

冷等离子体处理对燕麦种子发芽及幼苗抗旱性的影响

卜咏梅，包锦^{*}，吕晓桂

(内蒙古农业大学理学院，呼和浩特 010018)

摘要：为探究冷等离子体处理对燕麦种子发芽及幼苗抗旱性的影响，该研究以坝蓂1号燕麦种子为材料，用不同浓度（3%、10%、15%、20%）的PEG-6000溶液模拟干旱胁迫，利用4、5、6 kV电压的大气压氩气冷等离子体对燕麦种子进行分别处理，测定在不同程度的干旱胁迫下，燕麦种子发芽指标、幼苗生长指标及生理生化指标。结果表明：冷等离子体处理显著（ $P<0.05$ ）增加了燕麦种子的亲水性，未进行干旱胁迫，电压为5 kV的处理对燕麦种子的发芽势、发芽率、发芽指数、活力指数的提高作用效果最显著（ $P<0.05$ ），且各处理组燕麦幼苗的株高、根须数也较对照组（电压为0）有所增加。干旱胁迫下，各处理组燕麦幼苗的株高、根长、根须数、叶绿素含量、可溶性蛋白含量都较对照组出现不同程度的增加，且丙二醛含量低于对照组。基于隶属函数和主成分分析对燕麦抗旱能力进行综合评价分析发现，电压为5 kV，时间为30 s的冷等离子体处理对PEG-6000溶液浓度为3%、10%、15%的干旱胁迫下燕麦幼苗抗旱能力的提高作用效果较好。该研究结果可为燕麦育种及干旱半干旱地区燕麦种植提供一定理论参考。

关键词：冷等离子体；燕麦；干旱；胁迫；PEG-6000溶液

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202406092

中图分类号: S512.6

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-22-0243-09

卜咏梅，包锦，吕晓桂. 冷等离子体处理对燕麦种子发芽及幼苗抗旱性的影响[J]. 农业工程学报, 2024, 40(22): 243-251. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202406092 <http://www.tcsae.org>

BU Yongmei, BAO Jin, LYU Xiaogui. Effects of cold plasma treatment on oat seeds germination and seedling drought resistance[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(22): 243-251. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202406092 <http://www.tcsae.org>

0 引言

燕麦是世界第4大谷类作物，年生产总值仅次于小麦、水稻和玉米。有研究表明燕麦中蛋白质、脂肪、维生素、矿物元素、纤维素的含量在国民日常食用的9类粮食作物中均居于首位^[1]，而且燕麦中含有的高蛋白和矿物质也使其成为世界范围内的优质饲草。中国燕麦种植面积居世界第八，年产量约85万t，主要分布于内蒙古、甘肃和河北等地，在云南、贵州、四川、西藏有小面积种植，其中内蒙古地区的种植面积占全国总种植面积的35%以上^[2-3]。但是，干旱加剧、盐碱化加重等逆境胁迫使得目前燕麦种子的萌发率普遍较低、产量不高，因此对于提高燕麦幼苗抗旱能力的研究就显得很有必要^[4-8]。

等离子体是物质的第四态，在系统内部正负离子分开并携带的电量相同，表现出电中性，所以被称为等离子体。根据系统内离子温度将等离子体分为高温等离子体和低温等离子体，低温等离子体根据其离子温度又分为热等离子体和冷等离子体^[9]。因为冷等离子体宏观温

度接近室温，所以广泛应用于医学、农业、食品安全、食品加工等各个领域，冷等离子体处理技术，特别是在农业领域，因其对作物生长的不同时期都具有一定的促进作用而备受关注^[10]。

冷等离子处理种子的作用机制主要有4个方面。一是等离子体射流产生的臭氧和紫外辐射具有杀菌消毒作用；二是等离子体对种皮的刻蚀作用可以提高种子的亲水性，使水分更容易进入种子内部，帮助种子打破休眠；三是等离子体处理过程中产生的活性物质被种子细胞感知到，并在吸涨过程进入种子内部，促进种子萌发和幼苗生长^[11]，STOLARIK等^[12]研究发现，等离子体处理对豌豆种子表面的修饰作用可以诱导种子苗期提前，同时还可以促进幼苗生长过程中植物信号传导，HASAN等^[13]通过等离子体低压介质阻挡放电处理小麦种子，发现处理后种子的发芽率、含铁量大幅增加，叶中的 H_2O_2 浓度增加，同时小麦根中的TaCAT和TaSOD基因的表达量提高，小麦籽粒产量增加；四是等离子体能够改变种子酶活性和激素水平，王敏等^[14]研究发现在80 W冷等离子体处理下， α -淀粉酶活性显著增强，BURDUCEA等^[15]对经氮气冷等离子体处理后的小麦种子进行生化分析发现，处理后的小麦草叶绿素、类黄酮和多酚含量增加，且在不同品种间显示出差异性。目前等离子体处理种子已经应用于小麦^[16]、水稻^[17]、燕麦^[18]等粮食作物，以及苜蓿^[19]、不结球白菜^[20]、穿心莲^[20]等经济作物，但关于冷等离子体处理对燕麦抗旱性能影响的研究鲜见报道。

收稿日期: 2024-06-14 修订日期: 2024-10-25

基金项目: 内蒙古自治区直属高校基本科研业务费项目(BR230111); 内蒙古自治区高等学校科学研究项目(NJZZ23036)

作者简介: 卜咏梅, 研究方向为冷等离子体处理种子。

Email: 3157136341@qq.com

※通信作者: 包锦, 教授, 研究方向为半导体基础物理。

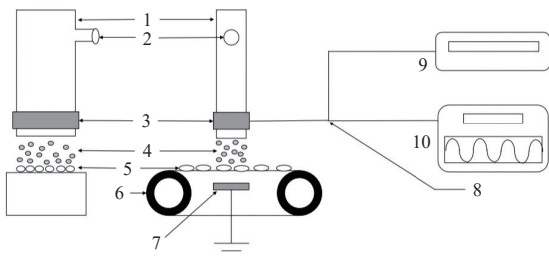
Email: jbaoimu@163.com

本文以坝蓆 1 号燕麦种子为材料, 对其进行不同强度的大气压氩气冷等离子体处理, 并在不同程度的干旱胁迫下进行燕麦种子萌发及幼苗生长试验。通过分析燕麦种子的发芽和幼苗生长情况、干旱胁迫下燕麦幼苗期的形态特征变化和内源物质含量的变化, 研究大气压氩气冷等离子体处理对燕麦种子抗旱能力的影响, 为燕麦育种及干旱半干旱地区燕麦种植提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验装置

