

不同生态条件下白菜型冬油菜性状差异分析

刘自刚,孙万仓,杨宁宁,武军艳,方彦,李学才,曾秀存,王月

(甘肃省油菜工程技术研究中心,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,甘肃农业大学农学院,甘肃兰州 730070)

摘要:在 4 个生态区种植 11 个不同抗寒性白菜型冬油菜品种,探讨北移种植后冬油菜生育期进程、农艺性状、品质等的变化特征及与主要生态因子间的相关性。结果表明:与原种植区(天水)相比,冬油菜北移后其生育期进程发生明显改变,主要表现在冬前生育期缩短,越冬期延长;越冬后返青期~成熟期生育期总天数不变,但早期(返青期~终花期)生育期进程加快,而角层期延长。北移种植后冬油菜株高、分枝部位降低,主花序变短、单株角果数减少,分枝数增加,株型变差;角粒数、千粒重增加,角、粒性状改善。含油量、油酸、亚麻酸、芥酸含量增加,亚油酸、廿碳烯酸、硫苷含量降低;油酸、亚麻酸含量与纬度、海拔呈显著正相关,与降雨量、年均温度、最冷月温度呈显著负相关;廿碳烯酸、硫苷与油酸、亚麻酸表现相反。冬油菜北移后株型变差,角、粒性状改善;冬前生育期变短,越冬期延长,返青后生育期加快,而角层期延长,有利于粒重增加;籽粒含油量增加,高纬度、高海拔有利于油酸、亚麻酸积累,而高降雨量、低温有利于廿碳烯酸积累。

关键词:白菜型冬油菜;北移种植;生态区;生育期进程;农艺性状;品质

中图分类号: S565.4 **文献标志码:** A

Variations in quality and agronomic traits of winter rapeseed (*Brassica campestris* L.) grown in different ecological regions

LIU Zi-gang, SUN Wan-cang, YANG Ning-ning, WU Jun-yan, FANG Yan,
LI Xue-cai, ZENG Xiu-cun, WANG Yue

(Gansu Engineering Research Center of Rapeseed/Gansu Provincial Key Laboratory of Aridland Crop Science/
Gansu Key Laboratory of Crop Improvement & Germplasm Enhancement/Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: Eleven winter rapeseed (*Brassica campestris* L.) cultivars with different levels of cold resistance were grown in four ecological regions in Gansu province, northwest China. Changes in the progression of growth, agronomic traits, and quality of northward-expanded rapeseed plants were determined, and their correlations with major regional ecological factors were evaluated, in order to provide a reference for northward expansion and cultivation of this crop. Compared with those in the original growing area (Tianshui), northward – expanded rapeseed plants exhibited great changes in the progression of growth, as reflected mainly by the significantly shortened growth period in pre-winter and prolonged over-wintering period. Total growth period (number of days) between seedling establishment and maturation stages after wintering was not changed. However, early growth process during seedling establishment to final flower stage was accelerated, while the podding stage was prolonged. Additionally, northward-expanded rapeseed cultivars had taller plant height and lower branch part, with shorter primary inflorescence than the control plants. The former had a reduced number of siliques per plant but an increased number of branches, showing poor plant morphology. The number of seeds per silique and thousand seed weight were increased, suggesting improvements in silique and seed traits. Seed oil content as well as oleic, linolenic, and erucic acid contents became increased, which coincided with reductions in linoleic, e-icosenoic acid, and thioglycoside contents. Seed oleic and linolenic acid contents were positively correlated with latitude and altitude, and negatively correlated with rainfall, mean annual temperature, and temperature of the coldest month, whereas gadoleic acid and thioglycoside contents showed the opposite. In conclusion, northward expansion of winter rape-

收稿日期:2014-09-20
基金项目:国家“863”高技术研究发展计划(2011AA10A104);国家自然科学基金(31460356);国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-13);甘肃省科技重大专项(1203NKDF0018)
作者简介:刘自刚(1975—),男,甘肃天水人,副教授,主要从事油菜遗传育种研究。E-mail: zgworking@163.com。
通信作者:孙万仓(1975—),男,甘肃会宁人,教授,博士生导师,主要从事油菜遗传育种研究。E-mail: 18293121851@163.com。

seed cultivars resulted in the poor plant morphology but improved silique and seed traits; during the progression of plant growth, the pre-winter growth period was shortened, but the over-wintering period was prolonged. The growth after seedling establishment was accelerated, and prolonging of podding stage facilitated gain of seed weight. Also, seed oil content was increased. High latitude and altitude were beneficial to the accumulation of oleic and linolenic acids, whereas high rainfall and low temperature were favorable for the accumulation of eicosenoic acid.

Keywords: winter rapeseed; northward expansion; ecological region; growth process; agronomic traits; quality

我国油菜生产包括冬油菜和春油菜两大产区^[1]。新疆、西藏、青海与长城沿线的甘肃、宁夏、山西、北京等北方寒旱区冬季严寒漫长、干旱少雨,自然条件严酷,冬油菜不能越冬,属传统的春油菜区^[2]。春油菜在春季播种,由于春耕春播等农事措施造成表土疏松,加之该区春季少雨多风,形成较厚的浮土层,是沙尘暴的主要沙尘源^[3]。冬油菜冬春季可在地表形成厚的固定层和枯叶覆盖层,同时免去春季土壤耕作,减少沙尘源,保护了农田生态^[4]。研究表明冬油菜对地表覆盖度达到 95%,每年可减少沙尘量 $347.1\text{ kg}\cdot 667\text{ m}^{-2}$,土壤有机质、碱解 N、速效 P、K 分别增加 13.0、0.68、0.788、0.712 $\text{kg}\cdot 667\text{ m}^{-2}$ (按照平均每年 2 次大风,每次 2 小时测算)^[5]。我国北方寒旱区存在大量冬闲田,具有发展冬油菜种植的巨大潜力,据测算,中国北方寒旱区适宜发展冬油菜的面积约在 333.33 万 hm^2 以上,近期如能发展冬油菜 133.33 万 hm^2 ,即可减少农田沙尘 694.2 万 t,具有重大生态效益^[2]。目前,已育成适宜我国北方寒旱区种植的超强抗寒冬油菜系列品种,抗 -30°C 极端低温,使我国冬油菜种植北界向北向西推移 5~13 个纬度;但冬油菜北移后其生育期、性状表现、籽粒品质等都可能随着生态条件改变而发生变化,这些变化将影响冬油菜种植效益、前后茬作物的选择衔接和种植模式创新等。目前已进行了不同生态区冬油菜栽培试验,包括播期、密度、冬季镇压、雪上追肥等^[6-9],以确定适宜不同生态区的冬油菜栽培技术;这些试验结果综合起来看,我国北方寒旱区冬油菜适宜密度为 45~90 万株 $\cdot\text{hm}^{-2}$,播期为 8 月中下旬至 9 月中下旬;目前适宜北方寒旱区种植的冬油菜品种及其栽培技术已日趋完善。不同生态条件对作物性状表现、产量形成、品质性状等具有很大影响;不同品种对生态区变化的反应也存在差异。冬油菜属北方寒旱区新型作物,冬油菜北移至新生态区种植,明确其生育期、品质、农艺性状等变化,对指导寒旱区冬油菜生产及其改善该区农田生态具有重要意义。本文利用 11 个白菜型冬油菜品种在 4 个不同生态区种植,研究冬油菜从原生态区北移至北方寒旱区不同生态区后,其生育期进程、农艺性

