

doi:10.16104/j.issn.1673-1891.2021.02.018

# 加压训练适应机制、量效关系和安全性综述

潘彦蓉<sup>a</sup>, 付玉<sup>a,b</sup>, 王漫达<sup>a</sup>, 袁境晗<sup>a</sup>, 梁敏<sup>a</sup>, 李顺昌<sup>a\*</sup>

(成都体育学院 a.运动医学与健康研究所; b.运动医学与健康学院, 四川 成都 610041)

**摘要:**综述了加压训练的骨骼肌适应机制、应用效应、模式、不良反应和安全性, 以期为研究人员和教练员更好地实施加压训练提高人体运动能力提供理论依据和实践参考。

**关键词:**加压训练; 血流限制训练; 运动强度; 运动效益; 作用机制; 安全性

**中图分类号:**G808.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-1891(2021)02-0098-08

## On the Adaptive Mechanism, Dose-effect Relationship and Safety of KAATSU Training

PAN Yanrong<sup>a</sup>, FU Yu<sup>a,b</sup>, WANG Manda<sup>a</sup>, YUAN Jinhan<sup>a</sup>, LIANG Min<sup>a</sup>,  
LI Shunchang<sup>a\*</sup>

(a.Institute of Sports Medicine and Health; b. School of Sports Medicine and Health, Chengdu Sport University, Chengdu, Sichuan 610041, China)

**Abstract:** The skeletal muscle adaptation mechanism, application effects, modes, adverse reactions and safety of KAATSU Training are reviewed in this paper in order to provide theoretical basis and practical reference for researchers and coaches to better implement compression training to improve people's athletic ability.

**Keywords:** KAATSU Training; blood flow restriction training; exercise intensity; exercise benefits; mechanism; safety

## 0 引言

大强度运动对肌肉和心肺功能的刺激更强, 可通过增加线粒体容量、肌肉蛋白质合成以及细胞内合成代谢, 使肌纤维肥大和摄氧量峰值提高, 进而带来比持续中等强度训练更大的健康益处<sup>[1,2]</sup>。然而, 并非所有人群都能获得大强度运动带来的运动效益。针对运动能力较弱的人群, 如老年人和体弱者, 研究人员一直在寻求一种训练强度低、训练时间短, 却能达到类似大强度运动效果的代替方案。加压训练(KAATSU Training)既可以作为一种力量训练手段应用于不同竞技项目提高肌力水平, 又可以作为一种辅助康复训练手段帮助运动能力较弱的人群进行功能性恢复训练<sup>[3-4]</sup>。本文综述了加压训练的骨骼肌适应机制、应用效应、模式、不良反应和安全性, 以期为研究人员和教练员更好地实施加压训练提高人体运动能力提供理论依据和实践

参考。

## 1 加压训练的基本概述

加压训练, 又被称为血流限制训练(Blood Flow Restriction Training, BFR), 1997年首次发现其可提高肌力<sup>[5]</sup>。传统观点认为, 只有当抗阻强度大于70%1RM时, 才能诱导肌肉生长<sup>[1]</sup>。然而, 加压训练的使用对这一理论提出了挑战。低于50%1RM的加压训练可通过外部加压结合低强度运动使肌肉反应性充血, 致使骨骼肌适应性变化, 进而增加肌肉力量和肥大、肌耐力和心肺耐力<sup>[6-9]</sup>。

### 1.1 加压训练与骨骼肌适应机制

骨骼肌对加压训练的适应机制尚不完全清楚, 有研究指出代谢应激和机械张力可能在调节加压训练的肥厚效应中起主导作用<sup>[10]</sup>, 这2种机制协同作用, 介导多种次级相关信号通路, 刺激自分泌和/或旁分泌, 进而诱导肌肉肥大。

收稿日期: 2021-01-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(31971104)。

作者简介: 潘彦蓉(1996—), 女, 四川达州人, 硕士研究生, 研究方向: 运动与健康促进的理论及应用。\*通信作者: 李顺昌(1983—), 男, 河南安阳人, 教授, 博士, 研究方向: 运动生理学。

### 1.1.1 代谢应激

加压训练导致肌肉内  $H^+$  的捕获和积累,提高了体内代谢压力,延长代谢性酸中毒持续时间,以及代谢对快速糖酵解系统的适应,引起急性动脉扩张全身激素反应,形成有利于血液流入肌纤维的压力梯度,血液再灌注增强,细胞扩张和细胞骨架结构伸展,引起肿胀,进而激活骨骼肌细胞合成代谢蛋白激酶转导途径<sup>[11]</sup>,刺激更多胰岛素生长因子(IGF-1)、血管内皮生长因子(VEGF)、睾酮和皮质醇浓度的良性变化,以及一氧化氮合酶(NOS)、生长激素(HGH)等激素水平的提升<sup>[12-14]</sup>,进而促进骨骼肌肉细胞蛋白质合成增加和水解减少<sup>[15]</sup>。加压训练持续 4 周以上,IGF-1 分泌提升更明显<sup>[16]</sup>。

### 1.1.2 机械张力

机械张力通过机械转导过程导致形态适应,形成肌膜结合的机械传感器,如整合素和局灶性粘连,将机械能转化为介导细胞内合成代谢和分解代谢途径的化学信号,最终导致有利于合成而不是降解的肌肉蛋白质平衡的改变<sup>[17]</sup>。除此之外,机械张力还可以通过增加局部激素分泌<sup>[18]</sup>、活性氧(ROS)生成<sup>[19-20]</sup>和快速抽搐纤维募集增加<sup>[21]</sup>,促进卫星细胞激活和增殖和/或相关来增加蛋白质合成,以诱导肌肉生长<sup>[10]</sup>。

