

文章编号:1004-4213(2010)08-1449-6

# UV-B 诱导的大豆愈伤组织超弱光子辐射的动力学分析\*

习岗<sup>a</sup>, 刘锴<sup>a</sup>, 张晓辉<sup>b</sup>, 李少华<sup>a</sup>

(西安理工大学 a. 理学院 应用物理系; b. 自动化与信息工程学院 电子系, 西安 710048)

**摘 要:** 为了研究细胞超弱光子辐射的动力学特征及其所揭示的生物学意义, 用  $20 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  UV-B 辐射大豆愈伤组织 2 h, 测定停止辐射后 4 d 内大豆愈伤组织在 LED 光诱导下的延迟发光. 通过建立延迟发光动力学方程和数学拟合得到了大豆愈伤组织超弱光子辐射中的延迟发光积分强度、初始光子数、衰减参数和自发发光, 讨论了这些发光动力学参数的生物学意义. 研究表明, 在停止 UV-B 辐射后的 4 d 内, 大豆愈伤组织的光诱导延迟发光服从双曲线弛豫. 动力学分析发现, 延迟发光积分强度和初始光子数随处理后时间的进行呈现波动变化, 停止 UV-B 辐射后, 自发发光和丙二醛(MDA)含量均呈现升高的趋势, 在辐射后 2 d 附近达到峰值, 此后同步下降. 用延迟发光积分强度和自发发光的比值定义细胞的状态参量  $Q$  和序参量  $R$ , 发现 UV-B 辐射后大豆愈伤组织细胞  $Q$  值或  $R$  值的变化反映了 UV-B 辐射对大豆愈伤组织细胞的损伤以及细胞的恢复过程.

**关键词:** 超弱光子辐射; 大豆愈伤组织; UV-B 辐射; 细胞状态参量

中图分类号: Q632

文献标识码: A

doi: 10. 3788/gzxb20103908. 1449

## 0 引言

生物超弱光子辐射包括自发发光和延迟发光. 自发发光是指生物系统在暗中产生的光子发射, 延迟发光是指外界短暂光照射后生物系统出现的持续发光现象. 近年来的大量研究表明, 生物超弱光子辐射是生命系统一个重要的信息源, 它与生物的光合作用、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联系<sup>[1-4]</sup>, 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<sup>[5-7]</sup>, 因此, 其在医学、农业和环境检测等众多方面都具有重要的应用价值<sup>[8]</sup>. 目前, 生物超弱光子辐射的应用研究报道很多, 但是, 机理和定量研究较少. 由于缺乏对生物超弱光子辐射定量规律的了解, 制约了应用研究的进展.

有实验表明, UV-B 辐射可以引起植物叶片超弱光子辐射的明显改变<sup>[9]</sup>, 那么, 对于代谢旺盛的愈伤组织, 其超弱光子辐射对 UV-B 辐射应该有更强烈的反应. 有鉴于此, 本文以大豆愈伤组织为材料,

研究 UV-B 辐射诱导下大豆愈伤组织超弱光子辐射的动力学规律, 探索其定量分析方法, 期望本文的研究结果有助于揭示生物超弱光子辐射的定量规律, 并解读其所蕴含的物理意义和生物学意义, 从而促进生物光子技术的应用研究.

## 1 材料与方法

大豆愈伤组织的培养方法见文献[10], 待大豆愈伤组织呈指数增长趋势(13 d 左右)时, 将愈伤组织进行 UV-B(312 nm, 20 W 北京电光源研究所提供)辐射处理, 处理剂量由台湾产 TN340 型紫外线光强计(UV Light meter)确定. UV-B 处理剂量为  $20 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ , 处理时间为 2 h, 分别在处理后的 1 天(1 d)、2 天(2 d)、3 天(3 d)、4 天(4 d)取样.

大豆愈伤组织超弱光子辐射的测量由自制的测量系统完成, 该系统由激发光源、光源驱动模块、温度控制模块、快门驱动模块、光探测器、数据采集与处理模块、暗室和计算机构成, 可以同时测量自发发光和延迟发光, 系统结构如图 1.

