

• 科研论著 •

运动对肥胖儿童青少年脂肪氧化动力学影响研究

谢维俊^{1,2}, 朱琳³, 郑李¹, 梁曼娜¹

1. 广州体育学院研究生院, 广东 广州 510500; 2. 南京邮电大学体育部, 江苏 南京 210000;

3. 广州体育学院运动与青少年体质健康研究型重点实验室

摘要: **目的** 分析 4 周运动干预对肥胖儿童青少年运动时底物代谢变化的影响, 探讨运动引起最大脂肪氧化率变化的影响因素。**方法** 2022 年 7—8 月, 招募 45 名 10~16 岁肥胖儿童青少年进行 4 周封闭式运动, 实验前后均采用气体代谢分析仪(Cortex Meta Max 3B)测试递增负荷运动状态下的底物代谢, 使用配对样本 t 检验比较运动前后变化差异。**结果** 最终纳入 41 名肥胖儿童青少年进行统计分析, 4 周运动干预后, 递增负荷运动中 5~7km/h 的脂肪氧化率($t=3.103$ 、 4.991 、 5.671)及其供能比($t=3.614$ 、 4.621 、 5.067)均显著高于干预前($P<0.05$); 糖氧化率($t=3.599$ 、 3.397 、 2.866)及其供能比($t=3.614$ 、 4.621 、 5.067)均显著低于干预前($P<0.05$)。最大脂肪氧化率 $[(6.47\pm2.13)\text{mg}/(\text{kg}\cdot\text{min}) \text{ vs. } (5.26\pm1.40)\text{mg}/(\text{kg}\cdot\text{min}), t=3.900]$ 、最大脂肪氧化强度 $[(5.10\pm1.26)\text{METs} \text{ vs. } (4.25\pm1.04)\text{METs}, t=3.809]$ 和心率 $[(142.74\pm14.61)\text{beat}/\text{min} \text{ vs. } (133.26\pm16.89)\text{beat}/\text{min}, t=3.820]$ 均显著高于干预前($P<0.01$), 最大脂肪氧化率变化量(ΔMFO)与最大摄氧量变化量($\Delta\text{VO}_{2\text{max}}$)呈显著正相关($\beta=0.448, P<0.01$), 与体脂百分比变化量($\Delta\text{BF}\%$)呈显著负相关($\beta=-0.513, P<0.05$)。**结论** 4 周运动干预能有效提高肥胖儿童青少年脂肪氧化利用能力, 降低糖的供能。最大摄氧量和体脂百分比是最大脂肪氧化率的重要影响因素。

关键词: 肥胖症; 底物代谢; 最大脂肪氧化率; 儿童; 青少年**中图分类号:** G804.32 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-6579(2025)10-1127-05 **doi:** 10.11852/zgetbjzz2024-1118

Effect of exercise on the dynamics of fat oxidation in obese children and adolescents

