



李乃伟,徐裕玲,陈红,等.胡颓子属杂交后代种子特征及耐盐性评价[J].江西农业大学学报,2026,48(1):83–92.
LI N W,XU Y L,CHEN H,et al.Seed characteristics and salt tolerance evaluation in hybrid offspring of genus *Elaeagnus*[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2026,48(1):83–92.

胡颓子属杂交后代种子特征及耐盐性评价

李乃伟,徐裕玲,陈红,吴宝成,王忠,庄维兵,王涛*

(江苏省中国科学院植物研究所(南京中山植物园)/江苏省植物资源保护与利用重点实验室,江苏 南京 210014)

摘要:【目的】胡颓子属植物的耐盐特性在近年来受到了广泛关注。【方法】以栽植于江苏盐城大丰盐碱地的胡颓子(*Elaeagnus pungens*)和埃比速生胡颓子(*Elaeagnus×ebbingei*)的杂交后代为研究对象,探究其种子特征以及对盐胁迫的响应。【结果】(1)杂交后代的种子为黄褐色、椭圆球状具肋,氨基酸总量达1.81%,矿质元素含量丰富,以K含量最高。种子出芽率与播种季节关系密切,5月份播种的出芽率可达80.3%。(2)2018年至2020年收集的果肉可食率为71.89%~77.34%。除2018年外,果实的糖酸比均在5以上,且不同矿质元素的含量均未超过国家对食品中重金属的限量卫生标准。(3)盐胁迫试验显示,随着NaCl含量的增加,种子中渗透调节物质的含量以及抗氧化酶系统的活性呈现出不同的变化。Na⁺、K⁺含量在叶片和果实组织中也不同,新叶和种子的K⁺/Na⁺比值高于成熟叶和果肉。【结论】杂交后代通过不同渗透调节物质和抗氧化酶系统的协同作用以及对不同元素的选择性吸收和运输维持种子在盐胁迫环境下的功能和品质。

关键词:胡颓子属;杂交后代;种子特征;耐盐性

中图分类号:S728.5 文献标志码:A

文章编号:1000-2286(2026)01-0083-10

CSTR:32399.14.aauj.2026008

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Seed characteristics and salt tolerance evaluation in hybrid offspring of genus *Elaeagnus*

LI Naiwei, XU Yuling, CHEN Hong, WU Baocheng, WANG Zhong,
ZHUANG Weibing, WANG Tao*

(Jiangsu Key Laboratory for Conservation and Utilization of Plant Resources, Institute of Botany, Jiangsu Province and Chinese Academy of Sciences(Nanjing Botanical Garden Mem. Sun Yat-Sen), Nanjing 210014, China)

Abstract: [Objective] This study aims to explore the characteristics of salt tolerance of genus *Elaeagnus* plants. [Method] In this study, the hybrid offspring of *E. pungens* and *Elaeagnus×ebbingei* planted in the saline-

收稿日期:2025-07-02 修回日期:2025-08-21 接受日期:2025-08-28

基金项目:江苏省林业科技创新与推广项目(LYKJ[2025]06)和江苏省海洋科技创新专项(HY2018-5)

Project supported by the Jiangsu Province Forestry Science and Technology Innovation and Promotion Project (LYKJ[2025]06) and the Jiangsu Province Marine Science and Technology Innovation Project (HY2018-5)

作者简介:李乃伟,高级实验师,硕士,orcid.org/0009-0004-6262-2646,linaiwei8828@163.com;*通信作者:王涛,助理研究员,博士,主要从事药赏植物育种和推广利用研究,orcid.org/0000-0003-2634-1519,johnwt1007@163.com。

©《江西农业大学学报》编辑部,开放获取CC BY-NC-ND协议

alkali land of Yancheng City, Jiangsu Province was collected to explore their seed characteristics and responses to salt stress. [Result] (1) The seeds are yellowish-brown, oval-shaped, and ribbed, with a total amino acid content of 1.81%. They are rich in minerals, especially potassium. The germination rate of seeds is closely related to the sowing season, which in May can reach 80.3%. (2) The edible rate of the pulp collected from 2018 to 2020 ranged from 71.89% to 77.34%. Except for 2018, the sugar-acid ratio of the fruits was all above 5, and none of the contents of mineral elements exceeded the national hygiene standards for the limits of heavy metals in food. (3) The gradient salt stress test showed that with the increase of NaCl concentration, the content of osmotic regulatory substances and the activity of the antioxidant enzyme system in seeds changed differently. The contents of Na^+ and K^+ contents in leaf and fruit tissues were also different. The K^+/Na^+ ratio in young leaves and seeds is higher than that in mature leaves and pulp. [Conclusion] These combined results indicated that the hybrid offspring maintains the function and quality of seeds under salt stress through the synergistic effect of different osmotic regulatory substances and antioxidant enzyme systems, as well as the selective absorption and transport of different elements.