在该系统中, 激发光源为单只中心波长为 456 nm 的白色大功率超高亮度 LED, 采用低噪声低压差大功率恒流源芯片 CN5611 及其外围电路为 LED 提供稳定的驱动电流. LED 发出的光经过透镜均匀照射到样品上, 样品受激后发出的光经过电子快门进入光探测器进行数据采集. 光探测器参照目

\* 国家自然科学基金(50977079)和陕西省教育厅专项科研项目(09JK667)资助

Tel: 029-82310504

Email: xigangchao@gmail.com

收稿日期: 2010-03-08

修回日期: 2010-04-26

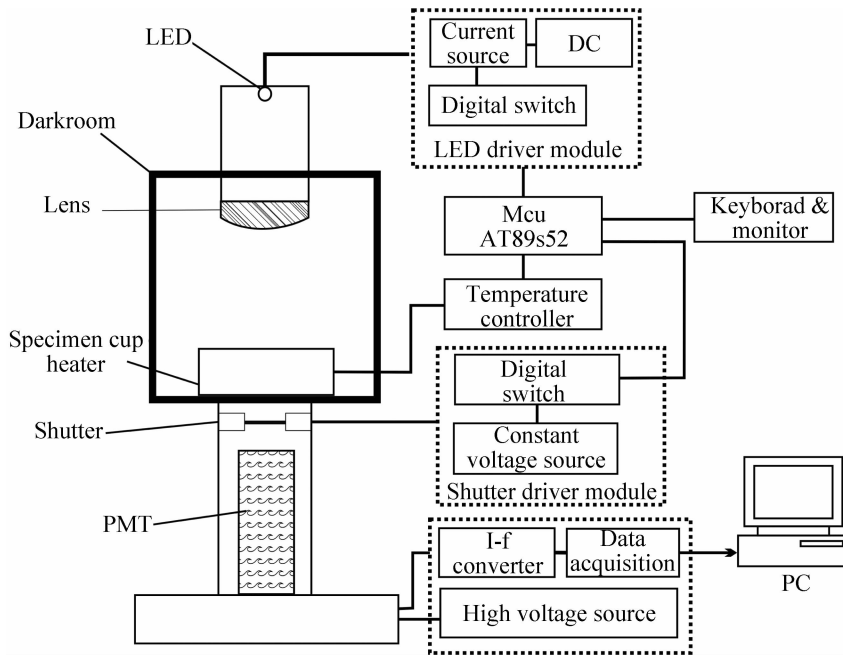


图 1 延迟发光检测系统结构图  
Fig. 1 The structure of delayed luminescence detection system

前大多数研究者采用的日本滨松 (Hamamatsu) 公司生产的光子计数专用大口径光电倍增管 (PMT) [3,7,11-12]。LED 光源和电子快门的电路系统控制图如图 2, 系统的工作过程见图 3。整个电路系统以 AT89s52 单片机作为控制核心, 进行光照时间

的控制。在电路进行复位后, 对光照时间进行设置, 然后按开始键使整个电路进行工作。当计时时间到以后, 单片机输出一个控制信号使光源熄灭, 同时由单片机发出控制信号使快门打开, 采集系统开始采集生物延迟发光信号, 并在计算机上得到需要的信息。

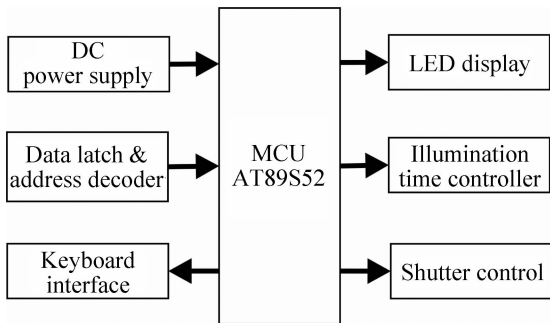


图 2 电路系统控制图  
Fig. 2 Circuit system control chart

样品室温度由温度控制系统控制, 其由加热器、温度传感器和温度控制器构成, 保证样品室达到恒温状态, 且恒温段波动控制在  $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  的范围内。该系统在温度为  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、PMT 加载高压  $1\ 000\ \text{V}$  时, 暗室的本底噪声的平均光子计数为  $28\ \text{cps}$ 。