XIE Weijun^{1,2}, ZHU Lin³, ZHENG Li¹, LIANG Manna¹

1. Graduate School, Guangzhou Sport University, Guangzhou, Guangdong 510500, China;

2. Athletic Department, Nanjing Post and Telecommunication University Nanjing, Jiangsu 210000, China;

3. Key Laboratory for Exercise and Adolescent Physical Health, Guangzhou Sport University

Corresponding author: ZHU Lin, E-mail: 11251@gzsport.edu.cn

Abstract: **Objective** To analyze the effects of a 4-week exercise intervention on substrate metabolism during exercise in children and adolescents with obesity, and to explore factors influencing exercise-induced changes in the maximal fat oxidation rate (MFO). **Methods** From July to August 2022, a total of 45 children and adolescents with obesity aged 10–16 years were recruited to participate in a 4-week structured exercise program. Substrate metabolism during graded exercise testing was assessed before and after the intervention using a gas metabolism analyzer (Cortex MetaMax 3B). Paired sample t -tests were employed to compare pre- and post-intervention differences. **Results** Forty-one participants were included in the final statistical analysis. After the 4-week exercise intervention, fat oxidation rates ($t=3.103$, 4.991 , 5.671) and their energy contribution ratios ($t=3.614$, 4.621 , 5.067) at speeds of 5–7km/h during graded exercise were significantly higher than those before the intervention ($P<0.05$). In contrast, carbohydrate oxidation rates ($t=3.599$, 3.397 , 2.866) and their corresponding energy contribution ratios ($t=3.614$, 4.621 , 5.067) were significantly lower ($P<0.05$). The maximal fat oxidation rate increased significantly from $(5.26\pm1.40)\text{mg}/(\text{kg}\cdot\text{min})$ to $(6.47\pm2.13)\text{mg}/(\text{kg}\cdot\text{min})$ ($t=3.900$, $P<0.01$), the intensity at MFO (in METs) increased from 4.25 ± 1.04 to 5.10 ± 1.26 ($t=3.809$, $P<0.01$), and the heart rate at MFO increased from $(133.26\pm16.89)\text{beats}/\text{min}$ to $(142.74\pm14.61)\text{beats}/\text{min}$ ($t=3.820$, $P<0.01$). ΔMFO was positively correlated with the change of maximal oxygen uptake ($\Delta\text{VO}_{2\text{max}}$) ($\beta=0.448$, $P<0.01$) and negatively correlated with the change of body fat percentage ($\Delta\text{BF}\%$) ($\beta=-0.513$, $P<0.05$). **Conclusions** A 4-week exercise intervention effectively enhances fat oxidation utilization and reduces carbohydrate-dependent energy supply in

基金项目: 国家社会科学基金重点项目(23ATY007); 广东省哲学社会科学“十四五”规划 2021 项目(GD21CTY01); 广东省普通高校重点领域专项(2022ZDZX2038)

作者简介: 谢维俊(1998—), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为运动与健康促进。

通信作者: 朱琳, E-mail: 11251@gzsport.edu.cn

children and adolescents with obesity. Maximal oxygen uptake and body fat percentage are identified as significant factors influencing changes in maximal fat oxidation rate.

Keywords: obesity; substrate metabolism; maximum fat oxidation rate; children; adolescents

21 世纪全球儿童青少年肥胖问题呈现显著上升趋势,已成为威胁公共卫生的重要挑战。数据显示,我国 7~18 岁学生肥胖检出率从 1985 年的 0.1% 急剧攀升至 2014 年的 7.3%,30 年间增长超 50 倍,年增长率为 0.10%~0.58% 之间^[1]。截至 2020 年,6 岁以下儿童肥胖率达 3.6%,6~17 岁群体则升至 7.9%。值得关注的是,儿童期肥胖具有显著的持续性特征,约 41%~80% 的肥胖儿童会延续至成年,并显著增加成年期心血管疾病及代谢综合征的发病风险^[2]。肥胖导致机体游离脂肪酸含量升高、线粒体脂肪酸转运障碍及 β 氧化能力降低,进而损害脂肪氧化^[3]。朱琳等^[4]研究发现,肥胖儿童青少年的能量代谢存在缺陷,其脂肪氧化能力要远低于正常体重的青少年。

运动作为调节脂肪代谢的重要手段,其干预效果与运动强度密切相关。研究表明,脂肪氧化率与运动强度呈倒“U”型曲线关系,当运动强度达到最大脂肪氧化强度(the exercise intensity eliciting maximal fat oxidation, FATmax),脂肪氧化效率达到峰值^[5]。以 FATmax 为靶强度的运动干预,可有效提升肥胖人群的脂质代谢能力,实现体脂率的科学调控。最大脂肪氧化率(maximum fat oxidation, MFO)作为一个可调节的参数^[6],然而,现有研究在运动干预效果方面存在争议。Venables 等^[7]在对肥胖人群进行 4 周耐力训练后发现,MFO 未出现显著变化。尽管已有研究系统分析了 MFO 的影响因素^[8],但运动干预对 MFO 的作用因素仍不明确。鉴于此,本研究旨在分析 4 周运动是否能增强肥胖儿童青少年脂肪动员能力,并探讨运动引起 MFO 变化的影响因素,以期为肥胖儿童青少年制定有效的运动代谢改善策略提供科学依据。

1 对象和方法

1.1 对象 2022 年 7—8 月,从华南地区封闭式减肥营地招募年龄为 10~17 岁的肥胖青少年 45 名,受试者需符合《学龄儿童青少年超重与肥胖标准》诊断标准^[9],排除病理性肥胖、心肺功能异常及运动受限者。研究过程中 4 人因未完成干预被剔除,排除样本与纳入样本基本特征差异无统计学意义($P > 0.05$),最终纳入 41 名肥胖儿童青少年。受试者均

