

冷等离子体处理对紫花苜蓿种子萌发及田间长势的影响

邵长勇^{1,2} 王德成¹ 唐欣³ 张丽丽² 赵立静² 冯金奎¹

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 山东省种子有限公司, 济南 250100;
3. 山东农业工程学院科研处, 济南 250100)

摘要: 运用冷等离子体种子处理技术对苜蓿种子进行非电离辐射处理,研究该技术对于苜蓿种子萌发和田间长势的影响。利用不同剂量的冷等离子体处理苜蓿种子,经过室内发芽试验和田间种植试验,调查发芽势、发芽率、发芽指数、越冬、返青、株高、分枝数、结荚数等,并进行数据分析。结果表明,经不同剂量冷等离子体处理后,种子发芽指标和田间长势均有明显变化。冷等离子体处理后放置4 d、20 d进行室内发芽试验,当供电功率为20 W时苜蓿种子的各项发芽指标均大幅提高,并且具有一致的规律性,处理后放置4 d各项发芽指标均显著高于放置20 d,说明放置时间影响冷等离子体处理效果,随放置时间增加苜蓿种子发芽优势下降。与对照相比,处理后苜蓿种子田间种植越冬性普遍增强,返青期提前,其中供电功率160 W的田间苜蓿株高、分枝数、结荚数提高幅度最大。说明该技术对苜蓿种子室内发芽和田间生长均具有重要影响,在生产上具有使用和推广价值。

关键词: 苜蓿种子; 冷等离子体; 萌发; 田间长势

中图分类号: O539; S351.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)03-0138-06

Effects of Low-temperature Plasma on Seed Germination Characteristics and Growth Condition in Field of Alfalfa

Shao Changyong^{1,2} Wang Decheng¹ Tang Xin³ Zhang Lili² Zhao Lijing² Feng Jinkui¹

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Shandong Province Seeds Group Co., Ltd., Ji'nan 250100, China

3. Office of Scientific Research, Shandong Agricultural and Engineering University, Ji'nan 250100, China)

Abstract: Low-temperature plasma (LTP) treatment of seed before sowing is the largest application of modern physical method in agricultural production. As a conductor, plasma is known as the four states of matter, belongs to the areas of physical discipline. Low-temperature plasma stimulation plays an important role in optimizing crops in terms of activation of endogenous substances in the seeds rejuvenation, promotion of plant grown, protection against disease, and the maximization of yield. Plasma seed processing technology is the use of high energy aggregation on treating crop seeds within 20 s. The LTP plasma stimulation could improve seed germination and seedling growth. This technology was applied practically and works well now. In this paper, the effects of different intensities of LTP on Alfalfa seeds were investigated on the fourth and twentieth days after treated. The vigor, germination rate, germination index, wintering ability, returning green stage, plant height, tillers and pod growth were compared for treated and untreated seeds. The result shows that LTP could improve alfalfa seeds germination and seedling growth, and advance the reviving stage. There is a great value of using and spreading on production.

Key words: alfalfa seeds; low-temperature plasma; germination; growth condition in fields

收稿日期: 2015-09-15 修回日期: 2015-10-29

基金项目: 国家牧草产业技术体系项目(CARS-35)

作者简介: 邵长勇(1968—),男,博士后,研究员,主要从事种子工程技术研究,E-mail: shaochangyong@cau.edu.cn

通信作者: 王德成(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事农业机械化工程研究,E-mail: wdc@cau.edu.cn

