

甘蓝型冬油菜在西北不同生态区 适应性及生理生化反应

王月^{1,3}, 孙万仓^{2,3}, 刘自刚^{1,2}, 杨宁宁^{1,3}, 方彦^{1,2},
曾秀存^{1,2}, 孔德晶^{1,3}, 鲁美宏^{1,3}, 王丽萍^{1,3}, 董红业^{1,3},
杨刚^{1,3}, 侯献飞^{1,3}, 刘林波^{1,3}, 种彦容³

(1. 甘肃省干旱生境作物学重点实验室, 甘肃省作物遗传改良与种质创新重点实验室, 甘肃 兰州 730070;

2. 甘肃省油菜工程技术研究中心, 甘肃 兰州 730070; 3. 甘肃农业大学农学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 选用 50 个国内外甘蓝型冬油菜品种, 在兰州和天水两个生态区进行大田种植, 苗期进行田间植物学形态特征统计, 越冬前降温期对叶片过氧化氢酶 (CAT)、过氧化物酶 (POD)、超氧化物歧化酶 (SOD) 活性及丙二醛 (MDA)、可溶性蛋白 (SP) 含量以及相应光合参数进行测定, 研究它们在不同生态区的抗寒适应性和生理生化反应。结果显示: 由天水北移至兰州后, 各参试品种越冬率大幅下降, 证明天水是我国冬油菜分布北界; 部分品种形态特征发生变化, 78% 的叶色加深, 52% 的叶柄变短, 大多数品种的侧裂叶对数由 1~2 对增至 3~4 对; 胞间 CO_2 浓度 (C_i) 和气孔导度 (G_s) 下降, 平均降幅为 1.54% 和 60.53%, 蒸腾速率 (Tr) 显著升高, 平均升幅为 44.27%, 不同品种的光合速率 (P_n) 变化存在较大差异; 同时, CAT、POD、SOD 酶活性、MDA 和可溶性蛋白含量都有所升高, 其中 POD 酶活性和 MDA 含量升高幅度较大, 分别为 82.59% 和 48.82%。相关性分析表明, 两地的越冬率与 POD 酶活性和可溶性蛋白含量呈极显著正相关, 而与 MDA 含量呈极显著负相关。

关键词: 甘蓝型冬油菜; 生态区; 酶活性; 抗寒性

中图分类号: S565.4 **文献标志码:** A

Adaptation and physiological and biochemical characteristics of winter rapeseed (*Brassica napus* L.) in different eco-regions of northwest China

WANG Yue^{1,3}, SUN Wan-cang^{2,3}, LIU Zi-gang^{1,2}, YANG Ning-ning^{1,3}, FANG Yan^{1,2},
ZENG Xiu-cun^{1,2}, KONG De-jing^{1,3}, LU Mei-hong^{1,3}, WANG Li-ping^{1,3}, DONG Hong-ye^{1,3},
YANG Gang^{1,3}, HOU Xian-fei^{1,3}, LIU Lin-bo^{1,3}, CHONG Yan-rong³

(1. Gansu Key Laboratory of Crop Improvement and Germplasm Enhancement, Key Laboratory of Arid Land Crop Science in Gansu Province, Lanzhou, Gansu 730070, China; 2. Gansu Rapeseed Engineering Research Center, Lanzhou, Gansu 730070, China;

3. College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: In this research, field experiments in Tianshui (original planting area) and Lanzhou (extending northern area), Gansu province, with 50 winter varieties of *B. napus* rapes from domestic and international resources, were conducted to study the adaptation and the physiological and biochemical characteristics of the winter *Brassica napus*. The following indexes were included in this analysis including catalase (CAT), peroxidase (POD), superoxide dismutase (SOD) activities, malondialdehyde (MDA), soluble protein (SP) contents, and photosynthetic parameters during the pre-winter cold acclimation stage. The results showed that the wintering rate of varieties (lines) tested in Lanzhou was decreased largely compared to that in Tianshui, which suggested that Tianshui was the north boundary of winter rape planting. Some growth morphologies of winter rapeseed seedlings were changed. 78% of leaf color of varieties (lines) were deepened, 52% of the petiole length of varieties (lines) became shorter, and the number of cleft leaf pairs of most

收稿日期: 2014-04-29

基金项目: 农业部公益性行业 (农业) 科研专项 (200903002-04); 国家高技术研究发展计划 (“863”计划) 项目 (2011AA10A104); 现代农业产业技术体系建设专项 (CARS-13)

作者简介: 王月 (1986—), 女, 山东临沂人, 在读硕士研究生, 研究方向为作物遗传育种。E-mail: kamuer@126.com。

通信作者: 孙万仓 (1957—), 男, 甘肃会宁人, 教授, 博士, 主要从事油菜的遗传育种研究。E-mail: 18293121851@163.com。

varieties (lines) went increased from 1–2 to 3–4. G_s and C_i of leaves were decreased by 1.54% and 60.53% on average, respectively, while Tr was increased by 44.27% with low temperature treatment. Pns of different varieties (lines) varied significantly. The protective enzyme activities, soluble protein and MDA contents of the varieties tested in Lanzhou were increased compared to those in Tianshui, and the average increases were 29.37% and 48.82%, respectively. Through correlation analyses, it was found that there were significant positive pairwise correlations among the POD activity, soluble protein content and the wintering rate, and a negative correlation between MDA content and the wintering rate.

