

极低频高压脉冲电场对萌发绿豆 干旱伤害的缓解作用

高 宇¹, 习 岗¹, 杨运经², 刘 锴¹

(1. 西安理工大学应用物理系, 陕西 西安 710048; 2. 西北农林科技大学应用物理系, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 采用峰值场强为 $100 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ 、脉宽 80 ms 、脉冲频率为 1 Hz 的极低频高压脉冲电场 (ELF-PEF) 处理 -0.1 MPa 的 PEG-6000 溶液中萌发的绿豆种子, 研究了绿豆在萌发过程中鲜重、自发发光、延迟发光、丙二醛 (MDA) 含量和超氧化物歧化酶 (SOD) 活性的变化。结果表明, ELF-PEF 对 PEG 胁迫下萌发的绿豆鲜重、自发发光和延迟发光积分强度促进作用分别达到了 28.58% 、 78.35% 和 40.6% , 说明 ELF-PEF 可以有效促进绿豆种子萌发过程中的生理代谢, 缓解干旱胁迫对细胞的伤害作用。ELF-PEF 通过提高 PEG 胁迫下萌发绿豆中 SOD 活性, 降低 MDA 含量, 缓解干旱胁迫对萌发绿豆的氧化损伤, ELF-PEF 对细胞毛细吸水和代谢吸水的促进可能是其缓解干旱伤害的原因。

关键词: 极低频高压脉冲电场; 萌发绿豆; 自发发光; 延迟发光; 丙二醛; 超氧化物歧化酶

中图分类号: S522.031; S125 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2014)06-0082-05

Alleviating effect of extremely low frequency high-voltage pulsed electric field on drought damage of germinating mung beans

GAO Yu¹, XI Gang¹, YANG Yun-jing², LIU Kai¹

(1. Department of Applied Physics, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

2. Department of Applied Physics, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Mung beans soaked in -0.1 MPa PEG solution were treated by extremely low frequency pulsed electric field (ELF-PEF) with peak electric field strength of $100 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$, pulse width of 80 ms , and pulse frequency of 1 Hz . Traits like fresh weight, spontaneous luminescence, delayed luminescence, malondialdehyde (MDA) and superoxide dismutase (SOD) activity during mung beans germination were investigated. The fresh weight, spontaneous luminescence and delayed luminescence integral intensity in germinating mung beans were 28.58% , 78.35% and 40.6% , respectively under PEG stress, indicating that ELF-PEF can accelerate the physiological metabolism and alleviate cells injury under drought stress. Although with increased SOD activity and simultaneously reducing MDA content, the oxidation damage caused by drought stress was alleviated by ELF-PEF in germinating mung beans. The promoting effect of ELF-PEF on capillary water absorption and metabolism water absorption in cells may be the cause of alleviating drought injury.

Keywords: extremely low frequency high-voltage pulsed electric field; germinating mung beans; spontaneous luminescence; delayed luminescence; malondialdehyde; superoxide dismutase

在节水农业中, 应用各种物理技术提高作物抗旱性是一个重要的研究方向^[1]。其中, 有关高压静电场 (HVEF) 的研究较多。高压静电场处理有利于提前启动与种子萌发有关的生理生化过程, 刺激生理活性物质和酶的产生, 从而促进种子萌发和生长^[2-6]。进一步研究证明高压静电场处理能够显著提高种子在干旱胁迫下的发芽率、发芽指数和活力

指数, 增加萌发种子和幼苗叶片中的 SOD、POD 和 CAT 的活性, 减缓膜不饱和脂肪酸的下降程度和丙二醛 (MDA) 含量、酸性磷酸酯酶活性的增加幅度, 说明电场处理种子可以减轻发育过程中细胞膜对干旱胁迫的敏感性, 降低干旱诱导的细胞膜脂过氧化和磷脂脱酯化作用, 进而维持干旱胁迫下细胞膜的稳定性和完整性, 提高种子对干旱的适应能力^[7-10]。

收稿日期: 2014-04-11

基金项目: 国家自然科学基金 (50977079, 51277151)

