

本文引用: 王 枫, 刘若江, 秦晋梅, 等. 基于阈值的个体化运动处方在代谢综合征中的临床应用进展[J]. 中国动脉硬化杂志, 2024, 32(11): 1006-1012. DOI: 10.20039/j.cnki.1007-3949.2024.11.012.

· 文献综述 ·

[文章编号] 1007-3949(2024)32-11-1006-07

基于阈值的个体化运动处方在代谢综合征中的临床应用进展

王 枫¹, 刘若江², 秦晋梅³, 陈文学⁴, 裴志强³, 薛伟珍⁵

1. 山西医科大学附属第九临床学院心血管内科, 山西省太原市 030000; 2. 中北大学体育学院, 山西省太原市 030051;
3. 山西医科大学附属第九临床学院心脏康复中心, 山西省太原市 030000; 4. 山西医科大学, 山西省太原市 030001;
5. 山西省太原市医学会, 山西省太原市 030012

[摘 要] 代谢综合征(MS)患者存在潜在的心血管疾病风险, 日渐受到公众和医学界的关注。研究表明, 规律的体育锻炼能够有效调节血压、血糖与血脂等代谢指标, 在降低心血管疾病风险、改善患者预后方面起到了积极作用, 而运动强度被确定为运动干预中降低心血管死亡风险和全因死亡率的最重要方面, 因此设计既科学又满足个体差异的运动处方成为研究的焦点问题。当前临床研究大部分是以百分比的运动强度作为 MS 患者标准化运动处方的制定依据, 而以心肺运动试验(CPET)为基础的个体化阈值制定的运动强度的研究仍然较少。CPET 表明, 个体化运动处方可有效降低 MS 患者的身体成分指标、血压及血糖, 改善心肺功能, 提高其运动耐力和生活质量。文章综述了依据 CPET 中的阈值指标制定不同强度的个体化运动方案, 分析其对 MS 患者及亚组人群的干预效果及可能存在的机制, 为 MS 患者个性化运动处方的制定和实施提供一定的参考依据, 也为深入开展个体化运动干预 MS 的研究提供借鉴。

[关键词] 心肺运动试验; 代谢综合征; 心肺耐力; 运动处方; 无氧阈值

[中图分类号] R5

[文献标识码] A

Progress in clinical application of individualized exercise prescription based on threshold in metabolic syndrome

WANG Feng¹, LIU Ruojiang², QIN Jinmei³, CHEN Wenxue⁴, PEI Zhiqiang³, XUE Weizhen⁵

1. Department of Cardiovascular Medicine, the Ninth Clinical College Affiliated to Shanxi Medical University, Taiyuan, Shanxi 030000, China; 2. School of Physical Education, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China;
3. Cardiac Rehabilitation Center, the Ninth Clinical College Affiliated to Shanxi Medical University, Taiyuan, Shanxi 030000, China; 4. Shanxi Medical University, Taiyuan, Shanxi 030001, China; 5. Taiyuan Medical Association, Taiyuan, Shanxi 030012, China

[ABSTRACT] Patients with metabolic syndrome (MS) are at potential risk for cardiovascular disease and have received increasing public and medical attention. Studies have shown that regular physical exercise can effectively regulate metabolic indicators such as blood pressure, blood sugar and blood lipids, and play a positive role in reducing the risk of cardiovascular disease and improving the prognosis of patients. Exercise intensity has been identified as the most important aspect in reducing the risk of cardiovascular death and all-cause mortality in exercise intervention. Therefore, the design of exercise prescription which is both scientific and satisfying individual differences has become the focus of research. Most of the current clinical studies are based on the percentage of exercise intensity as the basis for the formulation of standardized exercise prescription for MS patients, while the studies on the individualized threshold of exercise intensity based on cardiopulmonary exercise test (CPET) are still few. CPET has shown that individualized exercise prescription can effectively reduce body composition index, blood pressure and blood glucose, improve cardiorespiratory function, exercise endurance and quality of life in MS patients. This paper reviewed the development of individualized exercise programs with

[收稿日期] 2024-01-10

[修回日期] 2024-04-02

[基金项目] 中国医学科学院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助(2022-JKCS-30); 山西省高等学校教学改革创新项目(J2019171); 2022 年区域医疗中心科技创新计划项目(202242)

[作者简介] 王枫, 硕士研究生, 研究方向为心脏康复, E-mail: wf182345@163.com。通信作者薛伟珍, 硕士, 主任医师, 硕士研究生导师, 主要从事冠心病的诊断和治疗研究, E-mail: tyby6387@163.com。

different intensification according to threshold indexes in CPET, analyzed the intervention effects and possible mechanisms for MS patients and subgroups, and provided certain reference for the formulation and implementation of personalized exercise prescriptions for MS patients, and also provided references for in-depth research on individualized exercise intervention for MS.

