

·综述·

抗阻训练方案中诱导骨骼肌肥大的最佳训练量的研究进展*

孙嘉伟^{1,2} 孟庆华^{1,2,4} 鲍春雨^{2,3}

不论年龄和性别,许多人都会做一些常规的抗阻训练(resistance training, RT),因为它是维持和增加瘦体重以及肌肉力量的最有效手段。但是,设计RT程序是一个复杂的过程,需要对训练的变量和其关键原理有透彻的了解,这是由DeLorme^[1]首次提出。Krieger^[2]对训练变量进行了定义,包含:肌肉动作,负荷和容量,运动选择和顺序安排^[3],休息时间,重复速度和频率^[4]。这些变量的不同组合会大幅影响RT对骨骼肌的刺激深度,进而影响神经—肌肉的适应性和肌肉—骨骼系统对训练的反应,因此对于何种训练量能诱导最大程度的骨骼肌肥大是目前RT研究的热门领域。这对于竞技健美运动、大众健身和以力量发展为主的运动项目而言,具有较深刻的研究意义和参考价值。但是骨骼肌肥大受众多变量因素的影响,除上述训练变量外,还有个体睡眠时间、每日训练时间段^[5]、营养摄入^[6]、年龄、性别,以及有无训练经历等影响因素,导致现今的众多试验还无法统一所有变量,孤立地测验出某一单独变量对骨骼肌肥大的影响效果。在未来的试验设计方案中,如何有效统一干扰变量是设计过程中的一个重要问题。本篇对以往的相关试验进行了整理、分析,尽可能的排除训练量以外的其他变量的干扰影响,并将试验的数据、结论进行整合,以较为全面的视角对训练量与骨骼肌肥大间的剂量反应关系进行阐述。

1 负荷强度

1.1 高负荷强度

RT是诱导骨骼肌肥大和增加力量的有效刺激手段,然而决定骨骼肌肥大和力量的确切负荷强度仍是目前研究的首要领域。当下较为普遍的建议是负荷强度较大,即70%—85%1RM是诱导骨骼肌肥大最大化的前提条件^[7]。并且现已存有大量的试验为此论点提供了数据支持,如Holm等^[8]对12例未经训练的年轻男性进行为期12周,每周3次的膝关节伸展训练。在训练过程中将两侧腿分别进行单独训练,并将一半的受试者随机分配为优势腿负载低负荷(LL 15.5%1RM,重复36次),对侧腿负载高负荷(HL 70%1RM,重复8

次),同时使另一半的受试者与上述分配持相反状态。在12周的训练后,通过磁共振成像对比发现:HL组的股四头肌生理横截面积(cross-sectional area, CSA)增长显著高于LL组($P < 0.05$),增长幅度分别为 $(8 \pm 1)\%$ 和 $(3 \pm 1)\%$ 。

1.2 低负荷强度

目前对较高负荷强度的RT可以诱导骨骼肌肥大一事已是无可争议的^[9],但有学者发现低负荷强度的RT,同样可以引起与高负荷强度相似效益的骨骼肌肥大反应。Jenkins等^[10]将26例男性随机分配至低负荷组(30%1RM; n=13)和高负荷组(80%1RM; n=13)进行为期6周,每周3次的膝伸训练,在每次训练中,两组均将动作进行至肌肉力竭,无法成功完成下一次重复为止(repetitions to failure, RF)。通过在第3周和第6周的超声测量中发现;两组受试者腿部伸肌厚度的增长幅度无显著性差异。Barcelos等^[11]通过试验也发现:在20%1RM和50%1RM的负荷强度下进行抗阻训练,两者可以产生相似程度的骨骼肌肥大效应。持有相似观点的人还有很多,如Schoenfeld等^[12]为了比较低负荷强度和高负荷强度与抗阻训练方案之间的关于力量和骨骼肌肥大变化关系,对以往的相关文献进行检索,检索的时间截至2017年3月,分别在Pubmed、MEDLINE、Cochrane Library和Scopus进行了搜索。检索策略为:(muscle hypertrophy)AND (muscle strength) AND (skeletal muscle OR resistance training OR cross-sectional area OR growth OR training intensity OR training load OR high load OR low load OR muscle fibers OR loading OR muscle thickness OR bodybuilding OR fitness)。通过筛选,最终在1RM(one-repetition maximum)方面的比较上囊括了包含在14篇研究中的84个ES(effect size),在肌肉肥大方面囊括了包含在10篇研究中的41个ES。通过数据分析,最终得出结论:在RM的增长上,高负荷强度的平均ES显著高于低负荷($P=0.003$);在骨骼肌肥大方面,两者之间没有显著区别。目前已有大量的试验数据显示:在低负荷强度下,将动作进行至RF的训练模式(LL-RF, repetitions to failure with high load),可以产生与高负

DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2022.07.025

*基金项目:国家自然科学基金资助项目(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:2020-05-17

荷强度下相似的骨骼肌肥大效益^[13]。此结论无疑引起了大家的思考:何种负荷强度是诱导骨骼肌肥大的最大效率强度。对此,作者将现有的相关试验进行搜集、整理,最终通过比对后,将两种差异悬殊的负荷强度能产生相似效益的原因总结如下。

1.2.1 训练量的差异:低负荷强度可产生与高负荷强度下相似的骨骼肌肥大效应。但是执此观点的试验大多数是建立在LL-RF训练量大于HL-RF的基础上。为了证明在相同训练量的前提下,是否还会得此结论,Lasevicus等^[14]对30例男性进行了为期12周,每周2次的抗阻训练。在训练中,所有受试者被要求一侧手臂和腿负载20%1RM的负荷强度,另一侧肢端随机负载为40%1RM、60%1RM、80%1RM的负荷强度。在每次训练过程中,先以负荷为20%1RM的一侧肢端进行肘屈和膝伸训练,每组动作均进行至无法成功完成下一次重复为止。然后以此侧肢端的训练量匹配至对侧肢端。经过12周的训练后发现:负荷强度为80%1RM的肢端在股外侧肌CSA增长上显著大于20%1RM一侧。所有负荷强度的肢端在力量增长上均显著区别于训练前,但20%1RM侧增长幅度显著低于80%1RM侧。Lasevicus认为:①在训练容量相等的条件下,低强度和高强度的负荷都能增加肌肉的力量和体积,然而在力量和肌肉横截面积的增长幅度方面,20%1RM负荷的效果不如80%1RM;②在最初的6周训练内,研究中的所有强度都可以增加无抗阻训练经验男性的力量。Holm等^[8]的试验结果也为此结论提供了支持。与Lasevicus等持不同观点的是,Barcelos^[11]发现:无论训练量如何变化,在20%1RM—50%1RM的负荷区间内,只要在相同负荷强度下,将每组训练动作进行至RF,骨骼肌的肥大和力量增长就不会因为训练组数变化而产生显著性差异。他将47例无训练经历的受试者随机分配为以下5组(负荷×组数):20%1RM×1组、20%RM×3组、50%RM×1组、50%RM×3组、对照组。5组训练动作均进行至RF。在为期8周的膝伸训练后,通过测量得出数据,股四头肌的CSA增长幅度分别为:4.3%;3.8%;2.4%;1.5%;-0.7%。1RM增长幅度分别为:18.5%;21.6%;18.6%;26.8%;-1.7%。这意味着在不同负荷强度下进行相同组数的RT中,以RF模式进行抗阻训练,低负荷强度诱导的骨骼肌肥大效益大于高负荷强度。通过比较训练量得知:20%1RM×1组>50%RM×1组,20%RM×3组>50%RM×3组。显然此结果正面回应了前文在训练量方面的观点:低负荷强度可产生与高负荷强度下相似的骨骼肌肥大效应,这是建立在LL-RF训练量大于HL-RF的基础上;而在相同负荷条件的RT-RF模式下,1组RT所诱导的骨骼肌肥大效益大于3组,这似乎是由于进行多组数的RF模式训练所引发的训练过度导致。由此,Barcelos通过试验得出:以较低的负荷强度进行抗阻训练,RF模式才是低负荷强度与高

负荷强度间产生骨骼肌肥大显著区别的主要原因。这也在一定程度上证明:负荷强度和训练量不是影响诱导骨骼肌肥大的决定性因素。

1.2.2 诱导不同类型的肌纤维肥大:人类的骨骼肌是由多种具有不同功能的纤维组织构成^[15]。这些功能各异的纤维交织在一起来满足肌肉的各种特定功能需求。同时骨骼肌的另一个特点就是通过改变其表现型来应对各种特定刺激^[16]。抗阻训练可以显著地改变骨骼肌的力量和体积。早于1945年,DeLorme^[1]在他的经典著作中曾提出,使用低重复—高负荷的RT方案有利于增强肌肉力量和神经—肌肉控制,而高重复—低负荷的训练方案则可以提高肌肉耐力。目前检测骨骼肌肥大的方法众多,包括超声、磁共振成像和计算机断层扫描等。与这些方法不同的是,肌肉活检取样也可以用来评估骨骼肌肥大,并且肌肉活检取样可以区分肌纤维的种类,如I型肌纤维和II型肌纤维。通常认为,通过阻力训练,II型肌纤维具有更高的肥大潜力^[17]。但是,越来越多的证据表明,诱导不同类型的肌纤维肥大对应不同的最佳负荷区间。换言之,可能以较高负荷强度(即≥60%1RM)进行抗阻训练会导致II型肌纤维的更大生长,而以较低负荷(即<60%1RM)进行训练,可能会主要增加I型肌纤维肥大^[18]。Campos等^[19]将32例年轻男性随机分为3个组,分别是:低重复组(每个动作4组,3—5RM间歇3min)、中重复组(每个动作3组,9—11RM,间歇2min)、高重复组(每个动作2组,20—28RM,间歇1min)和对照组,通过对受试者进行深蹲、腿举和伸膝等腿部训练,比较在不同负荷和重复次数下各组腿部的1RM、肌肉耐力、肥大程度和肌纤维类型的变化。在8周的训练结束后通过检测发现:与其他组相比,高重复组在腿举中的局部肌肉耐力改善最大:高重复组改善94%,中重复组改善10%,低重复组减少20%、对照组减少19%;在所有培训组中,纤维类型都发生了相同程度的转换,被归类为II ab型的纤维的百分比大约增加了两倍,而被归类为“纯”II b型的纤维占比也随之减少;与高重复组相比,中低重复组的RT方案产生的肥大效应更大。

