

姚悦梅, 戴忠良, 张振超, 等. 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.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2017.06.022

羽衣甘蓝对低温的生理响应与耐寒性综合评价

姚悦梅, 戴忠良, 张振超, 肖 燕, 潘跃平
(江苏丘陵地区镇江农业科学研究所, 江苏 句容 212400)

摘要: 以 24 个羽衣甘蓝品种为试验材料, 测定低温胁迫后叶片相对电导率、可溶性糖含量、可溶性蛋白质含量、脯氨酸含量、丙二醛(MDA)含量、超氧化物歧化酶(SOD)活性等生理生化指标, 以各项指标的耐寒系数衡量羽衣甘蓝品种的耐寒性, 并利用主成分分析和隶属函数分析法对其耐寒性进行综合评价。结果表明: 经过低温胁迫后, 叶片相对电导率、可溶性糖含量、可溶性蛋白质含量、脯氨酸含量、MDA 含量、SOD 活性均高于对照, 且各品种间差异显著。参试品种的综合分值(D 值)介于 0.15 到 0.60 之间。根据 D 值将 24 个品种分为 4 类: Y108、Y4389、霓裳和 Y93, 耐寒性极强; 名古屋红、瑞羽 6 号、Y92、Y122、Y4382、Y90 和 Y114, 耐寒性强; Y4330、Y4496、Y130、Y4467 和 Y105, 耐寒性中等; 红欧、瑞羽 11 号、白鸥、白鸽、Y9197、Y9196、Y112 和名古屋白, 耐寒性弱。相关性分析结果显示, D 值与植株叶片可溶性糖含量、脯氨酸含量及 SOD 活性呈极显著正相关($P < 0.01$), 与可溶性蛋白质含量呈显著正相关($P < 0.05$)。因此, 植株叶片的可溶性糖含量、脯氨酸含量、SOD 活性、可溶性蛋白质含量可以用于综合评价羽衣甘蓝的耐寒性。

关键词: 羽衣甘蓝; 耐寒性; 生理响应; 综合评价

中图分类号: S682.36 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2017)06-1349-09

Physiological response to low temperature and comprehensive evaluation of cold tolerance in kale

YAO Yue-mei, DAI Zhong-liang, ZHANG Zhen-chao, XIAO Yan, PAN Yue-ping
(Zhenjiang Institute of Agricultural Sciences of the Ning-Zhen Hilly District, Jurong 212400, China)

Abstract: Using 24 kale varieties as material, the effect of low temperature stress on cabbage leaf relative electrical conductivity, soluble protein content, soluble sugar content, proline content, malondialdehyde (MDA) content and superoxide dismutase (SOD) activity was determined. The cold tolerance of kale was measured by cold resistant coefficient of each index and comprehensively evaluated by using principal component analysis and membership function analysis. The results showed that leaf relative electrical conductivity, soluble protein content, soluble sugar content, proline content, MDA content and SOD activity of kale in the group of low temperature stress were higher than those in the group of control, and there was significant difference among the different varieties. Comprehensive score (D value) was between 0.15 to 0.60. According to the D value, 24 kale materials could be divided into four types, including Y108, Y4389, Nishang and Y93 as strong cold resistance, Mingguwu red, Ruiyu6, Y92, Nagoya Y122, Y4382, Y90 and Y114 as cold resistance, Y4330, Y4496, Y130, Y4467 and Y105 as the medium cold resistance, Hongou, Ruiyu11, Baiou, Baige, Y9197, Y9196, Y112

and Mingguwu white as the low cold resistance. Correlation analysis showed that the D value had extremely significant positive correlation ($P < 0.01$) with soluble sugar content, proline content and SOD activity, and had significantly positive correlation ($P < 0.05$) with the soluble protein content. In conclusion, soluble sugar content, proline con-

收稿日期: 2017-06-09

基金项目: 镇江市国际合作项目(GJ2015009)

作者简介: 姚悦梅(1974-), 女, 新疆石河子人, 大学, 副研究员, 主要从事蔬菜花卉的选育和开发推广。(Tel) 0511-80978051;
(E-mail) 1045714975@qq.com

通讯作者: 潘跃平, (Tel) 13905298827; (E-mail) pyp1962@163.com

tent, SOD activity soluble protein content can be used as comprehensive evaluation index of kale cold tolerance.

Key words: kale; cold tolerance; physiological response; comprehensive evaluation

羽衣甘蓝 (*Brassica oleracea* L. var. *acephala* DC) 又称彩叶甘蓝、叶牡丹, 属于十字花科芸苔属甘蓝类一个变种, 是以观叶为主的两年生园艺植物^[1]。羽衣甘蓝株型、叶形优美多变, 经低温后叶色鲜艳亮丽, 具有较长的观赏期和较强的耐寒性, 且栽培养护简单, 秋冬季节可以用于花坛、花径及道路两侧绿化美化, 是具有较高观赏价值的观叶花卉^[2]。温度是影响植物生长的重要环境因子之一, 低温冻害对羽衣甘蓝生产和栽培区域有很大影响^[3-4]。培育、推广耐寒新品种是提高羽衣甘蓝耐寒性, 抵御冻害发生的有效途径。

