合盐碱胁迫下施用有机肥可促进甜菜叶片光合色素的积累,且随着施肥水平的提高,甜菜叶片叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素含量均呈先升后降趋势。在 5 个取样时期,4 个施用有机肥处理甜菜叶片的叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素含量整体显著高于对照 CK 和 S 处理($P<0.05$),且以 SF3 处理最高,其光合色素含量与 SF1 和 SF2 处理的差异达到了显著水平($P<0.05$)。



柱上标不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同
Different lowercase letters mean significant difference among treatments at 5% level. The same below
图 1 有机肥对混合盐碱胁迫甜菜叶片叶绿素 a 含量的影响
Fig. 1 Effect of organic fertilizer on chlorophyll a of sugar beet leaves under mixed saline alkali stress

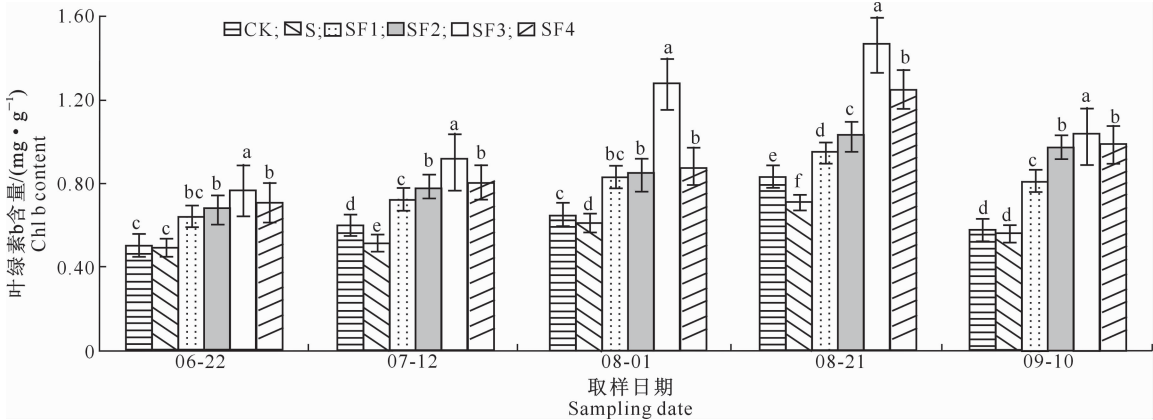


图 2 有机肥对混合盐碱胁迫甜菜叶片叶绿素 b 含量的影响

Fig. 2 Effect of organic fertilizer on chlorophyll b of sugar beet leaves under mixed saline alkali stress

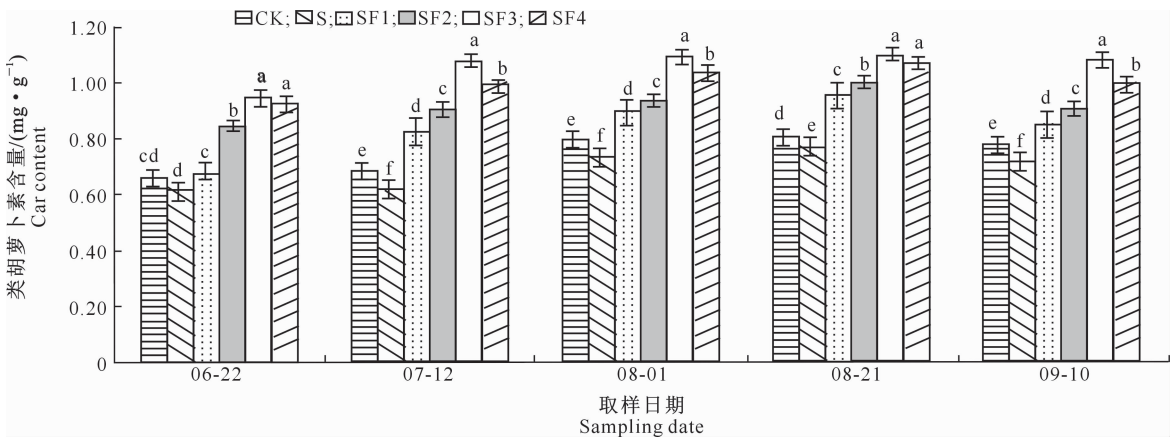


图 3 有机肥对混合盐碱胁迫甜菜叶片类胡萝卜素含量的影响

Fig. 3 Effect of organic fertilizer on carotenoids content of sugar beet under mixed saline alkali stress

2.2 有机肥对混合盐碱胁迫甜菜光合特性的影响

由表 1 可知,在取样期间甜菜叶片净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(E)、胞间 CO_2 浓度(C_i)均表现出先上升后下降的变化趋势,且生长后期降幅较大。混合盐碱处理 S 的 P_n 、 E 、 G_s 和 C_i 降幅较大,且总体与其他处理差异显著($P<0.05$)。

