

低氧暴露与减控体重效果的元分析

王盼¹, 赵华^{2*}

摘要: 目的: 评价低氧暴露对减控体重的影响效果, 提供最优的减控体重方案。方法: 在数据库中检索建库至 2023 年 10 月的所有文献, 使用偏倚风险评估工具评价纳入文献质量。使用 Stata14.0 进行异质性检验、效应量合并、敏感性分析以及发表偏倚检验。结果: 共纳入 49 篇 RCT 文献, 1 392 名被试者; 相对于常氧暴露, 低氧暴露对减轻体重 (SMD=-0.18, 95%CI[-0.29, -0.07], $P < 0.01$)、降低体脂肪 (SMD=-0.23, 95%CI[-0.35, -0.18], $P < 0.01$) 的优势明显。相对于常氧暴露, 低氧暴露对去脂体重 (SMD=-0.05, 95%CI[-0.22, 0.13], $P > 0.05$)、肌肉质量 (SMD=0.01, 95%CI[-0.20, 0.21], $P > 0.05$)、身体水分 (SMD=-0.12, 95%CI[-0.48, 0.23], $P > 0.05$) 的改善无明显效果。调节变量结果: 低氧暴露对成年群体的体重减轻 (SMD=-0.21, 95%CI[-0.35, -0.08], $P < 0.01$)、体脂肪降低 (SMD=-0.28, 95%CI[-0.42, -0.13], $P < 0.01$) 具有显著效果。低氧暴露对男性和女性的体重减轻、体脂肪降低均具有显著效果。低氧环境下, 不控制饮食对体重减轻 (SMD=-0.23, 95%CI[-0.37, -0.09], $P < 0.01$)、体脂肪降低 (SMD=-0.33, 95%CI[-0.49, -0.18], $P < 0.01$) 的效果明显; 控制饮食和未控制饮食对去脂体重、肌肉质量、身体水分的影响无明显差异 ($P > 0.05$)。低氧环境下, 与消极暴露相比, 积极暴露时体重减轻 (SMD=-0.19, 95%CI[-0.31, -0.07], $P < 0.01$)、体脂肪降低 (SMD=-0.26, 95%CI[-0.38, -0.14], $P < 0.01$) 的效果明显; 消极暴露和积极暴露对去脂体重、肌肉质量、身体水分的影响无明显差异 ($P > 0.05$)。结论: 与常氧暴露相比, 低氧暴露对减体重和降体脂具有明显优势; 低氧暴露对成年男性和成年女性的体重具有明显改善效果, 也有效改善成年男性的体脂率; 低氧暴露期间, 暴露方式和饮食干预影响减控体重的效果, 积极低氧暴露、自由饮食对体重和体脂肪的改善效果明显。

关键词: 低氧暴露; 体重; 体脂肪; 去脂体重

中图分类号: G804 文献标志码: A 文章编号: 1006-1207(2024)02-0073-16

DOI: 10.12064/ssr.2023082201

Effects of Hypoxia Exposure on Weight Loss: A Systematic Review, Meta-analysis

WANG Pan¹, ZHAO Hua^{2*}

(1. Wuhan University of Bioengineering, Wuhan 430415, China; 2. School of Physical Education, Central China Normal University, Wuhan 430079, China)

Abstract: Objective: To evaluate the effect of hypoxia exposure on weight reduction, and provide the optimal weight reduction program. Methods: All literature from the establishment of the database to October 2023 were searched and the quality of included literature was evaluated using the risk of bias assessment tool. The heterogeneity, effect size combination, sensitivity analysis, and publication bias were evaluated by Stata14.0. Results: A total of 49 RCT articles were included with 1392 subjects in this study. Compared with hypoxia exposure, hypoxic exposure had significant effects on weight loss (SMD=-0.18, 95%CI[-0.29, -0.07]; $P < 0.01$), body fat reduction (SMD=-0.23, 95%CI[-0.35, -0.18]; $P < 0.01$). Compared with hypoxia exposure, hypoxic exposure had no significant effects on lean body mass (SMD=-0.05, 95%CI[-0.22, 0.13]; $P > 0.05$), muscle mass (SMD=0.01, 95%CI[-0.20, 0.21]; $P > 0.05$), body water (SMD=-0.12, 95%CI[-0.48, 0.23]; $P > 0.05$). Results of regulatory variables: hypoxia exposure has a significant effect on weight loss (SMD=-0.21, 95%CI[-0.35, -0.08]; $P < 0.01$)

收稿日期: 2023-08-22

第一作者简介: 王盼, 男, 硕士, 助教。主要研究方向: 体质干预与健康促进。E-mail: i_wangpan@foxmail.com。

* 通信作者简介: 赵华, 男, 博士, 副教授。主要研究方向: 运动与骨骼肌代谢的调控机制。E-mail: zhaohua@ccnu.edu.cn。

作者单位: 1. 武汉生物工程学院 体育学院, 湖北 武汉 430415; 2. 华中师范大学 体育学院, 湖北 武汉 430079。



and body fat reduction (SMD=-0.28, 95% CI[-0.42, -0.13]; $P < 0.01$) in adult populations. Hypoxia exposure has a significant effect on weight loss and body fat reduction in both men and women, with no gender differences. In the hypoxic environment, with no dietary control, weight loss (SMD=-0.23, 95% CI[-0.37, -0.09]; $P < 0.01$) and body fat (SMD=-0.33, 95% CI[-0.49, -0.18]; $P < 0.01$) had the most obvious effect; there was no significant difference in the changes of fat-free body mass, muscle mass, and body water between the controlled diet and the uncontrolled diet, $P > 0.05$. In the hypoxic environment, compared with the negative exposure, the effect on body weight loss (SMD=-0.19, 95% CI[-0.31, -0.07]; $P < 0.01$) and body fat reduction (SMD=-0.26, 95% CI[-0.38, -0.14]; $P < 0.01$) were obvious in the active exposure; there were no significant differences in changes in fat-free body mass, muscle mass, and body water between negative and active exposures, $P > 0.05$. Conclusion: In comparison with normoxic exposure, hypoxic exposure has obvious advantages in reducing weight and body fat. Hypoxia exposure has a significant improvement effect on the body weight of adult men and women, and also effectively improves the body fat rate of adult men. During hypoxia exposure, exposure-pattern and dietary-intervention influence the effect of weight loss. Active hypoxia exposure and free-diet have obvious effects on improving body weight and body fat.

Keywords: hypoxic exposure; body weight; body fat; fat-free body mass

近年来,肥胖成为诱发心血管疾病、糖尿病等疾病的主要危险因素。2004—2018年,全国调查研究发现,我国成年人的标准化平均BMI水平从2004年的 22.7 kg/m^2 上升到2018年的 24.4 kg/m^2 ,肥胖人口从2010年的3.1%上升到2018年的8.1%^[1]。可见,我国超重和肥胖人口快速蔓延,探寻合理的减控体重策略对预防肥胖至关重要。低氧或缺氧被定义为动脉血氧饱和度降低导致的组织氧气供应不足或减少^[2],低氧暴露是机体以任何方式暴露于高海拔自然低氧环境或人工模拟低氧环境。早期研究表明,低氧暴露联合运动干预可有效减轻体重、降低体脂^[3-4]。这些身体成分的变化对促进肥胖群体的健康有益;但是,进驻中高海拔地区的群体,例如:登山探险人员、高原旅居人员,需要维持一定的体重和去脂体重,以应对高海拔期间体力和心理表现下降。因此,需要探索低氧暴露期间的干预措施以应对不同群体减控体重的需求。

低氧暴露能否作为减体重的有效干预手段,结果并不一致。随机对照研究(Randomized Controlled Trial, RCT)结果显示,与常氧暴露相比,低氧暴露减轻体重具有明显优势^[5-6],其他研究报道低氧和常氧暴露下体重变化幅度无明显差异^[7-8]。此外,早期的系统综述定性评价了低氧暴露期间体重变化,但是体重减轻是由体脂肪降低所致,还是由去脂体重降低所致,或由体脂肪和去脂体重同时降低所致^[9-10],需要进一步佐证。近期的荟萃分析定量评估了低氧运动期间体重的变化,这些研究集中于肥胖青少年群体^[11],或肥胖成人^[12],或超重群体^[13],并未探讨饮食干预、暴露方式、年龄和性别等潜在因素对体

重变化的影响。

高海拔低氧暴露会抑制饥饿感和减少进食量^[14-15],这种现象也被称为“高原厌食症”,被认为与高海拔相关的环境因素(寒冷、脱水等)和医疗状况(急性高山病、胃肠道紊乱)有关。然而,在环境温度和湿度控制良好的常压低氧舱中,越来越多的研究显示低氧暴露本身可以诱导食欲减退^[16-17],降低食物热量摄入而导致能量负平衡。再结合徒步、登山和滑雪等较高体力活动所需的能量消耗增加,体重减轻;其中瘦体重降低会对旅居高海拔地区人群的身体表现产生不利影响,例如:肌力水平下降^[18]、免疫功能受抑^[19]。同时,高海拔低氧暴露促进机体对碳水化合物作为燃料底物的依赖^[20],而体内有限的糖原储备在长期低氧暴露期间大量消耗;补充外源性碳水化合物会增加肌肉和肝脏的糖原储备,促进碳水化合物的氧化利用^[21]。此外,在高海拔低氧暴露期间,食物偏好也朝着碳水化合物增加转变^[22];对于进驻高海拔地区的平原人群,传统膳食建议每天摄入 $6\sim 8 \text{ g/kg}$ 体重的碳水化合物,为最佳身体表现提供营养支持^[23]。可见,针对高海拔地区减控体重的需求,合理膳食意义重大。因此,本研究采用元分析,探讨低氧暴露对不同性别、不同年龄的减控体重效果,并在此基础上采用亚组分析探讨其制约因素。

