

单球壳模型参数对细胞介电频谱的影响

廖 聪¹, 吴佳瑛², 孙梦霞¹, 岑莉超¹, 马 青^{1*}

(1. 宁波大学 医学院, 浙江 宁波 315211; 2. 宁波市中医院, 浙江 宁波 315010)

摘要: 为研究单球壳模型的9个参数(ε_0 , κ_0 , ε_m , κ_m , ε_{in} , κ_{in} , R , d , Φ)对细胞介电频谱的影响, 采用固定其他8个参数, 仅改变单一参数的方法, 观察介电频谱的变化. 结果表明: ε_0 主要影响低频和高频介电常数(ε_l 和 ε_h); κ_0 主要影响低频和高频电导率(κ_l 和 κ_h); ε_m 主要影响低频介电常数(ε_l)、介电增量($\Delta\varepsilon$)和特征频率(f_c); κ_m 主要影响低频参数(ε_l , κ_h)和增量($\Delta\varepsilon$, $\Delta\kappa$); ε_{in} 主要影响高频电导率(κ_h); κ_{in} 主要影响高频电导率(κ_h)、电导率增量($\Delta\kappa$)和特征频率(f_c); R 和 d 主要影响 ε_l 、 $\Delta\varepsilon$ 和 f_c , 但两者作用相反; 体积分数 Φ 主要影响低频参数(ε_l , κ_l)和增量($\Delta\varepsilon$, $\Delta\kappa$)以及 κ_h . 阐明单球壳细胞模型的参数变化规律, 有益于提取细胞电学参数(细胞膜和细胞质), 为探讨癌变细胞的电生理机制提供帮助.

关键词: 单球壳模型; 介电频谱; 介电常数; 电导率; 复平面图

中图分类号: Q64

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2018) 01-0099-06

细胞介电谱方法作为一种细胞电生理学和生物物理学的实用方法^[1-2], 主要通过交流电阻抗技术^[3-4]检测生物细胞的电导率和介电常数(电容率), 并引入电介质物理模型的数值计算, 获得细胞外、细胞膜和细胞质的电学信息. 生物细胞作为非均匀结构(细胞外、细胞膜和细胞质), 其电学特性具有异质性. 当交流电场作用细胞时, 细胞的介电响应出现 α 色散、 β 色散和 γ 色散的弛豫现象^[5]. 为了把复杂的细胞电学问题简单化, 学者把生物细胞简化成单球壳模型^[6], 并应用在红细胞^[7-8]、人结肠癌 HT-29 细胞^[9]和鱼腥藻^[10]等细胞的分析. 由此可见, 阐明单球壳细胞物理模型的变化规律, 对于细胞介电频谱的理论分析具有重要意义.

本文以单球壳介电模型为基础, 讨论了模型参数变化对细胞介电频谱的影响, 并探究其规律性, 以期为进一步研究其他癌变细胞的电生理机制提供参考.

1 理论模型

1.1 单球壳模型

图 1 为细胞介电理论模型.

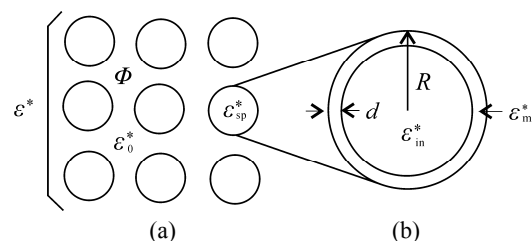


图 1 介电单球壳细胞模型

图 1(a)将细胞模拟成一个球形颗粒(spherical particle, ε_{sp}^*), 此细胞颗粒悬浮在细胞外介质(ε_0^*)中, 其细胞颗粒的体积分数为 Φ , 具有 Φ 个细胞颗粒的复介电常数为:

$$\varepsilon^* = \varepsilon - j \frac{\kappa}{\omega \varepsilon_v} = \varepsilon' - j \varepsilon'',$$

式中: ω 是角频率($\omega=2\pi f$); f 是电场频率; j 是虚部; ε_v 为真空介电常数, $\varepsilon_v=8.854 \times 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$; ε' 和 ε'' 分别是介电常数的实数和虚数部, 其中 $\varepsilon'=\varepsilon$, $\varepsilon''=\kappa/(\omega \varepsilon_v)$; $\Delta\varepsilon'$ 和 $\Delta\varepsilon''$ 分别是介电常数和电导率的虚数部增量:

$$\Delta\varepsilon'' = (\kappa - \kappa_l) / (\omega \varepsilon_v),$$

$$\Delta\kappa'' = (\varepsilon - \varepsilon_h) \omega \varepsilon_v,$$

当 $\Phi < 0.3$ 时, 根据 Maxwell-Wagner 介电理论^[6,11], 球状颗粒的复介电常数 ε^* :

收稿日期: 2017-06-21.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journal.lg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(51277099); 宁波市科技惠民项目(2015C50009).

