

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3142.2013.02.005

李林玉 张时萍 黄群策. 低能 N^+ 离子束注入对不同染色体组倍性水稻幼苗期生理特性的影响[J]. 广西植物 2013, 33(2): 164–170Li LY Zhang SP Huang QC. Effects of low-energy N^+ ion beam irradiation on the main physiological characteristics of rice (*O. sativa*) with different chromosome sets in seedling period[J]. *Guihaia* 2013, 33(2): 164–170

低能 N^+ 离子束注入对不同染色体组 倍性水稻幼苗期生理特性的影响

李林玉¹, 张时萍², 黄群策^{1, 2*}

(1. 郑州大学 河南省离子束生物工程重点实验室, 郑州 450052; 2. 合肥三丰种子有限公司, 合肥 230061)

摘 要: 以 2 份水稻二倍体及其相应的同源四倍体为试验材料, 采用 3 种不同剂量的低能 N^+ 离子束对其种胚进行注入处理, 对其出芽率、成苗率以及幼苗期 5 种主要生理指标: 超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)、丙二醛(MDA)和可溶性糖进行初步测定。结果表明: 随着辐射剂量的增加, 试验材料的出芽率和成苗率均呈下降趋势, 在最高剂量处理条件下($5.0 \times 10^{17} N^+ / cm^2$) 试验材料的出芽率、成苗率与对照相比差异达极显著水平($P < 0.01$)。二倍体材料幼苗 SOD、POD、CAT 的活性均呈先上升后下降的趋势, 并在 $3.0 \times 10^{17} N^+ / cm^2$ 的剂量下达到最高, 而四倍体材料幼苗 SOD、POD、CAT 的活性则呈先上升后下降再上升的趋势, 并在 $1.0 \times 10^{17} N^+ / cm^2$ 的剂量下达到最高。二倍体材料幼苗 MDA 含量的变化呈先下降再上升的趋势; 四倍体材料幼苗 MDA 含量的变化呈先下降后上升再下降的趋势。两种染色体组倍性水稻材料中可溶性糖含量在各处理组间差异不是特别显著, 但均低于空白对照组。由此可见, 不同剂量的低能 N^+ 离子束会对试验材料的出芽率、成苗率以及幼苗期的主要生理特性产生显著的影响, 且不同染色体组倍性材料间也存在一定的差异。

关键词: 低能 N^+ 离子束; 水稻; SOD; POD; CAT; MDA; 可溶性糖

中图分类号: Q691.5511 文献标识码: A 文章编号: 1000-3142(2013)02-0164-07

* Effects of low-energy N^+ ion beam irradiation on the main physiological characteristics of rice (*O. sativa*) with different chromosome sets in seedling period

LI Lin-Yu¹, ZHANG Shi-Ping², HUANG Qun-Ce^{1, 2*}

(1. Henan Provincial Key Laboratory of Ion Beam Bio-engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China; 2. Hefei Sanfeng Seed Co. Ltd, Hefei 230061, China)

Abstract: Three different doses of low-energy N^+ ion beam were injected into the embryo of diploid rice seeds and corresponding autotetraploids. The germination capacity, seedling rate and five major physiological indexes superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD), catalase (CAT), malonaldehyde (MDA) and soluble sugar were examined preliminarily at seedling period. The results showed that with the increase of the implantation dose, the germination capacity and seedling rate of experimental materials tended to decline, and the difference between each treatment group and CK reached the particularly significant level ($P < 0.01$) under the maximum dose ($5.0 \times 10^{17} N^+ / cm^2$). The SOD, POD and

* 收稿日期: 2012-09-11 修回日期: 2012-11-18

基金项目: 河南省科技攻关项目(82300433202); 河南省水稻重大专项(091100110401)

作者简介: 李林玉(1988-) 男, 河南林州人, 硕士生, 研究方向为离子束生物效应 (E-mail) swkxly2008@126.com。

通讯作者: 黄群策, 教授, 博士生导师, 河南省特聘教授, 主要从事离子束生物技术研究工作 (E-mail) quncehuang@zzu.edu.cn。

CAT activity of diploid materials increased first and then decreased with the dose increasing and all of them reached the maximum at the dose of $3.0 \times 10^{17} N^+ / cm^2$, while the SOD, POD and CAT activity of tetraploid materials showed increase-decrease-increase curve and all of them reached maximum at $1.0 \times 10^{17} N^+ / cm^2$. The MDA content of diploid materials decreased first and then increased with the dose increasing, while that of tetraploid materials showed decrease-increase-decrease curve. There was no particularly significant difference among the treatment group of soluble sugar content, but the content of soluble sugar was lower than that of the CK. Thus, different doses of low-energy N^+ ion beam had a significant effects on the germination capacity, seedling rate and main physiological characteristics of rice with different chromosome sets in seedling period and there were also some differences between materials with different ploidy.

