

运动对代谢性疾病静息代谢率影响的研究进展

秦煜玲¹, 朱琳², 陈泽恺², 程国栋¹

(1.广州体育学院 研究生院, 广东 广州 510500; 2.广州体育学院 运动与健康学院, 广东 广州 510500)

摘要: **目的** 基于过去 20 年全球代谢性疾病患病率逐年上升背景下, 本综述对代谢性疾病的静息代谢率(RMR)特点进行梳理, 并重点论述运动改善 RMR 的潜在途径, 以期对代谢性疾病的管理和治疗提供新的思路。**方法** 通过文献资料法, 系统检索并整理了肥胖、高血压、糖尿病、代谢综合征与运动、静息代谢率等关键词的研究, 总结了上述疾病的 RMR 特征与运动对 RMR 的影响及相关途径。**结果与结论** RMR 在代谢性疾病管理中具有重要的价值, 对于预测体重变化与代谢水平有一定作用。急性运动可通过提高肌肉修复活动、交感神经兴奋性、运动后过量氧耗途径改变 RMR; 规律运动可通过改变身体成分、激素水平、骨骼肌代谢等途径影响 RMR。对于代谢性疾病, 未来需要更加重视时间管理在运动中的作用, 例如不同时间段与持续时间运动对 RMR 的影响, 有助于更精准制定运动处方。

关键词: 静息代谢率; 运动; 肥胖; 高血压; 2 型糖尿病; 代谢综合征

中图分类号: G804.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-983X(2024)05-0097-05

DOI: 10.20185/j.cnki.1003-983X.2024.05.017

Research Progress on Effect of Exercise on Resting Metabolic Rate in Metabolic Diseases

QIN Yuling¹, ZHU Lin², CHEN Zekai², CHENG Guodong¹

(1.Graduate School, Guangzhou Sport University, Guangzhou Guangdong, 510500; 2.School of Sport & Health, Guangzhou Sport University, Guangzhou Guangdong, 510500)

Abstract: **Objective** Based on the background of the increasing prevalence of metabolic diseases globally over the past 20 years, this review summarizes the characteristics of resting metabolic rate (RMR) in metabolic diseases and focuses on discussing the potential pathways of exercise to improve RMR, aiming to provide new ideas for the management and treatment of metabolic diseases. **Methods** Through literature review, this study systematically searched and collated research on obesity, hypertension, diabetes, metabolic syndrome, exercise, and resting metabolic rate, summarizing the RMR characteristics of these diseases, the impact of exercise on RMR, and related pathways. **Results and Conclusion** RMR plays an important role in managing metabolic diseases and has a certain role in predicting weight changes and metabolic levels. Acute exercise can change RMR through increasing muscle repair activities, sympathetic nerve excitability, and post-exercise oxygen consumption; regular exercise can affect RMR by changing body composition, hormone levels, and skeletal muscle metabolism. For metabolic diseases, more attention should be paid to the role of time management in exercise in the future, such as the impact of different periods and durations of exercise on RMR, which will help to formulate exercise prescriptions.

Keywords: resting metabolic rate; exercise; obesity; hypertension; type 2 diabetes; metabolic syndrome

目前世界近三分之一的人口被归类为超重或肥胖^[1]。肥胖是一种能量摄入超过消耗的能量失衡状态, 是高血压、2 型糖

尿病(type 2 diabetes mellitus, T2DM)、代谢综合征(metabolic syndrome, MetS)等代谢性疾病发病的重要危险因素。在过去 20 年里, 全球代谢性疾病患病率逐年上升, 随之而来的肥胖相关死亡率趋势增加^[2]。研究表明体重减轻与改善肥胖及其相关代谢性疾病的患病率和严重程度有关。目前体力活动指南建议每周至少参加 150 min 的中等强度或 75 min 的高强度运动可有降低心血管代谢风险与创造负能量平衡的作用^[3]。

静息能量消耗(resting energy expenditure, REE)是指机体禁食 2 h 以上, 在合适温度保持清醒状态下平卧 30 min 后测得的能量消耗, 对总能耗贡献最大, 约占 60%~70%。REE 如按一天计算, 则为静息代谢率(rest metabolism rate, RMR), 体重、

收稿日期: 2024-02-20

基金项目: 国家社科基金重点项目(23ATY007)。

第一作者简介: 秦煜玲(1998~), 女, 江苏南通人, 在读硕士, 研究方向: 运动与健康促进。

通讯作者简介: 朱琳(1975~), 女, 黑龙江佳木斯人, 博士, 教授, 研究方向: 运动健康促进、慢病运动疗法、运动生理学机能评定, E-mail: 11251@gzsports.edu.cn。

