

DOI: 10.13376/j.cbls/2025018

文章编号: 1004-0374(2025)02-0158-12

周期性多次高压氧疗法对高强度训练后运动性疲劳干预效果的研究进展及训练应用策略

向阳, 朱欢*, 文凡, 庾艳芳, 周术锋
(湖北民族大学体育学院, 恩施 445000)

摘要: 高压氧 (HBO) 疗法指将人体置于高于一个大气压的环境里吸入纯氧, 以提高血液中的物理性溶氧量和氧分压, 增大血液与细胞的氧分压差, 增加氧的有效扩散距离。研究指出, HBO 干预能提高血液循环系统向细胞输送氧气的的能力, 改善细胞缺氧状态, 加快代谢产物的清除, 促进运动性疲劳消除。目前, HBO 疗法的应用研究主要有单次干预和周期性多次干预两种模式, 并以单次为主。多项研究指出, 大强度训练后单次 HBO 干预能有效促进运动性疲劳消除, 但单次干预效果能否在周期性多次的干预中有效积累尚不明确。运动性疲劳是周期性反复过程, 并非一次性变化, 需进行长期恢复干预, 因此明确周期性多次 HBO 疗法对运动性疲劳的干预效果具有重要的实践意义。基于此, 本文通过分析相关文献总结周期性多次 HBO 疗法对运动性疲劳的干预效应, 并从训练实践出发提出训练应用策略, 为 HBO 疗法在训练实践中的应用提供理论依据和应用模式参考。

关键词: 高压氧恢复; 周期性; 多次; 运动性疲劳; 应用策略

中图分类号: Q44 **文献标志码:** A

Research progress and training application strategies of periodic multiple hyperbaric oxygen therapy on exercise fatigue after high-intensity training

XIANG Yang, ZHU Huan*, WEN Fan, TUO Yan-Fang, ZHOU Shu-Feng
(School of Sports of Hubei Minzu University, Enshi 445000, China)

Abstract: Hyperbaric oxygen (HBO) therapy refers to placing the human body in an environment at an pressure higher than one atmosphere to inhale pure oxygen, in order to improve the physical oxygen solubility and oxygen partial pressure in the blood, increase the oxygen partial pressure difference between the blood and cells, and increase the effective diffusion distance of oxygen. Studies have pointed out that HBO therapy can improve the ability of the blood circulatory system to deliver oxygen to cells, improve the state of hypoxia in cells, accelerate the clearance of metabolites, and promote the elimination of exercise fatigue. At present, the applied research of HBO therapy mainly has two modes: single intervention and periodic repeated multiple intervention, and the single time is the main one. A number of studies have pointed out that a single HBO intervention can effectively promote the elimination of exercise-induced fatigue after high-intensity training, but whether the effect of a single intervention can effectively accumulate in repeated interventions is still unclear. Exercise fatigue is a cyclical and repeated process, not a transient change, which requires long-term recovery intervention. Therefore, it is of great practical significance to clarify the intervention effect of HBO therapy on exercise fatigue. Based on this, this study summarized the intervention effect of periodic and repeated HBO therapy on exercise-induced fatigue by analyzing

收稿日期: 2024-06-11; 修回日期: 2024-07-23

基金项目: 湖北民族大学博士科研启动基金(BS24040); 2023年湖北省教育厅科学技术研究重点项目(D20231903); 2022年湖北民族大学校内科研项目(PY22015)

*通信作者: E-mail: 1207105091@qq.com

relevant literature, and proposed training application strategies based on training practice to provide theoretical basis and application model reference for the application of HBO therapy in training practice.

Key words: hyperbaric oxygen recovery; periodicity; repeated many times; exercise fatigue; application strategy

运动性疲劳是由于运动引起的运动能力和身体功能暂时下降的现象^[1]。在运动性疲劳发生过程中,细胞缺氧是重要的诱导因素。氧分子是细胞内许多生化反应和线粒体ATP产生的关键物质,对于维持机体代谢稳态至关重要^[2]。在长时间或高强度运动后,机体供氧障碍导致血乳酸、氢离子、无机磷酸、氨等多种代谢产物积累,使内环境的酸碱度(potential of hydrogen, pH)下降,抑制细胞的活性,使骨骼肌、内脏器官等工作能力下降,进而诱发运动性疲劳产生,因此运动后高质量补氧是促进运动性疲劳消除的关键路径。高压氧(hyperbaric oxygen, HBO)疗法指将人体置于高于一个大气压(absolute atmosphere, ATA)的环境里吸入纯氧,以提高血液中的物理性溶氧量和氧分压,增大血液与细胞的氧分压差,增加氧的有效扩散距离,提高组织细胞氧供应的疗法^[3]。研究指出,HBO干预能提高血液循环系统向细胞输送氧气的的能力,改善细胞缺氧状态,加快代谢产物的清除,并促进细胞能源物质恢复及提高其合成速度,进而加速疲劳消除速度^[3-4]。基于HBO疗法对运动性疲劳的干预效果,其在竞技体育领域已成为促进运动员疲劳消除的常用手段,如在备战2022年北京冬奥会期间,HBO疗法成为国家钢架雪车、单板滑雪平行大回转等多支队伍的主要恢复手段^[5-7]。

目前,HBO疗法在运动训练中的应用研究主要有单次干预和周期性多次干预(干预总次数>2、单次干预剂量及时间间隔相同)两种模式,并以单次为主。多项研究指出,高强度训练后单次HBO干预能有效促进运动性疲劳消除^[3-4, 8-11],但有关周期性多次的HBO疗法的干预研究较少,尤其是以高水平运动员为干预对象。HBO疗法的单次干预效果和周期性多次干预效果并不存在直接等价关系,单次研究结果并不能直接应用到或适用于运动员长期备战训练。虽然单次HBO干预能促进疲劳消除,但其干预效果能否在周期性多次干预中有效积累尚缺乏研究证据。运动性疲劳是周期性反复过程,并非一过性变化,需进行长期恢复干预,因此明确周期性多次的HBO疗法对运动性疲劳的干预效果具有重要的实践意义,同时也是运动训练的迫

切需求。另外,单次干预研究主要以“设定的高强度力竭运动方案或训练中某一高强度训练课诱导的疲劳类型”为主,受试者疲劳类型较为单一且疲劳程度较深^[6-10]。在运动训练中,不同运动项目、不同训练周期(储备期、提升期、比赛期、调整期等)、不同训练内容以及特殊环境下产生的疲劳类型、程度不尽相同,HBO疗法对不同程度、类型的疲劳是否具有较好的综合干预效应尚不明确。基于此,本研究通过分析相关文献总结周期性多次HBO疗法对运动性疲劳的干预效应,并从训练实践出发提出训练应用策略,为HBO疗法在训练实践中的应用提供理论依据和应用模式参考。

