

调环酸钙对盐碱胁迫下绿豆苗期生长的调控作用

侯雪¹ 陈雨洁¹ 李春苗¹ 方淑梅^{1,2} 梁喜龙^{1,2} 郑殿峰^{1,3}

(¹黑龙江八一农垦大学, 163319, 黑龙江大庆; ²黑龙江省植物生长调节剂工程技术研究中心, 163319, 黑龙江大庆; ³广东海洋大学, 524088, 广东湛江)

摘要 以绿丰2号和绿丰5号为试验材料, 于第1片复叶展开期进行150mmol/L的混合盐碱胁迫及叶面喷施不同浓度的调环酸钙(Pro-Ca), 再继续培养15d后取样, 研究不同浓度的Pro-Ca对绿豆苗期生长的调控作用。结果表明, 叶面喷施适宜浓度的Pro-Ca(100mg/L)可通过增加渗透物质含量、提升抗氧化酶活性及降低MDA含量来维持细胞渗透势, 消除活性氧, 降低膜质过氧化程度, 保护细胞膜结构, 从而缓解盐碱胁迫对绿豆幼苗植株造成的伤害, 提高绿豆幼苗抗盐碱的能力, 具体表现为100mg/L Pro-Ca处理下绿丰2号和绿丰5号株高分别降低29.64%和21.72%, 地下干重分别增加33.33%和50.00%, 根冠比分别增加42.86%和8.33%, 叶绿素含量分别增加15.77%和18.55%。

关键词 盐碱胁迫; 调环酸钙; 绿豆; 渗透调节; 保护性酶

随着人口增加和环境恶化, 土壤盐碱化已成为日益严重的全球性问题。目前全球约有7%的土地受到盐碱化威胁, 尚无有效措施来控制其传播^[1]。土壤盐碱化对植物的胁迫效应包括盐胁迫和碱胁迫。根据含盐量和pH, 盐碱胁迫的程度可分为轻度(含盐量小于3‰, pH为7.1~8.5)、中度(含盐量3‰~6‰, pH 8.5~9.5)和重度(含盐量超过6‰, pH超过9.5)^[2]。中国松嫩平原、澳大利亚维多利亚州和美国加利福尼亚州是世界上3个典型的盐碱地土壤分布地区, 其中, 中国的盐碱地面积约为1亿hm², 东北松嫩平原占373万hm², 对中国农业生产造成一定的不良影响^[3]。

绿豆作为我国重要的杂豆类作物之一, 因其具有生育周期短(65~90d)、播种范围广、抗旱、耐贫瘠和生态适应性强等特性已成为国际市场的高附加值农产品^[4-6]。同时绿豆具有固氮养地的作用, 其不仅可作为间作套种的良好前茬, 也成为农业种植结构调整的重要作物, 且可有效提高生态环境利用率^[7-10]。我国盐碱土地面积分布广泛, 但目前对提高绿豆耐盐碱能力的有效栽培技术研究有限, 制约了绿豆产业发展。植物生长调节剂已经被广泛应用于提高作物抗逆性、抗倒伏、改善品质和促控生

长发育等诸多方面。可以通过施加生长调节剂, 使植物向着预期的方向和程度生长, 从而达到调控作物生长发育、提高生态适应能力的作用。

调环酸钙(prohexadione-calcium, Pro-Ca)是一种抑制赤霉素生物合成的新型植物生长调节剂, 其化学名称为3,5-二氧代-4-丙酰基环己烷羧酸钙, 与多效唑及烯效唑等三唑类延缓剂相比, 作物残留倾向低, 对环境无污染, 毒理学和生态毒理学特征优势明显, 应用前景好, 有可能取代三唑类生长延缓剂^[11-12]。已有研究^[13]表明, 外源施加Pro-Ca可减少冷害下番茄果实的丙二醛(MDA)含量, 降低磷脂酶D(PLD)和脂氧合酶(LOX)活性, 并增加脯氨酸(Pro)含量来保持细胞膜的完整性, 从而减轻冷害对番茄果实造成的损伤。暴露于干旱环境下的禾草经过LOX处理后降低了电解质渗漏和MDA含量, 并显著提高超氧化物歧化酶(SOD)、抗坏血酸过氧化物酶(APX)及过氧化氢酶(CAT)活性, 增强植物对干旱的耐受性^[14]。Pro-Ca也可减轻盐分对豆类幼苗的有害影响, 研究^[15]显示, Pro-Ca可以通过增加光合色素、总碳水化合物、总可溶性糖、Pro含量和抗氧化酶活性来提高蚕豆幼苗在盐胁迫下的耐受性。目前, 人们对Pro-Ca在

作者简介: 侯雪, 从事植物逆境与化学调控研究, E-mail: 1450674207@qq.com; 陈雨洁为共同第一作者, 从事植物化学调控相关研究, E-mail: 1414554166@qq.com

方淑梅为通信作者, 从事植物抗逆及化学调控研究, E-mail: fangshumei520@126.com; 梁喜龙为共同通信作者, 从事植物逆境生理及化学调控与高产研究, E-mail: xilongliang@126.com

