



不同菜心品种萌发期和苗期耐热性分析及其鉴定指标筛选

庞强强, 周 曼, 孙晓东, 陈贻诵, 蔡兴来

(海南省农业科学院 蔬菜研究所/海南省蔬菜生物学重点实验室, 海口 571100)

摘 要 为明确不同菜心品种间的耐热性强弱, 构建菜心品种耐热评价体系。以 20 个菜心品种为试验材料, 通过设置正常和人工模拟 37 °C 高温 2 个处理, 对不同菜心品种萌发期和幼苗期的 21 个形态和生理生化指标进行测定, 以各单项指标的耐热系数(γ) 作为衡量耐热性依据, 采用相关性分析、主成分分析、隶属函数分析、聚类分析、灰色关联度分析及逐步回归分析等方法相结合, 对不同菜心品种进行耐热性鉴定及耐热指标筛选。结果表明, 与正常处理相比, 高温胁迫后各菜心品种的发芽率、发芽指数、活力指数、地上部鲜质量、地下部鲜质量、地上部干质量、地下部干质量、叶绿素质量分数和根系活力均下降, 热害指数、 O_2^- 质量分数、 H_2O_2 质量分数、丙二醛(MDA)质量摩尔浓度、可溶性糖质量分数、Pro 质量分数和 CAT 活性均升高, 发芽势、根冠比、相对电导率、SOD 活性和 POD 活性既有下降又有升高。相关性分析显示各评价指标间存在信息重叠与交叉现象, 主成分分析将 21 个单项指标转化为 3 个相互独立的综合指标, 隶属函数法计算获得了各品种综合耐热能力 D 值并排序, 聚类分析将 20 个菜心品种划分为耐热型(6 个)、中等耐热型(10 个)和不耐热型(4 个)3 种类型; 采用逐步回归方法建立了菜心耐热性评价方程, 同时结合灰色关联度分析, 筛选出热害指数、过氧化物酶活性、MDA 质量摩尔浓度、可溶性糖质量分数、发芽势和过氧化氢质量分数等 6 个指标, 可作为菜心耐热性综合鉴定指标。本研究结果为菜心耐热性评价、耐热品种选育、耐热机理及调控机制研究提供了理论基础。

关键词 菜心; 高温胁迫; 耐热性评价; 鉴定指标

中图分类号 S634.5

文献标志码 A

文章编号 1004-1389(2020)02-0295-11

菜心(*Brassica campestris* L. spp. *chinensis* var. *utilis* Tsen et Lee), 又名菜薹, 为十字花科芸薹属芸薹种白菜亚种的一个变种, 以花薹为主要食用器官, 是中国华南地区的特产蔬菜之一^[1]。菜心喜温, 其生长适宜温度为 15~25 °C, 30 °C 以上高温植株生长就会受到阻碍^[2], 导致菜薹叶片纤细, 品质下降, 甚至死亡。海南岛地处热带北缘, 属热带季风气候, 素有“天然大温室”的美称。随着全球气候变暖, 海南岛高温日数也呈现出明显增多的态势^[3], 高温已成为农业生产中面临的主要问题之一。通过筛选、培育耐热菜心品种是解决上述问题的必由之路, 而合理选择耐热性鉴定指标是进行耐热育种、耐热机理及高温调控缓解机制研究的基础。

作物耐热性鉴定及耐热指标筛选需要将不同指标相结合, 对各个时期进行综合评价, 以筛选出

简单有效的耐热性鉴定指标和适宜的综合评价方法^[4]。种子萌发期和苗期是植物生长发育过程中的重要时期但又是脆弱最的时期^[5]。多年来, 国内外学者在作物萌发期和苗期耐热性鉴定及耐热指标筛选方面开展了大量研究工作, 同时提出了不同作物在不同条件下的鉴定指标和评价体系^[6-7]。在菜心耐热适应机制研究上, 研究者发现高温会导致菜心种子发芽势、发芽力及发芽指数降低^[8], 幼苗叶片内甜菜碱、可溶性糖、可溶性蛋白和脯氨酸含量及抗氧化酶活性显著升高^[1,9]; 郭培国等^[10]采用抑制差减杂交(SSH)技术, 构建了一个高温胁迫下在耐热品种中特异表达的 SSH cDNA 基因文库, BLAST 分析发现 99 条 ESTs 代表 81 个基因可能与菜心的耐热性相关。在菜心耐热性指标筛选研究方面, 李光光等^[11]通过隶属函数法得到高温塑料棚采收期的菜心株

收稿日期 2019-06-10 修回日期 2019-09-10

基金项目 海南省重大科技计划(ZDKJ2017001); 海南省重点研发计划(ZDYF2019066); 国家现代农业产业技术体系建设专项资金(CARS-23-G52)。

第一作者 庞强强, 男, 研究实习生, 主要从事蔬菜育种及生理生化研究。E-mail: qiangq113@163.com

通信作者 蔡兴来, 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事蔬菜栽培及新品种选育研究。E-mail: 13307531052@163.com

高、薹叶数、单株生物总质量可用来评价菜心的耐热性,并将 6 个菜心材料分为 3 类。李荣华等^[12]认为生物量和薹质量可作为评价菜心耐热性强弱的关键农艺性状指标。综合前人研究结果来看,当前的研究主要集中在高温胁迫对菜心的农艺性状指标和生理生态响应方面,而关于菜心萌发期和苗期耐热性鉴定及其耐热指标筛选的研究并不常见,至今还未建立一套高效的菜心耐热性鉴定体系和评价标准。本研究采用模拟高温胁迫法,通过对菜心不同品种萌发期种子发芽指标和苗期生长及生理指标进行测定,以各单项指标的耐热系数为衡量单项耐热能力的指标,采用主成分分

析法、隶属函数法、聚类分析、关联度分析、逐步回归分析法对菜心耐热性进行鉴定和综合评价,从而筛选出耐热性强的菜心材料及易测定的与菜心种质耐热性密切相关的指标,以期为菜心耐热种质的发掘及新品种选育提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试菜心品种 20 份(表 1),试验在海南省农业科学院蔬菜研究所永发试验基地和海南省蔬菜学重点实验室进行。

