·临床研究·

老年肌少症患者跌倒影响因素分析及预测模型构建

黄墩兵[1]　田欢[2]　毋振华[1]　李立红[1]　柯晓华[2]　王嘉琪[2]　任鸿飞[2]　宋薇[2]

[1]浙江中医药大学附属第二医院，杭州　310005；[2]同济大学附属上海市第四人民医院，上海 200434

通信作者：宋薇，Email：songwei94@ tongji.edu.cn

【摘要】　目的　探讨影响老年肌少症患者跌倒的相关因素，并构建风险预测模型。**方法**　采用横断面研究方法，收集 2024 年 1 月至 12 月期间在同济大学附属上海第四人民医院就诊的 318 例老年肌少症患者的临床资料，按 7∶3 比例随机分为建模组（共 223 例）及验证组（共 95 例）。同时本研究依据建模组患者最近 1 年内是否发生过跌倒事件将其细分为跌倒组与非跌倒组，并对 2 组患者分别进行单因素分析及多因素 Logistic回归分析，筛选影响其跌倒的独立因素，并基于显著变量构建列线图预测模型。通过受试者工作特征（ROC）曲线、Hosmer-Lemeshow 拟合优度检验及临床决策曲线（DCA）分析评估模型性能。**结果**　建模组患者跌倒发生率为 38.12%。通过单因素分析发现，Berg 平衡量表（BBS）评分、闭眼压力中心（COP）运动长度、步态周期、步速、股直肌积分肌电值（iEMG）及胫骨前肌均方根值（RMS）等变量在跌倒组与非跌倒组间差异均具有统计学意义（$P<0.05$）。经多因素 Logistic 回归分析发现，低 BBS 评分、闭眼 COP 运动长度增加、步态周期延长、步速下降、股直肌 iEMG 及胫骨前肌 RMS 降低均为老年肌少症患者跌倒的独立危险因素。基于上述变量构建的列线图模型其 ROC 曲线下面积（AUC）为 0.837（95%*CI*：0.785～0.889），灵敏度为 74.1%，特异度为 83.3%，Hosmer-Lemeshow 检验结果显示 $\chi^2=15.5$，$P=0.061$，提示该模型拟合良好。采用该模型对验证组患者进行测试，发现其 AUC 为 0.877（95%*CI*：0.805～0.950），显示该模型具有较好的区分能力。**结论**　本研究通过整合平衡、步态与表面肌电等多维客观生物力学及神经肌肉指标，构建并验证了老年肌少症患者跌倒风险的可视化预测模型，发现该模型具有良好的判别与校准性能；然而本研究未纳入“既往跌倒史”这一强预测变量可能限制了该模型的预测上限及部分临床适用性，今后仍需在多中心人群中进一步验证该模型的稳健性并评估其应用边界。

【关键词】　老年人；　肌少症；　跌倒；　影响因素；　预测模型

基金项目：虹口区卫生健康委员会医学科研课题（虹卫 2302-13）；虹口区第二轮“国医强优”三年行动计划（2022－2024 年）资助（HKZYY-2024-11）

DOI：10.3760/cma.j.cn421666-20250603-00459

Predicting the fall risk of elderly persons with sarcopenia

Huang Dunbing[1], *Tian Huan*[2], *Wu Zhenhua*[1], *Li Lihong*[1], *Ke Xiaohua*[2], *Wang Jiaqi*[2], *Ren Hongfei*[2], *Song Wei*[2]

[1]*The Second Affiliated Hospital of Zhejiang Chinese Medical University, Hangzhou 310005, China*; [2]*The Fourth People's Hospital of Shanghai, Tongji University, Shanghai 200434, China*

Corresponding author: Song Wei, Email: songwei94@ tongji.edu.cn

【Abstract】　Objective　To identify factors associated with falls among elderly persons with sarcopenia and to develop a risk-prediction model. **Methods**　This cross-sectional study treated clinical data describing 318 elderly hospital patients with sarcopenia. They were randomly divided into a model group ($n=223$) and a validation group ($n=95$) and also classified into a fall group and a non-fall group according to their history of falls in the previous year. Univariate analyses and multivariable logistic regression were performed to determine independent predictors of falls. A nomogram was then constructed based on the significant variables, and its performance was evaluated using the receiver operating characteristics (ROC) curve, the Hosmer-Lemeshow goodness-of-fit test, and decision curve analysis. **Results**　In the derivation cohort, the incidence of falls was 38.12%. Univariate analyses showed significant inter-group differences in terms of Berg Balance Scale (BBS) scores, eyes-closed sway path lengths, gait cycle times, gait speed, rectus femoris iEMG, and tibialis anterior RMS. Multivariable logistic regression identified lower BBS scores, longer eyes-closed sway path length, prolonged gait cycle time, slower gait speed, lower rectus femoris iEMG, and lower tibialis anterior RMS as independent predictors of fall risk. The nomogram

based on those variables yielded an area under the ROC curve (AUC) of 0.837 (95%*CI*, 0.785-0.889), with a sensitivity of 74.1% and specificity of 83.3%. The Hosmer-Lemeshow test indicated good calibration ($\chi^2 = 15.5$, $P = 0.061$). In the validation cohort, the AUC was 0.877 (95%*CI*, 0.805-0.950), demonstrating good discrimination ability. **Conclusions** A fall-risk assessment tool for elderly sarcopenia patients was developed based on objective biomechanical observations rather than prior fall history. The model showed good discrimination and calibration in both derivation and validation cohorts. However, excluding prior fall history, a strong predictor, may limit the model's performance and some aspects of clinical applicability. Therefore, further multicenter studies are warranted to extend and refine the model.