引言

从 20 世纪 70 年代开始,国外科研人员就开始研究现代物理农业工程的单项技术,其中,低温等离子种子处理是俄罗斯科学家发明的一种种子处理新技术^[1],该技术在俄罗斯及独联体国家已有一定的应用规模,中小型工厂化低温等离子种子处理企业已经出现^[2]。在美国、加拿大等国家也有这方面的报道^[3]。日本的研究发现,低温等离子处理有助于种子早发芽,促使作物提早成熟,经过低温等离子处理的种子可增加开花数量,提高作物产量^[4]。国外研究证明,低温等离子处理不仅具有电离辐射的能量作用过程,而且还具有质量沉积效应和电荷交换作用,通过等离子束对种子的照射,可以激活种子胚内生命物质,并使种皮相对软化,加快种子萌发和出苗的速度,可表现出一定的增产效果,同时起到抗旱、抗寒、防病等作用^[5-11]。目前国内也对冷等离子体种子处理技术进行大量研究,迟丽华等^[12]研究不同剂量的等离子体处理的玉米苗期在盐害、干旱、冷害胁迫下脯氨酸含量的变化,得出逆境下脯氨酸的含量均有升高;邵长勇等^[13-14]研究冷等离子体处理对大葱、小麦种子的发芽特性的影响,得出大葱种子用 240 W 处理功率处理后 20 d,各发芽指标均达到最佳,而用 80 W 处理功率可提高小麦种子的田间长势;在等离子体处理对大豆^[15]、水稻^[16]、黄瓜^[17]影响等方面亦开始了相关研究。国内关于苜蓿种子处理的研究主要在微波、盐胁迫、水分胁迫、电场、铜离子、紫外线、超干旱等方面^[18-21],而冷等离子体处理对苜蓿种子的影响仅是邵长勇等在苜蓿表观遗传中提出^[22],但对处理工艺及影响指标均未进行分析。本研究利用冷等离子体种子机,在真空密闭、充入氦气等模拟太空环境下处理苜蓿种子,通过分析处理后苜蓿种子的各项发芽指标的变化及大田种植后越冬、返青、株高、分枝、结荚等生物指标的差异,旨在探讨冷等离子体处理对苜蓿种子萌发及幼苗田间长势的影响,以期冷等离子体处理苜蓿种子技术推广提供参考。

1 材料与方 法

1.1 试验装置与试验材料

1.1.1 试验装置

种子处理装置为中国农业大学研制的冷等离子体种子处理机(图 1),适用于对农作物种子进行等离子体激活处理。该装置在模拟真空状态下进行密闭操作,即先抽成真空后,注入适量氦气,用氦气作为介质进行种子处理。本装置真空度小于 5 Pa,工

作绝对压力为 130 ~ 160 Pa。在此工作环境下,可以有效提高种子活力,促进种子萌发和幼苗生长,并能提高幼苗缺水忍耐能力和保水力,有助于幼苗抗旱性的改善。

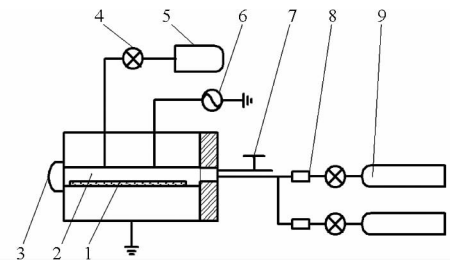


图 1 冷等离子体试验平台装置简图
Fig. 1 Operating platform of low-temperature plasma treatment
1. 样品盘 2. 真空仓 3. 真空仓门 4. 截止阀 5. 泵 6. 射频电源 7. 放气阀 8. 气体流量计 9. 氦气瓶

冷等离子体种子处理的作用机理是:冷等离子体中的真空紫外线使作物种子的生物大分子产生能量的跃迁,即由基态跃迁到激发态,通过非电离辐射对生物活组织的影响,对种子产生积极的生物学效应,不同的非电离辐射可产生不同的生物学作用。

1.1.2 试验材料

以中国农业科学院北京畜牧兽医所选育的中苜 6 号紫花苜蓿种子为试验材料,该种子属于中熟型品种。

1.2 试验方法

1.2.1 种子处理

选择籽粒饱满、大小均匀(千粒质量约 2.3 g)的中苜 6 号紫花苜蓿种子,由冷等离子体处理设备设置不同参数进行处理,种子的处理时间为 20 s。分别设置供电剂量为 0、20、40、60、80、100、120、140、160、180、200 W 的冷等离子体处理种子。

1.2.2 试验设计

1.2.2.1 室内试验设计

将纯净水置于洗净消毒的培养皿中,至滤纸饱和,每个培养皿播入 100 粒经冷等离子体处理的苜蓿种子,每个处理各设 4 次重复。处理后的种子分别放置 4 d 和 20 d 进行发芽试验;在 20℃ 恒温光照培养箱内培养 10 d,每天观察种子萌发情况,并记录发芽数。该试验在山东省种子有限公司质检室进行。

