

# 北方粳稻萌发期耐冷性鉴定评价与筛选

蒋昆炜 孙国才 王健 王桂艳 崔月峰

(铁岭市农业科学院, 112616, 辽宁铁岭)

**摘要** 北方粳稻区易受冷害, 选育耐冷水稻品种是应对冷害最直接有效的手段。以 45 份北方粳稻为试验对象, 设定 14 °C 为冷胁迫温度, 测定各材料的发芽势、发芽率、发芽指数、芽活力指数、根活力指数、平均发芽天数及发芽系数等 7 个指标, 采用相关性分析、主成分分析、隶属函数综合分析和聚类分析等多元统计方法进行耐冷性评价。结果表明, 冷胁迫下各项萌发指标均呈不同程度的下降趋势, 根活力指数降幅最为明显。通过计算各指标隶属函数值, 经主成分分析将 7 个指标转化为 2 个综合指标, 利用聚类分析将 45 份北方粳稻划分为 4 类, 成功筛选出 13 份耐冷材料。进一步通过回归分析构建方程, 明确发芽势、发芽率、根活力指数和发芽系数是鉴定北方粳稻萌发期耐冷性的关键指标。

**关键词** 粳稻; 萌发期; 冷胁迫; 综合评价

水稻作为广泛种植的谷物作物, 是多数人口的主要食物来源<sup>[1]</sup>, 其对寒冷敏感, 早期生长易受冷害影响<sup>[2-3]</sup>。种子萌发是作物正常生长的首要环节, 萌发期遭受冷害会导致种子萌发受阻, 甚至丧失发芽能力<sup>[4-6]</sup>, 进而严重制约水稻产量潜力的发挥<sup>[7-8]</sup>。

我国北方地区是主要的农业产区, 但其热量条件有限, 春播期和幼苗生长期常遭遇大规模低温冷害, 抑制作物生长发育<sup>[8-10]</sup>。北方粳稻区纬度跨度大, 涵盖东北早熟粳稻区、华北单季粳稻区和西北干燥粳稻区, 种植面积约占我国粳稻总面积的 60%<sup>[11]</sup>。该区域春季温度波动大, 清晨气温低、升温慢, 水稻冷害频发, 减产现象时有发生, 严重制约了北方粳稻区的稻作发展<sup>[12]</sup>。

选育耐冷品种是解决水稻冷害问题最直接有效的手段<sup>[13]</sup>, 通过遗传改良培育新品种对北方粳稻

区水稻生产至关重要, 而构建耐冷综合评价体系是筛选耐冷材料的前提。目前, 学者已对谷子<sup>[4]</sup>、糜子<sup>[14]</sup>、棉花<sup>[15]</sup>、高粱<sup>[16]</sup>和花生<sup>[17]</sup>等多种作物开展了萌发期耐冷性综合评价, 但针对北方粳稻萌发期耐冷性综合评价的相关研究较少。本试验利用人工培养箱模拟冷胁迫环境, 对 45 份北方粳稻的萌发期耐冷性进行鉴定, 分析耐冷材料的性状特征, 明确萌发期耐冷性的关键指标, 旨在为北方粳稻区耐冷水稻选育提供优质种质资源与理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

以 45 份粳稻类型水稻为供试材料, 包括来源中国的 43 份(表 1)和来源日本的 2 份(秋光, J44; 秋田小町, J45), 均由铁岭市农业科学院提供。

表 1 来源中国的供试水稻信息  
Table 1 Information of tested rice from China

编号 Number	材料 Material	来源 Origin	编号 Number	材料 Material	来源 Origin
J1	吉粳 860	吉林省农业科学院	J11	优育 104	宁夏农林科学院农作物研究所
J2	吉大 388	吉林大学植物科学学院	J12	松粮 850	松原粮食集团水稻研究所有限公司
J3	富禾稻 1305	辽宁东亚种业有限公司	J13	吉粳 855	吉林省农业科学院
J4	京粳 24	中国农业科学院作物科学研究所	J14	北粳 255	沈阳农业大学
J5	天隆优 717	辽宁天隆生物科技有限公司	J15	新疆-10	新疆维吾尔自治区农业科学院
J6	沈稻 523	沈阳农业大学	J16	天隆优 619	天津天隆种业科技有限公司
J7	沈稻 97	沈阳农业大学	J17	铁粳 1913	铁岭市农业科学院
J8	吉大 978	吉林大学植物科学学院	J18	铁粳 1947	铁岭市农业科学院
J9	盐粳 2122	辽宁省盐碱地利用研究所	J19	铁粳 1811	铁岭市农业科学院
J10	盘粳 508	盘锦北方农业技术开发有限公司	J20	铁粳 1808	铁岭市农业科学院