测量时称取  $1.000\ \text{g}$  处理后的愈伤组织, 用镊子把愈伤组织夹成均匀的颗粒状, 把愈伤组织放在测量系统的样品室中在  $1\ 500\ \text{Lx}$  光照  $5\ \text{min}$  后延迟  $0.5\ \text{s}$  开始测量延迟发光。每次测量时间为  $30\ \text{s}$ , 采集数据间隔为  $0.5\ \text{s}$ , 工作电压  $-1\ 000\ \text{V}$ 。为了减少实验误差, 测量前后各测  $1$  次本底, 每个处理设置  $3$  个重复, 取平均。测量样品的自发发光时, 关闭激发光源, 在黑暗中处理  $5\ \text{min}$ , 其他操作同延迟发光测定。测量温度保持在  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

丙二醛 (MDA) 含量的测定采用硫代巴比妥酸 (TBA) 测定 MDA 含量的方法 [13], 以每克鲜重所含 MDA 物质的量表示 MDA 含量 ( $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}\ \text{FW}$ )。

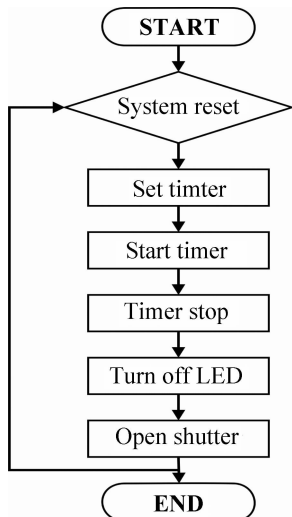


图 3 系统工作流程图  
Fig. 3 Work flow chart of system

## 2 结果与分析

### 2.1 UV-B 辐射诱导的大豆愈伤组织延迟发光动力学分析

将大豆愈伤组织用  $20\ \mu\text{W}/\text{cm}^2$  的 UV-B 辐射

2 h,在停止辐射后 1 d、2 d、3 d 和 4 d 时的延迟发光曲线如图 4。图中 CK 为不经 UV-B 辐射处理的对照组。由图 4 可见,各组曲线在辐射后 4 d 内呈现出不同的变化。

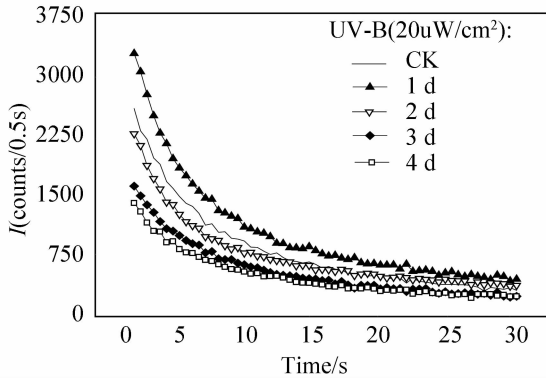


图 4 UV-B 辐射后大豆愈伤组织 4 天内的延迟发光曲线  
Fig. 4 Delayed luminescence curves of soybean callus in four days after UV-B radiation

为了定量分析图 4 所示的各延迟发光曲线的特征和区别,认为生物光子辐射起源于生命物质中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。于是,根据发光动力学基本原理可知,处于激发态的生物分子布居数应该服从以下的非线性动力学方程

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

式中, $\mu$  和  $\gamma$  是两个常数。

设  $n_0$  为外来激发光光照终止时 ( $t=0$ ) 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

$$I(t) = \frac{I_0}{\left(1 + \frac{t}{\tau}\right)^\beta} \quad (2)$$

式中, $\beta = \frac{\gamma}{\gamma-1}$ ,  $\tau = \frac{1}{\mu(\gamma-1)n_0^{\gamma-1}}$ ,  $I_0 = \mu n_0^\gamma$ 。

但是,由式(2)将得到  $t \rightarrow \infty$  时,  $I=0$  的情况。由于在外来光激发下,生物超弱光子辐射应包括自发光  $I_{SL}$  和延迟发光,  $t \rightarrow \infty$  时,  $I$  应该趋近于自发光,考虑到这一点,将式(2)修改为

$$I(t) = I_{SL} + \frac{I_0}{\left(1 + \frac{t}{\tau}\right)^\beta} \quad (3)$$

式中,  $I_{SL}$  为单位时间内的自发光。

应用式(3)拟合图 4 中各延迟发光曲线,可以得到延迟发光动力学过程的特征参数  $I_0$ 、 $\tau$  和  $\beta$  以及  $I_{SL}$ ,结果示于表 1,  $R^2$  是表征拟合优度的决定系数。由表 1 可见,各组曲线的  $R^2$  均在 0.998 以上,表明式(3)表示的动力学方程很好地刻画了图 4 中大豆愈伤组织延迟发光及其在 UV-B 辐射诱导下的变

