

MRI拉莫尔频率范围内人体脑胶质瘤组织的介电特性

黄唯¹, 徐中标¹, 邓官华², 吕凤泉¹, 李海南³, 蔡林波², 梁瑜¹

1. 广东省人民医院(广东省医学科学院)放疗科, 广东 广州 510080; 2. 广东三九脑科医院肿瘤综合治疗中心, 广东 广州 510510;
3. 广东三九脑科医院病理科, 广东 广州 510510

【摘要】目的:研究人体脑胶质瘤组织在MRI拉莫尔频率范围内(50~500 MHz)的介电特性,建立人体脑胶质瘤组织介电参数频率谱图,为磁共振断层成像技术提供理论依据和数据参考。**方法:**以神经外科手术中切下的脑胶质瘤组织为标本,在温度为37℃的恒温水箱中,利用开端同轴线法,在50~500 MHz频率范围内使用AV 3656A网络分析仪测量脑胶质瘤组织标本的介电特性。以四阶Cole-Cole模型为基础,利用最小二乘曲线拟合方法,提取人体脑胶质瘤组织的介电特征参数。同时,将实验测得的脑胶质瘤组织介电特性与健康人体组织介电特性数据库中的正常脑组织进行比较。**结果:**在测频率范围内,人体脑胶质瘤组织实测数据与Cole-Cole模型吻合良好,且有人体脑胶质瘤组织的相对介电常数比正常脑组织高29.5%~36.6%,电导率比正常脑组织高56.1%~64.8%。**结论:**本文报道了37℃下人体脑胶质瘤组织在MRI拉莫尔频率范围内(50~500 MHz)的介电特性数据及相应的Cole-Cole模型介电特征参数,可为人体脑胶质瘤组织介电特性研究和磁共振断层成像技术提供基础数据。

【关键词】脑胶质瘤;开端同轴线法;拉莫尔频率;介电特性

【中图分类号】R318.4

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2021)12-1538-06

Dielectric properties of human glioma tissue at Larmor frequencies in MRI

HUANG Wei¹, XU Zhongbiao¹, DENG Guanhua², LÜ Fengquan¹, LI Hainan³, CAI Linbo², LIANG Yu¹

1. Department of Radiation Oncology, Guangdong Provincial People's Hospital, Guangdong Academy of Medical Sciences, Guangzhou 510080, China; 2. Department of Oncology, Guangdong Sanjiu Brain Hospital, Guangzhou 510510, China; 3. Department of Pathology, Guangdong Sanjiu Brain Hospital, Guangzhou 510510, China

Abstract: Objective To investigate the dielectric properties of human glioma tissue at Larmor frequencies in MRI (50-500 MHz) and to establish the dielectric parameter frequency spectrum of human glioma tissue, thereby providing theoretical basis and reference data for magnetic resonance electrical property tomography (MREPT). **Methods** The glioma tissue which was removed from the brain during neurosurgery was taken as specimen. In a thermostatic water container with the temperature controlled at 37 °C, open-ended coaxial line method was used to measure the dielectric properties of human glioma tissue specimen via AV 3656A network analyzer at the frequencies between 50 MHz and 500 MHz. The dielectric characteristic parameters of human glioma tissue were obtained by the least square curve fitting method based on fourth-order Cole-Cole model. Finally, the dielectric properties of glioma tissue which were measured in the experiment were compared with those of normal brain tissue in a healthy human tissue dielectric property database. **Results** The measured data were fit closely with Cole-Cole model at the frequencies. The relative dielectric constant of human glioma tissue was 29.5%-36.6% high than that of the normal tissue; and the conductivity was 56.1%-64.8% higher than that of normal tissue. **Conclusion** The dielectric properties of human glioma tissue are measured at Larmor frequencies in MRI (50-500 MHz) at 37 °C, and the dielectric characteristic parameters of the corresponding Cole-Cole model are also obtained in the study, which provide basic data for the research on the dielectric properties of human glioma tissue and MREPT.