【Key words】 Elderly; Sarcopenia; Falls; Risk factors; Predictive modeling

Funding: Hongkou District Health and Wellness Committee Medical Research Project (Hongwei 2302-13); Supported by the Second Round "Guoyi Qiangyou" Three-Year Action Plan of Hongkou District (2022-2024) (HKZYY-2024-11)

DOI: 10.3760/cma.j.cn421666-20250603-00459

肌少症是与年龄相关的综合征,其核心特征是骨骼肌进行性、全身性退化,表现为肌力下降与肌量减少,进而影响机体运动功能[1]。既往研究显示,肌少症与机体活动能力受限、跌倒、骨折、衰弱及死亡等不良结局显著相关[2]。全球流行病学调查资料显示,老年人每年至少跌倒 1 次的占比超过 1/3[3],与非肌少症人群比较,肌少症患者的跌倒发生率增加约 2.5~3.3 倍[4]。由于跌倒通常为突发事件,而现有风险评估工具受主观判断影响较大,且单一量化指标难以全面反映老年人复杂、动态的平衡与步态状况,对高风险个体的前瞻性识别敏感性不足[5]。既往研究多从静态平衡、步态或肌肉激活等单一维度量化肌少症群体发生跌倒的风险,缺乏整合多源信息的综合预测模型[6-7]。为此,本研究拟整合平衡功能、步态特征与表面肌电等多维指标,初步探讨老年肌少症患者跌倒的关键相关因素,并构建可视化风险预测模型,以期为临床早期识别高风险个体并制订个性化干预策略提供循证依据。

对象与方法

一、研究对象

本研究采用横断面设计方案,于患者首次就诊时采集其临床资料及功能评估数据,并经同济大学附属上海市第四人民医院伦理委员会审批(批准号:2023096-001)。患者纳入标准包括:①年龄≥60 岁,男女不限;②符合亚洲肌少症工作组制订的肌少症诊断标准[8];③具备独立行走能力,能完成步态分析及姿势稳定性测试;④对本研究知晓并签署知情同意书。患者排除标准包括:①存在认知或沟通功能障碍;②患有可能影响体成分或功能评估的疾病;③既往为竞技运动员或长期从事高强度运动者。

于 2024 年 1 月至 2024 年 12 月期间选取在同济大学附属上海市第四人民医院就诊且符合上述标准的 318 例老年肌少症患者作为观察对象,按 7∶3 比例经 SPSS 26.0 版软件随机分为建模组(共 223 例)及验证组(共 95 例),2 组患者基线特征资料(表 1)经统计学比较,发现组间差异均无统计学意义(均 $P>0.05$),具有可比性。本研究中的单因素、多因素 Logistic 回归分析、共线性诊断及列线图构建均基于建模组数据;验证组数据仅用于独立外部验证。

二、研究方法

1.资料收集:采用统一设计的病例报告表,并结合医院电子病历系统采集患者的相关基础信息及功能评估数据。收集的资料内容包括:性别、年龄、居住方式、体重指数(body mass index, BMI)、既往跌倒史、糖尿病史、骨质疏松史、握力、骨骼肌指数(skeletal muscle index, SMI)、6 米步速、简易体能状况量表(short physical performance battery, SPPB)及 Berg 平衡量表(Berg balance scale, BBS)评分等。

2.平衡功能测试:采用意大利产 Pro-Kin 平衡训练评估系统(型号 PK-254)对患者静态姿势稳定性进行测试。测试过程中,要求患者站于平台上并尽量保持静止状态,视觉焦点注视正前方墙面预设的黑色参照标记,双足依据 A3/A7 标线摆放并形成 60°外展角。分别于患者睁眼及闭眼状态下各进行 1 次 30 s 的站立测试,记录其压力中心(center of pressure, COP)在平台上的运动轨迹,并分析椭圆面积及运动长度等参数,用于量化患者平衡能力[9]。

3.步态与肌电分析:本研究采用 GaitWatch 三维步态分析系统与 XmyoMove-EOW 表面肌电系统对患者进行同步数据采集。在正式测试前,由专业技术人员按照标准化流程布置相应设备,在患者骶骨、双侧股骨近端、胫骨近端及足背共 7 个部位固定三维加速度传感器,同时在股直肌、股二头肌、胫骨前肌及腓肠肌 4 个目标肌群表面贴附电极。在正式测试前进行 10 s 静息状态肌电信号校准(确保电极与皮肤间接触阻抗

