

影响心肌细胞所受电场应力和膜内电能的因素

张辉, 张小娣

咸阳师范学院物理与电子工程学院, 陕西 咸阳 712000

【摘要】目的:研究影响心肌细胞所受电场应力及细胞膜内储存电能改变的因素。**方法:**通过求解边值问题,得到细胞内外区域电势分布,并应用生物电磁学理论、电场应力张量法分析影响细胞膜内储存电能以及心肌细胞应力分布因素。**结果:**细胞半径越大,作用在细胞上的拉力与压力交界点对应极角越大,电场法向、切向应力随胞外介质介电常数变化率越大。在细胞半径较小范围内,电场引起的应力和膜内储存的电能随半径增加变化较大;否则,应力和电能随半径变化较小。**结论:**心肌细胞直径、胞外介质的介电常数均影响细胞所受的电场应力和细胞膜内储存的电能;半径较小的细胞,外加直流电场的影响更为明显;直流电场可引起细胞的形变、融合、旋转、离子跨膜迁移量的改变,产生细胞生物学效应。

【关键词】心肌细胞;电场应力;膜内电能;介电常数

【中图分类号】R318

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2022)02-0252-05

Factors affecting electric field stress on cardiomyocyte and electrical energy stored in cell membrane

ZHANG Hui, ZHANG Xiaodi

College of Physics and Electronic Engineering, Xianyang Normal University, Xianyang 712000, China

Abstract: Objective To explore the factors affecting the electric field stress on myocardial cells and the electrical energy stored in the cell membrane. **Methods** By solving the boundary value problem, the potential distributions inside and outside the cells were obtained, and the factors affecting the energy stored in the cell membrane and the electric field stress distribution on cardiomyocyte were analyzed by the theory of bio-electromagnetics and the electric field stress tensor method. **Results** With larger cell radius, the polar angle corresponding to the junction point of the pulling force and pressure acting on the cell was larger, and the change rates of the electric field normal and tangential stresses with the dielectric constant of the extracellular medium were also larger. The stress caused by the electric field and the electric energy stored in the cell membrane changed obviously within a small cell radius; otherwise, the stress and the change rate changed little with cell radius. **Conclusion** Both the radius of cardiomyocyte and the dielectric constant of extracellular medium affect the electric field stress and the electric energy stored in the cell membrane, and the cells with smaller radius are more easily affected by the additional direct-current electric field. Direct-current electric field can lead to cell deformation, fusion, rotation, and the changes of the ion trans-membrane migration, thereby resulting in cell biological effects.

Keywords: cardiomyocyte; electric field stress; electric energy stored in cell membrane; dielectric constant

前言

随着科学技术的发展,人类生存环境中电磁场占的份额越来越多,人们也越来越关注电磁场对人体或其他生物体的影响。对广西巴马县的调研发现

电磁场作用可影响人体心脑血管组织器官等的正常生理活动^[1-4],日益恶化的电磁环境是近年来巴马老人患心血管疾病比例不断增加的原因之一^[5]。

在细胞水平上,众多研究表明:电场能调控细胞许多形态和生命活动,如细胞增殖、迁移、粘附、细胞骨架重组、胞内离子通道激活等生命活动,也能引起细胞变形、融合和旋转等^[6-8]。分析产生这些效应的物理原因,普遍认为外电场能改变细胞膜内外的电场、细胞表面的电场应力分布以及细胞膜储存的电场能,导致细胞膜跨膜电位、细胞膜两侧离子浓度的变化,从而引起电磁场的生物学效应。因此,从生物物理学角度研究外电场刺激下心肌细胞表面应力的

【收稿日期】2021-08-05

【基金项目】国家教育部产学研协同育人项目(201901260024);陕西省科技厅科研基金(2019KRM026)

