

文章编号: 0258-7025(2010)03-0891-06

激光加电场处理对水稻相关生理生化参数的影响

范树国^{1,2} 陈 凯¹ 李 杨¹ 邱 璐^{1,2*} 杨海艳¹ 李国树^{1,2} 李易洲¹ 谢美华¹

(¹ 楚雄师范学院化学与生命科学系, 云南 楚雄 675000
² 滇中高原生物资源开发与利用研究所, 云南 楚雄 675000)

摘要 探讨“三角大香糯”及激光加电场处理后的水稻“激三香糯”相关生理生化参数变化。测定叶绿素 a 与叶绿素 b 的含量、种子活力、赖氨酸含量、低温逆境下脯氨酸含量、可溶性糖含量、淀粉酶活性、过氧化氢酶活性、硝酸还原酶活性及呼吸速率。硝酸还原酶活性、过氧化氢酶活性、呼吸速率、赖氨酸含量等在处理前后变化不大; 处理后可溶性糖含量、种子活力、叶绿素 a 与叶绿素 b 的含量有所提高, 但淀粉酶活性下降。激光加电场诱变后, 水稻的相关生理生化参数会发生相应的变化, 有正向的, 也有负向的。

关键词 激光技术; 电场; 水稻; 生理生化参数

中图分类号 S123; Q631 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103703.0891

Effects of Laser and Electric Field on Related Physiological and Biochemical Parameters of Rice

Fan Shuguo^{1,2} Chen Kai¹ Li Yang¹ Qiu Lu^{1,2} Yang Haiyan¹ Li Guoshu^{1,2}
Li Yizhou¹ Xie Meihua¹

(¹ Department of Chemistry and Life Science, Chuxiong Normal University, Chuxiong, Yunnan 675000, China)
(² Institute of Bio-resources Research and Utilization in Central Yunnan, Chuxiong, Yunnan 675000, China)

Abstract To compare the related physiological and biochemical parameters of “Sanjiao fragrant glutinous rice from Yao’an county” and its induced variety treated by laser and electric field. To measure the content of chlorophyll a, chlorophyll b, Lys, Pro under low temperature treatment and soluble sugar; the activity of amylase, catalase and nitrate reductase; seed vigor and respiratory rate. The activity of catalase and nitrate reductase, respiratory rate, and the content of Lys did not change so much; the activity of amylase declined; but the content of chlorophyll a, chlorophyll b, soluble sugar and seed vigor increased by laser and electric field treatment. The related physiological and biochemical parameters of “Sanjiao fragrant glutinous rice from Yao’an county” and its induced variety treated by laser and electric field have changed, some of them increased, whereas some of them decreased.

Key words laser technique; electric field; rice; physiological and biochemical parameters

1 引 言

激光加电场诱变育种是激光和电场在生物、农业领域应用的一个分支, 目前国际国内在此研究方面取得了一些实用成果^[1~3], 但激光加电场诱变几率低下, 诱变方向难以控制, 诱变作用机理不十分清楚, 还不能建立完整的数学模型, 用电磁学、电

动力学、量子力学的观点来描述误差太大, 故而诱变作用机理的探索研究显得十分重要^[4]。而诱变水稻生理生化参数为诱变作用机理的探索研究提供了现实的依据, 研究生理生化也就是从表达水平上研究遗传物质的变化; 同时生理生化参数也是评价诱变结果好坏的重要尺度。对育种学的发展起到积极

收稿日期: 2009-03-16; 收到修改稿日期: 2009-06-12

基金项目: 云南省中青年学术技术带头人后备人才培养计划(2006PY01-61)、楚雄州学术技术带头人项目(200401)、楚雄师范学院重点学科建设项目(05YJJSXK03)、楚雄师范学院学术带头人专项(05YJDTR08)和楚雄师范学院 2008 年度大学生校级立项(S08-023)资助课题。

作者简介: 范树国 (1965—), 男, 博士, 教授, 主要从事生物化学及分子生物学方面的研究。E-mail: fansg@cxtc.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: qiulu@cxtc.edu.cn

