

# 磁场对酶学效应影响的研究进展\*

王山杉 李琳 李冰

(华南理工大学轻工与食品学院 广州 510640)

**摘要:**本文就近年来国内外关于脉冲磁场和恒定磁场对于生物体内各种酶的活性、构象、酶促反应动力学的效应的研究进行了综述。

**关键词:**磁场;酶活性;构象;反应动力学

**中图分类号:**Q64 **文献标识码:**A

## Review on Enzymatic Effects by Magnetic Fields

WANG Shan-shan, LI Lin, LI Bing

(College of Light Industry and Food Sciences, the South China University of Technology, Guangzhou 510640, Guangdong, China)

**ABSTRACT:** This paper reviewed the internal and external progress on the effects of pulsed magnetic fields and static magnetic fields on enzymatic activity, conformation and reaction dynamics in recent years.

**Key words:** Magnetic Fields; Activity of Enzyme; Conformation; Reaction Dynamics

## 引言

目前,国内外有许多关于磁场对生物体的行为学和形态学、细胞周期动力学、细胞的增殖与分化、细胞凋亡、跨膜离子流、RNA 和蛋白质的合成,以及对 DNA 的损伤和致变异作用等方面影响效果的研究。酶,作为参与与催化生物体内各种代谢过程,介导信号转导和驱动离子跨膜流动的重要大分子物质,在磁场的作用下发生的构象、活性等方面的变化也是生物体的生理生化性质产生宏观改变的原因之一。

因此,一些磁生物效应的研究也将酶作为其研究客体,应用包括恒定磁场、脉冲磁场、旋转磁场、核磁共振等磁场类型,通过改变包括恒定磁场的磁感应强度、梯度、时间,脉冲磁场的频率和曝磁时间等作用参数,来研究酶活性、分子构象和反应动力学的变化。通过研究磁场与酶特性之间相互作用的规律,可以对磁场生物效应的产生进行机理方面的探讨,并且对于磁场处理在工农业生产上的实际应用也具有意义。本文将就近年来国内外有关磁场对酶学影响效果的研究进行综述。

## 1 磁场对酶活性的影响

### 1.1 脉冲磁场对酶活性的影响

脉冲磁场是大小和方向都随着时间变化的磁场,其频率、波形和峰值等均可根据需要调节。脉冲磁场在不同强度、时间和频率下对酶活性产生不同的影响。目前,在脉冲磁场下的酶学研究主要包括抗氧化酶系统,例如过氧化物酶(peroxidase, POD)<sup>[1,2]</sup>、过氧化氢酶(catalase, CAT)<sup>[3,4]</sup>、超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)<sup>[3]</sup>、谷胱甘肽还原酶(glutathione reductase, GR)<sup>[3]</sup>、多酚氧化酶(polyphenol oxidase, PPO)<sup>[4]</sup>、抗坏血酸氧化酶(ascorbate oxidase, AO)<sup>[4]</sup>、硝酸还原酶(nitrate reductase, NR)<sup>[4]</sup>;定位于细胞膜上的酶,例如细胞色素 C 氧化酶(cytochrome C oxidase, CO)<sup>[5-8]</sup>、Na, K-ATP 酶(Na, K-AT-

Pase)<sup>[7,9,10]</sup>;与细胞分裂及细胞周期相关、并在肿瘤研究中得到重视的鸟氨酸脱羧酶(ornithine decarboxylase, ODC)<sup>[11-14]</sup>;蛋白激酶 C (protein kinase C, PKC)<sup>[15]</sup>;腺苷酸激酶(adenylate kinase, AK)<sup>[16]</sup>;α-淀粉酶(α-amylase)<sup>[4]</sup>;烯醇酶(enolase)<sup>[17]</sup>等。各种酶活性受脉冲磁场影响的情况,详见表 1。

