



100 m短跑科学化训练进展与趋势

——基于运动生物学和方法学的思考

郑雪峰¹, 陈辉^{2,3}, 苏炳添^{3,4}, 宋庆全³, 束洋¹, 陈小平^{1,5*}

(1. 国家体育总局体育科学研究所, 北京 100061; 2. 重庆第二师范学院 体育与健康管理学院, 重庆 400065;

3. 北京体育大学 体能训练学院, 北京 100084; 4. 暨南大学 体育学院, 广东 广州 510632;

5. 宁波大学 体育学院, 浙江 宁波 315211)

摘要:100 m短跑是奥运会最具影响力的项目,深入研究世界短跑项目的训练进展与趋势对提升我国短跑科学化训练水平具有重要现实意义。在综述国内外相关研究成果的基础上,立足运动生物学和训练方法学的角度,从训练理念、负荷和方法等不同层面对世界及我国短跑项目进行深入分析。研究发现:以伸髋肌群和踝屈肌群为驱动力的用力模式是近年世界短跑训练的重点;增大ATP-PCr储量和提高无氧糖酵解供能速率是短跑运动员训练的2项主要任务;力量和爆发力训练是世界精英短跑运动员训练计划安排的重要部分;短跑的神经-肌肉动员和募集特征及其相应的能量代谢过程是负荷安排的关键。基于奥运备战的现实诉求,应全面了解和深入分析世界短跑训练的发展、现状及趋势,科学探索与认识短跑专项特征,从源头把握训练规律及方向;加强基础性研究,重点聚焦尚未解决与有争议的问题,形成具有中国特色的短跑科学化训练体系,助力我国短跑竞技实力的整体提升。

关键词:100 m短跑;专项特征;肌肉用力模式;能量代谢;训练负荷

中图分类号:G808.1 **文献标识码:**A

在科学训练下,世界100 m短跑成绩出现快速提升,20世纪60和80年代,美国选手Jim Hines和原东德选手Marlies Gohr先后将男子与女子100 m世界纪录突破10 s和11 s。2000年之后,不仅出现了Usain Bolt、Shelly-Ann Fraser-Pryce等奥运金牌选手,而且涌现出一批世界级优秀运动员。分析1960—2021年世界100 m短跑成绩发现,共有173名男运动员突破10 s,123名女运动员突破11 s。其中,2010—2021年,94名男运动员跑进10 s,占总数的54.34%,58名女运动员跑进11 s,占总数的47.1%,近10年男、女运动员达到世界级水平(男子10 s、女子11 s)的数量大幅度提升,占近60年总数的51%(World Athletics, 2021)。一个项目整体运动水平快速大幅度提升的原因必然可以追溯到运动训练,训练的科学化及其相关基础研究的深入是运动水平快速发展的驱动力。

同时,短跑项目与运动员天赋密切相关,长期被认为是“天才”的角逐和黑人运动员之间的博弈。而近年来,我国短跑项目成绩出现快速增长,特别在东京奥运周期呈现出整体性和爆发式崛起的态势。对2000—2021年中达到国际级运动健将成绩标准(男子10.25 s、女子11.38 s)的人数和最佳成绩统计发现,从2015年开始我国100 m项目

无论在数量上还是最佳成绩上均出现明显提升。在整体数量上,有12名男运动员和5名女运动员达到并超过国际级运动健将水平,分别占总人数(2010—2021年)的48.00%和38.46%。在东京奥运会上,我国短跑项目取得历史性突破,苏炳添以9.83 s创造新的亚洲纪录,并在决赛中以9.98 s获得第6名,葛曼棋、谢震业分别以11.20 s、20.34 s晋级女子100 m和男子200 m半决赛,均创造中国奥运代表团最好参赛成绩。同时,我国男、女4×100 m接力在决赛中也分获第4名和第6名,展现了中国短跑的整体实力。

世界短跑项目整体水平的快速提升,以及我国短跑项目国际竞争力明显增长的原因,是我国运动训练理论和实践领域普遍关心的问题,也是短跑项目运动水平可持

收稿日期:2021-12-07; **修订日期:**2022-01-31

基金项目:国家社会科学基金一般项目(19BTY099)。

第一作者简介:郑雪峰(1994-),男,在读硕士研究生,主要研究方向为运动训练理论与实践,E-mail: 15554405153@163.com。

***通信作者简介:**陈小平(1956-),男,教授,博士,博士研究生导师,主要研究方向为运动训练理论与实践,E-mail: chenxiaoping@ciss.cn。

续发展亟需明晰的问题,对我国其他类似项目的训练兼具借鉴和指导作用。为此,本文在总结国内外相关研究成果的基础上,立足运动生物学和训练方法学视角,从训练理念、负荷和方法等不同层面,对世界及我国100 m短跑项目近20年的训练进行深入分析和总结。

1 肌肉用力模式——短跑动力源之辨

跑,作为人类生存的一种最基本运动方式,很早就引起人们的关注。早在20世纪30年代,美国学者Fenn(1930)就开始研究短跑克服重力做功和不同速度下功的变化,Kistler(1934)和Dickinson(1934)分别研究了短跑起跑反作用力和起跑脚间距对跑速的影响,这些研究开启了短跑专项研究的先河。此后,研究者从运动学、动力学、肌电、能量代谢和选材与训练等多个角度进行剖析,对短跑专项特征的认识逐渐深入。

世界短跑快速发展的背后是训练科学化水平的大幅度提升,这种提升首先表现在对短跑用力模式的认识上。用力模式是指人体运动时神经-肌肉所表现出的符合专项运动需求且合理的专门用力方式。该模式以运动的有效性和经济性为目标,可以为人体运动提供最大的动力并减少阻力。100 m短跑对神经-肌肉用力的精确性和动态控制具有极高要求,运动员一旦出现错误甚至微小瑕疵便基本失去取胜机会,因此,用力模式对100 m短跑这一典型的周期性短距离项目尤为重要。运用科学的训练方法形成符合专项力学特点和运动员个体条件的用力模式,是每一位世界精英选手取得优异成绩的必备前提。

20世纪80年代,Mann等(1980)对15名男子优秀短跑运动员高速跑动时下肢支撑腿的动作进行力学分析,认为短跑中支撑腿髋、膝、踝处的肌肉形成的某种高效用力模式是影响跑速的重要因素,指出了短跑用力模式对速度驱动力和运动表现的关键作用。随后,一些学者的基础研究也直接或间接支持了这一观点。Lemaire等(1989)对8名加拿大和美国高水平短跑运动员进行了运动学测试,运用逆向动力学方法对运动员室内和室外高速跑时摆动腿髋、膝和踝关节肌肉发力功率进行计算发现,虽然很多教练员在其短跑训练计划中非常重视伸膝和勾腿力量训练,但功率(爆发力)分析结果显示,在整个摆动相中髋关节肌群才是下肢的主要驱动力,这也提示在短跑运动员的负重力量训练计划中,伸髋和屈髋肌群的训练应当引起足够的重视。该研究进一步明确了伸髋肌在提升下肢驱动力中的位置和作用,为短跑运动员的力量训练提出了指导性建议。