1 研究方法

1.1 文献检索

按照系统评价和荟萃分析(PRISMA)推荐的方法进行元分析。检索中国知网、万方数据库等中文数据库,PubMed、Embase等英文数据库;检索时间

为从数据库建立到 2023 年 10 月 31 日。使用主题词和自由词进行综合检索,英文检索词包括:hypoxia、altitude training、live high-train high、loss weight、weight reduction 等;中文检索词包括:低氧、高原训练、高住高训、减肥、减体重、减控体重等。对相关综述和收录文章的参考文献进行手动筛选,以确保全面检索。

1.2 文献纳入和数据提取

文献筛选和数据提取由 2 名研究者独立完成,分歧由协商一致和(或)第三位研究者的参与得以解决。根据标题和摘要对所有研究进行相关性筛选,如果无法根据标题和摘要确定其相关性,则对全文进行阅读。纳入标准:①研究对象为生活在平原地区的人群;②试验类型为随机对照试验,试验组为低氧环境暴露,对照组为常氧环境暴露(即空白对照);③主要结局指标为体重,其他结局指标为去脂体重、肌肉质量、身体水分。排除标准:①会议、报告、综述类文献;②细胞、动物类文献;③结局数据缺失、数据重复文献。

从最终纳入的文献中提取所有相关数据,并记录以下基线特征:作者、研究对象特征、低氧暴露方式、饮食干预、海拔高度、周期以及结局指标。单个文献含有多组结局数据时,需要合并数据^[24]:假设 A 组的样本量为 N_1 ,均值为 \bar{X}_1 ,标准差为 SD_1 ;B 组的样本量为 N_2 ,均值为 \bar{X}_2 ,标准差为 SD_2 ;则合并后:

$$\text{样本量 } N=N_1+N_2, \text{ 均值 } MD=\frac{N_1\bar{X}_1+N_2\bar{X}_2}{N_1+N_2};$$

标准差

$$SD=\sqrt{\frac{(N_1-1)SD_1^2+(N_2-1)SD_2^2+\frac{N_1+N_2}{N_1+N_2}(\bar{X}_1^2+\bar{X}_2^2-2\bar{X}_1\bar{X}_2)}{N_1+N_2-1}}$$

1.3 文献质量和偏倚风险评估

使用 Cochran 推荐工具评估纳入文献的方法学质量,包括随机分配方法、分配方案隐藏、受试者和参与者盲法、结果评估盲法、结果数据的完整性、选择性报告研究结果、其他偏倚来源 7 个条目;每个条目又分为高风险、低风险和不确定性风险 3 个选项,根据所纳入的研究对以上各方面的描述,研究者进行判读并进行质量评价。为确保筛选过程的可靠性,避免主观偏见,文献筛选和方法学质量评价由 2 名研究者独立完成,如果筛选过程中遇到分歧,协商解决。

1.4 统计学分析

本研究的数据类型为连续性数值变量,选择前后测变化值的均值、标准差进行效应量统计。若文献

未报告变化值的均值和标准差,需按照如下公式进行计算^[24]:

$$\bar{X}=\bar{X}_1-\bar{X}_2(\bar{X}: \text{测量前后变化值的均值}; \bar{X}_1: \text{前测均值}; \bar{X}_2: \text{后测均值}),$$

$$SD=\sqrt{SD_1^2+SD_2^2-2R\times SD_1\times SD_2} \quad (SD \text{ 为测量前后变化值的标准差}; SD_1 \text{ 为前测值的标准差}; SD_2 \text{ 为后测值的标准差}; R \text{ 为相关系数}).$$

运用 Stata14.0 进行统计分析。① I² 检验、Q 检验评估文献间的异质性,若 $I^2 < 50\%$ 且 $P > 0.1$,则文献间无异质性,采用固定效应模型合并效应量;若 $I^2 \geq 50\%$ 或 $P \leq 0.1$,表明文献间存在异质性,使用敏感性分析查找异质性来源并消除异质性后,再采用固定效应模型进行分析。② 绘制漏斗图、Egger 检验评估发表偏倚;若漏斗图对称、Egger 检验 $P > |t| > 0.05$,提示无发表偏倚;反之,文献间存在发表偏倚,需要通过剪补法来修剪和填补漏斗图,消除发表偏倚。③ 由于结局指标计量单位的差异性,采用标准化均值差(SMD)和 95% 置信区间进行数据统计, $P < 0.05$ 表示具有统计学意义。

2 研究结果

2.1 文献检索结果与基本特征

初步检索文献 17 660 篇,删除重复文献 3 798 篇。通过阅读文献摘要和标题排除 13 279 篇,初筛后得到 496 篇;通过阅读文献全文排除 347 篇,得到潜在相关文献 149 篇;最终纳入 49 篇 RCT 文献(图 1)。

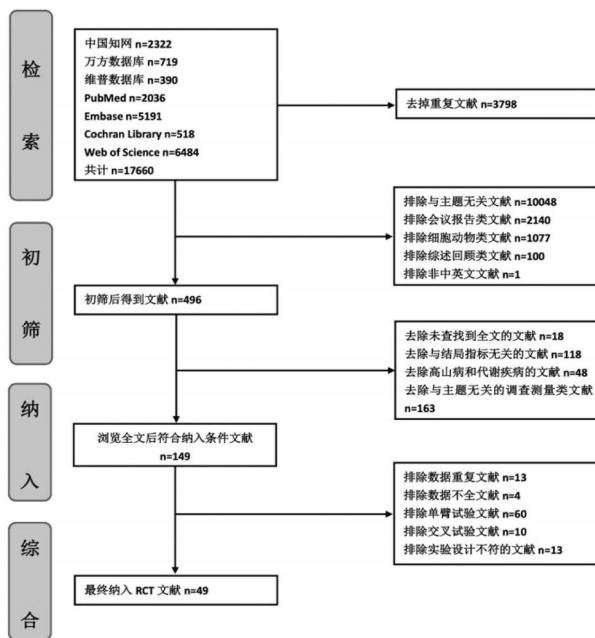


图 1 文献检索与筛选流程图

Figure1 Flowchart of literature search and study selection



49篇 RCT 文献涉及 1 392 名被试,所有被试按照随机或自愿原则分配到试验组和对照组,试验组在低氧环境下进行暴露,暴露方式可以是在高原低氧环境下或在人工模拟低氧环境下进行短时间滞留、生活等消极暴露,也可以是进行有规律的运动训练、体育活动等积极暴露;而对照组是在常氧环境下进行暴露。在低氧暴露剂量(海拔高度 km·时间 h)

上,海拔或模拟海拔高度处于 1.7~4.5 km,时间限于 8~672 h;其中 Hobbins 等^[6]的低氧暴露剂量最低,为 3.5 km·8 h,冯连世等^[4]、陈立军等^[25]和李靖等^[26]的低氧暴露剂量最高,达到 2.3 km·672 h。6 篇研究文献为低氧环境下消极暴露,43 篇研究文献为低氧环境下积极暴露;16 篇研究文献中受试者进行饮食干预,33 篇研究文献中受试者未进行饮食干预(表 1)。

表 1 纳入研究文献的基线总特征

Table 1 Characteristics of studies included in this meta-analysis

研究人员 (发表年份)	研究对象特征		海拔 /km	低氧暴露方式		饮食干预(是 / 否)	周期	结局指标
	人数	年龄		消极暴露	积极暴露			
田中等 ^[31] (2004)	G1:4(2F/2M)	未提及	2.80	睡眠 12~13 h/d		否(保持正常饮食习惯)	3 w	①②③④
	G2:8(4F/4M)	未提及						
杨谦等 ^[32] (2005)	G1:8(4F/4M)	未提及	2.80	睡眠 11 h/d		否(保持正常饮食习惯)	3 w	①②③④⑤
	G2:8(4F/4M)	未提及						
刘花层 ^[33] (2007)	G1:8M	大学生	3.00	睡眠 10 h/d	功率自行车;骑车	否	4 w	①
	G2:8M	大学生						
Wiesner 等 ^[34] (2010)	G1:21M	42.10±7.79	2.50		有氧运动	否(保持正常饮食习惯)	4 w	①③
	G2:24M	42.20±8.33						
孙天瑜 ^[35] (2011)	G1:8(3F/5M)	20.75±2.27	2.00~3.00		慢跑 / 力量训练等	是(制定饮食计划)	4 w	①②④
	G2:12(5F/7M)	20.75±2.27						
王宁琦等 ^[36] (2012)	G1:7(3F/4M)	22.40±2.07	2.50~2.80		有氧运动 / 力量训练	是(三餐热量比 3 : 4 : 4;糖 60%/蛋白质 15%/脂肪 25%)	4 w	①②
	G2:11(5F/6M)	19.50±1.64						
姜永波 ^[37] (2013)	G1:54(29F/25M)	15.61±3.28	2.50~2.80	睡眠 12 h/d	跑步 / 力量训练等	是(三餐能量比 3 : 4 : 3;糖 40%~55%/蛋白质 20%~30% / 脂肪 20%~25%)	30 d	①②
	G2:35 (14F/21M)	15.77±3.51						
王茹等 ^[38] (2013)	G1:19(8F/11M)	13.90±0.90	2.70	睡眠 10 h/d		是(热量 2 000 kcal/d;三餐能量比 3 : 4 : 3;糖 60% / 蛋白质 15% / 脂肪 25%)	4 w	①②③
	G2:16(8F/8M)	14.40±1.40						
安江红等 ^[39] (2014)	G1:6M	20.38±1.36	2.50	睡眠 10 h/d	骑车 / 跑步	否(保持正常饮食习惯)	4 w	①②③
	G2:6M	20.17±0.24						
Ho 等 ^[40] (2014)	G1:9M	21.20±1.90	2.30		抗阻运动	否(保持正常饮食习惯)	6 w	①②③
	G2:9M	21.40±2.20						
Kong 等 ^[41] (2014)	G1:8(3F/5M)	22.30±1.70	2.00~3.00		跑步 / 骑车 / 力量训练	是(三餐能量比 3 : 4 : 3;糖 60%/蛋白质 15%/脂肪 25%)	4 w	①②④⑤
	G2:10(5F/5M)	19.80±2.20						
Morishima 等 ^[42] (2014)	G1:11M	32.00±3.00	2.50		功率自行车;骑车	否(保持正常饮食习惯)	4 w	①②
	G2:9M	30.00±2.00						
杨贤罡等 ^[43] (2014)	G1:8M	22.13±2.17	2.50		有氧运动	否(正常饮食并记录食物热量)	4 w	①②
	G2:10M	22.50±1.27						



