

健康志愿者心肌磁共振纹理特征初探*

吴 韬¹, 孙怀强¹, 刘秀民¹, 陈玉成², 董 杨², 何 帅¹, 万 珂², 程 巍¹, 郜发宝¹, 孙家瑜^{1△}

1. 四川大学华西医院 放射科(成都 610041); 2. 四川大学华西医院 心内科(成都 610041)

【摘要】 目的 探讨汉族健康志愿者心肌磁共振图像的纹理特征。**方法** 收集健康汉族志愿者 59 例,行 3.0T 心脏核磁共振电影序列及增强前后的 T1 mapping 序列扫描。计算每位健康志愿者的心功能参数。测量左室心肌的 Native T1 值,并计算细胞外容积(extracellular volume, ECV)值。在增强前的 T1 mapping 图像上提取 40 组心肌纹理特征,分析心肌纹理特征与年龄、Native T1、ECV 值之间的相关性,并比较心肌纹理特征在性别、年龄分层组中的差异。**结果** 共纳入 59 例健康汉族志愿者(女性 28 例,18~76 岁),其中低龄组(<45 岁)29 例,高龄组(≥45 岁)30 例。男性左室心肌质量指数(left ventricular mass index, Lvmassi)高于女性、Native T1 值低于女性($P<0.01$),其余血压、心率、左室射血分数(left ventricular ejection fraction, LVEF)以及 ECV 值在不同性别组间差异均无统计学意义。在 40 个心肌纹理特征中,有 10 个心肌纹理特征存在性别差异($P<0.01$),在低龄组中,男性和女性有 13 个心肌纹理特征存在差异;高龄组心肌纹理特征不存在性别差异($P>0.01$)。有 8 个心肌纹理特征与年龄相关(最大 $r=0.483$, $P<0.01$)。有 6 个一阶统计量与左心室心肌中层 Native T1 值相关(最大 $r=0.792$, $P<0.01$),3 个一阶统计量与 ECV 相关(最大 $r=0.409$, $P<0.01$)。**结论** 基于 T1 mapping 的心肌纹理特征在中国汉族健康人群中存在年龄和性别差异。

【关键词】 心脏磁共振 T1 mapping 纹理特征 年龄 性别

Myocardial Magnetic Resonance Texture Characteristics of Healthy Volunteers WU Tao¹, SUN Huai-qiang¹, LIU Xiu-min¹, CHEN Yu-cheng², DONG Yang², HE Shuai¹, WAN Ke², CHENG Wei¹, GAO Fa-bao¹, SUN Jia-yu^{1△}. 1. Department of Radiology, West China Hospital, Sichuan University, Chengdu 610041, China; 2. Department of Cardiology, West China Hospital, Sichuan University, Chengdu 61004, China

△ Corresponding author, E-mail: sjy080512@163.com

【Abstract】 Objective To determine the myocardial texture features of cardiac magnetic resonance (CMR) in healthy adult Han populations. **Methods** 59 healthy Han volunteers were recruited for this study from May 2016 to November 2017. CMR examinations were performed on the participants with a 3.0T scanner (Tim Trio, Siemens Medical Solution) to estimate the functional parameters, Native T1 value and ECV. Texture analysis (TA) was performed on the region of interest (ROI) in the left ventricle myocardium on T1 mapping images, with 40 myocardial texture features being extracted. Differences in the myocardial texture features across gender and age groups were analyzed through Student's t-tests or Wilcoxon signed-rank tests. Spearman correlations were analyzed between the myocardial texture features and age, native T1 value and extracellular volume (ECV). **Results** Of the 59 participants, 28 were women and 29 were in the younger age group (<45 years old). The male participants had higher left ventricular mass index (Lvmassi) and lower native T1 than their female counterparts ($P<0.01$). No gender differences in blood pressure, heart rate, left ventricular ejection fraction (LVEF) and ECV values were found. Ten of the forty myocardial texture features showed gender differences, including two first order features and eight Grey-level co-occurrence matrix (GLCM) features. Gender differences appeared in five first order features and eight GLCM features in the younger group (<45 years old), but not in the older group (≥45 years old). Eight myocardial texture features were correlated with age, including five first order features and three GLCM features (all $P<0.01$). Six first-order texture features were correlated with Native T1 values of the left ventricle middle myocardium. Three first-order texture features were correlated with ECV. **Conclusion** Myocardial texture features in T1 mapping images vary by gender and age in healthy Han populations.

