

# 低温胁迫下粳稻选育品种耐冷性状的鉴定评价

崔迪<sup>1</sup>, 杨春刚<sup>2</sup>, 汤翠凤<sup>3</sup>, 余腾琼<sup>3</sup>, 张俊国<sup>2</sup>, 曹桂兰<sup>1</sup>,  
阿新祥<sup>3</sup>, 徐福荣<sup>3</sup>, 张三元<sup>2</sup>, 戴陆园<sup>3</sup>, 韩龙植<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国农业科学院作物科学研究所/国家农作物基因资源与基因改良重大科学工程/农业部作物种质资源与生物技术重点开放实验室, 北京 100081;  
<sup>2</sup> 吉林省农业科学院水稻研究所, 公主岭 136100; <sup>3</sup> 云南省农业科学院生物技术与种质资源研究所, 昆明 650205)

**摘要:** 选取来源于中国 11 个省份和其他 9 个国家的 347 份粳稻选育品种作为试验材料, 分析了自然低温和冷水胁迫下, 不同来源粳稻选育品种孕穗期的耐冷性及主要农艺性状的表型差异和聚类特点。研究表明, 在自然低温和冷水胁迫下各省份或国家粳稻选育品种主要农艺性状及其冷水反应指数有明显的差异。在自然低温和冷水胁迫下, 云南和日本品种的孕穗期结实率及其冷水反应指数均较高, 表现出较强的孕穗期耐冷性。从总体趋势上看, 在自然低温下, 除个别省份外, 我国纬度相对较高的北方省份品种的孕穗期耐冷性强于纬度相对较低的南方省份品种; 而在冷水胁迫下, 品种的耐冷性与其来源地的关系并不密切, 没有呈现出一定的规律性。此外, 聚类结果表明, 不同省份或国家粳稻选育品种的聚类结果与其品种的地理来源均有一定的相关性, 而与自然条件相比, 冷水胁迫下粳稻选育品种的聚类结果与其品种的地理来源的相关性更为密切。

**关键词:** 粳稻选育品种; 孕穗期; 耐冷性; 自然低温; 冷水胁迫; 聚类分析

## Evaluation of Cold Tolerance Traits for Improved *Japonica* Rice under Low Temperature Stress

CUI Di<sup>1</sup>, YANG Chun-gang<sup>2</sup>, TANG Cui-feng<sup>3</sup>, YU Teng-qiong<sup>3</sup>, ZHANG Jun-guo<sup>2</sup>,  
CAO Gui-lan<sup>1</sup>, A Xin-xiang<sup>3</sup>, XU Fu-rong<sup>3</sup>, ZHANG San-yuan<sup>2</sup>, DAI Lu-yuan<sup>3</sup>, HAN Long-zhi<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Key Laboratory of Crop Germplasm Resources and Biotechnology, Ministry of Agriculture/National Key Facility for Crop Gene Resource and Genetic Improvement/Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081;  
<sup>2</sup> Institute of Rice Research, Jilin Academy of Agricultural Sciences, Gongzhuling 136100;  
<sup>3</sup> Crop Genetic Resources Institute, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming 650205)

**Abstract:** The cold tolerance at the booting stage and main agronomic traits of 347 improved *japonica* rice varieties, which were from nine countries and eleven provinces of China, were evaluated under natural low temperature and cold water irrigation and the cluster analysis of the varieties was conducted. The results showed that the main agronomic traits associated with cold tolerance and cold water response index (CRI) among the varieties were significant different under natural low temperature and cold water irrigation. Under both conditions seed setting rate at the booting stage and CRI of the improved rice varieties from Yunnan Province and Japan were higher than those of other countries or provinces. From the overall trend, The cold tolerance at booting stage of the varieties from relatively higher latitude of north provinces were stronger than those from relatively low latitude of southern

收稿日期: 2011-11-30 修回日期: 2012-04-02

基金项目: 国家科技支撑项目(2006BAD13B01); “973”项目(2004CB117201); 作物种质资源保护项目[NB10-2130135(25-30)-01]; 国家科技基础条件平台项目(2005DKA21001-01)

作者简介: 崔迪, 在读博士, 主要从事水稻基因多样性研究。E-mail: cuidibaobei@163.com

通讯作者: 张三元, 研究员。E-mail: ilgzszsy12@yahoo.com.cn;

戴陆园, 研究员。E-mail: luyuandai@yahoo.com.cn;

韩龙植, 研究员。E-mail: lzhan58@yahoo.com.cn

provinces except few provinces under natural low temperature. However, under cold water irrigation, the relationship between the cold tolerance and origin of varieties was not close and did not show a regularity. In addition, the cluster analysis of the improved japonica rice varieties were associated with geographical locations. Moreover, the results was associated more closely with origins of varieties under cold water irrigation than natural condition.

**Key words:** Improved japonica rice variety; Booting stage; Cold tolerance; Natural low temperature; Cold water irrigation; Cluster analysis

低温冷害导致水稻减产是世界范围内普遍存在的问题。据报道,全世界有 24 个国家将近 1500 万  $\text{hm}^2$  以上的稻作面积时常受到低温威胁<sup>[1-3]</sup>。低温冷害在水稻各个生育时期均有发生,其中以孕穗期和抽穗开花期发生的冷害最为严重。这类冷害常在朝鲜、韩国和日本等高纬度国家以及我国东北高纬度地区和云贵高原粳稻区发生。近 10 多年来通过水稻耐冷育种,使水稻品种的耐冷性提高了较高水平,但全球气候环境异常多变,低温冷害等自然灾害有增无减,耐冷性仍然是当前高纬度、高海拔地区重要的水稻育种目标。因此,开展水稻种质资源的孕穗期耐冷性鉴定研究,从中筛选出强耐冷性水稻种质并将其利用于耐冷育种,具有重要的现实意义。

国内外许多学者针对水稻孕穗期耐冷性鉴定方法、评价指标和耐冷种质的鉴定筛选等方面进行了不少研究,并取得了显著进展<sup>[4-15]</sup>。韩龙植等<sup>[4]</sup>对国内外采用的耐冷性鉴定与评价方法进行归纳,为水稻种质资源耐冷性鉴定与评价技术的规范化提供了重要依据;戴陆园等<sup>[6]</sup>对云南稻种资源分别进行了芽期、苗期、孕穗开花期耐冷性鉴定,最终筛选出一批耐冷性极强的宝贵资源;刘昌文等<sup>[16]</sup>通过对冷

