

·循证医学·

飞轮离心超负荷训练对预防模拟失重人群废用性肌萎缩效果的meta分析

苏玉莹^{1,2} 尹洪满^{2,4} 石旅畅¹ 于 瀛² 梁 辰² 陈文辉² 张 镒²
谢文韬² 刁凯月² 张晋豪² 苑 文³

当机体因为不良状态(如运动损伤、骨折固定、相关疾病和失重等)原因需要较长时间卧床休息和制动来限制身体活动时,骨骼肌外部负荷和神经激活减少,肌肉质量和力量下降所导致的肌萎缩称为“废用性肌萎缩”^[1-2]。废用性肌萎缩如不进行有效的措施进行干预,极易成为代谢性疾病和器官衰竭等多种疾病的继发表现^[3]。目前尚无有效措施和公认药物来防止卧床休息期间肌肉质量和力量的丢失^[4],体育锻炼被认为是卧床休息期间预防肌肉萎缩和维持蛋白质合成的最佳手段^[5],肌肉力量和质量的增加需要依靠抗阻训练来实现^[6]。

飞轮离心超负荷训练(以下简称飞轮训练)作为一种在离心阶段产生“负荷过载”的阻力训练方法已被广泛应用在竞技体育和康复训练领域^[7-8]。相比于哑铃等阻力训练方法,飞轮训练对肌肉的刺激程度更高^[9-10],提高肌肉力量和肥大程度更加明显^[11-13]。因此,美国国家宇航局早已将飞轮训练应用在微重力状态下航天员的肌萎缩预防方面。在长时间卧床休息期间,飞轮训练可以减轻和抵消骨骼肌萎缩和力量的下降,维持神经肌肉功能的有效性^[14-17]。飞轮训练还可以针对特定的骨骼肌群进行训练并且其能量代谢成本更低,这对于脑卒中、昏迷和脊髓损伤等长时间卧床休息和活动量减少的患者来说是一种高效的干预措施。对于废用性肌萎缩的运动干预防治,需要重点考虑运动方式、运动强度和持续时间等因素的关系。这些内容正是预防废用性肌萎缩的关键因素,如果缺失这方面的关键因素将会导致现有运动方案指导性建议不足。

1 研究方法

1.1 文献的纳入与排除标准

文献纳入标准依据PICOST原则的6个方面来制定,包括研究对象、文献类型、干预措施、结局指标、研究设计与类型和观察时间。所有纳入文献的标准均有两名评议人员进行审阅,如有异议,采取第三方进行讨论。

文献纳入标准:

①文献研究类型须为随机对照实验(RCT);②实验组需要利用飞轮训练设备进行抗阻干预,对照组采取仅卧床休息或营养补充等;③干预周期不少于4周;④研究对象需进行长期的卧床休息或肢体固定干预;⑤研究对象应大于18周岁以上,无精神疾病且符合相关人体实验规定;⑥结局指标以肌肉肥大和肌肉力量为主。

文献排除标准:

①文献研究类型为自身对照或无控制组;②会议摘要或无全文的论文;③数据不完整的文献;④非中英文文献;⑤结局指标不符合纳入标准。

1.2 文献数据的检索与筛查

文献数据的检索与筛查分别由两名检索人员采取独立双盲的方式进行^[18]。文献检索的数据库为:中国知网、万方、PubMed、Web of Science、EBSCO-SPORTD运动科学全文数据库。检索日期为1994年(第一篇关于离心超负荷的论文发表^[7])至2020年4月1日。中文检索词为:飞轮训练、离心超负荷训练、卧床休息、肢体悬吊和肌肉萎缩为关键词进行组合搭配,外文检索词为flywheel resistance training、flywheel training、flywheel exercise、eccentric overload、isoinertial training、isoinertial exercise、inertial training、gravity-independent training为关键词进行检索。通过检索的关键词共从5个数据库中检索出1053篇文献,将所有文献纳入NoteExpress 3.2.0软件进行去重后得到735篇文献,进一步阅读文献的标题和摘要,排除非离心超负荷干预的文献得到134篇,通过通读全文,排除无对照组、结局指标不符合干预时间较短等最终得到14篇英文文献(如图1所示)。

