



儿童青少年“拉长-缩短周期”运动能力增龄性变化及机制

Mechanisms of the Age-Related Changes on Stretch-Shortening Cycle Ability in Children and Adolescents

田俊龙^{1*}, 李志远²

TIAN Junlong^{1*}, LI Zhiyuan²

摘要: 儿童青少年“拉长-缩短周期”(stretch-shortening cycle, SSC)运动能力受到年龄增长过程中肌肉、肌腱结构以及神经肌肉适应性变化的影响。采用文献资料调研、逻辑分析法,归纳儿童青少年SSC运动发展的肌肉、肌腱结构特点和神经肌肉适应性机制,并概述年龄增长对SSC运动能力产生的影响。研究认为:儿童青少年向成年期转变过程中,肌肉体积、肌纤维长度和肌肉羽状角均有所增加。同时,肌腱的尺寸和力学特性发生变化,从而影响其刚度。随着年龄增长,神经对肌肉的控制能力得到提升,表现为牵张反射活动增强、主动肌和拮抗肌共同收缩减少,以及预激活水平和募集高阶运动单位能力提升。以上变化对SSC运动能力产生了积极的影响。系统性的快速伸缩复合训练和力量训练后,儿童青少年SSC运动能力可以得到改善,其具体机制仍需进一步研究。

关键词: 拉长-缩短周期;儿童青少年;年龄;神经肌肉;快速伸缩复合训练

Abstract: The stretch-shortening cycle (SSC) ability of children and adolescents is affected by changes in muscle, tendon structure, and neuromuscular adaptations during the aging process. The methods of literature review and logical analysis are used to summarize the structural characteristics of muscles and tendons and the neuromuscular adaptation mechanism of SSC development in children and adolescents, and to outline the effect of aging on the SSC ability. The results show that: during the transition from childhood to adulthood, muscle volume, muscle fiber length, and muscle pennation angle increase. At the same time, the size and mechanical properties of the tendon change, which affects its stiffness. With the growth of age, children's neural control of muscles improves, which is manifested in the enhancement of stretch reflex activity, the reduction of co-contraction of active and antagonistic muscles, and the improvement of pre-activation level and the ability to recruit high-threshold motor units. The above changes have a positive impact on SSC ability. The SSC ability of children and adolescents can be improved after systematic plyometric and resistance training, and the specific mechanism of improvement still needs further research.

Keywords: stretch-shortening cycle; children and adolescents; age; neuromuscular; plyometric training

中图分类号:G804.2 **文献标识码:**A

***通信作者简介:**

田俊龙(1988-),男,讲师,在读博士研究生,主要研究方向为青少年身体运动功能训练, E-mail: 284008826@qq.com。

作者单位:

1. 首都体育学院, 北京 100191;
2. 浙江大学, 浙江 杭州 310058
1. Capital University of Physical Education and Sports, Beijing 100191, China;
2. Zhejiang University, Hangzhou 310058, China.

儿童青少年时期建立的跑、跳、投运动能力可以为良好的身体素质和运动技能的形成奠定重要基础(Lloyd et al., 2015)。跑、跳、投运动的共同特点是利用“拉长-缩短周期”(stretch-shortening cycle, SSC)的理论原理,在肌肉向心收缩动作之前,先进行离心拉伸动作(Nicol et al., 2006)。Komi(2000)研究发现,与单纯的向心收缩作用相比,先进行离心的拉伸,可以利用牵张反射作用提高肌肉向心收缩的能力。Bosco等(1987)研究表明,成人受试者在纵跳前先进行预拉伸动作,相比没有预拉伸,起跳高度提升18%~

30%。然而,在儿童受试者中,预拉伸后起跳高度仅提升1%~5%(Lloyd et al., 2009)。

世界卫生组织将2~10岁定义为儿童期,10~19岁定义为青少年期。儿童青少年时期身体运动表现受年龄的影响。SSC运动能力受神经肌肉功能的控制,需要神经系统、肌肉系统(Komi, 2000; Nicol et al., 2006)以及肌肉-肌腱单元(muscle-tendon unit, MTU)之间有效的相互作用(图1)(Sawicki et al., 2015)。随着年龄增长,神经系统发展中对SSC运动能力产生影响的因素包括有效的预激活(Lazaridis et al., 2010; Lloyd et al., 2012)、牵张反射强度的增加(Grosset et al., 2007)、肌腱刚度的提升(Lambertz et al., 2003),以及肌肉共同收缩率的减小(Frost et al., 1997)等。另外,儿童青少年时期,肌肉和肌腱的形态特征会产生许多适应性变化(表1),肌肉的变化包括肌肉厚度、肌肉横截面积(cross-sectional area, CSA)和肌纤维长度增加,以及肌肉羽状角的变化(Kubo et al., 2001)。肌腱的变化包括肌腱CSA、肌腱长度和刚度增加(Kubo

et al., 2001; Waugh et al., 2012)。基于此,本研究旨在系统阐述儿童青少年在年龄增长过程中肌肉、肌腱结构和神经肌肉适应性的发展和变化,分析其对儿童和青少年SSC运动能力的影响。

