

甘蓝型油菜发芽期低温耐性的评价与材料筛选

黄贺¹, 闫蕾¹, 吕艳¹, 丁晓雨¹, 蔡俊松², 程勇¹, 张学昆¹, 邹锡玲^{1*}

(1. 中国农业科学院油料作物研究所/农业农村部油料作物生物学与遗传育种重点实验室, 湖北 武汉, 430062;
2. 湖北省油菜办公室, 湖北 武汉, 430060)

摘要: 为建立甘蓝型油菜发芽期低温耐性的鉴定及评价方法, 筛选强耐低温材料, 分别在22℃和9℃对66份材料进行发芽势、发芽率、发芽指数以及平均发芽时间的考察, 利用隶属函数法进行综合评价, 并通过聚类分析划分材料的低温耐性等级。结果表明: 9℃低温会降低发芽势、发芽率和发芽指数, 延长发芽时间。不同类型的品种间耐低温程度差异明显: 中部品种的耐低温能力高于北部品种, 半冬性品种的耐低温能力高于春性品种与冬性品种, 常规种的耐低温能力高于杂交种。单一指标与综合隶属函数值对品种的耐低温评价结果基本一致。筛选出极端耐低温品种H5(秦油8号×e6013)和敏感品种S10(汇丰一号)。

关键词: 油菜; 萌发; 耐低温; 隶属函数; 聚类分析

中图分类号: S565.4; S332.5

文献标识码: A

文章编号: 1007-9084(2019)05-0723-12

Screening and evaluation of low temperature tolerance of rapeseed (*Brassica napus* L.) at germination stage

HUANG He¹, YAN Lei¹, LYU Yan¹, DING Xiao-yu¹, CAI Jun-song², CHENG Yong¹,
ZHANG Xue-kun¹, ZOU Xi-ling^{1*}

(1. Oil Crops Research Institute of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory Biology and Genetic Improvement of Oil Crops, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430062; 2. Hubei Province Oilseed Rape Office, Wuhan 430060, China)

Abstract: To establish evaluation method for low temperature tolerance of rapeseed (*Brassica napus* L.) at germination stage, 66 rapeseed lines were investigated under the conditions of 22℃ and 9℃. The parameters including germination potential, germination rate, germination index and mean germination time were investigated. After evaluation, materials were categorized by cluster analysis into different low temperature tolerance grades. The results showed that 9℃ (low temperature) decreased germination potential, germination rate and germination index, it also prolonged germination time. The materials' temperature tolerances were obvious among types: materials from mid-land were more tolerant than those from north, semi-winter-type lines were more tolerant than spring- and winter-type materials, conventional varieties were more tolerant than hybrids. The evaluation results from single indicators were consistent with those from comprehensive membership values. Among the 66 materials, H5 (hybrid of Qinyou 8 × e6013) was the extremely low-temperature-resistant variety, and S10 (Huifeng 1) was the sensitive one.

Key words: rapeseed; germination; low temperature tolerance; membership function; cluster analysis

油菜是我国第一大油料作物, 常年种植面积约1亿亩^[1]。我国80%的油菜分布在长江流域, 随着水稻收获时期不断延后以及稻稻油三熟制面积不断扩大, 长江流域油菜播种期逐渐推迟到10月中下旬甚至11月初^[2]。气象资料表明该时期温度多在15℃

以下, 且经常出现异常低温^[3]。由于劳动力成本提高, 传统油菜育苗移栽技术逐步退出生产, 直播油菜大面积推广。在长江流域, 直播油菜面临的首要挑战是低温下油菜种子是否能够正常萌发^[4,5]。

前人研究表明, 油菜种子萌发的最适温度为

收稿日期: 2019-02-01

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFD0101700); 中国农业科学院农业科技创新计划; 湖北省农业科技创新中心

作者简介: 黄贺(1994-), 男, 硕士研究生, 研究方向为作物遗传育种, E-mail: 1514272472@qq.com

* 通讯作者: 邹锡玲, 女, 江苏无锡人, 副研究员, 研究方向为油菜分子育种, E-mail: zouxiling@gmail.com

25℃,3d发芽率可达到80%以上;11℃时需要4~5d发芽率才能达到80%以上;而8~9℃时达到90%左右的发芽率则需要10d^[6]。低温严重影响了油菜的发芽、成苗,在低温下发芽推迟2~8d,成苗推迟4~7d,发芽率和出苗率分别降低5.0%~97.3%和7.0%~95.3%。不同品种间发芽期低温耐性差异显著^[3],为筛选强低温耐性材料以及培育耐低温品种提供了基础。

隶属函数法是将多个相关鉴定指标统一在一个系统中进行综合评价^[7],是目前品种耐逆性评价与耐性品种筛选的常用方法。李波等将91份玉米自交系在10℃低温条件下进行发芽试验,同时利用隶属函数法对91份玉米自交系进行了耐低温评价^[8]。雷雨婷等以25种贵州本地玉米种质为材料,在5℃低温胁迫条件下进行发芽试验,并利用隶属函数综合评价不同玉米种质的抗寒性^[9]。王道杰等用隶属函数综合评判法将各生理指标结合在一起,对20个油菜品种的苗期抗旱性进行综合评价,筛选出了4个抗旱性较强的油菜品种^[10]。桂月晶等也借助隶属函数对苗期油菜抗旱性进行了综合评价^[11]。目前,利用隶属函数法对作物抗寒性鉴定和抗寒材

料的筛选研究主要集中在玉米等作物,在油菜中缺乏应用。鲜孟筑等对30个油菜品种(系)进行低温发芽试验发现:低温条件下,种子的发芽率、成苗率、等相较正常条件下均显著降低,且不同品种间差异明显;同时采用隶属函数对参试油菜品种(系)进行耐低温等级划分^[2]。

为解决长江流域油菜播种面临的低温胁迫,本研究以66份来源不同的油菜品种(系)为材料,在9℃低温下进行发芽期各性状的考察,利用隶属函数对这些材料的耐低温能力进行分析,并采用聚类分析法划分耐低温等级,以筛选强耐低温的油菜品种(系),为选育优良的迟直播油菜提供材料,为进一步解析油菜在发芽期耐低温的分子机制奠定基础。

1 材料与方法

1.1 材料

选用66份油菜品种(系),包括春性油菜12份、半冬性油菜32份、冬性油菜22份;常规种43份、杂交种23份;北部油菜14份、中部油菜52份(表1)。所有材料来自国家油菜产业技术体系。

表1 试验材料及其特征
Table 1 Tested materials and their characteristics

编号 No.	品种 Variety	来源 Source	特性 Characteristic	编号 No.	品种 Variety	来源 Source	特性 Characteristic
S1	绵油20 Mianyou 20	N	S H	H22	浙油21 Zheyou 21	M	SW C
S2	青杂4号 Qingza 4	N	S H	H23	皖油20号 Wanyou 20	M	SW C
S3	青杂2号 Qingza 2	N	S H	H24	皖油29 Wanyou 29	M	SW C
S4	冠油702 Guanyou 702	N	S H	H25	天油早1号 Tianyouzao 1	M	SW H
S5	德恒油900 Dehengyou900	N	S H	H26	丰油730 Fengyou 730	M	SW H
S6	益油杂1号 Yiyouza 1	N	S H	H27	蓉油14号 Rongyou 14	M	SW H
S7	青杂11号 Qingza 11	N	S H	H28	油研924 Youyan 924	M	SW H
S8	冠油杂812 Guanyouza 812	N	S H	H29	荣华油2号 Ronghuayou 2	N	SW H
S9	冠油杂303 Guanyouza 303	N	S H	H30	绵油15号 Mianyou 15	M	SW H
S10	汇丰一号 Huifeng 1	N	S H	H31	阳光131 Yangguang 131	M	SW H