1.3 文献数据的提取和纳入文献的基本特征

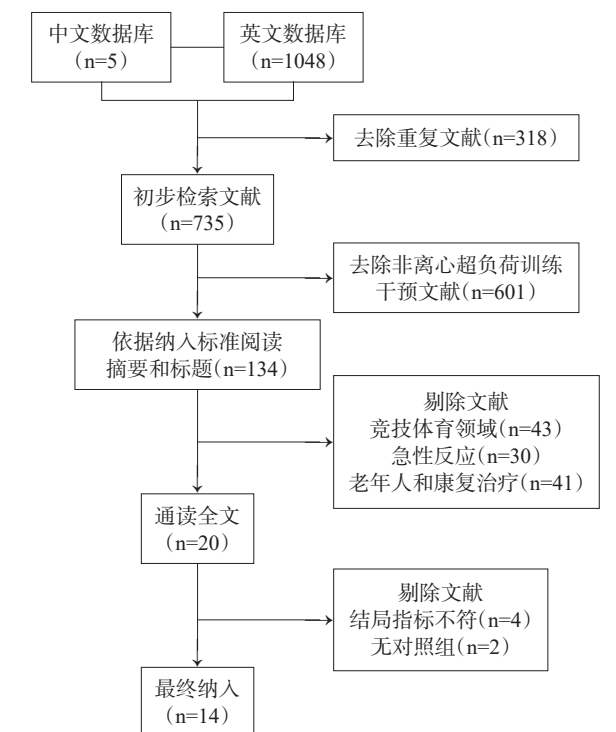
1.3.1 数据的提取:数据提取由两名检索人员采取独立双盲的方式对第一作者信息、发表年份、实验对象的数据、干预方案、结局指标等内容进行提取。对缺乏信息数据的文献通过电子邮件的形式向通讯作者索取或进行深度提取^[19]。

1.3.2 纳入文献的基本特征:纳入的14篇随机对照文献中,

DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2022.02.015

1 渤海大学体育学院,辽宁省锦州市,121013; 2 北京体育大学中国排球运动学院; 3 齐鲁师范学院; 4 通讯作者
第一作者简介:苏玉莹,男,硕士研究生,助教; 收稿日期:2020-09-10

图1 本研究文献纳入流程图



共有被试者261例,其中男性被试者196例,女性被试者65例。干预方案包括药物结合抗阻训练、有氧训练结合抗阻训练和抗阻训练三种形式,干预周期在4—13周不等和每周2—3次训练干预,卧床类型包括单侧的下肢悬吊、卧床休息和6°头向下倾斜卧床休息,结局指标采取力量指标和肌肉横截面积为相应结局指标。纳入文献的基本特征见表1。

1.4 文献方法学质量评价

对纳入文献进行方法学质量评价是对研究文献规范的重要评价指标,本次研究采取物理治疗证据数据库(physiotherapy evidence database, PEDro)量表^[20-22]。PEDro量表共由11个题目组成,除第一题不计入总分以外,其余每题各记一分,共计10分。凡是得分≥6分的研究文献即认为文献质量较高,其中9—10分为高质量文献、6—8分为较高质量文献、4—5分为一般质量文献、低于4分为低质量文献^[23]。本次纳入的14篇文献中,较高质量≥6分的文献有12篇,一般质量文献2篇,纳入被试条件明确,研究采取盲法的文献较少,研究文献的方法学质量较高(见表2)。

1.5 统计学分析

本研究采用Revman 5.3软件和Stata-SE 15软件对肌肉横截面积和肌肉力量两个指标进行效应量检验。由于本次纳入文献的结局指标为连续性变量,且单位并不统一,故采取标准化均差(standardized mean difference, SMD)及其95%

置信区间(95%Confidence Interval, 95%CI)来表示。合并效应量显著性意义检验采用 P 值表示。采用 I^2 来检验异质性的。当 I^2 在<50%时,采用固定效应模型,当 $I^2 \geq 50\%$ 时,需要采取随机效应模型进行分析。当文献异质性较高时,需进行亚组分析,检验不同亚组存在的差异。

2 研究结果

2.1 飞轮训练对卧床休息期间肌肉横截面积的影响

2.1.1 干预的整体效应检验:纳入文献中有12篇文献的结局指标选取肌肉横截面积。异质性检验结果 $I^2=82\%$ 为高度异质性,故采用随机效应模型。合并效应量 $SMD=2.41$, 95%CI=(1.52, 3.29), $P<0.05$,表明合并效应量具有显著性意义(图2)。依据Cohen J ^[34]研究分析,0.8以上即为大效应量,故飞轮训练可以有效预防卧床休息期间肌萎缩的发生。

2.1.2 Meta回归分析和调节变量亚组检验:当纳入研究超过10个以上,且异质性 $I^2>50\%$ 需要通过回归分析来探讨产生异质性的主要来源^[35]。本次研究根据文献提取数据设置四个协变量,分别为性别、干预形式、干预周期和干预频次。Meta回归分析显示(表3),性别($P=0.628$)和干预周期($P=0.333$) P 值 >0.05 ,而干预形式($P=0.007$)和干预频次($P=0.001$) P 值 <0.05 ,因此,性别和干预周期不是导致异质性的主要来源,而干预形式和干预频次可能是产生异质性的主要来源。