Keywords: winter rapeseed (*Brassica napus* L.); eco-regions; enzyme activity; cold resistance

油菜富含油脂、蛋白质,是全世界范围内广泛种植的重要油料作物之一,它不仅是食用油和蛋白质饲料的重要来源,也是加工工业及生物能源的重要原料,在农业生产中占据重要地位。油菜以播种季节的不同,分为冬油菜与春油菜两大产区,以山东南部、河北南部、山西南部、陕西关中东到甘肃东、南部为界,向南为冬油菜区,向北为春油菜区。其中冬油菜作为唯一的冬季油料作物,可利用冬闲耕地发展油菜生产,加上它在轮作中的重要地位,冬油菜的发展对经济发展和农业生产具有重要意义。在全球气候趋暖的背景下,冬油菜北移研究已成为油菜育种研究的热点之一,也是北方寒旱区应对气候暖化挑战的重要技术措施和战略之一^[1]。目前,我国北方寒旱区白菜型冬油菜北移的研究已取得了重大进展,白菜型冬油菜已经成功引入甘肃河西走廊、新疆阿勒泰、塔城、乌鲁木齐、青海、宁夏、北京等地,使种植区域纬度向北推进约 5°~13°,海拔提高到 2 300 m 左右,取得了显著经济效益、生态效益和社会效益^[2-3]。而冬油菜抗寒性的研究亦逐渐从形态水平发展到生理生化水平及分子生物学水平,并取得了很多有价值的研究成果。有研究指出,在低温诱导下,白菜型冬油菜品种 CAT、SOD 等抗氧化酶活性升高,可溶性糖、游离脯氨酸等渗透调节物质不断积累,且抗寒性不同的材料在低温下其生理特性变化存在差异^[4];王学芳等^[5]证实抗氧化酶活性、丙二醛、可溶性蛋白等生理生化指标与冬油菜抗寒性密切相关;还在白菜型冬油菜中克隆了 *BnMKK2*^[6]、*BnMKK4*^[7]、*BnMPK6*^[8]、*BnHMGB2*^[9]等基因 cDNA 全长,并分析了基因结构、功能及低温诱导下的表达情况,结果表明这些基因在响应低温、盐胁迫中发挥重要作用。由于抗寒性强的白菜型冬油菜品种在品质和产量等性状方面存在诸多问题,其自交不亲和性、品种多样性较为狭窄,使其推广受到限制。甘蓝型油菜因其产量高、适应性强、品质优良,是我国油菜生产中播种面积最大的类型,约占油菜播种面积的 90% 左右,主要分布在长江流域,北方地区播种面积

较小。西北地区干旱少雨、蒸发量大,冬季严寒,甘蓝型油菜越冬十分困难。因此,研究不同甘蓝型冬油菜品种在北方不同生态条件下的抗寒性与生理生化反应,挖掘抗寒基因资源,培育抗寒新品种,对发展北方甘蓝型冬油菜生产具有十分重要的意义。本文报道不同甘蓝型冬油菜品种在兰州和天水不同生态条件下的抗寒性与形态特征、光合特性以及生理生化特性表现,通过相关性分析,筛选与甘蓝型冬油菜抗寒性有关的因子,以期对甘蓝型油菜抗寒性品种的选育和栽培提供技术和理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与处理

试验材料信息见表 1。试验于 2012—2013 年在兰州市和天水市秦州区进行。供试材料于 2012 年 8 月中旬播种,每个品种 3 行,60 株,行长 1.4 m,行距 20 cm。试验地前茬为小麦,施农家肥 60 000 kg·hm⁻²、磷酸二铵 300 kg·hm⁻²。田间管理按大田常规生产进行。

1.2 植物学形态统计

参照伍晓明等^[10]的方法,分别于冬前观察记载各试点不同甘蓝型冬油菜的基叶叶型、叶色、叶脉色、叶柄长度、叶尖形状、叶缘形状、真叶刺毛、侧裂叶对数、苗期生长习性等。

冬前苗期统计每个参试品种植株数,冬后返青期统计存活株数,计算越冬率。

越冬率 = 返青期植株数/苗期植株总数 × 100%

1.3 甘蓝型冬油菜光合参数测定

冬前(2012 年 10 月 25 日)于各试验点使用 ADC-Lcpro 便携式光合仪,设定叶室(625 mm²)内温度为 20℃,光强为 600 μmol·m⁻²·s⁻¹,测定各品种叶片胞间 CO₂ 浓度、蒸腾速率、气孔导度和光合速率,重复 2 次。