表 1　本研究建模组与验证组一般资料情况比较

变量	建模组(223 例)	验证组(95 例)	χ^2/Z 值	P 值
性别[例(%)]				
男	88(39.46)	41(43.16)	0.377	0.539
女	135(60.54)	54(56.8)		
年龄(岁)	74(71,77)	74(72,76)	0.005	0.996
居住方式[例(%)]				
独居	63(28.25)	23(24.21)	0.551	0.458
非独居	160(71.75)	72(75.79)		
糖尿病史[例(%)]				
是	59(26.46)	27(28.42)	0.130	0.718
否	164(73.54)	68(71.58)		
骨质疏松症[例(%)]				
是	84(37.67)	36(37.89)	0.001	0.970
否	139(62.33)	59(62.11)		
1 年内跌倒史[例(%)]				
是	85(38.12)	37(38.95)	0.019	0.889
否	138(61.88)	58(61.05)		
体重指数(kg/m^2)	21.45(20.45,22.45)	21.35(20.55,22.44)	0.045	0.964
握力(kg)	16.78(15.78,17.80)	17.11(15.60,17.85)	0.311	0.756
SMI(kg/m^2)	5.4(5.3,6.5)	5.5(5.2,6.5)	0.089	0.929
6 米步速(m/s)	0.89(0.88,0.93)	0.89(0.87,0.95)	0.339	0.734
SPPB 评分(分)	8(8,9)	8(8,9)	0.494	0.621
BBS 评分(分)	46(45,46)	45(45,46)	0.009	0.993

注:SMI 指骨骼肌指数(skeletal muscle index,SMI);BMI 指体重指数(body mass index,BMI);SPPB 指简易体能状况量表(short physical performance battery,SPPB);BBS 指 Berg 平衡量表(Berg balance scale,BBS)

≤10 kΩ)。在正式测试过程中,要求患者以舒适步速完成 12 m 直线行走,步态系统则实时采集患者下肢关节三维运动学参数,肌电系统同步记录目标肌群电信号。具体采集指标包括:①步态时空参数(如步频、步速、步态周期、步幅、步长等);②肌电参数[如目标肌肉均方根值(root-mean-square,RMS)、积分肌电值(integrated EMG,iEMG)等]。在分析数据时,首先去除行走开始及结束阶段不稳定的步态周期数据,选取中间连续 5 段最稳定步态周期数据进行分析。步态稳定性的判断标准包括:①关键时空参数(如步长、步频、步速等)的变异系数小于 5%;②由 2 名具备丰富经验的研究人员独立判断患者在行走过程中有无明显异常表现(如拖步、停顿、跨越等)。

鉴于个体间皮下脂肪厚度、电极放置部位等因素可能对肌电信号幅值产生影响,有部分学者建议采用最大自主等长收缩(maximum voluntary contraction,MVC)方式对原始信号进行归一化处理[10]。但考虑到本研究对象为老年肌少症患者,且部分患者存在肌力较弱、认知配合度差或执行 MVC 测试时跌倒风险大等情况,出于安全性与可行性考虑,本研究未进行标准化处理。

三、统计学方法

本研究采用 IBM SPSS Statistics 26.0 版统计学软件包进行数据整理及统计分析,对所有连续型变量进行正态性检验,对符合正态分布的计量资料以($\bar{x}\pm s$)表示,组间比较采用独立样本 t 检验;对不符合正态分布的计量资料以中位数(P_{25},P_{75})表示,采用 Mann-Whitney U 检验进行组间比较。分类变量以频数及百分比表示,组间比较采用 χ^2 检验或 Fisher 确切概率法。采用单因素分析筛选老年肌少症患者跌倒相关变量($P<0.05$),经方差膨胀因子(variance inflation factor,VIF)检验(VIF>10)排除共线性变量后,通过逐步前进法进行多因素 Logistic 回归分析,以确定老年肌少症患者跌倒的独立危险因素。采用 R4.4.2 软件构建列线图预测模型,通过受试者工作特征曲线(receiver's operating characteristic,ROC)曲线、Hosmer-Lemeshow 检验、Youden 指数(灵敏度/特异度)和临床决策曲线(decision curve analysis,DCA)分别评估模型区分度、校准度、预测阈值及临床获益。所有统计检验均为双侧检验,以 $P<0.05$ 表示差异具有统计学意义。

结　果

一、建模组患者基本特征及跌倒风险单因素分析

根据建模组老年肌少症患者最近 1 年内是否发生过跌倒事件将其细分为非跌倒组(138 例)与跌倒

组(85 例),其整体跌倒发生率为 38.12%。通过单因素分析发现,2 组患者在 6 米步速、SPPB 评分、BBS 评分、闭眼 COP 运动椭圆面积、闭眼 COP 运动长度、步频、步态周期、步幅、步速、双支撑相、步长和股直肌、股二头肌、胫骨前肌、腓肠肌 RMS 及 iEMG 方面组间差异均具有统计学意义(均 $P<0.05$),其余变量 2 组间差异均无统计学意义(均 $P>0.05$),具体数据见表 2。

二、建模组变量的共线性诊断

采用 SPSS 26.0 版软件对单因素分析中筛选出的 19 个具有统计学意义的变量进行多重共线性诊断,结果显示所有变量的方差膨胀因子(variance inflation factor, VIF)均小于 5,提示未发现明显共线性问题,具体情况见表 3。

三、建模组跌倒风险的多因素 Logistic 回归分析

以是否发生跌倒作为因变量,将单因素分析中差异具有统计学意义的变量纳入到多因素 Logistic 回归分析中,结果显示 BBS 评分、步速、股直肌 iEMG 及胫骨前肌 RMS 是老年肌少症患者跌倒的保护性因素($OR<1$),而闭眼 COP 运动长度与步态周期是老年肌少症患者跌倒的危险性因素($OR>1$),具体情况见表 4。