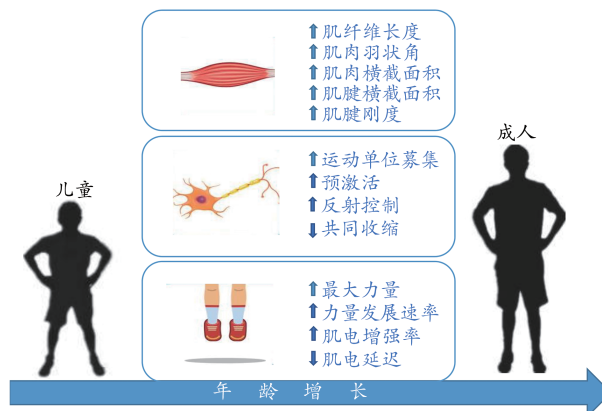


图1 年龄增长对儿童SSC运动能力产生主要影响的因素
Figure 1. Factors that Mainly Influence SSC Ability with Age

表1 与年龄增长有关的肌肉、肌腱结构和神经肌肉适应性变化对SSC运动能力的影响

Table 1 Effects of Age-Related Changes in Muscles, Tendon Structure, and Neuromuscular Adaptations on SSC Ability

变化类型	文献来源	变量及单位	不同年龄阶段的差异			运动学变量	对SSC能力的影响
			儿童(2~10岁)	青少年(10~19岁)	成人(>19岁)		
肌纤维类型组	Lexell等(1992)	VL I型肌纤维比例/%	约65%	约56%	约50%	力量输出、收缩速度	力量输出↑、RFD↑
成	Glenmark等(1992)	VL I型、II型肌纤维类型比例/%	—	女:I型51±9 II型49±11 男:I型55±12 II型44±11	女:I型55±12 II型49±11 男:I型48±13 II型49±13	速度	
肌肉体积	Kubo等(2001)	RF、VL厚度/mm	RF: 19.7±2.9 VL: 19.5±2.6	RF: 22.9±3.1 VL: 22.7±2.8	RF: 26.4±3.2 VL: 27.8±3.0	力量输出	冲量↑、RFD↑、横桥数量↑、EPE储存↑
	Lexell等(1992)	VL面积/mm ²	约1776	约3120	约3888		
	Tonson等(2008)	前臂MMCSA/cm ²	18.7±2.8	27.1±7.1	40.6±4.6		
肌纤维长度	Kubo等(2001)	VL长度/cm	62.1±5.8	80.2±7.5	84.7±6.9	收缩速度	RFD↑、EPE再利用↑
	O'Brien等(2010a)	RF长度/cm	男:57.3±5.4 女:58.9±3.9	—	男:85.4±4.0 女:61.1±4.3		
	Kubo等(2014a)	髌腱初长度/mm	38.5±0.8	45.3±0.6	47.0±0.8		
肌肉羽状角	Kubo等(2014a)	VL肌束角度/(°)	16.2±0.9	16.6±1.5	17.2±1.3	力-速度、长度-张力的关系	力量输出↑、RFD↑、EPE再利用↑、下肢刚度↑
	Kannas等(2010)	在不同足底屈曲角度MI-VC时MG的羽状角/(°)	0°屈曲:约33° 15°屈曲:约37° -15°屈曲:约29°	—	0°屈曲:约40° 15°屈曲:约45° -15°屈曲:约35°		
肌腱尺寸	Waugh等(2012)	跟腱长度/mm	126.0±19.9	150.8±24.4	192.5±28.5	力量产生效率	肌腱刚度↑、RFD↑
	Kubo等(2014a)	髌腱横截面积/mm ²	49.2±2.3	65.4±2.8	82.7±2.1		

