

·综述·

## 等张收缩模式下动作速度与张力持续时间对肌力和骨骼肌肥大的影响差异研究进展\*

孙嘉伟<sup>1,2</sup> 鲍春雨<sup>2,3,4</sup> 孟庆华<sup>1,2</sup>

抗阻训练(resistance training, RT)被认为是诱导骨骼肌肥大,提高肌力和运动表现的重要训练方式<sup>[1]</sup>。对于普通大众、职业竞技运动员、教练员,甚至包括有运动障碍的人群,抗阻训练都是最为关键的一部分。如何能够制定一份有效的RT方案则是教练员和运动康复医师所面临的重要问题。早前的研究已经表明,在抗阻训练过程中有较多因素可以影响到力量的发展和骨骼肌肥大,如运动选择、运动顺序、训练频率、组间隔、负荷强度和训练量等<sup>[2-4]</sup>。现阶段这些主要的影响变量已经得到专家、学者们的广泛研究。而对于个体在完成动作时,肌肉的收缩类型,尤其是不同收缩速度,肌肉在张力下的持续时间等因素对骨骼肌肥大和力量增益的影响还缺乏更深入的研究,由此也导致了实验样本较少,并且在实验结论方面矛盾较为突出。在实际应用中,相对于等速训练所需要的昂贵精密仪器,抗阻训练利用身体自重和一些自由重物、固定轨迹的抗阻器械等,无疑是目前应用最为广泛的训练方式。在此背景下,对肌肉的动态等张收缩进行深入研究显得越发重要<sup>[5-8]</sup>。为此,作者在Web of Science、PubMed和Embase等数据库,以resistance training、concentric training、eccentric training、time under tension、movement speed、hypertrophy、strength作为主题词进行检索,对相关文章进行归纳整理,继而分析向心和离心训练所诱导的骨骼肌肥大和力量增益差异,以及不同动作速度下所产生的不同影响。最终以期望能够为从事运动康复的医务人员、运动员、教练员和大众健身人群提供一份有价值的参考。

### 1 离心收缩与向心收缩对肌力和骨骼肌肥大发展的影响差异

抗阻训练是一种最为常见与便捷的训练方式,运用一些简单的负载器械即可以进行自如训练。而在抗阻训练过程中更容易被忽视的环节就是在执行动作过程中的离心收缩部分。通常认为,离心收缩可以比向心收缩更易诱发骨骼肌肥大,因为它们可以产生更大的肌肉力量神经肌肉适应性、IGF-1 mRNA表达、卫星细胞活化和增殖以及蛋白质合成

等<sup>[9-11]</sup>。但是,也有一些学者认为离心和向心训练间的肌肉力量和肥大增益并没有显著性差异,尤其是在相同负荷强度或工作量的情况下<sup>[12-15]</sup>。因此在现阶段,离心或向心训练对力量和肥大增益的影响差异仍备受争议。

目前,对于向心收缩所负载的负荷强度,其能诱导的骨骼肌肥大和力量增益已经有了较为深刻的研究<sup>[16-19]</sup>。无论是单一组数还是多组数,70%—90%1RM的负荷强度均能显著提高最大肌肉力量<sup>[20-21]</sup>。众所周知,肌肉离心收缩所能负载的强度要比向心收缩高50%以上<sup>[22]</sup>,负荷强度作为影响骨骼肌肥大和肌肉力量的重要因素,也由此特性引发了学者们对离心收缩能够诱导更大骨骼肌肥大效应的猜想。而肌肉损伤也被认为是运动诱发肌肉肥大的主要机制之一<sup>[23]</sup>,现有的实验结果已经表明,在进行向心、离心和等长训练时均可以观察到显著的肌肉损伤<sup>[24]</sup>,且在三者中,离心训练对肌肉组织的损伤最大。在机体反应层面,也显示出了离心训练会导致肌肉蛋白质合成速率加快,细胞内合成代谢信号增强<sup>[25-26]</sup>。这些发现看似已经将离心训练导向更大的肥大增益,但是最终的实验结果却恰恰相反。

