

董 扬. 糜子萌芽期耐冷种质资源综合评价体系构建[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(21): 82–89.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.21.012

# 糜子萌芽期耐冷种质资源综合评价体系构建

董 扬

(黑龙江省农业科学院齐齐哈尔分院, 黑龙江齐齐哈尔 161006)

**摘要:**耐冷品种的选育是解决低温冷害问题最直接有效的手段。本研究以 240 份糜子资源为试验材料,在人工气候箱内培养皿培养,通过 25、12、10、8、6、4 ℃ 等 6 个温度逐级低温发芽筛选,确定糜子萌发期最低发芽温度可为 6 ℃。根据不同地域来源从供试糜子资源中随机选出 25 份材料,测定萌发期 12、10、8、6 ℃ 低温下的种子活力,利用标准差系数赋予权重法、标准正态分布检验和 QQ-Plot 分析,发现 10 ℃ 可作为糜子种质资源萌发期耐冷性鉴定的最适温度。在 25 ℃ 和 10 ℃ 测定 240 份糜子资源萌发期的相对发芽势、相对发芽率、相对发芽指数、相对根长、相对根鲜质量、相对芽长、相对芽鲜质量、相对活力指数和相对冷害率等指标。通过描述统计分析、相关性分析和主成分分析,评估糜子资源的萌发期各性状对冷胁迫的耐受性。结果显示,在 10 ℃ 冷胁迫下,240 份糜子萌发期的性状指标大部分都小于对照,但不同品种降低幅度存在差异;相关性分析结果表明,相对发芽势、相对发芽指数和相对发芽率之间呈极显著正相关( $P < 0.01$ ),且相关系数均大于 0.80,相对芽鲜质量、相对活力指数和相对根鲜质量之间呈极显著正相关( $P < 0.01$ ),且相关系数均大于 0.90,说明这些耐冷性状有很大的关联性。主成分分析结果表明,前 3 个主成分累计贡献率达到 87.22%,相对发芽率、相对发芽势和相对发芽指数有较大的载荷量。综合试验结果得出,10 ℃ 处理,发芽率、发芽势和发芽指数可作为糜子种质资源耐冷性的鉴定指标。

**关键词:**糜子;萌芽期;耐冷性鉴定;相关性分析;主成分分析;评价体系

**中图分类号:**S516.02 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2022)21-0082-08

糜子(*Panicum miliaceum* L.)是  $C_4$  作物,能忍受盐碱、干旱、高温等极端条件<sup>[1]</sup>,是干旱、半干旱地区的重要特色杂粮作物<sup>[2]</sup>。我国具有丰富的糜子种质资源,目前共收集 10 200 余份,国家已存储 8 850 余份,尤其是地方品种资源较多<sup>[3]</sup>,具有广泛的遗传变异性和丰富的抗逆基因<sup>[4-5]</sup>。糜子的生育期短,是东北等冷凉地区的救灾抗逆作物,在北方

有较大的生产优势和地区优势。

植物的耐冷性是指作物个体对低温冷害所表现出的抵抗性或耐受性<sup>[6]</sup>,是植物对低温逆境而表现出的一种生理应激反应<sup>[7]</sup>。农业生产中,减轻低温冷害所造成的损失最有效的手段就是选用耐冷品种,而农作物耐冷性评价体系的建立是鉴定和筛选耐冷种质资源的基础与前提<sup>[8]</sup>。种子在萌发阶段对低温反应最为敏感,低温破坏了种子细胞的生物活性,从而大幅度地降低了种子的发芽势、发芽率、发芽指数等<sup>[9]</sup>。近些年,在耐冷性鉴定分析评价方法上,前人已经做了大量工作,种子萌发的时间和活力最先受到低温影响<sup>[10]</sup>。环境温度越低,种子萌发所需的时间越长<sup>[9]</sup>。长时间的萌发会使种子受到土壤中病原菌的侵害,使种子腐烂,降低发芽率<sup>[11-12]</sup>。在种子萌发期,发芽率、发芽势、发芽指

收稿日期:2021-12-16

基金项目:黑龙江省农业科学院院级课题(编号:2020YF035);国家现代农业产业技术体系资助项目(编号:CARS-06-14.5-B21);齐齐哈尔市科技计划创新激励项目(编号:CNYGG-2020030);农业科技创新跨越工程杂粮杂豆科技创新专项(编号:HNK2019CX05-06)。

作者简介:董 扬(1982—),女,河北唐山人,硕士,助理研究员,主要从事谷子、糜子遗传育种与高产高效栽培研究。E-mail: dongyang0717@126.com。

[26]李鸿雁,李大红. 转拟南芥 *P5CS1* 基因增强羽衣甘蓝的耐旱性[J]. 植物生理学报, 2014, 50(7): 1009–1013.

[27]胡景江,左仲武,周白云. 外源活性氧清除剂对油松幼苗的抗旱性效应[J]. 西北林学院学报, 2005, 20(4): 18–20, 43.

[28]单云鹏,陈新慧,万 平,等. 小豆种质资源苗期抗旱性评价及抗旱资源筛选[J]. 植物遗传资源学报, 2019, 20(5): 1151–1159.

[29]徐银萍,潘永东,刘强德,等. 大麦种质资源成株期抗旱性鉴定及抗旱指标筛选[J]. 作物学报, 2020, 46(3): 448–461.

[30]李 龙,毛新国,王景一,等. 小麦种质资源抗旱性鉴定评价[J]. 作物学报, 2018, 44(7): 988–999.

[31]王玉斌,平俊爱,牛 皓,等. 粒用高粱种质中后期抗旱性鉴定筛选与分类指标评价[J]. 中国农业科学, 2019, 52(22): 4039–4052.