然而,从20世纪80、90年代的相关研究看,由于当时动力学和肌电的研究尚不深入,大部分研究基本局限在运动学范畴,仅从动作表象和肌肉解剖位置与功能视角分析短跑肌肉用力模式。2000年之后,短跑研究快速发

展,Belli等(2002)运用测力台、高速摄像机和肌电图仪对9名中距离跑运动员慢速、中速和最大速度下肢关节力矩和功率进行测试,通过运动学、动力学和肌电同步研究发现,踝关节和膝关节伸肌的作用是在着地前和着地期产生高的关节刚度,髋关节伸肌是身体向前运动的主要驱动力。随后,Bezodis等(2008)运用测力台、高速摄像机对4名不同水平的100 m项目运动员进行研究,运用逆向动力学方法更加详细地分析运动员途中跑支撑阶段下肢髋、膝和踝关节在支撑前期和后期的动力学特征。结果显示,最大速度(10.37 m/s)时的前支撑阶段,即从脚着地到身体重心垂直于着地点阶段,力量(功率)的产生主要来自伸髋肌群,在后支撑阶段(推进阶段),伸髋力矩和跖屈力矩为主要驱动力。进一步来看,在推进阶段前期,伸髋力矩是主要驱动力,而在推进阶段后期,屈髋肌群离心收缩对抗伸髋惯性力矩以减小伸髋角速度,为下一步周期做准备,此时跖屈力矩增大,成为推进阶段后期的主要驱动力(图1)。钟运健等(2011)通过环节互动动力学研究发现,在摆动后期(髋关节最大屈曲之前),伸髋肌群做离心收缩对抗屈髋惯性力矩使髋关节屈曲速度减慢,之后伸髋肌群做正功积极摆腿下压(伸髋),支撑阶段对抗外力矩做正功使髋关节持续伸展;从摆动后期到支撑阶段中后期髋关节一直表现为伸髋力矩,伸髋肌群先后做离心收缩和向心收缩。同时,Huang等(2013)利用环节互动动力学方法对优秀短跑运动员进行研究发现,摆动期髋关节的伸髋肌肉群作用与支撑期的作用同等重要。Morin等(2015)研究表明,水平地面反作用力的产生与触地之前高度激活的股后肌群肌电活动以及能够产生较大离心力的股后肌群有关。由此,髋关节伸肌的工作范围以及工作性质更加明确,不仅强调闭链形式下髋关节的蹬伸,还要求开链形式下髋关节的积极伸展。

伸髋肌群对跑步的主导作用始于脚落地的反向支撑和缓冲,世界高水平短跑运动员高度重视“臀鞭打”(whip from the hip)这一腿着地发力技术(Clark et al., 2020)。Mann等(2018)提出,最大速度时,身体与地面的相对速度较高,触地时会产生很大的制动力,正确的“鞭打”动作能够降低脚与地面的相对速度,进而减小着地时的水平制动力。同时,“鞭打”动作还能在支撑前期产生适宜的垂直反作用力,为弹性势能的蓄积和神经-肌肉的反射性募集创造条件。Haugen等(2019a)认为,虽然增加水平推进力是提高速度的关键,但垂直分力同样重要,应在加速阶段提升身体重心高度,在最大速度阶段保持身体重心高度。从拉长-缩短周期角度,支撑前期机体从垂直方向获得的弹性能量,在支撑后期转换释放为水平推进分力。从解剖学角度看,在足落地至支撑前期,地面反作用力从髋关节和膝关节前方经过,外力矩的作用是屈髋和伸膝,此时的肌肉力矩为伸髋和屈膝力矩(刘宇,2017)。因此,

髋关节伸肌群在“鞭打”这一动作中起到主要贡献,这与前人研究一致,Bezodis等(2008)指出髋关节是前支撑阶段主要驱动力(功率)来源,同时,支撑阶段膝关节主要作用是保持身体重心高度以及将髋关节力量通过踝关节向跑道传递。越来越多的研究结果表明,以臀大肌、股二头肌为主的髋关节伸肌群和以小腿三头肌、胫骨后肌为主的踝关节屈肌群是影响优秀短跑运动员跑速的重要下肢力量来源(图2)。

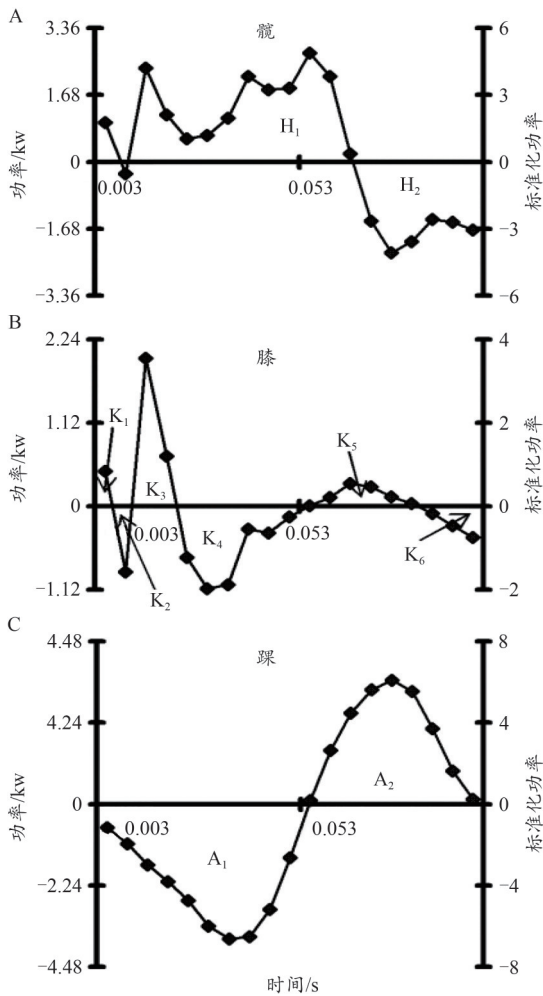


图1 优秀100 m运动员最大速度支撑阶段下肢各关节功率 (Bezodis et al., 2008)

