

文章编号:1004-4213(2011)02-0282-7

渗透胁迫下萌发小麦种子超弱光子辐射的变化及意义

李少华¹, 习岗¹, 樊琳琳^{2,3}, 刘锴¹

(1 西安理工大学 应用物理系, 西安 710048)

(2 陕西师范大学 物理学与信息技术学院, 西安 710062)

(3 武警西安指挥学院 数理教研室, 西安 710038)

摘 要:为了将生物超弱光子技术应用于萌发过程中小麦种子的抗旱性评价,采用聚乙二醇处理萌发的小麦种子,跟踪测量了正常和渗透胁迫下小麦种子萌发过程中的超弱光子辐射,得到了小麦种子萌发过程中超弱光子辐射的自发发光和延迟发光信号.通过建立延迟发光动力学方程和数学拟合获得了种子萌发过程中延迟发光初始光强 $I(0)$ 、衰减参量 β 、相干时间 τ 和延迟发光积分强度 $I(T)$,根据延迟发光积分强度和自发发光的生物学意义构建了用于描述细胞状态及其有序性的状态参量和序参量.实验结果发现:小麦种子萌发过程中,自发发光和延迟发光积分强度呈现阶跃式增长,细胞系统的状态参量和序参量也呈现阶跃式的增长,渗透胁迫抑制了这种增长,提示基于光子辐射的细胞系统的状态参量和序参量有可能作为种子抗旱性评价的物理指标.

关键词:超弱光子辐射;渗透胁迫;小麦萌发;序参量

中图分类号:Q632

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20114002.0282

0 引言

生物超弱光子辐射包括自发发光(Spontaneous Luminescence, SL)和外因诱导发光,其中外因诱导发光又称为延迟发光(Delayed Luminescence, DL).近年来的大量研究表明,生物超弱光子辐射与氧化代谢、DNA 合成反应、细胞分裂和死亡以及生长调控等等许多基本生命过程都有极为密切的内在联系^[1-4],并且对生物系统内部的微观变化及外界环境的影响高度敏感,是生物代谢状态极其灵敏的物理指标^[5-7],由此产生了一类生物光子分析技术^[8].该技术的最大优点在于其对环境变化的敏感性,其应用价值在于通过对生物延迟发光信息的提取、分析与识辨,为判断和评价生物细胞对环境胁迫的反应提供无损、快速和灵敏的物理方法.

关于种子萌发过程中光子辐射已有一些研究报告^[9-11],基本上都是对萌发过程中自发发光现象的研究,未见对延迟发光特征的研究.对主要农作物进行抗旱性鉴定、评价、筛选和培育抗旱、优质、高产的

作物品种是节水农业研究的重点^[12].然而,在作物的各种抗逆性中,抗旱性最难确定^[13-16].虽然几十年来,国内外研究者在作物抗旱种质的筛选鉴定方面做了大量工作,从不同角度提出了许多鉴定方法和评价指标,但是,至今没有形成一套准确、可靠、简单和公认的鉴定方法和指标体系^[17].

由于作物的抗旱性是由多基因控制的、在细胞层面上体现的综合性状,对其抗旱性的评价必须研究干旱胁迫下细胞的整体行为,而光学技术具有无损、高特异性、高灵敏、高空间分辨、高时间分辨和实时动态等优势,成为研究活细胞生命现象的主流研究方法,这一方法的引入使得研究活体细胞的行为成为可能^[18],其中生物超弱光子辐射有可能在生命系统状态的表达和植物抗逆性研究中扮演重要角色^[8,19].鉴于此,本文研究了小麦种子萌发过程中超弱光子辐射特征及其在渗透胁迫下的变化,探讨利用生物超弱光子辐射特征对细胞状态进行定量分析的方法,为将生物光子技术应用于作物种质的抗旱性评价打下基础.

