

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2024.34216

谷子育成品种萌芽期耐冷性综合评价

闫 锋¹ 董 扬^{1,*} 李清泉¹ 赵富阳¹ 侯晓敏¹ 刘 洋¹ 李青超¹
赵 蕾¹ 范国权² 刘 凯³

¹ 黑龙江省农业科学院齐齐哈尔分院, 黑龙江齐齐哈尔 161006; ² 黑龙江省农业科学院经济作物研究所, 黑龙江哈尔滨 150086; ³ 黑龙江省农业科学院, 黑龙江哈尔滨 150086

摘 要: 黑龙江地处高纬度地区, 谷子播种后萌发期冷害频繁发生, 造成出苗缓慢、出苗不齐、缺苗, 是限制本地区谷子产量和品质的关键性因素, 鉴定谷子耐冷性并筛选耐冷评价指标, 可为耐冷谷子品种选育提供理论依据并对谷子安全生产具有重要意义。以 52 个谷子育成品种为研究对象, 设置 12 个萌发期冷胁迫处理, 以发芽率为指标探讨了谷子萌发期耐冷性的适宜鉴定方法。低温胁迫后测量了发芽势、发芽率、发芽指数、芽长、根长、芽鲜重、根鲜重 7 个指标的耐冷系数, 运用隶属函数分析、主成分分析、相关分析和聚类分析法对参试品种的耐冷性进行了综合评价和归类, 并采用逐步回归分析建立了耐冷性预测回归方程。结果表明, 8℃ 低温处理 7 d, 谷子品种发芽率的变异幅度最大, 能较好地鉴别品种间耐冷性差异, 是谷子萌发期耐冷性鉴定的最适宜条件; 低温胁迫后 7 个鉴定指标均低 28℃ 对照处理, 但各指标间降低程度不同; 利用主成分分析将 7 个单项指标转化为 3 个独立的综合指标, 主成分分析表明, 芽长、芽鲜重和根鲜重最能代表谷子萌发期对低温胁迫后的响应情况, 可作为萌发期耐冷性鉴定的评价指标。通过聚类分析, 将 52 个谷子品种划分为 3 类, 筛选出嫩选 14、朝谷 14、蒙黑谷 8 号等 17 个高度耐冷品种, 以及鲁谷 7 号、晋谷 20 等 15 个冷敏感品种, 这些品种可为耐冷育种和谷子生产提供种质基础。

关键词: 谷子; 萌芽期; 冷胁迫; 综合评价; 主成分分析

Comprehensively evaluation on cold tolerance of foxtail millet varieties at germination stage

YAN Feng¹, DONG Yang^{1,*}, LI Qing-Quan¹, ZHAO Fu-Yang¹, HOU Xiao-Min¹, LIU Yang¹, LI Qing-Chao¹, ZHAO Lei¹, FAN Guo-Quan², and LIU Kai³

¹ Qiqihar Branch, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Qiqihar 161006, Heilongjiang, China; ² Industrial Crops Institute, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150086, Heilongjiang, China; ³ Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150086, Heilongjiang, China

Abstract: Heilongjiang province, located in high latitudes, frequently experiences cold damage during the germination period of millet after sowing. This leads to slow and uneven emergence, as well as insufficient seedling growth, which is a key limiting factor for millet yield and quality in this region. Identifying the cold tolerance of millet and screening appropriate evaluation indices for cold tolerance can provide a theoretical foundation for breeding cold-tolerant millet varieties. It holds great significance for ensuring the safe production of millet. In this study, 52 foxtail millet cultivars were selected as research subjects. Twelve cold stress treatments were applied during the germination stage, and the suitability of using germination rate as the index for evaluating cold tolerance at this stage was explored. Following low-temperature stress, the cold tolerance coefficients of seven indices, including germination potential, germination rate, germination index, bud length, root length, bud fresh weight, and root fresh weight, were measured. Comprehensive evaluation of the tested varieties' cold tolerance was conducted using membership function analysis, principal component analysis, correlation analysis, and cluster analysis. Stepwise regression analysis was employed

本研究由财政部和农业农村部国家农业现代产业技术体系建设专项(CARS-06-14.5-B21)资助。

This study was supported by the China Agricultural Research System of MOF and MARA (CARS-06-14.5-B21).

* 通信作者(Corresponding author): 董扬, E-mail: dongyang0717@126.com

第一作者联系方式: E-mail: yanfeng6338817@126.com

Received (收稿日期): 2023-12-30; Accepted (接受日期): 2024-05-21; Published online (网络出版日期): 2024-05-31.

URL: <https://link.cnki.net/urlid/11.1809.S.20240530.1431.002>

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

to establish a regression equation for predicting cold tolerance. The results revealed that the germination rate of millet varieties exhibited the largest variation range after seven days of low-temperature treatment at 8°C. This treatment effectively distinguished the differences in cold tolerance among varieties and proved to be the most suitable condition for evaluating cold tolerance during the germination stage. Following low-temperature stress, all seven evaluated indices showed lower values compared to the control treatment at 28°C, although the degree of reduction varied among the indices. Through principal component analysis, the seven individual indices were transformed into three independent comprehensive indices. It was found that bud length, bud fresh weight, and root fresh weight best represented the response of millet during the germination period to low-temperature stress. These indices can be used for evaluating cold tolerance during the germination stage. Cluster analysis categorized the 52 millet varieties into three groups, identifying 17 highly cold-tolerant varieties such as Nenxuan 14, Chaogu 14, and Mengheigu 8, as well as 15 cold-sensitive varieties such as Lugu 7 and Jinggu 20. These varieties serve as valuable germplasm resources for breeding cold-tolerant millet and enhancing millet production.

Keywords: foxtail millet; germination stage; cold stress; comprehensive evaluation; principal components analysis

谷子起源于中国, 考古学证据表明谷子的驯化栽培历史已有 16,000 年, 是古代先民最早驯化栽培的作物之一^[1]。在中华文明的历史长河中, 谷子一直是我国北方旱作农业区的主栽作物, 缔造了我国北方文明。谷子脱壳后的小米, 适口性好, 营养丰富, 富含矿物质、维生素、膳食纤维和不饱和脂肪酸, 被人们公认为健康保健食品^[2-4]。谷子具有抗旱、耐瘠薄、水分利用效率高、适应性广的特点, 是我国旱作农业区传统的代表作物之一, 是一种被认为可以有效应对干旱种植环境的战略作物^[5-6]。谷子在我国的种植区域主要分布在内蒙古、山西、河北、黑龙江、吉林、辽宁等省区, 大致可分为东北春谷区、西北春谷区和华北夏谷区^[7-8]。作为谷子主要产区之一的东北春谷区, 属大陆性季风气候, 在谷子播种期易发生倒春寒天气^[9], 产生的低温冷害轻则会导致出苗率降低, 幼苗生长迟滞, 使谷子生长期间的物候期推迟, 重则导致“粉籽”或幼苗直接被冻死, 造成绝产, 低温冷害是影响谷子产量的重要因素之一^[10]。因此, 通过筛选、创新耐冷谷子种质是解决东北地区播期遭遇低温情况下谷子稳产的有效途径之一。

低温胁迫是非生物胁迫因子之一, 严重影响植物的生长发育, 植物在低温胁迫下表现为生长缓慢, 叶片萎蔫失绿, 从而导致产量及品质的下降^[11-12]。近些年, 前人对不同作物耐冷性鉴定分析评价方面的研究做了大量工作, 研究表明, 低温胁迫显著影响种子的萌发, 胁迫温度越低, 种子萌发所需的时间越长^[13], 出苗过长导致土壤中的病原菌侵入种子, 使萌发中的种子腐烂, 严重降低种子发芽率^[14]。张鹤等^[15]在萌发期对不同冷胁迫条件下不同花生品种的种子活力进行标准正态分布检测发现, 6°C 处理 7 d 可作为花生种质耐冷性鉴定的适宜条件, 并筛选出耐冷品种农花 5 号及冷敏感品种阜花 18。赵星棋