【作者简介】张辉,博士,教授,研究方向:生物电磁学, E-mail: xdzhy@163.com

【通信作者】张小娣,高级实验师,研究方向:生物电磁学, E-mail: 285157301@qq.com

变化规律以及膜内能量的变化规律对于进一步分析心血管疾病比例的增加等具有理论和实际意义。

已有学者研究外加电场作用下,球形细胞所受电场应力、膜内电场能量分布^[9-12],但对在直流电场作用下的圆柱形心肌细胞研究未见报道。本研究在心肌细胞物理模型的基础上,根据生物电磁学理论,分析直流电场作用下,影响心肌细胞所受的电场应力以及细胞膜内电场能量分布规律因素,为心肌细胞电磁场生物学效应的研究提供理论参考。

1 理论分析

考虑一般情况下,心肌细胞大致是柱形,且其半径远小于长度,所以,本研究将心肌细胞看成是无限长圆柱体,图1为位于直流电场中圆柱形心肌细胞物理模型截面图。研究区域分为3部分,即细胞质($\rho \leq a$)、细胞膜($a \leq \rho \leq b$)和细胞外液($\rho \geq b$),假设各部分均匀且各向同性,相应区域介电常数分别为: ϵ_i 、 ϵ_m 和 ϵ_e 。图中外加直流电场 $E = E_0 e_x$ 其中 E_0 、 e_x 分别是外加电场大小、方向, ϕ 是外加电场与场点位置 ρ 的夹角。设心肌细胞的轴与 z 轴重合,若用 $\varphi_i(\rho, \phi)$ 、 $\varphi_m(\rho, \phi)$ 和 $\varphi_e(\rho, \phi)$ 分别表示细胞质、细胞膜以及细胞外电位分布,求解研究区域内满足边界条件的拉普拉斯方程,则空间电位分布为^[1]:

$$\begin{cases} \varphi_i(\rho, \phi) = A\rho \cos\phi, & \rho \leq a \\ \varphi_m(\rho, \phi) = (B\rho + C\rho^{-1})\cos\phi, & a \leq \rho \leq b \\ \varphi_e(\rho, \phi) = (-E_0\rho + D\rho^{-1})\cos\phi, & \rho \geq b \end{cases} \quad (1)$$

其中,

$$\begin{cases} A = \frac{-4\epsilon_m\epsilon_e}{[(\epsilon_i + \epsilon_m)(\epsilon_e + \epsilon_m) - (\epsilon_i - \epsilon_m)(\epsilon_e - \epsilon_m)a^2/b^2]} E_0 \\ B = \frac{-2\epsilon_e(\epsilon_i + \epsilon_m)}{[(\epsilon_i + \epsilon_m)(\epsilon_e + \epsilon_m) - (\epsilon_i - \epsilon_m)(\epsilon_e - \epsilon_m)a^2/b^2]} E_0 \\ C = \frac{2\epsilon_e(\epsilon_i - \epsilon_m)a^2}{[(\epsilon_i + \epsilon_m)(\epsilon_e + \epsilon_m) - (\epsilon_i - \epsilon_m)(\epsilon_e - \epsilon_m)a^2/b^2]} E_0 \\ D = \frac{(\epsilon_i - \epsilon_m)(\epsilon_e + \epsilon_m)a^2 - (\epsilon_i + \epsilon_m)(\epsilon_e - \epsilon_m)b^2}{[(\epsilon_i + \epsilon_m)(\epsilon_e + \epsilon_m) - (\epsilon_i - \epsilon_m)(\epsilon_e - \epsilon_m)a^2/b^2]} E_0 \end{cases} \quad (2)$$

由电磁场理论,细胞膜外电场可由 $E = -\nabla\varphi(\rho, \phi) = E_\rho e_\rho + E_\phi e_\phi$ 求得:

$$\begin{cases} E_\rho = (E_0 + \frac{D}{\rho^2})\cos\phi \\ E_\phi = (-E_0 + \frac{D}{\rho^2})\sin\phi \end{cases} \quad (3)$$

式中, E_ρ 、 E_ϕ 分别为细胞膜外电场强度的法向和切向分量。

电磁场具有动量,对作用的物体有力的作用。若 E 、 H 分别为作用在物体上的电场和磁场,则电磁场的动量流密度张量为 \vec{T} ,即:

$$\vec{T} = -\epsilon EE - \mu HH + \frac{1}{2} \vec{I}(\epsilon E^2 + \mu H^2) = \vec{T}_e + \vec{T}_m \quad (4)$$