表 1 参试菜心品种名称及编号

Table 1 Name and number of Chinese flowering cabbage cultivars in test

编号 Number	名称 Name	编号 Number	名称 Name
C1	春梅菜心 Chunmei Chinese flowering cabbage	C11	超世纪油青尖叶甜菜心 050 Super Century Youqing sweet Chinese flowering cabbage 050 with cusp leaves
C2	无渣 31 号四九全年油青甜菜心 Wuzha No. 31 Sijiu Youqing sweet Chinese flowering cabbage of full year	C12	尖叶甜脆菜心 Sweet Chinese flowering cabbage with cusp leaves
C3	005 号菜心 No. 005 Chinese flowering cabbage	C13	正源全年粗条甜菜心 Zhengyuan rough sweet Chinese flowering cabbage of the full year
C4	008 号菜心 No. 008 Chinese flowering cabbage	C14	天元尖叶 50 d 菜心 Tianyuan 50-day Chinese flowering cabbage with cusp leaves
C5	珍美 45 d 尖叶油青菜心 Zhenmei 45-day Chinese flowering cabbage with cusp leaves	C15	绿翡翠超纯尖叶甜菜心 Lüfeicui super pure sweet Chinese flowering cabbage with cusp leaves
C6	旺田尖绿油青菜心 Wangtian Chinese flowering cabbage with green points	C16	俊宝 45 d 菜心 Junbao 45-day Chinese flowering cabbage
C7	港种 228 油青甜菜心 Hongkong 228 Youqing sweet Chinese flowering cabbage	C17	碧绿粗薹菜心 Green bolting Chinese flowering cabbage
C8	226 甜菜心 226 sweet Chinese flowering cabbage	C18	旺田尖顶油青菜心 Wangtian Chinese flowering cabbage with point rape-seed
C9	初恋杂交菜心 Chulian hybrid Chinese flowering cabbage	C19	赤野翡翠大花菜心 Chiyefeicui Cauliflower Chinese flowering cabbage
C10	广府青菜心 Guangfu Chinese flowering cabbage	C20	航育 49-1 菜心 Hangyu 49-1 Chinese flowering cabbage

1.2 试验设计

1.2.1 模拟高温胁迫试验 以珍珠岩为基质进行穴盘育苗,常规栽培管理。当幼苗长至三叶一心时移至 25 °C/18 °C(昼/夜),12 h/12 h(昼/夜),光照覆盖率 80%,相对湿度 90%的光照培养箱中预培养 3 d,之后进行高温处理。为明确不同基因型菜心萌发期和苗期高温胁迫耐性的适宜筛选温度,进行预备试验,得出 37 °C/27 °C能较好地反映不同品种耐热性的差异。因此,选取 37 °C/27 °C作为高温胁迫处理温度。以 25 °C/18 °C条件下正常生长的幼苗为对照,每个处理重复

3 次。

1.2.2 种子发芽试验 20 个菜心品种分别选取 100 粒优质、饱满的种子,去离子水中浸泡 2 h 后,在洁净、烘干的培养皿中均匀摆入已干燥的种子,盖上培养皿,分别放入不同温度的培养箱中,让其在黑暗中发芽,保持滤纸湿润,每个品种均设 3 次重复。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 发芽试验测定项目和方法 以胚根的长度超过种子半径视为发芽,第 7 天统计发芽势,第 14 天统计发芽率,具体计算公式如下:

发芽率(GR) = 发芽终期全部正常发芽种子数/供试种子数 × 100% (1)

发芽势(GP) = 发芽初期正常发芽的种子数/供试种子数 × 100% (2)

活力指数(VI) = 发芽指数 GI × 幼苗生长势 S (3)

发芽指数(GI) = $\sum(G_t/D_t)$ (4)

式中, G_t 为在 t 日的发芽数, D_t 为其相应的发芽日数。

1.3.2 生长和生理指标测定方法 高温处理 5 d 后, 观察全部幼苗的热害情况, 参考张景云等^[13]的方法, 计算热害指数。每个处理分别随机选取高温处理 5 d 后的 10 株幼苗, 测定生长和生理生化指标。用电子天平分别称量植株单株地上部和地下部鲜质量, 之后放入烘箱, 105 °C 杀青后, 80 °C 烘至恒量, 用万分之一天平称取单株地上部和地下部干质量; 采用 SPAD-502Plus 叶绿素计测定叶绿素质量分数(SPAD 值); 根系活力、过氧化物酶(POD)活性、过氧化氢酶(CAT)活性、超氧化物歧化酶(SOD)活性、可溶性糖(SS)质量分数、脯氨酸(Pro)质量分数、丙二醛(MDA)质量摩尔浓度和相对电导率参照李合生^[14]的方法; 超氧阴离子自由基(O_2^-)质量分数采用高俊凤^[15]的方法测定; 过氧化氢(H_2O_2)质量分数参照赵世杰^[16]的方法测定。

1.4 数据分析与评价方法

按照公式计算植株耐热系数(γ)。

$\gamma = \text{处理组测定值} / \text{对照组测定值}$ (5)

按照公式计算综合指标隶属函数值 [$u(X_i)$]。

$u(X_i) = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad i = 1, 2, 3, \dots, n$ (6)

式中, $u(X_i)$ 表示第 i 个综合指标的隶属函数值; X_i 表示第 i 个综合指标值; X_{\min} 、 X_{\max} 分别表示综合指标的最小值和最大值。

各综合指标权重 $W_i = P_i / \sum_{i=1}^n p_i \quad i = 1, 2, 3, \dots, n$ (7)

式中, W_i 表示第 i 个综合指标在所有综合指标中重要程度; P_i 表示第 i 个综合指标的贡献率。

耐热综合评价值 $D = \sum_{i=1}^n [\mu(x_i) \cdot W_i] \quad i = 1, 2, 3, \dots, n$ (8)

式中, D 表示不同品种在高温胁迫下综合指

标评价所得的综合耐热性评价价值。

采用 Microsoft Excel 2003 对数据进行统计, 利用 SPSS 22.0 进行方差和显著性检测, 单因素分析采用 Duncan's 法。采用皮尔逊相关系数对各单项指标进行相关性分析, 用主成分分析法进行主因子分析, 采用组间连接距离聚类法对各品种进行聚类分析, 采用灰色关联度分析法分析各单项指标的耐热系数与参考序列的关联度, 采用逐步回归分析法建立最优回归方程。

