

根据心肺最佳点构建反向传播神经网络最大摄氧量预测模型

吴东哲, 高晓麟, 李闯涛, 王昊

<https://doi.org/10.12307/2023.054>

投稿日期: 2022-01-18

采用日期: 2022-03-10

修回日期: 2022-05-13

在线日期: 2022-06-08

中图分类号:

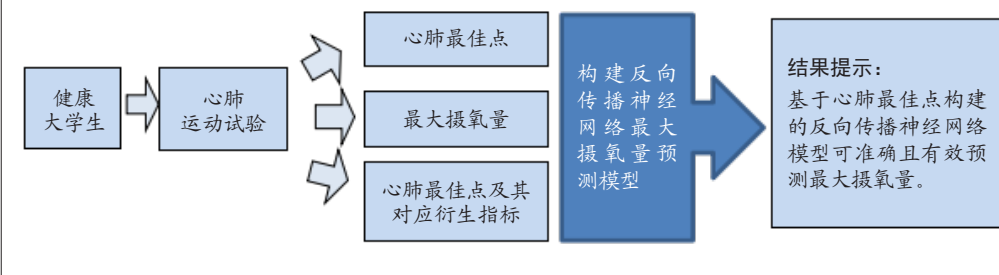
R459.9; R318; R874

文章编号:

2095-4344(2023)08-01224-08

文献标识码: B

文章快速阅读: 采用“心肺最佳点”构建反向传播神经网络模型预测最大摄氧量



文题释义:

反向传播神经网络(back-propagation network, BP神经网络): 作为一种非线性多层反向传播网络, 通过梯度下降及连续调整神经元权值实现对于模型最小误差的无限逼近, 优于处理复杂模糊的映射关系、无需了解数据的分布形式和变量间的关系, 对非线性系统具有较强的模拟与预测能力, 且相较传统回归模型在拟合优度、对初始数据的仿真和预测精度等方面展现出较为明显的优势。

心肺最佳点: 被认为是人体呼吸系统和心血管系统的最佳整合点, 当人体进行递增运动过程中每分通气量与每分摄氧量的最低值被定义为“心肺最佳点”, 心肺最佳点的测试强度仅约为最大摄氧量的50%并可准确反映人体有氧运动能力。

摘要

背景: 研究证明最大摄氧量被认为是评价有氧运动能力的“金标准”, 但测试其所需运动强度较大且存在指标再现性低、测试者主观影响效应等限制因素。

目的: 通过反向传播神经网络采用新型次最大运动评估指标“心肺最佳点”构建最大摄氧量预测模型。

方法: 试验经国家体育总局体育科学研究所伦理委员会批准, 招募80名健康大学生受试者(男40名, 女40名), 了解试验流程、目的并自愿签署知情同意书配合完整试验过程。受试者进行递增负荷心肺运动试验, 采集最大摄氧量与心肺最佳点等相关指标, 进行相关性分析获得具有统计学意义的指标, 并构建最大摄氧量预测模型。

结果与结论: ①最大摄氧量与心肺最佳点、体质量指数、性别、心肺最佳点对应的摄氧量和功率均存在显著相关性($P < 0.01$); ②运用反向传播神经网络构建经典3层拓扑结构最大摄氧量预测模型(包含5个输入层、10个隐藏层和1个输出层), 该模型预测值与实测值绝对误差均值为0.227 L/min、相对误差均值为12%, 提示基于心肺最佳点构建的反向传播神经网络可准确且有效预测最大摄氧量; ③反向传播神经网络模型最大摄氧量预测值与多元线性回归预测值相比差异无显著性意义($P > 0.05$), 但依据心肺最佳点构建的反向传播神经网络模型预测精度要优于多元线性回归模型。

关键词: 心肺最佳点; 最大摄氧量; 反向传播神经网络; 心肺运动试验

缩略语: 心肺最佳点对应功率: rate of work of cardiorespiratory optimal point, WR_{COP} ; 心肺最佳点对应摄氧量: oxygen uptake of cardiorespiratory optimal point, VO_{2COP} ; 心肺最佳点对应心率: heart rate of cardiorespiratory optimal point, HR_{COP}

Constructing the prediction model of maximal oxygen uptake by back-propagation neural network based on the cardiorespiratory optimal point

Wu Dongzhe, Gao Xiaolin, Li Chuangtao, Wang Hao

China Institute of Sport Science, Beijing 100061, China

Wu Dongzhe, Master candidate, China Institute of Sport Science, Beijing 100061, China

Corresponding author: Gao Xiaolin, PhD, Researcher, China Institute of Sport Science, Beijing 100061, China

Abstract

BACKGROUND: Maximal oxygen uptake is considered as the “gold standard” for evaluating aerobic exercise capacity and cardiopulmonary health. However, the measurement of maximal oxygen uptake requires a strong exercise load, and there are some limitations such as low reproducibility of the index and subjective effect of the test participants.

国家体育总局体育科学研究所, 北京市 100061

第一作者: 吴东哲, 男, 1996年生, 河北省保定市人, 汉族, 国家体育总局体育科学研究所读硕士, 主要从事运动损伤与运动性心血管意外的风险评估、预防与康复。

通讯作者: 高晓麟, 博士, 研究员, 国家体育总局体育科学研究所, 北京市 100061

<https://orcid.org/0000-0002-3253-933X>(吴东哲)

基金资助: 国家体育总局体育科学研究所基本科研业务费资助项目(基本19-18), 项目负责人: 高晓麟

引用本文: 吴东哲, 高晓麟, 李闯涛, 王昊. 根据心肺最佳点构建反向传播神经网络最大摄氧量预测模型 [J]. 中国组织工程研究, 2023, 27(8):1224-1231.



OBJECTIVE: To construct the prediction model of maximal oxygen uptake using the new sub-maximal exercise evaluation index – cardiorespiratory optimal point – through the back-propagation neural network.

METHODS: The trial protocol was approved by the Ethics Committee of the China Institute of Sports Science. Eighty healthy college students (40 males and 40 females) were randomly recruited. They were fully informed of the trial process and purpose and voluntarily signed informed consent to cooperate with the whole trial process. The participants underwent an incremental load cardiopulmonary exercise test to identify the maximal oxygen uptake, cardiorespiratory optimal point, and other related indicators for correlation analysis to obtain statistically significant indicators. Then, the prediction model of maximal oxygen uptake was built.

RESULTS AND CONCLUSION: There were significant correlations between maximal oxygen uptake and cardiorespiratory optimal point, body mass index, sex, oxygen uptake and power corresponding to the cardiorespiratory optimal point ($P < 0.01$). The prediction model of maximal oxygen uptake with classical three-layer topology was established using the back-propagation neural network, including 5 input layers, 10 hidden layers and 1 output layer. The mean absolute and relative errors between the predicted and measured values of the model were 0.227 L/min and 12%, respectively. This indicated that the back propagation neural network model built based on the cardiorespiratory optimal point could accurately and effectively predict the maximal oxygen uptake. There was no significant difference between the maximal oxygen uptake predicted value of the back propagation neural network model and that of the multiple linear regression model ($P > 0.05$). However, the prediction accuracy of the back propagation neural network model constructed according to the cardiorespiratory optimal point was better than that of the multiple linear regression model.