式中 \vec{T}_e 、 \vec{T}_m 分别为电场、磁场动量流密度, \vec{I} 是单位张量。在直流电场作用下,图1所示柱状细胞所受电场应力为:

$$P = -e_\rho \cdot (\vec{T}_e)_{\rho=b} = P_\rho e_\rho + P_\phi e_\phi \quad (5)$$

其中,细胞所受电场应力的法向和切向分量 P_ρ 、 P_ϕ 为:

$$\begin{cases} P_\rho = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_{re} (E_{e\rho}^2 - E_{e\phi}^2) \\ P_\phi = \epsilon_0 \epsilon_{re} E_{e\rho} E_{e\phi} \end{cases} \quad (6)$$

式中, ϵ_{re} 为细胞外介质的相对介电常数。

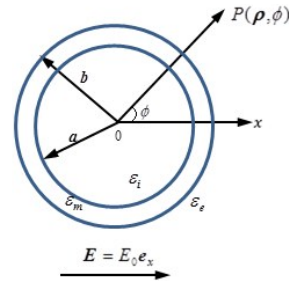


图1 柱状心肌细胞物理模型

Figure 1 Physical model of the columnar cardiomyocyte

a 、 b 分别为细胞膜的内外半径, ϵ_i 、 ϵ_m 和 ϵ_e 分别为细胞质、细胞膜以及胞外介质介电常数, ϕ 为外加电场与场点位置矢量 ρ 间夹角

2 数值分析

在电磁场生物学效应数值分析文献中^[13-14],细胞内、外介电常数常取一般细胞典型值,即 ϵ_i 、 ϵ_e 取 $6.4 \times 10^{-11} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$,细胞膜厚度取 5 nm ,介电常数取 $\epsilon_m = 4.4 \times 10^{-11} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$ 。本研究从以下方面进行讨论:(1)由于心肌细胞的肌原纤维粗细差别很大,一般直径为 $0.2 \sim 2.3 \mu\text{m}$,因此本研究在该直径变化范围内讨论为心肌细胞柱面半径变化对应力分布的影响;(2)考虑细胞外介质介电常数因生物组织不同而不同,同时外部刺激也影响离子的跨膜迁移,改变胞外介质的电参数,本研究讨论 ϵ_e 在典型值附近变化引起的细胞膜所受应力的变化规律;(3)分析影响细胞膜储存电场能量的因素。

2.1 细胞半径对细胞膜电场应力影响

图2分别为在极角 $\pi/6$ 、 $\pi/3$ 处细胞所受电场应力的法向分量和切向分量随细胞半径变化关系曲线,其中,data1、data2曲线分别对应法向应力 P_ρ 与切向应力 P_ϕ 。图2a显示,在极角 $\pi/6$ 位置处,随细胞半径的增加,细胞所受法向力为正值,即表现为外场对细胞膜的拉力;图2b显示,在极角 $\pi/3$ 处,法向力为负值,即外场对细胞膜的作用力表现为压力,压力大