状、品种性状变化及品种间差异,为冬油菜北移种植提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料及试验点主要气候特点

试验于 2011—2013 年在甘肃省的天水渭南、临洮玉井、兰州安宁、永登秦川 4 个试点进行。天水为冬油菜原种植区试点,永登等 3 个试点为北方寒旱区冬油菜北移区试点,其中,天水试点位于甘肃东南部的黄土梁峁沟壑区,属秦巴山区西秦岭北部,大陆性半湿润气候,油菜区划上属于北方冬春油菜过度区(或北方冬油菜边缘区),境内四季分明,光照充足,在河谷川水区种植甘蓝型冬油菜,山区种植白菜型冬油菜。永登等 3 试点为冬油菜北移种植区,主要气象因子见表 1。8 月 25 日—9 月 10 日依据各试点具体气象特征安排播种,播前结合翻耕整地施尿素 $10\text{ kg}\cdot 667\text{ m}^{-2}$ 、磷酸二铵 $10\text{ kg}\cdot 667\text{ m}^{-2}$ 作基肥,其它管理同大田生产。试验小区 $6\text{ m}^2(2\text{ m}\times 3\text{ m})$,重复 3 次,随机区组排列。

试验所用品种材料为北方寒旱区不同生态区大面积推广应用的主要白菜型冬油菜品种和抗寒性不同的重要育种材料(品系),品种特性及来源见表 2。

1.2 冬油菜生长发育进程观察

在冬油菜生长期观察记录不同生态区参试品系生育期进程,主要包括播种期、出苗期、枯叶期、返青期、现蕾期、初花期、终花期、成熟期。

1.3 冬油菜农艺性状测定

成熟期各参试品系随机取具有代表性的植株 5 株,对其主要农艺性状进行考种,测定内容包括植株高度(cm)、分枝部位(cm)、一次有效分枝数(个)、二次有效分枝数(个)、主花序长(cm)、单株有效角果数(个)、每角粒数(个)、千粒重(g)等,重复 5 次。

1.4 品质性状测定

考种时收获的油菜籽粒用于测定分析其品质性状,采用近红外分析仪(Foss-NIR System)测定油菜籽粒棕榈酸(16:0)、硬脂酸(18:0)、油酸(18:1)、亚油酸(18:2)、亚麻酸(18:3)、碳烯酸(20:1)、芥酸(22:1)、硫苷、蛋白质含量和含油量等。

表 1 冬油菜生育期间原种植区与北移区主要气象因子

Table 1 Major climate and environment factors in the original and the northward expended regions for winter rapeseed				
生态因子 Ecological factor	天水 Tianshui	临洮 Lintao	兰州 Lanzhou	永登 Yongdeng
纬度 Latitude	34°33′	35°51′	36°03′	36°36′
海拔高度 Altitude/m	1083.4	1874	1517.2	1964
最冷月平均气温 The average lowest temperature in the coldest month/℃	− 2.4	− 6.1	− 7.8	− 8.1
最冷月平均最低气温 The average temperature in the coldest month/℃	− 7.0	− 11.3	− 13.4	− 14.6
年均温度 Annual average temperature/℃	10.9	7.6	6.6	5.9
无霜期天数 Free frost days/d	186	154	154	162
降雨量 Precipitation/mm	507.6	391	327	287
年平均蒸发量 Annual evaporation/mm	1420.2	1264.2	1406.8	1879.7

表 2 试验材料抗寒特性及来源
Table 2 Name and source of materials tested

品种(系) Cultivar(line)	类型 Type	温度反应类型 Response type to temperature	品种抗寒类型 Cold-resistance type	来源或选育单位 Source
天油 2 号 Tianyou 2	白菜型油菜 <i>Brassica campestris</i> L.	强冬性 Strong winterness	耐寒 Cold resistance	天水市农科所 Tianshui Institute of Agricultural Sciences
天油 4 号 Tianyou 4	白菜型油菜 <i>Brassica campestris</i> L.	强冬性 Strong winterness	耐寒 Cold resistance	天水市农科所 Tianshui Institute of Agricultural Sciences
天油 5 号 Tianyou 5	白菜型油菜 <i>Brassica campestris</i> L.	强冬性 Strong winterness	耐寒 Cold resistance	天水市农科所 Tianshui Institute of Agricultural Sciences
天油 8 号 Tianyou 8	白菜型油菜 <i>Brassica campestris</i> L.	强冬性 Strong winterness	耐寒 Cold resistance	天水市农科所 Tianshui Institute of Agricultural Sciences
陇油 6 号 Longyou 6	白菜型油菜 <i>Brassica campestris</i> L.	强冬性 Strong winterness	超强抗寒 Ultra strong cold resistance	甘肃农业大学 Gansu Agricultural University
陇油 7 号 Longyou 7	白菜型油菜 <i>Brassica campestris</i> L.	强冬性 Strong winterness	超强抗寒 Ultra strong cold resistance	甘肃农业大学 Gansu Agricultural University
陇油 8 号 Longyou 8	白菜型油菜 <i>Brassica campestris</i> L.	强冬性 Strong winterness	强抗寒 Strong cold resistance	甘肃农业大学 Gansu Agricultural University
陇油 9 号 Longyou 9	白菜型油菜 <i>Brassica campestris</i> L.	强冬性 Strong winterness	抗寒 Cold resistance	甘肃农业大学 Gansu Agricultural University
200119	白菜型油菜 <i>Brassica campestris</i> L.	强冬性 Strong winterness	弱抗寒 Weak cold resistance	
延油 2 号 Yanyou 2	白菜型油菜 <i>Brassica campestris</i> L.	强冬性 Strong winterness	抗寒 Cold resistance	延安洛川市农科所 Luochuan Institute of Agricultural Science
宁油 2 号 Ningyou 2	白菜型油菜 <i>Brassica campestris</i> L.	强冬性 Strong winterness	弱抗寒 Weak cold resistance	宁县农技中心 Ningxian Agricultural Technology Center

1.5 数据分析

利用 SPSS 软件对实验数据进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同生态区白菜型冬油菜的生育期进程