【Key words】 Cardiac magnetic resonance T1 mapping Texture feature Age Gender

* 国家自然科学基金(No. 81520108014, No. 81771800, No. 81829003), 国家科技部重大研究项目(No. 2016YFA0201402), 四川省科技厅国际合作项目(No. 2017HH0045)和四川大学华西医院学科卓越发展 1·3·5 工程项目基金(No. ZYJC18013)资助

△ 通信作者, E-mail: sjy080512@163.com

纹理分析是通过提取图像内部大量纹理特征信息,并对所获得的特征数据进行挖掘和分析的图像后处理方式。纹理特征是描述图像像素分布特点及灰阶强度的参数,能反映图像肉眼不可见的组织学及结构等信息^[1],现已广泛应用于医学领域。纹理分析在肿瘤鉴别、疾病分期中有重要意义^[2-5]。近两年,纹理分析也开始应用于心脏核磁共振领域^[6-10]。BAESSLER等^[7]和LARROZA等^[9]研究表明,用磁共振电影序列及延迟强化的纹理特征鉴别急性、亚急性和慢性心肌梗塞,有较高的准确度。

T1 mapping 定量技术,为测量体素组织 T1 值的一种磁共振定量技术。通过计算出采集范围内每个体素的 T1 值,然后将这些值赋予每个体素,形成定量的 T1 mapping。有研究发现,基于 T1 mapping 序列的健康志愿者的 Native T1 值〔即初值 T1 值,在增强前测量的 T1 值,未给予对比剂情况下的纵向弛豫时间(T1)〕及细胞外容积(extracellular volume fraction, ECV)值存在性别及年龄差异^[11-14],提示健康人群的心肌组织特性存在性别及年龄差异。对健康人群心肌组织特性与年龄、性别关系的研究有助于更加深入地了解老年人及女性舒张性心衰发生的机制。心脏磁共振纹理分析已成为研究热点,但尚未见有关健康人群,尤其是中国汉族这一全球最大的单一种族人群的心脏磁共振纹理特征及其与年龄、性别的关系的研究。本研究通过分析健康汉族志愿者基于 T1 mapping 序列的心肌纹理特征,探讨其在年龄、性别中的变化规律,以及与 Native T1 值、ECV 的相关性。

1 对象与方法

1.1 研究对象

2016年5月至2017年11月,前瞻性纳入年龄18~80岁的健康汉族志愿者59例。排除患心脑血管疾病、高血压或静息态血压 $\geq 140/90$ mmHg(1 mmHg=0.133 kPa)、心律不齐、肾功能不全、有核磁共振检查禁忌症(幽闭恐惧症、起搏器等金属植入物)等。在磁共振扫描前后24 h内,采集志愿者外周静脉血测量红细胞压积(hematocrit, HCT)。

本研究获得四川大学华西医院伦理委员会批准(批准号2015审304),所有志愿者签署知情同意书。

1.2 心肌磁共振图像采集

用3.0 T核磁共振(Siemens Magnetom Tim Trio)对每位志愿者行常规的心脏核磁共振成像。

采用稳态自由进动序列结合回顾性心电门控技术并在屏气的状态下完成心脏电影序列的采集,包括从左心室基底到心尖的逐层短轴位、两腔心、三腔心及四腔心,扫描参数如下:重复时间(TR)3.4 ms;回波时间(TE)1.3 ms;翻转角 50° ;扫描视野(FOV)300~360 mm;矩阵 256×144 ;层厚8 mm;时间分辨率42 ms;空间分辨率 $1.4 \text{ mm} \times 1.3 \text{ mm}$ 。通过前瞻性的心电门控技术,使用运动校正后的LOOK-LOCKER 翻转回复序列(MOLLI)采集左心室心肌短轴位的基底层、中间层和心尖层面的T1 mapping 图像;扫描参数如下:TR 2.9 ms;TE 1.12 ms;翻转角 35° ;带宽930 Hz/像素;首次反转时间为100 ms,往后每次增加80 ms;并行采集2;矩阵 192×144 ;平面空间分辨率 $2.4 \text{ mm} \times 1.8 \text{ mm}$;总采集时间为17个心动周期。

