

闫圆圆, 曾爱松, 宋立晓, 等. 结球甘蓝幼苗耐热性鉴定方法及耐热生理[J]. 江苏农业学报, 2016, 32(4): 885-890.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2016.04.027

结球甘蓝幼苗耐热性鉴定方法及耐热生理

闫圆圆, 曾爱松, 宋立晓, 严继勇
(江苏省农业科学院蔬菜研究所, 江苏 南京 210014)

摘要: 为了筛选出一套适用于甘蓝苗期耐热性鉴定的方法, 以耐热性不同的 6 份甘蓝材料为试验材料, 通过采用不同的胁迫温度、胁迫时间和胁迫苗龄对甘蓝苗期耐热性进行评价, 并测定不同材料的生理指标。结果显示, 4~5 片真叶的甘蓝幼苗在 38.0 °C/29.0 °C (昼/夜) 人工模拟气候箱中处理 3 d, 可以准确评价不同类型甘蓝材料的耐热性差异。高温处理 3 d 后, 甘蓝幼苗相对电导率大幅升高, 其中耐热材料启夏的增幅小于热敏感材料 W410。随着高温胁迫时间的延长, 启夏和 W410 的 MDA 含量和游离脯氨酸含量呈升高的趋势, 且两者间差异达显著水平, 两种类型材料的 SOD 活性均呈现出先上升后下降趋势, 其中启夏的 SOD 活性始终高于 W410。POD 活性变化与耐热性无明显相关性。因此, 相对电导率、MDA 含量、游离脯氨酸含量和 SOD 活性均可以作为甘蓝苗期耐热性鉴定的间接指标。

关键词: 甘蓝; 耐热性鉴定; 相对电导率; MDA 含量; 游离脯氨酸含量; SOD 活性

中图分类号: S635.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2016)04-0885-06

Identification of heat tolerance in cabbage seedlings and heat-tolerant physiology

YAN Yuan-yuan, ZENG Ai-song, SONG Li-xiao, YAN Ji-yong
(*Institute of Vegetable Crops, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China*)

Abstract: To develop a method for identifying heat tolerance at seedling stage, six cabbage varieties or inbred lines with different heat tolerances were evaluated for the optimal temperature, time duration and seedling age of high temperature stress. The cabbage seedlings with 4–5 true leaves inside artificial climate box under 38.0 °C / 29.0 °C (d/n) for 3 d was favorable for heat tolerance identification. After high temperature treatment for 3 d, the relative conductivity of cabbage seedlings dramatically increased, and the increment was bigger in heat-sensitive materials than that in heat-tolerant materials. As high temperature stress lasted, the contents of MDA and proline in both heat-tolerant and-sensitive material climbed up, and the SOD activities declined following an initial rising. The SOD activity in heat-tolerant variety was higher than that in heat-sensitive variety. The POD activity was variety-independent. In sum, relative conductivity, MDA content, proline content activity could be used as indirect indicators for heat tolerance identification of cabbage seedlings.

Key words: cabbage; heat resistance identification; relative electric conductivity; MDA content; proline content; SOD activity

收稿日期: 2015-12-21

基金项目: 江苏省农业科技支撑计划项目 (BE2013429); 江苏省农业科技自主创新基金项目 [CX(15)1015]

作者简介: 闫圆圆 (1990-), 女, 山东省滨州人, 硕士研究生, 主要从事结球甘蓝遗传与生物技术育种研究。(Tel) 15951971276; (E-mail) 1126928018@qq.com

通讯作者: 严继勇, (Tel) 13951890164; (E-mail) yjyqr@163.com

结球甘蓝 (*Brassica oleracea* L. var. *capitata*) 为十字花科芸苔属的两年生草本植物, 简称甘蓝, 起源于欧洲地中海至北海沿岸, 是世界性的重要蔬菜^[1]。由于营养丰富, 尤其是维生素 C 含量在蔬菜中位居前列, 并且食用方法多样, 深受人们喜爱, 所

