



基于相位角电阻抗成像的肌肉组织 脂肪浸润检测方法研究*

肖悟光¹⁾ 朱小鹏¹⁾ 冯慧^{2)**} 孙博^{1,4)} 赵桐¹⁾ 姚佳烽³⁾

(¹⁾ 西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 西安 710048; (²⁾ 南京医科大学附属江宁医院康复医学科, 南京 211100;

(³⁾ 暨南大学物理与光电工程学院, 广州 510632; (⁴⁾ Department of Mechanical Engineering, Chiba University, Chiba 263-0022, Japan)

摘要 目的 脂肪浸润已被证明与肌肉质量下降以及多种肌肉疾病密切相关。本研究提出一种基于相位角电阻抗成像 (phase-angle electrical impedance tomography, Φ EIT) 的方法, 用于可视化肌肉脂肪浸润引起的肌肉电学特性响应, 旨在为肌肉质量退化的早期无创检测提供新的技术手段。**方法** 本研究分为两部分。第一, 构建实验室猪肉模型, 通过向不同肌肉隔室分别注入 1 ml 和 2 ml 乳化脂肪溶液模拟不同程度的脂肪浸润, 利用 Φ EIT 重建相位角图像; 第二, 开展人体实验, 招募两个年龄段 (20~25 岁、26~30 岁) 的健康受试者 ($n=8$), 通过生物电阻抗分析法 (bioelectrical impedance analysis, BIA) 测量左、右腿脂肪含量百分比 η_{fat} , 并使用 Φ EIT 对左、右小腿进行相位角图像重建, 进一步分析全局平均相位角 Φ_M 及各肌肉隔室空间平均相位角 Φ_{M_i} 与脂肪浸润之间的关系。**结果** 实验室猪肉模型中, 图像灰度值随的猪肉内脂率 P_f 增加而升高, Φ_M 呈下降趋势。人体实验结果表明, 全局平均相位角随脂肪含量百分比 η_{fat} 的增加而降低。此外, M_2 (比目鱼肌) 隔室对脂肪浸润最为敏感, M_2 (比目鱼肌)、 M_3 (胫骨后肌和趾长屈肌) 和 M_4 (胫骨前肌、趾长伸肌和腓骨长肌) 隔室的空间平均相位角 Φ_{M_i} 均显示出明显的组间差异。**结论** Φ EIT 成像能够有效区分不同程度的脂肪浸润, 特别是在深层、体积小或位置特殊的肌肉中表现出较高的敏感性, 证明该方法在局部肌肉质量监测及早期无创诊断中的应用潜力。

关键词 肌少症, 脂肪浸润, 相位角, 电阻抗成像, 肌肉质量

中图分类号 Q4-33, Q445

DOI: 10.3724/j.pibb.2025.0241

CSTR: 32369.14.pibb.20250241

肌肉质量的下降与日常功能障碍、肌肉减退以及多种代谢性疾病的发生密切相关, 已成为近年来研究的热点方向^[1-3]。肌肉内脂肪 (intramuscular adipose tissue, IMAT) 是由脂肪组织向骨骼肌内部迁移形成的, 其在组织中异常沉积被称为脂肪浸润 (fat infiltration, FI)^[4-5]。脂肪浸润不仅会影响肌肉功能, 还与肥胖、糖尿病、衰老等代谢性疾病密切相关^[6-8]。

目前, 脂肪浸润的检测方法主要有肌肉活检、磁共振成像 (magnetic resonance imaging, MRI)、计算机断层扫描 (computed tomography, CT) 和定量超声 (quantitative ultrasound, QUS)。肌肉活检虽然能够在组织层面提供精细结构信息, 但为侵入性操作, 存在操作复杂、周期长及创伤风险等问题^[9]。MRI 具备无辐射、软组织成像清晰等优势, 但缺乏对肌肉密度的定量能力, 且成本较高、普及

率有限^[10-11]。CT 可对皮下脂肪与肌间脂肪进行区分, 并支持三维重建, 但受限于高成本与辐射暴露^[9]。QUS 具备便携、低成本等特点, 可用于评估肌肉厚度与回声特征, 但易受操作者经验影响^[12]。

生物电阻抗分析 (bioelectrical impedance analysis, BIA) 作为一种无创、快速的检测方法, 广泛用于肌肉质量评估。相位角 (phase angle, PhA, Φ) 作为 BIA 中表征细胞结构与功能的重要参数, 可反映细胞膜电阻与细胞外液电抗的相对关

* 南京医科大学附属江宁医院医工融合实验室开放课题 (JNYZZXKY202320) 和陕西省重点研发计划 (2025GH-YBXM-007) 资助项目。

** 通讯联系人。

Tel: 13851959264, E-mail: 447173103@qq.com

收稿日期: 2025-05-19, 接受日期: 2025-06-30

系^[13-14]。研究表明,相位角较低通常与肌质差、衰弱、跌倒风险增高等现象相关联^[15-16],而相位角较高代表肌质量良好,多出现在年轻人或运动员群体中^[17]。然而,BIA获取的是整体性指标,无法实现对局部肌肉区域脂肪浸润程度的定量评估^[17-19],限制了其在局部肌肉健康监测中的应用。

近年来,电阻抗成像(electrical impedance tomography, EIT)技术因其具有无创、便捷、无辐射和成像速度快等优点,成为肌肉功能状态监测的有力工具^[20-21]。已有研究表明,EIT结合机器学习算法可有效区分健康与受损肌肉,准确率可98%^[22]。针对EIT普遍面临的水分状态干扰问题,Clark等^[23]向肌肉施以微弱的多频电流,有效消除了水分状态对EIT骨骼肌评估的影响,从而提高了肌肉健康评估的可靠性。此外,Guo等^[24]通过设计新型微创探头,成功将EIT的成像算法应用于微创手术中的术中组织检测。这一系列的应用和发现,都展示了EIT在生物医学领域的潜在价值和应用前景,也为进一步研究和开发相关技术提供了重要的参考依据^[21, 25]。尽管EIT在肌肉检测方面已经取得了很多进展,但是传统EIT方法在应用于脂肪浸润检测时存在两方面挑战:缺乏对脂肪浸润与电学特性之间关联的量化分析;常采用整体区域建模,忽略对局部肌肉结构和异质性变化的识别能力。

传统EIT主要生成电导率或阻抗分布的空间图像,虽然能反映肌肉电学特性变化,但是电导率或阻抗不能直接关联肌肉功能或质量指标^[13-15]。此

外,相较于电导率和阻抗,相位角对肌内脂肪和纤维组织增加(肌肉质量恶化)的灵敏度和特异化程度更高^[4, 13]。因此本研究提出一种基于相位角电阻抗成像(phase-angle electrical impedance tomography, Φ EIT)算法,旨在定量评估肌肉脂肪浸润的同时,增强对局部肌肉隔室电学特性变化的响应能力。本研究通过对实验室猪肉模型与人体实验相结合,利用 Φ EIT重建不同肌肉隔室的相位角图像,并引入全局平均相位角 Φ_M 与各肌肉隔室的平均相位角 Φ_{M_i} 两种指标,探索其与脂肪含量百分比 η_{fat} 之间的响应关系,为肌肉质量退化的早期检测提供一种新的高效、非侵入式方法。

1 材料与方法

1.1 肌肉相位角电阻抗成像算法

本研究提出一种基于 Φ EIT的方法,旨在通过测量肌肉组织的阻抗特性,推导其电导率(σ)和介电常数(ϵ),获得肌肉相位角(Φ),进而重建肌肉截面的相位角分布图像 Φ_{muscle} ,以评估不同程度的脂肪浸润。以小腿肌肉为研究对象,根据解剖结构将小腿肌肉群划为4个隔室,分别表示为: M_1 隔室(腓肠肌), M_2 隔室(比目鱼肌), M_3 隔室(胫骨后肌和趾长屈肌)和 M_4 隔室(胫骨前肌、趾长伸肌和腓骨长肌)(图1)。实验采用16电极相邻激励方式进行 Φ EIT成像。依据小腿各组织层(皮肤、脂肪、骨骼及肌肉隔室)分别构建实部雅可比矩阵 $\text{Re}(J_n^m)$ 和虚部雅可比矩阵 $\text{Im}(J_n^m)$,进而得到相位角雅可比矩阵 ΦJ_n^m 。

