

3 个梅花品种幼苗耐盐性综合评价

杨佳鑫,李庆卫,郭子燕,蔡亚南,毕春竹

(北京林业大学 园林学院,花卉种质创新与分子育种北京市重点实验室,国家花卉工程技术研究中心,
城乡生态环境北京实验室,教育部林木花卉育种实验室,北京 100083)

[摘要] **【目的】**研究不同梅花(*Prunus mume*)品种幼苗的耐盐性,为梅花盐碱土地区推广应用提供依据。**【方法】**以香雪宫粉、丰后、美人 3 个梅花品种 1 年生自根苗为试材,设置土壤 NaCl 含量分别为 0(对照),3,6,9,12,15 g/kg,处理 35 d 后观测不同含量 NaCl 胁迫下 3 个梅花品种的盐害指数、盐害率以及叶片的形态、生长和生理指标的变化;采用主成分分析法和隶属函数法相结合的方法,对 3 个梅花品种耐盐性进行综合评价。**【结果】**(1)随着 NaCl 胁迫含量的升高,3 个梅花品种盐害指数和盐害率均逐渐增大,叶长、叶宽、株高、新梢长度生长量总体呈下降趋势。(2)与对照相比,NaCl 胁迫后 3 个梅花品种相对电导率,游离脯氨酸、可溶性糖、可溶性蛋白含量和 SOD、POD 活性总体呈上升趋势;叶片组织含水量总体呈下降趋势。随着 NaCl 含量的升高,香雪宫粉 MDA 含量呈先升后降趋势,丰后和美人 MDA 含量呈升-降-升的趋势。(3)3 个梅花品种耐盐能力从强到弱依次为香雪宫粉>丰后>美人。**【结论】**香雪宫粉、丰后、美人 3 个梅花品种幼苗的耐盐性有差异,其耐盐阈值分别是 6.96, 6.53, 6.09 g/kg,耐盐能力从强到弱依次为香雪宫粉>丰后>美人。

[关键词] 梅花品种;NaCl 胁迫;盐害指数;耐盐性评价

[中图分类号] S685.170.1

[文献标志码] A

[文章编号] 1671-9387(2019)08-0065-10

Comprehensive evaluation on salt tolerance of three *Prunus mume* varieties

YANG Jiaxin, LI Qingwei, GUO Ziyang, CAI Yanan, BI Chunzhu

(Beijing Key Laboratory of Ornamental Plants Germplasm Innovation & Molecular Breeding,
National Engineering Research Center for Floriculture, Beijing Laboratory of Urban and Rural Ecological Environment,
Key Laboratory of Genetics and Breeding in Forest Trees and Ornamental Plants of Ministry of Education,
School of Landscape Architecture, Beijing Forestry University, Beijing, 100083, China)

Abstract: **【Objective】** This study investigated salt resistance of different *P. mume* varieties to provide theoretical basis for promoting the application of *P. mume* in saline soil. **【Method】** One-year-old own-rooted seedlings of *P. mume* Xiangxue Gongfen, Fenghou, and Meiren were tested for 35 d under salt stresses of 0 (control), 3, 6, 9, 12, and 15 g/kg. The salt injury index, salt injury rate, and form, growth and physiology indicators of leaves were observed to investigate the morphological and physiological responses to salt stress. Principal component analysis and membership function method were used to comprehensively evaluated the salt tolerance. **【Result】** (1) With the increase of soil NaCl content, the salt injury index and salt injury rate of three *P. mume* varieties gradually increased, while the increments of leaf length, leaf width,

[收稿日期] 2018-05-25

[基金项目] 科学研究与研究生培养共建科研项目“北京实验室-北京城乡节约型绿地营建技术与功能型植物材料高效繁育”(2016GJ-03)

[作者简介] 杨佳鑫(1993—),女,贵州贵阳人,硕士,主要从事园林植物种质资源利用与育种研究。E-mail: 2645358442@qq.com

[通信作者] 李庆卫(1968—),男,河南周口人,教授,博士生导师,主要从事园林植物种质资源与育种研究。
E-mail: lqw6809@bjfu.edu.cn

stem length, and new shoots length decreased. (2) Compare with the control, the relative conductivity, contents of free protein, soluble sugar and soluble protein content, and SOD and POD activities increased, while leaf tissue moisture decreased. With the increase of soil NaCl content, MDA content of Xiangxue Gongfen increased firstly and then decreased, MDA contents of Fenghou and Meiren increased firstly and then decreased and increased in the end. (3) The overall salt tolerance was in the order of Xiangxue Gongfen>Fenghou>Meiren. 【Conclusion】 There were differences in salt resistance among three *P. mume* varieties. The salt tolerance thresholds of Xiangxue Gongfen, Fenghou, and Meiren were in the decreasing order of 6.96, 6.53, and 6.09. The overall salt tolerance was in the order of Xiangxue Gongfen>Fenghou>Meiren.

Key words: *Prunus mume* variety; NaCl stress; salt injury index; salt tolerance evaluation

梅花作为我国传统名花,在我国园林应用中有着举足轻重的地位和影响。目前关于梅花的抗性研究主要集中在抗寒性方面,如张启翔^[1]、张文娇^[2]、段美红等^[3]研究了梅花品种及梅花杂交种根系的抗寒性;李庆卫^[4]和张秦英^[5]进行了抗寒梅花品种区域试验;彭婷^[6]和过聪^[7]以梅花为试材对冷驯化植物中普遍存在的 CBF/DREB1 基因进行了研究;张素英等^[8]研究发现,抗寒梅花的繁殖推广呈现以北京为中心向“三北”地区辐射的趋势,在沈阳、兰州、延安、大庆、乌鲁木齐及赤峰等地都有梅花的栽植。目前国内外学者对梅花近缘种紫叶李、黑杆樱李、紫叶矮樱^[9]、山桃^[10]、伊朗野生杏仁^[11]、欧洲酸樱桃^[12]等进行了耐盐性研究;杨佳鑫等^[13]研究表明,梅花具有一定耐盐性。

土壤盐碱化问题是全球最严重的环境问题之一,盐碱土在我国东北、华北、西北内陆地区以及长江以北沿海地带分布很广^[14]。梅花幼苗是栽培的关键阶段,同时也是对盐碱胁迫较为敏感的时期,但关于梅花幼苗耐盐性的研究目前尚未见报道。鉴于此,本研究以梅花 3 个代表品种香雪宫粉(宫粉品种群)、丰后(杏梅品种群)、美人(美人品种群)的 1 年生自根苗为试材,通过测定盐胁迫下梅花幼苗生长及生理生化指标,对 3 个梅花品种幼苗耐盐性进行

