

加压训练的应用及限制研究进展*

刘 申¹ 王 硕² 姬卫秀^{2,3}

加压训练是一种新型运动训练方法,是在运动训练过程中对训练部位进行加压限制或者间歇阻断静脉血流,故也称血流限制训练(blood flow restriction training, BFR),其在刺激肌肉生长、促进蛋白质合成和提高肌肉适能方面具有一定效果。与传统抗阻训练相比,加压训练不但能提高肌肉机能,而且在低负荷运动中能提高训练者的有氧运动能力、预防骨骼内矿物质的丢失,对老年人、心血管病患者、神经系统疾病患者等均适用。故在康复医学、预防医学、航天医学、运动健身和竞技体育等领域应用广泛。

1 加压训练的应用

1.1 康复医学领域

自20世纪60年代,日本医学博士佐藤义昭发明加压训练以来,人们逐渐认识到加压训练在促进肌肉肥大,增加肌肉力量等方面的效果。近年来,有学者将加压训练应用于运动损伤后的康复、急性脑梗死患者的术后康复、2型糖尿病及高血压的运动康复等康复医学领域,取得了良好的效果,引起了医学工作者的广泛关注。

前交叉韧带重建(anterior cruciate ligament reconstruction, ACLR)术后股四头肌萎缩无力可持续数年。通过对9例成人ACLR(术后5±2年,股四头肌大小和力量不超过90%)进行患肢加压训练后发现,股直肌、股外侧肌厚度和膝伸肌力量均有所提高,股四头肌功能得到改善^[1]。刘莉等^[2]在膝关节手术患者康复训练中加入2周加压训练,发现膝关节的肌肉力量及功能评分都优于传统的康复训练。加压训练还可以缓解膝关节疼痛和积液淤积,使机体整体功能得到较大改善^[3]。

急性脑梗死患者的术后康复采用常规康复训练与间歇充气加压(intermittent pneumatic compression, IPC)相结合,发现其运动功能评分和日常生活活动能力评分比常规训练得到显著提高^[4]。提示,IPC结合基础康复训练可进一步改善急性脑梗死患者的运动功能,提高其生存质量。虽然其作用机制还不明确。但胡雪等^[4]认为这可能是由于IPC治疗时需间歇性挤压静脉,有效促进了静脉回流,提高了回心血量,

进而有利于机体恢复。

叶琼等^[5]将90例糖耐量减低的人群随机分为三组,进行为期36周的加压结合抗阻训练后发现,其糖耐量试验2h血糖、胰岛素抵抗指数显著优于单独抗阻训练组和对照组,加压结合抗阻训练可以改善机体对胰岛素的敏感性。除了改善胰岛素敏感性外,低负荷的加压训练还对自发性高血压大鼠有良好的降压效果。这些研究为2型糖尿病、高血压患者的运动康复提供了一种新方法^[6]。

此外,利用加压训练效果转移的特点,可以对一侧肢体受伤的运动员,在健康一侧对肢体进行加压训练以保持和提高患侧肢体的肌肉力量,有效缩短运动员伤病的恢复时间^[7]。而且,低强度加压训练能提高跟腱的力学和形态学特性,其程度与传统的高负荷耐力训练相似,这对于那些不能承受沉重训练负荷,但仍希望减轻患病症状的人来说尤为重要^[8]。

1.2 预防医学领域

加压训练除了通过增加肌肉体积和力量对疾病康复产生作用外,还有预防疾病发生的作用。

有学者发现,加压训练能显著改善老年人骨健康水平,并提高其运动能力,且不会导致肌肉损伤^[9]。Nielsen等^[10]研究指出绝经妇女在20周的加压训练之后,骨密度有所提高。叶琼^[5]发现经过36周的运动干预后(使用加压训练装置以150mmHg压强对受试者左右腿局部加压,在平地执行训练方案),受试者大转子、Ward三角区、股骨颈骨密度均出现明显改善。这可能是因为加压训练会促进机体生长激素、胰岛素生长因子等物质的分泌,促进骨形成因子的分泌和诱导骨芽细胞分化,进而有利于改善骨密度,起到防止骨质疏松的作用^[11]。

在加压训练干预过程中,重复和间歇的缺血和再灌注会引起流体剪切应力增加,放大的血流动力学刺激使血管内皮一氧化氮合酶释放增多,导致血液中一氧化氮(NO)合成增加,浓度增大,产生扩张血管的效应^[12]。Araujo等^[13]还发现加压训练使血液中的NO浓度增加的同时,还可以使血管紧张素Ⅱ(缩血管物质)的产生减少,进一步降低血液流动的阻力。此外,加压训练时,在低氧与高乳酸的刺激下,机体为了

DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2022.03.025

*基金项目:2019年天津市“131”创新型人才培养工程第三层次项目;2019年天津市高校青年后备人才项目

1 天津体育学院社会体育与健康科学学院,天津市,101617; 2 天津体育学院运动与健康研究院; 3 通讯作者

第一作者简介:刘申,男,本科生; 收稿日期:2020-07-20

使肌肉更有利地应对缺血缺氧的情况,血管内皮生长因子会相应增加,促进毛细血管的生成,为加压部位远端提供更多的携氧血红蛋白^[14]。Madarame等^[15]发现11例男性在进行急性加压训练之后,他们的内皮质功能有所提高,从而能改善血管紧张度,有效预防了血管疾病的发生。

长期卧床会使下肢肌张力明显下降,引发废用性肌肉萎缩。吴旻等^[16]最近的研究发现,加压训练能够促进下肢肌肉肥大,增加下肢肌力。加压训练联合低电流电刺激治疗,对下肢肌肉减少症患者具有诱导其骨骼肌肥大的作用^[17]。于亮等^[18]发现,加压训练可以通过改变肌纤维的类型、促进蛋白质的合成、调节激素的分泌,预防废用性肌肉萎缩。

1.3 航天医学领域

众所周知,太空环境存在着微重力暴露、辐射、感官剥夺、昼夜节律紊乱及人工环境破坏等问题,危害人体健康^[19]。为解决这些问题,许多训练方法相继被提出,如:肌肉电刺激、有氧训练等。虽然这些训练方法对于保持肌肉力量具有一定作用,但仍存在多种不足,如肌肉电刺激强度较高,易引起机体不适,且会造成等长收缩力量下降;有氧训练耗时长效率偏低^[20]。而加压训练,可以在不增加额外航天载荷的情况下,在较短的时间内,以较低的训练负荷来减轻太空环境导致的宇航员肌肉机能的下降。

宇航员面临的健康问题主要是骨骼肌萎缩。研究发现,受试者以中等血流限制(施加到小腿近侧部分的压力为200mmHg)、低强度负荷(跑步机行走5×2次,每次2min,速度为50m/min,每运动1min休息1次)、在全重力环境下的跑步机上行走,仅3周就出现肌肉肥大、肌力增加^[21]。低强度加压训练,可以激活生长激素-胰岛素样生长因子轴,从而促进肌肉力量增加和肌肉肥大,预防骨骼肌萎缩的发生^[22]。空间站上的练习设备主要是跑步机,而这种加压训练为宇航员提供了一种参考,不会产生额外的载荷,可以在不增加机上设备数量的情况下提高训练的有效性^[21]。此外,利用加压抗阻训练的交叉转移效应,宇航员进行上肢加压训练时会连带促进胸部肌肉肥大;进行腿部加压训练时也有利于促进躯干肌肉肥大^[23]。

除了肌肉萎缩,宇航员还要承受骨矿物质丢失。有研究表明低强度的加压训练对骨的形成、吸收和代谢有积极影响^[24]。由血管阻塞引起的髓内压力增加和骨内间质液体流动被认为是影响骨重塑的主要机制^[25]。加压训练对骨骼的影响可以通过成骨细胞的活性来研究。研究人员通过比较未训练和低强度加压训练后老年人血清中骨标志物的浓度,发现加压训练后成骨细胞的活性升高^[26]。此外,骨吸收标志物I型胶原的C-末端交联端肽在加压运动后被报告降低^[26]。

综上,加压训练适用于航天领域,合理运用加压训练有利于防止因制动和慢性卸载导致的骨骼肌萎缩和骨矿物质

丢失的现象。

1.4 运动健身领域

随着“全民健身”口号的打响,国人越来越注重运动健身,但传统的力量训练负荷较大,可接受度低。而加压训练则具有风险低、强度小的特点。研究发现,健康成人进行3周的加压训练(每周2—3次,每次持续5—10min,负荷20%—40%1RM)后,其上臂和大腿的围度及横截面积均明显增大^[10]。虽有研究认为初期肌肉尺寸的增加可能由急性水肿引起,但在训练后2—10天内仍能观察到肌肉尺寸增大^[27]。同时,肌肉动态等张、等长和等速力量均有一定程度的增加,爆发力也显著增强^[28—29]。