Key words: low-energy N^+ ion beam; rice; SOD; POD; CAT; MDA; soluble sugar

20 世纪 80 年代中期,中国科学院等离子体物理研究所余增亮先生首次提出了以离子注入生物体的方法进行诱变育种的构想(余增亮等,1989),自此,辐射诱变效应已成为辐射生物学研究领域中的一个重要课题(郭金华,2003)。经过 20 多年的发展,低能离子束诱变育种已广泛应用于动物、植物以及微生物育种等相关领域,并取得了可观的成效。离子束辐射会使植物体内产生大量的自由基(余增亮,1996),这些自由基会攻击生物大分子,引起蛋白质、核酸等的损伤(李兴林,2000)。植物体会启动自身的保护系统,进行自我修复,清除自由基,在一定程度范围内消除危害。

水稻作为我国第一大粮食作物,约占粮食总产量的 40%。水稻生产不仅担负着确保我国粮食安全重任,并肩负着实现种粮增效、稻农增收和全面推广新农村建设的重大使命,也是现阶段我国农业和农村经济发展的中心任务之一(黄群策,2011)。关于离子束注入对水稻影响的报道很多,但研究者大多都是集中于研究离子束注入对二倍体水稻的影响,此类研究主要集中在离子束注入对二倍体水稻同工酶(洪仁远等,1999)、种子 M1 代生物学效应(慎玫等,1996)、当代幼苗存活率及幼苗生长速度(郑乐娅等,2001)、生育及产量性状(史维东等,1993)、种子形态生理(鲁润龙等,1992)以及种子电导度(吴跃进等,1995)等方面的影响。关于离子束注入对四倍体水稻的影响也有报道,黄群策等(2007)研究过低能氮离子束注入对同源四倍体水稻双胚苗特性的影响;代西梅等(2009)研究过离子束注入对同源四倍体水稻生殖发育的影响;李玉峰等(2006)研究过氮离子束注入对同源四倍体水稻萌发的影响。但关于离子束注入对不同倍性水稻影响差异研究的报道甚少,因此本文立足于前人研究的基础之上进一步探索离子束注入对水稻的影响,并且初步探究了离子束注入对不同倍性水稻影响的

差异,以期能为离子束技术的发展及应用提供更多的参考资料。

1 材料与方法

1.1 供试材料

以籼型水稻二倍体 902₍₂₎、903₍₂₎ 以及与其相应的同源四倍体 902₍₄₎、903₍₄₎ 为试验材料,同源四倍体材料是由二倍体材料通过种芽诱导法培育并经过多代稳定遗传而获得。试验材料均由郑州大学河南省离子束生物工程重点实验室提供。

1.2 试验方法

1.2.1 N^+ 离子注入 在供试材料中选取籽粒饱满胚完整的成熟种子,脱去颖壳,将其胚朝上插入准备好的花泥中,将其放入郑州大学离子束生物工程实验室的离子注入机的靶室内进行注入。注入时设 3 个不同剂量,分别为 $1.0 \times 10^{17} N^+ / cm^2$ 、 $3.0 \times 10^{17} N^+ / cm^2$ 和 $5.0 \times 10^{17} N^+ / cm^2$ 。每个处理设 3 个重复,每个重复 100 粒种子。注入能量为 30 keV,真空度为 5.0×10^{-2} Pa,采用脉冲式注入方式(离子注入频率为 24 Hz),束流为 200 mA。

1.2.2 处理设置 将实验组材料及空白材料统一种植于郑州大学河南省离子束生物工程实验室的温室,内常规培养,1 周后统计其出芽率,待幼苗长出 3 片真叶时统计其成苗率并测定其各生理指标。本实验共设 4 组:CK(未经任何处理)、X1(处理剂量为 $1.0 \times 10^{17} N^+ / cm^2$)、X2(处理剂量为 $3.0 \times 10^{17} N^+ / cm^2$)、X3(处理剂量为 $5.0 \times 10^{17} N^+ / cm^2$)。

1.2.3 生理指标的测定 本实验选取 5 个生理指标:超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)、丙二醛(MDA)和可溶性糖。其含量均参照李玲等(2009)和张志良(2009)的方法进行测定(紫外吸光度法),并稍作改进。各指标的吸光度值在 TU-4901 双光束可见分光光度计上测

定。每个样品设 3 个重复,取其平均值。用 Origin7.0 作图,并用 SPSS13.0 软件分析各处理间及与对照之间的相关性(LSD 方差分析)。

2 结果与分析

2.1 N^+ 离子束注入对水稻种子出芽率、成苗率的影响

由表 1 看出,低能 N^+ 离子束注入对试验材料的出芽率及成苗率有很明显的影响。不同剂量下各试验材料的出芽率及成苗率有很大差异,同剂量下不同倍性试验材料出芽率及成苗率也有所不同。随着辐照剂量的增加,试验材料的出芽率及成苗率急剧下降。处理 X1 与对照 CK 相比,902₍₂₎ 和 902₍₄₎ 出芽率、成苗率的降幅分别为 9.24%、15.25% 和 12.04%、16.26%;903₍₂₎ 和 903₍₄₎ 出芽率、成苗率的降幅分别为 11.07%、15.44% 和 11.56%、17.69%,其差异均未达到显著水平,说明此剂量处理还不足以