化,也说明了大豆愈伤组织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 UV-B 辐射诱导的超弱光子辐射动力学参数的变化

Table 1 Variations of dynamic parameters of ultra-weak biophoton emission induced by UV-B radiation

Time after UV-B treatment/d	CK	1	2	3	4
$I_{SL}/\text{counts} \cdot 0.5\text{s}^{-1}$	43.01	177.33	216.32	40.16	34.86
$I_0/\text{counts} \cdot 0.5\text{s}^{-1}$	2 806.3	3 511.8	2 393.2	1 509.9	1 735.9
$\tau/\text{s}$	5.576 5	5.336 0	4.217 8	4.431 3	5.856 9
$\beta$	1.221 0	1.319 3	1.231 4	0.969 2	1.138 9
$R^2$	0.999 2	0.999 4	0.999 1	0.998 9	0.998 5

## 2.2 延迟发光积分强度 $I(T)$ 与初始光子数 $I(0)$ 的变化

将式(3)对时间积分可以得到延迟发光曲线下的面积,称为延迟发光积分强度,用  $I(T)$  表示,其解析表达式为

$$I(T) = I_{SL}T + \frac{\tau I_0}{\beta-1} \left[ 1 - \frac{1}{\left(1 + T/\tau\right)^{\beta-1}} \right] \quad (4)$$

式中,  $T$  为测量时间。

将  $T=30\text{ s}$  和表 1 中的各参数值带入式(4)可以计算出图 4 中对照和各处理组延迟发光积分强度  $I(T)$ 。由式(3)可知,延迟发光初始光子数  $I(0) = I_{SL} + I_0$ 。由表 1 中参数和式(4)算出的 UV-B 辐射后 4 d 内大豆愈伤组织延迟发光  $I(T)$  和初始光子数  $I(0)$  的变化见图 5。在图 5 中,相对于未受处理的对照组(CK),在 UV-B 辐射后 1 d,处理组的  $I(T)$  和  $I(0)$  都有所增强;在 UV-B 辐射后 2~3 d,两者呈现下降的趋势;在 4 d 时两者开始回升。相关性分析表明,  $I(T)$  与  $I(0)$  呈现很好的正相关,拟合优度  $R^2 = 0.998\ 38$ 。

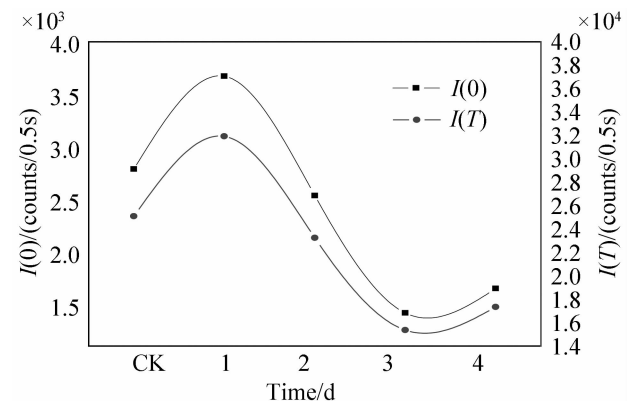


图 5 大豆愈伤组织延迟发光初始光子数和积分强度的变化  
Fig. 5 Variations of initial light intensity and integrated intensity of DL of soybean callus

关于  $I(T)$  的生物学意义,由式(4)可知,  $I(T)$  与  $I_0$  成正比,而由式(2)中关于  $I_0$  的定义可知,  $I_0$  与外来激发光光照终止时 ( $t=0$ ) 激发态上高能分子

的布居数有关. 由于代谢越旺盛, 处于激发态的生物分子就越多,  $I_0$  也就越大, 因此,  $I_0$  或者  $I(T)$  的大小表征了细胞生命系统总体代谢强度.

