

# 健康中青年中三角肌弹性参考值建立及临床意义

蒋 慧<sup>1,2</sup>, 丁士儒<sup>1,2</sup>, 任文洋<sup>1,2</sup>, 王 磊<sup>1,2</sup>, 曾 俊<sup>1,2</sup>

1. 电子科技大学医学院, 四川 成都 611731; 2. 四川省医学科学院·四川省人民医院(电子科技大学附属医院), 四川 成都 610072

**【摘要】 目的** 建立健康人群三角肌弹性的平均剪切波速度正常参考值, 并分析其影响因素及探索其临床意义。**方法** 采用超声剪切波弹性成像技术, 测量 94 名健康中青年中三角肌的左、右侧中立位(L/R 0°)及水平外展位(L/R 90°)的厚度及平均剪切波速度。比较不同体位下平均剪切波速度的差异, 评估性别、年龄、体重指数对弹性的影响。**结果** 志愿者年龄(42.43±9.22)岁, 体重指数(23.95±2.74)kg/m<sup>2</sup>。不同性别间平均剪切波速度在 L0°及 R0°位比较, 差异有统计学意义( $P<0.05$ ), 而 L/R90°位比较, 差异无统计学意义( $P>0.05$ )。健康中青年三角肌中束平均剪切波速度参考值范围分别为: 左 0°男性 2.42~3.05 m/s, 女性 2.48~3.19 m/s; 右 0°男性 2.44~3.24 m/s, 女性 2.60~3.33 m/s; 左 90°为 4.96~6.77 m/s; 右 90°为 5.12~7.17 m/s。**结论** 本研究建立了健康中青年人群三角肌中束在静息与功能位的平均剪切波速度参考范围, 不同性别之间静息位参考范围有差异, 功能位无差异。该参考范围为定量评估三角肌功能及相关疾病诊断提供了基线参考。

**【关键词】** 肌肉弹性; 中三角肌/三角肌中束; 剪切波速度; 剪切波弹性成像; 参考值范围。

**【中图分类号】** R445.1 **【文献标志码】** A **【文章编号】** 1672-6170(2026)03-0139-06

**Establishment of reference values of deltoid muscle elasticity in healthy middle-aged and young adults and its clinical significance** JIANG Hui<sup>1,2</sup>, DING Shi-ru<sup>1,2</sup>, REN Wen-yang<sup>1,2</sup>, WANG Lei<sup>1,2</sup>, ZENG Jun<sup>1,2</sup> 1. School of Medicine, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China; 2. Sichuan Academy of Medical Sciences & Sichuan Provincial People's Hospital (Affiliated Hospital of University of Electronic Science and Technology of China), Chengdu 610072, China

**【Corresponding author】** ZENG Jun

**【Abstract】 Objective** To establish normal reference values for mean shear wave velocity (SWV) of deltoid muscle elasticity in healthy individuals and to analyze influencing factors as well as to explore its clinical significance. **Methods** Shear wave elastography was performed on 94 healthy middle-aged and young adults to measure the thickness and mean SWV of the middle deltoid muscle at left/right neutral position (0°) and horizontal abduction position (90°). Differences in mean SWV were compared under different body positions. The effects of gender, age and body mass index (BMI) on SWV were assessed. **Results** The mean age of the volunteers were (42.43±9.22) years old. The BMI of the volunteers was (23.95±2.74) kg/m<sup>2</sup>. There were significant differences in the mean SWV between the genders at left 0° and right 0° positions ( $P<0.05$ ). However, there was no significant difference in the mean SWV at 90° position ( $P>0.05$ ). The reference ranges for the average SWV of the deltoid muscle bundle in healthy middle-aged and young people were: 2.42~3.05m/s for males at left 0° and 2.48~3.19m/s for females at left 0°; 2.44~3.24 m/s for males at right 0° and 2.60~3.33 m/s for female at right 0°; 4.96~6.77 m/s at left 90° and 5.12~7.17 m/s at right 90°. **Conclusions** This study establishes the reference ranges for mean SWV of the deltoid muscle at rest and during a functional position in healthy young and middle-aged adults. There are differences in the reference range of resting position between different genders, but no differences in functional position. These reference value ranges provide an baseline for quantitative assessment of deltoid muscle function and related disorders.

