

ESR条件下的微波辐射对小麦种子 萌发过程的影响*

张孟丹 丘海明

(生物学系) (无线电电子学系)

摘要 本文把2个小麦品种(法国和中国春小麦)经浸泡17h已开始萌动的种子暴露于具有特定共振条件的电子自旋共振(ESR)场72h,实验选用的高频电磁场频率分别为 $\nu_1 = 147.9\text{MHz}$, $\nu_2 = 53.6\text{MHz}$, $\nu_3 = 84.4\text{MHz}$. 实验结果显示,频率为147.9MHz和84.4MHz的ESR高频场对萌发种子胚芽的生长有抑制效应,其抑制峰分别在 $H_0 = 2.15\text{A}$, 2.25A 处和 $H_1 = 3.5\text{V}$ 处,而频率为53.6MHz的ESR场对种子胚芽生长则有促进作用,其促进峰在 $H_1 = 4.0\text{V}$. 这种依共振条件为转移的ESR生物学效应是一种非热致效应.本工作证实了ESR场对萌发胚芽生长有调控作用.这就从实验方面支持和丰富了Fröhlich提出的关于非热致生物学效应机制的理论.

关键词 ESR场,非热致生物学效应,长程相位相关作用,频率窗现象,功率窗现象,种子萌发

随着电磁生物学的发展,电磁波对生物机体作用的“热效应”已为大量实验所证实,理论分析也日趋成熟.到五十年代,一些学者发现,强度很弱的电磁辐射对生物系统作用后虽不引起温升,却能导致其生理机能或形态学方面的变化.据此,有人提出了“非热效应”假说^[1,2].1968年,Fröhlich指出^[3],由于细胞膜的非极性性质,氢键的重复出现和非定域化电子阱(pockets of non-localized electrons)的存在,使得生物系统中存在纵向振荡模(longitudinal electric modes),其振荡频率在 $10^{11} \sim 10^{12}\text{sec}^{-1}$ 的范围.在含有纵向电模的生物系统中,能量将以高度有序的形式贮存,这种能量有序化表现为长程相位相关作用(longrange phase correlations).Fröhlich于1982年又提出^[4],很小的电磁波功率密度就能触发特定的生物学事件(非热致生物学效应).按照Fröhlich的观点^[5],可以设想生物系统中存在一组酶,其中有些处于激活的极性态,另一些则处于未激活的非极性态,还有底物分子,这三者都表现出有远距离的选择性相互作用.由这个模型可推知,生物系统中发生的化学振荡与往返于极性和非极性态的酶所引起的电振荡相关连.而这样的模型具有极限环性质.Kaiser研究了外场对极限环振荡系统的影

本文1992年2月13日收到

*本工作的主要部分在巴黎十一大学法国国家科研中心基础电子学研究所完成

响^[6], 解释了非热效应的“频率窗”和“功率窗”现象。Fröhlich的经典性非热效应理论得到了W. Grundler等的实验支持^[7,8]。1968年, Y. H. Tchoo发现了ESR场影响生物机体生长的现象^[9]。本文是在Tchoo教授指导下进行的关于“ESR场对小麦种子萌发过程的影响”的实验研究。实验结果提示, 微弱的ESR场有抑制或促进小麦种子萌发的作用, 而“抑制”或“促进”的作用与所用的射频场频率及其磁场分量 H_1 的大小或直流磁场的大小有关。这一结果可从Fröhlich的理论得到解释, 并在实验上支持了这一理论。

1 材料和方法

1.1 实验原理和装置

由电子自旋共振原理知, 在直流磁场中, 构成生物系统(细胞)的物质的自由电子将处于 $m_s = \pm 1/2$ 的二个不同能态(m_s 称为自旋数)。若再以高频电磁波辐射物质样品, 并使高频电磁波磁场分量 H_1 的偏振方向垂直于直流磁场 H_0 ; 且高频电磁场的频率 ν 和直流磁场强度 H_0 之间有如下关系

$$h\nu = g_e\mu_B H_0, \quad \nu = \frac{g_e\mu_B}{h} H_0 = \nu \cdot H_0$$

式中 h 是planck常数; μ_B 称为Bohr磁子; g_e 称 g 因子(对于自由电子 $g_e \approx 2.003$); $\nu = 2.8\text{MHz/G}$; 将这些常数代入上式, 得 $H_0 = 0.357 \times 10^{-6} \text{ gauss}$ 。当高频电磁场的频率适合这个条件时, 样品中的自由电子将强烈吸收电磁波能量而从低能态跃迁至较高能态, 即发生共振跃迁。在跃迁过程中, 电子的自旋反向。上式即为共振条件。满足这一共振条件通常可采用两种方式, 一为固定 H 改变 ν , 一为固定 ν 改变 H 。本实验用后者, 即固定 ν 而改变 H 使共振条件得到满足。

