

基于¹⁸F-FDG PET/CT 的机器学习模型 对风湿性多肌痛的诊断价值

孙苏文冬¹ 邵晓梁² 蒋婉岚¹ 张璐¹ 徐婷¹ 吴敏¹ 王跃涛²

¹苏州大学附属第三医院、常州市第一人民医院免疫风湿科,常州 213003;²苏州大学附属第三医院、常州市第一人民医院核医学科,常州 213003

通信作者:王跃涛, Email: yuetao-w@163.com; 吴敏, Email: wuumin@163.com

【摘要】目的 探讨基于¹⁸F-FDG PET/CT 的机器学习模型对风湿性多肌痛(PMR)的诊断价值。**方法** 回顾性分析 2014 年 11 月至 2022 年 12 月间入住常州市第一人民医院免疫风湿科,疑似 PMR 并行¹⁸F-FDG PET/CT 检查的 177 例患者[男 119 例、女 58 例,年龄 67.0(61.0, 72.0)岁]资料。将患者按照 7:3 随机等比抽样分为训练集和验证集。利用分类和回归树(CART)、最小绝对收缩和选择算子(LASSO)算法和 logistic 回归 3 种机器学习模型对 PET/CT 影像学特征进行学习。通过 ROC 曲线分析评估各模型的诊断效能,采用 Delong 检验比较不同 AUC 的差异。**结果** PMR 患者 78 例(44.1%, 78/177),非 PMR 患者 99 例(55.9%, 99/177);训练集 124 例,验证集 53 例。Logistic 回归模型(训练集:AUC=0.961,验证集:AUC=0.930)在诊断 PMR 方面优于 CART(训练集:AUC=0.902, $z=2.96, P=0.003$;验证集:AUC=0.844, $z=2.46, P=0.014$),与 LASSO 算法诊断效能相似(训练集:AUC=0.957, $z=0.95, P=0.340$;验证集:AUC=0.930, $z=0.00, P=1.000$),但其评估部位较少。简化后的 PMR-Logit 评分在总体人群中的 AUC 为 0.951,诊断 PMR 的灵敏度为 89.74%(70/78),特异性为 90.91%(90/99)。**结论** 基于¹⁸F-FDG PET/CT 影像学特征的机器学习模型有望成为一种有效诊断 PMR 的工具。

【关键词】 风湿性多肌痛;影像组学;机器学习;正电子发射断层显像术;体层摄影术,X 线计算机;氟脱氧葡萄糖 F18

基金项目:常州市“十四五”卫生健康高层次人才培养工程领军人才(2022260)

DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20230930-00067

Diagnostic value of machine learning model based on ¹⁸F-FDG PET/CT for polymyalgia rheumatica

Sun Suwendong¹, Shao Xiaoliang², Jiang Wanlan¹, Zhang Lu¹, Xu Ting¹, Wu Min¹, Wang Yuetao²

¹Department of Rheumatology and Immunology, the Third Affiliated Hospital of Soochow University, the First People's Hospital of Changzhou, Changzhou 213003, China; ²Department of Nuclear Medicine, the Third Affiliated Hospital of Soochow University, the First People's Hospital of Changzhou, Changzhou 213003, China
Corresponding authors: Wang Yuetao, Email: yuetao-w@163.com; Wu Min, Email: wuumin@163.com

【Abstract】Objective To investigate the diagnostic value of machine learning model based on ¹⁸F-FDG PET/CT for polymyalgia rheumatica (PMR). **Methods** From November 2014 to December 2022, 177 patients (119 males, 58 females; age: 67.0 (61.0, 72.0) years) admitted to the Department of Rheumatology and Immunology, the First People's Hospital of Changzhou, with suspected PMR and undergoing ¹⁸F-FDG PET/CT examination were retrospectively analyzed. Patients were randomly divided into training set and validation set at the ratio of 7:3. Three machine learning models, including classification and regression tree (CART), the least absolute shrinkage and selection operator (LASSO) algorithm, and logistic regression, were established based on the PET/CT imaging features to aid in the diagnosis of PMR. The diagnostic efficacy of each model was evaluated by ROC curve analysis and differences among AUCs were analyzed by Delong test. **Results** There were 78(44.1%, 78/177) PMR patients and 99(55.9%, 99/177) non-PMR patients, and 124 patients in the training set and 53 patients in the validation set. The logistic regression model (training set: AUC=0.961; validation set: AUC=0.930) was superior to the CART (training set: AUC=0.902, $z=2.96, P=0.003$; validation set: AUC=0.844, $z=2.46, P=0.014$) in diagnosing PMR, and was similar to LASSO algorithm (training set: AUC=0.957, $z=0.95, P=0.340$; validation set: AUC=0.930, $z=0.00, P=1.000$), but with fewer sites evaluated. The simplified PMR-Logit score had the AUC of 0.951 in the overall population, with the sensitivity of 89.74%(70/78) and the specificity of 90.91%(90/99). **Conclusion** Machine learning models based on ¹⁸F-FDG PET/CT imaging features are expected to be an effective diagnostic tool for PMR.