数、根长、芽长等指标会发生不同程度的变化,是植物受到低温胁迫最直接、具体的表现<sup>[13-14]</sup>。徐伟豪将冷胁迫 14 ℃ 条件下水稻芽期的发芽率设置 5 个耐冷评价标准,发芽率 > 90% 为极强,80% < 发芽率 ≤ 90% 为强,70% < 发芽率 ≤ 80% 为中,60% < 发芽率 ≤ 70% 为弱,发芽率 ≤ 60% 为极弱<sup>[15]</sup>。Marocco 等的研究表明,玉米的最适生长温度为 25 ~ 28 ℃,在温度低于 10 ℃ 时植株生长会变得明显缓慢,6 ~ 8 ℃ 时就不再生长发育<sup>[16]</sup>。王俊娟等的研究表明,棉花最低萌发温度为 10 ~ 12 ℃,最适温度为 20 ~ 30 ℃<sup>[17-18]</sup>。辣椒的适宜发芽生长温度在 20 ~ 30 ℃ 之间,长时间在 12 ℃ 以下生长会受到冷害<sup>[19]</sup>。唐双勤等设计 5、8、10 ℃ 等 3 个低温处理直播水稻,结果表明 8 ℃ 处理最适鉴别品种间耐冷性差异<sup>[20]</sup>。杨光等对 296 份玉米自交系进行了耐冷性鉴定研究,结果表明在 4 ℃ 低温下,yw9706 自交系全部发芽,而自交系龙抗 11 完全没有发芽<sup>[21]</sup>,说明同一作物不同品种间耐冷性存在差异。糜子种子发芽最适温度为 20 ~ 30 ℃<sup>[22]</sup>,当温度低于 12 ℃ 时容易对糜子造成冷害胁迫<sup>[23]</sup>。

目前,对糜子的研究主要集中在抗旱、抗倒伏和抗盐碱等抗逆方面<sup>[24-26]</sup>,对耐冷能力的研究鲜见报道。本研究以 240 份糜子种质资源为参试材料,通过逐级低温筛选,确定糜子的最低发芽温度,通过萌发期不同低温处理,调查耐冷性相关指标,并利用模糊数学隶属函数、正态分布检验、相关性分析、主成分分析等统计方法进行综合分析,以期建立糜子耐冷性综合评价体系,为耐冷糜子品种资源的鉴定提供方法,并对资源加以利用。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

试验于 2021 年在黑龙江省农业科学院齐齐哈尔分院实验室内进行,该科研基地(123°45′E,47°15′N)位于黑龙江省西部干旱半干旱地区,海拔 141 m,年平均气温为 3.37 ℃,积温为 2 600 ~ 2 700 ℃,生长季总降水量为 415 mm。试验材料是从适宜在该科研基地种植的 820 份糜子品种资源中,根据 2017—2019 年测量的株高、落粒性、穗质量、千粒质量等农艺性状和产量性状指标初步筛选出的 240 份优质糜子资源,选种以来源广泛、适宜当地种植、成熟度好、农艺性状和产量性状突出为原则。

240 份糜子资源来自 21 个国家,其中我国资源

209 份,国外资源 31 份,我国资源中包括新疆 11 份、山西 27 份、宁夏 16 份、陕西 16 份、青海 10 份、内蒙古 33 份、黑龙江 31 份、辽宁 8 份、西藏 1 份、吉林 8 份、云南 2 份、山东 7 份、江苏 3 份、甘肃 17 份、湖北 1 份、海南 2 份、北京 3 份、河北 13 份。

### 1.2 试验设计

将糜子种子在 1% 的 NaClO 溶液中消毒 15 min 后,用自来水冲洗 5 min,将种子置于阴凉通风处阴干后置于铺有 3 层滤纸的大号培养皿中,每个培养皿中均等摆放籽粒饱满、大小颜色一致的种子 30 粒。将培养皿置于人工气候箱内,每个试验均设置 3 次重复。设 25 ℃(对照)及 12、10、8、6、4 ℃ 6 个温度处理试验,黑暗 24 h,设置湿度为 70%。

**1.2.1 耐冷种子最低发芽温度试验方法** 将 240 份糜子资源逐级放入 25、12、10、8、6、4 ℃ 中筛选,25、12、10 ℃ 处理的发芽率以 80% 为标准,发芽率 ≥ 80% 的资源进入下一水平低温处理,8、6、4 ℃ 处理的发芽率以 60% 为标准,发芽率 ≥ 60% 的资源进入下一水平低温处理。

**1.2.2 最适低温筛选试验方法** 为确定糜子萌发期耐冷性鉴定的最适温度,根据不同地域来源从供试糜子资源中随机选出 25 份材料,分别于 25、12、10、8、6 ℃(试验“1.2.1”节确定出的最低发芽温度)5 个温度条件下处理 10 d,之后转入 25 ℃ 条件下恢复生长 6 d。每个试验均设置 3 次重复。低温胁迫处理期间无光照,生长恢复阶段 07:00—19:00 光照,每天 12 h,设置 2 500 lx 的光照强度和 70% 的相对湿度。每天记录发芽过程中的发芽粒数,计算发芽指数,生长恢复第 3 天测定发芽势,第 6 天测发芽率,并计算活力指数。

**1.2.3 萌发期耐冷性鉴定试验** 将 240 份糜子资源分别放在 10 ℃(最适低温筛选温度)和 25 ℃(对照)2 个温度条件下萌发,培养方法同“1.2.2”节。发芽过程中每天记录发芽粒数,计算出发芽指数,恢复生长第 3 天测定发芽势,第 6 天测定发芽率、根长、根鲜质量、芽长、芽鲜质量,计算活力指数和冷害率等。根长为从种胚到最长根尖的长度;芽长为从种胚到最长叶尖的长度。萌发期生长指标计算公式如下:发芽势 = 第 3 天发芽种子数/处理种子数 × 100%;发芽率 = 第 6 天发芽种子数/处理种子数 × 100%;发芽指数 =  $\sum$ (第  $n$  天的发芽种子数/相应发芽天数);活力指数 = 发芽指数 × 根鲜质量;发芽相对冷害率 = (对照发芽率 - 处理发芽