等^[16]将 33 分大豆种质在 6°C 下处理 7 d 发现, 低温能够显著降低大豆的发芽各参数指标, 采用隶属函数法及聚类分析, 将参试种质分为耐冷型种质(4 份)、中间型种质(9 份)和冷敏感型种质(10 份)。沈倩等^[17]采用恒定低温、昼夜变温处理方法, 结合多元统计分析方法对 200 份棉花种质出苗期进行耐冷性评价, 发现恒定低温处理条件下的棉苗总长、出苗率、干物重和昼夜变温处理条件下的萌发率, 可作为耐冷鉴定指标。笔者通过查阅文献发现关于谷子萌发期耐冷综合评价体系构建及资源评价方面的研究鲜有报导, 课题组以来自我国不同谷子产区的 52 个育成品种为研究对象, 通过不同胁迫温度及时间的处理, 利用模糊数学隶属函数法、主成分分析和聚类分析对谷子萌发特性进行综合评价, 构建谷子耐冷评价体系, 以期筛选萌发期耐冷的谷子品种和评价指标提供材料和方法。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试谷子品种共计 52 份, 具体名称及来源见表 1, 由中国农业科学院作物科学研究所提供。为保证参试品种的种子活力, 各品种均在 2022 年同一地块种植更新, 成熟收获后保存条件一致。

1.2 试验设计

选取颗粒饱满、无机械损伤的种子, 将种子置于 1% 次氯酸钠溶液中浸泡 15 min, 而后用无菌水漂洗 5 次, 将漂洗后的种子置于直径 7 cm 的培养皿中(内铺 3 层湿润滤纸), 放入 28°C 恒温培养箱催芽至露白, 露白后每个品种挑取 50 粒均匀一致的种子进行低温胁迫, 胁迫期间根据培养皿内滤纸干湿情况及时补充适量无菌水保持滤纸湿润即可。预试验设 5 个温度处理(4°C、6°C、8°C、10°C、12°C), 1 个时间处理(5 d); 低温处理条件筛选试验设 4 个温度处

表 1 52 份谷子品种名称及来源
Table 1 Name and sources of the 52 foxtail millet varieties

编号 No.	品种 Variety	来源 Sources	编号 No.	品种 Variety	来源 Sources
1	嫩选 11 Nenxuan 11	黑龙江 Heilongjiang	27	金谷 1 号 Jingu 1	河北 Hebei
2	嫩选 14 Nenxuan 14	黑龙江 Heilongjiang	28	冀谷 27 Jigu 27	河北 Hebei
3	嫩选 15 Nenxuan 15	黑龙江 Heilongjiang	29	冀谷 30 Jigu 30	河北 Hebei
4	龙谷 26 Longgu 26	黑龙江 Heilongjiang	30	保谷 18 Baogu 18	河北 Hebei
5	龙谷 31 Longgu 31	黑龙江 Heilongjiang	31	衡早 1 号 Hengzao 1	河北 Hebei
6	龙谷 37 Longgu 37	黑龙江 Heilongjiang	32	衡早 9 号 Hengzao 9	河北 Hebei
7	胜谷 2 号 Shenggu 2	黑龙江 Heilongjiang	33	坝谷 214 Bagu 214	河北 Hebei
8	公矮 5 号 Gong'ai 5	吉林 Jilin	34	郑谷 2 号 Zhenggu 2	河南 Henan
9	公谷 88 Gonggu 88	吉林 Jilin	35	郑谷 4 号 Zhenggu 4	河南 Henan
10	白谷 6 号 Baigu 6	吉林 Jilin	36	豫谷 12 Yugu 12	河南 Henan
11	九谷 15 Jiugu 15	吉林 Jilin	37	豫谷 18 Yugu 18	河南 Henan
12	九谷 19 Jiugu 19	吉林 Jilin	38	豫谷 31 Yugu 31	河南 Henan
13	九谷 23 Jiugu 23	吉林 Jilin	39	豫谷 32 Yugu 32	河南 Henan
14	朝谷 14 Chaogu 14	辽宁 Liaoning	40	豫谷 35 Yugu 35	河南 Henan
15	朝谷 58 Chaogu 58	辽宁 Liaoning	41	鲁谷 6 号 Lugu 6	山东 Shandong
16	朝 438 Chao 438	辽宁 Liaoning	42	鲁谷 7 号 Lugu 7	山东 Shandong
17	燕谷 16 Yangu 16	辽宁 Liaoning	43	鲁谷 10 号 Lugu 10	山东 Shandong
18	燕谷 18 Yangu 18	辽宁 Liaoning	44	陇谷 4 号 Longgu 4	甘肃 Gansu
19	朝新谷 8 号 Chaoxingu 8	辽宁 Liaoning	45	陇谷 7 号 Longgu 7	甘肃 Gansu
20	赤谷 1 号 Chigu 1	内蒙古 Inner Mongolia	46	陇谷 13 Longgu 13	甘肃 Gansu
21	赤谷 4 号 Chigu 4	内蒙古 Inner Mongolia	47	大同 25 Datong 25	山西 Shanxi
22	赤谷 17 Chigu 17	内蒙古 Inner Mongolia	48	大同 29 Datong 29	山西 Shanxi
23	峰红 4 号 Fenghong 4	内蒙古 Inner Mongolia	49	晋谷 13 Jingu 13	山西 Shanxi
24	蒙黑谷 8 号 Mengheigu 8	内蒙古 Inner Mongolia	50	晋谷 20 Jingu 20	山西 Shanxi
25	金苗 K1 Jinmiao K1	内蒙古 Inner Mongolia	51	中谷 2 号 Zhonggu 2	北京 Beijing
26	金苗 K2 Jinmiao K2	内蒙古 Inner Mongolia	52	中谷 9 号 Zhonggu 9	北京 Beijing

理(6℃、8℃、10℃、12℃), 3 个时间处理(3 d、5 d、7 d), 共 12 个处理, 以 28℃为对照。预试验和低温处理条件筛选试验中每个处理低温胁迫后恢复到 28℃培养 5 d, CK 浸种后直接进入 28℃培养 5 d, 3 次重复。低温胁迫期间培养箱内无光照, 恢复生长期间培养箱每天 6 时至 18 时提供光强度为 1000 μmol m⁻² s⁻¹ 的光照。

1.3 测定项目与方法

参考唐双勤等^[18]的鉴定方法, 以相对发芽率为参考指标筛选出谷子萌发期耐冷鉴定最适的温度与天数组合, 各谷子品种在筛选出的最适低温处理条件下进行胁迫后, 于 25℃恢复生长阶段每天记录发芽粒数, 计算发芽指数, 恢复生长第 3 天计算发芽势, 第 5 天测量每个品种低温处理的发芽率、根长、芽长、根鲜重、芽鲜重。对照各项指标统计方法及时期同冷胁迫处理。

发芽势=恢复期第 3 天发芽种子个数/供试种子

个数×100%;
发芽率=发芽种子个数/供试种子个数×100%;
发芽指数=∑(Gt/Dt), Gt 为第 t 日的发芽种子个数, Dt 为相应的发芽天数。

1.4 数据处理与分析

用 Microsoft 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、主成分分析及聚类分析。为了消除不同性状间原始数据量纲的差异, 文中采用各性状的相对值(耐冷系数=处理值/对照值)进行统计分析并对各参试品种耐冷性进行评价, 相关指标计算参照谢志坚^[19]的方法计算, 具体公式如下:

$$U(X_j) = (X_j - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \tag{1}$$

式中, $U(X_j)$ 表示第 j 个主成分的隶属函数值; X_j 表示第 j 个主成分综合值; $X_{\max}$ 和 $X_{\min}$ 分别表示第 j 个主成分综合值中的最大值和最小值。

$$W_j = P_j / \sum P_j \tag{2}$$

式中, W_j 表示第 j 个主成分在所有主成分中的权重; P_j 为主成分分析中第 j 个主成分的贡献率。

$$D = \sum [U(X_j) \times W_j] \quad (3)$$

式中, D 表示各品种的综合评价值, 根据 D 值大小可以对各谷子品种的萌发期耐冷性进行排序。

2 结果与分析

2.1 耐低温鉴定条件筛选

预试验阶段参试谷子品种在 4℃ 处理 5 d 后, 52 个品种中只有 10 个品种的发芽率在 0~10% 之间, 其余品种发芽率均为 0, 由于大部分品种无法正常萌发, 故在随后的低温处理条件筛选试验设计中淘汰了 4℃ 的处