1 周期性多次HBO疗法对高强度训练后运动性疲劳的干预效果

在运动训练中,用于监控运动性疲劳的指标主要包括生化指标和生理指标两大类,其中血尿素(blood urea, BU)、肌酸激酶(creatine kinase, CK)、睾酮(testosterone, T)、皮质醇(cortisol, C)、红细胞(erythrocyte, RBC)、血红蛋白(hemoglobin, Hb)等指标是监控运动员外周疲劳常用的生化指标,也是重点监控指标^[12]。如备战冬(残)奥会期间,BU、CK、T、C、Hb等指标是多支国家冬奥队伍监控运动员身体机能和疲劳发生的主要指标^[13-18]。基于BU、CK、Hb、T、C等指标与运动性疲劳之间的关系,其也是评价周期性多次HBO疗法干预效果的重点观察指标。目前,用于评价周期性多次HBO疗法干预效果的生理指标主要有心率变异性(heart rate variability, HRV)、心率(heart rate, HR)、主观疲劳感觉(rating of perceived exertion, RPE)等。HRV主要反映自主神经系统对心血管系统的调节作用,其能较好地反映运动员神经系统功能的变化,且具有高度的敏感性^[19-20]。此外,RPE也是监控运动员疲劳发生的常用生理指标,具有常规生化监控指标(客观指标)不可替代的作用,两者相结合能更为准确地诊断运动员的身体机能状态^[21]。基于上述指标与运动性疲劳之间的关系,本文重点从生化指标和生理指标两个方面阐述周期性多次HBO疗法对运动性疲劳的干预效果。

1.1 周期性多次HBO疗法对运动性疲劳生化监控指标的干预效果

1.1.1 周期性多次HBO疗法对BU、CK的干预效果

BU是运动训练中监控运动性疲劳的有效指标,能敏感反映出运动员疲劳状态的变化^[22]。正常情况下蛋白质参与供能的比例较小,但当机体处于运动疲劳状态时,糖和脂肪的供能可能出现障碍,此时蛋白质分解供能的比例增加,进而使BU含量升高(尿素是蛋白质分解的终产物)。另外,大强度训练可能使肾脏组织缺氧,诱发肾脏氧化应激损伤等,导致肾脏功能障碍,肾脏血流量减少,降低肾脏对BU的清除能力,使BU含量升高。CK是评价运动强度和运动员骨骼肌损伤发生的常用指标,在运动训练中有着广泛应用^[23]。正常情况下CK位于肌肉或者心肌细胞内,当细胞因缺氧或机械性损伤导致肌细胞膜损伤或通透性变化后CK透过细胞膜流入血液中,因此CK主要用于评价运动后肌肉对运动强度的适应及损伤情况。

周期性多次 > 2 ATA-HBO疗法能够降低高强度训练后血液中的BU、CK含量,促进疲劳消除。研究表明,2周6次2.5ATA-HBO干预(3次/周、120 min/次)能降低举重运动员训练期间的BU、CK水平^[24]。另外,动物实验表明30天30次^[25]和8周56次^[26]2.5ATA-HBO疗法(1次/d、60 min/次)均能降低运动性疲劳大鼠血液中的BU水平,且前者还能显著降低大鼠CK水平。此外,周期性多次HBO预处理也能降低高强度运动后血液的CK水平。有研究指出,10天10次2.2ATA-HBO预处理(1次/d、稳压65 min/次)能降低体育专业大学生3000 m跑后的CK、HR及乳酸水平^[27]。HBO预处理对受试者高强度运动后相关指标的改善作用可能与提高受试者运动前的身体机能水平有关。当受试者运动前身体机能较差时(尤其细胞存在慢性缺氧现象),HBO预处理能通过改善细胞供氧水平提高身体机能水平和运动表现,降低大强度训练后身体的应激水平,进而减轻疲劳^[3]。因此,当身体机能较差或处于疲劳状态时,可以通过HBO预处理减轻运动后的疲劳程度。但作者认为,当运动员训练前处于良好的身体机能状态时,细胞供氧充分,HBO预处理难以进一步提高细胞的供氧能力,此时HBO预处理可能无法提高受试者运动前的身体机能水平。

另外,周期性多次的1.3ATA-HBO疗法也能降低运动员高强度训练后血液中的BU、CK水平。近

年来,随着氧疗恢复在运动训练中的应用,低压力HBO疗法(舱内压力多为1.3ATA)作为一种新型的恢复方式在体育运动领域中得到应用,并显示出较好的应用效果。1.3ATA-HBO疗法指将人置于1.3ATA的环境下吸入高浓度氧气(氧浓度一般不超过39%)^[28-29]。虽然相比于常规的医用HBO(压力介于2ATA~3ATA),1.3ATA-HBO疗法的压力和氧浓度相对偏低,但该压力仍能显著提高血液的溶氧量和氧分压,如在1.3ATA的高压环境下呼吸空气能使组织含氧量增加50%左右^[30]。有研究表明,单次60 min和6周18次1.3ATA-HBO(3次/周、60 min/次)干预均能降低帆船运动员高强度训练后的BU、CK水平,但后者干预效果更佳^[31]。但Zhu等^[32]研究显示,钢架雪车运动员经过4周高强度体能训练后的BU、CK水平显著升高,4周16次1.3ATA-HBO干预(4次/周、60 min/次)能降低BU、CK上升幅度,但不能使BU、CK显著下降。另外,马涛等^[6]的研究也得出类似结论,6周冬训高原训练期间国家平行大回转运动员的BU、CK均出现上升趋势,但整个训练阶段1.3ATA-HBO干预组(6周18次、3次/周、60 min/次)的BU、CK水平均低于对照组。此外,马涛等^[7]在国家单板滑雪平行大回转运动员夏季湿热环境下的HBO干预研究(8周24次、3次/周、60 min/次)也得出类似结论。不同研究结果的差异可能与运动员疲劳程度、训练环境等因素有关。夏训期间钢架雪车运动员主要以大强度的冲刺训练等为主,训练强度和训练量均较大,运动员疲劳程度深以及疲劳类型较为复杂,而帆船运动员的训练强度和训练量相对较小,运动员疲劳程度较轻,因此HBO疗法对帆船运动员有较好的干预效果,而对于钢架雪车项目的干预效果相对有限。对于单板滑雪平行大回转项目,在冬训高原训练期间,运动员面临运动缺氧和自然缺氧的双重刺激,导致运动员疲劳程度较深。另外,冬训寒冷环境可能使运动员身体机能进一步下降(如肌肉粘滞性提高、肌肉功能下降以及免疫抑制等),从而使机体产生更深的疲劳^[6]。由于机体疲劳程度较深,HBO疗法难以完全清除训练中产生的疲劳,因此干预效果有限。针对周期性多次1.3ATA-HBO疗法对钢架雪车、单板滑雪平行大回转等运动员BU和CK的干预效果,建议采取更长时间或更高压力的HBO疗法。此外,重复多次的1.25ATA-HBO疗法也能有效促进运动性疲劳消除。Qu等^[33]研究指出,大强度耐力运动后重复6次的

1.25ATA-HBO 疗法(1次/d、60 min/次)能显著降低运动员 BU 和 CK 水平,减轻运动疲劳后血清肌酸激酶与酸性代谢产物,但单次(仅1次)干预效果不明显。另外,瞿超艺等^[34]还得出重复6次的1.25ATA-HBO 疗法(1次/d、30 min/次 vs 60 min/次)能显著降低大鼠耐力运动后的CK水平,但60 min 组干预效果更佳。在训练实践中,周期短、见效快的疲劳消除手段是提高训练质量的重要保证。相比于上述学者^[6,31-32]的干预总次数,瞿超艺的干预次数明显减少(仅为6次),但该次数也能有效促进运动性疲劳消除,说明重复6次1.25ATA-HBO 疗法是一种有效的疲劳消除方式。但由于不同项目在训练计划、训练内容上差异较大,因此在具体项目的应用中建议根据训练安排和训练实际情况制定更加精准短周期的HBO 干预方案。综上,周期性多次2.5ATA-HBO 和(1.25~1.3)ATA-HBO 疗法均能促进运动后血液中BU和CK的清除,但当运动员疲劳较深或缺氧程度较深时,建议采取高压力的HBO 疗法。

