

分类号：_____

学校代码：_____10585_____

密 级：_____

学 号：_____105852021100033_____

广州体育学院学术型硕士学位论文

两种复合运动对胰岛素抵抗型肥胖儿童 青少年健康和代谢体适能影响的研究

学科门类：教育学

一级学科：体育学

学科专业：运动人体科学

研究方向：运动与健康促进

研 究 生：郑李

指导教师：朱琳（教授）

二〇二四年六月

**Dissertation Submitted to Guangzhou Sport
University for Master Degree**

**The Effect of two types of Compound
Exercise on Health and Metabolic Fitness in
Insulin-resistant Obese Children and
Adolescents**

Master Candidate: Zheng Li

Supervisor: Zhu Lin

June, 2024

摘要

目的：将封闭式减肥训练营的部分复合运动替换为同运动量中等强度持续训练（MICT）和高强度间歇训练（HIIT），通过分析两种替换后的复合运动对胰岛素抵抗（IR）型肥胖儿童青少年健康及代谢体适能的改善效果，进一步比较改善效果的差异，探究更适合改善 IR 型肥胖儿童青少年健康和代谢体适能的复合运动形式，为 IR 型肥胖儿童青少年制定更有效且实用的运动方案提供参照，并为封闭式减肥训练营针对 IR 型肥胖儿童青少年改进运动方案提供指引。

方法：从 2021 年某封闭式减肥训练营招募 IR 型肥胖儿童青少年共 42 名（男/女：22/20），随机分至包含 MICT 的复合运动组（MICT 复合组，n=20）和包含 HIIT 的复合运动组（HIIT 复合组，n=22）。两复合组 IR 型肥胖儿童青少年均进行 4 周复合运动干预，频率为 6 天/周，每天 10:00~12:00 和 15:00~17:00 共同进行，运动形式主要为瑜伽、运动游戏、篮球、羽毛球等，以中低强度运动为主。每次训练的 15:00~16:00 间，MICT 复合组在将原运动替换为强度约 55%~65%HR_{max} 的 35.5min 慢跑；HIIT 复合组则替换为与 MICT 运动量相同的折返跑，为强度约 75%~85%HR_{max} 的 1min 折返跑，穿插强度约 55%~65%HR_{max} 的 1min 原地踏步，交替进行共 30min。MICT 和 HIIT 期间均使用 polar team Pro 心率遥测系统监控强度，两复合组 15:00~16:00 外的运动安排一致。干预前后采集受试者健康体适能指标：体重、身体质量指数（BMI）、体脂肪量、体脂百分比、去脂体重、骨骼肌、颈围（NC）、胸围（CC）、腰围（WC）及臀围（HC）、最大摄氧量（VO_{2max}）、肺活量及握力等；代谢体适能指标：收缩压（SBP）、舒张压（DBP）、总胆固醇（TC）、甘油三酯（TG）、高密度脂蛋白胆固醇（HDL-C）、低密度脂蛋白胆固醇（LDL-C）、空腹血糖（FPG）和空腹胰岛素（FINS）。采用 2×2 重复测量方差分析两复合组健康及代谢体适能指标的变化，独立样本 t 检验比较两复合组的各指标基线值以及健康及代谢体适能指标的变化量及变化率差异，卡方检验比较两复合组 IR 改善率差异。

结果：（1）干预前两复合组 IR 型肥胖儿童青少年健康及代谢体适能指标基线值均无显著差异（ $P>0.05$ ）；（2）在健康体适能中，干预后两复合组 IR 型肥胖儿童青少年的身体成分及身体围度指标均显著下降（ $P<0.01$ ），心肺适能及握力显著提升（ $P<0.01$ ）；在代谢体适能中，干预后两复合组 IR 型肥胖儿童青少年 SBP、DBP、TC、TG、LDL-C 和胰岛素抵抗指数（HOMA-IR）等均显著降低（ $P<0.05$ ），HDL-C 在两复合组中均有降低但并不显著（ $P>0.05$ ），FPG 仅在 MICT 复合组中显著下降（ $P<0.05$ ），在 HIIT 复合组中则无

显著变化 ($P>0.05$)。 (3) 在健康体适能中, 干预后 MICT 复合组 IR 型肥胖儿童青少年 BMI (-2.65 vs -2.32, $P<0.05$) 变化量显著高于 HIIT 复合组, 而 NC (-2.4cm vs -1.2cm, $P<0.01$; -6.32% vs -3.26%, $P<0.01$)、WC (-8.2cm vs -5.6cm, $P<0.05$; -8.26% vs -5.90%, $P<0.05$)、WHR (-0.03 vs -0.01, $P<0.05$; -3.60% vs -1.55%, $P<0.05$) 等指标变化量及变化率均显著高于 HIIT 复合组; 在代谢体适能中, 干预后 MICT 复合组 FPG (-0.88mmol/L vs 0.01mmol/L, $P<0.01$; -17.48% vs 1.23%, $P<0.01$) 变化量及变化率均显著高于 HIIT 复合组, HOMA-IR (-57.83% vs -39.62%, $P<0.01$) 变化率显著高于 HIIT 复合组; (4) MICT 复合组 IR 型肥胖儿童青少年 IR 改善率为 90%, 显著高于 HIIT 复合组的 54.55% ($P<0.05$)。

结论: 两种复合运动均可有效改善 IR 型肥胖儿童青少年健康及代谢体适能水平, MICT 复合运动降低 IR 型肥胖儿童青少年 BMI、身体围度和 HOMA-IR 的效果优于 HIIT 复合运动, 其更适用于 IR 型肥胖儿童青少年在短期内改善肥胖和胰岛素抵抗, 提高健康及代谢体适能水平。

关键词: 胰岛素抵抗; 肥胖; 儿童青少年; 复合运动; 体适能

ABSTRACT

Objective: Replacing some of the compound exercises in closed weight loss boot camps with same-volume moderate-intensity continuous training (MICT) and high-intensity interval training (HIIT). By analyzing the improvement effects of the two replacement compound exercises on the health and metabolic fitness of insulin resistant (IR) obese children and adolescents, and further comparing the differences in improvement effects, explore the more suitable compound exercise forms for improving health and metabolic fitness of IR obese children and adolescents, provide reference for developing more effective and practical exercise plans for IR obese children and adolescents, and provide guidance for improving exercise plans for IR obese children and adolescents in the closed weight loss training camp.

Methods: A total of 42 (male/female: 22/20) children and adolescents with IR-type obesity were recruited from a closed weight-loss boot camp in 2021 and randomly assigned to a combined exercise group containing MICT (MICT combined group, n=20) and a combined exercise group containing HIIT (HIIT combined group, n=22). Both composite groups of IR-type obese children and adolescents underwent a 4-week composite exercise intervention with a frequency of 6 days/week, 10:00~12:00 and 15:00~17:00 together every day, and the form of exercise was mainly in the form of yoga, sports games, basketball, badminton, etc. which was based on low- and medium-intensity exercise. Between 15:00 and 16:00 of each training session, the MICT complex group replaced the original exercise with a 35.5-min jog at an intensity of approximately 55% to 65% HRmax; the HIIT complex group replaced the same amount of MICT exercise with a 1-min round trip run at an intensity of approximately 75% to 85% HRmax, interspersed with a 1-min round trip run at an intensity of 55% to 65% HRmax. 1min of marching in place, alternating for a total of 30min. Intensity was monitored during both MICT and HIIT using the polar team Pro heart rate telemetry system, and the schedule of exercise outside 15:00 to 16:00 was consistent for both composite groups. Health fitness indicators were collected before and after the intervention: body weight, body mass index (BMI), body fat mass, body fat percentage, defatted body weight, skeletal muscle, neck circumference (NC), chest circumference (CC), waist circumference (WC), and hip circumference (HC), maximal oxygen uptake (VO₂max), lung capacity, and grip strength; metabolic fitness indicators: systolic blood pressure (SBP), diastolic blood pressure (DBP), total cholesterol (TC), triglycerides

(TG), high-density lipoprotein cholesterol (HDL-C), low-density lipoprotein cholesterol (LDL-C), fasting glucose (FPG) and fasting insulin (FINS). Changes in health and metabolic fitness indicators in the two composite groups were analyzed using 2×2 repeated measures ANOVA, independent samples t-tests to compare the baseline values of the indicators as well as the differences in the amount and rate of change in health and metabolic fitness indicators between the two composite groups, and chi-square tests to compare the differences in the rate of improvement in IR between the two composite groups.

Results: (1) There were no significant differences in health and metabolic fitness indicators between the two composite groups of IR-type obese children and adolescents before the intervention ($P > 0.05$); (2) In health fitness, body composition and body circumference indexes of IR-type obese children and adolescents decreased significantly in both composite groups after the intervention ($P < 0.01$), and cardiorespiratory fitness and grip strength increased significantly ($P < 0.01$); in metabolic fitness, SBP, DBP, TC, TG, LDL-C, and insulin resistance index (HOMA-IR) of IR-type obese children and adolescents in the two composite groups decreased significantly after the intervention ($P < 0.05$), HDL-C was reduced but not significantly in both composite groups ($P > 0.05$), FPG was significantly reduced only in the MICT composite group ($P < 0.05$), and there was no significant change in the HIIT composite group ($P > 0.05$). (3) In health fitness, the amount of change in BMI of IR-type obese children and adolescents in the MICT composite group (-2.65 vs -2.32, $P < 0.05$) was significantly higher than that in the HIIT composite group after the intervention, while the amount of change in NC (-2.4 cm vs -1.2 cm, $P < 0.01$; -6.32% vs -3.26%, $P < 0.01$), WC (-8.2 cm vs -5.6 cm, $P < 0.05$; -8.26% vs -5.90%, $P < 0.05$), and WHR (-0.03 vs -0.01, $P < 0.05$; -3.60% vs -1.55%, $P < 0.05$) were significantly higher than that in the HIIT composite group in terms of the amount of change and rate of change; In metabolic fitness, the amount and rate of change in FPG (-0.88 mmol/L vs 0.01 mmol/L, $P < 0.01$; -17.48% vs 1.23%, $P < 0.01$) were significantly higher in the MICT composite group than in the HIIT composite group after the intervention, and the rate of change in HOMA-IR (-57.83% vs -39.62%, $P < 0.01$) was significantly higher than that of the HIIT composite group; (4) The improvement rate of IR in obese children and adolescents with IR was 90% in the MICT composite group, which was significantly higher than the 54.55% in the HIIT composite group ($P < 0.05$).

Conclusion: Both composite exercises can effectively improve the health and

metabolic fitness level of IR-type obese children and adolescents, and the effect of MICT composite exercise to reduce BMI, body circumference and HOMA-IR of IR-type obese children and adolescents is better than that of HIIT composite exercise, which is more suitable for IR-type obese children and adolescents to improve their obesity and insulin resistance, and to improve their health and metabolic fitness level in the short term.

Key Words: insulin resistance; obesity; children and adolescents; combined exercise; physical fitness

目 录

1 前言.....	1
2 文献综述.....	3
2.1 儿童青少年肥胖的发生现状及危害	3
2.1.1 儿童青少年肥胖的发生现状.....	3
2.1.2 儿童青少年肥胖的危害.....	3
2.1.3 儿童青少年肥胖与胰岛素抵抗的关系	4
2.2 儿童青少年胰岛素抵抗的发生现状及危害	4
2.2.1 胰岛素抵抗的测量及判定.....	4
2.2.2 儿童青少年胰岛素抵抗的发生现状.....	5
2.2.3 儿童青少年胰岛素抵抗的危害.....	6
2.3 儿童青少年肥胖、胰岛素抵抗与体适能的关系	6
2.3.1 体适能的概念.....	6
2.3.2 肥胖与健康及代谢体适能的关系.....	7
2.3.3 胰岛素抵抗与健康及代谢体适能的关系	8
2.4 运动干预对肥胖儿童青少年健康及代谢体适能的影响	9
2.4.1 MICT 对肥胖儿童青少年健康及代谢体适能的影响	9
2.4.2 HIIT 对肥胖儿童青少年健康及代谢体适能的影响	10
2.4.3 RT 对肥胖儿童青少年健康及代谢体适能的影响.....	11
2.4.4 封闭式减肥训练营式复合运动对肥胖儿童青少年健康及代 谢体适能的影响	12
3 研究对象与方法	14
3.1 研究对象.....	14
3.1.1 研究对象及纳排标准.....	14
3.1.2 研究对象分组.....	15
3.2 研究方法.....	15
3.2.1 数据测量.....	15
3.2.2 运动方案.....	17
3.2.3 饮食方案.....	19
3.2.4 数理统计法.....	19
3.2.5 实验设计框架图.....	21
4 结果.....	22
4.1 受试者基本信息.....	22
4.2 两种复合运动对 IR 型肥胖儿童青少年健康体适能的影响	24
4.2.1 两种复合运动对 IR 型肥胖儿童青少年身体成分的影响	24

4.2.2 两种复合运动对 IR 型肥胖儿童青少年身体围度的影响	25
4.2.3 两种复合运动对 IR 型肥胖儿童青少年心肺适能及握力的影响	26
4.3 两种复合运动对 IR 型肥胖儿童青少年代谢体适能的影响	27
4.4 两种复合运动对 IR 型肥胖儿童青少年 IR 的改善效果	29
5 讨论.....	29
5.1 两种复合运动改善 IR 型肥胖儿童青少年健康体适能的效果及差异	29
5.1.1 两种复合运动改善 IR 型肥胖儿童青少年身体成分的效果及差异	30
5.1.2 两种复合运动改善 IR 型肥胖儿童青少年身体围度的效果及差异	31
5.1.3 两种复合运动改善 IR 型肥胖儿童青少年心肺适能及握力的效果及差异	31
5.2 两种复合运动改善 IR 型肥胖儿童青少年代谢体适能的效果及差异	32
5.3 研究创新与不足.....	34
6 结论.....	35
8 参考文献.....	36
9 附录 A 中英文缩略词表.....	45

1 前言

全球儿童青少年肥胖率日趋增长，是当下全球公共卫生领域面临的一大难题，肥胖严重影响着儿童青少年的身心健康^[1]。自 1980~2015 年，中国和印度儿童肥胖率就已高居世界首位^[2]，研究表明，1991~2015 年我国 9 个省份儿童青少年超重和肥胖检出率均呈逐年增加趋势^[3]。2009~2019 年 6~15 岁中国儿童肥胖率增长速度虽逐步放缓，但整体超重肥胖人群基数还在继续扩大^[4]。流行病学研究表明，大约 80% 的肥胖儿童在青春期继续肥胖，大约 70% 的肥胖青少年在成年后仍然肥胖^[5]。肥胖对儿童青少年的身心健康影响深远，与肥胖相关的病症多样，如皮肤类如黑棘皮病，心理类如抑郁症，心血管及代谢风险类如胰岛素抵抗（Insulin resistance, IR）、2 型糖尿病（Type 2 diabetes, T2DM）、高血压、高血脂等，其他临床疾病类如阻塞性睡眠呼吸暂停、哮喘、多囊卵巢综合征、非酒精性脂肪肝病（Nonalcoholic fatty liver disease, NAFLD）等，此外肥胖还影响儿童青少年心肺功能和肌肉骨骼健康^[6]。IR 是肥胖儿童青少年较为常见的并发症，流行病学研究显示我国 6~18 岁肥胖儿童青少年 IR 检出率为 55.71%，相对未患有 IR 的肥胖儿童青少年，IR 型肥胖儿童青少年的体重、身体质量指数（Body mass index, BMI）、腰围（Waist circumference, WC）等身体成分及围度指标均显著更高，且更易出现血压、血脂、血糖等的代谢紊乱^[7, 8]，肥胖儿童青少年发生 IR 是在肥胖的基础上更进一步的代谢紊乱，且 IR 在 T2DM 的发病中起了关键作用^[9]，早期 IR 和血糖未得到有效控制，最终会进展为 T2DM。因此，对 IR 型肥胖儿童青少年进行早期干预，以改善他们的整体健康水平尤为重要。

体适能是从体育学角度评价健康的一个综合指标，包含健康体适能、代谢体适能和竞技体适能等三个部分，健康体适能包括心肺适能、身体成分、柔韧性、肌肉力量及耐力等，代谢体适能则包括血糖、血脂、血胰岛素、骨密度等方面，竞技体适能包括速度、反应时、爆发力、协调性、平衡性及灵敏性等^[10]。竞技体适能更多偏向竞技方向，需要良好的健康和代谢体适能基础，IR 型肥胖儿童青少年亟需提升健康和代谢体适能水平。

运动是提升肥胖儿童青少年健康和代谢体适能水平的安全且有效的方式之一，现在主流的运动形式有高强度间歇训练（High intensity interval training, HIIT）、中等强度持续训练（Medium intensity continuous training, MICT）、抗阻训练（Resistance training, RT）及几种运动形式组合的复合运动等。国内外研究证明，以上几种不同的运动干预形式对肥胖儿童青少年的健康及代谢体适

能均有不同程度的改善^[11-15]。参加封闭式减肥训练营集训是肥胖儿童青少年暑期减肥的方式之一，其干预周期一般为暑期的 1~2 个月不等，以瑜伽、运动游戏、篮球、羽毛球等多种运动相结合的复合运动干预，再配合饮食控制，吃住练一体化的形式具备较好的减肥氛围，近些年颇受肥胖儿童青少年及家长们的追捧。过往研究发现，3~6 周封闭式减肥训练营的复合运动干预均能有效改善肥胖儿童青少年身体成分、身体围度、心肺适能及心血管风险因素^[13, 16, 17]，其减肥和提升整体健康水平效果良好，但多数研究是探索在封闭式减肥训练营的综合干预下的改善效果，少数研究将封闭式减肥训练营与核心力量训练相结合成复合运动，对肥胖儿童青少年进行干预研究探索^[18]，尚未有研究将封闭式减肥训练营的运动与标准化 MICT、HIIT 结合两种成复合运动，探索两者对肥胖儿童青少年整体健康水平的影响。

而参加封闭式减肥训练营的肥胖儿童青少年多数已经存在脂代谢紊乱和 IR 倾向^[13]，MICT、HIIT 和 RT 虽均可改善肥胖儿童青少年的身心健康，但在改善肥胖儿童青少年 IR 方面，荟萃分析认为 MICT 降低肥胖青少年的 IR 是有效的^[19]，且对于改善肥胖女孩的胰岛素敏感性的效果是要优于 RT 的^[20]，故针对 IR 型肥胖儿童青少年，减肥训练营增加更多类似 MICT 形式的运动在降低 IR 方面可能获益更多。HIIT 因减肥高效的特点，颇受减肥者的追捧，在过往研究中 MICT 常与 HIIT 作为对比。荟萃分析认为 MICT 和 HIIT 对身体成分的影响效果是类似的，但 HIIT 似乎更节省时间^[21]，即能用更少时间达到 MICT 类似的减肥效果，而单次运动量相同的 MICT 和 HIIT 提高青少年的胰岛素敏感性的效果类似，HIIT 亦表现出时间效率优势^[22]，但 HIIT 表现出的高效性与其在较短时间就能达到甚至超过 MICT 的运动量是否有关，目前尚无明确的研究结论证明。也有研究认为 HIIT 在改善心肺功能、血压等心血管危险因素方面表现更好，MICT 则对糖代谢改善效果更好^[23-25]，过往研究中 MICT 和 HIIT 在改善肥胖儿童青少年 IR 方面得出的结论不一。