[KEY WORDS] cardiopulmonary exercise testing; metabolic syndrome; cardiopulmonary endurance; exercise prescription; anaerobic threshold

代谢综合征(metabolic syndrome, MS)是一种人体蛋白质、脂肪、碳水化合物等物质发生代谢紊乱的病理状态,以高血压、腹型肥胖、胰岛素抵抗和血脂异常等代谢性疾病在个体聚集为特征的一组临床症候群,它与患糖尿病、动脉粥样硬化性心血管疾病的风险增加密切相关,被认为是最重要的心血管疾病风险因素之一^[1]。随着经济的不断发展,MS 患病率不断上升,最新流行病学调查发现,MS 的全球患病率为 12.5%~31.4%^[2]。2021 年发布的中国营养与健康监测报告显示中国成年人 MS 的患病率为 31.1%,女性患病率明显高于男性,MS 及其组分已经成为全球公共卫生的负担^[3]。因此需要更有效的干预措施来改善 MS 及其并发症,从而减轻 MS 带来的全球负担。目前已有大量研究证实,运动干预是 MS 患者治疗的重要基石,它作为一种一线、低成本、非药物、非侵入性的治疗方式,不仅能有效改善和预防 MS,还可延缓心血管疾病的进展^[4-5]。然而,在针对改善不同 MS 组分方面,仍需进一步深入研究以确定最佳运动强度,并探索改善心血管和代谢性疾病的运动生理学潜在机制,以开发高效、高依从性的运动处方^[6]。

心肺运动试验(cardiopulmonary exercise testing, CPET)是指在负荷递增的运动下,反映人体的心肺功能指标,通过对各种参数综合分析,全面、客观、科学地评价心脏、肺脏等系统之间的交互和储备能力的一种检查方法^[7]。CPET 能够解释个体在不同负荷运动时的动态病理生理变化,可为疾病预后提供一定预测价值,因此被认为是评估心肺储备功能的最佳方式,同时也是制定个性化有氧运动处方的金标准^[8-9]。

1 运动处方在代谢综合征患者中的应用及研究进展

研究发现,MS 可以使心血管疾病(cardiovascular disease, CVD)风险增加 60%,而运动强度已被确定为有氧运动处方中降低心血管死亡风险和全因死亡率的最重要方面^[10-11]。运动处方中的运动强度

可以个体化制定,它是指在规避运动风险的前提下,达到个人最大程度的耐受强度,保证了运动的有效性及其安全性^[12]。心率储备(heart rate reserve, HRR)和最大摄氧量(maximum oxygen uptake, $VO_2\max$)百分比等标准化方法是目前研究中用于确定运动处方中运动强度常用的方法,这类方法简单易行,可通过 CPET 取得最大生理值搭配固定百分比计算,但其易受临床、个体因素或药理学的影响^[13]。研究表明当不同运动干预对象基于百分比制定的运动强度相同时,它引起的生理刺激反应并不完全相同,导致在长期运动过程中出现低或无运动效益,因此它对不同个体心肺耐力的改善效果存在较大的差异性;此外在合并高血压的 MS 患者中,降压药物(尤其是 β 受体阻滞剂)会减慢心率,无法设定最适宜的运动强度^[14]。一些人发现当使用最大摄氧量百分比(maximum oxygen uptake percentage, % $VO_2\max$)及最大心率百分比(maximum heart rate percentage, %HRmax)为使用 β 受体阻滞剂的心脏病患者开出中等强度处方时,61% $VO_2\max$ 和 74% HRmax 对应于高强度而非中等强度,导致实际运动强度过高;相反,如果在 β 受体被阻断的患者中使用心率储备百分比(heart rate reserve percentage, %HRR),58% 的患者强度低于指南推荐的阈值,同时由于强度制定不恰当所致干预效果差^[15]。因此运用 % $VO_2\max$ 和 %HRR 等标准化方法制定 MS 患者的运动处方可能不是最优选择^[16]。

有研究提出,相比于 $VO_2\max$ 和 HRmax, CPET 中的无氧阈值(anaerobic threshold, AT)和呼吸代偿点(respiratory compensatory point, RCP)两个生理阈值更加能反映代谢率和底物利用率的变化,以响应不同的运动强度^[17-18]。AT 是指在 CPET 测试中运动负荷增加到一定程度后,组织对氧的需求超过循环所能提供的氧供量,组织必须通过无氧代谢提供更多的能量;可视为有氧代谢与无氧代谢的临界点,其正常值一般在 $VO_2\max$ 的 50%~65% 之间,易受长期有氧训练等个体因素的影响^[19]。当过了 AT 以后,随着运动强度继续加大,血液乳酸缓冲系统逐渐饱和,血液代谢性酸中毒,机体发生呼吸代偿,

