

· 技术与方法 ·

## 8周滑雪训练对下肢骨骼肌表面肌电和微循环功能的影响研究: 一项随机对照试验

付贝伦<sup>1,2</sup> 朱欢<sup>1,2</sup> 周术锋<sup>1,2</sup> 李森<sup>1,2</sup> 万利<sup>1,2\*</sup> 王康锋<sup>3</sup> 陆碧琼<sup>3</sup> 胡江平<sup>3</sup><sup>1</sup>湖北民族大学体育学院, 恩施土家族苗族自治州 445000;<sup>2</sup>湖北民族大学运动科学研究中心, 恩施土家族苗族自治州 445000; <sup>3</sup>广西民族师范学院体育学院, 崇左 532200)

**摘要** 该研究对体育专业男子业余滑雪运动员进行8周滑雪训练干预, 探讨训练前后受试者下肢肌肉表面肌电(sEMG)信号和微循环功能的变化, 并从微循环功能角度探讨sEMG的变化原因, 为揭示滑雪训练对人体肌肉功能的影响提供新的研究视角和理论支撑。该研究通过招募38名符合标准的受试者, 采用分层区组随机化法将受试者分为对照组和试验组。试验组进行持续8周、5次/周、90 min/次的双板滑雪训练。8周滑雪训练分基础技能训练(2周)、专项能力发展训练(3周)、专项能力强化训练(3周)三个阶段, 其中基础技能训练阶段最大滑行坡度为11°, 单次滑行距离为0.15 km; 专项能力发展训练最大坡度为22°, 单次滑行距离为0.9 km; 专项能力强化训练最大坡度为27°, 单次滑行距离为0.7 km。对照组维持常规日常生活状态, 不进行系统性运动训练。试验前后分别对受试者右下肢肌力、纵跳高度及股直肌、腓肠外肌在无负重深蹲过程的积分肌电(iEMG)、均方根振幅(RMS)、中位频率(MF)、平均功率频率(MPF)和微血管反应性(MR)、经皮氧分压(TcPO<sub>2</sub>)、肌氧饱和度(SmO<sub>2</sub>)等指标进行测试。该研究得出(1) 试验后, 试验组右下肢肌力、纵跳高度均显著高于对照组( $P<0.01$ ); (2) 试验后, 试验组股直肌与腓肠外肌的MF、MPF值显著高于对照组( $P<0.05$ ), 股直肌的iEMG、RMS及腓肠外肌的iEMG显著低于对照组( $P<0.05$ ), 腓肠外肌的RMS显著低于对照组( $P<0.01$ ); (3) 试验后, 试验组股直肌的MR、TcPO<sub>2</sub>和腓肠外肌的MR、TcPO<sub>2</sub>、SmO<sub>2</sub>显著高于对照组( $P<0.05$ ), 股直肌的SmO<sub>2</sub>显著高于对照组( $P<0.01$ )。8周滑雪训练能同时增强体育专业男子业余滑雪运动员下肢骨骼肌sEMG和微循环功能, 但两者之间是否存在因果关系还需进一步研究明确。综上, 该研究认为滑雪训练是提高下肢骨骼肌功能的有效方式。

**关键词** 8周; 滑雪训练; 下肢肌肉; 表面肌电信号; 微循环功能

## The Effects of 8-Week Skiing Training on Surface Electromyography and Microcirculation Function of Lower Limb Skeletal Muscles: a Randomized Controlled Trial

收稿日期: 2025-12-03

接受日期: 2026-01-12

2024年湖北省高校优秀中青年科技创新团队(批准号: T2024016)、广西高等学校千名中青年骨干教师培育计划(批准号: 2023QGRW048)和2024年广西民族师范学院科研团队项目(批准号: KYTD201404)资助的课题

\*通信作者。Tel: 13339949959, E-mail: 9975350@qq.com

Received: December 3, 2025

Accepted: January 12, 2026

This work was supported by the Excellent Young and Middle-Aged Scientific and Technological Innovation Team of Hubei Universities in 2024 (Grant No. T2024016), the Training Program for 1 000 Young and Middle-Aged Key Teachers in Guangxi Colleges and Universities (Grant No.2023QGRW048), and the Research Team Project of Guangxi Minzu Normal University in 2024 (Grant No.KYTD201404)

\*Corresponding author. Tel: +86-13339949959, E-mail: 9975350@qq.com

FU Beilun<sup>1,2</sup>, ZHU Huan<sup>1,2</sup>, ZHOU Shufeng<sup>1,2</sup>, LI Miao<sup>1,2</sup>, WAN Li<sup>1,2</sup>, WANG Kangfeng<sup>3</sup>, LU Biqiong<sup>3</sup>, HU Jiangping<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*School of Physical Education of Hubei Minzu University, Enshi Tujia and Miao Autonomous Prefecture 445000, China;*

<sup>2</sup>*the Sports Science Research Center of Hubei Minzu University, Enshi Tujia and Miao Autonomous Prefecture 445000, China;*

<sup>3</sup>*School of Physical Education, Guangxi Normal University for Nationalities, Chongzuo 532200, China)*

**Abstract** This study investigates the changes in sEMG (surface electromyography) signals and microcirculation function of lower limb muscles in male amateur skiers majoring in physical education before and after an 8-week skiing training intervention, and to explore the causes of sEMG changes from the perspective of microcirculation function. This study aims to provide a new research perspective and theoretical support for revealing the effects of skiing training on human muscle function. A total of 38 eligible subjects were recruited and randomly divided into a control group and an experimental group using a stratified block randomization method. The experimental group underwent an 8-week alpine skiing training program, with 5 sessions per week and 90 min per session. The 8-week training was divided into three phases: basic skiing training (2 weeks), special ability development training (3 weeks), and special ability enhancement training (3 weeks). During the basic skill training phase, the maximum skiing slope was 11° and the single-run distance was 0.15 km; during the special ability development training phase, the maximum slope was 22° and the single-run distance was 0.9 km; during the special ability enhancement training phase, the maximum slope was 27° and the single-run distance was 0.7 km. The control group maintained their regular daily routines without systematic exercise training. Before and after the experiment, the following indicators were measured for all subjects: muscle strength of the right lower limb, vertical jump height, as well as iEMG (integral electromyography), RMS (root mean square), MF (median frequency), MPF (mean power frequency) of the rectus femoris and lateral gastrocnemius during unweighted squat, and MR (microvascular reactivity), TcPO<sub>2</sub> (transcutaneous oxygen partial pressure), SmO<sub>2</sub> (muscle oxygen saturation) of the corresponding muscles. This study found that: (1) after the experiment, the muscle strength of the right lower limb and vertical jump height of the experimental group were significantly higher than those of the control group ( $P < 0.01$ ); (2) after the experiment, the MF and MPF values of the rectus femoris and lateral gastrocnemius in the experimental group were significantly higher than those in the control group ( $P < 0.05$ ); the iEMG and RMS of the rectus femoris, as well as the iEMG of the lateral gastrocnemius in the experimental group were significantly lower than those in the control group ( $P < 0.05$ ); the RMS of the lateral gastrocnemius in the experimental group was significantly lower than that in the control group ( $P < 0.01$ ); (3) after the experiment, the MR and TcPO<sub>2</sub> of the rectus femoris, as well as the MR, TcPO<sub>2</sub> and SmO<sub>2</sub> of the lateral gastrocnemius in the experimental group were significantly higher than those in the control group ( $P < 0.05$ ); the SmO<sub>2</sub> of the rectus femoris in the experimental group was significantly higher than that in the control group ( $P < 0.01$ ). 8-week skiing training can simultaneously improve the sEMG activity and microcirculation function of lower limb skeletal muscles in male amateur skiers majoring in physical education. However, further research is required to clarify whether a causal relationship exists between these two indicators. In summary, this study suggests that skiing training is an effective approach to enhance the function of lower limb skeletal muscles.

**Keywords** 8-week; skiing training; lower limb muscles; surface electromyography signal; microcirculatory function

骨骼肌作为运动时的主要动力器官, 与人体运动能力、运动损伤预防及健康水平等均有着密切关系。滑雪运动作为一种在不稳定界面和变负荷条件下进行的周期性运动, 其特殊的下肢肌肉收缩方式(尤其是离心收缩)对提高骨骼肌功能有着重要作

用。在滑雪过程中, 肌肉的离心收缩方式对肌肉的刺激更深, 能显著促进蛋白质合成、肌肉肥大, 提高肌肉力量和增强功率输出, 并优化能量消耗。有研究指出, 相比于传统的抗阻训练, 离心训练能对高山滑雪男子运动员肌肉产生更大的生理刺激, 使上下肢

肌肉力量和平衡能力产生更加显著的变化<sup>[1]</sup>。邹强等<sup>[2]</sup>得出相同结论,离心训练对高山滑雪运动员肌肉力量有显著的提高作用,并且能有效预防运动损伤。此外,在滑雪过程中长时间中高强度的运动能刺激骨骼肌线粒体生物合成,优化氧化酶活性,提升骨骼肌能量供应并提高能量利用效率,进而提高肌肉的耐疲劳能力<sup>[3]</sup>。因此,长期进行滑雪训练能从多个方面对下肢骨骼肌功能产生积极影响。