第一作者: 廖聪(1993-), 女, 湖北鄂州人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 细胞介电频谱的理论分析. E-mail: 786484089@qq.com

*通信作者: 马青(1962-), 男, 黑龙江佳木斯人, 教授, 主要研究方向: 细胞生物物理. E-mail: maqing@nbu.edu.cn

$$\varepsilon^* = \varepsilon_o^* \frac{2(1-\Phi)\varepsilon_o^* + (1+2\Phi)\varepsilon_{sp}^*}{(2+\Phi)\varepsilon_o^* + (1-\Phi)\varepsilon_{sp}^*}, \quad (1)$$

式中: ε_o^* 为细胞外复介电常数, 计算式为:

$$\varepsilon_o^* = \varepsilon_o - j(\kappa_o / (\omega \varepsilon_v)),$$

式中: ε_o 为细胞外介电常数; κ_o 为细胞外电导率.

ε_{sp}^* 为细胞颗粒复介电常数, 计算公式为:

$$\varepsilon_{sp}^* = \varepsilon_{sp} - j \frac{\kappa_{sp}}{\omega \varepsilon_v},$$

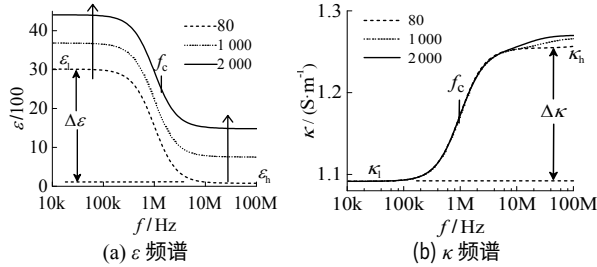
ε_{sp}^* 由图 1(b) 的细胞膜相和细胞内相计算得到.

$$\varepsilon_{sp}^* = \varepsilon_m^* \frac{2(1-\Phi_{in})\varepsilon_{in}^* + (1+2\Phi_{in})\varepsilon_{in}^*}{(2+\Phi_{in})\varepsilon_{in}^* + (1-\Phi_{in})\varepsilon_{in}^*}, \quad (2)$$

式中: ε_m^* 为细胞膜复介电常数, 计算公式为:

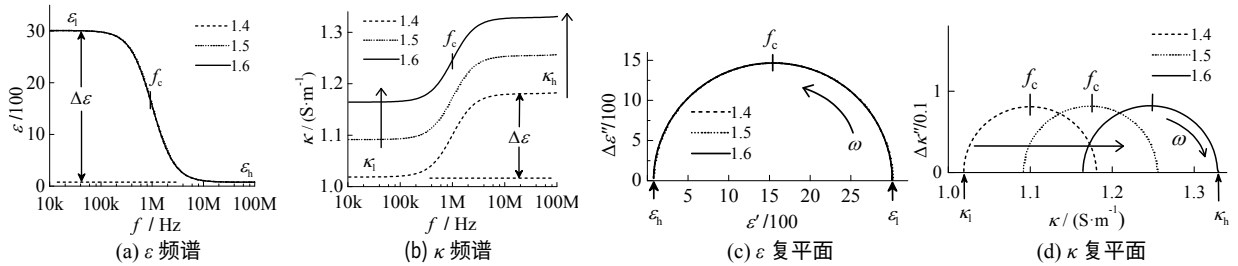
$$\varepsilon_m^* = \varepsilon_m - j \frac{\kappa_m}{\omega \varepsilon_v},$$

式中: ε_m 为细胞膜介电常数; κ_m 为细胞膜电导率.



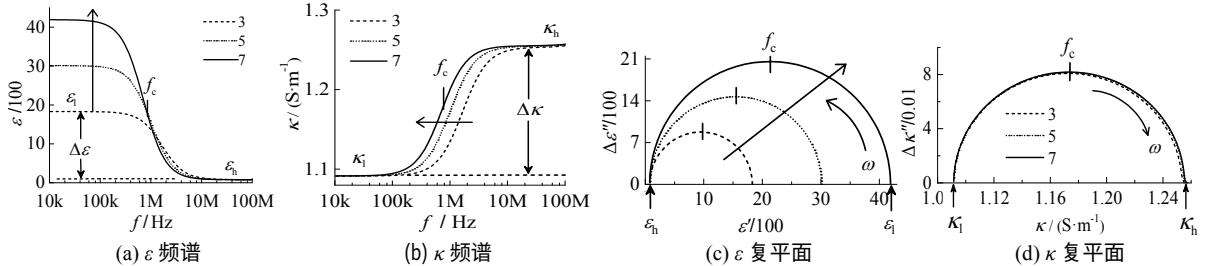
$\kappa_o = 1.5 S \cdot m^{-1}$, $\varepsilon_m = 5$, $\kappa_m = 10^{-6} S \cdot m^{-1}$, $\varepsilon_{in} = 60$, $\kappa_{in} = 0.5 S \cdot m^{-1}$, $R = 8 \mu m$, $d = 5 nm$, $\Phi = 0.2$; 自变量 ε_o 分别取 80, 1 000, 2 000

