

DOI: 10.5846/stxb201807041463

陈春晓, 谢秀华, 王宇鹏, 李俊朋, 信健, 朱婷婷, 刘静, 陈敏. 盐分和干旱对沙枣幼苗生理特性的影响. 生态学报, 2019, 39(12): - .
Chen C X, Xie X H, Wang Y P, Li J P, Xin J, Zhu T T, Liu J, Chen M. Effects of salt and drought on the physiological characteristics of *Elaeagnus angustifolia* L. seedlings. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(12): - .

盐分和干旱对沙枣幼苗生理特性的影响

陈春晓¹, 谢秀华², 王宇鹏³, 李俊朋¹, 信健¹, 朱婷婷¹, 刘静¹, 陈敏^{1,*}

1 山东师范大学生命科学学院/山东省逆境植物重点实验室, 济南 250014

2 山东省东营市农业农村局, 东营 257091

3 山东省潍坊北海中学, 潍坊 261200

摘要:以沙枣(*Elaeagnus angustifolia* L.)幼苗为实验材料,分别对其进行轻度干旱(土壤含水量 7%—9%)、重度干旱(土壤含水量 3%—5%)、100 mmol/L NaCl 以及 100 mmol/L NaCl 处理下不同程度的盐旱共胁迫处理,处理 2 周后测其生理指标,包括生长指标、光合指标、渗透调节指标以及复水后生长指标,研究盐旱共胁迫对沙枣幼苗生理特性的影响。结果表明:和对照相比,轻度干旱对沙枣幼苗的生物量没有显著影响,重度干旱处理明显降低了沙枣的生物量,无论是轻度干旱还是重度干旱,都显著降低了沙枣幼苗的净光合速率、K⁺含量,显著增加了 Na⁺含量、脯氨酸含量、可溶性糖含量、有机酸含量、总酚和类黄酮含量;和对照相比,100 mmol/L NaCl 处理显著降低了沙枣幼苗的生物量、净光合速率和 K⁺含量,显著增加了 Na⁺含量、脯氨酸含量、可溶性糖含量、有机酸含量、总酚和类黄酮含量;和盐处理相比,轻度干旱和盐分共胁迫对沙枣幼苗的各项指标没有显著差异,而重度干旱和盐分共胁迫明显降低了沙枣幼苗的生物量、净光合速率;复水一周后,只有轻度干旱可以恢复到对照水平。以上结果表明,盐分和干旱处理明显抑制了沙枣幼苗的生长,轻度干旱和盐分共胁迫条件下,沙枣幼苗表现出一定的交叉适应现象,而重度干旱却加重了盐害。

关键词:沙枣;盐胁迫;干旱胁迫;盐旱共胁迫;交叉适应

Effects of salt and drought on the physiological characteristics of *Elaeagnus angustifolia* L. seedlings

CHEN Chunxiao¹, XIE Xiuhua², WANG Yupeng³, LI Junpeng¹, XIN Jian¹, ZHU Tingting¹, LIU Jing¹, CHEN Min^{1,*}

1 College of Life Sciences, Shandong Normal University/Shandong Provincial Key Laboratory of Plant Stress Reserch, Jinan 250014, China

2 Dongying City Agricultural and Rural Bureau, Dongying 257091, China

3 Weifang Beihai Middle School, Shandong Province, Weifang 261200, China

Abstract: The problem of soil salinization is becoming more and more serious, and the area of saline land is increasing, which seriously affects the sustainable development of agriculture. The Yellow River Delta (YRD) of China not only has highly saline and alkalinized soil but also drought in spring or autumn. Coupled with salt in the soil, the plants growing here are often subjected to double stress from salinity and drought, resulting in a decline in plant yields and economic benefits. *Elaeagnus angustifolia* L. is a tree species that can tolerate salt and drought. In recent years, research on the stress resistance of *E. angustifolia* has been abundant, but most of them focus on a single stress factor. There are few studies on the physiological characteristics of *E. angustifolia* seedlings under double stress from salinity and drought. An experiment was carried out to investigate the effects of drought and salt stress on the growth and physiological characteristics of

基金项目:国家自然科学基金(31400239);山东省重大科技创新工程(2017CXGC0311,2017CXGC0313)

收稿日期:2018-07-04; 网络出版日期:2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chenminrundong@126.com

E. angustifolia seedlings to provide the theoretical basis for the introduction of *E. angustifolia* to the YRD. In this study, the seedlings of *E. angustifolia* were used as experimental materials and subjected to mild drought (7%—9% of soil moisture content), severe drought (3%—5% of soil moisture content), 100 mmol/L NaCl, the salt and drought stress treatments. The physiological indexes were measured after two weeks of treatment, which included growth, photosynthesis, osmotic adjustment index, and growth index after re-watering, in order to study the effects of salinity and drought interaction on the physiological characteristics of *E. angustifolia* seedlings. The results showed that compared with the control, mild drought had no significant effect on the biomass while the biomass of *E. angustifolia* seedlings significantly decreased under severe drought. Irrespective of the drought condition, the net photosynthetic rate and K^+ content were significantly ($P < 0.05$) reduced, and the content of Na^+ , proline, soluble sugar, organic acid, total phenol, and flavonoid of the *E. angustifolia* seedlings were significantly ($P < 0.05$) increased. Compared with the control, the biomass, the net photosynthetic rate, and K^+ content were significantly ($P < 0.05$) decreased, and the content of Na^+ , proline, soluble sugar, organic acid, total phenol, and flavonoid of *E. angustifolia* seedlings significantly ($P < 0.05$) increased under 100 mmol/L NaCl treatment. Compared with NaCl treatment, the indexes of *E. angustifolia* seedlings showed no significant ($P > 0.05$) change under mild drought and salt treatment. Compared with NaCl treatment, the biomass, the net photosynthetic rate, and K^+ content were significantly ($P < 0.05$) reduced, and the content of Na^+ , proline, soluble sugar, organic acid, total phenol, and flavonoid of *E. angustifolia* seedlings significantly ($P < 0.05$) increased under salinity and severe drought treatment. After one week of re-watering, only the *E. angustifolia* seedlings under mild drought can return to the control level. The findings of this study suggested that salt and drought treatment significantly inhibited the growth of *E. angustifolia* seedlings. Under mild drought and salt stress, the *E. angustifolia* seedlings showed some cross-adaptation, while severe drought exacerbated salt damage.

