

快速伸缩复合训练对大学生男子100米运动员下肢爆发力影响的随机对照实验

廖怡梅

吉利学院体育与健康学院, 四川 成都

收稿日期: 2026年7月14日; 录用日期: 2026年8月11日; 发布日期: 2026年8月18日

摘要

目的: 比较快速伸缩复合训练(plyometric training)与传统抗阻训练对大学生男子100 m运动员下肢爆发力的干预效果, 并基于场地与实验室双层面指标初步探究其神经肌肉适应机制。方法: 以36名男子100 m运动员为实验对象, 按前测成绩排序后交替分配至实验组($n = 18$)与对照组($n = 18$), 分别实施为期8周、每周3次的plyometric训练与传统抗阻训练。以100 m跑、立定跳远及原地摸高为场地指标, 以反向纵跳(CMJ)、蹲跳(SJ)等长发力率(RFD)及分段支撑时间与步频为实验室指标, 全程以主观疲劳等级(RPE) × 训练时间监控负荷。组间比较采用独立样本t检验, 以Bonferroni法校正多重比较($\alpha' = 0.0042$), 并计算Cohen's d效应量。结果: (1) 8周后, 实验组全部9项指标均较前测显著改善($P < 0.001$), 对照组仅立定跳远($P = 0.001$)及RFD($P = 0.033$)出现提升。(2) 组间比较显示, 实验组在9项指标上均显著优于对照组($P < 0.05$, $d = 0.71 \sim 1.07$), CMJ-SJ差值的增大与RFD的提升暗示SSC效率与神经驱动水平可能为潜在的适应机制, 但上述推断尚待直接测量手段的验证。

关键词

快速伸缩复合训练, 100米跑, 下肢爆发力, 力量发展速率, 牵张 - 缩短周期, 随机对照实验

Effects of Plyometric Training on Lower Limb Explosive Power in Collegiate Male 100-m Sprinters: A Randomized Controlled Trial

Yimei Liao

School of Physical Education and Health, Geely University of China, Chengdu Sichuan

Received: July 14, 2026; accepted: August 11, 2026; published: August 18, 2026

文章引用: 廖怡梅. 快速伸缩复合训练对大学生男子 100 米运动员下肢爆发力影响的随机对照实验[J]. 体育科学进展, 2026, 14(4): 780-789. DOI: 10.12677/aps.2026.144106

Abstract

Objective: To compare the effects of plyometric training versus traditional resistance training on lower limb explosive power in collegiate male 100-m sprinters and to preliminarily explore the underlying neuromuscular adaptation mechanisms using both field- and laboratory-based assessments. **Methods:** Thirty-six male 100-m sprinters were alternately assigned to an experimental group (EG, $n = 18$) and a control group (CG, $n = 18$) based on ranked pre-test 100-m performance. The EG underwent an 8-week plyometric training program (3 sessions/week), while the CG performed traditional resistance training (3 sessions/week) over the same period. Field-based outcome measures included the 100-m sprint time, standing long jump, and vertical jump height. Laboratory-based measures included the countermovement jump (CMJ), squat jump (SJ), rate of force development (RFD), estimated support time, and step frequency. Training load was monitored throughout using the session rating of perceived exertion (sRPE) method. Between-group differences were examined using independent-samples t-tests with Bonferroni correction for multiple comparisons (adjusted $\alpha' = 0.0042$), supplemented by Cohen's d effect sizes. **Results:** (1) After 8 weeks, all 9 performance indicators in the experimental group showed significant improvement compared with the pre-test values ($P < 0.001$), whereas only the standing long jump ($P = 0.001$) and RFD ($P = 0.033$) demonstrated improvements in the control group. (2) Intergroup comparisons revealed that the experimental group outperformed the control group significantly across all 9 indicators ($P < 0.05$, $d = 0.71 \sim 1.07$); the increase in the CMJ-SJ difference and the improvement in RFD suggest that SSC efficiency and neural drive level may represent potential adaptive mechanisms; however, these inferences require further validation through direct measurement methods.

Keywords

Plyometric Training, 100-Meter Sprint, Lower Limb Explosive Power, Rate of Force Development, Stretch-Shortening Cycle, Randomized Controlled Trial

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在短跑训练实践中, 存在一个长期被忽视的矛盾: 高校短跑教练员通常将大量训练时间投入杠铃深蹲、硬拉等传统抗阻练习以增强运动员的下肢最大力量, 但力量的增长并不能完全转化为 100 m 成绩的提升[1][2]。这一“力量-速度转化鸿沟”的神经肌肉根源在于, 短跑运动中下肢发力所依赖的并非最大力量(F_{max})本身, 而是力量在极短时间窗内的增长率(rate of force development, RFD)以及肌肉牵张-缩短周期(stretch-shortening cycle, SSC)的利用效率[3][4]。100 m 跑运动员在加速与最大速度阶段的触地时间仅约 0.09~0.12 s, 而人体达到最大等长力量通常需要超过 0.3 s [5]。这意味着在短跑的每一次着地瞬间, 运动员根本没有足够的时间来调用其最大力量储备。因此, 单纯追求 F_{max} 增长的传统抗阻训练模式, 在力-速曲线的生理学坐标上可能打在了错误的位置。

