

doi:10.3969/j.issn.1006-9852.2025.06.007

基于三维超声深度学习模型诊断腰部多裂肌慢性损伤 *

闫龙涛¹ 毛 鹏¹ 朱 谦¹ 张 超² 陈伊葶³ 郑 锐³ 张明博² 樊碧发^{1△}⁽¹⁾中日友好医院疼痛科, 北京 100029; ⁽²⁾中国人民解放军总医院第一医学中心超声诊断科, 北京 100853; ⁽³⁾上海科技大学信息科学与技术学院, 上海 200120)

摘 要 目的: 多裂肌作为稳定脊柱的核心肌群, 其慢性退行性改变导致腰痛。本研究通过三维超声成像解析多裂肌纹理, 探索人工智能无创评估腰部慢性损伤的可行性。**方法:** 纳入 2024 年 5 月至 2025 年 1 月在中日友好医院疼痛科就诊的 46 例腰痛病人, 采用三维容积探头采集 L₂~S₁ 节段双侧多裂肌共 368 个三维超声容积数据。同步记录病人临床资料。以 MRI 脂肪浸润诊断为金标准, 分别构建随机森林 (random forest, RF) 机器学习模型和深度卷积神经网络 (deep convolutional neural network, DCNN) 模型进行特征分析, 并通过受试者工作特征曲线 (receiver operating characteristic curve, ROC) 比较模型性能。**结果:** DCNN 模型诊断多裂肌脂肪浸润的准确率达 69% (AUC = 0.76), 显著优于 RF 模型的 62% (AUC = 0.68) ($P = 0.032$)。**结论:** 基于三维超声的深度学习技术能有效评估多裂肌慢性损伤, 为腰痛的精准诊疗提供了新型无创影像学工具。

关键词 三维超声; 多裂肌; 深度学习; 脂肪浸润; 慢性腰痛

Diagnosis of chronic lumbar multifidus muscle injury based on a three-dimensional ultrasound deep learning model *

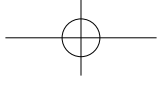
YAN Long-tao¹, MAO Peng¹, ZHU Qian¹, ZHANG Chao², CHEN Yi-ting³, ZHENG Rui³, ZHANG Ming-bo², FAN Bi-fa^{1△}⁽¹⁾ Department of Pain Medicine, China-Japan Friendship Hospital, Beijing 100029, China; ⁽²⁾ Department of Ultrasound Diagnosis, The First Medical Center of Chinese PLA General Hospital, Beijing 100853, China; ⁽³⁾ School of Information Science and Technology, Shanghai University of Science and Technology, Shanghai 200120, China)

Abstract Objective: The multifidus muscle is the core muscle group for maintaining spinal stability, and its chronic degeneration is the key pathological factor causing low back pain. The aim of this study is to analyze the spatial texture features of the multifidus muscle by three-dimensional ultrasound imaging technology, and to explore the feasibility of artificial intelligence in noninvasive evaluation of chronic lumbar multifidus muscle injury. **Methods:** From May 2024 to January 2025, 46 patients with low back pain in the Department of Pain Medicine, China-Japan Friendship Hospital were enrolled. A total of 368 three-dimensional ultrasound volume data of bilateral multifidus muscles at L₂-S₁ segment were collected by three-dimensional volume probe. The clinical data of patients were recorded simultaneously. With MRI fatty infiltration diagnosis as the gold standard, random forest (random forest, RF) machine learning model and deep convolutional neural network deep convolutional neural network (DCNN) model were constructed for feature analysis, and the performance of the models was compared by receiver operating characteristic curve (ROC). **Results:** The accuracy of the DCNN model in diagnosing fatty infiltration of the multifidus muscle was 69% (AUC = 0.76), which was significantly better than 62% (AUC = 0.68) of the RF model ($P = 0.032$). **Conclusion:** Deep learning based on 3D ultrasound can effectively evaluate chronic multifidus muscle injury and provide a new non-invasive imaging tool for the precise diagnosis and treatment of low back pain.

