

广适性光温敏不育系 Y58S 幼穗分化期耐冷性表现及生理机制

柏斌¹, 吴俊¹, 庄文¹, 姚栋萍¹, 李莺歌², 邓启云^{1,2}

(¹湖南杂交水稻研究中心/杂交水稻国家重点实验室,长沙 410125;²湖南袁创超级稻技术有限公司,长沙 410100)

摘要:为了阐明水稻光温敏不育系幼穗分化期耐冷的形态生理机制,以耐冷不育系 Y58S 和 4 个生产上常用光温敏不育系为试验材料,研究了低温胁迫(17.5 °C, 10 d)下结实率、穗部形态、株高、光合特性以及抗氧化酶系统等的变化。结果表明,低温胁迫下 Y58S 的幼穗分化期耐冷性在 5 个不育系中最强,与敏感的 C815S 和株 1S 相比, Y58S 表现为株高和穗长降低幅度较小,保持较高结实率;光合作用受低温影响不显著, SPAD 值、光合速率等光合指标无显著变化; SOD、POD 活性降低幅度较小, MDA 含量、相对电导率增幅较小。

关键词:水稻;光温敏不育系;低温胁迫;幼穗分化期;生理

Studies on Cold Tolerance of Widely Adaptable PTGMS Line Y58S and Its Physiological Mechanism at the Booting Stage

BAI Bin¹, WU Jun¹, ZHUANG Wen¹, YAO Dong-ping¹, LI Ying-ge², DENG Qi-yun^{1,2}

(¹ State Key Laboratory of Hybrid Rice/Hunan Hybrid Rice Research Center, Changsha 410125;

² Bio-Rice(Hunan) Co. Ltd., Changsha 410100)

Abstract: In order to clarify morphological and physiological mechanisms of cold tolerance at the booting stage for rice photo thermo sensitive genic male sterile (PTGMS) lines, by using the cold tolerant PTGMS line Y58S and four other key PTGMS lines widely used in the production, the effects of low temperature stress (17.5 °C, 10 d) on seed setting rate, panicle traits, plant height, photosynthetic characteristics and antioxidant enzymes were studied in this experiment. The results showed that Y58S had the highest cold tolerance among the five PTGMS lines under the long-term cold stress. Comparing to the cold sensitive PTGMS lines C815S and Zhu1S, morphological and physiological mechanisms of cold tolerant line Y58S were as follows: higher seed setting rate and lower cold injury index; panicle length and plant height were reduced to a lesser extent; photosynthesis was effected not significantly by cold stress, the SPAD value and Pn value didn't change significantly; SOD and POD activity were slighter decreased, MDA content and relative conductivity were less increased.

Key words: rice; PTGMS lines; cold stress; booting stage; physiology

两系杂交水稻具有配组自由、选育优良组合机率高等优势,近年来在水稻生产上发展迅速,在我国多个省份的种植面积已经超过了三系杂交水稻^[1]。水稻光温敏不育系是两系法育种的基础,育性转换

起点温度较低可降低两系杂交稻在制种时因不育系育性波动而导致的风险,因而是实用型光温敏不育系选育的最关键技术指标^[2]。但是,不育系如果在育性敏感期遇到温度低于其生理不育下限温度,会

收稿日期:2017-04-27 修回日期:2017-02-03 网络出版日期:2017-06-13

URL: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4996.S.20170613.0912.030.html>

基金项目:湖南省科技计划项目(2016JC2025)

第一作者主要从事水稻遗传育种方向研究。E-mail: baibin87@163.com

通信作者:邓启云,主要从事水稻遗传育种和杂种优势利用方向研究。E-mail: dqy100@163.com

出现生殖障碍,进而降低繁殖产量甚至绝收^[3]。因此,育种上要选育起点温度低和生理不育下限温度也低的“双低”不育系,这样既能保证制种的安全性,又能确保不育系繁殖的产量。当前的两系育种中,育种工作者主要考虑选育起点温度低的不育系,而往往忽视生理不育下限温度。前人对水稻幼穗分化期耐冷性的研究多采用结实率作为评价指标,系统性研究受低温胁迫后形态生理特征变化的报道较少。研究低温对光温敏不育系形态生理性状的影响,可以丰富幼穗分化期耐冷性的评价指标,也有助于认识水稻幼穗分化期低温胁迫下的形态生理变化特征。