Keywords: glioma tissue; open-ended coaxial line; Larmor frequency; electrical property

【收稿日期】2021-08-21

【基金项目】广东省基础与应用基础研究基金(2019A1515111182);广东省医学科学技术研究基金(A2019315);广东省人民医院自然配套启动资金资助项目(6200010127)

【作者简介】黄唯,工程师,研究方向:肿瘤早期发现及治疗,E-mail: huangwei_0118@163.com

【通信作者】梁瑜,工程师,研究方向:肿瘤放射物理,E-mail: gzyjs_ly@126.com

前言

脑胶质瘤是常见颅内恶性肿瘤,约占原发性脑肿瘤的60%,且其呈浸润性生长,无明显边界^[1]。目前临床上对脑胶质瘤的治疗主要为以手术切除为主,放化疗为辅的综合治疗^[2]。近年来,免疫治疗及基因治疗等新疗法也从基础研究向临床应用转化^[3]。然而,对于脑胶质瘤的治疗并没有取得突破性进展,高级别胶质瘤患者大多在确诊后一年内死亡^[4]。现有的文献表明,人体组织的介电特性在肿瘤组织与正常组织之间存在较大差异^[5-8]。这种由于细胞生理或者病理状态发生改变导致的组织介电特性变化,有可能成为肿瘤早期诊断的有效手段。在MRI频率范围内,人体组织介电特性的研究有了几十年的历史,并且Gabriel等^[9]建成了人体正常组织的介电特性数据库。Surowiec等^[10]利用网络分析仪测量了人体乳腺癌组织在20 kHz~100 MHz范围内的介电特性,并给出了相应的一阶Cole-Cole模型参数。Haemmerich等^[11]在10 Hz~1 MHz范围内,利用四电极法测量了人体肝癌组织的介电特性,结果显示肝癌组织的电导率至少比正常肝组织高80%。王洁然等^[12]利用阻抗分析仪在100 Hz~100 MHz范围内,测量了肺癌组织的介电特性,结果显示肺癌组织的相对介电常数为正常肺组织的3~5倍,电导率为正常肺组织的1.6~3.3倍。Zhou等^[13]利用开端同轴线法在50~500 MHz范围内,测量了人体结直肠癌组织的介电特性,结果显示结直肠癌组织的相对介电常数比正常结直肠组织高14.6%,电导率比正常结直肠组织高17%。然而到目前为止,对于人体脑胶质瘤组织介电特性的数据报道尚很缺乏。磁共振断层成像技术(Magnetic Resonance Electrical Property Tomography, MREPT)是在磁共振成像技术基础上,通过检测反映人体组织介电特性分布的射频场来计算人体组织各处介电特性分布的新型诊断技术^[14]。研究脑胶质瘤组织在MRI频率范围内的介电特性能为MREPT技术提供1.5 T(64 MHz)、3.0 T(128 MHz)、7.0 T(298 MHz)、9.4 T(400 MHz)及11 T(468 MHz)下的脑胶质瘤组织介电特性的比数据库。因此,本文将利用开端同轴线法,在37 °C下,测量人体脑胶质瘤组织在磁共振频率范围内(50~500 MHz)的介电特性,并给出相应的四阶Cole-Cole模型参数,为人体脑胶质瘤组织介电特性研究和MREPT测量提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 测量原理

利用开端同轴线测量组织介电特性时,探头终

端可以用等效电路模型进行分析,如图1所示。其中, C_f 表示为同轴线内部的等效电容, $C(\epsilon_r)$ 表示同轴探头内外导体之间电场在待测组织形成的等效电容。

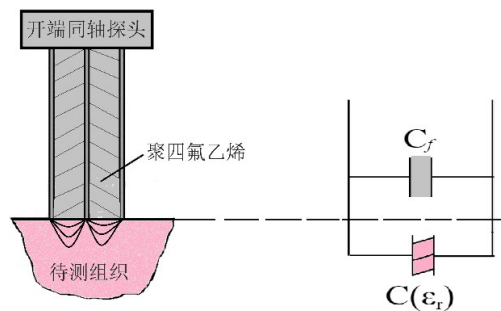


图1 生物组织介电特性值测量示意图

Fig.1 Principle scheme of measurement of dielectric properties of biological tissues

通过分析,可以建立反射系数与待测组织复介电常数 ϵ^* 的关系式^[15-17]:

$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon'' = \frac{A_2 - A_1\rho_m}{\rho_m - A_3} \quad (1)$$