目前,对于骨骼肌功能的评价,主要通过肌力、纵跳高度等指标进行评定。虽然这些指标能直观地反映出骨骼肌功能的变化,但不能反映出运动中肌肉内氧的代谢、骨骼肌的收缩活动及疲劳状态等。此外,肌力、纵跳高度等指标也不能反映出神经系统对肌细胞的调控作用。因此,仅观察肌力、纵跳高度的变化不能深入揭示运动对肌肉功能的内在影响,而检测特定运动动作模式下肌肉表面肌电(surface electromyography, sEMG)信号的变化能较好地解决这些问题。sEMG作为一种非侵入性生物信号检测技术,其通过时域和频域参数分析肌肉收缩时伴随的电信号,可定量反映肌肉激活水平、疲劳状态等,其凭借对肌肉活动电生理信号的高敏感性与无创检测特性,已成为评价骨骼肌功能的常用手段<sup>[4]</sup>。有研究指出,在无氧运动早期,相较于肌氧饱和度和(muscle oxygen saturation, SmO<sub>2</sub>), sEMG时频指标能更灵敏反映肌肉的疲劳状态<sup>[5]</sup>。此外,由于肌细胞的电信号受神经系统的调控,因此sEMG能在一定程度上反映神经系统对肌细胞的调控作用。因此,在特定运动动作模式下sEMG的变化能够动态揭示运动对骨骼肌功能的内在影响。在sEMG的基础上,将肌力、纵跳高度等指标和sEMG相结合能从多个维度评价骨骼肌功能的变化。但本研究通过对相关文献进行梳理,发现目前尚未有研究从该角度探讨长期滑雪训练对下肢骨骼肌的影响。

此外,对于滑雪训练改善下肢肌肉sEMG的作用机制,肌细胞内外微环境稳态的重塑可能是关键所在<sup>[6]</sup>。在这个过程中,微循环功能的变化起到了重要作用。微循环作为组织细胞与血液进行物质交换的主要场所,其功能状态直接影响运动肌群的氧供、代谢废物清除及能量代谢效率。因此,微循环功能状态是影响肌细胞内外微环境动态的关键因素,与sEMG的变化有密切关系。有研究指出,在血流限制抗阻训练过程中,sEMG信号的增强与SmO<sub>2</sub>呈负相

关,SmO<sub>2</sub>越低,工作肌局部缺氧越明显,需要激活更多运动单位以维持运动<sup>[7]</sup>。由此可见,微循环功能可能与sEMG存在关系,但目前这一假设也缺乏相应的研究证据。基于此,本研究通过对体育专业业余滑雪运动员进行8周的滑雪训练干预,探讨训练前后受试者下肢肌力、纵跳高度和sEMG的变化,并从微循环功能角度探讨sEMG变化的原因,为滑雪训练增强人体肌肉功能提供新的研究视角和理论支撑。

## 1 研究对象与方法

### 1.1 研究对象

本研究于2024年11月,通过湖北民族大学运动科学中心公众号、校园海报及校园现场报名方式招募受试者。受试者初步纳入标准如下:(1) 体育专业男性大学生(规避激素、月经周期等对测试结果的影响),有一定的滑雪经历和技术基础;(2) 身心健康,无各种身体和心理疾病;(3) 现阶段未服用各类药物以及接受治疗(尤其是影响血管舒缩的药物和治疗方式);(4) 能有效完成本研究所需要的基本运动技能或动作。(5) 在了解本次试验流程、目的、测试指标以及研究成果的应用等情况下仍同意参加。经过初筛后,入选的受试者前往湖北民族大学附属医院(三级甲等)进行心电图、心血管功能、运动损伤等检查。依据检查结果排除不符合标准的受试者,受试者排除标准如下:(1) 患有各类皮肤病;(2) 目前有严重运动损伤或近三年内有手术史;(3) 由于心电图异常、肺功能障碍等不能进行高强度运动。

通过G\*Power3.1进行样本量评估,采用单因素重复测量,组间-组内交互设计,效应量 $f$ 设为0.25,  $\alpha$ 错误概率为0.05, 检验效能 $1-\beta$ 为0.80, 样本量至少为34人。为避免运动损伤、运动量不达标等因素造成样本量流失,故将样本量增加10%,最终招募38名符合标准的受试者。为了使干预效果具有可比性,本研究采用分层区组随机化法对受试者进行分组。首先根据骨骼肌含量的基线值将受试者进行小组分配(每小组2人),并确保每小组组内受试者的骨骼肌含量基线值接近。其次,分别将每小组受试者随机分为对照组、滑雪训练干预组(以下简称试验组),即每小组受试者分别随机分配到对照组或试验组,最后每组各纳入19人。所有受试者均被告知试验流程,并签署了知情同意书,本研究通过了湖北民族大学伦理委员会的审查(2024年102号)。受试者详细信息

表1 两组受试者基本信息

Table 1 Basic information of subjects in both groups

组别 Group	人数 Number of subjects	年龄/岁 Age /years	身高/cm Height /cm	体质量/kg Body mass /kg	训练年限 Training years	骨骼肌含量/kg Skeletal muscle mass /kg
Experimental group	19	22.2±0.63	177.70±4.56	73.91±2.94	5.9±0.32	37.51±2.73
Control group	19	22.5±0.53	175.19±4.15	74.03±3.72	6.2±0.92	36.37±3.14
<i>t</i>		-1.152	1.376	-0.337	-0.896	0.975
<i>P</i>		0.264	0.219	0.167	0.394	0.326

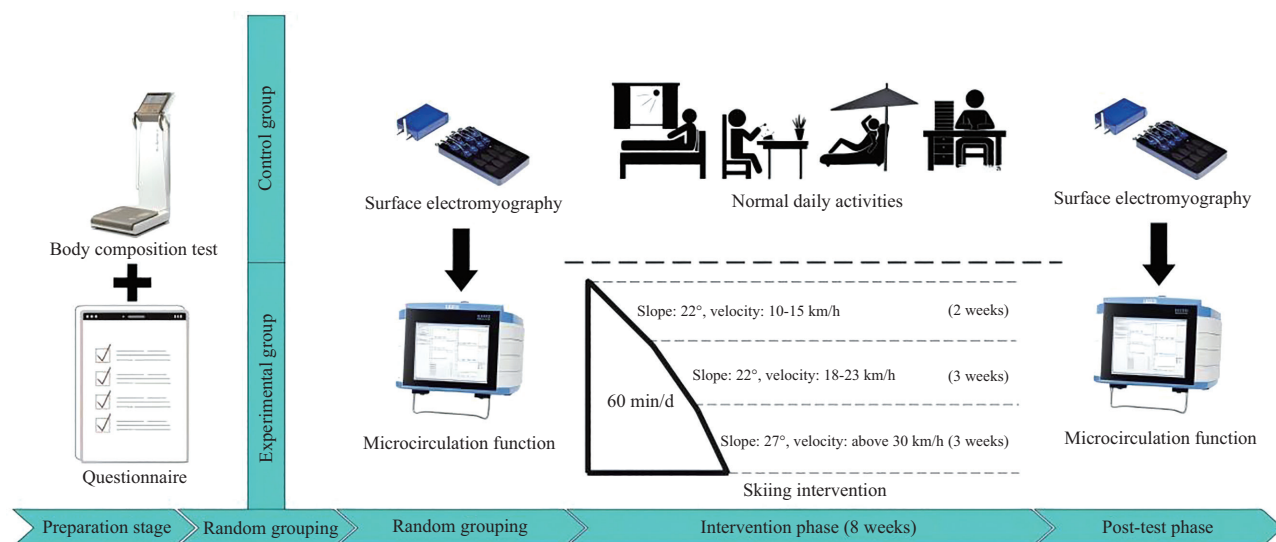


图1 本研究试验流程图

Fig.1 Flowchart of the experimental procedure in this study

见表1。

## 1.2 研究方法

**1.2.1 运动方案** 试验组进行5次/周, 90 min/次的单板越野滑雪运动训练, 为期8周, 训练时间段为10:00至11:30, 训练地点为恩施巴东绿葱坡滑雪场, 海拔为1 800 m, 温度在-2 °C~5 °C, 湿度在65%~75%。运动前先进行20 min的准备活动, 采用Polar Team Pro心率监测仪记录, 控制心率在50%~70%最大心率区间。训练结束后实施10 min拉伸放松。越野滑雪训练时长为60 min, 心率保持在最大心率的75%~85%。基于运动训练的阶段性和周期性原则<sup>[8]</sup>以及结合场地实际条件, 本研究共分三个阶段。第一阶段为基础技能训练(2周), 训练最大坡度为11°, 单次运动距离0.15 km, 目标滑行速度区间10~15 km/h。第二阶段为专项能力发展训练(3周), 训练最大坡度为22°, 单次运动距离0.9 km, 目标滑行速度区间18~23 km/h。第三阶段为专项能力强化训练(3周),

训练最大坡度为27°, 单次运动距离0.7 km, 目标滑行速度大于30 km/h。每次训练时, 正式训练时间维持在60 min左右, 运动强度在最大心率的70%~85%。

另外, 为确保研究变量控制的严谨性, 对照组在为期8周的干预周期内维持常规日常生活状态。全程规避酒精摄入, 避免出现睡眠剥夺情况, 并禁止参与任何形式的系统性体育训练(假期), 以最大限度降低可控混杂因素对研究结果的干扰(图1)。

**1.2.2 测试指标** 本研究分别在运动前和8周后对两组受试者如下指标进行采集。

下肢肌力和纵跳高度。右下肢大腿肌肉力量使用Micro FET3便携式数字化肌力与脊柱关节活动度测量仪(HOGGAN Scientific公司)进行测试。受试者取仰卧位, 双手自然垂放于身体两侧, 掌心朝上; 受试者非测试侧下肢屈膝, 足跟贴靠于测试侧膝关节处以保持身体稳定。测试者站位靠近受试者肢体近端, 一侧手臂穿过测试侧下肢腘窝, 手掌托持并固定屈

