

电磁波非热效应机制的一种理论

陈 国 璋

(浙江医科大学微波研究室, 杭州)

在电磁波生物效应的研究中, 一个迫切的任务就是回答低强度电磁波在不引起体温上升的前提下能否产生生物效应, 即非热效应 (non-thermal effect)。说迫切, 那是因为目前国际上非电离辐射的卫生标准相差很大。而在我国, 居民非电离辐射卫生标准正在酝酿和制订之中, 这个问题就显得更为迫切。在非热效应的研究中, 实验上已经取得一些漂亮结果^[1,2], 但欲以此为基础来建立系统理论还远远不够; 而理论上提出的好几种模型, 但都有待进一步证实。本文结合某些作者的实验结果, 简略介绍 Fröhlich 关于非热效应机制的理论。这一理论虽远不是成熟的, 但由于它能较好地解释某些实验现象, 能代表本研究领域的潮流, 反映本学科前沿水平, 而为不少学者所引用。

目前, 一般认为电磁波(本文中是指红外以外的非电离辐射电磁波)有两类生物效应, 即热效应和非热效应。所谓热效应, 是指电磁波辐射到生物体中, 使其体温升高, 从而增加细胞的代谢水平, 并由此而引起各种生理和病理变化。所谓非热效应, 是指电磁波通过使生物体温度升高的热作用以外的方式来改变生理生化过程的效应。尽管在定义上二者可以划分得很清楚, 但实际上在电磁波生物效应的研究中, 却很难区分。例如人能够听到一定频率和宽度脉冲调制的微波^[3], 而其平均功率密度只有 120—135 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 。对此, 有人认为是非热效应引起的, 但经过仔细测量才知道, 即使这么弱的脉冲微波却能使听骨肌肉温度升高 10^{-6}°C ^[4], 因而有人认为“听效应”属于热效应。

电磁波热效应的特点是, 在平衡态附近, 生

物系统对电磁波的应答一直到 10^5 V/m 时都是线性的; 系统产热正比于场强的平方; 并且这种热效应和用其它方式来加热生物系统所产生的效应是相同的^[5]。而非热效应的特点是, 生物系统对满足一定条件的电磁波的应答是非线性的, 这种应答方式和生物学上免疫应答相类似, 也和化学上的自催化反应以及物理学上的相变过程相类似。非热效应有频率窗现象和功率窗现象 (图 1 和图 2)^[6]。在产生应答的时间上, 非热效应比热效应快而直接, 因为它不须要把电磁能变为热能, 然后再产生生物效应。

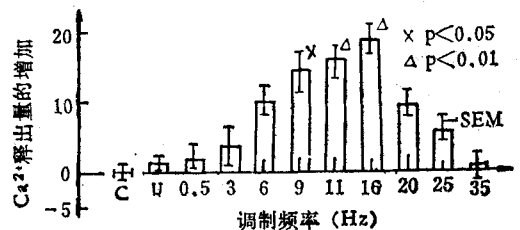


图 1 电磁波的“频率窗”现象

极低频正弦波调制的 147 MHz 的电磁波对新生鸡离体前脑组织 Ca^{2+} 释出的影响。可见调制频率为 16 Hz 时释出最多。C 为未暴露组, U 为未调制的 147 MHz 暴露组, SEM 为标准误。

引起非热效应的电磁波功率密度可以是很微弱的, 但作为非热效应的生物系统的应答却很大。我们可这样来估计两者的大小: 设生物系统是极性溶液(相应于细胞质的情况), 为了使极性分子随电磁场取向, 后者则必须克服溶液分子的热骚动, 即要求 $\mu E > KT$, 这里 E 为场强, μ 为极性分子的偶极矩, 并设 $\mu = 100$ 德拜; T 为溶液的绝对温度, 并设 $T = 310^{\circ}\text{K}$, K 为玻尔兹曼常数, 则这时所要加的电场强度就要大于 10^5 V/cm , 如果设生物系统的过程是

