

血液与刀豆凝集素作用过程的阻抗特性

凌利, 钟先华, 李章勇

重庆邮电大学生物信息学院, 重庆 400065

【摘要】目的:研究血液与刀豆凝集素相互作用形成血凝过程中血细胞的阻抗特性。**方法:**选用家兔血细胞与刀豆凝集素构成实验组,以精密阻抗分析仪为基础搭建阻抗监测平台,持续采集各实验组反应过程的复阻抗幅模量、相位角、频率、实部值、虚部值等阻抗特征参数进行整理分析。**结果:**在50%比容的家兔血细胞悬浮液中,分别加入10、20和30 mg/mL浓度的刀豆凝集素后,家兔血细胞的特征频率从19.80 MHz提高到 (27.31 ± 2.19) MHz;在特征频率下,随反应时间的增加,复阻抗幅模量的增量均值和相位角的增量均值分别为 $(-18.27 \pm 1.29) \Omega$ 、 $3.86^\circ \pm 0.38^\circ$,与不含刀豆凝集素的空白对照组呈相反趋势。**结论:**刀豆凝集素可使家兔血细胞的特征频率升高,复阻抗幅模量降低,相位角增大,凝集速度加快。

【关键词】血凝;刀豆凝集素;阻抗特性;特征频率

【中图分类号】R318

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2022)06-0758-06

Impedance characteristics in the interaction process between blood and concanavalin agglutinin

LING Li, ZHONG Xianhua, LI Zhangyong

School of Bioinformatics, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China

Abstract: Objective To study the impedance characteristics of blood cells in the process of blood coagulation formation by the interaction of blood and concanavalin agglutinin. **Methods** Rabbit blood cells and concanavalin agglutinin were selected to form the experimental group. An impedance monitoring platform which was built based on precise impedance analyzer was used to continuously collect the impedance characteristic parameters such as complex impedance amplitude modulus, phase angle, frequency, real value, imaginary value during the reaction process in each experimental group for further collation and analysis. **Results** After adding 10, 20 and 30 mg/mL of concanavalin agglutinin into a 50% hematocrit of rabbit blood cell suspension, the characteristic frequency of rabbit blood cells was increased from 19.80 MHz to (27.31 ± 2.19) MHz. At the characteristic frequency, with the increase of the reaction time, the average increment of the complex impedance amplitude modulus was $(-18.27 \pm 1.29) \Omega$, and the average increment of the phase angle was $3.86^\circ \pm 0.38^\circ$. However, the blank control group without adding concanavalin agglutinin showed the opposite trends. **Conclusion** Concanavalin agglutinin can increase the characteristic frequency of rabbit blood cells, decrease complex impedance amplitude modulus, enlarge phase angle, and speed up the agglutination.

Keywords: hemagglutination; concanavalin agglutinin; impedance characteristic; characteristic frequency

前言

凝血功能疾病最典型的是A类血友病,在人群中的发病率为(5~10)/10万人。本病发病症状为身体出现异常出血不止,重症患者直接面临生命危险^[1]。所以,术前凝血功能异常的诊断尤为重要,能避免患者在术中、术后因出血不止,而出现危及生命的紧急状

况,为手术的顺利完成保驾护航^[2]。血凝过程中的凝血指数表征凝血功能是否正常,凝血指数过高或过低,患者将出现大面积血凝块或出血不止等凝血功能异常的病况^[3]。因此,对凝血功能疾病的诊断而言,血细胞凝集过程的监测是一种良好的解决方案。血细胞凝集是一项复杂和动态变化的生理现象^[4]。目前,对于血凝现象的检测主要有血凝板法^[5]、玻片法^[6]、比色池法^[7]等传统实验法,根据实验最终凝集效果来鉴别血凝程度,对结果属于定性分析,灵敏度较低,过程性研究不足。

针对血凝过程的监测现状,Xu等^[8]采用光学相干断层扫描技术,监测血流状态下的凝血过程,探究

【收稿日期】2022-02-19

【基金项目】国家自然科学基金(81901839)

【作者简介】凌利,硕士研究生,研究方向:生物医学信息, E-mail: 563802806@qq.com

流速、血细胞压积等血液性质的变化情况,有一定的监测效果。但结果准确度容易受流速快慢、管径大小、血液浓度等因素的影响。张译之等^[9]利用分子生物学技术,发现肝脏凝血过程中凝血因子活性降低,天然抗凝剂减少。这种方法监测成本高、时间周期长,且缺乏持续的监测数据来提供有力的判别依据。