作者简介: 蒋昆炜, 研究方向为水稻育种、栽培及示范推广, E-mail: jiangkunwei@163.com

崔月峰为通信作者, 研究方向为水稻育种、栽培及示范推广, E-mail: sncyf552@126.com

基金项目: 辽宁省农业重大专项 (2022020766-JH1/102-06)

收稿日期: 2024-08-14; 修回日期: 2024-10-11; 网络出版日期: 2024-10-16

续表 1 Table 1 (continued)

编号 Number	材料 Material	来源 Origin	编号 Number	材料 Material	来源 Origin
J21	铁粳 96	铁岭市农业科学院	J33	花粳 97	辽宁省盐碱地利用研究所
J22	铁粳 1603	铁岭市农业科学院	J34	东研稻 27	东港市示范繁殖农场
J23	铁粳 1743	铁岭市农业科学院	J35	港优 9 号	东港市示范繁殖农场
J24	铁粳 1712	铁岭市农业科学院	J36	阳光 33	大石桥市阳光种业有限公司
J25	北粳 3-2	沈阳农业大学	J37	沈农 315	沈阳农业大学
J26	北粳 4 号	沈阳农业大学	J38	丹 213	丹东农业科学院
J27	北粳 K13	沈阳农业大学	J39	盐粳 196	辽宁省盐碱地利用研究所
J28	铁粳 11 号	铁岭市农业科学院	J40	沈农 518	沈阳农业大学
J29	铁粳香 3 号	铁岭市农业科学院	J41	盘粳 202	盘锦北方农业技术开发有限公司
J30	营育 9 号	大石桥市阳光种业有限公司	J42	天实稻 821	沈阳市天实水稻技术研究所
J31	沈稻 6 号	沈阳农业大学	J43	辽粳 810	辽宁省水稻研究所
J32	辽粳 9 号	辽宁省水稻研究所			

### 1.2 试验设计

参照金铭路等<sup>[18]</sup>的方法，每份材料称取 30 g 种子置于装有 0.5% NaClO 溶液的烧杯中充分搅拌，消毒 20 min 后将种子取出，用蒸馏水冲洗干净，随后在蒸馏水中浸种 12 h。每份材料挑选 100 粒饱满的种子，均匀放置于垫有滤纸的培养皿中，置于培养箱中，设置 26 °C（对照组，CK）和 14 °C（处理组，T）2 个萌发温度<sup>[19]</sup>，期间每天更换培养皿中的蒸馏水，每个处理 3 次重复。

### 1.3 测定指标与方法

以种子露白记为发芽，逐日观察并记录 CK 和 T 处理的发芽情况；以当日发芽粒数无新增的时间记为规定期限，CK 处理为 5 d，T 处理为 15 d，用直尺测量并记录芽长和根长。参照黄贺等<sup>[20]</sup>的方法，计算发芽势（germination potential, GP）、发芽率（germination rate, GR）、发芽指数（germination index, GI）、芽活力指数（vigor index of shoot, VIS）、根活力指数（vigor index of root, VIR）、平均发芽天数（average germination days, AGD）和发芽系数（germination coefficient, GC）7 个指标。其中，在 1/3 规定期限时统计发芽势（CK 处理于第 2 天测定，T 处理于第 5 天测定），此时种子出芽旺盛，考察各品种出芽整齐度和种子活力；在规定期限时统计发芽率，此时种子已基本出芽完毕，考察各品种出芽能力。各指标计算公式为：

$$GP (\%) = \frac{\text{测定日种子发芽数}}{\text{供试种子数}} \times 100 \quad (1)$$

$$GR (\%) = \frac{\text{测定日种子发芽数}}{\text{供试种子数}} \times 100 \quad (2)$$

$$GI (\%) = \frac{\sum (\text{当日发芽粒数} / \text{浸种后天数})}{100} \quad (3)$$

$$VIS = \text{芽长} \times GI \quad (4)$$

$$VIR = \text{根长} \times GI \quad (5)$$

$$AGD = \frac{\sum [(\text{当日发芽粒数} \times \text{浸种后天数}) / \text{总发芽粒数}]}{\quad} \quad (6)$$