其中, ϵ' 为相对介电常数, ϵ'' 为损耗因子, ρ_m 为测量平面发射系数, ϵ_0 为真空介电常数。 A_1 、 A_2 、 A_3 为测量系数,通过测量开端同轴线在短路(ρ_1)、开路(ρ_2)及去离子水(ρ_3)3种情况下的反射系数来确定:

$$\begin{cases} A_1 = \frac{(\rho_2 - \rho_1) + (\rho_1 - \rho_3)(\epsilon^s - j\frac{\sigma^s}{\omega\epsilon_0})}{\rho_3 - \rho_2} \\ A_2 = \frac{\rho_3(\rho_2 - \rho_1) + \rho_2(\rho_1 - \rho_3)(\epsilon^s - j\frac{\sigma^s}{\omega\epsilon_0})}{\rho_3 - \rho_2} \\ A_3 = \rho_1 \end{cases} \quad (2)$$

1.2 测量系统

本研究采用操作简单,非侵入式且适用于宽频测量的开端同轴线法,该方法在测量过程中只需将探头紧贴待测组织表面,避免了探头插入待测组织内部导致组织内部结构受损引起介电特性值变化的影响。测量系统由便携式网络分析仪(AV 3656A,安捷伦科技有限公司)、半刚性同轴线(UT-086,深圳市泰维诺克科技有限公司)、恒温水箱(HH-1,绍兴市景迈仪器设备有限公司)、电子温度计(Apuhua TM-902,佛山市普联云仪表科技有限公司)组成,笔记本电脑用于控制网络分析仪和数据处理,连接示意图如图2所示。

1.3 校准过程

为了确保开端同轴线法的测量精度,在测量人脑胶质瘤组织介电特性前,需要对测量系统进行参数校准和误差分析。通过测量甲醇(浓度99.8%,国

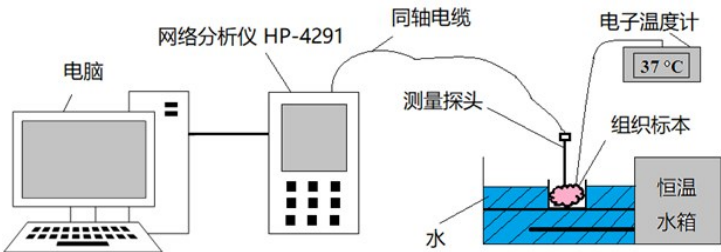


图2 介电特性测量系统
Fig.2 Dielectric properties measurement system

药集团化学试剂有限公司)、乙二醇(浓度 99.5%, 国药集团化学试剂有限公司)、异丙醇(浓度 99.7%, 国药集团化学试剂有限公司)在 50~500 MHz 范围内的介电特性,并与对应温度下(25 ℃)的文献值比较^[18],来分析测量系统的准确性。为了减小实验误差,在校准过程中采取多次测量,测量结果取平均值。

1.4 测量人体脑胶质瘤组织

选取广东三九脑科医院收治的 10 例脑胶质瘤切除手术患者作为研究对象,患者的一般临床资料如表 1 所示。为了保持标本的组织活性,标本切除后马上送往测量中心,所有标本测量要求在 30 min 内完成。标本直径至少为 2 cm,有效厚度约为 1 cm^[19],测量前需要用手术纸将黏附在肿瘤组织表面的血液及组织液擦干净,以免影响测量结果^[20]。为了确保测量组织介电特性的精确性,在兼顾组织标本大小及有效厚度的情况下,采用特征阻抗为 50 Ω,外径为 2.2 mm 的半刚性开端同轴线探头,同轴线内部以聚四氟乙烯填充,以防止被测组织的水份渗入缝隙引起测量误差^[21]。此外,对测量探头表面进行镀银处理,以避免探头与组织液发生电解反应。同时为了保持被测量离体组织的温度接近于在体状态(37 ℃),实验测量主要在温度为 37 ℃ 的恒温水箱中进行,通过恒温水箱来保持组织温度,如图 2 所示。

1.5 数据处理

为了便于相关研究人员快速得到 50~500 MHz 范围内任意一点脑胶质瘤组织的介电特性,本实验将离散频率点的介电特性转换为连续频率的介电特性。为了提高拟合精度,对测量数据进行了四阶的 Cole-Cole 经验公式拟合^[22]:

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon'(\omega) - j\varepsilon''(\omega) = \varepsilon_\infty + \sum_{n=1}^4 \frac{\Delta\varepsilon_n}{1 + (j\omega\tau_n)^{1-a_n}} + \frac{\sigma_i}{j\omega\varepsilon_0}$$

(5)

其中 ω 为角频率; $\varepsilon^*(\omega)$ 为与频率相关的组织复介电常数; $\varepsilon'(\omega)$ 为与频率相关的组织相对介电常数, $\varepsilon''(\omega)$ 为与频率相关的损耗因子; ε_∞ 、 σ_i 、 $\Delta\varepsilon_n$ 、 τ_n 、 a_n 、 $\Delta\varepsilon_n$ 、 τ_n 、 a_n ($n=1, 2, 3, 4$) 为四阶 Cole-Cole 拟合参数。

表 1 病人临床资料

Tab.1 Clinical data of patients

序号	性别	年龄/岁	病理诊断	患病部位
1	男	62	胶质母细胞瘤 WHO IV 级	右侧额叶
2	男	22	胶质母细胞瘤 WHO IV 级	四脑室
3	男	30	星形细胞瘤 WHO II 级	右侧额叶
4	男	1	胶质母细胞瘤 WHO IV 级	右侧额叶
5	女	28	胶质母细胞瘤 WHO IV 级	左侧颞骨
6	男	56	胶质母细胞瘤 WHO IV 级	右侧额颞叶
7	男	29	胶质母细胞瘤 WHO IV 级	右侧额叶
8	女	63	胶质母细胞瘤 WHO IV 级	左侧额叶
9	女	52	星形细胞瘤 WHO II 级	左侧额叶
10	男	54	星形细胞瘤 WHO III 级	右侧额叶

2 结果

2.1 3 种标准物的介电特性

图 3 显示为甲醇、乙二醇、异丙醇 3 种标准物在 50~500 MHz 范围内的介电特性。对于相对介电常数,甲醇、乙二醇、异丙醇与文献值在整个频率段范围内的最大绝对误差分别为 1.623、1.304、1.552,相应的最大相对误差分别为 4.728%、3.151%、7.656%;电导率的最大绝对误差分别为 0.003、0.004、0.007 S/m,相应的最大相对误差分别为 4.193%、4.218%、3.320%。除了异丙醇的相对介电常数外,甲醇、乙二醇的相对介电常数和电导率以及异丙醇的电导率测量相对误差均在 5% 以内。由于在 50~500 MHz 范围内,异丙醇的相对介电常数较小,从而造成相对误差较大(超过 5%)。考虑到人体脑组织属于高介电特性组织(高相对介电常数及电导率),本系统的测量误差可控制在 5% 以内,误差在临床可接受误差范围内。