Key words: cardiorespiratory optimal point; maximal oxygen uptake; back-propagation neural network; cardiopulmonary exercise test

Funding: the Fundamental Research Funds for the China Institute of Sport Science (project 19-18) (to GXL)

How to cite this article: WU DZ, GAO XL, LI CT, WANG H. Constructing the prediction model of maximal oxygen uptake by back-propagation neural network based on the cardiorespiratory optimal point. *Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu*. 2023;27(8):1224-1231.

0 引言 Introduction

有氧运动能力，又称心肺耐力，它被认为是人体气体和血液交换的能动枢纽，可准确反映人体心血管和呼吸系统的整体功能状况^[1]。国内外大量研究证实，有氧运动能力不仅可以指导运动人群运动能力的提高，还可以应用于临床医学以评估个体的体质健康水平，并于2016年经美国心脏协会科学声明将“有氧运动能力”视为第五大生命体征^[2-4]。目前最大摄氧量的测试方法（直接测试法、间接测试法）已可以满足大多数人群有氧运动能力评估需求，但多数测试方法均存在一定的局限性（如指标再现性差、指标获取运动强度过大、实验室测量受测试者主观影响较大等）^[5-9]。因此，优化最大摄氧量评估流程以增加其“公众普适性”对于有氧运动能力评估的“客观化”则显得尤为重要。

心肺最佳点于2012年被RAMOS等^[10]提出，该指标提出背景是研究发现在进行递增负荷运动时人体通气等效物每分通气量与每分摄氧量比值典型变化曲线为“U型”，认为人体在安静和最大运动期间通气效率往往较低，但在中等及次最大运动期间通气效率较高。因此，将递增负荷运动期间给定分钟内的通气量与摄氧量比值最低点定义为“心肺最佳点”，该点被认为是人体呼吸系统和心血管系统的最佳整合。经近年相关研究证明，相比于传统有氧运动能力评价指标，心肺最佳点的获得受人体主观影响性较小且更易测量，并与最大摄氧量呈高度相关关系^[11]。自2012年起，已有运动及临床医学领域学者就心肺最佳点展开一系列研究，研究人群从临床患者至职业运动员，研究方向逐渐从临床诊断预测转向健康及运动能力的评估^[12-17]。

反向传播神经网络是基于Back-propagation算法的神经网络，该网络作为一种多层前馈型神经网络，可通过对人类神经元的功能进行模仿且无需对输入输出变量映射关系进行描述，对非线性系统具有较强的模拟与预测能力^[18]。反向传播神经网络是当前各研究领域实践应用较为广泛的人工神经网络之一，其特征为：信息正向传播——误差逆向传播，该网络通过反向传递的方式模拟大脑神经元，连续修正使误差函数沿负梯度持续下降，最终使神经元连接权值达到预期

要求^[19-20]。由于反向传播神经网络改善了以往多层神经网络隐藏层神经元修正问题，所以研究发现反向传播神经网络已广泛应用于生物医学工程、自动化技术、金融及体育等领域，且依据其突触化人脑信息储存能力、高度自学习自组织自适应能力和较强的容错性特点，其预测精度要优于多数现行的预测模型^[21-23]。

因而，此次试验通过性别、体质量指数、心肺最佳点及其衍生指标构建反向传播神经网络最大摄氧量预测模型，为丰富有氧运动能力评价指标体系及优化最大摄氧量评估流程提供借鉴思路。

1 对象和方法 Subjects and methods

1.1 设计 反向传播神经网络建模试验，采用Kolmogorov-Smirnovtest检验其正态性，针对不同类型数据采用Pearson或Spearman相关分析检验各指标间的相关关系，后筛选线性相关指标录入Matlab2021a构建反向传播神经网络，采用经典3层拓扑结构（即输入层、隐藏层、输出层）。

1.2 时间及地点 试验于2019年3-11月在国家体育总局体育科学研究所完成。

1.3 对象 共纳入80名健康无运动训练经历的在校大学生，其中男40名，女40名；年龄(22.0±1.7)岁；体质量(62.5±10.2)kg；身高(168.5±7.6)cm；体质量指数(21.92±2.72)kg/m²。测试前受试者应了解研究目的、试验流程及受试者权利、责任，并自愿签署知情同意书。测试期间运动风险筛查受试者身体状况表现良好，并能按要求完成心肺运动试验。试验经国家体育总局体育科学研究所伦理委员会的批准，批准号：20210205。

纳入标准：①受试者身体健康，无运动禁忌证；②近期无骨折手术史和下肢骨折未愈合的情况；③年龄20-25岁；④通过PAR-Q问卷筛查^[24]；⑤了解试验流程、研究目的签署知情同意书，自愿配合试验全过程。

排除标准：①存在心脑血管、骨关节、代谢性疾病或有家族猝死病史；②经PAR-Q问卷筛查不能参与高强度运动的受试者。

1.4 试验器材 心肺功能测试系统(型号: MetaMax3B, Cortex, 德国)1台;呼吸面罩3个(大中小号各1个);心率带(型号: H10, POLAR, 美国)3条;功率自行车(型号: Eegoline100, Ergoline Academy, 德国)1台;3M防水胶带1包。

1.5 方法

1.5.1 心肺运动试验方案 对受试者身高、体质量、体质量指数、年龄等基线数据进行采集,然后进行心肺运动试验。实验环境保持舒适安静,室内温度恒定保持23-26℃。开启MelaMax3B心肺功能测试系统预热、气体校正并为受试者佩戴气体采集呼吸面罩,在正式开始运动试验前应再次向受试者明确整个试验流程及注意事项。测试人员为受试者佩戴试验所需传感器,根据受试者身高调试功率自行车高度。待试验开始后指导受试者静坐于功率自行车保持放松并记录静息气体代谢数据持续5min。静息状态完成后,进入线性递增负荷运动阶段,受试者起始功率均控制在40W保持2min,后进入递增负荷阶段,递增速率为男生20W/min,女生15W/min,详见表1,视受试者运动时的生理表现试验人员给予适当口头鼓励,直至受试者力竭并达到最大摄氧量标准时终止负荷。运动力竭后,仍保持20W恒定功率继续蹬车3min至试验结束,受试者全程蹬车转速应保持在60-65r/min。测试结束后记录受试者即刻通气指标最大摄氧量,心肺最佳点则选取心肺运动试验运动阶段中受试者通气量与摄氧量的最小比值。此外,确保每名受试者测试前对心肺功能测试系统重新气体校正,并完成气体采集面罩的卫生清理。

表1 | 心肺运动试验方案
Table 1 | Cardiopulmonary exercise testing protocols

| 性别 | 转速 | 静息时间 | 起始负荷 | 递增速率 | 恢复时间 |
|----|----------|-------|------------|----------|-------|
| 男 | 60 r/min | 5 min | 40 W×2 min | 20 W/min | 3 min |
| 女 | 60 r/min | 5 min | 40 W×2 min | 15 W/min | 3 min |