### 1.1.3 信号转导通路

肌肉质量主要受 2 大信号通路控制: IGF1-AKT-mTOR/FoxO 和 TGF $\beta$ /Smads(图 1)。在骨骼肌中,IGF-1 激活蛋白激酶(Akt)通过诱导雷帕霉素靶蛋白(mTOR)刺激蛋白质翻译。mTOR 参与了信使 RNA(mRNA)翻译起始的调节,并在运动诱导的肌肉蛋白质合成和训练诱导的肥大中起着重要作用<sup>[22]</sup>。低强度(20%1RM)的加压训练也可以通过其相关的下游效应器核糖蛋白 S6 激酶 1(S6K1)和核糖体蛋白 S6(rpS6)磷酸化刺激 mTOR 信号通路<sup>[23-24]</sup>,使 p70 核糖体蛋白 S6 激酶(p70S6K-Thr389)和 p38 丝裂原活化蛋白激酶(p38MAPK<sup>Thr180/Tyr182</sup>)磷酸化升高,促进蛋白质合成<sup>[25]</sup>。由 S6K1 激活的 mTOR 信号也可抑制翻译延伸因子 2(eEF2)激酶的活性,显著降低 eEF2 磷酸化<sup>[23]</sup>,从而促进翻译起始和延伸<sup>[26]</sup>。S6K1 的过度上调可能会放大其对胰岛素受体底物(IRS1)的抑制性反馈,从而损害磷酸肌醇 3-激酶(PI3K)和 Akt 的激活<sup>[27-28]</sup>。

在加压训练中,IGF1-AKT 除了在合成代谢信号传导中通过刺激翻译机制作用外,Akt 的激活还通过促进叉头盒转录因子(FOXO)的磷酸化和失活来抑制骨骼肌中的蛋白质降解<sup>[29-30]</sup>。去磷酸化的

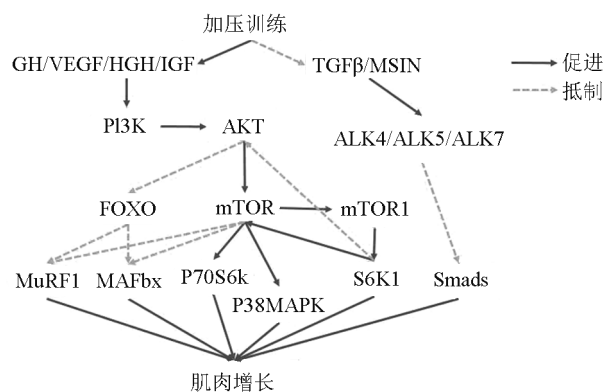


图 1 加压训练促进骨骼肌适应的相关信号通路

FOXO 转移到细胞核中,诱导其靶基因的表达。Akt 诱导的 FOXO 磷酸化导致其保留在细胞质中并抑制 FOXO 依赖性转录<sup>[31]</sup>。FOXO 转录因子可显著上调肌肉环状指蛋白 1(MuRF-1)和肌肉萎缩盒 F 蛋白(MAFbx)<sup>[32]</sup>。因此,由 Akt 磷酸化介导的 FOXO 抑制阻止了 MuRF-1 和 MAFbx 的表达及其在骨骼肌中的分解代谢作用。另外,mTOR 激活通过抑制糖皮质激素活性来阻断 MuRF-1 和 MAFbx 的活性<sup>[33]</sup>。糖皮质激素与 FOXO 转录因子协同诱导 E3 泛素连接酶<sup>[34-35]</sup>。因此,可以推测,在加压训练中,mTOR 活性的增加也在一定程度上抑制了 MuRF1 和 MAFbx 的活性,从而促进肌肉肥大的信号传导。

研究表明,加压训练后,肌生成抑制素(MSTN)表达减少,肌肉质量和力量增加<sup>[36]</sup>,强调了 MSTN 在加压训练诱导肌肉肥大中的抑制作用。MSTN 是转化生长因子配体(TGF $\beta$ )超家族成员,TGF $\beta$  触发酪氨酸激酶活化素 I 型受体(ALK4、ALK5 和 ALK7)的募集和激活,导致特定的 Smads 蛋白(Smad2 和 Smad3,Smad2/3)磷酸化,使 Smads 蛋白与 Smad4 蛋白形成转录复合物。Smad2/3-Smad4 复合物随后转移到细胞核,以减少与肌肉生长相关的基因表达方式调节染色质结构<sup>[37]</sup>。尽管 Smad2/3-Smad4 复合物对肌肉生长相关基因产生负面影响,但激活 Smad1/5/8-Smad4 复合物可增加与细胞生长和分化相关的基因表达<sup>[38]</sup>。

## 2 加压训练应用效应

### 2.1 肌肉力量和肌肉肥大

大强度力量训练是提高神经肌肉适应性和促进蛋白质合成,提高肌力最有效的方法<sup>[39]</sup>。低强度加压训练可通过增加肌肉蛋白质合成和刺激生长激素分泌增强肌力和肌肉肥大<sup>[12,40]</sup>。多项研究分别对老年人、年轻人、损伤患者、运动员等不同人群进行加压训练<sup>[41-46]</sup>发现,加压训练均可以在短时间

内以低强度训练负荷达到高强度训练效果引起的肌力增加和肌肉肥大。

肌纤维的活化是获得肌力显著增长的关键,II型肌纤维比I型肌纤维更具有增长肌力和肌肉肥大的潜能。有证据表明加压训练可以增强高阈值肌纤维的招募<sup>[47]</sup>。对健康女性实施12周加压运动干预后发现,股外侧肌和股四头肌肌纤维横截面积增大,肌纤维成分发生了变化,IIA纤维比例增加,IIx纤维比例降低,II型纤维比例较高的个体对加压训练的总体适应更好<sup>[48]</sup>。

