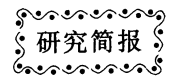


DOI: 10.3724/SP.J.1006.2008.01662



高温胁迫对水稻灌浆结实期叶绿素荧光、抗活性氧活力和稻米品质的影响

滕中华¹ 智 丽² 宗学风¹ 王三根^{1,*} 何光华¹

(¹ 西南大学农学与生物科技学院, 重庆 400716; ² 西南大学园艺园林学院, 重庆 400716)

摘 要: 选用西农优 30 和富优 1 号两个水稻品种, 在灌浆结实期利用人工气候室进行高温处理, 测定叶绿素含量、叶绿素荧光参数、抗活性氧活力的动态及成熟稻米的营养品质。结果表明, 高温胁迫下水稻叶片叶绿素含量降低, 叶绿素荧光参数初始荧光(F_0)明显上升, PS II 的潜在活性(F_v/F_0)和 PS II 的最大光能转化效率(F_v/F_m)均低于对照, 呈下降趋势; 灌浆结实后期 F_v/F_0 和 F_v/F_m 的下降速率最快; 灌浆结实后期抗氧化活力低于对照。同时, 高温胁迫下的成熟稻米总淀粉及直链淀粉含量降低, 蛋白质含量升高, 垩白度上升而千粒重下降。高温胁迫下光合作用的原初反应被抑制, 抗活性氧活力降低, 水稻叶片功能期缩短, 可能是稻米品质降低的重要原因。

关键词: 水稻; 高温胁迫; 叶绿素荧光; 抗活性氧活力; 品质

Effects of High Temperature on Chlorophyll Fluorescence, Active Oxygen Resistance Activity, and Grain Quality in Grain-Filling Periods in Rice Plants

TENG Zhong-Hua¹, ZHI Li², ZONG Xue-Feng¹, WANG San-Gen^{1,*}, and HE Guang-Hua¹

(¹ College of Agronomy and Biotechnology, Southwest University, Chongqing 400716; ² College of Horticulture and Landscape Architecture, Southwest University, Chongqing 400716, China)

Abstract: The synthesis of assimilate such as starch, protein and lipid depends on the photosynthesis. Under stresses, the pigments, primary reaction and electronic transport chain which have relations with photosynthesis are hurt or inhibited. The effect of high temperature caused by “Greenhouse Effects” becomes more and more frequent. To elucidate the injury mechanism under high temperature in rice plants, the dynamic changes of chlorophyll content, chlorophyll fluorescence parameters and active oxygen resistance activity were measured and the grain quality indices including starch, protein, and chalkiness were also analyzed in rice plants of cultivars Xinongyou 30 and Fuyou 1 during grain-filling period under high temperature treatment in climatic cabinets. The results showed that under high temperature (33°C), chlorophyll content of leaves decreased, initial fluorescence (F_0) increased obviously, maximal photochemical efficiency of PS II (F_v/F_m) and the potential photochemical efficiency of PS II (F_v/F_0) decreased, F_v/F_0 and F_v/F_m declined faster during the whole grain-filling period, especially in late period. Meanwhile, active oxygen resistance activity (AORA) lowered by 45.16 and 35.99% as compared with the control in the late grain-filling period; under high temperature condition, the total starch and amylose contents of grains were lower than those of control, the protein contents increased to a different degree, and chalkiness and 1000-grain weight changed significantly in two cultivars. The main reason of degeneration of grain quality under high temperature stress is related to the inhibition of primary reaction of photosynthesis, drop of active oxygen resistance activity and contraction of functional period in leaves of rice plants.

Keywords: Rice (*Oryza sativa* L.); High temperature stress; Chlorophyll fluorescence; Active oxygen resistance activity; Grain quality

基金项目: 重庆市科委项目(CSTC2007AB1033, CSTC2007AA1099, CSTC2007AC1051)

作者简介: 滕中华(1972–), 男, 重庆潼南人, 西南大学讲师, 在职博士, 从事植物生理学教学与科研工作。E-mail: zhonghuateng@sina.com

* 通讯作者(Corresponding author): 王三根。E-mail: wangsg@swu.edu.cn

Received(收稿日期): 2007-07-04; Accepted(接受日期): 2008-03-25.