由于离心收缩能够负载远超向心收缩更大的负荷特性,所以将离心的负荷强度对比分为2个部分,即一部分以向心最大负荷为基线,另一部分则为超越向心收缩的最大负荷(超负荷离心强度)。为了比较两者在力量和肥大上的增益区别,Toien<sup>[27]</sup>将受试者随机分为2组进行膝屈伸实验,第一组执行传统膝屈伸动作,负荷强度为90%1RM;第二组在维持原有的组数、重复次数基础上,在离心阶段增加50%负荷。通过为期8周,每周3次的训练后发现,两组受试者的力量提升幅度虽然明显,但是两组间却并无显著差别,增益幅度分别为21%±9%,18%±10%。在现阶段的实验发现:排除训练动作中的向心收缩部分,单纯进行离心收缩训练依然与传统向心—离心训练模式收益相似<sup>[28]</sup>。无论是在总的训练量上控制相等,还是孤立的进行离心或向心训练,单从负荷强度的加減中均显示出两种收缩方式具有相似的增益效果,

DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2023.03.025

\*基金项目:国家自然科学基金项目(11372223,11102135);天津市自然科学基金重点项目(17JCZDJC36000,18JCZDJC35900)

1 天津体育学院体育教育与教育科学学院,天津市,301617; 2 天津体育学院天津市运动生理与运动医学重点实验室; 3 天津体育学院社会体育与健康科学学院; 4 通讯作者

第一作者简介:孙嘉伟,男,硕士研究生; 收稿日期:2020-08-04

即使离心阶段施加了更大的负荷强度。虽然离心收缩确实能带来对肌纤维更加强烈的破坏,但就目前的研究结果而言,还无法证明这种损伤会与骨骼肌肥大产生直接的正比例关系。在一篇2017年的meta分析中,作者Franchi<sup>[29]</sup>对比了离心收缩与向心收缩对肌肉肥大的影响差异,最终结论是当两种收缩方式的负荷强度和训练量相等时,两者间并无显著区别(不含老年群体),此结论包括肌肉围度、肌肉横截面积、肌肉体积以及肌肉厚度四个指标。Schoenfeld<sup>[30]</sup>对此也提出了相同结论。虽然两种收缩带来类似的肌肉生长,但在肥大的反应机制上却存在不一样的结构重塑方式。有人发现向心收缩与离心收缩会产生不同的结构适应性改变,如离心训练会导致束长显著增长,这种增长可能强化了肌肉的纵向生长。在理论上,这也意味着肌节的增加,在动物实验中,连续肌节的增加可能影响肌纤维收缩的最大速度<sup>[31]</sup>。

综上所述,在训练量相等时,离心收缩虽然可以比向心收缩承载更大的训练负荷,但两者在肌肉力量和肥大的提升中并无显著性差异。因此当以肌肉力量和肥大为训练目标时,单一孤立的离心训练无法提供更为快速、有效的增长助力。

## 2 速度因素对肌力和骨骼肌肥大发展的影响差异

与其他阻力训练变量相比,运动速度常被忽略,尤其是对于初次接触抗阻训练的人群。当个体为了达成某一运动目标而进行训练时,执行动作的快慢则成为影响此次训练质量的一个重要因素。关于运动速度对肌肉力量和肥大影响的各种研究表明,快速运动或中慢速运动会对肌肉力量和肥大产生不同的适应性改变<sup>[32-34]</sup>。对于肌肉力量而言,无论是单纯的向心训练还是离心训练,速度因素都极为关键,较快的收缩速度可以使力量提升幅度显著高于慢速训练。如Jose<sup>[35]</sup>对30例男性大学生进行了为期6周,每周3次的卧推训练,在整个训练过程中,受试者分别以最大向心速度(Max V)和Max V一半的速度(Half V)进行训练,为了使实验中的负荷强度和训练量相等,所有受试者均控制相同百分比的负荷重量以及相同的重复次数进行。在完成整个训练周期后,通过测试发现:Max V组的1RM提升幅度要显著高于Half V组( $P < 0.05$ )。Morel<sup>[36]</sup>在他的实验中也发现了相似的结果,同时他还发现,与慢速训练组相比较,快速组的乳酸堆积水平更为强烈( $P < 0.05$ ),消耗氧气量更多,同时扭矩的损失也最大。相似的是,在一篇有关运动速度对力量发展的meta分析报告中也报道了类似结论<sup>[37]</sup>,作者将抗阻训练过程中的快速移动定义为1s:1s(即1s向心:1s离心)或最大向心速度(爆发式);中等速度定义为1—2s:1—2s,而较慢的移动速度为: $> 2s:2s$ (2s以上向心:2s离心)。在最终对实验方案进行筛选后,对比发现:无论年龄和训练状态如何,如果使用中等负荷强度训练,则在应用更快的动作速度时,力量增加

