·论著·

基于心肺运动试验的精准有氧运动干预在老年射血分数保留型心力衰竭患者中的应用

张雅琪[1],孙敏[1],杨桂云[1],刘康[2]
(1.武汉市第一医院综合医疗科,武汉 430022;2.湖北省中西医结合医院心内科,武汉 430015)

摘要 目的 探讨基于心肺运动试验(CPET)的精准有氧运动干预在老年射血分数保留型心力衰竭(HFpEF)患者中的应用效果。**方法** 选取2024年1月至2024年12月间武汉市第一医院收治的106例HFpEF患者,随机分为对照组(n = 53)和试验组(n = 53),对照组进行常规有氧运动干预,试验组实施基于CPET的精准有氧运动干预。比较2组干预前后心肺功能[左室射血分数(LVEF)、峰值摄氧量(VO_{2peak})、无氧阈(AT)、二氧化碳通气当量(VE/VCO_2)斜率]、可溶性生长刺激表达基因2蛋白(sST2)、血清N末端脑钠肽前体(NT-proBNP)水平、6 min步行试验(6MWT)情况及生活质量。**结果** 干预后,2组LVEF、AT、VO_{2peak}及6MWT均较干预前升高,NT-proBNP、sST2水平、生活质量评分及VE/VCO_2斜率均降低,且试验组上述指标改善程度均优于对照组(P < 0.05)。**结论** 基于CPET的精准有氧运动干预能够显著改善HFpEF患者的心肺功能,同时提升患者运动耐力与生活质量水平。

关键词 心肺运动试验;运动干预;射血分数保留型心力衰竭
中图分类号 R541.6 **文献标志码** A **文章编号** 0258-4646(2026)07-0604-05
网络出版地址 https://link.cnki.net/urlid/21.1227.R.20260709.1808.034
DOI:10.12007/j.issn.0258-4646.2026.07.006

Application of precision aerobic exercise intervention based on cardiopulmonary exercise testing in older patients with heart failure with preserved ejection fraction

ZHANG Yaqi[1],SUN Min[1],YANG Guiyun[1],LIU Kang[2]
(1. Comprehensive Medical Department,Wuhan First Hospital,Wuhan 430022,China; 2. Department of Cardiology,Hubei Integrated Traditional Chinese and Western Medicine Hospital,Wuhan 430015,China)

Abstract Objective To evaluate the effectiveness of precision aerobic exercise intervention based on cardiopulmonary exercise testing (CPET) in older patients with heart failure with preserved ejection fraction (HFpEF). **Methods** A total of 106 patients with HFpEF who were admitted to Wuhan First Hospital between January 2024 and December 2024 were enrolled and randomly assigned to a control group (n = 53) or an experimental group (n = 53). The control group received conventional aerobic exercise intervention, whereas the experimental group received an individualized aerobic exercise prescription based on CPET. Cardiopulmonary function indicators, including left ventricular ejection fraction (LVEF), peak oxygen uptake (VO_{2peak}), anaerobic threshold (AT), slope of carbon dioxide ventilation equivalent (VE/VCO_2), soluble growth stimulation-expressing gene 2 protein (sST2), serum N-terminal pro-brain natriuretic peptide (NT-proBNP) level, 6-minute walk test (6MWT), and quality of life were compared between the two groups before and after the intervention. **Results** After the intervention, LVEF, AT, and VO_{2peak}, and 6MWT significantly increased in both groups compared with baseline. Levels of NT-proBNP, sST2, VE/VCO_2 slope, and quality-of-life scores significantly decreased. Improvement in all measured outcomes was significantly greater in the experimental group than in the control group (P < 0.05). **Conclusion** Precision aerobic exercise prescription based on CPET significantly improves cardiopulmonary function, exercise capacity, and quality of life in patients with HFpEF.

