



男子足球运动员下肢功能性力量与血流限制 整合训练效果实证研究

Empirical Study on the Effects of Integrated Training of Functional Strength and Blood Flow Restriction of Lower Extremity in Male Football Players

吕默然¹, 王迪², 李明¹, 金羽彬¹, 许文鑫^{1*}

LYU Moran¹, WANG Di², LI Ming¹, JIN Yubin¹, XU Wenxin^{1*}

摘要:目的:为探究功能性力量与血流限制整合训练对足球运动员膝关节等速肌力、相关生理指标及体能素质的影响。方法:14名男子足球运动员分为整合组($n=7$)和对照组($n=7$),整合组进行功能性力量组合血流限制训练,对照组进行功能性力量训练。实验干预开始前进行前测,8周后进行后测。比较实验前、后等速肌力、速度、爆发力、灵敏素质以及最大无氧功率和下肢围度等生理指标变化。结果:1)8周训练干预后,整合组和对照组膝关节 $60^\circ/\text{s}$ 角速度等速峰力矩显著增强($P<0.05$),增幅优于对照组。2)整合组最大无氧功率、平均无氧功率、下肢围度等生理指标显著增加($P<0.05$)。3)整合组在爆发力、速度素质测试均出现显著性差异($P<0.05$),提升幅度优于对照组;但T灵敏测试,整合组和对照组均未产生明显变化($P>0.05$)。结论:功能性力量与血流限制整合训练可以提高足球运动员无氧能力、等速肌力、速度、爆发力等素质,并有效促进肌肉肥大,训练效果优于功能性力量训练,但灵敏素质未见显著变化。

关键词:功能性力量训练;血流限制训练;力量训练;无氧能力;体能素质;整合训练

Abstract: Objective: To explore the effects of integrated training of functional strength and blood flow restriction on knee isokinetic muscle strength, related physiological indexes, and physical quality of male football players. Methods: Fourteen male football players were recruited and randomly divided into the integration group ($n=7$) and the control group ($n=7$). The integration group underwent functional strength training with blood flow restriction, while the control group underwent functional strength training without restriction. A pre-test was conducted prior to the experimental intervention, followed by a post-test 8 weeks later. The changes of isokinetic muscle strength, velocity, explosive force, agility, maximum anaerobic power, and lower limb circumference were compared before and after the intervention. Results: 1) After 8 weeks of training intervention, the $60^\circ/\text{s}$ angular velocity peak torque of the knee joint in both groups significantly increased ($P<0.05$), and the increase rate was better than that in the control group. 2) Physiological indexes such as maximum anaerobic power, average anaerobic power, and lower limb circumference were significantly increased in the integration group ($P<0.05$). 3) There were significant differences in explosiveness quality and speed quality tests in the integration group ($P<0.05$), with a greater improvement compared to the control group; However, there were no significant changes in T agility test results for both groups ($P>0.05$). Conclusions: The integrated training functional strength and blood flow restriction can enhance the anaerobic capacity, isotonic muscle strength, speed, explosive power, and muscle hypertrophy of football players. The training effects of the integrated training is better than that of functional strength training alone, but there is no significant change in agility quality.

Keywords: functional strength training; blood flow restriction training; strength training; anaerobic capacity; physical quality; integration training

中图分类号:G808.1 **文献标识码:**A

基金项目:

国家社会科学基金一般项目(19BTY017);福建省社会科学规划项目(FJ2020B080)

第一作者简介:

吕默然(1996-),男,在读硕士研究生,主要研究方向为功能性训练、血流限制训练理论与实践, E-mail:178793411@qq.com。

*通信作者简介:

许文鑫(1975-),男,教授,博士,主要研究方向为体能训练、体育产业经济, E-mail:xwx2005888@126.com。

作者单位:

1.福建师范大学,福建福州 350117;
2.浙江中医药大学,浙江杭州 310053

1.Fujian Normal University, Fuzhou 350117, China;

2.Zhejiang Chinese Medical University, Hangzhou 310053, China.

随着科技水平不断提高和科研工作者的不断探索,对体能训练的研究认识也不断深入。早期传统力量训练已经不能满足现代竞技体育、学校体育、社会体育发展的需要,因此,研究者们开始积极探索新的训练理念和方法,以期解决忽视身体运动功能链接能力、结合运动专项不足等问题。

Cook等(1997)提出功能性力量训练(functional strength training, FST)的概念,认为人体运动是多环节的,是一个整体的运动链,因此在力量训练中应注重整体性。与传统高负荷力量训练不同,FST更注重对小肌群、深层肌群的刺激,补充身体薄弱环节,减少身体或局部肌肉承受较大负荷而导致运动损伤等发生(马金宁等,2020)。FST通过多肌群、多维度、多关节训练增强神经对主动肌、协同肌、拮抗肌的协调控制(李洋,2021),补充身体功能弱链,增强神经控制肌肉能力,促使更多的运动单位参与运动,使得力量输出功率增大,提高力量(Palmieri-Smith et al., 2022)、平衡稳定性(Guler et al., 2021; Yildiz et al., 2019)、协调灵敏(Du, 2022)等能力,从而提高运动表现。