据前人的工作^[10]将实验分成3组: 第一组(下称147.9M组)电磁波频率 $\nu_1 = 147.9\text{MHz}$, 相应的直流磁场 $H_0 = 52.820\text{G}$; 第二组的实验频率较低, $\nu_2 = 53.6\text{MHz}$ (称53.6M组), 相应的 $H_0 = 19.135\text{G}$; 第三组的频率选在第一、二组之间, $\nu_3 = 84.4\text{MHz}$ (称84.4M组), 相应的 $H_0 = 30.131\text{G}$, 目的是观察不同频率下的ESR生物学效应, 并探索低频ESR效应用于农业的可能性。3组的实验装置基本相同。装置框图如图1所示。

①直流磁场 H_0 由通有高稳定度的直流电流的Helmholtz线圈产生。147.9M组的线圈平均半径 $a = 20\text{cm}$; 53.6M组的 $a = 20\text{cm}$; 84.4M组 $a = 30\text{cm}$ 。直流磁场均匀区能保证样品的全体都处于ESR条件下。无商品化亥氏线圈, 三组亥氏线圈都是我们自己设计制作的^[1]。 B_{M1} B_{M2} 是交流调制线圈, 供确定系统的共振条件使用。②高频电磁场。由一商品化的高频功率发生器输出, 经衰减后耦合到一个镀银电感线圈中。样品置于线圈内, 如图1所示。为了验证在ESR条件下, 高频磁场频率 ν 和直流磁场分量 H_1 的大小对生物效应的影响。高频场线圈是一个经严密设计的特殊形状的线圈。

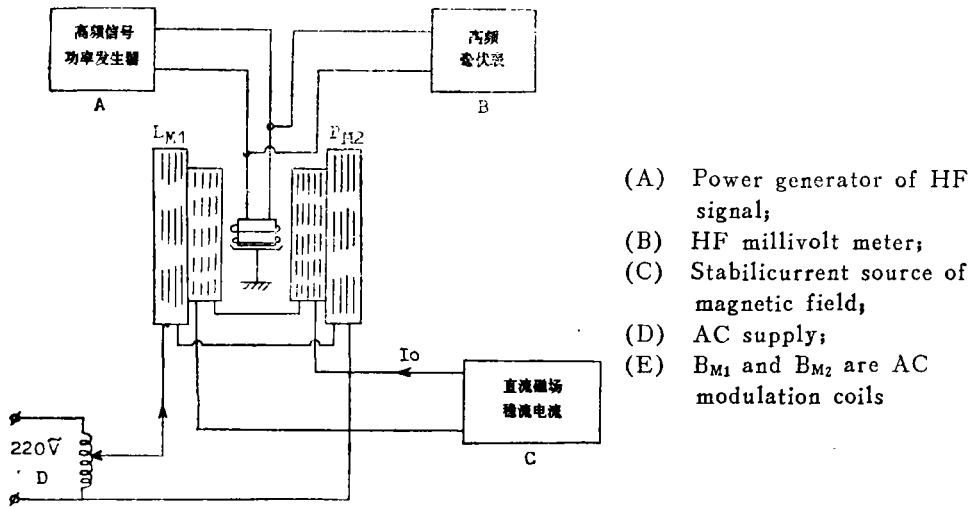


图1 电子自旋共振装置原理图
 Fig1. The block diagram for ESR arrangement

1.2 实验样本

实验用的是法国春小麦品种(147.9M及53.6M组)和中国春小麦品种(84.4M组)。为尽可能缩小个体差异,应严格挑选每粒种子。将饱满匀称的种子:147.9M和53.6M种子浸泡于20~21℃,84.4M组种子浸泡于26~28℃的清水中,约浸泡17h,然后择选芽未冲裂种皮的种子160粒,分盛于直径为5.20cm的8个有机玻璃培养皿中。培养皿内垫二层滤纸,注入5ml水于滤纸上。每个培养皿放20粒种子。摆放种子应注意几何位置。8个培养皿分为2组:4个放入ESR场(处理组);4个放在场外(对照组)。147.9M和53.6M的实验环境温度为22℃~24℃;84.4M组的实验环境温度为29℃~30℃。对照组和处理组的环境温度偏差控制在±0.1℃,处理时间为72h。