快速伸缩复合训练(plyometric training, 亦称超等长训练)为弥合上述转化鸿沟提供了一条独特的神经肌肉通路。其核心机制在于充分利用 SSC: 肌肉在快速离心收缩阶段储存弹性势能, 随即在向心收缩阶段释放, 从而产生远超单纯向心收缩的峰值力量输出[6]。这一机制与短跑途中跑的着地-蹬伸循环在动作结构上具有高度的生物力学同构性——二者均依赖下肢肌群在极短时间内完成“离心缓冲→向心蹬

伸”的 SSC 转换[7]。正因如此，plyometric 训练被认为可能比传统抗阻训练更精确地作用于短跑成绩的力-速限制因素。

在既有的实验证据中，plyometric 训练对下肢爆发力的提升效果已在篮球、足球、排球等球类项目中获得较为一致的正面验证[8]-[10]。Stojanović 等[5]的系统综述报告了 plyometric 训练对垂直跳跃高度的大效应量改善($d = 0.44 \sim 1.21$)；翟华楠和周彤[11]的 Meta 分析进一步证实，复合式训练对青少年下肢爆发力的综合效应量达中等偏大水平。然而，从球类项目到短跑专项的证据迁移面临三重断裂：其一，球类项目的下肢发力以垂直方向为主导，而短跑加速阶段的核心需求是水平方向的爆发力输出；其二，球类项目的起跳动作允许较长的预蹲与发力时间(0.3 s)，而短跑的着地-蹬伸周期极为短暂(< 0.12 s)，二者在 SSC 的时间尺度上存在本质差异；其三，绝大多数已有研究仅以立定跳远、纵跳摸高等场地测试为评价指标，缺乏测力台等长发力率等实验室级测量手段，因而无法区分 plyometric 训练对 SSC 效率、向心收缩能力及神经驱动水平等不同维度的差异化效应[5]。

上述证据断裂导致了两个直接后果：在实践层面，教练员难以判断将球类项目的 plyometric 方案简单迁移至短跑训练是否具有充分的专项适配性；在理论层面，plyometric 训练对短跑运动员下肢爆发力的促进究竟是源于 SSC 效率的改善、神经驱动的增强，还是肌肉-肌腱力学特性的改变，仍缺乏来自同一实验的多维度证据的交叉验证[12]。基于上述背景，本研究设计了一个综合性的匹配对照实验，以回答三个层次递进的问题：(1) 在 RPE 等量化的训练负荷框架下，8 周专项化 plyometric 训练是否比传统抗阻训练更有效地提升大学生男子 100 m 运动员的下肢爆发力？(2) 若有效，这种优势在场地测试(立定跳远、原地摸高)与实验室测量(CMJ、SJ、RFD)两个层面是否具有一致的表现？(3) CMJ 与 SJ 的差值变化以及 RFD 的提升能否为 plyometric 训练的神经肌肉适应机制提供间接的推断线索？通过同时采集场地与实验室两个层面的 9 项指标，本研究试图在统一的实验框架内为上述三个问题提供初步的证据链。

2. 研究对象与方法

2.1. 实验对象

选取男子 100 m 运动员 36 名。纳入标准：系统训练年限 ≥ 2 a；100 m 个人最好成绩 11.00~12.00 s；实验前 3 个月内无下肢运动损伤史；自愿参与并签署知情同意书。将 36 名受试者按 100 m 跑前测成绩排序后，以相邻配对方式交替分配至实验组与对照组，各 18 人。实验前两组受试者在年龄、身高、体质量、训练年限及全部基线指标上的差异均无统计学意义($P > 0.05$)，分组均衡可比(表 1)。

Table 1. Comparison of basic conditions and baseline indicators between the two groups before the experiment ($M \pm SD$)
表 1. 实验前两组受试者基本情况与基线指标比较($M \pm SD$)

指标 Indicator	实验组(n = 18) EG	对照组(n = 18) CG	t	P
年龄/a	20.3 $\pm$ 1.2	20.5 $\pm$ 1.1	-0.521	0.606
身高/cm	178.3 $\pm$ 3.2	177.8 $\pm$ 3.8	0.427	0.672
体质量/kg	71.2 $\pm$ 4.5	70.6 $\pm$ 4.9	0.383	0.704
训练年限/a	4.2 $\pm$ 1.0	4.5 $\pm$ 0.9	-0.946	0.351
100 m/s	11.41 $\pm$ 0.20	11.39 $\pm$ 0.18	0.315	0.755
立定跳远/m	2.97 $\pm$ 0.07	2.95 $\pm$ 0.08	0.797	0.431
原地起跳摸高/m	3.16 $\pm$ 0.42	3.14 $\pm$ 0.58	0.118	0.907
CMJ/cm	42.8 $\pm$ 5.1	42.1 $\pm$ 5.8	0.384	0.703

续表

SJ/cm	38.5 ± 4.6	37.8 ± 5.2	0.427	0.672
RFD/(N·s ⁻¹)	2852 ± 418	2798 ± 452	0.372	0.712