签署知情同意书,研究方案获广州体育学院伦理委员会批准(2018LCLL-008)。

1.2 方法

1.2.1 体格测量 采用国民体质监测标准器材测量身高(cm)和体重(kg)。结果精确至 0.1cm 和 0.1kg。根据结果计算体质量指数(body mass index, BMI)。

1.2.2 身体成分测量 采用 Inbody370 人体成分分析仪,通过生物电阻抗法(Bioelectrical impedance analysis, BIA)测定受试者的身体成分。主要测量的指标包括体重、体脂肪量、去脂体重、骨骼肌含量等。测试规范:固定晨间空腹状态(7~8 点),统一操作培训,确保数据一致性。

1.2.3 心肺适能测试 以最大摄氧量(maximal oxygen consumption, VO_{2max})作为心肺适能的评价指标,采用 20m 折返跑(20-m shuttle run test, 20-mSRT)测试评估 VO_{2max} 。于干预前后 1~2 天早上 10:00—12:00 间或下午 3:00—5:00 点期间进行测试。由专人带跑并记录完成圈数(laps),最大摄氧量的计算公式^[10]如下:

$$VO_{2max} = 41.76799 + (0.49261 \times \text{Pacer}) - (0.00290 \times \text{Pacer}^2) - (0.61613 \times \text{BMI}) + (0.34787 \times \text{Gender} \times \text{age})$$

1.2.4 运动和饮食干预 受试者统一进行运动以及饮食干预,针对受试者具体情况,制定饮食及运动锻炼方案。运动形式以中低强度的有氧运动为主(如快走、慢跑、有氧操、娱乐性球类活动),辅以短时间高强度运动以提高心肺功能与代谢效率。运动强度通过靶心率调控,其计算公式^[11]为: $HR_{安静} + \text{心率储备}(20\% \sim 40\%)$ (心率储备 = $220 - \text{年龄}$)。运动干预周期为 4 周,每周 6d,每天运动 4h(上午和下午各 2h)。使用 Polar 表进行心率监控,实时调整每个阶段的运动强度,确保运动的安全性和有效性。饮食方案由营养师依据受试者的性别、年龄、身高和体重以肥胖儿童青少年的静息能耗为基础进行统一配餐,一天中早、中、晚三餐的能量供应比例约为 3:4:3。饮食配比方面,营养师严格控制糖类、脂肪和蛋白质的摄入量分别占总能量比例的 55%~65%、20%~35% 和 10%~15%^[12]。

1.2.5 FATmax 实验 采用德国产的 Cortex Meta Max 3B 便携式气体分析仪进行 FATmax 运动测试。受试者在跑台上以坡度为 0 的状态进行 3km/h (散步)、4km/h (健步)、5km/h (快走)、6km/h (慢跑)、7km/h (快跑) 进行 FATmax 测试^[13]。每级负荷定为 5min, 中间无间歇^[14]。测试期间 1 名测试人员负责用自觉疲劳量表评定受试者的主观疲劳程度; 同时, 受试者佩戴心率表(芬兰极地 H7)实时监测心率。另一名则负责记录运动期间 VCO₂ 和 VO₂ 数据。测试终止标准为受试者满足力竭, 主观疲劳感觉>17、实时心率达到 90%HR_{max} (HR_{max} = 208 - 0.7×年龄) 或 RER>1.0 中的任何一项。

每级负荷以 1~3min 为适应期, 选取每级运动后 2min 计算平均值 VCO₂ 和 VO₂。每级负荷强度的底物代谢氧化率及供能比例根据 Frayn 公式^[15] 计算, 通过三项式拟合曲线方法确定引起 FATmax 的运动强度和最大脂肪氧化率^[5]。

1.3 统计学方法 采用 SPSS 26.0 软件对数据进行统计分析。先采用 Shapiro-Wilk 检验方法对连续变量进行正态性检验, 符合正态分布的数据表示为 $\bar{x} \pm s$, 不符合正态分布的数据以 $[M(P_{25}, P_{75})]$ 表示。配对样本 *t* 检验或 Wilcoxon 检验比较干预前后各指标的差异。多元线性回归分析探究身体成分、心肺适能与最大脂肪氧化率的关系。使用 GraphPad Prism 9 绘制运动过程中底物代谢的变化折线图。P<0.05 为差异具有统计学意义。