理。由图 1 可知, 在低温处理条件筛选试验中随着低温胁迫时间的延长和温度的降低, 各参试品种的发芽率逐渐降低。在同一温度条件下, 低温胁迫处理 7 d 的发芽率最低; 同一胁迫时间条件下, 6℃ 处理下的发芽率最低。在 12 个处理中, 8℃ 处理 7 d 发芽率变异系数最高, 其次是 6℃ 处理 7 d, 再者是 6℃ 处理 5 d, 变异系数分别为 59.2%、47.4% 和 42.8%。表明在 12 个低温处理中, 8℃ 处理 7 d 条件下供试品种间的耐冷性总体差异最大, 能比较客观地区分 52 个谷子品种的萌发期耐冷性差异, 故选择 8℃ 处理 7 d 对 52 个谷子品种的萌发期耐冷性进行鉴定更为合理。

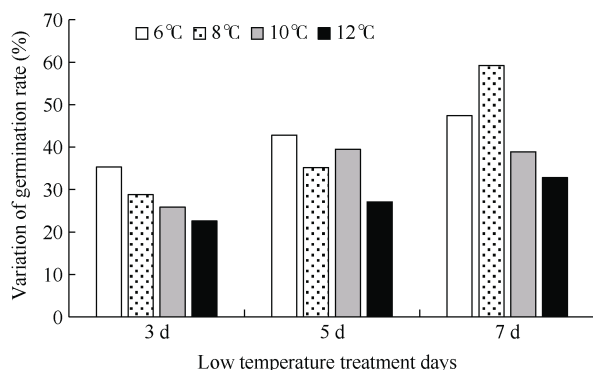


图 1 低温处理后品种间发芽率、变异幅度的比较

Fig. 1 Comparison of germination rate and variation range among varieties after low temperature treatments

2.2 耐低温指标的差异分析

由图 2 可知, 谷子露白后 8℃ 冷胁迫 7 d, 52 个谷子品种各指标耐冷系数均低于 1, 说明冷胁迫能够显著降低谷子种子发芽势、发芽率、发芽指数、芽长、根长、芽鲜重、根鲜重。不同品种各指标耐冷差异较大(附表 1), 发芽势耐冷系数变幅为 0.383~0.977, 均值为 0.828; 发芽率耐冷系数变幅为 0.460~0.986, 均值为 0.786; 发芽指数耐冷系数变幅为 0.167~0.370, 均值为 0.277; 芽长耐冷系数变幅为 0.382~0.851, 均值为 0.639; 根长耐冷系数变幅为 0.520~0.969, 均值为 0.784; 芽鲜重耐冷系数变幅为 0.171~0.850, 均值为 0.497; 根鲜重耐冷系数变幅为 0.281~0.933, 均值为 0.611。52 个谷子品种萌发期各指标的变异系数也存在差异, 根鲜重耐冷系数 (CV=0.284) 的变异系数最大, 而发芽率耐冷系数 (CV=0.150) 的变异系数最小, 说明冷胁迫对根鲜重的影响最大, 对发芽率的影响最小。单一评判指标下, 赤谷 17、朝谷 14、九谷 23、九谷 19、嫩选 14、中谷 9 号、晋谷 13 分别在单一指标下的耐冷系数是最高的, 表现出较强的耐冷性, 而晋谷 20、鲁谷 7

号、豫谷 31、豫谷 35、公谷 88、金苗 K1、嫩选 11 分别在单一指标下的耐冷系数最低, 耐冷性较差,

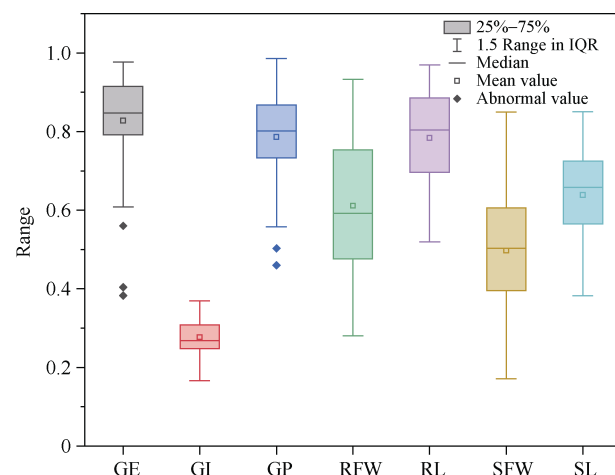


图 2 低温胁迫下各指标耐冷系数描述性统计

Fig. 2 Statistics of cold tolerance coefficient of different index under chilling stress

GE: 发芽势; GP: 发芽率; GI: 发芽指数; SL: 芽长; RL: 根长; SFW: 芽鲜重; RFW: 根鲜重。
GE: germination energy; GP: germination percentage; GI: germination index; SL: sprout length; RL: root length; SFW: shoot fresh weight; RFW: root fresh weight.

但是靠单一指标不能准确评价各品种间耐冷性的差异，有必要对各品种的耐冷指标综合值进行评价。

2.3 低温胁迫下各指标的相关性分析

52 个谷子品种在 8℃ 下胁迫 7 d 后，对萌发期的发芽指数、发芽势、发芽率、根长、芽长、根鲜重、芽鲜重 7 个指标的耐冷系数进行相关性分析(图 3)。结果表明，发芽势与发芽率、芽长呈显著正相关，与发芽指数呈极显著正相关；发芽率与芽长呈显著正相关；芽长与芽鲜重呈显著正相关，与根鲜重呈极显著正相关；芽鲜重与根鲜重呈极显著正相关。由相关分析结果可以看出，低温胁迫下谷子一些指标之间是相互关联的，且具有一致性。

2.4 低温胁迫下各指标的主成分分析

对 52 个谷子品种低温胁迫后 7 个指标的耐冷系数进行主成分分析，共选取到 3 个特征值大于 1 的主成分。3 个主成分的贡献率分别为 35.612%、21.765%、15.390%，前 3 个主成分的累计贡献率为 72.767%(表 2)。第 1 主成分与芽长、芽鲜重和根鲜重有较大的正相关关系，表明低温胁迫对根、芽生

长影响较大；第 2 主成分与发芽率、发芽势和发芽指数有较大的正相关关系，表明低温胁迫下发芽指标可作为评价谷子耐冷性的重要指标；第 3 主成分与根长有较明显的正相关关系，表明根长对其起主要作用。

2.5 谷子萌发期耐冷综合评价及聚类分析

根据主成分分析结果，利用公式(1)计算前 3 个主成分的综合指标的隶属函数值，根据 3 个主成分的贡献率利用公式(2)确定 3 个隶属函数值得权重，最后利用公式(3)计算出 52 个谷子品种耐冷性综合评价值(D 值)，并依据 D 值的大小对其耐冷能力进行评价， D 值越大，表明其耐冷性越强，反之越弱。依据 D 值大小，对 52 个谷子品种耐冷能力强弱进行排序(表 3)。耐冷性较强的前 5 个品种分别为嫩选 14、朝谷 14、蒙黑谷 8、陇谷 13、龙谷 31；对冷敏感的前 5 个品种分别为鲁谷 7 号、晋谷 20、豫谷 31、豫谷 35、晋谷 13。为了更好地对参试谷子品种耐冷性进行综合分级评价，利用 SPSS 软件中的 Ward 法对 52 个谷子品种 D 值进行了聚类分析，

