

基于心音心电动态监测技术的运动性疲劳评估模型的建立

马利彬¹, 吴德振¹, 张子依¹, 罗云根², 史春婷¹, 周志康¹, 林奕³, 丁浩冉³, 王静⁴, 米卫东¹, 曹江北¹

¹解放军总医院第一医学中心麻醉科, 北京 100853; ²联勤保障部队北戴河康复疗养中心, 河北秦皇岛 066100; ³福州闻心电子科技有限公司, 福建福州 350003; ⁴军事科学院军事医学研究院环境医学与作业医学研究所, 天津 300050

摘要: **背景** 疲劳是威胁健康的重要因素之一, 准确评价疲劳程度并进行干预具有重要意义。**目的** 构建健康青年男性运动性疲劳的评估模型。**方法** 2023年4月解放军总医院第一医学中心麻醉科招募健康青年男性受试者192例为建模训练集, 另招募不同单位的青年男性受试者33例为验证集。所有受试者利用“疲劳自觉症状调查表”进行评价, 通过血压体位反射试验采集无创血压, 利用可穿戴心音心电设备采集心音心电数据, 并按照(平躺后扶起恢复2 min后-平躺前)/平躺前进行数据处理。单因素和多因素逻辑回归分析该人群中运动性疲劳发生的相关因素, 建立对应的列线图评估模型。采用受试者工作特征(receiver operating characteristic, ROC)曲线分析模型效能。绘制校准曲线, 评估模型的校准度, 绘制决策曲线(decision curve analysis, DCA)评估模型的临床适用性。**结果** 训练集中多因素逻辑回归分析显示, Δ 射血前期($OR=1.067$, 95% CI : 1.011 ~ 1.139)、 Δ 第二心音能量($OR=1.019$, 95% CI : 1.003 ~ 1.039)、 Δ 心率($OR=1.115$, 95% CI : 1.033 ~ 1.215)、 Δ 第一心音能量($OR=0.972$, 95% CI : 0.943 ~ 0.997)、 Δ 校正左心室射血时间($OR=0.772$, 95% CI : 0.613 ~ 0.932)均与中-重度疲劳独立关联。将以上因素纳入并建立列线图评估模型, 该模型训练集的曲线下面积(area under the curve, AUC)为0.908 (95% CI : 0.825 ~ 0.991)。此模型在33例受试者组成的验证集中预测中-重度疲劳的AUC为0.940(95% CI : 0.854 ~ 1.000)。校准曲线显示验证结果与模型结果有较高的一致性; 决策曲线显示模型在低至中等风险阈值范围内表现较好。**结论** 本研究利用心音心电相关数据建立的逻辑回归模型在运动后疲劳程度评估方面表现良好, 具有一定应用价值。

关键词: 心音; 心电; 疲劳; 运动性疲劳; 评估模型; 列线图

中图分类号: R44; G804.6

文献标志码: A

文章编号: 2095-5227(2025)05-0461-07

DOI: 10.12435/j.issn.2095-5227.24061901

引用本文: 马利彬, 吴德振, 张子依, 等. 基于心音心电动态监测技术的运动性疲劳评估模型的建立 [J]. 解放军医学院学报, 2025, 46 (5): 461-467.

Establishment of an evaluation model for exercise-induced fatigue based on dynamic monitoring technology of heart sounds and electrocardiography

MA Libin¹, WU Dezhen¹, ZHANG Ziyi¹, LUO Yungen², SHI Chunting¹, ZHOU Zhikang¹, LIN Yi³, DING Haoran³, WANG Jing⁴, MI Weidong¹, CAO Jiangbei¹

¹Department of Anesthesiology, the First Medical Center of PLA General Hospital, Beijing 100853, China; ²Beidaihe Rest and Recuperation Center, Qinhuangdao 066100, Hebei Province, China; ³Fuzhou WenXin Electronic Technology Co. Ltd, Fuzhou 350003, Fujian Province, China; ⁴Institute of Environmental and Operational Medicine, Academy of Military Medical Sciences, Academy of Military Sciences, Tianjin 300050, China

Corresponding author: CAO Jiangbei. Email: caojiangbei@301hospital.com.cn

Abstract: Background Fatigue is one of the crucial factors threatening people's health, and accurate assessment of fatigue levels and intervention are of great significance. **Objective** To construct and analyze the evaluation model for exercise-induced fatigue in healthy young male subjects. **Methods** In April 2023, 192 healthy young male subjects were recruited as the modeling training set by the Anesthesiology Department of the First Medical Center of Chinese PLA General Hospital. Another 33 young male subjects from different units were recruited as the validation set. All subjects were evaluated using the "Self-reported Symptoms of Fatigue Questionnaire". Non-invasive blood pressure was collected through the blood pressure postural reflex test, and heart sound and electrocardiogram data were collected using wearable heart sound and electrocardiogram devices. The data were processed according to (the value 2 minutes after being lifted up and recovered from lying flat - the value before lying flat) / the value before lying flat. Univariate and multivariate logistic regression analyses were performed to analyze the related factors for the occurrence of exercise-induced fatigue in this population, and the corresponding nomogram evaluation model was established. The receiver