通过分层亚组进一步分析发现(表4),在协变量性别中,女性的效应量 $SMD=3.69$ 优于男性 $SMD=2.62$ 。在干预形式中,共有飞轮抗阻干预训练和有氧结合飞轮抗阻干预训练两种,其中有氧结合飞轮抗阻训练 $SMD=4.21$ 优于飞轮抗阻训练 $SMD=2.12$ 。在干预周期中,根据纳入文献的干预周期将其分为三种,4—6周、8—10周和13周的干预,其中8—10周优于4—6周和13周的干预。在干预频次中,3次的干预频次高于2次和2—3次的干预频次。

综上,不同的干预形式和干预频次可能是导致异质性较大的主要原因。女性的干预效果优于男性,有氧结合飞轮抗阻训练的形式优于飞轮抗阻训练,8—10周的干预周期优于4—6周和13周,每周3次的干预频次效果最好。

2.2 飞轮训练对卧床休息期间肌肉力量的影响

2.2.1 干预的整体效应检验:飞轮训练对肌肉力量影响的文献共纳入9篇。通过异质性检验发现 $I^2=80\%$ 为高度异质性,故采用随机效应模型。合并效应量 $SMD=1.99$, 95%CI=(0.98, 3.01), $P<0.05$,合并效应量具有显著性意义(图3)。因此,飞轮训练可以有效预防卧床休息期间肌肉力量的下降。

2.2.2 调节变量亚组检验:由于本次纳入文献数量不足10篇故不做Meta回归分析。仅对四个调节变量进行亚组分析(表5)。在关于性别的调节变量中,女性干预效果要优于男性。在干预形式的调节变量中,有氧结合飞轮抗阻训练优于

表1 本研究纳入文献信息基本特征

作者及发表年份	试验对象	性别	年龄	卧床类型	干预措施	干预周期	干预频率	结局指标
Caruso JF, et al.2008 ^[24]	E=15 C=9	男=14 女=10	大学生	单侧ULLU	实验组利用两个直径0.22m的旋轮飞轮进行足部屈曲训练4组7次并结合药物沙丁胺醇,对照组接受安慰剂。	6周	3次/周	AP
Alkner BA, et al.2004 ^[25]	E=8 C=9	男=23	33±4	6°HDBR	实验组利用5KG惯性矩0.1105kg·m ² 飞轮设备进行仰卧深蹲和足部屈曲4组7次和14次,对照组仅卧床。	4周	2—3次/周	CSA
Koppelmans V, et al.2018 ^[14]	E=8 C=5	男=13	31±5	6°HDBR	实验组进行75%VO ₂ 有氧训练和飞轮抗阻训练,对照组仅卧床休息。	10周	3次/周	MVC、CSA
Belavý DL, et al.2017 ^[15]	E=9 C=16	男=25	31±5	6°HDBR	实验组进行飞轮抗阻仰卧深蹲和足部屈曲训练4组7次和14次,对照组仅卧床休息。	13周	2—3次/周	CSA
Tesch PA, et al.2004 ^[26]	E=10 C=11	男=14 女=7	42±8	单侧ULLU	实验组利用4.2kg飞轮进行坐姿膝盖伸展运动4组7次,对照组仅卧床休息。	5周	2—3次/周	MVC、CSA
Reeves ND, et al.2005 ^[16]	E=9 C=9	男=18	32±5	6°HDBR	实验组进行仰卧深蹲和小腿抬高训练4组7次,对照组仅卧床休息。	13周	2次/周	MVC、CSA
Rittweger J, et al.2005 ^[17]	E=9 C=9	男=18	32±4	6°HDBR	实验组进行仰卧蹬腿和小腿伸展运动4组7次,对照组仅卧床休息。	13周	2—3次/周	CSA
Rittweger J, et al.2013 ^[27]	E=9 C=9	男=18	31±6	LTBR	实验组进行仰卧深蹲和小腿按压4组7次和14次,对照组仅卧床休息。	13周	2次/周	CSA
Rittweger J, et al.2009 ^[28]	E=9 C=9	男=18	31±5	6°HDBR	实验组进行仰卧深蹲4组7次,对照组仅卧床休息。	13周	2—3次/周	CSA
Rittweger J, et al.2007 ^[29]	E=9 C=9	男=18	31±6	6°HDBR	实验组进行仰卧深蹲和小腿按压4组7次和14次,对照组仅卧床休息。	13周	2次/周	AP
Holt JA, et al.2016 ^[30]	E=8 C=8	女=16	33±1	6°HDBR	实验组进行40%—80%耗氧量的有氧训练结合抗阻训练仰卧深蹲和小腿按压,对照组仅卧床休息。	8周	2—3次/周	CSA、MVC
Lee SM, et al.2014 ^[31]	E=8 C=8	女=16	33±1	6°HDBR	实验组进行40%—80%耗氧量的有氧训练结合飞轮抗阻训练,对照组仅卧床休息。	8周	3次/周	CSA、MVC
Schneider SM, et al.2009 ^[32]	E=8 C=8	女=16	33±4	6°HDBR	实验组进行有氧结合飞轮抗阻训练,对照组仅卧床休息。	8周	3次/周	CSA
Alkner BA, et al.2004b ^[33]	E=9 C=8	男=17	33±5	6°HDBR	实验组进行仰卧深蹲和小腿下蹲训练4组7次和14次,对照组仅卧床休息。	13周	2—3次/周	MVC、CSA

