

不同木豆幼苗低温胁迫下的生理响应及耐寒性鉴定

唐 军^{1,2}, 王文强¹, 丁西朋¹, 马向丽², 毕玉芬², 郭凤根^{2*}

1. 中国热带农业科学院热带作物品种资源研究所/农业农村部华南作物基因资源与种质创制重点实验室, 海南海口 571101; 2. 云南农业大学动物科学技术学院, 云南昆明 650201

摘 要: 木豆 [*Cajanus cajan* (L.) Millsp.] 为热区重要的粮饲兼用作物。为解析木豆响应低温胁迫生理特性及耐寒能力, 本研究以 8 份木豆种质幼苗为试验材料, 通过低温胁迫 (4 °C) 处理, 对木豆 8 个生理指标测定分析, 运用隶属函数综合分析法鉴定其耐寒性。结果表明: 随低温胁迫时间的延长, 木豆相对电导率 (REC) 和可溶性糖 (SS)、丙二醛 (MDA)、脯氨酸 (Pro) 的含量呈升高趋势, 超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD) 活性随低温处理时间的延长呈先升后降之势, 叶绿素 (Chl) 含量总体呈下降趋势, 过氧化氢酶 (CAT) 活性变化存在差异, 仅 P₂ 中 CAT 活性差异显著。运用隶属函数综合评价木豆耐寒性强弱为: 缅甸木豆>海南儋州木豆>木豆 (170306001)>木豆 (060302216)>ICPL7086>木豆 (南 02137)>广西木豆>海南琼中木豆, 且木豆耐寒性与 Chl 含量、SOD 和 POD 活性呈显著相关, 这些指标可以作为木豆耐寒性评价的可信指标。

关键词: 木豆; 低温胁迫; 生理指标; 耐寒性

中图分类号: S541.9

文献标志码: A

Physiological Response to Cold Stress and Identification of Its Cold Tolerance in Different Pigeonpea Seedling Stage

TANG Jun^{1,2}, WANG Wenqiang¹, DING Xipeng¹, MA Xiangli², BI Yufen², GUO Fenggen^{2*}

1. Tropical Crops Genetic Resources Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences / Key Laboratory of Crop Gene Resources and Germplasm Enhancement in Southern China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Haikou, Hainan 571101, China; 2. College of Animal Science and Technology, Yunnan Agricultural University, Kunming, Yunnan 650201, China

Abstract: Pigeonpea is an important food and forage crop in the tropics. In order to dissect the physiological characteristics of pigeonpea under cold stress and its cold tolerance, eight seedlings of pigeonpea were tested and analyzed by 8 physiological indexes under 4 °C stress, and cold tolerance of pigeonpea were evaluated by subordinate function value method in this study. The results showed that with the prolongation explored to cold stress, REC, SS, MDA and Pro increased respectively, SOD and POD increased firstly and then decreased, and Chl showed a general trend of decline, and the variation of CAT activity was significant difference only in P₂ among the 8 accessions. The cold tolerance of the 8 accessions was in the order: Miandian>Danzhou>170306001>060302216>ICPL7086>Nan 02137>Guangxi>Qiongzong. The content of Chl, SOD and POD activity were significantly correlated with cold tolerance of pigeonpea, which could be the reliable physiological indexes to evaluate the cold tolerance of pigeonpea.

Keywords: *Cajanus cajan*; cold stress; physiological indexes; cold tolerance

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2024.08.012

低温是影响植物地理分布和生长发育的重要的环境限制因子, 影响植物的正常生长发育^[1]。

植物受伤害严重程度关键在于低温的强度影响和暴露在低温下的持续时间, 温度在 0~15 °C 之间,

收稿日期 2023-09-27; 修回日期 2024-02-04

基金项目 海南农业厅科技示范推广项目“牛羊饲草利用示范项目”; 热带饲料作物与特色畜牧创新团队项目 (No. 17CXTD-18); 非营利性科研机构改革专项启动费项目 (No. 0316051)。

作者简介 唐 军 (1979—), 男, 博士, 副研究员, 研究方向: 热带牧草及饲料作物育种。*通信作者 (Corresponding author): 郭凤根 (GUO Fenggen), E-mail: yngfg@sina.cn。

苗期最容易受伤^[2]。低温胁迫后,植物细胞膜透性增大,导致膜系统结构的变化及膜上酶活性的改变,膜的选择透性丧失导致细胞物质交换平衡破坏,细胞代谢发生混乱^[3-6]。低温胁迫下植物产生大量的超氧自由基(O_2^-),引起过氧化物酶(POD)、超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)等抗逆反应,减少低温对植物的损伤^[7-8]。狗牙根[*Cynodon dactylon* (L.) Pers.]细胞电解质渗透率能够很好地反映出品种间抗寒能力的差异,SOD、POD 活性及其持续时间的长短与其抗寒能力呈正相关性^[9]。薛云云等^[10]发现耐寒花生(*Arachis hypogaea* L.)中脯氨酸(proline, Pro)含量、SOD 和 POD 活性高于不耐寒材料。南丽等^[11]以苜蓿(*Medicago sativa* L.)根系丙二醛(MDA)、可溶性糖(soluble sugar, SS)、Pro 含量和 CAT、SOD 活性为指标探讨了苜蓿品种间在不同生态区随气温变化的生理规律。HAN 等^[12]利用叶绿素(chlorophyll, Chl)、Pro、MDA、SOD、CAT 等 9 个生理指标对水稻(*Oryza sativa* L.)的耐寒机理进行研究,发现 MDA 含量和 SOD 活性与耐寒性呈显著相关。

