

金龙飞,杨蒙迪,周丽霞,等. 9 个油棕品种抗寒性的生理生化鉴定[J]. 江苏农业科学,2021,49(8):132-136.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2021.08.023

9 个油棕品种抗寒性的生理生化鉴定

金龙飞,杨蒙迪,周丽霞,冯美利,曹红星

(中国热带农业科学院椰子研究所/农业农村部热带油料科学观测试验站,海南文昌 571737)

摘要:以三年生的油棕小叶为材料,研究低温胁迫对其可溶性糖、可溶性蛋白、总酚、脯氨酸、丙二醛含量和超氧化物歧化酶、过氧化氢酶以及过氧化物酶活性的影响,采用隶属函数法对不同油棕品种的抗寒性进行综合评价。结果表明,9 个油棕品种在低温胁迫下的生理生化指标变化差异显著,隶属函数值的平均值表现为 RYCR2 > RYCR3 > RYNG1 > RYCR6 > RYCR4 > RYMY8 > RYCR5 > RYMY9 > RYCR7。9 个油棕品种中 RYCR2、RYCR3、RYNG1 的抗寒性较强,RYCR6、RYCR4、RYMY8 次之,RYCR5、RYMY9、RYCR7 最弱。

关键词:油棕;低温胁迫;抗寒性评价;隶属函数;生理生化指标

中图分类号:S565.901 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2021)08-0132-05

油棕(*Elaeis guineensis*)是重要的热带木本油料作物,产油效率极高,是花生的 5~6 倍,大豆的 9~10 倍。油棕原产于非洲几内亚湾的热带河谷地区,性喜湿热,适宜生长的温度为 22~32℃。当气温低于 20℃,油棕的开花结实受抑制;当温度低于 15℃,生长受抑制;当温度低于 10℃,油棕受到严重的寒害^[1]。油棕在我国海南、云南、广西、雷州半岛等地区种植时,冬季易受低温寒害^[2-5]。中国热带农业科学院椰子研究所从尼日利亚、马来西亚、哥斯达黎加等引进了 9 个油棕品种进行试种,对这些品种在低温胁迫下的抗寒性评价是引种试验的重要内容。在低温胁迫下,植物会通过一系列的生理生化变化增强对低温的耐受性,包括增加可溶性糖(SS)、可溶性蛋白(SP)、游离脯氨酸(Pro)等渗透调节物质的含量;通过增强抗氧化酶活性,例如超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)和过氧化物酶(POD)等;以及增强非酶类抗氧化物质的含量,例如酚类物质、谷胱甘肽和类黄酮等,增强对低温引起的活性氧的清除能力^[6-10]。李静等对 10 个油棕品种低温的生理生化特性进行测定,发现在低温胁迫下叶片可溶性糖含量逐渐升高,脯氨酸和可

溶性蛋白含量先升高后降低^[2]。曹红星等研究不同油棕资源对低温胁迫的生理生化响应,发现 SS、SP、Pro、丙二醛(MDA)的含量,SOD、POD、CAT、抗坏血酸过氧化物酶(APX)的活性与抗寒性密切相关,可作为油棕抗寒鉴定指标^[11]。本研究从生理生化角度对 9 个油棕品种的抗寒性进行评价和鉴定,通过对不同低温胁迫处理的油棕叶片的可溶性糖、可溶性蛋白和脯氨酸等渗透调节物质的含量,总酚和丙二醛的含量以及 SOD、CAT、POD 等抗氧化酶的活性进行测定,并采用隶属函数对 9 个品种的抗寒性进行综合评价,以期为我国油棕引种奠定理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试油棕品种取自中国热带农业科学院椰子研究所试验基地(110°46'E,19°33'N),品种名依次为 RYNG1、RYCR2、RYCR3、RYCR4、RYCR5、RYCR6、RYCR7、RYMY8、RYMY9。在晴天 09:00,选择长势统一、生长旺盛、无病害的三年生油棕植株的第 17 片叶进行采样,采样后带回实验室进行低温胁迫处理。在人工气候箱中分别设置 2 个低温梯度[15℃(T1)、10℃(T2)],处理 24 h,以 25℃作为对照(CK),每个处理设置 3 次重复。试验于 2020 年 1—4 月开展。