注:E为实验组,C为对照组;ULLU为单侧下肢悬吊(unilateral lower limb unloading),6°HDBR为6°头向下倾斜卧床休息(head down tilt bed rest),LTBR为长期卧床休息(long term bed rest);AP为平均功率(average power),MVC为最大自主收缩力(maximal voluntary strength),CSA为肌肉横截面积(cross-sectional area)。

飞轮抗阻训练。在干预周期中,8—10周的干预效果要优于4—6周和13周的干预。在干预频次中,每周3次的干预效果优于每周2次和每周2—3次的干预效果。

综上所述,女性的干预效果优于男性,有氧结合飞轮抗阻训练效果优于飞轮抗阻训练。8—10周和每周3次的干预方式效果显著。

2.3 敏感性分析

由于肌肉力量和肥大的分析中异质性较高,故在整体研究的基础上采取逐个剔除的方式,评估每个研究对整体效应

量的影响。通过分析发现,剔除某一项研究后对整体的异质性影响不大,表明meta分析的结果较为稳定。

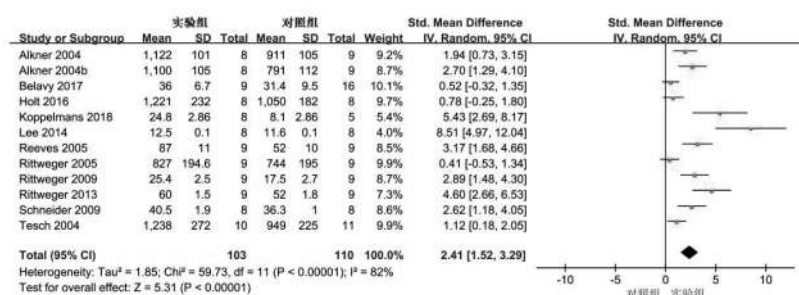
2.4 发表偏倚检验

漏斗图常用来观察某个系统评价结果是否存在偏倚,当资料无偏倚时,其图形呈现对称的倒漏斗状。一般当纳入的文献超过10篇以上时才进行漏斗图的分析^[36],通过对肌肉横截面积进行漏斗图分析(见图4)。漏斗图左右基本平衡,其中右边部分文献出现了一些偏倚,文献发表偏倚可以接受,不存在明显的发表偏倚。

表2 纳入文献的PEDro得分

作者及发表年份	受试者纳入 条件	随机分 配	分配 隐藏	基线 相似	受试者 设盲	干预实施 者设盲	结局测量 者设盲	对85%以上的人 进行至少一项主 要结果的测量	意向治疗 分析	组间统 计报告	结果的点测 量值和变异 测量值	得分
Caruso JF, et al.2008 ^[24]	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	8
Alkner BA, et al.2004 ^[25]	1	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	6
Koppelmans V, et al.2018 ^[14]	1	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	6
Belavý DL, et al.2017 ^[15]	1	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	6
Tesch PA, et al.2004 ^[26]	1	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	6
Reeves ND, et al.2005 ^[16]	1	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	6
Rittweger J, et al.2005 ^[17]	1	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	5
Rittweger J, et al.2013 ^[27]	1	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	6
Rittweger J, et al.2009 ^[28]	1	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	5
Rittweger J, et al.2007 ^[29]	1	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	6
Holt JA, et al.2016 ^[30]	1	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	6
Lee SM, et al.2014 ^[31]	1	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	6
Schneider SM, et al.2009 ^[32]	1	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	6
Alkner BA, et al.2004b ^[33]	1	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	6

