

DOI: 10.12101/j.issn.1004-390X(n).202005001

高温胁迫下粳稻产量因子的变化以及 对抗氧化酶活性的影响*

刘航江¹, 袁新捷¹, 陈国兴^{**}

(华中农业大学 植物科学技术学院, 湖北 武汉 430070)

摘要:【目的】研究高温对粳稻的影响并筛选出耐高温品种, 为粳稻的耐高温育种提供基础材料。【方法】以中日韩 15 个粳稻品种为材料(编号为 S1~S15), 通过 3 年田间自然高温胁迫和盆栽控温试验, 使粳稻在抽穗开花期进行至少连续 7 d 日均温度高于 32 °C 或最高温度高于 35 °C 的高温胁迫, 利用全自动数字化考种机对总粒数、实粒数、结实率和千粒质量等指标进行测定, 利用酶试剂测试盒对剑叶叶片进行 SOD、CAT 和 POD 活性检测。【结果】田间试验中, 粳稻品种年均结实率达 80% 以上的有 S1、S2、S4、S5、S7 和 S14, 年均结实率约为 75% 的有 S6、S8、S9、S11 和 S13, 年均结实率约为 50% 的有 S3、S10 和 S15。盆栽控温试验中, 粳稻品种相对结实率在 95% 以上的有 S2、S7、S8 和 S9, 相对结实率在 75%~95% 的有 S1、S4、S5、S6、S11、S12、S13 和 S14, 相对结实率在 55%~75% 的有 S3、S10 和 S15; 高温胁迫下, SOD、CAT 和 POD 活性与相对结实率均呈不显著正相关($P>0.05$), 且各品种在经历了高温胁迫后的抗氧化酶活性均高于对照组。【结论】结合田间和盆栽试验, 筛选出 2 个具有耐高温能力且综合农艺性状较好的品种, 即奥羽 392 (S2) 和临稻 16 号 (S7), 耐高温水稻表现出较高水平的抗氧化酶活性。

关键词: 粳稻; 高温胁迫; 结实率; 抗氧化酶

中图分类号: S 511.01

文献标志码: A

文章编号: 1004-390X (2021) 01-0014-08

Changes of Japonica Rice Yield Factors and Effects on Antioxidant Enzyme Activities under High Temperature Stress

LIU Hangjiang¹, YUAN Xinjie¹, CHEN Guoxing

(College of Plant Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: [Purpose] To study the effect of high temperature on japonica rice and screen out high-temperature-tolerant varieties to provide basic materials for high-temperature breeding of japonica rice.

[Method] Using 15 japonica rice varieties from China, Japan and South Korea as materials, through years of field natural high temperature stress and pot temperature control experiments, japonica rice was subjected to high temperature stress with a daily average temperature higher than 32 °C or a maximum temperature higher than 35 °C for at least 7 consecutive days during heading and flowering. The indexes such as total grain number, grain number, seed setting rate, 1 000-grain weight and so on were determined by using a full-automatic digital seed testing machine, and the activities of SOD, CAT and POD were detected by using an enzyme reagent test kit. [Result] In the field test, S1, S2,

收稿日期: 2020-05-03

修回日期: 2020-10-17

网络首发时间: 2021-01-14 11:29:10

*基金项目: 国家重点研发计划课题子课题(2016YFD0100101-18)。

作者简介: 刘航江(1995—), 男, 四川南充人, 在读硕士研究生, 主要从事水稻重要农艺性状形成与调控研究。E-mail: 422497636@qq.com

**通信作者 Corresponding author: 陈国兴(1962—), 男, 湖北武汉人, 硕士, 副教授, 主要从事水稻重要农艺性状与调控研究。E-mail: chenguoxing@mail.hzau.edu.cn

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/53.1044.s.20210112.1341.003.html>



S4, S5, S7 and S14 had an average annual seed setting rate of more than 80%, S6, S8, S9, S11 and S13 had an average annual seed setting rate of about 75%, S3, S10 and S15 had an average annual seed setting rate of about 50%. In pot temperature control test, S2, S7, S8 and S9 were the japonica rice varieties with relative seed setting rate above 95%, S1, S4, S5, S6, S11, S12, S13 and S14 were the japonica rice varieties with relative seed setting rate between 75% and 95%, S3, S10 and S15 were the japonica rice varieties with relative seed setting rate between 55% and 75%. Under high temperature stress, SOD, CAT and POD activities are positively correlated with relative seed setting rate ($P>0.05$), and the antioxidant enzyme activities of each variety after high temperature stress are higher than those of the control group. [**Conclusion**] Combining field and pot experiments, 2 varieties with high temperature tolerance and good comprehensive agronomic traits were selected, they are Aoyu 392 (S2), and Lindao 16 (S7). High temperature tolerant rice varieties have a higher level of antioxidant enzyme activity.