本研究尝试控制 MICT 和 HIIT 运动量相同，以同运动量 MICT 和 HIIT 替换封闭式减肥训练营的一部分运动时间，以两种新的复合运动对 IR 型肥胖儿童青少年进行 4 周干预，在明确 MICT 和 HIIT 复合运动对 IR 型肥胖儿童青少年健康及代谢体适能改善效果的前提下，进一步比较改善效果的差异，探究更适合改善 IR 型肥胖儿童青少年健康及代谢体适能的复合运动形式，为 IR 型肥胖儿童青少年制定有效且切合实际生活的运动方案提供参照，同时也能为封闭式减肥训练营在针对 IR 型肥胖儿童青少年改进运动方案时提供指引。

2 文献综述

2.1 儿童青少年肥胖的发生现状及危害

2.1.1 儿童青少年肥胖的发生现状

近些年儿童青少年超重肥胖发生率的快速增长,已成为世界性的公共卫生问题之一^[26]。在过去的四十年中,大多数国家和地区 5~19 岁儿童青少年的 BMI 和肥胖人数持续增加,在高收入国家,儿童和青少年 BMI 的上升已经趋于平稳,但在亚洲部分地区还在加速增加^[27]。1980~2015 年间,全球肥胖儿童发生率上升至 5.0%,在高达 1.077 亿肥胖儿童中,中国和印度稳居世界首位^[2]。自 1991~2015 年,我国 9 个省份儿童青少年超重和肥胖检出率均呈逐年增加趋势^[3],而 2009~2019 年 6~15 岁中国儿童肥胖率虽然增长速度减缓,但是整体超重肥胖人群基数还在继续扩大^[4]。经济高速发展带来的生活条件改善及饮食结构变化使得我国儿童青少年的肥胖患病率迅速攀升。儿童青少年肥胖问题引起了我国政府部门的高度重视,2016 年《“健康中国 2030”规划纲要》^[28]印发实施,全民健身上升为国家战略,科学健身意识逐渐深入人心,后续 2021 年又推出“双减政策”^[29],减少了儿童青少年学业压力和久坐时间,增加了儿童青少年课外身体活动量。虽已采取一系列的有利政策措施,但当前儿童青少年肥胖问题仍是国内重大公共卫生问题之一。

2.1.2 儿童青少年肥胖的危害

肥胖是一种涉及多因素的慢性代谢紊乱的疾病,与肥胖相关的并发症多样,如皮肤类如黑棘皮病,心理类如抑郁症;心血管及代谢风险类如胰岛素抵抗、T2DM、高血压、高血脂等;其他临床疾病类如阻塞性睡眠呼吸暂停、哮喘、多囊卵巢综合征、NAFLD 等,此外肥胖还影响儿童青少年心肺功能和肌肉骨骼健康^[6]。其中,肥胖与心血管及代谢疾病关系尤其密切,调查显示,约 50% 儿童高血压患者伴随肥胖^[30],儿童青少年肥胖和高血压存在显著的相关性^[31]。肥胖也是儿童青少年血脂异常的高度相关因素,血脂异常主要表现为总胆固醇 (Total cholesterol, TC)、甘油三酯 (Triglyceride, TG) 水平高于正常参考值,高密度脂蛋白胆固醇 (High density lipoprotein cholesterol, HDL-C) 的水平低于正常参考值^[32],随着儿童青少年肥胖检出率上升,其血脂异常的比例也呈现上升趋势^[33]。近些年,儿童青少年糖尿病的发生现状也不容乐观,2016—2017 年

来自 31 个省、直辖市、自治区的数据显示,中国 6~17 岁儿童青少年血糖异常率和糖尿病患病率分别为 2.40%和 0.26%,而肥胖、高血压及血脂异常均为儿童青少年血糖异常的相关因素^[34]。血糖的异常表现与 IR 密不可分,而肥胖伴随的异位脂质积累是导致儿童青少年 IR 的潜在机制^[35],IR 和血糖异常则是 T2DM 早期发展时的典型特征。

2.1.3 儿童青少年肥胖与胰岛素抵抗的关系

现有研究对胰岛素抵抗的机制尚未达成共识,尽管 IR 的确切原因尚未完全阐明,但已经提出了许多主要机制,包括氧化应激、炎症、胰岛素受体突变、内质网应激和线粒体功能障碍等^[36]。与儿童青少年 IR 相关的因素较多,包括肥胖和内脏肥胖、种族、青春期、2 型糖尿病家族史、性别、胎龄小或早产等^[37]。其中,肥胖是儿童 IR 的关键危险因素,尤其是内脏肥胖与 IR 呈强正相关^[38]。

现代社会中,美味且富含卡路里的食物很容易获得,久坐少动的生活方式在儿童青少年中很常见,这就导致肥胖儿童青少年数量与日俱增。而肥胖伴随异位脂质积累,各种脂肪细胞因子和脂肪组织中,炎症细胞分泌的产物损害肌肉与肝脏的代谢,直接抑制了胰岛素作用,促进 IR 的发生发展^[35]。IR 是代谢综合征的一个关键组成部分,其在儿童青少年群体中的患病率正在增加,特别是在肥胖儿童和青少年中^[39],Meta 分析显示,在肥胖儿童青少年中 IR 的发生率明显高于正常儿童青少年^[40]。虽然肥胖人群不一定都有 IR,但是绝大多数患有 IR 的人群是处于超重或肥胖状态^[41],在缺乏有效的预防和干预的情况下,儿童青少年 IR 发生率会伴随着肥胖儿童青少年基数的扩大而上升。

2.2 儿童青少年胰岛素抵抗的发生现状及危害

2.2.1 胰岛素抵抗的测量及判定

胰岛素抵抗是指组织对胰岛素介导的细胞作用的反应减弱,术语“胰岛素抵抗”通常是指在生理胰岛素水平下,全身葡萄糖摄取减少,从而对葡萄糖和胰岛素代谢产生影响^[42]。目前,判定 IR 的主要方法包括直接测量法和间接测量法,直接法主要是高胰岛素正常血糖钳夹技术和高糖钳夹技术,其中高胰岛素正常血糖钳夹技术是目前国际上公认的测定 IR 的金标准^[43],但这种方法因价格昂贵、程序复杂且构成侵入性,并不能作为测定 IR 的常规使用方法。间接测量法包括多次样本的静脉葡萄糖耐量试验、口服葡萄糖耐量试验、空腹胰岛素水平(Fasting plasma insulin, FINS)、空腹血糖(Fasting plasma glucose, FPG)

与 FINS 比值、定量胰岛素敏感度指数、胰岛素抵抗稳态模型评估法（Homeostasis model of assessment for insulin resistance, HOMA-IR）等，其中，HOMA 模型评估的 IR 指数已被证明是评估 IR 的可靠临床和流行病学工具^[44]。

1985 年由 Matthews 等人^[45]首次描述的 HOMA-IR 指数，在检测 IR 时具有实用、快速且廉价的特点，并且与正常血糖钳夹检测 IR 的效果具有高度相关性。此后 HOMA-IR 被研究人员广泛接受，并用于流行病学研究，以确定成人、儿童和青少年的 IR，作为昂贵和复杂的 IR 评估方法的替代选择。在儿童青少年中，HOMA-IR 临界值的确定，对于 IR 的判定尤为重要，在一项关于儿童青少年 IR 临界点的系统综述发现，纳入的不同国家儿童青少年 IR 的 HOMA-IR 临界值均不同，女孩最低临界值为 1.65，最高 3.82；男孩最低 1.95，最高可达 5.22，不同的结论受样本量、种族、性别及性成熟阶段等的影响，都有一定的局限性^[46]。因此针对国内人群的关于 IR 的研究，参照国内过往研究的 IR 临界值更为精确，早期一项针对国内人群的 IR 诊断标准研究中，将 $\text{HOMA-IR} \geq 2.69$ 作为 IR 的判定标准^[47]，后国内一项临床研究中将此标准应用于肥胖儿童青少年 IR 的判定，以区分 IR 和 n-IR（Non-insulin resistance, n-IR）儿童青少年^[8]。

2.2.2 儿童青少年胰岛素抵抗的发生现状

不同国家的研究中，儿童青少年 IR 的发生率均相对较高，在基于以 HOMA-IR 来判定 IR 的相关研究中，斯洛伐克的横断面研究发现平均 18.6% 的青少年（男性 19.8%，女性 17.6%）患有 IR^[48]，智利的一项涉及 667 名青少年的研究发现 16.3% 的青少年患有 IR^[49]，韩国的一项研究调查了 2716 位儿童青少年，IR 的患病率达 9.8%（男性 10.9%，女性 8.6%）^[50]，Manios 等^[51]对 481 名希腊学龄儿童的研究中，使用不同 HOMA-IR 临界值判定 IR，IR 发生率不同，当 $\text{HOMA-IR} > 3.16$ 和 $\text{HOMA-IR} > 2.1$ 时，其患病率分别为 3.1% 和 9.2%，临界值越低，IR 患病率越高。由此可见，不同国家和地区的儿童青少年 IR 发生率存在差异，一项系统综述纳入了 18 项与儿童青少年 IR 相关的流行病学研究，发现儿童青少年 IR 的总体患病率在 3.1% 至 44% 之间，女孩的 IR 患病率似乎高于男孩^[40]。

在肥胖儿童青少年中 IR 的发生率似乎更高，研究表明，美国超过 50% 的肥胖青少年患有 IR^[37]，而我国的肥胖儿童青少年 IR 发生率同样不容乐观，据调查研究显示，我国 6~18 岁肥胖儿童青少年 IR 检出率为 55.71%，明显高于正常体重儿童青少年的 10.38%。显然，肥胖儿童青少年患 IR 的风险远大于正常体重儿童青少年，儿童青少年的整体 IR 发生现状令人担忧。

2.2.3 儿童青少年胰岛素抵抗的危害

IR 会促进各类代谢及心血管并发症的发生与发展^[52]，其中，IR 在 T2DM 的发病中起关键作用^[9]，早期 IR 和血糖未得到有效控制，最终会进展为 T2DM。除 T2DM 外，IR 与其他代谢及心血管疾病也关系密切，如儿童青少年 T2DM 患者中，IR 还是高血压发病机制的关键组成部分^[53]，同时还是终末期肾病的预测指标^[31]。IR 也是儿童青少年发生 NAFLD 的危险因素^[8]，与儿童期动脉血管内皮功能恶化有关^[54]。此外，IR 也与多类临床疾病有关，如 IR 与肥胖儿童青少年过敏性哮喘发生风险增加有关^[55]，与儿童青少年全身骨密度呈负相关，影响儿童青少年骨骼健康^[56]。成人银屑病与代谢疾病和 IR 密切相关，青春期前的儿童银屑病患者中，IR 的发病率也很高^[57]。可见，IR 与儿童青少年的多类疾病尤其是心血管及代谢并发症有关。

研究表明，肥胖亦是高血压、血脂异常、T2DM 及 NAFLD 等心血管及代谢疾病的危险因素^[58]，那么肥胖儿童青少年并发 IR 则是在肥胖的基础上更进一步的代谢紊乱。研究表明，相对未患有 IR 的肥胖儿童青少年，IR 型肥胖儿童青少年的体重、BMI、WC 等身体成分及围度指标均显著更高，且更易出现血压、血脂、血糖等的代谢紊乱^[7, 8]，所以，IR 型肥胖儿童青少年比 n-IR 型肥胖儿童青少年更需要及时的干预，以改善他们的整体健康水平。

2.3 儿童青少年肥胖、胰岛素抵抗与体适能的关系

2.3.1 体适能的概念

美国运动医学学会（American college of sports medicine, ACSM）认为体适能为“人们拥有或获得的、与完成体力活动的能力相关的一组要素或特征”^[59]，主要可分为两类，即健康体适能和竞技体适能，其中健康体适能包括心肺适能、身体成分、肌肉力量及耐力、柔韧性；而竞技体适能包括速度、反应时、爆发力、协调性、平衡性及灵敏性^[60]。在儿童青少年群体中，美国的国家运动与体育教育协会（National association for sport and physical education, NASPE）认为健康体适能是指衡量一个人进行需要耐力、力量或柔韧性等体育活动的的能力，技能体适能和健康体适能并不能完全分开，但儿童青少年即使不具备高水平的技能体适能，也可以终身参与体育活动，拥有健康的生活方式^[61]。早期，国内学者也以学校体育学为切入点，认为体适能是“使每个人在各种不同状况下，选择最适合自己需要的运动方式和运动量来增强自己的体能，以保持最佳的健

康状态”^[62]。随着我国社会的变迁，体适能的概念也在推陈出新，陈佩杰等^[10]在《健康体适能评定理论与方法》一书中，将代谢体适能的概念纳入体适能的范畴，在健康体适能和竞技体适能的基础上进一步囊括了包括血糖、血脂、血胰岛素、骨密度等代谢体适能参数，将体适能定义为机体有效与高效执行自身机能的能力，书中指出“拥有优秀技能体适能的前提是机体具有良好的健康体适能”，肥胖儿童青少年亟需解决的是健康问题，应在良好的健康和代谢体适能基础上，再去进一步追求技能体适能的提升。

身体围度的变化能够较为直观的反映身体成分及体型的变化，因其测量方便、无创且高效，因此较受研究者的青睐。早期研究表明，BMI 是衡量儿童全身肥胖的一种被广泛接受的指标^[63]，但 BMI 并不能反应体脂的分布情况。

而测量 WC 是评估腹部肥胖的简单方法^[64]，有研究表明，较多中度至剧烈体力活动时间与 IR 水平显著降低有关，而 WC 完全介导了两者之间的关系^[65]。在儿童青少年中，与 BMI 相比，WC 与收缩压（Systolic Blood Pressure, SBP）和舒张压（Diastolic blood pressure, DBP）的正相关作用更强^[66]，是血脂异常和 IR 的更好预测指标^[67]。作为 WC 的衍生指标 WHR（Waist-to-hip ratio, WHR），也被用作判断向心性肥胖（“梨形”或“苹果形”肥胖）的参数，向心性肥胖与 IR 之间存在遗传联系，一些 WHR 相关基因在胰岛素分泌和信号传导过程中起作用^[68]。此外，NC（Neck circumference, NC）与大多数心血管风险因素相关，也可作为儿童心血管风险的简单替代筛查工具^[69]，国内研究认为 NC 是识别中国人群内脏肥胖的简单而适用的筛查工具，可作为内脏肥胖的补充指标^[70]。可见，BMI 能判断肥胖程度，引入 NC、WC、HC（Hip circumference, HC）、WHR 不仅能更进一步判断肥胖人群的肥胖类型，且能够反馈肥胖人群体型的变化方向，将身体围度作为健康体适能的补充指标，能更为全面的评价肥胖人群健康水平的变化情况。

2.3.2 肥胖与健康及代谢体适能的关系

肥胖与健康体适能密切相关，在没有长期运动习惯的肥胖儿童青少年中，通常 BMI 越高，体重、体脂量和体脂百分比也会相应的更高。与正常体重儿童青少年相比，肥胖儿童青少年的体脂肪量占总体重的比例更高，表现为较高的体脂肪百分比，相对应的，去脂体重则占总体重的比例更低。BMI 能够反映全身肥胖情况，而身体围度则能更进一步反映肥胖类型，研究表明，肥胖儿童青少年 BMI、WC、HC、WHR、体脂肪百分比均高于正常体重儿童青少年^[7]，同样，全身肥胖也会让 NC 和胸围（Chest circumference, CC）随之上升。另外，肥胖还与心肺适能和握力有关，国外研究发现，在体重正常、超重、肥胖的

12~19 岁青少年中,其最大摄氧量 (Maximum oxygen uptake, VO_{2max}) 有所不同,随着肥胖程度的增加, VO_{2max} 越低^[71],李晓彤等^[72]的研究也发现,青少年的峰值摄氧量随肥胖程度的增加而下降,与正常体重的儿童青少年相比,肥胖儿童青少年单位体重的肺活量较低^[73]。研究表明,6~15 岁儿童和青少年中,无论是男孩还是女孩,握力均随着体重的增加而增加^[74],虽然肥胖儿童青少年具有更高的绝对握力,但单位体重的握力也较低^[73]。

在代谢体适能中,国内早期的研究就已明确肥胖对代谢体适能的负面影响,一项对 8~11 岁儿童的研究发现,与正常体重儿童相比,超重肥胖儿童血压、FINS、TG、TC 均显著更高, HDL-C 水平则更低^[75]。另一项研究涉及 10~17 岁儿童青少年,在血压指标中无论是男孩还是女孩,超重肥胖儿童青少年 SBP 和 DBP 均显著高于正常体重儿童青少年^[76]。在没有 IR 和空腹血糖受损的情况下,儿童青少年血糖通常较为稳定,但研究也表明,肥胖儿童青少年 FPG 也要显著高于体重正常的儿童青少年,且超重肥胖儿童具有明显的血压、血糖及 TG 偏高现象,且 HDL-C 水平明显较低^[77]。HOMA-IR 由 FPG 和 FINS 计算而来,显然 HOMA-IR 在肥胖儿童青少年中也会更高,研究发现,肥胖儿童青少年 HOMA-IR 明显高于正常体重儿童青少年,肥胖儿童青少年 IR 检出率也高于正常体重儿童青少年在青春发育期,肥胖儿童 IR 程度更为严重^[8],Meta 分析也显示,在肥胖儿童青少年中 IR 的发生率明显高于正常儿童青少年^[40]。可见,肥胖儿童青少年健康和代谢体适能水平平均比正常体重儿童青少年更差。

2.3.3 胰岛素抵抗与健康及代谢体适能的关系

在身体成分和身体围度指标中,体重、BMI、WC、WHR 和腰高比 (Waist-to-height ratio, WHtR) 等指标是评估整体或局部肥胖的常用人体测量指标,研究表明,体重、BMI 和 WHR 是青少年 IR 的重要预测指标,以此类简单指标建立列线图模型,可以预测儿童青少年 IR 风险^[78]。除了 WC 及其衍生指标外,颈围与大多数心血管疾病危险因素有关,这些关联与 BMI z 评分、WC、WHR 和 WHtR 观察到的关联相当,也是儿童心血管风险的简单替代筛查工具^[69]。儿童青少年腹型肥胖是 IR 的重要危险因子,在老年人群中, BMI、体脂百分比是 IR 的独立危险因子,但 BMI、WC 比体脂百分比更能反映 IR^[79]。在 3~7 岁超重肥胖儿童中, WHtR, WC 和 BMI 均与 IR 发生率呈现正相关,三者超重肥胖儿童中与心脏代谢危险因素的相关性类似^[80]。除了体脂外,也有研究指出通过运动干预提高肌肉含量和肌力,有利于预防 IR 导致的代谢综合征^[81]。

IR 与心肺适能和肌肉力量关系密切,一项针对欧洲青少年的研究发现 VO_{2max} 、体脂肪百分比与 HOMA-IR 呈显著负相关^[82]。在一项涉及 1710 名儿童