图2 飞轮训练对肌肉横截面积影响的森林图



3 讨论

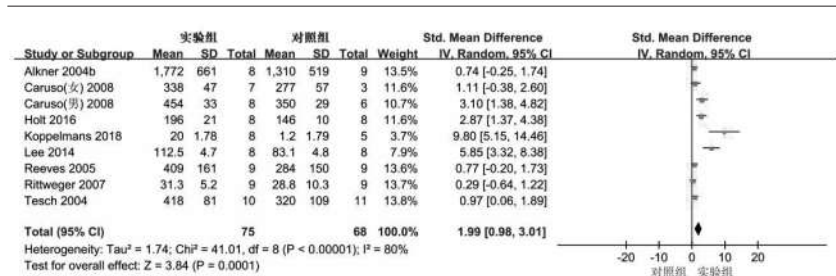
飞轮训练最早起源于航空航天工程领域。20世纪80年代,航空航天事业快速发展,但航天员长期太空飞行造成的肌肉萎缩问题一致困扰医学界。传统的杠铃和哑铃等重力器械不适用于太空失重的环境。航天局急需一种可以在失重条件下进行抗阻训练的器械,因此,飞轮训练器应运而

生。1994年,Berg HE等^[7]第一次介绍了飞轮训练器的原理,发现这种设备类似于传统的抗阻训练,可以有效对抗微重力条件下肌肉萎缩问题。至此,飞轮训练器在20多年里已经从航天领域逐渐应用到康复领域和竞技体育领域。

本研究发现,飞轮训练可以有效预防卧床休息期间肌肉萎缩的发生和肌肉力量的下降。有学者认为离心收缩和拉伸是促进肌肉肥大和力量生长最有效的刺激因素^[37-38]。飞轮训练器可以

为训练者提供“离心超负荷”,其在离心阶段产生适应性阻力^[39],即每一次训练中离心力大小会与疲劳程度成正比,受训人员在向心阶段发力越大,飞轮转动速度使动能存储能力越大,后期离心阶段负荷更高,离心超负荷的刺激就会更好,针对不同训练水平的人群都能够为其提供个性化的适应性阻力。研究表明,利用飞轮进行抗阻训练可以有效提高骨骼肌的肥大程度^[26,40]。Illera-Domínguez V等^[41]对10名男性进

图3 飞轮训练对肌肉力量影响的森林图



行为期4周的飞轮深蹲干预训练,在2周和4周后对肌肉质量和力量进行评估,股四头肌体积2周后增加 $5.5\pm 1.9\%$,4周后增加 $8.6\pm 3.8\%$,伸肌最大随意收缩力量(maximal voluntary contraction, MVC)4周后增加 $28\pm 17\%$ 。同样,Seynnes OR等^[40]对7名健康男性进行为期35天的飞轮训练干预,每周干预3次,每次4组7次重复的膝关节伸展运动,3周后,股四头肌中央和远端CSA增加3.5%和5.2%,35天后股四头肌中央和远端CSA增加 $6.5\pm 1.1\%$ 和 $7.4\pm 0.8\%$,MVC增加 $38.9\pm 5.7\%$ 。仅须2—3周的训练后便可以检测到肌肉大小的变化,飞轮训练似乎对于诱导这些早期的结构适应特别有效,并且有助于力量的增加。相比于传统阻力训练,飞轮训练以非常低的代谢成本进行,因为完成一个离心动作所需要的能量仅为同一周期中向心阶段所需能量的五分之一^[42]。急性运动下,Norrbrand L等^[43]对10名运动员在飞轮深蹲和杠铃深蹲后的肌电效果进行对比,相比于传统抗阻训练,利用飞

表3 不同协变量对CSA的Meta回归分析

协变量	β 回归系数	标准误	t值	$P> t $	95%CI
性别	1.1635	2.3211	0.50	0.628	-4.0872,6.4143
干预形式	3.9545	1.1627	3.40	0.007	1.3637,6.5454
干预周期	1.5971	1.5603	1.02	0.333	-1.9327,5.1270
干预频次	4.9870	1.0727	4.65	0.001	2.5602,7.4138