2 结 果

2.1 干预前后身体成分及最大摄氧量的变化结果 4 周运动干预后, 41 名肥胖儿童青少年的体重、BMI、体脂肪量、体脂百分比、去脂体重以及骨骼肌量等指标与干预前相比均显著下降, 差异有统计学意义(P<0.01)。此外, 单位体重的去脂体重和最大摄氧量较干预前则显著上升(P<0.01)。见表 1。

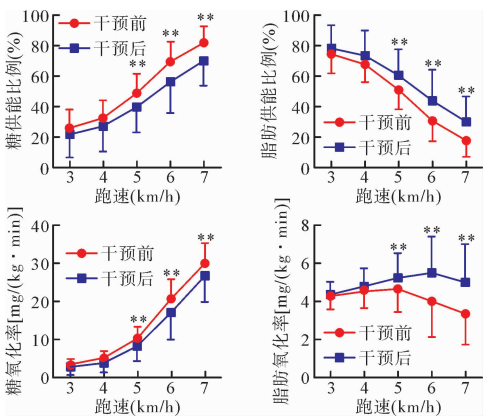
表 1 干预前后身体成分及最大摄氧量的变化比较 ($\bar{x} \pm s$)

Tab. 1 Comparison of changes in body composition and maximum oxygen uptake before and after the intervention ($\bar{x} \pm s$)

指标	干预前	干预后	<i>t</i> 值	<i>P</i> 值
体重(kg)	80.96±13.89	74.07±12.61	20.155	<0.001
BMI(kg/m ²)	31.07±3.76	28.42±3.43	22.533	<0.001
体脂肪量(kg)	32.48±7.91	27.33±7.26	17.253	<0.001
体脂百分比(%)	39.89±6.08	36.72±6.10	11.621	<0.001
去脂体重(kg)	48.48±9.24	46.75±8.45	7.304	<0.001
骨骼肌量(kg)	26.81±5.53	25.68±5.06	7.922	<0.001
去脂体重/体重(kg)	0.60±0.06	0.63±0.06	11.793	<0.001
最大摄氧量[ml/(kg·min)]	40.38±7.20	44.10±6.92	16.656	<0.001

2.2 干预前后肥胖儿童青少年底物代谢的变化结果 经过 4 周运动干预后, 无论是运动干预前或干预后, 随着运动负荷的递增, 糖氧化率在不断增加, 脂肪氧化率呈先上升, 后下降的倒“U”形曲线, 在跑速为 5~7km/h 时, 运动干预后的脂肪氧化率及其供能比例则要显著高于干预前(P<0.01), 而且从图 1 可见干预后的脂肪氧化率拐点出现延后, 在跑速为 6km/h 时才出现下降; 相反, 运动干预后的糖氧化率和糖供能比均显著低于干预前(P<0.05)。见表 2。

2.3 干预前后肥胖儿童青少年最大脂肪氧化率及对应指标变化结果 经过三项式拟合曲线分析得出运动干预前后的 MFO 其对应指标, 4 周运动干预后, 肥胖儿童青少年的 MFO、FATmax 和 FATmax-HR 较运动干预前均有显著提高, 差异有统计学意义(P<0.01)。见表 3。



注 ** P<0.01。

图 1 运动干预前后在递增负荷运动下底物代谢的变化折线图

Fig. 1 Line plot of changes in substrate metabolism under increasing loading exercise before and after exercise intervention

表 2 肥胖儿童青少年干预前后底物代谢的变化比较 ($\bar{x} \pm s$)

Tab. 2 Comparison of changes in substrate metabolism before and after the intervention in obese children and adolescents ($\bar{x} \pm s$)

测试项目	脂肪氧化率[mg/(kg·min)]				脂肪供能比(%)			
	干预前	干预后	<i>t</i> 值	<i>P</i> 值	干预前	干预后	<i>t</i> 值	<i>P</i> 值
3km/h	4.26±0.78	4.32±0.77	-0.511	0.612	74.27±12.28	78.23±15.10	-1.648	0.107
4km/h	4.70±0.93	4.87±0.97	-0.901	0.373	67.62±11.75	73.04±16.43	-2.011	0.051
5km/h	4.74±1.17	5.45±1.41**	-3.103	0.004	51.03±12.69	60.29±17.06**	-3.614	<0.001
6km/h	4.04±1.68	5.75±2.48**	-4.991	<0.001	30.76±13.38	43.90±20.39**	-4.621	<0.001
7km/h	2.93±1.75	4.97±2.51**	-5.671	<0.001	18.10±10.74	29.99±16.29**	-5.067	<0.001