作者简介: 高 宇 (1989—), 女, 陕西延安人, 硕士, 研究方向为生物光子学。E-mail: gygao89@163.com。

* 通信作者: 习 岗 (1957—), 男, 陕西杨凌人, 教授, 主要研究方向为生物电磁学与生物光学。E-mail: xig@xaut.edu.cn。

脉冲电场(PEF)具有快速的上升前沿,除了其对具有双电层的生物细胞膜具有很强的冲击作用以外,还能在细胞内产生感生电流影响细胞活动,通过诱导电荷与偶极子的平移和旋转运动,改变化学反应速率、分子之间的化学键联与蛋白质分子形状和结构等,直接或间接影响生物系统^[11]。更为重要的是,在一定剂量的外加脉冲电场作用下,当细胞膜两侧所承受的跨膜电压超过其绝缘强度时,细胞膜会出现可逆电穿孔,从而使细胞通透性发生改变^[12]。因此,脉冲电场对生物的影响比静电场和一般的变化电场要复杂和剧烈得多,其生物学效应更为显著。然而,应用 PEF 技术提高作物种子抗旱性的研究未见报道。

极低频脉冲电场(ELF-PEF)是指频率为 0~300 Hz 的脉冲电场。植物的电位波动能够影响呼吸代谢、光合作用、水分吸收和气孔导度变化等核心生理过程^[13-14],而植物电位波动的本征频率在 10 Hz 以下^[15-16],采用频率与之相近的 10 Hz 以下的 ELF-PEF,通过电位耦合共振能够显著促进植物种子的萌发和生长^[17-18],因此,ELF-PEF 对作物种子抗旱性的影响很值得关注。

绿豆是我国北方的主要农作物之一^[19-20],同时,绿豆发芽迅速,易于培养,是研究种子抗旱性的理想材料。本研究以绿豆为材料,探讨了 ELF-PEF 对绿豆萌发期抗旱性的影响,为研究一种可以有效提高种子抗旱性的生物电磁新技术奠定基础。

1 材料与方法

1.1 材料培养与干旱处理

供试材料为市售绿豆种子中绿 2 号。选取大小、外观一致的饱满种子,用蒸馏水洗涤,0.2% Hg-Cl₂ 消毒、清洗后,均匀放置在铺有两层滤纸的培养皿中,加入适量蒸馏水在 25℃ 环境下恒温避光培养 10 h,然后更换渗透势为 -0.1 MPa 的 PEG-6000 溶液萌发。

1.2 ELF-PEF 处理

ELF-PEF 处理系统为自制系统,该系统可输出幅值在 6~20 kV 范围内连续可调、输出频率在 0.1~15 Hz 的极低频高压脉冲,系统设计原理和输出波形见文献^[21]。系统样品室中内置 2 个 60 cm×60 cm 的平行放置的铜板作为电极,处理时将放有绿豆种子的培养皿置于两个极板中间位置以避免电场边缘效应。参照文献^[17-18]的结果,ELF-PEF 的场强设置为 100 kV·m⁻¹,脉宽 80 ms,脉冲频率为 1 Hz,场强方向竖直向下。从更换 -0.1 MPa 的

PEG-6000 溶液开始每天用 ELF-PEF 处理萌发种子 12 h。同时,另取相同种子作为对照组,除不经过脉冲电场处理外,一切条件均相同。实验中,处理组 and 对照组各设 3 个重复。在开始 ELF-PEF 处理后每隔 24 h 进行各种指标的测量。

1.3 萌发种子鲜重的测量

每隔 24 h 分别均匀选取对照组与处理组的萌发绿豆各 3 组,每组种子 10 粒,用滤纸吸干绿豆表面液体,放入电子天平称量质量,取平均值。

1.4 自发发光的测定

自发发光的测量采用 BPCL 微弱发光测量仪(中国科学院生物物理研究所研制)。测量前将仪器预热 1 h,使系统本底稳定,并且每个样品测量前先用无水乙醇擦洗样品杯,作杀菌处理以避免细菌发光对试验造成影响。每次测量时间为 60 s,采集数据的时间间隔设置为 1 s,工作电压 -1000 V,暗室测量的环境温度设为 25℃。测量时分别选取处理组和对照组的绿豆各 3 组,每组 10 粒,用滤纸吸干表面液体测其质量后放入测量仪样品室暗室处理 5 min,测定样品的自发发光。每次测量前测定 1 次本底,并减去本底。