基金项目:国家自然科学基金(No. 50977079)和陕西省教育厅专项科研计划(No. 09JK667)资助

第一作者:李少华(1979-),男,硕士研究生,主要研究方向为生物光子学. Email: yuzhouzhiniao@sina.com

导师(通讯作者):习岗(1957-),男,教授,主要研究方向为光生物和光物理. Email: xigangchao@gmail.com

收稿日期:2010-08-11; **修回日期:**2010-10-09

1 材料和方法

1.1 材料与处理方法

材料为陕农 26 号小麦种子(由西北农林科技大学农学院提供). 选取籽粒饱满的种子,用 0.2% 的 HgCl_2 消毒 2 min,然后用蒸馏水冲洗两次,放入大小适中的培养皿中,加适量蒸馏水,放入 35 °C 恒温箱中培养 12 h. 选取露白的种子三百粒,均匀放入 6 个直径为 90 mm 的培养皿中,各培养皿中加入直径 90 mm 中速滤纸,其中三个培养皿加入渗透势为 -0.25 MPa 的 PEG-6000 溶液,另外三个为对照组,加蒸馏水,30 °C 下避光培养. 每天早晚九点各加一次培养液,保持滤纸湿润,对照组加等量蒸馏水. 在种子萌发过程中,每隔 24 h 测量种子自发发光和延迟发光.

1.2 超弱光子辐射的测量

1.2.1 自发发光的测量

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),测量时每次取出种子十粒,用滤纸吸干表面溶液,而后暗处理 5 min,放入样品室,测定自发发光. 每次测量 40 s,采集数据间隔为 1 s,工作电压 -1000 V ,样品室温度保持 25 °C,测量前后各测 1 次本底,并减去本底,每组样品重复三次,取平均. 测量仪预热 1 h,使本底稳定. 用单位时间的光子数表示自发发光强度(counts/s).

1.2.2 延迟发光的测量

延迟发光的测量采用自制的测量系统,主要由激发光源、温度控制模块、快门驱动模块、光探测器、光源驱动模块、数据采集与处理模块、暗室和计算机等组成,其结构如图 1.

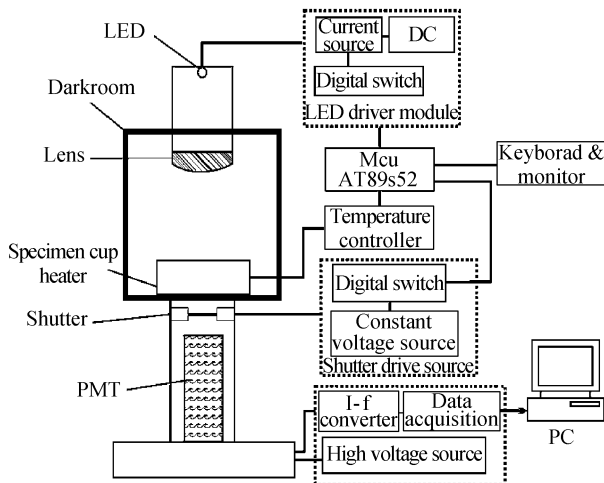


图 1 延迟发光检测系统原理

Fig. 1 Diagram of delayed luminescence detection system

测量系统的光源采用波长为 467 nm 的单只大功率蓝色 LED. 光源发出的光经过透镜均匀照射到样品上,中控模块的单片机精确控制光强和辐照时间,温度控制器保持样品处于恒温状态,快门驱动模块按照预设程序控制电子快门的开闭,光电倍增管(Photo Multiplier Tube, PMT)进行延迟发光的采集.

系统的测量过程包括两部分:本底值的测量和生物延迟发光信号的测量. 本底值的测量测出系统的噪音信号,得出当前条件下噪音信号的平均光子计数. 延迟发光信号的测量则是在激发光作用后,采集包括延迟发光和本底噪音的叠加信号. 测量本底值时,关闭激发光源和快门,在 PC 端设置 PMT 的负高压和电流-频率变换器的积分时间,在 PC 端采集到当前本底噪音. 采集延迟发光信号时,将待测样品放入样品室,在单片机上设置好激发光源的强度值和辐照时间, PMT 的负高压和积分时间保持不变. 系统启动后,快门保持关闭状态,LED 点亮,计时器开始倒计时,计时时间到达预设时间后,单片机输出一个控制信号使 LED 光源熄灭,同时由单片机发出控制信号使快门打开,PC 端软件采集和处理 PMT 接收的样品延迟发光信号.

测量时每次取出种子 10 粒,用滤纸吸干表面溶液,放入样品室,设置光照时间为 1 min. 测量时间为 40 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 °C,测量前后各测 1 次本底,并减去本底,每组样品重复三次,取平均. 测量仪预热 1 h,使本底稳定.