水胁迫下粳稻主要耐冷性状的鉴定评价和不同来源粳稻品种的聚类分析,阐明了不同来源粳稻品种的耐冷性差异和相似性,为水稻耐冷性遗传育种提供了理论依据;杨志奇等<sup>[17]</sup>通过对中国不同地理来源的粳稻地方品种进行孕穗期耐冷性鉴定及聚类分析,明确了不同省份粳稻地方品种耐冷特性遗传背景的差异性,为水稻耐冷育种的亲本选配提供了依据。但目前水稻耐冷种质资源仍较贫乏,及时鉴定筛选出对耐冷育种具有重要利用价值的耐冷种质是当务之急。

本研究主要以近 10 年来在生产上已推广应用或新选育的粳稻品种为试验材料,进行孕穗期耐冷性鉴定及聚类分析,以期明确不同国家(省份)粳稻选育品种耐冷性状的表型差异,为水稻耐冷性鉴定筛选和耐冷育种的亲本选配提供参考。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 供试材料

试验所选取的材料为不同来源的粳稻选育品种 347 份,包括黑龙江、吉林、辽宁等中国 11 个省的粳稻选育品种 216 份;韩国、日本等 9 个国家的粳稻选育品种 131 份,详见表 1。

表 1 供试的不同省份或国家的粳稻选育品种份数

Table 1 Accession of improved japonica rices used in the experiment

省份(国家)	份数	省份(国家)	份数	省份(国家)	份数
Province or country	Accession	Province or country	Accession	Province or country	Accession
黑龙江 Heilongjiang	32	山东 Shandong	12	澳大利亚 Australia	5
吉林 Jilin	33	安徽 Anhui	12	俄罗斯 Russia	5
辽宁 Liaoning	29	江苏 Jiangsu	16	意大利 Italy	6
宁夏 Ningxia	10	云南 Yunnan	13	保加利亚 Bulgaria	7
北京 Beijing	37	朝鲜 DPRK	8	法国 France	5
河北 Hebei	15	韩国 Korea	38	美国 American	5
河南 Henan	7	日本 Japan	52		

## 1.2 试验方法

**1.2.1 自然低温鉴定** 试验在位于昆明的云南省农业科学院生物技术与种质资源研究所试验田进行。供试材料的孕穗期处于6月初至8月末,而昆明每年6-8月份的温度较低,一般最低温度变异在15~19℃<sup>[17]</sup>,具备了鉴定孕穗期耐冷性的良好自然低温环境。2008年3月31日播种,5月9日移栽,2次重复,顺序排列,1行区,每行20穴,单本插秧,插秧规格为25cm×15cm。N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>施用量分别为120kg/hm<sup>2</sup>、80kg/hm<sup>2</sup>。在抽穗期调查记载每个品种的抽穗日期,并计算从播种至抽穗所需的抽穗天数。成熟期调查记载秆长(茎基部至穗颈节之间距离)、穗长、穗颈长(也称穗抽出度,指剑叶节至穗颈节之间的距离,距离为负值时指穗颈全部被包在剑叶鞘之中)、有效穗数、穗粒数和结实率。每份材料调查10株,以10株平均值作为统计单元。

**1.2.2 冷水胁迫鉴定** 在吉林省农业科学院水稻研究所(公主岭)进行。2008年4月15日播种,5月25日插秧。设冷水灌溉和自然对照2个处理,2次重复,顺序排列。1行区,每行12穴,单本插秧,插秧规格25cm×15cm, N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>施用量分别为120kg/hm<sup>2</sup>、80kg/hm<sup>2</sup>。冷水胁迫采用恒温深冷水灌溉法,从7月1日开始用19℃冷水持续处理40d,前期水深20cm,后期调整至30cm。在生育后期的8月末至10月中旬,全试验区搭架盖塑料大棚,保证个别晚熟材料的正常抽穗和成熟。调查记载项目包括抽穗日期、株高、有效穗数、穗粒数和结实率,并计算冷水反应指数(cold water response index, CRI)。冷水反应指数=(冷水胁迫下性状值/自然条件下性状值)×100%。当CRI小于100%时,其值越大,则说明该性状对冷水的反应越迟钝,反之亦然;而CRI大于100%时,其值越大,则说明该性状对冷水的反应越敏感,反之亦然。考种时每小区两边各去掉2株后,调查中间8个单株。以冷水胁迫下的结实率作为孕穗期耐冷性评价指标。

## 1.3 统计分析

以云南昆明自然低温、吉林公主岭冷水胁迫下调查的各农艺性状数据为基础数据,以国家(或省份)为单位,利用SAS8.0软件计算有关耐冷性状的均值,并对均值进行标准化处理,采用欧氏距离的类平均法(UPGMA)进行聚类分析,绘制树状聚类图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同来源粳稻选育品种的耐冷性状表型差异

**2.1.1 自然低温下不同来源粳稻选育品种的耐冷性状的表型变异** 株高 各省份或国家育成品种的株高有明显的差异,中国云南、保加利亚和俄罗斯的品种株高较高,分别为98.5cm、89.9cm和88.4cm;而黑龙江和河北的品种株高较低,分别为69.7cm和67.7cm,其余各省份或国家的品种株高变幅在70.1~80.3cm(表2)。年度间各品种株高的变异系数为1.0%~15.0%,其中澳大利亚品种的株高变异系数最大,为15.0%,山东和黑龙江品种的株高变异系数最小,分别为1.0%和2.0%。

穗长 供试品种穗长有明显的差异,中国云南和美国品种的穗长相对较长,分别为20.1cm和19.5cm;而安徽、河北和山东品种的穗长较短,分别为14.9cm、14.9cm和14.8cm。其余各省份或国家品种变幅在15.2~18.8cm。江苏品种穗长年度间的变异系数较小,为0.1%,而其余省份或国家品种年度间的变异系数变幅在0.2%~6.2%。