收稿日期: 2024-10-10

第一作者: 马利彬, 硕士, 主治医师. Email: malibindongchongcao@126.com

通信作者: 曹江北, 副主任医师, 副教授. Email: caojiangbei@301hospital.com.cn

operating characteristic (ROC) curve was used to analyze the efficacy of the model. The calibration curve was drawn to evaluate the calibration degree of the model, and the decision curve analysis (DCA) was drawn to evaluate the clinical applicability of the model. **Results** In the training set, multivariate logistic regression showed that Δ PEP ($OR=1.067$, 95% CI : 1.011-1.139), Δ S2E ($OR=1.019$, 95% CI : 1.003-1.039), and Δ HR ($OR=1.115$, 95% CI : 1.033-1.215) were risk factors for moderate to severe fatigue; Δ S1E ($OR=0.972$, 95% CI : 0.943-0.997) and Δ LVETc ($OR=0.772$, 95% CI : 0.613-0.932) were independently associated with moderate to severe fatigue. Incorporating the above factors and establishing a nomogram evaluation model, the area under the curve (AUC) of the training set of this model was 0.908 (95% CI : 0.825-0.991). The AUC of the validation set was 0.940 (95% CI : 0.854-1.000). The calibration curve showed that there was a high degree of consistency between the verification results and the model results; The decision curve showed that the model performed well within the low to medium risk threshold range. **Conclusion** The logistic regression model in this study utilizing heart sound and electrocardiography data demonstrates good performance in assessing post-exercise fatigue levels and has certain application value.

Keywords: heart sound; electrocardiogram; fatigue; exercise-induced fatigue; evaluation model; nomogram

Cited as: Ma LB, Wu DZH, Zhang ZY, et al. Establishment of an evaluation model for exercise-induced fatigue based on dynamic monitoring technology of heart sounds and electrocardiography[J]. Acad J Chin PLA Med Sch, 2025, 46(5): 461-467.

疲劳是一种长时间或反复受刺激后产生的复杂的生理和心理现象^[1], 常伴注意力不集中、困倦及对日常活动兴趣减弱^[2-3]。疲劳可分为运动性疲劳、脑力性疲劳、心理性疲劳、病理性疲劳和综合性疲劳等^[4]。其对人体各系统均会产生一定危害, 可导致记忆力下降、头疼、焦虑, 心血管系统发生不同程度的病变, 还可造成免疫系统功能调节失常, 最终引起免疫功能低下等。因此, 准确评价疲劳状态并进行相应干预至关重要。目前, 疲劳的评价方法主要分为主观评价方法、生化指标评价方法和生理学指标评价方法^[5]。主观评价方法以量表的形式, 对受试者的疲劳状况进行评价, 该方法的评估效能良好, 但容易受到受试者主观因素的影响, 可能会对结果的准确性产生一定的影响^[6-7]; 生化指标评价方法广泛应用于疲劳评价, 但目前仍缺少特异性的疲劳评价指标^[8-11], 同时生化指标的结果获取较为烦琐; 生理学指标评价方法主要包括肌电信号、心电信号、脑电信号以及汗液等^[12-15], 生理学指标的测量相对容易, 成为疲劳评价研究的重要方向。尽管疲劳的评价模式趋于多样化, 主观评价法仍是当前主要的评价手段, 但主观评价方法的限制因素较多, 尤其是对受试者主观感受产生影响的因素均会对评价结果产生影响。因此, 如何通过客观指标数据的变化来评价疲劳状态是目前研究的热点。

军事作业疲劳是部队官兵在平时或战时特殊环境条件下进行军事劳动、训练以及战斗引起的疲劳, 可能会导致官兵生理和认知能力下降, 身体功能下降, 甚至可能严重影响军事作业效能。疲劳评价对维护官兵健康和保持战斗力具有重要意义。建立基于客观指标数据的评价模型并简单快捷地进行疲劳评价具有现实意义。本研究拟通

过可穿戴心音心电监测设备, 利用动态监测技术采集血压体位反射试验^[16]中的数据, 针对军事作业疲劳中最常见的运动性疲劳, 建立关于中-重度疲劳的逻辑回归评估模型, 为运动性疲劳的监测评价提供一种简单快捷的方法。

1 对象与方法

1.1 研究对象

选取2023年4月—2023年7月解放军总医院第一医学中心招募的健康青年男性受试者共225例。将2023年4月招募的192例受试者作为训练集, 2023年7月招募的不同单位的33例受试者作为验证集。纳入标准: (1)健康青年男性; (2)年龄18~40岁; (3)招募前2周每周参与体能锻炼 ≥ 3 次, 每次 ≥ 1 h(体能锻炼主要有5 km跑、3 km跑、俯卧撑、蛇形跑、引体向上、仰卧起坐、400 m障碍等)。排除标准: (1)对试验用贴片过敏; (2)出现明显胸闷、呼吸困难等身体不适; (3)主动要求中止实验或因其他原因无法配合完成实验。本研究流程符合《赫尔辛基宣言》要求, 所有受试者在试验前均签署知情同意书, 并经解放军总医院第一医学中心医学伦理委员会批准(编号: S2023-593-01)。

1.2 评价指标与协变量

本研究的主要评价指标为中-重度疲劳的发生率。通过“疲劳自觉症状调查表”检测^[17], 对受试者的疲劳程度进行评估。按照量表的分值分为无-轻度疲劳组(< 60 分)和中-重度疲劳组(≥ 60 分)。

协变量指标及测量。(1)受试者的基线资料: 年龄、身高、体质量、胸围。(2)无创血压: 使用电子血压计(欧姆龙公司U32K)测试右侧手臂血压。佩戴完成后, 进行血压体位反射试验, 具体如下:

受试者静坐在折叠床5 min后,由专人测量血压;受试者随即仰卧并保持3 min,受试者恢复坐姿(推受试者背部使其被动坐起,避免让其自己坐起),立即测血压,随后静坐2 min后测量第3次血压。所有测试及结果记录均由专人负责完成。在血压体位反射试验中测量3次血压参数,包括收缩压、舒张压和平均压。(3)心音心电数据:受试者在测试开始前在肺动脉瓣听诊点佩戴本课题组开发的可穿戴心音心电监测设备(闻心科技,HR-0536)采集心音心电信号指标,包括心率(heart rate, HR)、左心室射血时间(left ventricular ejection time, LVET)、射血前期(pre-ejection period, PEP)、左心室收缩时间(left ventricular systolic time, LVST)、第一心音能量(first heart sound energy, S1E)、第二心音能量(second heart sound energy, S2E)、第一心音振幅(the amplitude of the first heart sound, S1A;第一心音在心音图表现出的声音强度或波动幅度)、第二心音振幅(the amplitude of the second heart sound, S2A)。(4)指标数据处理:血压体位反射试验中采集的资料数据包括收缩压、舒张压、平均压、HR、PEP、LVST、S1E、S2E、S1A、S2A、LVET、校正LVET(left ventricular ejection time calibration, LVETc)、收缩时间间期(systolic time intervals, STI)等,均采集后进行数据转化:(平躺后扶起恢复2 min后-平躺前)/平躺前。为了与原指标区分,均在前冠以 Δ ,如此形成以下指标: Δ 收缩压、 Δ 舒张压、 Δ 平均压、 Δ HR、 Δ PEP、 Δ LVST、 Δ S1E、 Δ S2E、 Δ S1A、 Δ S2A、 Δ LVET、 Δ LVETc、 Δ STI。

1.3 模型建立与验证

研究通过单因素和多因素逻辑回归的方法筛选与运动性疲劳相关的因素,将相关因素以及被认为与疲劳相关的指标纳入模型,剔除具有多重共线性关系的变量,进行多因素Logistic回归,并建立回归风险评估列线图模型,并计算模型中变量的OR值。采用ROC曲线分析其评估效能。绘制校准曲线,评估模型的校准度,绘制决策曲线(decision curve analysis, DCA)评估模型的临床适用性。以验证集对评估模型进行验证,评估模型的外推价值。

1.4 统计学分析

采用R 4.3.1统计软件进行统计学分析和建模,符合正态分布的数值型变量以 $\bar{x}\pm s$ 表示,非正态分布的数值型变量以 $M(IQR)$ 表示,分类变量以例数

(百分比)表示。单因素Logistic回归分析对变量进行初步筛选,剔除具有多重共线性的变量,选择 $P<0.05$ 及在临床中有意义的变量纳入Logistic回归模型进行分析;采用受试者工作特征(receiver operating characteristic, ROC)曲线验证模型准确性。采用一致性指数(C-index)评估模型的区分度,DCA曲线评估模型的效益。所有检验均为双侧。 $P<0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 一般资料的比较结果

(1)训练集:纳入受试者192例,中位年龄23(IQR : 22~25)岁,中位身高175(IQR : 173~178)cm,中位体质量68.5(IQR : 65~74)kg。其中无-轻度疲劳者166例(86.5%),得分最高分58分,最低分30分;中-重度疲劳者26例(13.5%),评分最高分90分,最低分62分。两组受试者的年龄、身高、体质量、胸围、 Δ 舒张压、 Δ 平均压、 Δ S1E、 Δ S2E、 Δ S1A、 Δ S2A、 Δ HR差异无统计学意义($P>0.05$)。中-重度疲劳组的 Δ 收缩压、 Δ LVST低于无-轻度疲劳组, Δ PEP、 Δ LVET、 Δ LVETc、 Δ STI高于无-轻度疲劳组($P<0.05$)。见表1。

(2)验证集:纳入受试者33例,中位年龄22(IQR : 21~24)岁,中位身高175(IQR : 173~177)cm,中位体质量70(IQR : 66~75)kg;无-轻度疲劳者29例(87.9%),得分最高分58分,最低分30分;中-重度疲劳者4例(12.1%),得分最高分74分,最低分64分。见表1。

(3)训练集与验证集基线指标的比较:两样本集的年龄、身高、体质量、胸围、收缩压、舒张压等均无统计学差异($P>0.05$)。

2.2 疲劳评估模型的构建

2.2.1 影响因素分析/模型的自变量选择——Logistic回归 使用训练集样本。因变量为运动性疲劳状态(赋值亚变量:1=中-重度疲劳发生,0=否),见表2。多因素回归的自变量为单因素分析中 $P<0.05$ 的因素/指标。单因素回归显示,年龄、身高、体质量、胸围等指标差异无统计学意义($P>0.05$), Δ PEP、 Δ LVET、 Δ LVETc、 Δ STI差异有统计学意义($P<0.05$);多因素回归显示,共5个指标被保留纳入回归模型中,其中 Δ PEP($OR=1.067$, 95% CI : 1.011~1.139)、 Δ S2E($OR=1.019$, 95% CI : 1.003~1.039)、 Δ HR($OR=1.115$, 95% CI :

表 1 无-轻度疲劳组与中-重度疲劳组受试者一般资料比较[M(IQR)]
 Tab. 1 Comparison of the general and clinical data of subjects between the non-mild fatigue group and the moderate-severe fatigue group (M(IQR))