1.3 种子活力的测量

采用 TTC 定量法^[20]测定种子活力,以每克样品鲜重所还原 TTC 的量表示种子活力($\mu\text{S} \cdot \text{g}^{-1}$).

2 结果与分析

2.1 小麦种子萌发过程中的自发发光和种子活力的变化

图 2 为萌发过程中自发发光强度 I_{sl} 的变化. 图中随着萌发时间的进行,未经渗透胁迫的对照组的自发发光随着萌发时间的进行呈现阶梯型增长,在萌发 2 d 和 4 d 时出现缓台阶,这个现象与花生种子萌发时出现的现象是类似的^[9]. 在 PEG 渗透胁迫下,在萌发 1 d 时自发发光较未经胁迫的对照组有明显增长,在 2 d 以后则明显小于对照.

在萌发过程中种子活力的变化见图 3. 图 3 显示,在萌发过程中对照组的种子活力随着萌发时间

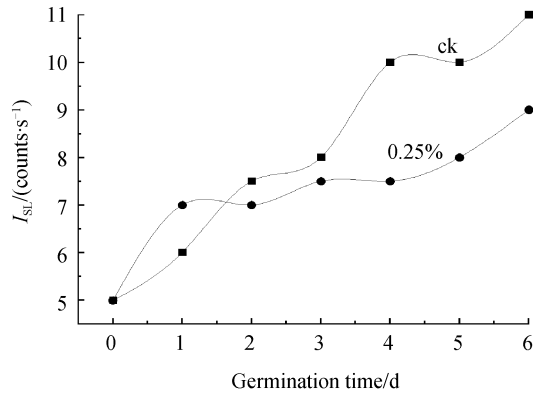


图 2 小麦种子萌发过程中的自发发光及其在渗透胁迫下的变化

Fig. 2 Spontaneous bioluminescence of wheat seed in germination and its changes under osmotic stress

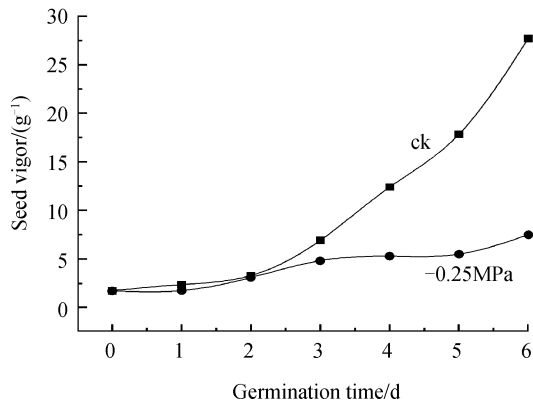


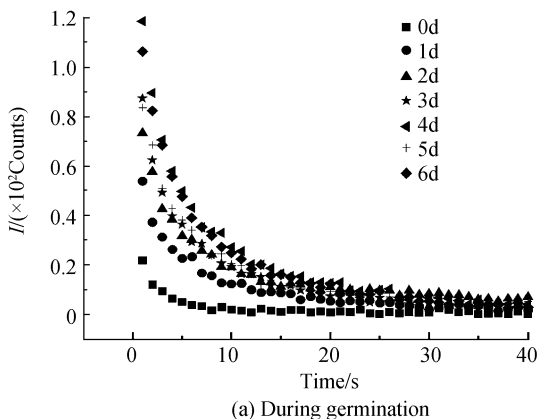
图 3 小麦种子萌发过程中种子活力及其在渗透胁迫下的变化

Fig. 3 Seed vigor in wheat germination and its changes under osmotic stress

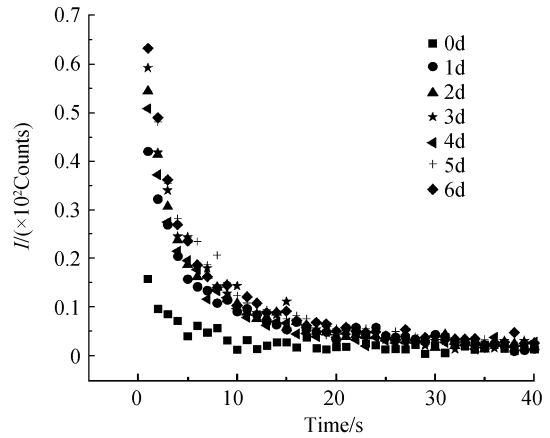
迅速增长,渗透胁迫明显抑制了萌发过程中活力的增长.但是,无论对照组还是处理组,萌发过程中自发发光和种子活力的变化有所不同.

