

doi:10.3788/gzxb20154405.0517003

极低频脉冲电场对渗透胁迫下玉米幼苗根系 细胞延迟光子辐射的影响

贺瑞瑞, 习岗, 刘锴, 赵燕燕

(西安理工大学 应用物理系, 西安 710048)

摘 要:为了揭示极低频脉冲电场对作物抗旱性的影响及其机理,采用渗透势为 -0.1 MPa 的 PEG-6000 溶液模拟干旱条件,研究脉冲频率为 1 Hz、场强为 200 kV/m、脉宽为 80 ms 的极低频脉冲电场对干旱胁迫下玉米幼苗根系延迟光子辐射动力学参数的影响.结果表明,在干旱胁迫下,玉米幼苗根系细胞延迟光子辐射动力学参数的初始光子数 I_0 、相干时间 τ 和衰减参数 β 均随着胁迫时间的延长呈现出波动性的下降趋势,经过极低频脉冲电场处理的玉米幼苗根系细胞的初始光子数 I_0 、相干时间 τ 和衰减参数 β 的变化趋势与之类似,但是,各动力学参数的数值均明显高于对照.延迟发光动力学参数的变化暗示极低频脉冲电场处理提高了渗透胁迫下玉米幼苗根系细胞的代谢水平和组织序性,增强了细胞内功能分子之间的相互作用.延迟光子辐射的分析结果为在活体细胞层面阐明极低频脉冲电场对作物抗旱性的影响及其机理提供了参考.

关键词:延迟光子辐射;脉冲电场;渗透胁迫;根系细胞;细胞代谢;组织序性;抗旱性

中图分类号:Q689;S129

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2015)05-0517003-6

Effect of Extremely Low Frequency Pulsed Electric Field on Delayed Biophoton Emission of Cells in Maize Seedling Root under Osmotic Stress

HE Rui-rui, XI Gang, LIU Kai, ZHAO Yan-yan

(Department of Applied Physics, Institute of Science, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Extremely low frequency pulsed electric field could arouse a comparatively intense reaction on physiological characteristics of plant cells, so the effect of the extremely low frequency pulsed electric field on crops drought resistance is very worthy to be studied. The delayed biophoton emission of cells, as a kind of life information, can reflect the changes of cellular physiological state. In order to study the influence of the extremely low frequency pulsed electric field on drought resistance of plants seedlings and its mechanism, the PEG-6000 solution with the osmotic potential of -0.1 MPa was used to simulate drought conditions, the germinating maize was treated by the extremely low frequency pulsed electric field at 100 kV/m, frequency 1 Hz and pulse width 80 ms, the changes of the delayed biophoton emission from maize seedling roots under osmotic stress were discussed. The results show that the changes of the kinetic parameters about delayed biophoton emission such as the initial photon number I_0 , coherence time τ and decay factor β decrease volatility. The changes of the kinetic parameters about delayed biophoton emission of maize seedling root treated by extremely low frequency pulsed electric field are the same, but, the value of these parameter increase significantly in comparison with the control. The analysis indicates that the extremely low frequency pulsed electric field treatment can raise the level of the metabolic level of cell and improve tissue order, the interactions between functional molecules in cells is enhanced. The results of this paper provide a reference for explaining clearly the effect of extremely low frequency pulsed

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 51277151,31471412)和西安理工大学科技创新计划项目(No. 2013CX019)资助

第一作者:贺瑞瑞(1991-),女,硕士研究生,主要研究方向为生物电磁学和生物光子学,Email:heruiruijy@163.com

导师(通讯作者):习岗(1957-),男,教授,主要研究方向为生物电磁学与生物光学,Email:xig@xaut.edu.cn

收稿日期:2014-11-19;录用日期:2015-01-12

<http://www.photon.ac.cn>

electric field on drought resistance of plants seedlings and its mechanism.