Keywords three-dimensional ultrasound; multifidus muscle; deep learning; fatty infiltration; chronic low back pain

* 基金项目: 中日友好医院中央高水平医院临床业务费项目 (超声影像下老年人腰部多裂肌损伤早期诊断及疗效评估系统构建) 2024-NHLHCRF-PY-I-10

△ 通信作者 樊碧发 fb1616@yeah.net



慢性腰痛作为全球致残率最高的健康问题之一,显著降低病人生活质量并造成巨大的社会经济负担,其中约 90% 的慢性腰痛与腰部软组织退行性改变密切相关^[1,2]。多裂肌作为维持脊柱稳定性的核心肌群,其脂肪浸润与萎缩被认为是腰痛发生和进展的关键病理机制,可作为评估疾病严重程度的客观标志^[3,4]。MRI 是评估肌肉脂肪浸润的金标准,但由于其高成本、扫描时间长、金属置入物及部分病人幽闭恐惧等限制临床广泛应用^[5]。二维超声虽具实时、无创优势,却难以捕捉多裂肌沿肌纤维走行的三维空间纹理特征。因此,开发一种兼具高精度、低成本且无创的肌肉退变评估工具,成为临床亟需解决的难题。

近年来,三维超声技术的进步为肌肉结构的多维度量化分析提供了可能^[6]。三维超声可通过容积成像展示肌肉组织的空间纹理分布,提升脂肪浸润的检出敏感性。与此同时,人工智能 (artificial intelligence, AI) 尤其在医学影像分析中的应用迅速扩展^[7]。深度卷积神经网络 (deep convolutional neural network, DCNN) 能够从原始图像中自主提取多尺度特征,在复杂解剖结构的分类任务中展现出超越传统机器学习方法的性能。然而,目前国内外研究多聚焦于二维超声与 AI 的结合,未见三维超声容积数据的深度学习模型构建及其在肌肉退变评估中的应用报道。因此,本研究创新性地三维超声容积成像与 DCCN 相结合,通过三维超声显示多裂肌脂肪浸润的空间特征,并基于 DCCN 模型提取特征,构建多裂肌脂肪浸润的诊断模型。本研究为慢性腰痛的病因学诊断提供了新型无创影像标志物,还为肌肉退变的动态监测及康复疗效评估开辟了技术路径。

方 法

1. 一般资料

本研究通过中日友好医院医学伦理委员会审核 (伦理批号 2024-KY-302)。连续纳入 2024 年 5 月至 2025 年 1 月期间在中日友好医院疼痛科确诊为慢性腰痛病人 46 例,所有病人均签署书面知情同意书。收集病人的临床资料,包括年龄、性别、体重指数 (body mass index, BMI)、职业与生活习惯 (包括久坐、体力劳动、夜班、每周锻炼时长等)、疼痛视觉模拟评分法 (visual analogue scale, VAS) 评分、病程、因疼痛卧床时间和脂肪浸润程度等。

纳入标准:①符合《中国非特异性腰背痛临床诊疗指南》诊断标准^[8];②近 3 个月未使用激素类药物及长效镇痛剂;③无腰部外伤或手术史;④入

组前 1 周内完成腰部 MRI 检查。

排除标准:① BMI $\geq 28 \text{ kg/m}^2$;②年龄 < 18 岁或 > 80 岁;③腰背部超声图像显示不清晰;④急性肌肉痉挛状态 (腰背部持续性剧烈疼痛,伴有明显的肌肉僵硬感,触诊发现腰背部肌肉局部紧张、硬结或条索状改变);⑤存在腰椎肿瘤、结核、感染或结构性畸形。

2. 仪器与方法

(1) 超声仪器及探头:采用 Philips 公司的 EPIQ Elite 彩色多普勒超声诊断仪。定位腰椎节段采用 C5-1 探头 (频率 1.0~5.0 MHz)。三维超声容积数据获取采用 XL14-3 三维矩阵探头 (频率 3.0~14.0 MHz、中心频率 6.8 MHz)。

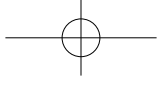
(2) 超声图像的采集:由 1 位 5 年以上肌骨超声经验的医师按标准化方案完成数据采集。

体位:受试者呈俯卧位,腹部垫枕以维持腰椎位置,腰背部肌肉完全放松,脚踝在床的边缘,双脚保持中立位^[9]。

二维超声定位:采用 C5-1 探头,检查条件设置为常规腹部条件,二维增益 50%~60%,深度 6~9 cm,焦点位于腰背部多裂肌水平,动态范围为 55 dB,定位并标记腰椎节段。