本试验以镇江农业科学研究所蔬菜花卉研究室选育的羽衣甘蓝 F₁ 杂种、杂交组合以及市场上收集的品种为试验材料, 探究低温胁迫对羽衣甘蓝生理生化特性的影响, 并对不同种质的耐寒性进行综合评价, 以期揭示不同类型材料的耐寒性差异, 同时为耐寒性强的羽衣甘蓝新品种的培育、推广应用提供理论基础。

表 1 羽衣甘蓝试验品种名称及供种单位

Table 1 The name and source of kale used in this study

序号	品种名称	类型	供种单位	序号	品种名称	类型	供种单位
1	瑞羽 6 号	皱叶红色	镇江农业科学研究所	13	白鸥	皱叶白色	农友种苗(中国)有限公司
2	名古屋白	皱叶白色	浙江虹越花卉有限公司	14	Y90	红色皱叶	镇江农业科学研究所
3	瑞羽 11 号	皱叶白色	镇江农业科学研究所	15	红欧	红色皱叶	农友种苗(中国)有限公司
4	名古屋红	皱叶红色	浙江虹越花卉有限公司	16	Y130	红色皱叶	镇江农业科学研究所
5	Y4389	白色波浪叶	镇江农业科学研究所	17	Y93	白色裂叶	镇江农业科学研究所
6	Y4382	红色圆叶	镇江农业科学研究所	18	Y92	粉色浅裂叶	镇江农业科学研究所
7	白鸽	白色圆叶	浙江虹越花卉有限公司	19	Y112	白色浅裂叶	镇江农业科学研究所
8	Y4467	粉色圆叶	镇江农业科学研究所	20	Y114	红色浅裂叶	镇江农业科学研究所
9	Y4330	紫色板叶	镇江农业科学研究所	21	Y108	红色皱叶	镇江农业科学研究所
10	霓裳	粉色浅裂叶	镇江农业科学研究所	22	Y105	粉色皱叶	镇江农业科学研究所
11	Y122	红色皱叶	镇江农业科学研究所	23	Y9196	红色皱叶	镇江农业科学研究所
12	Y4496	红色圆叶	镇江农业科学研究所	24	Y9197	红色皱叶	镇江农业科学研究所

1.3 生理生化指标的测定

相对电导率、游离脯氨酸含量和丙二醛含量的测定均参照张立军等^[7]的方法, 可溶性糖含量、可

1 材料与方法

1.1 试验材料

24 个羽衣甘蓝品种, 包括 19 个本研究所选育的 F₁ 杂交品种和杂交组合、5 个引进品种(表 1)。

1.2 试验设计

试验在本研究所试验基地进行。采用 50 孔穴盘基质育苗, 于 8 月 20 日播种。幼苗 4 片真叶时移栽于 20 cm×20 cm 的花盆内, 置于连栋温室中, 进行正常水肥管理, 每个品种每个处理设置 3 次重复, 每个重复 3 株。

羽衣甘蓝定植 55 d 时, 放在智能低温人工气候箱中进行低温处理, 逐步降温到试验要求温度。低温处理温度为 -8 ℃ (略高于羽衣甘蓝耐受低温)^[5], 以露地温度 (13~17 ℃) 为对照。处理 16 h 后取出, 室温条件下恢复生长 24 h 后, 观察其冻害形态特征^[6], 并选取由内向外第 4 片叶测定生理生化指标。

溶性蛋白质含量和超氧化物歧化酶活性均参照邹琦^[8]的方法测定。

耐寒系数(%) = 低温胁迫后指标测定值/对照

指标测定值 $\times 100\%$ ^[9]。

1.4 数据分析

利用 Microsoft Excel 2010 进行数据处理,利用 SPSS20.0 软件进行相关性分析、主成分分析。根据各主成分的贡献率分别计算其隶属函数值和权重,再据此计算出各品种耐寒性综合评价值 D 。根据 D 值对羽衣甘蓝的耐寒性进行综合评价^[10-11]。

2 结果与分析

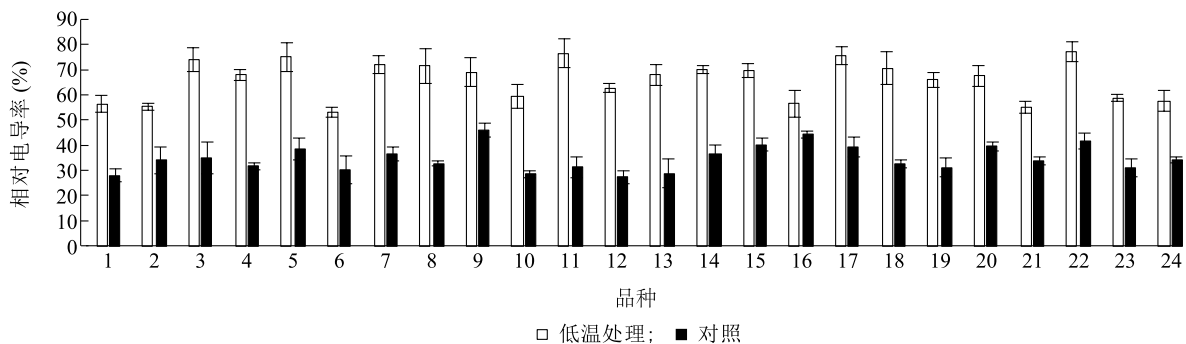
2.1 低温处理对羽衣甘蓝叶片形态特征的影响

-8 ℃低温处理 16 h 后,除 Y108、Y4389、霓裳、Y93 4 个品种外,其他 20 个品种叶片均呈现出不同程度的冻害。名古屋红、瑞羽 6 号等受到轻微冻害,心叶、叶缘处轻微枯黄。Y4330、Y4496、Y130 等外叶个别叶片边缘变干枯发黄,心叶部分叶片 1/3 ~