的横断面研究中^[83],发现 VO_{2max} 、体脂肪百分比与 HOMA-IR 显著相关,但 VO_{2max} 与 HOMA-IR 的相关性可能是基于脂肪量与 HOMA-IR 显著相关,横断面研究结论还需要纵向研究来加以证明。在肌肉力量与 IR 关系的一项研究中^[84],以深蹲和卧推的 1RM 表示肌肉力量,在排除种族和青春期阶段的影响后,仍然发现肌肉力量增加和胰岛素敏感性提升有关。可见通过提升心肺适能和肌肉力量对于改善肥胖儿童青少年 IR 的潜在益处。

代谢体适能亦与 IR 密切相关,研究发现,IR 和青少年心脏代谢危险的增加有关,如 FPG 的升高及血脂异常,而血脂异常体现在 TG、TC、低密度脂蛋白胆固醇 (Low-density lipoprotein cholesterol, LDL-C) 等的升高^[78];此外,IR 与高尿酸和高血压有关,IR 不仅是心血管相关疾病发病的前期表现,还是终末期肾病的预测指标^[31],对照国内早期的研究发现,肥胖儿童青少年 IR 造成的高胰岛素血症与 SBP 呈显著正相关^[85]。另有研究发现,相对于单纯的空腹血糖受损患者,空腹血糖受损伴高血压患者 IR 更为明显,且他们的 IR 可能与血压的升高相关,控制空腹血糖受损患者的血压在正常范围,可改善空腹血糖受损患者的 IR^[86]。

可见,IR 可能与儿童青少年代谢体适能相关指标均有关联,进行及时的运动干预,有利于降低儿童青少年罹患与 IR 相关心血管及代谢疾病的风险。

2.4 运动干预对肥胖儿童青少年健康及代谢体适能的影响

2.4.1 MICT 对肥胖儿童青少年健康及代谢体适能的影响

一般情况下,MICT 是以 55~70%最大心率 (Maximum heart rate, HR_{max}) 或 40~60% VO_{2max} 为强度进行的运动^[87],是通过有氧代谢供能既能满足运动过程中能量需求的运动,其运动形式多样,如持续慢跑、游泳、骑自行车等,MICT 是增加体力活动和改善健康的传统运动干预方式,其效果较好且安全,易于坚持,适合各类人群进行日常体育锻炼。不过,对于不同运动形式和剂量 (如运动形式、运动频率、运动持续时间和运动强度等) 能最有效的改善儿童青少年肥胖的健康,还尚未有统一的结论。《健康中国行动 2019-2030》中明确指出:“鼓励每周进行 3 次以上、每次 30 分钟以上中等强度运动,或者累计 150 分钟中等强度或 75 分钟高强度身体活动”^[88]。

MICT 干预研究较为多见,如曹薏等^[11]的一篇研究中,对肥胖儿童青少年进行 12 周,每周 3 次的 HIIT 和 MICT,其中 MICT 运动强度为 60%~80%最大有氧速度 (Maximum aerobic speed, MAS),运动持续时间从 1~12 周从 20min 增

加至 40min, HIIT 为 100%-120%MAS 的 15s 运动和 50%MAS 的 15s 运动交替, 持续时间为 11min, 发现 12 周 MICT 和 HIIT 均降低了肥胖儿童青少年的体脂百分比、内脏脂肪含量和 WC, 提高了 VO_{2max} , 另外 FPG、FINS、HOMA-IR 和 HDL-C 在干预后也均得以改善。过往研究中强度不一的 MICT 运动, 也均能够不同程度改善 VO_{2max} ^[89]。Sigal 等^[90]将 304 名 14 至 18 岁肥胖青少年分为 MICT、抗阻训练、复合训练、对照等四个组, 其中 MICT 每次运动时间 20~45min, 强度为 65%~85% HR_{max} , 22 周的干预后, MICT 组肥胖青少年体重、BMI、体脂和 WC 均出现明显下降, 而 VO_{2max} 和腿部伸展 1RM 也明显提升, 同时 SBP、DBP、TC、LDL-C 等血压和血脂指标均显著下降, HDL-C、TG、FINS 和 FPG 则小幅度上升。Araujo 等^[91]对肥胖儿童进行连续 12 周的 MICT, 每周 2 次, 每次 30~60min, 每 3 周递增 10min, 强度为 80% HR_{max} , 发现肥胖儿童的体重、BMI 和 WC 均下降, 血压指标无明显变化, 血脂指标中的 TG 无变化, TC、LDL-C、HDL-C 等均出现上升, FINS 和 HOMA-IR 则显著降低。

MICT 对于肥胖儿童青少年健康体适能的影响基本一致, 但对于代谢体适能的影响, 各研究得出的结论略有不同。但 Meta 分析显示, 多数 MICT 和 HIIT 干预均能降低肥胖儿童的 TC、TG 和 LDL-C, 而 HDL-C 则会有所提升^[92]。对于 IR 的影响多数研究结论一致, Lee 等^[93]发现持续 12 周 MICT 能有效降低肥胖女性青少年血浆内脂素和 IR 水平, Davis 等^[94]研究发现无论性别或种族如何, 不同剂量的 MICT 对超重/肥胖儿童的体脂、内脏脂肪及 IR 均有改善作用, 且全身及内脏脂肪的改善与 IR 有剂量效应益处。

总之, MICT 能够降低儿童青少年体重、体脂和 BMI 等身体成分指标, WC 会随之下降, 整体身体围度均会随之下降, 心肺适能相应得到提升, 同时血压和血脂等指标也会同时得以改善。而 WC、体脂百分比、心肺适能的适应性变化都有利于改善 IR, 从而降低儿童青少年罹患心血管及代谢类疾病的风险。

2.4.2 HIIT 对肥胖儿童青少年健康及代谢体适能的影响

100 多年前, 在中长跑运动员的训练中发现 HIIT 对于提高中长跑成绩非常有效^[95], 自此 HIIT 开始逐渐广泛应用。儿童在日常状态下更习惯于短时间的、高强度的游戏活动^[96], 因此, 近十多年研究人员尝试将 HIIT 应用于肥胖儿童的运动干预, 以期改善儿童青少年的肥胖。HIIT 为短时间的高强度运动的负荷期和较低强度运动或静止休息的恢复期交替进行的一种间歇式的运动训练方法^[97, 98], 目前 HIIT 在运动强度、频率和持续时间方面的最佳标准尚未达成共识^[99], 其最佳训练方案有待进一步深入探索。

目前肥胖儿童青少年进 HIIT 干预研究较为多见, 上文提到的曹薏等^[11]的研究中, 对肥胖儿童青少年进行 12 周, 每周 3 次的 HIIT 和 MICT, 其中 HIIT 为 100%-120%MAS 的 15s 运动和 50%MAS 的 15s 运动交替, 持续时间为 11min, HIIT 总时长比 MICT 更短, 12 周 HIIT 和 MICT 在改善身体成分和其他糖、脂代谢的效果无显著差异, 但干预后 HIIT 组肥胖儿童青少年的 VO_{2max} 水平要显著高于 MICT 组, 也就是说 HIIT 用了更少的时间, 心肺适能的提升效果好于 MICT。Dias 等^[12]的研究中, 对肥胖儿童进行 12 周的 HIIT 和 MICT 干预, 其中 HIIT 为 4 次 4min 的运动期, 强度为 85%~95% HR_{max} , 穿插 3min 的 50%~70% HR_{max} 的间歇期, MICT 强度为 60%~70% HR_{max} , 持续 44min, 每周 3 次, 也发现 HIIT 对心肺功能提升较 MICT 更高, 而两组体重、体脂百分比和血脂、血糖等指标则没有显著变化。Araujo 等^[91]对肥胖儿童进行连续 12 周的 MICT 和 HIIT, 其中 HIIT 每周 2 次, 运动期强度为 100%MAS, 每次 1min, 间歇期强度 50%MAS, 每次 3min, 每回合 3~6 次, 发现肥胖儿童的体重、BMI 和 WC 均下降, 血压指标中仅 SBP 显著下降, 血脂相关指标均无显著变化, FINS 和 HOMA-IR 则显著降低, 两种训练方式改善肥胖儿童健康及代谢体适能效果类似, 但很明显 HIIT 用时更短。荟萃分析表明, MICT 和 HIIT 对身体成分的影响效果类似, 但相对于 MICT, HIIT 似乎更省时间^[21]。也有研究认为 HIIT 在改善心肺功能、血压等心血管危险因素部分指标表现更好, MICT 对糖代谢效果更好^[23-25], MICT 和 HIIT 两种运动干预改善肥胖儿童青少年健康水平的效果还有一定争议。

而 HIIT 对 IR 型肥胖儿童青少年的健康改善效果与上述肥胖儿童青少年的研究结果类似, Alvarez 等^[100]对 44 名 IR 儿童进行为期 6 周的基于学校的 HIIT 干预, 发现不同成熟度的儿童皮下脂肪、FINS 和 HOMA-IR 均显著降低, HIIT 能够降低 IR 学龄儿童的 FINS 和 HOMA-IR, 而身体成分、身体围度、心肺适能及肌肉力量等又和 IR 有一定关联, 必然伴随出现积极变化。IR 成年女性的研究结论类似, 10 周的 HIIT 能显著改善 IR 成年女性体重、BMI、肌力、血压和胰岛素抵抗^[101]。

总之, MICT 和 HIIT 对肥胖儿童青少年的健康和代谢体适能均有不同程度改善作用, 多数研究认为 HIIT 能在更短时间达到与 MICT 类似的干预效果, 而 HIIT 对 IR 人群的健康和代谢体适能同样具有良好的改善效果, HIIT 的最佳运动方案目前尚未达成共识, 还需要进一步探究。

2.4.3 RT 对肥胖儿童青少年健康及代谢体适能的影响

所谓抗阻训练, 通常指的是在一次或多次训练中, 对抗外部负荷或自身重量/惯性进行的重复运动^[102]。RT 对身体成分和身体围度的改善较为直观, 如

Ribeiro 等^[103]的一项荟萃分析囊括了 21 篇肥胖儿童青少年 RT 相关研究,发现 RT 可减少肥胖儿童青少年体脂和 BMI,降低 WC,同时肌力和心肺适能也得到增强。荟萃分析也显示,RT 与超重/肥胖儿童青少年的 BMI、体脂百分比、VO_{2max}、TG、LDL、TC 改善相关^[104],其改善效果与上文中的 MICT 和 HIIT 类似,但相对于 MICT,RT 对肥胖儿童青少年的力量改善更明显,MICT 则改善心肺功能效果更好^[105]。另外,荟萃分析发现 RT 可能对儿童青少年血压具有积极的影响,不过还需要更多证据^[106],但随着体重、BMI 的降低,血压也会随之下降^[107]。对于 IR 儿童青少年,Alvarez 等^[108]的研究发现 6 周 RT 和 HIIT 干预均与 IR 儿童的身体成分、WC、肌力、血压和心脏代谢风险的改善有关。

在改善胰岛素敏感性方面, Lee 等^[109]认为在无热量限制的情况下,12 周 RT 与肥胖儿童青少年的胰岛素敏感性显著改善有关。另一篇研究结论则相反,认为单独 MICT 与 RT+MICT 对提高肥胖青少年胰岛素敏感性和减少异位脂肪同样有益,而单独 RT 则与胰岛素敏感性的改善无关^[15],一项荟萃分析涉及 21 篇肥胖青少年 RT 运动干预研究,得出的结论类似,RT 除了对肥胖青少年肌力和心肺功能的提升外,胰岛素敏感性和瘦体重都未变化^[103],显然 RT 对于胰岛素敏感性的影响结论还存在争议。相对于 MICT 和 HIIT,RT 干预在增加肌力方面更有优势,而肌力的增加与胰岛素敏感性增加显著相关^[84],甚至在不减轻体重的情况下进行的抗阻训练,也可以增加力量和瘦体重,提高肝胰岛素敏感性^[110]。

综上,RT 能降低肥胖儿童青少年的体脂百分比和内脏脂肪,增加瘦体重,从而提升肌肉力量,心肺功能也会有所改善。同时对血脂改善较明显,但对血压的积极影响可能与体重、BMI 的下降有关,对胰岛素敏感性的影响尚有争议。虽然过往研究阐明了 RT 对儿童青少年的积极影响,但对于生长发育期的儿童青少年,骺软骨并未完全发育完全,大重量的重复刺激可能会造成其过早发育完成,也容易导致骨骼变形或受伤,不利于身体的生长发育,尤其是对于肥胖儿童青少年,自身较大的体重已导致骨骼关节承受的压力较大,应选择对关节和骨骼压力更小的 MICT 和 HIIT 来改善健康为宜。

2.4.4 封闭式减肥训练营式复合运动对肥胖儿童青少年健康及代谢体适能的影响

将两种及以上运动形式合理组合,即能形成复合运动形式,其各类运动相互组合,更贴近儿童青少年日常的身体活动模式,因此研究适用于改善肥胖儿童青少年的复合运动形式,更有利于将研究成果推广实践于日常生活中。封闭式减肥训练营是针对超重肥胖人群设计的一种集中管理和训练的运动减肥模式,

参加封闭式减肥训练营集训是国内肥胖儿童青少年较为有效的暑期减肥方式之一，其干预周期一般 1~2 个月不等，通常以瑜伽、运动游戏、篮球、羽毛球等多种运动复合而成，并配合饮食控制，吃住练一体化具备较好的减肥氛围，因此近些年颇受肥胖儿童青少年及家长们的追捧。

封闭式减肥训练营具备较好的研究条件，于减肥训练营开展各类学术研究自然较多，但国外类似减肥训练营干预研究中的日常训练及管理没有国内的严格，但依然在降低肥胖儿童青少年身体成分和围度、提高肌力、改善血压和胰岛素敏感性等方面均有较好的效果^[111-113]。国内的封闭式减肥训练营对肥胖儿童青少年的日常训练、饮食控制及纪律管理更为严格，这也为肥胖儿童青少年的减肥和开展学术研究创造了良好的基础，来自我国不同地域的封闭式减肥营的研究均表明，封闭式减肥训练营的复合运动干预对肥胖儿童青少年身体成分和围度、心肺适能及肌力、心血管危险因素等方面指标都有较大的改善作用。如郭吟等^[13]在位于上海的某减肥训练营对 126 名肥胖儿童进行为期 4 周的有氧运动结合饮食的干预，采用羽毛球、篮球、游泳、慢跑、健美操等可持续且强度易控制的复合运动形式，每周训练 6 天，每天上午和下午分别运动 2~2.5h，以 polar 心率监测系统实时监控运动心率，心率维持在 20%~40% 储备心率区间，饮食由专门的营养师统一制定个性化饮食方案，以满足儿童青少年的每日基本能量和营养需求为原则，4 周的干预使肥胖儿童青少年身体成分指标中的体重、BMI、体脂肪量和体脂百分比等都显著下降，身体围度指标中的 WC、HC、大腿围及其衍生指标也显著下降，同时血脂和 FINS、FPG 等也有所改善，并且发现参加封闭式减肥训练营的多数肥胖儿童青少年具有 IR 倾向。林云等^[16, 114]、尚延侠等^[17]也于同一减肥训练营进行过类似的实验，在肥胖儿童青少年健康及代谢体适能方面的改善与郭吟等的结论类似。叶莉等^[115]、徐磊等^[116]在武汉某减肥中心进行的实验，其运动干预和饮食控制也与上文类似，发现封闭式减肥营的 4 周复合运动干预可改善男性肥胖青少年的身体成分、身体形态、血脂、身体炎症及血清脂肪酸组分等。博庆丽等^[117]在合肥的某封闭式减肥训练营进行的研究中，运动干预形式包含 MICT 和 RT 的复合运动，其运动强度、时间及频率未做监测，饮食方面也是以满足儿童青少年生长发育的基本能量和营养需求为原则，但是增加了以授课、讨论和游戏的形式进行健康教育干预，这种复合形式的干预改善了肥胖儿童青少年身体成分和形态学指标。丁花阳等^[118]在江苏的某减肥夏令营实验中，将 43 名肥胖儿童青少年分为有氧组和复合运动组进行为期 6 周的干预，其有氧运动的方案与上文中郭吟等^[13]的方案类似，复合运动于每天下午以有氧运动和核心力量训练相结合的方式进行，由至少 5 种以上核心力量训练动作组成，其余训练与有氧组相同，两组的饮食内容相同。发现两

组均能显著改善肥胖儿童青少年体重、体脂率、BMI、WC、HC、大腿围等身体成分及围度，但复合运动的效果更好；血液指标中，两组均能显著改善血脂、血糖和血清胰岛素水平，但复合运动组对血清胰岛素的改善效果更好。这也是国内封闭式减肥训练营研究中为数不多的将其他标准化运动形式融入封闭式减肥训练营的复合运动中，探索新的复合运动对肥胖儿童青少年健康的影响，而将减肥训练营的多类运动与其他标准化运动形式结合，其干预效果可能更好，这也为改进封闭式减肥训练营的复合运动方案提供了新的思路。

而将封闭式减肥训练营的多类运动结合标准化 MICT 和 HIIT，可进一步探究更适合封闭式减肥训练营的复合运动方案，目前国内还未有人进行过类似研究。鉴于参加封闭式减肥训练营的肥胖儿童青少年多数已存在血脂异常和 IR 倾向，而 MICT 和 HIIT 在改善肥胖儿童青少年 IR 方面均较为高效，将他们结合封闭式减肥训练营的多类运动对 IR 型肥胖儿童青少年进行干预研究，对比两种结合后的复合运动的干预效果，不仅为 IR 型肥胖儿童青少年在暑期参加封闭式减肥训练营选择运动方案时提供参照，还能为各大封闭式减肥训练营在针对 IR 型肥胖儿童青少年改进训练方案时提供指引。

3 研究对象与方法

3.1 研究对象

3.1.1 研究对象及纳排标准

本研究对象为 2021 年某暑期夏令营的 IR 肥胖儿童青少年，纳入标准：（1）年龄 10~17 岁；（2）符合中国儿童青少年肥胖标准，参照《学龄儿童青少年超重与肥胖筛查》^[118]；（3）患有 IR 的肥胖儿童青少年（HOMA-IR \geq 2.69）^[8]；（4）智力正常且积极配合完成运动干预和相关指标测试；（5）同意参与运动干预和相关测试并签署知情同意书。排除标准：（1）病理性肥胖儿童青少年（BMI \geq 40kg/m²）^[119]；（2）空腹血糖受损和糖尿病肥胖儿童青少年（FPG \geq 5.60mmol/L）^[120]（3）患有严重心血管疾病、阻塞性睡眠呼吸暂停、特发性颅内压增高等的肥胖儿童青少年^[121]；（4）正在接受肥胖或其他任何疾病（如肝胆疾病、慢性肾病）的药物治疗；（5）运动受限或拒绝参与运动干预和相关测试的。

