

The Application of Computational Biology in Evaluating Heat Resistance of Hybrid Rice Combinations in Whole Growth Stage[#]

Jianfeng Cheng^{1,2*}, Yibai Liu¹, Xiaoyun Pan¹, Jinhu Zhao¹

¹Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Genetic Breeding, Ministry of Education, Jiangxi Agricultural University, Nanchang

²Institute of Plant Physiology and Ecology, Shanghai Institutes for Biological Sciences, Chinese Academy of Sciences, Shanghai

Email: chjfkarl@163.com

Received: Oct. 19th, 2011; revised: Nov. 13th, 2011; accepted: Nov. 16th, 2011.

Abstract: With increasing temperature with glasshouse, the heat resistances and responses of 37 hybrid rice combinations to high temperature in whole stage were analyzed and evaluated with the heat susceptibility index, heat resistance coefficient and geometric mean in yields and their traits (panicle length, primary branches, secondary branches, total grains, no-filled grains, panicle number, 1000-grain-weight, seed-setting rate and grain density). The results showed that heat susceptibility indexes, heat resistance coefficient and geometric means in yields and their traits of 35 hybrid rice combinations to high temperature in whole stage were significantly genotypic differences. The maximum and minimum responses or heat susceptibility indexes of traits were respectively those of secondary branches and seed-setting rate. The maximum and minimum geometric means of traits were respectively those of no-filled grains and panicle length. Correlations of heat response or susceptibility indexes of 1000-grain-weight and seed-setting rate, geometric mean of total grains and grain density to heat resistance coefficient were significant at 0.01 level. The clustering and discrimination analyses of heat resistance in 37 hybrid rice combinations were conducted according to the comprehensive heat resistances of responses, heat susceptibility indexes and geometric means in yields and their traits, which indicated that the results had no fully common with the direct evaluation according to heat resistance coefficient, and the best consistency (70.27%) with heat susceptibility indexes, the next (59.50%) with geometric means and the worst (48.65%) with comprehensive responses. Therefore, comprehensive heat resistance of heat susceptibility indexes in yield traits was the dependent method and index of indirect evaluation on rice heat resistance, the maximum effect with 1000-grain-weight and seed-setting rate.

Keywords: Computational Biology; Hybrid Rice; Heat Resistance; High Temperature; Heat Susceptibility Index

计算生物学在杂交稻全生育期抗热性评价中的应用[#]

程建峰^{1,2*}, 刘宜柏¹, 潘晓云¹, 赵金虎¹

¹江西农业大学教育部作物生理生态与遗传育种重点实验室, 南昌

²中国科学院上海生命科学研究院植物生理生态研究所, 上海

Email: chjfkarl@163.com

收稿日期: 2011年10月19日; 修回日期: 2011年11月13日; 录用日期: 2011年11月16日

摘要: 采用玻璃温室增温法, 以产量及其性状(穗长、一次枝梗数、二次枝梗数、总粒数、空粒数、穗数、千粒重、结实率、着粒密度和单株产量)的抗热响应、感热指数和几何均值为抗热性指标, 对37个杂交稻组合进行了全生育期抗热性的评价。结果表明, 不同杂交稻组合产量及其性状对全生育期高温的响应、感热指数和几何均值存在着显著基因型差异, 对高温的响应和性状感热指数以二次枝梗数为最大和结实率为最小, 性状几何均值以空粒数为最大和穗长为最小。相关分析发现, 千粒重、结实率的性状响应和感热指数与抗热系数呈极显著相关, 总粒数和着粒密度的几何均值与抗热系数呈极显著相关。以综合响应、性状感热指数和性状几何均值的综合抗热力为依据对杂交稻组合的抗热性进行聚类 and 判别分析发现, 三种间接评价方法结果与抗旱系数直接评价结果并不完全一致, 吻合度最好的是性状感热指数(70.27%), 而综合性状居中(59.50%), 性状几何均值最差(48.65%)。因此, 产量性状感热指数的综合抗热力可作为杂交水稻抗热性间接评价的可靠方法和指标。

关键词: 计算生物学; 杂交稻; 抗热性; 高温; 感热指数

1. 引言

气候预测表明, 温室效应将导致全球气温上升, 极端高温出现频率增加, 在许多地区, 高温已成为影响作物生长的主要因素之一, 整个种植业面临高温挑战^[1,2]。由于高温逆境对植物的影响发生的时间和空间不及旱涝和寒冻等广泛, 特别是它的隐蔽性, 遂造成对高温影响的研究不甚广泛和深入, 夏旱时间的热害常被忽略就是一例^[2]。水稻高温热害在许多盛产水稻国家都有发生, 受害面积略有 400 万 hm^2 , 我国高温热害主要发生在长江流域以南, 较严重地区是江西大部、湖南东部、福建西部、浙江西南部、四川东部和广东东北部, 导致水稻大幅度减产^[3]。因此, 加速选育和推广应用耐热性强的优良组合成为战胜高温灾害的根本性措施, 重视并了解水稻的热胁迫反应及其耐热性具有十分重要的理论与实践意义。

中籼水稻杂交组合在长江流域稻区抽穗开花期一般处于 8 月上、中旬, 此期自然气温较不稳定, 时常出现异常高温, 年份或地区间高温值差异较大, 使得一些具有高产潜力组合或组合的高产性不稳定, 给大面积推广带来风险性, 故了解组合或组合结实性对高温的适应能力是必要的^[4]。引进外地或新育成的水稻杂交组合的高产稳定性评价是通过多年多点组合区域试验来进行的, 这对评价组合的综合性状和产量的稳定性是必不可少有效方法, 但对于产量的高温稳定性这单一性状, 由于自然条件下难以遇到稳定存在的适宜鉴定条件, 不能有效地评价其高温影响程度, 直到“八五”国家水稻育种攻关项目中才增加水稻组合抗热性的鉴定内容, 以弥补国内在此项研究中的空白^[5]。本试验以杂交稻组合为材料, 采用玻璃温室增温法, 研究了全生育期高温对水稻产量及其性状的影响, 并利用性状感热指数和性状的几何均值对杂交组合进行了综合评价, 为杂交稻组合的选育和栽培种植提供理论依据与技术参考, 对促进水稻生产持续、稳步发展具有深远意义。

2. 材料与方法

2.1. 供试材料

37 个国家杂交稻区试组合, 由农业部国家农作物

*基金项目: 江西省教育厅重点项目资助[赣教技字(2006)150 号]。

品种区域试验中心提供, 组合编号见表。

2.2. 试验设计

试验于 2005 年 5 月~10 月在江西农业大学植物生理研究室进行。种子用 1% 的 H_2O_2 消毒, 清水浸种至露白播种, 日期为 5 月 20 日, 育秧采用常规露地湿润法^[6]。6 月 20 日, 选择生长一致的秧苗进行移栽, 每组合 8 盆, 每盆 4 苗。试验设高温和常温两个处理, 高温采用玻璃温室增温。其他栽培管理为无差别的常规性施肥和灌溉管理。