指标	训练集						P 值	测试集			P 值
	整体(n=192)	无-轻度疲劳组(n=166)	中-重度疲劳组(n=26)	整体(n=33)	无-轻度疲劳组(n=29)	中-重度疲劳组(n=4)					
年龄/岁	23.00(22.00 ~ 25.00)	23.00(21.00 ~ 25.00)	23.00(22.00 ~ 24.75)	22.00(21.00 ~ 24.00)	22.00(21.00 ~ 24.00)	24.00(23.00 ~ 25.00)	0.239	22.00(21.00 ~ 24.00)	22.00(21.00 ~ 24.00)	24.00(23.00 ~ 25.00)	0.208
身高/cm	175.00(173.00 ~ 178.00)	175.00(173.00 ~ 178.00)	176.00(173.00 ~ 178.00)	175.00(173.00 ~ 177.00)	175.00(173.00 ~ 177.00)	176.00(174.75 ~ 178.50)	0.768	175.00(173.00 ~ 177.00)	175.00(173.00 ~ 177.00)	176.00(174.75 ~ 178.50)	0.290
体重/kg	68.50(65.00 ~ 74.00)	68.00(64.25 ~ 74.00)	69.95(65.50 ~ 74.75)	70.00(66.00 ~ 75.00)	70.00(66.00 ~ 75.00)	72.50(68.75 ~ 75.00)	0.304	70.00(66.00 ~ 75.00)	70.00(66.00 ~ 75.00)	72.50(68.75 ~ 75.00)	0.824
胸围/cm	88.00(83.00 ~ 92.00)	88.00(83.25 ~ 92.00)	87.00(80.75 ~ 92.00)	90.00(87.00 ~ 95.00)	90.00(86.00 ~ 95.00)	92.50(89.25 ~ 95.75)	0.578	90.00(87.00 ~ 95.00)	90.00(86.00 ~ 95.00)	92.50(89.25 ~ 95.75)	0.677
Δ收缩压 ^a	1.702(-1.751 ~ 4.505)	1.786(-1.472 ~ 4.990)	0.000(-3.893 ~ 2.449)	0.028	0.010(-0.010 ~ 0.050)	0.000(-0.020 ~ 0.010)	0.028	0.010(-0.010 ~ 0.050)	0.010(0.000 ~ 0.060)	0.000(-0.020 ~ 0.010)	0.282
Δ舒张压 ^a	1.370(-2.931 ~ 6.483)	1.419(-2.847 ~ 6.401)	0.000(-4.551 ~ 6.322)	0.422	0.010(-0.020 ~ 0.060)	0.030(-0.020 ~ 0.060)	0.422	0.010(-0.020 ~ 0.060)	0.010(0.020 ~ 0.040)	0.030(-0.020 ~ 0.060)	0.804
Δ平均压 ^a	1.912(-1.544 ~ 4.440)	2.005(-0.980 ~ 4.484)	0.379(-2.149 ~ 2.999)	0.122	0.000(-0.020 ~ 0.050)	0.010(0.000 ~ 0.020)	0.122	0.000(-0.020 ~ 0.050)	0.000(-0.020 ~ 0.050)	0.010(0.000 ~ 0.020)	0.868
ΔPEP ^a	0.000(-8.948 ~ 4.785)	-1.563(-10.133 ~ 3.905)	11.294(0.976 ~ 31.986)	<0.001	-0.020(-0.050 ~ 0.040)	0.130(0.030 ~ 0.220)	<0.001	-0.020(-0.050 ~ 0.040)	-0.020(-0.060 ~ 0.020)	0.130(0.030 ~ 0.220)	0.047
ΔS1E ^a	-4.074(-23.507 ~ 17.629)	-3.724(-23.655 ~ 17.952)	-4.539(-21.464 ~ 11.222)	0.541	-0.070(-0.190 ~ 0.050)	0.010(-0.060 ~ 0.080)	0.541	-0.070(-0.190 ~ 0.050)	-0.100(-0.200 ~ 0.050)	0.010(-0.060 ~ 0.080)	0.225
ΔLVST ^a	0.889(-1.176 ~ 3.088)	1.153(-1.062 ~ 3.227)	-0.473(-1.651 ~ 0.708)	0.015	0.000(-0.010 ~ 0.020)	0.020(-0.020 ~ 0.050)	0.015	0.000(-0.010 ~ 0.020)	0.000(-0.010 ~ 0.020)	0.020(-0.020 ~ 0.050)	0.659
ΔS2E ^a	-0.183(-15.588 ~ 23.656)	-0.700(-16.135 ~ 24.501)	2.536(-13.835 ~ 21.895)	0.741	0.010(-0.100 ~ 0.140)	0.140(0.120 ~ 0.210)	0.741	0.010(-0.100 ~ 0.140)	0.000(-0.170 ~ 0.130)	0.140(0.120 ~ 0.210)	0.061
ΔS1A ^a	-4.378(-18.886 ~ 11.948)	-4.144(-18.102 ~ 11.990)	-5.823(-24.815 ~ 8.766)	0.567	-0.090(-0.170 ~ 0.030)	-0.010(-0.170 ~ 0.110)	0.567	-0.090(-0.170 ~ 0.030)	-0.090(-0.170 ~ 0.020)	-0.010(-0.170 ~ 0.110)	0.659
ΔS2A ^a	0.170(-14.297 ~ 20.275)	-0.446(-15.205 ~ 24.038)	5.183(-9.733 ~ 11.492)	0.635	0.000(-0.130 ~ 0.130)	0.040(-0.070 ~ 0.150)	0.635	0.000(-0.130 ~ 0.130)	0.000(-0.170 ~ 0.120)	0.040(-0.070 ~ 0.150)	0.620
ΔHR ^a	0.000(-5.818 ~ 3.524)	-1.379(-6.557 ~ 3.494)	0.704(-1.717 ~ 4.333)	0.125	-0.020(-0.070 ~ 0.030)	0.040(0.020 ~ 0.060)	0.125	-0.020(-0.070 ~ 0.030)	-0.040(-0.090 ~ 0.020)	0.040(0.020 ~ 0.060)	0.069
ΔLVET ^a	1.747(-1.323 ~ 6.239)	2.752(-0.295 ~ 6.918)	-5.213(-8.125 ~ -1.085)	<0.001	0.010(-0.010 ~ 0.050)	-0.010(-0.040 ~ 0.000)	<0.001	0.010(-0.010 ~ 0.050)	0.020(-0.010 ~ 0.060)	-0.010(-0.040 ~ 0.000)	0.047
ΔLVETc ^{ab}	1.181(-1.320 ~ 4.036)	1.567(-0.673 ~ 4.524)	-2.735(-5.758 ~ -0.251)	<0.001	0.010(-0.02 ~ 0.040)	-0.010(-0.030 ~ 0.010)	<0.001	0.010(-0.02 ~ 0.040)	0.020(-0.010 ~ 0.040)	-0.010(-0.030 ~ 0.010)	0.408
ΔSTI ^{ac}	-2.899(-12.783 ~ 5.191)	-4.290(-15.620 ~ 3.241)	15.561(3.695 ~ 51.003)	<0.001	-0.030(-0.090 ~ 0.040)	0.140(0.070 ~ 0.220)	<0.001	-0.030(-0.090 ~ 0.040)	-0.050(-0.100 ~ 0.030)	0.140(0.070 ~ 0.220)	0.004