以甘蓝正逐渐被全国各地引种栽培,栽培面积也不断扩大^[2]。甘蓝对温度的适应范围较广,但喜温和冷凉气候,适宜在 15~25 ℃ 的气温条件下生长^[3-4]。近几年,随着全球气温不断上升和极端高温天气的频繁出现,在夏季和初秋季节,环境温度常高于其生长发育的最适温度,所以甘蓝在夏季生产中往往会表现出生长速率减慢,死苗率高,不能正常结球,并且病虫害易发,产量和品质均下降,这对甘蓝的周年供应产生一定的限制^[5-6]。因此,甘蓝耐热性研究日趋受到重视,耐高温胁迫已经成为甘蓝新品种选育的重要目标之一。

近年来,随着耐热育种的发展,中国蔬菜科技工作者对热胁迫下作物的生理生化变化作了较多的研究,探索出了一些针对不同蔬菜作物进行抗热性鉴定的方法,并鉴定出了一系列优良的耐热品种^[7-9]。但在甘蓝的耐热研究上则少有报道,缺乏一套快速、简便的耐热性苗期鉴定方法。本研究以耐热性不同的 6 份甘蓝材料为试验材料,采用苗期人工气候箱和电导法进行初步鉴定,同时研究高温胁迫对甘蓝叶片中 MDA 含量、Pro 含量以及 SOD 活性和 POD 活性的影响,以期建立一套简单、快速、准确鉴定甘蓝耐热性的方法提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

选取耐热性差异明显的 3 种类型甘蓝为试验材料。分别为耐热性强的材料耐热 60、启夏;耐热性中等的材料探春、绿珠;热敏感材料 460、W410。以上材料均由江苏省农业科学院蔬菜研究所甘蓝项目组提供。

1.2 试验方法

试验于 2015 年 3~7 月在江苏省农业科学院蔬菜研究所甘蓝组实验室和试验基地进行。3 月 9 日开始第一次播种,选取 6 份材料中籽粒饱满、整齐一致,无病虫害的种子播种于 50 孔的穴盘,每份材料播种 4 盘,每隔 7 d 播种 1 次,以便同时有不同苗龄的供试材料,待幼苗长至一定大小时将幼苗完全随机地排列在人工气候箱中进行高温胁迫处理。

1.2.1 人工气候箱鉴定方法

1.2.1.1 最佳鉴定温度和时间的确定 每份材料中选取 4~5 片真叶期的幼苗 30 株,3 次重复,完全随机排列于 QHX-400BS-Ⅲ 型人工气候箱内进行高温

处理,昼/夜温度设定 2 个处理水平: 36.5 ℃/20.0 ℃ 和 38.0 ℃/29.0 ℃。湿度控制在 50%,光周期 12 h/12 h(昼/夜),光照度 10 000 lx。分别在高温处理的第 3 d、第 4 d、第 5 d 统计各个材料的热害情况并计算热害指数。热害分级标准根据处理植株的表现并参照康俊根等^[5]的方法(表 1)进行制定。热害指数 = $[(\sum \text{热害级别} \times \text{各级株数}) / (\text{最高级株数} \times \text{总株数})] \times 100\%$ 。

表 1 甘蓝幼苗热害分级标准

Table 1 The classification standard of heat injury of cabbage seedlings

分级	植株表现
0 级	叶片正常生长,无黄叶出现,没有热害现象
1 级	叶片绿色,叶片边缘轻度翻卷萎蔫
2 级	叶片微黄,中度萎蔫,具有 1~2 片微黄叶片
3 级	叶片发黄,重度萎蔫,具有 2~3 片黄叶出现
4 级	植株茎萎蔫,除新叶外,其余叶片均变为枯黄
5 级	整个植株干枯死亡