1/2 叶缘发白或焦黄。Y9196、Y112、名古屋白等心叶大面积变干枯发黄坏死,外叶大部分萎蔫。不同羽衣甘蓝品种在低温胁迫下均受到一定程度的伤害,且耐寒性存在差异,整体耐寒性表现为紫色>红色>粉色>白色。

2.2 低温处理对羽衣甘蓝生理指标的影响

露地温度下(对照)各品种相对电导率为 27.3%~45.9%,品种间差异显著($P<0.05$),Y4330 最高(45.9%),其次是 Y130(44.2%),Y4496 最低(27.3%)(图 1)。低温处理后,不同品种相对电导率均显著高于对照,介于 53.1%到 77.1%之间,Y105 最高(77.1%),其次是 Y122(76.5%),Y4382 最低(53.2%)。与对照相比,Y122 增幅最高(59.1%),而 Y130 增幅最低,仅为 21.7%。



各品种名称见表 1。

图 1 低温胁迫下不同羽衣甘蓝品种叶片相对电导率

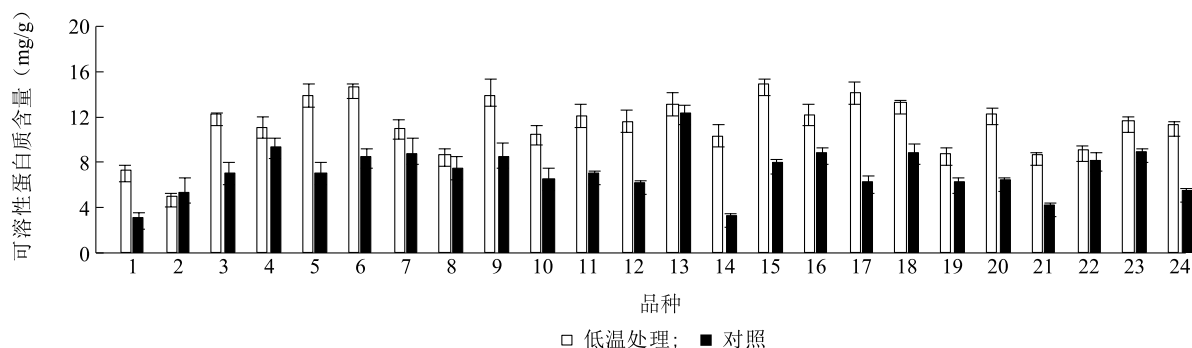
Fig.1 Relative electrical conductivity of kale leaves in response to low temperature stress

对照羽衣甘蓝(鲜样)可溶性蛋白质含量在 3.12 mg/g 到 12.33 mg/g 之间,不同品种间差异显著,白鸥最高(12.33 mg/g),其次是名古屋红(9.32 mg/g),瑞羽 6 号含量最低(3.12 mg/g)(图 2)。低温处理后,不同品种可溶性蛋白质含量处于 5.03 mg/g 到 14.89 mg/g 之间,红欧最高(14.89 mg/g),其次是 Y4382(14.63 mg/g),名古屋白含量最低(5.03 mg/g)。与对照相比均有不同程度的增加或减少,其中 Y90 增加最多,增加了 7.09 mg/g,而名古屋白却减少了 0.32 mg/g。

对照羽衣甘蓝叶片(干样)可溶性糖含量介于 4.73 mg/g 到 12.75 mg/g 之间,不同品种间差异显著,Y4330 最高(12.75 mg/g),其次是白鸽(11.08 mg/g),名古屋白含量最低(4.73 mg/g)(图 3)。低温处理后,各品种可溶性糖含量介于 5.58 mg/g

到 14.67 mg/g 之间,名古屋红最高(14.67 mg/g),其次是霓裳(14.63 mg/g),名古屋白含量最低(5.58 mg/g);与对照相比,各品种均有不同程度的增加,霓裳增加了 5.44 mg/g,而 Y4496 仅增加了 0.17 mg/g。