综合评价,从而为梅花在盐碱地种植品种的选择提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料及设置

以采自于河南省周口市梅园的香雪宫粉、丰后、美人 1 年生自根苗为试材。采用单株盆栽方法,2017 年 3 月将长势相对一致的梅花苗木栽植于上口口径 30 cm、下口径 20 cm、高 30 cm 的塑料花盆内,盆底布置托盘。培养基质由草炭土、珍珠岩、洗净河沙按照体积比 2:1:1 混合而成,基质质量为 7.5 kg/盆。

2017 年 6 月上旬,试验苗进入旺盛生长期时,先将盆土控水 1 d,使土壤干燥,有利于盐分迅速扩散。试验土壤 NaCl 含量分别为 0(CK),3,6,9,12,15 g/kg 共 6 个处理,每处理 5 个重复。待盆土干燥后,将定量的 NaCl 溶解后浇灌到对应的处理中,具体方法见表 1。盐分添加的第 5 天即为盐胁迫处理的开始,将托盘置于盆下,浇水后将溢出的溶液倒回盆内,以免盐分流失。盐胁迫处理后,定期浇水,维持土壤持水量在 60%~80%,处理 35 d 后结束试验。

表 1 供试土壤中不同 NaCl 含量的配置
Table 1 Soil salinity gradient of the experiment

NaCl 含量/ (g · kg ⁻¹) NaCl concentration	加入 NaCl 质量/g The quality of NaCl					7.5 kg 基质中累积 NaCl 质量/g Accumulation of salt
	第 1 天 The first day	第 2 天 The second day	第 3 天 The third day	第 4 天 The forth day	第 5 天 The fifth day	
0(CK)						0.0
3					22.5	22.5
6				22.5	22.5	45.0
9			22.5	22.5	22.5	67.5
12		22.5	22.5	22.5	22.5	90.0
15	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5	112.5

1.2 试验方法

1.2.1 梅花幼苗盐害指数和盐害率的测定 NaCl 处理后每 7 d 观察 1 次供试植株表现, 35 d 后统计不同盐害分级下的植株数量, 计算盐害指数(SI)和盐害率(P)。盐害分级标准: 0 级. 没有盐害表现; 1 级. 轻度盐害, 有少部分叶尖、叶缘变黄; 2 级. 中度盐害, 大约有 1/2 的叶尖、叶缘干枯; 3 级. 重度盐害, 大部分叶尖、叶缘干枯或落叶; 4 级. 极重度盐害, 叶落、枝枯、植株死亡^[9]。

盐害指数(SI)=

$$\frac{\sum(\text{盐害级值} \times \text{相应盐害级株数})}{\text{总株数} \times \text{盐害最高级值}} \times 100\%,$$

$$\text{盐害率}(P) = \frac{\text{出现盐害症状株数}}{\text{调查总株数}} \times 100\%。$$

1.2.2 梅花幼苗生长指标测定 分别于盐胁迫试验前和结束后(第 35 天)测定梅花幼苗叶长、叶宽、株高、新梢长度, 以上指标盐胁迫试验前与结束后的差值即为其生长量, 每处理测定 5 盆供试植株, 每株测定 3 个叶片及新梢。其中幼苗叶长、叶宽用游标卡尺进行测量, 精度 0.01 cm; 幼苗株高、新梢长度用直尺进行测量, 精度 0.1 cm。

1.2.3 梅花幼苗生理指标测定 于试验第 35 天早晨采用随机取样法采集梅花新梢中上部功能叶 8~10 片, 之后置于 -80 °C 的超低温冰箱中(其中叶片组织含水量和相对电导率需在叶片采后立即测定), 用于测定生理指标。其中叶片组织含水量采用烘干法^[15]测定, 相对电导率采用电导率仪测定, 丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸法^[16]测定, 超氧化物歧化酶(SOD)活性采用氮蓝四唑法^[15]测定, 过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚法^[17]测定, 游离脯氨酸含量采用茚三酮比色法测定^[16], 可溶性糖含量采用蒽酮比色法^[16]测定, 可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝 G-250 染色法^[16]测定。

1.2.4 梅花幼苗耐盐性综合评价 采用模糊数学中的隶属函数法并结合主成分分析法对梅花幼苗进行耐盐性综合评价。具体方法如下:

(1)主成分分析。首先对各项指标的原始数据进行无量纲化^[18]。参照魏秀君等^[19]的方法, 计算各指标的耐盐系数(α), 若指标与植物耐盐性呈正相关, 则该指标的 $\alpha = (\text{处理组平均值} / \text{测定组平均值}) \times 100\%$; 若指标与植物耐盐性呈负相关, 则该指标的 $\alpha = (\text{测定组平均值} / \text{处理组平均值}) \times 100\%$ 。之后对各项指标的耐盐系数进行 Person 相关性分析, 在此基础上对各项指标的耐盐系数 α 值进行主成分

分析, 得到不同主成分下各指标的负载权数及贡献率, 获得综合指标。

(2)隶属函数法。首先参照文献[18]的方法计算 3 个梅花品种的综合指标值 $CI(m)$ 。

$$CI(m) = \sum_{i=1}^n [B_i \times Prin(m)_i],$$

$$(m=1, 2, 3, \dots, n; i=1, 2, 3, \dots, n)$$

式中: $CI(m)$ 为综合指标值, B_i 为单项指标的耐盐系数 α 值, $Prin(m)_i$ 为第 m 个综合指标第 i 个指标的综合指标系数。

然后参照文献[18]的方法计算每种梅花综合指标的隶属函数值 $u(X_i)$, 再依据主成分分析法获得各指标的贡献率, 确定各综合指标的权重 W_i 。

$$u(X_i) = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}。$$

式中: $u(X_i)$ 为第 i 个综合指标的隶属函数值, X_i 为第 i 个综合指标, $X_{\min}$ 为第 i 个综合指标的最小值, $X_{\max}$ 为第 i 个综合指标的最大值。