试验采用自制的大气压氩气冷等离子体射流放电处理装置 (图 1), 该装置包括放电、传送、检测 3 部分。放电部分由高压交流电源、高压电极 (包裹于规格为 50 mm×5 mm 的扁口状石英管外壁的铝箔)、阴极 (铜片)、99.999% 的高纯氩气、玻璃转子流量计构成。上下电极间距为 11.5 mm, 流量计控制不同流量的氩气由进气口进入石英管内部, 在高压电极附近被电离形成等离子体, 等离子体在气流作用下喷向传送带上方的石英管开口附近区域, 形成等离子体射流区。传送部分由可调速动力装置和绝缘橡胶传送带组成, 低压电极置于 2 层绝缘履带之间并接地, 试验时将种子平铺于传送带上层, 通过调节动力装置以改变传送速度, 来控制种子经过等离子体射流区的时间。检测部分主要由高压探头和数字示波器组成, 用来检测放电电压。



1. 扁口状石英管 2. 氩气进气口 3. 铝箔 4. 等离子体射流 5. 种子 6. 传送带 7. 低压电极 8. 高压探头 9. 高压交流电源 10. 示波器
1. Flat-mouthed quartz tube 2. Argon intake 3. Aluminum foil 4. Plasma jet 5. Seeds 6. Conveyor belt 7. Low voltage electrodes 8. High voltage probe 9. High voltage AC power supply 10. Oscilloscope

图 1 等离子体处理装置
Fig.1 Plasma treatment device

1.2 种子处理

试验选用由内蒙古农业大学燕麦产业研究中心提供的“坝蓆 1 号”燕麦种子。等离子体处理前将种子用自来水冲洗 20 min, 蒸馏水冲洗 2 次后, 用滤纸吸净种子表面水分, 平铺放在烘箱中, 35 °C 下烘干, 使种子的含水量一致, 分装备用, 之后进行等离子体处理。依据本课题组内前期的试验结果^[21-22], 本次试验设置 3 个处理电压, 分别为 4 kV (A 组)、5 kV (B 组)、6 kV (C 组), 处理时间为 30 s, 以不进行等离子体处理为对照组 (CK 组), 处理时氩气气体流量恒为 150 L/h。

1.3 发芽试验

将等离子体处理后的种子在 2%NaClO 溶液中浸种消毒 5 min, 用蒸馏水洗净种子表面药品并浸泡 6 h 催芽。

在发芽盒中铺 2 层育苗纸作为芽床, 将浸泡后的种子腹沟向下均匀摆放在湿润的芽床上, 每组 3 次重复, 每次重复 50 粒种子。将发芽盒放在人工气候箱中, 相对湿度 65%, 昼 26 °C/夜 15 °C 进行培养, 培养期间每天喷洒适量蒸馏水保持育苗纸湿润。从培养第 2 天起, 每天固定时间统计发芽数。以根长不短于种子长, 芽长不短于种子长的 50% 为发芽标准。具体发芽指标如下:

$$G_P = \frac{n_3}{n} \times 100\% \quad (1)$$

式中 G_P 为发芽势, %; n_3 为试验第 3 天发芽种子数; n 为试验种子总数。

$$G_R = \frac{n_7}{n} \times 100\% \quad (2)$$

式中 G_R 为发芽率, %; n_7 为试验第 7 天发芽种子数。

$$G_I = \sum \frac{n_i}{D_i} \quad (3)$$

式中 G_I 为发芽指数; n_i 为第 n 天的发芽种子数; D_i 为试验第 t 天。

$$P_I = 1.0 \times G_{R1} + 0.75 \times G_{R3} + 0.50 \times G_{R5} + 0.25 \times G_{R7} \quad (4)$$

式中 P_I 为萌发指数; G_{R1} 、 G_{R3} 、 G_{R5} 、 G_{R7} 分别为第 1、3、5、7 天种子的发芽率, %。

$$V_I = P_I \times S_L \quad (5)$$

式中 V_I 为活力指数, S_L 为发芽第 7 天幼苗的平均长度, cm。

1.4 干旱胁迫处理

在培养第 8 天时, 加入不同浓度的 PEG-6000 溶液, 模拟干旱胁迫环境, 以不经等离子体处理为对照 (CK), 胁迫浓度及处理强度参数如表 1 所示。

表 1 胁迫浓度及处理强度参数

组别 Group	PEG-6000 溶液浓度 Concentration of PEG-6000 solution /%	处理电压 Processing voltage/kV	处理时间 Treatment time/s
CK1	3	0	0
CK2	10	0	0
CK3	15	0	0
CK4	20	0	0
A1	3	4	30
A2	10	4	30
A3	15	4	30
A4	20	4	30
B1	3	5	30
B2	10	5	30
B3	15	5	30
B4	20	5	30
C1	3	6	30
C2	10	6	30
C3	15	6	30
C4	20	6	30

1.5 表面接触角测量

不同结构的种皮对水的亲和能力不一样, 当蒸馏水滴接触到不同结构的种皮时, 会与种皮形成大小不同的夹角, 即种皮的表面接触角。表面接触角越大, 种皮的亲水性越弱。本文使用 Kino 光学接触角仪 (型号 SL150E, 美国科诺工业有限公司) 测量种子表面接触角。用相机记录样品表面水滴的数字图像, 然后使用制造商提供的软件 (CAST) 进行分析, 并记录种皮的表面接触角值。

1.6 幼苗生长指标测量

在培养的第 8 天和第 15 天，每组随机挑选 9 棵幼苗（3 次重复，每次重复 3 棵），从根结处分离。用毫米刻度尺直接测量幼苗根结至叶尖的长度记作芽长，根结至根尖的长度记作根长。

1.7 生理生化指标测量

培养第 15 天开始测量生理生化指标。可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝染色法测定^[23]；叶绿素含量采用分光光度计法测定^[24]；丙二醛（MDA）含量采用硫代巴比妥酸法测定^[25]。

1.8 数据统计分析

使用 SPSS 27.0.1 软件对数据进行单因素方差分析（ANOVA）及多重比较（显著性水平 $P < 0.05$ ），并进行主成分分析。

用隶属函数法对不同处理强度及干旱胁迫下的燕麦各项生长指标处理分析，得到隶属函数值。

$$\mu(X_i) = \frac{X_i - X_{i\min}}{X_{i\max} - X_{i\min}} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

式中 $\mu(X_i)$ 表示第 i 个隶属函数值； X_i 表示第 i 个综合指标值； $X_{i\min}$ 表示第 i 个综合指标中的最小值； $X_{i\max}$ 表示第 i 个综合指标中的最大值。

计算各指标的权重

$$W_i = \frac{p_i}{\sum_{i=1}^n p_i} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