1.5 延迟发光的测定

与自发发光的测量相比,生物系统延迟发光的测量需要外界光的激发,本文采用蓝色 LED 为激发光源,测量仪器组成和测量方法见文献^[22]。测量时分别选取处理组和对照组的绿豆各 3 组,每组 10 粒,用滤纸吸干表面溶液,用 LED 辐照 30 s 后开始测量样品的延迟发光,设置测量时间为 60 s,采集数据间隔为 1 s,工作电压为 -1000 V,样品室温度保持 25℃,测量前后各测 1 次本底,并减去本底。每组样品重复 3 次,取平均。测量前仪器预热 1 h,使本底稳定。将每次测量得到的种子延迟发光曲线按照式(1)拟合^[23]:

$$I(t) = I_{SL} + \frac{I(0)}{\left(1 + \frac{t}{\tau}\right)^{\beta}} \tag{1}$$

其中, t 为测量时间(s), $I(0)$ 为初始光子数(counts/s), τ 和 β 为拟合常数, I_{SL} 为自发发光。延迟发光积分强度(即延迟发光曲线下的面积)由式(2)计算:

$$I(T) = I_{SL}T + \frac{\tau I(0)}{\beta - 1} \left[1 - \frac{1}{\left(1 + T/\tau\right)^{\beta-1}} \right] \tag{2}$$

其中, T 为测量周期。

1.6 MDA 含量测定

在种子萌发过程中,每隔 24 h 分别从对照和处理中取 3 组萌发绿豆,每组 1 g,加入 10 ml 预冷的

10%的三氯乙酸,冰浴中研磨成匀浆,在转速 4 000 r·min⁻¹下离心 10 min。取上清液 2 ml(空白对照组加入 2 ml 蒸馏水),加入 0.67%的硫代巴比妥酸 2 ml,于沸水浴中加热 20 min,迅速冷却,再以 3 000 r·min⁻¹离心 15 min,第二次上清液即为提取液。采用双组分分光光度计法测量 MDA 含量^[24],其单位用 μmol·g⁻¹表示。

1.7 超氧化物歧化酶(SOD)活性测定

采用氮蓝四唑(NBT)光氧化法测定绿豆种子萌发过程中超氧化物歧化酶(SOD)活性,以抑制 NBT 50%为一个 SOD 酶活性单位(U)^[25]。SOD 活性以酶活力单位每克鲜重表示(U·g⁻¹)。

1.8 数据处理

应用 SPSS 软件进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 ELF-PEF 对 PEG 胁迫下萌发绿豆鲜重的影响

图 1 为 ELF-PEF 处理和对照组绿豆在 -0.1 MPaPEG-6000 溶液中萌发过程中鲜重(去皮)变化。从图 1 可以看出,随着萌发天数的增加,经过 ELF-PEF 处理的萌发绿豆与对照鲜重均呈增加趋势,但是在萌发过程中处理组萌发的鲜重要高于对照组,在萌发 106 h 时相对增长率达到了 28.58% ($P < 0.01$),显示出 ELF-PEF 对在 PEG 胁迫下的绿豆种子萌发具有明显的促进作用。

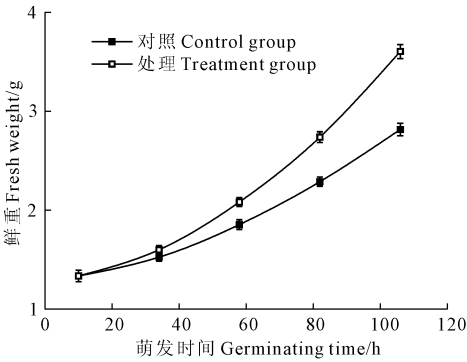


图 1 绿豆萌发过程中鲜重的变化

Fig.1 Fresh weight of mung beans during germination

2.2 ELF-PEF 对 PEG 胁迫下萌发绿豆自发发光的影响

在种子萌发过程中,随着种子的吸胀过程,贮藏物质逐渐被分解和利用,呼吸代谢和各种酶活性不断增强,核酸开始合成。由于种子萌发过程中发生的呼吸代谢、DNA 合成和各种氧化反应都是自发发光的来源^[26],因此,在萌发过程中种子的自发发光强度可以反映种子细胞生理代谢强度的信息,通过