1.4 降温后甘蓝型冬油菜叶片生理生化指标测定

于冬前降温后(10 月 25 日)采样,分别对 CAT、POD、SOD 酶活性及可溶性蛋白、MDA 含量 5 个指标进行测定,然后求其平均值作为各项抗寒性状指标

表 1 参试品种名称及越冬情况

Table 1 Names and wintering rates of materials tested

序号 Number	品种名称 Name	越冬率 Wintering rate/%	
		天水 Tianshui	兰州 Lanzhou
1	2012y5 2646 82 – 2524	100	33.33
2	2012y15 3303 lesira	91.67	50
3	2012y18 3397 Rapora	80	20
4	2012y20 5170 koolzaand – 2	100	14.29
5	2012y22 5226 Arabelle	100	28.57
6	2012y24 6146 gave	66.67	0
7	2012zy4 3392	100	33.33
8	2012zy5 5132	100	30
9	2012zy6 5867	25	0
10	2012zy18 1193	100	16.67
11	2012zy21 7476	33.3	0
12	2012zy22 7478	100	25
13	2012zy24 7499	100	14.29
14	Sun1 WGP1 W35	100	25
15	WGP4 W38	100	33.33
16	WGP5 W39	92	20
17	WGP6 W40	92	25
18	WGP8 W42	100	38
19	WGP10 W44	100	44
20	WGP11 W45	100	33.33
21	WGP12 W46	87.5	33.33
22	WGP13 W47	100	50
23	WGP14 W48	25	0
24	WGP18 W52	20	0
25	WGP19 W53	52.94	0
26	WGP20 W54	61.54	17
27	WGP22 W56	81.82	17
28	WGP24 W58 sun2	83.33	33.33
29	WGP25 W59	91.67	20
30	WGP26 W60	94.12	33.33
31	WGP27 W61	75	17
32	WGP28 W62	100	33.33
33	WGP29A W63A	90	28.57
34	WGP29B W63B	80	17
35	WGP30 W64	84.62	20
36	WGP31 W65	100	33.33
37	WGP33B W67B	100	29
38	WGP38 W72	94.34	14.29
39	WGP41 W75	100	29
40	WGP42 W76	50	0
41	WGP43 W77	100	25
42	WGP45 W79	84.62	25
43	WGP46 W80	55.56	0
44	WGP47 W81	100	33.33
45	WGP48 W82	100	25
46	510	100	25
47	07 – 1908	100	29
48	10 – 2117	100	30
49	甘杂 1 号 Ganza 1	100	33.33
50	平甘 1 号 Pinggan 1	100	40

的代表值。

参照邹琦^[11]的方法测定:CAT 酶活性采用紫外分光光度法测定;POD 酶活性采用愈创木酚比色法测定;SOD 酶活性采用氮蓝四唑(NBT)光还原法测定;可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝 G – 250 法测定;MDA 含量采用硫代巴比妥酸(TBA)法测定。

1.5 试点气候生态条件

冬油菜种植区气候生态条件见表 2。

表 2 冬油菜种植区主要气候因子

Table 2 Major climatic and environmental factors in the planting regions for winter rapeseeds

环境因子 Environment factor	天水 Tianshui	兰州 Lanzhou
纬度 Latitude	34°33′	36°03′
海拔/m Altitude	1083.4	1517.2
年均温度/℃ Annual average temperature	10.9	6.6
最冷月均温/℃ The average lowest temperature in the coldest month	– 2.4	– 7.8
最冷月最低温度/℃ The average temperature in the coldest month	– 7	– 13.4
无霜期天数/d Free frost days	186	154
年均降雨量/mm Annual average precipitation	496.84	309.2
年均蒸发量/mm Annual evaporation	2160.86	1584.17
生育期蒸发量/mm Evaporation during growth period	1329.65	952.02

1.6 数据分析

利用 SPSS 和 EXCEL 软件进行数据分析。

2 结果与分析

2.1 不同生态条件下甘蓝型冬油菜的越冬率

越冬率能够很直观地表现出不同油菜品种的抗寒能力,是常见的测定油菜抗寒性的指标。来源不同的 50 个油菜品种在水天、兰州的越冬情况见表 1,从两试点的越冬率可以看出:所有品种在水天试点的越冬率均高于兰州试点,50 个供试材料在水天试点的越冬率达到 80%以上的品种有 25 个,只有 3 个品种的越冬率低于 30%,最低越冬率为 20%,平均越冬率为 75.02%,而在兰州试点,越冬率均在 60%以下,越冬率处于 50% ~ 57.1%的品种有 8 个,42 个品种越冬率在 50%以下,占参试品种 84%。试验结果表明,如果品种选择得当,甘蓝型冬油菜品种在水天地区完全能够安全越冬,具有良好发展潜力,但难以适宜兰州的生态条件,很难越冬。同时,试验结果也验证天水是我国甘蓝型冬油菜的分布北界。

2.2 不同生态条件下甘蓝型冬油菜的形态特征

如表 3 所示,所有参试甘蓝型冬油菜品种苗期叶片为裂叶,叶脉色为白色,叶缘形状为锯齿状,无刺毛,半直立生长,基叶叶型、叶脉色、叶缘形状、真叶刺毛、苗期生长习性 5 个形态特征在水天、兰州 2 个试点均无变化,但有些性状在不同试点发生变化。

表 3 甘蓝型冬油菜品种在不同生态区秋播后形态特征差异
Table 3 Morphological comparisons of winter rapeseed varieties (lines) in different eco-regions

性状 Morphological character		百分率 Rate/%	
		天水 Tianshui	兰州 Lanzhou
基叶叶型 Shape of basal leaf	完整叶 Entire	0	0
	裂叶 Lacerate	100	100
	花叶 Parted	0	0
叶色 Leaf color	浅绿 Light-green	100	22
	黄绿 Yellow-green	0	0
	深绿 Dark-green	0	78
	紫红 Purple	0	0
叶脉色 Leaf vein color	白色 White	100	100
	绿色 Green	0	0
	紫色 Purple	0	0
叶柄长度 Petiole length	无 None	0	0
	短 Short	0	52
	长 Long	100	48
叶缘形状 Leaf margin shape	全缘 Entire	0	0
	锯齿 Dentate	100	100
	波状 Undulate	0	0
	缺刻 Doubly dentate	0	0
叶尖形状 Leaf apex shape	圆 Round	100	98
	中等 Intermediate	0	2
	尖 Acute	0	0
侧裂叶对数 Number of cleft leaf pairs	0	2	0
	1~2	94	14
	3~4	4	84
	5~6	0	2
真叶刺毛 Sate over leaf	无 None	100	100
	少 Fewness	0	0
	多 Multispinous	0	0
苗期生长习性 Growth habit	匍匐 Grovel	0	0
	直立 Erection	0	0
	半直立 Half-erection	100	100

注:根据植株叶片与地表夹角大小判定其生长习性,≤5°为完全匍匐生长,5°~15°为匍匐生长,15°~25°为半匍匐生长,25°~60°为半直立生长,>60°为直立生长。

Note: Determine the growth habit according to the angle between leaves and the surface; ≤5° are completely prostrate; 5°~15° are prostrate; 15°~25° are semi-prostrate; 25°~60° are semi-erect; ≥60° are erect.