1.3 图像后处理

1.3.1 心功能参数测量 采用Qmass7.6(Medis, Leiden, The Netherlands)分析电影序列,在连续短轴位的电影序列上,分别画出左心室舒张末期心内膜和心外膜的轮廓以及左心室收缩末期心内膜的轮廓,舒张末期容积(EDV)和收缩末期容积(ESV)由连续短轴位的数值相加得到。心室搏出量(SV)=EDV-ESV,射血分数(EF)=(SV/EDV) $\times 100\%$ 。采用舒张末期左室心肌短轴逐层面积积分后得到左室心肌体积,并与心肌密度(1.05 g/cm^3)相乘,得出左室心肌质量指数(left ventricle mass index, Lvmassi)。

1.3.2 Native T1 值和 ECV 分析 Native T1 值基于左心室短轴中段的 T1 mapping 序列图像进行测定。利用 Medis Suite 2.1 (Medis, Leiden, The Netherlands)软件在注射钆造影剂前后采集的 T1 mapping 图像上手动画出左心室心肌中层的内膜和外膜的轮廓并计算出注射造影剂前心肌的 Native T1 值(T1 myocardial pre-contrast)和注射造影剂后心肌的 Native T1 值(T1 myocardial post-contrast)。而注射造影剂前血池的 Native T1 值(T1 blood pre-contrast)和注射造影剂后血池的 Native T1 值(T1 blood post-contrast)则是通过手动描绘左心室腔内血池的感兴趣区获得。通过计算得到每个健康志愿者左室心肌中层的 ECV。ECV 计算公式参考文献^[15]。

1.3.3 纹理分析 纹理分析的兴趣区勾画采用软件ITK-SNAP。选取T1 mapping中间层面的Map图像载入软件,兴趣区包括整个左心室心肌中层,以

心内膜和心外膜为边界,如图 1 所示。在 Pyradiomics^[16] 软件上提取 40 个纹理特征,包括 18 个一阶统计量的特征,以及 22 个灰度共生矩阵 (grey-level co-occurrence matrix, GLCM) 的特征。在提取特征时,先将各图像的像素按最大像素标准化后,再进行提取。

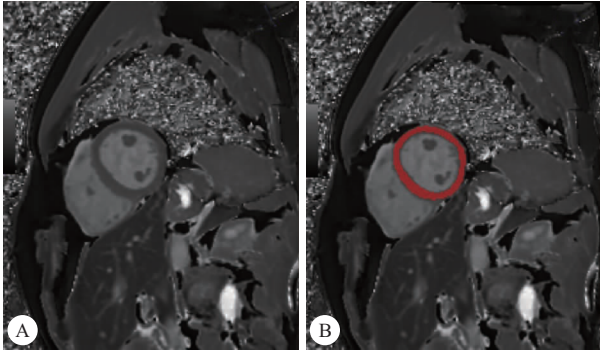


图 1 一志愿者短轴位中间层心肌的 T1 mapping 图(A),红色区域为提取纹理特征所勾画的 ROI(B)

Fig 1 The short-axias T1 mapping image of mid myocardium (A) in a volunteer; Red circle shows the region of interest (ROI) used for the extraction of the texture features (B)

1.4 统计学方法

数据的正态分布采用 Kolmogorov-Smirnov 检验,服从正态分布的连续变量采用 $\bar{x} \pm s$ 表示,采用独立样本 t 检验分析,不服从正态分布的连续变量采用中位数和四分位数间距 ($P_{25} \sim P_{75}$) 表示,采用秩和检验进行分析;采用 Spearman 相关分析年龄、Native T1、ECV 与纹理特征之间的相关性。临床资料的分析结果以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义;

纹理特征的分析结果以 $P < 0.01$ 为差异有统计学意义^[10]。

2 结果

2.1 健康志愿者基本临床资料

本研究共纳入 59 例健康汉族志愿者,其中女性 28 例,基本临床资料见表 1。按男、女性别分组,男性 Lvmassi 值高于女性 ($P < 0.001$),Native T1 值低于女性 ($P = 0.001$);体质质量指数 (BMI)、血压、心率、左室 EF 以及 ECV 值在男女性别组中差异均无统计学意义;进一步按年龄分层分组,低龄组 (年龄 < 45 岁) 中男性 BMI 及 Lvmassi 值高于女性 ($P < 0.01$),Native T1 值低于女性 ($P < 0.005$);高龄组 (年龄 ≥ 45 岁) 中,男性年龄大于女性 ($P < 0.05$),Native T1 值低于女性 ($P < 0.05$)。