值得注意的是,I型和II型肌纤维具有某些明显的特征:II型肌纤维具有比I型肌纤维更快的钙离子流通速度、更快的收缩速度和产生更多能量的能力^[20]。另外,与II型肌纤维相比,I型肌纤维具有更高的氧化能力和更高的疲劳阈值。有证据表明,有氧运动,特别是长途自行车运动,会导致I型肌纤维肥大,但不会导致II型肌纤维肥大,而且这种效应与年龄无关^[21]。这些发现是有氧运动所特有的。同时,持续时间较长的活动,以及延长负载于激活肌肉上的负荷时间,可能会导致I型肌纤维肥大。因此,在阻力训练中,可以假设需要更长的负载时间来刺激这些纤维的集中生长。Netreba等^[22]使用类似的方法,在14例未受过训练的男性中观

察到相同的结果。显然以LL-RF模式的动作训练前期,其已经具备了有氧运动的特性。目前也有研究表明:具有高氧化代谢性的肌纤维(即I型肌纤维)也具有较高的蛋白质合成能力^[23]。这似乎也是低负荷强度能够诱导骨骼肌肥大的重要因素之一。最近的证据也支持了这一观点,当在低负荷强度下进行阻力训练时,I型肌纤维优先肥大^[24]。尽管对于I型肌纤维肥大,建议使用低负荷强度来获得更大的收益,但如果负荷过低,则可能难以通过阻力训练来最大程度地提高外周疲劳。Mackey等^[25]的一项研究证明了这一结论。研究人员采用方案之一:其中,低负荷组使用15%1RM的负荷强度,训练10组,每组重复动作36次。尽管肌肉的负载时间很长,但是该训练方案不足以在I型和II型肌纤维中诱发明显的骨骼肌肥大效应。这也同样说明:骨骼肌的负载时间和负荷强度,在两者共同影响下诱导了I型肌纤维的肥大。综合LL-RF的特性以及I型肌纤维的肥大反应条件,有理由相信:LL-RF虽然诱导出同样的骨骼肌肥大效应,但其在诱导肥大的肌纤维类型上与HL-RF所诱导的骨骼肌肥大存在本质上的不同。同时,骨骼肌的收缩方式对不同肌纤维也会产生相应的影响。有试验表明:离心训练会导致II型肌纤维先行发生损伤^[26]。等张收缩是抗阻训练过程中最为主要的收缩方式,根据其收缩形式不同又可分为离心收缩与向心收缩。与等长和等速相比较,其无需高昂的训练器材成本,对训练条件要求较低,且个体可以进行自主训练,这使得等张训练成为目前应用最为广泛的训练方案。向心收缩是目前抗阻训练诱导骨骼肌肥大的最为基础的一环,与其相比,离心训练反而是大众在训练过程中更容易忽略的环节,肌肉在离心收缩时可产生远超向心收缩的力量^[27],但在产生最大离心收缩力时,神经元会产生反向的抑制作用,以此保护肌腱不受损伤。但是强烈的离心收缩仍会导致肌肉受损,其特点就是肌肉酸痛、无力和肌内的糖原代谢发生改变^[28]。这些信息显示:离心训练会对骨骼肌产生更加强烈的刺激,并同时对抗肌内代谢进行改变,由此来提高骨骼肌横截面积。所以,离心收缩是骨骼肌肥大训练过程中不可或缺的环节。当个体在进行重复抗阻训练时,向心与离心相结合,可以最大效率提高骨骼肌的输出功率,提高肌肉应激代谢水平,以此促进诱导骨骼肌肥大最大化。