HBO 疗法促进BU、CK清除的机制与改善细胞的缺氧状态相关。HBO 干预为组织细胞提供充足的氧气,改善细胞的缺氧状态,加速细胞功能恢复尤其是恢复线粒体氧化酶的活性,促进糖和脂肪供能,减少蛋白质的供能比例,降低BU水平^[25];同时,肌细胞的供氧和血流水平得到改善,使肌细胞膜得到修复,保证了细胞功能的完整性,抑制CK等代谢酶外流,进而降低血液中CK水平。另外,运动员肾脏功能的改善与BU水平也有着重要关系。HBO 干预后运动员肾脏功能得到恢复,肾脏血流量升高,加速尿液的形成,进而提高对BU的清除能力,降低BU含量^[27]。此外,HBO 疗法减少肾小管和集合管对尿素的重吸收也是加快BU清除的重要机制。

1.1.2 周期性多次HBO疗法对T、C、T/C的干预效果

T 主要反映机体的合成代谢的状态,与肌肉蛋白质合成、肌肉力量、肌肉葡萄糖吸收、肌肉糖原等密切相关,C与之相反。另外,T在体内有游离状态和结合状态两种形式,其中游离T属于活性T,也是真正发挥作用的T。目前,有关周期性多次HBO 疗法对运动员T、C、T/C的干预研究主要以1.3ATA-HBO 为主。晋宇^[31]以帆船运动员为干预对象,得出6周18次1.3ATA-HBO(3次/周、60 min/次)干预能提高帆船运动员训练期间T、T/C水平,并降低C水平。但Zhu等^[32]的研究表明,夏训期

间4周16次1.3ATA-HBO(4次/周、60 min/次)干预后钢架雪车运动员的T、T/C出现升高,但C未出现下降,这与晋宇的研究结果不一致,其原因可能与干预周期、专项特点等有关。在Zhu等^[32]研究中,对钢架雪车运动员进行了4周16次1.3ATA-HBO 干预,而晋宇^[31]对帆船运动员进行了6周18次1.3ATA-HBO 干预,随着时间的进一步延长HBO 可能会抑制C的产生,但目前该方面的研究成果较少,该结论有待于进一步研究证实。另外,钢架雪车项目夏训内容主要以无氧供能为主,而帆船项目主要以有氧供能为主,HBO 疗法对不同供能特点运动项目的干预效应可能存在差异,HBO 干预下不同项目运动员身体机能的特点表现出不同的变化特点。此外,马涛等^[6]在整个冬季高原训练期间虽然对国家平行大回转运动员进行了1.3ATA-HBO 干预(6周、3次/周、60 min/次),但是运动员的T、T/C水平仍降低。分析其原因,可能与冬训高原训练期间国家平行大回转运动员面临着训练缺氧、自然缺氧以及低温环境等有关,大强度的运动训练加上寒冷缺氧的自然环境导致运动员疲劳程度较深,因此HBO 干预后运动员的T、T/C仍出现下降^[6]。马涛等^[7]在夏季湿热环境下的干预研究(8周24次、3次/周、60 min/次)也得出类似结论。其原因可能是湿热环境中运动员机体各系统所受到的刺激相较于常温环境更强烈,导致心血管系统高度应激、核心温度升高、水分大量丢失,使运动员产生明显的疲劳反应以及身体机能明显下降,HBO 干预难以完全逆转运动员身体机能的变化。因此,当运动员疲劳程度较深时,周期性1.3ATA-HBO 疗法对T、T/C的恢复效果可能有限。此时可能需要更高压力的HBO 疗法。有研究指出,仅10次2.5ATA-HBO(1次/d、90 min/次,持续10d)干预就能显著提高受试者血液中T总浓度^[35]。因此,周期性多次2.5ATA-HBO 可能对T浓度有着显著的干预效应。但该研究也存在局限性,主要体现在该研究的研究对象为健康受试者,并非疲劳状态下的运动员,因此周期性多次2.5ATA-HBO 能否显著提高运动员T含量还需要进一步研究证实。此外,该研究测定的是受试者的T总浓度,而非单一的游离T含量(活性T),因此周期性多次2.5ATA-HBO 对游离T含量的干预效果尚不明确,这也是影响该研究成果在运动训练中推广应用的限制性因素。

此外,HBO 对C的干预效果不尽相同。有研究指出4周28次1.3ATA-HBO 干预(1次/d、60 min/

次)后橄榄球运动员血液中C出现升高,但无显著差异,该研究认为HBO干预对运动员C无明显影响^[35]。陈希等^[36]得出类似结论,指出15天15次2ATA-HBO(1次/d、90 min/次)干预使高原官兵血清C水平呈上升趋势。其原因可能是由于在高原低氧环境下,人体分解代谢将会增强,C含量将会增加,而HBO疗法并不能有效抑制C含量升高。综上,虽然上述研究得出周期性多次1.3ATA-HBO干预后血液中C呈上升趋势,但均无显著差异,因此1.3ATA-HBO疗法对C的影响还需进一步研究明确。此外,C分泌受昼夜节律和血液采集时间等因素影响,故在评价HBO干预效果时应固定采集时间,以精准评价HBO的干预效果。

1.1.3 周期性多次HBO疗法对WBC、RBC、Hb的干预效果

机体免疫功能是监控运动员疲劳发生的重要指标。当机体处于运动疲劳状态时,免疫功能可能出现下降并诱发炎症反应,其不仅会降低运动员身体机能水平,且增大伤病发生风险,进而严重破坏运动员身体机能状态。在运动训练中,白细胞(white blood cell, WBC)是监控运动员免疫功能的常用指标,但目前有关长期多次HBO疗法对WBC干预效应的研究较少,且主要以1.3ATA-HBO疗法为主。有研究指出,6周18次1.3ATA-HBO(3次/周、60 min/次)干预能显著降低帆船运动员训练期间WBC水平(处在正常范围内),减轻运动员体内炎症反应^[31]。此外,瞿超艺等^[34]还得出,1周6次高强度耐力训练使大鼠肌纤维排列紊乱以及炎症细胞浸润,6次1.25ATA-HBO疗法(1次/d、30 min/次 vs 60 min/次)能减轻大鼠纤维排列紊乱以及炎症细胞浸润程度,且60 min组干预效果更佳。但高超^[37]指出,夏训期间4周16次1.3ATA-HBO干预(4次/周、60 min/次)不能提高钢架雪车运动员WBC水平,但能抑制其进一步下降。马涛等^[6]也得出类似结论,冬训高原训练期间国家平行大回转运动员WBC出现下降,但1.3ATA-HBO干预组的(6周、3次/周、60 min/次)WBC在整个训练阶段均高于对照组。马涛等^[7]在夏季湿热环境下的干预研究(8周、3次/周、60 min/次)也得出类似结论。此外,章政^[35]研究发现,4周28次1.3ATA-HBO疗法(1次/d、60 min/次)使橄榄球运动员WBC水平轻度升高,但无显著差异。作者认为,不同研究间的差异可能与运动员免疫状态有关。当运动员出现炎症反应使WBC明显升高时,HBO干

预能减轻机体的炎症反应,降低WBC水平,使其恢复到正常水平;当机体免疫功能降低时,HBO干预可增强机体的免疫功能,使WBC水平升高,保持在正常范围之内。但因训练和环境使运动员机体免疫抑制程度较深时,1.3ATA-HBO疗法仅能在一定程度上增加机体免疫功能,避免WBC水平过度下降,而不能显著升高WBC水平,此时可能需要进行更长周期和更高压力的HBO疗法。

