

冷等离子体处理对盐地碱蓬黑色种子发芽及幼苗叶片生理指标的影响初探

王 凯, 何苏南, 郁 凯, 刘 冲, 邢锦城^①

(江苏沿海地区农业科学研究所, 江苏 盐城 224002)

摘要:为促进盐地碱蓬[*Suaeda salsa* (Linn.) Pall.]黑色种子发芽和幼苗生长,以盐地碱蓬品种‘沿海碱蓬 1 号’(‘Yanhai Jianpeng No. 1’)为材料,以未经过冷等离子体处理(0 W)的种子为对照,对 100、200、300、400 和 500 W 冷等离子体处理 3 min 后‘沿海碱蓬 1 号’黑色种子部分发芽指标及幼苗叶片生理指标进行比较,并对处理功率与各指标进行相关性分析。结果表明:各处理组的发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数、苗长、根长、可溶性糖含量和超氧化物歧化酶活性以及 100、200 和 300 W 处理组的过氧化氢酶活性均显著($P < 0.05$)高于对照组,而各处理组的平均发芽时间、丙二醛含量和过氧化物酶活性以及 400 和 500 W 处理组的过氧化氢酶活性均显著低于对照组。冷等离子体处理功率与发芽势、根长和可溶性糖含量显著正相关,与丙二醛含量显著负相关。综合分析认为,100~500 W 冷等离子体处理 3 min 可有效促进盐地碱蓬黑色种子发芽,增强幼苗的抗氧化能力,其中 300 W 冷等离子体处理效果最佳。

关键词:冷等离子体;盐地碱蓬;种子发芽;生理指标;相关性分析

中图分类号: Q945.35; S504.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674–7895(2025)02–0104–04

DOI: 10.3969/j.issn.1674–7895.2025.02.12

Preliminary study on effects of cold plasma treatment on black seed germination and leaf physiological indexes of seedlings of *Suaeda salsa* WANG Kai, HE Sunan, YU Kai, LIU Chong, XING Jincheng^① (Jiangsu Coastal Area Institute of Agricultural Sciences, Yancheng 224002, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2025, 34(2): 104–107

Abstract: To promote the germination and seedling growth of black seeds of *Suaeda salsa* (Linn.) Pall., the cultivar ‘Yanhai Jianpeng No. 1’ of *S. salsa* was used as material, and the seeds without cold plasma treatment were used as the control, some germination indexes of black seeds and leaf physiological indexes of seedlings of ‘Yanhai Jianpeng No. 1’ were compared after 100, 200, 300, 400, and 500 W cold plasma treated for 3 min, and the correlation analysis was conducted between the treatment power and each index. The results show that the germination rate, germination potential, germination index, vigor index, seedling length, root length, soluble sugar content, and superoxide dismutase activity in all treatment groups, as well as the catalase activity in 100, 200, and 300 W treatment groups, are significantly higher ($P < 0.05$) than those in the control group, while the mean germination time, malonaldehyde content, and peroxidase activity in all treatment groups, as well as the catalase activity in 400 and 500 W treatment groups, are significantly lower than those in the control group. The treatment power of cold plasma shows significant positive correlations with the germination potential, root length, and soluble sugar content, while it exhibits a significant negative correlation with the malonaldehyde content. The comprehensive analysis suggests that 100–500 W cold plasma treatment for 3 min can effectively promote the black seed germination of *S. salsa* and enhance the antioxidant capacity of seedlings, among which, 300 W cold plasma treatment has the best effect.

Key words: cold plasma; *Suaeda salsa* (Linn.) Pall.; seed germination; physiological index; correlation analysis

盐地碱蓬[*Suaeda salsa* (Linn.) Pall.], 俗称黄须菜、翅碱蓬,为藜科(Chenopodiaceae)碱蓬属(*Suaeda* Forsk. ex Scop.)一年生草本植物,多生长在滨海湿地等盐碱地中^[1]。盐地碱蓬用途广泛,为一种典型的盐碱地指示植物,可用于盐碱地的水土保持和绿化^[2];其幼嫩茎叶营养丰富,是一种优良的绿色蔬菜,亦可加工成动物饲料;其种子富含不饱和脂肪酸,可用

于压榨食用油^[3]。

等离子体是物质存在的第 4 种状态,由自由电子、活性粒子、紫外线、可见光等组成^[4],可分为高温等离子体和低温等离子体。冷等离子体(cold plasma)属于低温等离子体,已在化工、医药和环保等领域广泛应用^[5],但在农业生产和研究领域的应用尚处于起步阶段,主要用于促进作物的种子萌发和植