注: CMJ = 反向纵跳腾空高度; SJ = 蹲跳腾空高度; RFD = 0~200 ms 等长发力率。

2.2. 训练方案与负荷监控

实验为期 8 周。两组运动员保持原有专项技术训练(5 次/周, 约 90 min/次)不变, 力量训练安排在技术训练前实施(3 次/周, 周一、周三、周五, 约 45 min/次)。

实验组采用 plyometric 训练方案, 参照美国国家体能协会(NSCA)推荐的三阶段进阶原则[4], 将 8 周划分为基础适应期(第 1~4 周)及专项转化期(第 5~8 周)。

基础适应期练习内容: 原地纵跳(3 组 × 8 次)、团身跳(3 组 × 8 次)、分腿蹲跳(3 组 × 每侧 8 次)、单腿原地跳(3 组 × 每侧 6 次)、低跳箱跳深(跳箱高 30 cm, 3 组 × 8 次)。每次训练完成 5 个动作, 足触地约 80 次, 组间间歇 3 min。

强度提升期练习内容: 跳深(跳箱高 45 cm, 3 组 × 8 次)、原地纵跳(3 组 × 10 次)、交替箭步跳(3 组 × 每侧 10 次)、栏架连续跳(栏高 40 cm × 5 栏, 3 组 × 5 次)、单腿跨步跳(3 组 × 每侧 8 次)。每次训练完成 5 个动作, 足触地约 100 次, 组间间歇 2.5 min。

专项转化期练习内容: 跳深(跳箱高 60 cm, 3 组 × 8 次)、栏架连续跳(栏高 50 cm × 6 栏, 3 组 × 6 次)、30 m 跨步跳(3 组)、单腿三级跳(3 组 × 每侧 4 次)、之字形双腿跳(3 组 × 8 次)。每次训练完成 5 个动作, 足触地约 120 次, 组间间歇 2 min。

对照组采用传统抗阻训练方案: 杠铃深蹲(4 组 × 8 次, 75% 1 RM)、硬拉(4 组 × 8 次, 75% 1 RM)、腿举(4 组 × 10 次, 80% 1 RM)、负重提踵(3 组 × 12 次)、俯卧腿弯举(3 组 × 10 次)。每次训练完成 5 个动作, 组间间歇 2~3 min。第 5 周起将深蹲与硬拉负荷上调至 80% 1 RM, 以维持训练刺激。

训练负荷监控: 每次力量训练结束后 15 min, 采用 Borg CR-10 主观疲劳等级量表(RPE)收集运动员的自我疲劳感知。以“RPE × 训练时间(min)”计算单次会话负荷(session load, SL), 并汇总每周总负荷(weekly load, WL)。两组训练由同一名教练员全程监督, 实验期间要求运动员保持常规饮食与作息, 不额外摄入运动营养补剂。

2.3. 测试指标与方法

2.3.1. 场地测试

100 m 跑: 使用电子计时系统(FAT)于标准 400 m 田径场测试, 受试者着钉鞋、蹲踞式起跑, 每人测试 1 次。

立定跳远: 受试者双脚平行立于起跳线后, 屈膝摆臂后双脚同时发力前跳, 测量起跳线至脚跟最近着陆点的垂直距离。每人测试 3 次, 取最佳成绩。

原地双脚起跳摸高: 受试者侧对墙壁站立, 单臂尽力上举标记指尖高度(站立摸高), 原地下蹲后双脚同时发力垂直起跳, 标记指尖触碰最高点, 二者之差即为净跳高度。每人测试 3 次, 取最佳成绩。

2.3.2. 实验室测试

反向纵跳(CMJ)与蹲跳(SJ): 采用便携式测力台(Kistler 9286B, 采样频率 1000 Hz)进行测试。CMJ 测试时, 受试者双手叉腰立于测力台上, 自直立位快速下蹲后立即全力向上起跳, 要求起跳与落地过程中躯干保持直立。SJ 测试时, 受试者双手叉腰呈半蹲位(膝角约 90°)静止 2 s 后, 在无预蹲动作的条件下全力向上起跳。系统自动计算腾空高度。每项测试 3 次, 取最佳成绩, 组间间歇 1 min。以 CMJ 与 SJ 的差

值(CMJ-SJ)作为 SSC 效率的间接指标。

等长发力率(RFD): 受试者站立于测力台上, 以膝角 120°的姿势执行最大等长收缩 5 s, 采集发力初期的力 - 时间曲线, 取 0~200 ms 区间的平均力变化率($\Delta F/\Delta t$)作为 RFD 值。每名受试者测试 3 次, 取最佳成绩, 组间间歇 2 min。

30 m 分段运动学参数: 在 100 m 跑场地测试中同步布设红外光电计时门(Brower TC-System), 于 0、10、20、30 及 60 m 处采集分段计时。由 0~60 m 分段时间与步数推算该区段平均步频。上述参数均为间接推算值, 非直接测量值(直接测量需高速摄像 ≥ 200 fps 或足底压力鞋垫), 其精度受推定腾空时间的假设影响, 需在解读时审慎对待。每名受试者采集 1 次有效数据。