才会有上升的趋势。

对于老年人群体,最近的ACSM建议则是使用中等负荷强度,慢速至中速的训练以增加肌肉力量和肌肉质量<sup>[38-39]</sup>。但是,这些有关提高力量的建议是基于慢速收缩对老年人的干预研究,并未专注于训练速度不同所产生的影响差异。在Orssatto<sup>[5]</sup>的实验里,每周慢速和快速训练之间的力量改善幅度相似,但是在等距最大力量的对比上,快速训练则存在更有效的趋势。对于未经训练的老年人和年轻人,在训练后影响力量增长的因素中,神经肌肉适应性提升要远大于肌肉肥大<sup>[40-41]</sup>。快速和缓慢的收缩训练都能够增强最大自主激活水平,且快速收缩会引起更大的运动单位激活。同时在相同负荷强度下,慢速收缩和快速收缩之间的表面肌电图振幅也存在明显差异<sup>[42]</sup>。所以与相等负荷强度的慢阻力训练相比,尽可能快地执行中度到高强度的阻力训练或许会带来更大的力量提升。

虽然由抗阻训练所诱导的骨骼肌肥大与肌肉力量呈现了一定比例的正向相关性,且快速的训练能带来更大的力量增益,但是反观速度对骨骼肌肥大的影响结果,却呈现出了不一样的结论。Unlu<sup>[6]</sup>将41例受试者随机分为5组进行伸膝训练,分别为快速向心组(FC)、快速离心组(FE)、慢速向心组(SC)、慢速离心组(SE)和传统组(CE,向心+离心)。快速组和传统组的运动速度设为180°/s,慢速组为30°/s,负荷强度分别为FE:100%—115%1RM、FC:80%—85%1RM、SE:80%—85%1RM、SC:50%—60%1RM、CE:60%—70%1RM。所有受试者均执行至自主力竭。在经过12周,每周3次的训练后发现,各组间在肌肉体积增益上并无显著性差异( $P > 0.05$ )。众多的实验也呈现出与之相似的结论,即使在训练量相同的条件下。

由此可见,在抗阻训练中,向心收缩与离心收缩速度对肌肉力量和肥大发展呈现出不同的影响结果。当以提升个体肌肉力量为目标时,无论是否以等速模式训练,在确保合适的负荷强度后,用较快的肌肉收缩会带来更好的力量增益。在当前较为普遍的70%—90%1RM推荐负荷强度下,个体难以以较快速度完成训练动作,尤其是对于未经训练或刚刚接触训练的人群。运动速度作为抗阻训练方案中的变量因素,似乎对于无法进行大重量负荷运动的人群和普通健身爱好者而言是一个更有意义的考量因素。而反观肌肉的肥大增益,从目前众多的实验数据和meta分析报告来看,速度快慢对诱导骨骼肌肥大并无影响。这对于仅以肥大为目标的人群而言,较快的速度成为次要选择,因为快速运动通常会伴随相关肌肉群代偿性发力增多以及动作稳定性降低的问题,由此从运动安全和训练效率两方面衡量,中等或慢速的动作速度才是最佳选择。

### 3 肌肉在不同张力持续时间下的力量和肥大发展差异

机械张力被认为是刺激骨骼肌肥大的重要因素之一。抗阻训练过程中,肌肉在张力下的持续时间(time under tension, TUT)也是影响训练结果和效率的关键变量。延长肌肉动作过程中离心和向心阶段的持续时间,是否会带来更大的肌肉力量和肥大增益,本节对此进行了检索与分析。但是通过检索,并未发现TUT与肌肉力量、肥大的直接相关联实验。分析其原因为:训练量(负荷强度、组数、重复次数)等因素可以对骨骼肌的收缩力量和肥大发育产生直接影响。而TUT和动作速度则是建立在上述因素的基础上进行控制改变。TUT作为时间变量,与训练量和运动速度有密不可分的关系。在一次动作(one repetition)执行过程中,速度的快慢必然直接影响TUT的长短,但是在一组(one set)动作中,TUT则由动作速度和重复次数共同决定:相同动作幅度下,TUT一定,动作速度快则重复次数多,速度慢则重复次数少。所以TUT自身作为受训练量影响的变量,无法明确有效的对肌肉力量和肥大产生直接影响。