膝状态下的膝关节部位;另一侧手持测量仪,放于被测试者胫骨远端。测试时,受试者持续发力4 s,测试者同步施加反向抵抗力量以维持测量仪稳定,并读取测试数据。为确保测试结果的可靠性与准确性,本测试重复进行3次,每次测试结束后给予受试者1 min的休息时间,最终以3次测试数据的平均值作为该指标的测试值。

使用EZEjump无线纵跳测试系统(澳大利亚)采集受试者下蹲跳的纵跳高度。准备阶段,受试者呈双手叉腰姿势,双脚与肩同宽、脚尖微微外展,听到口令后迅速下蹲至大腿平行地面后迅速向上跳起。为规避膝角差异对跳跃高度的影响,整个测试过程由两名试验人员分别于矢状面与冠状面进行动作规范性评估,将受试者膝角稳定控制在90°左右。

sEMG。使用Myon-Aktos-Waterproof无线表面肌电仪(意大利)采集和分析受试者无负重深蹲过程中右下肢的肌电信号。应用Mate Book X Pro(华为终端有限公司)笔记本电脑及配备的MX Brio[罗技(中国)科技有限公司]摄像头作为拍摄工具,辅助记录无负重深蹲过程中右下肢股直肌(髌前上棘与髌骨上缘连线中点)、腓肠外肌(小腿后外侧最大周长处的肌腹内侧)的肌电信号。将作用电极固定在测试部位,参考电极紧邻固定,两电极间距为20 mm。贴电极片前刮去受试者腿部毛发,并用酒精清洁皮肤。准备阶段,受试者正常站立,双脚与肩同宽,双臂自然下垂于身体两侧,手肘微微弯曲,手掌自然放松,手指微微弯曲,指尖向下;测试时以髋关节为轴,均匀、缓慢地向后下方下蹲,在最低位置停留0.5~1.0 s后迅速将身体向上推起恢复到起始姿势。获取原始肌电信号后使用EMG&Motion Tools程序处理数据。本研究采用20 Hz的高通滤波器和400 Hz的低通滤波器,截取受试者完成无负重深蹲动作流程的完整肌电数据。选择频域中位频率(median frequency, MF)、平均功率频率(mean power frequency, MPF)、积分肌电(integrated electromyography, iEMG)、均方根振幅(root mean square, RMS)作为评价指标。

微循环功能。从微血管反应性(microvascular reactivity, MR)、经皮氧分压(transcutaneous oxygen partial pressure, TcPO<sub>2</sub>)、SmO<sub>2</sub>三方面对受试者微循环功能进行测试<sup>[9-10]</sup>。该指标体系从微血管舒张功能和血流氧合状态等角度评价受试者微循环功能,由本团队近年来所提出,并在不同人群的研究中进行应用。使用PF6000双通道激光多普勒血流

和经皮氧分压检测仪(Perimed, 瑞典)测量受试者右下肢与sEMG相同部位的表面皮肤在基础状态及局部加热状态(44 °C)下的微血管血流灌注量(micro-circulatory blood perfusion, MBP)、血细胞移动速度(concentration of moving blood cell, CMBC)、血细胞浓度(average velocity of blood cell, AVBC),其中MBP=(AVBC×CMBC)/100,单位为PU(perfusion unit)。前3 min记录相关指标的基线值,然后将探头加热至44 °C并维持15 min左右,待数据曲线趋于稳定期时,记录加热刺激后的值,并使用MBP的加热后值表示MR<sup>[9-10]</sup>。MR是评价微循环功能的常用方式,其中局部热刺激法(44 °C)测量结果的重复性以及受试者的依从性最好<sup>[11]</sup>。

TcPO<sub>2</sub>的值是局部皮肤加热到44 °C时从毛细血管弥散出来的氧气量。局部皮肤组织加热到44 °C会促使组织中的毛细血管达到最大的扩张状态,局部血流量显著增加,O<sub>2</sub>透过毛细血管壁弥散到皮下组织而被监测探头感知、测定,然后将数据转化成TcPO<sub>2</sub><sup>[12]</sup>。使用美国Moxy近红外光无线肌氧测试系统测量受试者下肢股直肌、腓肠外肌的SmO<sub>2</sub>。SmO<sub>2</sub>能在TcPO<sub>2</sub>的基础上进一步评价微血管向肌肉细胞输送氧气的能力<sup>[7-8]</sup>。上述指标在湖北民族大学运动科学研究中心由专业的试验人员完成测试。

### 1.3 试验质量控制

(1) 运动强度监控:采用Watch GT5 Pro(华为终端有限公司)记录受试者运动时坡度及速度,Polar Team Pro心率监测仪记录受试者运动时心率。(2) 运动指导及指标测试:运动干预全程由固定教练团队统一指导,以排除不同指导者带来的操作差异;试验前后的各项指标测试均由同一批经过严格培训的课题组成员完成(试验前后同一指标由相同的人员完成测试),最大限度减少人为测量误差,保障数据的准确性与可靠性。此外,在正式开展运动干预及指标测试前,研究团队已针对干预方案的执行细节、测试设备的规范操作及数据记录标准等内容对试验人员进行系统培训,以进一步提升干预实施与数据采集的标准化水平。(3) 药物控制:禁止两组受试者在试验期间服用任何抗氧化剂、促进代谢与提高运动能力的营养补充剂以及促进血管舒缩的药物等,如需服用其他药物需与课题组进行沟通说明。(4) 受试者脱落标准:在整个运动期间未完成90%以上的运动训练量或干预期间有连续4次及以上未参与运动,视为

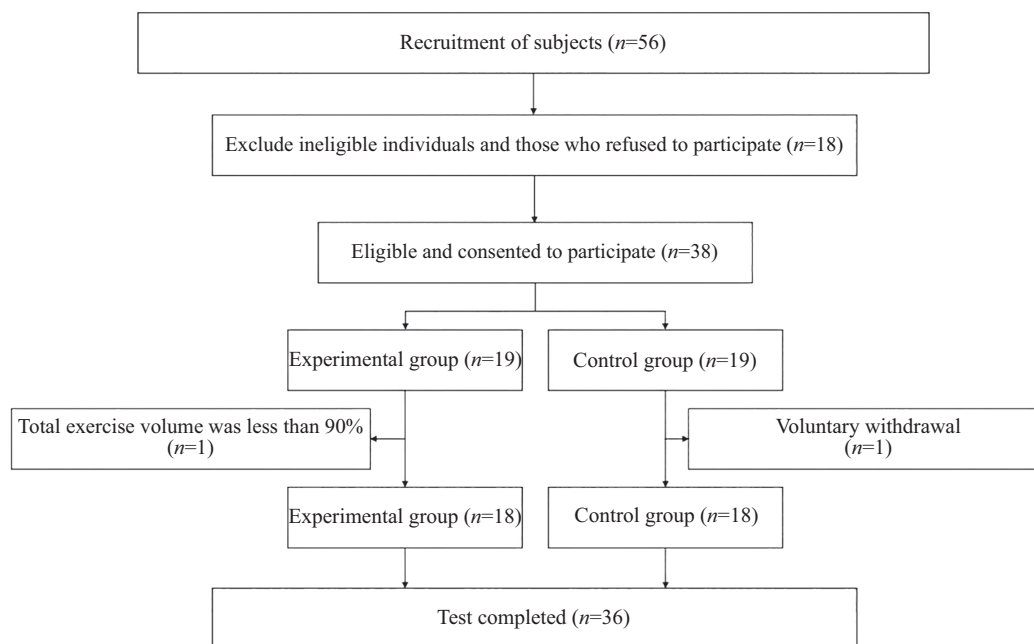


图2 CONSORT实验流程图

Fig.2 CONSORT flow diagram of the experiment

无效样本(图2)。

#### 1.4 数据统计

采用 SPSS 27.0和Excel软件完成相关数据统计与分析。应用S-W法检验数据正态分布, Levene's法检验数据方差齐性。若数据满足正态分布检验及球形度假设, 则采用重复测量方差分析。若数据不满足正态性则对数据进行对数转换; 变换后若数据满足前提假设, 则继续采用重复测量方差分析。若数据变换无效, 则改用Friedman检验进行组内差异分析。球形度假设采用Mauchly球形度检验; 不满足球形度假设时, 使用Greenhouse-Geisser方法进行校正。采用独立样本 $t$ 检验对2组受试者的基本信息进行差异比较; 采用2(时间: 试验前、试验后) $\times$ 2(组别: 试验组、对照组)重复测量方差分析法比较两组受试者sEMG以及微循环功能指标。若差异具有统计学意义, 采用最小显著差异法(least-significant different, LSD)标准进行事后两两比较。数据结果以平均值 $\pm$ 标准差( $\bar{x}\pm s$ )形式表示, 显著性水平为 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 。

## 2 研究结果

### 2.1 两组受试者试验前后常规指标的比较

由图3可知, 右下肢肌力( $F=8.917$ ,  $P=0.009$ )、纵跳高度( $F=16.059$ ,  $P=0.001$ )具有组别与时间的显著差异。同组内, 试验后试验组右下肢肌力、纵跳