式中 W_i 表示第 i 个综合指标中的重要程度，即权重； p_i 表示经主成分分析所得燕麦各项生长指标的贡献率。

$$D_i = \sum (\mu(X_i) \times W_i) \quad (8)$$

式中 D_i 值为不同电压冷等离子体处理下燕麦种子在干旱胁迫下根据综合指标评价所得的抗旱性综合评价值，可以用来表示综合抗旱能力的强弱。

2 结果与分析

2.1 不同电压冷等离子体处理对燕麦种子表面接触角的影响

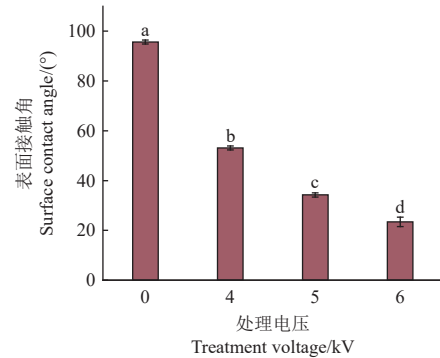
表面接触角越小，种皮的亲水性越强。不同强度的等离子体处理种子，其表面接触角的变化如图 2 所示。处理后的种子表面接触角相比于未处理组（0 kV）都显著减小（ $P < 0.05$ ），其中处理电压为 6 kV 时最显著，比未处理组减小了 75.54%。结果表明冷等离子体处理显著增加了种子的亲水性，随着处理电压的增大，种子的亲水性也逐渐增强。

2.2 不同电压冷等离子体处理对燕麦生长指标的影响

2.2.1 未受干旱胁迫

在种子培养的第 2~8 天（未受干旱胁迫）记录种子发芽数，利用计算式（1）~（5）计算不同处理电压下燕麦种子发芽指标，结果如图 3 所示。在发芽初期，各处理组种子的发芽势、发芽率、发芽指数和活力指数较未处理组（0 kV）都有提高，其中处理电压为 5 kV 组的变化最显著（ $P < 0.05$ ），种子的发芽势、发芽率、发芽

指数、活力指数较未处理组分别提高了 59.78%、39.15%、49.57%、71.67%。



注：不同小写字母表示不同处理间存在显著性差异（ $P < 0.05$ ），下同。
Note: Different lowercase letters indicate that there is a significant differences between treatments ($P < 0.05$), the same below.

图 2 不同电压冷等离子体处理对燕麦种子亲水性的影响
Fig.2 Effects of cold plasma treatment with different voltages on the hydrophilicity of oat seeds

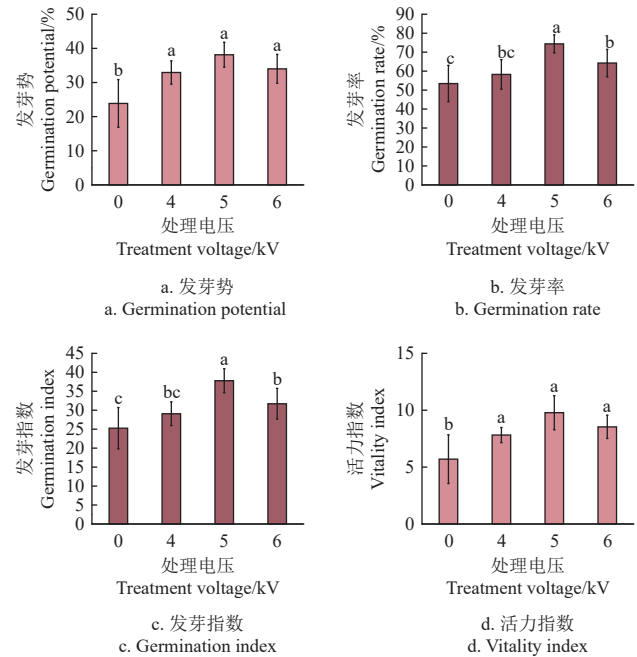


图 3 不同处理条件对燕麦种子发芽指标的影响
Fig.3 Effects of different treatment conditions on oat seeds germination indicators

在培养第 8 天测量燕麦幼苗的株高、根长和根须数，结果如图 4 所示。由图 4a 可知，与未处理组（0 kV）相比，处理电压为 5 kV 时的株高显著增加（ $P > 0.05$ ），增加了 18.00%。由图 4b 可知，与未处理组（0 kV）相比，各处理组的根长无显著性差异。由图 4c 可知，与未处理组（0 kV）相比，处理电压为 4、5 kV 的根须数分别显著（ $P < 0.05$ ）增加了 10.4%、14.11%。

2.2.2 干旱胁迫后

1) 株高

在培养第 8 天进行干旱胁迫，培养第 15 天测量幼苗的株高、根长和根须数，不同处理电压对干旱胁迫下燕麦幼苗株高的影响如图 5a 所示。3%PEG-6000 溶液胁迫

下, 只有 A1 组燕麦幼苗株高显著 ($P<0.05$) 增加了 3.47%。10%PEG-6000 溶液胁迫下, B2 组燕麦幼苗株高显著 ($P<0.05$) 增加了 14.17%。15% PEG-6000 溶液胁迫下, 各处理组的燕麦幼苗株高较 CK3 组都有显著 ($P<0.05$) 增加, 其中 B3 组燕麦幼苗株高增加最多, 比 CK3 组增加了 17.61%。20%PEG-6000 溶液胁迫下, A4、C4 组燕麦幼苗株高分别显著 ($P<0.05$) 增加了 5.39%、4.73%。

2) 根长

不同处理电压对燕麦幼苗根长的影响如图 5b 所示。3%PEG-6000 溶液胁迫下, 除 C1 组外, 其余各处理组的根长较 CK1 组显著 ($P>0.05$) 减小, 其中 A1 组根长减小最显著 ($P<0.05$), 为 6.11%。10%PEG-6000 溶液胁迫

下, 各处理组根长较 CK2 组有显著 ($P<0.05$) 减小。PEG-6000 溶液浓度增加到 15% 时, A3、B3、C3 各组的根长都较 CK3 组有显著 ($P<0.05$) 增加, 其中 A3 组根长增加最多, 增加了 17.10%。20% 浓度 PEG-6000 溶液胁迫下, 各处理组的根长都显著减小。

3) 根须数

干旱胁迫下燕麦幼苗的根须数随处理电压的变化如图 5c 所示。3% PEG-6000 溶液胁迫下, 各处理组的根须数较 CK1 组都显著 ($P<0.05$) 增加。10% PEG-6000 溶液胁迫下, B2 组根须数较 CK2 显著 ($P<0.05$) 增加。20% 浓度 PEG-6000 溶液胁迫下, A4、B4、C4 组根须数较 CK 组都有所增加。

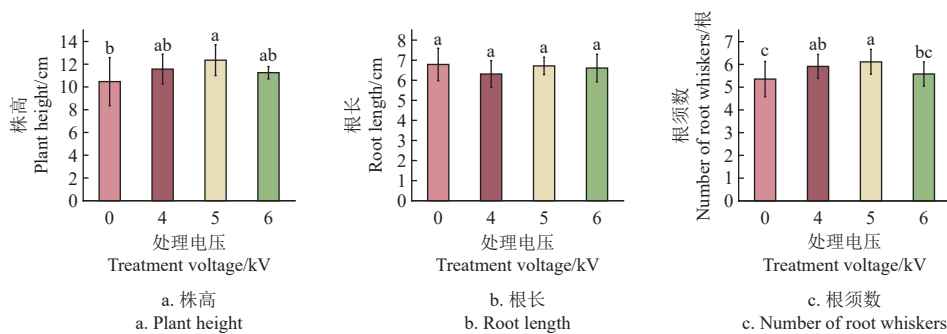


图 4 不同处理电压对燕麦株高、根长和根须数的影响

Fig.4 Effects of different treatment voltages on plant height, root length and number of root whiskers of oat