Keywords: japonica rice; high temperature tolerance; setting rate; antioxidant enzyme

据统计, 中国约有 65% 的人口都以稻米为主食, 而且水稻播种面积常年居于 3 000 万 hm^2 上下, 稻谷年产量达 2.1 亿 t 以上^[1-2]。在中国许多地区, 水稻高温热害已经成为影响水稻生长发育的主要自然灾害之一, 尤其是在长江流域以及南方稻区^[3]。近年来, 为保证国家粮食安全, “籼改粳”已经成为中国南方稻区的重要任务之一^[4], 因此在南方稻区进行粳稻品种的选育工作具有更为重要的现实意义。

粳稻和籼稻的耐高温特性存在一定的差异, 且一般情况下, 籼稻的耐高温性普遍强于粳稻, 这可能是由于高温主要影响籼稻当天开放的颖花; 而粳稻则不同, 高温除了影响当天开放的颖花外, 对次日开放的颖花也有不利的影响^[5]。李守华等^[6]研究发现: 最近 50 年江汉平原的平均气温和最高气温并未升高, 整体保持基本稳定, 长期温度变化表现出一定的周期特征, 即 7—8 月期间, 连续 3 和 5 d 平均气温高于 30 $^{\circ}\text{C}$ 以及最高温度高于 35 $^{\circ}\text{C}$ 的天气出现频次高, 且有增加趋势, 这对水稻花期可能产生致命性伤害。对高温最敏感的时期为水稻减数分裂期和开花期, 这 2 个时期遭遇高温对水稻结实率的影响最大, 因此, 通常在这 2 个时期进行耐高温品种的鉴定筛选^[7-8]。此外, 水稻开花期如遭遇 35 $^{\circ}\text{C}$ 以上的高温, 会造成颖花不育和结实率下降, 最终使产量降低^[9-10]。

有研究发现: 高温胁迫后, 水稻叶片的质膜通透性增强, 游离脯氨酸增多, 但是过氧化物酶 (POD)、过氧化氢酶 (CAT) 和超氧化物歧化酶

(SOD) 活性均呈上升趋势^[11]。郭培国等^[12]通过对水稻进行夜间高温胁迫后发现: 水稻叶片光合速率降低并且出现了氧化症状, 随着高温胁迫时间增加植株体内的 $\text{O}_2^{\cdot -}$ 和 H_2O_2 含量也增高, 但 POD、CAT 和 SOD 活性随着时间先升高而后降低, 这说明随着高温胁迫时间延长, 活性氧的生成速度已经远远大于活性氧的清除速度, 并且长时间高温会抑制抗氧化酶活性, 使植株受到过氧化损伤。

以往关于水稻耐高温特性的筛选鉴定多是利用间接鉴定法, 即利用人工气候箱等设备对水稻的温度、光照和湿度等自然要素进行严格控制, 但是这类方法的鉴定结果往往会与大田实际生产结果有较大的出入。本试验基于大田自然条件, 与盆栽温室控温相结合, 以使各品种水稻自始穗期起经历至少连续 7 d 日均温度高于 32 $^{\circ}\text{C}$ 或最高温度高于 35 $^{\circ}\text{C}$ 的高温胁迫, 通过对水稻总粒数、结实率、千粒质量和抗氧化酶活性等指标进行测定, 综合各项指标对 15 个粳稻品种的耐高温特性进行评价, 筛选出具有耐高温特性且产量因子表现好的优质品种, 以期对粳稻耐高温品种鉴定筛选研究提供新思路, 为耐高温粳稻种质资源的利用提供参考依据, 也为耐高温粳稻品种的培育提供基础材料, 保证水稻的稳产和高产。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2017—2019 年在华中农业大学作物遗传与改良国家重点实验室盆栽场进行。试验田

前茬为冬闲田, 土壤类型为黄棕壤水稻土, 试验前测得大田表层 0~20 cm 土壤基础养分为: 有机质 18.89 g/kg, 速效钾 145.32 mg/kg, 速效磷 9.52 mg/kg, 碱解氮 65.11 g/kg, pH 6.08。试验前测得盆栽土壤基础养分为: 有机质 46.55 g/kg, 速效钾 188.46 mg/kg, 速效磷 16.81 mg/kg, 碱解氮 143.65 mg/kg, pH 5.35。

1.2 试验材料

试验以中日韩 15 份粳稻品种为材料: W1202 (中国山东)、奥羽 392 (日本)、丰优 100 (中国吉林)、合系 27 号 (中国云南)、垦育 16 号 (中国河北)、辽粳 326 (中国辽宁)、临稻 16 号 (中国山东)、龙粳 25 号 (中国吉林)、牡丹江 17 (中国黑龙江)、千重浪 1 号 (中国辽宁)、青早稻 (中国山东)、沈农 2100 (中国辽宁)、万年 (中国辽宁)、永山稻 (韩国) 和元子粘稻 (中国江苏)。依次编号为 S1~S15, 均由中国农业科学院作物科学研究所提供。