RBC和Hb是评价机体营养状况、有氧能力和恢复的重要指标,是监控运动性疲劳的常用指标^[38]。此外,除运输氧气外,RBC可通过免疫黏附、调节补体系统活性、直接杀伤病原体等机制执行免疫调控功能^[39]。对于长期HBO疗法对Hb的干预效果,李国印^[25]得出30天30次2.5ATA-HBO疗法(1次/d、60 min/次)能提高运动后疲劳大鼠脑红蛋白、Hb含量。Bosco等^[40]得出相似结论,非训练日3周12次2.5ATA-HBO(4次/周、90 min/次)干预均能提高运动员RBC、Hb水平,发挥免疫调节作用。虽然李国印、Bosco等均得出周期性多次2.5ATA-HBO能提高Hb水平,但两者的干预状态存在差异。李国印是在训练日对急性疲劳状态下大鼠进行HBO干预,Bosco是在非训练日的慢性疲劳状态下对运动员进行HBO干预,说明在不同疲劳程度时周期性多次2.5ATA-HBO干预均能提高Hb水平。

此外,压力介于1.25ATA~1.5ATA的HBO疗法对运动员高强度训练后的Hb水平也有积极的干预效果。瞿超艺等^[34]得出,1周6次1.25ATA-HBO疗法(1次/d、30 min/次 vs 60 min/次)均能显著提高大鼠耐力性运动后平均血细胞血红蛋白计数与平均血细胞血红蛋白浓度,但60 min组干预效果更佳。HBO环境下的RBC、Hb水平升高与机体抗氧化酶有关。虽然缺氧是促进RBC生成的重要因素,但HBO环境下机体抗氧化酶谷胱甘肽过氧化物酶(glutathione peroxidase, GSH-Px)对RBC的保护作用会减少RBC的分解,促使RBC、Hb水平升高^[41]。另外,非训练日3周12次1.5ATA-HBO(4次/周、60 min/次)也能提高运动员RBC、Hb水平,发挥免疫调节作用^[25]。但有研究指出夏训期间4周16次1.3ATA-HBO干预(4次/周、60 min/次)不能提高钢架雪车运动员RBC、Hb水平,仅能在一定程度上抑制RBC、Hb的降解^[37]。另外,章政^[35]研究也得出4周28次1.3ATA-HBO(1次/d、60 min/次)干预后橄榄球运动员血液中RBC、Hb均未出现显著变化。不同学者间的研究差异可能与训练负荷特

点有关。当训练强度和训练量较大时,运动员疲劳程度较深,导致Hb降解量较大,而HBO干预仅能在一定程度上减少Hb的降解量,不能完全抑制Hb降解。因此,当运动员疲劳程度较深或训练量较大,建议适当提高HBO疗法的干预压力或浓度,以获得更好的干预效果。HBO提高高强度运动后运动员RBC水平与可能降低RBC的氧化应激损伤有关。高强度运动后机体由于缺氧导致氧化应激水平升高,使自由基攻击RBC细胞膜,RBC受到损伤发生降解,而HBO疗法能够改善机体的缺氧状态,减少RBC膜氧化应激损伤,使RBC功能得到恢复,进而减少其降解量。

1.2 周期性多次HBO疗法对运动性疲劳生理监控指标的干预效果

1.2.1 周期性多次HBO疗法对HRV的干预效果

HRV是监控自主神经系统疲劳状态常用的无创指标^[20-21]。耿瑞峰^[15]指出夏训阶段钢架雪车运动员HRV与训练冲量、基础HR、CK、BU、WBC之间都存在不同程度的相关性,HRV可用于监控钢架雪车运动员训练负荷和运动员机能状态。另有研究指出,HRV的变化与常规机能状态监控指标的变化具有一致性,能作为运动员机能监控的无创指标^[10]。王钧^[21]也得出,在疲劳评价中HRV和BU、CK、T、C等血液生化指标具有较好的相关性。长期HBO干预能提高运动员神经系统功能,调节交感神经/迷走神经功能平衡,促进心脏功能恢复。赵莹^[41]研究发现,4周28次(2.5~3)ATA-HBO(1次/d、60min/次)干预能增强世居高原中长跑运动员高强度训练后HRV,提高迷走神经兴奋性,降低基础HR。徐莉等^[42]研究发现,15天15次、30天30次2ATA-HBO(1次/d、90min/次)疗养均能显著增强刚下高原官兵的HRV指标,提高心脏功能。这提示,2~4周的常规医用HBO疗法能显著增强高原环境下高强度训练后受试者HRV。

高原环境下的1.3ATA-HBO干预也能显著增强HRV。马涛等^[6]以国家平行大回转运动员为研究对象,得出冬训高原训练期间6周18次1.3ATA-HBO干预(3次/周、60min/次)能促进运动员中枢神经系统、自主神经系统调节功能以及身体机能综合准备状态的恢复,增强HRV。另外,高超^[37]以我国钢架雪车运动员为研究对象,得出夏训平原训练期间4周16次1.3ATA-HBO干预(4次/周、60min/次)能显著增强钢架运动员HRV。此外,更短周期的1.3ATA-HBO干预也能显著增强运动员的HRV。谢

元攀^[43]研究发现,2周14次1.3ATA-HBO(1次/d、60min/次)干预均能提高拳击运动员迷走神经活性,减弱交感神经张力,增强HRV。这提示,2~6周1.3ATA-HBO疗法能显著增强高强度训练后运动员HRV。综上,周期性多次1.3ATA-HBO和 ≥ 2 ATA-HBO干预均能增强高强度训练后的HRV,但两种压力对HRV干预效应的比较研究较少。因此,HBO对HRV的干预效应是否存在压力上的“剂量-效应”关系尚不明确。如果HBO对HRV的干预效应存在压力上的“剂量-效应”关系,当运动员发生严重的神经系统疲劳时,可采用更高压力的HBO疗法促进神经系统疲劳的消除,但同时应注意高压力的HBO疗法潜在的副作用。此外,周期性多次HBO疗法对HRV的干预机制可能与提高脑能量供应、降低脑血氨水平、平衡氧化还原状态和改善神经递质分泌有关。高强度训练可能通过脑能量供应障碍、氨中毒、氧化还原状态失衡以及神经递质分泌紊乱等导致脑功能障碍,损伤自主神经系统功能,进而产生自主神经疲劳。HBO疗法能改善脑能量供应障碍、加快血氨清除以及平衡氧化还原状态、神经递质分泌,提高自主神经系统功能,促进神经系统功能恢复。

1.2.2 周期性多次HBO疗法对RPE的干预效果

RPE是监控运动员疲劳发生的常用方式,和BU、CK、T、C等血液生化指标具有较好的相关性^[21]。在备战2022年北京冬奥会期间,RPE是监控钢架雪车运动员疲劳状态的常用方式^[44]。研究指出,周期性多次HBO干预能降低大强度运动后RPE得分^[6,33]。Qu等^[33]研究指出大强度运动后1周6次1.25ATA-HBO干预能显著降低运动员RPE得分、HR,并提高血流灌注指数,减轻运动疲劳程度。朱欢^[45]以我国钢架雪车运动员为研究对象,发现夏训期间(高温高湿环境)4周16次1.3ATA-HBO干预(4次/周、60min/次)能显著降低运动员RPE水平。马涛等^[7]得出类似结论,8周24次1.3ATA-HBO恢复干预(3次/周、60min/次)能显著降低国家单板滑雪平行大回转运动员夏季湿热环境大负荷训练后心理疲劳得分和RPE得分。此外,马涛^[6]还得出冬训高原训练期间(低温低氧环境)6周18次1.3ATA-HBO干预(3次/周、60min/次)能显著降低国家单板滑雪平行大回转运动员RPE水平。但章政^[35]研究得出,橄榄球运动员经过4周28次1.3ATA-HBO(1次/d、60min/次)干预后RPE无明显变化。不同研究结果的差异可能