2.3. 测定项目和方法

自移栽之日起每日记录四个时段(2:00, 8:00, 14:00, 20:00)的气温。成熟时取样考种, 考察项目有穗长、一次枝梗数、二次枝梗数、总粒数、空粒数、穗数、千粒重, 并计算结实率、着粒密度和单株产量^[7,8]。

2.4. 数据分析

2.4.1. 抗热性的指标的计算

性状对高温的响应 = (高温下性状值-常温下性状值)/常温下性状值 $\times 100\%$ ^[9]; 抗热系数 = (高温下产量-常温下产量)/常温下产量 $\times 100\%$ ^[10]; 感热指数(S) = $(1 - \text{YD}/\text{YP})/\text{D}$, 几何平均值 = $(\text{YD} \times \text{YP})^{1/2}$, YD 表示某一基因型在热胁迫试验环境下的性状观测值的平均值, YP 表示该基因型在非热胁迫试验环境下的性状观测值的平均值, D(环境胁迫强度) = $1 - \overline{\text{YD}}/\overline{\text{YP}}$ ($\overline{\text{YD}}$: 高温胁迫试验环境下全部基因型 YD 的平均值; $\overline{\text{YP}}$: 非热温胁迫试验环境下全部基因型 YP 的平均值)^[11-13]。

2.4.2. 抗热性的鉴定与评价

1) 抗热性的直接鉴定: 以目前被广泛认可和采用的产量抗热系数为指标, 对单株产量的模糊隶属函数值进行聚类来进行抗热等级的直接评定^[14-16]。

2) 抗热性的综合鉴定: 以调查产量及其性状的抗热响应进行模糊隶属函数的分析, 后对模糊隶属函数值进行聚类来进行抗热等级的评定^[14-16], 计算某一组合的综合抗热能力(D), 然后对 D 值进行聚类来进行抗热等级的综合评定^[17,18]。D 值的计算公式为:

$$D = \sum_{j=1}^n \left[u(x_j) \cdot \left(r_j / \sum_{j=1}^n |r_j| \right) \right] \quad (j = 1, 2, 3 \dots n)$$

式中 D 为各组合在热胁迫下用表征水稻抗热性状为指标进行综合评价抗热性度量值, r_j 为各组合第 j 个指标与抗热系数间的相关系数; $\mu(x_j)$ 为第 j 个指标的隶属函数值, 如果 r_j 为负值, 则以 $1 - \mu(x_j)$ 代替式中的 $\mu(x_j)$; $r_j / \sum_{j=1}^n |r_j|$ 为指标权数, 表示第 j 个指标在所有指标中的重要程度。

3) 鉴定方法的比较: 以抗热性的直接评定等级为参照, 对其指标模糊隶属函数值和 D 值分别进行判别分析^[19]。

以上所有数据分析均在统计分析软件包——SPSS 11.5 上进行^[19]。

3. 结果与分析

3.1. 杂交稻组合全生育期的温度变化

由全生育期不同时间段室内外的温度及其温差变化曲线可知(图 1), 在 2:00 和 8:00 时, 室内温度要比室外普遍高出 1°C 以上, 其中最高温差为 6°C ; 20:00 时室内温度也比室外普遍高出 1°C 以上, 但最高温差达到 8°C ; 而 14:00 时则要高出 4°C 以上, 最高温差甚至达到 14°C , 最低温差均为 0°C 。而最高气温大于或等于 35°C 且持续 3 天的 6, 7, 8 月份以及 9 月份均有出现(图 1), 这说明不同处理的杂交稻在全生育期均已造成不同程度的热害。

3.2. 不同温度下杂交稻组合产量及其性状的基因型差异

在不同温度下国家杂交稻组合产量及其性状的变异程度大小不一(图 2), 这表明不同杂交稻产量及其性状对高温的响应存在显著的基因型差异。高温下的变异系数为空粒数 > 二次枝梗数 > 单株产量 > 穗数 > 总粒数 > 结实率 > 着粒密度 > 一次枝梗数 > 千粒重 > 穗长, 常温下的变异系数为空粒数 > 二次枝梗数 > 单株产量 > 总粒数 > 千粒重 > 着粒密度 > 穗数 > 一次枝梗数 > 穗长 > 结实率; 由图 3 还可知, 高温下绝大部分产量性状变异大于常温, 只有千粒重表现为常温大于高温, 这说明高温胁迫将加大产量及其性状的基因型差异。

3.3. 杂交稻组合产量性状对全生育期高温的响应及其抗热性评价

不同杂交稻组合产量及其性状对高温响应的变异程度大小不一(图 3), 依次为二次枝梗数 > 着粒密度 > 穗长 > 千粒重 > 总粒数 > 一次枝梗数 > 穗数 > 单株产量 > 综合抗热力 > 空粒数 > 结实率。相关分析表明(表 1), 一次枝梗、总粒数、千粒重、结实率和着粒密度对高温的响应与抗热系数呈极显著正相关, 相关性大小为千粒重 > 结实率 > 一次枝梗数 > 着粒密度 > 总粒数; 二次枝梗数对高温的响应与抗热系数呈显著正相关, 穗长、空粒数和穗数对高温的响应与抗热系数无显著相关。上述结果表明千粒重和结实率可反映杂交组合的抗热性。

作物形成产量的能力是鉴定作物抗热性最可靠的指标^[20]。由组合抗热系数可知(表 1), 高抗组合有 2010, 2034, 低抗组合有 2002, 2004, 2007, 2013, 2021, 2022, 2023, 2025, 2026, 2029, 2035, 2041, 2042, 2047, 2048, 2049, 2050, 2052, 其余均为中抗。不同水稻组合的产量性状对全生育期高温的表现出不同的抗热性, 为综合评价组合的抗热性, 通过计算综合抗热力可知(表 1), 组合 2010 表现为高, 组合 2002, 2023, 2029, 2032, 2038, 2047, 2050, 2052 表现为低, 其余均为中。

3.4. 采用性状感热指数对杂交稻组合产量性状对全生育期高温响应的分类

水稻抗热性的鉴定, 国内外通常采用热感指数的方法, 它能表征在热胁迫环境与正常环境条件下观测性状变化的量度, 能客观的反映不同组合的抗热性^[11-13]。水稻产量及其性状对高温响应的性状热感指数的变异程度不同(图 4), 变异大小依次为二次枝梗数 > 综合抗热力 > 着密度粒 > 穗数 > 总粒数 > 千粒重 > 一次枝梗数 > 穗数 > 单株产量 > 空粒数 > 结实率。表 2 表明, 与抗热系数呈极显著相关的有千粒重、结实率、一次枝梗数、着粒密度和总粒数, 相关性大小为千粒重 > 结实率 > 一次枝梗数 > 着粒密度 > 总粒数; 与抗热系数呈显著相关的只有二次枝梗数, 与抗热系数无显著相关的有空粒数、穗长、穗数, 这说明千粒重和结实率的感热指数能较好的表征产量