$$W_i = P_i / \sum_{i=1}^n P_i, (i=1, 2, 3, \dots, n)。$$

式中: W_i 为第 i 个综合指标在所有综合指标中所占的权重, P_i 为第 i 个综合指标的贡献率。

最后采用加权单因子法将各指标叠加, 获得植物耐盐的综合评价价值 D 。

$$D = \sum_{i=1}^n [u(X_i) \times W_i], (i=1, 2, 3, \dots, n)。$$

式中: D 为耐盐性综合评价价值, D 值越大则耐盐能力越强。

1.3 数据处理与分析

数据均使用 Excel 2012 进行计算, 采用 SPSS 22.0 统计软件对试验数据进行单因素方差分析、相关性分析和主成分分析。

2 结果与分析

2.1 NaCl 胁迫对 3 个梅花品种幼苗生长和生理指标的影响

2.1.1 盐害指数和盐害率 由表 2 可知, 随着 NaCl 含量的增加, 梅花的盐害指数和盐害率均逐渐增大。当 NaCl 含量为 3 g/kg 时, 丰后盐害指数为 25.0%, 香雪宫粉和美人的盐害指数分别为 15.0% 和 18.8%; 各梅花品种的盐害率均达到 50.0% 及以上。当 NaCl 含量为 6 g/kg 时, 香雪宫粉和丰后的盐害指数分别为 30.0% 和 37.5%, 美人的盐害指数达到 56.3%; 香雪宫粉盐害率为 80.0%, 丰后和美人的盐害率达到了 100.0%。当 NaCl 含量为 9

g/kg时,香雪宫粉、丰后、美人的盐害指数分别为80.0%,75.0%,75.0%;各梅花品种的盐害率均达到了100.0%。当NaCl含量为12~15 g/kg时,各梅花品种的盐害指数和盐害率均达到100.0%。

盐害指数和盐害率相结合更能客观反映植株盐

害情况。根据 Logistic 方程^[9]求得各梅花品种盐害指数在 50%时的土壤 NaCl 含量,即耐盐阈值。经计算,香雪宫粉、丰后、美人的耐盐阈值分别是6.96, 6.53, 6.09 g/kg(表 3),说明 3 个梅花品种耐盐性由强到弱依次为香雪宫粉>丰后>美人。

表 2 NaCl 处理 35 d 后 3 个梅花品种的盐害指数和盐害率

Table 2 Salt injury indexes and salt injury rates of three *Prunus mume* varieties with NaCl treatments after 35 days

NaCl 含量/ (g·kg ⁻¹) NaCl concentration	盐害指数/% Salt injury indexe			盐害率/% Salt injury rate		
	香雪宫粉 Xiangxue Gongfen	丰后 Fenghou	美人 Meiren	香雪宫粉 Xiangxue Gongfen	丰后 Fenghou	美人 Meiren
CK	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	15.0	25.0	18.8	60.0	50.0	50.0
6	30.0	37.5	56.3	80.0	100.0	100.0
9	80.0	75.0	75.0	100.0	100.0	100.0
12	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
15	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

表 3 NaCl 胁迫下 3 个梅花品种 Logistic 回归方程和耐盐阈值

Table 3 The Logistic regression equation and salt tolerance domain values of three varieties of *Prunus mume* under NaCl stress

品种 Varieties	回归方程 Regression equation	回归系数 <i>b</i> Regression coefficient <i>b</i>	耐盐阈值/(g·kg ⁻¹) Salt tolerance domain values
香雪宫粉 Xiangxue Gongfen	$y=78.333x-4.500$	78.333	6.96
丰后 Fenghou	$y=70.833x+3.750$	70.833	6.53
美人 Meiren	$y=68.750x+8.125$	68.750	6.09

注:*x* 代表 NaCl 含量,*y* 代表盐害指数。耐盐阈值指盐害指数为 50%时 NaCl 含量。

Note:*x* represents the concentration of NaCl,*y* represents salt injury indexes. Salt tolerance domain values are the NaCl concentration with 50% salt injury indexes.

2.1.2 幼苗生长指标 由表 4 可知,随着 NaCl 含量的升高,香雪宫粉和美人叶长生长量逐渐下降,且 NaCl 胁迫处理的香雪宫粉叶长生长量与对照差异显著($P<0.05$)。当 NaCl 含量为 3,6 g/kg 时,美人叶长生长量与对照差异不显著($P>0.05$);当 NaCl 含量为 9~15 g/kg 时,美人叶长生长量与对照相比显著下降($P<0.05$)。随着 NaCl 含量的升高,丰后叶长生长量呈现先升后降趋势;低含量(3 g/kg)NaCl 对丰后叶长生长有一定的促进作用,较对照增加了 10.00%;而高含量(6~15 g/kg)NaCl 处理下其叶长生长量则逐渐下降。

由表 4 还可知,不同含量 NaCl 胁迫下 3 个梅花品种叶宽生长量与叶长生长量变化相似。随着 NaCl 含量的升高,香雪宫粉和美人叶宽生长量逐渐下降,在 3 g/kg NaCl 胁迫处理下二者均与对照无显著差异($P>0.05$),在 6~15 g/kg NaCl 胁迫处理下二者均与对照差异显著($P<0.05$)。随着 NaCl 胁迫含量的升高,丰后叶宽生长量呈现先升后降趋势,3 g/kg NaCl 处理对丰后叶宽生长有一定的促进

作用,与对照相比增加了20.00%;6~15 g/kg NaCl 处理下其叶宽生长量则逐渐下降。

由表 4 可知,随着 NaCl 胁迫含量的升高,香雪宫粉和丰后株高生长量总体下降,二者在各 NaCl 处理下均与对照差异显著($P<0.05$)。3 g/kg NaCl 处理美人株高生长量略有增加,但与对照差异不显著($P>0.05$);6~15 g/kg NaCl 处理美人株高生长量逐渐下降,且与对照差异显著($P<0.05$)。

由表 4 可以看出,不同含量 NaCl 胁迫下,3 个梅花品种新梢长度生长量与株高生长量变化相似。随着 NaCl 胁迫含量的升高,香雪宫粉和丰后新梢长度生长量逐渐下降,且丰后在低含量(3 g/kg)NaCl 处理下与对照无显著差异($P>0.05$),而高含量(6~15 g/kg)NaCl 处理下与对照差异显著($P<0.05$);香雪宫粉在各 NaCl 处理下均与对照差异显著($P<0.05$)。美人新梢长度生长量在 3 g/kg NaCl 处理下略有增加,在 6~15 g/kg NaCl 处理下则有所下降,且各 NaCl 处理均与对照差异显著($P<0.05$)。

表 4 NaCl 胁迫对 3 个梅花品种幼苗生长指标的影响

Table 4 Effects of NaCl stress on growth indexes of three *Prunus mume* varieties

