

介质阻挡放电等离子体对苜蓿种子活力的影响及综合评价模型构建

李莹艳 常吉庆 乔艺颖 董露露 柳佳清 龙海涛 蒲陆梅

(甘肃农业大学理学院,甘肃 兰州 730000)

摘要 低温等离子体被认为是一种可以刺激种子发芽、幼苗生长的绿色技术。为探究介质阻挡放电等离子体 (Dielectric barrier discharge, DBD) 放电电压与处理时间对苜蓿种子活力的影响的最优条件, 本文采用二元二次正交回归旋转组合设计, 考察处理电压与时间对种子发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数、吸水率、相对电导率及幼苗鲜干比等7项指标的影响, 并融合层次分析法 (Analytic hierarchy process, AHP)-熵权法构建了种子活力的综合评价模型 (Z值), 以确定最佳处理条件。结果表明, 在二元二次正交回归旋转组合设计的实验条件下, 等离子体处理能显著提升种子发芽指标, 其中发芽率与活力指数分别可达78.33%与613.71, 幼苗长度增至46.83 mm, 鲜干比和吸水率分别达到19.03和94.23%, 相对电导率和丙二醛 (Malondialdehyde, MDA) 含量分别降为28.15%和0.009 $\mu\text{mol/g}$ 。方差分析表明, 电压与时间对Z值均存在极显著影响 ($p<0.01$), 且电压的影响效应大于时间。模型优化得出DBD处理苜蓿种子的最佳条件为电压18.60 kV、时间24 s, 此时预测得分Z为83.60。经实验验证, 在该条件下Z值达90.54, 优于预测值。扫描电镜分析证实, DBD处理增强种子吸水能力, 加速萌发进程。本文建立的综合评价模型为优化DBD种子处理条件提供了可靠方法, 所获结果也为等离子体在农业中的应用奠定了理论基础。

关键词 苜蓿种子活力, 条件优化, AHP-熵权法, 介质阻挡放电等离子体

中图分类号 Q691.5

DOI: 10.11889/j.1000-3436.2025-0110

CSTR: 32195.14.j.JRRRP.1000-3436.2025-0110

引用该文:

李莹艳, 常吉庆, 乔艺颖, 等. 介质阻挡放电等离子体对苜蓿种子活力的影响及综合评价模型构建[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, XXXX, XX(X): XXXXXX. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2025-0110.

LI Yingyan, CHANG Jiqing, QIAO Yiyang, *et al.* Effect of dielectric barrier discharge plasma on alfalfa seed vigor and the construction of comprehensive evaluation model[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, XXXX, XX(X): XXXXXX. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2025-0110.



基金资助: 国家自然科学基金 (31860472)

第一作者: 李莹艳, 女, 2001年5月出生, 2024年于甘肃农业大学获得学士学位, 现为甘肃农业大学化学专业硕士研究生, Email: 3069788996@qq.com

通信作者: 蒲陆梅, 博士生导师, E-mail: pulm@gsau.edu.cn

收稿日期: 初稿 2025-11-20; 修回 2026-02-13

Supported by National Natural Science Foundation of China (31860472)

First author: LI Yingyan (female), born in May 2001, obtained her bachelor's degree from the Gansu Agricultural University in 2024 and is now a master's degree in chemistry from Gansu Agricultural University, Email: 3069788996@qq.com

Corresponding author: PU Lumei, doctoral supervisor, E-mail: pulm@gsau.edu.cn

Received 20 November 2025; accepted 13 February 2026

Effect of dielectric barrier discharge plasma on alfalfa seed vigor and the construction of comprehensive evaluation model

LI Yingyan CHANG Jiqing QIAO Yiying DONG Lulu LIU Jiaqing LONG Haitao PU Lumei

(College of Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730000, China)

ABSTRACT Low temperature plasma has been considered as a green technology that can stimulate seed germination and seedling growth. In order to explore the optimal conditions for the effect of dielectric barrier discharge plasma (DBD) discharge voltage and treatment time on alfalfa seed vigor, this paper used binary quadratic orthogonal regression rotation combination design to investigate the effects of treatment voltage and time on seed germination rate, germination potential, germination index, vigor index, water absorption, relative conductivity and seedling fresh-dry ratio. The comprehensive evaluation model (Z value) of seed vigor was constructed by AHP-entropy weight method to determine the optimal treatment conditions. The results showed that under the experimental conditions of the binary quadratic orthogonal regression rotation combination design, plasma treatment could significantly improve the seed germination index, with the rate and vigor index reaching 78.33% and 613.71, respectively. The seedling length increased to 46.83 mm. The fresh-dry ratio and water absorption rate reached 19.03 and 94.23%, respectively. The relative conductivity and MDA content decreased to 28.15% and 0.009 $\mu\text{mol/g}$, respectively. Analysis of variance showed that voltage and time had extremely significant effects on Z values ($p < 0.01$), and the effect of voltage was greater than that of time. The model optimization showed that the optimal conditions for DBD treatment of alfalfa seeds were voltage of 18.60 kV and time of 24 s, and the predicted score Z was 83.60. The experimental results showed that the Z value is 90.54 under this condition, which is better than the predicted value. Scanning electron microscopy analysis confirmed that DBD treatment enhanced the water absorption capacity of seeds and accelerated the germination process. The comprehensive evaluation model established in this paper provides a reliable method for optimizing DBD seed treatment conditions, and the obtained results also lay a theoretical foundation for the application of plasma in agriculture.

KEYWORDS Alfalfa seed vigor, Condition optimization, AHP-entropy weight method, Dielectric barrier discharge plasma

CLC Q691.5

紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)被誉为"牧草之王",是全球种植最广的豆科牧草,营养价值高,且具有天然生物固氮特性^[1-3],对土壤改良、畜牧生产及人类健康均具有重要价值。优质的苜蓿种子直接影响苜蓿植株的生长速度、抗逆性、再生能力与营养品质,可确保高产、高蛋白的饲草供应,降低畜牧业对进口饲料的依赖。

目前,促进种子萌发的主要方式是人工破壳、机械磨皮等物理技术处理,这些方法不仅耗时费力,而且操作不当还会使种子丧失活力。化学药剂拌种面临环境污染、农药残留和抗药性等问题,生物处理是通过接种有益微生物或其代谢产物于种子表面,增强种子抗虫病性,但受环境影响大,稳定性和持续性需提高^[4]。因此,迫切需要开发一种高效、环保的种子活力提高技术。

等离子体是继固态、液态和气态之后物质的第

四种聚集状态,是由电子、离子、中性原子及自由基组成的带电粒子系统,并以电中性存在。根据系统的温度分为高温等离子体和低温等离子体,高温等离子体电子温度(T_e)与气体温度(T_g)相等,但低温等离子体中, T_e 远高于 T_g ^[5]。介质阻挡放电等离子体(Dielectric barrier discharge, DBD)是一种电化学高级氧化技术,也是低温等离子体的一种,其结构由两个电极之间的介电层组成电介质阻挡层。当施加足够高的交流电压时,电子获得足够的动能以穿透介质屏障,从而引发电子与气体分子间撞击电离,产生放电等离子体。

低温等离子体技术在植物生物学领域应用广泛,已有大量研究发现该技术能促进种子发芽^[6-8]、植株生长和提高作物产量^[9]。Tounekti等^[10]使用常压氦气DBD处理葡萄种子,使其萌发时间提前了10 d。Puligundla等^[11]使用冷大气压等离子体处理

萝卜种子显著提高其发芽率,并且促进了幼苗生长。徐文倩等^[12]研究发现电晕放电等离子体处理的苜蓿幼苗ROS含量显著高于对照组,但当电压强度过高时对种子吸水率、幼苗长度有抑制作用。齐先科等^[13]使用DBD处理小麦种子,当处理时间过长时,等离子体中的活性粒子会对种子造成损伤,影响种子的萌发和幼苗生长。Pia等^[14]研究表明低压电感耦合氧等离子体处理小麦种子时,过高的氧自由基通常导致种子表面过度氧化,反而抑制发芽率。Iranbakhsh等^[15]使用DBD处理浸泡过的大麻种子时,短时间(40 s)处理促进幼苗生长,而更长时间(60 s)的处理显著延迟生长并减少生物量。以上研究结果共同表明,等离子体产生的活性氧(ROS,如 H_2O_2 、 $O_2^{\cdot-}$ 、 $\cdot OH$)与活性氮(RNS,如 $\cdot NO$ 、 NO_2^- 、 NO_3^-)可能是影响种子萌发与植物生长的关键信号分子,该效应具有显著的剂量依赖性,存在促进种子萌发的最优处理条件。在放电区域中,活性粒子对种皮表面进行蚀刻,增加其通透性和孔隙度^[16],改善种子微环境中的水分吸收和气体交换^[17]。同时,活性粒子渗透进入种子内部,激活抗氧化酶系统,两种效应协同打破休眠,促进萌发^[18]。而过量的ROS会造成氧化应激,造成生物膜损伤,从而抑制发芽。

鉴于以上研究内容,适当的处理条件对种子萌发以及幼苗生长产生积极影响,当处理强度过大时,会产生抑制作用。此外,多数研究以种子发芽指标最高的处理条件作为最优条件,活力指标评价单一,难以对种子质量做一个全面的评估。二元二次正交回归旋转组合设计法是一种基于响应面法

的多元统计分析的实验设计方法^[19],该方法具有减少实验次数、建模精度高的优点,已广泛应用于优化农业、工程等领域的技术参数。因此,本文旨在突破现有等离子体影响种子活力评价体系的局限性,采用二元二次正交回归旋转组合设计法设计实验,通过DBD处理紫花苜蓿种子,将处理时间、放电电压作为考察因素,分别以发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数、种子吸水率、相对电导率、鲜干比等多指标为评估标准,通过构建多维度生物指标协同分析的种子活力综合评价模型,优化等离子体处理种子的最佳条件,建立更具科学性的种子活力评估模型,为等离子体在农业中的应用提供理论依据与方法支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