^a将血压体位反射试验中采集的数据按照(平躺后扶起恢复2 min后 - 平躺前)/平躺前进行处理,形成以下指标:Δ收缩压、Δ舒张压、Δ平均压、ΔPEP、ΔS1E、ΔLVST、ΔS2E、ΔS1A、ΔS2A、ΔHR、ΔLVET、ΔLVETc、ΔSTI等;PEP:射血前期;S1E:第一心音能量;LVST:左心室从开始收缩到射血完成的时长(包括等容收缩期、快速射血期和慢速射血期);S2E:第二心音能量;S1A:第一心音在心音图表现出的声音强度或波动幅度;S2A:第二心音在心音图表现出的声音强度或波动幅度;HR:心率;LVET:左心室射血时间;LVETc:校正LVET;STI:收缩时间间期。^bLVETc=LVET/[sqrt(60 000/HR/1 000)]。^cSTI=PEP/LVET。

1.033 ~ 1.215)是中-重度疲劳发生的危险因素, $\Delta S1E(OR=0.972, 95\% CI: 0.943 \sim 0.997)$ 、 $\Delta LVETc(OR=0.772, 95\% CI: 0.613 \sim 0.932)$ 是中-重度疲劳发生的保护性因素(表2)。

表2 单因素和多因素逻辑回归结果

Tab. 2 Results of univariate and multivariate logistic regression

变量	单因素分析		多因素分析	
	OR (95% CI)	P值	OR (95% CI)	P值
年龄	1.070(0.936 ~ 1.210)	0.296		
身高	1.015(0.980 ~ 1.123)	0.698		
体质量	1.040(0.974 ~ 1.109)	0.235		
胸围	0.988(0.939 ~ 1.040)	0.628		
Δ 收缩压	0.936(0.870 ~ 1.005)	0.071		
Δ 舒张压	0.976(0.918 ~ 1.022)	0.390		
Δ 平均压	0.925(0.842 ~ 1.006)	0.090		
Δ PEP	1.091(1.056 ~ 1.138)	<0.001	1.067(1.011 ~ 1.139)	0.031
Δ S1E	0.993(0.981 ~ 1.004)	0.273	0.972(0.943 ~ 0.997)	0.044
Δ LVST	0.904(0.812 ~ 1.000)	0.054		
Δ S2E	1.002(0.991 ~ 1.012)	0.691	1.019(1.003 ~ 1.039)	0.028
Δ S1A	0.995(0.981 ~ 1.007)	0.442		
Δ S2A	1.003(0.990 ~ 1.016)	0.598		
Δ HR	1.033(0.988 ~ 1.081)	0.150	1.115(1.033 ~ 1.215)	0.007
Δ LVET	0.805(0.728 ~ 0.874)	<0.001		
Δ LVETc	0.742(0.637 ~ 0.838)	<0.001	0.772(0.613 ~ 0.932)	0.013
Δ STI	1.075(1.046 ~ 1.115)	<0.001		

2.2.2 列线图评估模型 纳入以上5个指标建立评价疲劳状态的列线图评估模型(图1)。模型中5个指标的总得分的矢量和为220分, 总标量和约286分。其中指标 Δ LVETc最为重要, 其得分最高(100分), 提示应予特别关注。而影响相对最小的为 Δ S2E, 其得分为38分。此外, 由得分推测: 5个指标中, 只要 Δ LVETc和其余任一指标同时为阳性表现(达图中对应线段最右端危险水平), 即可得标量分和 ≥ 150 分, 则男青年受试者出现运动性疲劳状态(中-重度疲劳发生)的概率/发生率可近50%。与图上预估的0.50概率对应总分(173分)相近。

