

引用格式: 黄卡玛, 陈文琦. 微波非热效应——半个世纪的科学探索 [J]. 电子科技大学学报, 2026, 55(1): 27-39.

HUANG K M, CHEN W Q. Microwave non-thermal effects: Half a century of scientific exploration[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2026, 55(1): 27-39.

## 微波非热效应——半个世纪的科学探索



黄卡玛<sup>1\*</sup>, 陈文琦<sup>2</sup>

(1. 四川大学电子信息学院, 成都 610065; 2. 西华师范大学电子信息工程学院, 南充 637009)

**摘要:** 系统梳理了微波非热效应领域五十年的探索历程, 从概念定义、实验证据、理论争议到未来方向展开全面的综述。回顾实验层面(活化能/指前因子测定、等温对照、原位测温)与理论层面(相干电振荡、自由基对/三重态机制、膜噪声限制等)的主要成果与分歧, 重点提出并扩展了“后极化效应”理论假说——通过分子动力学模拟和量子力学计算证实弱微波场能改变极性分子碰撞模式与能量分布。同时, 还指出该领域面临的争议, 如理论普适性不足、热效应难以完全排除等挑战。认为争议的症结在于: 尚无单一理论能覆盖所有现象、量子力学与热力学的基本约束不可违背、实验上难以完全排除热路径。一旦非热效应被明确证实, 它将对多个领域产生深远影响。

**关键词:** 微波非热效应; 活化能; 指前因子; 相干电振荡; 自由基对; 三重态; 膜噪声限制; 后极化效应

中图分类号: TN011

文献标志码: A

DOI: 10.12178/1001-0548.2025207

## Microwave non-thermal effects: Half a century of scientific exploration

HUANG Kama<sup>1\*</sup> and CHEN Wenqi<sup>2</sup>

(1. School of Electronic Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. School of Electronic Information Engineering, China West Normal University, Nanchong 637009, China)

**Abstract:** This paper systematically reviews five decades of exploration in the field of microwave non-thermal effects, providing a comprehensive overview spanning conceptual definitions, experimental evidence, theoretical debates, and future directions. This review summarizes the key experimental achievements and disagreements in both the experimental and theoretical aspects, the experimental aspects include activation energy/pre-exponential factor measurements, isothermal controls, and in situ temperature measurements and the theoretical aspects include coherent electrical oscillations, radical pair/triplet mechanisms, and membrane noise limitations. The key point lies in proposing and expanding the "post-polarization effect" theoretical hypothesis, that is, through molecular dynamics simulations and quantum mechanics calculations, it has been confirmed that weak microwave fields can alter the collision patterns and energy distributions of polar molecules. This paper also identifies ongoing controversies (such as insufficient theoretical universality and the difficulty of completely ruling out thermal effects) and challenges within the field. We contend that the crux of the controversy lies in the absence of a single theory capable of explaining all phenomena, the fundamental constraints of quantum mechanics and thermodynamics that cannot be violated, and the experimental difficulty of completely excluding thermal pathways. Should non-thermal effects be definitively confirmed, they would have profound implications across multiple disciplines.

**Key words:** microwave non-thermal effect; activation energy; pre-exponential factor; coherent electric oscillation; radical pair; triplet; membrane noise; post-polarization

微波广泛用于通信、医疗与材料加工。现行的人体暴露限值与工程剂量学主要以热效应为依据, 围绕能量沉积与温升建立。微波与物质相互作用产

生的热效应, 源于介电损耗将电磁能转化为热能, 引起体系温度上升与随之而来的动力学/传质变化<sup>[1-3]</sup>。然而, 自 20 世纪下半叶以来, 越来越多的

收稿日期: 2025-10-16

基金项目: 国家自然科学基金 (U24A20225)

作者简介: 黄卡玛, 博士, 教授, 主要从事电磁场微波工程和微波化学等方面的研究。

\*通信作者 E-mail: kmhuang@scu.edu.cn

研究报告在宏观温升可忽略的条件下仍可观测到微波对生物与化学体系的影响,即微波非热效应。微波的非热效应指在温升不足以解释观测现象时,微波电磁场通过分子振动、离子通道调控与生物膜结构重塑等途径引发的生物物理与化学效应,区别于纯粹的热学作用<sup>[4-9]</sup>。

20 世纪上半叶,以极化与介电损耗理论为基础,借助新兴的高频电子学与波导技术,研究者在极性液体和含离子体系中反复观测到快速的体加热现象,并据此提出“微波介电加热”的基本概念<sup>[1]</sup>。随后的规范化与工程化阶段(二十世纪五十年代—二十世纪七十年代),工业、食品与材料加工对微波加热的需求,推动了剂量学与测量范式的建立:以比吸收率(specific absorption rate, SAR)或体功率密度为核心的能量通量表征,配合波导/谐振腔介电谱测量与模式定标,使不同装置与实验之间具备可比性与可追溯性<sup>[10-11]</sup>。微波化学兴起的精细化阶段(二十世纪八十年代—二十世纪九十年代),大量关于“速率/选择性显著提升”的报道随之出现,但由于空间测温与场定标手段有限,部分现象被解读为“非热效应”。随着光纤与内嵌传感测温、等温对照实验、原位介电谱与场-热耦合模拟等方法的完善,许多最初被视为“异常”的结果得以在非均匀升温与传热差异的框架下自洽解释<sup>[10-14]</sup>。自 2000 年以来,多物理-多尺度整合方法(电磁-传热-流动耦合计算、频散介电谱-热性质联测、微/纳尺度温度场重建)使热点分布、穿透深度与尺度效应在多相体系(多孔/负载催化剂、金属-介质界面等)中获得系统确证,从而进一步巩固了微波热效应作为绝大多数“微波促进”现象首要解释的地位<sup>[10-11,15]</sup>。

## 1 微波热效应

微波加热的本质在于电磁波在不同介质中的不同损耗转化为热量。在各向同性、简谐稳态近似下,单位体积时间平均耗散功率可写为:

$$P_v = \frac{1}{2} \omega \varepsilon_0 \varepsilon_r'' |E|^2 + \frac{1}{2} \sigma |E|^2 + \frac{1}{2} \omega \mu_0 \mu_r'' |H|^2 \quad (1)$$

式中,第 1 项为介电损耗;第 2 项为欧姆损耗;第 3 项为磁损耗; $\varepsilon_r''$ 与 $\mu_r''$ 分别表征相对介电常数与相对磁导率; $\sigma$ 为电导率; $\omega$ 为角频率; $\varepsilon_0$ 与 $\mu_0$ 为真空中的介电常数和磁导率。损耗角 $\tan \delta = \varepsilon_r'' / \varepsilon_r'$ 是筛选材料微波耦合能力的关键指标<sup>[1-3]</sup>。损耗可以具体分为:偶极取向/弛豫损耗、界面/空间电荷极化、导电(焦耳)损耗以及磁损耗。

得益于微波加热的特性,体加热、选择性耦合和快速响应,微波的热效应已经在材料、化学与化工、环境工程、食品工程以及生物医学等领域形成较为成熟的技术体系<sup>[10-11]</sup>。

**材料合成与高温加工领域:**在陶瓷烧结、玻璃-陶瓷结晶、金属/合金致密化以及碳材料活化等过程中,微波在高损耗相或特定缺陷/界面处实现更高的局部热源密度,从而获得更短保温时间、更细晶粒与更低孔隙率<sup>[15]</sup>。

**化学合成与多相催化过程领域:**在有机合成中,极性介质的快速体加热与过热窗口可显著减少反应时间<sup>[12-14]</sup>。在气-固与气-液-固催化中,微波对载体/活性相的选择性耦合有助于在活性位附近形成介观热点,提升强吸热或受扩散控制反应的表观速率与选择性;典型场景包括 VOCs 催化氧化、甲烷部分氧化、重整与裂解以及吸附剂再生等<sup>[16-20]</sup>。

**环境与资源工程领域:**微波在吸附剂/催化剂原位再生、含水固废的快速干化-热解-气化、油污与含氟污染物去除以及烟气/VOCs 治理方面表现出能效优势,机理基础仍是差异化介电耦合与体加热<sup>[16-20]</sup>。

**食品工程与生物质加工领域:**在食品解冻、回温、巴氏杀菌、干燥与膨化过程中,微波体加热可显著缩短工时并降低营养成分的热降解<sup>[15]</sup>。

**生物医学领域:**微波热疗与消融已在肿瘤治疗、心律失常消融、止血与美容医学等领域形成临床应用路径,常用频率为 915 MHz 与 2.45 GHz。与射频消融相比,微波在高阻抗/脱水组织的穿透以及对碳化层的耐受方面具有优势,但同样依赖精确的温度/能量剂量学与影像引导以避免过度损伤<sup>[21-24]</sup>。