2.2 心脏纹理特征与性别的关系

2.2.1 一阶统计量特征 18 个一阶统计量纹理特征中,有 2 个纹理特征 (Energy, total energy) 在男女性别分组中差异有统计学意义 ($P < 0.005$)。在低龄组中,有 5 个特征 (Energy, total energy, Mean absolute deviation, Entropy, Variance) 的性别差异有统计学意义 ($P < 0.005$),见表 2;在高龄组中,没有存在有性别差异的特征 ($P > 0.01$),数据不予罗列。

2.2.2 共生矩阵特征 22 个共生矩阵特征中,有 8 个特征 (Imc1, Imc2, Idm, Inverse difference, Inverse variance, Difference average, Difference entropy, Joint entropy) 在男女性别分组中差异有统计学意义 ($P < 0.01$)。在低龄组中,有 8 个特征

表 1 健康志愿者的基本临床资料/ $\bar{x} \pm s$ 或中位数 ($P_{25} \sim P_{75}$)									
Table 1 Demographic characteristics of the healthy adult Chinese volunteers/ $\bar{x} \pm s$ or median ($P_{25} \sim P_{75}$)									
Characteristic	Total (n=59)			Younger age group (<45 yr, n=29)			Older age group (≥ 45 yr, n=30)		
	F (n=28)	M (n=31)	P	F (n=14)	M (n=15)	P	F (n=14)	M (n=16)	P
Age/yr.	42±15	43±20	0.801	29±9	28±11	0.798	55±6	62±9	0.027
BMI/(kg/m ²)	22±3	23±2	0.180	20±2	23±3	0.005	23±3	23±2	0.513
HR/min ⁻¹	78 (69-81)	74 (66-80)	0.311	80 (65-82)	75 (66-80)	0.57	75±7	73±10	0.461
SBP/mmHg	120±10	122±9	0.533	117±9	123±9	0.108	124±10	121±9	0.455
DBP/mmHg	73±10	75±7	0.366	70±11	77±7	0.077	76±6	74±8	0.414
Lvmassi/(g/m ²)	41.65±6.49	49.94±9.87	<0.001	40.05±5.00	53.14±10.00	<0.001	43.24±7.54	46.95±9.04	0.237
LVEF/%	62.91 (60.09-65.79)	60.87 (58.46-66.83)	0.595	62.03±3.33	60.70±4.39	0.369	64.17±4.71	64.52±6.02	0.860
Native T1/ms	1 208 (1 188-1 264)	1 183 (1 150-1 211)	0.001	1 220±40	1 177±29	0.003	1 223±42	1 183±44	0.018
ECV/%	27.28±2.90	26.03±3.07	0.116	27.18±3.52	25.07±2.47	0.077	27.38±2.24	26.86±3.37	0.633

F; Female; M; Male; BMI; Body mass index; HR; Heart rate; SBP; Systolic blood pressure; DBP; Diastolic blood pressure; Lvmassi; Left ventricle mass index; LVEF; Left ventricle ejection fraction; ECV; Extra cellular volume; 1 mmHg=0.133 kPa

(Contrast, Imc1, Imc2, Idm, Inverse difference, Inverse variance, Difference average, Difference entropy) 性别差异有统计学意义 ($P < 0.01$), 见表 2; 而高龄组中没有存在有性别差异的特征 ($P > 0.01$), 数据不予罗列。

2.3 心脏纹理特征与年龄的相关性分析

所有纹理特征中,有 8 个特征与年龄有相关性 ($P < 0.01$), 包括 5 个一阶统计量特征和 3 个共生矩阵特征, 见图 2。

2.4 心脏纹理特征与 Native T1 和 ECV 值的相关性分析

Spearman 的相关性分析结果显示,左心室心肌中层 Native T1 值与纹理特征 6 个一阶统计量特征呈正相关($P<0.01$); ECV 值与 3 个一阶统计量特征呈正相关($P<0.01$),见图 3。

表 2 心脏纹理特征参数值性别差异/ $\bar{x}\pm s$ 或中位数 (P_{25} - P_{75})
Table 2 Gender differences in the cardiac texture features/ $\bar{x}\pm s$ or median (P_{25} - P_{75})