续表 1

研究人员 (发表年份)	研究对象特征		海拔 /km	低氧暴露方式		饮食干预(是 / 否)	周期	结局指标
	人数	年龄		消极暴露	积极暴露			
Gatterer 等 ^[44] (2015)	G1: 16(10F/6M)	52.40±7.90	3.50~4.50	休息 90 min/d	室内骑车 / 跑步等	否(保持正常饮食习惯)	32 w	①②④
	G2: 16(12F/4M)	50.30±10.30						
刘晓鹏 ^[45] (2015)	G1: 18M	13.53±2.17	2.50~2.80		骑车 / 跑步	是(三餐能量比 3 : 4 : 3;糖 60%/蛋白质 15%/脂肪 25%)	4 w	①②④
	G2: 19M	14.25±1.21						
吴娜娜等 ^[46] (2015)	G1: 19(8F/11M)	13.90±0.90	2.70	睡眠 10 h/d	游泳 / 有氧操 / 篮球	是(热量 2 000 kcal/d;糖 60% / 蛋白质 15% / 脂肪 25%)	4 w	①②
	G2: 16(8F/8M)	14.30±1.40						
赵述强等 ^[45] (2016)	G1: 9M	18.08±1.79	2.70		功率自行车;骑车	否	8 w	①②④
	G2: 9M	18.24±2.23						
王茹等 ^[47] (2016)	G1: 17(4W/13M)	13.72±0.77	2.70	睡眠 10 h/d	游泳 / 有氧操 / 篮球	是(热量 2 000 kcal/d;三餐能量比 3 : 4 : 3;糖 60% / 蛋白质 15% / 脂肪 25%;镁补充剂)	4 w	①②
	G2: 17 (7W/10M)	14.42±1.35						
Camacho-Cardenosa 等 ^[48] (2017)	G1: 8M	24.40±3.50	3.40		冲刺训练	是(正常热量饮食;糖 65% / 蛋白质 15% / 脂肪 20%)	4 w	①②
	G2: 8M	22.10±2.60						
Kong 等 ^[49] (2017)	G1: 13F	18.00~30.00	2.50		高强度间歇训练	是(糖 60% / 蛋白质 15% / 脂肪 35%)	5 w	①②③
	G2: 11F	18.00~30.00						
Park 等 ^[50] (2017)	G1: 12F	47.20±6.30	2.00		骑车 / 跑步	否	6 w	①②
	G2: 11F	42.00±4.40						
	G2: 12F	46.60±5.70						
Klug 等 ^[27] (2018)	G1: 11M	57.60±7.30	2.50		跑步	否	6 w	①②③
	G2: 12M	55.00±7.27						
Menéndez 等 ^[51] (2018)	G1: 11(9F/2M)	32.20±8.40	3.00		跑步机;跑步	否(保持正常饮食习惯)	3 w	①②③
	G2: 12(10F/2M)	34.80±4.70						
Shin 等 ^[52] (2018)	G1: 12M	27.80±13.0	2.50		有氧运动	否	4 w	①②
	G1: 9M	46.00±20.50						
	G2: 11M	28.60±15.60						
	G2: 8M	45.60±20.90						
Yang 等 ^[53] (2018)	G1: 19(8F/11M)	13.90±0.90	2.70	睡眠 10 h/d		是	4 w	①②③
	G2: 16(8F/8M)	14.30±1.40						
李文静 ^[54] (2019)	G1: 7M	大学生	2.50		抗阻训练	否	6 w	①②④
	G2: 8M	大学生						
刘岩 ^[55] (2019)	G1: 7F	22.86±0.83	1.50		跑步	否(保持正常饮食习惯)	4 w	①②③④⑤
	G2: 8F	21.38±1.11						
Park 等 ^[28] (2019)	G1: 12M	66.50±0.67	3.00		有氧运动 / 力量训练	否	12 w	①②③
	G2: 12M	66.50±0.90						
张念坤 ^[29] (2019)	G1: 20M	21.87±2.31	2.50		骑车	否(饮食方式不变并记录食物)	4 w	①②
	G2: 20M	22.34±2.15						
Chacaroun 等 ^[56] (2020)	G1: 11(3F/8M)	56.00±11.00	3.70		功率自行车;骑车	否	8 w	②③
	G2: 12(1F/11M)	52.00±12.00						



续表 1

研究人员 (发表年份)	研究对象特征		海拔 /km	低氧暴露方式		饮食干预(是 / 否)	周期	结局指标
	人数	年龄		消极暴露	积极暴露			
Britto 等 ^[8] (2020)	G1:7(4F/3M)	12.00~17.00	2.80		有氧运动 / 力量训练	是(控制食物热量;糖 48%/蛋白质 18%/脂肪 34%;纤维 26 g/d)	30 w	①②③
	G2:7(4F/3M)	12.00~17.00						
连立文 ^[57] (2020)	G1:40(20F/20M)	33.10±6.80	2.00		跑步 / 力量训练	否	6 w	①②④
	G2:40(20F/20M)	33.10±6.80						
马莉 ^[31] (2020)	G1:30M	22.08±2.02	2.50		骑车	否(饮食方式不变并记录食物)	4 w	①②
	G2:30M	22.40±1.66						
王一峰 ^[58] (2020)	G1:10M	24.40±1.88	2.30		慢走 / 跑步 / 骑车	否(保持正常饮食习惯)	4 w	①②④
	G2:10M	23.93±1.02						
郑蓓蓓等 ^[59] (2020)	G1:10F	19.38±0.74	3.00		间歇性跑步	否	6 w	①②④
	G2:10F	19.60±1.26						
Gao 等 ^[7] (2020)	G1:9	16.61±1.96	2.30	睡眠 12 h/d	慢跑 / 快走 / 骑车	是	4 w	①②③
	G2:10	19.30±1.92						
Guardado 等 ^[60] (2020)	G1:16M	25.70±6.42	4.30		抗阻运动	否(保持日常饮食习惯)	7 w	①②④
	G2:16M	25.70±6.42						
Hobbins 等 ^[6] (2021)	G1:8(3F/5M)	41.10±13.00	3.50		间歇性步行	否(保持正常饮食习惯)	2 w	①
	G2:8(4F/4M)	32.10±10.20						
时莹清等 ^[30] (2021)	G1:15F	27.11±1.13	2.60		慢跑 / 有氧操等	否	4 w	①②③
	G2:15F	27.05±1.09						
付丽娟等 ^[61] (2022)	G1:10M	22.50±2.60	2.30		骑车	否(饮食方式不变并记录食物)	4 w	①②④
	G2:10M	22.30±2.80						
Ghaith 等 ^[62] (2022)	G1:15(2F/13M)	52.00±7.50	4.20		高强度间歇训练	否(保持日常饮食习惯)	8 w	①②③
	G2:16(6F/10M)	51.00±8.30						
Barnholt 等 ^[63] (2006)	G1:9M	23.10±5.50	4.30	待在高原		是(所需食物的热量比保持体重热量少 40%;糖 68%/蛋白质 11%/脂肪 21%)	3 w	①②③
	G3:10M	22.10±2.80						
Greie 等 ^[64] (2006)	G1:35M	36.00~66.00	1.70	待在高原	徒步旅行(4次/周)	否(无饮食限制,均衡饮食)	19 d	⑤
	G3:36M	36.00~66.00						
陈立军等 ^[25] (2013)	G1:10	19.30±3.40	2.30	待在高原	羽毛球 / 篮球 / 慢跑	是(三餐能量比 3:4:3;糖 60%~70%/蛋白质 10%~15%/脂肪 20%~30%)	4 w	①②③
	G3:10	19.50±3.20						
冯连世等 ^[4] (2013)	G1:18(9F/9M)	16.69±1.74	2.30	睡眠 10 h	慢跑 / 快走 / 骑车	是(糖 55%~65%/蛋白质 20%~35%/脂肪 10%~15%)	4 w	①②
	G2:18(10F/8M)	19.22±2.14						
	G3:11(7F/4M)	19.57±3.23						
			2.30	待在高原	慢跑 / 快走 / 骑车	是(糖 55%~65%/蛋白质 20%~35%/脂肪 10%~15%)	4 w	



续表 1

研究人员 (发表年份)	研究对象特征		海拔 /km	低氧暴露方式		饮食干预(是 / 否)	周期	结局指标
	人数	年龄		消极暴露	积极暴露			
冯连世等 ^[4] (2013)	G1:18(9F/9M)	16.69±1.74	2.30	睡眠 10 h	慢跑 / 快走 / 骑车	是(糖 55%~65% / 蛋白质 20%~35% / 脂肪 10%~15%)	4 w	①②
	G2:18(10F/8M)	19.22±2.14						
	G3:11(7F/4M)	19.57±3.23		待在高原	慢跑 / 快走 / 骑车	是(糖 55%~65% / 蛋白质 20%~35% / 脂肪 10%~15%)	4 w	
Chia 等 ^[65] (2013)	G1:8M	14.90±0.40	2.30	待在高原	游泳	否	3 w	①②③
	G3:10M	13.00±1.60						
李靖等 ^[26] (2014)	G1:18(8F/10M)	16.69±1.74	2.30	待在高原	慢跑 / 有氧操 / 篮球	是(三餐能量比 3 : 4 : 3;糖 50% / 蛋白质 25% / 脂肪 25%)	4 w	②
	G2:16(8F/8M)	19.22±2.14						
	G3:10(6F/4M)	19.57±3.23			慢跑 / 有氧操 / 篮球	是(三餐能量比 3 : 4 : 3;糖 50% / 蛋白质 25% / 脂肪 25%)	4 w	
Gutwenger 等 ^[66] (2015)	G1:6(3F/3M)	60.30±5.20	1.90		徒步旅行	否	2 w	①②④
	G3:8(5F/3M)	50.10±7.80						
Mekjavic 等 ^[67] (2016)	G1:6M	23.70±4.00	2.80~3.40	待在高原		是	10 d	①②③
	G3:5M	23.70±4.00						