1.2 试验方法

采用蒽酮比色法测定可溶性糖(SS)含量,二喹啉甲酸法测定总蛋白(SP)含量,分光光度法测定总

收稿日期:2020-07-13

基金项目:中国热带农业科学院基本科研业务费项目(编号:1630152017008)。

作者简介:金龙飞(1988—),男,湖北荆门人,博士,助理研究员,主要从事热带木本油料作物栽培研究。E-mail:jinf@catas.cn。

通信作者:曹红星,博士,研究员,主要从事热带木本油料作物种质资源评价研究。E-mail:hongxing1976@163.com。

酚(TF)含量和游离脯氨酸(Pro)含量,硫代巴比妥酸法测定丙二醛(MDA)含量;采用试剂盒(南京建成生物工程研究所)测定超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)等的活性。

1.3 数据分析

数据采用 SPSS 13.0 进行差异显著性分析。采用隶属函数值法对抗寒性进行综合评价,计算 SS、SP、TF、Pro、MDA 含量以及 SOD、POD、CAT 活性等指标在 T1、T2 时的隶属函数值。分析指标与抗寒性呈正相关,则计算公式为 $U(X_{ijk}) = (X_{ijk} - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$;分析指标与抗寒性呈负相关,则计算公式为 $U(X_{ijk}) = 1 - (X_{ijk} - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$ 。 X_{ijk} 表示第*i*个品种第*j*个处理下的第*k*个指标的测定值; $U(X_{ijk})$ 表示第*i*个品种第*j*个处理下的第*k*个指标的隶属函数值; X_{\max} 、 X_{\min} 分别表示测定值中的

最大值、最小值。先对各指标分别计算隶属函数值,再对所有指标计算平均值,值越大表示抗寒性越强,反之则越弱。

2 结果与分析

2.1 低温胁迫对油棕叶片渗透调节物质含量的影响

低温胁迫处理下,9 个油棕品种叶片的渗透调节物质含量变化情况如表 1 所示。油棕叶片可溶性糖(SS)含量随着温度的降低整体呈上升趋势,10 ℃时 RYCR2 叶片可溶性糖含量最高,为 97.95 mg/g,显著高于对照;10 ℃时 RYCR5 叶片可溶性糖含量增幅最大,是对照的 4.4 倍。油棕叶片可溶性蛋白(SP)含量随着温度的降低呈上升趋势,10 ℃时 RYCR2 叶片可溶性蛋白含量最高,为 4.83 mg/g,显

