

不同品种北美豆梨对NaCl胁迫的生理响应及耐盐性评价

赵佳伟¹, 李清亚¹, 路斌¹, 李艳¹, 朱玉菲¹, 栗浩³, 路丙社^{1,2,*}

¹河北农业大学园林与旅游学院, 河北保定071000

²河北省林木种质资源与森林保护重点实验室, 河北保定071001

³任丘市园林绿化局, 河北任丘062550

摘要: 为探明不同品种北美豆梨(*Pyrus calleryana*)的耐盐能力, 以5个品种北美豆梨为材料, 研究了不同浓度NaCl处理(0、0.15%、0.30%、0.45%和0.60%)对苗木生长及相关生理指标的影响, 利用模糊隶属函数对其耐盐性进行了综合评价。结果表明, 随着NaCl浓度增加, 5个品种的苗木生长量逐渐降低, 盐害指数逐渐升高, ‘新布拉德福德’、‘克利夫兰’、‘殿级堂’、‘红塔’和‘贵族’的可忍耐的土壤含盐量分别为0.42%、0.43%、0.50%、0.48%和0.46%。SOD、POD活性和可溶性蛋白含量随NaCl浓度增加呈先上升后下降的变化, MDA、脯氨酸和可溶性糖含量随NaCl浓度增加均逐渐增大; 叶片Na⁺含量随NaCl浓度增加均逐渐增大, Na⁺/K⁺均逐渐上升。隶属函数分析结果表明, 5个品种北美豆梨的耐盐性强弱顺序为: ‘殿级堂’>‘红塔’>‘贵族’>‘克利夫兰’>‘新布拉德福德’。

关键词: NaCl胁迫; 北美豆梨; 生理指标; 耐盐阈值; 隶属函数

土壤盐渍化限制植物生长, 制约生态环境稳定, 甚至破坏生态环境(刘翠玉等2018)。随着国家对生态环境文明建设的重视, 发掘和筛选适宜盐碱地种植的园林绿化树种, 提高盐碱地绿化面积, 改善景观环境, 已成为研究热点(王璐等2015; 程淑娟等2012)。盐胁迫对植物的危害主要是渗透胁迫和离子毒害, 而植物自身可以通过提高保护酶活性、合成渗透调节物质和离子区域化等方式避免盐胁迫造成的危害; 不同植物对盐胁迫环境的响应机制及耐盐能力不尽相同, 开展不同品种耐盐性评价, 对指导不同立地环境的品种选择具有重要的现实意义。

北美豆梨(*Pyrus calleryana*)是从北美引进的具有很高观赏价值的彩叶树种。北美豆梨有10余个栽培品种, 不同品种间在树姿、形态性状和抗逆性方面均存在一定差异, 但由于引进时间不长, 相关研究主要集中在叶色变色机理及苗木繁育技术等方面(杨暖等2015; 邱玉宾等2014), 有关其耐盐性的研究尚未见报道。为了探明北美豆梨不同品种的耐盐能力, 本试验以2014年引进的北美豆梨5个品种为材料, 研究了NaCl胁迫对其叶绿素含量、净光合速率、苗木生长、盐害指数、细胞保护酶活性、渗透调节物质以及Na⁺、K⁺含量的影响, 运用Fuzzy数学中的隶属函数对其耐盐能力进行了综合评价, 以期为北美豆梨耐盐品种筛选及园林应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与处理

试验材料为二年生北美豆梨(*Pyrus calleryana* Decne.)嫁接苗, 嫁接砧木为杜梨。北美豆梨引自北美, 由河北省衡水市绿泽家庭农场提供, 参试品种分别为: ‘新布拉德福德’ (‘New Bradford’)、‘克利夫兰’ (‘Cleveland’)、‘殿级堂’ (‘Chanticleer’)、‘红塔’ (‘Redspire’)、‘贵族’ (‘Avistocra’)。

试验于2017年3~7月在河北农业大学园林学院苗圃进行。选择长势一致无病虫害的苗木定植于直径为50 cm、底部打孔的塑料桶中, 栽培基质采用园土与河沙(3:1)混匀的土壤, 每桶装土10 kg, 栽植苗木3株, 常规管理, 待苗木生长旺盛后于6月20日实施NaCl胁迫处理。试验采用完全随机区组设计, 设置5个盐分梯度, 土壤NaCl含量分别为0 (对照)、0.15%、0.30%、0.45%和0.60%, 每个处理5次重复。采用浇灌盐水的方式施盐, 每桶浇1 L相应浓度NaCl溶液, 对照浇1 L无离子水; 为防止盐分流失, 处理时桶下放置托盘, 将渗出的溶液再返倒回桶中。为防止降雨影响, 视天气情况及时加盖遮雨棚。处理15 d后进行相关指标测定。

收稿 2018-11-02 修定 2019-01-07

资助 国家科技支撑计划(2013BAD01B06-1)、河北省自然科学基金(C2015204066)和河北省教育厅青年基金项目(2019219)。

* 通讯作者(lubingshe@126.com)。

1.2 生长量的测定

NaCl处理前和试验结束时分别用直尺测定主干新梢长度,计算生长量。计算公式为:生长量(cm)=处理结束后新梢生长量-处理前新梢生长量。

1.3 盐害指数的测定

盐害分级标准参照孙晶等(2010)的方法进行统计。0级:无盐害症状;1级:轻度盐害,有少部分叶尖、叶缘或者叶脉变黄;2级:中度盐害,有大约1/2的叶尖、叶缘焦枯;3级:重度盐害,大部分叶尖、叶缘焦枯或落叶;4级:极重度盐害,枝枯、叶落、最终死亡。