2.2 待测人体脑胶质瘤组织标本及其病理

图 4 为 1 例待测脑组织标本及其对应的病理结果图,标本有效直径至少 2 cm,有效厚度为 1 cm。每一组织块至少测量 3 个不同位置,每个位置至少重复

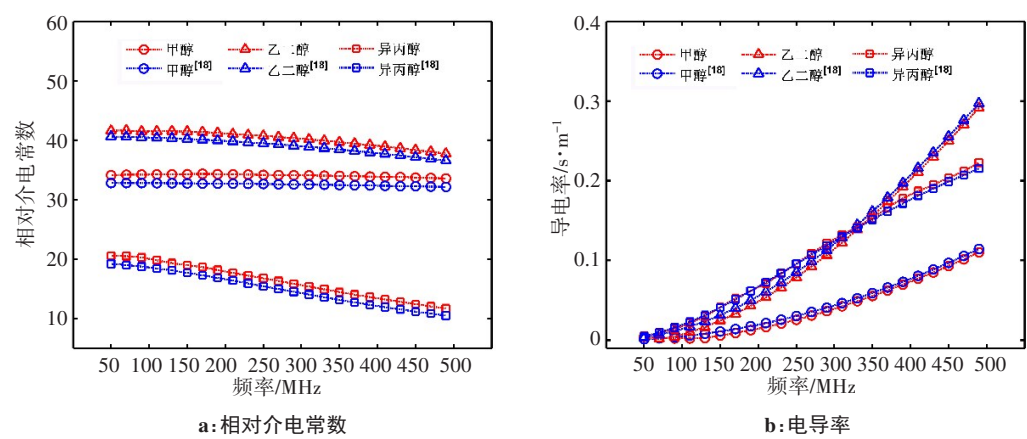


图3 甲醇、乙二醇、异丙醇3种校准液的介电特性
Fig.3 Dielectric properties of 3 kinds of calibration solutions, namely methanol, ethanol and propanol

测量5次,对测量结果取平均,以减少取样造成测量不确定度的影响。如图4b所示,脑组织发生癌变后,

其细胞密度有所增加。

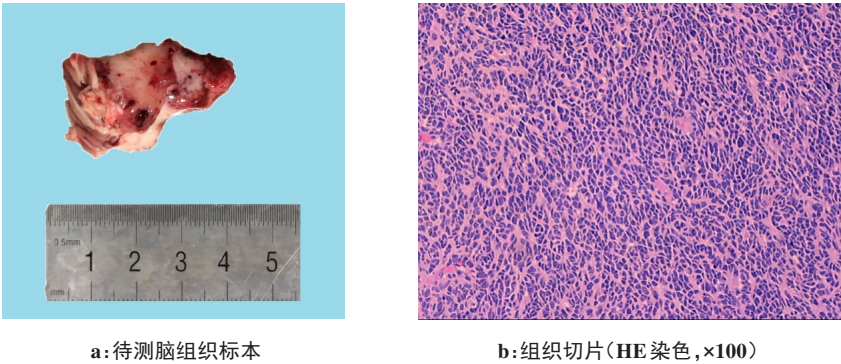


图4 待测组织标本及其病理结果
Fig.4 Tissue specimen to be detected and its pathological result

2.3 人体脑胶质瘤组织介电特性的 Cole-Cole 模型

为了便于相关科研人员能够获取任意频率下介电特性,本实验对脑胶质瘤组织离散频率电的介电特性进行四阶 Cole-Cole 拟合,拟合结果如图5所示,其中图5a为脑胶质瘤相对介电常数中值曲线拟合图,图5b为脑胶质瘤电导率中值曲线拟合图,其中 ϵ_∞ 、 σ_i 、 $\Delta\epsilon_i$ 、 τ_i 、 a_1 、 $\Delta\epsilon_2$ 、 τ_2 、 a_2 、 $\Delta\epsilon_3$ 、 τ_3 、 a_3 、 $\Delta\epsilon_4$ 、 τ_4 、 a_4 分别为19、0.38、32、15 ps、0.01、235、7.96 ns、0.1、4×10⁴、45 μs、0.3、4×10⁷、7.958 ms、0.02。此外,图5中红色线为Gabriel等^[9]测量的正常脑组织介电特性,粉红色圆形为Lu等^[8]测得的脑胶质瘤组织介电特性。由图5可知,在50~500 MHz范围内,脑胶质瘤组织相对介电常数至少比正常脑组织高29.5%,最高差异达36.6%;电导率至少比正常脑组织高56.1%,最高差异达64.8%。

3 讨论

脑胶质瘤作为颅内常见的恶性肿瘤,约占原发

肿瘤的60%,具有浸润性生长的生物学特性^[1]。虽然随着现代医学的发展及综合治疗技术的进步,脑胶质瘤的治疗有了很大的提高,但是病人的生存期并没有取得突破性进展。因此,积极探索脑胶质瘤的早期诊断是近年来备受瞩目的研究热点之一。科学文献表明在组织病变早期,组织介电特性会发生显著变化,因此以组织介电特性作为成像介质进行疾病诊断有可能为癌症早期诊断提供有价值的信息。

本研究根据开端同轴线法的相关理论,测量人脑胶质瘤组织在MRI拉莫尔频率范围内(50~500 MHz)的介电特性,并对其进行了较为详细的分析。为了保证测量系统的准确性及稳定性,在测量人体脑胶质瘤组织介电特性前,需测量甲醇、乙二醇、异丙醇3种标准物的介电特性并与文献值相比较。实验结果显示本测量系统具有较高的准确性及良好的稳定性,如图3所示,可为人体脑胶质瘤组织介电特性测量提供可靠依据。Gabriel等^[9]系统地总结了健康组织的