在生物体细胞内广泛存在着由过氧化物酶(peroxidase, POD)、过氧化氢酶(catalase, CAT)和超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)组成的保护酶系统。已有许多研究报道了外加磁场与细胞保护酶系统的关系。2003 年,Portaccio 等研究了 50Hz, 1mT 的极低频电磁场对可溶及不可溶辣根过氧化物酶(horseradish peroxidase, HRP)活性的影响,发现脉冲磁场会影响可溶性 HRP 的失活率<sup>[1]</sup>。2005 年,他们继续研究了频率为 50-400Hz 的极低频电磁场对固定及自由的 HRP 活性的影响,130Hz, 1mT 的磁场会最大地提高可溶性 HRP 的活性;包埋和共价结合的 HRP,其最适活性激发频率分别为 150 和 170mT<sup>[2]</sup>。Piacentini 等也报道在 50Hz, 0.1mT 磁场作用下,黄瓜已完全分化的子叶比对照生长更快,生存时间长,并且发现,这与幼苗中多种抗氧化保护酶,如 SOD、CAT 和 GR 的活性都有所提高有关<sup>[3]</sup>。

Blank 等系统地研究了低频磁场对定位于细胞膜上的 Na, K-ATP 酶和细胞色素 C 氧化酶(cytochrome C oxidase, CO)的影响。他们在 1995 年发现,0-70Hz, 0-0.2mT 的磁场会将 Na, K-ATP 酶的活性提高 5-10%,活性的提高与磁场密度无关<sup>[9]</sup>。1997 年研究了在脉冲磁场中 Na, K-ATP 酶的活性与频率的关系,并提出移动电荷互作(mobile charge interaction, MCI)模型<sup>[10]</sup>。CO 是电子传递链的限速酶,可催化还原型细胞色素 C 的氧化,并影响 ATP 合成。他们在 1998 年报道,脉冲磁场会提高 CO 的活性,加速细胞色素 C 氧化过程中电子的运动<sup>[6]</sup>。2001 年提出脉冲磁场会加速 Na, K-ATP 酶和 CO 的反应,这两种酶频率依赖曲线的斜率相似,并且低频部分的斜率比高频部分高 10 倍<sup>[7]</sup>。此外, Nossol 等人也研究了 50Hz 脉冲

\* 国家自然科学基金重点项目(20436020);国家自然科学基金青年基金(20306007);广东省自然科学基金重点项目(04105934) 资助项目。

作者简介:王山杉(1976-),女,博士研究生,研究方向:物理场的生物学效应

通讯作者:王山杉, E-mail: sswang1976@gmail.com

(收稿日期:2006-06-21 接受日期:2006-07-30)

磁场对牛心中 CO 氧化还原活性的影响<sup>[5]</sup>,发现磁场对 CO 活性的影响具有双向性,此双向性与酶上的两个催化位点

-- 高亲和位点与低亲和位点的改变密切相关。

表 1 脉冲磁场对酶活性的影响

Tab 1 Effects of pulsed magnetic fields on enzymatic activity

酶 Enzymes	磁场作用参数 Parameters of MFs			对酶活性影响 Effects on Enzymatic Activity	作者 Authors	文献 References
	场强	频率	曝磁时间			
	Magnetic Intensity	Frequencies	Time of Exposure			
ODC	10 $\mu$ T	60Hz	4hr	无明显差异 <sup>[11]</sup>	Azadniv. 1995	9
	100 $\mu$ T	50Hz	1, 2, 8, 13 周	2 周后诱导活性增强 <sup>[12]</sup>	Mevissen. 1999	10
	4 $\mu$ T	60Hz	8, 15, 17, 20, 23, 26hr	原肠胚期增强, 神经胚期减弱 <sup>[14]</sup>	Farrell. 1997	12
POD	1mT	50Hz	1, 2, 3hr	可溶酶活性下降 50%, 不可溶酶无显著差异 <sup>[1]</sup>	Portaccio. 2003	1
	1mT	50 - 400Hz	1, 2, 3, 4hr	根据频率有正、负或零效果 <sup>[2]</sup>	Portaccio. 2005	2
PKC	1.1mT	60Hz	1hr	胞质 PKC 活性降低, 膜活性增加 <sup>[15]</sup>	Tuinstra. 1998	14
CO	10 $\mu$ T	10 - 2500Hz	1min	活性提高 <sup>[6]</sup>	Blank. 1998	8
	0 - 10 $\mu$ T	60Hz	1 - 8min	对活性较低的酶作用显著 <sup>[8]</sup>	Blank. 1998	6
	50 $\mu$ T - 100mT	50Hz	-	活性变化 90% <sup>[5]</sup>	Nossol. 1994	5
Na, K - ATP 酶	5 $\mu$ T, 100 $\mu$ T	1 - 3000Hz	40min	3 - 3000Hz 使活性改变 5 - 10% <sup>[10]</sup>	Blank. 1997	17
AK, POD	50 - 250 $\mu$ T	75Hz	1, 2, 5, 10, 20min	活性下降 54% <sup>[16]</sup>	Ravera. 2004	15
SOD, CAT, GR	0.1mT	50Hz	每日 24hr 共 2 周	SOD, CAT, GR 活性高于对照 <sup>[3]</sup>	Piacentini. 2001	3
烯醇酶	138.5nT	10 - 72Hz	30min	不同频率结合 ELF - EF 时 活性降低 <sup>[17]</sup>	Nazar. 1996	16
$\alpha$ - 淀粉酶, CAT, PPO, AO, NR	60 - 150mT	50Hz	10min	几种酶的活性均有不同 程度的提高 <sup>[4]</sup>	曹学成. 1998	4