引起试验材料产生明显的生物学效应。处理 X2 与对照 CK 相比,902₍₂₎ 和 902₍₄₎ 出芽率、成苗率的降幅分别为 22.79%、28.76% 和 24.31%、33.19%;903₍₂₎ 和 903₍₄₎ 出芽率、成苗率的降幅分别为 17.36%、27.31% 和 35.55%、40.33%,其差异均已达到显著水平($P < 0.05$),其中 902₍₄₎、903₍₂₎、903₍₄₎ 的成苗率与对照相比差异已达极显著水平($P < 0.01$)。处理 X3 与对照 CK 相比,902₍₂₎ 和 902₍₄₎ 出芽率、成苗率的降幅分别为 48.32%、49.07% 和 55.25%、66.26%;903₍₂₎ 和 903₍₄₎ 出芽率、成苗率的降幅分别为 30.08%、65.86% 和 64.18%、84.29%,其差异均已达到极显著水平($P < 0.01$),其相应的出芽率及成苗率非常低,几乎不能应用于农业生产。在同剂量处理条件下,二倍体材料的出芽率及成苗率要普遍高于四倍体材料(如:在处理 X2 条件下,902₍₂₎ 的出芽率、成苗率分别比 902₍₄₎ 高 13.25%、13.41%;903₍₂₎ 的出芽率、成苗

表 1 N^+ 离子束注入后试验材料的出芽率及成苗率 (%)
Table 1 Germination rate and survival plant rate of the tested materials after N^+ ion implantation

材料 Material	统计项目 Statistical item	CK (空白)	X1 ($1.0 \times 10^{17} N^+ / cm^2$)	X2 ($3.0 \times 10^{17} N^+ / cm^2$)	X3 ($5.0 \times 10^{17} N^+ / cm^2$)
902 ₍₂₎	出芽率	95.20 $\pm$ 2.77a A	86.40 $\pm$ 2.92ab A	73.50 $\pm$ 2.92bc AB	49.20 $\pm$ 4.35c B
	成苗率	90.50 $\pm$ 4.06a A	79.60 $\pm$ 6.21ab A	68.50 $\pm$ 5.15bc AB	40.50 $\pm$ 3.16c B
902 ₍₄₎	出芽率	91.10 $\pm$ 2.88a A	77.20 $\pm$ 5.19ab A	64.90 $\pm$ 4.34bc AB	46.40 $\pm$ 5.34c B
	成苗率	90.40 $\pm$ 4.31a A	75.70 $\pm$ 5.54ab AB	60.40 $\pm$ 3.78bc BC	30.50 $\pm$ 3.16c C
903 ₍₂₎	出芽率	93.90 $\pm$ 5.03a A	83.50 $\pm$ 4.36a A	77.60 $\pm$ 3.09ab A	61.90 $\pm$ 5.32b A
	成苗率	91.70 $\pm$ 3.19a A	81.10 $\pm$ 3.21ab AB	59.10 $\pm$ 3.65b BC	30.10 $\pm$ 3.13c C
903 ₍₄₎	出芽率	95.20 $\pm$ 2.59a A	80.50 $\pm$ 5.70ab A	69.20 $\pm$ 6.59b A	32.50 $\pm$ 2.92c B
	成苗率	91.00 $\pm$ 2.62a A	74.90 $\pm$ 3.49a AB	54.30 $\pm$ 3.01b B	14.30 $\pm$ 3.09c C

注:表中数据为平均值 $\pm$ 标准误;不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平上差异显著;不同大写字母表示在 $P < 0.01$ 水平上差异显著。

Note: the data in the table are average value $\pm$ Se, different lowercase letters mean significant differences at $P < 0.05$ level; different capital letters mean particularly significant differences at $P < 0.01$ level.

率分别比 903₍₄₎ 高 12.14%、8.84%)。

2.2 N^+ 离子束注入对试验材料幼苗 SOD 活性的影响

由图 1 和图 2 可以看出,随着注入剂量的增加,二倍体材料 SOD 活性呈先上升后下降的趋势,且在 $3.0 \times 10^{17} N^+ / cm^2$ 处达到最大值。在此剂量下,902₍₂₎ SOD 活性与 CK 相比增加了 113.38%,差异显著($P < 0.05$);903₍₂₎ 与 CK 相比增加了 143.86%,差异显著($P < 0.05$)。四倍体材料呈先上升后下降再上升的趋势,且在 $1.0 \times 10^{17} N^+ / cm^2$ 处达到最大值。在此剂量下,902₍₄₎ SOD 活性与 CK 相比增加了 98.61%,差异显著($P < 0.05$);903₍₄₎ 与 CK 相比增加了 156.96%,差异显著($P < 0.05$)。