1.5.2 试验中止标准 受试者摄氧量随着运动时间、运动强度的增加不再增加或出现平台;主观运动疲劳分值接近19,经鼓励后仍不能继续相应要求的运动强度;受试者口头、肢体出现极度疲劳而无法继续试验方案。受试者满足其中任意2条即被认定为已达最大摄氧量。

1.6 主要观察指标 ①心肺运动试验中采集的受试者最大摄氧量绝对值;②心肺最佳点选取心肺运动试验运动阶段中受试者通气量与摄氧量的最小比值,其对应的摄氧量、心率及于运动功率作为心肺最佳点对应的衍生指标,即心肺最佳点对应功率(rate of work of cardiorespiratory optimal point, WR_{COP})、心肺最佳点对应摄氧量(oxygen uptake of cardiorespiratory optimal point, VO_{2COP})、心肺最佳点对应心率(heart rate of cardiorespiratory optimal point, HR_{COP})。

1.7 统计学分析 文章统计学方法已经国家体育总局体育科学研究所生物统计学专家审核。将测得指标录入SPSS 26.0统计软件进行数理统计分析和逻辑筛查,计量资料采用 $\bar{x}\pm s$ 表示,通过Kolmogorov-Smirnovtest检验其正态性,针对不同

类型数据采用Pearson或Spearman相关分析检验各指标间的相关关系,后筛选线性相关指标录入Matlab2021a构建反向传播神经网络,采用经典3层拓扑结构(即输入层、隐藏层、输出层)。选取相同具有线性相关关系指标构建多元线性回归模型,后通过独立样本t检验、配对样本t检验对多元线性回归模型与反向传播神经网络模型预测值进行仿真检验及对比分析。相关图形均由GraphPadPrism 9.0绘制进行可视化分析。

2 结果 Results

2.1 参与者数量分析 研究中完成整个试验流程的受试者数据视为有效数据,其中男40名,女40名。

2.2 受试者一般人口学特征 详见表2。

表2 | 受试者的人体测量特征
Table 2 | Anthropometric characteristics of the participants

| 指标 | 男(n=40) | 女(n=40) | 总计(n=80) |
|---------------------------|-----------|-----------|-----------|
| 年龄(岁) | 21.9±1.9 | 22.1±1.7 | 22.0±1.7 |
| 身高(cm) | 173.9±4.8 | 163.1±5.9 | 168.5±7.6 |
| 体质量(kg) | 68.7±8.9 | 56.1±6.9 | 62.5±10.2 |
| 体质量指数(kg/m ²) | 22.8±3.0 | 21.1±2.1 | 21.9±2.7 |

2.3 试验流程图 见图1。

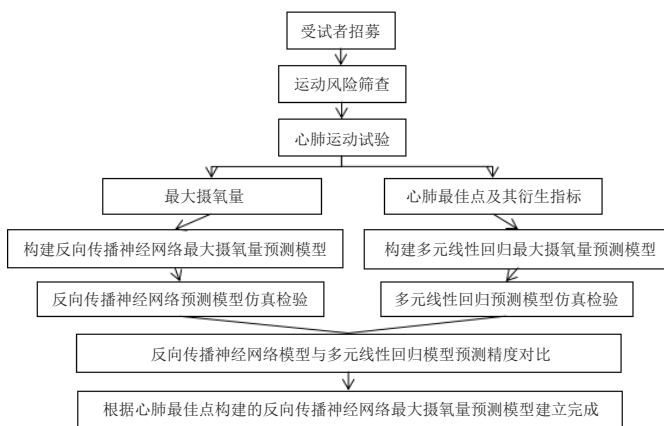


图1 | 试验流程图
Figure 1 | Trial flow chart

2.4 心肺运动试验基线资料比较 由表3可知,不同性别受试者最大摄氧量、心肺最佳点、WR_{COP}、VO_{2COP}相比差异均有显著性意义(P<0.05);不同性别受试者HR_{COP}相比差异无显著性意义(P>0.05),结果提示男生有氧运动能力要优于女性。

表3 | 不同性别受试者心肺运动试验指标比较
Table 3 | Comparison of cardiopulmonary exercise testing indexes between male and female

| 指标 | 男(n=40) | 女(n=40) | 总计(n=80) |
|---------------------|--------------|--------------------------|--------------|
| 最大摄氧量(L/min) | 2.47±0.51 | 1.77±0.33 ^a | 2.12±0.55 |
| 心肺最佳点(每分钟通气量/最小摄氧量) | 21.78±1.85 | 24.10±2.74 ^a | 22.94±2.6 |
| 心肺最佳点对应摄氧量(L/min) | 1.16±0.73 | 0.80±0.24 ^a | 0.98±0.57 |
| 心肺最佳点对应心率(次/min) | 120.28±19.32 | 122.50±17.68 | 121.39±18.43 |
| 心肺最佳点对应功率(W) | 76.05±39.93 | 53.27±28.25 ^a | 64.66±36.23 |

表注:与男性相比,^aP<0.05

2.5 最大摄氧量与心肺运动试验选定指标间的相关性分析由表 4 可知,最大摄氧量与性别、体质量指数、心肺最佳点、 VO_{2COP} 和 WR_{COP} 均存在显著性相关 ($P < 0.01$); 与年龄、 HR_{COP} 未见相关关系 ($P > 0.05$)。

表 4 | 最大摄氧量与心肺运动试验选定指标间的相关性分析
Table 4 | Correlation analysis of maximal oxygen uptake and cardiopulmonary exercise testing indexes

| 最大摄氧量 | r 值 |
|------------|---------------------|
| 性别 | -0.654 ^a |
| 年龄 | -0.122 |
| 体质量指数 | 0.511 ^a |
| 心肺最佳点 | -0.706 ^a |
| 心肺最佳点对应摄氧量 | 0.525 ^a |
| 心肺最佳点对应心率 | 0.037 |
| 心肺最佳点对应功率 | 0.568 ^a |

表注: 性别变量 (1 表示男生, 2 表示女生) 作为分类变量采用 Spearman 相关分析, 其余连续型变量采用 Pearson 相关分析。^a $P < 0.01$

2.6 反向传播神经网络模型

2.6.1 反向传播神经网络的选择 由上文可知,反向传播神经网络具备良好的非线性映射能力、精确泛化能力与高度的容错性,基于该网络对数据预测所具有的独特优势,选择反向传播神经网络作为最大摄氧量预测的数学模型。根据以往研究证明多隐藏层神经网络虽依据数据特性具有一定的优势,但其预测效果并未优于单层隐藏层的神经网络^[25]。此次研究选择采用经典 3 层拓扑结构以构建最大摄氧量预测模型。

2.6.2 输入输出变量的选取 由相关分析结果可知,受试者性别、体质量指数、心肺最佳点、 VO_{2COP} 和 WR_{COP} 均与最大摄氧量呈高度相关 ($P < 0.01$),故选取该 5 个指标引入反向传播神经网络输入层 (Input),输入层节点数为 5。将最大摄氧量引入反向传播神经网络输出层 (Output) 作为该神经网络的唯一输出变量,输出层节点数为 1。