Figure 1. Power of Each Joint of Lower Limbs in the Maximum Speed Support Stage of Elite 100 m Athletes (Bezodis et al., 2008)



图2 不同支撑阶段下肢用力模式

Figure 2. Lower Limb Power Patterns at Different Support Stages

经过近40年的研究,从“用力模式”的提出到主要参与肌群功能作用的明确,人们对短跑运动员奔跑时下肢驱动力的认识在不断深入和清晰(图3)。从生物力学的角度,获得尽可能大的水平推进力并尽可能减小落地时的制动力是提高奔跑速度的关键(Haugen et al., 2019a)。总体上,髋、膝、踝关节及其肌群在制动力和水平推进力2个重要因素上扮演的角色不同。触地前期,支撑腿膝和踝关节需要形成较高刚度的支撑,髋部伸肌群推动身体向前运动;而到蹬伸阶段,跖屈肌群则成为向前推动力的主要来源;同时,摆动后期髋关节的积极伸展(即“臀鞭打”)对产生较小的制动力和较大的水平作用力起到非常关键的作用。因此,明晰髋关节伸肌群和踝关节屈肌群对短跑运动员尤其是高水平运动员的重要性是世界短跑理论研究的重要成果,其改变了传统的以下肢膝、踝关节发力为主的短跑用力方式,强调髋关节和骨盆肌群的发力,不仅充分调动人体下肢大肌群参与运动从而增大驱动力,而且还强化了躯干核心肌群对上、下肢用力的传导和协同作用,在某种程度上将以往的“腿部发力”变为“身体发力”,形成以“臀鞭打”为主要特征的新型奔跑用力模式。

理论研究成果必然影响到运动员的训练,根据肌肉在跑动中的不同作用,世界范围内的短跑运动员明显提高了对各部位不同肌群训练的针对性。在力量训练上,以臀大肌、股二头肌和小腿三头肌等伸髋和屈踝肌群为训练重点的同时,努力发展下肢肌肉拉长-缩短周期的反应力量和膝、踝肌群的刚度。在技术训练中,形成以伸髋肌群和踝屈肌群为驱动力的跑步模式是近年来世界短跑运动员高度关注的训练任务;强调在前支撑阶段髋关节的积极伸展和在后支撑阶段踝关节的主动跖屈,以期增加身体向前的水平分力,成为短跑技术训练的重要内容。同时,短跑用力模式的发展也影响到多个运动项目奔跑能力的训练,激活臀大肌已成为诸多运动项目的训练重点,用力模式的改变不仅能够提高跑动的驱动力,还可以代偿性减少膝关节的蹬伸动作,进而降低膝关节运动损伤发生的可能。研究表明,运动员在跑动中的触地初期和摆动末期,股后肌群受到来自髋、膝关节处外力矩同时向相反方向的牵拉,导致其处于巨大的应力(超过身体质量的8倍)和快速的应变状态,可能会造成股后肌群损伤(魏书涛等,2009)。因此,应根据股后肌群的肌肉类型及短跑的肌肉用力模式对股后肌群进行针对性训练,在预防损伤的同时提高成绩,延长运动寿命。

2 肌肉能量代谢——短跑项目特征之解读

100 m短跑成绩受耐力的影响吗?答案应该是肯定的,可相当部分运动员和教练员认为耐力对于短跑似乎是可以忽略不计的因素。然而,尽管100 m短跑的距离和时间很短,但仍存在明显的能量供应问题,在起跑—加速—途

中一冲刺各阶段,人体3个能量代谢系统都参与其中,具

有独特的专项能量代谢特征。

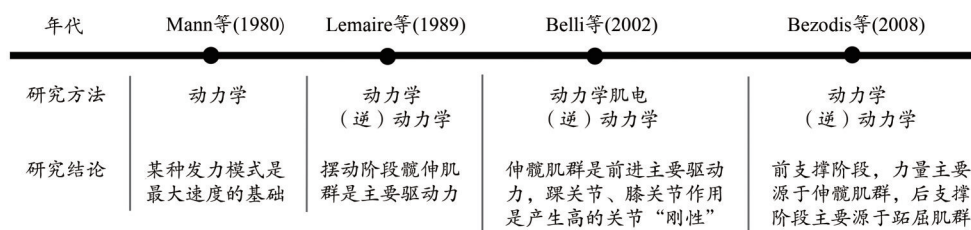


图3 短跑最大速度阶段下肢动力学研究进展

Figure 3. Research Progress of Lower Limb Dynamics in Maximum Speed Stage of Sprint

对100 m短跑能量代谢的探析可以追溯到Margaria等的研究,其认为能量消耗主要发生在起跑和起跑后的加速、对抗风阻和保持速度3个方面,分别需要消耗60 cal/kg、40 cal/kg、100~120 cal/kg的能量;同时,研究认为100 m短跑运动员以磷酸原供能为主,提供了大约120~150 cal/kg的能量,另外由糖酵解系统提供40~50 cal/kg,有氧系统大约只提供10 cal/kg (Margaria, 1968)。Mader等(1983)对100 m短跑运动员(成绩为10.31 s)跑动过程中的能量代谢进行了计算机模拟分析发现,在起跑后4~6 s过程中能量的主要来源为磷酸肌酸(PCr),其储量从约20 mmol/kg快速下降到2.5~3.0 mmol/kg,以补充和维持机体唯一的直接能量供应物质ATP的水平;在100 m的后程,即大约5~10 s的阶段,PCr储备已低于3 mmol/kg,不足以继续作为主要供能来源,而糖原的无氧氧化,即糖酵解供能随即成为主要供能渠道,此时肌糖原在极短时间内快速酵解,并产生大量代谢产物——乳酸(图4)。

的储备量和糖原无氧酵解的速率,前者决定了起跑及加速运动表现,后者主要决定了后半程的奔跑速度。一般认为,ATP储量极少,约为5 μmol/g湿肌,大约只能为肌肉最大强度收缩提供1~2 s的能量供应(De Marées, 1996)。PCr的储备约为20~25 mmol/kg,且只有85%可以动用,供能速率和供能时间与运动强度密切相关(Di Prampero, 1981)。糖酵解的主要能量物质为肌糖原,在最大强度的力竭性运动中可以维持50~90 s的能量供应,而对于100 m项目即10 s的短距离运动来说,单位时间的供能速率就成为该能量动用的关键因素,一般可以用血乳酸单位时间的生成率[mmol/(kg·s)]作为评价指标(Hohmann et al., 2002)。有氧氧化的能源物质尽管在人体的储量较多,但由于其供能速率较慢,对100 m短跑的作用很小(表1)。