光温敏不育系 Y58S 具有不育起点温度低、株叶形态好、开花习性好、异交结实率高、抗病、抗逆性强、一般配合力高、米质优良等优点,尤其是不育起点温度低且生理不育下限温度也较低,既有利于安全制种,又有利于繁殖高产^[4]。截至 2015 年,以 Y58S 配组的两系杂交稻组合近 90 个,其中 17 个通过国家审定,已成为目前配组审定最多的两系不育系。本研究以具有双低不育特性的 Y58S 为研究对象,比较了当前生产上大面积应用的 5 个光温敏不育系在幼穗分化 V 时期(不育系的育性敏感期)受低温胁迫后的形态生理特征变化,分析各光温敏不育系幼穗分化期的耐冷性差异,从形态、光合作用、酶活性等特征上探究光温敏不育系幼穗分化期耐冷的形态生理机制,为耐冷不育系的选育和生产应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料与种植方法

供试材料为生产上广泛应用的 5 个不育系:Y58S、培矮 64S(简称 P64S)、广占 63S(简称 GZ63S)、C815S、株 1S(简称 Z1S),由湖南杂交水稻研究中心提供。

在 2013 年预备试验的基础上,2014 年在湖南杂交水稻研究中心试验田进行大田试验。5 月 24 日开始播种,每间隔 10 d 播种一期,共播种 4 期。每期单个材料设 3 个重复,完全随机设计,单个小区种植 4 行,栽插行株距为 26.7 cm × 20.0 cm,每穴插单苗。试验期间灌溉和病虫害防治均参考湖南地区中稻常规管理办法。

1.2 试验处理

按照丁颖^[5]的水稻发育期分类法进行取材,待不育系生长至幼穗分化 V 时期(该时期水稻主茎的叶龄余数约为 1.3 ~ 0.8,本试验选取处在叶龄余数 0.9 时期的单株),将生长一致的各材料转移至盆钵

(每个盆钵放入 2 个单株)进行盆栽试验处理。再将盆钵中的各不育系均分 2 份,分别作为对照处理组(control)和低温处理组(LT, low temperature)。低温处理组移至人工气候室内,日均温 17.5 °C 处理 10 d。人工气候室的光照和湿度条件尽量与外界环境相近,光照长度 14 h,光强度控制在 10000 ~ 20000 Lx,湿度控制在 65% 以上。对照组材料移至 21 °C 冷灌池内冷水处理 10 d,冷水取自地下 15 m 深度的井水,水温可保持在 21 °C;灌水深度为 21 cm,确保温敏期的幼穗部位充分感受低温。由于这 5 个不育系的不育起点温度均高于 21 °C,因此,对照组也可称为可育温度处理组(FT, fertile temperature)。处理结束后,将所有单株从盆钵取出再移至大田自然条件下生长至成熟。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 结实率、株高和穗部形态 水稻植株在田间自然生长成熟后,单个不育系各处理间分别选取 6 个生长相对一致的单株,考察计算两种温度处理后植株的结实率、株高、穗长、穗颈长(即穗基部节至剑叶节间的距离,有卡颈现象的记录为负值)、穗下节长及穗的 1 ~ 2 节长(即穗基部的第 1 节至第 2 节的长度)共 6 个性状。用受低温影响的结实率变化值与对照结实率的比值计算冷害指数(CJI, cold injury index)。

1.3.2 花药长及其体积 待水稻在大田自然生长至抽穗期,单个不育系各处理分别取 3 个单株的主茎穗,每一个穗上选取 3 个生长时期相对一致的颖花,即选择穗最上端的 3 个一次枝梗上的第 3 朵颖花。这些颖花属于特定位颖花,该类颖花生长发育较为一致^[6]。利用游标卡尺在体视显微镜下测量,计算每个颖花上的花药平均长度(L)和宽度(W),用公式 $V = 0.34LW^2$ 计算花药的体积^[7]。