Type	TF	Total ($n=59$)			Younger age group (<45 yr, $n=29$)		
		Female	Male	P	Female	Male	P
First order features	Energy/($\times 10^8$)	4.44 (4.04-5.49)	5.76 (5.31-6.57)	0.001	4.64 $\pm$ 1.29	5.98 $\pm$ 1.16	0.007
	Total energy/($\times 10^8$)	9.99 (9.09-11.24)	12.97 (11.94-14.78)	0.001	10.4 $\pm$ 2.9	13.4 $\pm$ 2.60	0.007
	Mean absolute deviation	59.40 $\pm$ 14.80	52.13 $\pm$ 16.48	>0.01	59.97 $\pm$ 16.37	43.97 $\pm$ 11.14	0.005
	Entropy	5.32 $\pm$ 0.28	5.17 $\pm$ 0.33	>0.01	5.31 $\pm$ 0.28	5.00 $\pm$ 0.28	0.007
	Variance	5 752.44 (4 139.52-7 416.61)	4 067.01 (2 774.38-6 300.69)	>0.01	6 428.24 $\pm$ 3 604.60	3 340.75 $\pm$ 1 437.47	0.005
GLCM	Contrast	135.53 (101.78-177.85)	89.46 (61.02-158.42)	0.017	141.16 (118.70-166.07)	65.90 (53.15-112.35)	0.003
	Imc1	-0.55 $\pm$ 0.08	-0.46 $\pm$ 0.09	<0.001	-0.57 $\pm$ 0.09	-0.43 $\pm$ 0.08	<0.001
	Imc2	0.998 (0.997-1.000)	0.995 (0.991-0.998)	0.001	0.998 (0.997-0.999)	0.993 (0.981-0.996)	<0.001
	Idm	0.14 $\pm$ 0.03	0.17 $\pm$ 0.04	0.002	0.14 $\pm$ 0.04	0.19 $\pm$ 0.04	0.007
	Inverse difference	0.22 $\pm$ 0.04	0.26 $\pm$ 0.04	0.001	0.22 $\pm$ 0.04	0.27 $\pm$ 0.04	0.003
	Inverse variance	0.14 $\pm$ 0.03	0.17 $\pm$ 0.04	0.002	0.14 $\pm$ 0.03	0.19 $\pm$ 0.04	0.001
	Difference average	8.36 (7.43-8.93)	6.75 (5.55-8.12)	0.004	8.79 (7.50-9.31)	5.82 (5.12-7.63)	0.002
	Difference entropy	4.24 $\pm$ 0.28	4.00 $\pm$ 0.32	0.005	4.26 $\pm$ 0.28	3.88 $\pm$ 0.32	0.002
	Joint entropy	7.54 $\pm$ 0.39	7.82 $\pm$ 0.33	0.005	7.43 $\pm$ 0.35	7.76 $\pm$ 0.30	>0.01

GLCM; Grey-level co-occurrence matrix; Imc1; First measure of information correlation; Imc2; Second measure of information correlation; Idm; Inverse difference moment