年龄、身高、性别对 RMR 的解释可达 71%^[4]。RMR 是预测未来体重发展的重要因素^[5],比基础能量代谢率(basal metabolism rate,BMR)更具有实际应用价值,低 RMR 与未来体重增加和体重恢复有关。研究发现 RMR 在肥胖、高血压、T2DM、MetS 患者中与正常人群存在一定差异^[6]。因此明确代谢性疾病患者的 RMR 特点有助于了解其发病机制及预防代谢疾病的产生。

迄今为止,关于代谢性疾病的 RMR 变化研究较多,但结果不尽一致;另外运动已被证实可改善正常人群的 RMR^[7],但对于代谢疾病人群的影响目前还未有定论。所以本综述对不同代谢性疾病人群的 RMR 特征进行梳理,并重点论述运动对 RMR 的改善与作用途径,以期对代谢疾病的管理和治疗提供一定帮助。

1 代谢性疾病与静息代谢率

1.1 肥胖与静息代谢率

肥胖与 RMR 互为因果关系。多项研究认为不同 BMI 人群 RMR 不一致。不论在青年、中年、老年任何时期,虽然肥胖者 RMR 较 BMI 正常人群高,但是校正体质量 (body weight, BW)后却低于 BMI 正常人群。吴一凡等^[8]测得男性青年的 RMR 后发现,BMI 正常者的 RMR 显著低于肥胖者[(1 744.33±249.62)kcal/d vs(2 104.06±520.32)kcal/d],但 RMR 经 BW 校正 (RMR/BW) 后发现,BMI 正常者显著高于肥胖者[(24.02±2.61)kcal/kg/d vs(19.98±4.38)kcal/kg/d]。此外,顾新等^[9]发现平均年龄 50 岁中年肥胖组 RMR/BW 也明显低于 BMI 正常组。该结论在老年人群中同样适用^[10]。考虑可能与肥胖者继发脂毒性假说、解偶联蛋白线粒体水平较低以及蛋白遗传多态性等机制相关^[11]。同样,低 RMR 是导致肥胖的因素之一^[9],长期保持会出现体重增加或体重反弹风险。

1.2 高血压与静息代谢率

高血压本身对 RMR 的影响较小。服用 β -受体阻滞剂类药物是高血压患者 RMR 下降的主要因素,可使总能耗下降 4%~12%^[12]。在 Kunz 等^[13]开创性研究中肥胖与肥胖高血压患者的 RMR 存在差异,排除接受 β -受体阻滞剂治疗的高血压患者后发现,肥胖高血压组($n=43$)比单纯肥胖组($n=27$)的 RMR 高 9%。这与 Pable 等^[14]和孙菁等^[15]研究结果相似,主要原因一方面是高血压患者心肌摄氧量比血压正常者高约 1.3 ml·min⁻¹/100g(因个体心脏大小差异有所不同);另一方面由于交感神经系统(sympathetic nervous system,SNS)是神经体液控制血压的重要参与者,高血压患者 SNS 被过度激活。

RMR 是血压的重要预测因素。将 RMR 按照四分位数划分,最高四分位数组与最低四分位数组相比,高血压的患病风险 OR 值为 1.7^[16]。Snodgrann 等^[17]在调整体成分、年龄等混杂变量后,发现 RMR 与收缩压、舒张压、脉压强相关。Brock 等^[18]也发现在 108 名无症状女性进行血压和 RMR 两者关系的探究中,独立于瘦体重(fat free mass,FFM)、脂肪量(fat mass,FM)等混杂因素下,RMR 是 SBP 的显著预测因子($\beta=0.30$, $p=0.04$),对 DBP 具有趋向预测作用($\beta=0.24$, $p=0.09$)。

1.3 2 型糖尿病与静息代谢率

血糖与 RMR 密切关联,不同糖代谢状态人群会出现不同的 RMR 变化。空腹血糖水平(fasting blood glucose ,FPG)>10

mmol/L,可以决定 RMR 增加 3%~8%^[19]。这种升高是正常糖耐量向 T2DM 转变的不利结果^[20]。Ryan 等^[21]发现轻度高血糖的肥胖患者 RMR 并未增加。而 Bitz^[22]研究结果却证明 T2DM 组 RMR 相较于对照组高 6.9%。Buscemi 等^[23]与贺红艳等^[24]发现 T2DM 患者 RMR 显著高于非 T2DM 患者,推测 FPG 影响 RMR 存在一定阈值,当达到或超过阈值时糖异生是这类患者增加能量消耗的特有途径。此外,葡萄糖的无效循环、更高的 Cori 循环率也是此类患者 RMR 升高的可能机制^[25]。