1.3.3 光合作用 在各不育系材料处理的第 10 天,用 SPAD502 测定倒二叶的 SPAD 值,作为叶绿素相对含量值,单株样品重复测 3 个点,3 点的平均值作为该单株的 SPAD 值。各不育系的每个处理测定 6 个单株。使用 LI-COR(LI-6400)便携式光合测定仪测定倒二叶的光合速率,测定时间统一为处理后移至大田 5 d 时的 10:00 ~ 12:00,单株样品重复测 5 个点,计算 5 个点的平均值,单个不育系各处理间分别选取 3 个单株测定。

1.3.4 抗氧化酶、膜系统 处理的第 10 天,选取植株生长一致的倒二叶叶片,参照李合生^[8]的方法,分别用氮蓝四唑法和愈创木酚法测定 SOD 和 POD 活

性。用硫代巴比妥酸比色法试剂盒测定 MDA 含量 (购自碧云天生物技术研究,产品编号:S0131)。单个不育系各处理间分别选取 3 个单株测定。

使用 METTLER TOLEDO FE30 型电导率仪测定相对电导率^[9],计算方法:相对电导率 = 煮沸前电导率(s/cm) / 煮沸后电导率(s/cm)。

1.4 数据整理与分析

试验数据采用 Excel 和 SigmaPlot 12.5 软件进行数据整理和方差分析。

2 结果与分析

2.1 水稻幼穗分化期低温对结实率的影响

表 1 所示为 17.5 °C 处理 10 d 后的结实率和冷

害指数。从表中可以看出,5 个不育系在对照处理的条件下均正常结实,结实率变幅为 72.72% ~ 79.77%,品种间差异较小。而低温处理与对照处理相比,5 个不育系的结实率均显著降低,并且品种间结实率降低幅度差异较大。Z1S 的结实率甚至不到 10%;相比之下,Y58S 的结实率仍达到 37%。与对照相比,下降幅度最大的是 C815S 和 Z1S,其次是 GZ63S 和 P64S,Y58S 的下降幅度最小。5 个不育系受到低温影响的冷害指数均达到 0.5 以上。相比之下,Y58S 的冷害指数(0.52)在 5 个不育系中最小,GZ63S、P64S 次之,C815S、Z1S 最大。因此,5 个不育系中 Y58S 的耐冷性最强,C815S 和 Z1S 的耐冷性最差。

表 1 低温处理下结实率和冷害指数

Table 1 Difference in seed setting rate and cold injury indexes of the two-line sterile lines under control and low temperature treatment

品种 Variety	低温结实率(%) Seed setting rate under LT treatment	对照结实率(%) Seed setting rate under FT treatment	冷害指数 Cold injury index
Y58S	37.11 ± 1.31b	77.31 ± 3.08a	0.52
GZ63S	23.37 ± 1.18b	79.27 ± 2.67a	0.71
P64S	20.96 ± 2.11b	75.22 ± 3.48a	0.72
C815S	11.58 ± 0.55b	79.77 ± 2.90a	0.85
Z1S	9.79 ± 0.56b	72.72 ± 1.27a	0.87

不同的小写字母表示两者达到 0.05 显著水平,下同

Values within rows with the same letter are not significantly different at $P < 0.05$ probability level by a Tukey test. The same as below

2.2 水稻幼穗分化期低温对穗部形态和株高的影响

低温胁迫显著降低了各不育系的穗下节长、穗

长和株高(表 2)。低温处理后,Y58S、P64S、Z1S 的穗下节长分别降低到 18.13 cm、19.09 cm、19.47 cm,与对照相比,降低幅度分别为 20.6%、19.9%、

表 2 低温处理下水稻穗部形态和株高的差异

Table 2 Difference in panicle morphology and plant height of the two-line sterile lines under control and low temperature treatment