变化类型	文献来源	变量及单位	不同年龄阶段的差异			运动学变量	对SSC能力的影响
			儿童(2~10岁)	青少年(10~19岁)	成人(>19岁)		
肌腱刚度	O'Brien等(2010b)	髌腱横截面积/mm ²	男:75.3±15.0 女:73.5±15.7	—	男:114.8±17.8 女:95.1±16.8		
	Lloyd等(2012)	次最大跳跃时的下肢绝对刚度/(KN·m ⁻¹)	16.1±5.1	40.1±15.0	—	力量产生效率	RFD↑、牵张反射↑、EMD↓
	Waugh等(2012)	跟腱相对刚度/(N·mm ⁻¹)	100.8±30.4	162.4±42.9	259.2±44.2		
运动单位募集	O'Brien等(2010b)	髌腱刚度/(N·mm ⁻¹)	男:554.6±70.8 女:561.5±57.4	—	男:1 075.5±87.0 女:1 030.4±139.0		
	Grosset等(2008)	TS EMG _{max} /μV、 NME _{max} ⁰ /°Nm	189±38 5.7±0.2	365±109 7.7±0.3	641±122 8.2±0.2	力量输出	RFD↑、肌肉收缩速度↑
	Pitt等(2015)	VL EMG _{Th} /%	86.4±9.6	—	79.7±10.0		
共同收缩	Lazaridis等(2010)	20 cm跳深制动时期跟腱与MG和SOL的协同激活比值	0.82±0.4	—	0.46±0.2		
	Frost等(1997)	VL和HAM在不同VO _{2max} 百分比条件下的CI值	25%~29%VO _{2max} :7.3 65%~68%VO _{2max} :14.3	25%~29%VO _{2max} :5.6 65%~68%VO _{2max} :8.2	—	力量输出	EPE再利用↑、牵张反射↑、神经增强作用↑
	Frost等(2002)	AT和SOL在不同移动速度下的CI值	1.34 m/s:13.9 2.19 m/s:19.7	1.34 m/s:8.9 2.19 m/s:13.8	—		
预激活	Lloyd等(2012)	与地面接触前100 ms SOL肌电活动占比/%	52.5±9.4	66.8±5.2	—	力量产生效率	EMD↓、RFD↑
	Lazaridis等(2010)	跳深时MG预激活时长、肌电振幅比较	成年男性GM的预激活时间比男孩更长(P=0.005),激活前GM的肌电振幅显著高于男孩(P=0.005)				
	Oliver等(2010)	在高频率跳跃下(3.0 Hz)的肌肉激活水平	成年男性相比男孩表现出更高的预激活水平,SOL、VL的肌电活动显著增加				
反射控制	Lazaridis等(2010)	20 cm跳深GM和SOL短潜伏期反射/ms	GM:39.6±6.0 SOL:41.0±3.9	—	GM:45.2±6.5 SOL:46.1±3.8	力量输出	力量输出↑、RFD↑、MTU刚度↑
	Grosset等(2007)	TS H反射、T反射、牵张反射潜伏期与年龄的关系(青春前期)	H反射、T反射、牵张反射潜伏期与青春前期儿童年龄呈显著相关(H反射:r=0.95,n=5,P<0.05;T反射:r=0.97,n=5,P<0.05;牵张反射:r=0.95,n=5,P<0.05)				
肌电增强率	Falk等(2009)	肘关节最大自主屈伸PT/Nm dt/dτ _{max} /(Nm·s ⁻¹)	屈:19.5±5.8 伸:18.4±5.7 屈:445±113 伸:113±32	—	屈:68.5±11.0 伸:55.0±10.1 屈:625±154 伸:141±53	力量产生效率	RFD↑
	Waugh等(2013)	跟腱REI	肌电出现后75 ms内,成人REI显著大于5~6岁、7~8岁儿童(P<0.05);在75 ms和150 ms时,9~10岁儿童REI显著大于5~6岁、7~8岁儿童(P<0.05);成人REI值比5~6岁儿童平均高10%				

注:VL=股外侧肌(vastus lateralis);RFD=力量发展速率(rate of force development);RF=股直肌(rectus femoris);EPE=弹性势能(elastic potential energy);MMCSA=最大肌肉横截面积(maximal muscle cross-sectional area);MIVC=最大等长收缩(maximal isometric voluntary contraction);MG=内侧腓肠肌(medial gastrocnemius);EMD=肌电延迟(electromagnetic delay);TS=小腿三头肌(triceps surae);SOL=比目鱼肌(soleus);HAM=腓绳肌(hamstrings);AT=胫骨前肌(anterior tibialis);EMG_{max}=最大肌电信号(maximal electromyogram);NME_{max}=最大神经肌肉效率(maximal neuromuscular efficiency);VO_{2max}=最大摄氧量(maximal oxygen consumption);EMG_{Th}=肌电阈值(electromyographic threshold);CI=共同收缩指数(co-contraction index);PT=峰值力矩(peak torque);dt/dτ_{max}=力矩发展峰值速率(peak rate of torque development);REI=肌电增强率(rate of EMG increase);↑提高;↓下降。

1 肌肉类型和结构的变化

1.1 肌纤维类型的组成

肌纤维类型组成的差异是儿童力量弱于成人的原因

之一(Dotan et al., 2012)。Lexell等(1992)研究发现,3~21月龄的幼儿与成人相比,IIb型肌纤维的比例较低[(6.2%±1.1%) vs (20.5%±1.6%)],5岁时I型纤维的比

例约为 65%，20 岁时下降到约 50%。但是，随着青少年向成年阶段发展，肌纤维类型组成呈现出明显的性别差异。在 16~27 岁，女性 I 型纤维的比例有所增加 (51%~55%)，而男性 I 型肌纤维比例显著减少 (55%~48%) (Glenmark et al., 1992)。II 型肌纤维比例的增加有助于提升与快速力量能力有关的跳跃和冲刺表现 (赵可伟等, 2021)。因此，在年龄增长过程中，II 型肌纤维比例增加有利于在 SSC 运动中获得更好表现。