续表

编号 No.	品种 Variety	来源 Source	特性 Characteristic		编号 No.	品种 Variety	来源 Source	特性 Characteristic	
S11	秦杂油4号 Qinzayou 4	N	S	H	H32	C18(1801)	M	SW	H
S12	青杂5号 Qingza 5	N	S	H	W1	甘油5号 Ganyou 5	M	W	C
H1	中双6号 Zhongshuang 6	M	SW	C	W2	农林42 Nonglin 42	M	W	C
H2	21937×9508(12×26)	M	SW	C	W3	淮油6号 Huaiyou 6	M	W	C
H3	wb早 Wb zao	M	SW	C	W4	黔油331 Qianyou 331	M	W	C
H4	秦油8号×棚3 Qinyou 8×Peng 3	M	SW	C	W5	恩油73-1-2 Enyou 73-1-2	M	W	C
H5	秦油8号×e6013 Qinyou8×e6013	M	SW	C	W6	川油20 Chuanyou 20	M	W	C
H6	中双6号×9981 Zhongshuang 6×9981	M	SW	C	W7	湘油13号 Xiangyou 13	M	W	C
H7	秦油8号×9981 Qinyou 8×9981	M	SW	C	W8	湘油15号 Xiangyou 15	M	W	C
H8	竹3×H243 Zhu3×H243	M	SW	C	W9	湘油11号 Xiangyou 11	M	W	C
H9	竹3×7789 Zhu 3×7789	M	SW	C	W10	希望106 Xiwang 106	M	W	C
H10	竹3×神油2715 Zhu 3×Shenyou 2715	M	SW	C	W11	华油2号 Huayou 2	M	W	C
H11	中双6号×98V41 Zhongshuang 6×98V41	M	SW	C	W12	沪油15号 Huyou 15	M	W	C
H12	秦油8号×油27842 Qinyou 8×You 27842	M	SW	C	W13	沪油12号 Huyou 12	M	W	C
H13	Y114	M	SW	C	W14	史力佳 Shilijia	M	W	C
H14	2007R003	M	SW	C	W15	红油3号 Hongyou 3	M	W	C
H15	2007R0131	M	SW	C	W16	浙油18 Zheyou 18	M	W	C
H16	FC76	M	SW	C	W17	浙油758 Zheyou 758	M	W	C
H17	2007R033	M	SW	C	W18	沪油14 Huyou 14	M	W	C
H18	04B08	M	SW	C	W19	沪油18 Huyou 18	M	W	C
H19	B018×沪油17 B018×Huyou 17	M	SW	C	W20	浙油19 Zheyou 19	M	W	C
H20	21937×9558	M	SW	C	W21	皖油15号 Wanyou 15	M	W	C
H21	中双11号 Zhongshuang 11	M	SW	C	W22	Y00326	N	W	C

注:N:北部;M:中部;S:春性;SW:半冬性;W:冬性;C:常规;H:杂交;

Note: N: Northern; M: Midland; S: Spring; SW: Semi-winter; W: Winter; C: Convention; H: Hybrid

1.2 试验材料的培养及试验设计

选择籽粒饱满的油菜种子用1%次氯酸钠消毒5min后,蒸馏水清洗4次,风干备用。配置0.8%(8g/L)的琼脂溶液,倒入130mm×130mm培养皿中,每个培养皿倒入30mL琼脂溶液,待琼脂冷却凝固后,均匀铺放油菜种子。每个培养皿4个品种,每个品种25粒种子,3次重复,共66个品种(系)。对照组置于22℃条件下黑暗培养5d,试验组置于9℃恒温培养箱中,黑暗培养12d^[12,13]。每天定时统计发芽数,以芽长>2mm为发芽标准^[2]。

1.3 测定指标与方法

对照组第3d测定发芽势^[14],第5d测定发芽率^[12,13]、发芽指数、平均发芽速度;试验组第8d测定发芽势,第12d测定发芽率^[12,13]、发芽指数、平均发芽速度,计算方法参照鲜孟筑^[3]。

发芽率=正常发芽种子数/供试种子总数×100%

对照组发芽势=第3d正常发芽种子数/供试种子总数×100%

低温发芽势=第8d正常发芽种子数/供试种子总数×100%

发芽指数= $\sum Gt/Dt$

平均发芽时间= $\sum(Gt \times Dt)/\sum Gt$

Gt代表第t天发芽的种子数,Dt代表自播种后的第t天。

1.4 数据分析

运用Excel 2010对试验数据进行整理、计算和作图。用SPSS25.0系统进行方差分析与聚类分析(组间联结法)。

1.4.1 数据标准化处理 由于各指标的量纲不同,需要对原始数据进行标准化处理,处理公式为:

相对值=低温(9℃)下的测定值/对照(22℃)测定值^[8]

1.4.2 隶属函数 对测得的各指标的数据用模糊

数学隶属度公式进行转换,隶属函数公式如下:

$$U_{(ik)}=(X_i-X_{imin})/(X_{imax}-X_{imin}) \quad (1)$$

$$U'_{(ik)}=1-(X_i-X_{imin})/(X_{imax}-X_{imin}) \quad (2)$$

如果指标与抗低温呈正相关,则用公式(1)进行计算,如果指标与抗低温呈负相关,则用公式(2)进行计算。

$$X_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_{ik}$$

$$v_k = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{ik} - X_0)^2}}{X_0}$$

$$W_k = \frac{v_k}{\sum_{k=1}^m v_k}$$

$$D(i) = \sum_{k=1}^m U_{ik} \times W_k$$

式中, X_0 为平均值, W_k 为第k项指标在所有指标中的权重, v_k 为第k项指标的标准差系数,表示各品种第k指标在油菜耐低温中的贡献率。 $D(i)$ 表示综合隶属函数值。

2 结果与分析

2.1 低温胁迫对不同油菜品种各发芽指标的影响

利用66个油菜品种(系),分别在22℃和9℃条件下进行种子萌发试验。由表2可知,在22℃条件下,各品种的发芽率均达到90%以上,说明种子质量合格。与对照组(22℃)相比,在低温(9℃)条件下,发芽势、发芽率、发芽指数显著降低,其中发芽势降低0~60.3%,发芽率降低0~45.3%,发芽指数降低45.1%~88.7%;发芽时间显著延缓,低温(9℃)下的发芽时间是对照组(22℃)的1.8~5.2倍。不同品种间的发芽势、发芽率、发芽指数和平均发芽时间差异显著。

表2 不同油菜品种低温(9℃)与对照(22℃)条件下种子萌发指标分析

Table 2 Seed germination of different rapeseed varieties under low temperature (9℃) and control (22℃)

