

基于 GGE 双标图的北方旱寒区 冬油菜适应性分析

孙瑞^{1,2}, 杨刚^{3,4}, 张华², 孙万仓^{1,3,4}

(1.甘肃省油菜工程技术研究中心, 甘肃 兰州 730070; 2.兰州大学生命科学学院, 甘肃 兰州 730000; 3.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; 4.甘肃农业大学农学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要:为评判白菜型冬油菜品种(系)的抗寒性以及北方地区越冬的稳定性和适应性,对北方11个省(区、市)两年25个试点43点次试验的12个白菜型冬油菜品种的越冬率进行了GGE双标图法分析。结果表明,品种效应为55.12%,远远大于环境效应和品种与环境互作效应,为环境效应、品种与环境互作效应的2.5倍,因此,北方旱寒区冬油菜生产关键是选择超强抗寒品种。陇油6号、7号和12号品种抗寒性优良、越冬率稳定、广适性好,以‘陇油6号’和‘陇油7号’为最佳。GGE双标图分析还表明,本试验25个试点除祁县和天水两个试点外,其余试点对白菜型冬油菜品种抗寒性的鉴别力均较好,可作为北方冬油菜抗寒性鉴定的试点,以泾源、临河和靖边为最佳试点。同时将所有试点划分成不同的生态区,并筛选出了适宜不同生态区的特异适应性品种。‘陇油6号’和‘陇油7号’适于在参试的所有试点栽培;‘07泉兰DQW-1-3’和‘07兰州MXW-1-3’适于在拉萨、酒泉、定州、顺义、延边等地栽培;‘06468’适于在水天栽培。本研究表明,品种效应对冬油菜越冬率的影响占主导地位,但环境效应和品种与环境互作效应对冬油菜越冬率的影响也占较大比重,故在北方旱寒区冬油菜生产中,要综合考虑品种、环境及品种与环境互作效应,因地制宜地选择适宜地区以及不同地区的种植品种,才能保证安全越冬。

关键词:冬油菜;越冬率;品种适应性;生态适宜性;GGE双标图法;北方旱寒区

中图分类号:S565.4;S338 **文献标志码:**A

Adaptability analysis of winter rapeseed (*Brassica rapa* L.) in drought-cold regions of northern China based on GGE biplot

SUN Rui^{1,2}, YANG Gang^{3,4}, ZHANG Hua², SUN Wancang^{1,3,4}

(1. Gansu Research Center of Rapeseed Engineering and Technology, Lanzhou, Gansu 730070, China; 2. School of Life Science, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000, China; 3. Key Laboratory of Arid Land Crop Science in Gansu Province, Gansu Key Laboratory of Crop Improvement and Germplasm Enhancement, Lanzhou, Gansu 730070, China; 4. College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: This research mainly evaluated the index of cold resistance including capability, stability and adaptability of winter turnip rape (*Brassica rapa* L.) in northern China by using GGE Biplot (genotype and genotype by environment interaction) analysis based on the data of over wintering rates of 43 tests in 25 environments of northern China's 11 Provinces (Autonomous Regions, Cities) within two years continuously. The result showed that cultivar effect was 55.12%, which was 2.5 times of environment effect, cultivar-environment interaction effect respectively. Therefore, it was concluded that selecting varieties of super cold resistance played the outstanding role in the production of winter rapeseeds (*Brassica rapa* L.) in drought-cold regions of northern China. The cold-resistant capability and adaptability of ‘Longyou 6’ and ‘Longyou 7’ indicated they were the best among 12 winter rapeseeds (*Brassica rapa* L.) cultivars. GGE double plotting analysis also showed that except Qixian and Tianshui,

收稿日期:2022-08-22

修回日期:2023-03-24

基金项目:农业农村部强冬性油菜品种改良项目(CARS12-09);甘肃省科技重大专项(22ZD6NA009,17ZD2NA016-4);甘肃农业大学招博士科研启动项目(GAU-KYQD-2022-09, No.31560397);国家农业科技成果转化项目(2014G10000317)

作者简介:孙瑞(1995-),女,甘肃会宁人,硕士研究生,研究方向为植物逆境适应。E-mail: ruisun1212@163.com

通信作者:张华(1978-),女,甘肃庆阳人,副教授,主要从事植物逆境适应研究。E-mail: zhanghua@lzu.edu.cn

孙万仓(1957-),男,甘肃会宁人,教授,主要从事作物遗传育种研究。E-mail: 18293121851@163.com

the other 25 pilot sites had good discrimination of cold resistance of cabbage winter rape varieties, which could be used as a pilot project for cold resistance identification of northern winter rape, with Jingyuan, Linhe and Jingbian as the best pilot sites. However, different sets (ecological regions) had various ecological conditions significantly, so these regions had specific requirements for their special cultivar's adaptability. 'Longyou 6' and 'Longyou 7' adapt to all the pilot cultivation tested; '07 Gaolan DQW-1-3' and '07 Lanzhou MXW-1-3' are suitable for cultivation in Lhasa, Jiuquan, Dingzhou, Shunyi, Yanbian and other places. '06468' is suitable for cultivation in Tianshui. This study showed that the variety effect played a leading role in the winter rape overwintering rate, but the environmental effect and the interaction between variety and environment also account for a large proportion of the winter rape overwintering rate, so in the northern winter rapeseeds (*Brassica rapa* L.) production, it was necessary to comprehensively consider the variety, environment and the interaction between variety and environment, and select suitable areas and varieties in different areas according to local conditions in order to ensure safe winter.

Keywords: winter rapeseed (*Brassica rapa* L.); over wintering rate; variety adaptability; ecological suitable areas; GGE biplot; drought-cold regions of northern China

甘肃天水以北地区气候严寒干旱、极端低温低,降雨量少,蒸发量大,甘蓝型冬油菜无法安全越冬,该地区大部分耕地冬季闲置。甘肃农业大学孙万仓教授选育出了可抗 -32°C 极端低温的白菜型冬油菜品种‘陇油 6 号’及多个超强抗寒白菜型冬油菜品种,基本解决了北方旱寒区冬油菜安全越冬问题,并在我国首次提出冬油菜北移^[1-3]。

种植冬油菜可增加冬春季植被覆盖度,有效减少沙尘、保护环境;其产量、含油率高于其他春播油料作物;同时,由于成熟早,有利于一年一熟为一年两熟或两年三熟,提高复种指数^[4]。因此,冬油菜在北方旱寒区的生态效益和经济效益十分显著。但是,我国北方旱寒区冬季气候严寒干旱,冬油菜越冬环境条件十分严酷。因此,准确和客观地评价品种的抗寒性、稳定性及适应性,选择适宜的品种与栽培地区,对北方旱寒区冬油菜生产显得尤为重要。

作物性状的评价方法较多,如算术平均值和联合方差法^[5]、联合回归图法^[6]、AMMI 模型^[7-8]以及 GGE 双标图分析法^[9-11]。近年 GGE 双标图分析法越来越受到育种工作者重视。双标图可集品种评价、试点评价和品种生态区划于一体,是分析作物品种适应性的理想方法,已在小麦^[12-13]、大麦^[14-15]、水稻^[16]、豆类^[17-18]、玉米^[19-20]和甘蔗^[21]等作物上广泛应用。Yan^[14]等采用 GGE 双标图分析法为加拿大东部燕麦育种确定出了基本试验点。Kang 等^[15]采用 GGE 双标图分析法对菜豆多年多点试验的品种适应性和稳定性进行了分析。Kaya^[9]和 Jalata^[12]借助 GGE 双标图分析法分别筛选出了稳定高产的面包小麦和大麦理想品系,并对试验点生态区划进行了研究。从以上大量报道来