盐害指数(%)=Σ(盐害级数×相应盐害级植株数)/(总株数×盐害最高级数)×100%。

1.4 叶绿素含量的测定

采用80%丙酮浸提法(李合生等2006)测定叶片中叶绿素含量。

1.5 净光合速率的测定

选取不同处理植株新梢中部发育成熟叶片,用Li-6400便携式光合作用仪(LI-COR公司)于晴天9:00~11:00测定净光合速率(P_n),叶室设定的光照强度为1 000 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, CO_2 气源为室外大气 CO_2 。

1.6 酶液提取和活性测定

称取0.5 g叶片置于预冷的研钵中,加入5 mL预冷的0.05 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 磷酸缓冲液(pH=7.8),冰浴研磨,用Sigma DK-315台式冷冻离心机在4°C下离心(11 180×g) 20 min,取上清液用于酶活性测定。超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)活性测定采用氮蓝四唑还原法;过氧化物酶(peroxidase, POD)活性测定采用愈创木酚法;丙二醛(malonaldehyde, MDA)含量测定采用硫代巴比妥酸法;可溶性蛋白含量测定采用考马斯亮蓝法;脯氨酸含量测定采用磺基水杨酸法;可溶性糖含量测定用蒽酮比色法(李合生等2006)。

1.7 Na^+ 和 K^+ 含量测定

参照刘炳响等(2012)的方法。

1.8 综合评定方法

应用隶属函数法(张士超等2015)综合评价5个豆梨品种的耐盐性。与耐盐性呈正相关的用隶属函数公式计算,反之,用反隶属函数公式计算。将各指标耐盐性隶属值累加求其平均值,隶属函数均值越大,说明耐盐性越强。

隶属函数计算公式为:

$$U(X_j) = \frac{X_j - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (j = 1, 2, \dots, n)$$

反隶属函数计算公式为:

$$U(X_j) = 1 - \frac{X_j - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (j = 1, 2, \dots, n)$$

式中: X_j 表示第j个综合指标; X_{\min} 表示第j个综合指标的最小值; X_{\max} 表示第j个综合指标的最大值。

1.9 数据处理

用SPSS 22.0及Excel 2010对试验数据进行处理分析,采用Duncan法进行显著性比较。

2 实验结果

2.1 NaCl胁迫对苗木生长及盐害指数的影响

由图1可以看出,随着NaCl浓度增加,5个品种北美豆梨的苗木生长量逐渐降低。0.15%处理条件下,除‘贵族’品种显著低于对照外,其他品种与对照无显著差异;0.30%~0.60%处理时,5个品种均显著低于对照,但0.30%处理时下降幅度较小,0.45%和0.60%处理时下降幅度较大,说明0.45%和0.60%处理严重阻碍了苗木的正常生长。表1结果表明,5个品种北美豆梨的耐盐阈值存在一定差异,盐害指数均随着NaCl浓度的增加逐渐增大。0.15%处理时,‘殿级堂’、‘红塔’、‘贵族’叶片没有出现盐害症状,‘新布拉德福德’和‘克利夫兰’盐害指数呈小幅上升;0.45%处理时,各品种盐害指数均大幅升高,除‘殿级堂’外,其他品种的盐害指数均在40%以

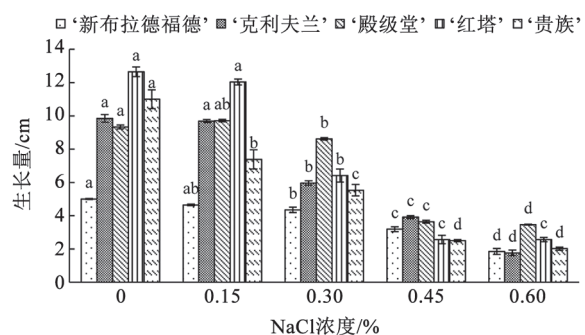


图1 NaCl胁迫下北美豆梨植株生长量

Fig.1 The growth of *P. calleryana* seedlings under NaCl stress
图中不同字母分别表示同一品种不同处理间存在显著差异 ($P < 0.05$), 下同。

表1 盐胁迫下北美豆梨叶片盐害指数和耐盐阈值

Table 1 Salt injury index and salt-tolerant threshold of *P. calleryana* under salt stress

品种	不同土壤盐浓度盐害指数/%					盐害起始浓度/%	耐盐阈值/%	耐盐极限浓度/%
	A	B	C	D	E			
‘新布拉德福德’	0.0	10.0	33.3	52.9	82.5	0.25	0.42	0.58
‘克利夫兰’	0.0	8.0	30.0	48.0	85.0	0.27	0.43	0.59
‘殿级堂’	0.0	0.0	16.7	36.9	72.0	0.36	0.50	0.64
‘红塔’	0.0	0.0	25.0	41.7	75.0	0.32	0.48	0.63
‘贵族’	0.0	0.0	25.0	45.6	78.5	0.31	0.46	0.61

A: 对照; B-E分别代表NaCl浓度为0.15%~0.60%。

上; 0.60%处理时, 各品种盐害指数均达70%以上。为准确推算不同品种耐盐临界阈值, 利用logistic曲线方程计算的盐害指数达50%的土壤含盐量分别为: ‘新布拉德福德’ 0.42%、‘克利夫兰’ 0.43%、‘殿级堂’ 0.50%、‘红塔’ 0.48%和‘贵族’ 0.46%, 其中, ‘殿级堂’最大、‘新布拉德福德’最小。由此可见, 5个品种耐盐性强弱顺序依次为: ‘殿级堂’>‘红塔’>‘贵族’>‘克利夫兰’>‘新布拉德福德’。

2.2 NaCl胁迫对叶绿素含量的影响

如图2所示, 随着NaCl胁迫浓度的升高, ‘殿级堂’的叶绿素含量先上升后下降, 其余品种均不断下降, 且不同品种下降幅度不同, 说明各品种间的耐盐能力存在差异。0.60%处理时, ‘新布拉德福德’、‘克利夫兰’、‘殿级堂’、‘红塔’和‘贵族’5个品种的叶绿素含量均显著降低, 分别为对照的24.17%、26.35%、56.62%、32.86%和21.97%, 其中‘殿级堂’降幅最小。方差分析表明, ‘新布拉德福德’和‘贵族’各处理均与对照差异显著, 其余品种的0.30%、0.45%和0.60%处理与对照达到显著差异水平。

