

低强度射频电磁场对大豆和香蕉光合细胞 Chla 荧光动力学过程的影响

宋 清, 习 岗, 杨初平, 曹永军

(华南农业大学 理学院, 广东 广州 510642)

摘要: 大豆和香蕉叶片光合细胞 Chla 荧光动力学过程在 300 MHz 低强度射频电磁场作用下发生了变化, 荧光动力学参数 F_V/F_0 、 F_V/F_m 、 $\Delta F_V/T$ 和 CA 随辐射功率密度的增加呈减小的趋势, F_{VI}/F_V 和 $T_{1/2}$ 呈增大的趋势, 表明在低强度射频电磁场的作用下大豆和香蕉叶片光合细胞 PS II 潜在活性降低, PS II 无活性中心相对含量增加, 光合电子传递速率减小, PS II 氧化侧电子库受到损伤, PS II 反应中心原初光能转换效率降低. 光合细胞对低强度射频电磁场的这种响应是一种非热效应.

关键词: 电磁场; 光合细胞; 叶绿素荧光动力学; 非热效应

中图分类号: Q64

文献标识码: A

文章编号: 1001-411X(2004)04-0067-04

Effect of low level radio frequency electromagnetic field on chlorophyll fluorescence dynamics process in photosynthesis cell of soybean and banana

SONG Qing, XI Gang, YANG Chu-ping, CAO Yong-jun

(College of Sciences, South China Agric. Univ., Guangzhou 510642, China)

Abstract: Under the action of low level radio frequency electromagnetic field of 300 MHz, chlorophyll fluorescence dynamics process in leaves of soybean and banana was changed. The fluorescence dynamics parameters F_V/F_0 , F_V/F_m , $\Delta F_V/T$ and CA decreased with the increase of power density of electromagnetic field, while F_{VI}/F_V and $T_{1/2}$ increased. These results showed that low level of radio frequency electromagnetic field leads to the decrease of potential activity of PS II reaction center, the increase of relative content of PS II inactive center and the damage of electron store of PS II. Thus, the photochemical efficiency of PS II in leaf decreases by the action of electromagnetic field. These responses of photosynthesis cell are the non-thermal effects of electromagnetic field.

Key words: electromagnetic field; photosynthesis cell; chlorophyll fluorescence dynamics; non-thermal effects

由高频电磁波(0.1~300 MHz)和微波(300 MHz 以上)产生的电磁场称射频电磁场(radio frequency electromagnetic field, RFEF). RFEF 的主要来源是电台、电视台、雷达以及移动通讯设备. 有实验表明, 当生物体反复接触低强度 RFEF 后, 体温虽无上升, 但也可以造成机体的结构改变和功能紊乱, 即产生所

谓的非热效应(non-thermal effect)^[1,2]. 由于在现代社会中通讯技术被大量使用, 整个地球无时无刻不处于这种 RFEF 之中, 这种 RFEF 对生物体系的非热效应引起了人们的极大关注^[3]. 从 20 世纪 70 年代, 人们即开始对 RFEF 生物学效应的研究, 几十年的研究结果已确定了 RFEF 对生物体系具有非热效应. 发

收稿日期: 2003-12-09

作者简介: 宋 清(1969-), 男, 讲师.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50177010); 广东省自然科学基金资助项目(010297)

现低强度射频电磁场会对细胞膜的结构与功能、细胞的信息传导和生物分子的结构产生影响^{4~6]}。然而,迄今为止的研究结果几乎都是在动物体上获得的,很少见到低强度射频电磁场对植物影响的研究。

在植物电磁学效应的研究中,人们已经较深入地研究了静电场和静磁场对植物的影响,发现静电场和静磁场会改变植物细胞的结构与功能,并影响到细胞中某些酶的活性和基因表达^{7,8]}。由于变化的电磁场对细胞电生物过程的影响更大,根据目前 RFEF 对动物细胞的研究结果可以推断, RFEF 也会对植物叶片中的光合细胞产生作用,从而对光合作用乃至农业造成影响。