**【Key words】** Elasticity; Middle deltoid muscle/middle bundle of deltoid muscle; Shear wave velocity; Shear wave elastography; Normal reference ranges

肩部疼痛是职业人群常见的肌肉骨骼系统疾病<sup>[1]</sup>。不同肩部体位下的肌肉定量评估有助于提

高对肩部疼痛或活动受限性疾病诊断的准确性<sup>[2]</sup>。中三角肌是维持肩关节稳定性的重要肌肉, 其弹性

- [16] Malik R, Goel H. Clinical validation of calf circumference with DEXA scans as a measure of muscle mass to assess sarcopenia in community settings in indian postmenopausal women[J]. J Midlife Health, 2024, 15(2): 99-103.
- [17] Casto EM, Mancinelli C, Meszaros P, et al. Asymmetric changes in foot anthropometry with pregnancy may be related to onset of lower limb and low back pain[J]. PLoS One, 2024, 19(2): e0292115.
- [18] Zhang J, Pang T, Yao J, et al. Clinical application of myofascial therapy in the treatment of postpartum pain-related functional disorders: A review[J]. Medicine, 2024, 103(40): e39869.
- [19] 邵正, 陈莉娜, 王新. 足底筋膜炎对跑步下肢生物力学影响的

研究[J]. 医用生物力学, 2024, 39(S1): 459.

- [20] Mei Q, Gu Y, Fernandez J. Alterations of pregnant gait during pregnancy and post-partum[J]. Sci Rep, 2018, 8(1): 2217.
- [21] Ong CF, Geijtenbeek T, Hicks JL, et al. Predicting gait adaptations due to ankle plantarflexor muscle weakness and contracture using physics-based musculoskeletal simulations[J]. PLoS Comput Biol, 2019, 15(10): e1006993.
- [22] 张妍, 顾耀东, 李建设. 女性妊娠期运动生物力学特征研究进展[J]. 浙江体育科学, 2014, 36(5): 100-104.

(收稿日期: 2025-07-25; 修回日期: 2026-03-02)

(本文编辑: 侯晓林)

特性的改变可导致肩胛骨力学失衡,进而引发肩部不适或功能障碍<sup>[3,4]</sup>。虽然已有研究表明肌肉弹性与肌力呈正相关<sup>[4-6]</sup>,但如何实现三角肌的准确、便捷评估仍是一个临床难题。等速肌力测试虽被视为肌力评估的金标准,但其运动模式并非生理性、操作复杂且难以针对单一肌肉进行独立评估<sup>[5,6]</sup>,临床实践中亟需更简单实用的评估手段<sup>[7]</sup>。剪切波弹性成像作为一种基于组织弹性力学原理的新型影像技术,可实现肌肉弹性的无创定量检测,具有较高的灵敏度与准确性<sup>[8]</sup>。该技术测得的平均剪切波速度与肌肉收缩力呈线性关系<sup>[8-10]</sup>,且由于三角肌中束纤维排列较为平行,其测量结果具有良好的可重复性<sup>[10]</sup>。因此,超声剪切波弹性成像技术有望成为定量评估中三角肌弹性的有效工具<sup>[11]</sup>。目前,对于超声剪切波弹性成像评估中三角肌的研究尚不多见,尤其缺乏针对中三角肌平均剪切波速度影响因素及正常参考值范围的系统研究<sup>[12]</sup>。既往研究多聚焦于单一肩部姿势下的弹性测定<sup>[13]</sup>,尚未构建静息位(0°)与典型功能位(90°)结合的参考值体系,对性别影响的探讨亦不够充分。

本研究旨在建立健康中青年人群三角肌中束在 0°与 90°位下的平均剪切波速度参考值范围;分析性别、年龄、体重指数及肌肉厚度对弹性的影响,为肩部肌肉疾病的诊断与功能评估提供一组可靠、分性别的定量影像学参考标准。

## 1 资料与方法

### 1.1 一般资料

2023 年 1 月至 2024 年 1 月四川省人民医院招募健康中青年 94 例。纳入标准:①年龄 18~59 岁;②三角肌肌力 5 级;③肩关节活动范围正常,无肩痛病史;④依从性良好。排除标准:①有肩部手术或外伤史;②妊娠期女性;③存在结核、肿瘤等消耗性疾病病史;④存在类风湿性关节炎、系统性红斑狼疮、糖尿病、甲状腺功能异常、骨质疏松症等可影响肌肉代谢或结构的疾病史。入组志愿者年龄 19~56 岁[(42.43±9.22)岁],体重指数 16.02~32.44 kg/m<sup>2</sup>[(23.95±2.74)kg/m<sup>2</sup>]。其中女 63 例(65.3%),年龄 23~56 岁[(46.14±6.30)岁],体重指数 16.02~32.44 kg/m<sup>2</sup>[(24.15±2.81)kg/m<sup>2</sup>];男 31 例(34.7%),年龄 19~55 岁[(34.87±9.66)岁],体重指数 19.00~28.39 kg/m<sup>2</sup>[(23.55±2.59)kg/m<sup>2</sup>]。本研究经四川省人民医院伦理委员会批准,遵循《赫尔辛基宣言》原则实施。所有受试者于检查前均签署知情同意书。