北方冬油菜生长发育以枯叶期为特征分为三个阶段,即冬前生长期、越冬期和冬后生长期。冬油菜北移后其生育期进程发生明显改变,总体表现为冬前生长期缩短,越冬期延长;如与原种植区(天水)相比,北移区(永登)种植的陇油 6 号冬前生长期缩短

16 d,越冬期延长 40 d。北移后冬油菜冬后生长期总时长基本不变,但前期(返青期~终花期)生育期明显加快,而角层期(终花期~成熟期)明显延长,如秦川试点冬油菜角层期比天水试点长 26.2 d(表 3)。

2.2 不同生态区白菜型冬油菜农艺性状表现差异

与原种植区(天水)相比,白菜型冬油菜不同品种北移后其农艺性状均发生明显变化。冬油菜北移后株高、分枝部位降低,主花序长度变短,单株角果数减少,分枝数增多,株型变差;角粒数、千粒重增加,角、粒性状改善。

白菜型冬油菜北移后,不同农艺性状的变化量明显不同,其中变化最大的为植株分枝部位,北移后平均下降了 103.5%,其次为主花序长度缩短了 19.9%;变化最小的性状为角粒数和千粒重,北移后分别增加了 1.2%和 3.1%,表明这两个性状具有较高遗传力,在不同生态区表现较为稳定。

白菜型冬油菜北移后,不同来源品种其性状变化量存在明显差异,总体表现为:与北移区冬油菜品种相比,原种植区品种北移后性状变化量较大,如原种植区冬油菜天油系列品种北移后株高、分枝部位分别平均降低 15.2 cm、20.5 cm,而北移区陇油系列品种降低仅为 3.1 cm、14.4 cm(表 4)。

表 3 不同生态区种植白菜型冬油菜的生育期/d
Table 3 The growth and development of winter rapes varieties in different eco-regions

试点 Locus	播种期 ~ 出苗期 Sowing ~ emergence	出苗期 ~ 枯叶期 Emergence ~ wilt	冬前生 育期 Days before winter	枯叶期 ~ 返青期 Wilt ~ regreening	返青期 ~ 现蕾期 Regreening ~ budding	现蕾期 ~ 初花期 Budding ~ beginning of flowering	初花期 ~ 终花期 Beginning of flowering ~ the final flowering	终花期 ~ 成熟期 The final flowering ~ maturing	冬后生 育期 Days after winter
永登 Yongdeng	12.0	79.2	91.2	117.8	21.2	6.7	27.7	54.8	110.5
兰州 Lanzhou	10.0	89.4	99.4	92.2	32.8	10.2	28.8	37.8	109.6
临洮 Lintao	10.0	86.8	96.8	97.2	29.5	10.5	29.1	41.1	110.3
天水 Tianshui	10.0	97.0	107.0	72.8	39.4	13.3	29.3	28.6	110.5

表 4 白菜型冬油菜北移区与原种植区(天水)间农艺性状的差异
Table 4 Differences of agronomic traits of winter rapes between Tianshui and other eco-regions

试点 Locus	株高 Plant height/cm	分枝部位 Branch height/cm	一次分枝数 Number of first branch	二次分枝数 Number of second branch	主花序长度 Lengh of main florescence/cm	单株角果数 Total siliquas of plant	每角粒数 Seeds per siliquas	千粒重 1000-seeds weight/g
永登 Yongdeng	- 14.91	- 22.12	2.53	2.91	- 11.59	- 125.64	0.80	0.15
兰州 Lanzhou	- 7.04	- 10.68	1.07	0.93	- 4.14	- 37.36	- 0.53	0.05
临洮 Lintao	- 8.04	- 17.50	1.35	1.56	- 8.05	- 72.45	0.44	0.08

2.3 不同生态区白菜型冬油菜品质性状差异

2.3.1 不同生态区白菜型冬油菜棕榈酸含量比较

白菜型冬油菜北移后棕榈酸含量变化显著,从原种植区(天水)北移至临洮、秦川试点后,棕榈酸含量总体呈降低趋势,兰州试点明显增加。方差分析结

果表明,同一生态区不同品种棕榈酸含量无显著差异,处于同一水平;而不同生态区间存在极显著差异,兰州试点种植品种十六碳烯酸极显著高于原种植区(天水),秦川、临洮 2 试点极显著低于原种植区(表 5)。

表 5 不同生态区白菜型冬油菜棕榈酸含量比较/%
Table 5 Palmitic acid content of winter rapes in four ecological regions

品种(系) Cultivar(line)	秦川 Qinchuan	兰州 Lanzhou	临洮 Lingtao	天水 Tianshui
天油 2 号 Tianyou 2	2.47efghijklmn	3.01abcde	2.62cdefghijklmn	2.50defghijklmn
天油 4 号 Tianyou 4	2.85abcdefghij	3.18abc	2.24klmn	2.72bcdefghijklm
天油 5 号 Tianyou 5	2.43efghijklmn	2.91abcdefgh	2.31klmn	2.29jklmn
天油 8 号 Tianyou 8	2.64cdefghijklmn	2.96abcdefg	2.60cdefghijklmn	2.79abcdefghijk
陇油 6 号 Longyou 6	2.35hijklmn	3.26ab	2.38ghijklmn	2.89abcdefghi
陇油 7 号 Longyou 7	2.34hijklmn	3.12abc	2.31ijklmn	2.63cdefghijklmn
陇油 8 号 Longyou 8	2.41fghijklmn	3.06abcd	2.37hijklmn	3.08abcd
陇油 9 号 Longyou 9	2.51defghijklmn	3.32a	2.17mn	2.71bcdefghijklmn
200119	2.14n	2.92abcdefgh	2.24klmn	2.74bcdefghijklm
延油 2 号 Yanyou 2	2.20lmn	3.00abcdef	2.45efghijklmn	2.79abcdefghijk
宁油 2 号 Ningyou 2	2.77abcdefghijkl	2.80abcdefghijk	2.43efghijklmn	2.62cdefghijklmn

注:不同字母表示差异达 $P < 0.05$ 水平,下同。
Note: Different letters means significantly different at $P < 0.05$ levels. The same below.