【Key words】 Polymyalgia rheumatica; Radiomics; Machine learning; Positron-emission tomography; Tomography, X-ray computed; Fluorodeoxyglucose F18

Fund program: Leading Talent of Changzhou "The 14th Five-Year Plan" High-Level Health Talents Training Project (2022260)

DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20230930-00067

风湿性多肌痛 (polymyalgia rheumatica, PMR) 是一类好发于 50 岁以上人群的炎性反应性风湿性疾病,主要表现为对称性颈、肩带及骨盆带等肢带肌的疼痛和僵硬^[1]。目前 PMR 的诊断主要依赖于患者的症状、炎性反应标志物以及对糖皮质激素治疗的反应,但由于缺乏特异性临床表现及诊断标志物,易与类风湿关节炎 (rheumatoid arthritis, RA)、脊柱关节病 (spondyloarthropathy, SpA) 等相混淆,导致漏诊、误诊^[2-3]。

¹⁸F-FDG PET/CT 是一种广泛应用于肿瘤学领域的显像技术,但¹⁸F-FDG 除被肿瘤细胞摄取外,还在炎性反应组织中积聚^[4],且 PET/CT 可在 1 次检查中提供有关全身活动性病变分布的信息^[5]。因此,使用 PET/CT 评估全身炎性疾病的报道越来越多^[6-7]。然而¹⁸F-FDG 本身的摄取是非特异性的,了解 PMR 患者病变部位的特定摄取模式至关重要。一项 meta 分析表明,PET/CT 中单个部位的异常并不具备足够的灵敏度和特异性来诊断 PMR^[5],而目前机器学习 (machine learning, ML) 正在成为实现复杂多参数决策算法的一个有前途的工具^[8]。本研究旨在通过 ML 开发一个简单的 PET/CT 评分以帮助诊断 PMR。

资料与方法

1. 研究对象。本研究经常州市第一人民医院伦理委员会审批通过,伦理批件号:〔(2022)教第 014 号〕。回顾性收集 2014 年 11 月至 2022 年 12 月间常州市第一人民医院免疫风湿科收治住院的符合以下标准的患者资料。纳入标准:(1)年龄 ≥ 50 岁;(2)有双侧肩胛带和(或)骨盆带部位疼痛;(3)住院期间行 PET/CT 检查;(4)在行 PET/CT 检查前 1 周末使用糖皮质激素治疗。排除标准:(1)在 PET/CT 检查时病情处于缓解稳定期;(2)肝功能严重受损(血清丙氨酸氨基转移酶或天冬氨酸氨基转移酶超出 5 倍正常上限值);(3)重要临床资料缺失。共纳入 177 例患者,其中男 119 例、女 58 例,年龄 67.0(61.0,72.0)岁。

PMR 诊断参照 1984 年 Healey 分类标准,包括疾病初发及复发;非 PMR 选择同期住院有类似症状的除 PMR 外其他疾病的患者,其中 RA 诊断参照 2010 年美国风湿病学会/欧洲抗风湿病联盟分类标

准,炎性肌病诊断参照 1975 年 Bohan 和 Peter 建议的标准^[9],SpA 诊断参照 2009 年和 2011 年国际脊柱关节炎评估协会推荐中轴型及外周型 SpA 的分类标准,未分化结缔组织病 (undifferentiated connective tissue diseases, UCTD) 诊断参照 1998 年 Mosca 等^[10]提出的分类标准,缓和的血清阴性对称性滑膜炎伴凹陷性水肿 (remitting seronegative symmetrical synovitis with pitting edema, RS3PE) 诊断参照 McCarty 等^[11]的描述及多数学者的共识,恶性肿瘤符合相应的病理学诊断标准。最终由免疫风湿科及相应专科主治医师以上成员讨论后决定,所有诊断在治疗后和随访过程中已被证实。