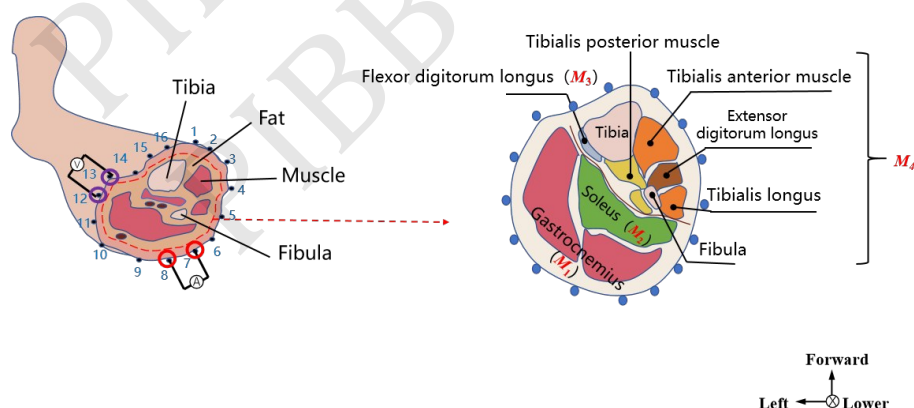


Fig. 1 Electrode arrangement and division of muscle compartments

(a) Schematic diagram of the calf muscle and electrode arrangement. (b) Distribution of muscle compartments in the calf cross sectional area.

Φ EIT 成像算法主要分为两大部分, 整个框架如图2所示。第一部分为正问题求解模块, 其中基础层生成阻抗雅可比矩阵, 核心层基于 Φ EIT 灵敏度矩阵与阻抗雅可比矩阵构建相位角雅可比矩阵。第二部分为逆问题图像重建模块, 作用为基于测量数据重建 Φ EIT 图像, 并计算两类相位角指标: a. 肌肉截面的全局平均相位角 Φ_M , 反映整体脂肪浸润水平; b. 各肌肉隔室空间平均相位角 Φ_{M_i} , 反映局部脂肪浸润程度。

Φ EIT 方法首先需要构建肌肉雅可比矩阵 $J_n^{x,y,z,p}$, 并在此基础上构建相位角雅可比矩阵 ΦJ_n^m , 二者分别由公式 (1) 和公式 (2) 得到:

$$J_n^{x,y,z,p} = - \int_{\Omega_u} \nabla u(I^{x,y}) g \nabla u(I^{z,p}) d\Omega_M \quad (1)$$

$$\Phi J_n^m = \frac{\text{Im}(J_n^m)}{\text{Re}(J_n^m)} \quad (2)$$

其中, $u(I^{x,y})$ 和 $u(I^{z,p})$ 分别是相对电极对注入电流产生的复电场。通过有限元法 (FEM) 求解电场分布 $u(I^{i,j})$, 满足连续性方程 $\nabla \cdot J = 0$, 输出各网格点的电场强度 E 和电流密度 I 。在公式 (1) 和公式 (2) 基础上计算出肌肉隔室内相位角雅可比矩阵, 即可构建出该隔间的相位角分布图像。以肌肉隔室 M_i 举例, M_i 的相位角分布图像矩阵 Φ_{M_i} 如公式 (3) 所示:

$$\Phi_{M_i} = [\Phi_1, \dots, \Phi_{n_M}, \dots, \Phi_{N_{M_i}}]^T \in \mathbb{R}^{N_{M_i}} \quad (3)$$

其中, Φ_n 是第 n 个测量点的相位角, n_M 是 M_i 隔室内的像素编号, N_{M_i} 是 M_i 隔室内的总网格数, $\mathbb{R}^{N_{M_i}}$ 是指 M_i 区域通过二维离散化得到的区域元素总数。

为提高图像重建质量, 采用高斯-牛顿法迭代法优化重建过程。正则化参数 λ 通过 L 曲线法确定, 在本研究中, λ 的取值范围为 0.001~0.1^[23, 25] 以平衡噪声和图像分辨率以避免过拟合。迭代公式为:

$$\Phi^{i+1} = \Phi^i - \left(\theta J^{(T)} \theta J + \lambda R \right)^{-1} \theta J^{(T)} \Delta \theta \quad (4)$$

其中, R 为正则化矩阵。 θJ 是雅可比矩阵, λ 为超参数, $\Delta \theta = [\Delta \theta_1, \dots, \Delta \theta_m, \dots, \Delta \theta_M]^T \in \mathbb{R}^M$ 是所选低频率 f_0 和高频率 f_1 下的相位角变化, 其中 $\Delta \theta_m$ 计算如公式 (5) 所示:

$$\Delta \theta_m(f_1 - f_0) = \theta_m(f_1) - \theta_m(f_0) \quad (5)$$

计算 M_i 隔室的空间平均相位角 Φ_{M_i} , 该平均值代表隔间整体的相位角特征, Φ_{M_i} 越低, 该肌肉隔室内脂肪浸润程度越高。 Φ_{M_i} 的计算如公式 (6) 所示:

$$\Phi_{M_i} = \sum_{n_{M_i}=1}^{n_{M_i}=N_{M_i}} \Phi_{n_{M_i}} / N_{M_i} \quad (6)$$

同理, 计算 M_2 、 M_3 和 M_4 隔室对应的空间平均相位角 Φ_{M_2} 、 Φ_{M_3} 和 Φ_{M_4} 。考虑到脂肪组织电导率远低于肌肉组织^[20-21], 相位角降低反映脂肪浸润程度增加。横截面肌肉全局平均相位角矩阵 Φ_M 评估肌肉整体状况, 由如下公式表示:

$$\Phi_M = \frac{1}{N_M} \sum_{n=1}^{N_M} \Phi_{n_M} \quad (7)$$

1.2 实验室猪肉模型实验

为验证 Φ EIT 方法在脂肪浸润检测中的可行性与敏感性, 本研究基于实验室猪肉模型搭建了 Φ EIT 成像实验平台。图3显示了实验室猪肉模型实验平台建立, 实验样本为当日屠宰的带骨猪腿样本, 猪肉模型实验平台由4部分组成: a. 16电极可穿戴式传感器阵列, 用于将物理场分布信息转换为电信号; b. 多路复用器 (multiplexer), 实现不同电极对之间的自动切换; c. 阻抗分析仪 (IM3570, HOKI, Japan), 用于采集传感器处理数据; d. 图像重建单元, 基于 Python 软件环境完成相位角图像重建。阻抗分析仪的测量精度为 0.08%, 激励频率覆盖范围为 4 Hz ~ 5 MHz。

在实验过程中, 传感器阵列紧密贴附于猪腿肉样本表面, 确保电极良好接触。施加的交流激励电流为 $I_{AC}=1$ mA。相对于脂肪和骨骼, 肌肉相位角随频率变化比较明显^[26], 因此本研究针对肌肉组织的这种特性采用频差成像对肌肉进行成像^[18, 21, 26], 参考频率设为 $f_0=650$ Hz, 成像目标频率设为 $f_1=1300$ Hz^[14, 27]。实验分为对照组与实验组, 对照组样本不注入脂肪乳化液, 实验组分为两类干预强度: 实验组1向 M_4 隔室及 M_1 、 M_4 隔室分别注入 1 ml 脂肪乳化液; 实验组2向相同部位分别注入 2 ml 脂肪乳化液。通过多路复用器快速切换电极对组合, 实现高效数据采集。

