

北方旱寒区冬油菜根系抗寒指标分析

武军艳¹, 方彦¹, 张鹏飞², 杨月蓉¹, 孙万仓¹, 刘自刚¹, 李学才¹

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

2. 内蒙古鄂托克旗农业技术推广站, 内蒙古 鄂托克旗 016100)

摘要: 为了研究北方旱寒区冬油菜根部生理特性与其抗寒性的相关性, 对 6 个不同抗寒性冬油菜品种整个生育期根部的干物质积累、含水量、可溶性蛋白含量及相关保护性酶活性的变化进行了分析, 并将各指标与越冬率进行了相关性分析, 用与越冬率相关性显著、极显著的 6 个指标对冬油菜进行聚类分析。结果表明, 降温前, 各指标与越冬率的相关性均不显著; 降温后, 越冬率与可溶性蛋白含量、SOD 活性极显著正相关, 与 POD、APX 活性显著正相关, 与根直径、根冠比、CAT 活性正相关, 与根含水量负相关; 根据聚类分析结果, 可将试验材料分为 3 类, 第 1 类: 07-G01, 天油 2 号, 天油 4 号, 此类抗寒性弱, 为耐寒性品种; 第 2 类: 上党, 74-1, 此类抗寒性一般, 为中抗寒性品种; 第 3 类: 陇油 6 号, 此类抗寒性强, 为强抗寒性品种。由此推断, 在北方旱寒区, 冬油菜越冬前根直径大、根冠比高、根含水量低有利于冬油菜安全越冬; 降温后, 冬油菜可溶性蛋白、SOD、POD、CAT 和 APX 酶活性值越高, 其抗寒性越强。

关键词: 白菜型冬油菜; 抗寒性; 根系; 干物质; 可溶性蛋白; 酶活性; 北方旱寒区

中图分类号: S565.4; S332.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2014)06-0250-06

Analysis of cold-tolerant characters of winter rape roots in northern arid-cold area

WU Jun-yan¹, FANG Yan¹, ZHANG Peng-fei², YANG Yue-rong¹, SUN Wan-cang¹, LIU Zi-gang¹, LI Xue-cai¹

(1. College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Gansu Key Lab of Crop Improvement and Germplasm Enhancement;

Gansu Provincial Key Laboratory of Aridland Crop Science, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2. Etuoke Banner Agricultural Technique Extension Station, Etuoke, Inner Mongolia 016100, China)

Abstract: To study the relationship between the cold tolerance and the physiological characters of winter rape root, an experiment was conducted to analyze the changes of the dry matter, the water content, the soluble protein and the enzymatic activity of the roots of six different cold-tolerant cultivars. It also analyzed the correlation between the winter survival rate and other indexes, and used six significant indexes to get the cluster analysis of the materials. The results showed that, before cooling, the correlation was not significant between winter survival rate and other indexes; but after cooling, the survival rate was most significantly positively correlated with soluble protein and SOD, significantly positively correlated with POD and APX, positively correlated with diameter of roots, root-shoot ratio and CAT activity, while negatively correlated with water content. According to the cluster analysis results, the test materials can be divided into three categories, 1: 07-G01, Tianyou 2 and Tianyou 4, weak cold-tolerant varieties; 2: Shangdang and 74-1, general cold-tolerant varieties; 3: Longyou 6, strong cold-tolerant varieties. So it can be deduced that the bigger the diameter and root-shoot ratio, the higher the winter survival rate; and the higher the SOD, POD, CAT and APX enzymatic activity, the stronger the cold tolerance of the winter rape.