图2 ε_o 对细胞介电频谱的影响



$\varepsilon_o = 80$, $\varepsilon_m = 5$, $\kappa_m = 10^{-6} S \cdot m^{-1}$, $\varepsilon_{in} = 60$, $\kappa_{in} = 0.5 S \cdot m^{-1}$, $R = 8 \mu m$, $d = 5 nm$, $\Phi = 0.2$; 自变量 κ_o 分别取 1.4, 1.5, 1.6 $S \cdot m^{-1}$

图3 κ_o 对细胞介电频谱的影响



$\varepsilon_o = 80$, $\kappa_o = 1.5 S \cdot m^{-1}$, $\kappa_m = 10^{-6} S \cdot m^{-1}$, $\varepsilon_{in} = 60$, $\kappa_{in} = 0.5 S \cdot m^{-1}$, $R = 8 \mu m$, $d = 5 nm$, $\Phi = 0.2$; 自变量 ε_m 分别取 3, 5, 7

图4 ε_m 对细胞介电频谱的影响

ε_{in}^* 为细胞内复介电常数, 计算公式为:

$$\varepsilon_{in}^* = \varepsilon_{in} - j \frac{\kappa_{in}}{\omega \varepsilon_v},$$

式中: ε_{in} 为细胞内介电常数; κ_{in} 为细胞内电导率.

Φ_{in} 是细胞内的体积分, 计算公式为:

$$\Phi_{in} = (1 - d/R)^3,$$

式中: d 是细胞膜厚度; R 是细胞半径.

1.2 理论公式的计算方法

有关式(1)和式(2)的解法参考文献[12-13].

2 结果和讨论

2.1 细胞外相参数(ε_o , κ_o)对介电频谱的影响

在图 2 中, 当 ε_o 从 80 增加至 2 000 时, 图 2(a) 的 ε 频谱: 曲线整体向上平移, 引起低频介电常数(ε_l)和高频介电常数(ε_h)增加, 但是介电弛豫增量($\Delta\varepsilon = \varepsilon_l - \varepsilon_h$)和特征频率(f_c)不变. 图 2(b)电导率(κ)频谱: 左侧低频段曲线不变, 右侧高频段曲线略增,

κ_h 微增. 图 2(c) 的 ε 复平面: 圆弧曲线整体向右侧平移, 导致左截距 ε_h 和右截距 ε_l 皆增加, $\Delta\varepsilon$ 不变. 图 2(d) 的 κ 复平面: 圆弧曲线的右下角出现小圆弧, κ_h 略增. 故细胞外介电常数 ε_0 增加, 主要引起 ε_l 和 ε_h 增大.

在图 3 中, 当 κ_0 从 1.4 增加至 1.6 时, 图 3(a) 的 ε 频谱: 谱线没有变化; 图 3(b) 的 κ 频谱: 谱线整体向上平移, 引起低频电导率(κ_l)和高频电导率(κ_h)增加, 但是电导率增量($\Delta\kappa = \kappa_h - \kappa_l$)不变; 图 3(c) 的 ε 复平面: 圆弧曲线不变; 图 3(d) 的 κ 复平面: 圆弧曲线整体向右侧平移, 导致左截距 κ_l 和右截距 κ_h 增加. 故细胞外电导率 κ_0 增加, 主要引起 κ_l 和 κ_h 增大.

2.2 细胞膜相参数(ε_m, κ_m)对介电频谱的影响

在图 4 中, 当 ε_m 从 3 增加至 7 时, 图 4(a) 的 ε 频谱: 左侧低频段谱线向上移动, 导致 ε_l 和 $\Delta\varepsilon$ 增加, 右侧高频谱线不变, ε_h 不变; 图 4(b) 的 κ 频谱: 谱线整体向左平移, 导致 f_c 减小, κ_l 、 κ_h 和 $\Delta\kappa$ 不变; 图

4(c) 的 ε 复平面: 以左截距 ε_h 为锚定点, 谱线圆弧向右上扩展, 导致圆弧面积增加, ε_l 和 $\Delta\varepsilon$ 增加, ε_h 不变; 图 4(d) 的 κ 复平面: 谱线圆弧不变. 故细胞膜介电常数 ε_m 增加, 主要引起 ε_l 和 $\Delta\varepsilon$ 增加, f_c 减小.

