

N⁺ 离子束注入对毛叶山桐子种子萌发、幼苗生长和碳氮含量的影响

赵子睿¹, 周静波^{2*}, 张明², 姚建铭³

(1. 上海伯豪生物技术有限公司, 上海 201203; 2. 安徽林业职业技术学院资源与环境系, 合肥 230031; 3. 中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

摘要: 为了解 N⁺ 离子束处理对毛叶山桐子种子萌发和表型的影响, 采用 4 种不同能量 N⁺ 离子束 (0、20、25 和 30 keV, 同一剂量 4×10¹⁵ N⁺·cm⁻²) 注入毛叶山桐子 (*Idesia polycarpa* Maxim. var. *vestita* Diels) 种子, 比较分析其种子的发芽率、容器苗株高、冠幅、叶片数、地径和叶片全 C、N 含量, 以筛选出最适宜种子萌发和营养生长的 N⁺ 离子束注入能量。结果表明, 与 CK 比较, 30 keV 处理可显著增加种子发芽率、幼苗株高、冠幅、叶片数、叶片全 N 含量, 显著减少了 C/N; 25 keV 处理对种子发芽率、幼苗株高、冠幅、叶片数和地径无显著影响, 但显著增加了叶片全 C、N 含量; 20 keV 处理对种子发芽率、幼苗冠幅、叶片数和地径增加无显著影响, 对株高增加有一定促进作用, 并显著增加了叶片全 C、N 含量。因此, 在进行毛叶山桐子容器育苗时, 30 keV 是最有利其种子萌发和幼苗营养生长的 N⁺ 离子束注入能量。

关键词: 毛叶山桐子; N⁺ 离子束注入; 催芽; 营养生长; 全 C 和全 N 含量

中图分类号: S727.32

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2022)01-0035-06

Effects of N⁺ ion beam exposure on seed germination, seedling growth, and carbon and nitrogen contents in *Idesia polycarpa* var. *vestita*

ZHAO Zirui¹, ZHOU Jingbo², ZHANG Ming², YAO Jianming³

(1. Shanghai Bohao Biotechnology Corporation, Shanghai 201203;

2. Department of Resources & Environment, Anhui Vocational & Technical College of Forestry, Hefei 230031;

3. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031)

Abstract: To explore the effect of N⁺ beam treatment on seed germination and phenotype of *Idesia polycarpa* Maxim. var. *vestita* Diels, a comparative experiment was carried out using idesia tree seeds exposed to four different energy of N⁺ ion beam with the concentrations of 0, 20, 25, and 30 keV at a dose of 4 × 10¹⁵ N⁺·cm⁻². The seed germination rate, plant height, crown diameter, leaf number, ground diameter, and total carbon (C) and nitrogen (N) contents in the leaves of the plants grown in container were determined and analyzed to obtain the most suitable energy of N⁺ ion beam on the vegetative growth of idesia tree. It was found that 30 keV treatment significantly increased the seed germination rate, plant height, crown width, number of leaves and total N content in the leaves as compared with the control. C/N ratio was significantly reduced in the leaves too. In contrast, 25 keV treatment had no significant effect on the seed germination rate, plant height, crown width, number of the leaves and ground diameter of the seedlings, but it had a significant effect on the total C and N contents in the leaves. Obviously, 20 keV treatment had no significant influence on the seed germination rate, crown width, number of leaves and ground diameter of the container seedlings, but it could promote the plant height and significantly increased the total C and N contents in the leaves. These results indicated that 30 keV is the most favorable energy of N⁺ ion beam for the seed germination and vegetative growth of idesia tree seedlings.