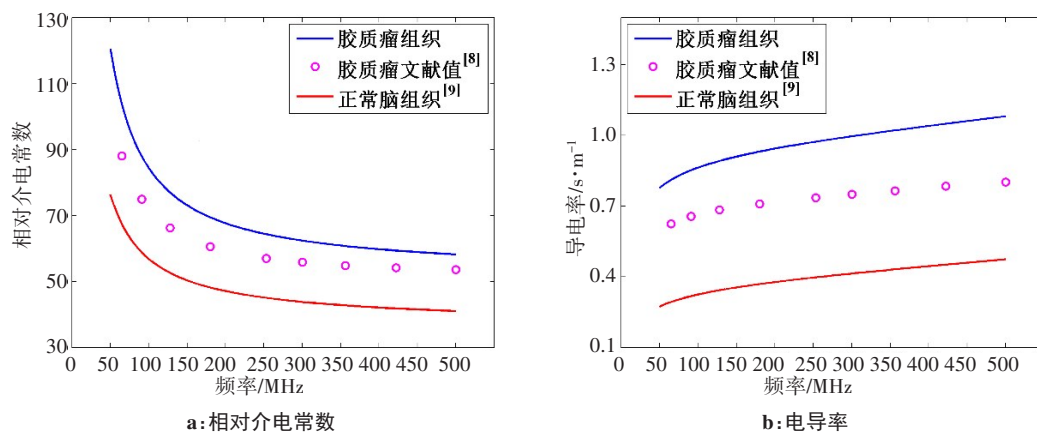


图5 脑胶质瘤组织介电特性四阶 Cole-Cole 拟合结果

Fig.5 Fourth-order Cole-Cole fitting results of dielectric properties of glioma tissue

介电特性频率谱,且已经建立健康人体脑组织介电特性,如图5所示。在50~500 MHz范围内,脑胶质瘤组织介电特性高于正常脑组织,且电导率随着频率的增加差异逐渐增大,最大差异达64.8%。组织的介电特性很大程度上取决于组织的含水量,组织的含水量越高其介电特性越大^[20]。从宏观层面上可以将脑胶质瘤组织与正常脑组织的介电特性差异解释为脑胶质瘤组织与正常脑组织含水量的差异^[20]。相关文献表明正常脑组织向脑胶质瘤组织转化过程中,胶质瘤细胞会通过分泌血管内皮生长因子来促进肿瘤血管的形成,进而增加肿瘤微血管的密度^[23-24]。随着恶性程度依次增加,血管新生也愈加明显,肿瘤周围水肿区域也愈大,进而导致肿瘤组织的含水量高于正常组织,导致恶性脑胶质瘤组织介电特性高于正常脑组织。微观层面上可以解释为胶质瘤细胞组成成分及结构发生变化,细胞膜通透性增加,钠、钾离子通道表达异常,钠、钾离子往细胞内流^[25-26],使得其具有较高的介电特性。此外,如图5所示,通过与Lu等^[8]测量的脑胶质瘤组织介电特性对比发现,本文所测的数据略高于Lu所测的胶质瘤组织介电特性,相对介电常数高7.9%~15.1%,电导率高23.0%~25.9%。究其原因,有以下几方面:一是Lu等是在室温下(24℃)下测量了人脑胶质瘤组织的介电特性。而本实验中待测脑组织的温度为37℃,考虑到组织的介电特性与温度相关,温度每增加1℃时,组织的介电常数将发生0.3%~1.2%的变化。二是Lu等所测量的脑组织为脑白质,本实验采用的脑组织成分包含了脑白质和脑灰质,两者的脑组织标来源稍微不同,且脑灰质介电特性要高于脑白质。三是两组胶质瘤WHO分级不一样。在Lu等研究中,患者主要为WHO II~III级,而本实验中患者主要为WHO IV级,病理级别较高,癌细胞密度较大,血管较为丰富,肿