品种 Variety	处理方式 Treatment	穗颈长(cm) Peduncle length	穗下节长(cm) Node length under panicle	穗长(cm) Panicle length	1~2 节长(cm) First to second nod length	株高(cm) Plant height
Y58S	对照 FT	-5.77 ± 0.95a	22.84 ± 2.27a	23.85 ± 1.11a	0.85 ± 0.44a	76.25 ± 3.10a
	低温 LT	-6.21 ± 1.38a	18.13 ± 1.80b	22.05 ± 1.08b	0.65 ± 0.37a	68.54 ± 1.35b
GZ63S	对照 FT	-3.39 ± 1.03a	26.86 ± 1.85a	21.24 ± 0.61a	1.41 ± 0.87a	76.00 ± 3.45a
	低温 LT	-5.21 ± 1.77a	17.40 ± 1.41b	19.13 ± 0.92b	0.90 ± 0.32a	65.44 ± 3.61b
P64S	对照 FT	-5.53 ± 2.82a	26.32 ± 4.29a	20.64 ± 0.61a	0.28 ± 0.17a	75.68 ± 5.33a
	低温 LT	-7.00 ± 1.19a	19.09 ± 4.87b	17.87 ± 1.20b	0.23 ± 0.07a	63.45 ± 3.19b
C815S	对照 FT	-2.45 ± 0.63a	29.51 ± 1.88a	20.55 ± 0.89a	0.26 ± 0.04a	72.73 ± 1.26a
	低温 LT	-6.18 ± 1.26b	21.94 ± 3.01b	17.67 ± 2.53b	0.45 ± 0.47a	61.49 ± 3.12b
Z1S	对照 FT	-1.63 ± 2.14a	23.95 ± 1.50a	20.16 ± 1.28a	0.78 ± 0.25a	75.28 ± 4.62a
	低温 LT	-4.85 ± 0.68b	19.47 ± 0.94b	16.08 ± 1.77b	0.83 ± 0.36a	60.37 ± 3.58b

18.7%。不育系 GZ63S 和 C815S 穗下节长降低幅度更大,降低幅度分别为 35.2%、25.7%。对照处理后 Y58S 的穗长为 23.85 cm,低温处理后为 22.05 cm,降低幅度为 7.5%,在 5 个不育系中降低幅度最小;GZ63S 和 P64S 在对照处理后穗长分别为 21.24 cm、20.64 cm,低温处理后其穗长降幅分别为 9.9%、13.4%;C815S 和 Z1S 在对照处理后穗长分别为 20.55 cm、20.16 cm,低温处理后其穗长降幅分别为 14.0%、20.2%。Y58S 经对照处理后其株高为 76.25 cm,低温处理后株高降低至 68.54 cm,降低幅度为 10.1%,降低幅度最小;GZ63S、P64S 和 C815S 在对照处理后其株高分别为 76.00 cm、75.68 cm、72.73 cm,低温处理后其株高降低幅度分别为 13.9%、16.0%、15.5%;Z1S 受低温影响后,株高减至 60.37 cm,与对照处理后的株高 75.28 cm 相比,降低幅度为 19.8%,降低幅度最大。

低温处理后,Y58S、GZ63S、P64S 3 个不育系的穗颈长度与对照相比没有显著的变化,而低温处理使得 C815S 和 Z1S 的穗颈长度显著低于对照处理。

表 3 低温处理下花药长和花药体积的差异

Table 3 Difference in anther length and anther volume of the two-line sterile lines under control and low temperature treatment

品种	处理方式	花药长(mm)	变化比例(%)	花药体积(mm ³)	变化比例(%)
Variety	Treatment	Anther length	Change percentage	Anther volume	Change percentage
Y58S	对照 FT	2.11 ± 0.07a	14.69	0.094 ± 0.007a	29.79
	低温 LT	1.80 ± 0.06b		0.066 ± 0.005b	
GZ63S	对照 FT	2.02 ± 0.06a	15.35	0.100 ± 0.017a	34.00
	低温 LT	1.71 ± 0.09b		0.066 ± 0.004b	
P64S	对照 FT	1.94 ± 0.05a	5.67	0.098 ± 0.008a	10.20
	低温 LT	1.83 ± 0.10b		0.088 ± 0.005b	
C815S	对照 FT	2.16 ± 0.12a	20.83	0.080 ± 0.006a	20.00
	低温 LT	1.71 ± 0.06b		0.064 ± 0.008b	
Z1S	对照 FT	2.40 ± 0.06a	10.83	0.094 ± 0.014a	13.83
	低温 LT	2.14 ± 0.09b		0.081 ± 0.011b	