在微波促进化学与材料处理的研究中,许多研究报告了在等温或温升不足的情况下出现速率显著提升、选择性改变或表观活化能降低等异常现象,因而被解读为存在微波的非热效应。然而,随着空间分辨测温、能量剂量学(体功率密度)定标以及电磁-传热耦合反演等方法的完善,大量被解读为存在微波的非热效应的案例可由非均匀升温与传热/传质差异充分解释,而非真正的非热效应<sup>[10-14,25]</sup>。如过热现象、超极化加热,最终都确认为是微波的热效应。

文献 [12] 使用微波在极性液体中检测到过热效应,可能会出现高于正常沸点 13 °C~26 °C 的过热现象,表 1 列出了常见的溶剂在过热现象下的沸点。出现过热现象的原因是:极性液体或高黏体系在微波体加热下易出现成核受限,导致实际温度超过常压沸点数至数十开尔文,表现为突沸与异常

沸腾曲线。微波对体相优先生热削弱了壁面成核与对流换热, 从而扩大过热窗口; 引入成核剂、粗糙容器或搅拌后该现象消失或显著减弱 (如图 1 所示), 表明其本质为热学与两相流动耦合效应<sup>[12-14]</sup>。

表 1 一系列溶剂的成核极限沸点和加热速率 (假设全功率=650 W)  $^{\circ}\text{C}$

| 溶剂   | B.p. <sup>a</sup> | NLBP <sup>b</sup> | NLBP- B.p |
|------|-------------------|-------------------|-----------|
| 水    | 100               | 104               | 4         |
| 乙醇   | 79                | 103               | 24        |
| 甲醇   | 65                | 84                | 19        |
| 二氯甲烷 | 40                | 55                | 15        |
| 四氢呋喃 | 66                | 81                | 15        |
| 乙腈   | 81                | 107               | 26        |
| 异丙醇  | 82                | 100               | 18        |
| 丙酮   | 56                | 81                | 25        |
| 丁醇   | 118               | 132               | 14        |

<sup>a</sup>: B.p.( $^{\circ}\text{C}$ )为成核极限沸点, <sup>b</sup>: NLBP ( $^{\circ}\text{C}$ ) 为非成核极限沸点。

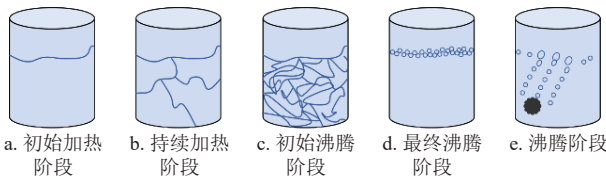


图 1 对微波过沸现象的目视观察

四川大学团队在 2024 年提出并验证了“微波超极化效应”, 利用两路相互正交且非相干的微波电场, 在保持总输入功率恒定的前提下, 对比了单源单极化与正交非相干复合场对多种溶剂的加热表现。后者普遍表现出更高的初期升温速率效率 (如图 2 所示)。这是因为在非相干微波电场作用下, 极性分子发生复杂的多向极化, 增加极性分子的碰撞频率, 更多微波能量转化为热能。宏观表现为样品吸收更多微波能量并升温更快, 从而加速加热速率。将这种效应统称为微波超极化效应。微波超极化效应的核心并非自旋超极化, 而是偶极取向的多向驱动带来的介电耗散增强<sup>[26]</sup>。

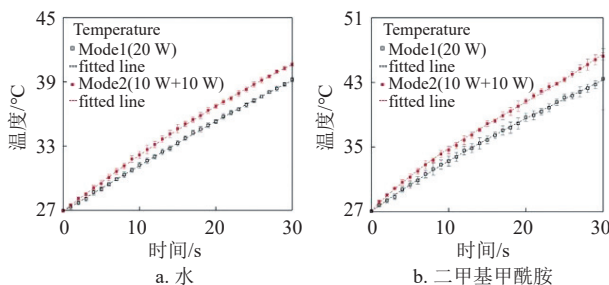


图 2 两种加热方式下不同溶剂的升温速率曲线

## 2 微波非热效应

### 2.1 微波非热效应的研究意义

自发明以来, 微波越来越多的应用于日常生产

和生活中, 如卫星、雷达、手机等设备。微波技术在通信、探测、医疗、制造与基础科学中构成现代社会中重要的基础设施, 其主要利用了微波的高宽带, 强穿透、可定向与可选择性耦合。文献 [27] 报道了手机辐射信号暴露对人脑葡萄糖代谢活动的影响, 分别在两种条件下进行两次 18F-FDG PET 扫描: 一是右侧手机开启 (静音) 50 min, 二是双侧手机关闭。全脑平均代谢在开启与关闭条件间无显著差异, 但靠近天线的脑区 (眶额皮层/颞极) 代谢显著升高, 且增幅与理论估算的局部电场强度高度正相关。

研究微波非热效应的意义不在于为异常现象寻找新奇解释, 而在建立可证伪的定义—严格判据—可复核实验—工程应用的闭环: 要么将所有促进现象归入热—传质机制并据此优化工程, 要么在确证非热通道存在的前提下, 量化其触发条件与效应上限, 使其成为可控、可放大、可迁移的设计变量。无论结论如何, 整个过程都将提升微波相关研究与应用的可靠性与可用度。

### 2.2 微波非热效应的应用前景

微波辐射对物质的影响在本质上十分复杂, 越来越多的研究报道了用微波热效应无法解释的现象。我们统计了近几十年来大量的关于微波非热效应的论文 (如图 3 所示), 其间关于微波非热效应是否存在的争论十分激烈。但是越来越多的论文承认微波非热效应的存在, 其广泛地存在于医学、农业和环境治理等领域。

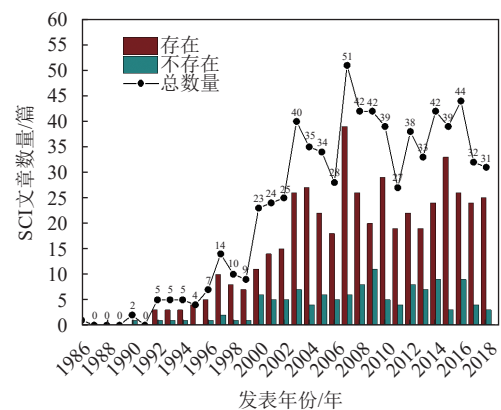


图 3 近几十年来关于微波非热效应的论文数量

在医学领域, 微波非热效应通过抑制 DNA 合成、激活免疫应答实现肿瘤抑制。文献 [28] 通过多组学分析揭示, 2.8 GHz 和 9.3 GHz 复合微波暴露可激活大鼠脾脏转录组与蛋白组, 显著上调 B 淋巴细胞比例及 IL-4 $\alpha$ 、IL-6 $\beta$  等细胞因子表达,

形成短暂性免疫增强效应。

在农业领域,文献[29]通过单模腔微波发生器精确控制电场强度至 972 V/m,发现脉冲微波通过 PHYB-PIF4 通路激活赤霉素信号,促进氨基酸合成并降低细胞壁厚度,代谢组学检测显示, $\beta$ -丙氨酸等氨基酸含量显著增加。文献[30]在菜籽油加工中发现,微波非热效应使吡嗪类风味物质含量提升至传统热处理的 3.88 倍,并特异性生成呋喃类化合物,形成独特风味。

在环境治理创新领域,微波技术通过热-非热协同效应实现垃圾裂解资源化。皮革加工中微波膨化技术缩短处理时间 40%,轮胎硫化均匀性提升 20%。在土壤修复领域,微波激活微生物活性降解多环芳烃,降解率提高至 85%。

微波非热效应在医学、农业、环境治理等领域展现出显著应用潜力。然而,其产业化应用需建立科学安全评价体系,明确微波频率、功率、暴露时间等参数阈值,完善动态暴露评估模型及生物标志物监测标准。

### 3 微波非热效应半个世纪探索的历程

#### 3.1 实验探索

有很多研究在实际应用过程中使用微波辐射作为替代能源产生了意想不到的效果。文献[31]研究的抗人类免疫缺陷病毒(HIV)的新型药物——替普拉韦的合成过程中发现,利用微波替代传统加热可以将合成时间从 24 h 减少到 20 min 且保持产率几乎不变。文献[32]在微波辐射下利用烷基卤化物在水介质中直接生成叔胺也发现了类似的趋势。这些过程都预示着微波在材料加工等领域展现出非热效应。为此,从很早之前研究者们就做了很多实验上的探索。

1995 年,文献[33]使用 2.45 GHz 多模受控气氛微波施加器在氧化铝坩埚中加热  $\text{TiO}_2$  和炭黑粉末制备碳化钛粉末过程,观测到微波加热与传统加热的反应速率出现明显差别。如图 4 所示,研究给出了  $\text{TiO}_2+\text{C}$  混合物在微波和常规加热中的重量损失相对于总反应时间的关系。微波加热条件下反应起始的最低温度为 1 050  $^{\circ}\text{C}$ ,常规加热条件下则为 1 200  $^{\circ}\text{C}$ 。两组数据均符合抛物线模型,表明反应过程的速率主要受扩散控制,与常规加热相比,使用微波加热的扩散速率更快。表 2 给出的抛物线模型的反应(扩散)速率常数  $k$  能定量地证明这一点,使用微波的扩散速率是使用常规加热实现的扩散速率的 3 倍以上。