2.2.3 列线图评估模型的效能分析 以上述回归因变量为预测目标指标, 以该列线图模型值作为预测指标进行ROC分析。模型的AUC为0.908(95% CI: 0.825 ~ 0.991)(图2A), 敏感度为0.750, 特异度为0.932, 准确度为0.907。可见其效能较高。对预测及评估男青年受试者运动性疲劳状态(中-重度疲劳)发生率有较高的应用价值。

2.3 模型的验证

(1) 验证集验证: 参考2.2.3设计, 使用验证集样

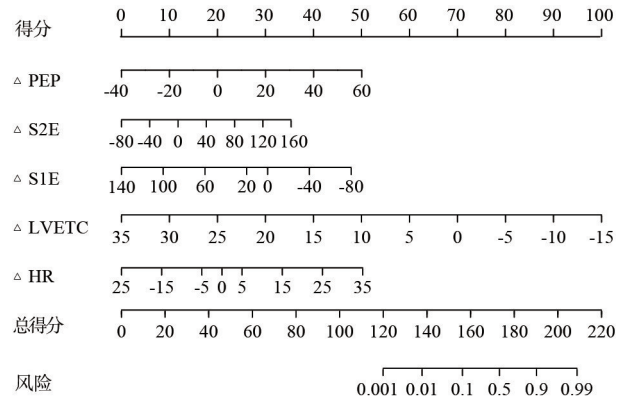


图1 男青年受试者运动性疲劳的评估模型列线图

Fig. 1 Nomogram of the evaluation model for exercise-induced fatigue in young male subjects

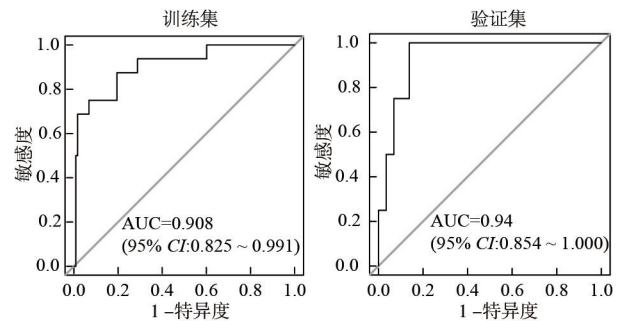


图2 男青年受试者运动性疲劳的评估模型的ROC曲线

Fig. 2 ROC curves of the evaluation model for exercise-induced fatigue in young male subjects

本进行ROC分析。验证集的AUC为0.940(95% CI: 0.854 ~ 1.000)(图2B)。将其与训练集样本所得模型比较(Delong 检验), $Z=1.597, P=0.113$, 提示二者的评估效能相近。

(2)Bootstrap法验证: 随机抽取样本(500次), 抽样结果(采用Uniform策略)的平均绝对误差为0.026, C指数为0.933。预测术后复发的列线图模型的校准曲线见图3, 图中可见预测概率与实际概率大体一致, 且Hosmer-Lemeshow拟合优度检验 $P=0.565$, 一致性较好。

(3)DCA曲线: 分别制作两样本集对应的男青年受试者运动性疲劳的评估模型的DCA曲线, 见图4。DCA曲线中, 训练集净收益为0的阈值概率为0.8, 净获益为0.119; 验证集的阈值概率为0.650, 净获益为0.121, 模型在低至中等风险阈值范围内表现较好。

3 讨论

疲劳是一种较为复杂的主观感受, 伴随疲乏、无力、劳累等症状。其具有一定的主观性, 缺少准确的诊断标准, 不易与劳累、抑郁等相关状态

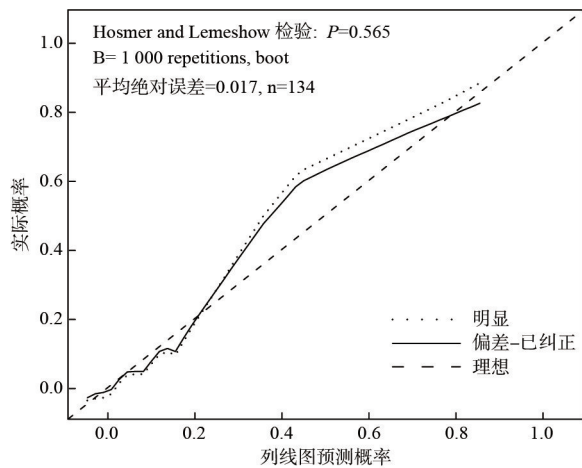


图3 男青年受试者运动性疲劳评估模型的校准曲线

Fig. 3 Calibration curve of the evaluation model for exercise-induced fatigue in young male subjects

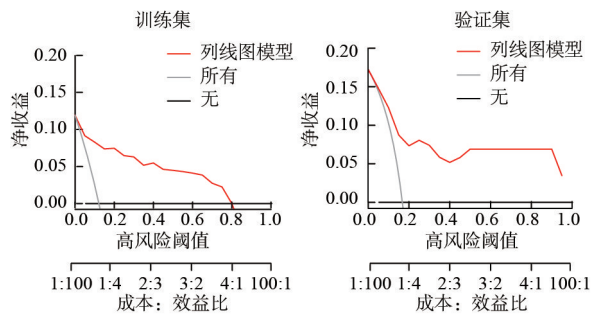


图4 男青年受试者运动性疲劳评估模型的临床决策曲线

Fig. 4 DCA of the evaluation model for exercise-induced fatigue in young male subjects