三维超声图像采集:采用 XL14-3 三维矩阵探头对病人腰部多裂肌进行三维超声容积数据采集,增益 45%~55%,深度 4~7 cm,动态范围 55 dB。采集时,探头和皮肤保持紧贴,探头方向与脊椎垂直,与人体横断面平行。选择 L₂₋₃、L₃₋₄、L₄₋₅、L₅S₁ 四个节段的多裂肌,并在左右两侧各获取 1 个三维超声容积图像,即 1 个受试者获取 8 个容积图像。

(3) 纹理分析:①数据预处理:调整超声增益以提高成像清晰度。为消除增益对脂肪浸润评价的影响,选取棘突及其下方声影作为高低回声参考点,计算灰度值,获得标准参考值,对数据进行标准化。提取感兴趣区域 (region of interest, ROI),统一尺寸为 180×180×70 (体素),以便后续分析。②机器学习:本研究共选择了 3 类纹理特征对三维超声数据进行分析,包括灰度共生矩阵 (gray level co-occurrence matrix, GLCM)、nakagami 特征和一阶统计量。通过三维 GLCM 提取特征,生成二维灰度共生矩阵,参数包括灰度阶数、步长和方向。在样本中尝试了不同的灰度阶数和偏移量,共生成 1170 种参数,计算 GLCM 的 6 个属性,最终得到 7020 维特征。使用 nakagami 特征时,将三维 ROI 展平并去除 0 值,利用 Gamma 分布拟合,得到二维向量。一阶统计量特征包括平均灰度值、标准偏差等,



构成五维向量。最终构建了 1 个十三维特征空间，并使用随机森林对特征向量进行分类，选择最优模型进行测试。③深度学习：首先使用 Z 得分对数据进行归一化。然后调整图像尺寸，把所有三维容积数据的尺寸统一压缩为 $128 \times 128 \times 64$ （体素），以便用于分类网络的训练。本研究使用 MedicalNet^[10] 的 3Dresnet50 网络进行训练并使用其预训练权重，将模型最后的 8 分支译码器替换为全连接层，采用 sigmoid 激活函数获得类别概率。设置最大训练 100 轮，批大小为 4，损失函数为二分类交叉熵损失，学习率调整使用标准随机梯度下降法^[11]。④评价指标：使用灵敏度、特异度、阳性预测值、阴性预测值、准确率和曲线下面积 (area under curve, AUC) 来评估模型性能。为避免过度依赖单次划分的随机性，本研究采用 5 折交叉验证，并在训练集中划分 20% 数据作为验证集。

分级标准：多裂肌脂肪浸润程度共被分为无、轻度、中度、重度四个等级，由 2 位具有 10 年以上肌骨 MRI 专家盲法评估脂肪浸润分级^[12]，如结果不一致再请 1 位具有 15 年以上经验的高年资医师会诊确定。

3. 样本量计算

本研究受试者数量为 46 例，但通过采集 $L_2 \sim S_1$ 双侧共 8 个节段的三维容积数据 ($46 \times 8 = 368$ 个独立分析单元)，实际建模数据量已达到深度学习方法的基本要求。相比传统二维影像研究（每例仅 1~2 个切面），本研究通过三维容积采样的空间连续性显著提升了单病例信息密度；采用分层五折交叉验证 (Stratified 5-fold CV)，确保每个折集均保持脂肪浸润分级比例，最终 DCNN 模型的平均 AUC 达 0.76 (95% CI: 0.71-0.81)，显示模型在有限样本下仍具有可靠区分度。

4. 统计学分析

采用 PASS 25.0 软件进行统计学处理。符合正态分布的连续变量以均数 $\pm$ 标准差 ($\bar{x} \pm SD$) 表示；非正态分布以 M (Q1, Q3) 表示。计算疼痛评分与分别计算机器学习和深度学习算法诊断多裂肌脂肪浸润的敏感性、特异性、阳性预测值、阴性预测值、准确性和 AUC。模型性能比较采用 DeLong 检验。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