Key words: *Idesia polycarpa* var. *vestita*; N⁺ ion beam injection; seed pregermination; vegetative growth; total carbon and nitrogen contents

收稿日期: 2021-08-29

基金项目: 安徽省高校自然科学研究重点项目 (KJ2017A866) 资助。

共同第一作者: 赵子睿, 工程师。E-mail: 119200582@qq.com 周静波, 教授。E-mail: 515911792@qq.com

* 通信作者: 周静波, 教授。E-mail: 515911792@qq.com

山桐子 (*Idesia polycarpa* Maxim.) 属于大风子科山桐子属落叶乔木, 主要分布于我国长江流域、华北和西北南部的 17 个省区。其中, 变种毛叶山桐子 (*I. polycarpa* Maxim. var. *vestita* Diels) 与原种的主要区别在于小枝、叶柄、叶下面及花序均密生短柔毛^[1-3]。毛叶山桐子为阳性速生树种, 生长迅速, 主杆挺直, 分枝轮生, 树冠圆塔形; 果实成熟后呈红、黄等色, 垂于枝头, 是比较理想的城市绿化、美化和造林的优良树种。同时, 毛叶山桐子也是一种木本油料树种, 果实和种子都可榨油。毛叶山桐子油主要由亚油酸、油酸、棕榈酸、棕榈烯酸、硬脂酸等脂肪酸组成, 可以制备生物柴油和润滑油; 经深加工的油脂可以用作降低血脂、血压的药物^[4-6]。然而, 毛叶山桐子资源有限, 主要以产地划分, 在自然界种子萌发困难, 成片成林的群落较少, 这给其广泛、大面积推广栽种造成了极大的困难。因此, 研究毛叶山桐子的生态适应性, 加快其优质苗木的选育, 提高良种化水平成为当务之急。

离子束生物技术是一项新型的生物技术, 其原理是在真空条件下, 通过离子注入机高压电离气体或金属物质, 产生等离子体, 注入植物材料。通过注入离子的能量传递、电荷传递、质量沉积等多种效应, 引起植物体内某些物质或染色体发生变化, 再通过人工选育的方法得到良种^[7]。离子束注入技术可以产生多种突变性状, 在植株表型变化的突变类型主要包括叶色、叶型、花型、花色、株型、生长周期突变等, 从而丰富种质资源^[8]。目前这项技术已应用于蔬菜^[9]、花卉^[10]、小麦^[11-12]、水稻^[13-15]、玉米^[16]、甘草^[17]和麻风树^[18]等的催芽、育种和改良作物品质等领域, 但是离子束生物技术处理毛叶山桐子种子所产生的生物效应尚鲜见报道。

本研究旨在将氮离子束生物技术应用到毛叶山桐子的良种培育中, 借鉴其在小麦、水稻、蔬菜的催芽和改良品质等领域的方法和经验, 研究氮离子束注入毛叶山桐子的种子后对种子萌芽和幼苗表型的生物学效应, 以期为园林和林业生产提供优质苗木、促进安徽省山桐子产业的良性发展。

1 材料与方法

1.1 材料

2016 年 10 月采集安徽省舒城万佛山农户家的毛叶山桐子果实, 用相对湿度 60% 的细沙于 5 °C 冰箱中层积沙藏。12 月取出净种, 晾干后放在自封袋中, 储存于 5 °C 冰箱中待用。

1.2 方法

1.2.1 发芽率测定 2017 年 3 月, 将种子送往武汉中科光谷绿色生物技术有限公司。微波 ECR 离子注入机 (IBBe-Device) 分别用不同能量的 N^+ 离子束 20 keV 4×10^{15} 、25 keV 4×10^{15} 和 30 keV 4×10^{15} $N^+ \cdot cm^{-2}$ (分别简称 20、25 和 30 keV) 注入毛叶山桐子种子。采用随机区组设计, 以未经 N^+ 离子束注入的毛叶山桐子种子为对照 (0 keV, CK), 20、25 和 30 keV 每种处理 100 粒种子, 3 次重复。3 月 24 日, 取 4 种处理的种子各 300 粒, 分别用下列方法浸种: 用 $1 g \cdot L^{-1}$ $KMnO_4$ 消毒种子 1 h, $15 g \cdot L^{-1}$ KH_2PO_4 、 $200 mg \cdot L^{-1}$ GA_3 和 $0.1 g \cdot L^{-1}$ 的生根粉混合溶液浸种 24 h。倒出混合液, 洗净种子, 放在纱布上晾干。3 月 27 日, 将晾干后的种子分别放在 12 个铺垫滤纸的培养皿中, 每皿 100 粒, 用水浸湿, 定期更换滤纸并加水。盖上培养皿盖, 在光照培养箱内催芽, 光照培养箱温度设为 23 °C, 空气湿度 80%, 光强 2 500 Lx。早晨 6:00 开灯, 下午 18:00 关灯。观察记录发芽数, 计算发芽率。