表1 磷酸原、糖酵解和有氧氧化系统供能能力和功率 (Heck et al., 2003)

Table 1 Capacity and Power of Phosphagen, Glycolysis and Aerobic Oxidative System (Heck et al., 2003)

能量供应系统	底物	供能功率 [mmol/(kg·s)]	供能能力 (mmol/kg)
磷酸原	ATP, PCr→ADP, Cr	3~6	20~25
糖酵解	肌糖原→乳酸	1.5~3	50
有氧氧化	糖原→CO ₂ 脂肪酸→CO ₂	0.5~0.75 0.24~0.4	受底物限制

注:表中单位kg表示湿肌质量。

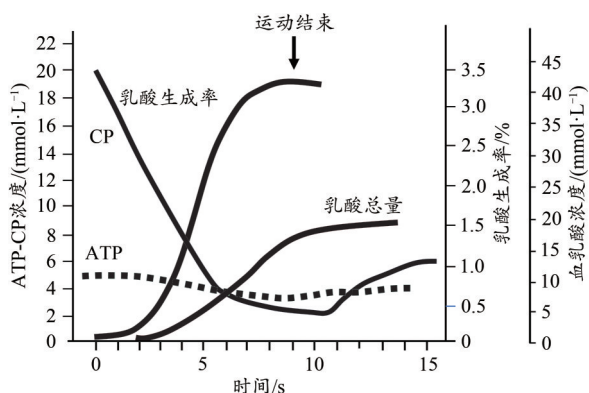


图4 短时间高强度运动能量代谢特征(Mader et al., 1983)

Figure 4. Energy Metabolism Characteristics of Short Time High-Intensity Exercise (Mader et al., 1983)

总体上,100 m短跑的能量供应主要为ATP-PCr和糖酵解系统(Duffield et al., 2004)。PCr的供能主要发生在起跑至40~50 m处,之后由于其储备有限迅速接近枯竭,此时无氧糖酵解供能速度开始快速提升,迅速接替磷酸原成为后半程的主要供能方式。因此,从能量代谢的角度来看,决定100 m短跑成绩的主要因素是人体ATP-PCr

由此可见,对于100 m短跑训练来说,训练手段和负荷的选择与安排都必须考虑专项能量代谢特征,增大ATP-PCr储量和提高无氧糖酵解的速率应该是运动员训练的2项主要任务。然而,从目前的研究看,尽管有研究证明训练可以提高肌肉的ATP-PCr含量(Di Prampero, 1981),但多数研究并没有发现训练因素(包括短距离高强度训练)对静态ATP-PCr储备提升的显著影响(Dawson et al., 1998; Nevill et al., 1989; Sharp et al., 1986),人体ATP-PCr的储备是否可以通过训练得到增加仍存在争议。从运动生物学角度看,ATP-PCr的储备与肌纤维类型和肌肉量有关,快肌纤维尤其是无氧快肌纤维的ATP-PCr含量

明显高于有氧快肌纤维和慢肌纤维。而短跑运动员的肌肉比例以及肌肉中快肌纤维比例均高于普通人和耐力项目选手 (Neumann, 1990), 这也许是短跑运动员通过训练增加肌肉量, 尤其是优先提高快肌纤维体积进而提高 ATP-PCr 储量的一个选择。但须注意的是, 这些研究的受试者基本都是普通人或体育专业大学生, 缺乏专业运动员特别是优秀短跑运动员的数据。

因此, 无氧糖酵解作为 100 m 短跑运动员的第二个主要供能来源得到了运动训练学领域的广泛关注。虽然已有大量研究证明肌糖原具有超量恢复的特性 (陈小平, 2017), 但由于其在无氧条件下的高强度力竭运动中最大供能时间为 50~90 s (De Marées, 1996), 对于 10 s 左右的短距离项目来说, 无氧糖酵解的能源物质储备和供能时间基本均覆盖甚至超出该专项距离 (时间) 的需求, 所以无氧糖酵解在单位时间内的使用速率就成为这类项目运动表现的关键因素。Mader 等 (1996) 运用计算机模拟得出了平均最大乳酸产生速率与短跑距离 (运动时间) 的关系 (表 2), 运动距离 (时间) 越短, 运动后血乳酸值越低, 而血乳酸的生成率越高; 运动距离 (时间) 越长, 血乳酸值越高, 血乳酸生成率越低。这表明, 在力竭性运动条件下, 运动强度是决定无氧糖酵解速率的关键因素, 对于 100 m 短跑来说该速率基本决定了后 5 s 的运动表现。

表 2 平均最大乳酸产生速率与跑步距离 (运动时间) 的关系 (Mader et al., 1996)

变量	100 m	200 m	400 m
运动时间/s	10.5	21.5	45.0
无乳酸时间/s	3	4	8
运动后最大血乳酸浓度/(mmol·L ⁻¹)	13	18	22
运动前血乳酸浓度/(mmol·L ⁻¹)	1.9	1.9	1.9
血乳酸生成速率/(mmol·L ⁻¹ ·s ⁻¹)	1.48	0.92	0.53

作为三大能量代谢系统之一的无氧糖酵解供能在速度耐力训练中具有重要作用。从代谢产物血乳酸的生成曲线看 (图 5), 还可以将其进一步分为快速动员能力、最大高峰能力和乳酸保持能力 (通常也称抗乳酸能力) 3 种 (Gastin, 2001)。短距离项目特别是 100 m 短跑显然以前 2 种能力为主, 但需要强调的是, 无氧糖酵解的快速动员和使用是一种专门能力, 它具有自身的生理机制并受其他因素影响。无氧糖酵解的快速动员能力可以通过训练得到显著提升, 这种提升主要与糖原分解 (水解) 酶的活性增强有关, 如磷酸果糖激酶 (PFK) 和己糖激酶 (HK) 等 (Linossier et al., 1993; Parra et al., 2000; Rodas et al., 2000)。另一方面, 无氧糖酵解能力同时还受到磷酸原和有氧能力的影响, 较高的磷酸肌酸浓度可以延长其

供能时间, 减少无氧糖酵解的供能比例, 从而在相同时间或速度条件下促进肌乳酸和血乳酸值下降 (Hautier et al., 1994)。而有氧能力的增强也会间接影响到无氧糖酵解供能, 对于 100 m 短跑或 10 s 运动来说, 这种影响很低甚至可以忽略不计, 但对于 60 s 左右的力竭性运动来说, 有氧能力的提高可以有效降低同一时间或距离的血乳酸浓度 (Hanon et al., 2010)。也有研究认为, 有氧能力的提升可以明显提高肌肉对酸性环境的缓冲能力, 即提高机体对乳酸的耐受力 (Spriet, 1995)。由此可见, 人体 3 个能量代谢系统之间存在相互影响, 在运动中不能简单地运用某一单一指标评价特定能力的优劣。例如, 不能简单地用血乳酸值的高低来说明无氧糖酵解能力强弱 (Hautier et al., 1994), 而应将 3 个能量系统统筹考虑, 综合评定。