鸟氨酸脱羧酶(ornithine decarboxylase, ODC)是真核细胞分裂过程中由间期进入 S 期的必需酶,是调节 DNA 复制和细胞增殖的一个关键酶。所有快速生长的细胞都表现为 ODC 活性显著增强,因此,在研究极低频磁场致癌效应时,往往会测定生物体内 ODC 的活性。研究表明,当小鼠和人类细胞系中 ODC 暴露在微特斯拉级、50/60Hz 的磁场中时,活性会显著提高,根据细胞系的不同活性增加从 30% 到 500%<sup>[13]</sup>。Farrell 等对鸡的胚胎进行研究,发现 4 $\mu$ T, 60Hz 的正弦磁场可极大地提高鸡胚胎原肠胚期 ODC 的活性,而降低神经胚期的 ODC 活性<sup>[14]</sup>。

Ravera 等研究了极低频电磁场对牛视网膜中杆外体节的腺苷酸激酶(adenylate kinase, AK)活性的作用<sup>[16]</sup>。75Hz, 125 $\mu$ T 的电磁场会显著影响杆外体节膜的 AK 活性,使杆外体节膜或盘膜产生的 ATP 降低约 54%。

在磁场对酶活性影响效果的研究中,常见磁场与其它化学物质协同作用于酶,从而增强酶失活诱变剂效果。例如, Tuinstra 等<sup>[15]</sup>研究了 60Hz 正弦波磁场单独作用以及与佛波酯同时作用于 HL60 细胞后对细胞中蛋白激酶 C 活性改变的效果。当 1.1mT 的磁场单独作用于细胞培养物或与 2 $\mu$ mol/l 豆蔻酰佛波醇乙酯(phorbol 12 - myristate 13 - acetate, PMA)共同作用 1 小时,酶的活性没有改变。如果先由 PMA 作用于培养物 45min,再由磁场和 PMA 共同作用 15min,胞质酶活性有较大的下降,膜上的酶活性有较大提高。这说明磁场是以增效的方式作用于已激活的途径。Mevissen 等<sup>[12]</sup>也报道,当雌性大鼠暴露在 50Hz, 50 $\mu$ T 磁场中,并受致癌化学物质 7, 12 - 二甲苯并蒽(7, 12 - dimethyl<sup>[a]</sup>anthracene, DMBA)作用

时,磁场会显著促进乳腺肿瘤的生长。

关于脉冲磁场影响酶反应的机理,Portaccio 认为是因为磁场在酶中介入了不可逆或缓慢可逆的修饰<sup>[11]</sup>;在 Blank 等人提出的 MCI 模型中则认为,磁场会通过影响可移动的电荷来影响酶反应<sup>[10]</sup>。在协同作用的反应中, Tuinstra 认为磁场可能是通过与已经起作用的反应或途径相互作用来产生效果<sup>[15]</sup>。

## 1.2 恒定磁场对酶活性的影响

恒定磁场是恒定直流电或静止永磁体产生的磁场,大小和方向都不随时间改变。对恒定磁场下酶的磁效应研究主要包括 CAT<sup>[1]</sup>、乙酰胆碱酯酶(acetylcholinesterase, AChE)<sup>[23]</sup>、碳酸酐酶(carbonic anhydrase, CA)<sup>[24]</sup>、纤维素酶(cellulase)<sup>[25]</sup>、CO<sup>[5]</sup>、SOD<sup>[26]</sup>、枯草杆菌蛋白酶<sup>[27]</sup>、环核苷酸磷酸二酯酶(cyclic nucleotide phosphodiesterase)<sup>[28]</sup>、POD<sup>[29]</sup>等。恒定磁场影响各种酶活性的情况详见表 2。

