



力量训练提升马拉松跑者耐力运动表现的研究进展及训练策略

李 斐, 丁海勇*

摘要: 有氧能力的高低是马拉松跑者能否取得优异成绩的关键。最大摄氧量、乳酸阈和跑步经济性是衡量运动员有氧能力和耐力运动表现的关键指标,也是长跑训练效果的核心考量。由于力量和耐力训练对机体产生不同的训练刺激,教练员和运动员很少将力量训练作为提升耐力运动表现的手段,以防止有氧能力受到负面影响。通过对大量文献梳理发现,力量训练可以在不影响机体最大摄氧量和乳酸阈值的前提下,通过改善神经肌肉功能、转换肌纤维类型以及增强肌肉肌腱刚度和利用弹性势能的能力,提高跑步经济性和无氧能力,改善运动员耐力运动表现。本文基于对力量、耐力训练的生理学适应的探讨,总结不同形式力量训练对耐力运动表现的影响与作用机制,并为马拉松选手科学安排力量训练提出建议,从而优化其耐力运动表现。

关键词: 力量训练;耐力运动表现;最大摄氧量;乳酸阈;跑步经济性

中图分类号:G808 文献标志码:A 文章编号:1006-1207(2019)05-0016-13

DOI:10.12064/ssr.20190503

A Review on Strength Training to Improve Endurance Performance of Marathoners and Training Strategies for Optimum Performance

LI Fei, DING Haiyong*

(School of Physical Education and Training, Shanghai University of Sport, Shanghai 200438, China)

Abstract: Aerobic capacity is the cornerstone of excellent performance in marathon running. Maximum oxygen uptake, lactate threshold and running economy are critical physiological determinants of athletes' aerobic performance and also are the priorities of long-distance training. Since strength and endurance training exert distinct stimulus on individuals, coaches and athletes rarely use strength training as a means of improving endurance performance in case the aerobic capacity is adversely affected. Through reviewing a large number of literature, the study found that strength training could improve the running economy and anaerobic capacity and thus enhance endurance performance of the runners by improving neuromuscular function, transforming muscle fiber types, and increasing muscle-tendon stiffness and the ability to use elastic potential energy, without impairing maximal oxygen uptake and lactate threshold. Based on the physiological adaptation of strength and endurance training, the study summarizes the effect and mechanism of various strength training on the endurance performance and offers suggestions for marathoners to plan strength training scientifically so as to optimize the endurance performance.

Key Words: strength training; endurance performance; maximal oxygen uptake; lactate threshold; running economy

0 前言

跑步是世界上最受欢迎的运动之一,其优点为

运动形式简单,不受空间、地点和装备的约束。因此,跑步运动吸引了不同性别、不同年龄、不同阶层的大批爱好者参与其中,我国参与马拉松跑步的人数逐

收稿日期:2019-06-26

基金项目:上海市科学技术委员会科研计划项目(17080503300)。

第一作者简介:李斐,男,博士,讲师。主要研究方向:力量和耐力训练。E-mail:felix_2008@foxmail.com。

* 通讯作者简介:丁海勇,男,教授,博士生导师。主要研究方向:体育教育训练学。E-mail:dingh_y@163.com。

作者单位:上海体育学院 体育教育训练学院,上海 200438。



年来呈指数增长。2018年,我国举办的各类马拉松赛事达到了1581场,538万人次参与其中,享受跑步带来的乐趣与健康效应。马拉松项目包括半程(21.09 km)、全程(42.195 km)和超长距离(50 km、100 km)马拉松,该类型项目需要运动员具备极强的有氧能力,力求用最短的时间完成比赛^[1]。最大摄氧量(Maximum Oxygen Uptake, VO_{2max})、乳酸阈(Lactate Threshold, LT)和跑步经济性(Running Economy, RE)是影响长跑项目运动表现的3个关键生理因素^[2-4],马拉松训练的核心就在于不断发掘这些因素的潜力以达到最佳效果,促使耐力运动表现的提升。在过去很长一段时间内,由于对训练专项性原则的遵循,教练员和运动员更加注重通过不同形式跑的训练(如长距离低速跑、不同强度的间歇/冲刺跑及节奏变化的法特莱克跑等)来提升机体有氧能力和专项成绩^[2,5],很少考虑使用力量训练作为提升耐力运动表现的手段,或仅仅将其视为专项训练的辅助部分,用来预防过度跑步带来的伤病。究其原因,主要在于力量和耐力训练可对机体肌纤维重塑、能量代谢酶活性、线粒体和毛细血管结构与数量等方面产生截然不同的生理刺激和适应^[6]。因此教练员和运动员在安排和实施力量训练时非常谨慎,防止两类训练相互干扰造成对运动表现的不良影响。自从Hickson于1980年首次提出了“同时进行力量和耐力训练虽然会限制运动员力量水平的增长,但并不会影响其有氧能力发挥”观点后,不同形式力量训练对于长跑耐力运动表现的影响迅速引起科研人员和教练员的关注^[7]。

本文将综述力量训练对于马拉松(长跑)运动表现生理因素(包括 VO_{2max} 、RE、LT的和无氧能力)的影响与作用机制,同时对马拉松(长跑)运动员合理安排力量训练提出参考建议,为教练员和运动员更好地将力量训练融入整体训练计划,从而改善耐力运动表现提供理论依据和实践参考。

1 力量和耐力训练的生理学适应

力量训练以无氧代谢供能为主,包含高强度、低重复的肌肉收缩形式,运动时间较短。耐力训练以有氧代谢供能为主,包含低强度、多重复的肌肉收缩形式,运动时间较长^[6]。由于这些刺激因素的差异,两种训练模式产生明显不同的生理适应。

在力量训练过程中,由于运动强度较大,I型和II型肌纤维被募集,均产生了肌纤维体积和横截面积增长的积极性适应^[8,9],但II型肌纤维肥大的程度远高于I型肌纤维^[10]。同时随着训练中高阈值运动单位的不断动用,II型肌纤维亚型之间的比例会发

生变化,表现为IIx型肌纤维转变为IIa型^[10-12],IIa型肌纤维仍然保持良好的力量和爆发力,但是有氧功能和抵御疲劳的能力更强,并且较IIx型肌纤维更容易被募集。高负荷力量训练会减少骨骼肌细胞内线粒体的密度^[13]。虽然在整个训练期间线粒体数量并没有发生明显变化,但是由于线粒体数量增长速率不及肌肉横截面积的提高,故单位体积肌肉内线粒体的密度相对减少。同样,力量训练后不会引起肌肉内毛细血管数量的增加,但会因为肌肉肥大而导致单位毛细血管密度降低^[14]。此外,力量训练会提高磷酸肌酸激酶、肌酸激酶、磷酸果糖激酶等ATP-CP和糖酵解酶活性,从而改善无氧工作能力,但对有氧氧化酶没有影响^[15-16]。

不同于力量训练、耐力训练刺激了心血管和呼吸系统,提高了心输出量和呼吸效率,两者共同作用促进了 VO_{2max} 的提升。同时,耐力训练运动强度低、运动总量大的特点提高了I型肌纤维募集的频率和数量^[17],耐力训练后II型肌纤维亚型也与力量训练一样出现比例变化,由IIx型肌纤维转换为有氧能力更强的IIa型肌纤维^[18],促进耐力表现的提升。

长期有氧训练增加了肌纤维周围毛细血管数量和单位肌肉毛细血管密度^[19],更多的毛细血管提升血液与工作肌肉间氧气、营养和代谢产物的交换^[16]。同时耐力训练会提高线粒体数量和体积,增强线粒体利用氧气产生ATP的能力。此外,耐力训练增强线粒体内重要有氧代谢酶(如柠檬酸合成酶和琥珀酸脱氢酶等)活性,加速能源物质分解形成ATP,提高机体有氧能力^[20]。

同时进行力量和耐力训练并不会损害训练者的耐力水平。同期训练(力量和耐力训练安排在相同时期的训练方法^[21])后IIx型肌纤维会向IIa型肌纤维转化;同时线粒体密度、有氧代谢酶活性与单独进行耐力训练相比,增长速率相同,这为同期训练保持有氧能力提供了生理学依据^[21]。但同期训练后力量和爆发力相较单独进行力量训练增长幅度减少,原因在于骨骼肌不能在代谢或形态层面上对两种训练同时产生适应^[22]。首先,力量增长需要对训练肌肉施加足够的张力^[23],耐力训练不能为肌肉力量增长带来充足的刺激。长期耐力训练会诱发运动单位募集效率^[23]和II型肌纤维快速收缩速度的下降^[24],同时会降低蛋白质合成反应^[12],使肌纤维横截面积缩小。其次,肌糖原是力量训练重要的能量底物^[25],而耐力活动会极大地减少体内肌糖原储量^[26],导致肌肉产生疲劳影响随后力量训练的效果和质量^[22],这些因素都会限制同期训练中力量增长的速率。