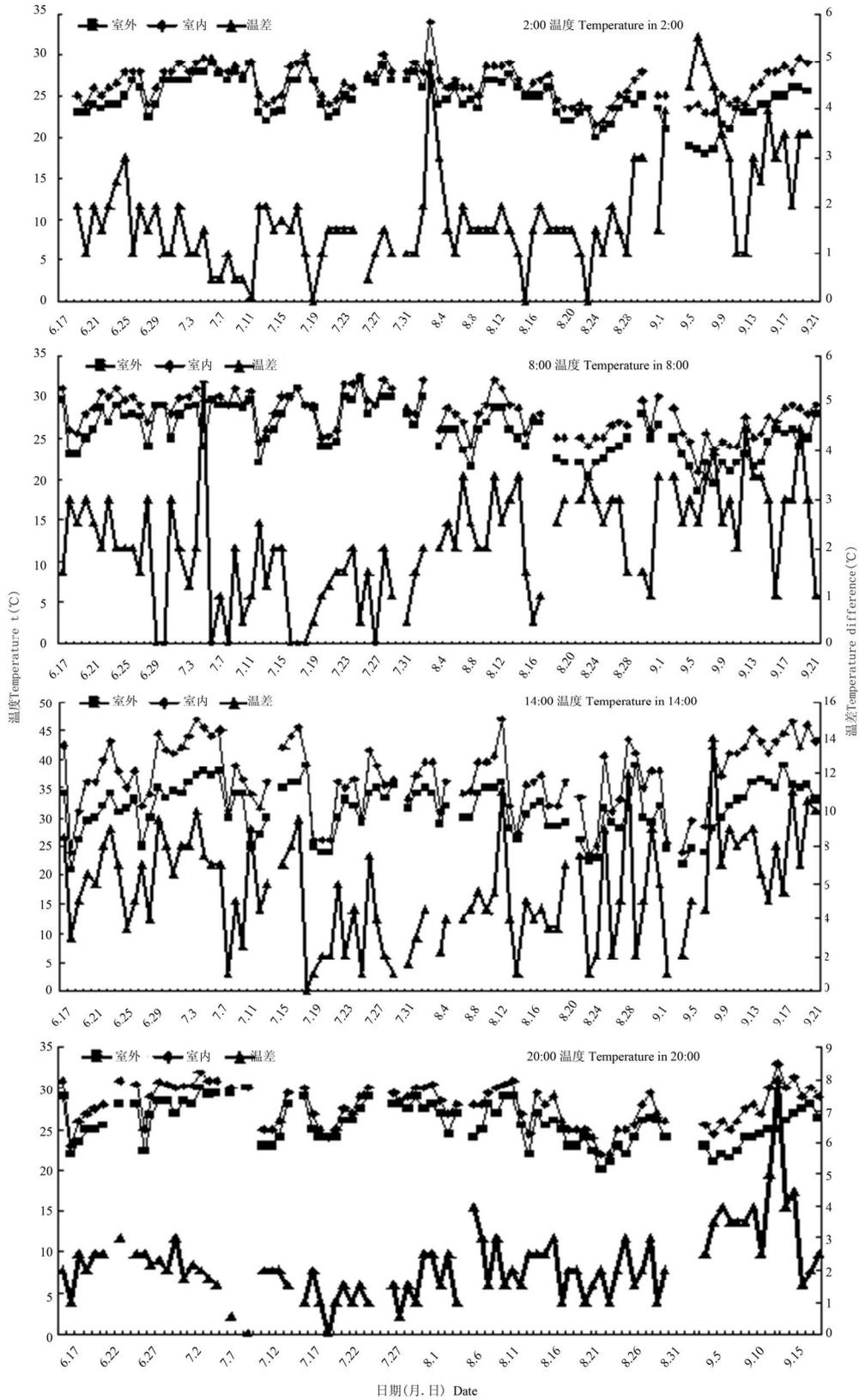


Figure 1. The curve line of temperature and temperature difference in the whole stage
图 1. 全生育期温度和温差变化曲线

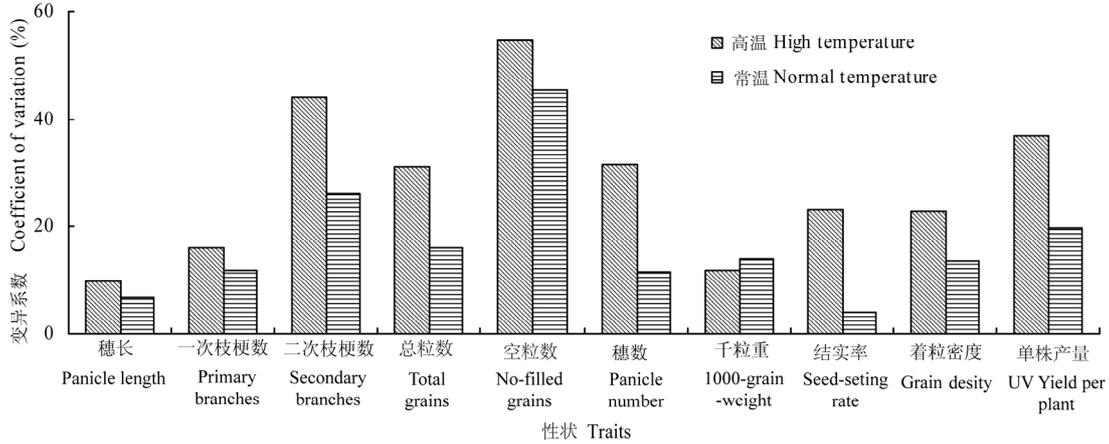


Figure 2. The variation of yield and yield traits in hybrid rice combinations under the different temperature
图 2. 不同温度下杂交稻组合产量性状的变异