小随半径的增加而减小;这两种情况下,切向应力方向一致,均沿 $-e_\phi$ 方向,其大小随细胞半径的增加而增加,且趋于一定值,法向应力因位置不同而发生变

化。在半径较小区域,如半径小于 $0.3\ \mu\text{m}$,法向及切向应力随半径的变化率较大。

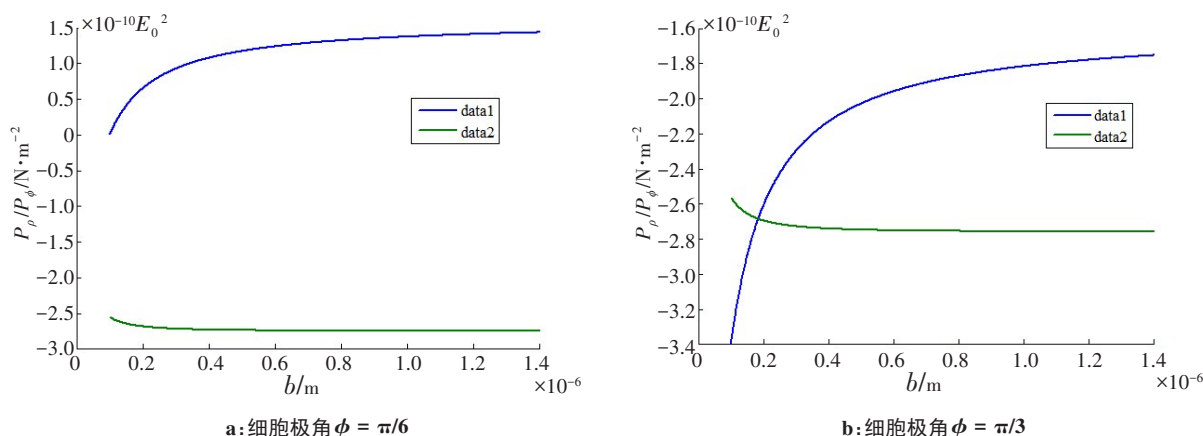


图2 电场应力与细胞半径关系

Figure 2 Electric field stress changing with cell radius

data1、data2曲线分别对应法向应力与切向应力

图3给出细胞半径为 $0.15\ \mu\text{m}$ 和 $0.30\ \mu\text{m}$,细胞膜厚度为 $5\ \text{nm}$ 时,细胞所受电场应力的法向分量和切向分量随极角变化关系曲线。图3a显示,作用在半径 $0.15\ \mu\text{m}$ 圆柱细胞表面切向应力中,压力与拉力分界点在 $\phi_{c1} = \pm 68^\circ$,在 $-68^\circ \leq \phi \leq 68^\circ$ 范围内,细胞受外电场的法向应力表现为拉力,否则,表现为压力;且法向应力最大值在 $\phi = 180^\circ$ 位置,大小为 $4.55 \times 10^{-10} E_0^2$,

大于切向应力最大值 $3.065 \times 10^{-10} E_0^2$ 。比较图3a和b可以看出:在细胞表面位置不同,细胞所受电场切向、法向应力不同;细胞半径越大,细胞所受法向应力中,拉力与压力的分界点(图3b, $\phi_{c2} = \pm 78^\circ$)对应极角也在增大,法向应力的最大值减小、切向应力最大值在增大。