在图 5 中, 当 κ_m 从 $10^{-6} \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$ 增加至 $10^{-4} \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$ 时, 图 5(a) 的 ε 频谱: 左侧低频谱线向下移动, 导致 ε_l 和 $\Delta\varepsilon$ 减小, 右侧高频谱线不变, ε_h 不变; 图 5(b) 的 κ 频谱: 左侧低频谱线向上移动, 导致 κ_l 和 $\Delta\kappa$ 增大, 右侧高频谱线不变, κ_h 不变; 图 5(c) 的 ε 复平面: 以左截距 ε_h 为锚定点, 谱线圆弧从右上向左下缩小, 导致圆弧面积减小, ε_l 和 $\Delta\varepsilon$ 减小, ε_h 不变; 图 5(d) 的 κ 复平面: 以右截距 κ_h 为锚定点, 谱线圆弧从左上向右下缩小, 导致圆弧面积减小, κ_l 和 $\Delta\kappa$ 减小, κ_h 不变. 故细胞膜电导率 κ_m 增加, 主要减低的参数包括: 低频参数(ε_l, κ_l)、增量($\Delta\varepsilon, \Delta\kappa$)和圆弧面积.

2.3 细胞内相参数($\varepsilon_{in}, \kappa_{in}$)对介电频谱的影响

在图 6 中, 当 ε_{in} 从 60 增加至 260 时, 图 6(a) 的 ε

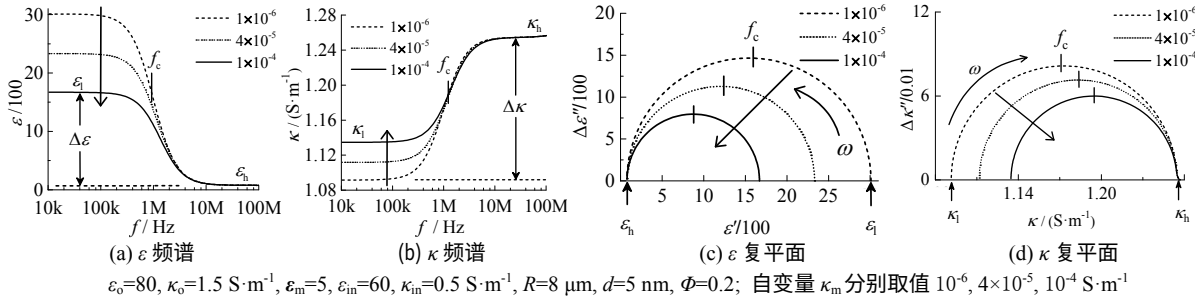


图 5 κ_m 对细胞介电频谱的影响

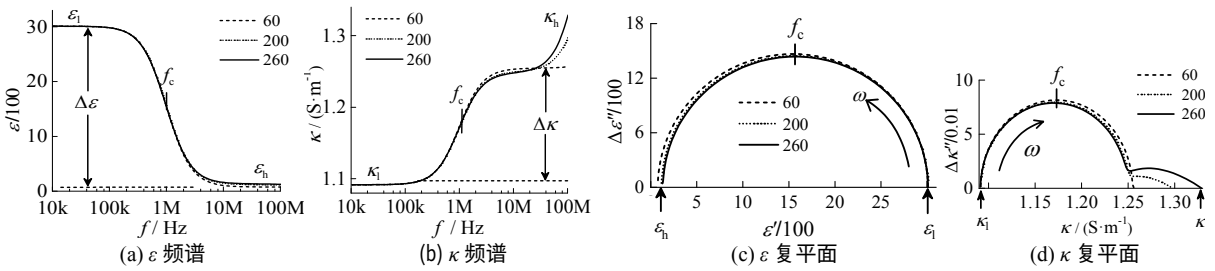


图 6 ε_m 对细胞介电频谱的影响

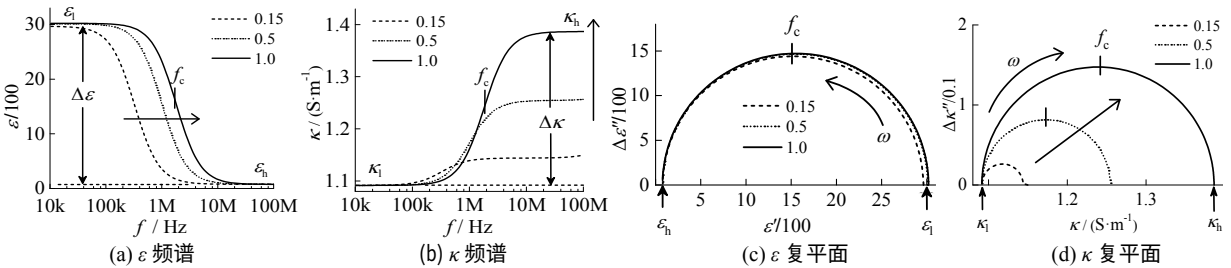
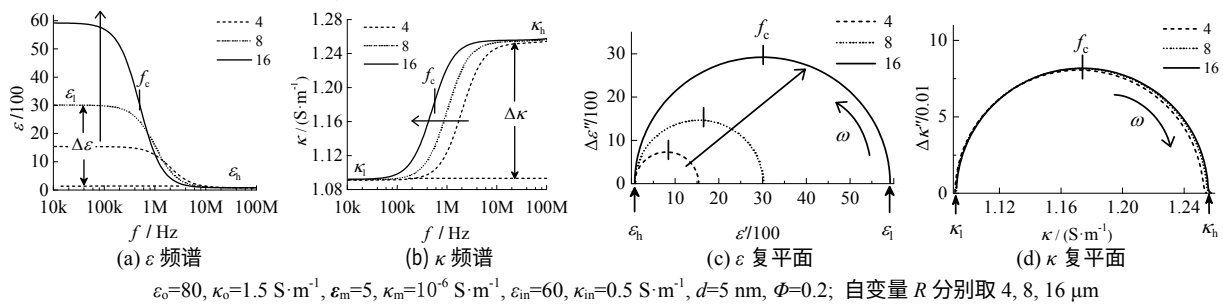
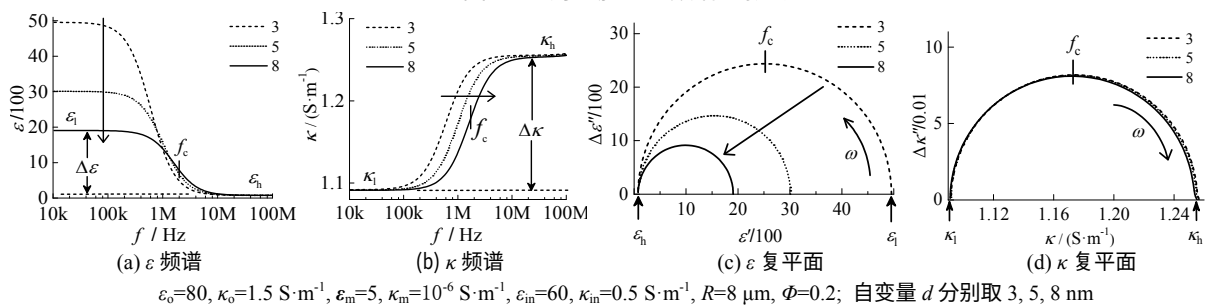
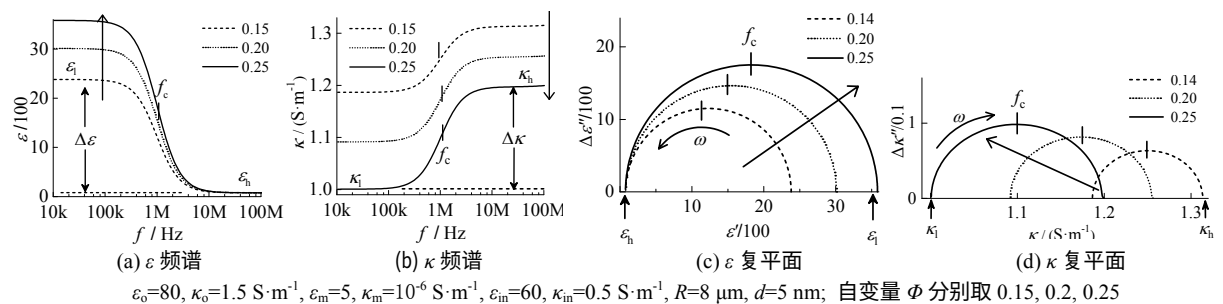