变化比例 = [| (低温处理平均值 - 对照处理平均值) | / 对照处理平均值] × 100%。下同

Change percentage = [| (mean value in low temperature treatment - mean value in control) | / mean value in control] × 100%. The same as below

2.4 水稻幼穗分化期低温对光合特性的影响

经低温 10 d 处理后,不育系 GZ63S、P64S、C815S、Z1S 的 SPAD 值均显著下降,但 Y58S 的 SPAD 值仍无显著差异(表 4)。类似低温对 SPAD 值的影响,当恢复自然生长 5 d 后,低温处理过的 Y58S 的 Pn 值无显著性差异,但其余 4 个不育系材料低温处理过的 Pn 值与对照处理相比存在显著性差异,均显著低于其对照处理。

与对照相比,各材料低温处理后的 1~2 节节长并没有表现出显著差异。

2.3 水稻幼穗分化期低温对花药长和花药体积的影响

低温胁迫造成 5 个不育系的花药长和花药体积均显著降低,影响了花药正常的生长发育(表 3)。低温对不育系 C815S 的花药长度影响最大,与对照相比,低温处理后 C815S 的花药长降低了 20.83%;对 Y58S 和 GZ63S 的影响次之,均比对照下降了 0.31 mm;对 P64S 和 Z1S 的影响相对较小,降幅分别为 5.67% 和 10.83%。低温对花药体积的影响与花药长略有不同,受低温影响最大的是 GZ63S,与对照相比下降了 34.00%;其次是 C815S 和 Y58S,在低温胁迫下分别下降了 20.00% 和 29.79%;对 P64S 和 Z1S 的影响较小,降幅分别为 10.20% 和 13.83%。总体上,P64S 和 Z1S 的花药长和花药体积受低温影响变化不大,而 C815S、GZ63S、Y58S 在低温胁迫下花药长和花药体积变化较大,这与低温胁迫下结实率的变化不同。

2.5 水稻幼穗分化期低温对抗氧化物和膜系统的影响

低温处理 10 d 后,只有不育系 Z1S 的 SOD 活性显著低于对照处理,其余 4 个不育系虽然 SOD 活性较对照处理有所降低,但并不显著(表 5)。不育系 Y58S 低温处理后 SOD 活性下降幅度最小,而 C815S 和 Z1S 下降最大。低温处理后 5 个不育系的 POD 活性均低于对照处理,其中不育系 C815S 的 POD 活性下降幅度最大,GZ63S 的 POD 活性下降幅度最小。

表 4 低温处理下光合特性的变化

Table 4 Change in photosynthetic characteristics of the two-line sterile lines under control and low temperature treatment

品种 Variety	处理方式 Treatment	SPAD 值 SPAD value	光合速率 ($\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$) Pn
Y58S	对照 FT	43.98 \pm 0.65a	18.18 \pm 0.09a
	低温 LT	43.90 \pm 0.48a	18.42 \pm 0.35a
GZ63S	对照 FT	45.39 \pm 1.25a	22.82 \pm 0.35a
	低温 LT	41.39 \pm 0.42b	20.26 \pm 0.29b
P64S	对照 FT	45.66 \pm 0.28a	18.04 \pm 0.27a
	低温 LT	44.32 \pm 0.03b	16.32 \pm 0.05b
C815S	对照 FT	40.29 \pm 0.59a	19.27 \pm 0.19a
	低温 LT	38.44 \pm 0.86b	17.71 \pm 0.26b
Z1S	对照 FT	47.36 \pm 0.34a	23.62 \pm 0.18a
	低温 LT	42.38 \pm 0.30b	20.58 \pm 0.69b

表 5 对低温条件下 SOD 和 POD 活性的变化

Table 5 Change of SOD and POD activity of the two-line sterile lines under control and low temperature treatment