$$GC = GR / AGD \quad (7)$$

### 1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2016 进行数据整理，利用 R 4.1.3 的 corrplot 包进行 Pearson 相关性分析，利用 SPSS 23 进行主成分分析，利用 R 4.1.3 的 ggplot2 包、ComplexHeatmap 包、circlize 包和 dendextend 包进行聚类分析，采用 ward.D 方法层次聚类，采用 Euclidean 方法计算遗传距离，利用 SPSS 23 的线性回归分析对综合耐冷性评价价值（D）进行回归方程分析。相关计算公式<sup>[21]</sup>如下：

$$\text{耐冷系数 (cold resistance coefficient, CRC)} = \frac{\text{T 处理性状值}}{\text{CK 处理性状值}} \quad (8)$$

其中，CRC<sub>1</sub>~CRC<sub>7</sub> 分别表示发芽势、发芽率、发芽指数、芽活力指数、根活力指数、平均发芽天数和发芽系数的耐冷系数。

$$U(CI) = \frac{(CI_j - CI_{\min})}{(CI_{\max} - CI_{\min})} \quad (9)$$

式中，U(CI) 表示各综合指标的隶属函数值，CI<sub>j</sub> 表示第 j 个综合指标值，CI<sub>max</sub> 表示第 j 个综合指标的最大值，CI<sub>min</sub> 表示第 j 个综合指标的最小值。

$$W_j = \frac{P_j}{\sum_{j=1}^n P_j} \quad (10)$$

式中，W<sub>j</sub> 表示第 j 个综合指标的权重；P<sub>j</sub> 表示第 j 个综合指标的贡献率。

$$D = \sum_{j=1}^n [U(CI) \times W_j] \quad (11)$$

## 2 结果与分析

### 2.1 冷胁迫下 45 份水稻材料萌发期的性状指标

45 份水稻材料在 T 处理下的平均发芽天数与 CK 处理相比增加了 219.90%（表 2）。与 CK 处理相比，发芽势、发芽率、发芽指数、芽活力指数、

根活力指数和发芽系数均降低，降幅分别为 39.47%、15.31%、71.23%、80.66%、89.48% 和 71.43%，其中根活力指数的降幅最大，发芽率降幅

最小。此外，CK 处理各指标的变异系数在 1.95%~35.13%，T 处理在 23.57%~84.83%，2 个处理均存在较大差异，由此计算其耐冷系数进行后续分析。

表 2 冷胁迫下 45 份水稻材料萌发期的性状指标  
Table 2 Trait indexes of 45 rice materials at germination stage under cold stress

处理 Treatment	项目 Item	发芽势 GP (%)	发芽率 GR (%)	发芽指数 GI (%)	芽活力指数 VIS	根活力指数 VIR	平均发芽天数 AGD (d)	发芽系数 GC
T	最大值 Max.	0.92	0.98	45.70	594.46	516.00	11.39	0.31
	最小值 Min.	0.00	0.27	3.12	10.61	0.00	2.98	0.03
	平均值 Mean	0.46	0.83	19.55	226.52	177.64	6.27	0.16
	标准差 SD	0.30	0.19	10.15	173.19	150.70	2.17	0.07
	变异系数 CV(%)	65.90	23.57	51.94	76.45	84.83	34.59	48.17
CK	最大值 Max.	1.00	1.00	95.65	2037.35	3118.19	3.49	0.92
	最小值 Min.	0.16	0.93	32.58	485.47	729.83	1.09	0.27
	平均值 Mean	0.76	0.98	67.96	1171.22	1688.77	1.96	0.56
	标准差 SD	0.19	0.02	18.15	386.99	593.31	0.62	0.18
	变异系数 CV(%)	25.03	1.95	26.71	33.04	35.13	31.83	32.17

## 2.2 45 份水稻材料萌发期各指标的耐冷系数

由表 3 可知，各指标耐冷系数的变异系数在

22.99%~74.85%，根活力指数的耐冷系数变异最大，发芽率的耐冷系数最小，表明供试材料间存在

表 3 45 份水稻材料萌发期各指标的耐冷系数  
Table 3 Cold tolerance coefficients of 45 rice materials at germination stage

项目 Item	CRC <sub>1</sub>	CRC <sub>2</sub>	CRC <sub>3</sub>	CRC <sub>4</sub>	CRC <sub>5</sub>	CRC <sub>6</sub>	CRC <sub>7</sub>
最大值 Max.	0.99	0.99	0.56	0.42	0.26	5.62	0.50
最小值 Min.	0.00	0.27	0.06	0.02	0.00	1.66	0.07
平均值 Mean	0.55	0.84	0.28	0.18	0.10	3.28	0.28
标准差 SD	0.33	0.19	0.11	0.11	0.07	0.90	0.10
变异系数 CV(%)	60.16	22.99	38.98	63.80	74.85	27.40	37.24