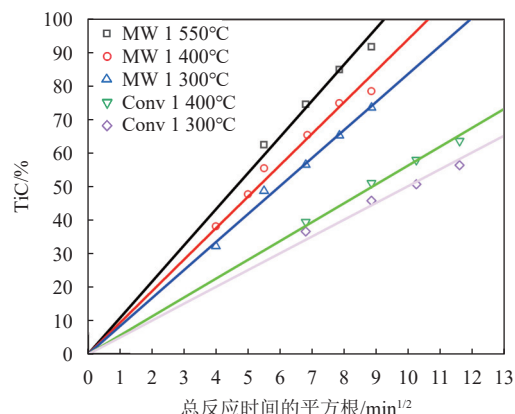


图 4 微波加热与传统加热条件下碳热还原的减重与反应时间对比

表 2 通过微波和常规加热实现的反应速率

| 保持温度/ $^{\circ}\text{C}$ | 加热方法 | 反应速率常数 $k/\text{min}^{-1}$ | 比率 $k_{\text{mw}}/k_{\text{conv}}$ |
|--------------------------|------|----------------------------|------------------------------------|
| 1 300                    | MW   | 15.8                       | 3.3                                |
| 1 300                    | Conv | 4.8                        | —                                  |
| 1 400                    | MW   | 21.8                       | 3.4                                |
| 1 400                    | Conv | 6.5                        | —                                  |
| 1 550                    | MW   | 28.4                       | —                                  |

文献[33]的研究过程中假设这是由于原子的流动性增强,考虑阿伦尼乌斯方程来研究这种行为的起源。 $\ln k$  与  $1/T$  的关系图可得出微波加热与常规加热情况下的活化能  $Q$  (见图 5)。在微波加热和常规加热条件下,活化能的平均值分别为 56 和 63 kJ/mol。在此基础上,使用 60 kJ/mol 的中间值,对于微波和常规加热情况产生了大约 1 650  $\text{min}^{-1}$  和 500  $\text{min}^{-1}$  的指前因子的值,因此,微波的使用导致指前因子明显增加了 3.3 倍。由于指前因子与反应界面上原子振动频率有关,因此可以推测,微波场可能对原子振动产生了影响。

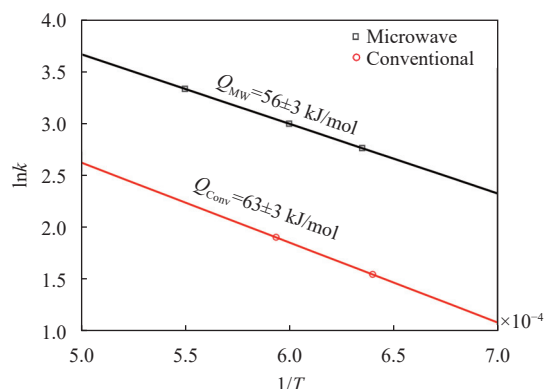


图 5 微波和常规加热碳热还原的活化能

1996 年,文献[34]也研究了正弦调幅的射频电磁波对过氧化氢碘化钾的反应作用。在微波作用下,两者发生的反应为:

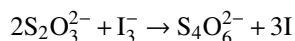


图 6a 中活化能的相对变化与温度之间呈现明显的线性关系, 电磁波提高了反应的活化能。图 6b 中, 指前因子与温度之间呈现明显的非线性关系。对于不同电性的离子, 电磁波的作用是使其向相反方向运动, 从而使其相对运动得到加强, 指前因子增加。但是, 当反应物温度太高时, 反应物分子热运动太剧烈, 弱电磁波的这种作用将被分子的热运动所淹没。很多研究都测量到了活化能与指前因子改变, 但是从分子层面如何理解尚缺乏理论模型。

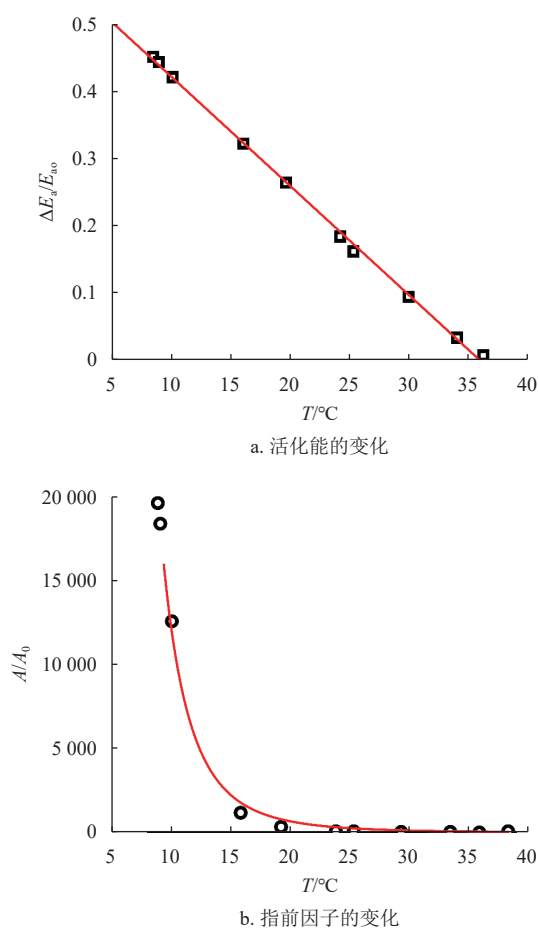


图 6 电磁波照射下

## 3.2 理论假设

### 3.2.1 相干电振荡理论

文献 [7] 在多年前就提出, 频率约为  $10^{11} \sim 10^{12}$  Hz 的电振荡可通过代谢过程在活性生物材料中产生相干激发。该频率范围仅为粗略估算, 与当前常用的微波频段极为接近。此类激发可能产生深远的生物学影响, 因为它们会引发选择性长程相互作用——这种作用或许正是调控正常组织生长的必要机制,

缺失则可能导致癌症发生。后续在细菌<sup>[35]</sup>和酵母培养物<sup>[36]</sup>中获得其存在的决定性实验证据, 后者延续并拓展了先前关于相干毫米波作用于生物系统的研究<sup>[37]</sup>。

细菌实验的激光拉曼光谱结果如图 7 所示, 7a 为营养液, 7b 为细胞悬浮液, 7c 为在戴维斯最小培养基 ( $\text{NH}_3$  葡萄糖) 中重新悬浮 30 min 后芽孢杆菌的光谱, 7d 是经过计算机校准后的光谱结果。图 7c 显示出 3 条位移线, 分别对应  $5.7 \times 10^{11}$ 、 $3.75 \times 10^{12}$  和  $4.3 \times 10^{12}$  Hz 的共振频率; 经计算机校正的光谱图 7d 显示出第 4 条明显位移线位于  $1.2 \times 10^{11}$  Hz 处出现。

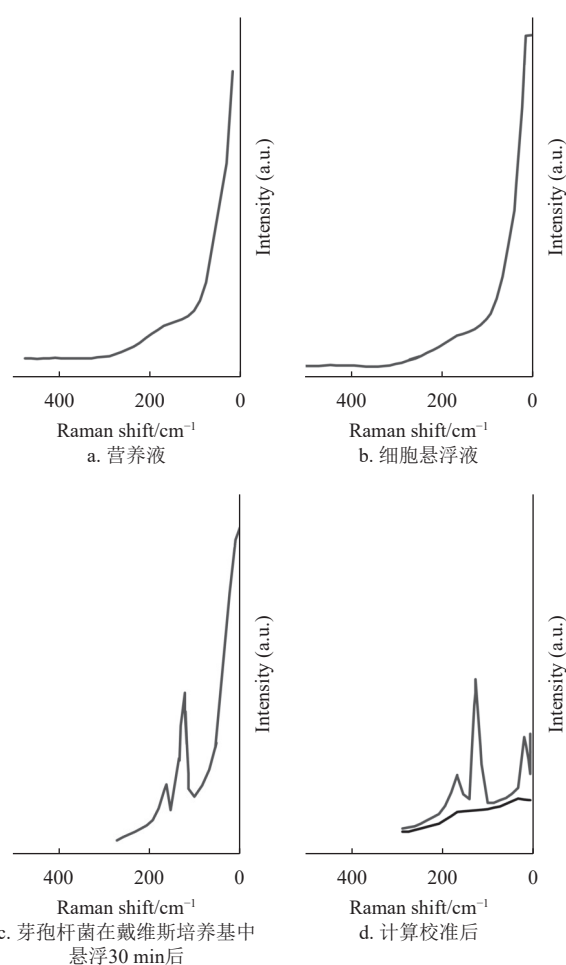


图 7 不同情况下的拉曼光谱结果

分子共振频率在  $7.5 \times 10^{10}$  Hz  $\sim$   $5 \times 10^{12}$  Hz 之间存在分子共振现象, 该现象与活性代谢过程相关。静止细胞、细胞匀浆液或营养溶液中均未检测到此类共振, 因此推测其源于特定的体内分子组织结构, 这种对生命过程至关重要的结构存在属间差异, 但可在特定细胞中通过营养调控实现精确改变。微波并不是通过整体升温起作用, 而是相干地