2.6.3 数据归一化处理 反向传播神经网络输入层输出层数据及节点数确定后,为减小因数据范围差距较大导致的预测误差,所以对试验数据进行归一化处理。因性别取值范围采用 [1, 2],故将输入层 5 项指标均按公式 $Y=(X-Z_{min})/(Z_{max}-Z_{min})$ 进行归一化处理,数据归一化后 Y 取值在 [-1, 1]。

2.6.4 隐藏层节点数量的选择 由上文可知,该反向传播神经网络预测模型输入层选取具有统计学意义的性别、体质量指数、心肺最佳点、 VO_{2COP} 和 WR_{COP} ,节点数为 5;输出层选择最大摄氧量作为模型唯一输出变量,节点数为 1。隐藏层节点数的选择对于反向传播神经网络模型成功构建至关重要,节点数过多将会增加模型计算量和复杂性且可能导致数据产生过度拟合,而隐藏层节点数过小将导致模型未达到最优预测效果便结束,影响模型预测准确性。根据以往研究,隐藏层数量的选择是据经验公式 $nl=[\sqrt{vn+m}+a]$,nl 为隐藏层节点数;n 为输入层节点数;m 为输出层节点数;a ∈ [1, 10]。因该网络输入层节点数为 5、输出层为 1^[26],将其引入经验公式进行推导,并根据神经网络预测结果进行调整,最终确定当隐藏层数量为 10 的时候预测效果较好,故该神经网络

隐藏层数量选择 10,构建结构为 5-10-1 的反向传播神经网络预测模型。

2.6.5 反向传播神经网络模型建立与训练 此次试验中顺利完成整个试验流程视为有效数据,80 名志愿者均完成整个试验流程。从受试者人数中随机选取 80%(64 名)作为训练集、20%(16 名)作为测试集。该反向传播神经网络输入层到隐藏层的传递函数及输出层的传递函数均采用 S 型正切函数 tansig 作为隐藏层神经元的激励函数,隐藏层到输出层的传递函数选择 Pruelin 线性函数。基于均方根误差 (Mean squared error, MSE) 网络性能函数设定该网络最大迭代次数为 1 000 次;反向传播神经网络运算过程中学习率的选择尤为重要,学习率取值越大网络处理及收敛速度也就越快,但数值过大会引起网络模型不稳定状况;相反,学习率取值越低网络模型稳定性便越强,但网络模型相应的运算速度及收敛速度会受到一定程度的影响。因此,基于以往研究该神经网络模型学习率设定为 0.01。选择准确性较强、收敛速度较快的 Levenberg-Marquardt 算法进行计算并完成建模,见图 2。反向传播神经网络模型构建完成后开始进行反复迭代训练,经 8 次迭代后神经网络模型收敛完成,训练集 $R=0.957\ 28$,验证集 $R=0.965\ 12$,训练集 $R=0.966\ 95$,整体 $R=0.940\ 76$,各数据点均匀分布在拟合曲线附近,提示该模型拟合度尚且具有良好的预测效果,见图 3, 4。

Neural Network

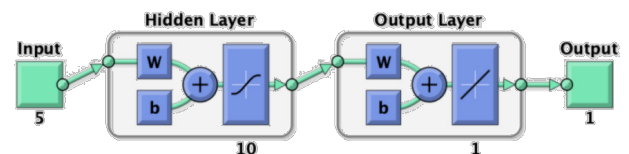


图 2 | 反向传播神经网络结构图

Figure 2 | Diagram of the back-propagation neural network model

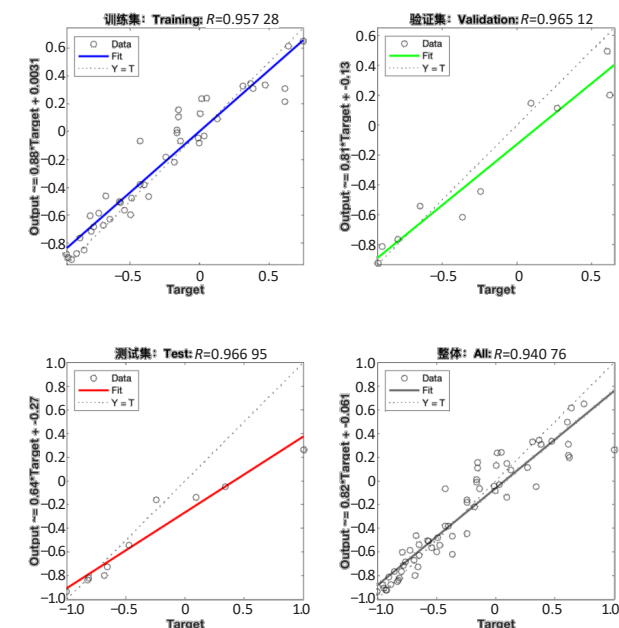


图 3 | 最大摄氧量预测模型拟合回归图

Figure 3 | Fitting regression diagram of the maximal oxygen uptake prediction model

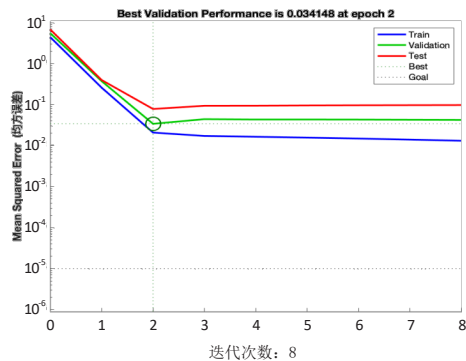


图4 | 最大摄氧量预测模型训练误差曲线图

Figure 4 | Training error curve of the maximal oxygen uptake prediction model

2.6.6 反向传播神经网络模型仿真检验 为检验根据心肺最佳点构建的反向传播神经网络预测精度,更好地反映预测值与实测值误差的实际情况,故选择预测组16名受试者最大摄氧量实测值与模型预测值平均绝对误差(实测值与预测值算数差值的绝对平均值)、平均相对误差(预测值与实测值绝对误差所占实测值百分比)作为该神经网络预测精度评估指标。采用仿真 Sim 函数对训练好的神经网络模型对检验样本进行检验,且将实测值、预测值分为2组引入 SPSS 进行配对样本 t 检验分析。由表5可见,16名预测对象最大摄氧量实测值与预测值平均绝对误差为0.227 L/min、平均相对误差为12%,实测组与预测组最大摄氧量均值相比差异无显著性意义($P > 0.05$),见图5,提示该神经网络模型预测效果较为理想,符合预定设置。