1.2.2.2 田间试验设计

每个处理种植 4 行小区,行长 4 m,行距 50 cm,株距 15 cm,开沟后点播。每个处理设 2 次重复,随机区组排列。调查越冬性情况、田间长势,种植时间为 2013 年 10 月 2 日。

1.2.3 结果计算和表示

发芽势、发芽率、发芽指数的计算公式分别为

$$V_{GR1}=n_1/N\times 100\%$$
$$V_{GR2}=n_2/N\times 100\%$$
$$V_{Gz}=\sum(G_t/D_t)$$

式中 n_1 ——第 4 天发芽数 N ——种子总数
 n_2 ——第 10 天发芽数
 G_t ——第 t 天的种子发芽数
 D_t ——发芽天数 V_{GR1} ——发芽势
 V_{GR2} ——发芽率 V_{Gz} ——发芽指数

利用方差分析软件对试验数据进行单因素随机
区组试验方差分析。

越冬情况:调查全株叶数,即冬前(生长停滞
前)叶片数;功能叶比例,即 1/2 以上叶片未冻伤且
保持功能的叶片数占全株总叶片数的比例。

田间长势测定方法:调查 10 株长势均匀植株的
株高、分枝数、结荚数的情况。

2 结果与分析

2.1 室内发芽试验结果

冷等离子体处理后放置 4 d 进行发芽试验,苜
蓿种子各发芽指标随不同剂量冷等离子体处理的
变化情况及显著性分析结果见表 1。

表 1 冷等离子体处理苜蓿种子放置 4 d 后的发芽指标
Tab.1 Germination indexes of alfalfa seeds stimulated
after 4 d by low-temperature plasma

供电功率/W	发芽势/%	发芽率/%	发芽指数
0	43 ± 2. 31 ^d	55 ± 1. 73 ^d	16. 45 ± 1. 30 ^c
20	57 ± 4. 04 ^a	62 ± 4. 63 ^{ab}	19. 89 ± 0. 95 ^a
40	53 ± 2. 63 ^{ab}	61 ± 1. 15 ^{ab}	19. 15 ± 2. 07 ^{ab}
60	47 ± 4. 04 ^{cd}	55 ± 3. 20 ^d	17. 10 ± 0. 94 ^{bc}
80	50 ± 0. 58 ^{bc}	59 ± 2. 89 ^{bc}	18. 30 ± 1. 03 ^{abc}
100	54 ± 0. 82 ^{ab}	63 ± 1. 73 ^a	19. 69 ± 1. 82 ^a
120	52 ± 3. 46 ^b	63 ± 2. 06 ^a	19. 36 ± 0. 91 ^{ab}
140	45 ± 1. 15 ^d	57 ± 1. 50 ^{cd}	17. 11 ± 0. 18 ^{bc}
160	50 ± 0. 96 ^{bc}	59 ± 3. 20 ^{bc}	18. 24 ± 1. 75 ^{abc}
180	47 ± 2. 31 ^{cd}	61 ± 2. 89 ^{abc}	18. 35 ± 0. 78 ^{abc}
200	50 ± 3. 46 ^{bc}	61 ± 1. 29 ^{abc}	18. 75 ± 1. 71 ^{ab}

注:同列中不同小写字母表示冷等离子体处理苜蓿田间相关调
查项目的显著性差异($P\leq 0.05$),下同。

冷等离子体处理后放置 20 d 进行发芽试验,苜
蓿种子各发芽指标随不同剂量冷等离子体处理的
变化情况及显著性分析结果见表 2。

由表 1、表 2 可以看出,不同剂量的冷等离子处
理苜蓿种子,处理后放置 4 d 和放置 20 d 进行发芽
试验,发芽势、发芽率、发芽指数与对照相比均有明
显改变。

不同剂量的冷等离子处理苜蓿种子,处理后放
置 20 d 进行发芽试验测得的发芽势、发芽率、发芽

指数与放置 4 d 进行发芽试验时测得的相关数据具
有一致性。说明处理后放置时间对于冷等离子体处
理苜蓿种子发芽的促进作用没有明显影响。

表 2 冷等离子体处理苜蓿种子放置 20 d 后的发芽指标
Tab.2 Germination indexes of alfalfa seeds stimulated
after 20 d by low-temperature plasma