2.3 NaCl胁迫对 P_n 的影响

由图3可以看出, ‘殿级堂’的 P_n 随着NaCl浓度的增加呈先上升后下降的趋势, 其余品种的 P_n 均不断下降。0.60%处理时‘新布拉德福德’、‘克利夫兰’、‘殿级堂’、‘红塔’和‘贵族’5个品种的 P_n 达到最低值, 分别为对照的12.28%、14.18%、45.89%、16.98%和14.74%, 其中‘殿级堂’的 P_n 降幅最小且均高于其余品种, 说明其耐盐性较强。‘殿级堂’、‘红塔’、‘贵族’的 P_n 在NaCl浓度大于0.30%时显著低于对照, 其余品种各处理间均与对照达到显著差异水平。

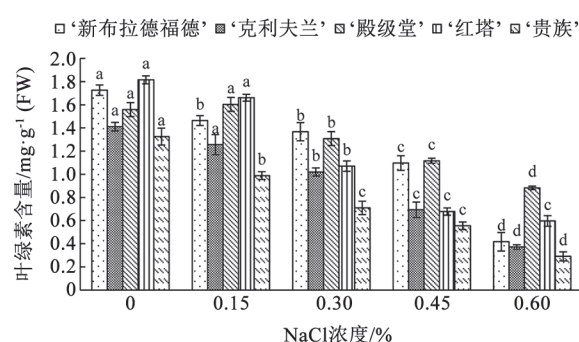


图2 NaCl胁迫下北美豆梨叶绿素含量的变化
Fig.2 Variations of chlorophyll content of *P. calleryana* under NaCl stress

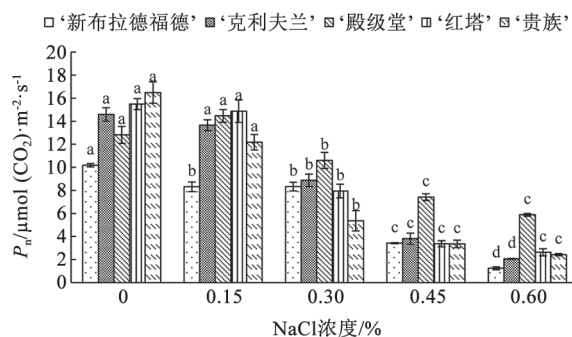


图3 NaCl胁迫下北美豆梨 P_n 的变化
Fig.3 Variations of P_n of *P. calleryana* under NaCl stress

2.4 NaCl胁迫对细胞保护酶活性的影响

2.4.1 NaCl胁迫对SOD活性的影响

由图4可知, 随着NaCl浓度的增加北美豆梨不同品种SOD活性均呈先上升后下降的变化趋势。‘新布拉德福德’和‘克利夫兰’在NaCl浓度0.30%时达到最大值, 分别为对照的1.73倍和1.48倍, 且与对照差异显著; ‘殿级堂’、‘贵族’和‘红塔’在NaCl浓

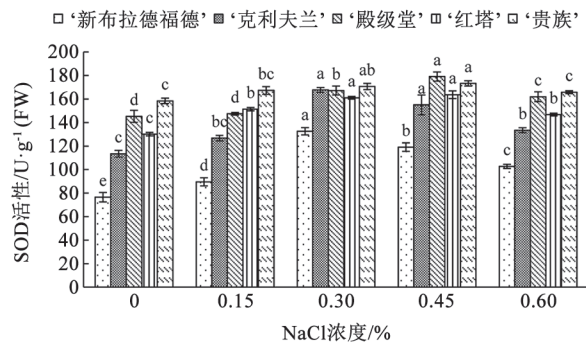


图4 NaCl胁迫下北美豆梨SOD活性的变化
Fig.4 Variations of SOD activity of *P. calleryana* under NaCl stress

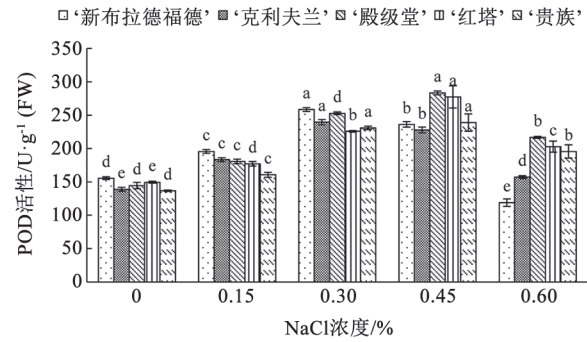


图5 NaCl胁迫下北美豆梨POD活性的变化
Fig.5 Variations of POD activity of *P. calleryana* under NaCl stress

度0.45%时达到最大值, 分别是对照的1.23、1.17和1.09倍, 均达到显著差异水平。

2.4.2 NaCl胁迫对POD活性的影响

随着NaCl浓度升高, POD活性呈先升高后降低的趋势(图5)。*‘新布拉德福德’*和*‘克利夫兰’* POD活性在NaCl浓度0.30%时达到最大值, 且显著高于对照, 分别是对照的1.66倍和1.72倍; *‘殿级堂’*、*‘红塔’*和*‘贵族’*在0.45%处理时POD活性最高, 且显著高于对照, 分别为对照的1.96、1.86和1.75倍; 0.60%处理时各品种的POD活性又显著下降。