Keywords: genus *Elaeagnus*; hybrid offspring; seed characteristics; salt tolerance

【研究意义】土壤盐碱化是世界上主要的生态环境问题之一。中国的盐碱化土地分布广、面积大、类型多^[1]。其中,江苏省沿海滩涂总面积已超过68.7万 hm^2 ,且每年以1 267 hm^2 的速度增长^[2]。随着人口增加和耕地减少,人们对盐碱地的开发利用的需求增加。然而,盐碱地较高的土壤含盐量严重制约着农林业的发展,最明显的变化就是植物遭受离子毒害、渗透胁迫和氧化损伤,以及植物生长受抑制,甚至导致植株死亡^[3-4]。选育优质的耐盐植物是解决江苏盐碱地植物营建的关键措施之一。【前人研究进展】植物会通过拒盐^[5]、泌盐^[6]、稀盐^[7],以及离子稳态与区隔化^[8-9]等多种机制,降低盐胁迫对植物形态、细胞内稳态、酶活性,以及离子运输、吸收和分配等过程产生的不利影响。值得注意的是,植株体内的 Na^+ 、 K^+ 浓度及 K^+/Na^+ 比值的变化是衡量其耐盐性的重要指标,维持高 K^+/Na^+ 比值更是多数耐盐植物的重要生长机制^[10]。然而,植物体不同部位对 Na^+ 的敏感程度不同,已有的研究多聚焦于植物的营养器官对盐胁迫的响应,鲜有研究报道盐胁迫对植物生殖器官的影响。

【本研究切入点】胡颓子科(Elaeagnaceae)胡颓子属(*Elaeagnus*)植物主要分布于亚洲、北美、东南欧和澳大利亚的温带和亚热带地区,是重要的观赏、药用和野生果树资源,也是土壤养护和改良的先锋树种^[11-12]。胡颓子(*E. pungens*)作为一种野生灌木,常见于我国华东地区(如江苏、浙江),果实较大,抗逆性弱^[13]。埃比速生胡颓子(*Elaeagnus × ebbingei*)为杂交园艺品种,具有独特的观赏特性,果实较小,但对盐胁迫具有较强的承受能力^[14]。亟须选育出能在盐碱困难立地种植且产优质果实的胡颓子属种质资源。【拟解决的关键问题】本研究拟以胡颓子和埃比速生胡颓子为亲本,通过人工杂交构建了杂交群体,栽植于江苏盐城大丰盐碱地进行耐盐区域试验。2018年起,杂交后代实生树开始稳定坐果。本研究测定从盐碱地收获的杂交后代果实的主要内含物质,评估种子的萌发特性和果肉的可食用性,并初步探究种子对盐胁迫的响应机制。研究结果为胡颓子属植物的抗盐碱育种和果实的开发利用提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

以胡颓子和埃比速生胡颓子为亲本的杂交后代实生树定植于江苏省盐城市大丰港盐土大地农业有限公司基地。在2018年至2020年期间,从植株中上部向阳处采集无虫害、果形整齐、发育完好的成熟果实,用蒸馏水清洗并沥干后立即用于试验。此外,为探究植株不同部位对盐胁迫的响应差异,将一批实生树栽植于统一规格的塑料花盆中,置于南京中山植物园设施大棚内。待盆栽苗生长约100 d之后,采用随机区组设计,共设置4个NaCl处理组,分别为0.0%、0.2%、0.4%和0.6%(土壤干重的百分含量,依次记为CK、T1、T2和T3),选择长势一致、无病虫害的健康苗木,每个处理由10株个体组成,开展盐胁迫研

究。为了避免盐激反应,盐溶液浇灌分3次进行,每次间隔2 d,含量逐渐增加,直至达到预设含量。视土壤干湿程度每隔3~5 d浇水。在处理后的第10天采样,测定植株叶片(分为新叶和成熟叶)、果实(分为果肉和种子)的 Na^+ 、 K^+ 含量以及种子的生理生化指标。

1.2 形态指标测定

随机选取收集的成熟果实,先目测记录其果形、果色等指标,然后将果肉与种子分离,并分别称量,计算可食率。果肉用于基本成分测定。种子测量长度和直径后,取部分用于基本成分测定,剩余进行种子萌发试验。

1.3 种子萌发试验

种子萌发试验于南京中山植物园设施大棚内进行。设置苗床,下垫约12 cm厚的河沙,铺平,上面再放置100孔穴盘,压实。基质由2份草木灰+4份园土+4份堆肥混合而成,摊开暴晒2 d消毒,然后装盘备用。分别于5月、6月和7月中旬播种,每穴均播种1粒种子。播后定期喷水,保持苗床湿润,30 d后统计出苗率。

1.4 营养成分和氨基酸组分的测定

参照GB/T 15672—2009的方法测定总糖含量;参照GB/T 12456—2008的方法测定总酸含量;参照GB 5009.124—2016的方法测定氨基酸含量。每份样品重复测定3次,结果取平均值。

1.5 矿质元素含量测定

参照GB 5009.93—2017的方法测定硒元素含量;参照GB 5009.123—2014的方法测定铬元素含量;参照GB 5009.13—2017的方法测定铜元素含量;参照GB 5009.242—2017的方法测定锰元素含量;参照GB 5009.91—2017的方法测定钾元素与钠元素含量;参照GB 5009.92—2016的方法测定钙元素含量;参照GB 5009.14—2017的方法测定锌元素含量。每份样品重复测定3次,结果取平均值。

1.6 Na^+ 、 K^+ 含量测定

选取不同盐胁迫处理的盆栽苗样品,40 °C烘干后分别称取0.02 g放入20 mL玻璃试管中,加入10 mL 100 mmol/L冰乙酸,密封试管,90 °C恒温水浴2 h,自然冷却后过滤2次,稀释适当倍数后,量取30 μL 待测液上机,用火焰分光光度计(2655-00,美国)测定溶液中的 Na^+ 、 K^+ 浓度。