1.2.2 容器苗生长指标测定 4 月 25 日, 将光照培养箱中催芽苗, 定植于口径×高为 12 cm × 10 cm 的营养钵中, 从 CK、20、25 和 30 keV 4 种处理的所有营养钵苗中, 各选择 9 株长势相近的幼苗作为样本。采用随机区组设计, 每种处理栽植 3 盆, 每盆栽植 1 株, 3 次重复, 放在光照培养箱中培养, 温度设为 23 °C, 每天光照 12 h。5 月 27 日开始, 每隔 7 d 测定 1 次容器苗的株高、冠幅、叶片数, 测定方法参考文献^[19], 地径用游标卡尺测定, 共测定 7 次。

1.2.3 叶片全 N、全 C 含量测定 9 月 11 日, 分别从 CK、20、25 和 30 keV 4 种处理容器苗 9 株样本中, 剪取叶片, 每株从基部开始向上取 6 片叶, 在水龙头下冲洗干净, 吸水纸吸干。4 个处理样本的叶片分别放于 9 个牛皮纸信封中, 共 36 个信封放在电热鼓风干燥箱中, 105 °C 杀青 20 min, 再于 50 °C 烘干 96 h; 9 月 18 日, 用高速万能粉碎机将叶片研成粉状。9 月 20 日使用元素分析仪 (EA3000, Vector, Italy) 测定全 N、全 C 的含量。

1.3 数据分析

为比较不同能量的 N^+ 束对毛叶山桐子种子萌发和幼苗生长的影响, 采用单因素方差分析 (One-way ANOVA) 进行不同处理间的显著性检验, 具有显著性差异的进一步进行 Tukey 多重比较 (HSD), 统计分析在统计软件 R (4.0.2 版本) 进行, 加载 multcomp、car、agricolae 等软件包, 作图在 Excel 中进行。

2 结果与分析

2.1 不同能量 N⁺离子束注入毛叶山桐子种子对其发芽率的影响

从图 1 可以看出, 催芽后的 21、22、26 和 27 d, 30 keV 处理的种子发芽率与 CK 差异都显著, 而 20

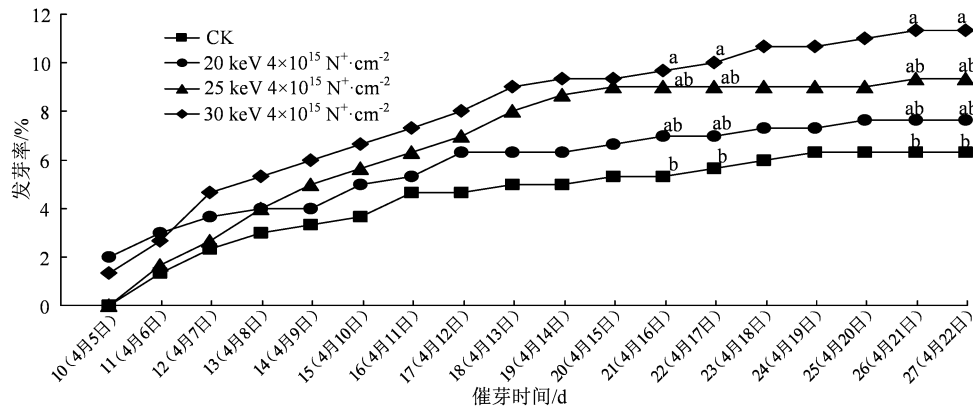


图 1 不同能量 N⁺离子束注入后对毛叶山桐子种子发芽率的影响

Figure 1 Effects of different energy N⁺ ion beam exposure on the germination rate of *I. polycarpa* var. *vestita* seeds