1.2 肌肉体积

下肢肌肉体积随儿童年龄增长而显著增大 (Kubo et al., 2001; O'Brien et al., 2010a)。随着肌肉体积的增大，在 SSC 运动的离心阶段和向心收缩阶段均可获得更大力量输出 (Kubo et al., 2001; O'Brien et al., 2010a)。Evangelidis 等 (2016) 研究表明，股四头肌向心收缩的力量以及腓绳肌离心收缩的力量与肌肉体积相关。在 SSC 运动中，增加向心收缩的力量可以获得更佳的冲量以及 RFD，从而在短跑和跳跃运动中获得更好的运动表现。同时，离心阶段的力量增强可以促进肌纤维内起作用的横桥摆动数量增加，从而影响肌肉拉长过程中神经调节强度，有利于弹性势能的储存和利用 (Henchoz et al., 2006)。因此，随着年龄增长，儿童青少年肌肉体积的增加有利于提升 SSC 运动能力。

1.3 肌纤维长度

较长的肌纤维能提高肌肉在较高速度和较大长度范围内产生力的能力 (Methenitis et al., 2019)。儿童的下肢肌纤维长度小于成人 (Kubo et al., 2001; O'Brien et al., 2010a)。但随着年龄增长，在 15 岁左右时，肌纤维长度已经接近或达到成人水平 (Kubo et al., 2001)。Earp 等 (2010) 研究发现，腓肠肌的长度是预测成人下蹲跳 RFD 值的重要因素，也是提升儿童和青少年 SSC 运动能力的重要因素。RFD 值增加可以减少触地时关节的屈曲，从而提高下肢的整体刚度，促进青少年跳跃和短跑能力的提升 (McMahon et al., 2012)。因此，肌纤维长度增加能够促进青少年快速力量能力的提升，从而获得更好的 SSC 运动表现。

1.4 肌肉羽状角

肌肉羽状角是指肌束与深层筋膜所成的角度 (李玉章等, 2010)。随着年龄增长，儿童肌肉羽状角增大，在青春期后保持稳定 (Kannas et al., 2010)。更大的羽状角能够增加肌肉 CSA，使得更多的弹性元附着在腱膜或肌腱上 (Kawakami et al., 1995)。同时，羽状角增加可以减少肌肉在同等发力条件下的整体收缩程度 (Wakeling et al., 2011)，使肌肉在力-速度曲线的更优区域上工作，以及延长肌肉在更优长度-张力曲线区域的工作时间 (Askew et al., 1998)。此外，较大的羽状角可能对 SSC 运动中的肌肉刚度产生有益影响。Earp 等 (2011) 研究表明，肌肉羽状角更大的受试者在跳深过程中有更佳的早期 RFD，

原因是其肌肉应对离心负荷的能力更强。

2 肌腱结构的变化

2.1 肌腱尺寸和内部特性

肌腱的生长贯穿整个儿童青少年时期，生长期肌腱的尺寸和内部特性会发生变化 (Kubo et al., 2001, 2014a; O'Brien et al., 2010b; Waugh et al., 2012)。Kubo 等 (2014a, 2014b) 研究表明，小学男生的髌腱长度明显短于初中男生和成年男性，男性的跟腱尺寸在 14 岁左右呈稳定状态。肌腱的尺寸对其功能有很大影响。例如，长而薄的肌腱顺应性更佳，能够充分储存和利用弹性势能 (Van Soest et al., 1995)。相比之下，短而粗的肌腱刚度更大 (Van Soest et al., 1995)，拉伸的阻力也更大，能够将肌肉收缩产生的力量更有效地传递到骨骼，因此肌腱的尺寸与 SSC 运动的效率密切相关。

此外，肌腱的内部特性对其刚度也有影响。年龄增长过程中儿童青少年肌腱所承受的负荷增加，引起肌腱组织胶原纤维之间的相互交融以及直径和密度的增加，从而增加肌腱组织的弹性模量 (Bailey et al., 1998)，进而影响肌腱刚度的增加 (Dotan et al., 2012; Kubo et al., 2014a; O'Brien et al., 2010a; Waugh et al., 2012)。

2.2 肌腱刚度

刚度是指物体在受载 (load) 时抵抗变形的能力 (魏勇等, 2009b)。青少年时期，髌腱和跟腱的刚度都有所增加，10 岁儿童的肌腱刚度低于 13 岁青少年和成人水平 (Kubo et al., 2014a)。到 15 岁时，青少年膝关节伸肌肌腱的力学特性与成人接近 (Kubo et al., 2001)，表明肌腱刚度可能在生长速度高峰 (peak height velocity, PHV) 后达到成人水平。肌腱刚度增加可以促进力更有效地向骨骼转移 (姜自立等, 2015)，从而影响 RFD。此外，Waugh 等 (2013) 研究表明，EMD 会影响肌肉快速力量的产生，EMD 随儿童神经肌肉系统逐渐发育成熟而缩短，且儿童肌腱刚度与 EMD 呈负相关，部分解释了儿童快速力量随年龄增长而提高的原因。因此，随着儿童青少年肌腱刚度的增加以及 EMD 的缩短，其 SSC 的运动能力得到提升。

