



不同模式下低氧运动对肥胖人群代谢改善的影响： 基于随机对照实验的 Meta 分析*

王婕婷 李小诗 王汝雯 张译尹 于凤至 王 茹**

(上海体育大学运动健康学院, 上海 200438)

摘要 本文旨在系统评价不同氧体积分数下低氧运动对肥胖人群体成分、葡萄糖代谢及脂代谢的干预效果, 并明确最佳氧体积分数 (fraction of inspired oxygen, FiO_2) 区间, 为个体化、精准化的低氧运动处方提供科学依据。通过检索 Cochrane Library、PubMed、Web of Science、Embase 与中国知网 (CNKI) 等数据库, 筛选截至 2025 年 2 月 31 日前发表的关于低氧运动干预肥胖人群的随机对照试验和前后对照研究。采用 RevMan 5.4 软件进行 Meta 分析, 评估不同氧体积分数 (氧体积分数 $\leq 14\%$ 与氧体积分数 $> 14\%$) 下干预对身体质量指数 (BMI)、体脂率、腰围、空腹血糖、胰岛素、胰岛素抵抗指数 (HOMA-IR)、甘油三酯 (TG)、低密度脂蛋白胆固醇 (LDL-C) 及高密度脂蛋白胆固醇 (HDL-C) 的影响, 并进行亚组分析。本研究共纳入 22 项研究, 合计样本量为 292 人。Meta 分析结果显示, 低氧运动可显著改善肥胖人群的体成分、糖代谢与脂代谢指标, 在氧体积分数大于 14% 的中等低氧环境进行运动干预效果更优。氧体积分数作为低氧运动中的关键参数, 其精准设定对优化干预效果至关重要。

关键词 氧体积分数, 肥胖, 体成分, 葡萄糖代谢, 脂代谢

中图分类号 G804.55

DOI: 10.16476/j.pibb.2025.0198

CSTR: 32369.14.pibb.20250198

近年来, 肥胖及其相关代谢性疾病发病率持续攀升, 已成为全球公共健康领域亟待解决的重要难题。肥胖不仅显著增加心血管疾病、代谢综合征、糖尿病、高血压及血脂异常等慢性疾病的风险, 其与多种癌症的发生亦密切相关^[1]。据统计, 全球肥胖患者已超过 10 亿人, 约占总人口的 13%, 其中中国肥胖率呈快速上升趋势, 覆盖各年龄段人群, 防控形势严峻, 健康与经济负担加重^[2]。已有研究指出, 2021 年中国 25 岁及以上成年人中超重和肥胖人数已达 4.02 亿人, 若缺乏有效干预, 预计到 2050 年该人群数量将上升至 6.27 亿, 同时肥胖儿童及青少年的总数也将增至约 3 520 万人, 呈现持续高发、年轻化的发展趋势, 对公共健康系统构成严重挑战^[3]。作为改善肥胖及代谢异常的重要非药物干预手段, 运动干预被广泛应用于临床与健康管理实践中^[4-6], 但传统常氧运动的干预效果常受依从性差、代谢适应性不足及周期长等因素限制, 并非所有肥胖患者均能达到产生明显健康效益

所需的身体活动强度或运动量, 存在一定的局限性^[7]。2024 年底, 受国家卫生健康委医疗应急司委托, 国家心血管病中心健康生活方式医学中心组织制定的《体重管理指导原则》正式发布, 2024 年被倡导为“体重管理年”。“控体重、防三高、促健康”作为核心宣传主题, 进一步凸显了肥胖干预策略在国家层面健康政策中的重要地位, 这一背景下, 探索更科学、可推广、具个体适配性的运动干预策略, 已成为当前代谢性疾病防控研究的关键方向。

基于高原训练理念发展的模拟低氧运动, 因其在能量代谢重塑方面的独特优势, 逐渐成为代谢干预研究的热点。低氧运动被定义为在被动环境性缺氧与主动运动训练相结合条件下, 机体组织氧供

* 国家自然科学基金 (32271226, 31971097) 和国家重点研发计划 (2020YFA0803800) 资助项目。

** 通讯联系人。

Tel: 021-65507356, E-mail: wangru@sus.edu.cn

收稿日期: 2025-04-30, 接受日期: 2025-06-13

应量减少,进而引起动脉血氧饱和度降低的一种运动干预模式^[8]。已有研究表明,低氧运动较常氧运动更能有效改善肥胖患者的体成分、葡萄糖代谢及血脂异常,尤其适用于传统运动效果有限或难以坚持的人群^[9-10]。当运动干预方式为有氧运动与阻力训练相结合时,体脂率的降低更为显著^[11]。适当剂量的间歇性低氧可以提供代谢优势,减少肥胖风险,同时避免因过度或频繁的低氧暴露导致的负面健康影响。相较于高海拔或极端海拔地区,中等海拔的低氧暴露被认为在肥胖管理方面的效果最佳^[12]。此外,低氧运动还被发现可改善肥胖老年女性的炎症生物标志物,具有潜在的心血管疾病预防价值^[13]。在代谢调节方面,运动干预通过增强外周组织对葡萄糖的摄取能力,改善胰岛素敏感性,从而有效促进血糖稳态的维持。相较于在常氧下进行运动,低氧运动对葡萄糖稳态的调节作用更加明显^[14]。这一作用机制主要通过激活腺苷酸活化蛋白激酶(adenosine monophosphate-activated protein kinase, AMPK)等代谢通路,增强脂肪氧化与葡萄糖利用,提升能量消耗,并促进红细胞生成与血管新生,全面改善代谢功能^[15-16]。然而,低氧运动的干预效果依赖于氧体积分数(fraction of inspired oxygen, FiO₂)、运动模式及持续时间等关键因素,不合理的设计方案可能导致心血管风险及其他代谢负担增加。

尽管相关研究逐渐增多,但目前关于不同氧体积分数条件下低氧运动干预效果的研究结果差异较大,缺乏系统性的综述与量化评价。尤其在氧体积分数选择方面,尚未形成统一的科学规范,导致实际应用中干预效果波动较大、缺乏针对性和指导性。因此,本研究将采用Meta分析,综合评估不同氧体积分数下低氧运动对肥胖人群体成分、葡萄糖代谢及脂代谢的影响,旨在明确最佳氧体积分数区间,优化干预策略,推动个性化、精准化的低氧运动处方体系建设,为肥胖及代谢性疾病的非药物干预提供科学依据与实践指导。

1 数据分析

本研究基于PRISMA(preferred reporting items for systematic reviews and meta-analysis)声明^[17],已在PROSPERO进行注册(CRD420251039142)。

1.1 纳入标准与排除标准

文献纳入条件:a.研究设计为随机对照实验

(Randomized Controlled Trial, RCT); b.研究结果需要报告干预前后至少一项代谢指标(如身体质量指数(body mass index, BMI)、体脂率、血糖、胰岛素或血脂等); c.研究对象为超重或肥胖人群(肥胖定义为BMI $\geq$ 28 kg/m²,超重定义为BMI $\geq$ 24 kg/m²); d.参与者在低氧条件下(模拟海拔,或受控的低氧环境)进行结构性运动干预; e.研究对象为人类; f.语言限制为中文或英文。

排除条件:a.缺少详细结果与全文资料; b.未描述氧体积分数或模拟海拔高度; c.研究对象为动物; d.实验地点全程均在高原地区; e.实验未进行运动干预或存在其他干预(如药物治疗、营养干预、外科手术等); f.研究对象具有代谢性疾病(如糖尿病、高血压、非酒精性脂肪肝等)或使用减肥药物者; g.结果与代谢指标无关或无法提取; h.涉及任何性别或种族歧视的研究。

1.2 文献检索策略与资料提取

依据Moher等^[17]提出的统合分析标准流程PRISMA指引中所建议的系统性文献回顾与统合分析的方法,进行文献的搜寻与筛选。研究问题为低氧运动对肥胖人群代谢指标影响的统合分析,本文共搜寻5个数据库,包括Cochrane Library、PubMed、Web of Science、Embase与中国知网,以低氧(hypoxic)、运动(exercise/training)、肥胖(obesity)等关键词的同义字与控制词汇(MeSH等)进行搜索,不限年代。数据提取包括:a.第一作者; b.期刊和出版年份; c.研究设计; d.地点/国家; e.受试者人数; f.性别; g.年龄; h.氧体积分数; i. BMI/体脂率; j.运动类型与频率; k.结果的均值与标准偏差。如果原始出版物中的数据缺失或不清楚,会尝试通过电子邮件联系相应的作者。

文献筛选与资料提取由两名研究人员独立进行,研究人员分别对文献进行独立筛选、阅读全文、提取资料并进行交叉核对。两位研究者通过讨论解决分歧,当意见仍不一致时,由第3位研究人员介入协商解决。资料提取内容包括:a.纳入研究的基本信息:题目、作者与发表时间; b.研究对象的详细信息; c.运动干预类型与频率; d.氧体积分数或模拟海拔高度; e.结局指标。

1.3 统计学方法

本研究运用Cochrane RevMan 5.3统计软件(The Cochrane Collaboration, Copenhagen, Denmark)进行资料的整理与分析。分析过程按照文献异质性(Higgins' *I*² test)的程度采取固定效

应模式 (fixed effects model) 或随机效应模式 (random effects model)。若 $I^2 < 50\%$ 且异质性统计结果不显著, 则采用固定效应模型; 当 $I^2 > 50\%$ 则采用随机效应模型。本研究之结果指针分数将以平均差 (mean difference, MD) 估计。

2 分析结果

2.1 文献检索流程及结果

在搜寻 5 个数据库后共有 379 篇文献, 删除重复文献 121 篇, 经标题及摘要浏览后删除与研究无关之文献共 223 篇, 浏览题目与摘要后符合条件文章共 35 篇, 阅读正文后根据下列原因排除文献 13 篇: a. 缺失关键信息 (未报告氧体积分数^[18]、样

本量^[19]或均值^[20]); b. 无完整结果数据^[21-27]; c. 研究环境为持续性高原暴露^[28-30]。最终筛选出符合条件之文献共 22 篇纳入^[31-51], 进行系统性文献回顾与统合分析。其文献筛选过程如图 1 所示。

2.2 纳入研究的基本特征

经过对检索结果的筛选以及对全文的阅读, 共纳入符合 Meta 分析要求的文献 22 篇, 纳入文献的总样本量为 292 人。所有纳入研究均为低氧干预组前后对照设计, Meta 分析所用效应量基于干预前后数值变化计算, 未纳入常氧对照组数据。纳入文献中, 氧体积分数从 16.4%~12%, 进行的运动项目有自行车、跑步、HIIT 与力量训练, 运动干预周期为 4~32 周不等。文献基本特征如表 1 所示。