## 2.2 肌肉耐力

肌肉耐力通常在中低强度训练形式下发展,高强度力量训练会减少骨骼肌细胞内线粒体的密度,降低单位毛细血管密度<sup>[49,50]</sup>。加压训练导致的局部肌肉缺氧条件可刺激毛细血管数量和血红蛋白浓度增加,使局部肌肉供氧能力得到进一步改善,对提升局部肌耐力非常有利。低强度抗阻加压训练后,线粒体呼吸能力和毛细血管含量以及肌肉耐力性能均得到改善<sup>[51]</sup>。低强度骑行加压训练实验发现加压组比不加压组表现出更多的肌氧合<sup>[52]</sup>。

低强度抗阻加压训练也可以促进局部肌肉耐力的提高。加压训练后乳酸(Lac),去甲肾上腺素(NE)以及促进血管生成或毛细血管形成的关键生长因子VEGF显著增加,改善了血管内皮功能和外周血循环,增强肌耐力<sup>[53]</sup>。另一项随机交叉实验检测运动后,VEGF水平、血管生成的mRNA转录物(包括VEGF及其主要受体(VEGF-R2)、NOS亚型等)、股外侧肌中脱氧血红蛋白水平均显著升高,VEGF、VEGF-R2和神经元一氧化氮合酶的mRNA转录显著增加,可见,与传统抗阻运动相比,加压抗阻运动引起的肌肉缺氧和血管生成反应明显更大<sup>[54]</sup>。

## 2.3 心肺耐力

加压训练可以改变有氧运动和抗阻运动时的心输出量、 $VO_{2max}$ 、氧化活性酶、毛细血管密度、每搏输出量(SV)、糖原储备和心率(HR)。在加压压力适宜情况下,探究有氧加压运动对生理和知觉反应的实验中发现高强度间歇训练(HIIE)和低强度加压训练引起 $VO_{2max}$ 、HR、感知疲劳、毛细血管数量以及乳酸转运酶数量明显增加,表明低强度加压运动方法可替代HIIE方法提高 $VO_{2max}$ ,增强心肺耐力<sup>[9,55]</sup>。篮球运动员进行加压行走训练后,加压训练组SV升高,HR下降,无氧能力增加。为期2周

的加压行走训练明显增加运动员的 $VO_{2max}$ ,且可用于运动员维持康复训练或提高耐力<sup>[56]</sup>。另外,有研究表明加压训练并不总能观察到心肺耐力的显著改善<sup>[57]</sup>,这可能与加压压力、运动模式和干预人群等因素相关。

## 3 加压训练模式

为了更好地运用加压训练,表1总结了加压有氧和加压抗阻训练对心肺耐力和肌肉力量的量效反应。

### 3.1 运动方式

加压抗阻和加压有氧训练均可通过改善机体神经肌肉功能提高生理机能,但其发生机制存在差异性,抗阻(力量)和有氧(耐力)训练在收缩蛋白量、结缔组织硬度、代谢酶活性、线粒体和毛细血管密度和结构等方面产生不同的适应机制<sup>[58]</sup>。加压抗阻训练更能够通过增加肌肉蛋白合成量提高运动单位的募集和同步性,对肌肉肥大的机械应力刺激更强<sup>[59-60]</sup>;加压有氧训练表现出的血流动力学反应(包括毛细血管、代谢酶活性的变化)更明显,肌肉代谢产物积累较多<sup>[7,9,61-62]</sup>。低强度加压抗阻运动可以使肌肉增长最大化,但血流动力学反应较小。低强度加压有氧运动除了功能上的改进以外,更能够改善老年人运动后的心血管反应<sup>[63]</sup>。多组合、多关节、大肌肉群参与的练习方式,便于获得多重训练效应,提高肌适能发展速率。

### 3.2 运动强度和干预周期

训练强度和干预周期是影响运动效益的重要因素。6周自行车运动干预后未出现肌肉肥大和肌力增加<sup>[64]</sup>,而Abe等<sup>[6]</sup>用相同方式干预8周后,发现其股四头肌横截面积和肌肉体积有所增加,最大摄氧量和运动至疲惫的时间显著改善。在加压训练中以40% $VO_{2max}$ 进行为期4~8周有氧运动干预可提高受试者有氧运动能力和肌肉力量<sup>[42,65]</sup>。

传统抗阻训练中的大强度负荷训练增强肌力更明显,却容易对受试者生理机能造成负面影响。在加压抗阻训练中,30%1RM进行4周加压训练后,膝关节伸展能力增长<sup>[66]</sup>;以20%~30%1RM进行12周低强度加压运动后,股四头肌横截面积和肌力均有增加,并且在停训24周时,肌肉力量保持良好<sup>[64]</sup>。在加压抗阻运动剂效中,20%~30%1RM干预4~12周可显著提高神经肌肉功能和心肺适应<sup>[54,67-68]</sup>。