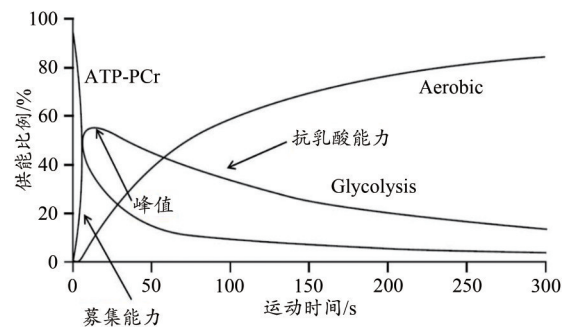


图 5 不同持续时间的高强度运动中糖酵解系统供能特征
Figure 5. Energy Supply Characteristics of Glycolysis System during High-Intensity Exercise with Different Durations

注: 根据 Gastin (2001) 的研究结果改编绘制。

100 m 能量代谢特征应在一个更大视角下进行解读。Heck 等 (2003) 在 Mader 等 (1983, 1996) 能量代谢计算机模拟系列研究的基础上, 对短距离运动无氧代谢及其能力的诊断与评价进行了总结, 揭示了在 10 s 和 60 s 全力跑中三大代谢系统的供能差异 (图 6): 1) 对于力竭性高强度运动而言, PCr 的作用主要发生在运动的前程, 距离越短主导作用越强, 10 s 运动的作用明显大于 60 s; 2) 糖酵解动员慢于 PCr, 在一定范围内, 距离或时间越短, 糖酵解的代谢速率 (非代谢量) 对运动表现的影响越大, 随着运动时间的延长, 其速率对运动表现的影响逐步减小, 而代谢量 (乳酸量) 逐步成为重要的影响因素; 3) 有氧能力 (摄氧量) 会影响力竭性高强度运动时的表现和代谢, 运动距离 (时间) 越长作用越大, 尤其对后程冲刺具有主导作用; 4) pH 值是人体酸碱平衡的重要指标, 与血乳酸堆积的对应关系也被视为人体无氧乳酸缓冲或耐受能力, 在高强度力竭性运动中, pH 值的大小在一定程度上影响甚至决定了无氧糖酵解能力的水平, 一般认为, 通过有氧训练该能力可以得到提升; 5) 无论是 10 s 还是 60 s 的运动, 3 个能量代谢系统都参与其中, 且相互之间具有互补和制约关系。

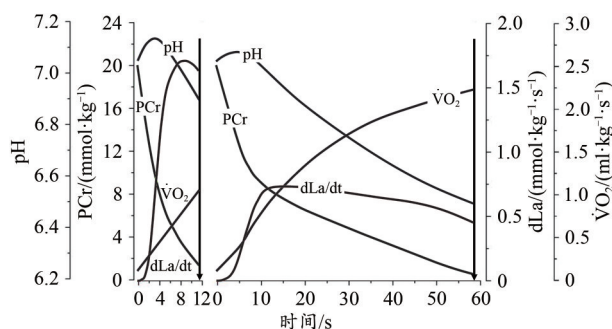


图6 10 s或60 s高强度运动过程中能量代谢模拟 (Heck et al., 2003)

Figure 6. Simulation of Energy Metabolism during All-Out Exercise for 10 s or 60 s (Heck et al., 2003)

综上所述,能量代谢是包括100 m短跑在内所有竞技运动项目训练的重要基础,从生物学角度全面和深入地认识100 m短跑的专项供能特征,并以此为依据科学设计和实施训练,是近年来世界和我国短跑运动水平快速提高的重要原因。

3 方法与负荷——短跑训练之关键

如果说神经-肌肉用力模式和能量代谢特征是短跑训练2个重要生物学基础的话,那么短跑的训练实践就应该以此为依据做出回应和应变,这些回应和应变首先应发生在训练的方法和负荷方面。方法和负荷是运动训练设计与实施的2个重要内容。方法是运动训练的基本形式,是所有训练刺激的载体,负荷是施加于人体生理和心理刺激的总和,不同运动能力需要运用不同的负荷量和强度进行有针对性的训练,它决定了运动能力的发展。

训练方法在运动形式上可以确定训练的“靶目标”,对于100 m短跑这一时间短、速度快和对运动技术具有极高要求的项目,改善和增强专项肌肉用力模式是训练方案需要解决的首要问题。Mann等(2018)长期运用现场诊断方法助力高水平短跑运动员的训练,运用运动学模型对运动员跑步技术进行现场诊断、评估和改进,其实质就是从专项技术和运动员个体特征2个方面反复对跑步的用力模式进行优化,使其不断接近专项和个体的理想目标模型。当然,“用力模式”的优化并不能只通过场地专项训练解决,而需要各个训练要素的协作与配合。因此,体能是优秀短跑运动员的训练重点,力量和爆发力训练是世界精英短跑运动员训练计划安排的关键部分,训练方式包括从一般性的深蹲、抓举、挺举、高翻练习到基于专项动作模式下的箭步蹲、分腿蹲、单腿硬拉等。如何将一般身体能力与专项紧密结合,如何发展专项所需要的体能,从能力发展的角度改进和完善短跑的用力模式是训练方案需要解决的另一个主要问题。

我国优秀短跑运动员东京奥运周期一般准备期和专项准备期中的6周力量训练安排如图7所示。从刺激部

位上可以将训练分为6类,不仅覆盖了短跑的主要肌群,而且突出了对短跑驱动力具有关键作用的髂胫肌群和踝屈肌群的训练,即加强对用力模式相关主要肌群的针对性训练。可以看出,无论是一般准备期还是专项准备期,该训练安排都将全身性力量训练作为基本内容,以确保力量素质的全面发展。同时,不仅在一般准备期就将短跑主要肌群作为重要训练内容,而且专项准备期的力量训练侧重点明显向伸髌肌群和踝屈肌群转移。图7右侧饼图将针对伸髌肌群的力量训练分为一般性力量训练(如山羊挺身、臀桥等)和符合专项动作模式的力量训练(摆腿伸髌练习),可以看出专项准备期大幅度增加摆腿伸髌练习的比重,进一步突出力量训练的专项性。同时,快速伸缩复合训练,即反应力量训练同样是力量和爆发力训练的重要内容,通过不同形式的高强度(触地时间<100 ms)跳跃练习(单腿、双腿、连续跳等),提升腿部反应力量水平,进而提升专项的腿部制动刚度和推动力。