Key words: Delayed biophoton emission; Pulsed electric field; Osmotic stress; Root cell; Cell metabolism; Tissue order; Drought resistance

OCIS Codes: 170.0170;170.1420;160.1435

0 引言

现代节水农业的重要研究方向之一是应用各种物理技术提高作物抗旱性^[1],有关研究集中在静电场^[2-6],未见有关极低频脉冲电场的研究报道。

极低频脉冲电场(Extremely Low Frequency Pulsed Electric Field, ELF-PEF)是指频率为0~300 Hz的脉冲电场,由于植物细胞自身电位波动的频率范围在此范围以内^[7],前者与细胞呼吸代谢、光合作用、水分吸收和气孔导度变化等核心生理过程密切相关^[8-9],ELF-PEF易于通过与植物细胞电位的耦合共振,对作物细胞的生理状态产生较为强烈的干扰,因此,ELF-PEF对作物抗旱性的影响很值得研究。

生物延迟光子辐射(delayed biophoton emission)又称延迟发光(delayed luminescence),是生命系统在外界光照停止后出现的持续发光现象,其辐射强度比荧光和磷光要低,弛豫时间比荧光要长^[10-11]。由于生物延迟光子辐射来源于与细胞组织结构性质密切相关的相互协作的分子中电子态的激发和衰变,非常长的衰减过程反映了与空间结构序性相关的分子水平^[12],因此,延迟光子辐射与生物系统的功能状态有关^[13],是细胞生理状态的灵敏指标^[10,14-15]。目前,生物延迟光子辐射分析技术作为一种非侵入性的光学活检技术,已应用于植物系统的功能状态的评价^[4]和对环境变化的检测^[16-18]。

基于生物延迟光子辐射的技术优势,并考虑到在干旱胁迫中作物根系首先受到影响,根系细胞的反应对作物抗旱性意义重大,因此,本文以频率为1 Hz的ELF-PEF处理萌发玉米种子,以PEG-6000溶液对玉米幼苗根系形成生理干旱,研究了玉米幼苗根系细胞延迟光子辐射的变化,通过根系细胞延迟光子辐射的动力学分析,阐述ELF-PEF对玉米幼苗抗旱性的影响。

1 材料与方法

1.1 材料培养

供试材料为偃单8号玉米品种,选取大小、外观一致的饱满玉米种子,用蒸馏水洗涤,0.2% HgCl₂消毒、清洗后,均匀放置在培养皿中,加入适量蒸馏水在25℃恒温环境下浸泡24 h,在30℃恒温箱中催芽48 h,挑选发芽较好的玉米种子平均分成两份分别作为对照组和处理组,每组200粒。每天定时加入定量蒸馏水。

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,输出频率为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[19]。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,处理时将放有玉米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[19]的结果,ELF-PEF的场强设置为200 kV/m,脉宽80 ms,脉冲频率为1 Hz,场强方向竖直向下。将发芽一致的玉米种子平均分成两份分别作为对照组和处理组,每组200粒。将处理组采用上述场强在每天上午11:00连续处理5 d,每天处理30 min。

1.3 渗透胁迫处理

参照文献[20]的方法,去除上述已经萌发5天的对照组和处理组中的蒸馏水,同时加入等量渗透势为-0.1 MPa的PEG-6000溶液,在渗透胁迫后的不同时间取样测量。

1.4 根系自发光子辐射 I_{SL} 的测量

从渗透胁迫开始,每隔1 d(24 h)从处理组和对照组中分别随机选取玉米幼苗3组,每组5株,剪取各组玉米幼苗的根系,用滤纸吸干根系的表面液体,将其放入仪器样品室中暗处理5 min开始测量根系自发光子辐射。测量仪器采用BPCL型微弱发光测量仪(中国科学院生物研究所研制)。测量前将仪器预热1 h,使系统本底稳定,并且用无水乙醇擦拭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为1 s,工作电压为-1100 V,样品室环境温度为25℃。每次测量前均测定1次本底,并减去本底。用 I_{SL} 表示单位时间的自发光子辐射强度,单位为 counts/s。