二氧化碳通气当量斜率(carbon dioxide ventilation equivalent slope, VE/VCO_2 slope)变得陡峭上升,这个转折点就是呼吸代偿点(respiratory compensatory point, RCP),它是高强度和超高强度的分界线^[20]。因此,应用生理阈值的运动强度可在个体之间产生均匀的运动刺激,从而更好地控制运动引起的急性生理反应;当随着运动时间延长,运动强度会导致更均匀的慢性适应和提高反应率,避免低效的运动,增加运动的依从性和有效性^[18]。以生理阈值制定的强度可以让人们的运动获益最大化,运动风险最小化,指导不同个体进行科学精准化运动,同时对于心血管疾病高危人群是最佳和最安全的选择^[10]。李慧敏等^[21-22]也证明了此类观点,他们利用CPET制定的个体化精准运动整体方案不仅改善了人体身体成分、降低血脂和血糖水平,还可以安全有效地增强心肌收缩力,增加每搏输出量,提高心肺耐力水平,从而改善心脑血管疾病患者的整体功能状态。

2 基于阈值的个体化运动强度在代谢综合征患者中的疗效分析及进展

根据心脏康复相关指南推荐,可利用CPET中的AT和RCP两个指标所对应的心率或功率值划分为3个运动强度领域并且根据感知疲劳等级(rating of perceived exertion, RPE)确定运动强度(图1): (1)AT及以下的低至中等运动强度领域,运动强度为RPE<11,常见的运动方式有散步、瑜伽等;(2)介于AT和RCP之间的中至高运动强度领域,运动强度为RPE 12~17,如慢跑、游泳;(3)RCP及以上的高至极高运动强度领域,运动强度为RPE≥18,例如跳绳、冲刺折返跑等^[9,23-24]。

2.1 低至中等运动强度领域

研究显示,长期中低强度的(最大摄氧量的50%~60%或者最大心率的50%~70%,每次运动40~60 min,每周运动5~7次,持续12周以上)有氧运动是有效减脂的运动方式之一,这是由于脂肪是中低强度运动的重要能量来源^[25-26]。潜在的机制是随着中低强度运动的时间延长,使得脂肪分解激素(例如儿茶酚胺、皮质醇、胰高血糖素和生长激素)水平显著升高,这些激素又反作用于脂肪组织,加快甘油三酯水解,游离脂肪酸水平升高进而激活过氧化物酶体增殖物激活受体 γ 共激活因子1 α (peroxisome proliferator-activated receptor γ coactivator 1 α , PGC-1 α)途径,增加肌肉线粒体和肌膜转运蛋白

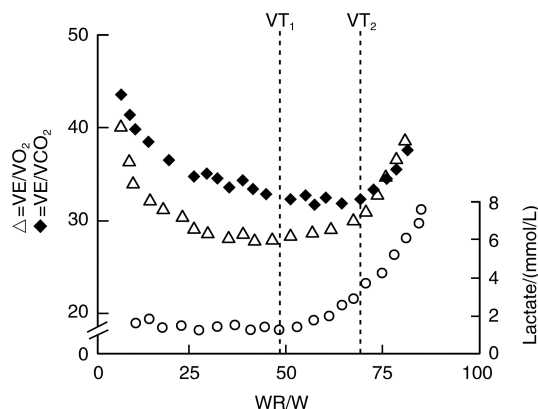


图1. 递增功率和通气阈值的关系^[9]

CPET中第一通气阈值(first ventilation threshold, VT1)和第二通气阈值(second ventilation threshold, VT2)的判定方法与无氧阈值(AT)和呼吸代偿点(RCP)的判定方法一致。

Figure 1. Relationship between working rate (WR) and ventilation threshold (VT)