结 果

1. 一般资料

本研究共收集中日友好医院疼痛科就诊的慢

性腰痛病人 46 例，其中女性 23 例，男性 23 例，年龄范围 (32.2 ± 9.8) 岁。共 16 例被排除（3 例因 BMI $> 28 \text{ kg/m}^2$ 而被排除，13 例因数据不完整、切面不全或图像显示不清晰而被排除）。共收集了 368 个多裂肌三维超声容积数据。收集所有受试者的临床资料统计信息，包括年龄、性别、BMI、职业与生活习惯（包括久坐、体力劳动、夜班、每周锻炼时长等）、VAS 评分、病程、因疼痛卧床时间和脂肪浸润程度（见表 1）。研究结果表明 BMI 与疼痛评分呈显著正相关 (Pearson $r = 0.42, P < 0.01$)，BMI 越高，VAS 评分越高。

2. 超声图像特征

正常多裂肌二维超声图像显示肌纤维呈短线状排列，肌间深筋膜及肌内肌间隔纹理清晰（见图 1A）；发生脂肪浸润的多裂肌，超声图像显示肌肉纹理由短线变为细颗粒状，肌肉回声增强，肌间深筋膜及肌内肌间隔分界模糊不清（见图 1B）。三维超声可以沿多裂肌空间走行方向，显示肌肉纹理特征。正常多裂肌三维超声图像显示肌纤维呈平行线状排列，肌间深筋膜及肌内肌间隔高回声带清晰连续（见图 2）；发生脂肪浸润的多裂肌，三维超声图像显示肌肉回声增强，肌间深筋膜及肌内肌间隔分界模糊不清（见图 3）。三维超声的特征显示更加明显。

3. 模型性能比较

机器学习的随机森林模型与深度学习神经网络模型均可区分多裂肌脂肪浸润情况有无的特征，5 折交叉验证中两种模型的诊断效能结果见表 2 和表 3。两种模型诊断效能的比较见表 4。随机森林模型平均准确率为 61.87%，AUC = 0.68；神经网络模型平均准确率为 70.41%，AUC = 0.79。深度学习在各评价指标上均显著优于传统机器学习 ($P < 0.001$)，表明神经网络模型在处理此二分类任务时具有相对更好地性能和更高地稳定性。

讨 论

本研究首次将三维超声容积成像与深度学习技术相结合，系统评估了多裂肌慢性损伤的影像特征与诊断效能。结果显示，基于三维超声的 DCNN 模型在诊断多裂肌脂肪浸润方面显著优于传统机器学习方法（准确率 70.41% vs. 61.87%，AUC 0.79 vs. 0.68），为慢性腰痛的病因学诊断提供了新型无创评估工具。

腰部多裂肌是维持腰椎稳定性的关键肌肉，其

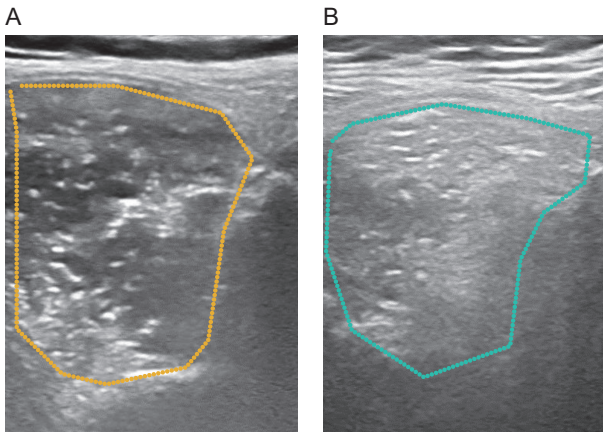


图 1 腰部多裂肌超声图像
(A) 正常节段的多裂肌超声图像 (黄色区域) 肌纤维呈短线状排列, 肌间深筋膜及肌内肌间隔纹理清晰; (B) 脂肪浸润的多裂肌超声图像 (蓝色区域) 肌肉回声增强, 肌间深筋膜及肌内肌间隔分界模糊不清

Fig. 1 Ultrasound image of the lumbar multifidus muscle
(A) In the normal segment, the multifidus muscle ultrasound image (yellow area) showed short linear arrangement of muscle fibers, clear texture between the deep fascia and the intermuscular septum; (B) Ultrasound image of fatty infiltration of multifidus muscle (blue area) with enhanced muscle echo and blurred boundary of deep intermuscular fascia and intramyomuscular septum.