2 结果与分析

2.1 不同菜心品种各单项指标的耐热系数和相关性分析

进行比较分析时, 与绝对值相比, 通过计算指标相对值(耐热系数)更能准确地反映试验材料耐热能力的大小, 且能消除种质材料间固有的差异。当耐热系数大于 1 ($\gamma > 1$) 时代表处理组测定值高于对照组测定值, 耐热系数小于 1 ($\gamma < 1$) 时代表处理组测定值低于对照组测定值, 耐热系数等于 1 ($\gamma = 1$) 时代表处理组测定值等于对照组测定值。由表 2 可知, 高温胁迫后各菜心品种的热害指数(HDI)、 O_2^- 质量分数(SAR)、 H_2O_2 质量分数(HP)、MDA 质量摩尔浓度、可溶性糖质量分数(SS)、脯氨酸质量分数(Pro)、CAT 活性同对照条件下相比均升高 ($\gamma > 1$), 发芽率(GR)、发芽指数(GI)、活力指数(VI)、地上部鲜质量(FAW)、地下部鲜质量(FUW)、地上部干质量(DAW)、地下部干质量(DUW)、叶绿素质量分数(Chl)、根系活力(RA)均下降 ($\gamma < 1$), 而发芽势(GP)、根冠比(RSA)、相对电导率(RC)、SOD 活性、POD 活性或下降或升高 ($\gamma > 1, \gamma < 1$)。同一指标耐热系数在各品种之间变异范围也较大, 各指标变异系数为 0.11~0.76, 其中热害指数变异系数最大, 其次为 MDA 质量摩尔浓度, 叶绿素质量分数的变异系数最小。由于变异幅度在各种质中分布的差异较大, 需进一步对各指标之间相关性进行评价。

对初级指标耐热系数进行相关性分析发现, 多数生理指标间存在不同程度的相关性(表 3), 其中有的指标间存在显著的相关性, 如活力指数与地上部鲜质量 ($r = 0.297, P < 0.05$), 可认为活力指数与地上部鲜质量提供的共同信息量为 29.7%。而有的指标间存在极显著的相关性, 如发芽率与活力指数之间相关性显著 ($r = 0.721, P < 0.01$), 可认为发芽率与活力指数提供的共同

信息量为 72.1%；发芽率与发芽势之间相关性显著($r=0.621, P<0.01$)，可认为相发芽率与发芽势提供的共同信息量为 62.1%，其余具有相关性的评价指标间也存在着不同的信息重叠。因此，

用某一个鉴定指标来评价不同菜心品种的耐热性难以得到客观的结果。为了弥补用单一指标来评价耐热性的不足，在此基础上需进一步发掘能充分反映其在高温胁迫条件下的耐热性指标。

表 2 不同菜心品种各单项指标的耐热系数变异分析

Table 2 Variation analysis of heat resistance coefficient of every individual indicator in different Chinese flowering cabbage cultivars

指标 Indicator	最小值 Minimum value	最大值 Maximum value	平均值 Average value	标准差 Standard deviation	变异系数 Variation coefficient
GR	0.27	0.70	0.46	0.10	0.22
GI	0.27	0.70	0.46	0.10	0.22
VI	0.42	0.99	0.71	0.15	0.21
GP	0.18	1.19	0.52	0.27	0.52
FAW	0.58	0.92	0.77	0.10	0.13
FUW	0.47	0.93	0.72	0.12	0.17
DAW	0.41	0.96	0.71	0.13	0.18
DUW	0.35	0.96	0.70	0.15	0.21
HDI	0.05	0.89	0.34	0.26	0.76
Chl	0.57	0.97	0.80	0.09	0.11
RA	0.17	0.89	0.51	0.18	0.35
RSA	0.66	1.35	0.99	0.16	0.16
SAR	1.26	4.76	2.59	0.93	0.36
HP	1.23	7.61	4.08	1.79	0.44
RC	0.99	10.23	3.85	2.33	0.61
MDA	1.41	17.63	5.46	3.69	0.68
SS	1.41	13.13	5.16	2.62	0.51
Pro	1.15	6.69	4.10	1.37	0.33
SOD	0.69	8.46	3.77	2.11	0.56
CAT	1.91	5.47	3.42	0.94	0.27
POD	0.95	10.42	4.61	2.35	0.51

注:GR.发芽率;GI.发芽指数;VI.活力指数;GP.发芽势;FAW.地上部鲜质量;FUW.地下部鲜质量;DAW.地上部干质量;DUW.地下部干质量;HDI.热害指数;Chl.叶绿素质量分数;RA.根系活力;RSA.根冠比;SAR.O₂⁻质量分数;HP.H₂O₂质量分数;RC.相对电导率;MDA.丙二醛质量摩尔浓度;SS.可溶性糖质量分数;Pro.脯氨酸质量分数;SOD.SOD活性;CAT.CAT活性;POD.POD活性。下表同。

Note: GR.germination rate;GI.germination index;VI.vigor index;GP.germination potential;FAW.fresh aboveground mass;FUW.fresh underground mass;DAW.dry aboveground mass;DUW.dry underground mass;HDI.heat damage index;Chl.chlorophyll mass fraction;RA.root activity;RSA.root-shoot ratio;SAR.O₂⁻ mass fraction;HP.H₂O₂ mass fraction;RC.relative conductivity;MDA.malondialdehyde molality;SS.soluble sugar mass fraction;Pro.proline mass fraction;SOD.SOD activity;CAT.CAT activity;POD.POD activity. The same as below.

2.2 不同菜心品种各鉴定指标的主成分分析

利用主成分分析法将 21 个单项指标换算成 3 个相互独立的综合指标,分别用主成分 1、主成分 2 和主成分 3 表示(表 4),其贡献率分别为 66.30%、8.22% 和 6.36%,累计贡献率达到 80.88%,说明这 3 个综合指标已经包含菜心耐热性的大部分信息。根据主成分分析原则,同一指

标的特征向量的最大绝对值所在的主成分即为其所属主成分。各综合指标对应的特征向量为:第 1 主成分(主成分 1) $\approx 1 = 0.775GR + 0.777GI + 0.441VI + 0.724GP + 0.977FAW + 0.911FUW + 0.890DAW + 0.879DUW - 0.911HDI + 0.876Chl + 0.758RA + 0.169RSA - 0.838SAR - 0.805HP - 0.939RC - 0.819MDA + 0.881SS +$

表 3 不同菜心品种各单项指标的相关系数矩阵

Table 3 Correlation matrix of every individual indicator in different Chinese flowering cabbage cultivars