2.3 N^+ 离子束注入对试验材料幼苗 POD 活性的影响

由图 3 和图 4 看出,两品种 POD 活性随注入剂

量的增加变化程度虽有较大差异,但其变化趋势基本相同,且类似于 SOD 活性的变化。二倍体材料 SOD 活性均呈先上升后下降的趋势,并在 $3.0 \times 10^{17} N^+ / cm^2$ 处达最大值,在此剂量下,902₍₂₎ POD 活性是 CK 的 3.59 倍,两者差异显著($P < 0.05$);903₍₂₎ POD 活性是 CK 的 2.66 倍,两者差异显著($P < 0.05$)。四倍体材料呈先上升后下降再上升的趋势,并在 $1.0 \times 10^{17} N^+ / cm^2$ 处达最大值,在此剂量下,902₍₄₎、903₍₄₎ POD 活性分别是 CK 的 5.73 倍、2.10 倍,其差异均达显著水平($P < 0.05$)。

2.4 N^+ 离子束注入对试验材料幼苗 CAT 活性的影响

由图 5 和图 6 看出,随着注入剂量的增加,试验材料 CAT 活性的变化趋势类同于 SOD、POD 活性的

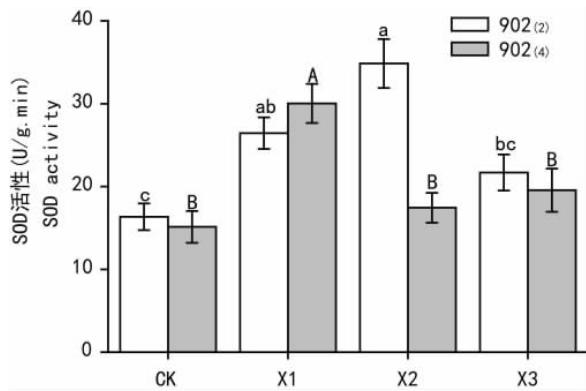
图 1 N^+ 注入对 902 SOD 活性变化的影响

Fig.1 Effects of N^+ ion beam implantation on SOD activity of 902

不同小写字母表示二倍体在 $P < 0.05$ 水平上差异显著; 不同大写字母表示四倍体在 $P < 0.05$ 水平上差异显著。下同。
Different lowercase letters mean significant difference between diploid at $P < 0.05$ level; different capital letters mean particularly significant difference between tetraploid at $P < 0.05$ level. The same below.

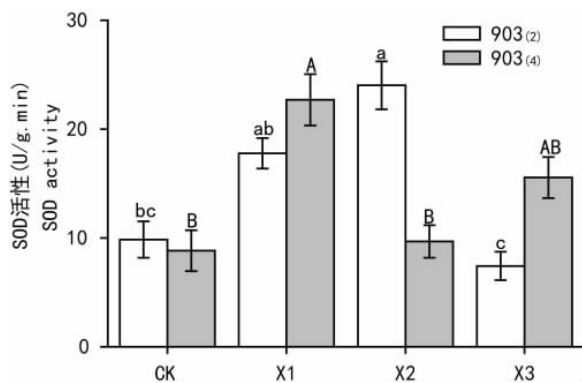
图 2 N^+ 注入对 903 SOD 活性变化的影响

Fig.2 Effects of N^+ ion beam implantation on SOD activity of 903

变化。二倍体均在 $3.0 \times 10^{17} N^+ / cm^2$ 处达到峰值, 在此剂量下 902₍₂₎、903₍₂₎ CAT 活性与 CK 相比分别增加了 24.54%、28.08%, 其差异均达显著水平 ($P < 0.05$)。四倍体均在 $1.0 \times 10^{17} N^+ / cm^2$ 处达到峰值, 在此剂量下 902₍₄₎、903₍₄₎ CAT 活性与 CK 相比分别增加了 30.17%、25.73%, 其差异均达显著水平 ($P < 0.05$)。

2.5 N^+ 离子束注入对试验材料 MDA 含量的影响

不同剂量离子束处理对试验材料 MDA 含量的影响如图 7、图 8 所示。随处理剂量的增加, 二倍体材料 MDA 含量呈先下降再上升的趋势, 四倍体材料 MDA 含量呈先下降然后上升最后再下降的趋