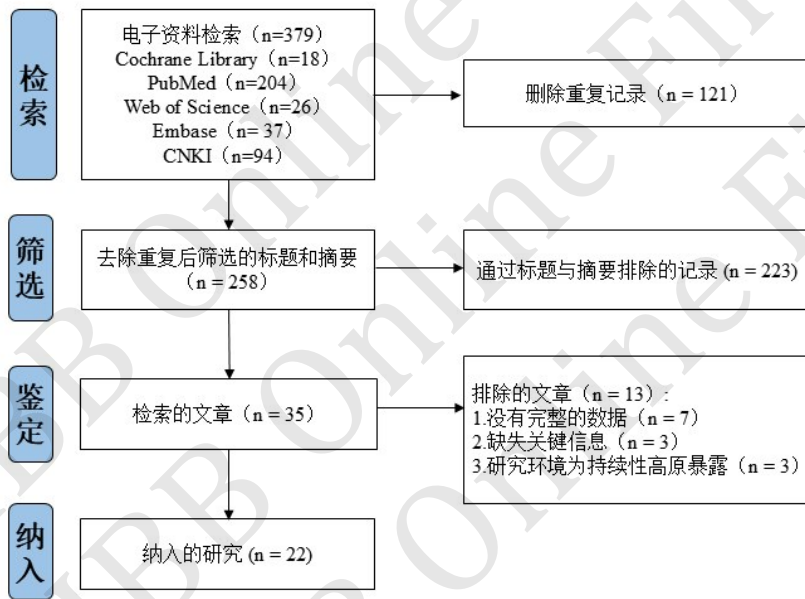


Fig. 1 PRISMA flow diagram defining the electronic search and selection process

图1 文献筛选流程图

表1 纳入文献的基本特征

Table 1 Characteristics of studies included in the meta-analysis

作者, 年份	国家	样本量	受试者基本信息		运动干预方式				结局指标	主要发现
			BMI/ (kg·m ⁻²)	年龄 (mean ±SD) / 岁	氧体积分数/模 拟海拔高度	运动类型	频率	持续 时间		
Britto等, 2020 ^[31]	比利 时	7	35.4± 4.2	12~17	15%	自行车+ 力量训练	1次/周	50~ 60 min	BMI、体脂率	肥胖青少年的形态学、健康指标 以及运动表现得到改善

续表

作者, 年份	国家	样本量	受试者基本信息		氧体积分数/模拟海拔高度	运动干预方式				结局指标	主要发现
			BMI/ (kg·m ⁻²)	年龄 (mean ±SD) / 岁		运动类型	频率	持续时间	周期/周		
González-Muniesa等, 2015 ^[32]	西班牙	17	34.4±2.8	25~50	16%~13.7%; 2 150~3 350 m	有氧运动+力量训练	2次/周	60 min	8	BMI、体脂率、腰围、TG、HDL、LDL	体重、腰围及舒张压均得到改善
Gatterer等, 2015 ^[33]	澳大利亚	16	37.9±8.1	50.3±10.3	14%; 3 500 m	自行车/跑步	2次/周	90 min	32	BMI、体脂率、腰围、空腹血糖、TG、HDL	长期、中等强度的低氧运动可以使体重减轻并改善代谢
Wiesner等, 2010 ^[52]	德国	24	30.2±3.6	42±7.1	15.0%	跑步	3次/周	60 min	4	腰围、空腹胰岛素、HOMA-IR、LDL	低氧运动相比常氧运动更好的改善了肥胖人群的体成分
Gao等, 2020 ^[34]	中国	10	28±3.6	19.3±1.9	2 300 m	有氧运动	3次/周	120 / min	4	TG、HDL、LDL	有效的降低了超重和肥胖女性的体重和体脂率
Lee等, 2017 ^[35]	韩国	10	26.3±4.0	38±8.2	13.5%; 3 500 m	有氧运动	3次/周	60 min	12	TG、HDL、LDL	低氧运动比常氧运动更能减少体脂和增加HDL-C
Kong等, 2017 ^[36]	中国	14	25.8±2.3	18~30	15%	HIIT	4次/周	60 次×8 s	5	BMI、体脂率、HDL	改善了超重的中国年轻女性的心肺适应性和血脂
Yang等, 2018 ^[37]	中国	16	32.9±3.5	14.3±1.4	14.7%; 2 700 m	有氧运动	6次/周; 2 次/d	120 min/次	4	BMI、体脂率、空腹血糖、空腹胰岛素、TG、HDL、LDL	低氧运动能安全有效地减轻体重, 并能提高血浆GLP-1水平
付丽娟等, 2022 ^[38]	中国	10	34.5±4.6	22.3±2.8	15.9%; 2 300 m	自行车	5次/周	60 min	4	BMI、体脂率、TG、HDL、LDL	低氧训练有助于改善肥胖群体的身体成分, 增强其有氧耐力
李靖等, 2014 ^[39]	中国	16	33.2±3.5	16~24	2 366 m	有氧运动	6次/周	240 min	4	BMI、体脂率、空腹血糖、HOMA-IR、TG	低强度低氧运动能更有效降低肥胖青少年的体脂率
王茹等, 2013 ^[40]	中国	18	33.6±3.9	14.4±1.4	14.7%; 2 700 m	游泳/有氧操/篮球	6 d/周; 2 次/d	120 min / 次	4	BMI、腰围、空腹血糖、空腹胰岛素、TG、HDL、LDL	显著改善了肥胖青少年身体形态和糖脂代谢指标, 存在性别差异
王宁琦等, 2011 ^[41]	中国	11	34.6±5.1	19.5±1.6	15.4%-14.8%; 2 500~2 800 m	有氧运动+力量训练	3次/周	120 min	4	BMI、体脂率、腰围、HOMA-IR、TG、HDL、LDL	降低了肥胖青年体重和 BMI; 降低了糖化血红蛋白和胰岛素抵抗等 II 型糖尿病危险因素
杨贤罡等, 2014 ^[42]	中国	10	30.7±4.3	22.5±1.3	15.4%; 2 500 m	有氧运动	5 次/周	60 min	4	BMI、体脂率、TG、HDL、LDL	改善超重和肥胖人群体成分和血脂代谢指标, 可能可以避免锻炼后的体重反弹和血脂代谢紊乱
张念坤等, 2019 ^[43]	中国	20	32.8±4.3	22.3±2.2	15%; 2 500 m	自行车	5 次/周	60 min	4	BMI、TG、HDL、LDL	可以有效降低体重、脂肪重量、BMI 和血脂代谢水平, 并且可以避免运动后的体重反弹, 稳定血脂
赵述强等, 2016 ^[44]	中国	9	33±4.6	18.2±2.2	14.7%	自行车	5 次/周	60 min	8	BMI、体脂率	可以降低肥胖大学生的体重、体脂, 增加肌肉质量, 提高有氧耐力水平

										续表
			受试者基本信息			运动干预方式				主要发现
作者, 年份	国家	样本量	BMI/ (kg·m ⁻²)	年龄 (mean ±SD) / 岁	氧体积分数/模 拟海拔高度	运动类型	频率	持续时间	周 期/ 周	结局指标
Chacaroun等, 2020 ^[45]	法国	12	31.2± 2.4	52±12	13%; 3 700 m	自行车	3次/周	45 min	8	BMI、体脂率、 腰围、空腹血 糖、空腹胰岛 素、HOMA- IR、TG、 HDL、LDL 低氧运动额外改善了肥胖个体的 健康状况
Kong等, 2014 ^[46]	中国	10	34.7± 5.3	19.8± 2.2	16.4%~14.5 %	有氧运动	11次/ 周	120 min	4	BMI 更好的减轻了体重
Morishima等, 2014 ^[47]	日本	9	25.6± 1.2	30±2	15%	自行车	3次/周	60 min	4	体脂率、空腹 血糖、空腹胰 岛素、TG、 HDL、LDL 改善了葡萄糖耐量
Jung等, 2020 ^[48]	韩国	12	27.1± 4.3	47.2± 6.4	14.5%	普拉提	3次/周	50 min	12	空腹血糖、空 腹胰岛素、 HOMA-IR、 TG、HDL、 LDL 改善了肥胖女性的舒张压、总胆 固醇和甘油三酯浓度
Jiao等, 2024 ^[49]	中国	13	28.1± 2.1	36.6± 9.5	15%; 2 700 m	有氧运动	5次/周	60 min	4	空腹血糖、TG、 HDL、LDL 有效降低超重或肥胖个体的内脏 脂肪量并改善了血管弹性
Menedez等, 2018 ^[50]	瑞士	12	34.1± 2.6	34.8± 4.7	14.5%; 3 000 m	步行	3次/周	60 min	3周	空腹血糖、空 腹胰岛素、 HOMA-IR、 TG、HDL、 LDL 低氧条件下进行的步行训练相比 于常氧未有更好的效果
Ghaith等, 2022 ^[51]	法国	16	31.5± 4	51.0± 8.3	12%; 4 200 m	HIIT	3次/周	32 次× 30 s	8	BMI、空腹血 糖、空腹胰岛 素、HOMA- IR、TG、 HDL、LDL 低氧运动改善了心肺功能，但与 常氧运动相比并不优越

BMI: 身体质量指数 (body mass index); TC: 胆固醇 (cholesterol); TG: 甘油三酯 (triglyceride); HDL-C: 高密度脂蛋白胆固醇 (high-density lipoprotein cholesterol); LDL-C: 低密度脂蛋白胆固醇 (low-density lipoprotein cholesterol); HOMA-IR: 胰岛素抵抗 (homeostasis model assessment method); HIIT: 高强度间歇训练 (high-intensity interval training)。

2.3 纳入文献风险偏倚评估

使用 Cochrane 风险偏倚评估工具分别从随机序列的产生 (选择性偏倚)、分配隐藏 (选择性偏倚)、对受试者与实验人员实施盲法 (实施偏倚)、对结局评估员实施盲法 (测量偏倚)、结果数据不完整 (随访偏倚)、选择性报告研究结果 (报告偏倚) 与其他偏倚对纳入的文献进行评价。在纳入分析的 22 篇文献中, 存在一定的偏倚性, 其中高质量文献 18 篇^[31-34, 36-44, 46-47, 49, 51-52], 中等质量文献 4 篇^[35, 45, 48, 50], 主要集中在“盲法实施”与“选择