对萌发种子自发发光强度的测量可以获知种子内生理代谢的变化情况。图 2 中随着萌发时间的延长,萌发绿豆的自发发光逐渐增长,表明萌发绿豆的生理代谢逐渐增强。从 34 h 开始,处理组的自发发光逐渐高于对照,此后一直保持较高水平。在 106 h 时,相对增长率达 78.35% ($P < 0.01$)。由此看来,ELF-PEF 对干旱胁迫下萌发绿豆的生理代谢有很大的促进作用,ELF-PEF 对生理代谢的促进是图 1 中处理组和对照组鲜重产生差异的原因。

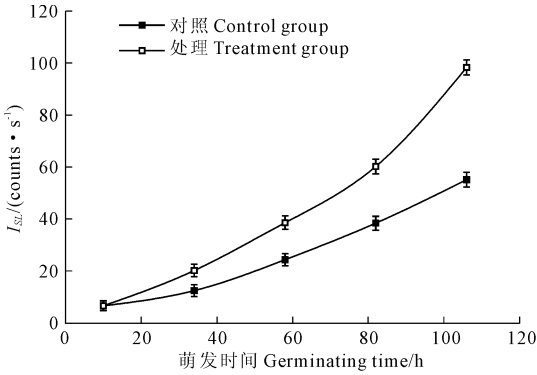


图 2 萌发过程中绿豆自发发光的变化

Fig.2 Spontaneous luminescence of mung beans during germination

2.3 ELF-PEF 对 PEG 胁迫下萌发绿豆延迟发光的影响

生物延迟发光是生物细胞在外来光激发下所产生的持续发光现象。在外界光照射下细胞中各种分子被激发,这些被激发的分子之间存在相互作用而使其从激发态跃迁至基态时的时间各不相同,导致发光不同于荧光而要持续较长时间,呈现出随时间衰减的弛豫过程。生物延迟发光的弛豫过程与集体生物分子之间的相干非线性相互作用有关^[27]。如果细胞受到伤害,分子之间的关联被破坏,将导致延迟发光迅速衰减而使延迟发光曲线下的面积(称延迟发光积分强度)减小。因此,通过对生物延迟发光的分析可以获取细胞是否受到伤害的信息。由于在干旱胁迫下过量的自由基会直接攻击细胞膜脂和含巯基的蛋白质,引起细胞膜组分的降解和某些酶功能的丧失,导致细胞膜损伤、氧化磷酸化解偶联、呼吸速率下降和 ATP 生成减少,延迟发光迅速衰减。因此,干旱胁迫下种子延迟发光的变化实际上传递了细胞结构与功能的有序性和细胞受到伤害的信息,通过对萌发种子延迟发光变化的分析,可以从细胞系统的角度将种子受到的伤害程度定量反映出来^[28]。在干旱胁迫下的萌发过程中绿豆种子的延迟发光如图 3(对照组)和图 4(处理组)所示。

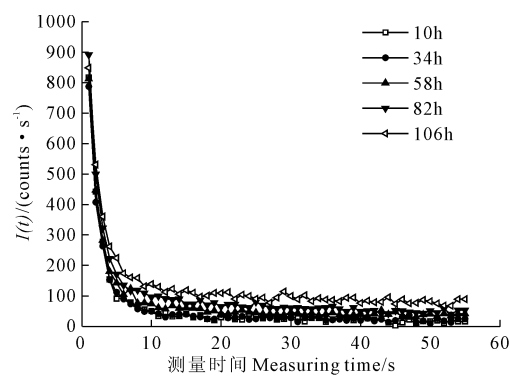


图 3 干旱胁迫下萌发绿豆延迟发光的变化

Fig.3 Delayed luminescence of germinating mung beans under drought stress

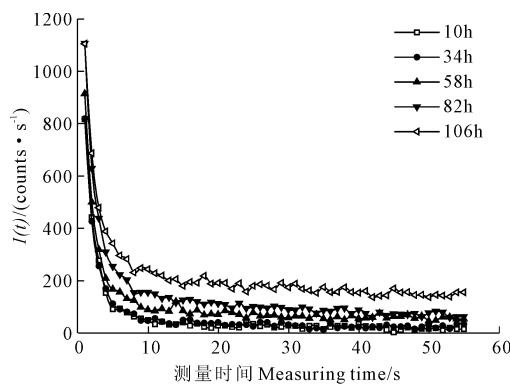


图 4 ELF-PEF 作用下萌发绿豆延迟发光的变化

Fig.4 Delayed luminescence of germinating mung beans treated by ELF-PEF

将图 3 和图 4 中各曲线按照式(1)拟合,获得各拟合参数后,再带入式(2)得到图 3 和图 4 中各延迟发光积分强度,结果示于图 5。由图 5 可见,随着萌发时间的延长,对照组和处理组萌发绿豆的延迟发光积分强度都呈现出逐渐增长的趋势,但是,处理组比对照组要高,在 106 h 时相对增长率达到 40.6%,差异具统计学意义($P < 0.01$)。这种萌发种子延迟发光积分强度保持在较高水平的结果表明,ELF-PEF 处理明显缓解了干旱胁迫造成的细胞伤害。