的推动作用。水稻生理生化参数能反映水稻的抗病虫、抗逆、抗除草剂能力以及是否高产优质等特性,能指导在生产中进行良种选择。在高产核心种质、高产性状的发育遗传、生理生化机理和群体生态生理研究基础上,利用生物信息学的研究手段,根据育种目标,组织不同学科协同研究,从分子到群体不同生理层次相互依存关系,应用现代信息技术,通过计算机模拟仿真,设计出适合不同生态类型需要的新株型的具体形态指标、生理育种技术、选择标准和方法,逐步实现水稻超高产设计数字化生理育种^[5]。

水稻生理生化参数作为育种结果的重要衡量尺度,对水稻的育种起到了极其重要的作用。水稻生理生化参数也是水稻生命特性的指标,所以科研工作者常在不同条件下测量不同的水稻生理生化参数。陈大清等^[6]测定在植物生长调节剂 S_N5 的作用下水稻超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化氢酶(CAT)活性、叶绿素含量及可溶性蛋白质含量。林振武等^[7]测定过硝酸还原酶活力。高宇等^[5]进行了水稻的流测定。日本科学家斋藤邦行等^[8]测定了水稻高产与光合速率的关系。李延等^[9]研究了 Zn 对水稻生理代谢的影响及潜在性缺 Zn 诊断。Liang 等^[10]曾研究了脱落酸的含量与水稻蒸腾作用的关系。胡瑞芝等^[11]研究了硅对杂交水稻生理指标的影响。种子发芽率和发芽势是鉴定种子活力的重要标志,在确定播种量以及生理生化研究方面具有重要作用;呼吸强度与种子活力高低密切相关,呼吸强度能反映种子活力。光合作用是植物生长发育所需能量和干物质积累的必经阶段,高光合速率是水稻高产品种高产的直接原因,通过改善光合性能来提高水稻的产量是可能的^[6]。叶绿素 a 与叶绿素 b 的含量与水稻光合速率相关,测定叶绿素的含量可以从另一方面探讨激光加电场处理对植物诱变的影响。叶片光合速率日变化是一日中光合作用持续的能力,研究其变化特征对分析作物光合生产力和产量形成有一定的理论和实践意义。叶绿素含量是衡量光合功能的一个重要参数^[12]。赖氨酸是必需氨基酸,谷物籽粒内赖氨酸含量的高低是品质优劣的标志之一,因而,在食品工业、农业和农业科学研究中常常需要测定赖氨酸的含量。植物体内的碳素营养状况以及农产品的品质性状,常以可溶性糖含量作为重要指标;植物为了适应逆境条件,如干旱、低温,也会主动积累一些可溶性糖,降低渗透势和冰点,以适应外界环境条件的变化。硝酸还原酶是植物体内氮代谢的关键酶,对外界氮肥敏感,还对氮肥

的吸收利用起关键作用^[7]。硝酸还原酶活性高有利于植物的生长。通过测定过 CAT 活性可以反映叶片的衰老程度,CAT 可以分解过氧化氢从而减慢叶片衰老。淀粉酶能水解淀粉,水稻有些品种成熟期如遇阴雨天气会发生严重的穗发芽,造成巨大损失,这是淀粉酶活动的结果。因此淀粉酶的活性测定具有应用研究的意义。

姚安三角大香糯是云南省楚雄市姚安县三角村一带种植的一季晚熟糯粳稻,俗名“三角大香糯”。其米质优良,食味极佳,尤其是其独特的香味而远近闻名^[4]。但其植株较高,茎秆纤细,易倒伏。王昆林等^[4]采用波长为 632.8 nm,功率为 1.5 mW 的 He-Ne 激光对水稻种子的胚部进行近距离辐照,调节辐照时间的长短从而控制辐照剂量。采用波长为 10.6 μm ,功率为 10 W 的 CO_2 激光固定距离辐照,用 5 kV 高压直流电所形成的两平行板均强电场对水稻种子进行批量短时激发。经过诱变改良的水稻材料,植株降低 27.2 cm,生育期缩短 20 d,每亩增产 103.2 kg,其米质在香性糯性等方面与原品种基本一致,因此诱变改良第 5 代的水稻材料在当地是成功的。暂定名为“激三香糯”^[1]。本文对“三角大香糯”及激光加电场诱变得到的“激三香糯”的相关生理生化参数进行比较,探讨其可能的诱变机制,为激光加电场诱变进一步在水稻育种中的应用提供依据。