木豆[*Cajanus cajan* (L.) Millsp.]为豆科木豆属多年生常绿灌木,株高 1.5~3.0 m,世界种植面积 400 多万 hm^2 ^[13]。嫩茎叶可用作动物饲料,籽实可食用或药用^[14]。本课题组调研发现我国木豆花期、结荚期一般在 11 月至翌年的 2 月,受到冷害的影响,木豆籽实产量会受到严重的影响。笔者在查阅国内外相关文献,发现木豆在耐寒性方面的研究报道极少。本研究通过对木豆低温胁迫处理后,开展木豆生理指标的变化及相关性研究,以期揭示木豆耐寒生理机制,为耐寒木豆资源的鉴定和新品种的培育提供科学参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料

选用 8 份木豆种质,试验代号分为 P₁(琼中木豆,采集地:海南琼中)、P₂(种质编号:170306001,采集地:海南白沙)、P₃(ICPL7086,来源地:印度引入)、P₄(缅甸木豆,来源地:缅甸引入)、P₅(种质编号:060302216,采集地:广西大新)、P₆(儋州木豆,采集地:海南儋州)、P₇(南 02137,黑种,来源地:库存)和 P₈(广西木豆,采集地:广西崇左),所有参试材料均由中国热带农业科学院热带作物品种资源研究

所提供。

1.2 试验设计

采用育苗袋直播的方法,每袋 5 粒种子,每份材料 36 袋,待苗长致 20 cm 以上,置于 20 °C 准备间预处理 12 h,再转入低温 4 °C 冷库处理,设 4 个处理时间,即 0 (CK)、24、48、72 h,每份木豆幼嫩叶片材料混合取样,测定生理指标包括相对电导率(REC)、SS、Chl、Pro、MDA 含量和 SOD、CAT、POD 活性,每个指标设 3 个生物学重复。相关生理指标测定方法均参照王学奎^[15]的方法。

1.3 木豆资源耐寒性综合评价方法

木豆资源耐寒性综合评价采用模糊综合评判方法^[13]。隶属函数值的计算方法及具体步骤如下:

若某一指标与耐寒性呈正相关,则公式为 $X_i = (X - X_{min}) / (X_{max} - X_{min})$;若 REC、MDA 与耐寒性呈负相关,则公式为 $X'_i = 1 - (X - X_{min}) / (X_{max} - X_{min})$,式中, X_i 为各指标的隶属度值; X 为某一指标的测定值; X_{min} 为某一指标测定值中的最小值; X_{max} 为某一指标测定值中的最大值。最后计算各指标隶属函数值的平均值,隶属函数平均值越大则表明耐寒性越强。

1.4 数据处理

本研究数据采用 Excel 2019 和 IBM SPSS 20 软件进行统计与分析。

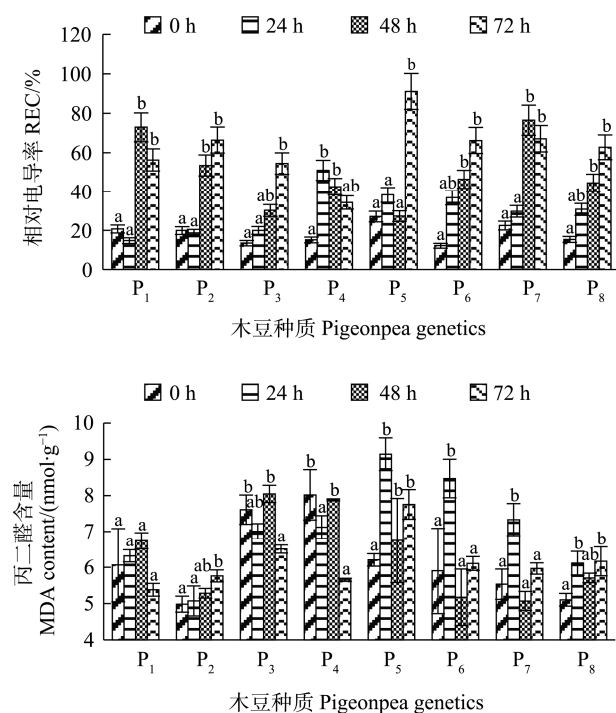
2 结果与分析

2.1 低温胁迫对木豆 REC 和 MDA 含量的影响

REC 和 MDA 直接反映细胞膜受伤害程度。参试木豆的 REC 随低温胁迫时间的增加,总体呈上升趋势,峰值出现时间点不同(图 1)。处理 24 h 后,P₁ 的 REC 变化最小,为 CK 的 0.71 倍;P₄ 变化最大,为 CK 的 3.37 倍,差异显著。处理 48 h 后,P₅ 变化最小,为 CK 的 1.01 倍,差异不显著;P₆ 变化最大,为 CK 的 3.81 倍,差异显著。处理 72 h 后,P₂、P₃、P₅、P₆ 和 P₈ 出现最大值,细胞膜透性最大,P₄ 变化最小,为 CK 的 2.27 倍,差异显著;P₅ 骤然升高,为 CK 的 5.45 倍,差异显著。P₁ 的 REC 在 48、72 h 较 24 h 时呈骤然上升趋势,分别为 24 h 的 4.96 倍和 3.83 倍,差异显著。P₄ 的 REC 在 48、72 h 与 24 h 时的 REC 差异不显著。REC 与植物耐寒特性呈负相关,P₄ 材料受低温胁迫后,REC 先升高后降低并保持相对稳定的趋势,维持较好相对电导率,说明其在抵御