率)/对照发芽率×100% ; 相对值 = 各指标处理值/对照值。

1.3 数据处理与分析

用 Excel 2019 软件进行数据统计分析,用 SPSS 19.0 软件进行相关性分析、主成分分析,用 R studio 软件进行聚类分析。

采用标准差系数赋予权重法<sup>[27]</sup>进行耐冷性综合评价:采用公式(1)计算隶属函数值,用公式(2)计算标准差系数,用公式(3)计算各指标的权重,用公式(4)计算各材料的综合评价值。

$$U(X_j) = \frac{X_j - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}, j = 1, 2, \cdots, n_o. \quad (1)$$

式中: $U(X_j)$ 表示第  $j$  个指标的隶属函数值; $X_j$ 表示第  $j$  个综合指标; $X_{\min}$ 表示第  $j$  个综合指标的最小值; $X_{\max}$ 表示第  $j$  个综合指标的最大值。

$$P_j = \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_{ij} - \bar{X}_j)^2 / \bar{X}_j}, j = 1, 2, \cdots, n; \quad (2)$$

$$W_j = p_j / \sum_{j=1}^n P_j, j = 1, 2, \cdots, n_o. \quad (3)$$

式中: $X_{ij}$ 表示第  $i$  个品种第  $j$  个性状的相对值; $\bar{X}_j$ 表示第  $j$  个指标平均值; $W_j$ 表示第  $j$  个综合指标在所有综合指标中的重要程度,即权重; $P_j$ 为各基因型第  $j$  个综合指标的贡献率。

$$D = \sum_{j=1}^n [U(X_j) \times W_j], j = 1, 2, \cdots, n_o. \quad (4)$$

式中: $D$ 表示各品种用综合指标评价所得的综合评价价值。

2 结果与分析

2.1 低温萌发温度评价

2.1.1 糜子萌发期最低发芽温度的确定 对 240 份糜子资源进行逐级降温筛选,结果(图 1)表明,在 25 ℃萌发时出芽率均大于 98%,说明参试糜子资源种子质量良好,因此全部进行逐级低温发芽试验。在 12 ℃温度下发芽率大于 80% 的糜子资源有 195 份,占总数的 81.25%,195 份资源在 10 ℃培养箱中

发芽率大于 80% 的糜子资源有 164 份,占总数的 68.33%,164 份资源在 8 ℃培养箱中发芽率大于 60% 的资源有 84 份,占总数的 35.00%,将筛选出的 84 份糜子放入 6 ℃培养箱中发芽,结果显示发芽率大于 60% 的糜子资源有 22 份,占总数的 9.16%,22 份糜子资源在 4 ℃培养箱中均没有发芽。因此,糜子萌发期最低发芽温度为 6 ℃。

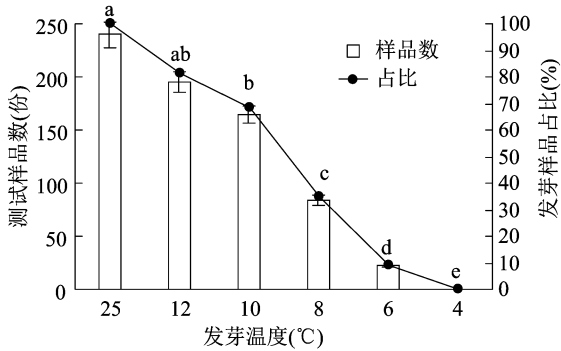


图1 240 份糜子资源逐级低温发芽筛选结果

2.1.2 不同低温处理下各指标的耐冷响应 由表 1 可知,在 12、10、8、6 ℃低温胁迫下,25 份糜子资源的 4 个发芽性状均表现出不同程度的下降趋势,且各指标的相对值大部分都小于 1,平均值均小于 1,说明 4 个低温处理对 25 份糜子的萌发均造成一定程度的冷害,并且相对发芽势的变异系数范围为 9.12%~113.14%,相对发芽率的变异系数范围为 7.10%~89.42%,相对发芽指数的变异系数范围为 8.01%~94.33%,相对活力指数的变异系数范围为 17.12%~105.00%,表明测定的指标对 4 个低温反应敏感,通过对供试材料萌发期相对指标的统计分析可知,25 份抽选样本的遗传多样性较高,能够代表 240 份参试糜子材料,可以进一步分析以确定糜子耐冷性评价的最适温度。

2.1.3 确定最适耐冷性评价温度 确定筛选耐冷糜子资源的最适低温,用隶属函数法计算出 25 个糜子资源在 4 个低温下的芽期指标综合得分( $D$ )(表 2),对  $D$  进行正态分布检验和 QQ-Plot 分析(图 2)。