2.4 ELF-PEF 对 PEG 胁迫下萌发绿豆 MDA 的影响

MDA 含量的高低常被用作表征细胞因为干旱受到的氧化损伤的程度。图 6 中随着萌发过程的进行,对照组 MDA 含量快速上升,在 58 h 时出现了一个拐点,以后缓慢上升,表明 -0.1 MPa PEG-6000 溶液萌发的绿豆在胁迫初期受到的伤害迅速增大,在 ELF-PEF 作用下 MDA 含量虽然也呈现出上升的趋势,但是其含量和上升的幅度都明显低于对照,表明 ELF-PEF 作用对于干旱引起的细胞氧化损伤有缓解作用。

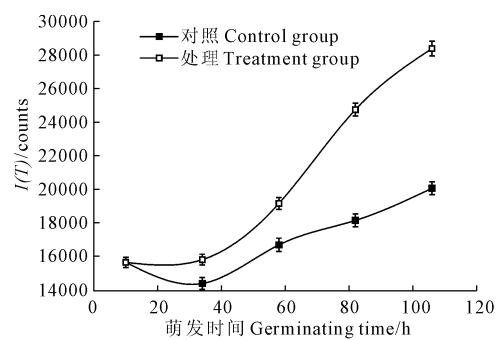


图 5 ELF-PEF 对干旱胁迫下萌发绿豆延迟发光积分强度的影响

Fig.5 Effect of ELF-PEF on delayed luminescence integrated intensity during germination of mung beans under drought stress

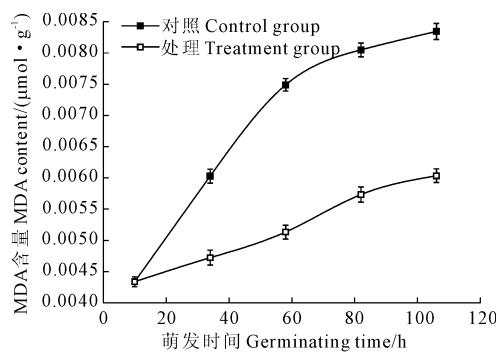


图 6 ELF-PEF 对干旱胁迫下萌发绿豆 MDA 含量的影响

Fig.6 Effect of ELF-PEF on MDA content during germination of mung beans under drought stress

2.5 ELF-PEF 对 PEG 胁迫下萌发绿豆 SOD 的影响

SOD 是植物清除活性氧自由基的保护酶系统中的关键酶。图 7 显示,在干旱胁迫下的绿豆萌发过程中 SOD 活性的变化呈现出先增后减的变化规律。在萌动初期,SOD 活性较低;随着萌发的开始,SOD 活性逐渐提高;在 60 h 后急剧升高,在 80 h 左右 SOD 活性达到峰值,此后逐渐下降。图 7 还显示,在

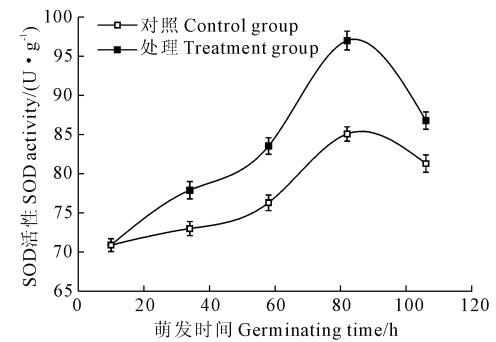


图 7 ELF-PEF 对干旱胁迫下萌发绿豆 SOD 活性的影响

Fig.7 Effect of ELF-PEF on SOD activity of during germination mung beans under drought stress

