



## 助力中国航天:微重力环境运动应对理论与实践探索

董德朋<sup>1</sup>, 汪毅<sup>2\*</sup>

(1. 曲阜师范大学 体育科学学院, 山东 曲阜 273165; 2. 中国人民大学 体育部, 北京 100872)

**摘要:**长征五号遥三运载火箭的成功发射,预示着中国航天正式进入空间站时代,如何尽快建成中国特色的微重力环境运动应对标准或理论体系是一项时代任务和使命。综合运用文献资料分析、历史分析和逻辑归纳等方法,对国内外有关微重力环境运动应对的研究文献进行梳理,对微重力环境运动应对的基本内涵、运动应对方案的设计、抗阻+有氧训练的优化、高强度间歇抗阻及快速伸缩复合训练等基本理论与实践问题展开探讨。研究认为:微重力环境下的运动应对已从早期的抗阻训练,走向了有氧、灵活及本体感觉相结合的一体化训练;运动应对以抗阻+有氧模式为主,且能够实现有条件的优化组合;高强度间歇训练更支持低量高强度间歇模式,但年龄可能会成为条件性障碍,高强度间歇抗阻训练可以作为一种同步发展有氧和肌耐力的适配方式;快速伸缩复合训练在峰值力矩、爆发力等效应指标上得到临床实验的证据支持,但主要集中在下肢,且存在时间线性效应(10~12周达最大效应值)。未来,如何根据年龄、时间、设备等属性变量增加微重力环境下运动应对理论与方法的适配性,擘画中国特色微重力环境运动应对理论创新体系和标准,是助力中国航天强国梦的基本逻辑和责任担当。

**关键词:**航天;微重力;运动应对;抗阻训练;有氧训练

**中图分类号:**G806 **文献标识码:**A

由于微重力或无重力环境的作用(如月球、火星表面重力为1/6 g和1/3 g),在短期和长期太空飞行中,航天员的心肺功能和骨骼肌系统都会受到一系列不利影响(Andrew et al., 2019; Sibongel et al., 2015; Widrick et al., 1999)。有研究指出,短期的航天飞行后(<3周),人体会失去10%~20%的肌肉,如果不采取积极有效的运动应对防护,在长期无重力或微重力飞行( $\geq 90$ 天)后肌肉量的下降可能会达到50%(Gallagher et al., 2005),而在无运动应对防护状态下7~15天的短期微重力环境就会使肌肉萎缩达到中等的显著降低效应(Andrew et al., 2019)。微重力环境运动应对(microgravity exercise countermeasures)主要是指通过身体运动的方式来对抗微重力或无重力环境给人体带来的各项生理影响(Cavanagh et al., 2005; James et al., 2019),如应对航天员在微重力、失重或低重力条件下骨骼肌萎缩及心肺功能下降等问题。早在20世纪70年代初期,有关微重力环境下的运动应对方案就已经在空间站任务中开展,苏联礼炮-1号空间站任务就针对心肺功能设计了测试评估方案,通过测试腿部深蹲来评价航天员心肺功能的一些参数变化(Degtyarev et al., 1975),并通过使用不同设备形成了不同形式的运动应对方案,运动应对微重力环境下的机体损耗逐渐成为各航天强国的一项重要保障性工作。

当前,以运动抗阻和心肺耐力为主的运动应对理论与实践正在不断发生创新性变化,设备已从早期的拉力器发展为飞轮抗阻、弹力带、功率车等(English et al., 2015; Lem, 1975),并进一步向着自动化、数字化、智能化、精准性及便捷性等方面发展,内容上正在走向力量、耐力、平衡、稳定和爆发力的协同化,方案上突出运动应对的精准性和时间效应,方法上注重有条件的组合优化。

2019年12月27日20时45分,中国空间站指定运载工具——长征五号遥三运载火箭发射成功,揭开了我国从航天大国向航天强国迈进的新步伐,中国航天正式进入新时代。2022年7月25日10时03分,中国航天员乘组顺利进入问天实验舱,这是中国航天员首次在轨进入科学实验舱,这就对如何应对我国航天员在微重力或失重环境所引起的肌肉萎缩、心肺功能下降以及骨钙流失等生理影响提出了新要求。为此,围绕此命题对微重力环境运动应对对人体影响的方法、手段、内容、效应、标准等进行梳理,从

收稿日期:2022-06-22; 修订日期:2022-08-29

基金项目:国家社会科学基金一般项目(20BTY029)

第一作者简介:董德朋(1988-),男,副教授,博士,主要研究方向为运动理论与方法,E-mail:depeng\_d@126.com。

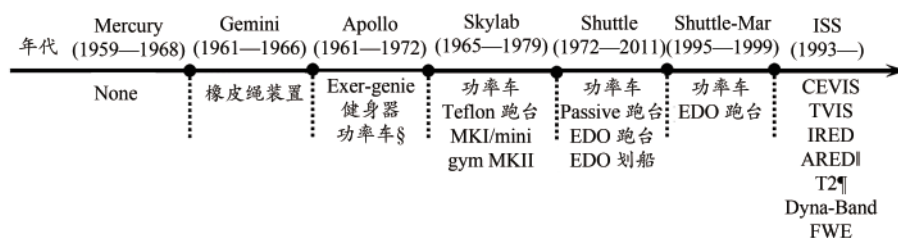
\*通信作者简介:汪毅(1980-),男,副教授,博士,主要研究方向为运动医学、航天医学,E-mail:wang-yi@ruc.edu.cn。

而擎画中国特色微重力环境运动应对标准和理论体系,是体育领域助力中国航天强国梦的责任担当。

### 1 微重力环境运动应对的基本内涵

从国际实践探索来看,针对航天员在微重力环境下的“运动应对”这一概念的英文表述有 microgravity exercise countermeasures、microgravity physical training 和 microgravity preventive countermeasures 等,但较为统一的是使用 microgravity exercise countermeasures,国内学者通常翻译为微重力的运动应对、运动防护或体育锻炼等,本义是指航天员通过身体运动的方式来应对微重力环境中身体机能的下降。苏联在早期的微重力环境运动应对理论方面做

出了突出贡献,Kakurin等(1978)较早提出了针对航天员的下体负压训练(lower body negative pressure, LBNP),并一直沿用至今。相对系统的研究起始于20世纪80年代,Davis等(1988)首次提出了“空间适应综合征”(space adaptation syndrome, SAS)这一概念,指出在失重环境中驻留可以引起机体多个系统发生适应性改变以及引发如肌萎缩、肌耐力下降和脊柱疼痛等病理生理性变化。伴随着这一理论的发展,运动应对方案不断突破早期单一的训练方式,进入了多设备、多手段以及多模式的训练时代,隔振健身踏车、隔振健身跑台、间歇性阻力运动设备、先进抗阻训练设备及虚拟现实技术等逐渐在国际空间站(International Space Station, ISS)得到应用(图1)。



注:CEVIS为隔振健身踏车(cycle ergometer with vibration isolation system),EDO为在轨加长跑台(extended duration orbiter),TVIS为隔振健身跑台(treadmill with vibration system),MKI/mini gym为等动绳索牵引装置(isokinetic rope and pull device),iRED为间歇性阻力运动设备(interim resistive exercise device),MKII为手柄式弹簧锻炼装置(handle and spring assembled exercise device),ARED为先进抗阻训练设备(advanced resistive exercise device),T2为第二代跑台(second-generation treadmill),Dyna-band为戴娜带(大型橡皮带),FWE为飞轮抗阻(fly-wheel ergometry);§表示因重量问题而退出,¶表示2009年开始使用,||表示2010年开始使用。

图1 太空飞行任务中运动应对装备变化

Figure 1. Equipment Changes of Exercise Countermeasures in Space Missions

运动应对的方法手段主要分为抗阻训练和有氧训练,抗阻训练主要使用拉力带、飞轮抗阻、企鹅服、弹性振动抗阻、负压筒等设备,通过向心和离心等不同收缩形式或组合形式提升应对效果;有氧训练主要借助下体负压跑台、功率车等设备进行心肺耐力训练。具体采用的方法有间歇训练法(包括高强度间歇)、持续训练法、重复训练法等(Alkner et al., 2004; Julia et al., 2017; Roberto et al., 2019)。此外,一些其他运动应对方法的研究也逐渐展开,如Chris等(2018)对航天员平衡能力及身体功能等进行了研究,Hakkinen等(2003)对航天员的神经控制能力进行了研究。

表1梳理了俄罗斯航天员和ISS航天员在微重力环境下的一些运动应对内容,可以看出,俄罗斯在骨组织、肌肉系统、心肺功能及运动控制系统方面形成了自己的运动应对特征,而ISS的训练范畴更为广泛且精细,除了骨组织、神经控制、有氧能力及肌组织以外,功能性评估、等速及心率控制等也成为运动应对重点内容或监控领域。我国在探索微重力环境下运动应对的过程中,形成了包括微重力表现、运动应对设备、运动应对程序以及运动应对评估等内容的理论体系(表2)。由此可见,微重力环境下的运动应对是以缓解或抵消微重力环境对机体的不利影响为目

的,针对骨、骨骼肌、心肺功能、身体功能、运动感觉系统及免疫系统进行的,以运动抗阻和心肺耐力训练为主要内容的运动方案。

### 2 运动应对的方案设计及应用效应

本文通过在CNKI、PubMed、SCI以及EBSCO等数据库中以“microgravity” and “exercise countermeasures” or “sport” or “training”、“astronaut” and “exercise” or “sport” or “training”、“space flight” and “exercise” or “sport” or “training”等不同组合为检索式对相关文献进行检索,并结合研究主题辐射内容,进一步以“blood flow” or “bed rest” and “intensity interval” or “resistance” or “aerobic” or “strength” and “training”进行文献补充。从既有研究来看(表3),微重力环境下的运动应对主要包括抗阻训练(传统抗阻和振动抗阻)、有氧防护训练(低强度持续有氧和高强度间歇)、有氧+抗阻训练及快速伸缩复合训练4个方面。为了便于对不同方案或标准进行展示和描述,本研究采用以下格式:运动应对措施或手段(负荷量或强度标准)×次数或时间×组数[间歇时间]×每天次数×每周天数(交替方案)×实验天数。其中,涉及多种手段或多个分组的采用(手段1+

手段2+……+手段n)方式列出, 缺失部分表明研究未提及此指标。

表1 国际航天员微重力环境下的运动应对内容

Table 1 Contents of Exercise Countermeasures for International Microgravity Environment

| 俄罗斯    |               | ISS    |                      |
|--------|---------------|--------|----------------------|
| 维度     | 内容            | 维度     | 内容                   |
| 骨组织    | 骨密度           | 骨组织    | 骨密度(全身、腰背、股骨颈、跟骨、前臂) |
|        | 股骨和胫骨肌群等速测试   | 倾斜测试   | 立位稳定测试               |
| 肌肉属性   | 胫骨强直收缩条件下肌腱测量 | 神经平台测试 | 神经平衡控制及感觉统合测试。       |
|        | 比目鱼肌测量(活检)    | 有氧能力   | 功率自行车(递增负荷测试)        |
|        | 心肺功能          | 跑台测试   | 功能性评估                |
| 心肺功能   | 功率自行车         | 在轨体能   | 柔韧、灵敏、力量、耐力、功率和平衡    |
|        | 上身功率测试        | 等速测试   | 动作操控相关的身体素质          |
|        | 运动控制系统        | 跟腱反射   | 心率控制                 |
| 前庭系统   | 平衡测量          | 肌组织    | 有氧运动期间的心率控制          |
|        | 力量测试          | 后期恢复   | 活检(腿部肌群)             |
|        | 头腿协调测试        |        | 各项体能表现               |
|        | 其他运动测试        |        |                      |
| 感觉适应测试 |               |        |                      |

注: 根据(Lori, 2015; Judith, 2015)综合编制。

## 2.1 抗阻运动方案

既有研究文献采取的抗阻运动方案主要是(1.2~1.8BW/70%~100%MIF/70%~100%1RM: 仰卧深蹲+提踵+脚蹬等)×(3~30 s)×(7~14次)×(4~5组)[1~2 min]×(3~6天/周)×(14~90天), 采用的训练设备通常为飞轮(图2)。虽然研究在实验周期、负荷强度以及运动手段上存在差异, 但均展示了在微重力环境中抗阻运动对肌肉防护的有效性。Andrew等(2019)采用太空飞行和临床医学公认的-6°头低位卧床实验模拟微重力环境, 发现航天员在这一实验环境下无运动应对时, 下肢肌肉总量14天就会产生中等效应的下降。而Akima等(2000)将-6°头低位卧床休息的9名男性分为抗阻运动组和对照组, 并通过离心机及间歇性耐力训练对抗阻运动组受试者进行实验干预, 20天后抗阻运动组腿部肌肉总量得到有效保持, 对照组却明显下降; Bjorn等(2004)则在90天的-6°头低位卧床实验中, 采用仰蹲和脚蹬训练使受试者的腿部肌肉总量得到有效保持。