基金项目: 大学生创新创业训练计划项目(201910223010); 黑龙江省农垦总局科技攻关项目(HNK135-02-10); 黑龙江省杂粮现代农业产业技术协同创新体系项目; 黑龙江省杂粮生产与加工特色学科建设项目

收稿日期: 2021-09-06; 修回日期: 2021-11-19; 网络出版日期: 2022-10-11

植物生长、发育和胁迫方面有了更加深入的研究,但对盐碱胁迫下的研究和应用还十分有限,尤其是对调控盐碱胁迫下的绿豆生理响应还鲜见报道。为此,本研究以盐碱抗性绿豆品种(绿丰 2 号,幼苗盐害指数 <20)和盐碱敏感性绿豆品种(绿丰 5 号, $60 \leq$ 幼苗盐害指数 <80)为试验材料,探讨不同浓度 Pro-Ca 对绿豆幼苗在盐碱胁迫下的调控作用,为深入揭示 Pro-Ca 抗盐碱胁迫作用及在农业生产中深入应用提供试验基础和依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

绿丰 2 号和绿丰 5 号均由国家杂粮工程技术研究中心提供,植物生长调节剂调环酸钙(Pro-Ca, 5%)由四川国光农化股份有限公司提供。

1.2 试验设计

1.2.1 播种与幼苗培养 选取籽粒饱满、形状均一致的绿豆种子,经 75%乙醇消毒后用无菌水冲洗 3 次,以蛭石为栽培基质在塑料盒(37cm \times 29cm \times 11cm)中种植,每盒均播种 30 粒,出苗后定苗 15 株。于 2019 年在黑龙江八一农垦大学农学院温室中进行培养,昼/夜空气温度为 23 $^{\circ}$ C~28 $^{\circ}$ C/20 $^{\circ}$ C~25 $^{\circ}$ C,光照强度为 18 000lx。播种时每盆加入 1.5L 蒸馏水,自真叶长出时开始每 3d 补充 1/2 Hoagland 营养液 0.5L。

1.2.2 盐碱胁迫处理 当幼苗长至复叶展开期,选取长势基本一致的绿豆幼苗同时进行盐碱胁迫及调节剂处理。其中盐碱胁迫以模拟典型盐碱土的实际情况进行,即使用混合盐碱溶液(NaCl:Na₂SO₄:NaHCO₃:Na₂CO₃=1:9:9:1, pH=8.5 \pm 0.1)浓度为 150mmol/L^[16]。各处理及对照均透灌 1.5L 的盐碱溶液进行胁迫处理,处理 3d 后再补充 0.5L 盐碱溶液。

1.2.3 外源 Pro-Ca 处理 于盐碱胁迫处理的同时进行 Pro-Ca 调节剂处理,分别设置 50、100、150、200mg/L 4 个浓度梯度,以蒸馏水为对照(CK),从上向下每盒均匀喷施 50mL(叶面形成一层水膜),每个处理均设置 2 盒。盐碱胁迫 15d 后,各处理均随机选取 3 株,用于生长参数和相对叶绿素含量(SPAD)的测定,试验设置 4 次重复。以第 1 片完全展开的复叶为研究对象,另随机选取 3 株植株叶片混合,取样后用液氮速冻立即置于-80 $^{\circ}$ C低温冰箱中保存,用于各项生理指标测定,试验设置

3 次重复。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 生长参数及生物量 分离地上和地下部分,测量株高、茎粗、地上干重和地下干重,并计算根冠比(R/S),R/S=根干重/地上部干重。

1.3.2 SPAD 以第 1 片完全展开的复叶为研究对象,采用便携式叶绿素仪(日本)测定 SPAD。

1.3.3 渗透物质含量 取样后利用蒽酮比色法、磺基水杨酸法和考马斯亮蓝 G-250 染色法分别测定可溶性糖、Pro 及可溶性蛋白质含量。

1.3.4 保护性酶活性及 MDA 含量 取样后分别用氮蓝四唑(NBT)法、愈创木酚法、紫外吸收法和硫代巴比妥酸(TBA)法测定 SOD、POD、CAT 活性及 MDA 含量。

1.4 数据处理

利用 Microsoft Excel 统计数据与绘图,SPSS 22.0 软件进行 ANOVA 单因素方差分析,Duncan's 进行不同处理间的比较检验,同时使用双因素方差分析测试喷施 Pro-Ca 与品种类型对盐碱胁迫交互作用的主要影响。