1.3 试验设计

2017—2019 年, 大田试验为每年每份材料种植 1 个小区, 规格为 (4×5) 株, 行株距为 16 cm×16 cm, 小区之间间距均为 32 cm。高温处理采用自然高温胁迫的方式^[11-12], 自始穗期起经历至少连续 7 d 日均温度高于 32 ℃ 或最高温度高于 35 ℃ 的品种才视做经历了高温胁迫, 调整播期使抽穗开花期集中在 7 月中下旬和 8 月中上旬。大田试验基肥施用复合肥 30 kg/667 m², 在一叶一心期和分蘖期分别追施尿素 5 kg/667 m²。试验期间适时进行人工除草和防治病虫害。

2019 年进行盆栽试验。盆钵规格为下部直径 16 cm, 上部直径 19.5 cm, 盆高 19 cm。每份材料单插本, 10 次重复, 每 2 个重复排成 1 列, 每列盆钵连续排列, 行间距为 90 cm。水稻见穗初期将 4 株移入温室进行为期 7 d 的高温处理 (日最高温度 > 35 ℃), 作为高温胁迫组; 6 株采用遮阳降温 (日最高温度 < 35 ℃ 且日平均温度 < 32 ℃), 作为对照组。土壤氮磷钾有效含量分别为 0.15、0.10 和 0.15 g/kg; 追肥为每升水溶解尿素 2.7 g、磷酸二氢钾 1.6 g 和氯化钾 1.1 g, 于分蘖期和孕穗期追施。试验期间适时进行人工除草和防治病虫害。

1.4 指标测定

1.4.1 温度

试验期间, 利用美国生产的 HOBO 自动温湿

度记录仪每 30 min 自动记录 1 次大田自然温度。

1.4.2 产量性状及耐热等级评价标准

在水稻成熟期, 选取 3 株具有代表性、长势较好且接近的水稻, 晒干后脱粒, 利用全自动数字化考种机^[13]对总粒数、实粒数、结实率和千粒质量等指标进行测定, 并计算盆栽试验的相对结实率。

相对结实率=试验组结实率/对照组结实率×100%。

根据 NY/T 2915—2016《水稻高温热害与鉴定标准》对水稻的耐热等级进行评价分级。(1) 强耐热型: 相对结实率≥95%; (2) 耐热型: 75%≤相对结实率<95%; (3) 中间型: 55%≤相对结实率<75%; (4) 不耐热型: 35%≤相对结实率<55%; (5) 极不耐热型: 相对结实率<35%。

1.4.3 抗氧化酶活性

高温处理结束后, 分别选取对照组和试验组 3 株长势较好且一致的水稻, 每株水稻取剑叶 1~2 g, 利用酶试剂盒测定水稻剑叶的超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD) 和过氧化氢酶 (CAT) 活性。测试盒分别为: A001-1 (羟胺法, 南京建成科技有限公司)、A084-3 (南京建成科技有限公司) 和 A007-1 (可见光法, 南京建成科技有限公司)。试验过程严格按照试剂盒说明书操作。

1.5 数据统计与分析

考种数据及采集温度数据利用 Excel 2010 进行计算和整理, 使用 SPSS 21.0 统计分析软件对产量性状及抗氧化酶活性进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 不同粳稻品种抽穗开花期温度

由图 1 可知: 2017 年温度波动较大, 2019 年相对 2018 年极端高温天气出现的更加频繁。

由表 1 可知: 各品种大田试验始穗期开始, 2017 年只有 S1 和 S7 未经历连续至少 7 d 平均温度高于 32 ℃ 或最高温度高于 35 ℃ 的高温胁迫; 2018 和 2019 年的温度波动起伏相对较小, 平均温度主要维持在 32 ℃ 以上, 平均最高温度主要在 37 ℃ 左右波动, 2019 年平均最高温度比 2018 年略有升高, 即在年度大田重复试验中各品种至少经历了 2 次高温胁迫。