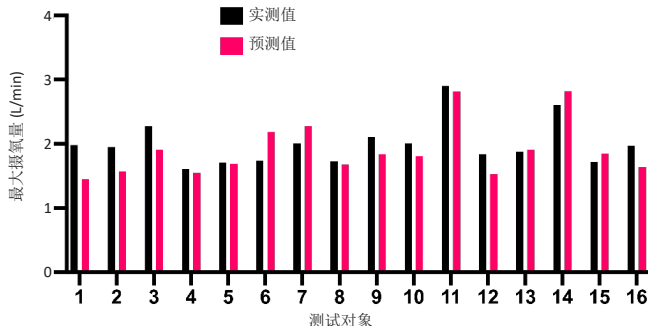
表5 | 反向传播神经网络模型预测精度概况

Table 5 | Prediction accuracy of the back-propagation neural network model

| 预测对象 | 预测精度 | | P 值 |
|----------------|-------------|-------------|-------|
| | 实测值 (L/min) | 预测值 (L/min) | |
| 1 | 1.98 | 1.45 | 0.175 |
| 2 | 1.95 | 1.57 | |
| 3 | 2.27 | 1.91 | |
| 4 | 1.61 | 1.55 | |
| 5 | 1.71 | 1.69 | |
| 6 | 1.74 | 2.18 | |
| 7 | 2.01 | 2.27 | |
| 8 | 1.73 | 1.68 | |
| 9 | 2.11 | 1.84 | |
| 10 | 2.01 | 1.81 | |
| 11 | 2.90 | 2.81 | |
| 12 | 1.84 | 1.53 | |
| 13 | 1.88 | 1.91 | |
| 14 | 2.60 | 2.82 | |
| 15 | 1.72 | 1.85 | |
| 16 | 1.97 | 1.64 | |
| 平均绝对误差 (L/min) | 0.227 | | |
| 平均相对误差 (%) | 12.000 | | |

表注: 平均绝对误差值与平均相对误差值越接近0表明预测精度越高

2.7 反向传播神经网络模型与多元线性回归模型预测精度对比 为探究反向传播神经网络相较于其他预测算法所存在的优势,故选择目前较为流行的多元线性回归预测模型作对比分析。选取与最大摄氧量呈线性相关的受试者性别、体质量



图注: 实测组与预测组最大摄氧量均值相比差异无显著性意义($P > 0.05$)

Figure 5 | Comparative analysis of predicted and measured values of the back-propagation neural network model

指数、心肺最佳点、 VO_{2COP} 和 WR_{COP} 等指标作为多元线性回归自变量,最大摄氧量作为模型因变量,利用 Stepwise 法构建最大摄氧量多元线性回归预测模型,得到最具代表性和拟合优度最佳的回归方程: $\hat{Y}_{\text{最大摄氧量}} = 4.54 - 0.092 \times COP - 0.386 \times \text{性别} + 0.004 \times WR_{COP}$ ($F=57.963, P < 0.01$),最大摄氧量变异的68.4%可由心肺最佳点、性别和心肺最佳点对应的功率来解释(校正 $R^2=0.684, P < 0.01$),模型标准估算误差=0.31, Durbin-Watson=1.29,提示模型构建良好,不存在明显的自相关和多重共线性问题。将多元线性回归预测值与实测值分为2组引入 SPSS 进行配对样本 t 检验分析。由表6可见,16名预测对象最大摄氧量实测值与预测值平均绝对误差为0.328 L/min、平均相对误差为16%,实测组与预测组最大摄氧量均值相比差异无显著性意义($P > 0.05$),见图6。

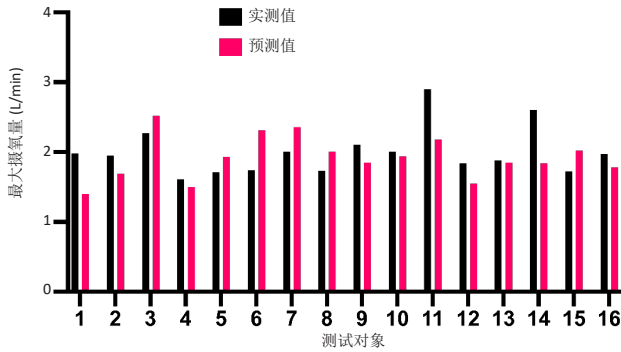
表6 | 多元线性回归模型预测精度概况

Table 6 | Prediction accuracy of the multiple linear regression model

| 预测对象 | 预测精度 | | P 值 |
|----------------|-------------|-------------|-------|
| | 实测值 (L/min) | 预测值 (L/min) | |
| 1 | 1.98 | 1.40 | 0.422 |
| 2 | 1.95 | 1.69 | |
| 3 | 2.27 | 2.52 | |
| 4 | 1.61 | 1.50 | |
| 5 | 1.71 | 1.93 | |
| 6 | 1.74 | 2.31 | |
| 7 | 2.01 | 2.36 | |
| 8 | 1.73 | 2.01 | |
| 9 | 2.11 | 1.85 | |
| 10 | 2.01 | 1.94 | |
| 11 | 2.9 | 2.18 | |
| 12 | 1.84 | 1.55 | |
| 13 | 1.88 | 1.85 | |
| 14 | 2.6 | 1.84 | |
| 15 | 1.72 | 2.02 | |
| 16 | 1.97 | 1.78 | |
| 平均绝对误差 (L/min) | 0.328 | | |
| 平均相对误差 (%) | 16.000 | | |

表注: 平均绝对误差值与平均相对误差值越接近0表明预测精度越高

将多元线性回归模型预测值与反向传播神经网络模型预测值引入 SPSS 进行独立样本 t 检验对比分析,结果显示两种模型预测值差异无显著性意义($P=0.920 > 0.05$),但反向传播神经网络预测模型平均绝对误差与平均相对误差均优于多元线性回归预测模型,见表7。



图注：实测组与预测组最大摄氧量均值相比差异无显著性意义 ($P > 0.05$)

图 6 | 多元线性回归模型最大摄氧量均值实测值与预测值对比分析

Figure 6 | Comparative analysis of predicted and measured values of the multiple linear regression model

表 7 | 反向传播神经网络模型预测精度概况

Table 7 | Prediction accuracy of the back-propagation neural network model

| 项目 | 多元线性回归模型组 | 反向传播神经网络模型组 | P 值 |
|----------------|-----------|-------------|--------|
| 预测值 (L/min) | 1.92±0.34 | 1.91±0.42 | 0.920 |
| 平均绝对误差 (L/min) | 0.328 | 0.227 | < 0.05 |
| 平均相对误差 (%) | 16 | 12 | < 0.05 |

3 讨论 Discussion

3.1 既往最大摄氧量预测研究存在的问题 心肺运动试验提供了涉及心肺、肌肉组织和细胞氧化系统的运动生理学全面评估^[27-30]，最大摄氧量作为人体心肺功能的重要评价指标，测试其往往需要受试者进行高强度运动试验。当前已有相关领域学者基于最大摄氧量相关机制及影响因素构建预测模型试图优化该指标测试程序。