1.5 根系延迟光子辐射的测量

生物系统延迟光子辐射的测量方法见文献[19]。测量前将仪器预热1 h,使本底稳定。测量时从处理组和对照组中分别随机选取玉米幼苗3组,每组5株,分别剪取玉米幼苗根系,用滤纸吸干玉米根系表面液体后,放入样品室,设置光照时间为30 s,测量时间为60 s,采集数据间隔为1 s,工作电压为-1100V,样品室的温度设置为25℃,每次测量前先测本底,并减去本底。每组重复三次,取平均。

1.6 延迟光子辐射的动力学分析

参照文献[21-22]的方法,并考虑到延迟光子辐射连续地趋向于自发光子辐射^[23],将玉米幼苗根系延迟光子辐射动力学曲线拟合为

$$I(t) = I_{SL} + \frac{I_0}{\left(1 + \frac{t}{\tau}\right)^\beta} \quad (1)$$

式中, t 为测量时间(单位: s), I_0 为初始光子数(单位: counts/s), τ 称相干时间, β 为衰减参数, I_{SL} 为单位时间的自发光子辐射.

2 结果与分析

2.1 ELF-PEF 处理对渗透胁迫下玉米幼苗根系延迟光子辐射动力学曲线的影响

图 1 为渗透胁迫下玉米幼苗根系延迟光子辐射曲线,图 2 为经过 ELF-PEF 处理的玉米幼苗根系延迟光

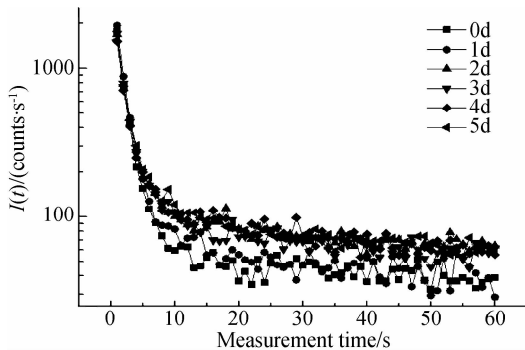


图 1 渗透胁迫下对照组玉米幼苗根系延迟光子辐射的变化
Fig. 1 Changes of the delayed biophoton emission of maize seedling roots about control group under osmotic stress

子辐射曲线. 由图 1 和图 2 可见, 在外界光激发停止后, 玉米幼苗根系细胞的光子辐射随时间呈现出下降的趋势, 其衰减过程涉及到几十秒. 为了阐明图 1 和图 2 中各延迟光子辐射的特征与区别, 将图 1 和图 2 中各曲线按照式(1)拟合, 结果列入表 1 和表 2. 由表 1 和表 2 可见, 各曲线的拟合优度 R^2 均大于 0.99, 表明表 1 和表 2 中各参数 I_0 、 τ 和 β 决定的式(1)均准确刻画了图 1 和图 2 中各延迟光子辐射动力学特征.

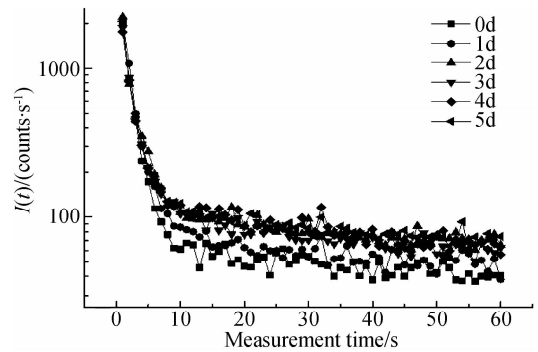


图 2 渗透胁迫下处理组玉米幼苗根系延迟光子辐射的变化
Fig. 2 Changes of the delayed biophoton emission of maize seedling roots about treated group under osmotic stress

表 1 渗透胁迫下玉米幼苗根系细胞延迟光子辐射动力学参数

Table 1 The kinetic parameters of delayed biophoton emission in root cells of maize seedlings under osmotic stress