低温胁迫的能力上强于其他材料, 表明 P_4 为较耐寒材料; P_5 在胁迫时间延长时, 同时间处理中增加倍数最大, 说明其耐寒性较差。

受低温胁迫时长变化, P_1 的 MDA 含量先升后降, 但差异不显著; P_2 的 MDA 含量逐渐升高, P_3 和 P_4 呈先降后升再降的趋势; P_5 、 P_6 、 P_7 和 P_8 中 MDA 含量呈现先升后降再升的变化趋势, 处理 24 h 后达到最大值。其中, P_4 增加倍数最小, 为 CK 的 0.89 倍, 差异不显著; P_5 增加最大, 为 CK 的 1.47 倍, 差异显著。处理 48 h 后, P_6 差异不显著; P_8 增加达到 CK 的 1.12 倍, 差异不显著。处理 72 h 后, P_5 增加最大, 为 CK 的 1.25 倍, 差异显著, P_4 降低为 CK 的 0.70 倍, 差异显著。 P_1 中 MDA 含量随时间处理无显著变化, 为相对较耐寒种质。



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

图 1 不同处理间木豆相对电导率和丙二醛含量

Fig. 1 REC and MDA content of pigeonpea in different treatments

2.2 低温胁迫对木豆 SS、Chl 和 Pro 含量的影响

参试材料中 SS 含量总体呈上升趋势 (图 2)。 P_1 、 P_2 、 P_3 和 P_8 中的 SS 含量呈先降低后升高的趋势, P_4 、 P_6 和 P_7 呈逐步升高, P_5 先降低后升高再降低。处理 24 h, P_6 增加倍数最多, 为 CK 的

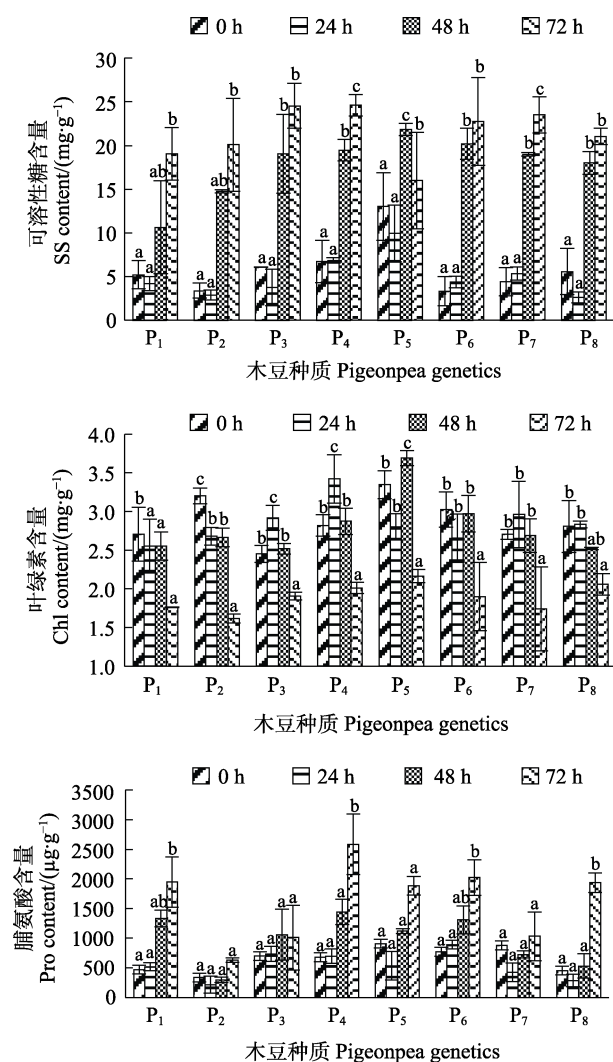
1.32 倍; P_8 的含量最少, 为 CK 的 0.47 倍。处理 48 h, P_6 增加的倍数最高, 为 CK 的 6.06 倍, P_5 增加的倍数最小, 为 CK 的 1.68 倍。处理 72 h, P_6 增加的倍数最多, 为 CK 的 6.83 倍。处理 48、72 h, P_8 中 SS 增加倍数最高, 分别为处理 24 h 的 6.87 倍、8.02 倍, 差异显著, 而 P_5 增加倍数最小, 分别为处理 24 h 的 1.22 倍和 2.20 倍。 P_6 、 P_8 中 SS 含量增加的倍数较大, 其相对为较耐寒材料。

Chl 含量的变化直接反映叶片受伤害的程度。 P_1 、 P_2 中 Chl 含量随处理时间增加逐渐降低, P_3 、 P_4 、 P_7 和 P_8 中 Chl 含量呈先升后降的趋势, P_5 和 P_6 呈现先降后升再降 (图 2)。处理 24 h 后, P_4 中 Chl 含量相较于 CK 增加倍数最大, 为 CK 的 1.21 倍, 差异显著; P_5 增加的最小, 为 CK 的 0.84 倍, 差异不显著。处理 48 h 后, P_5 为 CK 的 1.10 倍, 差异显著; P_2 为 CK 的 0.83 倍, 差异显著。处理 72 h 后, P_3 中 Chl 含量显著下降最少, 为 CK 的 0.78 倍; P_2 显著下降最大, 为 CK 的 0.51 倍。 P_4 、 P_5 和 P_8 中相较于 CK, Chl 含量保持较高含量, 相对为较耐寒材料。