Key Words: *Elaeagnus angustifolia* L.; salt stress; drought stress; salt and drought co-stress; cross adaptation

非生物胁迫(例如:干旱、盐碱、极端温度、氧化胁迫)是限制植物生长的主要因素,非生物胁迫通过影响植物生长、发育、营养代谢及一系列分子变化,进而影响植物形态、结构和产量^[1]。盐和干旱是两种主要的非生物胁迫因子而且二者常常同时发生,尤其在干旱、半干旱地区,干旱和盐胁迫共同作用严重危害着植物的生长及产量。黄河三角洲是黄河数百年来冲积而成的一块年轻的陆地,由于成陆较晚,土地整体质量不高,现有的 533333 hm² 边际性土地多为盐碱地,其特点是土壤含盐量高、有机质含量低、营养元素不均衡,地下水位高,春秋易旱、夏季易涝,不适合于普通农作物生长^[2]。生长在黄河三角洲地区的植物在春、秋季常常受到盐和干旱共同的影响。

正是由于黄河三角洲地区特殊的土壤情况和气候特征,黄河三角洲地区的植物种类少、植被单一,严重制约了当地的经济发展和生态改良。所以引种一些适合当地生长的经济和生态植物迫在眉睫。沙枣(*Elaeagnus angustifolia* L.)是胡颓子科(*Elaeagnaceae*)胡颓子属(*Elaeagnus* Linn.)的落叶小乔木,主要分布于我国西北五省,在北京、天津和山东等地也开展了引种栽培^[3-4]。我们课题组前期的结果表明,沙枣具有一定的耐盐性,可以在黄河三角洲地区生长良好^[2,5]。但是对于沙枣适应黄河三角洲地区春、秋季的盐旱共同胁迫的机理是还不清楚。目前单一胁迫因子(盐胁迫或干旱胁迫)对植物生长的影响研究较多,但对于盐分和干旱共胁迫的研究相对较少。在已有的研究中发现:许多植物在盐分或者干旱胁迫时,其生物量是降低的,而在盐分和干旱共胁迫胁迫时,在一定的条件下,植物会表现出比在单一胁迫下生长更好的现象。例如,2012年朱金方等研究发现,盐旱胁迫下怪柳表现出一定的交叉适应性,适度的干旱胁迫能增强怪柳的耐盐能力^[6];另外2017年翁亚伟等研究发现,盐旱复合胁迫可以通过增强根系水分吸收及降低根叶中ABA含量以维持较高光合能力,进而提高小麦适应性^[7];2017年华智锐等研究也发现,在盐旱共胁迫下小麦幼苗表现出交叉适应性^[8]。这些研究都说明了在干旱和盐分这两种胁迫因子的共同作用下,植物出现了交叉适应现象。

沙枣的生存能力极强,具有抗干旱、耐盐碱、抗风沙、耐贫瘠、根蘖性强的特点,可用于水土保持,还可以调

节气候、净化空气、改良土壤,并且沙枣根系上有固氮根瘤菌,能提高土壤肥力,改善土壤环境^[9]。沙枣作为耐逆的先锋树种是否可以更好的适应盐旱共胁迫?关于这个问题没有相关的报道,所以本实验模拟黄河三角洲地区春、秋季的盐旱共同胁迫,来研究盐分和干旱共同胁迫对沙枣幼苗生长及生理特性的影响。从而为将沙枣引进黄河三角洲地区提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验材料为沙枣(*Elaeagnus angustifolia* L.)幼苗。本实验室于2017年从新疆吐鲁番购入沙枣果实,将果实去果肉后得到干净的种子,将种子种植于培养盘中获得沙枣幼苗备用。

1.2 材料的培养

机械方法去除果肉,对种子进行统一的消毒处理,用蒸馏水反复冲洗,备用。种植前将其置于低温(0—4℃)下进行冷层积处理(低温处理采用低温培养箱,品牌:上海捷呈;型号:LRH-600F),以打破休眠并软化种皮以便于种子萌发,10 d后将种子取出(此时种子已经露白)。种植于装有洗净细沙的塑料盆中,每盆播种20粒种子(种子距沙面约2 cm),然后移至温室(光强:600 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$;相对湿度:70%;温度:24℃;光照:16 h光亮,8 h黑暗)内。培养期间每天浇水保持沙子湿润,待种子萌发后,停止浇水改为浇1/2 Hoagland 营养液。待沙枣幼苗长出2—3片真叶时,进行间苗(保留盆内生长较健壮且生长状况大致相同的7—8株幼苗),待幼苗生长到5—6片真叶时,开始胁迫实验。

1.3 实验处理

实验分为6个处理,每个处理5个重复。处理方法如下:

①对照(the control,CK):一直浇灌1/2 Hoagland 营养液。

②轻度干旱(the treatment of mild drought,LS):浇灌1/2 Hoagland 营养液7 d,之后保持土壤含水量在轻度干旱标准(土壤含水量,7%—9%,下同)14 d,每天于早中晚3次测量含水量(Soil water content were determined with an HH2 moisture meter with a WET-2 sensor (Delta-T, Cambridge, UK)),补浇1/2 Hoagland 营养液,使含水量保持不变,下同。

③重度干旱(the treatment of severe drought,SS):浇灌1/2 Hoagland 营养液7 d,之后保持土壤含水量在轻度干旱标准(土壤含水量3%—5%,下同)14 d,每天于早中晚3次测量含水量,补浇1/2 Hoagland 营养液,使含水量保持不变,下同。

④盐(the treatment of 100 mmol/L NaCl,100CK):一直浇灌含有100 mmol/L NaCl的1/2 Hoagland 营养液。

⑤盐+轻度干旱(the treatment of 100 mmol/L NaCl and mild drought,100LS):浇灌含有100 mmol/L NaCl的1/2 Hoagland 营养液7 d,之后保持土壤含水量在轻度干旱标准14 d,每天于早中晚三次测量含水量。

⑥盐+重度干旱(the treatment of 100mmol/L NaCl and severe drought,100SS):浇灌含有100 mmol/L NaCl的1/2 Hoagland 营养液7 d,之后保持土壤含水量在重度干旱标准14 d,每天于早中晚三次测量含水量。

1.4 生理指标的测定

1.4.1 株高、根长、含水量及根冠比的测定

处理2周后,用刻度尺测量株高(沙面以上为株高),然后小心将整株植物取出,洗净后用刻度尺测量根长并称量地上与地下部分的鲜重(fresh mass, FW)。将鲜材料放入105℃的烘箱中杀青10 min后,80℃烘干至恒重,分别称地上与地下部分干重(dry mass, DW)。根据下列方式计算组织含水量和幼苗根冠比:

$$\text{含水量} = (\text{鲜重} - \text{干重}) / \text{鲜重} \times 100\%$$

$$\text{根冠比} = \text{地下干重} / \text{地上干重}$$

1.4.2 叶绿素含量的测定

采用高奔等法^[10]。根据下式计算组织中叶绿素含量:

$$\text{叶绿素含量}(\text{mg/g FW}) = 8.02A_{663} + 20.21A_{645}$$

式中, A_{645} 为 645 nm 处的吸光度; A_{663} 为 663 nm 处的吸光度。

1.4.3 光合参数的测定

采用李艳等法^[11], 使用 CIRAS-2 型英国 PP.Systems 公司便携式光合作用测定仪对沙枣完全展开的第二叶进行净光合速率 (netphotosynthetic rate, P_n)、胞间 CO_2 浓度 (intercellular CO_2 concentration, C_i)、气孔导度 (stomatal conductance, g_s)、蒸腾速率 (transpiration rate, T_r) 等光合参数的测定。测定过程中光强约为 $1500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 大气温度变化范围为 20—24℃, 大气 CO_2 浓度变化范围为 477—497 $\mu\text{mol/L}$, 测定时间为 10:00—11:30。