2. 图像采集。检查前患者禁食 4~6 h,控制血糖水平 < 11.1 mmol/L,按体质量经外周静脉导管注入 3.70~5.55 MBq/kg 的¹⁸F-FDG(放化纯 $> 95\%$,由南京江原安迪科正电子研究发展有限公司提供)。注射后 1 h,患者仰卧于检查床,双手上举交叉置于颅顶,使用 PET/CT 扫描仪(德国 Siemens Biograph 64 型 PET/CT)从颅底部至股骨上段进行显像,扫描时间为每个床位 120 s,进行 PET 扫描前先进行低剂量 CT 成像,图像采集结束后进行重建阅片。CT 扫描参数:管电压为 100 kV,电流为 60~180 mA,螺距为 0.8,球管单层的旋转时间为 0.5 s,层厚为 5 mm。

3. 特征提取。PET/CT 显像结果由 2 名工作经验丰富的主治以上核医学医师独立阅片,经协商达成共识。分析双侧肩锁关节、肩关节区、胸锁关节、骶髂关节、耻骨联合旁、坐骨结节旁、股骨大转子囊、髌关节区(包括髌髌囊)、最显著的颈椎和腰椎棘间囊的¹⁸F-FDG 摄取以及腰椎间囊的“Y”形摄取。参照文献^[12],对每个部位的¹⁸F-FDG 摄取采用标准化的视觉分析分级系统评估:0 分为无摄取(与骨骼相同);1 分为轻度摄取(高于骨骼但低于肝脏);2 分为中度摄取(与肝脏相同);3 分为显著摄取(高于肝脏)。根据相关研究,阳性定义为视觉评分 ≥ 2 分^[13-14]。由于 PMR 多表现为对称性疼痛,当双侧部位摄取不同时,选取得分较小侧进行分析。

4. 模型构建。通过 R 4.2.1 软件中的“createData-Partition”函数将患者按 7:3 随机等比抽样,分为训练集和验证集;“ggplot2”、“rpart”、“glmnet”、“rms”、“pROC”和“rmda”软件包用于分类和回归树

(classification and regression tree, CART)、最小绝对收缩和选择算子(least absolute shrinkage and selection operator, LASSO)算法、logistic 回归、列线图的建立、ROC 曲线分析、校准曲线和决策曲线分析(decision curve analysis, DCA)图的生成。

5. 统计方法。使用 R 4.2.1 软件进行数据分析。采用 Kolmogorov-Smirnov 检验每个变量的正态性,不符合正态分布的定量资料用 $M(Q_1, Q_3)$ 表示,组间比较采用 Mann-Whitney U 检验;定性资料用频数(百分比)表示,组间比较采用 χ^2 检验。观测者间的一致性采用组内相关系数(intraclass correlation coefficient, ICC)。采用 CART、LASSO 算法和 logistic 回归在训练集构建模型,由验证集进行验证。最小赤池信息准则用于 logistic 回归最优参数的筛选。ROC 曲线分析用于评估不同部位及模型的诊断效能,采用 Delong 检验比较不同 AUC 的差异。 $P < 0.05$ 表示差异有统计学意义。

结 果

1. 一般资料。177 例患者中,PMR 患者 78 例(44.1%);非 PMR 患者 99 例(55.9%),其中 RA 36 例、SpA 22 例、炎性肌病 20 例、UCTD 12 例、先前未诊断的恶性肿瘤 5 例、感染 2 例以及肌筋膜炎、RS3PE 各 1 例。PMR 患者中男 58 例、女 20 例,年龄 68.0(59.0,72.0)岁;非 PMR 患者中男 61 例、女 38 例,年龄 67.0(62.8,72.3)岁,2 组患者年龄($z = -0.55, P = 0.585$)、性别($\chi^2 = 3.22, P = 0.073$)差异无统计学意义。

2. 单个部位诊断效能(表 1)。坐骨结节旁 ^{18}F -FDG 阳性摄取的诊断效能最佳,AUC 为 0.864,灵敏度为 85.90%(67/78)、特异性为 86.87%(86/99)、准确性为 86.44%(153/177)。2 位观察者的测量结果具有很好的一致性,ICC 为 0.908~0.986。典型摄取