高度显著高于试验前( $P<0.01$ ), 组间比较, 试验后试验组的右下肢肌力高于对照组( $P<0.01$ )。

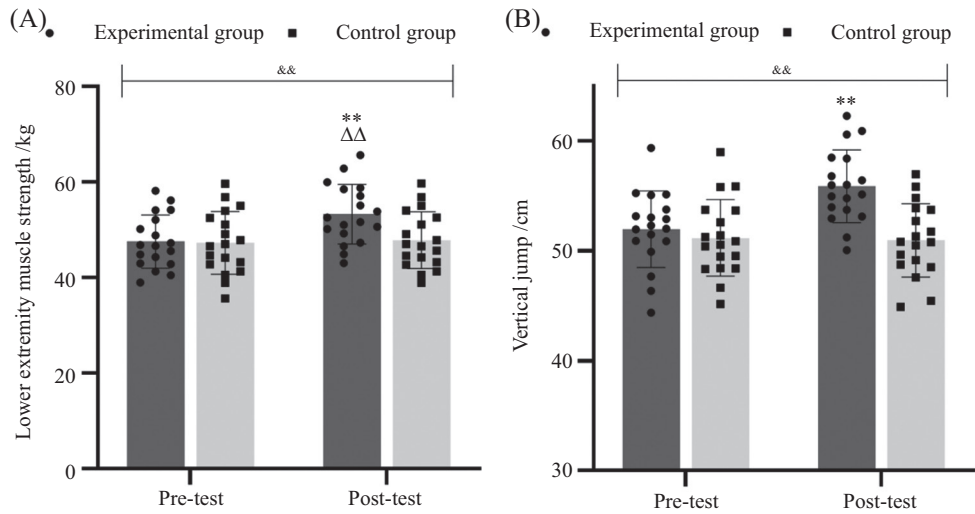
### 2.2 两组受试者试验前后sEMG的比较

2.2.1 两组受试者试验前后股直肌sEMG的比较 由图4可知, 股直肌的MF( $F=5.442$ ,  $P=0.030$ )、MPF( $F=5.598$ ,  $P=0.028$ )、RMS( $F=4.420$ ,  $P=0.048$ )、iEMG( $F=4.593$ ,  $P=0.045$ )具有组别与时间的显著差异。同组内, 试验后试验组的RMS高于运动前( $P<0.05$ ), MF、MPF、iEMG高于运动前( $P<0.01$ ); 组间比较, 试验后试验组的MF、MPF、RMS、iEMG高于对照组( $P<0.05$ )。

2.2.2 两组受试者试验前后腓肠外肌sEMG的比较 由图5可知, 腓肠外肌的MF( $F=6.376$ ,  $P=0.023$ )、MPF( $F=7.923$ ,  $P=0.011$ )、RMS( $F=8.274$ ,  $P=0.009$ )、iEMG( $F=4.682$ ,  $P=0.043$ )具有组别与时间的显著差异。同组内, 试验后试验组的MF高于运动前( $P<0.05$ ), MPF、RMS、iEMG高于运动前( $P<0.01$ ); 组间比较, 试验后试验组的MF、MPF、iEMG高于对照组( $P<0.05$ ), RMS高于对照组( $P<0.01$ )。

### 2.3 两组受试者试验前后微循环功能的比较

2.3.1 两组受试者试验前后股直肌微循环功能的比较 由图6可知, 股直肌的MBP加热值( $F=4.985$ ,  $P=0.037$ )、CMBC加热值( $F=7.994$ ,  $P=0.010$ )、AVBC加热值( $F=7.527$ ,  $P=0.008$ )、TcPO<sub>2</sub>( $F=5.126$ ,

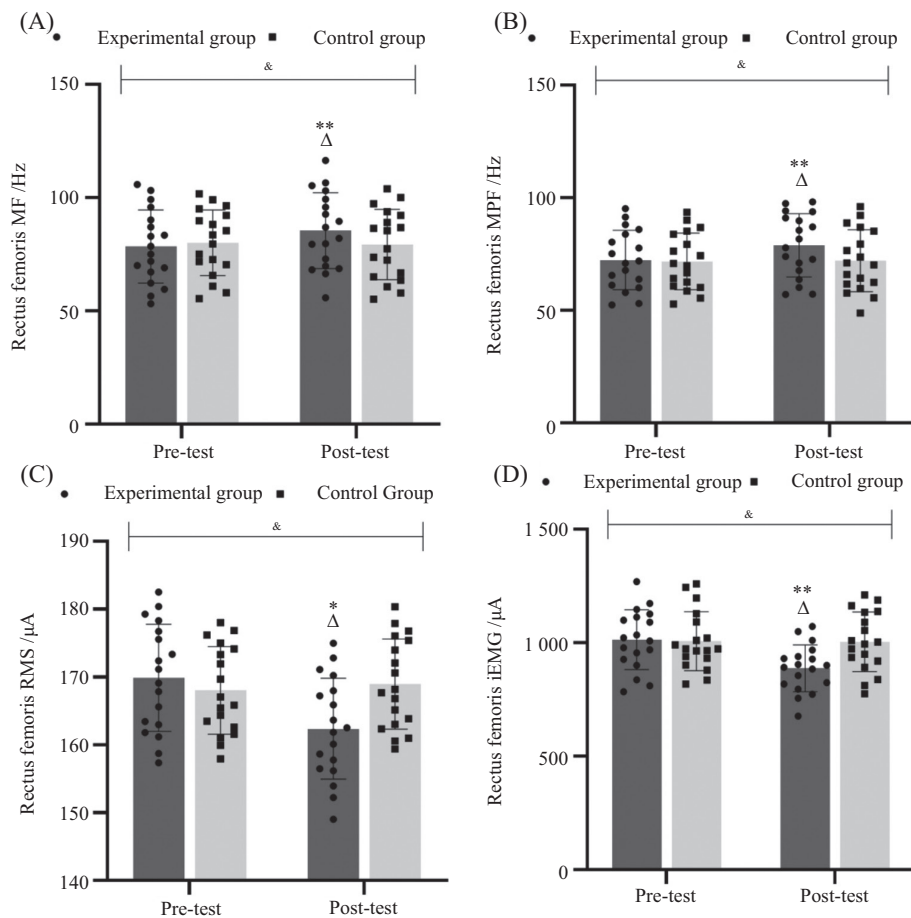


A: 大腿肌肉力量的对比; B: 纵跳高度的对比。 \*\* $P < 0.01$ , 与运动前比较;  $\Delta\Delta P < 0.01$ , 与对照组比较;  $\&\& P < 0.01$ 。

A: comparison of thigh muscle strength; B: comparison of vertical jump height. \*\* $P < 0.01$  compared with the pre-test group;  $\Delta\Delta P < 0.01$  compared with the control group;  $\&\& P < 0.01$ .

图3 常规指标的比较

Fig.3 Comparison of conventional indicators

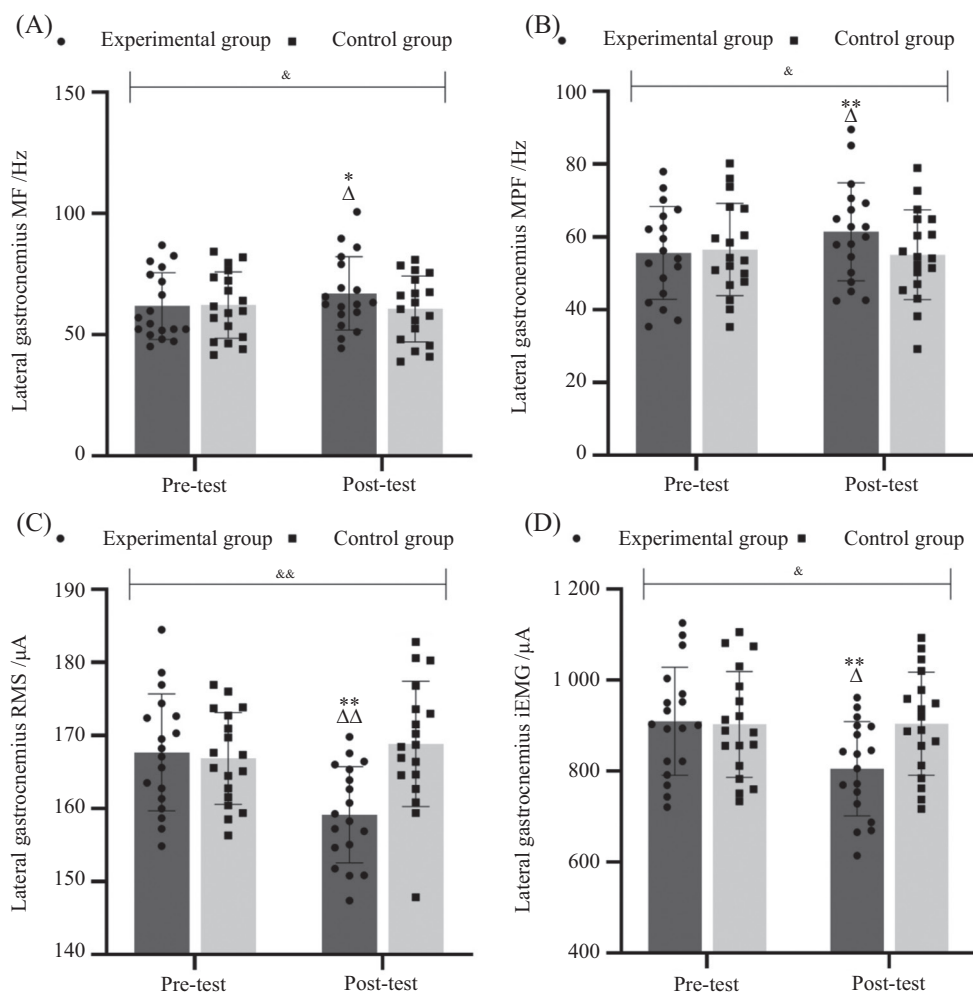


A: 股直肌MF的对比; B: 股直肌MPF的对比; C: 股直肌RMS的对比; D: 股直肌iEMG的对比。 \* $P < 0.05$ , \*\* $P < 0.01$ , 与运动前比较;  $\Delta P < 0.05$ , 与对照组比较;  $\& P < 0.05$ 。

A: comparison of rectus femoris MF; B: comparison of rectus femoris MPF; C: comparison of rectus femoris RMS; D: comparison of rectus femoris iEMG. \* $P < 0.05$ , \*\* $P < 0.01$  compared with the pre-test group;  $\Delta P < 0.05$  compared with the control group;  $\& P < 0.05$ .