血流限制训练(blood flow restriction training, BFRT)又称加压训练(KAATSU training)或血管闭塞训练(vascular occlusion training),是通过专业加压设备对血液流动速度进行限制,减缓血流速度从而产生特殊生理负荷刺激,在此基础上进行相关训练(佐藤義昭等,2008)。与传统高负荷力量训练相比,在血流限制状态下以40% 1RM低强度进行抗阻训练与65%~85% 1RM传统高强度抗阻训练所产生的效果极为相近(Yasuda et al., 2019)。以往研究发现,BFRT可以使神经肌肉间产生相互适应,可以募集更多运动单位参与运动。由于其特殊生理负荷刺激,营造缺氧、缺血的内环境,使得募集更多II型肌纤维参与运动,II型肌纤维得到进一步强化,肌肉横截面积明显增大,力量增强(Abe et al., 2005a; Pearson et al., 2015; Loenneke et al., 2012)。此外,车同同等(2021)、孙科等(2019)研究发现,BFRT不仅能提高限流部位的肌分肌电值,未限流部位的肌分肌电也会增大。有研究发现,其原因主要是BFRT可使机体产生一氧化氮酶、胰岛素样生长因子-1等激素,并且随血液流动扩散至全身,因此未限流部位的肌肉也得到增强(孙科等,2019,2020;魏佳等,2019)。BFRT不仅对青少年(Kakhak et al., 2022)、成年人(Cai et al., 2021)、老年人(Cardoso et al., 2018)肌力提升效果较好,对运动员群体,如橄榄球(Brocherie et al., 2020)、公路自行车(Tangchaisuriya et al., 2022)、体操(Yang et al., 2022)运动员的肌肉最大力量、爆发力、肌肉围度等均产生显著增益效果,且未发生动脉硬化、凝血、血栓等不良反应。

BFRT和FST对力量等体能素质提升效果较为显著。有国外学者开展了对功能性训练和BFRT进行整合的理论研究,但鲜见实证研究。基于此,本研究选取功能性训

练中的FST与BFRT进行力量训练整合实证研究,旨在探讨8周FST与BFRT整合训练对男子足球运动员下肢爆发力、膝关节等速肌力、无氧能力、体能素质等方面的影响,并与FST进行对比分析研究。

1 研究对象与方法

1.1 研究对象

招募18名男子足球运动员为研究对象,实验过程中4名受试者因其他因素退出,最终14名受试者随机分成对照组($n=7$)和整合组($n=7$),所有受试者运动员技术等级均为二级及以上,身体健康、无伤病(表1),已知晓本次实验注意事项、潜在风险以及应急方案,并签署知情同意书,自愿参加本研究。

表1 受试者基本信息

组别	身高/cm	年龄/岁	训练年限/年	体重/kg	
				实验前	实验后
整合组	180.1±6.5	20.1±0.6	4.1±0.8	75.3±10.8	75.7±11.6
对照组	181.4±6.0	20.3±0.7	3.9±0.8	76.5±6.8	76.6±7.3

1.2 研究方法

1.2.1 实验设计与干预方案

对照组进行FST,整合组在FST基础上通过加压设备限制血液流速进行训练。正式实验前对各项测试指标进行实验前测,并于8周实验结束后进行后测。

整合组训练方案(刘瑞东等,2016,2018;王骏昇等2017;尹军等,2015;Palmieri-Smith et al., 2022): 1)适应阶段,为期2周,负荷强度为30%~40% 1RM,间歇时间为60 s,每项内容练习组数为3组和次数为15次,使用便携式智能加压训练仪器(易动康),捆绑压和充气压分别为20~30 mmHg和130~150 mmHg。2)稳定阶段,为期3周,负荷强度为40%~60% 1RM,间歇时间增至70 s,每项训练内容练习每组次数减少为12次,捆绑压和充气压分别增至为30~40 mmHg和150~180 mmHg。3)强化阶段,为期3周,负荷强度为60%~80% 1RM,间歇时间增至80 s,练习组数和次数与稳定阶段相同,捆绑压和充气压分别进一步升高为40~50 mmHg和180~210 mmHg(表2)。

对照组除无血流限制加压外,练习内容、练习时间、组数、次数、间歇时间、负荷强度与整合组一致(表3)。

1.2.2 测试指标与测试方法

1.2.2.1 等速肌力测试指标

选用多关节等速测试训练系统(HUMAC NORM,美国)测试膝关节等速肌力,以60°/s角速度进行峰力矩测试。

1.2.2.2 体能素质测试指标

1)助跑摸高:在篮球馆进行测试,起点至摸高器垂直

地面点距离设置为 5 m, 足球运动员在做头顶球时大多数处于行进间, 单脚起跳, 因此受试者均采取 5 m 助跑单脚起跳摸高测试, 测试 2 次, 取最高值进行记录。

2) 立定跳远: 在室内田径馆进行, 测试 2 次, 采用红外线跳远测量仪进行测量, 取最高值进行记录。

3) 30 m 加速跑: 测试地点为室内塑胶田径馆, 在起点 30 m 处进行标记并放置红外计时器, 受试者采取站立式起跑姿势, 准备完毕后自行起跑。

4) T 灵敏性: 测试在室内塑胶田径场地。使用卷尺、胶带、标志桶对需要测试的距离进行测量和标记, 点 1 至

点 2 的直线距离为 9.14 m, 点 2 为横线中间点, 横线全长与直线相同为 9.14 m, 点 2 至点 3、点 4 的距离均为 4.57 m (图 1)。采用红外计时器进行测量, 为保证精确度, 将 2 个传感器分别置于起点的左、右侧, 间距为 2 m。要求受试者统一穿着运动鞋、短裤, 采取半蹲准备姿势, 听口令由点 1 出发沿 A 路线直线跑 9.14 m 触碰标志物点 2, 迅速向左沿 B 路线做滑步触碰标志物点 3, 随后立即向右沿 C 路线快速滑步触碰标志物点 4, 触碰后沿 D 路线快速滑步至标志物点 2, 同时快速后撤步至起(终)点 1 结束。测试 2 次, 间歇 10 min, 取最好成绩。