Keywords: winter rape; cold tolerance; root; dry matter; soluble protein; enzymatic activity; northern arid-cold area

收稿日期: 2014-04-24

基金项目: 农业部公益性行业(农业)科研专项经费项目(200903002-04); 国家高技术研究发展计划项目(863 计划)(2011AA10A104); 农业部产业技术体系建设资金项目(CARS-13)

作者简介: 武军艳(1981—), 女, 讲师, 硕士, 主要从事油菜的育种工作。E-mail: wujuny@gsau.edu.cn

通信作者: 孙万仓(1957—), 男, 教授, 博士, 主要从事油菜的育种工作。E-mail: 18293121851@163.com

油菜为十字花科植物,可作为油料、饲料及蔬菜作物加以利用,是我国种植面积最大的油料作物^[1]。我国西部的高海拔地区、北部的高纬度地区以及沿长城两侧的一些冬有严寒、夏有酷暑的二熟复种地区原属春油菜栽培区域,气候变化和白菜型冬油菜新品种的成功选育使得该区现已发展为冬油菜新的栽培区^[2-8]。在冬油菜原栽培区,冬油菜越冬期植株地上部分正常生长不抽薹,叶片为绿色;而在北方冬油菜新产区,冬油菜进入越冬期后叶片逐渐干枯,仅存根系在土壤中,返青后,地上部分重新生长发育。王学芳等^[9-10]研究表明冬油菜的枯叶能为地表形成很好的覆盖保护,其抗风蚀效果比冬小麦、免耕麦茬及春播都好,可有效减少浮沉、扬沙。然而,在我国北方旱寒区,冬油菜能否安全越冬是影响其种植的主要因素,选育强抗寒性品种是方法之一。

孙万仓等^[11]、张俊杰等^[12]的研究表明,北方冬油菜的抗寒性与其根系的生长发育情况密切相关。本研究用不同抗寒类型的北方冬油菜品种为材料,研究冬油菜整个生育期根系的干物质积累分配、可溶性蛋白含量及保护性酶活性的变化情况,了解北方冬油菜整个生育期根系生长发育情况及在干旱低温条件下冬油菜根部的响应机制,为北方冬油菜新品种选育及栽培提供理论依据,对北方冬油菜抗寒性育种及种质资源创新具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 试验材料

所有试验材料均由甘肃农业大学提供,各试验材料越冬率数据为近5年在北方15个试验点的平均值。

表1 试验材料

Table 1 The experimental materials

品种 Cultivars	选育单位 Breeding units	抗寒性 Cold resistance	平均越冬率/% Over wintering rate
陇油6号 Longyou 6	甘肃农业大学 Gansu Agricultural University	强 Strong	95
74-1	陕西省农业科学院 Shaanxi Academy of Agricultural Sciences	中 Good	86
上党 Shangdang	山西省农业科学院 Shanxi Academy of Agricultural Sciences	中 Good	84
天油4号 Tianyou 4	甘肃天水市农业科学研究所 Tianshui Institute of Agriculture Sciences	弱 Weak	62
天油2号 Tianyou 2	甘肃天水市农业科学研究所 Tianshui Institute of Agriculture Sciences	弱 Weak	63
07-G01	甘肃农业大学 Gansu Agricultural University	弱 Weak	64

注:越冬率为2009年甘肃永登地区统计结果。

Note: The data of over wintering rate come from 2009 statistics of Yongdeng region in Gansu.

1.2 试验设计

试验于2009年8月至2010年5月在甘肃永登县秦王川甘肃农业大学试验基地进行。试验材料于

8月20日播种,播种方式为点播,行距20 cm,株距10 cm。8月28日出苗,9月10日长出第一片真叶。于10月8日五叶期开始取样。

表2 取样日期对应气温表

Table 2 The air temperature of the sampling date

日期(月-日) Date(m-d)	10-08	10-17	10-31	11-15	01-18	03-03	03-19	04-07	04-24	05-13	05-22
气温/°C Temperature	14~20	8~17	-2~12	-10~-4	-9~-4	-4~8	2~16	6~18	8~26	14~26	15~28

1.3 试验方法

1.3.1 冬油菜干物质测定 在整个生育期不同时期取样,每次3个重复,测定干物质积累量。在尽量不损失根系的情况下将植株挖出,用水冲洗干净,从子叶节处切开,分别烘干、称重。计算植株含水量、干物质积累量与根冠比。根直径测量用游标卡尺对冬油菜根颈处进行测量;组织含水量=(鲜重-干重)/鲜重×100%;根冠比=地下部分/地上部分=根干重/(植株干重-根干重)^[13]。