Teixeira 等^[28] 的研究表明猪肉的内脂率与灰度值大小成正相关 ($R^2=0.999$): 内脂率越大, 对应的灰度值越大, 这说明可通过灰度值表示动物实验样本的内脂率^[29]。为进一步验证 Φ EIT 重建图像与实际组织脂肪分布的一致性, 实验同时拍摄实物照片, 并计算图像的灰度值 $Gray$, 灰度值计算公式如下:

$$Gray = 0.299R + 0.587G + 0.114B \quad (8)$$

其中, R 、 G 、 B 分别为红、绿、蓝三通道色值^[27]。灰度值由商用图像分析软件 (Photoshop, 2022,

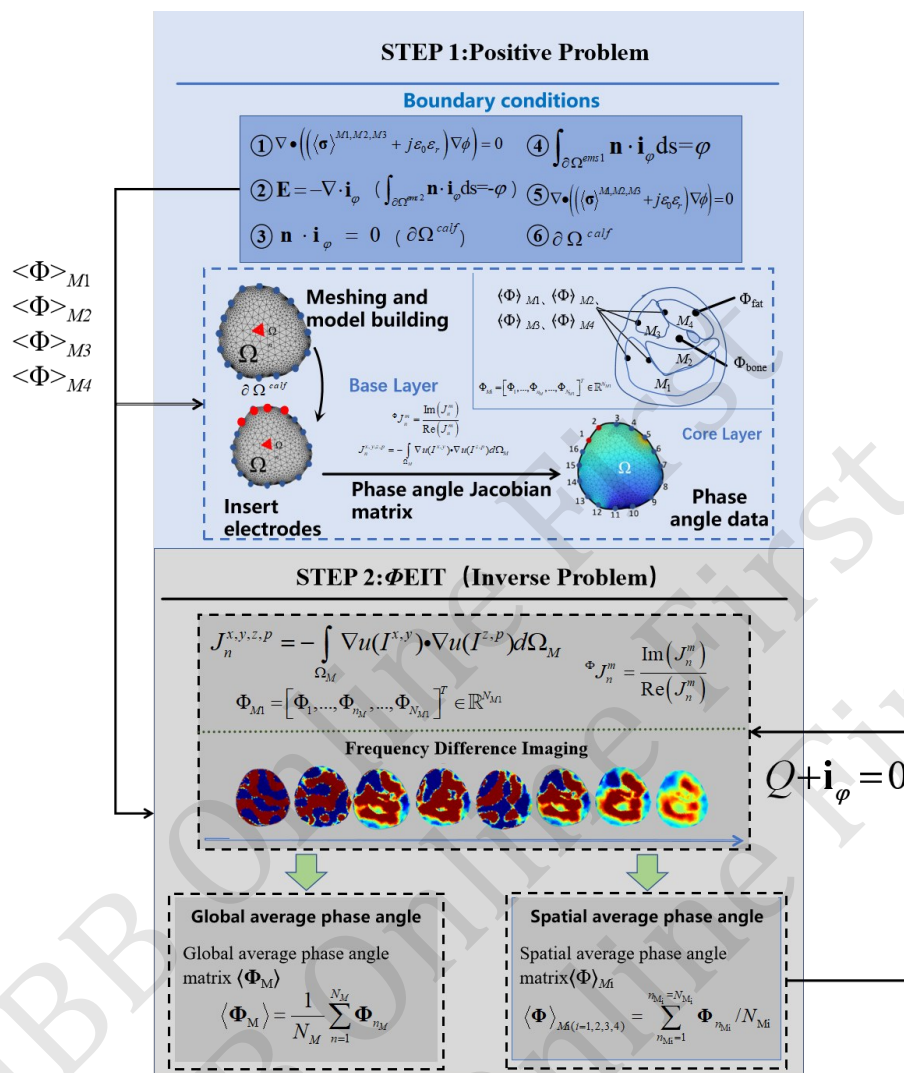
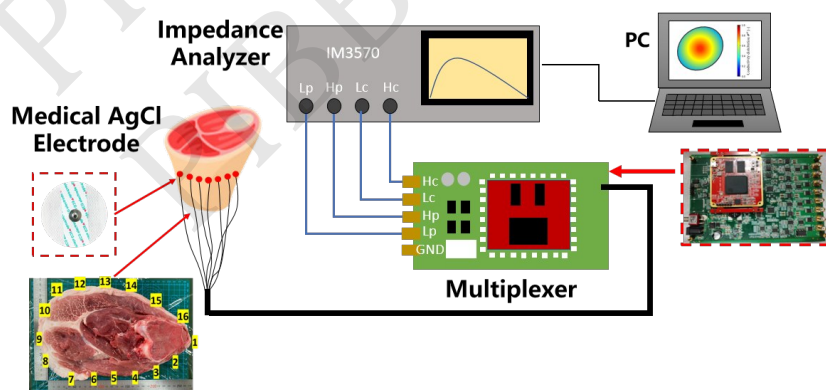
Fig. 2 Algorithm flowchart of Φ EIT

Fig. 3 Laboratory pork model test platform

USA,) 提取。

相较于其他重建方法, 高斯-牛顿法在处理非

线性和病态问题方面具有优势^[23, 30], 因此本研究选择高斯-牛顿法为 Φ EIT 的迭代方法。图 4a 显示

了实验现场拍摄的带骨猪腿肉模型实物图像, 图 4b 是实验现场拍摄的带骨猪腿肉模型实物图像的灰度值图像, 4 个肌肉隔室的灰度值 $Gray_{p_i}$ 关系为 $Gray_{p_1} > Gray_{p_2} > Gray_{p_3} > Gray_{p_4}$, 表明 4 个肌肉隔室的内脂肪率 P 关系为 $P_1 > P_2 > P_3 > P_4$ 。图 4c 是

Φ EIT 重建图像, 4 个肌肉隔室空间平均相位角 Φ_{p_i} 的顺序为 $\Phi_{p_1} < \Phi_{p_2} < \Phi_{p_3} < \Phi_{p_4}$ 。由图 4 可以看出, 随着 P 的下降, Φ_{p_i} 增加, 表明了 Φ EIT 方法对肌肉隔室 (局部肌肉) 内脂肪率变化敏感。

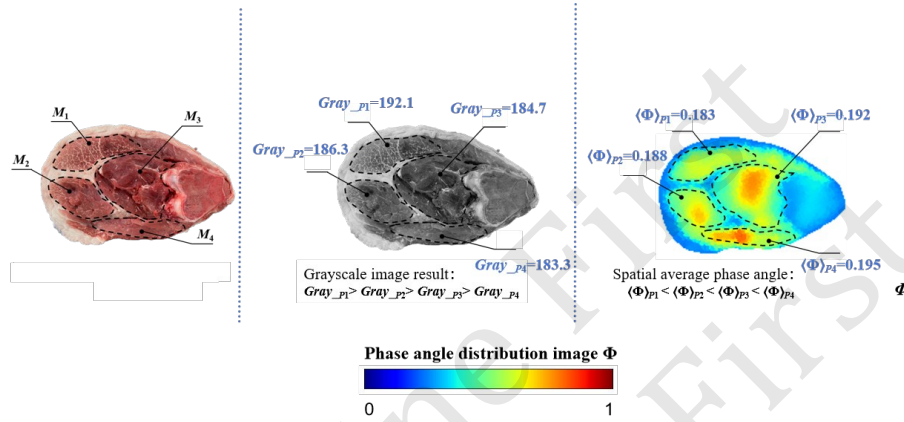


Fig. 4 Comparison results of physical image, grayscale image and Φ EIT image

(a) Physical image. (b) Grayscale image. (c) Gauss-Newton Φ EIT image.

图 5 显示了脂肪乳化液注入前后实物灰度值图与 Φ EIT 图像重建结果的变化情况。当仅向 M_1 隔室注入脂肪乳化液时, 实验组 1 的全局平均相位角 Φ_M 从初始的 0.194 减小至 0.186, 实物灰度值由 183.6 增加至 196.35; 实验组 2 中, Φ_M 从初始的 0.194 减小至 0.181, 灰度值由 183.6 增加至 198.9。当同时向 M_1 隔室和 M_4 隔室注入脂肪乳化液时, 实

验组 1 的 Φ_M 从初始的 0.194 减小至 0.176, 灰度值由 183.6 增加至 198.9; 实验组 2 中, Φ_M 从初始的 0.194 减小到 0.172, 灰度值由 183.6 增加至 201.45。总体来看, 全局平均相位角 Φ_M 随着脂肪乳化液注入量的增加而减小, 这一结果验证了 Φ EIT 方法在肌肉整体脂肪浸润检测中的有效性和敏感性。