有效穗数 供试品种有效穗数差异较大,朝鲜、河南和江苏品种的有效穗数较多,为每穴9.6穗、9.3穗和9.1穗;而宁夏和俄罗斯品种相对较少,为每穴6.0穗和5.9穗,其余变幅在每穴6.6~8.9穗。辽宁品种有效穗数的年度间变异系数较小,为1.8%,而其余各省份或国家品种年度间变异系数的变幅在2.2%~50.6%。

穗粒数 供试品种穗粒数差异明显,云南、宁夏和辽宁品种的穗粒数较多,分别为170.3粒、161.4粒和160.8粒,而保加利亚品种的穗粒数最少,为73.8粒,其余省份或国家品种变幅在103.7~150.4粒。澳大利亚品种的穗粒数年度间变异系数较小,为3.0%,其余省份或国家品种年度间变异系数的变幅在3.3%~35.8%。

结实率 供试品种结实率差异明显,各省份或国家品种的结实率高低顺序为云南>日本>朝鲜>黑龙江>意大利>保加利亚>韩国>宁夏>北京>山东>吉林>河南>河北>法国>辽宁>俄罗斯>美国>安徽>江苏>澳大利亚。云南、日本和朝鲜品种的结实率相对较高,分别为65.8%、58.7%和51.5%;而澳大利亚品种的结实率较低为4.1%;其余省份或国家品种变幅在15.7%~49.7%。结实率年度间的变异系数变幅在1.0%~63.3%,其中俄罗斯品种年度间的变异系数较小,为1.0%。

表 2 自然低温下不同地理来源粳稻选育品种的耐冷性比较

Table 2 Comparison of traits associated with cold tolerance for improved *japonica* rice variety from difference places under natural low temperature

来源 Origin	株高 (cm) Plant height				穗长 (cm) Panicle length				有效穗数 Effective panicles				穗粒数 Grains per panicle				结实率 (%) Seed setting rate			
	年份 Year		变异系数 (%) CV	均值 Mean	年份 Year		变异系数 (%) CV	均值 Mean	年份 Year		变异系数 (%) CV	均值 Mean	年份 Year		变异系数 (%) CV	均值 Mean	年份 Year		变异系数 (%) CV	
	2007	2008			2007	2008			2007	2008			2007	2008			2007	2008		2007
黑龙江 Heilongjiang	69.7	70.7	68.7	2.0	17.4	17.7	17.1	2.4	7.6	6.2	8.9	25.7	104.7	108.5	100.8	5.2	49.7	62.5	36.8	36.6
吉林 Jilin	72.1	68.4	75.8	7.3	17.7	17.4	18.0	2.6	8.8	9.3	8.2	9.4	137.5	121.9	153.2	16.1	28.6	23.0	34.2	27.5
辽宁 Liaoning	73.1	70.5	75.7	5.0	16.0	15.4	16.7	5.9	6.6	6.6	6.5	1.8	160.8	139.6	181.9	18.6	24.6	23.6	25.6	5.8
宁夏 Ningxia	78.1	74.3	82.0	7.0	17.3	17.6	17.0	2.4	6.0	6.1	5.9	2.6	161.4	154.3	168.4	6.2	36.6	37.7	35.6	4.0
北京 Beijing	73.7	68.5	78.9	10.0	18.8	18.5	19.2	2.8	7.4	7.6	7.1	4.1	150.4	132.4	168.5	17.0	35.1	30.2	40.0	19.8
河北 Hebei	67.7	64.1	71.4	7.6	14.9	14.7	15.1	2.3	7.0	7.7	6.3	14.2	140.7	127.8	153.6	13.0	25.3	24.6	25.9	3.7
河南 Henan	73.7	72.6	74.8	2.1	16.1	16.8	15.3	6.2	9.3	8.9	9.7	5.4	116.7	120.7	112.7	4.9	27.2	34.3	20.1	37.0
山东 Shandong	72.5	72.0	73.1	1.0	14.8	15.2	14.5	3.3	6.9	7.9	6.0	19.4	133.0	137.3	128.6	4.6	33.6	27.8	39.4	24.3
安徽 Anhui	75.2	72.8	77.5	4.4	14.9	15.5	14.4	4.9	7.7	8.2	7.2	8.9	120.2	123.0	117.4	3.3	15.7	22.7	8.7	63.1
江苏 Jiangsu	70.9	67.1	74.7	7.5	15.2	15.2	15.2	0.1	9.1	8.6	9.5	6.6	123.1	116.4	129.8	7.7	15.7	22.7	8.7	63.3
云南 Yunnan	98.5	92.9	104.1	8.1	20.1	19.7	20.4	2.5	7.0	6.7	7.3	5.4	170.3	147.0	193.5	19.3	65.8	60.4	71.1	11.6
朝鲜 DPRK	80.3	77.6	83.1	4.8	17.4	17.2	17.5	1.1	9.6	7.4	11.8	32.1	116.9	109.5	124.3	9.0	51.5	53.7	49.4	5.8
韩国 Korea	70.1	66.0	74.2	8.3	17.4	17.3	17.4	0.5	8.9	7.7	10.0	18.4	119.8	104.1	135.5	18.6	41.8	44.9	38.7	10.5
日本 Japan	72.7	68.2	77.2	8.7	17.4	17.4	17.5	0.2	7.9	7.3	8.5	11.5	118.4	108.1	128.7	12.3	58.7	57.9	59.5	1.9
澳大利亚 Australia	70.9	63.4	78.4	15.0	18.7	18.3	19.1	3.3	7.9	7.0	8.7	15.4	129.6	96.8	162.4	35.8	4.1	3.9	4.4	8.6
俄罗斯 Russia	88.4	89.8	87.0	2.2	18.0	18.1	17.9	0.9	5.9	5.2	6.6	17.3	110.4	108.0	112.8	3.0	23.0	23.2	22.9	1.0
意大利 Italy	74.1	68.9	79.3	9.9	18.2	17.8	18.6	3.2	7.0	7.1	6.9	2.2	116.7	120.9	112.6	5.0	48.2	43.2	53.3	14.9
保加利亚 Bulgaria	89.9	86.5	93.3	5.4	17.5	17.4	17.6	0.7	6.6	6.0	7.3	13.1	73.8	75.6	71.9	3.5	43.8	44.6	42.9	2.6
法国 France	74.9	69.3	80.4	10.5	17.2	16.7	17.7	4.1	7.7	4.9	10.4	50.6	103.7	95.1	112.4	11.8	24.7	18.1	31.3	37.9
美国 American	77.4	74.4	80.5	5.6	19.5	19.0	20.0	3.6	7.0	5.9	8.2	23.3	127.5	121.0	134.0	7.2	16.6	16.1	17.1	4.4