表 1 低温处理对不同品种油棕叶片渗透调节物质含量变化的影响

品种	测定指标	CK(25 ℃)	T1(15 ℃)	T2(10 ℃)
RYNG1	SS 含量(mg/g)	26.77 ± 1.84c	30.98 ± 0.09b	87.50 ± 0.46a
	SP 含量(mg/g)	1.51 ± 0.07b	2.90 ± 0.09a	3.23 ± 0.30a
	Pro 含量(μg/g)	28.99 ± 0.77c	35.34 ± 1.15b	44.38 ± 3.22a
RYCR2	SS 含量(mg/g)	36.45 ± 2.02c	57.48 ± 2.11b	97.95 ± 4.87a
	SP 含量(mg/g)	1.88 ± 0.03c	3.80 ± 0.04b	4.83 ± 0.08a
	Pro 含量(μg/g)	26.36 ± 0.50c	34.26 ± 0.53b	46.10 ± 2.51a
RYCR3	SS 含量(mg/g)	32.08 ± 1.96c	58.72 ± 2.13b	82.66 ± 2.05a
	SP 含量(mg/g)	1.53 ± 0.09c	2.33 ± 0.14b	4.20 ± 0.13a
	Pro 含量(μg/g)	25.86 ± 0.66c	35.91 ± 0.76b	41.78 ± 1.10a
RYCR4	SS 含量(mg/g)	43.50 ± 6.65c	63.35 ± 2.56b	96.47 ± 3.89a
	SP 含量(mg/g)	1.80 ± 0.13c	2.81 ± 0.36b	3.82 ± 0.14a
	Pro 含量(μg/g)	25.87 ± 0.58c	30.72 ± 0.40b	33.43 ± 1.37a
RYCR5	SS 含量(mg/g)	23.61 ± 3.30c	41.40 ± 3.58b	103.17 ± 5.12a
	SP 含量(mg/g)	1.82 ± 0.09b	1.92 ± 0.05b	2.86 ± 0.21a
	Pro 含量(μg/g)	26.66 ± 0.98c	31.33 ± 0.29b	34.66 ± 0.82a
RYCR6	SS 含量(mg/g)	45.44 ± 1.94c	54.64 ± 1.59b	69.52 ± 2.43a
	SP 含量(mg/g)	1.42 ± 0.02c	1.50 ± 0.11b	3.65 ± 0.16a
	Pro 含量(μg/g)	26.19 ± 0.63c	34.80 ± 0.43b	39.30 ± 1.25a
RYCR7	SS 含量(mg/g)	26.65 ± 1.94c	33.04 ± 2.54b	52.49 ± 1.99a
	SP 含量(mg/g)	2.15 ± 0.13c	3.14 ± 0.29b	4.27 ± 0.22a
	Pro 含量(μg/g)	27.97 ± 0.35c	37.84 ± 1.50b	41.11 ± 0.61a
RYMY8	SS 含量(mg/g)	41.20 ± 0.82c	45.94 ± 1.67b	63.56 ± 2.23a
	SP 含量(mg/g)	1.75 ± 0.17b	3.52 ± 0.05a	4.05 ± 0.76a
	Pro 含量(μg/g)	26.74 ± 1.08c	33.74 ± 0.48b	42.46 ± 1.27a
RYMY9	SS 含量(mg/g)	34.47 ± 2.20c	46.33 ± 0.80b	62.08 ± 1.82a
	SP 含量(mg/g)	1.46 ± 0.22b	2.08 ± 0.30b	3.42 ± 0.47a
	Pro 含量(μg/g)	25.86 ± 0.62c	34.07 ± 0.74b	36.76 ± 0.31a

注:表中同一行中不同的小写英文字母表示差异显著($P < 0.05$)。表 2、表 3 同。

著高于对照;10 ℃时 RYCR3 叶片可溶性蛋白含量增幅最大,是对照的 2.8 倍。低温胁迫下油棕叶片脯氨酸(Pro)含量随着温度的降低呈升高的趋势,10 ℃时 RYCR2 叶片脯氨酸含量最高,为 46.10 μg/g,显著高于对照;增幅也最大,是对照的 1.7 倍。

2.2 不同低温处理对油棕叶片总酚和丙二醛含量的影响

低温胁迫处理下,9 个油棕品种叶片 TF、MDA

含量变化如表 2 所示。低温胁迫下油棕叶片 TF 含量随着温度的降低呈上升趋势。15 ℃时 RYNG1 叶片 TF 含量最高,为 15.19 mg/g,显著高于对照;10 ℃时 RYCR5 叶片 TF 含量增幅最大,是对照的 1.99 倍。低温胁迫下油棕叶片的丙二醛(MDA)含量随着温度的降低整体呈上升趋势,10 ℃的 RYMY8 叶片 MDA 含量最高,为 101.29 nmol/g,显著高于对照;RYNG1、RYCR2 叶片 MDA 含量增幅较小。