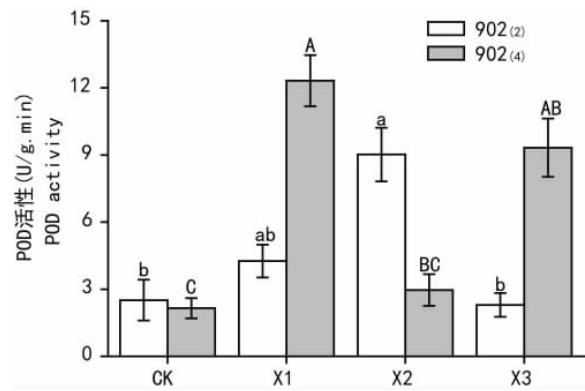
图 3 N^+ 注入对 902 POD 活性变化的影响

Fig.3 Effects of N^+ ion beam implantation on POD activity of 902

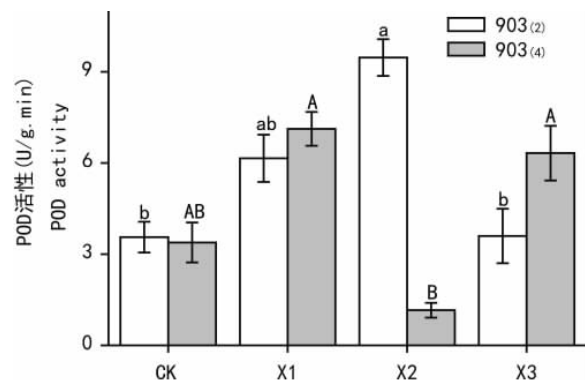
图 4 N^+ 注入对 903 POD 活性变化的影响

Fig.4 Effects of N^+ ion beam implantation on POD activity of 903

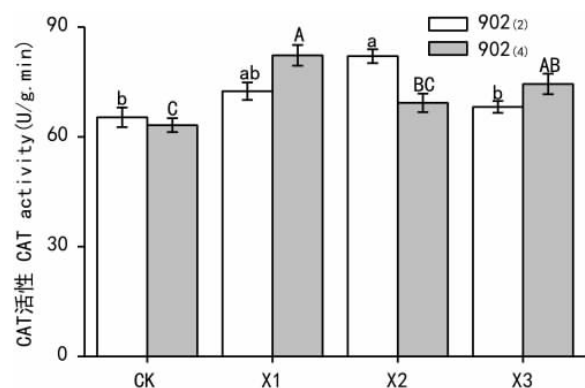
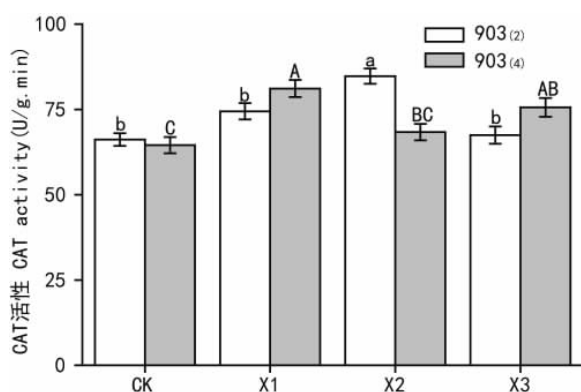
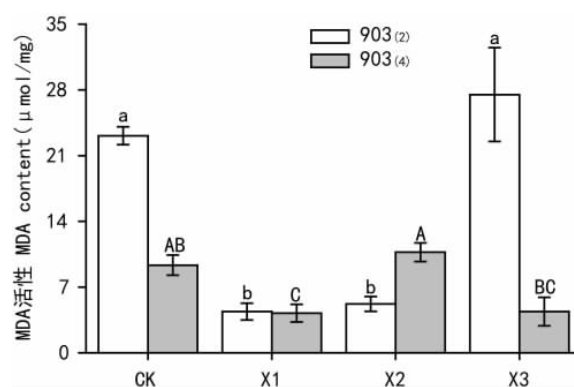
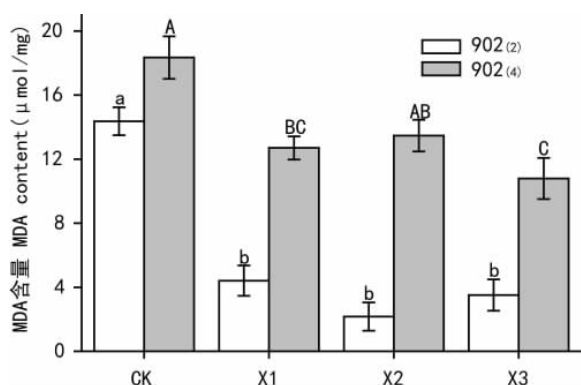
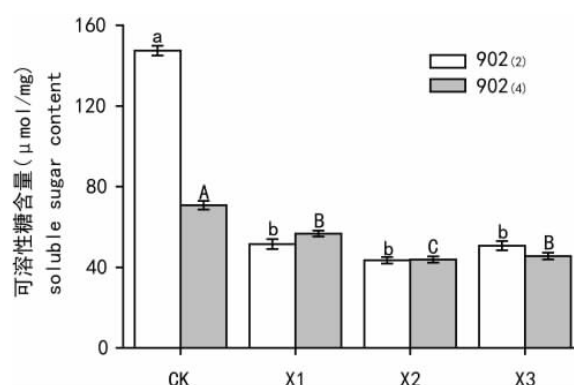
图 5 N^+ 注入对 902 CAT 活性变化的影响