2.3.2 不同生态区白菜型冬油菜 C18 脂肪酸含量比较 白菜型冬油菜 C18 脂肪酸主要有 4 种,即硬

脂酸、油酸、亚油酸和亚麻酸。不同生态区种植的 11 个白菜型冬油菜品种平均 C18 含量存在显著差

异,其中临洮试点种植的冬油菜硬脂酸平均含量最高,为 1.16%;兰州试点油酸、亚油酸含量最高,分别为 25.3%、15.3%;秦川试点亚油酸含量最高,为 10.79%。不同品种间 C18 含量也存在显著差异,其

中陇油 7 号平均硬脂酸含量最高,为 1.192%;陇油 6 号油酸、亚油酸、亚麻酸含量均较高,其平均含量分别为 25.8%、14.8%、10.6%(表 6)。

表 6 不同生态区白菜型冬油菜 C18 脂肪酸含量比较

Table 6 C18 fatty acids content of winter rapes in four ecological regions

种类 Type	品种(系) Cultivar(line)	秦川 Qinchuan	兰州 Lanzhou	临洮 Lingtao	天水 Tianshui
C18:0	天油 2 号 Tianyou 2	1.043cdefg	1.140abcdef	1.267ab	1.140abcdef
	天油 4 号 Tianyou 4	1.057bcdefg	0.987defg	1.073bcdefg	1.137abcdef
	天油 5 号 Tianyou 5	1.033defg	1.117abcdefg	1.197abcd	1.013defg
	天油 8 号 Tianyou 8	0.990defg	0.973efg	1.203abcd	1.107abcdefg
	陇油 6 号 Longyou 6	1.070bcdefg	1.120abcdefg	1.120abcdefg	0.963efg
	陇油 7 号 Longyou 7	1.150abcdef	1.147abcdef	1.320a	1.150abcdef
	陇油 8 号 Longyou 8	1.033defg	1.260abc	1.070bcdefg	1.147abcdef
	陇油 9 号 Longyou 9	1.077bcdefg	1.020defg	1.180abcde	1.110abcdefg
	200119	1.040defg	1.060bcdefg	1.097bcdefg	1.020defg
	延油 2 号 Yanyou 2	0.903g	1.120abcdefg	1.103abcdefg	1.123abcdef
C18:1	宁油 2 号 Ningyou 2	0.950fg	1.100bcdefg	1.080bcdefg	1.130abcdef
	天油 2 号 Tianyou 2	24.897bcdefgh	26.133abcdefg	24.047bcdefghij	19.680ijkl
	天油 4 号 Tianyou 4	22.090efghijk	23.853bcdefghijk	24.500bcdefghi	22.397defghijk
	天油 5 号 Tianyou 5	24.207bcdefghij	24.317bcdefghij	21.600fghijkl	19.243jkl
	天油 8 号 Tianyou 8	25.160abcdefgh	30.117a	24.260bcdefghij	27.080abcde
	陇油 6 号 Longyou 6	27.010abcde	28.760ab	25.863abcdefg	21.383fghijkl
	陇油 7 号 Longyou 7	27.747abc	24.477bcdefghi	26.257abcdef	24.310bcdefghij
	陇油 8 号 Longyou 8	24.370bcdefghij	18.767kl	21.750fghijk	16.633l
	陇油 9 号 Longyou 9	22.183efghijk	27.520abcd	24.730bcdefghi	21.330fghijkl
	200119	22.407defghijk	25.587abcdefgh	23.387cdefghijk	23.927bcdefghijk
C18:2	延油 2 号 Yanyou 2	27.533abcd	27.193abcde	23.350cdefghijk	23.017cdefghijk
	宁油 2 号 Ningyou 2	20.647hijkl	21.257fghijkl	21.033ghijkl	22.170efghijk
	天油 2 号 Tianyou 2	13.710defghijklmno	14.537bcdefghijkl	12.5467hijklmnop	16.050abcde
	天油 4 号 Tianyou 4	15.670abcdef	16.627abc	10.77p	13.823defghijklmno
	天油 5 号 Tianyou 5	13.143fghijklmnop	14.170cdefghijklm	11.7667lmnop	11.130op
	天油 8 号 Tianyou 8	13.320efghijklmnop	15.287abcdefgh	12.63hijklmnop	15.180abcdefghi
	陇油 6 号 Longyou 6	13.850defghijklmno	17.610a	14.6bcdefghijk	13.177fghijklmnop
	陇油 7 号 Longyou 7	13.253fghijklmnop	15.607abcdefg	12.85ghijklmnop	15.003abcdefghij
	陇油 8 号 Longyou 8	13.953cdefghijklmn	17.047ab	11.38nop	16.233abcd
	陇油 9 号 Longyou 9	14.427bcdefghijkl	16.040abcde	11.2433nop	14.253cdefghijklm
C18:3	200119	12.410ijklmnop	14.700bcdefghij	13.0067fghijklmnop	12.480ijklmnop
	延油 2 号 Yanyou 2	11.913klmnop	12.337jklmnop	11.56mnop	14.320bcdefghijklm
	宁油 2 号 Ningyou 2	13.670defghijklmno	14.600bcdefghijk	12.3933jklmnop	13.483defghijklmnop
	天油 2 号 Tianyou 2	11.057ab	10.470abcdefgh	8.927h	10.900abcd
	天油 4 号 Tianyou 4	11.060ab	10.470abcdefgh	10.253abcdefgh	10.183abcdefgh
	天油 5 号 Tianyou 5	11.267a	9.817abcdefgh	10.917abcd	9.470cdefgh
	天油 8 号 Tianyou 8	10.270abcdefgh	10.223abcdefgh	10.170abcdefgh	9.220fgh
	陇油 6 号 Longyou 6	11.090ab	10.050abcdefgh	10.680abcdef	10.760abcdef
	陇油 7 号 Longyou 7	10.327abcdefgh	10.057abcdefgh	10.060abcdefgh	9.560bcdefgh
	陇油 8 号 Longyou 8	11.047ab	10.590abcdefg	11.250a	11.037abc
	陇油 9 号 Longyou 9	10.957abcd	10.060abcdefgh	9.897abcdefgh	10.467abcdefgh
	200119	11.160a	10.157abcdefgh	10.860abcde	9.293efgh
	延油 2 号 Yanyou 2	9.263fgh	9.040gh	10.887abcd	9.390defgh
	宁油 2 号 Ningyou 2	11.237a	10.950abcd	10.007abcdefgh	9.893abcdefgh

2.3.3 不同生态区白菜型冬油菜甘碳烯酸含量比较 白菜型冬油菜从原种植区西扩北移种植后,甘碳烯酸平均含量呈逐渐降低的规律性变化,原种植区(天水试点)甘碳烯酸平均含量 12.01%,极显著高于北移区。白菜型冬油菜甘碳烯酸平均含量在不同品种间存在显著差异,其中宁油 2 号平均含量最高,为 12.34%;陇油 7 号最低,为 10.42%(表 7)。

2.3.4 不同生态区白菜型冬油菜芥酸和硫苷含量

变化 不同生态区种植白菜型冬油菜种子芥酸、硫苷含量均存在显著差异,临洮试点种植的冬油菜其种子平均芥酸含量显著高于其它试点,而硫苷含量显著低于其它试点;兰州试点芥酸含量最低,硫苷含量显著高于其它各试点。白菜型冬油菜芥酸、硫苷含量品种间也存在显著差异,如宁油 2 号芥酸平均含量为 42.4%,显著高于天油 8 号和陇油 7 号;陇油 6 号硫苷含量显著高于陇油 8 号和宁油 2 号(表 8)。