所有测试分别于实验前(第 0 周)及实验后(第 9 周初)两个时点完成, 由同一组测试人员使用相同设备操作。

2.4. 统计学处理

采用 SPSS 27.0 处理数据。组内实验前后比较采用配对样本 t 检验, 组间后测比较采用独立样本 t 检验, 显著性水平 $\alpha = 0.05$ 。为弥补小样本可能导致的统计效力不足, 在 P 值基础上补充计算 Cohen's d 效应量, 依据 Cohen 标准: $|d| = 0.2$ 为小效应, 0.5 为中效应, ≥ 0.8 为大效应[13]。同时计算各指标训练前后变化率($\Delta\%$)。

3. 结果

3.1. 训练负荷监控

两组 8 周内的周均 RPE 及会话负荷(SL)差异均无统计学意义($P > 0.05$)。实验组周均 RPE 为 6.7 ± 0.5 , 对照组为 6.8 ± 0.4 ; 实验组单次 SL 为 302 ± 25 AU, 对照组为 306 ± 22 AU。8 周总 WL 两组亦无显著差异(实验组 7254 ± 598 AU vs 对照组 7344 ± 528 AU, $t = -0.478$, $P = 0.636$), 表明两组在实验周期内承受了统计学上等量的训练负荷(见表 2)。

Table 2. Comparison of training load between the two groups over 8 weeks (M $\pm$ SD)
表 2. 两组 8 周训练负荷比较(M $\pm$ SD)

指标 Indicator	实验组(n = 18) EG	对照组(n = 18) CG	t	P
周均 RPE	6.7 $\pm$ 0.5	6.8 $\pm$ 0.4	-0.662	0.512
单次 SL/AU	302 $\pm$ 25	306 $\pm$ 22	-0.509	0.614
8 周总 WL/AU	7254 $\pm$ 598	7344 $\pm$ 528	-0.478	0.636

注: SL = RPE $\times$ 训练时间(min); WL = 每周 SL 之和。

3.2. 场地测试

实验组 100 m 跑后测成绩(11.24 ± 0.15 s)较前测(11.41 ± 0.20 s)呈现极显著下降($t = 5.128$, $P < 0.001$, $\Delta\% = -1.49\%$); 对照组前后测差异未达显著水平(11.39 ± 0.18 s vs 11.36 ± 0.16 s, $t = 1.682$, $P = 0.110$, $\Delta\% = -0.26\%$)。后测组间比较显示, 实验组成绩优于对照组($t = -2.320$, $P = 0.026$, $d = 0.77$), 但经 Bonferroni 校正后未达校正显著性阈值。

实验组立定跳远后测成绩(3.07 ± 0.06 m)较前测(2.97 ± 0.07 m)有极显著提升($t = -8.216$, $P < 0.001$, $\Delta\% = +3.37\%$); 对照组亦呈极显著提升(2.95 ± 0.08 m vs 3.00 ± 0.07 m, $t = -4.243$, $P = 0.001$, $\Delta\% = +1.69\%$), 但提升幅度约为实验组的一半。后测组间比较显示, 实验组成绩极显著优于对照组($t = 3.221$, $P = 0.003^*$,

$d = 1.07$), 经 Bonferroni 校正后仍达显著水平。

实验组原地摸高后测成绩(3.21 ± 0.38 m)较前测(3.16 ± 0.42 m)呈极显著提升($t = -7.889$, $P < 0.001$, $\Delta\% = +1.58\%$); 对照组前后测差异无统计学意义(3.14 ± 0.58 m vs 3.15 ± 0.51 m, $t = -0.682$, $P = 0.504$, $\Delta\% = +0.32\%$)。后测组间比较显示, 实验组成绩显著优于对照组($t = 2.144$, $P = 0.039$, $d = 0.71$), 经 Bonferroni 校正后未达校正显著性阈值(见表 3)。

Table 3. Changes in field test indicators between the two groups before and after the experiment (M $\pm$ SD)

表 3. 两组实验前后场地测试指标变化(M $\pm$ SD)

指标 Indicator	组别 Group	实验前 Pre	实验后 Post	t 组内	P 组内	$\Delta\%$	d 组间
100 m 跑/s	实验组 EG	11.41 ± 0.20	11.24 ± 0.15	5.128	<0.001	-1.49	0.77
	对照组 CG	11.39 ± 0.18	11.36 ± 0.16	1.682	0.110	-0.26	
立定跳远/m	实验组 EG	2.97 ± 0.07	3.07 ± 0.06	-8.216	<0.001	3.37	1.07*
	对照组 CG	2.95 ± 0.08	3.00 ± 0.07	-4.243	0.001	1.69	
原地摸高/m	实验组 EG	3.16 ± 0.42	3.21 ± 0.38	-7.889	<0.001	1.58	0.71
	对照组 CG	3.14 ± 0.58	3.15 ± 0.51	-0.682	0.504	0.32	

注: Bonferroni 校正阈值 $\alpha' = 0.0042$ (12 项指标同时检验), *表示组间 P 值在 Bonferroni 校正后仍达显著水平; t 组内为配对 t 检验值, d 组间为独立样本 t 检验。

3.3. 实验室测试

3.3.1. 反向纵跳(CMJ)与蹲跳(SJ)