如天水试点的参试品种叶色均较浅,呈浅绿色,而北移至兰州后,大部分品种的叶色变深,呈深绿色;叶柄长度也发生变化,在水天试点,所有的参试品种均为长叶柄,而在兰州试点,叶柄长度变短,短叶柄的品种比例为 53.06%;侧裂叶对数的变化幅度也比较明显,天水试点的参试品种侧裂叶对数一般只有 1~2 对,比例为 93.48%,最多至 3~4 对,比例为3.26%,而北移至兰州试点后,大部分品种的侧裂叶对数增至 3~4 对,比例为 79.59%,有些参试品种的侧裂叶对数达到 5~6 对,比例为 2.04%。

2.3 不同生态条件下甘蓝型冬油菜光合特性的变化

胞间 CO₂ 浓度、蒸腾速率、气孔导度和光合速率是表征光合特性的重要指标,图 1~图 4 分别为天水 and 兰州试点油菜品种叶片的胞间 CO₂ 浓度、蒸腾速率、气孔导度和光合速率的比较。由图中可知,甘蓝型油菜由天水北移至兰州后,胞间 CO₂ 浓度和气孔导度下降,平均降幅分别为 1.54%和 60.53%,蒸腾速率显著升高,平均升幅为 44.27%,不同品种的光合速率变化存在较大差异。说明生态区的气候条件对油菜叶片的光合特性具有重要的影响,进而影响油菜的生长,随着海拔和纬度的升高,其与光合特性有关的指标发生变化。

2.4 不同生态条件下甘蓝型冬油菜酶活性变化

图 5~图 7 分别为天水 and 兰州试点不同品种冬油菜叶片中 CAT、POD、SOD 酶活性比较。由图中可知,参试品种在兰州试点的 CAT、POD、SOD 酶活性明显高于天水试点,其中以 POD 酶活性增幅最大,平均升幅为 82.59%,说明 POD 酶活性由天水北移至兰州后对当地低温气候较敏感,表现为越冬率高的品种 POD 酶活性高,越冬率低的品种 POD 酶活性低。

2.5 不同生态条件下甘蓝型冬油菜丙二醛(MDA)含量变化

由图 8 可看出,兰州试点油菜叶片的 MDA 含量显著高于天水试点。天水试点 MDA 含量最大值为 7.79 mg·g⁻¹,最小值为 3.06 mg·g⁻¹,均值为 5.10 mg·g⁻¹,兰州地区 MDA 含量最大值为 11.45 mg·g⁻¹,最小值为 4.08 mg·g⁻¹,均值为 7.59 mg·g⁻¹,分别增幅 31.96%,33.33%,48.82%,增幅较大。说明兰州地区的油菜在经历低温胁迫后其细胞受损程度高于天水地区,越冬率较低的品种 MDA 含量显著高于其他品种,表现出较低的抗寒性和较差的适应性,越冬率较高的品种 MDA 含量相对较低,表现出较高的抗寒性和较高的适应性。

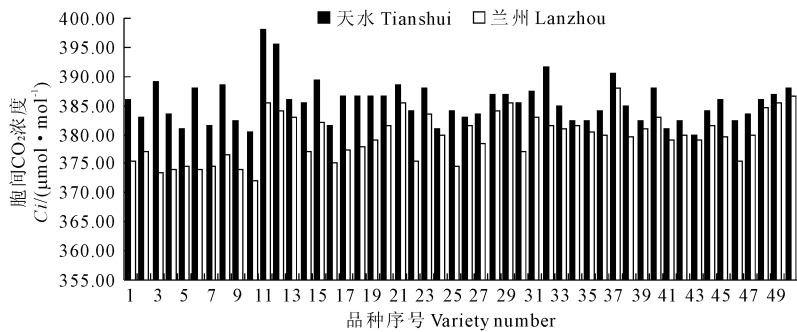


图 1 不同生态区不同甘蓝型冬油菜品种胞间 CO₂ 浓度比较

Fig.1 Changes of C_i for different cultivated winter rapeseed in different eco-regions

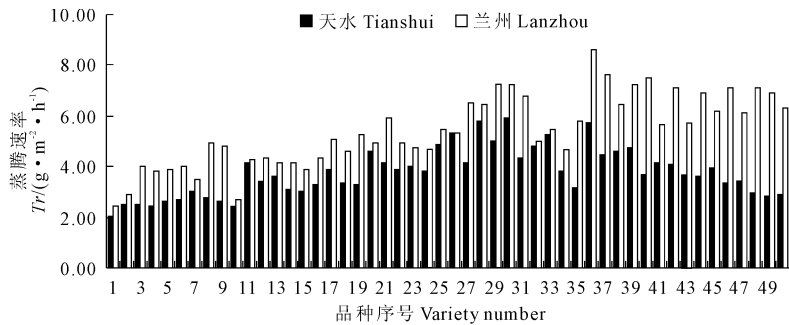


图 2 不同生态区不同甘蓝型冬油菜品种蒸腾速率比较

Fig.2 Changes of Tr for different cultivated winter rapeseed in different eco-regions