据已有研究证明,血液与植物凝集素在一定浓度下,能够产生显著的血细胞凝集现象^[10]。凝集素参与的血凝与抗原-抗体作用产生的血凝虽然表观效果一致,但本质机理有所差异^[11]。本研究选用的是植物凝集素中最具代表性的豆科类凝集素,即刀豆凝集素 A (Concanavalin A, 简称 Con A)^[12]。以一定浓度的 Con A 溶液与家兔血细胞相互作用,产生血细胞凝集现象,构建实验组。

本研究对血凝过程的监测是基于生物阻抗技术。因生物组织具有高导电性,使得生物阻抗技术在生物医学领域应用广泛,尤其是在血液学的研究方面。例如兔子血细胞的阻抗特性研究^[13]、阻抗模型测评血液中葡萄糖量^[14]和测量大鼠血液的电阻抗谱^[15]等课题的研究;且对于复杂的生物组织而言,例如细胞悬浮液,生物阻抗技术可作为一项非损伤性和高效的监测方法^[16-19]。人体组织的阻抗特性由细胞内液、细胞外液、细胞膜通透性以及环境等因素共同决定^[20],生物阻抗作为一项重要的生理参数,反映了丰富的医学信息。因此,对血细胞凝集过程进行持续的阻抗特性监测,可获取血凝过程中阻抗特征

参数的变化规律,有助于为凝血功能异常等相关疾病的诊断提供判别依据。

1 实验材料

2.0~2.5 kg 健康成年实验兔, Con A 冻干粉, 0.01 mol/L、pH 7.2~7.4 磷酸盐缓冲盐溶液 (Phosphate Buffered Saline, 简称 PBS 溶液), 0.55×19 mm 一次性静脉采血针, 一次性真空采血管, 0.9% NaCl 溶液, 96 灭菌孔板, 湘仪台式高速离心机 (TG16-WS), Agilent 4294A 精密阻抗分析仪, Agilent 16092 夹具, Agilent 42942A 适配器。

试剂的配制:在兔子耳静脉处采集全血 4 mL,收集在枸橼酸钠(1:9)的抗凝管内。将全血以 2 000 r/min 的转速离心 5 min,共 3 次;每次离心完后用 0.9% 的生理盐水洗涤,最终取得下层压积血细胞;最后用 PBS 溶液将 Con A 冻干粉配制成浓度为 10、20、30 mg/mL 的 Con A 溶液。

2 方法

本研究对血液与刀豆凝集素作用过程的阻抗特性研究,整体技术方案如图 1 所示。首先将各实验组对应的试剂,分别加入 96 孔板的单个反应孔内;然后经阻抗监测平台,可采集和存储多种形式的复阻抗数据,主要分为以频率和反应时间为横轴的两类;通过数据分析,可得出相应的特征频率和时序增量,从而实现血液与刀豆凝集素作用过程的阻抗监测。

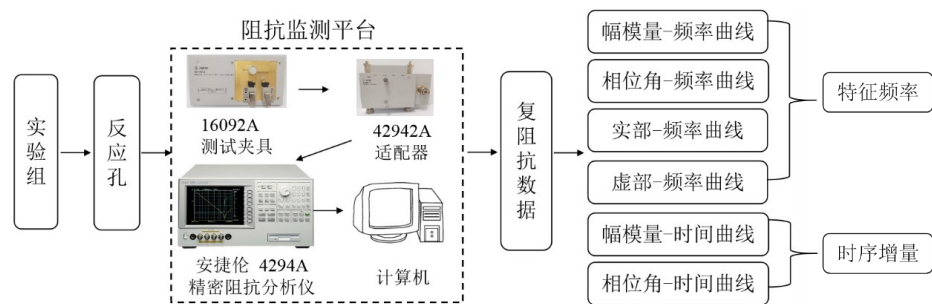


图1 技术方案示意图

Figure 1 Schematic diagram of technical solution

2.1 实验组

遵循等细胞比容原则,构建如表 1 所示的实验组。其中 A 组为空白对照组,B、C、D 为血凝实验组。因家兔血常规指标中血细胞比容的正常值约为 50%^[21],所以每组中血细胞比容设定为 50%,每种试剂对应用量为 60 μL,各组试剂总体积为 120 μL,每组总体积介于 96 灭菌孔板单孔容积的 1/3~2/3 范围内。