材料:实验所用甘农2号苜蓿种子由甘肃创绿草叶公司提供。

试剂:次氯酸钠、75%乙醇,均为分析纯。

1.2 仪器与设备

CTP-2000K 介质阻挡放电等离子体装置,南京苏曼等离子科技有限公司;恒温光照培养箱,青岛卓英社科技股份有限公司;BEC-6600 数字化电导率测定仪,成都美仪传感技术有限公司;H-101-3 电热恒温鼓风干燥箱,上海跃进医疗器械有限公司;UV-1780 紫外可见分光光度计,岛津仪器(苏州)有限公司。

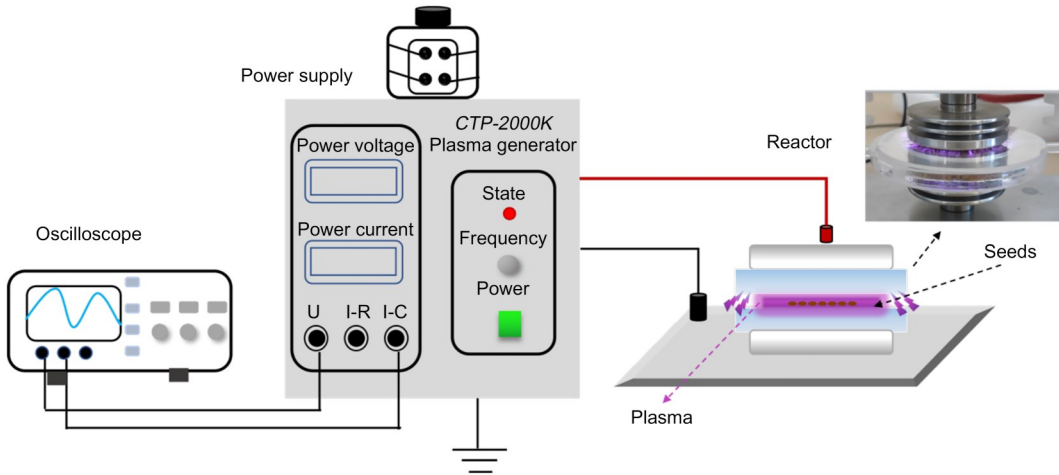


图1 DBD装置示意图
Fig.1 Schematic diagram of DBD device

实验所用装置为DBD 大气压空气等离子体系统(图1所示)。设备由实验电源、调压器、配备

不锈钢材质高压电极的石英介质反应器、TBS1102 C 示波器四部分组成。输出电压范围为0~50 kV,

频率调节范围在 5~20 kHz，两石英介质之间距离范围 0~8 mm，直径为 90 mm。DBD 是在经介质反应器隔开的两个高压电极板之间建立一个强电场，气体分子在强电场作用下电离，产生自由电子与电离粒子，从而形成放电等离子体。

1.3 实验方法

1.3.1 二元二次正交回归旋转组合设计

选取处理时间（A）和放电电压（B）两因素，采用二元二次正交旋转组合设计法来设计实验方案，未处理样品为对照组（CK）。根据实验数据进行方差分析，建立两因素与种子活力之间的回归方程，探究单因素效应以及交互影响。实验因素

与编码表如表 1，二元二次正交回归旋转组合设计表如表 2。

表1 因子编码表
Table 1 Factor coding table

编码值 Coded value	因素水平 Level of factors	
	z_1 /s	z_2 /kV
-1.414	5.00	15.00
-1	13.05	16.48
0	32.50	20.00
1	51.94	23.53
+1.414	60.00	25.00

表2 二元二次正交回归旋转组合设计表
Table 2 Binary quadratic orthogonal regression rotation combination design table

实验组别 Text group	编码值 Coding value		处理 Treatment	
	z_1	z_2	A / s	B / kV
CK	-	-	-	-
G1	1	1	52	23.53
G2	1	-1	52	16.48
G3	-1	1	13.05	23.53
G4	-1	-1	13.05	16.48
G5	1.414	0	60	20
G6	-1.414	0	5	20
G7	0	1.414	32.5	25
G8	0	-1.431 4	32.5	15
G9	0	0	32.5	20
G10	0	0	32.5	20
G11	0	0	32.5	20
G12	0	0	32.5	20
G13	0	0	32.5	20

1.3.2 等离子体的放电特性与穿透力评估

（1）参考戴阳^[20]的输出功率计算方法，采用 TBS1102C 数字示波器配合高压探头和电流探头测量放电过程中的实时电压电流波形分布，并将输出信号传输到示波器中保存，DBD 放电功率的计算通常采用 Lissajous 图法。当放电发生时，使用串联在放电回路中的测量电容 C_M 采集放电输送的电荷量 Q ，则流过回路的电流计算公式为式（1）。

$$I = \frac{dQ}{dt} = \frac{d(C_M V_M)}{dt} = C_M \frac{dV_M}{dt}$$
 (1)

式中： I 为放电回路中的电流，A； V_M 为测量电容 C_M 两端的电压，V； V_M 正比于测量电容的电荷量 Q ，

C；进而放电功率为式（2）。

$$P_{out} = \frac{1}{T} \int_0^T V I dt = \frac{C_M}{T} \int_0^T V \frac{dV_M}{dt} dt = f C_M \oint V dV_M = f C_M S$$
 (2)

式中： P_{out} 为放电功率（W）， V 为电源输出电压； T 为输出电压的周期（s），输出电压的频率为 $f = 1/T$ （Hz）， V 和 V_M 分别加在示波器的 X - Y 轴上得到的闭合曲线，即为 Lissajous 图形， S 为闭合曲线的面积（V²），正比于放电功率 P_{out} 。

$$S = k \times k_x \times k_y \times A$$
 (3)

式中： k 为取样电压的衰减倍数， $k=1$ ； k_x 、 k_y 为示波器的两通道 CH1 与 CH2 的衰减倍数， $k_x=k_y=$

1; A 为 Lissajous 的面积值, 用 Origin 软件计算出 $A=31.73V^2$, 则放电功率 (P_{out}) 为式 (4)。

$$P_{out} = f \times C_M \times k \times kx \times ky \times A \quad (4)$$

(2) 采用淀粉碘化钾琼脂凝胶显色法^[21], 评估等离子体产生的活性粒子的穿透力。称淀粉和碘化钾各 0.5 g, 溶解于 100 mL 质量浓度 3.2% 的琼脂溶液中, 趁热倒入培养皿中, 控制凝胶厚度分别为 2 mm 和 4 mm, 将干燥的种子平铺于琼脂表面, 用刀片将琼脂切成约 3.5×3.5 (cm) 的小块, 置于反应器中, 在 20 kV 电压下处理 5 min, 处理结束后立即观察并拍照记录琼脂表面颜色变化。

1.3.3 种子样品处理与发芽指标测定

种子预先消毒冲洗干净之后, 自然晾干, 置 5 g 于石英反应器中, 打开 DBD 装置电源, 调节调压器和频率, 按表 2 设计条件处理种子。选取 20 粒种子置于 9 cm 培养皿中进行发芽实验, 加入 3.5 mL 无菌水, 并用封口膜封口^[22]。在光照时间 16 h, 黑暗时间 8 h 恒温光照培养箱中培养 7 d, 每日记录种子萌发数。当胚根明显突破种皮且长度达到 1 mm 以上即认为种子发芽, 每个处理组重复三次实验。种子发芽率 (G_r)、发芽势 (G_e)、发芽指数 (G_i)、活力指数 (V_i) 由式 (5) ~ (8) 计算。

$$G_r = \frac{N_7}{N_{ts}} \times 100\% \quad (5)$$

$$G_e = \frac{G_3}{N_{ts}} \times 100\% \quad (6)$$

$$G_i = \sum \frac{N_{ts}}{G_d} \quad (7)$$

$$V_i = G_i \times L_t \quad (8)$$

式中: N_7 、 N_{ts} 、 N_{ts} 、 G_d 、 L_t 分别为 7 d 内种子发芽数、供试种子数、种子 t d 的萌发数、萌发天数以及苗长, mm。

1.3.4 苗长与鲜干比测定

发芽实验结束后, 每皿随机取样 3 株幼苗, 用刻度尺测量幼苗高度, mm。从每皿中随机选取 3 株幼苗, 称其鲜重, 置于烘箱烘干至恒重, 测定其干重, g; 计算鲜重与干重的比值, 即为鲜干比。

1.3.5 种子吸水率和相对电导率的测定

选择均一饱满的 15 粒种子, 准确称量初始质量 M_1 , 置于 30 mL 蒸馏水中放置 24 h, 取出后用滤纸吸干表面水分, 待其干燥之后称其质量 M_2 , g。吸水率 (W_{ar}) 计算见式 (9)。

$$W_{ar} = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \times 100\% \quad (9)$$

式中: M_1 为种子初始质量, M_2 为种子吸水 24 h 后的质量, g。

参考 Liu 的方法^[23]来测定相对电导率。随机选取 20 粒干燥种子, 用去离子水冲洗 3 次, 去除表面附着的电解质, 用滤纸吸干样品表面水分。加入 20 mL 去离子水后, 立即使用电导率仪 (BEC-6600, China) 测量初始电导率 (EC_0)。浸泡 4 h 后, 再次测定种子浸出液的电导率 (EC_1)。随后 100 °C 水浴 15 min, 以杀死植物组织, 完全释放细胞中所有电解质, 当溶液冷却至室温时测定最终电导率 (EC_2), 相对电导率 (R_{ec}) 的计算见式 (10)。

$$R_{ec} = \frac{EC_1 - EC_0}{EC_2 - EC_0} \times 100\% \quad (10)$$

式中: EC_0 为初始电导率值; EC_1 为浸泡 4 h 后电导率值; EC_2 为最终电导率值, $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。

1.3.6 种子 H_2O_2 和 MDA 含量测定

H_2O_2 的含量用硫酸钛比色法进行测定^[24]。称 0.2 g 种子于预冷的丙酮中研磨, 离心收集上清液, 在 0.5 mL 上清液中加入 0.25 mL 质量浓度 5% 的 $Ti(SO_4)_2$ (硫酸) 溶液和 0.5 mL 氨水, 混匀离心取沉淀, 再加 3 mL 浓硫酸溶解沉淀, 记录 415 nm 的吸光度值, 并以同样方法制备标准曲线计算 H_2O_2 浓度。