1.7 生理生化指标的测定

选取不同盐胁迫处理的新鲜种子,分别称取0.2 g样品,加入5 mL 0.1 mmol/L pH7.0 PBS缓冲液,冰浴研磨成匀浆状,置于离心机中,在4 °C、8 000 r/min的条件下离心15 min,吸取上清液用于不同生理生化指标的测定。其中,可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝法进行测定^[15]。超氧化物歧化酶活性采用氮蓝四唑法进行测定^[16]。过氧化物酶活性采用愈创木酚法进行测定^[16]。此外,可溶性糖含量采用蒽酮硫酸法进行测定^[17]。称取0.1 g鲜样,加入10 mL蒸馏水,在沸水浴中提取30 min(共提取2次),收集提取液稀释并定容至25 mL。取0.5 mL提取液与1.5 mL蒸馏水和5 mL蒽酮试剂混合,充分振荡后置于沸水浴中10 min,冷却后于630 nm处测定吸光度。

1.8 数据处理

采用Excel 2019软件对试验数据进行统计和处理分析。采用SPSS 25.0软件进行单因素方差分析(ANOVA)并通过Duncan's检验进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 种子主要特征及发芽率

胡颓子和埃比速生胡颓子的杂交后代种子为黄褐色,椭圆形,两端尖锐中部饱满隆起,其上均匀分布有凸起的棱条,棱条上具白色丝状绵毛。种子长度为13.06 mm,宽度为4.04 mm,百粒质量为8.17 g,含水量为36.72%。发芽率试验结果显示,5月份播种的出芽率达80.3%;随着时间的延长,出芽率大幅下降,6月和7月的出芽率仅分别为20.59%和5.71%(表1)。

表 1 种子特征参数
Tab.1 Seed characteristic parameters

种子大小/mm Seed size		种子质量/g Seed quality		出芽率/% Germination rate		
长度 Length	宽度 Width	百粒质量 Hundred-grain weight	含水量/% Water content	5 月 May	6 月 June	7 月 July
13.06±1.28	4.04±0.25	8.17	36.72	80.3±6.17	20.59±5.06	5.71±4.18

2.2 种子矿质元素及含量分析

从常量元素来看,杂交后代种子中 K 元素含量最高,为 2 980 mg/kg,Na 元素和 Ca 元素含量低于 K 元素含量,分别为 422 mg/kg 和 303 mg/kg。从微量元素来看,Cu 元素和 Cr 元素的含量都为 1.10 mg/kg。本研究未在杂交后代种子中检测出 Se 元素、Mn 元素和 Zn 元素(表 2)。

表 2 种子矿质元素含量
Tab.2 The content of mineral elements in seeds mg/kg

矿质元素种类 Mineral element	含量 Content	矿质元素种类 Mineral element	含量 Content
K*	2 980.00	Cr	1.10
Na*	422.00	Mn	—
Ca*	303.00	Zn	—
Cu	1.10	Se	—

—为未检测出;*为常量元素。
— represents undetected;* represents major elements.

2.3 种子氨基酸组分及含量分析

从必需氨基酸来看,杂交后代种子中 Lys 含量最高,为 0.12%;Thr 含量仅次于 Lys,为 0.08%;Met 含量最低,为 0.02%。从非必需氨基酸来看,Asp 的含量最高,为 0.57%;Ser、Glu 及 Pro 的含量分别为 0.10%、0.20% 和 0.16%。此外,总氨基酸含量为 1.81%,总必需氨基酸含量占总氨基酸含量的 23.76%,总必需氨基酸含量与总非必需氨基酸含量的比值为 0.311 6(表 3)。

表 3 种子氨基酸含量表
Tab.3 The amino acid content in seeds

氨基酸种类 Amino acids	含量/% Content	氨基酸种类 Amino acids	含量/% Content
Asp	0.57	Ile*	0.05
Thr*	0.08	Tyr	0.09
Ser	0.10	Leu*	0.05
Glu	0.20	Phe*	0.05
Gly	0.07	Lys*	0.12
Ala	0.09	His	0.05
Val*	0.06	Arg	0.06
Met*	0.02	Pro	0.16

*为必需氨基酸。
*represents essential amino acids.

2.4 果肉特征及风味分析

杂交后代的果实为矩圆形的小粒果型,成熟后果肉鲜红色,果皮因表面具银白色金属光泽而显淡红色,并有大量褐色小腺点。2018 年至 2020 年收集的果肉可食率为 71.89%~77.34%,其变异系数为 9.24%。果肉中总糖的含量范围为 3.00%~8.30%,其变异系数为 51.87%;总酸的含量范围为 7.62~30.17 g/kg,其变异系数为 51.87%,糖酸比的范围为 0.99~9.97(表 4)。

表 4 果肉特征参数
Tab.4 The pulp characteristic parameters

年份 Year	可食率/% Edible rate	总糖/% Total sugar	总酸/(g·kg ⁻¹) Total acid	糖酸比 Sugar-acid ratio
2018	73.36	3.00	30.17	0.99
2019	71.89	7.60	7.62	9.97
2020	77.34	8.30	9.56	8.68

2.5 果肉矿质元素分析

从常量元素来看,杂交后代的果实中 K 元素平均含量最高,为 2 240 mg/kg,其变异系数为 4.97%;Na 元素和 Ca 元素的平均含量分别为 330.67 mg/kg 和 146.98 mg/kg,二者的变异系数分别为 42.17% 和 76.82%。从微量元素来看,Mn 元素平均含量最高,为 1.24 mg/kg,其变异系数为 19.56%,Cu 元素平均含量仅次于 Mn 元素,为 0.71 mg/kg,其变异系数为 29.27%。本研究中,因硒元素和 2020 年度的锌元素未检测出值,所以并未对其做变异系数分析(表 5)。