1.3.2 生理生化指标测定 采用考马斯亮蓝法测定可溶性蛋白含量^[13],用氮蓝四唑法测定超氧化物歧化酶(SOD)活性^[13],愈创木酚法测定过氧化物酶(POD)活性^[13],用H₂O₂法测定抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性^[14-15],用H₂O₂法测定过氧化氢酶(CAT)活性^[13],每个指标重复测定3次。

1.3.3 数据处理 试验数据图表主要采用Excel制作完成,相关性分析采用SPSS软件完成,显著差异性分析及聚类分析采用DPS软件完成。

2 结果分析

2.1 冬油菜根直径的变化

冬油菜在整个生育期中根直径的变化呈较平滑的“M”形(图 1)。从播种到 10 月 31 日,根直径逐渐增加,之后逐渐减小,返青后再次增加,4 月 24 日后逐渐减小。越冬期间,油菜根直径增长比较缓慢,基本处于休眠状态,可能是由于此时根组织内开始结冰而导致。

10 月 31 日气温开始降低后,各品种根直径有少量减少,且品种间有显著差异($P < 0.05$);11 月 15 日温度最低时,陇油 6 号、上党、74-1 和 07-G01 根直径较大,天油 4 号和天油 2 号较小。返青后各品种根直径均增加,至 4 月 7 日陇油 6 号、上党、74-1 和 07-G01 根直径逐渐减小,而天油 4 号和天油 2 号至 5 月 13 日逐渐减少。由此推断,强抗寒性品种越冬前其根直径较大,可以存储较多的营养物质;生育期后期,强抗寒性品种根系较早停止生长。

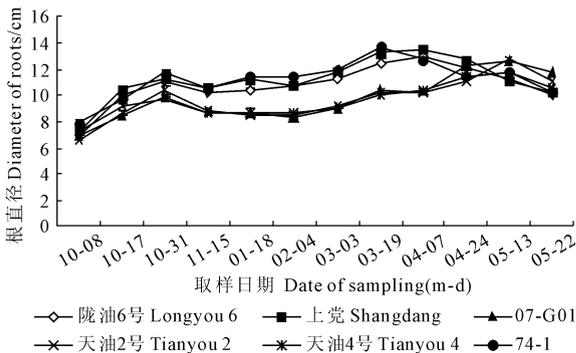


图 1 冬油菜根直径变化情况

Fig.1 Changes of diameter of winter rape roots

2.2 冬油菜根冠比变化

越冬前,冬油菜根冠比逐渐增大,干物质主要向地下部分积累;越冬期间地上部分逐渐干枯,营养物质全部集中在地下部分;越冬后,地上部分返青,根冠比快速减小,地上部分干物质快速积累。陇油 6 号越冬前根冠比增长速度最快,74-1 次之,并与上党、天油 2 号、天油 4 号及 07-G01 达到极显著水平($P < 0.01$)。返青后,陇油 6 号和 74-1 根冠比下降较快,地上部分干物质积累量明显高于其它品种,并达到极显著水平($P < 0.01$)(图 2)。

2.3 冬油菜根部含水量的变化

冬油菜根部含水量在整个生育期呈先降低后增加再降低的趋势,不同品种间含水量差异不显著(图 3)。各品种进入越冬期后,含水量逐渐降低,可能因为此时组织内结冰,温度回升后,冰晶融化,组织恢复正常,含水量逐渐升高。