图 7 κ_{in} 对细胞介电频谱的影响

频谱: 右侧高频谱线略微抬升, 致 ε_h 微增; 图 6(b) 的 κ 频谱: 右侧高频谱线上扬, 导致 κ_h 增加; 图 6(c) 的 ε 复平面图: 以右截距 ε_l 为锚定点, 圆弧微减, 致 ε_h 微增, $\Delta\varepsilon$ 微减; 图 6(d) 的 κ 复平面: 以左侧 κ_l 为锚定点, 左侧第一圆弧微减, 右侧高频谱线出现第二个弧线, 且增加, 致 κ_h 增加。故细胞内介电常数 ε_{in} 增加, 主要引起高频参数变化: κ_h 增加而 ε_h 微增。

在图 7 中, 当 κ_{in} 从 $0.15 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ 增加至 $1.0 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ 时, 图 7(a) 的 ε 频谱: 谱线整体向右侧高频段平移, 导致 f_c 增加, ε_l 、 ε_h 和 $\Delta\varepsilon$ 不变; 图 7(b) 的 κ 频谱: 左侧低频谱线不变, κ_l 不变, 右侧高频谱线向上移动, 导致 κ_h 和 $\Delta\kappa$ 增大; 图 7(c) 的 ε 复平面: 以左截距 ε_h 为锚定点, 谱线圆弧向右上微增, 圆弧面积微增, ε_l 和 $\Delta\varepsilon$ 微增, ε_h 不变; 图 7(d) 的 κ 复平面: 以左截距 κ_l 为锚定点, 谱线圆弧从左上向右上扩增, 导致圆弧面积增加, κ_h 和 $\Delta\kappa$ 增加, κ_l 不变。故细胞内电导率 κ_{in} 增加, 主要增加 3 个参数: f_c 、 κ_h 和 $\Delta\kappa$ 。

图 8 R 对细胞介电频谱的影响图 9 d 对细胞介电频谱的影响图 10 Φ 对细胞介电频谱的影响

2.4 细胞结构参数(R, d, Φ)对介电频谱的影响

在图 8 中, 当细胞半径 R 从 $4 \mu\text{m}$ 增加至 $16 \mu\text{m}$ 时, 图 8(a) 的 ε 频谱: 左侧低频谱线提高, 导致 ε_l 和 $\Delta\varepsilon$ 增加, 右侧高频谱线不变, ε_h 不变; 图 8(b) 的 κ 频谱: 谱线整体向左侧低频方向平移, 导致 f_c 减小, κ_l 、 κ_h 和 $\Delta\kappa$ 不变; 图 8(c) 的 ε 复平面: 以左截距 ε_h 为锚定点, 谱线圆弧向右上方扩增, 圆弧面积增加, ε_l 和 $\Delta\varepsilon$ 增大, ε_h 不变; 图 8(d) 的 κ 复平面: 谱线圆弧基本不变, κ_l 、 κ_h 和 $\Delta\kappa$ 不变。故细胞半径 R 增加, 主要影响的参数: ε_l 和 $\Delta\varepsilon$ 增加, f_c 减小。

在图 9 中, 当细胞膜厚度 d 从 3 nm 增加至 8 nm 时, 图 9(a) 的 ε 频谱: 左侧低频谱线降低, 导致 ε_l 和 $\Delta\varepsilon$ 减小, 右侧高频谱线不变, ε_h 不变; 图 9(b) 的 κ 频谱: 谱线整体向右侧高频方向平移, 导致 f_c 增大, κ_l 、 κ_h 和 $\Delta\kappa$ 不变; 图 9(c) 的 ε 复平面: 以左截距 ε_h 为锚定点, 谱线圆弧从右上方, 向左下方收缩, 圆弧面积减小, ε_l 和 $\Delta\varepsilon$ 减小, ε_h 不变; 图 9(d) 的 κ 复平

表 1 单球壳模型参数对细胞介电谱特征参数的影响

模型参数	介电参数			导电参数			特征频
自变量	ε_l	ε_h	$\Delta\varepsilon$	κ_l	κ_h	$\Delta\kappa$	率(f_c)
$\uparrow\varepsilon_o$	增加	增加	不变	不变	微增	微增	不变
$\uparrow\kappa_o$	不变	不变	不变	增加	增加	不变	不变
$\uparrow\varepsilon_m$	增加	不变	增加	不变	不变	不变	减小
$\uparrow\kappa_m$	减小	不变	减小	增加	不变	减小	不变
$\uparrow\varepsilon_{in}$	不变	微增	微减	不变	增加	增加	不变
$\uparrow\kappa_{in}$	不变	不变	不变	不变	增加	增加	增加
$\uparrow R$	增加	不变	增加	不变	不变	不变	减小
$\uparrow d$	减小	不变	减小	不变	不变	不变	增加
$\uparrow\Phi$	增加	不变	增加	减小	减小	增加	不变