2.2 小麦种子萌发过程中的延迟发光

图 4(a)和图 4(b)分别是用蒸馏水和渗透势为 -0.25 MPa 的 PEG-6000 溶液胁迫处理的小麦种子萌发过程中的延迟发光.由图 4(a)和图 4(b)可见,在种子萌发过程中,每天的延迟发光都随测量时



(a) During germination



(b) During germination under osmotic stress

图 4 无渗透胁迫和渗透胁迫下小麦种子萌发过程中的延迟发光

Fig. 4 Delayed luminescence of wheat seed without and with during germination under osmotic stress

间衰减,对照组延迟发光强度随时间增加比胁迫组明显.

为了定量分析图 4(a)和图 4(b)的延迟发光所带来的信息,假设延迟发光来自于生命物质激发态所有粒子间的合作效应,它们按高阶非线性耦合的方式关联起来,形成了一个高度相干的整体.于是,处于激发态的生物分子布居数应服从非线性动力学方程

$$dn/dt = -\mu \cdot n^\gamma(t) \tag{1}$$

式中, $\mu (>0)$ 和 $\gamma (>1)$ 是两个常量.

设 n_0 为外来激发光照射终止时 ($t=0$) 激发态上高能分子的布居数,辐射强度 $I(t)$ 正比于激发态布居数的减少率,即 $I(t) \propto -dn/dt$,式(1)给出的辐射强度为

$$I(t) = \frac{I(0)}{\left(1 + \frac{t}{\tau}\right)^\beta} \tag{2}$$

式中, $\beta = \frac{\gamma}{\gamma-1}$, $\tau = \frac{1}{\mu(\gamma-1)n_0^{\gamma-1}}$, $I(0) = \mu n_0^\gamma$.

式(2)可作为延迟发光的动力学模型,其中的 $I(0)$ 为初始光子数,它依赖于被测样品的性质,同时与光照条件有关; τ 是相干时间,它只与样品自身的性质有关; β 是一个无量纲的纯数,可称为衰减系数,它强烈控制着弛豫的速率.将图 4(a)和图 4(b)中各曲线的数据按照式(2)拟合,可以得到各曲线的动力学参量,结果见表 1 和表 2.由表 1 和表 2 可见,各组曲线的 R^2 均在 0.98 以上,表明式(2)的动力学方程很好地刻画了小麦种子萌发过程中的延迟发光及其在渗透胁迫下的变化,也说明了小麦萌发过程中的延迟发光确实来源于多模光子辐射与处于激发态的各种生物分子间的集体相干效应.

表 1 小麦种子萌发过程中延迟发光动力学参数的变化
Table 1 Changes of DL dynamic parameters of wheat seed during germination

Germination time/d	0	1	2	3	4	5	6
$I(0)$	616.7	721.5	1 122	1 191	1 614	1 694	2 137
β	0.802	3.767	1.857	4.194	4.312	3.418	3.889
τ	1.288	1.375	0.960	1.561	1.524	1.490	1.630
R^2	0.986	0.990	0.993	0.995	0.997	0.997	0.998

表 2 渗透胁迫下小麦种子萌发过程中延迟发光动力学参数的变化
Table 2 Changes of DL dynamic parameters of wheat seed during germination under osmotic stress

Germination time/d	0	1	2	3	4	5	6
$I(0)$	590.1	620.7	841.9	857.7	1 052	1 111	1 210
s	0.187	2.733	2.727	3.258	1.824	3.356	2.413
β	0.716	1.221	1.363	1.438	1.058	1.413	1.298
R^2	0.985	0.989	0.995	0.989	0.995	0.993	0.994

基于式(2)的延迟发光积分强度 $I(T)$ 为

$$I(T) = \frac{\tau I(0)}{\beta - 1} \left[1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{T}{\tau}\right)^{\beta - 1}} \right] \quad (3)$$

式中 T 为测量周期. 将表 1 和表 2 中各参量带入式(3), 得到萌发过程中对照组和胁迫组的 $I(T)$ 变化, 结果如图 5.