2.4.3 NaCl胁迫对MDA含量的影响

NaCl胁迫下, 北美豆梨不同品种叶片丙二醛(MDA)含量逐渐升高(图6)。*‘新布拉德福德’*、*‘克利夫兰’*、*‘殿级堂’*和*‘贵族’*在NaCl浓度0.15%和0.30%时增加缓慢, 0.45%时急剧升高; *‘红塔’*在NaCl浓度0.45%以下均增加平缓, 0.60%处理时迅速升高, 且均显著高于对照。从MDA含量增加幅度来看, *‘殿级堂’*在不同NaCl浓度处理条件下的增加量均小于其他品种, 说明其细胞膜伤害最小, 耐盐能力较强。

2.5 NaCl胁迫对渗透调节物质的影响

随着NaCl浓度增加, 不同品种游离脯氨酸和可溶性糖含量均逐渐升高(图7-A和B)。在0.30% NaCl浓度以下时游离脯氨酸和可溶性糖含量均上升平缓, 在0.60%处理时达到最大值并显著高于其他处理。可溶性蛋白含量随盐浓度升高均呈先上升后下降的趋势(图7-C)。*‘新布拉德福德’*的可溶

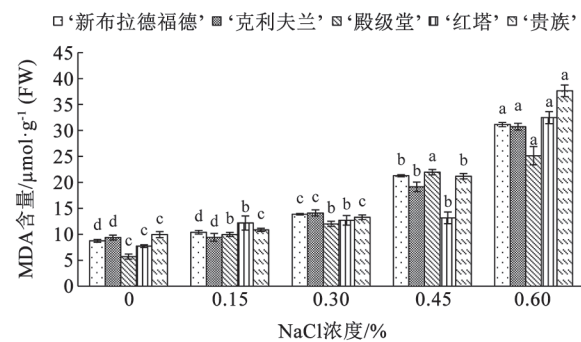


图6 NaCl胁迫下北美豆梨MDA含量的变化
Fig.6 Variations of MDA content of *P. calleryana* under NaCl stress

性蛋白含量在NaCl浓度0.30%时达到峰值, 其余品种在0.45%时达到峰值, 且均显著高于对照。

2.6 NaCl胁迫对Na⁺、K⁺含量的影响

各品种叶片Na⁺含量均随着NaCl处理浓度的增大显著上升(图8-A)。0.15%处理时, *‘新布拉德福德’*、*‘克利夫兰’*、*‘贵族’*和*‘红塔’*的Na⁺含量与对照无显著差异; 0.30%和0.45%处理的各品种Na⁺含量均大幅升高, 0.60%处理时达到最大值, 且均显著高于其他处理。不同品种Na⁺积累量顺序为: *‘新布拉德福德’*>*‘克利夫兰’*>*‘贵族’*>*‘殿级堂’*>*‘红塔’*。

随着NaCl浓度升高, 各品种K⁺含量变化趋势不尽相同(图8-B)。*‘新布拉德福德’*、*‘克利夫兰’*和*‘贵族’*叶片K⁺含量随着NaCl浓度升高呈先上升后下降的趋势, *‘殿级堂’*和*‘红塔’*叶片K⁺含量随着NaCl浓度的升高逐渐下降。0.60%处理时, 不同品

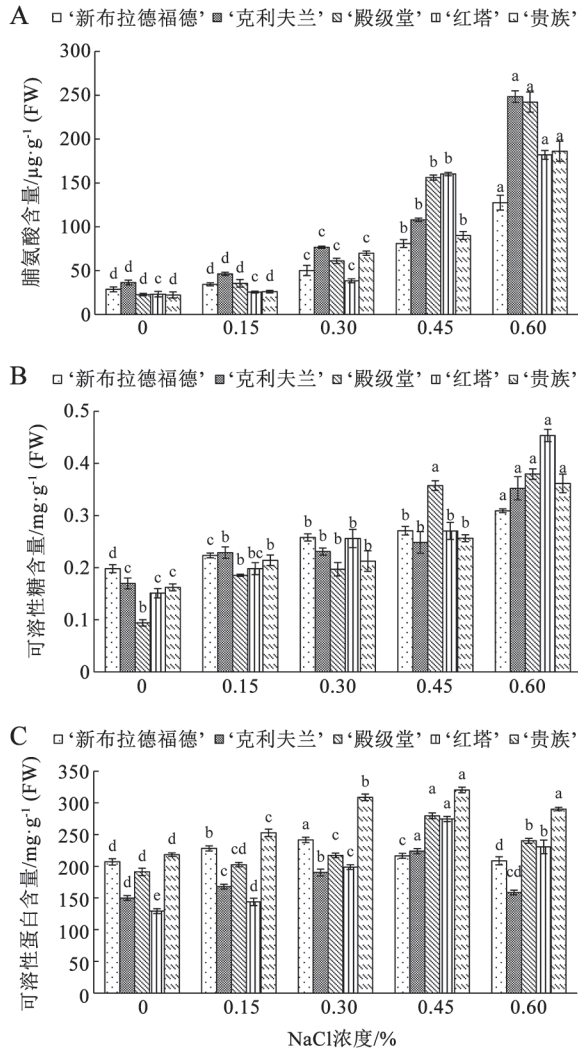


图7 NaCl胁迫下北美豆梨渗透调节物质的变化
Fig.7 Variations of osmotic adjustment substance of *P. calleryana* under NaCl stress

种 K^+ 含量均显著低于对照, '新布拉德福德'、'克利夫兰'、'殿级堂'、'贵族'和'红塔'的 K^+ 含量分别是对照处理的55.40%、66.73%、68.36%、71.60%和76.33%, 说明NaCl处理阻碍或限制了苗木对 K^+ 的吸收和积累。

各品种 Na^+/K^+ 均随NaCl浓度增加呈逐渐上升的趋势(图8-C)。0.15%处理时, Na^+/K^+ 与对照无显著差异; 0.30%和0.45%时 Na^+/K^+ 显著上升, 0.60%时达到最大值, 除'红塔'外, 均显著高于其他处理。0.45%和0.60%处理条件下'红塔'和'殿级堂'