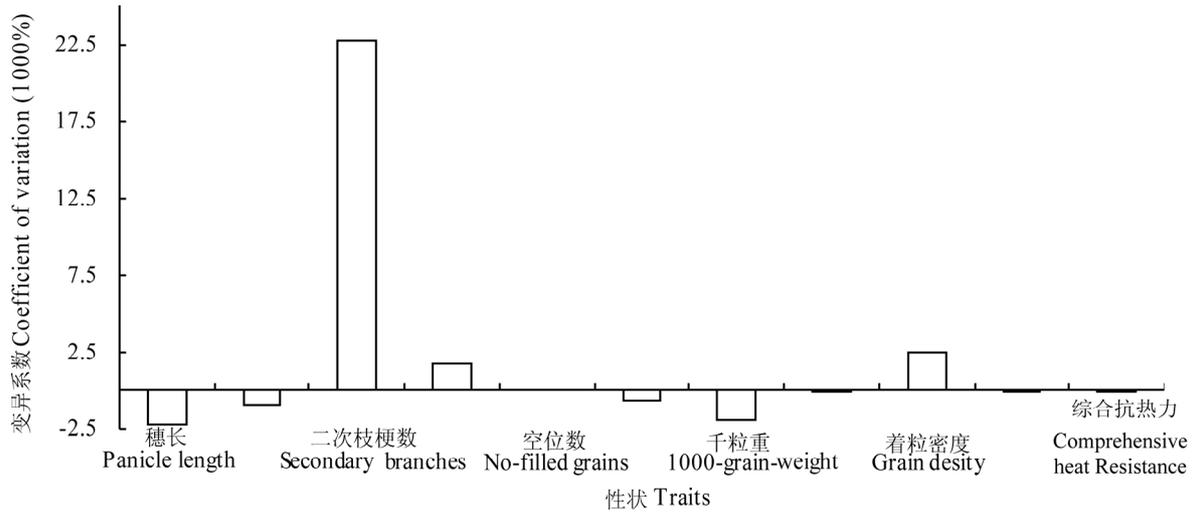


Figure 3. The variation in the responses of yields and their traits in hybrid rice combinations to high temperature in whole stage
图 3. 杂交稻组合产量性状对全生育期高温响应的变异

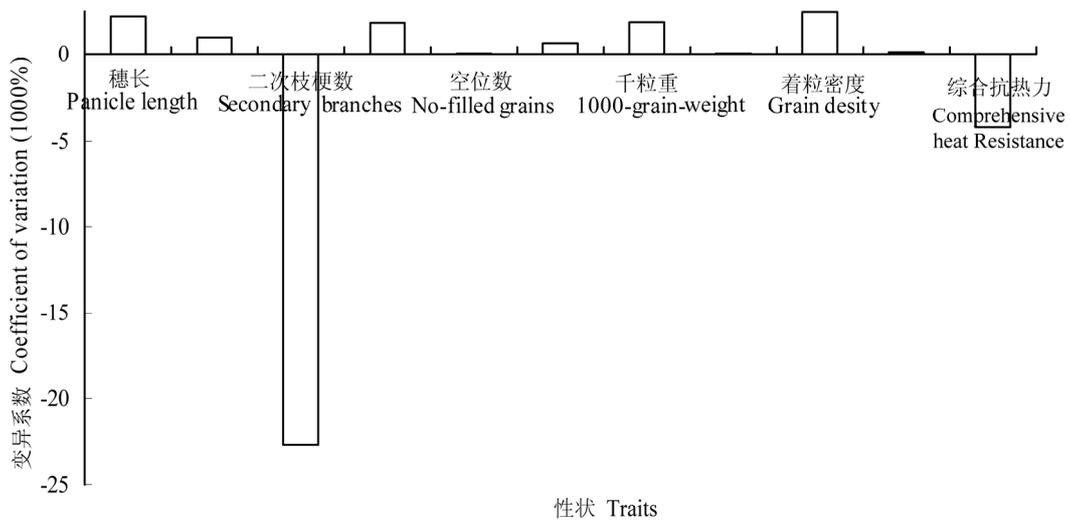


Figure 4. The variation in the responses of yields and their traits in hybrid rice combinations to high temperature in whole stage
图 4. 杂交稻组合产量性状对全生育期高温响应的性状感热指数的变异

Table 1. Responses of yields and their traits in hybrid rice combinations to high temperature in whole growth stage and types according to them
表 1. 杂交稻组合产量性状对全生育期高温的响应及分类

CB	PL	PB	SB	TG	NFG	PN	TGW	SSR	GD	YPP	HRD	CHR	RD
2001	-1.11	-6.95	-16.35	-6.83	73.52	0.00	3.99	-7.80	-5.80	-10.68	中	-3.74	中
2002	-11.45	-17.75	-42.69	-24.73	407.76	86.67	-28.06	-42.24	-14.98	-68.65	低	-20.90	低
2003	8.83	-7.19	-9.12	-6.36	106.36	53.33	-1.36	-14.26	-13.97	-20.83	中	-5.50	中
2004	-9.90	-4.66	-44.63	-30.00	182.08	-27.78	-3.32	-40.71	-22.34	-59.84	低	-12.34	中
2006	-4.05	12.96	-9.73	6.02	-7.46	-6.67	1.31	1.51	10.52	9.08	中	1.37	中
2007	-6.19	-17.34	-37.81	-23.32	301.71	21.05	4.44	-27.44	-18.25	-41.95	低	-13.98	中
2010	-5.61	0.77	-26.19	-16.31	27.14	16.67	191.96	-6.85	-11.32	127.27	高	11.95	高
2011	-4.48	-20.40	-26.09	-8.17	25.64	10.00	9.05	-4.29	-3.90	-4.18	中	-2.96	中
2013	-5.79	-19.27	-40.07	-26.66	58.31	-11.11	2.80	-13.94	-22.14	-35.04	低	-7.13	中
2014	-5.61	-5.61	-26.71	-14.61	397.28	-11.11	9.05	-18.45	-9.54	-24.07	中	-13.62	中
2017	1.95	11.39	9.68	9.83	360.81	-23.81	10.10	-24.19	7.74	-8.29	中	-8.49	中
2020	-2.42	6.17	-27.09	-2.35	-3.80	-5.88	3.47	0.22	0.08	1.25	中	-0.48	中
2021	2.67	-34.18	-57.64	-29.50	108.71	21.43	2.71	-16.51	-31.33	-39.48	低	-10.52	中
2022	-2.63	4.58	-25.99	-23.20	33.02	114.29	3.52	-13.13	-21.15	-30.95	低	-4.77	中
2023	-5.06	-0.53	24.72	4.49	653.31	-15.79	-16.44	-46.21	10.06	-53.07	低	-20.26	低
2024	-3.84	-6.28	-23.42	-8.19	127.94	-6.67	1.28	-9.12	-4.54	-15.47	中	-5.79	中
2025	-3.14	16.68	8.63	11.00	191.75	-47.37	-33.23	-22.68	14.61	-42.65	低	-6.85	中
2026	-4.39	-0.32	-15.24	-10.38	263.74	-28.57	0.75	-44.54	-6.28	-49.93	低	-11.28	中
2028	1.13	13.78	26.39	37.30	591.15	33.33	-8.43	-41.64	35.75	-26.68	中	-14.14	中
2029	0.40	-8.83	19.41	-12.05	717.22	-26.67	-17.77	-53.52	-12.41	-66.44	低	-24.82	低
2030	5.58	25.71	40.78	41.37	324.32	-38.89	-16.26	-20.92	33.95	-6.44	中	-4.68	中
2031	7.86	11.11	66.77	38.28	187.75	-14.29	-9.16	-15.45	28.22	6.29	中	-0.28	中
2032	2.81	12.07	48.11	29.02	802.55	-21.05	-12.31	-21.36	25.46	-11.05	中	-18.67	低
2033	8.31	-4.64	24.63	19.74	345.45	-25.00	-12.96	-23.66	10.59	-20.46	中	-9.37	中
2034	4.20	39.67	122.09	78.16	643.46	-29.41	11.98	-22.43	70.98	54.76	高	-3.81	中
2035	-3.91	5.80	4.41	-6.46	186.96	-40.00	-11.21	-42.66	-2.67	-52.31	低	-8.61	中
2036	13.99	8.49	72.19	54.98	300.91	-44.44	-8.66	-32.13	35.97	-4.01	中	-2.85	中
2037	10.71	17.08	48.86	39.69	244.89	-37.50	-15.94	-22.66	26.16	-9.14	中	-3.09	中
2038	10.48	8.25	38.82	33.31	759.62	-33.33	-16.95	-27.67	20.65	-19.95	中	-18.64	低
2041	6.89	-1.03	2.13	19.85	502.18	0.00	-17.12	-38.92	12.12	-39.41	低	-15.62	中
2042	2.44	-6.35	4.71	-12.69	169.90	-5.56	-24.47	-32.11	-14.78	-55.31	低	-9.96	中
2043	1.67	-13.70	24.44	11.54	248.51	-18.75	-4.94	-25.09	9.70	-20.50	中	-7.31	中
2047	-14.12	-32.83	-61.10	-46.11	297.22	12.50	-16.93	-13.60	-37.25	-61.28	低	-18.50	低
2048	-1.61	8.90	6.69	-15.64	188.69	10.00	-2.94	-29.78	-14.29	-42.45	低	-8.00	中
2049	1.85	-22.86	-51.92	-23.30	153.80	-6.67	-14.90	-26.68	-24.67	-52.17	低	-12.36	中
2050	-3.19	-19.94	-13.16	-4.20	507.05	-42.11	-15.05	-68.40	-1.04	-74.25	低	-20.89	低
2052	-4.09	-12.18	-31.98	-28.13	747.67	-5.26	-16.38	-69.38	-25.08	-81.59	低	-30.23	低
R	0.254	0.470**	0.362*	0.440**	-0.253	-0.033	0.769**	0.617**	0.452**				