供电功率/W	发芽势/%	发芽率/%	发芽指数
0	51 ± 1. 15 ^{cde}	56 ± 3. 77 ^c	17. 05 ± 0. 81 ^c
20	58 ± 1. 83 ^a	60 ± 2. 22 ^{ab}	18. 82 ± 1. 44 ^{abc}
40	54 ± 2. 89 ^{bcd}	57 ± 2. 63 ^c	17. 90 ± 0. 94 ^{abc}
60	56 ± 5. 20 ^{abc}	56 ± 2. 94 ^c	18. 41 ± 1. 99 ^{abc}
80	56 ± 1. 71 ^{ab}	62 ± 2. 65 ^a	18. 99 ± 0. 64 ^a
100	56 ± 4. 62 ^a	57 ± 2. 22 ^c	18. 14 ± 1. 61 ^{abc}
120	54 ± 1. 50 ^{abcd}	58 ± 3. 70 ^c	18. 44 ± 1. 26 ^{ab}
140	50 ± 1. 73 ^c	55 ± 3. 65 ^c	17. 11 ± 1. 40 ^{abc}
160	53 ± 4. 04 ^{bcd}	60 ± 3. 59 ^{ab}	18. 13 ± 1. 19 ^{abc}
180	52 ± 2. 89 ^{de}	61 ± 2. 65 ^a	18. 35 ± 0. 70 ^{abc}
200	53 ± 1. 29 ^{bcd}	61 ± 4. 99 ^a	18. 01 ± 1. 39 ^{abc}

当供电功率为 20 W 时,处理后放置 4、20 d 进
行发芽试验的发芽势、发芽率、发芽指数均得到提
高,发芽势比对照的提高幅度尤为显著,产生极显
著差异。可以得出,不论处理后放置 4 d 开始进行
发芽试验还是处理后放置 20 d 开始进行发芽试
验,供电功率为 20 W 时是促进发芽势的最佳剂
量。

处理后放置 4 d 开始进行发芽试验,在 20、40、
80、100、120、160、200 W 的供电剂量时,均与对照产
生显著差异,而发芽率、发芽指数亦均有大幅提高,
促进种子发芽的作用效果非常明显;处理后放置 20 d
开始进行发芽试验,在 20、80、100、160 W 的供电剂
量时,发芽势、发芽率、发芽指数均有大幅提高,促进
种子发芽的作用效果非常显著;而在 140 W 的供电
剂量时,4 d、20 d 的发芽势、发芽率、发芽指数促进
作用不明显,甚至存在一定的抑制作用,方差分析结
果与对照相同。

冷等离子体处理后苜蓿种子发芽试验中,发芽
势、发芽率、发芽指数总体规律趋势一致,随供电功
率递增,发芽指标增幅呈现不规则马鞍形。

2.2 田间试验结果

2.2.1 冷等离子体处理对种子越冬及返青的影响

每个重复顺次调查 10 株苜蓿的冻害级别并取
平均数,比较冷等离子体处理对苜蓿越冬性的影响
及返青时间,具体数据见表 3。

由表 3 得出,不同功率冷等离子体处理对苜蓿
种子越冬及返青均与对照产生明显改变。

越冬前全株叶数可反映停滞生长前苜蓿幼苗的
大田长势情况。调查数据看出,供电功率 20、40、

表 3 冷等离子体处理苜蓿种子越冬及返青情况比较

Tab.3 Investigation on overwinter and green-up of alfalfa seeds treated by low-temperature plasma

供电功率/W	全株平均叶数	功能叶占比/%	返青时间/d
0	4.50	51.28	3.10
20	4.71	59.16	2.28
40	4.97	51.57	3.10
60	4.42	57.08	2.28
80	4.55	62.75	2.26
100	4.02	66.53	2.26
120	4.41	53.53	3.10
140	4.67	63.67	2.26
160	4.91	60.00	2.27
180	4.86	60.36	2.27
200	5.13	60.07	2.27