收稿日期: 2024–09–20

基金项目: 江苏省省级作物种质资源库(耐盐植物)建设项目(JS–ZW–K12); 江苏省碳达峰碳中和科技创新专项资金子项目(BE2022304); 农业农村部沿海盐碱地科学观测实验站开放课题暨所基金项目(YHS202208)

作者简介: 王 凯(1994—),男,安徽蚌埠人,硕士,研究实习员,主要从事耐盐植物种质资源利用研究。

^①通信作者 E-mail: 20201804@jaas.ac.cn

引用格式: 王 凯, 何苏南, 郁 凯, 等. 冷等离子体处理对盐地碱蓬黑色种子发芽及幼苗叶片生理指标的影响初探[J]. 植物资源与环境学报, 2025, 34(2): 104–107.

株生长及增产^[6-8]。

盐地碱蓬种皮颜色分为棕色和黑色2种,其黑色种子籽粒小、种皮厚、发芽率低^[9],且幼苗生长慢,严重制约了盐地碱蓬的推广与应用。鉴于此,笔者比较了不同功率冷等离子体处理下盐地碱蓬黑色种子发芽及幼苗叶片生理指标的差异,并对处理功率与各指标进行了相关性分析,以期筛选出适合盐地碱蓬种子发芽和幼苗生长的冷等离子体处理功率,为盐地碱蓬高效栽培技术推广奠定基础,并为该技术在改善种子活力方面的应用提供参考。

1 材料和方法

1.1 材料

于2022年10月在江苏盐城金海农场收集盐地碱蓬品种‘沿海碱蓬1号’(‘Yanhai Jianpeng No. 1’)的黑色种子(千粒质量1.234 35 g)。

1.2 方法

1.2.1 冷等离子体处理方法 于2023年6月,将种子置于40℃温水中浸泡2~3 h;收集沉底的种子,晾干后均匀铺在边长12 cm的正方形玻璃培养皿中;使用HD-2N型辉光放电冷等离子体处理机(常州中科常泰等离子体技术有限公司)进行冷等离子体处理,处理功率设100、200、300、400和500 W 5个水平,处理时间均为3 min,以未经过冷等离子体处理(0 W)的种子作为对照(CK)。

1.2.2 种子发芽实验及相关指标测定 取经过冷等离子体处理的种子,均匀摆放在铺有2层滤纸的正方形玻璃培养皿中,置于温度(25±1)℃、空气相对湿度75%、光照度5 500 lx、光照时间12 h·d⁻¹的人工气候箱中进行萌发培养。定期补充去离子水,保证种子发芽所需水分。每个处理3个培养皿,视为3个重复,每皿50粒种子。参考Li等^[10]的方法统计发芽情况,计算发芽率、发芽势、平均发芽时间、发芽指数和活力指数,并在发芽培养12 d(连续3 d没有种子发芽)使用直尺(精度1 mm)测量苗长(自然状态下的幼苗长度)和根长(主根基部到根尖的长度)。

1.2.3 幼苗培育及叶片生理指标测定 将经过冷等离子体处理的种子均匀播种到花盆(上口径21 cm、下口径18 cm、高14 cm)中进行露天培养,育苗基质为V(草炭):V(蛭石)=2:1的混合基质。子叶展平前浇1次去离子水,子叶展平后每周浇灌1次Hoagland营养液,浇灌量均为每盆300 mL。每盆保留10株苗,每个处理3盆,视为3个重复。2个月后测定叶片相关生理指标,每个指标重复测定3次,结果取平均值。其中,超氧化物歧化酶(SOD)活性测定采用氮蓝四唑光化还原法^[11],过氧化物酶(POD)活性测定采用愈创木酚法^[11],过氧化氢酶(CAT)活性测定采用高锰酸钾滴定法^[11],丙二醛(MDA)含量测定采用硫代巴比妥酸法^[12],可溶性糖含量测定采用蒽酮比色法^[13]。

1.3 数据分析

采用SPSS 26.0软件进行单因素方差分析(one-way ANOVA)和Duncan's新复极差检验;采用Origin 2021软件进行Pearson相关性分析。