驱动一簇强耦合的偶极振子（膜/蛋白/界面上的极性基团、离子团或集体极化模），当外场频率接近这些集体本征模时，能量以相干方式集中到少数低损耗模式中，触发下游信号或化学通道，因此呈现出场强阈值、非线性放大与“后极化”等典型非热效应的特征。

### 3.2.2 生物信号的转导或扩增

细胞周围流体中的电磁场能够调节细胞膜内外的信号流。强度仅为细胞膜电位梯度（ $10^5$  V/cm）百万分之一的电磁场，就能充分调节细胞对激素、抗体及其他表面刺激分子的反应<sup>[38]</sup>。对这些场作用的仔细评估揭示了细微的影响，表明其相互作用机制基于长程相互作用和非平衡过程。温度的升高并非观察到的生物敏感性的主要因素。而且这些场也没有足够的光子能量通过电离来破坏暴露分子系统的原子组织。物理科学某些领域长期存在一种观点：非电离电磁场除加热作用外无法诱发生物效应<sup>[16]</sup>。这种观点忽视了生物分子系统中协同组织的可能性，以及协同性在检测这些场对组织成分的影响中似乎发挥的重要作用——尤其体现在将体液刺激从细胞表面传递至内部的转导耦合过程中。

为描述场相互作用机制，研究者们考虑了多种过程，如活性膜振荡器、膜内随时间变化的钙离子转运以及膜内相互作用偶极子区域。尽管所有模型的细节均属高度推测性，但它们都包含一个基本理念：外部场与非线性膜振荡器的耦合，该振荡器又通过直接或化学途径与内部  $\text{Ca}^{2+}$  振荡器耦合。如图 8 所示，模型由两个耦合的非线性振荡器构成，它们同时受化学刺激和电磁刺激的影响<sup>[17]</sup>。两个耦合的振荡器分别描述了细胞膜和细胞质区域的  $\text{Ca}^{2+}$  浓度  $X$  和  $Z$ 。两个振荡器都受到化学和电磁场刺激的影响。

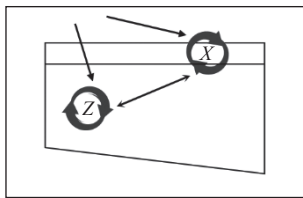
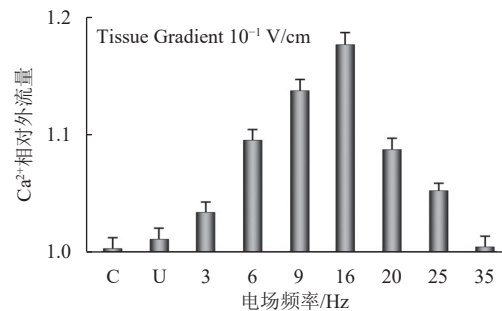


图 8 非线性  $\text{Ca}^{2+}$  振荡器模型的示意图

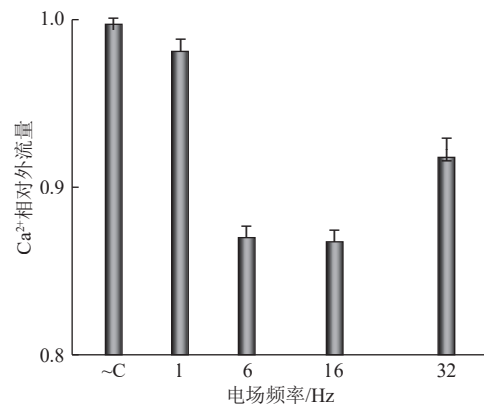
与微弱细胞周围电振荡及体液分子在膜受体位点结合相关的初始刺激，会引发膜表面糖蛋白钙结合功能的高度协同性改变。纵向扩散方向与生理活动及施加电磁场引发的细胞外电流流动方向一致，亦符合文献<sup>[18]</sup>提出的钙依赖性蛋白激酶在细胞

膜上的扩散激活机制，该机制近期由文献<sup>[19]</sup>在培养神经元表面观测到。此为放大阶段，通过施加电磁场对这些初始事件的同步操控可证实：钙外流量的增减幅度远超施加场能量或受体-配体结合事件所能解释的范围<sup>[20, 39-40]</sup>。更令人瞩目的是，钙结合修饰的非线性特性仅在特定频率与振幅的狭窄窗口内发生，进一步印证了其非线性本质<sup>[16, 21, 38, 41]</sup>。

文献<sup>[23, 39]</sup>首次揭示了细胞与组织中钙离子外流变化的“调谐曲线”，其变化随频率呈现函数关系（如图 9 所示，图 9a 和图 9b 中组织梯度差异约  $10^6$  倍。）。多数研究采用脑组织作为模型，包括清醒完整猫脑皮层<sup>[25]</sup>、分离雏鸡脑半球<sup>[23-24, 39, 42]</sup>、培养神经元及脑突触体分馏物<sup>[43]</sup>。不同实验室的研究结果一致表明：钙外流变化取决于场内低频特性及场强强度，在 16 Hz 附近达到峰值，在更高或更低频率下则减弱。这些场会在生理水平上诱导电位梯度，包括脑细胞周围流体中的脑电图电位梯度。其强度至少比膜电位的电势屏障低 6 个数量级，从而引发一系列生物作用的改变。



a. 在弱射频场（147 MHz,  $0.8 \text{ W/cm}^2$ ）作用下



b. 更微弱的电场（空气中 56 V/m）产生的影响

图 9 不同场作用下对分离出的鸡脑半球中  $\text{Ca}^{2+}$  的外流情况

越来越多的研究证据表明，细胞膜在其附近区域对微弱的电化学事件具有强大的放大作用。跨越细胞膜的肽分子在将信号耦合至细胞内部方面起着关键作用。在低于 100 Hz 的电磁场频率下，最大

相互作用发生, 并且它们通常在频率、振幅和暴露持续时间方面受到限制。癌促进物质与电磁场(两者都在细胞膜上起作用)之间的强大协同作用表明, 癌症促进可能涉及来自细胞的扭曲的向内信号流。这些膜与细胞内的各种细胞器(包括细胞核)相连接; 并且未来癌症治疗或许会针对细胞膜机制展开。

### 3.2.3 自由基对机制

自由基对(radical pair, RP)由两电子自旋相关的短寿命自由基组成, 其化学反应路径对单重态( $S$ )/三重态( $T$ )占据与相干演化高度敏感。微波作用并非通过升温改变反应速率常数, 而是通过调制自旋哈密顿量中的跃迁与混合, 从而改写 $S/T$ 选择性复合的几率与产物支比, 实现微波的非热效应<sup>[44-46]</sup>。自由基对源于纯单重态或三重态自旋态, 当它们通过化学过程由相应多重性的前体形成时, 或当它们通过自由基碰撞形成时, 由于重组过程中的多重性选择, 将呈现此类自旋极化。通常, 纯自旋态并非哈密顿的本征函数, 因此会随时间发生相干演化, 该过程称为自旋演化。

自由基对的自旋哈密顿量可写为<sup>[9]</sup>:

$$\widehat{H} = \mu_B \mathbf{B}_0 \cdot (g_1 \mathbf{S}_1 + g_2 \mathbf{S}_2) + \mathbf{S}_1 \cdot \mathbf{A}_1 \cdot \mathbf{I}_1 + \mathbf{S}_2 \cdot \mathbf{A}_2 \cdot \mathbf{I}_2 + \mathbf{J} \cdot \mathbf{S}_1 \cdot \mathbf{S}_2 + \mathbf{S}_1 \cdot \mathbf{D} \cdot \mathbf{S}_2 + \gamma_e \mathbf{B}_1(t) \cdot (\mathbf{S}_1 + \mathbf{S}_2) \quad (2)$$

式中,  $\mu_B$ 为玻尔磁子;  $g_1, g_2$ 为两个自由基的电子 $g$ 因子;  $\mathbf{B}_0$ 为静磁场;  $\mathbf{S}_1$ 和 $\mathbf{S}_2$ 为两个电子的自旋角动量算符;  $\mathbf{A}_1$ 和 $\mathbf{A}_2$ 为超精细耦合张量;  $\mathbf{I}_1$ 和 $\mathbf{I}_2$ 为核自旋算符;  $\mathbf{B}_1(t)$ 为微波(或其调制包络)产生的交变磁场;  $\mathbf{A}$ 为超精细耦合;  $\mathbf{J}/\mathbf{D}$ 分别为交换/偶极相互作用。反应动力学常用 Haberkorn 形式的主方程描述<sup>[9]</sup>:

$$\dot{\rho} = -\frac{i}{\hbar} [\widehat{H}, \rho] - \frac{k_S}{2} \{\Phi_S, \rho\} - \frac{k_T}{2} \{\Phi_T, \rho\} \quad (3)$$