表 1 加压训练量剂效应

作者/发表年限	研究对象	运动干预 (T <sub>实验</sub> /C <sub>对照</sub> )	干预周期 /周	运动频次	强度	研究结果
Abe et al, 2010 <sup>[66]</sup>	19 名健康男性	T:骑行加压 C:骑行	8	T:15 min/次 C:45 min/次 3 次/周	40% VO <sub>2max</sub>	干预前后 T 的 VO <sub>2max</sub> 、运动至筋疲力时间、股四头肌横截面积、肌力均增加;C 无显著改善
Oliveira et al, 2016 <sup>[42]</sup>	17 名健康男性	T:骑行加压 C:骑行	4	2 min 骑行和 1 min 间歇/组,组间歇 3 min,2 组 5~8 次(每周递增一次)/次,3 次/周	40% VO <sub>2max</sub>	干预前后 T 的 VO <sub>2max</sub> 和肌力增加;C 无明显变化
Conceicao et al, 2019 <sup>[65]</sup>	30 名健康青年	T:加压有氧 C:传统有氧	8	30 min/次 4 次/周	T:40% VO <sub>2max</sub> C:70% VO <sub>2max</sub>	干预前后 T 的 VO <sub>2max</sub> 、肌肥大和肌力增加
Shimizu et al, 2016 <sup>[53]</sup>	40 名健康老年人	T:加压抗阻 C:传统抗阻	4	20 个/组,3 组/1 个动作,持续 15 min/次,3 次/周	20% 1RM	干预前后 T 血管内皮功能、外周血循环和肌肉力量增加;C 无明显变化
Segal et al, 2015 <sup>[66]</sup>	40 名膝关节炎患者	T:加压抗阻 C:传统抗阻	4	4 组(30, 15, 15, 15)/每次,3 次/周	30% 1RM	干预前后 T 的 1RM 和肌力均增加;干预后 T 肌力明显高于 C
Yasuda et al, 2014 <sup>[67-68]</sup>	19 名健康老年人	T:加压抗阻 C:不做干预	12	4 组(30, 20, 15, 10)/次,2 次/周	T:20%~30% 1RM	干预前后 T 下肢肌肉横截面积和肌力增加,维持动脉顺应性;C 无明显变化
Vechin et al, 2015 <sup>[69]</sup>	23 名健康老年人	T:加压抗阻 C:高强度抗阻	12	T:4 组(30, 15, 15, 15)/次,2 天/周 C:4 组(10, 10, 10, 10)/次,2 次/周	T:20%~30% 1RM C:70%~80% 1RM	干预前后 T 小腿 1RM 和股四头肌横截面积均增加
Yamanaka et al, 2012 <sup>[70]</sup>	32 名足球运动员	T:加压抗阻 C:传统抗阻	4	4 组(30, 20, 20, 20)/次,3 次/周	20% 1RM	干预前后 T 下肢肌肉横截面积和肌力增加;C 无明显变化
Gavanda et al, 2020 <sup>[71]</sup>	21 名青年男性	T:加压抗阻 C:传统抗阻	6	4 组/次,2 次/周	30% 1RM	干预前后两组 1RM 显著增加,T 重复次数低于 C
Rodrigues et al, 2019 <sup>[72]</sup>	48 名类风湿关节炎患者	T1:加压抗阻 T2:高强度抗阻 C:不做干预	12	T1:15 个/组,4 组/次,2 次/周 T2:15 个/组,4 组/次,2 次/周	T1:30% 1RM T2:70% 1RM	T1 与 T2 肌肉横截面积和肌力均提高,明显高于对照组
Alves et al, 2020 <sup>[73]</sup>	22 名艾滋病患者	T1:加压骑行抗阻 T2:高强度骑行抗阻 C:不做干预	12	T1:1 min 30% 的强度进行三组 12 次,3 次/周 T2:1 min 80% 的强度进行三组 12 次,3 次/周	T1:30% 1RM T2:80% 1RM	T1 与 T2 出现相似显著的肌肉肥大、体脂减少和肌力增强

注:T 表示实验组,C 表示对照组。

## 4 不良反应和安全性

### 4.1 肌肉疲劳和损伤反应

传统的抗阻运动和有氧运动导致的肌肉损伤反应与肌红蛋白、过氧化脂质(LP)、肌酸激酶

(CK)、乳酸脱氢酶(LDH)和炎性因子(主要是 IL-6、IGF-a 等)的急性升高有关。高强度运动引起的肌肉损伤炎症过程较为明显,甚至会减弱运动后恢复效果。Takarada 等<sup>[74]</sup>研究了 20% 1RM 加压运动对 GH、白介素 6(IL-6)、CK 和 LP 浓度的影响,发

现在运动后 90 min 内,IL-6 的浓度逐渐增加,CK 和 LP 的浓度未出现明显变化。同时,有研究指出高强度加压训练后肌红蛋白和 IL-6 明显增加,四肢疼痛感增强,但不会增加肌肉损伤或炎症反应<sup>[40]</sup>。提示加压训练可通过代谢产物的区域积累极大地刺激 GH 的分泌或增加肌肉疲劳的发生率,使下肢肌肉量、围度和肿胀程度增加,但不会对组织造成明显损害<sup>[75-76]</sup>。近年来,有研究<sup>[77]</sup>对 250 位加压训练人群(包括康复、理疗、运动科学等人群)进行加压训练使用情况的横向调查发现,80% 实践者认为使用加压训练效果明显。综合现有研究,使用者在能够规避个人关键禁忌证的情况下,可以安全地进行加压训练<sup>[78]</sup>。

#### 4.2 心血管反应

运动会引起血流动力学反应和氧化应激反应,使运动后 HR、血压(BP)、脂质过氧化增强。与传统低强度运动相比,低强度加压训练后心肌耗氧量<sup>[79]</sup>和血流量显著增加<sup>[80]</sup>。这可能是由于静脉顺应性增加,导致运动后动脉增加,出现心血管应激反应<sup>[81]</sup>。低强度加压运动与高强度运动相比,其血流动力学反应相等或更低,对心血管适应性更好<sup>[82]</sup>。可见,低强度加压训练在达到相似效益的同时,心血管应激反应会更小。