表 2　本研究建模组患者跌倒风险的单因素分析

变量	非跌倒组(138 例)	跌倒组(85 例)	$t/\chi^2/Z$ 值	P 值
性别[例(%)]				
男	52(37.68)	36(42.35)	1.397	0.237
女	86(62.32)	49(57.65)		
年龄(岁)	75.00(70.25,77.00)	74.00(72.00,77.00)	−0.279	0.780
居住方式[例(%)]				
独居	40(28.99)	23(27.06)	0.096	0.756
非独居	98(71.01)	62(72.94)		
糖尿病史[例(%)]				
是	35(25.36)	24(28.24)	0.223	0.637
否	103(74.64)	61(71.76)		
骨质疏松症[例(%)]				
是	49(35.51)	35(41.18)	0.720	0.396
否	89(64.49)	50(58.82)		
BMI(kg/m^2)	21.56(20.45,22.55)	20.88(20.38,21.65)	−1.883	0.060
握力(kg)	16.78(16.44,17.77)	16.56(14.73,17.89)	−1.525	0.127
6 米步速(m/s)	0.91(0.88,0.97)	0.88(0.88,0.89)	−4.507	0.001
SPPB 评分 (分)	9.00(8.00,9.00)	8(8.00,8.00)	−4.106	0.001
BBS 评分(分)	46.00(45.00,46.00)	45.00(45.00,46.00)	−2.898	0.004
睁眼 COP 运动椭圆面积(mm^2)	189.00(167.75,203.25)	189.00(187.00,203.50)	−1.294	0.196
睁眼 COP 运动长度(mm)	278.00(259.75,292.00)	278.00(277.00,289.00)	−1.452	0.147
闭眼 COP 运动椭圆面积(mm^2)	278.00(266.00,288.25)	288.00(277.00,295.00)	−2.659	0.008
闭眼 COP 运动长度(mm)	453.00(427.00,473.75)	469.00(454.00,485.00)	−3.964	0.001
步频(步/分钟)	105.00(102.00,109.00)	102.00(100.00,105.00)	−4.175	0.001
步态周期(s)	1.09(1.03,1.18)	1.18(1.11,1.21)	−5.738	0.001
步幅(cm)	133.50(129.75,135.00)	131.00(129.00,133.00)	−2.969	0.003
步速(cm/s)	121.50(113.00,125.25)	121.00(112.00,122.00)	−3.061	0.003
步长偏差(cm)	9.00(7.75,12.00)	9.00(8.00,9.00)	−0.056	0.956
双支持相(%)	19.00(18.00,20.00)	20.00(19.00,21.00)	−3.372	0.001
步长(cm)	68.00(66.00,70.00)	67.00(66.00,68.00)	−3.534	0.001
股直肌 RMS(μV)	76.00(68.00,79.52)	68.00(67.00,70.00)	−5.665	0.001
股直肌 iEMG(μV·s)	601.50(566.24,665.55)	588.00(562.00,606.5)	−2.529	0.011
股二头肌 RMS(μV)	88.00(78.44,94.78)	78.00(77.00,88.00)	−4.146	0.001
股二头肌 iEMG(μV·s)	711.00(654.5,786.00)	670.00(612.00,765.00)	−2.846	0.004
胫骨前肌 RMS(μV)	141.89(122.30,145.33)	122.00(119.00,134.22)	−5.451	0.001
胫骨前肌 iEMG(μV·s)	1268.50(1088.00,1243.50)	1144.99(1209.58,1344.25)	−4.772	0.001
腓肠肌 RMS(μV)	67.00(54.87,66.00)	59.00(63.16,74.30)	−6.616	0.001
腓肠肌 iEMG(μV·s)	365.61(339.72,399.17)	339.00(328.05,377.50)	−2.695	0.007

表 3　本研究建模组变量的共线性诊断分析

常量	容差	VIF
6 米步速(m/s)	0.719	1.390
SPPB 评分(分)	0.760	1.315
BBS 评分(分)	0.878	1.139
闭眼 COP 运动椭圆面积(mm^2)	0.875	1.143
闭眼 COP 运动长度(mm)	0.765	1.307
步频(步/min)	0.675	1.481
步态周期(s)	0.670	1.492
步幅(cm)	0.806	1.241
步速(cm/s)	0.857	1.167
双支持相(%)	0.763	1.311
步长(cm)	0.691	1.447
股直肌 RMS(μV)	0.739	1.354
股直肌 iEMG(μV·s)	0.756	1.323
股二头肌 RMS(μV)	0.825	1.213
股二头肌 iEMG(μV·s)	0.809	1.236
胫骨前肌 RMS(μV)	0.893	1.120
胫骨前肌 iEMG(μV·s)	0.719	1.391
腓肠肌 RMS(μV)	0.665	1.503
腓肠肌 iEMG(μV·s)	0.889	1.125