与 RPE 测试结果的准确性有关。RPE 的测量主要受运动员主观因素、测试时间、测试环境等因素的影响,运动员是否填写以及是否在规定的时间内填写问卷对测试结果有着直接影响。这提示,在使用 RPE 评价 HBO 恢复效果时应正确引导运动员在规定的时间内填写,并由同一教练员或科研人员单独对运动员进行测试,同时保持测试环境(温度、湿度、气压等)一致,以确保测试结果的准确性。

HBO 干预后运动员 RPE 的变化与身体生理疲劳减轻、心理慰藉及心理状态变化等有关。当运动员生理疲劳减轻后,其主观疲劳程度也将得到相应改善,进而使 RPE 得分降低。另外,HBO 疗法的安慰剂效应也起到重要作用。有研究指出,让受试者误认为吸入高浓度氧气的特殊氧气安慰剂干预能提高运动受试者心理上的信念,其原因可能是因为吸入高氧后的心理安慰效应起到了重要作用,但在长期的干预中是否存在安慰剂效应尚不明确^[46-47]。但由于多数研究未对对照组运动员进行“吸入气体安慰剂干预”,所以尚不能明确该效应的产生是否与 HBO 的心理慰藉作用有关。此外,运动员心理状态的变化也会影响 RPE 的变化,尤其是当运动员自信心和成就感增强后会创造良好的心理状态,从而减弱主观疲劳感觉。王钧^[21]研究指出,连续多次运动疲劳后受试者成就感、警觉/注意集中能力及精力充沛感降低,使躯体疲劳、疲劳感受度增加。反之,提高运动员成就感、警觉/注意集中能力及精力充沛感,躯体疲劳、疲劳感受度减轻。综上,为了深入探究 HBO 疗法改变 RPE 的机制,后续研究应重点从“常规生理生化监控指标与 RPE 的关联度、设置安慰剂干预组以及运动员心理状态变化”等角度开展。

2 周期性多次 HBO 疗法在运动训练中的应用策略

2.1 建立特异与常规相结合的干预效果评价指标,提高 HBO 疗法的精准度

由上可知,目前用于评价周期性多次 HBO 疗法干预效果的生化指标主要有 BU、CK、T、C、WBC、RBC、Hb 及生理指标有 HRV、HR、RPE 等。虽然这些指标已被证实能够用于评价 HBO 的干预效果,但也存在局限性。首先,多数研究仅以单一形式的指标体系评价 HBO 的干预效果,缺乏两类指标联合应用。运动性疲劳的发生是多种因素共同作用的结果,不同运动项目、训练周期、训练内容

以及训练环境等所造成的疲劳类型、疲劳程度不尽相同,仅使用某一类型的评价指标并不能科学、精准地反映运动员的机能状态和疲劳情况,尤其是冬季运动项目。受训练环境限制,冬季项目(如钢架雪车)主要由夏秋季专项体能和春冬季专项技术两个训练阶段组成,专项体能训练阶段运动员多以外周疲劳为主,主要应用 BU、CK、T、C 等血液生化指标监控运动员机能状态和评价 HBO 恢复效果。但在专项技术训练阶段,运动员兼有外周疲劳和中枢疲劳,并以中枢疲劳为主,因此应在 BU、CK、T、C 等血液生化指标基础上增加 HRV、睡眠质量等指标,以评价 HBO 对中枢疲劳的干预效果。如在备战 2022 年北京冬奥会期间,科研人员针对钢架雪车项目的训练特点及训练实际需求,构建了血液生化指标(血常规、BU、CK、T、C 等)与生理指标(HR、HRV、微循环指标等)相结合的疲劳诊断指标,以提高运动性疲劳监控的质量和水平^[45]。因此,在制定 HBO 的恢复方案时,应根据项目特点、训练特点制定针对性的评价指标。

其次,缺乏评价 HBO 干预效果的特异性和直接性指标。虽然传统的疲劳指标能够评价 HBO 的干预效果,但多为“间接性”评价指标。HBO 疗法主要作用是增加血液中的物理溶氧量,增大血液向细胞的供氧能力,因此血液中氧气含量和细胞(尤其是肌细胞)氧含量是 HBO 干预效果的直接体现,但训练实践中少有涉足该方面的研究。目前,用于评价 HBO 特异性干预效果的指标主要是 SpO₂,但正常情况下动脉血 SpO₂ 在 95%~99% 之间,因此 HBO 的干预效果很难进一步体现。另外,当机体呼吸功能和 SpO₂ 正常时仍可能存在局部组织缺氧^[48],如脑缺血疾病、突发性耳聋等。因此,应用 SpO₂ 监测 HBO 干预效果具有局限性。经皮氧分压(transcutaneous oxygen pressure, TcPO₂)能实时反映机体组织的供氧能力,是评价血流营养状态和微循环功能的常用指标^[49]。将皮肤温度加热到 43℃~44℃,将显著提高氧气从毛细血管弥散出来的效率,皮肤氧分压接近动脉氧分压水平,能较好地反映出血液氧气含量的变化。因此,TcPO₂ 不仅能用于 HBO 干预效果的评价,且不会对机体带来创伤,适合在训练中推广应用。

此外,肌氧饱和度(muscle oxygen saturation, SmO₂)能进一步评定血液向肌细胞输送氧气的的能力。SmO₂ 是指骨骼肌细胞中氧合肌红蛋白(myohemoglobin, Mb)和氧合 Hb 占总 Mb、Hb 的比

例^[50]。运动过程中氧合 Mb 会快速释放 O₂ 供细胞氧化代谢所用。肌细胞中的氧合 Mb 和氧合 Hb 含量越高, SmO₂ 越大, 肌肉收缩时获取的能量越多。在正常情况下, SpO₂ 可达 98% 以上, 但 SmO₂ 明显低于 SpO₂, 且大强度运动后会进一步下降。当机体供氧能力增强时, SmO₂ 随之升高, 因此 SmO₂ 能敏感反映出肌细胞的氧合状态。另外, SmO₂ 与运动性疲劳的发生有着密切关系。有研究指出, 改善运动后 SmO₂ 能缓解运动性疲劳、减轻肌肉酸痛感^[51]。此外, 还有研究指出增加前臂 SmO₂ 能减轻柔术运动员肌肉疲劳程度, 防止肌肉力量下降^[52]。骨骼肌收缩时所需能量来源于能量物质的氧化分解, 当骨骼肌中的 O₂ 含量较多时, 可快速氧化分解能量物质为肌肉供能, 故 SmO₂ 与骨骼肌的收缩功能、抗疲劳能力有着密切关系。因此, SmO₂ 可在 TcPO₂ 基础上用于进一步评价 HBO 的直接干预效果。但氧分压过高也会导致二氧化碳 (carbon dioxide, CO₂) 对呼吸系统的刺激能力减弱, 抑制机体呼吸功能。血液中 CO₂ 具有刺激呼吸的作用, 当血液中 CO₂ 含量较低时, 其对呼吸中枢的刺激能力减弱, 导致不能发出维持呼吸动作的神经冲动, 使呼吸功能减弱, 甚至呼吸停止。另外, 过低的 CO₂ 浓度还会导致代谢性酸中毒和呼吸性碱中毒, 导致大脑缺氧。因此, 当机体氧分压过高时可能会使 CO₂ 分压显著下降, 进而影响呼吸功能, 因此建议在 TcPO₂ 和 SmO₂ 基础上进一步监测经皮二氧化碳分压 (transcutaneous carbon dioxide pressure, TcPCO₂) 的变化, 综合判断 HBO 对机体供氧能力的影响, 并对三者与常规运动性疲劳监控指标之间的“剂量 -