【基金项目】四川省国际科技创新合作项目(编号:2025YFHZ0106)

【通讯作者】曾俊

### 1.2 方法

所有志愿者进行超声弹性剪切波成像检查。检查前需静坐休息 20 分钟以上,以确保肌肉充分放松。检查时,坐位,保持身体直立、头部中立位。检查姿势包括:①左、右侧中立位(L/R 0°):肩部完全放松,上臂自然下垂轻靠胸壁,与胸壁处于同一平面,肘关节屈曲 90°,前臂旋前,手掌向下置于大腿上;②左、右水平外展位(L/R 90°):参与者主动将肩关节外展至 90°,手臂与胸壁处于同一平面,肘关节伸直,拇指指向天花板(额状面 90°外展)。该体位由量角器定位以确保可靠性与一致性,主动保持 90°外展以评估自然状态下的肌肉收缩功能。

所有检查由同一位具有 10 年以上肌骨超声经验的医师完成。设备选用 Aixplorer U.S. 超声系统(法国声科影像),搭配 SL 10-2 线阵探头。B 模式分辨率为 0.3 mm,弹性成像模式下为 1 mm。选用肌骨弹性成像预设模式,弹性量程设定为<600 kPa 以优化成像质量,测量深度随肌肉厚度在 4~6 cm 范围内调整。探头与皮肤间涂抹数毫米耦合剂形成“声垫”,轻触皮肤,避免施压,确保压力反馈指数始终≤1。测量部位的定位标志为肩峰至三角肌粗隆连线的中点附近。B 模式下的中三角肌超声定位见图 1。

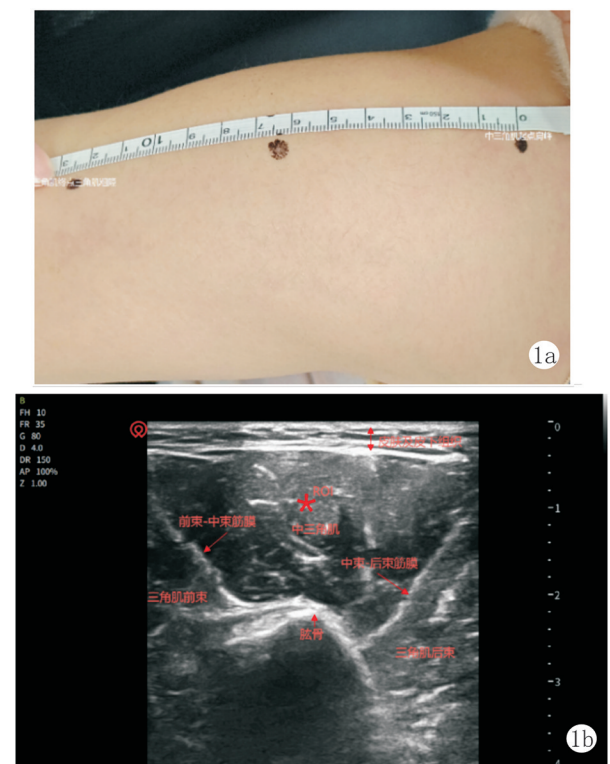


图 1 中三角肌超声定位示意图 a:右肩超声图像采集体表位置定位示意图:肩峰至三角肌粗隆连线的中点;b:于 a 图所示定位点采集右侧肩部中三角肌短轴切面超声图像(B 模式)

在 Aixplorer U.S. 超声系统的肌骨弹性成像模式下,剪切波速度在方形感兴趣区彩色编码图内的 Q-box(直径约 8 mm)的圆形区域内测量,避开了三

角肌中束的深、浅筋膜。感兴趣区的大小根据目标三角肌中束的厚度进行调整。该方案的弹性图稳定性由设备内置算法自动优化。在中三角肌超声图像中方形感兴趣区彩色编码图颜色均匀一致、无明显闪烁或缺失区域时,视为弹性图像已达到稳定状态。在此稳定状态下保持 2~3 秒后保存图像,系统自动计算平均剪切波速度。同一位置重复测量厚度与平均剪切波速度各 3 次,取平均值作为最终结果。本研究的各体位中三角肌剪切波速度数据

由同一名经验丰富且专业的超声医师完成 3 次测量取平均值得到,为了量化评估本研究中三角肌平均剪切波速度测量者内的信度,计算了各体位 3 次重复测量的组内相关系数 (ICC) 及其 95% 置信区间,结果显示 ICC 范围为 0.88~0.96,提示在不同体位下,三次重复测量的 ICC 值均表现出良好至优秀的信度水平。R0°和 R90°体位下取样框 (Q-box) 区域的剪切波速度值见图 2。