目前相关研究人员对于最大摄氧量的预测方法以多元线性回归等算法为主，预测变量的选择主要集中于心功能（心排量、每搏输出量、心率等）^[24, 31-33]、体成分（去脂体质量和体脂百分比等）^[21, 24, 34]、运动试验成绩及血液生化指标等^[4, 24, 32, 35-37]。李莉婕^[38]通过大学生高、低台阶试验指数、体脂百分比及身高构建最大摄氧量多元线性回归预测模型，模型拟合优度尚可 ($R^2=0.709$)，但以往研究证实基于台阶试验展开的有氧运动能力预测具有“高误差低相关”特性且对男生评价较为准确，但对于女性出现评价偏差过大等问题。王念辉等^[39]通过大学生体表面积、肺活量构建最大摄氧量多元线性回归方程，该方程虽选取指标较易测量，但模型拟合优度（男性 $R^2=0.484$ ，女性 $R^2=0.035$ ）较低，且预测精度在不同性别中的应用难以保证。LI 等^[40]通过成年人 3 min 递增步频试验构建多元线性回归最大摄氧量预测模型，研究认为 3 min 递增负荷具有运动强度较低、指标测试简单及所需运动空间较小等特点，该预测模型拟合优度较好 ($R^2=0.631$)，但该模型预测应用主要基于 40-50 岁人群，对于青少年或老年人群的适用性目前尚不清楚，且试验中对于步频的要求尚未标化统一，递增最佳步频的选择仍有待确定。杨慧君^[24]采用大学生静态心功能、血液、体成分等指标通过多元线性回归算法建立非运动性最大摄氧量预测模型，该模型拟合优

度 ($R^2=0.803$) 较高，可对最大摄氧量实施准确预测，但该研究局限在于该回归模型中自变量“锻炼人群的划分”模糊并无标准化说明，且该模型指标测试包括有创血液检验、双能 X 射线骨密度仪体成分检验等，提示模型“预测成本”较高。AANDSTAD^[41]通过成年士兵 3 000 m 越野跑成绩对最大摄氧量实施预测，该研究中以不同性别建立预测模型（男性预测模型 $R^2=0.545$ ，女性预测模型 $R^2=0.621$ ），不同性别模型预测值与实测值均未见显著性差异，但该研究局限在于模型性别分布不均（男 229 人，女 30 人）或导致模型预测精度偏高，且该测试项目在温度、湿度及路面湿滑等野外环境下进行，类似不利条件或在一定程度上影响模型预测的准确性。

最大摄氧量预测的核心要义是在提高预测精度的前提下简化试验流程。如上文所示，目前一些代替性运动测试尽管降低了以往实验室精密仪器下的指标测试难度，但预测精度较低、准确性较差，而涉及血液生化、心功能和体成分检验的预测算法不仅增加了测试难度、成本，且于科研领域中的实践应用性或难以得到保证。

3.2 心肺最佳点的应用及研究进展 RAMOS 等^[10]于 2012 年提出的次最大运动无量纲指标“心肺最佳点”已引起相关领域的广泛关注，心肺最佳点被认为是人体呼吸系统和心血管系统的最佳整合点，在运动期间最经济地利用通气为活动组织获取氧气，其定义取值为在运动期间给定分钟内通气量与摄氧量最小比值。RAMOS 等^[10]研究证明心肺最佳点可作为心肺运动试验一个新的次最大变量，该指标随年龄增加而上升且女性高于男性，并印证该指标与传统心肺能力评估指标最大摄氧量、无氧阈之间均呈线性相关；该研究团队认为，心肺最佳点对心肺反应解释具有独立性和潜在的贡献性并同年展开一项约 6 年的随访研究，该研究得出无论是单独使用心肺最佳点还是与最大摄氧量结合使用，可以准确预测社区人群（健康或慢性病）全因死亡率并建议较低的心肺最佳点是人体健康水平良好的预测指标^[12]。LAUKKANEN 等^[15-16]对 2 190 例男性临床患者进行心肺运动试验获取其心肺最佳点指标并跟进受试者健康情况随访研究，发现心肺最佳点与心源性猝死呈显著负相关及独立分级关系，认为心肺最佳点可用于预测心源性猝死长期风险。2018 年 SILVA CGND 等^[14]一项关于心肺最佳点对于职业足球运动员运动能力评估的研究，得出心肺最佳点在精英足球运动员心肺运动试验过程中易获得性较高，不会因为运动员场地位置而发生显著性差异且认为较低的心肺最佳点在高强度运动中代表运动生理优势。RAMOS 等^[13]一项关于惊恐障碍患者心肺功能评估的研究中证实，惊恐患者在进行心肺运动试验中未出现不良症状且心肺最佳点作为次最大心肺指标可能有助于惊恐障碍患者评估客观的心肺功能。近 10 年的相关研究已证实，心肺最佳点不仅对于健康、运动人群有氧运动能力的评估具有独立贡献意义且对于临床患者病情监控及预后也具有较强的实际应用意义。作为首次将心肺最佳点应用于最大摄氧量的预测模型构建，此次研究证实依据心肺最佳点构建的反向传播

神经网络及多元线性回归预测模型中均表现出较高的预测精度。因此, 鉴于此次研究结果, 认为心肺最佳点指标的选取可适当改善目前最大摄氧量预测所存在的局限性, 对心肺功能的准确反映及易测量性作为该指标的主要特点, 无需受试者完成难以承受的力竭运动生理挑战且与最大摄氧量相关性和一致性较好, 既而保证对最大摄氧量较高的预测精度, 建议可将心肺最佳点于运动科学及健康评估领域中推广应用。

3.3 反向传播神经网络模型的应用及预测效能评估 此次研究模型构建纳入 5 项具有统计学意义且易测量的指标, 包括受试者性别、体质量指数、心肺最佳点及其衍生指标。该神经网络预测模型通过 8 次迭代初步完成模型构建, 经仿真检验后发现模型预测值与实测值平均绝对误差仅为 0.227 L/min, 平均相对误差为 12%, 认为反向传播神经网络模型具有较强的预测效能, 可准确且高效地对最大摄氧量进行预测。已知, 多元线性回归算法作为目前体育领域中主流的预测算法, 经以往研究证实, 多元线性回归模型对于存在因果关系的线性相关数据处理效果尚可^[42-45], 所以, 此文选择多元线性回归模型与反向传播神经网络模型预测精度并进行对比分析, 尽管此次研究中 2 种模型预测值并未存在显著性差异且均保持相对较高的预测准确性, 但反向传播神经网络模型预测精度(平均绝对误差、平均相对误差)要优于多元线性回归模型。研究认为造成两模型预测精度差异的原因是由多元线性回归算法无法对非线性数据进行有效处理所致, 该模型通过逐步回归法仅保留 5 项指标中的线性相关度最强的 3 项作为预测模型自变量, 而反向传播神经网络作为一种非线性多层反向传播网络, 通过梯度下降及连续调整神经元权值可实现对模型最小误差的无限逼近, 无需了解数据的分布形式和变量间的关系, 对非线性复杂模糊的映射关系进行有效处理。因此, 相较于传统回归模型, 此次研究中采用的反向传播神经网络模型在拟合优度、对初始数据的仿真和预测精度等方面均展现了较为明显的优势。