模式见图 1。

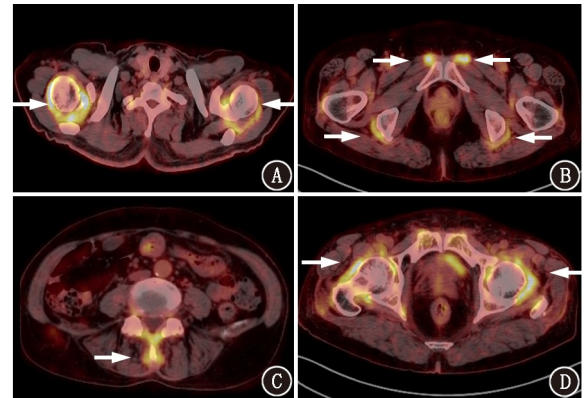


图 1 风湿性多肌痛(PMR)患者不同部位的 ^{18}F -FDG PET/CT 显像图(箭头示病灶的 ^{18}F -FDG 摄取)。A.肩关节区(男,66 岁);B.耻骨联合旁及坐骨结节旁(女,70 岁);C.腰椎间囊的“Y”形摄取(女,67 岁);D.髋关节区(男,84 岁)

3. 模型构建与验证。训练集 124 例,验证集 53 例。CART 模型表明需先后评估坐骨结节旁及肩关节区的 ^{18}F -FDG 摄取,若视觉评分均 ≥ 2 分,则诊断为 PMR,反之则排除。LASSO 算法和 10 折交叉验证对变量进行降维,获得 5 个与 PMR 相关的 PET/CT 特征:LASSO-score = $1.31\ 064 \times$ 坐骨结节旁 + $0.91\ 379 \times$ “Y”形摄取 + $0.50\ 181 \times$ 耻骨联合旁 + $0.26\ 744 \times$ 髋关节区 + $0.10\ 461 \times$ 肩关节区,这 5 个变量均根据视觉评分 ≥ 2 分定义为 0 或视觉评分 < 2 分定义为 1。Logistic 回归(表 2)保留了 4 个变量:肩关节区、耻骨联合旁、坐骨结节旁的 ^{18}F -FDG 阳性摄取和腰椎间囊的“Y”形摄取。

3 种模型在训练集和验证集中的诊断效能见表 3。其中 logistic 回归模型的诊断性能优于 CART 模型(训练集: $z = 2.96, P = 0.003$;验证集: $z = 2.46, P = 0.014$),与 LASSO 算法相似(训练集: $z = 0.95, P =$

表 1 177 例患者单个部位 ^{18}F -FDG 阳性摄取的诊断效能

部位	AUC(95% CI)	灵敏度	特异性	准确性
肩锁关节	0.513(0.459~0.567)	16.67%(13/78)	85.86%(85/99)	55.37%(98/177)
肩关节区	0.756(0.700~0.812)	93.59%(73/78)	57.58%(57/99)	73.45%(130/177)
胸锁关节	0.628(0.563~0.693)	39.74%(31/78)	85.86%(85/99)	65.54%(116/177)
骶髂关节	0.499(0.413~0.585)	3.85%(3/78)	95.96%(95/99)	55.37%(98/177)
耻骨联合旁	0.791(0.735~0.848)	60.26%(47/78)	97.98%(97/99)	81.36%(144/177)
坐骨结节旁	0.864(0.805~0.923)	85.90%(67/78)	86.87%(86/99)	86.44%(153/177)
转子囊	0.767(0.704~0.830)	70.51%(55/78)	82.83%(82/99)	77.40%(137/177)
髋关节区	0.803(0.744~0.862)	80.77%(63/78)	79.80%(79/99)	80.23%(142/177)
颈椎棘间囊	0.730(0.668~0.793)	55.13%(43/78)	90.91%(90/99)	75.14%(133/177)
腰椎棘间囊	0.827(0.771~0.883)	84.62%(66/78)	80.81%(80/99)	82.49%(146/177)
腰椎间囊 ^a	0.826(0.771~0.881)	69.23%(54/78)	95.96%(95/99)	84.18%(149/177)

注:括号中为例数比;^a“Y”形摄取

0.340; 验证集: $z = 0.00, P = 1.000$), 但其评估部位较少, 因此 logistic 回归模型最佳。

Logistic 回归的校准曲线 (图 2A) 表明, 训练集和验证集中预测概率和观测概率之间均有很好的的一致性; DCA (图 2B) 表明, 在 5% ~ 95% 的阈值概率下, 使用 logistic 回归诊断 PMR 获得了更高的净效益。为便于医师决策, 根据回归系数对每个变量进行赋分, 肩关节区、坐骨结节旁的 ¹⁸F-FDG 阳性摄取和腰椎间囊的“Y”形摄取各赋值 1 分, 耻骨联合旁的 ¹⁸F-FDG 阳性摄取赋值 2 分, 定义此评分为 PMR-