在光合作用中,发生于叶绿体膜上的光合电子传递过程是光合作用的核心,而电子传递对 RFEF 非常敏感,因此,即使低强度 RFEF 不造成膜结构的变化,光合电子传递过程也可能发生改变。由于光合电子传递过程的变化可以通过发源于膜上光合机构的荧光动力学过程来反映^{9]},因此, RFEF 下 Chla 荧光动力学参数的变化就是光合细胞电生物过程对 RFEF 最灵敏的反应信号,根据 RFEF 下活体叶片 Chla 荧光动力学信息的提取,就可以判断和识别 RFEF 能否通过非热效应对细胞电生物过程产生作用,导致光合细胞原初光能转换效率的变化,对现代农业造成影响。基于这种考虑,本试验研究低强度 RFEF 作用下大豆和香蕉光合细胞 Chla 荧光动力学过程的变化,希望能够由此揭示射频电磁场对植物光合细胞中电子传递过程和光合作用的影响。

1 材料与方法

材料为巴西香蕉 *Musa acuminata* Colla cv. Williams 试管苗和巴西 3 号大豆 *Glycine max* Merrill cv. Brasil 3 幼苗。香蕉试管苗在华南农业大学热带和亚热带果树研究室经过起始培养、不定芽增殖、小植株生根与假植等生产工序培养,在试管苗叶片中段取样测定。巴西 3 号大豆在华南农业大学资源环境学院玻璃温室中培养,在正常水肥条件下待大豆植株长至 30 cm 高时,在同一叶位处取样测定。

Chla 荧光动力学参数用中国科学院植物研究所等单位研制的 PEM102 型植物荧光计测定。测定用的激发光源为 6 只排列成圈的超高亮度兰色发光二极管($\lambda_m=660$ nm)。光束经多层真空镀膜的长波截止型滤光片($\lambda_m<700$ nm)过滤和有机玻璃光导体聚集后照射在材料表面。激发光源的开闭由微机程序

控制,发光强度用一个连续可变电阻器调节,光强度由 Li-Cor 光量子辐射计测定。

接收荧光信号的为光传感器,它是一种高灵敏度单片超低噪近红外光电流放大器,包含一个 PIN 光电二极管和以精密 FET 为输入端的超低噪线性运算放大器。光传感器和激发光源安装在中央开孔的圆筒状铝合金探头($d\times h=30$ mm \times 50 mm)内。在光传感器之前覆盖着一片深红色滤光片,该滤光片只让材料中大于 710 nm 的叶绿素荧光通过,而对较短波长的激发光几乎全部截止。光传感器接收的光信号经前置放大器转换后传送给主放大器,再经分压电阻传给液晶式数字电压表和 12Bit A/D 多功能数据采集控制板。

测控软件用 C 语言编制,采取树状结构以菜单驱动和人机联作的工作方式,在菜单控制和支持下,将荧光测定步骤及其参数的数据分析用模块动态组合方式编程。在测定时,程序通过一个 I/O 输出通道触发打开激发光源,使材料被激发,同时开始荧光信号的采集。程序由定时触发方式依次以 15 μ s/点(采 20 点)精确记录荧光初始快速上升过程、0.5 ms/点记录荧光上升全过程和 50 ms/点记录荧光猝灭过程,并将荧光或电压信号强度—时间二维图象显示出来。

为了减少由于测定部位、激发光强漂移以及荧光发射不均引起的测量误差,本试验采用在同一条件下多次测量累加后平均的方法,由计算机直接给出平均后的动力学曲线中各参数的数据及标准差。

测定前将待测叶片用湿滤纸包裹,暗适应 30 min,激发光强为 $40 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,每次测定设 3 个重复。

射频电磁场辐射在本课题组研制的射频电磁波生物学效应实验系统中进行^{10]}。在该系统中可以形成一个不均匀性小于 ± 2 dB 的电磁场。将植物叶片置于其中,经受 300 MHz 电磁场处理 30 min,处理的最大环境功率密度分别为 1.3 和 5 mW/cm²。