3 神经肌肉适应性变化

3.1 运动单位的募集

儿童在肌肉自主收缩期间，运动单位募集的比例小于成人，运动单位募集的能力随年龄增长而提高 (Grosset et al., 2008)。有研究认为，无法有效募集和利用高阶运动单位是限制儿童发力能力的因素 (Halim et al., 2003)。Pitt 等 (2015) 研究发现，与成年男性相比，男童在渐进性运动中对高阶运动单位使用较少。随着年龄增长，当儿童的中枢神经系统发育更为成熟时，才能够更好地募集高阶运动单位，从而促进 SSC 运动中快速力量的产生。

3.2 共同收缩

共同收缩是指主动肌与拮抗肌在特定时间段内同时活动(魏勇等,2009a)。儿童共同收缩率随年龄增长而减小(Lambertz et al.,2003)。共同收缩有助于维持运动时关节稳定性,但拮抗肌收缩增强会增加主动肌的能量消耗,削减肌肉净力量的输出(Arpinar-Avsar et al.,2020; Frost et al.,2002)。在SSC运动中,肌肉收缩的幅度或速度使MTU的长度过快发生变化时,腱器官增加传入活动,从而抑制支配主动肌的运动神经元,增加拮抗肌运动单位(Brooks et al.,2000),通过增加与地面的接触时长以及减少力的输出来降低SSC运动的整体效率。因此,在儿童年龄增长过程中减少肌肉的共同收缩,可以减少对主动肌的抑制作用,增加肌肉离心时期的预拉伸效果,从而改善SSC的运动能力。

3.3 预激活

预激活可以反映身体下落腾空阶段,在受到地面冲击前肌肉活动的水平(Hobara et al.,2008)。Lazaridis等(2010)研究发现,在20 cm跳深测试中,儿童表现出的预激活明显少于成人。利用前馈机制能力不足导致儿童在跳跃过程中产生更长的地面接触时间(Oliver et al.,2010),使得SSC运动的表现欠佳。这种神经肌肉反应机制与年龄相关,Lloyd等(2012)研究发现,15岁的青少年在跳跃时比9岁和12岁的儿童产生更高的预激活水平。儿童在跳跃中前馈活动的减少反映了一种防止MTU在接触地面时速度过快的保护机制(Horita et al.,2002)。在年龄增长过程中,随着儿童在运动中预先控制能力的提升,SSC运动能力逐渐得到改善。

3.4 反射控制

落地或受到冲击后30~60 ms、60~90 ms和90~120 ms的平均肌电图(electromyogram,EMG)分别代表短潜时、中潜时和长潜时牵张反射(Hobara et al.,2008)。研究发现,在原地连续纵跳时,儿童更依赖于长潜时牵张反射(Lloyd et al.,2012; Oliver et al.,2010)。但随着年龄增长,青少年更善于利用短潜时牵张反射调节下肢的刚度(Lloyd et al.,2012)。其内部机制是改善肌梭敏感性、运动感觉通路的成熟度,以及增加MTU的刚度(Grosset et al.,2007)。牵张反射活动的增强,会引起机电活动增强,从而促使SSC运动产生更大的力量。

3.5 机电增强率

研究表明,肌肉激活率决定了RFD的水平(Rossi et al.,2017)。儿童的机电增幅明显低于成人(Falk et al.,2009; Waugh et al.,2013),这与二者之间RFD的差别有关(Thorpe et al.,2016)。肌肉激活率不足限制了儿童快速发力的能力,这可能是运动单位募集能力的差异所致(Dotan et al.,2012; Pitt et al.,2015)。因此,较早地募集到高阶运动单位能够表现出更高的机电增强率。理论上

讲,随着年龄增长,儿童募集高阶运动单位能力提高,并转化为机电增强率的上升,从而提升在SSC运动期间快速发力的能力。

4 SSC运动能力的可训练性

为了验证训练对青少年SSC运动能力的影响,通常采取一系列的跳跃方法量化SSC的表现。研究表明,快速伸缩复合训练(白杨等,2018;井兰香等,2010;Ramírez-Campillo et al.,2015)、力量训练(张象,2015)以及快速伸缩复合训练和力量训练相结合(翟华楠等,2020;Fischetti et al.,2019),对儿童和青少年的跳跃能力有积极影响。此外,Meta分析结果表明,抗阻训练可以作为改善青少年SSC运动能力的措施(王贝,2013;Harries et al.,2012)。但是,干预措施的有效性受青少年发育程度的影响(Lloyd et al.,2016)。快速伸缩复合训练对达到PHV前的男孩效果更好,而快速伸缩复合训练和传统力量训练相结合的综合训练对达到PHV后的男孩干预效果更佳(Lloyd et al.,2016)。