的数量,导致骨骼肌 β 氧化速率加强,实现负脂肪平衡^[27-28]。

在CPET测试中,随着运动强度的逐渐增加,糖供能急剧增加,脂肪参与供能比例相应下降,因此脂肪氧化率随运动强度的增加呈现出逐渐上升至最高点后下降的抛物线趋势,此抛物线顶点(图2)就是促使机体出现脂肪氧化利用最大化时的运动强度称为最大脂肪氧化运动强度(maximal fat oxidation, FATmax)^[29]。研究发现在渐增负荷运动中,血乳酸浓度随运动负荷的递增而增加,当运动强度达到某一负荷时,血乳酸浓度升高时存在两个拐点分别为第一乳酸阈值和第二乳酸阈值,分别与CPET中AT和RCP有高度的相关性^[30]。在中低运动强度期间(<AT),以脂肪供能为主时乳酸产生量很少,所以血乳酸阈值通常<2.0 mmol/L;当糖供能为主时,乳酸值升高至2.0 mmol/L及以上,因此FATmax时的血乳酸值接近于2.0 mmol/L,可用来表示中低运动强度领域^[29,31]。相关研究也进一步证明以FATmax制定MS患者的运动处方,可启动肥胖个体的身体调节,使其燃烧脂肪为主,仅产生和清除少量乳酸,有效提高运动效果,改善腹部肥胖,而不会有肌肉或关节损伤的风险^[31]。研究^[31-33]数据显示,在超重和肥胖个体中,以FATmax制定的运动处方治疗10周后,运动组体质量、体质指数、体脂百分比、腹部脂肪量、甘油三酯、血清瘦素均显著降低,脂蛋白脂肪酶活性增加;另一项荟萃分析结果也证明了FATmax可以有效降低体质量和腰围($P<0.01$),增加最大摄氧量($P<0.01$)。此外,某些研

究还发现 FATmax 不仅可以改善脂质代谢,还对葡萄糖稳态有明显益处。Jiang 等^[34]通过 FATmax 有氧运动干预 2 型糖尿病人群,发现干预组的最大摄氧量和运动耐力增加,同时身体成分得到了显著改善,尤其是减少腹部肥胖、降低空腹血糖浓度和糖化血红蛋白。Tan 等^[35]的临床研究同样发现该 FATmax 可降低 2 型糖尿病患者的体脂百分比($P<0.001$)、内脏脂肪百分比($P<0.001$)和空腹血糖($P<0.001$),增加血液中的脂联素水平,从而降低 2 型糖尿病肥胖患者的胰岛素抵抗。此外,Wang 等^[36]发现,FATmax 治疗 10 周后心肺耐力可增加 10%,从而降低收缩压(13 mmHg),改善每搏输出量(5 mL)和射血分数(4.6%)。综上,依据 FATmax 制定的个体化运动处方在改善 MS 患者的腹部肥胖、胰岛素抵抗,提高心肺耐力,降低收缩压及心血管风险等方面有着显著效果。

当然目前研究结果并不完全一致。Özdemir 等^[37]发现在久坐不动的超重个体中,在步行 40 min 运动中,尽管 CPET 确定的 FATmax 对应的心率保持不变,而 FATmax 在 16 min 后呈衰减趋势,且在整个运动中无法维持。先前的荟萃分析结果显示,FATmax 在前 15 min 内也有类似结果,而在 60 min 后才可恢复到正常水平,这可能会导致长时间的运动下个体的脂肪氧化率显著降低,从而使临床治疗效果不佳,这可能与选择低运动强度的运动相关^[31]。因此,基于 FATmax 制定 MS 患者个体化运动处方需在临床实验中进一步研究,以确定分歧产生的生理学机制,得出普适的结论。

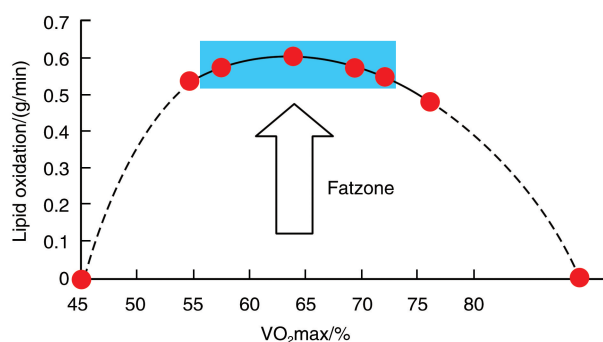


图 2. 最大摄氧量与脂肪氧化的关系^[30]

脂肪氧化从低强度到中等强度增加,在 FATmax 达到峰值后,随着运动强度的进一步增加而减少。
蓝色区域代表脂肪区:脂肪氧化率高的运动强度。

Figure 2. Relationship between maximum oxygen uptake and lipid oxidation^[30]

2.2 中至高运动强度领域

基于 AT 及以上的运动强度可以对心肺耐力(指个人的肺脏与心脏从空气中携带氧气,并将氧气输送到组织细胞加以利用的能力,临床主要用峰值摄氧量评估)进行最佳改善,可能是基于其制定的运动处方应用了更高的运动代谢压力,进而能诱发出更大的代谢信号,促进 ATP 周转,机体对碳水化合物和糖原等能量的需求增加,而增加的能量需求进一步使细胞内特定激酶活性升高(AMP 活化蛋白激酶等),增加有氧代谢所需线粒体数量,促使能量进一步增加,从而更大程度上改善心肺耐力和运动耐量,降低心脏代谢风险^[10,38-39]。