性报告”两个维度。文献整体质量处于中等偏上, 详细结果见图 S1 和 S2。

2.4 纳入文献敏感性分析

为评估 Meta 分析结果的稳健性, 本文采用逐项剔除法对高异质性指标进行敏感性分析。结果显示, 剔除任一研究均未导致合并效应量方向或显著性发生实质性改变, 提示结果具有较好稳健性。个别研究的剔除可轻微降低 *I*² 值, 但整体影响有限, 表明分析结果未受单一研究的主导影响。

2.4 不同氧体积分数下低氧运动对肥胖人群体成分的影响

2.4.1 对身体质量指数 (BMI) 的影响

共有 15 项研究评估了不同氧体积分数下低氧运动对肥胖人群 BMI 的影响 (图 2)。由于研究间存在中度异质性 ($P=57\%$), 因此采用随机效应模型进行 Meta 分析。结果显示, 低氧运动整体可显著降低 BMI ($MD=-2.29$, $95\%CI: -3.42 \sim -1.17$, $P<0.0001$)。亚组分析的结果进一步表明, 在氧体积分数 $>14\%$ 的环境下, 低氧运动可显著降

低 BMI ($MD=-2.79$, $95\%CI: -4.00 \sim -1.58$, $P<0.0001$), 而在氧体积分数 $\leq 14\%$ 的环境下, BMI 的变化无统计学意义 ($MD=0.02$, $95\%CI: -1.55 \sim 1.58$, $P=0.80$)。总体而言, 当个体在氧体积分数 $>14\%$ 的环境下进行运动时, BMI 平均下降约 9.3%, 而在氧体积分数 $\leq 14\%$ 的环境下运动下降幅度不足 2%。亚组间差异具有统计学意义 ($P=0.005$), 在氧体积分数 $>14\%$ 的环境下进行运动对 BMI 的改善效果更为显著。

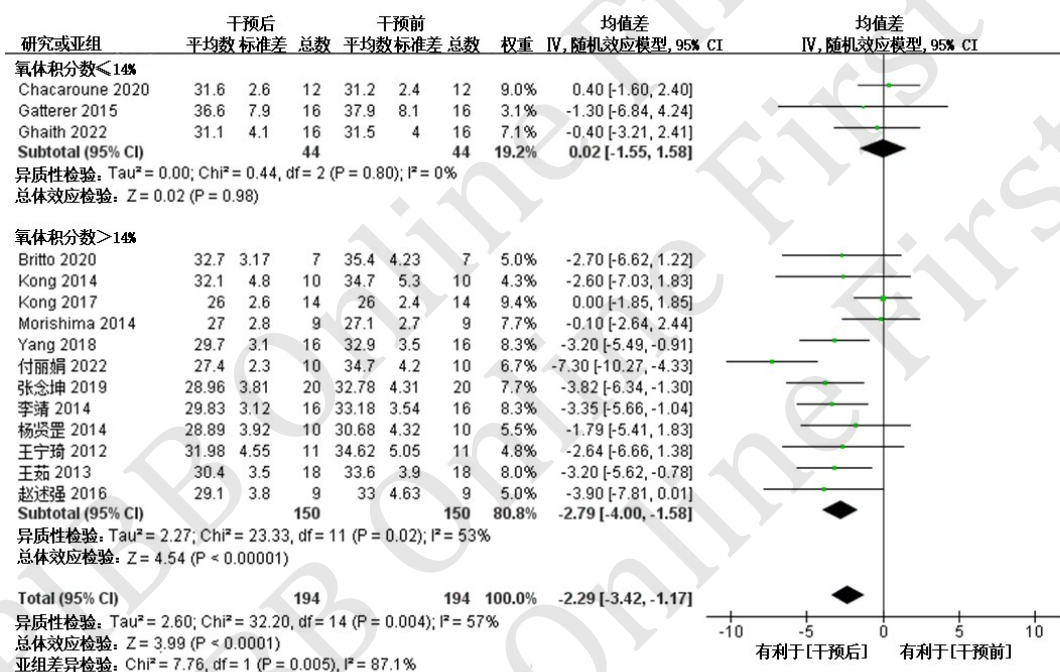


Fig. 2 BMI responses to hypoxic training under different FiO_2

图2 不同氧体积分数下低氧运动对BMI的影响

2.4.2 对体脂率的影响

共有 12 项研究报告了不同氧体积分数下低氧运动对肥胖人群体脂率的影响 (图 3)。由于研究间无明显异质性 ($I^2=0\%$), 采用固定效应模型进行 Meta 分析。结果显示, 低氧运动可显著降低体脂率 ($MD=-2.32$, $95\%CI: -3.1 \sim -1.47$, $P<0.001$)。亚组分析进一步探讨了氧体积分数的调节作用, 与在氧体积分数 $>14\%$ 的环境中, 低氧运动显著降低了肥胖人群的体脂率 ($MD=-2.46$, $95\%CI: -3.36 \sim -1.57$, $P<0.001$), 而在氧体积分数 $\leq 14\%$ 的环境中, 体脂率无显著变化 ($MD=-1.16$, $95\%CI: -3.66 \sim 1.34$, $P=0.36$)。总体而言,

氧体积分数 $>14\%$ 环境下体脂率平均下降约 6.5%, 而氧体积分数 $\leq 14\%$ 环境下下降幅度不足 2%。提示氧体积分数对体脂率的干预效果可能存在一定倾向性, 但需进一步研究验证。

2.4.3 对腰围的影响

共有 6 项研究评估了不同氧体积分数下低氧运动对肥胖人群腰围的影响 (图 4)。Meta 分析结果显示, 低氧运动整体可显著减少腰围 ($MD=-3.79$, $95\%CI: -6.73 \sim -0.85$, $P=0.01$), 研究间异质性为零 ($P=0\%$), 说明结果具有较好一致性。亚组分析显示, 在氧体积分数 $>14\%$ 的中等低氧环境中进行运动, 腰围显著下降 ($MD=-6.76$,

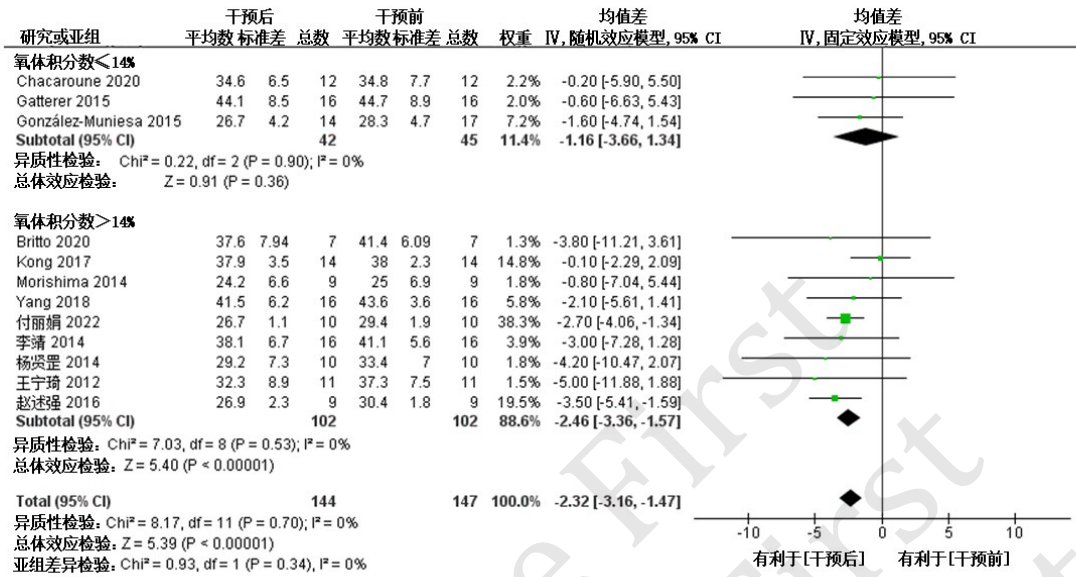


Fig. 3 Fat mass percentage responses to hypoxic training under different FiO_2

图3 不同氧体积分数下低氧运动对体脂率的影响

95%CI: -11.56~ -1.97, $P=0.006$), 而氧体积分数 $\leq 14\%$ 的极低氧组中则未观察到显著变化 ($MD=-2.00$, 95%CI: -5.72~1.72, $P=0.29$)。虽然亚组间差异无统计学意义 ($P=0.12$), 但从趋势上看,

氧体积分数 $>14\%$ 的中等低氧干预可能更具优势, 低氧运动对肥胖人群腰围的干预效果可能与氧体积分数有关。

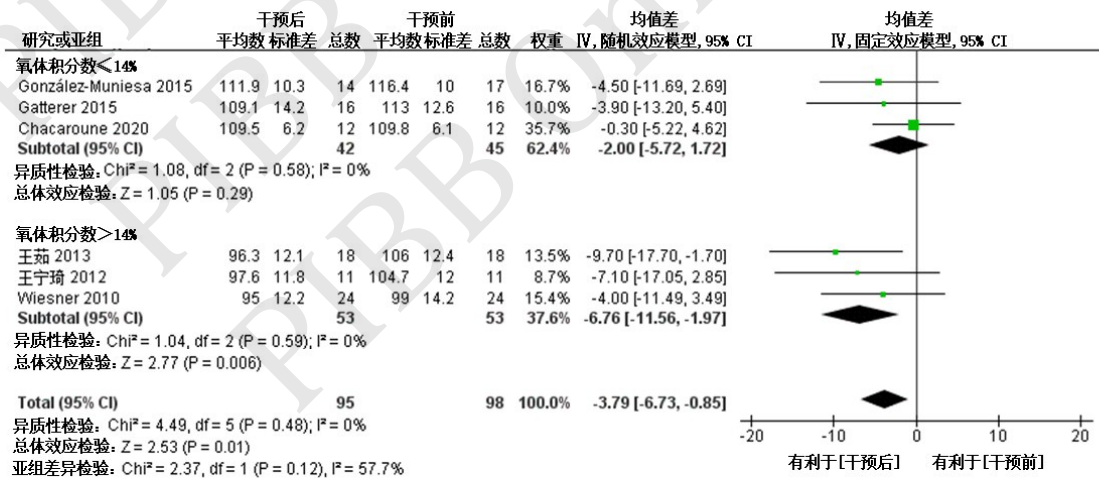


Fig. 4 Waist circumference responses to hypoxic training under different FiO_2

图4 不同氧体积分数下低氧运动对腰围的影响

2.5 不同氧体积分数下低氧运动对肥胖人群葡萄糖代谢与胰岛素敏感性的影响

2.5.1 对空腹血糖的影响

共有10项研究评估了不同氧体积分数下低氧运动对肥胖人群空腹血糖(fasting glucose)的影响(图5)。由于研究间异质性较低($P=25\%$),采用固定效应模型进行Meta分析。结果显示,低氧运动整体可显著降低空腹血糖($MD=-3.58$, $95\%CI: -6.23 \sim -0.93$, $P=0.008$)。亚组分析结果表明,在氧体积分数 $>14\%$ 的环境下进行运动,空