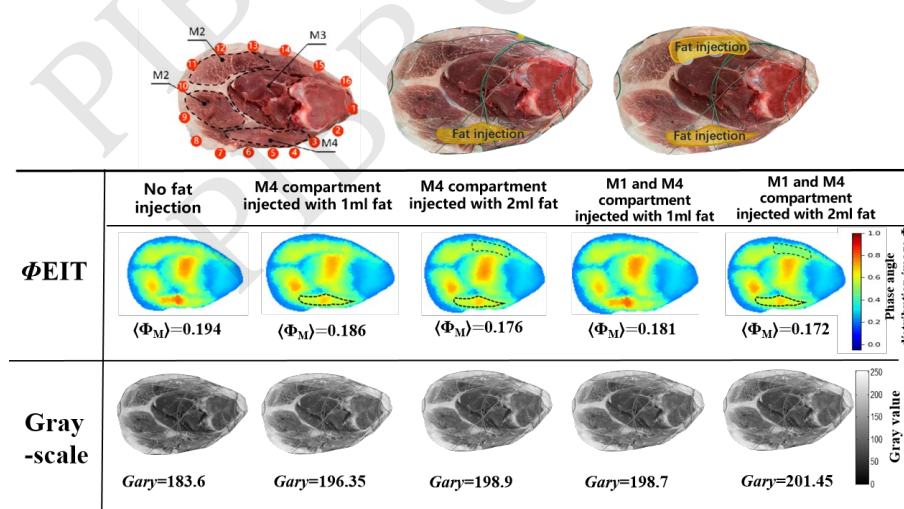


Fig. 5 Grayscale image and Φ EIT image before and after fat injection

2 人体实验

2.1 实验设计与流程

在实验室猪肉模型实验中， Φ EIT方法已初步验证了其检测脂肪浸润的可行性。为进一步评估其在人类肌肉组织中的应用潜力，本研究在健康受试者中进行了 Φ EIT成像实验。根据中国康复研究中心人体实验伦理道德规范，所有受试者在获得详细解释后，均已签署研究的书面知情同意书，已了解参与有关的目的、潜在利益和风险。所有研究程序均根据《赫尔辛基宣言》和中国康复研究中心科研项目伦理道德规范执行，并得到中国康复研究中心

医学伦理委员会的批准（JNUKY-2022-005）。本次实验共招募16名健康成年男性（年龄（25±5）岁，身高（172.5±6.5）cm，BMI（32.2±10.4）kg/m²），无任何肌肉骨骼或神经系统疾病史，并近3个月内未进行额外的肌肉训练或剧烈运动。文献[12]表明，因为肌肉脂肪含量在成年人中因代谢状态和生活方式（如肥胖、活动少）而在25岁时开始出现脂肪浸润现象，因此本研究以年龄作为实验组的划分依据：实验组1（20~25岁）和实验组2（26~30岁），每组按右腿脂肪含量百分比从低到高对受试者进行编号（1~8）。受试人员的基本信息如表1和表2所示。

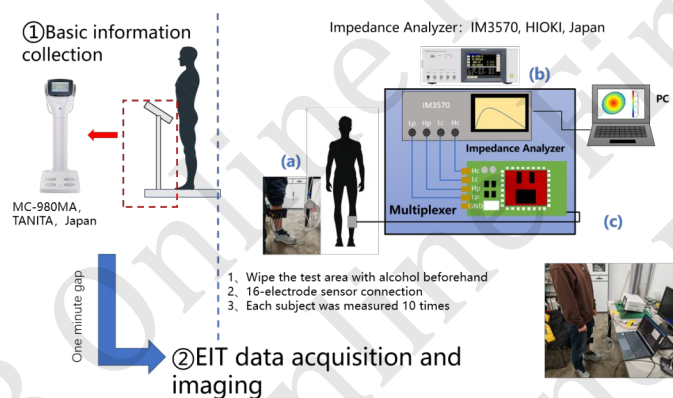


Fig. 6 Experimental procedures

实验前，使用人体成分分析仪（MC-980MA，TANITA，Japan）对受试者进行生物电阻抗分析，测量受试者左右腿的脂肪率。实验过程中，受试者按编号顺序依次进行测试，测试前先用酒精擦拭小腿皮肤以降低接触阻抗，随后佩戴16电极可穿戴传感器阵列，传感器经多路复用器与阻抗分析仪连接，进行数据采集。每位受试者的每条腿重复测量10次并取均值，以提高数据稳定性。

2.2 实验结果

2.2.1 Φ EIT图像重建结果

图7显示了基于相位角电阻抗成像（ Φ EIT）重建的16位健康受试者的相位角分布图像结果（ Φ ），其中每组受试者依据BIA测量的右腿脂肪含量百分比 η_{fat} （详见表1和表2）从低到高排序。 Φ EIT图像通过颜色来区分的小腿不同组织归一化后的重建结果，其中红色代表相位角较高的区域，绿色表示相位角中等区域，蓝色表示相位角较低区域。图7表明， Φ EIT图像重建结果有效地反映了

Table 1 Basic data of group 1

	Hight/ cm	Weight/kg	BMI/ (kg· m ⁻²)	Left leg fat proportion	Right leg fat proportion	Age/ year
1	164	52.8	19.6	19.70%	19.90%	21
2	175	72.5	23.7	24.10%	22.50%	22
3	170	80	27.7	23.50%	23.90%	22
4	176	54	17.4	23.70%	24.10%	21
5	176	79.6	25.7	24.80%	24.20%	24
6	178	70.3	22.6	24.70%	25.30%	23
7	163	80.1	30.1	25.40%	26.10%	24
8	165	79.2	29.1	28.30%	28.90%	21

小腿肌肉隔室的分布及空间位置，且左右腿的肌肉分布与图1的解剖结构保持一致。在实验组1中，受试者7和8的图像呈现较浅的颜色（偏向绿色和蓝色），实验组2中，受试者6、7和8同样显示出类似现象，这些颜色较浅的图像对应的 η_{fat} 均超过28%，然而，同在 $\eta_{fat} < 28\%$ 或 $\eta_{fat} > 28\%$ 的图像中，相位角分布的差异并不显著。

Table 2 Basic data of group 2

	Hight/ cm	Weight/kg	BMI/ (kg· m ⁻²)	Left leg fat proportion	Right leg fat proportion	Age/ year
1	176	70	22.6	23.40%	23.90%	25
2	175	72.5	23.7	23.80%	24.10%	26
3	178	79.2	25.0	24.50%	24.20%	27
4	176	79.6	25.7	24.80%	24.90%	28
5	172	67	22.7	25.50%	25.30%	27
6	178	80	25.3	27.50%	26.80%	26
7	163	80.1	30.1	28.60%	29.50%	29
8	178	81.4	25.2	29.60%	29.60%	26

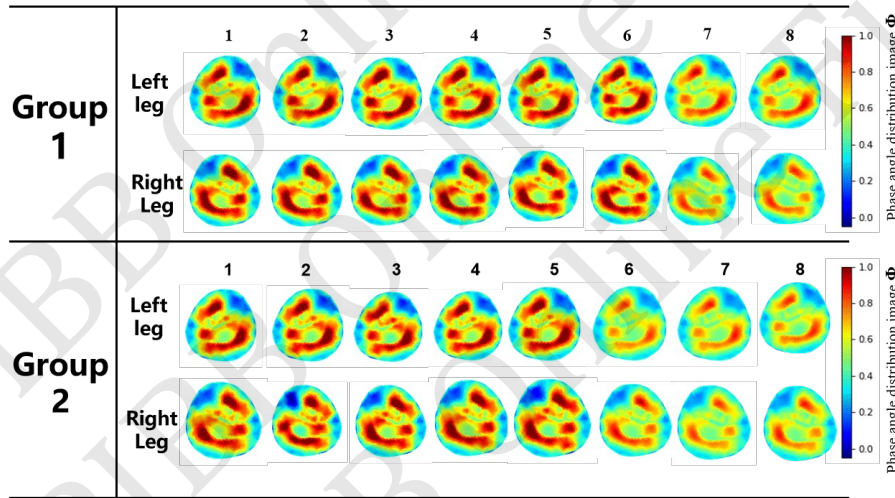
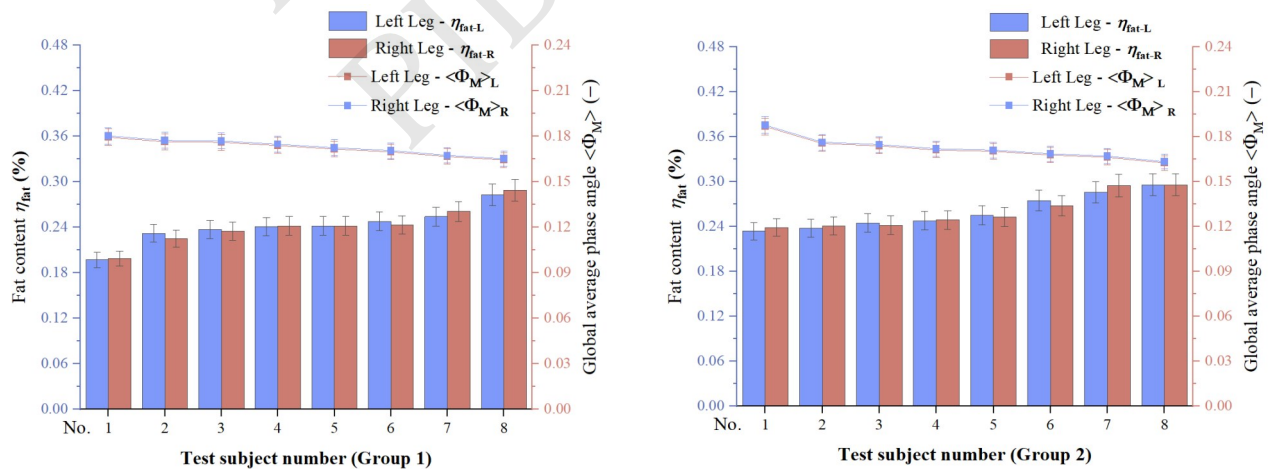
2.2.2 脂肪浸润对全局平均相位角的影响