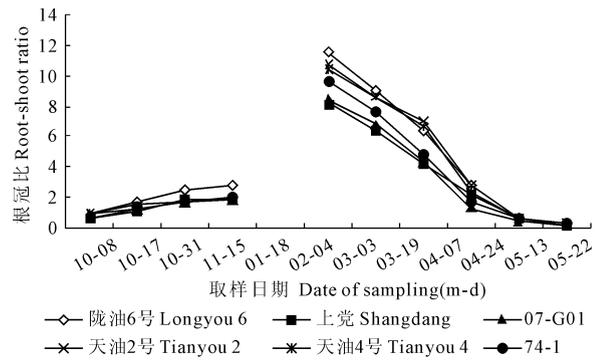


图 2 冬油菜根冠比变化情况

Fig.2 Changes of root-shoot ratio of winter rape

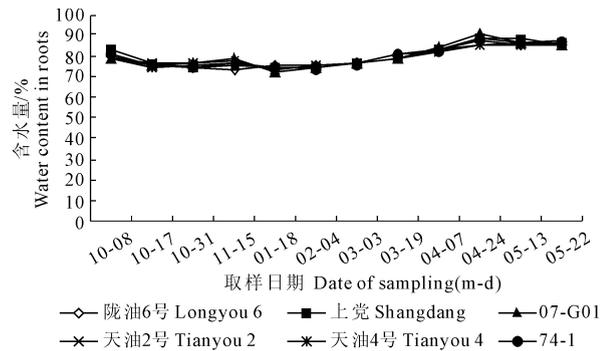


图 3 冬油菜根部含水量变化情况

Fig.3 Changes of water content in winter rape roots

2.4 冬油菜可溶性蛋白含量的变化

越冬前,根部可溶性蛋白含量逐渐增加,10 月 31 日达到最大值后开始下降,返青后 1 月 18 日重新开始增加(图 4)。不同品种间可溶性蛋白含量变化不同。越冬前,陇油 6 号、74-1 和上党可溶性蛋白含量增加较快,至 10 月 31 日陇油 6 号值最高。越冬期间,不同品种蛋白含量下降程度不同,陇油 6 号、74-1 和上党下降较缓慢,含量相对较高,各品种间达到极显著水平($P < 0.01$)。返青后,蛋白含量迅速增加,陇油 6 号增加最快。

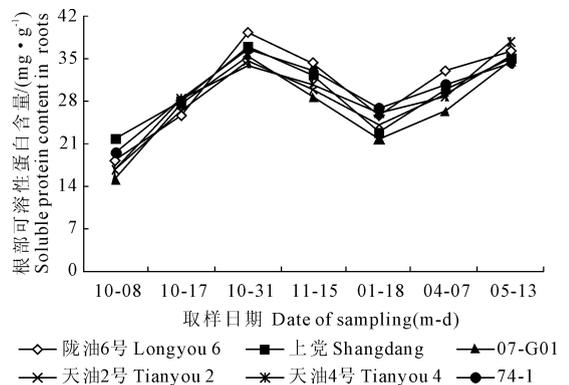


图 4 冬油菜根部可溶性蛋白含量变化情况

Fig.4 Changes of soluble protein content in winter rape roots

2.5 冬油菜保护性酶活性变化

2.5.1 冬油菜 SOD、POD、APX 活性变化 冬油菜整个生育期 SOD、POD、APX 活性变化趋势相似。越冬前各酶活性呈递增趋势(图 5~图 7),到 11 月 15 日开始降低,返青期 1 月 18 日开始增加,4 月 7 日后少量降低。越冬前,陇油 6 号、74-1 和上党酶活性增加较快;至 11 月 15 日陇油 6 号活性值最高,上党次之,天油 2 号和 07-G01 的值最小,各品种差异达到极显著水平($P < 0.01$)。越冬期间,冬油菜组织内结冰,酶活性下降,陇油 6 号比其它品种较高,各品种差异达到极显著水平($P < 0.01$)。返青后,陇油 6 号和 74-1 活性迅速增加,上党次之。于 5 月 13 日时品种间无太大差异趋于稳定。