为了比对固定负荷强度下,延长TUT对肌肉活性的影响,Nobrega<sup>[43]</sup>对12例具有训练经验的男性进行伸膝实验,将12人随机分为SELF组和FIX组,两组负荷强度均为80%1RM,训练组数相同,每组动作执行至力竭。在肌肉的收缩时间上,SELF组由个人意志进行随意发挥,而FIX组则固定时间为向心2s,离心2s。在实验过程中,记录股外侧肌和股内侧肌肌电图。最终通过比对后发现,在每次执行动作中,SELF组的TUT显著低于FIX组( $P=0.0002$ ),但3组结束后,总的TUT并无显著区别,且SELF组的训练量高于FIX组,同时在这3组中,SELF组的肌电图均显著高于FIX组。最后Nonrega得出结论:自主调控肌肉收缩时间的训练,比固定动作时间能带来更大的训练量和肌肉活性。与之相似的是,Wilk<sup>[44]</sup>通过实验也发现,在训练过程中,动作节奏慢,延长动作时间会使训练容量显著降低。更长的TUT不仅会降低个体的训练量,同时还会对肌肉的输出功率产生负面影响。Wilk<sup>[45]</sup>通过设定不同的肌肉离心收缩时间,来测验肌肉在向心阶段的功率。最终发现,延长离心阶段的TUT会使得肌肉在向心期间的最大功率和平均功率均发生显著性降低,同时向心收缩速度也会发生大幅度下降。这些结果均显示出延长TUT对肌肉力量、肥大发展所带来的直接负面影响。由此可见,对于训练者而言,在进行提升肌肉力量和诱导骨骼肌肥大的训练时,延长肌肉动作中的持续时间,似乎并不适合在每次训练的前期进行。

虽然延长TUT会对训练带来负面影响,但也有研究人员发现了其可能对力量和肥大发展的正面影响。Burd<sup>[46]</sup>对8例具有2年以上训练经历的男性进行伸膝实验,将受试者的两侧腿随机分配为SLOW组和CTL组,以30%1RM的负荷强度

进行3组训练,受试者每组动作执行至力竭。SLOW组在收缩时间上为向心6s,离心6s。CTL组为向心1s,离心1s。在训练后以肌肉活检的方式来测量肌球蛋白、肌浆蛋白以及线粒体的合成速率。结果表明:在运动24—30h后,SLOW组肌球蛋白合成速率显著高于CTL组( $P<0.001$ )。在运动后0—6h,SLOW组运动诱导的线粒体和肌浆蛋白合成率分别提高114%和77%( $P<0.05$ )。有研究表明<sup>[47]</sup>:在总TUT相等条件下,双倍的离心和向心收缩时间会使机体应激代谢反应显著升高,血乳酸浓度增加。这种由抗阻训练所产生的应激代谢增加也被认为是诱导骨骼肌肥大的重要因素之一<sup>[48]</sup>。需要注意的是,单独的代谢物累积并不足以显著增加人体的肌肉质量。但是,由于代谢物具有增加肌肉活性的能力,目前仍认为它可能会对合成代谢途径产生积极效应<sup>[49]</sup>。

由此可见,在训练动作中TUT的长短对个体而言存在十分显著的双面效应。延长TUT则肌肉代谢水平增强,并使得骨骼肌具备更佳的肥大潜力,但与此同时,个体总训练量也会随之发生下降;相反,TUT缩短则训练量上升,动作速度加快,这更有利于肌肉力量的提升。所以在训练方案制定中,合理利用TUT特性可以使训练者更快速、更高效地完成最终目标。