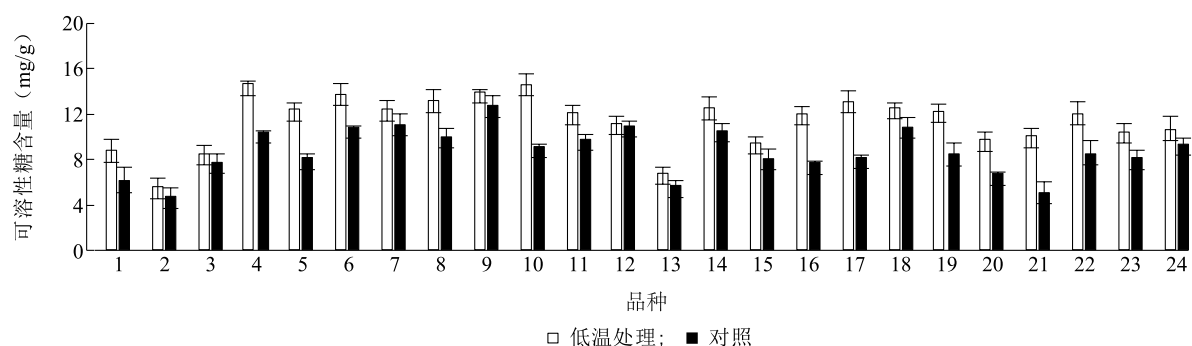
对照羽衣甘蓝叶片(鲜样)游离脯氨酸含量处于 13.24 $\mu\text{g/g}$ 到 28.63 $\mu\text{g/g}$ 之间,不同品种间差异显著,红鸥最高(28.63 $\mu\text{g/g}$),其次是瑞羽 6 号(28.38 $\mu\text{g/g}$),Y4389 含量最低(13.24 $\mu\text{g/g}$)(图 4)。低温处理后,各品种游离脯氨酸含量处于 44.75 $\mu\text{g/g}$ 到 25.28 $\mu\text{g/g}$ 之间,白鸽最高(44.75 $\mu\text{g/g}$),其次是 Y90(44.36 $\mu\text{g/g}$),瑞羽 11 号含量最低(25.29 $\mu\text{g/g}$);与对照相比,各品种均有不同程度的增加,其中 Y90 增加了 24.42 $\mu\text{g/g}$,而 Y9196 仅增加了 5.13 $\mu\text{g/g}$ 。



各品种名称见表 1。

图 2 低温胁迫下不同羽衣甘蓝品种叶片可溶性蛋白质含量

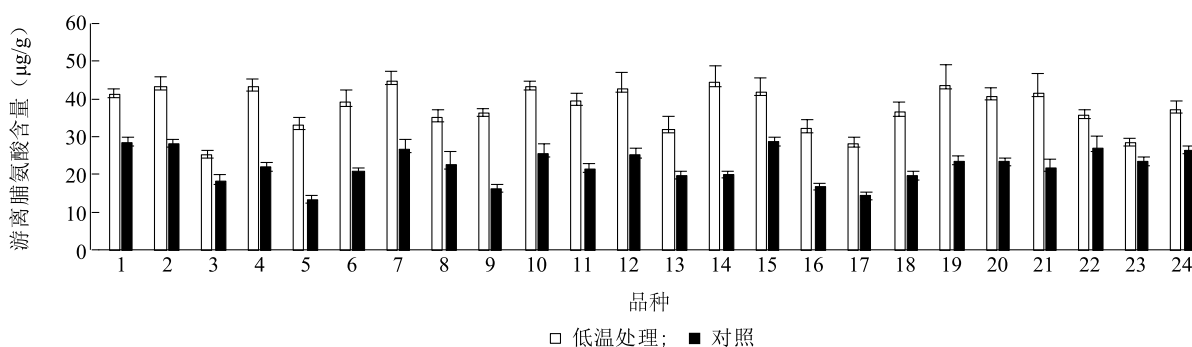
Fig.2 Soluble protein content of kale leaves in response to low temperature stress



各品种名称见表 1。

图 3 低温胁迫下不同羽衣甘蓝品种叶片可溶性糖含量

Fig.3 Soluble sugar content of kale leaves in response to low temperature stress



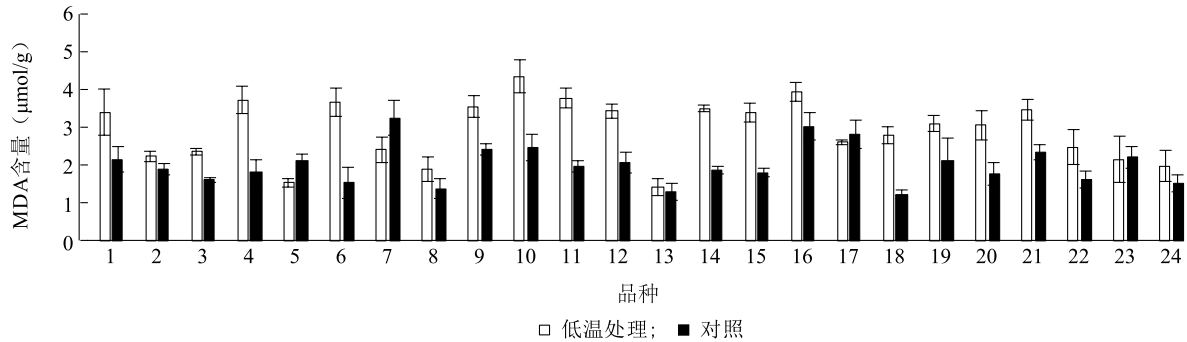
各品种名称见表 1。

图 4 低温胁迫下不同羽衣甘蓝品种叶片游离脯氨酸含量

Fig.4 Free proline content of kale leaves in response to low temperature stress

对照羽衣甘蓝叶片(鲜样)丙二醛(MDA)含量处于 1.22 $\mu\text{mol/g}$ 到 3.25 $\mu\text{mol/g}$ 之间,不同品种间差异显著,白鸽最高(3.25 $\mu\text{mol/g}$),其次是 Y130(3.02 $\mu\text{mol/g}$),Y92 含量最低(1.22 $\mu\text{mol/g}$)(图 5)。低温处理后,不同品种 MDA 含量介于 1.41