表 2 整合组训练方案

Table 2 Integration Group Training Program

训练阶段	训练内容	练习组数×次数	负荷强度/1RM	间歇时间/s	捆绑压/mmHg	充气压/mmHg
适应阶段	单腿罗马尼亚硬拉	3×15	30%~40%	60	20~30	130~150
	保加利亚单腿蹲	3×15	30%~40%	60	20~30	130~150
	平衡垫半蹲	3×15	30%~40%	60	20~30	130~150
	BOSU球上弓步跳	3×15	30%~40%	60	20~30	130~150
	负重燕式平衡接高顶腿	3×15	30%~40%	60	20~30	130~150
稳定阶段	弹震式深蹲	3×15	30%~40%	60	20~30	130~150
	前后分腿蹲	3×12	40%~60%	70	30~40	150~180
	颈前半蹲	3×12	40%~60%	70	30~40	150~180
	保加利亚单腿蹲	3×12	40%~60%	70	30~40	150~180
	单腿罗马尼亚硬拉	3×12	40%~60%	70	30~40	150~180
强化阶段	BOSU球上负重燕式平衡接高顶腿	3×12	40%~60%	70	30~40	150~180
	弹震式深蹲	3×12	60%~80%	80	40~50	180~210
	单腿罗马尼亚硬拉	3×12	60%~80%	80	40~50	180~210
	保加利亚单腿蹲	3×12	60%~80%	80	40~50	180~210
	平衡垫半蹲	3×12	60%~80%	80	40~50	180~210
	BOSU球上燕式平衡接高顶腿	3×12	60%~80%	80	40~50	180~210
	运动踏板持杠铃片单腿蹲	3×12	60%~80%	80	40~50	180~210

表 3 对照组训练方案

Table 3 Control Group Training Program

训练阶段	训练内容	练习组数×次数	负荷强度/1RM	间歇时间/s
适应阶段	单腿罗马尼亚硬拉	3×15	30%~40%	60
	保加利亚单腿蹲	3×15	30%~40%	60
	平衡垫半蹲	3×15	30%~40%	60
	BOSU球上负重弓步跳	3×15	30%~40%	60
	负重燕式平衡接高顶腿	3×15	30%~40%	60
稳定阶段	弹震式深蹲	3×15	30%~40%	60
	前后分腿蹲	3×12	40%~60%	70
	颈前半蹲	3×12	40%~60%	70
	保加利亚单腿蹲	3×12	40%~60%	70
	单腿罗马尼亚硬拉	3×12	40%~60%	70
强化阶段	BOSU球上负重燕式平衡接高顶腿	3×12	40%~60%	70
	弹震式深蹲	3×12	60%~80%	80
	单腿罗马尼亚硬拉	3×12	60%~80%	80
	保加利亚单腿蹲	3×12	60%~80%	80
	平衡垫半蹲	3×12	60%~80%	80
	BOSU球上负重燕式平衡接高顶腿	3×12	60%~80%	80
	运动踏板持杠铃片单腿蹲	3×12	60%~80%	80

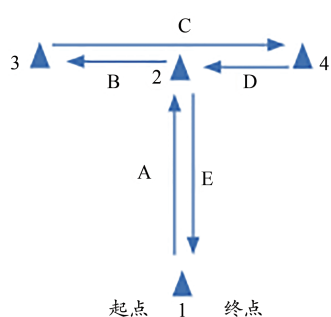


图1 T灵敏测试跑动路线
Figure 1. T Agility Test Running Route

1.2.2.3 生理学指标

无氧能力测试:无氧功率车(Monark 894E,瑞典)受试者需进行7 s全速蹬车运动,阻力系数为0.075。根据系统自动计算得出数据。

下肢围度:对两侧大、小腿分别进行测量,具体要求如下:受试者需在放松状态下测量腿部最粗部位的周长,测试时间为清晨起床后、空腹、贴身测量,防止因运动肌肉充血、食物、衣物等因素影响数据。

皮褶厚度:使用电子皮褶卡钳对受试者大腿和小腿皮褶厚度进行测量,每个部位测量3次,精确到0.1 mm,每次测量误差不得超过1.0 mm,测试时间为清晨起床后、空腹。

1.2.3 统计分析

使用Excel 2016、SPSS 26.0进行统计分析,数据表示采用平均值±标准差($M \pm SD$)。首先采用Shapiro-Wilk检验方法分析该数据是否符合正态分布,随后检验方差齐性。在符合正态分布且方差齐性的情况下,组内实验前、后用配对样本 t 检验,不同组间实验效果算差值用两独立样本 t 检验;若不符合正态分布,则采用Kruskal-Wallis检验, $P < 0.05$ 认为差异具有统计学意义。

2 结果

2.1 干预前、后等速肌力指标变化

整合组与对照组在训练干预8周后右、左腿伸肌群、屈肌群峰力矩均得到显著提升($P < 0.05$),整合组相较于对照组提升幅度略优(图2),两组之间无显著性差异($P > 0.05$,表4)。

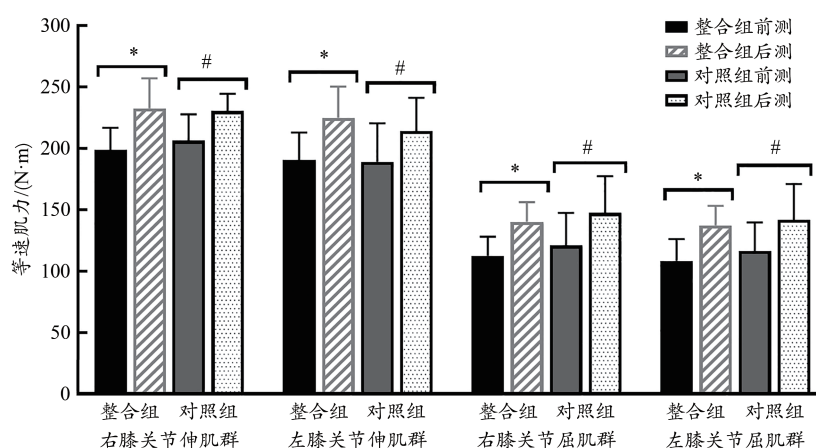


图2 整合组与对照组等速肌力变化

Figure 2. Changes of Isokinetic Muscle Strength between Integration Group and Control Group