### 4 小结

在抗阻训练过程中,过度的强调离心收缩并不会带来更大的肌肉力量或肥大增益。在训练量相等时,无论是进行孤立的离心训练,还是加大离心阶段的负荷强度,最终结果都无法超越传统向心+离心的训练模式。导致此现象的生理机制目前还尚不明确,需要研究人员在未来进行更加深入的探索。而动作速度的变化对肌肉力量改变较为明显,包括青年和老年群体在内,当训练量一定时,更快的动作速度会带来更大的力量增益。但是对于骨骼肌肥大而言,速度上的改变并不会带来明显影响。目前看来,肌肉在张力下的持续时间不会对肌肉力量和肥大产生直接影响。TUT自身作为受众多因素影响的变量(如:重复次数、动作幅度),其自身无法作为一个决定性因子参与到实验设计中对肌力和肌肉肥大进行直接改变,但是,当不以训练量为恒定时,TUT却展现出了更为明显的影响作用:TUT延长,则个体训练量下降,肌肉活性下降,肌肉输出功率下降,应激代谢水平上升和肌球蛋白合成速率增加等。所以在抗阻训练的实验方案设计中,是否以牺牲重复次数、组数、动作幅度和训练量等变量,来换取动作速度和TUT的绝对平衡,还需要根据具体情况谨慎考虑。

### 参考文献

- [1] Hass CJ, Feigenbaum MS, Franklin BA. Prescription of resistance training for healthy populations[J]. Sports Med,

- 2001, 31(14):953—964.
- [2] Avelar A, Ribeiro AS, Nunes JP, et al. Effects of order of resistance training exercises on muscle hypertrophy in young adult men[J]. *Appl Physiol Nutr metab*, 2019, 44(4): 420—424.
  - [3] Brigatto FA, Braz TV, Zanini TCD, et al. Effect of resistance training frequency on neuromuscular performance and muscle morphology after 8 weeks in trained men[J]. *J Strength Cond Res*, 2019, 33(8):2104—2116.
  - [4] Schoenfeld BJ, Grgic J, Krieger J. How many times per week should a muscle be trained to maximize muscle hypertrophy? A systematic review and meta-analysis of studies examining the effects of resistance training frequency[J]. *J Sports Sci*, 2019, 37(11):1286—1295.
  - [5] Lucas B, Lucas CE, Louis AL, et al. Why fast velocity resistance training should be prioritized for elderly people[J]. *Strength and Conditioning Journal*, 2019, 41(1):105—114.
  - [6] Unlu G, Cevikol C, Melekoglu T. Comparison of the effects of eccentric, concentric, and eccentric-concentric isometric resistance training at two velocities on strength and muscle hypertrophy[J]. *J Strength Cond Res*, 2020, 34(2): 337—344.
  - [7] Pareja-Blanco F, Rodriguez-Rosell D, Sanchez-Medina L, et al. Effects of velocity loss during resistance training on athletic performance, strength gains and muscle adaptations[J]. *Scand J Med Sci Sports*, 2017, 27(7):724—735.
  - [8] Englund DA, Sharp RL, Selsby JT, et al. Resistance training performed at distinct angular velocities elicits velocity-specific alterations in muscle strength and mobility status in older adults[J]. *Exp Gerontol*, 2017, 91(1):51—56.
  - [9] Farthing JP, Chilibeck PD. The effects of eccentric and concentric training at different velocities on muscle hypertrophy[J]. *Eur J Appl Physiol*, 2003, 89(6):578—586.
  - [10] Maeo S, Shan XY, Otsuka S, et al. Neuromuscular adaptations to work-matched maximal eccentric versus concentric training[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2018, 50(8):1629—1640.
  - [11] Roig M, O'Brien K, Kirk G, et al. The effects of eccentric versus concentric resistance training on muscle strength and mass in healthy adults: a systematic review with meta-analysis[J]. *Br J Sports Med*, 2009, 43(8):556—568.