Keywords cardiopulmonary exercise testing; exercise intervention; heart failure with preserved ejection fraction

射血分数保留型心力衰竭(heart failure with preserved ejection fraction,HFpEF)是老年人心力衰竭的主要类型,占比>50%以上。HFpEF以左心室舒张功能障碍为病理特点,患者常表现为劳力性呼吸困难、运动耐受力下降及生活质量受损[1]。传统药物治疗能在一定程度上改善症状,但其不良反应严重;而常规心脏康复训练因缺乏个体化强度调控,

基金项目:湖北省中医药科研项目(ZY2022Z017)
作者简介:张雅琪(1994-),女,中级,本科.
通信作者:孙敏,E-mail:15118998136@163.com
收稿日期:2025-06-23
网络出版时间:2026-07-10 11:03:21

康复效果也难以达到预期。心肺运动试验(cardiopulmonary exercise testing,CPET)作为评估心肺功能的“金标准”,可通过测量摄氧量、无氧阈(anaerobic threshold,AT)等指标精准反映患者心肺储备与代谢特征,从而为制定分层化有氧运动干预提供指导[2]。已有研究[3]证实,基于CPET设计的精准有氧运动干预措施,对改善脑卒中患者的心肺功能、提升运动耐力具有积极作用,并能有效减轻患者运动疲劳感。然而,目前针对老年HFpEF患者开展的基于CPET精准有氧运动研究尚显匮乏。此外,老年患者常伴随多系统功能衰退及多种基础疾病,进一步增加了运动康复的复杂性。因此,本研究探讨基于CPET的精准有氧运动干预对老年HFpEF患者心肺功能、运动耐量及生活质量的影响,以期为优化HFpEF患者心脏康复实践提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　一般资料

选取2024年1月至2024年12月间武汉市第一医院收治的106例老年HFpEF患者,随机分为对照组($n=53$)和试验组($n=53$)。纳入标准:(1)符合HFpEF的诊断标准[4];(2)有心力衰竭症状和体征;(3)左室射血分数(left ventricular ejection fraction,LVEF)≥50%,且左心室大小正常;(4)年龄≥60岁;(5)患者知情并同意参与研究。排除标准:(1)有先天性心脏病、主动脉夹层、主动脉瘤者;(2)急性心肌梗死者;(3)患有严重心律不齐者;(4)恶性肿瘤患者;(5)严重贫血者。本研究获得武汉市第一医院伦理委员会批准(20230311)。

1.2　方法

对照组接受常规有氧运动干预。患者全面评估后制定个体化有氧运动方案,干预过程中通过心电图持续监测心功能,并依据实时反馈动态调整运动强度。运动项目主要采用平板步行和踏车锻炼。

试验组在对照组基础上实施基于CPET的精准有氧运动干预。方案由同一位康复医师统一制定,制定前综合评估患者基础疾病、合并症、用药情况及运动风险,并排除禁忌。采用CPX-1000型心肺运动系统测定患者最大有氧运动负荷,初始运动强度设为40%最大负荷,结合患者实时反应动态调整,训练方式同样为平板步行和踏车锻炼。具体流程如下。(1)热身环节:以40%最大负荷进行5~10 min热身,配合肌肉拉伸与关节活动,并通过心肺系统监测心肺负荷;若心率、呼吸平稳,可逐步加快速度;一旦出现心跳过速或呼吸急促,则降低强度,增加休息,延长热身时间,确保患者平稳过渡至运动状态。(2)运动训练:初期目标为心率达到最大心率的60%~70%,氧耗量达到最大摄氧量的40%~70%,单次训练20~30 min。若训练5~10 min内即达目标心率,需降低强度并延长适应期;若能稳定维持20~30 min,则保持强度;若超过30 min仍未达标或仅勉强达标,则适度增强负荷。每次训练总时长控制在20~40 min,每周3~5次,连续干预12周。若训练中出现胸闷、气短、心悸、恶心、大汗淋漓或心律失常等症状,立即停止训练。

1.3　观察指标

1.3.1　心肺功能指标:在干预措施实施前后,使用彩色多普勒超声检测仪(上海艾培电子科技有限公司)测定患者LVEF;同时,借助心肺运动功能测试设备(武汉清易云康医疗设备有限公司),对2组AT、峰值摄氧量(peak oxygen uptake,VO_{2peak})及二氧化碳通气当量(ventilatory equivalent for carbon dioxide,VE/VCO_2)斜率等参数进行分析。