美国运动医学学会在2009年指出,对于传统的抗阻训练来说,只有训练负荷 $\geq 70\%$ 1RM时的肌肉收缩才有效果, $< 70\%$ 1RM时,促进肌肉肥大的效果则不明显^[30]。若以促进肌肉肥大为目的,加压训练只需要在相对较低负荷下训练即可达到传统抗阻训练的效果。Taylor等^[31]发现,28例健康男子在经过5周不同负荷加压短跑间歇训练后,常规负荷加压训练(负荷20%—50%1RM)比低负荷加压训练(负荷 $< 10\%$ 1RM)和高负荷加压训练(负荷 $> 50\%$ 1RM)改善肌肉力量的效果都更明显。瞿超艺等^[32]认为高负荷加压训练之所以肌肉力量增加的效果不显著,可能是由于高负荷加压训练易造成肌肉疲劳、神经麻痹,致使训练时间不足导致的。于亮等^[33]通过研究22例无任何训练背景的成年男性发现,在通过2周深蹲训练后250mmHg加压组受试者的下肢骨骼肌含量增长但普通抗阻力量训练组却均未出现明显变化。以上说明,加压训练可促进肌肉力量增长,且比单独使用低强度抗阻训练更有效。

与传统抗阻训练相比,加压训练风险较低,可适用于老年人。研究发现,加压训练可使老年人的肌肉力量得到改善^[34—35]。有学者通过对23例老年人进行为期10周步行加压训练(45%储备心率强度),发现其股四头肌最大肌肉力量显著增大,还伴有屈伸膝关节的能力提高,这种锻炼方式还提高了一系列生活任务中的功能能力,如坐姿屈肘、单腿伸膝等^[36—37]。加压训练后,额外补充蛋白质还可使其训练效果增强^[38]。

加压训练除了在肌肉方面的良好作用外,在增强有氧运动能力方面也有一定的效果。Abe等^[39]通过对9例健康成年男性进行8周加压训练,发现其最大摄氧量显著提高,有氧运动能力得到改善。

1.5 竞技体育领域

力量素质是身体素质的基础,对某些项目来说,肌肉力量是影响竞技成绩的关键,故训练能否提高运动员力量素质往往决定了该训练在运动员的训练周期中的重要性。传统抗阻训练虽然可以提高运动员的肌肉力量,但同时其也具有

缺点,如训练强度较大、容易造成运动性疲劳或损伤、不易恢复等。而加压训练能够取得与传统高负荷抗阻训练基本相同的训练效果,甚至在某些运动项目中可替代传统抗阻训练,且其训练强度相对较小,造成运动损伤的风险较低^[40]。所以,加压训练在竞技体育领域中较传统抗阻训练是一个更好的选择,有着更广阔的应用前景。

Luebbers PE等^[41]通过观察青少年举重运动员≥8周的加压举重训练,发现他们的肌肉力量和横截面积显著提高。Loenneke^[42]认为加压训练之所以能提高肌肉功能,可能是由于肢体远端静脉血流限制引起了局部乳酸和代谢产物的堆积,进而诱发了肌细胞增大、肌纤维中的收缩蛋白含量的增加及肌外非收缩成分增加。加压训练所诱发的生理压力还会提高抗肌肉萎缩复合蛋白-一氧化氮合成酶-1活性,促进骨骼肌卫星细胞活化,使肌纤维增粗,力量增大^[43]。最近有学者发现,采用加压训练热身是一种实用的热身策略,不仅有助于提高男子短跑运动员的肌肉力量,而且还可以降低腿部肌肉受伤的风险^[44]。

加压训练对于运动员身体素质的增强有积极作用,有利于运动成绩的提高。王明波等^[45]将18例男子手球运动员平分成两组(对照组9例采用传统高强度训练,实验组采用加压训练),分别在4周和8周之后对运动员进行测验,发现实验组运动员的最大摄氧量、股后肌群力量、无氧运动能力、纵跳能力、短时冲刺跑和灵敏素质等方面优于对照组。Park等^[46]在对14例篮球运动员进行两周的加压训练后,也发现其最大摄氧量增加,有氧运动能力得到提高。Miller等^[47]发现,跳高运动员在进行低强度的加压训练后,他们的下蹲跳成绩得到了明显提高。9例田径运动员在两周的加压干预之后,其短跑冲刺能力增强^[48]。