2 结果与分析

2.1 Pro-Ca 对盐碱胁迫下绿豆苗期形态指标影响

由表 1 可知,不同浓度 Pro-Ca 处理下的绿丰 2 号株高与 CK 处理相比分别降低了 25.02%、29.64%、32.85%和 18.90%,且均与 CK 处理差异达显著水平;而绿丰 5 号分别较 CK 处理降低了 0.06%、21.72%、0.08%和 10.32%,且在 100mg/L 处理下株高较 CK 处理降低达显著水平。由此可见,Pro-Ca 对盐碱胁迫下绿豆苗期的株高均有不同程度的降低效果。绿丰 2 号茎粗与 CK 处理相比无明显改变,而绿丰 5 号茎粗则随 Pro-Ca 处理浓度的增加呈先增加后降低的趋势,在 100mg/L 处理下达最大值,较 CK 处理增加了 13.33%,说明 Pro-Ca 对盐碱胁迫下绿丰 5 号的茎粗有一定程度的增加效果。Pro-Ca 对盐碱胁迫下苗期绿豆的干物质积累量均有不同程度的促进作用,绿丰 2 号和绿丰 5 号的地上部干重均有不同程度的增加,但各组间与 CK 处理相比无显著差异,说明 Pro-Ca 对盐碱胁迫下绿丰 2 号与绿丰 5 号的地上部干重影响较小。绿丰 2 号在不同浓度 Pro-Ca 处理下地下部干重与 CK 处理相比各组间均呈显著增加水平,绿丰 5 号随

Pro-Ca 浓度的增加则呈先增加后降低的趋势，且在 100mg/L 处理下达显著差异水平。根冠比表现为绿丰 2 号受 Pro-Ca 影响较大，与 CK 处理相比分别增加了 57.14%、42.86%、28.57%和 50.00%，50mg/L 处理达显著水平。绿丰 5 号在 100mg/L Pro-Ca 处理下根冠比虽然增加，但与 CK 处理相比差异不显著，说明 Pro-Ca 可以增加绿豆在盐碱胁迫下的根冠比，且对绿丰 2 号影响较为显著。双因素分析表明，Pro-Ca 对盐碱胁迫下绿丰 2 号和绿丰 5 号的株高、地下部干重和根冠比均有极显著或显著的影响，且

表 1 Pro-Ca 对盐碱胁迫下绿豆苗期形态指标的影响
Table 1 Effects of Pro-Ca on plant morphological indexes of mung bean seedlings under salt-alkali stress

处理浓度 Treatment concentration (mg/L)	品种 Variety	株高 Plant height (cm)	茎粗 Stem diameter (mm)	地上部干重 Shoot dry weight (g)	地下部干重 Root dry weight (g)	根冠比 R/S
0 (CK)	绿丰 2 号	20.58±2.12a	1.43±0.19a	0.20±0.05a	0.03±0.01c	0.14±0.07b
	绿丰 5 号	20.44±3.10a	1.43±0.19b	0.23±0.08a	0.04±0.02b	0.24±0.22a
50	绿丰 2 号	15.43±1.65bc	1.45±0.33a	0.24±0.10a	0.05±0.01ab	0.22±0.10a
	绿丰 5 号	19.18±2.12a	1.55±0.24ab	0.25±0.10a	0.04±0.02b	0.17±0.08ab
100	绿丰 2 号	14.48±1.67c	1.43±0.26a	0.23±0.10a	0.04±0.02b	0.20±0.09ab
	绿丰 5 号	16.00±1.49b	1.65±0.26a	0.28±0.08a	0.08±0.08a	0.26±0.17a
150	绿丰 2 号	13.82±2.64c	1.43±0.18a	0.24±0.09a	0.04±0.02bc	0.18±0.09ab
	绿丰 5 号	18.77±3.17a	1.58±0.15ab	0.25±0.07a	0.03±0.01b	0.12±0.05b
200	绿丰 2 号	16.69±1.96b	1.38±0.18a	0.28±0.11a	0.05±0.01a	0.21±0.10a
	绿丰 5 号	18.33±2.60a	1.48±0.24ab	0.29±0.14a	0.04±0.01b	0.17±0.09ab
F 值 F-value	处理	10.912**	0.892	1.629	4.480**	2.720*
	品种	19.301**	5.314*	2.086	1.937	0.017
	处理×品种	2.823*	0.539	0.191	4.058*	2.944*

同列数据不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)，***表示差异极显著 ($P < 0.01$)，**表示差异显著 ($P < 0.05$)。下同
Different lowercase letters in the same column indicate significant difference at 0.05 level, *** indicates extremely significant difference at 0.01 level, ** indicates significant difference at 0.05 level. The same below

对绿丰 5 号茎粗的影响大于绿丰 2 号。

2.2 Pro-Ca 对盐碱胁迫下绿豆苗期 SPAD 的影响

如图 1 所示，不同浓度 Pro-Ca 均一定程度地提高了绿丰 2 号和绿丰 5 号 SPAD。随着 Pro-Ca 浓度的增加，绿丰 2 号 SPAD 与 CK 处理相比分别增加了 14.88%、15.77%、14.88%和 14.58%，而绿丰 5 号分别增加了 7.86%、18.55%、10.69%和 12.58%，且绿丰 2 号和绿丰 5 号的 SPAD 都在 100mg/L Pro-Ca 处理下达到峰值，但差异并未达显著水平。