3.1.2 研究对象分组

根据上述纳排标准筛选 2021 年某封闭式减肥训练营的儿童青少年, 符合中国儿童青少年肥胖标准的共 80 人, 再根据受试者前测采集的 FPG 和 FINS 数据, 计算 HOMA-IR, 其计算公式为 $\text{HOMA-IR} = \text{FINS (mIU/L)} \times \text{FPG (mmol/L)} / 22.5$ 。以 $\text{HOMA-IR} \geq 2.69$ 为 IR 的判定标准^[8], 筛选出 IR 型肥胖儿童青少年共 42 人, 由于国内外以 HOMA-IR 判定 IR 的标准均不同, 本研究主要涉及国内的肥胖儿童青少年, 故采用国内的一项关于肥胖儿童青少年临床研究中所使用的 IR 判定标准。再将 IR 型肥胖儿童青少年分别随机分至包含 MICT 的复合运动组 (MICT 复合组) 和包含 HIIT 的复合运动组 (HIIT 复合组), 其中 MICT 复合组 IR 型肥胖儿童青少年 20 人, HIIT 复合组 IR 型肥胖儿童青少年 22 人。

3.2 研究方法

3.2.1 数据测量

3.2.1.1 基本信息采集

受试者入营后, 测试人员向家长说明本次实验的研究内容和目的, 征得监护人及受试者同意, 签署知情同意后数据进行数据采集和运动干预。首先采集基本信息, 包括姓名、出生年月、身高、有无运动训练史、既往病史等, 身高采用身高计 (汝可 RK001) 测量, 测试要求: 受试者脱鞋、摘下帽子置于指定位置, 光脚站上身高计的底座, 身体保持正直, 目视前方, 骶骨和两肩胛紧贴身高仪立柱, 两脚跟并拢, 脚尖呈 60° 夹角向外, 两臂自然下垂。测试人员移动身高计水平板至受试者的头顶, 双眼与身高计的水平板平行时读数, 精确到 0.1cm。本研究已获广州体育学院伦理委员会审批 (审批编号: 2018LCLL-008)。

3.2.1.2 身体成分测试

采用身体成分分析仪 (韩国产, inbody370) 测量体重、肌肉量、脂肪量、体脂百分比、去脂体重、肌肉量等身体成分, 根据身高、体重计算 BMI, 公式: $\text{BMI} = \text{体重 (kg)} / [\text{身高 (m)}]^2$ 。于干预前后 1~2 天早上 7:00~9:00 空腹进行测试。

测试要求: 测试者将受试者的基本信息, 如出生年月、姓名、性别等输入 inbody370 配对的软件中。受试者在清醒、空腹的状态下, 将身上的物品包括项链、眼镜等金属物品置于指定位置, 赤足站立于 inbody370 金属感应区域内, 身体保持直立稳定, 目视正前方, 双手握紧 inbody370 手柄感应区, 手臂与躯干呈 30° , 保持该体位安静站立, 直至测试结束。

3.2.1.3 身体围度测量

使用围度软尺测量受试者的 NC、CC、WC、HC 等，单位为 cm，精确到 0.1cm，根据测量数据计算 WHR， $WHR=WC/HC$ 。于干预前后 1~2 天早上 7:00~9:00 空腹进行测量。

测试要求：于运动干预前一天和干预后一天早晨测量，测量时受试者自然站立，保持头部正直，目视正前方，双臂在胸前交叉，均匀呼吸。测试人员测量 NC、CC、WC、HC 时，环绕对应位置最高点测量，其中 CC 和 WC 在呼气末读数，测试人员统一于受试者左侧进行测量和读数。

3.2.1.4 心肺适能及握力指标测试

心肺适能及握力指标于运动干预前后 1~2 天进行，测试项目包括 VO_{2max} (ml/kg/min)、肺活量 (ml)、握力 (kg)，测试要求如下：

VO_{2max} 采用 20 米折返跑间接测量，需要提前准备雪糕筒、卷尺、蓝牙音响、20 米折返跑音乐等。测试开始时，要求受试者根据音响播放的 20 米折返跑音乐节奏折返跑，尽可能多的完整往返于雪糕筒标记的跑道两端，为防止受试者主观努力程度对结果的影响，由测试人员跟跑并鼓励每位受试者达到自身能力极限，当受试者有 2 次不能在规定的时间内到达两端时，测试结束。由另一名测试人员记录完整完成的 laps，再代入公式^[122]计算 VO_{2max} ，公式如下：

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

其中，PACER 为 20 米折返跑完整完成的 laps 数，男生 gender=1，女生 gender=0。

肺活量测试使用电子肺活量计，测试前告知受试者深吸气，使胸腔和腹腔充满气后，嘴唇紧贴肺活量计的吹嘴，匀速吹气至极限，此过程不可间断，连续测量 3 次，每次间隔 1min，测试人员记录 3 次并取最大值，单位为 ml，精确到 1ml。

握力采用电子握力计测量，首先测试人员以受试者的惯用手第二指节为基准调节握把宽度，使手指第二指节对齐握把，受试者按照标准直立姿势站立，使用自身惯用手握紧握力计，手臂伸直，掌心向身体侧，手臂外展约 30°，全力握紧握力计，连续测量 2 次，间隔 1min，测试人员记录 2 次并取最大值，单位为 kg，精确到 0.1kg。

3.2.1.5 血压及其他血液指标采集

于运动干预前后 1~2 天进行血压及其他血液指标的采集，以评估受试者代谢体适能的变化情况。其中血压采用臂式电子血压计（日本产，欧姆龙 HEM-1020）

测量, 包括 SBP 和 DBP, 单位为 mmHg。受试者到达测试场地, 静坐 10min, 待身体状态稳定后有序测量。血压统一测量受试者左臂, 测量时受试者自然坐于测试桌前, 左臂置于血压计测试位置, 尺骨鹰嘴贴靠血压计底垫, 掌心向上, 右手自然置于测试桌面, 全身放松, 呼吸均匀, 测试者即可开始测量, 测量结束读取血压数据并记录。

其他血液检测指标包括血脂 4 项: TC(mmol/L)、TG(mmol/L)、HDL-C(mmol/L)和 LDL-C(mmol/L), 以及 FPG(mmol/L)和 FINS(mIU/L)。在运动干预前后 1~2 天, 受试者在禁食 12 小时后, 于早晨 7:00~9:00 空腹状态采血, 所有受试者血液的采集由指定医院的护士完成, 并统一送至医院进行检测分析。血脂 4 项采用酶联免疫法检测, FPG 采用葡萄糖氧化酶法检测, FINS 采用电化学发光法进行检测。

3.2.2 运动方案

本研究中为期 4 周的运动量相同的 MICT 和 HIIT 方案参照 Rognmo 等^[123]、Chin 等^[124]的方法, 方法如下:

本研究 HIIT 以约 60%储备心率 (Heart rate reserve, HRR) 的强度的运动 1min, 穿插约 40%HRR 强度的间歇 1min, 交替进行, 运动期共 15min, 间歇期共 15min, HIIT 干预时间共 30min; MICT 以约 40%HRR 强度运动, 假设其运动时间为 t, 可通过下列公式计算出 t, 从而达到运动量相同的目的。

因储备心率百分比 (%HRR) 等同于储备摄氧量百分比 (%VO₂R)^[125], 即 %HRR=%VO₂R=(VO₂运动-VO₂静息)/(VO₂max-VO₂静息)×100%, 公式可改写为 VO₂运动=[(VO₂max-VO₂静息)×%VO₂R+VO₂静息], 运动时的摄氧量 (VO₂运动) 可通过上述公式计算。

两组每次运动的总耗氧量 (运动量) 均以 VO₂运动×t 表示, 那么 HIIT 每次运动期和间歇期耗氧量可表示为:

$$\text{HIIT 运动氧耗}=[(\text{VO}_{2\text{max}}-\text{VO}_{2\text{静息}})\times 60\%+\text{VO}_{2\text{静息}}]\times 15(\text{min}) \quad (1)$$

$$\text{HIIT 间歇氧耗}=[(\text{VO}_{2\text{max}}-\text{VO}_{2\text{静息}})\times 40\%+\text{VO}_{2\text{静息}}]\times 15(\text{min}) \quad (2)$$

MICT 每次运动的能耗可表示为:

$$\text{MICT 运动氧耗}=[(\text{VO}_{2\text{max}}-\text{VO}_{2\text{静息}})\times 40\%+\text{VO}_{2\text{静息}}]\times t(\text{min}) \quad (3)$$

将 20 米折返跑测试获得 IR 型肥胖儿童青少年的平均 VO₂max=33.72 (ml/kg/min) 和肥胖儿童青少年 VO₂静息=4.35 (ml/kg/min)^[126]代入 (1)、(2) 和 (3) 式, 计算 (1)+(2)=(3) 可得 t 约为 35.5min。

因运动干预期间 polar team Pro 心率遥测系统以 %HR_{max} 的形式监控强度, 故需通过 %HRR 计算出最大心率百分比 (%HR_{max}), 公式 %HRR=(HR_{运动}-HR_{静息})

$/(HR_{\max}-HR_{\text{静息}})\times 100\%$ ，其中 $HR_{\max}=220$ -年龄，受试者总体平均年龄约为 15 岁，设置 $HR_{\text{静息}}$ 为 80 次/min，代入 HR_{\max} 、 $HR_{\text{静息}}$ 可计算运动心率 ($HR_{\text{运动}}$) 和间歇心率 ($HR_{\text{间歇}}$)，再将其代入 $\%HR_{\max}=HR_{\text{运动}}/HR_{\max}$ ，计算可得 HIIT 运动心率约为 $78\%HR_{\max}$ ，间歇心率约为 $63\%HR_{\max}$ ，MICT 心率约为 $63\%HR_{\max}$ 。

考虑实际干预过程中心率波动范围较大，HIIT 运动期心率范围尽量控制在 $75\%\sim 85\%HR_{\max}$ 间波动，间歇期监控时控制心率在 $55\%\sim 65\%HR_{\max}$ 之间波动，MICT 也控制心率在 $55\%\sim 65\%HR_{\max}$ 之间波动。有研究表明，最大脂肪氧化强度是运动减脂的最佳强度^[127]，横断面研究也发现，在最大脂肪氧化强度下运动，燃烧的脂肪比高强度更多^[128]，IR 型肥胖儿童青少年最大脂肪氧化强度低于 n-IR 型肥胖儿童青少年，在最大脂肪氧化强度运动时，对应的心率为 $63\%HR_{\max}$ ^[129]，这与本研究 MICT 复合组的运动强度相近。

3.2.2.1 MICT 复合运动方案

MICT 复合组 IR 型肥胖儿童青少年于训练日的 10:00~12:00 和 15:00~17:00 进行复合运动干预，由封闭式训练营的专职教练安排不同类型的运动，运动形式主要为军姿练习、运动游戏、瑜伽、篮球、羽毛球类等有氧运动，及少量的自重抗阻运动，如平板支撑、徒手深蹲等，训练频率为 6 天/周，共 4 周，其运动强度主要在 $50\%\sim 80\%HR_{\max}$ ，以中低强度运动为主。

其中，在每次训练的 15:00~16:00 间，MICT 复合组受试者进行时长约 35.5min 的慢跑，心率控制在 $55\%\sim 65\%HR_{\max}$ 。受试者形成两列并排在训练场馆内慢跑，期间所有受试者佩戴 polar team Pro 心率表以监控训练强度，现场教练根据 polar team Pro 的实时心率变化，调整受试者的慢跑速度，以维持受试者的整体平均心率在实验要求的范围内波动，直至训练结束。每次慢跑前进行 10~20min 准备活动，形式以关节活动、伸展动作为主，训练后进行 10~20min 整理活动，形式是拉伸和自由活动为主。

3.2.2.2 HIIT 复合运动方案

HIIT 复合组 IR 型肥胖儿童青少年亦于训练日的 10:00~12:00 和 15:00~17:00 进行复合运动干预，其运动形式、强度、频率和周期的安排都与 MICT 复合组一致，与 MICT 复合组于同一场馆进行运动干预。

与 MICT 复合组不同的是，HIIT 复合组在每次训练的 15:00~16:00 间进行与 MICT 运动量相同的 HIIT。HIIT 的运动形式为折返跑，间歇形式为原地踏步，所有受试者进行 1min 强度为 $75\%\sim 85\%HR_{\max}$ 的折返跑后，再进行 1min 强度为 $55\%\sim 65\%HR_{\max}$ 的原地踏步，运动和间歇交替进行共 30min，其中包含运动期 15min，间歇期 15min，直至训练结束。

HIIT 期间所有受试者两两组合，于起始线站成一排，训练开始时一人在 25 米距离连续进行折返跑，让心率在前 30s 尽快升至 75%~85%HR_{max}，并维持在此心率区间；另一人则原地踏步间歇，间歇期间让心率在前 30s 尽快降至 55%~65%HR_{max}，并维持在此心率区间。所有受试者佩戴 polar team Pro 心率表监控训练强度，polar team Pro 心率遥测系统会在折返跑的起点正前方现场投屏每个人心率变化，受试者在跑动过程中会看到大屏幕上自己的心率变化，主教练在每次训练时告知受试者可通过调整跑动强度，以在运动期达到并维持在实验要求的心率范围，训练过程中多名辅助教练也会根据实时投屏的心率，督促个别强度过低受试者加快跑动速度，强度过高的受试者减缓跑动速度，同时告知间歇期的受试者通过调整呼吸节奏、深度和频率，让心率能够稳定下降至实验要求的范围内。

HIIT 复合组折返跑与 MICT 复合组慢跑训练前、后进行的准备活动和整理活动一致。两复合组在 15:00~16:00 外的其它运动安排一致，且两复合组 IR 型肥胖儿童青少年的饮食和睡眠均统一管理，早间 8:00~10:00 安排学员整理内务和早餐，12:00~15:00 安排统一午餐和午睡，17:00~21:00 在晚餐后安排写日记、作业、看电影等活动，于 21:00~22:00 统一由减肥营教练管理入睡。

3.2.3 饮食方案

所有受试者的饮食由减肥训练营专业营养师统一制定，入营时依据受试者的性别、年龄、身高和体重，利用 Harris-Benedict 公式^[130]计算静息消耗，再根据受试者的平均静息能耗制定饮食方案，其每日摄入的能量以满足基础能耗为原则。配餐时遵循一日三餐热量比例和平衡膳食分配比例进行，根据中国疾病预防控制中心制定的 2018 版《中国食物营养成分表》，早、中、晚三餐所含热量比例分别为 30%、40%、30%，每餐的碳水化合物约占总能量的 55%~65%，脂肪约占 20%~35%，蛋白质约占 10%~15%。三餐食物以炖、凉拌、蒸煮等烹饪方式为主，低盐少油，整个运动干预周期中，受试者三餐均有 1~3 名教练监督，以保证学员按计划饮食，严禁外来食物摄入。

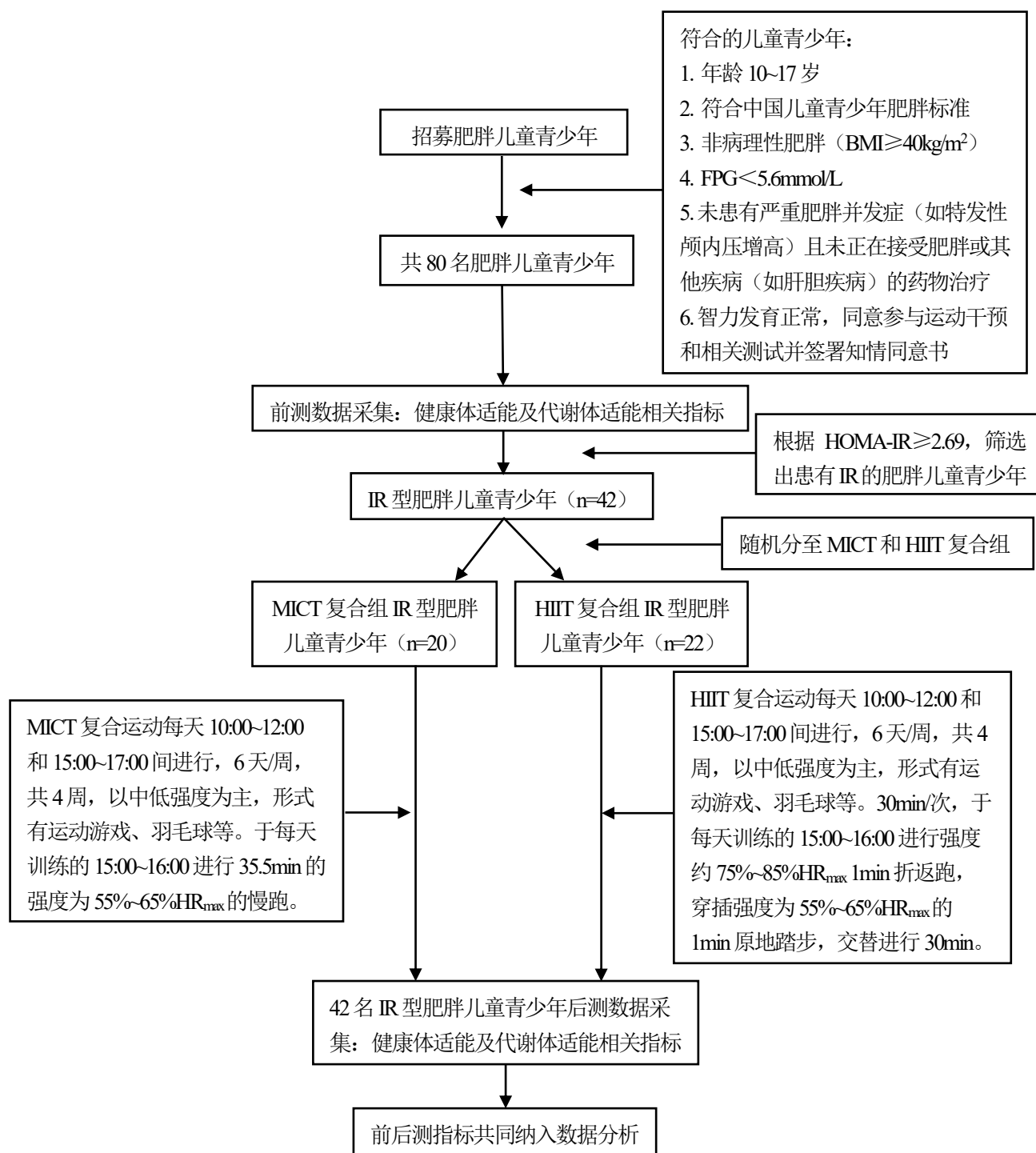
3.2.4 数理统计法

采用 spss26.0 进行分析，连续性变量采用均值±标准差（M±SD）表示，分类变量采用 n（%）表示，干预前后各指标变化量以“Δ 指标”表示，干预前后各指标变化率以“% 指标”表示，变化量=干预后数值-干预前数值，变化率=变化量/干预前数值×100%，改善率=（干预前 IR 人数-干预后 IR 人数）/干预前 IR

人数 $\times 100\%$ ，采用 Shapiro-Wilk 检验验证数据正态性，不符合正态分布的数据采用非参数检验。

采用独立样本 t 检验、卡方检验比较两复合组的 IR 型肥胖儿童青少年的基线数据差异，采用 2×2 重复测量方差分析比较两复合组的 IR 型肥胖儿童青少年的健康和代谢体适能指标的变化，采用独立样本 t 检验比较两复合组健康和代谢体适能的变化量及变化率的差异，采用卡方检验比较两复合组胰岛素抵抗改善率的差异，采用 GraphPad Prism 9.0 软件绘制柱状图，在本研究的数据分析中 $P < 0.05$ 为差异具有统计学意义。