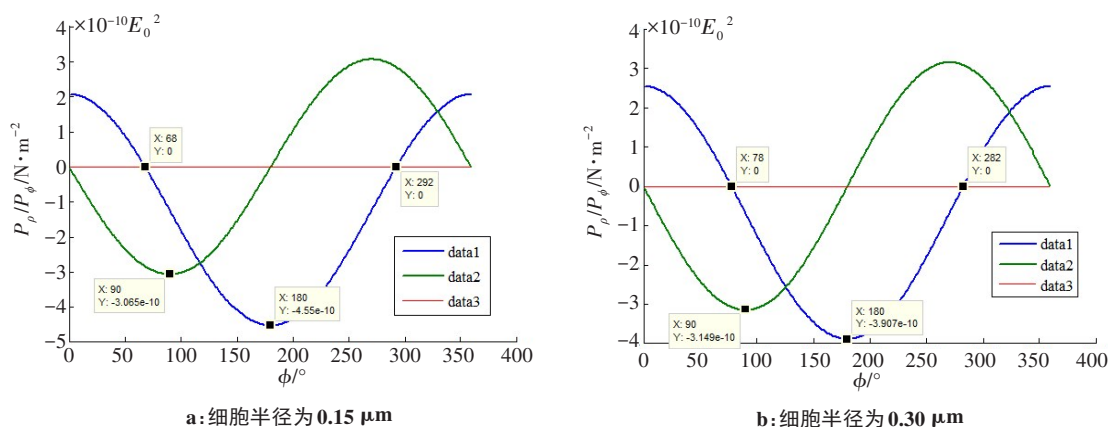


图3 电场应力与极角关系

Figure 3 Electric field stress changing with the polar angle

data1、data2曲线分别对应法向应力与切向应力,data3对应法向应力等于零

2.2 细胞外液介电常数变化对细胞膜电场应力影响

图4a给出了在 $\phi = \pi/6$, $\epsilon_e = 5.27 \times 10^{-11} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1} \sim 7.26 \times 10^{-11} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$ 范围内,柱状细胞所受法向、切向应力随 ϵ_e 变化曲线。随 ϵ_e 增加,所受法向应力值逐渐减少、切向应力逐渐增加,力方向不变; $\phi = \pi/3$ 时,所受法向

应力、切向应力大小逐渐增加(图4b)。由图4可以看出,随胞外介电常数的增加,细胞膜外不同位置所受电场法向、切向应力大小不同,但变化趋势相同;在其它参数不变情况下,细胞所受电场应力与胞外相对介电常数呈线性关系。

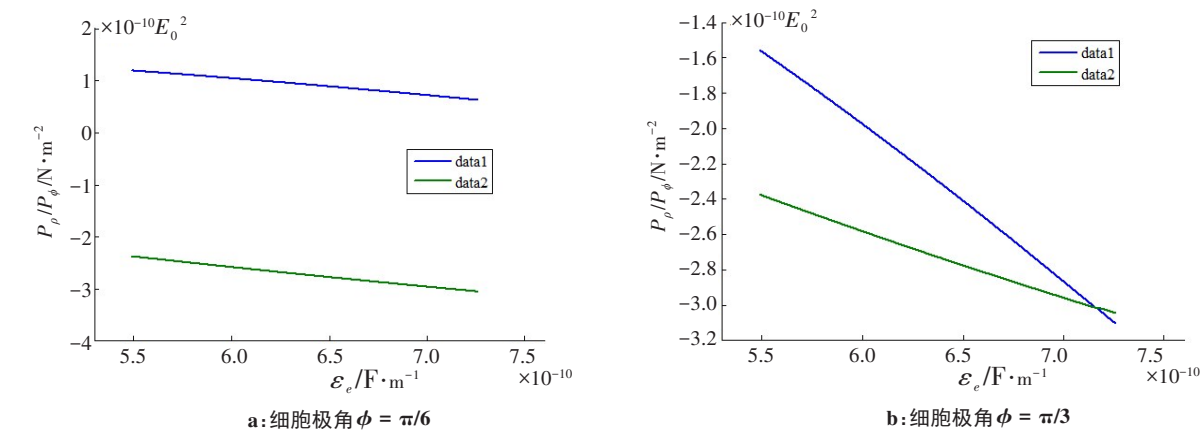


图 4 电场应力随细胞外介质介电常数变化关系

Figure 4 Electric field stress changing with the dielectric constant of extracellular medium

data1、data2 曲线分别对应法向应力与切向应力

2.3 影响细胞膜储存电场能量的因素

在外直流电场作用下,心肌细胞膜电位变化 $\Delta\varphi_m$,即细胞内外膜上的电位差为:

$$\begin{aligned}\Delta\varphi_m &= \varphi_m(b, \phi) - \varphi_m(a, \phi) \\ &= (b - a) \left(B + \frac{C}{ab} \right) \cos\phi\end{aligned}\tag{7}$$

从物理学角度,细胞膜可以看成是一电容器,电容器具有储存电能的作用。外加直流电场作用于心肌细胞,使储存在细胞膜上单位面积电场能量改变量为 Δw :

$$\Delta w = \frac{\varepsilon_m}{2d_0} (\Delta\varphi_m)^2\tag{8}$$

图 5 给出在心肌细胞不同位置, Δw 随细胞膜半径变化关系图。在心肌细胞位置不同, Δw 不同;在细胞半径较小时(如半径小于 $0.3\text{ }\mu\text{m}$), Δw 变化较大,且随细胞半径增加, Δw 缓慢增加。