因此,加压训练在竞技体育领域也有良好的应用前景,合理应用可以为即将举办的冬奥会提供帮助。

2 加压训练的局限

在进行加压训练时,要求对远端毛细血管和肢体静脉进行加压以限制血流速度,但长期对肢体加压,或是加压过大,会导致加压部位以下的静脉血液回流受阻、血液淤积,甚至可能会进一步导致肺栓塞、心肌梗死等病变^[49]。William等^[50]发现,在一段时间的不合适的加压训练之后,机体的总外周阻力增加、血压进行性降低,造成机体的有效循环血量减少,从而出现全身的不适反应,如出冷汗、面色苍白和呼吸加快等。而对于患有心肺疾病的人,进行加压训练极有可能加重症状,所以对他们来说应该禁止进行加压训练。

最新研究发现,与传统训练相比,加压训练诱发的血流动力学应激变化显著增强^[51]。长期对血管进行加压限制可能会损伤血管,造成血管壁内皮细胞脱落,内皮下胶原暴露,

进而激活凝血系统形成血栓,严重时会导致血栓性静脉炎^[26]。有个案报道,糖尿病和高血压的患者,长期进行加压训练引起视网膜静脉阻塞^[36]。糖尿病引起的高粘血症和糖尿病微血管病变能够诱发异常湍流,从而提高了血栓形成的风险,易引起视网膜静脉阻塞。此外,由于糖尿病和高血压,导致白细胞和/或血小板异常粘附的各种炎性细胞因子可能出现上调。在这种情况下进行加压训练很可能加剧深静脉血栓形成,并最终引发严重的静脉阻塞^[26]。鉴于以上因素,在进行加压训练之前,需要对受试者进行一定的身体评估,以防心血管不良事件的发生。

在加压训练时,需要将训练者的特定部位用加压带捆绑。但多数运动员都需要控制体重,其皮下组织一般较少。此时,进行加压训练,如加压带捆绑过紧、持续时间过长,则可能导致加压带以下部位的神经纤维受到强烈刺激,引发一系列知觉变化,严重时可能因脑供血不足造成晕厥^[52-53]。Buford等^[54]通过追踪调查13000例(不同年龄,进行不同强度的加压训练)后,发现由于压迫外周神经,会使机体出现麻木感和发冷,其概率分别占1.297%和0.127%。此外,在加压训练中,自感劳累评分也较高^[55]。

因此,对于患有心脏疾病(如心肌梗死、心绞痛、心肌炎、心力衰竭等)、肺部疾病(如肺栓塞、肺水肿、肺梗死等)以及血管血液疾病(如血栓病、周围血管疾病、血栓性静脉炎、高血压)及其并发症的人群均不宜进行加压训练。此外,有神经损伤、神经感觉功能障碍的人群也不宜进行加压训练,因为长时间加压时会刺激神经束引起训练者不适^[56]。对于无上述禁忌证的人群,可以选择加压训练。尤其是对于伴有运动功能丧失、活动能力受限,以及无法承受传统运动负荷的人群,目前来说,加压训练是很好的一个选择。

3 加压训练的风险防范

3.1 装置的使用

加压训练方便易操作,不需要大器械的辅助即可完成,其中必不可少的装置就是加压带,其多是弹性袖口和尼龙袖口;弹性护膝是最近提出的加压装置,因其产生的疲劳刺激更大,有望替代传统的加压训练中使用的加压带^[57]。在下肢,使用相同宽度但由两种不同材料制成的袖带,在静息动脉闭塞或重复同心衰竭(血流替代)方面似乎没有什么区别^[58]。而在上肢,材料对静息动脉闭塞压力影响很大^[59]。

除了加压带的材料之外,加压带的长度及宽度在训练中也起着非常重要的作用。一般手臂用加压带的长度为50—90cm左右,宽度为3—5cm左右,腿部用加压带的长度为90—175cm左右,宽度为5—18cm左右^[43]。对于较宽的加压带来说,因为其受力表面积较大,所以只需要较低的压力就可以达到限制血流的效果,如此将不会或不易引起肢体感觉

减弱和一些其他不良反应,同时也可降低损伤血管下内皮细胞的风险。相反,较窄的加压带会压迫训练部位的神经纤维,引起受训部位麻木和神经传导速度减慢等不良反应。故加压带应该尽可能宽,但是使用过宽的加压带可能会限制机体运动。所以,加压带长度和宽度的选择还需要根据训练者的情况进行相应的调整。