瘤组织含水量较高。综上所述,本实验报道的脑胶质瘤组织介电特性要高于与Lu等报道的数据。

本研究利用开端同轴线法,在37℃下,快速准确的测量了人脑胶质瘤组织在50~500 MHz范围的介电特性,并建立脑胶质瘤组织介电特性的Cole-Cole参数模型。本研究的局限性是人体脑胶质瘤的标本量较少,未能分析不同病理类型和不同分化程度的胶质瘤介电特性差异,在后续的研究中将继续扩大标本的数量。另外,虽然本研究所有测量操作均在组织离体后30 min内完成,根据Gersing^[27]文献报道,生物组织的介电特性在离体几个小时内可以维持稳定,但严格意义上本研究仍属于离体实验阶段,未能完全真实反映在体人体脑胶质瘤的介电特性,有待以后将开端同轴线射频仪器应用于在体人体脑胶质瘤组织的检测。

4 结论

本文根据开端同轴线法的相关理论,在37℃下,测量了人脑胶质瘤组织在50~500 MHz范围的介电特性,并对其进行了较为详细的分析。实验结果显示脑胶质瘤组织介电特性显著高于正常脑组织,相对介电常数最大差异达36.6%,电导率最大差异达64.8%。此外,本实验还将脑胶质瘤组织离散频率点的介电特性转换为连续频率的介电特性,并提取了脑胶质瘤组织四阶Cole-Cole模型的参数,便于相关科研人员快速得到MRI拉莫尔频率范围内(50~500 MHz)脑胶质瘤组织的介电特性。

【参考文献】

- [1] STEWART L A. Chemotherapy in adult high-grade glioma: a systematic review and meta-analysis of individual patient data from 12 randomised trials[J]. The Lancet, 2002, 359(9311): 1011-1018.
- [2] GALLEGO O. Nonsurgical treatment of recurrent glioblastoma[J]. Curr Oncol, 2015, 22(4): e273-e281.