注:G1 为常压常氧对照组,G2 为常压低氧试验组,G3 为高原试验组,仅有 8 篇文章^[4,25-26,63-67]包含 G3;F 为女性,M 为男性;①为体重,②为体脂肪,③为去脂体重,④为肌肉质量,⑤为身体水分;根据 WHO 对年龄的划分,10~19 岁为青少年,65 岁以上为老年人。

2.2 偏倚风险评估结果

对 49 篇文章进行方法学质量评估,其中 39 篇文章提及随机序列产生,低偏倚风险占比 79.59%;在分配方案隐藏条目上,不清楚偏倚风险占比 87.76%;仅有 5 篇文章^[27,52-53,56,60]处于低风险。所有文献在选择性报告结果、其他偏倚来源两个条目上均属于低偏倚风险;在结局数据完整性上,低偏倚风险占比 89.80%。由于低氧暴露试验具有一定的风险,被试被告知试验流程并签署知情同意书,实验设计难以做到盲法,故在被试盲法和研究者盲法、结局测量者盲法上高偏倚风险占比 48.98%、71.43%(图 2)。

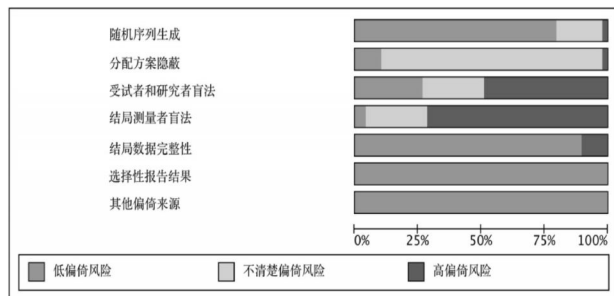


图 2 纳入研究的偏倚风险图

Figure2 Methodological Quality of Studies Included

2.3 效应量合并结果

2.3.1 体重

46 篇文章报告了体重,639 名被试接受低氧暴露,622 名被试接受常氧暴露。各文献之间无异质性($I^2=0.00%$, $P=0.82$),进行固定效应模型分析。低氧暴露对减轻体重的合并效应量为 $SMD=-0.18(P<0.01)$ 。提示相比于常氧环境暴露,低氧环境暴露对减轻体重具有明显效果(图 3)。

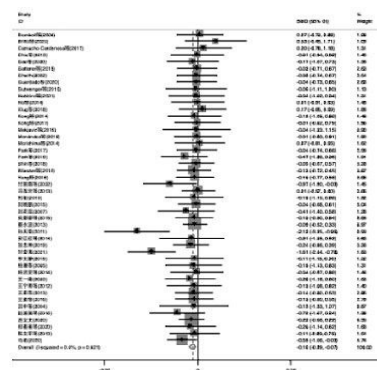


图 3 低氧暴露对体重干预效果森林图

Figure3 Forest plot of the effect of hypoxia exposure on body weight intervention



2.3.2 体脂肪

44 篇文献报告了体脂肪,610 名被试接受低氧暴露,599 名被试接受常氧暴露。各文献之间无异质性 ($I^2=0.00\%$, $P=0.87$),进行固定效应模型分析。低氧暴露对降低体脂肪的合并效应量为 $SMD=-0.23$ ($P<0.01$)。提示相比于常氧环境暴露,低氧环境暴露降低体脂肪具有明显效果(图 4)。

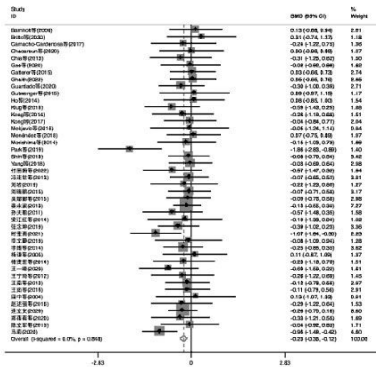


图 4 低氧暴露对体脂肪干预效果森林图
Figure4 Forest plot of the effect of hypoxia exposure on body fat intervention

2.3.3 去脂体重

23 篇文献报告了去脂体重,271 名被试接受低氧暴露,251 名被试接受常氧暴露。各文献之间无异质性 ($I^2=0.00\%$, $P=1.00$),进行固定效应模型分析。提示与常氧暴露相比,低氧暴露对减少去脂体重没有优势($SMD=-0.05$, $P>0.05$)(图 5)。

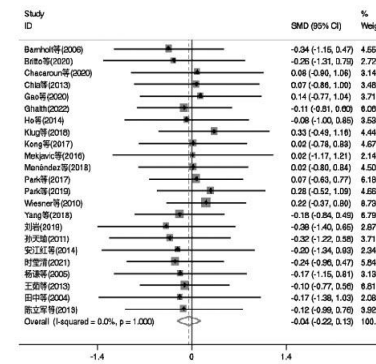


图 5 低氧暴露对去脂体重干预效果森林图
Figure5 Forest plot of the effect of hypoxia exposure on body weight reduction

2.3.4 肌肉质量

15 篇文献报告了肌肉质量,192 名被试受低氧暴露,177 名被试接受常氧暴露。各文献之间无异质性 ($I^2=0.00\%$, $P=1.00$),进行固定效应模型分析。提示与常氧暴露相比,低氧暴露对减少肌肉质量没有优势($SMD=0.01$, $P>0.05$)(图 6)。

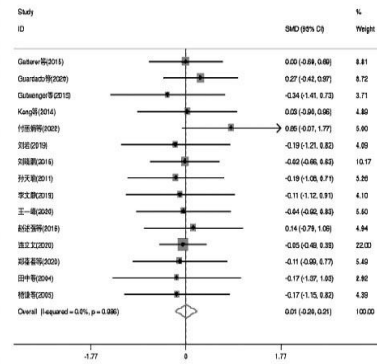


图 6 低氧暴露对肌肉质量干预效果森林图
Figure6 Forest plot of the effect of hypoxia exposure on muscle mass intervention

2.3.5 身体水分

4 篇文献报告了身体水分,62 名被试接受低氧暴露,58 名被试接受常氧暴露。各文献之间无异质性 ($I^2=0.00\%$, $P=0.99$),进行固定效应模型分析。提示与常氧暴露相比,低氧暴露对减少身体水分没有优势($SMD=-0.12$, $P>0.05$)(图 7)。

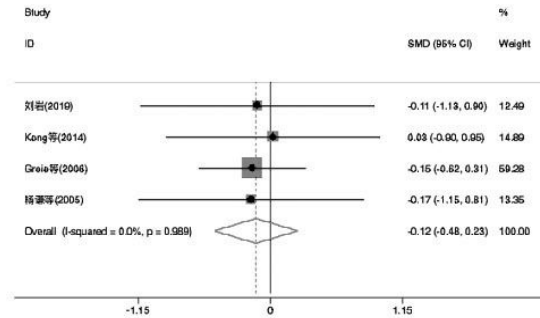


图 7 低氧暴露对身体水分干预效果森林图
Figure7 Forest plots of hypoxic exposure on body composition

2.4 敏感性分析

为验证效应量合并结果的稳健性,通过两种模型分析比较,固定效应模型与随机效应模型对合并效应量结果没有实质性改变,提示研究结果具有较好的稳定性。同时,对体重、体脂肪、去脂体重和肌肉质量进行敏感性分析,逐一剔除文献后发现剩余文献的效应量估值均落在总效应量的 95% 置信区间内;剔除前后效应量结果也无明显变化,可以认为研究结果可靠。

2.5 发表偏倚检验

体重、体脂肪、去脂体重、肌肉质量纳入的文献



数量达到 10 个以上，绘制漏斗图进行发表偏倚检验。图 8 可见体重、体脂肪的漏斗图略微不对称，时莹清^[30]、Park 等^[28]、马莉^[31]、孙天瑜^[35]不在漏斗图 95% 可信区间内，提示可能存在发表偏倚。进一步进

行 Egger 检验， P 值均大于 0.05，证实体重、体脂肪纳入的文献之间无发表偏倚。此外，去脂体重、肌肉质量的漏斗图对称且 Egger 检验中 $P > 0.05$ ，提示去脂体重、肌肉质量所纳入的文献不存在发表偏倚。