整个萌发过程中,经过 ELF-PEF 处理的萌发绿豆体内 SOD 活性始终高于对照组,在 80 h 附近,处理组 SOD 活性比对照组升高 14.17%,差异具统计学意义($P < 0.01$)。表明 ELF-PEF 作用通过提高 SOD 活性来降低 MDA 含量,从而减轻干旱对萌发绿豆的伤害。

3 讨 论

高压静电场对萌发种子抗旱性的影响已有诸多研究,但 PEF 对种子抗旱性的研究鲜见报道。本研究采用基于植物细胞电位波动频率的 ELF-PEF 作用于干旱胁迫下的萌发绿豆种子。通过对萌发绿豆鲜重、自发发光、延迟发光的测定表明,ELF-PEF 作用可以有效提高干旱胁迫下绿豆种子的萌发,缓解干旱胁迫造成的细胞代谢强度的下降和细胞伤害。通过对萌发种子 MDA 和 SOD 的分析表明,ELF-PEF 处理通过提高 SOD 活性而减缓由于 MDA 升高造成的细胞伤害。基于植物细胞电位波动的 ELF-PEF 作用能够有效缓解干旱胁迫对萌发绿豆造成的伤害,显示了应用 PEF 处理技术提高作物抗旱性的应用潜力。

那么,ELF-PEF 处理为什么会产生如此作用呢?关于 ELF-PEF 对萌发绿豆 SOD 的作用机理,我们曾经报道了 ELF-PEF 通过加速种子细胞的呼吸作用,诱导超氧阴离子的大量产生而激活种子中的 SOD^[18]。我们的研究还发现,ELF-PEF 处理促进萌发种子呼吸作用的机理在于 ELF-PEF 处理提高了种子吸胀早期的毛细吸水和萌发后期的代谢吸水(结果另报)。有报道指出,在场强为 $\text{kV} \cdot \text{cm}^{-1}$ 级的微秒和毫秒脉冲电场作用下,细胞内外的离子运动并聚集在细胞膜(外膜)两侧,形成跨膜电位,细胞膜的脂质双分子层暂时重新排列形成了一些亲水性微孔,即产生可逆性电穿孔效应^[12]。当外加电场频率小于 10^4 Hz,电场主要作用于外膜。当脉宽大于 10^{-6} s(毫或微秒级),脉冲电场诱导的外膜跨膜电位大于内膜跨膜电位, $0.7 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$ 左右的场强就可使外膜跨膜电位大于穿孔阈值,诱导细胞膜电穿孔^[28]。细胞膜产生电穿孔现象后,其渗透性增强,有利于细胞吸水。因此,在本研究中,当施加频率为 1 Hz、电场强度为 $1 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$ 、脉宽为 80 ms 的 ELF-PEF 刺激萌发绿豆种子时,绿豆细胞膜的脂质双层膜将会由于发生电穿孔而形成亲水性通道,有利于水分和氧气进入细胞,促进细胞的呼吸作用,从而激活 SOD。

除此之外,ELF-PEF 作用通过对细胞膜上的水

通道蛋白(AQP)的激活,促进代谢吸水,进而促进细胞代谢也可能是 ELF-PEF 能够减轻干旱伤害的原因。由于 AQP 的活性受压力、溶质梯度、磷酸化等门控机制的调控^[29-30],ELF-PEF 作用加快储藏蛋白的分解,促进新蛋白的合成^[18],必然导致细胞渗透压的上升,从而激活细胞膜上的 AQP,形成对代谢吸水的促进,进而延缓干旱造成的细胞伤害。

4 结 论

1) 在场强为 $100 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ 、脉宽 80 ms、脉冲频率为 1 Hz 的 ELF-PEF 的作用下,在干旱胁迫中萌发的绿豆种子鲜重、自发发光和延迟发光积分强度都有明显增长,表明 ELF-PEF 处理对萌发绿豆的干旱伤害具有缓解作用。

2) ELF-PEF 处理对在干旱胁迫中萌发的绿豆种子中 SOD 具有激活作用,SOD 活性的升高使细胞中 MDA 含量下降,导致干旱引起的细胞氧化损伤减小。

3) ELF-PEF 作用通过可逆电穿孔效应在细胞膜上形成亲水性通道,促进水分和氧气进入细胞,以及通过激活 AQP 促进细胞的代谢吸水可能是 ELF-PEF 处理对萌发绿豆的干旱伤害具有缓解作用的原因。