表 1 实验组试剂组成

Table 1 Reagent composition of experimental group

序号	实验组	血细胞	试剂
A 组	空白对照组	压积血细胞	PBS 溶液
B 组	血凝实验组	压积血细胞	10 mg/mL Con A
C 组	血凝实验组	压积血细胞	20 mg/mL Con A
D 组	血凝实验组	压积血细胞	30 mg/mL Con A

2.2 阻抗监测平台

阻抗监测平台的组成:由 Agilent 16092A 测试夹具、42942A 端口适配器、4294A 精密阻抗分析仪依次连接组成,复阻抗数据通过本地传输存储到计算机内。因银的导电性能好,稳定性仅次于金、铂,在缓冲液内不易被腐蚀,所以本方法采用规格为直径 0.5 mm,长度 5 cm,纯度 99.99% 的两根等长的银导线连接反应孔与测试夹具。导线一端固定在夹具上,另一端平行紧贴于反应孔内壁,形成电容型电极。

阻抗监测步骤:(1)前期准备,预热 42942A 精密阻抗分析仪 30 min 后,进行仪器开路、短路校准,依次选择 Cal-Fixture compen-open/short 功能键,对夹具进行补偿。(2)参数的设置:Meas 键选择参数类型为幅模量-相位角;Format 键选择曲线显示类型为 LIN 线性;Scale Ref 键设置为 Autoscale 自动曲线刻度,将曲线显示最佳化;选择 Display-split on OFF,分开显示曲线 A、B;Seep 键设置扫描模式为 Freq 频率扫描;电场频率范围为 0.55~110.00 MHz。(3)固定夹具,加入实验试剂,记录与存储数据。

2.3 特征频率

家兔血细胞具有两个特征频率,是血液细胞对交流电场响应在阻抗谱的标志性参数。一个特征频率可在相-频曲线中,相位峰值处,反映细胞膜相与细

胞内相的界面对交流电场产生的弛豫过程的频率响应特性,本研究称为特征频率 f_1 ;另一个征频率可在虚部增量-实部增量曲线中,虚部增量峰值的频率点处,反映的是细胞外相与细胞膜相的界面对交流电场产生的频率响应特性,本研究称为特征频率 f_2 ^[22-23]。

3 结果与分析

3.1 频率特性

图 2 是 A、B、C、D 4 个实验组的频率特性图,展现了随着交流电场频率 f 从低频变为高频的过程中,复阻抗的幅模量 $|Z|$ 、相位角 θ 、实部 R 、虚部 X 这 4 个特征参数的变化规律。在图 2a 和图 2b 中,随着 f 的增加,幅模量 $|Z|$ 和实部 R 的曲线总体呈现下降趋势。在 $f < 10$ MHz 范围, $|Z|$ 和 R 的曲线下落比较陡,差值较大;在 $f > 10$ MHz 范围, $|Z|$ 和 R 值均缓慢减小,并逐渐趋于平缓。在图 2c 中随着 f 的增加,相位角 θ 曲线呈现先增加至峰值后,再逐渐减小的变化规律。相位角峰值处的频率值已在图 2c 中标明,该频率为兔血细胞的特征频率 f_1 。从图 2 可发现,血凝实验组 B、C、D 组的 f_1 均比空白对照组 A 组的 f_1 值大。在图 2d 中随着 f 的增加,虚部 X 值曲线呈现先迅速增加至峰值后,逐渐平缓。