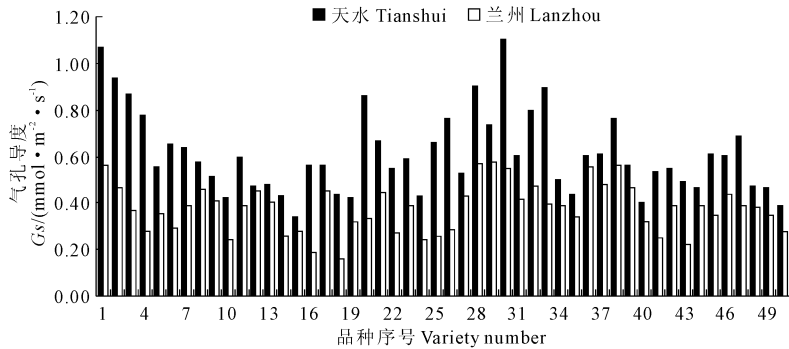


图 3 不同生态区不同甘蓝型冬油菜品种气孔导度比较

Fig.3 Changes of G_s for different cultivated winter rapeseed in different eco-regions

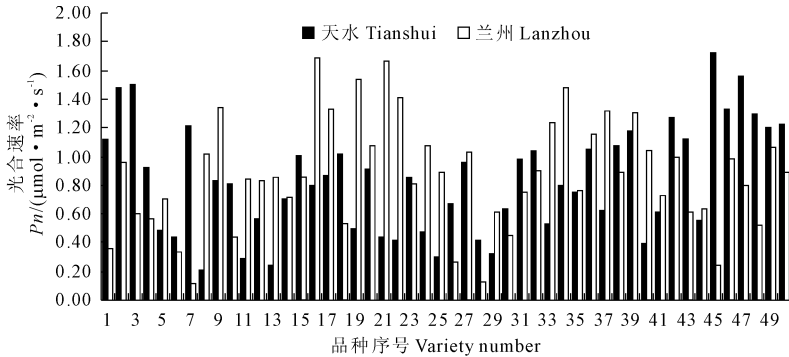


图 4 不同生态区不同甘蓝型冬油菜品种光合速率变化

Fig.4 Changes of P_n for different cultivated winter rapeseed in different eco-regions

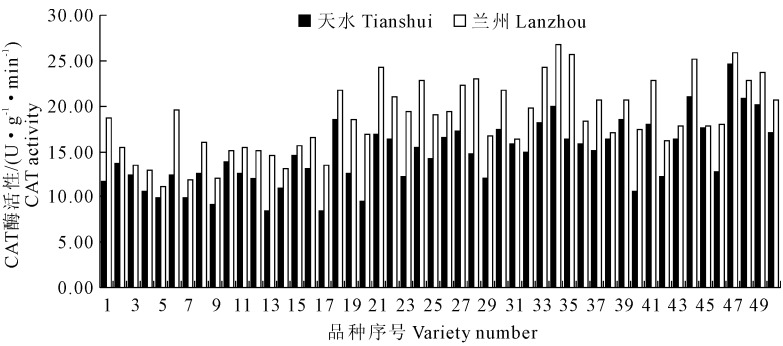


图 5 不同生态区不同甘蓝型冬油菜品种 CAT 酶活性比较

Fig.5 Changes of CAT activity for different cultivated winter rapeseed in different eco-regions

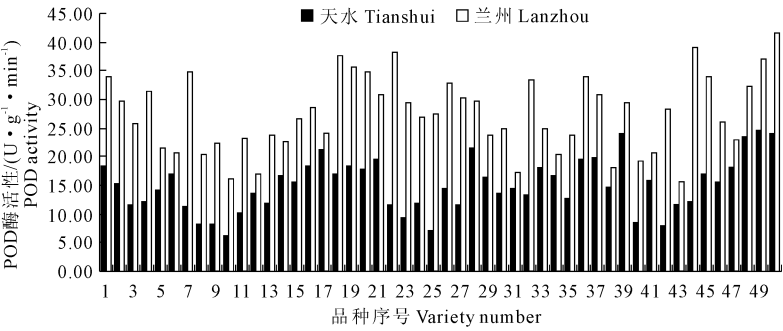


图 6 不同生态区不同甘蓝型冬油菜品种 POD 酶活性比较

Fig.6 Changes of POD activity for different cultivated winter rapeseed in different eco-regions

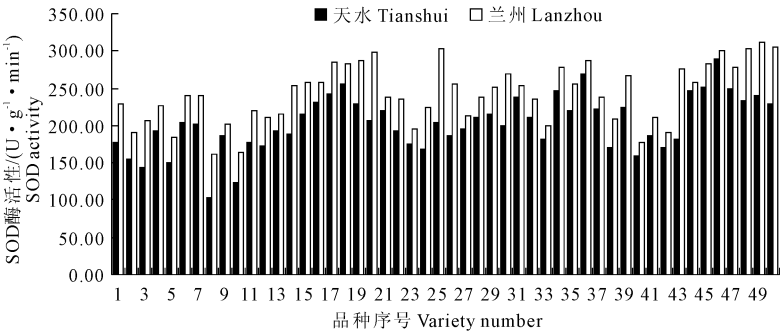


图 7 不同生态区不同甘蓝型冬油菜品种 SOD 酶活性比较

Fig.7 Changes of SOD activity for different cultivated winter rapeseed in different eco-regions