Logit 评分, 其在总体人群中的 AUC 为 0.951, 当 PMR-Logit 评分 ≥ 2 分时, 诊断 PMR 的灵敏度为 89.74% (70/78), 特异性为 90.91% (90/99)。

讨 论

本研究首先分析了 PMR 患者不同病变部位的诊断性能, ¹⁸F-FDG 阳性摄取的肩关节区具有非常好的诊断灵敏度, 但特异性较差, 与 Henckaerts 等^[15]的研究相似, 这可能是由于本研究对象包含了一部分有肩部疾病的患者, 尤其是血清阴性 RA, 在

表 2 训练集 ($n = 124$) 中 ¹⁸F-FDG PET/CT 区分 PMR 与非 PMR 患者的 logistic 回归分析结果

参数 (摄取部位)	单因素		多因素	
	OR (95% CI)	P 值	OR (95% CI)	P 值
肩锁关节	1.569 (0.575~4.412)	0.380	-	-
肩关节区	17.362 (6.226~62.274)	<0.001	6.269 (1.531~32.788)	0.016
胸锁关节	2.970 (1.302~7.087)	0.011	-	-
骶髂关节	1.182 (0.138~10.113)	0.869	-	-
耻骨联合旁	105.000 (20.774~1 920.444)	<0.001	18.745 (1.657~601.632)	0.044
坐骨结节旁	48.450 (17.629~156.053)	<0.001	10.072 (2.800~40.165)	<0.001
转子囊	9.701 (4.363~22.868)	<0.001	-	-
髋关节区	20.190 (8.365~53.688)	<0.001	-	-
颈椎棘间囊	13.013 (5.140~38.103)	<0.001	-	-
腰椎棘间囊	23.187 (9.395~63.863)	<0.001	-	-
腰椎间囊 ^a	54.667 (17.180~246.908)	<0.001	8.870 (1.965~49.390)	0.006

注: OR 为比值比, PMR 为风湿性多肌痛; - 为未行多因素分析; “Y”形摄取

表 3 3 种模型在训练集和验证集中的诊断效能

模型	训练集 ($n = 124$)				验证集 ($n = 53$)			
	AUC (95% CI)	灵敏度	特异性	准确性	AUC (95% CI)	灵敏度	特异性	准确性
CART	0.902 (0.848~0.957)	84.21% (48/57)	92.54% (62/67)	88.71% (110/124)	0.844 (0.738~0.950)	71.43% (15/21)	93.75% (30/32)	84.91% (45/53)
LASSO	0.957 (0.924~0.990)	96.49% (55/57)	85.07% (57/67)	90.32% (112/124)	0.930 (0.864~0.997)	80.95% (17/21)	90.62% (29/32)	86.79% (46/53)
Logistic 回归	0.961 (0.930~0.992)	92.98% (53/57)	89.55% (60/67)	91.13% (113/124)	0.930 (0.866~0.994)	80.95% (17/21)	93.75% (30/32)	88.68% (47/53)

注: 括号中为例数比; CART 为分类和回归树, LASSO 为最小绝对收缩和选择算子

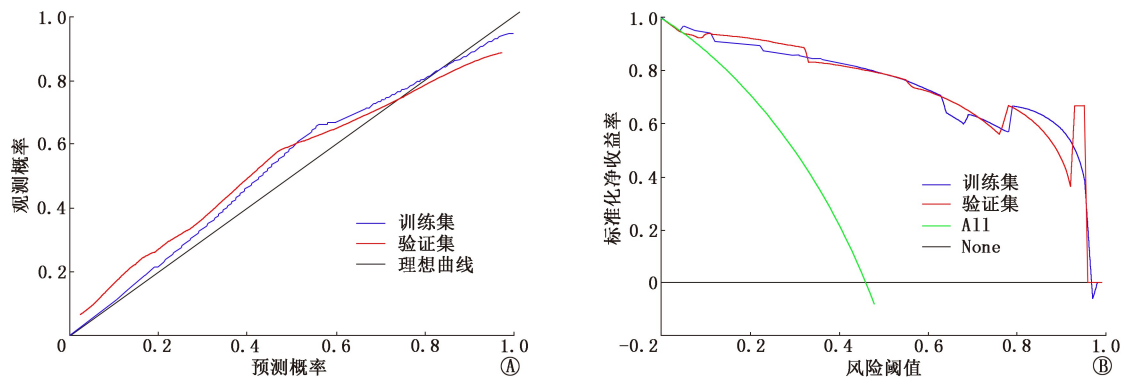


图 2 Logistic 回归模型诊断风湿性多肌痛 (PMR) 的校准曲线 (A) 和决策曲线分析图 (B)。训练集 124 例, 验证集 53 例; All 表示假设所有患者为 PMR, None 表示假设所有患者为非 PMR