Osmotic stress time/d	0	1	2	3	4	5
$I_{SL}/\text{counts} \cdot \text{s}^{-1}$	64.14292	78.02993	94.06038	83.90849	95.00106	101.1685
$I_0/\text{counts} \cdot \text{s}^{-1}$	5448.777	6474.114	5414.19	6081.47	5638.086	4547.521
τ/s	2.12199	2.90822	1.958623	1.430503	1.83724	1.2002
β	3.40542	3.21937	2.872263	2.5158	2.73997	2.102867
R^2	0.997583	0.998127	0.995947	0.99638	0.994487	0.99432

表 2 经过 ELF-PEF 处理的玉米幼苗根系细胞延迟光子辐射动力学参数

Table 2 The kinetic parameters of delayed biophoton emission in root cells of maize seedlings treated by ELF-PEF under osmotic stress

Osmotic stress time /d	0	1	2	3	4	5
$I_{SL}/\text{counts} \cdot \text{s}^{-1}$	66.09663	83.70023	100.7656	89.66129	98.7926	104.583
$I_0/\text{counts} \cdot \text{s}^{-1}$	6496.773	7665.022	6251.737	6981.58	6622.703	5660.549
τ/s	2.762267	3.31689	2.543237	1.77065	2.204463	1.61723
β	3.75043	3.57762	3.143653	2.675737	2.943603	2.50795
R^2	0.998383	0.99731	0.99439	0.996407	0.993273	0.99647

2.2 ELF-PEF 处理对渗透胁迫下玉米幼苗根系延迟光子辐射动力学参数的影响

在生物延迟光子辐射动力学过程中, 初始光子数 I_0 、相干时间 τ 和衰减常数 β 是表征延迟光子辐射特征的动力学参数. 为了清楚地显示 ELF-PEF 处理对渗透胁迫下玉米幼苗根系细胞延迟光子辐射动力学过程的影响, 下面根据表 1 和表 2 分析玉米幼苗根系延迟光子辐射动力学参数的变化.

2.2.1 ELF-PEF 处理对初始光子数 I_0 的影响

ELF-PEF 处理对渗透胁迫下玉米幼苗根系延迟

光子辐射动力学参数初始光子数 I_0 的影响如图 3 所示. 由图 3 可见, 在渗透胁迫过程中, 对照组的初始光子数 I_0 呈现出波动性的变化, 在胁迫后 1 d 和 3 d 附近到达峰值, 此后大幅下降. 由于 I_0 与处于激发态的功能分子的数量有关, 在非饱和光激发下, 处于激发态的分子数越多, 初始光子数 I_0 越大, 表明系统中能够处于活性状态的功能分子数越多, 系统潜在的能态水平越高, 代谢能力越强, 因此, I_0 可以作为细胞系统代谢潜力强弱的标志^[18,24]. 基于对 I_0 所隐含的生物学意义的认识, 图 3 显示的 I_0 的动态变化实际上反映了渗透

胁迫下玉米幼苗根系细胞代谢能力的变化是波动的. 在渗透胁迫下根系细胞呼吸代谢会首先被加速, 后者导致光子辐射的增强^[25], 持续的渗透胁迫又会阻碍呼吸电子传递链, 抑制呼吸代谢中糖酵解/三羧酸循环(EMP/TCA), 造成ATP的缺乏, 代谢强度降低, 从而导致 I_0 的减小. 在胁迫3 d后 I_0 又出现峰值的原因可能是细胞对渗透胁迫的适应性反应, 因为在种子萌发过程中, EMP/TCA的抑制会造成磷酸戊糖途径(PPP)的激活^[26-27], 从而刺激代谢强度的再次升高. 在胁迫5 d时 I_0 大幅降低, 则表明细胞受到了不可逆损伤, 细胞代谢被严重抑制.