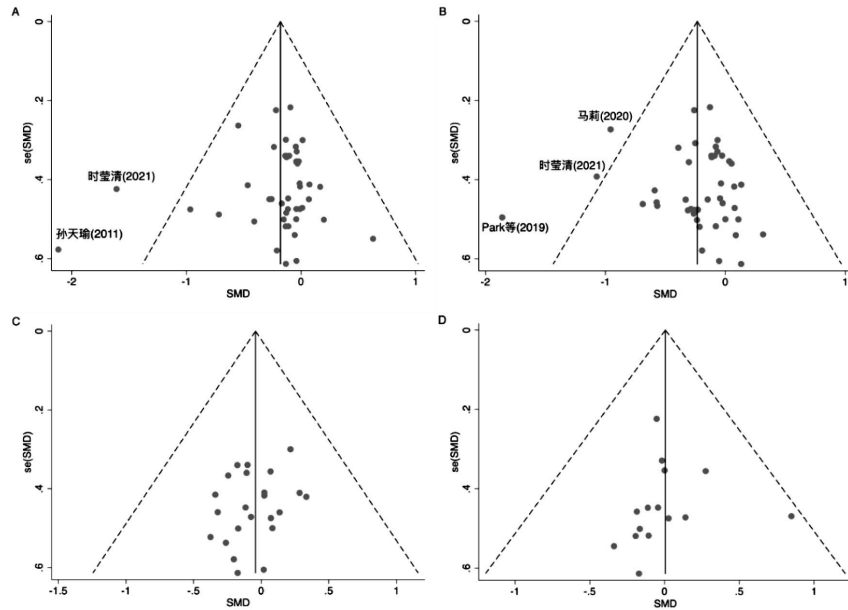


图 8 本研究的发表偏倚漏斗图

Figure8 Publication bias evaluation funnel plots of this meta-analysis

2.6 调节变量分析

调节变量分析结果见表 2。

表 2 调节变量分析

Figure2 Effects of the adjustable variables

结局指标	自变量	自变量类型	异质性检验			因变量 合并效应量(95%CI)	双尾检验		文献数量*
			χ^2	P	$I^2(\%)$		Z	P	
体重			36.23	0.82	0.00	-0.18[-0.29,-0.07]	3.14	0.00	46
	性别	男性	18.07	0.75	0.00	-0.21[-0.37,-0.05]	2.55	0.01	24
		女性	13.54	0.06	48.30	-0.34[-0.62,-0.06]	2.37	0.02	8
		混合#	1.89	1.00	0.00	-0.05[-0.26,0.15]	0.51	0.61	15
	年龄	青少年	3.61	0.99	0.00	-0.09[-0.29,0.11]	0.88	0.38	12
		成年	31.25	0.60	0.00	-0.21[-0.35,-0.08]	3.03	0.00	33
		老年				-0.47[-1.28,0.35]			1
	饮食干预	是	14.85	0.54	0.00	-0.10[-0.30,0.10]	0.99	0.32	17
		否	20.25	0.89	0.00	-0.23[-0.37,-0.09]	3.13	0.00	29
暴露方式	消极暴露	0.20	1.00	0.00	-0.08[-0.43,0.26]	0.48	0.63	6	
	积极暴露	35.84	0.74	0.00	-0.19[-0.31,-0.07]	3.13	0.00	40	
体脂肪			35.37	0.87	0.0	-0.23[-0.35,-0.18]	3.93	0.00	44
	性别	男性	22.79	0.47	0.00	-0.35[-0.51,-0.19]	4.20	0.00	24
		女性	4.67	0.32	14.40	-0.32[-0.66,0.01]	1.88	0.06	5
	混合#	1.85	1.00	0.00	-0.05[-0.24,0.14]	0.53	0.60	16	
	年龄	青少年	1.42	1.00	0.00	-0.09[-0.28,0.10]	0.97	0.33	13



续表 2

结局指标	自变量	自变量类型	异质性检验			因变量 合并效应量(95%CI)	双尾检验		文献数量*
			χ^2	<i>P</i>	<i>I</i> ² (%)		<i>Z</i>	<i>P</i>	
去脂体重		成年人	20.71	0.92	0.00	-0.28[-0.42,-0.13]	3.69	0.00	30
		老年人				-1.86[-2.83,-0.89]			1
	饮食干预	是	4.19	1.00	0.00	-0.10[-0.28,0.07]	1.18	0.24	18
		否	27.35	0.39	4.90	-0.33[-0.49,-0.18]	4.23	0.00	26
	暴露方式	消极暴露	0.33	1.00	0.00	0.01[-0.34,0.35]	0.03	0.98	6
		积极暴露	33.00	0.78	0.00	-0.26[-0.38,-0.14]	4.18	0.00	38
			4.76	1.00	0.00	-0.05[-0.22,0.13]	0.41	0.68	23
	性别	男性	3.59	0.89	0.00	0.04[-0.25,0.33]	0.24	0.81	9
		女性	0.76	0.94	0.00	-0.11[-0.49,0.27]	0.56	0.58	5
		混合#	0.39	1.00	0.00	-0.11[-0.40,0.19]	0.72	0.47	8
	年龄	青少年	0.53	0.99	0.00	-0.08[-0.42,0.25]	0.49	0.62	6
		成年人	4.28	1.00	0.00	-0.06[-0.27,0.16]	0.51	0.61	16
		老年人				0.28[-0.52,1.09]			1
	饮食干预	是	1.63	1.00	0.00	-0.15[-0.42,0.13]	1.02	0.31	9
		否	3.09	1.00	0.00	0.02[-0.21,0.24]	0.14	0.89	14
暴露方式	消极暴露	0.30	1.00	0.00	-0.17[-0.51,0.18]	0.96	0.34	6	
	积极暴露	4.56	1.00	0.00	-0.01[-0.21,0.20]	0.06	0.96	17	
肌肉质量			5.00	1.00	0.00	0.01[-0.20,0.21]	0.05	0.96	15
	性别	男性	4.79	0.57	0.00	0.10[-0.20,0.39]	0.64	0.52	7
		女性	0.07	1.00	0.00	-0.14[-0.57,0.30]	0.62	0.54	4
		混合#	0.37	1.00	0.00	-0.10[-0.48,0.29]	0.50	0.62	8
	年龄	青少年				0.14[-0.79,1.07]			1
		成年人	4.92	0.98	0.00	-0.001[-0.21,0.21]	0.01	0.99	14
		老年人							
	饮食干预	是	0.12	0.94	0.00	-0.05[-0.51,0.41]	0.22	0.83	3
		否	4.81	0.94	0.00	0.02[-0.21,0.25]	0.17	0.87	12
	暴露方式	消极暴露	0.00	0.99	0.00	-0.17[-0.93,0.59]	0.43	0.67	2
		积极暴露	4.79	0.97	0.00	0.02[-0.19,0.23]	0.18	0.86	13

注:#表示纳入的文献中,未明确具体性别,故未纳入到男性或女性亚组分析;*表示纳入的部分文献属于多臂设计,故文献和研究数量并不一致,研究数量多于文献数量。

2.6.1 年龄

3个自变量类型在效应量差异上不存在异质性($P < 50\%$, $P > 0.10$),表明合并结果稳健。结果显示,与常氧暴露相比,低氧暴露对改善成年人的体重、体脂肪具有明显优势($SMD = -0.21$, $P < 0.01$; $SMD = -0.28$, $P < 0.01$);对于青少年的体重和体脂肪改善情况,低氧暴露较常氧暴露无明显优势($P > 0.05$)。老年群体仅被纳入1项研究^[28]。

2.6.2 性别

2个自变量类型在效应量差异上不存在异质性($P < 50\%$, $P > 0.10$)。结果显示,与常氧暴露相比,低氧暴露对改善男性、女性的体重具有明显效果($SMD = -0.21$, $P < 0.05$; $SMD = -0.34$, $P < 0.05$)。低氧暴露对改善男性的体脂肪也具有显著作用($SMD = -0.35$, $P < 0.01$);而女性仅被纳入5项独立研究,效应量结

果为 $SMD = -0.32$ ($P > 0.05$)。

2.6.3 暴露方式

2个自变量类型在效应量差异上不存在异质性($P < 50\%$, $P > 0.10$)。结果发现,积极暴露时,与常氧环境相比,低氧环境对改善体重、体脂肪具有明显优势($SMD = -0.19$, $P < 0.01$; $SMD = -0.26$, $P < 0.01$);消极暴露时,常氧环境和低氧环境对改善体重、体脂肪的效果无明显差异($P > 0.05$)。

2.6.4 饮食干预

2个自变量类型在效应量差异上不存在异质性($P < 50\%$, $P > 0.1$)。结果发现,当不进行饮食干预,低氧暴露较常氧暴露对改善体重、体脂肪具有明显优势($SMD = -0.23$, $P < 0.01$; $SMD = -0.33$, $P < 0.01$);当进行饮食干预,低氧暴露和常氧暴露在改善体重、体脂肪的效果上无明显差异, $P > 0.05$ 。



3 分析与讨论

3.1 低氧暴露对减轻体重的效果

本研究对 46 篇包含减轻体重文献进行方法学质量评估、敏感性分析以及发表偏倚评估,效应量合并结果具有很高的稳定性。结果显示,对于减轻体重,低氧环境暴露具有显著优势,其中有 39 篇独立文献与本报告结果相同。汤盈^[1]和吕中凡等^[13]在系统评价中显示积极低氧暴露有利于体重减轻,其以随机效应模型进行分析。相比之下,本研究利用固定效应模型进行分析,同时纳入有关积极低氧暴露、消极低氧暴露的文献,从不同角度证实了低氧暴露的减体重效果优于常氧暴露。

3.1.1 不同群体的减轻体重效果

不同性别亚组分析显示,与常氧暴露相比,低氧暴露对减轻男性体重的效应量达到 0.21,减轻女性体重效应量达到 0.34,且具有统计学意义。因此,在低氧环境中,男性和女性的体重能够得到明显改善。

不同年龄亚组分析显示,与常氧暴露相比,低氧暴露对成年人的体重减轻具有显著效果。青少年群体被纳入 12 项独立研究,冯连世等^[4]对肥胖青少年进行短周期高频率的低氧干预,结果发现,与常氧暴露相比,低氧暴露减轻体重幅度并无显著性优势。Britto 等^[8]研究发现,肥胖青少年在进行长周期低频率的低氧干预后,低氧暴露和常氧暴露的减轻体重效果并无明显差异。另外 4 项独立研究结果同样显示,低氧暴露较常氧暴露后体重变化无显著优势。鉴于目前文献数量,与常氧暴露相比,低氧暴露对减轻青少年群体的体重是否具有显著优势,尚无统一的观点。同时,未来仍需要进一步考虑老年人群体在低氧环境中体重变化。

3.1.2 不同干预措施的减轻体重效果

饮食干预亚组分析显示,低氧暴露对不控制饮食亚组的体重减轻具有显著效果。控制饮食亚组合并 17 篇文献,体重无显著变化;其中有 1 篇文献^[63]摄入食物热量比保持体重热量少 40%,有 3 篇文献^[33,41-42]提供食物热量 2 000 kcal/d,剩余 13 篇文献提供标准化饮食或定量化饮食方案。本研究认为控制饮食规避了其他因素,单独考察低氧对减控体重的影响,但是这种定量化饮食方案解决了低氧暴露下能量摄入不足的问题。反观不控制饮食,体重减轻,可能原因是进食量减少。早期高原饮食调查报道多见于登山探险人员,Westerterp 等^[22]调查了登山探险人员的饮食状况,期间自由膳食,从 5 000 m 上升到 8 000 m,摄