2 材料与方法

2.1 发芽率测定

材料为“三角大香糯”种子与激光加电场处理后的“激三香糯”种子,由楚雄师范学院物理与电子科学系王昆林老师提供。“激三香糯”是经过实验室激光加电场诱变处理,田间栽种筛选改良的三角大香糯第 5 代,在原产地三角村出现了良好且性状稳定的宏观表现^[1](下同)。种子发芽率测定用红墨水染色法^[13]。实验步骤:1) 浸种:将待测种子在 30~35 $^{\circ}\text{C}$ 温水中浸种 2 h,以增强种胚的呼吸强度,使显色迅速。2) 染色:取已吸胀的种子 150 粒,沿胚的中线切为两半,将一半置于培养皿中,加入 5% 红墨水(已淹没种子为度),染色 15 min。染色后倒去红墨水,用水冲洗多次,至冲洗液无色为止。检查种子死活,凡种胚不着色或着色很浅的为活种子;凡种胚与胚乳着色程度相同的为死种子。用沸水杀死的种子作对照观察。3) 计数种胚不着色或着色浅的种子数,算出活种子的百分率。实验重复 3 次。

2.2 呼吸强度测定

材料为“三角大香糯”与激光加电场处理后的“激三香糯”发芽种子，浸种2 h，25 ℃催芽3 d。种子呼吸速率测定用小篮子法^[13]。实验步骤：1) 取500 mL广口瓶一个，装配一只三孔橡皮塞，一孔插入盛碱石灰的干燥管，以吸收空气中的CO₂，保证吸入呼吸瓶的空气无CO₂，一孔插入温度计，另一孔直径约1 cm供滴定用，滴定前用小橡皮塞塞紧。瓶塞下面挂一尼龙网制小篮，用以盛实验材料。2) 称取萌发的水稻种子15 g，装于小篮内，将小篮挂在广口瓶内，同时加浓度为0.05 mol/L的Ba(OH)₂溶液25 mL于广口瓶内，立即塞紧瓶塞，并用熔化的石蜡密封瓶口，防止漏气。每10 min左右，轻轻地摇动广口瓶，破坏溶液表面的BaCO₃薄膜，以利对CO₂的吸收。3) 1 h后，小心打开瓶塞，迅速取出小篮，加入2滴指示剂，立即重新塞紧瓶塞。然后拔出小橡皮塞，将滴定管插入小孔中，用浓度为1/44 mol/L的草酸滴定，直到蓝绿色转变成无色为止。记录滴定所用的草酸溶液的体积(mL)数。4) 另取用沸水煮死的种子为材料，做同样测定，以此作为对照。5) 计算：呼吸强度[CO₂, mg/(g·h)] = (V₀ - V₁) / [种子鲜重(g) × 时间(h)]。式中V₀为煮死的种子所耗用的草酸的体积(mL)，V₁为发芽的种子所耗用的草酸的体积(mL)。实验重复3次。

2.3 叶绿素 a, b 含量测定

材料为“三角大香糯”与激光加电场处理后的“激三香糯”苗期叶片。水稻种子浸种2 h，25 ℃催芽3 d，25 ℃光照培养生长一周。叶绿素 a, b 的含量测定用分光光度法^[13]。实验重复3次。

2.4 可溶性总糖含量测定

材料为“三角大香糯”与激光加电场处理后的“激三香糯”的干种子。样品处理方法：用粉碎机将干种子粉碎，过筛，取100目(150 μm)筛下物为待测样品。取样品在烘箱内105 ℃烘干，恒重后，精确称取5 g，置于锥形瓶中，加入80 mL沸蒸馏水，放入沸水浴。不时摇动，提取30 min。取出立即过滤，残渣用沸蒸馏水反复洗涤并过滤，合并滤液。冷却至室温，用蒸馏水定容至100 mL。可溶性总糖含量测定用蒽酮比色法^[14]。实验重复3次。