1.4.4 荧光参数的测定

采用冯伟等法^[12], 下列方式计算组织含水量和幼苗根冠比 (9:30—12:00), 用 OS5-FL 型调制式叶绿素荧光分析仪 (OPTI-SCI-ENCES, 美国) 测定光适应下的最大光化学效率 (maximum quantum efficiency, F_v/F_m)、光系统 II 实际光化学量子效率 (quantum efficiency of photosystem II, Φ_{PSII}) 以及光化学猝灭系数 (photochemical quenching coefficient, qP)。取完全展开的同一叶位的沙枣叶片测定, 测定时先固定好沙枣叶片, 使叶片受光一致, 每个处理测定至少 20 片叶。测定暗适应荧光参数前将叶片充分暗适应 20 min。

1.4.5 无机离子含量的测定

采用张志良法^[13], 将烘干的沙枣材料分别碾碎后于马弗炉中 550℃ 灰化, 灰分用浓硝酸溶解, 定容后用原子吸收光谱仪 (日立 Z-8000 型) 测定 Na^+ 含量、 K^+ 含量, AgNO_3 滴定法测定 Cl^- 含量。

1.4.6 脯氨酸含量的测定

采用酸性茚三酮法^[14]。根据下式计算组织中脯氨酸含量:

$$\text{脯氨酸含量}(\mu\text{g/g FW}) = (X \times V_t) / (W \times V_s \times 10^6) \times 100\%$$

式中, X 为从标曲中查得的脯氨酸含量 (μg); V_t 为提取液体积 (mL); W 为样品的质量 (g); V_s 为测定时所用样品的体积。

1.4.7 可溶性糖含量的测定

采用蒽酮法^[15], 称取 0.2 g 沙枣叶片磨细的烘干样品置 10 mL 离心管中, 用 80% 乙醇浸提离心后定容至 25 mL。准确吸取糖的乙醇提取液 2 mL 水浴中蒸去乙醇, 准确加水 10 mL 搅拌使糖完全溶解。吸取上清液 2 mL 加入试管中, 记录 620 nm 下的 OD 值并计算可溶性糖含量。

1.4.8 总酚含量的测定

采用 Folin-Ciocalteu 比色法^[16]。根据下式计算组织中总酚含量:

$$\text{总酚含量}(\mu\text{g/g FW}) = X \times V / m$$

式中, X 为由吸光度按标准曲线查的结果; V 为粗提液总体积 (mL); m 为称样质量 (g)。

1.4.9 类黄酮含量的测定

采用亚硝酸钠-硝酸铝比色法^[17]。根据下式计算组织中类黄酮含量:

$$\text{类黄酮含量}(\mu\text{g/g FW}) = X \times V / m$$

式中, X 为由吸光度按标准曲线查的结果; V 为粗提液总体积 (mL); m 为称样质量 (g)。

1.4.10 丙二醛 (MDA) 含量的测定

紫外-可见分光光度计法^[18]。根据下式计算组织中 MDA 的含量:

$$\text{MDA 含量}(\text{mmol/gFW}) = \Delta A \times N / (155 \times W)$$

式中, ΔA 为 A_{532} 和 A_{600} 的差; N 为上清液总体积; 155 为 1 mmol 为反应产物在 532 nm 处的吸收系数; W 为称取植物材料的鲜重 (g)。

1.5 数据统计分析

上述各处理 5 个重复, 所得数据用 SigmaPlot 10.0 作图, 用 IBM SPSS Statistics 19 软件进行显著性分析, 同一种

处理的各参数以平均值加减标准差的形式表示(mean±SD),同时采用字母标注法($P<0.05$ 表示存在显著性差异)。

2 结果

2.1 盐旱共胁迫对沙枣幼苗生长速率和生物量的影响

轻度干旱除了降低了沙枣的株高和根长外,对沙枣的生物量和含水量没有影响,但是重度干旱却明显降低了沙枣的各生长指标(图 1,表 1)。除了含水量以外,100 mmol/L NaCl 明显降低了沙枣的各生长指标。和 100 mmol/L NaCl 处理条件下的各项生理指标相比,轻度干旱和 100 mmol/L NaCl 共胁迫对沙枣的生长没有显著影响,但是重度干旱和 100 mmol/L NaCl 共胁迫却明显降低了沙枣的生长。

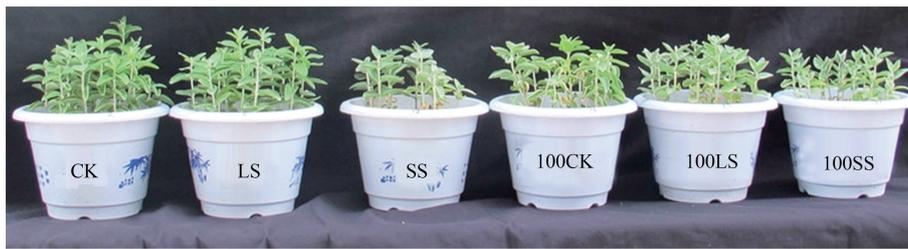


图 1 盐旱共胁迫对沙枣幼苗生长的影响

Fig.1 The effects of salt and drought co-stress on the growth of *E. angustifolia* seedlings

CK:对照,the control;LS:轻度干旱,mild drought;SS:重度干旱,severe drought;100CK:盐,100 mmol/L NaCl;100LS:盐+轻度干旱,100 mmol/L NaCl and mild drought co-stress;100SS:盐+重度干旱,100 mmol/L NaCl and severe drought co-stress

表 1 盐旱共胁迫对沙枣生长指标的影响

Table 1 The effects of salt and drought co-stress on the growth index of *E. angustifolia* seedlings