四、建模组预测模型构建及内部评价

根据建模组多因素 Logistic 回归分析结果，本研究构建了老年肌少症患者跌倒风险的列线图模型(详见图 1)。该图通过量化各独立变量对总风险评分的贡献度，实现了个体化的跌倒风险预测。通过对比各变量在图中相应线段的长度，其影响权重由高到低依次为步态周期、BBS 评分、胫骨前肌 RMS、闭眼 COP 运动长度、步速及股直肌 iEMG，提示步态参数、平衡功能、下肢肌电活动是影响老年肌少症患者跌倒的重要风险因素。

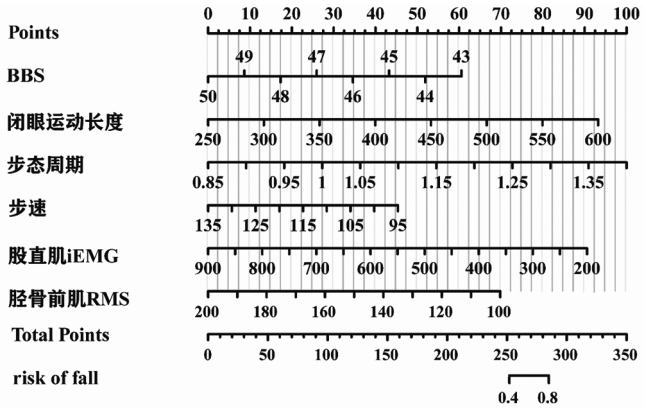


图 1　本研究建模组患者跌倒风险预测列线图

通过 ROC 曲线分析发现，该模型的曲线下面积(area under curve, AUC)为 0.837(95% *CI*：0.785－0.889)，约登指数为 0.575，最佳阈值为 0.444，对应的最佳阈值处灵敏度及特异度分别为 0.741 和 0.833，表明该模型区分度良好，见图 2A。校准曲线显示，该模型有较好的校准能力，见图 2B。Hosmer-Lemeshow 检验结果显示，$\chi^2 = 15.50$，$P = 0.061$($P>0.05$)，提示该模型校准度良好。DCA 分析结果显示，当该模型预测阈值在 0%～78%范围时具有较佳的临床净获益，具体情况见图 2C。

表 4　建模组患者跌倒风险的多因素 Logistic 回归分析

变量	β	*SE*	*Wald* χ^2	*P* 值	*OR*(95%*CI*)
6 米步速(m/s)	−8.506	4.543	3.507	0.061	0.001(0.000−1.487)
SPPB 评分(分)	−0.245	0.332	0.543	0.461	0.783(0.408−1.502)
BBS 评分(分)	−0.560	0.213	6.911	0.009	0.571(0.376−0.867)
闭眼 COP 运动椭圆面积(mm^2)	−0.04	0.01	0.122	0.727	1.004(0.983−1.024)
闭眼 COP 运动长度(mm)	0.013	0.006	4.797	0.029	1.013(1.001−1.024)
步频(steps/min)	−0.50	0.049	1.009	0.315	0.952(0.864−1.048)
步态周期(s)	0.861	0.172	4.603	0.001	2.366(1.690−3.315)
步幅(cm)	−0.023	0.035	0.434	0.510	0.977(0.911−1.047)
步速(cm/s)	−0.061	0.029	4.594	0.032	0.940(0.889−0.995)
双支持相(%)	0.122	0.103	1.406	0.236	1.130(0.923−1.383)
步长(cm)	0.024	0.077	0.093	0.760	1.024(0.880−1.191)
股直肌 RMS(μV)	−0.051	0.028	3.294	0.070	0.950(0.900−1.004)
股直肌 iEMG(μV·s)	−0.008	0.004	4.306	0.038	0.992(0.985−1.000)
股二头肌 RMS(μV)	−0.021	0.017	1.485	0.223	0.979(0.946−1.013)
股二头肌 iEMG(μV·s)	0.000	0.002	0.004	0.950	1.000(0.996−1.004)
胫骨前肌 RMS(μV)	−0.029	0.012	5.324	0.021	0.972(0.948−0.996)
胫骨前肌 iEMG(μV·s)	−0.001	0.001	0.432	0.511	0.999(0.997−1.002)
腓肠肌 RMS(μV)	−0.049	0.026	3.631	0.057	0.952(0.905−1.001)
腓肠肌 iEMG(μV·s)	−0.001	0.004	0.096	0.757	0.999(0.991−1.006)