Fig.5 Effects of N^+ ion beam implantation on CAT activity of 902

势。试验材料 MDA 含量的变化与 SOD、POD、CAT 活性的变化几乎成相反的趋势。在二倍体材料

图 6 N^+ 注入对 903 CAT 活性变化的影响Fig. 6 Effects of N^+ ion beam implantation on CAT activity of 903图 8 N^+ 注入对 903 MDA 含量变化的影响Fig. 8 Effects of N^+ ion beam implantation on MDA content of 903图 7 N^+ 注入对 902 MDA 含量变化的影响Fig. 7 Effects of N^+ ion beam implantation on MDA content of 902图 9 N^+ 注入对 902 可溶性糖含量变化的影响Fig. 9 Effects of N^+ ion beam implantation on soluble sugar content of 902

902₍₂₎ 中,各处理组材料的 MDA 含量均低于 CK,且差异显著 ($P < 0.05$),各处理组之间差异不显著;903₍₂₎ 中,除处理 X3 MDA 含量高于 CK 外,其它各处理组均低于 CK,且差异达到显著水平 ($P < 0.05$),处理 X1、X2 差异不显著。在四倍体材料 902₍₄₎ 中,各处理组 MDA 含量均低于 CK,且差异显著 ($P < 0.05$),处理 X1、X2 差异不显著,处理 X3 与其它各组差异均显著 ($P < 0.05$);903₍₄₎ 中,除处理 X2 MDA 含量略高于 CK 外,其它各处理均低于 CK,但只有处理 X1 与 CK 差异显著 ($P < 0.05$),处理 X2、X3 与 CK 相比差异均不显著。

2.6 N^+ 离子束注入对试验材料可溶性糖含量的影响

图 9、图 10 显示了离子束处理对试验材料可溶性糖含量的影响。在所有试验材料中,处理组 (X1、

X2、X3) 可溶性糖含量均低于空白对照组 (CK),且差异显著 ($P < 0.05$)。对 902₍₂₎ 和 903₍₄₎ 来说,各处理组之间差异不显著。对 902₍₄₎、903₍₂₎ 来说,处理 X1、X3 之间差异不显著,但处理 X2 与其它各组之间均存在显著差异 ($P < 0.05$)。

3 结论与讨论

低能 N^+ 离子束注入种子的过程发生了能量沉积、动量传递、电荷交换和质量沉积,由此引起生物体发生复杂的物理化学变化,进而诱发多种生物学效应的产生,最终导致植物遗传物质的损伤和细胞生理生化功能的改变(余增亮,1998)。

本实验中,经不同剂量的离子束辐照后,试验材

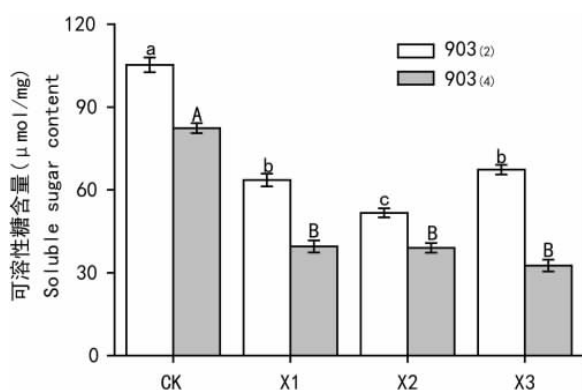
图 10 N^+ 注入对 903 可溶性糖含量变化的影响

Fig. 10 Effects of N^+ ion beam implantation on soluble sugar content of 903

料的出芽率和成苗率都发生了明显的变化,且随着辐照剂量的增加,其出芽率和成苗率急剧下降,且相同剂量下二倍体材料的出芽率和成苗率要高于四倍体。莫海玲等(2003)研究结果表明,低剂量的离子束处理会在一定程度上促进种子发芽,提高其出芽率及成苗率,但中剂量和高剂量的离子束处理会导致试验材料出芽率和成苗率的下降,此结果与本人所得有所出入,但中、高剂量的处理结果与本人相同。黄群策等(2006)研究结果表明,二倍体和四倍体试验材料的出芽率及成苗率随辐照剂量的增加而下降,且相同剂量下,四倍体的出芽率及成苗率要低于二倍体,从而得出同源四倍体水稻比二倍体水稻对低能氮离子束注入处理更敏感的结论,此结果与本人所得相同。离子束注入对水稻的生长发育具有胁迫作用,低剂量条件下,此胁迫效应不是很明显,所以出芽率和成苗率虽有所下降,但与对照相比差异不显著。而随着注入剂量的增加,此胁迫效应越来越明显,致使其出芽率和成苗率的大幅下降。至于四倍体比二倍体对低能氮离子束注入处理更敏感的原因机理目前尚未见有相关文献支持,但笔者初步认为可能是由于两者的内部结构稳定性不同造成的,毕竟本实验中四倍体是由二倍体诱导产生的,无论在内部结构还是生理、遗传等方面,其稳定性可能都要低于二倍体。