看,GGE 双标图分析法主要应用于作物产量稳定性评价研究,在评价冬油菜的基因与环境互作、品种抗寒性及生态适应性方面研究尚不充分。越冬率是农作物抗寒性强弱的直观体现,故本文采用 GGE 双标图法对北方 2011—2013 年 11 个省(区、市)中 25 个试点、43 点次白菜型冬油菜试验越冬率进行分析,旨在合理评价各品种的抗寒性和稳定性以及各试点冬油菜的适应性,为我国北方旱寒区乃至全球寒冷地区冬油菜生产与品种布局提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

参试的 12 份材料均为白菜型冬油菜,基本情况见表 1,以‘天油 4 号’为对照。

1.2 试验设计

在我国北方近 11 个省(区、市)的 25 个点进行两年多点试验,两年累计 43 点次。其中 2011—2012 年 23 点次,2012—2013 年 20 点次。各试点分布及基本情况见表 2。各试点田间试验设计按统一试验方案执行。采用随机区组试验设计,3 次重复,小区面积 24 m^2 ($4\text{ m}\times 6\text{ m}$)。各试点分别于 2011、2012 年 8 月中、下旬播种,开沟条播。越冬前后统计各小区田间出苗数,以此计算各品种(系)的越冬率。待田间油菜 70% 为蜡黄时按小区收获、考种、脱粒、称重。各试点灌溉、施肥、药剂防治等田间试验管理条件与大田生产一致。

1.3 数据分析方法

采用 GGE-Biplot 软件分析作图,软件由甘肃农业大学农学院白江平教授惠赠。利用线性统计模型,即表现型值(P)等于性状总体平均值(M)、品种主效益(G)、环境主效应(E)和品种-环境互作效应

(GE)之和,将区试试验数据进行环境中心化,并采用遗传力平方根 h 校正的 GGE 双标图。GGE 数学模型可表示为: $Y_{ij} - \bar{Y}_j = \xi_{i1}\eta_{j1} + \xi_{i2}\eta_{j2} + \varepsilon_{ij}$, $\xi_{in} = \lambda_n^{-\frac{1}{2}}\xi_{in}$, $\eta_{jn} = \lambda_n^{-\frac{1}{2}}\eta_{jn}$, $n=1,2$ 。式中, Y_{ij} 表示基因型 i 在环境 j 中的产量, \bar{Y}_j 表示所有基因型在环境 j 中的产量表现, ξ_{i1} 与 ξ_{i2} 分别表示基因型 i 在 PC1 与 PC2 的得分, η_{j1} 与 η_{j2} 分别表示基因型 j 在 PC1 与 PC2 的得分, ε_{ij} 为模型中的残差。用图中两向量间夹角

的大小来判断其之间的相关性(夹角 $< 90^\circ$ 为正相关,夹角 $> 90^\circ$ 为负相关,夹角 $= 90^\circ$ 表示无关),而其夹角余弦值表示两向量间的相关系数;而试验点向量长度代表试验点区分力,其与平均环境向量的角度大小来衡量环境代表性;图中平均环境轴(Average-environment axis, AEA)代表参试品系的总体平均产量,其箭头方向为正,各品系在 AEA 上的投影越靠右,则产量越高;AEC((Average environment coordinate axis)纵轴(即 Y 轴)代表品种的稳定性的

表 1 参试品种(系)基本情况

Table 1 Basic information of tested varieties (strains)

代码 Code	品种(系) Variety (strains)	类型 Type	供种单位 Source
G1	陇油 6 号 Longyou 6	白菜型 <i>Brassica rapa</i>	甘肃农业大学 Gansu Agricultural University
G2	陇油 7 号 Longyou 7	白菜型 <i>Brassica rapa</i>	甘肃农业大学 Gansu Agricultural University
G3	陇油 12 号 Longyou 12	白菜型 <i>Brassica rapa</i>	甘肃农业大学 Gansu Agricultural University
G4	07 皋兰 DQW-1-3 07 Gaolan DQW-1-3	白菜型 <i>Brassica rapa</i>	甘肃农业大学 Gansu Agricultural University
G5	07 兰州 MXW-1-3 07 Lanzhoumxw-1-3	白菜型 <i>Brassica rapa</i>	甘肃农业大学 Gansu Agricultural University
G6	07 兰天 2 号-2 07 Lantian 2-2	白菜型 <i>Brassica rapa</i>	甘肃农业大学 Gansu Agricultural University
G7	宁油 2 号 Ningyou 2	白菜型 <i>Brassica rapa</i>	宁县农技中心 Ningxian Agricultural Technologic Center
G8	平油 1 号 Pingyou 1	白菜型 <i>Brassica rapa</i>	平凉农科所 Pingliang Academy of Agricultural Sciences
G9	07302	白菜型 <i>Brassica rapa</i>	天水农科所 Tianshui Academy of Agricultural Sciences
G10	06468	白菜型 <i>Brassica rapa</i>	天水农科所 Tianshui Academy of Agricultural Sciences
G11	0737	白菜型 <i>Brassica rapa</i>	天水农科所 Tianshui Academy of Agricultural Sciences
G12	天油 4 号(CK) Tianyou 4	白菜型 <i>Brassica rapa</i>	天水农科所 Tianshui Academy of Agricultural Sciences

表 2 各试点基本情况

Table 2 Basic information of testing sites

代码 Code	试点 Site	省/自治区/直辖市 Province/Autonomous Region/City	纬度 Latitude	经度 Longitude	年均气温 Annual temperature/ $^\circ\text{C}$	最冷月平均气温 Coldest month temperature/ $^\circ\text{C}$	极端最低气温 Extreme low temperature/ $^\circ\text{C}$	冬季负积温 Negative accumulated temperature/ $^\circ\text{C}$
E1	乌鲁木齐 Urumqi	新疆 Xinjiang	43°77'	87°18'	7.3	-12.1	-30.0	-1093.0
E2	拉萨 Lhasa	西藏 Xizang	29°59'	94°25'	8.5	-0.7	-16.5	-51.7
E3	互助 Huzhu	青海 Qinghai	36°19'	102°51'	8.3	-5.8	-21.0	-422.5
E4	酒泉 Jiuquan	甘肃 Gansu	39°75'	98°52'	7.8	-8.9	-29.8	-746.8
E5	天水 Tianshui	甘肃 Gansu	34°06'	105°69'	11.4	-1.5	-17.4	-151.0
E6	武威 Wuwei	甘肃 Gansu	37°93'	102°63'	8.5	-7.2	-32.0	-520.5
E7	景泰 Jingtai	甘肃 Gansu	37°14'	104°05'	9.1	-6.1	-24.5	-469.0
E8	上川 Shangchuan	甘肃 Gansu	36°03'	103°40'	7.4	-8.5	-27.7	-660.0
E9	会宁 Huining	甘肃 Gansu	35°72'	150°08'	6.5	-6.4	-24.1	-527.5
E10	镇原 Zhenyuan	甘肃 Gansu	35°07'	107°22'	8.1	-8.9	-30.6	-706.4
E11	银川 Yinchuan	宁夏 Ningxia	38°47'	106°27'	9.5	-7.7	-26.1	-517.8
E12	泾源 Jingyuan	宁夏 Ningxia	35°05'	106°33'	9.4	-6.5	-24.3	-476.8
E13	临河 Linhe	内蒙古 Inner Mongolia	40°44'	107°22'	8.7	-9.3	-27.2	-792.8
E14	靖边 Jingbian	陕西 Shaanxi	37°61'	107°89'	8.8	-7.3	-27.3	-528.9
E15	祁县 Qixian	山西 Shanxi	37°35'	112°33'	10.1	-7.9	-24.1	-510.9
E16	晋源 Jinyuan	山西 Shanxi	37°73'	112°48'	10.4	-7.0	-23.3	-335.1
E17	天津 Tianjin	天津 Tianjin	38°51'	116°51'	12.9	-3.0	-18.1	-245.1
E18	顺义 Shunyi	北京 Beijing	40°73'	116°85'	13.2	-7.3	-17.0	-207.8
E19	定州 Dingzhou	河北 Hebei	36°06'	114°47'	9.2	-11.2	-24.9	-694.3
E20	葫芦岛 Huludao	辽宁 Liaoning	40°18'	120°25'	8.5	-7.6	-32.9	-1006.2
E21	绥中 Suizhong	辽宁 Liaoning	40°20'	120°18'	9.9	-9.3	-26.4	-535.3
E22	普兰店 Pulandian	辽宁 Liaoning	39°23'	121°58'	9.7	-2.7	-18.8	-307.1
E23	凤城 Fengcheng	辽宁 Liaoning	40°47'	124°05'	9.2	-8.3	-25.8	-560.4
E24	长春 Changchun	吉林 Jilin	43°87'	126°57'	6.1	-13.0	-33.7	-1382.0
E25	延边 Yanbian	吉林 Jilin	42°52'	129°30'	5.7	-10.7	-31.4	-1165.7