Weatherwax 等^[40]对比了两种运动干预(使用 AT 和% HRR 制定运动强度),干预 12 周后发现 AT 组和% HRR 组的体质量、静息心率和最大心率的改善程度无明显差异,但 AT 组在降低收缩压[(119.7±7.2) mmHg 比 (126.7±9.9) mmHg, $P<0.01$],增加最大摄氧量[(0.024 4±0.004 7) L/(kg·min) 比 (0.029 5±0.007 5) L/(kg·min), $P<0.01$]的疗效上显著升高;此外两组的心脏代谢风险评分得到了明显改善,但 AT 组似乎可以逆转 MS 患者的心脏代谢危险因素,其 2/3 的参与者干预后不再是 MS 人群;并且 AT 组运动有效率达 100%,远高于% HRR 组(有效率为 83%)。Kirtton 等^[41]也发现了 AT 组的健身肥胖指数(代谢当量/腰围身高比)增加幅度明显高于% HRR 组,而通过改善健身肥胖指数可以降低全因死亡率、癌症和心血管疾病死亡率已是共识。国内王晓东等^[42]同样应用 AT 个体化强度来干预 MS 患者,发现干预组的体质指数、腰围、血压、血脂、血糖均较干预前降低,且差异有统计学意义($P<0.05$);同时实验组患者经过运动康复治疗,53.33% 的患者药物用量较前明显减少。同样李莉等^[43]也发现应用 AT 制定的运动处方改善最大心率、最大摄氧量等心肺指标的程度明显高于常规药物治疗组。

综上所述,应用 AT 及以上中等个体化强度运动干预 MS 患者确实能使其从代谢、心血管及心肺耐力方面获益,同时还可以减少 MS 患者药物治疗量,延缓慢性非传染性疾病的发生与发展,减轻社会经济负担,减少资源的浪费。国内此研究尚未广泛应用,需要期待更多相关临床试验的开展。

2.3 高至极高运动强度领域

研究表明运动强度在 RCP 及以上主要通过无氧代谢供能,属于高至极高的运动强度领域,是高强度间歇运动和冲刺间歇运动的实际标准,与中低

强度运动相比,高强度运动在改善心肺耐力、降低 MS 相关疾病风险方面更有效^[44]。潜在的机制可能是高强度运动可以增加心输出量引起血管剪切应力增加,从而激活内皮细胞中的信号转导途径和基因表达,抑制细胞增殖、炎症和动脉粥样硬化;同时机体产生的细胞应激会促进细胞外超氧化物歧化酶的释放,从而促进一氧化氮(nitric oxide, NO)的产生,NO 可诱导血管舒张达到降压效果,抑制血小板聚集,从而降低冠状动脉粥样硬化的进展风险;另外高强度运动还可以诱导脂解激素(包括生长激素和肾上腺素)的分泌,这可能会促进运动后能量消耗和脂肪氧化^[45-47]。

研究表明等于或高于 RCP 的运动强度制定的耐力训练计划在降低 MS 肥胖女性的内脏脂肪和 2 型糖尿病患者的血压方面特别有效^[48-49]。Irving 等^[48]研究了不同强度运动对肥胖的 MS 患者腹部脂肪和身体成分的影响,发现运动强度 \geq RCP 时可显著降低腹部总脂肪($P<0.001$)、皮下脂肪($P=0.034$)和内脏脂肪($P=0.010$)。Lima 等^[49]表明,AT 和 RCP 两种运动强度均可使 2 型糖尿病的收缩压降低,但是 RCP 以上的高强度运动似乎在降低舒张压和平均动脉压方面更灵敏,但是会导致不同的代谢紊乱、心血管事件风险,还需要谨慎开具高强度运动处方。Guio 等^[38]研究两种阈值强度(AT、RCP)对肥胖患者心肺耐力的改善程度,结果表明两组摄氧量均随训练而改善($P<0.001$),相比于 AT 强度,RCP 强度可以使参与者获得更高的摄氧量值($P<0.001$)。因此高于 RCP 的运动强度在健康和医疗领域的应用有望增加,但长时间处于 RCP 及以上的无氧代谢状态会造成机体大量乳酸堆积、氢离子增加导致电解质紊乱和运动能力降低,同时可能使心肌损伤,引起循环系统功能障碍,严重甚至会诱发猝死等不良事件,因此其可行性和安全性在不久的将来需进行进一步评估^[39]。