1.3.2　心力衰竭相关指标:分别于干预前后采集患者4 mL外周静脉血,将获取的血液样本使用医用离心机(美国贝克曼库尔特有限公司)以3 000 r/min离心10 min后,收集样本上清液,使用酶联免疫吸附试验检测样本中的可溶性生长刺激表达基因2蛋白(soluble suppression of tumorigenicity 2,sST2)、N末端脑钠肽前体(N-terminal pro-brain natriuretic peptide,NT-proBNP)水平,sST2试剂盒购自武汉益普生物科技有限公司;NT-proBNP试剂盒购自武汉白意欣生物科技有限公司。

1.3.3　6 min步行试验(6-minute walk test,6MWT):分别于干预前后让患者在30 m直线距离内,根据自身状况全力往返行走,统计其6 min步行距离。

1.3.4　生活质量评分:于干预前后采用明尼苏达心力衰竭生活质量调查表(Minnesota living with heart failure questionnaire,LiHFe)[5]对患者的生活质量进行评估,涵盖身体、情绪和其他领域,包含21个条目,每个条目0~5分,总分为0~105分,分值越高,代表患者生活质量水平越低。

1.4　统计学分析

采用SPSS 26.0软件分析数据，计量资料以$\bar{x} \pm s$表示，组间比较采用独立样本t检验，组内比较采用配对样本t检验；计数资料以率（%）表示，两两比较采用χ^2检验，$P < 0.05$为差异有统计学意义。

2　结果

2.1　2组一般资料比较

2组一般资料比较，差异无统计学意义（$P > 0.05$）。见表1。

表1　2组一般资料比较

Tab.1　Comparison of general characteristics between the two groups

Item	Control group (n = 53)	Experimental group (n = 53)	χ^2/t	P
Sex [n (%)]			0.151	0.698
Male	28 (52.83)	26 (49.06)		
Female	25 (47.17)	27 (50.94)		
Age (year)	67.59 ± 3.44	66.81 ± 3.53	1.152	0.252
NYHA grading [n (%)]			0.151	0.697
Ⅱ	27 (50.94)	29 (54.72)		
Ⅲ	26 (49.06)	24 (45.28)		
Merge diseases [n (%)]				
Hypertension	33 (62.26)	30 (56.60)	0.352	0.553
Diabetes	28 (52.83)	27 (50.94)	0.038	0.846
Obesity	10 (18.87)	13 (24.53)	0.500	0.480
Coronary heart disease [n (%)]				
Stable angina pectoris	15 (28.30)	14 (26.42)	0.047	0.828
Unstable angina pectoris	8 (15.09)	9 (16.98)	0.070	0.791
History of coronary intervention	12 (22.64)	10 (18.87)	0.229	0.632
History of coronary artery bypass surgery	3 (5.66)	2 (3.77)	0.000	1.000
Medication history [n (%)]				
ACEI/ARB	42 (79.25)	40 (75.47)	0.215	0.643
Beta-blocker	40 (75.47)	38 (71.70)	0.194	0.659
Metformin	25 (47.17)	26 (49.06)	0.038	0.846
Diuretics	30 (56.60)	33 (62.26)	0.352	0.553
Digoxin	12 (22.64)	10 (18.87)	0.229	0.632

ACEI, angiotensin-converting enzyme inhibitor; ARB, angiotensin receptor blocker.

2.2　2组心肺功能比较

2组心肺功能指标在干预后均得到改善，与干预后的对照组比较，试验组LVEF、AT、VO_{2peak}更高，VE/VCO_2斜率更低（$P < 0.05$）。见表2。

表2　2组心肺功能比较

Tab.2　Comparison of cardiorespiratory functions between the two groups

Group	n	LVEF (%)		AT (mL·min^{-1}·kg^{-1})		VO_{2peak} (mL/min)		Slope of VE/VCO_2	
		Before intervention	After intervention	Before intervention	After intervention	Before intervention	After intervention	Before intervention	After intervention
Control	53	58.19 ± 4.29	61.98 ± 2.81[1)]	10.42 ± 2.24	11.95 ± 2.21[1)]	14.64 ± 3.13	15.88 ± 3.26[1)]	36.17 ± 10.67	29.76 ± 9.21[1)]
Experimental	53	58.24 ± 4.36	64.31 ± 2.53[1),2)]	10.61 ± 2.19	13.19 ± 3.05[1),2)]	14.69 ± 3.40	17.71 ± 4.76[1),2)]	35.98 ± 10.69	25.83 ± 9.75[1),2)]

1) $P < 0.05$ vs. before intervention within group; 2) $P < 0.05$ vs. control group at the same time point.