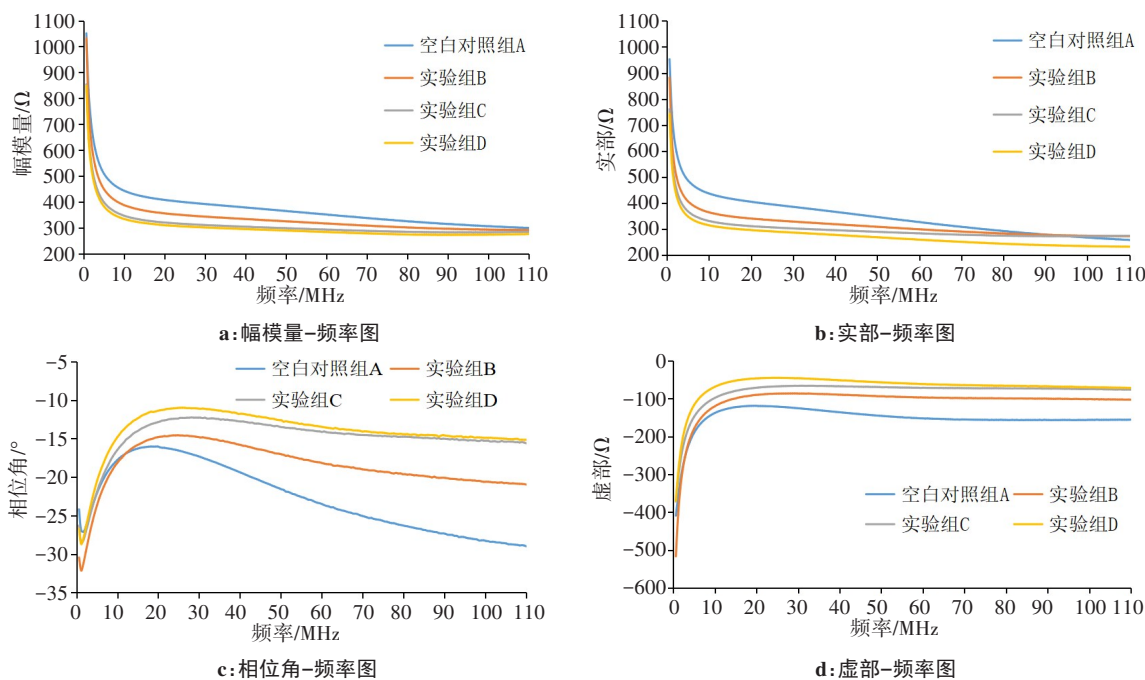


图 2 实验组频率特性图

Figure 2 Frequency characteristic diagram of experimental group

图 3 中横轴为实部增量 ΔR 的对数值,纵轴是虚部增量 ΔX 。 $\Delta R = R - R_{0.55}$, $R_{0.55}$ 代表在 0.55 MHz 下的复阻抗实部值; $\Delta X = X - X_{110}$, X_{110} 代表在 110 MHz 下

的复阻抗虚部值。图 3 中,随着实部增量的增加,虚部增量曲线刚开始处于平缓状态,到达峰值后陡然下降。虚部增量的峰值处频率值已在图 3 中标明,该

频率为兔血细胞的特征频率 f_2 , 可发现血凝实验组B、C、D组的 f_2 点均在对照组A组的左侧。

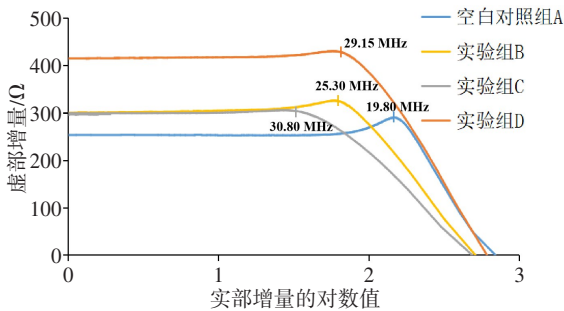
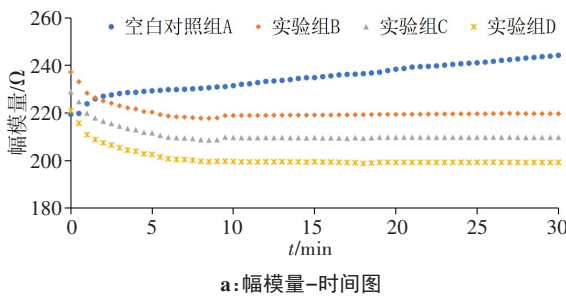


图3 虚部增量-实部增量对数图
Figure 3 Graph of imaginary increment-logarithm of real increment



3.2 时序复阻抗数据

随着实验组反应开始至 30 min, 每间隔 0.5 min 记录一次复阻抗数据。图 4 为时序复阻抗曲线图, 血凝实验组与空白对照组的曲线走势相反。其中图 4 幅模量-时间图为复阻抗幅模量 $|Z'|$ (为区分与图 2 中的幅模量 $|Z|$)随时间的变化曲线。随反应时间的增加, 空白对照组 A 组的 $|Z'|$ 逐渐增加, 而血凝实验组 B、C、D 组的 $|Z'|$ 却逐渐减小; 且随着 Con A 浓度的增大, $|Z'|$ 越低。图 4 相位角-时间图为复阻抗相位角 θ' (为区分与图 2 中的相位角 θ)随时间的变化曲线。随反应时间的增加, 空白对照组 A 组的逐渐降低, 而血凝实验组 B、C、D 组的 θ' 却逐渐增加; 且随着 Con A 浓度的增大, θ' 越低。