效应”关系进行深入探讨, 为不同类型、不同疲劳程度下 HBO 疗法的制定提供精准的剂量参考。

综上, 建议将 TcPO₂、SmO₂、TcPCO₂ 与常规生理生化指标相结合共同用于评价 HBO 疗法的干预效果, 并明确两类指标的相关关系以及针对不同的疲劳类型建立针对性的评价指标 (图 1)。

2.2 选择适宜的HBO压力, 减小长期HBO疗法潜在的风险

虽然医用 HBO 疗法对运动性疲劳有较好的干预效果, 但长期 HBO 干预可能会造成运动员氧化应激损伤、气压伤、氧中毒等。相比于机体已出现病理变化的患者, 运动性疲劳仍属于生理性变化。当机体供氧过多时, 会使细胞产生过多的氧自由基, 造成氧化应激损伤。Lin 等^[53]研究表明, 3 天 3 次 2.5ATA-HBO (1 次/d、90 min/次) 暴露使皮肤真皮成纤维细胞活性氧自由基过量产生, 导致细胞毒性作用发生, 影响细胞的增殖和存活。于秋红等^[54]得出一致性的研究结论, HBO 疗法能提高大鼠肾上腺髓质嗜铬瘤细胞的存活率, 但当压力过大时会导致自由基大量产生, 使细胞线粒体膜电位降低, 进而产生较强的毒性作用, 降低细胞的存活率。另外, 1.5ATA-HBO 疗法能促进创伤性脑损伤患者神经功能的恢复, 提高大脑的认知功能, 但 2.4ATA-HBO 疗法会导致过高的氧水平, 可能对大脑有抑制作用, 甚至产生局部毒性作用^[55]。HBO 疗法的神经毒性作用与诱导型一氧化氮合酶 (inducible nitric oxide synthase, iNOS) 有关。NOS 有三种亚型, 其中神经元型一氧化氮合酶 (neuronal nitric oxide synthase, nNOS) 和 iNOS 具有神经毒性作用, 内皮

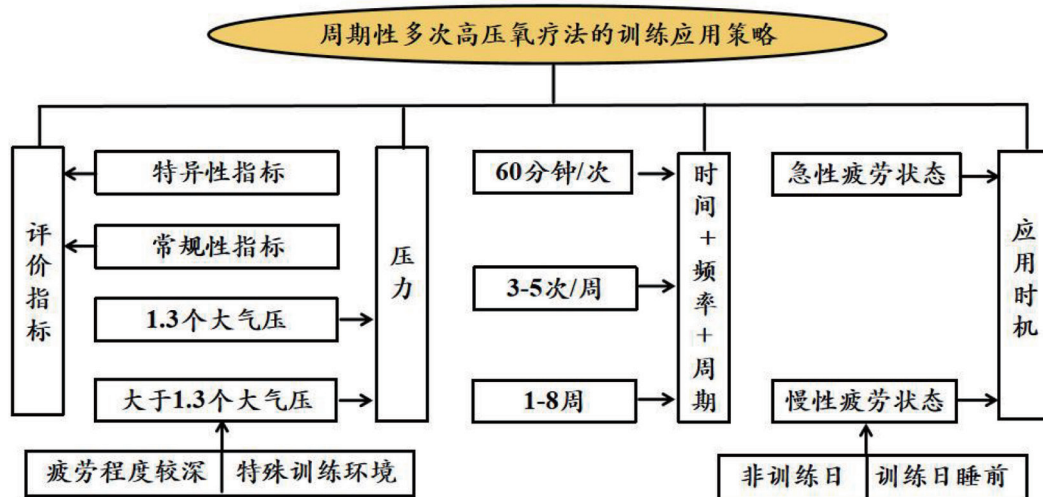


图1 周期性多次HBO疗法在运动训练中的应用思路

型一氧化氮合酶 (endothelial nitric oxide synthase, eNOS) 具有神经保护作用。过量的 iNOS 能抑制与线粒体功能相关的各种酶的活性, 并与超阴离子相互作用形成剧毒的羟基自由基和二氧化氮自由基, 直接杀死神经细胞。

此外, HBO 的压力越高, 心血管系统的应激程度越高, 不良心血管事件发生概率越大。在运动训练中, 高强度训练负荷使运动员心血管系统处于高应激状态, 甚至造成运动员心血管功能损伤。当 HBO 的压力较大时, 可能会进一步提高运动员心血管系统的应激水平, 导致不良心血管事件的发生, 尤其当运动员心脏功能异常时, HBO 疗法的风险大大增大。此外, 医用 HBO 舱设备体积、重量较大, 不便于携带和运输, 大大降低设备的机动性。在备战训练中, 一些项目一年中不同训练阶段需在不同的训练基地完成, 甚至需长期在国外备战训练, 医用 HBO 舱显然无法满足训练需求。同时, 医用 HBO 舱操作复杂, 需专业人员操作, 限制了 HBO 疗法在运动训练中的应用。低压力 HBO 疗法 (稳压多为 1.3ATA) 作为一种新型的恢复方式在体育运动领域中得到应用, 并显示出较好的应用效果。多项研究指出, 周期性多次 1.3ATA-HBO 恢复干预能促进疲劳消除和身体机能恢复, 该疗法可作为疲劳消除的恢复手段^[6-7, 31-32, 34-35, 37, 46, 56]。此外, 由于舱内压力和氧浓度偏低, 降低了运动员发生氧中毒、气压伤的风险, 提高运动员的依从性; 同时市场上低压力 HBO 多为软体舱, 质量较轻, 便于折叠携带运输, 提高了 HBO 疗法在运动训练中应用机动性, 因此 1.3ATA-HBO 疗法更适于在运动训练中应用 (图 2)^[57]。但需要注意的是, 当运动员疲劳程度较深或者处于特殊环境下时 (如低温低氧等), 如果 1.3ATA-HBO 疗法不能有效消除运动员的疲劳, 建议适当提高 HBO 疗法的干预压力或浓度, 以获得更好的干预效果。但在过高压力下, 运动员可能会发生氧化应激损伤、气压伤等, 因此对运动员进行较高压力的 HBO 疗法干预时, 建议补充一定量的抗氧化剂 (如虾青素), 以抵消干预过程可能出现的氧化应激损伤 (图 2)。另外, 为了避免运动员出现气压伤, 在实施 HBO 干预前应充分检查运动员的身体健康状态 (尤其是鼓膜), 提高运动员对气压伤害的抵抗能力 (图 2)。综上, 在训练实践中应综合训练负荷特点、训练环境等因素, 选择针对性的 HBO 疗法, 且要围绕不同疲劳程度、不同训练环境等因素深入探讨不同压力的 HBO 疗法对运