1.3 数据处理方法

经72h处理后,对种子胚芽长度逐粒进行测量,求出处理组与对照组的胚芽平均长度和标准差,并进行两组间差异的显著性t或t'测验。在此后将ESR处理组与对照组的样本均数相差的显著性水平达于t(n')0.05显著点的均数留下,算出它们的相对长度。对实验结果作这样的处理,犯错误的概率为5%。

2 结果和讨论

用于指示ESR生物学效应的指标是种子胚芽相对平均长度,可用式子 $\bar{X}_c - \bar{X}_T / \bar{X}_c$ 表示。它是对照组种子胚芽平均长度(\bar{X}_c)与处理组种子胚芽平均长度(\bar{X}_T)差和对照组种子胚芽平均长度之比。

1)丘海明,张孟丹.电子自旋共振生物学效应实验用磁场线圈的设计和绕制,1985

2.1 147.9MHz组

本组实验是固定 $H_1(=2.0V)$, 改变直流磁场强度 H_0 , 观察ESR条件下 H_0 对种子萌发过程的影响。结果列于表1。

表1 ESR条件下直流磁场强度对种子萌发的影响

Tab.1 Effect of DC magnetic field density under ESR on seed germination

Magnetic field Density of direct current $H_0(A)$	Control		Treated		Relative average length $(\bar{X}_c - \bar{X}_T) / \bar{X}_c$ (%)
	n	$\bar{X}_c(\text{with SD})$	n	$\bar{X}_T(\text{with SD})$	
1.75	49	17.76 ± 4.77	47	15.84 ± 4.69	0.108
1.85	53	25.76 ± 5.43	53	21.17 ± 6.54	0.178
1.95	49	12.96 ± 3.30	39	11.58 ± 3.63	0.106
2.05	55	23.76 ± 7.83	51	20.78 ± 6.61	0.125
2.15	57	21.81 ± 5.23	60	17.78 ± 5.38	0.185
2.15	59	28.32 ± 4.96	58	25.05 ± 4.90	0.116
2.15	51	25.12 ± 5.86	47	20.20 ± 7.39	0.196
2.15	51	19.98 ± 5.44	53	16.83 ± 4.84	0.158
2.17	60	26.93 ± 4.08	59	25.61 ± 3.22	0.049
2.25	47	30.28 ± 9.39	51	22.56 ± 10.15	0.255
2.25	55	22.47 ± 4.85	55	19.04 ± 4.47	0.153
2.25	54	35.41 ± 4.55	60	32.80 ± 5.96	0.074
2.50	58	25.62 ± 4.74	54	22.74 ± 4.95	0.112
2.55	59	25.92 ± 6.95	51	21.47 ± 7.46	0.172
2.59	60	19.15 ± 3.33	55	16.71 ± 3.53	0.128
2.64	58	24.50 ± 3.54	59	23.22 ± 3.90	0.052
2.80	58	38.88 ± 4.17	57	34.14 ± 6.00	0.122

Note: Amplitude of HF-field $V_0=2.0V$,
Modulation volt (Modulation field density) $H_\infty = 10\sim 45V$,
HF-field frequency $\nu_1=147.9MHz$

从表1和图2可见, $\bar{X}_c - \bar{X}_T$ 为正值, 说明在高频场的频率为147.9MHz, 场强为2v (以加在高频线圈上的电压值指示)时, ESR效应对小麦萌发起抑制作用。图2还表明, 在直流磁场强度 H_0 为2.15A (以流经直流磁场线圈的电流强度指示磁场强度, 50mA/1Gauss), 即 $H_0 \approx 43Gauss$ 和2.25A处, 即 $H_0 = 45Gauss$ 各有一个“抑制峰”。