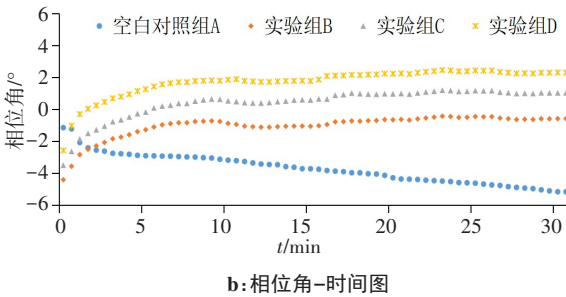
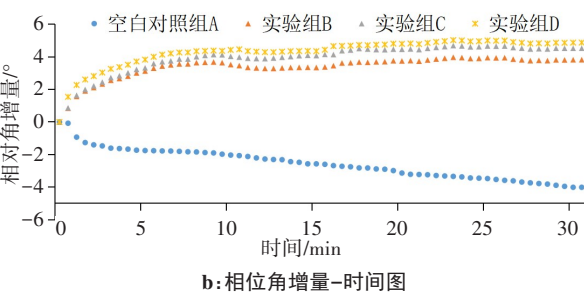
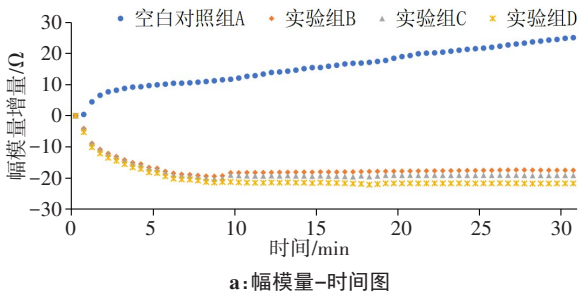


图 5 为时序复阻抗增量图。其中, 图 5a 的纵坐标是指时序幅模量增量 $\Delta|Z'|$, $\Delta|Z'| = |Z'| - |Z'|_0$, $|Z'|_0$ 代表在反应时间为 0 min 处的时序幅模量值。随反应时间的增加, 空白对照组 A 组的 $\Delta|Z'|$ 明显增加。而血凝实验组 B、C、D 组的 $\Delta|Z'|$ 却逐渐减小且变化规

律相似。图 5b 的纵坐标是指时序相位角增量 $\Delta\theta'$, $\Delta\theta' = \theta' - \theta'_0$, 同理 θ'_0 代表在反应时间为 0 min 处的时序相位角值。随反应时间的增加, 空白对照组 A 组的 $\Delta\theta'$ 明显减小, 而血凝实验组 B、C、D 组的 $\Delta\theta'$ 却逐渐增大。



3.3 阻抗特征参数

经过两次重复试验, 本研究采集的阻抗特征参数如表 2 所示。家兔血细胞与 Con A 作用后, 特征频率从 19.80 MHz 变为 (27.31 ± 2.19) MHz; 且时序幅模量的增量均值从 15.56 Ω 降低到 (-18.27 ± 1.29) Ω , 时

序相位角的增量均值从 -2.56° 提升到 $3.86^\circ \pm 0.38^\circ$, 变化趋势相异, 发生了明显的改变。此外, $|Z|$ 、 θ 、 \bar{R} 、 $\overline{\Delta R}$ 、 \bar{X} 、 $\overline{\Delta X}$ 等参数在 Con A 的作用下与对照组也存在着一一定的差异, 但不明显。

图5 时序复阻抗增量图
Figure 5 Incremental graph of complex impedance over time

表2 阻抗特征参数
Table 2 Impedance characteristic parameters

复阻抗特征参数	物理量(单位)	A组 (对照组)	B、C、D组 (血凝实验组)
特征频率	\tilde{f} (MHz)	19.80	27.31±2.19
时序幅模量的增量均值	$\overline{\Delta Z }$ (Ω)	15.56	-18.27±1.29
时序相位角的增量均值	$\overline{\Delta\theta}$ ($^{\circ}$)	-2.56	3.86±0.38
幅模量	$ Z $ (Ω)	373.67	316.84±15.51
相位角	θ ($^{\circ}$)	-22.70	-15.68±1.96
实部均值	\bar{R} (Ω)	350.92	297.14±17.72
实部增量均值	$\overline{\Delta R}$ (Ω)	92.08	36.76±8.68
虚部均值	\bar{X} (Ω)	-150.03	-84.20±16.44
虚部增量均值	$\overline{\Delta X}$ (Ω)	258.50	334.94±53.37