注:全株平均叶数和功能叶比例的调查时间为 2014 年 1 月 25 日。

表 4 冷等离子体处理后苜蓿田间长势比较

Tab.4 Growth condition of alfalfa seeds treated by low-temperature plasma

供电功率/W	2014 年 5 月 5 日		2014 年 8 月 8 日	
	株高/cm	分枝数	株高/cm	结荚数
0	31.88 ± 1.642 ^f	5.40 ± 0.548 ^{bc}	84.50 ± 4.324 ^c	16.57 ± 6.047 ^c
20	32.25 ± 1.753 ^f	6.00 ± 1.000 ^{abc}	91.33 ± 6.121 ^{bc}	17.71 ± 4.676 ^{bc}
40	38.38 ± 3.249 ^{bcd}	6.00 ± 1.000 ^{abc}	91.17 ± 4.119 ^{bc}	19.14 ± 7.387 ^{bc}
60	38.00 ± 1.604 ^{cd}	7.40 ± 2.074 ^a	84.17 ± 5.269 ^c	17.71 ± 3.724 ^{bc}
80	38.75 ± 1.035 ^{bc}	6.20 ± 0.837 ^{abc}	104.67 ± 7.257 ^a	16.14 ± 6.646 ^c
100	35.13 ± 2.748 ^e	6.20 ± 0.837 ^{abc}	97.50 ± 4.722 ^{ab}	24.43 ± 8.238 ^{ab}
120	35.00 ± 2.928 ^e	6.98 ± 0.045 ^a	91.50 ± 7.45 ^{bc}	23.43 ± 5.967 ^{abc}
140	36.38 ± 2.446 ^{de}	4.80 ± 0.837 ^c	93.83 ± 9.169 ^{bc}	27.57 ± 8.55 ^a
160	41.25 ± 1.581 ^a	6.80 ± 0.837 ^{ab}	99.17 ± 7.679 ^{ab}	29.00 ± 7.494 ^a
180	40.25 ± 2.550 ^{ab}	6.00 ± 0.707 ^{abc}	96.17 ± 10.147 ^{ab}	16.43 ± 5.115 ^c
200	36.75 ± 1.669 ^{cde}	6.20 ± 0.837 ^{abc}	94.17 ± 6.765 ^{bc}	18.86 ± 8.343 ^{bc}

由表 4 方差分析得出:冷等离子体处理对苜蓿株高、分枝数、结荚数等均产生不同程度的影响。

2014 年 5 月 5 日时,与对照相比,冷等离子体处理的苜蓿田间株高均不同程度高于对照;且 40 ~ 200 W 与对照产生显著差异,其中 160 W 株高最高,差异极其显著,而 20 W 与对照不产生差异。2014 年 8 月 8 日时,冷等离子体处理的苜蓿田间株高除 60 W 均高于对照,与前期生长规律不尽相同;其中,当供电功率 80、100、160、180 W 时,株高大幅高于对照,且产生显著差异;当供电功率为 20、40、120、140 W 时,株高高于对照存在差异但不产生显著差异;而供电功率 60 W 时,株高稍低于对照但不存在差异。由 2 次株高调查得出,不同功率的冷等离子体处理,均对苜蓿株高产生不同程度促进作用。随功率递增,当供电功率 80、160 W 时,株高达到 2 个小高峰值,整体呈不规则马鞍形。

通过分枝调查数据可以得出:当供电功率为

140 ~ 200 W 时,全株平均叶数高于对照,而供电功率 60、80、100、120 W 时,全株平均叶数与对照相近甚至低于对照,呈不规则马鞍形,这与发芽势、发芽率的规律相似。

功能叶占比可以间接反映苜蓿幼苗的越冬性,占比越高越冬性越强,与返青时间有一定相关性。由表 3 数据得出,冷等离子体处理后功能叶占比均高于对照,说明冷等离子体处理可以提高功能叶占比,有利于苜蓿幼苗越冬,而供电功率 100 W 时,功能叶占比最高。冷等离子体处理后 40、120 W 返青时间不变,而其他处理返青时间均提前 1 ~ 2 d。

2.2.2 冷等离子处理对苜蓿田间长势的影响

调查时每个重复顺次调查 10 株苜蓿的株高、分枝数、结荚数等,用方差分析软件 SPSS 进行方差分析,并计算标准误差,具体数据见表 4。

60、120 W 时,分枝数显著增多,与对照产生显著差异,其中 60 W 分枝数最多;当供电功率为 20、40、80、100、160、180、200 W 时,分枝数比对照明显增多,存在差异,但不产生显著差异;而供电功率 140 W 时,分枝数受到抑制,比对照明显减少,但未产生显著差异。