图4 股直肌sEMG的比较

Fig.4 Comparison of rectus femoris sEMG



A: 腓肠外肌MF的对比; B: 腓肠外肌MPF的对比; C: 腓肠外肌RMS的对比; D: 腓肠外肌iEMG的对比。\* $P<0.05$ , \*\* $P<0.01$ , 与运动前比较;  $\Delta P<0.05$ ,  $\Delta\Delta P<0.01$ , 与对照组比较;  $\& P<0.05$ ,  $\&\& P<0.01$ 。

A: comparison of lateral gastrocnemius MF; B: comparison of lateral gastrocnemius MPF; C: comparison of lateral gastrocnemius RMS; D: comparison of lateral gastrocnemius iEMG. \* $P<0.05$ , \*\* $P<0.01$  compared with the pre-test group;  $\Delta P<0.05$ ,  $\Delta\Delta P<0.01$  compared with the control group;  $\& P<0.05$ ,  $\&\& P<0.01$ 。

图5 腓肠外肌sEMG的比较

Fig.5 Comparison of lateral gastrocnemius sEMG

$P=0.035$ )、 $\text{SmO}_2$  ( $F=4.511$ ,  $P=0.046$ ) 具有组别与时间的显著差异。同组内, 试验后试验组 MBP、CMBC、AVBC 的加热值以及  $\text{TcPO}_2$ 、 $\text{SmO}_2$  均高于运动前 ( $P<0.01$ ); 组间比较, 试验后试验组的  $\text{SmO}_2$  高于对照组 ( $P<0.01$ ), 试验组的 MBP、CMBC、AVBC 加热值以及  $\text{TcPO}_2$  均高于对照组 ( $P<0.05$ )。股直肌的 MBP、CMBC、AVBC 基础值不具有显著性差异 ( $P>0.05$ )。

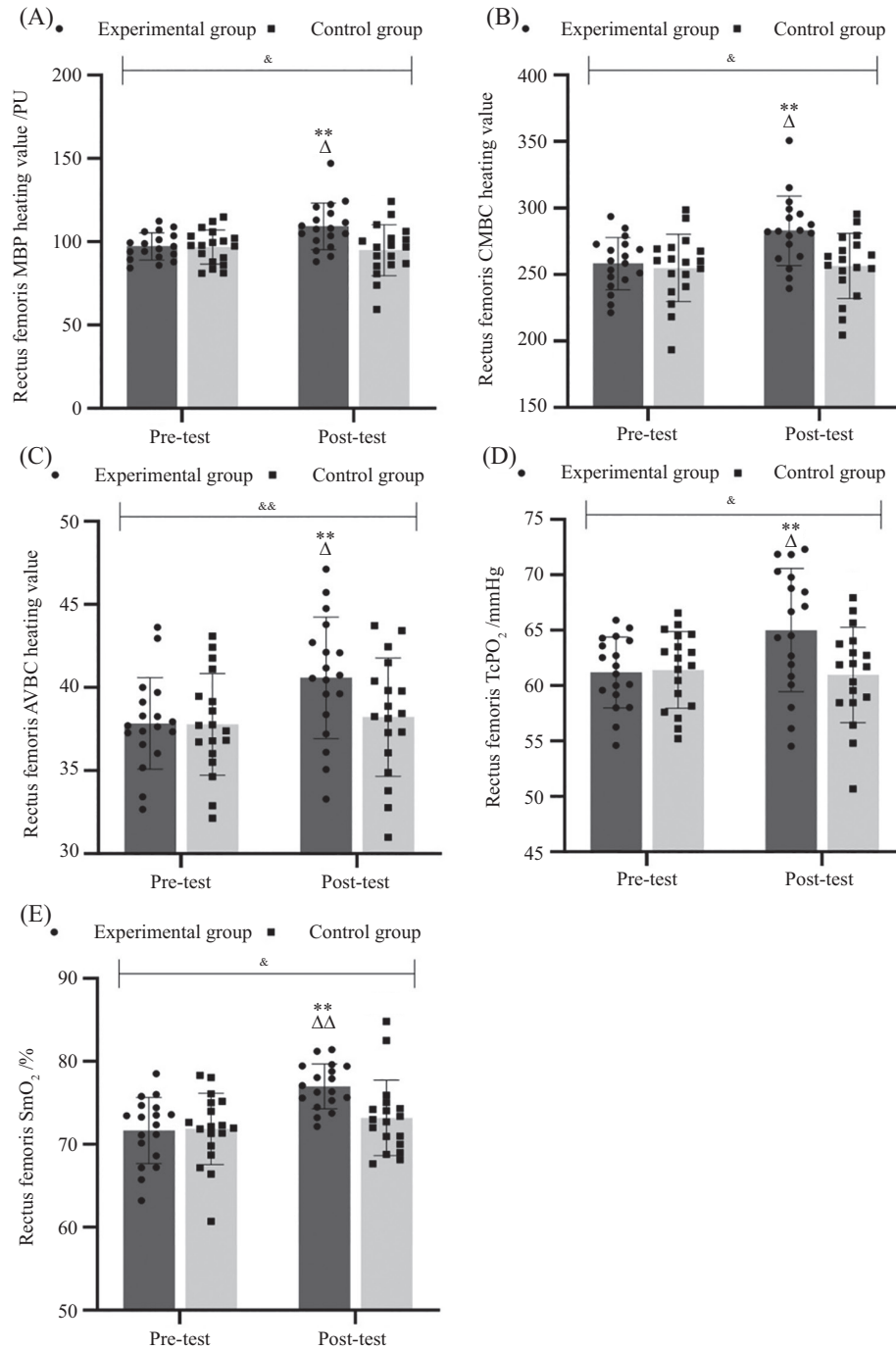
2.3.2 两组受试者试验前后腓肠外肌微循环功能的比较 由图7可知, 腓肠外肌的 MBP 加热值 ( $F=5.425$ ,  $P=0.030$ )、CMBC 加热值 ( $F=8.992$ ,  $P=0.007$ )、AVBC 加热值 ( $F=4.408$ ,  $P=0.049$ )、 $\text{TcPO}_2$  ( $F=5.028$ ,  $P=0.036$ )、 $\text{SmO}_2$  ( $F=5.848$ ,

$P=0.025$ ) 具有组别与时间的显著差异。同组内, 试验后试验组 MBP、CMBC 的加热值以及  $\text{TcPO}_2$ 、 $\text{SmO}_2$  均高于运动前 ( $P<0.01$ ), 试验组 AVBC 的加热值高于运动前 ( $P<0.05$ ); 组间比较, 试验后试验组 CMBC 的加热值高于对照组 ( $P<0.01$ ), 试验组 MBP、AVBC 的加热值以及  $\text{TcPO}_2$ 、 $\text{SmO}_2$  均高于对照组 ( $P<0.05$ )。腓肠外肌的 MBP、CMBC、AVBC 基础值不具有显著性差异 ( $P>0.05$ )。

### 3 讨论与分析

#### 3.1 滑雪训练对受试者sEMG干预效果的分析

sEMG 是骨骼肌活动时产生的生物电信号, 其可以反映肌肉的电生理特征、疲劳程度和神经传导



A: 股直肌MBP加热值的对比; B: 股直肌CMBC加热值的对比; C: 股直肌AVBC加热值的对比; D: 股直肌TcPO<sub>2</sub>的对比; E: 股直肌SmO<sub>2</sub>的对比。  
\*\* $P < 0.01$ , 与运动前比较;  $\Delta P < 0.05$ ,  $\Delta\Delta P < 0.01$ , 与对照组比较;  $\& P < 0.05$ ,  $\&\& P < 0.01$ 。