4 讨论

4.1 阻抗监测方法

通过本研究所设计的阻抗监测方法,发现家兔血细胞悬浮液的频率特性呈现一定规律:随着频率的增加,每个实验组中,家兔血细胞悬浮液的幅模量和实部值都逐渐降低,而相位角和虚部值都逐渐升高,如图2所示。本研究成果的上述频率特性变化规律,与现有研究如翟琳等^[18]和王力等^[22]对家兔全血细胞的阻抗研究结果所呈现的规律总体一致。这说明本研究的阻抗监测方法具有一定的可靠性。

但本研究空白对照组所得的家兔血细胞特征频率为19.80 MHz,而翟琳等^[18]和王力等^[22]所得家兔全血特征频率为2.58和5.21 MHz,存在偏差。一方面是因为研究对象具有差异。翟琳等^[18]和王力等^[22]的研究对象为32.17%比容的家兔全血细胞,而本研究对象为50%比容家兔血细胞,且本研究加入了刀豆凝集素,而非自然状态的血液凝集或者血清-抗原抗体结合产生的血凝。另一方面,通过对本研究的阻抗监测方法进行系统性分析,可能是由阻抗电极的材质不同所导致的。在阻抗特性研究中,翟琳等^[18]和王力等^[22]选用铂片构建的平行板电容器型电极;而本研究选用的是纯银材质的电极,结合安捷伦16092A夹具尺寸和稳定性,最终选用直径为0.5 mm的纯银电极。由于铂的价格昂贵,而银的价格相对适宜,且银的稳定性仅次于铂,银的导电性能比绝大多数金属都稳定,在保证良好的监测效果下,银电极的性价比更高。现有研究的方法值得借鉴,但本研究也为家兔血液阻抗特性的研究提供一种新的且可靠的阻抗监测方法。

4.2 阻抗特征参数的频率特性

从空白对照组A到实验组B、C、D组,刀豆凝集

素的浓度从无到有依次变大。由图2可知,在频域内刀豆凝集素的浓度越高,家兔血细胞的复阻抗幅模量和实部值越低,呈负相关。这表征刀豆凝集素的浓度是影响家兔血液阻抗特性的重要因素之一。观察图2和图3中曲线的峰值,可得家兔血细胞悬浮液的特征频率规律,即含有刀豆凝集素的实验组均比空白对照组的特征频率更大。这说明在刀豆凝集素的作用下,家兔血细胞膜与细胞内相和细胞外相的界面对交流电场所产生的频率响应发生了改变,使得家兔血细胞膜的阻抗特征频率变大,且实验组B、C、D组的特征频率也存在细微差异,这表明在家兔血细胞比容和试剂用量相等的情况下,刀豆凝集素的浓度也会影响家兔血细胞的特征频率。

4.3 阻抗特征参数的时序变化

阻抗监测结果显示,随反应时间的增加,含有刀豆凝集素的实验组B、C、D组,它们的复阻抗幅模量逐渐降低,相位角逐渐增大,而空白对照组A则呈相反变化方向,如图4所示。根据生物阻抗等效电路模型理论:若被测生物组织的容抗增加,其他变量视为不变的情况下,则复阻抗幅模量会随之减小^[24]。由此可知,刀豆凝集素逐渐改变了血细胞悬浮液原有的空间分布状态,血细胞发生了凝集现象,出现血细胞“抱团”,使得血细胞间距减小,从而导致细胞膜电容性增强,整体的容抗增加,最终导致复阻抗幅模量降低;而没有刀豆凝集素参与的空白对照A组中,血细胞悬浮液因重力作用,血细胞逐渐下沉,变化过程与实验组形成差异,在时域内呈现阻抗特征参数不同的变化规律。此外,刀豆凝集素的加入使得血细胞的阻抗相位角增大,这表征血细胞的空间分布状态改变后,交流电路的电压超前电流的相位值也会有所影响,但具体改变机制需进一步探究。

将时序复阻抗数据与数据初始值相比,得到了时序复阻抗的增量变化规律,如图5所示。在实验开始的0~10 min,实验组的复阻抗幅模量增量曲和相位角增量的曲线斜率,明显比10~30 min更大,10 min后实验组曲线趋于平缓。这表征刀豆凝集素与家兔血细胞的相互作用,在刚开始的前10 min内比较剧烈,血细胞在悬浮液中的空间分布状态改变更加迅速且复杂;而10~30 min,实验组特征参数的时序增量趋于恒定,血细胞的空间分布状态逐渐稳定,血液与刀豆凝集素作用基本结束。而空白对照组A的幅模量增量还在逐渐上升,相位增量在逐渐下降,这说明血细胞悬浮液的自然沉降并聚集在底部的过程仍在继续,速度较缓慢。因此,较血细胞自然沉降过程,刀豆凝集素可加速改变家兔血细胞悬浮液的空间分布状态,减少血细胞凝集的时间,提升血凝速度。