采用硫代巴比妥酸法测定种子中丙二醛 (MDA) 含量^[25]。取 0.2 g 种子置于研钵中, 加入 3 mL 质量浓度 10% 的三氯乙酸溶液, 离心吸取上清液, 将其与硫代巴比妥酸溶液按体积比 1:1 混匀, 沸水浴 15 min, 立即冷却, 离心 5 min, 测定上清液在 450 nm、532 nm、600 nm 处的吸光值。

1.3.7 种皮微观结构测定

将干燥的种子放入离子溅射仪 (SBC-12) 喷镀金膜之后, 采用 Phenom Pure G6 扫描电子显微镜 (SEM) 在 10 kV 加速电压下观察并拍照。

1.3.8 指标权重的确定

(1) 层次分析法 (Analytic hierarchy process, AHP): 鉴于各项指标在体系中的重要性不同, 因此在实际问题中需赋予其权重以表示其差异性。AHP 是由美国运筹学家 Saaty^[26] 于 20 世纪 70 年代中期所提出的一种将定量与定性相结合的多目标决策分析方法。

首先, 构建指标层次结构, 再结合 Saaty 给出

的1-9标度法（见表3）并将其定量化，以期构造反映各指标间重要性程度的判断（成对比较）矩阵；其次求解判断矩阵的最大特征值 $\lambda_{\max}$ 及其对应的归一化特征向量，由此确定指标权重，并由 I_c 和 R_c 进行一致性检验。

$$R_c = \frac{I_c}{I_r} \tag{11}$$
式中： R_c 为判断矩阵的随机一致性比率； I_c 为判断矩阵的一致性指标且 $I_c = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$ ， I_r 为判断矩阵的平均随机一致性指标，部分阶的判断矩阵的值见表4。

表3 判断矩阵标度
Table 3 Judgment matrix scale

标度(a_{ij})	强度(因素 <i>i</i> 比 <i>j</i>)	含义
Scale	Intensity (factor <i>i</i> vs. <i>j</i>)	Meaning
1	相等	两因素重要性相同
	Equal importance	Factors <i>i</i> and <i>j</i> are equally important
3	较强	两因素相比一个因素比另一个稍微重要
	Moderate importance	Factor <i>i</i> is slightly more important than factor <i>j</i>
5	强	两因素相比一个因素比另一个重要
	Strong importance	Factor <i>i</i> is strongly more important than factor <i>j</i>
7	很强	两因素相比一个因素比另一个极为重要
	Very strong importance	Factor <i>i</i> is very strongly more important than factor <i>j</i>
9	绝对强	两因素相比一个因素比另一个极端重要
	Extreme importance	Factor <i>i</i> is extremely more important than factor <i>j</i>
2、4、6、8	上述2个相邻判断中值	上述判断的中间值
	Intermediate values	Compromise values between adjacent judgments

表4 平均随机一致性指标值
Table 4 Average random consistency index value

阶数Order	1	2	3	4	5	6	7	8	9
I_r	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.41	1.45	1.49

当判断矩阵时 $R_c<0.1$ ，认为判断矩阵具有满意的一致性，反之，要调整矩阵中的元素使其具有满意的一致性。

（2）熵权法：在多指标的决策问题中，熵权法可以确定各评价指标的权重，对可行方案来说，方案的指标向决策者提供决策信息，若指标所提供的信息量大，则它对决策的作用就大，从而该指标的权重也就越大。

假设多指标决策问题有 m 个方案 $A_1, A_2, \dots, A_m$ ， n 个指标 $G_1, G_2, \dots, G_n$ ，其决策矩阵 X 为

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{pmatrix} \tag{12}$$

令

$$\frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}}, \quad i = 1, 2, \dots, m; \quad j = 1, 2, \dots, n,$$

则第 j 个指标的熵输出为

$$E_j = -K \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij}, \quad j = 1, 2, \dots, n \tag{13}$$

其中， $K = \frac{1}{\ln m}$ ，即所有方案对指标 G_j 的贡献总量，这里 $0 \leq E_j \leq 1$ 。记 $d_j = 1 - E_j$ ，则指标 G_j 的权重为

$$\omega_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j}, \quad j = 1, 2, \dots, n \tag{14}$$

若决策者提前对 n 个指标 $G_1, G_2, \dots, G_n$ 有自己的偏好，认为这 n 个指标的优先权为 $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)'$ ，则可以利用 ω_j 对优先权 λ_j 进行修正， G_j 的修正权重可记为

$$\bar{\lambda}_i = \frac{\lambda_j \omega_j}{\sum_{j=1}^n \lambda_j \omega_j}, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (15)$$

(3) 指标组合赋权：层次分析法得出的权重主观性较强，而熵权法依据数据通过数学模型生

成权重，客观性强却忽视主观判断。为提高权重的科学性与合理性，将两种方法融合，实现主客观信息互补，从而优化指标赋权。

采用AHP和熵权法分别计算各指标权重，由式(15)确定各指标组合权重，见表5。

表5 各指标权重
Table 5 Weights of each index

指标 Indicators	权重 Weight		
	层次分析法 AHP	熵权法 Entropy weight method	AHP-熵权法 AHP-entropy weight method
发芽率 Germination rate	0.35	0.09	0.26
发芽势 Germination energy	0.15	0.11	0.13
发芽指数 Germination index	0.10	0.12	0.10
活力指数 Vigor index	0.13	0.15	0.16
吸水率 Water absorption rate	0.14	0.18	0.19
相对电导率 Relative electrical conductivity	0.05	0.21	0.08
鲜干比 Fresh-dry ratio	0.08	0.12	0.07

1.3.9 数据处理

每组实验重复三次，采用Excel整理并计算数据，绘图软件采用Origin 2021。采用SPSS 24软件进行方差分析和多重比较， $p < 0.05$ 认为具有显著性差异，使用Python 3.12.9进行拟合方程，并求最优解。

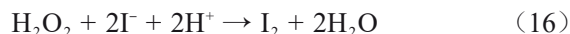
2 结果与分析

2.1 等离子体放电特性与穿透力分析

图2(a)是DBD在处理条件(18.60 kV, 9.20 kHz)下一个周期内稳定放电的实时电压电流波形图，电压呈标准正弦波，正负峰峰值电压约为 ± 20 kV，电流在电压变化的相位处呈现脉冲尖峰，等离子体放电稳定。基于此绘制的图2(b) Q-V Lissajous图，呈现标准的平行四边形，其面积对应于单周期放电能量。经计算，该条件下处理20 g种子的放电功率约为137.64 W，单批次处理时间极短，理论小时处理通量可达3 kg。

为验证等离子体产生的活性粒子能否有效作用于种子，采用KI-淀粉法验证ROS渗透能力。将苜蓿种子覆盖于厚度分别为2 mm(图2(c)~(e))和4 mm(图2(f)~(h))琼脂板表面，DBD处理后， H_2O_2 等活性粒子将I⁻氧化为I₂并与淀粉反应呈蓝紫色(见反应式(16))。2 mm厚琼脂板的正面(图2(d))与背面(图2(e))均清晰呈现显色反

应，表明在较薄介质中活性粒子可实现全层渗透。相比之下，4 mm厚琼脂板的显色主要集中于种子接触面及邻近区域(图2(g))，背面仅见微弱或局部显色(图2(h))，说明活性粒子可沿种子与凝胶间的微米级间隙传输，但整体穿透深度有限。该结果直观证实， H_2O_2 能随气流有效扩散，穿透覆盖的苜蓿种子层，并溶解渗透进入下方的琼脂凝胶基质，但受介质厚度的影响。前人利用琼脂凝胶模型的研究已证实，等离子体活性粒子能够在琼脂糖凝胶中传输并渗透至毫米级深度^[16, 27-29]。因此，本文结果直观表明等离子体活性粒子能够渗透种子与琼脂之间的毫米级间隙。



2.2 DBD对苜蓿种子活力指标的影响

2.2.1 DBD对种子发芽指标的影响

在种子质量评估中，发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数是核心评价指标^[30]。DBD处理对苜蓿种子发芽指标的影响如图3所示，对照组的 G_r 、 G_e 、 G_i 、 V_i 分别为73.33%、73.33%、12.78、547.53，处理时间为32.5 s时(图3(a))，处理电压组的 G_r 分别为70.00%、65.83%、73.84%、43.33%、13.33%，其中，处理电压为20 kV时，发芽率达到最高；电压处理组的 G_e 和 G_i 、 V_i 低于对照组。

当处理电压为20 kV时(图3(b))，处理时间组的发芽率分别为78.33%、58.33%、52.17%、

50.83%、70%； G_e 分别为 75.00%、58.33%、47.78%、50.00%、65.00%； G_i 分别为 13.02、8.67、7.66、7.93、9.47； V_i 分别为 613.71、344.26、296.00、364.01、425.94，其中，处理时间为 5 s 时各发芽指标均达到最高。

以上结果表明，低强度、短时间处理有助于促进种子萌发，电压强度过高会抑制种子萌发，破坏种子角质层，导致内部结构损伤，处理时间过长会导致种子内部会积累更多的活性氧 (ROS)，造成氧化损伤从而抑制发芽^[31]。

2.2.2 DBD对幼苗苗长的影响

苗长可以直观体现紫花苜蓿的生长速度以及整体生长活力^[32]。如图4所示，处理时间为 32.5 s 时(图4(a))，对照组和电压处理组的苗长分别为 42.83 mm、38.06 mm、46.58 mm、44.24 mm、35.42 mm、19.67 mm，处理电压为 16.48 kV 时苗长达到最大值，25 kV 处理组的苗长显著低于其他处理组的苗长 ($p < 0.05$)，是由于电压过高抑制了幼苗的生长。