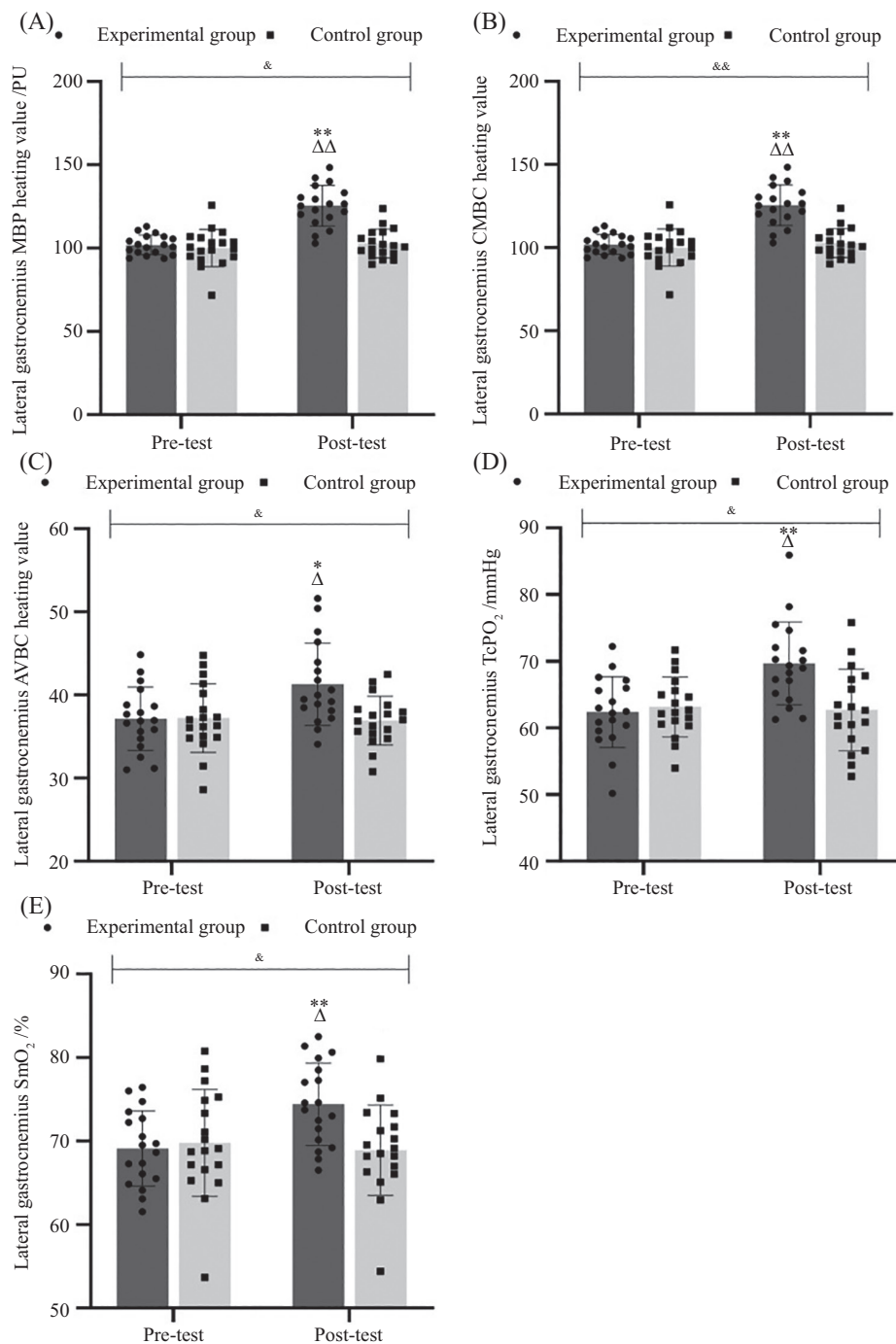
A: comparison of rectus femoris MBP heating value; B: comparison of rectus femoris CMBC heating value; C: comparison of rectus femoris AVBC heating value; D: comparison of rectus femoris TcPO<sub>2</sub>; E: comparison of rectus femoris SmO<sub>2</sub>. \*\* $P < 0.01$  compared with the pre-test group;  $\Delta P < 0.05$ ,  $\Delta\Delta P < 0.01$  compared with the control group;  $\& P < 0.05$ ,  $\&\& P < 0.01$ 。

图6 股直肌微循环功能的比较

Fig.6 Comparison of microcirculatory function in rectus femoris

速度。sEMG信号源于大脑运动皮层发出的运动指令,通过 $\alpha$ 运动神经元传递,最终在神经肌肉接头处引发肌纤维产生动作电位<sup>[13]</sup>。sEMG通过贴附于皮肤表面的电极可以采集到肌肉的微弱电信号,并经

过放大、滤波处理,将其转化为时域和频域指标<sup>[13]</sup>。研究表明,iEMG能够反映某一时间段内肌肉活动的总电荷量,体现出肌肉收缩时运动单位激活的数量、放电频率以及持续时间的综合效应,而MF和MPF



A: 腓肠外肌MBP加热值的对比; B: 腓肠外肌CMBC加热值的对比; C: 腓肠外肌AVBC加热值的对比; 腓肠外肌TcPO<sub>2</sub>的对比; E: 腓肠外肌SmO<sub>2</sub>的对比。\* $P < 0.05$ , \*\* $P < 0.01$ , 与运动前比较;  $\Delta P < 0.05$ ,  $\Delta\Delta P < 0.01$ , 与对照组比较; & $P < 0.05$ , && $P < 0.01$ 。

A: comparison of lateral gastrocnemius MBP heating value; B: comparison of lateral gastrocnemius CMBC heating value; C: comparison of lateral gastrocnemius AVBC heating value; D: comparison of lateral gastrocnemius TcPO<sub>2</sub>; E: comparison of lateral gastrocnemius SmO<sub>2</sub>. \* $P < 0.05$ , \*\* $P < 0.01$  compared with the pre-test group;  $\Delta P < 0.05$ ,  $\Delta\Delta P < 0.01$  compared with the control group; & $P < 0.05$ , && $P < 0.01$ .

图7 腓肠外肌微循环功能的比较

Fig.7 Comparison of microcirculatory function in lateral gastrocnemius

通过肌电信号频谱特征的迁移敏感表征肌肉代谢状态及神经肌肉控制效率<sup>[14]</sup>。此外, RMS可以反映肌运动单元的活性和肌纤维的募集效率, 通过监测RMS值的变化, 可以了解肌肉的激活程度和疲劳情

况。因此, 通过监测特定运动模式、定量负荷状态下sEMG信号的特征性变化, 能够客观量化特定肌肉的激活水平、参与程度、肌肉协调性以及疲劳状态, 从而为评估运动训练效果、优化技术动作、预防运

动损伤以及制定个性化的健康促进与康复方案提供至关客观生理学依据。

对于滑雪运动, sEMG能较好地反映出运动员骨骼肌的生理特性和工作特点。郭峰等<sup>[15]</sup>研究指出, sEMG能够反映出单板U型场地滑雪运动员在夏季陆地模拟训练中, 执行不同空中动作时下肢骨骼肌的工作情况, 能有效验证陆地模型训练的效果。另外, sEMG能较好地反映出我国残奥不同级别残疾人单板滑雪运动员出发阶段的身体不同部位肌肉的运动生物力学特征<sup>[16]</sup>。以上研究揭示, 通过检测sEMG的变化能科学了解运动员的肌肉功能状态。在本研究中, 8周滑雪训练干预后受试者在定量负荷测试中股直肌与腓肠外肌的MF、MPF出现升高, RMS、iEMG出现降低。定量负荷下以MF、MPF为代表频域指标的上升说明骨骼肌在运动过程中保持了较高的频率特性, 预示着慢肌纤维的参与比例增加, 肌肉的有氧代谢能力得到提升, 肌肉收缩的质量和神经驱动效率得到提高, 抗疲劳能力得到增强。以RMS、iEMG为代表时域指标的下降, 表明骨骼肌在完成相同运动负荷时电活动强度与总体神经肌肉激活水平下降, 说明肌纤维的发力更加高效、控制更为精准, 神经肌肉工作的协调性更好, 同时反映骨骼肌的做功经济性提高。综上, 本研究认为8周滑雪训练能显著调节下肢骨骼肌的肌电信号, 增强骨骼肌功能, 表现为增强肌细胞内部代谢能力、抗疲劳能力及神经肌肉工作的协调性等。

骨骼肌生理功能的优化对提高运动员在滑雪过程中的肌肉输出功率和保持输出功率的持久稳定有着重要作用。肌肉输出功率的提升使滑雪运动员在需要快速启动、变向和跳跃的运动中能表现出更强的瞬时爆发力, 提高滑雪过程中的速度, 进而产生更强的速度表现能力。另外, 线粒体生物合成增加、毛细血管密度增大、抗氧化酶活性增强以及底物利用效率提升(如脂肪氧化能力提高、乳酸清除速率加快)等代谢变化特点, 能有效维持滑雪过程中肌肉力量和力量耐力输出的稳定性。在本研究中, 滑雪训练场的海拔为1 800 m, 属于低氧的亚高原环境。在低氧环境下, 运动员在滑雪训练中面临运动缺氧和自然缺氧的双重刺激, 滑雪训练能为机体有氧代谢带来更深的刺激, 使机体产生更深的生理变化, 如血液中的红细胞压积及肌肉中的毛细血管密度显著增大等。这种变化能有效延缓运动性疲劳的发生,

表现为运动员在大强度运动中肌肉中血乳酸浓度更低、运动经济性更高, 延长特定功率的输出时间。此外, 神经肌肉工作协调性的优化能降低滑雪运动员完成特定动作时的能量消耗, 使技术动作更精准、经济, 这在需要重复性高功率输出的周期性项目中尤为关键。综上, 长期滑雪训练对骨骼肌功能的优化作用, 可以使运动员在滑雪过程中具有更稳定的输出功率、更强的疲劳抵抗能力, 并能提高运动经济性, 为提升滑雪运动表现奠定基础。

### 3.2 滑雪训练对受试者微循环功能的干预效果

在本研究中, 运动员经过8周滑雪训练后股直肌与腓肠外肌的MR、TcPO<sub>2</sub>与SmO<sub>2</sub>均显著升高, 表明长期滑雪训练能显著增强下肢微循环功能。基于干预后运动员sEMG和微循环功能的同步性变化及两者的内在关联, 推测微循环功能的增强可能是影响sEMG相关参数变化的重要原因。在运动过程中, 微循环系统是物质能量交换的主要场所, 为肌纤维提供氧气和营养物质, 并带走代谢产物, 其功能水平直接决定了肌细胞有氧代谢的能力及能量供应的稳定性。当微循环功能正常时, 肌肉功能稳定, sEMG信号处于正常状态。但当机体出现微循环功能障碍时, 肌肉功能因能量代谢障碍等出现减弱, 并进入疲劳状态。疲劳状态下肌肉sEMG中iEMG、RMS、MF等参数会发生显著变化, 表明肌肉生物电出现紊乱现象<sup>[17]</sup>。因此, 微循环功能状态是维持肌肉正常电生理活动的基础, 并直接影响sEMG信号。