环境条件的异常改变,如极端温度、强光辐射及干旱等,可能引起与光合色素、原初反应及电子传递链等受损或被抑制,进而影响同化物的合成。当今全球范围的“温室效应”对植物的影响越来越明显,水稻作为一种重要的粮食作物,其遭受热害对人类生活带来的不利影响是不言而喻的。灌浆结实期高温胁迫使水稻叶片产生光抑制和光氧化,进而引起稻米品质严重下降^[1-3]。叶绿素荧光动力学是以光合作用理论为基础,利用体内叶绿素来研究和探测植物光合生理状况及外界因子对其细微影响的一种新型植物活体测量和诊断技术。由于其快速、灵敏和非破坏性测量等优点,在水稻的缺钾胁迫、镉胁迫和有机物污染等逆境生理研究中得到应用^[4-6]。在水稻的温度逆境胁迫研究中,郭培国发现 42℃ 高温胁迫后水稻叶片的 PS II 原初光能转化效率(F_v/F_m)、PS II 线性电子传递的量子效率(Φ_{PSII})、光化学猝灭系数(q_p)下降,PS II 的相对还原状态($1-q_p$)升高^[7]。季本华等发现低温强光下处理 4 d 的粳稻叶片, F_v/F_m 和 q_N 降低^[8]。金松恒等研究 6 个水稻品种孕穗期叶绿素荧光特性,发现 F_v/F_m 随叶位发生变化,而 PS II 的光化学效率(Φ_{PSII})和电子传递速率(ETR)随叶位降低明显下降^[9]。在高温胁迫下灌浆结实期,水稻的叶绿素荧光、抗氧化活力的变化及其对稻米品质影响方面的研究迄今报道甚少,本试验利用人工气候室精确控温,应用叶绿素荧光技术,探讨高温胁迫对水稻的伤害机理。

1 材料与方法

1.1 试验材料 with 处理

参考程方民^[3]的方法,在大田中栽种西农优 30 和富优 1 号(西南大学水稻研究所提供),至孕穗期分别选取发育进程与长势基本一致的稻株,移入盆钵,每盆 3 株,继续培养数日,于水稻齐穗当日,将盆钵移入不同温度的人工气候室(每个处理各 10 盆)。参考前人^[1,3]设计及重庆地区夏季自然高温特征,设适温处理为日均温度 27℃,日最高温 30℃,最低温 24℃;高温处理为日均温度 33℃,日最高温 37℃,最低温 29℃。模拟自然气温,由程序自动控制变化。其他气候因子一致,相对湿度 80%,光照时间 5:30—19:30,光照强度 1 000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。自抽穗第 7 d 起,每隔 7 d,于上午 9:00—10:30 取样并进行叶绿素荧光动力学测定。其后,将剑叶样品迅速保存于 -20℃ 冰柜中用于抗氧化测定。收获的成熟籽粒,经烘干后用于稻米品质指标的测定。

1.2 测定方法

1.2.1 叶绿素含量 用叶绿素计(SPAD-502 型,日本)测剑叶,测时避开叶脉^[10],重复测定 3~5 次。

1.2.2 叶绿素荧光参数 参考金松恒等方法^[9]。稻株经一个晚上暗适应,第 2 天用 LI-6400 和荧光叶室 6400-40(美国, Li-Cor 公司)测定健康剑叶。荧光参数包括初始荧光 F_0 , PS II 潜在活性 F_v/F_0 , PS II 的最大光能转化效率(F_v/F_m)。计算公式来自 LI-6400 仪器说明书,所有计算均

由仪器自动完成,重复测定 3~5 次。

1.2.3 抗活性氧活力 参考宗学风等的原理与方法^[11],采用南京建成生物所生产的抗活性氧活力试剂盒测试,测定抗活性氧活力,其单位为 $\text{U mg}^{-1} \text{Protein}$,重复测定 3 次。

1.2.4 籽粒营养品质 采用湖南农业大学植物激素重点实验室开发的软件测定垩白度^[12];用碘比色法测定直链淀粉含量^[13];用旋光法测定总淀粉含量^[13];用凯氏定氮法测定蛋白质含量,重复测定 2~3 次。

2 结果与分析

2.1 高温胁迫对叶绿素含量的影响

图 1 表明,在水稻灌浆期,随籽粒灌浆进程,叶片不断衰老,叶绿素逐渐降解,叶绿素含量呈下降趋势。高温胁迫下,结实后期两个水稻品种的叶绿素含量降低比对照更明显,表明此阶段叶绿素的降解更剧烈。