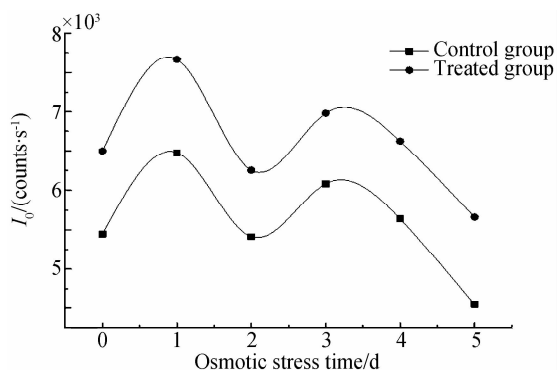


图3 ELF-PEF处理对初始光子数 I_0 的影响

Fig. 3 Effect of ELF-PEF on initial photon number I_0 .

图3还显示, 经过ELF-PEF处理的处理组玉米幼苗根系细胞初始光子数 I_0 与对照相比呈现出同步的变化, 但是其水平整体上比对照组要高. 在渗透胁迫开始(0 d), 经过ELF-PEF处理的玉米根系细胞延迟光子辐射的初始光子数 I_0 即高于未经过ELF-PEF处理的对照组, 相对增长率为19.2%. 在此后的渗透胁迫过程中, 处理组的初始光子数均高于对照, 在渗透胁迫1 d、2 d、3 d、4 d和5 d时, 相对增长率分别为18.4%、15.4%、14.8%、17.4%和24.5%, 说明ELF-PEF处理使渗透胁迫下的玉米幼苗根系细胞的代谢水平有明显的提高.

2.2.2 ELF-PEF处理对相干时间 τ 的影响

在延迟光子辐射动力学分析中, 相干时间 τ 值的大小取决于处于激发态的功能分子之间的偶联程度, 处于激发态的相互偶联的分子数越多, 曲线衰减得越慢, τ 值越大, 非常长的衰减过程反映了与空间结构序性相关的分子水平^[12], 因此, τ 值可以作为反映细胞系统组织结构序性的标志^[18,24]. 图4显示, 在渗透胁迫后的1 d时, 对照组 τ 值迅速增大; 此后, 随着渗透胁迫时间的进行, τ 值逐渐减小, 在4 d时又出现一个小峰, 然后下降. 对这种现象的解释是在渗透胁迫开始后, 根系细胞各种保护酶系统会被激活, 系统序性增强, τ 值增加; 随着胁迫时间的延长, 胁迫形成的过量自由基会攻击细胞膜, 造成细胞结构与功能的损伤, 细胞活性分子

之间的关联被打断, 细胞序性降低. 在4 d时 τ 值出现一个小峰的原因可能源于细胞序性的又一次调整.

对于ELF-PEF处理的影响, 图4显示, 经过ELF-PEF处理的处理组的 τ 值在胁迫开始时就比对照组要大, 相对增长率达到30.1%; 在此后的胁迫过程中, 处理组 τ 值的变化趋势与对照组相同, 但是, 其数值均比对照组要大. 在渗透胁迫1 d、2 d、3 d、4 d和5 d时, 相对增长率分别为14.1%、29.8%、23.8%、20.1%和34.7%. 由此看来, ELF-PEF处理有效提高了渗透胁迫下玉米幼苗根系细胞组织序性.