品种 Variety	发芽势/% Germination vigor			发芽率/% Germination rate			发芽指数GI Germination index			平均发芽时间/d Mean germination time		
	22℃	9℃	R	22℃	9℃	R	22℃	9℃	R	22℃	9℃	R
S1	94.7±1.3	86.7±2.1	0.915	97.3±2.3	94.7±2.3	0.973	13.9±2.4	4.1±0.4	0.295	2.0±0.3	7.2±1.8	3.69
S2	98.7±3.5	98.7±2.3	1.000	98.7±4.6	98.7±2.3	1.000	20.7±1.4	6.8±0.8	0.329	1.3±0.1	3.8±0.3	2.918
S3	94.7±3.5	92.0±2.9	0.972	100.0±0.0	93.3±2.1	0.933	18.5±1.5	5.3±0.6	0.285	1.6±0.2	5.0±0.7	3.047
S4	100.0±0.0	100.0±0.0	1.000	100.0±0.0	100.0±0.0	1.000	23.7±1.9	6.7±0.6	0.284	1.1±0.2	4.0±0.3	3.494
S5	100.0±0.0	89.3±2.1	0.893	100.0±0.0	89.3±2.1	0.893	24.4±0.1	5.7±1.1	0.232	1.1±0.0	4.5±0.9	4.228
S6	100.0±0.0	100.0±0.0	1.000	100.0±0.0	100.0±0.0	1.000	20.0±0.9	5.9±0.5	0.294	1.4±0.1	4.4±0.6	3.171
S7	98.7±2.7	98.7±2.3	1.000	100.0±0.0	98.7±2.3	0.987	23.8±1.3	7.4±0.0	0.31	1.1±0.2	3.4±0.1	2.98

续表

品种 Variety	发芽势/%			发芽率/%			发芽指数GI			平均发芽时间/d		
	Germination vigor			Germination rate			Germination index			Mean germination time		
	22℃	9℃	R	22℃	9℃	R	22℃	9℃	R	22℃	9℃	R
S8	96.0±2.3	53.3±2.1	0.556	100.0±0.0	54.7±4.6	0.547	22.8±0.7	3.3±0.5	0.146	1.2±0.1	4.6±0.5	3.699
S9	97.3±1.3	78.7±3.5	0.808	98.7±2.3	80.0±2.4	0.811	23.3±0.4	4.7±1.1	0.202	1.2±0.0	4.4±0.3	3.798
S10	100.0±0.0	41.3±3.7	0.413	100.0±0.0	50.7±2.1	0.507	23.7±0.7	2.7±1.3	0.113	1.1±0.1	5.9±1.1	5.253
S11	81.3±3.3	61.3±3.9	0.754	92.0±4.0	82.7±2.3	0.899	10.5±0.7	3.1±0.3	0.291	2.4±0.1	8.6±0.6	3.641
S12	90.7±1.3	78.7±2.3	0.868	90.7±2.3	88.0±4.0	0.971	18.6±1.4	4.9±0.3	0.261	1.4±0.1	5.2±0.5	3.826
H1	100.0±0.0	90.7±2.6	0.907	100.0±0.0	92.0±4.0	0.920	23.5±0.5	7.3±0.2	0.311	1.1±0.0	3.5±0.1	3.156
H2	100.0±0.0	94.7±2.6	0.947	100.0±0.0	94.7±4.6	0.947	14.9±0.9	5.3±1.1	0.351	1.8±0.1	5.7±1.2	3.073
H3	100.0±0.0	97.3±2.3	0.973	100.0±0.0	98.7±2.3	0.987	12.4±0.1	5.2±0.4	0.415	2.0±0.0	5.6±0.8	2.782
H4	88.0±4.0	82.7±2.3	0.939	92.0±2.0	88.0±4.0	0.957	13.2±0.4	4.5±0.5	0.343	2.0±0.1	6.9±0.6	3.38
H5	100.0±0.0	100.0±0.0	1.000	100.0±0.0	100.0±0.0	1.000	14.0±0.0	7.7±0.3	0.549	1.9±0.0	3.4±0.2	1.787
H6	98.0±1.2	96.0±2.0	0.980	98.0±2.0	96.0±4.0	0.980	19.9±0.8	7.2±0.6	0.364	1.3±0.1	3.4±0.2	2.574
H7	100.0±0.0	98.7±2.3	0.987	100.0±0.0	100.0±0.0	1.000	19.7±1.3	6.5±0.1	0.328	1.4±0.1	4.1±0.1	2.897
H8	97.3±1.3	93.3±2.1	0.959	97.3±2.3	96.0±4.0	0.986	20.2±2.7	6.7±0.9	0.33	1.5±0.1	4.3±1.0	2.87
H9	98.7±1.3	97.3±2.3	0.986	100.0±0.0	100.0±0.0	1.000	18.3±2.8	6.5±0.6	0.357	1.4±0.0	4.4±0.7	3.132
H10	97.3±1.3	97.3±2.6	1.000	97.3±2.3	97.3±4.6	1.000	19.5±0.5	6.3±0.5	0.323	1.4±0.0	5.1±0.7	3.638
H11	98.7±1.3	96.0±2.0	0.973	100.0±0.0	100.0±0.0	1.000	15.6±1.2	4.9±0.3	0.314	1.8±0.1	5.7±0.1	3.258
H12	100.0±0.0	92.0±0.0	0.920	100.0±0.0	92.0±0.0	0.920	21.1±1.3	6.0±0.4	0.285	1.3±0.1	4.3±0.5	3.294
H13	100.0±0.0	100.0±0.0	1.000	100.0±0.0	100.0±0.0	1.000	23.2±0.3	9.4±0.3	0.405	1.1±0.0	3.3±0.2	3.000
H14	100.0±0.0	92.0±2.6	0.920	100.0±0.0	97.3±2.3	0.973	14.6±1.0	4.7±0.8	0.322	1.8±0.1	6.0±1.4	3.239
H15	100.0±0.0	100.0±0.0	1.000	100.0±0.0	100.0±0.0	1.000	24.6±0.3	7.8±0.2	0.319	1.0±0.0	3.3±0.1	3.128
H16	100.0±0.0	100.0±0.0	1.000	100.0±0.0	100.0±0.0	1.000	24.5±0.5	7.4±0.6	0.304	1.0±0.0	3.6±0.5	3.449
H17	97.3±2.7	96.0±2.9	0.986	98.7±2.3	96.0±2.9	0.973	19.7±0.7	7.4±0.4	0.376	1.4±0.0	3.6±0.5	2.491
H18	97.3±1.3	97.3±2.3	1.000	98.7±2.3	98.7±2.3	1.000	12.9±0.1	4.9±0.5	0.38	1.9±0.0	6.3±1.2	3.23
H19	97.3±1.3	97.3±2.3	1.000	98.7±0.0	98.7±2.3	1.000	13.5±0.5	5.8±1.5	0.432	1.9±0.1	6.4±2.6	3.351
H20	92.0±2.3	66.7±2.0	0.725	93.3±2.3	88.0±0.0	0.943	11.3±0.6	3.1±0.3	0.277	2.2±0.1	10.0±0.8	4.439
H21	96.0±2.3	96.0±2.0	1.000	100.0±0.0	97.3±2.3	0.973	16.3±0.8	4.8±0.9	0.292	1.8±0.1	6.0±1.1	3.301
H22	100.0±0.0	100.0±0.0	1.000	100.0±0.0	100.0±0.0	1.000	12.4±0.1	3.9±0.1	0.314	2.0±0.0	9.9±0.8	4.882
H23	100.0±0.0	96.0±2.9	0.960	100.0±0.0	96.0±2.9	0.960	12.3±0.1	3.9±0.8	0.32	2.1±0.0	8.6±3.1	4.199
H24	98.7±1.3	44.0±2.1	0.446	100.0±0.0	94.7±2.1	0.947	11.8±0.4	2.8±0.5	0.234	2.2±0.1	9.7±0.7	4.443
H25	96.0±2.3	89.3±2.6	0.931	96.0±4.0	92.0±4.0	0.958	22.6±1.7	5.4±0.6	0.24	1.1±0.1	4.7±1.0	4.164
H26	96.0±2.3	93.3±2.3	0.972	98.7±2.3	93.3±2.3	0.946	23.2±1.0	6.1±1.1	0.265	1.2±0.1	4.1±0.4	3.469
H27	98.7±1.3	97.3±2.6	0.986	100.0±0.0	97.3±4.6	0.973	21.8±0.3	5.6±0.3	0.257	1.3±0.0	4.5±0.2	3.501
H28	98.7±1.3	96.0±2.0	0.973	100.0±0.0	97.3±4.6	0.973	22.7±0.7	6.1±0.3	0.27	1.2±0.0	4.2±0.1	3.5
H29	94.7±3.5	64.0±3.3	0.676	100.0±0.0	78.7±3.1	0.787	15.6±0.8	3.4±1.2	0.22	1.9±0.2	7.1±1.4	3.726
H30	81.3±4.8	57.3±3.2	0.705	92.0±6.9	74.7±2.2	0.812	10.3±0.8	2.8±0.5	0.268	2.4±0.2	9.8±0.9	4.064
H31	100.0±0.0	100.0±0.0	1.000	100.0±0.0	100.0±0.0	1.000	23.2±0.1	9.5±0.2	0.410	1.2±0.0	3.5±0.4	2.917
H32	98.7±2.3	98.7±2.3	1.000	98.7±4.0	98.7±2.3	1.000	20.8±2.8	7.8±0.2	0.374	1.4±0.0	3.3±0.1	2.395
W1	97.3±2.7	54.7±3.7	0.562	97.3±4.6	56.0±3.2	0.575	12.1±0.6	2.2±0.9	0.185	2.0±0.0	7.5±0.9	3.715
W2	100.0±0.0	72.0±3.8	0.720	100.0±0.0	76.0±3.4	0.760	12.5±0.0	3.0±0.9	0.242	2.0±0.0	7.6±1.7	3.777
W3	98.7±1.3	45.3±3.6	0.459	98.7±2.3	92.0±2.6	0.932	10.9±0.1	2.7±0.5	0.246	2.4±0.1	9.9±0.6	4.212
W4	98.7±1.3	97.3±2.3	0.986	98.7±2.3	97.3±2.3	0.986	12.3±0.3	3.9±0.2	0.315	2.0±0.0	8.3±1.7	4.143
W5	100.0±0.0	89.3±2.1	0.893	100.0±0.0	89.3±2.1	0.893	12.5±0.0	4.1±0.4	0.328	2.0±0.0	5.6±0.5	2.815
W6	90.7±2.7	58.7±2.1	0.647	92.0±4.0	85.3±3.2	0.928	10.8±0.4	2.8±0.2	0.257	2.2±0.1	10.3±1.5	4.69
W7	100.0±0.0	100.0±0.0	1.000	100.0±0.0	100.0±0.0	1.000	12.4±0.1	4.3±0.1	0.343	2.0±0.0	6.6±0.8	3.237
W8	100.0±0.0	81.3±2.6	0.813	100.0±0.0	81.3±3.6	0.813	12.3±0.2	3.3±0.2	0.27	2.0±0.0	7.0±0.5	3.408
W9	97.3±1.3	96.0±2.0	0.986	100.0±0.0	98.7±2.3	0.987	12.3±0.0	4.3±0.1	0.353	2.1±0.0	6.5±0.3	3.143
W10	97.3±2.7	73.3±2.1	0.753	97.3±4.6	92.0±2.9	0.945	11.7±0.5	3.0±0.1	0.256	2.1±0.1	9.7±0.4	4.577