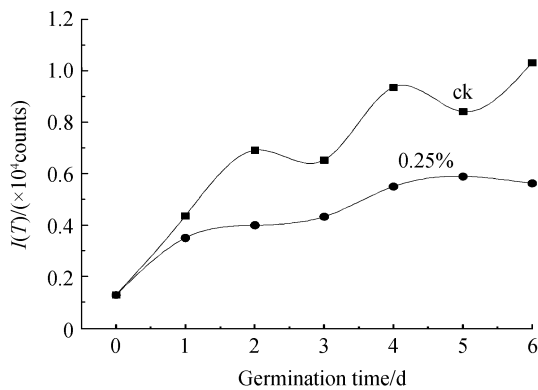


图 5 种子萌发过程中延迟发光积分强度的变化
Fig. 5 Changes of integrated intensity of DL during germination

图 5 中, 未经胁迫处理的小麦种子的延迟发光积分强度 $I(T)$ 随着萌发时间的进行呈现出阶跃式的增长趋势, 而在渗透胁迫下 $I(T)$ 虽然也随萌发时间呈现出增长的趋势, 但增长幅度远小于对照组, 特别是在 5d 时出现了下降的趋势.

2.3 基于光子辐射的种子状态参量 Q 和序参量 R 的变化

在细胞生命活动中, 细胞代谢驱使细胞生命状态更加有序, 而生命活动中活性氧的过量产生使细胞趋于无序, 细胞生命状态应取决于两者的平衡. 由

于延迟发光积分强度 $I(T)$ 的大小可以作为细胞代谢强度的指标^[8], 自发发光 I_{sl} 的大小可以作为活性氧含量高低(或者膜质过氧化程度)的标志^[21-23], 因此, 细胞状态可以定义和表征为

$$Q = I(T) / I_{sl} T \quad (4)$$

式中 Q 是一个无量纲的纯数. 因为 Q 值越大, 表明细胞生命系统的状态越好, 故 Q 可以作为表征细胞生命状态的状态参量.

细胞生命系统是一个远离平衡的自组织系统. 在非平衡统计物理学中, 远离平衡的系统状态是通过系统的序参量来表达的, 用序参量的大小反映系统与热平衡态偏离的程度. 当系统序性最高时, 序参量为 1; 系统最混乱(即序性最低时), 序参量为 0. 根据这一特点, 定义细胞生命系统的序参量 R 为

$$R = 1 - 1/Q = 1 - I_{sl} T / I(T) \quad (5)$$

式(5)中, $I(T)$ 越大, 若此时 $I_{sl} T$ 较小, R 就越大, 系统有序程度越高; 当 $I_{sl} T = 0$ 时, $R = 1$, 系统达到序性最高的状态; 当 $I_{sl} T = I(T)$ 时, $R = 0$, 系统达到无序状态. 因此, R 的数值大小反映了细胞生命状态及其与平衡态的偏离.

将图 2 和图 5 结果带入式(4)和式(5), 得到的渗透胁迫下小麦种子的状态参量 Q 和序参量 R 的变化如图 6. 图 6(a) 显示, 从种子吸胀开始到 2 d

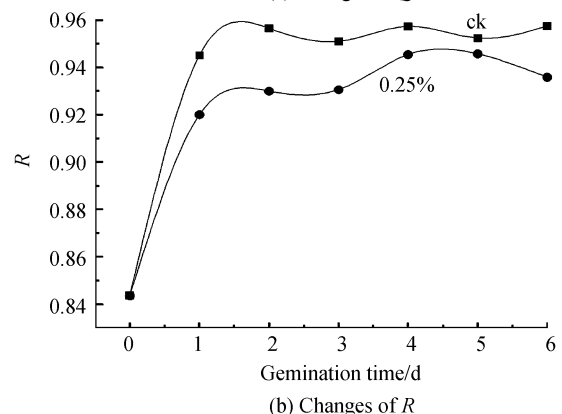
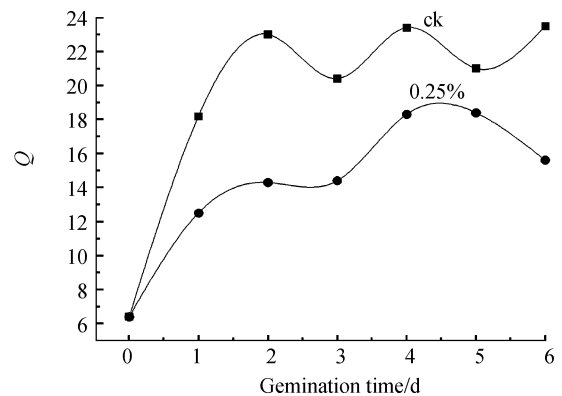