表 2 单球壳模型参数对细胞介电谱的影响

模型参数	介电常数	电导率频	ε'' - ε' 复	κ'' - κ' 复
自变量	频谱 $\varepsilon(f)$	谱 $\kappa(f)$	平面图	平面
$\uparrow\varepsilon_o$	整体谱线提升	高频谱线提升	整体谱线向右平移	高频谱线出现第二小圆弧
$\uparrow\kappa_o$	无影响	整体谱线提升	无影响	整体谱线向右平移
$\uparrow\varepsilon_m$	低频谱线提升	谱线整体向低频方向平移	谱线圆弧向右上方扩展	几乎无影响
$\uparrow\kappa_m$	低频谱线降低	低频谱线提升	谱线圆弧向左下方缩小	谱线圆弧向右下方缩小
$\uparrow\varepsilon_{in}$	几乎无影响	高频谱线出现弧线上扬	几乎无影响	高频谱线出现第二个弧线
$\uparrow\kappa_{in}$	谱线整体向高频方向平移	高频谱线提升	几乎无影响	谱线圆弧向右上方扩展
$\uparrow R$	低频谱线提升	谱线整体向低频方向平移	谱线圆弧向右上方扩展	几乎无影响
$\uparrow d$	低频谱线降低	谱线整体向高频方向平移	谱线圆弧向左下方缩小	几乎无影响
$\uparrow\Phi$	低频谱线提升	谱线整体降低	谱线圆弧向右上方扩展	谱线圆弧向左上方扩展

面: 谱线圆弧基本不变, κ_l 、 κ_h 和 $\Delta\kappa$ 不变. 故细胞膜厚度 d 增加, 主要影响的参数: ε_l 和 $\Delta\varepsilon$ 减小, f_c 增加.

在图 10 中, 当细胞体积分数 Φ 从 0.15 增加至 0.25 时, 图 10(a)的 ε 频谱: 左侧低频谱线提高, 导致 ε_l 和 $\Delta\varepsilon$ 增加, 右侧高频谱线不变, ε_h 不变; 图 10(b)的 κ 频谱: 谱线整体水平降低, 导致 κ_l 和 κ_h 减小, f_c 不变; 图 10(c)的 ε 复平面: 左截距 ε_h 为锚定点, 谱线圆弧向右上方扩增, 圆弧面积增加, ε_l 和 $\Delta\varepsilon$ 增大, ε_h 不变; 图 10(d)的 κ 复平面: 谱线无锚定点, 圆弧向左侧扩展, 圆弧下面积增加, κ_l 和 κ_h 减小, $\Delta\kappa$ 增加. 故细胞体积分数 Φ 增加, 主要影响的参数: ε_l 和 $\Delta\varepsilon$ 增加, κ_l 和 κ_h 减小, $\Delta\kappa$ 增加.

在表 1 中, 作为自变量的单球壳模型参数包括: 6 个相参数(ε_o , κ_o , ε_m , κ_m , ε_{in} , κ_{in})和 3 个几何参数(R , d , Φ). 当 9 个自变量参数改变时, 细胞介电谱的特征参数将随之变化, 故从表 1 可以获得单球壳物理模型的变化规律.

由表 2 可知, 介电常数和电导率的频谱($\varepsilon(f)$ 和 $\kappa(f)$)具有 3 种变化方式: 低频和高频的谱线同时整体上下左右平移、低频谱线上下移动、高频谱线上下移动. ε'' - ε' 复平面图和 κ'' - κ' 复平面的圆弧曲线变化形式: 曲线圆弧有锚定点的扩展与缩小、曲线圆弧无锚定点的左右平移、扩展与缩小.

3 结论

本研究通过改变的单球壳模型 9 个参数(ε_o , κ_o , ε_m , κ_m , ε_{in} , κ_{in} , R , d , Φ), 分析其对介电频谱特征参数(ε_l , ε_h , κ_l , κ_h , f_c)的影响. 结论如下: (1)介电参数(ε_l , ε_h)主要受细胞外介电常数(ε_o)、细胞膜参数(ε_m , κ_m)和几何参数(R , d , Φ)影响. 其中 ε_o 、 ε_m 、 R 和 Φ 引起 ε_l 增加, κ_m 和 d 引起 ε_l 减小. (2)导电参数(κ_l , κ_h)主要受三相电导率(κ_o , κ_m , κ_{in})、细胞内介电常数(ε_{in})和体积分数(Φ)的影响. 其中, κ_o 和 κ_m 引起 κ_l 增加, Φ 引起 κ_l 减小; κ_o 、 ε_{in} 、 κ_{in} 引起 κ_h 增加, Φ 引起 κ_h