退化与脊柱稳定性下降、慢性腰痛及其他脊柱疾病 (如腰椎滑脱、椎间盘退变等) 密切相关。多裂肌退化的病理机制包括肌肉萎缩与脂肪浸润、肌纤维胶原沉积等。其中, 多裂肌脂肪浸润与腰痛严重程度、功能障碍 (如 Oswestry 功能障碍指数) 显著相关, 脂肪浸润超过 20% 时, 腰椎活动度下降和疼痛加剧的风险显著增加^[13]。本研究基于这一理论基础, 应用纹理分析与 DCNN 评估三维超声多裂肌脂肪浸润情况, 为肌肉慢性损伤提供一种无创且实时的评估方法, 进而为腰痛的早期诊断和干预提供新的思路。

传统超声已用于测量多裂肌厚度和横截面积^[9], 但三维超声通过容积数据可实现更精细的连续层面分析。本研究中应用具有多重数据流实时动态聚焦技术的三维矩阵探头, 实现多切面、多角度实时成像, 使病变与周围器官的空间位置关系直接显示^[14]。病人腰部多裂肌脂肪浸润会导致肌纤维排列紊乱^[15], 而三维超声可清晰显示这种结构异常, 并通过多平面重建量化脂肪与肌肉组织的空间分布比例。然而, 三维超声数据的分析难度增加, 本研究结合三维超声与人工智能的协同优势, 应用传统

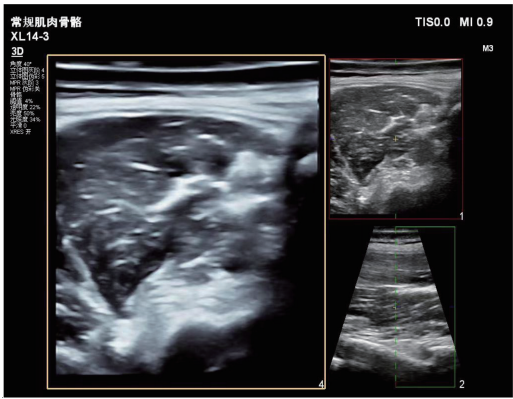


图 2 正常多裂肌三维超声图像
肌纤维呈平行线状排列, 肌间深筋膜及肌内肌间隔高回声带清晰连续

Fig. 2 Three-dimensional sonographic image of normal multifidus muscle
The muscle fibers were arranged parallel and linear, and the hyperechoic bands between the deep intermuscular fascia and the intermuscular septum were clear and continuous.

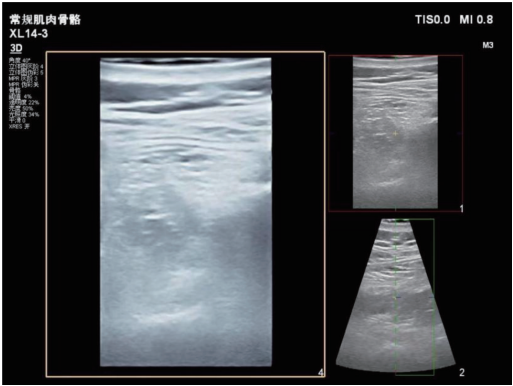


图 3 脂肪浸润的多裂肌三维超声图像
肌肉回声弥漫性增强, 肌间深筋膜及肌内肌间隔分界模糊不清

Fig. 3 Three-dimensional sonographic image of the fat-infiltrated multifidus muscle
The muscle echo was diffusely enhanced, and the boundary between the deep intermuscular fascia and the intermuscular septum was blurred.

机器学习和深度学习卷积神经网络, 分别获取三维容积数据中多裂肌沿肌纤维走行的空间纹理特征。DCNN 模型通过自主提取三维空间特征 (如脂肪浸润的局灶性分布模式), 在脂肪浸润的自动分类中表现出 70.41% 的准确率, 相较于传统的纹理分析法 (61.87%), 具有显著优势。相比之下, 传统机器学习依赖人工设计的 GLCM 和 Nakagami 特征, 难以表征脂肪与肌纤维的复杂空间交互作用, 导致分类性能受限, 提示 DCNN 方法在复杂解剖结构分析



表 1 病人临床信息及 MRI 脂肪浸润程度
Table 1 Clinical information of patients and MRI fat infiltration degree