3.2 训练负荷及加压压力的选择

在加压训练中,不适的训练负荷往往会引起运动损伤。大量学者认为,加压训练采用20%—40%1RM的负荷量可以促进肌肉生长,提高肌肉力量,而当所使用的负荷位于此范围的底端(20%1RM)时,可能需要更高的压力才能够引起肌肉生长^[60]。最新研究发现,心血管疾病患者采用10%1RM负荷加压训练既可以发挥肌肉激活的作用,又可以减少患者的运动负担^[61]。

一般情况下,竞技体育专业运动员的肌肉较发达,加压训练若使用正常加压压力可能达不到限制血流的目的,因此,需要适当增加加压压力以达到训练效果^[62]。对于皮下脂肪较厚的肥胖人群,也应适当增加加压压力。

3.3 训练次数与间隔时间

在加压训练期间使用的运动组间休息时间通常较短,并且通常在整个训练期间保持血流限制。Loenneke等^[49]通过meta分析,发现30—60s的运动间歇时间最合适。有人曾在急性研究中,将加压训练的组间休息时间延长至150s,发现其训练效果并不好^[63]。Yasuda等^[64]发现,连续和间歇的压力都可引起类似的肌肉激活,而间歇性的加压训练可以减少肿胀。

传统上,建议每周进行2—4次抗阻训练,以诱发骨骼肌肥大和力量增加^[65]。研究发现,每周2次或2—3次加压训练即可促进肌肉肥大和力量增加^[66—67]。在临床康复中,每天2次加压训练可加速机体康复^[68—69]。因此,高频(每天1—2次)加压训练只适用于短时间(1—3周)康复,长期加压训练,建议每周2—3次。

整体而言,加压训练是提高肌肉力量和质量的有效训练方式,并且在停训后有较高的力量维持水平,但加压训练在引起肌肉代谢反应激活的同时,会导致血压相对增加,因此在加压训练期间应控制心血管参数^[51,70]。

4 展望

加压训练广泛被应用于康复医学、预防医学、航天医学、运动健身和竞技体育等领域。加压训练能增加肌肉体积、增强肌肉力量和提高运动成绩,能有效预防老年人肌肉萎缩、肌力下降、提高骨健康水平,也可以作为新的训练方法来对抗宇航员在轨失重生理效应,并解决宇航员面临的一些其他健康问题。但是,目前加压训练在临床中的研究对象不够广泛,老年人、女性和儿童的研究不足,缺乏全方位、深层次的

研究,临床应用的具体运动处方也没有确切的标准。因此,今后应加大对老年人和女性的研究力度,把加压训练的作用机制作为研究重点,更深层次地探讨加压负荷与收益之间的关系,评价其临床应用的有效性和安全性。

参考文献

- [1] Kilgas MA, Lytle L, Drum SN, et al. Exercise with blood flow restriction to improve quadriceps function long after ACL reconstruction[J]. Int J Sports Med, 2019, 40(10): 650—656.
- [2] 刘莉,李静,赵冬梅,等.血流限制训练在膝关节术后患者康复训练中的应用[J].护理学杂志,2017,32(24): 82—84.
- [3] Hughes L, Rosenblatt B, Haddad F, et al. Comparing the effectiveness of blood flow restriction and traditional heavy load resistance training in the post-surgery rehabilitation of anterior cruciate ligament reconstruction patients: a UK national health service randomised controlled trial[J]. Sports Med, 2019, 49(11): 1787—1805.
- [4] 胡雪,赵蕊,潘虹,等.康复训练联合间歇充气加压对急性脑梗死患者运动功能的影响[J].中华物理医学与康复杂志,2020(3):197—198.
- [5] 叶琼.加压训练搭配振动训练对老年男性骨质代谢和骨密度影响[J].中国骨质疏松杂志,2018,24(3): 290—294.
- [6] 谭朝文,赵彦,俞莹莹,等.低负荷加压训练改善自发性高血压大鼠的血压效果及机制研究[J].体育科学,2020,40(3): 46—53.
- [7] Brandner CR, Kidgell DJ, Warmington SA. Unilateral bicep curl hemodynamics: low-pressure continuous vs high-pressure intermittent blood flow restriction[J]. Scand J Med Sci Sports, 2015, 25(6): 770—777.
- [8] Centner C, Lauber B, Seynnes OR, et al. Low-load blood flow restriction training induces similar morphological and mechanical Achilles tendon adaptations compared with high-load resistance training[J]. J Appl Physiol (1985), 2019, 127(6): 1660—1667.
- [9] Wilson JM, Lowery RP, Joy JM, et al. Practical blood flow restriction training increases acute determinants of hypertrophy without increasing indices of muscle damage[J]. J Strength Cond Res, 2013, 27(11): 3068—3075.
- [10] Nielsen JL, Aagaard P, Bech RD, et al. Proliferation of myogenic stem cells in human skeletal muscle in response to low-load resistance training with blood flow restriction[J]. J Physiol, 2012, 590(17): 4351—4361.
- [11] 李卓倩,魏文哲,赵之光,等.低强度抗阻运动中不同程度的血流限制对血清生长激素和睾酮分泌量的影响[J].中国体育科技,2020,56(4): 38—43.
- [12] Green DJ, Hopman MT, Padilla J, et al. Vascular adaptation to exercise in humans: role of hemodynamic stimuli[J]. Physiol Rev, 2017, 97(2): 495—528.
- [13] Araujo JP, Neto GR, Loenneke JP, et al. The effects of water-based exercise in combination with blood flow restriction