与传统血凝实验法相比,本研究对刀豆凝集素参与的血凝过程进行了持续性的阻抗监测,不局限于对最终凝集状态的判别,更加客观地揭示了血凝动态作用过程中家兔血细胞特征参数的时序变化规律,这有助于为凝血功能疾病的检测提供判别依据。

5 结论

本研究提出一种血液与刀豆凝集素作用过程的阻抗监测方法,发现在50%比容的家兔血细胞悬浮液中,分别加入10、20、30 mg/mL浓度的Con A后,家兔血细胞的复阻抗特征参数具有明显差异:(1)家兔血细胞的特征频率从19.80 MHz提升至 (27.31 ± 2.19) MHz;(2)在27.31 MHz特征频率下,血凝实验组的时序复阻抗幅模量呈下降趋势,时序相位角呈上升趋势,增量均值分别为 $(-18.27 \pm 1.29) \Omega$ 、 $3.86^\circ \pm 0.38^\circ$,与对照组呈相反变化方向。研究表明,在家兔血细胞与刀豆凝集素相互作用,产生血细胞凝集的过程中,复阻抗幅模量减小,相位角增大,凝集速度加快。这可作为一条有力的判别依据来区分血细胞是否为凝集状态。在进一步的研究中,将探究不同人群血细胞凝集过程的阻抗特性,为凝血功能健康检测提供新的解决方案。