注:整合组组内前测与后测比较,* $P < 0.05$;对照组组内前测与后测比较,# $P < 0.05$,下同。

表4 干预前、后等速肌力指标变化

Table 4 Changes of Isokinetic Muscle Strength Index before and after Intervention

等速肌力/(N·m)	组别	实验前测	实验后测	变化率/%
右膝关节伸肌群	整合组	198.71 ± 18.05	232.57 ± 24.51*	17.1
	对照组	206.29 ± 21.56	230.43 ± 14.00#	11.7
左膝关节伸肌群	整合组	190.71 ± 22.31	225.00 ± 25.36*	18.0
	对照组	189.14 ± 31.25	214.14 ± 27.06#	13.2
右膝关节屈肌群	整合组	112.57 ± 15.48	140.29 ± 15.87*	24.6
	对照组	120.86 ± 26.57	147.43 ± 29.98#	21.9
左膝关节屈肌群	整合组	108.29 ± 17.81	137.29 ± 16.03*	26.8
	对照组	116.57 ± 23.14	141.71 ± 29.37#	21.5

注:整合组组内前测与后测比较,* $P < 0.05$;对照组组内前测与后测比较,# $P < 0.05$,下同。

2.2 干预前、后体能素质指标变化

8周训练干预后,整合组、对照组在力量素质测试中助跑摸高和立定跳远成绩均显著提高($P < 0.05$,表5),且整合组变化率略高于对照组;整合组在速度素质的30 m加速跑测试中,提升幅度较为明显($P < 0.05$),但对照组并未发生显著性变化($P > 0.05$);整合组和对照组T灵敏性测试成绩提升不明显,均未发生显著性变化($P > 0.05$),2组变化率极为接近。

2.3 干预前、后生理学指标变化

2.3.1 无氧能力

如表6所示,0.075阻力系数下,整合组、对照组的最大无氧功率和平均无氧功率提升效果均较为显著($P < 0.05$),

且整合组最大无氧功率、平均无氧功率的提高幅度和变化率相对优于对照组,2 组之间无显著性差异($P>0.05$)。

表 5 干预前、后体能素质指标变化
Table 5 Changes of Physical Quality Index before and after Intervention

体能素质	测试项目	组别	实验前测	实验后测	变化率/%
力量素质 (爆发力)	助跑摸高/m	整合组	3.03±0.10	3.11±0.10*	2.6
		对照组	3.01±0.08	3.06±0.11#	1.7
	立定跳远/m	整合组	2.75±0.10	2.85±0.09*	3.6
		对照组	2.77±0.08	2.82±0.08#	1.8
速度素质	30 m 加速跑/s	整合组	4.48±0.17	4.34±0.18*	-3.1
		对照组	4.52±0.27	4.41±0.16	-2.4
灵敏素质	T 灵敏性/s	整合组	11.79±1.03	11.66±1.02	-1.1
		对照组	11.40±0.48	11.31±0.44	-0.8

表 6 干预前、后无氧功率指标变化
Table 6 Changes of Anaerobic Power Index before and after Intervention

测试项目	组别	实验前测	实验后测	变化率/%
最大无氧功率	整合组	850.33±71.04	1 025.72±104.85*	20.6
	/W 对照组	845.94±54.18	919.52±88.42#	8.7
平均无氧功率	整合组	735.83±67.64	865.25±71.08*	17.6
	/W 对照组	739.44±53.09	807.55±75.12#	9.2

2.3.2 下肢围度

8 周实验干预后,整合组与对照组相比,右、左大腿围度均产生显著性增加($P<0.05$),提升幅度略优于对照组(表 7);整合组和对照组右、左小腿围度提升效果较小($P>0.05$),且两组之间大腿、小腿围度未产生显著性差异($P>0.05$)。

表 7 干预前、后下肢围度指标变化
Table 7 Changes of Lower Limb Circumference before and after Intervention

下肢围度/cm	组别	实验前测	实验后测	变化率/%
右大腿	整合组	58.49±3.57	58.99±3.53*	0.9
	对照组	58.30±2.01	58.64±1.90#	0.6
左大腿	整合组	58.02±3.52	58.91±3.43*	1.5
	对照组	57.69±1.86	58.17±1.77#	0.8
右小腿	整合组	37.64±3.33	37.71±3.29	0.3
	对照组	37.04±1.84	37.09±1.87	0.1
左小腿	整合组	37.67±3.41	37.74±3.37	0.2
	对照组	36.90±1.69	36.96±1.68	0.2

2.3.3 下肢皮褶厚度

8 周的训练干预可以明显降低整合组和对照组大腿皮褶厚度($P<0.05$,表 8),而整合组和对照组小腿皮褶厚度均未发生显著性变化($P>0.05$),且下肢皮褶厚度组间无显著性差异($P>0.05$)。

表 8 干预前、后下肢皮褶厚度指标变化

Table 8 Changes of Lower Limb Skinfold Thickness before and after Intervention

下肢皮褶厚度	组别	实验前测	实验后测	变化率/%
大腿/mm	整合组	14.96±0.83	14.81±0.78*	-1.0
	对照组	15.27±0.83	15.16±0.76#	-0.7
小腿/mm	整合组	5.71±0.35	5.67±0.39	-0.2
	对照组	6.01±0.31	5.99±0.30	-0.2