表4 运动方案中调节变量影响肌肉横截面积的效应结果

协变量及 分层亚组	文献 数量	效应量和 置信区间	P值	I^2	P异质性
性别					
男性	8	2.62[1.44, 3.80]	0.000	84.4%	0.000
女性	3	3.69[0.54, 6.84]	0.022	90.8%	0.000
干预形式					
抗阻训练	8	2.12[1.16, 3.08]	0.000	81.1%	0.000
有氧+抗阻	4	4.21[1.37, 7.05]	0.004	89.9%	0.000
干预周期					
4—6周	2	1.52[0.67, 2.37]	0.000	22.6%	0.256
8—10周	4	4.21[1.37, 7.05]	0.004	89.9%	0.000
13周	6	2.37[1.02, 3.71]	0.001	86%	0.000
干预频次					
2次	2	3.95[2.50, 5.40]	0.000	42.4%	0.224
3次	3	5.60[2.03, 9.16]	0.002	84.2%	0.002
2—3次	7	1.43[0.70, 2.16]	0.000	69.2%	0.003

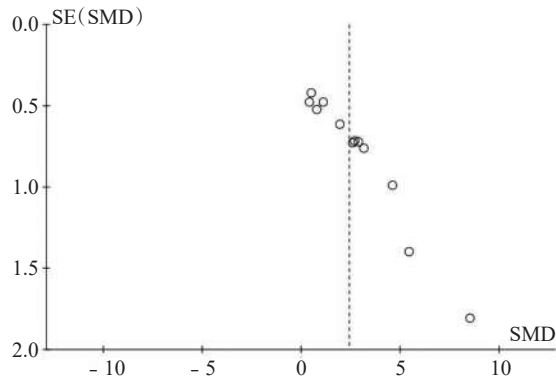
轮训练后在离心作用阶段的肌肉峰值功率和激活水平显著高于传统抗阻训练。飞轮训练的离心超负荷使能量代谢需求增加(即血乳酸浓度),离心运动的代谢特征促使在肌肉功能和力量方面具有更大的发展^[44]。长期效应下,Norrbrand L等^[9]和Wernbom M等^[10]研究发现,与传统抗阻训练相比,飞轮训练器引起的肌肉肥大是其两倍。

在预防肌肉萎缩和力量下降方面,女性的干预效果优于男性,8—10周和每周3次的干预效果最好。依据板块周期训练理论,力量的提升需要经过提高、保持和消退三个阶段,采用较长时间的周期安排,就容易导致训练适应的延迟,也容易导致受试者的惰性现象的发生^[45]。对于普通人群来说,肌肉肥大一般在8周左右出现明显的变化,有学者对16周的大强度力量训练研究发现^[46],前8周的训练会提高最大神经激活能力,此期间的肌肉肥大程度不明显,8周后最大神经激活能力下降,肌肉肥大明显增

表5 运动方案中调节变量影响肌肉力量的效应结果

协变量及 分层亚组	文献 数量	效应量和 置信区间	P值	I^2	P异质性
性别					
男性	5	1.94[0.43, 3.45]	0.012	84.9%	0.000
女性	3	3.30[0.86, 5.74]	0.008	82.6%	0.003
干预形式					
抗阻训练	6	1.04[0.42, 1.67]	0.001	48.1%	0.086
有氧+抗阻	3	6.07[2.36, 9.78]	0.001	83.6%	0.002
干预周期					
4—6周	3	1.71[0.42, 3.01]	0.010	64.3%	0.061
8—10周	3	6.07[2.36, 9.78]	0.001	83.6%	0.002
13周	3	0.62[0.06, 1.18]	0.029	0%	0.712
干预频次					
2次	2	0.55[-0.12, 1.22]	0.110	0%	0.467
3次	4	4.75[1.75, 7.75]	0.002	86.6%	0.000
2—3次	3	1.48[0.31, 2.64]	0.013	69.8%	0.036

图4 发表偏倚漏斗图



加。所以对于力量和肌肉质量的保持在8—10周最为合适,4—6周的训练干预会太短,而13周的训练干预会导致机体的惰性增加。肌肉力量训练后需要至少48h的恢复时间,所以每周安排3次力量训练是最佳的干预频次。本次研究与前人研究一致,每周3次的飞轮训练可以有效预防肌肉萎缩和力量的下降。