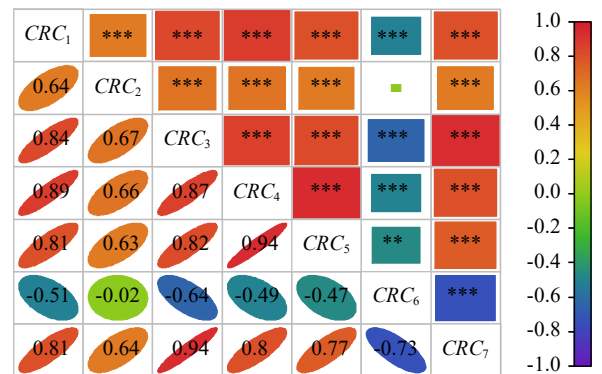
广泛的遗传多样性，故对其进行综合评价。

## 2.3 45 份水稻材料耐冷系数的相关性分析

45 份水稻材料萌发期各耐冷系数之间存在不同程度的相关关系（图 1）。发芽势、发芽率、发芽指数、芽活力指数、根活力指数和发芽系数的耐冷系数之间均呈极显著正相关，其中芽活力指数与根活力指数耐冷系数的相关系数高达 0.94。平均发芽天数与其余指标的耐冷系数均呈负相关，其中与发芽势、发芽指数、芽活力指数、根活力指数和发芽系数的耐冷系数呈显著负相关，与发芽系数耐冷系数的相关系数绝对值最大（-0.73）。各单项指标间存在不同程度的相关性，使信息产生重叠，因此，直接利用单项指标评价北方粳稻萌发期耐冷性是不全面的，需要进行多元统计分析。

## 2.4 45 份水稻材料耐冷系数的主成分分析

对 45 份水稻材料萌发期的耐冷系数进行主成分分析，将原有的 7 个指标转化为 2 个独立的综合指标 CI1 和 CI2（表 4）。2 个主成分特征值均大于 1，累计贡献率为 89.866%，以贡献率占比作为权



“\*\*”和“\*\*\*”分别表示在  $P < 0.01$  和  $P < 0.001$  水平上极显著相关。

“\*\*” and “\*\*\*” indicate extremely significant correlations at the  $P < 0.01$  and  $P < 0.001$  levels, respectively.

图 1 45 份水稻材料萌发期耐冷系数的相关性分析

Fig.1 Correlation analysis of cold tolerance coefficients of 45 rice materials at germination stage

重，主成分 CI1 权重占比 83.7%，主成分 CI2 权重占比 16.3%。这 2 个主成分可以较好地替代 7 个性状指标，对萌发期耐冷性进行评价。

## 2.5 45 份水稻材料耐冷性的聚类分析

将 45 份水稻材料进行聚类分析（图 2），分为

表 4 45 份水稻材料的耐冷系数主成分分析  
Table 4 Principal component analysis of cold tolerance coefficients of 45 rice materials

项目 Item	CI1	CI2
CRC <sub>1</sub>	0.174	0.061
CRC <sub>2</sub>	0.135	0.605
CRC <sub>3</sub>	0.182	-0.063
CRC <sub>4</sub>	0.179	0.099
CRC <sub>5</sub>	0.173	0.108
CRC <sub>6</sub>	-0.119	0.744
CRC <sub>7</sub>	0.179	-0.162
特征值 Eigenvalue	5.266	1.024
贡献率 Contribution rate (%)	75.233	14.633
累计贡献率 Cumulative contribution rate (%)	75.233	89.866

4 种类型，其中 J23、J16、J5、J20、J35、J32、J41、J21、J34、J29、J12、J22 和 J27 归为一类，共 13 份材料，为耐冷型；J17、J8、J31、J40、J19、J33、J15、J42 和 J14 归为一类，共 9 份材料，为较耐冷型；J4、J18、J45、J13、J11、J3、J37 和 J30 归为一类，共 8 份材料，为冷敏感型；其余 15 份归为一类，为冷较敏感型。