3 分析与讨论

3.1 整合训练对等速肌力的影响效果

有研究表明,FST 与 BFRT 都可以增强肌肉力量。我们研究发现,8 周实验干预后,整合组提升效果更为显著,提升幅度略高于对照组。Adami 等(2022)研究表明,精英级举重运动员进行高强度 FST,在等速肌力伸展和弯曲测试中力量得到显著提高,同样对 45 名受试者进行为期 4 个月的 FST,也出现等速肌力 60°/s 角速度数值显著提升,伸肌群峰力矩增长幅度明显优于控制组现象。此外,Takarada 等(2002)研究发现,橄榄球运动员采取 8 周 BFRT 干预后,等速肌力测试膝关节伸肌群的峰力矩相较于控制组增益效果更为显著,提高幅度为 9.2%。王明波等(2019)研究发现,高水平男子手球运动员下肢进行 8 周加压力量训练后,等速肌力测试伸肌群峰力矩增加,且屈肌群峰力矩增加更为明显。BFRT 对受试者膝关节等速肌力测试中峰力矩提升较为明显,可能与肌肉围度增加有关(李志远等,2019)。

本研究结果与前人研究一致。但值得注意的是,本研究发现,整合组相较于对照组不仅肌力提高幅度大,而且在改善不对称性方面效果更为显著,在保持优势侧肌力上升的情况下,非优势侧力量提升幅度更大,下肢双侧间力量差值缩小更为明显,这与功能性训练非平衡稳定下多维度,多层面、多肌群的训练模式有关(吕默然,2022)。整合组与对照组采取相同的训练内容和外部负荷,对照组训练效果低于整合组,主要原因可能是缺乏内部负荷刺激。整合组训练效果优于对照组,主要作用机制是通过 BFRT 营造缺氧、缺血的内环境,相较于单一 FST 所产生的负荷刺激更大,使得快肌纤维被大量募集,同时促肌肉合成的相关激素,如生长素(human growth hormone, HGH)分泌大量增加、抑制肌肉生长抑制素(myostatin, MSTN)的分泌,促使肌肉合成量增加,肌力增长(Pazokian et al., 2022; Takarada et al., 2000)。此外,整合组等速肌力提升幅度优于对照组也可能与大负荷刺激有关,大强度运动可使快肌纤维(II 型肌纤维)被大量募集,力量输出功率增大。研究发现,20%~40%1RM 运动强度 BFRT 所产生的训练效果与 75%~85%1RM 高强度抗阻训练相似,低氧和缺血代谢负荷刺激对肌肉刺激更

大,快肌纤维募集程度化更高,较小的运动负荷即可达到高负荷训练效果(吴昉等,2019)。

本研究结果显示,BFRT与FST整合训练对等速肌力的影响效果优于对照组,BFRT与FST结合可以进一步强化FST的效果。

3.2 整合训练对生理指标的影响效果

3.2.1 无氧能力

本研究发现,8周BFRT与FST整合训练可以增强受试者无氧能力,主要表现为干预后最大无氧功率和平均无氧功率得到显著提升,无氧能力提升幅度高于对照组。Pearson等(2015)研究认为,氧气供应量和运动强度对肌纤维募集顺序和程度具有重要影响。高强度或低氧可致II型肌纤维被大量募集,尽管FST在改善身体健康指数方面有效,但缺乏代谢负荷(Ozaki et al., 2016; Sillen et al., 2014)。无氧代谢酶活性较高的II型肌纤维募集程度是影响无氧能力的主要因素之一。相较于FST,BFRT通过限制血液流动速度,增加生理代谢负荷刺激,诱使机体适应代谢产物增多(Meyer, 2006)。同时,氧含量减少的低氧内环境可以有效刺激III类和IV类传入纤维抑制 α 运动神经元兴奋性,延缓疲劳,加快II型肌纤维募集以维持肌肉力量(Loenneke et al., 2010),极大程度刺激快肌纤维的发展,使得输出功率增加,无氧能力增强(王周等,2023)。由此,因特殊代谢负荷刺激,与FST相比,FST与BFRT组合可进一步强化无氧能力。

3.2.2 下肢围度与皮褶厚度

我们研究发现,整合组与对照组右、左大腿围度均发生显著性变化,并且整合组大腿围度变化程度优于对照组。Manimmanakorn等(2013)研究发现,高水平女子网球运动员下肢进行数周BFRT后,下肢围度明显增加。Centner等(2023)发现,为期14周、每周3次的低负荷BFRT对肌肉横截面积增加效果显著优于传统高负荷抗阻训练。此外,李志远等(2019)研究发现,精英男子手球运动员进行4周BFRT后,大腿肌肉出现进一步肥大现象,且臀围也产生了相应显著变化。本研究通过对受试者进行下肢围度测量,结合皮褶厚度、体重变化进行分析发现,FST与BFRT整合后可以增强肌肉横截面积,并且出现体重上升、皮下脂肪减少的现象。与前人研究一致,BFRT可以促进肌肉横截面积增大和四肢围度增加(李志远等,2019)。本研究发现,整合组和对照组均可增加下肢肌肉围度,从整体看,整合组肌肉围度增加效果优于对照组。而左侧大腿围度增加幅度大于右侧,其原因可能是足球运动员专项特征导致干预效果具有非对称性。左腿为非优势侧,训练化程度较低,缺乏有针对性训练,因此提升幅度较大;而右腿为惯用侧,可能与训练化程度较高以及训练周期相对较短有关,因此没有出现显著性变化。整合组与对照组左、右小腿围度均未发生显著性变化。肌