通过结荚调查数据可以得出:与对照相比,当供电功率为 100、140、160 W 时,结荚数明显增加,产生显著差异;当供电功率为 20、40、60、120、200 W 时,结荚数比对照有明显增加,但不产生显著差异;而当供电功率为 80、180 W 时,结荚数略低于对照,方差分析结果不存在差异。

3 讨论

本研究利用冷等离子体种子处理机,在真空密闭、充入氩气等模拟太空环境下处理苜蓿种子,通过分析处理后苜蓿种子的各项发芽指标及大田生长指

标的差异,得出处理后促进苜蓿种子萌发和幼苗田间长势的最佳时间和剂量。冷等离子体种子处理技术在苜蓿种子的播前处理的应用方面得到有效结果。主要作用机理是通过辉光放电产生的等离子“渗透”种皮,与内部的生物大分子相互作用,使生物大分子产生基态到激发态的能量跃迁,大分子中包括种子萌发生理生化过程相关的酶,从而产生积极的生物学效应,具体表现在生理活性大大加强,潜在抗逆基因得到表达,提高了作物的生长活力和抗逆性,激发种子的萌发潜能,提升种子的生命活力、增强种子的健壮程度,加速种子内部各种酶的转化,提高可溶性糖和种子中可溶性蛋白含量,促进基因表达,达到提高产量、提高质量的目的^[23]。苜蓿抗寒性与植株 SOD、POD 等酶的活性及脯氨酸含量有关,此研究与等离子作用机理研究相同,等离子体种子处理对酶的激发和脯氨酸含量的改变可以对苜蓿越冬性产生影响^[24]。目前,冷等离子体对苜蓿越冬性、返青期影响需继续开展相关机理的研究。

关于冷等离子体种子播前处理的剂量效应,类似于离子束注入微生物的作用效果,也就是冷等离子体处理种子的作用效果曲线随着冷等离子体注入剂量的增加均呈现为先降后升再降的“马鞍形”变化,完全不同于紫外线和 Y 射线辐射下的“肩形”(D. radiodurans)和“直线形”(E. coli)。这些都说明离子注入的作用机制不同于其他电离辐射的作用机制^[25]。

在氦气作为介质,媒介压力为 130 ~ 160 Pa 情形下,冷等离子体种子处理有一定的时效性,选择处理后第 10、15、30、60、90、150、180、200 天开始试验,最终确定在处理后放置 150 d 还保持效应。这与以往利用弧光磁化等离子体处理机处理完的种子一定

要在 5 ~ 12 d 内播种,否则起不到应有的效果的结果^[26]不太一致,有利于在生产上大面积推广。

4 结论

(1)从试验得出,不同剂量的冷等离子体处理苜蓿种子,处理后放置 4 d 和放置 20 d 进行发芽试验,发芽势、发芽率和发芽指数与对照均有明显差异。说明冷等离子体对于苜蓿种子的发芽势、发芽率和发芽指数有显著影响。当供电功率为 20 W 时,不论处理后放置 4 d 还是放置 20 d 进行发芽试验,发芽势、发芽率和发芽指数与对照相比较都有较大幅度提高,说明供电功率为 20 W 时是促进苜蓿发芽的最佳剂量。

(2)苜蓿种子经过冷等离子体处理并放置 20 d 后进行发芽试验的发芽势、发芽率和发芽指数与放置 4 d 后进行发芽试验的测定值具有一致性。说明处理后,放置时间对于苜蓿种子发芽指标的促进作用没有明显影响。苜蓿种子经过冷等离子体处理并放置 4 d 和放置 20 d 后进行发芽试验,随供电功率递增,苜蓿发芽势、发芽率和发芽指数均呈不规则马鞍形,且规律具有一致性。

(3)苜蓿种子经过冷等离子体处理后田间种植,越冬、返青、株高、分枝数、结荚数与对照均有明显差异,说明冷等离子体处理对苜蓿田间长势有显著影响。其中,冷等离子体处理可以提高苜蓿幼苗的功能叶占比,增强苜蓿幼苗的越冬性,并且合适供电功率时返青期可提前 1 ~ 2 d。供电功率对全株平均叶数的影响规律与室内发芽规律相似。