指标 Indicator	GR	GI	VI	GP	FAW	FUW	DAW	DUW	HDI	Chl
GR	1.000									
GI	1.000**	1.000								
VI	0.721**	0.722**	1.000							
GP	0.621**	0.622**	0.524**	1.000						
FAW	0.635**	0.636**	0.297*	0.631**	1.000					
FUW	0.487**	0.488**	0.206	0.543**	0.809**	1.000				
DAW	0.508**	0.509**	0.293*	0.515**	0.851**	0.662**	1.000			
DUW	0.498**	0.500**	0.256*	0.582**	0.839**	0.724**	0.709**	1.000		
HDI	-0.652**	-0.653**	-0.397**	-0.661**	-0.873**	-0.785**	-0.831**	-0.722**	1.000	
Chl	0.582**	0.584**	0.252	0.577**	0.811**	0.679**	0.835**	0.710**	-0.824**	1.000
RA	0.579**	0.577**	0.087	0.460**	0.728**	0.538**	0.544**	0.633**	-0.605**	0.655**
RSA	0.059	0.060	-0.033	0.168	0.131	0.214	-0.204	0.533**	0.016	-0.006
SAR	-0.586**	-0.586**	-0.316*	-0.599**	-0.789**	-0.747**	-0.731**	-0.723**	0.708**	-0.699**
HP	-0.440**	-0.442**	-0.326*	-0.478**	-0.778**	-0.694**	-0.690**	-0.668**	0.671**	-0.599**
RC	-0.639**	-0.640**	-0.282*	-0.645**	-0.906**	-0.799**	-0.833**	-0.766**	0.940**	-0.881**
MDA	-0.450**	-0.452**	-0.294*	-0.469**	-0.835**	-0.653**	-0.759**	-0.690**	0.764**	-0.752**
SS	0.730**	0.731**	0.387**	0.568**	0.803**	0.643**	0.627**	0.695**	-0.721**	0.672**
Pro	0.595**	0.596**	0.224	0.580**	0.933**	0.781**	0.821**	0.778**	-0.822**	0.785**
SOD	0.667**	0.668**	0.317*	0.589**	0.846**	0.735**	0.749**	0.691**	-0.790**	0.712**
CAT	0.333**	0.334**	0.135	0.363**	0.583**	0.545**	0.499**	0.516**	-0.497**	0.473**
POD	0.652**	0.653**	0.330**	0.564**	0.826**	0.619**	0.670**	0.659**	-0.731**	0.652**

指标 Indicator	RA	RSA	SAR	HP	RC	MDA	SS	Pro	SOD	CAT	POD
GR											
GI											
VI											
GP											
FAW											
FUW											
DAW											
DUW											
HDI											
Chl											
RA	1.000										
RSA	0.210	1.000									
SAR	-0.673**	-0.147	1.000								
HP	-0.525**	-0.117	0.739**	1.000							
RC	-0.674**	-0.067	0.757**	0.742**	1.000						
MDA	-0.586**	-0.034	0.518**	0.687**	0.742**	1.000					
SS	0.770**	0.200	-0.696**	-0.731**	-0.770**	-0.692**	1.000				
Pro	0.680**	0.120	-0.801**	-0.790**	-0.897**	-0.798**	0.779**	1.000			
SOD	0.659**	0.070	-0.742**	-0.805**	-0.832**	-0.721**	0.907**	0.871**	1.000		
CAT	0.408**	0.116	-0.334**	-0.304*	-0.516**	-0.609**	0.354**	0.587**	0.347**	1.000	
POD	0.772**	0.084	-0.664**	-0.748**	-0.764**	-0.729**	0.921**	0.815**	0.883**	0.446**	1.000

注: * 和 ** 分别表示 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 的显著水平。

Note: * and ** significant level at $P < 0.05$ and $P < 0.01$.

表 4 各综合指标的系数及贡献率

Table 4 Coefficients and proportion of comprehensive indicators

指标 Indicator	特征向量 Eigenvector		
	主成分 1 Component 1	主成分 2 Component 2	主成分 3 Component 3
GR	0.775	0.564	-0.021
GI	0.777	0.563	-0.020
VI	0.441	0.752	-0.178
GP	0.724	0.372	0.037
FAW	0.977	-0.148	-0.011
FUW	0.911	-0.190	-0.029
DAW	0.890	-0.230	-0.285
DUW	0.879	-0.134	0.334
HDI	-0.911	0.022	0.227
Chl	0.876	-0.153	-0.170
RA	0.758	-0.077	0.261
RSA	0.169	0.058	0.949
SAR	-0.838	0.018	-0.086
HP	-0.805	0.138	-0.035
RC	-0.939	0.128	0.093
MDA	-0.819	0.247	0.117
SS	0.881	0.144	0.154
Pro	0.933	-0.207	0.004
SOD	0.907	0.002	-0.028
CAT	0.562	-0.255	0.027
POD	0.874	0.028	0.035
特征值 Eigen value	13.92	1.73	1.34
贡献率/% Contribution rate	66.30	8.22	6.36
累计贡献率/% Accumulative contribution rate	66.30	74.52	80.88

0.933Pro+0.907SOD+0.562CAT+ 0.874POD, 其中在地上部鲜质量、相对电导率、脯氨酸质量分数有较高的载荷量;第 2 主成分(主成分 2) $z_2 = 0.564GR + 0.563GI + 0.752VI + 0.372GP - 0.148FAW - 0.190FUW - 0.230 DAW - 0.134DUW + 0.022HDI - 0.153Chl - 0.077RA + 0.058RSA + 0.018SAR + 0.138HP + 0.128RC + 0.247MDA + 0.144SS - 0.207Pro + 0.002SOD - 0.255CAT + 0.028POD$, 其中在活力指数、发芽率上均有较高的载荷量;第 3 主成分(主成分 3) $z_3 = -0.021GR - 0.020GI - 0.178VI + 0.037GP - 0.011FAW - 0.029FUW - 0.285 DAW + 0.$

334DUW+ 0.227HDI- 0.170Chl+0.261RA+ 0.949RSA-0.086SAR-0.035HP+0.093RC+0.117MDA+0.154SS+0.004Pro- 0.028SOD+ 0.027 CAT+0.035 POD, 其中在根冠比上有较高的载荷量。