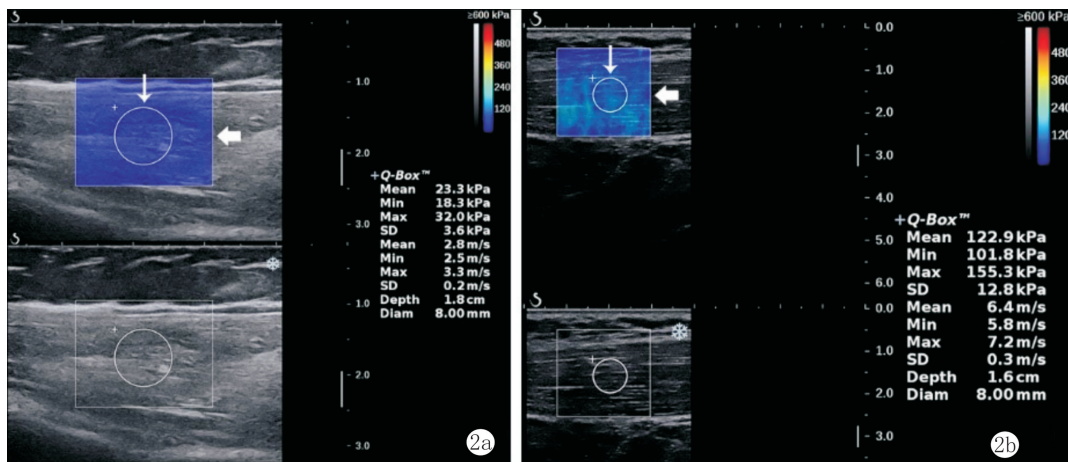


图 2 中三角肌的剪切波弹性成像模式 (上图) 和 B 模式 (下图) 超声图像 剪切波弹性成像框内 (粗箭头) 显示了中三角肌弹性的彩色图。Q-box (细箭头) 内的平均剪切波速度显示在图像的右侧。a: R0°位的平均剪切波速度为 2.8 m/s; b: R90°位的平均剪切波速度为 6.4 m/s

**1.3 统计学方法** 采用 SPSS 26.0 统计学软件进行数据分析。连续变量经 Shapiro-Wilk 检验评估正态性,符合正态分布者以均值±标准差描述,不符合者则以中位数 (四分位数间距) 描述。分类变量以例数 (%) 描述。采用独立样本 *t* 检验 (正态分布) 或 Mann-Whitney *U* 检验 (非正态分布) 比较性别间平均剪切波速度差异。采用回归分析年龄、体重指数、肌肉厚度与平均剪切波速度的关系。正常参考值范围 (95% CI) 按正态分布法计算,公式为: 均值±1.96×标准差。检验水准  $\alpha = 0.05$  (双侧)。

## 2 结果

**2.1 中三角肌厚度与平均剪切波速度** 各体位下三角肌中束厚度及平均剪切波速度测量结果见表

表 2 不同性别受试者各体位中三角肌平均剪切波速度比较 (m/s)

肩部体位	男性 ( $n=31$ )	女性 ( $n=63$ )	<i>t</i>	<i>P</i>
L0°	2.73±0.16	2.84±0.18	-2.727	0.008
R0°	2.84±0.21	2.96±0.19	-2.886	0.005
L90°	5.85±0.43	5.88±0.48	-0.273	0.786
R90°	6.22±0.63	6.11±0.46	0.887	0.378

**2.3 三角肌平均剪切波速度的单因素线性回归分析** 单因素线性回归分析结果显示,年龄及体重指数与 L0°、R0°、L90°及 R90°位中三角肌平均剪切波

速度均无显著相关性 (均  $P>0.05$ )。其中,体重指数与 L0°及 L90°位平均剪切波速度呈弱正相关趋势,但差异均未达到统计学意义。见表 3。

**1. 功能位 (90°) 的平均剪切波速度显著高于静息位 (0°), 差异有统计学意义 ( $P<0.05$ )。**  
**2.2 不同性别三角肌中束弹性比较** L0°位和 R0°位男性与女性受试者比较差异有统计学意义 ( $P<0.01$ ); L90°位和 R90°位比较差异均无统计学意义 (均  $P>0.05$ )。见表 2。

表 1 通过超声剪切波弹性成像测得的中三角肌厚度与平均剪切波速度

肩部体位	中三角肌厚度 (mm)	中三角肌平均剪切波速度 (m/s)
L0°	14.69±0.74	2.80±0.18
R0°	14.95±0.92	2.92±0.20
L90°	20.61±1.59	5.87±0.46
R90°	21.63±1.72	6.15±0.52