1.2.3 内部负荷差异:内部负荷可以定义为个体在运动过程中的生理和心理反应^[29]。有人将不同负荷强度所导致的不同反应差异进行研究。Martorelli^[30]把12例具有1年以上训练经历的男性随机分为3组进行深蹲和卧推训练,3组分别是:POW组(50%RM—5组—6次重复)、HPY组(75%RM—5组—RF)和STR组(90%RM—5组—RF)。在每次的训练后会受试者进行测试,包括疲劳感调研、训练冲量(TRIMP)、肌酸激酶(CK)、血乳酸浓度和血清皮质醇水平。试验统计

如下:训练量:HPY>POW>STR;负荷强度:STR>HPY>POW;CK水平:HPY>STR>POW;训练冲量:STR>POW;皮质醇水平:HPY>STR>POW。Martorelli发现在抗阻训练的24h后,HPY组血清CK提高224%,STR组提高78%。HYP组和STR组都在运动后24h诱导了更大的CK释放(HYP组大于STR组),而POW组却没有引起任何变化。这个结果也表明POW组没有引起任何肌肉损伤。虽然POW组在训练量上大于STR组,但是在内部应激反应上却远远低于另外两组,包括训练疲劳度和训练冲量。同时应该注意的是,皮质醇水平提高通常还伴随着生长激素释放的增加,这也可能导致更大的内部反应^[31]。此试验结果也证明了在低负荷强度下,机体很难产生较高的内部负荷。相关的结果还表明,高负荷强度的抗阻训练可以在II型肌纤维中引发更高的代谢应激反应^[32]。因此,高负荷强度的训练方案可能会在更大程度上刺激II型肌纤维的合成代谢信号,从而导致更高的II型肌纤维肥大。同时,肌肉在进行低负荷强度的力竭训练时,首先会募集低阈值的运动单位,当这些运动单位变得疲劳时,则会依次募集更高阈值的运动单位。所以,在每组训练的最后一刻,不同类型的肌纤维所产生的应激代谢反应是可以进行比较的。

通过对相关的试验进行分析,最后可以得出:低负荷强度下的抗阻训练确实可以诱导与高负荷强度下相似的骨骼肌肥大效应。但是这种肥大反应是建立在更高的训练量和I型肌纤维肥大之上,并且LL-RF的RT模式在力量上的提升要远远低于其在肌耐力的增长,所以从骨骼肌肥大最大化角度考虑,这也可能会导致其诱导骨骼肌肥大的最大值低于高负荷强度RT,而目前还未发现长期使用LL-RF模式的RT试验。目前在各类的竞技体育项目中,以骨骼肌肥大程度作为评判标准的仅有健美运动。反观众多体系的健美训练方案中,目前还未发现哪种是以LL-RF模式为主体训练内容的方案。分析其原因除了上述的观点外,这也可能是由于低负荷强度的训练过程中,在参与收缩的主动肌里,表层肌肉做功所占比例更高,这也导致深层肌肉无法得到充足的刺激进而影响全身整体的围度发展。所以对于希望发展肌肉体积,同时提高肌肉耐力的人群而言,可以将低强度的抗阻训练作为首要考虑。而仅是以发展骨骼肌体积为目标的人群,从长远角度来看还应需以高负荷强度作为抗阻训练的负荷。对于老年和青少年,低负荷强度也可以作为提高神经—肌肉控制的一种较为安全的手段,但是要避免将动作重复至力竭,也就是LL-RF模式,这可能会导致训练过度等运动性损伤的发生。

2 训练组数

Michels等^[33]认为:运动诱导的骨骼肌肥大似乎更依赖

于训练量。一次RT的训练量=组数×次数×负荷,而传统抗阻训练的组数一般为3—5组。但是在肌肉力量的增加幅度上有人提出,单一组数RT与多组数RT的增益效果相似,并无明显差异^[34]。Radaelli等^[35]将27例无训练经历的老年妇女随机分为单一组数(single set, SS)和多组数训练组(multiple sets, MS)进行膝伸训练,通过为期6周,每周2次的抗阻训练后发现:SS组与MS组膝伸1RM力量增长显著($P < 0.05$),但两组间无显著性差异($P > 0.05$)。众所周知,神经—肌肉适应是无训练经历的个体在RT早期肌肉增长力量的主要原因^[36]。未经训练的受试者的力量快速增长可以部分解释为:未经训练的个体无法完全激活其肌肉,并且似乎存在无法立即使用的功能储备。同时还有研究发现:未经训练的受试群体在训练后会获得25%—30%的力量增益,而在经过训练的人群中仅会获得2%—7%的增益量^[37]。