2.3 不同菜心品种耐热性综合评价

2.3.1 隶属函数分析 为进一步明确 3 个综合指标对菜心高温胁迫耐受性的贡献率,采用隶属函数分析法进行菜心耐热性综合评价(表 5)。首先对 20 个品种的耐热系数进行标准化,再按公式(6)计算 20 个品种在 3 个综合指标中的隶属函数值。同一综合指标下,隶属函数值越大,表明菜心品种在这一综合指标上的耐热性越强,反之则越弱。由表 5 可知,不同菜心品种的所有综合指标的隶属函数值不尽相同。对于同一综合指标 z_1 而言,品种 C3 的 $u(X_1)$ 值最大为 1,说明 C3 菜心品种在 z_1 这一综合指标上表现出的耐热性最强,而 C15 的 $u(X_1)$ 值最小为 0,说明 C15 菜心品种在 z_1 这一综合指标上表现出的耐热性最弱。对于同一综合指标 z_2 而言,C14 的 $u(X_2)$ 值最大为 1,说明 C14 菜心品种在 z_2 这一综合指标上表现出的耐高温性最强,而 C17 的 $u(X_2)$ 值最小为 0,说明 C17 菜心品种在 z_2 这一综合指标上表现出的耐高温性最弱。对于同一综合指标 z_3 而言,C15 的 $u(X_3)$ 值最大为 1,说明 C15 菜心品种在 z_3 这一综合指标上表现出的耐高温性最强,而 C5 的 $u(X_3)$ 值最小为 0,说明 C5 菜心品种在 z_3 这一综合指标上表现出的耐高温性最弱。

2.3.2 各综合指标权重和综合评价 通过公式(7)计算各综合指标在主成分贡献率中的权重,从而得出 3 个综合指标权重分别为 0.820、0.102、0.079。根据隶属函数值和权重的计算结果,用公式(8)来量化每一品种的综合耐热性能的强弱。本研究中, D 值为各品种耐热性的综合评价值, D 值越大,表明材料的综合耐热性越强。由表 5 可知,通过对各品种的 D 值进行排序得出,不同菜心材料耐热性强弱顺序为 $C12 > C9 > C10 > C3 > C17 > C4 > C14 > C8 > C11 > C19 > C1 > C5 > C15 > C18 > C2 > C6 > C20 > C13 > C16 > C7$ 。

2.3.3 耐热性聚类分析 采用组间连接距离聚类法对 20 个菜心品种的 D 值进行耐热性聚类分析,建立聚类树状图。由图 1 可知,可将 20 个菜心品种分为 3 类,即第 I 类对高温的耐受性较强,包括品种 C3、C17、C4、C9、C10 和 C12;第 II 类对

高温耐受性较差,包括品种 C13、C16、C7 和 C20; C8、C14、C2、C6、C5、C15、C18 和 C1。
 第Ⅲ类对高温的耐受性一般,包括品种 C11、C19、

表 5 不同菜心品种的耐热综合指标值、权重、隶属函数值、D 值及综合评价

Table 5 Comprehensive indicator values, index weight, membership function values, D values and comprehensive evaluation of heat tolerance in different Chinese flowering cabbage cultivars

品种 Variety	综合指标值 Comprehensive indicator value			隶属函数值 Membership function value			D 值 D value	综合评价 Comprehensive evaluation
	z1	z2	z3	$u(X_1)$	$u(X_2)$	$u(X_3)$		
C1	-0.059 3	-0.089 6	-0.330 5	0.533	0.504	0.368	0.474	11
C2	-0.196 9	-1.556 4	-0.598 1	0.457	0.342	0.557	0.397	15
C3	1.048 9	-0.412 1	0.181 9	1.000	0.513	0.608	0.762	4
C4	0.923 9	-1.152 5	-0.539 9	0.506	0.801	0.527	0.696	6
C5	-0.117 5	-0.316 3	-0.870 5	0.042	0.772	0.000	0.441	12
C6	-0.335 1	-1.945 2	0.382 4	0.517	0.468	0.516	0.375	16
C7	-1.584 3	1.385 2	-1.625 7	0.457	0.208	0.102	0.087	20
C8	0.009 5	0.118 1	0.955 3	0.431	0.302	0.439	0.526	8
C9	1.172 6	1.395 4	0.116 5	0.206	0.208	0.498	0.836	2
C10	1.320 8	0.194 7	-1.175 2	0.933	0.157	0.293	0.815	3
C11	0.079 5	0.765 9	-0.895 5	0.022	0.219	0.263	0.517	9
C12	1.659 7	1.571 9	1.572 5	0.611	0.457	0.066	0.998	1
C13	-1.616 2	0.728 1	0.439 0	0.917	0.730	0.639	0.111	18
C14	0.116 4	1.189 8	-0.374 5	0.086	1.000	0.219	0.548	7
C15	-0.098 0	-0.358 3	-1.250 5	0.000	0.668	1.000	0.436	13
C16	-1.555 9	-0.625 5	0.786 1	0.904	0.503	0.760	0.102	19
C17	1.063 3	-1.283 7	0.752 0	0.075	0.000	0.890	0.759	5
C18	-0.224 2	0.051 3	-0.799 5	0.777	0.483	0.450	0.424	14
C19	-0.111 2	0.029 3	1.633 1	0.447	0.268	0.144	0.509	10
C20	-1.496 0	0.309 9	1.641 0	0.845	0.287	0.078	0.160	17
权重 Weight					0.820	0.102	0.079	

2.3.4 各单项指标与 D 值的灰色关联度分析

对各单项指标的耐热系数(比较序列)与其 D 值(参考序列)做灰色关联度分析,得到各指标耐热系数与 D 值的关联度(表 6),来反映各指标在菜心耐热性评价中的作用强弱。结果表明,各指标中,MDA 质量摩尔浓度与菜心耐热性关联最为密切,其关联度为 0.779;其余指标关联度较大的指标还有热害指数(0.716)、相对电导率(0.603)、O₂⁻ 质量分数(0.561)、可溶性糖质量分数(0.517)、H₂O₂ 质量分数(0.491)、POD 活性(0.460)、SOD 活性(0.446)和发芽势(0.437),这些指标可能与菜心耐热性关系较为密切。