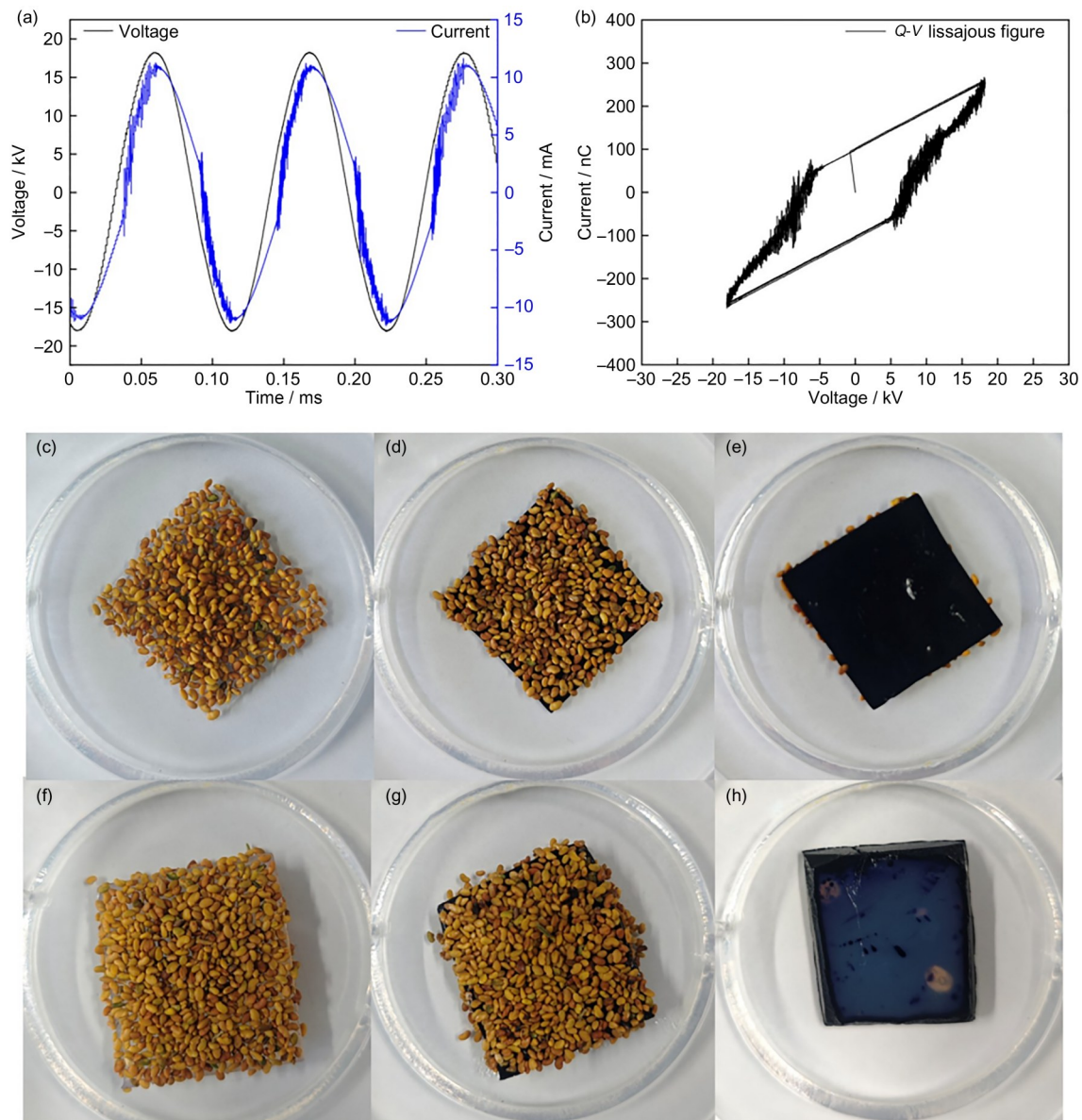


图2 电压-电流波形图与活性粒子显色评估

(a)电压和电流随时间的波形；(b)Q-V Lissajous 图；(c~e)2 mm 厚琼脂板：(c)未处理对照，(d)处理后正面，(e)处理后背面；(f~h)4 mm 厚琼脂板：(f)未处理对照，(g)处理后正面，(h)处理后背面

Fig.2 Voltage-current waveform and active particle color evaluation

(a) Voltage and current waveforms over time; (b) Q-V Lissajous diagram; (c - e) 2 mm thick agar plates: (c) untreated control, (d) front side after treatment, (e) back side after treatment; (f - h) 4 mm thick agar plates: (f) untreated control, (g) front side after treatment, (h) back side after treatment

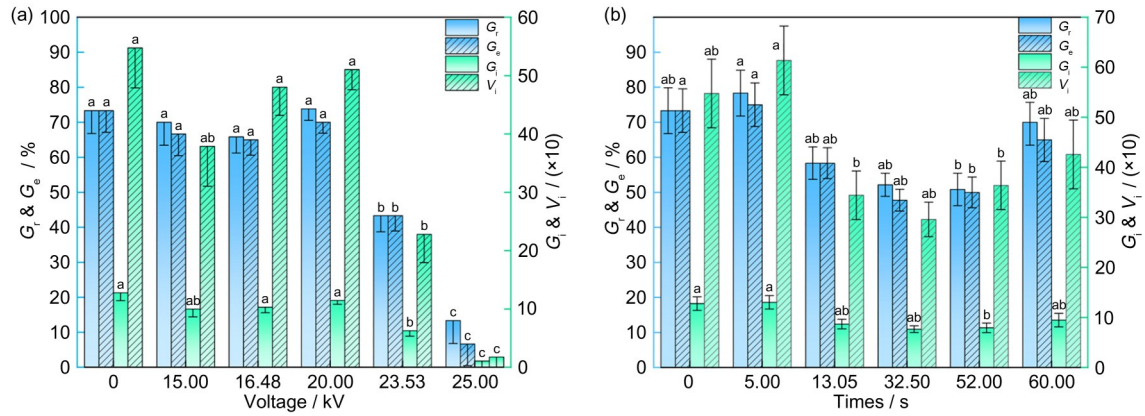


图3 电压、时间对发芽指标的影响
Fig. 3 Effect of voltage and time on germination index

当处理电压为20 kV时(图4(b)), 处理时间组的苗长分别为46.83 mm、39.42 mm、33.09 mm、42.58 mm、44.33 mm, 处理时间为5 s时的幼苗最长, 比对照组高4 mm, 但与对照组相比差异不显

著 ($p>0.05$)。这表明适当能量水平的等离子体处理改善了苜蓿幼苗的生长, 这与 Shashikanthalu^[33] 和 Karmakar^[34] 等的研究结果相似。

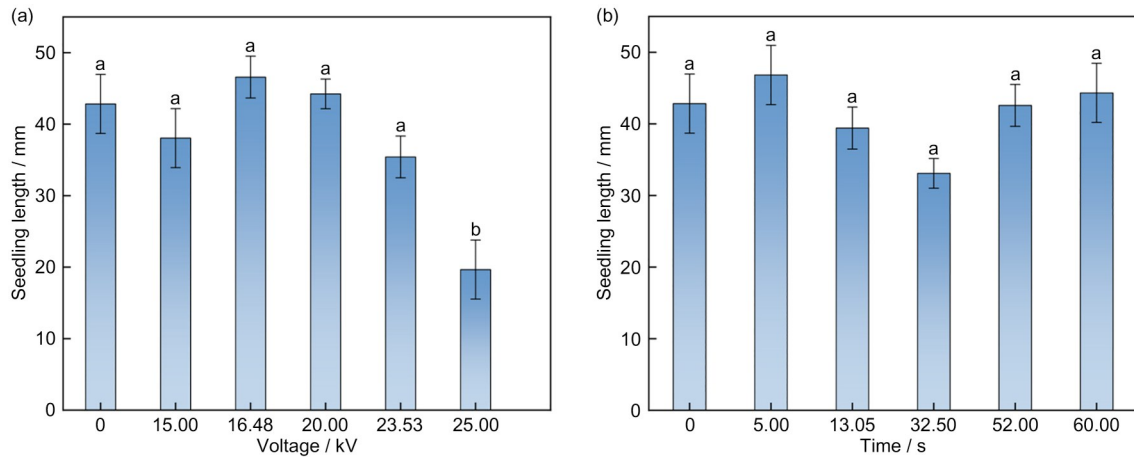


图4 电压、时间对苗长的影响
Fig. 4 Effects of voltage and time on seedling length

2.2.3 DBD对幼苗鲜干比的影响

鲜干比是衡量牧草水分含量和干物质积累效率的重要参数^[35]。如图5所示, 未处理组的鲜干比为14.79, 当处理时间为32.5 s时(图5(a)), 随着电压的增大, 幼苗鲜干比先上升后下降, 电压为16.48 kV时鲜干比达到最大值(19.03), 是对照组的1.286倍; 处理电压为20 kV时(图5(b)), 处理时间为52 s时鲜干比达到最大值(18.65), 是未处理组的1.26倍。经DBD处理后的幼苗鲜干比与对照组相比均有增加, 但总体差异不显著 ($p>0.05$)。

2.2.4 DBD对种子吸水率、相对电导率的影响

吸水率反映种子吸水能力和胚的活性^[36]。对照组的吸水率为16.69%, 处理时间为32.5 s时(图

6(a)), 电压组的吸水率分别为92.02%、54.24%、72.01%、53.29%、92.63%。其中, 电压为25 kV时吸水率最高, 是对照组的5.55倍, 与对照组相比差异显著。DBD处理增加了种子的吸水能力, 可能是由于等离子体严重蚀刻种皮, 种子内部暴露更多吸水位点。电压强度过高可能致使膜结构损坏, 胞内积累ROS超过细胞清除能力, 进而引发膜脂过氧化, 导致细胞膜透性异常^[37-38]。

当处理电压为20 kV时(图6(b)), 处理时间组的吸水率分别为63.17%、74.72%、94.23%、32.81%、54.86%, 其中, 时间为32.5 s的吸水率达到最大值, 是对照组的5.65倍。对照组与处理组间具有显著性差异 ($p<0.05$)。种子吸水率随着处理时间的延长先增高后降低, 更长时间(60 s)的