参量 Parameters	处理 Treatment					
	CK	LS	SS	100+CK	100+LS	100+SS
地上鲜重 Shoot fresh weight	1.11±0.29a	1.11±0.30a	0.92±0.17b	0.88±0.31b	0.70±0.22bc	0.59±0.13c
地上干重 Shoot dry weight	0.23±0.06a	0.25±0.05a	0.23±0.04b	0.20±0.06b	0.19±0.05bc	0.17±0.04c
地下鲜重 Root fresh weight	0.73±0.03a	0.65±0.04ab	0.51±0.02bc	0.40±0.02cd	0.35±0.02d	0.30±0.02de
地下干重 Root dry weight	0.12±0.04a	0.11±0.04ab	0.07±0.02b	0.07±0.06b	0.07±0.03b	0.07±0.02b
株高 Plant length	11.06±0.98a	9.40±1.00b	6.87±0.58d	9.68±0.75b	8.31±0.58c	6.77±0.80d
根长 Root length	8.77±0.76a	7.36±0.55b	6.04±0.62de	6.92±0.63bc	6.46±0.83cd	5.69±0.69e
地上含水量 Shoot water content	78.73±2.40a	77.72±3.14a	74.42±4.40b	76.82±3.07a	72.40±2.30c	71.47±2.53c
根冠比 Root shoot ratio	0.16±0.04a	0.14±0.03ab	0.11±0.03e	0.13±0.04bc	0.12±0.03cd	0.09±0.02d

表中数据为平均数±标准差($n=5$);不同小写字母表示不同处理之间差异显著($P<0.05$);CK:对照,the control;LS:轻度干旱,mild drought;SS:重度干旱,severe drought;100+CK:盐,100 mmol/L NaCl;100+LS:盐+轻度干旱,100 mmol/L NaCl and mild drought co-stress;100+SS:盐+重度干旱,100 mmol/L NaCl and severe drought co-stress

2.2 盐旱共胁迫对沙枣幼苗叶绿素含量的影响

轻度干旱对沙枣幼苗叶绿素含量没有影响,但是重度干旱却明显降低了沙枣幼苗的叶绿素含量。100 mmol/L NaCl 显著降低了沙枣幼苗的叶绿素含量($P<0.05$)。和 100 mmol/L NaCl 处理条件下的各项生理指标相比,轻度干旱和 100 mmol/L NaCl 共胁迫对其没有显著影响($P>0.05$),但是重度干旱和 100 mmol/L NaCl 共胁迫却明显降低了沙枣幼苗的叶绿素含量($P<0.05$) (图 2)。

2.3 盐旱共胁迫对沙枣幼苗光合参数的影响

轻度干旱除了降低了沙枣叶片净光合速率和气孔导度外,对沙枣的胞间 CO_2 浓度和蒸腾速率没有影响($P>0.05$),但是重度干旱却明显降低了除胞间 CO_2 浓度外的各光合参数($P<0.05$)。除了净光合速率(降低)和胞间 CO_2 浓度(升高)外,100 mmol/L NaCl 对沙枣的各光合参数没有影响($P>0.05$)。和 100 mmol/L NaCl

处理条件下的各项光合参数相比,除净光合速率以及气孔导度外,轻度干旱和 100 mmol/L NaCl 共胁迫对沙枣的光合参数没有显著影响 ($P>0.05$),但是重度干旱和 100 mmol/L NaCl 共胁迫却明显降低了沙枣的净光合速率、气孔导度、蒸腾速率且明显增加了胞间 CO_2 浓度 ($P<0.05$) (图 3)。

2.4 盐旱共胁迫对沙枣幼苗荧光参数的影响

轻度干旱或 100 mmol/L NaCl 降低了沙枣的最大光化学效率和光化学猝灭系数外,但对沙枣的实际光化学效率没有影响 ($P>0.05$),但是重度干旱却明显降低了沙枣的各荧光参数 ($P<0.05$)。和 100 mmol/L NaCl 处理条件下的各荧光参数相比,轻度干旱和 100 mmol/L NaCl 共胁迫对沙枣的荧光参数没有显著影响 ($P>0.05$),但是重度干旱和 100 mmol/L NaCl 共胁迫却明显降低了沙枣的荧光参数 ($P<0.05$) (图 4)。

2.5 盐旱共胁迫对沙枣幼苗离子含量的影响

轻度干旱和重度干旱均显著降低了沙枣的地上和地下的 K^+ 含量,显著增加了沙枣地上、地下的 Na^+ 含量 ($P<0.05$)。100 mmol/L NaCl 极显著降低了沙枣的地

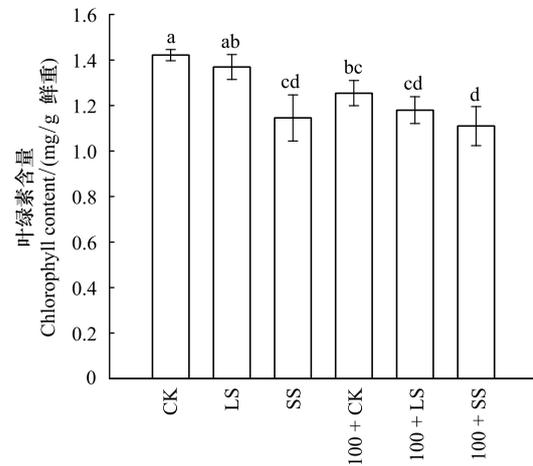


图 2 盐旱共胁迫对沙枣幼苗叶绿素含量的影响

Fig.2 The effects of salt and drought co-stress on the chlorophyll content of *E. angustifolia* seedlings

图中数据为平均数 \pm 标准差 ($n=5$);不同小写字母表示不同处理之间差异显著 ($P<0.05$)