3.2.5 实验设计框架图



4 结果

4.1 受试者基本信息

本研究共纳入 80 名肥胖儿童青少年，其中 IR 型肥胖儿童青少年共 42 人，将 IR 型肥胖儿童青少年随机分至 MICT 复合组和 HIIT 复合组后，MICT 复合组 IR 型肥胖儿童青少年 20 人，HIIT 复合组 22 人。42 名 IR 型肥胖儿童青少年均为主动报名参加暑期封闭式减肥训练，其提升健康水平的主观意愿较强，故两复合组受试者在 4 周复合运动干预中均未发生脱落现象。两复合组受试者干预前基本信息比较如下，采用独立样本 t 检验、卡方检验进行两组 IR 型肥胖儿童青少年基本信息的比较，发现 MICT 和 HIIT 复合组 IR 型肥胖儿童青少年所有指标均无显著差异（ $P>0.05$ ）。（详见表 1）

表 1 MICT 和 HIIT 复合组 IR 型肥胖儿童青少年基本信息比较

指标	MICT 复合组 (n=20)	HIIT 复合组 (n=22)	总数 (n=42)	<i>P</i> (<i>t</i> / χ^2)
性别(男/女)	11/9	11/11	22/20	0.746(0.105)
年龄(岁)	14.70±1.59	14.09±2.20	14.38±1.94	0.315(1.02)
身高(cm)	162.0±6.4	161.5±9.3	161.7±8.0	0.823(0.23)
体重(kg)	83.56±13.40	81.36±14.84	82.40±14.05	0.619(0.50)
BMI(kg/m ²)	31.70±4.00	30.96±3.50	31.31±3.72	0.528(0.64)
体脂肪量(kg)	34.74±8.18	33.44±8.56	34.06±8.30	0.617(0.50)
体脂百分比(%)	41.43±5.52	40.74±5.19	41.07±5.29	0.678(0.42)
去脂体重(kg)	48.82±8.29	47.92±8.37	48.35±8.24	0.731(0.35)
肌肉量(kg)	26.94±5.11	26.47±4.99	26.69±4.99	0.764(0.30)
NC(cm)	37.2±2.7	36.2±2.8	36.7±2.7	0.229(1.22)
CC(cm)	102.3±7.5	101.4±8.2	101.8±7.7	0.715(0.37)
WC(cm)	97.7±9.3	94.8±9.4	96.2±9.3	0.331(0.98)
HC(cm)	108.0±7.6	106.7±8.5	107.3±8.0	0.605(0.52)
WHR	0.90±0.06	0.89±0.08	0.90±0.07	0.525(0.64)
VO _{2max} (ml/kg/min)	33.00±6.69	34.38±4.90	33.72±5.79	0.445(-0.77)
肺活量(ml)	3080±657	2938±845	3005±755	0.549(0.60)
握力(kg)	25.4±6.6	25.2±6.8	25.3±6.6	0.906(0.12)
SBP(mmHg)	115.00±9.17	112.77±12.18	113.83±10.78	0.510(0.66)
DBP(mmHg)	67.45±7.29	68.77±10.54	68.14±9.05	0.642(-0.47)
TC(mmol/L)	4.86±0.99	5.20±0.94	5.04±0.97	0.273(-1.11)
TG(mmol/L)	1.32±0.48	1.37±0.58	1.35±0.53	0.768(-0.30)
HDL-C(mmol/L)	1.11±0.21	1.22±0.23	1.17±0.22	0.104(-1.67)
LDL-C(mmol/L)	2.97±0.78	2.97±0.72	2.97±0.74	0.988(-0.02)
FINS(mIU/L)	21.15±6.11	22.56±6.96	21.89±6.53	0.491(-0.70)
FPG(mmol/L)	4.83±0.50	4.47±0.68	4.64±0.62	0.062(1.92)
HOMA-IR	4.52±1.35	4.43±1.35	4.47±1.33	0.830(0.22)

注：连续性变量组间比较采用 *t* 检验，性别男女比例的组间差异采用卡方检验。BMI：身体质量指数，NC：颈围，CC：胸围，WC：腰围，HC：臀围，WHR：腰臀比，VO_{2max}：最大摄氧量，SBP：收缩压，DBP：舒张压，TC：总胆固醇，TG：甘油三酯，HDL-C：高密度脂蛋白胆固醇，LDL-C：低密度脂蛋白胆固醇，FINS：空腹胰岛素，FPG：空腹血糖，HOMA-IR：胰岛素抵抗指数。

4.2 两种复合运动对 IR 型肥胖儿童青少年健康体适能的影响

4.2.1 两种复合运动对 IR 型肥胖儿童青少年身体成分的影响

重复测量方差分析结果显示,在两复合组的身体成分指标中,BMI 时间的主效应显著($P<0.01$),组别的主效应不显著($P>0.05$),组别与时间之间的交互作用显著($P<0.05$),说明 BMI 随时间的变化可能受到组别的影响,应进一步对时间和组别进行简单效应分析。时间的单独效应发现,两组 BMI 干预后均显著低于干预前($P<0.01$),组别的单独效应发现,两组干预前和干预后均无显著差异($P>0.05$),说明 4 周运动干预显著降低了两复合组 IR 型肥胖儿童青少年的 BMI。体重、体脂肪量、体脂百分比、去脂体重和肌肉量时间的主效应显著($P<0.01$),组别的主效应不显著($P>0.05$),组别与时间之间的交互作用不显著($P>0.05$),说明运动干预显著降低了两复合组的体脂肪量、体脂百分比、去脂体重和肌肉量,两组体脂肪量、体脂百分比、去脂体重和肌肉量干预前后变化趋势相同(详见表 2)

表 2 MICT 和 HIIT 复合组 IR 型肥胖儿童青少年身体成分的变化表

指标	MICT 复合组 (n=20)		HIIT 复合组 (n=22)		$P(\eta^2)$		
	干预前	干预后	干预前	干预后	时间	组别	交互作用
体重(kg)	83.56±13.40	76.63±11.96	81.36±14.84	75.40±14.18	<0.001(0.938)	0.687(0.004)	0.072(0.079)
BMI(kg/m ²)	31.70±4.00	29.05±3.66	30.96±3.50	28.65±3.48	<0.001(0.959)	0.616(0.006)	0.046(0.095)
体脂肪量(kg)	34.74±8.18	29.60±7.99	33.44±8.56	28.75±8.04	<0.001(0.900)	0.672(0.005)	0.380(0.019)
体脂百分比(%)	41.43±5.52	38.37±6.35	40.74±5.19	37.69±5.57	<0.001(0.789)	0.694(0.004)	0.988(0.001)
去脂体重(kg)	48.82±8.29	47.04±7.70	47.92±8.37	46.65±8.21	<0.001(0.590)	0.801(0.002)	0.215(0.038)
肌肉量(kg)	26.94±5.11	25.90±4.66	26.47±4.99	25.66±4.88	<0.001(0.611)	0.815(0.001)	0.328(0.024)

注:重复测量方差分析

进一步对两复合组身体成分变化量及变化率比较后发现,MICT 复合组的 BMI 变化量显著高于 HIIT 复合组($P<0.05$),变化率则无显著差异($P>0.05$);两复合组的体重、体脂肪量、体脂百分比、去脂体重和肌肉量的变化量、变化率的差异均无统计学意义($P>0.05$)。说明两复合运动均能显著降低 IR 型肥胖儿童青少年的体重、BMI、体脂肪量、脂肪百分比、去脂体重和肌肉量,MICT 复合运动降低 BMI 的效果优于 HIIT 复合运动。(详见表 3)

表 3 MICT 和 HIIT 复合组 IR 型肥胖儿童青少年身体成分变化量及变化率比较表

指标	MICT 复合组 (n=20)		HIIT 复合组 (n=22)		<i>P</i> (<i>t</i>) 值	
	变化量	变化率(%)	变化量	变化率(%)	变化量	变化率
体重(kg)	-6.93±1.99	-8.21±1.59	-5.96±1.36	-7.43±1.64	0.072(-1.85)	0.126(-1.56)
BMI(kg/m ²)	-2.65±0.63	-8.34±1.62	-2.32±0.40	-7.57±1.57	0.046(-2.06)	0.127(-1.56)
体脂肪量(kg)	-5.15±1.85	-15.22±5.46	-4.69±1.50	-14.49±4.38	0.380(-0.89)	0.632(-0.48)
体脂百分比(%)	-3.05±1.73	-7.69±4.73	-3.05±1.50	-7.65±3.79	0.989(-0.01)	0.975(-0.03)
去脂体重(kg)	-1.78±1.21	-3.50±2.23	-1.27±1.38	-2.67±2.79	0.215(-1.26)	0.295(-1.06)
肌肉量(kg)	-1.04±0.75	-3.63±2.50	-0.81±0.76	-3.09±2.75	0.328(-0.99)	0.508(-0.67)

注：独立样本 *t* 检验

4.2.2 两种复合运动对 IR 型肥胖儿童青少年身体围度的影响

重复测量方差分析结果显示，在两复合组的身体围度指标中，NC、WC 和 WHR 时间的主效应显著 ($P<0.01$)，组别的主效应不显著 ($P>0.05$)，组别与时间的交互作用显著 ($P<0.05$)，说明 NC、WC 和 WHR 随时间的变化可能受到组别的影响，应进一步对时间和组别进行简单效应分析。时间的单独效应分析发现，两复合组 NC、WC 和 WHR 干预后均显著低于干预前 ($P<0.05$)；组别的单独效应分析发现两复合组 NC、WC、WHR 在干预前、干预后均无显著差异 ($P>0.05$)。说明两种复合运动干预均显著降低了 IR 型肥胖儿童青少年的 NC、WC、WHR。CC、HC 的时间主效应显著 ($P<0.01$)，组别主效应不显著 ($P>0.05$)，时间与组别的交互效应不显著 ($P>0.05$)，说明 4 周运动干预显著降低了 CC、HC。（详见表 4）

表 4 MICT 和 HIIT 复合组 IR 型肥胖儿童青少年身体围度的变化表

指标	MICT 复合组 (n=20)		HIIT 复合组 (n=22)		<i>P</i> (η^2)		
	干预前	干预后	干预前	干预后	时间	组别	交互作用
NC(cm)	37.2±2.7	34.8±2.0	36.2±2.6	35.0±2.4	<0.001(0.689)	0.567(0.008)	0.003(0.195)
CC(cm)	102.3±7.5	97.3±6.4	101.4±8.2	96.6±8.1	<0.001(0.778)	0.738(0.003)	0.788(0.002)
WC(cm)	97.7±9.3	89.5±7.7	94.8±9.4	89.2±9.4	<0.001(0.833)	0.575(0.008)	0.011(0.151)
HC(cm)	108.0±7.6	102.8±7.1	106.7±8.5	102.0±8.5	<0.001(0.834)	0.674(0.004)	0.453(0.014)
WHR	0.90±0.06	0.87±0.05	0.89±0.08	0.88±0.07	<0.001(0.470)	0.835(0.001)	0.020(0.128)

注：同表 2

进一步对两复合组身体围度变化量及变化率进行比较后发现，MICT 复合组 NC、WC 和 WHR 变化量及变化率显著高于 HIIT 复合组 ($P<0.05$)，两复合组 CC、HC 的变化量及变化率均无显著差异 ($P>0.05$)。说明两复合运动均能显

著降低 NC、CC、WC、HC 和 WHR 等身体围度，MICT 复合运动降低 NC、WC 和 WHR 的效果优于 HIIT 复合运动。（详见表 5）

表 5 MICT 和 HIIT 复合组 IR 型肥胖儿童青少年身体围度变化量及变化率比较表

指标	MICT 复合组（n=20）		HIIT 复合组（n=22）		<i>P</i> （ <i>t</i> ）值	
	变化量	变化率(%)	变化量	变化率(%)	变化量	变化率
NC(cm)	-2.4±1.4	-6.32±3.44	-1.2±1.0	-3.26±2.73	0.003(-3.11)	0.003(-3.20)
CC(cm)	-5.0±2.7	-4.82±2.46	-4.8±2.7	-4.73±2.65	0.788(-0.27)	0.909(-0.11)
WC(cm)	-8.2±3.0	-8.26±2.61	-5.6±3.3	-5.90±3.47	0.011(-2.66)	0.017(-2.47)
HC(cm)	-5.2±2.1	-4.82±1.81	-4.7±2.4	-4.41±2.30	0.453(-0.76)	0.529(-0.63)
WHR	-0.03±0.03	-3.60±2.74	-0.01±0.03	-1.55±3.00	0.020(-2.30)	0.027(-2.30)

注：同表 3

4.2.3 两种复合运动对 IR 型肥胖儿童青少年心肺适能及握力的影响

重复测量方差分析结果显示，两复合组心肺适能及握力指标中，肺活量、VO_{2max} 及握力时间主效应显著（*P*<0.001），组别的主效应不显著（*P*>0.05），时间与组别的交互作用不显著（*P*>0.05），说明 4 周运动干预显著提高了两组的肺活量、VO_{2max} 和握力，两组运动干预后肺活量、VO_{2max} 和握力的变化趋势相同。（详见表 6）

表 6 MICT 和 HIIT 复合组 IR 型肥胖儿童青少年心肺适能及握力的变化表

指标	MICT 复合组（n=20）		HIIT 复合组（n=22）		<i>P</i> (<i>η</i> ²)		
	干预前	干预后	干预前	干预后	时间	组别	交互作用
VO _{2max} (ml/kg/min)	33.00±6.69	36.61±7.04	34.38±4.90	38.38±4.91	<0.001(0.769)	0.386(0.019)	0.566(0.008)
肺活量(ml)	3080±657	3378±710	2938±815	3332±670	<0.001(0.568)	0.671(0.005)	0.316(0.025)
握力(kg)	25.4±6.6	27.7±7.4	25.2±6.8	27.1±7.3	0.001(0.369)	0.840(0.001)	0.668(0.005)

注：同表 2

进一步对两复合组的心肺适能及握力的变化量、变化率进行比较后发现，MICT 复合组和 HIIT 组的 VO_{2max}、肺活量和握力变化量、变化率的差异均无统计学意义（*P*>0.05）。两复合运动均能提升 IR 型肥胖儿童青少年 VO_{2max}、肺活量和握力，但两复合组的干预效果无显著差异（*P*>0.05）。（详见表 7）

表 7 MICT 和 HIIT 复合组 IR 型肥胖儿童青少年心肺适能及握力的变化量及变化率比较表

指标	MICT 复合组 (n=20)		HIIT 复合组 (n=22)		$P(t)$ 值	
	变化量	变化率(%)	变化量	变化率(%)	变化量	变化率
VO _{2max} (ml/kg/min)	3.61±1.61	11.35±5.69	3.99±2.51	12.11±8.19	0.565(-0.58)	0.730(-0.35)
肺活量(ml)	298±244	10.03±9.58	395±358	16.69±16.73	0.317(-1.01)	0.126(-1.56)
握力(kg)	2.3±2.4	8.97±10.55	1.9±3.1	8.19±14.01	0.668(0.43)	0.841(0.20)

注：同表 3

4.3 两种复合运动对 IR 型肥胖儿童青少年代谢体适能的影响

重复测量方差分析结果显示，两复合组代谢体适能指标中，SBP、DBP、TC、TG、LDL-C、FINS、HOMA-IR 时间主效应显著 ($P<0.05$)，组别的主效应不显著 ($P>0.05$)，时间与组别的交互效应不显著 ($P>0.05$)，说明 4 周运动干预均显著降低了两组 SBP、DBP、TC、TG、LDL-C、FINS、HOMA-IR。HDL-C 时间主效应不显著 ($P>0.05$)，组别的主效应不显著 ($P>0.05$)，时间与组别的交互效应不显著 ($P>0.05$)，结合均值发现，两复合组的 HDL-C 均随时间有显著下降的趋势 ($P=0.057$)。

FPG 时间的主效应显著 ($P<0.01$)，组别的主效应不显著 ($P>0.05$)，时间与组别的交互效应显著 ($P<0.05$)。进一步对 FPG 组别和时间进行简单效应分析，FPG 时间的单独效应发现，MICT 复合组 FPG 干预后显著低于干预前 ($P<0.01$)，HIIT 复合组干预前后差异无统计学意义 ($P>0.05$)；FPG 组别的单独效应发现，干预前两复合组 FPG 无显著差异 ($P>0.05$)，干预后两复合组 FPG 有显著差异 ($P<0.05$)，说明 MICT 复合组 IR 型肥胖儿童青少年 FPG 在干预后显著降低，但 HIIT 组 IR 型肥胖儿童青少年 FPG 却无显著变化。（详见表 8）

表 8 MICT 和 HIIT 复合组 IR 型肥胖儿童青少年代谢体适能变化表

指标	MICT 复合组 (n=20)		HIIT 复合组 (n=22)		$P(\eta^2)$		
	干预前	干预后	干预前	干预后	时间	组别	交互作用
SBP(mmHg)	115.00±9.17	111.75±8.29	112.77±12.18	107.95±12.15	0.009(0.159)	0.314(0.025)	0.595(0.007)
DBP(mmHg)	67.45±7.29	63.85±7.30	68.77±10.53	63.91±9.78	0.017(0.134)	0.751(0.003)	0.713(0.003)
TC(mmol/L)	4.86±0.99	3.95±0.65	5.20±0.94	3.88±0.61	<0.001(0.699)	0.558(0.009)	0.093(0.069)
TG(mmol/L)	1.32±0.48	0.91±0.32	1.37±0.58	0.89±0.29	<0.001(0.455)	0.907(0.001)	0.645(0.005)
HDL-C(mmol/L)	1.11±0.21	1.06±0.20	1.22±0.23	1.13±0.29	0.057(0.087)	0.162(0.048)	0.548(0.009)
LDL-C(mmol/L)	2.97±0.78	2.25±0.48	2.97±0.72	2.29±0.68	<0.001(0.561)	0.909(0.001)	0.859(0.001)
FINS(mIU/L)	21.15±6.11	10.31±3.08	22.56±6.96	12.55±4.35	<0.001(0.668)	0.131(0.056)	0.725(0.003)
FPG(mmol/L)	4.83±0.50	3.95±0.69	4.47±0.68	4.48±0.75	0.001(0.255)	0.605(0.007)	0.001(0.264)
HOMA-IR	4.52±1.35	1.79±0.53	4.43±1.35	2.54±1.07	<0.001(0.705)	0.207(0.039)	0.084(0.073)

注：同表 2

进一步对两复合组的 IR 型肥胖儿童青少年代谢体适能指标的变化量、变化率进行比较后发现，MICT 和 HIIT 复合组的 SBP、DBP、TC、TG、HDL-C、LDL-C、FINS 变化量、变化率的差异均无统计学意义 ($P>0.05$)。两复合组 FPG 变化量及变化率均有显著差异 ($P<0.05$)，其中 MICT 复合组 FPG 显著下降 ($P<0.05$)，HIIT 复合组 FPG 则无显著变化 ($P>0.05$)，说明 MICT 复合运动降低 FPG 效果优于 HIIT 复合运动。两复合组 HOMA-IR 变化量无显著差异 ($P=0.084$)，变化率则有显著差异 ($P<0.05$)，说明 MICT 复合运动降低 IR 型肥胖儿童青少年 HOMA-IR 优于 MICT 复合运动。（详见表 9）