表 3 年龄、体重指数与各体位中三角肌平均剪切波速度的单因素线性回归分析 (n=94)

危险因素	肩部体位	B	SE	t	P	95%CI
年龄	L0°	0.0027	0.0020	1.336	0.185	-0.0013 ~ 0.0067
	R0°	0.0032	0.0023	1.424	0.158	-0.0013 ~ 0.0077
	L90°	0.0053	0.0052	1.010	0.315	-0.0051 ~ 0.0156
	R90°	-0.0006	0.0059	-0.101	0.920	-0.0123 ~ 0.0111
	L0°	0.0118	0.0067	1.743	0.085	-0.0016 ~ 0.0252
体重指数	R0°	-0.0019	0.0077	-0.250	0.803	-0.0172 ~ 0.0133
	L90°	0.0300	0.0173	1.730	0.087	-0.0044 ~ 0.0643
	R90°	0.0266	0.0197	1.350	0.180	-0.0125 ~ 0.0658

2.4 肌肉厚度与平均剪切波速度的关系 仅在 L0°位观察到肌肉厚度与平均剪切波速度呈负相关

( $r = -0.239, R^2 = 0.057, P = 0.018$ ), 其余体位均未发现显著相关性 ( $P > 0.05$ )。见图 3。

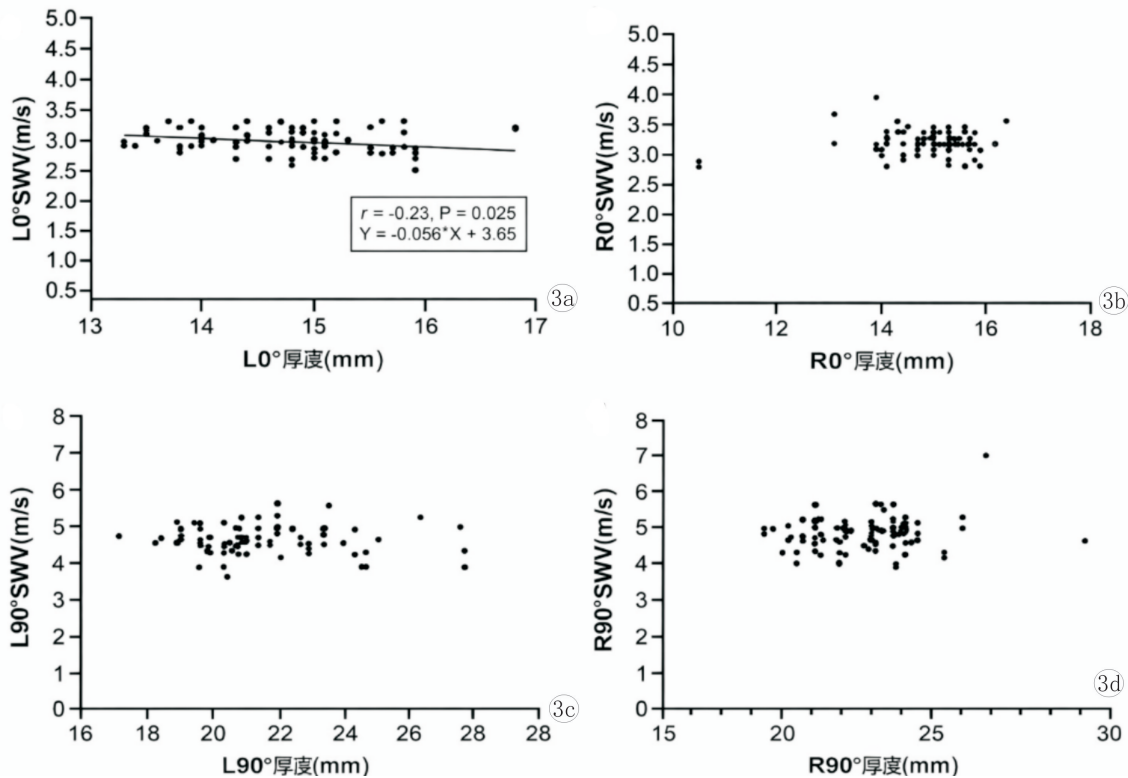


图 3 中三角肌厚度与中三角肌平均剪切波速度之间的关系 a: L0°位; b: R0°位; c: L90°位; d: R90°位

2.5 不同年龄亚组三角肌弹性比较 将受试者划分为青年组 (18~44 岁, n=38) 与中年组 (45~59 岁, n=56), 两组在 L0°、R0°、L90°及 R90°位的平均剪切波速度比较, 差异均无统计学意义 (均  $P > 0.05$ )。见表 4。