腹血糖显著下降($MD=-3.83$, $95\%CI: -6.66 \sim -0.99$, $P=0.008$),而在氧体积分数 $\leq 14\%$ 的环境下运动,血糖变化无统计学意义($MD=-1.82$, $95\%CI: -9.33 \sim 5.70$, $P=0.64$)。总体而言,氧体积分数 $>4\%$ 环境下空腹血糖平均下降约5.1%,而氧体积分数 $\leq 14\%$ 环境下变化幅度较小,且无显著改善。虽然亚组间差异未达到统计学上的显著($P=0.62$),但不同氧体积分数下的运动干预效果存在明显的差异。

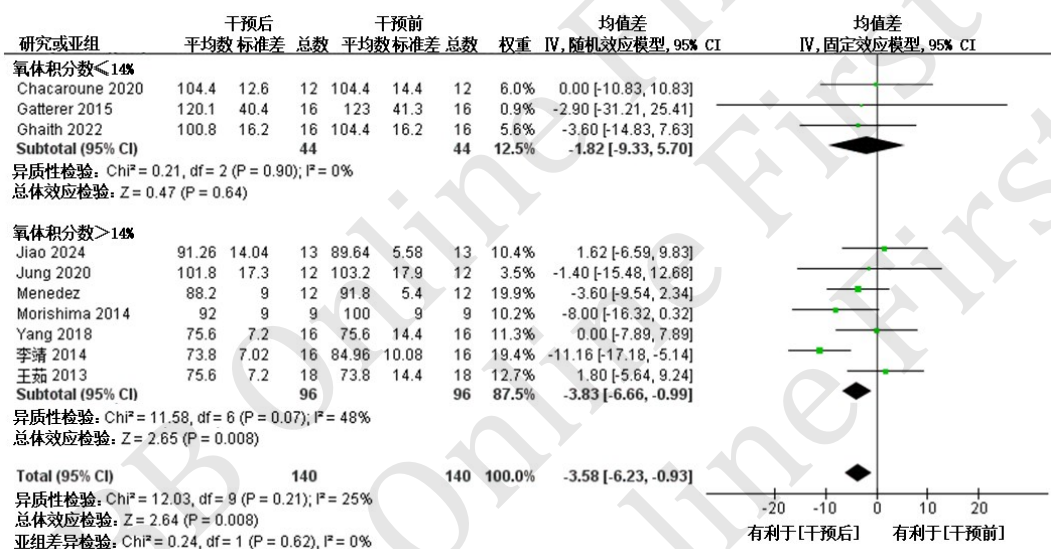


Fig. 5 Fasting glucose responses to hypoxic training under different FiO_2

图5 不同氧体积分数下低氧运动对空腹血糖的影响

2.5.2 对空腹胰岛素的影响

共有8项研究评估了不同氧体积分数下低氧运动对肥胖人群空腹胰岛素水平的影响(图6)。由于研究间无明显异质性($P=0\%$),采用固定效应模型进行Meta分析。结果显示,低氧运动整体可显著降低空腹胰岛素水平($MD=-1.60$, $95\%CI: -2.98 \sim -0.22$, $P=0.02$)。亚组分析结果表明,在氧体积分数 $>14\%$ 的环境下,空腹胰岛素水平显著下降($MD=-2.02$, $95\%CI: -3.5 \sim -0.45$, $P=0.01$),而在氧体积分数 $\leq 14\%$ 的环境下,未观察到显著变化($MD=-1.12$, $95\%CI: -3.06 \sim -2.82$, $P=0.94$)。总体而言,氧体积分数 $>14\%$ 环境下空腹胰岛素平均下降约8.6%,而氧体积分数 $\leq 14\%$ 环境下无明显改善。虽然亚组间的差异无统计学意义($P=0.26$),但再中等低氧体积分数下进行运动的干

预效果更为显著。

2.5.3 对胰岛素抵抗指数(HOMA-IR)的影响

共有7项研究评估了不同氧体积分数下低氧运动对肥胖人群HOMA-IR水平的影响(图7)。Meta分析结果显示,低氧运动整体可降低HOMA-IR,但差异未达到统计学显著性($MD=-0.74$, $95\%CI: -1.52 \sim 0.04$, $P=0.06$),研究间存在较高异质性($P=89\%$)。亚组分析显示,在氧体积分数 $>14\%$ 的中等低氧环境下, HOMA-IR显著下降($MD=-1.10$, $95\%CI: -2.19 \sim -0.01$, $P=0.05$),而在氧体积分数 $\leq 14\%$ 的极低氧环境中,运动干预前后无显著差异($MD=0.02$, $95\%CI: -0.35 \sim 0.40$, $P=0.91$)。亚组间的差异接近显著($P=0.06$),中等低氧可能具有更优的胰岛素敏感性改善潜力。

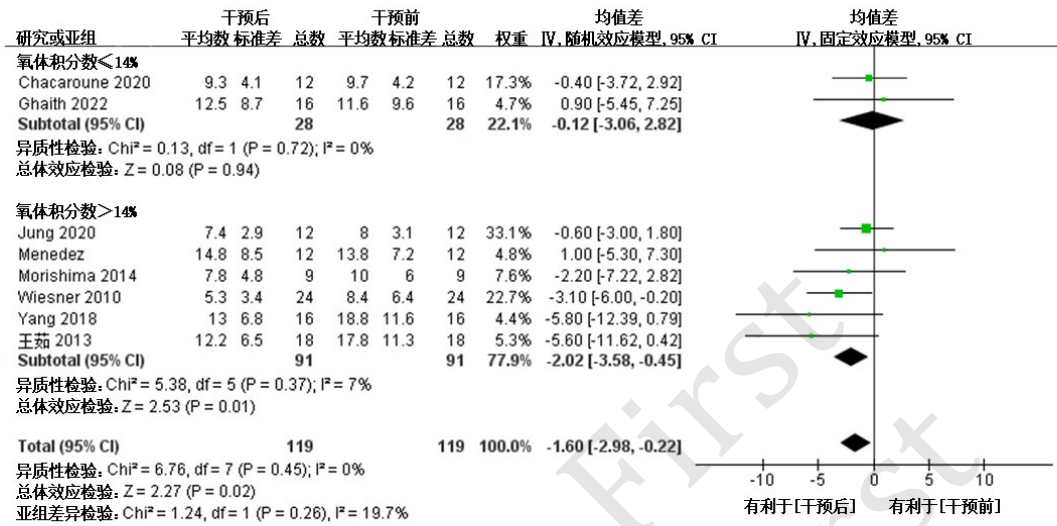


Fig. 6 Fasting insulin responses to hypoxic training under different FiO_2

图6 不同氧体积分数下低氧运动对空腹胰岛素的影响

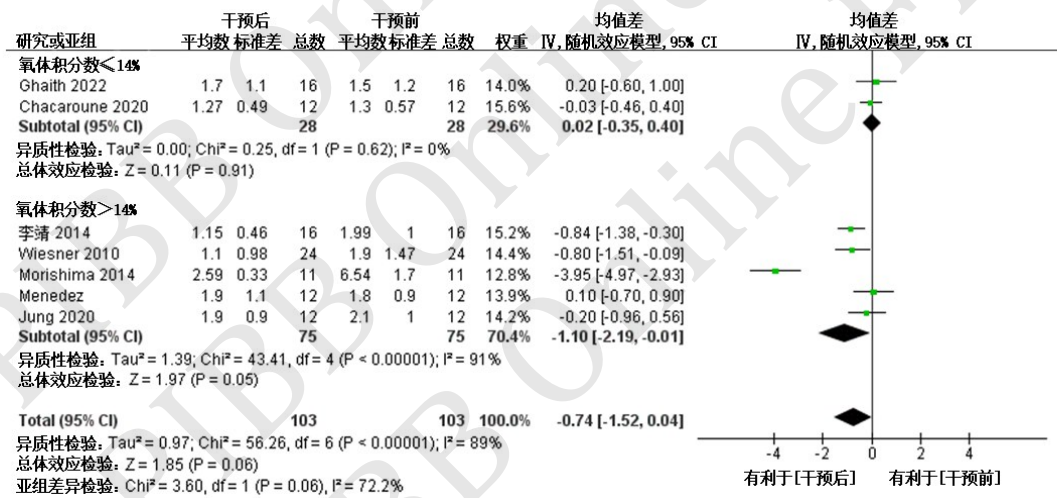


Fig. 7 HOMA-IR responses to hypoxic training under different FiO_2

图7 不同氧体积分数下低氧运动对HOMA-IR的影响

2.6 不同氧体积分数下低氧运动对肥胖人群血脂水平的影响

2.6.1 对甘油三酯 (TG) 的影响

共有 17 项研究评估了不同氧体积分数下低氧运动对肥胖人群 TG 水平的影响 (图 8)。由于研究间异质性较低 ($P=3\%$), 采用固定效应模型进行 Meta 分析。结果显示, 低氧运动整体可显著降低 TG 水平 ($MD = -0.18$, $95\%CI: -0.25 \sim -0.12$, $P < 0.001$)。亚组分析结果显示, 在氧体积分数 >

14% 的环境下, TG 水平显著下降 ($MD = -0.20$, $95\%CI: -0.27 \sim -0.13$, $P < 0.001$); 而在氧体积分数 $\leq 14\%$ 的环境下, TG 变化无统计学意义 ($MD = 0.01$, $95\%CI: -0.23 \sim 0.25$, $P = 0.92$)。当在氧体积分数 >14% 环境下进行运动时, TG 平均下降约 7.8%, 而氧体积分数 $\leq 14\%$ 环境下无明显改善。亚组间差异接近统计学显著性 ($P = 0.10$), 提示中等低氧体积分数下的干预效果更优。