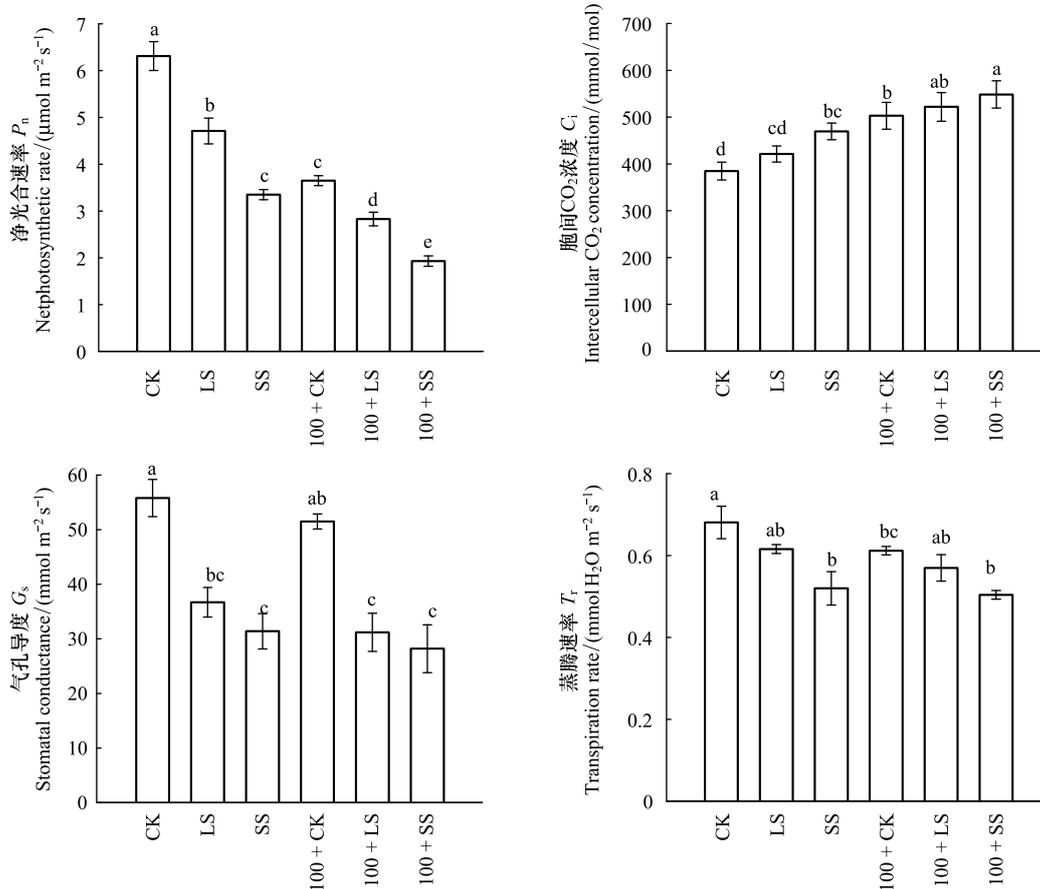


图 3 盐旱共胁迫对沙枣幼苗光合参数的影响

Fig.3 The effects of salt and drought co-stress on photosynthesis of *E. angustifolia* seedlings

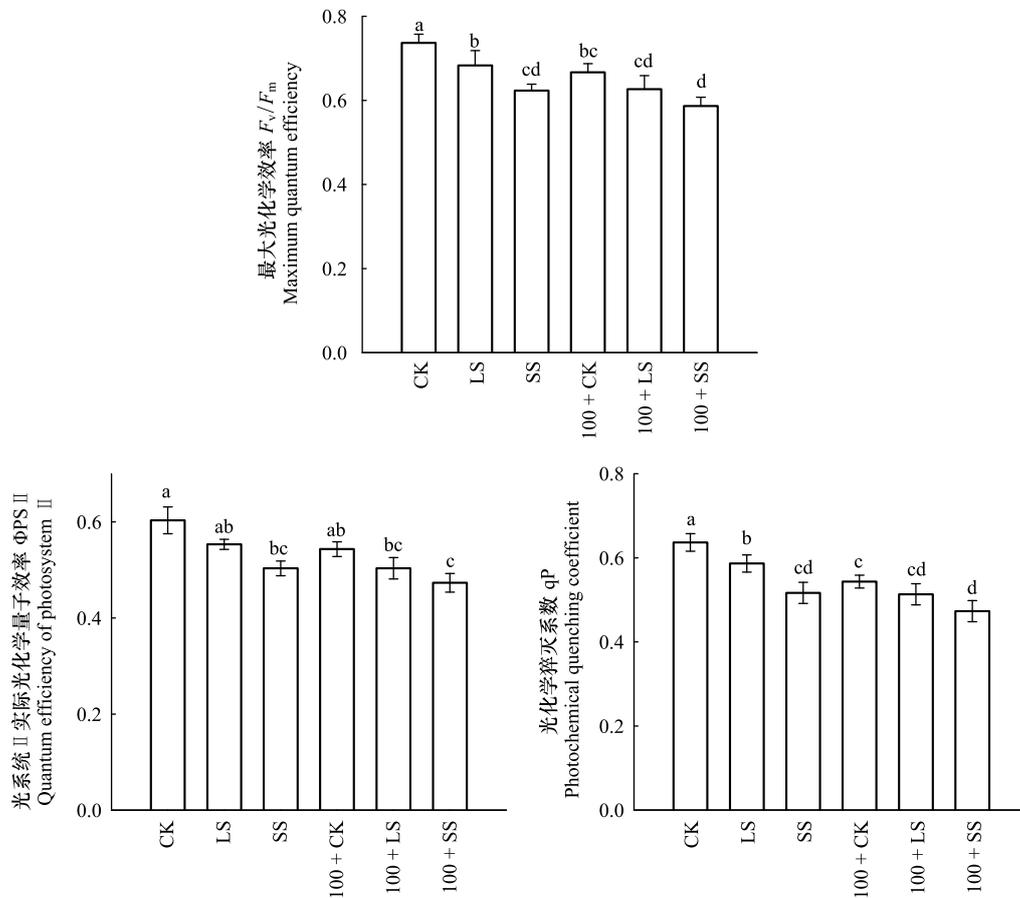


图4 盐旱共胁迫对沙枣幼苗荧光参数的影响

Fig.4 The effects of salt and drought co-stress on fluorescence parameters of *E. angustifolia* seedlings

上和地下的 K^+ 含量,极显著增加了沙枣地上、地下的 Na^+ 含量 ($P < 0.01$)。和 100 mmol/L NaCl 处理条件下的沙枣离子含量相比,轻度干旱和 100 mmol/L NaCl 共胁迫以及重度干旱和 100 mmol/L NaCl 共胁迫都显著降低了地上和地下的 K^+ 含量,显著增加了沙枣地上、地下的 Na^+ 含量 ($P < 0.05$) (图 5)。

2.6 盐旱共胁迫对沙枣幼苗有机物质及次生代谢产物的影响

轻度干旱除了对沙枣叶片中可溶性糖、脯氨酸和总酚含量没有影响外 ($P > 0.05$),显著提高了沙枣幼苗其他有机物质和次生代谢产物含量 ($P < 0.05$),但是重度干旱显著提高了各指标含量 ($P < 0.05$)。除脯氨酸含量外,100 mmol/L NaCl 明显提高了沙枣幼苗的有机物质及次生代谢产物含量 ($P < 0.05$)。和 100 mmol/L NaCl 处理条件下的各项指标相比,轻度干旱和 100 mmol/L NaCl 共胁迫以及重度干旱和 100 mmol/L NaCl 共胁迫都显著增加了各指标含量 ($P < 0.05$) (图 6)。