盐碱胁迫下甜菜叶片 P_n 、 G_s 、 E 和 C_i 均随着有机肥施用量的增加呈先升后降趋势,均在 SF3 处理下达到最大,总体与其他 3 个施肥处理达到显著性差异($P<0.05$)。与 SF3 处理相比,SF4 处理甜菜 P_n 、 G_s 、 E 和 C_i 均有所降低,但仍高于 SF1 和 SF2 处理。

表 1 有机肥对混合盐碱胁迫甜菜光合特性的影响

Table 1 Effect of organic fertilizer on photosynthetic characteristics of sugar beet under mixed saline alkali stress

光合指标 Photosynthetic characteristics	处理 Treatment	取样日期 Sampling date				
		06-22	07-12	08-01	08-21	09-10
$P_n/$ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	CK	9.90±0.88 b	11.46±1.94 d	13.41±3.48 e	9.97±2.56 e	10.93±0.90 d
	S	7.94±0.83 d	7.08±1.92 e	9.13±1.78 f	9.76±3.87 e	8.11±1.13 f
	SF1	8.58±0.32 c	14.92±3.76 c	16.21±2.19 c	16.00±3.25 c	13.69±0.34 c
	SF2	10.28±0.26 a	16.43±1.05 b	17.20±3.34 b	16.40±1.53 b	13.76±1.36 b
	SF3	10.46±0.14 a	18.18±0.41 a	18.61±2.35 a	17.15±1.27 a	13.95±0.15 a
	SF4	8.09±0.67 d	14.90±2.89 c	15.47±3.68 d	12.00±1.53 d	11.42±1.04 e
$E/$ ($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	CK	1.72±0.48 c	1.92±0.41 c	2.30±0.43 d	0.77±0.26 c	0.56±0.29 d
	S	1.27±0.14 d	1.52±0.32 d	2.09±0.25 e	0.76±0.72 c	0.42±0.01 e
	SF1	1.81±0.07 ab	2.38±0.66 b	2.56±0.02 c	1.18±0.24 ab	1.14±0.07 ab
	SF2	1.90±0.07 b	2.44±0.24 b	3.09±0.67 b	1.28±0.31 ab	1.25±0.17 b
	SF3	2.16±0.12 a	2.83±0.41 a	3.63±0.39 a	1.36±0.23 a	1.33±0.43 a
	SF4	1.80±0.18 ab	1.82±0.27 ab	2.28±0.51 cd	0.85±0.23 b	0.85±0.36 c

表 1(续) Continued table 1

光合指标 Photosynthetic characteristics	处理 Treatment	取样日期 Sampling date				
		06-22	07-12	08-01	08-21	09-10
$C_i/$ ($\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)	CK	298.10±36.02 c	573.23±46.69 c	594.07±187.20 e	250.77±24.02 c	237.58±35.11 c
	S	241.07±11.87 d	349.30±26.59 e	574.12±105.48 f	232.90±8.30 d	162.43±18.24 d
	SF1	271.53±13.76 b	581.50±35.33 c	604.63±51.99 c	261.20±22.00 c	258.70±34.75 b
	SF2	317.03±27.16 b	602.80±44.59 b	706.20±4.08 b	278.97±22.81 a	257.73±26.36 b
	SF3	322.40±33.73 a	639.97±36.81 a	745.00±40.27 a	285.53±36.26 a	287.73±47.14 a
	SF4	304.37±19.37 c	417.30±131.09 d	588.23±115.64 d	258.47±9.09 b	258.23±14.81 b
$G_s/$ ($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	CK	55.04±3.47 d	67.68±3.48 e	67.85±3.94 d	53.53±4.75 d	52.30±2.46 d
	S	43.40±1.88 c	52.06±9.73 f	55.05±1.88 e	43.19±1.15 e	37.75±5.47 e
	SF1	56.34±3.83 d	67.83±5.27 d	69.03±3.83 d	60.20±6.94 c	58.50±5.07 c
	SF2	64.81±4.25 b	77.10±6.36 b	78.93±0.78 b	64.89±0.78 b	63.13±5.87 b
	SF3	78.13±2.09 a	79.65±8.87 a	81.92±2.09 a	69.18±9.18 a	69.18±3.19 a
	SF4	61.58±0.95 b	69.66±1.41 c	70.10±0.95 c	60.42±1.97 c	59.91±4.13 c

注:同列数据后不同小写字母表示处理间差异达 5%显著水平。下表同。
Note:Different lowercase letters in each column indicate significant difference among treatments at the 5% level. The same below.