表 1 不同低温处理下 25 份糜子材料的萌发表现

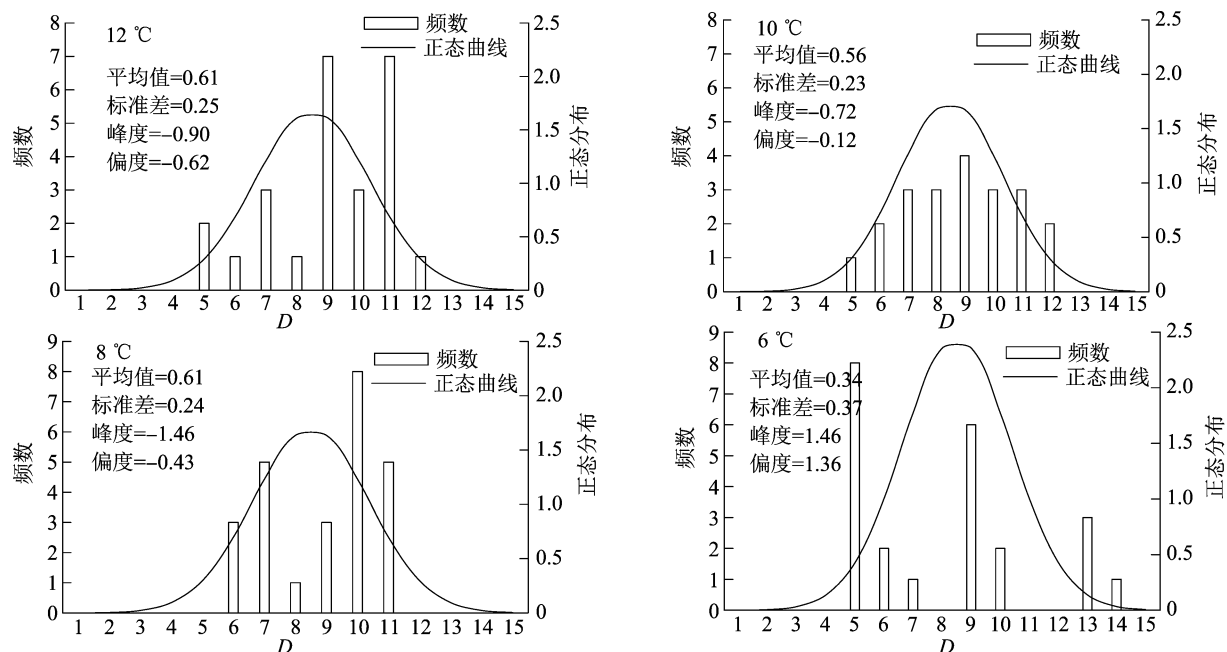
温度 (℃)	相对发芽势				相对发芽率				相对发芽指数				相对活力指数			
	最大值	最小值	平均值	变异系数(%)	最大值	最小值	平均值	变异系数(%)	最大值	最小值	平均值	变异系数(%)	最大值	最小值	平均值	变异系数(%)
12	0.99	0.72	0.89	9.12	1.00	0.88	0.95	7.10	0.32	0.29	0.30	8.01	0.28	0.26	0.27	17.12
10	0.95	0.35	0.75	22.35	0.92	0.83	0.85	24.23	0.26	0.09	0.20	16.52	0.24	0.17	0.13	37.56
8	0.77	0.12	0.52	34.12	0.79	0.37	0.60	35.25	0.20	0.12	0.17	31.67	0.10	0.01	0.09	74.00
6	0.72	0.00	0.18	113.14	0.88	0.00	0.33	89.42	0.26	0.00	0.10	94.33	0.13	0.00	0.04	105.00