表 9 MICT 和 HIIT 复合组 IR 型肥胖儿童青少年代谢体适能变化量及变化率比较表

指标	MICT 复合组 (n=20)		HIIT 复合组 (n=22)		$P(t)$ 值	
	变化量	变化率(%)	变化量	变化率(%)	变化量	变化率
SBP(mmHg)	-3.25±9.55	-2.49±7.88	-4.82±9.42	-3.97±8.46	0.595(0.54)	0.561(0.59)
DBP(mmHg)	-3.60±8.91	-4.54±13.79	-4.86±12.65	-5.39±17.75	0.713(0.37)	0.864(0.17)
TC(mmol/L)	-0.92±0.69	-17.68±11.04	-1.32±0.80	-23.91±12.99	0.093(1.72)	0.103(1.67)
TG(mmol/L)	-0.42±0.43	-26.14±25.12	-0.49±0.57	-27.84±28.29	0.645(0.46)	0.839(0.21)
HDL-C(mmol/L)	-0.05±0.12	-3.56±9.83	-0.09±0.28	-6.02±22.64	0.548(0.61)	0.657(0.45)
LDL-C(mmol/L)	-0.72±0.56	-22.53±13.24	-0.69±0.70	-21.65±18.29	0.859(-0.18)	0.861(-0.18)
FINS(mIU/L)	-10.84±6.44	-47.82±22.74	-10.02±8.40	-40.06±24.26	0.725(-0.35)	0.292(-1.07)
FPG(mmol/L)	-0.88±0.83	-17.48±15.49	0.01±0.69	1.23±15.62	0.001(-3.78)	<0.001(-3.89)
HOMA-IR	-2.73±1.35	-57.83±16.20	-1.89±1.68	-39.62±23.94	0.084(-1.77)	0.007(-2.86)

注：同表 3

4.4 两种复合运动对 IR 型肥胖儿童青少年 IR 的改善效果

以 IR 的评价标准为基础, 卡方检验结果显示, 干预后 MICT 复合组 IR 型肥胖儿童青少年 IR 改善率为 90%, 显著高于 HIIT 复合组的 54.55% ($P < 0.05$), MICT 复合组全部 IR 型肥胖儿童青少年 HOMA-IR 在干预后的整体下降情况要明显好于 HIIT 复合组。说明 MICT 复合运动改善 IR 型肥胖儿童青少年 IR 的效果优于 HIIT 复合运动。(详见表 10, 图 1)

表 10 MICT 和 HIIT 复合组 IR 型肥胖儿童青少年 IR 改善率比较表

评价标准	MICT 复合组 (n=20)			HIIT 复合组 (n=22)			$P(t/\chi^2)$ (改善率)
	干预前 (n)	干预后 (n)	IR 改善率	干预前 (n)	干预后 (n)	IR 改善率	
HOMA-IR ≥ 2.69	20	2	90%	22	10	54.55%	0.011(6.453)

注: 卡方检验

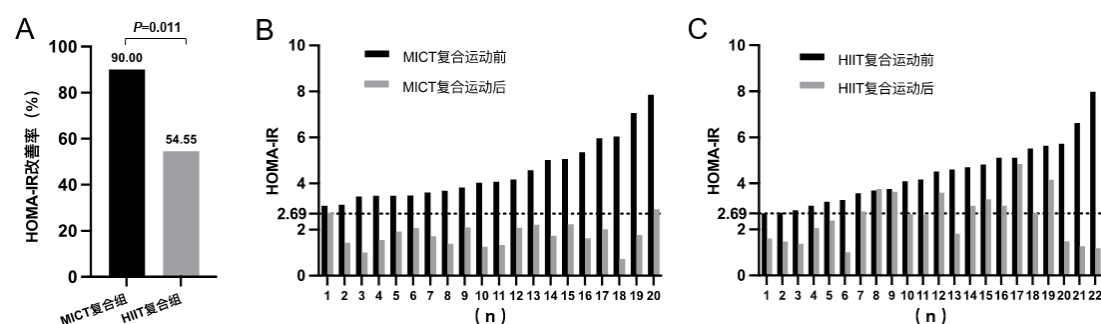


图 1 MICT 和 HIIT 复合组 IR 型肥胖儿童青少年 HOMA-IR 改善效果图

5 讨论

5.1 两种复合运动改善 IR 型肥胖儿童青少年健康体适能的效果及差异

临床研究显示, 年龄在 6~18 岁之间的儿童中, IR 型肥胖儿童青少年的体重、BMI、WC 等身体成分及身体围度指标显著高于 n-IR 型肥胖儿童青少年^[7], 且 IR 型肥胖儿童青少年比 n-IR 型肥胖儿童青少年更易出现血压、血脂和血糖的代谢紊乱^[8]。更大程度的代谢紊乱, 也意味着及时提升 IR 型肥胖儿童青少年健康及代谢体适能必要性。

5.1.1 两种复合运动改善 IR 型肥胖儿童青少年身体成分的效果及差异

中国儿童青少年整体超重肥胖基数还在继续扩大^[4]，而运动干预是肥胖儿童青少年改善健康的安全有效的途径之一。本研究依托封闭式减肥训练营，进一步结合过往研究中较为成熟和应用广泛的 MICT 和 HIIT，对 IR 型肥胖儿童青少年进行运动干预。在身体成分指标中，无论是 MICT 复合运动还是 HIIT 复合运动，均能使 IR 型肥胖儿童青少年体重、BMI、体脂肪量、体脂百分比、去脂体重和肌肉量等显著下降。国内外研究均表明，封闭式减肥训练营干预能显著降低肥胖儿童青少年的体重、BMI、体脂百分比等身体成分指标，并同时伴随着 WC 的下降^[13, 111, 112]，曹薏等^[11]进行 12 周的 MICT 和 HIIT 干预也均能有效降低肥胖儿童青少年体重、BMI、体脂肪量、体脂百分比等身体成分指标，有关肥胖儿童青少年 MICT 和 HIIT 干预的 Meta 分析得出的结论类似^[92]。在 IR 型肥胖儿童青少年的研究中，Alvarez 等^[100]对 IR 肥胖儿童进行为期 6 周的 HIIT 干预，发现 IR 儿童的体重、WC 及体脂肪量均下降。本文中 4 周 MICT 和 HIIT 复合运动干预均能显著降低 IR 型肥胖儿童青少年的体重、BMI、体脂肪量、体脂百分比，这与过往的结论类似。去脂体重和肌肉量与其他身体成分指标的变化相反，两复合组的 IR 型肥胖儿童青少年去脂体重和肌肉量均出现不同程度的下降，可能是因为体重下降导致的肌肉中水分大量丢失，肌肉总量和去脂体重随之减少。其中 MICT 复合组的 IR 型肥胖儿童青少年下降趋势均更为明显，HIIT 复合组去脂体重和肌肉量下降幅度更小，可能是因为 HIIT 运动强度更大，比 MICT 在瘦体重的维持上更具有优势。

两复合组的 IR 型肥胖儿童青少年各身体成分指标变化差异不大，仅 BMI 在 MICT 复合组的降低幅度显著大于 HIIT 复合组，变化率则并不显著更大，反观体重，MICT 复合组降低 IR 型肥胖儿童青少年体重虽明显高于 HIIT 复合组，但并不显著。在过往研究中，4 周封闭式减肥训练营干预，确实能够显著降低 IR 型肥胖儿童青少年体重和 BMI^[131]，12 周的 MICT 和 HIIT 干预均能显著降低肥胖儿童青少年 BMI，但两组的下降幅度没有显著差异^[11]，而 Dias 等^[12]对肥胖儿童进行 12 周 MICT 和 HIIT 干预，发现 MICT 和 HIIT 组 BMI 均下降，但 MICT 组的 BMI 下降幅度要更大，上述两项研究均未控制 MICT 和 HIIT 的运动量相同。本研究发现 MICT 复合运动降低 IR 型肥胖儿童青少年 BMI 的效果更好，这与 Dias 等^[12]的研究结果类似，但由于相对基线值的变化率差异并不显著，故 MICT 复合运动效果更好的原因，也可能与 BMI 基线值较高有关。

5.1.2 两种复合运动改善 IR 型肥胖儿童青少年身体围度的效果及差异

身体围度是较为直观的反映身体成分变化的指标, NC、CC、WC、HC、WHR 等作为简单易获得的指标, 能在减重的基础上更进一步判断肥胖儿童青少年的体型变化, 这一点对于衡量肥胖儿童青少年健康改善情况较为重要。本文中身体围度与 BMI 在干预前后的变化趋势基本一致, MICT 和 HIIT 复合组的 IR 型肥胖儿童青少年的 NC、CC、WC、HC 和 WHR 干预后均出现显著下降。潘丽英等^[132]对 50 名肥胖青少年进行为期 6 周的有氧运动干预, 发现无论是中度和重度肥胖的青少年, 其 WC 和 HC 均显著下降, 詹晓梅等^[131]的研究中肥胖青少年进行 4 周封闭式减肥训练营的复合运动干预后, 也得出类似的结论。WC 等身体围度指标的改善, 降低了 IR 型肥胖儿童青少年的心血管及代谢疾病的风险。

但两种复合运动对 IR 型肥胖儿童青少年身体围度的改善效果有明显的差异, MICT 复合组 NC、WC 和 WHR 的变化量及变化率均显著高于 HIIT 复合组, 过往研究也发现, 12 周的 MICT 和 HIIT 干预均能使肥胖儿童 WC 明显下降, MICT 组肥胖儿童的 WC 降低幅度明显大于 HIIT 组^[133]。上文提到 MICT 复合运动降低 IR 型肥胖儿童青少年 BMI 的效果是优于 HIIT 复合运动的, 从体型变化的角度看, 主要体现在 MICT 复合运动对 IR 型肥胖儿童青少年的 NC、WC 和 WHR 等的改善效果更好。而 WC 与向心性肥胖密切相关^[64], WHR 也被用于判定向心性肥胖, 高 WHR 水平也与高胰岛素血症、IR 相关^[134], NC 同样与向心性肥胖呈正相关^[70], 是筛查心血管风险的补充指标^[69], 而肥胖是儿童 IR 的关键危险因素, 尤其是内脏肥胖与 IR 呈强正相关^[38], 在成人和儿童中, 向心性肥胖和心血管及代谢类疾病高度有关^[135-138], MICT 复合运动改善 NC、WC 和 WHR 的效果更好, 意味着在改善向心性肥胖方面更有优势, 其改善心血管及代谢风险的效果也更好。MICT 复合组 IR 型肥胖儿童青少年 NC、WC 和 WHR 的改善效果更好的原因, 可能与其以最大脂肪氧化强度进行运动的时间更长有关, 研究表明, 最大脂肪氧化强度是运动减脂的最佳强度^[127], 在最大脂肪氧化强度下运动, 燃烧的脂肪比高强度更多^[128]。

5.1.3 两种复合运动改善 IR 型肥胖儿童青少年心肺适能及握力的效果及差异

肥胖儿童青少年的心肺适能及肌力一直是研究的焦点, VO_{2max} 和肺活量是反映心肺适能的常规指标, 其中主要指标是 VO_{2max} ^[139]。研究发现, 高心肺适能与超重肥胖儿童的心血管代谢疾病风险降低相关, 提高心肺适能可以缓和肥胖

与心脏代谢疾病风险之间的关系^[140]，在 12~17 岁青少年中，心肺适能部分中介了肥胖与心血管代谢风险的相关性^[141]，相比于正常体重儿童，肥胖或不健康儿童具备较高的心肺适能时，对他们心血管代谢风险的有益影响更为明显^[142]。握力则是反映儿童青少年整体肌力的重要参考指标，肌力与儿童青少年心血管及代谢风险亦呈负相关^[143]。本文两复合运动均能显著提升 IR 型肥胖儿童青少年 VO_{2max} 、肺活量和握力，提示两种复合运动对降低 IR 型肥胖儿童青少年的心血管及代谢风险的益处。过往研究发现 4 周封闭式减肥训练营干预能够提升肥胖儿童青少年 VO_{2max} 和肺活量，且中高强度身体活动量与肥胖儿童青少年心肺适能改善具有剂量-效应关系^[144]，而 12 周 MICT 和 HIIT 干预也均能明显提升肥胖儿童青少年心肺适能^[11]。在握力方面，通常认为 RT 是提升的握力的有效方式，但也有研究发现有氧运动能够提升握力^[105]。本文两复合运动提升 IR 型肥胖儿童青少年心肺适能及握力的结论与过往研究结论类似。

两复合组的 IR 型肥胖儿童青少年 VO_{2max} 、肺活量和握力的变化量及变化率并没有显著差异，提示两复合运动改善 IR 型肥胖儿童青少年心肺适能及握力的效果类似，但 HIIT 复合运动提升心肺适能的效果更好一些。过往也有研究表明 MICT 和 HIIT 干预均能提升肥胖儿童青少年 VO_{2max} ，而 HIIT 的提升效果好于 MICT^[11]，Chin 等^[124]也发现的同能耗 HIIT 提升 VO_{2max} 的效果比 MICT 更好，这与本文的结论类似，这可能与 HIIT 有更高的运动强度有关，较高的运动强度利于提升 VO_{2max} 。

综上所述，两种复合运动均可有效改善 IR 型肥胖儿童青少年健康体适能，两复合运动对 IR 型肥胖儿童青少年心肺适能及握力的改善效果类似，但 MICT 复合运动改善 IR 型肥胖儿童青少年 BMI 及向心性肥胖的效果显著优于 HIIT 复合运动。

5.2 两种复合运动改善 IR 型肥胖儿童青少年代谢体适能的效果及差异

相对于正常体重儿童青少年，超重或肥胖的儿童青少年高血压检出率均较高，肥胖比超重儿童青少年更高^[145]，超重和肥胖与高血压有关，而肥胖儿童青少年中，IR 比 n-IR 型肥胖儿童青少年 SBP 和 DBP 更高^[8]。本文中两复合组的 IR 型肥胖儿童青少年 SBP 和 DBP 均显著下降，但我们发现 IR 型肥胖儿童青少年在两种复合运动干预下血压的改善效果均类似。封闭式减肥训练营的复合运动能够有效改善肥胖儿童青少年的血压^[111,146]，而肥胖儿童青少年在 12 周 MICT 和 HIIT 干预下，SBP 和 DBP 的变化没有显著差异^[11]，这与本文研究结论类似。

两复合组的 IR 型肥胖儿童青少年 TC、TG 和 LDL-C 均显著下降, HDL-C 未显著下降, 但下降趋势也较为明显。TC、TG、HDL-C 和 LDL-C 的变化与过往封闭式减肥营研究结论基本一致, 如林云等^[16]在肥胖青少年的 4 周封闭式减肥营干预研究中, 发现 TC、TG、HDL-C 和 LDL-C 均下降, 而多数 MICT 和 HIIT 干预亦能降低肥胖儿童的 TC、TG 和 LDL-C, HDL-C 则会有所提升^[92], HDL-C 的变化趋势与封闭式减肥营类干预研究的结论有所不同。本研究中两复合组 IR 型肥胖儿童青少年 HDL-C 出现下降, 其原因可能是封闭式减肥营严格控制肥胖儿童青少年饮食, 导致脂肪摄入较少, 而脂肪酸是 HDL-C 的底物, 故脂肪摄入的减少是导致 HDL-C 下降的原因^[147]。一项涉及 2500 名糖尿病前期超重患者的研究发现, 低能量饮食干预后, 男性和女性体重和 IR 均显著改善的同时, HDL-C 也会大幅度下降^[148]。另外, 两复合组 IR 型肥胖儿童青少年 TC、TG、HDL-C 和 LDL-C 的下降幅度均没有显著差异, 过往研究中, 12 周 MICT 和 HIIT 干预对肥胖儿童青少年的 TC、TG、HDL-C 和 LDL-C 的改善也没有显著差异^[11], 这与本研究结论类似。

两复合组的 IR 型肥胖儿童青少年 FINS 和 HOMA-IR 在干预后均显著下降, 其中 HOMA-IR 变化量差异虽不显著但较为明显, 在相对基线值的 HOMA-IR 变化率上两复合组有显著差异。过往研究中, 4 周封闭式减肥训练营的干预均能降低显著 IR 倾向的肥胖儿童青少年 FINS 和 HOMA-IR^[17, 131], MICT 和 HIIT 也均能降低肥胖儿童青少年 FINS 和 HOMA-IR, 但 FINS 和 HOMA-IR 下降幅度类似^[11]。本研究结论中两复合组 IR 型肥胖儿童青少年 HOMA-IR 的变化量差异虽较为明显但并无显著差异, 这与上文结论类似, 但 MICT 复合组的 HOMA-IR 变化率显著高于 HIIT 复合组, 这说明 MICT 复合运动干预在 HOMA-IR 改善上是更有成效的, 其原因可能与 MICT 复合运动对 IR 型肥胖儿童青少年 NC、WC 和 WHR 的改善更显著有关, NC、WC 和 WHR 均与向心性肥胖密切相关^[64], 而向心性肥胖与 IR 呈强正相关^[38]。两种复合运动能有效降低 IR 型肥胖儿童青少年 FINS 和 HOMA-IR, 在封闭式减肥训练营的复合运动中, 增加更长时间的 MICT 类运动更有利于改善 IR 型肥胖儿童青少年的胰岛素抵抗现状。

但 FPG 则在两复合组中表现不同, MICT 复合组 IR 型肥胖儿童青少年 FPG 显著下降, HIIT 复合组 FPG 则略有升高。过往研究中, 郭吟等^[13]对有 IR 倾向的肥胖儿童青少年进行 4 周封闭式减肥训练营干预, 发现男生和女生的 FPG 均明显下降, 曹薏等^[11]的研究中, 12 周 MICT 和 HIIT 干预均能降低 FPG, 但下降均不显著, 这与 MICT 复合组的结论类似, 与 HIIT 复合组 FPG 略有升高的结论不符。不过 Duncan 等^[149]的一项研究包含 89 名青少年, 对其中 42 名 (其余为对照组) 进行为期 7 周的 HIIT 干预, 也发现了 FPG 呈现略微上升状态 (4.9mmol/L

升至 5.0mmol/L)。Peake 等^[150]对 10 名自行车和铁人三项运动员进行单次同等运动量的 MICT 和 HIIT 干预,其中 HIIT 运动期强度约为 80%VO_{2max},间歇期输出功率为 50W; MICT 强度约为 65%VO_{2max},发现 HIIT 干预后血糖升高幅度明显大于 MICT 后,Peake 等^[150]认为其原因主要与 MICT 和 HIIT 后人体激素和特定代谢物的变化不同所致,首先,丙氨酸、谷氨酸和酪氨酸仅在 HIIT 后显著增加,而 MICT 后反而持续下降,更高的丙氨酸水平可能与 HIIT 后血糖升高有关,因为运动恢复期的支链氨基酸、谷氨酰胺、丙氨酸等从骨骼肌排出会刺激血糖显著上升^[151];其次,HIIT 组促肾上腺皮质激素、皮质醇和生长激素上升幅度显著高于 MICT 组,其中皮质醇在 MICT 后出现了下降现象,研究表明低强度运动(40%VO_{2max})会导致循环皮质醇水平降低,而中高强度运动(60%VO_{2max}以上)才会引起皮质醇上升^[152],皮质醇和生长激素在静息时调节血糖浓度具有重要作用^[153, 154];另外,白细胞介素-6 和儿茶酚胺类在 MICT 和 HIIT 后的变化不同,白细胞介素-6 和儿茶酚胺类也与运动后血糖升高有关^[155, 156]。其单次 MICT 和 HIIT 后的血糖表现与本文结论类似,但本研究因受条件限制并未对相关激素和特定代谢物的进行测定,故目前还无法提供更多证据来解释两种复合运动对 FPG 影响的差异。