$\mu\text{mol/g}$ 到 4.35 $\mu\text{mol/g}$ 之间,霓裳最高(4.35 $\mu\text{mol/g}$),其次是 Y130(3.93 $\mu\text{mol/g}$),白鸽含量最低(1.41 $\mu\text{mol/g}$);与对照相比,各品种均有不同程度的增加或减少,其中 Y4382 增加了 2.13 $\mu\text{mol/g}$,而白鸽却减少了 0.84 $\mu\text{mol/g}$ 。



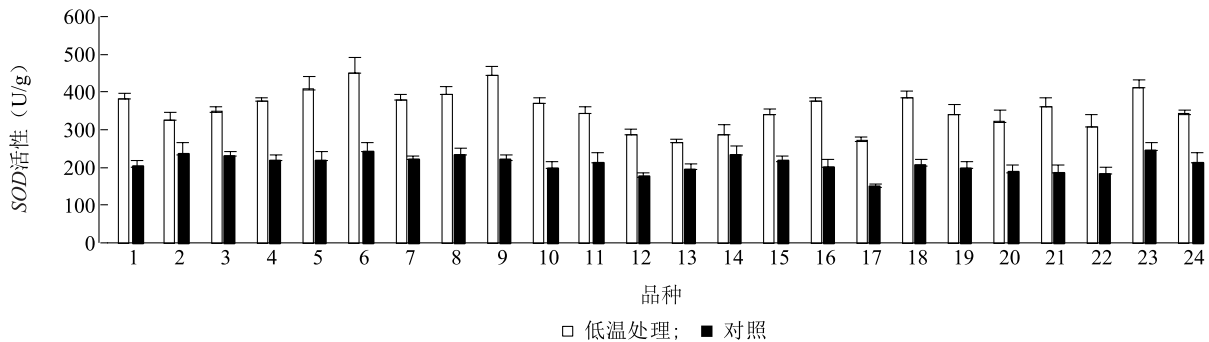
各品种名称见表1。

图5 低温胁迫下不同羽衣甘蓝品种叶片MDA含量

Fig.5 MDA content of kale leaves in response to low temperature stress

对照羽衣甘蓝叶片(鲜样)SOD活性处于149.47 U/g到245.61 U/g之间,不同品种间差异显著,Y9196最高(245.61 U/g),其次是Y4382(241.63 U/g),Y93最低(149.47 U/g)(图6)。低温处理后,不同品种SOD活性介于266.25 U/g到

450.32 U/g之间,Y4382最高(450.32 U/g),其次是Y4330(444.16 U/g),白鸽最低(266.25 U/g);与对照相比,各品种均有不同程度的增加,Y4330增加了223.81 U/g,而Y90仅增加了53.27 U/g。



各品种名称见表1。

图6 低温胁迫下不同羽衣甘蓝品种叶片SOD活性

Fig.6 SOD activity of kale leaves in response to low temperature stress

由各单项指标的耐寒系数(表2)可看出,经低温胁迫处理后,24个品种中,相对电导率耐寒系数最大的是Y122(为对照的244%),Y130最小(为对照的128%),表明Y122对低温的抵抗能力最弱,Y130最强。可溶性蛋白质含量耐寒系数最大的是Y90(为对照的318%),最小的是名古屋白(为对照的94%),说明Y90的耐寒能力最强,名古屋白最弱。可溶性糖含量耐寒系数最大的是Y108(196%),最小的是Y4496(102%)。脯氨酸含量耐寒系数最大的是Y4389(249%),最小的是Y9196(122%)。MDA含量耐寒系数最大的是Y4382(239%),最小的是Y4389(73%)。除Y9196、Y93、白鸽、Y4389外,

其余品种MDA含量耐寒系数均在100%以上。SOD活性耐寒系数最大的是Y4330(202%),最小的是Y90(123%),说明Y4330对低温的抵抗能力最强,Y90最弱。

2.3 羽衣甘蓝单项生理指标主成分分析

对24个羽衣甘蓝品种的6个理化指标的耐寒系数进行主成分分析,前5个综合指标($CI_1 \sim CI_5$)的贡献率分别为32.369%、21.914%、15.798%、13.266%和10.293%(表3),累积贡献率达93.640%。理论上,大于85%的累积贡献率即可认为具有较强的信息代表性^[9],因此可用这5个综合指标对羽衣甘蓝品种的耐寒性进行分析。

表 2 羽衣甘蓝各单项指标的耐寒系数

Table 2 Cold resistant coefficient of each index of kale

品种	相对电导率耐寒系数(%)	可溶性蛋白质含量耐寒系数(%)	可溶性糖含量耐寒系数(%)	脯氨酸含量耐寒系数(%)	MDA 含量耐寒系数(%)	SOD 活性耐寒系数(%)
瑞羽 6 号	202	235	144	146	158	189
名古屋白	163	94	118	154	119	139
瑞羽 11 号	212	174	110	139	147	151
名古屋红	214	119	141	197	205	172
Y4389	195	197	152	249	73	187
Y4382	176	173	127	188	239	186
白鸽	198	125	112	168	74	170
Y4467	219	115	131	156	138	168
Y4330	150	164	110	224	148	202
霓裳	209	162	159	170	177	187
Y122	244	172	124	183	193	161
Y4496	230	188	102	169	166	163
白鸥	236	106	120	162	109	137
Y90	192	318	119	223	187	123
红欧	174	187	117	146	189	157
Y130	128	138	156	192	130	186
Y93	192	225	160	197	92	182
Y92	216	150	116	186	229	188
Y112	212	140	145	185	147	172
Y114	171	192	144	174	174	171
Y108	162	206	196	192	148	195
Y105	185	111	142	132	153	167
Y9196	189	130	128	122	97	168
Y9197	168	207	114	141	131	161