品种 Variety	处理方式 Treatment	超氧化物歧化酶活性 (U/g) SOD activity	变化比例 (%) Change percentage	过氧化物酶活性 (U/g) POD activity	变化比例 (%) Change percentage
Y58S	对照 FT	607.4 \pm 12.6a	4.53	11.00 \pm 1.75a	13.36
	低温 LT	579.9 \pm 9.9a		9.53 \pm 1.09a	
GZ63S	对照 FT	557.6 \pm 11.4a	8.93	13.36 \pm 0.74a	8.68
	低温 LT	507.8 \pm 17.2a		12.20 \pm 0.20a	
P64S	对照 FT	590.3 \pm 12.3a	8.70	13.34 \pm 0.55a	13.57
	低温 LT	539.0 \pm 23.6a		11.53 \pm 1.77a	
C815S	对照 FT	556.5 \pm 14.2a	10.48	15.36 \pm 2.03a	17.45
	低温 LT	498.2 \pm 18.7a		12.68 \pm 0.22a	
Z1S	对照 FT	575.6 \pm 10.1a	11.08	17.16 \pm 0.94a	12.82
	低温 LT	511.8 \pm 15.0b		14.96 \pm 0.76a	

低温处理 10 d 后,5 个不育系的 MDA 含量相比对照均有上升,但上升幅度有差异,Y58S、P64S 和 C815S 增幅相对较小,GZ63S 和 Z1S 的增幅较大(表 6)。对相对电导率的影响分析发现,当低温处理 10 d

时,冷敏感的 C815S 和 Z1S 相对电导率增幅较大,其中 Z1S 相比对照增加了 106.00%。相比对照处理,Y58S 和 GZ63S 的相对电导率增幅较小,Y58S 的相对电导率增幅为 28.85%,在 5 个不育系中增幅最小。

表 6 低温处理下 MDA 含量和相对电导率的变化

Table 6 Change of MDA content and relative conductivity of the two-line sterile lines under control and low temperature treatment

品种 Variety	处理方式 Treatment	丙二醛含量($\mu\text{mol}/\text{g}$) MDA content	变化比例 (%) Change percentage	相对电导率 Relative conductivity	变化比例 (%) Change percentage
Y58S	对照 FT	1.74 \pm 0.28a	38.51	7.28 \pm 0.10b	28.85
	低温 LT	2.41 \pm 0.15a		9.38 \pm 0.20a	
GZ63S	对照 FT	1.84 \pm 0.63a	51.09	8.37 \pm 0.19b	33.70
	低温 LT	2.78 \pm 0.86a		11.19 \pm 0.09a	
P64S	对照 FT	1.90 \pm 0.35a	32.63	9.50 \pm 0.15b	48.95
	低温 LT	2.52 \pm 0.35a		14.15 \pm 0.17a	
C815S	对照 FT	2.07 \pm 0.23a	37.20	9.37 \pm 0.24b	73.43
	低温 LT	2.84 \pm 0.46a		16.25 \pm 0.17a	
Z1S	对照 FT	1.32 \pm 0.09b	68.18	6.33 \pm 0.14b	106.00
	低温 LT	2.22 \pm 0.10a		13.04 \pm 0.14a	

2.6 水稻幼穗分化期低温下形态生理性状差异间的相关性分析

通过分析形态生理指标的变化与结实率变化的相关性发现(表 7),结实率的变化与穗长、株高、Pn 值、SOD 活性的相关性均呈显著正相关,而与相对电导率的变化呈极显著负相关。穗长、株高、SPAD 值、Pn 值、SOD 活性等指标的变化与冷害指数呈显著正相关,冷害指数与相对电导率的变化呈极显著负相关。

表 7 形态生理部分指标变化与结实率变化及冷害指数的相关系数

Table 7 Correlation between indexes changes of morphological and physiological, seed setting rates changes and cold injure index

指标 Index	结实率 Seed setting rate	冷害指数 Cold injury index
穗下节长 Peduncle length	0.2871	0.1288
穗长 Panicle length	0.6941 *	0.8404 **
株高 Plant height	0.7211 *	0.8617 **
花药长 Anther length	0.3363	0.1788
花药体积 Anther volume	-0.4763	-0.5755
SPAD 值 SPAD value	0.5848	0.6792 *
光合速率 Pn	0.7148 *	0.7955 *
SOD 活性 SOD activity	0.9373 **	0.9846 **
POD 活性 POD activity	0.6320	0.6206
MDA 值 MDA value	-0.3537	-0.3967
相对电导率 RC	-0.8859 **	-0.9223 **