动性疲劳的干预效果。

2.3 制定最佳的 HBO 干预时间、干预频率与周期, 实现 HBO 疗法精准干预

干预时间是决定 HBO 疗法效果的重要因素, 干预时间过短可能会导致效果不明显, 干预时间过长可能会造成氧化应激损伤、氧中毒等。在运动训练中, HBO 疗法的干预时间多为每次 60 min。多项研究证实, 每次 60 min 的 HBO 干预能有效促进疲劳消除^[6-7, 31-32, 35, 37, 46]。此外, 也有研究得出 90 min^[36, 41]、120 min^[24] 的干预也能促进疲劳消除。但长时间 HBO 干预 (每次干预时间大于 60 min) 可能会产生一定的毒副作用及不良反应, 如氧中毒、肺损伤、中耳损伤等^[58]。此外, 有关周期性多次 (1.25~1.3) ATA-HBO 疗法的研究中, 每次干预时间也多为 60 min^[6-7, 31, 33, 34-35, 37, 44, 46]。基于上述研究结果, 建议在制定周期性多次 HBO 疗法中单次干预时间设定为 60 min (图 1)。但作者认为, 虽然上述学者均得出单次 60 min 的 HBO 干预能有效促进运动性疲劳消除, 但缺乏不同时间干预效果的比较, HBO 疗法的疲劳消除效应是否具有“时间剂量-效应”关系尚不明确, 尤其是当 HBO 疗法的干预时间低于 60 min 时是否仍能有效促进疲劳消除。在训练实践中, “耗时短、效果好”的恢复干预手段更符合训练需求, 也更易推广应用。因此, 明确 HBO 疗法促进运动性疲劳消除的“时间剂量-效应”关系对实现 HBO 疗法的精准干预有着重要的实践意义。此外, 对于不同类型、不同程度的疲劳, HBO 干预效果的“时间剂量-效应”关系更是鲜有报道。因此, 未来应围绕不同类型、不同程度的疲劳, 明确 HBO 干预效果的“时间剂量-效应”关系。综上所述, 每次干预时间为 60 min 的 1.3ATA-HBO 疗法能促进运动性疲劳消除, 但干预时间超过 60 min 的 HBO 疗法是否具有更佳的干预效果仍有待于进一步证实。

干预频率是决定 HBO 干预效果的重要因素, 频率过低可能会导致干预效果无法有效累积, 干预频率过高可能会造成氧化应激损伤、氧中毒等。目前, 有关周期性多次 HBO 疗法的干预频率有 3 次/周、4 次/周、5 次/周、7 次/周。作者认为, 训练中 HBO 疗法的干预频率的制定应依据训练计划、训练阶段以及运动员身体机能状态而定。在训练日, 当训练强度和训练量较大、运动员疲劳程度较深时, 建议每天进行 1 次 HBO 疗法, 以充分消除运动性疲劳为第二天训练营造良好的身体状态; 反之, 当

运动员疲劳程度较轻时,可采取隔天1次或多天1次的HBO疗法(图1),但干预频率不应低于3次/周,否则干预效果难以体现。对于HBO疗法的干预周期,干预周期过短可能导致干预效果无法有效积累。有研究指出,HBO的干预效应存在一定的累积时间反应关系,并与机体累积痕迹效应延续和机体的持续适应能力等因素有关^[33]。相关研究指出,1~8周的HBO干预均能促进疲劳消除^[6-7, 31, 33-35, 37, 40, 44, 46],但以4周居多^[32, 35, 37, 40, 46]。作者认为,训练实践中应根据项目特点、训练计划和训练目的制定HBO干预周期,但目前该方面的研究较少,有待进一步研究。在后续的研究中,应重点围绕HBO与运动性疲劳间的“周期剂量-效应”关系,为HBO疗法的制定提供精准的干预周期。

2.4 制定“常规与针对性”的HBO应用时机,强化HBO干预效果

目前,HBO疗法在训练中的应用时机主要包括大强度训练后的急性疲劳期和训练后的休息恢复期(慢性疲劳期)。在单次干预研究中,主要观察HBO疗法对急性疲劳的干预效果,以验证或明确HBO疗法对急性疲劳的干预效果。在大强度训练后的急性疲劳期,机体处于急性缺氧状态,细胞缺氧程度较深,导致代谢产物在血液中大量堆积,加之血细胞变形能力下降、凝集反应等,使血流速度减慢,血流量降低,诱发深度的疲劳状态。HBO疗法的主要生理机制是增加血液中物理溶氧量,提高机体的供氧能力,改善运动后的缺氧状态,因此机体缺氧程度和疲劳程度越深,HBO干预效果可能越佳。但训练实践中受诸多因素的限制,训练结束后即刻难以进行HBO干预,如受HBO干预设备限制以及训练后常规拉伸放松的影响等。随着缺氧时间的延长,急性疲劳将转变成慢性疲劳,此时缺氧可能不再是导致疲劳发生的主导因素,进而弱化HBO疗法的干预效果,因此训练结束后应尽快安排运动员进行HBO恢复,以强化HBO的干预效果(图1)。

另外,对于高强度训练日,建议睡前针对运动员的机能状态制定HBO恢复策略。一般而言,运动员经过高强度训练后会产生或者积累一定程度的疲劳,甚至产生运动损伤。若前一天训练造成的疲劳不能有效清除,不仅会影响次日的训练质量,且易因疲劳积累而形成过度疲劳状态。因此,高强度大负荷训练日睡前针对性的HBO恢复干预有助于提升次日运动员的训练状态和训练质量。睡前HBO

恢复还能提升运动员的睡眠质量。有研究指出,HBO干预能有效改善拳击运动员睡眠效率,增大深睡眠比重,降低睡眠转换次数和觉醒次数^[45]。良好的睡眠不仅能有效促进疲劳消除,且有助于提高运动表现^[59]。因此,对于具有睡眠障碍的运动员,睡前HBO恢复有重要意义。此外,对于非训练日(如周日),也应根据运动员机能状态制定相应的HBO恢复干预方案。在训练实践中,周一至周六一般为训练日,周日为休息恢复,其主要目的通过消除训练日造成或积累的疲劳,为接下来的训练创造好的身体状态。因此,建议非训练的休息日在对运动员身体机能的评估的基础上,对运动员进行针对性的HBO恢复干预(图1)。

本研究主要选用的是训练实践中常用的疲劳监控指标,这些指标确实能够较好地监控运动性疲劳的发生,但在训练实践中其他指标也有一定的应用,但本研究未对这部分指标展开论述,这是本研究存在的局限性。在后续的研究中作者将对其他指标也展开研究,以更加全面的梳理HBO疗法对运动性疲劳的干预效果。

3 结论与建议

在运动训练中用于运动性疲劳消除的周期性HBO疗法主要有“ $\geq 2ATA$ -HBO和 $1.3ATA$ -HBO”两种。当运动员疲劳程度较轻时,推荐持续1~8周、每周3~5次、每次60 min的 $1.3ATA$ -HBO疗法,并建立“特异性与常规疲劳监控指标”相结合的评价指标;当运动员疲劳程度较深或处于特殊训练环境时(如低温低氧、高温高湿),建议适当提高HBO疗法的压力和氧浓度。此外,应尽量在训练后急性疲劳期对运动员进行HBO恢复干预,并针对运动员的机能状态制定训练日睡前和非训练休息日HBO恢复方案,以提高HBO疗法的干预效果。