尽管有综述<sup>[81,83-84]</sup>报道了与加压训练相关的潜在负面影响,如心血管负面反应(血栓、静脉充

血/扩张、缺血再灌注损伤)、肌肉损伤和运动性横纹肌溶解症发生率增加,但加压训练与传统低强度运动对这些事件发生的应激反应相似,运动风险较低。日本的一项对超过 12 000 名受试者加压运动的大规模调查中发现<sup>[85]</sup>,运动后副作用很少(包括短暂的麻木或头晕、瘙痒),且没有出现任何严重事件(如脑梗死或血栓)。考虑到实验缺乏长期的前瞻性,以及人口统计学和临床特征的差异性,应注意加压训练过程中各变量的影响。

#### 5 结语

加压训练可通过代谢应激和机械张力诱导相关分子信号通路 IGF1-AKT-mTOR/FoxO 和 TGFβ/Smads 提高神经肌肉适应性,改善骨骼肌质量;不同加压训练模式的改善机制和改善效应有差异性;进行 4~12 周,每周 2~4 次,选择多模式训练方式进行干预可明显改善肌肉力量和心肺耐力;排除个人运动禁忌情况下,加压训练不容易对肌肉系统和心血管造成负面影响。

尽管加压训练机制和量效获得了研究人员的高度关注,但是仍然缺乏系统性研究成果。需进一步深入明确加压训练改善肌肉力量和耐力的生理机制,以及加压训练运动模式(运动方式、动作、强度、持续时间等)的剂量关系对运动表现的影响,以此提高加压训练效率。

#### 参考文献:

- [1] CASSIDY S, THOMA C, HOUGHTON D, et al. High-intensity interval training: a review of its impact on glucose control and cardiometabolic health[J]. *Diabetologia*, 2017, 60(1): 7-23.
- [2] McKendry J, Pérez-López A, McLeod M, et al. Short inter-set rest blunts resistance exercise-induced increases in myofibrillar protein synthesis and intracellular signalling in young males[J]. *Experimental physiology*, 2016, 101(7): 866-882.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] KOUZAKI M, YOSHIHISA T, FUKUNAGA T. Efficacy of tourniquet ischemia for strength training with low resistance[J]. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 1997, 77(1-2): 189-191.
- [6] ABE T, FUJITA S, NAKAJIMA T, et al. Effects of low-intensity cycle training with restricted leg blood flow on thigh muscle volume and  $VO_{2max}$  in young men[J]. *Journal of Sports Science & Medicine*, 2010, 9(3): 452.
- [7] CORVINO R B, ROSSITER H B, LOCH T, et al. Physiological responses to interval endurance exercise at different levels of blood flow restriction[J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2017, 117(1): 39-52.
- [8] LIBARDI C A, CHACON-MIKAHIL M P T, CAVAGLIERI C R, et al. Effect of concurrent training with blood flow restriction in the elderly[J]. *International Journal of Sports Medicine*, 2015, 36(5): 395-399.
- [9] Júlio C.G. Silva, DOMINGOS-GOMES J R, FREITAS E D S, et al. Physiological and perceptual responses to aerobic exercise with and without blood flow restriction[J]. *The Journal of Strength and Conditioning Research*, 2019, 10: 1519.
- [10] PEARSON S J, HUSSAIN S R. A review on the mechanisms of blood-flow restriction resistance training-induced muscle hypertrophy[J]. *Sports Medicine*, 2015, 45(2): 187-200.
- [11] NIELSEN J L, AAGAARD P, BECH R D, et al. Proliferation of myogenic stem cells in human skeletal muscle in response to low-load resistance training with blood flow restriction[J]. *The Journal of Physiology*, 2012, 590(17): 4351-4361.