1.2.1.2 最佳甘蓝苗龄的确定 将 3 个不同苗龄(2~3 片真叶期、4~5 片真叶期和 6~8 片真叶期)的甘蓝幼苗于方法 1.2.1.1 中确定的最佳鉴定条件中进行处理,根据幼苗热害表现确定出最适合耐热性鉴定的苗龄。

1.2.2 电导率的测定 选取耐热性鉴定最佳苗龄的甘蓝幼苗放于人工气候箱,在确定出最佳温度、最佳时间下高温处理,湿度控制在 50%,光周期 12 h/12 h(昼/夜),光照度 10 000 lx,分别于处理前(0 d)和处理后(3 d)取样,参照王学奎^[10]的方法测定相对电导率。

1.2.3 生理指标的测定 根据鉴定结果,选择耐热性差异最大的启夏和 W410 在方法 1.2.2 所述条件下进行生理指标测定。每份材料 30 株,3 次重复,25.0 ℃/20.0 ℃(昼/夜)培养室作为对照,分别于处理后 0 d、2 d、4 d、6 d、恢复 3 d(R3)后取样。

丙二醛含量,采用王学奎^[10]的硫代巴比妥酸(TBA)法进行测定;游离脯氨酸含量采用酸性茚三酮显色法^[10]进行测定;酶活性参考文献[11]的方法测定;SOD 活性采用氮蓝四唑法测定;POD 活性采用愈创木酚法测定。

1.3 数据处理与统计分析

采用 Microsoft Excel 软件整理原始数据,采用 DPS 软件进行方差分析和差异显著性测验。

2 结果与分析

2.1 耐热性鉴定最佳温度 and 时间的筛选

从表 2 中可以看出,在 36.5℃/20.0℃ 中处理第 3 d 时,耐热性材料和耐热性中等材料的热害指数均为 0,2 个热敏感材料表现出了轻微的热害症状;在处理的第 4 d 时 3 种类型材料均表现出热害症状;但是耐热性强的材料和耐热性中等的材料受害程度相似,不能明显区分 2 种类型材料耐热性;在 36.5℃/20.0℃ 处理第 5 d 时耐热性材料、耐热性中等的材料和热敏感性材料热害指数差异显著。在 38.0℃/29.0℃ 处理第 3 d 时,3 种类型甘蓝材料的热害指数差异显著;处理第 4 d 时,耐热性中等的材料和热敏感材料热害情况较为严重,热害指数的差异不显著;在处理第 5 d 时,各个品种均表现出了复杂的热害症状,难以明显区分不同类型材料的热害程度。虽然 3 种类型的材料分别在 36.5℃/20.0℃ 处理第 5 d 时和在 38.0℃/29.0℃ 处理第 3 d 时均表现出显著性差异,但是从试验结果来看在 38.0℃/29.0℃ 处理第 3 d 时,耐热性材料和热敏感性材料表现出的差异性相对于在 36.5℃/20.0℃ 处理第 5 d 时更加明显。因此,综合考虑处理时间和 3 种类型材料的耐热性区分度,确定在人工气候箱中设定 38.0℃/29.0℃ 处理第 3 d 时是甘蓝耐热性鉴定的最适条件。

表 2 36.5℃/20.0℃ 和 38.0℃/29.0℃ 处理下甘蓝苗期热害指数
Table 2 The heat injury index of cabbage seedlings at 36.5℃/20.0℃ and 38.0℃/29.0℃

品种	耐热类型	热害指数 (%)					
		36.5℃/20.0℃			38.0℃/29.0℃		
		3 d	4 d	5 d	3 d	4 d	5 d
W410	热敏感	0.55a	15.85a	39.75a	79.30a	84.85a	91.05a
460	热敏感	0.30b	15.70a	39.45a	78.50a	84.40a	89.75a
探春	中等	0c	2.70b	11.60b	44.20b	83.15a	88.85ab
绿珠	中等	0c	2.60b	11.45b	42.10c	83.05a	86.75bc
耐热 60	耐热	0c	2.25b	3.25c	15.85d	52.25b	84.9cd
启夏	耐热	0c	2.20b	3.20c	15.05d	52.15b	83.15d