(4)供电功率 160 W 时,田间株高、分枝数、结荚数等均有大幅提高,且规律较一致,可考虑生产中推广应用。

参 考 文 献

- 1 郝学金,秦建国. 低温等离子种子处理研究初报[J]. 山西农业科学,1998,26(2):39-41.
HAO Xuejin, QIN Jianguo. Preliminary study on low temperature plasma treatment of seed[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 1998,26(2):39-41. (in Chinese)
- 2 李瑞福. 等离子体机种子处理技术[J]. 北方水稻,2010(4):52-53.
LI Ruifu. Plasma machine seed treatment technology[J]. North Rice, 2010(4):52-53. (in Chinese)
- 3 尹美强. 磁化弧光等离子体对种子生物效应的研究[D]. 大连:大连理工大学,2006.
YIN Meiqiang. Research of magnetized arc plasma on seeds biological effects[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006. (in Chinese)
- 4 张宇航,张景楼,王清发. 物理方法在甜菜种子处理上的应用[J]. 中国甜菜糖业,2005(2):20-22.
ZHANG Yuhang, ZHANG Jinglou, WANG Qingfa. The application of physical methods in sugar beet seed treatment[J]. China Beet and Sugar, 2005(2):20-22. (in Chinese)
- 5 黄明镜,马步洲,岳艳翠,等. 等离子体对种子活力及抗旱性的影响[J]. 干旱地区农业研究,2002,20(3):65-68
HUANG Mingjing, MA Buzhou, YUE Yancui, et al. Effect of plasma on seeds vigor and drought resistance[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2002,20(3):65-68. (in Chinese)
- 6 徐志莹,陈波,魏振. 不同种子处理方法对玉米产量的影响[J]. 农业科技与装备,2011(4):15-16.
XU Zhiying, CHEN Bo, WEI Zhen. Various seed treatments on corn yield[J]. Agricultural Science & Technology and Equipment, 2011(4):15-16. (in Chinese)