处理反而使吸水率增高,是由于部分断裂的化学键重组,形成更强的亲水基团,进一步提高了亲

水性^[39]。

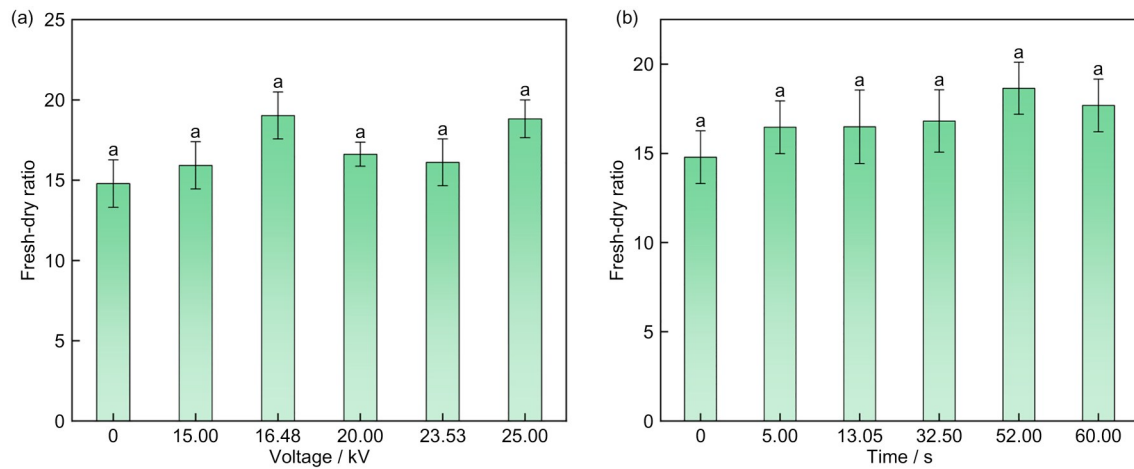


图5 电压、时间对鲜干比的影响
Fig.5 Effects of voltage and time on the ratio of fresh to dry

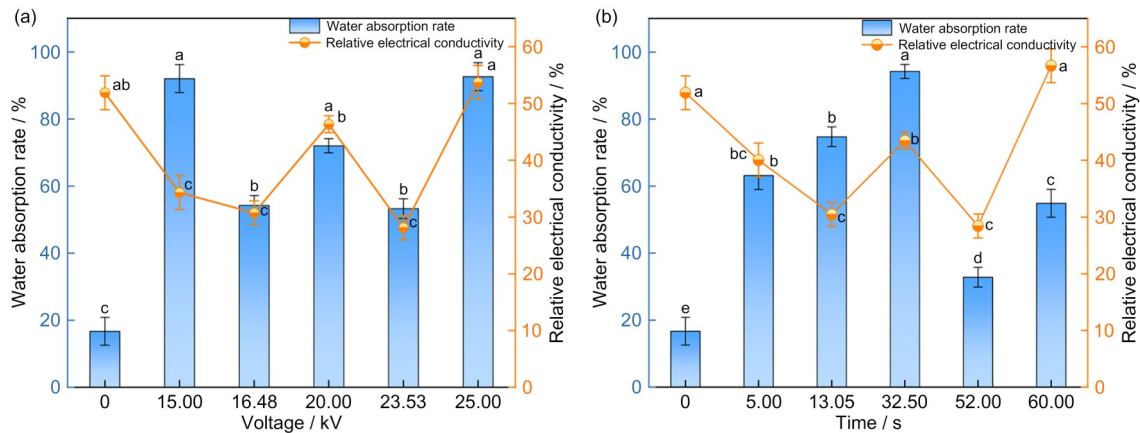


图6 电压、时间对吸水率和相对电导率的影响
Fig.6 Effects of voltage and time on water absorption and relative conductivity

相对电导率反映细胞膜的受损程度与膜透性^[40]。当处理时间为32.5 s时(图6(a)),处理电压组的相对电导率分别为34.32%、30.75%、46.35%、28.15%、53.72%,电压为23.53 kV种子的相对电导率达到最低值(对照组:51.91%)。当处理电压为20 kV时(图6(b)),处理时间组的相对电导率分别为40.05%、30.47%、43.46%、28.43%、56.69%,处理时间为52 s时,相对电导率达到最低值,组间差异极显著($p<0.01$)。相对电导率较高(25 kV, 32.5 s)表明细胞膜的完整性受损,电解质渗漏,种子活力低。反之,相对电导率较低表明种子具有良好的细胞结构,种子活力较高。

2.2.5 DBD对种子 H_2O_2 、MDA含量的影响

H_2O_2 是植物体内的重要的ROS信号分子。经等离子体处理后, H_2O_2 含量呈现明显的变化趋势,

当处理时间为32.5 s时(图7(a)),处理电压组的 H_2O_2 含量分别为0.019 $\mu\text{mol/g}$ 、0.028 $\mu\text{mol/g}$ 、0.010 $\mu\text{mol/g}$ 、0.026 $\mu\text{mol/g}$ 、0.018 $\mu\text{mol/g}$,对照组的 H_2O_2 含量为0.014 $\mu\text{mol/g}$,电压为16.48 kV时, H_2O_2 含量达到最大值,表明等离子体促进了细胞内 H_2O_2 的积累。当处理电压为20 kV时(图7(b)),处理时间组的 H_2O_2 含量分别为0.018 $\mu\text{mol/g}$ 、0.032 $\mu\text{mol/g}$ 、0.015 $\mu\text{mol/g}$ 、0.023 $\mu\text{mol/g}$ 、0.015 $\mu\text{mol/g}$,其中处理时间为13.05 s时, H_2O_2 含量达到最大值(0.032 $\mu\text{mol/g}$)。当处理条件为20 kV/32.5 s时, H_2O_2 含量显著降低,表明细胞内抗氧化防御系统被激活,清除了过量的 H_2O_2 ,当处理条件随着处理强度的增大, H_2O_2 含量再次上升,损伤了种子的抗氧化防御系统,导致 H_2O_2 的再次积累(25 kV/60 s)^[41]。

MDA是衡量细胞膜氧化损伤的关键指标。处

理时间为32.5 s时(图7(a)),对照组的MDA含量为0.013 μmol/g, 处理电压组的MDA含量分别是0.012 μmol/g、0.009 μmol/g、0.012 μmol/g、0.011 μmol/g、0.012 μmol/g; 处理电压为20 kV时(图7(b)), 处理时间组的MDA含量分别为0.013 μmol/g、0.011 μmol/g、0.011 μmol/g、0.009 μmol/g、0.014 μmol/g。处理电压为16.48 kV时, MDA含量达到最低值, 表明等离子体处理未

对细胞膜造成氧化损伤。当处理电压进一步升高, MDA含量升高, 加剧细胞膜的氧化损伤。随着处理时间的增大, MDA含量略微降低, 当处理时间为52 s时MDA含量达到最低值, 随后处理时间增加到60 s, MDA的含量升高, 表明等离子体处理强度过高破坏了细胞内抗氧化系统, 从而导致膜脂过氧化程度加深^[42]。

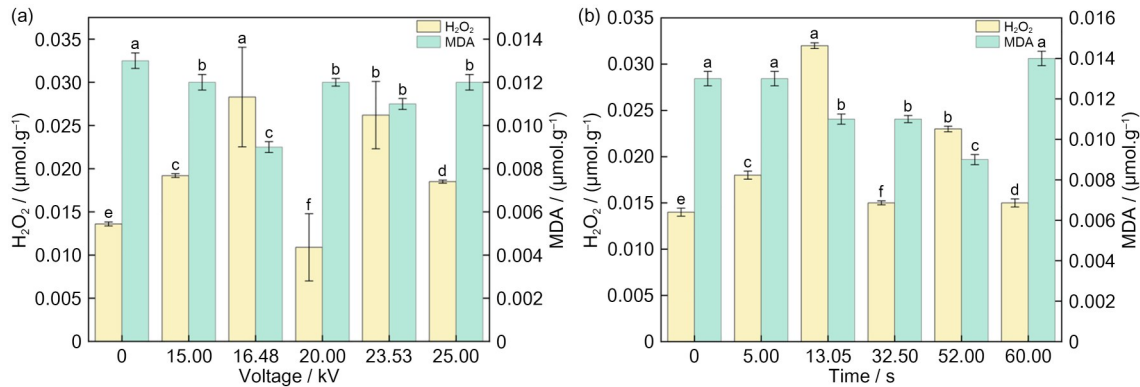


图7 电压、时间对种子H₂O₂和MDA的影响
Fig.7 Effects of voltage and time on seed H₂O₂ and MDA

2.3 等离子体处理对苜蓿种子活力影响的综合评价模型构建

2.3.1 回归模型建立

根据AHP-熵权法所确定的权重(表5), 计算出种子活力综合得分Z值(表6)。响应面模型的方差分析结果(表7)表明处理电压A和处理时间B对综合得分Z的影响结果均达极显著水平($p < 0.001$)。

对于综合得分(Z)与处理时间(A)和处理电压(B)建立回归方程, 如式17所示。

$$Z = -479.5048 + 2.1166A + 57.8472B - 0.0778AB - 0.0141A^2 - 1.5053B^2 \quad (17)$$

回归模型中系数绝对值的大小能够衡量各因素对综合得分所产生的影响效应, 正负号表示各因素对目标函数影响方向^[43-44]。由式(17)可知, 处理时间、处理电压的一次项回归系数分别为2.1166、57.8472, 表明在实验设计范围内, 两因素对苜蓿种子综合发芽实验得分具有正效应, 且

影响次序为处理电压>处理时间。模型 R^2 为0.804, 模型整体拟合效果较好。电压、时间两因素的交互作用系数为-0.0778, 时间、电压平方项系数分别为-0.0141、-1.5053, 对苜蓿种子综合实验指数表现为负交互作用。两因素交互作用的回归影响 p 值显著低于0.01, 表明交互项达到极显著水平。 F 值越大, 因子或交互作用项对响应值的影响越大^[45], 电压(B)对苜蓿种子活力的综合得分影响程度大于时间(A), 因此, 放电电压对苜蓿综合得分影响较为显著。

电压和时间对苜蓿综合发芽实验指数的影响如图8所示, 三维曲面呈现出较陡的凸面状(图8(a)), 这表明处理电压、处理时间两因素对苜蓿综合得分的(Z)影响较大。等高线的疏密程度表示响应值Z变化的快慢, 等高线越密集, 说明Z值在该区域变化越剧烈, 反之, 变化越平缓(图8(b))。基于式(17), 得出的处理时间为24 s, 处理电压为18.60 kV, 综合得分(Z)为83.60。

表6 二元二次正交回归旋转组合设计实验结果
Table 6 Experimental results of binary quadratic orthogonal regression rotation combination design

组别 Group	处理 Treatment		综合得分 Comprehensive core Z
	A / s	B / kV	
CK	—	—	59.600 3
G1	52	23.53	28.090 7

续表

组别 Group	处理 Treatment		综合得分 Comprehensive core
G2	52	16.48	65.271 0
G3	13.05	23.53	52.064 1
G4	13.05	16.48	68.253 5
G5	60	20	58.782 4
G6	5	20	79.209 9
G7	32.5	25	11.581 0
G8	32.5	15	72.098 8
G9	32.5	20	71.784 9
G10	32.5	20	84.582 7
G11	32.5	20	86.036 3
G12	32.5	20	73.177 5
G13	32.5	20	79.840 5

注：Z为种子发芽各指标综合得分。
Note: Z represents the comprehensive score of each indicator for seed germination.