但既有研究仍然存在一定的局限, 表现为抗阻运动方

案的训练效应主要是基于对下肢肌肉总量的诊断和测评所设计的实验而来, 缺乏对上肢等全身性的关注。Arbeille等(2008)针对24名女性设置了-6°头低位卧床实验环境, 并对训练组进行仰卧下蹲(全力)7次×4[2 min]+脚蹬(全力)14次×4[2 min]×3次/周×55天的实验训练, 结果证实, 训练组的股四头肌肌肉总量没有产生显著变化, 但对照组却显著下降, 说明抗阻运动在微重力环境中对下肢肌肉具有积极的防护效应。Bamman等(1997)则同样在-6°头低位卧床休息的环境下对16名男性进行了分组研究, 实验组采用仰卧抗阻(恒定负荷)6~10次×5[2 min]×30 min×14天的应对方案, 结果表明, 实验组受试者跖屈肌群的1RM及做功能力有所提高。Gallagher等(2007)也采用-6°头低位卧床实验环境, 对17名健康男性进行分组实验, 实验组采用飞轮抗阻(最大向心+离心收缩)7次×4[2 min]+提踵14次×4组)×1次/3天×84天的运动应对方案, 结果发现, 实验组腿部股外侧肌和比目鱼肌的肌球蛋白重链(myosin heavy chain, MHC)增加了10%, 腿部肌肉获得了较好的训练效应。可以看出, 当前针对下肢的抗阻运动方案相对全面, 而全身性的抗阻运动训练理论与实践研究有待进一步探索。

表2 中国航天员微重力环境下的运动应对内容

Table 2 List of Exercise Countermeasures under Microgravity Environment in China

| 表现     | 措施      | 程序      | 评估     |
|--------|---------|---------|--------|
| 骨丢失    | 身体训练    | 运动程序    | 心血管    |
| ·骨折风险  | ·太空跑台   | ·中等强度   | ·超声    |
| ·肾结石   | ·太空功率车  | 训练      | ·倾斜测试  |
| 骨骼肌萎缩  | 失重      | ·高强度间歇  | ·血速    |
| ·肌肉总量↓ | ·抗重力服   | 训练      | 肌肉     |
| ·肌肉质量↓ | ·LBNP   | 力量训练    | ·肌肉总量  |
| ·腰背疼痛  | ·重力模拟   | ·力量耐力   | ·肌肉力量  |
| 心血管    | 目标保护    | 运动      | ·肌肉耐力  |
| ·立位耐力↓ | ·肌肉电刺激  | ·爆发性运动  | ·MVC   |
| ·有氧能力↓ | ·骨骼振动刺激 | 专门化训练   | ·1RM   |
| ·G-耐力↓ | 药物方法    | ·手臂运动   | ·步态    |
| 感觉系统   | ·二磷酸盐   | ·呼吸机运动  | 骨      |
| ·空间运动  | 模拟平台    | 保护性程序   | ·骨密度   |
| 风险     | ·零重力跑步  | ·抗重力服装  | ·骨代谢   |
| ·空间失向  | 模拟      | ·LBNP程序 | ·心肺功能  |
|        | ·仰卧抗阻训练 | ·药物剂量   | ·有氧能力  |
|        | ·仰卧自行车  |         | 免疫和内分泌 |
|        | 训练      |         | ·压力测试  |
|        | ·结构性服装  |         | ·T淋巴   |
|        |         |         | ·B淋巴   |
|        |         |         | ·K细胞   |
|        |         |         | ·单核细胞  |
|        |         |         | ·巨噬细胞  |
|        |         |         | ·潜伏性病毒 |

注: MVC为最大自主收缩(maximum voluntary contraction); 根据(Linjie et al., 2019)编制。

表3 不同研究中的运动应对方案设计及其效果

Table 3 Scheme Design and Effect of Different Research Exercise Countermeasures

| 研究者                  | 受试(n, 年龄/岁)            | 运动方案   | 训练效果  |
|----------------------|------------------------|--|---|
| Akima等<br>(2000)     | 健康男性<br>(9, 24±2.7)    | Br-Tr(5): 静力脚蹬(最大力量)3S×30[30 s]/天×20天<br>Br-Cont(4): 无干预   | Br-Tr: 膝关节伸肌PCSA无变化; 膝关节屈肌、跖屈及MVC ↓<br>Br-Cont: ↓                   |
| Akima等<br>(2003)     | 健康男性<br>(12, 23±2)     | Br-Tr(6): 动态蹬伸(70%MIF)上午: 10次×5[1 min]/天×20天<br>跖屈(70%MIF)下午: 10次×5[1 min]/天×20天<br>Br-Cont(6): 无干预  | Br-Tr: 跖屈肌(PF)PCSA无变化, 力矩无变化。<br>Br-Cont: ↓                         |
| Akima等<br>(2005)     | 健康男性<br>(12, 22.4±3.4) | Br-Tr(6): 两个阶段(每个阶段20 min[10 min])/天×20天(间隔1天, 共10天)<br>第一阶段功率车(60 w, 0.8-1.4 G): 20 min×1×20天<br>第二阶段功率车(60 w, 0.3 G): (40% $\dot{V}O_{2max}$ (2 min)+60% $\dot{V}O_{2max}$ (3 min)+40% $\dot{V}O_{2max}$ (2 min)+70% $\dot{V}O_{2max}$ (3 min)+40% $\dot{V}O_{2max}$ (2 min)+80% $\dot{V}O_{2max}$ (3 min)+40% $\dot{V}O_{2max}$ (2 min)+80% $\dot{V}O_{2max}$ (3 min))×20天<br>Br-Cont(6): 无干预 | Br-Tr: 腿部肌肉量无差异, 膝关节MVC和EMG ↓<br>Br-Cont: ↓                         |
| Akima等<br>(2007)     | 健康男性<br>(12, 23.3±4.9) | Br-Tr(6): 上午动力性脚蹬(70%MIF)10次×5[1 min]/天×16天(20天)<br>下午跖屈(70%MIF)10次×5[1 min]/天×16天(20天)<br>Br-Cont: 无干预。   | Br-Tr: 肌肉量无差异<br>Br-Cont: ↓   |
| Bjorn等<br>(2004)     | 健康男性<br>(17, 26~41)    | Br-Tr(8): (仰蹲(次最大强度)7次×4组[2 min]+脚蹬(次最大强度)14次×4组[2 min])×3天/周×90天<br>Br-Cont(9): 无干预   | Br-Tr: 肌肉量、肌力、功率、力矩、EMG无显著变化。<br>Br-Cont: ↓                         |
| Bjorn等<br>(2016)     | 健康男性<br>(17, 26~41)    | Br-Tr(8): 仰蹲(1RM)7次×5组[2 min]×1次/3天×90天<br>Br-Tr(9): 无干预   | Br-Tr: RFD(肌力变化率)无显著差异, 最大力矩(Maximal Torque)、等动力量 ↓<br>Br-Cont: ↓   |
| Donald等<br>(2000)    | 健康男性<br>(8, 24~49)     | Br-Tr(4): 仰卧跑台(1.0-1.2BW)40 min×1次/天×15天<br>Br-Cont(4): 无干预  | Br-Tr: Te(耗竭时间)、 $\dot{V}O_{2max}$ 、冲刺速度等无显著差异。<br>Br-Cont: ↓       |
| Arbeille等<br>(2008)  | 健康男性<br>(16, 31±1)     | Br-Tr(8): (仰卧下蹲(全力)7次×4[2 min]+脚蹬(全力)14次×4组[2 min])×3天/周×55天<br>Br-Cont(8): 无干预  | Br-Tr: 股四头肌体积无变化。<br>Br-Cont: ↓                                     |
| Bamman等<br>(1997)    | 健康男性<br>(16, 28±5.2)   | Br-Tr(8): 仰卧抗阻(恒定负荷)6-10次×5[2 min]×30 min×14天。<br>Br-Cont(8): 无干预  | Br-Tr: 跖屈(1RM)、力矩、功率 ↑<br>跖屈EMG无变化<br>Br-Cont: 跖屈(1RM) ↓ EMG和力矩无变化。 |
| Amorim等<br>(2006)    | 双胞胎男性<br>(30, 26±4)    | Br-Tr(16): 跑步机跑动(40%-80% $\dot{V}O_{2max}$ )×40 min×6天/周×20天<br>Br-Cont(14): 无干预   | Br-Tr: 膝关节、踝关节最大力矩无变化。<br>Br-Cont: ↓                                |
| Rittweger等<br>(2010) | 健康男性<br>(9, 33.4±6.6)  | Br-Tr(5): 振动抗阻(全身75%-85%1RM)×30 min×2[4-6 min]×56天<br>Br-Cont(4): 无干预  | Br-Tr: 小腿三头肌无明显变化, 腓绳肌 ↓<br>Br-Cont: 腓绳肌 ↓                          |
| Belave等<br>(2009)    | 健康男性<br>(20, 20~45)    | Br-Tr(10): 振动抗阻(恒定负荷, 75%-85%1RM)(40 s下蹲+40 s提踵+40 s足背屈)×30 min[2 min]×2次/天×5天/周×3周<br>Br-Cont(10): 无干预  | Br-Tr: RMS无变化。<br>Br-Cont: ↓  |
| Duvoisin等<br>(1989)  | 健康男性<br>(14, 22.3±2)   | Br-Tr(7): EMS(60 Hz脉冲)训练×5 min×4[10 min]×3天[1天]×30天<br>Br-Cont(7): 无干预   | Br-Tr: 膝踝屈伸肌力矩 ↑<br>Br-Tr: ↓  |
| Gast等<br>(2012)      | 健康男性<br>(24, 26.7±3.4) | Br-Tr(12): (1.3倍自身体质量提踵+75%-85%1RM双腿加压+1.8倍自身体质量提踵+1.5倍自身体质量踝背屈)×6 min×3天/周×60天<br>Br-Cont(12): 无干预  | Br-Tr: 跳跃能力 ↑<br>15米和30米冲刺 ↑<br>Br-Cont: ↓                          |
| Germain等<br>(1995)   | 健康男性<br>(12, ?)        | Br-Tr(12): (硬举(34-40 min)+静蹲(15-30 s))×22 min/天×20天<br>Br-Cont(12): 无干预  | Br-Tr: 峰值力矩 ↑<br>Br-Cont: ↓   |
| Greenleaf等<br>(1994) | 健康男性<br>(19, ?)        | Br-Tr(10): 等张和等速训练<br>Br-Cont(9): 无干预  | Br-Tr: 伸膝总功和峰值力矩不变。<br>Br-Cont: ↓                                   |
| Greenleaf等<br>(1989) | 健康男性<br>(19, ?)        | Br-Tr(10): 跑台(60%-90% $\dot{V}O_{2max}$ )×30 min×5天/周×30天<br>Br-Cont(9): 无干预   | Br-Tr: 峰值力矩及耐力无变化。<br>Br-Cont: ↓                                    |

(续表3)