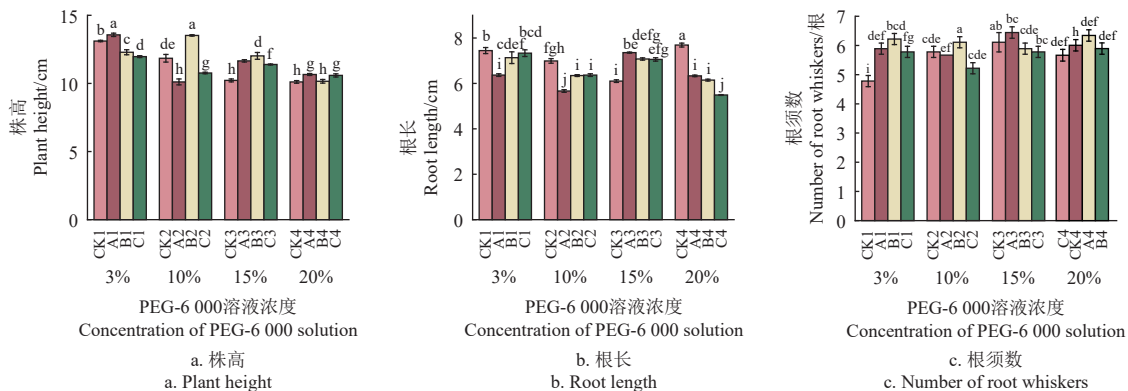


图 5 不同电压冷等离子体处理对不同强度干旱胁迫下燕麦株高、根长和根须数的影响

Fig.5 Effects of different voltage cold plasma treatment on plant height, root length and number of root whiskers of oat under different intensity drought stress

2.3 不同电压冷等离子体处理对燕麦生理生化指标的影响

2.3.1 叶绿素

干旱胁迫后, 叶绿素含量随处理电压的变化如图 6 所示。10%PEG-6000 溶液胁迫下, A2、B2、C2 各组叶绿素含量较 CK2 组分别显著 ($P<0.05$) 增加了 113.20%、59.00% 和 68.89%; PEG-6000 溶液浓度为 20% 时, A4、B4 组的叶绿素含量较 CK4 组增加了 33.01%、47.63%。

2.3.2 丙二醛

不同浓度的 PEG-6000 溶液胁迫下, 植株内丙二醛含量随等离子体处理电压增加的变化情况如图 7 所示。

在 15%PEG-6000 溶液胁迫下, 各处理组丙二醛浓度均低于 CK3 组, 但差异不显著 ($P>0.05$), 其中 A3 组丙二醛浓度较 CK3 组下降了 15.04%。20%PEG-6000 溶液胁迫下 C4 组丙二醛浓度较 CK4 组下降了 10.29%。表明冷等离子体处理可以相对减轻干旱胁迫下燕麦的脂质过氧化和膜损伤程度。

2.3.3 可溶性蛋白

不同浓度的 PEG-6000 溶液胁迫下, 可溶性蛋白含量随处理电压增加的变化情况如图 8 所示。在 PEG-6000 溶液浓度为 15% 时, C3 组可溶性蛋白含量较 CK3 增加 16.62%。在 PEG-6000 溶液浓度为 20% 时, B4、

C4 组可溶性蛋白含量较 CK4 分别增加 7.90% 和 9.75%，但均无显著性 ($P>0.05$) 差异。

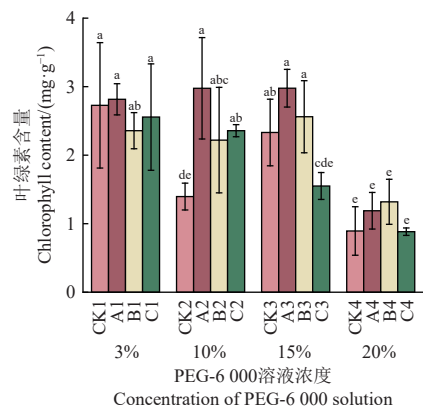


图 6 不同电压冷等离子体处理对不同强度干旱胁迫下燕麦叶绿素含量的影响

Fig.6 Effects of different voltage cold plasma treatment on chlorophyll content of oat under different intensity drought stress

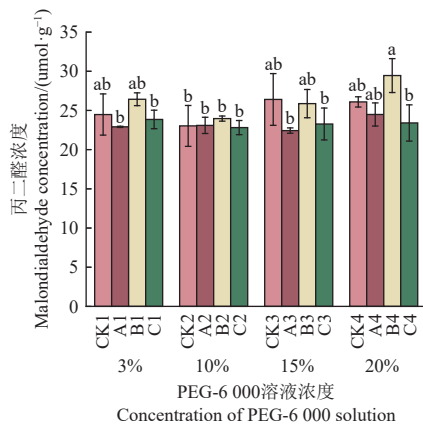


图 7 不同电压冷等离子体处理对不同强度干旱胁迫下燕麦丙二醛浓度的影响

Fig.7 Effects of different voltage cold plasma treatment on malondialdehyde concentration of oat under different intensity drought stress

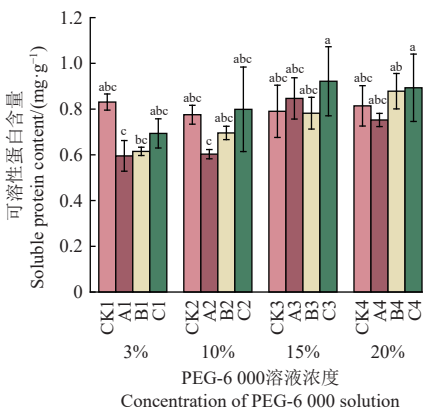


图 8 不同电压冷等离子体处理对不同强度干旱胁迫下燕麦可溶性蛋白含量的影响

Fig.8 Effects of different voltage cold plasma treatment on soluble protein content of oat under different intensity drought stress

2.4 处理胁迫参数主成分分析

针对燕麦发芽期的生长指标及生理生化特征参数进

行主成分分析，根据累计贡献率达到 85% 以上的原则进行提取，共提取到 4 个主成分，累计贡献率为 86.502% (表 2)，表明 4 个主成分能够全面、客观地反映不同处理强度及胁迫条件对燕麦生长情况的大部分信息。