测试项目	糖氧化率[mg/(kg·min)]				糖供能比(%)			
	干预前	干预后	<i>t</i> 值	<i>P</i> 值	干预前	干预后	<i>t</i> 值	<i>P</i> 值
3km/h	3.33±1.59	2.86±2.22	1.337	0.189	25.73±12.28	21.77±15.10	1.648	0.107
4km/h	5.08±1.89	4.26±2.88	1.788	0.081	32.37±11.75	26.97±16.43	2.011	0.051
5km/h	10.35±3.03	8.33±3.96**	3.599	<0.001	48.97±12.68	39.70±17.06**	3.614	<0.001
6km/h	20.81±5.06	17.24±7.21**	3.397	0.002	69.24±13.38	56.10±20.39**	4.621	<0.001
7km/h	30.09±5.38	26.80±7.03**	2.866	0.007	81.90±10.75	70.01±16.29**	5.067	<0.001

注:与干预前相比,* $P<0.05$,** $P<0.001$ 。

表 3 肥胖儿童青少年干预前后最大脂肪氧化率及对应指标变化比较 ($\bar{x} \pm s$)

Tab. 4 Comparison of maximum fat oxidation rate and corresponding indicators before and after intervention in obese children and adolescents ($\bar{x} \pm s$)

项目	干预前	干预后	<i>t</i> 值	<i>P</i> 值
MFO[mg/(kg·min)]	5.26±1.40	6.47±2.13	3.900	<0.001
FATmax(METs)	4.25±1.04	5.10±1.26	3.809	<0.001
FATmax-HR(次/min)	133.26±16.89	142.74±14.61	3.820	<0.001

2.4 干预前后肥胖儿童青少年最大脂肪氧化率的影响因素 使用最大脂肪氧化率变化量(Δ MFO)作为因变量,以性别、最大摄氧量变化量(Δ VO_{2max})、体脂百分比变化量(Δ BF%)和去脂体重变化量(Δ FFM)作为自变量进行多元线性回归分析。 Δ MFO 与 Δ VO_{2max} 呈显著正相关($\beta=0.448, P<0.01$),与 Δ BF% 呈显著负相关($\beta=-0.513, P<0.05$),但与性别和 Δ FFM 无显著相关性($P>0.05$)。所有自变量的 VIF 值均小于 10,表明不存在多重共线性问题。整体模型显著($F=4.361, P<0.05$),解释了 MFO 变化的 32.6% ($R^2=0.326$)。见图 2、表 4。

表 4 Δ MFO 的多元线性回归分析

Tab. 4 Multiple linear regression analysis of the Δ MFO

自变量	β 值	<i>t</i> 值	<i>P</i> 值	VIF	<i>F</i> 值	R^2
性别	-0.017	-0.117	0.908	1.188	4.361	0.326
Δ 去脂体重	-0.357	-1.523	0.137	2.942		
Δ 最大摄氧量	0.448	2.826	<0.01	1.342		
Δ 体脂百分比	-0.513	-2.276	0.029	2.714		

3 讨 论

3.1 运动对递增负荷运动过程中底物代谢的影响 本研究揭示了运动强度对机体底物代谢模式的调控机制。随着运动强度递增,总能量需求呈线性上升趋势,而糖脂供能比例呈现反向动态变化特征。

依据“葡萄糖-脂肪酸循环”理论,即优先利用某一底物会通过抑制代谢关键酶活性等机制,显著抑制另一底物的氧化过程^[16]。另外,从图 1 和表 2 数据对比可见,运动干预后,在相同运动跑速下,受试者的脂肪氧化率显著高于干预前;此外,随着运动强度的变化干预后的脂肪氧化率及其供能比例的变化幅度

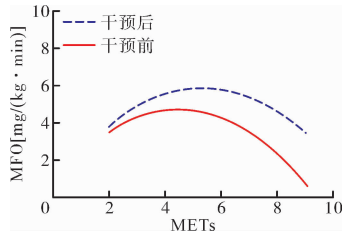


图 2 干预前后总体肥胖儿童青少年最大脂肪氧化率及对应强度的拟合曲线
Fig. 2 Fitting curves of maximum fat oxidation rate and corresponding intensity in overall obese children and adolescents before and after intervention