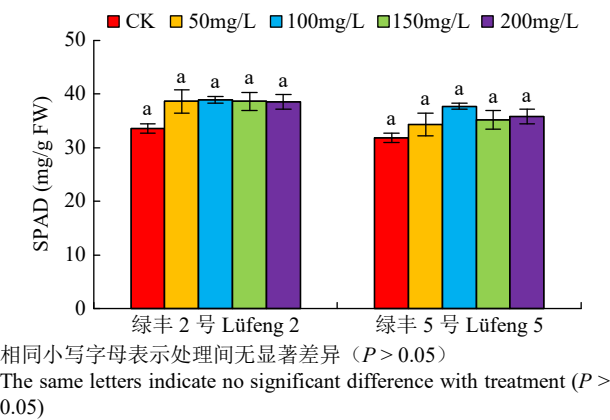


图 1 Pro-Ca 对盐碱胁迫下绿豆苗期 SPAD 的影响
Fig.1 Effects of Pro-Ca on SPAD of mung bean seedlings under salt-alkali stress

2.3 Pro-Ca 对盐碱胁迫下绿豆苗期渗透调节物质含量的影响

2.3.1 Pro-Ca 对可溶性糖含量的影响 由表 2 可知，绿丰 2 号和绿丰 5 号叶片可溶性糖含量随着 Pro-Ca 浓度的增加呈先升后降的趋势，分别在 150 和 100mg/L 浓度下叶片可溶性糖含量最高，与其对照相比含量均增加了约 2 倍，当绿丰 2 号和绿丰 5 号分别用超过 150 和 100mg/L 浓度处理时，叶片可溶性糖含量逐渐降低。说明外源施加 Pro-Ca 可增加盐碱胁迫下绿豆苗期可溶性糖含量，从而缓解盐碱胁迫对绿豆造成的损伤。

2.3.2 Pro-Ca 对可溶性蛋白含量的影响 由表 2 可知，在盐碱胁迫下，2 个绿豆品种在不同浓度 Pro-Ca 处理下均可增加叶片可溶性蛋白含量。绿丰 2 号和绿丰 5 号分别在 50 和 100mg/L 的 Pro-Ca 处理下达到最大值，与其对照相比分别增加了 43.47%和 53.83%，随后逐渐降低。说明在盐碱胁迫下 Pro-Ca 对绿豆苗期可溶性蛋白含量调控的最适浓度分别为 50 和 100mg/L。

2.3.3 Pro-Ca 对 Pro 含量的影响 由表 2 可知，在盐碱胁迫下，绿丰 2 号和绿丰 5 号叶片的 Pro 含量随着 Pro-Ca 浓度的增加呈先升高后降低的趋势，

且在 100 和 150mg/L 处理下 Pro 含量相对较高，其中，绿丰 2 号叶片的 Pro 含量较 CK 处理分别增加了 92.03%和 118.89%，绿丰 5 号叶片的 Pro 含量较 CK 处理均增加了 187.24%，随后呈下降趋势。说明在 100 和 150mg/L 处理下，Pro-Ca 对 Pro 的调节能力强。双因素分析表明，不同浓度 Pro-Ca 对绿豆叶片可溶性糖和可溶性蛋白含量的影响均达极显著差异水平，不同浓度 Pro-Ca 与不同品种交互作用显示，除对 Pro 含量无显著影响外，对绿豆叶片可溶性糖和可溶性蛋白含量均达极显著差异水平。

表 2 Pro-Ca 对盐碱胁迫下绿豆苗期渗透调节物质含量的影响				
Table 2 Effects of Pro-Ca on osmotic adjustment substances in mung bean seedlings under salt-alkali stress				
处理浓度 Treatment concentration (mg/L)	品种 Variety	可溶性糖含量 Soluble sugar content (m/g FW)	可溶性蛋白质含量 Soluble protein content (m/g FW)	脯氨酸含量 Proline content (μg/g FW)
0(CK)	绿丰 2 号	3.89±0.17a	4.44±0.02a	18.58±5.62a
	绿丰 5 号	2.62±0.29a	4.18±0.17b	12.62±2.25a
50	绿丰 2 号	7.42±0.23bc	6.37±0.12a	21.94±1.92a
	绿丰 5 号	4.49±0.20a	5.63±0.14ab	15.31±3.58a
100	绿丰 2 号	10.63±0.34c	4.63±0.19a	35.68±2.25a
	绿丰 5 号	10.10±0.42b	6.43±0.12a	36.25±6.80a
150	绿丰 2 号	11.80±0.46c	4.94±0.09a	40.67±1.16a
	绿丰 5 号	9.27±0.26a	4.93±0.05ab	36.25±1.73a
200	绿丰 2 号	9.62±0.28b	5.65±0.17a	21.94±3.66a
	绿丰 5 号	9.09±0.10a	4.72±0.05ab	31.74±4.56a
F 值 F-value	处理	702.983**	156.345**	43.608**
	品种	211.231**	0.346	2.836
	处理×品种	21.760**	114.639**	2.501