**2.1.2 冷水胁迫下不同来源粳稻选育品种的耐冷性状的表型变异** 株高 与自然条件相比,冷水胁迫下各省份或国家品种的株高有所降低,且株高差异很明显。冷水胁迫下,俄罗斯、保加利亚和云南品种的株高较高,分别为 119.0cm、117.8cm 和 113.2cm;而吉林和辽宁品种株高较矮,分别为 89.2cm 和 85.6cm,其余各品种的株高变幅在 92.5 ~ 111.3cm。各省份或国家品种株高年度间的变异系数变幅在 1.5% ~ 15.2%。除法国和俄罗斯的品种外,其余各品种的株高 CRI 均小于 100%。其中,黑龙江和北京品种的 CRI 较高,为 97.4% 和 97.1%,对冷水反应比较迟钝,而河南品种相对较小,为 82.8%,对冷水的反应相对敏感,其余品种变幅在 86.9% ~ 96.4%。意大利品种的株高 CRI 年度间的变异系数最小,为 0.6%,其余品种变幅在 2.8% ~ 14.2%。正常种植和冷水胁迫下,山东、河北、安徽和江苏大部分粳稻选育品种都未抽穗,因此不包括于此表中(表 3)。

**有效穗数** 冷水胁迫下各省份或国家品种的有效穗数明显少于自然条件,且各品种间差异明显。冷水胁迫下朝鲜和俄罗斯品种的有效穗数较多,为 6.1 ~ 5.9 穗/穴,澳大利亚品种较少,为 3.8 穗/穴,其余省份或国家品种变幅在 3.9 ~ 5.8 穗/穴。各省份或国家品种年度间的变异系数变幅为 3.5% ~ 47.1%。各省份或国家品种有效穗数的 CRI 均小于 100%,其中俄罗斯品种的 CRI 较大,为 54.2%,对冷水的反应较迟钝,而宁夏和北京品种较小,为 31.7% 和 30.4%,对冷水反应较敏感,其余品种变幅在 31.8% ~ 42.6%。各省份或国家品种有效穗数 CRI 的年度间变异系数变幅为 0.6% ~ 55.0%,其中澳大利亚品种的最小,为 0.6%。

**穗粒数** 与自然条件相比,冷水胁迫下各省份或国家品种的穗粒数明显减少,且差异较大。冷水胁迫下,宁夏和云南品种的穗粒数较多,分别为 119.1 粒和 118.1 粒,河南品种最少,为 82.4 粒,其余各省份或国家品种的穗粒数变幅在 87.5 ~ 109.1 粒。各省份或国家品种穗粒数年度间的变异系数变幅在 2.7% ~ 33.9%。各省份或国家品种穗粒数的 CRI 均小于 100%,但差异较大。其中澳大利亚和美国品种的 CRI 较小,分别为 50.0% 和 55.2%,对冷水反应较为敏感,而日本和黑龙江品种的 CRI 较高,分别为 84.8% 和 82.9%,对冷水反应较迟钝。其余各省份或国家品种变幅在 58.6% ~ 81.0%。各省份或国家品种穗粒数 CRI 的年度间变异系数的变幅为 2.8% ~ 34.8%,其中辽宁品种 CRI 的年

度间变异系数最小,为 2.8%。

**结实率** 与自然条件相比,冷水胁迫下各省份或国家品种的结实率明显降低,且差异显著。各省份或国家品种结实率的高低顺序为云南 > 北京 > 日本 > 韩国 > 辽宁 > 河南 > 朝鲜 > 美国 > 保加利亚 > 意大利 > 澳大利亚 > 宁夏 > 黑龙江 > 法国 > 俄罗斯 > 吉林。云南、北京和日本品种的结实率相对较高,分别为 57.4%、47.9% 和 46.5%,而吉林和俄罗斯品种的结实率很低,分别为 9.3% 和 10.5%,其余省份或国家品种变幅在 14.0% ~ 46.5%。各省份或国家品种结实率年度间的变异系数变幅在 1.1% ~ 71.5%,其中北京品种年度间的变异系数较小,为 1.1%。除云南、河南和北京外,各省份或国家品种结实率的 CRI 较小,为 8.7% ~ 50.7%,说明冷水胁迫对结实率的影响很大。云南、河南和北京品种的 CRI 相对较大,分别为 83.3%、78.6% 和 71.1%,对冷水的反应相对迟钝,而意大利和吉林品种的 CRI 较小,分别为 8.7% 和 10.3%,对冷水的反应较为敏感。各省份或国家品种结实率 CRI 的年度间变异系数变幅在 1.9% ~ 63.2%。其中朝鲜品种 CRI 的年度间变异系数最小,均为 1.9%。

## 2.2 不同来源粳稻选育品种的聚类分析

**2.2.1 自然低温下不同来源粳稻选育品种的聚类分析** 以自然低温下鉴定的耐冷性状的均值为基础数据,对各省份或国家品种进行聚类分析(图 1)。以欧氏距离 1.2 为阈值,可将 20 个省份或国家品种分为两大类群。其中,云南品种的耐冷性明显区别于其他,单独归于第 I 类群,而其余省份或国家的品种归于第 II 类群。在欧氏距离 0.8 的位置,第 II 类群又可分为逐级聚合的 4 个小类群。第 i 类群包括黑龙江、吉林、日本、朝鲜、韩国、河南、江苏、意大利和法国的品种;第 ii 类群包括北京、澳大利亚和美国的品种;第 iii 类群包括辽宁、宁夏、河北、山东和安徽的品种;俄罗斯和保加利亚的品种则归为第 iv 类群。