表 5 果肉矿质元素含量表
Tab.5 The content of mineral elements in pulp

矿质元素种类 Mineral element	2018/(mg·kg ⁻¹)	2019/(mg·kg ⁻¹)	2020/(mg·kg ⁻¹)	变异系数 Variation coefficient
K [*]	2 260.00	2 120.00	2 340.00	4.97%
Na [*]	198.00	318.00	476.00	42.17%
Ca [*]	361.00	110.00	103.00	76.82%
Cu	0.59	0.95	0.59	29.27%
Cr	0.32	0.05	0.17	76.38%
Mn	1.02	1.50	1.20	19.56%
Zn	3.40	4.60	—	—
Se	—	—	—	—

—为未检测出;*为常量元素。

— represents undetected;* represents major elements.

2.6 NaCl处理对盆栽苗不同组织离子含量影响

由表 6 可知,杂交后代的新叶、成熟叶、果肉和种子 4 个部位 CK 组的 K⁺ 含量为 269.41~468.75 mmol/kg; Na⁺ 含量为 18.38~24.75 mmol/kg。随着 NaCl 含量的增加,K⁺ 含量在不同叶片组织中均先升后降,而在果肉中则先降后升,在种子中也呈“降-升-降”的趋势;高盐胁迫处理下,K⁺ 积累量由高到低依次为果肉、新叶、种子和成熟叶。相比而言,不同组织中 Na⁺ 含量则不断上升,在 T3 组的成熟叶和果肉中,Na⁺ 积累量分别达到了 278.20 mmol/kg 和 266.25 mmol/kg,远高于同期新叶和种子中 Na⁺ 积累量。此外,随着盐胁迫的加深,K⁺/Na⁺ 比值在不同组织中出现不同程度的下降,但新叶和种子的 K⁺/Na⁺ 比值在不同盐含量处理下均高于成熟叶和果肉。

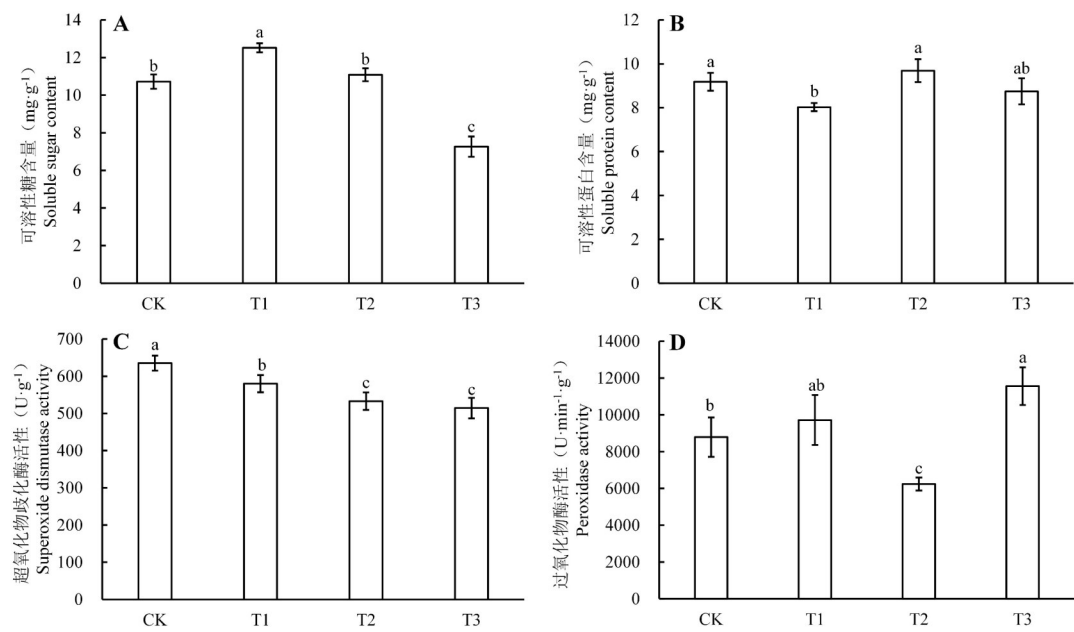
2.7 NaCl处理对盆栽苗种子生理生化指标的影响

随着 NaCl 处理含量的增加,杂交后代种子中可溶性糖含量呈先升高后降低的变化趋势。其中,T1 组的含量最高,较 CK 组上升了 16.81%,差异显著($P<0.05$);T3 组的含量显著低于其他处理组($P<0.05$) (图 1A)。可溶性蛋白含量在不同 NaCl 处理组中呈现波动的变化。除了 T1 组之外,其他处理组与 CK 组的差异均不显著($P>0.05$) (图 1B)。SOD 活性随 NaCl 处理含量的增加不断下降。T2 和 T3 组分别较 CK 组降低了 16.1% 和 19.0%,差异显著($P<0.05$) (图 1C)。此外,T2 组的 POD 活性显著低于其他处理组($P<0.05$),这与 T1 和 T3 组的变化相反,其中,T3 组较 CK 组上升了 31.56%,差异显著($P<0.05$) (图 1D)。