2.5 种子内赖氨酸含量测定

材料为“三角大香糯”与激光加电场处理后的“激三香糯”的干种子。样品处理方法同“可溶性总糖含量测定”。种子内赖氨酸含量测定用分光光度法^[15]。实验重复3次。

2.6 硝酸还原酶活性测定

材料为“三角大香糯”与激光加电场处理后的“激三香糯”苗期叶片。水稻种子浸种2 h，25 ℃催芽3 d，25 ℃光照培养生长一周。硝酸还原酶活性测定用分光光度法^[13]。实验重复3次。

2.7 低温逆境下脯氨酸含量测定

材料为“三角大香糯”与激光加电场处理后的“激三香糯”低温幼苗。处理方法：水稻种子浸种2 h，25 ℃催芽3 d，25 ℃光照培养生长一周后，转入10 ℃培养3 d。脯氨酸含量测定采用分光光度法^[16]。实验重复3次。

2.8 淀粉酶的活性测定

材料为“三角大香糯”与激光加电场处理后的“激三香糯”苗期叶片。水稻种子浸种2 h，25 ℃催芽3 d，25 ℃光照培养生长一周。淀粉酶的活性测定用分光光度法^[17]。实验重复3次。

2.9 过氧化氢酶的活性测定

材料为“三角大香糯”与激光加电场处理后的“激三香糯”发芽种子。浸种2 h，25 ℃催芽3 d。称取萌发的水稻种子5 g，用量筒量取50 mL pH = 7的磷酸缓冲液，用少量缓冲液把材料研磨成匀浆，再洗入三角瓶中，然后放入30 ℃恒温水浴中浸提2 h，取出过滤，滤液即为酶提取液。过氧化氢酶的活性测定用高锰酸钾标定法^[16]。实验重复3次。

3 结果与分析

3.1 激光加电场处理对水稻种子发芽率的影响

激光加电场处理对水稻种子发芽率的影响如表1所示。

表1 水稻种子活力

Table 1 Vitality of rice seeds

Materials	No. of stained (dead) seeds (embryo and endosperm with same staining)
Sanjiao fragrant glutinous rice from Yao'an county (150 grains)	28 ± 0.05
Laser- and electric field-induced rice seeds (150 grains)	4 ± 0.04

由表1可知，“三角大香糯”种子的平均发芽率(种子活力)为81.33% (活种子数为150 - 28 = 122粒，故活种子的百分比为122/150 = 81.33%)，经过激光加电场处理后得到的“激三香糯”种子发芽率(种子活力)为97.33% [(150 - 4)/150 = 97.33%]。统计分析结果表明， $u = 5.26 > u_{0.05} = 1.645$ ；所以 $p < 0.05$ ，样本差异显著。激光加电场处理后，种子发

芽率明显提高;因此种子活力明显提高。

3.2 激光加电场处理对水稻种子呼吸强度的影响

激光加电场处理对水稻种子呼吸强度的影响如表 2 所示。

表 2 水稻种子呼吸强度

Table 2 Respiratory intensity of rice seeds

Materials	Consumption of oxalic acid /mL
Blank	7.00±0.02
Germinating seeds of Sanjiao fragrant glutinous rice from Yao'an county	6.83±0.01
Germinating seeds of laser- and electric field-induced rice	6.90±0.01

由表 2 可知,“三角大香糯”的发芽种子呼吸强度为 0.06 mg CO₂/(g·h),激光加电场处理后的发芽种子呼吸强度为 0.072 mg CO₂/(g·h)。统计分析结果表明, $u = 0.44 < u_{0.05} = 1.645$; 所以 $p > 0.05$, 样本差异不显著。激光加电场处理后“三角大香糯”的种子呼吸强度变化不大。

3.3 激光加电场处理对水稻叶绿素 a,b 含量的影响

激光加电场处理对水稻叶绿素 a,b 含量的影响如表 3 所示。

表 3 水稻叶绿素 a,b 光吸收

Table 3 Absorbance of chlorophyll a and b of rice

Materials	A ₆₆₃	A ₆₄₅
Optical density (OD) value of young leaf from Sanjiao fragrant glutinous rice from Yao'an county	0.920±0.002	0.645±0.001
OD value of young leaf from laser- and electric field-induced rice	1.444±0.003	0.872±0.002