2.2 高温胁迫对大田粳稻产量构成因子的影响

由表 2 可知: 2017—2019 年, S2 和 S4 的单

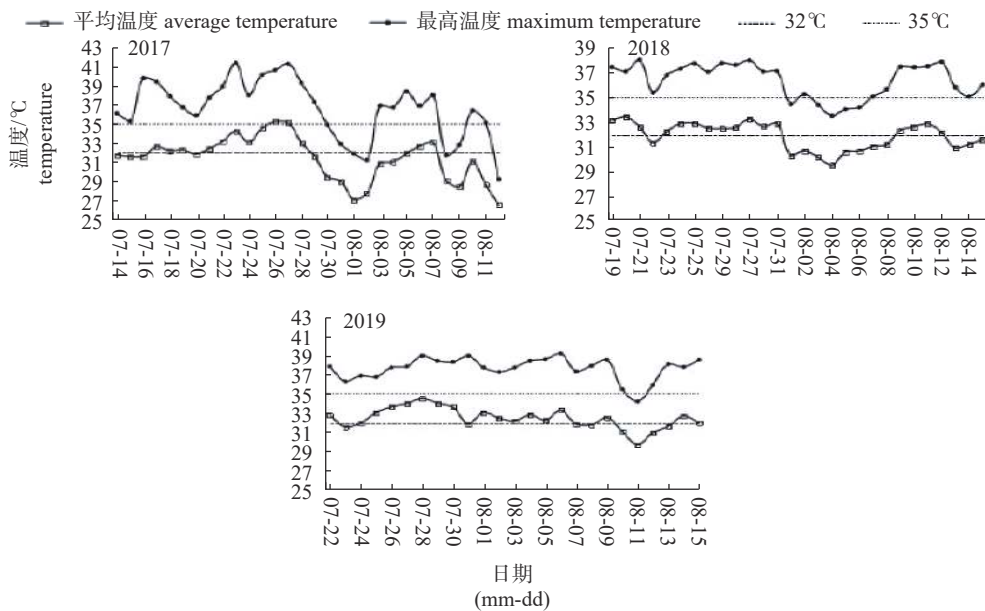


图 1 2017—2019 年抽穗开花期的日均温度和最高温度

Fig. 1 Daily average temperature and maximum temperature during heading and flowering period from 2017 to 2019

表 1 各梗稻品种始穗期及连续 7 d 平均温度和平均最高温度

Tab. 1 Japonica rice varieties average temperature and average maximum temperature in initial heading stage during 7 days									
品种编号 variety No.	始穗期 initial heading stage			7 d 平均温度/℃ 7 d average temperature			7 d 平均最高温度/℃ 7 d average maximum temperature		
	2017	2018	2019	2017	2018	2019	2017	2018	2019
S1	08-06	07-21	07-31	29.93	32.49	32.59	34.30	37.13	38.07
S2	07-24	07-19	08-10	33.15	32.71	31.47	38.78	37.10	36.79
S3	07-15	07-19	07-31	32.08	32.71	32.59	37.52	37.10	38.07
S4	07-26	07-29	07-28	31.51	31.43	33.11	36.87	35.70	38.00
S5	07-27	07-19	08-09	30.44	32.71	31.58	35.53	37.10	36.79
S6	07-23	07-24	08-01	33.82	32.81	32.59	39.71	37.48	37.85
S7	07-29	07-24	08-02	29.55	32.81	32.42	34.54	37.46	37.87
S8	07-22	08-09	07-23	34.04	32.03	33.25	39.94	36.72	37.38
S9	07-14	07-23	08-02	31.98	32.75	32.42	37.29	37.44	37.87
S10	07-20	07-19	07-27	33.49	32.71	33.36	38.94	37.10	38.02
S11	07-26	07-27	07-22	31.51	32.19	33.08	36.87	36.74	37.30
S12	07-23	07-24	07-28	33.82	32.81	33.11	39.71	37.48	38.00
S13	07-24	07-19	08-01	33.15	32.71	32.59	38.78	37.10	37.85
S14	07-25	07-23	07-30	32.56	32.75	32.63	38.05	37.44	37.95
S15	07-14	07-19	07-28	31.98	32.71	33.11	37.29	37.10	38.00

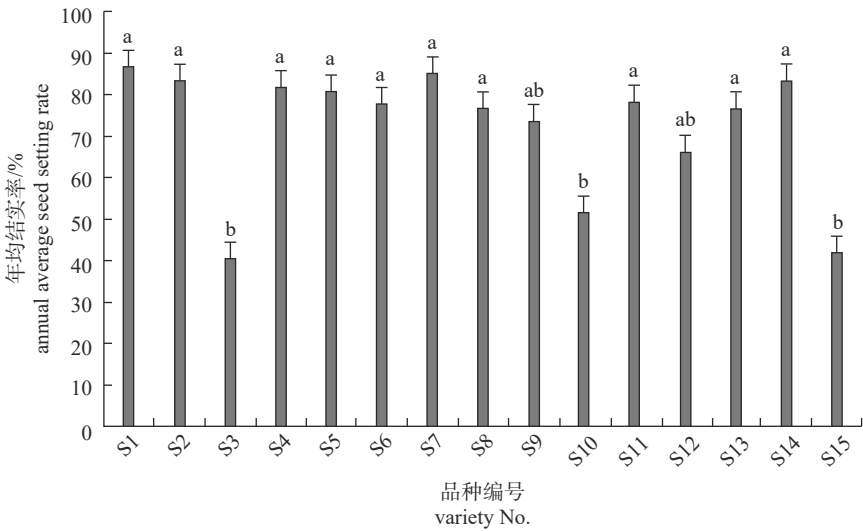
株总粒数均高于 2 000, S3 和 S15 的单株实粒数均低于 1 000, S2、S5、S7、S8、S9、S10 和 S11 千粒质量均高于 20 g, S1、S2 和 S14 的结实率均达 80% 以上, S3 结实率均低于 50%。

由于 S1 和 S7 在 2017 年未经历连续至少 7 d 日均温度高于 32 ℃ 或最高温度高 35 ℃ 的高温胁迫, 故 S1 和 S7 的年均结实率以 2018 和 2019