明显大于干预前,脂肪氧化率的拐点出现延后,而糖氧化率及其供能比例显著降低。这种差异与训练后脂肪动员和氧化能力的增强有关。研究表明,训练状态是影响机体脂肪氧化的重要因素之一,规律的运动能够显著提升肌肉中脂肪的分解及氧化供能能力^[17]。张勇等^[18]研究也证实,接受过训练的个体在相同运动强度下的脂肪氧化能力优于无训练者。对于运动改善脂肪代谢能力的潜在机制可能包括以下几点:1)运动使得骨骼肌发生适应性变化,增加了骨骼肌线粒体的体积和数量,这些变化共同促进了运动过程中脂肪代谢能力^[19];2)运动通过改善机体皮下脂肪组织的血液循环,增强了脂肪酸的运输能力^[20];3)运动提高了脂质结合蛋白的表达以及脂肪分解酶的活性^[21];4)运动提高了肾上腺素受体敏感度^[22],并增强心钠肽活性^[23],从而促进脂解过程。

3.2 运动对最大脂肪氧化率及其对应指标的影响 本研究通过 4 周运动干预发现,受试者的 MFO、FATmax 以及 FATmax-HR 分别增加了 1.21 mg/(kg·min)、0.85METs 和 9.48bpm,这些变化提示,4 周的运动使机体对运动负荷产生适应性变化,减少了乳酸的生成,使乳酸生成的临界点(无氧阈)提高,减弱了乳酸对脂肪酸代谢的抑制作用,从而增强了脂肪分解能力,延长了脂肪供能时间^[24]。这与过往研究结果相一致,规律运动能够使人在运动中消耗更多的脂肪^[25]。回归分析显示,MFO 与体脂百分比呈负相关,与心肺适能呈正相关。这与 Haufe^[26]等研究结果一致,但与 Ilaria^[27]的结论(体脂百分比与 MFO 之间并无相关性)存在差异,可能与样本选择及测试方法有关。综上研究分析可知,通过运动提升心肺适能确实能够有效提高肥胖人群的 MFO,这一点已得到广泛的认可,然而,对于肥胖程度是否直接影响 MFO,研究结果尚不一致。是否因肥胖而导致心肺能力下降进而影响 MFO,还需进一步研究来证实。近年来,研究者们将 FATmax 运动作为改善代谢性疾病的手段^[28]。然而,多数研究并未对 FATmax 运动方案进行调整。本研究发现,仅 4 周的运动即可显著改变 MFO 和 FATmax 水平。提示在 4 周运动干预后,应对运动方案进行定期评估和调整,以确保干预效果的最大化。

本研究存在以下优势和局限性。研究采用封闭式运动干预方案,通过间接测热法量化发现:心肺适能提升与体脂率下降是改善脂肪氧化能力的核心因素,为构建儿童青少年个性化运动处方提供了关键参数。但本实验干预周期仅为 4 周,时间较短,尚需进一步研究验证延长干预周期是否会得出一致结

果,而研究对象的特殊性,未能设立对照组,这可能在一定程度上影响结果的解释程度。未来研究可以探讨不同运动强度、周期与形式对脂肪代谢的具体影响,分析不同运动剂量对最大脂肪氧化能力的优化作用,以制定更加精准和高效的运动处方。