3 未来和展望

综上所述,基于生理阈值为 MS 患者制定个体化的运动处方是可行的,并且对于长期久坐不动的 MS 和心血管高危风险人群来说,以自己的个体化阈值强度进行运动时风险较低。

目前大部分研究只是单独分析个体化强度的疗效,很少有通过阈值制定运动处方以比较哪种运动强度更适合 MS 患者及其亚组人群的研究,以及依据阈值制定运动处方改善 MS 患者的腹型肥胖、

血糖水平及降低心血管疾病风险中的糖脂代谢通路机制尚不明确,也是今后领域需进一步探究的课题。目前,应用生理阈值制定个体化运动处方是否能在临床意义上全面降低 MS 的严重程度,有效减少 MS 组分的个体数量,大幅度降低 MS 患者的心血管疾病发生率,仍存在一定争议,未来仍需要进一步研究。

[参考文献]

- [1] SILVEIRA ROSSI J L, BARBALHO S M, REVERETE DE ARAUJO R. Metabolic syndrome and cardiovascular diseases: going beyond traditional risk factors [J]. *Diabetes Metab Res Rev*, 2022, 38(3): e3502.
- [2] NOUBIAP J J, NANSSEU J R, LONTCHI-YIMAGOU E, et al. Geographic distribution of metabolic syndrome and its components in the general adult population: a Meta-analysis of global data from 28 million individuals [J]. *Diabetes Res Clin Pract*, 2022, 188: 109924.
- [3] YAO F, BO Y, ZHAO L, et al. Prevalence and influencing factors of metabolic syndrome among adults in China from 2015 to 2017 [J]. *Nutrients*, 2021, 13(12): 4475.
- [4] MORALES-PALOMO F, MORENO-CABAÑAS A, RAMIREZ-JIMENEZ M, et al. Exercise reduces medication for metabolic syndrome management: a 5-year follow-up study [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2021, 53(7): 1319-1325.
- [5] NIKBAKHT H A, REZAIANZADEH A, SEIF M, et al. Physical activity and metabolic syndrome: a population base study (forest and tree model algorithms) [J]. *Clin Nutr ESPEN*, 2023, 56: 173-179.
- [6] 房文倩, 肖俊杰. 运动锻炼对心血管和代谢性疾病影响的研究进展 [J]. *中国动脉硬化杂志*, 2023, 31(4): 277-286.
FANG W Q, XIAO J J. Research progress on the effects of exercise training on cardiovascular and metabolic diseases [J]. *Chin J Arterioscler*, 2023, 31(4): 277-286.
- [7] HERDY A H, RITT L E, STEIN R, et al. Cardiopulmonary exercise test: background, applicability and interpretation [J]. *Arq Bras Cardiol*, 2016, 107(5): 467-481.
- [8] GLAAB T, SCHMIDT O, FRITSCH J. Guidance to the interpretation of cardiopulmonary exercise testing [J]. *Pneumologie*. 2020, 74(2): 88-102.
- [9] MEZZANI A, HAMM L F, JONES A M, et al. Aerobic exercise intensity assessment and prescription in cardiac rehabilitation: a joint position statement of the European association for cardiovascular prevention and rehabilitation, the American association of cardiovascular and pulmonary rehabilitation and the Canadian association of cardiac rehabilitation [J]. *Eur J Prev Cardiol*, 2013, 20(3): 442-467.