年的结实率进行统计。由图 2 可知: 在高温胁迫下, 各梗稻品种产量构成因子稳定性存在差异。S1、S2、S4、S5、S7 和 S14 的年均结实率均高于 80%, S6、S8、S11 和 S13 的年均结实率在 75%~80%, S3、S9、S10、S12 和 S15 的年均结实率均低于 75%, S3 年均结实率最小, 且 S3、S10 和 S15 的年均结实率显著低于除 S9 和 S12

表 2 2017—2019 年各粳稻品种产量因子
Tab. 2 Yield factor of japonica rice varieties from 2017 to 2019

品种编号 variety No.	年均单株总粒数 annual average total grain number per plant			年均单株实粒数 annual average real grain number per plant			年均千粒质量/g annual average 1 000- grain weight			年均结实率/% annual average seed setting rate		
	2017	2018	2019	2017	2018	2019	2017	2018	2019	2017	2018	2019
S1	1 662	1 469	2 308	1 407	1 354	1 965	19.54	26.75	25.29	84.66	92.18	85.07
S2	2 014	2 252	3 179	1 770	1 832	2 653	21.66	23.36	25.85	87.88	81.32	83.42
S3	1 712	2 063	1 515	648	791	604	25.31	16.45	20.43	37.85	38.47	46.82
S4	2 162	2 183	2 250	1 572	1 938	1 928	18.11	29.41	28.80	72.71	89.12	85.67
S5	2 161	1 481	2 523	1 550	1 437	1 901	25.28	21.27	23.59	71.73	97.17	75.38
S6	1 020	2 351	1 986	753	1 882	1 578	19.80	25.79	23.34	73.82	80.06	81.26
S7	1 121	2 139	2 001	867	2 003	1 742	27.28	24.95	26.56	77.38	93.60	87.04
S8	1 802	1 613	1 465	1 290	1 400	1 084	21.62	24.85	22.34	71.58	86.79	73.95
S9	898	1 493	1 655	541	1 227	1 341	25.32	25.04	23.23	60.24	81.97	80.79
S10	2 101	1 720	1 805	687	1 118	1 065	21.63	22.99	21.38	32.70	64.99	58.48
S11	365	1 550	2 534	315	1 460	1 423	22.76	22.92	21.17	86.30	94.60	55.95
S12	1 831	1 692	1 165	618	1 451	916	17.61	23.76	23.00	33.75	87.82	79.10
S13	1 498	2 012	1 482	1 210	1 775	916	17.38	28.01	24.22	80.77	89.30	61.86
S14	1 532	2 116	1 298	1 264	1 899	1 039	13.36	27.08	25.79	82.51	89.74	80.05
S15	1 362	1 623	675	463	669	357	8.01	24.39	25.31	33.99	41.08	52.87



注：不同小写字母表示不同品种或处理间差异显著 ($P<0.05$)；下同。
Note: Different lowercase letters indicate significant differences in different varieties or treatments ($P<0.05$); the same as below.

图 2 高温胁迫对不同粳稻品种年均结实率的影响

Fig. 2 Effect of high temperature stress on the annual average seed setting rates of different japonica rice varieties

以外的其他品种 ($P<0.05$)。

2.3 不同温度对盆栽粳稻结实率和抗氧化酶的影响

以 15 个粳稻品种相对结实率进行耐热等级评价分级 (图 3) 可知：S2、S7、S8 和 S9 是强耐热型品种，S1、S4、S5、S6、S11、S12、S13 和 S14 是耐热型品种，S3、S10 和 S15 是中间型品种。筛选出的强耐热品种和耐热品种均是研究粳稻耐热生理机制的良好材料。

由图 4 可知：不同品种间的 SOD、CAT 和 POD 活性均有所差异，且各品种在经历了高温胁迫后的抗氧化酶活性均高于对照组，说明高温胁迫会使植株体内 SOD、CAT 和 POD 活性增高。高温胁迫下，强耐热型品种 S7、S8 和 S9 的 SOD

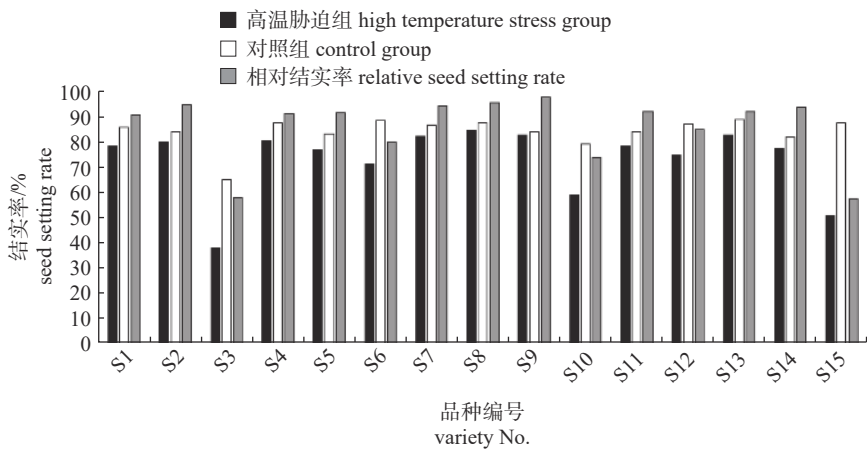


图 3 抽穗开花期不同温度对不同品种结实率的影响

Fig. 3 Influence of temperature during the flowering stage on the seed setting rates of different varieties