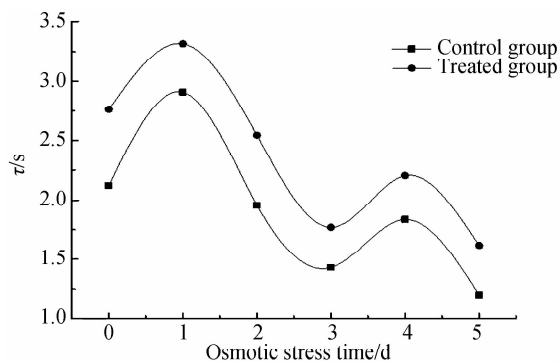


图4 ELF-PEF处理对相干时间 τ 的影响

Fig. 4 Effect of ELF-PEF on coherence time τ

2.2.3 ELF-PEF处理对衰减参数 β 的影响

衰减参数 β 是延迟光子辐射动力学方程中的一个指数因子, 其表征了处于激发态的功能分子之间相互作用的大小^[18,24]. 在图5中, 在渗透胁迫开始时, 对照组 β 值最大; 随着渗透胁迫的进行, β 值逐渐减小, 在胁迫4 d附近出现小峰后迅速下降. 这个现象表明, 在正常状态下, 玉米根系细胞各组分之间的相互作用最强, 渗透胁迫将造成根系细胞各组分相互作用的减弱. ELF-PEF处理的结果使得在渗透胁迫开始时(0 d), 处理组的 β 值就高于对照, 相对增长率达到10.3%, 此后, 处理组的 β 值一直呈现出高于对照的态势, 表明ELF-PEF处理使得渗透胁迫下玉米幼苗根系细胞内各组分相互作用加强了.

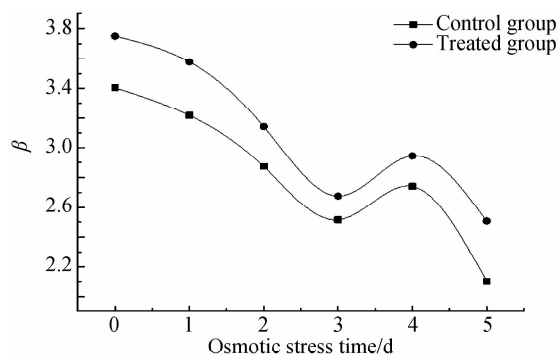


图5 ELF-PEF处理对衰减参数 β 的影响

Fig. 5 Effect of ELF-PEF on decay factor β

3 讨论与分析

考虑到玉米幼苗细胞电位波动功率谱分布的中心频率在 1 Hz 附近,场强为 kV/cm 级的微秒和毫秒脉冲电场易于诱发明显的生物学效应^[7,28],因此,本文主要研究频率为 1 Hz、电场强度为 2 kV/cm、脉宽为 80 ms 的 ELF-PEF 对玉米幼苗抗旱性的影响。

在有关电场生物学效应的研究中,一般都是研究作物苗长、根长、鲜质量、干质量、幼苗存活率等形态指标或者细胞膜透性、丙二醛(MDA)含量、超氧化物歧化酶(SOD)活性、叶绿素含量等生理生化指标的变化^[2-6,29]。前者必须在形态出现变化后才能判断,不能进行早期诊断,也无法揭示其机理;后者则大都来源于破坏性的试管实验,需要将细胞破碎,这种方法必然割裂了细胞各组分之间的相互联系,造成了细胞内各组分、各层次之间相互作用信息的丢失,也无法反映干旱胁迫中作物细胞发生的动态变化,延迟光子辐射分析技术可以避免传统研究方法的弊端。

本文的研究发现,ELF-PEF 处理使得渗透胁迫下玉米幼苗根系细胞延迟光子辐射中的初始光子数 I_0 、相干时间 τ 和衰减参数 β 均有所增加,表明 ELF-PEF 处理提高了渗透胁迫下的玉米幼苗根系细胞的代谢水平和组织序性,细胞内各组分的相互作用也加强了。由此可见,通过对于延迟光子辐射的采集和分析可以较为全面地了解渗透胁迫下玉米幼苗根系活体细胞发生的变化及 ELF-PEF 处理的影响,从而为在细胞层面阐明 ELF-PEF 处理对作物抗旱性的影响及其机理提供了一种快速和灵敏的光学活检新技术。

应该指出,从本文的研究结果来看,ELF-PEF 处理造成的渗透胁迫过程中玉米幼苗根系细胞延迟光子辐射动力学参数的差异在渗透胁迫开始时就已经出现,在渗透胁迫过程中得以保持,说明 ELF-PEF 处理造成的影响源于 ELF-PEF 处理对种子萌发和根系生长的促进。事实上,已有证据表明 1 Hz ELF-PEF 处理对玉米种子的萌发具有较为强烈的促进作用^[28],优势生长的根系细胞对渗透胁迫的抵抗和适应能力自然会有所增强。至于 ELF-PEF 处理促进种子萌发的原因则可能在于 ELF-PEF 处理通过与细胞电位耦合共振的方式在细胞膜表面形成可逆性电穿孔效应^[30],促进细胞毛细吸水和蛋白质代谢,后者会导致细胞渗透压的上升,激活细胞膜上的水通道蛋白(AQP),形成对代谢吸水的促进^[31-32]。