2.6 萌发期耐冷性评价回归分析方程

45 份水稻材料萌发期综合耐冷性评价价值 *D* 的分布范围在 0.024~0.890，其中 J29 最大，表明其萌发期耐冷性最好；J30 最小，表明其萌发期耐冷性

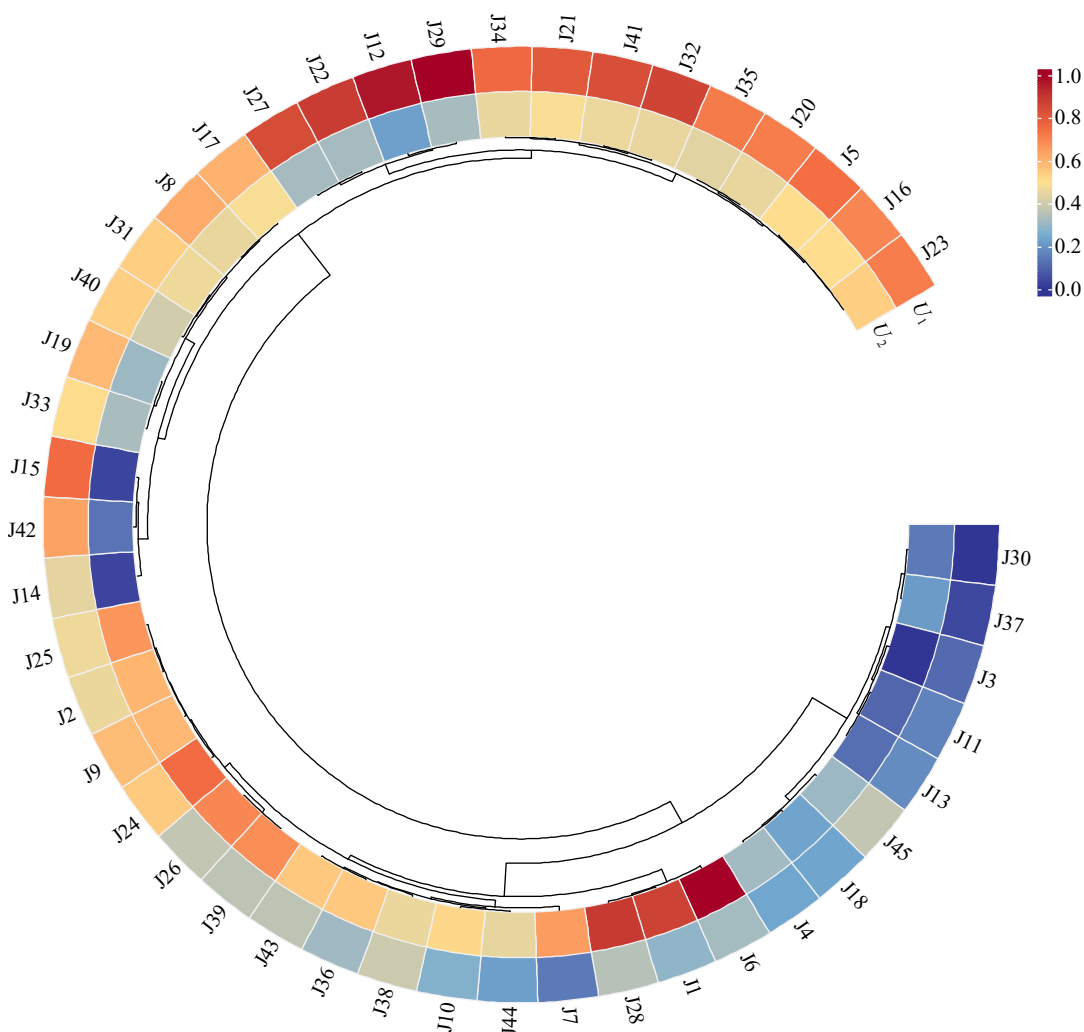


图 2 冷胁迫下 45 份水稻材料萌发期耐冷性聚类热图

Fig.2 Clustering heat maps of cold tolerance of 45 rice accessions at germination stage under cold stress

最差（表 5）。为进一步分析水稻萌发期评价指标与耐冷性之间的关系，以耐冷系数为自变量、*D* 值为因变量进行回归分析，构建最优回归方程： $D_1 = -0.104 + 0.178X_1 + 0.292X_2 + 1.034X_5 + 0.552X_7$  ( $R^2 = 0.994$ ,  $P < 0.05$ )，式中，*D*<sub>1</sub> 为耐冷评价预测值，