本研究用全局平均相位角 Φ_M 量化 Φ EIT 图像与脂肪含量百分比 η_{fat} 的关系, 以说明脂肪浸润对整体肌肉性质的影响。实验组 1 和实验组 2 左右腿的

全局平均相位角 Φ_M 与 η_{fat} 的关系如图 8 所示。

图 8 中 Φ_{M-L} 代表每个实验组的左腿全局平均相位角, Φ_{M-R} 代表每个实验组右腿全局平均相位角, 图 8a 为实验组 1 脂肪含量百分比 η_{fat} (%) 和全局平均相位角 Φ_M 的实验结果, 图 8b 为实验组 2 的 η_{fat} 和 Φ_M 的实验结果。图 8a 和图 8b 中的横轴为受试人员编号 (test subject number), 左侧纵轴 1 为 η_{fat} , 右侧纵轴 2 为 Φ_M ; 红色柱状图代表左腿脂肪含量百分比 η_{fat-L} , 蓝色的柱状图代表右腿数据脂肪含量百分比 η_{fat-R} ; 红色点图代表左腿的全局平均相位角结果 Φ_{M-L} , 蓝色点图代表右腿的全局平均相位角结果 Φ_{M-R} 。

结合表 1、2、图 8a 和图 8b 可以得到, 同实验组左右腿的 η_{fat-L} 和 η_{fat-R} 差异在 5% 以内, 每组 Φ_{M-L} 和 Φ_{M-R} 曲线几乎重合, 表明同实验组中左右腿的 Φ_M 区别不明显; Φ_{M-L} 和 Φ_{M-R} 都随 η_{fat} 的增加而下降,

**Fig.7 Φ EIT test results of the left and right legs****Fig. 8 Results of average phase angle and fat content**

(a) Experimental results of group 1. (b) Experimental results of group 2.

表明脂肪浸润越严重, Φ_M 越小。

2.2.3 脂肪浸润对肌肉隔室空间平均相位角的影响

图8结果表明脂肪含量百分比 η_{fat} 与全局平均相位角 Φ_M 呈负相关, 为进一步分析脂肪浸润程度相同时局部肌肉的肌肉性质变化, 本研究用肌肉空间平均相位角 Φ_{M_i} 对肌肉隔室肌肉性质进行量化, 选择脂肪含量百分比相近的4个数据组 (Data Set) 分析 Φ_{M_i} : Data Set 1 (实验组1的受试者3号和实

验组2的受试者1号, $\eta_{\text{fat}}=23.9\%$), Data Set 2 (实验组1的受试者4号和实验组2的受试者2号, $\eta_{\text{fat}}=24.1\%$)、Data Set 3 (实验组1的受试者5号和实验组2的受试者3号, $\eta_{\text{fat}}=24.2\%$) 以及 Data Set 4 (实验组1的受试者6号和实验组2的受试者3号, $\eta_{\text{fat}}=25.3\%$), 4个数据组的结果依次如图9a~d所示。

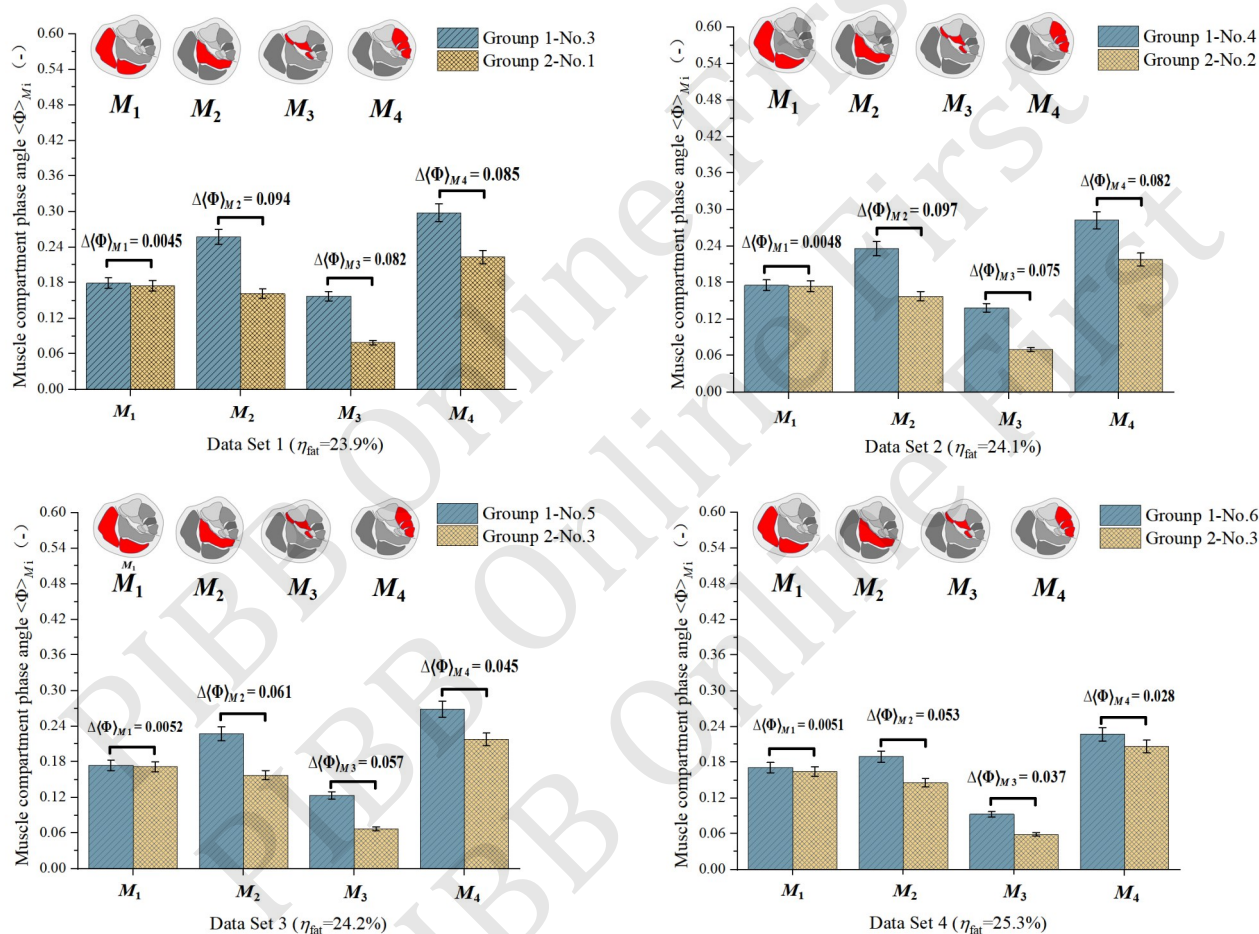


Fig. 9 The average phase angle of muscle compartments (M_1-M_4) varies with fat content

(a) Data Set 1. (b) Data Set 2. (c) Data Set 3. (d) Data Set 4.