| 研究者                  | 受试(n, 年龄/岁)             | 运动方案   | 训练效果  |
|----------------------|-------------------------|--|---|
| Greenleaf等<br>(1994) | 健康男性<br>(19, 36±4)      | Br-Tr(10): 跑台(40%, 50%, 60%, 70%, 80% $\dot{V}O_{2max}$ )×2 min[50 s]×30天<br>Br-Cont(9): 无干预   | Br-Tr: 肌肉量↓<br>Br-Cont: ↓   |
| Krainski等<br>(2014)  | 健康男性<br>(18, ?)         | Br-Tr(9): 划船(80%HR <sub>max</sub> )×30 min×6天/周×5周<br>Br-Cont(9): 无干预  | Br-Tr: 肌肉量不变<br>Br-Cont: ↓  |
| Lee等<br>(2014)       | 健康女性<br>(24, ?)         | Br-Tr(12): (仰卧平板+最大向心离心飞轮抗阻)×20 min×3天/周×30天<br>Br-Cont(12): 无干预   | Br-Tr: 膝关节和踝部力量不变。<br>Br-Cont: ↓  |
| Mulder等<br>(2009)    | 健康男性<br>(22, 21~45)     | Br-Tr(11): 振动抗阻(全身)×5-6 min[2 min]×23 min×3天/周×60天。<br>Br-Cont(11): 无干预  | Br-Tr: MVC无变化<br>Br-Cont: ↓   |
| Mulder等<br>(2007)    | 健康男性<br>(17, 32.7±4.8)  | Br-Tr(9): 振动抗阻(19 Hz)(深蹲、提踵、跖屈和深蹲)×4[2 min]×6天/周×56天<br>Br-Cont(8): 无干预  | Br-Tr: MVT(最大收缩力矩)略有下降。<br>Br-Cont: ↓   |
| Belavy等<br>(2013)    | 健康男性<br>(24, 32.2±10.4) | Br-Tr(12): (振动抗阻(8.7G加速度, 24 Hz)+1.3倍自重单腿提踵(26 Hz)+1.8倍自重双腿提踵(26 Hz)+1.5倍踝背屈(16 Hz))×5 min×3组[2 min]×60天<br>Br-Cont(12): 无干预   | Br-Tr: 腓肠肌、比目鱼肌、拇长屈肌和趾长屈肌下降不明显。<br>Br-Cont: ↓   |
| Trappe等<br>(2007)    | 健康女性<br>(24, ?)         | Br-Tr(12): 1. 仰卧下蹲(最大收缩)7次×4×3次/周×60天; 2. 跑步机(1.2倍BW)(40% $\dot{V}O_{2max}$ 7 min, 60% $\dot{V}O_{2max}$ 3 min, 40% $\dot{V}O_{2max}$ 2 min, 70% $\dot{V}O_{2max}$ 3 min, 50% $\dot{V}O_{2max}$ 2 min, 80% $\dot{V}O_{2max}$ 3 min, 60% $\dot{V}O_{2max}$ 2 min, 80% $\dot{V}O_{2max}$ 3 min, 50% $\dot{V}O_{2max}$ 2 min, 70% $\dot{V}O_{2max}$ 3 min, 40% $\dot{V}O_{2max}$ 2 min, 60% $\dot{V}O_{2max}$ 3 min, 40% $\dot{V}O_{2max}$ 5 min)40 min×1次/2天×60天<br>Br-Cont(12): 无干预 | Br-Tr: 肌肉体积和肌肉质量略有下降。<br>Br-Cont: ↓   |
| Watenpauh等<br>(2000) | 健康男性<br>(7, 24~49)      | Br-Tr(3): 仰卧跑台(1.2倍BW)(40% $\dot{V}O_{2max}$ 7 min, 60% $\dot{V}O_{2max}$ 3 min, 40% $\dot{V}O_{2max}$ 2 min, 70% $\dot{V}O_{2max}$ 3 min, 50% $\dot{V}O_{2max}$ 2 min, 80% $\dot{V}O_{2max}$ 3 min, 60% $\dot{V}O_{2max}$ 2 min, 80% $\dot{V}O_{2max}$ 3 min, 50% $\dot{V}O_{2max}$ 2 min, 40% $\dot{V}O_{2max}$ 5 min)40 min/天×15天<br>Br-Cont(4): 无干预  | Br-Tr: $\dot{V}O_{2max}$ 不变; 耗竭时间、短距离冲刺↓<br>Br-Cont: ↓                                    |
| Dillon等<br>(2019)    | 健康男性<br>(24, 35±8)      | Br-Tr(12): 高强度间歇有氧训练(1次/2天)+力量抗阻(1次/天)+持续有氧(与高强度间歇交替进行)×70天<br>Br-Cont(12): 无干预  | Br-Tr: 肌肉量不变<br>Br-Cont: ↓  |
| Tobias等<br>(2019)    | 健康男性<br>(8, 29.4±5.2)   | Br-Tr(8): 跑台跳跃(0.7G, 0.38G, 0.27G, 0.16G)×30S×3[2 min]<br>Br-Cont: 无(表示无对照组)   | 最大垂直反作用力(GRF)and 跳跃高度(Hopping height)↑  |
| Andreas等<br>(2017)   | 健康男性<br>(23, 29±6)      | Br-Tr(12): (跳跃训练(徒手双脚跳)10次×4[1 min]+(徒手单脚跳)10次×2[1 min])×5-6天/周×60天<br>Br-Cont(11): 无干预  | Br-Tr: 峰值力量, 峰值功率及跳跃高度保持不变。<br>Br-Cont: 肌肉质量↓基础心率↑  |
| Gallagher等<br>(2005) | 健康男性<br>(17, 32±1)      | Br-Tr(8): (飞轮抗阻(最大向心离心收缩)7次×4[2 min]+提踵(14次×4组)[2 min])×1次/3天×84天<br>Br-Cont(9): 无干预   | Br-Tr: MHC(myosin heavy chain)I↓<br>MHCIIa 不变, hybrids↑<br>Br-Cont: MHCI和MHCIIa↓ hybrids↑ |
| Rittweger等<br>(2009) | 健康男性<br>(24, 32±4.2)    | Br-TR(9): (飞轮抗阻(最大向心离心收缩)7次×4[2 min]+腿蹬(14次×4组)[2 min])×1次/3天×90天<br>Br-Cont(9): 无干预<br>Br-Pam(6): 药物干预  | Br-Tr: 小腿肌肉横截面积和骨的恢复速度明显(1年以上)。<br>Br-Cont: 小腿肌肉 PCSA↓, 骨恢复速度慢。<br>Br-Pam: 骨的恢复速度大约1年以上。  |

注: Br-Tr为训练组(bed rest-training), Br-Cont为对照组(bed rest-control), PCSA为横截面积(physiological cross-sectional area), MVC为最大自主收缩(Maximum Voluntary Contraction), MIF为最大等长收缩(maximal isometric force), ?表示未注明, 无干预为-6°头低位卧床(head down bedrest; HDBR), GRF为地面反作用力(ground reaction force), ↓表示显著下降, ↑表示显著上升。

## 2.2 振动抗阻方案

振动训练也称为周期性机械振荡训练。20世纪初, 随着人们对振动技术研究的深入, 振动训练得以流行, 主要用于肌肉力量训练与运动康复领域。Johnston等(1970)发

现, 对肌肉和肌腱进行局部振动刺激能够引起肌肉收缩力量的增长。Hagbarth等(1968)通过对75名患有中枢运动障碍患者的肱二头肌、股四头肌进行10~200 Hz的振动刺激, 结果发现, 10~200 Hz的振动刺激会使肌腹、肌腱产

生收缩性反应,并提出振动训练可以广泛应用于力量训练与运动康复中。随着航空航天技术的发展,振动抗阻训练

也作为一种微重力环境下的运动应对手段逐渐得到应用。

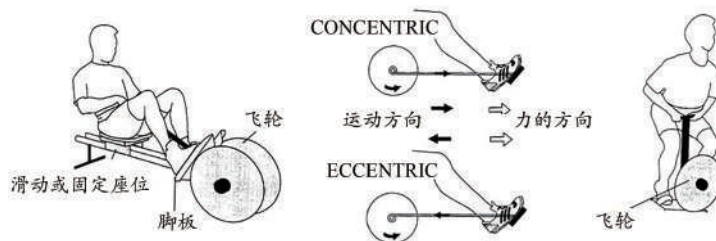


图2 微重力环境飞轮抗阻运动方式

Figure 2. Flywheel Resistance Training Mode in Microgravity Environment

微重力环境下运动应对方案的振动频率一般设定为16~26 Hz,负荷设计通常采用振动抗阻(70%~90%1RM或恒定负荷或16~26 Hz)×时间×组数[间歇]×每周天数×总天数,时间为4~30 min不等,主要采用仰卧下蹲、提踵(单双腿)、足背屈和深蹲等动作(Mulder et al., 2010; Belavy et al., 2013)。Rittweger等(2010)将-6°头低位卧床的健康男性分为控制组和实验组,实验组采用伽利略空间训练设备(平台振动主要来自身体质量的离心旋转,并使用弹簧装置以替代重力;图3),以75%~85%1RM的负荷强度,进行30 min×2[4-6 min]/天×28天的全身振动抗阻训练,结果表明,实验组受试者的小腿三头肌等肌力无明显下降,仅腓绳肌有一定程度的下降,肌肉力量得到较好保持。Buching等(2011)将参与-6°头低位卧床实验的20名男性平均分为实验组和对照组,实验组进行(下蹲40 s+提踵40 s+足背屈40 s+踢腿10次)×30 min[2 min]×2次/天×5天/周×3周的振动抗阻实验,结果表明,实验组的足底屈曲力的肌电均方根值(root mean square, RMS)无明显变化,对照组却出现明显下降,从而提出振动抗阻在维持足底屈曲力上具有有效性。以上研究说明在微重力环境下通过振动抗阻训练来进行运动应对具有重要价值,但多数研究的实验效应集中于肌肉力量方面,对肌腱、韧带等进行深层次的运动解剖学评价较少。未来,微重力环境下运动应对的抗阻训练方案应该超越仅是保护肌肉这一单一维度,实现对骨骼肌、肌腱、韧带以及关节等综合效应的研判。

### 2.3 有氧运动方案

有氧运动主要有持续性有氧运动和间歇性有氧运动,持续性有氧运动一般训练负荷强度较低(小于无氧阈),间歇性有氧运动由于训练负荷强度偏高,所以往往被称之为高强度间歇训练(high intensity interval training, HIIT)。根据组织形式的不同,间歇训练可以提高运动员、普通人群的有氧和无氧代谢能力(黎涌明,2015)。由此,持续性有氧与HIIT便成为微重力环境下运动应对的多重选择方案。在持续性有氧训练方面,既有研究通常采用跑台或功率车进行实验设计(图4)。Donald等(2000)将男性受试者分

为实验组和控制组,实验组采用仰卧跑台×40 min(1.0-1.2BW)/天×15天的训练方案,结果表明,实验前后的实验组男性在达到耗竭的时间(time to exhaustion, Te)和最大摄氧量( $\dot{V}O_{2max}$ )等指标上无显著差异,控制组则明显下降。上述实验证明持续性有氧训练具有良好的运动应对效应,但由于航天员的时间珍贵,HIIT逐渐成为微重力环境下的更优选择。Thomas等(2019)认为,HIIT可以为人体带来一些益处:1)身体机能在短期内获得高强度的生理刺激,使其出现过量氧耗,从而提升 $\dot{V}O_{2max}$ 以及血红蛋白含量;2)身体素质在耐力、协调等方面受到多元效应影响,提高动作的经济性;3)避免有氧运动方案使用单一的運動模式,提高训练的持续性;4)可以对上下肢肌群进行神经肌肉激活,提高反应能力。



图3 微重力环境振动抗阻训练设备

Figure 3. Vibration Resistance Training Equipment in Microgravity Environment

微重力环境中HIIT更多地被界定为次最大或接近最大心率的训练(>80%HR<sub>max</sub>)或短间歇训练(Sprint Interval Training, SIT, 负荷强度>100% $\dot{V}O_{2max}$ )(Weston et al., 2014; MacInnis et al., 2017)。大量研究证实了HIIT是一种提高 $\dot{V}O_{2max}$ 的有效策略(Astorino et al., 2017; Helgerud et al., 2007),但由于当前多数研究的受试者年龄相对较低,而从事航天员的年龄相对较大(普遍40岁以上),为此,对适用于航天员参与的HIIT方案中的负荷量与强度上还需做出进一步的理论研究和实验验证。

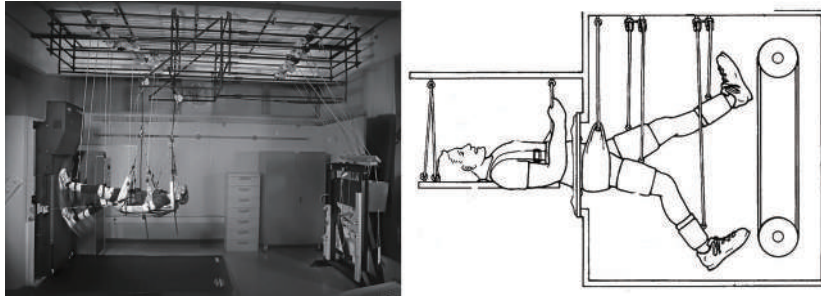


图4 下体负压训练跑台(Watenpaugh et al., 2000)

Figure 4. Lower Body Negative Pressure Treadmill(Watenpaugh et al., 2000)

同时,传统的HIIT往往是使用跑台或功率车进行,以跑动为主要运动形式,但这种方式通常不会增加肌肉力量。对处于微重力环境下的航天员来说,不仅需要提高其心肺耐力,更需要保持其综合运动能力,尤其是防止肌肉力量的下降(Christopher et al., 2019)。为此,越来越多的研究开始以抗阻性的HIIT来同步提升心肺功能与肌肉力量,学界称之为高强度间歇抗阻训练,也称为高强度功能训练(high-intensity interval resistance training, HIRT)(Antonio et al., 2012; Feito et al., 2018; Marin et al., 2020),并通过实验证实HIRT能够使受试者在有限的时间内提高 $\dot{V}O_{2max}$ 、下肢肌肉功率、上下肢1RM和肌耐力(Buckley et al., 2015; Sperlich et al., 2017)。目前,针对HIIT的研究已相对普遍,如ISS当前采用的就是 $(70\% \sim 80\%)HR_{max} \times (30 \sim 40) \text{ min}$ 或间歇性有氧功率车(全力)20 s $\times$ 8[10 s]的有氧运动方案,但针对微重力环境下HIRT的理论与实践研究还较为有限。

#### 2.4 抗阻+有氧运动方案

抗阻+有氧是指单纯抗阻和单纯有氧分别进行的方式(Helgerud et al., 2007; McHugh et al., 2002; Sousa et al., 2019),如ISS使用的抗阻+有氧间隔安排的训练方式(表4)。目前,这种方案是微重力环境运动应对选择的主要依据,应对效果与HIRT相似,但在训练时间、训练量、训练方式和训练顺序等方面有所不同。