4 结论

ELF-PEF 处理使渗透胁迫下玉米幼苗根系细胞延迟光子辐射动力学初始光子数 I_0 、相干时间 τ 和衰减参数 β 均有所增加,表明 ELF-PEF 处理提高了渗透

胁迫下玉米幼苗根系细胞的代谢水平和组织序性,细胞内功能分子之间的相互作用加强了,原因在于 ELF-PEF 通过与细胞电位的耦合共振促进种子萌发与根系生长。生物延迟光子辐射分析技术为研究活体细胞代谢和功能状态的变化提供了一种快速和灵敏的光学活检新技术,为在细胞层面阐明 ELF-PEF 处理对作物抗旱性的影响及其机理提供了参考。

参考文献

- [1] ZHANG Xin-hua, LI Fu-jun. Application of physical techniques for plant stress resistance[J]. *Plant Physiology Communications*, 2005, **41**(6): 851-854.
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] 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**(6): 837-846.
- [3] 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.
- [4] COSTANZO E. The influence of an electric field on the growth of soy seedlings[J]. *Journal of Electrostatics*, 2008, **66**(7-8): 417-420.
- [5] HOU Jian-hua, YANG Ti-qiang, Lü Jian-gang, et al. Effect of electric treatment of sunflower seeds on the drought resistance in the germination stage [J]. *Acta Biophysica Sinica*, 2003, **19**(2): 194-197.
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.
- [6] NA Ri, YANG Sheng, HUANG Hong-yun. Responses of stomatal density and distribution in leaves of *Artemisia sphaerocephala* krasch to drought stress under electric field treatment [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2005, **23**(4): 151-154.
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.
- [7] ZHANG Xiao-hui, YU Ning-mei, 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.
- [8] KOZIOLEK C, GRAMS T E E, SCHREIBER U, et al. Transient knockout of photosynthesis mediated by electrical signals[J]. *New Phytologist*, 2003, **161**(3): 715-722.
- [9] FROMM J, LAUTNER S. Electrical signals and their physiological significance in plants [J]. *Plant Cell & Environment*, 2007, **30**(3): 249-257.
- [10] KIM H W, SIM S B, KIM C K, et al. Spontaneous photon emission and delayed luminescence of two types of human lung cancer tissues: adenocarcinoma and squamous cell carcinoma[J]. *Cancer Letters*, 2005, **229**(2): 283-289.
- [11] BOKKON I, VIMAL R L P, WANG C, et al. Visible light induced ocular delayed bioluminescence as a possible origin of negative afterimage [J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 2011, **103**(2): 192-199.
- [12] HO M W, MUSUMECI F, SCORDINA A, et al. Delayed luminescence from bovine Achilles' tendon and its dependence on collagen structure [J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 2002, **66**(3): 165-170.
- [13] YAN Y, POPP F A, ROTHE G M. Correlation between