  - [12] Blazeovich AJ, Cannavan D, Coleman DR, et al. Influence of concentric and eccentric resistance training on architectural adaptation in human quadriceps muscles[J]. *J Appl Physiol* (1985), 2007, 103(5):1565—1575.
  - [13] Cadore EL, Gonzalez-Izal M, Pallares JG, et al. Muscle conduction velocity, strength, neural activity, and morphological changes after eccentric and concentric training[J]. *Scand J Med Sci Sports*, 2014, 24(5):E343—E352.
  - [14] Schoenfeld BJ, Ogborn DI, Vigotsky AD, et al. Hypertrophic effects of concentric vs. eccentric muscle actions: A systematic review and meta-analysis[J]. *J Strength Cond Res*, 2017, 31(9):2599—2608.
  - [15] Wernbom M, Augustsson J, Thomee R. The influence of frequency, intensity, volume and mode of strength training on whole muscle cross-sectional area in humans[J]. *Sports Med*, 2007, 37(3):225—264.
  - [16] Lasevicius T, Ugrinowitsch C, Schoenfeld BJ, et al. Effects of different intensities of resistance training with equated volume load on muscle strength and hypertrophy[J]. *Eur J Sport Sci*, 2018, 18(6):772—780.
  - [17] Azeem K, Al Ameer A. Resistance training with low to high intensity protocol on muscular hypertrophy, and selected health related fitness variables among overweight males[J]. *International Journal of Applied Exercise Physiology*, 2019, 8(4):108—114.
  - [18] Hill EC, Housh TJ, Keller JL, et al. Early phase adaptations in muscle strength and hypertrophy as a result of low-intensity blood flow restriction resistance training[J]. *Eur J Appl Physiol*, 2018, 118(9):1831—1843.
  - [19] Azeem K, Tabur E. Influence of low, medium and high intensity of resistance training on muscular hypertrophy, and selected health related fitness variables among underweight males[J]. *International Journal of Applied Exercise Physiology*, 2017, 6(4):14—24.
  - [20] Ratamess NA, Alvar BA, Evetoch TE, et al. Progression models in resistance training for healthy adults[J]. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 2009, 41(3): 687—708.
  - [21] Holm L, Reitelseder S, Pedersen TG, et al. Changes in muscle size and MHC composition in response to resistance exercise with heavy and light loading intensity[J]. *J Appl Physiol* (1985), 2008, 105(5):1454—1461.
  - [22] Bamman MM, Shipp JR, Jiang J, et al. Mechanical load increases muscle IGF-I and androgen receptor mRNA concentrations in humans[J]. *Am J Physiol Endocrinol Metab*, 2001, 280(3):E383—E390.
  - [23] Schoenfeld BJ. The mechanisms of muscle hypertrophy and their application to resistance training[J]. *J Strength Cond Res*, 2010, 24(10):2857—2872.
  - [24] Gibala MJ, Macdougall JD, Tarnopolsky MA, et al. Changes in human skeletal-muscle ultrastructure and force production after acute resistance exercise[J]. *J Appl Physiol* (1985), 1995, 78(2):702—708.
  - [25] Eliasson J, Elfegoun T, Nilsson J, et al. Maximal lengthening contractions increase p70 S6 kinase phosphorylation