联合方差和显著性分析分别采用软件 DPS 7.05 和 Spss 19.0 处理。

2 结果与分析

2.1 冬油菜品种(系)越冬率变异分析

从表 3、表 4 可知,品种(系)间平均越冬率的两年度数据分析结果基本一致。2011—2012 年度,G1(陇油 6 号)和 G2(陇油 7 号)越冬率最高,分别为 80.88 和 82.70,G12(天油 4 号)最低,为 46.09。综合两年数据分析,在 E9(会宁)和 E15(祁县)试点平均越冬率较高;而在 E22(普兰店)、E20(葫芦岛)、E13(临河)、E14(靖边)等试点平均越冬率较低,这些试点气候条件差,抗寒性较弱的品种(系)不能安全越冬。可见,我国北方冬油菜越冬率在品种间、环境间存在显著差异。

联合方差分析表明(表 5),两年数据结果的规

律基本一致,且品种间(G)与试点间(E)和品种与环境互作(G×E)均存在极显著差异。两年均值表明,品种间(G)的平均变异平方和占总平方和的 55.12%,试点间(E)和品种与环境互作(G×E)分别占 22.22%和 22.66%。由此可见,品种(系)间抗寒性的强弱是影响北方地区冬油菜安全越冬能力的主要原因,品种效应对越冬率的影响分别是环境效应和品种与环境互作效应的近 2.5 倍,而 E 和 G×E 二者对越冬率的影响基本相同,也占较大比例。

2.2 冬油菜品种(系)抗寒性与稳定性分析

在 GGE 双标图中,水平方向的单箭头直线是平均环境轴(AEA),所指方向为品种在所有环境下的近似平均值。箭头所示方向为正,即各个品种(系)在 AEA 上的投影点越靠右,其越冬率越高。图 1 中主成分 PC1 和 PC2 分别解释了 2011—2012 年 82.6%和 2012—2013 年 66.0%的变异信息,其集中了

表 3 2011—2012 年冬油菜品种(系)越冬率表现/%

Table 3 Performance of over wintering rate (%) of winter rapeseed varieties (strains) in northern China during 2011—2012

试点 Site	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10	G11	G12	平均 Average	位次 Rank
E2	72.03	83.44	71.17	76.63	79.57	59.07	66.66	33.15	60.76	59.37	42.47	47.59	62.66kK	11
E3	85.20	84.67	79.64	82.12	79.02	81.25	60.06	79.47	53.15	71.43	73.17	69.23	74.87gG	7
E4	78.20	77.95	47.24	82.56	89.92	45.58	54.97	44.75	49.76	51.11	36.36	40.03	58.20lL	13
E6	77.77	87.62	72.86	51.23	41.79	53.80	25.82	30.03	29.16	24.05	39.22	11.87	45.43qQ	18
E7	91.63	90.88	87.88	93.63	89.69	83.38	81.90	75.31	74.58	76.30	73.73	78.30	83.10dD	4
E8	87.41	90.00	73.66	77.83	75.13	76.60	62.79	60.37	46.73	35.66	41.97	44.92	64.42jJ	10
E9	91.92	90.06	90.32	91.58	92.07	83.34	78.56	80.65	79.95	74.71	78.84	77.79	84.15bB	2
E10	94.01	92.03	80.87	82.69	72.97	83.07	78.97	89.87	76.06	80.59	79.81	80.13	82.59eE	5
E11	76.81	80.10	65.23	77.03	73.20	66.00	56.27	58.93	60.75	59.97	56.90	54.80	65.50iI	9
E12	92.91	91.78	77.10	86.80	81.81	77.02	78.00	73.16	70.90	72.06	71.98	72.91	78.87fF	6
E13	72.91	74.14	36.15	65.17	61.41	30.39	28.13	25.10	14.13	13.68	11.93	10.24	36.95tT	21
E14	80.99	82.76	72.43	68.09	42.58	35.02	33.63	33.37	21.26	21.02	20.50	18.65	44.19rR	19
E15	87.02	85.18	81.27	78.57	86.49	84.64	82.18	84.03	85.26	83.30	85.63	81.28	83.74cC	3
E16	80.22	80.95	75.99	81.15	77.23	74.13	71.07	72.10	70.32	68.84	68.29	63.07	73.61hH	8
E17	74.13	76.60	65.87	70.63	71.30	66.63	34.13	44.17	35.29	41.26	45.12	49.11	56.19mM	14
E18	98.30	97.21	90.47	96.95	98.53	98.34	78.24	76.14	77.56	79.42	81.71	80.38	87.77aA	1
E19	72.27	83.21	71.05	76.18	79.78	58.93	66.43	33.17	60.65	59.38	42.73	47.66	62.62kK	12
E20	70.18	70.07	22.07	60.00	43.97	22.93	19.87	6.40	7.76	14.83	21.16	14.97	31.18uU	22
E21	77.10	80.94	70.52	44.56	84.28	22.04	24.70	71.63	47.70	0.93	51.89	11.61	48.99oO	16
E22	82.52	82.93	45.03	10.30	7.20	17.78	9.79	24.66	10.84	14.34	12.92	15.43	27.81vV	23
E23	75.06	74.06	46.50	70.97	71.70	40.43	38.17	37.07	33.90	27.30	24.83	26.00	47.17pP	17
E24	70.00	72.66	37.43	66.48	59.03	35.43	29.23	25.73	21.20	19.67	19.77	23.15	39.98sS	20
E25	71.60	72.77	55.00	66.77	60.97	42.07	44.14	47.96	45.10	45.23	40.08	40.84	52.71nN	15
平均 Average	80.88bB	82.70aA	65.90eE	72.08cC	70.42dD	58.17fF	52.33hG	52.49gG	49.25iH	47.58kJ	48.74jI	46.09lK		
位次 Rank	2	1	5	3	4	6	8	7	9	11	10	12		

注:表中不同大、小写字母分别表示差异极显著($P<0.01$)和差异显著($P<0.05$)。横行平均值代表同一品种在不同参试点的差异;纵列平均值代表同一参试点不同品种间的差异。多重比较采用 S-N-K 法,下同。

Note: The different uppercase and lowercase letters in the table indicate extremely significant differences ($P<0.01$) and significant differences ($P<0.05$), respectively. The horizontal average represents the differences of the same variety in different pilot sites. The column average represents the differences between different varieties in the same pilot site. The S-N-K method is used for multiple comparisons. The same below.