2 结果和分析

2.1 不同功率冷等离子体处理对盐地碱蓬种子发芽后相关指标的影响

统计结果(表1)表明:随着冷等离子体处理功率提高,盐地碱蓬的种子发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数基本上呈现先升高后降低再略升高的变化趋势,并且,各处理组的发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数显著($P<0.05$)高于对照组(0 W);各处理组的平均发芽时间无明显变化规律,但均显著低于对照组。总体来看,300 W冷等离子体处理组的种子发芽效果最好,发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数分别较对照组增加了14.1%、40.7%、31.8%和72.9%,平均发芽时间较对照组减少了4.7%。

盐地碱蓬的苗长和根长随着冷等离子体处理功率提高呈现先升高后降低再略升高的变化趋势,并且,各处理组的苗长和根长显著高于对照组。其中,300 W冷等离子体处理组的苗长和根长最大,分别较对照组增加了30.3%和43.1%。

表1 不同功率冷等离子体处理对盐地碱蓬种子发芽后相关指标的影响($\bar{X}\pm SE$)¹⁾

Table 1 Effect of cold plasma treatment with different powers on related indexes after seed germination of *Suaeda salsa* (Linn.) Pall. ($\bar{X}\pm SE$)¹⁾

功率/W Power	发芽率/% Germination rate	发芽势/% Germination potential	平均发芽时间/d Mean germination time	发芽指数 Germination index	活力指数 Vigor index	苗长/cm Seedling length	根长/cm Root length
0(CK)	80.33±2.31c	55.67±5.77c	7.50±0.13a	152.55±9.24c	701.68±43.70c	4.62±0.10e	2.60±0.08f
100	85.67±4.16b	67.67±5.03b	7.26±0.08b	179.36±9.56b	896.83±51.57b	5.01±0.10d	2.96±0.20e
200	91.67±3.06a	69.67±5.03ab	7.31±0.12b	185.71±9.30ab	954.04±68.41b	5.14±0.10c	3.13±0.13d
300	91.67±1.15a	78.33±5.03a	7.15±0.13b	201.03±9.41a	1 213.21±68.40a	6.02±0.08a	3.72±0.16a
400	88.33±2.31ab	73.00±3.46ab	7.21±0.06b	187.34±5.88ab	948.81±51.54b	5.09±0.18cd	3.33±0.13c
500	91.00±2.00a	75.00±2.00ab	7.29±0.06b	188.59±8.58ab	1 000.44±90.68b	5.27±0.20b	3.55±0.18b

¹⁾ 同列中不同小写字母表示在不同处理组间差异显著($P<0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant differences ($P<0.05$) between different treatment groups.

2.2 不同功率冷等离子体处理对盐地碱蓬幼苗叶片生理指标的影响

统计结果(表2)表明:盐地碱蓬幼苗叶片的可溶性糖含量和过氧化氢酶活性随着冷等离子体处理功率提高呈现先升高后降低的变化趋势,且均在300 W冷等离子体处理组最大,分别较对照组(0 W)增加了39.2%和33.8%;丙二醛含量和过氧化物酶活性随着冷等离子体处理功率提高呈现先降低后升

高再降低的变化趋势,且分别在500和200 W冷等离子体处理组最小,分别较对照组减少了22.8%和25.6%;超氧化物歧化酶活性则随着冷等离子体处理功率提高呈现先升高后降低再升高的变化趋势,且在300 W冷等离子体处理组最大,较对照组增加了163.4%。另外,各处理组的可溶性糖含量、丙二醛含量、超氧化物歧化酶活性、过氧化物酶活性和过氧化氢酶活性均与对照组间存在显著差异($P < 0.05$)。

表2 不同功率冷等离子体处理对盐地碱蓬幼苗叶片生理指标的影响($\bar{X} \pm SE$)¹⁾

Table 2 Effect of cold plasma treatment with different powers on leaf physiological indexes of *Suaeda salsa* (Linn.) Pall. seedlings ($\bar{X} \pm SE$)¹⁾