Pro 为植物响应低温胁迫的重要指标, 在 8 份材料中 Pro 含量均呈现显著增加趋势 (图 2)。处理 24 h, P_6 增加倍数最大, 为 CK 的 1.16 倍; P_7 增加倍数最小, 为 CK 的 0.47 倍。处理 48 h, P_1 增加倍数最大, 为 CK 的 2.83 倍; P_7 增加倍数最小, 为 CK 的 0.83 倍。处理 72 h, P_8 的 Pro 含量显著增加最大, 为 CK 的 4.29 倍, P_6 提高倍数最小, 为 CK 的 2.6 倍。木豆 Pro 含量呈逐步上升的趋势, P_1 、 P_4 和 P_8 较 CK 增加的倍数较高, 为相对较耐寒种质。

2.3 低温胁迫时长木豆 SOD、CAT 和 POD 活性变化

SOD 是植物的抗氧化酶系统, 能有效去除 O_2^- 歧化对植物体造成的毒害。8 份木豆材料的 SOD 活性变化趋势不一样, P_1 、 P_3 、 P_5 、 P_6 的 SOD 活性先缓慢升高后逐步下降。 P_2 、 P_4 和 P_8 的 SOD 活性随时间处理变化的差异不显著, P_7 先降低后升高再降低 (图 3)。处理 24 h, P_3 的 SOD 活性增加倍数最大, 为 CK 的 1.18 倍, 差异显著; P_7 下降最多, 仅为 CK 最低 0.91 倍, 差异不显著。处理 48 h 后, P_3 的 SOD 活性增加倍数最高, 为 CK 的 1.18 倍, 差异显著; P_8 的 SOD 活性下降最多, 为 CK 的 0.88 倍, 差异不显著。处理 72 h 后,



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

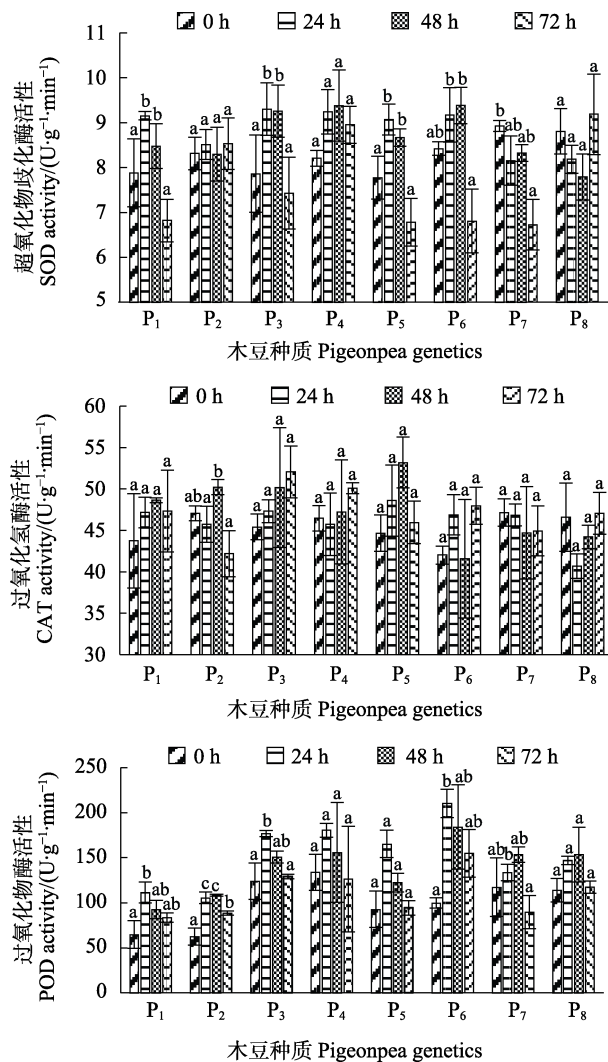
Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P<0.05$).

图 2 不同处理间木豆 SS、MDA 和 Pro 含量

Fig. 2 SS, Chl and Pro content of pigeonpea in different treatments

P₄ 的 SOD 活性倍数增加最大, 为 CK 的 1.09 倍, 差异不显著; P₇ 的 SOD 活性呈现显著下降, 仅为 CK 的 0.75 倍。P₃、P₄ 受低温胁迫后, SOD 活性逐步增加, 为相对耐寒种质。

CAT 在去除植物体内的 O₂⁻ 过程中有着重要作用。8 份木豆材料的 CAT 活性变化趋势不同, P₁、P₅ 先缓慢升高后降低, P₄、P₇、P₈ 先缓慢降低后升高, P₂ 先降低后升高再降低, P₃ 一直缓慢升高, P₆ 的 CAT 活性先升高后降低再升高(图 3)。处理 24 h 后, P₆ 的 CAT 活性变化最大, 为 CK 的 1.12 倍; 变化最小的是 P₂, 为 CK 的 0.97 倍。处理 48 h 后, P₅ 的 CAT 活性增加倍数最大, 为 1.19 倍; P₇ 增加倍数最小, 为 CK 的 0.97 倍。处理 72 h 后,



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P<0.05$).