流行的运动科学理论认为:通过精准操控RT的程序变量,可以使肌肉—神经适应性得到最大程度上的提高^[38],训练量就是其中最关键的变量之一。对于竞技健美运动员和普通健身爱好者而言,骨骼肌肥大就是他们追求的训练目标之一。目前已经有大量的试验能够证明:无训练经历的男性,在诱导骨骼肌肥大方面,MS组显著优于SS组^[34]。Ronnestad等^[39]将未经训练的年轻男性随机分为2队,一队做1组上身训练和3组下身训练,另一队则相反,做3组上身训练和1组下身训练,以此来规避个体的遗传基因差异和饮食营养以及睡眠恢复的干扰。两队在为期11周,每周3次的RT中按照固定动作顺序分别执行:腿举,腿屈伸,腿弯举,坐姿推胸,坐姿划船,阔腿肌下拉,肱二头肌弯举和肩部推举动作,两队的负荷强度相似,均控制在7RM—10RM,执行动作的收缩方式为:爆发式的向心收缩以及2s—3s的离心收缩。训练前进食蛋白棒,训练过程中有能量饮料供应。在11周的训练后测得:3L—1UB队(下身3组,上身1组)的大腿肌肉的CSA明显高于1L—3UB队(上身3组,下身1组)($P = 0.01$);在上斜方肌的CSA变化上,1L—3UB队和3L—1UB队之间没有显著性差异;两队上下身瘦体重的变化无显著差异。由于该试验的执行动作顺序固定不变,且前3个动作均为腿部动作,这也导致两队在腿部的训练上拥有最佳状态,包括能量供应系统和最佳的神经兴奋性。所以这种差异可能是导致斜方肌CSA变化上两组无显著差异的主要原因,同时在训练的上身动作安排中,包括坐姿推胸、坐姿划船、肱二头肌弯举和肩部推举,这些动作的主动肌群都不是上斜方肌,这也可能导致最终的测量结果产生误差。所以实验人员在计划训练方案上可能还需要考虑训练动作的主动肌群与测试目标是否相一致,以及受试者在训练时的机体状态是否处于最佳。

在过去,许多学者认为:每次训练中,所有人只做一组

训练动作即可,并且连续的做组无法获得进一步的收益。但与之相反的是,在2010年,Krieger对每次训练做单一组数和多组数的效应量差异进行Meta分析(囊括55个ES,包含在19个受试组和8个研究中)。分析发现与单一组数相比,多组数的训练与较大的ES关联更紧密($P = 0.016$);在受过训练和未经训练的受试者中,多组数训练组比单一组数在肌肉肥大方面提升显著,同时分析数据发现,ES随训练组数的增加而增加,增加趋势在4—6组间趋于平稳,这似乎表明训练组数对肌肉肥大影响的ES在4—6组间达到最大化。但是由于该分析中仅有2项研究涉及4—6组的训练,因此检测差异的能力很低,无显著性差异^[40]。与Krieger的分析结果相似的是,在2017年,Schoenfeld等为了比较不同训练组数对骨骼肌肥大的影响,将2014年12月之前所有在PubMed, Sports Discus和CINAHL数据库发表的相关文章进行检索。搜索的关键词组合如下:“muscle”“hypertrophy”“growth”“cross sectional area”“fat free mass”“resistance training”“resistance exercise”“multiple sets”“single sets”“volume”and “dose response”。经过筛选,最终的分析囊括了34个受试组,包含在15个试验内。分析结果显示:作为连续变量,每周的训练量与肌肉体积变化存在显著相关性,每增加一组训练动作,ES的增益百分比就会增加0.37%^[41]。但是也有研究发现:对于未经训练的人群,无论是单一组数还是多组数训练方案,在早期都会产生相似程度的骨骼肌肥大现象^[42]。

不同性别、不同年龄的人群是否会对RT组数产生差异性的骨骼肌肥大反应?目前已经有多篇试验对此进行了研究。Cannon等^[43]将15例年轻女性和16例老年女性随机分为1S组(仅执行1组训练)和3S组(执行3组训练)进行为期10周,每周3次的腿屈,腿伸训练。负荷强度为50%—70%1RM。每组动作重复10次。在无饮食,睡眠等因素的干扰下最终得出:①在中等强度负荷下,未经训练的年轻和老年女性都无法通过3组训练获得额外的肌肉—神经适应和力量增长。②在肌肉力量和围度的增长上,老年人与青年人有着相似的增益效果并不受年龄和训练组数的影响。Radaelli等^[35]的试验结论也与之相似:在未经训练的老年女性群体中,肌肉质量和肌肉厚度的增长与单一组数和多组数RT间无显著性差异($P > 0.05$)。这似乎与女性血清睾酮浓度低于男性,以及试验周期较短有关,使女性肌蛋白的低合成速率无法在短期内产生更显著的肌肉增长。并且也有研究发现,在训练的初期,对老年妇女使用多组训练方式并不能获得额外的收益,甚至可能会产生负面影响^[44]。