图 6 萌发过程中 Q 和 R 值的变化
Fig. 6 Changes of Q and R values during germination

时, Q 值迅速升高, 此后呈现波动性的变化; 在渗透胁迫下, Q 值在萌发开始时虽然也呈现出升高的趋势, 但普遍要比对照组的 Q 值低, 特别是, 从 5d 开始, Q 值出现了下降的趋势. 图 6(b) 显示, 序参量 R 值的变化趋势与 Q 值的变化趋势是类似的.

3 讨论

对种子萌发过程中自发发光的研究较多, 一些研究认为自发发光强度的高低在一定程度上反映了种子活力的高低^[9-10]. 本研究表明, 小麦种子萌发过程中自发发光呈现阶梯型增长, 和种子活力的单调升高不同(见图 2 和图 3). 因此, 用自发发光来反映种子活力是不准确的. 事实上, 种子活力是种子萌发过程中各种脱氢酶活性的反映, 而自发发光与活性氧 (O^- 、 $\cdot OH^-$ 、 H_2O_2) 代谢和 DNA 反应有关, 两者的机理是不同的. 在萌发初期, 渗透胁迫诱导了活性氧的产生, 因此, 图 1 中萌发 1 d 时种子的自发发光较对照组要高. 随着萌发过程的进行, DNA 反应逐渐启动, 自发发光越来越强, 而渗透胁迫对 DNA 反应的抑制作用造成了处理组的自发发光比对照组要低.

关于种子萌发过程中外界光激发下的延迟发光的研究至今未见报道, 本研究发现, 在萌发过程中的各个阶段, 延迟发光都随测量时间呈现双曲线弛豫, 并且通过数学拟合得到了描述延迟发光特征的诸动力学参量. 研究发现, 未经胁迫处理的小麦种子的延迟发光积分强度 $I(T)$ 呈现阶跃式的增长(见图 5). 由于种子萌发时, 干种子吸水膨胀, 生化反应被启动, 呼吸代谢增强, $I(T)$ 升高; 随着营养物质被分解, 呼吸作用下降, $I(T)$ 略有降低; 然后, 随着细胞分裂的开始, 细胞代谢再次增强, $I(T)$ 又一次升高. 因此, $I(T)$ 第一峰值的出现可能与种子吸水时的生理变化有关, 第二峰值的出现则可能与细胞的有丝分裂有关.

长期以来, 作物种质抗旱性评价指标的基础数据多来源于植物生理学、生物化学乃至分子生物学实验, 这些实验需要离体操作, 即要将细胞破碎、纯化、富集或扩增目标分子, 不能进行活细胞的实时定位测量, 造成了细胞内各组分、各层次之间相互作用信息的丢失, 因此, 尽管利于生理抗旱指标和分子生物学方法研究作物种质抗旱性取得了许多进展, 但是由于试管实验所得到的结果已是试管中的反应物和测试系统相互作用的结果, 这种结果无限度地偏离了活体的实际运转状态, 无法反映细胞的自组织