表 4 2012—2013 年区试品种(系)越冬率表现/%

Table 4 Performance of over wintering rate (%) of winter rapeseed varieties (strains) in northern China during 2012–2013

试点 Site	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10	G11	G12	平均 Average	位次 Rank
E1	98.60	98.30	63.53	97.50	89.87	78.70	81.60	69.47	80.37	62.82	83.90	62.00	80.55jI	12
E2	69.10	78.30	66.53	74.57	57.83	43.46	59.53	44.89	55.97	56.37	59.17	55.93	60.14mL	16
E3	94.30	94.73	85.97	94.99	94.97	87.96	79.90	80.94	79.93	77.93	74.80	74.97	85.12eD	6
E4	98.50	96.73	95.86	90.70	98.07	71.70	85.73	69.59	81.28	94.47	84.47	60.43	85.63dC	5
E5	95.23	90.22	88.72	90.37	90.71	96.33	83.59	90.77	95.25	94.31	94.47	93.19	91.93aA	1
E6	94.07	92.91	88.67	92.08	93.80	85.88	84.37	86.78	79.77	81.77	83.80	80.30	87.02cB	3
E7	94.03	94.87	77.77	93.67	94.03	76.40	70.90	78.83	79.06	75.00	78.85	79.96	82.78hG	10
E8	92.77	79.76	39.99	51.05	38.53	23.44	37.48	53.56	31.86	72.37	59.21	23.79	50.32oN	18
E9	90.50	92.03	94.07	89.63	89.23	82.80	77.83	88.10	79.93	79.73	81.03	82.97	85.66dC	4
E10	95.17	95.70	85.40	86.00	82.07	86.63	64.07	87.03	82.17	83.77	81.83	85.30	84.59fE	7
E11	89.83	90.91	77.92	81.73	79.77	74.93	74.73	70.93	73.87	75.99	75.94	73.97	78.38kJ	14
E12	94.80	93.77	77.63	87.97	84.87	79.92	80.84	81.86	80.78	78.81	77.93	77.90	83.09gF	9
E13	75.90	76.35	39.00	68.05	66.49	38.66	35.30	32.00	26.47	23.80	25.92	25.23	44.43qP	20
E14	79.93	83.80	75.53	71.97	46.77	40.90	38.63	35.70	24.69	24.11	22.53	20.80	47.11pO	19
E15	90.23	91.11	86.88	89.33	85.27	91.37	85.93	88.97	82.99	84.52	85.34	85.64	87.30bB	2
E16	83.02	83.20	82.20	85.53	89.35	80.27	78.07	77.87	82.07	79.71	80.53	80.37	81.85iH	11
E17	80.16	79.08	86.45	78.12	75.56	84.17	44.17	44.90	50.75	61.63	54.71	54.07	66.15iK	15
E18	89.87	90.83	84.80	84.83	89.93	89.94	89.93	82.77	90.70	60.00	59.90	85.00	83.21gF	8
E20	96.85	80.89	70.47	44.30	84.17	20.10	24.67	71.67	47.49	4.57	52.03	11.73	50.74nM	17
E25	98.61	80.37	63.43	97.47	89.84	78.53	81.73	69.43	97.27	62.90	83.70	61.80	80.42jI	13
平均 Average	90.07aA	88.19bB	76.54cC	82.49dD	81.06eE	70.60fF	67.95gG	70.30ghGH	70.13hH	66.73iI	70.00jJ	63.77kK		
位次 Rank	1	2	5	3	4	6	10	7	8	11	9	12		

表 5 北方冬油菜品种(系)越冬率联合方差分析

Table 5 Combined analysis of over wintering rate variance of winter rapeseed varieties (strains) in northern China

变异来源 Source of variation	自由度 DF		平方和 SS		占总平方和 的百分比/% Percentage of SS		均方 MS		F 值 F value	
	2012	2013	2012	2013	2012	2013	2012	2013	2012	2013
总变异 Total	827	719	493843.1	291468.2						
处理 Treatment	46	40	1252.8	1433.0			27.23	35.83	146.73 **	148.46 **
基因型 (G)	22	19	266336.6	162840.8	54.08	56.17	12106.21	8570.57	65224.91 **	35515.97 **
环境 (E)	11	11	134222.2	49825.0	27.25	17.19	12202.02	4529.54	65741.12 **	18770.18 **
交互作用 (G×E)	242	209	91937.6	77263.2	18.67	26.65	379.91	369.68	2046.84 **	1531.94 **
误差 Error	506	440	93.9	106.2			0.19	0.24		

注: ** 代表极显著水平 ($P < 0.01$)。

Note: ** stands for significance level at $P < 0.01$.

G+GE 的大部分变异信息,由此可知分析结果可靠性较高。两年的分析结果基本一致,在 AEC 纵轴右边的品种,其越冬率大于平均值,而左边的品种越冬率小于平均值。越冬率最高的为 G2(陇油 7 号),其次为 G1(陇油 6 号),G4(07 皋兰 DQW-1-3)、G5(07 兰州 MXW-1-3)、G3(陇油 12 号)越冬率依次降低,越冬率最低的是 G12(天油 4 号)。

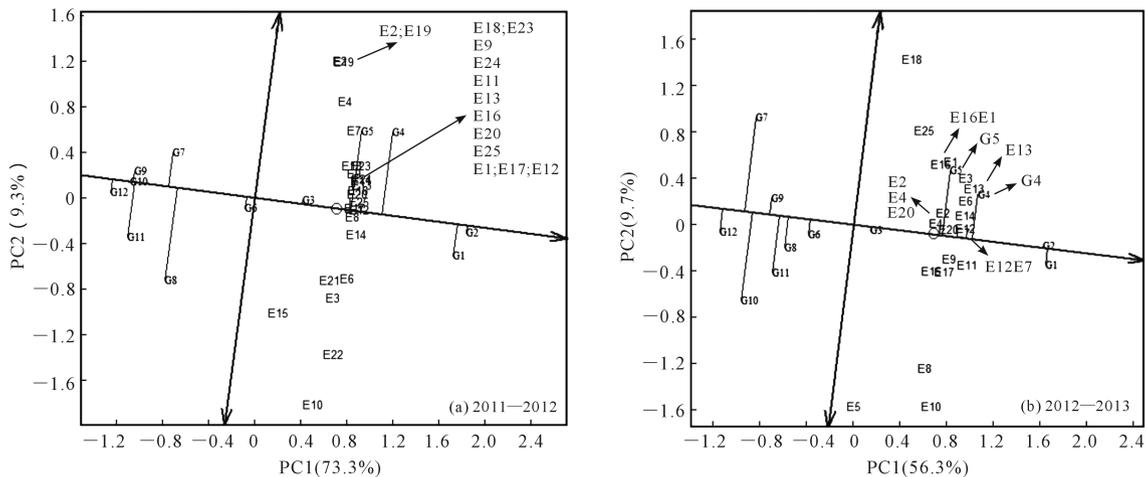
与 AEA 垂直并通过原点的、带双箭头的直线 (AEC)代表各品种(系)与各环境相互作用的倾向性。箭头向外指向较大的不稳定性,越偏离 AEA 越