式中, 第1项负责自旋相干演化; 后两项则是自旋选择性的不可逆耗散;  $\rho$ 为自由基对的自旋密度算符; 产物中 $\Phi_S$ 和 $\Phi_T$ 分别为单重态和三重态投影算符;  $k_S$ 和 $k_T$ 为自旋选择性反应速率常数。微波改变的是 $\rho(t)$ 的相干与 $S/T$ 占据随时间的演化, 从而改变 $\Phi_{S/T}$ , 而非通过升温改变速率常数<sup>[44, 47-49]</sup>。

微波主要通过3条途径进行耦合。1) EPR近共振驱动, 当微波频率 $\omega \approx \gamma_e \mathbf{B}_0$ 或其受超精细/交换修饰的跃迁频率时,  $\mathbf{B}_1$ 以Rabi频率 $f_R = (\gamma_e/2\pi) \mathbf{B}_1$ 驱动自旋翻转并加速 $S \leftrightarrow T$ 混合; 对于 $\mathbf{B}_1 \sim 3\mu T$ 的近场,  $f_R$ 可达0.8~1.4 MHz, 与许多自由基对的化学/相干寿命同量级<sup>[44-46]</sup>。2) 调制包络驱动低频跃迁,

微波的幅度/相位调制在千赫兹至兆赫兹的包络频率上等效产生弱RF场, 直接驱动由超精细主导的低频跃迁, 解释了对载频不敏感而对调制频率敏感的窗口现象<sup>[45-46, 49]</sup>。3) 近场与磁性结构增强, 在含顺磁缺陷或磁性纳颗粒的材料中, 微波近场可显著放大有效 $\mathbf{B}_1$ 或改变局域有效静场, 使RPM共振更易在常温常压下达成(对材料/催化体系尤为关键)<sup>[49]</sup>。

文献[50]展示了对于自由基对 $N$ ,  $N$ -二甲基苯胺( ${}^2\text{py}^- + {}^2\text{DMA}^+$ )自由基对中的电子自旋运动。通常, 自由基对中两个自由基的电子自旋会围绕不同轴线以不同频率进动。因此, 两个电子自旋的相对取向会随时间在平行与反平行排列之间变化。在零外场条件下, 自由基对的自旋亚态间可发生任意跃迁。随着外场强度增大, 合场 $\mathbf{B}_0$ 对 $\mathbf{B}$ 的影响日益显著, 致使两自旋进动轴方向趋于一致, 从而阻断 $T_+, T_-$ 与 $S, T_0$ 间的跃迁(即自旋翻转跃迁)。然而, 由平行于 $\mathbf{B}_0$ 的 $\mathbf{B}_{\text{hfc}}$ (自由基中各核自旋超精细耦合总和的有效磁场)分量引起的进动频率差得以保留,  $S-T_0$ 跃迁(即所谓重相位跃迁)不受外部磁场抑制。

外加磁场和微波电磁场可以通过塞曼交互作用影响未配对电子的自旋状态, 从而延长自由基对处于三重态的时间。这种时间延长可能改变自由基对反应性和稳定性, 进而影响生物体内的化学反应过程。对材料/催化体系而言, 在含顺磁缺陷(如石墨化碳、SiC缺陷、F-中心)、过渡金属活性位或磁性纳颗粒的催化剂上, 关键中间体( $\cdot\text{O}$ 、 $\cdot\text{OH}$ 、 $\text{R}\cdot$ 、 $\text{O}_2^-$ 等)可形成自旋相关的成对态。通过设计合适 $\mathbf{B}_0$ 与窄带微波结合低频调制并利用纳结构近场增强, 等温条件下, 可以观察到成对态的选择性或者分支比发生小幅但可重复改变的变化, 从而与热点/选择性加热路径区分<sup>[49]</sup>。

### 3.2.4 三重态理论

三重态机制认为: 体系在光激发或化学过程后形成具有3个自旋亚能的激发三重态; 其自旋子空间由零场分裂(zero-field splitting, ZFS)与外加静磁场共同决定。微波通过选择性驱动三重态亚能级间的磁共振跃迁与/或调制单重—三重(ISC)转化速率, 从而改变下游磷光强度、能量转移/淬灭路径或化学产率, 即使宏观温升可以忽略, 亦可产生可测效应, 体现微波的非热本质。

这种机制也属于间接机制, 即磁场并不直接参与引发初始态反应性衰变的相互作用, 而是磁场重新耦合初始态的流形, 在这种情况下, 是电子激发

三重态的子态<sup>[9]</sup>:

$$\{i_k\} = \{T_u, T_c, T_l\} \quad (4)$$

式中,  $u$ 、 $c$  和  $l$  分别代表上、中、下子态。它们是  $H_0$  的本征态,  $H_0$  为:

$$H_0 = H_{ZFS}(\Omega) + H_Z(B) \quad (5)$$

式中,  $H_{ZFS}$  是零场分裂哈密顿量, 用于描述三重态分子中的分子内自旋-自旋和自旋-轨道相互作用;  $\Omega$  参数突出了该相互作用在实验室固定参考系中的方向依赖性。

图 10 所示的情况, 一个简化的三重态次能级选择性反应方案解释了三重态机制如何产生 MFE 的原理: 在零场中, 只有一个子状态 ( $T_x$ ) 将通过系统间穿越而经历无辐射衰减到  $S_0$  (速率常数  $k_{0,x}$ ), 而从所有三重子状态中, 一些产物通道可以以速率均匀常数  $k_p$  打开。在磁场中, 子状态重新耦合如下<sup>[9]</sup>:

$$\{T_x, T_y, T_z\}_{ZF} \rightarrow \{T_u, T_c, T_l\}_{field} \quad (6)$$

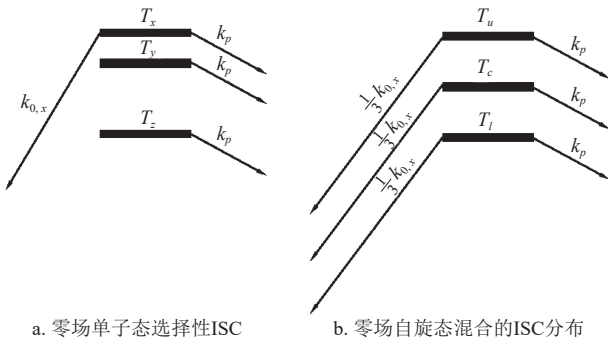


图 10 三重态次能及选择性反应方案

电子在微波作用下基态重新折叠, 覆盖了初始态的流形, 改变了三重态亚能级的自旋选择倾向, 从而影响化学反应速率等宏观结果。在有机半导体、金属有机配合物、碳/SiC 缺陷以及存在三重态能量转移 (如 TTA 上转换) 的体系中, 三重态的 ZFS 与取向各向异性天然存在。通过窄带微波加上合适  $B_0$  对三重态亚能级进行相干操控, 有望在等温条件下调变能量转移效率、上转换量子产率或表面活性位的三重态参与度, 表现为选择性 (而非整体速率) 的小幅但系统性变化; 相关趋势应与谱学峰位、取向与  $B_0$  依赖形成一致图景<sup>[51-52]</sup>。

### 3.2.5 膜噪声限制理论

膜噪声限制机制将细胞膜视作近阈值的弱信号探测器: 在热噪声 (Johnson-Nyquist) 与通道本底涨落主导下, 只有当外加电场在给定积分时间与带

宽内使跨膜电压/电流的有效信号超过噪声均方根值时, 膜上非线性门控元件 (离子通道、载体蛋白、泵) 才会表现出可测响应。该框架据此给出了可检测电场的物理下限与频率-功率-时间的耦合标尺, 为“弱场亦可致效且不依赖显著升温”的非热现象提供了可检验解释<sup>[53-55]</sup>。目前已经有许多研究报告了由于细胞暴露于电场而产生的显著生物学效应, 包括涉及表现出反应的分离细胞的体外实验 (如改变合成或转录) 到非常弱的场。关于弱场响应的有效性的争议已经出现: 1) 实验再现的效果并不总是实现; 2) 理论上的反对意见, 即有时所报道的极小场强似乎低于由导致细胞过程随机化的热噪声所规定的数值。

热噪声极限具有重要意义, 原因在于它具有基础性作用, 同时其他生物反应机制也有一个接近此极限的阈值。细胞对外部场的反应意味着所施加的场引起的变化大于由于随机波动事件, 即噪声引起的变化。膜具有许多噪声源, 包括基本噪声如热噪声、 $1/f$  噪声以及由于离子传导通道的随机打开和关闭而产生的噪声, 任何细胞对低场的反应都必须至少克服热噪声的影响。