肉横截面积增大主要受氧气含量和运动强度影响(Abe et al., 2005b)。整合组因其血液流速被限制产生特殊代谢负荷刺激,对神经肌肉刺激较大,极大程度上刺激快肌纤维发展,而快肌纤维极易增粗。此外,虽然加压部位为大腿上方1/3处,但会出现“效果转移”现象。有研究发现,通过肌电图测得非限流部位肌肉放电值较高(车同同等,2021)。Madarame等(2008)研究发现,对下肢一侧进行BFRT后,另一侧非限流肢体同样会出现肌肉围度增加,肌力增强现象。Yasuda等(2010)研究发现,在血流限制后进行卧推训练,不仅受限部位的肱三头肌力量和肌肉围度增加,而且未受限的胸大肌也出现肌肉围度增加,力量增强的现象。本研究结果与前人相关研究略有不同,小腿围度变化不明显可能与训练周期短、局部肌肉量占比较低导致增幅有限,或血液受限部位对未受限部位的影响与距离有关。

3.3 整合训练对体能素质的影响效果

冲刺跑、纵跳、灵敏测试能够反映爆发力素质,爆发力水平越高,短时间募集肌纤维的能力越强(Alemdaroglu et al., 2002; Lockie et al., 2011)。我们发现,整合组30m加速跑、立定跳远、助跑摸高成绩整体提升较为显著;对照组立定跳远、助跑摸高成绩变化提升也较为显著,但30m加速跑和T灵敏性测试结果并未显著提升。FST可有效提升爆发力(Xiao et al., 2021)、速度(Bashir et al., 2022; Xiao et al., 2021)、跳跃能力(Yang et al., 2014)、敏捷性等(Bashir et al., 2022)体能素质,训练强度、持续时间、频率对运动员体能素质提升有重要影响。

此外,有研究发现,数周BFRT可以对垂直跳跃能力(Davids et al., 2021; Doma et al., 2020)、肌肉力量(Clarkson et al., 2019)等素质具有显著促进作用。本研究结果与前人研究基本一致,整合组与对照组的爆发力水平均得到增强,立定跳远与摸高成绩也得到提升。也有研究发现,虽然短时间BFRT可以增加下肢肌肉围度和1RM深蹲能力,但纵跳能力(Madarame et al., 2011)、速度(Abe et al., 2005b)并未发现显著变化。造成此差异的主要原因可能与运动专项、训练周期、BFRT设备使用压力强度不同有关。但也有学者认为,FST和BFRT对体能素质会产生积极促进作用(李志远等,2019;刘瑞东等,2016; Bashir et al., 2022)。

本研究结果发现,整合组速度、爆发力素质提升幅度相对优于对照组。FST通过针对性训练刺激神经调控主动肌、拮抗肌能力,增强募集肌纤维能力,提高体能素质。30m加速跑、T灵敏性、立定跳远、助跑摸高测试需要受试者具备较强的无氧能力,而整合训练中BFRT因其特殊生理负荷刺激,在低氧缺血的状态下,可进一步优化肌纤维募集能力。当代谢负荷加大,更具有针对性增强快肌纤维(II型肌纤维)募集,力量输出功率得到增强,从而提

高运动表现(Garcia et al., 2017),是爆发力、速度素质提升的主要原因。

值得注意的是,本研究结果显示,整合组和对照组在 T 灵敏测试成绩均未出现显著变化,变化率分别为-1.1%和-0.8%。灵敏性提升幅度较小,可能受训练经历、实验干预周期的影响,也可能与足球项目特征有关,足球专项训练多涉及灵敏素质,干预对其刺激较小。Garcia 等(2017)研究发现,橄榄球运动员进行 BFRT 后,T 灵敏测试并未明显变化,与前人研究相同。有研究认为,BFRT 主要促进肌肥大使体能素质提高,并未对神经适应产生影响(Madarama et al., 2011; Segal et al., 2015; Yasuda et al., 2011)。Yasuda 等(2011)研究认为,结合功能训练也许可通过肥大和神经适应提升最大力量,但 BFRT 是否促进神经适应目前尚未有明确定论。通过本研究对比分析,FST 与 FST 整合训练后 T 灵敏测试略有改善,但是否由于进一步强化 FST 致使神经适应增加,或者是肌肉力量增强导致跑动速度加快而缩短测试时间,难以得出具体结论。因此,进一步探究 BFRT 对神经适应的影响或进行专业反应灵敏测试尤为重要,有助于进一步了解其作用机制,优化训练手段和方法。

4 结论

1)FST 与 BFRT 整合训练对膝关节等速肌力中伸肌群和屈肌群提升效果较为明显,其中大腿屈肌群提升效果更为显著,并且提升优势侧的同时,也增强非优势侧的肌肉力量,在缩小非对称性力量差值方面优于 FST。

2)FST 与 BFRT 整合训练可以提升足球运动员爆发力、速度能力,但对于练习灵敏性较多的足球运动员进行 8 周短期干预训练,其灵敏素质并未出现显著提高。

3)FST 与 BFRT 整合训练可以提升足球运动员无氧运动能力和下肢肌肉横截面积,增益效果优于 FST。

4)相较于单一 FST,FST 与 FST 整合训练进一步强化 FST 训练效果,提高最大力量、爆发力、无氧能力、肌肉围度、速度能力等,为未来研究提供研究思路。FST 与 FST 整合训练也可以作为专业运动员或业余运动爱好者体能训练及医疗康复的手段和方法。

参考文献:

车同同,杨铁黎,梁永杰,等,2021. 下肢低强度加压半蹲起训练对核心区肌群肌肉激活程度和主观疲劳度的影响[J]. 体育科学,41(7): 59-66,78.