2 力量训练对耐力运动表现影响因素的作用

2.1 力量训练与 VO_{2max}

VO_{2max} 指的是机体在运动中主动摄取并被细胞利用的最大氧量,是肺内氧气扩散、心脏泵血、血红蛋白运载氧气和骨骼肌利用氧气能力的综合体现^[27]。 VO_{2max} 是长跑运动员有氧能力的关键指标,也是其达到出色运动表现的基础和先决条件。例如,要以 2 h15 min 的成绩跑完 42 km 的马拉松,运动员必须在整个跑步过程中保持 60 mL/kg/min 的平均摄氧量^[9]。由于马拉松跑者通常只能以 75%~85% VO_{2max} 的强度完成比赛^[20],所以选手要达到此运动成绩,必须具备 70.5~80 mL/kg/min 的 VO_{2max} 水平。正因如此,许多长跑选手致力于通过不同训练方法提升 VO_{2max} 水平。

关于力量训练对于 VO_{2max} 影响的研究发现,力量训练可以提高无训练经历者的 VO_{2max} 水平^[28-29],但对优秀长跑选手的 VO_{2max} 水平没有影响。Gettman 等人对无训练经验的 41 名男性和 36 名女性进行 12 周,每周 4 次的循环力量训练和耐力跑训练干预后发现,只进行循环力量组与跑步加循环力量训练组受试者的 VO_{2max} 水平都出现了明显改善,分别提升了 12% 和 17%^[30]。力量训练能够提升无训练经验者 VO_{2max} 水平的原因可能在于这类人群的初始 VO_{2max} 水平较低,相比高水平训练者存在较大的提升空间,任何训练方式都有可能提升他们的有氧能力^[30];同时研究中使用了循环力量训练方式,间歇时间短、训练总量大的特点刺激了受试者心血管和呼吸系统,改善了他们的 VO_{2max} 水平。之前有研究报道^[31],持续 8~20 周的循环力量训练可以提升中低有氧能力人群 5%~8% 的 VO_{2max} 水平。

对于优秀或良好训练水平的长跑运动员来说,目前并没有证据表明力量训练可以提升他们的 VO_{2max} 水平。Sedano 等人发现,将力量训练加入到耐力训练计划中可以提高运动员最大速度以及 RE,但是不会改变运动员 VO_{2max} 水平^[32]。优秀运动员经过长期耐力训练, VO_{2max} 达到瓶颈并趋于稳定,力量训练带来的心血管刺激并不能对他们的有氧能力造成影响。Burlison 等人报道,传统力量训练课的平均练习强度只有 VO_{2max} 的 44%^[33],因此,力量训练与优秀长跑运动员 VO_{2max} 水平提升之间并没有生理学上的联系^[4]。

此外,由于力量训练会增加体重和 II 型肌纤维体积,降低线粒体和毛细血管密度^[34],教练员更加关注力量训练是否会损害运动员的 VO_{2max} 。在最近一篇 Meta 分析中,作者指出在耐力训练中加入力量训练虽然不会提高运动员 VO_{2max} 水平,但也不会对其

造成负面影响^[35]。Beattie 等人对 20 名高水平长跑运动员进行每周 2 次,持续 40 周的力量训练,干预后受试者 VO_{2max} 没有出现下降,表明长时间力量训练并不会影响高水平运动员的 VO_{2max} 水平^[36]。因此,在耐力训练计划中加入力量训练并不会损害运动员的有氧能力,同时力量训练对于提升耐力运动表现的贡献不在于改善 VO_{2max} 。

2.2 力量训练与 RE

RE 是指在次极限负荷的特定速度下跑步,摄氧量达到稳定状态时的耗氧量^[37]。它反映了人体在次最大速度下的能量消耗^[38]以及能量转换成跑步速度的效率^[39]。更好的 RE 意味着在定量负荷中的耗氧量(能量消耗)更少^[40],使运动员可以在既定速度下跑得更远或特定距离下跑得更快。东非地区选手之所以能在长距离跑步项目中保持优势,主要归因于他们出色的 RE^[41]。此外,RE 与 VO_{2max} 改善存在显著的非一致性,即运动员可以在 VO_{2max} 没有明显变化的前提下,通过改善 RE 来提高长跑运动成绩^[42]。

影响 RE 的要素包括生理学因素、形态学因素、生物力学因素、神经肌肉因素和训练因素^[38,43]。其中神经肌肉功能的改善是提高 RE 的重要机制^[44]。力量训练带来的神经肌肉功能改善可以提高肌肉内/间协调和运动单位募集数目,增加肌肉力量和收缩速度^[8];同时改善下肢肌肉肌腱刚度和拉长缩短周期(Stretch-Shortening Cycle, SSC)利用能力,从而降低同等跑速下的能量消耗^[45-46]。目前的研究指出,持续 6~20 周最大力量^[32,36,47-50]、爆发力^[51-53]和超等长训练^[46,54-55]可以改善神经肌肉功能,提高跑者 2%~8% 的 RE。同时,低、中、高水平跑者都可以通过力量训练改善 RE,表明虽然跑者训练水平存在差异,但都可以从力量训练中获益^[35]。但要注意的是并不是所有的力量训练都可以为 RE 带来积极变化。固定器械^[56]或单关节^[57]的力量训练因为不具备与跑步动作相似的肌肉收缩方式和训练学特征,因此并不能产生很好的训练效果。Blagrove 指出,使用多关节、自由重量的力量训练动作可以更好地刺激神经肌肉系统,将获得的训练效益迁移至 RE 的提高^[35]。此外,目前的研究更多注重在耐力训练计划中加入一种或两种类型的力量训练,很少考虑到力量周期性发展的特点。我国学者李山在研究中使用分期力量训练干预,提升了运动员 65% VO_{2max} 和 85% VO_{2max} 强度下的 RE^[58],但由于实验样本量较小,水平相对较低无法证明分期力量对于 RE 的确切影响,未来需要有更多的研究来探寻长周期分期力量训练对于 RE 的作用。



2.3 力量训练与LT值

LT指在递增负荷强度运动中,血乳酸值出现急剧增加的拐点。它是评价长跑运动员耐力表现的重要指标^[59]。高于LT值的运动强度会给呼吸和代谢系统带来额外的压力^[60],如加速肌肉糖原的消耗^[61]和体内酸性代谢产物产生,进而影响肌肉收缩功能,加速疲劳产生^[62]。经过训练后,LT值的提高可以使运动员在血乳酸拐点出现前维持更高的训练或比赛强度(更高比例的 VO_{2max} 、心率或速度)。因此,通过训练提高LT水平是运动员提升耐力水平的有效途径。

目前,有关力量训练直接影响LT值的研究报道非常有限。Marcinik等人对10名无训练经验者进行为期12周8~20RM的循环力量训练,干预后发现,受试者伸膝、屈膝最大扭矩分别提升了30%和52%,同时LT值提高了12%,并在75%峰值强度下自行车力竭骑行时间增加了33%^[63]。由于此研究中受试者没有训练基础,循环力量训练方案可以对他们的LT水平产生足够的刺激。对于高水平运动员来说,目前没有研究表明力量训练会直接影响其LT水平,但是可以提高LT强度下的跑步速度(Lactate Threshold velocity, vLT)。Hamilton等人在20名中长跑运动员训练计划中加入7周爆发力训练,训练干预后实验组4mmol/L LT速度提高了3.5%,5km成绩显著提高了1.2%^[54]。Storen等人的研究也有类似的发现,17名长跑运动员进行为期8周,每周3次最大力量训练后,虽然LT没有出现变化,但vLT提高了2.8%,70% VO_{2max} 强度下RE提高了5%^[50]。vLT的改善往往伴随着RE的提升^[50,54],因其降低了LT强度下的心率^[50]和能量消耗^[64],表明运动员可以在达到相同血乳酸浓度时奔跑的速度更快。但目前尚未有研究对两者相关性进行分析,无法证实运动员vLT是RE提高的结果。此外,没有证据表明力量训练会对LT水平造成负面影响。