伴随着微循环功能的增强(如毛细血管数量增多、血流速度加快、血管调节能力增强等), 肌肉组织的氧供水平和营养物质输送效率将提高, 使肌细胞在收缩过程中能够维持较高的有氧代谢比例, 减少乳酸等代谢产物的局部堆积<sup>[18]</sup>。这些变化能为动作电位的稳定产生与传导提供良好的内环境, 保持肌纤维膜电位的稳定性与兴奋-收缩耦联的高效性, 使sEMG具有较为稳定的放电模式以及较高的MPF和MF值。因此, 机体微循环功能和肌肉sEMG信号存在密切关系, 前者能提升肌组织氧合水平与代谢底物供给效率, 提升肌纤维膜稳定性与神经肌肉传导能力, 促进运动单位的募集与放电同步性, 进而调节sEMG信号的电信号特征。

下肢骨骼肌微循环功能的优化对提高滑雪运动员骨骼肌的收缩性能、疲劳抵抗性及代谢适应能力有着重要作用。骨骼肌的能量稳态高度依赖

于持续的氧气、葡萄糖与游离脂肪酸等能量底物供应,同时依赖于乳酸、氢离子及二氧化碳等代谢终产物的有效清除。骨骼肌毛细血管网络密度、血流灌注的均匀性、内皮依赖性血管舒张能力以及微血管-肌细胞界面的物质交换效率等是影响这一过程的关键因素<sup>[19]</sup>。首先,骨骼肌微血管血流量的提升不仅提高了骨骼肌有氧代谢的底物供给效率,为线粒体氧化磷酸化提供了充足原料,还通过加速乳酸等代谢产物的清除,减少了其在细胞内的蓄积。这些变化能抑制细胞内酸中毒的发展及钾离子等在细胞外的异常堆积,保护肌浆网的钙储存与释放功能,避免因无机磷酸盐与钙结合沉淀、氢离子影响钙敏感性等导致的肌浆网钙稳态失衡;同时保障横管系统动作电位传导及电压传感器与肌浆网钙释放通道的正常相互作用,维护兴奋-收缩耦联的完整性,提高骨骼肌在重复或持续活动中维持收缩功能的时间阈值<sup>[20]</sup>。其次,微循环血流动力学的优化能通过过氧化物酶体增殖物激活受体 $\gamma$ 辅激活因子1 $\alpha$ (peroxisome proliferator-activated receptor gamma coactivator 1 alpha, PGC-1 $\alpha$ )调控核呼吸因子1(nuclear respiratory factor 1, NRF1)、线粒体转录因子A(mitochondrial transcription factor A, TFAM)等,促进骨骼肌线粒体生物合成,增加线粒体蛋白酶活性,诱导糖酵解纤维向氧化纤维转换并激活脂质氧化通路,共同推动骨骼肌从糖酵解主导转向有氧氧化主导,从而优化整体能量代谢谱<sup>[21]</sup>。因此,微循环不仅是骨骼肌能量供给的关键通路,更是连接运动负荷与微观细胞代谢适应的关键调控节点,其功能的改善通过多途径、多靶点协同作用,从“血管舒张-血流调控-物质交换-能量代谢”多个环节形成协同效应。这个过程不仅保障了骨骼肌在高强度与长时间运动中的能量供给,也显著提升了其代谢适应与功能储备,是提升骨骼肌功能的重要生理基础与适应性机制。

滑雪训练提高运动员微循环功能的原因主要与滑雪训练的供能特点和训练环境有关。在滑雪过程中,机体主要以中高强度的有氧运动为主,而有氧运动机体是提高微循环功能的常用方式。作者团队前期的多项研究表明,有氧运动能提高不同人群(如久坐人群、肥胖人群、高血压人群、糖尿病人群及老年群体等)微循环功能,提高机体能量代谢水平<sup>[7,9,22-25]</sup>。但上述研究主要以常规有氧运动为主,在供能方式

和肌肉收缩方式等方面与滑雪运动存在差异。滑雪作为一项高强度的复合型有氧运动,其心率水平通常高于一般的稳态有氧运动。这一现象不仅与滑雪运动本身的体能需求有关,还受到滑雪环境中高落差、高速滑行等因素引发的紧张或兴奋情绪的影响,从而激活交感神经系统,导致心率升高。此外,亚高原的低氧训练环境也会对运动员微循环功能产生更深的刺激。相比于正常氧环境,低氧环境训练能对骨骼肌抗氧化能力、骨骼肌微循环功能和线粒体质量控制的调节能力更好<sup>[26]</sup>。因此,低氧环境下,长期滑雪训练可能会对运动员微循环功能产生更好的效果。针对这一问题,建议后续研究比较不同训练环境、运动模式的有氧运动对微循环功能的影响,为增强微循环功能提供更加有效的训练方式。

对于微循环功能变化的内在生物机制主要与调控一氧化氮(nitric oxide, NO)、血管内皮生长因子(vascular endothelial growth factor, VEGF)等血管因子生成有关。运动训练通过热休克蛋白90与内皮型一氧化氮合酶(endothelial nitric oxide synthase, eNOS)的结合、eNOS磷酸化以及激活血管内皮细胞生长因子受体2(vascular endothelial growth factor receptor 2, VEGFR2)、磷脂酰肌醇3激酶(phosphatidylinositol 3-kinase, PI3K)、蛋白激酶B(protein kinase B, Akt),上调eNOS表达,促进NO的生物合成,增强微血管内皮依赖性血管舒张能力和血管反应性<sup>[27-29]</sup>。在这个过程中,滑雪训练过程中产生的层流血流剪切应力是主要的诱发机制。在滑雪过程中,随着心输出量增大和肌肉泵的挤压作用,微血管的血流速度会显著提升,作用于血管壁上的层流血流剪切应力随之增大。层流剪切应力会被内皮细胞中的小窝、原发性纤毛、机械敏感通道Piezo1、连接蛋白、糖萼等机械传感器感应,通过激活相关的通路和蛋白促进eNOS的表达,增强NO的合成能力<sup>[30]</sup>。此外,层流剪切应力还能通过维持线粒体稳态、内皮细胞通透性以及抑制单核细胞黏附、内皮炎症、内皮细胞程序性细胞死亡等对内皮细胞产生保护作用<sup>[30-31]</sup>。血管内皮细胞既是感应细胞,也是效应细胞,其不仅能够感受到血管中炎症物质、激素水平及剪切力等信号的变化,还能根据感应信号分泌多种活性物质(如NO)来调节机体血管功能的稳态<sup>[32]</sup>。

此外,运动诱导的肌肉收缩产生的机械牵拉与

代谢应激会激活多重信号通路,调控血管生成相关分子的表达。当肌肉氧耗超过氧供引发生理性缺氧时,缺氧诱导因子-1 $\alpha$ (hypoxia-inducible factor-1 $\alpha$ , HIF-1 $\alpha$ )的降解受到抑制而被稳定激活,通过调控VEGF等基因的转录,为血管新生提供关键信号。同时,肌肉收缩产生的剪切应力会通过细胞膜上的整合素、机械门控钙通道瞬时受体电位阳离子通道C亚族等机械传感器触发信号传递,激活包括腺苷酸激活蛋白激酶在内的能量感知与应激响应通路。腺苷酸激活蛋白激酶不仅能响应运动中的能量代谢变化,还可与机械应力信号协同,进一步参与VEGF及其下游通路的调控过程<sup>[37]</sup>。在这些信号的共同作用下,VEGF介导的下游血管生成通路被显著激活,驱动毛细血管新生,最终使肌肉组织的毛细血管-肌纤维比率得到提升,从而扩大氧与能量底物的“接触界面”,增强骨骼肌的氧摄取能力与提升代谢底物交换速率。

本研究存在一些局限性。(1)考虑到女性生理期等因素对干预效果的影响,本研究未纳入女性受试者,因此本研究结果是否适用于女性尚有待于进一步研究。(2)本研究仅通过sEMG、微循环等生理指标揭示干预前后受试者肌肉功能的影响,未通过采集肌肉因子、NO、VEGF等指标深入揭示运动对骨骼肌功能的影响。另外,本研究仅能揭示滑雪能同时增强受试者sEMG和微循环功能,但无法证明二者存在因果关系。针对上述问题,本团队将在后续的研究中纳入女性受试者,并通过采集肌肉因子、NO、VEGF等深入揭示运动对骨骼肌功能的影响,并探讨sEMG和微循环功能之间的因果关系,如通过促进和抑制一氧化氮合酶的表达来观察sEMG的变化。

#### 4 小结与展望

8周滑雪训练能同时增强体育专业男子业余滑雪运动员下肢骨骼肌sEMG和微循环功能,但两者之间是否存在因果关系还需进一步研究明确。综上,本研究认为滑雪训练是提高下肢骨骼肌功能的有效方式。

为了进一步深入揭示滑雪训练对下肢骨骼肌功能的影响,后续研究应重点以女性受试者运动员为研究对象,并检测与骨骼肌功能相关的肌肉因子、血管因子、激素水平的变化。此外,还可以通过延