李洋,2021. 我国女子手球运动员射门技术特征及身体运动功能训练效果的实证研究[D]. 北京:首都体育学院.

李志远,赵之光,王明波,等,2019. 4 周加压训练对男子手球运动员身体成分和最大力量的影响[J]. 中国体育科技,55(5):37-43.

刘瑞东,陈小平,2016. 功能性力量训练对肌肉募集特征和身体素质的影响[J]. 上海体育学院学报,40(5):73-79.

刘瑞东,刘建秀,李庆,2018. 功能性与传统力量训练的训练效果比

较研究:基于下肢运动生物力学、FMS 和运动能力测试[J]. 武汉体育学院学报,52(5):79-87.

吕默然,2022. 中外功能性训练研究的热点透视及特征解析:基于知识图谱[J]. 吉林体育学院报,38(3):76-86.

马金宁,李荣,吉祥波,2020. 功能性力量训练:释义、机制、价值[J]. 中国体育教练员,28(4):10-13.

孙科,魏文哲,赵之光,2019. 下肢低强度加压训练中血流受限部位和未受限部位肌肉活动的差异[J]. 中国体育科技,55(5):14-19.

孙科,魏文哲,赵之光,2020. 加压放松对越野滑雪运动大强度抗阻训练疲劳相关指标的影响[J]. 中国体育科技,56(12):9-16.

王骏昇,尹军,齐光涛,2017. 射击运动员身体运动功能训练[M]. 北京:人民体育出版社:106-110.

王明波,李志远,魏文哲,等,2019. 高水平男子手球运动员下肢加压力量训练效果实证研究[J]. 中国体育科技,55(5):30-36.

王周,吴迎,2023. 缺血预处理提升运动表现:方法、应用及机制[J]. 中国组织工程研究,27(30):4869-4875.

魏佳,李博,杨威,等,2019. 血流限制训练的应用效果与作用机制[J]. 体育科学,39(4):71-80.

吴旻,李倩,包大鹏,2019. 加压力量训练对下肢骨骼肌影响的 Meta 分析[J]. 中国体育科技,55(3):20-26.

尹军,袁守龙,2015. 身体运动功能训练[M]. 北京:高等教育出版社:159-172.

佐藤善昭,石井直方,長島敏明,等,2008. 加压トレーニングの理論と実践[M]. 東京:講談社:3-5.

ABE T, BEEKLEY M D, HINATA S, et al., 2005a. Day-to-day change in muscle strength and MRI-measured skeletal muscle size during 7 days KAATSU resistance training: A case study[J]. Int J KAATSU Training Res, 1(2):71-76.

ABE T, KAWAMOTO K, YASUDA T, et al., 2005b. Eight days KAATSU-resistance training improved sprint but not jump performance in collegiate male track and field athletes[J]. Int J KAATSU Training Res, 1(1):19-23.

ADAMI P E, ROCCHI J E, MELKE N, et al., 2022. Physiological profile comparison between high intensity functional training, endurance and power athletes[J]. Eur J Appl Physiol, 122(2): 531-539.

ALEMDAROGĞLU U, 2002. The relationship between muscle strength, anaerobic performance, agility, sprint ability and vertical jump performance in professional basketball players [J]. J Hum Kinet, 31(31):149-158.

BASHIR M, SOH K G, SAMSUDIN S, et al., 2022. Effects of functional training on sprinting, jumping, and functional movement in athletes: A systematic review [J]. Front Physiol, doi: 10.3389/fphys.2022.1045870.

BROCHERIE F, MORELET L, GIRARD O, et al., 2020. Combining blood flow restriction training with heat to maximize hypertrophy and strength in rugby players[J]. Med Sci Sport Exerc, 52(7S): 845-845.

CAI Z Y, WANG W Y, LIN J D, et al., 2021. Effects of whole body vibration training combined with blood flow restriction on muscle adaptation[J]. Eur J Sport Sci, 21(2): 204-212.

CARDOSO R K, ARAUJO A M, FREITAS M P, et al., 2018. Effect of training with partial blood flow restriction in older adults: A systematic review[J]. Rev Bras Cin Desempenho Hum, 20(2): 219-228.

CENTNER C, JERGER S, LAUBER B, et al., 2023. Similar patterns of tendon regional hypertrophy after low-load blood flow re-