- [3] NEWCOMB E W, DEMARIA S, LUKYANOV Y, et al. The combination of ionizing radiation and peripheral vaccination produces long-term survival of mice bearing established invasive GL261 gliomas [J]. Clin Cancer Res, 2006, 12(15): 4730-4737.
- [4] BLEEHEEN N M, STENNING S P. A medical research council trial of two radiotherapy doses in the treatment of grades 3 and 4 astrocytoma [J]. Brit J Cancer, 1991, 64(4): 769-774.
- [5] SHA L W, WARD E R, STORY B. A review of dielectric properties of normal and malignant breast tissue [C]//Proceedings IEEE Southeast Con 2002. IEEE, 2002: 457-462.
- [6] GRANT J P, SPYROU N M. Complex permittivity differences between normal and pathological tissues: mechanisms and medical significance [J]. Journal of Bioelectricity, 1985, 4(2): 419-458.
- [7] ZYWIETZ F, KNOCHER R. Dielectric properties of Co- γ -irradiated and microwave-heated rat tumour and skin measured *in vivo* between 0.2 and 2.4 GHz [J]. Phys Med Biol, 1986, 31(9): 1021-1029.
- [8] LU Y, LI B, XU J, et al. Dielectric properties of human glioma and surrounding tissue [J]. Int J Hyperther, 1992, 8(6): 755-760.
- [9] GABRIEL C, GABRIEL S, CORTHOOT E. The dielectric properties of biological tissues: I. Literature survey [J]. Phys Med Biol, 1996, 41(11): 2231-2249.
- [10] SUROWIEC A J, STUCHLY S S, BARR J R, et al. Dielectric properties of breast carcinoma and the surrounding tissues [J]. IEEE Trans Biomed Eng, 1988, 35(4): 257-263.
- [11] HAEMMERICH D, SCHUTT D J, WRIGHT A S, et al. Electrical conductivity measurement of excised human metastatic liver tumours before and after thermal ablation [J]. Physiol Meas, 2009, 30(5): 459-466.
- [12] 王洁然, 王化祥, 徐晓. 人体肺部组织介电特性实验研究 [J]. 中国生物医学工程学报, 2013, 32(2): 178-183.
- [12] WANG J R, WANG H X, XU X. Experimental study of dielectric properties on human lung tissue [J]. Chinese Journal of Biomedical Engineering, 2013, 32(2): 178-183.
- [13] ZHOU L, DENG G H, LI Z, et al. A large-scale measurement of dielectric properties of normal and malignant colorectal tissues obtained from cancer surgeries at Larmor frequencies [J]. Med Phys, 2016, 43(11): 5991-5997.
- [14] 辛学刚. 人体组织电特性磁共振断层成像(MREPT)技术进展 [J]. 中国生物医学工程学报, 2015, 34(1): 83-90.
- [14] XIN X G. Technological progresses of the Magnetic Resonance Electrical Property Tomography of human tissues [J]. Chinese Journal of Biomedical Engineering, 2015, 34(1): 83-90.
- [15] YU X, SUN Y, CAI K, YU H, et al. Dielectric properties of normal and metastatic lymph nodes *ex vivo* from lung cancer surgeries [J]. Bioelectromagnetics, 2020, 41(2): 148-155.
- [16] BOBOWSKI J S, JOHNSON T. Permittivity measurements of biological samples by an open-ended coaxial line [J]. Prog Electromagn Res, 2012, 40: 159-183.
- [17] FU F, XIN S X, CHEN W. Temperature-and frequency-dependent dielectric properties of biological tissues within the temperature and frequency ranges typically used for magnetic resonance imaging-guided focused ultrasound surgery [J]. Int J Hyperther, 2014, 30(1): 56-65.
- [18] GREGORY A P, CLARKE R. Tables of the complex permittivity of dielectric reference liquids at frequencies up to 5 GHz: MAT 23 [R]. National Physical Laboratory, 2012.
- [19] HAGL D M, POPOVIC D, HAGNESS S C, et al. Sensing volume of open-ended coaxial probes for dielectric characterization of breast tissue at microwave frequencies [J]. IEEE Trans Microw Theory, 2003, 51(4): 1194-1206.
- [20] 周地福, 翟伟科, 孙颖, 等. 结直肠恶性组织黏膜面与浆膜面、癌旁1、3 cm以及正常组织黏膜面与浆膜面的介电特性差异 [J]. 南方医科大学学报, 2018, 38(4): 434-442.
- [20] ZHOU D F, ZHAI W K, SUN Y, et al. Differences in dielectric properties between mucosal and serosal surface of malignant colorectal tissues, adjacent tissues at 1 cm and 3 cm and normal colorectal tissues [J]. Journal of Southern Medical University, 2018, 38(4): 434-442.
- [21] 顾本立, 黄雷. 生物组织介电特性测量 [J]. 南京工学院学报, 1987, 17(5): 1-7.
- [21] GU B L, HUANG L. Measurement of dielectric properties of biological tissues [J]. Nanjing Institute of Technology, 1987, 17(5): 1-7.
- [22] GROSSE C. A program for the fitting of Debye, Cole-Cole, Cole-Davidson, and Havriliak-Negami dispersions to dielectric data [J]. J Colloid Interf Sci, 2014, 419: 102-106.
- [23] EMERY I F, GOPALAN A, WOOD S, et al. Expression and function of ABCG2 and XIAP in glioblastomas [J]. J Neuro-Oncol, 2017, 133(1): 47-57.
- [24] ZHU H, ACQUAVIVA J, RAMACHANDRAN P, et al. Oncogenic EGFR signaling cooperates with loss of tumor suppressor gene functions in gliomagenesis [J]. P Natl Acad Sci U S A, 2009, 106(8): 2712-2716.
- [25] OU S W, KAMEYAMA A, HAO L Y, et al. Tetrodotoxin-resistant Na⁺ channels in human neuroblastoma cells are encoded by new variants of Nav1.5/SCN5A [J]. Eur J Neurosci, 2005, 22(4): 793-801.
- [26] MENÉNDEZ S T, RODRIGO J P, ALLONCA E, et al. Expression and clinical significance of the Kv3.4 potassium channel subunit in the development and progression of head and neck squamous cell carcinomas [J]. J Pathol, 2010, 221(4): 402-410.
- [27] GERSING E. Impedance spectroscopy on living tissue for determination of the state of organs [J]. Bioelectrochem Bioenerg, 1998, 45(2): 145-149.

(编辑: 薛泽玲)