- 7 刘山,欧阳西荣,聂荣邦.物理方法在作物种子处理中的应用现状与发展趋势[J].作物研究,2007(增刊):520-524.
LIU Shan, OUYANG Xirong, NIE Rongbang. Application status and development trend of the physical methods in the crop seed treatment[J]. Crop Research, 2007(Supp.): 520-524. (in Chinese)
- 8 邵长勇,王德成,唐欣,等.弧光磁化等离子体种子处理装备应用现状及发展趋势[J].中国种业,2012(8):1-3.
SHAO Changyong, WANG Decheng, TANG Xin, et al. Arc plasma system and its application & development trends on pre-sowing seeds treatment[J]. China Seed Industry, 2012(8):1-3. (in Chinese)
- 9 胡良龙,田立佳,胡志超,等.物理农业技术在种子选后处理中的应用[J].安徽农业科学,2007,35(13):3778-3779.
HU Lianglong, TIAN Lijia, HU Zhichao, et al. Application of physical agriculture techniques in cleaned seeds treatments[J]. Journal of Anhui Agricultural Science, 2007,35(13):3778-3779. (in Chinese)
- 10 YIN Meiqiang, HUANG Mingjing. Stimulating effects of seed treatment by magnetized plasma on tomato growth and yield[J]. Plasma Science & Technology, 2005,7(6):3143-3147.
- 11 IRINA Filatova, VIKTOR Azharonok, MIKHAIL Kadyrov. RF and microwave plasma application for pre-sowing caryopsis treatments[J]. Publications de l'Observatoire Astronomique de Belgrade, 2010, 89: 289-292.
- 12 迟丽华.等离子体对作物种子生物学效应的研究[D].长春:吉林农业大学,2004.
CHI Lihua. Study of biological effect of plasma on crop's seeds [D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2004. (in Chinese)
- 13 邵长勇,方宪法,唐欣,等.冷等离子体处理对大葱种子发芽特性的影响[J].农业机械学报,2013,44(6):201-205.
SHAO Changyong, FANG Xianfa, TANG Xin, et al. Stimulating effects of low-temperature plasma on seed germination characteristics of green Chinese onion[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(6):201-205. (in Chinese)
- 14 邵长勇,尤泳,唐欣,等.冷等离子体处理对小麦幼苗特性的影响[J].农业机械学报,2013,44(2):251-255.
SHAO Changyong, YOU Yong, TANG Xin, et al. Effects of Low-temperature plasma on characteristics of wheat seedling [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(2):251-255. (in Chinese)
- 15 石玉海,方向前,许东恒,等.等离子体不同剂量处理大豆种子对生物学性状、产量及产值的影响[J].吉林农业科学,2010(6):6-7,29.
SHI Yuhai, FANG Xiangqian, XU Dongheng, et al. Effect of plasma treatment of soybean seed with different radiation intensity on biological traits, yield and economic output[J]. Journal of Jilin Agricultural Sciences, 2010(6): 6-7,29. (in Chinese)
- 16 王永维,曹林,王俊,等.冷等离子体处理对水稻种子萌发的影响[J].农业机械学报,2013,44(6):206-209.
WANG Yongwei, CAO Lin, WANG Jun, et al. Influence of cold plasma treatment on rice seed germination[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(6):206-209. (in Chinese)
- 17 王敏,杨思泽,陈青云,等.大气压等离子体处理对黄瓜种子萌发及幼苗生长的影响[J].农业工程学报,2007,23(2):195-199.
WANG Min, YANG Sizhe, CHEN Qingyun, et al. Effects of atmospheric pressure plasma on seed germination and seedling growth of cucumber[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(2):195-199. (in Chinese)
- 18 李波,焦德志,战春岩,等.微波处理苜蓿种子发芽率及其幼苗抗旱性的影响[J].种子,2006(12):28-30.
LI Bo, JIAO Dezhi, ZHAN Chunyan, et al. Influence of different microwave treatment on germination and seedling resistance to drought of alfalfa[J]. Seed, 2006(12):28-30. (in Chinese)
- 19 霍平慧,李剑峰,师尚礼,等.盐胁迫对超干处理苜蓿种子萌发及幼苗生长的影响[J].草原与草坪,2011(1):13-17.
HUO Pinghui, LI Jianfeng, SHI Shangli, et al. Germination and growth of ultra-dried alfalfa seeds under salt stress[J]. Grassland and Turf, 2011(1):13-17. (in Chinese)
- 20 秦芳.微波处理对甘肃省4个苜蓿地方品种抗旱性的影响[J].草业科学,2004(11):41-43.
QIN Fang. Effect of microwave treatment on drought resistance of four local alfalfa cultivars of Gansu Province[J]. Pratacultural Science, 2004(11):41-43. (in Chinese)
- 21 征荣,许月英,杨体强,等.电场处理苜蓿种子对其幼苗期生长的影响[J].内蒙古大学学报:自然科学版,2002(3):359-362.
ZHENG Rong, XU Yueying, YANG Tiqiang, et al. The influence of electric field treating lucerne on the growth [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Neimongol, 2002(3):359-362. (in Chinese)
- 22 邵长勇,王德成,杨鹏,等.基于冷等离子体种子处理技术的苜蓿表观遗传研究[J].中国种业,2015(3):12-15.
SHAO Changyong, WANG Decheng, YANG Peng, et al. Study on epigenetic variation in alfalfa seeds treated by low-temperature plasma [J]. China Seed Industry, 2015(3):12-15. (in Chinese)
- 23 于亚学,吕雪松,李富娟.等离子体种子处理技术的推广应用[J].农业开发与装备,2011(2):19-20.
- 24 任卫波,陈立波,郭慧琴,等.紫花苜蓿耐寒越冬性研究进展[J].中国草地学报,2008,30(2):104-108.
REN Weibo, CHEN Libo, GUO Huiqin, et al. Progress in winter hardiness and survival of alfalfa [J]. Chinese Journal of Grassland, 2008,30(2): 104-108. (in Chinese)
- 25 宋道军,姚建铭,邵春林,等.离子注入微生物产生“马鞍型”存活曲线的可能作用机制[J].核技术,1999(3):129-132.
SONG Daojun, YAO Jianming, SHAO Chunlin, et al. A possible mechanism of dose related survival of microorganism implanted by N^+ ions[J]. Chinese Journal of Nuclear Techniques, 1999(3):129-132. (in Chinese)
- 26 尹美强,郭平毅,温银元,等.磁化等离子体处理大豆种子的生物学效应[J].核农学报,2010,24(3):470-475.
YIN Meiqiang, GUO Pingyi, WEN Yinyuan, et al. Biological effects of magnetized plasma on soybean seeds[J]. Chinese Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2010,24(3):470-475. (in Chinese)