血糖控制不佳的患者具有较高的 RMR,而经治疗血糖正常的患者往往具有正常的 RMR^[26]。这也解释了血糖控制不佳的 T2DM 患者后期体重的持续丢失。药物是治疗 T2DM 的常用手段,药物治疗的介入时间和剂量是 RMR 变化的重要因素。早期接受胰岛素与磺脲类降糖药治疗的 RMR 没有明显变化^[21]。而 Buscemi 等^[23]和钱秦娟等^[27]发现 T2DM 患者在胰岛素治疗后,RMR 随之下降,部分原因与蛋白质转化率下降相关。随着年龄及病情严重程度增加的双重作用下,这类患者出现 FFM 的持续丢失以及严重胰岛素抵抗,线粒体氧化能力降低 30%~40%^[28],从而导致 RMR 下降。

1.4 代谢综合征与静息代谢率

RMR 在 MetS 患者中的特征可根据代谢异常组分的数量决定。MetS 的特征是代谢异常集合,包含胰岛素抵抗、高血压、向心性肥胖、血脂异常^[29]。Soares 等^[30]招募 180 名的欧洲和南非洲样本,在调整身体成分等混杂因素的模型 2 中发现 MetS 组相较于 1~2 个代谢异常指标的 MetS-组具有更高的 RMR,组分数量的增加导致 RMR 呈阶梯式增加,其中从 0—2 个组分总体增加 824 kJ/d,比从 3—5 个组分总体增加 374 kJ/d 高出一倍多。Soares 等进一步探究发现在 MetS 所有组分中,甘油三酯(triglyceride,TG)和收缩压可独立正向预测 RMR^[31]。另外,伴有血糖异常的 MetS 患者的 RMR 比 MetS 高 6%,同样说明血糖异常是 RMR 增加的因素之一^[6]。出现上述情况的原因是血压、血糖、血脂与体重异常引起的慢性炎症会导致更多的能量消耗,相关机制与线粒体的功能障碍有关。线粒体 DNA 多态性和功能上的改变可以引起 ATP 形成和产热增加,影响 RMR,当环境改变时,MetS 风险会增加^[32]。

胰岛素抵抗是 MetS 患者 RMR 变化的重要预测因子, MetS 的发病机制与 SNS 过度活动相关。胰岛素抵抗通过 SNS 使血压升高,收缩压随稳态模型-胰岛素抵抗指数(HOMA-IR)升高而升高,舒张压与 HOMA-IR 暂时没有被发现有显著关联^[33]。此外,SNS 可调节肝脏和白色脂肪中的 TG 代谢,SNS 的过度活动会导致循环 TG 升高,随之可能会驱动棕色脂肪产热^[34]。但也有研究指出胰岛素抵抗及脂肪的过度堆积会影响机体氧化呼吸及 ATP 的产生,导致心脏、大脑等高代谢器官静息状态下的代谢活性降低,RMR 降低^[35]。在国内肥胖青少年中,RMR/BW 与胰岛素抵抗、收缩压及舒张压呈显著负相关;在调整年龄后,RMR/BW 仍然与胰岛素抵抗显著负相关^[36]。提示胰岛素抵抗机体存在代谢障碍,影响 RMR。

2 运动对静息代谢率的改善作用

身体活动不足所引起的身体成分变化是 RMR 下降的主要原因^[37]。横断面研究报道 FFM/FM 与女性 RMR 之间存在

强相关($r=0.867$, $r=0.784$)^[38], 在男性中此种关联减弱, 但同样具有显著性。因此 FFM、FM 的减少伴随 RMR 下降可能会阻碍体重减轻。研究指出长期规律运动有效增加 RMR 与饮食中的蛋白质补充或运动训练诱导骨骼肌含量增加密切相关^[39]。而急性运动可排除在控制饮食一致情况下对实验的干扰。因此有必要探讨急性运动与规律运动通过不同的作用途径对 RMR 产生的影响。

2.1 急性运动对静息代谢率的改善作用

急性运动可通过提高肌肉修复活动、SNS 兴奋性来增加 RMR。晁敏等^[40]发现 66 例中年受试者中接受一次训练后 12 h 的 RMR 在抗阻训练组比有氧高强度间歇训练有更明显增加趋势。RMR 的增加归因于一方面能量通量增加引起 SNS 兴奋性增加, 线粒体解偶联蛋白表达驱动产热^[41], 另一方面是运动引起的受损肌肉纤维降解和再合成过程产热^[42]。