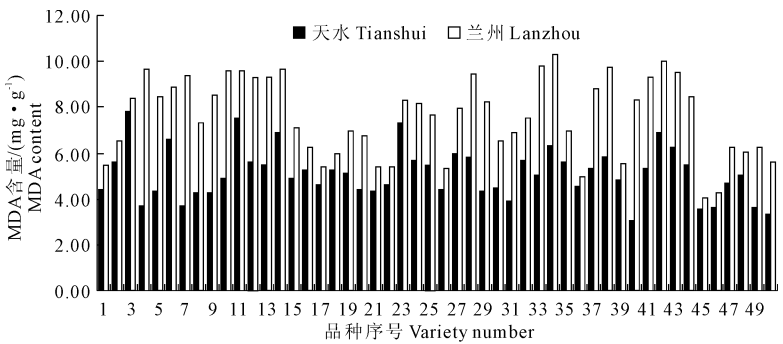


图 8 不同生态区不同甘蓝型冬油菜品种 MDA 含量比较

Fig.8 Changes of MDA content for different cultivated winter rapeseed in different eco-regions

2.6 不同生态条件下甘蓝型冬油菜可溶性蛋白 (SP)含量变化

如图 9 所示,天水试点可溶性蛋白含量最大值为 29.20 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$,最小值为 15.17 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$,均值为 22.27 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$,兰州试点可溶性蛋白含量最大值为 39.79 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$,最小值为 21.56 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$,均值为28.81

$\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$,分别增幅 36.27%,42.12%,29.37%。同天水试点比较,兰州试点的叶片可溶性蛋白含量总体升高,基本反映了田间越冬情况,表现为越冬率高的品种可溶性蛋白含量高,越冬率低的品种可溶性蛋白含量低。

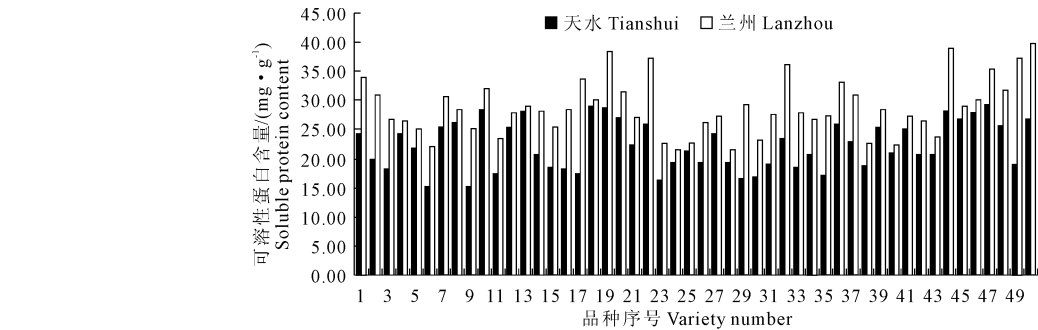


图 9 不同生态区不同甘蓝型冬油菜品种可溶性蛋白含量比较

Fig.9 Changes of soluble protein content for different cultivated winter rapeseed in different eco-regions

2.7 甘蓝型冬油菜主要生理生化性状与抗寒性的相关性分析

分别将两生态区抗寒性指标与越冬率做相关性分析,结果表明(表 4),越冬率与 POD 酶活性、可溶

性蛋白含量呈极显著正相关,与 MDA 含量呈极显著负相关,与光合速率相关性不显著。说明甘蓝型冬油菜的抗寒性与 POD 酶活性、MDA 及可溶性蛋白含量有密切关系,而与光合参数关系不明显。

表 4 甘蓝型冬油菜抗寒指标与越冬率的相关关系

Table 4 Correlation coefficients between cold-resistant characters of the tested materials

指标 Index	试点 Site	CAT	POD	SOD	MDA	SP	Ci	Tr	Gs	Pn
越冬率	天水 Tianshui	0.177	0.463 * *	0.267	- 0.334 *	0.578 * *	- 0.048	- 0.097	0.089	0.259
Wintering Rate	兰州 Lanzhou	0.169	0.572 * *	0.236	- 0.438 * *	0.687 * *	0.075	0.053	0.203	0.092

注: * 在 0.05 水平(双侧)上显著相关, * * 在 0.01(双侧)上显著相关。
Note: *, values are significant at $P<0.05$ level; *, values are significant at $P<0.01$ level.

3 讨 论

3.1 不同生态条件下甘蓝型冬油菜的适应性

关于甘蓝型冬油菜的分布区与适应性前人已有研究。甘蓝型油菜原产欧洲,后来逐渐扩展到亚洲及其他各地。我国的甘蓝型油菜首先是由原浙江大学 的孙逢吉教授 1943 年从日本引进,后来推广到全国。如我国西北甘蓝型冬油菜边缘地区陕西,1949 年前种植油菜品种多属白菜型冬油菜。1955 年汉中地区农业科学研究所由四川引入抗病、丰产的甘蓝型的胜利油菜。1992—1994 年,陕西省实施了甘蓝型油菜北移计划,通过以品种为突破口,选用抗寒、抗旱、高产优质的甘蓝型油菜新品种,再配合沟播、培土冬苫和施用多效唑化控的越冬保苗措施,较好地解决了甘蓝型油菜在渭北的安全越冬问题,将甘蓝型油菜从关中灌区引种到渭北旱原,甘蓝型油

菜种植区域向北推进约半个纬度,海拔提高 400 m 左右,明确了甘蓝型油菜的适宜北界是北纬 35°,海拔 1 100 m 左右、冬季负积温 200℃ 以下的地区。1994、2000 年,王栓全、王晨光等分别在陕西甘蓝型冬油菜北移的基础上,提出甘蓝型油菜再次北移的问题^[12-13],拟将甘蓝型油菜的种植区域继续向北推移至崂山以南、北纬 36°左右的广大地区。通过几代人的努力,甘蓝型冬油菜已经成功引入渭北,并逐步发展到甘肃天水、山西南部^[13-14]。我国淮河以北地区 50 年代种植白菜型冬油菜,但白菜型冬油菜抗病性差,产量低。20 世纪 70 年代以后淮北开始发展甘蓝型油菜,使冬油菜适宜栽培区约向北推移 200 多千米^[15]。本研究表明,甘蓝型冬油菜的抗寒性与适应性品种间存在显著差异,甘蓝型冬油菜由天水北移至兰州后,由于主要气候生态条件的变化,越冬率、生育时期、植物学性状及生理生化性状发生