实验组 CMJ 腾空高度后测(47.5 ± 4.3 cm)较前测(42.8 ± 5.1 cm)有极显著提升($t = -7.823$, $P < 0.001$, $\Delta\% = +11.0\%$); 对照组前后测差异处于显著性边界(42.1 ± 5.8 cm vs 43.2 ± 5.2 cm, $t = -2.105$, $P = 0.050$, $\Delta\% = +2.6\%$)。后测组间比较显示, 实验组 CMJ 显著优于对照组($t = 2.699$, $P = 0.011$, $d = 0.90$), 经 Bonferroni 校正后未达校正显著性阈值。

Table 4. Changes in CMJ and SJ flight height between the two groups before and after the experiment (M $\pm$ SD)

表 4. 两组实验前后 CMJ 与 SJ 腾空高度变化(M $\pm$ SD)

指标 Indicator	组别 Group	实验前 Pre	实验后 Post	t 组内	P 组内	$\Delta\%$	d 组间
CMJ	实验组(EG)	42.8 ± 5.1	47.5 ± 4.3	-7.823	<0.001	11.0	0.90
	对照组(CG)	42.1 ± 5.8	43.2 ± 5.2	-2.105	0.050	2.6	
SJ	实验组(EG)	38.5 ± 4.6	41.9 ± 4.0	-6.452	<0.001	8.8	0.72
	对照组(CG)	37.8 ± 5.2	38.7 ± 4.8	-1.824	0.085	2.4	
CMJ-SJ	实验组 EG	4.3 ± 2.0	5.6 ± 2.2	-4.528	<0.001	—	0.51
	对照组(CG)	4.3 ± 2.3	4.5 ± 2.1	-0.895	0.383	—	

实验组 SJ 腾空高度后测(41.9 ± 4.0 cm)较前测(38.5 ± 4.6 cm)有极显著提升($t = -6.452$, $P < 0.001$, $\Delta\% = +8.8\%$); 对照组前后测差异未达显著水平(37.8 ± 5.2 cm vs 38.7 ± 4.8 cm, $t = -1.824$, $P = 0.085$, $\Delta\% = +2.4\%$)。后测组间比较显示, 实验组 SJ 显著优于对照组($t = 2.170$, $P = 0.037$, $d = 0.72$), 经 Bonferroni 校正后未达校正显著性阈值。

实验组 CMJ-SJ 差值由实验前的 4.3 ± 2.0 cm 增大至后测的 5.6 ± 2.2 cm ($t = -4.528$, $P < 0.001$), 对照组前后无显著变化(4.3 ± 2.3 cm vs 4.5 ± 2.1 cm, $t = -0.895$, $P = 0.383$), 提示实验组 SSC 利用效率可能出现选择性提升(见表 4)。

3.3.2. 等长发力率(RFD)

实验组 RFD 后测(3328 ± 375 N·s⁻¹)较前测(2852 ± 418 N·s⁻¹)有极显著提升($t = -7.124$, $P < 0.001$, $\Delta\% = +16.7\%$); 对照组亦出现显著提升(2798 ± 452 N·s⁻¹ vs 2910 ± 408 N·s⁻¹, $t = -2.318$, $P = 0.033$, $\Delta\% = +4.0\%$), 但提升幅度远小于实验组。后测组间比较显示, 实验组 RFD 极显著优于对照组, 经 Bonferroni 校正后仍达显著水平(见表 5)。

Table 5. Changes in RFD between the two groups before and after the experiment (M $\pm$ SD) (N·s⁻¹)
表 5. 两组实验前后 RFD 变化(M $\pm$ SD) (N·s⁻¹)

组别 Group	实验前 Pre	实验后 Post	t 组内	P 组内	$\Delta\%$	d 组间
实验组 EG (n = 18)	2852 $\pm$ 418	3328 $\pm$ 375	-7.124	<0.001	16.7	1.07*
对照组 CG (n = 18)	2798 $\pm$ 452	2910 $\pm$ 408	-2.318	0.033	4.0	

注: *表示组间 P 值在 Bonferroni 校正后仍达显著水平; t 组内为配对 t 检验值, d 组间为独立样本 t 检验。

3.3.3. 运动学参数

实验组 0~30 m 加速段平均支撑时间(推算值)后测(0.126 ± 0.008 s)较前测(0.134 ± 0.011 s)呈极显著缩短($t = 5.892$, $P < 0.001$, $\Delta\% = -6.0\%$); 对照组前后测差异未达显著水平(0.132 ± 0.010 s vs 0.130 ± 0.009 s, $t = 1.685$, $P = 0.110$, $\Delta\% = -1.5\%$)。后测组间比较显示, 实验组支撑时间极显著短于对照组, 经 Bonferroni 校正后仍达显著水平。

实验组 30~60 m 最大速度段平均步频后测(4.47 ± 0.17 Hz)较前测(4.31 ± 0.20 Hz)有极显著提升($t = -5.892$, $P < 0.001$, $\Delta\% = +3.7\%$); 对照组前后测差异未达显著水平(4.28 ± 0.22 Hz vs 4.32 ± 0.19 Hz, $t = -1.485$, $P = 0.155$, $\Delta\% = +0.9\%$)。后测组间比较显示, 实验组步频显著高于对照组($t = 2.495$, $P = 0.018$, $d = 0.83$), 经 Bonferroni 校正后未达校正显著性阈值(见表 6)。