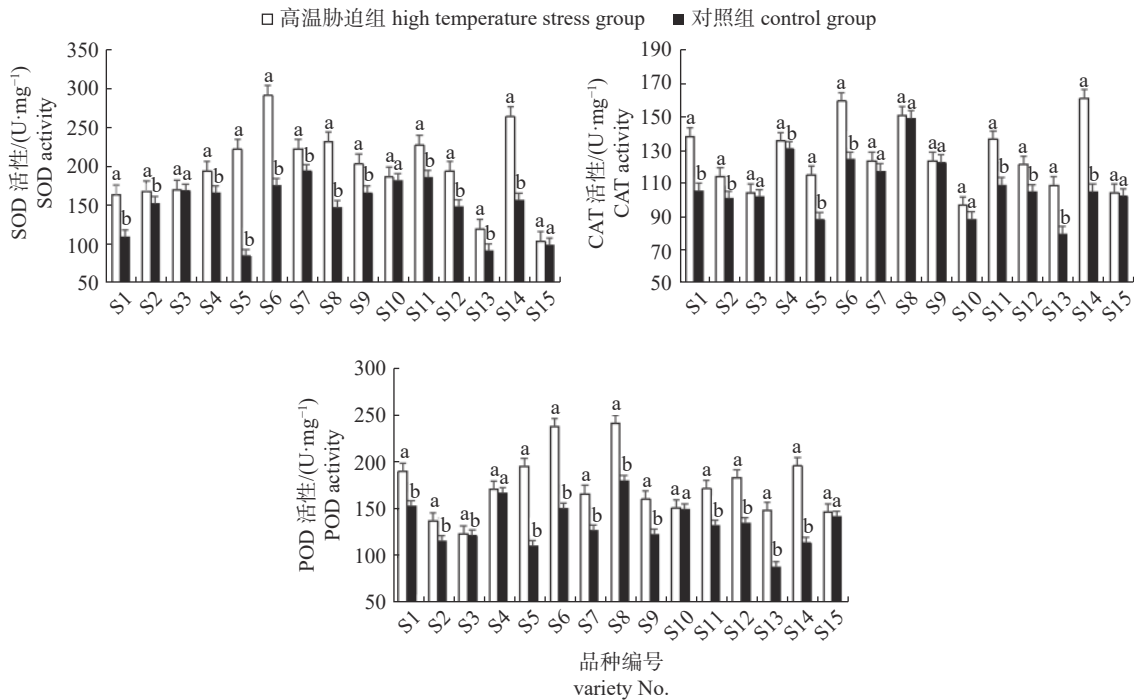


图 4 高温胁迫下不同品种的抗氧化酶活性

Fig. 4 Antioxidant enzyme activities of different varieties under high temperature stress

活性均高于 200 U/mg, 且 3 个品种的 SOD 和 POD 活性均显著高于对照组 ($P<0.05$), 但 S2 的 3 种抗氧化酶活性均显著高于对照组 ($P<0.05$); 耐热型品种中, 除 S4 的 POD 活性外, 其他品种高温胁迫组与对照组的 SOD、CAT 和 POD 活性差异均达显著水平 ($P<0.05$); 中间型品种中, 高温胁迫组的 SOD 和 CAT 活性与对照组差异均不显著 ($P>0.05$), 且仅 S3 的高温胁迫组与对照组 POD 活性差异达显著水平 ($P<0.05$)。

由表 3 可知: 高温胁迫组 SOD、CAT 和 POD

活性互为极显著正相关, 说明在高温胁迫下不同梗稻品种 3 种抗氧化酶活性协同增长, 结实率与 SOD、CAT 和 POD 活性均未达到显著相关水平。对照组中, CAT 活性与 POD 活性极显著相关, 说明在非高温胁迫下, CAT 和 POD 活性协同增长, 结实率与 SOD、CAT 和 POD 活性均未达到显著相关水平。

3 讨论

水稻耐热性鉴定是水稻耐热种质资源评价和

表 3 水稻结实率与抗氧化酶活性的相关分析
Tab. 3 Correlation analysis of seed setting rate and antioxidant enzyme activity

指标 index	高温胁迫组 high temperature stress group				对照组 control group			
	SOD	CAT	POD	相对结实率 relative seed setting rate	SOD	CAT	POD	相对结实率 relative seed setting rate
SOD	1.000	0.750**	0.709**	0.332	1.000	0.445	0.287	-0.253
CAT	0.750**	1.000	0.807**	0.495	0.445	1.000	0.722**	0.261
POD	0.709**	0.807**	1.000	0.457	0.287	0.722**	1.000	0.205

注：“***”表示达到 0.01 显著性水平。
Note: “***” represents 0.01 significance.