基本信息 General information		数据 Data
人口学特征 Demographic characteristics		
男/女 Male/Female		23/23
年龄（岁） Age (Years)		32.2±9.8
身高（厘米） Height (cm)		169.5±7.9
体重（千克） Weight (kg)		66.9±13.3
BMI 指数（千克/米 ² ） BMI index (kg/m ²)		23.17±3.76
职业与生活习惯 Occupation and lifestyle		
久坐（≥ 30 min/次） Sedentary (≥ 30 min/session)		56.5% (26/46)
体力劳动（需腰部用力） Physical labor (Requiring waist effort)		34.8% (16/46)
有夜班（≥ 4 次/月） Night shifts (≥ 4 times/month)		23.9% (11/46)
锻炼时间（小时/周） Exercise time (Hours/Week)		2 (1, 3)
疼痛相关指标 Pain-related indicators		
VAS 评分 VAS scores		3.6±1.8
疼痛病程（月） Pain duration (Months)		12 (1, 32)
因疼痛卧床时间（月） Bed rest due to pain (Months)		2 (1, 3)
MRI 脂肪浸润程度 MRI fat infiltration degree		腰椎节段数 (%) Number of lumbar segments (%)
无脂肪浸润 No fat infiltration		208 (56.5)
有脂肪浸润 Fat infiltration		160 (43.5)
轻度 Mild		87 (54.4)
中度 Moderate		48 (30.0)
重度 Severe		25 (15.6)

表 2 机器学习随机森林模型的诊断效能
Table 2 Diagnostic performance of machine learning random forest model

5 折交叉验证 5-fold cross validation	准确率 (%) Accuracy (%)	阳性预测值 (%) Positive predictive value (%)	阴性预测值 (%) Negative predictive value (%)	灵敏度 (%) Sensitivity (%)	特异度 (%) Specificity (%)	曲线下面积 AUC
Fold-1	53.13	48.65	59.26	62.07	45.71	0.62
Fold-2	67.18	64.70	70.00	70.97	63.64	0.72
Fold-3	67.18	66.67	69.23	76.47	59.06	0.71
Fold-4	62.50	70.97	54.55	59.46	66.67	0.72
Fold-5	59.37	62.50	56.25	58.82	60.00	0.64

表 3 深度学习卷积神经网络模型的诊断效能
Table 3 Diagnostic performance of deep learning convolutional neural network model

5 折交叉验证 5-fold cross validation	准确率 (%) Accuracy (%)	阳性预测值 (%) Positive predictive value (%)	阴性预测值 (%) Negative predictive value (%)	灵敏度 (%) Sensitivity (%)	特异度 (%) Specificity (%)	曲线下面积 AUC
Fold-1	75.34	65.63	82.93	75.00	75.56	0.84
Fold-2	72.60	78.13	68.29	65.79	80.00	0.83
Fold-3	61.64	55.88	66.67	59.38	63.41	0.71
Fold-4	72.60	62.50	80.50	71.43	73.30	0.82
Fold-5	69.86	71.88	68.29	63.89	75.68	0.75

表 4 机器学习模型与深度学习模型诊断效能的比较
Table 4 Comparison of diagnostic performance between machine learning model and deep learning model

诊断效能平均指标 Diagnostic performance average index	机器学习随机森林模型 Machine learning random fo rest model	深度学习卷积神经网络模型 Deep learning convolutional neural network model
准确率 (%) Accuracy (%)	61.87±5.24	70.41±4.71
阳性预测值 (%) Positive predictive value (%)	62.70±7.56	66.80±7.66
阴性预测值 (%) Negative predictive value (%)	61.86±6.52	73.34±6.91
灵敏度 (%) Sensitivity (%)	66.25±6.97	67.10±6.39
特异度 (%) Specificity (%)	59.02±7.18	73.59±5.53
曲线下面积 AUC	0.68±0.04	0.79±0.05

中的普适性优势。

本研究证实 DCNN 不仅能够提高诊断的准确性, 还有潜力成为腰痛疾病管理中的一种标准化工具^[16]。当前临床实践中, MRI 因扫描时间长、成本高、金属植入物(如心脏起搏器)、幽闭恐惧症等禁忌证限制问题, 难以作为慢性腰痛的常规筛查工具。本研究证实三维超声结合 DCNN 诊断慢性腰痛具有可行性, 其诊断效能准确率高 ($AUC = 0.76$), 且具有实时、动态评估的优势。对于早期筛查动态监测多裂肌退变进程, 识别高风险人群(如久坐职业者), 以及量化评估核心肌群训练效果, 优化运动康复方案等应用场景具有较高的应用潜力。