2 结果与分析

2.1 大豆和香蕉叶片的荧光动力学曲线及射频电磁场对 F_v/F_m 的影响

在 $40 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 的激发光强下,大豆和香蕉叶片的荧光动力学曲线见图 1。由于在 Chla 荧光动力学分析中,动力学曲线的快速上升前沿部分具有重要意义^{11,12]},所以为了能够反映出曲线前沿的快

速上升情况, 在图 1 的时间标度上采取了不等距分布, 将起始 1 s 内的时间间隔扩大. 如果将图 1 中的时间标度等距分布, 图 1 的 Chla 荧光动力学曲线与前人在菠菜^[13] 和小麦^[14] 等植物叶片上发现的 Chla 荧光动力学曲线相似.

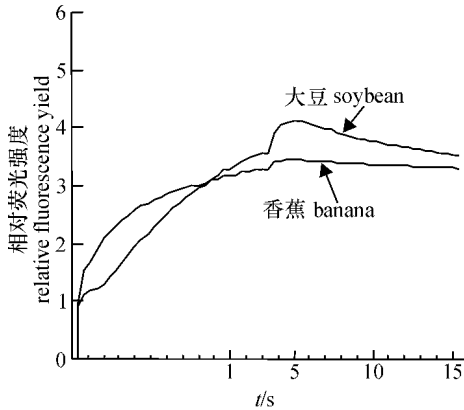


图 1 大豆和香蕉叶片的荧光动力学曲线
Fig. 1 Chlorophyll a fluorescence dynamic curve of the leaf of banana and soybean

在不同功率密度的 RFEF 作用下, 大豆和香蕉叶片的荧光动力学曲线都发生了一些变化. 曲线变化带来的荧光动力学参数的变化由 PFM 102 型植物荧光计的测控软件自动给出. 图 2-a 给出了最大环境功率密度为 1、3 和 5 mW/cm² 时荧光动力学参数

F_V/F_m 的变化. 其中, F_V 为可变荧光, 它是 PS II 活性中心受激发后发出的荧光; F_m 为最大荧光, 它是整个 PS II 复合蛋白体处于激发态时发出的荧光. 由于 F_V/F_m 反映了光合细胞中 PS II 原初光能转换效率的大小^[15]. 在图 2-a 中, 随着环境功率密度的增大, 大豆和香蕉叶片的 F_V/F_m 呈小幅减小的趋势, 表明 RFEF 会使大豆和香蕉叶片光合细胞的原初光能转换效率下降.

2.2 射频电磁场对 F_V/F_0 和 F_{VI}/F_V 的影响

RFEF 对大豆和香蕉叶片 F_V/F_0 和 F_{VI}/F_V 的影响分别见图 2-b 和图 2-c. 在图 2-b 和图 2-c 中, F_0 为固定荧光, F_V/F_0 表征了 PS II 的潜在活性^[16, 17]. $F_{VI}=F_1-F_0$, F_1 为偏转荧光. F_{VI}/F_V 表征了 PS II 无活性中心的相对含量^[11, 12]. 由图 2-b 和图 2-c 可见, F_V/F_0 随环境功率密度的增加而下降, 而 F_{VI}/F_V 随功率密度的增加而增大, 表明 RFEF 使大豆和香蕉叶片光合细胞 PS II 的潜在活性降低, PS II 无活性中心的相对含量升高. 并且光合细胞 PS II 的这种变化随电磁场环境功率密度的增加而呈增大的趋势. 结合图 2-a 的结果可以认为: RFEF 使光合细胞 PS II 无活性中心相对含量提高可能是叶片光合细胞原初光能转换效率下降的原因.