2.2 不同能量 N⁺离子束注入毛叶山桐子种子对其容器苗生长的影响

2.2.1 不同能量 N⁺离子束注入种子对毛叶山桐子容器苗株高的影响 从图 2 可以看出, 20 keV 处理的毛叶山桐子容器苗, 在定植 47 d 时, 株高与对照差异显著, 30 keV 处理的容器苗, 在定植 61 和 68 d 时, 株高与对照差异显著, 25 keV 处理的容器苗, 在 47、61 和 68 d 时, 株高与对照差异都不显著; 定植 40、54 和 75 d 时, 20、25 和 30 keV 处理的容器苗, 株高与对照差异都不显著。说明 20 和 30 keV 的 N⁺离子束注入毛叶山桐子种子, 对容器苗的株高增加有一定的促进作用, 而 30 keV 处理的容器苗株高增长更快一些。

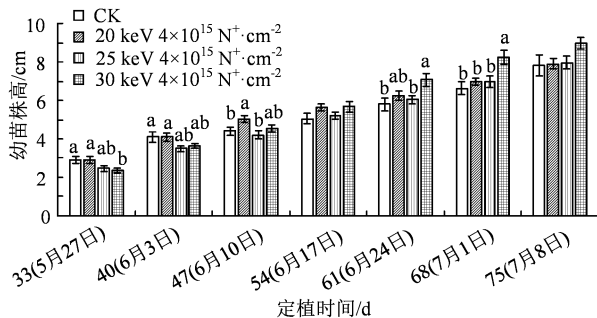


图 2 不同能量 N⁺离子束注入对毛叶山桐子幼苗株高影响
Figure 2 Effects of different energy N⁺ ion beam exposure on the height of *I. polycarpa* var. *vestita* seedlings

2.2.2 不同能量 N⁺离子束注入种子对毛叶山桐子容器苗冠幅的影响 从图 3 可以看出, 30 keV 处理

和 25 keV 处理的种子发芽率与 CK 差异都不显著; 催芽后的 10~20 d 和 23~25 d, 20、25 和 30 keV 处理的种子发芽率与 CK 的差异都不显著。结果表明 30 keV N⁺离子束注入毛叶山桐子种子对发芽率起显著增加作用, 而 20 和 25 keV N⁺离子束注入种子对发芽率的作用不显著。

的毛叶山桐子容器苗, 在定植 61 d 时, 冠幅与对照差异显著, 在定植 54、68 和 75 d 时, 虽然与对照差异不显著, 但是都大于对照, 20 keV 处理的容器苗, 在定植 54、61、68 和 75 d 时, 冠幅与对照差异不显著, 而且都小于对照; 25 keV 处理的容器苗, 定植 54、61、68 和 75 d 时, 冠幅与对照差异不显著, 同时都小于 30 keV 处理的容器苗; 说明 30 keV 的 N⁺离子束注入毛叶山桐子种子, 对容器苗冠幅的增加起一定的作用。

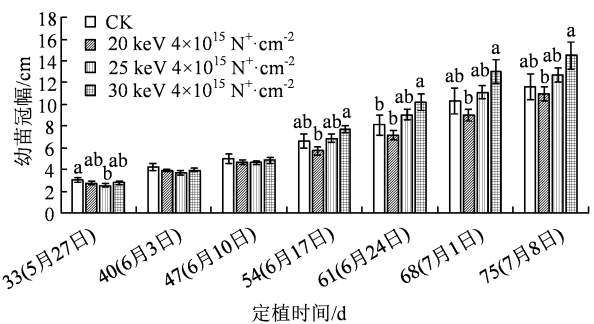


图 3 不同能量 N⁺离子束注入对毛叶山桐子幼苗冠幅影响
Figure 3 Effects of different energy N⁺ ion beam exposure on the crown diameter of *I. polycarpa* var. *vestita* seedlings

2.2.3 不同能量 N⁺离子束注入种子对毛叶山桐子容器苗叶片数的影响 从图 4 可以看出, 30 keV 处理的毛叶山桐子容器苗, 在定植 54 d 时, 叶片数与对照差异显著, 定植 61、68 和 75 d, 虽然与对照差异不显著, 但都是多于对照, 20 和 25 keV 处理的容器苗, 在定植 54、61、68 和 75 d 时, 叶片数与对