本研究存在的局限性: 首先, 单中心研究、样本量较小, 可能影响结果的普遍适用性, 后续研究需要在更大规模的多中心样本中进行验证。其次, 缺乏对不同治疗方案的直接评估, 未来的研究应结合临床验证, 探索如何将这些新技术应用于实际治疗中。

综上所述, DCNN 在评估多裂肌脂肪浸润方面具有应用潜力, 可为临床提供一种肌肉损伤评估工具, 为腰痛的早期诊断和个性化治疗提供新的思路。

利益冲突声明: 作者声明本文无利益冲突。

参 考 文 献

- [1] Knezevic NN, Candido KD, Vlaeyen JWS, *et al.* Low back pain[J]. *Lancet*, 2021, 398(10294):78-92.
- [2] 王海宁, 刘波涛, 樊碧发, 等. 腰神经内侧支不同温度射频热凝治疗慢性腰痛疗效分析[J]. *中国疼痛医学杂志*, 2022, 28(12):921-926.
- [3] Jacobs WC, Rubinstein SM, Koes B, *et al.* Evidence for surgery in degenerative lumbar spine disorders[J]. *Best Pract Res Clin Rheumatol*, 2013, 27(5):673-684.
- [4] James G, Chen X, Diwan A, *et al.* Fat infiltration in the multifidus muscle is related to inflammatory cytokine expression in the muscle and epidural adipose tissue in individuals undergoing surgery for intervertebral disc herniation[J]. *Eur Spine J*, 2021, 30(4):837-845.
- [5] Berry DB, Rodriguez-Soto AE, Englund EK, *et al.* Multiparametric MRI characterization of level dependent differences in lumbar muscle size, quality, and microstructure[J]. *JOR Spine*, 2020, 3(2):e1079.
- [6] Budzikowski JD, Murray WM. Multi-sweep 3-dimensional ultrasound is accurate for in vivo muscle volume quantification, expanding use to larger muscles[J]. *J Biomech*, 2023, 151:111501.
- [7] Savadjiev P, Chong J, Dohan A, *et al.* Demystification of AI-driven medical image interpretation: past, present and future[J]. *Eur Radiol*, 2019, 29(3):1616-1624.
- [8] 中国康复医学会脊柱脊髓专业委员会, 中华医学会骨科学分会骨科康复学组. 中国非特异性腰背痛临床诊疗指南[J]. *中国脊柱脊髓杂志*, 2022, 32(3):258-268.
- [9] 张超, 毛译, 王雁, 等. 超声多参数成像评价腰部多裂肌损伤的前瞻性临床研究[J]. *中国疼痛医学杂志*, 2024, 30(6):432-438.
- [10] Chen S, Ma K, Zheng Y. Med3D: transfer learning for 3D medical image analysis[J]. *arXiv*, 2019, a rXiv: 1904.00625.
- [11] Krizhevsky A, Sutskever I, Hinton GE. Imagenet classification with deep convolutional neural networks[J]. *Commun ACM*, 2017, 60(6):84-90.
- [12] Park BK, Hong SH, Jeong K. Effectiveness of ultrasound in evaluation of fatty infiltration in rotator cuff muscles[J]. *Clin Orthop Surg*, 2020, 12(1):76.
- [13] Hildebrandt M, Fankhauser G, Meichtry A, *et al.* Correlation between lumbar dysfunction and fat infiltration in lumbar multifidus muscles in patients with low back pain[J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2017, 18(1):12.
- [14] Li YY, Liu YH, Yan L, *et al.* Single-plane versus real-time biplane approaches for ultrasound-guided central venous catheterization in critical care patients: a randomized controlled trial[J]. *Crit Care*, 2023, 27(1):366.
- [15] Chan ST, Fung PK, Ng NY, *et al.* Dynamic changes of elasticity, cross-sectional area, and fat infiltration of multifidus at different postures in men with chronic low back pain[J]. *Spine J*, 2012, 12(5):381-388.
- [16] Bailey JF, Fields AJ, Ballatori A, *et al.* The relationship between endplate pathology and patient-reported symptoms for chronic low back pain depends on lumbar paraspinal muscle quality[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2019, 44(14):1010-1017.