- [10] GONZALEZ-CHÁVEZ A, CHÁVEZ-FERNÁNDEZ J A, ELIZONDO-ARGUETA S, et al. Metabolic syndrome and cardiovascular disease: a health challenge[J]. Arch Med Res, 2018, 49(8): 516-521.
- [11] WISLØFF U, NILSEN T I, DRØYVOLD W B, et al. A single weekly bout of exercise may reduce cardiovascular mortality: how little pain for cardiac gain? 'The HUNT study, Norway' [J]. Eur J Cardiovasc Prev Rehabil, 2006, 13(5): 798-804.
- [12] IZQUIERDO M, MERCHANT R A, MORLEY J E, et al. International exercise recommendations in older adults (ICFSR): expert consensus guidelines [J]. J Nutr Health Aging, 2021, 25(7): 824-853.
- [13] MANN T, LAMBERTS R P, LAMBERT M I. Methods of prescribing relative exercise intensity: physiological and practical considerations[J]. Sports Med, 2013, 43(7): 613-625.
- [14] MANN T N, LAMBERTS R P, LAMBERT M I. High responders and low responders: factors associated with individual variation in response to standardized training[J]. Sports Med, 2014, 44(8): 1113-1124.
- [15] ANSELM F, CAVIGLI L, PAGLIARO A, et al. The importance of ventilatory thresholds to define aerobic exercise intensity in cardiac patients and healthy subjects [J]. Scand J Med Sci Sports, 2021, 31(9): 1796-1808.
- [16] IANNETTA D, INGLIS E C, MATTU A T, et al. A critical evaluation of current methods for exercise prescription in women and men[J]. Med Sci Sports Exerc, 2020, 52(2): 466-473.
- [17] MEYLER S, BOTTOMS L, WELLSTED D, et al. Variability in exercise tolerance and physiological responses to exercise prescribed relative to physiological thresholds and to maximum oxygen uptake[J]. Exp Physiol, 2023, 108(4): 581-594.
- [18] MEYLER S, BOTTOMS L, MUNIZ-PUMARES D. Biological and methodological factors affecting $\dot{V}O_{2\max}$ response variability to endurance training and the influence of exercise intensity prescription[J]. Exp Physiol, 2021, 106(7): 1410-1424.
- [19] POOLE D C, ROSSITER H B, BROOKS G A, et al. The anaerobic threshold: 50⁺ years of controversy [J]. J Physiol, 2021, 599(3): 737-767.
- [20] CAVIGLI L, OLIVOTTO I, FATTIROLI F, et al. Prescribing, dosing and titrating exercise in patients with hypertrophic cardiomyopathy for prevention of comorbidities: ready for prime time[J]. Eur J Prev Cardiol, 2021, 28(10): 1093-1099.
- [21] 李慧敏, 孙兴国, 台文琦, 等. 新理论 CPET 指导个体化精准运动整体方案有效改善“虚弱症”的整体功能状态[J]. 中国应用生理学杂志, 2021, 37(2): 208-218.
- [22] LI H M, SUN X G, TAI W Q, et al. The new theory CPET guides the overall plan of individualized precision exercise to effectively improve the overall functional status of “frailty” [J]. Chin J Appl Physiol, 2021, 37(2): 208-218.
- [23] 宋雅, 孙兴国, 谢友红, 等. 心肺运动试验(CPET)评价个体化精准运动整体方案强化管控心脑血管慢病疗效的临床研究[J]. 中国应用生理学杂志, 2021, 37(1): 79-88.
- [24] SONG Y, SUN X G, XIE Y H, et al. Cardiopulmonary exercise testing (CPET) to evaluate the efficacy after intensive control of personalized precise exercise training for cardiovascular and cerebrovascular chronic diseases [J]. Chin J Appl Physiol, 2021, 37(1): 79-88.
- [25] THOMPSON P D, ARENA R, RIEBE D, et al. ACSM's new preparticipation health screening recommendations from ACSM's guidelines for exercise testing and prescription, ninth edition[J]. Curr Sports Med Rep, 2013, 12(4): 215-217.
- [26] BOK D, RAKOVAC M, FOSTER C. An examination and critique of subjective methods to determine exercise intensity: the talk test, feeling scale, and rating of perceived exertion[J]. Sports Med, 2022, 52(9): 2085-2109.
- [27] SILVEIRA L R, PINHEIRO C H, ZOPPI C C, et al. Regulation of glucose and fatty acid metabolism in skeletal muscle during contraction [J]. Arq Bras Endocrinol Metabol, 2011, 55(5): 303-313.
- [28] VAN AGGEL-LEIJSEN DP, SARIS WH, HUL GB. Long-term effects of low-intensity exercise training on fat metabolism in weight-reduced obese men[J]. Metabolism, 2002, 51(8): 1003-1010.
- [29] BRUN J F, MYZIA J, VARLET-MARIE E, et al. Beyond the calorie paradigm: taking into account in practice the balance of fat and carbohydrate oxidation during exercise? [J]. Nutrients, 2022, 14(8): 1605.
- [30] RODRIGUES JUNIOR C F, MURATA G M, GERLINGER-ROMERO F, et al. Changes in skeletal muscle protein metabolism signaling induced by glutamine supplementation and exercise [J]. Nutrients, 2023, 15(22): 4711.
- [31] ACHTEN J, JEUKENDRUP A E. Relation between plasma lactate concentration and fat oxidation rates over a wide range of exercise intensities[J]. Int J Sports Med, 2004, 25(1): 32-37.
- [32] BINDER R K, WONISCH M, CORRA U, et al. Methodological approach to the first and second lactate threshold in incremental cardiopulmonary exercise testing[J]. Eur J Cardiovasc Prev Rehabil, 2008, 15(6): 726-734.