表 2 主成分贡献率			
Table 2 Contribution rate of principal components			
主成分 Principal component	特征值 Eigenvalue	贡献率 Contribution rate/%	累计贡献率 Accumulative contribution rate/%
1	2.173	36.220	36.220
2	1.136	18.940	55.160
3	1.097	18.288	73.448
4	0.783	13.054	86.502

利用计算式 (6) 对各组燕麦的生长综合指标的隶属函数值 $\mu(X_i)$ 进行计算，利用计算式 (7) 对不同胁迫参数下的经不同强度等离子体处理的各组燕麦生长指标进行综合权重计算，利用计算式 (8) 得到 D_i 值排名，结果如表 3，可以看到在 PEG-6000 溶液浓度为 3%、10%、15% 时，等离子体处理强度 5 kV (B 组)，处理时间 30 s 时的燕麦综合指标较好，当胁迫浓度继续增大到 20% 后，各处理组的综合指标均低于 CK 组。另外值得注意的是，在胁迫浓度为 10%、15%、20% 时，等离子体处理电压 6 kV (C 组)，处理时间 30 s 时的燕麦综合指标均低于 CK 组，表明处理电压达到临界值，且对燕麦的生长出现负面影响。

表 3 不同电压冷等离子体处理后燕麦各生长指标的权重综合值 (D_i) 排名		
Table 3 Ranking of the weight synthesis value D_i of growth indexes of oat treated with cold plasma at different voltages		
PEG-6000 溶液浓度 Concentration of PEG-6000 solution/%	组别 Groups	D_i 值 D_i -values
3	B1	0.814
	A1	0.737
	C1	0.705
	CK1	0.682
10	B2	0.691
	CK2	0.533
	A2	0.490
	C2	0.432
15	B3	0.704
	A3	0.664
	CK3	0.519
	C3	0.472
20	CK4	0.523
	B4	0.497
	A4	0.447
	C4	0.250

3 讨 论

3.1 冷等离子体处理对燕麦种子表面接触角的影响

种子的吸涨过程被认为是种子打破休眠期，进入萌发期的关键因素之一，吸涨过程从种子吸水开始^[26]。等离子体处理过程中产生的高能粒子对种皮表面有刻蚀作用，可以改变种子表皮的粗糙程度，增加种子的相对表面积，从而增加种子的亲水性，缩短种子萌发时间。种皮由角质层、表皮、下皮层和薄壁细胞组成，而等离子体处理可以降解种皮中的脂质和角质层，有助于水分更快的

进入种子内部^[27]。该研究中种子的表面接触角随等离子体的处理强度增加而减小,与 BENABDERRAHIM 等^[28]的研究结果一致。但种子的吸水过程必须按照一定比例,吸水太快或太慢都不利于种子萌发,甚至会导致种子死亡,因此需要一个合适的处理参数,在本研究中 5 kV 处理电压下既可以提高种子亲水性,又不会使种子吸水过多不能发芽。

3.2 冷等离子体处理对燕麦种子发芽指标的影响

等离子体处理后的种子发芽率增大的原因,一是种子的亲水性增强,使种子更快进入吸涨过程,打破休眠;二是等离子体处理过程中产生的带电粒子、活性物质(活性氧、活性氮)、电场、光子(可见光、紫外线辐射)对种子的影响^[29]。在该研究中,处理后的燕麦种子发芽率、发芽势较 CK 组都有显著($P<0.05$)提高。但随处理强度增加,燕麦种子的发芽率、发芽势呈现先增大后减小的趋势。在电压为 5 kV 的冷等离子体处理下,燕麦的发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数分别比对照组增加了 59.78%、39.15%、49.57%、71.67%,且都达到峰值,而不是亲水性更强的 6 kV,推测是因为种子破损严重,导致吸水量减少,从而使各发芽指标变低。各参数都表明,对于“坝蓓 1 号”的最佳处理强度为 5 kV 电压下处理 30 s。适宜强度的等离子体处理对燕麦种子的发芽有显著促进作用,可能与处理过程中产生的活性氮和活性氧有关。外部的活性氧被种子细胞检测到,活性氧作为信号因子,诱导种子外层细胞信号传导^[30]。有研究表明等离子体处理会产生大量的 H_2O_2 , H_2O_2 作为一种启动因子,诱导多种氧化途径^[31]。另外等离子体处理过程中产生的紫外线可以对燕麦种子起到灭菌作用,增加种子发芽的可能性。

3.3 冷等离子体处理对燕麦种子生长指标的影响

在发芽初期等离子体对幼苗生长情况的影响也不同,等离子体对燕麦幼苗的根长影响并不显著($P<0.05$),但对株高和根须数都有不同程度的促进作用,在 5 kV 电压下处理 30 s 的株高和根须数比对照组分别增加了 18.00% 和 14.11%。就目前处理强度来看还没有达到使幼苗出现“低促高抑”现象的临界值。

在遭遇干旱胁迫后,燕麦地下部分与地上部分的生长情况表现出协调效应,即地上部分生长旺盛,地下部分的生长则受到抑制;地上部分生长受抑,地下部分会生长过快,这种现象随等离子体处理的强度增加而有所抑制^[32],这与李娟等^[33]的研究结果一致,即干旱胁迫会降低高羊茅的根系生物量和根系总长度,而抗旱型品种的根系生物量和根系总长度降幅较小。但在适宜强度等离子体处理下,植株的根须数有显著($P<0.05$)增加,张璐璐等^[34]的研究表明,侧根伸长对土壤干旱敏感,提高对水分和养分的吸收,以响应干旱。在该研究中,随干旱胁迫浓度增加,CK 组地下部分与地上部分出现协调效应,经等离子体处理后这一现象有所抑制,表明适宜等离子体处理可以使植物上下部生物量分配更均衡,增加植物耐旱性。

3.4 冷等离子体处理对干旱胁迫下燕麦叶绿素含量的影响

光合作用是贯穿植物生长的主要能量代谢途径,而叶绿素是植物进行光合作用的物质基础,参与光合作用中的吸收、传递光能或引起原初光化学反应^[35]。干旱胁迫下植物无法获取充足的水分,导致叶绿素合成减缓甚至解体^[36]。该研究中随干旱胁迫程度加重,叶绿素含量显著减少,这与冯蕊等^[37-38]的研究结果一致。等离子体处理后的种子发芽后,在适宜强度下叶绿素含量高于对照组^[39]。值得注意的是,在适宜强度的等离子体处理下 PEG-6000 溶液浓度为 3% 时,处理组的叶绿素含量较对照组增幅较小,随胁迫浓度增大(10%、15%、20%)处理组的叶绿素含量较对照组增幅变大,表明适宜强度的等离子体处理可以提高植株在逆境下光合作用的能力,可能与等离子体处理产生的氮氧化合物有关,氮氧化合物可以促进植株启动防御系统。