减小。(3)特征频率(f_c)受细胞膜介电常数(ϵ_m)、细胞内电导率(κ_{in})和几何参数(R, d)的影响。其中 κ_{in} 和 d 引起 f_c 增高; ϵ_m 和 R 引起 f_c 降低。阐明单球壳细胞模型的参数变化规律, 有益于提取细胞电学参数(细胞膜和细胞质), 为探讨癌变细胞的电生理机制提供帮助。

参考文献:

- [1] 赵孔双. 微小生物细胞的介电研究方法[J]. 生物物理学报, 2002, 16(1):176-182.
- [2] 王立洪, 王雪敏. 大鼠血液细胞介电谱的数学模型分析[J]. 宁波大学学报(理工版), 2007, 20(2):193-196.
- [3] Xu Y, Xie X, Duan Y, et al. A review of impedance measurements of whole cells[J]. Biosens Bioelectron, 2016, 77:824-836.
- [4] 沈斌, 赵伟红, 杨阳, 等. 人胃癌黏膜上皮细胞介电谱的实验研究[J]. 宁波大学学报(理工版), 2015, 28(3): 103-107.
- [5] Heileman K, Daoud J, Tabrizian M. Dielectric spectroscopy as a viable biosensing tool for cell and tissue characterization and analysis[J]. Biosens Bioelectron, 2013, 49(11):348-359.
- [6] 丁冲, 刘玺, 商澎. 细胞悬浮液介电谱检测与应用研究进展[J]. 北京生物医学工程, 2014, 33(1):94-100.
- [7] Asami K, Takahashi Y, Takashima S. Dielectric properties of mouse lymphocytes and erythrocytes[J]. Biochim Biophys Acta, 1989, 1010(1):49-55.
- [8] Bordi F, Cametti C, Biasio A D. Determination of cell membrane passive electrical properties using frequency domain dielectric spectroscopy technique: A new approach[J]. Biochim Biophys Acta, 1990, 1028(2): 201-204.
- [9] Wu L Q, Yung L Y L, Lim K M. Dielectrophoretic capture voltage spectrum for measurement of dielectric properties and separation of cancer cells[EB/OL]. [2017-02-06]. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3365349/>.
- [10] Zhao K, Bai W, Mi H. Dielectric spectroscopy of *Anabaena* 7120 protoplast suspensions[J]. Bioelectrochemistry, 2006, 69(1):49-57.
- [11] Wagner K W. Theoretische Grundlagen[M]. Berlin: Springer, 1924:1-59.
- [12] Asgharian N, Schelly Z A. Accurate determination of the dielectric parameters of spherical shells in suspension[J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2010, 12(27): 7688-7694.
- [13] 赵孔双. 稀薄细胞悬液系模型的介电解析法[J]. 高等学校化学学报, 1997, 18(1):107-111.

Influence of single shell model parameters on cellular dielectric spectra

LIAO Cong¹, WU Jia-ying², SUN Meng-xia¹, CEN Li-chao¹, MA Qing^{1*}

(1. Medical School, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2. Ningbo Hospital of Traditional Chinese Medicine, Ningbo 315010, China)

Abstract: In order to investigate the effect of nine parameters (ϵ_0 , κ_0 , ϵ_m , κ_m , ϵ_{in} , κ_{in} , R , d , Φ) of the single spherical model on the dielectric spectrum of cell, we used the method of observing the changing behaviors of dielectric spectrum with eight parameters fixed and only one parameter variable. The results show that the parameter ϵ_0 mainly affects the low frequency and high frequency permittivity (ϵ_l , ϵ_h). κ_0 mainly affects the low frequency and high frequency conductivity (κ_l , κ_h). ϵ_m mainly affects the low frequency permittivity (ϵ_l), the permittivity increment ($\Delta\epsilon$) and the characteristic frequency (f_c); κ_m mainly affects the low frequency parameters (ϵ_l , κ_h) and the increment ($\Delta\epsilon$, $\Delta\kappa$); ϵ_{in} mainly affect (κ_h), κ_{in} mainly affect the high frequency conductivity(κ_h), conductivity increment ($\Delta\kappa$) and characteristic frequency (f_c); R and d mainly affect ϵ_l , $\Delta\epsilon$ and f_c , but the effect is opposite between the two parameters; volume fraction Φ mainly effects the low frequency parameters (ϵ_l , κ_l) and increment ($\Delta\epsilon$, $\Delta\kappa$) and κ_h . The rules of parametric variation of the single spherical shell cell model are elucidated, which is beneficial to extract the electrical parameters (cell membrane and cytoplasm), and to explore the electrophysiological mechanism of the cancerous cells.

Key words: single spherical shell model; dielectric spectrum; permittivity; conductivity; complex plane plot

(责任编辑 史小丽)