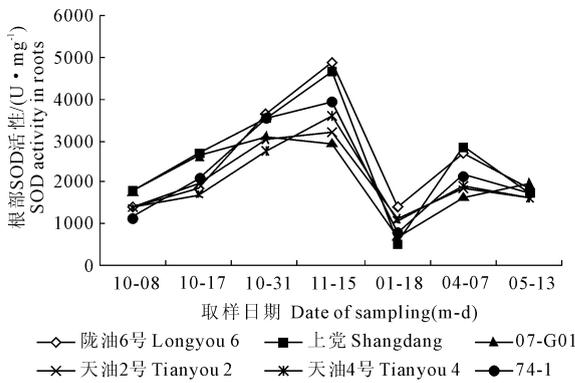


图 5 冬油菜根部 SOD 含量变化情况

Fig.5 Changes of SOD activity in winter rape roots

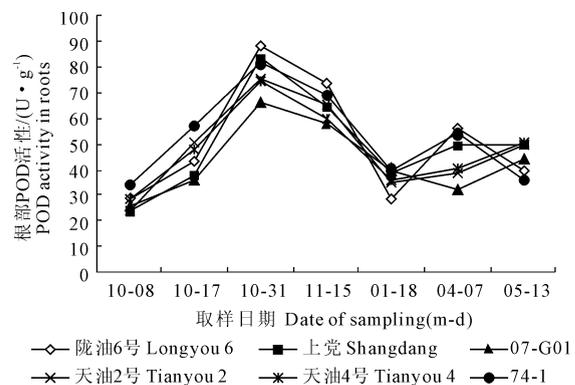


图 6 冬油菜根部 POD 含量变化情况

Fig.6 Changes of POD activity in winter rape roots

2.5.2 冬油菜 CAT 活性的变化 10 月 17 日前,各品种 CAT 活性都增加,之后开始下降,10 月 31 日后重新增加,11 月 15 日下降;返青后 CAT 活性逐渐增加(图 8)。10 月 17 日后,各品种 CAT 活性开始下降,其中 07-G01、天油 2 号和天油 4 号下降速度最快,陇油 6 号、上党和 74-1 下降较缓慢;10 月 31 日

后陇油 6 号 CAT 活性继续下降,其它品种则出现增加趋势,各品种达到极显著水平($P < 0.01$),至 11 月 15 日后各品种均大幅度下降。

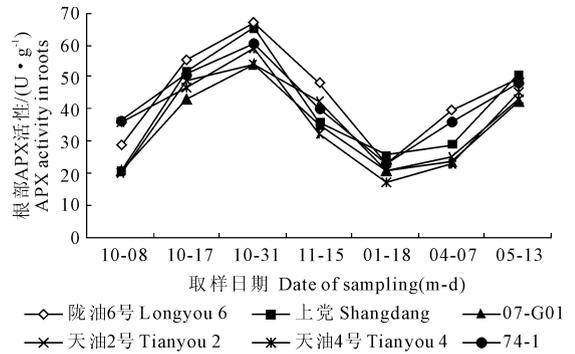


图 7 冬油菜根部 APX 含量变化情况

Fig.7 Changes of APX content in winter rape roots

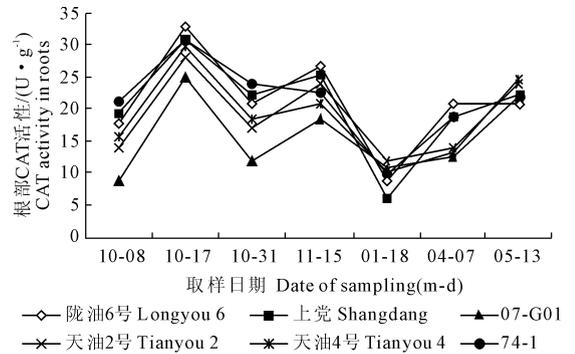


图 8 冬油菜根部 CAT 含量变化情况

Fig.8 Changes of CAT content in winter rape roots

2.6 越冬率与各指标之间的相关性分析

相关性分析表明,10 月 31 日前,各指标与越冬率的相关性都不显著,10 月 31 日降温后,越冬率与可溶性蛋白含量、SOD 活性极显著相关,与 POD、APX 活性显著相关,与根直径、根冠比、CAT 活性呈正相关性,与根含水量呈负相关性。11 月 15 日,越冬率与根直径、可溶性蛋白、SOD、POD 活性呈显著正相关性,与根含水量呈显著负相关性,与根冠比、CAT、APX 活性呈正相关性。返青后,除 1 月 18 日,根含水量与越冬率显著相关,其余指标相关性均不显著。由此推断,冬油菜越冬前根直径大,根冠比大,根含水量低,抗寒性强;根部可溶性蛋白含量高, SOD、POD、CAT、APX 活性强,抗寒性强。