- [12] 袁文涛. 下肢加压结合不同阻力训练对人体机能的影响研究[J]. 基因组学与应用生物学, 2018, 37(11): 5017-5024.
- [13] 赵之光, 程金娜, 魏文哲, 等. 加压训练和传统增肌训练对优秀男子手球运动员部分激素及生物活性因子的影响[J]. 中国体育科技, 2019, 55(5): 20-29.
- [14] 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+318.
- [15] LANG F, BUSCH G L, RITTER M, et al. Functional significance of cell volume regulatory mechanisms[J]. *Physiological Reviews*, 1998, 78(1): 247-306.
- [16] 罗若莹, 林迪, 郭惠杰, 等. 加压训练对类胰岛素生长因子(IGF-1)分泌影响的 Meta 分析[J]. 河北体育学院学报, 2020, 34(3): 70-76.
- [17] ZOU K, MEADOR B M, JOHNSON B, et al. The  $\alpha 7\beta 1$ -integrin increases muscle hypertrophy following multiple bouts of eccentric exercise[J]. *J Appl Physiol*, 2011, 111(4): 1134-1141.
- [18] ADAMS G R. Invited review: autocrine/paracrine IGF-I and skeletal muscle adaptation[J]. *J Appl Physiol*, 2002; 93(3): 1159-1167.
- [19] CENTNER C, ZDZIEBLIK D, DRESSLER P, et al. Acute effects of blood flow restriction on exercise-induced free radical production in young and healthy subjects[J]. *Free Radical Research*, 2018, 52(4): 446-454.
- [20] BARILI A, DA SILVA CORRALO V, CARDOSO A M, et al. Acute responses of hemodynamic and oxidative stress parameters to aerobic exercise with blood flow restriction in hypertensive elderly women[J]. *Molecular Biology Reports*, 2018, 45(5): 1099-1109.
- [21] COOK S B, MURPHY B G, LABARBERA K E. Neuromuscular function after a bout of low-load blood flow-restricted exercise[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2013; 45(1): 67-74.
- [22] O'NEIL T K, DUFFY L R, FREY J W, et al. The role of phosphoinositide 3-kinase and phosphatidic acid in the regulation of mammalian target of rapamycin following eccentric contractions[J]. *J Physiol*, 2009; 587(14): 3691-3701.
- [23] FUJITA S, ABE T, DRUMMOND M J, et al. Blood flow restriction during low-intensity resistance exercise increases S6K1 phosphorylation and muscle protein synthesis[J]. *J Appl Physiol*, 2007; 103(3): 903-910.
- [24] FRY C S, GLYNN E L, DRUMMOND M J, et al. Blood flow restriction exercise stimulates mTORC1 signaling and muscle protein synthesis in older men[J]. *J Appl Physiol*, 2010, 108(5): 1199-1209.
- [25] WERNBOM M, APRO W, PAULSEN G, et al. Acute low-load resistance exercise with and without blood flow restriction increased protein signalling and number of satellite cells in human skeletal muscle[J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2013, 113(12): 2953-2965.
- [26] WANG X, PROUD C G. The mTOR pathway in the control of protein synthesis[J]. *Physiology*, 2006, 21(5): 362-369.
- [27] HARRINGTON L S, FINDLAY G M, GRAY A, et al. The TSC1-2 tumor suppressor controls insulin-PI3K signaling via regulation of IRS proteins[J]. *J Cell Biol*, 2004, 166(2): 213-223.
- [28] UM S H, FRIGERIO F, WATANABE M, et al. Absence of S6K1 protects against age- and diet-induced obesity while enhancing insulin sensitivity[J]. *Nature*, 2004, 431(7005): 200-205.
- [29] SANDRI M, SANDRI C, GILBERT A, et al. Foxo transcription factors induce the atrophy-related ubiquitin ligase atrogin-1 and cause skeletal muscle atrophy[J]. *Cell*, 2004, 117(3): 399-412.
- [30] GLASS D J. Skeletal muscle hypertrophy and atrophy signaling pathways[J]. *The International Journal of Biochemistry & Cell Biology*, 2005, 37(10): 1974-1984.
- [31] BRUNET A, BONNI A, ZIGMOND M J, et al. Akt promotes cell survival by phosphorylating and inhibiting a Forkhead transcription factor[J]. *Cell*, 1999, 96(6): 857-868.
- [32] SANDRI M, SANDRI C, GILBERT A, et al. Foxo transcription factors induce the atrophy-related ubiquitin ligase atrogin-1 and cause skeletal muscle atrophy[J]. *Cell*, 2004, 117(3): 399-412.
- [33] SHIMIZU N, YOSHIKAWA N, ITO N, et al. Crosstalk between glucocorticoid receptor and nutritional sensor mTOR in skeletal muscle[J]. *Cell Metab*, 2011, 13(2): 170-82.
- [34] WADDELL D S, BAEHR L M, van den Brandt J, et al. The glucocorticoid receptor and FOXO1 synergistically activate the skeletal muscle atrophy-associated MuRF1 gene[J]. *Am J Physiol Endocrinol Metab*, 2008, 295(4): 785-797.
- [35] ZHAO W, QIN W, PAN J, et al. Dependence of dexamethasone-induced Akt/FOXO1 signaling, upregulation of MAFbx, and protein catabolism upon the glucocorticoid receptor[J]. *Biochem Biophys Res Commun*, 2009, 378(3): 668-672.
- [36] KHOUBI M, HABIBI A, GHANBARZADEH M, et al. Acute interval waking with blood flow restriction could not increase ERK, p38 and decrease myostatin[J]. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 2020, 60(1): 32-36.
- [37] GAARENSTROOM T, HILL C S. TGF- $\beta$  signaling to chromatin: how Smads regulate transcription during self-renewal and