*X*<sub>1</sub>、*X*<sub>2</sub>、*X*<sub>5</sub> 和 *X*<sub>7</sub> 分别为发芽势、发芽率、根活力指数和发芽系数的耐冷系数，可以解释 *D*<sub>1</sub> 值的 99.4%，说明此方程可用于萌发期耐冷性评价。方程估计精度较高，利用该回归方程估算 *D* 值，可提高水稻萌发期耐冷性评价的工作效率。

表 5 萌发期耐冷性评价回归分析方程的估计精度  
Table 5 Estimation accuracy of regression analysis equation for cold tolerance evaluation at germination stage

编号 Number	$D$	$D_1$	精度 Accuracy (%)	编号 Number	$D$	$D_1$	精度 Accuracy (%)	编号 Number	$D$	$D_1$	精度 Accuracy (%)
J1	0.384	0.387	99.174	J16	0.668	0.657	98.367	J31	0.529	0.534	98.923
J2	0.481	0.484	99.154	J17	0.583	0.601	97.027	J32	0.802	0.824	97.274
J3	0.094	0.101	92.947	J18	0.233	0.233	99.989	J33	0.480	0.473	98.567
J4	0.251	0.239	95.434	J19	0.542	0.534	98.123	J34	0.714	0.721	99.136
J5	0.711	0.681	95.834	J20	0.675	0.681	99.014	J35	0.676	0.711	95.137
J6	0.430	0.441	97.413	J21	0.754	0.723	95.906	J36	0.352	0.349	98.978
J7	0.229	0.223	97.389	J22	0.797	0.811	98.264	J37	0.065	0.068	95.174
J8	0.593	0.618	95.981	J23	0.689	0.722	95.467	J38	0.402	0.401	99.751
J9	0.581	0.596	97.442	J24	0.584	0.552	94.586	J39	0.415	0.411	98.933
J10	0.310	0.311	99.528	J25	0.499	0.513	97.244	J40	0.519	0.519	99.923
J11	0.155	0.166	93.599	J26	0.427	0.438	97.484	J41	0.777	0.724	93.275
J12	0.851	0.828	97.190	J27	0.761	0.746	97.864	J42	0.558	0.554	99.273
J13	0.173	0.180	95.908	J28	0.440	0.444	99.196	J43	0.397	0.400	99.238
J14	0.377	0.386	97.729	J29	0.890	0.891	99.917	J44	0.258	0.258	99.964
J15	0.641	0.666	96.304	J30	0.024	0.025	94.756	J45	0.364	0.336	92.264

### 3 讨论

近年来, 低温对农作物生产及粮食安全产生了诸多影响<sup>[22]</sup>。种子萌发作为作物生长发育过程中的重要环节, 对产量具有决定性作用, 若作物在萌发期具有较强的耐冷性, 则能为后期生长奠定良好基础<sup>[2]</sup>。随着农村劳动力外流, 劳动力与生产物资成本提高, 直播稻因其省工节本的特点愈发受到农民青睐, 然而, 直播稻早春播种时易遭受低温冷害<sup>[23-24]</sup>。因此, 筛选并培育耐冷品种既契合北方粳稻区的生产需求, 也满足了耐冷直播水稻品种的选育要求, 还可推广至其他高纬度、高海拔低温地区, 有助于扩大水稻的低温适应性, 降低气候变化对水稻产量的影响<sup>[2,25]</sup>。

由于各指标间差异显著, 为更直观地呈现冷胁迫对各指标的影响, 采用 T 处理与 CK 处理的相对值, 即耐冷系数, 可消除不同品种间基本性状的差异<sup>[4]</sup>。本试验的 45 份北方粳稻中, 各指标的变化趋势与幅度存在差异, 且各耐冷系数间存在不同程度的相关性。由于指标间信息重叠, 仅依靠单一指标的耐冷系数难以全面阐释耐冷实质, 从而导致无法准确评价不同材料萌发期的耐冷性<sup>[26-27]</sup>。隶属函数分析与主成分分析已广泛应用于多种作物的抗逆性评价中<sup>[28-31]</sup>。本研究运用主成分分析法, 将萌发期 7 个耐冷性指标转化为 2 个主成分, 可解释 89.866% 的变异, 能更准确地反映萌发期的耐冷信息。通过计算综合隶属函数值并结合聚类分析, 对萌发期耐冷性进行分级评价, 将 45 份北方粳稻划分为耐冷型、较耐冷型、冷较敏感型