表 2 低温处理对不同品种油棕叶片总酚和丙二醛含量变化的影响

品种	测定指标	CK(25 ℃)	T1(15 ℃)	T2(10 ℃)
RYNG1	TF 含量(mg/g)	10.16 ± 0.86b	15.19 ± 0.50a	14.20 ± 0.41a
	MDA 含量(nmol/g)	32.22 ± 2.19c	41.57 ± 1.58b	57.78 ± 3.15a
RYCR2	TF 含量(mg/g)	8.00 ± 0.06b	12.94 ± 0.05a	13.95 ± 0.89a
	MDA 含量(nmol/g)	26.29 ± 0.50b	29.67 ± 0.73b	46.30 ± 4.10a
RYCR3	TF 含量(mg/g)	4.31 ± 0.14c	6.66 ± 0.22b	7.52 ± 0.45a
	MDA 含量(nmol/g)	27.05 ± 1.81c	41.29 ± 1.14b	59.19 ± 0.29a
RYCR4	TF 含量(mg/g)	6.29 ± 0.76c	9.17 ± 0.51b	10.53 ± 0.11a
	MDA 含量(nmol/g)	24.91 ± 1.79c	45.21 ± 2.91b	67.87 ± 0.40a
RYCR5	TF 含量(mg/g)	5.45 ± 0.17c	8.09 ± 0.59b	10.86 ± 1.08a
	MDA 含量(nmol/g)	37.14 ± 1.64c	54.11 ± 1.95b	84.20 ± 7.55a
RYCR6	TF 含量(mg/g)	3.12 ± 0.31b	3.69 ± 0.63b	5.72 ± 0.95a
	MDA 含量(nmol/g)	39.64 ± 2.35c	56.48 ± 3.41b	99.22 ± 4.76a
RYCR7	TF 含量(mg/g)	4.56 ± 0.09b	6.52 ± 0.63a	6.62 ± 0.48a
	MDA 含量(nmol/g)	33.74 ± 0.79c	91.52 ± 1.48b	98.09 ± 0.58a
RYMY8	TF 含量(mg/g)	6.65 ± 0.27c	8.46 ± 0.21b	9.72 ± 0.16a
	MDA 含量(nmol/g)	52.08 ± 3.31b	95.95 ± 29.04a	101.29 ± 2.08a
RYMY9	TF 含量(mg/g)	3.86 ± 0.23c	4.98 ± 0.16b	5.72 ± 0.31a
	MDA 含量(nmol/g)	50.31 ± 2.07b	92.12 ± 4.83a	97.51 ± 3.82a

2.3 不同低温处理对油棕叶片抗氧化酶活性的影响

低温胁迫处理下,9 个油棕品种叶片抗氧化酶活性变化如表 3 所示。油棕叶片 SOD 活性随着温度的降低呈升高的趋势,15 ℃时 RYCR3 叶片 SOD 活性最高,为 3.39 U/g,显著高于对照;15 ℃时 RYCR4 叶片 SOD 活性增幅最大,是对照的 2.5 倍。油棕叶片 POD 活性总体随着温度的降低呈先升高再降低的趋势,RYMY8、RYMY9 的 POD 活性总体随着温度的降低而逐渐升高。15 ℃时 RYCR5 叶片 POD 活性最高,为 126.05 U/g,显著高于对照。油棕叶片 CAT 活性总体随着温度的降低呈逐渐升高的趋势。10 ℃时 RYCR6 叶片 CAT 活性最高,为 37.71 U/g,显著高于对照;RYMY8 叶片 CAT 酶活性增幅最大,是对照的 2.4 倍。

2.4 不同品种油棕各指标隶属函数值和综合评价结果

通过对低温胁迫下油棕叶片的可溶性糖(SS)、

可溶性蛋白(SP)、总酚(TF)、脯氨酸(Pro)、丙二醛(MDA)含量和 SOD、POD、CAT8 酶活性等 8 项抗寒相关生理指标变化幅度的隶属函数值求平均值,按其大小排序得到 9 个油棕抗寒性的综合评价结果(表 4),表明 9 个油棕的抗寒能力表现为 RYCR2 > RYCR3 > RYNG1 > RYCR6 > RYCR4 > RYMY8 > RYCR5 > RYMY9 > RYCR7。

3 讨论与结论

油棕起源于热带雨林,对低温的抵御能力较弱,在长期的栽培、引种和驯化中,其抗寒性也逐渐增强^[12-13]。SS、SP、Pro 是植物细胞内重要的渗透调节物质,在低温胁迫下渗透调节物质含量的增加能够改变细胞质浓度,提高细胞的保水能力,进而有效缓解低温对植物细胞的伤害^[14],其含量的高低也能从一定程度上反映抗寒性的强弱^[15-16]。SS 与水结合形成束缚水,提高原生质的黏度,能够降低