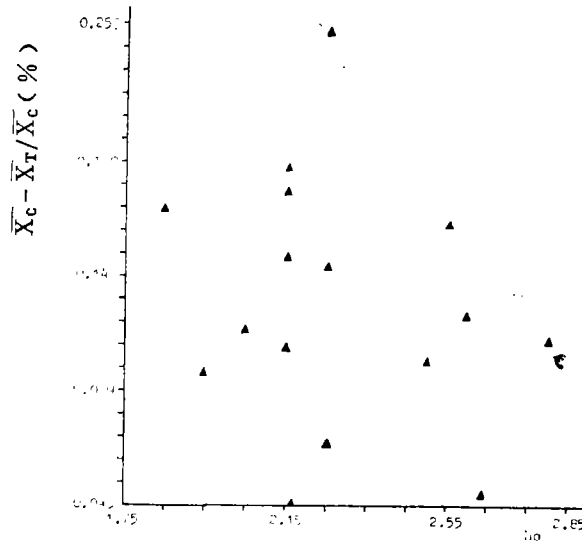


图 2 在 ESR 条件下 H_0 对 $(\bar{X}_C - \bar{X}_T) / \bar{X}_C$ 的作用 (示抑制峰)

Fig.2 Action of H_0 on $(\bar{X}_C - \bar{X}_T) / \bar{X}_C$ under ESR condition, showing inhibition peak (at $H_0 = 2.15A, 2.25A$)

2.2 53.6M组

本组的部分实验结果列于表 2。设计本实验的目的在于了解射频场频率较低时, 射频场场强 H_1 对小麦种子萌发过程的影响, 试图找出能促进种子胚芽发育的 H_1 最佳值。

表 2 ESR 条件下射频磁分量对小麦种子萌发的作用

Tab.2 Action of RF-magnetic component under ESR on seed sprouting

Radiofrequency commagnetic ponent $H_2(V)$	Control		Treated		Relative average length $(\bar{X}_C - \bar{X}_T) / \bar{X}_C(\%)$
	n	\bar{X}_C (with SD)	n	\bar{X}_T (with SD)	
3.5	75	23.32 ± 5.65	78	24.94 ± 5.01	-0.069
4.0	78	18.31 ± 5.25	72	20.55 ± 5.31	-0.122
4.0	77	30.95 ± 3.22	79	32.40 ± 4.25	-0.047
4.0	80	27.00 ± 4.12	79	28.61 ± 3.29	-0.060
4.0	79	29.82 ± 5.28	79	33.11 ± 5.56	-0.110
4.0	78	21.19 ± 3.75	80	22.45 ± 3.74	-0.062
4.0	78	26.32 ± 5.43	79	28.01 ± 4.18	-0.064
4.0	69	15.65 ± 4.96	61	17.33 ± 5.45	-0.108
4.5	75	13.11 ± 3.25	72	17.67 ± 4.92	-0.348
5.0	71	18.68 ± 5.28	74	20.93 ± 7.55	-0.121

Noti: RF-field frequency $\nu^2 = 53.6MHz$,

Modulation field density (modulation current) $H_\infty = 40mA$

从表 2 和图 3 可见, $\bar{X}_C - \bar{X}_T$ 是负值, 且当射频场频率 $\nu_2 = 53.6MHz$ 时, 射频场强度 $H_1 = 4.0v$ 处有一个种子胚芽生长“促进峰”。这一宏观现象和表现生理作用, 如能在微观水平上对 ESR 场影响萌发种子内部的新陈代谢细节进行研究并加以印证, 当会有很大的理论意义。

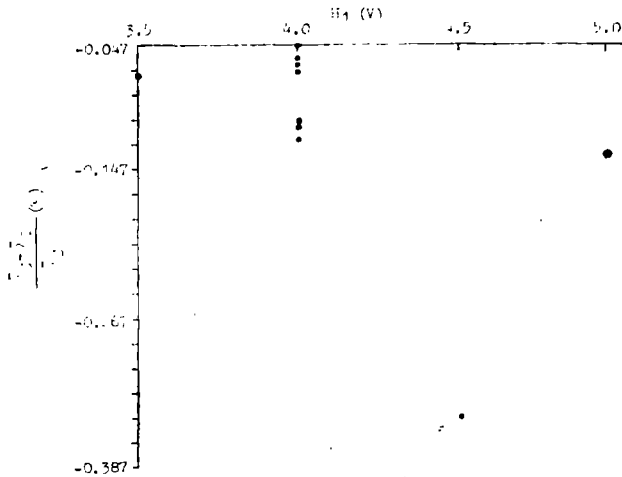


图3 ESR条件下 H_1 对 $(\bar{X}_c - \bar{X}_r)/\bar{X}_c$ 的作用(示促进峰)