参考文献

- [1] 中国居民营养与慢性病状况报告(2020 年)[J]. 营养学报, 2020, 42(6): 521.
Report on Nutrition and Chronic Diseases of Chinese Residents (2020)[J]. Journal of Nutrition, 2020, 42(6): 521.
- [2] Drozd D, Alvarez-Pitti J, Wójcik M, et al. Obesity and cardiometabolic risk factors: From childhood to adulthood[J]. Nutrients, 2021, 13(11): 4176.
- [3] Fritzen AM, Lundsgaard AM, Kiens B. Tuning fatty acid oxidation in skeletal muscle with dietary fat and exercise[J]. Nat Rev Endocrinol, 2020, 16(12): 683-696.
- [4] 朱琳, 陈佩杰, 庄洁, 等. 12~14 岁正常和肥胖男性青少年运动能耗的比较研究[J]. 中国运动医学杂志, 2011, 30(2): 166-181.
Zhu L, Chen PJ, Zhuang Jie, et al. Comparative study of exercise energy consumption in normal and obese male adolescents aged 12 to 14 years[J]. Chinese Journal of Sports Medicine, 2011, 30(2): 166-181. (in Chinese)
- [5] Achten J, Gleeson M, Jeukendrup A E. Determination of the exercise intensity that elicits maximal fat oxidation[J]. Med Sci Sports Exerc, 2002, 34(1): 92-97.
- [6] Yin M, Chen Z, Nassis G P, et al. Chronic high-intensity interval training and moderate-intensity continuous training are both effective in increasing maximum fat oxidation during exercise in overweight and obese adults: A meta-analysis[J]. J Exerc Sci Fit, 2023, 21(4): 354-365.
- [7] Venables MC, Jeukendrup AE. Endurance training and obesity: Effect on substrate metabolism and insulin sensitivity[J]. Med Sci Sports Exerc, 2008, 40(3): 495-502.
- [8] Purdom T, Kravitz L, Dokladny K, et al. Understanding the factors that effect maximal fat oxidation[J]. J Int Soc Sports Nutr, 2018, 15(1): 3.
- [9] 国际卫生和计划生育委员会. 学龄儿童青少年超重与肥胖筛查: WS/T 586—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
National Health and Family Planning Commission. Screening for overweight and obesity in school-aged children: WS/T 586—2018[S]. Beijing: China Standards Press, 2018.
- [10] Léger LA, Mercier D, Gadoury C, et al. The multistage 20 metre shuttle run test for aerobic fitness[J]. J Sports Sci, 1988, 6(2): 93-101.
- [11] 秦煜玲, 朱琳, 程国栋. 减重率与肥胖青少年静息代谢率变化量的剂量-效应关系研究[J]. 中国儿童保健杂志, 2025, 32(2): 155-159.
Qin YL, Zhu L, Cheng GD. Dose-effect relationship between the weight loss rate and the amount of change in resting metabolic rate in obese adolescents[J]. Chin J Child Health Care, 2025, 32(2): 155-159. (in Chinese)

(下转第 1137 页)

- adults and children[J]. *J Clin Med*, 2020,9(11).
- [12] Manuel S, Luis G. Nutrition, obesity and asthma inception in children. The role of lung function[J]. *Nutrients*, 2021, 13(11): 3837.
- [13] Yang C, Li S, Wu L, et al. Prevalence of prediabetes by the fasting plasma glucose and HbA1c screening criteria among the children and adolescents of shenzhen, china[J]. *Front Endocrinol*, 2024,15: 1301921.
- [14] Hovestadt I, Kiess W, Lewien C, et al. Hba1c percentiles and the association betweenbmi, age, gender, puberty, and HbA1c levels in healthy german children and adolescents [J]. *Pediatr Diabetes*, 2022,23(2): 194-202.
- [15] Ghaddar R, Hudson EA, Jeans MR, et al. Ethnicity/race, parent educational attainment, and obesity associated with prediabetes in children [J]. *Nutr Diabetes*, 2023, 13(1): 15.
- [16] Al-Mansoori L, Al-Jaber H, Prince MS, et al. Role of inflammatory cytokines, growth factors and adipokines in adipogenesis and insulin resistance[J]. *Inflammation*, 2022, 45(1): 31-44.
- [17] Sharma A, Sharma A, Chauhan R. Spirometric lung functions in type 2 diabetes mellitus; A hospital-based study [J]. *Cureus*,2023,15(5): e38919.
- [18] Mohamad IL, Saad K, Abdel-Azeem A, et al. Evaluation of pulmonary function changes in children with type 1 diabetes mellitus in upper Egypt[J]. *Ther Adv Endocrinol Metab*,2015,6(3): 87-91.
- [19] Mameli C, Ghezzi M, Mari A, et al. The diabetic lung: Insights into pulmonary changes in children and adolescents with type 1 diabetes[J]. *Metabolites*, 2021,11(2): 69.
- [20] Zhang RH, Zhou JB, Cai YH, et al. Non-linear association between diabetes mellitus and pulmonary function; A population-based study[J]. *Respir Res*, 2020,21(1): 292.
- 收稿日期:2024-10-10 修回日期:2024-12-06 本文编辑:王悦

(上接第 1131 页)