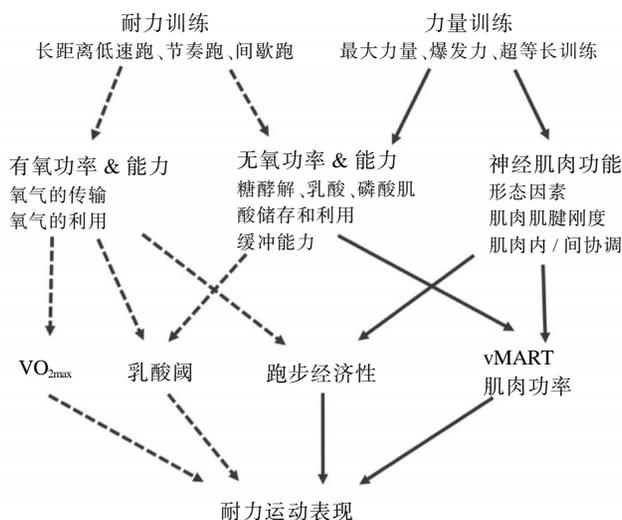
2.4 力量训练与无氧能力

虽然良好的有氧能力和RE是长跑运动员取得优异成绩的前提,但是越来越多的研究表明有氧能力并不是影响耐力运动表现的唯一因素。随着长跑项目比赛节奏的加快和竞争愈发激烈,运动员的无氧能力同样起到关键作用^[65]。最大冲刺速度、 VO_{2max} 速度(Maximum Oxygen Uptake Velocity, vVO_{2max})和最大无氧跑步测试速度(Maximal Anaerobic Running Test Velocity, vMART)是评价长跑运动员无氧能力的有效指标。

当长跑选手具备相似的有氧能力、LT值或RE时,速度更为出色的运动员可以在起跑阶段发挥优势占据有力位置,并在最后的冲刺时刻超越对手赢得比赛,这是区分优秀和精英运动员的重要因素。研究表明,6~9周的力量或超等长训练即可提升长跑运动员神经肌肉功能,改善其20~30m最大冲刺速度^[52-53,66]。

vVO_{2max} 是跑台递增负荷测试可以达到的峰值速度,也是 VO_{2max} 、RE和无氧能力的综合体现^[65,67],与多项长跑成绩具有相关性^[68-69]。研究发现多数长跑选手运动生涯中的 VO_{2max} 都保持稳定,但 vVO_{2max} 可以通过训练提升约14%^[11],表明运动员可以通过训练,将最大有氧功率转化为更快的跑步速度,提高其运动成绩。力量训练带来的神经肌肉功能的变化可以改善 vVO_{2max} ,提高长跑运动表现。Damascen对18名男性跑者进行为期8周,每周2次的最大力量训练干预,训练后受试最大力量和跳深高度均有改善,同时 vVO_{2max} 和10km成绩分别显著提升了2.9%和2.5%^[70]。Hamilton对20名男性中等水平跑者进行5~7周,每周1~3次的超等长力量训练,训练后受试者 vVO_{2max} 显著提升了1.8%,5km成绩提高了1.2%^[54]。

最大无氧跑步测试是以速度逐渐递增的方式进行20s跑步冲刺,中间休息100s,再进行20s冲刺,如此反复直到力竭的跑台测试^[71]。Paavolainen在其研究中以模型指出(图1),该测试所达到的峰值速度(vMART)受到神经肌肉和无氧能力两方面因素的影响,能够反映机体专项耐力肌肉功率(Specific-endurance Muscle Power)^[65,72-73],即机体在高强度运动中(高有氧或糖酵解代谢需求)神经肌肉系统反复、快速产生功率输出的能力,并与5km成绩显著相关^[65]。他在实验中对22名男子运动员进行为期9周爆发力和超等长训练干预后,实验组vMART和5km跑步成绩分别提高了4.6%和3.1%。Mikkola等人也有相似的发现,他对25名青年长跑运动员进行8周力量和爆发力训练后,vMART提高了3%,同时14km/h速度下的RE增加了2.7%^[52]。由此可见,力量训练引起的力量与力量发展速率(Rate of Force Development, RFD)的改善,不仅可以提升RE,还会改善运动员的最大冲刺速度、 vVO_{2max} 和vMART,进而提高他们的耐力运动成绩。由于此领域相关的文献较少,今后需要更多的研究同时纳入这3个指标进行测量,以充分证实可以通过力量训练改善无氧能力提升运动成绩。



注:根据 Paavolainen 等人^[53]的研究修改,虚线箭头表明耐力训练带来的生理学效益,实线箭头表明力量训练带来的生理学效益

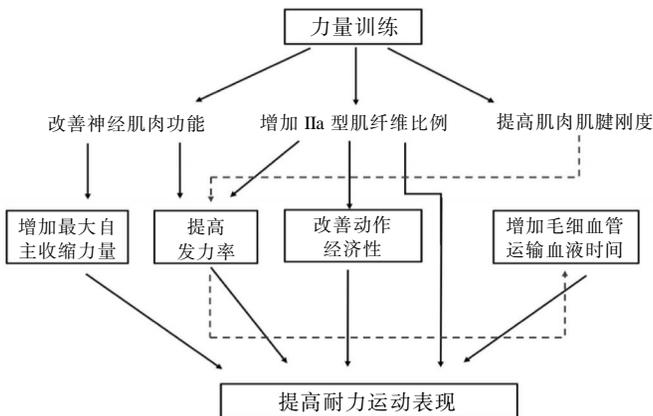
图 1 力量和耐力训练对于长跑运动员耐力运动表现影响的假设模型

Figure 1 Hypothetical Model of the Effects of Strength and Endurance Training on Endurance Performance of Long-distance Runners

3 力量训练改善耐力运动表现的机制

研究已经证明,力量训练带来的生理效益可以

提高长跑运动员 5 km 马拉松跑步成绩^[48,53-54]和最大有氧速度力竭时间^[50]。在多位学者^[74-76]的研究基础上,将背后的机制总结如图 2。



注:根据 Aagaard 等人^[74]的研究修改,实线箭头表示力量训练带来的刺激效应,虚线箭头表示潜在的相互影响,需要实验进一步证明

图 2 力量训练对于耐力运动表现的影响机制

Figure 2 Influence Mechanism of Strength Training on Endurance Performance

首先,力量训练改善了神经肌肉功能,提高了肌肉最大力量和收缩速度,增加了跑步过程中的蹬地力量^[77],使机体能以相对更低的力量比例完成每一个跑步动作,减少相同负荷下肌纤维激活的程度和运动单位募集的数量^[49,78],改善 RE。同时,力量训练增加了肌肉协调和共同收缩的能力^[79],提高了下肢肌群的力量发展速率,运动员可以用更短的时间达到既定跑速下所需要的推进力,减少脚在支撑阶段触地时间,从缓

冲到推进阶段的转换时间更快,能量消耗降低^[80]。此外,力量发展速率的提高使肌肉产生特定力量的收缩时间减少,降低了因为肌肉收缩所造成的血液循环限制,提高毛细血管输送血液的时间 (Capillary Transit Time),增加氧气传递以及与做功肌肉能量物质交换的效率,从而提高有氧能力^[74,81]。

其次,力量训练会产生 IIx 型肌纤维向 IIa 型肌纤维转换的适应^[76]。Staron 等人发现,在进行高负荷下



肢力量训练后,无训练经验的男女受试者 II 型肌纤维出现重新分配,表现为 IIx 肌纤维比例下降,IIa 型肌纤维比例提高^[9-10]。IIa 型肌纤维同样具备较高的收缩力量和收缩速度,并且其抵抗疲劳的能力远高于 IIx 型。IIa 型肌纤维比例增加有助于更好地维持重复性高强度运动,增进 RE 和耐力运动表现^[82-83]。

再次,力量训练会带来 I 型和 II 型肌纤维的肥大和力量的增强^[9]。根据肌纤维募集大小原则,随着运动强度的增加,肌纤维会按照 I→IIa→IIx 的方式募集。力量训练带来的 I 型肌纤维力量增长,可以推迟次大强度运动疲劳发生的时间,降低有氧能力较弱的 II 型肌纤维(尤其是 IIx 型)募集比例或频率^[84],减慢肌肉内储存糖原的排空速度和肌肉整体的疲劳程度^[80],从而延长运动员参与高强度运动至力竭的时间。Storen 等人对受试进行为期 8 周的力量训练干预,干预后最大有氧速度跑台测试的力竭时间提高了 21.3%^[50]。

最后,跑步是一项肌肉离心与向心收缩不断交替转换的运动,因此机体将离心阶段储存的弹性势能,转移至向心阶段释放的能力尤为重要。有研究报道,跑动过程中下肢弹性能量的储存和利用大约可占运动所需总能量的 30%~40%^[50]。此外,肌肉肌腱刚度(腿在跑动过程中抗变形的能力)^[85]和肌肉拉长-缩短周期的能力(肌肉在高速离心收缩后立即进行