表 6 NaCl 处理下盆栽苗不同部位离子含量表
Tab.6 The ion content in different tissues of potted plants treated with NaCl

部位	处理	K ⁺ 含量	Na ⁺ 含量	K ⁺ /Na ⁺ 比
Tissue	Treatment	K ⁺ content	Na ⁺ content	K ⁺ /Na ⁺ ratio
新叶 Young leaves	CK	379.36±1.51 ^b	21.38±2.63 ^c	17.74±2.29 ^a
	T1	433.57±6.42 ^a	68.63±1.13 ^b	6.31±0.01 ^b
	T2	431.25±0.75 ^a	78.34±1.88 ^{ab}	5.50±0.44 ^b
	T3	393.38±22.88 ^b	80.96±11.18 ^a	4.86±0.19 ^b
成熟叶 Mature leaves	CK	269.41±24.16 ^b	24.75±2.25 ^c	10.89±1.99 ^a
	T1	308.32±26.18 ^a	109.52±20.23 ^b	2.82±0.79 ^b
	T2	196.70±20.45 ^c	255.48±40.23 ^a	0.77±0.20 ^c
	T3	187.88±2.63 ^c	278.20±6.06 ^a	0.68±0.02 ^c
果肉 Pulp	CK	468.75±13.5 ^a	19.50±6.75 ^c	24.04±10.44 ^a
	T1	403.88±1.13 ^b	164.63±1.13 ^b	2.45±0.01 ^b
	T2	370.12±11.63 ^c	261.00±0.00 ^a	1.42±0.03 ^b
	T3	462.00±24.75 ^a	266.25±11.25 ^a	1.74±0.14 ^b
种子 Seed	CK	321.75±1.50 ^a	18.38±3.38 ^d	17.51±3.43 ^a
	T1	314.25±4.50 ^a	73.75±0.10 ^c	4.26±0.06 ^b
	T2	335.71±10.72 ^a	105.38±4.88 ^b	3.19±0.14 ^b
	T3	281.25±20.25 ^b	108.38±7.88 ^a	2.60±0.25 ^b

不同浓度处理间差异用不同小写字母表示($P<0.05$)。
Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments ($P<0.05$).



不同浓度处理间差异用不同小写字母表示($P<0.05$)。
Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments ($P<0.05$).

图 1 NaCl 处理对杂交后代种子可溶性糖(A)、可溶性蛋白(B)、SOD(C)和 POD(D)的影响

Fig.1 Effects of NaCl treatment on soluble sugar(A), soluble protein(B), SOD(C), and POD(D) in hybrid offspring seeds

3 讨论

苏北平原位于黄海之滨,其沿海地区滩涂面积约占我国滩涂总面积的 25%^[2]。沿海农业种植在未受

人为改良土壤的条件下,只适合盐生植物或者耐盐植物生存^[18-19]。胡颓子和埃比速生胡颓子的杂交后代继承了父母本的优良性状,在大丰盐碱地试种栽植期间,生长情况良好,并能正常开花结果,具有成为当地耐盐先锋树种的潜质。此外,种子中富含氨基酸类物质,这为杂交后代适宜采用种子繁育提供了生物学基础^[20]。种子萌发试验显示收获的种子具有良好的萌发能力,进一步表明胡颓子和埃比速生胡颓子的杂交后代能在高盐环境下完成其生活史,具有较强的耐盐特性。

氨基酸不仅是植物的养分来源,也在植物生长发育过程中发挥重要的信号作用^[21]。Alfosea-Simón等^[22]研究结果显示施用天冬氨酸(Asp)、谷氨酸(Glu)、丙氨酸(Ala)等可以增加番茄植株的生长量。本研究结果显示,埃比速生胡颓子和胡颓子的杂交后代种子中天冬氨酸(Asp)含量高达0.57%;其次是谷氨酸(Glu),含量也达到0.20%。这为其种子能够正常萌发和生长提供了有利的证据。此外,氨基酸能够增强植物对不同逆境胁迫的响应和适应能力^[23]。例如,脯氨酸(Pro)具有很强的渗透保护功能,可以通过激发植物体内的应激机制来缓解逆境胁迫程度^[24]。有趣的是,杂交后代种子中Pro的含量仅次于Glu的含量,为0.16%。这一占比与其他胡颓子品种果实中的测定结果均不相同,这可能是杂交后代长期适应盐碱地生存的结果。

矿质元素是植物生长所必需的元素。本研究结果显示,胡颓子和埃比速生胡颓子的杂交后代种子中K元素含量最高,其次是Na元素。有研究表明,K和Na均与植物的耐盐性有关,可以促进盐土植物的生长^[25-26]。除此之外,在提供营养方面K和Na可以相互替代^[27]。从微量元素的角度看,杂交后代种子中积累了一定水平的Cu和Cr,这对其维持种内环境的新陈代谢十分必要^[28-29]。然而,种子中并未检测到Zn和Mn,这与其果肉中的检测结果并不一致。Zn和Mn多与植物的光合作用紧密相关,但在高盐胁迫下会加速活性氧的生成^[30-31]。种子作为繁殖器官,通过细胞壁阻碍等方式减少对重金属的吸收,以保证遗传物质的健康^[32]。值得注意的是,不同年份收集的果肉中矿质元素的含量也存在一定的差异,导致变异系数较大。推测这可能是植株不同组织及个体需求不同,以及所处土壤微环境不同所致。从可食用性的角度而言,杂交后代的果实总体上为高钾高钙低钠和富铜富锰富锌的保健水果,其中铜、铬、锌、硒等元素的含量均未超过国家对食品中重金属的限量卫生标准。此外,除2018年外,其甜度总体上高于酸度,可作为鲜果或加工成果汁、茶饮、酒等食用,这与其他胡颓子品种果实的研究结果基本一致^[33]。