照差异都不显著;说明 30 keV 处理对于毛叶山桐子容器苗的叶片增加有一定的促进作用。

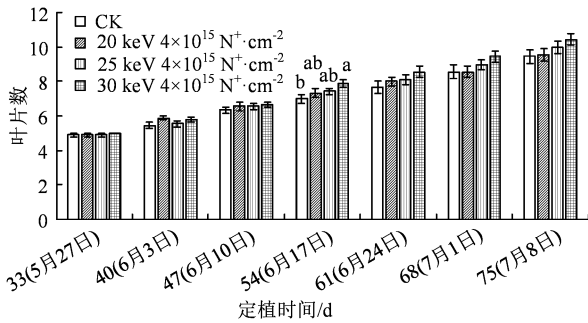


图 4 不同能量 N⁺离子束注入对毛叶山桐子幼苗叶片数的影响
Figure 4 Effects of different energy N⁺ ion beam exposure on the leaf number of *I. polycarpa* var. *vestita* seedlings

2.2.4 不同能量 N⁺离子束注入种子对毛叶山桐子容器苗地径的影响 从图 5 可以看出,在定植 47、54、61、68 和 75 d 时,30 keV 处理的毛叶山桐子容器苗,地径虽然与对照差异不显著,但在数值上都大于对照,而且有上升的趋势;20 keV 处理的容器苗,地径与对照差异都不显著,只有定植 47 d 时,略高于对照,其他都是小于对照;25 keV 处理的容器苗,地径与对照差异也不显著,只有定植 47 和 68 d 时,略高于对照,其他也都小于对照。说明 30 keV 处理对于毛叶山桐子容器苗地径的增加略有作用。

综上所述,20 keV 处理的 N⁺离子束注入毛叶山桐子种子,对容器苗的株高增加有一定的促进作用,对冠幅、叶片数、地径增加没有显著的影响;25 keV 处理的 N⁺离子束注入毛叶山桐子种子,对容器苗的株高、冠幅、叶片数、地径的增加都没有显著的影

响;30 keV 处理的 N⁺离子束注入毛叶山桐子种子,对容器苗的株高、冠幅、叶片数的增加都有显著的影响,对地径增加影响虽然不显著,但是从数值上来看,高于对照。说明 30 keV N⁺离子束注入毛叶山桐子种子,在容器苗定植后,对其株高、冠幅、叶片数和地径增加都有促进作用,可以用该法培养株高、冠大、叶片多和地径粗的容器苗,为园林和林业生产提供优质苗木。

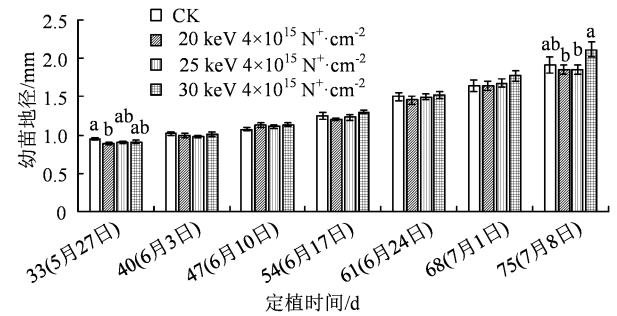


图 5 不同能量 N⁺离子束注入对毛叶山桐子幼苗地径影响
Figure 5 Effects of different energy N⁺ ion beam exposure on the ground diameter of *I. polycarpa* var. *vestita* seedlings

2.3 不同能量 N⁺离子束注入种子对容器苗叶片全 C、N 含量的影响

从图 6 可以看出,容器苗定植 140 d (9 月 11 日),20、25 和 30 keV 处理的毛叶山桐子叶片中的全氮含量与对照差异都显著。20 和 25 keV 处理叶片中的全碳含量与对照差异显著;而 30 keV 处理的毛叶山桐子叶片中的全碳含量与对照差异不显著。从图 7 可以看出,20 keV 处理的毛叶山桐子叶片中的 C / N 与对照差异不显著,而 25 和 30 keV 处理与对照差异显著,都小于对照,30 keV 最小。