向心收缩)^[86]对于跑步过程中的能量传递和抵抗落地产生的冲击力有重要的作用,与 RE 存在显著关系^[43,87],力量和超等长训练^[46,55,88]可以提高下肢肌肉肌腱刚度和机体利用拉长-缩短周期的能力,增加机体储存和释放弹性势能的效率,降低跑步过程中肌肉主动收缩做功的程度和次大强度下的能量需求,从而改善 RE 和耐力运动表现^[89]。

目前为止,研究更多从骨骼肌肉结构和神经肌肉功能角度出发讨论力量训练对于耐力促进的作用和机制,但对全面理解力量与耐力运动表现相互关系仍然存在局限性。在未来的机制研究中,应更多增加力量训练干预后机体跑步技术运动生物力学层面的变化,包括对运动学和动力学的具体影响。同时,探讨力量训练对大脑皮层和中枢兴奋性的作用也不可少,以更好诠释力量训练对于提高运动单位募集和激活水平、改善耐力运动表现的作用。

4 马拉松(长跑)运动员力量训练的安排策略

为了更好地将力量训练应用到长跑项目中,教练员和运动员在设计和执行力量训练计划时要充分考虑力量训练模式、训练动作、训练频率与顺序等要素的综合作用,优化耐力表现的同时,减少训练带来的受伤风险。表 1 总结了对照试验中不同形式力量训练对于长跑运动表现的影响。

表 1 不同形式力量训练对于长跑运动员耐力运动表现影响的研究一览表

Table I List of Researches on the Effect of Various Strength Training on Endurance Performance of Long-distance Runners

| 作者,年份 | 实验对象 | 训练训练类型/频率 | 力量训练计划 | 耐力训练计划 | 研究结果 |
|-----------------------------------|------------------|---|--|---|--|
| 薛锋等 ^[7] ,2014 | 19 名良好训练水平男性运动员 | 最大力量 6 周/每周 3 次 | 实验组(N=10):无负重或低负重跑跳、核心训练 3 次/周;负重半蹲 4 组×4 RM 对照组(N=9):无负重或低负重跑跳、核心训练 3 次/周 | 实验组:8~16 km 公路跑;4~12 km 场地跑,每周训练 10~11 次; 对照组:8~16 km 公路跑;4~12 km 场地跑,每周训练 10~11 次 | 实验组: ↑ 1RM 半蹲, ↑ RFD; ↑ vVO _{2max} 5.4%±4.8%; ↑ 90% 无氧阈速度 RE4.1%±3.7% |
| Beattie 等 ^[86] ,2016 | 20 名男性国家水平大学运动员 | 最大力量、爆发力训练; 1~20 周/每周 2 次 20~40 周/每周 1 次 | 实验组(N=11)首要目标最大力量(深蹲等),20~40 周;主要目标爆发性力量(深蹲跳) | 实验组:维持原有耐力训练 对照组:维持原有耐力训练 | 实验组: ↑ 1RM 深蹲, CMJ;30cmDJ; ↑ 2/4 mmol/L 血乳酸跑速 3.5%±3.2%; ↑ vVO _{2max} 3.5%±2.9%; ↑ 5~9 km/h RE |
| Damasceno 等 ^[70] ,2015 | 18 名男性中等训练水平业余跑者 | 最大力量; 8 周/每周 2 次 | 实验组(N=9)半蹲,倒蹬,伸膝 1~2 周 3 组 8~10 RM;3~4 周 3 组 6~8 RM;5~6 周 3 组 4~6 RM;7~8 周 2 组 3~5 RM 对照组(N=9)无力量训练 | 实验组:中低强度有氧耐力跑 50%~70% VO _{2max} 对照组:同实验组 | 实验组: ↑ 1RM 力量 23±4.2%; ↑ 10 km 跑步成绩 2.5%; ↑ vVO _{2max} 2.9%±0.8% |

(接下表)



(续上表)

| 作者,年份 | 实验对象 | 训练训练类型/频率 | 力量训练计划 | 耐力训练计划 | 研究结果 |
|------------------------------------|--------------------------|---------------------------------------|---|---|---|
| Skovgaard 等 ^[49] ,2014 | 23 名男性中等水平跑者 | 最大力量 + 冲刺 8 周 / 每周 2 次 | 实验组 (N=12):30 s 冲刺 3 min 间歇 4~12 个;深蹲、硬拉等 3 组 4~8 RM 至 4 组 4 RM 对照组(N=11) | 实验组:4×4 min>85% HR _{max} 有氧间歇跑;中等有氧强度 75%~85% HR _{max} 40~70 min 对照组:(40±8)千米/周长距离跑、(4±5)千米/周间歇跑 | 实验组: ↑ 1RM 深蹲 12%; ↑ 12 km/h RE 3.1%; ↑ 10 km 跑步成绩 3.8% ↑ 1 500 m 跑步成绩 5.5% |
| Støren 等 ^[50] ,2008 | 17 名(9 男 8 女)训练良好长跑运动员 | 最大力量 8 周 / 每周 3 次 | 实验组 (N=8):4 组 4 次半蹲 对照组(N=9):无力量训练 | 实验组:维持原有常规耐力训练(65%~95%最大心率区间) 对照组:同实验组 | 实验组: ↑ 1RM 半蹲 33.2%, RFD 26%; ↑ 70% VO _{2max} RE; ↓ LT 强度下心率 2.8%, 70% VO _{2max} 心率 1.9%; ↑ 最大有氧速度力竭时间 21.3% |
| Piacentini 等 ^[48] ,2013 | 16 名(12 男,4 女)中年训练良好水平跑者 | 最大力量(实验组 1) 次最大力量(实验组 2) 6 周 / 每周 2 次 | 实验组 1 (N=6):深蹲、卧推等 4 组 3~4 次(85%~90%1RM) 实验组 2 (N=5):深蹲、卧推等 3 组 10 次(70%1RM) 对照组(N=5):无力量训练 | 实验组 1:常规节奏跑、间歇跑,50 千米/周 实验组 2、对照组:同实验组 1 | 实验组 1: ↑ 1RM 下肢蹬踏力量 17%, ↑ 下肢刚度 13%; ↑ 马拉松节奏 RE (10.75 km/h)6.17% |
| Sedano 等 ^[52] ,2013 | 18 名男性良好训练水平运动员 | 最大力量(实验组 1) 力量耐力(实验组 2) 12 周 / 每周 2 次 | 实验组 1:深蹲 + 垂直跳等 3 组×7 次 70% 1RM 实验组 2:力深蹲 + 坐姿伸膝等 3 组×20 次 40%1RM 对照组:8 个弹力带力量训练动作×25 次 | 实验组 1:越野跑 0.5~1.5 h, 法特莱克、间歇跑 0.5~1.5 小时 / 每周 6 次 实验组 2、对照组:同实验组 1 | 实验组 1: ↑ 1RM 力量,CMJ; ↑ 12 km/h、16 km/h RE; ↑ 3 km 跑步成绩 实验组 2: ↑ CMJ; ↑ 12 km/h RE、 |
| Millet 等 ^[45] ,2002 | 15 名男性高水平运动员 | 最大力量 14 周 / 每周 2 次 | 实验组(N=7):腓绳肌卷曲、蹬踏、深蹲等练习 3~5 组 3~5 次 对照组(N=8):无力量训练 | 实验组:< 70% VO _{2max} 有氧耐力跑 (48±7)千米/周 对照组:< 70% VO _{2max} 有氧耐力跑 (44±5)千米/周 | 实验组: ↑ 1RM 半蹲、提踵; ↓ 下肢刚度; ↑ 75% VO _{2max} 强度 RE; ↑ vVO _{2max} 2.7 |
| Berryman 等 ^[51] ,2010 | 35 名男性训练良好长跑运动员(省级水平) | 爆发力量训练 超等长训练 8 周 / 每周 3 次 | 实验组 1(N=12):3~6 组 8 RM 向心收缩蹲 实验组 2(N=11):20、40、60 cm 跳深 对照组(N=5):无力量训练 | 实验组 1:2 次高强度间歇,1 次低强度持续训练 / 每周 实验组 2、对照组:同实验组 1 | 实验组 1: ↑ CMJ, ↑ 12 km/h RE4%; 3 km 跑步成绩 4.1% ↑ vVO _{2max} 4.2% 实验组 2: ↑ CMJ 4.5%, ↑ 12 km/h RE7%; 3 km 跑步成绩 4.8% ↑ vVO _{2max} 4.2% |
| Mikkola 等 ^[52] ,2007 | 25 名(18 男 7 女)高中长跑选手 | 爆发力训练 8 周 / 每周 3 次 | 实验组 (N=13)50~10 个 30~150 m 冲刺;各类跳跃训练;2~3 组 6~10 次的力量练习如深蹲、伸膝等 对照组(N=12)不进行力量训练 | 实验组:(8.8±2.1)小时 / 周, 常规耐力跑,< 95%LT 强度。19%耐力训练替换为爆发力训练 对照组:(8.5±2.5)小时 / 周, 常规耐力跑,< 95%LT 强度。 | ↑ MVC8%±9%, ↑ RFD 31%±42%, ↓ 12 km/h、14 km/h 血乳酸浓度(12±20%),(11±15%); ↑ 14 km/h RE2.7% ± 7%; ↑ vMART3%±2%; ↑ 30 米冲刺速度 1.1% ±1.3% |
| Hamilton 等 ^[54] ,2006 | 20 名男性中等水平跑者 | 超等长训练 5~7 周 / 每周 1~3 次 | 实验组(N=10):5×30 s 冲刺 + 单腿跳 对照组(N=10):无力量训练 | 实验组:维持原有常规耐力训练(<70%~100%最大心率区间) 对照组:同实验组 | 实验组: ↑ 4 mmol/L 血乳酸跑速 3.5% ± 3.4%; ↑ 5 km 跑步成绩 1.2% ±1%; ↑ vVO _{2max} 1.8% ± 1.1% |