NaCl 含量/(g·kg ⁻¹) NaCl concentration	叶长生长量/cm Leaf length increment			叶宽生长量/cm Leaf width increment		
	香雪宫粉 Xiangxue Gongfen	丰后 Fenghou	美人 Meiren	香雪宫粉 Xiangxue Gongfen	丰后 Fenghou	美人 Meiren
0(CK)	0.27±0.05 a	0.20±0.03 ab	0.26±0.03 a	0.21±0.03 a	0.20±0.05 a	0.29±0.04 a
3	0.20±0.03 b	0.22±0.05 a	0.24±0.06 a	0.17±0.04 ab	0.24±0.06 a	0.26±0.03 ab
6	0.20±0.02 b	0.17±0.02 ab	0.21±0.03 ab	0.15±0.05 b	0.13±0.02 b	0.23±0.02 b
9	0.10±0.02 c	0.16±0.04 b	0.17±0.02 b	0.10±0.01 bc	0.12±0.01 b	0.17±0.05 c
12	0.03±0.01 d	0.10±0.02 c	0.08±0.03 c	0.05±0.02 cd	0.11±0.01 c	0.09±0.02 d
15	0.02±0.00 d	0.04±0.00 d	0.04±0.00 c	0.00±0.00 d	0.04±0.00 c	0.03±0.01 e

NaCl 含量/(g·kg ⁻¹) NaCl concentration	株高生长量/cm Plant height increment			新梢长度生长量/cm Plant twig increment		
	香雪宫粉 Xiangxue Gongfen	丰后 Fenghou	美人 Meiren	香雪宫粉 Xiangxue Gongfen	丰后 Fenghou	美人 Meiren
0(CK)	33.2±1.5 a	32.9±2.1 a	36.4±2.6 a	8.4±1.2 a	1.8±0.5 a	8.5±0.8 a
3	11.6±1.1 b	22.3±0.6 b	38.6±1.5 a	6.4±0.9 b	1.7±0.2 ab	10.1±1.1 b
6	3.1±0.3 cd	14.3±1.4 c	14.1±0.6 b	5.8±0.3 b	1.2±0.4 bc	5.7±0.2 c
9	4.5±0.6 c	13.0±1.5 c	8.0±0.5 c	5.3±0.5 bc	1.0±0.1 c	3.7±0.4 d
12	2.8±0.4 d	7.3±0.4 d	4.0±0.5 d	4.3±0.3 c	0.9±0.3 c	4.1±0.3 d
15	2.0±0.3 d	5.5±0.5 d	2.8±0.3 d	0.7±0.1 d	0.9±0.0 c	2.4±0.2 e

注:数据为“平均值±标准误差”。同列数据后不同小写字母表示不同处理之间差异显著($P<0.05$)。表 5 同。
Note:The data are “average±standard error”. Different lowercase letters in column stand for significant difference ($P<0.05$). The same for Table 5.

2.1.3 幼苗生理指标 NaCl 胁迫对 3 个梅花品种幼苗生理指标的影响如表 5 所示。由表 5 可知,随着 NaCl 胁迫含量的升高,3 个梅花品种叶片组织含水量总体均呈现下降的趋势。当 NaCl 含量为 3 g/kg 时,3 个梅花品种幼苗叶片组织含水量均与对照无显著差异($P>0.05$);除了香雪宫粉外,其余植株叶片组织含水量与对照相比无显著变化,当 NaCl 含量为 9~15 g/kg 时,3 个梅花品种幼苗叶片组织含水量与对照相比均显著($P<0.05$)下降,表明植物叶片受到严重伤害。

由表 5 可知,随着 NaCl 胁迫含量升高,3 个梅花品种相对电导率均增大,当 NaCl 含量较低(3~6 g/kg)时与对照差异总体不显著($P>0.05$),当 NaCl 含量较高时(9~15 g/kg)时与对照差异显著($P<0.05$)。说明在较低含量盐胁迫下植物细胞电解质外渗较少,细胞膜受损程度较小,而中高含量盐胁迫下植物细胞电解质外渗较多,细胞膜的损伤程度较大,植物膜系统的完整性受到破坏。

由表 5 可知,随着 NaCl 胁迫含量的升高,香雪宫粉 MDA 含量呈先升后降趋势,但各 NaCl 处理与对照差异均不显著($P>0.05$);丰后和美人 MDA 含量呈现升-降-升趋势,其中丰后只在 6 g/kg NaCl 处理下与对照差异显著($P<0.05$),其余 NaCl 处理下均与对照差异不显著($P>0.05$);美人 MDA 含量仅在 3,15 g/kg NaCl 处理与对照差异显著($P<$

0.05)。

由表 5 可知,与对照相比,NaCl 胁迫处理 3 个梅花品种 SOD 活性总体均增加。各 NaCl 胁迫处理美人 SOD 活性与对照差异均不显著($P>0.05$);香雪宫粉 SOD 活性在 3,9 g/kg NaCl 处理下与对照无显著差异($P>0.05$),而在 6,12,15 g/kg NaCl 处理下与对照差异显著($P<0.05$);丰后 SOD 活性仅在 15 g/kg NaCl 处理下与对照差异显著($P<0.05$)。

由表 5 可知,与对照相比,NaCl 胁迫处理后 3 个梅花品种 POD 活性总体呈上升趋势。各 NaCl 处理香雪宫粉和美人 POD 活性均与对照差异显著($P<0.05$);丰后 POD 活性在低含量(3 g/kg)NaCl 处理下与对照差异不显著($P>0.05$),而在中高含量(6~15 g/kg)NaCl 处理下与对照组差异显著($P<0.05$)。

表 5 表明,与对照相比,NaCl 胁迫处理后 3 个梅花品种游离脯氨酸含量呈上升趋势。各梅花游离脯氨酸含量在 3~9 g/kg NaCl 处理下均与对照无显著差异($P>0.05$);在 12 g/kg NaCl 处理下,香雪宫粉梅和丰后游离脯氨酸含量均与对照差异显著($P<0.05$);15 g/kg NaCl 处理下各 3 个梅花品种游离脯氨酸含量均与对照差异显著($P<0.05$)。