在自然低温条件下,从各省份或国家品种的耐冷表现上来看,第 I 类群和第 i 小类群内大多数品种的耐冷性明显强于其他类群的品种。从品种的地理分布上来看,第 i、第 iii、第 iv 小类群和第 I 大类群内各省份或国家的地理位置或纬度相对较近,气候条件较相似,而归于第 ii 小类群的各省份或国家地理位置相隔较远,气候条件有较大差异。由此可见,自然低温下各省份或国家品种的聚类结果与品种的地理分布和品种的耐冷性都有着较密切的联系。

表3 自然条件和冷水胁迫下不同地理来源粳稻选育品种的主要农艺性状的差异

Table 3 Difference of main agronomic traits among improved japonica rice variety from different countries or provinces under natural condition and cold water stress

来源 Origin	性状	冷水胁迫 Cold water					冷水反应指数(%)CRI					冷水胁迫 Cold water					冷水反应指数(%)CRI					
		均值 Mean	年份 Year	2007	2008	变异系数(%) CV	均值 Mean	年份 Year	2007	2008	变异系数(%) CV	性状	均值 Mean	年份 Year	2007	2008	变异系数(%) CV	均值 Mean	年份 Year	2007	2008	变异系数(%) CV
黑龙江 Heilongjiang	株高 (cm)	92.5	82.5	102.4	15.2	97.4	90.3	104.6	10.3	有效穗	5.8	7.1	4.6	30.8	39.4	54.7	24.1	55.0				
吉林 Jilin		89.2	81.2	97.3	12.8	86.9	78.2	95.6	14.2	Effective	5.6	6.5	4.7	22.4	38.0	49.5	26.5	42.8				
辽宁 Liaoning	Plant height	85.6	83.8	87.3	2.9	90.4	87.5	93.2	4.4	panicles	4.0	3.9	4.1	4.8	31.8	34.8	28.9	13.3				
宁夏 Ningxia		97.1	90.8	103.4	9.2	88.4	82.7	94.1	9.1		4.4	4.8	4.0	11.5	31.7	38.4	25.0	29.9				
北京 Beijing		99.2	96.7	101.8	3.6	97.1	92.8	101.4	6.2		4.6	4.8	4.4	5.2	30.4	34.2	26.5	17.7				
河南 Henan		96.2	94.2	98.1	2.9	82.8	84.4	81.1	2.8		4.7	4.2	5.3	15.8	34.0	35.7	32.3	6.9				
云南 Yunnan		113.2	109.4	117.0	4.8	92.8	88.8	96.8	6.1		3.9	3.8	4.0	3.5	33.3	37.4	29.2	17.3				
朝鲜 DPRK		104.7	96.5	112.9	11.1	95.3	88.8	101.7	9.6		6.1	6.5	5.8	7.5	37.5	44.4	30.7	25.8				
韩国 Korea		94.3	88.8	99.7	8.2	92.3	86.1	98.5	9.6		5.2	5.0	5.4	6.2	37.9	39.0	36.7	4.4				
日本 Japan		93.5	89.7	97.2	5.7	95.6	90.2	101.0	8.0		5.8	6.1	5.4	8.5	35.9	42.3	29.5	25.2				
澳大利亚 Australia		100.1	97.9	102.3	3.1	96.4	91.4	101.5	7.5		3.8	4.0	3.6	6.7	38.2	38.4	38.1	0.6				
俄罗斯 Russia		119.0	106.4	131.6	14.9	101.6	93.9	109.3	10.7		5.9	7.8	3.9	47.1	54.2	72.6	35.7	48.1				
意大利 Italy		93.3	92.3	94.2	1.5	91.9	91.5	92.3	0.6		4.7	5.4	4.0	20.8	42.3	54.7	29.8	41.6				
保加利亚 Bulgaria		117.8	109.8	125.9	9.6	92.6	87.3	98.0	8.2		4.6	5.1	4.1	14.4	35.0	39.8	30.1	19.6				
法国 France		106.1	101.0	111.3	6.8	101.8	98.2	105.5	5.1		5.3	7.0	3.5	47.1	42.6	56.7	28.5	46.8				
美国 American		111.3	114.0	108.5	3.5	95.7	97.6	93.7	2.9		4.3	5.0	3.6	23.9	37.6	46.8	28.4	34.6				
黑龙江 Heilongjiang	穗粒数	87.5	95.6	79.4	13.2	82.9	86.2	79.5	5.7	结实率 (%)	14.4	13.9	14.9	5.0	15.0	14.6	15.4	4.0				
吉林 Jilin	Grans per panicle	98.0	113.2	82.7	22.1	72.2	76.8	67.7	8.9		9.3	13.3	5.4	59.7	10.3	14.9	5.7	63.2				
辽宁 Liaoning		99.4	103.1	95.8	5.1	67.3	66.0	68.7	2.8	Seed setting rate	34.9	43.9	26.0	36.2	41.5	54.5	28.5	44.3				
宁夏 Ningxia		119.1	121.4	116.8	2.7	68.4	63.9	72.9	9.3		17.4	22.9	12.0	44.3	21.6	29.9	13.4	54.0				
北京 Beijing		99.8	111.2	88.4	16.1	75.0	77.2	72.7	4.2		47.9	48.3	47.5	1.1	71.1	66.3	75.8	9.5				
河南 Hebei		82.4	102.2	62.7	33.9	59.8	74.4	45.1	34.8		34.7	37.5	31.9	11.5	78.6	-	78.6	-				
云南 Yunnan		118.1	131.1	105.1	15.6	73.4	71.8	75.0	3.1		57.4	56.8	57.9	1.3	83.3	84.5	82.0	2.1				
朝鲜 DPRK		94.6	102.5	86.8	11.7	80.5	82.4	78.5	3.4		32.2	31.7	32.6	2.0	36.0	36.5	35.5	1.9				
韩国 Korea		93.1	105.9	80.4	19.3	81.0	88.9	73.2	13.7		43.7	48.5	38.8	15.7	36.9	42.5	31.3	21.4				
日本 Japan		90.8	102.5	79.2	18.1	84.8	87.7	81.9	4.9		46.5	50.5	42.6	12.1	50.7	56.8	44.7	16.9				
澳大利亚 Australia		100.8	121.4	80.3	28.8	50.0	-	50.0	-		17.5	19.4	15.6	15.0	45.7	-	45.7	-				
俄罗斯 Russia		99.7	106.8	92.7	10.0	70.0	72.4	67.5	5.0		10.5	10.3	10.7	2.7	12.8	13.4	12.2	6.5				
意大利 Italy		95.5	108.1	82.9	18.6	58.6	-	58.6	-		19.7	29.7	9.7	71.5	8.7	-	8.7	-				
保加利亚 Bulgaria		87.6	97.2	78.0	15.4	71.2	73.7	68.6	5.1		22.1	21.0	23.2	6.8	21.0	11.6	30.4	63.2				
法国 France		92.7	99.8	85.6	10.9	79.7	85.3	74.2	9.8		14.0	18.3	9.7	43.3	17.6	24.4	10.7	55.2				
美国 American		109.1	124.6	93.6	20.1	55.2	59.9	50.4	12.1		30.3	34.1	26.5	17.8	30.9	21.8	40.1	41.8				