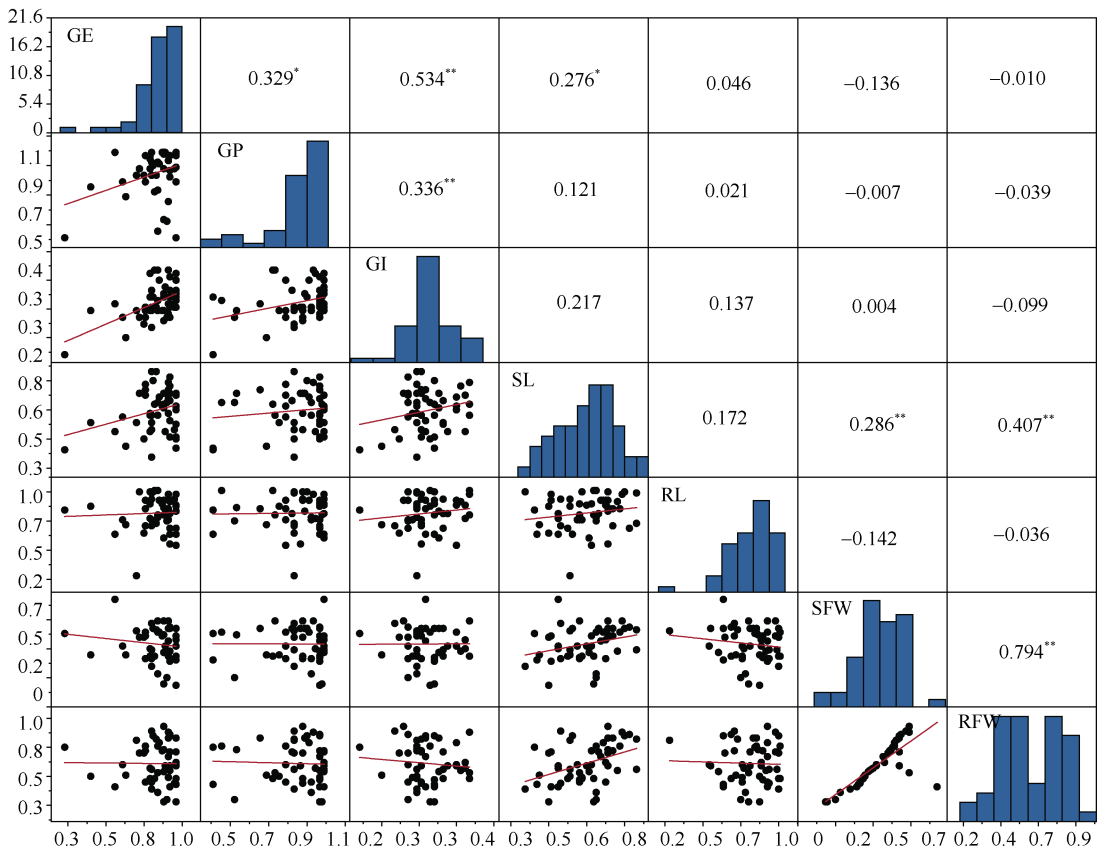


图 3 低温胁迫下各指标耐冷系数的相关分析

Fig. 3 Correlation analysis of cold tolerance coefficient of different index under chilling stress

* 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 概率水平相关性显著。缩写同图 2。

* and ** indicate significant correlation at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively. Abbreviations are the same as those given in Fig. 2.

表 2 各主成分的载荷矩阵、特征值及贡献率
Table 2 Loading matrix, eigen value, and contribution rates of each principle factor

指标 Index	主成分 Principle factor		
	I	II	III
发芽势 GP	0.173	0.373	0.140
发芽率 GR	0.134	0.284	0.321
发芽指数 GI	0.173	0.370	0.076
芽长 SL	0.353	0.067	0.293
根长 RL	0.028	0.139	0.846
芽鲜重 SFW	0.365	0.264	0.138
根鲜重 RFW	0.390	0.251	0.009
特征值 Eigen value	2.482	1.538	1.164
贡献率 Contribution ratio (%)	35.612	21.765	15.390
累计贡献率 Cumulative contribution ratio (%)	35.612	57.377	72.767

缩写同图 2。Abbreviations are the same as those given in Fig. 2.

表 3 参试谷子品种冷胁迫下的综合指标值、隶属函数值、D 值及预测值
Table 3 Comprehensive index value, $U(X)$, D -value, and predictive values of varieties under chilling stress

品种 Variety	X_1	X_2	X_3	$U(X_1)$	$U(X_2)$	$U(X_3)$	D 值 D -value	排名 Rank	预测值 P -value
嫩选 11 Nenxuan 11	0.750	0.731	0.794	0.651	0.428	0.525	0.472	33	0.495
嫩选 14 Nenxuan 14	0.850	0.886	1.050	0.815	0.744	0.979	0.804	1	0.837
嫩选 15 Nenxuan 15	0.786	0.868	0.986	0.709	0.706	0.865	0.699	10	0.717
龙谷 26 Longgu 26	0.494	0.774	0.916	0.230	0.516	0.740	0.332	44	0.304
龙谷 31 Longgu 31	0.814	0.897	1.012	0.755	0.765	0.911	0.758	5	0.767
龙谷 37 Longgu 37	0.782	0.877	0.965	0.703	0.726	0.828	0.692	11	0.676
胜谷 2 号 Shenggu 2	0.862	0.831	0.977	0.834	0.632	0.848	0.738	7	0.741
公矮 5 号 Gong'ai 5	0.641	0.855	1.023	0.471	0.681	0.931	0.578	21	0.598
公谷 88 Gonggu 88	0.797	0.628	0.938	0.728	0.218	0.780	0.518	29	0.539
白谷 6 号 Baigu 6	0.747	0.905	0.954	0.645	0.782	0.808	0.673	12	0.660
九谷 15 Jiugu 15	0.809	0.789	0.930	0.747	0.546	0.765	0.636	16	0.639
九谷 19 Jiugu 19	0.547	0.929	0.964	0.317	0.831	0.826	0.513	30	0.554
九谷 23 Jiugu 23	0.718	0.919	1.062	0.597	0.811	1.000	0.713	9	0.706
朝谷 14 Chaogu 14	0.843	0.921	0.957	0.803	0.814	0.813	0.773	2	0.758
朝谷 58 Chaogu 58	0.626	1.008	0.905	0.445	0.992	0.721	0.608	17	0.598
朝 438 Chao 438	0.962	0.712	0.986	1.000	0.389	0.865	0.752	6	0.735
燕谷 16 Yangu 16	0.875	0.697	0.973	0.855	0.358	0.841	0.654	14	0.658
燕谷 18 Yangu 18	0.582	0.967	0.865	0.373	0.909	0.651	0.519	28	0.495
朝新谷 8 号 Chaoxingu 8	0.938	0.621	0.932	0.96	0.203	0.769	0.639	15	0.636
赤谷 1 号 Chigu 1	0.755	0.768	0.897	0.658	0.504	0.708	0.556	23	0.547
赤谷 4 号 Chigu 4	0.593	0.891	0.870	0.392	0.753	0.659	0.479	32	0.481
赤谷 17 Chigu 17	0.729	1.012	0.812	0.616	1.000	0.556	0.657	13	0.623
峰红 4 号 Fenghong 4	0.762	0.926	0.998	0.670	0.825	0.886	0.724	8	0.736
蒙黑谷 8 号 Mengheigu 8	0.890	0.888	0.908	0.881	0.748	0.727	0.768	3	0.742
金苗 K1 Jinmiao K1	0.425	0.915	0.874	0.116	0.802	0.666	0.345	41	0.436
金苗 K2 Jinmiao K2	0.666	0.626	0.886	0.512	0.212	0.687	0.370	40	0.379
金谷 1 号 Jingu 1	0.659	0.756	0.847	0.500	0.479	0.618	0.433	35	0.413
冀谷 27 Jigu 27	0.737	0.813	0.932	0.629	0.594	0.769	0.589	20	0.594

(续表 3)