在图9a~d中, 横轴为上文提到的4个数据组 (Data Set 1 ~ Data Set 4) 的4个肌肉隔室 ($M_1 \sim M_4$), 纵坐标为对应的每个数据组对应的4个肌肉隔室空间平均相位角 Φ_{M_i} , 即 Φ_{M_1} 、 Φ_{M_2} 、 Φ_{M_3} 和 Φ_{M_4} 。青蓝色柱状图为实验组1的 Φ_{M_i} 结果, 橙色柱状图为实验组2的 Φ_{M_i} 结果。从图9a~d中可以得到, 两个实验组在 M_1 隔室的肌肉隔室空间平均相位角 Φ_{M_1} 差异 $\Delta\Phi_{M_1}$ 不明显 ($\Delta\Phi_{M_1} < 0.01$), 表明脂肪

浸润程度引起的相位角变化在 M_1 隔室中现象不明显, 但是两个实验组在 M_2 隔室的肌肉隔室空间平均相位角 Φ_{M_2} 差异比较显著 ($0.05 < \Delta\Phi_{M_2} < 0.12$), 在 Φ_{M_3} 和 Φ_{M_4} 存在较大差异 ($0.03 < \Delta\Phi_{M_3} < 0.09$, $0.02 < \Delta\Phi_{M_4} < 0.09$), 表明脂肪浸润程度引起的相位角变化在 M_2 、 M_3 和 M_4 隔室中都比较明显, 并且在 M_2 隔室中脂肪浸润的影响最大。

3 讨论

一般来说, 肌肉相位角作为反映肌肉组织电学特性的关键指标, 主要受细胞膜电学性质、细胞内水分含量及肌纤维再生速度的综合影响^[4, 13-14]。细胞膜的电学性质(如膜电容和其完整性)对虚部电抗具有重要作用, 膜结构受损或膜电容下降会减小相位角; 细胞内水分含量的变化直接影响组织的阻抗, 水分减少会导致阻抗升高, 从而降低相位角^[13]; 肌纤维的再生速度决定了肌肉组织的修复与维持能力, 再生能力较强的肌肉能够更好抵抗退化, 维持较高的相位角, 而再生速度减缓则加剧相位角下降^[14]。这3个因素相互作用, 共同驱动肌肉相位角的变化。

本研究结果表明, 随着脂肪含量百分比 η_{fat} 的增加, 全局平均相位角 Φ_M 和肌肉隔室空间平均相位角 Φ_{M_i} 均呈下降趋势。这是由于脂肪浸润对肌肉的导电性能和肌纤维的影响导致的。肌肉的导电性能可以通过图10所示的肌肉的等效电路模型中来

说明, 图10中, 等效电阻 R_e 对应于实部电阻 R , 反映电流通过组织时的阻力, 由和肌纤维细胞外液导电能力有关的细胞外液等效电阻(R_{ECW}), 以及反映细胞内液导电能力的细胞内液等效电阻(R_{ICW})组成; 等效容抗 X_c 代表虚部电抗 X , 与肌纤维细胞膜的电容特性及组织的极化能力相关。相位角的公式为 $\Phi = \arctan(X/R)$, 其中 R 为实部电阻, X 为虚部电抗, 脂肪浸润导致 R 增大而 X 减小, 从而使相位角减小。脂肪组织作为非导电成分, 会增加电流路径的长度和复杂性, 从而增大等效电阻 R_e 。同时由于脂肪分子非极化的特性, 其对交流电场的响应能力降低, 导致 X_c 减小^[13, 31-32]。在肌纤维方面, 脂肪浸润对肌纤维间的结构会产生影响, 例如增大肌纤维的细胞间隙或减少细胞内水分含量, 进一步削弱组织的电导率和电容响应能力。并且随着年龄的增大肌纤维的再生速度逐年减缓, 肌纤维对脂肪浸润的抵抗能力降低, 导致肌肉横截面积和力量逐年下降^[28], 这些因素共同导致了相位角 Φ 的降低。

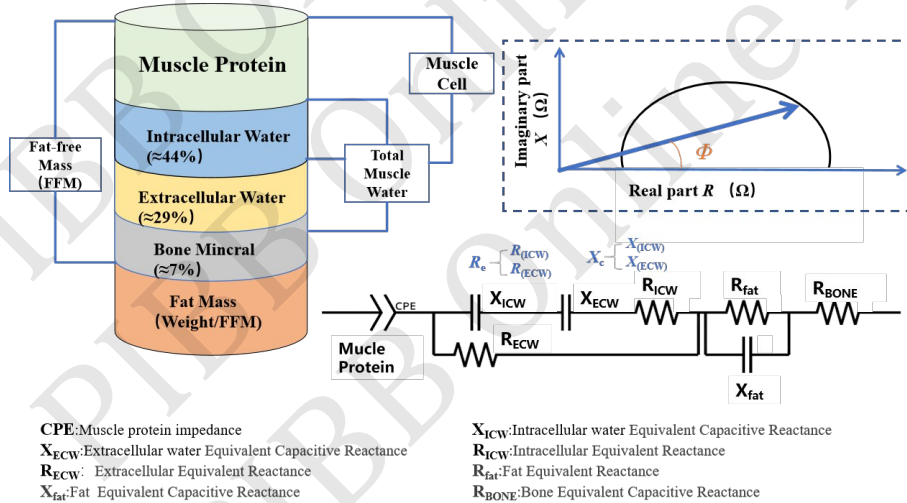


Fig. 10 Diagram of the muscle compartments and phase angle

从图8的结果来看, 两个实验组的全局平均相位角 Φ_M 的均随 η_{fat} 的增加而降低, 然而, 图9表明, η_{fat} 相同即脂肪浸润程度相近时, 两个实验组在 M_1 隔室(腓肠肌)的平均相位角 Φ_{M_1} 差异不明显($\Delta\Phi_{M_1} < 0.01$)。原因在于, M_1 对应的腓肠肌是浅层肌肉, 受到日常锻炼的影响比较大, 其纤维结构和功能较易维持, 从而在一定程度上能降低脂肪浸润的影响^[12, 33]。相比之下, 在 M_2 (代表深层肌肉)中, 两个实验组的 Φ_{M_2} 表现出的差异更显著

($0.05 < \Delta\Phi_{M_2} < 0.12$), 实验组1的 Φ_{M_2} 比实验组2的更高, 这可归因于脂肪浸润对肌肉的负面影响: 肌肉内脂肪的增加会降低肌肉质量, 而实验组1(年龄较小组)由于肌纤维再生速度较快^[28], 能更有效地抵抗脂肪浸润, 维持较高的肌肉质量和功能, 因此实验组1在深层肌肉中表现出更高的阻抗和相位角^[4, 14], 表明年轻的肌肉不仅对脂肪浸润更敏感, 还能更好的抵抗脂肪浸润的影响。

进一步分析表明, 实验室猪肉模型实验的结果

验证了 Φ EIT算法对脂肪浸润的高敏感性,能够有效检测到脂肪含量百分比变化引起的电学特性变化。在人体实验中, η_{fat} 越高,脂肪浸润程度越大, Φ_M 与 Φ_{M_i} 越小,特别是深层肌肉(如 M_2 隔室)对脂肪浸润的敏感性更高,表现出更显著的相位角下降。人体实验的结果进一步表明,本研究所开发的 Φ EIT算法不仅可以通过全局平均相位角 Φ_M 表征脂肪浸润对整个肌肉组织的综合影响,也能通过肌肉隔室空间平均相位角 Φ_{M_i} 表征脂肪浸润对不同深度、不同大小及不同位置的局部肌肉组织的特定影响。

综上所述,本研究通过实验室猪肉模型和人体实验验证了脂肪浸润对肌肉电学特性的显著影响,并确认了 Φ EIT算法在检测脂肪含量变化中的高敏感性和可靠性。实验结果表明,脂肪浸润程度与相位角呈负相关,深层肌肉对脂肪浸润的响应更为显著,而年轻肌肉因其较强的再生能力,能够更好地抵抗脂肪浸润的影响。这些发现不仅为基于电学特性的脂肪率评估提供了坚实的理论和实验依据,还突出证明了 Φ EIT算法在局部肌肉质量监测及早期无创诊断中的应用潜力。该算法通过全局和局部相位角分析,能够精准表征脂肪浸润对不同肌肉隔室的影响,为肌肉质量监测和相关疾病的早期诊断提供了高效、非侵入性的技术手段。