在生物体的衰老过程中存在着抗氧化能力下降的现象,这与自由基代谢异常有关;而负责对自由基进行清除的酶就是 SOD、CAT、POD 等保护酶。有很多研究表明,恒定磁场处理会提高这些酶的活性,从而使生物体内的自由基维持在一个较低的水平,减少自由基对于生物体的毒害。例如,张军等<sup>[22]</sup>报道,在 25 $^{\circ}$ C 下,经 0.23 - 0.61T 强稳恒磁场作用 1 小时,离体牛肝 CAT 的活性增加。夏丽华等<sup>[29]</sup>报道,以恒定磁场对羊草进行处理,发现羊草中 POD 的活性增加,并且诱发出新的同工酶谱带,羊草的生长也得到了促进。钟科军等<sup>[26]</sup>亦发现以不同强度磁场作用于 SOD 溶液, 200mT 处理 2 小时,其活性增长 17%。

表2 恒定磁场对酶活性的影响

Tab 2 Effects of static magnetic fields on enzymatic activity

酶 Enzymes	磁场作用参数 Parameters of MFs			对活性的影响 Effects on Activity	作者 Authors	文献 References
	场强 Magnetic Intensity	作用时间 Time of Exposure	温度 Temperature			
CAT	0.23 - 0.61T	0.5 - 24hr	25℃	0.23T, 0.39T, 随时间增加而升高 0.54T, 0.61T 先上升后下降 <sup>[22]</sup>	张军等, 2001	18
纤维素酶	0 - 0.460T	20min - 60hr	9℃	pH5.0, 0.190T, 活性增强 16.4% <sup>[25]</sup>	贺华君等, 1998	21
SOD	70 - 460mT	0 - 24hr	10℃	2hr, 200mT, 增加 17% <sup>[26]</sup> 300mT 时酶活性提高及同	钟科军等, 1999	22
POD	0 - 500mT	10min	-	工酶染色增加最明显 <sup>[29]</sup>	夏丽华, 2000	25
AchE	0 - 270mT	5 - 180min	4℃	150mT, 120min, 活性增加 24.0% <sup>[23]</sup>	林建员等, 2004	19
环核苷酸磷酸二酯酶	17 - 24μT	30min	37℃	活性非线性地依赖于游离钙浓度而改变 <sup>[28]</sup>	Liboff, et al., 2003	24
CA	0 - 210mT	1 - 24hr	4℃	210mT, 4hr 活性增强 17% <sup>[24]</sup>	贺华君等	20
枯草杆菌蛋白酶	0.1 - 0.335T	0 - 120min	4℃	0.13T, 100min, 活性提高 11.2% <sup>[27]</sup>	范秋领等, 1998	23

除抗氧化酶之外, Liboff 等<sup>[28]</sup>2003 年报道, 曝于弱恒磁场中的依赖于钙调素 (Calmodulin, CaM) 的环核苷酸磷酸二酯酶, 其活性会受到磁场改变, 这一改变非线性地依赖于游离钙的浓度, 磁场会影响酶途径中最初的  $Ca^{2+}/CaM$  的结合过程。

范秋领等研究了磁场对于枯草杆菌蛋白酶催化活性的影响, 0.13T 的磁场处理酶液 100min, 酶的催化活性会提高 11.2%<sup>[27]</sup>。

林建员等在 AchE 磁效应的研究中, 发现 150mT 的恒磁场, 作用于 AchE 溶液 2 小时, AchE 的活性会增加 24.0%; 但是如果作用 15 个小时, 则 AchE 的活性全部丧失<sup>[23]</sup>。这说明对于酶, 恒磁场可提高它们的活性, 但是, 当作用时间延长, 反而会抑制酶的活性, 甚至使酶失活。