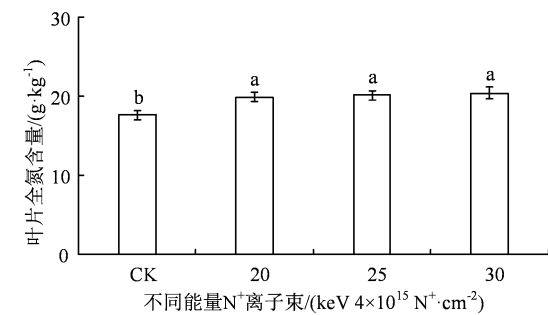
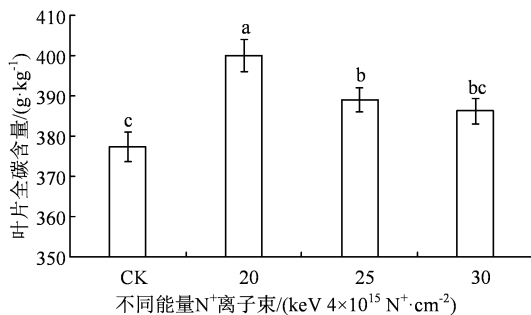


图 6 不同能量 N⁺束注入对毛叶山桐子幼苗叶片全碳和全氮含量的影响

Figure 6 Effects of different energy N⁺ ion beam exposure on total C and N contents in the leaves of *I. polycarpa* var. *vestita* seedlings

综上所述,这 4 种能量的 N⁺离子束注入毛叶山桐子种子,经过催芽、定植,140 d 后的容器苗,其样本每千克叶片中的含氮量(g)与对照差异都显著,说明这几种能量的 N⁺注入毛叶山桐子种子,对种苗生长叶片中的含氮量增加起促进作用,有利于植株

的营养生长。这也从氮营养方面说明了 30 keV 处理的毛叶山桐子株高、冠幅、叶片数等营养指标显著差异于对照的原因,但从图 6 中并没有看到 20、25 和 30 keV 处理之间每千克叶片含 N 量(g)的差异,说明这几种处理在株高、冠幅、叶片数、地径等形

态上的差异可能还有其他内因,有待进一步研究。

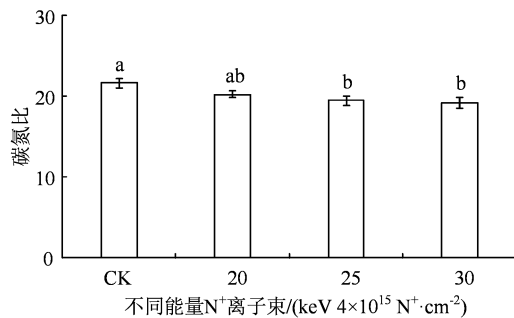


图 7 不同能量 N⁺束注入对毛叶山桐子幼苗叶片碳氮比的影响

Figure 7 Effects of different energy N⁺ ion beam exposure on C/N in the leaves of *I. polycarpa* var. *vestita* seedlings

3 讨论与结论

植物个体发育的起点从种子萌发开始,播种后种子能否迅速萌发,达到早苗、全苗和壮苗,关系到能否为作物的丰产打下良好的基础^[20]。植物的生长是一种不可逆的体积增加的过程。植物的体积大小(通常可以用长度或直径来代表)可以作为测量植物生长的一个重要指标^[21]。植物的株高、冠幅、叶片数和地径可以很好地反映植物的生长状态。30 keV 注入毛叶山桐子种子,无论在发芽率,后期容器苗的株高、冠幅、叶片数等形态指标,都显著差异于未处理的对照。20 keV 注入毛叶山桐子种子,其发芽率与 CK 差异不显著;对容器苗的株高增加有一定的促进作用,对冠幅、叶片数、地径增加没有显著的影响。25 keV 注入毛叶山桐子种子,其发芽率与 CK 差异不显著;对容器苗的株高、冠幅、叶片数、地径的增加都没有显著的影响。基于上述结果,不难看出 30 keV 注入毛叶山桐子种子,显著提高了种子的发芽率,促进了株高、冠幅、叶片数、地径的生长,是适宜于毛叶山桐子种子的萌发、植株营养生长的 N⁺离子束注入能量。