盐胁迫会影响植物组织形态的构建,降低植株生长量,并表现出明显的盐害症状。离子稳态是植物获得耐盐能力的重要方法之一^[34]。盐胁迫下,Na⁺积累少而K⁺含量高的品种往往具有较高的耐盐性^[35]。因此,植物不同部位在盐胁迫下对Na⁺、K⁺的选择性吸收能力就显得尤为重要。本研究中,随着外界NaCl浓度的不断增大,杂交后代盆栽苗不同组织中Na⁺含量均逐渐升高,这与在狗牙根(*Cynodon dactylon*)^[36]、黑果枸杞(*Lycium ruthenicum*)^[37]等耐盐植物中的研究结果一致。值得注意的是,K⁺优先保证在新叶和果实等幼嫩部位,并在低盐胁迫处理的成熟叶中显著升高;反之,Na⁺被隔离在成熟叶和果肉中,从而避免在新叶和种子中的积累。这也促使不同部位的K⁺/Na⁺维持在相对稳定的范围内。由此可见,胡颓子和埃比速生胡颓子的杂交后代可能对K⁺具有高选择性吸收与运输能力,这或许是其维持较高耐盐性的重要原因。

植物积累的渗透调节物质,如可溶性糖和可溶性蛋白能够行使调节膨压、保护细胞、清除活性氧等功能^[38]。本研究中,杂交后代种子中的可溶性糖和可溶性蛋白含量在T1和T2组的变化趋势不同,暗示两者可能通过协同作用的方式响应不断升高的NaCl浓度。然而,T3组的可溶性糖和可溶性蛋白含量均低于CK组,说明种子受到的盐胁迫达到了一定限度,无法继续通过积累渗透调节物质来抵抗胁迫。也可能是可溶性糖和可溶性蛋白作为有机营养物质向地下部分转移,增强根系的耐受能力^[39]。此外,植物应对盐胁迫引起的氧化损伤还依赖于抗氧化酶系统的清除能力。其中,杂交后代种子中的SOD活性随着NaCl含量的升高而逐渐降低,表明其可能不是清除盐胁迫诱导的活性氧自由基的关键酶。相比而言,除T2组外,其余NaCl处理组的POD活性均高于CK组,这可能与POD在活性氧清除过程中的多重作用机制紧密相关^[40]。其相关机制仍待进一步探究。

4 结 论

对栽植于江苏盐城大丰盐碱地的胡颓子与埃比速生胡颓子杂交后代的种子和果实的物理性状和营养成分进行分析表明,杂交后代种子中富含氨基酸和矿质元素,为其萌发和生长提供保障;果实总体上为高钾高钙低钠和富铜富锰富锌的保健水果,甜度高于酸度,具有较高的食用价值和开发潜力。盐胁迫试验显示, K^+ 优先保证在新叶和种子等幼嫩部位, Na^+ 被隔离在成熟叶和果肉中,促使不同部位的 K^+/Na^+ 维持在相对稳定的范围内。这可能是杂交后代能够耐受盐碱地环境的重要机制。此外,种子自身还通过渗透调节物质的协同作用以及抗氧化酶系统对活性氧的清除能力来抵御盐胁迫带来的损伤。

参考文献 References:

- [1] 赵其国, 骆永明. 论我国土壤保护宏观战略[J]. 中国科学院院刊, 2015, 30(4): 452-458.
ZHAO Q G, LUO Y M. The macro strategy of soil protection in China[J]. Bulletin of Chinese academy of sciences, 2015, 30(4): 452-458.
- [2] 崔士友, 张蛟, 翟彩娇. 江苏沿海滩涂快速改良与高效利用研究进展[J]. 农学学报, 2017, 7(3): 42-46.
CUI S Y, ZHANG J, ZHAI C J. Fast amelioration and efficient utilization of coastal beach in Jiangsu Province[J]. Journal of agriculture, 2017, 7(3): 42-46.
- [3] JOSEPH B, JINI D. Salinity induced programmed cell death in plants: challenges and opportunities for salt-tolerant plants [J]. Journal of plant sciences, 2010, 5: 376-390.
- [4] SAFDAR H, AMIN A, SHAFIQ Y, et al. A review: impact of salinity on plant growth[J]. Nature and science, 2019, 17(1): 34-40.
- [5] CHEN M, YANG Z, LIU J, et al. Adaptation mechanism of salt excluders under saline conditions and its applications[J]. International journal of molecular sciences, 2018, 19: 3668.
- [6] YUAN F, LENG B Y, WANG B S. Progress in studying salt secretion from the salt glands in recretohalophytes: how do plants secrete salt?[J]. Frontiers in plant science, 2016, 7: 977.
- [7] SONG J, WANG B S. Using euhalophytes to understand salt tolerance and to develop saline agriculture: *Suaeda salsa* as a promising model[J]. Annals of botany, 2015, 115(3): 541-553.
- [8] 夏曾润, 王沛东, 贾文, 等. K^+ 对盐胁迫下罗布麻生长及离子吸收分配的效应[J]. 草业科学, 2014, 31(11): 2088-2094.
XIA Z R, WANG P D, JIA W, et al. Effect of K^+ on the growth, ion absorption and distribution of *Apocynum venetum* under salt stress[J]. Pratacultural science, 2014, 31(11): 2088-2094.
- [9] 唐晓倩, 李焕勇, 杨秀艳, 等. 短期 NaCl 胁迫对西伯利亚白刺幼苗 Na^+ , K^+ 分配和平衡的影响[J]. 林业科学研究, 2017, 30(6): 1022-1027.
TANG X Q, LI H Y, YANG X Y, et al. Effects of short-time salt stress on distribution and balance of Na^+ and K^+ in *Nitraria sibirica* Pall. seedlings[J]. Forest research, 2017, 30(6): 1022-1027.
- [10] GUO Q, MENG L, HAN J W, et al. SOS1 is a key systemic regulator of salt secretion and K^+/Na^+ homeostasis in the recretohalophyte *Karelinia caspia*[J]. Environmental and experimental botany, 2020, 177: 104098.
- [11] 庄红丹, 李凤秋, 罗瑞龙, 等. 胡颓子属植物化学成分及药理活性研究进展[J]. 林产化学与工业, 2021, 41(4): 135-146.
ZHUANG H D, LI F Q, LUO R L, et al. Research progress of chemical constituents and pharmacological activity of *Elaeagnus* plants[J]. Chemistry and industry of forest products, 2021, 41(4): 135-146.
- [12] PATEL S. Plant genus *Elaeagnus*: underutilized lycopene and linoleic acid reserve with permaculture potential[J]. Fruits, 2015, 70: 191-199.
- [13] SUN M, LIN Q. A revision of *Elaeagnus* L. (Elaeagnaceae) in the mainland of China[J]. Journal of systematics and evolution, 2010, 48(5): 356-390.
- [14] AKOUMIANAKI-IOANNIDOU A, PAPAGIANNI M, FASSEAS C. Propagation of *Elaeagnus* $\times$ *ebbingei* by cuttings and its evaluation as an ornamental for use in urban and sub-urban areas[J]. Acta horticulturae, 2010, 885: 27-32.

- [15] BRADFORD M M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding[J]. *Analytical biochemistry*, 1976, 72: 248-254.
- [16] WANG T, LI L L, QIN Y, et al. Effects of seasonal changes on chlorophyll fluorescence and physiological characteristics in the two *Taxus* species[J]. *Plants*, 2023, 12: 2636.
- [17] YEMM E W, WILLIS A J. The estimation of carbohydrates in plant extracts by anthrone[J]. *Biochemical journal*, 1954, 57(3): 508-514.
- [18] 赵宝泉, 王茂文, 丁海荣, 等. 江苏沿海滩涂盐生药用植物资源研究[J]. *中国野生植物资源*, 2015, 34(6): 44-50.
ZHAO B Q, WANG M W, DING H R, et al. Study on resources of medical halophytes in coastal area of Jiangsu Province[J]. *Chinese wild plant resources*, 2015, 34(6): 44-50.
- [19] 华建峰, 杜丽娟, 王菁丰, 等. 混合盐胁迫对江苏省沿海常用绿化树种生长的影响及耐盐性评价[J]. *植物资源与环境学报*, 2015, 24(3): 41-49.
HUA J F, DU L J, WANG X F, et al. Effect of mixed salt stress on growth of common greening species in coastal area of Jiangsu Province and evaluation of their salt tolerance[J]. *Journal of plant resources and environment*, 2015, 24(3): 41-49.
- [20] AMIR R, GALILI G, COHEN H. The metabolic roles of free amino acids during seed development[J]. *Plant science*, 2018, 275: 11-18.
- [21] KAWADE K, TABETA H, FERJANI A, et al. The roles of functional amino acids in plant growth and development[J]. *Plant and cell physiology*, 2023, 64(12): 1482-1493.
- [22] ALFOSEA-SIMÓN M, SIMÓN-GRAO S, ZAVALA-GONZALEZ E A, et al. Ionomics, metabolic and hormonal characterization of the phenological phases of different tomato genotypes using omics tools[J]. *Scientia horticulturae*, 2022, 293: 110697.
- [23] TROVATO M, FUNCK D, FORLANI G, et al. Editorial: amino acids in plants: regulation and functions in development and stress defense[J]. *Frontiers in plant science*, 2021, 12: 772810.
- [24] EL MOUKHTARI A, CABASSA-HOURTON C, FARISSI M, et al. How does proline treatment promote salt stress tolerance during crop plant development?[J]. *Frontiers in plant science*, 2020, 11: 1127.
- [25] ANSCHÜTZ U, BECKER D, SHABALA S. Going beyond nutrition: regulation of potassium homeostasis as a common denominator of plant adaptive responses to environment[J]. *Journal of plant physiology*, 2014, 171(9): 670-687.
- [26] FLOWERS T J, COLMER T D. Salinity tolerance in halophytes[J]. *New phytologist*, 2008, 179(4): 945-963.
- [27] 罗迎波, 黄胜琴, 林继育. Na 代替 K 对番茄、玉米幼苗生长及若干生理指标的影响[J]. *亚热带植物科学*, 2004, 33(1): 16-18.
LUO Y B, HUANG S Q, LIN J Y. Effects of Na or K on the growth and some physiological indexes of tomato and maize[J]. *Subtropical plant science*, 2004, 33(1): 16-18.
- [28] LÓPEZ-BUCIO J S, RAVELO-ORTEGA G, LÓPEZ-BUCIO J. Chromium in plant growth and development: toxicity, tolerance and hormesis[J]. *Environmental pollution*, 2022, 312: 120084.
- [29] LA TORRE A, IOVINO V, CARADONIA F. Copper in plant protection: current situation and prospects[J]. *Phytopathologia mediterranea*, 2018, 57(2): 201-236.
- [30] YRUELA I. Transition metals in plant photosynthesis[J]. *Metallomics*, 2013, 5(9): 1090-1109.
- [31] 谢换换, 叶志鸿. 湿地植物根形态结构和泌氧与盐和重金属吸收、积累、耐性关系的研究进展[J]. *生态学杂志*, 2021, 40(3): 864-875.
XIE H H, YE Z H. Research advances in the relationship between root morphological structure, radial oxygen loss and salt/heavy metal uptake, accumulation and tolerance of wetland plants[J]. *Chinese journal of ecology*, 2021, 40(3): 864-875.
- [32] 韩旭, 丁国华. 植物对重金属的耐受性和吸收·转运特性的研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2016, 44(4): 106-109.
HAN X, DING G H. Research advances of plant tolerance, absorption and transport characteristics of heavy metals[J]. *Journal of Anhui agricultural sciences*, 2016, 44(4): 106-109.
- [33] ABDALLA T E. Some wild *Elaeagnus* species: overview, description, biochemistry, and utilization[M]// MARIOD A. *Wild fruits: composition, nutritional value and products*. Cham: Springer, 2019: 507-521.
- [34] AMIN I, RASOOL S, MIR M A, et al. Ion homeostasis for salinity tolerance in plants: a molecular approach[J]. *Physiologia plantarum*, 2021, 171(4): 578-594.