表 7 不同生态区种植白菜型冬油菜甘碳烯酸含量比较/%
Table 7 Eicosenoic acid content of winter rapes in four ecological regions

品种(系) Cultivar(line)	秦川 Qinchuan	兰州 Lanzhou	临洮 Lingtao	天水 Tianshui
天油 2 号 Tianyou 2	10.11ijklmn	11.69abcdefghijkl	10.05jklmn	11.59abcdefghijkl
天油 4 号 Tianyou 4	10.38ghijklmn	11.29abcdefghijklm	11.15bcdefghijklm	12.27abcdefg
天油 5 号 Tianyou 5	10.66defghijklmn	11.38abcdefghijklm	12.20abcdefg	13.09ab
天油 8 号 Tianyou 8	10.48ghijklmn	10.23hijklmn	11.19bcdefghijklm	11.32abcdefghijklm
陇油 6 号 Longyou 6	8.83n	9.58nm	11.01cdefghijklm	12.48abcdef
陇油 7 号 Longyou 7	9.44nm	10.90cdefghijklm	9.74lmn	11.61abcdefghijkl
陇油 8 号 Longyou 8	9.93klmn	11.65abcdefghijkl	11.59abcdefghijkl	12.58abcd
陇油 9 号 Longyou 9	10.63efghijklmn	9.90klmn	11.27abcdefghijklm	12.12abcdefgh
200119	10.60fghijklmn	11.10cdefghijklm	10.82defghijklm	11.20bcdefghijklm
延油 2 号 Yanyou 2	11.04cdefghijklm	10.81defghijklm	12.81abc	11.93abcdefghij
宁油 2 号 Ningyou 2	11.63abcdefghijkl	12.55abcde	13.17a	12.02abcdefghi

表 8 不同生态区种植白菜型冬油菜芥酸、硫苷含量变化/%
Table 8 Erucic acid and glucosinolate contents of winter rapes in four ecological regions

种类 Type	品种(系) Cultivar(line)	秦川 Qinchan	兰州 Lanzhou	临洮 Lingtao	天水 Tianshui
芥酸 Erucic C22:1	天油 2 号 Tianyou 2	38.3cdefghij	40.7bcdefg	38.5cdefghij	38.1defghij
	天油 4 号 Tianyou 4	37.5defghijk	36.3ghijk	42.0bcdef	38.3cdefghij
	天油 5 号 Tianyou 5	38.6cdefghij	39.2bcdefghi	42.0bcdef	43.7bc
	天油 8 号 Tianyou 8	39.1bcdefghi	35.0hijk	38.9bcdefghij	33.5jk
	陇油 6 号 Longyou 6	36.9fghijk	32.7k	41.3bcdefg	40.1bcdefgh
	陇油 7 号 Longyou 7	36.6fghijk	36.6fghijk	38.3cdefghij	36.1ghijk
	陇油 8 号 Longyou 8	37.9defghijk	39.4bcdefghi	44.3b	39.6bcdefghi
	陇油 9 号 Longyou 9	38.8bcdefghij	34.2ijk	42.9bcd	39.1bcdefghi
	200119	41.5bcdefg	37.2efghijk	40.4bcdefgh	39.5bcdefghi
	延油 2 号 Yanyou 2	42.6bcde	38.8bcdefghij	42.7bcd	37.7defghijk
硫苷 Glucosinolate	宁油 2 号 Ningyou 2	40.3bcdefgh	40.2bcdefgh	49.6a	39.5bcdefghi
	天油 2 号 Tianyou 2	96.8abcde	103.2abcd	88.4bcdef	77.7ef
	天油 4 号 Tianyou 4	105.0abc	99.5abcd	84.3def	92.8abcdef
	天油 5 号 Tianyou 5	88.3bcdef	105.8ab	84.0def	101.0abcd
	天油 8 号 Tianyou 8	82.9def	92.2abcdef	97.0abcde	89.2bcdef
	陇油 6 号 Longyou 6	105.9ab	96.3abcde	87.8bcdef	111.4a
	陇油 7 号 Longyou 7	95.9abcde	95.0abcde	87.7bcdef	87.8bcdef
	陇油 8 号 Longyou 8	88.5bcdef	84.4cdef	85.7bcdef	100.0abcd
	陇油 9 号 Longyou 9	89.9bcdef	95.9abcde	87.8bcdef	94.2abcde
	200119	100.5abcd	103.1abcd	88.6bcdef	98.2abcde
	延油 2 号 Yanyou 2	83.7def	92.7abcdef	97.6abcde	84.6cdef
	宁油 2 号 Ningyou 2	85.8bcdef	88.5bcdef	72.7f	102.5abcd

2.3.5 不同生态区白菜型冬油菜含油量变化 临洮、秦川两试点种植的白菜型冬油菜籽粒含油量高于兰州、天水试点,临洮试点 11 个品种平均含油量为 45.34%,而兰州试点仅为 37.68%,两者相差7.66 个百分点;同一试点不同冬油菜品种籽粒含油量存在显著差异,总体上看陇油 7 号含油量最高,为 42.01%,比天油 4 号高 5.90%(表 9)。

2.4 不同生态区种植冬油菜性状变异性分析

2.4.1 不同生态区种植冬油菜农艺性状的变异分

析 白菜型冬油菜不同农艺性状的变异性明显不同,其中分枝部位在不同生态试点间变化最大,其变异系数为 0.5929,粒重变异系数最小,为 0.0207,表明白菜型冬油菜粒重性状在不同生态区表现较为稳定。在 4 个生态点种植冬油菜,同一农艺性状不同品种的变异性明显不同,如陇油 7 号的一次分枝变异系数为 0.1273,而天油 8 号仅为 0.0492,表明不同品种农艺性状表现对生态环境变化的反应存在明显差异(表 10)。

表 9 不同生态区种植白菜型冬油菜含油量变化/%
Table 9 Seed oil content of winter rapes in four ecological regions