注(Notes): CB: 组合, Combination; R: 相关系数, Correlation; PL: 穗长, Panicle length; PB: 一次枝梗数, Primary branches; SB: 二次枝梗数, Secondary branches; TG: 总粒数, Total grains; NFG: 空粒数, No-filled grains; PN: 穗数, Panicle number; TGW: 千粒重, 1000-grain -weight; SSR: 结实率, Seed-setting rate; GD: 着粒密度, Grain density; YPP: 单株产量, Yield per plant; HRD: 抗热等级, Heat resistance degree; CHR: 综合抗热力, Comprehensive heat Resistance; RD: 响应等级, Response degree; **和*分别表示 1% 和 5% 差异显著水平, ** and * indicate respectively the significance at 1% and 5% levels. 下同, the same as below.

Table 2. Heat susceptibility indexes of yields and their traits in hybrid rice combinations to high temperature in whole growth stage and types according to them

表 2. 杂交稻组合产量性状感热指数和以其为标准的分类

CB	PL	PB	SB	TG	NFG	PN	TGW	SSR	GD	YPP	CHR	HRD
2001	4.42	2.93	12.11	-5.56	0.29	0.00	-0.69	0.29	-57.98	0.35	9.67	高
2002	45.79	7.49	31.62	-20.10	1.63	-12.75	4.84	1.60	-149.76	2.27	29.80	高
2003	-35.33	3.03	6.75	-5.17	0.42	-7.84	0.23	0.54	-139.66	0.69	16.77	高
2004	39.61	1.97	33.06	-24.39	0.73	4.08	0.57	1.54	-223.39	1.98	37.33	高
2006	16.18	-5.47	7.21	4.90	-0.03	0.98	-0.23	-0.06	105.24	-0.30	-12.57	中
2007	24.77	7.32	28.01	-18.96	1.20	-3.10	-0.77	1.04	-182.51	1.39	30.49	高
2010	22.45	-0.32	19.40	-13.26	0.11	-2.45	-33.10	0.26	-113.21	-4.20	12.19	高
2011	17.92	8.61	19.33	-6.64	0.10	-1.47	-1.56	0.16	-39.04	0.14	9.64	高
2013	23.15	8.13	29.68	-21.68	0.23	1.63	-0.48	0.53	-221.41	1.16	35.66	高
2014	22.46	2.37	19.79	-11.88	1.59	1.63	-1.56	0.70	-95.40	0.80	16.98	高
2017	-7.78	-4.80	-7.17	7.99	1.44	3.50	-1.74	0.91	77.42	0.27	-12.58	中
2020	9.66	-2.60	20.06	-1.91	-0.02	0.87	-0.60	-0.01	0.84	-0.04	2.32	高
2021	-10.70	14.42	42.70	-23.98	0.43	-3.15	-0.47	0.62	-313.35	1.30	47.15	高
2022	10.53	-1.93	19.25	-18.86	0.13	-16.81	-0.61	0.50	-211.50	1.02	31.01	高
2023	20.24	0.22	-18.31	3.65	2.61	2.32	2.83	1.75	100.60	1.75	-12.24	中
2024	15.36	2.65	17.35	-6.66	0.51	0.98	-0.22	0.34	-45.36	0.51	9.60	高
2025	12.57	-7.04	-6.39	8.94	0.77	6.97	5.73	0.86	146.06	1.41	-18.51	中
2026	17.57	0.13	11.29	-8.44	1.05	4.20	-0.13	1.68	-62.76	1.65	11.45	高
2028	-4.53	-5.81	-19.55	30.32	2.36	-4.90	1.45	1.57	357.54	0.88	-50.21	中
2029	-1.61	3.73	-14.38	-9.80	2.86	3.92	3.06	2.02	-124.15	2.20	16.67	高
2030	-22.30	-10.85	-30.21	33.64	1.29	5.72	2.80	0.79	339.53	0.21	-51.34	中
2031	-31.42	-4.69	-49.46	31.12	0.75	2.10	1.58	0.58	282.20	-0.21	-45.98	中
2032	-11.26	-5.09	-35.64	23.59	3.20	3.10	2.12	0.81	254.60	0.36	-38.61	中
2033	-33.25	1.96	-18.24	16.05	1.38	3.68	2.23	0.89	105.95	0.68	-18.26	中
2034	-16.82	-16.74	-90.44	63.54	2.57	4.33	-2.07	0.85	709.76	-1.81	-108.11	低
2035	15.65	-2.45	-3.27	-5.25	0.75	5.88	1.93	1.61	-26.67	1.73	5.07	高
2036	-55.98	-3.58	-53.47	44.70	1.20	6.54	1.49	1.21	359.72	0.13	-59.11	中
2037	-42.83	-7.21	-36.19	32.27	0.98	5.51	2.75	0.86	261.56	0.30	-43.08	中
2038	-41.92	-3.48	-28.76	27.08	3.03	4.90	2.92	1.05	206.52	0.66	-34.14	中
2041	-27.57	0.43	-1.58	16.14	2.00	0.00	2.95	1.47	121.16	1.30	-17.98	中
2042	-9.75	2.68	-3.49	-10.32	0.68	0.82	4.22	1.21	-147.81	1.83	20.02	高
2043	-6.69	5.78	-18.11	9.38	0.99	2.76	0.85	0.95	97.02	0.68	-14.29	中
2047	56.46	13.85	45.26	-37.49	1.19	-1.84	2.92	0.51	-372.51	2.02	61.72	高
2048	6.45	-3.76	-4.96	-12.71	0.75	-1.47	0.51	1.13	-142.93	1.40	19.09	高
2049	-7.40	9.64	38.46	-18.94	0.61	0.98	2.57	1.01	-246.70	1.72	38.15	高
2050	12.75	8.41	9.75	-3.41	2.02	6.19	2.59	2.59	-10.36	2.45	5.70	高
2052	16.38	5.14	23.69	-22.87	2.98	0.77	2.82	2.62	-250.75	2.70	39.24	高
R	0.255	0.471**	0.362*	-0.440**	0.253	-0.033	0.769**	0.617**	-0.453**			