品种 Variety	X_1	X_2	X_3	$U(X_1)$	$U(X_2)$	$U(X_3)$	D 值 D -value	排名 Rank	预测值 P -value
冀谷 30 Jigu 30	0.796	0.661	0.917	0.726	0.285	0.742	0.529	25	0.529
保谷 18 Baogu 18	0.821	0.710	0.749	0.767	0.384	0.444	0.498	31	0.489
衡早 1 号 Hengzao 1	0.763	0.688	0.734	0.671	0.339	0.419	0.422	36	0.404
衡早 9 号 Hengzao 9	0.565	0.854	0.893	0.345	0.678	0.699	0.440	34	0.439
坝谷 214 Bagu 214	0.785	0.768	0.936	0.708	0.503	0.776	0.603	18	0.593
郑谷 2 号 Zhenggu 2	0.526	0.784	0.934	0.281	0.536	0.773	0.377	38	0.368
郑谷 4 号 Zhenggu 4	0.548	0.872	0.772	0.318	0.714	0.486	0.374	39	0.358
豫谷 12 Yugu 12	0.822	0.583	0.766	0.768	0.126	0.475	0.419	37	0.412
豫谷 18 Yugu 18	0.607	0.882	1.037	0.415	0.735	0.955	0.573	22	0.568
豫谷 31 Yugu 31	0.586	0.727	0.657	0.380	0.419	0.282	0.248	50	0.201
豫谷 32 Yugu 32	0.724	0.581	0.728	0.608	0.121	0.408	0.309	46	0.307
豫谷 35 Yugu 35	0.514	0.744	0.780	0.262	0.453	0.500	0.258	49	0.260
鲁谷 6 号 Lugu 6	0.703	0.885	0.914	0.572	0.742	0.738	0.598	19	0.583
鲁谷 7 号 Lugu 7	0.451	0.660	0.673	0.158	0.282	0.310	0.087	52	0.104
鲁谷 10 号 Lugu 10	0.592	0.906	0.990	0.390	0.784	0.873	0.552	24	0.550
陇谷 4 号 Longgu 4	0.644	0.694	0.784	0.475	0.353	0.506	0.344	42	0.327
陇谷 7 号 Longgu 7	0.578	0.771	0.793	0.368	0.510	0.523	0.343	43	0.330
陇谷 13 Longgu 13	0.809	0.904	1.021	0.747	0.780	0.927	0.764	4	0.767
大同 25 Datong 25	0.568	0.732	0.753	0.350	0.429	0.451	0.285	47	0.274
大同 29 Datong 29	0.682	0.845	0.867	0.539	0.661	0.654	0.527	26	0.539
晋谷 13 Jingu 13	0.667	0.597	0.741	0.514	0.155	0.430	0.275	48	0.321
晋谷 20 Jingu 20	0.355	0.522	0.498	0	0	0	0.130	51	0.160
中谷 2 号 Zhonggu 2	0.563	0.736	0.838	0.342	0.438	0.603	0.327	45	0.342
中谷 9 号 Zhonggu 9	0.624	0.888	0.900	0.443	0.747	0.713	0.521	27	0.506

结果显示, 当平均欧氏距离为 6.0 左右时, 将 52 个谷子品种初步划分为 3 大类(图 4), I 类为高度耐冷型品种, 包括 16 个品种($D>0.636$), 占供试材料的 30.8%; II 类为耐冷型品种, 包括 21 个品种($0.419<D<0.608$), 占供试材料的 40.4%; III 类为冷敏感品种, 包括 15 个品种($0.087<D<0.377$), 占供试材料的 28.8%。

2.6 回归模型建立和鉴定指标筛选

为了明确谷子萌发期各单项指标与耐冷性之间的关系, 筛选出耐冷鉴定指标, 建立耐冷评价数学模型, 预测不同谷子品种耐冷性。以 7 个鉴定指标相对值(耐冷系数)为自变量, 以 D 值为因变量, 进行逐步回归, 建立最优回归方程 $D = -1.2274 + 0.4860X_1 + 0.9053X_2 + 0.5472X_4 + 0.2654X_5 + 0.1419X_6$ 。方程中 X_1 、 X_2 、 X_4 、 X_5 、 X_6 分别代表发芽势、发芽率、芽长、根长、芽鲜重, 方程决定系数 $R^2 = 0.9919$ 。将相关数据带入回归方程得到预测值, 由预测结果(表 3)可看出, 该方程可以较准确地预估不同谷子品种

的耐冷评价值(D 值), 表明本方程中的参考指标可以准确地反应谷子萌发期耐冷性。所以, 在相同处理条件下, 只需测定谷子的发芽势、发芽率、芽长、根长、芽鲜重这 5 个指标, 计算其耐冷系数, 最后利用该方程估算其 D 值, 就可以较好地对其耐冷性强弱进行评价。

3 讨论

黑龙江地区播种时节十年九春寒, 且倒春寒多发生在播种后种子对低温最为敏感的萌发阶段^[20-21], 重者使大部分种子丧失发芽能力, 造成出苗不齐、苗势弱、出苗时间延长等后果, 最终导致大幅度减产^[22]。农业生产中, 耐冷品种的应用是解决低温冷害最直接有效的手段, 而耐冷性评价方法是筛选耐冷种质的前提^[21-24]。前人关于不同作物的耐冷指标鉴定进行了大量工作^[25-27], 结果表明作物在萌发期耐冷性和生长后期的耐冷具性有一致性, 而在萌发期进行耐冷性鉴定具有用时短、效率高的优点, 因

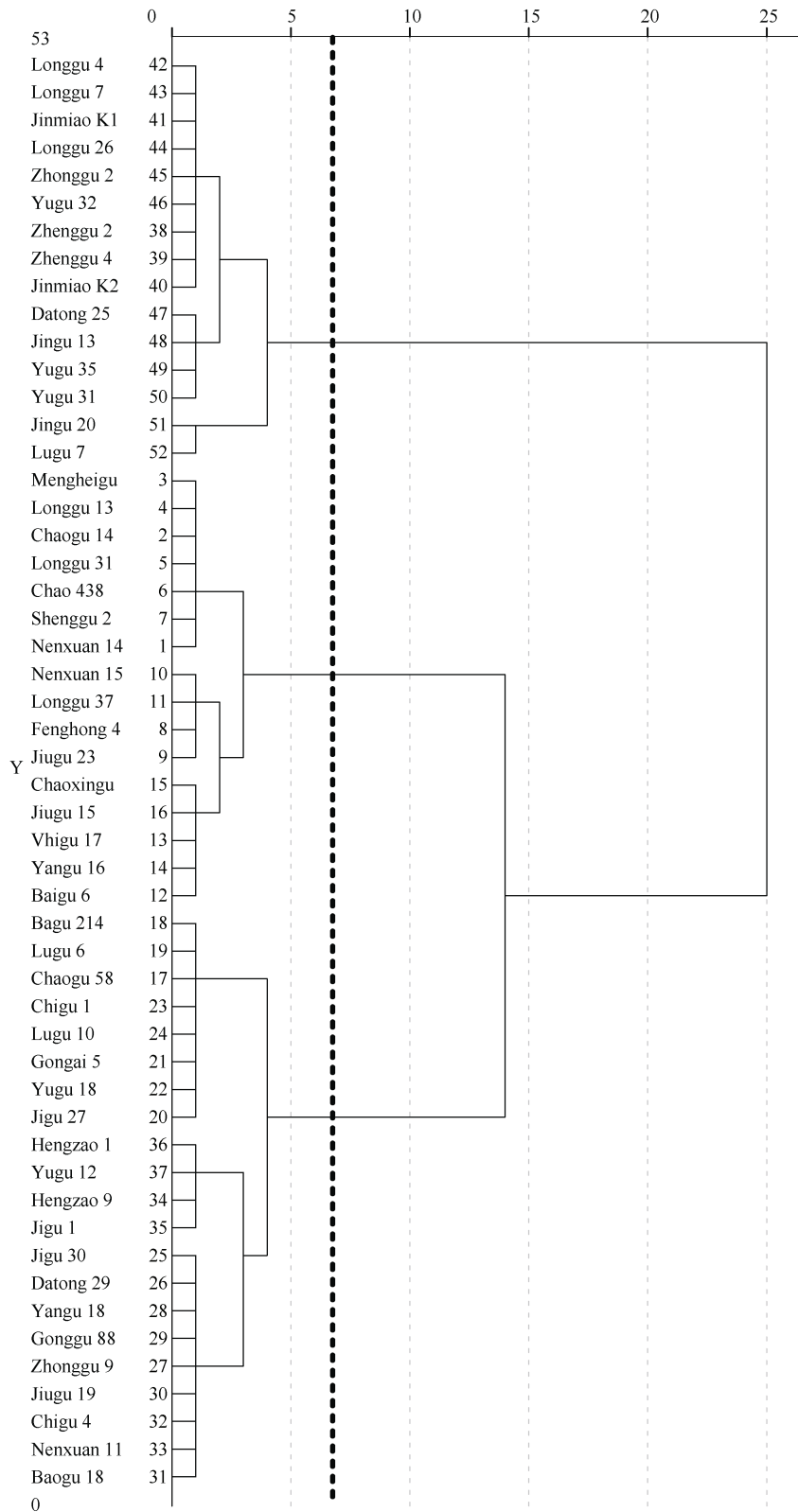


图 4 52 个谷子品种萌发期耐冷性的聚类分析
Fig. 4 Cluster analysis of cold tolerance of 52 foxtail millet varieties in germination stage