续表

品种 Variety	发芽势/% Germination vigor			发芽率/% Germination rate			发芽指数GI Germination index			平均发芽时间/d Mean germination time		
	22℃	9℃	R	22℃	9℃	R	22℃	9℃	R	22℃	9℃	R
	22℃	9℃	R	22℃	9℃	R	22℃	9℃	R	22℃	9℃	R
W11	98.7±1.3	92.0±4.0	0.932	98.7±2.3	94.7±4.6	0.959	12.3±0.3	3.9±0.1	0.316	2.0±0.0	7.5±1.0	3.748
W12	97.3±1.3	38.7±3.4	0.397	100.0±0.0	54.7±2.2	0.547	12.2±0.2	1.8±0.7	0.149	2.1±0.1	10.1±1.8	4.833
W13	98.7±1.3	48.0±3.0	0.486	100.0±0.0	93.3±2.3	0.933	10.9±0.2	2.8±0.1	0.255	2.4±0.1	10.4±0.1	4.346
W14	100.0±0.0	69.3±3.1	0.693	100.0±0.0	92.0±4.0	0.920	11.2±0.5	2.9±0.3	0.263	2.3±0.1	10.7±1.7	4.609
W15	94.7±3.5	52.0±3.3	0.549	98.7±2.3	88.0±4.0	0.892	10.7±0.1	2.8±0.3	0.258	2.4±0.0	10.0±0.5	4.107
W16	100.0±0.0	96.0±2.0	0.960	100.0±0.0	97.3±4.6	0.973	12.5±0.0	3.9±0.1	0.315	2.0±0.0	8.6±1.3	4.324
W17	100.0±0.0	86.7±2.6	0.867	100.0±0.0	96.0±0.0	0.960	12.4±0.2	3.4±0.1	0.277	2.0±0.0	10.2±0.7	5.01
W18	94.7±3.5	73.3±2.0	0.775	98.7±2.3	96.0±0.0	0.973	11.9±0.4	3.1±0.3	0.26	2.1±0.0	9.5±0.6	4.47
W19	100.0±0.0	80.0±2.0	0.800	100.0±0.0	97.3±2.3	0.973	12.2±0.3	3.2±0.4	0.264	2.1±0.1	10.8±1.4	5.239
W20	98.7±1.3	78.7±2.1	0.797	100.0±0.0	97.3±4.6	0.973	12.3±0.2	3.2±0.2	0.262	2.1±0.1	10.2±0.8	4.923
W21	100.0±0.0	94.7±2.2	0.947	100.0±0.0	98.7±2.3	0.987	12.5±0.0	4.1±0.6	0.325	2.0±0.0	8.2±2.4	4.116
W22	100.0±0.0	96.0±2.0	0.960	100.0±0.0	96.0±4.0	0.960	12.5±0.0	4.0±0.7	0.324	2.0±0.0	8.6±3.6	4.322
T	a	b	—	A	B	—	A	B	—	A	B	—

注:R表示各指标的相对值,T表示独立样本T检验;不同小写字母表示独立样本T检验差异显著性达0.05,不同大写字母表示独立样本T检验差异显著性达到0.01

Note: R: relative value of each indicator; T: independent sample T test; Different lowercase letters indicate significance at 0.05 level by T test; Different capital letters indicate high significance at 0.01 level