利用的基础，耐热性鉴定方法的科学性是准确评价及利用耐热种质资源的关键。高温胁迫会对水稻的表型指标及生理生化指标产生不同程度的影响。姚凤梅等^[14]以开花期日最高温度>35℃、灌浆期日最高温度>32℃为高温指标；陈升宇等^[15]以日最高气温大于 35℃且持续 3 d 或以上作为水稻出现高温热害的指标。本研究在前人研究的基础上，延长高温胁迫时间，以在抽穗开花期进行至少连续 7 d 日均温度>32℃或最高温度>35℃为标准，研究高温胁迫对粳稻结实率的影响。

本研究表明：丰优 100 (S3)、千重浪 1 号 (S10) 和元子粘稻 (S15) 经历高温后结实率低，对高温的耐受性较低，是中间型品种；奥羽 392 (S2)、临稻 16 号 (S7)、龙粳 25 号 (S8) 和牡丹江 17 (S9) 是强耐热型品种；W1202 (S1)、合系 27 号 (S4)、垦育 16 号 (S5)、辽粳 326 (S6)、青早稻 (S11)、沈农 2100 (S12)、万年 (S13) 和永山稻 (S14) 是耐热型品种。其中，奥羽 392 (S2)、合系 27 号 (S4) 和垦育 16 号 (S5) 的年均结实率均>80%，千粒质量和单株总粒数保持相对较高的水平，临稻 16 号 (S7) 的结实率>85%，且年均千粒质量最大。综上所述，奥羽 392 (S2) 和临稻 16 号 (S7) 是具有强耐高温能力且综合农艺性状较好的品种，这些材料对未来粳稻耐高温遗传研究及育种工作意义重大。

在正常条件下，水稻体内自由基的生成和清除处于动态平衡，当处于高温逆境下，水稻体内的这种平衡会被打破从而导致活性氧的积累，最终伤害细胞。黄英金等^[16]研究发现：高温胁迫后，水稻叶片的质膜通透性增强，游离脯氨酸增多，过氧化物酶 (POD)、过氧化氢酶 (CAT) 和超氧化物歧化酶 (SOD) 活性均呈上升趋势，说明这几类酶活性增强是水稻遭遇高温后的保护机制之一。张桂莲等^[17]研究发现：水稻叶片中含有 POD、

CAT 和 SOD，这 3 种酶活性在高温胁迫初期有所上升，之后迅速降低，且耐高温能力强的水稻酶活增幅较大。本研究表明：经历了连续高温胁迫后，15 份材料的 SOD、CAT 和 POD 活性均不同程度升高，这与前人研究结果一致。其中，丰优 100 (S3)、千重浪 1 号 (S10) 和元子粘稻 (S15) 的结实率经高温胁迫后降幅较大，同时 SOD、CAT 和 POD 活性在高温条件下与对照组差异不明显，结实率降低的原因可能就是抗氧化酶系统中的 SOD、CAT 和 POD 活性对高温胁迫的抗逆响应不灵敏。高温胁迫下，耐热型品种和强耐热型品种 W1202 (S1)、垦育 16 号 (S5)、辽粳 326 (S6)、青早稻 (S11)、沈农 2100 (S12)、万年 (S13)、永山稻 (S14)、临稻 16 号 (S7)、龙粳 25 号 (S8) 和牡丹江 17 (S9) 的 SOD、CAT 和 POD 活性高于对照组，说明高温环境下抗氧化酶活性升高有利于抵御高温胁迫产生的危害^[18]。另外，临稻 16 号、龙粳 25 号和牡丹江 17 等 3 份耐热材料在遭遇高温后 CAT 活性变化不明显，说明植株体内 H₂O₂ 的清除可能不仅仅依靠 CAT，还存在着其他清除机制^[19]；耐热型材料合系 27 号的 POD 活性升高不显著，这可能是由于 POD 本身在酶保护系统中就存在着双面性，可能在逆境中促进了活性氧的生成以及叶绿素的降解，从而导致细胞膜脂过氧化，伤害植株^[20]。

本研究还发现：经历高温胁迫后，水稻植株体内的 SOD、CAT 和 POD 活性存在协同增长，但均未与结实率达显著相关，说明抗氧化酶升高会防止植株损伤，是活性氧清除机制的组成部分之一，但并不是全部^[18]，其完整的保护机制仍有待进一步深入研究。盆栽试验中抗氧化酶 (SOD、POD 和 CAT) 活性变化趋势与结实率评价耐高温特性的结果几乎吻合，并且与田间高温试验的结果比较一致，进一步说明遭遇高温胁迫后水稻剑

叶抗氧化酶活性与水稻的结实率呈正相关关系。

综上所述,依据相对结实率对水稻的耐高温特性进行分级评价是可靠的,这适用于大批量水稻的鉴定筛选。

4 结论

本研究依据相对结实率筛选出2个综合农艺性状较好且具有强耐高温特性的优异品种;此外,可结合表型和生理生化等多项指标,尤其是水稻剑叶中的抗氧化酶活性进行综合考察和评价,最终确定水稻的耐高温特性。