对高温的响应,是衡量水稻抗热性的较好指标。依据性状感热指数的综合抗热力表明(表 2),组合 2034 为低抗,组合 2006、2017、2023、2025、2028、2030、2031、2032、2033、2036、2037、2038、2041 和 2043 为中抗,其余为高抗。

3.5. 采用性状几何均值对杂交稻组合产量性状对全生育期高温响应的分类

杂交组合产量及其性状对高温的响应的几何均值杂交稻存在显著差异(图 5),变异系数为空粒数 > 二次枝梗 > 单株产量 > 总粒数 > 穗数 > 综合抗热力 > 着粒密度 > 结实率 > 一次枝梗 > 千粒重 > 穗长。表 3 表明,与组合单株产量的几何均值呈极显著正相关的是总粒数、着粒密度、二次枝梗、一次枝梗、和穗长,相关性依次递减;与组合单株产量的几何均值呈显著相关的是结实率和穗数,分别为正相关和负相关;其他性状与组合单株产量的几何均值无相关性;因此,总粒数和着粒密度可作为采用性状几何均值来评价杂交稻抗热性的较可靠指标。由表 3 可知,不同水稻杂交组合性状几何均值的综合抗热力大小不一(表 3),聚类分析发现,高抗组合有 2022, 2028, 2030, 2031, 2036, 2037, 2043, 低抗组合有 2001, 2002, 2003, 2004, 2007, 2010, 2013, 2014, 2021, 2023, 2029, 2032, 2047, 2048, 2052, 其余组合均为中抗。

3.6. 不同全生育期高温响应的分类方法的综合评价

对供试杂交稻组合分别采用了抗热系数的直接评

定、性状感热指数和性状几何均值的间接评定,但间接评定的可靠性如何有待证明。相关分析表明,综合响应、性状感热指数与抗热系数均表现为极显著正相关,而性状几何均值则无显著相关(表 4)。判别分析表明(表 4),以性状感热指数为指标的综合抗热力间接评定与直接鉴定间的判别正确百分率为 70.27%,以综合响应为指标的综合抗热力间接评定与直接鉴定间的判别正确百分率为 59.50%,以性状几何均值为指标的综合抗热力间接评定与直接鉴定间的判别正确百分率为 48.65%;这些结果说明,以性状感热指数为指标的综合抗热力间接评定可作为水稻抗热性鉴定与评价的较可靠方法在生产实践中应用。

4. 小结与讨论

抗热性鉴定中除了田间自然鉴定和人工模拟气候鉴定法以外,一些简单可行的室内鉴定方法也被采用,尤以电导率法和配子体生活力鉴定法较为多见^[21]。植物抗热性评价指标很多,但一般采用一两个指标进行,如以品种的千粒重感热指数和几何平均穗粒重^[13]、抗热系数^[22]或模糊隶属函数值^[14-16,23]。尽管上述方法在一些植物上被成功应用,但仍缺乏普遍性,不能避免单一指标所造成的片面性,难以满足生产的需要,故采用多指标进行抗热性鉴定是必要的^[21]。本试验以国家杂交稻组合为材料,采用玻璃温室增温,利用性状感热指数和几何均值的模糊隶属值,求得各性状与抗热系数的相关性和品种的综合抗热力,进行了杂交新组合的综合评价,有效的避免了单一指标的片面性,有利于对品种进行全面的抗热性鉴定与评价。

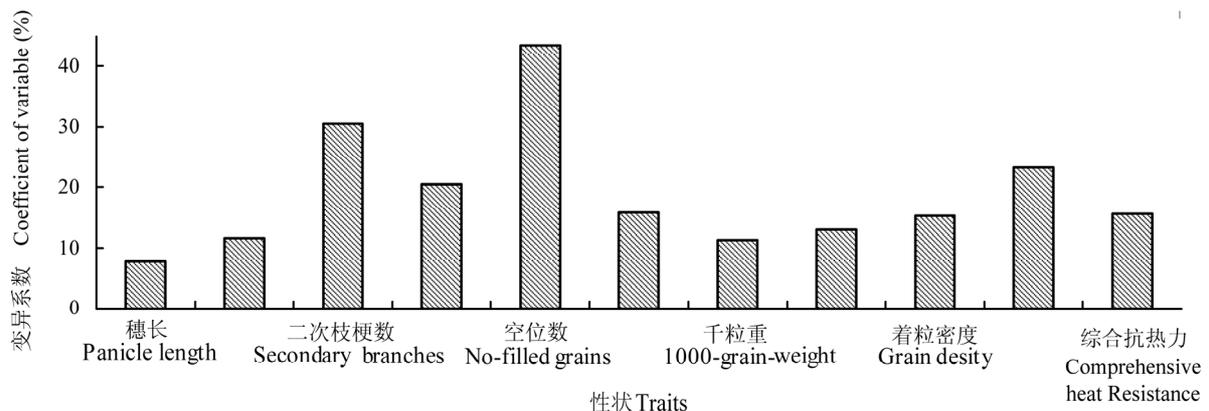


Figure 5. The geometric mean variations of yields and their traits in hybrid rice combinations to high temperature in whole stage