研究表明,快速伸缩复合训练对成人的运动单位募集、肌肉收缩速度(Malisoux et al.,2006)、短潜时牵张反射(Voigt et al.,1998)和肌肉激活(Chimera et al.,2004)有积极影响。此外,力量训练可以对成人的肌肉结构产生一定影响,特别是导致肌纤维长度(Baroni et al.,2015)、羽状角和CSA增加(Kawakami et al.,1995)。但快速伸缩复合训练和力量训练是否对儿童和青少年神经肌肉的适应性以及肌肉的结构产生相同影响,还无法从现有研究中得到验证。

研究发现,抗阻训练可以影响跟腱的力学特性(Waugh et al.,2014)。未受过训练的儿童进行2次/周,持续10周的抗阻训练后,跟腱刚度有所增加,但未发现跟腱CSA的显著变化,因此跟腱刚度的增加可能是跟腱内部特性的改变所引起的(Waugh et al.,2014)。此外,虽然肌腱刚度的增加也导致了EMD的降低,但没有引起EMG升高和RFD的改变。因此,要达到更好的训练效果,可能需要更长的训练周期或更高频的训练安排。

5 小结

儿童青少年向成年期转变过程中,跑、跳、投能力得到了自然增长。随着年龄增长,肌肉体积、肌纤维长度和肌肉羽状角均有所增加。肌腱尺寸和力学特性也发生变化,从而影响其刚度。此外,神经对肌肉控制能力的提升,对SSC运动能力有积极影响。表现为主动肌和拮抗肌的共同收缩减少,运动单位募集和预激活的增加。随着年龄增长,MTU和神经肌肉系统的适应性改变增强了快速发力能力,从而使儿童青少年在SSC运动中获得更好的表现。系统性的快速伸缩复合训练和力量训练后,

儿童青少年的 SSC 运动能力可以得到改善,其具体机制仍需进一步研究。

参考文献:

- 白杨,傅涛,2018.快速伸缩复合训练对改善大学生健康体适能的研究[J].中国学校卫生,39(9):1357-1359.
- 姜自立,李元,2015.静力性拉伸急性效应研究进展:作用,机制和启示[J].中国体育科技,51(2):3-13.
- 井兰香,刘宇,2010.篮球运动员 8 周负重超等长训练后下肢及髌、膝、踝关节动力学和刚度变化[J].中国运动医学杂志,29(4):417-420.
- 李玉章,吴瑛,2010.运用超声波技术对人体肌腱复合体特征的研究进展[J].上海体育学院学报,34(2):43-48.
- 王贝,2013.抗阻训练方案研究进展:科学研究优化训练方案[J].北京体育大学学报,36(8):45-54.
- 魏勇,刘宇,2009a.肌肉共同收缩研究进展[J].中国体育科技,45(5):54-59.
- 魏勇,刘宇,2009b.运动中下肢刚度变化及其机制研究进展[J].中国运动医学杂志,28(2):222-225.
- 翟华楠,周彤,2020.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,54(10):65-71.
- 张象,2015.两类不同性质力量训练对下肢肌力影响特征研究[J].成都体育学院学报,41(2):97-99.
- 赵可伟,梁美富,高炳宏,2021.增肌训练效益及训练策略的研究进展[J].中国体育科技,57(1):19-28.
- ARPINAR-AVSAR P, CELIK H, 2020. Does minimizing co-contraction increase agility test performance? [J]. *Isokinet Exerc Sci*, 28(4): 111-118.
- ASKEW G N, MARSH R L, 1998. Optimal shortening velocity (V/V_{max}) of skeletal muscle during cyclical contractions: Length-force effects and velocity-dependent activation and deactivation[J]. *J Exp Biol*, 201(10): 1527-1540.
- BAILEY A J, PAUL R G, KNOTT L, 1998. Mechanisms of maturation and ageing of collagen[J]. *Mech Ageing Dev*, 106(1-2): 1-56.
- BARONI B M, PINTO R S, HERZOG W, et al., 2015. Eccentric resistance training of the knee extensor muscle: Training programs and neuromuscular adaptations [J]. *Isokinet Exerc Sci*, 23(3): 183-198.
- BOSCO C, MONTANARI G, TARAKKA I, et al., 1987. The effect of pre-stretch on mechanical efficiency of human skeletal muscle[J]. *Acta Physiol Scand*, 131(3):323-329.
- BROOKS G A, FAHEY T D, WHITE T P, et al., 2000. *Exercise Physiology: Human Bioenergetics and Its Applications*[M]. California: Mayfield Publishing:181-209.
- CHIMERA N J, SWANIK K A, SWANIK B C, et al., 2004. Effects of plyometric training on muscle-activation strategies and performance in female athletes[J]. *J Athl Train*, 39(1): 24-31.
- DOTAN R, MITCHELL C, COHEN R, et al., 2012. Child-adult differences in muscle activation: A review [J]. *Pediatr Exerc Sci*, 24(1):2-21.
- EARP J E, KRAEMER W J, CORMIE P, et al., 2011. Influence of muscle-tendon unit structure on rate of force development during the squat, countermovement, and drop jumps[J]. *J Strength Cond Res*, 25(2): 340-347.
- EARP J E, KRAEMER W J, NEWTON R U, et al., 2010. Lower-body muscle structure and its role in jump performance during squat, countermovement, and depth drop jumps[J]. *J Strength Cond Res*, 24(3): 722-729.
- EVANGELIDIS P E, MASSEY G J, PAIN M T G, et al., 2016. Strength and size relationships of the quadriceps and hamstrings with special reference to reciprocal muscle balance[J]. *Eur J Appl Physiol*, 116(3): 593-600.
- FALK B, USSELMAN C, DOTAN R, et al., 2009. Child-adult differences in muscle strength and activation pattern during isometric elbow flexion and extension[J]. *Appl Physiol Nutr Metab*, 34(4): 609-615.
- FISCHETTI F, CATALDI S, GRECO G, 2019. A combined plyometric and resistance training program improves fitness performance in 12 to 14-years-old boys[J]. *Sport Sci Health*, 15(3): 615-621.
- FROST G, BAR-OR O, DOWLING J, et al., 2002. Explaining differences in the metabolic cost and efficiency of treadmill locomotion in children[J]. *J Sports Sci*, 20(6): 451-461.
- FROST G, DOWLING J, DYSON K, et al., 1997. Cocontraction in three age groups of children during treadmill locomotion[J]. *J Electromyogr Kinesiol*, 7(3): 179-186.
- GLENMARK B, HEDBERG G, JANSSON E, 1992. Changes in muscle fibre type from adolescence to adulthood in women and men[J]. *Acta Physiol Scand*, 146(2): 251-259.
- GROSSET J F, MORA I, LAMBERTZ D, et al., 2007. Changes in stretch reflexes and muscle stiffness with age in prepubescent children[J]. *J Appl Physiol*, 102(6): 2352-2360.
- GROSSET J F, MORA I, LAMBERTZ D, et al., 2008. Voluntary activation of the triceps surae in prepubertal children [J]. *J Electromyogr Kinesiol*, 18(3): 455-465.
- HALIN R, GERMAIN P, BERCIER S, et al., 2003. Neuromuscular response of young boys versus men during sustained maximal contraction[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 35(6): 1042-1048.
- HARRIES S K, LUBANS D R, CALLISTER R, 2012. Resistance training to improve power and sports performance in adolescent athletes: A systematic review and meta-analysis[J]. *J Sci Med Sport*, 15(6): 532-540.
- HENCHOZ Y, MALATESTA D, GREMION G, et al., 2006. Effects of the transition time between muscle-tendon stretch and shortening on mechanical efficiency[J]. *Eur J Appl Physiol*, 96(6): 665-671.
- HOBARA H, KIMURA K, OMURO K, et al., 2008. Determinants of difference in leg stiffness between endurance- and power-trained athletes[J]. *J Biomech*, 41(3): 506-514.
- HORITA T, KOMI P V, NICOL C, et al., 2002. Interaction between pre-landing activities and stiffness regulation of the knee joint musculoskeletal system in the drop jump: Implications to performance [J]. *Eur J Appl Physiol*, 88(1-2): 76-84.
- KANNAS T, KELLIS E, ARAMPATZI F, et al., 2010. Medial gastrocnemius architectural properties during isometric contractions in boys and men[J]. *Pediatr Exerc Sci*, 22(1): 152-164.
- KAWAKAMI Y, ABE T, KUNO S Y, et al., 1995. Training-induced changes in muscle architecture and specific tension[J]. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 72(1-2): 37-43.
- KOMI P V, 2000. Stretch-shortening cycle: A powerful model to study