3 讨论

3.1 水稻幼穗分化期低温胁迫下不育系的耐冷性差异

结实率是水稻幼穗分化期耐冷性评价的最可靠指标之一,当前对幼穗分化期耐冷基因定位与克隆方面的研究主要是利用结实率这一性状指标^[10-12]。早期研究已经发现,Y58S 在育性敏感期遇到长时间的低于 18 °C 温度时,仍可获得 4.5 t/hm² 以上的繁殖产量^[4]。有关 Y58S 和其他不育系在不同时期的耐冷性比较也已有报道,分析超级杂交稻及其不育系亲本不同时期耐冷性的结果表明,不育系芽期的耐冷能力依次为 Y58S > 培矮 64S > 广占 63-4S, Y58S 所配超级杂交稻 Y 两优 1 号、Y 两优 2 号在芽期、苗期及抽穗扬花期均有较强耐冷性^[13]。6 个 Y58S 系列组合和 6 个 C815S 系列组合灌浆期低温

抗性试验结果表明,Y58S 系列组合后期对低温的抗性强于 C815S 系列组合,主要表现在 Y58S 系列组合的高产性、结实率优于 C815S 系列组合^[14]。

本研究首次利用生产上常用的 5 个光温敏不育系进行幼穗分化期耐冷性评价。通过结实率和冷害指数的比较发现,5 个不育系在育性敏感期经 17.5 °C、10 d 低温处理后结实率均显著降低,但不育系之间结实率和冷害指数的变化也差异显著,其中 Y58S 的耐冷性表现相对最好,其次为 GZ63S 和 P64S, C815S 和 Z1S 受低温影响最大。

3.2 光温敏不育系 Y58S 幼穗分化期耐低温的形态生理机制

韩龙植等^[15]研究发现穗颈长、株高的冷反应指数值与结实率的冷反应指数值呈显著正相关。曾亚文等^[7]利用云南 548 份核心种质进行幼穗分化期耐冷性性状间的相关性及其生态差异分析,认为结实率、每穗实粒数、穗颈长、穗下节间长、1~2 节间长、花药长和花药体积都是幼穗分化期可靠的耐冷评价指标。在本研究中,5 个不育系低温胁迫后其穗长和株高均显著低于对照处理。与结实率的变化类似,耐冷不育系 Y58S 的穗长和株高在 5 个不育系中受低温胁迫的影响最小,冷敏感不育系 Z1S 的穗长和株高受低温影响最大。在今后的育种工作中,利用穗长和株高等形态指标评价不育系的耐冷性,将有助于选育生理下限温度低的不育系或双低不育系。光温敏不育系具有花粉不育、卡颈等特征,并且不育系材料的不育基因来源不同,如 Y58S、GZ63S、C815S、Z1S 的不育基因是 *tms5*, P64S 的不育基因是 *ptms12*,对这些不育基因的认识尚处在初步阶段,具体的作用机制仍然未知^[16]。本研究发现,低温和对照处理后的同一不育系单株间穗颈长和穗 1~2 节节长都存在较大差异,穗下节长、花药长及花药体积等性状的变化与结实率变化、冷害指数无显著的相关性,推测可能是由于不育系特有的特征引起的。

低温既能影响叶绿体类囊体膜的透性和流动性,降低叶绿素含量,也能够影响光合电子传递链及其参与光合反应途径中的酶类^[17]。水稻体内的自由基、ROS 与消除它们的酶类、非酶类物质在正常生理条件下处在一个平衡状态,低温胁迫打破了这种平衡,产生过量的 ROS,耐冷性强的水稻品种具有相对较高的抗氧化酶活性进而清除这些过量的 ROS^[18]。与其他光温敏不育系不同,本研究发现耐冷不育系 Y58S 较为明显的一个生理特性是受低温胁迫后的 SPAD 值和 Pn 值与对照比较均无显著性