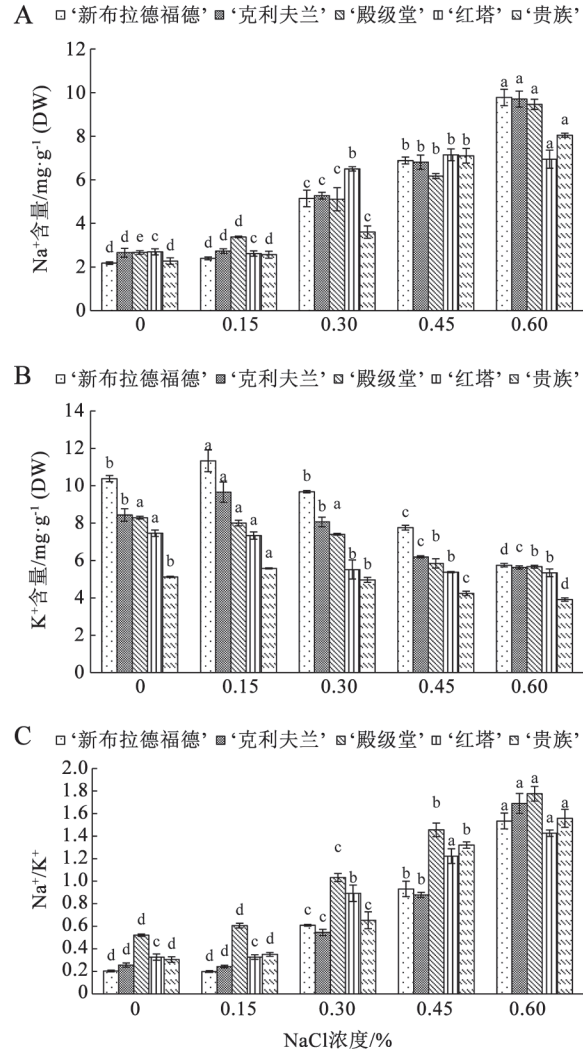


图8 NaCl胁迫下北美豆梨叶片离子含量的变化
Fig.8 Variations of ion content in leaves of *P. calleryana* under NaCl stress

的 Na^+/K^+ 增加幅度较其他品种小, 说明其在高盐胁迫下能维持合理的 Na^+/K^+ 来减缓离子胁迫对自身造成的伤害。

2.7 耐盐性综合评价

由表2可看出, 5个品种平均隶属度介于0.31~0.67之间, 其中, '殿级堂'平均隶属度最高, 为0.67, '新布拉德福德'平均隶属度最低, 为0.31。依据平均隶属度大小评判的5个品种的耐盐性强弱顺序依次为: '殿级堂'>'红塔'>'贵族'>'克利夫兰'>'新布拉德福德'。

表2 北美豆梨耐盐性综合评价

Table 2 Comprehensive evaluation of salt-tolerance of *P. calleryana*

品种	生长量	盐害指数	叶绿素	P_n	SOD	POD	丙二醛	脯氨酸	可溶性糖	可溶性蛋白	Na^+	K^+	Na^+/K^+	平均隶属度	排序
‘新布拉德福德’	0.00	0.00	0.15	1.00	0.00	0.37	0.41	0.00	0.43	0.42	0.25	0.99	0.00	0.31	5
‘克利夫兰’	0.71	0.15	0.66	0.44	0.56	0.27	0.56	0.99	0.19	0.00	0.01	0.67	0.07	0.41	4
‘殿级堂’	0.92	1.00	0.00	0.00	0.89	1.00	1.00	1.00	0.05	0.48	0.87	0.54	1.00	0.67	1
‘红塔’	1.00	0.70	0.25	0.37	0.74	0.75	0.81	0.55	1.00	0.17	0.06	0.34	0.38	0.55	2
‘贵族’	0.55	0.56	1.00	0.61	1.00	0.36	0.00	0.37	0.00	1.00	1.00	0.00	0.37	0.52	3

3 讨论

研究表明, 苗木生长量和盐害指数是植物对盐胁迫响应最敏感的形态和生理指标, 利用logistic曲线方程推算盐害指数达50%的土壤含盐量阈值可作为植物耐盐能力评价的重要指标(杜中军等2002; 刘炳响等2012)。本试验中, 随着NaCl浓度增加, 5个品种苗木生长量逐渐降低, 盐害指数逐渐增大, 且不同品种间存在一定差异。利用logistic曲线方程计算的‘新布拉德福德’、‘克利夫兰’、‘殿级堂’、‘红塔’和‘贵族’5个北美豆梨品种的耐盐阈值分别为0.42%、0.43%、0.50%、0.48%和0.46%(表1), 据此推断的耐盐能力强弱顺序依次为: ‘殿级堂’>‘红塔’>‘贵族’>‘克利夫兰’>‘新布拉德福德’。

植物通过光合作用积累有机物以维持自身生长, 叶绿素是光合作用的物质基础, 其含量与 P_n 密切相关(虞秀明等2016)。本研究中, 0.15%处理时‘殿级堂’的叶绿素含量和 P_n 小幅上升(图2和图3), 可能是低浓度盐胁迫使叶绿素合成酶的活性加强, 促进了叶绿素的合成, 进而叶绿素含量增加, 与前人研究结果一致(周丹丹等2016)。当NaCl浓度大于0.30%时, 各品种豆梨的叶绿素含量和 P_n 均不断下降, 可能是高浓度盐胁迫导致了叶绿体结构受损或功能紊乱, 阻碍了叶绿素的合成, 进而限制了光合作用的正常进行, 导致 P_n 下降, 具体原因有待于进一步研究。

SOD和POD是植物体主要的抗氧化酶, 盐胁迫下SOD和POD活性升高可有效清除活性氧自由基对植物细胞膜的伤害, 进而减缓或避免盐胁迫对植物的伤害(朱金方等2015)。本研究中(图4和5), 0.15%~0.30%处理条件下SOD和POD活性逐渐升