不稳定。本试验中,G4(07 皋兰 DQW-1-3)、G5(07 兰州 MXW-1-3)和 G8(平油 1 号)的稳定性较差。而稳定性最高的是 G2(陇油 7 号)和 G3(陇油 12 号),其次是 G1(陇油 6 号)、G6(07 兰天 2-2)、G9(07302)和 G12(天油 4 号)虽表现出了较好的稳定性,但 G9 和 G12 是稳定的越冬率低。综合越冬率和稳定性,表现最好的品种为 G2(陇油 7 号)、G1(陇油 6 号)和 G3(陇油 12 号)。可见,在北方旱寒区品种的越冬率有显著差异。

2.3 北方冬油菜品种的广适性

借助双标图中的 AEC 和 AEA 轴可以直观地确定最适宜的冬油菜品种,最适宜的冬油菜品种是指其抗寒性与稳定性在所有试点是最好的,广适性最强。以理想中最适宜的冬油菜品种为圆心,作若干同心圆,依据冬油菜品种(系)与圆心的距离进行最优选择,离圆心越近越理想,广适性就

愈强。图 2 中,G1(陇油 6 号)和 G2(陇油 7 号)品种离圆心最近,而且 2.1 节和 2.2 节中分析表明二者在两年试验中越冬率最高且较稳定,故在参试品种中广适性最强,其次分别是 G4(07 皋兰 DQW-1-3)、G5(07 兰州 MXW-1-3)和 G3(陇油 12 号)。而 G12(天油 4 号)、G10(06468)等品种广适性较差。

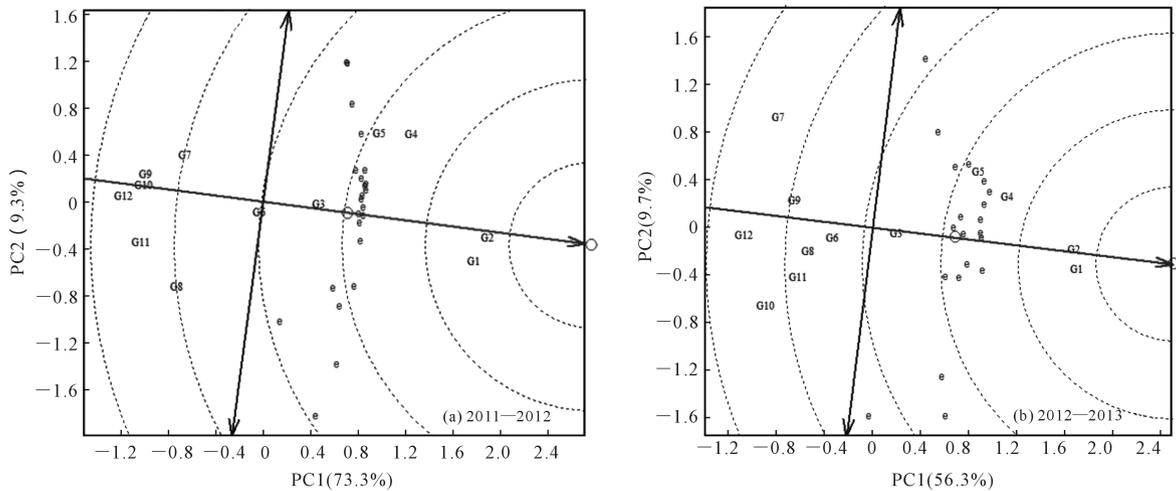


注:PC1 和 PC2 分别表示第一主成分和第二主成分,百分数表示解释的方差百分比,下同。

Note: PC1 and PC2 represent the first and second principal components, respectively, and the percentages represent the explained variance percentage, the same as below.

图 1 基于 GGE 双标图分析参试品种(系)的抗寒性和稳定性

Fig.1 GGE-biplot analysis of cold resistance performance and stability of winter rapeseed varieties (strains)



注:e 代表试验地点。

Note: e represents the testing locations.

图 2 最适宜的冬油菜品种(系)

Fig.2 Ideal varieties (strains) based on both mean and stability

2.4 参试试点抗寒鉴定代表性及最优选择

各试点向量长度是试点对冬油菜品种抗寒性鉴别能力的度量,而试点向量与平均环境向量的夹角则是试点对冬油菜品种抗寒性鉴别能力代表性的度量。角度越小,鉴别冬油菜品种抗寒性能力的

代表性越好;角度越大则越差。如果一个试点与平均环境向量的夹角是钝角,则它不适合鉴别冬油菜品种的抗寒性。综合两年数据分析来看,图 3 中各试点向量长度除 E15(祁县)外,其余都较长,说明各试点对冬油菜的抗寒性都具有较强的鉴别能力。

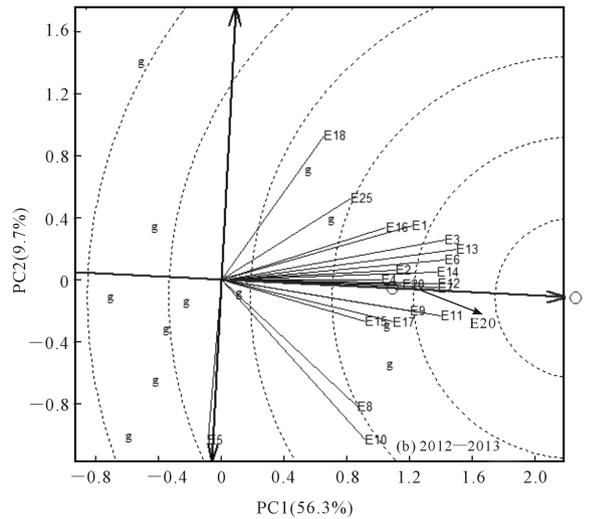
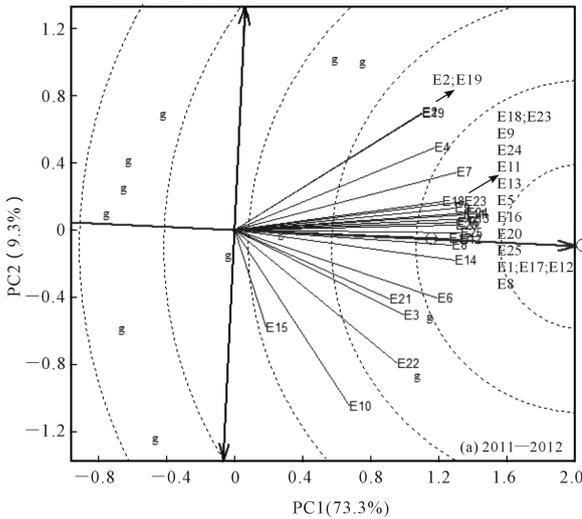
各试点向量与平均环境向量的夹角除 E5(天水)外都小于 90° , 其中 E4(酒泉)、E12(泾源)、E13(临河)、E14(靖边)、E20(葫芦岛)较小, 说明这些试点对冬油菜品种抗寒性鉴定具有很好的代表性。从气候条件看, E15(祁县)是一个相对气候温和地区, 对品种的抗寒性要求不甚严格, 大部分冬性白菜型冬油菜品种均能稳定越冬, 越冬率差异不大。而其他试点气候则较严寒, 对品种的抗寒性要求严格, 抗寒性差的品种越冬率越低。