2.3 有机肥对混合盐碱胁迫甜菜叶绿素荧光特性数 F_v/F_m 、Yield(Ⅱ)、 ETR 、 qP 、 NPQ 的影响如表 2 所示。

有机肥对混合盐碱胁迫处理甜菜叶绿素荧光参

表 2 有机肥对混合盐碱胁迫甜菜叶绿素荧光参数的影响

Table 2 Effect of organic fertilizer on chlorophyll fluorescence parameter characteristics of sugar beet under mixed saline alkali stress

叶绿素荧光参数 Chlorophyll fluorescence parameters	处理 Treatment	取样日期 Sampling date				
		06-22	07-12	08-01	08-21	09-10
F_v/F_m	CK	0.66±0.01 d	0.68±0.07 c	0.72±0.01 c	0.76±0.01 c	0.73±0.01 e
	S	0.57±0.03 e	0.55±0.02 d	0.66±0.04 d	0.68±0.01 d	0.68±0.00 f
	SF1	0.71±0.00 c	0.74±0.02 b	0.75±0.03 b	0.77±0.00 c	0.76±0.01 d
	SF2	0.74±0.02 b	0.78±0.02 b	0.76±0.03 b	0.79±0.01 b	0.78±0.00 c
	SF3	0.80±0.00 a	0.84±0.01 a	0.81±0.01 a	0.82±0.01 a	0.83±0.01 a
	SF4	0.75±0.00 b	0.80±0.03 a	0.80±0.01 a	0.79±0.01 b	0.80±0.00 b
Yield(Ⅱ)	CK	0.53±0.01 d	0.51±0.01 d	0.55±0.01 d	0.54±0.01 d	0.47±0.03 d
	S	0.48±0.02 e	0.43±0.06 e	0.46±0.02 e	0.47±0.02 e	0.43±0.03 e
	SF1	0.58±0.01 c	0.54±0.02 c	0.60±0.01 c	0.56±0.01 c	0.51±0.01 c
	SF2	0.65±0.01 b	0.62±0.05 b	0.64±0.01 b	0.59±0.01 b	0.55±0.01 b
	SF3	0.79±0.00 a	0.80±0.00 a	0.66±0.00 a	0.64±0.01 a	0.58±0.02 a
	SF4	0.65±0.01 b	0.68±0.01 b	0.65±0.00 a	0.64±0.01 a	0.61±0.01 a
ETR	CK	49.17±0.78 d	53.13±0.71 d	47.43±2.12 d	47.43±1.40 d	38.80±1.42 d
	S	45.30±0.46 e	48.70±1.06 e	42.17±3.87 e	41.40±0.92 e	33.07±0.71 e
	SF1	54.20±0.61 c	54.93±0.51 c	51.87±0.47 c	50.17±0.75 c	44.43±1.36 c
	SF2	55.47±0.80 b	56.43±0.35 b	54.00±0.44 b	52.73±0.96 b	48.07±0.25 b
	SF3	57.20±0.30 a	58.17±0.35 a	57.00±0.01 a	54.83±0.31 a	53.17±0.85 a
	SF4	56.30±0.21 ab	57.10±0.30 ab	56.17±0.42 a	53.50±1.08 a	52.07±0.75 a
qP	CK	0.76±0.02 c	0.69±0.02 c	0.77±0.02 c	0.74±0.03 c	0.69±0.02 d
	S	0.66±0.09 d	0.58±0.08 d	0.65±0.12 d	0.69±0.03 d	0.63±0.02 e
	SF1	0.82±0.00 b	0.73±0.04 c	0.80±0.00 c	0.79±0.03 b	0.75±0.01 c
	SF2	0.85±0.01 b	0.82±0.00 b	0.84±0.01 b	0.82±0.01 b	0.78±0.01 b
	SF3	0.92±0.00 a	0.90±0.01 a	0.93±0.01 a	0.93±0.01 a	0.83±0.01 a
	SF4	0.91±0.01 a	0.85±0.01 a	0.90±0.01 ab	0.91±0.01 a	0.82±0.01 a
NPQ	CK	0.49±0.01 a	0.27±0.01 b	0.61±0.03 b	0.30±0.01 b	1.37±0.05 b
	S	0.50±0.00 a	0.29±0.01 a	0.68±0.02 a	0.34±0.02 a	1.51±0.05 a
	SF1	0.37±0.01 b	0.24±0.02 c	0.53±0.01 c	0.25±0.01 c	1.08±0.02 c
	SF2	0.32±0.01 c	0.22±0.02 d	0.38±0.01 d	0.18±0.01 d	0.89±0.01 d
	SF3	0.25±0.01 d	0.13±0.01 f	0.24±0.01 f	0.08±0.01 f	0.47±0.01 f
	SF4	0.27±0.01 e	0.19±0.01 e	0.32±0.01 e	0.14±0.00 e	0.66±0.01 e

2.3.1 F_v/F_m F_v/F_m 指 PSⅡ 原初光能转换效率,常用来判断植物是否受到了光抑制, F_v/F_m 值越低,证明其发生光抑制的程度越高,具有越低的光能转换效率^[20]。表 2 结果表明,混合盐碱胁迫下甜菜 F_v/F_m 显著降低,且与其他处理达到显著差异水平($P<0.05$)。施加有机肥可提高混合盐碱胁迫处理甜菜的 F_v/F_m ,且随着施肥量的增加, F_v/F_m 呈先升后降的变化趋势,4 个施肥处理与 S 处理和 CK 的差异均达到显著水平($P<0.05$),其中以 SF3 处理的 F_v/F_m 最大,说明适当施加有机肥可以使植株具有较高的光能转换效率,施肥水平过高则会降低光能转换效率,光抑制的程度会有所升高。