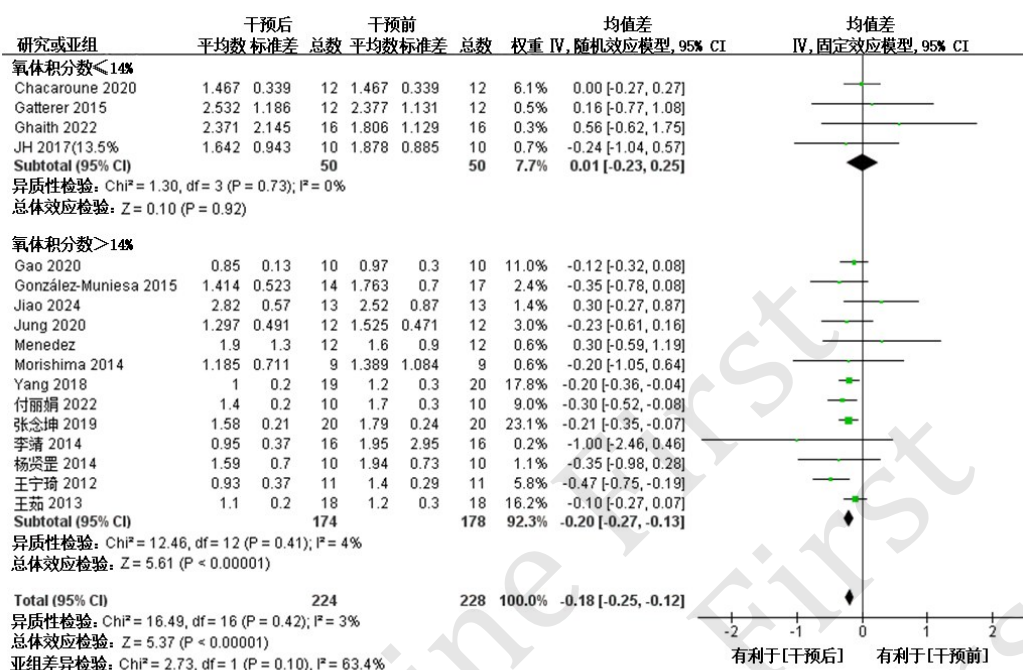
Fig. 8 TG responses to hypoxic training under different FiO_2

图8 不同氧体积分数下低氧运动对TG的影响

2.6.2 对低密度脂蛋白胆固醇 (LDL-C) 的影响

共有 16 项研究评估了不同氧体积分数下低氧运动对肥胖人群低密度脂蛋白胆固醇 (LDL-C) 水平的影响 (图 9)。由于研究间存在中度异质性 ($P=56\%$), 采用随机效应模型进行 Meta 分析。结果显示, 低氧运动整体可显著降低 LDL-C 水平 ($MD = -0.25$, $95\%CI: -0.39 \sim -0.11$, $P=0.0003$)。亚组分析结果表明, 在氧体积分数 $>14\%$ 的环境下, LDL-C 水平显著下降 ($MD = -0.32$, $95\%CI: -0.46 \sim -0.18$, $P<0.00001$); 而在氧体积分数 $\leq 14\%$ 的环境下, LDL-C 变化无统计学意义 ($MD=0.01$, $95\%CI: -0.16 \sim 0.17$, $P=0.94$)。亚组间差异具有统计学意义 ($P=0.004$), 中等低氧体积分数下的干预效果显著优于极低氧环境。总体而言, 再氧体积分数 $>14\%$ 环境下进行运动后 LDL-C 平均下降约 6.8%, 而氧体积分数 $\leq 14\%$ 环境下无明显改善。

2.6.3 对高密度脂蛋白胆固醇 (HDL-C) 的影响

共有 17 项研究评估了不同氧体积分数下低氧运动对肥胖人群高密度脂蛋白胆固醇 (HDL-C) 水平的影响 (图 10)。由于研究间存在较高异质性 ($P=72\%$), 采用随机效应模型进行 Meta 分析。结果显示, 低氧运动整体对 HDL-C 水平的影响无统计学显著性 ($MD = -0.09$, $95\%CI: -0.21 \sim 0.02$, $P=0.11$)。亚组分析结果表明, 无论在氧体积分数 $>14\%$ 环境 ($MD = -0.11$, $95\%CI: -0.25 \sim 0.02$, $P=0.09$), 还是在氧体积分数 $\leq 14\%$ 环境 ($MD = -0.02$, $95\%CI: -0.25 \sim 0.22$, $P=0.89$), HDL-C 水平的变化均未达到统计学显著性。亚组间差异同样无统计学意义 ($P=0.48$)。低氧运动对 HDL-C 的改善效果有限, 且不同氧体积分数下的干预差异不明显。

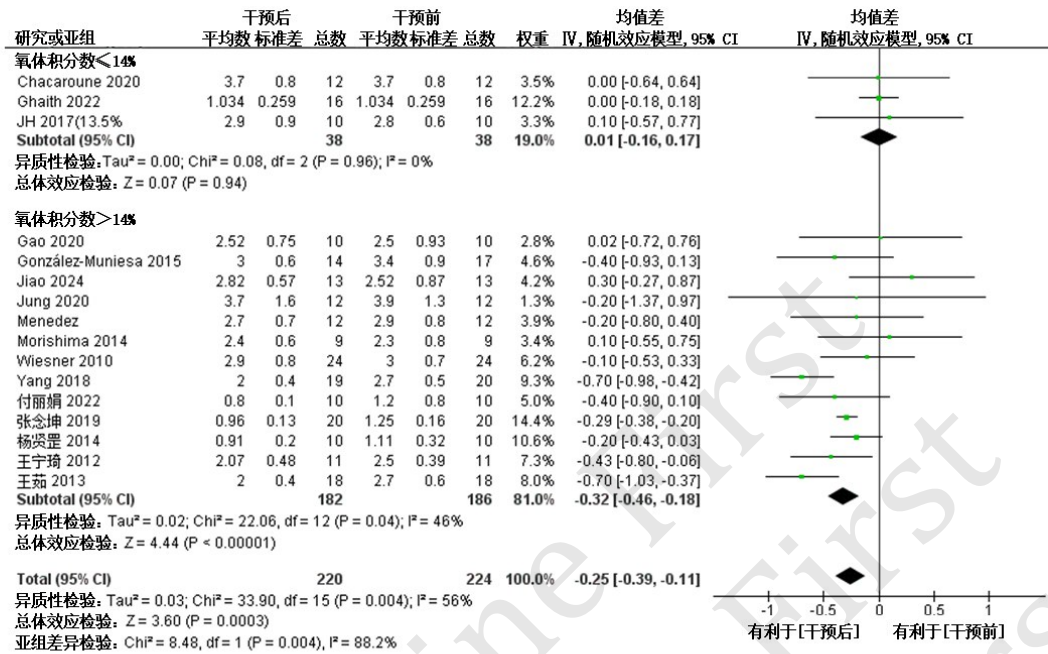


Fig. 9 LDL-C responses to hypoxic training under different FiO_2

图9 不同氧体积分数下低氧运动对LDL-C的影响

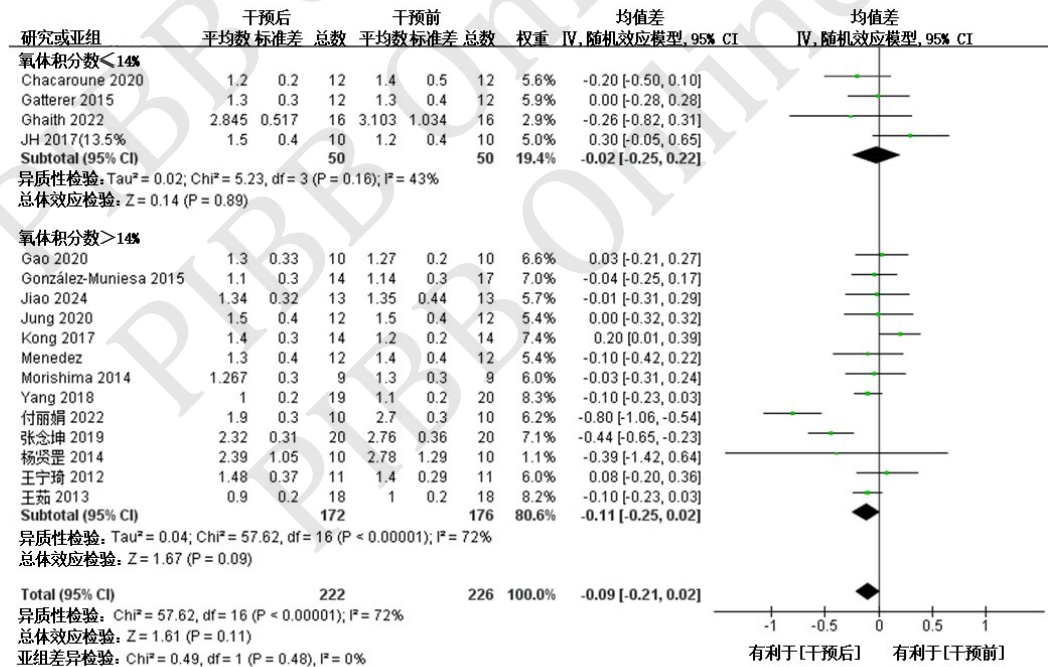


Fig. 10 HDL-C responses to hypoxic training under different FiO_2

图10 不同氧体积分数下低氧运动对高密度脂蛋白胆固醇 (HDL-C) 的影响

3 讨论

本文系统性地总结了不同氧体积分数下低氧运动对肥胖人群代谢健康产生的影响。Meta分析的结果显示,低氧运动能够显著改善体成分、葡萄糖代谢及部分血脂指标。尽管低氧环境影响代谢的确切机制仍有待充分阐明,目前大多数研究认为,低氧环境通过激活低氧诱导因子1 α (hypoxia-inducible factor-1 α , HIF-1 α) 信号通路,促进脂肪氧化、抑制脂肪合成,并提升胰岛素敏感性,从而对代谢健康产生积极影响^[15]。基于此理论,随着氧体积分数的降低,低氧运动对体成分、葡萄糖代谢及血脂水平的改善效果应逐步增强。然而,与该假设相反,进一步的亚组分析表明,在氧体积分数>14%的中等低氧环境下,绝大多数代谢指标均表现出显著改善;而在氧体积分数 $\leq$ 14%的极低氧环境下运动,未能改善肥胖人群的代谢健康。这些结果表明,氧体积分数水平在代谢改善效果中发挥了关键作用,低氧运动对肥胖人群代谢的改善并非氧体积分数越低越好,而是存在一个最佳低氧刺激区间,只有在中等低氧环境下进行运动才可以改善代谢健康。