4 结论

①飞轮离心超负荷训练可以有效预防卧床休息期间的肌肉萎缩和力量的下降;②女性的干预效果优于男性,8—10周和每周3次的干预效果最好。

参考文献

- [1] 周永战,陈佩杰,郑莉芳,等.废用性肌萎缩的发生机制及治疗策略[J].中国康复医学杂志,2017,32(11):1307—1313.
- [2] Bodine SC. Disuse-induced muscle wasting[J]. *Int J Biochem Cell Biol*,2013,45(10):2200—2208.
- [3] Malavaki CJ, Sakkas GK, Mitrou GI, et al. Skeletal muscle atrophy: disease-induced mechanisms may mask disuse atrophy[J]. *J Muscle Res Cell Motil*,2015,36(6):405—421.
- [4] 汪敏加,齐梓伊,朱玮华,等.肌肉萎缩机制及临床研究进展:基于第65届美国运动医学会年会的思考[J].中国组织工程研究,2019,23(15):2421—2426.
- [5] Cao Y, Arfat Y, Wang H, et al. Muscle atrophy induced by mechanical unloading: mechanisms and potential countermeasures[J]. *Front Physiol*,2018,9:235.
- [6] Convertino VA. Countermeasures against cardiovascular deconditioning[J]. *J Gravit Physiol*,1994,1(1):P125—128.
- [7] Berg HE, Tesch A. A gravity-independent ergometer to be used for resistance training in space [J]. *Aviat Space Environ Med*,1994,65(8):752—756.
- [8] Tous-Fajardo J, Maldonado RA, Quintana JM, et al. The flywheel leg-curl machine: offering eccentric overload for hamstring development[J]. *Int J Sports Physiol Perform*,2006,1(3):293—298.
- [9] Norrbrand L, Fluckey JD, Pozzo M, et al. Resistance training using eccentric overload induces early adaptations in skeletal muscle size[J]. *Eur J Appl Physiol*,2008,102(3):271—281.
- [10] Wernbom M, Augustsson J, Thomeé R. The influence of frequency, intensity, volume and mode of strength training on whole muscle cross-sectional area in human[J]. *Sports Med*,2007,37(3):225—264.
- [11] Horwath O, Paulsen G, Esping T, et al. Isokinetic resistance training combined with eccentric overload improves athletic performance and induces muscle hypertrophy in young ice hockey players[J]. *J Sci Med Sport*,2019,22(7):821—826.
- [12] Lundberg TR, García-Gutiérrez MT, Mandić M, et al. Regional and muscle-specific adaptations in knee extensor hypertrophy using flywheel versus conventional weight-stack resistance exercise[J]. *Appl Physiol Nutr Metab*,2019,44(8):827—833.
- [13] Maroto-Izquierdo S, García-López D, Fernandez-Gonzalo R, et al. Skeletal muscle functional and structural adaptations after eccentric overload flywheel resistance training: a systematic review and meta-analysis[J]. *J Sci Med Sport*,2017,20(10):943—951.
- [14] Koppelmans V, Scott JM, Downs ME, et al. Exercise effects on bed rest-induced brain changes[J]. *PLoS One*,2018,13(10):e0205515.
- [15] Belavý DL, Ohshima H, Rittweger J, et al. High-intensity flywheel exercise and recovery of atrophy after 90 days bed--rest[J]. *BMJ Open Sport Exerc Med*,2017,3(1):e000196.
- [16] Reeves ND, Maganaris CN, Ferretti G, et al. Influence of 90-day simulated microgravity on human tendon mechanical properties and the effects of resistive countermeasures [J]. *J Appl Physiol*(1985),2005,98(6):2278—2286.
- [17] Rittweger J, Frost HM, Schiessl H, et al. Muscle atrophy and bone loss after 90 days bed rest and the effects of flywheel resistance exercise and pamidronate: results from the LTBR study[J]. *Bone*,2005,36(6):1019—1029.
- [18] McInnes MDF, Moher D, Thombs BD, et al. Preferred reporting items for a systematic reviews and meta-analysis of diagnostic test accuracy studies: the PRISMA-DTA statement[J]. *JAMA*,2018,319(4):388—396.
- [19] 刘海宁,吴昊,姚灿,等.meta分析中连续性数据的深度提取方法[J].中国循证医学杂志,2017,17(1):117—121.
- [20] Higgins JPT, Green S. *Cochrane handbook for systematic reviews of interventions*[M]. Version 5.1.0. New Jersey: John Wiley & Sons,2011:4.
- [21] 曾宪涛,包翠萍,曹世义,等.meta分析系列之三:随机对照试验的质量评价工具[J].中国循证心血管医学杂志,2012,4(3):183—185.
- [22] Mallen C, Peat G, Croft P. Quality assessment of observational studies is not commonplace in systematic reviews[J]. *J Clin Epidemiol*,2006,59(8):765—769.
- [23] Maher CG, Sherrington C, Herbert RD, et al. Reliability of the PEDro scale for rating quality of randomized controlled trials[J]. *Phys Ther*,2003,83(8):713—721.
- [24] Caruso JF, Hamill JL, Yamauchi M, et al. Albuterol and exercise effects on ankle extensor strength during 40 days of unloading[J]. *Aviat Space Environ Med*,2008,79(6):577—584.