Fig.3 Effect of H_1 on $(\bar{X}_c - \bar{X}_r)/\bar{X}_c$ under ESR condition, showing acceleration peak (at 4.0v)

2.3 84.4M组

本组实验是夏季(6至7月间)进行的,平均室温高达 29.5°C ,对照组的种子胚芽生长速率比147.9M组(平均室温 23°C)的大许多,而比较处理组的胚芽生长速率,84.4M组慢得多,这表明本组的胚芽生长速率受到ESR场更强的抑制作用,如图4所示。从表3所列数据则看到在 $H_1 = 3.5\text{V}$ 处,有一个明显的胚芽生长“抑制峰”。

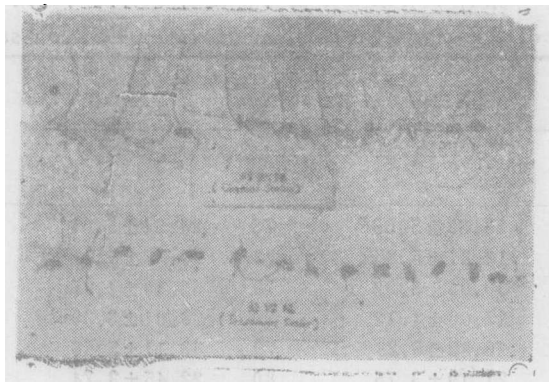


图4 照片示出ESR场对小麦种子胚芽生长的抑制

Fig.4 Photograph representation of ESR field ($\nu_3 = 84.4\text{MHz}$, $H_1 = 3.2 \sim 3.8\text{V}$) inhibites the growth of the plumule of the wheat seeds

为什么在 $\nu_1 = 147.9\text{MHz}$, $V_1 = 2.0\text{V}$, $H_0 = 2.15\text{A}$ 和 $\nu_3 = 84.4\text{MHz}$, $H_1 = 3.5\text{V}$ 这2个特定的ESR条件下,出现“抑制种子萌发”现象;而在另一个ESR条件($\nu_2 = 53.6\text{MHz}$, $H_1 = 4.0\text{v}$, $H_0 = 19.135\text{guass}$)下,则出现“促进种子萌发”现象?另外,ESR场所能提供的电磁能是很有限的,约 10^{-6}eV ,这么微弱的能量能引起生物系统那么强大的响应吗?根据Fröhlich的非热效应理论和Tchao的“ESR生物学效应”的假说,我