本文结果显示,低氧运动对肥胖人群体成分具有显著改善效果,具体表现为BMI、体脂率及腰围的显著下降,尤其在氧体积分数>14%的中等低氧环境下,改善效果更加明显。低氧运动对体成分的改善与先前研究一致,进一步证实了低氧运动作为非药物干预手段的有效性^[27]。Dünnwald等^[53]在综述中指出,当个体处于氧体积分数为14%~16%的环境下更有利于减轻体重,而极端低氧环境则可能因机体应激反应增强,导致代谢适应受限。低氧运动除了可以通过激活AMPK与HIF-1 α 信号通路实现脂肪动员,还能够调节Leptin与Ghrelin等食欲激素水平,抑制食欲,维持负能量平衡,达到体脂减少的目的^[54-55]。然而,由于干预周期、运动模式与人群特征的差异,研究的结果存在着较大的异质性。在干预时长为3周的研究中,Fernández Menéndez等^[50]的研究发现,短期干预效果有限,与此结果不同,杨贤罡等^[42]与张念坤等^[43]的研究中,低氧运动降低了干预结束后的体重反弹风险。当干预周期大于8~12周时,多项研究均报告了显著的体成分改善效果^[32, 35, 44]。然而,Gatterer等^[33]一项为期32周的研究显示,第12周与5周后的结果相比并无显著差异,更长时间

的低氧运动并未带来额外的增益效果。此外,运动干预方式的不同同样会影响效果。采用步行作为干预手段,结果显示低氧组与常氧组在代谢改善方面无显著差异^[50]。当运动类型为普拉提时,即使干预时长为12周,也未给肥胖患者带来体成分的改善^[48]。这可能与运动强度不足或训练方式无法有效激活低氧相关代谢通路有关,运动类型与低氧环境的协同作用机制仍需进一步探索。

低氧运动在改善肥胖人群葡萄糖代谢紊乱及胰岛素抵抗方面展现出积极作用。本研究的结果表明,空腹血糖及空腹胰岛素水平均有显著下降,且这种改善效应在氧体积分数>14%的中等低氧环境下更为显著。虽然低氧运动后HOMA-IR的值并未显著降低,但当氧体积分数>14%时,低氧运动显著降低了个体的HOMA-IR水平,改善了个体的代谢状况。这一发现与Mai等^[20]的随机对照试验的结论相似,低氧运动显著提升了受试者的胰岛素敏感性及葡萄糖调节能力,同时伴随运动能力的改善。多项研究进一步支持低氧暴露的代谢优势^[56-57],与居住在平原地区的个体相比,长期居住在高海拔地区的个体相较于平原地区居民,糖尿病的发病率更低^[58]。而Hamlin等^[59]的研究则发现,短期在高海拔地区进行运动能显著降低个体的胰岛素抵抗和口服葡萄糖耐量试验后的血糖浓度。Zhao等^[60]在糖尿病小鼠模型中发现,短期中度低氧暴露显著促进了线粒体NAD循环活性,揭示了低氧干预可能通过改善线粒体功能参与糖代谢紊乱的调控机制。这些研究证实长期与短期的低氧暴露均具有良好的糖代谢调节作用,然而,持续低氧暴露与间歇性低氧运动在机制激活路径上可能存在不同,当前尚缺乏系统性的比较研究以明确各自优势与适用人群。在低氧环境中,骨骼肌葡萄糖摄取能力的提升主要依赖于多条信号通路对葡萄糖转运蛋白4 (glucose transporter 4, GLUT4) 表达与转位的调控,促进其向细胞膜的转运,增强葡萄糖摄取与利用,从而改善胰岛素敏感性并维持血糖稳态^[61]。此外,低氧运动能够有效抑制炎症因子如肿瘤坏死因子 α (tumor necrosis factor- α , TNF- α)、白介素-6 (interleukin-6, IL-6) 的释放,减少慢性低度炎症对胰岛素信号通路的干扰,进一步巩固其代谢调节作用^[62]。然而,本研究发现极低氧环境(氧体积分数 $\leq$ 14%)未能显著改善糖代谢指标,Chacaroun等^[45]在采用较低氧体积分数(13%)及短期的干预实验时,未观察到糖代谢的显著改善。

这可能与过度低氧诱发的应激状态有关, 导致胰岛素信号通路受阻或代谢负担增加^[53]。因此, 低氧运动的代谢效应需选择合适的氧体积分数, 确保处于促进代谢适应而非激发应激反应的最佳区间。

此外, 低氧运动还可以显著改善肥胖人群的脂代谢状况, 具体表现为TG和LDL-C水平的显著下降, 而HDL-C未见明显改善, 且上述效应在氧体积分数>14%的中等低氧环境下更为突出。这一发现与先前研究结果一致^[34, 52], 均表明低氧运动在降低TG和LDL-C方面优于常氧运动。Morishima等^[47]在针对久坐肥胖女性的研究中进一步指出, 低氧环境下的有氧训练可有效促进脂质代谢, 特别是在内脏脂肪和血脂异常的改善上表现突出。然而, 脂代谢改善效果受到多重因素影响, 运动模式与强度尤为关键。高强度间歇训练(high-intensity interval training, HIIT)及中等强度有氧运动在低氧环境中均表现出良好的血脂调节效应^[36-38, 40-43], Jung等^[48]在14.5%氧体积分数下采用普拉提训练的研究却未观察到血脂指标的显著变化。关于HDL-C的变化, 已有研究结果存在明显分歧。部分研究结果表明, 短期低氧干预难以引起HDL-C的显著提升^[32-33], 这可能因为HDL-C合成机制复杂, 其调节效果更多依赖于长期、持续的中高强度运动刺激, 以及脂质代谢环境的系统性改善。Britto等^[31]在为期30周的青少年低氧训练中报告了HDL-C的轻度上升, 进一步说明干预周期的延长可能是影响HDL-C响应的关键因素之一。此外, 个体差异也是影响血脂响应的重要因素。研究显示, 女性在运动干预后的HDL-C提升幅度普遍高于男性, 这可能与雌激素对脂质代谢的调节作用相关^[63]。同时, 基础血脂水平较高或存在代谢异常的个体, 其TG与LDL-C的下降幅度更为明显, 而HDL-C变化则受限, 尤其在短期或低强度运动干预中更为明显^[64]。然而, 尽管大量证据支持低氧运动在改善脂代谢方面的积极作用, 但当前研究仍存在以下不足: a. 研究设计异质性大, 缺乏统一的运动干预标准; b. 对HDL-C响应机制认知有限, 特别是短期干预效果不佳的问题尚未解决; c. 极低氧体积分数的代谢风险评估不足。

4 总结与展望

基于前期在低氧运动干预及代谢调节机制研究的积累, 本研究以系统评价与Meta分析方法为基础, 首次从氧体积分数角度出发, 综合分析不同氧

水平下低氧运动对肥胖人群成分、葡萄糖代谢及脂代谢的干预效果, 明确氧体积分数>14%的中等低氧环境可获得更优改善效果。本研究结果表明, 在氧体积分数>14%的中等低氧环境中运动, 可以使BMI、体脂率、空腹血糖、空腹胰岛素、TG和LDL-C平均下降9.3%、6.5%、5.1%、8.6%、7.8%以及6.8%, 为肥胖人群的健康管理提供了一种全新的非药物干预途径。然而, 当前低氧运动在临床及健康管理中的应用仍面临诸多挑战, 尤其在氧体积分数选择、干预周期及运动模式等方面, 尚缺乏统一且规范化的干预标准, 限制了其广泛推广与精准实施。未来研究应聚焦于低氧干预参数的优化与标准制定, 特别是围绕氧体积分数的科学设置, 结合不同人群及代谢性疾病特征, 探索个体化、精准化的低氧运动处方, 为“健康中国”战略提供实践指导, 为肥胖人群的代谢健康管理提供更加坚实的理论依据。

附件 见本文网络版 (<http://www.pibb.ac.cn>, <http://www.cnki.net>):

PIBB_20250198_Figure S1.pdf

PIBB_20250198_Figure S2.pdf

参考文献

- [1] Recalde M, Pistillo A, Davila-Batista V, *et al.* Longitudinal body mass index and cancer risk: a cohort study of 2.6 million Catalan adults. *Nat Commun*, 2023, **14**(1): 3816
- [2] NCD Risk Factor Collaboration (NCD-RisC). Worldwide trends in underweight and obesity from 1990 to 2022: a pooled analysis of 3663 population-representative studies with 222 million children, adolescents, and adults. *Lancet*, 2024, **403**(10431): 1027-1050
- [3] GBD 2021 Adult BMI Collaborators. Global, regional, and national prevalence of adult overweight and obesity, 1990-2021, with forecasts to 2050: a forecasting study for the Global Burden of Disease Study 2021. *Lancet*, 2025, **405**(10481): 813-838
- [4] Jayedi A, Soltani S, Emadi A, *et al.* Aerobic exercise and weight loss in adults: a systematic review and dose-response meta-analysis. *JAMA Netw Open*, 2024, **7**(12): e2452185
- [5] Al-Mhanna S B, Batrakoulis A, Wan Ghazali W S, *et al.* Effects of combined aerobic and resistance training on glycemic control, blood pressure, inflammation, cardiorespiratory fitness and quality of life in patients with type 2 diabetes and overweight/obesity: a systematic review and meta-analysis. *PeerJ*, 2024, **12**: e17525
- [6] Al-Mhanna S B, Franklin B A, Jakicic J M, *et al.* Impact of resistance training on cardiometabolic health-related indices in patients with type 2 diabetes and overweight/obesity: a systematic review and meta-analysis of randomised controlled trials. *Br J*