借助双标图中的 AEC 和 AEA 轴可以直观地确定冬油菜抗寒性鉴定的最佳试点, 最适宜的冬油菜抗寒性鉴定的试点是指对冬油菜不同品种抗寒性分辨能力最强, 能够较清晰地把参试品种抗寒性进行鉴定、分级、而且是在所有试点中最具有普遍代

表性的试点。以理想中最适宜的冬油菜抗寒性鉴定的试点为圆心, 作若干同心圆, 依据试点与圆心的距离, 进行最优选择。离圆心越近越理想。可见试点 E12(泾源)、E13(临河)和 E14(靖边)等为最适宜的冬油菜抗寒性鉴定的试点(图 3)。

2.5 冬油菜品种适应性与生态适宜地区分析

各试验点向量与品系向量夹角的余弦是品系与试点相互作用效应的度量, 夹角小于 90° 表现为正向交互效应, 即该试点适应该品系种植; 夹角大于 90° 则为负向交互效应, 即该试点不适宜该品系种植。图 4 中, G1(陇油 6 号)、G2(陇油 7 号)和 G3(陇油 12 号)与所有试点的向量夹角小于 90° , 表现出正交互效应, 说明这 3 个品种的适应性很强, 适宜所有试点种植。G4(07 皋兰 DQW-1-3)和 G5(07 兰



注: g 代表参试品种。

Note: g represents the tested varieties.

图 3 最适宜的冬油菜品种(系)与最适宜的冬油菜抗寒性鉴定试点分析

Fig.3 Ideal varieties (lines) and optimal environment based on both mean and stability

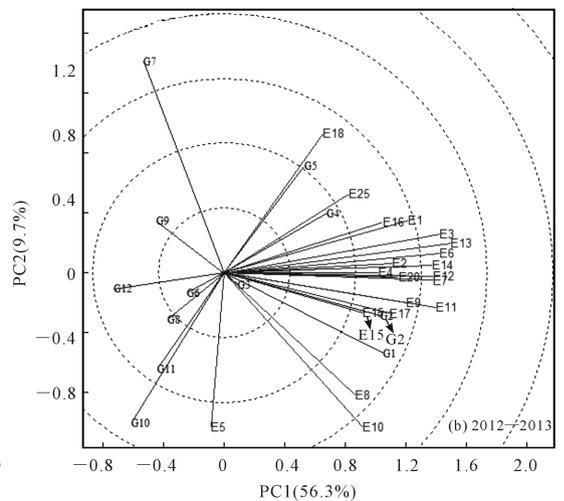
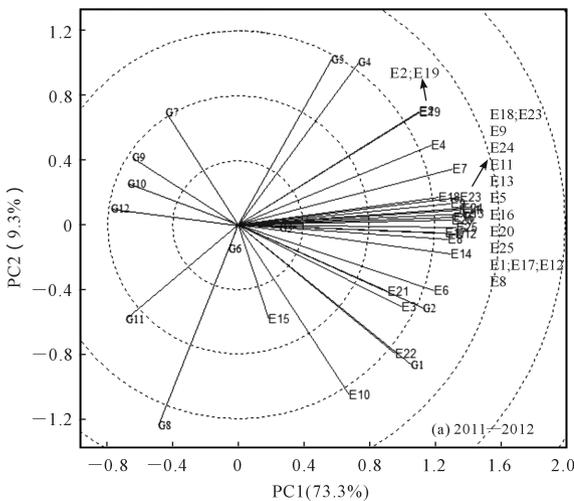


图 4 基于 GGE 双标图的品种与试点的相关性

Fig.4 Relevance of cultivars and test sites based on GGE-biplot analysis

州 MXW-1-3)除与 E5(天水)、E10(镇原)和 E15(祁县)表现出负交互效应外,与其余试点均表现出正交互效应,说明 G4 和 G5 两个品种适宜除 E5、E10 和 E15 以外的所有试点种植。而其余品种(系)除与个别试点正向交互外,与大部分试点表现为负交互作用,说明这些品种适应性较差。两年数据分析结果基本一致,个别品种年份间有一定变化,如 2011—2012 年, G4 与 E10 负向交互,但在 2012—2013 年表现出了正向交互,这种情况主要是由于 E10 试点两年气候变化较大。

将图 5 中同一方向离原点最远的品种用直线相连,构成一个多边形,其余品种则全部落在多边形中。过原点作各边的垂线,将双标图分成几个扇形区,将试点划分成不同的生态区。各生态区顶角的品种是在本区各试点表现最适宜品种,而离原点越近的品种对环境变化不敏感。两年的分析结果规律一致。2011—2012 年,可将所有试点划分为 3 个生态区,第一生态区的试点有 E2(拉萨)、E4(酒泉)和 E19(定州),而 G4(07 皋兰 DQW-1-3)和 G5(07

兰州 MXW-1-3)是该区最适应的品种;第二生态区的试点有 E7(景泰)、E14(靖边)、E23(丹东凤城)和 E18(顺义)等 14 个试点,而该区表现最好的品种为 G2(陇油 7 号)和 G4(07 皋兰 DQW-1-3);第三生态区的试点有 E3(互助)、E6(武威)、E10(镇原)、E15(祁县)、E20(葫芦岛)和 E22(普兰店),该区表现最好的是 G1(陇油 6 号)和 G2(陇油 7 号)。2012—2013 年,可将所有试点划分为 4 个生态区,第一生态区的试点只有 E18(顺义)和 E25(延边),G5(07 兰州 MXW-1-3)是该区最适宜的品种(系);第二生态区的试点有 E1(乌鲁木齐)、E3(互助)、E6(武威)、E13(临河)、E16(晋源),在该区表现较好的品种(系)是 G5(07 兰州 MXW-1-3)和 G2(陇油 7 号);第三生态区包含了除 E5(天水)以外的其余所有试点,而表现最好的品种(系)为 G1(陇油 6 号)和 G2(陇油 7 号);第四生态区的试点只有 E5(天水),该区表现最好的是 G10(06468),越冬率达到 94.31%。两年数据分析显示 G2(陇油 7 号)是许多试点表现最好的品种。

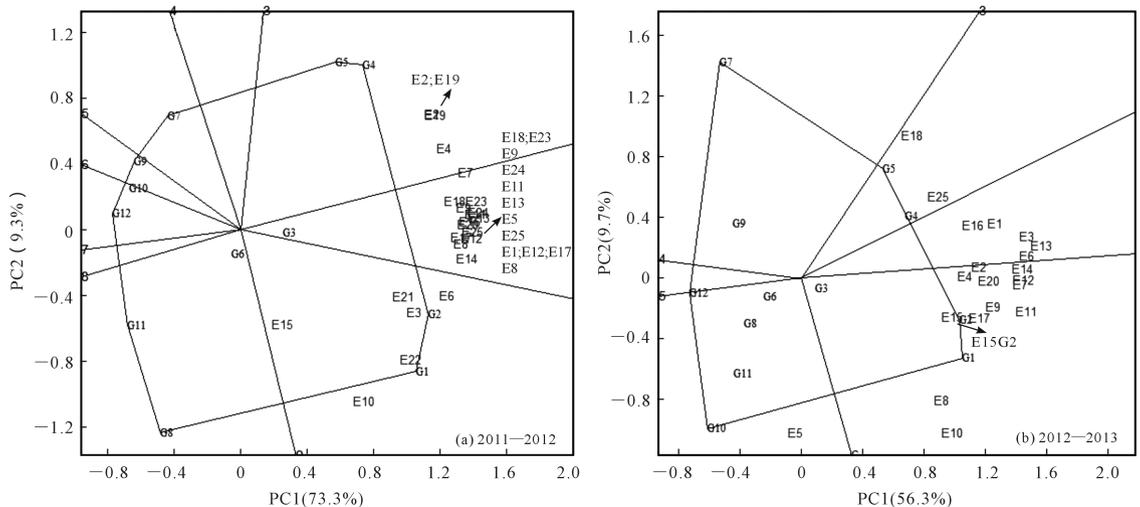


图 5 基于 GGE-biplot 双标图分析冬油菜参试品种(系)的适应性

Fig.5 Adaptability of winter rapeseed varieties (lines) based on GGE-biplot analysis