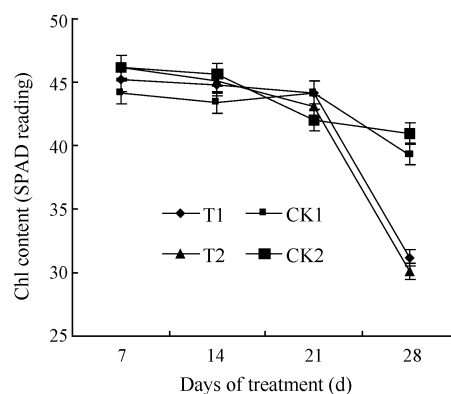


图 1 灌浆期高温对水稻叶绿素含量的影响

Fig. 1 Effects of high temperature in grain-filling period on chlorophyll content in rice

T1: 西农优 30 高温处理; CK1: 西农优 30 适温处理; T2: 富优 1 号高温处理; CK2: 富优 1 号适温处理。

T1: Xinongyou 30 under high temperature, CK1: Xinongyou 30 under optimal temperature, T2: Fuyou 1 under high temperature, CK2: Fuyou 1 under optimal temperature.

2.2 高温胁迫对叶绿素荧光动力学的影响

F_0 表示 PS II 反应中心全部开放即原初电子受体(QA)全部氧化时的荧光水平,如果 PS II 反应中心出现可逆失活或不易逆转的破坏会引起 F_0 的增加,且 F_0 增加量越多,受损伤程度就越严重^[14-17]。从图 2 可以看出,在整个灌浆结实期,高温处理的 F_0 不断上升。与对照相比,在灌浆中后期西农优 30 F_0 分别上升 8.61% 和 26.43%,富优 1 号也分别上升 5.02% 和 12.21%。

F_v/F_0 表示反应中心 PS II 的潜在活性,可变荧光与最大荧光的比值(F_v/F_m)表示 PS II 的最大光能转化效率^[18]。从图 3 和图 4 可以看出,整个结实期,高温胁迫下两个品种的 F_v/F_0 和 F_v/F_m 均低于对照,而且都呈下降趋势。从处理 7 d 到 28 d 西农优 30 的 F_v/F_0 和 F_v/F_m 分别下降 20.76% 和 5.35%,而对照下降 6.05% 和 1.23%;富优 1 号也具相似的变化,说明灌浆结实期的高温胁迫使水稻 F_v/F_0 和 F_v/F_m

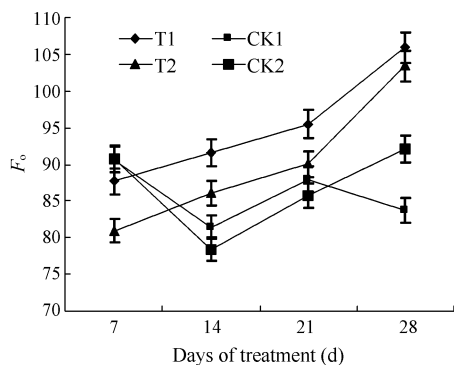


图2 结实期高温对水稻 F_0 的影响

Fig. 2 Effects of high temperature in grain-filling period on F_0 in rice
T1: 西农优 30 高温处理; CK1: 西农优 30 适温处理; T2: 富优 1 号高温处理; CK2: 富优 1 号适温处理。

T1: Xinongyou 30 under high temperature; CK1: Xinongyou 30 under optimal temperature; T2: Fuyou 1 under high temperature; CK2: Fuyou 1 under optimal temperature.

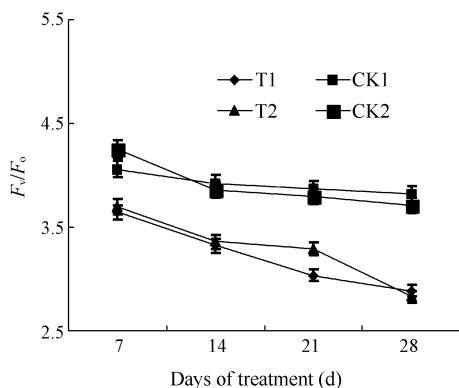


图3 结实期高温处理对水稻 F_v/F_0 的影响

Fig. 3 Effects of high temperature in grain-filling period on F_v/F_0 in rice

T1: 西农优 30 高温处理; CK1: 西农优 30 适温处理; T2: 富优 1 号高温处理; CK2: 富优 1 号适温处理。

T1: Xinongyou 30 under high temperature; CK1: Xinongyou 30 under optimal temperature; T2: Fuyou 1 under high temperature; CK2: Fuyou 1 under optimal temperature.