2.7 盐旱共胁迫对复水后沙枣幼苗生物量的影响

复水一周后,轻度干旱除了降低了沙枣幼苗的地下鲜重和干重外,对沙枣的地上鲜重、地上鲜重增加百分比、地上干重、地上干重增加百分比、地下鲜重增加百分比、地下干重增加百分比没有影响 ($P > 0.05$),但是重度干旱却显著降低了复水后沙枣的生物量指标 ($P < 0.05$)。100 mmol/L NaCl 显著降低了复水后沙枣幼苗的各生物量指标 ($P < 0.05$)。和 100 mmol/L NaCl 处理条件下的各项生物量指标相比,轻度干旱和 100 mmol/L NaCl 共胁迫除地上鲜重以及地上鲜重增加百分比外的其他生物量指标没有影响 ($P > 0.05$),但是重度干旱和 100 mmol/L NaCl 共胁迫却明显降低了复水后沙枣的生长 ($P < 0.05$) (表 2)。

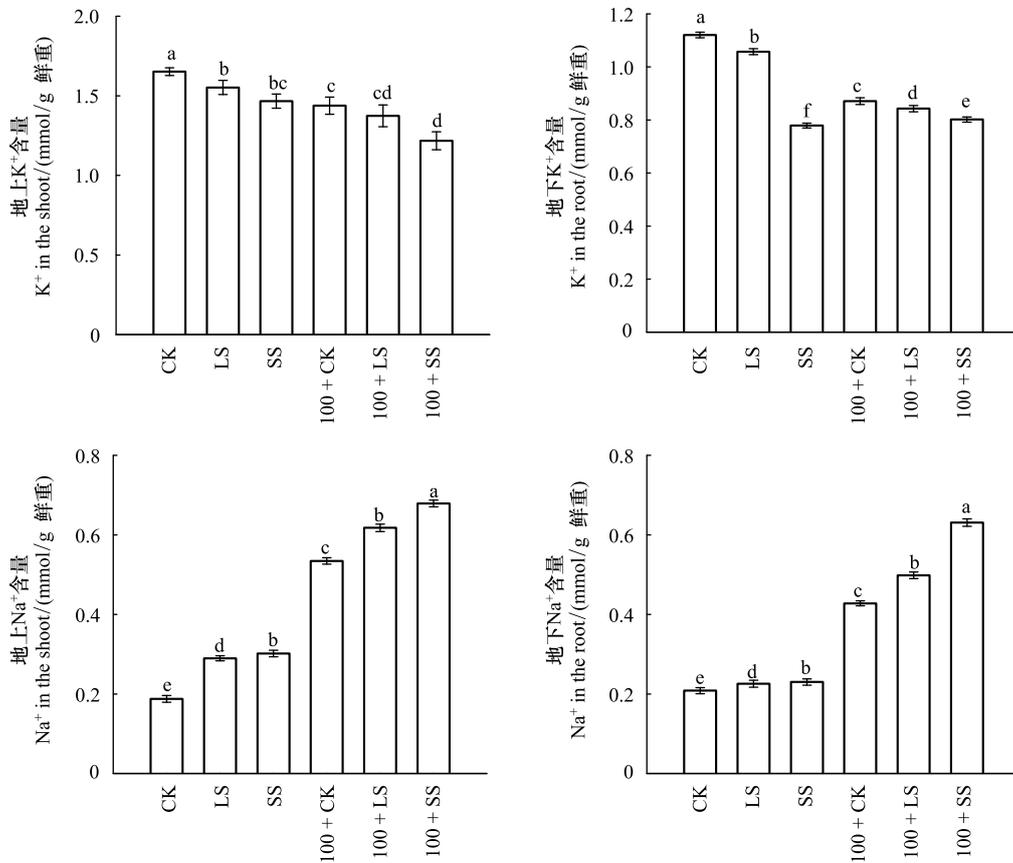


图5 盐旱共胁迫对沙枣幼苗离子含量的影响

Fig.5 The effects of salt and drought co-stress on ionic content of *E. angustifolia* seedlings

表2 复水一周后盐旱共胁迫对沙枣生物量的影响

Table 2 The effects of salt and drought co-stress on biomass of *E. angustifolia* seedlings after rhydration for one week

参量 Parameters	处理 Treatment					
	CK	LS	SS	100+CK	100+LS	100+SS
地上鲜重 Shoot fresh weight	1.44±0.05a	1.43±0.04a	1.07±0.06b	1.09±0.05b	0.85±0.06c	0.68±0.05d
地上鲜重增加百分比 Shoot fresh weight increase percentage	0.26±0.01a	0.26±0.01a	0.16±0.01d	0.24±0.01b	0.22±0.01bc	0.15±0.01d
地上干重 Shoot dry weight	0.30±0.02a	0.31±0.02a	0.27±0.01b	0.25±0.01bc	0.24±0.02c	0.19±0.01d
地上干重增加百分比 Shoot dry weight increase percentage	0.28±0.01a	0.28±0.01a	0.17±0.01c	0.26±0.01b	0.25±0.01b	0.17±0.01c
地下鲜重 Root fresh weight	0.98±0.04a	0.87±0.05b	0.64±0.04c	0.51±0.02d	0.48±0.04d	0.37±0.03e
地下鲜重增加百分比 Root fresh weight increase percentage	0.35±0.01a	0.34±0.01a	0.23±0.01c	0.30±0.01b	0.29±0.01b	0.23±0.03c
地下干重 Root dry weight	0.15±0.01a	0.14±0.01b	0.09±0.01cd	0.10±0.01c	0.09±0.01cd	0.08±0.01d
地下干重增加百分比 Root dry weight increase percentage	0.29±0.01a	0.29±0.01a	0.15±0.01cd	0.24±0.01b	0.22±0.01bc	0.17±0.01c

表中数据为平均数±标准差 ($n=5$); 不同小写字母表示不同处理之间差异显著 ($P<0.05$)

3 讨论

生物量是植物遭遇胁迫的综合反应,干旱胁迫和盐分胁迫抑制植物的生长,且胁迫程度越高抑制程度越明显^[19]。对于本研究的沙枣幼苗干旱胁迫及盐胁迫均可抑制沙枣幼苗的生长、降低植物组织含水量和生物量,尤其是重度干旱更为明显。干旱或盐处理降低沙枣幼苗的根冠比,沙枣在轻度干旱和盐共胁迫下表现出