3 讨论

3.1 在北方旱寒区冬油菜生产中选择超强抗寒品种是关键

本试验涉及北方 11 个省(区、市),两年共进行了 25 个试点 43 点次试验。研究表明,就北方冬油菜越冬率而言,品种效应为 55.12%,大于环境效应和品种与环境交互效应,为环境效应、品种与环境交互效应的 2.5 倍。这个结果与许多研究者对其他作物产量等性状的研究结果有所不同。前人许多研究表明,环境和基因型环境互作引起的产量等数

量性状的差异远大于基因型引起的差异^[21-22],其原因可能是品种间差异较小。而在本研究中,主要对越冬率进行了分析,越冬率是抗寒性强弱的最直观表现,品种效应远远大于环境效应,决定越冬率的主要因子是品种基因型。‘陇油 6 号’、‘陇油 7 号’和‘陇油 12 号’的抗寒性远远优于其他品种,能够在冬季极端低温-32℃条件下安全越冬。同时,试点分布于中国北方各省(区、市),气候生态条件差异巨大。因此,抗寒性强的品种往往表现出优良的适应性,反之则相反。由此可见,在北方旱寒区冬油菜生产中选择超强抗寒品种是关键。

3.2 陇油系列品种广适性强

冬油菜在各试点的效应也反映出冬油菜对各试点的适应性,本研究表明不同冬油菜品种对各试点的适应性有较大差异。其中‘陇油 6 号’、‘陇油 7 号’和‘陇油 12 号’与所有试点表现出正向交互效应,说明其在各参试试点的适应性最为优异,是具备抗寒性优良、越冬率稳定、广泛适应性的品种。‘07 皋兰 DQW-1-3’和‘07 兰州 MXW-1-3’除个别试点外,与其余试点均表现出正向交互效应,也表现出了较好的适应性。而‘宁油 2 号’和‘天油 4 号’等品种除与少数试点为正向交互效应外,与大部分试点表现出正向交互效应,适应性较差。由此可见,‘陇油 6 号’、‘陇油 7 号’和‘陇油 12 号’以优异的抗寒性表现出了极强的广适性。

3.3 参试试点对白菜型冬油菜品种抗寒性的鉴别力

通过多点试验,选择能够对冬油菜的抗寒性做出准确鉴定的有代表性的试点对北方冬油菜多点试验至关重要。本试验通过 25 个试点、43 点次试验表明,除祁县和天水两个试点外,其余试点对白菜型冬油菜品种抗寒性的鉴别力均较好,说明本试验试点的选择较合理。祁县和天水两个试点气候条件温和,所有冬油菜参试品种越冬率在 75% 以上,能安全越冬,但参试品种的越冬率差异性不显著,不能对参试品种的抗寒性进行分级、分类。在所有的试点中,宁夏泾源、内蒙古临河和陕西靖边鉴别力最高,为北方冬油菜抗寒性鉴定最佳试点。

3.4 北方冬油菜生产中要因地制宜地选择适宜地区以及品种

本研究中联合方差分析表明,品种效应虽是影响冬油菜越冬率的主要因素,但品种与环境互作及环境效应也占较大比例,故不可忽视二者对冬油菜越冬率的影响。因此,在北方冬油菜生产中,在选择抗寒品种的基础上,要综合考虑品种、环境及品种与环境互作效应等问题,因地制宜地选择适宜地区以及适宜不同地区的种植品种。本研究借助 GGE 双标图,将参试试点划分成不同的生态区,并筛选出适宜不同生态区的特异适应性的品种。如‘陇油 6 号’和‘陇油 7 号’在所有试点越冬率 70% 以上(除 2012—2013 年拉萨试点‘陇油 6 号’越冬率为 69.1%),适应参试的所有试点栽培;‘07 皋兰 DQW-1-3’和‘07 兰州 MXW-1-3’适应于拉萨、酒泉、定州、顺义及延边等地栽培;‘06468’适应于天水栽培。在参试试点中,内蒙古临河等试点虽然能够对冬油菜的抗寒性进行分级、做出客观评价,但

这些试点不是北方冬油菜最适宜种植区,在发展冬油菜生产时尤其要注意选择抗寒品种。

4 结 论

本研究对北方 11 个省(区、市)两年 25 个试点 43 点次试验中品种的越冬率进行 GGE 双标图分析,结果表明品种效应为 55.12%,为环境效应、品种与环境互作效应的 2.5 倍,远大于环境效应和品种与环境互作效应,因此,北方旱寒区冬油菜生产的关键是选择超强抗寒品种。‘陇油 6 号’、‘陇油 7 号’和‘陇油 12 号’抗寒性优良、越冬率稳定、广适性好,以‘陇油 6 号’和‘陇油 7 号’为最佳。通过 GGE 双标图分析还表明,25 个试点除祁县和天水两个试点外,其余试点对白菜型冬油菜品种抗寒性的鉴别力均较好,可作为北方冬油菜抗寒性鉴定的试点,以泾源、临河和靖边为最佳试点。本研究发 现品种效应虽对冬油菜越冬率的影响最大,但环境效应和品种与环境互作效应对冬油菜越冬率的影响也占较大比例,故在北方旱寒区冬油菜生产中,要综合考虑品种、环境及品种与环境互作效应,因地制宜地选择适宜地区以及适宜不同地区的种植品种。

致谢:感谢甘肃农业大学白江平教授惠赠 GGE-Biplot 分析软件。

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行性研究[J]. 中国农业科学, 2007, 40(12): 2716-2726.
SUN W C, MA W G, LEI J M, et al. Study on adaptation and introduction possibility of winter rapeseed to dry and cold areas in northwest China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(12): 2716-2726.
- [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.
SUN W C, WU J Y, FANG Y, et al. Growth and development characteristics of winter rapeseed northern-extended from the cold and arid regions in China[J]. Acta Agronomica Sinica, 2010, 36(12): 2124-2134.
- [3] 孙万仓, 刘自刚, 周冬梅, 等. 北方冬油菜北移与区划[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 21-24.
SUN W C, LIU Z G, ZHOU D M, et al. Northern winter oilseed rape northward migration and zoning[M]. Beijing: Science Press, 2016: 21-24.
- [4] GAUCH H G, Jr, ZOBEL R W. Identifying mega-environments and targeting genotypes[J]. Crop Science, 1997, 37(2): 311-326.
- [5] GAUCH H G, Jr, PIEPHO H P, ANNICCHIARICO P. Statistical analysis of yield trials by AMMI and GGE: further considerations[J]. Crop Science, 2008, 48(3): 866-889.
- [6] YAN W K. GGEbiplot—a windows application for graphical analysis of multi-environment trial data and other types of two-way data[J]. Agronomy Journal, 2001, 93(5): 1111-1118.