- tion on strength and functional capacity in post-menopausal women[J].Age (Dordr),2015,37(6): 110.
- [14] 梁国栋,刘礼宾,印笑.加压训练:改善肌肉功能的生理机制及提升心血管功能的可行性分析[J].体育世界(学术版),2018,(01): 179—180.
- [15] Madarame H, Kurano M, Takano H, et al. Effects of low-intensity resistance exercise with blood flow restriction on coagulation system in healthy subjects[J].Clin Physiol Funct Imaging,2010,30(3): 210—213.
- [16] 吴旻,李倩,包大鹏.加压力量训练对下肢骨骼肌影响的Meta分析[J].中国体育科技,2019,55(3):20—26.
- [17] Yoshikawa M, Morifuji T, Matsumoto T, et al. Effects of combined treatment with blood flow restriction and low-current electrical stimulation on muscle hypertrophy in rats [J].J Appl Physiol (1985),2019,127(5): 1288—1296.
- [18] 于亮,王瑞元,陈晓萍.加压运动对去负荷肌萎缩的影响及机制研究进展[J].生理科学进展,2016,47(3):227—230.
- [19] Dayanandan P.Gravitational biology and space life sciences: current status and implications for the Indian space programme[J].J Biosci,2011,36(5): 911—999.
- [20] Edmonds JW, Weston NB, Joye SB, et al. Variation in prokaryotic community composition as a function of resource availability in tidal creek sediments[J].Appl Environ Microbiol,2008,74(6): 1836—1844.
- [21] 徐飞,王健.加压力量训练:释义及应用[J].体育科学,2013,33(12): 71—80.
- [22] Abe T, Kearns CF, Sato Y.Muscle size and strength are increased following walk training with restricted venous blood flow from the leg muscle, Kaatsu-walk training[J].J Appl Physiol (1985),2006,100(5): 1460—1466.
- [23] Yasuda T, Abe T, Sato Y, et al. Muscle fiber cross-sectional area is increased after two weeks of twice daily KAATSU-resistance training[J]. KAATSU Train Res, 2005(1): 65—70.
- [24] Bittar ST, Pfeiffer PS, Santos HH, et al.Effects of blood flow restriction exercises on bone metabolism: a systematic review[J].Clin Physiol Funct Imaging,2018,3:1—6.
- [25] Loenneke JP, Young KC, Fahs CA, et al. Blood flow restriction: rationale for improving bone[J].Med Hypotheses, 2012,78(4): 523—527.
- [26] Behringer M, Willberg C.Application of blood flow restriction to optimize exercise countermeasures for human space flight[J].Front Physiol,2019,10: 33.
- [27] Pearson SJ, Hussain SR.A review on the mechanisms of blood-flow restriction resistance training-induced muscle hypertrophy[J].Sports Med,2015,45(2): 187—200.
- [28] Moore DR, Burgomaster KA, Schofield LM, et al.Neuromuscular adaptations in human muscle following low intensity resistance training with vascular occlusion[J].Eur J Appl Physiol,2004,92(4-5): 399—406.
- [29] Nielsen JL, Aagaard P, Prokhorova TA, et al.Blood flow restricted training leads to myocellular macrophage infiltration and upregulation of heat shock proteins, but no apparent muscle damage[J].J Physiol,2017,595(14): 4857—4873.