除了传统的单组和多组RT训练方案外,目前还流行有其他模式的抗阻训练方案如:力竭时负荷递减方案(drop-set, DS)和负荷递增次数递减方案(crescent pyramid, CP)等。DS:在既定的负荷强度下进行肌肉训练直至力竭,然后

立即降低负荷并再次执行尽可能多的次数来进行训练。这些方案的操控均是建立在多组数RT的基础上对其负荷进行调控。由于肌肉在做向心收缩直至力竭时,并非完全力竭,而是能在较低负荷条件下继续产生收缩力。所以有些人认为DS方案是一种更加有效的方法来使肌肉充分疲劳并提高肌肉的适应能力,并且通过引起更多的运动单位疲劳来促进肌肉生长^[45]。因为DS方案使肌肉处于负荷状态下的时间加长,导致局部缺血和应激代谢反应^[46],所以这也被认为是DS方案诱导骨骼肌肥大的产生机制。Angleri等^[47]在受试者腿部分别应用了DS方案和传统RT方案,以此来比较两者对骨骼肌肥大的反应差异,两方案在总训练量相等的条件下进行。训练内容为腿举和腿伸动作,一侧腿执行3—5组的传统RT方案,组间歇为2min。对侧腿则执行2组DS方案,负荷下降幅度为20%1RM。两种方案初始负荷强度均为75%1RM,训练周期为12周。结果显示传统RT组和DS组的股四头肌CSA明显增加,但是在两组间对比却无显著差异。Ozaki等^[48]将1组SDS(single drop-set, SDS)、3组80%1RM负荷强度和3组30%1RM负荷强度下的肘屈肌CSA进行比较,经过8周的训练后测量结果显示:3种方案均显著提高了肘屈肌的CSA,但增长幅度在3种方案间无明显差异。Angleri^[47]也认为:与传统的恒定强度和容量的RT方案相比,DS和CP方案不会更有效的提高肌肉力量和骨骼肌肥大以及在结构上的改变。过度使用DS模式甚至可能会产生负面效应。有学者发现随着反复的肌肉力竭训练,激素水平会产生缓慢改变,如静息状态下,胰岛素生长因子-1和睾酮素浓度降低^[49]。在现阶段,连续调整负荷强度是目前较为常见的方案设计手段,与常规的恒定负荷强度方案相比较,虽然这些高阶方案会产生更显著的急性影响,但是最终都没有取得更好的训练收益。

训练组数作为强度和重复次数的载体,对诱导骨骼肌肥大,提高肌肉素质等方面起着关键作用,两者在剂量关系上呈倒“U”趋势,过多或过少的训练组数都无法获得最佳的训练效果,这对各运动项目的专业运动员而言尤为重要。从目前的试验数据来看,4—5组的RT组数似乎是诱导骨骼肌肥大的最佳阈值所在区间。但是由于个体差异的影响,这个定量还需要每个人经过不断探索。

综上,根据目前的研究,不同负荷强度的抗阻训练均可产生骨骼肌肥大现象。高负荷强度对于发展个体1RM力量具有显著的优势,而低负荷强度则在发展肌肉耐力方面拥有更佳表现,低负荷强度RT相比高负荷,其对机体内部的刺激程度远低于高负荷RT,同时需要做出更大的训练量才可以产生相似程度的肥大效应。缺少较长周期的试验,以及在各训练方案中众多影响骨骼肌肥大的因素没有得到统一。