3.5 冷等离子体处理对干旱胁迫下燕麦丙二醛含量的影响

干旱胁迫下植物叶片内会产生大量的活性氧,使得细胞内活性氧代谢的动态平衡被打破,如果不能及时清除就会产生并累积大量的自由基,进一步加剧膜脂过氧化,造成过氧化产物丙二醛的产生和累积,最终导致膜系统崩溃,甚至植株死亡^[40]。丙二醛含量可以反映细胞膜脂质过氧化的程度,含量越低表明植物的抗旱能力越强。该研究中在不同的干旱胁迫程度下,适宜的等离子体处理强度会降低植株内丙二醛含量,在李想等^[41]的研究中,同样发现适宜剂量的等离子体处理紫云英种子可以降低幼苗的丙二醛含量,有利于提高紫云英幼苗适应干旱胁迫的能力。

3.6 冷等离子体处理对干旱胁迫下燕麦可溶性蛋白含量的影响

植物抗逆性与可溶性蛋白含量呈正相关。干旱胁迫下植物会主动累积可溶性蛋白来增加细胞液浓度,降低渗透势,减少水分流失,以适应缺水环境^[42]。随干旱胁迫浓度增大,适宜等离子体处理强度下可溶性蛋白含量增加,表明冷等离子体处理后可以增加燕麦幼苗在干旱胁迫环境中的适应能力。谢晓宇等^[43]用等离子体处理苦参种子后,其幼苗在处理强度为 0.5 A 时可溶性蛋白含量显著高于其他组,与该研究结果一致。处理组的可溶性蛋白含量随干旱胁迫增强的增幅大于对照组的增幅,这表明等离子体处理可以提高植株对干旱胁迫的响应能力。

3.7 处理胁迫参数主成分分析

通过对不同强度等离子体处理后的各组燕麦生长指标进行综合权重计算后排名,可以看到在 PEG-6000 溶液浓度为 3%、10%、15% 时,等离子体处理电压为 5 kV,处理时间为 30 s 的燕麦综合指标较好,当胁迫浓度继续增大到 20% 时,处理组的综合指标低于 CK 组。出现这种情况的原因推测有两个:一是处理强度不够,处理强度目前是由处理时间和处理电压决定,但处理电压更高的 C 组(6 kV),在不同干旱胁迫浓度下指标均

低于处理电压为 5 kV 的 B 组, 所以推测处理电压已出现临界值, 增加处理强度只能增加处理时间。另一个推测是未经等离子体处理的种子虽然抗旱性较弱, 但在长期的自然选择下, 应对不同强度干旱胁迫的韧性较大。而经等离子体处理后的种子虽然在某一区间的抗旱性增强, 但当干旱胁迫强度越过这一区间后, 对干旱的反应会更剧烈, 应对这一问题的方法是增加等离子体处理的时间。

4 结 论

该研究通过隶属函数综合反应不同等离子体处理强度下燕麦苗期耐旱程度, 筛选出不同干旱胁迫下适宜的等离子体处理强度, 主要结论如下:

1) 燕麦种子的亲水性随处理电压的增加而增强, 有利于提高种子的吸水能力, 进而增加种子的发芽率, 在 5 kV 处理电压下, 燕麦种子的发芽势、发芽率、发芽指数和活力指数均显著 ($P < 0.05$) 提高。

2) 冷等离子体处理对干旱胁迫下燕麦植株的叶绿素和可溶性蛋白合成有所促进, 不同干旱胁迫下适宜的冷等离子体强度有所不同, 同时植株的叶绿素含量和可溶性蛋白含量增幅都比未经处理的 CK 组大, 这是植株抗旱能力增强的表现。

3) 经不同强度等离子体处理的各组燕麦生长指标进行综合权重计算后排名, 可以看到在 PEG-6000 溶液浓度为 3%、10%、15% 时, 等离子体处理强度为 5 kV, 处理时间 30 s 时燕麦的综合指标均高于 CK 组, 当 PEG-6000 溶液浓度继续增大到 20% 后, 处理组的综合指标低于 CK 组。

综合本次试验结果, 为提高不同干旱胁迫强度下种子的存活率, 接下来的研究将会增加等离子体处理时间, 为等离子体处理种子在实际生产中的应用提供支持。

[参 考 文 献]

- [1] 杨志雪, 米俊珍, 刘景辉, 等. 不同裸燕麦品种抗倒能力及产量差异分析[J]. 麦类作物学报, 2024, 44(5): 605-613. YANG Zhixue, MI Junzhen, LIU Jinghui, et al. Analysis of toppling resistance and yield difference of different naked oat varieties[J]. Journal of Triticeae Crops, 2024, 44(5): 605-613. (in Chinese with English abstract)
- [2] 张晶, 张美莉. β -葡聚糖对燕麦淀粉凝胶特性及老化的影响[J]. 中国食品学报, 2021, 21(8): 91-101. ZHANG Jing, ZHANG Meili. Effects of β -glucan on gel properties and retrogradation of oat starch[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 21(8): 91-101. (in Chinese with English abstract)
- [3] 游茵洁, 周浩珍, 刘垚, 等. 燕麦干草、青贮燕麦与天然牧草饲喂牦牛的营养价值比较研究[J]. 草业学报, 2022, 31(8): 99-110. YOU Yinjie, ZHOU Haozhen, LIU Yao, et al. Comparison of nutritional value of oat hay, oat silage and Sichuan pasture for yaks[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2022, 31(8): 99-110. (in Chinese with English abstract)
- [4] SHAH H I, MANZOOR A M, WU J H, et al. Comprehensive review: Effects of climate change and greenhouse gases emission relevance to environmental stress on horticultural crops and management[J]. Journal of Environmental Management, 2024, 351(11): 119978.
- [5] 张馨馨. 植物生长延缓剂对多年生黑麦草生长及耐旱性的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2023. ZHANG Xinxin. Effects of Plant Growth Retardants on Growth and Drought Tolerance of *Lolium Perenne*[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2023. (in Chinese with English abstract)
- [6] 杨再强, 侯梦媛, 张曼义. 水分胁迫对设施甜椒结果期叶面积扩展及果实发育的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(12): 170-177. YANG Zaiqiang, HOU Mengyuan, ZHANG Manyi. Effects of soil water stress on expansion of leaf area and development of fruit in fruiting period of greenhouse sweet pepper[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2017, 33(12): 170-177. (in Chinese with English abstract)
- [7] NEW J, BARSKY D, UHDE-STONE C. ROS consumers or producers? Interpreting transcriptomic data by alpha fold modeling provides insights into class III peroxidase functions in response to biotic and abiotic stresses[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2023, 24(9): 8297.
- [8] DENES F S, MANOLACHE S O. Macromolecular plasma-chemistry: An emerging field of polymer science[J]. Progress in Polymer Science, 2004, 29(8): 815-885.
- [9] 季慧, 于娇娇, 张金, 等. 介质阻挡低温等离子体处理对花生蛋白持水性及溶解性的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(4): 299-304. JI Hui, YU Jiaojiao, ZHANG Jin, et al. Effects of dielectric barrier discharge cold plasma treatment on solubility and water holding capacity of peanut protein[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2019, 35(4): 299-304. (in Chinese with English abstract)
- [10] MOTRESCU I, LUNGOCI C, CALISTRU E A, et al. Non-thermal plasma (NTP) treatment of alfalfa seeds in different voltage conditions leads to both positive and inhibitory outcomes related to sprout growth and nutraceutical properties[J]. Plants (Basel, Switzerland), 2024, 13(8): 1140.
- [11] MOTRESCU I, LUNGOCI C, CIOLAN M, et al. Non-thermal plasma (NTP) treatment of *Trigonella foenum-graecum* L. seeds stimulates the sprout growth and the production of nutraceutical compounds[J]. BMC Plant Biology, 2024, 24(1): 33.
- [12] STOLARIK T, HENSELOVA M, MARTINKA M, et al. Effect of low-temperature plasma on the structure of seeds, growth and metabolism of endogenous phytohormones in pea (*Pisum Sativum* L.)[J]. Plasma Chem Plasma Process, 2015, 35(4): 659-676.
- [13] HASAN M, SOHAN M S R, SAJIB, S A, et al. The effect of low-pressure dielectric barrier discharge (LPDBD) plasma in boosting germination, growth, and nutritional properties in wheat[J]. Plasma Chem Plasma Process, 2022, 42(6): 339-362.
- [14] 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): 195-200. WANG Min, YANG Size, CHEN Qingyun, et al. Effects of atmospheric pressure plasma on seed germination and seedling growth of cucumber[J]. Transactions of the Chinese Society of

- Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2007, 23(2): 195-200. (in Chinese with English abstract)
- [15] BURDUCEA I, BURDUCEA C, MEREUTA P E, et al. Helium atmospheric pressure plasma jet effects on two cultivars of *Triticum aestivum* L.[J]. *Foods*, 2023, 12(1): 208.
- [16] HOLC M, MOZTIC M, ZAPLOTNIK R, et al. Effect of oxygen plasma treatment on wheat emergence and yield in the field[J]. *Plants*, 2022, 11(19): 2489.
- [17] RONGSANGCHAICHAREAN T, SRISONPHAN S, ONWIMOL D. Responses of rice seed quality to large-scale atmospheric nonthermal plasmas[J]. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 2022, 42(5): 1127-1141.
- [18] LEE M J, LEE H J, LEE Y, et al. Cold plasma treatment increases bioactive metabolites in oat (*Avena Sativa* L.) sprouts and enhances in vitro osteogenic activity of their extracts[J]. *Plant Foods for Human Nutrition* (Dordrecht, Netherlands), 2022, 78(1): 146-153.
- [19] FENG J K, WANG D C, SHAO C Y, et al. Effects of cold plasma treatment on alfalfa seed growth under simulated drought stress[J]. *Plasma Science and Technology*, 2018, 20(3): 035505.
- [20] VOLIN C J, DENE F S, YOUNG R A, et al. Modification of seed germination performance through cold plasma chemistry technology[J]. *Crop Science*, 2000, 40(6): 1706-1718.
- [21] 任棚, 吕晓桂, 石磊. 冷等离子体处理对燕麦种子萌发的影响[J]. *农技服务*, 2022, 39(10): 57-61.
- [22] 任棚, 吕晓桂, 石磊. 大气压冷等离子体持续和间隔处理对燕麦种子萌发的影响[J]. *中国农业科技导报*, 2023, 25(7): 215-221.
- REN Peng, LV Xiaogui, SHI Lei. Effects of atmospheric pressure cold plasma continuous and interval treatments on oat seed germination[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2023, 25(7): 215-221. (in Chinese with English abstract)
- [23] 王孝平, 邢树礼. 考马斯亮蓝法测定蛋白含量的研究[J]. *天津化工*, 2009, 23(3): 40-42.
- WANG Xiaoping, XING Shuli. Determination of protein quantitation using the method of coomassie brilliant blue[J]. *Tianjin Chemical Industry*, 2009, 23(3): 40-42. (in Chinese with English abstract)
- [24] 杨振德. 分光光度法测定叶绿素含量的探讨[J]. *广西农业大学学报*, 1996(2): 145-150.
- YANG Zhende. Studies on the determination of chlorophyll content by spectrophotometric method[J]. *Journal of Guangxi Agricultural University*, 1996(2): 145-150. (in Chinese with English abstract)
- [25] 张清航, 张永涛. 植物体内丙二醛(MDA)含量对干旱的响应[J]. *林业勘查设计*, 2019(1): 110-112.
- ZHANG Qinghang, ZHANG Yongtao. Study on response to drought stress of MDA content in plants[J]. *Forest Investigation Design*, 2019(1): 110-112. (in Chinese with English abstract)
- [26] BOZENA Š, VLADIMIR S, JANA J, et al. Effects of non-thermal plasma treatment on seed germination and early growth of leguminous plants—A review[J]. *Plants*, 2021, 10(8): 1616.
- [27] MRAVLJE J, REGVAR M, VOGEL-MIKUS K. Development of cold plasma technologies for surface decontamination of seed fungal pathogens: Present status and perspectives[J]. *Journal of Fungi*, 2021, 7(8): 650.
- [28] BENABDERRAHIM A M, BETTAIEB I, HANNACHI H, et al. Cold plasma treatment boosts barley germination and seedling vigor: Insights into soluble sugar, starch, and protein modifications[J]. *Journal of Cereal Science*, 2024, 116: 103852.
- [29] GURAGAIN P R, BANIYA B H, GURAGAIN P D, et al. Exploring the effects of non-thermal plasma pre-treatment on coriander (*Coriander sativum* L.) seed germination efficiency[J]. *Heliyon*, 2024, 10(7): 417-436.
- [30] LIAO X Y, LIU D H, XIANG, Q S, et al. Inactivation mechanisms of non-thermal plasma on microbes: A review[J]. *Food Control*, 2017, 75: 83-91.
- [31] OUF S A, ALMARASHI J Q M, MOHAMED A A. Characterization and evaluation of cold atmospheric plasma as seedborne fungal disinfectant and promoting mediator for physico-chemical characteristics of *Moringa oleifera* seedlings[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 15812.
- [32] 王丽娜. 等离子体对小麦萌发及幼苗抗旱性的影响[D]. 太谷: 山西农业大学, 2013.
- WANG Lina. The Effect of Plasma on Germination of Wheat Seed and Drought Resistance of Wheat Seeding[D]. Taiyu: Shanxi Agricultural University, 2013. (in Chinese with English abstract)
- [33] 李娟, 雷霞, 王小利, 等. 干旱胁迫对高羊茅航天诱变新品系生理特性的影响及综合评价[J]. *草业学报*, 2017, 26(10): 87-98.
- LI Juan, LEI Xia, WANG Xiaoli, et al. Effects of drought stress on the physiological characteristics of new lines of *Festuca arundinacea* induced by spaceflight and their comprehensive evaluation[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2017, 26(10): 87-98. (in Chinese with English abstract)
- [34] 张璐璐, 米珺瑶, 陈惠萍. 外源 H₂S 及 JA 供体对干旱胁迫下水稻幼苗侧根生长的调节作用[J]. *分子植物育种*, 2022, 20(10): 3355-3361.
- ZHANG Lulu, MI Junyao, CNEN Huiping. Regulation of exogenous H₂S donor and JA donor on the lateral root growth of rice seedlings under drought stress[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2022, 20(10): 3355-3361. (in Chinese with English abstract)
- [35] SUN M, SUN S J, JIA Z C, et al. Genome-wide analysis and expression profiling of glutathione reductase gene family in oat (*Avena sativa*) indicate their responses to abiotic stress during seed imbibition[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2022, 23(19): 11650.
- [36] 徐凯, 周立国, 余舜武, 等. 栽培稻响应干旱胁迫的生理及分子调控机制[J]. *上海农业学报*, 2022, 38(4): 56-65.
- XU Kai, ZHOU Ligu, YU Shunwu, et al. Physiological and molecular regulation mechanism of response to drought stress in cultivated rice[J]. *Acta Agriculturae Shanghai*, 2022, 38(4): 56-65. (in Chinese with English abstract)
- [37] 冯蕊, 周琪, 吴令上, 等. PEG 6000 模拟干旱胁迫对铁皮石斛幼苗生理和叶绿素荧光特性的影响[J]. *浙江农林大学学报*, 2024, 41(1): 132-144.
- FENG Rui, ZHOU Qi, WU Lingshang, et al. Effects of PEG 6000 simulated drought stress on physiological and chlorophyll fluorescence characteristics of *Dendrobium candidum* seedlings[J]. *Journal of Zhejiang A& F University*, 2024, 41(1): 132-144. (in Chinese with English abstract)
- [38] 韩同进, 吴继华. 干旱胁迫对花生光合色素含量、叶绿素荧光参数及根系活力的影响[J]. *现代农业科技*, 2023(9): 4-6.
- HAN Tongjin, WU Jihua. Effect of drought stress on