比色杯误差为 0.001,由表 3 根据公式^[13]计算可知(原始数据未显示),“三角大香糯”的幼叶叶绿素 a 的质量浓度为 9.874 μg/cm³,叶绿素 b 的质量浓度为 10.690 μg/cm³。激光加电场处理后幼叶叶绿素 a 的质量浓度为 15.993 μg/cm³,叶绿素 b 的质量浓度为 13.211 μg/cm³。统计分析结果表明, $u = 8.74 > u_{0.05} = 1.645$; 所以 $p < 0.05$, 样本差异显著。激光加电场处理后的水稻幼叶叶绿素 a,b 的含量提高。

3.4 激光加电场处理对水稻赖氨酸含量的影响

赖氨酸含量测定的标准曲线如图 1 所示。

比色杯误差为 0.002,由图 1 可以计算出“三角大香糯”种子的赖氨酸质量分数为 0.043%,激光加电场处理后种子“激三香糯”的赖氨酸质量分数为 0.049%。统计分析结果表明, $u = 1.35 < u_{0.05} = 1.645$;

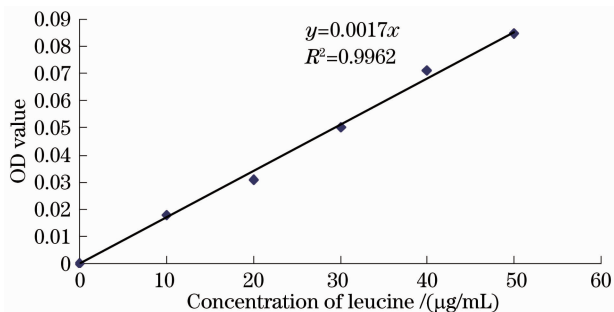


图 1 赖氨酸含量测定的标准曲线

Fig. 1 Standard curve for determination of lysine $p > 0.05$, 样本差异不显著(原始数据未显示)。激光加电场处理后种子的赖氨酸含量没有变化。

3.5 激光加电场处理对水稻可溶性总糖的影响

可溶性总糖测定的标准曲线如图 2 所示。

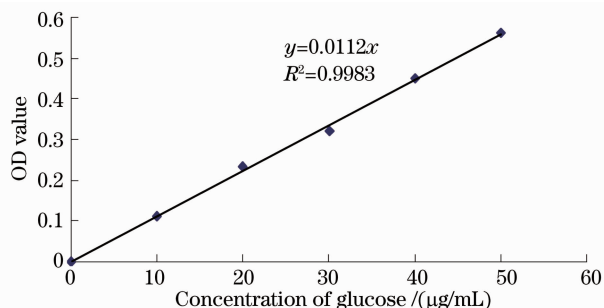


图 2 可溶性总糖测定的标准曲线

Fig. 2 Standard curve for determination of total soluble sugar

比色杯误差为 0.001,计算出“三角大香糯”幼苗可溶性总糖质量浓度为 10.73 μg/mL,激光加电场处理后幼苗可溶性总糖质量浓度为 12.18 μg/mL。统计分析结果表明, $u = 1.72 > u_{0.05} = 1.645$; $p < 0.05$, 样本差异显著(原始数据未显示)。激光加电场处理后种子的幼苗可溶性总糖含量上升。