(接下表)



(续上表)

| 作者,年份 | 实验对象 | 训练训练类型/频率 | 力量训练计划 | 耐力训练计划 | 研究结果 |
|---|------------------------|---|---|---|--|
| Saunders 等 ^[55] ,2006 | 15名男性高水平长跑运动员 | 超等长训练 9周/每周3次 | 实验组(N=7):30 min 单腿跳、跳栏架、反向 跳等不同形式增强式 训练 对照组(N=8):无力量 训练 | 实验组:长时间耐力 跑60~150 min;有氧 间歇跑 对照组:同实验组 | ↑5CMJ15%;RFD14% ↑实验组18 km/h RE4.1% |
| Spurrs 等 ^[46] ,2003 | 17名男性良好训练水平跑者 | 超等长训练 6周/1~3周每周2 次,3~6周每周3次 | 实验组(N=8)蹲跳、分 腿跳、跨步跳、单腿跳 等增强式训练。第一 周60次触地,第六周 180次触地 对照组(N=9):无力量 训练 | 实验组:常规耐力训 练,80千米/周 | 实验组:↑MVC; CMJ13.2%; RFD14.1% ↑12 km/h RE6.7%; 14 km/h RE 6.4%; 16 km/h RE 4.1%; ↑3 km 跑步成绩 2.7% |
| Paavolainen 等 ^[53] ,1999 | 18名男性高水平越野跑运动员 | 实验组(N=10):9周 增强式训练+爆发力 训练 对照组:同实验组 | 实验组(N=10);反向 跳、跳栏架等超等长 训练+<40%1RM负 荷的高动作速度蹬 踏、伸膝练习 对照组(N=8):同实验 组 | 实验组:84%~116% 个体LT强度越野跑, (8.4±1.7)小时/周。替 换33%耐力训练时间 至力量训练。 对照组:84%~116% 个体LT强度越野跑, (9.2±1.9)小时/周,替 换3%耐力训练时间 至力量训练。 | 实验组:↑MVC7.1%; ↑5 km 跑步成绩 3.1% ↑15 km/h RE 8.1%; ↑20 m 冲刺3.4% ↑vMART4.6% |
| RamírezCampillo 等 ^[61] , 2014 | 36名(22男,14女)高 水平运动员 | 超等长训练 6周/每周2次 | 实验组(N=18)20 cm、 40 cm、60 cm 跳深各 2组10次 对照组(N=18) | 实验组:常规有耐力训 练(64.7±18.8)千米/周 对照组:常规有耐力训 练(70.0±19.3)千米/周 | 实验组:↑DJ20、40、 CMJ;↑2.4 km 跑步 成绩3.9%, ↑20 m 冲刺2.3% |

注:↑表示提高,↓表示下降,CMJ=纵跳测试,DJ=跳深测试,MVC=最大自主收缩力量,HR_{max}=最大心率,RFD=力量发展速率,RM=最大重复次数,vVO_{2max}=最大摄氧量速度,vMART=最大无氧跑步测试速度

4.1 力量训练模式和训练动作的选择

最大力量、爆发力训练和超等长训练模式都可以通过改善机体的神经肌肉功能从而提高跑步运动表现,但力量训练改善长跑跑步成绩的机制存在差异。最大力量训练能增加高阈值运动单位募集数目和同步性,提高肌肉协调和共同收缩能力从而改善最大肌肉力量、爆发力和力量发展速率^[50,90]。这些神经肌肉功能的改善可以迁移到长跑运动员RE和运动成绩中。Skovgaard在23名男性长跑选手训练中加入8周每周2次的最大力量训练,显著提高了他们的最大力量水平以及12 km/h速度下的RE和10 km专项成绩^[49]。要注意的是对于没有良好力量训练基础的长跑运动员而言,需要在训练计划中逐渐增加外部负荷以防止伤病和过度训练^[91]。

力量耐力或循环力量训练是以相对低的负荷(30%~50%1RM)/较多的重复次数(>15 RM)配以短暂间歇时间(1 min左右)进行的力量训练方法,由于在肌肉运动与代谢方式最接近专项需求,因此是长跑运动员选择最多的训练形式,可以提高其耐力运动表现^[28-29,33]。

爆发力训练的外部负荷相对较低,但因为要求运动员在尽可能短的时间内释放很大的力,对骨骼肌肉系统产生很强的刺激,所以可以有效增加训练者力量发展速率和肌肉收缩速度^[78],增进运动表现。Berryman让35名训练良好的长跑运动员进行8周,每周3次的爆发力训练,干预后纵跳高度、12 km/h速度下的RE和3 km专项成绩出现显著提高^[51]。Paavolainen等人有类似的发现,他们对22名中等训练水平运动员进行9周爆发力训练干预后,受试者20 m冲刺、5次连续跳远和支撑阶段触地时间都有所改善,同时15 km/h速度下的RE以及5 km跑步成绩分别出现显著提升^[53]。

超等长训练指通过预先拉伸肌肉,使肌肉在离心收缩阶段储存弹性势能,在随后向心收缩阶段快速释放,产生更大输出力量的高强度训练^[44,92]。由于跑步是一个肌肉离心收缩和向心收缩不断交替转换的运动,因此,运动员合理利用肌肉支撑阶段所储存的弹性势能,并将其在蹬伸阶段释放的能力可以促进其RE的改善。Spurrs对17名男性长跑运动员进行6周的超等长训练干预后,提高了受试的最大力量,纵跳高度和力量发展速率^[46]。这些神经肌肉做功



能力的改善提高了他们 12~16 km/h 速度下的 RE 和 3 km 成绩。Mikkola 等人对 25 名青年长跑运动员进行为期 8 周,每周 2 次的超等长训练,虽然 VO_{2max} 未发生变化,但运动员最大肌力,力量发展速率和 30 m 冲刺速度均有提高,使他们在 14 km/h 速度下的 RE 提高了 2.7%^[52]。

爆发力和超等长训练都需要在尽可能短的时间内发挥出最大力量,因此对训练者骨骼、关节和肌肉承受高强度冲击力有很高的要求。具备良好训练经验的跑者来说,可以选择爆发力、超等长或是复合力量训练作为提升耐力运动表现的方法。针对力量水平薄弱的跑者,例如不进行力量训练的马拉松跑者,建议从力量耐力训练开始,在夯实力量基础的前提下,逐渐过渡到最大力量和超等长训练,避免训练计划设计不当造成的运动损伤^[93]。

在力量训练动作的选择上,尽量避免使用开链、单关节和固定器械的练习动作(如下肢蹬踏、坐姿伸膝、负重足背屈等)^[65,70]。Stone 指出,开链动作的力量训练并不能为闭链运动项目(跑步)提供最佳的训练效果,优化其运动表现^[94]。尽管跑步过程包含开链和闭链动作,但髌、膝、踝三关节只在闭链阶段中才共同发挥作用,蹬地推动身体向前。此外,肌肉在单关节开链和多关节闭链的练习中表现出的激活方式也有所区别^[95]。因此在力量动作的选择上,应选择贴近跑步蹬伸动作和下肢多关节、大肌肉群参与、闭链力量训练动作,包括深蹲、硬拉、弓箭步等。这样才能募集更多的肌肉组织并对神经肌肉系统产生良好的刺激,增强下肢力量和力量发展速率。