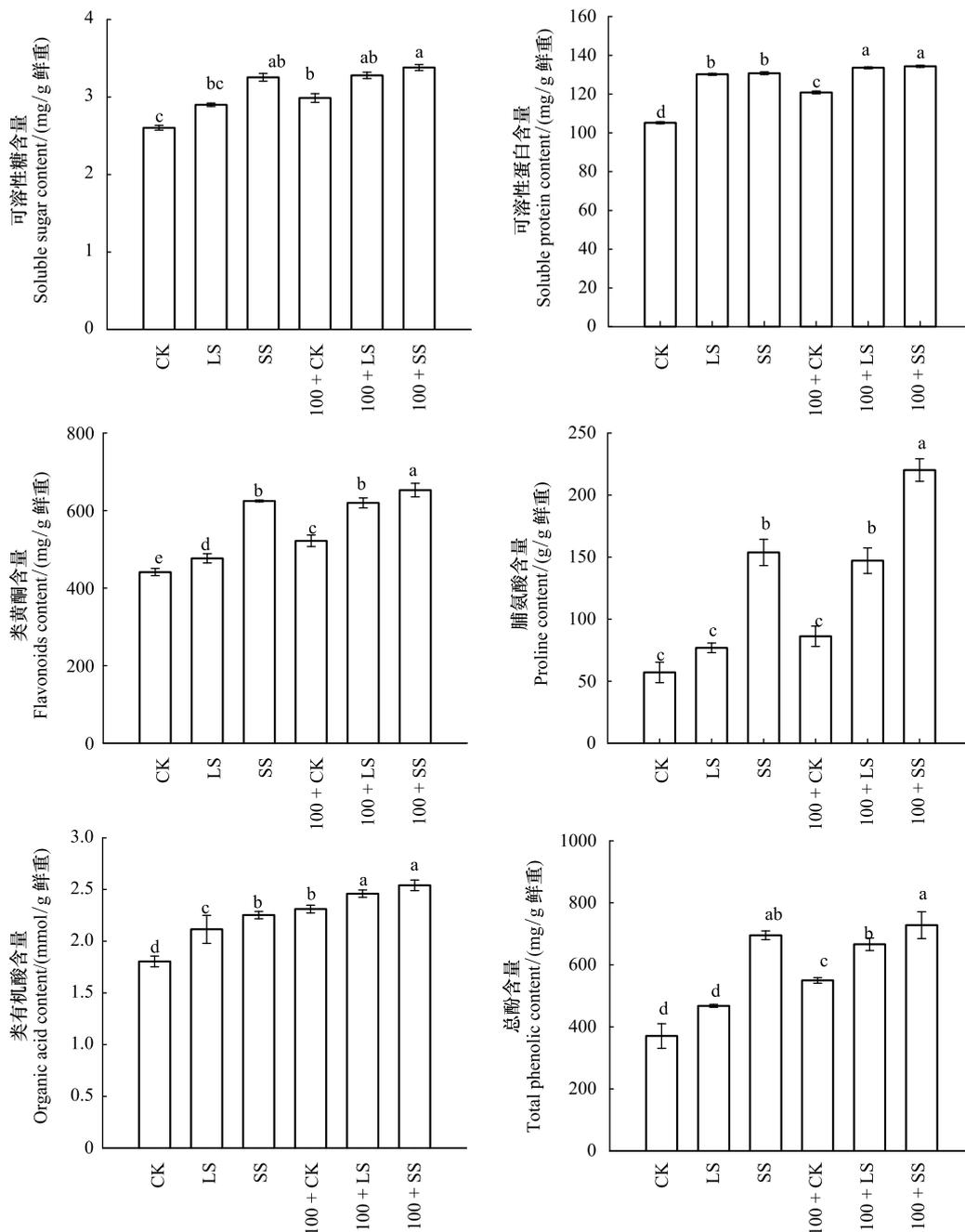


图6 盐旱共胁迫对沙枣有机物质及次生代谢产物含量的影响

Fig.6 The effects of salt and drought co-stress on organic matter content and secondary metabolites content of *E. angustifolia* seedlings

一定的交叉适应性。

处于逆境条件下的植物,为减少蒸腾作用关闭气孔,同时也阻碍了 CO_2 进入叶片,影响了 CO_2 参与羧化作用,降低了植物的净光合速率^[20-21]; CO_2 同化量降低、吸收的过剩光能会引起光抑制,严重时还会破坏光合结构,从而使植物光合作用下降^[22]。本研究发现:随着干旱程度增加,除胞间 CO_2 浓度外,沙枣幼苗的其他光合参数和各荧光参数均呈现降低的趋势;盐旱共胁迫条件下,各光合参数及荧光参数除胞间 CO_2 浓度外其他参数也呈现降低趋势。从这些结果可以看出轻度干旱和盐共胁迫下,沙枣幼苗在一定程度上通过减少光捕获、热耗散和酶活性调节稳定光合机构功能,阻止光合速率的下降;重度盐旱胁迫下光系统II和抗氧化酶系统损伤,光合速率下降更加显著,这种非气孔限制因素与已有的研究相一致^[23]。

渗透调节物质在植物适应盐旱胁迫环境中也发挥着重要作用^[24]。在盐、旱等逆境条件下,植物为了保持水分以适应盐旱胁迫环境,常常通过生理代谢活动增加无机离子以及渗透调节物质的方式来提高细胞液浓度、降低渗透势,从而维持正常的细胞膨压进而使植物体内与之相关的生理活动正常进行,提高植物的抗逆适应性^[25-26]。本研究也表明沙枣幼苗在干旱、盐分以及干旱和盐分共胁迫下,通过积累无机离子(主要是 Na^+)和有机溶质来保持较低的渗透势,以增加保水能力。这与沙棘植物在盐碱胁迫下的结果一致^[27]。对于沙枣植物,积累的有机溶质主要是脯氨酸,脯氨酸作为一种重要的渗透调节物质,在植物的耐逆过程中发挥重要的作用,大量研究表明脯氨酸的增加明显提高了植物的耐逆性^[28-29]。逆境条件下,植物除了积累渗透调节物质外,植物还会积累次生代谢产物以抵御逆境,有利于植物体适应逆境环境^[30]。本研究的沙枣幼苗在逆境条件下通过大量积累类黄酮和总酚含量来提高沙枣幼苗的耐逆性。这与蔡娜等^[31]、Wang 等^[32]的研究结果一致。

总之,盐分和干旱处理明显抑制了沙枣幼苗的生长,轻度干旱和盐分共胁迫条件下,沙枣幼苗表现出一定的交叉适应现象。沙枣幼苗通过降低生长、积累渗透调节物质、积累次生代谢产物来抵抗逆境。

参考文献 (References):