2.3.5 逐步回归分析 为分析 21 个单项指标与不同菜心品种之间的耐热性关系,筛选能够客观鉴定菜心耐热性的指标,建立可用于菜心萌发期

和苗期耐热性评价的数学模型,将耐热性综合评价价值(D 值)作为因变量,把各单项指标的耐热系数作为自变量进行逐步回归分析,建立最优回归方程: $D = -0.767 + 0.861HDI + 0.551POD + 0.373MDA + 0.018SS + 0.112GP - 0.014HP$,该方程决定系数 $R^2 = 0.995$, $F = 401.96$,显著性水平 $P = 0.000 1$,统计量为 2.41。由方程可知,21 个单项指标中有 6 个指标对菜心耐热性有显著影响,分别是热害指数、POD 活性、MDA 质量摩尔浓度、可溶性糖质量分数、发芽势、H₂O₂ 质量分数。因此,在实际应用中,可有选择性地测定与 D 值密切相关的指标并求得耐热系数,进而利用该方程预测其他菜心品种的耐热性,从而使鉴定工作简化。

表 6 不同菜心品种各单项指标的灰色关联度分析

Table 6 Grey relational degree analysis of every individual indicators in different Chinese cabbage varieties

指标 Indicator	关联度 Correlation degree	关联序 Relational order	指标 Indicator	关联度 Correlation degree	关联序 Relational order
GR	0.245	13	RSA	0.197	16
GI	0.244	14	SAR	0.561	4
VI	0.220	15	HP	0.491	6
GP	0.437	9	RC	0.603	3
FAW	0.098	21	MDA	0.779	1
FUW	0.152	19	SS	0.517	5
DAW	0.169	17	Pro	0.285	12
DUW	0.161	18	SOD	0.446	8
HDI	0.716	2	CAT	0.334	11
Chl	0.127	20	POD	0.460	7
RA	0.360	10			

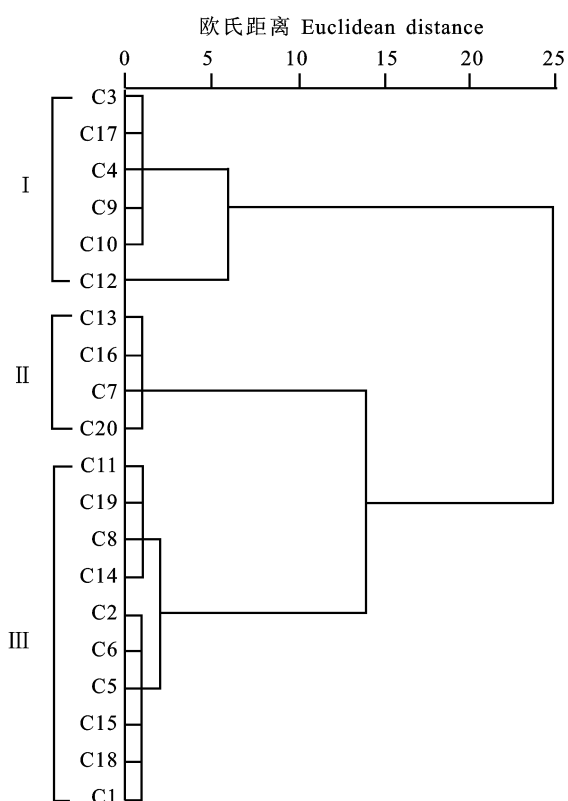


图 1 不同菜心品种耐热性聚类图

Fig.1 Dendrogram of clusters in different cultivars of Chinese flowering cabbage

3 讨论

高温、盐碱、干旱、水淹和低温是作物生长发育过程中面临的几种主要的非生物胁迫^[17-18]。针对海南岛地区的作物,高温对作物生长的影响最为严重^[19],通过选育耐高温品种是提高作物产量、品质及促进热带农业生产发展的有效途径。前人研究表明,高温胁迫可导致植株形态和生理生化指标发生改变^[20]。本试验也发现,与正常处理相比,高温胁迫后各菜心品种的发芽率、发芽指数、

活力指数、地上部鲜质量、地下部鲜质量、地上部干质量、地下部干质量、叶绿素质量分数及根系活力均下降,这说明菜心植株正常生长已受到影响;热害指数、O₂⁻质量分数、H₂O₂质量分数、MDA质量摩尔浓度、可溶性糖质量分数、Pro质量分数及CAT活性均升高,这是菜心为适应高温逆境的一种自我保护反应,用来减轻高温对其造成的伤害;而发芽势、根冠比、相对电导率、SOD活性和POD活性或下降或升高,导致这种差异的原因可能是不同菜心品种遗传背景复杂而造成遗传基础窄,对抵抗高温胁迫的响应机制有所不同。

植物耐热性是由多基因控制的复杂性状^[21-22],不同指标对耐热性的反映并不一致,如果仅用单一的指标很难全面准确地反映各品种的耐热性强弱,得出结果可能具有较大偏差;而多项指标之间又存在一定的相关性,容易发生信息重叠与交叉^[6,23],本研究结果也证实这一观点。近年来,国内外学者针对不同作物类型,提出采用多个指标、多种方法相结合的方式对作物进行抗性鉴定,能更加全面地反映出耐逆性强弱,同时也筛选出多种与植物耐逆性相关的生长和生理生化指标^[23-25]。本研究选用较为直观、便捷的21个指标进行测定,并将计算出的各指标耐热系数作为评价菜心单项耐热能力大小指标,以此来消除不同基因型菜心间固有的生物学和遗传学特性差异。然后采用主成分分析将21个指标的耐热系数转换为3个独立的综合指标,通过隶属函数分析法得出各菜心品种综合耐热能力(D值),同时结合聚类分析结果,较为客观地将20个参试品种划分为耐热型、中等耐热型和不耐热型3个不同耐热等级。最后通过回归分析,得出快速鉴别并预测菜心耐热能力的最优回归方程 $D = -0.767 + 0.$

861 HDI + 0.551 POD + 0.373 MDA + 0.018 SS + 0.112 GP - 0.014 HP, 筛选出 6 个对菜心耐热能力具有显著影响的指标, 即热害指数、POD 活性、MDA 质量摩尔浓度、可溶性糖质量分数、发芽势及 H₂O₂ 质量分数, 这与灰色关联度分析所显示的各指标重要程度的结果也基本一致。作物耐热性鉴定的最终结果是要划分供试种质的耐热等级, 以此来判定其耐热能力。因此, 在相同的高温胁迫条件下, 可通过测定这 6 个鉴定指标, 并利用回归方程来预测候选品种的耐热性强弱, 该方法已在燕麦^[26]、棉花^[27]和花生^[28]等作物的抗逆性鉴定中得到了应用。