2.4 Pro-Ca 对盐碱胁迫下绿豆苗期抗氧化酶活性的影响

2.4.1 Pro-Ca 对 SOD 活性的影响 从表 3 可以看出，在盐碱胁迫下，各处理组绿豆叶片 SOD 活性均高于 CK，并随着 Pro-Ca 浓度的增加其活性呈先增加后降低的趋势，均在 100mg/L 处理下达到峰值，与对照相比呈显著差异水平。绿丰 2 号和绿丰

5 号叶片 SOD 活性较同期 CK 相比分别增加了 16.90%和 12.57%，当 Pro-Ca 浓度超过 100mg/L 时，SOD 的活性开始下降。说明盐碱胁迫下喷施 Pro-Ca 可提高绿豆叶片的 SOD 活性，减少绿豆体内活性氧自由基对细胞造成的伤害，且在 100mg/L 处理下绿豆叶片 SOD 活性最强，之后随着浓度的增加 SOD 活性反而降低。

表 3 Pro-Ca 对盐碱胁迫下绿豆苗期 SOD, POD 和 CAT 活性的影响				
Table 3 Effects of Pro-Ca on the SOD, POD and CAT activity of mung bean seedlings under salt-alkali stress				
处理浓度 Treatment concentration (mg/L)	品种 Variety	SOD 活性 SOD activity (U/g FW)	POD 活性 POD activity (U/g FW)	CAT 活性 CAT activity (U/g FW)
0(CK)	绿丰 2 号	285.71±4.79a	1188.89±732.07a	311.11±27.76a
	绿丰 5 号	310.08±18.43a	877.78±150.31b	404.44±20.37a
50	绿丰 2 号	323.81±15.74bc	2388.89±171.05a	337.78±40.73a
	绿丰 5 号	330.90±19.17a	1788.89±69.39ab	524.44±7.70a
100	绿丰 2 号	334.00±2.03c	3644.44±509.18a	466.67±48.07a
	绿丰 5 号	349.06±23.93b	2344.44±101.84a	546.67±0.00a
150	绿丰 2 号	319.82±21.48c	2433.33±200.00a	391.11±20.37a
	绿丰 5 号	324.25±5.79a	2255.56±69.39ab	471.11±7.70a
200	绿丰 2 号	310.08±18.09b	1911.11±69.39a	315.56±7.70a
	绿丰 5 号	318.05±2.77a	1988.89±830.22ab	317.78±27.76a
F 值 F-value	处理	6.566**	18.911**	33.286**
	品种	4.367	10.008**	135.309**
	处理×品种	0.408	2.614	4.605**

2.4.2 Pro-Ca 对 POD 活性的影响 从表 3 可以看出，2 个绿豆品种叶片 POD 活性随着 Pro-Ca 浓度

的增加呈先升后降的趋势，且 POD 活性都在 100mg/L 处理下显著高于 CK 处理并达到峰值。绿丰 2 号和绿丰 5 号叶片的 POD 活性与 CK 处理相比分别增加了 206.54%和 167.09%，当 Pro-Ca 浓度超过 100mg/L 时 POD 活性开始下降。说明喷施 Pro-Ca 可以提高盐碱胁迫下绿豆叶片的 POD 活性，从而缓解盐碱胁迫对绿豆造成的伤害。从总体上来看，100mg/L Pro-Ca 处理为最适浓度，且对具有一定耐盐能力的绿丰 2 号调控效果更好。

2.4.3 Pro-Ca 对 CAT 活性的影响 从表 3 可以看出，2 个绿豆品种叶片 CAT 活性均随着 Pro-Ca 浓度的增加呈先上升后降低的趋势，各处理组绿豆叶片 CAT 活性均高于 CK 处理。其中在 50、100 和 150mg/L 处理下与 CK 处理相比达差异显著水平，绿丰 2 号与 CK 处理相比依次分别增加了 8.50%、50.00%和 25.71%，绿丰 5 号分别增加了 29.67%、35.17%和 16.48%。双因素分析表明不同浓度 Pro-Ca 对绿豆叶片 SOD、POD 和 CAT 活性的影响均达极显著差异水平，但不同浓度 Pro-Ca 与不同品种交互作用除对 CAT 影响极显著外，对 SOD 和 POD 活性均无显著影响。

2.5 Pro-Ca 对盐碱胁迫下绿豆苗期 MDA 含量的影响

如表 4 所示，盐碱胁迫下各处理组绿豆叶片 MDA 含量均低于 CK 处理。在 100 和 200mg/L 处理下绿丰 2 号和绿丰 5 号叶片 MDA 含量与 CK 处理相比达显著差异水平，且在 200mg/L 处理下叶片

MDA 含量均达到最低，分别比 CK 处理降低 36.07%和 17.12%。说明盐碱胁迫下，外源施加 Pro-Ca 均可降低绿豆叶片 MDA 含量，从而降低绿豆膜质过氧化程度，增加细胞膜结构稳定性。双因素分析表明，不同浓度 Pro-Ca 及不同品种类型对绿豆 MDA 含量影响达极显著差异水平，但交互作用显示不同浓度 Pro-Ca 对盐碱胁迫下绿丰 2 号和绿丰 5 号 MDA 含量无显著影响。