代西梅等^[22]用能量为 30 keV 的 N⁺离子束注入马齿苋,提高了种子的萌发速率、发芽率相一致。周立人等将 30 keV 的离子束注入大麦种胚后,不仅对种子本身萌发能力和 M1 代胚根、胚芽细胞的有丝分裂有促进作用,还对胚根根尖细胞和胚芽细胞内的核及染色体产生不同程度损伤,表现出核和染色体畸变^[23]。黄洪云等年用能量为 30 keV 的离子束注入玉米种子,种子电导率和幼苗叶片 MDA 含量均较低,对细胞膜的破坏性小^[24]。郭建秋等研究采用能量为 30 keV 的氮离子束注入大豆的种子,结果与航天搭载处理 M1 代的出苗率、株高、单株荚数、单株粒数无显著差异^[25]。樊继伟等试验中氮离子束注入

能量只有 1 个水平(30 keV),氮离子束注入后,小麦诱变群体氮素利用产生一定变化,影响产量和品质^[26]。这些研究的结论与本试验的结果一致。

叶片是植物进行光合作用的主要器官,不仅对环境变化敏感,而且可塑性大。作为植物固碳能力的指标,叶片碳含量是植物适应环境变化,维持碳平衡的重要参数。氮是蛋白质、核酸、磷脂的主要成分,而这三者又是原生质、细胞核和生物膜的重要组成部分,因此,氮在植物生命活动中占首要地位^[27],含氮量影响植株的营养生长。20 keV 处理的毛叶山桐子每 kg 样本叶片中的含 C 量和含 N 量与对照差异显著;25 keV 处理的毛叶山桐子叶片含 C 量和含 N 量与对照差异也显著;30 keV 处理的毛叶山桐子叶片含 C 量与对照差异不显著,但是略高于对照,含 N 量与对照差异显著。说明 20 和 25 keV 处理对毛叶山桐子幼苗叶片的固碳能力有一定的促进作用。叶片中的含碳量在采用 N⁺离子束注入后都有增加,但增加幅度随 N⁺离子束能量增加而减小;而含氮量各处理基本一致(图 6),也即是说,随着 N⁺离子束能量增加,其 C/N 比值在减小(图 7)。熊炳霖等的研究表明,叶绿素含量和碳氮比呈极显著的负相关^[28],30 keV 处理的毛叶山桐子叶片 C/N 最小,叶绿素含量高,光合效率好,有助于叶片的生长和发育,这从植物发育生理上解释了部分试验结果。

本研究采用 0、20、25 和 30 keV 等 4 个不同能量 N⁺离子束注入毛叶山桐子种子进行试验,筛选出 30 keV 4×10¹⁵ N⁺·cm⁻² 为适宜注入剂量,显著增加了种子发芽率、株高、冠幅、叶片数和叶片中氮的含量,有利于植株的营养生长。该方法对其他观赏植物优质苗木培育也有较大的参考价值。

参考文献:

- [1] 安徽植物志协作组. 安徽植物志[M]. 北京: 中国展望出版社, 1987.
- [2] 周静波, 邱燕宁, 赵子睿, 等. 大别山区毛叶山桐子的群落特征及其健康状况评估[J]. 河南农业大学学报, 2016, 50(1): 39-44, 55.
- [3] 周静波, 江源, 赵子睿, 等. 脱蜡和低温湿沙处理对毛叶山桐子种子的萌发及相关酶生理生化特征的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2015, 42(2): 159-164.
- [4] 钱学射, 张卫明, 顾龚平, 等. 燃料油植物毛叶山桐子的利用与栽培[J]. 中国野生植物资源, 2009, 28(1): 9-11, 23.
- [5] 吴全珍. 我国毛叶山桐子开发利用回顾和展望[J]. 中国油脂, 2011, 36(6): 54-57.