## 2 磁场对酶构象的作用

各种磁场在不同条件下会对酶构象产生影响, 从而使其荧光光谱的强度、发射峰的位置和形状发生改变。在组成酶蛋白质的氨基酸残基里, Trp (色氨酸)、Tyr (酪氨酸) 和 Phe (苯丙氨酸) 三种残基可以发射荧光。常通过荧光光谱法, 利用 Trp 的荧光变化来研究蛋白质分子及酶分子构象的变化。一般认为磁场影响酶的构象的机理在于: ①一些酶中含有 Co、Fe、Mn、Cu、Mo 等未填满电子壳层的过渡族金属原(离)子, 这些金属原(离)子表现为顺磁性, 并且位于酶的活性中心部位; 电磁场会通过对这些原(离)子的作用影响酶的活性, 并因而影响到金属离子附近主链、侧链的位置, 从而影响了酶的构象; ②磁场致使酶产生形成生物大分子共轭结构, 二硫桥键上的自由电子跃迁<sup>[30]</sup>; ③维系磁场活性部位空间结构的次级键的作用力通常较弱, 易受环境影响, 磁场作用于次级键, 使酶的构象改变<sup>[31]</sup>; ④与酶结合的水分子在维持酶分子自然构象中具有重要的作用, 已有的研究结果证明, 磁场处理会改变水溶液的粘度、表面张力、电导率等物理化学性质<sup>[32]</sup>, 因此也会通过影响水分子的结构, 改变水中氢键的长度和强度, 而使酶的构象产生影响。

张军等研究了强稳恒磁场对离体牛肝 CAT 构象的影响<sup>[22]</sup>。CAT 经 0.23 - 0.61T 磁场处理, 其紫外线光谱和荧光光谱都出现了吸收峰的改变。酶构象变化的同时, 酶的活性也有一定程度的增加。作者认为, CAT 构象和活力的变化可

能是由于 CAT 活性中心高自旋、顺磁性的  $Fe^{3+}$  在磁场中受到扰动, 同时具一定磁矩的酶分子侧链的取向分布发生了变化。

贺华君等以荧光光谱法研究了恒磁场对乳酸脱氢酶 (LDH)、肌酸激酶 (CK)、尿酶 (Urease) 和超氧化物歧化酶 (SOD) 构象的影响<sup>[30]</sup>。改变磁场强度、温度、介质和磁化时间, 会影响几种酶的构象, 在荧光光谱中, 荧光强度、发射峰位置和形状发生变化。

## 3 磁场对酶促反应动力学的影响

磁场会对酶促反应速度产生影响。磁场对酶促反应动力学影响的机理可能是由于削弱了溶液中不同分子极性基因之间的相互作用, 减小了分子的扩散阻力, 使解离出的酶分子能够以更快的速度重新与底物接近、复合, 从而提高酶促反应速度。

Blank 等在 1998 年关于脉冲磁场对 CO 活性效果的研究中也探讨了磁场对反应速率的影响<sup>[8]</sup>。

以 M 和 C 分别代表施加和未施加磁场的反应速率, M/C 代表磁场的效果。以 60Hz、强度分别为 2μT、5μT、7μT 和 10μT 的磁场作用于细胞色素 C 的氧化过程, 发现峰速度随场强增加而提高。M/C 依赖于反应进行 1min 后测得的绝对反应速度, M/C 与反应速率有负相关关系, 反应速率越大, M/C 越小。当场强小于 3μT 时, 速率常数可提高 20 - 30%; 在 6 - 10μT 范围内, 速率常数增加的因数为 2 - 3。以外推法可以推定细胞色素 C 对磁场产生反应的阈值。尽管在磁场中反应速率会加快, 但以公式  $F = q \times m \times v$  计算磁场中运动电子受到的洛伦兹力 (其中 q 为电荷电量, m 为电子质量, v 为电子运动速度), 算出力的大小为  $10^{-24}N$ , 此力的大小对电子运动的作用微乎其微, 因此更有理由认为磁场不是作用于电子的移动, 而是作用于参与反应的物质, 例如反应物的定向, 从而影响到反应的进行<sup>[6]</sup>。在贺华君等对磁场作用下纤维素酶活性变化的研究<sup>[25]</sup>中, 0.125T 的磁场使米氏常数  $K_m$  由  $1.3 \times 10^{-3}$  增加到  $2.6 \times 10^{-3}$ , 当  $k_2 < k_1$  时  $K_m \geq K_s$ ,  $K_s$  即酶 - 底物络合物的解离常数, 由此得出磁场影响了酶促反应动力学的结论。实验中最大反应速率  $V_m$  随场强增大而降低, 其抑制模式表现为竞争 - 非竞争抑制模式。