2.3　2组心力衰竭相关指标比较

干预后2组血清NT-proBNP、sST2水平较干预前均降低（$P<0.05$），与对照组相比，试验组降低更显著（$P<0.05$）。见表3。

2.4　2组干预前、后运动耐量比较

干预后，对照组6MWT由（350.69±26.85）m增加至（415.21±24.26）m，试验组由（350.73±26.89）m增加至（483.60±30.94）m。2组6MWT均较干预前增加（均$P<0.05$）；组间比较显示，干预后试验组6MWT显著高于对照组（$t=12.663$，$P<0.001$）。

表3　2组心力衰竭相关指标比较

Tab.3　Comparison of heart failure-related indicators between the two groups

Group	n	NT-proBNP (ng/L)		sST2 (ng/mL)	
		Before intervention	After intervention	Before intervention	After intervention
Control	53	3 289.28±633.49	1 532.68±337.50[1)]	36.81±7.39	28.31±4.29[1)]
Experimental	53	3 296.61±642.18	752.67±211.35[1),2)]	36.86±7.53	19.50±3.45[1),2)]

1) $P<0.05$ vs. before intervention within group; 2) $P<0.05$ vs. control group at the same time point.

2.5　2组生活质量评分比较

干预后，对照组LiHFe评分由（34.66±5.72）分降低至（29.67±4.77）分，试验组由（34.59±5.80）分降低至（23.36±5.69）分。2组LiHFe评分均较干预前显著降低（均$P<0.05$），组间比较显示，干预后试验组LiHFe评分显著低于对照组（$t=6.187$，$P<0.001$）。

3　讨论

HFpEF主要由心肌僵硬、舒张功能障碍及微血管炎症引起，与年龄相关纤维化、代谢综合征和慢性炎症密切相关，易导致心室充盈受阻、患者运动耐量显著下降[6]。研究[7]表明，HFpEF患者5年生存率<35%，常表现为劳力性呼吸困难、乏力及运动诱发肺动脉高压。尽管CPET指导的精准有氧运动有望改善氧代谢，但老年患者运动强度设定与风险管控仍具挑战。

本研究结果显示，干预后试验组LVEF、AT、VO_{2peak}高于对照组，VE/VCO_2斜率低于对照组。提示基于CPET的精准有氧运动干预能够显著改善HFpEF患者心肺功能。分析其机制，CPET指导下的个体化训练可动态优化运动强度，促进心肌细胞葡萄糖利用，减轻氧化应激，并通过抑制多种炎性细胞因子延缓心肌纤维化，改善左心室僵硬度与舒张充盈[8]。运动还可激活能量代谢通路，增加线粒体数量与酶活性，延缓乳酸堆积，从而提高AT[9]。同时，运动干预能够改善内皮功能，促进毛细血管新生，优化氧输送与利用[10]。此外，迷走神经张力增强、静息心率下降及每搏输出量提升共同增加心输出量，骨骼肌氧摄取能力改善亦提升VO_{2peak}；呼吸方面，该运动有助于降低左心房压与肺楔压，纠正通气/血流比例，减少无效腔通气，并增强呼吸肌耐力，使VE/VCO_2斜率趋于正常[11]。此外，干预后试验组NT-proBNP、sST2水平低于对照组；提示患者心力衰竭严重程度与心肌重构减轻。其机制可能在于，该训练方案可降低心脏负荷，逆转心室压力升高，恢复压力反射敏感性，抑制交感过度激活所致利钠肽释放；同时，CPET指导下的精准运动可避免一氧化氮堆积，减少sST2的生成[12-13]。可见该运动方案通过抑制心肌纤维化、神经内分泌调控等多方面作用，全面改善HFpEF患者心肺功能与心肌重构。