跨膜电位  $U(t)$  的随机波动, 如 Johnson 首先观察到并由 Nyquist 解释的那样, 电阻  $R$  中的热产生噪声描述为:

$$\overline{(\delta U)_{kT}^2} = 4RkT\Delta f \quad (7)$$

式中,  $kT = 4.3 \times 10^{-21} \text{ J} \approx 0.025 \text{ eV}$  (在 310 K 时) 是玻尔兹曼常数与绝对温度的乘积;  $\Delta f$  是所求信息的频率带宽; 而  $(\delta U)_{kT}^2$  上方的“横线”表示时间平均。可通过尽可能大的带宽  $\Delta f$  进行最坏情况的噪声估计<sup>[56]</sup>。

将细胞膜等效为膜电阻  $R$  和膜电容  $C$  的并联组合表示, 若外场在膜法向产生等效跨膜电压  $\Delta V_m(t)$ , 则其在观测带宽  $\Delta f \sim 1/\tau$  内的有效信号振幅必须满足<sup>[53]</sup>:

$$\Delta V_{m,rms} \geq \sqrt{4RkT\Delta f} \quad (8)$$

当以通道开关概率或膜片电流为读出时, 上式给出最小可测信号与积分时间、温度、器件噪声。据此估算的最小可检测外加电场典型在  $10^{-3} \text{ V/cm}$  量级 (具体值取决于细胞尺寸、几何与读出带宽), 为弱场生物效应设定了热噪声<sup>[53]</sup>。

作为具体的例子, 考虑一种嵌入在细胞膜中的简单 Michaelis-Menton 型酶 (图 11)。施加周期

性场为  $E(t) = E_0 \cos(2\pi ft)$ , 则对于球形细胞而言, 跨膜电位的最大变化  $\Delta U(t)$ , 其具有正弦时间依赖性  $\cos(2\pi ft)$ , 前提是  $2\pi ft$  小于双层电容的逆恢复时间。因此, 最大时变跨膜电位为  $U(t) \approx 1.5r_{\text{cell}} E_0 \cos(2\pi ft)$ 。此结果可以代入图中反应动力学的方程, 并由此求解出酶的状态概率和催化通量随时间的变化, 产物会随时间积累。这种机制具有很强的频率依赖性, 对于此处使用的参数, 最佳刺激频率为  $3 \times 10^3$  Hz。这种窄带现象通常是可以预期的, 但位置和带宽取决于特定的酶<sup>[57]</sup>。

1990 年, 文献 [53] 报道了在几个实验中观察到的弱场响应阈值远低于不包括窄带或时间平均的

热噪声限值。然而, 当考虑窄带和信号平均时, 实验阈值与热噪声限值相当一致, 如表 3 所示, 研究人员还发现纯粹平行的细胞取向在 10 Hz 时产生的阈值小 2.5 倍。

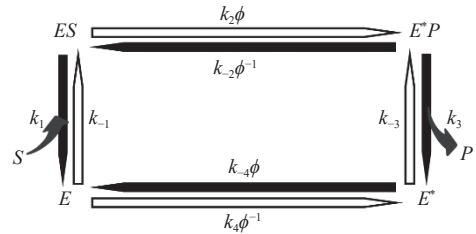


图 11 一种与电场耦合的膜酶 E 的四态机制

表 3 实验阈值和宽带模型预测的比较

| 频率/Hz     | 时间/s              | 最小场强/ $V \cdot m^{-1}$ |                    |                    |                    |
|-----------|-------------------|------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|           |                   | 实验                     | 理化平均               | 非理化平均              |                    |
| 1         | $8.6 \times 10^4$ | 鸡成纤维细胞                 |                    |                    |                    |
|           |                   |                        | $2 \times 10^{-5}$ | $3 \times 10^{-6}$ | $9 \times 10^{-4}$ |
| $10^{-1}$ | $4.3 \times 10^4$ | 牛成纤维细胞                 |                    |                    |                    |
|           |                   |                        | $1 \times 10^{-2}$ | $1 \times 10^{-5}$ | $9 \times 10^{-4}$ |
| 1         | $4.3 \times 10^4$ |                        | $7 \times 10^{-5}$ | $4 \times 10^{-6}$ | $9 \times 10^{-4}$ |
| $10^1$    | $4.3 \times 10^4$ |                        | $5 \times 10^{-5}$ | $1 \times 10^{-6}$ | $9 \times 10^{-4}$ |
| $10^2$    | $4.3 \times 10^4$ |                        | $1 \times 10^{-3}$ | $4 \times 10^{-7}$ | $9 \times 10^{-4}$ |
| $10^3$    | $4.3 \times 10^4$ |                        | $2 \times 10^{-2}$ | $1 \times 10^{-7}$ | $9 \times 10^{-4}$ |
| ~dc       | ~1                | 鲨鱼                     | $5 \times 10^{-9}$ | $4 \times 10^{-9}$ | $4 \times 10^{-9}$ |

在多孔催化、膜电材料和生物膜模型中, 若目标是非热强化而非整体升温, 应优先采用窄带微波和低频调制与法向极化, 并通过几何或介电对比提升局域场; 同时以阵列协同 (面积/通道数) 与时间积分提高 SNR, 而非提高平均功率。这样所得小幅但系统性的选择性变化 (而非普遍速率提升) 更符合膜噪声限制的可检验预言<sup>[58-59]</sup>。

3.2.6 合作系统对微波辐射的选择性和敏感性

在微波作用于生物物体的实验研究中, 已经观察到在某些条件下, 生物物体可以对弱场产生非常灵敏的响应<sup>[60]</sup>。但是在很多报道中提到, 这种响应相对于场频率是有选择性的, 其原因是特定频段内高分子的振荡会受到高粘性摩擦的影响<sup>[61]</sup>, 这使得生物聚合物即使在共振频率下也难以从微波场中积累足够能量。

可以合理推测, 确保在噪声环境中高质量感知信号的机制, 无论是上述微波辐射案例, 还是已知的听觉<sup>[62]</sup>、嗅觉<sup>[63]</sup>等感知系统, 乃至高度特异性的免疫反应<sup>[64]</sup>, 其结构都应具有相似性。这些例子具有共同特征: 它们都是分层的、阈值型的。这意味

着初级结构接收信号后, 该信号会在更高层次的结构中依次处理, 只有当信号强度在前一级结构超过特定阈值时, 才能传递到下一级结构。当不存在任何噪声时, 具有阈值的单个结构能够确保任意高的灵敏度, 只需要将阈值调整得足够低即可。如果初级结构具有最低的选择性, 那么两个结构的层级结构就能够确保任意高的选择性, 只需要将第 2 个阈值水平调整到接近初级结构响应特征的最大值附近 (图 12)。

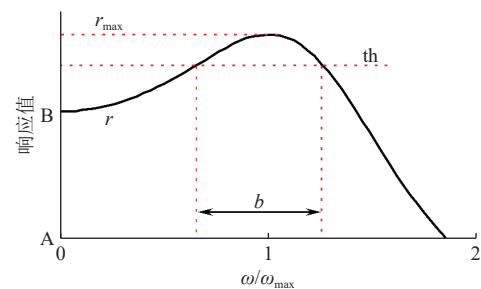


图 12 一级结构的响应水平

生物体内的系统之间通过相互作用和协同工作, 共同维持生物体的正常生理功能。当微波电磁

场作用于生物体时, 这些复杂系统可能会以合作的方式对微波辐射产生选择性和敏感性的响应, 从而影响生物体对微波的作用。

### 3.3 微波后极化效应

二十多年前, 文献 [65] 就进行了一系列的实验, 证明了微波非热效应的存在。近年, 文献 [66] 以水分子为例, 采用分子动力学模拟和量子化学计算研究了弱微波对水分子空间碰撞和能量分布的影响, 发现电场极化改变分子排列, 分子排列改变碰撞位点和能量。研究过程中统计了两个水分子的顶角  $\theta$  在  $75^\circ \sim 105^\circ$  和方位角  $\phi$  在  $165^\circ \sim 195^\circ$  范围内的有效碰撞, 总碰撞数几乎不受微弱微波场影响。然而, 与无微波场相比, 弱微波场存在时水分子在上述空间的碰撞概率增加了  $3\% \sim 9\%$ 。通过对能量分布的比较, 发现弱微波使能量分布发生了变化, 如图 13 所示。弱微波的分布曲线变得更高更窄。低能区分子所占比例相较中、高能区变化甚微, 在微波场作用下几乎可忽略不计。在弱微波作用下中等能量分子的比例增加, 而高能量分子比例下降。