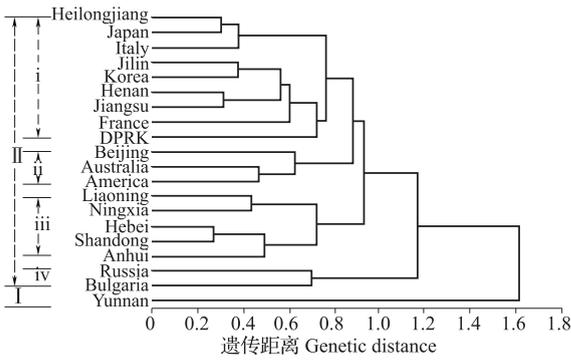


图1 自然低温下不同地理来源粳稻选育品种的UPGMA聚类图

Fig. 1 UPGMA clustering figure of improved japonica rice varieties from different countries or provinces under natural low temperature

**2.2.2 自然条件和冷水胁迫下不同来源粳稻选育品种的聚类分析** 以自然条件和冷水胁迫下鉴定的农艺性状与耐冷性状的均值为基础数据,对各省份或国家品种进行聚类分析。在自然条件下,以欧氏距离1.0为阈值,可将16个省份或国家品种分为两大类群(图2)。其中,黑龙江、吉林、辽宁、日本、朝鲜、韩国、北京、意大利和法国的品种聚于第I大类群,其余品种聚为第II大类群。以欧氏距离0.75为阈值,可将第I类群分为2个逐级聚合的小类群。第i类群包括辽宁、韩国、北京、意大利和法国,第ii类群包括黑龙江、吉林、日本和朝鲜的品种;第II类群分为3个逐级聚合的小类群,第i类群包括河南、澳大利亚和美国的品种,第ii类群包括云南、保加利亚和俄罗斯的品种,宁夏的品种单独聚成第iii小类群。从各省份或国家品种的结实率差异来看,第I类群的第i小类群中各品种的结实率均高于其他类群,表现出了较强的孕穗期耐冷性和相似的遗传背景。

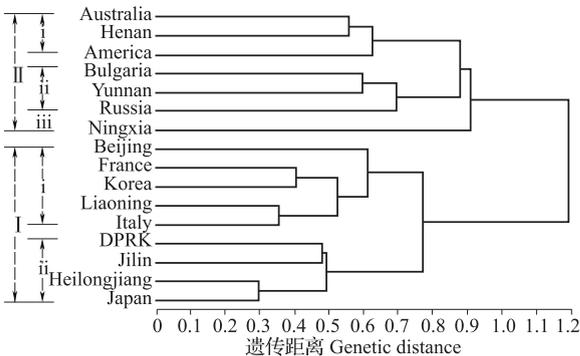


图2 自然条件下不同地理来源粳稻选育品种的UPGMA聚类图

Fig. 2 UPGMA clustering figure of improved japonica rice varieties from different countries or provinces under natural condition

在冷水胁迫下,以欧氏距离1.2为阈值,可将16个省份或国家的品种聚为两大类群(图3)。其中,来源于云南品种表现出了较强的孕穗期耐冷性,独自归为第I类群,而其余品种归为第II类群。在欧氏距离0.9的位置,第II类群又可分为3个逐级聚合的小类群,第i类群包括黑龙江、吉林、日本、朝鲜、韩国、北京、河南和法国的品种;第ii类群包括辽宁、宁夏、澳大利亚、意大利和美国的品种;俄罗斯和保加利亚的品种归为第iii类群。从各省份或国家品种的结实率差异及对冷水的反应来看,第I和第i类群内各品种的结实率相对较高,且冷水反应均较迟钝,第ii和第iii类群内各品种结实率相对较低,且冷水反应较敏感。说明各类群内的品种间耐冷性差异较小且遗传背景较为相似。

比较两种条件下的聚类结果可知,除个别省份或国家外,冷水胁迫下的聚类结果与自然条件下较为一致,纬度相近或海拔相似的省份或国家品种大都聚为同一类群,表现出了相似的孕穗期耐冷性和耐冷遗传背景。由此可知,无论是在自然条件和冷水胁迫下,其聚类结果均与品种来源地的地理位置和气候相似程度有关,且在冷水胁迫下这种关系更为密切。

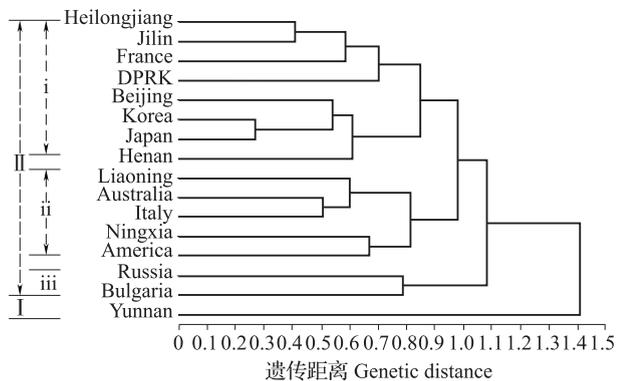


图3 冷水胁迫下不同地理来源粳稻选育品种的UPGMA聚类图

Fig. 3 UPGMA clustering figure of improved japonica rice varieties from different countries or provinces under cold water stress