### 2.3 自发发光 $I_{SL}$ 和 MDA 的变化

为了阐明自发发光  $I_{SL}$  的变化规律及其生物学意义, 同步测定了 UV-B 诱导的大豆愈伤组织  $I_{SL}$  和 MDA 的变化, 结果示于图 6. 在停止 UV-B 辐射后,  $I_{SL}$  和 MDA 含量均呈现升高的趋势, 在 2 d 附近达到峰值, 此后迅速下降. 由于 UV-B 辐射对植物细胞的损害过程为: 紫外辐射增强 → 保护酶 (SOD、CAT、POD) 活性降低 → 活性氧 ( $O^-$ 、 $\cdot OH$ 、 $H_2O_2$ ) 集聚 → 膜脂过氧化作用增强 → 丙二醛 (MDA) 含量骤增 → 膜结构完整性破坏 → 膜选择透性丧失 → 细胞内环境变化 (生物电位、pH 异常) → 细胞结构或功能受损 → 代谢紊乱或细胞死亡, 因此, UV-B 辐射导致的细胞伤害可以通过 MDA 含量的升高来表示<sup>[14-15]</sup>. 根据这个结果, 由图 6 可以推断, 在停止 UV-B 辐射后 1 d 和 2 d 时 UV-B 辐射对细胞造成的伤害仍在延续; 在停止辐射后 2 d 时, 伤害达到最大, 此后细胞的自组织作用使之逐渐恢复原状. 由于 UV-B 辐射诱导的大豆愈伤组织细胞  $I_{SL}$  和 MDA 含量的变化趋势是相同的, 这种一致性表明, MDA 含量的变化可能是大豆愈伤组织  $I_{SL}$  变化的原因,  $I_{SL}$  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.

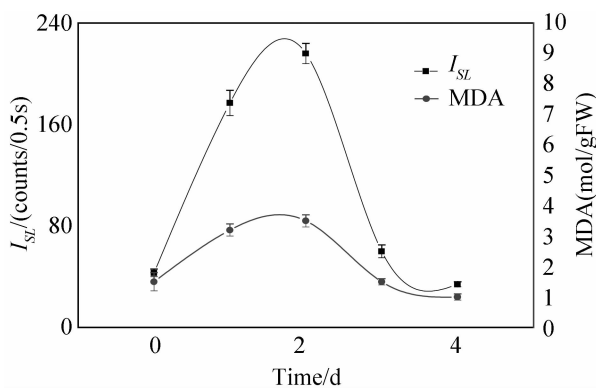


图 6 大豆愈伤组织自发发光和 MDA 的变化  
Fig. 6 Variations of spontaneous luminescence and MDA of soybean callus

### 2.4 大豆愈伤组织细胞状态参量 $Q$ 和序参量 $R$ 及其变化

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, 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, 因此, 细胞状态可以定义和表征为

$$Q = I(T) / I_{SL} T \quad (5)$$

这里,  $Q$  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

$$R = 1 - 1/Q = 1 - I_{SL} T / I(T) \quad (6)$$

式(6)中,  $I(T)$  越大, 若此时  $I_{SL}$  较小,  $R$  就越大, 系统有序程度越高; 当  $I_{SL} = 0$  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.

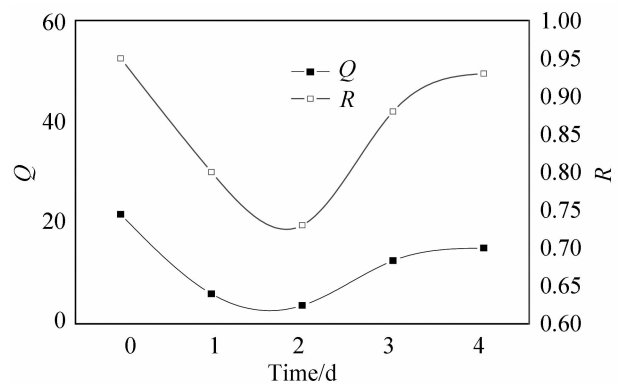


图 7 大豆愈伤组织状态参量和序参量的变化

Fig. 7 Variations of state parameter and order parameter of soybean callus

将表 1 中  $I_{SL}$  和图 5 中  $I(T)$  带入式(5)和式(6)得到的大豆愈伤组织细胞状态参量  $Q$  和序参量  $R$  的变化见图 7. 在停止 UV-B 辐射后 1 d 和 2 d, 和未受辐射的对照组相比, 大豆愈伤组织细胞状态参量  $Q$  有明显下降, 在 2 d 附近达到最低值, 此后开始回升; 序参量  $R$  的变化趋势与  $Q$  的变化趋势相似, 在 4 d 时  $R$  值已经接近于对照的水平. 这一结果表明, 在停止辐射后 2 d 时间内, 细胞的状态及其有序程度仍然比未受辐射的细胞要差, 在 2 d 以后细胞状态及其序性开始恢复, 在 4 d 时细胞的有序程度基本恢复到未受伤害的正常水平.