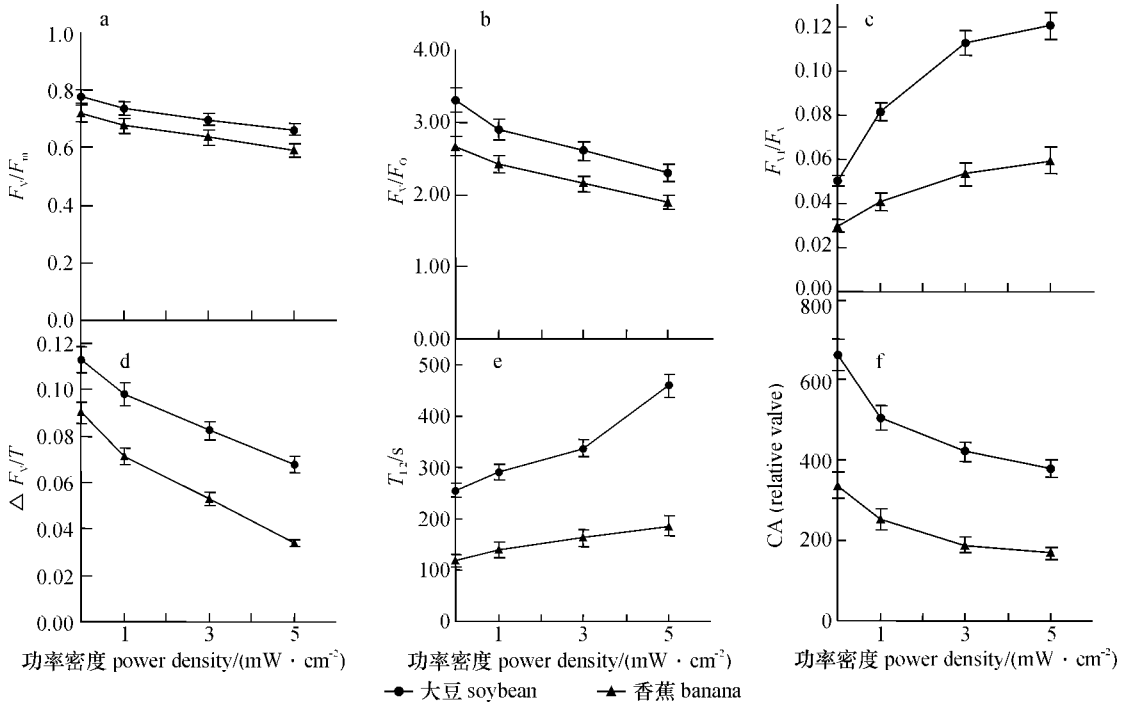


图 2 射频电磁场对荧光动力学参数的影响

Fig. 2 Effect of electromagnetic field on chlorophyll fluorescence dynamics parameters

2.3 射频电磁场对 $\Delta F_V/T$ 和 $T_{1/2}$ 的影响

在 Chla 荧光动力学分析中, $\Delta F_V/T$ 为可变荧光猝灭速率, 它反映了光合电子传递速率的大小; $T_{1/2}$ 为荧光从固定荧光 F_0 上升到最大荧光 F_m 的一半

时间, T_{V2} 越小, 说明 PS II 氧化侧电子传递速率越快^[9]. RFEF 对 $\Delta F_V/T$ 和 T_{V2} 的影响见图 2-d 和图 2-e.

由图 2-d 可见, 大豆和香蕉叶片的 $\Delta F_V/T$ 随辐射功率的增加而减小, 表明在 RFEF 的作用下发生在叶片光合细胞中的光合电子传递速率减慢, 并且 RFEF 的这种效应有随环境功率密度增加而增大的趋势. 图 2-e 中 T_{V2} 随环境功率密度的增大而增大的实验结果则进一步说明 PS II 氧化侧电子传递速率减慢.

2.4 射频电磁场对 CA 的影响

CA 为荧光上升互补面积, 它描述了 PS II 还原侧电子库 PQ 库的大小, 还原侧电子库是光合电子传递链的重要组成部分^[18]. RFEF 对 CA 的影响见图 2-f. 图 2-f 显示在射频电磁场的作用下大豆和香蕉叶片光合细胞 PS II 还原侧电子库 PQ 库随 RFEF 辐射功率的增加而减小.