同一列数据后不同小写字母表示差异显著 (P<0.05)。

2.2 耐热性鉴定甘蓝最佳苗龄的筛选

从表 3 中可以看出 2~3 片真叶期,各类型材料

的热害程度都表现十分严重,无法明确区分出不同材料的耐热性。在 6~8 片真叶期,各个品种受害较轻。耐热性强的材料和耐热中等的材料热害指数差异不显著,无法准确地区分它们耐热性的差异。在 4~5 片真叶期,耐热性强的材料、耐热性中等的材料和热敏感材料的热害指数差异都达到显著水平,可以准确、清晰地区分 3 种类型材料的耐热性。因此,在最佳处理条件下,4~5 片真叶期是甘蓝幼苗期进行耐热性鉴定的最佳时期。

表 3 不同叶龄的甘蓝幼苗 38.0℃/29.0℃ 处理 3 d 后热害指数的比较

Table 3 The heat injury index of cabbage seedlings at different leaf ages stress at 38.0℃/29.0℃ for 3 d

品种	耐热类型	热害指数 (%)		
		2~3 片真叶期	4~5 片真叶期	6~8 片真叶期
W410	热敏感	77.45a	81.70a	39.05a
460	热敏感	72.85ab	81.15a	35.80a
探春	中等	63.15b	44.00b	12.05b
绿珠	中等	63.65b	44.00b	11.80b
耐热 60	耐热	61.40b	15.15c	11.55b
启夏	耐热	63.75b	15.00c	11.40b

同一列数据后不同小写字母表示差异显著 (P<0.05)。

2.3 高温胁迫对甘蓝相对电导率的影响

从图 1 中可以看出,各个材料在高温处理前相对电导率差异不显著,耐热材料启夏的相对电导率在高温处理前后的相对差异最小,仅为 7.21%,热敏感品种 W410 的相对电导率在处理前后相对差异最大,为 25.52%。热敏感材料的相对电导率提高幅度明显高于耐热材料。高温处理前后相对电导率差异越小,表示材料的耐热性越好。从图 1 中可以看出各种材料的耐热性从强到弱的顺序依次为启夏、耐热 60、绿珠、探春、460、W410。其结果与人工气候箱鉴定结果和多年的田间鉴定结果基本一致。利用相对电导率在高温处理前后的差异可以鉴定出不同类型甘蓝材料的耐热性。

2.4 甘蓝幼苗叶片对高温胁迫的生理响应

2.4.1 MDA 含量 如图 2 所示,随着高温胁迫时间的延长,甘蓝耐热材料和热敏感材料的 MDA 含量均呈上升趋势,在恢复 3 d (R3) 后都表现出下降趋势。热敏感材料 W410 的 MDA 含量始终高于耐热材料启夏。38.0℃/29.0℃ 处理下 2 种材料都在高

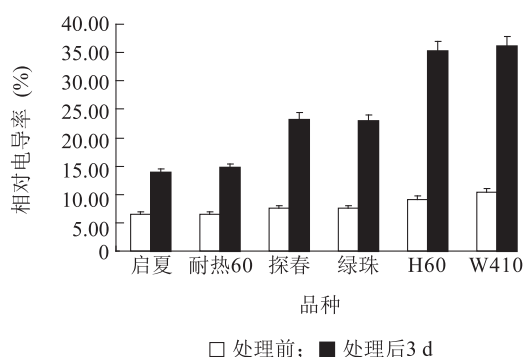


图1 高温处理前后甘蓝品种相对电导率的变化

Fig.1 The changes of relative electric conductivity in cabbage varieties under high temperature stress