- germination capacity and biophoton emission of barley seeds (*Hordeum vulgare* L.) [J]. *Seed Science and Technology*, 2003, **31**(2): 249-258.
- [14] LANZANO L, SCORDINO A, PRIVITERA S, *et al*. Spectral analysis of delayed luminescence from human skin as a possible non-invasive diagnostic tool [J]. *European Biophysics Journal*, 2007, **36**(7): 823-829.
- [15] GRASS F, KASPER S. Humoral phototransduction; light transportation in the blood and possible biological effects[J]. *Medical Hypotheses*, 2008, **71**(2): 314-317.
- [16] SCORDINO A, MUSUMECI F, GULINO M, *et al*. Delayed luminescence of microalgae as indicator of metal toxicity[J]. *Journal of Physics D-applied Physics*, 2008, **41**(15): 155-507.
- [17] ZHANG Ling-rui, XING Da, WANG Jun-sheng, *et al*. Light-induced delayed fluorescence as an indicator for the effects of salt stress on plant physiology[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(12): 2284-2289.
张玲瑞, 邢达, 王俊生, 等. 利用光诱导延迟荧光的植物盐胁迫生理监测[J]. 光子学报, 2007, **36**(12): 2284-2289.
- [18] XI Gang, LU Hong, LI Shao-hua. Changes of biophoton emission of plant leaf induced by H₂O₂ and its significance [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(12): 3250-3255.
习岗, 卢洪, 李少华. H₂O₂ 诱导的植物叶片光子辐射的变化及意义[J]. 光子学报, 2009, **38**(12): 3250-3255.
- [19] XI Gang, LIU Kai, YANG Yun-jing, *et al*. Effect of extremely low frequency high-voltage pulsed electric field on ultra-weak luminescence of corns during germination [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(6): 705-709.
习岗, 刘锴, 杨运经, 等. 极低频高压脉冲电场对萌发玉米种子超弱发光的影响[J]. 光子学报, 2013, **42**(6): 705-709.
- [20] GAO Yu, XI Gang, LIU Kai, *et al*. Application of spontaneous fluorescence of germinating maize in drought resistance evaluation under water stress[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(2): 132-136.
高宇, 习岗, 刘锴, 等. 水分胁迫下萌发玉米的自发发光在抗旱性评价中的应用[J]. 光子学报, 2014, **43**(2): 132-136.
- [21] PALAZZO G, MALLARDI A, HOCHKOEPLER A, *et al*. Electron transfer kinetics in photosynthetic reaction centers embedded in trehalose glasses: trapping of conformational substates at room temperature[J]. *Biophysical Journal*, 2002, **82**(2): 558-568.
- [22] MUSUMECI F, APPELGATE L A, PRIVITERA G, *et al*. Spectral analysis of laser-induced ultraweak delayed luminescence in cultured normal and tumor cells: Temperature dependence[J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 2005, **79**(2): 93-99.
- [23] XI Gang, LIU Kai, ZHANG Xiao-hui, *et al*. Dynamic analysis of ultra-weak photon radiation of soybean callus induced by UV-B radiation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(8): 1449-1454.
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] 顾樵. 生物光子学(第二版)[M], 北京: 科学出版社, 2012, 30.
- [25] RASTOGI A, POSPISIL P. Effect of exogenous hydrogen peroxide on biophoton emission from radish root cells[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2010, **48**(2-3): 117-123.
- [26] MICHAEL E, MAURINO V, KNAPPE S, *et al*. The plastidic pentose phosphate translocator represents a link between the cytosolic and the plastidic pentose phosphate pathways in plant[J]. *Plant Physiology*, 2002, **128**(2): 512-522.
- [27] HUANG J, ZHANG H S, Wang J F, *et al*. Molecular cloning and characterization of rice 6-phosphogluconate dehydrogenase gene that is up-regulated by salt stress[J]. *Molecular Biology Reports*, 2003, **30**(4): 223-227.
- [28] XI Gang, GAO Yu, LIU Kai, *et al*. Frequency difference of extremely low frequency high voltage pulsed electric field on corns during germination [J]. *High Voltage Engineering*, 2014, **40**(4): 1242-1248.
习岗, 高宇, 刘锴, 等. 极低频高压脉冲电场对玉米种子萌发的频率差异[J]. 高电压技术, 2014, **40**(4): 1242-1248.
- [29] COSTANZO E, GULINO M, LANZANO L, *et al*. Single seed viability checked by delayed luminescence[J]. *European Biophysics Journal with Biophysics Letters*, 2008, **37**(2): 235-238.
- [30] 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.
- [31] 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**(396): 449-461.
- [32] TORMROTH T H, YI W, KRISTINA H, *et al*. Structural mechanism of plant aquaporin gating[J]. *Nature*, 2006, **439**(9): 688-694.