- [7] YAN W K, TINKER N A. Biplot analysis of multi-environment trial data: principles and applications[J]. Canadian Journal of Plant Science, 2006, 86(3): 623-645.
- [8] YAN W K, KANG M S, MA B L, et al. GGE biplot vs. AMMI analysis of genotype-by-environment data [J]. Crop Science, 2007, 47 (2): 643-653.
- [9] KAYA Y, AKÇURA M, TANER S. GGE-biplot analysis of multi-environment yield trials in bread wheat [J]. Turkish Journal of Agriculture and Forestry, 2006, 30(5): 325-337.
- [10] MOHAMMADI R, HAGHPARAST R, AMRI A, et al. Yield stability of rainfed durum wheat and GGE biplot analysis of multi-environment trials [J]. Crop and Pasture Science, 2010, 61(1): 92-101.
- [11] DEHGHANI H, EBADI A, YOUSEFI A. Biplot analysis of genotype by environment interaction for barley yield in Iran [J]. Agronomy Journal, 2006, 98(2): 388-393.
- [12] JALATA Z. GGE-biplot analysis of multi-environment yield trials of barley (*Hordeum vulgare* L.) genotypes in Southeastern Ethiopia highlands [J]. International Journal of Plant Breeding and Genetics, 2011, 5(1): 59-75.
- [13] SAMONTE S O P, WILSON L T, MCCLUNG A M, et al. Targeting cultivars onto rice growing environments using AMMI and SREG GGE biplot analyses [J]. Crop Science, 2005, 45(6): 2414-2424.
- [14] YAN W K, RAJCAN I. Biplot analysis of test sites and trait relations of soybean in Ontario [J]. Crop Science, 2002, 42(1): 11-20.
- [15] KANG M S, AGGARWAL V D, CHIRWA R M. Adaptability and stability of bean cultivars as determined via yield-stability statistic and GGE biplot analysis [J]. Journal of Crop Improvement, 2006, 15(1): 97-120.
- [16] SETIMELA P S, VIVEK B, BÄNZIGER M, et al. Evaluation of early to medium maturing open pollinated maize varieties in SADC region using GGE biplot based on the SREG model [J]. Field Crops Research, 2007, 103(3): 161-169.
- [17] BALESTRE M, DE SOUZA J C, VON PINHO R G, et al. Yield stability and adaptability of maize hybrids based on GGE biplot analysis characteristics [J]. Crop Breeding and Applied Biotechnology, 2009, 9 (3): 219-228.
- [18] ALWALA S, KWOLEK T, MCPHERSON M, et al. A comprehensive comparison between Eberhart and Russell joint regression and GGE biplot analyses to identify stable and high yielding maize hybrids [J]. Field Crops Research, 2010, 119(2/3): 225-230.
- [19] GLAZ B, KANG M S. Location contributions determined via GGE biplot analysis of multi-environment sugarcane genotype-performance trials [J]. Crop Science, 2008, 48(3): 941-950.
- [20] YAN W K, FRÉGEAU-REID J, PAGEAU D, et al. Identifying essential test locations for oat breeding in eastern Canada [J]. Crop Science, 2010, 50(2): 504-515.
- [21] FREEMAN G H, PERKINS J M. Environmental and genotype-environmental components of variability VIII. Relations between genotypes grown in different environments and measures of these environments [J]. Heredity, 1971, 27(1): 15-23.
- [22] ROMAGOSA I, FOX P N. Genotype × environment interaction and adaptation [M] // HAYWARD M D, BOSEMARK N O, ROMAGOSA I. Plant breeding: principles and prospects. Dordrecht: Springer, 1993: 373-390.

(上接第 11 页)

- [28] 曾德志, 杨华伟, 向仕华, 等. 甘蓝型油菜种质资源耐旱性鉴定与筛选 [J]. 湖北农业科学, 2017, 56(1): 10-12.
- ZENG D Z, YANG H W, XIANG S H, et al. Selection and evaluation on drought resistance of rapeseed (*Brassica napus* L.) resources [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2017, 56(1): 10-12.
- [29] 朱宗河. 甘蓝型油菜耐旱种质筛选及耐旱相关性状遗传分析 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2011.
- ZHU Z H. Genome-wide association study identifies candidate genes for drought tolerance in *Brassica napus* [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2011.
- [30] 朱宗河, 郑文寅, 张学昆. 甘蓝型油菜耐旱相关性状的主成分分析及综合评价 [J]. 中国农业科学, 2011, 44(9): 1775-1787.
- ZHU Z H, ZHENG W Y, ZHANG X K. Principal component analysis and comprehensive evaluation on morphological and agronomic traits of drought tolerance in rapeseed (*Brassica napus* L.) [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(9): 1775-1787.
- [31] 原小燕, 符明联, 何晓莹. 不同抗旱性油菜种子萌发期抗旱指标比较研究 [J]. 干旱地区农业研究, 2012, 35(5): 77-81.
- YUAN X Y, FU M L, HE X Y. The comparative study on drought resistance index of rape with different drought resistance in germination [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2012, 35(5): 77-81.
- [32] 佚名. 经济作物种子 第 2 部分: 油料类 (GB 4407.2-2008) [J]. 种业导刊, 2008, (12): 35-36.
- Anon. Seed of economic crops - part 2: oil species (GB 4407.2-2008) [J]. Journal of Seed Industry Guide, 2008, (12): 35-36.
- [33] 钱秀珍, 胡琼, 伍晓明. 中国芥菜型油菜的主要特性 [J]. 作物品种资源, 1991, (2): 14-15.
- QIAN X Z, HU Q, WU X M. Main characteristics of *Brassica juncea* in China [J]. Crop Variety Resources, 1991, (2): 14-15.
- [34] 原小燕, 符明联, 张云云, 等. 云南芥菜型油菜资源品质及苗期耐旱性评价 [J]. 中国油料作物学报, 2020, 42(4): 573-584.
- YUAN X Y, FU M L, ZHANG Y Y, et al. Quality characteristics and drought tolerance evaluation of *Brassica juncea* in Yunnan Province [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2020, 42(4): 573-584.
- [35] 刘后利. 国内外芥菜型油菜的生产和研究动态 [J]. 伊犁农业科技, 1984, (1): 1-17.
- LIU H L. Production and research trends of *Brassica juncea* at home and abroad [J]. Ili Agricultural Science & Technology, 1984, (1): 1-17.
- [36] 张弋. 茶树叶片角质层蜡质组成特征与角质蒸腾的关系研究 [D]. 福州: 福建农林大学, 2020.
- ZHANG Y. Study on the correlation between cuticular wax composition and cuticular transpiration in *Camellia sinensis* leaves [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2020.
- [37] ALLAKHVERDIEV S I, KINOSHITA M, INABA M, et al. Unsaturated fatty acids in membrane lipids protect the photosynthetic machinery against salt-induced damage in *Synechococcus* [J]. Plant Physiology, 2001, 125(4): 1842-1853.
- [38] 朱倩, 程迅, 杜秀秀, 等. 极长链脂肪酸的合成缺陷对酵母细胞膜的稳定性和多烯类药物敏感性的影响 [J]. 微生物学通报, 2019, 46 (7): 1645-1653.
- ZHU Q, CHENG X, DU X X, et al. Effects of synthetic defects of very long-chain fatty acids on cell membrane stability and sensitivity of polyenes in yeast [J]. Microbiology China, 2019, 46(7): 1645-1653.