表4 国际空间站抗阻+有氧训练时间安排/min

Table 4 Example of ISS Resistance + Aerobic Combination Mode

| 方式   | 星期一   | 星期二 | 星期三   | 星期四 | 星期五   | 星期六 |
|------|-------|-----|-------|-----|-------|-----|
| 抗阻   | 35~60 |     | 35~60 |     | 35~60 |     |
| 间歇有氧 |       | 32  |       | 15  |       | 35  |
| 持续有氧 | 30    |     | 30    |     | 30    |     |

注:来自NTRS-NASA官网(An Evidence-Based Approach To Exercise Prescriptions on ISS-NASA Technical Reports Server (NTRS))。

在训练时间上,因HIRT不需要分2个时间段完成(Gibala et al., 2006),因此抗阻+有氧方案需要的运动时间相对较长。在训练量上,抗阻+有氧运动方案中的抗阻训练和有氧训练比例一般为1:1或3:1(Jones et al.,

2013; Thomas et al., 2019),考虑到有氧比例的增加会有损力量素质的保持,绝大多数研究支持抗阻训练占较大比例(Jones et al., 2016; Wilson et al., 2012),HIRT则是在抗阻训练中通过安排机体不完全恢复的间歇时间而形成的训练方法。所以不存在抗阻和有氧比例匹配的问题。在训练方式上,抗阻+有氧采用抗阻类的飞轮、弹力带、气阻与有氧类的跑台、功率车、划船等器械(Gibala et al., 2006; Maroto et al., 2017; Wilson et al., 2012)结合使用进行训练,而HIRT仅采用抗阻器械来进行间歇性训练。

此外,训练顺序是抗阻+有氧运动方案关注的焦点问题,而HIRT对此关注较少。目前,抗阻和有氧运动的训练安排通常有“有氧前抗阻后”(endurance-strength, ES)和“抗阻前有氧后”(strength-endurance, SE)两种。Docherty等(2000)的研究支持ES的顺序安排,认为力量训练在前可能会影响快速力量和力量耐力的发展和适应,而更多的研究则支持SE的顺序安排,认为这种安排更有助于提高动力性力量(Eddens et al., 2018)。由于抗阻和有氧训练的间隔时间可能会对急性和慢性力量表现产生一些影响(Sporer et al., 2003),因此,SE这种安排顺序之间的间隔可能需要6 h左右才能避免在有氧训练之后力量的损失(Robineau et al., 2016),且如果时间不够充裕,应保持最低4 h的间歇时间(James et al., 2019; Murach et al., 2018)。

由于航天员在微重力环境中既需要保持一定的肌肉力量,也需要一定的有氧能力,为此,抗阻+有氧运动方案在微重力环境运动应对中得到广泛的探索与应用,且证明具有较为理想的运动应对效果。Murach等(2018)让-6°头低位卧床休息的8名男性进行飞轮抗阻+有氧训练(持续或间歇)实验,70天后发现受试者的比目鱼肌有所增强,毛细血管、代谢酶有所提高。由此来看,抗阻+有氧运动在微重力环境下是一种较为理想的运动应对选择方式,能够对航天员起到肌肉含量增长和心肺功能提升的作用效果,且在训练时间、训练量、训练方式以及训练安排上逐步形成了较为明确的方案体系。

#### 2.5 快速伸缩复合训练方案

快速伸缩复合训练起源于20世纪60年代末,是苏联的Yuri V教授在田径训练时采用的一种方法,当时称之为

shock method, 国际上通常称之为 Plyometrics 训练, 80 年代之后该方式得到了广泛应用。1984 年出版的我国《运动生理学》中引用了“plyometric exercise”一词, 并翻译为“超等长训练”。从国内外文献来看, 关于这一训练方式的称谓表现不一, 有 plyometric hops、plyometrics、jump training、deep jump 以及 plyometric bouncing 等, 但其核心都是通过肌肉的快速拉长-缩短来提高快速力量和爆发力 (Chmielewski et al., 2006), 主要通过离心阶段、离心-向心耦联(时间极短)及向心阶段 3 个阶段来完成。

既有研究显示, 在微重力模拟环境中快速伸缩复合训练对人体快速力量、爆发力量的保持具有积极效应。Kramer 等(2010)设计了新型雪橇跳跃系统(sledge jump system, SJS)模拟失重环境, 以 21 名健康人士[(24±4)岁]为测试对象进行跳跃实验(图 5), 证明了快速伸缩复合训练对爆发力的积极意义。Andreas 等(2017)将-6°头低位卧床休息的男性受试者分为训练组和对照组, 训练组采用(双脚跳 10 次×4+单脚跳 10 次×2)×5~6 天/周×60 天的实验方案, 结果表明, 训练组的跳跃峰值功率、峰值力、高度等保持不变, 而实验组却显著下降。Tobias(2019)选取了 8 名健康男性志愿者[(29.4±5.2)岁]进行垂直跑台跳跃[(0.7 g, 0.38 g, 0.27 g, 0.16 g)×30 s×3]实验, 结果证实, 双侧峰值反作用力伴随着跳跃高度的增加而增加, 但该研究在跳跃高度上进行了限定(20 cm), 这一结果是否适用于更高的跳跃高度尚缺乏足够的实验证据。

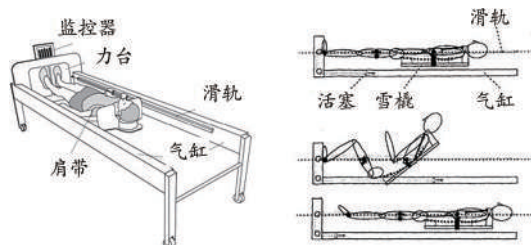


图 5 雪橇车快速伸缩复合训练设备

Figure 5. Sledge Fast Telescopic Composite Training Equipment

然而, 有研究指出, 快速伸缩复合训练在短期内可能会造成肌肉或韧带损伤 (Kyrolainen et al., 2005), 且由于受荷尔蒙及生理结构的影响 (Erik et al., 2015), 女性韧带受伤概率会大大增加, 这可能会对女性航天员在微重力环境下产生更为不利的影响。为此, 快速伸缩复合训练与力量训练相结合的组合式训练可能更为可取(当前通常称之为复合式训练), 其中, 快速伸缩复合训练与抗阻练习的结合最为常见 (张可盈等, 2017)。尽管 Peterson 等(2004)的研究证实了这种训练可以预防人体膝关节和踝关节损伤, 但针对女性受试者的有关探讨却并不多见。从以上证据中可以发现, 快速伸缩复合训练可以对肌肉的快速力量、爆发力量具有积极影响, 但需要注意它所引起的负面效应。

### 3 微重力环境运动应对方案的未来探索

#### 3.1 HIIT 如何保障力量效应

航天员微重力环境中的 HIIT 主要呈现出低量高强度 (low-volume HIIT, HIIT<sub>LV</sub>)、高量高强度 (High-Volume HIIT, HIIT<sub>HV</sub>) 和冲刺间歇训练 (sprint interval training, SIT) 3 种应用模式, 并随着研究的不断进展逐渐形成了高强度间歇抗阻训练 (high intensity interval resistance training, HIRT) 和高强度循环训练 (high intensity circuit training, HICT) 等方式 (表 5)。在微重力运动应对的理论与实践探索中, 传统上的高强度训练以 Greenleaf 等(1994)确立的间歇训练方案为典型代表 ((40%~80% $\dot{V}O_{2max}$ ) 跑台 [2 min]+等速抗阻 (膝关节屈伸) 10 min×5 [2 min]×30 天), 但该方案的应用结果显示肌肉总量会有所下降。Kirk 等(2020)采用 ISS 的 HIIT 方案中的 SPRINT (experiment group that performed a high intensity /lower volume exercise prescription) 设计, 对 26 名 ISS 航天员进行了 (跑台 (2.4~19.3 km/h) 100% $\dot{V}O_{2max}$  30 s×8 [15 s] +70%~90% $\dot{V}O_{2max}$  2 min×6 [2 min] +85%  $\dot{V}O_{2max}$  4 min×4 [3 min])×3 天/周的实验研究, 结果显示, 航天员的膝伸肌峰值扭矩有所降低, 而  $\dot{V}O_{2max}$  得到保持。

表 5 高强度间歇训练方式的不同类型

Table 5 Different Types of High Intensity Interval Training

| 类型                          | 强度   | 重复次数    | 间歇时间/s     | 每组累积间歇持续时间/min | 负荷间歇比   |
|-----------------------------|--|---------|------------|----------------|---------|
| 低量高强度 (HIIT <sub>LV</sub> ) | 80%~100% $\dot{V}O_{2max}$ 或 HR <sub>max</sub> | 1~10    | 60~240     | <15            | 1:1-1:2 |
| 高量高强度 (HIIT <sub>HV</sub> ) | 80%~100% $\dot{V}O_{2max}$ 或 HR <sub>max</sub> | ≥4      | 60~240     | ≥15            | 1:1-1:2 |
| 冲刺间歇训练 (SIT)                | >100% 最大功率/ $\dot{V}O_{2max}$ , 全力             | ≥4      | 8~30       | <10            | 1:1-1:9 |
| 高强度间歇抗阻训练 (HIRT)            | 60-100%1RM, 耗竭                                 | ≤10     | 30~60      | <25            | 1:1-1:2 |
| 高强度循环训练 (HICT)              | 60%~80%1RM/ $\dot{V}O_{2max}$                  | 15~20 次 | 15~180 /动作 | 7~14           | 1:1-1:2 |

注: 依据 (Angelo et al., 2021; Gibala et al., 2014; Sultana et al., 2019) 编制。

以上研究表明, HIIT 对于航天员的  $\dot{V}O_{2max}$ 、肺通气量等心肺耐力指标的影响是积极的, 但对肌肉功能的影响作用尚未确定。为此, 越来越多的研究开始转向 HIRT 和 HICT。从现有研究报道来看, HIRT 注重采用单一的抗阻手段进行训练刺激, 因此, 对肌肉力量的影响效应较为明显 (Barnes et al., 2013; Ramos et al., 2017)。HIRT 主要有两种运动方案: 1) 注重抗阻强度, Tatiana (2020) 针对健康年轻人群 [(22.15±1.95) 岁] 提出了 (80%1RM 腿蹬×6 次×3 [20 s] + (卧推+硬拉+高位下拉+肩推+臂屈伸) 80%1RM (耗竭) ×2~3 组 [20 s]) ×3 次/周 [1 天] ×6 周的训练方案; 2) 注重间歇时间的控制, Laura (2022) 设



计了(脚蹬+卧推+硬拉+背飞+提拉+前蹲+划船) 40%-60%1RM×10次×3-5组[30 s]×3次/周[1天]×7周实验方案,但结果显示这种训练方式对心肺功能的影响并不理想。

HICT是在HIRT的基础上,由美国运动医学会(American College of Sports Medicine, ACSM)改进的一种训练方式(主要包括开合跳、坐太空椅、伏地挺身、捲腹、登阶、深蹲、三角肌撑体、平板支撑、原地高抬腿、弓步、T型伏地挺身、侧平板支撑12个经典动作)。Schmidt等(2016)招募了53名女性和43名男性大学生为测试对象,分为CT-7(7 min高强度循环)组、CT-14(14 min高强度循环)组及对照组进行实验,证实了HICT在肌耐力方面和有氧能力方面的积极意义。此后,研究者也进一步验证了HICT对人体肌耐力和有氧能力的保持和提升具有重要作用(Marquez et al., 2017; Nunez et al., 2020)。

微重力环境下肌肉力量的保持至关重要,同时,积极的心肺耐力训练可以保证航天员在微重力环境中持续工作的能力。因此,微重力环境中的HIIT可能更需要通过HIRT和HICT两种方式实现有氧与肌力的双重训练效应(Marin et al., 2020; Nunez et al., 2018)。但该种训练模式针对微重力环境的模拟研究或在轨实验研究还不多见,对微重力环境中的航天员群体表现效应如何?长期的训练效应又会产生怎样的变化?这些问题也有待于深入探究。

### 3.2 力量和有氧训练如何实现最佳化

有氧能力与力量训练存在一定的兼容性或是交互效应,因此,微重力环境下的运动应对需要采用保持力量和有氧能力的融合策略或优化策略。早在20世纪80年代,Hickson等(1980)就对力量训练与有氧训练的关系进行了研究,指出与单纯的力量训练或有氧训练相比,两者结合的训练方式(抗阻+有氧训练)对力量和耐力素质的提高确实存在一定的限制作用,但并非没有提高,证实了抗阻训练与有氧训练的组合模式对力量和耐力素质有一定的积极影响。从既有研究来看,诸多研究认为,抗阻+有氧运动应对模式可能是目前更为适合的方式(Thomas et al., 2019),因为它具有同时保持肌肉力量和有氧耐力的双重作用,改善或抵消微重力环境对航天员身体功能的损害。Dillon等(2019)通过-6°头低位卧床实验来模拟太空飞行中的微重力环境,将健康男性分为运动组与对照组,运动组采用高强度间歇有氧(1次/2天)+力量抗阻+持续性有氧(与HIIT交替进行)(表3),结果证实,运动组健康男性的肌肉总量得到有效保护。但也有学者提出不同意见,Thomas等(2019)指出,融合训练会降低保持肌肉力量的效果,同时,由于在太空中航天员的时间非常宝贵,这就决定了运动应对训练的时间应更加集中,因此,应有条件的选择抗阻+有氧的训练模式。