和冷敏感型 4 种类型, 可有效筛选出对低温胁迫反应极端的材料。

构建回归方程并确定关键指标, 可进一步提高筛选效率<sup>[32-33]</sup>。本研究构建回归方程:  $D_1 = -0.104 + 0.178X_1 + 0.292X_2 + 1.034X_3 + 0.552X_7$  ( $R^2 = 0.994$ ,  $P < 0.05$ ), 明确发芽势、发芽率、根活力指数和发芽系数可用于萌发期耐冷性评价。同时, 各材料的估算精度较高, 表明该回归方程能够较为准确地预测不同北方粳稻品种的耐冷性强弱。

### 4 结论

通过多元统计方法进行萌发期耐冷性鉴定, 45 份北方粳稻材料可划分为 4 类。铁粳香 3 号、松粮 850、辽粳 9 号、铁粳 1603、盘粳 202、北粳 K13、铁粳 96、东研稻 27、天隆优 717、铁粳 1743、港优 9 号、铁粳 1808 和天隆优 619 共 13 份材料耐冷性最强, 可作为耐冷种质资源加以利用。通过回归分析构建方程, 确定发芽势、发芽率、根活力指数和发芽系数为北方粳稻萌发期耐冷性评价的关键指标, 可据此进行耐冷品种鉴定。

#### 参考文献

- [1] 刘次桃, 王威, 毛毕刚, 等. 水稻耐低温逆境研究: 分子生理机制及育种展望. 遗传, 2018, 40(3): 171-185.
- [2] Gelaw T A, Sanan-Mishra N. Nanomaterials coupled with microRNAs for alleviating plant stress: a new opening towards sustainable agriculture. Physiology and Molecular Biology of Plants, 2022, 28(4): 791-818.
- [3] 李可, 蒋伟勤, 车阳, 等. 水稻冷害成灾机制与调控机理研究进展及展望. 江苏农业科学, 2024, 52(2): 31-40.
- [4] 闫锋, 董扬, 李清泉, 等. 谷子育成品种萌芽期耐冷性综合评价. 作物学报, 2024, 50(9): 2207-2218.
- [5] Wang W J, Huang R Z, Wu G G, et al. Transcriptomic and QTL