4.2 力量训练的频率和练习顺序

在长跑跑者人群中使用时最大力量,爆发力或复合训练时进行 3~6 组,每组使用高负荷($\geq 70\% 1RM$)和低重复次数(≤ 5 次重复)能有效地提高跑者耐力运动表现。但与中等负荷和高重复次数力量训练计划相比,并没有表现出更好的效果。关于马拉松跑者力量训练的最佳负荷,仍需要进一步的研究。

在训练频率上,为期 4~12 周(每周 2~3 次)的力量训练可以为运动员带来神经肌肉系统适应,改善耐力运动表现^[32,48,53,70]。短于 4 周的力量训练由于刺激时间的不足,无法达到相应的生理效益。对于长期进行力量训练对耐力运动表现的影响方面,Beattie 对 20 名专业长跑选手进行为期 40 周的力量训练,包括 20 周赛季外和 20 周赛季内训练,发现力量训练除了可以改善运动员 RE 和耐力成绩外,对于比赛期内维持运动员赛季外所获得的力量水平也非常

有效^[37]。在训练的频率方面,有荟萃分析指出每周 2~3 次的力量训练对于力量增长非常有益^[96],而每周 1 次的力量训练只能用于维持已获得的力量水平。同时,由于长跑选手力量基础相对较低,两次力量训练之间的间隔应在 24 h 以上,确保充足的恢复。因此长跑运动员的力量训练频率不建议超过每周 3 次^[35]。

关于力量和耐力训练的顺序,虽然 Dudley^[97]、Bell^[98]和 Sale^[99]的研究认为,将力量和耐力训练放在不同训练日或同一训练日的不同时段(如上午耐力、下午力量)进行会增加两者的训练效益,但考虑现实训练效率问题,常把力量和耐力训练放在同一时段进行。在这种情况下,建议采用先耐力后力量的训练顺序,防止力量训练后带来的 RE 和耐力成绩的不良影响。Doma 等人对 14 名长跑运动员进行不同力量、耐力跑步组合发现,力量先于耐力的训练会对长跑运动员的 RE 和运动成绩造成负面影响^[100]。

5 结论与展望

马拉松(长跑)运动员在耐力训练计划中加入力量训练并不会对其 VO_{2max} 和 LT 值造成负面影响。同时,力量训练可以通过改善神经肌肉功能、转换肌纤维类型、增强肌肉肌腱刚度和利用弹性势能的能力提高训练者 RE、无氧能力(最大冲刺速度、 vVO_{2max} 、 $vMART$)和 5 km 马拉松项目专项成绩。不同的力量训练方式包括最大力量、爆发力训练和超等长训练都可以为运动员带来良好的训练适应。进行 4~12 周,每周 2~3 次,同时选择自由重量、多关节、闭链的力量训练动作能优化长跑运动员的训练效果,并将其迁移至耐力运动表现。

随着运动科学的不断发展,科研人员和教练员越来越重视力量训练对长跑项目的作用,但是在力量训练效果和内在机制方面仍然缺乏系统性研究。在今后的研究中,需要深入明确长周期分期力量训练各个要素(运动负荷、动作速度、间歇时间等)的变化对于耐力运动表现的影响,以此提高力量训练效率;同时,要进一步明确长期力量训练对于运动员耐力水平影响的生物学机制,包括激素水平变化、有氧代谢酶活性、线粒体数量和毛细血管密度等,从而更深入地解释力量训练对耐力运动表现的影响机制。

参考文献:

- [1] Jones A. The Physiology of the World Record Holder for the Women's Marathon[J]. International Journal of



- Sports Science & Coaching, 2009, 1(2): 101-116.
- [2] Jones A. M., Carter H. The Effect of Endurance Training on Parameters of Aerobic Fitness[J]. Sports Med., 2000, 29(6): 373.
- [3] Joyner M. J., Coyle E. F. Endurance exercise performance: the physiology of champions[J]. J. Physiol., 2008, 586(1): 35-44.
- [4] Midgley A. W., Mcnaughton L. R., Jones A. M. Training to Enhance the Physiological Determinants of Long-Distance Running Performance[J]. Sports Med., 2007, 37(10): 857-880.
- [5] Pate R. R., Branch J. D. Training for endurance sport[J]. Med. Sci. Sports Exerc., 1992, 24(9): 340-343.
- [6] Hughes D. C., Ellefsen S., Baar K. Adaptations to Endurance and Strength Training[J]. Cold Spring Harbor Perspectives in Medicine, 2017: a029769.
- [7] Hickson R. C. Interference of strength development by simultaneously training for strength and endurance[J]. European Journal of Applied Physiology & Occupational Physiology, 1980, 45(2-3): 255.
- [8] Folland D. J. P., Williams A. G. Morphological and Neurological Contributions to Increased Strength[J]. Sports Med, 2007, 37(2): 145-168.
- [9] Staron R. S., Leonardi M. J., Karapondo D. L., et al. Strength and skeletal muscle adaptations in heavy-resistance-trained women after detraining and retraining[J]. J Appl Physiol, 1991, 70(2): 631-640.
- [10] Staron R. S., Karapondo D. L., Kraemer W. J., et al. Skeletal muscle adaptations during early phase of heavy-resistance training in men and women[J]. J. Appl Physiol., 1994, 76(3): 1247.
- [11] Fry A. C., Allemeier C. A., Staron R. S. Correlation between percentage fiber type area and myosin heavy chain content in human skeletal muscle[J]. European Journal of Applied Physiology & Occupational Physiology, 1994, 68(3): 246.
- [12] Kraemer W. J., Patton J. F., Gordon S. E., et al. Compatibility of high-intensity strength and endurance training on hormonal and skeletal muscle adaptations[J]. J. Appl. Physiol., 1995, 78(3): 976-989.
- [13] Macdougall J. D., Sale D. G., Moroz J. R., et al. Mitochondrial volume density in human skeletal muscle following heavy resistance training[J]. Med. Sci. Sports, 1979, 11(2): 164-166.
- [14] Staron R. S., Malicky E. S., Leonardi M. J., et al. Muscle hypertrophy and fast fiber type conversions in heavy resistance-trained women[J]. European Journal of Applied Physiology & Occupational Physiology, 1990, 60(1): 71-79.
- [15] Macdougall J. D., Hicks A. L., Macdonald J. R., et al. Muscle performance and enzymatic adaptations to sprint interval training[J]. J. Appl. Physiol., 1998, 84(6): 2138-2142.
- [16] Wilmore J. H., Costill D. L. Physiology of sport and exercise[M]. ed.: Human Kinetics, 1994.
- [17] Simoneau J. A., Lortie G., Boulay M. R., et al. Human skeletal muscle fiber type alteration with high-intensity intermittent training[J]. European Journal of Applied Physiology & Occupational Physiology, 1985, 54(3): 250-253.
- [18] Wilson J. M., Loenneke J. P., Jo E., et al. The effects of endurance, strength, and power training on muscle fiber type shifting[J]. J. Strength Cond. Res., 2012, 26(6): 1724-1729.
- [19] Ricosanz J., Rankinen T, Joannis D. R., et al. Familial resemblance for muscle phenotypes in the HERITAGE Family Study[J]. Med. Sci. Sports Exerc., 2003, 35(8): 1360-1366.
- [20] Kenney W. L. Physiology of Sport and Exercise-5th Edition-Spanish - W. Larry Kenney, David Costill, Jack Wilmore[J]. Human Kinetics Inc.
- [21] 于洪军.论同期力量和耐力训练及其在竞技体育中的训练策略[J].体育科学,2014,34(2):18-33.
- [22] Leveritt M., Abernethy P. J., Barry B. K., et al. Concurrent Strength and Endurance Training[J]. Sports Med, 1999, 28(6): 413-427.
- [23] Chromia, Joseph A., Mulvaney, et al. A Review: The Effects of Combined Strength and Endurance Training on Strength Development[J]. J. Strength Cond. Res., 1990, 4(2).
- [24] Nader G. A. Concurrent strength and endurance training: from molecules to man[J]. Med Sci Sports Exerc, 2006, 38(11): 1965-1970.
- [25] Tesch P. A., Colliander E. B., Kaiser P. Muscle metabolism during intense, heavy-resistance exercise [J]. European Journal of Applied Physiology & Occupational Physiology, 1986, 55(4): 362-366.
- [26] Gollnick P. D., Piehl K., Saltin B. Selective glycogen depletion pattern in human muscle fibres after exercise of varying intensity and at varying pedalling rates[J]. Journal of Physiology, 1974, 241(1): 45-57.
- [27] Jr B. D., Howley E. T. Limiting factors for maximum oxygen uptake and determinants of endurance performance [J]. Med. Sci. Sports Exerc., 2000, 32(1): 70.
- [28] Haennel R., Teo K. K., Quinney A., et al. Effects of hydraulic circuit training on cardiovascular function[J]. Med. Sci. Sports Exerc., 1989, 21(5): 605.
- [29] Mccarthy J. P., Agre J. C., Graf B. K., et al. Compati-