五、预测模型的性能评价

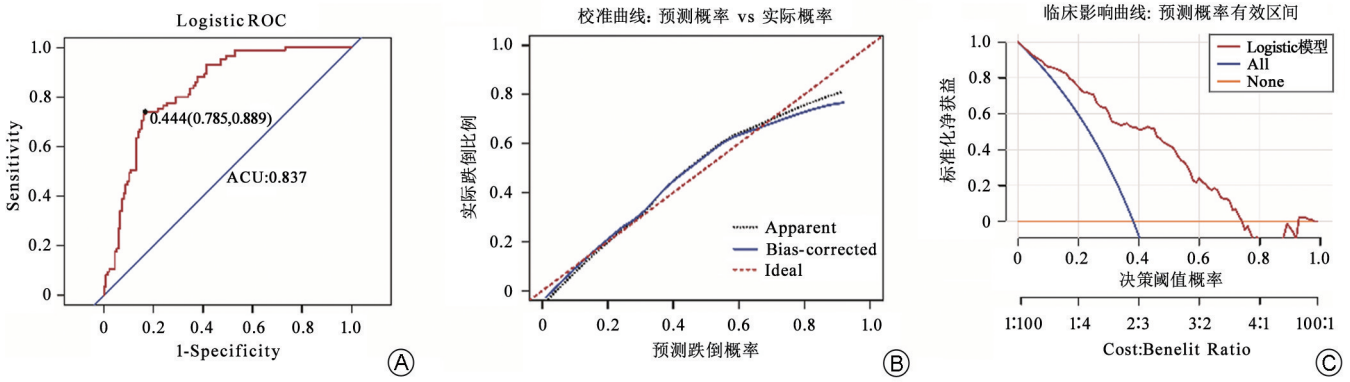
采用上述模型对验证组患者（共 95 例患者，有 37 例发生过跌倒事件，余患者未发生过跌倒事件）数据进行测试，发现该模型表现稳定：其 ROC 曲线 AUC 为 0.877（95%*CI*：0.805-0.950），最佳阈值为 0.456，约登指数为 0.636，对应敏感度为 0.757，特异度为 0.879，提示该模型区分度良好；校准曲线显示 Apparent 与 Bias-corrected 均贴近 Ideal，H-L 检验显示 $\chi^2 = 7.39$，$df = 8$，$P = 0.495$，提示该模型校准良好；决策曲线分析显示在阈概率 0%～98% 范围内该模型具有临床净获益，具体情况见图 3。

讨　论

本研究共入选 318 例老年肌少症患者，其整体跌倒发生率为 38.12%，与国内、外相关报道数据（30.8%～51.1%）相比，处于较高水平[11-12]，提示该人群总体跌倒风险不容忽视。与传统单一维度的风险筛查比较，本研究将平衡、步态、肌电等多维生理及功能指标纳入预测分析，有望为老年人群的跌倒风险评估及管理提供更精准、更具操作性的实用工具。

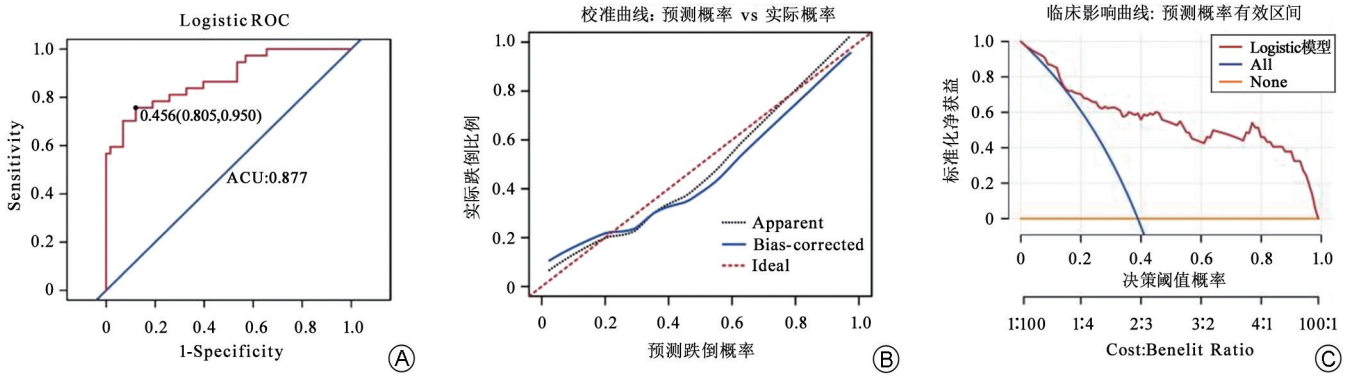
本研究结果表明，基于平衡（如 BBS 评分、闭眼 COP 运动长度）、步态和肌电等多维信息构建的列线图模型在预测建模组跌倒风险时获得可接受的判别及校准性能，并且预测性能表现稳定；决策曲线提示该模型在一定阈值区间内具有临床净获益，值得临床推广、应用，但仍需经多中心外部验证及方法学比较，以进一步确认其稳健性与临床适用范围。就平衡功能而论，BBS 评分与闭眼 COP 运动长度均为关键指标，前者为老年肌少症患者跌倒的独立保护性因素，后者反映患者在闭眼状态时的姿势控制能力，均能在一定程度上提示早期跌倒风险。将该模型应用于验证组时，其结果呈现更佳的判别与决策净获益值，可能与样本风险谱及测量一致性相关。

在步态参数方面，步态周期延长与步速下降被确认为是与跌倒显著相关的独立变量。步态周期延长通常伴随双支撑相占比增加及行走节律减慢，提示患者动态平衡能力可能受限[13]。步速作为反映下肢综合运动能力的关键指标，亦被亚洲肌少症工作组纳入为