- [6] 杨志玲, 王开良, 谭梓峰. 值得开发的几种野生木本油料树种[J]. 林业科技开发, 2003, 17(2): 41-43.
- [7] 刘瑞峰, 张志飞, 刘卫东, 等. N^+ 离子束注入对高羊茅种子发芽率的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2008, 28(5): 81-83,88.
- [8] 陈功海, 魏霞, 徐延浩. 离子束诱变在作物育种中的应用[J]. 宁夏农林科技, 2020, 61(2): 11-13.
- [9] 于永昂. 低能离子注入番茄生物效应的初步研究[D]. 新乡: 河南师范大学, 2012.
- [10] 李颖, 唐凌, 梁国鲁, 等. 低能氮离子注入桔梗种子的生物学效应研究[J]. 核农学报, 2019, 33(6): 1065-1071.
- [11] ZHAO S, HUANG Q, YANG P, et al. Effects of ion beams pretreatment on damage of UV-B radiation on seedlings of winter wheat (*Triticum aestivum* L.)[J]. Appl Biochem Biotechnol, 2012, 168(8): 2123-2135.
- [12] WEI Z Q, XIE H M, ZHANG J L, et al. Mutagenic effects of N ion beams on different sites of *Triticum aestivum* L. seed[J]. Acta Laser Biology Sinica, 2003, 12: 33-42.
- [13] 杨剑波, 吴跃进, 吴李君, 等. 低能离子束介导外源基因进入水稻细胞的研究[J]. 安徽农业大学学报, 1994, 21(3): 330-335
- [14] CHEN Q F, YA H Y, FENG Y R, et al. Expression of the key genes involved in ABA biosynthesis in rice implanted by ion beam[J]. Appl Biochem Biotechnol, 2014, 173(1): 239-247.
- [15] CHENG Y W, LIANG G F, WANG W D, et al. Transcriptome profiling of retarded-growth rice seedlings induced by low-energy N^+ beam implantation[J]. J Nanosci Nanotechnol, 2016, 16(7): 7024-7029.
- [16] 黄中文, 王春风, 崔秀珍. N^+ 离子束注入对玉米的生物学效应[J]. 河南科技学院学报(自然科学版), 2005, 33(3): 20-24.
- [17] 张祥胜. 离子束注入甘草种子的当代刺激效应[J]. 长江大学学报(自然科学版)农学卷, 2007, 4(2): 73-75,129.
- [18] XU G, WANG X T, GAN C L, et al. Biological effects of low energy nitrogen ion implantation on *Jatropha curcas* L. seed germination[J]. Nucl Instruments Methods Phys Res Sect B: Beam Interactions Mater Atoms, 2012, 287: 76-84.
- [19] 周静波, 徐小牛, 张余田, 等. 4种营养液对四季秋海棠‘超奥’生长及开花指标的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2013, 22(1): 118-120.
- [20] 王忠. 植物生理学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [21] 武维华. 植物生理学[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [22] 代西梅, 黄群策, 黄延伟. 低能氮离子束注入马齿苋的生物学效应[J]. 中国农学通报, 2005, 21(1): 29-31
- [23] 周立人, 程备久, 余增亮, 等. 氮离子束注入大麦种子的细胞生物学效应[J]. 激光生物学报, 1997, 6(3): 1125-1128.
- [24] 黄洪云, 杜宁, 张敬东. N^+ 离子束注入对玉米种子和幼苗生物学效应的影响[J]. 种子, 2014, 33(1): 37-39.
- [25] 郭建秋, 吴存祥, 冷建田, 等. 航天搭载和离子束注入对大豆诱变效应的初步研究[J]. 核农学报, 2009, 23(3): 395-399.
- [26] 樊继伟, 郭明明, 王康君, 等. 氮离子束小麦诱变群体氮素利用和籽粒品质的变化[J]. 北方农业学报, 2020, 48(3): 47-54.
- [27] 郑彩霞. 植物生理学[M]. 3版. 北京: 中国林业出版社, 2013.
- [28] 熊炳霖, 王鑫月, 陈道钳, 等. 苗期玉米叶片碳氮平衡与干旱诱导的叶片衰老之关系[J]. 西北植物学报, 2016, 36(3): 534-541.