此本研究只针对谷子萌芽期的耐冷性进行了鉴定。笔者通过查阅文献发现，目前，关于谷子耐冷评价体系构建方面及适宜胁迫鉴定条件方面的研究鲜有报道，为此，本研究以 28℃下催芽至露白的谷种为

试验材料, 消除了品种间由于休眠时间长短而造成发芽势产生差异, 并根据本地区春播时期时常会遭遇的冷害温度^[10]及预试验的结果, 以相对发芽率为参考指标, 初步筛选出 8℃ 处理 7 d 可以作为谷子萌芽期耐冷鉴定的最适条件。由于本研究首次对于谷子耐冷指标进行鉴定, 没有前人的研究结果可以借鉴, 受参试品种及参试条件(胁迫时间、胁迫温度)的局限性, 筛选出的萌芽期耐冷鉴定的最适条件(8℃ 处理 7 d)还有待后续研究加以完善、验证。

前人在研究中往往依据性状指标的绝对值来评价耐冷性, 忽略了种子生产年份、成熟度及存储条件等方面而造成的对低温响应的差异^[28]。本研究以同年同地块且储存条件相同的 52 个谷子品种作为试验材料, 并且采取了常温对照与低温处理下各耐冷指标的相对值进行统计分析, 消除了因不同品种而产生的差异, 使得试验指标数据更具有科学性。本研究中选用的 7 个指标作为衡量种子发芽情况的重要指标, 分别反映了种子的发芽速度、发芽能力、出苗的整齐度以及发芽后幼苗生长状况。52 个谷子品种受到冷胁迫后, 发芽势、发芽率和发芽指数等 7 个性状指标均有所下降, 就同一指标而言, 不同品种下降程度不同, 说明不同谷子品种对芽期低温的敏感度不同, 遗传背景的差异是决定谷子种子萌芽期耐冷性的主要因素, 就同一品种而言, 不同指标的下降程度也不同; 通过相关分析发现某些性状间存在显著的正相关关系, 说明不同指标之间的耐冷数据具有一致性且相互重叠。基于以上两点表明利用单一性状指标评价谷子耐冷性是不可靠的, 所以在进行谷子的耐冷性评价时需要对参考指标进行综合考量。对 52 个谷子品种的耐冷综合评价(D 值)进行系统聚类, 初步分为 3 个耐冷类型, 第 I 类 16 个品种的综合值 $D > 0.636$, 为高度耐冷型品种; 第 II 类 21 个品种的综合值 $0.419 < D < 0.608$, 为耐冷型品种; 第 III 类 15 个品种的综合值 $0.087 < D < 0.377$, 为冷敏感品种。

主成分分析和回归分析为植物抗逆评价提供了重要途径^[29-30], 为建立一种快速简便高效的谷子萌芽期耐冷性鉴定方法, 避免各耐冷性指标所反映的信息发生交叉重叠, 本研究通过主成分分析方法将 7 个单项指标降维为 3 个彼此独立的综合指标, 结果表明, 根鲜重、芽鲜重和芽长在主成分分析中贡献率最大, 在谷子萌芽期最能体现对冷胁迫的耐受力。为了进一步筛选出可靠地耐冷评价指标, 采用了逐步回归分析方法, 构建出谷子萌芽期耐冷评价

数学模型, 通过逐步回归发现 D 值与发芽势、发芽率、芽长、根长、芽鲜重密切相关。

4 结论

利用综合隶属函数分析、聚类分析、相关分析和主成分分析等多元分析方法, 对 52 个谷子品种萌芽期的耐冷性进行鉴定, 确定 8℃ 处理 7 d 为谷子萌芽期冷胁迫适宜条件, 并在此胁迫条件下筛选出嫩选 14、朝谷 14、蒙黑谷 8 等 17 个高度耐冷品种以及鲁谷 7 号、晋谷 20 等 15 个冷敏感品种; 利用逐步回归分析方法建立了谷子耐冷综合评价体系(数学模型); 主成分分析表明芽长、芽鲜重和根鲜重可作为谷子萌芽期耐冷性鉴定指标。

References

- [1] Diao X M, Jia G Q. Origin and domestication of foxtail millet. In: Doust A, Diao X, eds. Genetics and Genomics of Setaria. Berlin: Springer, 2017. pp 61–72.
- [2] 杨延兵, 管延安, 秦岭, 石慧, 王海莲, 张华文. 不同地区谷子小米黄色素含量与外观品质研究. 中国粮油学报, 2012, 27(1): 14–19.
Yang Y B, Guan Y A, Qin L, Shi H, Wang H L, Zhang H W. The studies on yellow pigment content and appearance quality of millet from different regions. *J Chin Cereals Oils Assoc*, 2012, 27(1): 14–19 (in Chinese with English abstract).
- [3] 任晓利, 崔纪菡, 刘猛, 赵宇, 艾月鹏, 刘斐, 南春梅, 夏雪岩, 李顺国. 夏播饲用谷子农艺性状与品质评价. 草业学报, 2019, 28(1): 15–26.
Ren X L, Cui J H, Liu M, Zhao Y, Ai Y P, Liu F, Nan C M, Xia X Y, Li S G. Evaluation of agronomic traits and forage quality in summer-sown varieties of forage foxtail millet. *Acta Pratac Sin*, 2019, 28(1): 15–26 (in Chinese with English abstract).
- [4] 刘思辰, 曹晓宁, 温琪汾, 王海岗, 田翔, 王君杰, 陈凌, 秦慧彬, 王纶, 乔治军. 山西谷子地方品种农艺性状和品质性状的综合评价. 中国农业科学, 2020, 53: 2137–2148.
Liu S C, Cao X N, Wen Q F, Wang H G, Tian X, Wang J J, Chen L, Qin H B, Wang L, Qiao Z J. Comprehensive evaluation of agronomic traits and quality traits of foxtail millet landrace in Shanxi. *Sci Agric Sin*, 2020, 53: 2137–2148 (in Chinese with English abstract).
- [5] 赵娟, 尹艺臻, 王晓璐, 马春英, 尹美强, 温银元, 宋喜娥, 董淑琦, 杨雪芳, 原向阳. 不同品种谷子愈伤组织对拿捕净胁迫的生理响应. 中国农业科学, 2020, 53: 917–928.
Zhao J, Yin Y Z, Wang X L, Ma C Y, Yin M Q, Wen Y Y, Song X E, Dong S Q, Yang X F, Yuan X Y. Physiological response of millet callus with different herbicide-resistance to sethoxydim stress. *Sci Agric Sin*, 2020, 53: 917–928 (in Chinese with English abstract).
- [6] 邵丽华, 王莉, 白文文, 刘雅娟. 山西谷子资源叶酸含量分析及评价. 中国农业科学, 2014, 47: 1265–1272.
Shao L H, Wang L, Bai W W, Liu Y J. Evaluation and analysis of folic acid content in millet from different ecological regions in