3 讨论

植物的株高、茎粗、干物质积累量及根冠比等生长指标是植物耐盐碱能力最直接的反映和表现。在盐碱胁迫下，植物的生长指标会受到不同程度的抑制，根冠比增加^[17-19]。目前，植物生长调节剂已被广泛推广并应用于提高作物的抗性能力方面。本研究发现，在盐碱胁迫下，叶面喷施 Pro-Ca 可在一定程度上降低绿豆株高，促进地上部和地下部干物质积累，其中，在不同浓度 Pro-Ca 处理下绿豆的地上部干重虽有不同程度的增加，但不显著。地下部干重在 100mg/L 处理下与 CK 处理相比呈显著差异水平，说明 Pro-Ca 对盐碱胁迫下绿丰 2 号和绿丰 5 号的地下部干重影响比地上部更显著。根冠比增加是植物的一种自我保护效应，有利于植物吸收水分和营养物质，降低蒸腾速率和缓解由各种胁迫造成的缺水伤害^[20]。本研究发现，100mg/L Pro-Ca 可增加绿豆根冠比。因此，Pro-Ca 有助于缓解盐碱胁迫对绿豆造成的损伤。

光合作用是植物进行正常生命活动最重要的形式之一，而叶绿素含量通常被作为衡量植物叶片光合作用的重要指标，盐胁迫通常会造成植物叶绿素含量下降，减弱光合能力^[21]。而应用 Pro-Ca 可以增加植物体内叶绿素含量，提高植物光合能力^[22]。本研究发现，绿豆在 Pro-Ca 各组处理下均增加了 SPAD，且都在 100mg/L 下达到峰值，说明外源施加 Pro-Ca 可以维持盐碱胁迫下绿豆叶片的 SPAD，保证植物进行正常的光合作用，增强绿豆对盐碱胁迫的抗性，这与 Bekheta 等^[15]在蚕豆上施加 Pro-Ca 可以增加其在盐胁迫下叶绿素含量的结果相一致。

渗透调节是植物响应盐碱胁迫的一种有效策略，在盐碱胁迫下，植物通过在代谢过程中积累与合成可溶性糖、可溶性蛋白和 Pro 等渗透调节物质来平衡体内细胞的渗透势，进而缓解盐碱胁迫造成的伤害^[23-27]。Bekheta 等^[15]研究发现，Pro-Ca 可以

表 4 Pro-Ca 对盐碱胁迫下绿豆苗期 MDA 含量的影响
Table 4 Effects of Pro-Ca on MDA content (mmol/g FW) of mung bean seedlings under salt-alkali stress

处理浓度 Treatment concentration (mg/L)	品种 Variety	MDA 含量 MDA content (mmol/g FW)
0 (CK)	绿丰 2 号	33.99±0.84a
	绿丰 5 号	23.66±0.67a
50	绿丰 2 号	28.52±7.57bc
	绿丰 5 号	22.21±0.28a
100	绿丰 2 号	26.20±0.51c
	绿丰 5 号	20.99±1.38b
150	绿丰 2 号	26.02±0.44c
	绿丰 5 号	22.00±2.20a
200	绿丰 2 号	21.73±0.55b
	绿丰 5 号	19.61±0.60a
F 值 F-value	处理	7.953**
	品种	35.401**
	处理×品种	2.124

促进盐胁迫下蚕豆体内渗透调节物质的积累来提高耐盐性。Aghdam^[28]研究发现, Pro-Ca 可以大大增加番茄中 Pro 含量, 从而增强对冷害的抗性。本试验结果表明, Pro-Ca 可以增加盐碱胁迫下绿豆叶片的可溶性糖、可溶性蛋白和 Pro 含量, 其中, 可溶性糖和 Pro 含量随着 Pro-Ca 的增加呈先增后降的趋势, 且均在 100mg/L 处理下达到峰值; 绿丰 2 号和绿丰 5 号叶片可溶性蛋白含量分别在 50 和 100mg/L 的 Pro-Ca 处理下达到最大值, 随后逐渐降低。从总体上来看, 100mg/L Pro-Ca 处理时效果最佳, 表明外源施加 Pro-Ca 可以增加绿豆叶片渗透调节物质含量, 增强绿豆对盐碱胁迫的抵抗能力, 维持植株正常生长。