参 考 文 献:

- [1] 张新华,李富军.物理方法在提高植物抗逆性中的应用[J].植物生理学通讯,2005,41(6):851-854.
- [2] 包斯琴高娃,杨体强,马占新,等.高压电场对优化小麦种子生长特性的时效性[J].高电压技术,2010,36(2):467-473.
- [3] Dietrich K. Impact of non-thermal processing on plant metabolites[J]. Journal of Food Engineering, 2003,56(2):131-134.
- [4] Cramariuc R, Donescu V, Popa M, et al. The biological effect of the electrical field treatment on the potato seed: agronomic evaluation[J]. Journal of Electrostatics, 2005,63:837-846.
- [5] Daniela I, Dorina C, Alina R. The influence of the electrostatic stress on cell proliferation in plants[J]. Journal of Electrostatics, 2007,65(7):408-413.
- [6] Costanzo E. The influence of an electric field on the growth of soy seedlings[J]. Journal of Electrostatics, 2008,66:417-420.
- [7] 侯建华,杨体强,吕剑刚,等.电场处理油葵种子后对其萌发期抗旱性的影响[J].生物物理学报,2003,19(2):194-197.
- [8] 杨体强,高 雄,侯建华,等.电场处理油葵种子对其萌发期水分胁迫敏感性的影响[J].中国油料作物学报,2005,27(4):45-49.
- [9] 那 日,杨 生,杨体强,等.模拟沙地干旱环境研究电场对两种沙生植物抗旱性的影响[J].中国沙漠,2005,25(1):113-117.
- [10] 那 日,杨 生,黄洪云.电场处理后白沙蒿气孔密度及分布对沙地干旱胁迫的响应[J].干旱地区农业研究,2005,23(4):151-154.

占到农业总产值的 30% ~ 50%,与农区相比有机肥相对较多,加之马铃薯是该区域的传统作物和优势作物,农民种植马铃薯历来具有施用有机肥的习惯。即使在有机肥不充足的情况下,宁可其它作物不施,也要给马铃薯田施有机肥。近年来随着国家农业投资力度的加大,阴山北麓旱区节水灌溉农业迅速发展起来,特别是滴灌和膜下滴灌马铃薯面积迅速增加,因此,滴灌条件下,有机肥配施 NPK 肥效果最好的研究结论不仅对提高马铃薯产量和水分利用效率栽培措施的制定具有重要的指导意义,而且具有生产可行性,值得在生产中大力推广。

参 考 文 献:

[1] 唐小明.有机肥的保水培肥效果及对冬小麦产量的影响[J].水土保持研究,2003,10(1):130-132.
[2] 王贵寅,张兰松,宋加杰,等.有机肥对提高旱地作物利用土壤水分的作用机理研究[J].河北农业科学,2002,6(2):25-28.
[3] 谷 洁,李生秀,高 华,等.有机无机复混肥对旱地作物水分利用效率的影响[J].干旱地区农业研究,2004,22(1):142-145.
[4] 张仁陟,李小刚,胡恒觉.施肥对提高旱地农田水分利用效率的机理[J].植物营养与肥料学报,1999,5(3):221-226.
[5] 李生秀,李世君,高亚清,等.施用氮肥对提高旱地作物利用土壤水分的作用机理和效果[J].干旱地区农业研究,1994,12(1):

38-46.
[6] 梁宗锁,康绍忠.植物水分利用率及其提高途径[J].西北植物学报,1996,16(6):79-84.
[7] 曹 靖,胡恒觉.不同肥料组合对冬小麦水分供需状况的研究[J].应用生态学报,2000,11(5):713-717.
[8] 汪德水.旱地农田肥水协同效应与耦合模式[M].北京:气象出版社,1999:1-49.
[9] 赵立新,荆家海.旱地冬小麦施肥效应研究[J].干旱地区农业研究,1991,(4):46-51.
[10] 王国兴,徐福利,王渭玲,等.氮磷钾及有机肥对马铃薯生长发育和干物质积累的影响[J].干旱地区农业研究,2013,31(3):106-111.
[11] 穆俊祥,曹兴明,弓建国,等.有机肥和氮磷钾肥配施对马铃薯产量和品质的影响[J].石河子大学学报,2009,27(4):428-432.
[12] 张益望,刘文兆,王 俊,等.定位施肥对冬小麦生长、产量及水分利用的影响[J].生态经济,2009,(10):35-39.
[13] 王 怡,高 华.冬小麦陕 229 在旱地不同施肥水平的水分利用效率研究[J].干旱地区农业研究,1999,17(3):35-39.
[14] 陈光荣,郭天文,高世铭,等.水肥对旱区马铃薯水分利用效率的影响[J].核农学报,2010,24(1):142-148.
[15] 王立为,潘志华,高西宁,等.不同施肥水平对旱地马铃薯水分利用效率的影响[J].中国农业大学学报,2012,17(2):54-58.
[16] 苏 秦,贾志宽,韩清芳,等.宁南旱区有机培肥对土壤水分和作物生产力影响的研究[J].植物营养与肥料学报,2009,(6):1466-1469.