发病初期或类风湿因子和(或)抗环瓜氨酸肽抗体阴性时难以鉴别^[3]。另外,RA 最重要的特征之一是滑膜炎^[16],超声、MR 甚至关节镜检查都已证明滑膜/滑囊炎也是 PMR 的特征^[17-18],当肩部出现此病变时,两者更加难以被区分。耻骨联合旁的 FDG 高摄取对 PMR 的诊断价值也被报道,在不同研究中诊断性能各异^[14-15,19],但 Sondag 等^[20]的研究表明在对照组中极少观察到耻骨联合旁的 FDG 摄取,提示其特异性较高,且病变主要位于内收肌腱附着点,而不累及关节,本研究也观察到类似表现(图 1B)。有研究表明,棘突周围的结构形成了后方韧带复合体,当该区域内有液体或炎性反应时可被识别,这种摄取模式被认为可能是滑囊炎从棘间滑囊延伸到硬膜后间隙再到双侧小关节的表现,呈现“Y”形摄取^[21];本研究同样在 PMR 患者中观察到这种典型的摄取模式(图 1C),非 PMR 患者中少见。近年国外开展了多项关于 PMR 诊断的复合模型研究,CART 模型是一种有序决策过程,其优点在于简化了 ML 转化到临床决策的过程,更加直观和易于理解;其缺点在于不稳定性,不同的临床数据可能得出完全不同的决策,解决实际问题的精度不高。一项研究使用 CART 模型发现 PET/CT 中坐骨结节附近以及肩关节周围或棘间囊的有序组合有助于诊断 PMR^[22],但不足在于对照组多为恶性肿瘤,诊断性能可能被高估。Flaus 等^[14]提出棘间囊和转子囊是诊断 PMR 的最佳有序组合部位,灵敏度和特异性在验证集中分别为 78.6%和 80.1%。本研究中 CART 模型提示坐骨结节旁和肩关节区的有序组合有利于诊断 PMR,但诊断性能同样不佳。尽管如此,CART 模型依然证明了坐骨结节旁和肩关节区是 PMR 的关键部位。另一项研究通过 logistic 回归开发了复合 PET/CT 评分用于区分 PMR 和非典型 SpA 患者,结果表明当肩部、坐骨结节和棘突中任意 2 个部位出现强烈 FDG 摄取时,有助于诊断 PMR^[23]。本研究构建的 PMR-Logit 评分同样诊断性能良好,且研究对象更具代表性。LASSO 算法是一种常用的变量降维方法,既往少有类似研究,但由于图像采集限制,未纳入手指、腕、肘、膝、踝等部位,导致降维能力略逊于 logistic 回归。

一项回顾性研究评估了 17 个部位的平均 SUV_{max},当临界值 ≥ 2.168 时,灵敏度为 77.2%,特异性为 77.6%^[13]。另一项研究分别利用视觉分析和半定量分析(SUV_{mean})描述不同部位的 FDG 摄取,结果表明 2 种方法之间存在高度相关性^[24]。本研

究组曾利用病变部位 SUV_{max} 与肝脏 SUV_{mean} 的比值进行研究^[25],但需要制定严格的方法(如勾画 ROI)、耗时且依赖于核医学科医师,过程较复杂,不适用于临床决断。故本研究利用视觉分析开发 PET/CT 模型,以期能帮助临床医师在阅图时快速并准确的判断疾病。

本研究尚存一些局限。首先,回顾性研究存在信息偏倚,且纳入样本相对较少,对照组多为风湿性疾病,存在选择偏倚。其次,未纳入上述小关节部位的 FDG 摄取,可能丧失一些有助于鉴别其他风湿性疾病(如 RA、SpA、RS3PE 等)的信息^[6]。最后,虽然 PET/CT 存在辐射暴露和费用问题,且在 PMR 中的常规应用在大多数国家没有医保支持,但其在识别炎性反应和肿瘤方面的优势使之更易有效诊断 PMR。综上,基于 PET/CT 的 ML 模型在诊断 PMR 方面具有较好的效果,其中 logistic 回归模型优于另外 2 种模型。