温处理的第 6 d 达到最大值,相比对照分别增加了 200.0% 和 108.0%。恢复到室温 3 d 后,耐热材料的 MDA 含量大幅度下降,降幅为 52.9%,而热敏感材料的 MDA 含量下降幅度较小,仅为 7.4%。可见耐热材料在高温胁迫下受到的伤害较小,并且恢复能力也远远大于热敏感材料。

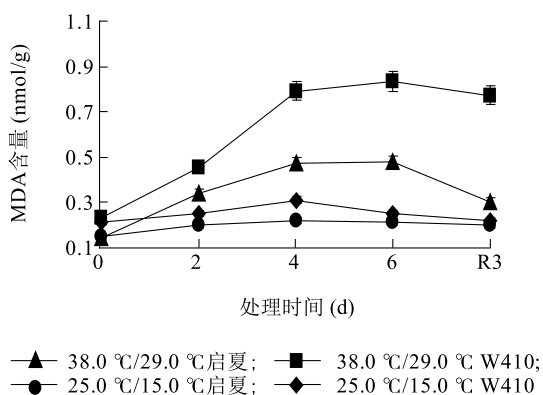


图2 高温胁迫对甘蓝幼苗叶片中 MDA 含量的影响

Fig.2 Effect of high temperature stress on MDA content in the leaves of cabbage seedlings

2.4.2 游离脯氨酸含量 由图 3 可知,与对照相比,两种甘蓝材料的游离脯氨酸含量在高温胁迫下随处理时间的延长均呈上升趋势,并且相同温度处理下耐热材料的游离脯氨酸含量始终高于热敏感材料。38.0 °C/29.0 °C 处理下耐热材料启夏和热敏感材料 W410 的游离脯氨酸都在高温处理的第 6 d 含量达到最大,相比对照分别增加了 276.0% 和 138.0%。恢复到室温 3 d 后,两种材料的游离脯氨酸含量均呈下降趋势,尽管耐热材料的下降幅度为

107.0%,热敏感材料的下降幅度仅为 41.0%,但是耐热材料的游离脯氨酸含量仍然比热敏感材料高 33.9%。

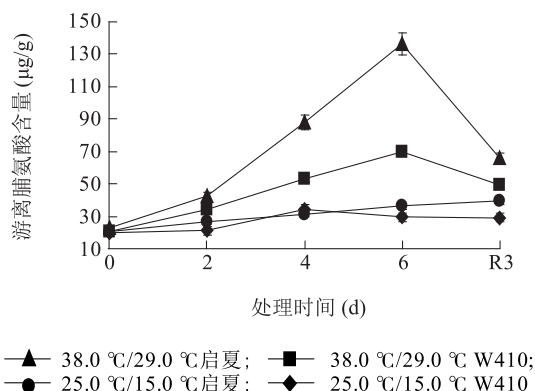


图3 高温胁迫对甘蓝幼苗叶片中游离脯氨酸含量的影响

Fig.3 Effect of high temperature stress on Pro content in the leaves of cabbage seedlings

2.4.3 超氧化物歧化酶活性 从图 4 中可以看出,与对照相比较,耐热材料启夏和热敏感材料 W410 在经过高温处理后 SOD 酶活性都显著升高。总体来看,启夏的 SOD 活性提高幅度大于 W410。同时在处理过程中两种材料均呈现出先升高后降低的趋势,在恢复到室温时均表现出上升趋势。在恢复到室温 3 d 后,耐热材料启夏的 SOD 酶活性比对照增加了 107.5%,热敏感材料 W410 较对照增加 70.2%。

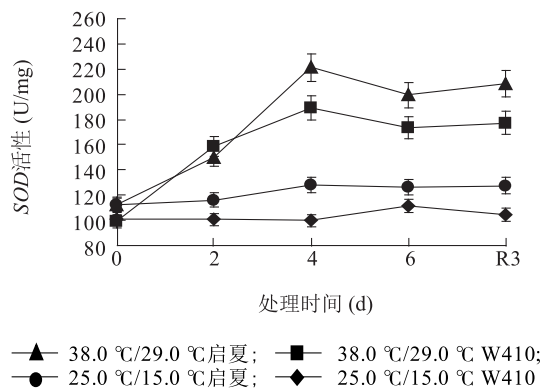


图4 高温胁迫对甘蓝幼苗叶片超氧化物歧化酶活性的影响

Fig.4 Effect of high temperature stress on SOD activity in the leaves of cabbage seedlings