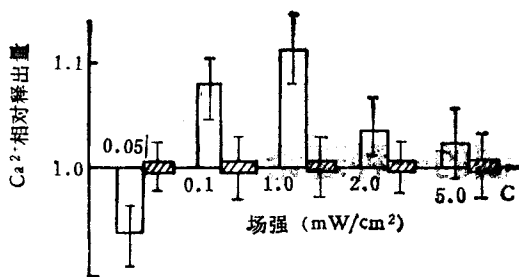


图2 电磁波“功率窗”效应

16 Hz 正弦波调制的 450 MHz 电磁场,功率密度为 0.1 至 1.0 mW/cm² 范围时才使新生鸡离体前脑组织 Ca²⁺ 释出量显著增加, C 为未暴露组。

电子电荷沿膜定向移动,则为了克服热骚动,加在电子上的电压则应为 $V > KT/e = 3 \times 10^{-2}$ (伏)。这里 e 为电子电荷,对厚度约为 10^{-6} cm 的细胞膜来说,则电场强度至少应为 3×10^4 V/cm。如果这类效应由微波场来诱发,则在真空中(阻抗 377 欧)其功率密度就要为 10^6 W/cm²,然而产生非热效应的电磁波功率密度却只在 10 mW/cm² 以下;在图 2 中的“功率窗”效应中,只有 1 mW/cm²,二者相差 7—8 个数量级!这么微弱的功率密度何以能诱发如此强大的生物应答呢? Fröhlich 指出^[3],激发这样应答的大部分能量是由生物系统本身提供的,外加电磁场只起引发作用或开关作用。他曾证明,以功率密度 S 提供能量,当某些条件满足以及 $S > S_0$ (这里 S_0 是阈值)时,可以导致单一模式振荡的相干激发作用。设 $S = S_m + S_b$, 这里 S_m 是微波能功率密度, S_b 是生物系统为特定事件所备的代谢能功率密度,而当 $S_b = S_0 - \epsilon$, ϵ 是阈值以下一个很小的值时,只要 $S_m > \epsilon$, 则很小的微波功率密度 S_m 就能触发特定的生物学事件,即非热效应。

电磁波是一种振荡着的电磁能,那么生物体内的什么机制和它产生电磁相互作用而引起非热效应的呢? Fröhlich 设想^[7]: 有一群酶,其中有 N 处于激活的极性态, Z 处于未激活的非极性态, S 是底物分子,这三者都表明有长程选择性相互作用,这种作用倾向于用流进方式或激发作用来增加它们的数量。可用下列方程来

表示它们之间的关系:

$$\dot{N} = \alpha NZS - \beta N \quad (1)$$

$$\dot{S} = -\alpha NZS + \gamma S \quad (2)$$

$$\dot{Z} = -\alpha NZS + \beta N - \lambda(Z - A) \quad (3)$$

这里 γS 和 $\lambda(Z - A)$ 是由长程选择性相互作用产生的, β 是酶从激发态回到基态的比例常数, γ 代表底物分子的长程吸引作用。方程 (3) 是无关的, (1) 和 (2) 即构成著名的 Lotka-Volterra 方程。对于一个接近平衡的系统, 设 v 和 σ 分别为 N 和 S 对平衡时值的偏离, 则方程 (1) 和 (2) 可简化为:

$$\dot{v} = \gamma \sigma \quad (4)$$

$$\dot{\sigma} = -\beta v \quad (5)$$

由此得到

$$v = v_{\max} \cos(\sqrt{\beta \gamma} t + \varphi_0)$$

可知极性酶的浓度在平衡点附近作余弦振荡, 角频率为 $\sqrt{\beta \gamma}$, 这样, 化学振荡就和往返于极性和非极性态的酶所引起的电振荡相关连。

Fröhlich 进一步认为, 在这个模型中, 大部分蛋白质, 底物, 离子和结构水系统通过酶-底物反应产生的能量而被激活, 预期它们以 10^{11} Hz 的频率作相干振荡, 通过由这种相干振荡而产生的相互作用, 系统实现很慢的化学振荡和电振荡, 其频率很可能就位于在脑中发现的 20 Hz 的范围。他又从这个系统的介电性上考虑, 受激发的酶分子不依赖时间的部分(平衡时的值 N_e) 偶极矩被系统中离子屏蔽了, 依赖时间的部分 v (即 $N - N_e$) 不应完全被屏蔽, 因而产生巨观振荡的电极化强度 P 。在介电性质上, 这个系统倾向一种铁电不稳定性 (Ferroelectric instability), 这就诱发产生正比于 P 的变化率 $\dot{P}$, 而 P 受正比于 $P_{\max}^2 - P^2$ 的活化能 U 控制, 其中 $P_{\max}$ 是达到铁电态时所能达到的最大电极化强度, 只要 P 不接近 $P_{\max}$, 铁电态就能被保持。电阻产生的摩擦作用反抗这种倾向, 因此提供了一个损耗项—— $d^2 P$, 这里 $1/d^2$ 正比于弛豫时间, 总起来, 由于 P 正比于 v , 把振荡的电极化产生的项和损耗项加到方程 (4) 中得到