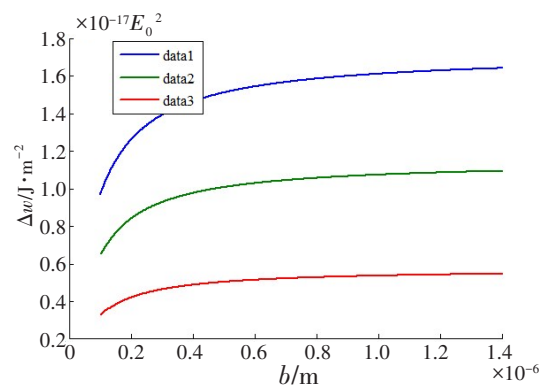


图 5 Δw 与细胞半径关系

Figure 5 Δw changing with the cell radius

data1、data2 和 data3 曲线对应极角分别为 $\pi/6$ 、 $\pi/4$ 和 $4\pi/3$

图 6 给出在半径取不同值时, Δw 随极角变化关系图。半径不同,电场引起细胞膜各点单位面积储存的

电能不同,但随极角变化的规律是相同的,且在细胞膜上沿外场方向, Δw 最大,在外电场的反方向, Δw 最小。

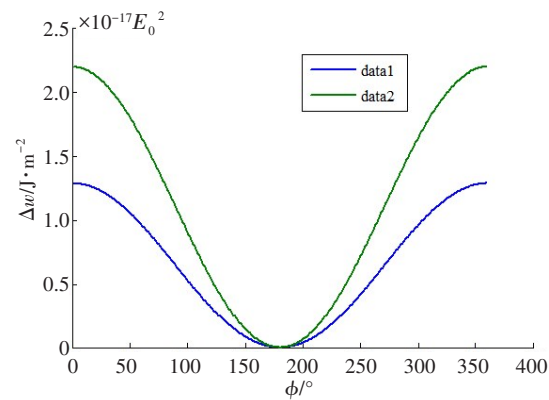


图 6 Δw 与极角关系

Figure 6 Δw changing with the polar angle

data1、data2 对应细胞半径分别为 0.1 和 $1.0\text{ }\mu\text{m}$

3 讨论

3.1 影响心肌细胞活动的物理因素

影响心肌细胞活动主要物理形式有两种:力学作用和电磁作用。合适的力学环境和电磁环境正性刺激心肌细胞的生长^[15]。有研究发现心肌在持续牵张力的作用下会产生肥大效应,单纯被动的拉伸会使成熟心肌细胞活性下降甚至凋亡,同时促进体外培养的心肌细胞 ET-1 (Endothelin-1) 的释放,施加在心肌细胞上的压力、剪切力影响细胞的活性^[16-17]。也有实验结果表明心肌细胞是非电离辐射的敏感细胞,心肌细胞膜是电磁场作用的靶部位^[18],低压稳恒直流电场可促进心肌细胞增殖,抑制细胞的凋亡^[19],脉冲电场幅度影响心肌细胞的兴奋^[20],外加电场强度大小影响心肌梗死胶原重塑^[21]、改变细胞膜跨膜电位、给细胞施加力的作用、改变离子跨膜迁移量^[12, 22-23],并引起细胞形变、旋转等。

综上所述,电磁场作用在细胞上的力或电磁场将引起细胞生理病理的变化。

3.2 电磁场对心肌细胞的作用机理

从生物电磁学角度看,细胞膜可看成是一电容器,具有储存电能的作用,能量表征了系统做功的本领。细胞膜也可看成是势垒,离子跨细胞膜迁移可以看成是势垒贯穿。电场作用下膜系统电能的改变将导致系统能量的变化,进而影响离子的跨膜迁移^[22]。同时,电场施加到细胞膜表面的法向力、切向力相当于在细胞表面施加压力、剪切力等,这些力的作用,除引起细胞活性、增殖等生物学变化外,也将引起细胞的状态、形变、旋转等物理学变化。所以,本研究讨论在电场作用下施加在心肌细胞上的力以及膜内电能的变化将有助于更好地理解电场在细胞上产生的生物学效应。