急性运动可提高运动后过量氧耗(excessive post-exercise oxygen consumption, EPOC)保持机体高代谢状态从而增加 RMR。EPOC 持续时间与含量根据运动的持续时间与运动强度决定。45 min 70% VO_{2max} 强度以上的运动在 10 名男性中出现比静息水平高 190 大卡的能量消耗, 这种状态可持续 14 h^[43]。而孙杨等^[44]检测 10 名男性青年在依次进行 [50% VO_{2max} , 60 min] 中等强度持续运动(moderate intensity continuous training, MICT)与 [25%~90% VO_{2max} , 30 min] 高强度间歇运动(high-intensity interval training, HIIT)后发现 HIIT 组第 1、2 天的 RMR 显著高于运动前, 说明当运动强度 >70% VO_{2max} , 保持一定的运动持续时间, 就会产生更多 EPOC^[45], 此时 EPOC 与 FM 变化无关。该结果在女性中相似, Byren 等^[46]将 61 名女性受试者按照运动强度划分, 发现在高强度运动中 RMR 有增加趋势。

2.2 规律运动对静息代谢率的改善作用

规律运动可通过改变身体成分来影响 RMR。相比于长期规律有氧运动, 抗阻运动提高 RMR 更明显^[47], 主要原因与肌肉含量及力量提高从而出现骨骼肌代谢增加有关^[39]。对于肥胖者, 往往要增加饮食限制才能达到理想减重效果。Meta 分析^[47]显示运动联合饮食减重组与单纯饮食减重组相比, 有促进成年人 RMR 增加趋势, 饮食干预对 RMR 的负作用因运动而抵消。但是过度的丢失体重会出现相反的效果, 每周消耗 20 kcal/kg 的有氧运动比每周消耗 8 kcal/kg 的有氧运动能够产生明显下降的 RMR^[48]。Soares 等^[49]研究中也指出经过运动联合饮食减重从 MetS 恢复人群与无 MetS 相比 RMR 下降约 250 kJ/d。所以当以减肥为目的过度运动或结合限制饮食时, 大量快速丢失 FFM、FM 随之而来的 RMR 下降会减缓体重的下降, 导致减重的效果通常低于预期, 此过程是机体的自我保护机制起关键作用。这表明身体出现能量补偿, 长时间的能量限制, 机体可通过降低 RMR 来节省能量, 维持能量平衡^[50]。

规律运动调节激素水平从而改善 RMR。甲状腺激素是 RMR 的主要调节剂, 12 周耐力训练可增加瘦素敏感性, 导致下丘脑—垂体—甲状腺轴活动增加, 进而增加三碘甲腺原氨酸(T₃)的活性^[51]。当 T₃ 被激活时, 可通过提高心率、血压和肌肉中三磷酸腺苷(ATP)的产生来增加能量消耗^[50]。但有研究认为甲状腺激素没有因运动发生变化从而对 RMR 产生影响, 游离甲状腺素(FT₄)、总甲状腺素(TT₄)下降没有影响 RMR

的可能原因是 T₄ 并不能代表甲状腺激素的活性^[52]。而 T₃ 经脱碘后生成 3,5-二碘-L-甲状腺素可增加线粒体消耗速率对能量代谢和脂质代谢具有积极作用。此外, Hirsch 等^[38]的横断面研究中指出男性 RMR 与皮质醇、雌二醇存在一定正相关, 女性 RMR 与胰岛素存在一定相关。已知去甲肾上腺素也可诱导的脂肪分解, 蛋白质合成, 糖原合成从而有助于合成骨骼肌或 FFM, 运动是否调节上述激素影响 RMR 还有待探究。

规律运动还能提高骨骼肌代谢能力来增加 RMR。体力活动的缺乏导致肌肉分解与合成代谢过程中消耗的能量减少^[53], 而运动是促进骨骼肌线粒体生物合成的有效刺激, 重复规律的运动可以对线粒体含量和适应产生变化, 改善线粒体的呼吸功能^[54]。对于糖代谢异常患者, 9 个月的抗阻和有氧联合运动提高了患者骨骼肌代谢能力, 相应的峰值摄氧量与棕榈酸氧化的改善引起线粒体 DNA 反应增加^[55]。Zurlo 等^[56]在 14 名受试者中发现校正后的 RMR 与前臂静息摄氧量相关($r=0.72$), 说明运动通过改善线粒体呼吸功能从而提高骨骼肌代谢。骨骼肌代谢能力的提升还体现在脂肪酸氧化增加, 12 周的耐力训练出现游离脂肪酸(free fatty acid, FFA)的显著增加(0.37 ± 0.03 mmol/L 上升至 0.48 ± 0.04 mmol/L, $p<0.001$)有助于保护 RMR 受季节影响而变小^[52]。运动量是影响线粒体含量变化的关键因素, 运动强度是影响线粒体呼吸功能的决定因素, 未来需要找到运动强度和运动量对线粒体的合适作用点进而探析在代谢疾病患者中, 骨骼肌代谢能力在运动与 RMR 之间的中介作用。