表 4 不同年龄亚组各体位中三角肌平均剪切波速度比较 (m/s)

肩部体位	青年组 (n=38)	中年组 (n=56)	t	P
L0°	2.76±0.17	2.83±0.18	-1.868	0.065
R0°	2.88±0.20	2.95±0.20	-1.528	0.117
L90°	5.85±0.41	5.88±0.50	-0.293	0.770
R90°	6.17±0.58	6.13±0.48	0.352	0.725

2.6 健康中青年中三角肌弹性的参考范围 根据上述分析结果, 静息位 (0°) 参考范围分性别报告,

功能位 (90°) 则报告总体参考范围。各体位下中三角肌平均剪切波速度的参考值范围见表 5。

表 5 健康中青年中三角肌平均剪切波速度参考值范围 (m/s)

肩部体位	剪切波速度	95% CI
L 0° (男性)	2.73±0.16	2.42~3.05
L 0° (女性)	2.84±0.18	2.48~3.19
R 0° (男性)	2.84±0.21	2.44~3.24
R 0° (女性)	2.96±0.19	2.60~3.33
L 90° (全部志愿者)	5.87±0.46	4.96~6.77
R 90° (全部志愿者)	6.15±0.52	5.12~7.17

### 3 讨论

本研究首次系统建立了健康中青年人群中三角肌在肩部静息与功能位下的平均剪切波速度参考范围, 并探讨了性别、年龄、体重指数及肌肉厚度

对其的影响。主要发现包括:①在肩部静息位时,中三角肌的平均剪切波速度在不同性别之间存在差异,男性低于女性;在功能位时,该差异消失;②年龄、体重指数在本研究人群中与中三角肌弹性未见明确相关性;③中三角肌厚度与弹性在左侧静息位下呈负相关。上述结果为肩部肌肉功能的量化评估提供了基线参考。

本研究的重要贡献在于构建了“静息功能”双体位对照的参考值体系。相较于以往单一体位的研究,同时评估 0°与 90°体位更贴合临床评估肌肉动态特性的实际需求<sup>[14,15]</sup>。尽管不同研究因设备、人群及方法差异导致平均剪切波绝对值略有不同<sup>[14]</sup>,但平均剪切波速度随外展角度增加而升高的趋势是一致的,证实了剪切波弹性成像对肌肉硬度变化的敏感性<sup>[15]</sup>。

本文的特别发现在于性别对肌肉弹性的影响呈现体位依赖性。静息位下女性平均剪切波速度比男性的高,与近期针对其他骨骼肌(如肱二头肌、腓肠肌)的剪切波弹性成像的研究结果相符,提示男女性在基础肌肉硬度上可能存在生理性差异<sup>[16-18]</sup>。这种差异可能与性激素水平、肌纤维类型构成、日常活动模式及绝对肌力基础等因素有关<sup>[19]</sup>。然而,在功能位时,不同性别间弹性差异消失,这可能是因为在功能体位下需主动收缩以维持姿势,其弹性更多地反映了任务依赖性的即时肌张力变化,从而掩盖了静息状态下固有的、与组织结构相关的性别差异<sup>[18]</sup>。这一变化特征对于鉴别生理性收缩与病理性僵硬具有潜在意义<sup>[20,21]</sup>;若患者在静息时即表现为异常增高的肌肉硬度,可能提示结构改变(如纤维化、脂肪浸润)<sup>[13,18]</sup>;而仅在特定活动姿势下出现的硬度增加,则可能更多与疼痛抑制、协同肌失活或神经控制异常等功能性因素相关<sup>[15,22]</sup>。

本研究建立的定量参考范围为临床评估肩部肌肉状态提供了客观基线数据,可作为“正常标尺”辅助识别因疼痛、废用或痉挛等原因引起的肌肉弹性异常。例如,肩袖损伤后患侧中三角肌可能出现代偿性过度激活或失用性改变,其平均剪切波速度值可能偏离正常范围;在粘连性关节囊炎(冻结肩)患者中,中三角肌作为动力稳定的重要结构,其弹性变化或许能反映疾病的进程与转归<sup>[23]</sup>。

此外,本研究结果显示右侧(优势侧)在 90°位的平均剪切波速度普遍高于左侧,这提示长期运动习惯对肌肉的力学特性具有塑造作用<sup>[15,24]</sup>。因此,在临床解读剪切波弹性成像结果时,除了参考群体数据外,还应结合患者的优势手、职业及运动史进