图 3 不同处理间木豆 SOD、CAT 和 POD 活性

Fig. 3 SOD, CAT and POD activity of pigeonpea in different treatments

P₃ 增加倍数最大, 为 CK 的 1.15 倍, 增加倍数最小的为 P₂, 为 CK 的 0.89 倍。P₃ 材料随处理时间延长, CAT 活性逐步增加, 为最耐寒材料, 其次为 P₁、P₅ 材料。

POD 可以催化各种还原剂的氧化反应。8 份材料中 POD 活性先逐渐升高后再降低(图 3)。处理 24 h 后, P₁、P₃、P₄、P₅、P₆ 的 POD 活性达到峰值, 其中, P₁、P₂、P₃、P₆ 的 POD 活性显著增加, P₆ 增加倍数最大, 为 CK 的 2.11 倍, P₃ 的 POD 活性增加最小, 为 CK 的 1.43 倍。处理 48 h 后, P₂ 的 POD 活性显著增加, 为 CK 的 1.74 倍; P₇ 的 POD 活性增加倍数最小, 为 CK 的 1.31 倍, 差异不显著。处理 72 h 后, P₂ 的 POD 活性显著

增加，为 CK 的 1.74 倍。P₂ 的 POD 活性一直显著高于 CK，为最耐寒材料。

2.4 各生理指标隶属函数值及耐寒性综合评价

由公式计算各生理指标间隶属值，如表 1 所示。对低温胁迫下 8 份木豆种质耐冷指标平均隶属函数值进行综合评价 X_i ，平均值越大，表明木豆幼苗的耐寒性越强。P₄ 各项指标隶属函数平均值最大，为 0.57，P₁ 隶属函数平均值最小，为 0.35。

经隶属函数分析得出，低温胁迫下 8 份木豆种质耐寒性从强到弱排序为：P₄>P₆>P₂>P₅>P₃>P₇>P₈>P₁。

2.5 各项生理指标的隶属函数平均值的相关性

由相关性分析发现，各份材料的耐寒性综合隶属指数（I）与 Chl、SOD、POD 均呈极显著正相关。其中，相关系数最大值是 Chl，达 0.67；其次为 SOD 和 POD，相关系数分别是 0.61 和 0.59（表 2）。

表 1 木豆低温胁迫下生理指标隶属函数值
Tab. 1 Subordinate function value of physiological indexes in pigeonpea under cold stress

编号 No.	隶属函数值 Subordinate function value								平均值 Average	排序 Prior
	REC	SS	Chl	MDA	Pro	SOD	CAT	POD		
P ₁	0.45	0.12	0.08	0.69	0.55	0.35	0.52	0.02	0.35	8
P ₂	0.55	0.35	0.52	0.73	0.14	0.52	0.90	0.29	0.50	3
P ₃	0.72	0.35	0.12	0.39	0.52	0.52	0.65	0.61	0.48	5
P ₄	0.54	0.48	0.45	0.38	0.83	0.63	0.60	0.66	0.57	1
P ₅	0.32	0.75	0.60	0.46	0.69	0.34	0.38	0.35	0.49	4
P ₆	0.50	0.31	0.30	0.69	0.82	0.61	0.33	0.73	0.54	2
P ₇	0.48	0.35	0.22	0.80	0.41	0.33	0.61	0.43	0.46	6
P ₈	0.63	0.25	0.21	0.86	0.27	0.29	0.39	0.49	0.42	7

表 2 木豆低温胁迫下生理指标的隶属函数平均值的相关性
Tab. 2 Correlation of subordinate function values of pigeonpea physiological indexes under cold stress

指标 Index	REC	SS	Chl	MDA	Pro	SOD	CAT	POD	I
REC	1.00								
SS	0.58**	1.00							
Chl	-0.22	0.22	1.00						
MDA	0.19	0.61**	0.59**	1.00					
Pro	0.55**	0.65**	-0.23	0.25	1.00				
SOD	0.01	0.57**	0.75**	0.81**	0.16	1.00			
CAT	0.26	0.73**	0.53**	0.86**	0.30	0.86**	1.00		
POD	0.17	0.46	0.47**	0.67**	0.16	0.69**	0.56**	1.00	
I	-0.34	0.12	0.67**	-0.34	0.07	0.61**	0.27	0.59**	1.00

注：**表示极显著相关（ $P<0.01$ ）。
Note: ** means extremely significant correlation ($P<0.01$).

3 讨论

3.1 木豆耐寒的生理特性

3.1.1 低温胁迫对木豆 REC 和 MDA 含量的影响
REC 直接反映植物在胁迫下细胞膜的伤害程度，MDA 是膜脂氧化的终产物，其含量高低代表质膜受损伤的程度，REC 与 MDA 与耐寒性呈负相关^[1, 16]。8 份参试材料受低温胁迫后，REC 呈总体上升趋势，说明低温胁迫下木豆叶片细胞膜受到一定程度的伤害，细胞膜透性增大，导致电解质渗漏。MDA 呈先升高再降低的变化趋势，说明