- normal and fatigued muscle[J]. *J Biomech*, 33(10):1197-1206.
- KUBO K, KANEHISA H, KAWAKAMI Y, et al., 2001. Growth changes in the elastic properties of human tendon structures[J]. *Int J Sports Med*, 22(2): 138-143.
- KUBO K, TESHIMA T, HIROSE N, et al., 2014a. Growth changes in morphological and mechanical properties of human patellar tendon in vivo[J]. *J Appl Biomech*, 30(3): 415-422.
- KUBO K, TESHIMA T, HIROSE N, et al., 2014b. A cross-sectional study of the plantar flexor muscle and tendon during growth[J]. *Int J Sports Med*, 35(10): 828-834.
- LAMBERTZ D, MORA I, GROSSET J F, et al., 2003. Evaluation of musculotendinous stiffness in prepubertal children and adults, taking into account muscle activity[J]. *J Appl Physiol*, 95(1): 64-72.
- LAZARIDIS S, BASSA E, PATIKAS D, et al., 2010. Neuromuscular differences between prepubescent boys and adult men during drop jump[J]. *Eur J Appl Physiol*, 110(1): 67-74.
- LEXELL J, SJÖSTRÖM M, NORDLUND A, et al., 1992. Growth and development of human muscle: A quantitative morphological study of whole vastus lateralis from childhood to adult age[J]. *Muscle Nerve*, 15(3): 404-409.
- LLOYD R S, OLIVER J L, FAIGENBAUM A D, et al., 2015. Long-term athletic development, part2: Barriers to success and potential solutions[J]. *J Strength Cond Res*, 29(5): 1451-1464.
- LLOYD R S, OLIVER J L, HUGHES M G, et al., 2009. Reliability and validity of field-based measures of leg stiffness and reactive strength index in youths[J]. *J Sports Sci*, 27(14): 1565-1573.
- LLOYD R S, OLIVER J L, HUGHES M G, et al., 2012. Age-related differences in the neural regulation of stretch-shortening cycle activities in male youths during maximal and sub-maximal hopping[J]. *J Electromyogr Kinesiol*, 22(1): 37-43.
- LLOYD R S, RADNOR J M, DE STE CROIX M B, et al., 2016. Changes in sprint and jump performance after traditional, plyometric, and combined resistance training in male youth pre-and post-peak height velocity[J]. *J Strength Cond Res*, 30(5): 1239-1247.
- MALISOUX L, FRANCAUX M, NIELENS H, et al., 2006. Stretch-shortening cycle exercises: An effective training paradigm to enhance power output of human single muscle fibers[J]. *J Appl Physiol*, 100(3): 771-779.
- MCMAHON J J, COMFORT P, PEARSON S, 2012. Lower limb stiffness: Effect on performance and training considerations [J]. *Strength Cond J*, 34(6): 94-101.
- METHENITIS S, STASINAKI A N, ZARAS N, et al., 2019. Intramuscular fiber conduction velocity and muscle fascicle length in human vastus lateralis[J]. *Appl Physiol Nutr Metab*, 44(2): 133-138.
- NICOL C, AVELA J, KOMI P V, 2006. The stretch-shortening cycle: A model to study naturally occurring neuromuscular fatigue[J]. *Sports Med*, 36(11): 977-999.
- O'BRIEN T D, REEVES N D, BALTZOPOULOS V, et al., 2010a. Muscle-tendon structure and dimensions in adults and children[J]. *J Anat*, 216(5): 631-642.
- O'BRIEN T D, REEVES N D, BALTZOPOULOS V, et al., 2010b. Mechanical properties of the patellar tendon in adults and children [J]. *J Biomech*, 43(6): 1190-1195.
- OLIVER J L, SMITH P M, 2010. Neural control of leg stiffness during hopping in boys and men[J]. *J Electromyogr Kinesiol*, 20(5): 973-979.
- PITT B, DOTAN R, MILLAR J, et al., 2015. The electromyographic threshold in boys and men[J]. *Eur J Appl Physiol*, 115(6): 1273-1281.
- RAMÍREZ-CAMPILLO R, BURGOS C H, HENRIQUEZ-OLGUIN C, et al., 2015. Effect of unilateral, bilateral, and combined plyometric training on explosive and endurance performance of young soccer players[J]. *J Strength Cond Res*, 29(5): 1317-1328.
- ROSSI D M, MORCELLI M H, CARDOZO A C, et al., 2017. Rate of force development and muscle activation of trunk muscles in women with and without low back pain: A case-control study[J]. *Phys Ther Sport*, 26: 41-48.
- SAWICKI G S, ROBERTSON B D, AZIZI E, et al., 2015. Timing matters: Tuning the mechanics of a muscle-tendon unit by adjusting stimulation phase during cyclic contractions[J]. *J Exp Biol*, 218(19): 3150-3159.
- THORPE C T, SCREEN H R C, 2016. Tendon structure and composition[J]. *Adv Exp Med Biol*, 920: 3-10.
- TONSON A, RATEL S, LE FUR Y, et al., 2008. Effect of maturation on the relationship between muscle size and force production[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 40(5): 918-925.
- VAN SOEST A J, HUIJING P A, SOLOMONOW M, 1995. The effect of tendon on muscle force in dynamic isometric contractions: A simulation study[J]. *J Biomech*, 28(7): 801-807.
- VOIGT M, CHELLI F, FRIGO C, 1998. Changes in the excitability of soleus muscle short latency stretch reflexes during human hopping after 4 weeks of hopping training[J]. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 78(6): 522-532.
- WAKELING J M, BLAKE O M, WONG I, et al., 2011. Movement mechanics as a determinate of muscle structure, recruitment and coordination [J]. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, 366(1570): 1554-1564.
- WAUGH C M, BLAZEVIČH A, FATH F, et al., 2012. Age-related changes in mechanical properties of the Achilles tendon[J]. *J Anat*, 220(2): 144-155.
- WAUGH C M, KORFF T, FATH F, et al., 2013. Rapid force production in children and adults: Mechanical and neural contributions[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 45(4): 762-771.
- WAUGH C M, KORFF T, FATH F, et al., 2014. Effects of resistance training on tendon mechanical properties and rapid force production in prepubertal children[J]. *J Appl Physiol*, 117(3): 257-266.

(收稿日期:2021-08-11; 修订日期:2022-12-01; 编辑:高天艾)