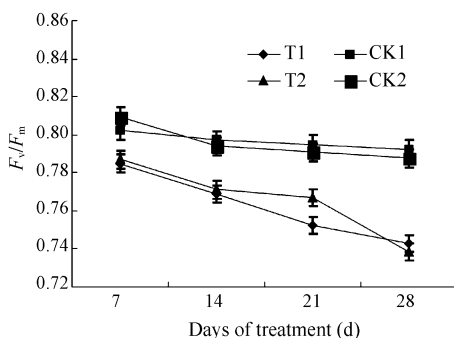


图4 高温处理对水稻 F_v/F_m 的影响

Fig. 4 Effects of high temperature in grain-filling period on F_v/F_m in rice

T1: 西农优 30 高温处理; CK1: 西农优 30 适温处理; T2: 富优 1 号高温处理; CK2: 富优 1 号适温处理。

T1: Xinongyou 30 under high temperature; CK1: Xinongyou 30 under optimal temperature; T2: Fuyou 1 under high temperature; CK2: Fuyou 1 under optimal temperature.

的下降速率更快、更明显,使水稻叶片 PS II 原初光能转换效率下降,潜在活性中心受损,光合作用的原初反应受到抑制。

2.3 高温胁迫对水稻抗活性氧活力的影响

高温胁迫下,植物叶片中活性氧的产生加速,相应地抗活性氧活力增强。从图 5 可以看出,高温胁迫下,两个品种的抗活性氧活力在 4 个时期均低于对照;灌浆结实前期,高温胁迫处理材料的抗活性氧活力高于对照,这可能与高温逆境下,活性氧的产生和清除处于动态平衡有关;灌浆结实前期,西农优 30 和富优 1 号的抗氧化活力分别比对照低 45.16%和 35.99%,可能与高温胁迫加速叶片的衰老,活性氧产生和清除的动态平衡被打破,导致活性氧积累有关。

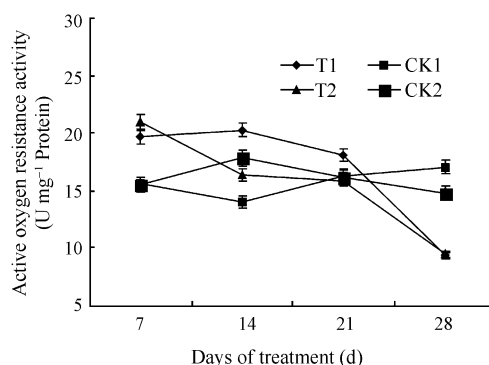


图5 高温处理下水稻叶片抗活性氧活力动态变化

Fig. 5 Dynamic changes of AORA in rice leaf under high temperature
T1: 西农优 30 高温处理; CK1: 西农优 30 适温处理; T2: 富优 1 号高温处理; CK2: 富优 1 号适温处理。

T1: Xinongyou 30 under high temperature; CK1: Xinongyou 30 under optimal temperature; T2: Fuyou 1 under high temperature; CK2: Fuyou 1 under optimal temperature.

2.4 高温胁迫对营养品质的影响

高温处理对成熟稻米的品质影响明显,垩白度大幅增加,蛋白质含量上升,千粒重、总淀粉和直链淀粉含量下降,差异分别达极显著和显著水平(表 1)。适温处理下两个品种的蛋白质含量较接近,经高温处理的富优 1 号蛋白质含量增加 15.1%,而西农优 30 增加达到 51.3%;经高温处理的富优 1 号总淀粉含量降低 14.1%,而西农优 30 降低 20.5%。表明两个品种的籽粒同化物在合成过程中对高温胁迫属不同的反应类型。

3 讨论

高温胁迫导致叶绿素含量降低,是由于高温胁迫降低了叶绿素的合成速率^[19],并引起活性氧的积累,加速了叶绿素的降解^[7]。叶绿素是光合作用中能量转化的物质基础,其含量是反映作物衰老状况和光合能力的一个重要指标^[20]。本实验的叶绿素动态变化表明,高温胁迫下水稻叶片功能期缩短,光合产物的积累时期则也会相应缩短。PS II 对环境胁迫非常敏感,叶绿素荧光动力学参数可以很好地反映 PS II 结构和功能变化。高温胁迫下,灌浆