- differentiation[C]//Seminars in Cell & Developmental Biology.Londen:Academic Press, 2014, 32: 107-118.
- [38] MIYAZONO K, MIYAZAWA K. Id: a target of BMP signaling[J]. Science's STKE, 2002, 2002(151): pe40-pe40.
- [39] American College of Sports Medicine. ACSM's guidelines for exercise testing and prescription[M]. Philadelphia:Lippincott Williams & Wilkins, 2013.
- [40] WINCHESTER L J, MORRIS C E, BADINGER J, et al. Blood flow restriction at high resistance loads increases the rate of muscular fatigue, but does not increase plasma markers of myotrauma or inflammation[J]. The Journal of Strength & Conditioning Research, 2020, 34(9): 2419-2426.
- [41] OZAKI H, MIYACHI M, NAKAJIMAT, et al. Effects of 10 weeks walk training with leg blood flow reduction on carotid arterial compliance and muscle size in the elderly adults[J]. Angiology, 2011, 62(1): 81-86.
- [42] OLIVEIRA M F M, CAPUTO F, CORVINO R B, et al. Short term low intensity blood flow restricted interval training improves both aerobic fitness and muscle strength [J]. Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports, 2016, 26(9): 1017-1025.
- [43] 刘莉,李静,赵冬梅,等.血流限制训练在膝关节镜术后患者康复训练中的应用[J].护理学杂志,2017,32(24):82-84.
- [44] LADLOW P, COPPACK R J, 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]. Frontiers in Physiology, 2018, 9: 1269.
- [45] 李志远,赵之光,王明波,等.4周加压训练对男子手球运动员身体成分和最大力量的影响[J].中国体育科技,2019,55(5):37-43.
- [46] 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.
- [47] POPE Z K, WILLARDSON J M, SCHOENFELD B J. Exercise and blood flow restriction[J]. The Journal of Strength & Conditioning Research, 2013, 27(10): 2914-2926.
- [48] ELLEFSEN S, HAMMARSTRÖM D, STRAND T A, et al. Blood flow-restricted strength training displays high functional and biological efficacy in women: a within-subject comparison with high-load strength training[J]. American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology, 2015, 309(7): 767-779.
- [49] MacDOUGALL J D, SALE D G, MOROZ J R, et al. Mitochondrial volume density in human skeletal muscle following heavy resistance training[J]. Medicine and Science in Sports, 1979, 11(2): 164-166.
- [50] TSITKANOU S, SPENGOS K, STASINAKI A N, et al. Effects of high-intensity interval cycling performed after resistance training on muscle strength and hypertrophy[J]. Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports, 2017, 27(11): 1317-1327.
- [51] PIGNANELLI C, PETRICK H L, KEYVANI F, et al. Low-load resistance training to task failure with and without blood flow restriction: muscular functional and structural adaptations[J]. American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology, 2020, 318(2): R284-R295.
- [52] KERAMIDAS M E, KOUNALAKIS S N, GELADAS N D. The effect of interval training combined with thigh cuffs pressure on maximal and submaximal exercise performance[J]. Clinical Physiology and Functional Imaging, 2012, 32(3): 205-213.
- [53] SHIMIZU R, HOTTA K, YAMAMOTO S, et al. Low intensity resistance training with blood flow restriction improves vascular endothelial function and peripheral blood circulation in healthy elderly people[J]. European Journal of Applied Physiology, 2016, 116(4): 749-757.
- [54] LARKIN K A, MACNEIL R G, DIRAIN M, et al. Blood flow restriction enhances post-resistance exercise angiogenic gene expression[J]. Medicine and Science in Sports and Exercise, 2012, 44(11): 2077.
- [55] 魏文哲,孙科,赵之光,等.不同程度的血流限制对递增速度跑运动中心肺功能的影响[J].中国体育科技,2019,55(5):8-13+29.
- [56] 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.
- [57] WILSON J M, LOWERY R P, JOY J M, et al. Practical blood flow restriction training increases acute determinants of hypertrophy without increasing indices of muscle damage[J]. The Journal of Strength & Conditioning Research, 2013, 27(11): 3068-3075.
- [58] HUGHES D C, ELLEFSEN S, BAAR K. Adaptations to endurance and strength training[J]. Cold Spring Harbor Perspectives in Medicine, 2017,8(6): a029769.
- [59] LIBARDI C A, CATAI A M, MIQUELINI M, et al. Hemodynamic responses to blood flow restriction and resistance exercise to

- muscular failure[J]. *International Journal of Sports Medicine*, 2017, 38(2): 134-140.
- [60] SARDELI A V, DO CARMO SANTOS L, FERREIRA M L V, et al. Cardiovascular responses to different resistance exercise protocols in elderly[J]. *International Journal of Sports Medicine*, 2017, 38(12): 928-936.
- [61] PARK S, KIM J K, CHOI H M, 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.
- [62] FERREIRA M L V, SARDELI A V, SOUZA G V D, et al. Cardiac autonomic and haemodynamic recovery after a single session of aerobic exercise with and without blood flow restriction in older adults[J]. *Journal of Sports Sciences*, 2017, 35(24): 2412-2420.
- [63] IZQUIERDO M, IBAÑEZ J, HÄKKINEN K, et al. Once weekly combined resistance and cardiovascular training in healthy older men[J]. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 2004, 36(3): 435-443.
- [64] KIM D, SINGH H, LOENNEKE J P, et al. Comparative effects of vigorous-intensity and low-intensity blood flow restricted cycle training and detraining on muscle mass, strength, and aerobic capacity[J]. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 2016, 30(5): 1453-1461.
- [65] CONCEICAO M S, JUNIOR E M M, TELLES G D, et al. Augmented anabolic responses after 8-wk cycling with blood flow restriction[J]. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 2019, 51(1): 84-93.
- [66] SEGAL N A, WILLIAMS G N, DAVIS M C, et al. Efficacy of blood flow-restricted, low-load resistance training in women with risk factors for symptomatic knee osteoarthritis[J]. *PM & R*, 2015, 7(4): 376-384.
- [67] YASUDA T, FUKUMURA K, SATO Y, et al. Effects of detraining after blood flow-restricted low-intensity training on muscle size and strength in older adults[J]. *Aging Clinical and Experimental Research*, 2014, 26(5): 561-564.
- [68] YASUDA T, FUKUMURA K, FUKUDA T, et al. Muscle size and arterial stiffness after blood flow-restricted low-intensity resistance training in older adults[J]. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 2014, 24(5): 799-806.
- [69] VECHIN F C, LIBARDI C A, CONCEIÇÃO M S, et al. Comparisons between low-intensity resistance training with blood flow restriction and high-intensity resistance training on quadriceps muscle mass and strength in elderly[J]. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 2015, 29(4): 1071-1076.
- [70] YAMANAKA T, FARLEY R S, CAPUTO J L. Occlusion training increases muscular strength in division IA football players [J]. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 2012, 26(9): 2523-2529.
- [71] GAVANDA S, ISENMANN E, SCHLÖDER Y, et al. Low-intensity blood flow restriction calf muscle training leads to similar functional and structural adaptations than conventional low-load strength training: a randomized controlled trial[J]. *Plos One*, 2020, 15(6): e0235377.
- [72] RODRIGUES R, FERRAZ R B, KURIMORI C O, et al. Low-load resistance training with blood flow restriction increases muscle function, mass and functionality in women with rheumatoid arthritis[J]. *Arthritis Care & Research*, 2020, 72(6): 787-797.
- [73] ALVES T C, SANTOS A P, ABDALLA P P, et al. Resistance training with blood flow restriction: impact on the muscle strength and body composition in people living with HIV/AIDS[J]. *European Journal of Sport Science*, 2020(4): 1-10.
- [74] TAKARADA Y, NAKAMURA Y, ARUGA S, et al. Rapid increase in plasma growth hormone after low-intensity resistance exercise with vascular occlusion[J]. *Journal of Applied Physiology*, 2000, 88(1): 61-65.
- [75] 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.
- [76] 盛菁菁,魏文哲,孙科,等.加压状态下慢速下坡步行的生理负荷与增肌效果研究[J].*中国体育科技*,2019,55(3):13-19.
- [77] PATTERSON S D, BRANDNER C R. The role of blood flow restriction training for applied practitioners: a questionnaire-based survey[J]. *Journal of Sports Sciences*, 2018, 36(2): 123-130.
- [78] 魏佳,李博,冯连世,等.血流限制训练的方法学因素及潜在安全性问题[J].*中国体育科技*,2019,55(3):3-12.
- [79] IVES D, CALCUS A, KALLURI S, et al. Effects of noise reduction on AM and FM perception[J]. *J Assoc Res Otolaryngol*, 2013, 14(1): 149-157.
- [80] PATTERSON S D, FERGUSON R A. Increase in calf post-occlusive blood flow and strength following short-term resistance exercise training with blood flow restriction in young women[J]. *Eur J Appl Physiol*, 2010, 108(5): 1025-1033.
- [81] LOENNEKE J P, WILSON J M, WILSON G J, et al. Potential safety issues with blood flow restriction training[J]. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 2011, 21(4): 510-518.