- Sports Med, 2025, **59**(10): 733-746
- [7] Tee C C L, Cooke M B, Chong M C, *et al.* Mechanisms for combined hypoxic conditioning and divergent exercise modes to regulate inflammation, body composition, appetite, and blood glucose homeostasis in overweight and obese adults: a narrative review. Sports Med, 2023, **53**(2): 327-348
- [8] Chen S, Su H, Liu X, *et al.* Effects of exercise training in hypoxia versus normoxia on fat-reducing in overweight and/or obese adults: a systematic review and meta-analysis of randomized clinical trials. Front Physiol, 2022, **13**: 940749
- [9] Guo H, Cheng L, Duolikun D, *et al.* Aerobic exercise training under normobaric hypoxic conditions to improve glucose and lipid metabolism in overweight and obese individuals: a systematic review and meta-analysis. High Alt Med Biol, 2023, **24**(4): 312-320
- [10] 王盼, 赵华, 张传勇. 低氧运动对肥胖成人身体成分和胰岛素抵抗影响的Meta分析. 湖北体育科技, 2024, **43**(1): 52-59
Wang P, Zhao H, Zhang C Y. Hubei Phys Sci, 2024, **43**(1): 52-59
- [11] Liu P, Chen H, Jiang X, *et al.* Impact of exercise training in a hypobaric/normobaric hypoxic environment on body composition and glycolipid metabolism in individuals with overweight or obesity: a systematic review and meta-analysis. Front Physiol, 2025, **16**: 1571730
- [12] Bagińska M, Kałuża A, Tota Ł, *et al.* The impact of intermittent hypoxic training on aerobic capacity and biometric-structural indicators among obese women-a pilot study. J Clin Med, 2024, **13**(2): 380
- [13] Park W, Park H Y, Kim S W. Effects of 12 weeks of combined exercise training in normobaric hypoxia on arterial stiffness, inflammatory biomarkers, and red blood cell hemorheological function in obese older women. Healthcare (Basel), 2024, **12**(18): 1887
- [14] van Meijel R L J, Blaak E E, Goossens G H. Effects of hypoxic exercise on 24-hour glucose profile and substrate metabolism in overweight and obese men with impaired glucose metabolism. Am J Physiol Endocrinol Metab, 2023, **324**(2): E135-E143
- [15] Song K, Zhang Y, Ga Q, *et al.* High-altitude chronic hypoxia ameliorates obesity-induced non-alcoholic fatty liver disease in mice by regulating mitochondrial and AMPK signaling. Life Sci, 2020, **252**: 117633
- [16] Burtcher J, Citherlet T, Camacho-Cardenosa A, *et al.* Mechanisms underlying the health benefits of intermittent hypoxia conditioning. J Physiol, 2024, **602**(21): 5757-5783
- [17] Moher D, Liberati A, Tetzlaff J, *et al.* Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement. PLoS Med, 2009, **6**(7): e1000097
- [18] Ahmad I, Zaman G S, Silvian S P, *et al.* Resistance training exercises for obese and non-obese individuals living in high-altitude regions utilizing biochemical markers-a controlled trial. Niger J Clin Pract, 2021, **24**(4): 600-607
- [19] Wróbel M, Rokicka D, Golaś A, *et al.* Combined aerobic and resistance training performed under conditions of normobaric hypoxia and normoxia has the same impact on metabolic control in men with type 1 diabetes. Int J Environ Res Public Health, 2021, **18**(24): 13058
- [20] Mai K, Klug L, Rakova N, *et al.* Hypoxia and exercise interactions on skeletal muscle insulin sensitivity in obese subjects with metabolic syndrome: results of a randomized controlled trial. Int J Obes (Lond), 2020, **44**(5): 1119-1128
- [21] Camacho-Cardenosa A, Camacho-Cardenosa M, Brazo-Sayavera J, *et al.* Repeated sprint in hypoxia as a time-metabolic efficient strategy to improve physical fitness of obese women. Eur J Appl Physiol, 2020, **120**(5): 1051-1061
- [22] Camacho-Cardenosa A, Camacho-Cardenosa M, Burtcher M, *et al.* High-intensity interval training in normobaric hypoxia leads to greater body fat loss in overweight/obese women than high-intensity interval training in normoxia. Front Physiol, 2018, **9**: 60
- [23] Camacho-Cardenosa A, Camacho-Cardenosa M, Olcina G, *et al.* Detraining effect on overweight/obese women after high-intensity interval training in hypoxia. Scand J Med Sci Sports, 2019, **29**(4): 535-543
- [24] Rausch L K, Hofer M, Pramsohler S, *et al.* Adiponectin, leptin and visfatin in hypoxia and its effect for weight loss in obesity. Front Endocrinol (Lausanne), 2018, **9**: 615
- [25] Netzer N C, Chytra R, Küpper T. Low intense physical exercise in normobaric hypoxia leads to more weight loss in obese people than low intense physical exercise in normobaric sham hypoxia. Sleep Breath, 2008, **12**(2): 129-134
- [26] DE Groote E, Britto F A, Bullock L, *et al.* Hypoxic training improves normoxic glucose tolerance in adolescents with obesity. Med Sci Sports Exerc, 2018, **50**(11): 2200-2208
- [27] Park H Y, Kim J, Park M Y, *et al.* Exposure and exercise training in hypoxic conditions as a new obesity therapeutic modality: a mini review. J Obes Metab Syndr, 2018, **27**(2): 93-101
- [28] 陈立军, 王兴, 王茹. 在多巴高原与平原分别实施有氧运动处方对肥胖青少年体质健康促进的实验研究. 中国体育科技, 2013, **49**(6): 89-93
Chen L J, Wang X, Wang R. China Sport Sci Technol, 2013, **49**(6): 89-93
- [29] 冯连世, 张漓, 高炳宏, 等. 不同环境下有氧运动对超重和肥胖青少年体重与体脂含量的影响. 体育科学, 2013, **33**(11): 58-65
Feng L S, Zhang L, Gao B H, *et al.* China Sport Sci, 2013, **33**(11): 58-65
- [30] Zaman G S, Abohashrh M, Ahmad I, *et al.* The impact of body resistance training exercise on biomedical profile at high altitude: a randomized controlled trial. Biomed Res Int, 2021, **2021**: 6684167
- [31] Britto F A, De Groote E, Aranda J, *et al.* Effects of a 30-week combined training program in normoxia and in hypoxia on exercise performance and health-related parameters in obese adolescents: a pilot study. J Sports Med Phys Fitness, 2020, **60**(4): 601-609
- [32] González-Muniesa P, Lopez-Pascual A, de Andrés J, *et al.* Impact of intermittent hypoxia and exercise on blood pressure and metabolic features from obese subjects suffering sleep apnea-

- hypopnea syndrome. *J Physiol Biochem*, 2015, **71**(3): 589-599
- [33] Gatterer H, Haacke S, Burtcher M, *et al.* Normobaric intermittent hypoxia over 8 months does not reduce body weight and metabolic risk factors—a randomized, single blind, placebo-controlled study in normobaric hypoxia and normobaric sham hypoxia. *Obes Facts*, 2015, **8**(3): 200-209
- [34] Gao H, Xu J, Zhang L, *et al.* Effects of living high-training low and high on body composition and metabolic risk markers in overweight and obese females. *Biomed Res Int*, 2020, **2020**: 3279710
- [35] Lee J, Kim C. Effects of 12 weeks aerobic training in hypoxia on body composition and fat metabolism in obese adults. *Int J Sports Sci Med*, 2017, **1**(1): 010-016
- [36] Kong Z, Shi Q, Nie J, *et al.* High-intensity interval training in normobaric hypoxia improves cardiorespiratory fitness in overweight Chinese young women. *Front Physiol*, 2017, **8**: 175
- [37] Yang Q, Huang G, Tian Q, *et al.* "Living High-Training Low" improved weight loss and glucagon-like peptide-1 level in a 4-week weight loss program in adolescents with obesity: a pilot study. *Medicine (Baltimore)*, 2018, **97**(8): e9943
- [38] 付丽娟, 李星瑜. 低氧训练对肥胖群体身体成分和有氧耐力的影响. *文体用品与科技*, **2022**(6): 92-94
Fu L J, Li X Y. *Sci Technol Station Sport Goods*, **2022**(6): 92-94
- [39] 李靖, 张漓, 冯连世, 等. 高原或低氧训练对肥胖青少年减体重效果及血糖代谢相关指标的影响. *中国运动医学杂志*, 2014, **33**(5): 460-464
Li J, Zhang L, Feng L S, *et al.* *Chin J Phys Med*, 2014, **33**(5): 460-464
- [40] 王茹, 王红霞, 许亚丽, 等. 高住低练对肥胖青少年形态学指标和糖脂代谢的影响. *北京体育大学学报*, 2013, **36**(9): 81-87
Wang R, Wang H X, Xu Y L, *et al.* *J Beijing Sport Univ*, 2013, **36**(9): 81-87
- [41] 王宁琦, 胡扬, 官余凌, 等. 4周低氧运动结合饮食控制对肥胖青年体重、血脂及胰岛素抵抗的影响. *中国运动医学杂志*, 2012, **31**(4): 289-294
Wang N Q, Hu Y, Guan Y L, *et al.* *Chin J Phys Med*, 2012, **31**(4): 289-294
- [42] 杨贤翌, 何文革, 史东林, 等. 低氧锻炼对超重和肥胖青年能量摄取、体成分和血脂代谢的影响. *中国运动医学杂志*, 2014, **33**(7): 638-645
Yang X G, He W G, Shi D L, *et al.* *Chin J Phys Med*, 2014, **33**(7): 638-645
- [43] 张念坤. 低氧中强度训练疗法对肥胖者的身体成分和血脂代谢的影响. *基因组学与应用生物学*, 2019, **38**(12): 5657-5663
Zhang N K. *Genom Appl Biol*, 2019, **38**(12): 5657-5663
- [44] 赵述强, 时洪举. 低氧训练对肥胖大学生体成分和有氧耐力的影响. *中国学校卫生*, 2016, **37**(11): 1637-1640
Zhao S Q, Shi H J. *Chin J Sch Health*, 2016, **37**(11): 1637-1640
- [45] Chacaroun S, Borowik A, Gonzalez I V Y, *et al.* Hypoxic exercise training to improve exercise capacity in obese individuals. *Med Sci Sports Exerc*, 2020, **52**(8): 1641-1649
- [46] Kong Z, Zang Y, Hu Y. Normobaric hypoxia training causes more weight loss than normoxia training after a 4-week residential camp for obese young adults. *Sleep Breath*, 2014, **18**(3): 591-597
- [47] Morishima T, Goto K. Successive exposure to moderate hypoxia does not affect glucose metabolism and substrate oxidation in young healthy men. *SpringerPlus*, 2014, **3**(1): 370
- [48] Jung K, Kim J, Park H Y, *et al.* Hypoxic Pilates intervention for obesity: a randomized controlled trial. *Int J Environ Res Public Health*, 2020, **17**(19): 7186
- [49] Jiao X, Liu M, Li R, *et al.* Helpful to live healthier? Intermittent hypoxic/ischemic training benefits vascular homeostasis and lipid metabolism with activating SIRT1 pathways in overweight/obese individuals. *Obes Facts*, 2024, **17**(2): 131-144
- [50] Fernández Menéndez A, Saudan G, Sperisen L, *et al.* Effects of short-term normobaric hypoxic walking training on energetics and mechanics of gait in adults with obesity. *Obesity (Silver Spring)*, 2018, **26**(5): 819-827
- [51] Ghaith A, Chacaroun S, Borowik A, *et al.* Hypoxic high-intensity interval training in individuals with overweight and obesity. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol*, 2022, **323**(5): R700-R709
- [52] Wiesner S, Haufe S, Engeli S, *et al.* Influences of normobaric hypoxia training on physical fitness and metabolic risk markers in overweight to obese subjects. *Obesity (Silver Spring)*, 2010, **18**(1): 116-120
- [53] Dünnwald T, Gatterer H, Faulhaber M, *et al.* Body composition and body weight changes at different altitude levels: a systematic review and meta-analysis. *Front Physiol*, 2019, **10**: 430
- [54] Wang R, Sun Q, Wu X, *et al.* Hypoxia as a double-edged sword to combat obesity and comorbidities. *Cells*, 2022, **11**(23): 3735
- [55] Midha A D, Zhou Y, Queliconi B B, *et al.* Organ-specific fuel rewiring in acute and chronic hypoxia redistributes glucose and fatty acid metabolism. *Cell Metab*, 2023, **35**(3): 504-516.e5
- [56] Rakhmawati H S N, Wungu C D K, Purwanto B, *et al.* Exercise under hypoxia on glucose tolerance in type 2 diabetes mellitus risk individuals: a systematic review and meta-analysis. *Tzu Chi Med J*, 2024, **36**(2): 212-222
- [57] 王琦琪. 低氧结合运动基于肝脏PI3K/AKT/FoxO1通路改善T2DM小鼠IR的研究[D]. 芜湖: 安徽师范大学, 2023
Wang Q Q. Mechanism of Hypoxia Exposure Combined With Endurance Exercise Improving Insulin Resistance via PI3K/AKT/FoxO1 Pathway in T2DM Mice. Wuhu: Anhui Normal University, 2023
- [58] Koufakis T, Karras S N, Mustafa O G, *et al.* The effects of high altitude on glucose homeostasis, metabolic control, and other diabetes-related parameters: from animal studies to real life. *High Alt Med Biol*, 2019, **20**(1): 1-11
- [59] Hamlin M J, Lizamore C A, Hopkins W G. The effect of natural or simulated altitude training on high-intensity intermittent running performance in team-sport athletes: a meta-analysis. *Sports Med*, 2018, **48**(2): 431-446
- [60] Zhao Y, Li C, Zhou S, *et al.* Enhanced glucose utilization of skeletal muscle after 4 weeks of intermittent hypoxia in a mouse model of type 2 diabetes. *PLoS One*, 2024, **19**(1): e0296815