3 讨论

在本试验中发现, 在 RFEF 的作用下大豆和香蕉叶片 Chla 荧光动力学参数中的 F_V/F_0 和 F_V/F_m 发生了变化, 并且随着环境功率密度的增大其值呈减小的趋势, 表明 RFEF 使大豆和香蕉叶片光合细胞 PS II 潜在活性降低, 原初光能转换效率下降, 下降的原因可能在于 PS II 无活性中心相对含量的升高. 这种 RFEF 使大豆和香蕉叶片光合细胞原初光能转换效率下降的作用不利于叶绿体把所捕获的光能转化为化学能, 从而会影响到光合碳同化过程, 因为在通常的情况下光合碳同化的基本限制因子被认为是 ATP 和 NADPH 供应不足.

值得注意的是, 在试验中还发现 RFEF 的作用使荧光动力学参数 $\Delta F_V/T$ 减小, T_{V2} 增大和 CA 下降, 表明在 RFEF 的作用下发生在叶片光合细胞中的光合电子传递速率减慢, PS II 氧化侧电子传递速率减慢, PS II 还原侧电子库 PQ 库减小. 由于在 RFEF 的作用下 PQ 库受到了损伤和破坏, 因此, 光合电子传递过程受阻可能也是光合细胞的原初光能转换效率下降的原因.

上述光合作用的变化是在 5 mW/cm^2 以下的射频电磁场作用下发生的, 一般认为 10 mW/cm^2 以下的电磁场所产生的生物学效应属于非热效应, 因为在此功率下, 生物体系不会产生明显的温度变化^[19]. 因此, 本研究揭示的 RFEF 对植物光合细胞的影响是

一种非热效应. 值得一提的是, 在本实验中, 还研究了 500 和 700 MHz 电磁场对香蕉和大豆叶片 Chla 荧光动力学的影响, 发现频率的差异对结果的影响不大. 看来, RFEF 对植物光合细胞的这种非热效应主要是通过强度因子起作用的. 因此, 可以初步得出结论, 低强度 RFEF 会通过非热效应对发生在植物光合细胞上的光合电子传递过程、PS II 活性中心和原初光能转换效率发生作用, 从而对植物光合作用产生不利的影响.

参考文献:

- [1] REPACHOLI M H. Low-level exposure to radio frequency electromagnetic fields: health effects and research needs [J]. *Bioelectromagnetics*, 1998, 19(1): 1-19.
- [2] THUROCZY G. Simultaneous response of brain electrical activity and cerebral circulation to microwave exposure in rats [J]. *Reviews on Environmental Health*, 1994, 10(2): 135-148.
- [3] 习岗, 宋清, 杨初平. 异常环境电磁场对生物影响的研究进展 [J]. *应用与环境生物学报*, 2003, 9(2): 203-206.
- [4] PHILIPPOVA T M, NOVOSELOV V I, ALEKSEEV S I. Influence of microwaves on different types of receptors and the role of peroxidation of lipids on recept-protein shedding [J]. *Bioelectromagnetics*, 1994, 15(2): 183-192.
- [5] BYUS C V, KARTUM K, PIEPER S et al. Increased ornithine decarboxylase activity in cultured cells exposed to low-energy modulated microwave fields and ester tumor promoters [J]. *Cancer*, 1988, 48(15): 4 222-4 226.
- [6] LAI H, SINGH N P. Acute low intensity microwave exposure increase DNA single strand breaks in rat brain cells [J]. *Bioelectromagnetics*, 1995, 16(2): 207-210.
- [7] 赵剑, 马福荣, 杨文杰, 等. 静电场对苜蓿愈伤组织抗寒能力的影响 [J]. *生物物理学报*, 2000, 16(2): 406-411.
- [8] 习岗, 杨运经. 作物细胞耐旱保护酶系统对外磁场的反应 [J]. *生物物理学报*, 1999, 15(4): 792-794.
- [9] 张其德, 朱新广, 卢从明, 等. 盐胁迫下 CO_2 浓度倍增对冬小麦叶绿体光能吸收和激发能分配的影响 [J]. *生物物理学报*, 1998, 14(3): 537-542.
- [10] 习岗, 候建强, 王海彬, 等. 射频电磁波生物学效应实验系统的研制 [J]. *华南农业大学学报*, 2003, 24(4): 92-95.
- [11] CAO J G. Chlorophyll a fluorescence transient as an indicator of active and inactive photosystem II in thylakoid membranes [J]. *Biochem Biophys Acta*, 1990, 1015(2): 180-188.