抗阻+有氧的训练模式可以作为航天员在轨期间应

对肌肉力量萎缩和心肺耐力下降的措施之一,但需要从训练时间、训练量、训练方式、训练安排等条件来综合考虑。在训练时间上要考虑航天员每天可用于运动的总时间的多少,在训练量上需要强调抗阻训练与有氧训练的比例分配,在训练方式上需要回答训练使用何种设备、采用何种抗阻训练及使用何种训练方法等问题,在训练安排上需要注重抗阻训练和有氧训练的间隔时间问题。基于对运动应对方案设计及应用效应文献的梳理,提出以下几点应用建议:1)从ISS的抗阻+有氧训练交替安排来看,航天员每天锻炼的总时间超过1.5 h时,可以采用该方法;2)从长期运动应对效应来看,抗阻训练和有氧训练必须均占有一定的训练量,且应以抗阻训练为主;3)为了达到抗阻和有氧的双重效果,自行车功率计或者是划船训练可能要优于跑台训练;4)如果力量训练和有氧训练需要同期进行,抗阻训练应先于有氧训练进行,且间歇时间最好为4 h以上。

### 3.3 快速伸缩复合训练是否存在最佳时间效应

快速伸缩复合训练在国内外的运动训练中已得到广泛采用,但应用于微重力环境中的训练实践还并不常见。2016年,德国航天中心(Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, DLR)联合康斯坦茨大学开展了60天的卧床实验,实验证明受试者每天进行短时间跳跃训练能基本维持跳跃时的峰值力矩、跳跃高度及爆发力,且能够应对失重带来的体质下降和心血管功能失调问题(Kramer et al., 2017)。2016年,我国航天医学基础与应用国家重点实验室与清华大学体育与健康科学研究中心联合开展了快速伸缩复合训练,自主研发了模拟失重跳跃系统,并开展了探索性研究,为航天员在轨运动应对提供了新的思路(张可盈等, 2017)。Andreas等(2017)就根据这一思路设计了60天-6°头低位高强度跳跃训练实验(表6),证实了该种训练对跳跃高度、最大功率及峰值力量的积极意义。

表6 高强度跳跃运动应对方案

Table 6 Exercise Countermeasures Plan for High Intensity Jumping

| 训练类型      | A    | B     | C          | D    |
|-----------|------|-------|------------|------|
| 单脚跳(次×组)  | 12×2 | 12×2  | 15×2       | 15×  |
| 半蹲跳(次×组)  | 10×3 | 4×10  | 15×2, 20×2 | 12×1 |
| 平均负荷/%BW  | 85   | 90    | 80         | 80   |
| 组间间歇/s    | 60   | 90    | 30         | 60   |
| 总训练时间/min | 17   | 14.30 | 9.30       | 8.30 |

但是,快速伸缩复合训练可能存在最佳的时间效应问题(Asadi, 2017; Koschate et al., 2018),本课题组通过元分析对负重和无负重条件下快速伸缩复合训练带来的跳跃高度效应进行了分析(共搜集了82篇文献,限于篇幅,元分析部分不在本文赘述,结果见图6),研究表明,负重和无负重条件下快速伸缩复合训练对跳跃能力(跳跃高度H)

存在明显的时间效应和线性峰值效应,即快速伸缩复合训练会带来跳跃能力的显著提升,但随着时间的推移,会出现跳跃高度上的峰值现象(10~12周达到效应量最大),这意味从时间效应来看快速伸缩复合训练可能并不是最佳选择。如何实现更长时间上的一种效应保障,还需要进一步的理论与实践探索。

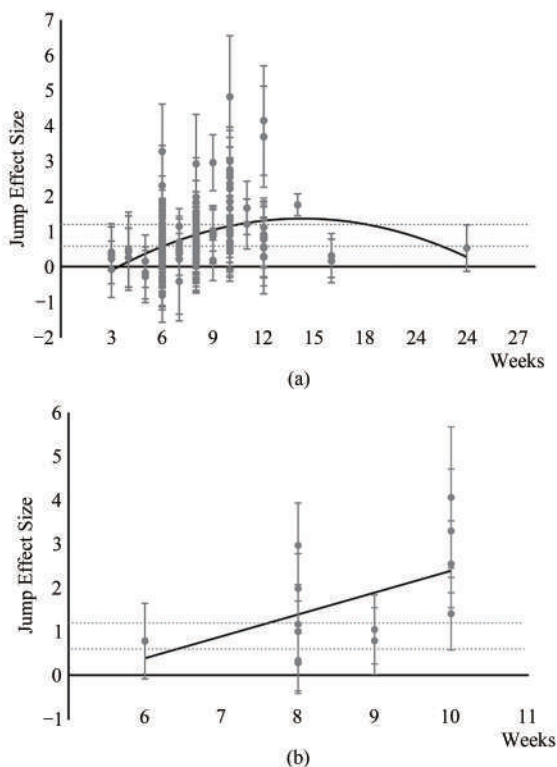


图6 有(a)或无(b)负重快速伸缩复合对跳跃能力(高度)影响的时间效应

Figure 6. Time Effect of Combined Training with (a) or without (b) Load-bearing Rapid Expansion and Contraction on Jumping Ability (Height)

### 3.4 加压训练如何融入微重力运动应对中

加压训练又被称为血流限制训练(blood flow restriction training, BFRT),是指在运动或组间休息时通过袖带或弹性绷带对肢体近端进行外部加压,达到静脉血流闭塞和部分动脉血流阻塞的目的(Willis et al., 2019)。与其他高强度或低强度训练相比,BFRT可以通过限制四肢血液流动以加强训练负荷,使用20%~40%1RM的低强度抗阻训练就可以达到传统使用65%~85%1RM高强度训练才能达到的肌肉力量增加的效果(Pope et al., 2013),而且可以在短时间获得恢复(Loenneke et al., 2012; Seo et al., 2016; Yasuda et al., 2014)。

评价BFRT效果的指标主要包括肌肉的横截面积(cross-sectional area, CSA)、肌肉厚度(muscle thickness, MTH)、MVC、韧带及 $\dot{V}O_{2max}$ 。在对肌肉横截面积增大效果的研究方面,越来越多的研究证实,BFRT与传统抗阻训练结合能发挥肌力提升的效果(Takarada et al., 2000; Yasuda

et al., 2016),结合有氧训练同样能够达到增肌的效果(Bell et al., 2000; Sakamaki et al., 2011),Abe等(2010)对19名普通男性进行了8周40% $\dot{V}O_{2max}$ 的自行车训练,BFRT组(每次15 min)的大腿肌肉CSA和伸膝MVC显著增大,有效避免了有氧和力量训练存在的相互削弱问题。

此外,BFRT对肌腱韧带的影响作用尤为需要关注。一些证据显示,缺氧条件提高了人类肌腱干细胞的增殖(Lee et al., 2012),且缺氧在实现骨髓功能愈合过程中执行了关键作用(Zhao et al., 2011)。但这种作用有急性和慢性两种反应:Mohmara等(2014)通过加压30%1RM提踵的方式对受试者跟腱厚度进行了即刻和实验后24 h的实验研究,结果显示,BFRT组和对照组之间无显著性差异,但从慢性反应来看,BFRT似乎产生了更显著的积极影响;Kubo等(2006)设置了高强度抗阻(80%1RM)加BFRT和低强度抗阻(20%1RM)加BFRT的训练方案,经过12周的训练(3次/周),结果显示,高强度抗阻加BFRT组受试者的肌腱筋膜厚度显著增加,但在低强度组未见显著性差异。这种作用对微重力环境中航天员的健康显然是极其重要的。处于微重力环境中的航天员存在肌肉和肌腱韧带等多重萎缩的问题,单纯地注重肌肉保障显然是不够的,这也是为什么许多航天员存在腰痛及立位耐力不足的一个主要致因(Ballard, 1997; Wing, 1991)。因此,针对BFRT的一些优点,研究者也开始关注微重力环境中这一训练方法的应用。Willis等(2019)指出,高强度抗阻(70%1RM)与加压或缺氧模式配合训练能够发挥运动防护的作用,可以作为太空飞行任务中有效的运动应对手段,这样的研究也得到了一定的理论支持(Peyrard et al., 2019),但这些研究还未能真实的太空中展开实验,还处于一种理论探索阶段,究竟是低强度加压还是高强度加压更有效还不清楚。

但随着相关研究的深入,越来越多的研究证据显示,低强度加压抗阻+高强度抗阻训练(combined BFRT and HIRT, CB-RT)的方式对肌肉力量有着更为积极的作用(Sousa et al., 2017; Yasuda et al., 2014),效果甚至要优于单独使用高强度抗阻训练。Kriley等(2014)和Luebbbers等(2014)的研究均证明了组合模式对力量增长效果显著大于单独的高强度力量训练和BFRT。魏佳等(2019a, 2019b)通过文献分析给出了BFRT的建议方案:血流限制压力为40%~80%AOP(静息动脉血流闭塞压),训练强度为20%~40%1RM/MVC,训练量为45~80次(分多组完成),间歇时间为30~60 s,训练频率为每周2~3次。鉴于此,本研究提出了微重力环境下航天员运动应对的理论方案(图7),未来可采用组间休息加压和训练同步加压两种方式,高强度(70%1RM)或低强度(30%1RM)的加压负荷(50~240 mmHg)开展实验探索。

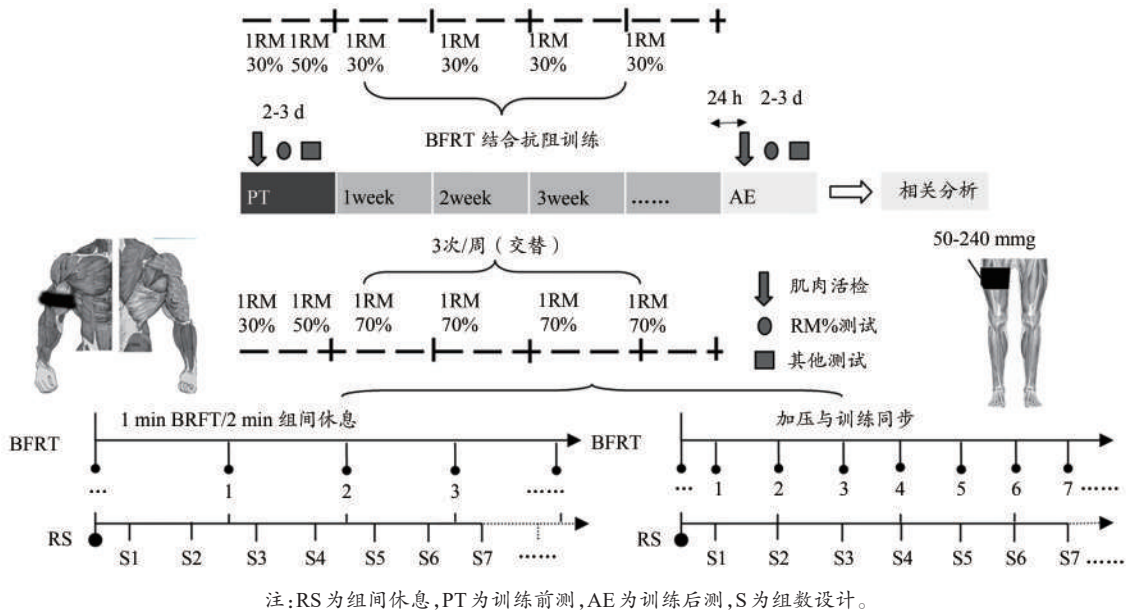


图7 加压+运动抗阻的组合设计方案

Figure 7. Schematic Diagram of Combined Design Scheme of Pressure + Motion Resistance

### 3.5 中国特色微重力环境运动应对的建构

如何尽快建立和完善中国特色的微重力或无重力环境中的运动应对理论是我国航天事业中的一项重要任务,这不仅需要在之前所述的方案架构和手段适配度上做出努力,还需要进一步考虑效应评估指标选择的有效性、身体部位的全面性及在轨与地面实验标准的匹配性构建。从目前众多的研究和ISS运动应对方案来看(表1),评估指标包括肌肉的CSA、肌肉总量、MVC、力矩、做功及功率等。但当前微重力环境中的运动应对研究,更多的是关注肌肉总量和肌腱韧带力量的保持(既有研究侧重于肌肉,忽视肌腱、韧带),以及对肌耐力和MVC的测评(Kyle et al., 2015),功率及做功等指标的研究相对较少(Trappe, 2007)。可以看出,如何确立更为有针对性的测评指标体系是未来理论构建的一个重要方面。