表 1 灌浆结实期高温对两个品种稻米部分品质的影响
Table 1 Effects of high temperature in filling period on rice grain quality of two cultivars

品种 Cultivar	处理 Treatment	垩白度 Chalkiness (%)	千粒重 1000-grain weight (g)	蛋白质含量 Protein content (%)	总淀粉含量 Total starch content (%)	直链淀粉含量 Amylose content (%)
西农优 30	高温 High temperature	45.2 a	12.24 b	21.31 a	60.8 c	7.8 c
Xinongyou 30	适温 Optimal temperature	3.7 b	18.18 a	14.08 b	76.5 a	13.5 b
富优 1 号	高温 High temperature	47.8 a	14.45 b	13.88 b	67.6 b	7.6 c
Fuyou 1	适温 Optimal temperature	5.2 b	20.50 a	12.06 c	78.7 a	16.7 a

中后期 F_0 剧烈上升(图 2), PS II 反应中心的破坏会导致 F_0 的升高, 而且 F_0 升高越多, 意味着受损程度就越严重^[14-17]。这表明高温胁迫导致水稻叶片 PS II 反应中心受到破坏或部分失活, 产生光抑制, 尤其在灌浆结实后期。 F_v/F_m 是逆境胁迫条件下植物发生光抑制的敏感指标^[21], 反映叶片衰老过程中光子转换效率的变化^[22]。整个灌浆结实期, F_v/F_0 和 F_v/F_m 都呈下降趋势(图 3 和图 4), 这与叶片的不断衰老有关。 F_v/F_0 和 F_v/F_m 均低于对照, 且高温胁迫下 F_v/F_0 和 F_v/F_m 的下降速率更快, 表明高温胁迫使水稻叶片 PS II 原初光能转换效率下降, 潜在活性中心受损, 光合作用的原初反应受到抑制, 导致光抑制产生。抗活性氧活力的变化也可以反映叶片氧化伤害情况。高温胁迫下叶绿素含量的降低和电子传递的受抑一方面可以将过剩的光能转化成 Mehler 反应的激发能, 导致活性氧的产生; 另一方面以分子态氧为受体的光合电子传递支路反应的增强也提高了活性氧的积累量。这些活性氧若不及时清除, 必然造成氧化胁迫, 引起膜脂过氧化, 导致膜系统破坏^[23]。本试验的高温胁迫使水稻叶片抗氧化活力在灌浆结实期呈下降趋势, 可能与高温胁迫加速叶片的衰老, 活性氧产生和清除的动态平衡被打破, 活性氧积累, 导致叶片遭受氧化伤害有关。

小麦籽粒产量、籽粒淀粉含量和淀粉产量与 F_v/F_0 和 F_v/F_m 等荧光动力学变化存在相关性^[24]。淀粉是水稻籽粒中含量最丰富, 最重要的碳水化合物, 它的合成直接依赖于光合作用的正常运转。高温胁迫不仅缩短淀粉的合成时期, 使叶绿素分解加速, PS II 原初光能转换效率下降, 潜在活性中心受损, 光合作用的原初反应被抑制, 光合能力下降, CO_2 同化力下降; 同时, 抗氧化活性降低造成膜脂过氧化, 使水稻遭受氧化伤害, 以上原因引起水稻叶片功能期缩短, 叶片光合产物合成总量减少, 因此供籽粒充实的光合产物显著减少, 造成籽粒总淀粉、千粒重含量降低及垩白度增加。此外, 籽粒的其他灌浆物质, 包括蛋白质合成所需的碳架, 也来自于光合产物, 因此, 光合作用机构的损伤也必然影响蛋白质的合成。研究表明, 高温胁迫下, 蛋白质含量升高, 这与前人的研究结果一致^[1,25-26]。干物质转运和氮素从营养体向籽粒中的转运是决定作物籽粒蛋白质含量的两个因素^[27], 而高温有利于叶片中的可溶性蛋白向籽粒运输, 促进籽粒蛋白质合成^[25], 引起籽粒蛋白质含量增加。但高温胁迫时, 水稻在光合作