- bility of adaptive responses with combining strength and endurance training[J]. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 1995, 27(3): 429-436.
- [30] Gettman L. R., Ward P., Hagan R. D. A comparison of combined running and weight training with circuit weight training[J]. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 1982, 14(3): 229-234.
- [31] Gettman L. R., Pollock M. L. Circuit Weight Training: A Critical Review of Its Physiological Benefits[J]. *Phys. Sportsmed*, 1981, 9(1): 44-60.
- [32] Sedano S., Marín P. J., Cuadrado G., et al. Concurrent training in elite male runners: the influence of strength versus muscular endurance training on performance outcomes[J]. *J. Strength Cond. Res.*, 2013, 27(9): 2433.
- [33] Jr B. M., O'bryant H. S., Stone M. H., et al. Effect of weight training exercise and treadmill exercise on post-exercise oxygen consumption[J]. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 1998, 30(4): 518-522.
- [34] Abernethy P. J., Jürimäe J., Logan P. A., et al. Acute and chronic response of skeletal muscle to resistance exercise[J]. *Sports Med.*, 1994, 17(1): 22.
- [35] Blagrove R. C., Howatson G., Hayes P. R. Effects of Strength Training on the Physiological Determinants of Middle- and Long-Distance Running Performance: A Systematic Review[J]. *Sports Med.*, 2017, (3): 1-33.
- [36] Beattie K., Carson B. P., Lyons M., et al. The Effect of Strength Training on Performance Indicators in Distance Runners[J]. *J. Strength Cond. Res.*, 2017, 31(1): 9-23.
- [37] 任占兵.影响跑步经济性的人体下肢肌肉做功研究[J]. *体育科学*, 2010, 30(1): 86-96.
- [38] Saunders P. U., Pyne D. B., Telford R. D., et al. Factors affecting running economy in trained distance runners[J]. *Sports Med.*, 2004, 34(7): 465-485.
- [39] Shaw A. J., Ingham S. A., Folland J. P. The valid measurement of running economy in runners[J]. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 2014, 46(10): 1968-1973.
- [40] Thomas, David Q., Fernhall, et al. Changes in Running Economy During a 5-km Run in Trained Men and Women Runners[J]. *J. Strength Cond. Res.*, 1999, 13(2): 162-167.
- [41] Lucia A., Esteve-Lanao J., Oliván J., et al. Physiological characteristics of the best Eritrean runners-exceptional running economy[J]. *Appl. Physiol. Nutr. Metab.*, 2006, 31(5): 530-540.
- [42] Conley D. L., Krahenbuhl G. S. Running economy and distance running performance of highly trained athletes [J]. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 1980, 12(5): 357-360.
- [43] Barnes K. R., Kilding A. E. Running economy: measurement, norms, and determining factors[J]. *Sports Med.* Open, 2015, 1(1): 8.
- [44] Barnes K. R., Kilding A. E. Strategies to improve running economy[J]. *Sports Med.*, 2015, 45(1): 37-56.
- [45] Millet G. P., Jaouen B., Borrani F., et al. Effects of concurrent endurance and strength training on running economy and $\dot{V}O_2$ kinetics[J]. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 2002, 34(8): 1351.
- [46] Spurrs R. W., Murphy A. J., Watsford M. L. The effect of plyometric training on distance running performance [J]. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 2003, 89(1): 1-7.
- [47] 薛锋,陈庆果,张健.长跑运动员最大力量训练的设计及其对跑步经济性的影响[J]. *中国体育科技*, 2014, 50(3): 3-12.
- [48] Piacentini M. F., De Ioannon G., Comotto S., et al. Concurrent strength and endurance training effects on running economy in master endurance runners[J]. *J. Strength Cond. Res.*, 2013, 27(8): 2295-2303.
- [49] Skovgaard C., Christensen P. M., Larsen S., et al. Concurrent speed endurance and resistance training improves performance, running economy, and muscle NHE1 in moderately trained runners[J]. *J. Appl. Physiol* (1985), 2014, 117(10): 1097-1109.
- [50] Storen O., Helgerud J., Stoa E. M., et al. Maximal strength training improves running economy in distance runners [J]. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 2008, 40(6): 1087-1092.
- [51] Berryman N., Maurel D. B., Bosquet L. Effect of plyometric vs. dynamic weight training on the energy cost of running[J]. *J. Strength Cond. Res.*, 2010, 24(7): 1818-1825.
- [52] Mikkola J., Rusko H., Nummela A., et al. Concurrent endurance and explosive type strength training improves neuromuscular and anaerobic characteristics in young distance runners[J]. *Int. J. Sports Med.*, 2007, 28(7): 602-611.
- [53] Paavolainen L., Hakkinen K., Hamalainen I., et al. Explosive-strength training improves 5-km running time by improving running economy and muscle power[J]. *Scand. J. Med. Sci. Sports*, 2003, 13(4): 272-272.
- [54] Hamilton R. J., Paton C. D., Hopkins W. G. Effect of high-intensity resistance training on performance of competitive distance runners[J]. *Int. J. Sports Physiol. Perform.*, 2006, 1(1): 40-49.
- [55] Saunders P. U., Telford R. D., Pyne D. B., et al. Short-term plyometric training improves running economy in highly trained middle and long distance runners[J]. *J. Strength Cond. Res.*, 2006, 20(4): 947.
- [56] Vikmoen O., Raastad T., Seynnes O., et al. Effects of Heavy Strength Training on Running Performance and