利益冲突 所有作者声明无利益冲突

作者贡献声明 孙苏文冬:研究设计与实施、数据采集与分析、论文撰写;邵晓梁:图像采集、阅片及特征提取;蒋婉岚、张璐、徐婷:数据分析与统计;吴敏、王跃涛:研究指导、论文修改

参 考 文 献

- [1] Rosenberg H, Halman S, Yadav K. Polymyalgia rheumatica [J]. CMAJ, 2021, 193(46): E1770. DOI:10.1503/cmaj.210541.
- [2] Mahmood SB, Nelson E, Padniewski J, et al. Polymyalgia rheumatica; an updated review [J]. Cleve Clin J Med, 2020, 87(9): 549-556. DOI:10.3949/ccjm.87a.20008.
- [3] Lundberg IE, Sharma A, Turesson C, et al. An update on polymyalgia rheumatica [J]. J Intern Med, 2022, 292(5): 717-732. DOI:10.1111/joim.13525.
- [4] 邵晓梁,牛荣,王跃涛,等. 基于¹⁸F-FDG PET/CT 的磨玻璃结节早期肺腺癌浸润性预测模型的构建及验证 [J]. 中华核医学与分子影像杂志, 2022, 42(7): 385-390. DOI: 10.3760/cma.j.cn321828-20201229-00462. Shao XL, Niu R, Wang YT, et al. Construction and validation of the predictive models for the pathological invasion of early lung adenocarcinoma presenting as ground glass nodules based on ¹⁸F-FDG PET/CT [J]. Chin J Nucl Med Mol Imaging, 2022, 42(7): 385-390. DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20201229-00462.
- [5] van der Geest K, Treglia G, Glaudemans A, et al. Diagnostic value of [¹⁸F]FDG-PET/CT in polymyalgia rheumatica: a systematic review and meta-analysis [J]. Eur J Nucl Med Mol Imaging, 2021, 48(6): 1876-1889. DOI:10.1007/s00259-020-05162-6.
- [6] Hotta M, Minamimoto R, Kaneko H, et al. Fluorodeoxyglucose PET/CT of arthritis in rheumatic diseases; a pictorial review [J]. Radiographics, 2020, 40(1): 223-240. DOI:10.1148/rg.2020190047.
- [7] Chen Z, Li Y, Wang Q, et al. Fluorine-18 labeled fluorodeoxyglucose positron emission tomography/computed tomography used in diagnosing connective tissue diseases in fever of unknown origin/inflammatory of unknown origin patients [J]. Clin Rheumatol, 2022,