表 2 不同温度处理后 25 份糜子种质耐冷系数的隶属函数分析

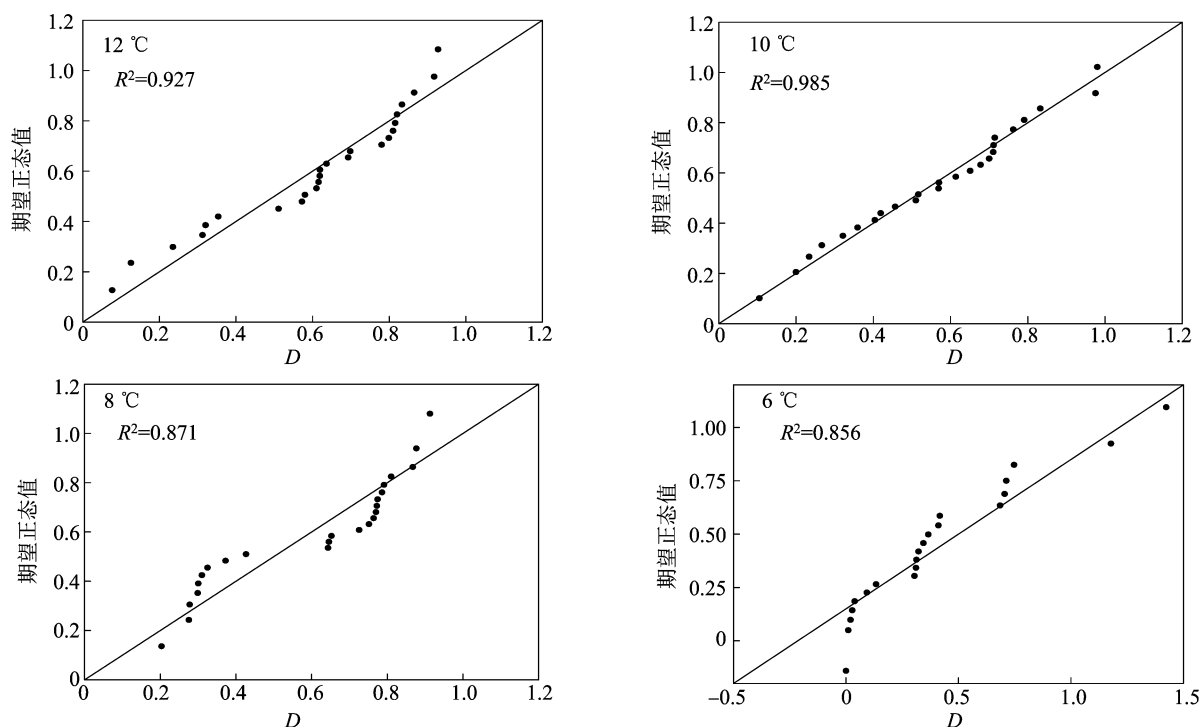
序号	品种	来源	12 ℃				10 ℃				8 ℃				6 ℃							
			$U(X_1)$	$U(X_2)$	$U(X_3)$	$U(X_4)$	$D$	$U(X_1)$	$U(X_2)$	$U(X_3)$	$U(X_4)$	$D$	$U(X_1)$	$U(X_2)$	$U(X_3)$	$U(X_4)$	$D$					
2	黄黍子	北京	0.73	1.00	0.71	0.83	0.08	0.82	0.71	0.55	0.82	0.10	0.94	0.56	0.79	0.61	0.13	0.22	0.41	0.54	0.50	0.00
11	张川麻糜子	甘肃	0.38	0.58	0.53	1.00	0.24	0.62	0.57	0.30	1.00	0.20	0.62	0.73	0.59	1.00	0.14	0.31	0.61	0.39	0.54	0.00
15	糯黍	海南	0.61	0.65	0.32	0.57	0.32	0.69	0.57	0.20	0.30	0.26	0.62	1.00	0.78	0.48	0.14	0.50	0.86	0.86	0.76	0.00
21	大黄黍	河北	0.25	0.07	0.00	0.63	0.35	0.69	0.14	0.07	0.29	0.30	0.90	0.57	0.29	0.17	0.30	0.06	0.15	0.34	0.02	0.00
32	黑糜子	黑龙江	1.00	1.00	1.00	0.67	0.51	0.95	0.86	1.00	0.54	0.36	0.52	0.86	0.17	0.26	0.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
42	红壳粘糜子	吉林	0.98	1.00	0.87	0.34	0.57	0.94	0.86	0.80	0.25	0.40	0.40	0.40	0.18	0.10	0.39	0.00	0.25	0.01	0.00	0.02
47	黄粟	江苏	0.75	0.78	0.26	0.39	0.61	0.69	0.57	0.14	0.42	0.42	0.37	0.00	0.00	0.17	0.64	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04
53	A75-2	辽宁	0.17	0.00	0.12	0.00	0.62	0.02	0.20	0.40	0.00	0.46	0.33	0.79	0.52	0.24	0.65	0.50	0.82	0.78	0.76	0.09
60	巴盟黄黍子	内蒙古	0.68	0.45	0.70	0.22	0.62	0.75	0.43	0.50	0.42	0.51	0.51	0.54	0.63	0.53	0.66	0.11	0.36	0.44	0.35	0.13
66	准旗紫秆红糜	内蒙古	0.81	1.00	1.00	0.65	0.62	0.82	1.00	0.85	0.69	0.52	0.68	0.56	0.36	0.03	0.81	0.00	0.00	0.00	0.00	0.30
73	红河黑糜子	宁夏	0.30	0.51	0.60	0.63	0.64	0.60	0.29	0.32	0.29	0.57	0.00	0.30	0.29	0.03	0.83	0.00	0.00	0.00	0.00	0.31
85	牛尾黄	青海	0.00	0.44	0.69	0.57	0.69	0.00	0.38	0.12	0.29	0.61	0.31	1.00	0.52	0.52	0.86	1.00	1.00	1.00	0.41	
92	红谷腿	山东	0.85	1.00	0.53	0.19	0.78	0.75	1.00	0.28	0.00	0.65	0.90	0.46	0.59	0.00	0.89	0.03	0.14	0.00	0.00	0.42
101	金教黍	山西	0.63	0.94	0.47	0.78	0.80	0.62	0.71	0.46	0.54	0.67	0.79	0.16	0.52	0.18	0.90	0.00	0.09	0.00	0.00	0.31
111	圪堵趟红软糜	陕西	0.68	1.00	0.70	0.77	0.81	0.69	0.86	0.66	0.68	0.68	0.56	0.91	0.94	0.34	0.90	0.67	0.68	0.74	0.66	0.37
127	黄糜子	新疆	0.95	1.00	1.00	0.76	0.82	0.95	0.86	0.82	0.58	0.69	1.00	0.90	0.71	0.39	0.94	0.31	0.30	0.39	0.27	0.32
150	宁糜 13 号	宁夏	0.23	0.65	0.15	0.30	0.82	0.29	0.29	0.10	0.30	0.71	0.38	0.80	0.53	0.38	0.94	0.33	0.39	0.57	0.40	0.68
155	品糜 1 号	山西	0.73	1.00	0.44	0.34	0.87	0.69	0.86	0.40	0.25	0.79	0.99	0.85	0.75	0.33	0.94	0.50	0.55	0.58	0.39	0.71
159	榆黍 1 号	陕西	0.93	0.90	0.75	0.71	0.92	1.00	0.57	0.61	0.73	0.83	0.69	0.94	1.00	0.83	0.96	0.50	0.77	0.78	0.61	1.18
174	URAL	哈萨克斯坦	0.93	1.00	0.70	0.64	0.93	0.95	1.00	0.57	0.46	0.98	0.87	0.25	0.33	0.67	1.17	0.00	0.05	0.00	0.00	1.42
182	PI 427248	尼泊尔	0.73	1.00	0.71	0.83	0.08	0.82	0.71	0.55	0.82	0.10	0.94	0.56	0.79	0.61	0.13	0.22	0.41	0.54	0.50	0.00
184	Shiroishikei NG-33	日本	0.54	0.88	0.63	0.72	0.79	0.38	0.54	0.68	0.58	0.36	0.32	0.55	0.16	0.38	0.29	0.13	0.25	0.42	0.33	0.01
191	Spain 9676 24	西班牙	0.43	0.26	0.89	0.32	0.37	0.88	0.62	0.59	0.84	0.14	0.16	0.02	0.40	0.46	0.55	0.23	0.35	0.36	0.12	0.17
198	列根特	俄罗斯	0.46	0.95	0.77	0.56	0.43	0.04	0.13	0.46	0.16	0.23	0.56	0.88	0.45	0.15	0.41	0.00	0.00	0.01	0.03	0.05
207	年丰 1	黑龙江	0.23	0.62	0.36	0.69	0.39	0.59	0.16	0.33	0.67	0.63	0.61	0.26	0.47	0.06	0.29	0.03	0.24	0.11	0.00	0.32