入的食物热量显著下降。Westerterp 等^[68]对健康男性进行模拟 4 500 m 到 8 848 m 的低压低氧环境暴露,食物热量摄入也显著下降。上述两项研究均调查了高海拔地区或极高海拔地区饮食,而本研究纳入的 46 篇文献均在中等海拔高度。相关研究显示,肥胖男性经过 7 d 中等海拔低氧暴露,不控制饮食,每天热量摄入由(2 989±332)kcal 下降到(2 256±224)kcal^[69]。Mekjavic 等^[67]模拟中等海拔低氧环境,观察到较低的热量摄入,每天热量(2 472±251)kcal,而常氧环境中每天热量为(2 847±241)kcal。另外,平原人群进驻中高海拔地区后胃肠反应患病率为 22.81%,其中恶心呕吐占 26%,腹泻者占 23.3%,这种胃肠道功能紊乱造成进食量大幅下降^[70]。除肠胃功能紊乱外,生长激素酰化肽(ghrelin)、瘦素(leptin)等食欲相关调节激素也是造成进食量降低的重要原因。Pramsohler 等^[71]系统评价高海拔地区食欲状况,认为高海拔滞留期间体重减轻主要因素是更高水平的瘦素分泌导致的食欲下降。特别是在急性暴露期间,生长激素酰化肽的浓度降低导致食欲下降^[72]。总体来讲,机体处于低氧环境中,进食量减少导致体重减轻;而标准化饮食和定量化配餐有利于食物摄入,维持体重稳定。

暴露方式亚组分析显示,40 篇文献实施了积极暴露,与常氧环境相比,低氧环境中积极暴露对体重减轻具有显著优势。有 6 篇文献实施了消极暴露,Barnholt 等^[63]对体重正常男性进行为期 3 周的消极低氧暴露,其间低热量饮食,低氧组与常氧组的体重均降低,但组间无显著差异。Mekjavic 等^[67]的研究结果显示,消极低氧暴露后体重并无显著变化。剩余 4 篇文献均为高住低训,即在低氧环境中进行消极暴露,其中,田中等^[31]和杨谦等^[32]研究显示,低氧组的体重得到显著下降,而常氧组的体重并无明显变化。王茹等^[38]和 Yang 等^[53]所在的低氧组和常氧组的体重显著下降。然而,上述 6 篇文献的合并效应量结果显示,与常氧环境相比,低氧环境对消极暴露亚组的体重减轻并无显著优势,未来需要纳入更多文献探索消极低氧暴露这一变量。中高海拔低氧暴露会抑制食欲,人体难以获得足够能量满足机体需求,体育活动进一步加大能量缺口,导致体重大幅减轻。基于当前的文献分析,本研究认为在低氧环境中积极暴露可以减轻体重。若考虑其他激素标志物,如生长激素(Growth Hormone, GH)和胰岛素样生长因子-1(Insulin-like Growth Factor-1, IGF-1),可能通过潜在的机制减轻体重。在动物模型中,Zhang 等^[73]报道消极低氧暴露会抑制大鼠的体重增长,与生长激素受到抑制有关。孟艳等^[74]将处于生长期的大鼠置



于低氧环境中暴露,其体重增长慢于常氧暴露大鼠。低氧运动组的大鼠 GH、IGF-1 下降幅度高于常氧运动组,提示积极低氧暴露抑制大鼠合成代谢,体重增长缓慢。

3.2 低氧暴露对降低体脂肪的效果

对 44 篇包含体脂肪文献进行方法学质量评估、敏感性分析以及发表偏倚评估,效应量结果具有很高的稳定性。结果显示,低氧暴露对降低体脂肪具有显著优势;其中 35 篇文献与本研究结果相同。在低氧环境中,机体缺氧影响葡萄糖和脂肪的利用率,Hochachka 等^[75]提出低氧环境下葡萄糖依赖增加可以解释为一种优化代谢“经济”的适应,葡萄糖氧化利用比脂肪氧化更“经济”。Roberts 等^[76]发现人体长期暴露在高海拔地区会减少静息和运动期间脂肪酸的消耗,与平原地区相比,高海拔地区人体脂肪酸利用减少,葡萄糖利用增加。然而,有限的葡萄糖储备可能会抵消其代谢经济性,高原低氧适应后,葡萄糖相对利用率没有继续增加^[77]。随后其他研究^[68,78-79]报道低氧暴露下体重的减轻归因于体脂肪降低,可能是脂肪氧化增加所致。Workman 等^[80]对 11 名健康男性进行慢性消极低氧暴露,测量被试能量代谢和底物利用,低氧暴露后,葡萄糖氧化率显著降低 31%,脂肪氧化率显著增加 44%,而 4 名男性在常氧暴露前后的脂肪氧化率仅为 4%。脂肪酸是静息、运动期间重要的能源物质,最新报道也显示慢性低氧暴露提高了脂肪酸的产生和消耗^[81]。

3.2.1 不同群体的降低体脂肪效果

不同性别亚组分析显示,与常氧暴露相比,低氧暴露对男性的体脂肪降低具有显著效果。女性亚组涉及 5 项独立研究,效应量为 0.32,达到中等效应,基于原始文献数量限制,无统计学意义($P=0.06$)。其中,姜永波^[57]发现女性青少年经过低氧暴露后,体脂肪无显著性变化。王茹等^[38]报道青少年在高住低训后,体脂肪变化存在性别差异,低氧组男性青少年的体重下降显著大于常氧组,女性青少年所在的低氧组无明显变化。剩余 3 项独立研究对象均为成年女性。可见有关青少年的性别差异报道较少,结果也存在差异。

不同年龄亚组分析显示,与常氧暴露相比,低氧暴露对成年人的体脂肪降低具有显著效果;青少年群体被纳入 13 项独立研究,效应量为 $SMD=-0.09$,低氧暴露改善青少年的体脂肪并无显著优势。未来仍需要纳入更多人群的低氧研究,并探索这些群体在减控体重中的性别差异。

3.2.2 不同干预措施降低体脂肪效果

饮食干预亚组分析显示,18 项独立研究实施了饮食控制,体脂肪合并效应量无统计学意义;26 项独立研究未实施饮食控制,体脂肪合并效应量具有统计学意义。提示低氧暴露中,自由饮食对降低体脂肪有明显效果,这对于减肥人群有益。同时,标准化饮食可以预防体脂肪过度丢失,对进驻高原人群保持更高的身心表现有益。本研究中仅有 6 项研究实施了消极低氧暴露,单纯低氧暴露较常氧暴露体脂肪变化无差异。38 项研究实施了积极低氧暴露,体脂肪合并效应量具有统计学意义,提示低氧环境中积极暴露有利于体脂肪减轻。低氧环境下积极暴露诱导了特定的生理适应增强,包括胰岛素敏感性^[52]、游离脂肪酸^[66]、小动脉直径和外周血管扩张^[82]、线粒体数量^[83]、糖酵解酶活性^[84],这有助于更多的氧气和脂肪酸转运进入骨骼肌线粒体参与氧化供能,体脂肪得到下降。

3.3 低氧暴露对去脂体重影响效果分析

对 23 篇包含去脂体重文献进行方法学质量评估、敏感性分析以及发表偏倚评估,效应量结果具有很高的稳定性。与常氧暴露相比,低氧暴露期间去脂体重的变化无明显差异($P>0.05$)。进一步亚组分析发现,低氧环境下的饮食干预和暴露方式对去脂体重的变化无统计学意义,而且低氧暴露对不同性别、年龄群体的去脂体重没有明显差异。去脂体重包含肌肉质量、身体水分等成分,为此应继续探究肌肉质量和身体水分的变化。

15 篇文献报告了常氧暴露和低氧暴露中的肌肉质量变化,两者之间变化幅度无明显差异。早期报道显示低氧暴露下肌肉质量减少是肌肉萎缩所致。研究对象在海拔 5 000 m 以上喜马拉雅山探险 8 周后以及在模拟攀登珠穆朗玛峰的低氧舱暴露 40 d,骨骼肌肌纤维横截面积明显下降,肌肉萎缩,体重减轻^[85-86]。这与其他报道^[87]存在差异,平原人群在 4 100 m 海拔高度暴露 8 周后,体重和骨骼肌肌纤维面积保持不变;同时,Levett 等^[88]对营地工作人员和探险人员的大腿肌肉进行活检,从海平面上升到 6 400 m (珠穆朗玛峰)期间暴露 66 d,营地工作人员的股外侧肌肉肌纤维横截面积下降 7.7%,探险人员股外侧肌肉肌纤维横截面积上升 1.1%,变化幅度均无统计学意义。最近报道^[89]也有类似结果,中等慢性低氧暴露对肌肉蛋白质降解标志物的影响很小,并且不会改变人体骨骼肌肌纤维横截面积。Jacobs 等^[90]发现健康男性在海拔 3 454 m 暴露 28 d 后,腿部瘦体重