木豆胁迫时间延长，木豆的生理活动受损严重。木豆低温胁迫 REC 和 MDA 变化趋势与马铃薯（*Solanum tuberosum* L.）^[17]、果蔗（*Saccharum officinarum* L.）^[18]、木薯（*Manihot esculenta* Crantz.）^[19]的低温胁迫研究结果部分相似。不同参试种质低温胁迫后的 REC 和 MDA 峰值出现的时间不一样，在一定程度上说明木豆不同的种质耐寒性存在差异。
3.1.2 低温胁迫对木豆 SS、Chl 和 Pro 含量的影响
SS 是渗透调节重要的物质，其含量的变化能

提高细胞的保水能力,降低逆境伤害程度;叶片受到伤害后,会导致 Chl 的合成受阻和含量下降;Pro 是膜稳定物质,积累量与植物抗寒性呈正相关^[20]。本研究中,木豆低温胁迫后,大部分 SS 出现逐步上升的趋势,一定程度上说明 SS 在木豆中积累需要相对长的发生时间。Chl 相较于对照总体呈下降趋势,Pro 呈上升的趋势,不同材料间变化趋势不一样,与在甘蓝 (*Brassica spp*)^[8]、马铃薯^[17]和甘蔗^[21]等的低温胁迫研究结果相似。随时间处理、变化趋势和增加倍数一定程度上反映不同材料的抗寒性差异。

3.1.3 低温胁迫对木豆 SOD、CAT 和 POD 活性的影响 SOD、CAT 和 POD 是植物抗氧化酶系统,SOD 能有效去除 O₂歧化对植物的毒害;CAT 能去除植物体内的氧自由基;POD 可以催化由过氧化氢参加的各种还原剂的氧化反应^[22]。SOD、POD、CAT 活性的提高有助于缓解低温胁迫造成的伤害。本研究中,不同的低温胁迫时间参试材料的 SOD、POD 活性呈先升高后降低的趋势,峰值出现时间各不相同;CAT 活性因种质差异,其变化趋势各不相同。苜蓿受连续低温胁迫后,SOD、POD 活性呈先升高后降低的趋势^[23]。低温胁迫后不同苜蓿材料间 CAT 活性的变化差异较大^[24]。甘蓝在受低温胁迫后 POD、CAT 活性呈先升高后降低的趋势,而 SOD 逐渐升高^[25]。咖啡 (*Coffea spp.*) 受低温胁迫的时间延长,SOD、POD 和 CAT 活性呈先升后降的趋势^[26]。水稻低温下耐冷品种体内的 CAT 活性变化很小,而冷敏感品种 CAT 活性的变化相对较大^[27]。通过本研究发现活性酶中 SOD、POD 活性与木豆的耐寒性呈现一定程度的正相关,胁迫后快速响应的种质相对较耐寒。CAT 稳定性相对较差,且不同材料耐寒性差异也导致其变化差异较大。

3.2 木豆种质耐寒性鉴定

植物耐寒性受到多因素影响,单一生理指标无法准确反映植物耐寒性强弱,隶属函数评价法是行之有效的一种综合评价方法,已在马铃薯^[28]、披碱草 (*Elymus dahuricus* Turcz.)^[29]、早熟禾 (*Poa annua* L.)^[30]和草类植物^[31]耐寒性评价中应用。本试验通过 8 项生理指标及隶属函数法对低温胁迫下木豆种质进行耐寒性综合分析,参试材料的耐寒性强弱为:缅甸木豆>海南儋州木豆>木豆 (170306001)>木豆 (060302216)>木豆 ICPL708>木豆 (南 02137)>广西木豆>海南琼中木豆。缅甸

木豆较采集于广西、海南等地的其他材料更为耐寒,一定程度上说明高海拔地区木豆的耐寒特性要优于其他材料,可能是对环境不断适应的一种表现。

木豆的种质资源比较丰富,但木豆种质材料耐寒性鉴定和生理评价的报道较少,无法进行相同研究的比较讨论。通过综合隶属的指数与 8 个生理指标间的相关性分析,发现 Chl、SOD、POD 均呈极显著正相关,说明在木豆耐寒研究中的这些生理指标较其他指标更能有效评判木豆耐寒性。

本研究为木豆的耐寒生理机制研究提供科学数据支撑,为发掘耐寒木豆资源和育种研究奠定重要的工作基础。

参考文献

- [1] RITONGA F N, CHEN S. Physiological and molecular mechanism involved in cold stress tolerance in plants[J]. *Plants*, 2020, 9(5): 560.
- [2] 吴帼秀. H2S 调控黄瓜耐冷性及其信号转导机理[D]. 济南: 山东农业大学, 2016.
WU G X. The mechanism of hydrogen sulfide regulating chilling Tolerance and its signal transduction in cucumber[D]. Jinan: Shangdong Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [3] 付娟娟. 西藏野生垂穗披碱草低温适应机理研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
FU J J. The physiological and molecular mechanisms of Tibetan wild *Elymus nutans* responses to cold stress[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2017. (in Chinese)
- [4] 王俊娟. 棉花抗冷性鉴定及相关基因的表达研究[D]. 北京: 中国农业科学院大学, 2016.
WANG J J. Identification of the chilling resistance of cotton and the expression of cold resistance eelated genes[D]. Beijing: University of Chinese Agricultural Sciences, 2016. (in Chinese)
- [5] 马媛媛, 肖霄, 张文娜. 植物低温逆境胁迫研究综述[J]. 安徽农业科学, 2012(12):7007-7008.
MA Y Y, XIAO X, ZHANG W N. Research progress of plants under cold stress[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2012(12): 7007-7008. (in Chinese)
- [6] YADAV S K. Cold stress tolerance mechanisms in plants. a review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2010, 30(3): 515-527.
- [7] MEHROTRA S, VERMA S, KUMAR S, KUMARI S, MISHRA B N. Transcriptional regulation and signalling of cold stress response in plants: an overview of current understanding[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2020,