4 结论

本研究提出的基于 Φ EIT的方法,能够无创评估浅层与深层肌肉的脂肪浸润程度。与传统的EIT方法相比, Φ EIT方法能够通过全局平均相位角 Φ_M 和肌肉隔室空间平均相位角 Φ_{M_i} ,定量表征脂肪浸润对肌肉组织电学特性的影响,为脂肪浸润的基础研究及临床干预提供了一种快速、非侵入式的评估手段。

a. 本研究开发了一种 Φ EIT图像重建算法,首先构建肌肉组织的相位角雅可比矩阵,并基于该矩阵完成 Φ EIT图像重建。以小腿肌肉为研究对象,将其划分为四个肌肉隔室($M_1 \sim M_4$),结合16电极传感器采集的阻抗数据实现图像重建。实验室猪肉模型实验表明, Φ EIT图像能够准确反映目标肌肉的电学特性变化,且图像灰度值规律与全局平均相位角高度规律一致,验证了 Φ EIT方法在脂肪浸润检测中的有效性和敏感性。

b. 通过设计两组不同年龄段的人体实验,系统分析了脂肪含量百分比 η_{fat} 与全局平均相位角 Φ_M 的

关系。结果显示, η_{fat} 越高, Φ_M 越小,二者呈负相关关系。这主要归因于脂肪浸润导致肌肉组织等效电阻 R_e 增加、等效容抗 X_c 减小,从而使相位角 Φ 减小。

c. 在脂肪含量百分比 η_{fat} 相近的受试者中,肌肉隔室空间平均相位角 Φ_{M_i} 的分析进一步揭示了 Φ EIT方法的局部识别能力。 η_{fat} 相同时,两个实验组除 M_1 (腓肠肌)隔室的肌肉隔室空间平均相位角 Φ_{M_1} 差异不明显外, M_2 (比目鱼肌)、 M_3 (胫骨后肌与趾长屈肌)、 M_4 (胫骨前肌、趾长伸肌与腓骨长肌)隔室的空间平均相位角(Φ_{M_2} 、 Φ_{M_3} 、 Φ_{M_4})差异都比较显著,其中 M_2 隔室最为显著($0.05 < \Delta \Phi_{M_2} < 0.12$)。这表明深层肌肉对脂肪浸润的敏感性更高,而腓肠肌作为浅层肌肉因日常锻炼较多,受脂肪浸润影响较小。上述结果充分验证了 Φ EIT方法在区分不同深度、不同大小及不同结构肌肉区域的脂肪浸润程度方面的优异性能,为肌肉功能障碍的早期检测和临床精细化干预提供了重要技术支撑。

参考文献

- [1] Koliaki C, Liatis S, Dalamaga M, *et al.* Sarcopenic obesity: epidemiologic evidence, pathophysiology, and therapeutic perspectives. *Curr Obes Rep*, 2019, **8**(4): 458-471
- [2] Samagh S P, Kramer E J, Melkus G, *et al.* MRI quantification of fatty infiltration and muscle atrophy in a mouse model of rotator cuff tears. *J Orthop Res*, 2013, **31**(3): 421-426
- [3] Biltz N K, Collins K H, Shen K C, *et al.* Infiltration of intramuscular adipose tissue impairs skeletal muscle contraction. *J Physiol*, 2020, **598**(13): 2669-2683
- [4] Lee K, Shin Y, Huh J, *et al.* Recent issues on body composition imaging for sarcopenia evaluation. *Korean J Radiol*, 2019, **20**(2): 205-217
- [5] Morrow J M, Evans M R B, Grider T, *et al.* Validation of MRC Centre MRI calf muscle fat fraction protocol as an outcome measure in CMT1A. *Neurology*, 2018, **91**(12): e1125-e1129
- [6] Li C W, Yu K, Shyh-Chang N, *et al.* Pathogenesis of sarcopenia and the relationship with fat mass: descriptive review. *J Cachexia Sarcopenia Muscle*, 2022, **13**(2): 781-794
- [7] McGregor R A, Cameron-Smith D, Poppitt S D. It is not just muscle mass: a review of muscle quality, composition and metabolism during ageing as determinants of muscle function and mobility in later life. *Longev Healthspan*, 2014, **3**(1): 9
- [8] Hausman G J, Basu U, Du M, *et al.* Intermuscular and intramuscular adipose tissues: bad vs. good adipose tissues. *Adipocyte*, 2014, **3**(4): 242-255
- [9] Waisman A, Norris A M, Elias Costa M, *et al.* Automatic and unbiased segmentation and quantification of myofibers in skeletal

- muscle. *Sci Rep*, 2021, **11**(1): 11793
- [10] Han G, Jiang Y, Zhang B, *et al.* Imaging evaluation of fat infiltration in paraspinal muscles on MRI: a systematic review with a focus on methodology. *Orthop Surg*, 2021, **13**(4): 1141-1148
- [11] Davis D L, Almardawi R, 3rd R F H, *et al.* Correlation of quantitative versus semiquantitative measures of supraspinatus intramuscular fatty infiltration to shoulder range of motion and strength: a pilot study. *Curr Probl Diagn Radiol*, 2021, **50**(5): 629-636
- [12] Wang L, Valencak T G, Shan T. Fat infiltration in skeletal muscle: influential triggers and regulatory mechanism. *iScience*, 2024, **27**(3): 109221
- [13] Kyle U G, Bosaeus I, De Lorenzo A D, *et al.* Bioelectrical impedance analysis: Part I: review of principles and methods. *Clin Nutr*, 2004, **23**(5): 1226-1243
- [14] Akamatsu Y, Kusakabe T, Arai H, *et al.* Phase angle from bioelectrical impedance analysis is a useful indicator of muscle quality. *J Cachexia Sarcopenia Muscle*, 2022, **13**(1): 180-189
- [15] Hospital K M S, Takao N, Toshimasa K, *et al.* Effectiveness of Impedance Parameters for Muscle Quality Evaluation in Healthy Men. *Journal of Physiological Sciences*, 2020, **70**(1): 1-9
- [16] Uemura K, Yamada M, Okamoto H. Association of bioimpedance phase angle and prospective falls in older adults. *Geriatr Gerontol Int*, 2019, **19**(6): 503-507
- [17] Wu H, Ding PA, Wu J, *et al.* Phase angle derived from bioelectrical impedance analysis as a marker for predicting sarcopenia. *Front Nutr*, 2022, **9**: 1060224
- [18] Di Vincenzo O, Marra M, Scalfi L. Bioelectrical impedance phase angle in sport: a systematic review. *J Int Soc Sports Nutr*, 2019, **16**(1): 49
- [19] Cirillo E, Pompeo A, Cirillo F T, *et al.* Relationship between bioelectrical impedance phase angle and upper and lower limb muscle strength in athletes from several sports: a systematic review with meta-analysis. *Sports (Basel)*, 2023, **11**(5): 107
- [20] 孙博, Prima Asmara Sejati, 姚佳烽. 人类小腿肌肉对运动训练生理响应的电学特性研究. *生物化学与生物物理进展*, 2023, **50**(3): 595-605
- Sun B, Sejati P, Yao J F. *Prog Biochem Biophys*, 2023, **50**(3): 595-605
- [21] 孙博, Panji Nursetia Darma, 张全成, 等. 神经肌肉电刺激下小腿肌肉的电学特性研究. *生物化学与生物物理进展*, 2023, **50**(6): 1443-1453
- Sun B, Darma P, Zhang Q C, *et al.* *Prog Biochem Biophys*, 2023, **50**(6): 1443-1453
- [22] Baby L Y, Shehayib R, Maalouf N. MUSCLE: muscle understanding through synthetic computation and lesion evaluation a semi-synthetic dataset for hamstring injury prediction using electrical impedance. *medRxiv*. 2024:2024-11
- [23] Clark B C, Rutkove S, Lupton E C, *et al.* Potential utility of electrical impedance myography in evaluating age-related skeletal muscle function deficits. *Front Physiol*, 2021, **12**: 666964
- [24] Guo J, Zhuang B, Li R, *et al.* EIT probe based intraoperative tissue inspection for minimally invasive surgery. *Meas Sci Technol*, 2024, **35**(10): 105119
- [25] Wu Y, Hanzaee F F, Jiang D, *et al.* Electrical impedance tomography for biomedical applications: circuits and systems review. *IEEE Open J Circuits Syst*, 2021, **2**: 380-397
- [26] Sato H, Nakamura T, Kusuhara T, *et al.* Effectiveness of impedance parameters for muscle quality evaluation in healthy men. *J Physiol Sci*, 2020, **70**(1): 53
- [27] Pratt W K. *Digital Image Processing: PIKS Scientific Inside*. Hoboken, NJ: Wiley, 2007: 100-150
- [28] Teixeira A, Silva S R, Hasse M, *et al.* Intramuscular fat prediction using color and image analysis of Bísaro pork breed. *Foods*, 2021, **10**(1): 143
- [29] Liu J H, Sun X, Young J M, *et al.* Predicting pork loin intramuscular fat using computer vision system. *Meat Sci*, 2018, **143**: 18-23
- [30] Mansouri S, Alharbi Y, Haddad F, *et al.* Electrical impedance tomography - recent applications and developments. *J Electr Bioimpedance*, 2021, **12**(1): 50-62
- [31] 姚佳烽, 万建芬, 杨璐, 等. 基于生物阻抗谱的细胞电学特性研究. *物理学报*, 2020, **69**(16): 90-97
- Yao J F, Wan J F, Yang L, *et al.* *Acta Phys Sin*, 2020, **69**(16): 90-97
- [32] 姚佳烽, 姜祝鹏, 赵桐, 等. 多电极阵列微流控芯片内细胞介电泳运动分析. *分析化学*, 2019, **47**(2): 221-228
- Yao J F, Jiang Z P, Zhao T, *et al.* *Chin J Anal Chem*, 2019, **47**(2): 221-228
- [33] Hatzantonis C, Satkunam L, Rabey K N, *et al.* Fatty infiltration of gastrocnemius-soleus muscle complex: Considerations for myosteatosis rehabilitation. *J Anat*, 2024, **245**(1): 50-57