2.4.4 过氧化物酶活性 如图 5 所示,两种材料的

变化趋势有所不同。在进行高温胁迫处理时,耐热材料启夏呈现出先下降后上升的趋势,在处理第2 d *POD* 活性低于对照,之后迅速上升,在恢复到室温后3 d,达到最大值,高于对照 56.0%;而热敏感材料 W410 的 *POD* 活性呈现出先上升后下降趋势,也在恢复到室温处理后达最大值,高于对照 34.2%。

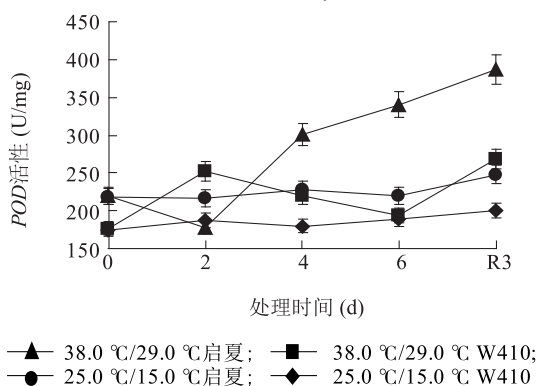


图5 高温胁迫对甘蓝幼苗叶片过氧化物酶活性的影响

Fig.5 Effect of high temperature stress on *POD* activity in the leaves of cabbage seedlings

3 讨论

目前,甘蓝耐热性鉴定方法尚未形成统一的标准,研究一套准确、快速、简便的鉴定方法十分有必要。利用人工气候箱对甘蓝不同类型材料进行耐热性鉴定,从外观形态上基本可以反映出各材料的耐热特性,结果符合田间的实际情况^[6,12]。康俊根等^[7]的研究结果表明,36.5 °C处理6 d是甘蓝较为理想的高温胁迫条件。此方法处理温度低,胁迫时间较长,没有考虑甘蓝苗龄的大小,作为甘蓝苗期的鉴定条件不够准确。而本试验利用人工模拟高温进一步筛选出了更加精确的鉴定条件,将4~5片真叶期的甘蓝幼苗置于昼夜温度为38.0 °C/29.0 °C的人工气候箱中处理3 d可以准确、快速地鉴定出甘蓝的耐热性。此方法不受外界环境因素制约,所需设备简单,易操作,适合甘蓝苗期耐热性鉴定。

植物组织处于逆境胁迫时,细胞膜是受害最为敏感的部位^[13]。当细胞膜遭到破坏时会直接引起细胞膜渗透性增强,电解质泄漏,相对电导率增加^[14]。电导率被广泛应用于植物抗逆性测定,被公认为是一个比较好的鉴定方法。从本试验结果中可以看出高温胁迫在不同程度上提高了各个材料的相对电导率,这可能是高温胁迫在一定程度上伤害了

植物细胞膜的结构,使细胞膜的电解质渗透率增加所致。甘蓝热敏感材料在38.0 °C/29.0 °C高温胁迫下,叶片组织的细胞膜受到比耐热材料更为严重的破坏,这与司家钢等^[15]在大白菜上的研究结果相一致。马晓娣等^[16]认为,叶片的相对电导率可以作为耐热性评价的生理学指标,这与本试验结果一致。因此,电导率可以作为甘蓝耐热性鉴定的重要指标之一。