由表 5 还可知,与对照相比,NaCl 胁迫处理后 3 个梅花品种可溶性糖含量总体呈上升趋势。香雪宫

粉可溶性糖含量在 3,9 g/kg NaCl 处理下与对照无显著差异($P>0.05$),其余含量 NaCl 处理下均与对照差异显著($P<0.05$);丰后可溶性糖含量在 3~6 g/kg NaCl 处理下与对照无显著差异($P>0.05$),在 9~15 g/kg NaCl 处理下与对照差异显著($P<0.05$);美人可溶性糖含量仅在高含量(12~15

g/kg)NaCl 处理下与对照差异显著($P<0.05$)。
由表 5 可知,与对照相比,NaCl 胁迫处理后 3 个梅花品种可溶性蛋白含量总体呈上升趋势。各梅花幼苗可溶性蛋白含量在 3,9 g/kg NaCl 处理下与对照无显著差异($P>0.05$),而在 12,15 g/kg NaCl 处理下与对照差异显著($P<0.05$)。

表 5 NaCl 胁迫对 3 个梅花品种幼苗生理指标的影响
Table 5 Effects of NaCl stress on physiological indexes of three *Prunus mume* varieties

NaCl 含量/ (g·kg ⁻¹) NaCl concentration	叶片组织含水量/% Leaf water content			相对电导率/% Relative conductivity		
	香雪宫粉 Xiangxue Gongfen	丰后 Fenghou	美人 Meiren	香雪宫粉 Xiangxue Gongfen	丰后 Fenghou	美人 Meiren
CK	75.55±1.66 a	75.06±1.45 a	73.32±3.76 a	16.81±1.46 c	16.08±5.43 b	60.83±3.80 b
3	73.47±1.37 ab	74.24±1.41 a	71.30±2.41 ab	25.73±14.66 bc	43.79±18.12 ab	64.57±8.85 b
6	69.44±4.47 bc	70.64±3.33 ab	69.35±1.40 abc	46.27±24.08 ab	74.11±30.17 a	63.70±8.58 b
9	70.06±3.45 bc	68.56±4.05 b	68.60±2.31 bc	55.00±27.64 a	74.06±35.26 a	82.73±12.36 a
12	67.95±3.81 c	66.44±4.96 bc	66.64±3.57 c	65.07±27.41 a	77.80±34.95 a	82.93±13.48 a
15	67.18±5.88 c	61.15±9.82 c	66.40±5.94 c	58.53±32.82 a	75.90±44.04 a	85.22±15.59 a

NaCl 含量/ (g·kg ⁻¹) NaCl concentration	MDA/(mmol·g ⁻¹)			游离脯氨酸/(μg·g ⁻¹) Free protein		
	香雪宫粉 Xiangxue Gongfen	丰后 Fenghou	美人 Meiren	香雪宫粉 Xiangxue Gongfen	丰后 Fenghou	美人 Meiren
CK	11.99±1.47 ab	7.32±0.89 b	17.17±2.77 b	27.36±9.18 c	25.84±11.40 c	28.75±3.79 b
3	17.70±8.29 a	11.38±3.57 ab	24.29±7.32 a	41.51±16.58 c	122.17±209.16 bc	45.56±19.05 b
6	16.57±9.03 a	13.13±5.32 a	22.52±4.08 ab	488.93±605.13 bc	233.81±269.44 bc	61.23±24.34 b
9	13.46±6.70 ab	10.20±3.79 ab	23.23±7.71 ab	464.98±298.78 bc	336.14±215.53 bc	56.51±27.13 b
12	8.61±1.52 b	10.87±3.50 ab	23.49±5.40 ab	892.63±655.83 ab	476.67±297.86 ab	158.15±82.03 b
15	8.32±1.65 b	11.41±3.75 ab	25.52±6.50 a	1 661.58±1 208.77 a	770.55±614.17 a	444.44±302.68 a

NaCl 含量/ (g·kg ⁻¹) NaCl concentration	可溶性糖/(mg·g ⁻¹) Soluble sugar			可溶性蛋白/(mg·g ⁻¹) Soluble protein		
	香雪宫粉 Xiangxue Gongfen	丰后 Fenghou	美人 Meiren	香雪宫粉 Xiangxue Gongfen	丰后 Fenghou	美人 Meiren
CK	16.97±1.28 c	8.66±0.47 b	16.84±0.84 c	1.34±0.21 b	1.29±0.15 c	1.67±0.18 c
3	20.75±2.35 bc	10.54±1.60 ab	19.07±3.54 bc	1.63±0.06 b	1.34±0.23 c	2.05±0.21 bc
6	23.02±4.23 ab	11.13±2.67 ab	19.82±3.40 bc	2.67±1.03 a	1.85±0.55 bc	2.23±0.37 ab
9	20.24±3.96 bc	12.42±2.40 a	19.72±2.75 bc	2.25±0.55 ab	2.08±0.54 abc	2.07±0.27 abc
12	22.42±4.85 ab	12.92±3.67 a	12.38±3.30 ab	2.84±1.25 a	2.52±1.25 ab	2.40±0.34 ab
15	26.49±5.50 a	13.04±3.42 a	25.25±6.00 a	3.15±0.92 a	2.81±0.90 a	2.50±0.57 a

NaCl 含量/ (g·kg ⁻¹) NaCl concentration	POD/(U·g·min ⁻¹)			SOD/(U·g ⁻¹)		
	香雪宫粉 Xiangxue Gongfen	丰后 Fenghou	美人 Meiren	香雪宫粉 Xiangxue Gongfen	丰后 Fenghou	美人 Meiren
CK	1 114.58±350.12 b	684.03±67.46 c	943.06±324.23 d	140.69±10.36 c	128.33±11.76 b	145.30±9.69 a
3	2 643.06±517.13 a	1 152.78±345.70 bc	1 836.81±489.30 c	159.00±34.39 bc	163.65±25.66 b	184.94±48.21 a
6	3 382.64±1 291.52 a	1 809.72±732.26 ab	2 115.97±578.14 bc	206.34±46.11 ab	112.91±45.58 b	218.08±72.67 a
9	2 902.50±525.51 a	2 181.67±1 130.24 a	2 050.00±213.03 bc	179.95±33.61 bc	133.21±51.68 b	151.24±44.12 a
12	3 264.17±2024.10 a	1 572.50±944.78 ab	2 644.17±632.71 ab	242.69±75.85 a	177.38±69.67 ab	168.23±98.03 a
15	4 062.50±1388.97 a	1 682.29±641.23 ab	2 853.13±750.79 a	206.50±47.26 ab	238.95±103.01 a	161.64±122.77 a

2.2 3 个梅花品种耐盐性综合的分析与评价
2.2.1 梅花幼苗生长及生理指标耐盐系数及相关性分析 计算得到 3 个梅花品种 4 个生长指标和 8 个生理指标的耐盐系数见表 6。植物耐盐性由各性状综合体现,而各单项指标侧重点有所不同,为了全面评价植物耐盐性,需对各单项指标进行综合分析