锻炼的身体部位是微重力环境运动应对监控体系建构的另一个方面。在ISS建立早期,俄罗斯的运动应对方案就从跑台测试、功率车测试、手臂功能测试、肌力(等速、等长及肌肉活检)及动作控制(韧带本体反射、平衡力量、头眼协调及步态控制等)等方面给出了身体部位和不同肌力类型的测评。Hackney等(2015)研究指出,在6个月的微重力环境飞行任务中,航天员上肢肌力下降达20%。Christopher等(2019)也进一步强调上下肢身体素质对微重力环境中航天员的重要意义。但从目前整理的-6°头低位模拟实验显示(表7),更多的是针对下肢或腰腹部位指标的评估。因此,如何确立和完善微重力环境下航天员身体部位的有针对性的训练方案和评估标准,也是未来理论构建的一个重要方面。

目前,地面模拟微重力环境较为成熟(通常采用-6°头低位卧床实验模型),但由于在太空微重力的特殊环境下,航天员的生理机能将面临着一系列的急性和慢性变化,身

体不同部位的血流和血管压力也发生着一系列改变(图8),如失重飞行初期的脑血流增加(Cerebral Blood Flow, CBF)等(Ogoh, 2021),这些都对在轨和地面实验标准的匹配性构建提出了实施要求。

表7 卧床-6°实验运动抗阻情况一览

Table 7 Resistance of Bed Rest -6° Experiment

| 应对方式  | 锻炼部位 | 测试肌群  | 评价指标          |
|-------|------|-------|---------------|
| 飞轮抗阻  | 膝关节  | 股四头肌  | 肌肉横截面积        |
| 振动抗阻  | 踝关节  | 腓肠肌   | 肌肉收缩能力        |
| 跖屈抗阻  | 髌关节  | 比目鱼肌  | 肌肉厚度          |
| 抗阻+振动 | 腰背   | 跖屈伸肌  | 肌肉质量          |
| 脚蹬    |      | 膝关节屈伸 | 肌肉总量          |
| 功率车抗阻 |      | 肌群    | 肌肉激活程度        |
| 干浸    |      | 股后肌群  | 最大自主收缩能力(MVC) |
| 划船抗阻  |      | 腰背肌   | 关节力矩          |
| 抗阻+有氧 |      |       | 做功            |
| 太空跑台  |      |       | 功率            |
| 束缚背心  |      |       | 心肺功能          |

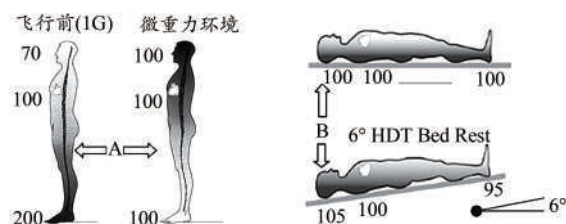
### 3.6 微重力环境运动应对如何实现军民融合

2015年,习近平总书记提出把军民融合发展上升为国家战略,预示着我国开始正式走向了国防和军队现代化与经济社会发展结合并进的时期。微重力环境下的运动应对理论和实践探索也为重力条件下的运动训练和运动康复等领域提供了诸多的可能和空间。早在20世纪90年代,Berg等(1994)就对太空中具有悠悠球运动原理的飞轮抗阻设备在重力条件下的使用进行了初步探索。Alejandro等(2021)使用飞轮抗阻训练设计(优势腿屈伸×30次×3组[5 min])对23名健康男性[(21.40±0.99)岁]和8名健康女性[(21.50±1.38)岁]展开研究(图9A),重点从腿部伸

展的角速度、角加速度和功率等指标识别肌肉做功的效率和疲劳情况,结果证实腿部伸展的角加速度是监控疲劳的最敏感的指标,并提出最大角加速度可以被用于监控训练负荷和训练量。在运动康复和老年医学领域, Gladys等(2008)探究了飞轮抗阻(group trained using a flywheel inertial loading machine, G-FEW)与传统重力抗阻(group trained using a weight-resistance loading machine, G-Weight)训练对老年人神经肌肉和平衡能力的影响(图9B,C),结果证明,飞轮抗阻不仅有利于老年人力量和平衡能力的增加,肌腱硬度也有所提高。

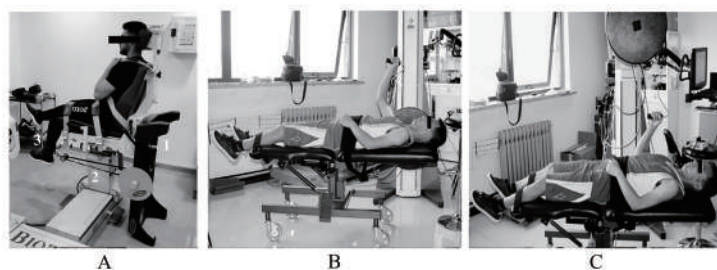
微重力环境中的立位耐力研究可能是航天科技走向民用的又一个重要方面。立位耐力是反映航天员站立时间长短的重要指标。由于航天员长期暴露在微重力环境中,骨骼和肌肉质量都出现了不同程度的萎缩,同时,也面临着回到地球后重力的再适应等问题,使航天员在返回地面的一段时间内不能站立行走或不能站立较长时间,于是针对航天员立位耐力的运动应对设备成为一个重要的研究领域。目前使用较多的是企鹅服(图10),它由于弹性的作用可以很好地达到对抗肌肉萎缩的效果。随着这一技术

的发展,也开始有研究将企鹅服应用于特殊人群(Julia et al., 2017; Ronald et al., 1999), Semenova(1997)就提出了将企鹅服应用于脑瘫患者的设想。但既有资料显示,目前企鹅服应用于特殊人群的实验研究还不多见,而应用于健康人群的实验研究有所开展。Carvil等(2017)对8名年轻健康志愿者(5名男性和3名女性)进行了企鹅服的应用研究,表明了企鹅服对静态轴向载荷和弹性力量方面的积极作用,并认为可以作为未来康复手段的一个选择。



注:图中数值代表血压,单位:mmHg;A为微重力环境;B为地面模拟环境;HDT Bed Rest为Head Down Tilt Bed Rest。

图8 航天失重与头低位卧床条件下体液分布及动脉压变化  
Figure 8. Changes of Body Fluid Distribution and Arterial Pressure in Space Weightlessness and Head Down Bed Rest



注:A为柱形飞轮装置;B为飞轮带;C为踝关节束缚装置。

图9 飞轮抗阻设备使用设计及不同体位动作

Figure 9. Use Design of Flywheel Resistance Equipment and Actions of Different Body Positions

#### 4 需关注的几个变量

微重力环境下的运动应对对航天员身体机能的保护是极其重要和必不可少的。但太空失重环境下的运动应对探索毕竟不同于地面模拟实验,长期与短期飞行任务也必然有着不同的运动要求。为此,运动应对领域还存在众多有待解决的问题,需要未来更多的实践应用和科学研究。

1)时间效应。从中短期来看,运动应对的实验研究主要集中在90天以内,且表现出对肌肉总量、肌肉横截面积、功率及心肺功能等方面的积极作用,但对更长时间的追踪研究不够。研究显示,快速伸缩复合训练对人体快速做功能力存在一定的最佳周期(10~12周),即并不会长期处于显著的作用状态。同样,对于HIRT或BFRT也少有长期的纵向研究或报道(长时间对同一群体的实验性研究),如何将其与传统抗阻或有氧训练相结合,最终实现长期的科学有效保障,还有待于更多的实验探索。



图10 企鹅服的发展演化(Julia et al.,2017)

Figure 10. Development and Evolution of Penguin Clothing (Julia et al.,2017)

2)目标设计。骨骼肌、心肺功能及立位耐力的干预是微重力或无重力环境下运动应对研究的重点。航天员在航期间需要在有限的时间和空间内达到更优的运动效果,

但由于力量和有氧训练的相互限制性,因此引发了微重力环境中是保障力量为主还是有氧为主的纷争,这就需要根据太空飞行任务的长短及日常时间来确定目标,并继而确定运动应对方案。

3)年龄效应。从文献研究来看,多数研究的实验对象年龄相对较小,但进入微重力或无重力环境中的航天员年龄相对较大(普遍在40岁以上),同时,许多的运动应对方法也来源于运动员群体,以提升竞技表现为目的(如HIIT、HIRT以及BFRT等),沿用的标准更多地是依据运动员或青少年群体而设计,那么,对于年龄相对较大的在轨航天员来说是否完全参照或实施,还需要给出新的年龄上的探索 and 关注。

4)肌腱韧带。目前研究更多的关注于微重力环境下运动应对对人体肌肉的影响,而肌腱韧带是链接人体运动的关键枢纽,单纯肌肉力量的防护并不一定带来身体整体机能的保持,如长期以来的立位耐力问题,还需要肌腱韧带的力量来保持身体整个环节的运动能力。从目前的实验证据来看,BFRT可以对肌腱韧带发挥较好的保障作用,因此,如何将其更好地融入传统抗阻或其他形式的运动应对方案当中,还需要更多的实践探索。

## 5 总结与展望

微重力环境运动应对的基本范畴在传统抗阻和心肺耐力的基础上,逐渐形成了包括骨、骨骼肌、心肺功能、身体功能性训练、运动感觉系统及免疫系统的运动锻炼体系,不同运动应对方案的防护效应基本呈现积极表现,但缺乏相应的长期追踪研究,更缺乏广泛的真实微重力环境下的实验探索。现有研究显示,快速伸缩复合、HIRT、BFRT等可成为微重力环境下重要的运动应对手段,快速伸缩复合训练对峰值力矩、爆发力表现出积极意义,HIRT可以实现对肌肉力量的有效防护,并能够保持有氧耐力的水平,在有限的时间内达到更优的训练效应;BFRT可以发挥更优的辅助作用,不仅能够提升肌力的训练效果,还能够对有氧能力发挥一定的保障作用,同时,对肌腱和骨的强化也具有积极影响,可以有效防止长期无负荷状态导致的废用性肌萎缩和肌无力,但BFRT在高低强度(~50%1RM或70%1RM~)的选择、与其他运动组合模式及加压幅度(现有研究为50~240mmgh)的设定方面还缺乏足够的实验依据。为此,尽快研制并建立微重力下的航天员运动应对标准是一项紧迫的任务。

当前,我国已然正式进入了航天新时代,运动应对理论与实践对促进2024年我国空间站战略任务的顺利实施,缩小与世界航天强国之间的差距,提升中国航天的硬实力有着重要的现实意义。未来,需进一步从“有氧训练的高量还是高强度更有利于微重力环境中的力量保持或发展,抗阻+有氧训练模式的频次、安排顺序或训练方式(跑台或

是功率车)对力量和有氧有何作用差异,飞行任务长短期的运动应对方案区别有哪些,离心力量训练是否与有氧训练共存,以及因性别、年龄等原因导致的训练效果异质性如何”等问题出发,对微重力环境运动应对理论与实践进行全面性回答,从而助力中国航天强国梦的实现。

## 参考文献:

- 黎涌明,2015. 高强度间歇训练对不同训练人群的应用效果[J]. 体育科学,35(08):59-75, 96.
- 魏佳,李博,杨威,等,2019a. 血流限制训练的应用效果与作用机制[J]. 体育科学,39(4):71-80.
- 魏佳,李博,冯连世,等,2019b. 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,55(3):3-12.
- 张可盈,张冰,刘书娟,等,2017. 航天在轨快速伸缩复合训练研究进展[J]. 军事医学,41(6):534-539.
- ABE T, FUJITA S, NAKAJIMA T, et al., 2010. Effects of low-intensity cycle training with restricted leg blood flow on thigh muscle volume and  $\dot{V}O_{2\max}$  in young men [J]. *J Sports Sci Med*, 9(3): 452-458.
- AKIMA H, KATAYAMA K, SATO K, et al., 2005. Intensive cycle training with artificial gravity maintains muscle size during bed rest[J]. *Aviat Space Environ Med*, 76(10):923-931.
- AKIMA H, KUBO K, KANEHISA H, et al., 2000. Leg-press resistance training during 20 days of 6° head-down-tilt bed rest prevents muscle deconditioning[J]. *Eur J Appl Physiol*, 82(1-2):30-38.
- AKIMA H, USHIYAMA J I, KUBO J, et al., 2003. Resistance training during unweighting maintains muscle size and function in human calf[J]. *Med Sci Sport Exer*, 35(4):655-662.
- AKIMA H, USHIYAMA J I, KUBO J, et al., 2007. Effect of unloading on muscle volume with and without resistance training[J]. *Acta Astronautica*, 60(8/9):728-736.
- ALEJANDRO M L, MARCO P, PABLO F, 2021. Real-time mechanical response to overload and fatigue using a flywheel training device[J]. *J Biomech*, 121(24):110429
- ALKNER B A, TESCH P A, 2004. 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*, 93(3):294-305.
- AMORIM F T, SCHNEIDER S M, LEE S, et al., 2006. Twins bed rest project: LBNP/exercise minimizes changes in lean leg mass, strength and endurance[J]. *MedSci Sport Exe*, 38(5):389-390.
- ANDREAS K, JAKOB K, EDWIN M, et al., 2017. High-intensity jump training is tolerated during 60 days of bed rest and is very effective in preserving leg power and lean body mass: an overview of the cologne RSL study[J]. *Plos One*, 12(1):e0169793.
- ANDREW W, JONATHAN S, NATHAN W, et al., 2019. Effect of time on human muscle outcomes during simulated Microgravity exposure without Countermeasures-systematic review[J]. *Front Physiol*, 10:1046-1070.
- ANGELO S, JONATHAN P L, NATHAN A J, 2021. Low-volume high-intensity interval training for cardiometabolic health [J]. *J Physiol*, 600(5):1-14.
- ANTONIO P, TATIANA M, GIUSEPPE M, et al., 2012. High-intensity interval resistance training (HIRT) influences resting energy expenditure and respiratory ratio in non-dieting individuals [J]. *J*