MDA是植物膜脂过氧化作用的重要产物,往往被视为胁迫损伤的指标之一^[17-18],它能反应膜损伤程度,其含量越高,说明质膜损伤越严重,反之,含量越低,则膜受害越轻^[19]。李成琼等^[20]研究发现MDA含量与耐热性强弱呈负相关,可以作为衡量耐热性强弱的一个指标。张景云等^[13]在小白菜上的研究结果表明,在高温胁迫下,随着处理时间的延长MDA含量逐渐升高,耐热材料的升高幅度低于不耐热材料。这与本试验的研究结果相一致,说明耐热材料可以通过自身的调节以减少MDA的积累,从而减轻细胞受到损伤。

游离脯氨酸是一种重要的渗透调节物质,广泛存在于植物体内^[21],被认为是植物抵抗和防御高温胁迫的重要生理机制之一,可以保护细胞膜系统免受外来伤害。因此测定植物体内游离脯氨酸含量的变化,在一定程度上可以反映植物对高温等逆境胁迫的忍耐和抵抗力^[12]。在持续高温胁迫下,耐热材料启夏和热敏感材料W410的游离脯氨酸含量均出现逐渐升高的趋势,启夏游离脯氨酸含量的增加幅度明显高于W410。娄丽娜等^[22]在不结球白菜中研究发现游离脯氨酸含量与耐热性呈极显著正相关,这与本试验结果相符合。这说明高温胁迫能使甘蓝叶片中游离脯氨酸含量增加,提高耐高温胁迫的渗透调节能力,从而避免高温热害。因此游离脯氨酸含量的多少可作为鉴别甘蓝耐热性强弱的生理指标。

在逆境条件下,植物体内产生大量的超氧阴离子自由基、活性氧等,造成细胞膜的伤害。*SOD*、*POD*是植物酶促防御系统的重要保护酶^[23]。正常条件下,植物靠自身的自由基清除系统保持细胞内活性氧平衡,而植物受到环境胁迫时,活性氧平衡受到破坏,其清除系统尤其是抗氧化酶系统则会表现出相应的应激反应^[24-25],缓解胁迫对植物膜系统造成的伤害。本研究中,在高温胁迫后启夏和W410

的 *SOD* 活性较常温对照均表现出升高趋势。这与叶陈亮等^[26] 对大白菜 *SOD* 活性的研究结果相一致。并且在整个高温处理过程中,无论是耐热材料还是热敏感材料都表现出先升高后下降的趋势。苏小俊等^[27] 在大白菜研究中也得到类似结果。而高温胁迫下 *POD* 活性在耐热材料和热敏感材料中表现不同,耐热材料的 *POD* 活性是先下降后上升,而热敏感材料是先上升后下降。胡俏强等^[28] 在不结球白菜上的研究结果与本研究结果不一致。这可能与研究的材料以及处理时间有关。因此,*POD* 活性在不同作物中的研究结果差别较大,不能作为甘蓝耐热性鉴定的可靠指标。