综上,两种复合运动均可有效改善 IR 型肥胖儿童青少年的血压、血脂、FINS 和 HOMA-IR 等代谢体适能指标,相对于 HIIT 复合运动,MICT 复合运动在改善 IR 型肥胖儿童青少年 FPG 和 IR 上具有一定的优势。

5.3 研究创新与不足

研究创新: 本研究以运动量相同的 MICT 和 HIIT 替换封闭式减肥训练营部分运动时间,对 IR 型肥胖儿童青少年进行干预对比研究,其实验设计思路较为新颖,且对暑期封闭式减肥训练营在针对 IR 型肥胖儿童青少年改进运动方案时提供了参考,具有一定的社会体育指导价值。

研究不足: (1) 本研究明确了两种复合运动对 IR 型肥胖儿童青少年的健康及代谢体适能改善作用,但没有探究其改善效果及差异的机制。(2) 本研究利用肥胖青少年暑假时间进行,未来可进行长期干预研究。(3) 本研究分析时排除了两复合组年龄、性别等混杂因素对结果的影响,为进一步提升结果的可靠性,未来研究中可排除更多的混杂因素如青春期等。

6 结论

(1) MICT 和 HIIT 复合运动均可有效降低 IR 型肥胖儿童青少年体重、BMI 和体脂,降低身体围度,提升心肺适能和握力,降低血压、血脂和胰岛素抵抗,两种复合运动均可有效改善 IR 型肥胖儿童青少年健康及代谢体适能水平。

(2) MICT 复合运动改善 IR 型肥胖儿童青少年 BMI、NC、WC、WHR 和 HOMA-IR 的效果优于 HIIT 复合运动, MICT 复合运动更适合 IR 型肥胖儿童青少年在短期内改善肥胖和胰岛素抵抗,提高健康及代谢体适能水平。

8 参考文献

- [1] Bray G A, Kim K K, Wilding J P H. Obesity: a chronic relapsing progressive disease process. A position statement of the World Obesity Federation [J]. *Obes Rev*, 2017, 18(7): 715-723.
- [2] Afshin A, Forouzanfar M H, Reitsma M B, et al. Health Effects of Overweight and Obesity in 195 Countries over 25 Years [J]. *N Engl J Med*, 2017, 377(1): 13-27.
- [3] 马淑婧, 张艳青, 羊柳, 等. 1991—2015 年中国 9 个省份儿童青少年超重和肥胖率的变化趋势分析 [J]. *中华预防医学杂志*, 2020, (02): 133-134-135-136-137-138.
- [4] 袁金娜, 金冰涵, 斯淑婷, 等. 2009 至 2019 年 6~15 岁中国儿童超重和肥胖趋势分析 [J]. *中华儿科杂志*, 2021, (11): 935-941.
- [5] Simmonds M, Llewellyn A, Owen C G, et al. Predicting adult obesity from childhood obesity: a systematic review and meta-analysis [J]. *Obes Rev*, 2016, 17(2): 95-107.
- [6] Jebeile H, Kelly A S, O'malley G, et al. Obesity in children and adolescents: epidemiology, causes, assessment, and management [J]. *Lancet Diabetes Endocrinol*, 2022, 10(5): 351-365.
- [7] 青丽. 肥胖儿童青少年胰岛素抵抗的临床特征 [D]. 南京: 南京医科大学, 2018.
- [8] 青丽, 彭璐婷, 刘倩琦, 等. 肥胖儿童青少年胰岛素抵抗的临床特征及其与代谢并发症的关系 [J]. *中华实用儿科临床杂志*, 2020, 35(11): 847-851.
- [9] Goldstein B J. Insulin resistance as the core defect in type 2 diabetes mellitus [J]. *Am J Cardiol*, 2002, 90(5a): 3g-10g.
- [10] 陈佩杰, 王人卫, 张春华, 等. 健康体适能评定理论与方法 [M]. 上海: 上海教育出版社, 2013: 11-12.
- [11] 曹薏, 唐玉成, 李抒, 等. 高强度间歇训练对肥胖儿童身体成分、心肺适能和血液指标的影响 [J]. *中国运动医学杂志*, 2022, 41(02): 109-117.
- [12] Dias K A, Ingul C B, Tjønnå A E, et al. Effect of High-Intensity Interval Training on Fitness, Fat Mass and Cardiometabolic Biomarkers in Children with Obesity: A Randomised Controlled Trial [J]. *Sports Med*, 2018, 48(3): 733-746.
- [13] 郭吟, 陈佩杰, 陈文鹤. 4 周有氧运动对肥胖儿童青少年身体形态、血脂和血胰岛素的影响 [J]. *中国运动医学杂志*, 2011, 30(05): 426-431.
- [14] Dias I, Farinatti P, De Souza M G, et al. Effects of Resistance Training on Obese Adolescents [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2015, 47(12): 2636-2644.
- [15] Lee S, Libman I, Hughan K, et al. Effects of Exercise Modality on Insulin Resistance and Ectopic Fat in Adolescents with Overweight and Obesity: A Randomized Clinical Trial [J]. *J Pediatr*, 2019, 206: 91-98.e91.
- [16] 林云, 陈文鹤. 4 周有氧运动对肥胖儿童少年动脉粥样硬化致病相关因子的影响 [J]. *中国体育科技*, 2012, 48(04): 131-136.
- [17] 尚延侠, 侯希贺, 潘珊珊, 等. 有氧运动对不同肥胖亚型儿童心血管危险因素的干预效果 [J]. *中国运动医学杂志*, 2022, 41(04): 266-273.
- [18] 丁花阳, 汪君民. 有氧及复合运动对单纯性肥胖青少年身体形态和生化指标影响 [J]. *中国学校卫生*, 2017, 38(12): 1859-1862.
- [19] García-Hermoso A, Saavedra J M, Escalante Y, et al. Endocrinology and Adolescence: aerobic exercise reduces insulin resistance markers in obese youth: a meta-analysis of randomized controlled trials [J]. *Eur J Endocrinol*, 2014, 171(4): R163-171.

- [20] Thivel D, Masurier J, Baquet G, et al. High-intensity interval training in overweight and obese children and adolescents: systematic review and meta-analysis [J]. *J Sports Med Phys Fitness*, 2019, 59(2): 310-324.
- [21] Wewege M, Van Den Berg R, Ward R E, et al. The effects of high-intensity interval training vs. moderate-intensity continuous training on body composition in overweight and obese adults: a systematic review and meta-analysis [J]. *Obes Rev*, 2017, 18(6): 635-646.
- [22] Cockcroft E J, Williams C A, Tomlinson O W, et al. High intensity interval exercise is an effective alternative to moderate intensity exercise for improving glucose tolerance and insulin sensitivity in adolescent boys [J]. *J Sci Med Sport*, 2015, 18(6): 720-724.
- [23] Way K L, Sultana R N, Sabag A, et al. The effect of high Intensity interval training versus moderate intensity continuous training on arterial stiffness and 24h blood pressure responses: A systematic review and meta-analysis [J]. *J Sci Med Sport*, 2019, 22(4): 385-391.
- [24] Leal J M, Galliano L M, Del Vecchio F B. Effectiveness of High-Intensity Interval Training Versus Moderate-Intensity Continuous Training in Hypertensive Patients: a Systematic Review and Meta-Analysis [J]. *Curr Hypertens Rep*, 2020, 22(3): 26.
- [25] Gripp F, Nava R C, Cassilhas R C, et al. HIIT is superior than MICT on cardiometabolic health during training and detraining [J]. *Eur J Appl Physiol*, 2021, 121(1): 159-172.
- [26] Worldwide trends in body-mass index, underweight, overweight, and obesity from 1975 to 2016: a pooled analysis of 2416 population-based measurement studies in 128·9 million children, adolescents, and adults [J]. *Lancet*, 2017, 390(10113): 2627-2642.
- [27] Blüher M. Obesity: global epidemiology and pathogenesis [J]. *Nat Rev Endocrinol*, 2019, 15(5): 288-298.
- [28] 中共中央 国务院印发《“健康中国 2030”规划纲要》 [J]. 中华人民共和国国务院公报, 2016, (32): 5-20.
- [29] 中共中央办公厅 国务院办公厅印发《关于进一步减轻义务教育阶段学生作业负担和校外培训负担的意见》 [J]. 中华人民共和国教育部公报, 2021, (10): 2-7.
- [30] Shulman G I. Ectopic fat in insulin resistance, dyslipidemia, and cardiometabolic disease [J]. *N Engl J Med*, 2014, 371(12): 1131-1141.
- [31] Fragoso A, Mendes F, Silva A P, et al. Insulin resistance as a predictor of cardiovascular morbidity and end-stage renal disease [J]. *J Diabetes Complications*, 2015, 29(8): 1098-1104.
- [32] Speliotes E K, Yerges-Armstrong L M, Wu J, et al. Genome-wide association analysis identifies variants associated with nonalcoholic fatty liver disease that have distinct effects on metabolic traits [J]. *PLoS Genet*, 2011, 7(3): e1001324.
- [33] Petersen K F, Dufour S, Hariri A, et al. Apolipoprotein C3 gene variants in nonalcoholic fatty liver disease [J]. *N Engl J Med*, 2010, 362(12): 1082-1089.
- [34] 迟学彭, 赵丽云, 于冬梅, 等. 2016—2017 年中国 6~17 岁儿童青少年血糖异常状况及相关因素 [J]. *卫生研究*, 2021, 50(05): 708-715.
- [35] Shah R V, Murthy V L, Abbasi S A, et al. Visceral adiposity and the risk of metabolic syndrome across body mass index: the MESA Study [J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2014, 7(12): 1221-1235.
- [36] Yaribeygi H, Farrokhi F R, Butler A E, et al. Insulin resistance: Review of the underlying molecular mechanisms [J]. *J Cell Physiol*, 2019, 234(6): 8152-8161.
- [37] Lee J M. Insulin resistance in children and adolescents [J]. *Rev Endocr Metab Disord*, 2006, 7(3): 141-147.

- [38] Jiang K, Luan H, Pu X, et al. Association Between Visceral Adiposity Index and Insulin Resistance: A Cross-Sectional Study Based on US Adults [J]. *Front Endocrinol (Lausanne)*, 2022, 13: 921067.
- [39] Chiarelli F, Marcovecchio M L. Insulin resistance and obesity in childhood [J]. *Eur J Endocrinol*, 2008, 159 Suppl 1: S67-74.
- [40] Van Der Aa M P, Fazeli Farsani S, Knibbe C A, et al. Population-Based Studies on the Epidemiology of Insulin Resistance in Children [J]. *J Diabetes Res*, 2015, 2015: 362375.
- [41] Popkin B M, Adair L S, Ng S W. Global nutrition transition and the pandemic of obesity in developing countries [J]. *Nutr Rev*, 2012, 70(1): 3-21.
- [42] Levy-Marchal C, Arslanian S, Cutfield W, et al. Insulin resistance in children: consensus, perspective, and future directions [J]. *J Clin Endocrinol Metab*, 2010, 95(12): 5189-5198.
- [43] DeFronzo R A, Tobin J D, Andres R. Glucose clamp technique: a method for quantifying insulin secretion and resistance [J]. *Am J Physiol*, 1979, 237(3): E214-223.
- [44] Singh B, Saxena A. Surrogate markers of insulin resistance: A review [J]. *World J Diabetes*, 2010, 1(2): 36-47.
- [45] Matthews D R, Hosker J P, Rudenski A S, et al. Homeostasis model assessment: insulin resistance and beta-cell function from fasting plasma glucose and insulin concentrations in man [J]. *Diabetologia*, 1985, 28(7): 412-419.
- [46] Andrade M I, Oliveira J S, Leal V S, et al. [Identification of cutoff points for Homeostatic Model Assessment for Insulin Resistance index in adolescents: systematic review] [J]. *Rev Paul Pediatr*, 2016, 34(2): 234-242.
- [47] 邢小燕, 杨文英, 杨兆军. 胰岛素抵抗指数在不同糖耐量人群中诊断代谢综合征的作用 [J]. *中华糖尿病杂志*, 2004, (03): 31-35.
- [48] Jurkovičová J, Hirošová K, Vondrová D, et al. The Prevalence of Insulin Resistance and the Associated Risk Factors in a Sample of 14-18-Year-Old Slovak Adolescents [J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2021, 18(3).
- [49] Burrows R, Correa-Burrows P, Reyes M, et al. Healthy Chilean Adolescents with HOMA-IR ≥ 2.6 Have Increased Cardiometabolic Risk: Association with Genetic, Biological, and Environmental Factors [J]. *J Diabetes Res*, 2015, 2015: 783296.
- [50] Yi K H, Hwang J S, Kim E Y, et al. Prevalence of insulin resistance and cardiometabolic risk in Korean children and adolescents: a population-based study [J]. *Diabetes Res Clin Pract*, 2014, 103(1): 106-113.
- [51] Manios Y, Moschonis G, Kourlaba G, et al. Prevalence and independent predictors of insulin resistance in children from Crete, Greece: the Children Study [J]. *Diabet Med*, 2008, 25(1): 65-72.
- [52] Barazzoni R, Gortan Cappellari G, Ragni M, et al. Insulin resistance in obesity: an overview of fundamental alterations [J]. *Eat Weight Disord*, 2018, 23(2): 149-157.
- [53] Tagi V M, Mainieri F, Chiarelli F. Hypertension in Patients with Insulin Resistance: Etiopathogenesis and Management in Children [J]. *Int J Mol Sci*, 2022, 23(10).
- [54] Miniello V L, Faienza M F, Scicchitano P, et al. Insulin resistance and endothelial function in children and adolescents [J]. *Int J Cardiol*, 2014, 174(2): 343-347.
- [55] Sánchez Jiménez J, Herrero Espinet F J, Mengibar Garrido J M, et al. Asthma and insulin resistance in obese children and adolescents [J]. *Pediatr Allergy Immunol*, 2014, 25(7): 699-705.
- [56] Kindler J M, Lobene A J, Vogel K A, et al. Adiposity, Insulin Resistance, and Bone Mass in

- Children and Adolescents [J]. *J Clin Endocrinol Metab*, 2019, 104(3): 892-899.
- [57] Caroppo F, Galderisi A, Ventura L, et al. Metabolic syndrome and insulin resistance in pre-pubertal children with psoriasis [J]. *Eur J Pediatr*, 2021, 180(6): 1739-1745.
- [58] Younossi Z, Anstee Q M, Marietti M, et al. Global burden of NAFLD and NASH: trends, predictions, risk factors and prevention [J]. *Nat Rev Gastroenterol Hepatol*, 2018, 15(1): 11-20.
- [59] 王正珍. ACSM 运动测试与运动处方指南 [M]. 北京: 人民卫生出版社, 2010.
- [60] Dominguez S, Lloyd L K, Schmidt E A, et al. Attitudes toward physical activity: identifying the relationships with health-related physical fitness and physical activity [J]. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 2002, 34(5): S64.
- [61] 田亨. 儿童青少年体适能教师教学指导 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2020.
- [62] 季浏, 胡增苹. 体育教育展望 [M]. 上海: 华东师范大学出版社, 2001.
- [63] Dobbelsteyn C J, Joffres M R, Maclean D R, et al. A comparative evaluation of waist circumference, waist-to-hip ratio and body mass index as indicators of cardiovascular risk factors. The Canadian Heart Health Surveys [J]. *Int J Obes Relat Metab Disord*, 2001, 25(5): 652-661.
- [64] Ross R, Neeland I J, Yamashita S, et al. Waist circumference as a vital sign in clinical practice: a Consensus Statement from the IAS and ICCR Working Group on Visceral Obesity [J]. *Nat Rev Endocrinol*, 2020, 16(3): 177-189.
- [65] García-Hermoso A, Martínez-Vizcaíno V, Recio-Rodriguez J I, et al. Abdominal obesity as a mediator of the influence of physical activity on insulin resistance in Spanish adults [J]. *Prev Med*, 2016, 82: 59-64.
- [66] Kułaga Z, Litwin M, Grajda A, et al. Oscillometric blood pressure percentiles for Polish normal-weight school-aged children and adolescents [J]. *J Hypertens*, 2012, 30(10): 1942-1954.
- [67] Bassali R, Waller J L, Gower B, et al. Utility of waist circumference percentile for risk evaluation in obese children [J]. *Int J Pediatr Obes*, 2010, 5(1): 97-101.
- [68] Fu J, Hofker M, Wijmenga C. Apple or pear: size and shape matter [J]. *Cell Metab*, 2015, 21(4): 507-508.
- [69] Androutsos O, Grammatikaki E, Moschonis G, et al. Neck circumference: a useful screening tool of cardiovascular risk in children [J]. *Pediatr Obes*, 2012, 7(3): 187-195.
- [70] Zhao L, Huang G, Xia F, et al. Neck circumference as an independent indicator of visceral obesity in a Chinese population [J]. *Lipids Health Dis*, 2018, 17(1): 85.
- [71] Sinaiko A R, Steinberger J, Moran A, et al. Influence of insulin resistance and body mass index at age 13 on systolic blood pressure, triglycerides, and high-density lipoprotein cholesterol at age 19 [J]. *Hypertension*, 2006, 48(4): 730-736.
- [72] 李晓彤, 李新, 王艳, 等. 12~14 岁少年体力活动、心肺耐力与肥胖三者关系 [J]. *中国运动医学杂志*, 2016, 35(10): 930-939+971.
- [73] 蒋汝刚, 林静. 单纯性肥胖对儿童形态、生理机能和运动能力的影响 [J]. *中国儿童保健杂志*, 2006, (06): 632-633.
- [74] Ervin R B, Fryar C D, Wang C Y, et al. Strength and body weight in US children and adolescents [J]. *Pediatrics*, 2014, 134(3): e782-789.
- [75] 王新利, 李松, 朱文丽, 等. 超重肥胖儿童血压、血脂及空腹胰岛素水平分析 [J]. *中国儿童保健杂志*, 2004, (06): 465-467.
- [76] 张志巍, 徐东江, 祖淑玉, 等. 儿童青少年肥胖指标与血压血脂的相关性分析 [J]. *中国实用儿科杂志*, 2011, 26(05): 364-368.