综上所述, 本试验将参试的 20 个菜心品种分成耐热型(6 个)、中等耐热型(10 个)和不耐热型(4 个)3 种类型。热害指数、POD 活性、MDA 质量摩尔浓度、可溶性糖质量分数、发芽势及 H₂O₂ 质量分数可以作为菜心耐热性鉴定指标。

参考文献 Reference:

- [1] 李春梅. 高温对不同菜心品种生长及生理性状的影响[J]. 佛山科学技术学院学报(自然科学版), 2011, 29(3): 76-78.
LI CH M. Effect of high temperature on growth and physiological character of different caixin varieties[J]. *Journal of Foshan University(Natural Science Edition)*, 2011, 29(3): 76-78.
- [2] 王阿桂. 菜薹夏秋高效栽培技术[J]. 中国蔬菜, 2005(6): 50-51.
WANG A G. High-efficient cultivation techniques of bolt in summer and autumn [J]. *China Vegetable*, 2005(6): 50-51.
- [3] 邢彩盈, 张京红, 吴胜安. 近 50 年海南岛高温日数和热浪的气候特征[J]. 中国农学通报, 2017, 33(22): 107-112.
XING C Y, ZHANG J H, WU SH A. Climatic characteristics of high temperature days and heatwaves: Hainan island in recent 50 years[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2017, 33(22): 107-112.
- [4] 任茂, 张文英. 棉花品种耐热性分析及鉴定指标筛选[J]. 核农学报, 2018, 32(4): 788-794.
REN M, ZHANG W Y. Evaluation of heat tolerance and screening the index for the assessment of heat tolerance in upland cotton[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2018, 32(4): 788-794.
- [5] DEMIRI I, EMIRS S, MAVI K, et al. Mean germination time of pepper seed lots (*Capsicum annum* L.) predicts size and uniformity of seedlings in germination tests and transplant modules[J]. *Seed Science and Technology*, 2008, 36: 21-30.
- [6] 但忠, 木万福, 龙洪进, 等. 不同欧洲型黄瓜苗期耐热性综合评价[J]. 热带作物学报, 2016, 37(12): 2312-2318.
DAN ZH, MU W F, LONG H J, et al. Comprehensive evaluation on heat tolerance of different europe-type cucumber germplasm at seeding stage[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2016, 37(12): 2312-2318.
- [7] 张侨, 韩莹琰, 范双喜, 等. 高温胁迫下不同品种叶用莴苣种子萌发特性[J]. 西北农业学报, 2010, 19(5): 171-176.
ZHANG Q, HAN Y S, FAN SH X, et al. Germination characteristics of *Lactuca sativa* L. under different heat stress [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2010, 19(5): 171-176.
- [8] 李光光, 黄红弟, 张华, 等. 菜心种子的活力及其品种耐热性鉴定[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2013, 39(1): 31-35.
LI G G, HUANG H D, ZHANG H, et al. Seed vigor and assessment for heat tolerance in different Chinese flowering cabbage cultivars[J]. *Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences Edition)*, 2013, 39(1): 31-35.
- [9] 李荣华, 郭培国, 张华, 等. 高温胁迫对不同耐热性菜心材料生理特性的差异研究[J]. 北方园艺, 2012(1): 1-6.
LI R H, GUO P G, ZHANG H, et al. Effects of heat stress on several physiological traits in heat-tolerant and heat-sensitive genotypes of flowering Chinese cabbage[J]. *Northern Horticulture*, 2012(1): 1-6.
- [10] 郭培国, 王直亮, 夏岩石, 等. 高温胁迫下菜心 SSH cDNA 文库的建立[J]. 广州大学学报(自然科学版), 2015, 14(1): 43-49.
GUO P G, WANG ZH L, XIA Y SH, et al. Preliminary study for investigation of heat-tolerant related genes in flowering Chinese cabbage[J]. *Journal of Guangzhou University(Natural Science Edition)*, 2015, 14(1): 43-49.
- [11] 李光光, 张财顺, 郑岩松. 不同菜心品种耐热性鉴定指标的筛选[J]. 北方园艺, 2012(18): 1-5.
LI G G, ZHANG C SH, ZHEN Y SH. Screening of assessment indexes on heat tolerance in different Chinese flowering cabbage cultivars [J]. *Northern Horticulture*, 2012(18): 1-5.
- [12] 李荣华, 郭培国, 张华, 等. 高温胁迫对菜心农艺性状的影响[J]. 长江蔬菜, 2011(22): 39-43.
LI R H, GUO P G, ZHANG H, et al. Effects of heat stress on agronomic traits of flowering Chinese cabbages [J]. *Journal of Changjiang Vegetables*, 2011(22): 39-43.
- [13] 张景云, 赵晓东, 万新建, 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.
ZHANG J Y, ZHAO X D, WAN X J, et al. Identification and analysis of heat tolerance in identification and analysis for *Brassica capestris* spp. *chinensis* [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2014, 28(1): 146-153.
- [14] 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: 119-120, 164-165, 165-167, 167-169, 195-197, 258-260, 260-261, 261-263.
LI H SH. Principles and Techniques of Plant Physiology and Biochemistry Experiments[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 119-120, 164-165, 165-167, 167-169, 195-197, 258-260, 260-261, 261-263.
- [15] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社,