和自我协调的能力^[24], 也就无法准确评价作物的抗旱性. 要研究和评价干旱胁迫下作物种质的抗旱性, 必须研究活体细胞的整体性质. 考虑到这一点, 本研究依据种子萌发过程中生物光子辐射的生物学意义构建了细胞状态参量 Q 和序参量 R , 并初步研究了渗透胁迫下小麦种子萌发过程中状态参量 Q 和序参量 R 的变化. 研究结果表明, 在种子吸胀萌发初期, 序参量 R 值增长迅速, 在 2 d 以后呈现出波动性的变化. 产生这种现象的原因在于萌发初期生化反应的启动和呼吸代谢的增强使得细胞序性迅速提高, 提高到一定水平后, 细胞分裂造成了细胞序性的波动. 由于渗透胁迫会造成对种子萌发的抑制, 而本研究的结果显示, 在萌发过程中遭受渗透胁迫的小麦种子序参量 R 的值均比未受胁迫的对照要小, 而且 R 的变化反映了种子萌发过程中细胞序性的动态变化过程, 这就使得序参量 R 有可能作为评价种子抗旱性强弱的物理指标. 引入序参量 R 的意义还在于将组织序的数值限制在 0~1 之间, 使得各种品种之间的序性具有可比性, 从而为定量区分和评价逆境下作物种子的抗旱性奠定了基础.

4 结论

小麦种子萌发过程中的自发发光呈现阶跃式增长, 种子活力不断升高, 渗透胁迫明显抑制了自发发光和种子活力的增长. LED 光激发下的小麦种子的延迟发光呈现双曲线弛豫, 随着萌发时间的进行, 小麦种子的延迟发光积分强度 $I(T)$ 也出现了阶跃式的增长趋势, 渗透胁迫对 $I(T)$ 的增长有抑制作用. 由延迟发光积分强度和自发发光定义的细胞状态参量和序参量反映了萌发过程中小麦种子细胞的状态及其组织序的变化, 其有可能作为种子抗旱性评价的物理指标.

参考文献

- [1] 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.
- [2] MANSFIELD J W. Biophoton distress flares signal the on set of the hypersensitive reaction[J]. *Trends Plant Sci*, 2005, **10**(7): 307-309.
- [3] YOON Y Z, KIM J, LEE B C, *et al.* Changes in ultraweak photon emission and heart rate variability of epinephrine-injected rats[J]. *Gen Physiol Biophys*, 2005, **24**(2): 147-159.
- [4] YOSHINAGA N, KATO K, KAGEYAMA C, *et al.* Ultraweak photon emission from herbivory-injured maize plants[J]. *Naturwissenschaften*, 2006, **93**(1): 38-41.