和股外侧肌纤维横截面积均保持不变。故低氧暴露是否诱导肌肉萎缩,需要进一步探究。本研究结果显示,低氧暴露和常氧暴露下肌肉质量变化幅度无差异,原因可能与低氧暴露剂量有关。D'Hulst 等^[91]认为低氧剂量与肌纤维面积减少百分比之间存在负相关关系,骨骼肌出现萎缩的低氧剂量阈值为 5 000 km·h,海拔高度和时间必须达到最小阈值 5.6 km 和 840 h,否则骨骼肌不会出现萎缩。相比之下,本研究纳入文献的低氧暴露剂量远低于该阈值。体育锻炼可以保持骨骼肌肌纤维横截面积,对维持中等低氧暴露下的肌肉质量至关重要^[92],与本研究 13 篇积极暴露的研究结果相似。此外,低氧暴露期间年龄和性别并不影响肌肉质量的变化,饮食干预对肌肉质量的影响效果无统计学差异。因此,本研究认为中等海拔高度地区,肌肉质量和去脂体重的变化并不是中等海拔高度体重减轻的主要原因。4 篇文献报告了身体水分,低氧暴露较常氧暴露下身体水分变化无明显差异。在理论上,高海拔地区暴露期间,身体含水量下降是无感失水量流失、饮水不足所致。在现有研究^[93]中,登山人员在探险初期身体含水量下降,一段时间后身体含水量又逐渐恢复。Westerterp 等^[78]发现,健康男性在模拟高海拔地区低氧暴露后,无感失水量变化不明显,这从侧面反映出身体水分下降并不是低氧暴露下体重减轻的主要原因。目前,关于低氧和常氧暴露下身体含水量的 RCT 较为鲜见,而本研究的 4 篇文献^[27,36,51,64],共 104 名观察对象,未来有必要纳入更多样本量考察低氧暴露下身体含水量对减控体重的影响。

4 结论与展望

4.1 结论

与常氧暴露相比,低氧暴露对减体重和降体脂具有明显优势。低氧暴露对成年男性和成年女性的体重具有明显改善效果,也能有效改善成年男性的体脂率。低氧暴露期间,暴露方式和饮食干预影响减控体重的效果,积极低氧暴露、自由饮食对体重和体脂肪的改善效果明显。

4.2 展望

建议开展不同群体的研究。本研究纳入的文献中,仅一项研究的对象为老年人群,因文献过少未能总结出可靠的结果。青少年群体纳入一定数量文献,但尚不明确低氧暴露和常氧暴露对体重的改善效果是否存在异同。因此,未来需要开展针对老年人和青少年群体的低氧研究,以探索适合不同年龄的干预措施。

参考文献:

- [1] WANG L, ZHOU B, ZHAO Z, et al. Body-mass index and obesity in urban and rural China: Findings from consecutive nationally representative surveys during 2004-18[J]. *Lancet*,2021,398(10294):53-63.
- [2] HEINONEN I H, BOUSHEL R, KALLIOKOSKI K K. The circulatory and metabolic responses to hypoxia in humans - with special reference to adipose tissue physiology and obesity[J]. *Front Endocrinol(Lausanne)*, 2016, 7:116.
- [3] 田中,李卫平,许豪文,等.模拟高住低练对优秀游泳运动员身体成分和物质代谢的影响[J].*山东体育学院学报*,2004,20(1):37-40.
- [4] 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[J].*体育科学*, 2013,33(11):58-65.
- [5] 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[J].*中国学校卫生*,2016,37(11):1637-1640.
- [6] HOBBS L, HUNTER S, GAOUA N, et al. Short-term perceptually regulated interval-walk training in hypoxia and normoxia in overweight-to-obese adults[J]. *Journal of Sports Science and Medicine*, 2021, 20(1):45-51.
- [7] 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[J]. *BioMed Research International*, 2020,2020:3279710.
- [8] 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]. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 2020,60(4):601-609.
- [9] 黄徐根,徐建方,冯连世.低氧暴露及低氧训练对体重的影响[J].*体育科学*,2006,26(3):86-93,96.
- [10] 路瑛丽,谢敏豪,冯连世.高原/低氧与减控体重研究[J].*中国运动医学杂志*,2012,31(2):169-174.
- [11] 汤盈.低氧训练改善肥胖青少年身体成分、血脂和血压效果的 Meta 分析[J].*吉林体育学院学报*,2022,38(3):87-94.
- [12] 王航平,孙振武.低氧训练对肥胖人群身体成分和血脂影响的 meta 分析[J].*环境与职业医学*,2019,36(2):157-163,169.
- [13] 吕中凡,史鹏,刘杨婷.低氧锻炼减控体重效果:基于随机对照实验的 meta 分析[J].*辽宁师范大学学报(自然科学版)*,2020,43(4):558-569.
- [14] WASSE L K, SUNDERLAND C, KING J A, et al. Influence of rest and exercise at a simulated altitude of



- 4,000 m on appetite, energy intake, and plasma concentrations of acylated ghrelin and peptide YY[J]. *Journal of Applied Physiology*(1985). 2012, 112(4):552-559.
- [15] MATU J, GONZALEZ J T, ISPOGLOU T, et al. The effects of hypoxia on hunger perceptions, appetite-related hormone concentrations and energy intake: A systematic review and meta-analysis[J]. *Appetite*, 2018, 125:98-108.
- [16] BAILEY D P, SMITH L R, CHRISMAS B C, et al. Appetite and gut hormone responses to moderate-intensity continuous exercise versus high-intensity interval exercise, in normoxic and hypoxic conditions[J]. *Appetite*, 2015, 89:237-245.
- [17] 王茹,刘冬梅,吴娜娜,等.高住低练对肥胖青少年内源性大麻素及相关食欲调节激素的影响[J].*体育科学*, 2016,36(2):51-57,71.
- [18] SERGI G, IMOSCOPI A, SARTI S, et al. Changes in total body and limb composition and muscle strength after a 6-8 weeks sojourn at extreme altitude (5000-8000 m) [J]. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 2010, 50(4):450-455.
- [19] MAZZEO R S. Altitude, exercise and immune function [J]. *Exercise Immunology Review*, 2005,11:6-16.
- [20] BROOKS G A, BUTTERFIELD G E, WOLFE R R, et al. Increased dependence on blood glucose after acclimatization to 4300 m[J]. *Journal of Applied Physiology*(1985), 1991, 70(2):919-927.
- [21] MICHALCZYK M, CZUBA M, ZYDEK G, et al. Dietary recommendations for cyclists during altitude training[J]. *Nutrients*, 2016, 8(6):E377.
- [22] WESTERTERP-PLANTENGA M S, WESTERTERP K R, RUBBENS M, et al. Appetite at "high altitude" [Operation Everest III (Comex-97)]: A simulated ascent of Mount Everest[J]. *Journal of Applied Physiology*(1985), 1999,87(1):391-399.
- [23] FRIEDLANDER AL, BRAUN B, JUAN M. Making molehills out of mountains: Maintaining high performance at altitude[J]. *ACSM's Health & Fitness Journal*, 2008,12(6):15-21.
- [24] 张天嵩,董圣杰,周支瑞.高级 Meta 分析方法:基于 Stata 实现[M].上海:复旦大学出版社,2015:83,257.
- [25] 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[J].*中国体育科技*,2013,49(6):89-93.
- [26] 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[J].*中国运动医学杂志*,2014,33(5):460-464.
- [27] KLUG L, MÄHLER A, RAKOVA N, et al. Normobaric hypoxic conditioning in men with metabolic syndrome [J]. *Physiological Reports*, 2018, 6(24): e13949.
- [28] PARK H Y, JUNG W S, KIM J, et al. Twelve weeks of exercise modality in hypoxia enhances health-related function in obese older Korean men: A randomized controlled trial[J]. *Geriatrics Gerontology International*,2019, 19(4):311-316.
- [29] 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[J].*基因组学与应用生物学*,2019,38(12):5657-5663.
- [30] 时莹清.不同环境下青年肥胖女性减重效果的差异分析[J].*文体用品与科技*,2021,6(6):89-90.
- [31] 马莉.低氧中强度训练可通过上调 HIF-1 α 来提高机体抗氧化能力[J].*基因组学与应用生物学*,2020,39(1): 270-277.
- [32] 杨谦,张国庆.模拟高原训练对游泳运动员身体成分的影响[J].*山东体育学院学报*,2005,21(4):68-71.
- [33] 刘花层.模拟高住低训对足球运动员血清瘦素和血脂的影响[J].*河南师范大学学报(自然科学版)*,2007,35(4):158-161.
- [34] 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 [J]. *Obesity*(Silver Spring),2010,18(1):116-120.
- [35] 孙天瑜.模拟低氧环境下的健身锻炼对肥胖青年身体形态的影响[D].南京:南京体育学院,2011.
- [36] 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[J].*中国运动医学杂志*,2012(4):289-294.
- [37] 姜永波.高住高练低训对青少儿减肥作用的实验研究 [D].北京:北京体育大学,2016.
- [38] 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[J].*北京体育大学学报*,2013, 36(9):81-87.
- [39] 安江红,赵凡,赵之光.HiHiLo 对优秀古典跤运动员备战全运会赛前减控体重期间部分生理生化指标的影响[J].*中国运动医学杂志*,2014,33(2):115-118,182.
- [40] HO J Y, KUO T Y, LIU K L, et al. Combining normobaric hypoxia with short-term resistance training has no additive beneficial effect on muscular performance and body composition[J]. *Journal of Strength and Conditioning Research*,2014,28(4): 935-941.
- [41] KONG Z W, ZANG Y P, HU Y. Normobaric hypoxia training causes more weight loss than normoxia training after a 4-week residential camp for obese young adults [J]. *Sleep and Breath*,2014,18(3):591-597.
- [42] MORISHIMA T, KURIHARA T, HAMAOKA T, et al. Whole body, regional fat accumulation, and appetite-related hormonal response after hypoxic training[J]. *Clini-*