从图 2 - A 可以看出,12、10、8 ℃ 正态分布检验的峰度值分别为 -0.90、-0.72、-1.46,均小于 0,呈平顶峰,6 ℃ 处理下的峰度值为 1.46,大于 0,呈尖顶峰,10 ℃ 的峰度值最接近于 0,6 ℃ 正态检验偏度值为 1.36,呈较大程度的正向偏离,12、10、8 ℃ 的偏度值分别为 -0.62、-0.12、-0.43,均小于 0,呈负向偏离。结果表明 10 ℃ 处理下的偏度绝对值仅为

0.12,是所有处理中偏度最小的,正态分布拟合度最高。隶属函数的 QQ - Plot 分析结果(图 2 - B)表明,25 份糜子材料在 10 ℃ 处理下相对发芽势、相对发芽率和相对活力指数的隶属函数值与趋势线拟合度最高( $R^2 = 0.985$ ),最符合正态分布。所以,10 ℃ 处理为筛选耐冷糜子资源的最适温度。



A. 频数直方图



B. QQ-Plot 图

图2 不同低温处理下 25 份糜子材料的 4 个指标的隶属函数正态分布图

2.2 萌发期耐冷性评价

2.2.1 萌发期糜子资源对冷胁迫的响应 从表 3 可以看出,在 10 ℃ 条件下 240 份糜子品种资源萌发期的各项指标与对照比的相对值大部分都小于 1,平均值均小于 1,说明 10 ℃ 低温处理对参试材料的萌发造成了一定程度的冷害。相对发芽势的范围为 0.00 ~ 1.00,相对发芽率的范围为 0.08 ~ 1.00,相对发芽指数的范围为 0.02 ~ 0.38,相对芽长的范围为 0.09 ~ 0.93,相对根长的范围为 0.21 ~ 2.98,相对芽鲜质量的范围为 0.03 ~ 1.33,相对根鲜质量的范围为 0.18 ~ 2.13,相对活力指数的范围为 0.02 ~ 0.69,相对发芽冷害率的范围为 0.00 ~ 0.92。其中,相对根鲜质量、相对活力指数、相对发芽冷害率的差异性较大,变异系数分别是 43.33%、58.45%、100.03%。表明不同品种资源的耐冷性存在差异,具有丰富的遗传多样性,参试材料的测定指标对 10 ℃ 低温胁迫反应敏感,测试材料可作为在冷胁迫下鉴定耐冷性状的品种资源。

2.2.2 萌发期冷胁迫下各性状的相关性分析 从相关性分析结果(表 4)可以看出,相对发芽势、相对发芽率、相对发芽指数分别与相对芽鲜质量、相对根鲜质量、相对活力指数、相对冷害率等指标间呈极显著负相关( $P < 0.01$ );相对根长与相对发芽率呈显著正相关( $P < 0.05$ ),与相对芽鲜质量、相对根

表 3 萌发期 10 ℃冷胁迫下各性状相对值的统计分析结果

性状	最小值	最大值	平均值	变异系数 (%)
相对发芽势	0.00	1.00	0.67	39.21
相对发芽率	0.08	1.00	0.83	20.60
相对发芽指数	0.02	0.38	0.23	29.67
相对芽长	0.09	0.93	0.54	25.62
相对根长	0.21	2.98	0.78	37.00
相对芽鲜质量	0.03	1.33	0.56	34.90
相对根鲜质量	0.18	2.13	0.75	43.33
相对活力指数	0.02	0.69	0.17	58.45
相对发芽冷害率	0.00	0.92	0.17	100.03

鲜质量、相对活力指数、相对冷害率呈显著负相关( $P < 0.05$ ),与相对芽长、相对发芽指数、相对发芽势呈极显著正相关( $P < 0.01$ );相对发芽势、相对发芽率、相对芽长、相对发芽指数这 4 个指标相互间均呈极显著正相关( $P < 0.01$ );相对根鲜质量、相对芽鲜质量、相对活力指数、相对冷害率这 4 个指标相互间均呈极显著正相关( $P < 0.01$ )。相对发芽势、相对发芽率和相对发芽指数相互间的相关系数均大于 0.80,相对芽鲜质量、相对活力指数和相对根鲜质量相互间的相关系数均大于 0.90,说明各性状间受到冷胁迫后的响应是相互关联的。

表 4 萌发期冷胁迫下各性状相对值的相关系数

指标	相关系数								
	相对发芽势	相对发芽率	相对发芽指数	相对芽长	相对根长	相对芽鲜质量	相对根鲜质量	相对活力指数	相对冷害率
相对发芽势	1.00								
相对发芽率	0.84**	1.00							
相对发芽指数	0.83**	0.86**	1.00						
相对芽长	0.31**	0.27**	0.34**	1.00					
相对根长	0.24**	0.15*	0.20**	0.22**	1.00				
相对芽鲜质量	-0.37**	-0.33**	-0.36**	-0.06	-0.19*	1.00			
相对根鲜质量	-0.40**	-0.36**	-0.39**	-0.06	-0.15*	0.98**	1.00		
相对活力指数	-0.40**	-0.36**	-0.39**	-0.05	-0.14*	0.97**	0.99**	1.00	
相对冷害率	-0.84**	-1.00**	-0.86**	-0.27**	-0.15*	0.33**	0.36**	0.36**	1.00