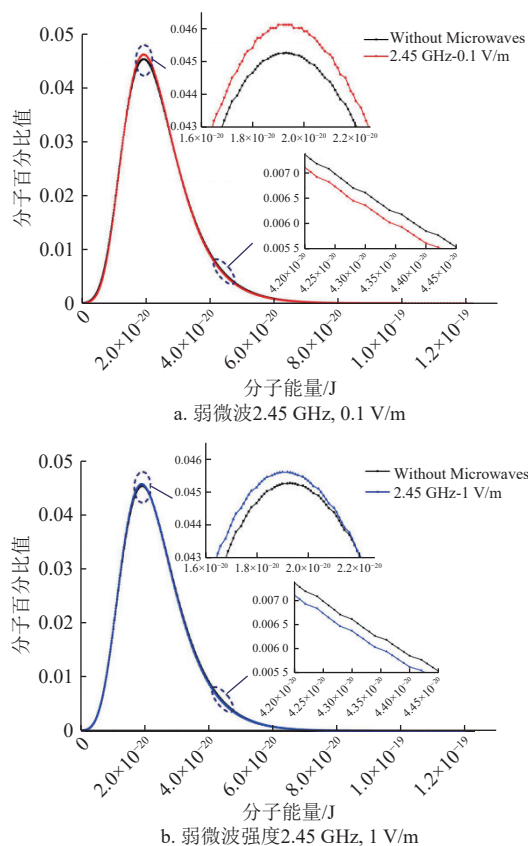


图 13 弱微波存在与不存在时的能量分布

利用极值函数分析能量, 发现在弱微波作用下, 能量分布的中心没有发生改变, 分布幅度变

高, 分布宽度随着微波的减弱而变窄。这是因为在微波作用下, 随着电场强度的增大, 高能分子在一定程度上被束缚在电场周围, 因此高能分子的运动速率减弱, 能量降低。

这些结果共同证实: 弱微波辐射能够诱导水分子沿电场方向发生定向排列, 这种介电极化过程不仅改变了传统热运动主导的各向同性碰撞模式, 更通过电场约束效应对极性分子产生了显著的取向约束作用, 进而产生微波后极化效应。基于微弱微波的约束条件, 这可对微波加速化学反应现象提供定性概括的解释。一方面, 假设化学反应的碰撞方向与电场方向一致, 这可能增加化学反应的碰撞概率。另一方面, 化学反应碰撞需具备足够能量。由于高能分子比例降低, 可能减少活化分子数量, 从而削弱化学反应有效碰撞次数。最终, 微波对化学反应速率的影响取决于这两种效应的综合程度。

## 4 微波非热效应的争议

尽管关于微波非热效应的研究已持续数十年, 现有的实验探索和理论假设对微波非热效应给出了适当的解释, 但学界至今尚未达成共识。其根本原因在于, 不论是理论解释还是实验验证, 都存在无法完全自洽或可重复的部分。

总体来看, 赞成派认为实验结果显示了微波可能改变反应的活化能与指前因子, 存在场致能量通道。典型工作是文献 [33-34] 的研究都指出活化能和指前因子的差异超出了纯粹热效应的解释范围。这些实验结果是迟滞微波非热效应存在的重要证据。而反对派则基于量子能级与热力学原理, 指出微波光子能量过低, 不足以直接参与化学键的形成或断裂, 如表 4 所示, 2.45 GHz 下单个微波光子的能量约为  $10^{-5}$  eV, 远低于典型化学键能 ( $1 \sim 5$  eV) 及分子振动能级间距, 无法直接引发键断裂或电子跃迁。因此, 微波不具备通过量子过程直接改变化学反应势垒的物理可能性。从热力学原理出发, 微波仅是一种能量输入形式, 只能改变体系的能量分布速率, 而不能改变反应的平衡常数  $K_{eq}$  或自由能差。若非热效应确实存在, 则意味着微波场能改变体系的自由能曲面或势垒结构, 这在传统热力学框架下难以自洽。同时, 随高分辨测温的发展, 大量早期被认定为“非热效应”的现象被重新解释为局域过热、非均匀加热或传质增强。如文献 [12] 发现极性液体中出现的“过热”现象, 本质上是由于微波体积加热抑制了壁面成核与对流换

热, 从而形成高于常压沸点  $10\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$  的热点。此类热学非均匀性足以造成反应速率差异, 使得实验结果被误判为微波的非热贡献。由此, 反对者认为目前尚无充分证据表明微波能够绕过热机制直接改变化学反应的本征势垒。

表4 不同化学键键能对比

| 参数    | 类型        |     |     |     |           |
|-------|-----------|-----|-----|-----|-----------|
|       | 微波光子能量    | 共价键 | 金属键 | 离子键 | 氢键        |
| 键能/eV | $10^{-5}$ | 5   | 2.4 | 7.6 | 0.04~0.44 |

赞成派的实验观察揭示了微波作用下动力学参数的异常变化, 而反对派的理论分析则提供了能量尺度与热力学约束的严谨解释。二者的核心分歧在于: 这些实验差异究竟源自真实的电场-分子相互作用, 还是源于测温误差与传热非均匀性的系统偏差。

## 5 结束语

经过近半个世纪的研究, 微波非热效应的存在仍未得到完全证实。虽然部分实验表明微波可能在特定条件下改变化学反应的活化能与指前因子, 但这些结果尚缺乏普适性和可重复性。量子力学与热力学的基本约束使得微波光子能量难以直接参与化学键的形成与断裂, 而实验条件中的非均匀加热和局域热点又使“非热现象”与“热效应”难以严格区分。因此, 目前尚无法给出一个被广泛接受的理论模型来统一解释所有现象。

尽管如此, 微波非热效应问题仍然必须被深入研究。随着微波技术在能源转化、材料加工、等离子体催化以及生命科学等领域的广泛应用, 人类活动正处于一个持续增强的电磁环境中。理解微波是否能以超越热机制的方式作用于物质体系, 已成为电磁科学、化学工程和环境安全交叉领域中的关键科学问题。为此, 未来研究亟需结合高时空分辨原位表征、温度与电场双闭环控制实验及多尺度模拟方法, 建立一套可重复、量化的研究体系, 为揭示微波场-物质相互作用的真实机制提供可靠证据。

更重要的是, 即使非热效应仅在特定条件下存在, 它也具有潜在的科学与工程价值。一旦被明确定量和可控, 微波非热通道可能为化学反应选择性调控、低温材料合成、污染物转化、催化活性中心重构等提供新的能量调控维度。同时, 对其深入理解也有助于制定电磁安全标准、避免潜在生物风险。可以预见, 微波非热效应的研究不仅关乎基础

科学问题的澄清, 更将为未来高效、清洁的能量利用开辟新的方向。

## 参考文献

- [1] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz)[J]. *Health Physics*, 2020, 118: 483-524.
- [2] IEEE International Committee on Electromagnetic Safety Technical Committee 95. IEEE standard for safety levels with respect to human exposure to electric, magnetic, and electromagnetic fields, 0 Hz to 300 GHz[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 171346-171356.
- [3] FOSTER K R, GLASER R. Thermal mechanisms of interaction of radiofrequency energy with biological systems with relevance to exposure guidelines[J]. *Health Physics*, 2007, 92: 609-620.
- [4] BLACKMAN C F, BENANE S G, ELDER J A, et al. Induction of calcium-ion efflux from brain tissue by radiofrequency radiation: Effect of sample number and modulation frequency on the power-density window[J]. *Bioelectromagnetics*, 1980, 1(1): 35-43.
- [5] ADEY W R. Frequency and power windowing in tissue interactions with weak electromagnetic fields[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1980, 68(1): 119-125.
- [6] JOINES W T, BLACKMAN C F. Power density, field intensity, and carrier frequency determinants of RF-energy-induced calcium-ion efflux from brain tissue[J]. *Bioelectromagnetics*, 1980, 1(3): 271-275.
- [7] FROHLICH H. Long-range coherence and energy storage in biological systems[J]. *Int J Quantum Chem*, 1968, 2: 641-649.
- [8] REIMERS J R, MCKEMMISH L K, MCKENZIE R H, et al. Weak, strong, and coherent regimes of Frohlich condensation and their applications to terahertz medicine and quantum consciousness[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2009, 106: 4219-4224.
- [9] STEINER U E, ULRICH T. Magnetic field effects in chemical kinetics and related phenomena[J]. *Chem Rev*, 1989, 89: 51-147.
- [10] CHOU C K, BASSEN H, OSEPCHUK J, et al. Radio frequency electromagnetic exposure: tutorial review on experimental dosimetry[J]. *Bioelectromagnetics*, 1996, 17: 195-208.
- [11] GABRIEL S, LAU R W, GABRIEL C. The dielectric properties of biological tissues: III. Parametric models for the dielectric spectrum of tissues[J]. *Phys Med Biol*, 1996, 41(11): 2271-2293.
- [12] BAGHURST D R, MINGOS D M P. Superheating effects associated with microwave dielectric heating[J]. *J Chem Soc Chem Commun*, 1992, 9: 674-677.
- [13] CHEMAT F, ESVELD E. Microwave super-heated boiling of organic liquids: Origin, effect and application[J]. *Chem Eng Technol*, 2001, 24: 735-744.
- [14] BRUYN M D, BUDARIN V L, STURM G S J, et al.