- cal Physiology and Functional Imaging, 2014, 34 (2): 90-97.
- [43] 杨贤罡,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[J].中国运动医学杂志,2014(7):638-645.
- [44] GATTERER H, HAACKE S, BURTSCHER 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[J]. Obesity Facts, 2015, 8(3):200-209.
- [45] 刘晓鹏.间歇性低氧运动处方对单纯性肥胖儿童体成分和骨代谢的影响[D].郑州:河南大学,2015.
- [46] 吴娜娜,管延飞,朱欢,等.高住低练对肥胖青少年血浆食欲调节激素的影响[J].中国应用生理学杂志,2015, 31(3):281-283.
- [47] 王茹,苏利强,杨钦,等.低氧训练对肥胖青少年减控体重的影响与血镁浓度相关[J].体育科学,2016,36(9): 28-35,47.
- [48] CAMACHO-CARDENOSAMCAMACHO-CARDENOSA A, MARTÍNEZ GUARDADO I, et al. A new dose of maximal-intensity interval training in hypoxia to improve body composition and hemoglobin and hematocrit levels: A pilot study[J]. Journal of Sports Medicine and Physical Fitness, 2017, 57(1-2):60-69.
- [49] KONG Z, SHI Q, NIE J, et al. High-intensity interval training in normobaric hypoxia improves cardiorespiratory fitness in overweight chinese young women[J]. Frontiers in Physiology, 2017, 23(8):175.
- [50] PARK H Y, LIM K. The effects of aerobic exercise at hypoxic condition during 6 weeks on body composition, blood pressure, arterial stiffness, and blood lipid level in obese women[J]. International Journal of Sports Science, 2017,1(1):1-5.
- [51] MENÉNDEZ A F, SAUDAN G, SPERISEN L, et al. Effects of short-term normobaric hypoxic walking training on energetics and mechanics of gait in adults with obesity[J]. Obesity (Silver Spring), 2018, 26(5):819-827.
- [52] SHIN S, MATSUOKA T, SO W Y, et al. Influences of short-term normobaric hypoxic training on metabolic syndrome-related markers in overweight and normal-weight men[J]. Journal of Men's Health,2018,14(1):e44-e52.
- [53] 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[J]. Medicine(Baltimore),2018,97(8):e9943.
- [54] 李文静.6周低氧循环抗阻训练对超重男性减脂和发展力量效果的研究[D].北京:北京体育大学,2019.
- [55] 刘岩.低氧环境下有氧运动对女大学生血脂和体成分的影响[D].杭州:浙江大学,2019.
- [56] CHACAROUN S, BOROWIK A, VEGA-ESCAMILLA Y, et al. Hypoxic exercise training to improve exercise capacity in obese individuals[J]. Medicine & Science in Sports & Exercise, 2020, 52(8):1641-1649.
- [57] 连立文.6周佩戴低氧面罩运动对成年超重/肥胖人群血液糖脂代谢指标的影响[D].北京:北京体育大学,2020.
- [58] 王一峰.常氧与低氧环境下Fatmax运动减肥方案对肥胖男青年身体的影响[D].长春:吉林体育学院,2020.
- [59] 郑蓓蓓,闻剑飞,邵梦霓,等.中等运动强度间歇低氧训练对大学生体成分的影响[J].通化师范学院学报,2020, 41(6):77-80.
- [60] GUARDADO I M, UREÑA B S, CARDENOSA A C, et al. Effects of strength training under hypoxic conditions on muscle performance, body composition and haematological variables[J]. Biology of Sport,2020,37(2): 121-129.
- [61] 付丽娟,李星谕.低氧训练对肥胖群体体成分和有氧耐力的影响[J].文体用品与科技,2022,6(6):92-94.
- [62] GHAITH A, CHACAROUN S, BOROWIK A, et al. Hypoxic high-intensity interval training in individuals with overweight and obesity[J]. American Journal of Physiology. Regulatory, Integrative and Comparative Physiology, 2022,323(5): R700-R709.
- [63] BARNHOLT K E, HOFFMAN A R, ROCK P B, et al. Endocrine responses to acute and chronic high-altitude exposure (4,300 meters): Modulating effects of caloric restriction[J]. American Journal of Physiology. Endocrinology and Metabolism, 2006, 290(6):E1078-E1088.
- [64] GREIE S, HUMPELER E, GUNGA H C, et al. Improvement of metabolic syndrome markers through altitude specific hiking vacations[J]. Journal of Endocrinological Investigation,2006,29(6):497-504.
- [65] CHIA M, LIAO C A, HUANG C Y, et al. Reducing body fat with altitude hypoxia training in swimmers: Role of blood perfusion to skeletal muscles[J]. Chinese Journal of Physiology,2013,56(1):18-25.
- [66] GUTWENGER I, HOFER G, GUTWENGER A K, et al. Pilot study on the effects of a 2-week hiking vacation at moderate versus low altitude on plasma parameters of carbohydrate and lipid metabolism in patients with metabolic syndrome[J]. BMC Research Notes,2015,28(8):103.
- [67] MEKJAVIC I B, AMON M, KÖLEGÅRD R, et al. The effect of normobaric hypoxic confinement on metabolism, gut hormones, and body composition[J]. Frontiers in Physiology,2016,7:202.
- [68] WESTERTERP K R, MEIJER E P, RUBBENS M, et al.



- Operation Everest III: Energy and water balance [J]. *Pflügers Archiv-european Journal of Physiology*,2000, 439(4):483-488.
- [69] LIPPL F J, NEUBAUER S, SCHIPFER S, et al. Hypobaric hypoxia causes body weight reduction in obese subjects[J]. *Obesity(Silver Spring)*,2010,18(4):675-681.
- [70] 李晓明,赵秋玲,杨全峰,等.急进驻高原官兵胃肠应激反应患病率及饮食因素调查[J].*第四军医大学学报*,2008(8):702-704.
- [71] PRAMSOHLER S, BURTSCHER M, RAUSCH L, et al. Weight loss and fat metabolism during multi-day high-altitude sojourns: A hypothesis based on adipocyte signaling[J]. *Life(Basel)*,2022,12(4):545.
- [72] DEBEVEC T. Hypoxia-related hormonal appetite modulation in humans during rest and exercise: Mini review [J]. *Frontiers in Physiology*,2017,8:366.
- [73] ZHANG Y S, DU J Z. The response of growth hormone and prolactin of rats to hypoxia[J]. *Neurosci Letters*, 2000,279(3):137-140.
- [74] 孟艳,林文强,翁锡全,等.低氧运动对大鼠生长激素、胰岛素样生长因子-1的影响[J].*军事体育进修学院学报*,2008,(3):103-106.
- [75] HOCHACHKA P W. Exercise limitations at high altitude: The metabolic problem and search for a solution[J]. *Circulation, Respiration and Metabolism*,1985: 240-249.
- [76] ROBERTS A C, BUTTERFIELD G E, CYMERMAN A, et al. Acclimatization to 4,300m altitude decreases reliance on fat as a substrate[J]. *Journal of Applied Physiology (1985)*,1996,81(4):1762-1771.
- [77] MCCLELLAND G B, HOCHACHKA P W, WEBER J M. Carbohydrate utilization during exercise after high-altitude acclimation: A new perspective[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*,1998,95(17):10288-10293.
- [78] WESTERTERP K R, KAYSER B. Body mass regulation at altitude[J]. *European Journal of Gastroenterology and Hepatology*, 2006, 18:1-3.
- [79] WESTERTERP-PLANTENGA M S. Effects of extreme environments on food intake in human subjects[J]. *The Proceedings of Nutrition Society*,1999,58:791-798.
- [80] WORKMAN C, BASSET F A. Post-metabolic response to passive normobaric hypoxic exposure in sedentary overweight males: A pilot study[J]. *Nutrition & Metabolism*,2012,9(1):103.
- [81] FUHRMANN D C, OLESCH C, KURRLE N, et al. Chronic hypoxia enhances β -oxidation-dependent electron transport via electron transferring flavoproteins [J]. *Cells*,2019,8(2):E172.
- [82] MONTERO D, LUNDBY C. Effects of exercise training in hypoxia versus normoxia on vascular health[J]. *Sports Medicine*,2016,46:1725-1736.
- [83] URDAMPILLETA A, GONZÁLEZ-MUNIESA P, PORTILLO M P, et al. Usefulness of combining intermittent hypoxia and physical exercise in the treatment of obesity [J]. *Journal of Physiology and Biochemistry*,2012,68: 289-304.
- [84] FENKCI S, SANSAN A, ROTA S, et al. Effects of resistance or aerobic exercises on metabolic parameters in obese women who are not on a diet[J]. *Advances in Therapy*,2006,23:404-413.
- [85] HOPPELER H, KLEINERT E, SCHLEGEL C, et al. Morphological adaptations of human skeletal muscle to chronic hypoxia[J]. *International Journal of Sports Medicine*,1990, Suppl 1: S3-S9.
- [86] MACDOUGALL J D, GREEN H J, SUTTON J R, et al. Operation Everest II: Structural adaptations in skeletal muscle in response to extreme simulated altitude[J]. *Acta Physiologica Scandinavica*,1991,142(3):421-427.
- [87] LUNDBY C, PILEGAARD H, ANDERSEN J L, et al. Acclimatization to 4100 m does not change capillary density or mRNA expression of potential angiogenesis regulatory factors in human skeletal muscle[J]. *Journal of Experimental Biology*,2004,207(Pt22):3865-3871.
- [88] LEVETT D Z, RADFORD E J, MENASSA D A, et al. Acclimatization of skeletal muscle mitochondria to high-altitude hypoxia during an ascent of Everest[J]. *FASEB Journal*,2012,26(4):1431-1441.
- [89] D'HULST G, FERRI A, NASLAIN D, et al. Fifteen days of 3,200 m simulated hypoxia marginally regulates markers for protein synthesis and degradation in human skeletal muscle[J]. *Hypoxia (Auckl)*,2016,4:1-14.
- [90] JACOBS R A, LUNDBY A K, FENK S, et al. Twenty-eight days of exposure to 3454 m increases mitochondrial volume density in human skeletal muscle[J]. *The Journal of Physiology*, 2016, 594(5):1151-1166.
- [91] D'HULST G, DELDICQUE L. Human skeletal muscle wasting in hypoxia: A matter of hypoxic dose? [J]. *Journal of Applied Physiology (1985)*,2017,122(2):406-408.
- [92] DELDICQUE L, FRANCAUX M. Acute vs. chronic hypoxia: What are the consequences for skeletal muscle mass? [J]. *Cellular and Molecular Exercise Physiology*, 2013,2(1):1-8.
- [93] FUSCH C, GFRÖRER W, KOCH C, et al. Water turnover and body composition during long-term exposure to high altitude (4900-7600m) [J]. *Journal of Applied Physiology (1985)*,1996,80(4):1118-1125.

(责任编辑:刘畅)