注: \*、\*\* 分别表示在 0.05、0.01 水平上显著相关。

2.2.3 萌发期冷胁迫下糜子测量性状相对值的主成分分析 对 240 份糜子冷胁迫下 9 个相对性状进行主成分分析,选取 3 个特征值大于 1 的主成分。由表 5 可知,第 1 主成分的贡献率为 52.57%,第 2 主成分的贡献率为 22.87%,第 3 主成分的贡献率

为 11.78%,累计贡献率为 87.22%,表明 3 个主成分涵盖了 9 个相对指标 87% 以上的数据信息。由表 6 可知,9 个性状相对值的变化趋势可以通过前 3 个主成分代表,它们之间的相关性可通过因子载荷量反映出来。第 1 主成分与相对发芽势、相对发芽

率和相对发芽指数呈较大的正相关,表明冷胁迫下糜子发芽性状可作为耐冷性评价的重要指标。第 2 主成分与相对芽鲜质量和相对根鲜质量呈较大的正相关,表明冷胁迫与种子发芽后的鲜质量有较大关系。第 3 主成分与相对根长呈较明显的正相关,表明根长对其起主要作用。

表 5 3 个主成分的特征值以及贡献率

主成分	特征值	贡献率 (%)	累计贡献率 (%)
1	4.73	52.57	52.57
2	2.06	22.87	75.44
3	1.06	11.78	87.22

表 6 各因子载荷矩阵

主成分	载荷								
	相对发芽势	相对发芽率	相对发芽指数	相对芽长	相对根长	相对芽鲜质量	相对根鲜质量	相对活力指数	相对冷害率
1	0.85	0.86	0.85	0.32	0.27	-0.72	-0.75	-0.75	-0.81
2	0.35	0.43	0.37	0.34	0.06	0.67	0.66	0.56	-0.43
3	-0.04	-0.19	-0.08	0.57	0.81	-0.04	-0.01	0.01	0.19

3 讨论

3.1 糜子耐冷温度评价

近年来,各国学者对不同农作物种子萌发期耐冷性方面做了大量研究。张鹤等采用模糊数学隶属函数方法研究认为,花生萌发期进行耐冷性评价最佳耐冷温度为 6 ℃<sup>[28]</sup>;孙世臣等研究发现,寒地水稻耐冷性评价最适温度为 10 ℃<sup>[29]</sup>。虽然前人对多种作物种子萌发期的耐冷性做了大量研究,但在处理糜子的耐冷低温和评价指标上还未见报道,因此,确定糜子耐冷性评价的适宜温度条件是进行糜子耐冷性鉴定工作的前提。本研究以 240 份糜子种质资源为参试材料,分别在 25、12、10、8、6、4 ℃ 的低温条件下处理,逐级筛选后发现,部分糜子可在 6 ℃ 发芽,而在 4 ℃ 条件下未见发芽,因此在 25、12、10、8、6 ℃ 的温度下,对根据不同地域来源随机选出 25 份材料进行处理,分别测定低温条件下的相对发芽势、相对发芽率、相对发芽指数和相对活力指数作为评价指标,利用标准差系数赋予权重法、标准正态分布检验和 QQ - Plot 对数据进行分析,结果显示在 6、8 ℃ 低温条件下萌发糜子对种子的活力影响较大,无法对耐冷能力进行准确判断;在 12 ℃ 低温条件下种子萌发对活力的影响较小,品种间的差异并不显著;10 ℃ 处理后的各项活力指标均呈明显的正态分布,且品种间差异显著。因此,在低温 10 ℃ 时对糜子种子做耐冷发芽试验可作为糜子种质资源的耐冷性鉴定条件。糜子耐冷性筛选的最适温度与寒地水稻<sup>[29]</sup>、玉米杂交种<sup>[30]</sup> 等相同,但与花生<sup>[28]</sup>和高粱<sup>[31]</sup> 等作物相比有所提高。说明不同作

物的最适耐冷性评价温度存在差异。

3.2 糜子萌发期耐冷性状评价

目前还未见有糜子资源萌发期耐冷性状的评价。袁雨豪等对 100 份糜子资源通过盐胁迫测定萌发起点的发芽率、发芽势、发芽指数等指标,通过主成分分析,确定糜子萌发期耐盐性鉴定性状指标<sup>[26]</sup>。本研究以 240 个糜子品种资源为试验材料,测定 10 ℃ 低温胁迫下糜子萌发期的相对发芽率、相对发芽势、相对冷害率等指标(以 25 ℃ 为对照),通过相关性分析,发现耐冷性状之间受到冷胁迫的程度是相互关联的。主成分分析后将发芽率、发芽势和发芽指数作为糜子萌发期耐冷性的鉴定指标,与油菜<sup>[32]</sup>、水稻<sup>[33]</sup> 等作物的耐冷性鉴定指标有一定相似性。

4 结论

通过逐级降温法发现部分糜子的最低发芽温度为 6 ℃,利用标准差系数赋予权重法计算综合隶属函数值,通过正态分布等确定最适耐冷性评价温度,结合主成分分析建立糜子资源萌芽期耐冷综合评价体系:在萌发期,10 ℃ 处理,以发芽率、发芽势和发芽指数作为耐冷性鉴定指标。

参考文献:

[1] Yang Q H, Zhang P P, Qu Y, et al. Comparison of physicochemical properties and cooking edibility of waxy and non - waxy proso millet (*Panicum miliaceum* L. ) [J]. Food Chemistry, 2018, 257: 271 - 278.

[2] 李顺国, 刘 猛, 赵 宇, 等. 2012 年谷子糜子产业政策建议及趋势分析[J]. 农业展望, 2012, 8(3): 41 - 44.