而在范秋领等<sup>[27]</sup>的研究中,发现磁场并未改变酶促反应的米氏常数  $K_m$ ,而最大反应速度  $V_{max}$  则不同程度增加,抑制模式表现为非竞争性抑制模式。可见磁场对于酶促反应动力学的影响并没有统一的模式。

#### 4 前景展望

从上文可以看到,在恒磁场的实验中,以小于 400mT 的低磁场强度对酶处理数分钟至数小时后,常会对酶的活性起到促进作用,而脉冲磁场的效果则没有一定的规律。酶活性的改变主要源于其分子构象的改变,构象的变化也与场强、温度、处理时间、介质等许多因素相关。磁场下酶促反应动力学的改变与酶分子、底物分子和介质的变化都相关,但其机理仍需进一步阐述。

随着高压线路的增加,医学大型仪器使用的更加普遍,更多移动通信基地的建立,以及更多使用电磁技术的设备(如磁悬浮列车)的出现,人类也比以往更易于暴露于电磁辐射中。电磁辐射对人体产生的影响及其机理,是需要进行研究并解答的问题。目前,国内对于磁场生物学效应的研究主要以恒定磁场为主,未来恒磁场的研究也可与对肿瘤的生长及恶化的效果相联系,如通过动物学实验研究在肿瘤细胞中活性异常的酶,了解长期曝于磁场中是否会有致癌的危险。对于脉冲磁场的研究,可从酶分子水平扩展到细胞水平、器官水平以至完整的动物个体水平,以了解磁场对机体生理代谢变化所起的放大作用。还需要加强脉冲磁场在细胞信号传导方面的研究,例如对于鸟氨酸脱羧酶的效果。对于能够解释生物学现象的机理,也应该通过实验检测进行评估。此外,磁场与其它因素,例如超声场、温度场、化学物质等的协同作用效果,也是将来磁场生物学研究的热点之一。磁场作用下酶分子结构的动态改变过程、酶构象改变与活性改变之间的关系、在后基因组时代磁场下的功能酶学和蛋白质组的差异表达,也是令人感兴趣的方向。