- Determinants of Running Performance in Female Endurance Athletes[J]. *PLoS One*, 2016, 11(3): 0150799.
- [57] Fletcher J. R., Esau S. P., Macintosh B. R. Changes in tendon stiffness and running economy in highly trained distance runners[J]. *Eu.r J. Appl. Physiol.*, 2010, 110(5): 1037-1046.
- [58] 李山,陈春彦,李兆林.分期力量训练对中长跑运动员跑步经济性的影响[J].*体育学刊*,2014,(1):104-109.
- [59] Faude O., Kindermann W., Meyer T. Lactate Threshold Concepts[J]. *Sports Med.*, 2009, 39(6): 469-490.
- [60] Simon J., Young J. L., Gutin B., et al. Lactate accumulation relative to the anaerobic and respiratory compensation thresholds[J]. *J. Appl. Physiol.*, 1983, 54(1): 13-17.
- [61] Rd B. A., Giamber S. R., Mager M., et al. Lactate inhibition of lipolysis in exercising man-Metabolism-Clinical and Experimental[J]. *Metabolism Clinical & Experimental*, 1974, 23(6): 531.
- [62] Sahlin D. K. Metabolic Factors in Fatigue[J]. *Sports Med.*, 1992, 13(2): 99.
- [63] Marcinik E. J., Potts J., Schlabach G., et al. Effects of strength training on lactate threshold and endurance performance[J]. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 1991, 23(6): 739-743.
- [64] Caird S. J., Mckenzie A. D., Sleivert G. G. Biofeedback and relaxation techniques improve running economy in sub-elite long distance runners[J]. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 1999, 31(5): 717-722.
- [65] Paavolainen L. M., Nummela A. T., Rusko H. K. Neuromuscular characteristics and muscle power as determinants of 5-km running performance[J]. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 1999, 31(1): 124-130.
- [66] Ramírezcampillo R., Alvarez C., Henríquezolguín C., et al. Effects of plyometric training on endurance and explosive strength performance in competitive middle-andlong-distance runners[J]. *J. Strength Cond. Res.*, 2014, 28(1): 97.
- [67] Billat L. V., Koralsztein J. P. Significance of the velocity at VO_{2max} and time to exhaustion at this velocity[J]. *Sports Med.*, 1996, 22(2): 90-108.
- [68] 向剑锋,刘无逸.最大摄氧量速度研究进展(综述)[J].*体育科研*,2004,25(1):37-40.
- [69] Noakes T. D., Myburgh K. H., Schall R. Peak treadmill running velocity during the VO_{2max} test predicts running performance[J]. *J. Sports Sci.*, 1990, 8(1): 35-45.
- [70] Damasceno M V, Lima-silva A E, Pasqua L A, et al. Effects of resistance training on neuromuscular characteristics and pacing during 10-km running time trial[J]. *Eur J Appl Physiol*, 2015, 115(7): 1513-1522.
- [71] Nummela A., Alberts M., Rijntjes R. P., et al. Reliability and validity of the maximal anaerobic running test[J]. *Int. J. Sports Med.*, 1996, 17 Suppl 2(S 2): S97.
- [72] Nummela A. T., Paavolainen L. M., Sharwood K. A., et al. Neuromuscular factors determining 5 km running performance and running economy in well-trained athletes[J]. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 2006, 97(1): 1-8.
- [73] Paavolainen L., Nummela A., Rusko H. Muscle power factors and VO_{2max} as determinants of horizontal and uphill running performance[J]. *Scand. J. Med. Sci. Sports*, 2000, 10(5): 286-291.
- [74] Aagaard P., Andersen J. L. Effects of strength training on endurance capacity in top-level endurance athletes[J]. *Scand J. Med. Sci. Sports*, 2010, 20(2): 39-47.
- [75] Beattie K., Kenny I. C., Lyons M., et al. The effect of strength training on performance in endurance athletes [J]. *Sports Med.*, 2014, 44(6): 845-865.
- [76] Ronnestad B. R., Mujika I. Optimizing strength training for running and cycling endurance performance: A review [J]. *Scand J. Med. Sci. Sports*, 2014, 24(4): 603-612.
- [77] Sale D. G. Neural adaptation to resistance training[J]. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 1988, 20(5): 135-145.
- [78] Stone M. H., Stone M. E., Sands W. A. Maximum Strength and Strength Training-A Relationship to Endurance?[J]. *Strength Cond. J.*, 2006, 28(3): 44-53.
- [79] Kraemer W. J., Fleck S. J., Evans W. J. Strength and power training: physiological mechanisms of adaptation [J]. *Exercise & Sport Sciences Reviews*, 1996, 24(1): 363.
- [80] Kyröläinen H., Belli A., Komi P. V. Biomechanical factors affecting running economy[J]. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 2001, 33(8): 1330-1337.
- [81] Osteras H., Helgerud J., Hoff J. Maximal strength-training effects on force-velocity and force-power relationships explain increases in aerobic performance in humans[J]. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 2002, 88(3): 255-263.
- [82] Hunter G. R., Mccarthy J. P., Carter S. J., et al. Muscle Fiber Type, Achilles Tendon Length, Potentiation, and Running Economy[J]. *J. Strength Cond. Res.*, 2015, 29(5): 1302.
- [83] Kyröläinen H., Kivela R., Koskinen S., et al. Interrelationships between muscle structure, muscle strength, and running economy[J]. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 2003, 35(1): 45.
- [84] Stone M. H., Stone M., Sands B. Principles and Practice of Resistance Training[M]. 2007.
- [85] 刘宇,魏勇.运动科学领域的下肢刚度研究[J].*上海体育学院学报*,2008,32(5):31-35.
- [86] 陈小平.反应力量和反应力量的训练[J].*体育科学*,



- 2001,21(5):36-39.
- [87] Dumke C. L., Pfaffenroth C. M., McBride J. M., et al. Relationship between muscle strength, power and stiffness and running economy in trained male runners[J]. *Int. J. Sports Med.*, 2010, 5(2): 249.
- [88] Kubo K., Kanehisa H., Fukunaga T. Effects of resistance and stretching training programmes on the viscoelastic properties of human tendon structures in vivo[J]. *Journal of Physiology*, 2002, 538(1): 219.
- [89] Bazzyler, Caleb D., Abbott, et al. Strength Training for Endurance Athletes: Theory to Practice[J]. *Strength Cond. J.*, 2015, 37(2): 1-12.
- [90] 薛锋,陈庆果,张健.长跑运动员最大力量训练的设计及其对跑步经济性的影响[J].*中国体育科技*,2014,50(3):3-12.
- [91] Kraemer W J, Ratamess N A. Fundamentals of resistance training: progression and exercise prescription[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2004, 36(4): 674.
- [92] Patel N. N. Plyometric Training: A Review Article[J]. *International Journal of Current Research & Review*, 2014.
- [93] Li F., Wang R., Newton R. U., et al. Effects of complex training versus heavy resistance training on neuromuscular adaptation, running economy and 5-km performance in well-trained distance runners[J]. *Peerj*, 2019, 7: e6787.
- [94] Cardinale M., Newton R. Strength and conditioning: biological principles and practical applications[M]. Wiley-Blackwell, 2010.
- [95] Stensdotter A. K., Hodges P. W., Mellor R., et al. Quadriceps activation in closed and in open kinetic chain exercise[J]. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 2003, 35(12): 2043-2047.
- [96] Rhea M. R., Alvar B. A., Burkett L. N., et al. A meta-analysis to determine the dose response for strength development[J]. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 2003, 35(3): 456.
- [97] Dudley G. A., Djamil R. Incompatibility of endurance- and strength-training modes of exercise[J]. *J. Appl. Physiol.*, 1985, 59(5): 1446-1451.
- [98] Bell G. J., Petersen S. R., Wessel J., et al. Physiological adaptations to concurrent endurance training and low velocity resistance training[J]. *Int. J. Sports Med.*, 1991, 12(4): 384.
- [99] Sale D. G., Macdougall J. D., Jacobs I., et al. Interaction between concurrent strength and endurance training [J]. *J. Appl. Physiol.*, 1990, 68(1): 260.
- [100] Doma K., Deakin G. B. The effects of strength training and endurance training order on running economy and performance[J]. *Appl. Physiol. Nutr. Metab.*, 2013, 38(6): 651-656.

(责任编辑:刘畅)

(上接第15页)

- [11] 张林,黄海燕.体育赛事经济影响评估研究[J].*体育科研*,2011,32(2):70-73.
- [12] 吴殷.基于投入产出的体育赛事活动的经济影响个案分析[J].*上海体育学院学报*,2009,33(4):9-11.
- [13] 国新办举行 2018 年国民经济运行情况发布会[EB/OL]. (2019-01-21)[2019-03-25]. <http://www.scio.gov.cn/xwfbh/xwfbh/wqfbh/39595/39709/index.htm>.
- [14] 王楠:完善赛事组织管理 共创马拉松美好未来[EB/OL]. (2019-01-03)[2019-03-26]. www.athletics.org.cn/competition/news/2019-01-03/537709.html.
- [15] 《南京市全民健身实施计划》政策解读[EB/OL].(2017-02-10)[2019-03-28]. http://sports.nanjing.gov.cn/njstyj/201810/t20181021_527993.html.
- [16] 潘秋玲.现阶段我国乡村旅游产品的供需特征及开发[J].*地域研究与开发*,1999(2):60-62.
- [17] 鲍明晓,赵承磊,饶远,等.我国体育旅游发展的现状、趋势和对策[J].*体育科研*,2011,32(6):4-9.
- [18] 白莉莉,冯晓露.美国路跑赛事发展特征、问题及启示[J].*中国体育科技*,2017,53(3):100-107.
- [19] 罗秋菊,庞嘉文,靳文敏.基于投入产出模型的大型活动对举办地的经济影响——以广交会为例[J].*地理学报*,2011,66(4):487-503.
- [20] Crompton J. L., Lee S., Shuster T. J. A guide for undertaking economic impact studies: The springfest example[J]. *Journal of Travel Research*,2001,40(1):79-87.
- [21] 朱柏宁,阮国定,李汉伟,等.上海市区居民体育消费状况的调查及其思考[J].*体育学刊*,1998(2):22-24.
- [22] 《全民健身指南》发布 国人运动有了指南针[EB/OL]. (2017-09-16)[2019-08-13]. <http://health.people.com.cn/n1/2017/0916/c14739-29539540.html>.
- [23] 陶茜.基于公共关系理论的上海国际马拉松赛形象塑造[D].上海:上海体育学院,2014.
- [24] 中国需要绍兴这样充满文化魅力的马拉松[EB/OL]. (2018-11-27)[2019-04-02]. http://www.xinhuanet.com/sports/2018-11/27/c_1123774156.htm.
- [25] 黄海燕,张林.体育赛事综合影响框架体系研究[J].*体育科学*,2011,31(1):75-84.

(责任编辑:晏慧)