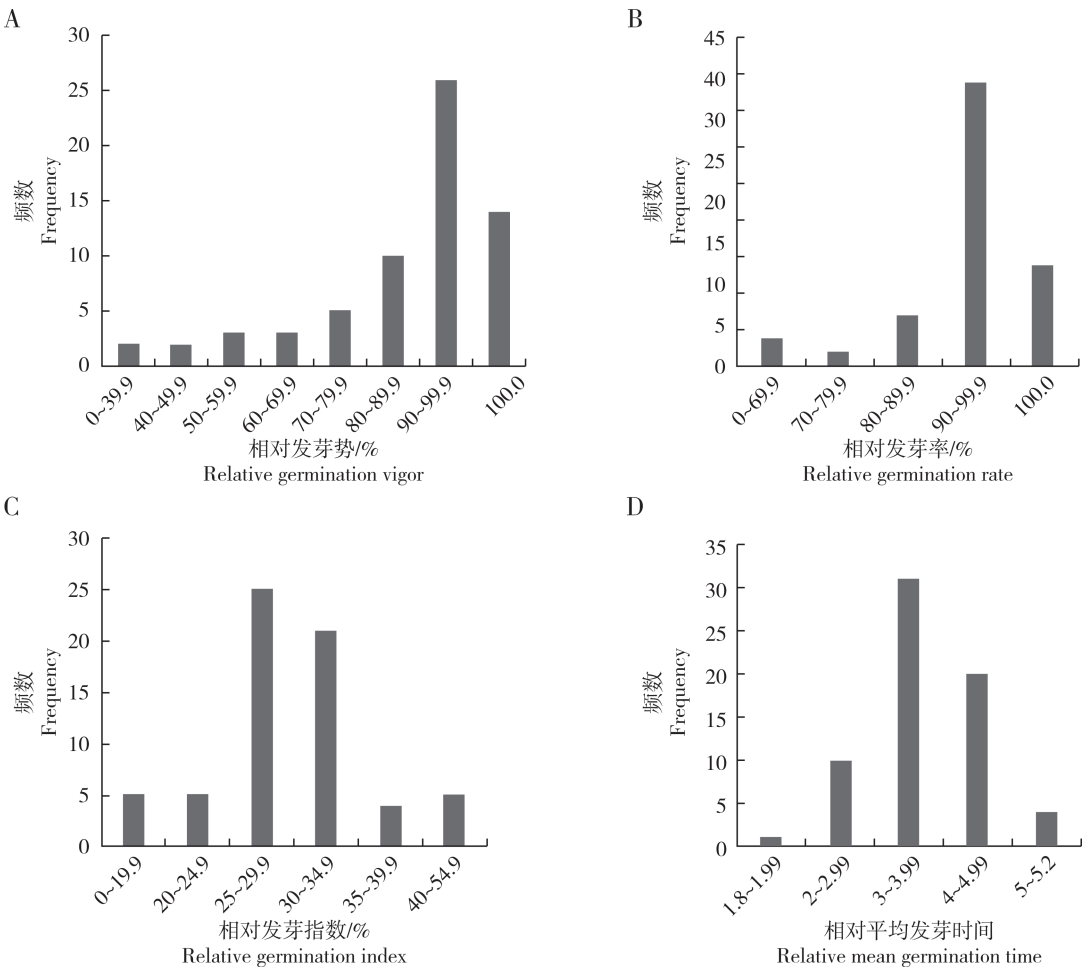


图1 相对发芽指标频率分布

Fig. 1 Frequency distribution of relative germination indexes

2.2 低温胁迫下不同油菜品种各发芽指标的分布

不同油菜品种各相对指标的分布如图 1:66 个品种(系)中有 53 个品种(系)的相对发芽率达到 90% 以上,有 40 个品种(系)的相对发芽势达到 90% 以上,其中 S2、S4、H5、H15、H19、H31、H32、W7 等 14 个品种(系)的相对发芽率、相对发芽势均达到 100%;9℃低温条件下油菜种子的发芽指数仅相当于 22℃条件下的 0%~54.9%,66 个品种(系)中有 45 个品种(系)的相对发芽指数分布在 25%~34.9% 之间,仅有 H3、H5、H19、H31、H32 等 3 个品种(系)的相对发芽指数在 40% 以上;9℃低温条件下油菜种子的平均发芽时间是 22℃条件下的 0~5.99 倍,有 54 个品种(系)的相对平均发芽时间在 3d 以上,仅有

H5 的相对平均发芽时间在 2d 以下。

2.3 隶属函数分析

根据各指标隶属函数值的标准差系数得到的各指标的权重,其中发芽势所占的权重为 0.202,发芽率所占的权重为 0.183,发芽指数所占的权重为 0.274,平均发芽时间所占的权重为 0.341。根据各指标的隶属函数值以及各指标所占的权重计算得到 66 份油菜品种(系)各自的综合隶属函数值如表 3,不同品种间的综合隶属函数值存在显著差异,66 份品种(系)中综合隶属函数值<0.4 的品种有 S10、H29、W1 以及 W12,综合隶属函数值>0.8 的有 H3、H5、H17、H31 和 H32。

表 3 低温胁迫条件下油菜种子萌发的隶属函数值
Table 3 Membership function value of rapeseed germination under low temperature

品种 Variety	发芽势/U1 Germination vigor	发芽率/U2 Germination rate	发芽指数/U3 Germination index	平均发芽时间/U4 Mean germination time	综合隶属函数值/D Integrated membership function values
S1	0.888	0.950	0.418	0.454	0.623
S2	1.000	1.000	0.496	0.676	0.751
S3	0.938	0.878	0.393	0.639	0.676
S4	1.000	1.000	0.392	0.510	0.666
S5	0.858	0.804	0.273	0.300	0.497
S6	1.000	1.000	0.415	0.603	0.704
S7	0.994	0.976	0.452	0.658	0.727
S8	0.410	0.168	0.075	0.452	0.288
S9	0.600	0.467	0.205	0.423	0.407
S10	0.070	0.095	0.000	0.006	0.033
S11	0.810	0.814	0.409	0.468	0.584
S12	0.824	0.937	0.339	0.415	0.572
H1	0.876	0.853	0.455	0.607	0.665
H2	0.929	0.902	0.449	0.533	0.658
H3	1.000	1.000	0.670	0.652	0.791
H4	0.885	0.920	0.528	0.543	0.677
H5	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
H6	0.973	0.950	0.575	0.774	0.792
H7	1.000	1.000	0.493	0.682	0.753
H8	0.951	0.975	0.442	0.789	0.761
H9	1.000	1.000	0.559	0.614	0.747
H10	0.976	0.951	0.481	0.469	0.663
H11	0.982	1.000	0.461	0.578	0.705
H12	0.894	0.853	0.395	0.568	0.639
H13	1.000	1.000	0.670	0.652	0.791
H14	0.947	0.951	0.478	0.584	0.695
H15	1.000	1.000	0.471	0.615	0.724
H16	1.000	1.000	0.438	0.602	0.710
H17	0.952	0.934	0.603	0.798	0.801
H18	0.994	0.992	0.613	0.483	0.715
H19	1.000	1.000	0.732	0.551	0.774