表 3 低温处理对油棕不同品种叶片保护酶活性的影响

品种	测定指标	CK(25 ℃)	T1(15 ℃)	T2(10 ℃)
RYNG1	SOD 活性(U/g)	1.53 ± 0.23b	2.34 ± 0.48a	1.81 ± 0.09ab
	POD 活性(U/g)	60.45 ± 0.86c	80.34 ± 1.58b	85.23 ± 0.80a
	CAT 活性(U/g)	8.14 ± 0.29c	13.67 ± 0.34b	20.69 ± 1.06a
RYCR2	SOD 活性(U/g)	0.89 ± 0.06c	1.32 ± 0.07b	2.11 ± 0.18a
	POD 活性(U/g)	43.74 ± 1.52c	70.72 ± 0.51a	68.74 ± 1.32b
	CAT 活性(U/g)	9.55 ± 0.09c	16.08 ± 2.40b	21.26 ± 1.88a
RYCR3	SOD 活性(U/g)	1.40 ± 0.06c	3.39 ± 0.20a	2.06 ± 0.12b
	POD 活性(U/g)	45.54 ± 3.05c	75.54 ± 5.56b	85.81 ± 1.11a
	CAT 活性(U/g)	15.04 ± 2.28c	28.11 ± 2.16b	33.44 ± 1.59a
RYCR4	SOD 活性(U/g)	0.86 ± 0.03c	2.18 ± 0.08a	2.02 ± 0.11b
	POD 活性(U/g)	54.96 ± 0.06c	109.77 ± 7.12a	67.98 ± 2.19b
	CAT 活性(U/g)	13.22 ± 2.68b	23.25 ± 1.00a	25.18 ± 2.66a
RYCR5	SOD 活性(U/g)	1.44 ± 0.12b	2.21 ± 0.04a	2.12 ± 0.06a
	POD 活性(U/g)	68.15 ± 1.99c	126.05 ± 8.51a	114.21 ± 0.79b
	CAT 活性(U/g)	16.52 ± 1.67b	18.41 ± 1.02b	26.01 ± 0.80a
RYCR6	SOD 活性(U/g)	1.90 ± 0.06c	2.57 ± 0.08b	3.18 ± 0.19a
	POD 活性(U/g)	42.36 ± 2.77c	99.46 ± 0.55a	92.42 ± 5.68b
	CAT 活性(U/g)	14.43 ± 3.26c	22.70 ± 3.20b	37.71 ± 1.01a
RYCR7	SOD 活性(U/g)	1.24 ± 0.09b	2.56 ± 0.32a	2.81 ± 0.05a
	POD 活性(U/g)	42.86 ± 1.12c	75.72 ± 1.19a	73.36 ± 1.00b
	CAT 活性(U/g)	12.66 ± 0.93b	14.71 ± 1.18b	20.12 ± 2.69a
RYMY8	SOD 活性(U/g)	1.35 ± 0.19c	2.24 ± 0.32b	2.31 ± 0.02a
	POD 活性(U/g)	49.58 ± 1.07c	56.22 ± 8.47b	83.34 ± 0.89a
	CAT 活性(U/g)	13.51 ± 0.91c	21.96 ± 1.74b	32.60 ± 3.23a
RYMY9	SOD 活性(U/g)	1.75 ± 0.06c	2.57 ± 0.05a	2.49 ± 0.22a
	POD 活性(U/g)	55.97 ± 4.11c	65.32 ± 2.19b	75.47 ± 3.00a
	CAT 活性(U/g)	14.35 ± 1.48c	26.23 ± 4.00b	32.48 ± 1.86a

表 4 油棕叶片在低温胁迫下 8 项指标的隶属函数值及抗寒性综合评价

品种	隶属函数值									位次
	SS	SP	Pro	TF	MDA	SOD	POD	CAT	平均值	
RYNG1	1.000	0.727	0.478	0.253	0.929	0.000	0.111	1.000	0.562	3
RYCR2	0.909	1.000	1.001	0.999	1.000	0.523	0.107	0.798	0.792	1
RYCR3	0.989	0.843	0.924	0.880	0.698	0.543	0.510	0.916	0.788	2
RYCR4	0.575	0.538	0.006	0.636	0.396	1.000	0.357	0.637	0.518	5
RYCR5	0.762	0.000	0.000	1.179	0.694	0.135	0.501	0.000	0.409	7
RYCR6	0.042	0.509	0.617	0.449	0.620	0.152	1.000	0.978	0.546	4
RYCR7	0.312	0.416	0.606	0.230	0.000	0.762	0.478	0.041	0.356	9
RYMY8	0.000	0.871	0.653	0.001	0.671	0.305	0.148	0.882	0.441	6
RYMY9	0.276	0.586	0.459	0.059	0.678	0.085	0.000	0.916	0.382	8