### 3 讨论

#### 3.1 不同来源粳稻选育品种的耐冷性差异

刘昌文等<sup>[16]</sup>研究表明,不同省份或国家间粳稻品种的耐冷性状有较大差异。杨志奇等<sup>[17]</sup>研究表明,在冷水胁迫下,除个别省份外,纬度相对较高的

粳稻地方品种的耐冷性均高于纬度相对较低的品种。Zeng 等<sup>[18]</sup>研究认为,云南地方稻种经百年乃至千年的冷驯化,孕穗开花期耐冷性种质数量居全国之首,且耐冷性普遍强于日本品种。张建华等<sup>[19]</sup>研究表明,粳稻耐冷性与其生态适应性密切相关。本研究表明,在自然低温和冷水胁迫下各省份或国家粳稻选育品种的孕穗期耐冷性状及其主要农艺性状有明显的差异。在自然低温下,云南品种表现其特有的生态适应性,株高、穗长、穗粒数和结实率的表型值均较大,表现为较强的孕穗期耐冷性。日本和朝鲜品种的结实率相对较高,同样表现出较强的耐冷性。比较中国各省份品种间的耐冷性差异,从总体上来看,除个别省份外,海拔或纬度相对较高的云南、黑龙江和宁夏等地品种的孕穗期耐冷性(结实率)较强,而纬度相对较低的安徽和江苏品种的耐冷性较弱。在冷水胁迫下,海拔相对较高的云南粳稻品种的结实率最高,且其 CRI 值最大,冷水反应较迟钝,表现出最强的孕穗期耐冷性。来自日本和北京的品种结实率相对较高,也表现出较强的孕穗期耐冷性。比较我国各省份品种间的耐冷性差异,品种的耐冷性与其来源地的关系并不十分密切,没有呈现出一定的规律性。在自然低温和冷水胁迫下,来自云南、日本、韩国、朝鲜和北京的品种的结实率较高,均表现出较强的孕穗期耐冷性。在今后的耐冷种质筛选中,要加强上述种质的鉴定评价,同时要更加重视云南品种在水稻耐冷育种中的应用。

水稻在低温下的反应是一个涉及到信号转导,基因调控的复杂过程<sup>[20-28]</sup>,其耐冷性遗传也较复杂。由于选用的材料和评价指标不同,鉴定方法和鉴定设施存在局限,参试材料的耐冷性往往得不到很好的比较,导致不同学者得出的结论也不尽相同。自然低温和冷水胁迫鉴定在水稻孕穗期耐冷性鉴定中经常被采用。其中,自然低温鉴定较适合于大量资源或育种材料的耐冷性鉴定筛选。从结实率的鉴定结果来看,海拔或纬度相对较高的云南、黑龙江和宁夏品种的结实率较高,而纬度相对较低的安徽和江苏品种的结实率较低,这与品种本身的耐冷性有关外,有可能是各地品种对高海拔和高纬度的生态适应性不同所致。同时,由于自然低温所发生的时期和强度在年度间有较大差异,因此有必要开展多年多点重复鉴定,以保证耐冷鉴定结果的可靠性。而冷水胁迫鉴定可通过人工模拟控制冷水温度,因此其鉴定结果较自然低温鉴定可能更可靠,但由于本试验在冷水胁迫处理时各品种所处的生育时期有

较大差异,黑龙江、吉林等生育期相对短的品种结实率较低,而云南、北京等生育期相对长的品种结实率较高。这与品种本身的耐冷性有关外,有可能是冷水鉴定方法的局限性所致。生育期短的品种有可能在减数分裂期正赶上冷水胁迫,其受害程度较重,而生育期长的品种减数分裂期有可能避开或部分遭遇冷水胁迫,其受害程度较轻,因此也存在一些弊端。在今后的耐冷鉴定工作中,要结合供试材料原产地的地理位置、生态气候类型、水稻生长发育时期和形态特性等诸多因素,综合考虑,根据需要选择最适宜的鉴定评价方法,以准确有效地鉴别水稻种质资源的耐冷性。

### 3.2 自然低温与冷水胁迫下聚类结果比较

张媛媛等<sup>[29]</sup>对中国 14 个省份或地区间籼稻地方品种的聚类分析指出,地理位置相邻的省份或地区间品种的亲缘关系较近,而地理位置相隔较远的省份或地区间品种的亲缘关系较远。束爱萍等<sup>[30]</sup>研究表明,纬度和地理位置相近的国家间粳稻品种的遗传相似系数较大,基本聚在同一个类群,而纬度差异较大,地理位置较远的国家间粳稻品种的遗传相似系数较小,聚在不同类群。张立娜等<sup>[31]</sup>研究表明,各省份或地区粳型早稻地方品种间遗传相似性与地理位置密切相关,而籼型早稻地方品种间遗传相似性与地理位置未见相关。

本研究表明,不同鉴定条件下聚类结果既有一致性又有互补性。在自然低温和冷水胁迫下,来源于云南的品种均单独聚为一大类群,其耐冷性明显区别于其他省份或国家品种,表现其独特的生态适应性和较强的孕穗期耐冷性;而在公主岭自然条件下,云南与俄罗斯、保加利亚等省份或国家的粳稻品种聚为一个类群,其主要农艺性状的表型值未表现出特殊性。在自然低温下,地理位置相近的意大利和法国的品种聚在同一小类群,表现较近的相似性;而冷水胁迫下,意大利和法国的品种分别聚于不同小类群,表现出一定的耐冷性差异。在自然低温或冷水胁迫下,地理位置较相近,气候条件较相似的日本、韩国和朝鲜的粳稻品种均聚为同一小类群,其农艺性状的表型特征和 CRI 值都表现出了一定的相似性,且耐冷性遗传背景也较相似。总之,各省份或国家粳稻品种的聚类结果与粳稻品种的地理来源均有一定的相关性,但与自然条件相比,冷水胁迫下粳稻品种的聚类结果与品种地理来源的相关性比自然条件下更为密切,能较好地反映品种的地理来源和耐冷性,从而更好地地区分不同地理来源品种的遗传