规律运动改善代谢紊乱来改变 RMR。在青少年中, 体力活动与糖耐量和 RMR 呈正相关, 适度的体力活动可以促进有效的葡萄糖处置和增加 RMR 来预防 T2DM^[57]。然而在 Jennings 等^[58]和 Karstoft 等^[59]的研究中 T2DM 患者 RMR 经过调整年龄、身体成分等因素后并没有通过运动训练得到应有的提升, 该结果理论基础为运动与血糖都能提高 RMR, 但运动改善 T2DM 患者的血糖水平抵消了对 RMR 的潜在增加, 具体机制还有待探究^[58]。而在 T2DM 前期空腹血糖耐量异常人群中, 12 周的抗阻运动提高 140 cal/min^[60], 侧面说明运动易改善空腹血糖耐量异常患者的 RMR 从而预防肥胖及血糖升高。针对上述结果的不同, 需要增大样本量和细化分组等实验方案来明确。

综上, 近年来大多数研究集中在急性与规律运动改善 RMR 的证据都是基于不同运动形式与强度。此外, 急性运动对 RMR 的改善受昼夜节律的影响。研究证实, 18 名男性大学生进行 65% VO_{2max} 正式运动 40 min 后, 相较于晚上运动, 早上运动对于提高运动后次日晨间 RMR 的增高更加显著^[61]。此种结果不能单纯用线粒体含量在白天增加原理解释, 可能机制是运动改变昼夜节律与生物钟基因表达对骨骼肌底物代谢的影响。因此针对代谢性疾病还需要进一步分析择时运动对于改善代谢状态, 提高 RMR 的可能潜力。

3 讨论与展望

RMR 与代谢性疾病的发生密切相关, 对预测体重变化与代谢水平有一定作用。明确代谢性疾病能量代谢率变化特点有助于预防和治疗相关疾病。研究显示相较于药物、手术和饮食减重对机体与 RMR 带来的不同层面的负面影响^[62-64], 运动训练提高 RMR 具有经济有效的独特优势。可根据改善身体成

分、激素水平、骨骼肌代谢能力、SNS 兴奋性等途径来改善 RMR。

大量研究证据显示机体代谢反应受不同时间运动影响,择时运动对血糖代谢的影响与进餐时间有关,晚上运动对降低血压有更大益处^[65]。未来有必要重视运动的时间管理,比如不同时间段运动与不同持续时间运动对相关代谢疾病人群 RMR 的作用,为更科学的运动处方提供一定理论依据和实践价值。另外,不同代谢疾病进程变化与 RMR 变化之间关联和机制还需要进一步探索。

参考文献:

- [1] CHOOI Y C, DING C, MAGKOS F J M. The epidemiology of obesity[J]. *Metabolism*, 2019, 92:6–10.
- [2] CHEW N W S, NG C H, TAN D J H, et al. The global burden of metabolic disease: Data from 2000 to 2019 [J]. *Cell Metab*, 2023, 35(3): 414–428.
- [3] SWIFT D L, MCGEE J E, EARNEST C P, et al. The Effects of Exercise and Physical Activity on Weight Loss and Maintenance [J]. *Prog Cardiovasc Dis*, 2018, 61(2): 206–213.
- [4] SOARES M J, MULLER M J. Resting energy expenditure and body composition: critical aspects for clinical nutrition[J]. *Eur J Clin Nutr*, 2018, 72(9): 1208–1214.
- [5] SIEDLER M R, DE SOUZA M J, ALBRACHT-SCHULTE K, et al. The Influence of Energy Balance and Availability on Resting Metabolic Rate: Implications for Assessment and Future Research Directions[J]. *Sports Med*, 2023, 53(8): 1507–1526.
- [6] BUSCEMI S, VERGA S, CAIMI G, et al. A low resting metabolic rate is associated with metabolic syndrome[J]. *Clin Nutr*, 2007, 26(6):806–809.
- [7] MACKENZIE-SHALDERS K, KELLY J T, SO D, et al. The effect of exercise interventions on resting metabolic rate: A systematic review and meta-analysis[J]. *J Sports Sci*, 2020, 38(14): 1635–1649.
- [8] 吴一凡, 玉应香, 谢岚, 等. 不同体重指数青年男性的静息能量消耗特点及预测方程评价[J/OL]. *北京大学学报(医学版)*, 1–12 [2024-03-04]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4691.R.20240112.1250.008.html>.
- [9] 顾新, 李京平, 陈刚, 等. 对肥胖者静息代谢率的研究[J]. *中国康复医学杂志*, 2005(3):200–202.
- [10] 王欢, 江崇民, 尚文元. 中老年肥胖男性身体活动水平与能量消耗特征[J]. *体育科学*, 2011, 31(11):21–26.
- [11] D'ADAMO M, PEREGO L, CARDELLINI M, et al. The -866A/A genotype in the promoter of the human uncoupling protein 2 gene is associated with insulin resistance and increased risk of type 2 diabetes[J]. *Diabetes*, 2004, 53(7):1905–1910.
- [12] SHARMA A M, PISCHON T, HARDT S, et al. Hypothesis: Beta-adrenergic receptor blockers and weight gain: A systematic analysis [J]. *Hypertension*, 2001, 37(2):250–254.
- [13] KUNZ I, SCHORR U, KLAUS S, et al. Resting metabolic rate and substrate use in obesity hypertension[J]. *Hypertension*, 2000, 36(1): 26–32.
- [14] PEDRIANES-MARTIN P B, PEREZ-VALERA M, MORALES-ALAMO D, et al. Resting metabolic rate is increased in hypertensive patients with overweight or obesity: Potential mechanisms[J]. *Scand J Med Sci Sports*, 2021, 31(7):1461–1470.
- [15] 孙菁, 刘英华, 黄慧, 等. 高血压患者静息能量消耗变化及影响因素分析[J]. *解放军医学院学报*, 2016, 37(1):39–42.
- [16] LUKE A, ADEYEMO A, KRAMER H, et al. Association between blood pressure and resting energy expenditure independent of body size[J]. *Hypertension*, 2004, 43(3):555–560.
- [17] SNODGRASS J J, LEONARD W R, SORENSEN M V, et al. The influence of basal metabolic rate on blood pressure among indigenous Siberians[J]. *Am J Phys Anthropol*, 2008, 137(2):145–155.
- [18] BROCK D W, TOMPKINS C L, FISHER G, et al. Influence of resting energy expenditure on blood pressure is independent of body mass and a marker of sympathetic tone[J]. *Metabolism*, 2012, 61(2): 237–241.
- [19] GOUGEON R, LAMARCHE M, YALE J F, et al. The prediction of resting energy expenditure in type 2 diabetes mellitus is improved by factoring for glycemia[J]. *Int J Obes Relat Metab Disord*, 2002, 26(12):1547–1552.
- [20] WEYER C, BOGARDUS C, PRATLEY R E. Metabolic factors contributing to increased resting metabolic rate and decreased insulin-induced thermogenesis during the development of type 2 diabetes [J]. *Diabetes*, 1999, 48(8):1607–1614.
- [21] RYAN M, SALLÉA, GUILLOTEAU G, et al. Resting energy expenditure is not increased in mildly hyperglycaemic obese diabetic patients[J]. *Br J Nutr*, 2006, 96(5):945–948.
- [22] BITZ C, TOUBRO S, LARSEN T M, et al. Increased 24-h energy expenditure in type 2 diabetes[J]. *Diabetes Care*, 2004, 27(10):2416–2421.
- [23] BUSCEMI S, DONATELLI M, GROSSO G, et al. Resting energy expenditure in type 2 diabetic patients and the effect of insulin bolus [J]. *Diabetes Res Clin Pract*, 2014, 106(3):605–610.
- [24] 贺红艳, 孙菁, 刘英华, 等. 不同糖代谢状态人群静息能量消耗变化及影响因素分析[J]. *中华保健医学杂志*, 2019, 21(3):202–206.
- [25] ZURLO F, TREVISAN C, VITTURI N, et al. One-year caloric restriction and 12-week exercise training intervention in obese adults with type 2 diabetes: emphasis on metabolic control and resting metabolic rate[J]. *J Endocrinol Invest*, 2019, 42(12):1497–1507.
- [26] ALAWAD A O, MERGHANI T H, BALLAL M A. Resting metabolic rate in obese diabetic and obese non-diabetic subjects and its relation to glycaemic control[J]. *BMC Res Notes*, 2013, 6:382.
- [27] 钱秦娟, 董宏, 费志永, 等. 胰岛素强化治疗对 2 型糖尿病患者静息能量消耗的影响研究[J]. *中国医刊*, 2017, 52(4):101–105.
- [28] PETERSEN K F, DUFOUR S, BEFROY D, et al. Impaired mitochondrial activity in the insulin-resistant offspring of patients with type 2 diabetes[J]. *N Engl J Med*, 2004, 350(7):664–671.
- [29] AMBROSELLI D, MASCIULLI F, ROMANO E, et al. New Advances in Metabolic Syndrome, from Prevention to Treatment: The Role of Diet and Food[J]. *Nutrients*, 2023, 15(3):640.
- [30] SOARES M, ZHAO Y, CALTON E, et al. The Impact of the Metabolic Syndrome and Its Components on Resting Energy Expenditure[J]. *Metabolites*, 2022, 12(8):722.
- [31] CALTON E K, PATHAK K, SOARES M J, et al. Vitamin D status and insulin sensitivity are novel predictors of resting metabolic rate: a cross-sectional analysis in Australian adults[J]. *Eur J Nutr*, 2016, 55(6):2075–2080.
- [32] BHOPAL R S, RAFNSSON S B. Could mitochondrial efficiency ex-