- [77] 谭凤珠, 董少霞, 贾建起, 等. 超重和肥胖对儿童血压、血糖及血脂的影响 [J]. 中国学校卫生, 2004, (02): 152-153.
- [78] Du R, Li L, Li P, et al. Impact of Insulin Resistance on Cardiometabolic Risk Factors and an Anthropometry-Based Predictive Nomogram for Insulin Resistance Among Adolescents in China [J]. *Front Endocrinol (Lausanne)*, 2022, 13: 852395.
- [79] Cheng Y H, Tsao Y C, Tzeng I S, et al. Body mass index and waist circumference are better predictors of insulin resistance than total body fat percentage in middle-aged and elderly Taiwanese [J]. *Medicine (Baltimore)*, 2017, 96(39): e8126.
- [80] Sijtsma A, Bocca G, L'abée C, et al. Waist-to-height ratio, waist circumference and BMI as indicators of percentage fat mass and cardiometabolic risk factors in children aged 3-7 years [J]. *Clin Nutr*, 2014, 33(2): 311-315.
- [81] Atlantis E, Martin S A, Haren M T, et al. Inverse associations between muscle mass, strength, and the metabolic syndrome [J]. *Metabolism*, 2009, 58(7): 1013-1022.
- [82] Kondakis K, Kondakis M, Androutsos O, et al. Cardiorespiratory fitness is associated with body composition and insulin resistance in European adolescents: HELENA study [J]. *J Sports Med Phys Fitness*, 2020, 60(10): 1349-1357.
- [83] Ahn B, McMurray R, Harrell J. Scaling of VO₂max and its relationship with insulin resistance in children [J]. *Pediatr Exerc Sci*, 2013, 25(1): 43-51.
- [84] Lee S, Kim Y, White D A, et al. Relationships between insulin sensitivity, skeletal muscle mass and muscle quality in obese adolescent boys [J]. *Eur J Clin Nutr*, 2012, 66(12): 1366-1368.
- [85] 欧凤荣, 何莉, 徐甲芬, 等. 单纯性肥胖儿童胰岛素抵抗与血压的关系 [J]. 中国儿童保健杂志, 2003, (01): 24-26.
- [86] 肖惟引, 宁宁, 谭明红, 等. 空腹血糖受损患者胰岛素抵抗与血压的关系 [J]. 第三军医大学学报, 2015, 37(11): 1150-1154.
- [87] 曹薏. 不同训练方案对肥胖男生身体成分和糖脂代谢的干预效果研究 [D]. 上海: 上海体育学院, 2020.
- [88] 国务院关于实施健康中国行动的意见 [J]. 中华人民共和国国务院公报, 2019, (21): 17-21.
- [89] 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(09): 36-39+53.
- [90] Sigal R J, Alberga A S, Goldfield G S, et al. Effects of aerobic training, resistance training, or both on percentage body fat and cardiometabolic risk markers in obese adolescents: the healthy eating aerobic and resistance training in youth randomized clinical trial [J]. *JAMA Pediatr*, 2014, 168(11): 1006-1014.
- [91] Corte De Araujo A C, Roschel H, Picanço A R, et al. Similar health benefits of endurance and high-intensity interval training in obese children [J]. *PLoS One*, 2012, 7(8): e42747.
- [92] 曹薏, 全明辉, 庄洁. 高强度间歇训练与中等强度持续训练对肥胖儿童身体成分和心血管功能影响的作用相似 [J]. 中国组织工程研究, 2019, 23(35): 5732-5740.
- [93] Lee K J, Shin Y A, Lee K Y, et al. Aerobic exercise training-induced decrease in plasma visfatin and insulin resistance in obese female adolescents [J]. *Int J Sport Nutr Exerc Metab*, 2010, 20(4): 275-281.
- [94] Davis C L, Pollock N K, Waller J L, et al. Exercise dose and diabetes risk in overweight and obese children: a randomized controlled trial [J]. *Jama*, 2012, 308(11): 1103-1112.
- [95] Buchheit M, Laursen P B. High-intensity interval training, solutions to the programming puzzle:

- Part I: cardiopulmonary emphasis [J]. *Sports Med*, 2013, 43(5): 313-338.
- [96] Bailey R C, Olson J, Pepper S L, et al. The level and tempo of children's physical activities: an observational study [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 1995, 27(7): 1033-1041.
- [97] Gibala M J, Little J P, Macdonald M J, et al. Physiological adaptations to low-volume, high-intensity interval training in health and disease [J]. *J Physiol*, 2012, 590(5): 1077-1084.
- [98] Panissa V L G, Fukuda D H, Caldeira R S, et al. Is Oxygen Uptake Measurement Enough to Estimate Energy Expenditure During High-Intensity Intermittent Exercise? Quantification of Anaerobic Contribution by Different Methods [J]. *Front Physiol*, 2018, 9: 868.
- [99] Eddolls W T B, McNarry M A, Stratton G, et al. High-Intensity Interval Training Interventions in Children and Adolescents: A Systematic Review [J]. *Sports Med*, 2017, 47(11): 2363-2374.
- [100] Alvarez C, Ramírez-Campillo R, Ramírez-Vélez R, et al. Effects of 6-Weeks High-Intensity Interval Training in Schoolchildren with Insulin Resistance: Influence of Biological Maturation on Metabolic, Body Composition, Cardiovascular and Performance Non-responses [J]. *Front Physiol*, 2017, 8: 444.
- [101] Álvarez C, Ramírez-Campillo R, Ramírez-Vélez R, et al. Prevalence of Non-responders for Glucose Control Markers after 10 Weeks of High-Intensity Interval Training in Adult Women with Higher and Lower Insulin Resistance [J]. *Front Physiol*, 2017, 8: 479.
- [102] Scott B R, Duthie G M, Thornton H R, et al. Training Monitoring for Resistance Exercise: Theory and Applications [J]. *Sports Med*, 2016, 46(5): 687-698.
- [103] Ribeiro B, Forte P, Vinhas R, et al. The Benefits of Resistance Training in Obese Adolescents: A Systematic Review and Meta-analysis [J]. *Sports Med Open*, 2022, 8(1): 109.
- [104] Chen T, Lin J, Lin Y, et al. Effects of aerobic exercise and resistance exercise on physical indexes and cardiovascular risk factors in obese and overweight school-age children: A systematic review and meta-analysis [J]. *PLoS One*, 2021, 16(9): e0257150.
- [105] Alberga A S, Prud'homme D, Sigal R J, et al. Effects of aerobic training, resistance training, or both on cardiorespiratory and musculoskeletal fitness in adolescents with obesity: the HEARTY trial [J]. *Appl Physiol Nutr Metab*, 2016, 41(3): 255-265.
- [106] Guillem C M, Loaiza-Betancur A F, Rebullido T R, et al. The Effects of Resistance Training on Blood Pressure in Preadolescents and Adolescents: A Systematic Review and Meta-Analysis [J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2020, 17(21).
- [107] Yang S, Zhou Z, Miao H, et al. Effect of weight loss on blood pressure changes in overweight patients: A systematic review and meta-analysis [J]. *J Clin Hypertens (Greenwich)*, 2023, 25(5): 404-415.
- [108] Álvarez C, Ramírez-Campillo R, Ramírez-Vélez R, et al. Metabolic effects of resistance or high-intensity interval training among glycemic control-nonresponsive children with insulin resistance [J]. *Int J Obes (Lond)*, 2018, 42(1): 79-87.
- [109] Lee S, Bacha F, Hannon T, et al. Effects of aerobic versus resistance exercise without caloric restriction on abdominal fat, intrahepatic lipid, and insulin sensitivity in obese adolescent boys: a randomized, controlled trial [J]. *Diabetes*, 2012, 61(11): 2787-2795.
- [110] Van Der Heijden G J, Wang Z J, Chu Z, et al. Strength exercise improves muscle mass and hepatic insulin sensitivity in obese youth [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2010, 42(11): 1973-1980.
- [111] El Mikati H K, Boateng A O, Mckinney B M, et al. Forever-Fit Summer Camp: The Impact of a 6-Week Summer Healthy Lifestyle Day Camp on Anthropometric, Cardiovascular, and

- Physical Fitness Measures in Youth With Obesity [J]. *J Prim Care Community Health*, 2020, 11: 2150132720903888.
- [112] George G L, Schneider C, Kaiser L. Healthy Lifestyle Fitness Camp: A Summer Approach to Prevent Obesity in Low-Income Youth [J]. *J Nutr Educ Behav*, 2016, 48(3): 208-212.e201.
- [113] Grønbæk H, Lange A, Birkebæk N H, et al. Effect of a 10-week weight loss camp on fatty liver disease and insulin sensitivity in obese Danish children [J]. *J Pediatr Gastroenterol Nutr*, 2012, 54(2): 223-228.
- [114] 林云, 陈文鹤. 4 周有氧运动对不同肥胖程度、肥胖类型儿童青少年血清胰岛素水平的影响 [J]. *中国运动医学杂志*, 2012, 31(03): 207-211.
- [115] 叶莉, 封飞虎, 李春艳, 等. 运动减肥夏令营对男性肥胖青少年体成分及血清生化指标的影响 [J]. *中国康复理论与实践*, 2016, 22(02): 198-202.
- [116] 徐磊, 李春艳, 毛彩凤, 等. 运动结合饮食干预对肥胖青少年血清脂肪酸组分和身体成分的影响及其相关性研究 [J]. *武汉体育学院学报*, 2018, 52(09): 86-92.
- [117] 博庆丽, 束莉, 余婷, 等. 肥胖中小学生饮食运动和健康教育联合干预效果评价 [J]. *中国学校卫生*, 2010, 31(07): 846-848.
- [118] 中华人民共和国国家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: 人民卫生出版社, 2018.
- [119] Ricci M A, De Vuono S, Scavizzi M, et al. Facing Morbid Obesity: How to Approach It [J]. *Angiology*, 2016, 67(4): 391-397.
- [120] Diagnosis and classification of diabetes mellitus [J]. *Diabetes Care*, 2009, 32 Suppl 1(Suppl 1): S62-67.
- [121] Kumar S, Kelly A S. Review of Childhood Obesity: From Epidemiology, Etiology, and Comorbidities to Clinical Assessment and Treatment [J]. *Mayo Clin Proc*, 2017, 92(2): 251-265.
- [122] Mahar M T, Guerieri A M, Hanna M S, et al. Estimation of aerobic fitness from 20-m multistage shuttle run test performance [J]. *Am J Prev Med*, 2011, 41(4 Suppl 2): S117-123.
- [123] Rognmo Ø, Hetland E, Helgerud J, et al. High intensity aerobic interval exercise is superior to moderate intensity exercise for increasing aerobic capacity in patients with coronary artery disease [J]. *Eur J Cardiovasc Prev Rehabil*, 2004, 11(3): 216-222.
- [124] Chin E C, Yu A P, Lai C W, et al. Low-Frequency HIIT Improves Body Composition and Aerobic Capacity in Overweight Men [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2020, 52(1): 56-66.
- [125] Swain D P, Leutholtz B C. Heart rate reserve is equivalent to % VO₂ reserve, not to % VO₂max [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 1997, 29(3): 410-414.
- [126] 刘景新. 肥胖儿童青少年身体活动有效测评方法与运动改善健康的量效关系研究 [D]. 上海: 上海体育学院, 2020.
- [127] 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.
- [128] Lazzer S, Lafortuna C, Busti C, et al. Fat oxidation rate during and after a low- or high-intensity exercise in severely obese Caucasian adolescents [J]. *Eur J Appl Physiol*, 2010, 108(2): 383-391.
- [129] 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.
- [130] Kim M H, Kim J H, Kim E K. Accuracy of predictive equations for resting energy expenditure

(REE) in non-obese and obese Korean children and adolescents [J]. *Nutr Res Pract*, 2012, 6(1): 51-60.

[131] 詹晓梅, 潘珊珊, 陈文鹤. 运动干预对肥胖青少年体成分、血脂、胰岛素抵抗及超敏 C 反应蛋白的影响 [J]. *上海体育学院学报*, 2012, 36(06): 62-66.

[132] 潘丽英, 马春莲, 谷涌泉. 6 周有氧运动改善不同程度肥胖青少年体质健康的研究 [J]. *武汉体育学院学报*, 2022, 56(07): 76-83.

[133] Koubaa A. The effects of intermittent and continuous training on body composition, cardiorespiratory fitness and lipid profile in obese adolescents [J]. *Iosr*, 2013, 3(2): 31-37.

[134] Benites-Zapata V A, Toro-Huamanchumo C J, Urrunaga-Pastor D, et al. High waist-to-hip ratio levels are associated with insulin resistance markers in normal-weight women [J]. *Diabetes Metab Syndr*, 2019, 13(1): 636-642.

[135] Pang Q, Zhang J Y, Song S D, et al. Central obesity and nonalcoholic fatty liver disease risk after adjusting for body mass index [J]. *World J Gastroenterol*, 2015, 21(5): 1650-1662.

[136] Wan H, Wang Y, Xiang Q, et al. Associations between abdominal obesity indices and diabetic complications: Chinese visceral adiposity index and neck circumference [J]. *Cardiovasc Diabetol*, 2020, 19(1): 118.

[137] 刘浩东, 李成, 赵敏, 等. 儿童期腹型肥胖及其腹型肥胖前期与高尿酸血症的关联研究 [J]. *中国儿童保健杂志*, 2023, 31(07): 707-712.

[138] 张鑫, 王文娟, 张润, 等. 中国成人 BMI 和腹型肥胖与急性心肌梗死发病关系的前瞻性研究 [J]. *中华疾病控制杂志*, 2022, 26(07): 750-755+789.

[139] Laukkanen J A, Kurl S, Salonen R, et al. The predictive value of cardiorespiratory fitness for cardiovascular events in men with various risk profiles: a prospective population-based cohort study [J]. *Eur Heart J*, 2004, 25(16): 1428-1437.

[140] Stoner L, Pontzer H, Barone Gibbs B, et al. Fitness and Fatness Are Both Associated with Cardiometabolic Risk in Preadolescents [J]. *J Pediatr*, 2020, 217: 39-45.e31.

[141] Cristi-Montero C, Courel-Ibáñez J, Ortega F B, et al. Mediation role of cardiorespiratory fitness on the association between fatness and cardiometabolic risk in European adolescents: The HELENA study [J]. *J Sport Health Sci*, 2021, 10(3): 360-367.

[142] Shang X, Li Y, Xu H, et al. Independent and Interactive Associations of Fitness and Fatness With Changes in Cardiometabolic Risk in Children: A Longitudinal Analysis [J]. *Front Endocrinol (Lausanne)*, 2020, 11: 342.

[143] Smith J J, Eather N, Morgan P J, et al. The health benefits of muscular fitness for children and adolescents: a systematic review and meta-analysis [J]. *Sports Med*, 2014, 44(9): 1209-1223.

[144] 陈泽恺, 朱琳, 李展权, 等. 中高强度身体活动量与肥胖儿童青少年心肺适能改善的剂量-效应关系研究 [J]. *中国运动医学杂志*, 2022, 41(09): 687-693.

[145] 周苗, 唐蕊, 朱霞, 等. 2017—2019 年深圳市龙华区 6~18 岁学生超重和肥胖与高血压的关系 [J]. *中华疾病控制杂志*, 2023, 27(09): 1096-1100.

[146] Huelsing J, Kanafani N, Mao J, et al. Camp jump start: effects of a residential summer weight-loss camp for older children and adolescents [J]. *Pediatrics*, 2010, 125(4): e884-890.

[147] Santos H O, Lavie C J. Weight loss and its influence on high-density lipoprotein cholesterol (HDL-C) concentrations: A noble clinical hesitation [J]. *Clin Nutr ESPEN*, 2021, 42: 90-92.

[148] Christensen P, Meinert Larsen T, Westertorp-Plantenga M, et al. Men and women respond differently to rapid weight loss: Metabolic outcomes of a multi-centre intervention study after a low-

- energy diet in 2500 overweight, individuals with pre-diabetes (PREVIEW) [J]. *Diabetes Obes Metab*, 2018, 20(12): 2840-2851.
- [149] Buchan D S, Ollis S, Young J D, et al. High intensity interval running enhances measures of physical fitness but not metabolic measures of cardiovascular disease risk in healthy adolescents [J]. *BMC Public Health*, 2013, 13: 498.
- [150] Peake J M, Tan S J, Markworth J F, et al. Metabolic and hormonal responses to isoenergetic high-intensity interval exercise and continuous moderate-intensity exercise [J]. *Am J Physiol Endocrinol Metab*, 2014, 307(7): E539-552.
- [151] Mourtzakis M, Saltin B, Graham T, et al. Carbohydrate metabolism during prolonged exercise and recovery: interactions between pyruvate dehydrogenase, fatty acids, and amino acids [J]. *J Appl Physiol* (1985), 2006, 100(6): 1822-1830.
- [152] Hill E E, Zack E, Battaglini C, et al. Exercise and circulating cortisol levels: the intensity threshold effect [J]. *J Endocrinol Invest*, 2008, 31(7): 587-591.
- [153] De Feo P, Perriello G, Torlone E, et al. Demonstration of a role for growth hormone in glucose counterregulation [J]. *Am J Physiol*, 1989, 256(6 Pt 1): E835-843.
- [154] De Feo P, Perriello G, Torlone E, et al. Contribution of cortisol to glucose counterregulation in humans [J]. *Am J Physiol*, 1989, 257(1 Pt 1): E35-42.
- [155] Keller C, Steensberg A, Pilegaard H, et al. Transcriptional activation of the IL-6 gene in human contracting skeletal muscle: influence of muscle glycogen content [J]. *Faseb j*, 2001, 15(14): 2748-2750.
- [156] Marker J C, Hirsch I B, Smith L J, et al. Catecholamines in prevention of hypoglycemia during exercise in humans [J]. *Am J Physiol*, 1991, 260(5 Pt 1): E705-712.

9 附录 A 中英文缩略词表

英文缩写	英文全称	中文全称
IR	Insulin resistance	胰岛素抵抗
T2DM	Type 2 diabetes	2 型糖尿病
NAFLD	Nonalcoholic fatty liver disease	非酒精性脂肪肝病
BMI	Body mass index	身体质量指数
WC	Waist circumference	腰围
HIIT	High intensity interval training	高强度间歇训练
MICT	Medium intensity continuous training	中等强度持续训练
RT	Resistance training	抗阻训练
TC	Total cholesterol	总胆固醇
TG	Triglyceride	甘油三酯
HDL-C	High-density lipoprotein cholesterol	高密度脂蛋白胆固醇
FINS	Fasting insulin	空腹胰岛素
FPG	Fasting blood glucose	空腹血糖
HOMA-IR	Homeostasis model of assessment for insulin resistance	胰岛素抵抗稳态模型 评估法
ACSM	American College of Sports Medicine	美国运动医学会
WHR	Waist to hip ratio	腰臀比
SBP	Systolic blood pressure	收缩压
DBP	Diastolic blood pressure	舒张压
NC	Neck circumference	颈围
HC	Hip circumference	臀围
CC	Chest circumference	胸围
VO _{2max}	Maximum oxygen uptake	最大摄氧量
WHtR	waist-to-height ratio	腰高比
LDL-C	Low-density lipoprotein cholesterol	低密度脂蛋白胆固醇
HR _{max}	Maximum heart rate	最大心率
MAS	Maximum aerobic speed	最大有氧速度
HRR	Heart rate reserve	储备心率