图 5. 杂交稻组合产量性状对全生育期高温响应的性状几何均值的变异

Table 3. Geometric mean of yields and their traits in hybrid rice combinations to high temperature in whole growth stage and types according to them

表 3. 杂交稻组合产量性状几何均值和以其为标准的分类

CB	PL	PB	SB	TG	NFG	PN	TGW	SSR	GD	YPP	CHR	HRD
2001	21.59	10.55	14.15	108.05	12.24	17.00	24.57	88.05	50.05	5.84	40.76	低
2002	21.13	9.25	10.09	97.93	17.42	20.49	22.25	70.79	46.36	3.86	36.04	低
2003	21.73	9.25	10.04	84.70	13.32	18.57	29.22	82.79	38.98	5.12	34.01	低
2004	20.51	9.22	13.02	93.05	22.12	15.30	24.89	67.88	45.37	3.93	36.03	低
2006	23.72	10.42	14.06	118.48	11.74	14.49	25.44	90.07	49.95	6.79	43.10	中
2007	19.24	9.86	8.22	75.77	10.54	20.90	25.29	80.00	39.38	3.83	31.25	低
2010	23.19	10.48	14.79	105.30	15.12	19.44	14.03	85.27	45.42	3.15	38.81	低
2011	21.16	11.15	14.96	119.02	14.52	20.98	25.15	87.63	56.25	6.56	43.63	中
2013	20.30	9.88	11.23	92.54	14.61	16.97	29.67	82.80	45.59	5.68	36.77	低
2014	20.07	10.04	10.51	92.05	8.18	16.97	26.77	86.98	45.86	5.36	36.41	低
2017	23.88	10.66	10.92	95.71	13.80	18.33	27.44	80.94	40.09	5.32	36.36	中
2020	24.12	11.69	16.17	115.56	14.71	16.49	25.50	87.26	47.90	6.43	42.56	中
2021	21.59	8.92	11.20	104.17	13.93	15.43	27.29	84.27	48.24	5.99	39.25	低
2022	23.25	10.95	23.17	143.29	28.67	20.49	27.14	79.04	61.63	7.68	50.34	高
2023	21.95	11.34	14.05	107.12	19.93	17.44	27.47	68.26	48.80	5.02	39.46	低
2024	22.22	10.33	13.71	112.49	10.27	14.49	29.88	89.81	50.62	7.55	42.17	中
2025	22.55	11.20	21.01	134.69	26.70	13.78	20.22	77.18	59.74	5.26	47.99	中
2026	22.26	9.41	21.51	129.82	33.24	11.83	25.57	65.01	58.31	5.40	46.63	中
2028	25.75	12.23	24.28	162.79	34.18	17.32	29.39	69.24	63.22	8.28	54.39	高
2029	22.35	10.38	12.89	97.91	18.10	12.85	27.77	64.04	43.80	4.35	36.74	低
2030	25.06	12.65	24.06	152.92	25.07	14.07	23.92	80.51	61.02	7.36	52.60	高
2031	25.91	14.23	24.91	172.70	31.14	12.96	25.50	80.46	66.65	8.86	57.83	高
2032	21.25	8.25	12.88	90.50	8.23	16.88	25.55	85.64	42.59	4.95	35.69	低
2033	24.42	11.78	20.31	124.81	19.27	13.86	26.07	80.38	51.12	6.54	45.26	中
2034	24.76	10.01	16.66	123.75	16.69	14.28	25.16	82.26	49.96	6.41	44.08	中
2035	22.30	10.29	14.36	109.68	32.86	15.49	27.75	62.77	49.19	4.78	40.37	中
2036	24.64	12.38	21.80	146.28	39.60	13.42	25.37	68.52	59.35	6.36	50.76	高
2037	23.68	10.07	22.95	153.06	32.15	12.65	24.68	76.19	64.63	7.20	52.82	高
2038	21.46	11.85	19.24	136.63	16.77	14.70	25.00	80.93	63.66	6.91	48.67	中
2041	24.45	11.59	22.29	136.53	26.99	17.00	24.93	71.26	55.84	6.06	47.68	中
2042	23.66	12.04	14.78	117.79	27.57	17.49	24.54	71.43	49.78	5.16	42.30	中
2043	24.71	11.73	25.10	171.29	31.98	14.42	21.52	77.41	69.31	7.13	57.06	高
2047	21.07	9.83	10.95	101.26	5.74	16.97	22.72	91.02	48.06	5.24	38.41	低
2048	20.31	9.50	12.50	105.26	21.32	20.98	28.13	74.62	51.82	5.52	39.41	低
2049	22.90	9.84	18.44	118.99	22.42	14.49	25.07	76.76	51.96	5.73	43.51	中
2050	25.94	12.29	18.83	131.98	37.75	14.46	26.58	49.83	50.88	4.37	44.93	中
2052	23.68	10.85	13.41	108.65	22.53	18.49	25.24	51.99	45.88	3.57	37.82	低
R	0.468**	0.509**	0.654**	0.733**	0.247	-0.340*	0.293	0.361*	0.731**			

Table 4. Discrimination analyses on heat resistance of hybrid rice combinations on the basis of heat resistant coefficient in yields and their trait

表 4. 以杂交稻组合抗热指数的抗热性判别分析

性状 Traits	综合响应 Comprehensive response	性状感热指数 Heat susceptibility indexes of traits	性状几何均值 Geometric mean of traits
与抗热系数的相关性 Correlation to heat resistant coefficient	0.786**	-0.479**	0.180
判别正确百分率(%) Discrimination percentage (%)	59.50	70.27	48.65

以往大量研究表明, 水稻耐热性鉴定一般通过形态指标^[24]、生长指标^[24]、生理生化指标^[24-27]和分子生物学指标^[24,25]的变化衡量。本研究表明, 不同杂交稻产量及其性状对高温的响应存在显著的基因型差异, 其中空粒数变异最大, 穗长最小; 且高温下绝大部分产量性状变异大于常温, 这意味着高温胁迫将加大产量及其性状的基因型差异。产量性状对全生育期高温响应的性状响应, 性状感热指数, 性状几何均值的变异则分别以二次枝梗数、二次枝梗数和空粒数最大, 以结实率、结实率和穗长最小; 造成上述现象的原因可能与高温使水稻枝梗和颖花发育受阻、颖花数减少、抽穗延迟和阻碍花粉成熟与花药开裂, 导致不育有关^[28-30]。