差异性,这与前人<sup>[16]</sup>的研究结果相一致。

### 参考文献

- [1] Shepl R B, Witcombe J R. Inheritance of tolerance to chilling stress in rice during germination and plumule greening[J]. *Crop Sci*, 1998, 38(3):660-665
- [2] 全成哲,金成海,金京花,等. 延边地区水稻冷害及其防御技术[J]. *延边大学学报*, 2006, 28(3):172-176
- [3] 马树庆,王琪,王连敏,等. 水稻开花期不育评估模式的试验研究[J]. *气象学报*, 2000, 58(S):954-960
- [4] 韩龙植,张三元. 水稻耐冷性鉴定评价方法[J]. *植物遗传资源学报*, 2004, 5(1):75-80
- [5] 戴陆园,叶昌荣,熊建华,等. 稻耐冷性鉴定评价方法[J]. *中国水稻科学*, 1999, 12(1):62
- [6] 戴陆园,刘屋国男,叶昌荣,等. 水稻耐冷性研究 II: 云南稻种资源耐冷性鉴定[J]. *西南农业学报*, 2002, 15(3):47-52
- [7] 戴陆园,林兴华,叶昌荣,等. 水稻耐冷性研究 III: 特定颖花结实率作为耐冷性指标的分子研究依据[J]. *作物学报*, 2003, 29(5):708-714
- [8] Satake T, Hayase H. Male sterility caused by cooling treatment at the young microspore stage in rice plants. V: Estimations of pollen developmental stage and the most sensitive stage to coolness[J]. *Proc Crop Sci Soc Japan*, 1970, 39:468-473
- [9] Satake T, Hayase H. Male sterility caused by cooling treatment at the young microspore stage in rice plants. X: A secondary sensitive stage at the beginning of meiosis[J]. *Proc Crop Sci Soc Japan*, 1974, 43(1):36-39
- [10] Nishiyama I. Male sterility caused by cooling treatment at the young microspore stage in rice plants. XXIII. Another length, pollen number and the difference in susceptibility to coolness among spikelets on the panicle[J]. *Japan J Crop Sci*, 1982, 51(4):462-469
- [11] 王永锐. 水稻生理育种[M]. 北京:科学技术文献出版社, 1995:365-422
- [12] 曾亚文,李绅崇,普晓英,等. 云南稻核心种质孕穗期耐冷性状间的相关性与生态差异[J]. *中国水稻科学*, 2006, 20(30):265-271
- [13] Satio K, Miura K, Nagano K, et al. Identification of two closely linked quantitative trait loci for cold tolerance on chromosome 4 of rice and their association with anther length[J]. *Theor Appl Genet*, 2001, 103:862-868
- [14] Tanno H, Kiuchi H, Hirayama Y, et al. Development of a simple testing method for cool weather tolerance at the flowering stage of rice using an air-conditioned room[J]. *Japan J Crop Sci*, 2000, 69(1):43-48
- [15] Xu C C, Jeon Y A, Lee C H. Relative contribution of photochemical and non-photochemical routes to excitation energy dissipation in rice and barley illuminated at a chilling temperature[J]. *Physical Plant*, 1999, 107:447-453
- [16] 刘昌文,郭桂珍,杨春刚,等. 冷水胁迫下不同地理来源粳稻品种的耐冷性差异[J]. *植物遗传资源学报*, 2008, 9(1):25-31
- [17] 杨志奇,杨春刚,汤翠凤,等. 中国粳稻地方品种孕穗期耐冷性评价及聚类分析[J]. *植物遗传资源学报*, 2008, 9(4):485-491
- [18] Zeng Y W, Shen S Q, Xu F R, et al. Ecological diversity of cold-tolerant rice in yunan China[J]. *Plant Gene Res Newal*, 1999, 117:43-47
- [19] 张建华,廖新华,杨晓洪,等. 粳稻育种材料的耐冷性评价[J]. *云南农业科技*, 1998(4):3-7
- [20] 乔永利,韩龙植,安永平,等. 水稻芽期耐冷性 QTL 的分子定位[J]. *中国农业科学*, 2005, 38(2):217-221
- [21] Han L Z, Qiao Y L, Zhang S Y, et al. Identification of quantitative trait loci for cold response of seedling vigor traits in rice[J]. *J Genet Genom*, 2007, 34(3):239-246
- [22] Dai L Y, Lin X Y, Ye C R, et al. Identification of quantitative trait loci controlling cold tolerance at the reproductive stage in Yunnan landrace of rice, Kunmingxiaobaigu[J]. *Breed Sci*, 2004, 154(3):253-258
- [23] 刘凤霞,孙传清,谭禄宾,等. 江西东乡野生稻孕穗开花期耐冷基因定位[J]. *科学通报*, 2003, 48(17):1864-1867
- [24] Fujino K, Sekiguchi H, Matsuda Y, et al. Molecular identification of a major quantitative trait locus, *qLTG3-1*, controlling low-temperature germinability in rice[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2008, 105:12623-12628
- [25] Saito K, Hayano-Saito Y, Maruyama-Funatsuki W, et al. Physical mapping and putative candidate gene identification of a quantitative trait locus *Ct1* for cold tolerance at the booting stage of rice[J]. *Theor Appl Genet*, 2004, 109:515-522
- [26] Andaya V C, Mackill D J. QTLs conferring cold tolerance at the booting stage of rice using recombinant inbred lines from a *japonica* × *indica* cross[J]. *Theor Appl Genet*, 2003, 106:1084-1090
- [27] 夏瑞祥,肖宁,洪义欢,等. 东乡野生稻苗期耐冷性的 QTL 定位[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(3):443-451
- [28] 刘晓,巩固,董彦君,等. 一个水稻苗期耐冷性的主效 QTL 精细定位研究[J]. *中国农学通报*, 2009, 25(22):62-66
- [29] 张媛媛,曹桂兰,韩龙植. 中国不同地理来源粳稻地方品种的亲缘关系研究[J]. *作物学报*, 2007, 33(5):757-762
- [30] 束爱萍,金钟焕,张三元,等. 世界不同地理来源粳稻品种的遗传相似性研究[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(7):1876-1886
- [31] 张立娜,曹桂兰,韩龙植. 中国不同地理来源早稻地方品种的遗传相似性研究[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(17):3481-3488