- plain the susceptibility to adiposity, metabolic syndrome, diabetes and cardiovascular diseases in South Asian populations? [J]. *Int J Epidemiol*, 2009, 38(4):1072-1081.
- [33] QUESADA O, CLAGGETT B, RODRIGUEZ F, et al. Associations of Insulin Resistance With Systolic and Diastolic Blood Pressure: A Study From the HCHS/SOL[J]. *Hypertension*, 2021, 78(3):716-725.
- [34] GEERLING J J, BOON M R, KOOIJMAN S, et al. Sympathetic nervous system control of triglyceride metabolism: novel concepts derived from recent studies[J]. *J Lipid Res*, 2014, 55(2):180-189.
- [35] AMARAL N, OKONKO D O. Metabolic abnormalities of the heart in type II diabetes[J]. *Diab Vasc Dis Res*, 2015, 12(4):239-248.
- [36] 王冉, 青丽, 李荣等. 肥胖儿童青少年静息能量消耗与代谢异常的关系研究[C]//中国营养学会, 中国疾病预防控制中心营养与健康所, 农业部食品与营养发展研究所, 中科院上海生科院营养科学研究所. 中国营养学会第十三届全国营养科学大会暨全球华人营养科学家大会论文汇编. 南京医科大学附属儿童医院, 2017:2.
- [37] SPEAKMAN J R, SELMAN C. Physical activity and resting metabolic rate[J]. *Proc Nutr Soc*, 2003, 62(3):621-634.
- [38] HIRSCH K R, SMITH-RYAN A E, BLUE M N M, et al. Influence of segmental body composition and adiposity hormones on resting metabolic rate and substrate utilization in overweight and obese adults[J]. *J Endocrinol Invest*, 2017, 40(6):635-643.
- [39] STIEGLER P, CUNLIFFE A. The role of diet and exercise for the maintenance of fat-free mass and resting metabolic rate during weight loss[J]. *Sports Med*, 2006, 36(3):239-262.
- [40] 晁敏, 梁丰, 王尊, 等. 单次高强度抗阻训练与间歇有氧运动对中年人基础代谢率的影响[J]. *中国康复医学杂志*, 2015, 30(10):1021-1024.
- [41] HUNTER G R, MOELLERLING D R, CARTER S J, et al. Potential Causes of Elevated REE after High-Intensity Exercise[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2017, 49(12):2414-2421.
- [42] BURT D G, LAMB K, NICHOLAS C, et al. Effects of exercise-induced muscle damage on resting metabolic rate, sub-maximal running and post-exercise oxygen consumption[J]. *Eur J Sport Sci*, 2014, 14(4):337-344.
- [43] KNAB A M, SHANELY R A, CORBIN K D, et al. A 45-minute vigorous exercise bout increases metabolic rate for 14 hours[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2011, 43(9):1643-1648.
- [44] 孙杨, 张涛. 急性高强度间歇运动和中等强度持续运动的能量消耗及底物代谢特征对比研究[J]. *中国运动医学杂志*, 2021, 40(2):83-91.
- [45] HUNTER G R, WEINSIER R L, BAMMAN M M, et al. A role for high intensity exercise on energy balance and weight control[J]. *Int J Obes Relat Metab Disord*, 1998, 22(6):489-493.
- [46] BYRNE H K, WILMORE J H. The relationship of mode and intensity of training on resting metabolic rate in women[J]. *Int J Sport Nutr Exerc Metab*, 2001, 11(1):1-14.
- [47] 李常青. 身体活动和心肺功能对安静代谢率的影响[D]. 北京体育大学, 2017.
- [48] BROSKEY N T, MARTIN C K, BURTON J H, et al. Effect of Aerobic Exercise-induced Weight Loss on the Components of Daily Energy Expenditure[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2021, 53(10):2164-2172.
- [49] SOARES M J, CUMMINGS N K, PING-DELFOFOS W L. Energy metabolism and the metabolic syndrome: does a lower basal metabolic rate signal recovery following weight loss? [J]. *Diabetes Metab Syndr*, 2011, 5(2):98-101.