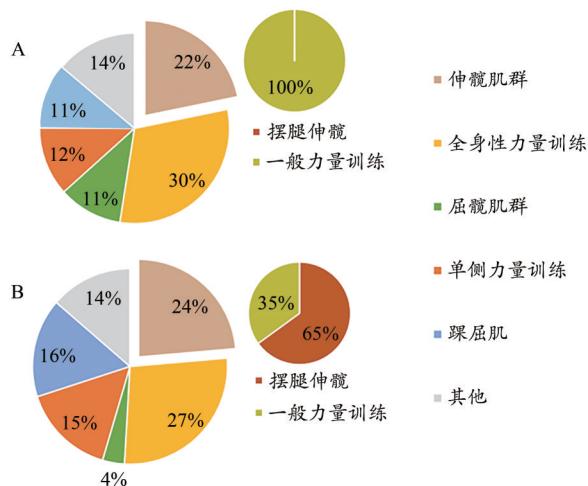


图7 我国优秀短跑运动员东京奥运周期一般准备期(A)和专项准备期(B)中6周力量训练安排

Figure 7. 6 Week Strength Training Program of General Preparation Period (A) and Special Preparation Period (B) in Chinese Elite Sprinters in Tokyo Olympic Period

负荷是运动训练的核心,是解决专项能力和提升运动表现水平最重要的因素,近10年世界短跑整体水平的大幅提升与训练负荷的科学设计和实施具有重要关系。首先,在大量生物学研究的支撑和推动下,人们不仅关注具体训练手段和方法的创新,而且将注意力聚焦到训练负荷的安排,将100 m短跑突出的神经-肌肉动员和募集特征及其相应能量代谢过程作为一种能力融入长期训练,从负荷安排的视角进行系统训练与培养;同时,在纵向上考虑不同年龄和水平运动员的特点,在横向上兼顾多种素质与能力之间的匹配关系。其次,在整体安排上,高度重视训练负荷的强度、疲劳、恢复及它们之间的关系。在理念上,科学认识训练疲劳与恢复的关系,从能量

代谢角度区别不同距离和时间的力竭性运动的专项特点,更加强调对运动员机体的动员和募集能力的训练,不以身体的疲劳程度作为衡量和评价训练质量的唯一标准,降低甚至避免机体长时间的疲劳积累。在训练上,进一步明确以短距离、高强度和适宜间歇的训练负荷原则,突出爆发力、速度以及速度保持的训练,同时注意最大力量和有氧能力等重要基础能力与专项能力之间的关系及其协调发展。

Haugen 等(2019b)基于短跑的理论 and 实践成果总结

了世界短跑精英选手训练方法(表3),以决定运动员运动表现的各种专项能力为出发点,对跑动距离、负荷强度、间歇时间和每节课训练量等训练要素进行量化,以期规范和指导训练负荷的设计与实施。尽管该研究更多的是从方法学角度归纳短跑训练的设计,但在内容上反映出明显的生物学特点,比如各种能力的训练参考了ATP-PCr和无氧糖酵解的供能比例、时间、速度和恢复时间。同时,该研究还针对具体的训练课负荷量及训练后恢复时间提出了建议,强调了刺激与恢复在短跑训练中的关系。

表3 短跑训练方法的实践总结(Haugen et al., 2019b)

Table 3 Summary of Practice in Sprint Training (Haugen et al., 2019b)

训练内容	距离/m	强度/%	恢复时间/min	课训练量/m	起跑方式	课间隔时间/h	跑鞋和场地要求
加速	10~50	>98	2~7	100~300	起跑器/3点式/蹲踞式	48	钉鞋,田径场
最大速度	10~30 ^a	>98	4~15	50~150 ^a	20~40 m加速跑	48~72	钉鞋,田径场
短跑专项耐力	80~150	>95	8~30	300~900	站立式起跑	48~72	钉鞋,田径场
速度耐力	60~80	90~95	2~4(8~15)	600~2 000	站立式起跑	48~72	钉鞋,田径场
阻力跑	10~30	80~95 ^b	3~6	50~200	3点式/蹲踞式	48	自选
助力跑	10~30 ^a	≤105	5~15	≤100 ^a	20~40 m加速跑	48	钉鞋,田径场
节奏跑	100~300	60~70	1~3	1 000~2 000	站立式	24	运动鞋,草地

注:强度为最大速度的百分比;速度耐力恢复时间:次间歇时间(组间歇时间);a表示途中跑距离,不包括加速距离;b表示主观用力程度最大,速度(强度)低是由阻力负荷引起的。

需要注意的是,从训练负荷而不是仅从方法的角度对训练进行研究是世界短跑发展的一个重要趋势。运动能力的提高是一个长期训练和机体适应的过程,是各种负荷刺激叠加和疲劳恢复交互作用的结果。从负荷的角度对短跑训练进行设计,可以更加广泛和全面地考量各种不同因素对训练的影响,其中最为重要的是可以将能量物质的储备、动员速率和可训练度等作为训练的依据,提高训练的针对性和实效性。另一方面,对训练负荷的关注不仅体现在以往的训练课的负荷层面上,还应高度重视中、长期的训练负荷安排,将短跑重要能力的训练贯穿整个训练过程,运用多种检测方法监控不同能力的发展,尤其是从能量代谢的角度检测和评估不同供能系统的变化,科学控制训练负荷。

4 启示与建议——我国短跑训练之见

随着世界短跑运动水平的快速提升,近年来已有许多研究从不同角度对短跑训练进行分析和探讨(姜自立等, 2019; 苏炳添等, 2019; Hargreaves et al., 2020)。这些研究的共同点在于,从跑的专项技术模式和能量代谢视角探究短跑专项特征和揭示训练规律,在此基础上发现训练存在的问题,通过改进、调控训练方法和负荷提高训练的针对性与实效性。

然而,虽然我国短跑运动水平呈现快速发展之势,在重大比赛中取得优异成绩并涌现出一批优秀运动员,但在整体上仍与世界存在一定差距,尤其是在生物学基础研究和训练方法创新方面存在明显不足,在技术特征、供