续表

品种	发芽势/U1	发芽率/U2	发芽指数/U3	平均发芽时间/U4	综合隶属函数值/D
Variety	Germination vigor	Germination rate	Germination index	Mean germination time	Integrated membership function values
H20	0.829	0.895	0.375	0.239	0.516
H21	1.000	0.951	0.410	0.566	0.681
H22	1.000	1.000	0.460	0.112	0.549
H23	0.947	0.927	0.474	0.308	0.596
H24	0.533	0.902	0.276	0.238	0.430
H25	0.908	0.924	0.290	0.318	0.540
H26	0.945	0.893	0.348	0.518	0.626
H27	0.982	0.951	0.331	0.508	0.636
H28	0.958	0.951	0.361	0.509	0.640
H29	0.364	0.609	0.008	0.000	0.187
H30	0.717	0.654	0.356	0.347	0.480
H31	1.000	1.000	0.681	0.676	0.802
H32	1.000	0.988	0.598	0.826	0.828
W1	0.259	0.000	0.166	0.447	0.250
W2	0.788	0.743	0.388	0.569	0.595
W3	0.726	0.868	0.305	0.304	0.493
W4	0.976	0.967	0.462	0.324	0.611
W5	0.858	0.804	0.494	0.705	0.696
W6	0.711	0.840	0.330	0.167	0.445
W7	1.000	1.000	0.528	0.584	0.729
W8	0.752	0.657	0.360	0.535	0.553
W9	0.965	0.976	0.550	0.611	0.732
W10	0.854	0.899	0.328	0.200	0.495
W11	0.910	0.917	0.466	0.438	0.629
W12	0.000	0.168	0.087	0.280	0.150
W13	0.318	0.878	0.326	0.266	0.405
W14	0.593	0.853	0.343	0.191	0.435
W15	0.401	0.802	0.333	0.334	0.433
W16	0.947	0.951	0.463	0.272	0.585
W17	0.823	0.927	0.376	0.076	0.465
W18	0.701	0.950	0.338	0.230	0.487
W19	0.734	0.951	0.347	0.010	0.421
W20	0.731	0.951	0.341	0.101	0.449
W21	0.929	0.976	0.487	0.332	0.613
W22	0.947	0.927	0.484	0.273	0.586
权重/W Weight	0.202	0.183	0.274	0.341	—

2.4 发芽期各相关性状以及综合隶属函数值间的相关性分析

将发芽势、发芽率、发芽指数、平均发芽时间以及综合隶属函数值之间进行了相关性检验,结果表明发芽势与发芽率、发芽指数、综合隶属函数值之间极显著相关,与平均发芽时间极显著负相关;发芽率与发芽指数、综合隶属函数值之间极显著相关,而与平均发芽时间显著负相关;发芽指数与综

合隶属函数值之间极显著相关,与平均发芽时间极显著负相关;平均发芽时间与综合隶属函数值极显著负相关(表4)。

2.5 不同类型油菜品种耐低温性比较

将以上油菜品种按照地理分布、生育特性以及育种方式的不同分类进行低温耐性比较,此外,根据张卫星的定级标准,将综合隶属函数值D≥0.6的品种定为耐低温品种^[15],我们统计了不同类型中D≥

0.6的品种数(表5)。北部油菜的平均综合隶属函数值为0.52,中部油菜的平均综合隶属函数值为0.61,其中,北部品种中 $D\geq 0.6$ 的有6份,占北部品种42.9%,中部品种 $D\geq 0.6$ 的有31份,占中部品种的61%,中部品种比北部品种耐低温能力强,低温耐性品种多。春性油菜的平均综合隶属函数值为0.54, $D\geq 0.6$ 的有6份,占春性油菜的50.0%;半冬性油菜的平均综合隶属函数值为0.67, $D\geq 0.6$ 的有25份,占半冬性油菜的78.1%,冬性油菜的平均综合隶属函数值为0.51, $D\geq 0.6$ 的有6份,占冬性油菜的27.3%,半冬性油菜的平均综合隶属函数值与春性油菜品种平均综合隶属函数值差异显著,与冬性油菜品种平均综合隶属函数值差异极显著,而春性油菜品种与冬性油菜品种的平均综合隶属函数值差异不显著,综合分析发现半冬性油菜品种的耐低

温能力最强,低温耐性品种最多。在春性与半冬性品种中,常规种的平均综合隶属函数值为0.61, $D\geq 0.6$ 的有26份,占常规种的56.5%,杂交种的平均综合隶属函数值为0.55, $D\geq 0.6$ 有11份,占杂交种的55.0%,在春性与半冬性品种中,常规种比杂交种的低温耐性品种更多,耐低温能力更强。

2.6 聚类分析

利用组间联接法,根据各指标计算得到的综合隶属函数值,对66份油菜品种(系)进行聚类分析,参照鲜孟筑等的分级标准^[2],定义距离阈值为2.5,将66份油菜品种(系)划分为6类(图2):H31、H32、H17、H6等19份油菜品种(系)为Ⅱ级,强耐低温品种;W16、W22、S11等25份油菜品种(系)为Ⅲ级,耐低温品种;W3、W10、S5等15份油菜品种(系)为Ⅳ级,中等耐低温品种,H29、W12、S8、W1为Ⅴ级不耐

表4 发芽期各相关性状以及综合隶属函数值间的相关系数

Table 4 Correlation coefficients between traits of germination and values of comprehensive membership functions

性状 Trait	发芽势 Germination vigor	发芽率 Germination rate	发芽指数 Germination index	平均发芽时间 Mean germination time	综合隶属函数值 Integrated membership function values
发芽势 Germination vigor	1.000				
发芽率 Germination rate	0.835**	1.00			
发芽指数 Germination index	0.741**	0.688**	1.00		
平均发芽时间 Mean germination time	-0.544**	-0.298*	-0.642**	1.00	
综合隶属函数值 Integrated membership function values	0.890**	0.764**	0.882**	-0.815**	1.00

注:*表示邓肯检验差异小于0.05显著水平,**表示邓肯检验差异小于0.01显著性水平

Note: * indicate significance at 0.05 level; ** indicate high significance at 0.01 level

表5 不同类型油菜品种的综合隶属函数值

Table 5 Integrated membership function values of different types of rape varieties

分类 Type	$D\geq 0.6$	份数 Number	综合隶属函数值/D Integrated membership function values			
			变幅 Range	平均值 Averange	标准差 SD	变异系数 CV
北部 Northern	6	14	0.03~0.75	0.52	0.22	0.42
中部 Midland	31	51	0.15~1.00	0.61	0.16	0.26
春性 Spring	6	12	0.03~0.75	0.54bAB	0.2	0.37
半冬性 Semi-winter	25	32	0.19~1.00	0.67aA	0.14	0.21
冬性 Winter	6	22	0.15~0.73	0.51bB	0.14	0.27
常规 Convention	26	46	0.15~1.00	0.61	0.16	0.26
杂交 Hybrid	11	20	0.03~0.75	0.55	0.19	0.35