- photosynthetic pigments contents, chlorophyll fluorescence parameters and root activity of peanut[J]. *Modern Agricultural Technology*, 2023(9): 4-6. (in Chinese with English abstract)
- [39] 齐先科, 李淼, 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.
- QI Xianke, LI Miao, LI Caihong, et al. Wheat seed vigor and seedling physiology using dielectric barrier discharge plasmas[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2024, 40(1): 301-309. (in Chinese with English abstract)
- [40] KOSAR F, ALSHALLASH S K, AKRAM A N, et al. Trehalose-induced regulations in nutrient status and secondary metabolites of drought-stressed sunflower (*Helianthus annuus* L.) Plants[J]. *Plants*, 2022, 11(20): 2780.
- [41] 李想, 张梦, 刘春增, 等. 等离子体处理对紫云英种子萌发和生理特性的影响[J]. *草业学报*, 2023, 32(10): 129-140.
- LI Xiang, ZHANG Meng, LIU Chunzeng, et al. Effects of dielectric barrier discharge plasma treatment on seed germination and physiological characteristics of *Astragalus sinicus*[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2023, 32(10): 129-140. (in Chinese with English abstract)
- [42] 吴秀宁, 付鑫鑫, 陈月星, 等. 商洛主栽小麦品种苗期抗旱性综合评价[J]. *西北农业学报*, 2024, 33(7): 1225-1234.
- WU Xiuning, FU Xinxin, CHEN Yuexing, et al. Comprehensive evaluation of drought resistance of main wheat varieties at seedling stage in Shangluo[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2024, 33(7): 1225-1234. (in Chinese with English abstract)
- [43] 谢晓宇. 磁场及等离子体对苦参生物学效应的研究[D]. 太原: 山西农业大学, 2020.
- XIE Xiaoyu. Study on the Biological Effects of Magnetic Field and Plasma on *Sophora flavescens* L. [D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2020. (in Chinese with English abstract)

Effects of cold plasma treatment on oat seeds germination and seeding drought resistance

BU Yongmei, BAO Jin^{*}, LYU Xiaogui

(College of Science, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

Abstract: Cold plasma treatment has attracted much attention in recent years, due to its enhancement of crop growth. Oats have been the fourth largest cereal crop in the world. However, the increasing stress of drought and salinization has led to low germination rates and yields of oat seeds. Therefore, it is very necessary to improve the drought resistance of oats. This study aims to investigate the impact of cold plasma treatment on oat germination and drought resistance. The oat seeds of Bayou 1 were used as test material. PEG-6000 solutions were set at the concentrations of 3%, 10%, 15%, and 20% to simulate drought stress. After that, the oat seeds were treated with the atmospheric pressure argon cold plasma with voltages of 4, 5, and 6 kV. The germination and drought resistance were assessed under different degrees of drought stress. A series of indicators were measured, including the germination indicators of oat seeds, and seedling growth, together with the physiological and biochemical indicators, such as germination vigor, germination rate, germination index, vitality index, plant height, root length, number of root hairs, as well as the content of soluble protein, malondialdehyde, and chlorophyll. The results indicated that the cold plasma treatment significantly ($P<0.05$) increased the hydrophilicity of oat seeds. Once drought stress was not applied, the treatment with a voltage of 5 kV shared the most significant effect on the germination potential, germination rate, germination index, and vitality index of oat seeds. There was also a varying increase in the plant height, root length, root number, chlorophyll content, and soluble protein content of oat seedlings in each treatment group, compared with the control. While the malondialdehyde content was lower than that of the control group under drought stress. The oat drought resistance was also evaluated using membership function and principal component analysis. It was found that the cold plasma treatment with a voltage of 5 kV and a time of 30 s performed the best on the drought resistance of oat seeding under drought stress with PEG-6000 solution concentrations of 3%, 10%, and 15%. The hydrophilicity of seeds that were treated with cold plasma was significantly improved, most of which was found in the treatment voltage of 6 kV. The increasing hydrophilicity was beneficial to the water absorption capacity of seeds for the better germination rate of seeds. Cold plasma treatment improved the germination indicators of seeds, including germination potential, germination rate, germination index, and vitality index. The best performance was achieved at the treatment voltage of 5 kV. Cold plasma treatment shared the promoting effect on the root length, plant height, and number of root hairs of oat seedlings. Cold plasma treatment also increased the chlorophyll content and soluble protein content of oat seedlings under drought stress, while there was a great reduction in the malondialdehyde content. Plasma treatment can be expected to improve the plant response to drought stress. The findings can also provide theoretical references for oat breeding and cultivation in arid and semi-arid regions.

Keywords: cold plasma; oats; drought; stress; PEG-6000 solution