[3] 王 纶, 王星玉, 温琪汾. 黍稷种质资源繁殖更新技术[J]. 山西

- 农业科学,2012,40(3):227-232,240.
- [4] Arab A, Bradaran R, Vahidipour T H. Effect of irrigation and mycorrhizal bio-fertilizers on yield and agronomic traits of millet (*Panicum miliaceum* L.) [J]. International Journal of Agriculture & Crop Sciences, 2013, 6(2):103-109.
- [5] Yue H, Wang M, Liu S Y, et al. Transcriptome-wide identification and expression profiles of the WRKY transcription factor family in broomcorn millet (*Panicum miliaceum* L.) [J]. BMC Genomics, 2016, 17:343.
- [6] 马延华. 玉米发芽至苗期耐冷性资源鉴定及遗传分析[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2013.
- [7] 李 霞, 戴传超, 程 睿, 等. 不同生育期水稻耐冷性的鉴定及耐冷性差异的生理机制[J]. 作物学报, 2006, 32(1):76-83.
- [8] 周亚峰, 许彦宾, 王艳玲, 等. 基于主成分-聚类分析构建甜瓜幼苗耐冷性综合评价体系[J]. 植物学报, 2017, 52(4):520-529.
- [9] Landi P, Frascaroli E, Lovato A. Divergent full-sib recurrent selection for germination at low temperature in a maize population [J]. Euphytica, 1992, 64(1/2):21-29.
- [10] Janda T, Kósa E I, Szalai G, et al. Investigation of antioxidant activity in maize during low temperature stress[J]. Acta Biologica Szegediensis, 2005, 49(1/2):53-54.
- [11] 李北齐, 张玉胡, 王贵强, 等. 不同生态型玉米品种低温下出苗机理研究[J]. 中国农学通报, 2011, 27(9):120-125.
- [12] 张 旭, 赵 明, 李连禄, 等. 温度对玉米生理生化特性的影响[J]. 玉米科学, 2002, 10(3):60-62.
- [13] Anjum Z I, Khatoon A. Chilling effect on germination and seedling vigour of some cultivated species of *Gossypium* [J]. Asian Journal of Plant Sciences, 2003, 2(3):297-299.
- [14] Wang D, Liu J L, Li C G, et al. Genome-wide association mapping of cold tolerance genes at the seedling stage in rice [J]. Rice, 2016, 9(1):61.
- [15] 徐伟豪. 吉林省东部地区优质水稻品种耐冷性鉴定[D]. 延吉:延边大学,2020.
- [16] Marocco A, Lorenzoni C, Fracheboud Y. Chilling stress in maize [J]. Maydica, 2005, 50(3/4):571-580.
- [17] 王俊娟, 阴祖军, 王德龙, 等. 棉花耐低温研究进展[J]. 中国棉花, 2016, 43(12):1-6.
- [18] 王钰静, 谢 磊, 李志博, 等. 低温胁迫对北疆棉花种子萌发的影响及其耐冷性差异评价[J]. 种子, 2014, 33(5):74-77.
- [19] 邹学校. 我国辣椒的栽培季节与种植模式[J]. 北方园艺, 2002(6):4-6.
- [20] 唐双勤, 吴自明, 谭雪明, 等. 直播早粳稻品种芽期耐冷性鉴定研究[J]. 作物杂志, 2019(1):159-167.
- [21] 杨 光, 刘宏魁, 李世鹏, 等. 玉米抗冷种质资源的筛选与鉴定[J]. 玉米科学, 2012, 20(1):57-60, 66.
- [22] 闫 锋, 李清泉, 崔秀辉, 等. 糜子新品种齐黍 2 号选育及栽培要点[J]. 黑龙江农业科学, 2019(11):161-162.
- [23] 李玉环, 杨明君, 谷 茂. 播期对黍籽粒产量及其主要经济性状的影响[J]. 内蒙古农业科技, 1999(增刊1):52-53, 55.
- [24] 刘紫娟, 李 萍, 宗毓铮, 等. 干旱胁迫对糜子生理及产量的影响[J]. 山西农业科学, 2016, 44(9):1279-1283.
- [25] 王宇先. 水分条件对糜子倒伏指标及产量的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2019(10):18-21.
- [26] 袁雨豪, 杨清华, 党 科, 等. 糜子资源耐盐性评价与盐胁迫生理响应[J]. 中国农业科学, 2019, 52(22):4066-4090.
- [27] 毛培春, 孟 林, 高洪文, 等. 39 份无芒雀麦种质材料苗期抗旱性综合评价[J]. 草业科学, 2010, 27(11):82-88.
- [28] 张 鹤, 蒋春姬, 殷冬梅, 等. 花生耐冷综合评价体系构建及耐冷种质筛选[J]. 作物学报, 2021, 47(9):1753-1767.
- [29] 孙世臣, 邹德堂, 刘化龙, 等. 寒地水稻种质资源萌发期耐冷性鉴定评价[J]. 东北农业大学学报, 2007, 38(2):145-148.
- [30] 刘 杰, 张春宵, 李淑芳, 等. 81 份玉米杂交种萌发期耐冷性的鉴定和评价[J]. 玉米科学, 2020, 28(5):20-26, 31.
- [31] 张瑞栋, 肖梦颖, 徐晓雪, 等. 高粱种子对萌发温度的响应分析与耐低温萌发能力鉴定[J]. 作物学报, 2020, 46(6):889-901.
- [32] 黄 贺, 闫 蕾, 吕 艳, 等. 甘蓝型油菜发芽期低温耐性的评价与材料筛选[J]. 中国油料作物学报, 2019, 41(5):723-734.
- [33] 王丽艳, 唐金敏, 郑桂萍, 等. 水稻萌发期和幼苗期耐低温指标体系构建及综合评价[J]. 中国农业科技导报, 2019, 21(10):58-65.