【参考文献】

- [1] 杨博,王刚,张夏林,等. 血友病A免疫抑制耐受的研究进展[J]. 临床血液学杂志, 2021, 34(5): 366-369.
Yang B, Wang G, Zhang XL, et al. Research progress of immunosuppressive tolerance in hemophilia A[J]. Journal of Clinical Hematology, 2021, 34(5): 366-369.
- [2] 谢玉海,王学军. 高原地区患者术前凝血功能特征及血栓弹力图评估凝血功能的价值研究[J]. 中国现代医学杂志, 2017, 27(17): 80-83.
Xie YH, Wang XJ. Study on the characteristics of preoperative coagulation function and the value of thromboelastography in evaluating coagulation function of patients in plateau area[J]. China Journal of Modern Medicine, 2017, 27(17): 80-83.
- [3] Li KX, Xiao J, Zhao YQ, et al. Moderate-intensity exercise improves the thromboelastography coagulation index in children with severe hemophilia A[J]. Blood Coagul Fibrin, 2016, 27(7): 1-7.
- [4] Lei KF, Chen KH, Tsui PH, et al. Real-time electrical impedimetric monitoring of blood coagulation process under temperature and hematocrit variations conducted in a microfluidic chip[J]. PLoS One, 2013, 8(10): e76243.
- [5] 李佳楠,杨薇,彭娜,等. 菜豆毒性分析及毒性预测模型建立[J]. 中国农业科学, 2015, 48(4): 729-730.
Li JN, Yang W, Peng N, et al. Bean toxicity analysis and toxicity prediction model establishment[J]. Chinese Agricultural Sciences, 2015, 48(4): 729-730.
- [6] Wim M, Birgid N. Recent and future trends in blood group typing[J]. Anal Bioanal Chem, 2009, 393(5): 1443-1451.
- [7] 单良,姚惠源. 麦胚凝集素红细胞凝集活性检测方法的改进[J]. 食品与生物技术学报, 2004, 23(1): 49-53.
Shan L, Yao HY. Improvement of the detection method of wheat germ agglutinin erythrocyte agglutination activity[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2004, 23(1): 49-53.
- [8] Xu XQ, Geng JH, Teng XS. Monitoring the blood coagulation process under various flow conditions with optical coherence tomography[J]. J Biomed Opt, 2014, 19(4): 046021.
- [9] 张译之,陈煜. 肝硬化患者的止血平衡改变[J]. 肝脏, 2020, 25(8): 786-788.
Zhang YZ, Chen Y. Changes in hemostatic balance in patients with liver cirrhosis[J]. Liver, 2020, 25(8): 786-788.
- [10] Damme E. History of plant lectin research[J]. Meth Mole Bio, 2014, 1200: 3-13.
- [11] Maxime H, Myriam C, Arnaud B. Red blood cell agglutination for blood typing with in passive microfluidic biochips[J]. High-Throughput, 2018, 7(2): 1-12.
- [12] Cavada B, Pinto-Junior V, Osterne V, et al. Con a-like lectins: high similarity proteins as models to study structure/ biological activities relationships[J]. Int J Mol Sci, 2018, 20(1): 1-24.
- [13] 邹瞿超,金锦江,黄天海,等. 生物电阻抗技术在皮肤创伤研究中的应用进展[J]. 传感器与微系统, 2021, 40(11): 1-3.
Zou QC, Jin JJ, Huang TH, et al. Application progress of bioelectrical impedance technology in skin trauma research[J]. Sensors and Microsystems, 2021, 40(11): 1-3.
- [14] 邵平,张晓东,邹雪城. 面向血液葡萄糖测量的生物组织阻抗模型[J]. 激光生物学报, 2016, 25(3): 250-256.
Shao P, Zhang XD, Zou XC. Biological tissue impedance model for blood glucose measurement[J]. Journal of Laser Biology, 2016, 25(3): 250-256.
- [15] 宫宇,陈林,沈斌,等. 电阻抗谱评价模拟失重对大鼠血液电特性的影响[J]. 生物医学工程学杂志, 2012, 29(4): 653-657.
Gong Y, Chen L, Shen B, et al. Electrical impedance spectroscopy to evaluate the effect of simulated weightlessness on the blood electrical characteristics of rats[J]. Journal of Biomedical Engineering, 2012, 29(4): 653-657.
- [16] Ackmann JJ. Complex bioelectric impedance measurement system for the frequency range from 5 Hz to 1 MHz[J]. Ann Biomed Eng, 1993, 21(2): 135-146.
- [17] Jensen B, Braun W, Both M, et al. Configuration of bioelectrical impedance measurements affects results for phase angle[J]. Med Eng Phys, 2020, 84: 10-15.
- [18] 翟琳,王力,沈腾越,等. 家兔全血细胞复阻抗谱的实验研究[J]. 医学研究杂志, 2008, 37(11): 57-59.
Zhai L, Wang L, Shen TY, et al. Experimental study on complex impedance spectroscopy of rabbit whole blood cells[J]. Journal of Medical Research, 2008, 37(11): 57-59.
- [19] 魏然,王鹏,陈天浩,等. 不同冻藏温度对鸡胸肉电阻抗特性的影响[J]. 食品工业科技, 2016, 37(20): 312-316.
Wei R, Wang P, Chen TH, et al. Effects of different freezing storage temperatures on electrical impedance characteristics of chicken breast[J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(20): 312-316.
- [20] Noshiro M, Morimoto T, Nagao H, et al. Electrical impedance in the lower limbs of patients with Duchenne muscular dystrophy: a preliminary study[J]. Med Biol Eng Comput, 1993, 31(2): 97-102.
- [21] 王东升,严作廷,张世栋,等. 两种家兔体温和部分血常规指标的比较[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2011(17): 130-132.
Wang DS, Yan ZT, Zhang SD, et al. Comparison of two kinds of rabbit body temperature and some blood routine indexes[J]. Heilongjiang Animal Husbandry and Veterinary Medicine, 2011(17): 130-132.
- [22] 王力,陈林,马青. 家兔全血细胞电阻抗频率特性[J]. 浙江大学学报(医学版), 2009, 38(4): 383-386.
Wang L, Chen L, Ma Q. Frequency characteristics of electrical impedance of rabbit whole blood cells[J]. Journal of Zhejiang University (Medicine Edition), 2009, 38(4): 383-386.
- [23] 方云,汤治元,张倩,等. 人肝癌细胞电阻抗特性的实验研究[J]. 生物医学工程学杂志, 2014, 31(5): 1070-1074.
Fang Y, Tang ZY, Zhang Q, et al. Experimental study on electrical impedance characteristics of human liver cancer cells[J]. Journal of Biomedical Engineering, 2014, 31(5): 1070-1074.
- [24] Tatara T, Tsuzaki K. Derivation of extracellular fluid volume fraction and equivalent dielectric constant of the cell membrane from dielectric properties of the human body. Part 2: a preliminary study for tracking the progression of surgical tissue injury[J]. Med Biol Eng Comput, 2000, 38(4): 384-389.

(编辑:陈丽霞)