4 结论

本研究在柱状心肌细胞物理模型的基础上,对直流电场作用下的柱状细胞,应用生物电磁学理论,求得空间电势、胞外电场分布,分析影响单个心肌细胞应力分布及细胞膜内储存电能的变化因素。分析结果显示:(1)柱状心肌细胞在半径较小情况下,半径变化将引起电场施加给细胞较大压力(拉力)改变;细胞半径越大,法向压力与拉力分界点所张极角范围就越大。(2)胞外介质的介电常数越大,作用于细胞表面的法向力、切向力就越小。(3)在半径较小情况下,单位面积储存电能的变化量随半径的变化较大。

现有电磁场对心肌细胞影响研究大多给出的是实验结论,生物物理研究相关文献也仅讨论电磁场对跨膜电位的影响。对直流电场作用下,细胞半径、胞外介质介电常数对心肌细胞作用力及膜内储存电能影响研究少见报道。本研究结果说明:较小半径的心肌细胞,在外加直流电场一定的情况下,较小的半径变化将引起细胞表面较大的应力以及细胞膜储存电能的变化,这些变化将引起细胞生物和物理学上的变化。同时,电磁场作用也将引起离子的跨膜迁移,改变胞外介质的介电常数,最终导致电磁场生物学效应。因此,本研究可作为电磁场生物学效应机理分析的基本理论。

本研究从理论上讨论了直流电场作用下,心肌细胞的半径、胞外介电常数对作用在细胞上的应力、细胞膜内储存电能的影响,但这些结论还需通过实验的验证。所以,理论的实验验证是下一步努力的方向。

【参考文献】

[1] MOHAMED F A, AHMED A A, BATAA M A, et al. Study of the cardiovascular effects of exposure to electromagnetic field[J]. Life Sci J, 2011, 8(1): 260-275.
[2] MCHAMEE D A, LEGROS A G, REWSKI D R, et al. A literature review: the cardiovascular effects of exposure to extremely low frequency electromagnetic fields[J]. Int Arch Occup Environ Health, 2009, 82(8): 919-933.