区别, 诊断较为困难, 且常被忽略, 目前主要通过自评或他评量表进行评估。本研究主要通过目前常用的自评量表先对受试者的疲劳状况进行自我评估, 再结合可穿戴设备监测得到的心音心电信息数据, 纳入 Δ PEP、 Δ S2E、 Δ HR、 Δ S1E、 Δ LVETc这5个指标, 建立中-重度运动性疲劳的评估模型。结果显示, 该模型AUC为0.908(95% CI: 0.825 ~ 0.991)(图2A), 敏感度为0.750, 特异度为0.932, 准确度为0.907。该模型特异度高, 敏感度尚可, 提示该模型能够准确排除未发生中-重度运动性疲劳者, 判断真正的中-重度运动性疲劳的准确率相对较低(75%), 总体上模型对运动性疲劳具有较好的评价效能。

目前, 针对疲劳的评价模型较多, 主要采取主客观指标相结合的方法。有研究通过测量受试者在运动过程中心率、血氧饱和度和能量消耗等数据, 利用BP神经网络的方法建立预测模型^[18], 该模型的预测输出与期望输出的误差比基本小于 $\pm 20\%$, 对运动性疲劳的实时预测值准确性较高,

较好地反映人在运动时的疲劳程度, 但其在测量设备要求上较高。也有利用主观疲劳、心率、呼吸率和无氧功率等指标建立疲劳评价模型, 并对模型进行了模糊层次综合分析, 利用所测实验数据验证了模型的准确性, 又利用MATLAB仿真软件进行验证, 得出该模型具有较高的可靠性^[19]。但该研究使用的监测设备较为复杂, 在实际应用中较为受限。本研究也采取主客观指标相结合的方法。但本研究纳入模型的数据可通过可穿戴式的心音心电监测设备获取, 该设备重量约30 g, 方便携带。将模型集成于该设备的软件, 可直接获取受试者的疲劳状态, 较适用于军事作业环境, 可较便捷地获取军事作业人员的疲劳状态, 为提高军事作业效能提供一定的数据支撑。

本模型纳入的指标数据均来源于心音心电数据, 现有研究已经证明疲劳状态能够导致心脏相关指标发生变化^[15], 包括心率、心室收缩功能等。部分研究已经将心电指标用于评价疲劳状态。心率变异性(heart rate variability, HRV)是目前用于评价身体疲劳的一个重要指标, 其已被大量应用于疲劳的评价研究中^[20]。Crawford等^[21]在针对高强度运动的健康青年的研究中发现, HRV增强会使疲劳感上升, 运动积极性降低。本研究中心率的变化在单因素逻辑回归分析上无统计学差异, 但依据既往研究证据, 本研究将其纳入评估模型中^[22]。在该模型中, Δ HR是疲劳评价模型的危险因素, 显示心率的变化对疲劳评价具有一定的预测价值。现有研究表明, 疲劳可导致心肌收缩力下降^[23]。但疲劳与PEP的相关性研究较少, PEP是评估左心室收缩功能的间接指标, 故可以推测疲劳可能会导致PEP的变化。本研究中 Δ PEP在无-轻度疲劳组与中-重度疲劳组间有统计学差异, 该指标主要受心室内压上升速率和心搏量的影响, 这在一定程度上验证了运动性疲劳可能导致心肌收缩力下降这一现象, 与现有研究结果基本一致。LVETc是经过心率矫正的LVET的结果, 其主要参考了QTc的校正方法^[24], 校正了心率对其结果的影响。现有研究已经证实其与左心室前负荷相关, 即时反映左心室的收缩功能^[25]。本研究中发现中-重度运动性疲劳的受试者在 Δ LVETc等指标上与无-轻度疲劳的受试者存在显著差异, 这些指标对疲劳存在一定的指示作用, 与现有研究结果基本一致。心音是心脏的一种生物学信号, 它包含大量的心脏活动信息, 能够反映心脏活动状态^[26],

目前已有研究显示心音指标能够反映心脏疲劳的状态^[27]。本研究中纳入了 $\Delta S1E$ 、 $\Delta S2E$ 两个指标，两个指标均是中-重度疲劳发生的危险因素，也进一步验证了现有的研究结果。

本研究通过纳入心音心电的相关指标建立了运动性疲劳逻辑回归评估模型，具有较好的评价效果，但将量表结果作为疲劳评价的金标准，其在准确性上可能会受到主观因素的影响。生化指标在评价疲劳方面具有重要作用，本研究主要通过利用可穿戴设备采集的数据进行疲劳分析，未纳入血糖、乳酸等疲劳相关生化指标；且作为一个初步探索性研究，本研究数据量较小，后期仍需进一步完善，提高评估模型的准确性和临床适用性。另外，该评估模型数据来源于健康青年男性人群，因此并不适用于其他人群，如老年人、儿童等。本研究并未针对所有疲劳状态建立评价模型，仅针对中-重度运动性疲劳，主要考虑在军事作业过程中，中-重度疲劳应及时采取一定的干预措施，避免疲劳进一步加重，否则会产生严重后果，该模型的建立更具有现实意义。