细胞的凝固点,植物中 SS 含量越高,植物的抗寒性越强^[17]。9 个油棕品种的 SS 含量在温度逐渐降低的过程中逐渐上升,其中 RYNG1、RYCR2、RYCR3 的 SS 含量上升的幅度最大,这表明这 3 个品种在低温胁迫下能够积累大量的 SS,缓解低温造成的细胞

损伤,提高抗寒性。9 个油棕品种的 SP 含量在温度逐渐降低的过程中逐渐上升,其中 RYCR2、RYCR3、RYMY8 的 SP 含量上升的幅度最大,这表明这 3 个品种在低温胁迫下能够积累大量的 SP,增强对低温胁迫的抗性。在一般情况下,植物细胞的 Pro 含量

较低,在低温胁迫下 Pro 迅速积累,外源喷施 Pro 能够增强植物的抗寒性^[18]。9 个油棕品种的 Pro 在 15、10 ℃ 处理下迅速积累,其中 RYNG1、RYCR3、RYMY8 的 Pro 含量上升的幅度最大,表明这 3 个品种在低温胁迫下能够积累大量的 Pro,增强对低温胁迫的抗性。

低温胁迫下细胞内会产生大量的活性氧,包括超氧阴离子自由基($O_2^- \cdot$)、过氧化氢(H_2O_2)、羟基自由基($\cdot OH$)、一氧化氮(NO)等^[19-20]。过量的活性氧积累会对蛋白质、核酸和脂质等生物大分子造成损伤,从而影响其正常的生理生化功能^[21]。MDA 是活性氧与脂质发生过氧化反应的终产物,会引起蛋白质、核酸等生物大分子的交联结合,且具有细胞毒性^[21]。RYNG1、RYCR2、RYCR3 的 MDA 含量在低温胁迫下的积累量明显低于其他品种,表明受低温胁迫的影响较小。酚类物质是植物重要的非酶类抗氧化剂,在逆境胁迫下,酚类物质的积累能够有效清除活性氧的积累^[21]。不同油棕品种在低温胁迫下的酚类物质变化差异较大,其中 RYNG1、RYCR3、RYCR5 的 TF 含量上升的幅度最大,表明这 3 个品种在低温胁迫下能够积累大量的酚类物质,增强对低温胁迫的抗性。SOD、POD、CAT 是植物细胞内重要的抗氧化酶,通过清除膜脂过氧化产生的活性氧来保护细胞免受伤害,减少细胞膜损伤,提高植物的抗寒能力。低温胁迫下 SOD、POD、CAT 活性的高低也能在一定程度上反映植物的抗寒能力。9 个油棕品种在低温胁迫下 SOD、POD、CAT 活性都有不同程度的上升,其中 RYCR4、RYCR6、RYNG1 在低温胁迫下 SOD、POD、CAT 活性上升的幅度高于其他品种,这表明 RYCR4、RYCR6、RYNG1 在低温胁迫下对活性氧的清除能力较强。

由于油棕树体高大,本研究采用油棕叶片离体低温处理的方式模拟低温胁迫,同时基于与抗寒性密切相关的生理生化指标的变化进行抗寒性的评估。植物抗寒性是多个因素综合控制的,包括形态结构、解剖结构、生理生化指标等,全面的抗寒性评估须对这些指标进行综合分析,同时还须结合田间调查的结果。本试验利用隶属函数对油棕叶片在低温胁迫下的生理生化指标综合分析,得出 9 个油棕品种的抗寒性表现为 RYCR2 > RYCR3 > RYNG1 > RYCR6 > RYCR4 > RYMY8 > RYCR5 > RYMY9 > RYCR7。

参考文献:

- [1] Woittiez L S, van Wijk M T, Slingerland M, et al. Yield gaps in oil palm: a quantitative review of contributing factors [J]. *European Journal of Agronomy*, 2017, 83: 57–77.
- [2] 李 静, 郑 丽, 何时雨, 等. 海南省油棕园土壤养分调查与评价 [J]. *南方农业学报*, 2013, 44(6): 958–962.
- [3] Xiao Y, Zhou L X, Lei X T, et al. Genome-wide identification of WRKY genes and their expression profiles under different abiotic stresses in *Elaeis guineensis* [J]. *PLoS One*, 2017, 12 (12): e0189224.
- [4] 黄汉驹, 曹红星, 张如莲. 油棕抗寒性研究进展 [J]. *热带农业科学*, 2013, 33(5): 60–63.
- [5] 李 静, 陈秀龙, 马帅鹏, 等. 2012 年广东江门油棕寒害调查及品种抗寒性分析 [J]. *农学学报*, 2013, 3(11): 1–4.
- [6] 李付鹏, 伍宝朵, 秦晓威, 等. 可可种质资源抗寒性初步评价及低温胁迫下生理响应 [J]. *热带作物学报*, 2019, 40(11): 2135–2141.
- [7] 唐江红, 邓小书, 韩龙植, 等. 低温胁迫水稻幼芽生长及生理响应 [J]. *西南农业学报*, 2019, 32(6): 1248–1252.
- [8] 许 娟, 郑 虚, 闫海锋, 等. 不同马铃薯品种苗期叶片对低温胁迫的生理响应 [J]. *南方农业学报*, 2016, 47(11): 1837–1843.
- [9] 陈荣发, 刘文娟, 张保青, 等. 低温胁迫对甘蔗幼苗根系线粒体生理生化作用的影响 [J]. *南方农业学报*, 2015, 46(8): 1385–1390.
- [10] 吴海宁, 罗兴录, 樊吴静. 低温胁迫对不同木薯品种幼苗生理特性的影响 [J]. *南方农业学报*, 2013, 44(11): 1791–1799.
- [11] 曹红星, 孙程旭, 冯美利, 等. 低温胁迫对海南本地种油棕幼苗的生理生化响应 [J]. *西南农业学报*, 2011, 24(4): 1282–1285.
- [12] 倪书邦, 刘世红, 魏丽萍. 西双版纳新引油棕品种抗寒性鉴定及抗氧化系统研究 [J]. *云南农业大学学报*, 2012, 27(1): 44–48.
- [13] 曾宪海, 吴香姑, 张日庆, 等. 应用电导率法及 Logistic 方程评价引种海南儋州油棕新品种抗寒性研究 [J]. *中国热带农业*, 2014(4): 59–63.
- [14] Pareek A, Sopory S K, Bohnert H J, et al. Abiotic stress adaptation in plants: physiological, molecular and genomic foundation [M]. The Netherlands: Springer, 2010: 358–367.
- [15] 高京草, 王慧霞, 李西选. 可溶性蛋白、丙二醛含量与枣树枝条抗寒性的关系研究 [J]. *北方园艺*, 2010(23): 18–20.
- [16] 范宗民, 孙军利, 赵宝龙, 等. 不同砧木赤霞珠葡萄枝条抗寒性比较 [J]. *果树学报*, 2020, 37(2): 215–225.
- [17] 李京蓉, 马 真, 张 骞, 等. 青海省 6 种禾本科牧草的抗寒性研究及综合评价 [J]. *草地学报*, 2020, 28(2): 405–411.
- [18] 普布卓玛, 其美拉姆, 李丹丹, 等. 外源脯氨酸对低温胁迫下西藏野生垂穗披碱草幼苗生长和抗氧化酶相关基因表达的影响 [J]. *草地学报*, 2020, 28(3): 589–596.
- [19] 朱鹏彪, 庞新华, 梁 春, 等. 低温胁迫对甘蔗幼苗活性氧代谢和抗氧化酶的影响 [J]. *作物杂志*, 2018(4): 131–137.
- [20] 丁红映, 王 明, 谢 洁, 等. 植物低温胁迫响应及研究方法进展 [J]. *江苏农业科学*, 2019, 47(14): 31–36.
- [21] Vats S. Biotic and abiotic stress tolerance in plants [M]. Singapore: Springer Nature Singapore Pte Ltd, 2018: 90–95.