综上所述,人工气候箱鉴定和电导法鉴定是两种准确快速、简便可靠的鉴定方法,此法操作简单,省时省力,能有效鉴定大量甘蓝种质资源的耐热性。*MDA* 含量、游离脯氨酸含量、*SOD* 活性均可作为甘蓝耐热性鉴定的间接指标,而 *POD* 活性能否作为甘蓝耐热性鉴定指标有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 王庆彪,方智远,杨丽梅,等.中国甘蓝育成品种系谱分析[J].园艺学报,2013,40(5):869-886.
- [2] 陈碧华.温度处理对甘蓝幼苗耐热性的影响研究[D].重庆:西南农业大学,2004.
- [3] 宋立晓,高兵,张边江,等.甘蓝耐寒性生理生化指标研究[J].江苏农业学报,2009,25(6):1341-1346.
- [4] BERRY J, BJORKMAN O. Photosynthetic response and adaptation to temperature in high plants[J]. Annu Rev Plant Physiol,1980, 31:491-543.
- [5] 康俊根,翟依仁.甘蓝耐热性遗传效应分析[J].华北农学报,2003,18(3):93-95.
- [6] 候晟灿.早秋耐热甘蓝新品种的选育[D].武汉:华中农业大学,2014.
- [7] 康俊根,翟依仁,张京社,等.甘蓝耐热性鉴定方法[J].中国蔬菜,2002(1):4-7.
- [8] 阳燕娟,来可可,陈文明,等.砧用葫芦种质资源耐热性评价[J].南方农业学报,2015,46(6):1047-1052.
- [9] 韦志扬,张力,陆杰思,等.高温胁迫下不同皮色西瓜耐热性评价研究[J].南方农业学报,2014,45(4):565-569.
- [10] 王学奎.植物生理生化实验原理和技术[M].2版.北京:高等教育出版社,2006.
- [11] 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,2000.
- [12] 邓耀华,程萍,候晟灿,等.早秋甘蓝品种的耐热性鉴定[J].长江蔬菜,2013(20):18-20.
- [13] 张景云,赵晓东,王建新,等.小白菜耐热性鉴定及其耐热性分析[J].核农学报,2014,28(1):146-153.
- [14] 吴国胜,曹婉虹,王永健,等.细胞膜热稳定性及保护酶和大白菜耐热性的关系[J].园艺学报,1995,22(4):353-358.
- [15] 司家钢,孙日飞,吴飞燕,等.高温胁迫对大白菜耐热性相关生理指标的影响[J].中国蔬菜,1995(4):4-6.
- [16] 马晓娣,王丽,汪矛,等.不同耐热性小麦品种在热锻炼和热胁迫下叶片相对电导率及超微结构的差异[J].中国农业大学学报,2003,8(5):4-8.
- [17] HSU Y T, KAO C H. Cadmium-induced oxidative damage in rice leaves is reduced by polyamines[J]. Plant Soil,2007,291:27-37.
- [18] MISHRA Y, BHARGAVA P, RAI L C. Different induction of enzymes and antioxidants of the antioxidative defence system in *Anabaena doliolum* exposed to heat stress[J]. J Therm Biol,2005,30:524-531.
- [19] 马宝鹏,巩振辉.辣椒幼苗对高温胁迫的生长生理响应[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2013,41(10):113-115.
- [20] 李成琼,宋洪元,雷建军.甘蓝耐热性鉴定研究[J].西南农业大学学报,1998,20(4):298-301.
- [21] WAHID A, GELANI S, ASHRAF M, et al. Heat tolerance in plants:an overview [J]. Environmental and Experimental Botany, 2007,61:199-223.
- [22] 娄丽娜,蒋立春,孙 俐,等.持续高温胁迫对不结球白菜生理指标的影响[J].江苏农业科学,2015,43(6):161-164.
- [23] 叶凡,侯喜林,袁建玉.高温胁迫对不结球白菜幼苗抗氧化酶活性和膜质过氧化作用的影响[J].江苏农业学报,2007,23(2):154-156.
- [24] GALLEGO S M, BENAVIDES M P, TOMARO M L. Effect of heavy metal ion excess on sunflower leaves: evidence for involvement of oxidative stress [J]. Plant Sci,1996,121:151-159.
- [25] LIDON F C, TEIXEIRA M G. Oxy radicals' production and control in the chloroplast of Mn-treated rice[J]. Plant Sci,2000,152:7-15.
- [26] 叶陈亮,柯玉琴,陈伟.大白菜耐热性生理研究Ⅲ.酶性和非酶性活性氧清除能力与耐热性[J].福建农业大学学报,1997,26(4):499-501.
- [27] 苏小俊,袁希汉,徐海.大白菜耐热性和过氧化物酶活性与热害指数的相关性[J].江苏农业学报,2007,23(5):456-458.
- [28] 胡俏强.不结球白菜耐热性鉴定方法及其耐热基因片段克隆研究[D].南京:南京农业大学,2011:52-56.

(责任编辑:陈海霞)