- 41(3): 839-846. DOI:10.1007/s10067-021-05965-4.
- [8] Venerito V, Emmi G, Cantarini L, et al. Validity of machine learning in predicting giant cell arteritis flare after glucocorticoids tapering[J]. *Front Immunol*, 2022, 13: 860877. DOI:10.3389/fimmu.2022.860877.
- [9] Bohan A, Peter JB. Polymyositis and dermatomyositis (first of two parts)[J]. *N Engl J Med*, 1975, 292(7): 344-347. DOI:10.1056/NEJM197502132920706.
- [10] Mosca M, Tavoni A, Neri R, et al. Undifferentiated connective tissue diseases; the clinical and serological profiles of 91 patients followed for at least 1 year[J]. *Lupus*, 1998, 7(2): 95-100. DOI:10.1191/096120398678919787.
- [11] McCarty DJ, O'Duffy JD, Pearson L, et al. Remitting seronegative symmetrical synovitis with pitting edema. RS3PE syndrome[J]. *JAMA*, 1985, 254(19): 2763-2767.
- [12] Slart R, Writing group, Reviewer group, et al. FDG-PET/CT(A) imaging in large vessel vasculitis and polymyalgia rheumatica: joint procedural recommendation of the EANM, SNMMI, and the PET Interest Group (PIG), and endorsed by the ASNC[J]. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2018, 45(7): 1250-1269. DOI:10.1007/s00259-018-3973-8.
- [13] Amat J, Chanchou M, Olagne L, et al. Utility of ¹⁸F-fluorodeoxyglucose positron emission tomography in inflammatory rheumatism, particularly polymyalgia rheumatica: a retrospective study of 222 PET/CT[J]. *Front Med (Lausanne)*, 2020, 7: 394. DOI:10.3389/fmed.2020.00394.
- [14] Flaus A, Amat J, Prevot N, et al. Decision tree with only two musculoskeletal sites to diagnose polymyalgia rheumatica using [¹⁸F] FDG PET-CT[J]. *Front Med (Lausanne)*, 2021, 8: 646974. DOI:10.3389/fmed.2021.646974.
- [15] Henckaerts L, Gheysens O, Vanderschueren S, et al. Use of ¹⁸F-fluorodeoxyglucose positron emission tomography in the diagnosis of polymyalgia rheumatica—a prospective study of 99 patients[J]. *Rheumatology (Oxford)*, 2018, 57(11): 1908-1916. DOI:10.1093/rheumatology/kex376.
- [16] 侯振宇,王婷婷,苏新辉,等. TSPO 靶向分子探针 CB86-DTPA-Gd 的制备及类风湿关节炎模型 MRI 研究[J]. *中华核医学与分子影像杂志*, 2021, 41(1): 41-46. DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20191114-00261.
Hou ZY, Wang TT, Su XH, et al. Preparation and MRI of CB86-DTPA-Gd targeting TSPO in rheumatoid arthritis model [J]. *Chin J Nucl Med Mol Imaging*, 2021, 41(1): 41-46. DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20191114-00261.
- [17] Kobayashi K, Nakagomi D, Kobayashi Y, et al. Ultrasound of shoulder and knee improves the accuracy of the 2012 EULAR/ACR provisional classification criteria for polymyalgia rheumatica [J]. *Rheumatology (Oxford)*, 2022, 61(3): 1185-1194. DOI:10.1093/rheumatology/keab506.
- [18] Nakamura H, Kamada K, Tarumi M, et al. Gadolinium-enhanced magnetic resonance imaging in shoulders contributes accurate diagnosis and predicting recurrence to patients with polymyalgia rheumatica[J]. *Clin Exp Rheumatol*, 2021, 39(1): 84-90. DOI:10.55563/clinexprheumatol/10jndl.
- [19] van der Geest K, van Sleen Y, Nienhuis P, et al. Comparison and validation of FDG-PET/CT scores for polymyalgia rheumatica [J]. *Rheumatology (Oxford)*, 2022, 61(3): 1072-1082. DOI:10.1093/rheumatology/keab483.
- [20] Sondag M, Guillot X, Verhoeven F, et al. Utility of ¹⁸F-fluoro-dexoxyglucose positron emission tomography for the diagnosis of polymyalgia rheumatica: a controlled study[J]. *Rheumatology (Oxford)*, 2016, 55(8): 1452-1457. DOI:10.1093/rheumatology/kew202.
- [21] Yuge S, Nakatani K, Yoshino K, et al. Diagnosing polymyalgia rheumatica on ¹⁸F-FDG PET/CT; typical uptake patterns[J]. *Ann Nucl Med*, 2018, 32(8): 573-577. DOI:10.1007/s12149-018-1269-5.
- [22] Owen CE, Poon A, Yang V, et al. Abnormalities at three musculoskeletal sites on whole-body positron emission tomography/computed tomography can diagnose polymyalgia rheumatica with high sensitivity and specificity[J]. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2020, 47(10): 2461-2468. DOI:10.1007/s00259-020-04731-z.
- [23] Pean de Ponfilly-Sotier M, Besson FL, Gomez L, et al. Use of ¹⁸F FDG PET-CT to discriminate polymyalgia rheumatica and atypical spondylarthritis in clinical practice[J]. *Joint Bone Spine*, 2022, 89(3): 105325. DOI:10.1016/j.jbspin.2021.105325.
- [24] Camellino D, Paparo F, Morbelli SD, et al. Clinical and FDG-PET/CT correlates in patients with polymyalgia rheumatica [J]. *Clin Exp Rheumatol*, 2022, 40(1): 78-85. DOI:10.55563/clinexprheumatol/4r78yg.
- [25] Sun S, Shao X, Liu X, et al. Assessing the feasibility of SUVindex (a metric derived from FDG PET/CT) for the diagnosis of polymyalgia rheumatica [J]. *Clin Radiol*, 2023, 78(10): 737-745. DOI:10.1016/j.crad.2023.06.007.

(收稿日期: 2023-09-30)