评价。因此,对各指标的耐盐系数进行 Person 相关性分析,结果(表 7)发现,各指标之间存在不同程度的相关性,其中部分指标间的相关性已达到显著或极显著水平,表明以上指标展现的耐盐性信息发生了重叠^[20]。

表 6 3 个梅花品种幼苗生长指标和生理指标的耐盐系数

Table 6 Salt tolerance coefficient of growth indexes and physiological indexes of three <i>Prunus mume</i> varieties												
品种 Variety	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
香雪宫粉 Xiangxue Gongfen	0.41	0.45	0.14	0.54	0.92	0.34	0.93	1.41	2.92	0.04	1.33	1.87
丰后 Fenghou	0.86	0.80	0.38	0.63	0.91	0.23	0.64	1.29	2.46	0.07	1.39	1.64
美人 Meiren	0.57	0.54	0.37	0.62	0.93	0.80	0.72	1.22	2.44	0.19	1.25	1.34

注:1. 叶长生长量;2. 叶宽生长量;3. 株高生长量;4. 新梢长度生长量;5. 叶片组织含水量;6. 相对电导率;7. MDA;8. SOD;9. POD;10. 游离脯氨酸;11. 可溶性糖;12. 可溶性蛋白。下表同。

Note:1. Leaf length increment;2. Leaf width increment;3. Plant height increment;4. Plant twig increment;5. Leaf water content;6. Relative conductivity;7. Malonic dialdehyde;8. Superoxide dismutase;9. Peroxidase; 10. Free protein;11. Soluble sugar;12. Soluble protein. The same below.

表 7 梅花幼苗生长指标和生理指标的相关系数矩阵

Table 7 Correlation coefficient matrix of growth indexes and physiological indexes of <i>Prunus mume</i> seedling												
指标 Index	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1											
2	0.958 **	1										
3	0.724 *	0.701	1									
4	0.271	0.121	0.314	1								
5	0.220	0.078	0.039	0.214	1							
6	-0.157	-0.255	0.012	0.135	0.388	1						
7	-0.286	-0.287	-0.664	-0.062	0.593	0.324	1					
8	-0.576	-0.635	-0.769 *	0.214	-0.203	-0.058	0.366	1				
9	-0.542	-0.503	-0.619	-0.680	-0.484	-0.085	0.001	0.455	1			
10	0.207	0.259	0.328	-0.135	0.323	0.731 *	0.223	-0.514	-0.246	1		
11	0.331	0.400	0.657	0.409	-0.348	-0.426	-0.664	-0.406	-0.584	-0.211	1	
12	-0.718 *	-0.682	-0.551	-0.361	-0.491	-0.400	-0.132	0.583	0.736 *	-0.604	-0.189	1

注: ** 表示在 0.01(双侧)水平上显著相关; * 表示在 0.05(双侧)水平上显著相关。
Note : ** represents significant correlation at the level of 0.01 (bilateral). * represents significant correlation at the level of 0.05 (bilateral)

2.2.2 梅花幼苗生长和生理指标主成分分析 对供试 3 个梅花品种 12 个指标的耐盐系数 α 值进行主成分分析,可得到主成分 1 和主成分 2 下各指标的负载权数及贡献率,结果见表 8。由表 8 可知,主成分 1 和主成分 2 的贡献率分别为 59.581% 和 40.419%,其累积贡献率达到 100%。说明 12 个单项指标可由这 2 个相互独立的综合指标代替,并代

表了原来 12 个单项指标 100% 的信息量。株高生长量、新梢长度生长量、MDA、SOD、POD 和可溶性蛋白含量在主成分 1 中的负载权数绝对值均在 0.9 以上,可作为评定梅花耐盐性的主要指标;叶片组织含水量和可溶性糖含量在主成分 2 中的负载权数绝对值在 0.9 以上,可作为评定梅花耐盐性的次要指标。

表 8 基于主成分分析的梅花各指标负载权数及贡献率

Table 8 Load weights and coefficients of comprehensive indexes of <i>Prunus mume</i> based on principal component analysis												
主成分 Principal component	负载权数 Load weight											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0.665	0.581	0.982	0.968	0.153	-0.475	-0.911	0.976	0.993	-0.763	0.234	0.902
2	-0.746	-0.814	0.189	0.253	-0.988	-0.880	-0.412	0.217	-0.117	-0.647	0.972	0.431

2.2.3 3 个梅花品种耐盐性综合评价 计算 NaCl 胁迫下 3 个梅花品种的综合指标值 $CI(m)$ 、隶属函数值 $u(X_i)$ 和综合评价值 D ,结果见表 9。根据表 9 中的 D 值对 3 个梅花品种进行耐盐能力排序,可知

耐盐能力从强到弱依次为香雪宫粉>丰后>美人,该结果与根据盐害指数和盐害率对 3 个梅花品种耐盐性的排名结果一致。

表 9 3 个梅花品种耐盐性综合评价

Table 9 Comprehensive evaluation on salt tolerance of three *Prunus mume* varieties

品种 Variety	CI(1)	CI (2)	u(1)	u (2)	D 值 D value	位次 Rank
香雪宫粉 Xiangxue Gongfen	6.569 5	−0.063 2	3.915 4	−0.025 5	3.889 9	1
丰后 Fenghou	6.719 6	−0.422 0	4.004 9	−0.170 5	3.834 4	2
美人 Meiren	5.732 5	−0.908 6	3.416 6	−0.367 1	3.049 5	3

3 讨 论

3.1 NaCl 胁迫下梅花幼苗生长指标的响应

非盐生植物在盐胁迫下最显著和最普遍的效应是抑制植物生长^[21]。本研究中,3 个梅花品种的叶长、叶宽、株高和新梢长度生长量总体随土壤 NaCl 含量的升高而降低。但低含量(3 g/kg)NaCl 处理下丰后叶长和叶宽生长量均高于对照,美人株高和新梢长度生长量略高于对照,可知 3 g/kg NaCl 处理对植物生长有一定促进作用,说明这些植物对低盐胁迫环境具有一定的适应能力,这与任志彬^[22]研究盐胁迫对锦带花新梢长度生长量的影响结果一致。但随着 NaCl 含量的升高,3 个梅花品种各生长量均逐渐下降,说明随着 NaCl 胁迫强度的增大,植物生长均受到了抑制,NaCl 胁迫缩短了植株个体的衰老以及死亡过程,土壤 NaCl 含量越高,植物体衰老和死亡速度越快^[23]。