表7 回归模型方差分析表
Table 7 Regression model analysis of variance table

来源 Source	平方和 Sum of squares	自由度 Degrees of freedom	F值 F-value	p 值 p-value
时间 A Time A	5 810.30	4	9.88	<0.000 1**
电压 B Voltage B	32 029.62	4	54.46	<0.000 1**
时间 A ² Time A ²	5 810.30	4	9.88	<0.000 1**
电压 B ² Voltage B ²	32 029.62	4	54.46	<0.000 1**
交互项 A×B Interaction A×B	19 701.99	8	16.75	<0.000 1**
残差 Residual	3 822.87	26		
决定系数 R ²	0.804			

Coefficient of determination R²

注：* 表示差异显著($p<0.05$)，** 表示差异极显著($p<0.01$)。
Note: * indicates a significant difference ($p < 0.05$) and ** indicates an extremely significant difference ($p < 0.01$).

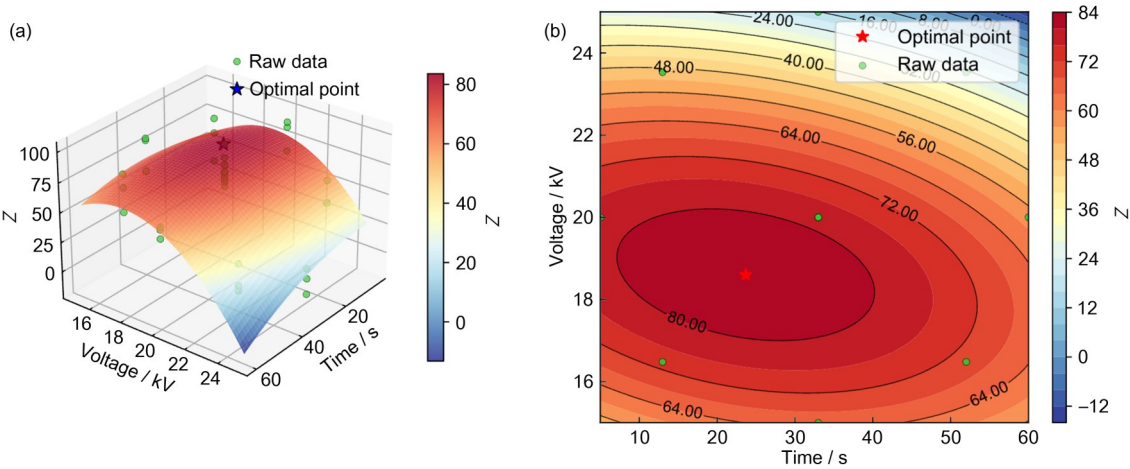


图8 二因素对苜蓿综合发芽实验指数的响应面和等高线图
Fig.8 Response surface and contour map of two factors on comprehensive germination index of alfalfa

2.3 最佳条件验证

2.3.1 验证种子的萌发参数

在预测的最佳条件下，经实验验证（图9），苜蓿种子的 G_r 为 80.00%， G_e 为 76.67%、 G_i 为 14.02， V_i 为 655.05，而对照组的 G_r 和 G_e 为 68.33%， G_i 为 12.67， V_i 为 451.15。与对照组相比，分别增加 11.67%、8.34%、1.35、203.90。该模型预测出的结果与对照组相比差异显著 ($p < 0.05$)，实测值与预测值相符，模型预测结果较好，说明使用 DBD 在合适的处理条件下可以促进种子的萌发。

2.3.2 验证种子的生理特性

如图 10 所示，处理组的吸水率达到 120.48%，相对电导率达到 44.72%，鲜干比为 10.43，苗长为 46.32 mm（图 10(a)）， H_2O_2 和 MDA 的含量分别为 0.024 $\mu\text{mol/g}$ 和 0.012 $\mu\text{mol/g}$ （图 10(b)）。对照组的吸水率为 127.09%，相对电导率为 44.04%，鲜干比为 10.78，苗长为 35.63 mm， H_2O_2 和 MDA 的含量均为 0.014 $\mu\text{mol/g}$ 。与对照组相比，吸水率下降了

6.61%，相对电导率变化不显著，但 MDA 含量下降，说明细胞膜完整性较好； H_2O_2 含量升高说明等离子体诱导了细胞内活性氧的产生，鲜干比降低了 0.35，说明处理组积累了更多的干物质；苗长增加了 10.63 mm，说明等离子体处理促使幼苗长度增加（图 10(c)、(d)）。

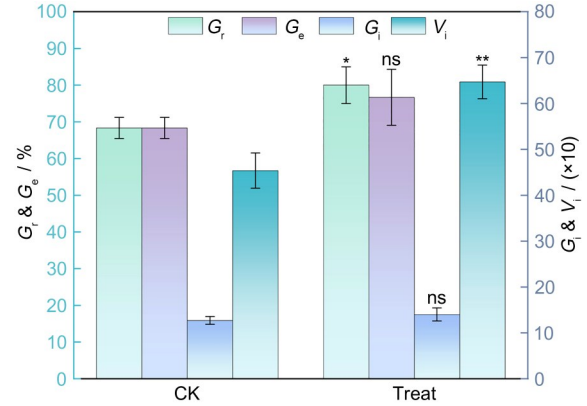


图9 验证实验种子萌发参数
Fig. 9 Validation of experimental seed germination parameters

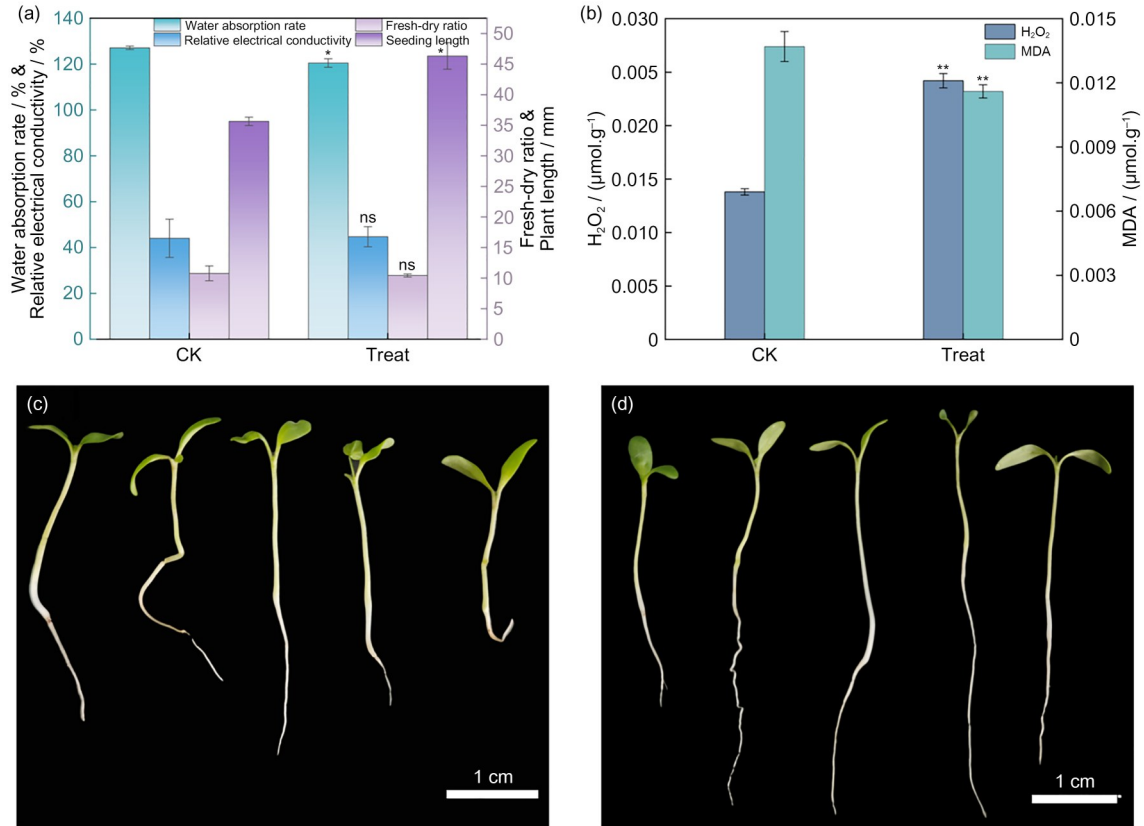


图10 验证实验种子生理特性及幼苗生长指标
(a) 种子吸水率、相对电导率、鲜干比、苗长；(b) DBD 处理前后种子 H_2O_2 、MDA 含量变化；(c) 和 (d) 分别为对照组和处理组的幼苗苗长直观图

Fig. 10 The physiological characteristics of experimental seeds and seedling growth indexes were verified (a) seed water absorption, relative conductivity, fresh-dry ratio, seedling length; (b) changes in the contents of H_2O_2 and MDA in seeds before and after DBD treatment; (c) and (d) are the visual images of seedling length of the control group and the treatment group, respectively

DBD 处理后种皮的表观形貌如图 11 所示, 对照组种皮表面较为光滑, 结构平整致密, 排布着微小的颗粒, 没有明显的裂痕或破损, 种皮较为完整(图 11(a)、(b)), 是由种皮细胞的排列或细胞壁的特定构造所形成, 其有助于维持种子内部环境稳定, 也会影响种子的吸水速率和萌发过程^[46]。经 DBD 处理后的种皮表面变得粗糙, 并有不规则的凹陷、褶皱或裂痕等结构(图 11(c)、(d)), 是由于放电等离子体产生的高能活性粒子对种皮组分进行改性^[47], 种子亲水性增加, 在后续干燥过程中因收缩率差异而形成褶皱和裂缝, 从而提高种皮吸水力^[48], 促进种子萌发^[49]。