品种(系) Cultivar(line)	秦川 Qinchuan	兰州 Lanzhou	临洮 Lingtao	天水 Tianshui
天油 2 号 Tianyou 2	40.05efghij	37.79hijkl	45.57abcd	38.80ghijkl
天油 4 号 Tianyou 4	38.26hijkl	35.04kl	47.53a	37.83hijkl
天油 5 号 Tianyou 5	39.50fghijk	39.22fghijk	46.41abc	42.13cdefgh
天油 8 号 Tianyou 8	41.45defghi	36.37jkl	47.36a	38.36hijkl
陇油 6 号 Longyou 6	41.79cdefghi	34.25l	40.41efghij	39.31fghijk
陇油 7 号 Longyou 7	43.58abcdefg	37.74hijkl	47.73a	38.99fghijk
陇油 8 号 Longyou 8	42.01cdefghi	39.26fghijk	44.65abcde	39.63fghijk
陇油 9 号 Longyou 9	42.26cdefgh	37.26ijkl	46.97ab	39.17fghijk
200119	43.65abcdef	38.58hijkl	40.88efghij	39.03fghijk
延油 2 号 Yanyou 2	42.48bcdefgh	39.68fghijk	45.49abcd	39.17fghijk
宁油 2 号 Ningyou 2	39.51fghijk	39.24fghijk	45.71abcd	39.54fghijk

表 10 不同生态区种植冬油菜农艺性状的变异系数
Table 10 The variation coefficients of agronomic traits of winter rapes in four ecological regions

品种(系) Cultivar(line)	株高 Plant height /cm	分枝部位 Branch height /cm	一次分枝数 Number of first branch	二次分枝数 Number of second branch	主花序长度 Lengh of main floescence /cm	单株角果数 Total siliquas of plant	每角粒数 Seeds per siliquas	千粒重 1000-seeds weight /g
天油 2 号 Tianyou 2	0.0701	0.7332	0.0742	0.1084	0.2144	0.2217	0.0045	0.0167
天油 4 号 Tianyou 4	0.0942	0.6545	0.1027	0.0961	0.2303	0.2031	0.0077	0.0143
天油 5 号 Tianyou 5	0.0578	0.6441	0.0680	0.1161	0.2060	0.2496	0.0043	0.0424
天油 8 号 Tianyou 8	0.0592	0.5814	0.0492	0.0564	0.1327	0.2524	0.0035	0.0151
陇油 6 号 Longyou 6	0.0113	0.6905	0.1230	0.0583	0.0419	0.0286	0.0408	0.0294
陇油 7 号 Longyou 7	0.0097	0.6516	0.1273	0.0428	0.0637	0.0401	0.0217	0.0442
陇油 8 号 Longyou 8	0.0104	0.5272	0.0950	0.0782	0.0233	0.0231	0.0434	0.0140
陇油 9 号 Longyou 9	0.0397	0.4717	0.0680	0.0767	0.1083	0.0461	0.0214	0.0148
200119	0.0554	0.6088	0.0956	0.1021	0.0961	0.0603	0.0075	0.0144
延油 2 号 Yanyou 2	0.0982	0.5771	0.0987	0.0890	0.1010	0.0550	0.2625	0.0153
宁油 2 号 Ningyou 2	0.0452	0.4572	0.0680	0.0649	0.1429	0.1788	0.0122	0.0136
品种间变异 Variation among varieties	0.1366	0.1970	0.0741	0.0728	0.0648	0.0535	0.0895	0.0242
试点间变异 Plot variation	0.0504	0.5929	0.0860	0.0792	0.1255	0.1189	0.0282	0.0207
总变异 Total variation	0.1426	0.5682	0.1070	0.1030	0.1435	0.1384	0.1060	0.0315

2.4.2 不同生态区种植冬油菜品质性状变异分析
变异性分析结果显示,不同生态区种植白菜型冬

油菜各品质性状变异性明显不同,棕榈酸(C16:0)、亚油酸(C18:2)含量变异最大,平均变异系数分别为

0.1204、0.1210,表明环境因素对这两项指标变化影响较大;亚麻酸(C18:3)、芥酸(C22:1)含量在不同生态区表现相对较为稳定,其平均变异系数也相对较小,分别为 0.0638、0.0774。不同品种同一品质性状指标的变异系数也存在明显差异,如延油 2 号棕榈酸含量的变异系数为 0.2029,而天油 2 号变异系数仅为 0.0993。不同生态区种植的同一种品种,其不同品质性状间变异系数有较大差异,如陇油 7 号棕榈酸含量变异系数为 0.1648,而芥酸含量变异系数仅为 0.0474,表明不同生态环境变化对陇油 7 号芥酸

含量影响较小,而对棕榈酸含量影响较大(表 12)。

不同生态区种植白菜型冬油菜,不同品质性状间变异程度明显不同,棕榈酸含量变异系数最大,为 0.1141,亚麻酸最小,为 0.0322,表明棕榈酸含量在不同生态区间变异程度最大,而亚麻酸变异性相对较小。在不同生态区种植的白菜型冬油菜,其同一品质性状变异性存在明显差异,如在临洮试点含油量变异系数为 0.0680,而在水天试点为0.0396,表明相对于天水试点,临洮试点种植的冬油菜含油量品种间差异增加(表 11)。

表 11 不同白菜型冬油菜品种品质性状的变异系数

Table 11 The coefficients of quality traits of winter rapes in four ecological regions

试点 Locus	C16:0	C18:0	C18:1	C18:2	C18:3	C20:1	C22:1	Glu	含油量 Fat
秦川 Qinchuan	0.1248	0.0896	0.1305	0.1150	0.0736	0.1004	0.0684	0.1137	0.0605
兰州 Lanzhou	0.1174	0.1177	0.1627	0.1235	0.0810	0.1121	0.0919	0.1071	0.0680
临洮 Lingtao	0.1044	0.0984	0.1026	0.1263	0.0874	0.1137	0.1051	0.1099	0.0818
天水 Tianshui	0.1068	0.1100	0.1505	0.1240	0.0979	0.0763	0.0719	0.1551	0.0396
总变异 Total variation	0.1141	0.0471	0.0609	0.0925	0.0322	0.0647	0.0497	0.0407	0.0810

表 12 白菜型冬油菜农艺性状与主要生态因子间的相关系数

Table 12 Analyses of the correlations between agronomic traits of winter rapes and eco-factors

生态因子 Eco-factor	株高 Plant height/cm	分枝部位 Branch height/cm	一次分枝数 Number of first branch	二次分枝数 Number of second branch	主花序长度 Lengh of main florescence/cm	单株角果数 Total siliquas of plant	每角粒数 Seeds per siliquas	千粒重 1000-seeds weight/g
纬度 Latitude	- 0.283	- 0.782 * *	0.628 * *	0.557 *	- 0.624 *	- 0.606 *	0.057	0.481 *
海拔高度 Altitude	- 0.286	- 0.909 * *	0.651 * *	0.624 * *	- 0.747 * *	- 0.706 * *	0.152	0.543 *
降雨量 Precipitation	0.284	0.769 * *	- 0.629 * *	- 0.558 *	0.618 * *	0.606 *	- 0.057	- 0.480 *
年平均蒸发量 Annual evaporation	- 0.211	- 0.432 *	0.489 *	0.474 *	- 0.438 *	- 0.506 *	0.129	0.388 *
年均温度 Annual average temperature	0.282	0.800 * *	- 0.625 * *	- 0.555 *	0.633 * *	0.607 *	- 0.058	- 0.481 *
无霜期天数 Free frost days	0.202	0.683 * *	- 0.437 *	- 0.373	0.489 *	0.418	- 0.006	- 0.336
最冷月平均气温 The average temperature in the coldest month	0.270	0.755 * *	- 0.594 *	- 0.519 *	0.590 *	0.564 *	- 0.036	- 0.450 *
最冷月平均最低气温 The average lowest temperature in the coldest month	0.282	0.774 * *	- 0.625 * *	- 0.554 *	0.618 * *	0.602 *	- 0.054	- 0.477 *