参考文献

- [1] Delorme TL. Restoration of muscle power by heavy-resistance exercises[J]. Journal of Bone and Joint Surgery, 1945, 27(4): 645—667.
- [2] Krieger JW. Single versus multiple sets of resistance exercise: a meta-regression[J]. Journal of Strength and Conditioning Research, 2009, 23(6): 1890—1901.
- [3] Avelar A, Ribeiro AS, Nunes J P, et al. Effects of order of resistance training exercises on muscle hypertrophy in young adult men[J]. Applied Physiology Nutrition and Metabolism, 2019, 44(4): 420—424.
- [4] Brigatto FA, Braz TV, Da Costa Zanini TC, et al. Effect of resistance training frequency on neuromuscular performance and muscle morphology after 8 weeks in trained men [J]. Journal of Strength and Conditioning Research, 2019, 33(8): 2104—2116.
- [5] Grgic J, Lazinica B, Garofolini A, et al. The effects of time of day-specific resistance training on adaptations in skeletal muscle hypertrophy and muscle strength: A systematic review and meta-analysis[J]. Chronobiology International, 2019, 36(4): 449—460.
- [6] Stokes T, Hector AJ, Morton RW, et al. Recent perspectives regarding the role of dietary protein for the promotion of muscle hypertrophy with resistance exercise training[J]. Nutrients, 2018, 10(2):180—192.
- [7] 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.
- [8] Holm L, Reitelseder S, Pedersen T G, et al. Changes in muscle size and MHC composition in response to resistance exercise with heavy and light loading intensity[J]. Journal of Applied Physiology, 2008, 105(5): 1454—1461.
- [9] Nakamura M, Yoshida T, Kiyono R, et al. The effect of low-intensity resistance training after heat stress on muscle size and strength of triceps brachii: a randomized controlled trial[J]. BMC Musculoskeletal Disorders, 2019, 20(1): 603—622.
- [10] Jenkins NDM, Miramonti AA, Hill EC, et al. Greater neural adaptations following high- vs. low-load resistance training[J]. Frontiers in Physiology, 2017, 8(2):331—343.
- [11] Barcelos LC, Nunes PRP, De Souza L, et al. Low-load resistance training promotes muscular adaptation regardless of vascular occlusion, load, or volume[J]. European Journal of Applied Physiology, 2015, 115(7): 1559—1568.
- [12] Schoenfeld BJ, Grgic J, Ogborn D, et al. Strength and hypertrophy adaptations between low- vs. high-load resistance training: a systematic review and meta-analysis[J].

- Journal of Strength and Conditioning Research, 2017, 31(12): 3508—3523.
- [13] Nobrega SR, Ugrinowitsch C, Pintanel L, et al. Effect of resistance training to muscle failure vs. volitional interruption at high- and low- intensities on muscle mass and strength[J]. Journal of Strength and Conditioning Research, 2018, 32(1): 162—169.
- [14] 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]. European Journal of Sport Science, 2018, 18(6): 772—780.
- [15] Staron RS. Human skeletal muscle fiber types: Delineation, development, and distribution[J]. Canadian Journal of Applied Physiology-Revue Canadienne De Physiologie Appliquee, 1997, 22(4): 307—327.
- [16] Pette D, Staron RS. Transitions of muscle fiber phenotypic profiles[J]. Histochemistry and Cell Biology, 2001, 115(5): 359—372.
- [17] Fry AC. The role of resistance exercise intensity on muscle fibre adaptations[J]. Sports Medicine, 2004, 34(10): 663—679.
- [18] Vinogradova OL, Popov DV, Natreba AI, et al. Optimization of training: development of a new partial load mode of strength training[J]. Fiziologija Cheloveka, 2013, 39(5): 71—85.
- [19] Campos GER, Luecke TJ, Wendeln HK, et al. Muscular adaptations in response to three different resistance-training regimens: specificity of repetition maximum training zones [J]. European Journal of Applied Physiology, 2002, 88(1—2): 50—60.
- [20] Schiaffino S, Reggiani C. Fiber types in mammalian skeletal muscles[J]. Physiological Reviews, 2011, 91(4): 1447—1531.
- [21] Harber MP, Crane JD, Dickinson JM, et al. Protein synthesis and the expression of growth-related genes are altered by running in human vastus lateralis and soleus muscles[J]. American Journal of Physiology-Regulatory Integrative and Comparative Physiology, 2009, 296(3): R708—R714.
- [22] Natreba A, Popov D, Bravyy Y, et al. Responses of knee extensor muscles to leg press training of various types in human[J]. Rossiiskii Fiziologicheskii Zhurnal Imeni I.M. Sechenova, 2013, 99(3): 406—416.
- [23] Van Wessel T, De Haan A, Van Der Laarse WJ, et al. The muscle fiber type-fiber size paradox: hypertrophy or oxidative metabolism?[J]. European Journal of Applied Physiology, 2010, 110(4): 665—694.
- [24] Popov DV, Lysenko EA, Bachinin AV, et al. Influence of resistance exercise intensity and metabolic stress on anabolic signaling and expression of myogenic genes in skeletal muscle[J]. Muscle & Nerve, 2015, 51(3): 434—442.
- [25] Mackey AL, Holm L, Reitelseder S, et al. Myogenic response of human skeletal muscle to 12 weeks of resistance training at light loading intensity[J]. Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports, 2011, 21(6): 773—782.
- [26] Asp S, Dugaard JR, Kristiansen S, et al. Exercise metabolism in human skeletal muscle exposed to prior eccentric exercise[J]. Journal of Physiology-London, 1998, 509(1): 305—313.
- [27] Tesch PA, Dudley GA, Duvoisin MR, et al. Force and emg signal patterns during repeated bouts of concentric or eccentric muscle actions[J]. Acta Physiologica Scandinavica, 1990, 138(3): 263—271.
- [28] Widrick JJ, Costill DL, Mcconell GK, et al. Time course of glycogen accumulation after eccentric exercise[J]. Journal of Applied Physiology, 1992, 72(5): 1999—2004.
- [29] Bourdon PC, Cardinale M, Murray A, et al. Monitoring athlete training loads: consensus statement[J]. International Journal of Sports Physiology and Performance, 2017, 12: 161-170.
- [30] Martorelli AS, De Lima FD, Vieira A, et al. The interplay between internal and external load parameters during different strength training sessions in resistance-trained men [J]. European Journal of Sport Science, 2020. DOI:10.1080/17461391.2020.1725646.
- [31] Kraemer WJ, Ratamess NA. Hormonal responses and adaptations to resistance exercise and training[J]. Sports Medicine, 2005, 35(4): 339—361.
- [32] Tesch P, Sjodin B, Karlsson J. Relationship between lactate accumulation, ldh activity, ldh isoenzyme and fiber type distribution in human skeletal-muscle[J]. Acta Physiologica Scandinavica, 1978, 103(1): 40—46.
- [33] Michels G, Hoppe UC. Rapid actions of androgens[J]. Frontiers in Neuroendocrinology, 2008, 29(2): 182—198.
- [34] Sooneste H, Tanimoto M, Kakigi R, et al. Effects of training volume on strength and hypertrophy in young men [J]. Journal of Strength and Conditioning Research, 2013, 27(1): 8—13.
- [35] Radaelli R, Wilhelm EN, Botton CE, et al. Effects of single vs. multiple-set short-term strength training in elderly women[J]. Age, 2014, 36(6):1—11.
- [36] Sale DG. Neural adaptation to resistance training[J]. Medicine and Science in Sports and Exercise, 1988, 20(5):