的实际解决方案是否唯一?有无评测标准等?这些问题仍需要深入思考。因此在未来的工作中,教师还要以产教融合为指导,来自软件企业的工程师也需要适当参与 PBL 教学过程。学生在了解与学习相关行业实例的过程中,可以引发不断地思考与提问,通过自发的专业课程学习,寻找工程问题的答案<sup>[11]</sup>。此外,在 PBL 教学中,针对导入的问题,对于学生探究出的一些有想法、有创意、对现代软件项目管理有帮助的问题的解决方案,鼓励学生能够把问题解决方案中的内容用于申报省(校)级各类大学生创新创业项目,进行进一步的项目研究与实践。学生可以个人或小组的形式,把一些问题解决方案进行创新(创意)产品设计,鼓励学生主动参

与到项目实践过程中,进行知识的内化与学以致用<sup>[12]</sup>。这为学生日后在 IT 行业从事软件项目管理相关工作打下扎实的基础。

## 5 结语

PBL 教学模式以学生为主体,以问题导入为核心,可以让每位学生充分参与,以提高学习兴趣与学习积极性。问题来自实际,可以让学生将书本上的知识和现实世界中的问题连接起来,明晰所学知识的应用场景,真正做到学以致用<sup>[4]</sup>。本文所阐述的 PBL 教学模式对于高校计算机及软件工程等相关专业的同类课程同样具有良好的借鉴作用。

### 参考文献:

- [1] 类骁.基于 POPBL 模式的《软件项目管理》课程教学改革探索[J].教育现代化,2019(35):46-48.
- [2] 刘锋,崔爱华,刘文倩.高等学校项目管理课程教学改革研究[J].纳税,2019(31):271.
- [3] 王芳,邓一星,秦映波.敏捷软件项目管理课程教学方案研究与实践[J].软件,2018(4):77-81.
- [4] 朱少民.软件测试课程的问题驱动教学模式探索[J].中国大学教学,2018(10):32-36.
- [5] 刘向举,陈辉,任萍.PBL 教学法在计算机组成原理课程教学中的应用[J].高师理科学刊,2020(4):86-89.
- [6] 李淑敬,李林国.基于 PBL 的翻转课堂教学模式在计算机实践类课程中的应用研究[J].山东农业工程学院学报,2019(5):177-180.
- [7] 刘可薇.PBL 教学模式下合作学习课堂组织设计——电气控制及 PLC 教学研究与实践[J].大学教育,2020(6):78-80.
- [8] 王肖焯.基于 PBL 教学理念的《人机工程学》实训教学模式研究[J].福建茶叶,2020(3):248-249.
- [9] 史东芳.教师教育领域中 PBL 问题有效性探析[J].黑龙江教师发展学院学报,2020(4):17-19.
- [10] 普措才仁.《软件项目管理》课程教学内容、教学方法和教学手段的配套改革研究与实践[J].科技风,2017(12):35-36.
- [11] 师洪涛,杨旭英,郭永萍.以产教融合为指导的工科专业课教学方法改革的探讨[J].当代教育实践与教学研究,2020(7):152-153.
- [12] 王彩萍,罗振敏,魏子淇,等.安全人机工程学课程混合式教学方法探索[J].考试周刊,2017(75):24.

(上接第 105 页)

- [82] POTON R, POLITO M D. Hemodynamic response to resistance exercise with and without blood flow restriction in healthy subjects[J].Clin Physiol Funct Imaging,2016, 36(3): 231-236.
- [83] HUGHES L, PATON B, ROSENBLATT B, et al. Blood flow restriction training in clinical musculoskeletal rehabilitation: a systematic review and meta-analysis[J]. Br J Sports Med, 2017, 51(13): 1003-1011.
- [84] PATTERSON S D, HUGHES L, WARMINGTON S, et al. Blood flow restriction exercise position stand: considerations of methodology, application and safety[J]. Frontiers in Physiology, 2019, 10(4):533-573.
- [85] NAKAJIMA T, KURANO M, IIDA H, et al. Use and safety of KAATSU training: results of a national survey[J]. International Journal of KAATSU Training Research, 2006, 2(1): 5-13.