功率/W Power	可溶性糖含量/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) Soluble sugar content	丙二醛含量/ ($\text{nmol} \cdot \text{g}^{-1}$) Malonaldehyde content	酶活性/($\text{U} \cdot \text{g}^{-1}$) Enzyme activity		
			超氧化物歧化酶 Superoxide dismutase	过氧化物酶 Peroxidase	过氧化氢酶 Catalase
0(CK)	14.19±0.61d	41.51±0.36a	611.37±24.78e	1 646.40±39.20a	66.26±1.17c
100	16.62±0.34c	38.17±0.53b	661.95±9.75d	1 319.73±55.73bc	75.69±0.77b
200	18.07±0.35b	37.16±0.69b	981.00±21.54c	1 225.00±9.80d	85.88±1.92a
300	19.75±0.18a	32.32±1.04d	1 610.56±46.84a	1 274.00±19.60cd	88.68±2.76a
400	19.67±0.20a	33.97±0.52c	937.77±30.88c	1 352.40±29.40b	46.12±4.61d
500	18.46±0.39b	32.03±0.16d	1 136.95±18.90b	1 241.33±50.29d	24.98±1.92e

¹⁾ 同列中不同小写字母表示在不同处理组间差异显著($P < 0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant differences ($P < 0.05$) between different treatment groups.

2.3 冷等离子体处理功率与盐地碱蓬相关指标的关系

相关性分析结果表明:冷等离子体处理功率与盐地碱蓬的发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数、苗长、根长、可溶性糖含量和超氧化物歧化酶活性均呈正相关,相关系数分别为0.732、0.818、0.722、0.618、0.506、0.846、0.816和0.601,且与发芽势、根长和可溶性糖含量的相关性达到显著水平($P < 0.05$)。另外,冷等离子体处理功率与盐地碱蓬的平均发芽时间、丙二醛含量、过氧化物酶活性和过氧化氢酶活性均呈负相关,相关系数分别为-0.609、-0.928、-0.644和-0.631,且仅与丙二醛含量的相关性达到显著水平。

3 讨论和结论

研究发现,冷等离子体处理能够促进多种植物的种子发芽^[10,14-17]。本研究中,不同功率冷等离子体处理后盐地碱蓬黑色种子的发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数均显著($P < 0.05$)高于对照组(0 W),而平均发芽时间却显著缩短,说明冷等离子体处理能够促进盐地碱蓬黑色种子发芽。这可能是由于冷等离子体处理产生的紫外线辐射、化学自由基等能够诱导种皮内部发生变化,激发种子活力,加速种子发芽进程^[18]。

可溶性糖是植物新陈代谢的基础,能够为植物的生长发育提供能量和代谢中间产物,同时具有稳定细胞膜和原生质体的功能^[19]。本研究中,100、200、300、400和500 W冷等离子体处理3 min均能显著提高盐地碱蓬幼苗叶片的可溶性糖

含量,其中300 W冷等离子体处理组幼苗叶片的可溶性糖含量最高。丙二醛含量是评价植物抗氧化潜力的重要参考指标,其含量越高表示植物细胞的脂质过氧化程度越高,植株受到伤害程度越大^[20]。本研究中,不同功率冷等离子体处理组盐地碱蓬幼苗叶片的丙二醛含量均显著低于对照组。植物体的抗氧化系统可以清除细胞内的活性氧(ROS),避免或降低细胞的氧化损伤,维持细胞正常生长^[21]。本研究中,5个冷等离子体处理组盐地碱蓬幼苗叶片的超氧化物歧化酶活性均显著高于对照组,过氧化物酶活性显著低于对照组,过氧化氢酶活性也与对照组存在显著差异,表现为在100~300 W冷等离子体处理下显著高于对照组,在400和500 W冷等离子体处理下显著低于对照组。综合上述结果,100~500 W冷等离子体处理3 min可以提高盐地碱蓬幼苗的抗氧化能力。

相关性分析结果表明:冷等离子体处理功率与盐地碱蓬的发芽势、根长及幼苗叶片的可溶性糖含量呈显著正相关,与幼苗叶片的丙二醛含量呈显著负相关,因此,可将这4个指标作为研究冷等离子体处理对盐地碱蓬种子发芽及幼苗生理影响的关键指标。

综合分析认为,100~500 W冷等离子体处理3 min可有效促进盐地碱蓬黑色种子发芽,增强幼苗的抗氧化能力,并以300 W冷等离子体处理效果最好,因此,可尝试将其用于盐地碱蓬的高效栽培。

参考文献:

- [1] YU W, WU W, ZHANG N, et al. Research advances on molecular mechanism of salt tolerance in *Suaeda* [J]. Biology, 2022,