- [1] Jia J, Huang C, Bai J H, Zhang G L, Zhao Q Q, Wen X J. Effects of drought and salt stresses on growth characteristics of euhalophyte *Suaeda salsa* in coastal wetlands. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2018, 103: 68-74.
- [2] Lin J, Li J P, Yuan F, Yang Z, Wang B S, Chen M. Transcriptome profiling of genes involved in photosynthesis in *Elaeagnus angustifolia* L. under salt stress. *Photosynthetica*, 2018, 56(4): 998-1009.
- [3] 郭丽君, 王玉涛. 沙枣种质资源特性及利用价值. *中国野生植物资源*, 2008, 27(5): 32-34.
- [4] 管文轲, 徐娜. 沙枣资源利用研究与开发现状述评. *安徽农学通报*, 2012, 18(19): 119-120, 213-213.
- [5] Qi Y, Li J P, Chen C X, Li L X, Zheng X L, Liu J, Zhu T T, Pang C H, Wang B S, Chen M. Adaptive growth response of exotic *Elaeagnus angustifolia* L. to indigenous saline soil and its beneficial effects on the soil system in the Yellow River Delta, China. *Trees*, 2018, doi: 10.1007/s00468-018-1746-4.
- [6] 朱金方, 夏江宝, 陆兆华, 刘京涛, 孙景宽. 盐旱交叉胁迫对怪柳幼苗生长及生理生化特性的影响. *西北植物学报*, 2012, 32(1): 124-130.
- [7] 翁亚伟, 张磊, 张姗, 田中伟, 靳雪莹, 李梦雅, 余钟毓, 姜东, 戴廷波. 盐旱复合胁迫对小麦幼苗生长和水分吸收的影响. *生态学报*, 2017, 37(7): 2244-2252.
- [8] 华智锐, 于浩世, 王新军. 盐旱交叉胁迫对商麦 5226 幼苗光合指标的影响. *云南师范大学学报: 自然科学版*, 2017, 37(2): 52-57.
- [9] 杨升, 刘涛, 张华新, 李焕勇, 张丽. 盐胁迫下沙枣幼苗的生长表现和生理特性. *福建林学院学报*, 2014, 34(1): 64-70.
- [10] 高奔, 宋杰, 刘金萍, 隋娜, 范海, 王宝山. 盐胁迫对不同生境盐地碱蓬光合及离子积累的影响. *植物生态学报*, 2010, 34(6): 671-677.
- [11] 李艳, 赵小明, 夏秀英, 栾雨时, 杜昱光, 李凤兰. 壳寡糖对干旱胁迫下油菜光合参数的影响. *作物学报*, 2008, 34(2): 326-329.
- [12] 冯伟, 李晓, 王永华, 王晨阳, 郭天财. 小麦叶绿素荧光参数叶位差异及其与植株氮含量的关系. *作物学报*, 2012, 38(4): 657-664.
- [13] 王素平, 郭世荣, 胡晓辉, 贾永霞, 焦彦生. NaCl 胁迫对黄瓜幼苗体内 K^+ 、 Na^+ 和 Cl^- 分布的影响. *生态学杂志*, 2007, 26(3): 348-354.
- [14] 职明星, 李秀菊. 脯氨酸测定方法的改进. *河南科技学院学报: 自然科学版*, 2005, 33(4): 10-12.
- [15] 刘海英, 王华华, 崔长海, 王曼, 郭净净, 文昭普, 李安琪. 可溶性糖含量测定(蒽酮法)实验的改进. *实验室科学*, 2013, 16(2): 19-20.
- [16] 梅进, 丁文平, 熊金娟, 庄坤. Folin-Ciocalteu 比色法测定大麦糟中总酚条件的优化. *食品与机械*, 2016, 32(2): 51-54.
- [17] 郭亚健, 范莉, 王晓强, 张兰珍. 关于 NaNO_2 - $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ - NaOH 比色法测定总黄酮方法的探讨. *药物分析杂志*, 2002, 22(2): 97-99.
- [18] 张秋萍, 吴霞红, 郑剑恒, 孙孟炜. 生物样本中丙二醛测定方法的研究进展. *理化检验-化学分册*, 2016, 52(8): 979-985.
- [19] 贺少轩, 梁宗锁, 蔚丽珍, 周白云. 土壤干旱对 2 个种源野生酸枣幼苗生长和生理特性的影响. *西北植物学报*, 2009, 29(7): 1387-1393.
- [20] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis. *Annual Review of Plant Physiology*, 1982, 33: 317-345.
- [21] 张守仁. 叶绿素荧光动力学参数的意义及讨论. *植物学通报*, 1999, 16(4): 444-448.
- [22] 齐学礼, 胡琳, 董海滨, 张磊, 王根松, 高崇, 许为钢. 强光高温同时作用下不同小麦品种的光合特性. *作物学报*, 2008, 34(12): 2196-2201.
- [23] 张仁和, 郑友军, 马国胜, 张兴华, 路海东, 史俊通, 薛吉全. 干旱胁迫对玉米苗期叶片光合作用和保护酶的影响. *生态学报*, 2011, 31(5): 1303-1311.
- [24] 荣少英, 郭蜀光, 张彤. 干旱胁迫对甜高粱幼苗渗透调节物质的影响. *河南农业科学*, 2011, 40(4): 56-59.

- [25] 刘艳, 陈贵林, 蔡贵芳, 张中霞, 岳鑫. 干旱胁迫对甘草幼苗生长和渗透调节物质含量的影响[J]. 西北植物学报, 2011, 31(11): 2259-2264.
- [26] 刘建新, 王金成, 王瑞娟, 贾海燕. 早盐交叉胁迫对燕麦幼苗生长和渗透调节物质的影响. 水土保持学报, 2012, 26(3):244-248.
- [27] Yang C W, Shi D C, Wang D L. Comparative effects of salt and alkali stresses on growth, osmotic adjustment and ionic balance of an alkali-resistant halophyte *Suaeda glauca* (Bge.). *Plant Growth Regulation*, 2008, 56(2): 179-190.
- [28] 史玉炜, 王燕凌, 李文兵, 高述民, 李霞. 水分胁迫对刚毛怪柳可溶性蛋白、可溶性糖和脯氨酸含量变化的影响. 新疆农业大学学报, 2007, 30(2): 5-8.
- [29] Sperdoui I, Moustakas M. Interaction of proline, sugars, and anthocyanins during photosynthetic acclimation of *Arabidopsis thaliana* to drought stress. *Journal of Plant Physiology*, 2012, 169(6): 577-585.
- [30] Foyer C H, Lelandais M, Kunert K J. Photooxidative stress in plants. *Physiologia Plantarum*, 1994, 92(4): 696-717.
- [31] 蔡娜, 淡荣, 陈鹏. 水分胁迫对苦荞幼苗黄酮类物质含量的影响. 西北农业学报, 2008, 17(4):91-93.
- [32] Wang D H, Du F, Liu H Y, Liang Z S. Drought stress increases iridoid glycosides biosynthesis in the roots of *Scrophularia ningpoensis* seedlings. *Journal of Medicinal Plants Research*, 2010, 4(24): 2691-2699.