- Shanxi province. *Sci Agric Sin*, 2014, 47: 1265–1272 (in Chinese with English abstract).
- [7] 王丹丹, 希日格乐, 孙宇燕, 金砾, 郭世华. 谷子农艺性状相关性分析与食味品质分析. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2014, 36(4): 29–37.
Wang D D, Xirigele, Sun Y Y, Jin S, Guo S H. Analysis on correlation of agronomic traits and eating quality in foxtail millet. *J Inner Mongolia Agric Univ* (Nat Sci Edn), 2014, 36(4): 29–37 (in Chinese with English abstract).
- [8] 秦娜, 付森杰, 朱灿灿, 代书桃, 宋迎辉, 魏昕, 王春义, 叶珍言, 李君霞. 谷子苗期耐低氮相关性状的 QTL 分析. 中国农业科学, 2023, 56: 3931–3945.
Qin N, Fu S J, Zhu C C, Dai S T, Song Y H, Wei X, Wang C Y, Ye Z Y, Li J X. QTL Analysis for seeding traits related to low nitrogen tolerance in foxtail millet. *Sci Agric Sin*, 2023, 56: 3931–3945 (in Chinese with English abstract).
- [9] 郑莉萍, 张云峰, 蒋洪蔚, 王明亮, 邱红梅, 孙星遂, 朴锦, 王曙明. 大豆种质资源芽期耐低温综合评价及筛选. 大豆科学, 2020, 39: 833–847.
Zheng L P, Zhang Y F, Jiang H W, Wang M L, Qiu H M, Sun X S, Piao J, Wang S M. Comprehensively evaluation and screening on low temperature tolerance of soybean germplasm resources at bud stage. *Soybean Sci*, 2020, 39: 833–847 (in Chinese with English abstract).
- [10] 常博文, 钟鹏, 刘杰, 唐中华, 高亚冰, 于洪久, 郭炜. 低温胁迫和赤霉素对花生种子萌发和幼苗生理响应的影响. 作物学报, 2019, 45: 118–130.
Chang B W, Zhong P, Liu J, Tang Z H, Gao Y B, Yu H J, Guo W. Effect of low-temperature stress and gibberellin on seed germination and seedling physiological responses in peanut. *Acta Agron Sin*, 2019, 45: 118–130 (in Chinese with English abstract).
- [11] Upadhyaya H D, Reddy L J, Dwivedi S L, Gowda C L L, Singh S. Phenotypic diversity in cold-tolerant peanut (*Arachis hypogaea* L.) germplasm. *Euphytica*, 2009, 165: 278–291.
- [12] 马骊, 孙万仓, 刘自刚, 赵艳宁, 杨刚, 刘海卿, 武军艳, 方彦, 李学才, 刘林波, 钱武, 侯献飞. 白菜型与甘蓝型冬油菜抗寒机理差异的研究. 华北农学报, 2016, 31(1): 147–154.
Ma L, Sun W C, Liu Z G, Zhao Y N, Yang G, Liu H Q, Wu J Y, Fang Y, Li X C, Liu L B, Qian W, Hou X F. Study of difference in mechanism of cold resistance of winter rapeseed of *Brassica rape* and *Brassica napus*. *Acta Agric Boreali-Sin*, 2016, 31(1): 147–154 (in Chinese with English abstract).
- [13] Theocharis A, Clement C, Barka E A. Physiological and molecular changes in plants grown at low temperatures. *Planta*, 2012, 235: 1091–1105.
- [14] 李北齐, 张玉胡, 王贵强, 芦宝琳, 孟斌. 不同生态型玉米品种低温下出苗机理研究. 中国农学通报, 2011, 27(9): 120–125.
Li B Q, Zhang Y H, Wang G Q, Lu B L, Meng B. Research on seed germination mechanism of different ecotype maize under low temperature. *Chin Agric Sci Bull*, 2011, 27(9): 120–125 (in Chinese with English abstract).
- [15] 张鹤, 蒋春姬, 殷冬梅, 董佳乐, 任婧瑶, 赵新华, 钟超, 王晓光, 于海秋. 花生耐冷综合评价体系构建及耐冷种质筛选. 作物学报, 2021, 47: 1753–1767.
Zhang H, Jiang C J, Yin D M, Dong J L, Ren J Y, Zhao X H, Zhong C, Wang X G, Yu H Q. Establishment of comprehensive evaluation system for cold tolerance and screening of cold-tolerance germplasm in peanut. *Acta Agron Sin*, 2021, 47: 1753–1767 (in Chinese with English abstract).
- [16] 赵星棋, 郭泰, 王志新, 郑伟, 李灿东, 徐杰飞, 王象然, 郭美玲, 张振宇, 赵建有. 黑龙江早熟区大豆芽期耐低温种质资源鉴定与筛选. 种子, 2023, 42(8): 58–63.
Zhao X Q, Guo T, Wang Z X, Zheng W, Li C D, Xu J F, Wang X R, Guo M L, Zhang Z Y, Zhao J Y. Identification and screening of soybean germplasms with low temperature tolerance at bud stage in early-maturing area of Heilongjiang province. *Seed*, 2023, 42(8): 58–63 (in Chinese with English abstract).
- [17] 沈倩, 张思平, 刘瑞华, 刘绍东, 陈静, 葛常伟, 马慧娟, 赵新华, 杨国正, 宋美珍, 庞朝友. 棉花出苗期耐冷综合评价体系的构建及耐冷指标筛选. 中国农业科学, 2022, 55: 4342–4355.
Shen Q, Zhang S P, Liu R H, Liu S D, Chen J, Ge C W, Ma H J, Zhao X H, Yang G Z, Song M Z, Pang C Y. Construction of a comprehensive evaluation system and screening of cold tolerance indicators for cold tolerance of cotton at seedling emergence stage. *Sci Agric Sin*, 2022, 55: 4342–4355 (in Chinese with English abstract).
- [18] 唐双勤, 吴自明, 谭雪明, 曾勇军, 石庆华, 潘晓华, 曾研华. 直播早粳品种芽期耐冷性鉴定研究. 作物杂志, 2019, (1): 159–167.
Tang S Q, Wu Z M, Tan X M, Zeng Y J, Shi Q H, Pan X H, Zeng Y H. Identification of cold tolerance of direct seeded early rice varieties at bud stage. *Crops*, 2019, (1): 159–167 (in Chinese with English abstract).
- [19] 谢志坚. 农业科学中的模糊数学方法. 武汉: 华中理工大学出版社, 1983. pp 99–193.
Xie Z J. Method of Fuzzy Mathematics in Agricultural Science. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1983. pp 99–193 (in Chinese).
- [20] 何学敏, 刘笑, 殷红, 游松财. 1986–2015 年中国东北地区主要农业气象灾害变化特征. 沈阳农业大学学报, 2019, 50: 392–398.
He X M, Liu X, Yin H, You S C. Characteristics of major agricultural meteorological disasters in northeast China from 1986 to 2015. *J Shenyang Agric Univ*, 2019, 50: 392–398 (in Chinese with English abstract).
- [21] Li M, Sui N, Lin L, Yang Z, Zhang Y. Transcriptomic profiling revealed genes involved in response to cold stress in maize. *Funct Plant Biol*, 2019, 46: 830–844.
- [22] Shen X, Liu B, Xue Z, Jiang M, Lu X, Zhang Q. Spatiotemporal variation in vegetation spring phenology and its response to climate change in freshwater marshes of northeast China. *Sci Total Environ*, 2019, 666: 1169–1177.
- [23] 杨静, 毛笈华, 于永涛, 李春艳, 王永飞, 胡建广. 低温对甜玉米种子氧化酶活性的影响及相关基因表达分析. 核农学报, 2016, 30: 1840–1847.
Yang J, Mao J H, Yu Y T, Li C Y, Wang Y F, Hu J G. Effects of chilling on antioxidant enzyme activity and related gene expression levels during seed germination. *Acta Agric Nucl Sci*, 2016, 30: 1840–1847 (in Chinese with English abstract).
- [24] 周亚峰, 许彦宾, 王艳玲, 李琼, 胡建斌. 基于主成分-聚类分析构建甜瓜幼苗耐冷性综合评价体系. 植物学报, 2017, 52: 520–529.
Zhou Y F, Xu Y B, Wang Y L, Li Q, Hu J B. Establishment of a