注:不同小写字表示不同类型间差异大于0.05显著水平;不同大写字母表示不同类型间差异大于0.01显著水平

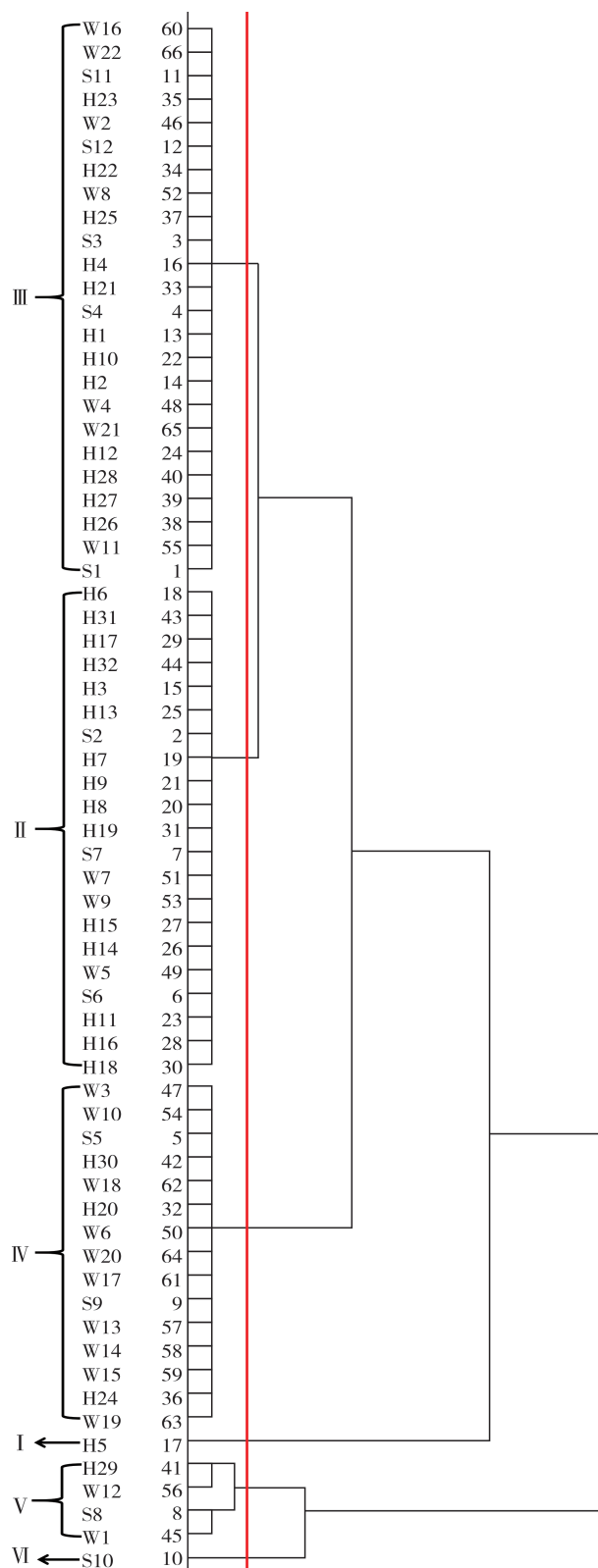
Note: Different lowercase letters indicate significant differences at 0.05 level; different capital letters indicate highly significant differences at 0.01 level

低温品种; I 级, 极端耐低温品种 H5(中部, 半冬性, 常规种) 和 VI 级, 敏感品种 S10(北部, 春性, 杂交种)。在耐低温品种中(包括强耐低温品种、耐低温品种和极端耐低温品种), 北部油菜有 9 个, 占北部油菜的 64.3%; 中部油菜品种有 36 个, 占中部油菜品种的 70.6%; 春性品种有 8 个, 占春性品种的 66.7%; 半冬性品种有 28 个, 占半冬性品种的 87.5%; 冬性品种有 9 个, 占冬性品种的 40.9%; 综合来看, 耐低温品种中, 中部多于北部, 半冬性品种多于春性品种和冬性品种, 不耐低温品种多来自北部品种, 主要是春性品种, 冬性品种。

3 讨论

3.1 通过室内发芽试验鉴定油菜耐低温性的可行性

本试验在室内通过低温萌发试验, 利用隶属函数根据相关发芽指标对油菜萌发期的低温耐性进行分析评价。在实验开展阶段分别进行了琼脂板萌发, 滤纸萌发的方法及选择 4℃、9℃、16℃ 作为萌发温度。采用滤纸萌发发现 9℃ 低温条件下 5d 大多数材料不萌发, 少数材料萌发但是萌发率极低。而采用琼脂板萌发一方面培养皿加上盖子可以部分模拟大田条件下种子埋于土中萌发的条件, 另一方面又避免了大田条件下种子埋于土中萌发不利于统计萌发指标的劣势。油菜在 20℃ 以上萌发正常, 因此试验初期采用 4℃、9℃、16℃ 作为萌发温度, 结果表明: 16℃ 大部分品种 5d 即完成萌发, 萌发率达 85% 以上, 且品种间差异不明显, 无法对不同材料的耐低温性进行判断。而 4℃ 大部分品种则需 30d 完成萌发, 耗时较长, 萌发率极低, 且在大田中常出现 10℃ 左右低温, 一般很少出现 4℃ 低温^[3], 因此本实验最终采用 9℃ 琼脂板进行低温萌发试验。大量研究发现, 发芽率、发芽势和发芽指数等常作为评价种子发芽的指标, 可以反映种子的发芽速度、发芽整齐度及种子的发芽活力, 可用于萌芽期耐低温材料的筛选^[16]。与前人研究相比, 本实验以 66 份油菜品种(系)为试验材料进行低温处理, 品种涵盖了春性、半冬性、冬性油菜品种, 分别来自于北部和中部地区, 包括杂交种和常规种, 避免了因品种少, 缺乏代表性, 导致试验结果不可靠。鲜孟筑等也研究了低温对油菜发芽、成苗的影响并筛选一些指标进行不同油菜品种低温耐性评价, 而本实验不仅对不同油菜品种的低温耐性进行评价, 还增加了对不同来源, 不同品种特性的油菜品种进行低温耐性比



注: I: 极端耐低温, II: 强耐低温, III: 耐低温, IV: 中等耐低温, V: 不耐低温, VI: 极不耐低温

Note: I: extremely resistant; II: strongly resistant; III: resistant; IV: moderately resistant; V: sensitive; VI: extremely sensitive

图2 不同耐低温油菜品种聚类分析图

Fig. 2 Dendrogram of cluster of rapeseed varieties with different resistance to low temperature

较、分析,为今后筛选材料进行深入研究油菜耐低温机制以及耐低温油菜的选育提供参考。

3.2 油菜发芽期低温耐性评价方法的比较

前人多认为隶属函数值可以准确地鉴定植物的低温耐性^[16]。本研究发现,发芽势、发芽率、发芽指数以及平均发芽时间与综合隶属函数值极显著相关;分别利用各相关发芽指标筛选得到的结果与利用综合隶属函数值筛选到的结果基本一致,例如低温耐性材料H5(秦油8号×e6013)在发芽率、发芽势、发芽指数、平均发芽时间、综合隶属函数值中均排名第1,敏感品种S10(汇丰一号)在发芽率、发芽势、平均发芽时间中排名第65,在发芽指数和综合隶属函数值中排名第66。因此我们在进行品种筛选时可以通过单个指标进行筛选,其结果与通过隶属函数分析筛选得到结果基本一致,并且利用单一指标进行筛选,方法简单,省时省力。

3.3 低温对油菜萌发的影响

实验结果表明:正常萌发条件下(22℃),66份油菜品种(系)的发芽率均能达到90%以上。但在9℃低温条件下,不同油菜品种的发芽率、发芽势均有所降低,发芽指数显著降低,平均发芽时间显著延迟,不同品种间差异明显,说明低温对油菜种子萌发存在普遍影响,且不同遗传背景的油菜品种耐低温的能力不同。9℃低温条件对发芽势、发芽率的影响程度较小,而对发芽指数,平均发芽时间的影响程度较大,说明9℃低温主要是通过降低发芽指数,延长发芽时间来影响种子的萌发,试验还发现在对照条件下,油菜种子在经过24h吸水膨胀后就开始萌发,而在9℃低温条件下,油菜种子72h后才开始萌发,其主要原因可能是低温降低了与种子萌发相关的酶的活性、有机物的代谢与运输速率造成的^[17-19]。