本研究结果显示，干预后试验组6MWT高于对照组；生活质量评分亦更优。表明基于CPET的精准有氧运动处方可有效提升HFpEF患者的运动耐力与生活质量。该运动方案可降低外周阻力与左室舒张末压，改善心室僵硬度，优化心–动脉耦合，提高每搏输出量；同时，规律性运动能够促进淋巴回流、降低肺毛细血管静水压，纠正通气/血流比例[14]。运动强度设定在AT水平，可提升VO_{2peak}和氧弥散效率，缓解劳力性呼吸困难症状；减少间质水肿，增加肺活量，降低夜间阵发性呼吸困难发作；并通过降低去甲肾上腺素水平、恢复压力反射敏感性，改善自主神经功能紊乱[15]。

综上所述，基于CPET的精准有氧运动干预能够

显著改善老年HFpEF患者的心肺功能，同时提升其运动耐力与生活质量水平。

参考文献：

[1] BORLAUG BA，SHARMA K，SHAH SJ，et al. Heart failure with preserved ejection fraction JACC scientific statement [J]. J Am Coll Cardiol，2023，81（18）：1810-1834. DOI：10.1016/j.jacc.2023.01.049.

[2] ALOTAIBI M，YANG JZ，PAPAMATHEAKIS DG，et al. Cardiopulmonary exercise test to detect cardiac dysfunction from pulmonary vascular disease [J]. Respir Res，2024，25（1）：121. DOI：10.1186/s12931-024-02746-w.

[3] 钱贞，卢同波，何俊，等. 精准化运动处方对脑卒中患者心肺适能及睡眠质量的影响研究[J]. 中国全科医学，2022，25（20）：2468-2474. DOI：10.12114/j.issn.1007-9572.2022.0030.

[4] 射血分数保留的心力衰竭诊断与治疗中国专家共识制定工作组. 射血分数保留的心力衰竭诊断与治疗中国专家共识2025[J]. 中国循环杂志，2025，40（11）：1041-1060. DOI：10.3969/j.issn.1000-3614.2025.11.001.

[5] HUA C，HUANG WR，CHEN Z，et al. Effects of exercise based cardiac rehabilitation delivery modes on chronic heart failure：a systematic review and network meta-analysis [J]. Sci Rep，2024，14：31246. DOI：10.1038/s41598-024-82608-z.

[6] OMOTE K，VERBRUGGE FH，BORLAUG BA. Heart failure with preserved ejection fraction：mechanisms and treatment strategies [J]. Annu Rev Med，2022，73：321-337. DOI：10.1146/annurev-med-042220-022745.

[7] HAMO CE，DEJONG C，HARTSHORNE-EVANS N，et al. Heart failure with preserved ejection fraction [J]. Nat Rev Dis Primers，2024，10：55. DOI：10.1038/s41572-024-00540-y.

[8] YU X，FAN YX，SUN XP，et al. Outcomes of genetic testing-based cardiac rehabilitation program in patients with acute myocardial infarction after percutaneous coronary intervention [J]. Cardiol Res Pract，2022，2022：9742071. DOI：10.1155/2022/9742071.

[9] SHEN Q，WU XY，HUANG C，et al. Aerobic exercise activates AMPK/PGC-1α pathway，inhibits cardiomyocyte apoptosis improves mitochondrial and infarcted heart function [J]. Dokl Biochem Biophys，2024，518（1）：420-428. DOI：10.1134/S1607672924600556.

[10] ULRICH CM，HIMBERT C，BARNES CA，et al. Precision exercise effect on fatigue and function in lung cancer surgery：a randomized clinical trial [J]. JAMA Surg，2025，160（5）：495. DOI：10.1001/jamasurg.2025.0130.

[11] 罗娜，于广洋，陈玲玲. 基于心肺运动试验的运动处方训练在老年慢性阻塞性肺疾病患者中的作用[J]. 中国医药导报，2022，19（31）：96-99. DOI：10.20047/j.issn1673-7210.2022.31.22.