(下转第 97 页)

对比图 6(a)、(b)可知, 虚拟样机仿真结果与理论计算结果完全吻合。同样, 依照本文编制的程序所获得的 C 点速度和加速度数据与虚拟样机上 C 点的速度、加速度仿真结果也完全吻合, 说明本文建立的数学模型和编程是正确的。

5 结论

本文建立了常用平面五杆机构杆组运动分析数学模型, 编制了基于该模型的机构运动分析软件, 应用虚拟样机技术对数学模型和编制的程序进行了验证。由题例看出, 该分析软件可有效地应用于常用平面二自由度五杆机构的运动分析, 精确计算任意 II 级机构当原动件在一个循环内时每个位置的运动参数, 自动绘制运动线图。任意输入原始数据, 可获得

各种类型的平面五杆机构运动参数和运动线图, 具有较强的通用性。此外, 所建立的数学模型可用于进一步评价机构的运动和动力性能。

参考文献:

- [1] 申永胜. 机械原理教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999. 58—68.
- [2] 王保平, 廖仁文. 多杆多自由度机构的分析与模拟[J]. 军械工程学院学报, 1998, 10(1): 49—54.
- [3] 师忠秀, 慕明正, 程强. 平面连杆机构的杆组法运动分析及仿真[J]. 青岛大学学报, 2003, 18(4): 24—26.
- [4] 郭卫东, 张玉茹. 两自由度闭链触觉再现机构的设计与仿真[J]. 中国机械工程, 2004, 15(5): 438—441.
- [5] 王国强. 虚拟样机技术及其在 ADAMS 上的实践[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2002. 1—50.

【责任编辑 李晓卉】

(上接第 70 页)

- [12] 习岗, 杨初平, 宋清, 等. 香蕉 Chla 荧光动力学参量对激发光强的反应[J]. 光子学报, 2001, 30(4): 1 041—1 044.
- [13] RENGER G, SCHREIER U. Practical applications of fluorimetric methods to algae and higher plant research[A]. GVOINDJEE. Light Emission by Plants and Bacteria[C]. London: Academic Press, 1986. 587—618.
- [14] 习岗, 杨初平, 宋清. 烟草光合细胞 Chla 荧光动力学和超弱发光对低强度射频电磁场的响应[J]. 光子学报, 2004, 33(5): 622—625.
- [15] SCHREIBER U, BILGERW N C. Chlorophyll fluorescence as Q nonintrusive indicator for rapid assessment of *in vivo* photosynthesis[A]. SCHULZE E D, CALDWELL M M. Eco-physiology of Photosynthesis[C]. Berlin: Springer-Verlag, 1994. 49—70.
- [16] SCHREIBER U. New ways of assessing photosynthetic activi-

ty with a pulse modulation fluorometer[A]. LICHTENTHALER H K. Applications of Chlorophyll Fluorescence in Photosynthesis Research, Stress Physiology, Hydrobiology and Remote Sensing[C]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1988. 63—69.

- [17] LICHTENTHALER H K. *In vivo* chlorophyll fluorescence as a tool for stress detection in plants[A]. LICHTENTHALER H K. Applications of Chlorophyll Fluorescence in Photosynthesis Research, Stress Physiology, Hydrobiology and Remote Sensing[C]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1988. 129—142.
- [18] 朱新广, 张其德, 匡廷云. NaCl 对小麦光合功能的伤害主要是由离子效应造成的[J]. 植物学通报, 2000, 17(4): 360—365.
- [19] 赵东红, 李建宏, 张双全, 等. 低功率微波辐射对离体人红细胞的损伤效应[J]. 环境科学进展, 1998, 6(4): 70—74.

【责任编辑 李晓卉】