- analysis of seed germination vigor under low temperature in weedy rice WR04-6. *Plants*, 2023, 12(4): 871-886.
- [6] 陈亮, 楼巧君, 孙宗修, 等. 水稻低温发芽力的 QTL 定位. *中国水稻科学*, 2006, 20(2): 159-164.
- [7] Fiorillo A, Mattei M, Aducci P, et al. The salt tolerance related protein (STRP) mediates cold stress responses and abscisic acid signalling in *Arabidopsis thaliana*. *Frontiers in Plant Science*, 2020, 13(11): 1251-1264.
- [8] 刘琳帅, 卞景阳, 孙兴荣, 等. 水稻低温冷害的研究进展. *江苏农业科学*, 2022, 50(24): 9-15.
- [9] 余志刚, 崔利达, 宫思羽. 东北地区建设国家粮食安全产业带: 基础优势、制约瓶颈和建设路径. *农村经济*, 2022(5): 50-59.
- [10] 杨川航, 王玉平, 涂斌, 等. 利用籼粳交 RIL 群体对水稻耐寒性及再生力的 QTL 分析. *中国水稻科学*, 2012, 26(6): 741-745.
- [11] 唐亮, 陈温福. 北方粳稻新品种培育与发展. *中国稻米*, 2022, 28(5): 79-81.
- [12] 檀艳静, 张佳华, 姚凤梅, 等. 中国作物低温冷害监测与模拟预报研究进展. *生态学杂志*, 2013, 32(7): 1920-1927.
- [13] 李莺歌, 吴俊, 柏斌, 等. 水稻苗期耐冷性研究进展. *杂交水稻*, 2015, 30(3): 9-16, 28.
- [14] 董扬. 240 份糜子种质资源萌芽期耐冷性综合评价及筛选. *干旱地区农业研究*, 2022, 40(6): 23-33.
- [15] 沈倩, 张思平, 刘瑞华, 等. 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(22): 4342-4355.
- [16] 田聪颖, 谷岩, 梅楠, 等. 高粱种质资源芽期耐低温综合评价及筛选. *分子植物育种*. (2022-08-31)[2024-08-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20220831.1049.002.html>.
- [17] 张玉松, 符明联, 雷永, 等. 372 份花生种质资源的耐冷性评价及耐冷种质筛选. *中国油料作物学报*, 2023, 45(6): 1247-1257.
- [18] 金铭路, 杨春刚, 余腾琼, 等. 中国水稻微核心种质不同生育时期耐冷性鉴定及其相关分析. *植物遗传资源学报*, 2009, 10(4): 540-546.
- [19] 宋佳. 粳稻萌发期耐冷性鉴定及全基因组关联分析. 哈尔滨: 东北农业大学, 2020.
- [20] 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. *中国油料作物学报*, 2019, 41(5): 723-734.
- [21] 武辉, 侯丽丽, 周艳飞, 等. 不同棉花基因型幼苗耐寒性分析及其鉴定指标筛选. *中国农业科学*, 2012, 45(9): 1703-1713.
- [22] 郭丽颖, 耿艳秋, 金峰, 等. 寒地水稻低温冷害防御栽培技术研究进展. *作物杂志*, 2017(4): 7-14.
- [23] 张耀元, 胡星辰, 孙冬, 等. 江苏省直播稻种植主要问题与对策——基于“农技耘”APP 问答数据的调查研究. *中国稻米*, 2024, 30(3): 78-83.
- [24] 陈雪飞, 唐艳萍, 谢英杰, 等. 我国机械化直播水稻生产技术研究进展. *中国稻米*, 2018, 24(4): 9-15.
- [25] Tu D B, Jiang Y, Liu M, et al. Improvement and stabilization of rice production by delaying sowing date in irrigated rice system in central China. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2020, 100(2): 595-606.
- [26] 刘雪梅, 尚庆茂, 张志刚. 辣椒不同品种种子萌芽期耐低温性及评价方法研究. *中国生态农业学报*, 2010, 18(3): 521-527.
- [27] 乔永利, 韩龙植, 安永平, 等. 水稻芽期耐冷性 QTL 的分子定位. *中国农业科学*, 2005, 38(2): 217-221.
- [28] 武兆云, 郭娜, 赵晋铭, 等. 大豆苗期耐低磷主成分及隶属函数分析. *大豆科学*, 2012, 31(1): 42-46.
- [29] 刘海卿, 孙万仓, 刘自刚, 等. 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(18): 3743-3756.
- [30] 耿雷跃, 马小定, 崔迪, 等. 水稻全生育期耐盐性鉴定评价方法研究. *植物遗传资源学报*, 2019, 20(2): 267-275.
- [31] 马帅国, 田蓉蓉, 胡慧, 等. 粳稻种质资源苗期耐盐性综合评价与筛选. *植物遗传资源学报*, 2020, 21(5): 1089-1101.
- [32] 郭胜微, 边思文, 丁建文, 等. 糯玉米萌发期耐低温品种资源的综合评价. *中国农业科技导报*, 2023, 25(2): 38-47.
- [33] 李晓菲, 高华伟, 广慧, 等. 大豆种质资源萌发期耐寒去津鉴定评价及优异种质筛选. *作物学报*, 2024, 50(7): 1699-1709.

## Identification, Evaluation and Screening of Cold Tolerance in *Japonica* Rice at Germination Stage in Northern China

Jiang Kunwei, Sun Guocai, Wang Jian, Wang Guiyan, Cui Yuefeng

(Tieling Academy of Agricultural Sciences, Tieling 112616, Liaoning, China)

**Abstract** Northern *Japonica* rice region is susceptible to cold damage, and breeding cold-tolerant rice varieties is the most direct and effective means to address this issue. In this study, 45 accessions of northern *Japonica* rice were used as experimental materials. Under 14 °C cold stress, seven indicators including germination potential, germination rate, germination index, vigor index of shoot, vigor index of root, average germination days, and germination coefficient were measured. Multivariate statistical methods such as correlation analysis, principal component analysis (PCA), membership function comprehensive analysis, and cluster analysis, were employed to evaluate cold tolerance. The results showed that all germination indicators exhibited varying degrees of decline under cold stress, with the vigor index of root showing the most obvious decrease. By calculating the membership function values of each indicator, the seven indicators were transformed into two comprehensive indicators through PCA. Cluster analysis was then used to categorize the 45 accessions into four groups, successfully screening 13 cold-tolerant materials. Furthermore, a regression equation was established, which identified that germination potential, germination rate, vigor index of root, and germination coefficient are the key indicators for evaluating cold tolerance in northern *Japonica* rice at the germination stage.

**Key words** *Japonica* rice; Germination stage; Cold stress; Comprehensive evaluation