(上接第 86 页)

[11] Radu C, Victor D, Mona P, et al. The biological effect of the electrical field treatment on the potato seed: agronomic evaluation[J]. Journal of Electrostatics, 2005,63(6-10):837-846.
[12] Weaver J C. Electroporation of biological membranes from multicellular to nano scales[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2003,10(5):754-768.
[13] Koziolok C, Grams Thorsten E E, Schreiber U, et al. Transient knockout of photosynthesis mediated by electrical signals[J]. New Phytologist, 2003,161(3):715-722.
[14] Fromm J, Lautner S. Electrical signals and their physiological significance in plants[J]. Plant, Cell & Environment. 2007,30(3):249-257.
[15] Zhang Xiaohui, Yu Ningmei, Meng Xiaoli, et al. Power spectrum analysis of maize based on wavelet de-noising[C]. The 2nd international conference on information science and engineering, Changchun, China, 2010:419-422.
[16] Zhang Xiaohui, Yu Ningmei, Xi Gang, et al. Changes in the power spectrum of electrical signals in maize leaf induced by osmotic stress[J]. Chinese Science Bulletin, 2012,57(4):413-420.
[17] 习 岗,刘 锴,杨运经,等.基于玉米电位波动的脉冲电场生物学效应[J].高电压技术,2013,39(1):129-134.
[18] 习 岗,刘 锴,徐永奎,等.极低频脉冲电场与高压静电场对作物种子萌发影响的差异[J].农业工程学报,2013,29(1):265-271.
[19] 张泽燕,张耀文.干旱胁迫下 21 份山西地方绿豆品种芽期抗旱性鉴定[J].植物遗传资源学报,2011,12(6):1010-1013.
[20] 郭中校,张连学,王明海,等.绿豆品种抗旱性早期鉴定方法研究[J].西北农林科技大学学报,2012,40(7):77-83.
[21] 杨运经,习 岗,张社奇,等.极低频高压脉冲电场生物学效应仪的设计与应用[J].农业工程学报,2012,28(2):49-54.
[22] 李少华,习 岗,樊琳琳,等.渗透胁迫下萌发小麦种子超弱光子辐射的变化及其意义[J].光子学报,2011,40(2):282-288.
[23] 习 岗,刘 锴,张晓辉,等.UV-B 诱导的大豆愈伤组织超弱光子辐射的动力学分析[J].光子学报,2010,39(8):1449-1454.
[24] 张玉荣,周显青,张 勇.储藏玉米膜脂过氧化与生理指标的研究[J].中国农业科学,2008,41(10):3410-3414.
[25] 王学奎.植物生理生化实验原理和技术(第二版)[M].北京:高等教育出版社,2006:167-192.
[26] 毛大璋,沈 恂,张月敬,等.代谢抑制剂对萌发绿豆超弱发光的影响[J].生物物理学报,1988,4(2):116-120.
[27] 顾 樵.生物光子学(第二版)[M].北京:科学出版社,2012.
[28] 姚陈果,陈 新,李成祥,等.脉冲电场作用下细胞频率特性仿真及窗口效应[J].生物医学工程学杂志,2011,28(1):12-17.
[29] Ye Q, Wiera B, Steudle E. A cohesion/tension mechanism explains the gating of water channels (aquaporins) in Chara internodes by high concentration[J]. Journal Experimental Botany, 2004,55:449-461.
[30] Susanna T H, Yi W, Kristina H, et al. Structural mechanism of plant aquaporin gating[J]. Nature, 2006,439(9):688-694.