- [25] Alkner BA, Tesch PA. Efficacy of a gravity-independent resistance exercise device as a countermeasure to muscle atrophy during 29-day bed rest[J]. *Acta Physiol Scand*, 2004, 181(3):345—357.
- [26] Tesch PA, Ekberg A, Lindquist DM, et al. Muscle hypertrophy following 5-week resistance training using a non-gravity-dependent exercise system[J]. *Acta Physiol Scand*, 2004, 180(1):89—98.
- [27] Rittweger J, Möller K, Bareille M, et al. Muscle X-ray attenuation is not decreased during experimental bed rest [J]. *Muscle Nerve*, 2013, 47(5):722—730.
- [28] Rittweger J, Felsenberg D. Recovery of muscle atrophy and bone loss from 90 days bed rest: results from a one-year follow-up[J]. *Bone*, 2009, 44(2):214—224.
- [29] Rittweger J, Felsenberg D, Maganaris C, et al. Vertical jump performance after 90 days bed rest with and without flywheel resistance exercise, including a 180 days follow-up [J]. *Eur J Appl Physiol*, 2007, 100(4):427—436.
- [30] Holt JA, Macias BR, Schneider SM, et al. Wise 2005: aerobic and resistance countermeasures prevent paraspinal muscle deconditioning during 60-day bed rest in woman[J]. *J Appl Physiol*(1985), 2016, 120(10):1215—1222.
- [31] Lee SM, Schneider SM, Feiveson AH, et al. Wise-2005: countermeasures to prevent muscle deconditioning during bed rest in woman[J]. *J Appl Physiol*(1985), 2014, 116(6): 654—667.
- [32] Schneider SM, Lee SM, Macias BR, et al. Wise-2005: exercise and nutrition countermeasures for upright VO_2pk during bed rest[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2009, 41(12): 2165—2176.
- [33] Alkner BA, Tesch PA. Knee extensor and plantar flexor muscle size and function following 90 days of bed rest with or without resistance exercise[J]. *Eur J Appl Physiol*, 2004, 93(3):294—305.
- [34] Cohen J. Statistical power analysis for the behavioral sciences[M]. 2nd ed. Hillsdale, NJ: Erlbaum, 1988, 83.
- [35] Schmid CH, Stark PC, Berlin JA, et al. Meta-regression detected associations between heterogeneous treatment effects and study-level, but not patient-level, factors[J]. *J Clin Epidemiol*, 2004, 57(7):683—697.
- [36] 周旭毓, 方积乾. meta分析的常见偏倚[J]. *循证医学*, 2002, 2(4):216—220.
- [37] Hornberger TA, Chien S. Mechanical stimuli and nutrients regulate rapamycin-sensitive signaling through distinct mechanisms in skeletal muscle[J]. *J Cell Biochem*, 2006, 97(6): 1207—1216.
- [38] Vandenburg HH. Motion into mass: how does tension stimulate muscle growth[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 1987, 19(5 Suppl):S142—149.
- [39] 郑天晨. 利用飞轮离心训练器进行下肢离心力量训练的肌电特征和训练效果研究[D]. 北京体育大学, 2019.
- [40] Seynnes OR, de Boer M, Narici MV. Early skeletal muscle hypertrophy and architectural changes in response to high-intensity resistance training[J]. *J Appl Physiol*(1985), 2007, 102(1):368—373.
- [41] Illera-Dominguez V, Nuell S, Carmona G, et al. Early functional and morphological muscle adaptations during short-term inertial-squat training[J]. *Front Physiol*, 2018, 9: 1265.
- [42] Caruso JF, Hernandez DA. Net caloric cost of a 3-set flywheel ergometer resistance exercise paradigm[J]. *J Strength Cond Res*, 2002, 16(4):567—572.
- [43] Norrbrand L, Tous-Fajardo J, Vargas R, et al. Quadriceps muscle use in the flywheel and barbell squat[J]. *Aviat Space Environ Med*, 2011, 82(1):13—19.
- [44] 许智勇, 殷鑫, 黄强年, 等. 离心运动的特征和急性反应[J]. *中国组织工程研究*, 2018, 22(16):2607—2612.
- [45] 郑丽, 孟国正. 力量训练中面对的三个问题: 方法、内容与周期 [J]. *武汉体育学院学报*, 2017, 51(1):88—91.
- [46] 陈金鳌, 相建华, 陈璇. 年龄和性别因素对力量训练后肌肉量变化的影响[J]. *体育科学*, 2011, 31(9):57—62+84.