- S135—S145.
- [37] Pollock ML, Gaesser GA, Butcher JD, et al. The recommended quantity and quality of exercise for developing and maintaining cardiorespiratory and muscular fitness, and flexibility in healthy adults[J]. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 1998, 30(6): 975—991.
- [38] Bird SP, Tarpenning KM, Marino FE. Designing resistance training programmes to enhance muscular fitness: A review of the acute programme variables[J]. *Sports Medicine*, 2005, 35(10): 841—851.
- [39] Ronnestad BR, Egeland W, Kvamme NH, et al. Dissimilar effects of one- and three-set strength training on strength and muscle mass gains in upper and lower body in untrained subjects[J]. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 2007, 21(1): 157—163.
- [40] Krieger JW. Single VS. Multiple sets of resistance exercise for muscle hypertrophy: a meta-analysis[J]. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 2010, 24(4): 1150—1159.
- [41] Schoenfeld BJ, Ogborn D, Krieger JW. Dose-response relationship between weekly resistance training volume and increases in muscle mass: A systematic review and meta-analysis[J]. *Journal of Sports Sciences*, 2017, 35(11): 1073—1082.
- [42] Cunha PM, Nunes JP, Tomeleri CM, et al. Resistance Training Performed With Single and Multiple Sets Induces Similar Improvements in Muscular Strength, Muscle Mass, Muscle Quality, and IGF-1 in Older Women: A Randomized Controlled Trial[J]. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 2020, 34(4): 1008—1016.
- [43] Cannon J, Marino FE. Early-phase neuromuscular adaptations to high- and low-volume resistance training in untrained young and older women[J]. *Journal of Sports Sciences*, 2010, 28(14): 1505—1514.
- [44] Hill M, Goldspink G. Expression and splicing of the insulin-like growth factor gene in rodent muscle is associated with muscle satellite (stem) cell activation following local tissue damage[J]. *Journal of Physiology-London*, 2003, 549(2): 409—418.
- [45] Willardson JM. The application of training to failure in periodized multiple-set resistance exercise programs[J]. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 2007, 21(2): 628—631.
- [46] Goto K, Sato K, Takamatsu K. A single set of low intensity resistance exercise immediately following high intensity resistance exercise stimulates growth hormone secretion in men[J]. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 2003, 43(2): 243—249.
- [47] Angleri V, Ugrinowitsch C, Libardi CA. Crescent pyramid and drop-set systems do not promote greater strength gains, muscle hypertrophy, and changes on muscle architecture compared with traditional resistance training in well-trained men[J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2017, 117(2): 359—369.
- [48] Ozaki H, Kubota A, Natsume T, et al. Effects of drop sets with resistance training on increases in muscle CSA, strength, and endurance: a pilot study[J]. *Journal of Sports Sciences*, 2018, 36(6): 691—696.
- [49] Izquierdo M, Ibanez J, Gonzalez-Badillo JJ, et al. Differential effects of strength training leading to failure versus not to failure on hormonal responses, strength, and muscle power gains[J]. *Journal of Applied Physiology*, 2006, 100(5): 1647—1656.