盐碱胁迫可导致植物体内活性氧代谢紊乱, 造成细胞膜脂过氧化, 甚至诱导细胞死亡。而抗氧化酶系统是植物对盐胁迫响应抵御盐害的关键机制, 其中, 抗氧化酶 SOD、POD 和 CAT 可以清除植物体内的活性氧, 增强抗膜质过氧化作用, 缓解盐碱胁迫的伤害^[29]。本试验发现, 外源施加 Pro-Ca 均可提高绿豆叶片的 SOD、POD 和 CAT 活性, 且总体上均随着 Pro-Ca 浓度的增加呈先上升后下降的趋势, 并在 100mg/L 处理下达到峰值, 其中 Pro-Ca 对 SOD 活性的调控效果在 2 个绿豆品种上差异不显著, 而 POD 活性的增强在耐盐品种中作用效果更好, CAT 的作用效果同样要低于盐敏感型品种。MDA 是膜脂过氧化反应的主要产物之一, 在盐碱环境下会损伤自身细胞膜系统, 引起膜脂过氧化反应, 其含量的多少在一定程度上反映膜损伤程度的大小^[30-31]。本试验发现, 外源施加 Pro-Ca 降低了 MDA 含量, 维持了细胞膜的稳定性, 这与 Ramírez 等^[32]的研究结果相似, 说明外源施加 Pro-Ca 可增强绿豆的抗氧化保护系统, 减少植物体内过氧化物积累, 从而降低膜质过氧化程度, 增强绿豆在盐碱胁迫下的抗性能力。

4 结论

不同浓度的 Pro-Ca 可以增加绿豆叶片 SPAD, 保证正常光合活动, 提高渗透物质可溶性糖、可溶性蛋白和 Pro 含量, 维持植物细胞渗透势, 同时诱导抗氧化酶 SOD、POD 及 CAT 活性增强, 降低叶片的 MDA 含量, 以清除过氧化物积累, 降低膜质过氧化程度, 从而增加盐碱胁迫下绿豆苗期根冠比和地上、地下部干重, 缓解盐碱胁迫对绿豆植株造

成的伤害, 提高盐碱抗性。综合不同浓度 Pro-Ca 对绿豆的调控效果, 初步确定 100mg/L 为缓解绿豆盐碱胁迫的最佳浓度。

参考文献

- [1] Li J, Pu L, Han M, et al. Soil salinization research in China: advances and prospects. *Journal of Geographical Sciences*, 2014, 24(5): 943-960.
- [2] Oster J, Shainberg I, Abrol I. Reclamation of salt-affected soils. *Agricultural Drainage*, 1999, 38(19): 659-691.
- [3] Feng W Z, Chen Q, Ma C H. Physico-chemical characteristics and microbial composition of saline-alkaline soils in Songnen Plain. *Soils*, 2007, 39(2): 301-305.
- [4] Abd-Alla M, Vuong T, Harper J. Genotypic differences in dinitrogen fixation response to NaCl stress in intact and grafted soybean. *Crop Science*, 1998, 38(1): 72-77.
- [5] Noble T. Development of the mungbean nested association mapping (NAM) resource. Brisbane: Queensland University of Technology, 2017.
- [6] Kumawat N, Kumar R, Sharma O. Nutrient uptake and yield of mung bean [*Vigna radiata* (L.) Wilczek] as influenced by organic manures, PSB and phosphorus fertilization. *Environment and Ecology*, 2009, 27(4B): 2002-2005.
- [7] Bhanu A, Singh M, Srivastava K. Screening mungbean [*Vigna radiata* (L.) Wilczek] genotypes for mungbean yellow mosaic virus resistance under natural condition. *Advances in Plants and Agriculture Research*, 2017, 7(6): 00276.
- [8] 程须珍. 绿豆生产技术. 北京: 北京教育出版社, 2016.
- [9] 林汝法, 柴岩, 廖琴. 中国小杂粮. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2002.
- [10] 徐宁, 曲祥春, 王明海, 等. 绿豆主要株型性状的遗传. *中国农业大学学报*, 2019, 24(4): 24-35.
- [11] Kamiya Y, Kobayashi M, Fujioka S, et al. Effects of a plant growth regulator, prohexadione calcium (BX-112), on the elongation of rice shoots caused by exogenously applied gibberellins and helminthosporol, Part III. *Plant and Cell Physiology*, 1991, 32(8): 1205-1210.
- [12] Winkler V W. Reduced risk concept for prohexadione-calcium, a vegetative growth control plant growth regulator in apples. *International Society for Horticultural Science (ISHS)*, 1997, 451: 667-672.
- [13] Soleimani Aghdam M. Mitigation of postharvest chilling injury in tomato fruit by prohexadione calcium. *Journal of Food Science and Technology*, 2013, 50(5): 1029-33.
- [14] Rezapour Fard J, Kafi M, Naderi R. The enhancement of drought stress tolerance of kentucky bluegrass by prohexadione-calcium treatment. *Journal of Ornamental Plants*, 2015, 5(4): 197-204.
- [15] Bekheta M A, Abdelhamid M T, El-Morsi A A. Physiological response of vicia faba to prohexadione-calcium under saline conditions. *Planta Daninha*, 2009, 27: 769-779.
- [16] 葛莹, 李建东. 盐生植被在土壤积盐——脱盐过程中作用的初探. *草业学报*, 1990(1): 70-76.
- [17] Benjamin J G, Nielsen D C, Vigil M F, et al. Water deficit stress effects on corn (*Zea mays* L.) root: shoot ratio. *Open Journal of Soil Science*, 2014(4): 151-160.
- [18] Liu Z, Zhang H, Yang X, et al. Effects of soil salinity on growth, ion relations, and compatible solute accumulation of two sumac species: *Rhus glabra* and *Rhus trilobata*. *Communications in Soil*