高, 说明细胞可通过提高SOD和POD活性来清除盐胁迫下活性氧自由基对细胞膜的伤害; 0.45%处理时‘殿级堂’、‘红塔’和‘贵族’的SOD和POD活性高于‘克利夫兰’和‘新布拉德福德’说明其清除活性氧自由基的能力和耐盐能力较强; 0.60%处理时各品种SOD和POD活性均显著下降, 说明0.60% NaCl处理超出了SOD和POD对活性氧自由基清除能力的极限, 细胞膜可能受到了严重伤害(胡晓立等2010)。MDA是衡量细胞膜损伤程度的重要指标, 盐胁迫产生的活性氧自由基会破坏细胞膜不饱和脂肪酸引起细胞膜脂过氧化, 使氧化产物MDA含量随之升高(吕廷良2010)。本研究中, 随着NaCl浓度升高, 不同品种MDA含量均逐渐增加(图6); 0.15%~0.30%处理时MDA含量增加较缓慢; 0.45%处理时, 除‘红塔’外其余品种均显著增加; 0.60%处理时MDA含量均达到峰值, 除‘殿级堂’外均显著高于其他处理, 说明此时细胞膜受到了严重伤害。0.45%和0.60%处理条件下, ‘殿级堂’的MDA含量较低而SOD和POD活性较高, 说明高浓度NaCl胁迫下‘殿级堂’可通过提高SOD和POD活性及时清除活性氧进而减缓对细胞膜的伤害, 是其耐盐性较强的生理机制所在。

大量研究表明, 盐胁迫引起的渗透胁迫可导致植物吸水能力的下降, 渗透调节物质如脯氨酸、可溶性糖和可溶性蛋白等含量的增加有利于对水分的吸收, 在减轻盐胁迫逆境对植物伤害方面发挥着重要作用, 是植物耐盐的一种重要生理机制(杨志莹等2011; 党晓宏等2016; 孙聪聪等2017)。在本研究中, 不同品种北美豆梨的脯氨酸和可溶性糖含量随着NaCl浓度的升高而持续升高, 可溶性蛋白含量随着NaCl浓度的升高而呈现先升

高后降低的趋势(图7), 说明NaCl胁迫下北美豆梨可通过增加渗透调节物质累积来而减缓因渗透胁迫对植株造成的伤害, 与上述前人研究结果一致。

离子胁迫是盐害发生的重要原因之一, NaCl胁迫下高浓度Na⁺后会抑制根系对K⁺的选择性吸收, 进而破坏细胞内的离子平衡导致盐害的发生(莫海波等2011; Takahashi等2007)。本研究中, 随着NaCl胁迫浓度升高, Na⁺含量逐渐增加, K⁺含量下降, Na⁺/K⁺逐渐增大(图8), 与王树凤等(2010)研究结果一致, 可能是由于Na⁺和K⁺有相似的离子半径和水合能, 两者相互竞争转运体的同一结合位, 高浓度的Na⁺进入细胞后阻碍了细胞对K⁺的吸收所致(王艳青等2011)。同时, 离子区隔化是植物耐盐的途径之一, 本试验中, ‘殿级堂’的Na⁺/K⁺在NaCl胁迫条件下普遍高于其他品种(图8-C)而其苗木生长量(图1)较其他品种大, 说明可能存在叶片细胞Na⁺区隔化, 在其抵御盐胁迫逆境中发挥了重要作用, 有待于进一步研究。

植物的耐盐性是多种因素共同作用的结果, 采用单一指标进行评价很难真实地反映其耐盐性。利用与耐盐性相关生理指标结合模糊隶属函数值进行综合评价是评价植物耐盐能力的重要方法(姚明志等2018; 杨升等2013), 平均隶属度越大, 表明耐盐能力越强, 反之耐盐能力越弱(任子蓓等2018)。本研究对不同指标的隶属函数分析表明(表2), 不同品种的平均隶属度介于0.31~0.67之间, ‘殿级堂’的平均隶属度最高, 耐盐性最强, ‘新布拉德福德’的平均隶属度最低, 耐盐性最弱。5个品种的耐盐强弱顺序依次为: ‘殿级堂’>‘红塔’>‘贵族’>‘克利夫兰’>‘新布拉德福德’。从不同指标隶属函数值来看, 豆梨‘殿级堂’的POD、MDA、脯氨酸和Na⁺/K⁺的隶属度均为1, 说明‘殿级堂’既可通过增加POD活性和脯氨酸积累来缓解盐胁迫导致的活性氧伤害和渗透胁迫, 也可通过调节Na⁺/K⁺来缓解离子胁迫引发的盐害发生, 多个生理代谢协同作用可能是其耐盐机制所在; 而‘红塔’和‘贵族’的可溶性糖和可溶性蛋白隶属度最高, 说明其耐盐机制以增加渗透调节物质含量来缓解盐害发生为主。

综上所述, 不同品种北美豆梨耐盐能力和耐

盐机制存在一定差异。5个品种的耐盐能力强弱顺序依次为: ‘殿级堂’>‘红塔’>‘贵族’>‘克利夫兰’>‘新布拉德福德’; 可忍耐的NaCl含量阈值分别为: ‘新布拉德福德’ 0.42%, ‘克利夫兰’ 0.43%, ‘殿级堂’ 0.50%, ‘红塔’ 0.48%, ‘贵族’ 0.46%。该结果为开展北美豆梨引种栽培提供了依据, 在园林应用时可根据不同地区立地条件选择适宜品种。

参考文献(References)