- striction and high-load resistance training [J]. *Scand J Med Sci Sports*, 33(6): 848-856.
- CLARKSON M J, MAY A K, WARMINGTON S A, 2019. Chronic blood flow restriction exercise improves objective physical function: A systematic review[J]. *Front Physiol*, doi: 10.3389/fphys.2019.01058.
- COOK G, FIELDS K, 1997. Functional training for the torso [J]. *Strength Cond J*, 19(2): 129-132.
- DAVIDS C J, RAASTAD T, JAMES L P, et al., 2021. Similar morphological and functional training adaptations occur between continuous and intermittent blood flow restriction [J]. *J Strength Cond Res*, 35(7): 1784-1793
- DOMA K, LEICHT A S, BOULLOSA D, et al., 2020. Lunge exercises with blood-flow restriction induces post-activation potentiation and improves vertical jump performance [J]. *Eur J Appl Physiol*, 120(3): 687-695.
- DU X, 2022. Functional training on ankle sprain rehabilitation in soccer players[J]. *Rev Bras Med Esporte*, 28: 709-712.
- GARCIA C, MOTA G D, LEICHT A, et al., 2017. Ischemic preconditioning and acute recovery of performance in rugby union players[J]. *Sports Med Int Open*, 1(3): E107-E112.
- GULER O, TUNCEL O, BIANCO A, 2021. Effects of functional strength training on functional movement and balance in middle-aged adults[J]. *Sustainability*, 13(3): 1074.
- KAKHAK S A H, KIANIGUL M, HAGHIGHI A H, et al., 2022. Performing soccer-specific training with blood flow restriction enhances physical capacities in youth soccer players[J]. *J Strength Cond Res*, 36(7): 1972-1977.
- LOCKIE R G, MURPHY A J, KNIGHT T J, et al., 2011. Factors that differentiate acceleration ability in field sport athletes[J]. *J Strength Cond Res*, 25:2704-2714.
- LOENNEKE J P, WILSON G J, WILSON J M A, 2010. Mechanistic approach to blood flow occlusion[J]. *Int J Sport Med*, 31(1):1-4.
- LOENNEKE J P, WILSON J M, MARÍN P J, et al., 2011. Low intensity blood flow restriction training: A meta-analysis [J]. *Eur J Appl Physiol*, 112 (5): 1849-1859.
- MADARAME H, NEYA M, OCHI E, et al., 2008. Cross-transfer effects of resistance training with blood flow restriction[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 40(2):258-263.
- MADARAME H, OCHI E, TOMIOKA Y, et al., 2011. Blood flow-restricted training does not improve jump performance in untrained young men[J]. *Acta Physiol Hung*, 98(4):465-471.
- MANIMMANAKORN A, HAMLIN M J, ROSS J J, et al., 2013. Effects of low-load resistance training combined with blood flow restriction or hypoxia on muscle function and performance in netball athletes[J]. *J Sci Med Sport*, 16(4):337-342.
- MEYER R A, 2006. Does blood flow restriction enhance hypertrophic signaling in skeletal muscle?[J]. *J Appl Physiol*, 100(5):1443-1444.
- OZAKI H, LOENNEKE J P, BUCKNER S L, 2016. Muscle growth across a variety of exercise modalities and intensities: Contributions of mechanical and metabolic stimuli[J]. *Med Hypotheses*, 88: 22-26.
- PALMIERI-SMITH R M, BROWN S R, WOJTY S E M, et al., 2022. Functional resistance training improves thigh muscle strength after ACL reconstruction: A randomized clinical trial[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 54(10): 1729-1737.
- PAZOKIAN F, AMANI-SHALAMZARI S, RAJABI H, 2022. Effects of functional training with blood occlusion on the irisin, follistatin, and myostatin myokines in elderly men [J]. *Eur Rev Aging Phys Act*, doi: 10.1186/s11556-022-00303-2.
- PEARSON S J, HUSSAIN S R, 2015. A review on the mechanisms of blood-flow restriction resistance training-induced muscle hypertrophy[J]. *Sports Med (Auckland, NZ)*, 45(2):187-200.
- SEGAL N, DAVIS M D, MIKESKY A E, 2015. Efficacy of blood flow-restricted low-load resistance training for quadriceps strengthening in men at risk of symptomatic knee osteoarthritis[J]. *Geriatr Orthop Surg Rehabil*, 6(3), 160-167.
- SILLEN M J, FRANSSSEN F M, VAES A W, 2014. Metabolic load during strength training or NMES in individuals with COPD: Results from the DICES trial[J]. *BMC Pulm Med*, doi: 10.1186/1471-2466-14-146.
- TAKARADA Y, NAKAMURA Y, ARUGA S, et al., 2000. Rapid increase in plasma growth hormone after low-intensity resistance exercise with vascular occlusion[J]. *J Appl Physiol*, 88(1): 61-65.
- TAKARADA Y, SATO Y, ISHII N, 2002. Effects of resistance exercise combined with vascular occlusion on muscle function in athletes[J]. *Eur J Appl Physiol*, 86(4):308-314.
- TANGCHASURIYA P, CHUENSIRI N, TANAKA H, et al., 2022. Physiological adaptations to high-intensity interval training combined with blood flow restriction in masters road cyclists[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 54(5): 830-840.
- XIAO W, SOH K G, WAZIR M R W N, et al., 2021. Effect of functional training on physical fitness among athletes: A systematic review[J]. *Front Physiol*, doi: 10.3389/fphys.2021.738878.
- YANG D J, KANG J I, PARK S K, et al., 2014. Effect of neuromuscular training on postural control and jump performance in functional ankle instability soccer player[J]. *Korean J Sport Biomech*, 24(3): 295-300.
- YANG S, ZHANG P, SEVILLA-SANCHEZ M, et al., 2022. Low-load blood flow restriction squat as conditioning activity within a contrast training sequence in high-level preadolescent trampoline gymnasts[J]. *Front Physiol*, doi: 10.3389/fphys.2022.852693.
- YASUDA T, BRECHUE W F, FUJITA T, et al., 2008. Muscle activation during low-intensity muscle contractions with varying levels of external limb compression[J]. *J Sports Sci Med*, 7(4): 467-474.
- YASUDA T, FUJITA S, OGASAWARA R, et al., 2010. Effects of low-intensity bench press training with restricted arm muscle blood flow on chest muscle hypertrophy: A pilot study[J]. *Clin Physiol Funct Imaging*, 30(5): 338-343.
- YASUDA T, OGASAWARA R, SAKAMAKI M, et al., 2011a. Relationship between limb and trunk muscle hypertrophy following high-intensity resistance training and blood flow-restricted low-intensity resistance training[J]. *Clin Physiol Funct Imaging*, 31(5): 347-351.
- YILDIZ S, PINAR S, GELEN E, 2019. Effects of 8-week functional vs. traditional training on athletic performance and functional movement on prepubertal tennis players[J]. *J Strength Cond Res*, 33(3): 651-661.

(收稿日期:2023-04-06; 修订日期:2023-09-26; 编辑:马婧)