表 3 羽衣甘蓝各生理指标主成分得分系数及贡献率

Table 3 The principal component score coefficient of each physiological index of kale and contribution rate

综合指标	生理指标主成分得分系数						贡献率(%)	累积贡献率(%)
	相对电导率	可溶性蛋白质含量	可溶性糖含量	脯氨酸含量	MAD 含量	SOD 活性		
CI ₁	-0.547	0.351	0.754	0.630	-0.031	0.744	32.369	32.369
CI ₂	0.300	0.716	-0.235	0.435	0.648	-0.220	21.914	54.283
CI ₃	0.269	-0.433	0.095	-0.162	0.657	0.471	15.798	70.081
CI ₄	0.709	-0.106	0.215	0.340	-0.344	0.051	13.266	83.347
CI ₅	0.158	0.315	0.493	-0.483	0.040	-0.122	10.293	93.640

2.4 羽衣甘蓝耐寒性综合评价

计算羽衣甘蓝各品种所有综合指标的隶属函数

值(表 4), $u(x_j)=(x_j-x_{\min})/(x_{\max}-x_{\min})$,式中, x_j 表示第 j 个综合指标, x_{\min} 表示第 j 个综合指标的最小

值, x_{\max} 表示第 j 个综合指标的最大值。对于同一综合指标(如 CI_1)而言,在低温胁迫条件下,Y108 的 $u(x_1)$ 值为 1.00,Y90 的 $u(x_1)$ 值为 0,说明在 CI_1 这一综合指标上,Y108 耐寒性最强,Y90 耐寒性最弱。

根据各综合指标($CI_1 \sim CI_5$)贡献率的大小(表 3),计算得到 5 个综合指标的权重分别为 0.345、0.234、0.171、0.142、0.110。

按公式计算羽衣甘蓝各品种的综合耐寒能力 D 值(表 4),Y108 最大(0.60),名古屋白最小(0.15),说明 Y108 的耐寒性最强,名古屋白最弱。

D 值大小与叶片形态特征表现基本一至,因此,本研究根据 D 值大小将羽衣甘蓝品种划分为 4 类:①耐寒性极强(D 值 ≥ 0.5),品种有 Y108、Y4389、霓裳、Y93;②耐寒性强($0.4 \leq D$ 值 < 0.5),品种有名古屋红、瑞羽 6 号、Y92、Y122、Y4382、Y90、Y114;③耐寒性中等($0.3 \leq D$ 值 < 0.4),品种有 Y4330、Y4496、Y130、Y4467、Y105;④耐寒性弱(D 值 < 0.3),品种有红欧、瑞羽 11 号、白鸥、白鸽、Y9197、Y9196、Y112、名古屋白。

表 4 各羽衣甘蓝品种的综合指标值(CI)、 $u(x_j)$ 值、 D 值及综合评价

Table 4 The value of comprehensive index (CI), $u(x_j)$, D value and comprehensive evaluation of kale

品种	CI_1	CI_2	CI_3	CI_4	CI_5	$u(x_1)$	$u(x_2)$	$u(x_3)$	$u(x_4)$	$u(x_5)$	D 值	耐寒评价
瑞羽 6 号	1.08	-0.95	1.00	0.43	0.25	0.64	0.14	0.47	0.57	0.61	0.48	强
名古屋白	-1.33	-0.73	-0.80	-0.92	-1.10	0.09	0.19	0.06	0.23	0.26	0.15	弱
瑞羽 11 号	-0.94	-1.00	0.26	-0.08	0.45	0.18	0.13	0.30	0.44	0.66	0.28	弱
名古屋红	0.33	0.62	-0.85	1.03	0.86	0.47	0.54	0.05	0.72	0.76	0.48	强
Y4389	0.65	2.44	0.25	-1.81	0.38	0.54	1.00	0.30	0	0.64	0.54	极强
Y4382	0	0.47	-0.29	2.11	-0.78	0.39	0.50	0.18	1.00	0.35	0.46	强
白鸽	-0.76	0.34	-1.05	-1.52	0.01	0.22	0.47	0.01	0.08	0.55	0.26	弱
Y4467	0.10	-0.43	-0.91	-0.27	0.91	0.42	0.27	0.04	0.39	0.78	0.36	中
Y4330	-0.67	2.24	-1.08	0.37	-1.82	0.24	0.95	0	0.56	0.08	0.39	中
霓裳	1.46	-0.34	-0.11	0.61	0.73	0.73	0.29	0.22	0.62	0.73	0.53	极强
Y122	-0.26	0.31	0.10	0.78	1.77	0.33	0.46	0.26	0.66	1.00	0.47	强
Y4496	-1.03	0.22	0.09	0.43	1.02	0.15	0.44	0.26	0.57	0.81	0.37	中
白鸥	-0.94	-0.35	-0.61	-1.26	1.59	0.18	0.29	0.10	0.14	0.95	0.27	弱
Y90	-1.70	0.85	3.39	0.17	0.05	0	0.60	1.00	0.50	0.56	0.44	强
红欧	-0.78	-1.01	0.49	0.87	-0.89	0.21	0.12	0.35	0.68	0.32	0.29	弱
Y130	0.71	0.33	-0.54	-0.41	-2.13	0.56	0.46	0.12	0.36	0	0.37	中
Y93	1.14	0.49	1.06	-1.34	0.24	0.66	0.50	0.48	0.12	0.61	0.51	极强
Y92	-0.14	0.76	-0.92	1.95	0.55	0.36	0.57	0.04	0.96	0.69	0.48	强
Y112	0.52	0.26	-0.42	-0.20	0.83	-0.13	0.45	0.15	0.41	0.76	0.23	弱
Y114	0.34	-0.33	0.59	0.46	-0.72	0.47	0.30	0.37	0.58	0.36	0.42	强
Y108	2.62	-0.22	0.98	-0.17	-0.57	1.00	0.32	0.46	0.42	0.40	0.60	极强
Y105	0.44	-1.49	-0.74	0.07	-0.26	0.49	0	0.08	0.48	0.48	0.30	中
Y9196	0.01	-1.49	-0.60	-1.00	-0.26	0.40	0	0.11	0.21	0.48	0.24	弱
Y9197	-0.82	-1.00	0.72	-0.28	-1.14	0.20	0.13	0.40	0.39	0.25	0.25	弱