- Cheng SJ, Qian HM, Tang DQ, et al (2012). Effect of NaCl stress on the growth and osmotic adjustment substances of four landscape plants. *J Shanghai Jiaotong Univ (Agric Sci)*, 30: 88–94 (in Chinese with English abstract) [程淑娟, 钱虹妹, 唐东芹等(2012). NaCl胁迫对4种园林植物生长及渗透调节物质的影响. 上海交通大学学报(农业科学版), 30: 88–94]
- Dang XH, Gao Y, Meng ZJ, et al (2016). Leaf physiological characteristics of seedlings of three *Atriplex* species under NaCl stress. *J Beijing For Univ*, 38: 38–49 (in Chinese with English abstract) [党晓宏, 高永, 蒙仲举等(2016). 3种滨藜属植物幼苗叶片对NaCl胁迫的生理响应. 北京林业大学学报, 38: 38–49]
- Du ZJ, Zhai H, Luo XS, et al (2002). Salt-tolerance identification on apple rootstocks. *J Fruit Sci*, 19: 4–7 (in Chinese with English abstract) [杜中军, 翟衡, 罗新书等(2002). 苹果砧木耐盐性鉴定及其指标判定. 果树学报, 19: 4–7]
- Hu XL, Li YH, Chen DL, et al (2010). Physiological responses of three colored-leaf species of *Prunus* under NaCl stress. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*, 30: 370–376 (in Chinese with English abstract) [胡晓立, 李彦慧, 陈东亮等(2010). 3种李属彩叶植物对NaCl胁迫的生理响应. 西北植物学报, 30: 370–376]
- Li HS, Sun Q, Zhao SJ, et al (2006). Principles and Technology of Plant Physiological and Biochemical Experiments. Beijing: Higher Education Press (in Chinese) [李合生, 孙群, 赵世杰等(2006). 植物生理实验原理与技术. 北京: 高等教育出版社]
- Liu BX, Wang ZG, Liang HY, et al (2012). Effects of salt stress on physiological characters and salt-tolerance of *Ulmus pumila* in different habitats. *Chin J Appl Ecol*, 23: 1481–1489 (in Chinese with English abstract) [刘炳响, 王志刚, 梁海永等(2012). 盐胁迫对不同生境白榆生理特性与耐盐性的影响. 应用生态学报, 23: 1481–1489]
- Liu CY, Yan M, Huang XB, et al (2018). Salt tolerance and screening for identification indexes with pomegranate cuttings. *J Zhejiang A & F Univ*, 35: 853–860 (in Chinese

- with English abstract) [刘翠玉, 闫明, 黄贤斌等(2018). 石榴耐盐性研究与指标筛选. 浙江农林大学学报, 35: 853–860]
- Lü TL (2010). Response features of four tree species such as *Fraxinus velutina* Torr. to salt stress treatments (dissertation). Taian: Shandong Agriculture University (in Chinese with English abstract) [吕廷良(2010). 白蜡等4个树种盐胁迫下生理生化反应的研究(学位论文). 泰安: 山东农业大学]
- Mo HB, Yin YL, Lu ZG, et al (2011). Effects of NaCl stress on the seedling growth and K^+ and Na^+ allocation of four leguminous tree species. *Chin J Appl Ecol*, 22: 1155–1161 (in Chinese with English abstract) [莫海波, 殷云龙, 芦治国等(2011). NaCl胁迫对4种豆科树种幼苗生长和 K^+ 、 Na^+ 含量的影响. 应用生态学报, 22: 1155–1161]
- Qiu YB, Wang CJ, Kao SG, et al (2014). Study on grafting technology of *Pyrus calleryana* Decne. *Shandong Agric Sci*, 46: 54–56 (in Chinese with English abstract) [邱玉宾, 王成金, 考尚文等(2014). 北美豆梨嫁接技术研究. 山东农业科学, 46: 54–56]
- Ren ZP, Xue TX, Ren SF (2018). Physiological responses of three species of *Forsythia* under NaCl stress. *J Hebei Agric Univ*, 41: 55–60 (in Chinese with English abstract) [任子蓓, 薛腾笑, 任士福(2018). 3种连翘属植物对NaCl胁迫的生理响应. 河北农业大学学报, 41: 55–60]
- Sun CC, Zhao HY, Zheng CX (2017). Effects of NaCl stress on osmolyte and proline metabolism in *Ginkgo biloba* seedling. *Plant Physiol J*, 53: 470–476 (in Chinese with English abstract) [孙聪聪, 赵海燕, 郑彩霞(2017). NaCl胁迫对银杏幼树渗透调节物质及脯氨酸代谢的影响. 植物生理学报, 53: 470–476]
- Sun J, Wang QC, Liu Q, et al (2010). Growth and physiological responses of *Sambucus coreana* and *Acer ginnala* seedlings to $NaHCO_3$ stress. *Sci Silv Sin*, 46: 71–77 (in Chinese with English abstract) [孙晶, 王庆成, 刘强等(2010). $NaHCO_3$ 胁迫下朝鲜接骨木和茶条槭苗木的生长及生理响应. 林业科学, 46: 71–77]
- Takahashi R, Nishio T, Ichizen N, et al (2007). Cloning and functional analysis of the K^+ transporter, PhaHAK₂, from salt-sensitive and salt-tolerant reed plants. *Biotechnol Lett*, 29: 501–506
- Wang L, Cai M, Lan HY (2015). Comparison of salt tolerance between *Chenopodium album* and *C. glaucum*. *Plant Physiol J*, 51: 1846–1854 (in Chinese with English abstract) [王璐, 蔡明, 兰海燕(2015). 藜科植物藜与灰绿藜耐盐性的比较. 植物生理学报, 51: 1846–1854]
- Wang SF, Hu YX, Li ZL, et al (2010). Effects of NaCl stress on growth and mineralion uptake, transportation and distribution of *Quercus virginiana*. *Acta Ecol Sin*, 30: 4609–4616 (in Chinese with English abstract) [王树凤, 胡韵雪, 李志兰等(2010). 盐胁迫对弗吉尼亚栎生长及矿质离子吸收、运输和分配的影响. 生态学报, 30: 4609–4616]
- Wang YQ, Jiang XN, Li Y, et al (2001). The changes of ion absorbing and distribution in different organ and cell of *Robinia pseudoacacia* seedlings for salt stress. *J Beijing For Univ*, 23: 18–23 (in Chinese with English abstract) [王艳青, 蒋湘宁, 李悦等(2001). 盐胁迫对刺槐不同组织及细胞离子吸收和分配的变化. 北京林业大学学报, 23: 18–23]
- Yang N, Jiang L, Jiang GH, et al (2015). The relationship between leaf color in autumn and physiological changes of *Pyrus calleryana* Decne. *J Agric*, 5: 73–78 (in Chinese with English abstract) [杨暖, 姜琳, 姜官恒等(2015). 北美豆梨秋冬叶色与生理变化的关系. 农学学报, 5: 73–78]
- Yang S, Liu ZX, Zhang HX, et al (2013). Comprehensive evaluation of salt tolerance and screening identification indexes for three tree species. *Sci Silv Sin*, 49: 91–98 (in Chinese with English abstract) [杨升, 刘正祥, 张华新等(2013). 3个树种苗期耐盐性综合评价及指标筛选. 林业科学, 49: 91–98]
- Yang ZY, Zhao LY, Xu ZD (2011). Impacts of salt stress on the growth and physiological characteristics of *Rosa rugosa*. *Chin J Appl Ecol*, 22: 1993–1998 (in Chinese with English abstract) [杨志莹, 赵兰勇, 徐宗大(2011). 盐胁迫对玫瑰生长和生理特性的影响. 应用生态学报, 22: 1993–1998]
- Yao MZ, Cao L, Wang LH, et al (2018). Effect of salt stress physiological and biochemical characteristics and salt-tolerance of *Vitex trifolia* L. var. *simplicifolia* Cham. from different provenances. *J Northeast For Univ*, 46: 19–23 (in Chinese with English abstract) [姚明志, 曹林, 王连红等(2018). 不同种源单叶蔓荆盐胁迫下生理生化特性及耐盐性评价. 东北林业大学学报, 46: 19–23]
- Yu XM, Sun Q, Yao HJ, et al (2016). Comparative photosynthetic characteristics of different *Hydrangea* L. varieties. *Plant Physiol J*, 52: 1142–1150 (in Chinese with English abstract) [虞秀明, 孙强, 姚红军等(2016). 绣球属品种间光合特性的比较研究. 植物生理学报, 52: 1142–1150]
- Zhang SC, Yuan F, Guo JR, et al (2015). Comprehensive evaluation on salt-tolerance of *Sorghum bicolor* seedlings by subordinate function values analysis. *Plant Physiol J*, 51: 893–902 (in Chinese with English abstract) [张士超, 袁芳, 郭建荣等(2015). 利用隶属函数值法对甜高粱苗期耐盐性的综合评价. 植物生理学报, 51: 893–902]
- Zhou DD, Liu DX, Li CH, et al (2016). Photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters of *Celtis sinensis* and *Ulmus pumila* L. seedling under salt stress. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*, 36: 1004–1011 (in