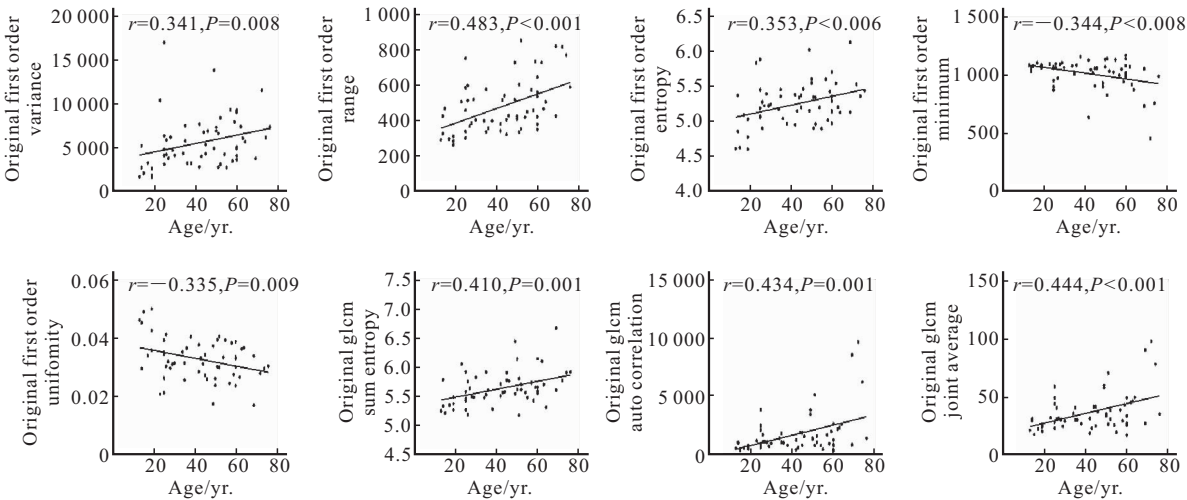


图 2 纹理参数与年龄的线性相关分析
Fig 2 Correlations between cardiac texture features and age

3 讨论

本研究较为全面、细致地分析了健康中国汉族人群 T1 mapping 图像的纹理特征,包括一阶统计量特征与二阶灰度共生矩阵特征,与年龄、性别之间的关系。结果发现:部分纹理特征存在性别差异,而这种性别差异仅存在于低龄组当中;部分纹理特征与年龄相关;部分一阶纹理特征与 Native T1、ECV 相关。

本研究发现,有 10 个心肌磁共振纹理特征在男性和女性中存在差异,而这种男女纹理特征性别的差异主要来自于低龄段。既往缺乏基于 T1 mapping 基础上的健康人群的心肌纹理特征的研究,而在健康人群中,部分研究表明,T1 mapping 技

术所测得的 Native T1 及 ECV 具有性别差异。DONG 等^[17]的研究发现,女性的 Native T1 和 ECV 均显著高于男性,而 PIECHNIK 等^[12]的研究发现,45 岁之前,女性 Native T1 值明显长于男性,而 45 岁之后这种差异便消失,这一结果同样支持本次研究所得出的结论。我们推测产生这一现象的原因可能与男女心肌的成分差异有关。心肌脂肪是指三酰甘油小滴储存在心肌细胞内,研究发现,BMI 与心肌的三酰甘油含量呈正相关^[18],而脂肪含量不同可以引起心肌信号强度差异,在本研究对象的低龄组段中,男性的 BMI 明显高于女性,推测低年龄段的女性心肌脂肪含量可能高于男性,这可能是造成纹理特征性别差异的原因之一。此外,心肌是性激素的靶器官之一,随着年龄的增长,男性体内的雄

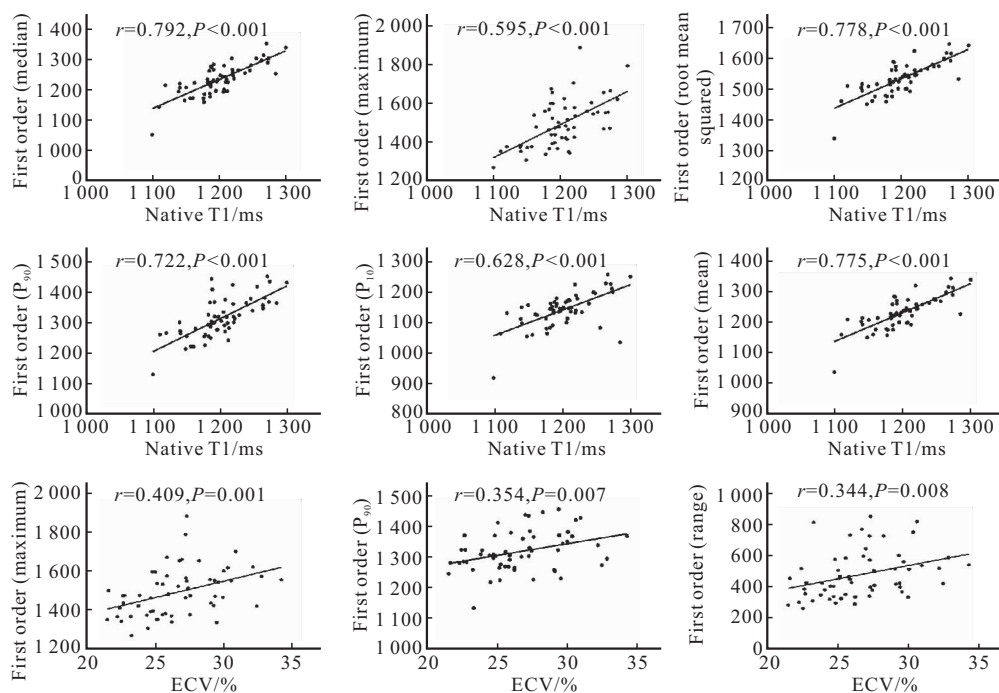


图3 心脏纹理特征与左室心肌中层 Native T1 和 ECV 值的相关性分析

Fig 3 Correlations between cardiac textures features and native T1/ECV of the left ventricle middle myocardium