注 A 为预测模型的 ROC 曲线；B 为预测模型的校准曲线；C 为预测模型的临床决策分析曲线

图 2　建模组预测模型的区分度、校准能力及临床净获益情况分析



注：A 为该预测模型用于验证组时的 ROC 曲线；B 为该预测模型用于验证组时的校准曲线；C 为该预测模型用于验证组时的临床决策分析曲线

图 3　该预测模型用于验证组时的区分度、校准能力及临床净获益情况分析

诊断肌少症的要素之一[14]。本研究观察到跌倒组步速普遍慢于非跌倒组水平,与既往报道结果基本一致[15]。需要注意的是,部分老年人可能出于稳态补偿心理而主动减慢步速,但过度谨慎会导致肢体活动减少,肌力进一步下降,反而增加跌倒风险[15]。因此,针对步速变化的解读应结合患者整体功能状况及行为学特征,从而获得更精准的个体评估结果。

本研究通过纳入表面肌电参数并探索其与老年肌少症患者跌倒风险间的相关性,同时还用于预测模型构建。经多因素回归分析发现,股直肌 iEMG 是老年肌少症患者跌倒的保护性因素,即在校正其他变量后,患者股直肌 iEMG 每增加 1 个单位,其发生跌倒的风险则相应降低,提示较高的股直肌激活水平代表更充分的运动单位募集及力量输出储备,有助于患者在步态周期中稳定膝关节伸肌链、维持动态平衡,对降低跌倒风险具有重要作用;相反,如股直肌 iEMG 偏低则提示神经肌肉驱动不足及肌力储备受限,患者跌倒风险较高[16]。另外胫骨前肌 RMS 亦是老年肌少症患者跌倒的保护性因素,如胫骨前肌 RMS 下降可能导致患者踝背屈控制与前向姿势调整能力受损,不利于步态稳定及动态平衡[17]。综上,神经肌肉激活能力下降(如股直肌 iEMG、胫骨前肌 RMS 下降等)可能减弱关节控制能力与步态稳定性,进而增加跌倒风险,这也为制订老年肌少症患者的肌群训练方案提供了生理学依据。

通过进行逐步多因素 Logistic 回归分析后,本研究发现在单因素分析中具有统计学意义的 6 米步速及 SPPB 评分未能进入最终模型。其原因可能包括:①构念重叠/信息冗余——SPPB 评分所涵盖的步速、平衡信息与 BBS 评分、步态周期等连续指标高度重合,而逐步法倾向于保留代表性更强者;②中介/替代效应——SPPB 评分对跌倒的影响部分由步态及肌电指标承载,经多变量校正后其独立性减弱;③测量分辨率与天花板效应——SPPB 评分存在分布集中及区分度相对不足等局限。值得注意的是,未入模不等同于无用,在基层初筛或条件受限时,6 米步速及 SPPB 评分与本模型联用仍具有实践价值,其增量效益将于后续通过 DeLong 检验、净重分类改善指标(net reclassification improvement, NRI)/综合判别改善指数(integrated discrimination improvement, IDI)及 DCA 等方法进一步评估。

尽管本研究构建的跌倒预测模型在敏感性、特异性及临床适用性方面表现良好,但仍具有一定局限性:其一,单中心、小样本,外推性受限;其二,三维步态分析与表面肌电检测依赖专用设备及技术,短期内基层推广困难;其三,采用横断面建模、面向首诊/初筛情境时,为避免与结局在时间窗/语义上的重叠导致信息泄漏,未纳入“既往跌倒史”变量,此策略使模型性能趋于保守且上限可能受限。未来可扩大样本来源并开展多中心外部再验证,在条件允许时采用 DeLong 检验比较 AUC 差异;结合不同应用场景优化决策阈值,同时融合多源电子病历数据,系统评估纳入“既往跌倒史”的增量价值与临床净获益,并引入机器学习技术以增强非线性关系识别,提升模型的临床转化率与推广价值。

综上所述,本研究通过整合平衡、步态与表面肌电等多维客观生物力学与神经肌肉指标,构建并验证了老年肌少症跌倒风险可视化预测模型,发现该模型在建模与独立验证样本过程中均表现出良好的判别与校准性能,具备一定临床应用价值,可用于风险分层、早期识别高风险个体及辅助个体化干预决策等。需要指出的是,未纳入“既往跌倒史”这一强预测变量可能在一定程度上限制了模型的性能上限及部分临床适用性,后续仍需在多中心人群中进一步验证该模型的稳健性并评估其应用边界。

利益冲突 所有作者声明不存在利益冲突

参 考 文 献

[1] Nunes-Pinto M, Bandeira de Mello RG, Pinto MN, et al. Sarcopenia and the biological determinants of aging: a narrative review from a geroscience perspective[J]. Ageing Res Rev, 2025, 103: 102587. DOI: 10.1016/j.arr.2024.102587.

[2] Sayer AA, Cooper R, Arai H, et al. Sarcopenia[J]. Nat Rev Dis Primers, 2024, 10(1): 68. DOI: 10.1038/s41572-024-00550-w.

[3] James SL, Lucchesi LR, Bisignano C, et al. The global burden of falls: global, regional and national estimates of morbidity and mortality from the Global Burden of Disease Study 2017[J]. Inj Prev, 2020, 26(S1): 3-11. DOI: 10.1136/injuryprev-2019-043286.

[4] 孙璐,钟娟平,牛雪庭,等.老年肌少症病人跌倒风险的研究进展[J].全科护理,2024,22(3):431-435. DOI: 10.12104/j.issn.1674-4748.2024.03.008.