了较大变化,最显著的是越冬率大幅度降低,所有参试品种在天水试点的越冬率全部高于兰州试点,平均越冬率为 75.02%,而在兰州试点,甘蓝型冬油菜难以适应当地生态条件,很难越冬,绝大部分品种越冬率均在 60% 以下,下一步,可以尝试从越冬率较高的品种中进行选择,提高甘蓝型油菜的越冬率,实现甘蓝型冬油菜的进一步北移。试验结果也验证天水是我国甘蓝型冬油菜的分布北界。

3.2 不同生态条件下甘蓝型冬油菜植物学特性的变化

植物的抗寒性与其生物学特征及生长发育和营养物质的积累水平有直接关系。早在 1951 年,Smith 就发现具有短而匍匐枝条的植物品种较直立高大的品种更能抵抗冬季寒冷伤害。前人观察提出,油菜品种的抗寒性与苗期生长习性、叶色深浅、叶片薄厚有关,苗期生长匍匐、叶色较深、叶片较厚的品种抗寒性较强,反之则弱。宋良图^[16]研究发现,不同甘蓝型油菜品种中,抗寒性弱的品种冬前叶色淡绿,叶柄长,植株直立生长,抗寒性好的品种冬前叶色深绿微带紫红色,叶柄短,植株矮小,生长习性匍匐型;孙万仓^[17]等在对白菜型冬油菜品种抗寒性研究中发现,抗寒性强的品种冬前匍匐生长、叶色浓绿,叶脉微紫,叶片数偏少,抗寒性弱的品种冬前苗直立生长,叶色绿色或黄绿,并得出冬壮苗的标准是叶柄短、脚茎矮、叶片厚实、叶色深绿。本试验中,所有参试甘蓝型油菜在苗期均为半直立生长,在不同生态区的对比试验中并没有出现明显变化,而叶色兰州较之天水颜色变深,叶柄变短,以适应更寒冷的气候环境,验证了上述结论;同时还发现,有 80% 的品种其侧裂叶对数,兰州较之天水明显增多,由天水的 1~2 对增至兰州的 3~4 对。

3.3 不同生态条件下甘蓝型冬油菜光合特性的变化

作物通过光合作用形成有机质,光合作用也是作物受低温影响最明显的生理过程之一。冬油菜整个生育期要经历较长时期的低温环境,冬前低温阶段利用有限的光热资源进行光合积累,可为越冬期根部抵御冬季严寒安全越冬以及翌年返青期进行地上部营养体迅速重建提供充足的有机物积累和物质基础。因此抗寒性强弱与光合能力的大小有较大的相关性,植物净光合速率越高,其抗寒性也越强^[18]。刘自刚等^[19]研究发现,白菜型冬油菜北移后,冬前低温阶段其气孔导度、胞间 CO_2 浓度下降,蒸腾速率升高,而品种间的光合速率差异明显,表现为抗寒性

弱的品种光合速率低,抗寒性强的品种光合速率高,并认为,气孔限制是北移区油菜品种冬前降温阶段光合速率下降的原因之一。本试验中,油菜北移后气孔导度和胞间 CO_2 浓度下降,蒸腾速率显著升高,而光合速率变化在不同品种间差异较大。与原种植区(天水)相比,兰州地区降温早,冬前生长期中低温阶段相对较长,甘蓝型冬油菜北移后,如何有效利用冬前低温阶段光热资源进行光合有机物的合成和积累,对冬油菜在环境更为恶劣的北方旱寒区安全越冬和翌年返青后营养体重建具有重要意义。

3.4 不同生态条件下甘蓝型冬油菜生理生化特性的变化

甘蓝型油菜抗寒性的季节变化分为抗寒性锻炼、抗寒性保持和抗寒性消解 3 个阶段,在抗寒性保持阶段,不同品种抗寒能力差异显著,在此期间进行品种抗寒性鉴定及各项指标测定结果较可靠^[20-21]。研究表明,植物遭受低温胁迫时,通过 SOD、POD、CAT 等保护性酶来清除体内自由基与活性氧等有害物质,减轻伤害^[22-23];低温胁迫下会引起植物膜脂过氧化,从而导致冷伤害^[24],这种伤害最明显的变化之一就是积累了大量的膜脂过氧化产物(MDA),因而 MDA 的产生量成了鉴别和了解逆境胁迫对生物膜危害程度的重要指标之一^[25];同时,在植物低温锻炼期间,抗寒性强的品种通过产生更多的可溶性蛋白来减少细胞失水,从而削弱低温对细胞造成的伤害^[26],低温逆境中,高含量的可溶性蛋白增加了细胞液浓度,对提高植株的抗寒性有重要作用,因此,在低温胁迫下,可溶性蛋白含量越高,植株抗寒性越强,越冬率越高^[27]。本试验在上述理论的基础上,对 50 个甘蓝型冬油菜品种进行了不同生态区抗寒性比较试验,在抗寒性保持阶段(兰州和天水地区为 10 月中下旬),测定了叶片 CAT、POD、SOD 酶活性、可溶性蛋白及 MDA 含量。对参试的 50 个甘蓝型冬油菜品种研究表明,冬油菜由天水移至兰州后,CAT、POD、SOD 酶活性、MDA 和可溶性蛋白含量都有所升高,其中 POD 酶活性和 MDA 含量升高幅度较大;相关性分析表明,两地的越冬率与 POD 酶活性和可溶性蛋白含量呈极显著正相关,而与 MDA 含量呈极显著负相关,抗寒性高的品种 POD 和可溶性蛋白含量较高,MDA 含量较低。在筛选抗寒性较强的材料时,可将 POD 酶活性、MDA 和可溶性蛋白含量作为重要参考指标。