[3] 孙成勋, 严茂胜, 陈青松, 等. 极低频电磁场接触对心血管系统影响研究进展[J]. 中国职业医学, 2015, 42(6): 695-699.
SUN C X, YAN M S, CHEN Q S, et al. Effects of extremely low frequency electromagnetic fields on cardiovascular system[J]. China Occupational Medicine, 2015, 42(6): 695-699.
[4] YITZAKI S, SHAINBER G A, SHAKE D M, et al. Weak magnetic field at 16 Hz affects cardiac myocyte Ca^{2+} transients and reduces cells damage caused by hypoxia[J]. Open Opt J, 2011, 5(1): 33-39.
[5] 覃玉荣, 黄冬丽, 林浩, 等. 直流电场作用下心肌细胞膜电位计算模型[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2016, 41(3): 822-825.
QIN Y R, HUANG D L, LIN H, et al. A computational model for transmembrane potential on a myocardial cell exposed to a DC electric field[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2016, 41(3): 822-825.
[6] 张辉, 王李阳, 张培杰, 等. 静电场调制椭圆形细胞膜电位和一侧离子浓度的研究[J]. 中国科学: (技术科学), 2018, 48(7): 783-790.
ZHANG H, WANG L Y, ZHANG P J, et al. Modulation of membrane potential and ion concentration of isolate ellipsoidal cell exposed to static electric field[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2018, 48(7): 783-790.
[7] SCHWAN H P. Nonthermal cellular effects of electromagnetic fields AC-field induced ponderomotive forces[J]. Br J Cancer, 1982, Suppl (45): 220-224.
[8] 武瑞青, 张辉. 球形细胞膜上电场应力的计算[J]. 中国医学物理学杂志, 2020, 37(2): 249-253.
WU R Q, ZHANG H. Calculation of electric field stress on spherical cell membrane[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2020, 37(2): 249-253.
[9] MCCONNELL L, VLAHOVSKAP M, MIKSI S M J, et al. Vesicle dynamics in uniform electric fields: squaring and breathing[J]. Soft Matter, 2015, 11(24): 4840-4846.
[10] PETERLIN P. Frequency dependent electrodeformation of giant phospholipid vesicles in AC electric field[J]. J Biol Phys, 2010, 36(4): 339-354.
[11] SALIPANTE P J, VLAHOVSKA P M. Vesicle deformation in DC electric pulses[J]. Soft Matter, 2014, 10(19): 3386-3393.
[12] SINHA K P, THAKKAR R M. Shape deformation of a vesicle under axisymmetric non-uniform alternating electric field[J]. J Phys Condens, 2019, 31(3): 1-30.
[13] ZHANG H, WANG L Y, ZHANG P J, et al. Estimation of biophysical properties of cell exposed to electric field[J]. Chin Phys B, 2021, 30(3): 038702-038709.
[14] LIU L Y, MAO Z, ZHANG J H, et al. The influence of vesicle shape and medium conductivity on possible electrofusion under a pulsed electric field[J]. PLoS One, 2016, 11(7): e0158739.
[15] 魏严, 张西正, 郭勇, 等. 力场、电场对心肌细胞与组织影响的研究[J]. 国际生物医学工程杂志, 2008, 31(1): 50-54.
WEI Y, ZHANG X Z, GUO Y, et al. Study on the effects of myocardial cells and tissue under strain and electrical stimulation[J]. International Journal of Biomedical Engineering, 2008, 31(1): 50-54.
[16] XI Y T, WU G R, BAI X J, et al. Mechanical stretch-induced hypertrophy of neonatal rat ventricular myocytes is mediated by beta (1)-integrin-microtubule signaling pathways[J]. Eur J Heart Fail, 2006, 8(1): 16-22.
[17] WANG T L, YANG Y H, CHANG H, et al. Angiotensin II signals mechanical stretch-induced cardiac matrix metalloproteinase expression via JAK-STAT pathway[J]. J Mol Cell Cardiol, 2004, 37(3): 785-794.
[18] 邓桦, 王德文, 彭瑞云, 等. 非电离辐射对大鼠心肌细胞的损伤及其机制[J]. 环境与健康杂志, 2004, 21(3): 137-139.
DENG H, WANG D W, PENG R Y, et al. Injury of rat cardiomyocytes exposed to nonionizing radiation and its mechanism[J]. Journal of Environment and Health, 2004, 21(3): 137-139.
[19] 蒋清安, 何国祥, 苗莉, 等. 低压稳恒直流电场对兔心肌梗死后心肌细胞增殖和凋亡的影响[J]. 岭南心血管病杂志, 2010, 增刊: 222.
JIANG Q A, HE G X, MIAO L, et al. Effects of low voltage DC field on proliferation and apoptosis of rabbit myocardial cells after myocardial infarction[J]. South China Journal of Cardiovascular Disease, 2010, Suppl: 222.
[20] VINOD S, ROBERT C S, LESLIE T. Paradoxical loss of excitation with high intensity pulses during electric field stimulation of single cardiac cells[J]. Biophys J, 2005, 88(4): 3038-3049.
[21] 蒋清安, 何国祥, 刘建平, 等. 低压稳恒直流电场对兔心肌梗死胶原重塑影响[J]. 岭南心血管病杂志, 2010, 增刊: 223.
JIANG Q A, HE G X, LIU J P, et al. Effect of low voltage DC field on collagen remodeling in rabbit myocardial infarction[J]. South China Journal of Cardiovascular Disease, 2010, Suppl: 223.
[22] SHARMA V, LESLIE T. Effects of uniform electric fields on intracellular calcium transients in single cardiac cells[J]. Am J Physiol Heart Circ Physiol, 2002, 282(1): H72-H79.
[23] 张辉, 许家栋, 牛中奇. 离子跨膜迁移的几率波理论[J]. 生物医学工程学杂志, 2007, 24(2): 257-261.
ZHANG H, XU J D, NIU Z Q. A probability wave theory on the ion movement across cell membrane[J]. J Biomed Eng, Journal of Biomedical Engineering, 2007, 24(2): 257-261.

(编辑:谭斯允)