2.7 试验材料聚类分析

依据相关性分析结果,利用越冬前与越冬率相关性显著、极显著的 6 个指标,对不同油菜品种进行抗寒性分类,共分为 3 类(图 9)。第 1 类:07-G01,

天油 2 号,天油 4 号,此类抗寒性弱,为耐寒性品种;
第 2 类:上党,74-1,此类抗寒性一般,为中抗寒性
品种;第 3 类:陇油 6 号,此类抗寒性强,为强抗寒性

品种。利用聚类分析对 6 个冬油菜品种进行简单分
类,结果与田间越冬率统计所得结果一致。

表 3 越冬率与各指标之间的相关性分析

Table 3 Analysis of correlation between winter survival rate and other indexes

日期(月-日) Date(m-d)	根直径 Root diameter	根冠比 Root-shoot ratio	根含水量 Water content in roots	可溶性蛋白 Soluble protein	SOD	POD	CAT	APX
10-08	0.352	-0.163	0.491	0.590	-0.113	0.348	0.618	0.225
10-17	0.751	0.618	0.289	-0.300	0.073	-0.061	0.708	0.789
10-31	0.774	0.794	-0.756	0.967**	0.926**	0.814*	0.618	0.834*
11-15	0.860*	0.732	-0.882*	0.874*	0.844*	0.810*	0.625	0.612
01-18	0.799		0.904*	0.258	0.097	-0.392	-0.623	0.738
04-07	0.796	-0.289	-0.177	0.779	0.786	0.769	0.730	0.738
05-13	-0.723	-0.029	0.204	-0.172	0.453	-0.688	-0.803	0.801

注:*,在 0.05 水平上显著相关;**,在 0.01 水平上显著相关。

Note: * means significant at 0.05 level; ** means significant at 0.01 level.

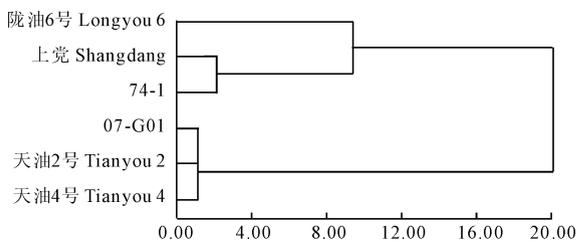


图 9 聚类分析结果

Fig.9 Hierarchical cluster result

3 结论与讨论

3.1 低温胁迫下的冬油菜根系干物质分配的变化

北方冬油菜在越冬前根冠比、根直径都呈增加趋势,并随着温度的逐渐降低,增加速度变慢。不同抗寒性品种变化不同,抗寒性强的品种在冬前较低温度条件下根直径较大,根冠比较高,有利于其积累大量干物质,为后期生殖生长奠定基础。因此高根茎值、高根冠比是保证根系干物质积累量的前提,只有提高冬油菜根冠比、根直径,防止植株徒长,才会保持较高的越冬率。姜丽娜等^[16]的研究结果表明,低温后幼苗干物质积累受到抑制,此结果与本研究一致。冬油菜进入越冬期,根直径停止生长并有少量减小,可能是由于此时根组织内开始结冰而导致。

3.2 低温胁迫对冬油菜根部含水量的影响

很多研究报道^[17-20],低温胁迫后组织相对含水量逐渐降低,与植物的抗寒性呈正相关性,此结果与本研究相关性分析结果一致。本研究结果表明,冬油菜随着温度的降低根组织含水量逐渐减少,不同抗寒品种的根组织含水量变化不同,但均未达到显著差异水平,可能因为植物鲜重常随时间及处理