- [31] CHÁVEZ-GUEVARA I A, URQUIDEZ-ROMERO R, PÉREZ-LEÓN J A, et al. Chronic effect of FATmax training on body weight, fat mass, and cardiorespiratory fitness in obese subjects: a Meta-analysis of randomized clinical trials[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2020, 17 (21): 7888.
- [32] KANTOROWICZ M, SZYMURA J, SZYGULA Z, et al. Nordic walking at maximal fat oxidation intensity decreases circulating asprosin and visceral obesity in women with metabolic disorders[J]. *Front Physiol*, 2021, 12: 726783.
- [33] TAN S, WANG J, CAO L, et al. Positive effect of exercise training at maximal fat oxidation intensity on body composition and lipid metabolism in overweight middle-aged women[J]. *Clin Physiol Funct Imaging*, 2016, 36 (3): 225-230.
- [34] JIANG Y, TAN S, WANG Z, et al. Aerobic exercise training at maximal fat oxidation intensity improves body composition, glycemic control, and physical capacity in older people with type 2 diabetes[J]. *J Exerc Sci Fit*, 2020, 18(1): 7-13.
- [35] TAN S, DU P, ZHAO W, et al. Exercise training at maximal fat oxidation intensity for older women with type 2 diabetes[J]. *Int J Sports Med*, 2018, 39(5): 374-381.
- [36] WANG J, TAN S, CAO L. Exercise training at the maximal fat oxidation intensity improved health-related physical fitness in overweight middle-aged women[J]. *J Exerc Sci Fit*, 2015, 13(2): 111-116.
- [37] ÖZDEMİR Ç, ÖZGÜNEN K, GÜNAŞTI Ö, et al. Changes in substrate utilization rates during 40 min of walking within the FATmax range[J]. *Physiol Int*, 2019, 106 (3): 294-304.
- [38] GUIO DE PRADA V, ORTEGA J F, RAMIREZ-JIMENEZ M, et al. Training intensity relative to ventilatory thresholds determines cardiorespiratory fitness improvements in sedentary adults with obesity[J]. *Eur J Sport Sci*, 2019, 19 (4): 549-556.
- [39] MACINNIS M J, GIBALA M J. Physiological adaptations to interval training and the role of exercise intensity[J]. *J Physiol*, 2017, 595(9): 2915-2930.
- [40] WEATHERWAX R M, RAMOS J S, HARRIS N K, et al. Changes in metabolic syndrome severity following individualized versus standardized exercise prescription: a feasibility study[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2018, 15(11): 2594.
- [41] KIRTON M J, BURNLEY M T, RAMOS J S, et al. The effects of standardised versus individualised aerobic exercise prescription on fitness-fatness index in sedentary adults: a randomised controlled trial[J]. *J Sports Sci Med*, 2022, 21(3): 347-355.
- [42] 王晓东, 谢友红, 孙兴国, 等. 个体化强度运动康复治疗代谢综合征的疗效分析[J]. *中国运动医学杂志*, 2021, 40(3): 181-185.
- WANG X D, XIE Y H, SUN X G, et al. Effects of individualized intensity exercise rehabilitation on patients with metabolic syndrome[J]. *Chin J Sports Med*, 2021, 40 (3): 181-185.
- [43] 李莉, 鲍燕. 基于心肺运动试验的个体化运动方案对代谢综合征患者心肺功能指标影响分析[J]. *实验与检验医学*, 2022, 40(2): 214-218.
- LI L, BAO Y. Analysis of the effects of individualized exercise program based on cardiopulmonary exercise test on cardiopulmonary function indexes in patients with metabolic syndrome[J]. *Exp Lab Med*, 2022, 40(2): 214-218.
- [44] FARAH B Q, RITTI-DIAS R M, CUCATO G G, et al. Clinical predictors of ventilatory threshold achievement in patients with claudication[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2015, 47(3): 493-497.
- [45] ITO S. High-intensity interval training for health benefits and care of cardiac diseases-the key to an efficient exercise protocol[J]. *World J Cardiol*, 2019, 11(7): 171-188.
- [46] GAO J, PAN X, LI G, et al. Physical exercise protects against endothelial dysfunction in cardiovascular and metabolic diseases[J]. *J Cardiovasc Transl Res*, 2022, 15 (3): 604-620.
- [47] YUNG L M, LAHER I, YAO X, et al. Exercise, vascular wall and cardiovascular diseases: an update (part 2)[J]. *Sports Med*, 2009, 39(1): 45-63.
- [48] IRVING B A, DAVIS C K, BROCK D W, et al. Effect of exercise training intensity on abdominal visceral fat and body composition[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2008, 40 (11): 1863-1872.
- [49] LIMA L C, ASSIS G V, HIYANE W, et al. Hypotensive effects of exercise performed around anaerobic threshold in type 2 diabetic patients[J]. *Diabetes Res Clin Pract*, 2008, 81(2): 216-222.
- (此文编辑 许雪梅)