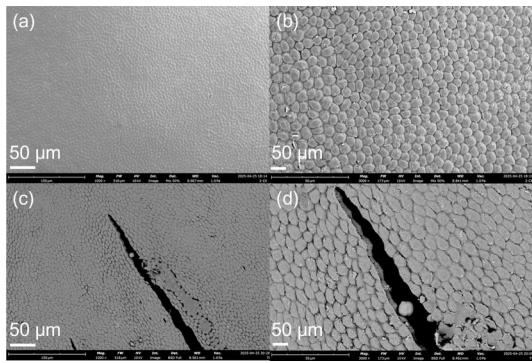


图 11 处理前后种子表面微观形貌
(a)、(b)分别为放大 1 000、3 000 倍对照组的 SEM 图像;(c)、(d)分别为对应处理组的图像

Fig. 11 Micro-morphology of seed surface before and after treatment
(a) and (b) are the SEM images of the control group magnified by 1 000 and 3 000 times, respectively; (c) and (d) are the images of the corresponding treatment groups, respectively

2.3.3 最佳处理条件下综合得分计算与分析

根据最佳处理条件下验证实验的实测值, 得出最终综合得分 Z 为 90.54, 高于模型预测的 Z 值 (83.60), 实测值与预测值进行比较, 相对误差为 7.67%, 模型较为合理, 也表明在处理时间为 24 s, 放电电压为 18.60 kV 的条件下苜蓿种子活力非常强, 说明特定的处理条件可以有效提高种子的综合活力。

4 结论

本文系统探讨了 DBD 对紫花苜蓿种子活力的影响, 并揭示了活性氧调控种子生理效应的剂量依赖性。结果表明, DBD 对种子活力具有显著的调控作用, 在低强度、短时间的处理参数下, 能显著提升种子的发芽率、发芽势、发芽指数、活

力指数及幼苗苗长, 其物理效应使种皮表面变得粗糙皱裂, 增加了种子的吸水透气性。此外, 诱导产生的 ROS (H_2O_2) 激活了种子内部的抗氧化防御系统, 促进了种子萌发。而当处理时间过长或电压过高时, ROS 过度积累, 可能引发膜脂过氧化 (MDA 含量升高) 和膜通透性改变 (相对电导率升高), 造成种子发芽率降低, 幼苗生长受到抑制, 可能引发了膜系统损伤, 抑制了种子活力。

在条件优化方面, 本文基于 AHP-熵权法和二元二次正交回归旋转组合构建了一个综合评估等离子体处理效应的模型, 确定出 DBD 处理苜蓿种子的最佳处理条件: 处理时间 24 s, 处理电压 18.60 kV, 该模型综合得分 (Z) 为 83.60, 对该条件进行实验验证, 所测得的 7 项指标结果均优于实验设计组的结果, 实验综合得分 (Z) 为 90.54, 优于预测值。该模型的构建克服了单一指标评价的局限性, 能够量化处理参数间的交互效应, 为精准优化等离子体种子处理条件提供了可靠的新方法。

本文采用的 DBD 处理技术具有设备简单、处理快速、能耗成本低的特点, 展现出良好的规模化应用潜力。后续研究需验证其对苜蓿营养价值以及田间产量提升的效果, 这将有助于全面评估处理效果、验证技术经济价值, 从而为该项绿色技术在农业生产中的大规模应用提供更全面的理论依据与技术支撑。

作者贡献声明 李莹艳是本研究的实验设计者和执行人, 并负责论文的撰写; 常吉庆参与实验构思与数据分析; 乔艺颖、董露露、柳佳清参与结果分析; 龙海涛参与实验指导; 蒲陆梅是通信作者, 是实验负责人, 主要负责论文方向的定夺、实验的指导、论文的最终修订、审阅及定稿等。所有作者均已阅读并认可该论文最终的所有内容。

参考文献

- 1 罗玉洁, 朱欣, 谢玲玲, 等. 酸胁迫对紫花苜蓿种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2025(11): 125-129. DOI: 10.13881/j.cnki.hljxmsy.2025.02.0067.
LUO Yujie, ZHU Xin, XIE Lingling, *et al.* Acid stress on alfalfa seed germination and seedling growth [J]. Heilongjiang Animal Husbandry and Veterinary Medicine, 2025(11): 125-129. DOI: 10.13881/j.cnki.hljxmsy.2025.02.0067.
- 2 李国文. 紫花苜蓿的利用技术及其畜禽饲喂效果[J]. 现代畜牧科技, 2017(2): 48. DOI: 10.19369/j.cnki. 2095-

- 9737.2017.02.042.
- LI Guowen. Utilization technology of alfalfa and its feeding effect on livestock and poultry [J]. Modern Animal Science and Technology, 2017(2): 48. DOI: 10.19369/j.cnki.2095-9737.2017.02.042.
- 3 杨军, 刘承武, 李霞, 等. 豆科植物-微生物共生固氮研究进展[J]. 植物生理学报, 2023, **59**(8): 1407-1435. DOI: 10.13592/j.cnki.ppj.600005.
- YANG Jun, LIU Chengwu, LI Xia, *et al.* Leguminous plants - microbes symbiotic nitrogen-fixing research progress [J]. Journal of plant physiology, 2023, **59**(8): 1407-1435. DOI: 10.13592/j.carolcarrollnkiPPJ.600005.
- 4 张桂兰, 卢兰娇, 陈树坤. 水稻直播栽培中种子处理技术及栽培管理[J]. 种子科技, 2025, **43**(16): 65-67. DOI: 10.19904/j.cnki.cn14-1160/s.2025.16.022.
- ZHANG Guilán, LU Lanjiao, CHEN Shukun. Seed treatment techniques and cultivation management in direct seeding of rice[J]. Seed Science and Technology, 2025, **43**(16): 65-67. DOI: 10.19904/j.cnki.cn14-1160/s.2025.16.022.
- 5 Pal P, Sehgal H, Joshi M, *et al.* Advances in using non-thermal plasmas for healthier crop production: toward pesticide and chemical fertilizer-free agriculture[J]. Planta, 2025, **261**(5): 109. DOI: 10.1007/s00425-025-04682-5.
- 6 Los A, Ziuzina D, Boehm D, *et al.* Investigation of mechanisms involved in germination enhancement of wheat (*Triticum aestivum*) by cold plasma: effects on seed surface chemistry and characteristics[J]. Plasma Processes and Polymers, 2019, **16**(4): 1800148. DOI: 10.1002/ppap.201800148.
- 7 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. DOI: 10.1016/j.freeradbiomed.2020.06.003.
- 8 Park Y, Oh K S, Oh J, *et al.* The biological effects of surface dielectric barrier discharge on seed germination and plant growth with barley[J]. Plasma Processes and Polymers, 2018, **15**(2): 1600056. DOI: 10.1002/ppap.201600056.
- 9 Abeysingha D N, Dinesh S, Roopesh M S, *et al.* The effect of cold plasma seed treatments on nodulation and plant growth in pea (*Pisum sativum*) and lentil (*Lens culinaris*) [J]. Plasma Processes and Polymers, 2024, **21**(7): 2400015. DOI: 10.1002/ppap.202400015.
- 10 Tounekti T, Mujahid Z, Khemira H. Non-thermal dielectric barrier discharge (DBD) plasma affects germination of coffee and grape seeds[J]. AIP Conference Proceedings, 2018, 1976(1): 020029. DOI: 10.1063/1.5042396.
- 11 Puligundla P, Kim J W, Mok C. Effects of nonthermal plasma treatment on decontamination and sprouting of radish (*Raphanus sativus* L.) seeds[J]. Food and Bioprocess Technology, 2017, **10**(6): 1093-1102. DOI: 10.1007/s11947-017-1886-3.
- 12 徐文倩, 栾欣昱, 李一冰, 等. 电晕放电等离子体辐射对紫花苜蓿种子的影响[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2021, **39**(02): 020401. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2021.rrj.39.020401.
- XU Wenqian, LUAN Xinyu, LI Yibing, *et al.* Effects of corona discharge plasma radiation on alfalfa seeds[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2021, **39**(2): 020401. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2021.rrj.39.020401.
- 13 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. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.202307192.
- 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, 2024, **40**(1): 301-309. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.202307192.
- 14 Starič P, Mravlje J, Mozetič M, *et al.* The influence of glow and afterglow cold plasma treatment on biochemistry, morphology, and physiology of wheat seeds [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2022, **23**(13): 7369. DOI: 10.3390/ijms23137369.
- 15 Iranbakhsh A, Oraghi Ardebili Z, Molaei H, *et al.* Cold plasma up-regulated expressions of WRKY1 transcription factor and genes involved in biosynthesis of cannabinoids in hemp (*Cannabis sativa* L.) [J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2020, **40**(2): 527-537. DOI: 10.1007/s11090-020-10058-2.
- 16 Ali Benabderrahim M, Bettaieb I, Secco V, *et al.* Synergistic effects of non-thermal plasma exposure time and drought on alfalfa (*medicago sativa* L.) germination, growth and biochemical responses[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2026, **27**(1): 330. DOI: 10.3390/ijms27010330.