行个体化分析<sup>[18,25]</sup>。尽管本研究未发现年龄、体重指数与三角肌中束弹性的关联,但这可能与样本年龄范围相对集中于中青年群体且体重指数多处于正常范围有关。最新研究表明,在老年人群或肥胖个体中,年龄相关的肌肉脂肪浸润和肥胖相关的慢性低度炎症可能显著改变肌肉弹性。因此,将本研究结论外推至老年或肥胖人群时需谨慎。

本研究存在以下局限性:首先,样本量有限,且性别分布不均衡(女性居多),可能对统计结果产生一定影响。其次,未系统记录受试者的优势手和日常活动水平,这些因素可能部分解释所观察到的侧别差异。第三,本研究未系统测量和记录受试者的皮下脂肪厚度,并分析其对剪切波速度测量的直接影响。皮下脂肪作为位于探头与目标肌肉之间的组织层,其厚度与声学特性可能对剪切波的激发与接收产生衰减,是影响测量准确性与可重复性的重要因素<sup>[26,27]</sup>。因此,未来研究应纳入体脂成分、皮下脂肪厚度等变量,进行分层分析以进一步明确所建立参考值在不同体型及体脂分布人群中的普适性。最后,本研究的研究对象局限于健康中青年群体,其结论不宜直接推广至其他人群。

已有研究表明年龄相关的肌少症、脂肪浸润以及肥胖相关的慢性炎症可显著改变肌肉的弹性特性<sup>[28]</sup>,针对这些人群的剪切波弹性成像参考值有待未来研究建立。未来的研究可从以下几方面进一步探索:①扩大样本量并开展多中心研究,纳入肩峰下撞击综合征、肩袖损伤、脑卒中后肩痛等患者,验证本研究参考值在疾病鉴别与严重度分层中的诊断效能;②纵向追踪康复干预前后肌肉弹性的变化,探索其作为疗效评估生物标志物的潜力;③推动剪切波弹性成像技术的标准化,并尝试与表面肌电、三维运动分析及患者报告结局等多模态数据整合,从而更全面地揭示肌肉弹性在肩关节疾病发生、发展与转归中的临床价值。

综上所述,本研究成功建立了健康中青年中三角肌在静息与功能位下的平均剪切波速度参考值范围,明确了性别仅在静息位下影响参考值的设定。该结果为客观、定量评估肩部肌肉的生物力学特性提供了重要依据,有助于推动超声剪切波弹性成像技术在肩关节疾病诊疗中的临床应用。

#### 【参考文献】

- [1] Dzakpasu FQS, Carver A, Brakenridge CJ, et al. Musculoskeletal pain and sedentary behaviour in occupational and non-occupational settings: a systematic review with meta-analysis [J]. *Int J Behav Nutr Phys Act*, 2021, 18(1):159.
- [2] Lin LZ, Yu YN, Fan JC, et al. Increased stiffness of the superficial