能方式等一些关键问题的认识和训练上仍存在不清晰、不确定甚至错误的现象。我国短跑运动水平的提升基本集中在100 m项目和国家队层面,同属短跑的200 m和400 m项目仍大幅度落后世界水平。因此,必须从理论和实践2个方面全面分析短跑训练,特别是要从运动生物学的层面深入探究,而不是仅仅从训练方法论的角度吸纳和借鉴国外既有研究成果,应在反思现有训练理念、负荷安排与方法的基础上进行创新,构建符合我国运动员的短跑训练体系。

1)全面了解和深入分析世界短跑训练的发展、现状及趋势,从多渠道、多层面梳理、分析及总结短跑的生物学基础研究和训练实践研究成果。须认识到,及时了解和掌握先进的研究成果尤其是重大关键理论和方法对训练具有方向性和整体性影响,对项目的持续发展具有重要作用。

2)科学探索和认识专项特征,从源头把握训练规律和方向。用力模式和供能特征是短跑训练的2个重要生物学基础,要分别从生物力学和能量代谢方面认识专项和支撑训练。用力模式是对短跑驱动力的诠释,是短跑专项技术训练和专项体能训练的靶目标;供能特征是短跑训练负荷制定与实施的基础,是能力训练和方法选择的重要依据。

3)近年我国短跑训练理念的转变和运动水平的快速提升与专项特征的深入认识和科学解读密切相关。用力模式改变并推动了专项技术训练及与之相关的力量训练方法和要求,提高了训练效率和针对性。对专项能量代

谢特征的清晰认识奠定了训练的基础,揭示了我国运动员长期存在又难以解决的“后程降速”问题的生物学原因,促进了训练思路的改变,以及新型训练方法的应用和训练负荷的高效合理配置,在保持甚至提升前程速度优势的情况下,有效遏制和解决后程降速问题。

4)加强基础性研究是我国短跑未来发展的一项重要任务。必须认识到,短跑是一项受先天遗传因素影响高,后天训练可塑性低的运动项目,中国短跑尽管取得了巨大进步,但无论在个体成绩还是在群体实力上与世界仍存在很大差距,要缩短差距不能只依靠“外援”,而必须进行自主知识产权研究,特别是运动生物学下的基础性研究,从根本上提高我国短跑运动员的运动水平和国际竞争力。

5)不断对我国短跑训练实践进行总结和探索,形成具有中国特色的短跑科学化训练体系。运动训练的科学化是提升竞技成绩的根本原因,理论与实践的发展在局部上往往并不具有线性关系,理论研究出色的国家可能并不能培养出优秀的短跑运动员,杰出的学者也许并不是优秀的教练员,理论与实践一直存在“隔阂”。因此,必须遵从运动训练的规律,同时从理论研究和实际训练两方面对短跑进行深入研究。对我国短跑当前的训练进行系统梳理与分析,基于技术训练、负荷安排、方法选择等方面的数据对苏炳添、谢振业等现役优秀运动员的训练进行跟踪分析,采集客观、有效的数据形成数据库并从中探寻规律,最终构建符合中国实际的短跑训练体系。

6)未解和有争议问题应成为我国短跑研究的重点。纵观世界短跑研究,仍存在许多尚未解决或有争议的问题,有些是由于实验设备、方法限制或计算模型尚不能满足研究的需求(如100 m的专项能量代谢问题),有些是由于实验设计和测量尚不能与专项相匹配(如优秀运动员的测量问题),当然也存在已有研究成果制约和固化人们认识的现象。提出并关注这些问题应成为我国短跑目前和未来研究的主要方向,这些问题的解决不仅可以快速提升我国短跑理论研究的水平,而且对训练实践具有重要指导意义。

5 结语

科学化训练是世界竞技体育强劲发展的动力。世界短跑的发展,尤其是中国在100 m短跑项目上的强势崛起均离不开科学的引领和助力。在备战2024年巴黎奥运会过程中,我国短跑项目又将面临艰巨挑战,科学研究和科学化训练必将再次成为中国短跑再续辉煌的利器。

参考文献:

陈小平, 2017. 运动训练生物学基础模型的演变:从超量恢复学说运动适应理论[J]. 体育科学, 37(1):3-11.
姜自立, 黎涌明, 李庆, 2019. 短跑不同模式速度耐力训练的能量代谢特征[J]. 体育科学, 39(5):51-60.

刘宇, 2017. 人体运动生物力学[M]. 上海:上海交通大学出版社.
苏炳添, 邓民威, 徐泽, 等, 2019. 新时代中国男子100 m短跑:回顾与展望[J]. 体育科学, 39(2):22-28.
魏书涛, 刘宇, 钟运健, 等, 2009. 短跑支撑期股后肌损伤的动力学分析[J]. 中国运动医学杂志, 28(6):639-43.
钟运健, 刘宇, 魏书涛, 等, 2011. 优秀短跑运动员途中跑时下肢关节力矩及肌群功率分析[J]. 中国运动医学杂志, 30(1):26-30.
BELLI A, KYRÖLÄINEN H, KOMI P V, 2002. Moment and power of lower limb joints in running[J]. Int J Sports Med, 23(2):136-141.
BEZODIS I N, KERWIN D G, SALO A I T, 2008. Lower-limb mechanics during the support phase of maximum-velocity sprint running[J]. Med Sci Sports Exerc, 40(4):707-715.
CLARK K P, MENG C R, STEARNE D J, 2020. “Whip from the hip”: Thigh angular motion, ground contact mechanics, and running speed[J]. Biol Open, doi:10.1242/bio.053546.
DAWSON B, FITZSIMONS M, GREEN S, et al., 1998. Changes in performance, muscle metabolites, enzymes and fibre types after short sprint training[J]. Eur J App Physiol, 78(2):163-169.
DE MARÉES H, 1996. Sportphysiologie[M]. Deutschen: Sport und Buch Strauß.
DICKINSON A D, 1934. The effect of foot spacing on the starting time and speed in sprinting and the relation of physical measurements to foot spacing[J]. Res Q Exerc Sport, 5(supl 1):12-19.
DI PRAMPERO P E, 1981. Energetics of muscular exercise[J]. Rev Physiol Biochem Pharmacol, 89:143-222.
DUFFIELD R, DAWSON B, GOODMAN C, 2004. Energy system contribution to 100-m and 200-m track running events[J]. J Sci Med Sport, 7(3):302-313.
FENN W O, 1930. Work against gravity and work due to velocity changes in running[J]. Am J Physiol, 93(2):433-462.
Gastin P B, 2001. Energy system interaction and relative contribution during maximal exercise[J]. Sports Med, 31(10):725-741.
HANON C, LEPRETRE P M, BISHOP D, et al., 2010. Oxygen uptake and blood metabolic responses to a 400-m run[J]. Eur J Appl Physiol, 109(2):233-240.
HARGREAVES M, LAWRENCE L S, 2020. Skeletal muscle energy metabolism during exercise[J]. Nat Metab, 2:817-828.
HAUTIER C A, WOUASSI D, ARSAC L M, et al., 1994. Relationships between postcompetition blood lactate concentration and average running velocity over 100-m and 200-m races[J]. Eur J Appl Physiol Occup Physiol, 68(6):508-513.
HAUGEN T, MCGHIE D, ETTEMA G, 2019a. Sprint running: From fundamental mechanics to practice: A review[J]. Eur J Appl Physiol, 119(6):1273-1287.
HAUGEN T, SEILER S, SANDBAKK Y, et al., 2019b. The training and development of elite sprint performance: An integration of scientific and best practice literature[J]. Sports Med Open, doi:10.1186/s40798-019-0221-0.
HECK H, SCHULZ H, BARTMUS U, 2003. Diagnostics of anaerobic power and capacity[J]. Eur J Sport Sci, 3(3):1-23.
HOHMANN A, LAMES M, LETZELTER M, 2002. Einführung in die Trainingswissenschaft [M]. Deutschland: Wiebelsheim.
HUANG L, LIU Y, WEI S, et al., 2013. Segment-interaction and its relevance to the control of movement during sprinting[J]. J Biomech, 46(12), 2018-2023.