2.3.2 Yield(Ⅱ)和 ETR Yield(Ⅱ)指实际光化学量子产量,即所吸收的光量子中用于光化学反应的比例,表示植物体光合机构吸收光能并进行转化的能力,Yield(Ⅱ)值越大,说明光能转化能力越强。PSⅡ 的相对电子传递速率 ETR 反映的是实际光强下表观电子的传递效率^[20]。表 2 结果表明,在甜菜整个生长期, Yield(Ⅱ)和 ETR 总体呈先升后降趋势。混合盐碱胁迫下甜菜 Yield(Ⅱ)和 ETR 均显著降低($P<0.05$),施加有机肥后 Yield(Ⅱ)和 ETR 均显著增加,且随着施肥量的增加,Yield(Ⅱ)和 ETR 表现出与 F_v/F_m 基本一致的变化趋势。4 个施肥处理的 Yield(Ⅱ)和 ETR 与对照(CK)和 S 处理的差异均达到显著水平($P<0.05$),其中 SF3 处理的 Yield(Ⅱ)和 ETR 均达到最大值,说明适当的施肥水平能提高叶片的实际光化学效率,有效提高原初光能捕获效率,进而为光合碳同化提供充足的还原力。

2.3.3 qP 和 NPQ qP 是光化学淬灭系数,即由于光化学反应所引起的荧光淬灭,可以反映光系统(Ⅱ)(PSⅡ)原初电子受体 QA 的氧化还原状态,其值越大表明 PSⅡ 的电子传递活性越大^[21]。表 2 结

果表明,混合盐碱胁迫下甜菜 qP 明显下降,且与其他处理的差异均达显著水平($P<0.05$),表明盐碱胁迫直接影响了光合作用的电子传递和 CO_2 同化过程。混合盐碱胁迫下施加有机肥后 qP 显著上升,且随着施肥水平的提高, qP 呈先升后降趋势。4 个施肥处理均与 S 和 CK 处理存在显著性差异($P<0.05$),其中以 SF3 处理的 qP 最大。

NPQ 指非光化学淬灭系数,反映 PSⅡ 天线色素所吸收光能中用于热耗散的比例,较高的 NPQ 有利于过剩光能的及时耗散,从而避免光系统的损害^[21]。表 2 结果表明,与对照相比,7 月 12 日后混合盐碱胁迫甜菜的 NPQ 明显升高,且与其他处理的差异也达到显著水平($P<0.05$),说明盐碱胁迫下,甜菜主要通过增加热耗散的方式来保护光合机构,但 PSⅡ 反应中心的开放程度降低,活性减弱,参与 CO_2 固定的电子较少,光化学效率较低。混合盐碱胁迫下施加有机肥后 NPQ 显著下降,且随着施肥水平的提高, NPQ 表现出与 qP 相反的变化趋势,4 个施肥处理的 NPQ 值与对照(CK)和 S 处理的差异均达显著水平($P<0.05$),其中以 SF3 处理的 NPQ 最小。

2.4 有机肥对混合盐碱胁迫甜菜生物量与根冠比的影响

由表 3 可以看出,混合盐碱胁迫使甜菜全株干质量、根干质量和根冠比较对照显著降低,盐碱胁迫下施加有机肥可显著提高甜菜的全株干质量、根干质量和根冠比,但随着施肥量的增加,甜菜全株干质量、根干质量和根冠比均呈先增后降趋势,表现为 $SF1<SF2<SF4<SF3$ 。在不同取样时期,各有机肥处理甜菜全株干质量、根干质量和根冠比均显著高于 CK 和 S 处理($P<0.05$),其中以 SF3 处理全株干质量、根干质量和根冠比最高,且与其他施肥水平差异显著($P<0.05$)。