3.2 NaCl 胁迫下梅花幼苗生理指标的响应

植物耐盐性受到生理生化多方面因素的影响,是一个由多基因控制的极为复杂的过程,也是综合性状的表现^[24]。本研究中,3 个梅花品种叶片组织含水量均随着 NaCl 胁迫强度的增加而逐渐下降,这与八棱海棠^[25]、夏蜡梅^[26]的表现类似;与对照相比,在低含量(3~9 g/kg)NaCl 胁迫下 3 个梅花品种叶片组织含水量变化相对缓慢,在高含量(12~15 g/kg)NaCl 胁迫下 3 个梅花品种叶片组织含水量均显著下降,这是因为细胞外界环境盐溶液浓度过高,由于渗透作用水分子从浓度较低的细胞中外渗,造成细胞失水,因此高含量盐胁迫下植株叶片组织含水量急剧降低。本研究中,与对照相比,3 个梅花品种叶片相对电导率在盐胁迫后均升高,这与前人对臭椿^[27]、雪菊^[28]的研究结果一致,说明盐胁迫后叶片电解质外渗,从而对植物的生长造成伤害。与对照相比,3 个梅花品种 MDA 含量在 NaCl 胁迫后总体呈上升趋势,表明质膜受损程度逐渐加大,这与前人对臭椿^[27]、花叶梔子^[29]研究结果一致;但香雪宫粉 MDA 含量在 12~15 g/kg NaCl 胁迫下略有下

降,可能与高含量 NaCl 胁迫致使其部分叶片死亡、导致 MDA 分解有关^[30]。3 个梅花品种中,美人 SOD 活性随着 NaCl 胁迫强度的升高无显著变化($P>0.05$),香雪宫粉和丰后 SOD 活性只在 15 g/kg NaCl 处理下与对照差异显著($P<0.05$);而三者 POD 活性均在 NaCl 胁迫后总体上显著增大,说明在对植物膜系统保护和修复过程中 POD 与 SOD 相比起主导作用。3 个梅花品种游离脯氨酸、可溶性糖和可溶性蛋白含量均随着土壤 NaCl 含量的升高总体呈上升趋势,说明在盐胁迫下各植物体内的 3 种渗透调节剂均能协同作用以减少盐胁迫对植物叶片的伤害。

3.3 3 个梅花品种耐盐性综合评价

评价植物抗逆性的生长指标、生理生化指标和光合指标较多,且各指标间有一定的相关性和重叠性,因此将各指标结合起来,综合分析植物耐盐性更为合理。本研究采用主成分分析法和隶属函数法相结合的方法,对 3 个梅花品种耐盐性进行综合评价,结果发现,株高生长量、新梢长度生长量、MDA、SOD、POD、可溶性蛋白含量可作为评定梅花耐盐性的主要指标,叶片组织含水量和可溶性糖含量可作为评定梅花耐盐性的次要指标;3 个梅花品种耐盐能力从强到弱依次为香雪宫粉>丰后>美人,这与根据综合盐害指数和盐害率得到的结果一致。

本研究中,香雪宫粉、丰后、美人均具有一定的耐盐性,其耐盐阈值分别为 6.96,6.53,6.09 g/kg,可知不同种群梅花品种之间耐盐性存在一定差异,这为梅花向盐渍土分布较广的北方推广应用提供了依据。但本次仅以香雪宫粉、丰后、美人的 1 年生自根苗为试材,从形态与生理方面研究了其耐盐机制,在后续研究中,应进一步评价更多梅花种群群的耐盐性,以筛选适合盐碱地区的综合抗性强、观赏价值高的梅花品种。

[参考文献]

[1] 张启翔. 梅花品种抗寒性的比较分析 [J]. 北京林学院学报, 1985(2):47-56.