2.5 羽衣甘蓝耐寒特性与生理指标的相关性

SPSS20.0 软件对各个生理指标和 D 值进行 Pearson 相关性分析,得到相关系数矩阵(表 5)。由

表 5 可以看出, D 值与叶片可溶性糖含量、脯氨酸含量以及 SOD 活性呈极显著正相关($P < 0.01$),与可溶性蛋白质含量呈显著正相关($P < 0.05$)。

表 5 羽衣甘蓝各耐寒生理指标与 *D* 值的相关性Table 5 Correlation between physiological indexes for cold resistance and *D* value in kale

	相对电导率	可溶性蛋白质含量	可溶性糖含量	脯氨酸含量	MAD 含量	SOD 活性
可溶性蛋白质含量	-0.091					
可溶性糖含量	-0.257	0.116				
脯氨酸含量	-0.114	0.363	0.247			
MAD 含量	0.133	0.175	-0.121	0.052		
SOD 活性	-0.286	-0.041	0.497 *	0.295	0.054	
<i>D</i> 值	0.073	0.485 *	0.579 **	0.596 **	0.330	0.555 **

*、** 分别表示在 0.05 水平、0.01 水平上显著相关。

3 讨论

低温胁迫后,植物为了应对伤害,会发生一系列生理响应,通过生化反应来调节对其不利影响^[12-16]。低温胁迫造成的植株伤害,最先始于叶片细胞膜系统,生物膜透性增加、膜受损程度加大,电解质渗透量增多,叶片相对电导率增大,所以相对电导率可以作为鉴定细胞膜透性以及破坏程度的重要指标^[17-18]。本研究结果表明,经低温处理后,羽衣甘蓝叶片细胞膜系统受到伤害,叶片相对电导率较对照均有所提高,品种之间提高的幅度各异,说明不同品种的耐寒能力存在差异。

低温处理后,不同羽衣甘蓝品种可溶性蛋白质、可溶性糖、游离脯氨酸等渗透调节物质的含量均不同程度升高,这与在大白菜^[19]、结球甘蓝^[20]、火龙果^[11]、冬油菜^[21]等园艺植物上的研究结果相似。渗透调节物质含量的增加,使植株耐寒性得到提升。本研究中,名古屋白的可溶性蛋白质含量较对照有所下降,说明该低温已超出其所能忍受的范围,叶片细胞膜结构已受到机械性损伤或破坏^[22]。

低温胁迫会引发植物体内膜脂过氧化,并生成膜脂过氧化产物 MDA,其含量与胁迫时间成正比,与温度成反比^[23];SOD 则可以清除植物体内的活性氧,减轻逆境对植株造成的损伤,使植物细胞膜受到保护^[24-25]。本研究中,低温胁迫提高了不同羽衣甘蓝品种 SOD 活性,有助于清除细胞内自由基积累,从而减轻膜脂过氧化伤害。

有文献指出羽衣甘蓝的耐寒性与叶形、叶色有关,红色的耐寒性强于白色,羽叶和圆叶的耐寒性强于皱叶^[26]。本试验结果与该结论有差异。在本试验中通过综合评价,发现耐寒性最强的是 Y108 红色皱叶杂交种,其耐寒性超过了圆叶及裂叶品种,这

可能与品种类型、亲本来源有关。本研究根据多个指标及其各自贡献率的大小对品种的耐寒性进行综合评价,较为全面科学^[27]。利用主成分分析方法将 6 个生理指标转换成 5 个彼此独立的综合指标,在此基础上,再采用隶属函数加权法对品种耐寒性进行综合评价^[28]。