- cervical extensor muscles in patients with cervicogenic headache: a study using shear wave elastography [J]. *Front Neurol*, 2022, 13:874643.
- [3] Schmalz J, Fenwick A, Reichel T, et al. Anterior deltoid muscle tension quantified with shear wave ultrasound elastography correlates with pain level after reverse shoulder arthroplasty[J]. *Eur J Orthop Surg Traumatol*, 2022, 32(2):333-339.
- [4] Yamaura K, Mifune Y, Inui A, et al. Sequential changes in posterior shoulder muscle elasticity after throwing as assessed via ultrasound shear wave elastography [J]. *Orthop J Sports Med*, 2021, 9(8):23259671211021362.
- [5] Bravo-Sanchez A, Abian P, Lucenteforte G, et al. The applicability of shear wave elastography to assess myotendinous stiffness of lower limbs during an incremental isometric strength test [J]. *Sensors (Basel)*, 2022, 22(20):8033.
- [6] Kim K, Hwang HJ, Kim SG, et al. Can shoulder muscle activity be evaluated with ultrasound shear wave elastography? [J]. *Clin Orthop Relat Res*, 2018, 476(6):1276-1283.
- [7] Tang X, Wang L, Guo R, et al. Application of ultrasound elastography in the evaluation of muscle strength in a healthy population[J]. *Quant Imaging Med Surg*, 2020, 10(10):1961-1972.
- [8] Ding CW, Song X, Fu XY, et al. Shear wave elastography characteristics of upper limb muscle in rigidity-dominant Parkinson's disease[J]. *Neurol Sci*, 2021, 42(10):4155-4162.
- [9] Bernabei M, Lee SSM, Perreault EJ, et al. Shear wave velocity is sensitive to changes in muscle stiffness that occur independently from changes in force [J]. *J Appl Physiol (1985)*, 2020, 128(1):8-16.
- [10] Wang L, Guo X, Tan L, et al. Quantitative assessment of normal middle deltoid muscle elasticity at various arm abduction using ultrasound shear wave elastography [J]. *Sci Rep*, 2021, 11(1):12479.
- [11] Harada R, Taniguchi-Ikeda M, Nagasaka M, et al. Assessment of the upper limb muscles in patients with Fukuyama muscular dystrophy: noninvasive assessment using visual ultrasound muscle analysis and shear wave elastography[J]. *Neuromuscul Disord*, 2022, 32(9):754-762.
- [12] Umehara J, Hasegawa S, Nakamura M, et al. Effect of scapular stabilization during cross-body stretch on the hardness of infraspinatus, teres minor, and deltoid muscles: an ultrasonic shear wave elastography study[J]. *Musculoskelet Sci Pract*, 2017, 27:91-96.
- [13] Xu W, Zheng Y, Jiang Y, et al. Shear wave imaging the active constitutive parameters of living muscles [J]. *Acta Biomater*, 2023, 166:400-408.
- [14] Chen ZT, Li XL, Jin FS, et al. Diagnosis of sarcopenia using convolutional neural network models based on muscle ultrasound images: prospective multicenter study[J]. *J Med Internet Res*, 2025, 27:e70545.
- [15] Andrade RJ, Racape A, Hernandez-Secorun M, et al. Simultaneous measurement of tensile and shear elasticity and anisotropy in human skeletal muscle tissue using steered ultrasound shear waves [J]. *Acta Biomater*, 2025, 199:217-229.
- [16] Wong KY, Lau MW, Lee MH, et al. Study on the effects of arm abduction angle and cushion support during sonographic examination on the stiffness of supraspinatus muscle of sonographers using shear wave elastography[J]. *J Occup Health*, 2021, 63(1):e12306.
- [17] Romano A, Staber D, Grimm A, et al. Limitations of muscle ultrasound shear wave elastography for clinical routine-positioning and muscle selection[J]. *Sensors*, 2021, 21(24):8490.
- [18] Chen C, Xu GX, Su WR, et al. Method for correcting the muscle fiber orientation determined by a T-shaped transducer in ultrasound shear wave elastography[J]. *IEEE Trans Med Imaging*, 2025, 44(6):2528-2540.
- [19] De Jong JCBC, Caspers MPM, Worms N, et al. Translatability of mouse muscle-aging for humans: the role of sex[J]. *Geroscience*, 2024, 46(3):3341-3360.
- [20] Malik A, Baranger J, Nguyen MB, et al. Impact of ventricular geometric characteristics on myocardial stiffness assessment using shear-wave velocity in healthy children and young adults[J]. *J Am Soc Echocardiogr*, 2023, 36(8):849-857.
- [21] Bezy S, Duchenne J, Orłowska M, et al. Impact of loading and myocardial mechanical properties on natural shear waves: comparison to pressure-volume loops [J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2022, 15(12):2023-2034.
- [22] Wheatley BB, Dyer OL, Tully EE, et al. Aponeurosis structure-function properties: evidence of heterogeneity and implications for muscle function[J]. *Acta Biomater*, 2023, 168:298-308.
- [23] Papalexis N, Parmeggiani A, Facchini G, et al. Current concepts in the diagnosis and treatment of adhesive capsulitis: role of diagnostic imaging and ultrasound-guided interventional procedures [J]. *Radiol Med*, 2022, 127(12):1390-1399.
- [24] Laohawiriyakamol T, Boonsri P, Phutphithak K, et al. Appropriate intradeltoid muscle needle penetration depth in vaccine administration: an MRI study in Thailand[J]. *Front Immunol*, 2023, 14:1302891.
- [25] Albano D, Basile M, Gitto S, et al. Shear-wave elastography for the evaluation of tendinopathies: a systematic review and meta-analysis[J]. *Radiol Med*, 2024, 129(1):107-117.
- [26] Chen C, Xu GX, Su WR, et al. Method for correcting the muscle fiber orientation determined by a T-shaped transducer in ultrasound shear wave elastography[J]. *IEEE Trans Med Imaging*, 2025, 44(6):2528-2540.
- [27] Kijanka P, Urban MW. Phase velocity estimation with expanded bandwidth in viscoelastic phantoms and tissues[J]. *IEEE Trans Med Imaging*, 2021, 40(5):1352-1362.
- [28] Lin CW, Shieh JY, Tsui PH, et al. Acoustic radiation force impulse shear wave elastography quantifies upper limb muscle in patients with Duchenne muscular dystrophy[J]. *Ultrason Sonochem*, 2023, 101:106661.

(收稿日期:2025-12-26;修回日期:2026-03-05)

(本文编辑:侯晓林)