- [30] American College of Sports Medicine position stand. Progression models in resistance training for healthy adults[J].Med Sci Sports Exerc,2009,41(3): 687—708.
- [31] Taylor CW, Ingham SA, Ferguson RA.Acute and chronic effect of sprint interval training combined with postexercise blood-flow restriction in trained individuals[J].Experimental Physiology,2016,101(1): 143—154.
- [32] 瞿超艺,覃飞,徐旻霄,等.加压训练在体育应用时的禁忌与风险防范[J].中国体育科技,2019,55(5): 3—7.
- [33] 于亮,赵泽铭,王政淞,等.短期加压力量训练对成年男性身体成分及心血管功能的影响[J].北京体育大学学报,2020,43(6): 132—139.
- [34] Centner C, Lauber B, Seynnes OR, et al.Low-load blood flow restriction training induces similar morphological and mechanical Achilles tendon adaptations compared with high-load resistance training[J].J Appl Physiol (1985),2019,127(6): 1660—1667.
- [35] Thiebaud RS, Abe T, Loenneke JP, et al.Acute muscular responses to practical low-load blood flow restriction exercise versus traditional low-load blood flow restriction and high-/low-load exercise[J].Journal of Sport Rehabilitation, 2020,29(7):984—992.
- [36] Ozawa Y, Koto T, Shinoda H, et al.Vision loss by central retinal vein occlusion after kaatsu training: a case report[J].Medicine (Baltimore),2015,94(36): e1515.
- [37] Clarkson MJ, May AK, Warmington SA.Chronic blood flow restriction exercise improves objective physical function: a systematic review[J].Front Physiol,2019,10: 1058.
- [38] Centner C, Zdzieblik D, Roberts L, et al.Effects of blood flow restriction training with protein supplementation on muscle mass and strength in older men[J].J Sports Sci Med,2019,18(3): 471—478.
- [39] Abe T, Fujita S, Nakajima T, et al.Effects of low-intensity cycle training with restricted leg blood flow on thigh muscle volume and VO2MAX in young men[J].J Sports Sci Med,2010,9(3): 452—458.
- [40] Iida H, Kurano M, Takano H, et al.Hemodynamic and neurohumoral responses to the restriction of femoral blood flow by KAATSU in healthy subjects[J].Eur J Appl Physiol,2007,100(3): 275—285.
- [41] Luebbbers Paul E, Witte Emily V, Oshel JQ, et al.Effects of practical blood flow restriction training on adolescent lower-body strength[J].Journal of Strength and Conditioning Research,2019,33(10): 2674—2683.
- [42] Loenneke JP, Young KC, Fahs CA, et al. Blood flow restriction: rationale for improving bone[J].Med Hypotheses, 2012,78(4): 523—527.
- [43] 魏佳,李博,杨威,等.血流限制训练的应用效果与作用机制[J].体育科学,2019,39(4): 71—80.
- [44] Chen YT, Hsieh YY, Ho JY, et al.Effects of running ex-