[12] 蔡昕姝，高岩，李芳，等. 心肺运动试验指导有氧训练对慢性心力衰竭患者无创血流动力学的影响[J]. 中国医刊，2022，57（10）：1078-1081. DOI：10.3969/j.issn.1008-1070.2022.10.010.

[13] 丁跃有，蒋玲玲，缪培智，等. 心肺运动试验在冠心病PCI术后患者运动康复训练中的应用[J]. 山东医药，2022，62（26）：63-65. DOI：10.3969/j.issn.1002-266X.2022.26.015.

[14] 周大亮，薛雷，魏林，等. 有氧运动、循环阻抗运动对射血分数中间型心力衰竭患者心肺运动试验参数、心功能的影响[J]. 长春中医药大学学报，2023，39（6）：666-669. DOI：10.13463/j.cnki.cczyy.2023.06.017.

[15] 高振，陈洁琼，周明，等. 有氧运动康复对冠状动脉慢性闭塞患者PCI术后心肺功能的影响[J]. 中国循证心血管医学杂志，2024，16（3）：296-299，303. DOI：10.3969/j.issn.1674-4055.2024.03.10.

（编辑　于　溪）

（上接第603页）

62-73. DOI：10.12151/JMCM.2025.04-04.

[13] NICHOLSON AG，TSAO MS，BEASLEY MB，et al. The 2021 WHO classification of lung tumors：impact of advances since 2015 [J]. J Thorac Oncol，2022，17（3）：362-387. DOI：10.1016/j.jtho.2021.11.003.

[14] YI E，LEE JH，JUNG Y，et al. Clinical implication of tumour spread through air spaces in pathological stage Ⅰ lung adenocarcinoma treated with lobectomy [J]. Interact Cardiovasc Thorac Surg，2021，32（1）：64-72. DOI：10.1093/icvts/ivaa227.

[15] WARTH A，MULEY T，KOSSAKOWSKI CA，et al. Prognostic impact of intra-alveolar tumor spread in pulmonary adenocarcinoma [J]. Am J Surg Pathol，2015，39（6）：793-801. DOI：10.1097/PAS.0000000000000409.

[16] DU ML，XIN JY，ZHENG R，et al. CYP2A6 activity and cigarette consumption interact in smoking-related lung cancer susceptibility [J]. Cancer Res，2024，84（4）：616-625. DOI：10.1158/0008-5472.CAN-23-0900.

[17] TOYOKAWA G，YAMADA Y，TAGAWA T，et al. Computed tomography features of resected lung adenocarcinomas with spread through air spaces [J]. J Thorac Cardiovasc Surg，2018，156（4）：1670-1676.e4. DOI：10.1016/j.jtcvs.2018.04.126.

[18] LEE JH，YOON YC，KIM HS，et al. Obesity is associated with improved postoperative overall survival，independent of skeletal muscle mass in lung adenocarcinoma [J]. J Cachexia Sarcopenia Muscle，2022，13（2）：1076-1086. DOI：10.1002/jcsm.12956.

[19] OSWALT C，LIU YZ，PANG H，et al. Associations between body mass index，weight loss and overall survival in patients with advanced lung cancer [J]. J Cachexia Sarcopenia Muscle，2022，13（6）：2650-2660. DOI：10.1002/jcsm.13095.

[20] CARDACI TD，VANDERVEEN BN，BULLARD BM，et al. Obesity worsens mitochondrial quality control and does not protect against skeletal muscle wasting in murine cancer Cachexia [J]. J Cachexia Sarcopenia Muscle，2024，15（1）：124-137. DOI：10.1002/jcsm.13391.

[21] ALVAREZ MORENO JC，ALJAMAL AA，BAHMAD HF，et al. Correlation between spread through air spaces（STAS）and other clinicopathological parameters in lung cancer [J]. Pathol Res Pract，2021，220：153376. DOI：10.1016/j.prp.2021.153376.

[22] TIAN Y，FENG J，JIANG L，et al. Integration of clinicopathological and mutational data offers insight into lung cancer with tumor spread through air spaces [J]. Ann Transl Med，2021，9（12）：985. DOI：10.21037/atm-21-2256.

（编辑　武玉欣）