- [50] 康杰, 刘畅. 体重管理中的能量补偿: 机制和意义[J]. *体育科研*, 2023, 44(6):1-12.
- [51] SOLOMON T P, SISTRUN S N, KRISHNAN R K, et al. Exercise and diet enhance fat oxidation and reduce insulin resistance in older obese adults[J]. *J Appl Physiol* (1985), 2008, 104(5):1313-1319.
- [52] LEE M G, SEDLOCK D A, FLYNN M G, et al. Resting metabolic rate after endurance exercise training[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2009, 41(7):1444-1451.
- [53] ZUCCARELLI L, BALDASSARRE G, MAGNESA B, et al. Peripheral impairments of oxidative metabolism after a 10-day bed rest are upstream of mitochondrial respiration[J]. *J Physiol*, 2021, 599(21):4813-4829.
- [54] GRANATA C, JAMNICK N A, BISHOP D J. Training-Induced Changes in Mitochondrial Content and Respiratory Function in Human Skeletal Muscle[J]. *Sports Med*, 2018, 48(8):1809-1828.
- [55] SPARKS L M, JOHANNSEN N M, CHURCH T S, et al. Nine months of combined training improves ex vivo skeletal muscle metabolism in individuals with type 2 diabetes[J]. *J Clin Endocrinol Metab*, 2013, 98(4):1694-1702.
- [56] ZURLO F, LARSON K, BOGARDUS C, et al. Skeletal muscle metabolism is a major determinant of resting energy expenditure[J]. *J Clin Invest*, 1990, 86(5):1423-1427.
- [57] THOMAS A S, GREENE L F, ARD J D, et al. Physical activity may facilitate diabetes prevention in adolescents [J]. *Diabetes Care*, 2009, 32(1):9-13.
- [58] JENNINGS A E, ALBERGA A, SIGAL R J, et al. The effect of exercise training on resting metabolic rate in type 2 diabetes mellitus [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2009, 41(8):1558-1565.
- [59] KARSTOFT K, BRINKLØV C F, THORSEN I K, et al. Resting Metabolic Rate Does Not Change in Response to Different Types of Training in Subjects with Type 2 Diabetes [J]. *Front Endocrinol (Lausanne)*, 2017, 8:132.
- [60] 王伟钰. 健身气功八段锦锻炼对糖尿病前期糖耐量受损人群能量代谢干预效果的观察 [D]. 天津体育学院, 2020.
- [61] 兰号, 吴锴槟, 王松涛. 择时运动对不同时间类型男性大学生能量消耗的影响[C]//中国体育科学学会第十三届全国体育科学大会论文摘要集: 专题报告(运动生理与生物化学分会). 华南师范大学, 2023:2. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2023.061964.
- [62] HEINITZ S, HOLLSTEIN T, ANDO T, et al. Early adaptive thermogenesis is a determinant of weight loss after six weeks of caloric restriction in overweight subjects[J]. *Metabolism*, 2020, 110:154303. DOI: 10.1016/j.metabol.2020.154303.
- [63] LAMARCA F, MELENDEZ-ARAÚJO M S, PORTO DE TOLEDO I, et al. Relative Energy Expenditure Decreases during the First Year after Bariatric Surgery: A Systematic Review and Meta-Analysis[J]. *Obes Surg*, 2019, 29(8):2648-2659.
- [64] NUIJTEN M A H, EIJSVOGELS T M H, MONPELLIER V M, et al. The magnitude and progress of lean body mass, fat-free mass, and skeletal muscle mass loss following bariatric surgery: A systematic review and meta-analysis[J]. *Obes Rev*, 2022, 23(1):e13370. DOI: 10.1111/obr.13370.
- [65] 汤立许, 兰金艳. 择时运动对代谢综合征的健康效应研究进展[J]. *上海体育学院学报*, 2023, 47(4):12-23.