注: * 表示显著相关($P < 0.05$), * * 表示极显著相关($P < 0.01$),下同。

Note: * indicate significant correlation at $P < 0.05$, and * * indicate significant correlation at $P < 0.01$. The same below.

2.5 白菜型冬油菜品种性状与种植区生态因子间的相关性分析

2.5.1 白菜型冬油菜农艺性状与生态因子间的相关性分析 白菜型冬油菜农艺性状与生态因子间存在显著相关性,同一农艺性状与不同生态因子相关性程度和方向明显不同。分枝部位、主花序长度、单株角果数、千粒重与海拔、纬度、蒸发量呈显著负相关,与降雨量、年均温度、无霜期天数、最冷月温度呈

显著正相关;分枝数与海拔、纬度、蒸发量呈显著正相关,与降雨量、年均温度、无霜期天数、最冷月温度呈显著负相关(表 12)。

2.5.2 白菜型冬油菜品质性状与生态因子间的相关性分析 生态因子与白菜型冬油菜品质性状间存在显著相关性,纬度、海拔与油酸、亚麻酸含量呈显著正相关,与廿碳烯酸、硫苷呈负相关;降雨量、年均温度、最冷月温度与与油酸、亚麻酸含量呈显著负相

关,与甘碳烯酸、硫苷呈显著正相关。表明高纬度、高海拔有利于油酸、亚麻酸积累,不利于甘碳烯酸、硫苷积累;而低气温、高降雨不利于油酸、亚麻酸积

累,利于甘碳烯酸、硫苷积累。含油量、芥酸含量与海拔呈显著正相关,棕榈酸含量与海拔显著负相关,其它生态因子对上述 3 种成分影响较小(表 13)。

表 13 白菜型冬油菜品质性状与主要生态因子间的相关系数

Table 13 Analyses of the correlations between quality traits of winter rapes and eco-factors

生态因子 Eco-factor	C16:0	C18:0	C18:1	C18:2	C18:3	C20:1	C22:1	Glu	含油量 Fat
纬度 Latitude	-0.016	-0.216	0.430 *	0.040	0.336 *	-0.592 * *	-0.071	-0.245	0.050
海拔高度 Altitude	-0.469 * *	-0.066	0.292 *	-0.352 *	0.386 *	-0.497 * *	0.252 *	-0.049	0.523 *
降雨量 Precipitation	0.002	0.243	-0.428 *	-0.062	-0.339 *	0.599 * *	0.095	0.244	-0.016
年平均蒸发量 Annual evaporation	-0.163	-0.505 * *	0.137	0.063	0.343 *	-0.465 * *	-0.200	0.011	-0.159
年均温度 Annual average temperature	0.042	0.176	-0.430 *	-0.005	-0.331 *	0.579 * *	0.033	0.242	-0.104
无霜期天数 Free frost days	0.022	-0.106	-0.391 *	0.086	-0.190	0.381 *	-0.122	0.252 *	-0.276
最冷月平均气温 The average temperature in the coldest month	-0.035	0.174	-0.442 *	-0.062	-0.305 *	0.568 * *	0.072	0.271 *	-0.039
最冷月平均最低气温 The average lowest temperature in the coldest month	0.004	0.223	-0.431 *	-0.052	-0.334 *	0.593 * *	0.082	0.248	-0.034

3 讨 论

白菜型冬油菜北移种植后其生育期表现为冬前生长期缩短、越冬期延长,冬后总生长期与原种植区一致,但也明显表现为不同特征的两个阶段,即返青~终花各时期生长进程明显加快,而角层期比原种植区明显延长。与原种植区相比,冬油菜北移区冬前降温早、降温快,冬季温度低、寒冷期长,因此使北移区冬油菜提早进入枯叶越冬期,而翌年返青较晚;翌年春季北移区开始升温的时间出现较晚,而开始升温后由于该区气候干燥、日照充足,升温速度较快,相对而言原种植区升温早而缓慢,这就使得北移区冬油菜返青期~终花期生长发育进程明显加快。终花期后由于北移区纬度、海拔高,气候较为凉爽,在角层灌浆期该区气候特点与冬油菜喜冷凉的生物学特性相适应,避免了冬油菜灌浆受高温逼熟等不利影响,使其灌浆时期延长、籽粒灌浆也较为充分,如秦川试点冬油菜平均千粒重达到 3.03 g,比原种植区高 5.21%。

冬油菜北移种植后株高、分枝部位降低(如秦川试点植株分枝部位仅为 3.5~9.8 cm),分枝数增加,株型变差;造成群体中下层密闭阴郁,降低群体光合转化效率,同时低的分枝部位也不利于抗倒和机械化收获等。相关性分析结果表明,北移区种植植株分枝部位降低与纬度、海拔、降雨量、年均温度、最冷月气温、无霜期等生态因子间均呈极显著相关,而海

拔、纬度等因子主要通过影响热量等的时空分布影响植物生长发育;同一品种材料经低温春化后春播,植株分枝部位升高到 25~40 cm,有效分枝数为 5~7 个,株型改善;表明冬油菜越冬期抵御严冬导致其冬后株型变差。低温下白菜型冬油菜基因表达组型发生重大变化,一系列抗寒相关基因被诱导激活或上调表达,如 *BnICE1*^[10]、*BnMKK2*^[11]、*BnMKK4*^[12]、*BnMPK6*^[13]、*BnHMGB2*^[14]、*APX*^[15]、*Fe - SOD*^[16] 等基因^[17-19],参与白菜型冬油菜冷适应和抗寒性形成,实现了冬油菜在形态、生理等方面低温适应转换;低温下强抗寒冬油菜电导率、抗氧化酶、抗冻蛋白等活性升高,渗透调节物含量、光合及产物分配特征等发生相应变化^[20-24];在形态方面主要表现在冬前低温下幼苗生长点下陷,向土壤中收缩^[3];冬后植株分枝部位下降、分枝数增加等;可以作如下判断,冬前幼苗生长点下陷是冬油菜寒冷适应的形态学特征,而冬后差株型是冬油菜严寒抵御之后的形态学后果之一。