条件而变化。相关性分析表明,越冬前根含水量与越冬率呈显著负相关性,返青后与越冬率呈显著正相关性;可推断冬油菜越冬前根含水量越低抗寒性越强,而强抗寒性的品种返青后根含水量高,恢复生长较快。

3.3 低温与可溶性蛋白质含量的关系

大量研究表明,植物在低温胁迫下可溶性蛋白含量会增加,有利于提高抗寒性^[21-25]。此结果与本研究一致。因此可推断,可溶性蛋白质含量的升高可能是有新的蛋白质合成,它们对植物的耐寒性及对低温的敏感性起着重要作用。本研究结果表明,北方冬油菜进入越冬期后,可溶性蛋白含量逐渐降低,可能是此时组织内部结冰的原因;抗寒性强的冬油菜品种其含量降低较缓慢,含量相对较高,返青后,抗寒性强的品种其含量增加较快。可见,植物在低温胁迫过程中,可溶性蛋白起着重要的作用。

3.4 低温胁迫对冬油菜保护酶系统的影响

大量报道表明,植物的抗寒性与其细胞内抗氧化酶活性有关,抗寒性强的植物抗氧化能力比抗寒性弱的植物强^[26-34]。本实验结果表明,低温胁迫下冬油菜根部诱发 SOD、POD、CAT 和 APX 酶活性上升,可能是由于冬油菜根部对低温胁迫因子的一种保护性应激反应,能够有效降解因低温胁迫而产生的有害代谢物,从而防止膜系统受到损伤。但随着低温胁迫时间的持续,保护酶活性表现为下降的趋势,可能由于冬油菜体内积累了相对过量的活性氧,使活性氧的动态平衡遭到了破坏,因而加剧了膜脂过氧化作用。抗寒性强的冬油菜品种通过低温胁迫能够较快地适应,保护酶活性快速变化且其酶活

性相对较高,返青后,酶活性增加较快。

总之,冬油菜在越冬前根直径大,根冠比高,根含水量低,可溶性蛋白含量高,SOD、POD、CAT、APX活性强,有利于其安全越冬。

参考文献:

- [1] 张冬晓.我国油菜生产的发展与展望[J].中国油料作物学报,2001,23(4):79-81.
- [2] 张树杰,张春雷.气候变化对我国油菜生产的影响[J].农业环境科学学报,2011,30(9):1749-1754.
- [3] 陈姣荣,孙万仓,方彦,等.白菜型冬油菜在北方寒旱区的适应性分析[J].干旱地区农业研究,2012,30(6):17-22.
- [4] 魏文慧,孙万仓,郭秀娟,等.氮磷钾肥对西北寒旱区冬油菜越冬率、产量及经济性状的影响[J].西北农业学报,2009,18(2):122-125,130.
- [5] 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行性研究[J].中国农业科学,2007,40(12):2716-2726.
- [6] 耿以工,张建党,杨润德,等.白菜型冬油菜品种在天津地区的适应性研究[J].天津农业科学,2012,18(1):136-139.
- [7] 李强,顾元国,贾东海,等.新疆旱寒区种植冬性甘蓝型和白菜型油菜的可行性[J].西北农业学报,2011,20(7):106-111.
- [8] 李强,顾元国,林萍,等.新疆冬油菜不同密度水平生育特性及经济性状比较研究[J].干旱地区农业研究,2011,29(2):59-64.
- [9] 王学芳,孙万仓,李孝泽,等.我国北方风蚀区冬油菜抗风蚀效果[J].生态学报,2009,29(12):6573-6577.
- [10] 王学芳,孙万仓,李芳,等.中国西部冬油菜种植的生态效应评价[J].应用生态学报,2009,20(3):647-652.
- [11] 孙万仓,武军艳,方彦,等.北方旱寒区北移冬油菜生长发育特性[J].作物学报,2010,36(12):1224-2134.
- [12] 张俊杰,孙万仓,李学才,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.
- [13] 邹琦.植物生理学实验指导[M].北京:中国农业出版社,2000:2-3,127-129,163-168,171-172.
- [14] 林加涵,魏文玲,彭宣宪,等.现代生物学实验[M].北京:高等教育出版社,2001:34-35.
- [15] 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,2000:105-263.
- [16] 姜丽娜,张黛静,林琳,等.低温对小麦幼苗干物质积累及根系分泌物的影响[J].麦类作物学报,2012,32(6):1171-1176.
- [17] 胡胜武,于澄宇,王绥璋,等.甘蓝型油菜抗寒性的鉴定及相关性状的研究[J].中国油料作物学报,1999,21(2):33-35.
- [18] 陈龙,吴诗光,李淑梅,等.低温胁迫下冬小麦拔节期生化反应及抗性分析[J].华北农学报,2001,16(4):42-46.
- [19] 张东昱,盖玥,牛俊义,等.白菜型油菜抗寒生理生化特性动态研究[J].甘肃农业大学学报,2011,46(3):43-48.
- [20] 刘灿,王金伟,李卓夫,等.低温驯化阶段不同抗寒性冬小麦品种生理代谢的比较[J].东北农业大学学报,2009,40(11):14-17.
- [21] 栗淑媛,马华山,王俊琴,等.低温对螺旋藻可溶性蛋白和游离氨基酸外渗的影响[J].西北植物学报,2005,25(6):1195-1198.
- [22] 孔祥会,王桂忠,李少菁,等.低温驯化对锯缘青蟹可溶性蛋白与可溶性糖的影响[J].厦门大学学报(自然科学版),2006,45(2):257-260.
- [23] 徐广平,何成新,李先琨,等.园林植物桂花叶片矿质元素及生理特征对冬季异常低温的响应[J].核农学报,2013,27(3):365-372.
- [24] 管毕财,龚熹,郭琼.低温打破龙牙百合休眠过程中可溶性蛋白的变化[J].南昌大学学报(理科版),2006,30(5):492-495.
- [25] 朱政,蒋家月,江昌俊,等.低温胁迫对茶树叶片SOD、可溶性蛋白和可溶性糖含量的影响[J].安徽农业大学学报,2011,38(1):24-26.
- [26] 薛国希,高辉远,李鹏民,等.低温下壳聚糖处理对黄瓜幼苗生理生化特性的影响[J].植物生理与分子生物学学报,2004,30(4):441-448.
- [27] Sreenivasulu N, Grimm B, Wobus U, et al. Differential response of antioxidant compounds to salinity stress in salt-tolerant and salt-sensitive seedlings of foxtail millet (*Setaria italica*) [J]. *Physiol Plant*, 2000, 109:435-442.
- [28] Fridovich I. Biological effects of the superoxide radical Arch [J]. *Biochem Biophys*, 1986, 247:1-11.
- [29] 蔡仕珍,潘远智,陈其兵,等.低温胁迫对花叶细辛生理生化及生长的影响[J].草业学报,2010,19(1):95-102.
- [30] 陈璇,李金耀,马纪,等.低温胁迫对春小麦和冬小麦叶片游离脯氨酸含量变化的影响[J].新疆农业科学,2007,44(5):553-556.
- [31] 王玉玲,康洁.低温胁迫对冬小麦苗期和拔节期生理生化特性的影响[J].河南农业科学,2004,(5):3-6.
- [32] 陈禹兴,付连双,王晓楠,等.低温胁迫对冬小麦恢复生长后植株细胞膜透性和丙二醛含量的影响[J].东北农业大学学报,2010,41(10):10-16.
- [33] 刘鸿先.低温对不同耐寒力的黄瓜幼苗子叶各细胞器中超氧化物歧化酶的影响[J].植物生理学报,1985,11(1):48-57.
- [34] 王燕,李雪萍,季作梁.芒果冷害对两种自由基清除剂的影响[J].园艺学报,1995,22(3):235-239.