- Zhang Q X. A comparative study on differences in cold hardiness in some of Mei flower cultivars [J]. Journal of Beijing Forestry University, 1985(2): 47-56.
- [2] 张文娇. ‘东方朱砂’等5个梅花品种生理特性及梅花造景研究 [D]. 杭州:浙江农林大学, 2011.
- Zhang W J. Study on the physiological of 5 cultivars of *Prunus mume* such as ‘Dongfang zhusha’ and *Prunus mume* in landscape [D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2011.
- [3] 段美红, 李文广, 高祥利, 等. 三种梅花品种枝条抗寒性研究 [C]//中国园艺学会. 中国观赏园艺研究进展. 福建厦门: 中国林业出版社, 2015: 495-499.
- Duan M H, Li W G, Gao X L, et al. Study on cold tolerance of three varieties of *Prunus mume* [C]//Chinese Society for Horticultural Science. Advances in ornamental horticulture of China. Xiamen, Fujian: China Forestry Publishing House, 2015: 495-499.
- [4] 李庆卫. 川、滇、藏、黔野梅种质资源调查和梅花抗寒品种区域试验的研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2009.
- Li Q W. Studies on investigation of wild Mei germplasm resources of Sichuan, Yunnan, Tibet and Guizhou province as well as regional tests of hardy mei cultivars in north China [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2009.
- [5] 张秦英. 抗寒梅花品种区域试验及离体培养的研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2004.
- Zhang Q Y. Studies on regional *in vitro* culture of hardy Mei flower (*Prunus mume*) cultivars [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2004.
- [6] 彭 婷. 不同梅花品种 *CBF/DREB1* 同源基因的克隆及功能分析 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2016.
- Peng T. Cloning and functional analysis of *CBF/DREB1* homologous genes in Mei cultivars with constrating levels of freezing tolerance [D]. Wuhan, Huazhong Agriculture University, 2016.
- [7] 过 聪. 梅花 *CBF/DREB1* 同源基因的克隆和功能的初步分析 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2010.
- Guo C. Cloning and primary functional analysis of *CBF/DREB1* homologous genes in *Prunus mume* [D]. Wuhan: Huazhong Agriculture University, 2016.
- [8] 张秦英, 陈俊愉, 魏淑秋. 梅花在中国分布北界变化的研究 [J]. 北京林业大学学报, 2007, 29(S1): 35-37.
- Zhang Q Y, Chen J Y, Wei S Q. The change of Mei's north boundary of distribution in China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2007, 29(S1): 35-37.
- [9] 胡晓立, 李彦慧, 陈东亮, 等. 3种李属彩叶植物对 NaCl 胁迫的生理响应 [J]. 西北植物学报, 2010, 30(2): 370-376.
- Hu X L, Li Y H, Chen D L, et al. Physiological responses of three colored-leaf species of *Prunus* under NaCl stress [J]. Acta Bot Boreal-occident Sin, 2010, 30(2): 370-376.
- [10] 赵丽君, 阿布都外力·木米尼, 曲艳华, 等. 山桃抗盐碱性评价 [J]. 北京农学院学报, 2014, 29(4): 87-90.
- Zhao L J, Abuduwalli·mumini, Qu Y H, et al. Evaluation on the resistance of *Prunus davidiana* (Carr.) to salinity and alkalinity [J]. Journal of Beijing University of Agriculture, 2014, 29(4): 87-90.
- [11] Karim S, Behrouz S, Vahid R, et al. Salt stress induction of some key antioxidant enzymes and metabolites in eight Iranian wild almond species [J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2012, 34(1): 203-213.
- [12] Chatzissavvidis C, Veneti G, Papadakis I, et al. Effect of NaCl and CaCl₂ on the antioxidant mechanism of leaves and stems of the root stock CAB-6P (*Prunus cerasus* L.) under *in vitro* conditions [J]. Plant Cell Tissue Organ Cult, 2008, 95(1): 37-45.
- [13] 杨佳鑫, 李庆卫, 刘玉霞, 等. NaCl 胁迫对梅花和山桃种子萌发及生理特性的影响 [J]. 西北林学院学报, 2018, 33(2): 94-99.
- Yang J X, Li Q W, Liu Y X, et al. Effects of NaCl stress on germination and physiological characteristics of *Prunus mume* and *Prunus davidiana* seeds [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(2): 94-99.
- [14] 张会丽, 袁 闯, 朱 林, 等. 利用隶属函数值法对玉米成熟期耐盐性的综合评价 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2018, 46(2): 47-55.
- Zhang H L, Yuan C, Zhu L, et al. Comprehensive evaluation of salt-tolerance of maize at mature period using subordinate function value analysis [J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition), 2018, 46(2): 47-55.
- [15] 高俊凤. 植物生理学实验指导 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- Gao J F. Plant physiology experiment guidance [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [16] 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, 2006.
- Li H S. Experimental principles and techniques of plant physiology and biochemistry [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [17] 高 茜. 贮藏温度对红砂种子生理特性的影响 [D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2013.
- Gao Q. Effect of storage temperature on physiological characteristics of *Reaumuria soongorica* seeds [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2013.
- [18] 雷 燕. 地被菊耐荫性研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2015.
- Lei Y. Study on shade tolerance of Ground-cover *Chrysanthemum* [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2015.
- [19] 魏秀君, 殷云龙, 芦治国, 等. NaCl 胁迫对5种绿化植物幼苗生长和生理指标的影响及耐盐性综合评价 [J]. 植物资源与环境学报, 2011, 20(2): 35-42.
- Wei X J, Yin Y L, Lu Z G, et al. Effects of NaCl stress on growth and physiological indexes of five greening plants seedlings and comprehensive evaluation of their salt tolerance [J]. Journal of Plant Resources and Environment, 2011, 20(2): 35-42.
- [20] 周广生, 梅方竹, 周竹青, 等. 小麦不同品种耐湿性生理指标综合评价及其预测 [J]. 中国农业科学, 2003, 36(11): 1378-

1382.

Zhou G S, Mei F Z, Zhou Z Q, et al. Comprehensive evaluation and forecast on physiological indices of waterlogging resistance of different wheat varieties [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36(11): 1378-1382.

[21] 刘友良, 汪良驹. 植物对盐胁迫的反应和耐盐性 [M]// 余叔文, 汤章城. 植物生理与分子植物学. 2 版. 北京: 科学出版社, 1998.

Liu Y L, Wang L J. Plant reaction to salt stress and salt tolerance [M]// Yu S W, Tang Z C. *Plant physiology and molecular botany*. 2nd edition. Beijing: Science Press, 1998.

[22] 任志彬. 锦带花耐盐性研究 [D]. 河北保定: 河北农业大学, 2011.

Ren Z B. Studies of salt resistance of *Weigela florida* [D]. Baoding, Hebei: Hebei Agriculture University, 2011.

[23] 龚理. 烟草品种耐盐性指标筛选及综合评价 [D]. 长沙: 湖南农业大学, 2009.

Gong L. Screening and comprehensive evaluation of salt tolerance indexes of tobacco varieties [D]. Changsha: Hunan Agriculture University, 2009.

[24] 张兆英, 于秀俊. 植物抗盐性评价生理指标的分析 [J]. 沧州师范专科学校学报, 2006, 22(4): 51-53.

Zhang Z Y, Yu J X. Analysis of physiological index about plant's salt-tolerance evaluation [J]. *Journal of Cangzhou Teachers' College*, 2006, 22(4): 51-53.

[25] 郭艳超, 王文成, 李克晔, 等. NaCl 胁迫对八棱海棠幼苗生长及其生理指标的影响 [J]. 中国农学通报, 2011, 27(28): 130-134.

Guo Y C, Wang W C, Li K Y, et al. Effects of NaCl stress on the growth and some physiological indexes of *Malus robusta* Rehd [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(28): 130-134.

[26] 纪凯婷. 夏蜡梅幼苗年生长规律和耐盐性研究 [D]. 南京: 南京林业大学, 2014.

Ji K T. Studies on annual growth rhythm and salt-tolerance of *Sinocalycanthus chinensis* seedlings [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2014.

[27] 黄广远. 盐胁迫对臭椿生长和生理的影响 [D]. 南京: 南京林业大学, 2012.

Huang G Y. Effects of salt stress on growth and physiology of *Ailanthus altissima* [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2012.

[28] 叶而根·夏依木拉提. 盐胁迫对雪菊种子萌发及幼苗生理和生长特性的影响 [D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2015.

Elgen · Chaimurat. Effects of salt stress on *Coreopsis tinctoria* seed germination and its seedlings physiological and growth characteristics [D]. Urumqi: Xinjiang Agriculture University, 2015.

[29] 王治钊. 8 种园林植物的耐盐性研究 [D]. 福州: 福建农林大学, 2014.

Wang Z C. Study on salt tolerance ability of 8 landscape plants [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2014.

[30] 刘行. 金露梅耐盐生理特性研究 [D]. 河北保定: 河北农业大学, 2009.

Liu X. Study of salt stress on the physiological characteristics in *Potentilla fruticosa* L. [D]. Baoding, Hebei: Hebei Agriculture University, 2009.