- Science and Plant Analysis, 2013, 44(21): 3187-3204.
- [19] Nasr S M H, Parsakhoo A, Naghavi H, et al. Effect of salt stress on germination and seedling growth of *Prosopis juliflora* (Sw.). New Forests, 2012, 43(1): 45-55.
- [20] Itai C, Benzioni A. Water stress and hormonal response, water and plant life. Springer, 1976, 19: 225-242.
- [21] Zuccarini P. Mycorrhizal infection ameliorates chlorophyll content and nutrient uptake of lettuce exposed to saline irrigation. Plant Soil and Environment, 2007, 53(7): 283-289.
- [22] Ozbay N, Ergun N. Prohexadione calcium on the growth and quality of eggplant seedlings. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 2015, 50: 932-938.
- [23] Hasegawa P M, Bressan R A, Zhu J K, et al. Plant cellular and molecular responses to high salinity. Annual Review of Plant Biology, 2000, 51(1): 463-499.
- [24] Sun J, He L, Li T. Response of seedling growth and physiology of *Sorghum bicolor* (L.) Moench to saline-alkali stress. PLoS ONE, 2019, 14(7): e0220340.
- [25] Vendruscolo E C G, Schuster I, Pileggi M, et al. Stress-induced synthesis of proline confers tolerance to water deficit in transgenic wheat. Journal of Plant Physiology, 2007, 164(10): 1367-1376.
- [26] Doganlar Z B, Demir K, Basak H, et al. Effects of salt stress on pigment and total soluble protein contents of three different tomato cultivars. African Journal of Agricultural Research, 2010, 5(15): 2056-2065.
- [27] Wang X, Geng S, Ri Y J, et al. Physiological responses and adaptive strategies of tomato plants to salt and alkali stresses. Scientia Horticulturae, 2011, 130(1): 248-255.
- [28] Aghdam M S. Mitigation of postharvest chilling injury in tomato fruit by prohexadione calcium. Journal of Food Science and Technology, 2013, 50(5): 1029-1033.
- [29] Parida A K, Das A B. Salt tolerance and salinity effects on plants: a review. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2005, 60(3): 324-349.
- [30] De Azevedo Neto A D, Prisco J T, Enéas-Filho J, et al. Effect of salt stress on antioxidative enzymes and lipid peroxidation in leaves and roots of salt-tolerant and salt-sensitive maize genotypes. Environmental and Experimental Botany, 2006, 56(1): 87-94.
- [31] McKay H, Mason W. Physiological indicators of tolerance to cold storage in Sitka spruce and Douglas-fir seedlings. Canadian Journal of Forest Research, 1991, 21(6): 890-901.
- [32] Ramírez H, Herrera-Gómez B, Benavides-Mendoza A, et al. Prohexadione calcium increases antioxidant capacity, lycopene content and enzymatic activity in fruits of tomato Floradade. Revista Chapingo. Serie Horticultura, 2010, 16(3): 155-160.

Regulating Effects of Prohexadione-Calcium on the Growth of Mung Bean Seedlings under Saline-Alkali Stress

Hou Xue¹, Chen Yujie¹, Li Chunmiao¹, Fang Shumei^{1,2}, Liang Xilong^{1,2}, Zheng Dianfeng^{1,3}

(¹Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, Heilongjiang, China; ²Heilongjiang Plant Growth Regulator Engineering Technology Research Center, Daqing 163319, Heilongjiang, China; ³Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, Guangdong, China)

Abstract Lüfeng 2 and Lüfeng 5 were used as the experiment materials. 150mmol/L mixed saline-alkali stress was applied and different concentrations of prohexadione-calcium (Pro-Ca) were foliar sprayed during the first compound leaf development period. Samples were collected after 15 days of continued growth to study the regulation effects of different concentrations of Pro-Ca on the growth of mung bean seedlings. The results showed that the suitable concentration of Pro-Ca (100mg/L) could maintain cell osmotic potential, eliminate reactive oxygen species, reduce the degree of membrane peroxidation, and protect cell membrane structure by increasing the content of osmotic substances, enhancing the activity of antioxidant enzymes, and reducing the content of MDA, thereby alleviating the damage to mung bean seedlings caused by salt-alkali stress, and improving the resistance of mung bean seedlings to salt-alkali. Specifically, the plant height of Lüfeng 2 and Lüfeng 5 decreased by 29.64% and 21.72%, the underground dry weight increased by 33.33% and 50.00%, and the root-to-shoot ratio increased by 42.86% and 8.33%, chlorophyll content increased by 15.77% and 18.55%, respectively, under the treatment of 100mg/L.

Key words Saline-alkali stress; Prohexadione-calcium; Mung bean; Osmotic adjustment; Protective enzymes