差异。这表明在冷胁迫条件下仍能维持较高的光合速率是光温敏不育系耐冷性的重要生理基础,这与前人关于超级杂交稻耐低温的主要特征是保持较高的光合速率^[19]的观点是一致的。低温胁迫初期植物会通过提高抗氧化酶 SOD、POD 的活性,从而加快降解脂膜过氧化产物 MDA 的含量。但随着胁迫的持续或者温度的降低,抗氧化酶的活性逐渐下降,而 MDA 含量则持续上升^[20]。长时间的低温处理使得 5 个不育系的 SOD 和 POD 活性均开始下降,MDA 含量则大幅上升。耐冷不育系 Y58S 低温胁迫后 SOD 下降幅度较小,并且 MDA 含量上升幅度低于冷敏感的 Z1S。低温处理 10 d 冷敏感的 C815S 和 Z1S 相对电导率增幅较大,耐冷的 Y58S 相对电导率增幅最小。总体上耐冷不育系 Y58S 低温胁迫下的膜系统和抗氧化酶系统变化相对平稳,也为其保持高的光合速率提供生理保障。

参考文献

- [1] 斯华敏,刘文真,付亚萍,等. 我国两系杂交水稻发展的现状和建议[J]. 中国水稻科学,2011,25(5):544-552
- [2] 邓启云,袁隆平. 光温敏核不育水稻育性稳定性及其鉴定技术研究[J]. 中国水稻科学,1998,12(4):200-206
- [3] 陈良碧,徐孟亮. 临界温度双低两用不育水稻的筛选研究[J]. 杂交水稻,1999,14(4):3-4
- [4] 邓启云. 广适性水稻光温敏不育系 Y58S 的选育[J]. 杂交水稻,2005,20(2):15-18
- [5] 丁颖. 中国水稻栽培学[M]. 北京:农业出版社,1961
- [6] 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依据[J]. 作物学报,2003,29(5):708-714
- [7] 曾亚文,李绅崇,普晓英,等. 云南稻核心种质孕穗期耐冷性状态的相关性与生态差异[J]. 中国水稻科学,2006,20(3):265-271
- [8] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京:高等教育出版社,2000
- [9] 左佳,高婧,贺荣华,等. 东乡野生稻苗期抗寒性 QTL 的初步定位[J]. 杂交水稻,2012,27(3):56-59,65
- [10] 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[J]. 植物遗传资源学报,2009,10(4):540-546
- [11] Andaya V, Mackill D. 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(6):1084-1090
- [12] Shirasawa S, Endo T, Nakagomi K, et al. Delimitation of a QTL region controlling cold tolerance at booting stage of a cultivar, 'Lijiangxintuanheigu', in rice, *Oryza sativa* L. [J]. Theor Appl Genet,2012,124(5):937-946
- [13] 常硕其,邓启云,罗祎,等. 超级杂交稻及其亲本的耐冷性研究[J]. 杂交水稻,2015,30(1):51-57
- [14] 易卫平,彭伟正,彭选明,等. C815S 和 Y58S 母系组合对灌浆期低温抗性的比较研究[J]. 湖南农业科学,2011(15):10-12,15
- [15] 韩龙植,元东林,玄英实,等. 水稻主要农艺性状的冷水反应遗传分析[J]. 中国水稻科学,2004,18(1):23-28
- [16] Zhou H, Zhou M, Yang Y, et al. RNase ZS1 processes Ubl40 mRNAs and controls thermosensitive genic male sterility in rice[J]. Nat Commun,2014,5:4884
- [17] 代玉华,刘训言,孟庆伟,等. 低温胁迫对类囊体膜脂代谢的影响[J]. 植物学通报,2004,21(4):506-511
- [18] 王国骄,王嘉宇,苗微,等. 强耐冷性水稻新品系 J07-23 抗氧化系统对长期冷水胁迫的响应[J]. 作物学报,2013,39(4):753-759
- [19] 王静,张成军,陈国祥,等. 低温对灌浆期水稻剑叶光合色素和类囊体膜脂肪酸的影响[J]. 中国水稻科学,2006,20(2):177-182
- [20] Heidari B, Pessarakli M, Dadkhodaie A, et al. Reactive oxygen species-mediated functions in plants under environmental stresses [J]. J Agric Sci Tech B,2012,2(2):159-168