- comprehensive evaluation system for chilling tolerance in melon seedlings based on principal component analysis and cluster analysis. *Acta Bot Sin*, 2017, 52: 520–529 (in Chinese with English abstract).
- [25] 单彩云. 大豆耐低温资源筛选及蛋白质组学研究. 东北农业大学硕士学位论文, 黑龙江哈尔滨, 2008.
Shan C Y. Screening and Proteomic Research of Soybean Low Temperature Tolerance Germplasm. MS Thesis of Northeast Agriculture University, Harbin, Heilongjiang, China, 2008 (in Chinese with English abstract).
- [26] 江玲, 侯名语, 刘世家, 陈亮明, 刘喜, 翟虎渠, 万建民. 水稻种子低温萌发生理机制的初步研究. *中国农业科学*, 2005, 38: 480–485.
Jiang L, Hou M Y, Liu S J, Chen L M, Liu X, Zhai H Q, Wan J M. Physiological mechanism of seed germination (*Oryza sativa* L.) under low temperature. *Sci Agric Sin*, 2005, 38: 480–485 (in Chinese with English abstract).
- [27] 薛云云, 白冬梅, 田跃霞, 权宝全. 24 份山西花生资源芽期和苗期耐寒性鉴定. *核农学报*, 2018, 32: 582–590.
Xue Y Y, Bai D M, Tian Y X, Quan B Q. Cold tolerance identification for 24 peanut resources from Shanxi province at the stage of germination and seedling. *Acta Agric Nucl Sci*, 2018, 32: 582–590 (in Chinese with English abstract).
- [28] 刘宏宇, 姚雪, 栾非时, 王学征. 厚皮甜瓜种子萌芽期耐冷性评价方法研究. *东北农业大学学报*, 2016, 47(7): 24–81.
Liu H Y, Yao X, Luan F S, Wang X Z. Study on evaluation method of chilling tolerance at germination stage in *Cucumis melo*. *J Northeast Agric Univ*, 2016, 47(7): 24–81 (in Chinese with English abstract).
- [29] 王树刚, 王振林, 王平, 王海伟, 李府, 黄玮, 武玉国, 尹燕桦. 不同小麦品种对低温胁迫的反应及抗冻性评价. *生态学报*, 2011, 31: 1064–1072.
Wang S G, Wang Z L, Wang P, Wang H W, Li F, Huang W, Wu Y G, Yin Y P. Evaluation of wheat freezing resistance based on the responses of the physiological indices to low temperature stress. *Acta Ecol Sin*, 2011, 31: 1064–1072 (in Chinese with English abstract).
- [30] 刘海卿, 孙万仓, 刘自刚, 武军艳, 钱武, 王志江, 郭仁迪, 马骊, 侯献飞, 刘林波. 北方寒旱区白菜型冬油菜抗寒性与抗旱性评价及其关系. *中国农业科学*, 2015, 48: 3743–3756.
Liu H Q, Sun W C, Liu Z G, Wu J Y, Qian W, Wang Z J, Guo R D, Ma L, Hou X F, Liu L B. Evaluation of drought resistance and cold resistance and research of their relationship at seedling stage of winter rapeseed (*Brassica campestris* L.) in cold and arid regions in north china. *Sci Agric Sin*, 2015, 48: 3743–3756 (in Chinese with English abstract).

附表 1 参试谷子冷胁迫后各指标耐冷系数(8℃, 7 d)

Table S1 Low temperature tolerance coefficient of each index under chilling stress (8℃, 7 d)

品种 Variety	发芽势 GE	发芽率 GP	发芽指数 GI	芽长 SL	根长 RL	芽鲜重 SFW	根鲜重 RFW
嫩选 11 Nenxuan 11	0.840	0.747	0.330	0.614	0.772	0.681	0.533
嫩选 14 Nenxuan 14	0.906	0.931	0.370	0.790	0.949	0.686	0.880
嫩选 15 Nenxuan 15	0.850	0.910	0.336	0.710	0.885	0.594	0.793
龙谷 26 Longgu 26	0.888	0.558	0.234	0.678	0.720	0.230	0.301
龙谷 31 Longgu 31	0.811	0.903	0.292	0.802	0.962	0.623	0.851
龙谷 37 Longgu 37	0.913	0.958	0.237	0.624	0.730	0.399	0.487
胜谷 2 号 Shenggu 2	0.958	0.890	0.299	0.725	0.802	0.615	0.833
公矮 5 号 Gong'ai 5	0.917	0.735	0.354	0.765	0.878	0.444	0.552
公谷 88 Gonggu 88	0.960	0.807	0.339	0.664	0.520	0.479	0.597
白谷 6 号 Baigu 6	0.909	0.830	0.266	0.702	0.888	0.523	0.667
九谷 15 Jiugu 15	0.920	0.826	0.313	0.687	0.782	0.620	0.710
九谷 19 Jiugu 19	0.818	0.775	0.369	0.673	0.969	0.395	0.476
九谷 23 Jiugu 23	0.803	0.840	0.247	0.851	0.952	0.455	0.562
朝谷 14 Chaogu 14	0.870	0.986	0.246	0.661	0.863	0.562	0.722
朝谷 58 Chaogu 58	0.920	0.909	0.291	0.487	0.893	0.364	0.415
朝 438 Chao 438	0.912	0.892	0.227	0.819	0.658	0.627	0.855
燕谷 16 Yangu 16	0.833	0.844	0.263	0.810	0.703	0.613	0.822
燕谷 18 Yangu 18	0.947	0.750	0.262	0.533	0.896	0.377	0.444
朝新谷 8 号 Chaoxingu 8	0.917	0.873	0.257	0.729	0.530	0.620	0.589
赤谷 1 号 Chigu 1	0.913	0.682	0.275	0.747	0.817	0.617	0.834
赤谷 4 号 Chigu 4	0.803	0.779	0.308	0.567	0.900	0.451	0.557
赤谷 17 Vhigu 17	0.977	0.862	0.255	0.486	0.942	0.561	0.711
峰红 4 号 Fenghong 4	0.929	0.961	0.335	0.636	0.848	0.479	0.593

(续附表 1)

品种 Variety	发芽势 GE	发芽率 GP	发芽指数 GI	芽长 SL	根长 RL	芽鲜重 SFW	根鲜重 RFW
蒙黑谷 8 号 Mengheigu 8	0.880	0.896	0.218	0.727	0.892	0.676	0.933
金苗 K1 Jinmiao K1	0.956	0.758	0.275	0.484	0.842	0.171	0.281
金苗 K2 Jinmiao K2	0.875	0.672	0.297	0.655	0.580	0.429	0.535
金谷 1 号 Jingu 1	0.876	0.571	0.255	0.726	0.830	0.568	0.730
冀谷 27 Jigu 27	0.950	0.905	0.310	0.564	0.662	0.396	0.476
冀谷 30 Jigu 30	0.760	0.790	0.259	0.753	0.676	0.563	0.722
保谷 18 Baogu 18	0.795	0.849	0.197	0.525	0.682	0.657	0.891
衡早 1 号 Hengzao 1	0.750	0.840	0.213	0.481	0.620	0.550	0.702
衡早 9 号 Hengzao 9	0.792	0.732	0.288	0.614	0.858	0.390	0.471
坝谷 214 Bagu 214	0.762	0.798	0.249	0.780	0.818	0.587	0.762
郑谷 2 号 Zhenggu 2	0.840	0.640	0.254	0.680	0.747	0.264	0.358
郑谷 4 号 Zhenggu 4	0.802	0.816	0.248	0.382	0.760	0.322	0.385
豫谷 12 Yugu 12	0.696	0.838	0.248	0.569	0.550	0.600	0.807
豫谷 18 Yugu 18	0.875	0.856	0.287	0.667	0.772	0.183	0.282
豫谷 31 Yugu 31	0.625	0.708	0.167	0.442	0.690	0.408	0.515
豫谷 32 Yugu 32	0.783	0.645	0.272	0.584	0.612	0.622	0.849
豫谷 35 Yugu 35	0.404	0.771	0.248	0.569	0.845	0.405	0.500
鲁谷 6 号 Lugu 6	0.720	0.802	0.228	0.733	0.960	0.550	0.705
鲁谷 7 号 Lugu 7	0.961	0.460	0.287	0.427	0.610	0.367	0.429
鲁谷 10 号 Lugu 10	0.763	0.797	0.232	0.721	0.887	0.385	0.451
陇谷 4 号 Longgu 4	0.609	0.738	0.231	0.600	0.730	0.484	0.602
陇谷 7 号 Longgu 7	0.842	0.503	0.284	0.677	0.900	0.589	0.763
陇谷 13 Longgu 13	0.960	0.921	0.360	0.720	0.848	0.530	0.620
大同 25 Datong 25	0.792	0.630	0.355	0.519	0.740	0.464	0.565
大同 29 Datong 29	0.894	0.853	0.322	0.520	0.780	0.479	0.591
晋谷 13 Jingu 13	0.560	0.787	0.271	0.517	0.606	0.850	0.410
晋谷 20 Jingu 20	0.383	0.637	0.340	0.600	0.806	0.582	0.746
中谷 2 号 Zhonggu 2	0.845	0.635	0.259	0.613	0.728	0.384	0.448
中谷 9 号 Zhonggu 9	0.792	0.801	0.248	0.619	0.860	0.396	0.479
平均值 Average	0.828	0.786	0.277	0.639	0.784	0.497	0.611
变异系数 CV	0.153	0.150	0.166	0.174	0.155	0.276	0.284

GE: 发芽势; GP: 发芽率; GI: 发芽指数; SL: 芽长; RL: 根长; SFW: 芽鲜重; RFW: 根鲜重。

GE: germination energy; GP: germination percentage; GI: germination index; SL: sprout length; RL: root length; SFW: shoot fresh weight; RFW: root fresh weight.