[5] Pennone J, Aguero NF, Martini DM, et al. Fall prediction in a quiet standing balance test via machine learning: is it possible? [J]. PLoS One, 2024, 19(4): e0296355. DOI: 10.1371/journal.pone.0296355.

[6] Kokkotis C, Apostolidis K, Menychtas D, et al. Explainable siamese neural networks for detection of high fall risk older adults in the community based on gait analysis[J]. J Funct Morphol Kinesiol, 2025, 10(1): 73. DOI: 10.3390/jfmk10010073.

[7] Wang S, Nguyen TK, Bhatt T. Trip-related fall risk prediction based on gait pattern in healthy older adults: a machine-learning approach[J]. Sensors, 2023, 23(12): 5536. DOI: 10.1016/j.jamda.2019.12.012.

[8] Chen LK, Woo J, Assantachai P, et al. Asian Working Group for sarcopenia: 2019 consensus update on sarcopenia diagnosis and treatment[J]. J Am Med Dir Assoc, 2020, 21(3): 300-307. DOI: 10.1016/j.jamda.2019.12.012.

[9] Zhai X, Wu Q, Li X, et al. Effects of robot-aided rehabilitation on the

ankle joint properties and balance function in stroke survivors: a randomized controlled trial[J]. Front Neurol, 2021, 12: 719305. DOI: 10.3389/fneur.2021.719305.

[10] Lanza MB, Balshaw TG, Massey GJ, et al. Does normalization of voluntary EMG amplitude to MMAX account for the influence of electrode location and adiposity? [J]. Scand J Med Sci Sports, 2018, 28(12): 2558-2566. DOI: 10.1111/sms.13270.

[11] Matsumoto H, Tanimura C, Tanishima S, et al. Sarcopenia is a risk factor for falling in independently living Japanese older adults: a 2-year prospective cohort study of the GAINA study[J]. Geriatr Gerontol Int, 2017, 17(11): 2124-2130. DOI: 10.1111/ggi.13047.

[12] 陈蓄, 刘淑萍, 曹明节, 等. 老年肌少症患者的肌功能减退及跌倒风险的影响因素[J]. 临床和实验医学杂志, 2022, 21(9): 995-998. DOI: 10.3969/j.issn.1671-4695.2022.09.027.

[13] Wang C, Jin B, Lu A. Effects of cognitive-motor and motor-motor dual tasks on gait performance in older adults with sarcopenia[J]. Healthcare, 2024, 12(12): 1206. DOI: 10.3390/healthcare12121206.

[14] Fukuchi CA, Fukuchi RK, Duarte M. Effects of walking speed on gait biomechanics in healthy participants: a systematic review and meta-analysis[J]. Syst Rev, 2019, 8(1): 153. DOI: 10.1186/s13643-019-1063-z.

[15] Zhou Z, Huang Y, Wang J, et al. A novel digital biomarker of sarcopenia in frail elderly: new combination of gait parameters under dual-task walking[J]. Front Aging Neurosci, 2023, 15: 1087318. DOI: 10.3389/fnagi.2023.1087318.

[16] Zhang T, Huo Y, Yin W, et al. Postural balance disorders in sarcopenia based on surface electromyography [J]. Heliyon, 2024, 10(1): e24116. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e24116.

[17] Afschrift M, van Deursen R, De Groote F, et al. Increased use of stepping strategy in response to medio-lateral perturbations in the elderly relates to altered reactive tibialis anterior activity[J]. Gait Posture, 2019, 68: 575-582. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2019.01.010.

（修回日期：2025-09-16）

（本文编辑：易　浩）

· 征订启事 ·

欢迎订阅《中华物理医学与康复杂志》

《中华物理医学与康复杂志》是中华医学会主办的物理医学与康复学专业的高水平学术期刊之一。本刊全面介绍本学科及相关领域领先的科研成果和新理论、新技术、新方法、新经验，以及对物理因子治疗、康复临床、疗养等有指导作用且与本学科密切相关的基础理论研究，及时反映我国物理医学与康复领域的重大进展。

本刊现设有述评、基础研究、临床研究、研究快报、个案报道、综述、讲座、继续教育、学术争鸣、外刊重要文章摘登、学会信息、康复器械与用品信息等栏目，并将依来稿情况随时作一些调整。

《中华物理医学与康复杂志》为月刊，大 16 开，内芯 96 页码，中国标准刊号：ISSN 0254-1424 CN 42-1666/R，邮发代号：38-391，每月 25 日出版；2026 年每册定价 30 元，全年 360 元整。热忱欢迎国内外物理治疗、物理医学与康复、康复医学领域以及神经内科、神经外科、骨科等相关科室的各级医务工作者踊跃订阅、投稿。

订购办法：①邮局订阅：按照邮发代号 38-391，到全国各地邮局办理订阅手续。②直接订阅：通过邮局汇款至《中华物理医学与康复杂志》编辑部订购，各类订户汇款时务请注明所需的杂志名称及年、卷、期、册数等。

编辑部地址：430100　武汉市蔡甸区中法新城同济专家社区 E 栋《中华物理医学与康复杂志》编辑部。

电话：(027)-69378391；E-mail：cjpmr@tjh.tjmu.edu.cn；杂志投稿网址：www.cjpmr.cn。

请及时关注本刊微信公众号。