- [12] 佟永清, 蔡宁. 运动配合营养干预对青少年肥胖患者体质质量指数及血糖血脂的影响[J]. *中国学校卫生*, 2019, 40(7): 1046-1049.
- Tong YQ, Cai N. Effect of exercise with nutrition intervention on body mass index and blood glucose and lipids in adolescent obese patients[J]. *Chin J Sch Health*, 2019,40(7): 1046-1049. (in Chinese)
- [13] Youxiang C, Lin Z, Zekai C, et al. Resting and exercise metabolic characteristics in obese children with insulin resistance[J]. *Front Physiol*, 2022, 13: 1049560.
- [14] Chrzanowski-Smith OJ, Edinburgh RM, Betts J A, et al. Evaluation of a graded exercise test to determine peak fat oxidation in individuals with low cardiorespiratory fitness [J]. *Appl Physiol Nutr Metab*, 2018, 43(12): 1288-1297.
- [15] Frayn K N. Calculation of substrate oxidation rates in vivo from gaseous exchange[J]. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol*, 1983, 55(2): 628-634.
- [16] Randle PJ, Garland PB, Hales CN, et al. The glucose fatty-acid cycle. Its role in insulin sensitivity and the metabolic disturbances of diabetes mellitus [J]. *Lancet*, 1963, 1(7285): 785-789.
- [17] Bordenave S, Flavier S, Fédou C, et al. Exercise calorimetry in sedentary patients; Procedures based on short 3 min steps underestimate carbohydrate oxidation and overestimate lipid oxidation [J]. *Diabetes Metab*, 2007, 33(5): 379-384.
- [18] 张勇, 李之俊. 训练者和无训练者脂肪氧化动力学与最大脂肪氧化强度研究[J]. *体育科学*, 2013, 33(2): 61-68.
- Zhang Y, Li ZJ. Fat oxidation kinetics and maximum fat oxidation intensity in trainers and no trainers[J]. *Sports Science*, 2013,33(2): 61-68. (in Chinese)
- [19] Egan B, Zierath J R. Exercise metabolism and the molecular regulation of skeletal muscle adaptation [J]. *Cell Metab*, 2013, 17(2): 162-184.
- [20] Perez-matute P, Neville MJ, Tan GD, et al. Transcriptional control of human adipose tissue blood flow[J]. *Obesity*, 2009, 17(4): 681-688.
- [21] Perez-Matute P, Neville MJ, Tan GD, et al. Transcriptional control of human adipose tissue blood flow[J]. *Obesity*, 2009, 17(4): 681-688.
- [22] Stich V, De Glisezinski I, Galitzky J, et al. Endurance training increases the beta-adrenergic lipolytic response in subcutaneous adipose tissue in obese subjects[J]. *Int J Obes Relat Metab Disord*, 1999, 23(4): 374-381.
- [23] Moro C, Pillard F, De Glisezinski I, et al. Training enhances ANP lipid-mobilizing action in adipose tissue of overweight men[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2005, 37(7): 1126-1132.
- [24] 孔凡明, 朱苗苗, 米靖, 等. 运动与脂肪氧化动力学特征的应用启示 [J]. *中国组织工程研究*, 2022, 26(29): 4709-4715.
- Kong FM, Zhu MM, Mi J, et al. Implications for the kinetic characteristics of exercise and fat oxidation[J]. *China Tissue Engineering Research*, 2022,26(29): 4709-4715. (in Chinese)
- [25] 谭思洁, 郭振, 曹立全, 等. 9~10 岁肥胖男童最大脂肪氧化强度运动减重处方的研究[J]. *体育科学*, 2016, 36(9): 36-53.
- Tan SJ, Guo Z, Cao LQ, et al. Study on maximum fat oxidation intensity exercise in obese boys aged 9 to 10 years [J]. *Sports Sci*, 2016,36(9): 36-53. (in Chinese)
- [26] Haufe S, Engeli S, Budziarek P, et al. Determinants of exercise-induced fat oxidation in obese women and men[J]. *Horm Metab Res*, 2010, 42(3): 215-221.
- [27] Croci I, Hickman IJ, Wood RE, et al. Fat oxidation over a range of exercise intensities; Fitness versus fatness[J]. *Appl Physiol Nutr Metab*, 2014, 39(12): 1352-1359.
- [28] Dizhi W, Peizhen Z, Jin L. Crossover point and maximal fat oxidation training effects on blood lipid metabolism in young overweight women; A pilot study[J]. *Front Physiol*, 2023, 14: 1190109.
- 收稿日期:2024-10-14 修回日期:2025-03-03 本文编辑:王悦