表 3 有机肥对混合盐碱胁迫甜菜生物量与根冠比的影响

Table 3 Effect of organic fertilizer on biomass and root shoot ratio of sugar beet under mixed saline alkali stress						
指标 Index	处理 Treatment	取样日期 Sampling date				
		06-22	07-12	08-01	08-21	09-10
全株干质量/ (g·株 ⁻¹) Total dry weight	CK	1.13±0.02 d	3.18±0.03 e	12.53±0.15 d	32.36±0.04 e	33.59±0.04 e
	S	1.04±0.03 e	3.05±0.03 e	9.81±0.21 e	30.68±0.11 f	33.13±0.03 f
	SF1	1.29±0.01 c	4.27±0.02 d	12.97±0.07 c	33.74±0.02 d	34.38±0.03 d
	SF2	1.32±0.03 c	5.64±0.04 c	13.94±0.08 b	34.37±0.15 c	43.45±0.04 c
	SF3	1.46±0.03 a	10.50±0.47 a	15.67±0.30 a	37.50±0.10 a	52.90±0.08 a
	SF4	1.41±0.01 b	6.57±0.15 b	15.43±0.11 a	36.56±0.04 b	44.05±0.04 b
根干质量/(g·株 ⁻¹) Root dry weight	CK	0.15±0.01 e	1.34±0.02 e	5.93±0.05 e	19.49±0.04 e	21.11±0.04 e
	S	0.12±0.01 f	0.95±0.03 f	3.47±0.05 f	13.88±0.10 f	19.17±0.03 f
	SF1	0.21±0.01 d	1.95±0.02 d	6.97±0.02 d	20.79±0.03 d	23.06±0.02 d

表 3(续) Continued table 3

指标 Index	处理 Treatment	取样日期 Sampling date				
		06-22	07-12	08-01	08-21	09-10
根干质量/ (g·株 ⁻¹) Root dry weight	SF2	0.26±0.02 c	2.02±0.02 c	7.48±0.02 c	21.75±0.03 c	30.23±0.02 c
	SF3	0.33±0.01 a	6.14±0.02 a	9.14±0.02 a	23.98±0.02 a	43.77±0.02 a
	SF4	0.29±0.01 b	3.33±0.02 b	8.43±0.02 b	22.18±0.02 b	33.74±0.05 b
根冠比 Root/shoot	CK	0.16±0.01 c	0.54±0.01 e	0.81±0.02 e	1.14±0.02 e	1.58±0.03 e
	S	0.13±0.02 c	0.47±0.02 f	0.55±0.02 f	0.80±0.05 f	1.35±0.02 f
	SF1	0.21±0.03 b	0.73±0.03 d	0.89±0.04 d	1.28±0.03 d	2.28±0.02 d
	SF2	0.23±0.03 b	0.90±0.03 c	1.16±0.03 c	1.73±0.03 c	2.31±0.03 c
	SF3	0.28±0.02 a	1.53±0.04 a	2.63±0.06 a	2.88±0.04 a	4.90±0.06 a
	SF4	0.24±0.01 b	1.06±0.02 b	1.21±0.03 b	1.91±0.04 b	3.27±0.02 b

2.5 有机肥对混合盐碱胁迫甜菜块根产量与含糖率的影响

由表 4 可知,与对照相比,混合盐碱胁迫使甜菜块根产量、产糖量和含糖率均有所降低,其中块根产量、产糖量差异显著($P<0.05$)。施用有机肥后,甜

菜块根产量和产糖量显著提高,且随着施肥量的增加呈先升后降的趋势,其中以 SF3 处理最高,且显著高于其他所有处理。含糖率以 SF4 处理甜菜最高,其次是 SF3 处理,且二者与 SF2 处理间均无显著差异。

表 4 有机肥对混合盐碱胁迫甜菜块根产量、产糖量和含糖率的影响

Table 4 Effects of organic fertilizer on root yield,sugar yield and sugar content of sugar beet under mixed saline alkali stress

处理 Treatment	块根产量/ (g·株 ⁻¹) Root yield	产糖量/ (g·株 ⁻¹) Sugar yield	含糖率/% Rate of sugar content	处理 Treatment	块根产量/ (g·株 ⁻¹) Root yield	产糖量/ (g·株 ⁻¹) Sugar yield	含糖率/% Rate of sugar content
CK	131.96±7.76 e	20.94±0.98 e	15.88±0.53 c	SF2	204.39±24.39 c	32.68±1.84 c	16.13±1.89 ab
S	107.83±8.70 f	16.07±1.92 f	14.87±0.74 c	SF3	277.85±12.63 a	49.62±3.49 a	17.85±0.71 a
SF1	159.92±19.78 d	26.70±2.33 d	16.75±0.95 b	SF4	232.14±26.70 b	41.77±6.19 b	17.99±1.64 a

3 讨 论

叶绿素含量的高低可以反映植物的生长状况和叶片光合能力^[22]。前人研究认为,盐胁迫会减弱植物色素蛋白复合体功能,导致叶绿体对光能的吸收降低,减小 P_n 和 G_s ,破坏 PSⅡ 反应中心及光合电子传递装置等^[23]。本试验表明,盐碱混合胁迫条件下甜菜叶片叶绿素含量降低,光合能力减弱,单株干物质质量减少;而增施有机肥能明显提高盐碱胁迫甜菜叶片中的光合色素含量和 P_n 、 G_s 、 E ,且随着有机肥施用量的增加,甜菜叶片中叶绿素含量、光合参数、生物量和根冠比均呈先升后降的趋势。马超男等^[24]在半夏上的研究表明,施肥量过少会造成叶绿素合成过程中所需的一些重要营养元素(如 N、Mg、Cu、Fe 等)缺乏,导致叶绿素含量降低,叶片光合速率下降,进而影响植物生长。贺维等^[25]在桉楠上的研究则表明,施肥量过多会使植株体内矿质元素比例失衡,导致代谢紊乱进而影响其叶绿素合成,最终影响植物叶片的光合活性。有研究表明,适当的施肥水平能显著提高烟草^[26]、莢果蕨^[27]和芥蓝^[28]的叶绿素含量和叶片 P_n ,生成更多的高能有机物,促进植株生长和干物质积累,最终提高作物产量。本