Chinese with English abstract) [周丹丹, 刘德玺, 李存华等(2016). 盐胁迫对朴树和速生白榆幼苗光合特性及叶绿素荧光参数的影响. 西北植物学报, 36: 1004–1011]
Zhu JF, Liu JT, Lu ZH, et al (2015). Effects of salt stress on

physiological characteristics of *Tamarix chinensis* Lour. seedlings. Acta Ecol Sin, 35: 5140–5146 (in Chinese with English abstract) [朱金方, 刘京涛, 陆兆华等(2015). 盐胁迫对中国柽柳幼苗生理特性的影响. 生态学报, 35: 5140–5146]

Physiological characteristics and comprehensive evaluation of *Pyrus calleryana* Decne. under NaCl stress

ZHAO Jia-Wei¹, LI Qing-Ya¹, LU Bin¹, LI Yan¹, ZHU Yu-Fei¹, LI Hao³, LU Bing-She^{1,2,*}

¹College of Landscape and Tourism, Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei 071000, China

²The Lab of Forestry Germ Resource and Protection of Hebei, Baoding, Hebei 071001, China

³Renqiu Institute of Landscape Architecture, Renqiu, Hebei 062550, China

Abstract: In order to find out the salt-tolerance ability in 5 cultivars of *Pyrus calleryana*, the effects of different concentrations (0, 0.15%, 0.30%, 0.45% and 0.60%) of NaCl stress on seedling growth, salt damage index, physio-biochemical indexes, and Na⁺ and K⁺ contents in leaves were studied. The salt-tolerance abilities of five varieties were evaluated by fuzzy membership function. The results showed that with the increase of NaCl concentration, the seedling growth of five varieties decreased gradually, and the salt injury index increased gradually. The NaCl content in the soil, where the seedlings of ‘New Bradford’, ‘Cleveland’, ‘Chanticlee’, ‘Redspire’ and ‘Avistocra’ could endure, was 0.42%, 0.43%, 0.50%, 0.48% and 0.46%, respectively. With the increase of NaCl concentration, the activities of SOD and POD and the content of soluble protein increased firstly and then decreased, while the contents of MDA, proline and soluble sugar increased gradually. With the increase of NaCl concentration, the content of Na⁺ in leaves increased and K⁺ decreased gradually. The results of membership function analysis showed that the order of salt tolerance abilities of five varieties were as follows: ‘Chanticlee’ > ‘Redspire’ > ‘Avistocra’ > ‘Cleveland’ > ‘New Bradford’.

Key words: NaCl stress; *Pyrus calleryana*; physiological index; salt tolerance threshold; membership function

Received 2018-11-02 Accepted 2019-01-07

This work was supported by National Science and Technology Support Program (2013BAD01B06-1), the Natural Science Foundation of Hebei Province (C2015204066), and Youth Fund Project of Hebei Education Department (2019219).

*Corresponding author (lubingshe@126.com).