与图 6 相比较, 细胞 MDA 含量的变化与状态参量和序参量的变化刚好相反, 说明了图 7 中状态参量和序参量的变化确实反映了 UV-B 辐射诱导下大豆愈伤组织细胞结构与功能的破坏和恢复过程.

## 3 讨论

对生物超弱发光中自发发光和延迟发光的采

集、分析和解读是生物光子技术应用研究的基础,其中,光诱导的延迟发光技术是生物光子技术未来优先研究和发展的重点之一。由于光诱导的延迟发光涉及到处于激发态的大量分子的相干跃迁,其发光的物理机制和发光时间都与荧光有很大区别。为了准确获取延迟发光的衰减特征,而又避免荧光干扰,必须在激发光停止数微秒以后开始采集延迟发光信号,同时,由于延迟发光随时间快速衰减,为了对比分析各处理组的延迟发光特征,必须准确控制各组测量中延迟发光的采集时间,本研究采用单片机控制电子快门的方法满足了这种要求。

在一些研究中,常将延迟发光曲线下的面积称为延迟发光强度,以此作为延迟发光的量度<sup>[9,16-17]</sup>,而对于延迟发光衰减特征所隐含的物理意义和生物学意义较少涉及。本文认为延迟发光起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,通过建立生物光子辐射的非线性动力学方程式(1),得到了延迟发光的弛豫特征式(3),并进而获得了延迟发光积分强度的解析表达式(4)。式(3)的意义在于一方面证明了生物延迟发光是一种涉及大量激发态分子的相干跃迁,其服从双曲线弛豫;另一方面将超弱光子辐射中的自发发光和延迟发光统一起来,通过式(3)对实验测得的延迟发光数据进行拟合,可以同时得到延迟发光积分强度  $I(T)$ 、初始光子数  $I(0)$ 、衰减参数  $\tau$ (或  $\beta$ )和单位时间的自发发光  $I_{SL}$ ,通过这些参数可以实现对生物超弱光子辐射信息的提取、分析和识辨。

在生命科学的研究中,细胞序性在研究细胞状态、演化及其与环境的关系中具有极为重要的意义,然而,至今未见细胞序性的研究,甚至连细胞系统的“状态”本身都没有准确的概念。本文从延迟发光和自发发光的生物学意义出发,用延迟发光积分强度  $I(T)$ 和自发发光  $I_{SL}$ 定义了细胞的状态参量  $Q$ 和序参量  $R$ ,并通过实验证明了  $Q$ 值或  $R$ 值的变化反映了UV-B辐射对大豆愈伤组织细胞结构与功能的破坏以及去除辐射后的细胞恢复过程。由于细胞状态参量  $Q$ 和序参量  $R$ 综合反映了细胞的自组织能力,其测量具有快速、无损和灵敏等优势,从而为研究活体细胞的状态、序性及其演化提供了新的思路和方法,期待着本文提出的细胞状态理论及其组织序的分析方法得到更多的实验证明和广泛的应用。

## 4 结论

用  $20 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  UV-B 辐射大豆愈伤组织 2 h,在停止辐射后的 4 d 内未受辐射的对照组和处理组的光诱导延迟发光均服从双曲线弛豫。通过对延迟发

光动力学方程的分析,可以得到自发发光强度和延迟发光的动力学参数。自发发光强度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,延迟发光积分强度或者初始光子数的大小可以作为细胞代谢强度的指标。用延迟发光积分强度  $I(T)$ 和自发发光  $I_{SL}$ 定义的细胞状态参量  $Q$ 和序参量  $R$ 的变化可以反映 UV-B 辐射对大豆愈伤组织细胞结构与功能的破坏以及去除辐射后的细胞恢复过程。