3.6 激光加电场处理对水稻硝酸还原酶活性的影响

硝酸还原酶测定的标准曲线如图 3 所示。

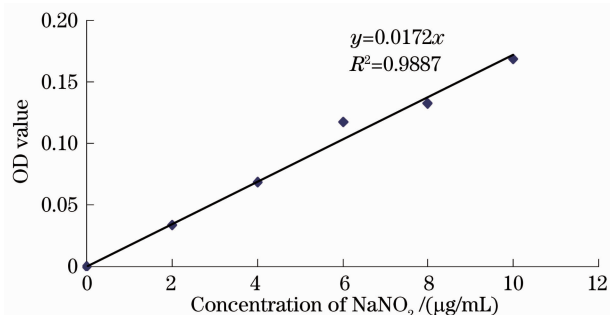


图 3 硝酸还原酶测定的标准曲线

Fig. 3 Standard curve for determination of nitrate reductase

比色杯误差为 0.001, 计算得到“三角大香糯”幼苗的硝酸还原酶活性为 $2.12 \mu\text{g NaNO}_2/(\text{g} \cdot \text{h})$, 激光加电场处理后幼苗的硝酸还原酶活性为 $1.94 \mu\text{g NaNO}_2/(\text{g} \cdot \text{h})$ 。统计分析结果表明, $u = 0.536 < u_{0.05} = 1.645; p > 0.05$, 样本差异不显著(原始数据未显示)。激光加电场处理后种子的幼苗硝酸还原酶活性不变。

3.7 激光加电场处理对水稻过氧化氢酶活性的影响

激光加电场处理对水稻过氧化氢酶活性的影响如表 4 所示。

表 4 水稻过氧化氢酶活性测定

Table 4 Determination of activity of catalase

Materials	Consumption of KMnO_4/mL
Seedlings of Sanjiao fragrant glutinous rice from Yao'an county	0.5 ± 0.003
Seedlings of laser- and electric field-induced rice	0.4 ± 0.002
Blank	7.7 ± 0.002

由表 4 计算得到“三角大香糯”幼苗的过氧化氢酶活性为 $0.45 \text{ mg H}_2\text{O}_2/(\text{g} \cdot \text{min})$, 激光加电场处理后过氧化氢酶活性为 $0.49 \text{ mg H}_2\text{O}_2/(\text{g} \cdot \text{min})$ 。统计分析结果表明, $u = 0.536 < u_{0.05} = 1.645, p > 0.05$ 。样本差异不显著, 激光加电场处理后种子的幼苗过氧化氢酶活性不变。

3.8 激光加电场处理对水稻逆境(低温)下脯氨酸含量的影响

脯氨酸含量测定的标准曲线如图 4 所示。

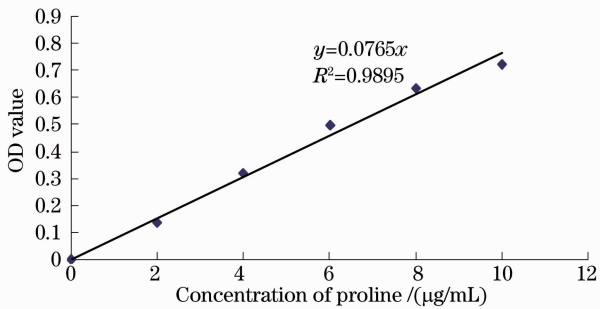


图 4 脯氨酸含量测定的标准曲线

Fig. 4 Standard curve for determination of proline

比色杯误差为 0.001, 计算得到“三角大香糯”幼苗逆境下脯氨酸质量浓度为 $0.02 \mu\text{g/mL}$, 激光加电场处理后幼苗逆境下脯氨酸质量浓度为 $0.018 \mu\text{g/mL}$ 。统计分析结果表明, $u = 0.788 < u_{0.05} = 1.645; p > 0.05$, 样本差异不显著(原始数据未显示)。激光加电场处理后逆境下脯氨酸含量不变。

3.9 激光加电场处理对水稻淀粉酶活性的影响

淀粉酶活性测定的标准曲线如图 5 所示。

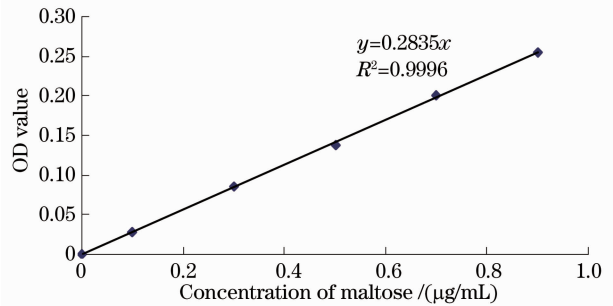


图 5 淀粉酶活性测定的标准曲线

Fig. 5 Standard curve for determination of amylase activity

比色杯误差为 0.002, 计算得到“三角大香糯”幼苗淀粉酶的活性为 $313 \text{ mg 麦芽糖}/(\text{g} \cdot 5 \text{ min})$, 激光加电场处理后幼苗淀粉酶的活性为 $161 \text{ mg 麦芽糖}/(\text{g} \cdot 5 \text{ min})$ 。统计分析结果表明, $u = 3.562 > u_{0.05} = 1.645; p < 0.05$, 样本差异显著(原始数据未显示)。激光加电场处理后淀粉酶活性下降。