表3 ESR条件下射频磁分量对胚芽生长的影响

Tab.3 Effect of RF-magnetic component under ESR on plumule growth

Radiofrequency magnetic com- ponent $H_1(V)$	Control		Treated		relative average length ($\bar{X}_c - \bar{X}_T$)/ $\bar{X}_c(\%)$
	n	$\bar{X}_c \pm SD$ (mm)	n	$\bar{X}_T \pm SD$ (mm)	
3.2	46	37.08 ± 1.55	40	8.86 ± 1.24	0.461
3.2	44	38.02 ± 1.82	40	8.42 ± 1.06	0.779
3.7	32	34.63 ± 1.95	30	8.92 ± 1.13	0.0742
3.5	48	34.80 ± 1.48	46	7.28 ± 1.35	0.791
3.5	62	36.15 ± 1.73	59	5.45 ± 1.68	0.739
3.5	60	37.40 ± 1.92	61	9.25 ± 1.75	0.753
3.5	45	39.54 ± 1.89	43	5.95 ± 1.08	0.850
3.5	45	38.38 ± 1.98	44	6.80 ± 1.06	0.823
3.5	31	37.65 ± 1.37	29	6.74 ± 1.10	0.821
3.5	30	35.80 ± 1.45	30	7.52 ± 1.09	0.790
3.5	47	38.32 ± 1.38	44	8.65 ± 1.28	0.774
3.5	45	38.30 ± 1.56	43	8.30 ± 1.30	0.783
3.5	48	35.66 ± 1.66	46	7.45 ± 1.25	0.791
3.3	48	34.51 ± 1.40	47	7.82 ± 1.35	0.773
3.3	48	37.20 ± 1.58	45	9.35 ± 2.04	0.749
3.3	44	37.40 ± 1.61	45	6.90 ± 1.30	0.816
3.3	42	34.35 ± 1.96	40	5.95 ± 1.15	0.827
3.3	43	36.74 ± 2.03	42	8.57 ± 1.40	0.767
3.8	45	39.15 ± 1.85	42	9.40 ± 1.86	0.760
3.8	48	37.80 ± 1.41	46	9.35 ± 1.75	0.753
3.6	46	35.42 ± 1.63	43	10.25 ± 2.15	0.711
3.6	46	38.15 ± 1.56	45	10.10 ± 2.00	0.735

Note: $\nu_3 = 84.352\text{MHz} \sim 84.355\text{MHz}$, $I_{DC} = 475\mu\text{A}$, $U_{AC} = 70 \sim 80\text{V}$, $U_{FR} = 4.0 \sim 2.4\text{V}$
 $RT = 30.8 \pm 0.1(\text{C})$

们试图作如下解释:

(1) 置于不同共振条件下的ESR场中的生物系统(细胞、器官组织或机体),其自由电子具有不同的物理状态,不妨把这类具有不同物理状态的电子称之为“生命电子”。所谓生命电子的物理状态,这里主要指低自旋态和高自旋态的能量水平,处于低能态和高能态的自旋电子数,电子自旋方向及其配对情况,以及这些电子处于非定域化电子阱中,易形成纵向电振荡,等等。生命电子所具有的物理状态与其所在的原子、分子的反应能力(生化活性)有关。按经典磁共振理论,在ESR条件下,外加射频磁场 H_1 的旋转方向和频率与自由电子磁化矢量绕 H_0 的转动同步,一个恒定的作用耦合到磁化矢量上,使几乎所有自由电子的自旋方向改变并相关,能量处于有序化状态。总之,处于ESR场中的生命电子,吸收了高频场能量后,具有相位相关作用。

(2) 萌发种子内部存在着两个基本的物质和能量代谢过程:一个是把贮藏于胚乳组织内的淀粉、蛋白质逐步氧化、分解,变成可被胚芽吸收利用的营养成分,且由一群酶催化的复杂酶促生化反应组成的物质异化代谢过程;另一个是细胞呼吸代谢过程,它为前一个过程提供能量。

(3)在ESR条件下,萌发着的种子内部的什么机制受ESR场作用并引起非热致效应呢?我们认为,处于某特定条件下的ESR场将导致萌发种子内部发生的氧化、分解酶促反应中产生的自由电子(生命电子)吸收一定值的能量,并发生从低自旋态向高自旋态跃迁,自旋状态改变。这相当于使酶蛋白分子中原有电子的分布状态发生改变。据Fröhlich的理论模型^[3],可以认为,在ESR场作用下,萌发种子的自旋电子(它们间有相位相关作用)的物理状态的改变起了触发种子内一组酶的活性,在系统内形成“功率窗”现象。从而实现对萌发种子内营养物质异化代谢速率的调控。基于同样的机制,ESR场也可以使吸呼吸代谢过程中产生的自由电子产生共振跃迁,从而达到对ATP合成反应速率的控制,这实质上是一个借助小能量控制大量的过程。

诚然,ESR场引发的非热致效应是表现为“抑制”还是“促进”种子萌发,则依共振条件,尤其是高频场频率为转移。已经知道,电磁场的非热致作用除具有“功率窗”现象外,还具有“频率窗”现象^[12]。本文的结果说明,ESR场同样也具有功率窗现象和频率窗现象,这就较好地解释了为什么某些频率下(147.9MHz, 84.4MHz)的ESR场表现出抑制种子萌发的作用,而在另一些频率下(如53.6MHz)的ESR场则有促进种子萌发作用这样一种有趣现象。