试验发现,在混合盐碱土中添加 3 000 kg/hm² 有机肥能显著提高甜菜叶片的光合能力,增加干生物量与块根产糖量。这可能是因为有机肥可改善盐碱土壤的通透性,保持土壤水分,促进植株根系生长发育,而强大的根系可从土壤中吸收大量的矿质元素,从而为植株的生长提供所需营养,土壤中充足的水分可促进植株叶片 G_s 的增加,提高叶片水势,从而减轻盐碱胁迫对植物细胞产生的渗透胁迫及离子毒害作用,间接影响植株光合代谢^[29-31]。

通过对叶绿素荧光特性的研究,可以了解植物生长及其在逆境胁迫下的生理状况^[20]。本研究表明,在混合盐碱胁迫下,甜菜叶片的 F_v/F_m 、Yield(Ⅱ)、 qP 和 ETR 均明显下降,而 NPQ 明显升高,说明甜菜叶片发生了光抑制,光化学效率降低,这与前人的研究结果^[8,23]基本一致。在混合盐碱胁迫下施用不同水平有机肥均能提高 F_v/F_m 、Yield(Ⅱ)、 qP 和 ETR ,降低 NPQ ,说明有机肥能降低光抑制程度和非光化学耗散的比例,提高光能利用率,增加干物质质量,提高根冠比和产量^[32],且以施用 3 000 kg/hm² 有机肥处理的效果最佳。随着有机肥施用量的增加, F_v/F_m 、Yield(Ⅱ)、 qP 和 ETR 变化趋势与叶绿素含量和光合参数一致, NPQ 的变化趋势则

相反。说明少量或过量施用有机肥均会对植株叶片PSⅡ反应中心产生光抑制,进而导致其生长受限,最终导致产量下降。马锦丽等^[33]在有机卷心菜上的研究证明,适度增施有机肥可调节光合代谢,保持叶片较高的光合性能。本研究证实,在3 000 kg/hm²有机肥施用水平下,甜菜叶片光合机构中参与CO₂固定的电子较多,光合电子传递速率和光能化学转化效率明显提高,*qP*显著降低,有效避免了光抑制的产生,并将所捕获的光能用于光合作用以制造更多的有机物,促进植株生长发育,增加甜菜块根产量,提高含糖量。

综上所述,有机肥对混合盐碱胁迫甜菜的生长有显著促进作用,施用有机肥可显著提高甜菜叶片叶绿素含量,改善甜菜的光合特性和叶绿素荧光特性,缓解盐碱胁迫对其的伤害,并能增加干物质积累量,提高甜菜的产量与含糖率。施用1 500~3 750 kg/hm²有机肥对盐碱胁迫的缓解效果与甜菜产量的提高作用因有机肥施用量的多少而表现不同,其中以3 000 kg/hm²有机肥处理的效果最佳。

[参考文献]