4 结 论

根据以上数据可以知道“三角大香糯”经激光加电场处理后种子呼吸强度、硝酸还原酶活性、过氧化氢酶活性、低温逆境下脯氨酸含量、赖氨酸含量变化不大; 种子活力、可溶性糖的含量、叶绿素 a, b 的含量有显著提高, 但淀粉酶活性下降。这次实验与刘惠娜等^[17]的实验相比, 种子呼吸强度大 0.32, 过氧化氢酶活性高 0.22; 这可能是因为刘惠娜等的实验中材料为东莞的“凤联 4 号”并且经过低温处理。与郭相等^[12]的实验相比叶绿素 a, b 的含量低 0.5, 这可能是因为郭相平等的实验中材料受胁迫影响, 叶绿素的含量在轻度胁迫下上升。大多数的指标变化不大, 表明激光加电场处理后得到的“激三香糯”对原“三角大香糯”的生长环境仍然适应; 赖氨酸含量变化不大表明米质没有多大改变。叶绿素 a, b 的含量显著提高, 对水稻非常有意义, 这将提高水稻光合作用的能力, 有机物的合成增强, 从而提高产量。这与“激三香糯”在田间实验时亩产增加 103.2 kg 是相吻合的^[4]。可溶性糖含量上升, 将使“激三香糯”在抵抗高渗等环境比原“三角大香糯”具有更强的能力。种子活力的提高, 可以得到更健壮的幼苗, 同时对缩短育苗期也有一定的意义; 这与“激三香糯”的育苗期比原“三角大香糯”缩短 21 d 是有关系的。淀粉酶活性下降, 对提高谷粒的饱满度