用受到损伤和抑制的状态下, 改变蛋白质和淀粉在籽粒分布比例的机理, 有待进一步研究。

灌浆结实期高温是水稻籽粒垩白形成的外在决定因素, 垩白的存在严重影响稻米品质。本试验表明, 高温胁迫下, 稻米直链淀粉含量降低, 但稻米蛋白质含量提高。蛋白质含量增加, 虽然提高了营养品质, 但过高的蛋白质含量造成稻米蒸煮食味品质变劣^[25], 从而降低稻米的综合品质, 而且蛋白质含量过高也可能造成产量下降^[28]。淀粉含量降低及垩白度增加, 千粒重减少都严重降低稻米的品质, 由此可见, 高温胁迫对稻米品质具严重的不利影响。

References

[1] Zhang G-F(张国发), Wang S-H(王绍华), You J(尤娟), Wang Q-S(王强盛), Ding Y-F(丁艳峰), Ji Z-J(吉志军). Effect of higher temperature in different filling stages on rice qualities. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2006, 32(2): 283–287 (in Chinese with English abstract)

[2] Satoshi M, Hiroyuki S, Junichi T, Konosuke F. Effect of high temperature on grain ripening in rice plants. *Jpn J Crop Sci*, 2004, 73: 77–83

[3] Cheng F-M(程方民), Zhong L-J(钟连进), Sun Z-X(孙宗修). Effect of temperature at grain-filling stage on starch biosynthetic metabolism in developing rice grains of early-indica. *Sci Agric Sin* (中国农业科学), 2003, 36(5): 492–501 (in Chinese with English abstract)

[4] Wang Z-G(王泽港), Luo J-F(骆剑峰), Gao H-M(高红明), Wan D-Z(万定珍), Ge C-L(葛才林), Luo S-S(罗时石), Yang J-C(杨建昌). Effects of 1, 2, 4-trichlorobenzene and naphthalene stress on photosynthetic characteristics of rice at heading period. *Sci Agric Sin* (中国农业科学), 2005, 38(6): 1113–1119 (in Chinese with English abstract)

[5] Xu H-X(徐红霞), Weng X-Y(翁晓燕), Mao W-H(毛伟华), Yang Y(杨勇). Effects of cadmium stress on photosynthesis, chlorophyll fluorescence characteristics and excitation energy distribution in leaves of rice. *Chin J Rice Sci* (中国水稻科学), 2005, 19(4): 338–342 (in Chinese with English abstract)

[6] Peng H-H(彭海欢), Weng X-Y(翁晓燕), Xu H-X(徐红霞), Jiang Q-S(蒋琴素), Sun J-W(孙骏威). Effects of potassium deficiency on photosynthesis and photo-protection mechanisms in rice plants. *Chin J Rice Sci* (中国水稻科学), 2006, 20(6): 621–625 (in Chinese with English abstract)