水稻耐热性是复杂的生物学性状, 对某一具体品种耐热性的认识既受评价指标或性状、生育时期以及高温处理时间等综合因素的影响, 温度与其它环境因子如光、水或湿度等的互作也对研究结果有很大影响。不同发育时期和产量构成存在耐热性差异, 在水稻的整个生长发育过程中, 以开花期对高温最敏感^[31]、灌浆期次之、营养生长期最小^[30]; 就产量构成性状而言, 则表现为结实率对高温最敏感、每穗粒数次之、千粒重第三、每株穗数最小^[30]。黄英金等认为秕粒率、实粒重、整精米率、垩白度和蛋白质含量的胁迫指数可作为水稻品种灌浆期耐热性田间鉴定的指标^[31]。本试验结果表明, 采用不同评价方法应选用不同的指标, 若采用性状响应和感热指数则选用千粒重和结实率, 采用性状几何均值则采用总粒数和着粒密度, 这与前人的研究存在出入^[2,30,32], 这与本试验水稻全生育期处在较高温度下有关。聚类和判别分析发现, 采用性状综合响应、感热指数和几何均值的间接评价的结果不完全一致, 与抗热系数的吻合度也不一致, 吻合度最好的是性状感热指数(70.27%), 综合响应的吻合度为

59.50%, 性状几何均值吻合度最差(48.65%); 因此, 水稻产量及其性状的感热指数可作为杂交水稻抗热性评价的可靠方法在生产实践中应用。

参考文献 (References)

- [1] 张桂莲, 陈立云, 雷东阳. 水稻耐热性研究进展[J]. 杂交水稻, 2005, 20(1): 1-5.
- [2] 王锋尖, 黄英金. 水稻高温胁迫及耐热性育种[J]. 中国农学通报, 2004, 20(3): 87-90.
- [3] 熊振民, 蔡洪法. 中国水稻[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1992: 777-793.
- [4] 曾汉来, 卢开阳, 贺道华等. 中籼杂交水稻组合结实性的高温适应性鉴定[J]. 华中农业大学学报, 2000, 19(1): 1-4.
- [5] 李太贵, 沈波. 水稻品种开花期抗热性鉴定研究[J]. 作物品种资源, 1995, 1: 35-36.
- [6] 杨文钰, 屠乃美. 作物栽培学各论[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003: 41.
- [7] 张龙步, 董克. 水稻田间试验方法与测定技术[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1993.
- [8] 肖应辉, 余铁桥, 唐湘如. 大穗型水稻单株产量构成研究[J]. 湖南农业大学学报, 1998, 24(6): 428-431.
- [9] 朱昌兰, 肖应辉, 王春明等. 水稻灌浆期耐热的数量性状基因位点分析[J]. 中国水稻科学, 2005, 19(2): 117-121.
- [10] 程建峰, 潘晓云, 刘宜柏. 水稻抗旱性鉴定的形态指标[J]. 生态学报, 25(11): 3117-3125.
- [11] P. L. Brucker, R. C. Froberg. Stress tolerance and adaptation in spring wheat. *Crop Science*, 1987, 27(1): 31-36.
- [12] B. Ehdai, J. G. Waines and A. E. Hall. Differential responses of landrace and improved spring wheat genotypes to stress environments. *Crop Science*, 1988, 28(5): 838-842.
- [13] 闫长生, 肖世和, 张秀英等. 冬小麦组合生育后期的耐热性评价[J]. 华北农学报, 2003, 18(3): 15-17.
- [14] 黎裕. 作物抗旱鉴定方法与指标[J]. 干旱地区农业研究, 1999, 17(2): 79-85.
- [15] 栗雨勤, 张文英, 王有增等. 作物抗旱性鉴定指标研究及进展[J]. 河北农业科学, 2004, 8(1): 58-61.
- [16] 孙彩霞, 沈秀璞. 作物抗旱性鉴定指标及数量分析方法的研究进展[J]. 中国农学通报, 2002, 18(1): 49-51.
- [17] 兰巨生. 农作物综合抗旱性的评价[J]. 中国农学通报, 1994, 10(5): 34-35.
- [18] F. X. Ni, X. X. Hua, X. D. Gao, et al. Studies on several physiological indexes of the drought resistance of sweet potato and its comprehensive evaluation. *Acta Agronomic Sinica*, 1996, 22(4): 392-398.
- [19] 余建英, 何旭宏. 数学统计分析与SPSS应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2003.
- [20] 曹立勇, 赵建根, 占小登等. 水稻耐热性的 QTL 定位及耐热性与光合速率的相关性[J]. 中国水稻科学, 2003, 17(3): 223-

- 227.
- [21] 宋洪元, 雷建军, 李成琼. 植物热胁迫反应及抗热性鉴定与评价[J]. 中国蔬菜, 1998, 23(1): 48-50.
- [22] J. Levitt. Response of plants to environmental stresses. Maryland Heights: Academic Press, 1980: 1-211.
- [23] 程建峰, 戴廷波, 曹卫星等. 稻种资源苗期氮素营养效率的分类鉴定与评价[J]. 作物学报, 2005, 31(12): 1640-1647.
- [24] 陈立松, 刘星辉. 植物抗热性鉴定指标的种类[J]. 干旱地区农业研究, 1997, 15(4): 72-77.
- [25] 欧志英, 林桂珠, 彭长连. 超高产杂交水稻培矮 64S/E32 和两优培九剑叶对高温的响应[J]. 中国水稻科学, 2005, 19(3): 249-254.
- [26] 朱雪梅, 柯永培, 邵继荣等. 高温胁迫对重穗型水稻品种叶片活性氧代谢的影响[J]. 种子, 2005, 24(3): 25-27.
- [27] 钟连进, 程方民, 张国平等. 灌浆结实期不同温度下早籼稻米淀粉链长分布与结构特征差异分析[J]. 中国农业科学, 2005, 38(2): 272-27.
- [28] 西山岩男, 赵贵彬, 凌天行. 水稻高温障碍的研究[J]. 国外农学——水稻, 1982, 5: 17-20.
- [29] 森谷国男. 徐正进译. 水稻高温胁迫抗性遗传育种研究概况[J]. 杂交水稻, 1992, 1: 47-48.
- [30] 杨纯明, L. J. Heilman. 谢国禄译. 短期高温对水稻生长发育和产量的影响[J]. 国外作物育种, 1994, 13(2): 4-5.
- [31] 黄英金, 张宏玉, 郭进耀. 水稻耐高温逼熟的生理机制及育种应用研究初报[J]. 科学技术与工程, 2004, 8(4): 654-657.
- [32] 况浩池, 文绍山, 刘国民. 沪恢 17 及其组合 II 优 7 号抽穗开花期耐热性研究[J]. 西南农业学报, 2002, 15(1): 106-108.