- 17 Baldanov B B, Semenov A P, Ranzhurov T V. Effect of exposure to nonthermal atmospheric pressure plasma on surface modification of cereal seeds[J]. Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2024, **18**(5): 1276-1280. DOI: 10.1134/S1027451024701131.
- 18 Li Y J, Wang T C, Meng Y R, *et al.* Air atmospheric dielectric barrier discharge plasma induced germination and growth enhancement of wheat seed[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2017, **37**(6): 1621-1634. DOI: 10.1007/s11090-017-9835-5.
- 19 Cao Q Q, Wang J Q, Chen J X, *et al.* Optimization of brewing conditions for Tieguanyin oolong tea by quadratic orthogonal regression design[J]. npj Science of Food, 2022, **6**: 25. DOI: 10.1038/s41538-022-00141-7.
- 20 戴阳, 万良溟, 万京林, 等. 调制脉冲同轴式双介质阻挡放电输出功率计算研究[J]. 集成电路应用, 2020, **37**(11): 4-7. DOI: 10.19339/j.issn.1674-2583.2020.11.002.
DAI Yang, WAN Lianghao, WAN Jinglin, *et al.* Study on output power calculation of modulated pulse coaxial double dielectric barrier discharge [J]. Integrated circuit application, 2020, **37**(11): 4-7. DOI: 10.19339/j.issn.1674-2583.2020.11.002.
- 21 Shi H P, Hidaka N, Okumura T, *et al.* Permeation of reactive oxygen species produced by atmospheric pressure plasma through rice seed coat[J]. Applied Physics Express, 2025, **18**(5): 056001. DOI: 10.35848/1882-0786/add78a.
- 22 徐毓鸿, 龙海涛, 王婷, 等. 接触辉光放电等离子体对紫花苜蓿种子萌发的促进作用及处理工艺[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2022, **40**(3): 030401. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2021-0305.
XU Yuhong, LONG Haitao, WANG Ting, *et al.* The promoting Effect of contact glow discharge plasma and seed treatment methodology on alfalfa seed germination [J]. Journal of Radiation Research and Radiation Technology, 2022, **40**(3): 030401. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2021-0305.
- 23 Liu H, Zhu Y F, Liu X, *et al.* Effect of artificially accelerated aging on the vigor of *Metasequoia glyptostroboides* seeds[J]. Journal of Forestry Research, 2020, **31**(3): 769-779. DOI: 10.1007/s11676-018-0840-1.
- 24 Ji S H, Kim T, Panngom K, *et al.* Assessment of the effects of nitrogen plasma and plasma-generated nitric oxide on early development of *Coriandum sativum*[J]. Plasma Processes and Polymers, 2015, **12**(10): 1164-1173. DOI: 10.1002/ppap.201500021.
- 25 Liu H, Zhang Y H, Yin H, *et al.* Alginate oligosaccharides enhanced *Triticum aestivum* L. tolerance to drought stress[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2013, **62**: 33-40. DOI: 10.1016/j.plaphy.2012.10.012.
- 26 Saaty T L. The analytic hierarchy process[M]. New York: McGraw-Hill, 1980: 1-110.
- 27 Shi H P, Hidaka N, Okumura T, *et al.* Permeation of reactive oxygen species produced by atmospheric pressure plasma through rice seed coat[J]. Applied Physics Express, 2025, **18**(5): 056001. DOI: 10.35848/1882-0786/add78a.
- 28 Dobrynin D, Fridman G, Friedman G, *et al.* Deep penetration into tissues of reactive oxygen species generated in floating-electrode dielectric barrier discharge (FE-DBD): an *in vitro* agarose gel model mimicking an open wound[J]. Plasma Medicine, 2012, **2**(1/2/3): 71-83. DOI: 10.1615/plasmamed.2013006218.
- 29 张雨晗, 朱鸿成, 杜晓霞, 等. 实现微米级灭菌范围控制的微细等离子体射流装置[J]. 光学精密工程, 2022, **30**(3): 296-309. DOI: 10.37188/OPE.20223003.0296.
ZHANG Yuhan, ZHU Hongcheng, DU Xiaoxia, *et al.* Micro plasma jet deviceS FOR micron sterilization range control[J]. Optical and Precision Engineering, 2022, **30**(3): 296-309. DOI: 10.37188/OPE.20223003.0296.
- 30 刘爱杰, 胡华兵, 王荣华, 等. 盐胁迫对不同甜菜种子萌发特性的影响[J]. 中国农学通报, 2024, **40**(21): 20-28. DOI: 10.11924/j.issn.1000-6850.casb2023-0884.
LIU Aijie, HU Huabing, WANG Ronghua, *et al.* Effects of salt stress on germination characteristics of different sugar beet seeds [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2024, **40**(21): 20-28. DOI: 10.11924/j.issn.1000-6850.casb2023-0884.
- 31 Priatama R A, Pervitasari A N, Park S, *et al.* Current advancements in the molecular mechanism of plasma treatment for seed germination and plant growth[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2022, **23**(9): 4609. DOI: 10.3390/ijms23094609.
- 32 权金鹏, 李小鹏, 甘辉林, 等. 甘肃张掖灌溉农业区43个紫花苜蓿品种的适应性[J]. 草业科学, 2023, **40**(7): 1888-1901. DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0893.
QUNA Jinpeng, LI Xiaopeng, GAN Huilin, *et al.* Adaptability of 43 *Medicago alfalfa* varieties in the irrigated agricultural area of Zhangye, Gansu Province [J]. Pratacultural Science, 2023, **40**(7): 1888-1901. DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0893.

- 33 Paatre Shashikanthalu S, Ramireddy L, Radhakrishnan M. Stimulation of the germination and seedling growth of *Cuminum cyminum* L. seeds by cold plasma[J]. Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants, 2020, **18**: 100259. DOI: 10.1016/j.jarmap.2020.100259.
- 34 Karmakar S, Billah M, Hasan M, *et al.* Impact of LFGD ($\text{Ar}+\text{O}_2$) plasma on seed surface, germination, plant growth, productivity and nutritional composition of maize (*Zea mays* L.) [J]. Heliyon, 2021, **7**(3): e06458. DOI: 10.1016/j.heliyon.2021.e06458.
- 35 袁玉涛, 吴莉, 魏小星, 等. 河西走廊半干旱区 12 个紫花苜蓿品种生产性能及品质评价[J/OL]. 草地学报, 1-11 [2025-05-24]. DOI: 10.11733/j. issn. 1007-0435.2025.09.032.
- YUAN Yutao, WU Li, WEI Xiaoxing, *et al.* Production Performance and Quality Evaluation of 12 Alfalfa Varieties in the Semi-Arid Area of Hexi Corridor [J/OL] Acta Grassland Sinica, 1-11[2025-05-24]. DOI: 10.11733/j.issn.1007-0435.2025.09.032.
- 36 沈超, 王莹, 张倩云, 等. 二乔玉兰种子萌发过程中胚乳储藏物质与酶活性的动态变化[J]. 林业科技开发, 2014, **28**(2): 55-58. DOI: 10.13360/j. issn. 1000-8101.2014.02.014.
- SHEN Chao, WANG Ying, ZHANG Qianyun, *et al.* Dynamic Changes of Endosperm Storage Substances and Enzyme Activities during the Germination Process of *Magnolia grandiflora* Seeds [J] Forestry Science and Technology Development, 2014, **28**(2): 55-58. DOI: 10.13360/j.issn.1000-8101.2014.02.014.
- 37 Mildaziene V, Ivankov A, Sera B, *et al.* Biochemical and physiological plant processes affected by seed treatment with non-thermal plasma[J]. Plants, 2022, **11**(7): 856. DOI: 10.3390/plants11070856.
- 38 Ma Q J, Song Z Q, Hu W H, *et al.* Effects of discharge plasma on seed germination and volatile compounds content of *agropyron mongolicum*[J]. Free Radical Biology and Medicine, 2024, **222**: 467-477. DOI: 10.1016/j.freeradbiomed.2024.07.001.
- 39 Potluri S, Sangeetha K, Santhosh R, *et al.* Effect of low-pressure plasma on bamboo rice and its flour[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2018, **42**(12): e13846. DOI: 10.1111/jfpp.13846.
- 40 Sweeney D C, Weaver J C, Davalos R V. Characterization of cell membrane permeability *in vitro* part I: transport behavior induced by single-pulse electric fields[J]. Technology in Cancer Research & Treatment, 2018, **17**: 1533033818792491. DOI: 10.1177/1533033818792491.
- 41 Ghodsimaab S P, Makarian H, Ghasimi Hagh Z, *et al.* Scanning electron microscopy, biochemical and enzymatic studies to evaluate hydro-priming and cold plasma treatment effects on the germination of *salvia leriifolia* benth seeds[J]. Frontiers in Plant Science, 2023, **13**: 1035296. DOI: 10.3389/fpls.2022.1035296.
- 42 马玉婷, 米敏, 白梅梅, 等. 冷等离子体处理对紫花苜蓿种子萌发和幼苗 MDA 含量的影响[J]. 安徽农业科学, 2020, **48**(08): 1-5. DOI: 10.3969/j. issn. 0517-6611.2020.08.001.
- MA Yuting, MI Min, BAI Meimei, *et al.* Effects of cold plasma treatment on seed germination and seedling MDA content of alfalfa[J]. Anhui Agricultural Sciences, 2020, **48**(08): 1-5. DOI: 10.3969 / j.issn.0517-6611.2020.08.00.
- 43 胡建芳, 陈建中, 王玉国, 等. 优化高压电场处理提高高粱种子活力[J]. 农业工程学报, 2015, **31**(12): 253-259. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.12.034.
- HU Jianfang, CHEN Jianzhong, WANG Yuguo, *et al.* Improving the viability of sorghum seeds by optimizing high-voltage electric field treatment [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, **31**(12): 253-259. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.12.034.
- 44 王德成, 黄晨, 尤泳, 等. 基于等离子体处理的苜蓿种子活力综合评价[J]. 农业工程学报, 2024, **40**(22): 234-242. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.202407088.
- WANG Decheng, HUANG Chen, YOU Yong, *et al.* Comprehensive evaluation of Alfalfa seed viability based on plasma treatment [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, **40**(22): 234-242. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.202407088.
- 45 Wu Y, Cheng J H, Keener K M, *et al.* Inhibitory effects of dielectric barrier discharge cold plasma on pathogenic enzymes and anthracnose for mango postharvest preservation[J]. Postharvest Biology and Technology, 2023, **196**: 112181. DOI: 10.1016/j. postharvbio. 2022.112181.
- 46 El Shaer M, El Welily H, Zaki A, *et al.* Germination of wheat seeds exposed to cold atmospheric plasma in dry and wet plasma-activated water and mist[J]. Plasma Medicine, 2020, **10**(1): 1-13. DOI: 10.1615/plasmamed.2020033660.
- 47 Rongsangchaicharean T, Srisophon 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. DOI: 10.1007/s11090-022-10261-3.
- 48 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. DOI: 10.1016/j.sajb.2021.06.025.
- 49 Alves C, de Oliveira Vitoriano J, da Silva D L S, *et al.* Water uptake mechanism and germination of Erythrina velutina seeds treated with atmospheric plasma[J]. Scientific Reports, 2016, **6**: 33722. DOI: 10.1038/srep33722.