- in human skeletal muscle in the absence of nutritional supply[J]. *Am J Physiol Endocrinol metab*, 2006, 291(6): E1197—E1205.
- [26] Franchi MV, Atherton PJ, Reeves ND, et al. Architectural, functional and molecular responses to concentric and eccentric loading in human skeletal muscle[J]. *Acta Physiol*, 2014, 210(3):642—654.
- [27] Toien T, Haglo HP, Unhjem R, et al. Maximal strength training: the impact of eccentric overload[J]. *J Neurophysiol*, 2018, 120(6):2868—2876.
- [28] Fisher JP, Carlson L, Steele J. The effects of muscle action, repetition duration, and loading strategies of a whole-body, progressive resistance training programme on muscular performance and body composition in trained males and females[J]. *Appl Physiol Nutr Metab*, 2016, 41(10): 1064—1070.
- [29] Franchi MV, Reeves ND, Narici MV. Skeletal muscle remodeling in response to eccentric vs. concentric loading: morphological, molecular, and metabolic adaptations[J]. *Front Physiol*, 2017, 8(3):172—183.
- [30] Schoenfeld BJ, Grgic J. Eccentric overload training: A viable strategy to enhance muscle hypertrophy?[J]. *Strength and Conditioning Journal*, 2018, 40(2):78—81.
- [31] Bodine SC, Roy RR, Meadows DA, et al. Architectural, histochemical, and contractile characteristics of a unique bi-articular muscle: The cat semitendinosus[J]. *J Neurophysiol*, 1982, 48(1):192—201.
- [32] Paddon-Jones D, Leveritt M, Lonergan A, et al. Adaptation to chronic eccentric exercise in humans: the influence of contraction velocity[J]. *Eur J Appl Physiol*, 2001, 85(5):466—471.
- [33] Pareja-Blanco F, Rodriguez-Rosell D, Sanchez-Medina L, et al. Effect of movement velocity during resistance training on neuromuscular performance[J]. *Int J Sports Med*, 2014, 35(11):916—924.
- [34] Rana SR, Chleboun GS, Gilders RM, et al. Comparison of early phase adaptations for traditional strength and endurance and low velocity resistance training programs in college-aged women[J]. *J Strength Cond Res*, 2008, 22(1): 119—127.
- [35] Jose Gonzalez-Badillo J, Rodriguez-Rosell D, Sanchez-Medina L, et al. Maximal intended velocity training induces greater gains in bench press performance than deliberately slower half-velocity training[J]. *Eur J Sport Sci*, 2014, 14(8):772—781.
- [36] Morel B, Clemencon M, Rota S, et al. Contraction velocity influence the magnitude and etiology of neuromuscular fatigue during repeated maximal contractions[J]. *Scand J Med Sci Sports*, 2015, 25(5):E432—E441.
- [37] Davies TB, Kuang K, Orr R, et al. Effect of movement velocity during resistance training on dynamic muscular strength: A systematic review and meta-analysis[J]. *Sports Med*, 2017, 47(8):1603—1617.
- [38] Borde R, Hortobagyi T, Granacher U. Dose-response relationships of resistance training in healthy old adults: A systematic review and meta-analysis[J]. *Sports Med*, 2015, 45(12):1693—1720.
- [39] Peterson MD, Rhea MR, Sen A, et al. Resistance exercise for muscular strength in older adults: A meta-analysis[J]. *Ageing Res Rev*, 2010, 9(3):226—237.
- [40] Buckner SL, Dankel SJ, Mattocks KT, et al. The problem of muscle hypertrophy: Revisited[J]. *Muscle Nerve*, 2016, 54(6):1012—1014.
- [41] Cadore EL, Izquierdo M. Muscle power training: A hallmark for muscle function retaining in frail clinical setting[J]. *J Am Med Dir Assoc*, 2018, 19(3):190—192.
- [42] Calatayud J, Vinstrup J, Jakobsen MD, et al. Influence of different attentional focus on EMG amplitude and contraction duration during the bench press at different speeds[J]. *J Sports Sci*, 2018, 36(10):1162—1166.
- [43] Nobrega SR, Barroso R, Ugrinowitsch C, et al. Self-selected vs. fixed repetition duration: effects on number of repetitions and muscle activation in resistance-trained men[J]. *J Strength Cond Res*, 2018, 32(9):2419—2424.
- [44] Wilk M, Golas A, Stastny P, et al. Does tempo of resistance exercise impact training volume?[J]. *J Hum Kinet*, 2018, 62(1):241—250.
- [45] Wilk M, Golas A, Krzysztofik M, et al. The effects of eccentric cadence on power and velocity of the bar during the concentric phase of the bench press movement[J]. *J Sports Sci Med*, 2019, 18(2):191—197.
- [46] Burd NA, Andrews RJ, West DWD, et al. Muscle time under tension during resistance exercise stimulates differential muscle protein sub-fractional synthetic responses in men[J]. *J Physiol*, 2012, 590(2):351—362.
- [47] Vargas-Molina S, Martin-Rivera F, Bonilla DA, et al. Comparison of blood lactate and perceived exertion responses in two matched time-under-tension protocols[J]. *PLoS One*, 2020, 15(1): 732—751.
- [48] Schoenfeld BJ. Potential Mechanisms for a role of metabolic stress in hypertrophic adaptations to resistance training[J]. *Sports Med*, 2013, 43(3):179—194.
- [49] Dankel SJ, Mattocks KT, Jessee MB, et al. Do metabolites that are produced during resistance exercise enhance muscle hypertrophy?[J]. *Eur J Appl Physiol*, 2017, 117(11):2125—2135.