综上所述，中-重度运动性疲劳患者在完成血压体位反射试验中，心音心电相关指标会发生相关的变化，与疲劳量表具有较高的一致性，其对疲劳的发生具有一定的评估价值，为下一步可穿戴设备的疲劳评价提供了一个重要方向。

作者贡献 马利彬：收集数据，数据分析，撰写初稿；吴德振、张子依、罗云根、史春婷、周志康、林奕、丁浩冉、王静：收集数据；米卫东：获得资助，文章审阅及修订；曹江北：文章审阅及修订。

利益冲突 所有作者声明无利益冲突。

数据共享声明 本论文相关数据可依据合理理由从作者处获取，Email: malibindongchongcao@126.com。

参考文献

- 1 张潇潇, 李亭佳卉, 何颖, 等. 围手术期疲劳发生情况及研究进展 [J]. 国际麻醉学与复苏杂志, 2022, 43 (12): 1332-1335.
- 2 Sun JQ, Liu GD, Sun YB, et al. Application of surface electromyography in exercise fatigue: a review [J]. Front Syst Neurosci, 2022, 16: 893275.
- 3 Mantri S, Klawson E, Albert S, et al. Understanding the lexicon of fatigue in Parkinson's disease [J]. J Parkinsons Dis, 2020, 10 (3): 1185-1193.

- 4 宋明箫, 范利君, 陈学伟, 等. 军事作业疲劳现场监测及评价技术研究进展 [J]. 军事医学, 2024, 48 (2): 143-147.
- 5 裴莹, 王磊, 李惠子. 军事训练中运动性疲劳评价方法的研究进展 [J]. 解放军医学院学报, 2022, 43 (8): 887-890.
- 6 Bulmer S, Corrigan SL, Drain JR, et al. Characterising psychophysiological responses and relationships during a military field training exercise [J]. Int J Environ Res Public Health, 2022, 19 (22): 14767.
- 7 石彤, 傅振寰, 王汝州, 等. 军人疲劳、情绪状态对睡眠质量的影响及睡眠质量与警觉性相关性分析 [J]. 军事医学, 2023, 47 (4): 259-263.
- 8 Heil J, Loffing F, Büsch D. The influence of exercise-induced fatigue on inter-limb asymmetries: a systematic review [J]. Sports Med Open, 2020, 6 (1): 39.
- 9 Zhang JY, Chen MM, Peng Y, et al. Wearable biosensors for human fatigue diagnosis: a review [J]. Bioeng Transl Med, 2022, 8 (1): e10318.
- 10 Varanoske AN, Wells AJ, Kozlowski GJ, et al. Effects of β -alanine supplementation on physical performance, cognition, endocrine function, and inflammation during a 24 h simulated military operation [J]. Physiol Rep, 2018, 6 (24): e13938.
- 11 王欢欢, 韩继明, 刘霖, 等. 驻高原武警官兵不同时间血清生化指标与情绪状态变化 [J]. 解放军医学院学报, 2021, 42 (12): 1243-1248.
- 12 吕汇, 王健, 董小燕. 长时间-低强度肌肉疲劳肌电检测方法研究进展 [J]. 中华劳动卫生职业病杂志, 2024, 42 (6): 475-480.
- 13 刘宁浩, 姜利英, 秦肖雲, 等. 基于电化学的可穿戴汗液传感器的研究进展 [J]. 化学通报, 2024, 87 (9): 1055-1065.
- 14 Wu XL, Yang JH, Shao YC, et al. Mental fatigue assessment by an arbitrary channel EEG based on morphological features and LSTM-CNN [J]. Comput Biol Med, 2023, 167: 107652.
- 15 Ahmed S, Lee YG, Lim YH, et al. Noncontact assessment for fatigue based on heart rate variability using IR-UWB radar [J]. Sci Rep, 2022, 12 (1): 14211.
- 16 李婷. 军事训练疲劳监测评估及其血液代谢组学研究 [D]. 天津: 天津体育学院, 2023.
- 17 韩辉, 周音莲, 蔡文杰, 等. 日本《疲劳自觉症状调查表》在潜艇部队的适用性研究 [J]. 海军医学杂志, 2011, 32 (5): 313-315.
- 18 李天博, 于梦浩, 吕毅, 等. 基于动态多生理参数的人体疲劳检测研究 [J]. 信息技术, 2017, 41 (11): 121-124.
- 19 司华山. 基于多参数的运动性疲劳分级系统研究与应用 [D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2019.
- 20 Tanriverdi A, Savci S, Ozcan Kahraman B, et al. Effects of high intensity interval-based inspiratory muscle training in patients with heart failure: a single-blind randomized controlled trial [J]. Heart Lung, 2023, 62: 1-8.
- 21 Crawford DA, Heinrich KM, Drake NB, et al. Heart rate variability mediates motivation and fatigue throughout a high-intensity exercise program [J]. Appl Physiol Nutr Metab, 2020, 45 (2): 193-202.
- 22 Mateus GAS, Assumpção CO, Cabido CET, et al. Effect of fatigue and graded running on kinematics and kinetics parameters in triathletes [J]. Int J Sports Med, 2022, 43 (9): 797-803.
- 23 侯婕, 刘鑫煜, 田佳敏, 等. 生脉饮加味对运动性疲劳模型大鼠心功能指标的影响 [J]. 中国兽医杂志, 2024, 60 (7): 117-121.