性激素和女性体内的雌性激素含量逐渐下降,体内性激素含量的改变同样会对健康人群的心肌构成产生影响^[19-20]。而随着年龄的增加,心肌细胞的三酰甘油含量增加^[21],心肌逐渐出现弥散性纤维化^[21],这种随着年龄增长而产生的心肌组分的改变可能是心肌纹理特征随年龄改变的原因。

本研究发现,部分一阶统计量的心肌纹理特征与 Native T1 值和 ECV 均相关。已有研究证明通过测量 Native T1 值和计算 ECV, T1 mapping 技术可以定量评价心肌弥漫性纤维化和浸润性病变^[22-23],且在对动物模型的病理研究中,证明了 ECV 值与心肌纤维化程度有着高度相关^[14]。在健康人群中, Native T1 值和 ECV 值在不同的年龄和性别中存在差异^[11-13]。基于 T1 mapping 纹理特征的研究方面,既往研究主要集中在欧美地区心脏病患者尤其是心肌病患者的研究上,而已有研究分析了扩张型心肌病患者与健康志愿者基于 T1 mapping 的纹理特征,发现多数特征在两组患者之间存在明显的差异^[10]。然而关于健康人群,尤其是亚洲人群基于 T1 mapping 的心肌纹理特征我们却知之甚少。本次研究发现基于 T1 mapping 的心肌纹理特征存在年龄与性别的差异,因此,在日后使用基于 T1 mapping 的心肌纹理特征对心脏病患者进

行研究时,年龄和性别便成为了较为重要的混杂因素,需要加以注意。

本研究存在的不足主要是样本量较小,今后需要更大样本的研究来探索年龄、性别等因素对中国汉族健康人群心肌纹理特征的影响;其次,研究中只提取了左室心肌短轴位中间层面的纹理特征,没有分析心肌不同层面的纹理特征是否有差异。

综上所述,在健康人群中,心肌的纹理特征受年龄和性别两种生理因素的共同影响。在研究心脏疾病的纹理特征时,选择年龄和性别匹配的对照组更有利于研究结果的准确性。

参 考 文 献

- [1] CASTELLANO G, BONILHA L, LI LM, *et al.* Texture analysis of medical images. *Clini Radiol*, 2004, 59(12): 1061-1069.
- [2] CHEN W, GIGER ML, LI H, *et al.* Volumetric texture analysis of breast lesions on contrast-enhanced magnetic resonance images. *Magn Reson Med*, 2007, 58(3): 562-571.
- [3] BAHL G, CRUITE I, WOLFSON T, *et al.* Noninvasive classification of hepatic fibrosis based on texture parameters from double contrast-enhanced magnetic resonance images. *J Magn Reson Imaging*, 2012, 36(5): 1154-1161.
- [4] HOLLI K, LAAPERI AL, HARRISON L, *et al.* Characterization of breast cancer types by texture analysis of