3 小 结

(1)同微波辐射生物学的实验存在着重复性差的现象一样,进行ESR条件下的电磁波辐射生物学实验也存在着重复性差的问题。导致实验重复性差的原因固然是多方面的,但值得注意的主要有几个:一是保证仪器装置的物理参数(如 H_0 , H_1 等)的稳定度;二是控制好能直接影响种子胚芽生长的温度、水份和空气,使处理组和对照组得到尽可能一致的环境条件,尤其是温度条件应控制好。我们的试验表明,只要对照组与处理组所处的环境温度相差 0.2°C ,ESR生物效应就会完全被掩盖,这是对本实验用的宏观参数来说的。可以想象,如果在微观水平上研究ESR效应,对环境条件和处理条件等的一致性的要求更高,不然将导致实验无法重复;三是生物样本中存在个体差异,这要求在判定处理组是否存有ESR生物学效应时,必须经过样本差异显著性测验,不能只是简单地认为,只要两组样本均数(胚芽平均长度)有差异,就下结论认为有ESR效应存在。同时还应注意样本含量不宜太小。

(2)当实验对象选定后,选择什么样的生物学指标(参数)来指示ESR生物学效应,是一个十分重要的问题。我们认为,不论开始选用哪种指标或参数,最后都必须深入到微观水平去研究,要选用微观范畴的指标或参数。亦即一定要进行微观水平上的ESR生物学效应的研究,舍此无法阐明ESR生物效应的机制。

参 考 文 献

- 1 Baillie H D. Thermal and Nonthermal Cataractogenesis by Microwave HEW, BRH/DBE 70-QP,59
- 2 ОБОСОВ АН, ВОПР КУРОРТОП, 1979, 3:73

- 3 Fröhlich H. Intern Quantum Chem, 1968, 2: 641~649
- 4 Fröhlich H. Bioelectromagnetics, 1982, 3(1):45~46
- 5 Fröhlich H. Neurosci Res Progr Bull, 1977, 15:67~72
- 6 Kaiser F. in "Biological Effects and Dosimeter of Nonionizing Radiation" (S Micelson ed). New Youk: Plenum Press, 1982. 251~282
- 7 Grundler W, Keilmann F. Z Naturforsch, 1978, 33c:15~22
- 8 Grundler W, Keilmann F. Physical Review Letters, 1983, 51:14
- 9 Tchao V H (Inst. of Founbational Electronic, Paris XI Univ, Bld 220, F-91405, Orsay Cedex, France). The Effect of ESR on the Regeneration of Freshwater Turbellaria, 1978
- 10 Roberts Jr Norbert J, Michaelson Sol M. Univ. of Rochester School of Medicine Rochester, New York, 14642 U S A, 1985
- 11 Adey W R. in "Biological Effects of Nonionizing Radiation" (Illinger K H ed). AM Chem Soc, Washington D C, 1981, 282

The Effects of Microwave Radiation under ESR Conditions on Germination Process of Seeds of Spring Wheat

Zhang Mengdan* Qiu Haiming

Abstract The Present relates the experiment that the seeds of two strains of French and Chinese spring wheat, on the verge of germination after being soaked for 17 hours, were exposed in the ESR field under specific conditions of resonance for 72 hours, with frequencies of the high-frequency electromagnetic field respectively of $\nu_1=147.9\text{MHz}$, $\nu_2=53.6\text{MHz}$, and $\nu_3=84.4\text{MHz}$. The result of the experiment, indicates that ESR fields of 147.9MHz and 84.4MHz have an inhibition effect on the growth of the plumule of the wheat seeds, with its inhibition peak being at $H_0=2.15\text{A}$, 2.25A and $H_1=3.5\text{V}$, while the ESR field of 53.6MHz has an acceleration effect on the plumule, with its acceleration peak being at $H_1=4.0\text{V}$. This biological effect which varies depending on resonance conditions is a nonthermal effect. The experiment has proved that ESR field has an effect of ajustment and control an the growth of the plumule of the seed, which supports and enriches experimentally the theory produced by Fröhlich on the machenism of the non-thermal biological effect.

Keywords ESR feild, nonthermal biological effect, long-range phase correlation, frequency window, power window, seed germination

* Department of Biology