- Transl Med,24(10):237.
- ARBEILLE P, KERBECEI P, MATTAR L, et al., 2008. Insufficient flow reduction during LBNP in both splanchnic & lower limb areas is associated with orthostatic intolerance after bedrest [J]. *Am J Physiol Heart-Circ*, 295(5):1846-1854.
- ASADI A, RAMIREZ-CAMPILLO R, MEYLAN C, et al., 2017. Effects of volume-based overload plyometric training on maximal-intensity exercise adaptations in young basketball players[J]. *J Sport Med Phys Fit*, 57(12):1557-1563.
- ASTORINO T A, EDMUNDS R M, CLARK A, et al., 2017. High-intensity interval training increases cardiac output and  $\dot{V}O_{2max}$  [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 49(2):265-273.
- BALLARD J R, FECHNERK R E, WATENPASUGH D E, et al., 1997. Height increase neuromuscular function and back pain during 6° head-down tilt with traction[J]. *Aviat Space Environ Med*, 68(1):24-29.
- BAMMAN M M, HUNTER G R, STEVENS B R, et al., 1997. Resistance exercise prevents plantar flexor deconditioning during bed rest [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 29(11):1462-1470.
- BARNES K R, HOPKINS W G, MCGUIGAN M R, et al., 2013. Effects of different uphill interval-training programs on running economy and performance [J]. *Int J Sports Physiol Perform*, 8(6):639-647.
- BELAVE D, MIOKOVIC T, ARMBRECHT G, et al., 2009. Resistive vibration exercise reduced lower limb atrophy during 56-day bed-rest[J]. *J Musculoskel Neuron*, 9(4):225-235.
- BELAVYD L, MIOKOVIC T, ARMBRECHT G, et al., 2013. Hypertrophy in the cervical muscles and thoracic discs in bed rest?[J]. *J Appl Physiol*, 115(5):586-596.
- BELL G, SYROTUIK D, MARTIN T, et al., 2000. Effect of concurrent strength and endurance training on skeletal muscle properties and hormone concentrations in humans[J]. *Eur J Appl Physiol*, 81(5):418-427.
- BERG H E, TESCH P A, 1994. A gravity-independent ergometer to be used for resistance training in space[J]. *Aviat Sp Environ Med*, 65(8):752-756.
- BJORN A A, LENA N, TESCH P A, 2016. Neuromuscular adaptation following 90 days bed rest with or without resistance exercise [J]. *Aerospace Med Hum Perf*, 87(7):610-618.
- BJORN A A, TESCH P A, 2004. 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*, 93:294-305.
- BUCKLEY S, KNAPP K, LACKIE A, et al., 2015. Multimodal high-intensity interval training increases muscle function and metabolic performance in females [J]. *Appl Physiol Nutr Metab*, 40(11):1157-1162.
- BUEHING B, BELAVY D L, MICHAELIS I, et al., 2011. Changes in lower extremity muscle function after 56 days of bed rest[J]. *J Appl Physiol*, 111(1):87-94.
- CAVANAGH PR, LICATA AA, RICE AJ, 2005. Exercise and pharmacological countermeasures for bone loss during long-duration space flight[J]. *Gravit Space Biol Bull*, 18(2):39-5.
- CAVIL P A, ATTIAS J, EVETT S N Set al., 2017. The effect of the gravity loading countermeasure skinsuit upon movement and Strength[J]. *J Strength Cond Res*, 31(1):154-161.
- CHMIELEWSK T L, MYER G D, KAUFFMA D, et al., 2006. Plyometric exercise in the rehabilitation of athletes: Physiological responses and clinical application[J]. *J Orthop Sports Phys Ther*, 36(5):308-319.
- CHRIS AM, LGOR K, RACHER R, et al., 2018. Functional task and balance performance in bed rest subjects and astronaut [J]. *Aerosp Med Hum Perf*, 89(9):805.
- CHRISTOPHER H, JONATHAN P R, KATHRYN L W, et al., 2019. High-intensity interval training: A potential exercise countermeasure during human spaceflight[J]. *Front Physiol*, 10:581-587.
- DAVIS J R, VANDERPLOEG J M, SANTY P A, et al., 1988. Space motion sickness during 24 flights of the space shuttle [J]. *Aviat Space Environ Med*, 59(12):1185-1189.
- DEGTYAREV V A, POPOV I I, BATENCHUK T, et al., 1975. Condition of cardiovascular systems of astronauts during flight of Soyuz orbital station[M]. *Weightlessness: Med and Biol Res*.
- DILLON E L, SOMAN K V, WIKTOROWICZ J E, et al., 2019. Proteomic investigation of human skeletal muscle before and after 70 days of head down bed rest with or without exercise and testosterone countermeasures[J]. *Plos One*, 14(6):e0217690.
- DOCHERTY D, SPORER B, 2000. A proposed model for examining the interference phenomenon between concurrent aerobic and strength training[J]. *Sports Med*, 30(6):385-394.
- DONALD E W, RICHARD E B, SUZANNE M, et al., 2000. Supine lower body negative pressure exercise during bed rest maintains upright exercise capacity[J]. *J Appl Physiol*, 89(1):218-227.
- DUVOISIN M R, CONVERTINO V A, BUCHANAN P, et al., 1989. Characteristics and preliminary observations of the influence of electromyostimulation on the size and function of human skeletal muscle during 30 days of simulated microgravity [J]. *Aviat Space Environ Med*, 60(7):671-678.
- EDDENS L, VAN S K, HOWATSONG, 2018. The role of intrasession exercise sequence in the interference effect: A systematic review with meta-analysis[J]. *Sports Med*, 48(1):177-188.
- ENGLISH K L, LEE S, LOEHR J A, et al., 2015. Isokinetic strength changes following long-duration spaceflight on the ISS [J]. *Aerosp Med Hum Perf*, 86(12Suppl):A68-A77.
- ERIK M, JASON B, 2015. Plyometric training considerations to reduce knee injuries[J]. *Strength Cond J*, 27(2):78-80.
- FEITO Y, HEINRICH K, BUTCHER S, et al., 2018. High-intensity functional training (HIFT): definition and research implications for improved fitness[J]. *Sports*, 2018, 6:76.
- GALLAGHER P, TRAPPE S, HARBER M, et al., 2005. Effects of 84-days of bedrest and resistance training on single muscle fibre myosin heavy chain distribution in human vastus lateralis and soleus muscles[J]. *Acta Physiol Scand*, 181(1):61-69.
- GAST U, JOHN S, RUNGE M, et al., 2012. Short-duration resistive exercise sustains neuromuscular function after bed rest [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 44(9):1764-1772.
- GERMAIN P, GUELL A, MARINI JF, 1995. Muscle strength during bedrest with and without muscle exercise as a countermeasure [J]. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 71(4):342-348.
- GIBALA M J, LITTLE J P, VAN E M, et al., 2006. Short-term sprint interval versus traditional endurance training: Similar initial adaptations in human skeletal muscle and exercise performance [J]. *J Physiol*, 575(Pt 3):901-911.

- GILLAM M G, 1982. Effects of frequency of weight training on muscle strength enhancement[J]. *J Sports Med Phys Fitness*, 21(4): 432-438.
- GLADYS L O, CONSTANTINOS N M, OMAR S M, et al., 2008. Neuromuscular and balance responses to flywheel inertial versus weight training in older persons[J]. *J Biomech*, 41(14):3133-3138.
- GREENLEAF J E, BERNAUER E M, ERTL A D, et al., 1989. Work capacity during 30 days of bed rest with isotonic and isokinetic exercise training[J]. *J Appl Physiol*, 67(5): 1820-1826.
- GREENLEAF J E, BERNAUER E M, ERTL A C, et al., 1994. Isokinetic strength and endurance during 30-day 6 degrees head-down bed rest with isotonic and isokinetic exercise training [J]. *Aviat Space Environ Med*, 65(1): 45-50.
- HACKNEY K J, KYLE J, SCOTT, et al., 2015. The astronaut-athlete: Optimizing human performance in space[J]. *J Strength Cond Res*, 29(12):3531-3545.
- HAGBARTH K E, EKLUND G, 1968. The effects of muscle vibration in spasticity, rigidity, and cerebellar disorders[J]. *J Neurol Neurosurg Psychiatr*, 31(3):207-213.
- HELGERUD J, HOYDAL K, WANG E, et al., 2007. Aerobic high-intensity intervals improve  $\dot{V}O_{2max}$  more than moderate training [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 39(4):665-671.
- HICKSON R C, 1980. Interference of strength development by simultaneously training for strength and endurance[J]. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 45(2-3): 255-263.
- JAMES S, PATROKLOS A K, CRAIG P, et al., 2019. Comparisons of resistance training and cardio exercise modalities as countermeasures to microgravity-induced physical deconditioning: New perspectives and lessons learned from terrestrial studies [J]. *Front Physiol*, 10(10):1150-1162.
- JOHNSTON R M, BISHOP S, BEVERLY B, et al., 1970. Mechanical vibration of skeletal muscle[J]. *Physical Therapy*, 50(4):499-505.
- JONES T W, HOWATSON G, RUSSELL M, et al., 2013. Performance and neuromuscular adaptations following differing ratios of concurrent strength and endurance training[J]. *J Strength Cond Res*, 27(12):3342-3351.
- JONES T W, HOWATSON G, RUSSELL M, et al., 2016. Performance and endocrine responses to differing ratios of concurrent strength and endurance training [J]. *J Strength Cond Res*, 30(3): 693-702.
- JULIA A, CARVIL P, JAMES W, et al., 2017. The Gravity-loading countermeasure Skinsuit (GLCS) and its effect upon aerobic exercise performance[J]. *Acta Astronautica*, 132:111-116.
- JUDITH H, 2015. The first decade of ISS exercise: Lessons learned on expeditions 1-25[J]. *Aerosp Med Hum Perf*, 86(12 Suppl):A1-A6.
- KAKURIN L I, KATKOVSKIB S, TISHLER V A, et al., 1978. Substantiation of a set of preventive measures applicable to the flight missions of the Saliut orbital station[J]. *Kosmicheskaia Biologiya I Meditsina*, 12(3):20-27.
- KIRK L E, MEGHAN D, ELIZABETH G, et al., 2020. High intensity training during spaceflight: Results from the NASA sprint study[J]. *NPJ Microgravity*, 6:21-30.
- KOSCHATE J, THIESCHAFFER L, DRESCHER U, et al., 2018. Impact of 60 days of 6° head down tilt bed rest on muscular oxygen uptake and heart rate kinetics: Efficacy of a reactive sledge jump countermeasure[J]. *Eur J Appl Physiol*, 118(9):1885-1901.
- KRAINSKI F, HASTINGS J L, HEINICKE K, et al., 2014. The effect of rowing ergometry and resistive exercise on skeletal muscle structure and function during bed rest[J]. *J Appl Physiol*, 116(12): 1569-1581.
- KRAMER A, KUMMEL J, MULDER E, et al., 2017. High-intensity jump training is tolerated during 60 days of bed rest and is very effective in preserving leg power and lean body mass: An overview of the Cologne RSL Study[J]. *Plos One*, 12(1):e0169793.
- KRILEY L, 2014. Effects of a Seven-Week Practical Blood Flow Restriction Training Program on Lower-Body Strength and Power [D]. Emporia: Emporia State University.
- KUBO K, KOMURO T, ISHIGURO N, et al., 2006. Effects of low-load resistance training with vascular occlusion on the mechanical properties of muscle and tendon [J]. *J Appl Biomech*, 22(2): 112-119.
- KYLE J H, JESSICA M S, ANDREA M, et al., 2015. The astronaut-athlete: Optimizing human performance in space [J]. *J Strength Cond Res*, 29(12):3531-3545.
- KYROLAINEN H, AVELA J, KOMI P V, 2005. Changes in muscle activity with increasing running speed [J]. *J Sports Sci*, 23(10): 1101-1110.
- LAURA J, PETERSDOTTER S P, CHAILLOU T, 2022. High-intensity resistance exercise is not as effective as traditional high-intensity interval exercise for increasing the cardiorespiratory response and energy expenditure in recreationally active subjects [J]. *Eur J Appl Physiol*, 122(2): 459-474.
- LEE S M, SCHNEIDER S M, FEIVESON A H, et al., 2014. WISE-2005: Countermeasures to prevent muscle deconditioning during bed rest in women[J]. *J Appl Physiol*, 116(6): 654-667.
- LEE W Y W, LIU P P Y, RUI Y F, 2012. Hypoxia-mediated efficient expansion of human tendon-derived stem cells in vitro [J]. *Tissue Eng Part A*, 18(5-6):484-498.
- LEM J D, 1975. Biomedical results from Skylab [Z]. Washington (DC): NASA.
- LINJIE W, ZHILI L, CHENG T, et al., 2019. Physiological effects of weightlessness: Countermeasure system development for a long-term Chinese manned spaceflight [J]. *Front Med*, 13(2):202-212.
- LOENNEKE J, ABE T, WILSON J, et al., 2012. Blood flow restriction: An evidence based progressive model [J]. *Acta Physiol Hung*, 99(3): 235-250.
- LORI P S, 2015. An Evidence-based approach to exercise prescriptions on ISS [EB/OL]. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20090013286>.
- LUEBBERS P E, FRY A C, KRILEY L M, et al., 2014. The effects of a 7-week practical blood flow restriction program on well-trained collegiate athletes [J]. *J Strength Cond Res*, 28(8): 2270-2280.
- MACINNIS M J, GIBALA M J, 2017. Physiological adaptations to interval training and the role of exercise intensity [J]. *J Physiol*, 595(9): 2915-2930.
- MARIN P C, BLAZEVIČ A J, ALCARAZ P E, et al., 2020. Acute physiological responses to high-intensity resistance circuit training vs. traditional strength training in soccer players [J]. *Biology*, 9(11):383.
- MAROTO I S, GARCIA L D, FERNANDEZ G R, et al., 2017. Skeletal muscle functional and structural adaptations after eccentric overload flywheel resistance training: A systematic review and meta-analysis [J]. *J Sci Med Sport*, 20(10): 943-951.