Table 6. Changes in kinematic parameters between the two groups before and after the experiment (M $\pm$ SD)
表 6. 两组实验前后运动学参数变化(M $\pm$ SD)

指标 Indicator	组别 Group	实验前 Pre	实验后 Post	t 组内	P 组内	$\Delta\%$	d 组间
支撑时间/s Support time	实验组(EG)	0.134 $\pm$ 0.011	0.126 $\pm$ 0.008	5.892	<0.001	-6.0	1.04
	对照组(CG)	0.132 $\pm$ 0.010	0.130 $\pm$ 0.009	1.685	0.110	-1.5	
步频/Hz: Step frequency	实验组(EG)	4.31 $\pm$ 0.20	4.47 $\pm$ 0.17	-5.892	<0.001	3.7	0.83
	对照组(CG)	4.28 $\pm$ 0.22	4.32 $\pm$ 0.19	-1.485	0.155	0.9	

4. 讨论

4.1. Plyometric 训练对跳跃爆发力与神经肌肉功能的差异化影响

实验组在场地测试与实验室测量两个层面的跳跃指标上均取得显著改善, 且效应量达到中至大水平。

其中, CMJ 腾空高度提升 11.0% ($d = 0.90$), SJ 腾空高度提升 8.8% ($d = 0.72$)。两项指标的共变与分化具有重要的机制提示意义。

CMJ 与 SJ 的核心区别在于前者允许预蹲阶段的 SSC 参与, 而后者排除了 SSC 的贡献[14]。因此, CMJ-SJ 差值的变化可作为 SSC 利用效率的间接判据。本研究中, 实验组 CMJ-SJ 差值由 4.3 cm 显著增大至 5.6 cm ($P < 0.001$), 而对照组无变化, 提示 plyometric 训练可能选择性地增强了受试者利用 SSC 的能力。已有文献表明, plyometric 训练可通过提高肌腱复合体的弹性储能与释能效率、缩短离心-向心耦合时间, 从而优化 SSC 的输出增益[5]。Markovic 等[6]进一步指出, 离心阶段的冲击速度是决定 plyometric 训练 SSC 适应程度的关键变量——离心速度越快, 肌梭牵张反射越强, 向心收缩峰值力越高。本实验方案中跳深练习的跳箱高度由 30 cm 递增至 60 cm, 离心冲击载荷的渐进增大可能正是驱动 SSC 适应的重要刺激条件。类似地, 有研究表明针对短跑专项大学生的 8 周加压训练也让实验组在跳跃等下肢力量指标上有显著提高; 针对三级跳远运动员的研究也显示, 为期 8 周、每周 2 次的训练干预可显著提升其下肢爆发力[15]。值得注意的是, CMJ-SJ 差值的组间比较未达统计学显著水平($P = 0.134$, $d = 0.51$), 这可能是由于差值的个体间变异较大(实验组后测 $SD = 2.2$ cm), 即便在中等样本($n = 36$)条件下仍缺乏足够的统计效力来检测组间差异。因此, 差值的变化方向虽与 SSC 效率改善的假设一致, 但这一推断的确定性有限。

RFD 的提升(+16.7%, $d = 1.07$)提供了另一维度的机制线索, 且该指标的组间差异在 Bonferroni 校正后仍达显著水平($P = 0.003$), 是本研究统计证据最稳健的发现之一。RFD 主要反映神经肌肉系统在发力初期的运动单位募集速率与放电频率, 是独立于最大力量的爆发力指标[16]。实验组 RFD 的大效应量改善提示, plyometric 训练不仅可能优化了外周肌腱的力学特性, 还可能提升了中枢神经驱动水平。对照组 RFD 亦出现小幅但统计显著的增长(+4.0%, $P = 0.033$), 表明传统抗阻训练对早期发力率亦有一定促进作用, 但其效应量远小于实验组。

需指出的是, 上述机制推断基于间接测量指标的共变分析, 缺乏肌电图、超声弹性成像等直接测量手段的支持。CMJ-SJ 差值的增大虽与 SSC 效率改善的理论预期一致, 但不能排除其他因素(如下肢刚度变化、起跳策略改变)的混淆效应。因此, 上述讨论应被视为基于现有数据与文献的合理推测, 其确证有赖于未来研究的直接测量验证。

4.2. 两种训练模式效果差异的力-速关系解释

在相同周期(8 周)与频率(3 次/周)条件下, 实验组的 plyometric 训练方案对下肢爆发力的改善幅度较对照组传统抗阻训练方案更为明显。相关研究显示, 8 周的渐进式增强式训练后, 受试者在立定跳远、垂直跳跃等下肢爆发力测试项目中取得的改善显著优于传统抗阻训练组; 另有针对高校女子篮球运动员的 8 周实验也表明, 采用爆发力相关训练的实验组在立定跳远、CMJ、助跑单脚起跳摸高等测试中的成绩提升明显优于采用传统训练的对照组。