- magnetic resonance images. *Acad Radiol*, 2010, 17(2): 135-141.
- [5] AERTS HJ, VELAZQUEZ ER, LEIJENAAR RT, *et al.* Decoding tumour phenotype by noninvasive imaging using a quantitative radiomics approach. *Nat Commun*, 2014, 5: 4006 [2019-01-11]. <https://doi.org/10.1002/mrm.21347>.
- [6] BAEßLER B, MANNIL M, MAINTZ D, *et al.* Texture analysis and machine learning of non-contrast T1-weighted MR images in patients with hypertrophic cardiomyopathy — preliminary results. *Eur J Radiol*, 2018, 102: 61-67 [2019-01-11]. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2018.03.013>.
- [7] BAESSLER B, MANNIL M, OEBEL S, *et al.* Subacute and chronic left ventricular myocardial scar: accuracy of texture analysis on nonenhanced cine MR images. *Radiology*, 2018, 286(1): 103-112.
- [8] CHENG S, FANG M, CUI C, *et al.* LGE-CMR-derived texture features reflect poor prognosis in hypertrophic cardiomyopathy patients with systolic dysfunction: preliminary results. *Eur J Radiol*, 2018, 28(11): 4615-4624.
- [9] LARROZA A, MATERKA A, LOPEZ-LEREU MP, *et al.* Differentiation between acute and chronic myocardial infarction by means of texture analysis of late gadolinium enhancement and cine cardiac magnetic resonance imaging. *Eur J Radiol*, 2017, 92: 78-83 [2019-01-11]. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2017.04.024>.
- [10] SHAO XN, SUN YJ, XIAO KT, *et al.* Texture analysis of magnetic resonance T1 mapping with dilated cardiomyopathy. *Medicine (Baltimore)*, 2018, 97(37): e12246 [2019-01-11]. <https://insights.ovid.com/crossref?an=00005792-201809140-00035>. doi: 10.1097/MD.00000000000012246.
- [11] DABIR D, CHILD N, KALRA A, *et al.* Reference values for healthy human myocardium using a T1 mapping methodology: results from the international T1 multicenter cardiovascular magnetic resonance study. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2014, 16(1): 69 [2019-01-11]. <https://doi.org/10.1186/s12968-014-0069-x>.
- [12] PIECHNIK SK, FERREIRA VM, LEWANDOWSKI AJ, *et al.* Normal variation of magnetic resonance T1 relaxation times in the human population at 1.5 T using ShMOLLI. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2013, 15(1): 13 [2019-01-11]. <https://doi.org/10.1186/1532-429X-15-13>.
- [13] VON KNOBELSDORFF-BRENKENHOFF F, PROTHMANN M, DIERINGER MA, *et al.* Myocardial T1 and T2 mapping at 3 T: reference values, influencing factors and implications. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2013, 15(1): 53-53 [2019-01-11]. <https://doi.org/10.1186/1532-429X-15-53>.
- [14] NEILAN TG, COELHO-FILHO OR, SHAH RV, *et al.* Myocardial extracellular volume fraction from T1 measurements in healthy volunteers and mice: relationship to aging and cardiac dimensions. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2013, 6(6): 672-683.
- [15] AUS DEM SIEPEN F, BUSS SJ, MESSROGHLI D, *et al.* T1 mapping in dilated cardiomyopathy with cardiac magnetic resonance: quantification of diffuse myocardial fibrosis and comparison with endomyocardial biopsy. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2015, 16(2): 210-216.
- [16] VAN GRIETHUYSEN JJM, FEDOROV A, PARMAR C, *et al.* Computational radiomics system to decode the radiographic phenotype. *Cancer Res*, 2017, 77(21): e104-e107 [2019-01-11]. <https://doi.org/10.1158/0008-5472>.
- [17] DONG Y, YANG D, HAN Y, *et al.* Age and gender impact the measurement of myocardial interstitial fibrosis in a healthy adult Chinese population: a cardiac magnetic resonance study. *Front Physiol*, 2018, 9: 140 [2019-01-11]. <https://doi.org/10.3389/fphys.2018.00140>.
- [18] LIU CY, BLUEMKE DA, GERSTENBLITH G, *et al.* Myocardial steatosis and its association with obesity and regional ventricular dysfunction: evaluated by magnetic resonance tagging and ¹H spectroscopy in healthy african Americans. *Int J Cardiol*, 2014, 172(2): 381-387.
- [19] DE SMET MA, LAPAUW B, DE BACKER T. Sex steroids in relation to cardiac structure and function in men. *Andrologia*. 2017, 49(2) [2019-01-11]. <https://doi.org/10.1111/and.12610>.
- [20] LUO T, KIM JK. The role of estrogen and estrogen receptors on cardiomyocytes: an overview. *Can J Cardiol*, 2016, 32(8): 1017-1025.
- [21] PETRITSCH B, GASSENMAIER T, KUNZ AS, *et al.* Age dependency of myocardial triglyceride content: a 3T high-field ¹H-MR spectroscopy study. *Rofo*, 2015, 187(11): 1016-1021 [2019-01-11]. <https://doi.org/10.1055/s-0035-1553350>.
- [22] PUNTMANN VO, VOIGT T, CHEN Z, *et al.* Native T1 mapping in differentiation of normal myocardium from diffuse disease in hypertrophic and dilated cardiomyopathy. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2013, 6(4): 475-484.
- [23] BROOKS J, KRAMER CM, SALERNO M. Markedly increased volume of distribution of gadolinium in cardiac amyloidosis demonstrated by T1 mapping. *J Magn Reson Imaging*, 2013, 38(6): 1591-1595.

(2019-04-28 收稿, 2019-05-15 修回)

编辑 沈 进