- [1] Daliakopoulos I N, Tsanis I K, Koutroulis A, et al. The threat of soil salinity: a European scale review [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 573: 727-739.
- [2] 魏显珍, 赵 斌, 武晓燕, 等. 不同盐度下施氮量对甜菜生长发育及氮素吸收利用特性的影响 [J]. *干旱地区农业研究*, 2017, 35(3): 205-211.
Wei X Z, Zhao B, Wu X Y, et al. Growth of sugar beet and its nitrogen uptake and utilization influenced by nitrogen level under different salinity [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2017, 35(3): 205-211.
- [3] Ren J H, Li X J, Zhao K. Quantitative analysis of relationships between crack characteristics and properties of soda-saline soils in Songnen plain, China [J]. *Chin Geogra Sci*, 2015, 25(5): 591-601.
- [4] Qian X, Patriek B, Xu J C, et al. Osmotic stress- and salt stress-inhibition and gibberellin-mitigation of leaf elongation associated with up-regulation of genes controlling cell expansion [J]. *Environ Exp Bot*, 2016, 131: 101-109.
- [5] Wang X S, Ren H L, Wei Z W, et al. Effects of neutral salt and alkali on ion distributions in the roots, shoots, and leaves of two alfalfa cultivars with differing degrees of salt tolerance [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2017, 16(8): 1800-1807.
- [6] Wang X P, Geng S J, Ri Y J, et al. Physiological responses and adaptive strategies of tomato plants to salt and alkali stresses [J]. *Scientia Horticulturae*, 2011, 130: 248-255.
- [7] Huang C J, Wei G, Jie Y C, et al. Effects of concentrations of sodium chloride on photosynthesis, antioxidative enzymes, growth and fiber yield of hybrid ramie [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2014, 76: 86-93.
- [8] 孙 璐, 周宇飞, 李丰先, 等. 盐胁迫对高粱幼苗光合作用和荧光特性的影响 [J]. *中国农业科学*, 2012, 45(16): 3265-3272.
Sun L, Zhou Y F, Li F X, et al. Effects of salt stress on photosynthesis and fluorescence characteristics of sorghum seedlings [J]. *Sci Agric Sin*, 2012, 45(16): 3265-3272.
- [9] Gui G, Ji Y. Sugar beet production and industry in China [J]. *Sugar Tech*, 2015, 17(1): 13-21.
- [10] Zou C L, Sang L M, Gai Z J, et al. Morphological and physiological responses of sugar beet to alkaline stress [J]. *Sugar Tech*, 2018, 20(2): 202-211.
- [11] 刘 洋, 李彩凤, 洪 鑫, 等. 盐碱胁迫对甜菜氮代谢相关酶活性及产量和含糖率的影响 [J]. *核农学报*, 2015, 29(2): 397-404.
Liu Y, Li C F, Hong X, et al. Effects of saline alkali stress on activities of enzymes related to nitrogen metabolism, yield and sugar content in sugar beet [J]. *Acta Agric Nucl Sin*, 2015, 29(2): 397-404.
- [12] Sun R, Guo X, Wang D, et al. Effects of long-term application of chemical and organic fertilizers on the abundance of microbial communities involved in the nitrogen cycle [J]. *Appl Soil Ecol*, 2015, 95: 171-178.
- [13] 罗 佳, 盛建东, 王永旭, 等. 不同有机肥对盐渍化耕地土壤盐分、养分及棉花产量的影响 [J]. *水土保持研究*, 2016, 23(3): 49-53.
Lou J, Sheng J D, Wang Y X, et al. Effects of different organic fertilizers on soil salinity, nutrients and cotton yield in saline soil [J]. *Res Soil Water Conserv*, 2016, 23(3): 49-53.
- [14] 杨 明, 孙 毅, 高玉山, 等. 有机肥对苏打盐碱土的改良效果研究 [J]. *吉林农业科学*, 2013, 38(3): 43-46.
Yang M, Sun Y, Gao Y S, et al. Study on improvement effect of organic fertilizer on soda saline alkali soil [J]. *J Jilin Agric Sci*, 2013, 38(3): 43-46.
- [15] 高 亮, 丁春明, 王炳华, 等. 生物有机肥在盐碱地上的应用效果及其对玉米的影响 [J]. *山西农业科学*, 2011, 39(1): 47-50.
Gao L, Ding C M, Wang B H, et al. Application effects of biological organic fertilizer in saline-alkali soil and its impacts on maize [J]. *J Shanxi Agric Sci*, 2011, 39(1): 47-50.
- [16] 吕丽媛, 伍玉鹏, 孙振钧, 等. 有机肥对盐碱地蓖麻苗生长的调控作用 [J]. *中国农业大学学报*, 2013, 18(3): 73-80.
Lü L Y, Wu Y P, Sun Z J, et al. Effect of organic fertilization on growth of castor bean seedling under saline sodic soil [J]. *J China Agric Univ*, 2013, 18(3): 73-80.
- [17] 王善仙, 刘 宛, 李培军, 等. 生物有机肥调控对盐碱胁迫下向日葵幼苗生长及生理指标的影响 [J]. *生态学杂志*, 2011, 30(4): 682-688.
Wang S X, Liu W, Li P J, et al. Effects of bio-organic fertilizer on growth and physiological indexes of sunflower seedlings under salt and alkali stress [J]. *J Eco*, 2011, 30(4): 682-688.
- [18] 刘 艳, 李 波, 孙文涛, 等. 生物有机肥对盐碱地春玉米生理