- [35] MAAYHUIS F, AMTMANN A. K^+ Nutrition and Na^+ toxicity: the basic of cellular K^+ / Na^+ ratios[J]. *Annals of botany*, 1999, 84(2): 123-133.
- [36] CHEN J B, ZONG J Q, LI D D, et al. Growth response and ion homeostasis in two bermudagrass (*Cynodon dactylon*) cultivars differing in salinity tolerance under salinity stress[J]. *Soil science and plant nutrition*, 2019, 65(4): 419-429.
- [37] 魏佳, RICHARD J T, 段慧荣. NaCl胁迫下黑果枸杞幼苗生长及 Na^+ , K^+ 吸收与分配的变化[J]. *西北农业学报*, 2022, 31(2): 193-201.
- WEI J, RICHARD J T, DUAN H R. Seedling growth of *Lycium ruthenicum* Murr and change of Na^+ and K^+ absorption and distribution under NaCl stress[J]. *Acta agriculturae boreali-occidentalis Sinica*, 2022, 31(2): 193-201.
- [38] 王娟, 李德全. 逆境条件下植物体内渗透调节物质的积累与活性氧代谢[J]. *植物学通报*, 2001, 18(4): 459-465.
- WANG J, LI D Q. The accumulation of plant osmoticum and activated oxygen metabolism under stress[J]. *Chinese bulletin of botany*, 2001, 18(4): 459-465.
- [39] 韩忠明, 胥苗苗, 王云贺, 等. 干旱胁迫对防风叶片保护酶活性、渗透调节物质含量及药材品质的影响[J]. *华南农业大学学报*, 2016, 37(6): 91-97.
- HAN Z M, XU M M, WANG Y H, et al. Effect of drought stress on leaf protective enzyme activities, contents of osmoregulation substances and quality of *Saposhnikovia divaricata* [J]. *Journal of south China agricultural university*, 2016, 37(6): 91-97.
- [40] 田国忠, 李怀方, 裘维蕃. 植物过氧化物酶研究进展[J]. *植物科学学报*, 2001, 19(4): 332-344.
- TIAN G Z, LI H F, QIU W F. Advances on research of plant peroxidases[J]. *Plant science journal*, 2001, 19(4): 332-344.

(责任编辑: 刘玉香)



第一作者简介: 李乃伟, 高级实验师, 现任江苏省中国科学院植物研究所植物迁地保护中心主任, 江苏省植物资源保护与利用重点实验室秘书, 江苏省濒危野生植物扩繁与迁地保护研究中心副主任, 江苏省农学会理事, 江苏省花木协会理事, 江苏省野生动植物保护专家。主要从事野生植物资源保护与利用研究工作。先后主持国家重点研发计划子课题、江苏省科技计划项目等省级及以上科研课题 11 项。获得江苏省科技进步奖、梁希科普奖、梁希林业科技进步奖等各级奖项 5 项; 获国家发明专利 22 件; 发表科技论文 30 篇; 选育植物新品种(良种) 15 个; 编制省级地方标准 9 部, 出版著作 5 部。



通信作者简介: 王涛, 助理研究员, 博士。主要从事药赏植物的收集与利用研究。主持国家青年自然科学基金 1 项, 参与省部级以上科研项目 5 项; 以第一或通讯作者发表论文 18 篇; 以第一选育人获省级认定林木良种 1 个, 参与选育省级审定林木良种 2 个; 以第一发明人授权国家发明专利 2 件, 参与授权 9 件; 以第一完成人修订省级地方标准 1 项, 参与制定 2 项; 以主要完成人获得梁希林业科技进步二等奖和中国商业联合会科技进步三等奖各 1 项。