低能 N^+ 离子束注入种子产生了一系列的物理和化学变化,引起了复杂的生物学变化(余增亮, 1996),这种生物学变化一般可以通过材料本身的生理生化指标来反应。植物在逆境中出现的伤害或

植物对逆境的不同抵抗能力往往与体内保护酶的活性有关(吴杏春等, 2001)。SOD、CAT 和 POD 是生物体内清除自由基的主要保护酶系, SOD 促使 O_2^- 转化为 H_2O_2 , 而 POD 和 CAT 是清除 H_2O_2 的酶, 三者阻断自由基上呈现出承上启下的作用(葛娟等, 2005)。

本实验中二倍体 3 种酶活性均有先上升后下降的变化趋势, 这与陆佳等(2008)、冯亮英等(2009)的研究结果一致, 而且酶活性随着剂量的变化会有一定波动。与前人研究结果不同之处在于本研究同时得出对于四倍体材料 3 种酶活性均呈先上升再下降最后又上升的变化趋势, 且峰值点与二倍体有所不同。笔者对此认为, 四倍体 3 种酶活性先上升后下降的机理与二倍体是一样的, 这是“损伤-修复-损伤”生物学效应在保护酶活性上的表现, 至于四倍体在最后又出现上升的趋势, 可能是由于高剂量的处理彻底打破了细胞内原有的酶系统平衡, 细胞自身又重建了新的酶系统, 这种新建的酶系统又在新的水平上开始自我修复, 使得酶活性再次上升, 至于其上升水平会不会超过先前的峰值或者空白对照还需要进一步研究。四倍体与二倍体酶活性出现的峰值点不同可能是由于两者对离子束处理的敏感度不同造成的。

丙二醛(MDA)是细胞膜脂过氧化作用的产物之一, 丙二醛产生数量的多少能够代表细胞膜脂氧化的程度, 可间接反应植物组织抗氧化能力的大小(李玲等, 2009)。从图 7、图 8 中可以看出, MDA 的变化趋势与保护酶(SOD、POD、CAT)活性的变化趋势基本相反, 这也间接地证实低能 N^+ 离子束注入对水稻的影响以及水稻自身所具有的协调修复作用。

可溶性糖是碳水化合物的重要组成物质, 参与植物体内的渗透调节作用(张娟等, 2008)。处理后的试验材料其可溶性糖有一定的变化, 处理组可溶性糖含量要低于对照组, 各处理间差异不是特别显著。由此可见, 当试验材料经离子束辐射后, 其抗氧化系统优于碳水化合物系统先表达, 这也与赵帅鹏等(2011)的研究相符。

综上所述, N^+ 离子束注入会对不同倍性水稻产生一定的影响, 特别是其抗氧化系统。不同倍性水稻材料对离子束处理的敏感程度也不一样, 其具体机理还有待进一步研究。

参考文献:

- 张志良. 2009. 植物生理学实验指导(第四版) [M]. 北京: 高等教育出版社: 227-228
- 李玲, 李娘辉, 蒋素梅, 等. 2009. 植物生理学模块实验指导 [M]. 北京: 科学出版社: 80
- 李玲, 李娘辉, 蒋素梅, 等. 2009. 植物生理学模块实验指导 [M]. 北京: 科学出版社: 97-100
- 余增亮. 1996. 离子束生物技术 [M]. 合肥: 安徽科学技术出版社: 67-105, 183-185
- 黄群策. 2011. 稻属植物及其潜在价值研究 [M]. 郑州大学出版社: 1
- Feng LY, Dong XC, Li WJ *et al.* 2009. Effect of C^{+} ions beam irradiation on seed germination and enzymes activity in seedlings of sweet sorghum [J]. *Agric Sci & Technol* **10**(5): 22-25
- Ge J(葛娟), Qi LJ(齐丽杰). 2005. Effects of low Energy Ar^{+} ions implantation on seed spouting growth and lipid peroxidation of Alfalfa seedling(Ar^{+} 离子注入对紫花苜蓿发芽、生长及幼苗脂质过氧化的影响 [J]. *Seed(种子)* **2**: 38-41
- Guo JH(郭金华), Xie CX(谢传晓), Xu J(徐剑) *et al.* 2003. Effects of N^{+} ion implantation on seed vigor of soybean and some antioxidase activity in soybean seedling(N^{+} 离子注入对大豆种子活力及其幼苗的抗氧化酶活性影响 [J]. *Acta Laser Biol Sin(激光生物学报)* **12**(5): 368-372
- Huang QC(黄群策), Jia HR(贾宏汝), Zhao SP(赵帅鹏). 2007. Characteristic stability of autotetraploid twin-embryo seedling rice after low-energy N^{+} ion beam implantation(低能氮离子束注入对同源四倍体水稻双胚苗特性的影响 [J]. *Henan Agric Sci(河南农业科学)* **11**: 34-37
- Huang QC(黄群策), Peng JG(彭建国), Li YF(李玉峰). 2006. Biological effects of autotetraploid rice after ion beam implantation(氮离子注入对同源四倍体水稻的诱变效应 [J]. *Henan Agric Sci(河南农业科学)* **4**: 24-27
- Hong RY(洪仁远), Liu XC(刘新城). 1999. A research of isozymes on injecting ion into rice(离子注入水稻的同工酶研究 [J]. *Henan Sci(河南科学)* **17**: 42-44
- Lu J(陆佳), Li ZH(李志辉), Zhang B(张斌) *et al.* 2008. Effects on N^{+} ion implantation on physiological and biochemical characters of *Sloanea hemsleyana* seeds(氮离子注入对仿栗种子当代生理生化性状的影响 [J]. *J Nucl Agric Sci(核农学报)* **22**(5): 617-620
- Lu RL(鲁润龙), Zhu XL(朱学良), Yu ZL(余增亮) *et al.* 1992. Effects of N^{+} beam on morphology and physiology on crop seeds (N^{+} 离子束对作物种子形态生理的影响 [J]. *Anhui Agric Sin(安徽农业学报)* **19**(1): 42-43
- Li XL(李兴林). 2000. Changes of M_1 generation of wheat endo-sperm implanted by $^{12}C^{6+}$ ($^{12}C^{6+}$ 注入小麦种子胚乳引起 M_1 代的变化 [J]. *Acta Laser Biol Sin(激光生物学报)* **9**(4): 276-280
- Li YF(李玉峰), Huang QC(黄群策), Liang YZ(梁运章). 2006. Effects of N^{+} implantation on rice IR36 seeds germination(氮离子束注入对同源四倍体水稻 IR36 萌发的影响 [J]. *J Nucl Agric Sci(核农学报)* **20**(5): 403-405
- Mo HL(莫海玲), Yu SB(于松保) *et al.* 2003. Influence of ion beam to development of rice(离子束注入对水稻生长发育的影响 [J]. *Guangxi Agric Sci(广西农业科学)* **5**: 13-15
- Shen M(慎玫), Wang CL(王彩莲), Chen QF(陈秋方) *et al.* 1996. Study on biological effects of ion implanted rice seed(离子注入水稻种子 M_1 代的生物学效应研究 [J]. *Zhejiang Agric Sin(浙江农业学报)* **8**(6): 330-334
- Shi WD(史维东), Guo YH(史维东). 1993. A research of ion beam biological effects(离子束生物效应的研究 [J]. *Liaodong Agric Sci(辽东农业科学)* **6**: 21-24
- Wu XC(吴杏春), Lin WX(林文雄), Guo YC(郭玉春). 2001. Effect of enhancing Ultraviolet-B radiation on antioxidant systems in rice seedling leaves(UV-B 辐射增强对水稻叶片抗氧化系统的影响 [J]. *Fujian Agric Sin(福建农业学报)* **16**(3): 51-53
- Wu YJ(吴跃进), Wu JD(吴敬德), Wu JD(吴家道). 1995. Effect of ion implantation on electric conductivity or rice seeds (离子束辐射对水稻种子电导度影响 [J]. *Anhui Agric Sci(安徽农业科学)* **23**(4): 310
- YU Zengliang. 1998. Introduction of Ion Beam Biotechnology [M]. Hefei: Anhui Science and Technology Press
- Yu ZL(余增亮), He JJ(何建军), Deng JG(邓建国) *et al.* 1989. Preliminary studies on the mutagenic mechanism of ion implantation on rice(离子注入水稻诱变育种机理初探 [J]. *Anhui Agric Sci(安徽农业科学)* **39**(1): 12-16
- Zhang J(张娟), Wang XH(王小花), Hao JH(郝金花) *et al.* Effects of He-Ne Laser on sugar metabolism of wheat seedling exposed to Ultraviolet-B radiation(He-Ne 激光对 UV-B 辐射小麦幼苗糖代谢的影响 [J]. *Acta Laser Biol Sin(激光生物学报)* **17**(5): 577
- Zhao SP(赵帅鹏), Huang QC(黄群策), Chen XN(陈雪能). 2011. Influence of low energy N^{+} ions pre-treatment on damage effects of UV-B irradiation on M_1 rice(低能 N^{+} 离子预处理对水稻 UV-B 辐射的当代损伤效应的影响 [J]. *Nucl Physic Rev(原子核物理评论)* **28**(6): 219-224
- Zheng YY(郑乐娅), Wu YJ(吴跃进), Wu JD(吴敬德). 2001. Study on the damage efficiency of ion beam implantation on the present generation of the rice(离子注入水稻诱发当代损伤效应的研究 [J]. *Anhui Agric Sci(安徽农业科学)* **29**(2): 137-139