- 特性及产量的影响 [J]. 作物杂志, 2017(2): 98-103.
- Liu Y, Li B, Sun W T, et al. Effects of bio organic fertilizer on physiological characteristics and yield of spring maize in saline alkali soil [J]. Crops, 2017(2): 98-103.
- [19] 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: 184-261.
- Li H S. Principles and techniques of plant physiology and biochemistry experiment [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 184-261.
- [20] Mehta P, Jajoo A, Mathur S, et al. Chlorophyll a fluorescence study revealing effects of high salt stress on photosystem II in wheat leaves [J]. Plant Physiol Biochem, 2010, 48: 6-20.
- [21] Kazufumi Z, Naotaka M. Using of chlorophyll a fluorescence OJIP transients for sensing salt stress in the leaves and fruits of tomato [J]. Scientia Horticulturae, 2017, 219: 216-221.
- [22] Yang J Y, Zheng W, Tian Y, et al. Effects of various mixed salt-alkaline stresses on growth, photosynthesis, and photosynthetic pigment concentrations of *Medicago ruthenica* seedlings [J]. Photosynthetica, 2011, 49(2): 275-284.
- [23] 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 and alkali interaction stress on chlorophyll fluorescence in leaves of *Sorghum bicolor* $\times$ *S. sudanense* [J]. Pratacultural Science, 2017, 34(10): 2090-2098.
- [24] 马超男, 蔡传涛, 刘贵周, 等. 有机肥对半夏生长及产量的影响 [J]. 西北农业学报, 2016, 25(9): 1399-1405.
- Ma C N, Cai C T, Liu G Z, et al. Effects of organic fertilizer application on growth and yield of pinellate [J]. Acta Agric Boreal-Occidet Sin, 2016, 25(9): 1399-1405.
- [25] 贺 维, 胡庭兴, 王 锐, 等. 施肥对桢楠幼苗光合生理及生长特性的影响 [J]. 西北植物学报, 2014, 34(6): 1187-1197.
- He W, Hu T X, Wang R, et al. Effect of fertilization on photosynthetic physiology and growth characteristics of *Phoebe zhennan* seedlings [J]. Acta Bot Boreal-Occidet Sin, 2014, 34(6): 1187-1197.
- [26] 王通明, 陈 伟, 潘文杰, 等. 有机肥和化肥对烟叶气体交换、叶绿素荧光特性及叶绿体超微结构的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(2): 517-526.
- Wang T M, Chen W, Pan W J, et al. Effects of organic and chemical fertilizer on gas exchange, chlorophyll fluorescence characteristics and chloroplast ultra structure of tobacco leaves [J]. Plant Nutr Fert Sci, 2015, 21(2): 517-526.
- [27] 徐金忠, 高德武, 孙雪文, 等. 不同有机肥处理对茱萸蕨幼苗生长及光合特性的影响 [J]. 中国农学通报, 2013, 29(13): 192-196.
- Xu J Z, Gao D W, Sun X W, et al. The influence of different organic manure treatment on growth and photosynthetic characteristic of *matteuccia* seedlings [J]. China Agric Sci Bull, 2013, 29(13): 192-196.
- [28] 李海达, 宋世威, 刘厚诚, 等. 生物有机肥对芥蓝生长及光合特性的影响 [J]. 中国农学通报, 2014, 30(22): 180-185.
- Li H D, Song S W, Liu H C, et al. Effect of biological organic fertilizer on yield and photosynthetic characteristics of Chinese kale [J]. China Agric Sci Bull, 2014, 30(22): 180-185.
- [29] 崔红艳, 许维成, 孙毓民, 等. 施用有机肥对土壤水分、胡麻产量和品质的影响 [J]. 水土保持学报, 2014, 28(3): 308-312.
- Cui H Y, Xu W C, Sun Y M, et al. Effects of different organic manures application on soil moisture, yield and quality of oil flax [J]. J Soil Water Conser, 2014, 28(3): 308-312.
- [30] 王晓娟, 贾志宽, 梁连友, 等. 不同有机肥量对旱地玉米光合特性和产量的影响 [J]. 应用生态学报, 2012, 23(2): 419-425.
- Wang X J, Jia Z K, Liang L Y, et al. Effects of organic fertilizer application rate on leaf photosynthetic characteristics and grain yield of dryland maize [J]. Chin J Appl Ecol, 2012, 23(2): 419-425.
- [31] 叶胜兰, 徐福利, 王渭玲, 等. 不同有机肥对黄土丘陵区梨枣生长、光合特性及果实品质的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 370-378.
- Ye S L, Xu F L, Wang W L, et al. Effects of the different organic fertilizers on growth, photosynthetic characteristics and quality of pear-jujube of in the Loess Plateau [J]. Plant Nutr Fert Sci, 2013, 19(2): 370-378.
- [32] 杜 研, 杨文忠, 孙林琦, 等. 不同施肥处理对核桃叶片光合作用和叶绿素荧光特性的影响 [J]. 甘肃农业大学学报, 2015, 50(4): 97-102.
- Du Y, Yang W Z, Sun L Q, et al. Effects of different fertilization treatments of photosynthesis, chlorophyll fluorescence characteristics of walnuts [J]. J Gansu Agric Univ, 2015, 50(4): 97-102.
- [33] 马锦丽, 江 洪, 舒海燕, 等. 竹炭有机肥对有机卷心菜叶绿素荧光特性和相对叶绿素含量的影响 [J]. 东北农业大学学报, 2015, 46(3): 29-36.
- Ma J L, Jiang H, Shu H Y, et al. Effect of bamboo charcoal organic fertilizer on chlorophyll fluorescence characteristics and relative chlorophyll content of organic cabbage [J]. J North-east Agric Univ, 2015, 46(3): 29-36.