- KISTLER J W, 1934. A study of the distribution of the force exerted upon the blocks in starting the sprint from various starting positions [J]. *Res Q Am Phys Educ Assoc*, 5(Sup1 1):27-32.
- LEMAIRE E D, ROBERTSON D G E, 1989. Power in sprinting[J]. *Track Field J*, 35:13-17.
- LINOSSIER M T, DENIS C, DORMOIS D, et al., 1993. Ergometric and metabolic adaptation to a 5 s sprint training programme[J]. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 67(5):408-414.
- MADER A, HECK H, 1996. Energiestoffwechselregulation, Erweiterungen Des Theoretischen Konzepts Und Seiner Begründungen. - Nachweis Der Praktischen Nützlichkeit Der Simulation Des Energiestoffwechsels[M]// MADER A, ALLMER H. Brennpunkte Der Sportwissenschaft-Computersimulation-Möglichkeiten Zur Theoriebildung Und Ergebnisinterpretation. Brennpunkte der Sportwissenschaft: 124-162.
- MADER A, HECK H, LIESEN H, et al., 1983. Simulative berechnungen der dynamischen änderungen von phosphorylierungspotential lactatbildung und lactatverteilung beim sprint[J]. *Dtsch Z Sportmed*, 34(1):14-22.
- MANN R, MURPHY A, 2018. The Mechanics of Sprinting and Hurdling[M]. Scotts Valley: CreateSpace.
- MANN R, SPRAGUE P, 1980. A kinetic analysis of the ground leg during sprint running[J]. *Res Q Exerc Sport*, 51(2):334-348.
- MARGARIA R, 1968. Capacity and power of the energy processes in muscle activity: Their practical relevance in athletics[J]. *Int Z Angew Physiol*, 25(4):352-360.
- MORIN J B, GIMENEZ P, EDOUARD P, et al., 2015. Sprint acceleration mechanics: The major role of hamstrings in horizontal force production[J]. *Front Physiol*, doi:10.3389/fphys.2015.00404.
- NEUMANN G, 1990. Die Leistungsstruktur in den Ausdauersportarten aus sportmedizinischer Sicht[J]. In *Leistungssport*, 26:174-176.
- NEVILL M E, BOOBIS L H, BROOKS S, et al., 1989. Effect of training on muscle metabolism during treadmill sprinting[J]. *J Appl Physiol*, 67(6):2376 - 2382.
- PARRA J, CADEFU J A, RODAS G, et al., 2000. The distribution of rest periods affects performance and adaptations of energy metabolism induced by high-intensity training in human muscle[J]. *Acta Physiol Scand*, 169(2):157-165.
- RODAS G, VENTURA J L, CADEFU J A, et al., 2000. Short training programme for the rapid improvement of both aerobic and anaerobic metabolism[J]. *Eur J Appl Physiol*, 82(5-6):480-486.
- SHARP R, COSTILL D, FINK W, et al., 1986. Effects of eight weeks of bicycle ergometer sprint training on human muscle buffer capacity[J]. *Int J Sports Med*, 7(1):13-17.
- SPRIET L L, 1995. Anaerobic Metabolism During High-Intensity Exercise[M]// HARGREAVES M. Exercise Metabolism. Champaign: Human Kinetics:1-39.
- WORLD ATHLETICS , 2021. 100 m men senior outdoor[EB/OL]. [2021-10-01]. <https://worldathletics.org/records/all-time-toplists/sprints/100-metres/outdoor/men/senior>.

Progress and Trend of Scientific Training in 100 m Sprint —Based on Exercise Physiology and Methodology

ZHENG Xuefeng¹, CHEN Hui^{2,3}, SU Bingtian^{3,4}, SONG Qingquan³, SHU Yang¹, CHEN Xiaoping^{1,5*}

1. *China Institute of Sport Science, Beijing 100061, China*; 2. *School of sports and health management, Chongqing University of Education, Chongqing 400065, China*; 3. *School of Strength and Conditioning, Beijing Sport University, Beijing 100084, China*; 4. *Faculty of Physical Education, Jinan University, Guangzhou 510632, China*; 5. *Faculty of Physical Education, Ningbo University, Ningbo 315211, China*

Abstract: The 100 m sprint is the most influential event in the Olympic Games, and the in-depth study of the training progress and trend of world sprint events has important practical significance for improving the scientific training level of sprint in China. Based on the previous research, this study analyzed the training concepts, loads and methods in China and other countries through exercise physiology and training methodology. It is found that, firstly, the muscle power pattern driven by hip extensors and ankle flexors is the focus of sprint training in recent years; secondly, increasing ATP-PCr storage and anaerobic glycolysis energy supply rate are the two main tasks of sprint training; thirdly, strength and explosive power training is the important training part in elite sprinters; lastly, the neuro-muscle mobilization and recruitment characteristics of the sprint and the corresponding energy metabolism process are the key points for the arrangement of training load. Based on the practical demands of preparing for the Olympics, we should comprehensively and deeply understand the current development and trends of sprint training in the world, scientifically explore the special characteristics of sprint, and grasp the training rules and direction from the source. In addition, more basic research should be conducted on the unresolved and controversial issues, so as to establish the scientific sprint training system and improve athletics performance in China.

Keywords: 100 m sprint; specific characteristics; muscle power pattern; energy metabolism; training load