- 2006:221-223.
- GAO J F. 2006. Experimental Guidance of Plant Physiology [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006:221-223.
- [16] 赵世杰. 植物生理学实验指导 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1998:155-156.
- ZHAO SH J. Experimental Guidance of Plant Physiology [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1998:155-156.
- [17] 王冰, 程宪国. 干旱、高盐及低温胁迫下植物生理及转录因子的应答调控 [J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 25(6): 1565-1574.
- WANG B, CHENG X G. Physiological responses and regulatory pathways of transcription factors in plants under drought, high-salt, and low temperature stresses [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 25(6): 1565-1574.
- [18] 胡兴旺, 金杭霞, 朱丹华. 植物抗旱耐盐机理的研究进展 [J]. 中国农学通报, 2015, 31(24): 137-142.
- HU X W, JIN H X, ZHU D H. Research progress of drought and salt resistant mechanism of plant [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, 31(24): 137-142.
- [19] 张明洁, 李文韬, 张京红, 等. 1961-2011 年海南岛农业气候资源变化及影响研究 [J]. 中国农学通报, 2014, 30(32): 232-241.
- ZHANG M J, LI W T, ZHANG J H, et al. Study on the changes of agricultural climate resources and effects on agriculture in Hainan island from 1961 to 2011 [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30(32): 232-241.
- [20] 余炳伟, 董日月, 雷建军, 等. 黄瓜耐热材料的筛选与鉴定 [J]. 分子植物育种, 2017, 15(11): 4695-4705.
- YU B W, DONG R Y, LEI J J, et al. Screening and identification of heat resistance cucumber [J]. *Molecular Plant Breeding*, 2017, 15(11): 4695-4705.
- [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] KOTAK S, LARKINDALE J, LEE U, et al. Complexity of the heat stress response in plants [J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 2007, 10(3): 310-316.
- [23] 于崧, 梁海芸, 郭潇潇, 等. 不同基因型绿豆苗期耐盐碱性分析及其鉴定指标的筛选 [J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(4): 221-232.
- YU S, LIANG H Y, GUO X X, et al. Analysis of saline-alkaline tolerance and determination of saline-alkaline tolerance evaluation indicators in seedling stage of different mung bean genotypes [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2018, 36(4): 221-232.
- [24] 路之娟, 张永清, 张楚, 等. 不同基因型苦荞苗期抗旱性综合评价及指标筛选 [J]. 中国农业科学, 2017, 50(17): 3311-3322.
- LU ZH J, ZHANG Y Q, ZHANG CH, et al. Comprehensive evaluation and indicators of the drought resistance of different genotypes of *Fagopyrum tataricum* at seedling stage [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(17): 3311-3322.
- [25] 段颖, 向成钢, 马玮, 等. 南瓜幼苗亚适温弱光耐受性指标筛选及综合评价 [J]. 核农学报, 2018, 32(6): 1106-1115.
- DUAN Y, XIANG CH G, MA W, et al. Index screening and tolerance evaluation of sub-optimal temperature and low light density in seedling stage of pumpkins [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2018, 32(6): 1106-1115.
- [26] 付鸾鸿, 于崧, 于立河, 等. 不同基因型燕麦萌发期耐盐碱性分析及其鉴定指标的筛选 [J]. 作物杂志, 2018(6): 27-35.
- FU L H, YU S, YU L H, et al. Analysis of saline-alkaline tolerance and screening of identification indexes of different oat genotypes at the germination stage [J]. *Crops*, 2018(6): 27-35.
- [27] 戴海芳, 武辉, 阿曼古丽·买买提阿力, 等. 不同基因型棉花苗期耐盐性分析及其鉴定指标筛选 [J]. 中国农业科学, 2014, 47(7): 1290-1300.
- DAI H F, WU H, Amanguli · Maimaitiali, et al. Analysis of salt-tolerance and determination of salt-tolerant evaluation indicators in cotton seedlings of different genotypes [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(7): 1290-1300.
- [28] 孙东雷, 卞能飞, 陈志德, 等. 花生萌发期耐盐性综合评价及耐盐种质筛选 [J]. 植物遗传资源学报, 2017, 18(6): 1079-1087.
- SUN D L, BIAN N F, CHEN ZH D, et al. Comprehensive evaluation of salt tolerance and screening for salt tolerant accessions of peanut (*Arachis hypogaea* L.) at germination stage [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2017, 18(6): 1079-1087.

Comprehensive Evaluation and Indexes Screening of Heat Tolerance at Germination and Seedling Stages in Different Cultivars of Chinese Flowering Cabbage

PANG Qiangqiang, ZHOU Man, SUN Xiaodong, CHEN Yisong and CAI Xinglai

(Hainan Provincial Academy of Agricultural Sciences, Vegetable Research Institute/ Hainan

Provincial Key Laboratory for Vegetable and Biology, Haikou 571100, China)

Abstract In order to explore the heat resistance ability and establish the evaluation system of heat resistance among different Chinese flowering cabbage cultivars, 20 varieties were used as experimental materials in this study, by two treatments of normal (control) and artificial simulation of 37 °C high temperature, the 21 morphological, physiological and biochemical indicators of different genotypes at germination and seedling stage, were measured. Taking the heat resistance coefficient (γ) of each individual indicator as the basis for measuring heat resistance, the methods of correlation analysis, principal component analysis, membership function analysis, cluster analysis, grey correlation degree analysis and stepwise regression analysis were used to identify the heat resistance and indexes screening of different Chinese flowering cabbage varieties. The results showed that, compared with the control, the germination rate, germination index, vigor index, fresh aboveground mass, fresh underground mass, dry aboveground mass, dry underground mass, chlorophyll mass fraction and root vigor of each variety decreased, heat damage index, O_2^- mass fraction, H_2O_2 mass fraction, MDA molality, soluble sugar mass fraction, Pro mass fraction and CAT activity increased, germination potential, root-shoot ratio, relative conductivity, SOD activity and POD activity declined and increased under high temperature stress. Correlation analysis showed that there was information overlap and crossover among evaluation indexes, though the principal component analysis, 21 individual indicators were converted into 3 independent comprehensive components, based on the membership function method comprehensively obtained the comprehensive heat resistance D value of each variety, 20 Chinese flowering cabbage cultivars were classified into 3 types by cluster analysis. The heat resistance evaluation equation was established by stepwise regression method, combining with grey relational degree analysis, 6 indicators closely related to thermostability, including heat injury index, POD activity, MDA molality, soluble sugar mass fraction, germination potential and hydrogen peroxide mass fraction, which could be used as comprehensive identification indices for heat tolerance of Chinese flowering cabbage. This study provided a theoretical basis for evaluation of heat resistance, the research of breeding and mechanism of varieties with heat resistance.

Key words Chinese flowering cabbage; High temperature stress; Heat tolerance evaluation; Identification index

Received 2019-06-10 **Returned** 2019-09-10

Foundation item Major Science and Technology Planning Projects in Hainan Province (No. ZDKJ2017001); Key Research and Development Projects of Hainan Province (No. ZDYF2019066); Special Funds for the Construction of National Modern Agricultural Industry Technology System (No. CARS-23-G52).

First author PANG Qiangqiang, male, research assistance. Research area: physiological and biochemical characteristics of vegetable breeding and cultivation. E-mail: qiangq113@163.com

Corresponding author CAI Xinglai, male, Ph.D, research fellow, doctoral supervisor. Research area: cultivation and breeding of vegetable varieties. E-mail: 13307531052@163.com

(责任编辑:潘学燕 **Responsible editor: PAN Xueyan**)