上述差异可从力-速关系曲线(Hill 曲线)的视角加以阐释。传统抗阻训练以中等负荷为主要刺激, 其核心适应为肌纤维横截面积增大及最大力量(F_{max})的提升[4]。然而, 根据 Hill 力-速关系, 最大力量的提升主要影响曲线的高力低速端(即最大力量区), 对高速度低力端(即爆发力区)的迁移效应有限[17]。100 m 跑的下肢发力特征正对应于力-速曲线的高速度区——触地时间仅 0.09~0.12 s, 远短于最大力量达峰所需时间(0.3 s) [5]。因此, 单纯 F_{max} 的增长难以有效转化为短跑运动表现的提升。

相较之下, plyometric 训练通过 SSC 机制的专项化刺激, 直接作用于力-速曲线的高速端, 使受试者在有限触地时间内实现更大的冲量输出。实验组立定跳远组间差异(3.07 m vs 3.00 m, $d = 1.07$)与原地摸高组间差异(3.21 m vs 3.15 m, $d = 0.71$)均达到中至大效应量, 佐证了 plyometric 训练在爆发力转化效率上的优势。

值得关注的是,对照组立定跳远亦出现极显著的组内提升($P = 0.001$),但其提升幅度(1.69%)约为实验组(3.37%)的一半,且原地摸高未见显著改变。此结果表明,传统抗阻训练可能通过最大力量增强间接改善水平方向爆发力,但对垂直方向爆发力的直接贡献有限,提示两类训练模式对力-速曲线不同区段的干预靶点存在本质差异。

4.3. 方案设计的专项适配性

本实验方案在三个维度上体现了与100 m短跑专项特征的对接。第一,水平与垂直方向的协同。100 m跑虽为水平方向运动,但其下肢发力涉及水平分力与垂直分力的复合[18]:加速阶段依赖较大的水平推进力,加速跑最初几步的支撑点处于身体重心投影点的后面,使后蹬的大部分力量用于提高水平速度;最大速度阶段则需充裕的垂直支撑力以维持高步频,高水平 and 低水平运动员的差别主要在前支撑期,高水平运动员产生的垂直力更大[5]。方案中跳深与原地纵跳侧重垂直方向爆发力,单腿跨步跳与交替箭步跳兼顾水平与垂直方向,栏架连续跳则模拟了跨栏与快速提膝的专项动作模式。三项测试指标的效应量呈现出高度一致性(立定跳远 $d = 1.07$,原地摸高 $d = 0.71$),验证了方案的双向均衡性。第二,双侧与单侧训练的兼顾。短跑为典型的单侧交替运动,对单腿支撑与蹬伸能力要求极高。方案中单侧练习的比例由基础期的约30%递增至转化期的约50%,保障了训练刺激的专项化演进[19]。第三,训练量的安全阈控。参照NSCA指南[4],将周足触地次数控制在80,200次/周,兼顾训练效益与损伤风险控制。8周实验期间实验组无急性运动损伤发生,初步验证了该量控策略的安全性。

4.4. 局限性及未来方向

本研究的局限性需在解读结论时审慎考量。其一,分组设计并非严格意义上的随机分配——受限于同一田径队的训练环境,受试者按基线成绩排序后以交替配对方式分配至两组,两组运动员在日常训练中处于同一场地,可能存在训练内容的沾染效应。尽管样本量($N = 36$)已较同类小样本研究有所提升,但统计效力仍不足以充分开展亚组分析(如按100 m成绩分层)。未来研究应采用整群随机或匹配配对等更严格的设计,并进一步扩大样本规模。其二,实验室测量手段仍不够全面。本研究虽纳入了测力台CMJ、SJ及RFD测试,但未采集肌电图以直接量化神经驱动水平,亦未使用超声弹性成像评估肌腱力学特性的适应性变化。后续研究应整合上述手段,以直接验证本研究所推测的SSC效率与神经驱动适应机制。其三,运动学参数仅获取了分段支撑时间与步频的间接估算值,未采用高速摄像或动作捕捉系统进行三维运动学分析,难以揭示plyometric训练对下肢关节角度、关节力矩及功率输出模式的精确影响。其四,尽管以RPE×训练时间法进行了负荷监控,但两组训练在力学刺激维度上的差异未被量化(如离心冲击总功、向心举起吨位),未来研究宜在等RPE负荷基础上进一步实现力学负荷的匹配设计。其五,本研究未设置跟踪测试时点,训练效果的保留与消退规律尚不明确。后续研究应在干预结束后4周及8周增设跟踪测试,以评估plyometric训练效应的持久性。

5. 结论

(1) 在本研究的特定条件下,8周专项化plyometric训练方案较同期传统抗阻训练方案,能够更有效地提升大学生男子100 m运动员的下肢爆发力。实验组在100 m跑($d = 0.77$)立定跳远($d = 1.07$)原地摸高($d = 0.71$)CMJ($d = 0.90$)SJ($d = 0.72$)RFD($d = 1.07$)支撑时间($d = 1.04$)及步频($d = 0.83$)共8项指标上的组间效应量均达到中至大水平,且全部9项指标的效应量方向一致,支持实验组的整体优势。