- 11: 1273.
- [2] 丁海荣, 洪立洲, 杨智青, 等. 盐生植物碱蓬及其研究进展[J]. 江西农业学报, 2008, 20(8): 35-37, 40.
- [3] 王茂文, 洪立洲, 邢锦城, 等. 耐盐蔬菜碱蓬优良品系选育初报[J]. 湖北农业科学, 2012, 51(5): 954-956, 980.
- [4] BARJASTEH A, LAMICHHANE P, DEGHANI Z, et al. Recent progress of non-thermal atmospheric pressure plasma for seed germination and plant development: current scenario and future landscape[J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2023, 42: 5417-5432.
- [5] LIN S P, KHUMSUPAN D, CHOU Y J, et al. Applications of atmospheric cold plasma in agricultural, medical, and bioprocessing industries [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2022, 106: 7737-7750.
- [6] CHALISE R, BHANDARI P, SHARMA S, et al. Enhancement of wheat yield by atmospheric pressure plasma treatment [J]. AIP Advances, 2023, 13: 065104.
- [7] HOLC M, PRIMC G, ISKRA J, et al. Effect of oxygen plasma on sprout and root growth, surface morphology and yield of garlic[J]. Plants, 2019, 8: 462.
- [8] DEGUTYTĖ-FOMINS L, PAUŽAITĖ G, ŽŪKIENĖ R, et al. Relationship between cold plasma treatment-induced changes in radish seed germination and phytohormone balance [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2020, 59(SH): SH1001.
- [9] 卫晓雅, 合展, 赵瑞华, 等. 盐地碱蓬二型性种子的萌发和休眠及生态适应特性[J]. 西北植物学报, 2017, 37(4): 758-766.
- [10] LI L, LI J, SHAO H, et al. Effects of low-vacuum helium cold plasma treatment on seed germination, plant growth and yield of oilseed rape[J]. Plasma Science and Technology, 2018, 20: 095502.
- [11] QI W, ZHANG L, FENG W, et al. ROS and ABA signaling are involved in the growth stimulation induced by low-dose gamma irradiation in *Arabidopsis* seedling [J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2015, 175: 1490-1506.
- [12] XU P, GUO Y, BAI J, et al. Effects of long-term chilling on ultrastructure and antioxidant activity in leaves of two cucumber cultivars under low light[J]. Physiologia Plantarum, 2008, 132: 467-478.
- [13] SOHAN M S R, HASAN M, HOSSAIN M F, et al. Low-frequency glow discharge (LFGD) plasma treatment enhances maize (*Zea mays* L.) seed germination, agronomic traits, enzymatic activities, and nutritional properties [J]. Chemical and Biological Technologies in Agriculture, 2022, 9: 18.
- [14] BILLAH M, KARMAKAR S, MINA F B, et al. Investigation of mechanisms involved in seed germination enhancement, enzymatic activity and seedling growth of rice (*Oryza sativa* L.) using LPDBD (Ar + Air) plasma [J]. Archives of Biochemistry and Biophysics, 2021, 698: 108726.
- [15] 齐先科, 李森, 李彩虹, 等. 介质阻挡放电低温等离子体处理对小麦种子活力及幼苗生理的影响[J]. 农业工程学报, 2024, 40(1): 301-309.
- [16] LI L, JIANG J F, LI J G, et al. Effects of cold plasma treatment on seed germination and seedling growth of soybean [J]. Scientific Reports, 2014, 4: 5859.
- [17] ADHIKARI B, ADHIKARI M, GHIMIRE B, et al. Cold plasma seed priming modulates growth, redox homeostasis and stress response by inducing reactive species in tomato (*Solanum lycopersicum*) [J]. Free Radical Biology and Medicine, 2020, 156: 57-69.
- [18] RASOOLI Z, BARZIN G, MAHABADI T D, et al. Stimulating effects of cold plasma seed priming on germination and seedling growth of cumin plant [J]. South African Journal of Botany, 2021, 142: 106-113.
- [19] BLACKMAN S A, OBENDORF R L, LEOPOLD A C. Maturation proteins and sugars in desiccation tolerance of developing soybean seeds [J]. Plant Physiology, 1992, 100: 225-230.
- [20] NETO A D D A, PRISCO J T, ENÉAS-FILHO J, et al. Effect of salt stress on antioxidative enzymes and lipid peroxidation in leaves and roots of salt-tolerant and salt-sensitive maize genotypes [J]. Environmental and Experimental Botany, 2006, 56: 87-94.
- [21] GILL S S, TUTEJA N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2010, 48: 909-930.

(责任编辑: 佟金凤)