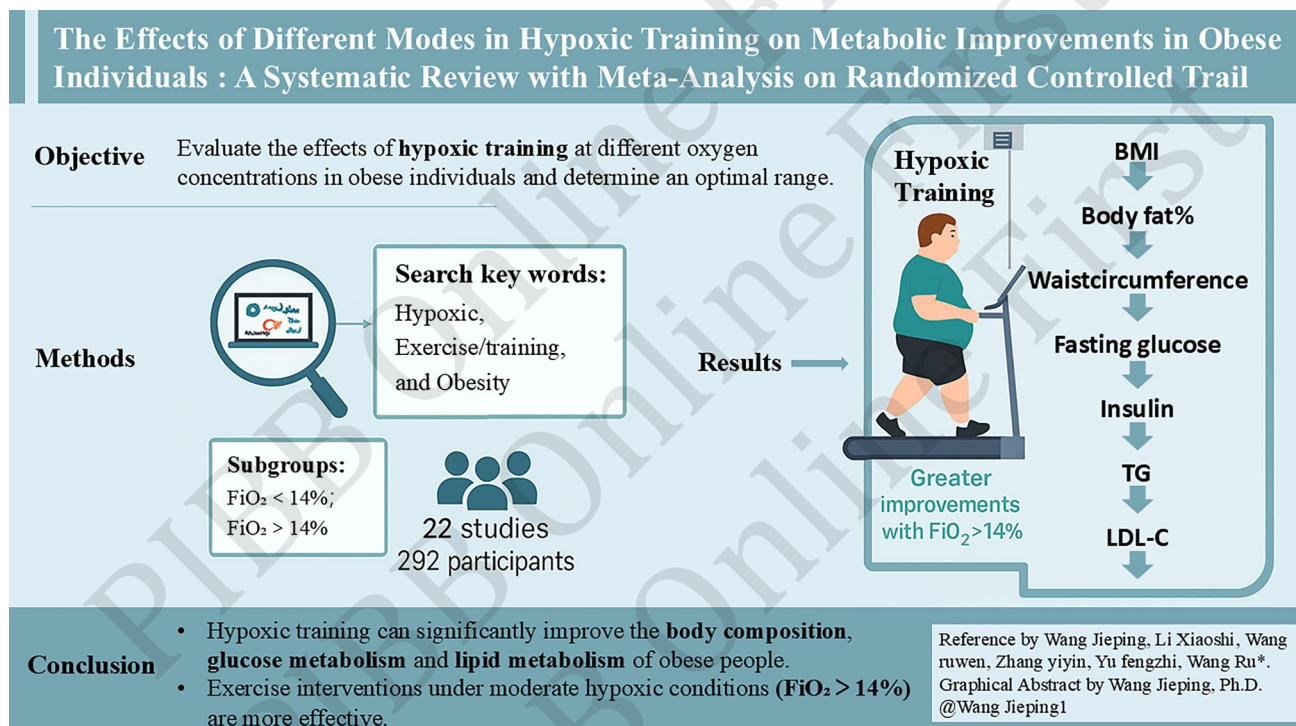
- [61] 王茹,王婕娉,王汝雯,等.低氧运动对代谢性疾病的潜在影响机制.上海体育大学学报,2025,49(2):29-45
Wang R, Wang J P, Wang R W, *et al.* J Shanghai Univ Sport, 2025, 49(2): 29-45
- [62] Khalafi M, Sakhaei M H, Symonds M E, *et al.* Impact of exercise in hypoxia on inflammatory cytokines in adults: a systematic review and meta-analysis. Sports Med Open, 2023, 9(1): 50
- [63] Luo X, Wang Y, Wang L, *et al.* Association between female androgen levels, metabolic syndrome, and cardiovascular disease: an NHANES analysis (2013-2016). Int J Womens Health, 2024, 16: 2087-2101
- [64] Smart N A, Downes D, van der Touw T, *et al.* The effect of exercise training on blood lipids: a systematic review and meta-analysis. Sports Med, 2025, 55(1): 67-78

Effects of Different Modes in Hypoxic Training on Metabolic Improvements in Obese Individuals : a Systematic Review With Meta-analysis on Randomized Controlled Trail*

WANG Jie-Ping, LI Xiao-Shi, WANG Ru-Wen, ZHANG Yi-Yin, YU Feng-Zhi, WANG Ru**

(School of Exercise and Health, Shanghai University of Sport, Shanghai 200438, China)

Graphical abstract



Abstract This paper aimed to systematically evaluate the effects of hypoxic training at different fraction of inspired oxygen (FiO_2) on body composition, glucose metabolism, and lipid metabolism in obese individuals, and to determine the optimal oxygen concentration range to provide scientific evidence for personalized and precise hypoxic exercise prescriptions. A systematic search was conducted in the Cochrane Library, PubMed, Web of Science, Embase, and CNKI databases for randomized controlled trials and pre-post intervention studies published up to February 31, 2025, involving hypoxic training interventions in obese populations. Meta-analysis was performed using RevMan 5.4 software to assess the effects of different fraction of inspired oxygen ($FiO_2 \leq 14\%$ vs. $FiO_2 > 14\%$) on BMI, body fat percentage, waist circumference, fasting blood glucose, insulin, HOMA-IR, triglycerides (TG), low-density lipoprotein cholesterol (LDL-C), and high-density lipoprotein cholesterol (HDL-C), with subgroup analyses based on oxygen concentration. A total of 22 studies involving 292 participants were included. Meta-analysis showed that hypoxic training significantly reduced BMI (mean difference (MD)= - 2.29, 95%CI: - 3.42 to - 1.17, $P < 0.0001$), body fat percentage (MD= - 2.32, 95%CI: - 3.16 to - 1.47, $P < 0.001$), waist circumference (MD= - 3.79, 95%CI: - 6.73 to - 0.85, $P = 0.01$), fasting blood glucose (MD= - 3.58,

95%CI: - 6.23 to - 0.93, $P=0.008$), insulin ($MD=-1.60$, 95%CI: - 2.98 to - 0.22, $P=0.02$), TG ($MD=-0.18$, 95%CI: - 0.25 to - 0.12, $P<0.001$), and LDL-C ($MD=-0.25$, 95%CI: - 0.39 to - 0.11, $P=0.0003$). Greater improvements were observed under moderate hypoxic conditions with $FiO_2>14\%$. Changes in HOMA-IR ($MD=-0.74$, 95%CI: - 1.52 to 0.04, $P=0.06$) and HDL-C ($MD=-0.09$, 95%CI: - 0.21 to 0.02, $P=0.11$) were not statistically significant. Hypoxic training can significantly improve body composition, glucose metabolism, and lipid metabolism indicators in obese individuals, with greater benefits observed under moderate hypoxia ($FiO_2>14\%$). As a key parameter in hypoxic exercise interventions, the precise setting of oxygen concentration is crucial for optimizing intervention outcomes.

Key words oxygen concentration, obesity, body composition, glucose metabolism, lipid metabolism

DOI: 10.16476/j.pibb.2025.0198

CSTR: 32369.14.pibb.20250198

* This work was supported by grants from The National Natural Science Foundation of China (32271226, 31971097) and the National Key R&D Program of China (2020YFA0803800).

** Corresponding author.

Tel: 86-21-65507356, E-mail: wangru@sus.edu.cn

Received: April 30, 2025 Accepted: June 13, 2025