(2) 经Bonferroni多重比较校正后,立定跳远($P = 0.003$)、RFD($P = 0.003$)及支撑时间($P = 0.004$)三项指标的组间差异仍达校正显著性阈值($\alpha' = 0.0042$),其余6项指标的原始P值在0.011~0.039之间,未达保守校正阈值,但效应量的一致方向削弱了多重比较导致的假阳性疑虑。

(3) CMJ-SJ 差值的增大($P < 0.001$)及 RFD 的提升($P < 0.001$)提示 plyometric 训练可能通过增强 SSC 利用效率与神经驱动水平发挥作用,但上述机制推断尚待肌电图、超声弹性成像等直接测量手段的验证。实验组 60 m 段步频提升 3.7% ($P < 0.001$),提示 plyometric 训练的神经肌肉适应可能在一定程度上转化至短跑专项运动学表现,但支撑时间为间接推算值,其精度有限。

(4) 在 RPE 等量化的训练负荷框架下(两组 8 周总 WL 差异 $P = 0.636$),上述效果可更合理地归因于训练模式本身的差异。鉴于非严格随机分组及非力学等负荷设计的制约,上述结论的外推需审慎。后续研究应扩大样本规模、采用严格的分组设计、引入触地时间的直接测量手段(高速摄像或足底压力鞋垫)及直接机制测量手段,并增设跟踪测试时点,以进一步验证 plyometric 训练对短跑运动员下肢爆发力的效应大小、机制路径及持久性。

参考文献

- [1] 田麦久,刘大庆. 运动训练学[M]. 北京:人民体育出版社,2012.
- [2] 王瑞元,苏全生. 运动生理学[M]. 北京:人民体育出版社,2012.
- [3] Komi, P.V. (1984) Physiological and Biomechanical Correlates of Muscle Function: Effects of Muscle Structure and Stretch-Shortening Cycle on Force and Speed. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, **12**, 81-122.
<https://doi.org/10.1249/00003677-198401000-00006>
- [4] Friedman, K. (2016) Essentials of Strength Training and Conditioning, 4th Edition. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, **48**, 2073.
- [5] Stojanović, E., Ristić, V., McMaster, D.T. and Milanović, Z. (2017) Effect of Plyometric Training on Vertical Jump Performance in Female Athletes: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Sports Medicine*, **47**, 975-986.
<https://doi.org/10.1007/s40279-016-0634-6>
- [6] Markovic, G., Jukic, I., Milanovic, D. and Metikos, D. (2007) Effects of Sprint and Plyometric Training on Muscle Function and Athletic Performance. *The Journal of Strength and Conditioning Research*, **21**, Article No. 543.
<https://doi.org/10.1519/r-19535.1>
- [7] Donald A. Chu. 快速伸缩复合训练[M]. 北京:北京体育大学出版社,2011.
- [8] 林奕贯,许洋洋,黄建华,等. 非稳定地面快速伸缩复合训练研究进展[J]. 中国运动医学杂志, 2020, 39(7): 577-584.
- [9] Asadi, A. and Ramírez-Campillo, R. (2016) Effects of Cluster vs. Traditional Plyometric Training Sets on Maximal-Intensity Exercise Performance. *Medicina*, **52**, 41-45. <https://doi.org/10.1016/j.medic.2016.01.001>
- [10] 胡水. 不同界面快速伸缩复合训练以及相关损伤预防的研究[J]. 广州体育学院学报, 2020, 40(2): 97-99.
- [11] 翟华楠,周彤. 复合式训练影响青少年下肢爆发力的 meta 分析[J]. 武汉体育学院学报, 2020, 54(10): 65-71.
- [12] 车同同. 生物力学视角下“Plyometric”与肌肉“拉长-缩短周期”运动理论的研究述评[J]. 南京体育学院学报, 2021, 20(4): 44-53.
- [13] Cohen, J. (1988) Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences. 2nd Edition, L. Erlbaum Associates.
- [14] 胡世奇,闫子龙. 超等长训练及训练中应注意的问题[J]. 军事体育学报, 1999(3): 73-75.
- [15] Fattahi, A. and Sadeghi, H. (2014) Resistance, Plyometrics and Combined Training in Children and Adolescents' Volleyball Players: A Review Study. *Journal of Scientific Research and Reports*, **3**, 2584-2610.
<https://doi.org/10.9734/jsrr/2014/11631>
- [16] 曹小祥. 论快速伸缩复合训练在竞技体育中的训练——起源,问题,发展[J]. 安徽体育科技, 2017, 38(1): 19-23.
- [17] Schmitt, O. (2017) The Heat of Shortening and the Dynamic Constants of Muscle.
https://xueshu.baidu.com/usercenter/paper/show?paperid=1f3e0cm03w4q06q0c01b0r30f6426819&site=xueshu_se
- [18] Negra, Y., Chaabene, H., Sammoud, S., Bouguezzi, R., Abbes, M., Hachana, Y., et al. (2017) Effects of Plyometric Training on Physical Fitness in Prepubertal Soccer Athletes. *International Journal of Sports Medicine*, **38**, 370-377.
<https://doi.org/10.1055/s-0042-122337>
- [19] 杨志鹏. 血流限制技术结合不同负重快速伸缩复合训练对下肢爆发力的影响研究[J]. 运动与健康, 2025, 4(11): 157-160.