4 结 论

本研究在兰州和天水两个生态区对 50 个甘蓝型冬油菜进行秋播试验,对冬油菜的植物学特征、生长习性、生理生化特性等方面进行研究,结果显示,由天水北移至兰州后,越冬率大幅下降,证明天水是我国冬油菜分布北界;油菜生物学形态特征发生变化,叶色加深,叶柄变短,侧裂叶对数增多;胞间 CO₂ 浓度和气孔导度下降,蒸腾速率显著升高,不同品种的光合速率变化存在较大差异;相关保护酶活性、MDA 和可溶性蛋白含量升高,并与抗寒性存在极显著相关关系。

参 考 文 献:

[1] 孙万仓,马卫国,雷建民,等.冬油菜在西北旱寒区的适应性和北移的可能性研究[J].中国农业科学,2007,40(12):2716-2726.

[2] Sovero M. Rapeseed, a new oilseed crop for the United States[C]// Janick J, Simon J E. New Crops. New York: John and Wiley Sons, Inc., 1993, 302-307.

[3] 王栓全,刘冬梅.甘蓝型油菜北移栽培技术[J].作物杂志,1995,1:20-21.

[4] 蒲媛媛,孙万仓.白菜型冬油菜抗寒性与生理生化特性关系[J].分子植物育种,2010,8(2):335-339.

[5] 王学芳.我国西北白菜型和甘蓝型冬油菜品种抗寒性研究[D].兰州:甘肃农业大学,2009.

[6] 张腾国,王圆圆,王 娟,等.油菜 BnMKK2 基因的克隆及表达分析[J].植物研究,2012,32:578-583.

[7] 张腾国,王 宁,王 娟,等.油菜 BnMKK4 全长基因的克隆及表达分析[J].植物生理学报,2012,48(5):491-498.

[8] 贾凌云,张腾国,王 娟,等.陇油 6 号油菜 BnMPK6 基因启动子分离及序列分析[J].西北师范大学学报(自然科学版),2012,48(2):86-90.

[9] 张腾国,王 娟,王圆圆,等.油菜 BnHMG2 基因的克隆及表达分析[J].植物研究,2012,32:724-730.

[10] 伍晓明,陈碧云,陆光远,等.油菜种质资源描述规范和数据标准[M].北京:中国农业出版社,2007.

[11] 邹 琦.植物生理学实验指导[M].北京:中国农业出版社,

2000.

[12] 王晨光,李思训.陕西省甘蓝型油菜再次北移的探讨[J].陕西农业科学(自然科学版),2000,3:32-33,46.

[13] 王栓全,刘冬梅.甘蓝型油菜北移的栽培技术[J].干旱地区农业研究,1994,12(3):74-78.

[14] 关温瑞.甘蓝型油菜北移晋南[J].山西农业,1994,(7):1-2.

[15] 朱维民.江淮地区冬季气候变化对油菜、柑桔、小麦生产的影响[J].中国农业气象,1995,16(6):28-31.

[16] 宋良图.甘蓝型油菜抗寒性的形态生理学研究[J].安徽农业科学,1995,16(6):28-31.

[17] 孙万仓,武军艳,曾 军,等.8 个白菜型冬油菜品种抗寒性的初步评价[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2007,13:153-155.

[18] 骆耀平,吴 珊,康孟利.二年生嫁接茶树的冬季光合特性与抗寒性[J].浙江大学学报(农业与生命科学版),2002,28(4):397-400.

[19] 刘自刚,张长生,孙万仓,等.不同生态区冬前低温下白菜型冬油菜不同抗寒品种(系)比较[J].作物学报,2014,40(2):346-354.

[20] 胡胜武,黄继英,徐爱遐,等.甘蓝型油菜抗寒性与某些渗透物质的关系[J].西北农业学报,1994,3(1):24-28.

[21] 严远鑫,刘友良.油菜抗冻性的季节变化和多效唑处理的效应[J].南京农业大学学报,1990,13(4):25-29.

[22] Bowley S R, McKersie B D. Relationships among freezing, low temperature flooding, and ice encasement tolerance in alfalfa[J]. Can J Plant Sci, 1990,70:227-235.

[23] Droillard M J, Paulin A, Massot J C. Free radical production, catalase and superoxide dismutase activities and membrane integrity during senescence of petals of cut carnations (*Dianthus caryophyllus*) [J]. Physiol Plant, 1987,71(2):197-202.

[24] Wise R R, Naylor A W. Chilling-enhanced photooxidation. Evidence for the role of singlet oxygen and super-oxide in the breakdown of pigments and endogenous antioxidants[J]. Plant Physiol, 1987,83(2):278-282.

[25] 王仕林,黄辉跃,唐 建,等.低温胁迫对油菜幼苗丙二醛含量的影响[J].湖北农业科学,2012,10(20):4467-4469.

[26] 蒲媛媛.白菜型冬油菜抗寒性的生理特性与蛋白质组学的电泳分析[D].兰州:甘肃农业大学,2010.

[27] 张俊杰,孙万仓,等.北方旱寒区冬油菜适宜群体的生长发育特性及生理生化基础[J].西北农业学报,2011,20(8):82-88.