[参考文献]

- [1] HUANG M, JIANG L G, XIA B, et al. Yield gap analysis of super hybrid rice between two subtropical environments[J]. Australian Journal of Crop Science, 2013, 7(5): 600.
- [2] 国家统计局. 国家数据(2019) [DB/OL]. [2020-05-03]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01&zb=A0D0F&sj=2019>.
- [3] SUN X S, LONG Z W, SONG G P, et al. High-temperature episodes with spatial-temporal variation impacted middle-season rice yield in China[J]. Agronomy Journal, 2018, 110(3): 961. DOI: 10.2134/agronj2017.09.0510.
- [4] 胡兰香. 南方梗稻育种分析[J]. 南方农业, 2018, 12(18): 180. DOI: 10.19415/j.cnki.1673-890x.2018.18.100.
- [5] 宋建, 乐明凯, 符冠富, 等. 水稻高温胁迫伤害机理研究进展[J]. 中国稻米, 2009(6): 8. DOI: 10.3969/j.issn.1006-8082.2009.06.003.
- [6] 李守华, 田小海, 黄永平, 等. 江汉平原近50年中稻花期危害高温发生的初步分析[J]. 中国农业气象, 2007(1): 5. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6362.2007.01.002.
- [7] 黎毛毛, 廖家槐, 张晓宁, 等. 江西省早稻品种抽穗扬花期耐热性鉴定评价研究[J]. 植物遗传资源学报, 2014, 15(5): 919. DOI: 10.13430/j.cnki.jpgr.2014.05.001.
- [8] 郭晶心, 曾文智, 周宝津, 等. 开花期高温胁迫对不同水稻品种花粉萌发和结实的影响[J]. 华南农业大学学报, 2010, 31(2): 50. DOI: 10.3969/j.issn.1001-411X.2010.02.014.
- [9] TSUTOMU M, KENJI O, TAKESHI H. The difference in sterility due to high temperatures during the flowering period among japonica-rice varieties[J]. Crop Science Society of Japan, 2001, 4(2): 90. DOI: 10.1626/pps.4.90.
- [10] TSUTOMU M, KENJI O. Rice (*Oryza sativa* L.) cultivars tolerant to high temperature at flowering: anther characteristics[J]. Annals of Botany, 2002, 89(6): 683. DOI: 10.1093/aob/mcf112.
- [11] 杨永杰, 符冠富, 熊杰, 等. 高温对水稻的影响及水稻耐热性测评方法研究[J]. 中国稻米, 2012, 18(1): 39. DOI: 10.3969/j.issn.1006-8082.2012.01.008.
- [12] 郭培国, 李荣华. 夜间高温胁迫对水稻叶片光合机构的影响[J]. 植物学报, 2000, 42(7): 673. DOI: 10.3321/j.issn:1672-9072.2000.07.003.
- [13] DUAN L F, YANG W N, HUANG C L, et al. A novel machine-vision-based facility for the automatic evaluation of yield-related traits in rice[J]. Plant Methods, 2011(1): 44. DOI: 10.1186/1746-4811-7-44.
- [14] 姚凤梅, 张佳华. 1981—2000年水稻生长季相对极端高温事件及其气候风险的变化[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(4): 37. DOI: 10.13577/j.jnd.2009.0407.
- [15] 陈升宇, 刘安国, 张亚杰, 等. 气候变化背景下湖北省水稻高温热害变化规律研究[J]. 气象与减灾研究, 2013, 36(2): 51. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9033.2013.02.007.
- [16] 黄英金, 张小牛, 刘陆生, 等. 优质早籼新品种农大228耐高温逼熟生理基础研究初探[J]. 植物遗传资源科学, 2001, 2(4): 8. DOI: 10.13430/j.cnki.jpgr.2001.04.002.
- [17] 张桂莲, 陈立云, 雷东阳, 等. 水稻耐热性研究进展[J]. 杂交水稻, 2005, 20(1): 1. DOI: 10.16267/j.cnki.1005-3956.2005.01.001.
- [18] 张桂莲, 陈立云, 张顺堂, 等. 高温胁迫对水稻剑叶保护酶活性和膜透性的影响[J]. 作物学报, 2006, 32(9): 1306. DOI: 10.3321/j.issn:0496-3490.2006.09.007.
- [19] 王艳, 高鹏, 黄敏, 等. 高温对水稻开花期剑叶抗氧化酶活性及基因表达的影响[J]. 植物科学学报, 2015, 33(3): 355. DOI: 10.11913/PSJ.2095-0837.2015.30355.
- [20] 许长成, 邹琦. 大豆叶片早促衰老及其与膜脂过氧化的关系[J]. 作物学报, 1993, 19(4): 359. DOI: 10.3321/j.issn:0496-3490.1993.04.011.

责任编辑: 何馨成