早期研究认为油菜脂肪酸生物合成以油酸为前提物质,沿碳链延长方向合成甘碳烯酸、芥酸等;沿碳链去饱和方向合成亚油酸、亚麻酸。这也揭示了油酸、亚油酸与芥酸之间密切的相关关系形成的生物学基础^[25]。白菜型油菜芥酸含量受 1 对胚基因控制,而甘蓝型油菜中受两对胚基因位点控制,并存在 3 个或 5 个复等位基因,位点间效应相等,呈加性或加-显效应模型遗传^[26];含油量^[27-28]和总硫苷

含量^[29]均受母体基因型控制,其中含油量受 1 对加性主基因和加性-显性多基因控制,总硫苷受 2~3 对基因位点控制。油菜品质性状表现均受微效多基因修饰,在杂交分离群体中呈连续分布特征,环境因子对表型有重要影响^[30-31]。冬油菜北移后其种植环境发生了很大变化,光热水等资源总量及其时空分布均不同于原种植区,生态因子的变化对白菜型冬油菜品质产生重要影响,北移后冬油菜油酸含量、含油量升高,硫苷含量降低;秦川、临洮试点亚油酸升高、芥酸降低,而兰州试点亚油酸含量降低、芥酸升高。相关分析表明,高海拔、高纬度条件下有利于油酸积累,并以油酸为前体主要沿去饱和合成亚麻酸方向进行,而延长碳链以形成廿碳烯酸合成途径被抑制;高降雨量、低气温下情况正好相反。另外,白菜型冬油菜北移至不同生态区种植,其硫苷与油酸、亚麻酸、廿碳烯酸含量间存在明显协同变化关系;一般认为,脂肪酸和硫苷分别通过两条独立的代谢途径合成,而白菜型冬油菜脂肪酸和硫苷含量对生态因子变化的协调响应关系表明,两条代谢途径可能有共同的生态因子应答机制。

参 考 文 献:

- [1] 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.
- [2] 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):2124-2134.
- [3] 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.
- [4] 王学芳,孙万仓.中国西部冬油菜种植生态效益评价[J].应用生态学报,2009,20(3):647-652.
- [5] 王学芳,孙万仓.我国北方风蚀区冬油菜抗风蚀效果[J].生态学报,2009,29(12):6572-6577.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [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的比较研究[J].干旱地区农业研究,2011,29(12):59-64.
- [9] 方彦,孙万仓,李强,等.北方旱寒区冬油菜种植密度对生态条件的响应[J].干旱地区农业研究,2012,30(5):46-50.
- [10] 张腾国,常燕,王娟,等.油菜 *BnICE1* 的克隆及表达分析[J].中国农业科学,2013,46(1):205-214.
- [11] 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(5):578-583.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 张腾国,王娟,王圆圆,等.油菜 *BnHMGB2* 基因的克隆及表达分析[J].植物研究,2012,32(6):724-730.
 - [15] 曾秀存,孙万仓,方彦,等.白菜型冬油菜抗坏血酸过氧化物酶(APX)基因的克隆、表达及其活性分析[J].作物学报,2013,39(8):1400-1408.
 - [16] 曾秀存,孙万仓,孙佳,等.白菜型冬油菜铁超氧化物歧化酶(Fe-SOD)基因的克隆及表达分析[J].中国农业科学,2013,46(21):4603-4611.
 - [17] 曾秀存,刘自刚,史鹏辉,等.白菜型冬油菜铜锌超氧化物歧化酶(Cu/Zn-SOD)基因的克隆及其在低温条件下的表达分析[J].作物学报,2014,40(4):636-643.
 - [18] 曾秀存,孙万仓,方彦,等.白菜型冬油菜抗坏血酸过氧化物酶(APX)基因的克隆、表达及其活性分析[J].作物学报,2013,46(21):4603-4611.
 - [19] 陈姣荣,方彦,孙万仓,等.芸芥木葡聚糖内糖基转移酶/水解酶基因 *EsXTH1* 的 cDNA 克隆和生物信息学分析[J].中国油料作物学报,2013-5-10.
 - [20] 杨宁宁,孙万仓,刘自刚,等.北方冬油菜抗寒性的形态与生理机制[J].中国农业科学,2014,47(3):452-461.
 - [21] Ashiq R M, Kyonoshin M, Hiroshi A, et al. Monitoring expression profiles of rice genes under cold, drought, and high-salinity stresses and abscisic acid application using cDNA microarray and RNA gel-blot analyses[J]. Plant Physiology, 2003,133(4):1755-1767.
 - [22] 史鹏辉,刘自刚,张亚宏,等.23 份油菜的抗氧化酶特性及过氧化物同工酶分析[J].西北农业学报,2014,23(1):113-119.
 - [23] 武军艳,孙万仓,杨杰,等.不同覆盖处理对甘肃中部地区甘蓝型冬油菜越冬率及产量的影响[J].干旱地区农业研究,2010,28(3):96-99.
 - [24] 张腾国,张艳,夏小慧,等. MAPKK 抑制剂对低温胁迫下油菜幼苗光合作用和抗氧化酶活性的影响[J].兰州大学学报(自然科学版),2013,49(1):92-99.
 - [25] Zhao J Y, Heiko C. Becker, Zhang D Q, et al. Oil content in a European × Chinese rapeseed population: QTL with additive and epistatic effects and their genotype-environment interactions[J]. Crop Science, 2005,45:51-59.
 - [26] LIU Xueping, TU Jinxing, LIU Zhiwen, et al. Construction of a molecular marker linkage map and its use for QTL analysis of erucic acid content in *Brassica napus* L[J]. Acta Agronomica Sinica, 2005,31(3):275-282.
 - [27] 金梦阳,李加纳,付福友,等.甘蓝型油菜含油量及皮壳率的 QTL 分析[J].中国农业科学,2007,40(4):677-684.
 - [28] 孙中永,程爽,王继变,等.油菜含油量性状 QTL 关联分析及有利等位基因在品种中的构成分析[J].中国农业科学,2012,45(19):3921-3931.
 - [29] 李培武,赵永国,张文,等.中国甘蓝型油菜硫苷含量及组份分析[J].中国农业科学,2005,38(7):1346-1352.
 - [30] Jan N, Andrabi K. Cold resistance in plants: A mystery unresolved[J]. Electronic Journal of Biotechnology, 2009,12(3):1-15.
 - [31] Miura K J, Jin J B, Lee J Y, et al. SIZ1-mediated sumoylation of ICE1 controls CBF3/DREB1A expression and freezing tolerance in arabidopsis[J]. The Plant Cell, 2007,19(4):1403-1414.