$$\dot{v} = \gamma \sigma + (c^2 \epsilon^2 v^2 - d^2) v \quad (6)$$

$$\dot{\sigma} = \beta v \quad (5)$$

这个方程表明有典型的极限环行为。而极限环振荡行为对外加电振荡很敏感,因而微弱的外加电磁波可能导至极限环的崩塌。由于崩塌前极限环中贮藏着能量,崩塌后释放出的能量就比外加电振荡信号大得多。Kaiser 在方程(6)的基础上直接加了一个线性振荡着的外场 $E \cos \phi$, 来研究外场对极限环振荡系统的影响^[8], 从而解释了受激发酶的浓度 ν 的振荡行为对外加电场频率和强度的非线性依赖关系(即“频率窗”和“功率窗”现象)。

由上述可知,电磁波非热效应可能有复杂的物理和化学机制;这种机制在生物体内形成又可能有复杂的进化过程。有人将大气中自然电磁场的波形(包括频率、振幅,和谐波成分等)和人的脑电图作比较^[9],发现在由地球和电离层所构成的共振腔中共振(Schumann 共振)着的大气电中的主要成分(极低频成分)的波形与脑电图波形非常相似,晴好天气时大气电的波形与处于松弛和静息状态时脑电图波形相似,即与 α 波相似,恶劣天气(特别是雷暴雨天气)时的波形与处于应激状态下(如头痛、痉挛和脑肿瘤等)脑电图波形相似即与 δ 波相似。由此来推测大气电在生物节律进化过程中的作用,从而企图论证电磁波非热效应机制在生物体内形成的深刻根源。

电磁波非热效应是一个机制尚不清楚,有待实验上和理论上进行深度研究的课题。本文介绍 Fröhlich 理论模型的目的在于引起对非热效应研究工作的注意,因为它不仅对制订卫生标准有迫切的实际意义,对医疗和诊断也可能有巨大潜力,而且在揭示生物系统非线性相

干振荡和长程相互作用方面,电磁波可能是不可代替的工具。如果在这方面有所突破,定会在医学和生物学方面开辟一个全新的领域。而要做到这一步,则需要多种学科的研究人员共同努力,例如本文提到的 Fröhlich 和 Kaiser 等人就是理论物理学家,在我国从事这方面研究工作的人,特别是理论研究的人甚少。但又特别需要这些人用非平衡热力学、协同学以及其它更有效的方法建立更深刻更普遍的理论模型来解释并预言生物电磁学现象,总结并指导实验研究工作。

李国栋同志审校本文,特致谢意。

参 考 文 献

- [1] Bawin, S. W. and Adey, W. R.: *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **75**, 6314, 1978.
- [2] Kailmann, F. and Grundler, W.: in "Nonlinear Electrodynamics in Biological Systems" (Adey, W. R. and Lawrence, A. F. ed.), Plenum Press, New York and London, pp. 59—64, 1984.
- [3] Frey A. H.: *Aerosp. Med.*, **32**, 1140—1142, 1961.
- [4] Chou, C. K. and Guy, A. W.: *J. Acoust. Soc. Am.*, **71**(6), 1321—1334, 1982.
- [5] Fröhlich, H.: *Bioelectromagnetics*, **3**(1), 45—46, 1982.
- [6] Adey, W. R.: in "Biological Effects of Nonionizing Radiation" (Illinger, K. H. ed.), AM Chem. Soc., Washington D. C., pp. 282, 1981.
- [7] Fröhlich, H.: *Neurosci. Res. Progr. Bull.*, **15**, 67—72, 1977.
- [8] Kaiser, F.: in "Biological Effects and Dosimetry of Nonionizing Radiation" (S. Michelson ed.), Plenum Press, New York, pp. 251—282, 1982.
- [9] Konig, H. L. et al.: in "Biological Effects of Environmental Electromagnetism", Springer-Verlag, New York Inc., pp. 10—15, 1981.

[本文于 1985 年 12 月 30 日收到]