- 180: 104243.
- [8] 姚悦梅, 戴忠良, 张振超, 肖燕, 潘跃平. 羽衣甘蓝对低温的生理响应与耐寒性综合评价[J]. 江苏农业学报, 2017, 33(6): 1349-1357.
YAO Y M, DAI Z L, ZHANG Z C, XIAO Y, PAN Y P. Physiological response to low temperature and comprehensive evaluation of cold tolerance in kale[J]. Jiangsu Journal of Agriculture Sciences, 2017, 33(6): 1349-1357. (in Chinese)
- [9] 孙宗玖, 阿不来提, 齐曼, 李培英, 杨文英. 狗牙根新品种抗寒性评价及生理基础的研究[J]. 中国草地学报, 2003, 25(4): 25-30.
SUN Z J, ABULAITI, QI M, LI P Y, YANG W Y. Evaluation and physiological basis for cold resistance of Bermudagrass varieties[J]. Grassland of China, 2003, 25(4): 25-30. (in Chinese)
- [10] 薛云云, 白冬梅, 田跃霞, 权宝全. 24 份山西花生资源芽期和苗期耐寒性鉴定[J]. 核农学报, 2018, 32(3): 582-590.
XUE Y Y, BAI D M, TIAN Y X, QUAN B Q. Cold tolerance identification for 24 peanut resources from Shanxi province at the stage of germination and seedling[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2018, 32(3): 582-590. (in Chinese)
- [11] 南丽丽, 师尚礼, 陈建纲, 朱新强, 郭全恩, 赵文翰. 不同根型苜蓿根系对低温胁迫的响应及其抗寒性评价[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(3): 619-625.
NAN L L, SHI S L, CHEN J G, ZHU X Q, GUO Q E, ZHAO W H. Field evaluation of the response and resistance to low temperature of alfalfa root with different root types during over-wintering[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(3): 619-625. (in Chinese)
- [12] HAN B, MA X, CUI D, WANG Y J, HAN L Z. Comprehensive evaluation and analysis of the mechanism of cold tolerance based on the transcriptome of weedy rice seedlings[J]. Rice, 2020, 13(1): 1-14.
- [13] FAKRUDIN B, SINGH M N, SUBHOJIT D, BANDHOPADHYA T K, RAJE R S, SHARMA T R, KISHOR G, VIVEK D, DANGEEDA S, GUPTA D K. Development of genic-SSR markers by deep transcriptome sequencing in pigeonpea [*Cajanus cajan* (L.) Millspaugh][J]. BMC Plant Biology, 2011, 11(1): 17-29.
- [14] 唐军, 王文强, 丁西朋, 马向丽, 毕玉芬, 郭凤根. 木豆遗传多样性及抗逆机制研究进展[J]. 热带作物学报, 2021, 42(10): 2798-2805.
TANG J, WANG W Q, DING X P, MA X L, BI Y F, GUO F G. Review of research in genetic diversity and mechanism of stress resistance of pigeonpea[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2021, 42(10): 2798-2805. (in Chinese)
- [15] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 第2版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
WANG X K. Principles and techniques of plant physiological and biochemical experiments[M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2006. (in Chinese)
- [16] 艾希珍, 于贤昌, 王绍辉, 邢禹贤. 低温胁迫下黄瓜嫁接苗与自根苗某些物质含量的变化[J]. 植物生理学通讯, 1999, 35(1): 26-29.
AI X Z, YU X C, WANG S H, XING Y X. Changes of some substances of grafted and own root cucumber seedlings under low temperature stress[J]. Plant Physiological Bulletin, 1999, 35(1): 26-29. (in Chinese)
- [17] 杨慧菊, 郭华春. 马铃薯幼苗低温胁迫的生理响应及品种耐寒性综合评价[J]. 西南农业学报, 2016, 11(9): 2560-2567.
YANG H J, GUO H C. Physiological responds of potato seedlings to low temperature stress and comprehensive evaluation on their cold tolerance[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2016, 11(9): 2560-2567. (in Chinese)
- [18] 陈明辉, 程世平, 张志录, 张保青. 不同品种果蔗幼苗对低温的生理响应及耐寒性评价[J]. 华南农业大学学报, 2018, 39(2): 40-46.
CHEN M H, CHENG S P, ZHANG Z L, ZHANG B Q. Physiological response and cold resistance evaluation of seedlings of different chewing cane cultivars to low temperature[J]. Journal of South China Agricultural University, 2018, 39(2): 40-46. (in Chinese)
- [19] 张玮, 易拓, 唐维, 宋勇. 木薯耐寒性种质资源及其鉴定指标的筛选与综合评价[J]. 热带作物学报, 2019, 40(1): 1-10.
ZHANG W, YI T, TANG W, SONG Y. Selection and comprehensive evaluation of cassava cold-resistant germplasm resources and identification indexes[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2019, 40(1): 1-10. (in Chinese)
- [20] 武辉, 侯丽丽, 周艳飞, 范志超, 石俊毅, 阿丽艳·肉孜, 张巨松. 不同棉花基因型幼苗耐寒性分析及其鉴定指标筛选[J]. 中国农业科学, 2012, 45(9): 1703-1713.
WU H, HOU L L, ZHOU Y F, FAN Z C, SHI J Y, ALIYAN·R Z, ZHANG J S. Analysis of chilling tolerance and determination of chilling-tolerance evaluation indicators in cotton of different genotypes[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(9): 1703-1713. (in Chinese)
- [21] 唐仕云, 杨丽涛, 李杨瑞. 不同甘蔗基因型对低温胁迫的响应及其耐寒性评价[J]. 热带作物学报, 2012, 33(4): 635-641.
TANG S Y, YANG L T, LI Y R. Response of different sugarcane genotypes to low temperature and evaluation for cold tolerance of sugarcane[J]. Chinese Journal of Tropical