Study on The Detection Method of Fat Infiltration in Muscle Tissue Based on Phase Angle Electrical Impedance Tomography*

XIAO Wu-Guang¹⁾, ZHU Xiao-Peng¹⁾, FENG Hui^{2)**}, SUN Bo^{1,4)}, ZHAO Tong¹⁾, YAO Jia-Feng³⁾

¹⁾School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

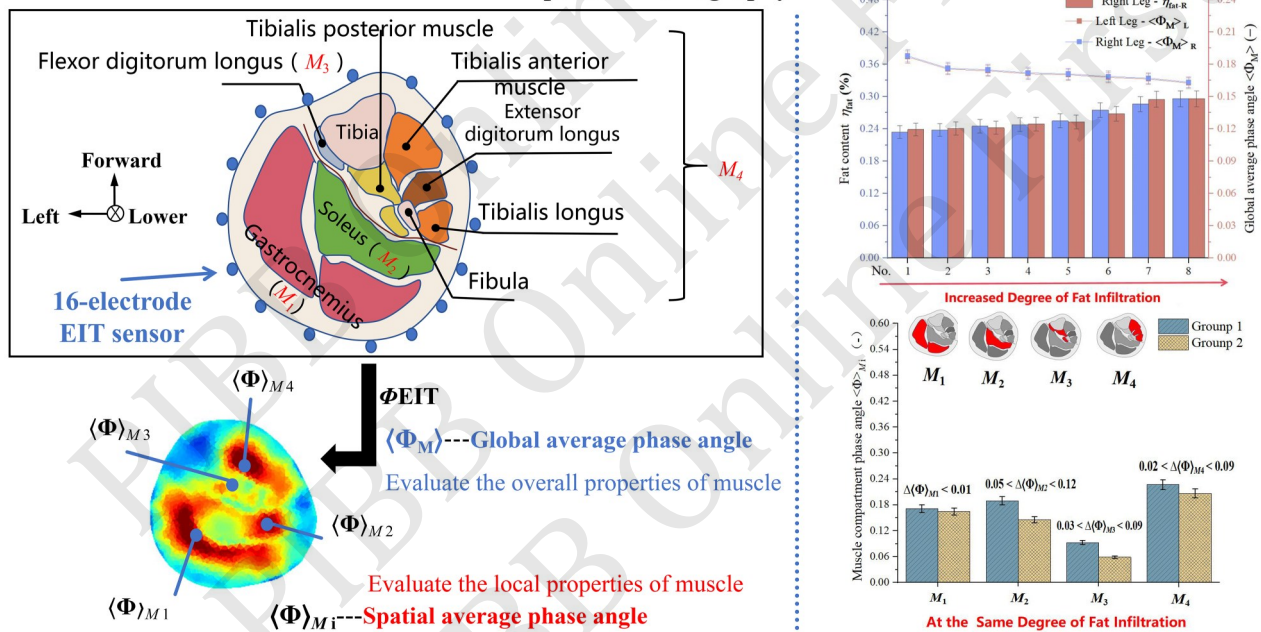
²⁾Department of Rehabilitation Medicine, Jiangning Hospital Affiliated to Nanjing Medical University, Nanjing 211100, China;

³⁾College of Physics & Optoelectronic Engineering, Jinan University, Guangzhou 510632, China;

⁴⁾Department of Mechanical Engineering, Chiba University, Chiba 263-0022, Japan)

Graphical abstract

Study on The Detection Method of Fat Infiltration in Muscle Tissue Based on Phase Angle Electrical Impedance Tomography



Abstract Objective Fat infiltration has been shown to be closely related to muscle mass loss and a variety of muscle diseases. This study proposes a method based on phase-angle electrical impedance tomography (Φ EIT) to visualize the electrical characteristic response caused by muscle fat infiltration, aiming to provide a new technical means for early non-invasive detection of muscle mass deterioration. **Methods** This study was divided into two parts. First, a laboratory pork model was constructed to simulate different degrees of fat infiltration by injecting 1 ml or 2 ml of emulsified fat solution into different muscle compartments, and the phase angle images were reconstructed using Φ EIT. Second, a human experiment was conducted to recruit healthy subjects ($n=8$) from two age groups (20 – 25 years old and 26 – 30 years old). The fat content percentage η_{fat} of the left and right legs was measured by bioelectrical impedance analysis (BIA), and the phase angle images of the left and right calves were reconstructed using Φ EIT. The relationship between the global average phase angle Φ_M and the spatial average phase angle Φ_{Mi} of each muscle compartment and fat infiltration was further analyzed. **Results** In the laboratory pork model, the grayscale value of the image increased with the increase of η_{fat} and Φ_M showed a downward trend.

The results of human experiments showed that at the same fat content percentage, the Φ_M of the 26 – 30-year-old group was about 20% – 35% lower than that of the 20 – 25-year-old group. The fat content percentage was significantly negatively correlated with Φ_M . In addition, the M_2 (soleus) compartment was most sensitive to fat infiltration, and the spatial average phase angles of the M_2 (soleus), M_3 (tibialis posterior and flexor digitorum longus), and M_4 (tibialis anterior, extensor digitorum longus, and peroneus longus) compartments all showed significant inter-group differences. **Conclusion** Φ EIT imaging can effectively distinguish different degrees of fat infiltration, especially in deep, small or specially located muscles, showing high sensitivity, demonstrating the potential application of this method in local muscle mass monitoring and early non-invasive diagnosis.

Key words sarcopenia, fat infiltration, phase angle, electrical impedance tomography (EIT), muscle quality

DOI: 10.3724/j.pibb.2025.0241

CSTR: 32369.14.pibb.20250241

* This work was supported by grants from The Open Research Topics of the Medical-Engineering Integration Laboratory at Nanjing Medical University Affiliated Jiangning Hospital (JNYZXKY202320) and The Key Research and Development Program of Shaanxi (2025GH-YBXM-007).

** Corresponding author.

Tel: 86-13851959264, E-mail: 447173103@qq.com

Received: May 19, 2025 Accepted: June 30, 2025