- ercise combined with blood flow restriction on strength and sprint performance[J]. *J Strength Cond Res*, 2019, 1: 1—7.
- [45] 王明波,李志远,魏文哲,等.高水平男子手球运动员下肢加压力量训练效果实证研究[J]. *中国体育科技*, 2019, 55(5): 30—36.
- [46] Park Saejong, Kim Jong Kyung, Choi HM, et al. Increase in maximal oxygen uptake following 2-week walk training with blood flow occlusion in athletes[J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2010, 109(4): 591—600.
- [47] Miller RM, Keeter VM, Freitas E, et al. Effects of blood-flow restriction combined with postactivation potentiation stimuli on jump performance in recreationally active men[J]. *J Strength Cond Res*, 2018, 32(7): 1869—1874.
- [48] Abe T, Kearns CF, Sato Y. Muscle size and strength are increased following walk training with restricted venous blood flow from the leg muscle, Kaatsu-walk training[J]. *J Appl Physiol* (1985), 2006, 100(5): 1460—1466.
- [49] Loenneke JP, Balapur A, Thrower AD, et al. The perceptual responses to occluded exercise[J]. *Int J Sports Med*, 2011, 32(3): 181—184.
- [50] William BM, Wang T, Haagenson MD, et al. Impact of HLA alleles on outcomes of allogeneic transplantation for B cell non-hodgkin lymphomas: a center for international blood and marrow transplant research analysis[J]. *Biol Blood Marrow Transplant*, 2018, 24(4): 827—831.
- [51] Cuyul-Vasquez I, Leiva-Sepulveda A, Catalan-Medalla O, et al. Blood flow restriction training for people with cardiovascular disease: an exploratory review[J]. *Rehabilitacion (Madr)*, 2020, 54(2): 116—127.
- [52] Mattocks KT, Mouser JG, Jessee MB, et al. Perceptual changes to progressive resistance training with and without blood flow restriction[J]. *J Sports Sci*, 2019, 37(16): 1857—1864.
- [53] Martin-Hernandez J, Santos-Lozano A, Foster C, et al. Syncope episodes and blood flow restriction training[J]. *Clin J Sport Med*, 2018, 28(6): e89—e91.
- [54] Buford TW, Fillingim RB, Manini TM, et al. Kaatsu training to enhance physical function of older adults with knee osteoarthritis: design of a randomized controlled trial[J]. *Contemp Clin Trials*, 2015, 43: 217—222.
- [55] Killinger B, Lauver JD, Donovan L, et al. The effects of blood flow restriction on muscle activation and hypoxia in individuals with chronic ankle instability[J]. *J Sport Rehabil*, 2019: 1—7.
- [56] Christiansen D, Murphy RM, Bangsbo J, et al. Increased FXYD1 and PGC-1 α mRNA after blood flow-restricted running is related to fibre type-specific AMPK signalling and oxidative stress in human muscle[J]. *Acta Physiol (Oxf)*, 2018, 223(2): e13045.
- [57] Thiebaud RS, Abe T, Loenneke JP, et al. Acute muscular responses to practical low-load blood flow restriction exercise versus traditional low-load blood flow restriction and high-/low-load exercise[J]. *J Sport Rehabil*, 2019, 29(7): 984—992.
- [58] Loenneke JP, Fahs CA, Rossow LM, et al. Blood flow restriction pressure recommendations: a tale of two cuffs[J]. *Front Physiol*, 2013, 4: 1—3.
- [59] Buckner SL, Dankel SJ, Counts BR, et al. Influence of cuff material on blood flow restriction stimulus in the upper body[J]. *J Physiol Sci*, 2017, 67(1): 207—215.
- [60] Lixandrão ME, Ugrinowitsch C, Berton R, et al. Magnitude of muscle strength and mass adaptations between high-load resistance training versus low-load resistance training associated with blood-flow restriction: a systematic review and meta-analysis[J]. *Sports Medicine*, 2018, 48(2): 361—378.
- [61] Ishizaka H, Uematsu A, Mizushima Y, et al. Blood flow restriction increases the neural activation of the knee extensors during very low-intensity leg extension exercise in cardiovascular patients: a pilot study[J]. *J Clin Med*, 2019, 8(8): 1252.
- [62] Slys J, Stultz J, Burr JF. The efficacy of blood flow restricted exercise: a systematic review & meta-analysis[J]. *J Sci Med Sport*, 2016, 19(8): 669—675.
- [63] Loenneke JP, Pujiol TJ. KAATSU: Rational for application in Astronauts[J]. *Hippokratia*, 2010, 14(3): 224.
- [64] Yasuda T, Loenneke JP, Ogasawara R, et al. Influence of continuous or intermittent blood flow restriction on muscle activation during low-intensity multiple sets of resistance exercise[J]. *Acta Physiol Hung*, 2013, 100(4): 419—426.
- [65] Kraemer WJ, Ratamess NA, Anderson JM, et al. Effect of a cetylated fatty acid topical cream on functional mobility and quality of life of patients with osteoarthritis[J]. *J Rheumatol*, 2004, 31(4): 767—774.
- [66] Laurentino G, Ugrinowitsch C, Aihara AY, et al. Effects of strength training and vascular occlusion[J]. *Int J Sports Med*, 2008, 29(8): 664—667.
- [67] Scott BR, Peiffer JJ, Goods P. The effects of supplementary low-load blood flow restriction training on morphological and performance-based adaptations in team sport athletes[J]. *J Strength Cond Res*, 2017, 31(8): 2147—2154.
- [68] Abe T, Kearns CF, Manso FH, et al. Muscle, tendon, and somatotropin responses to the restriction of muscle blood flow induced by KAATSU-walk training[J]. *Equine Vet J Suppl*, 2006, (36): 345—348.
- [69] Ladlow P, Coppack RJ, Dharm-Datta S, et al. Low-load resistance training with blood flow restriction improves clinical outcomes in musculoskeletal rehabilitation: a single-blind randomized controlled trial[J]. *Front Physiol*, 2018, 9: 1269.
- [70] Brandner CR, Clarkson MJ, Kidgell DJ, et al. Muscular adaptations to whole body blood flow restriction training and detraining[J]. *Front Physiol*, 2019, 10: 1099.