低温处理后,各品种不同生理指标相对数值均有变化。通过隶属函数法,由相对性状值计算出各品种的平均隶属度值和 *D* 值,根据 *D* 值将参试品种聚成了 4 类。其中, Y108 耐寒能力最强, Y4389 次之,而名古屋白最弱。相关分析结果表明,叶片 *D* 值与可溶性糖、脯氨酸含量以及 SOD 活性呈极显著正相关,与可溶性蛋白质含量呈显著正相关,因此这 4 个指标可以作为综合评价羽衣甘蓝耐寒性的主要依据。

参考文献:

- [1] 姚悦梅,潘跃平,戴忠良,等. 观赏羽衣甘蓝杂交新品种的比较[J]. 江苏农业科学, 2013, 41(11):209-210.
- [2] 石延昭. 钾肥的施用量对羽衣甘蓝抗寒性的影响[J]. 中国园艺文摘, 2013, 29(7):18-19.
- [3] 高振,翟衡,臧兴隆,等. 利用低温放热法分析 8 个葡萄砧木和 6 个栽培品种芽的抗寒性[J]. 园艺学报, 2014, 41(1):17-25.
- [4] 王慧,周小梅. 低温胁迫对辣椒相关生理生化指标的影响[J]. 山西农业科学, 2015(2):152-154.
- [5] 马光,郭继平,刘志华. 观赏羽衣甘蓝抗寒性评价[J]. 北方园艺, 2011(9):77-79.
- [6] 李慧芬,钱芝龙. 羽衣甘蓝创新种耐冻性及在杂交一代中遗传[J]. 中国园艺文摘, 2006(2):14-16.
- [7] 张立军,樊金娟. 植物生理学实验教程[M]. 北京:中国农业大学出版社, 2007.
- [8] 邹琦. 植物生理生化实验指导[M]. 北京:中国农业出版社, 1995.

- [9] 刘杜玲,张博勇,孙红梅,等. 早实核桃不同品种抗寒性综合评价[J]. 园艺学报, 2015, 41(3):545-553.
- [10] 黄其椿,赵洪涛,刘吉敏,等. 实生苗嫁接对红麻细胞质雄性不育系与保持系的生长发育及越冬抗寒性的影响[J]. 华中农业大学学报, 2013, 32(3):8-14.
- [11] 杨朴丽. 火龙果种质资源的耐寒性综合评价[J]. 中国果业信息, 2014(4):61-61.
- [12] 刘璐,毛永成,申亚梅. 3种地被月季对低温胁迫的生理响应[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(2):231-233.
- [13] MINAMI A, NAGAO M, IKEGAMI K, et al. Cold acclimation in bryophytes: low-temperature-induced freezing tolerance in *Physcomitrella patensis* associated with increases in expression levels of stress-related genes but not with increase in level of endogenous abscisic acid[J]. *Planta*, 2005, 220(3):414-423.
- [14] 张曼,胡雪丹,徐锦华,等. 葫芦砧木种质资源耐冷性评价[J]. 江苏农业学报, 2016, 32(6):1390-1395.
- [15] LIU Y Y, JUN-ZHOU L I, CHEN L, et al. Effect of low temperature stress on peroxidation product of membrane lipids and activity of related enzymes in wheat seedling leaves[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2006, 26(4):70-73.
- [16] 许娟,郑虚,闫海峰,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):1837-1943.
- [17] 杨惠,翟梅枝,李丽,等. 陕西核桃栽培品种优系抗寒性评价[J]. 中南林业科技大学学报, 2013, 33(4):50-55.
- [18] 高志强,张国红,张爱芝,等. 不同小麦品种对低温的生理反应研究[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2002, 22(2):109-112.
- [19] 孟凡珍,张振贤,于贤昌. 不同生态型结球大白菜抗寒性的评价[J]. 中国农业大学学报, 2004, 9(4):35-39.
- [20] 张扬勇,靳哲,方智远,等. 结球甘蓝抗寒性配合力分析及优良抗寒组合选育[J]. 中国蔬菜, 2011, 1(14):23-27.
- [21] 刘自刚,孙万仓,杨宁宁,等. 冬前低温胁迫下白菜型冬油菜抗寒性的形态及生理特征[J]. 中国农业科学, 2013, 46(22):4679-4687.
- [22] 利容千,王建波. 植物逆境细胞及生理学[M]. 武汉:武汉大学出版社, 2002.
- [23] 李春燕,陈思思,徐雯,等. 苗期低温胁迫对扬麦16叶片抗氧化酶和渗透调节物质的影响[J]. 作物学报, 2011, 37(12):2293-2298.
- [24] 田丹青,葛亚英,潘刚敏,等. 低温胁迫对3个红掌品种叶片形态和生理特性的影响[J]. 园艺学报, 2011, 38(6):1173-1179.
- [25] SCANDALIONS J G. Oxygen stress and superoxide dismutases[J]. *Plant Physiology*, 1993, 101:7-12.
- [26] 张亚玲,幸宏伟,郭宁,等. 羽衣甘蓝抗寒生理特性研究[J]. 华北农学报, 2016, 31(4):168-176.
- [27] 南丽丽,师尚礼,陈建纲,等. 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.
- [28] 王树刚,王振林,王平,等. 不同小麦品种对低温胁迫的反应及抗冻性评价[J]. 生态学报, 2011, 31(4):1064-1072.

(责任编辑:张震林)