长运动时间(大于8周),探讨滑雪训练和骨骼肌功能的“时间-剂量”效应关系。

#### 参考文献 (References)

- [1] 邹强. 离心训练对高山滑雪男子运动员肌肉力量和平衡能力的影响研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨体育学院, 2024.
- [2] 邹强, 房英杰. 浅谈离心训练对高山滑雪运动员肌肉力量的影响[C]//中国班迪协会, 澳门体能协会, 广东省体能协会. 第八届中国体能训练科学大会论文集. 哈尔滨体育学院(ZOU Q, FANG Y J. A brief discussion on the effect of eccentric training on muscle strength in alpine skiers [C]//Chinese Bandy Association, Macau Sports Science Association, Guangdong Sports Science Association. Proceedings of the 8th National Conference on Scientific Research in Physical Fitness Training, Harbin Sport University), 2023: 1147-51.
- [3] ØRTENBLAD N, NIELSEN J, BOUSHEL R, et al. The muscle fiber profiles, mitochondrial content, and enzyme activities of the exceptionally well-trained arm and leg muscles of elite cross-country skiers [J]. *Front Physiol*, 2018, 9: 1031-41.
- [4] CAMPANINI I, DISSELHORST-KLUG C, RYMER W Z, et al. Surface EMG in clinical assessment and neurorehabilitation: barriers limiting its use [J]. *Front Neurol*, 2020, 11: 934-55.
- [5] 孙夏林. SmO<sub>2</sub>与sEMG时频参数监测有氧和无氧运动中肌肉疲劳的差异比较研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2024.
- [6] ENOKA R M, DUCHATEAU J. Muscle fatigue: what, why and how it influences muscle function [J]. *J Physiol*, 2008, 586(1): 11-23.
- [7] 潘颖, 赵彦, 马晓媛, 等. 血流限制伴小强度抗阻运动对低体重女性骨骼肌微循环、神经肌肉激活及主观疲劳的影响[J]. *中国运动医学杂志*(PAN Y, ZHAO Y, MA X H, et al. Effects of low-intensity resistance training with blood flow restriction on skeletal muscle microcirculation, neuromuscular activation and subjective fatigue in underweight females [J]. *Chinese Journal of Sports Medicine*), 2019, 38(8): 677-84.
- [8] 田麦久. 运动训练学(第二版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2017.
- [9] 彭永, 胡江平, 朱欢. 低负荷血流限制和高强度抗阻运动对男性运动青年大腿微循环功能的影响[J]. *中国组织工程研究*(PENG Y, HU J P, ZHU H. Effects of low-load blood flow restriction and high-intensity resistance exercise on thigh microcirculation function in young male athletes [J]. *Chinese Journal of Tissue Engineering Research*), 2025, 29(2): 393-401.
- [10] 彭永, 朱欢, 刘尧峰, 等. 24周太极拳结合弹力带抗阻运动对2型糖尿病患者足背微循环功能的影响[J]. *首都体育学院学报*(PENG Y, ZHU H, LIU Y F, et al. Effects of 24-week tai chi combined with resistance band training on dorsalis pedis microcirculation function in patients with type 2 diabetes [J]. *Journal of Capital University of Physical Education and Sports*), 2023, 35(1): 77-85.
- [11] 朱欢, 高炳宏. 微血管反应性在耐力性运动员训练中的应用[J]. *中国运动医学杂志*(ZHU H, GAO B H. Application of microvascular reactivity in endurance athletes training [J]. *Chinese Journal of Sports Medicine*), 2019, 38(10): 907-14.
- [12] 徐菲菲, 郭渝成, 刘秀华. 皮肤微血管功能检测的研究进展[J]. *微循环学杂志*(XU F F, GUO Y C, LIU X H. Research progress in the detection of skin microvascular function [J]. *Chinese Jour-*

- nal of Microcirculation), 2014, 24(3): 71-6.
- [13] MERLETTI R, FARINA D. Surface electromyography: physiology, engineering, and applications [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2016.
- [14] RAMPICHINI S, VIEIRA T M, CASTIGLIONI P, et al. Complexity analysis of surface electromyography for assessing the myoelectric manifestation of muscle fatigue: a review [J]. Entropy, 2020, 22(5): 529-59.
- [15] 郭峰, 王葆衡. 国家优秀单板U型场地滑雪运动员陆地模拟训练时下肢肌肉表面肌电分析[C]//中国体育科学学会(China Sport Science Society). 2011第九届全国体育科学大会论文摘要汇编(1)(GUO F, WANG B H. Surface electromyographic analysis of lower limb muscles during land simulation training in national elite snowboard halfpipe athletes [C]//China Sport Science Society. Proceedings of Abstracts for the 9th National Sport Science Conference 2011, Volume 1), 2011: 604-05.
- [16] 郭才媛, 侯亚丽, 王向东. 残疾人单板滑雪障碍追逐出发阶段运动学及表面肌电特征研究[J]. 冰雪运动(GUO C Y, HOU Y L, WANG X D. A study on kinematic and surface electromyographic characteristics of para snowboard cross athletes during the start phase [J]. Snow and Ice Athletics), 2024, 46(2): 27-31,43.
- [17] 方博儒, 仇大伟, 白洋, 等. 表面肌电信号在肌肉疲劳研究中的应用综述[J]. 计算机科学与探索(FANG B R, CHOU D W, BAI Y, et al. A review on the application of surface electromyography signals in muscle fatigue research [J]. Journal of Frontiers of Computer Science and Technology), 2024, 18(9): 2261-75.
- [18] HOIER B, HELLSTEN Y. Exercise-induced capillary growth in human skeletal muscle and the dynamics of VEGF [J]. Microcirculation, 2014, 21(4): 301-14.
- [19] HOPPELER H, WEIBEL E R. Structural and functional limits for oxygen supply to muscle [J]. Acta Physiol Scand, 2000, 168(4): 445-56.
- [20] ALLEN D G, LAMB G D, WESTERBLAD H. Skeletal muscle fatigue: cellular mechanisms [J]. Physiol Rev, 2008, 88(1): 287-332.
- [21] ISLAM H, HOOD D A, GURD B J. Looking beyond PGC-1 $\alpha$ : emerging regulators of exercise-induced skeletal muscle mitochondrial biogenesis and their activation by dietary compounds [J]. Appl Physiol Nutr Metab, 2020, 45(1): 11-23.
- [22] 文凡, 向阳, 朱欢, 等. 运动干预改善2型糖尿病患者的微血管功能[J]. 中国组织工程研究(WEN F, XIANG Y, ZHU H, et al. Exercise intervention for improving microvascular function in patients with type 2 diabetes [J]. Chinese Journal of Tissue Engineering Research), 2026, 30(5): 1225-35.
- [23] 肖杰文, 朱欢, 胡庆华. 16w24式简化太极拳运动对中老年人膝关节微血管功能的影响[J]. 中国老年学杂志(XIAO J W, ZHU H, HU Q H. Effects of 16-week 24-form simplified tai chi exercise on knee joint microvascular function in middle-aged and elderly individuals [J]. Chinese Journal of Gerontology), 2022, 42(9): 2161-4.
- [24] 周术锋, 肖哲, 朱欢, 等. 12周有氧运动对习惯久坐大学生微循环功能的影响[J]. 中国学校卫生(ZHOU S F, XIAO Z, ZHU H, et al. Effects of 12-week aerobic exercise on microcirculatory function in sedentary college students [J]. Chinese Journal of School Health), 2021, 42(9): 1332-5,9.
- [25] 胡庆华, 乾佑玲, 刘晓丽, 等. 12周太极拳运动对中老年轻度高血压患者微血管反应性的影响及机制[J]. 中国应用生理学杂志(HU Q H, QIAN Y L, LIU X L, et al. Effects and mechanisms of 12-week tai chi exercise on microvascular reactivity in middle-aged and elderly patients with mild hypertension [J]. Chinese Journal of Applied Physiology), 2021, 37(6): 683-7.
- [26] 马春伟. Sirt3在高住低练调控骨骼肌微循环变化和线粒体质量控制中作用的研究[D]. 上海: 上海体育学院, 2023.
- [27] 冯丽丽, 李博文, 田振军. 振动训练与心血管及脑部疾病防治研究进展[J]. 生命科学(FENG L L, LI B W, TIAN Z J. Research progress in the prevention and treatment of cardiovascular and brain diseases by vibration training [J]. Life Sciences), 2021, 33(4): 502-11.
- [28] 谭景旺, 韩甲, 沈玉芹, 等. 全身水平振动训练对心血管系统的影响与机制进展[J]. 中国康复理论与实践(TAN J W, HAN J, SHEN Y Q, et al. Progress in effects and mechanisms of whole-body vertical vibration training on the cardiovascular system [J]. Chinese Journal of Rehabilitation Theory and Practice), 2019, 25(4): 430-3.
- [29] YIN M, DENG S, DENG J, et al. Physiological adaptations and performance enhancement with combined blood flow restricted and interval training: a systematic review with meta-analysis [J]. J Sport Health Sci, 2025, 14: 101030-47.
- [30] CHENG H, ZHONG W, WANG L, et al. Effects of shear stress on vascular endothelial functions in atherosclerosis and potential therapeutic approaches [J]. Biomed Pharmacother, 2023, 158: 114198-212.
- [31] PU L, MENG Q, LI S, et al. Laminar shear stress alleviates monocyte adhesion and atherosclerosis development via miR-29b-3p/CX3CL1 axis regulation [J]. J Cell Sci, 2022, 135(14): jcs259696-709.
- [32] 朱欢, 高炳宏. 有氧运动对人体微血管反应性的作用及机制研究进展[J]. 生命科学(ZHU H, GAO B H. Research progress in the effects and mechanisms of aerobic exercise on human microvascular reactivity [J]. Life Sciences), 2020, 32(8): 855-63.