- Subtle microwave-induced overheating effects in an industrial demethylation reaction[J]. *J Am Chem Soc*, 2017, 139: 5431-5436.
- [15] PERREUX L, LOUPY A. A tentative rationalization of microwave effects in organic synthesis[J]. *Tetrahedron*, 2001, 57: 9199-9223.
- [16] ADEY W R. Ionic nonequilibrium phenomena in tissue interactions with electromagnetic fields[J]. *Ann N Y Acad Sci*, 1981, 247: 271-297.
- [17] GRUNDLER W, KAISER F, KEILMANN F, et al. Mechanisms of electromagnetic interaction with cellular systems[J]. *Naturwissenschaften*, 1992, 79: 551-559.
- [18] NISHIZUKA Y. The role of protein kinase C in cell surface signal transduction and tumour promotion[J]. *Nature*, 1984, 308: 693-698.
- [19] EHRlich Y H, DAVIS T B, BOCK E, et al. Ecto-protein kinase activity on the external surface of neural cells[J]. *Nature*, 1986, 320: 67-70.
- [20] BAWIN S M, ADEY W R. Calcium binding in cerebral tissue[C]//Symposium on Biological Effects and Measurement of Radio Frequency/Microwaves. Washington DC: US Dept of Health, 1977: 305-313.
- [21] BLACKMAN C F, ELDER J A, WEIL C M, et al. Induction of calcium-ion efflux from brain tissue by radio-frequency radiation[J]. *Radio Sci*, 1979, 14(6S): 93-98.
- [22] ADEY W R. Cell membranes: the electromagnetic environment and cancer promotion[J]. *Neurochem Res*, 1988, 13(7): 671-677.
- [23] BAWIN S M, ADEY W R. Sensitivity of calcium binding in cerebral tissue to weak environmental electric fields[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 1976, 73(6): 1999-2003.
- [24] BLACKMAN C F, BENANE S G, KINNEY L S, et al. Effects of ELF fields on calcium-ion efflux[J]. *Radiat Res*, 1982, 92(3): 510-520.
- [25] ADEY W R, BAWIN S M, LAWRENCE A F. Effects of weak amplitude-modulated microwave fields on calcium efflux[J]. *Bioelectromagnetics*, 1982, 3(3): 295-307.
- [26] XIAO Q, HUANG K M, SHI H X. Microwave hyperpolarization effect[J]. *J Phys Chem B*, 2024, 128: 1963-1974.
- [27] VOLKOW N D, TOMASI D, WANG G J, et al. Effects of cell phone radiofrequency signal exposure[J]. *JAMA*, 2011, 305(8): 808-813.
- [28] YAO C, WANG H, SUN L, et al. Biological effects of compound microwave exposure[J]. *Cells*, 2022, 11: 3849.
- [29] SUZUKI N, HASEGAWA Y, KADOMATSU K, et al. Microwave pre-stimulation methodology for plant growth[J]. *Sci Rep*, 2025, 15: 13903.
- [30] 姚岚航, 李文林, 朱程, 等. 微波非热效应对浓香菜籽油风味形成的影响[J]. *农业工程学报*, 2025, 41(9): 290-295.  
YAO L H, LI W L, ZHU C, et al. Impacts of microwave non-thermal effect on aroma formation of fragrant rapeseed oil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2025, 41(9): 290-295.
- [31] TROST B M, ANDERSEN N G. Utilization of molybdenum- and palladium-catalyzed transformations[J]. *J Am Chem Soc*, 2002, 124: 14320-14321.
- [32] JU Y, VARMA R S. Aqueous N-alkylation of amines under microwave irradiation[J]. *Green Chem*, 2004, 6: 219-222.
- [33] BINNER J G P, HASSINE N A, CROSS T E. Role of the pre-exponential factor in microwave synthesis[J]. *J Mater Sci*, 1995, 30: 5389-5393.
- [34] 黄卡玛, 刘永清, 唐敬贤, 等. 电磁波对化学反应非致热作用的实验研究[J]. *高等学校化学学报*, 1996, 17: 764-768.  
HUANG K M, LIU Y Q, TANG J X, et al. A study of athermal action of electromagnetic waves[J]. *Chem J Chin Univ*, 1996, 17: 764-768.
- [35] WEBB S J, STONEHAM M E. Resonances between  $10^{11}$  and  $10^{12}$  Hz in active bacterial cells[J]. *Phys Lett A*, 1977, 60A(3): 267-268.
- [36] GRUNDLER W, KEILMANN F, FROHLICH H. Resonant growth rate response of yeast cells[J]. *Phys Lett A*, 1977, 62: 463-466.
- [37] DEVYATKOV N D. Influence of millimeter-band electromagnetic radiation[J]. *Sov Phys Usp*, 1974, 16: 568-572.
- [38] ADEY W R. Tissue interactions with nonionizing electromagnetic fields[J]. *Physiol Rev*, 1981, 61: 435-514.
- [39] BAWIN S M, KACZMAREK L K, ADEY W R. Effects of modulated VHF fields on the CNS[J]. *Ann N Y Acad Sci*, 1975, 247: 74-81.
- [40] LIN L S, ADEY W R. Low frequency amplitude modulated microwave fields[J]. *Bioelectromagnetics*, 1982, 3: 309-322.
- [41] BAWIN S M, SHEPPARD A, ADEY W R. Possible mechanisms of weak electromagnetic field coupling[J]. *Bioelectrochem Bioenerg*, 1978, 5(1): 67-76.
- [42] BLACKMAN C F, BENANE S G, HOUSE D E, et al. Effects of ELF and modulated RF fields[J]. *Bioelectromagnetics*, 1985, 6: 1-11.
- [43] ROSEN D M. Multiple hormonal mechanisms for control of collagen synthesis[J]. *Endocrinology*, 1983, 112(3): 992-999.
- [44] HORE P J, MOURITSEN H. The radical-pair mechanism of magnetoreception[J]. *Annu Rev Biophys*, 2016, 45: 299-344.
- [45] RODGERS C T, HORE P J. Chemical magnetoreception in birds[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2009, 106(2): 353-360.
- [46] TIMMEL C R, TILL U, BROCKLEHURST B, et al. Effects of weak magnetic fields[J]. *Mol Phys*, 1998, 95(1): 71-89.
- [47] FAY T P, LINDOY L P, MANOLOPOULOS D E. Spin-selective electron transfer reactions[J]. *J Chem Phys*, 2018, 149: 064107.
- [48] ADAMS B, SINAYSKIY L, PETRUCCIONE F. An open quantum system approach[J]. *Sci Rep*, 2018, 8: 1-10.
- [49] WANG S, BENJAMIN P, HORE P J. Magnetic field effects on radical pair reactions[J]. *Phys Chem Chem Phys*, 2023, 25: 975-982.
- [50] SCHULTEN K, WOLYNES P G. Semiclassical

- description of electron spin motion[J]. *J Chem Phys*, 1978, 68: 3292-3297.
- [51] BRONSVELD M V, DAUW X L R, GROENEN E J J. The triplet state of C<sub>70</sub>. A zero-field study[J]. *Chem Phys Lett*, 1998, 293(5-6): 528-534.
- [52] SCHLUTER W, ULRICH T, STEINER U E. Magnetic-field-enhanced radical yield[J]. *Chem Phys Lett*, 1983, 103(2): 118-123.
- [53] WEAVER J C, ASTUMIAN R D. The response of living cells to very weak electric fields: the thermal noise limit[J]. *Science*, 1990, 247(4941): 459-462.
- [54] ADAIR R K. Constraints on biological effects of weak ELF electromagnetic fields[J]. *Phys Rev A*, 1991, 43: 1039-1048.
- [55] ADAIR R K. Constraints of thermal noise on biological magnetite[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 1994, 91(8): 2925-2929.
- [56] BLANK M, FINDL E. Mechanistic approaches to interactions of electric fields[M]. Berlin: Springer, 2013.
- [57] ASTUMIAN R D, ROBERTSON B. Nonlinear effect of an oscillating electric field[J]. *J Chem Phys*, 1989, 91: 4891-4901.
- [58] ASTUMIAN R D, WEAVER J C, ADAIR R K. Rectification and signal averaging[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 1995, 92: 3740-3743.
- [59] MCDONNELL M D, ABBOTT D. What is stochastic resonance[J]. *PLoS Comput Biol*, 2009, 5(5): e1000348.
- [60] ADEY W R. Nonlinear electrodynamics in biological systems[M]. Berlin: Springer, 2012.
- [61] MCCAMMON J A. Protein dynamics[J]. *Rep Prog Phys*, 1984, 47(1): 1-46.
- [62] NEELY S T, KIM A O. An active cochlear model[J]. *Hear Res*, 1983, 9(2): 123-130.
- [63] EECKMAN F H, FREEMAN W J. Asymmetric sigmoid non-linearity[J]. *Brain Res*, 1991, 557(1-2): 13-21.
- [64] KANE K P, SHERMAN L A, MESCHER M F. Molecular interactions required for triggering CTL[J]. *J Immunol*, 1989, 142: 4153-4160.
- [65] HUANG K M, YANG X Q. New method to measure rate constant[J]. *Ind Eng Chem Res*, 2005, 44: 4501-4503.
- [66] GOU D Z, HUANG K M, LIU Y, et al. Influence of weak microwaves on water molecules[J]. *Chem Phys*, 2021, 540: 110977.

责任编辑 刘飞阳