- MARQUEZ G, ROMERO A S, TAUBE W, 2017. Peripheral and central fatigue after high intensity resistance circuit training[J]. *Muscle Nerve*, 56(1):152-159.
- MCHUGH M P, TYLER T F, GREENBERG S C, et al., 2002. Differences in activation patterns between eccentric and concentric quadriceps contractions[J]. *J Sports Sci*, 20(2):83-91.
- MOHMARA Y A, CHULVI M I, de MARCOS D G, et al., 2014. 5 effects of low-intensity concentric combined with blood flow restriction on achilles tendon[J]. *Br J Sports Med*, 48(Suppl. 2):A3-A4.
- MULDER E R, GERRITS K H L, KLEINE B U, et al., 2009. High-density surface EMG study on the time course of central nervous and peripheral neuromuscular changes during 8 weeks of bed rest with or without resistive vibration exercise[J]. *J Electromyogr Kines*, 19(2):208-218.
- MULDER E R, KUEBLER W M, GERRITS K H L, et al., 2007. Knee extensor fatigability after bedrest for 8 weeks with and without countermeasure[J]. *Muscle. Nerve*, 36(6): 798-806.
- MURACH K A, MINCHEV K, GROSICKI G J, et al., 2018. Myocellular responses to concurrent flywheel training during 70 days of bed rest[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 50(9):1950-1960.
- NUNEZ T P, AMORIM F T, BELTZ N M, et al., 2018. Metabolic effects of two novel high-intensity circuit training protocols [J]. *Med Sci sport Exer*, 50(5): 139.
- NUNEZ T P, AMORIM F T, KRAVITZ L, 2020. Metabolic effects of two high-intensity circuit training protocols: Does sequence matter?[J]. *J Exer Sci Fitness*, 18(1):14-20.
- OGOHO S, SATO K, ABREU S, et al., 2021. Effect of jump exercise training on long-term head-down bed rest-induced cerebral blood flow responses in arteries and veins[J]. *Experimental Physiol*, 106(7): 1549-1558.
- PETERSON M D, RHEA M R, ALVAR B A, 2004. Maximizing strength development in athletes: A meta-analysis to determine the dose-response relationship[J]. *J Strength Cond Res*, 18(2): 377-382.
- PEYRARD A, WILLIS S J, PLACE N, et al., 2019. Neuromuscular evaluation of arm-cycling repeated sprints under hypoxia and/or blood flow restriction[J]. *Eur J Appl Physiol*, 119(7): 1533-1545.
- POPE Z K, WILLARDSON J M, SCHOENFELD B, 2013. Exercise and blood flow restriction[J]. *J Strength Cond Res*, 27(10):2914-2926.
- RAMOS J S, DALLECK L C, BORRANIF, et al., 2017. Low-volume high-intensity interval training is sufficient to ameliorate the severity of metabolic syndrome [J]. *Metab Syndr Relat Disord*, 15(7): 319-328.
- RITTWEGER J, BELLER G, ARMBRECHT G, et al., 2010. Prevention of bone loss during 56 days of strict bed rest by side-alternating resistive vibration exercise[J]. *Bone*, 46(1):137-147.
- RITTWEGER J, FELSENBERG D, 2009. Recovery of muscle atrophy and bone loss from 90 days bed rest: Results from a one-year follow-up. *Bone*, 44(2):214-24.
- ROBERTO F, SVEN F, ROMAN H, et al., 2019. Acute cardiopulmonary responses to strength training, high-intensity interval training and moderate-intensity continuous training [J]. *Eur J Appl Physiol*, 119(7):1513-1523.
- ROBINEAU J, BABAULT N, PISCIONE J, et al., 2016. Specific training effects of concurrent aerobic and strength exercises depend on recovery duration[J]. *J Strength Cond Res*, 30(3):672-683.
- RONALD S, JULIE B, THEODORE W, et al., 1999. Orthostatic intolerance in the chronic fatigue syndrome[J]. *J Auton Nerv Syst*, 75(2-3):192-201.
- SAKAMAKI M, BEMBEN M G, ABE T, 2011. Legs and trunk muscle hypertrophy following walk training with restricted leg muscle blood flow[J]. *J Sports Sci Med*, 10(2): 338.
- SCHMIDT D, ANDERSON K, STRUTZ V, 2016. The effect of high-intensity circuit training on physical fitness [J]. *J Sports Med and Phys Fitness*, 56(5):534-540.
- SEMENOVA K A, 1997. Basis for a method of dynamic proprioceptive correction in the restorative treatment of patients with residual-stage infantile cerebral palsy. *Neurosci Behav Physiol*, 27(6): 639-643.
- SEO D-I, SO W-Y, SUNG D J, 2016. Effect of a low-intensity resistance exercise programme with blood flow restriction on growth hormone and insulin-like growth factor-1 levels in middle-aged women [J]. *South Afr J Res Sports Phys Educ Rec*, 38(2): 167-177.
- SIBONGEL J D, SPECTOR E R, JOHNSTON S L, et al., 2015. Evaluating bone loss in ISS astronauts[J]. *AerospMedHumPerf*, 86(12 Suppl): A38-A44.
- SOUSA A C, NEIVA H P, IZQUIERDO M, et al., 2019. Concurrent training and detraining: Brief review on the effect of exercise intensities[J]. *Int J Sports Med*. 2019, 40(12):747-755.
- SOUSA J, NETO G, SANTOS H, et al., 2017. Effects of strength training with blood flow restriction on torque, muscle activation and local muscular endurance in healthy subjects[J]. *Biol Sport*, 34(1): 83.
- SPERLICH B, WALLMANN S B, ZINNER C, et al., 2017. Functional high-intensity circuit training improves body composition, peak oxygen uptake, strength, and alters certain dimensions of quality of life in overweight women[J]. *Front Physiol*, 8(4):37-39.
- SPORER B C, WENGER H A, 2003. Effects of aerobic exercise on strength performance following various periods of recovery [J]. *J Strength Cond Res*, 17(4):638-644.
- SULTANA R N, SABAG A, KEATING S E, et al., 2019. The effect of low-volume high-intensity interval training on body composition and cardiorespiratory fitness: A systematic review and meta-analysis[J]. *Sports Med*, 49(11):1687-1721.
- TAKARADA Y, NAKAMURA Y, ARUGA S, et al., 2000. Rapid increase in plasma growth hormone after low-intensity resistance exercise with vascular occlusion[J]. *J Appl Physiol*, 88(1): 61-65.
- TATIANA M, GIUSEPPE M, ANTONINO B, et al., 2020. Effects of 6 weeks of traditional resistance training or high intensity interval resistance training on body composition, aerobic power and strength in healthy young subjects: a randomized parallel trial[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 17(11):4093-4107.
- THOMAS W J, NORA P, GLYN H, 2019. Optimization of exercise countermeasures for human space flight: Operational considerations for concurrent strength and aerobic training[J]. *Frontiers in Physiology*, 10:584-590.
- TOBIAS W, DAVID A G, JULIA A, et al., 2019. Hopping in hypogravity-A rationale for a plyometric exercise countermeasure in planetary exploration missions[J]. *Plos One*, 14(2):e0211263.
- TRAPPE T A, BURD N A, LOUIS E S, et al., 2007. Influence of concurrent exercise or nutrition countermeasures on thigh and calf muscle size and function during 60 days of bed rest in women[J]. *Acta Physiol*, 191(2):147-159.
- WATENPAUGH D E, BALLARD R E, SCHNEIDER S M, et al., 2000. Supine lower body negative pressure exercise during bed rest maintains upright exercise capacity[J]. *J Appl Physiol*, 89(1):218-227.



- WESTON K S, WISLOFF U, COOMBES J S, 2014. High-intensity interval training in patients with lifestyle-induced cardiometabolic disease: A systematic review and meta-analysis [J]. *Br J Sports Med*, 48(16):1227-1234.
- WIDRICK J J, Knuth S T, Norenberg K M, et al., 1999. Effect of 17-day spaceflight on contractile properties of human soleus muscle fibers[J]. *J Physiol*, 516(Pt3): 915-930.
- WILLIS S J, BORRANI F, MILLET G P, 2019. High-intensity exercise with blood flow restriction or in hypoxia as valuable spaceflight countermeasures?[J]. *Front Physiol*, 10:1266-1270.
- WILSON J W, MARIN P J, RHEA M R, et al., 2012. Concurrent training a meta-analysis examining interference of aerobic and resistance exercise[J]. *J Strength Cond Res*, 26(8):2293-2307.
- WING P, TSAN I, SUSAK L, et al., 1991. Back pain and spinal changes in microgravity[J]. *Orthop Clin N Am*, 22(2):255-262.
- YASUDA T, FUKUMURA K, FUKUDA T, et al., 2014. Effects of low-intensity, elastic band resistance exercise combined with blood flow restriction on muscle activation[J]. *Scand J Med Sci Sports*, 24(1):55-61.
- YASUDA T, FUKUMURA K, TOMARU T, et al., 2016. Thigh muscle size and vascular function after blood flow-restricted elastic band training in older women[J]. *Oncotarget*, 7(23):33595-33607.
- ZHAO J, ZHANG P, QIN L, et al., 2011. Hypoxia is essential for bone-tendon junction healing: The molecular biological evidence[J]. *Int Orthop*, 35(6):925-928.

## Facilitating China's Aerospace: Theory and Practice of Exercise Countermeasures Development Following Microgravity

DONG Depeng<sup>1</sup>, WANG Yi<sup>2\*</sup>

1. School of Sport Science, Qufu Normal University, Qufu 273165, China;

2. Physical Education Department, Renmin University of China, Beijing 100872, China

**Abstract:** The successful launch of CZ-5(3) carrier rocket indicates that China's aerospace has officially entered the era of space station. How to build a theoretical system or standard to microgravity environment with Chinese characteristics as soon as possible is a task and mission of the times. By using the methods of literature review, historical analysis, logical induction, Electronic databases and documents of exercise countermeasures on microgravity were searched in order to discuss category, countermeasures design, resistance+aerobic training, high intensity interval training(HIIT)and Plyometric training(PT), and so on. Previous work has also demonstrated that scope of exercise countermeasures is from resistance training to an integrated training of aerobic, flexibility and proprioception. Exercise coping measures are mainly based on resistance+aerobic mode, and can achieve conditional optimization combination. Low volume High intensity interval training(HIIT<sub>n</sub>) may be more supported, but age can be an important control variable, meanwhile, high intensity interval resistance training(HIIRT) can be used as an adaptive way to simultaneously develop aerobic and muscular endurance. The evidence of bed rest experiment supports the rapid retraction compound training on such effect indicators as peak torque and power, but previous work were mainly concentrated the lower limbs, and there is a time linear effect (maximum effect value is reached in 10-12weeks). In future, how to increase the adaptability of theories and methods of exercise countermeasures, according to age, time, equipment and other variables, and how to establish the China's program and standards of exercise countermeasures following microgravity environment are the basic logic and responsibility to facilitate China's aerospace.

**Keywords:** aerospace power; microgravity; exercise countermeasures; resistance training; aerobic training