值得注意的是, 研究结果显示在反向传播神经网络及多元线性回归模型中均出现预测值略低于实测值的现象, 两模型组共有 7 名受试者的预测值高于实测值, 9 名受试者的预测值低于实测值, 经过对受试者人口学特征及试验数据筛查, 发现预测值较高的 7 名受试者心肺最佳点要低于预测值较低的 9 名受试者。因此认为造成此类现象的原因主要是由于受试者个体差异及心肺耐力差异等因素所致, 并非受模型预测算法影响, 且假设在该预测模型中心肺耐力较强的受试者更容易出现预测值高于实测值等类似情况。

3.4 反向传播神经网络于体育领域中的应用前景 随着 AI 技术的高度发展以及学科交叉融合相关概念的推广, 智能化反向传播神经网络已逐渐被实践应用于体育、健康评估等领域研究中。梁华伟等^[46]基于反向传播神经网络构建了体育赛事风险预警模型, 通过反向传播神经网络实现体育赛事风险概率发生的准确预测。WANG 等^[47]设计了一种基于反向传播神经网络摔跤手动作识别与分类模式, 研究表明反向传播

神经网络模型在摔跤运动中具备实践应用意义且可有效提高摔跤手的训练效率。夏祥伟等^[48]基于反向传播神经网络构建的研究生运动与全面健康的相关研究模型, 研究提示通过反向传播神经网络构建不仅优化了运动对研究生健康影响的定量分析过程且对研究生运动干预措施的决策起到指导性作用。梁美富等^[49]通过反向传播神经网络构建的运动最佳负荷预测模型, 拟合度较高、预测精度较理想, 为最佳功率负荷的确定提出智能化借鉴思路。可见反向传播神经网络可作为研究非线性和不确定问题的有效方法, 于定性或定量研究中均能给出理想化解决方案, 反向传播神经网络模型克服了多元回归模型和灰色模型的缺点, 不需要事先确定数学模型的数学表达式形式, 从而获得更高的拟合精度。在科技助力驱动体育高质量发展的倡导下^[50], 科技化健康评估手段的创新尤为重要。对于公众健康及运动能力的评估, 反向传播神经网络基于其智能化、科技化特点或将迎来广阔的应用前景。

3.5 研究的局限性 ①受试者数量符合 G.POWER(3.1.9.6) 效应量估算, 但鉴于研究的创新性特点, 后期应在试验条件允许的前提下适当增加受试样本数量; ②此次研究受试者主要以健康无运动经历的大学生为主, 当对于不同人群(运动员、临床患者)进行最大摄氧量预测时, 建议进一步精确测量优化预测模型。

结论: ①最大摄氧量与心肺最佳点、体质量指数、性别、心肺最佳点对应的摄氧量和功率均存在显著相关性($P < 0.01$); ②运用反向传播神经网络构建经典 3 层拓扑结构最大摄氧量预测模型(包含 5 个输入层、10 个隐藏层和 1 个输出层), 该模型预测值与实测值绝对误差均值为 0.227 L/min、相对误差均值为 12%, 提示基于心肺最佳点构建的反向传播神经网络可准确且有效地预测最大摄氧量。

致谢: 感谢国家体育总局体育科学研究所为此次研究提供所需的专业试验仪器及试验场地, 感谢高晓麟研究员为此次研究提出创新思路及文章撰写过程中细节处理所作出的贡献, 感谢参与试验的各位受试者对此次研究的支持。

作者贡献: 研究由吴东哲、高晓麟共同设计实施, 李闯涛负责实验数据的采集, 王昊负责实验数据的数理统计分析, 文章撰写由吴东哲独立完成。

利益冲突: 文章的全部作者声明, 在课题研究和文章撰写过程中不存在利益冲突。

开放获取声明: 这是一篇开放获取文章, 根据《知识共享许可协议》“署名-非商业性使用-相同方式共享 4.0”条款, 在合理引用的情况下, 允许他人以非商业性目的基于原文内容编辑、调整和扩展, 同时允许任何用户阅读、下载、拷贝、传递、打印、检索、超级链接该文献, 并为之建立索引, 用作软件的输入数据或其它任何合法用途。

版权转让: 文章出版前全体作者与编辑部签署了文章版权转让协议。

出版规范: 该研究遵守《观察性临床研究报告指南》(STROBE 指南)。文章出版前已经过专业反剽窃文献检测系统进行 3 次查重。文章经小同行外审专家双盲外审, 同行评议认为文章符合期刊发稿宗旨。

4 参考文献 References

- [1] 程宙明, 卢健, 牛俊茹, 等. 最大耗氧量与安静时心输出量和肺呼吸功能相关性研究——以非运动专业的青年女大学生为例 [J]. 体育科学, 2015, 35(8): 30-39.