- English abstract)
- [7] Guo P-G(郭培国), Li R-H(李荣华). Effects of high nocturnal temperature on photosynthetic organization in rice leaves. *Acta Bot Sin* (植物学报), 2000, 42(7): 673–678 (in Chinese with English abstract)
 - [8] Ji B-H(季本华), Jiao D-M(焦德茂). Photo-inhibition and photo-oxidation in leaves of *indica* and *japonica* rice under different temperatures and light intensities. *Acta Bot Sin* (植物学报), 2001, 43(7): 714–720 (in English with Chinese abstract)
 - [9] Jin H-S(金恒松), Jiang D-A(蒋德安), Wang P-M(王品美), Zhao K(赵凯), Weng X-Y(翁晓燕). Characteristics of gas exchange and chlorophyll fluorescence in different position leaves at booting stage in rice plants. *Chin J Rice Sci* (中国水稻科学), 2004, 18(5): 443–448 (in Chinese with English abstract)
 - [10] Markwell J, Osterman J C, Mitchell J L. Calibration of the Minolta SPAD-502 leaf chlorophyll meter. *Photosynth Res*, 1995, 46: 467–472
 - [11] Zong X-F(宗学凤), Zhang J-K(张建奎), Li B-X(李帮秀), Yu G-D(余国东), Shi Y-M(石有明), Wang S-G(王三根). Relationship between antioxidation and grain colors of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Acta Agron Sin* (作物学报), 2006, 32(2): 237–242 (in Chinese with English abstract)
 - [12] Xiao L-T(萧浪涛), Li D-X(李东晖), Lin W-H(蔺万煌), Hong B(洪彬), Hong Y-H(洪亚辉). An objective method to measure chalkiness of rice grain. *Chin J Rice Sci* (中国水稻科学), 2001, 15(3): 206–208 (in Chinese with English abstract)
 - [13] Shanghai Institute of Plant Physiology, Chinese Academy of Sciences (中国科学院上海植物生理研究所). Modern Laboratory Manual of Plant Physiology (现代植物生理学实验指南). Beijing: Science Press, 1999. p 131 (in Chinese)
 - [14] Schnettger B, Critchley C, Santore U J. Relationship between photo-inhibition of photosynthesis, D1 protein turnover and chloroplast structure: Effect of protein synthesis. *Plant Cell Environ*, 1994, 17: 55–64
 - [15] Pastenes C, Horton P. Effect of high temperature on photosynthesis in beans. *Plant Physiol*, 1996, 112: 1245–1251
 - [16] Demmig-Adams B, Adams III W W. Photoprotection and other responses of plants to high light stress. *Ann Rev Plant Physiol Plant Mol Biol*, 1992, 43: 599–626
 - [17] Demmig B, Winter K, Krüger A. Photo-inhibition and zeaxanthin formation in intact leaves, a possible role of the xanthophyll cycle in the dissipation of excess light energy. *Plant Physiol*, 1987, 84: 218–224
 - [18] Maxwell K, Johnson G N. Chlorophyll fluorescence—A practical guide. *J Exp Bot*, 2000, 51: 659–668
 - [19] Tewari A K, Tripathy B C. Temperature-stress-induced impaired of chlorophyll biosynthetic reactions in cucumber and wheat. *Plant Physiol*, 1998, 117: 851–858
 - [20] Oh S A, Park J H, Lee G I, Paek K H, Park S K, Nam H G. Identification of three genetic loci controlling leaf senescence in *Arabidopsis thaliana*. *J Plant*, 1997, 12: 527–533
 - [21] Bjorkman O. High-irradiance stress in higher plants and interaction with other stress factors. *Prog Photosynth Res*, 1987, 4: 11–18
 - [22] Subhash N, Wenzel O, Lichtenthaler H K. Changes in blue-green and chlorophyll fluorescence emission and fluorescence ratios during senescence of tobacco plants. *Remote Sens Environ*, 1999, 69: 215–213
 - [23] Wang B-L(汪炳良), Xu M(徐敏), Shi Q-H(史庆华), Cao J-S(曹家树). Effects of high temperature stress on antioxidant systems, chlorophyll and chlorophyll fluorescence parameters in early cauliflower Leaves. *Chin J Rice Sci* (中国水稻科学), 2004, 37(8): 1245–1250 (in Chinese with English abstract)
 - [24] Li Y-J(李友军), Xiong Y(熊瑛), Chen M-C(陈明灿), Lü Q(吕强), Luo B-S(骆炳山). Chlorophyll fluorescence characteristics and their relationship with grain yield, starch accumulation of wheat with different quality. *J Triticeae Crops* (麦类作物学报), 2005, 25(6): 82–86 (in Chinese with English abstract)
 - [25] Jin Z-X(金正勋), Yang J(杨静), Qian C-R(钱春荣), Liu H-Y(刘海英), Jin X-Y(金学泳), Qiu T-Q(秋太权). Effects of Temperature during grain filling period on activities of key enzymes for starch synthesis and rice grain quality. *Chin J Rice Sci* (中国水稻科学), 2005, 19(4): 377–380 (in Chinese with English abstract)
 - [26] Resurrecion A P. Effect of temperature during ripening on grain quality of rice. *Soil Sci Plant Nutr*, 1977, 23: 109–112
 - [27] Desai R M, Bhatia C R. Nitrogen up take and nitrogen harvest index in durum wheat cultivars varying in their grain protein concentration. *Euphytica*, 1978, 27: 561–566
 - [28] Zhao J-Y(赵俊晔), Yu Z-W(于振文). Effects of nitrogen fertilizer rate on nitrogen metabolism and protein synthesis of superior and inferior wheat kernel. *Sci Agric Sin* (中国农业科学), 2005, 38(8): 1547–1554 (in Chinese with English abstract)