3.4 油菜萌发期耐低温与成苗期耐低温比较

本实验所用的材料与本课题组闫蕾等^[24]进行油菜苗期抗寒性鉴定所用的部分材料相同,因此将本试验的综合隶属函数值与闫蕾通过低温冷冻试验得到的抗寒指数进行相关性分析,发现综合隶属函数值与抗寒指数的相关系数为-0.007,综合隶属函数值与抗寒指数显著不相关,这说明不同油菜品种萌发期耐低温的能力强弱与成苗期耐低温强弱不相关,这与前人研究结果相反^[20,21],这可能是由两个方面的原因造成的,一方面油菜在萌发期耐低温的机制与油菜成苗期耐低温的机制不同;另一方面萌发期低温是9℃低温,而成苗期低温是零下低温

(-2℃~-6℃),油菜对零上低温胁迫与零下低温胁迫的响应机制不同,因此造成不同油菜品种萌发期耐低温的能力强弱与成苗期耐低温强弱不同,具体原因还在设计实验进行分析验证。

3.5 不同类型油菜品种萌发期耐低温性比较

通过隶属函数和聚类分析发现,中部油菜品种的耐低温性较强,耐低温品种数量分布较多,其原因可能是中部是冬性和半冬性品种,而北部为春性品种。同时发现半冬性油菜品种的耐低温能力最强,春性油菜品种的耐低温能力次之,冬性油菜品种的耐低温能力最弱,且耐低温品种多分布于半冬性品种,这可能与赤霉素调节途径有关。赤霉素是影响种子萌发的重要激素^[22],不同生态型之间与赤霉素途径相关的重要基因GA发生突变,这可能导致了在低温胁迫下,不同生态型之间发芽状况存在差异^[23]。闫蕾等通过对苗期油菜进行冷冻处理也发现春油菜的抗寒指数高于冬油菜^[24],春性油菜生长发育迅速,全生育期在100~120d,且在10℃左右便可通过感温开始生殖生长,而冬性油菜的全生育期在200d左右,这可能是春性品种在耐9℃低温方面强于冬性品种的原因,而半冬性品种的耐低温能力高于春性品种,可能是由于春性品种多在3月份种植,而半冬性品种多在10月下旬甚至11月中下旬种植,春性油菜品种的生育期温度高于半冬性油菜,在这种环境下通过长期自然选择或品种选育造成半冬性品种的耐低温能力高于春性品种;也有可能不同生态型品种数量不均等有关,具体原因还在进一步分析验证。此外还发现,春性与半冬性品种中,常规品种的耐低温能力比杂交种强,这可能是由于常规的地区适应性比较强,对低温的耐受能力更强^[23]。最后本实验还筛选出了极端耐低温品种H5(秦油8号×e6013)和敏感品种S10(汇丰一号),这一方面为耐低温育种提供了种质资源,另一方面也为下一步解析油菜发芽期耐低温机制提供基础材料。

参考文献:

- [1] 殷艳,王汉中.我国油菜生产现状及发展趋势[J].农业展望,2011,7(1):43-45.
- [2] 鲜孟筑,杨萍,胡立勇,等.油菜种子萌发成苗期耐低温性评价[J].作物杂志,2015(5):116-122.
- [3] 杨萍,鲜孟筑,胡立勇,等.低温胁迫对油菜种子萌发及幼苗生长的影响[J].华中农业大学学报,2015,34(6):7-13.
- [4] 徐恒恒,黎妮,刘树君,等.种子萌发及其调控的研

- 究进展[J]. 作物学报, 2014, 40(7): 1141-1156.
- [5] 杜尧东, 段世萍, 陈新光, 等. 低温对番茄种子萌发的影响[J]. 中国农业气象, 2010, 31(4): 541-545.
- [6] 李合生. 油菜种子萌发生理的研究[J]. 植物生理学通讯, 1981, 17(4): 21-25.
- [7] 于伟, 刘卫东, 柳李旺, 等. 隶属函数法对12个茄种幼苗期耐盐性的筛选与鉴定[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(11): 228-230.
- [8] 李波, 高云鹏, 徐艳霞. 91份玉米自交系种子耐低温等级的评价[J]. 种子, 2016, 35(12): 74-77.
- [9] 雷雨婷, 吕立堂, 赵德刚. 应用隶属函数法筛选贵州玉米苗期抗寒种质[J]. 山地农业生物学报, 2017, 36(2): 35-39.
- [10] 王道杰, 桂月靖, 杨翠玲, 等. 油菜抗旱性及鉴定方法与指标 III. 油菜苗期抗旱性及鉴定指标筛选[J]. 西北农业学报, 2012, 21(5): 108-113.
- [11] 桂月晶. 油菜抗旱指标筛选及抗旱相关基因的表达分析[D]. 开封: 河南大学, 2011.
- [12] Nykiforuk C L, Johnson-Flanagan A M. Germination and early seedling development under low temperature in canola[J]. Crop Sci, 1994, 34(4): 1047.
- [13] Nykiforuk C L, Johnson-Flanagan A M. Storage reserve mobilization during low temperature germination and early seedling growth in *Brassica napus* [J]. Plant Physiol Biochem, 1999, 37(12): 939-947.
- [14] 刘姗姗, 杨特武, 黄海东, 等. 吸胀期低温与水分条件对油菜种子萌发的耦合效应[J]. 中国油料作物学报, 2014, 36(1): 44-50.
- [15] 张卫星, 赵致, 柏光晓, 等. 不同基因型玉米自交系的抗旱性研究与评价[J]. 玉米科学, 2007, 15(5): 6-11.
- [16] 徐建伟, 张晨, 曾晓燕, 等. 近十年新疆北疆主栽棉花种子低温萌发能力差异评价[J]. 新疆农业科学, 2017, 54(9): 1569-1578.
- [17] 刘禹辰, 杨德光, 李梁, 等. 低温胁迫对玉米种子萌发及淀粉分解酶类活性的影响[J]. 玉米科学, 2018, 26(1): 64-68.
- [18] 杨娜, 赵和平, 葛凤伟, 等. 2种独行菜萌发对低温胁迫的生理响应[J]. 干旱区研究, 2015, 32(4): 760-765.
- [19] 蒋莉莉. 低温胁迫对西瓜种子萌发的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2016.
- [20] 姚明华, 徐跃进. 茄子种质资源的耐冷性鉴定[J]. 植物遗传资源科学, 2001, 2(4): 49-52, 63.
- [21] 丁广洲, 陈丽, 赵春雷, 等. 甜菜耐低温种质筛选和苗期耐冷性鉴定[J]. 种子, 2013, 32(8): 1-6.
- [22] 于延球, 杨谦. 赤霉素处理对西瓜种子发芽率的影响[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(6): 2422, 2428.
- [23] 胡鸣, 姚圣黎, 程晓晖, 等. 基于高深度重测序的春性、半冬性和冬性甘蓝型油菜基因组遗传变异分析[J]. 中国油料作物学报, 2018, 40(4): 469-478.
- [24] 闫蕾, 蔡俊松, 高立兵, 黄斌, 马海清. 甘蓝型油菜抗寒性鉴定方法的建立和种质资源筛选[J]. 中国油料作物学报, 2018, 40(1): 74-83.
- [25] 许晶, 曾柳, 徐明月, 等. 油菜耐渍性种质资源筛选与评价[J]. 中国油料作物学报, 2014, 36(6): 748-754.

(责任编辑:郭学兰)