- Crops, 2012, 33(4): 635-641. (in Chinese)
- [22] 许英, 陈建华, 朱爱国, 奕明宝, 王晓飞, 孙志民. 低温胁迫下植物响应机理的研究进展[J]. 中国麻类科学, 2015, 37(1): 40-49.
- XU Y, CHEN J H, ZHU A G, LUAN M B, WANG X F, SUN Z M. Research progress on response mechanism of plant under low temperature stress[J]. Plant Fiber Sciences in China, 2015, 37(1): 40-49. (in Chinese)
- [23] 亓春宇. 低温胁迫对 F_2 代紫花苜蓿生理特性的影响及抗寒性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学, 2017.
- QI C Y. Effects of low temperature stress on physiological characteristics and cold resistance of F_2 alfalfa[D]. Harbin: Harbin Normal University, 2017. (in Chinese)
- [24] 王晓龙. 苜蓿抗寒性鉴定及耐寒种质筛选[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021.
- WANG X L. Identification of cold tolerance and screening of cold tolerant germplasm of alfalfa[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2021. (in Chinese)
- [25] 秦文斌, 山溪, 张振超, 姚悦梅, 肖燕, 戴忠良. 低温胁迫对甘蓝幼苗抗逆生理指标的影响[J]. 核农学报, 2018, 32(3): 576-581.
- QIN W B, SHAN X, ZHANG Z C, YAO Y M, XIAO Y, DAI Z L. Effect of low temperature stress on anti-stress physiological indexes of cabbage seedlings[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2018, 32(3): 576-581. (in Chinese)
- [26] 黄丽芳, 李金芹, 龙宇宙, 董云萍, 王晓阳, 林兴军, 孙燕, 陈鹏, 闫林. 低温胁迫下不同咖啡生理生化指标的变化及耐寒性评价[J]. 热带作物学报, 2021, 42(7): 1941-1947.
- HUANG L F, LI J Q, LONG Y Z, DONG Y P, WANG X Y, LIN X J, SUN Y, CHEN P, YAN L. Changes of physiological, biochemical and evaluation of cold tolerance in coffea[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2021, 42(7): 1941-1947. (in Chinese)
- [27] 王国莉, 郭振飞. 水稻耐冷机理的研究进展[J]. 惠州学院学报(自然科学版), 2004, 24(3): 8-12.
- WANG G L, GUO Z F. Progress on the research of chilling tolerant mechanism in rice[J]. Journal of Huizhou University (National Science), 2004, 24(3): 8-12. (in Chinese)
- [28] 丁红映, 田宇豪, 李青, 杨佳怡, 胡新喜, 熊兴耀, 秦玉芝. 马铃薯低温胁迫的生理响应及耐寒性综合评价[J]. 西南农业学报, 2020, 33(6): 1165-1171.
- DING H Y, TIAN Y H, LI Q, YANG J Y, HU X X, XIONG X Y, QIN Y Z. Physiological responds of potato seedlings to low temperature stress and comprehensive evaluation on their cold tolerance[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2020, 33(6): 1165-1171. (in Chinese)
- [29] 梁坤伦, 贾存智, 孙金豪, 王明艳, 傅华, 毛祝新. 高寒地区垂穗披碱草种质对低温胁迫的生理响应及其耐寒性评价[J]. 草业学报, 2019, 28(3): 111-121.
- LIANG K L, JIA C Z, SUN J H, WANG M Y, FU H, MAO Z X. Evaluation of physiological responses and tolerance to low-temperature stress of *Elymus nutans* varieties[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2019, 28(3): 111-121. (in Chinese)
- [30] 吕优伟, 贺佳圆, 白小明, 董沁, 雷亚伟. 9 个野生早熟禾对低温胁迫的生理响应及苗期抗寒性评价[J]. 草地学报, 2014, 22(2): 326-333.
- LYU Y W, HE J Y, BAI X M, DONG Q, LEI Y W. Evaluation of physiological responses and resistances of nine wild Poa to low temperature[J]. Acta Agrestia Sinica, 2014, 22(2): 326-333. (in Chinese)
- [31] 何子华, 杨成行, 王沛, 包爱科, 马青. 高寒地区 6 种禾本科牧草对低温胁迫的生理响应及耐寒性评价[J]. 草业科学, 2021, 38(10): 2019-2028.
- HE Z H, YANG C H, WANG P, BAO A K, MA Q. Effect of low-temperature stress on the physiological responses of six gramineous forages in alpine regions and evaluation of their cold resistance[J]. Pratacultural Science, 2021, 38(10): 2019-2028. (in Chinese)