- [2] 赵安娜. 普通高校大学生最大摄氧量非运动在线测量方法的甄选研究[D]. 杭州: 杭州师范大学, 2020.
- [3] 程宙明. 抗阻和有氧训练对大学生最大摄氧量的影响及其运动适应机制的研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2017.
- [4] 范超群, 徐凯, 聂明剑, 等. 心肺耐力的科学测评: 心肺运动试验与 6 min 二级台阶试验的比较[J]. 中国组织工程研究, 2019,23(23): 3686-3691.
- [5] MAHER JP, HEVEL DJ, REIFSTECK EJ, et al. Physical activity is positively associated with college students' positive affect regardless of stressful life events during the COVID-19 pandemic. *Psychol Sport Exerc*. 2021; 52:101826.
- [6] ARAÚJO CG, PINTO VL. Maximal heart rate in exercise tests on treadmill and in a cycloergometer of lower limbs. *Arq Bras Cardiol*. 2005;85(1):45-50.
- [7] NEDER JA, STEIN R. A simplified strategy for the estimation of the exercise ventilatory thresholds. *Med Sci Sports Exerc*. 2006;38(5):1007-1013.
- [8] YE H MP, GARDNER RM, ADAMS TD, et al. "Anaerobic threshold": problems of determination and validation. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol*. 1983;55(4):1178-1186.
- [9] BALADY GJ, ARENA R, SIETSEMA K, et al. Clinician's Guide to cardiopulmonary exercise testing in adults: a scientific statement from the American Heart Association. *Circulation*. 2010;122(2):191-225.
- [10] RAMOS PS, RICARDO DR, ARAÚJO CG. Cardiorespiratory optimal point: a submaximal variable of the cardiopulmonary exercise testing. *Arq Bras Cardiol*. 2012;99(5):988-996.
- [11] LAUKKANEN JA. Is Cardiorespiratory Optimal Point Measured During the Maximal Cardiopulmonary Exercise Test a Relevant Indicator of Sports Performance? *Int J Cardiovasc Sci*. 2018;31(4):320-322.
- [12] RAMOS PS, ARAÚJO CG. Cardiorespiratory optimal point during exercise testing as a predictor of all-cause mortality. *Rev Port Cardiol*. 2017;36(4):261-269.
- [13] RAMOS PS, SARDINHA A, NARDI AE, et al. Cardiorespiratory optimal point: a submaximal exercise variable to assess panic disorder patients. *PLoS One*. 2014;9(8):e104932.
- [14] SILVA CGND SE, CASTRO CLB, FRANCA JOF, et al. Cardiorespiratory Optimal Point in Professional Soccer Players: A Novel Submaximal Variable During Exercise, 2018.
- [15] LAUKKANEN JA, SAVONEN K, HUPIN D, et al. Cardiorespiratory optimal point during exercise testing and sudden cardiac death: A prospective cohort study. *Prog Cardiovasc Dis*. 2021;68:12-18.
- [16] LAUKKANEN JA, KUNUTSOR SK, ARAÚJO CG, et al. Cardiorespiratory optimal point during exercise testing is related to cardiovascular and all-cause mortality. *Scand J Med Sci Sports*. 2021;31(10):1949-1961.
- [17] CHARITONIDIS K, KOUTLIANOS N, ANAGNOSTARAS K, et al. Combination of novel and traditional cardiorespiratory indices for the evaluation of adolescent volleyball players. *Hippokratia*. 2019;23(2):70-74.
- [18] BUSCEMA M. Back propagation neural networks. *Subst Use Misuse*. 1998;33(2):233-270.
- [19] WANG X, WANG K, DING J, et al. Predicting water quality during urbanization based on a causality-based input variable selection method modified back-propagation neural network. *Environ Sci Pollut Res Int*. 2021;28(1):960-973.
- [20] 刘天舒. BP 神经网络的改进研究及应用[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2011.
- [21] 石庆焱. 一个基于神经网络——Logistic 回归的混合两阶段个人信用评分模型研究[J]. 统计研究, 2005(5):45-49.
- [22] 张晓瑞, 方创琳, 王振波, 等. 基于 RBF 神经网络的城市建成区面积预测研究——兼与 BP 神经网络和线性回归对比分析[J]. 长江流域资源与环境, 2013,22(6):691-697.
- [23] 张景阳, 潘光友. 多元线性回归与 BP 神经网络预测模型对比与运用研究[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2013,38(6):61-67.
- [24] 杨慧君. 基于心功能、血液、体成分指标预测大学生最大摄氧量的研究[D]. 北京: 国家体育总局体育科学研究所, 2020.
- [25] 戴敏, 黄亚楼. 基于数据挖掘的运动员体能测试数据分析[J]. 计算机工程与应用, 2003(9):38-40+60.
- [26] 郭辉, 刘韵婷, 孔振兴, 等. 基于 BP 神经网络的最大摄氧量预测方法研究[J]. 实验室科学, 2020,23(5):44-48.
- [27] ATS/ACCP Statement on cardiopulmonary exercise testing. *Am J Respir Crit Care Med*. 2003;167(2):211-177.
- [28] CHRYSOHOOU C. Cardiopulmonary exercise test: more than a simple exercise test, but cautious how to interpret. *Hellenic J Cardiol*. 2021; 62(2):127-128.
- [29] TRAN D. Cardiopulmonary Exercise Testing. *Methods Mol Biol*. 2018; 1735:285-295.
- [30] GUAZZI M, BANDERA F, OZEMEK C, et al. Cardiopulmonary Exercise Testing: What Is its Value? *J Am Coll Cardiol*. 2017;70(13):1618-1636.
- [31] AGOSTONI P, VIGNATI C, GENTILE P, et al. Reference Values for Peak Exercise Cardiac Output in Healthy Individuals. *Chest*. 2017;151(6): 1329-1337.
- [32] KANG J, RATAMESS NA, FAIGENBAUM AD, et al. Use of Heart Rate Index to Predict Oxygen Uptake - A Validation Study. *Int J Exerc Sci*. 2020;13(7):1705-1717.
- [33] 董莉, 唐缨红, 黄骏, 等. 青少年耐力运动员最大摄氧量与 NICOM 心排量的相关性分析[J]. 辽宁体育科技, 2018,40(5):57-61.
- [34] 石羽飞, 罗林, 陈伟. 有氧运动能力与人体 VO₂max 和躯干去脂软体重的 Logistic 回归模型[J]. 当代体育科技, 2015,5(26):1+3.
- [35] 蔡秋, 王步标, 龚正伟. 12 分钟跑与 20 米往返跑预测最大吸氧量的比较研究[J]. 体育学刊, 1997,4(2):37-40.
- [36] 李萍, 曾令可, 税安泽, 等. 基于 MATLAB 的 BP 神经网络预测系统的设计[J]. 计算机应用与软件, 2008,25(4):149-150+184.
- [37] 梁红红. 基于心功能、血液、体成分指标预测大学生无氧阈的研究[D]. 北京: 国家体育总局体育科学研究所, 2021.
- [38] 李莉婕. 台阶试验评价大学生最大有氧能力方法的研究[D]. 北京: 北京体育大学, 2012.
- [39] 王念辉, 洪平, 苏中军. 基于身高、体重及肺活量的大学一年级男生最大摄氧量推算方法研究[J]. 中国运动医学杂志, 2018,37(3):202-207.
- [40] LI F, CHANG CH, HO CA, et al. The Determination of Step Frequency in 3-min Incremental Step-in-Place Tests for Predicting Maximal Oxygen Uptake from Heart Rate Response in Taiwanese Adults. *Int J Environment Res Public Health*. 2022;19(1):563.
- [41] AANDSTAD A. Estimation of maximal oxygen uptake from the 3,000 m run in adult men and women. *J Sports Sci*. 2021;39(15):1746-1753.
- [42] 米欢, 王正珍. 步行试验推测 40-49 岁人群最大摄氧量回归方程的研究[J]. 北京体育大学学报, 2012,35(5):50-54.
- [43] 郭辉, 孙景权, 张一民. 六分钟上下楼梯试验与摄氧量的相关性研究[J]. 成都体育学院学报, 2016,42(3):14-18.
- [44] 刘笑. 800 米、1000 米跑及 20mSRT 与最大摄氧量的相关性研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2014.
- [45] 李楠楠. 推测青少年最大摄氧量回归方程的研究[D]. 济南: 山东体育学院, 2017.
- [46] 梁华伟, 原颜东, 薛红卫. 基于 BP 神经网络的体育赛事风险预警模型[J]. 统计与决策, 2018,34(16):85-88.
- [47] WANG L, QIU K, LI W. Sports Action Recognition Based on GB-BP Neural Network and Big Data Analysis. *Comput Intell Neurosci*. 2021;2021: 1678123.
- [48] 夏祥伟, 毛丽娟, 黄金玲, 等. 中国高校研究生体育锻炼与全面健康的相关性——基于 BP 神经网络的实证研究[J]. 全球教育展望, 2018,47(4):111-128.
- [49] 梁美富, 曲淑华. 依据反向传播神经网络建模预测骨骼肌的最佳功率负荷[J]. 中国组织工程研究, 2021,25(23):3641-3647.
- [50] 张雷, 陈小平, 冯连世. 科技助力: 新时代引领我国竞技体育高质量发展发展的主要驱动力[J]. 中国体育科技, 2020,56(1):3-11.

(责任编辑: GD, ZN, ZJP)