- [5] ZHANG Ling-rui, XING Da, WANG Jun-sheng, *et al.* Light-induced 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.
- [6] YU Y, POPP F A, SIBYLLE S. Further analysis of delayed luminescence of plants[J]. *Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 2005, **78**(3): 235-244.
- [7] HIDEHIRO I, TOSHIYUKI I, WANG G X, *et al.* Spontaneous ultraweak photon emission from rice (*Oryza sativa* L) and paddy weeds treated with a sulfonylurea herbicide[J]. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 2007, **89**(2):158-162.
- [8] XI Gang, LU Hong, YAN Yi, *et al.* Changes of isoflavones and ultra weak photoemission of soybean callus induced by UV-B radiation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(10): 2640-2644.
习岗,卢洪,杨意,等.UV-B 诱导的大豆愈伤组织异黄酮和超弱发光的变化[J].光子学报,2009,**38**(10):2640-2644.
- [9] LI Shao-shan, WANG Yan, GUO Zhou-yi, *et al.* Ultraweak photon emission from germination peanut seeds [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2000, **29**(11):966-969.
李韶山,王艳,郭周义,等.萌发花生种子超弱发光的研究[J].光子学报,2000,**29**(11):966-969.
- [10] ZHANG Ju-ping, ZHANG Xing-zhi, GONG Zhen-hui. Application of ultraweak bioluminescence in vegetable research[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2006, **22**(1):220-222.
张菊平,张兴志,巩振辉.超微弱发光在蔬菜研究中的应用[J].中国农学通报,2006,**22**(1):220-222.
- [11] CHEN Wen-li, XING Da, HE Yong-hong. Determination the vigor of rice seed with different degrees of aging with ultraweak chemiluminescence during early imbibition [J]. *Acta Botanica Sinica*, 2002, **44**(11):1376-1379.
- [12] WU Pu-te, FENG Hao, NIU Wen-quan, *et al.* Technical trend and R&D focus of modern water-saving agriculture[J]. *Engineering Sciences*, 2007, **9**(2):12-18.
吴普特,冯浩,牛文全,等.现代节水农业技术发展趋势与未来研发重点[J].中国工程科学,2007,**9**(2):12-18.
- [13] LEVITT J. Response of plants to environmental stresses. Water, radiation, salt and other stresses[M]. New York: Academic Press, 1980: 325-358.
- [14] WANG W, VINOCUR B, ALTMAN A. Plant responses to drought, salinity and extreme temperatures: towards genetic engineering for stress tolerance[J]. *Planta*, 2003, **218**(1): 1-14.
- [15] FAN T L, BALTA M, RUDD J, *et al.* Canopy temperature depression as a potential selection criterion for drought resistance in wheat [J]. *Agricultural Sciences in China*, 2005, **4**(10): 793-800.
- [16] SUBRAHMANYAM D, SUBASH N, HARIS A, *et al.* Influence of water stress on leaf photosynthetic characteristics in wheat cultivars differing in their susceptibility to drought [J]. *Photosynthetica*, 2006, **44**(1): 125-129.
- [17] CHEN Zhao-bo. Resear advance and development trends of water use efficiency in plant biology[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, **40**(7): 1456-1462.
陈兆波.生物节水研究进展及发展方向[J].中国农业科学,2007,**40**(7):1456-1462.
- [18] NIU Ben-han, YUAN Xiao-cong, QU Jun-le, *et al.* The life phenomenon of cell analysis and study of means and optical methods[J]. *Science China G*, 2007, **37**(s1): 21-29.
牛憨笨,袁小聪,屈军乐,等.细胞生命现象分析和研究的光学方法与手段[J].中国科学 G 辑:2007,**37**(s1): 21-29.
- [19] ZHANG Xin-hua, LI Fu-jun, SHEN Lin, *et al.* Application of ultraweak luminescence technique in research of plant physiology[J]. *Plant Physiology Communications*, 2009, **45**(9):931-935.
张新华,李富军,申琳,等.超弱发光技术在植物逆境生理研究中的应用[J].植物生理学通讯,2009,**45**(9):931-935.
- [20] 张宪政,谭桂茹.植物生理学实验技术[M].沈阳:辽宁科学技术出版社,1989:286-288.
- [21] CALDWELL M M, FLINT S D, SEARLES P S. Spectral balance and UV-B sensitivity of soybean: a field experiment [J]. *Plant Cell & Environment*, 1994, **17**(3): 267-276.
- [22] POPP F A, ZHANG J Z. Mechanism of interaction between electromagnetic fields and living organisms[J]. *Science in China (Series C)*, 2000, **43**(5): 507-518.
- [23] 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**(10): 3250-3254.
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**(10): 3250-3254.
- [24] TANG Pei-song, XIAO Jing-ping. Certain modes of control of life process operation by respiratory metabolism in plant cells[J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 1991, **33**(10): 729-737.

Changes of Ultra-weak Photon Emission of Wheat Seed During Germination and Its Significance under Osmotic Stress

LI Shao-hua¹, XI Gang¹, FAN Lin-lin^{2,3}, LIU Kai¹

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

(2 *College of Physics and Information Technology, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China*)

(3 *Mathematics and Physics Section, Xi'an Commanding College of CAPF, Xi'an 710038, China*)

Abstract: In order to evaluate drought resistance of wheat seed during germination using bio-photonic technology, treatment to germinating wheat seeds with polyethylene glycol, spontaneous luminescence and delayed luminescence of wheat seed in ultra-weak photon emission during germination under osmotic stress were measured. Through establishment of dynamic equation of delayed luminescence and mathematical fitting, the initial intensity $I(0)$, attenuation parameters β , coherence time τ and integral intensity $I(T)$ of delayed luminescence during germination were obtained. And the state parameters and the order parameter of cell system were constructed according to the significance of delayed luminescence integral intensity and spontaneous luminescence. The experimental results shows that the increases of spontaneous luminescence and integrated intensity of delayed luminescence in ultra-weak photon emission of wheat seed are the stage during germination, the increases of the state parameter and order parameter of cell are the stage, and osmotic stress inhibits these increases. It is suggested that the state parameter and order parameter of cell based on ultra-weak photon emission may be used as physical indicators to evaluate drought resistance of wheat seed during germination.

Key words: Ultra-weak photon emission; Osmotic stress; Wheat germination; Order parameter