#### 参考文献

- Portaccio M, De Luca P, Durante D, et al. In vitro studies of the influence of ELF electromagnetic fields on the activity of soluble and insoluble peroxidase[J]. *Bioelectromagnetics*, 2003, 24:449 - 56
- Portaccio M, De Luca P, Durante D, et al. Modulation of the catalytic activity of free and immobilized peroxidase by extremely low frequency electromagnetic fields: dependence on frequency [J]. *Bioelectromagnetics*, 2005, 26:145 - 52
- Piacentini M P, Fratemale D, Piatti E, et al. Senescence delay and change of antioxidant enzyme levels in *Cucumis sativus* L. etiolated seedlings by ELF magnetic fields[J]. *Plant Science*, 2001, 161:45 - 53
- 曹学成,程炳嵩,邹琦,等.脉冲磁场对小麦生理效应的初步研究[J]. *山东农业大学学报*, 1998, 29(3):345 - 350
- Noosal B, Buse G, Silny J. Influence of weak static and 50 Hz magnetic fields on the redox activity of cytochrome - C oxidase[J]. *Bioelectromagnetics*, 1994, 14:361 - 72
- Blank M, Soo L. Frequency dependence of cytochrome oxidase activity in magnetic fields[J]. *Bioelectrochemistry and Bioenergetics*, 1998, 46:139 - 143
- Blank M, Soo L. Optimal frequencies for magnetic acceleration of cytochrome oxidase and Na, K - ATPase reactions [J]. *Bioelectrochemistry*, 2001, 53:171 - 74
- Blank M, Soo L. Enhancement of cytochrome oxidase activity in 60 Hz magnetic fields[J]. *Bioelectrochemistry and Bioenergetics*, 1998, 45:253 - 59
- Blank M, Soo L, Papstein V. Effects of low frequency magnetic fields on Na, K - ATPase activity [J]. *Bioelectrochemistry and Bioenergetics*, 1995, 38:267 - 73
- Blank M, Soo L. Frequency dependence of Na, K - ATPase function in magnetic fields [J]. *Bioelectrochemistry and Bioenergetics*, 1997, 42:231 - 34
- Azadniv M, Klinge C M, Gelein R, et al. A test of the hypothesis that a 60 - Hz magnetic field affects ornithine decarboxylase activity in mouse L929 cells in vitro [J]. *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, 1995, 214(2):627 - 31
- Mevissen M, Haussler M, Loscher W. Alterations in ornithine decarboxylase activity in the rat mammary gland after different periods of 50 Hz magnetic field exposure [J]. *Bioelectromagnetics*, 1999, 20:338 - 46
- Loscher W, Liburdy R P. Animal and cellular studies on carcinogenic effects of low frequency (50/60 - Hz) magnetic fields [J]. *Mutat Res.*, 1998, 2:185 - 220
- Farrell J M, Barber M, Krause D, et al. Effects of low frequency electromagnetic fields on the activity of ornithine decarboxylase in developing chicken embryos [J]. *Bioelectrochemistry and Bioenergetics*, 1997, 43:91 - 96
- Tuinstra R, Goodman E, Greenebaum B. Protein kinase C activity following exposure to magnetic field and phorbol ester [J]. *Bioelectromagnetics*, 1998, 19:469 - 76
- Ravera S, Repaci E, Morelli A, et al. Effects of extremely low frequency electromagnetic fields on the adenylate kinase activity of rod outer segment of bovine retina [J]. *Bioelectromagnetics*, 2004, 25:545 - 51
- Nazar A S M I, Paul A, Dutta S K. Frequency - dependent alteration of enolase activity by ELF fields [J]. *Bioelectrochemistry and Bioenergetics*, 1996, 39:259 - 262
- 朱杰.磁场的生物学效应及其机理的研究 [J]. *生物磁学*, 2005, 5(1):26 - 29
- 朱杰.不同类型磁场对细胞作用的生物学研究 [J]. *生物磁学*, 2004, 4(4):28 - 30
- 高丽松,宁榴贤,曾凡潘,等.磁处理党参、白术药液对胃蛋白酶活性影响的研究 [J]. *生物磁学*, 2004, 4(3):3 - 5
- 代群威,董发勤,吴峰春.微生物磁学研究现状述评 [J]. *生物磁学*, 2005, 5(2):38 - 40
- 张军,孙凡,陈德万,等.强稳恒磁场对离体牛肝过氧化氢酶构象及活力的影响 [J]. *中国医学物理学杂志*, 2001, 18:35 - 6
- 林建员,黄志勤,朱元保.乙酰胆碱酯酶的磁效应研究 [J]. *赣南医学院学报*, 2004, 24(3):241 - 2
- 贺华君,朱元保,范秋领,等.磁场对碳酸酐酶的影响 [J]. *吉首大学学报(自然科学版)*, 1999, 20(2):1 - 5
- 贺华君,朱元保,钟科军,等.磁场对纤维素的活性及构象的影响 [J]. *吉首大学学报(自然科学版)*, 1998, 19(1):41 - 6
- 钟科军,曹社祥.超氧化物歧化酶磁效应的研究 [J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 1999, 26(5):18 - 23
- 范秋领,朱元保,何双娥,等.磁场影响枯草杆菌蛋白酶催化活性的研究 [J]. *吉首大学学报(自然科学版)*, 1998, 19(1):47 - 50
- Liboff A R, Cherng S, Jenrow K A, et al. Calmodulin - dependent cyclic nucleotide phosphodiesterase activity is altered by 20 microT magnetostatic fields [J]. *Bioelectromagnetics*, 2003, 24:32 - 8
- 夏丽华,郭继勋.磁场对羊草过氧化物酶的激活效应及同工酶分析 [J]. *应用生态学报*, 2000, 11(5):699 - 702
- 贺华君,朱元保,钟科军,等.磁场对酶构象的影响 [J]. *吉首大学学报(自然科学版)*, 1998, 19(4):25 - 30
- 李红,胡道道,房喻,等.磁场对大分子构象的影响研究进展 [J]. *高分子通报*, 2005, 5:108 - 113
- 郑必胜,郭祀远,李琳,等.磁场处理强化水溶液蒸发效应的研究 [J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 1995, 23(7):20 - 25