有积极意义;同时使“激三香糯”比原“三角大香糯”在遇到连续阴雨天时产量受到的影响小,这也一定程度上保证了产量提高。

参 考 文 献

- Li Yuhua, Deng Mingqin, Jing Shixi *et al.*. The influence of laser and high-voltage electrostatic field on incompatibility of strawberry interspecific hybridization [J]. *Laser Biology*, 1995, **4**(2):635~641
李玉花,邓明琴,景士西等.激光和高压静电场对草莓种间杂交不亲和性的影响[J].激光生物学,1995, **4**(2):635~641
- Wang Kunlin, Zhang Jinliang, Wang Ying. Research on mutation breeding of laser and the high voltage even electric field—The laser and high voltage even electric field radiation the paddy seed influence of the germination percentage [J]. *Applied Laser*, 2006, **26**(3):198~200
王昆林,张金良,王莹.激光和高压均强电场诱变育种研究——激光和高压均强电场辐射对水稻种子发芽率的影响[J].应用激光,2006, **26**(3):198~200
- Qian Liduo, Qian Jianning, Zhou Lingyun. A study on biological characters of laser and electric field-treated chilli seeds [J]. *Journal of Kunming Institute of Technology*, 1995, **20**(2):49~51
钱立铎,钱建宁,周凌云.激光加电场处理辣椒种子的生物效应研究[J].昆明工学院学报,1995, **20**(2):49~51
- Wang Kunlin, Ren Zhaohong, Xu Weihua *et al.*. A study on the improvement the breeding of Sanjiao fragrant glutinous rice through mutagenesis by laser and electric field in Yao'an county [J]. *Journal of Chuzhong Normal University*, 2006, **21**(6):42~49
王昆林,任兆鸿,徐卫华等.激光加电场诱变改良姚安三角大香糯水稻研究[J].楚雄师范学院学报,2006, **21**(6):42~49
- Gao Yu, Tian Tian. Research progress on super rice physiological breeding [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2004, **20**(30):1~3
高宇,田恬.超高产水稻生理育种研究进展[J].中国农学通报,2004, **20**(30):1~3
- Chen Daqing, Li Yanan, Pan Gang. Effects of S_N5 on some physiological characteristics and yield of hybrid rice [J]. *Journal of Hubei Agricultural College*, 1999, **19**(3):198~200
陈大清,李亚男,潘刚. S_N5 对杂交水稻生理特性和产量的影响[J].湖北农学院学报,1999, **19**(3):198~200
- Lin Zhenwu, Zheng Chaofeng, Wu Shaobai *et al.*. Studies on nitrate reductase activity and nitrogen response in crop plants II. The uptake and assimilation of nitrate in indica and japonica rice [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1986, **12**(1):9~14
林振武,郑朝峰,吴少伯等.硝酸还原酶活力与作物耐肥性的研究 II. 籼、粳稻对硝态氮的吸收和同化[J].作物学报,1986, **12**(1):9~14
- K. Saito, H. Shimoda, K. Ishihara. Characteristics of dry matter production process in high yielding rice varieties. 5: Model simulation of canopy photosynthesis [J]. *Japanese Journal of Crop Science*, 1992, **61**(1):62~73
- Li Yan, Qin Suichu. Effects of zinc on rice metabolism and the diagnosis of hidden zinc-deficiency in rice [J]. *Journal of Fujian Agricultural University (Natural Science)*, 1999, **28**(1):66~70
李延,秦遂初. Zn 对水稻生理代谢的影响及潜在性缺 Zn 诊断[J].福建农业大学学报,1999, **28**(1):66~70
- J. Liang, J. Zhang. Xylem ABA concentration can not explain the delay of stomatal recovery of pre-stress plants after rewatering [J]. *Plant Growth Regulators*, 1999, **29**(1):77~86
- Hu Ruizhi, Fang Shuijiao, Chen Guiqiu. Effects of silicon on the physiological targets and yield of hybrid rice [J]. *Journal of Hunan Agricultural University*, 2001, **27**(5):335~338
胡瑞芝,方水娇,陈桂秋.硅对杂交水稻生理指标及产量的影响[J].湖南农业大学学报,2001, **27**(5):335~338
- Guo Xiangping, Zhang Liejun, Wang Qin *et al.*. Effects of water stress on photosynthetic and physiological characteristics of rice in jointing-booting stage [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2006, **24**(2):125~129
郭相平,张烈君,王琴等.拔节孕穗期水分胁迫对水稻生理特性的影响[J].干旱地区农业研究,2006, **24**(2):125~129
- Zhang Zhiliang, Qu Weijing. Guidance to Plant Physiological Experiments[M]. Beijing: Higher Education Press, 2003. 41~44,67~70,98~100,206~208
张志良,瞿伟菁.植物生理学实验指导[M].北京:高等教育出版社,2003. 41~44,67~70,98~100,206~208
- Wang Xiuqi, Qin Shuyuan, Gao Tianhui *et al.*. Fundamental Biochemistry Experiments [M]. Beijing: Higher Education Press, 1982. 103~105
王秀奇,秦淑媛,高天慧等.基础生物化学实验[M].北京:高等教育出版社,1982. 103~105
- Chen Yuquan. Methods and Techniques of Biochemistry Experiments [M]. Beijing: Science Press, 2002. 83~86, 186~188
陈毓荃.生物化学实验方法和技术[M].北京:科学出版社,2002. 83~86,186~188
- Zhang Zhiming, Zhao Changling, Mao Zichao *et al.*. Plant Physiological and Biochemical Techniques [M]. Kunming: Yunnan Agricultural University (unpublished), 1998. 55~58, 188~189
张志明,赵昶灵,毛自朝等.植物生理生化实验技术[M].昆明:云南农业大学(未出版),1998. 55~58,188~189
- Liu Huina, Zhong Dongfang, Xu Liangzheng. Effects of lanthanum nitrate on seed germination of rice under low temperature stress [J]. *Journal of Jiaying University*, 2007, **25**(3):71~76
刘惠娜,钟东方,许良政.低温胁迫下镧对水稻种子萌发的影响[J].嘉应学院学报,2007, **25**(3):71~76