## 参考文献

- [1] POPP F A, NAGL W, LI K H, *et al.* Biophoton emission; New evidence for coherence and DNA as source[J]. *Cell Biophys*, 1984, **6**(1): 33-52.
- [2] MANSFIELD J W. Biophoton distress flares signal the onset 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] SLAWINSKI J, EZZAHIR A, GODLEWESKI M, *et al.* Stress-induced photon emission from perturbed organism [J]. *Experientia*, 1992, **48**(11-12): 1041-1058.
- [6] YAN Y, POPP F A, SIBYLLE S, *et al.* 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] 顾樵. 生物光子学[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 9-12.
- [9] ZHANG Ling-rui, XING Da, WANG Jun-sheng, *et al.* Light-induced delayed fluorescence as an indicator for UV-B radiation environment stress on plants[J]. *Optoelectronics Laser*, 2007, **18**(7): 878-881.
- [10] 张玲瑞, 邢达, 王俊生, 等. 植物光诱导延迟荧光的紫外辐射环境胁迫检测[J]. 光电子·激光, 2007, **18**(7): 878-881.
- [10] XI Gang, LU Hong, YAN Yi, *et al.* Changes of isoflavones and ultraweak photoemission of soybean callus induced by UV-B radiation [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(10): 2640-2644.
- 刁岗, 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, 光子学报, 2009, **38**(10): 2640-2644.
- [11] KIM H, SIM S, KIM C, *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.
- [12] KIM H, AHN S, KIM J, SOH K. Enhancement of ultraweak photon emission with 3 MHz ultrasonic irradiation on transplanted tumor tissues of mice [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2008, **15**(5): 921-926.
- [13] 张志良, 瞿伟菁. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 274-243.
- [14] YAN Bin, DAI Qiu-jie. Effects of ultraviolet-B radiation on active oxygen metabolism and membrane system of rice leaves [J]. *Acta Phytophysiological Sinica*, 1996, **22**(4): 373-378.
- 晏斌, 戴秋杰. 紫外线 B 对水稻叶组织中活性氧代谢及膜系统的影响 [J]. 植物生理学报, 1996, **22**(4): 373-378.
- [15] ZHOU Qing, HUANG Xiao-hua. The survival stress

- ecophysiological effect of enhanced ultraviolet-B radiation on plant [J]. *Chinese Journal of Nature*, 2001, **23**(4):199-203.
- 周青, 黄晓华. 生存胁迫-紫外辐射增强对植物的生理生态效应[J]. 自然杂志, 2001, **23**(4):199-203.
- [16] 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.
- [17] LI Ying, XU Wen-hai, WANG Jun-sheng, *et al.* Detection of plant photosynthetic capacity based on unsaturated light-induced delayed Fluorescence [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2009, **20**(7):916-919.
- 李瑛, 许文海, 王俊生, 等. 基于非饱和光诱导延迟荧光的光合能力检测[J]. 光电子·激光, 2009, **20**(7):916-919.

## Dynamic Analysis of Ultra-weak Photon Radiation of Soybean Callus Induced by UV-B Radiation

XI Gang<sup>a</sup>, LIU Kai<sup>a</sup>, ZHANG Xiao-hui<sup>b</sup>, LI Shao-hua<sup>a</sup>

(a, Department of Applied Physics, Institute of Science; b, Department of Electronics, School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, 710048 China)

**Abstract:** In order to study the dynamic characteristics of ultra-weak photon emission in cell and its biological significance, soybean callus are radiated by UV-B radiation with  $20\mu\text{W}/\text{cm}^2$  for 2 hours. Delayed luminescence of soybean callus induced by light within 4 days after the UV-B radiation is determined. Delayed luminescence integral intensity, the initial photon number, attenuation parameters and the spontaneous luminescence in ultra-weak photon emission of soybean callus are obtained through the establishment of delayed luminescence dynamics equation and mathematical fitting. The biological significance of these dynamic parameters of ultra-weak photon emission is discussed. The results show that delayed luminescence induced by light of soybean callus within 4 days after UV-B radiation to obey the laws of hyperbolic relaxation. Dynamic analysis shows that the changes of the delayed luminescence integral intensity and initial photon number with the time after UV-B treatment are volatility. The intensity of spontaneous luminescence and the content of malondialdehyde(MDA) are increased after the cessation of UV-B radiation. The peaks of them appear nearly two days after UV-B radiation. Using the ratio of delayed luminescence integral intensity and spontaneous luminescence to define the state parameter Q and the order parameter R of cell, it is found that the changes of Q value or R value of soybean callus cells after UV-B radiation reflect the damage of UV-B radiation on soybean callus and cell recovery process.

**Key words:** Ultra-weak photon emission; Soybean callus; UV-B radiation; State parameter of cell



**XI Gang** was born in 1957, and received the M. S. degree in 1991. Now, he works as a professor, and his research interests focus on biophysics and biophotonics.