[参 考 文 献]

- [1] 王步标, 华明. 运动生理学(第二版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011: 251
- [2] 邢文娟, 董玲, 周嘉恒, 等. 常压高氧吸入改善代谢组学指标及心率变异性促进运动疲劳的消除. 北京体育大学学报, 2023, 46: 28-41
- [3] 朱欢, 晋宇, 田广, 等. 高压氧在运动科学领域中的应用研究进展. 中国运动医学杂志, 2022, 41: 567-75
- [4] 瞿超艺, 冯亦唯, 徐旻霄, 等. 不同氧疗手段对机体运动能力的影响及相关机理研究进展. 中国运动医学杂志, 2021, 40: 393-401
- [5] 赵杰修, 房国梁, 资薇, 等. 冬季项目的体能训练和训练

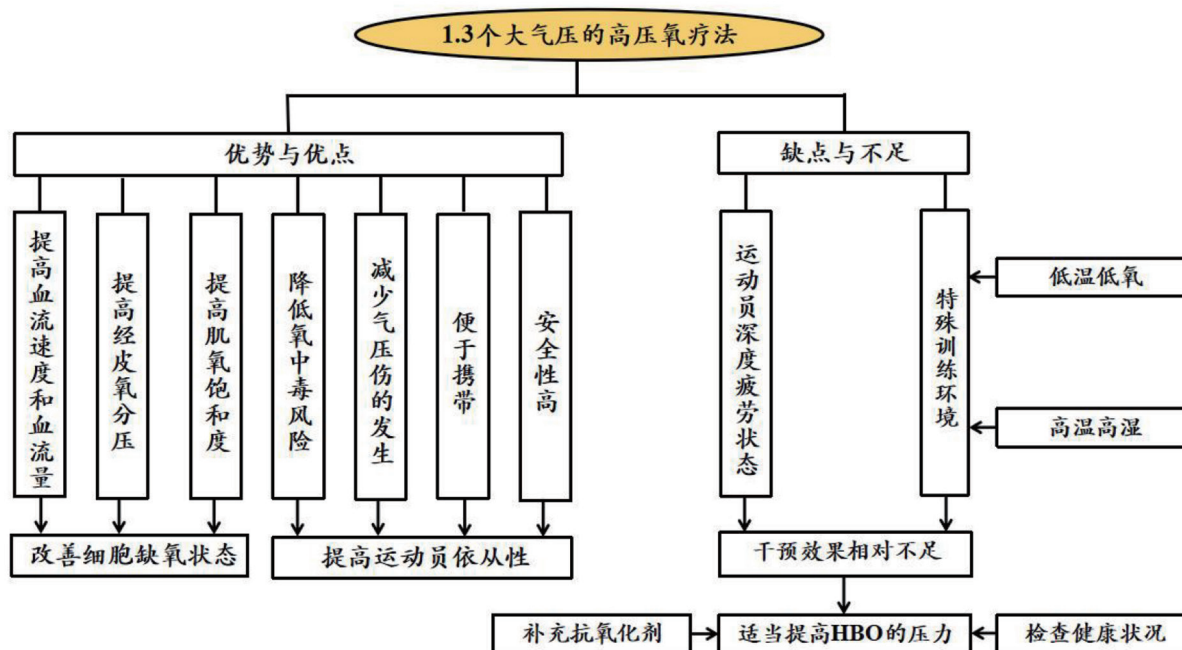


图2 1.3ATA-HBO疗法的优点、不足及改善措施

- 监控关键技术的研究进展. 北京体育大学学报, 2022, 45: 25-34
- [6] 马涛, 高炳宏. 高压氧干预对平行大回转运动员冬季高原训练后疲劳消除的效果. 北京体育大学学报, 2023, 46: 13-27
- [7] 马涛, 高炳宏, 庄继涵. 高压氧干预对国家单板滑雪平行大回转运动员湿热环境训练后机体疲劳消除效果的研究[C]. 中国体育科学学会. 第十三届全国体育科学大会论文摘要集, 2023: 3
- [8] 毕学翠, 詹建国. 软体高压氧舱对高强度间歇运动后恢复效果应用研究. 科学技术与工程, 2020, 20: 8079-85
- [9] Shimoda M, Enomoto M, Horie M, et al. Effects of hyperbaric oxygen on muscle fatigue after maximal intermittent plantar flexion exercise. *J Strength Cond Res*, 2015, 29: 1648-56
- [10] Woo J, Min JH, Lee YH, et al. Effects of hyperbaric oxygen therapy on inflammation, oxidative-antioxidant balance, and muscle damage after acute exercise in normobaric, normoxic and hypobaric, hypoxic environments: a pilot study. *Int J Environ Res Public Health*, 2020, 17: 7377-86
- [11] Branco BH, Fukuda DH, Andreato LV, et al. The effects of hyperbaric oxygen therapy on post-training recovery in Jiu-Jitsu athletes. *PLoS One*, 2016, 11: e0150517-27
- [12] 高炳宏. 优秀运动员备战重大比赛训练科学监控的思考. 体育科研, 2008, 29: 1-5
- [13] 孙志宏, 张蓓, 张妍, 等. 不同专项训练对越野滑雪优秀男子运动员身体机能的影响—基于血液生化指标监控. 宁波大学学报(理工版), 2022, 35: 115-20
- [14] 程媛媛, 罗坤, 李晓琳, 等. 国家残疾人高山滑雪站姿运动员备战期生理生化机能监控与评价研究. 体育科研, 2022, 43: 50-5
- [15] 耿瑞峥. 优秀钢架雪车运动员夏训期间心率变异性与其他机能指标变化研究[D]. 北京: 首都体育学院, 2021
- [16] 王会. 国家单板滑雪U型场地队赛前阶段机能监控及指标变化的研究[D]. 北京: 首都体育学院, 2019
- [17] 洪林友. 高原训练对冰壶运动员生理机能影响及训练学特征研究[D]. 西宁: 青海师范大学, 2018
- [18] 曲广财. 国家队自由式滑雪空中技巧男运动员备战冬奥会冬训期间生物学监控指标的研究[D]. 沈阳: 沈阳体育学院, 2018
- [19] 张俐, 徐晓晓, 靳灿灿, 等. 运动疲劳对人体心率变异性及肌电的影响. 华南国防医学杂志, 2019, 33: 177-80
- [20] 杨珊珊, 谭雅兮, 刘耀天. 心率变异性监控运动性疲劳的研究进展. 中国体育教练员, 2019, 27: 55-8
- [21] 王钧. 基于主观感觉疲劳量表和心率变异性相结合的运动性疲劳监测[D]. 武汉: 武汉体育学院, 2015
- [22] 邵威, 李博雅. 长跑运动员重大比赛前8周训练身体机能状态变化特点. 中国应用生理学杂志, 2015, 31: 229-30+37
- [23] 马涛, 高炳宏. 通过心率变异性联合儿茶酚胺和常规生化指标监控优秀赛艇运动员身体机能状态. 体育科学, 2021, 41: 61-9+97
- [24] 吴政达, 陈贞佑, 周文毅, 等. 高压氧治疗对于高强度运动选手分解代谢之影响[C]. 亚太潜水与高压医学学术会议暨第二届海峡两岸高压氧医学学术会议、中华医学会第二十二次全国高压氧医学学术会议论文汇编, 2013: 49-50
- [25] 李国印. 高压氧对运动性疲劳大鼠血液生化指标的影响研究. 江西科技师范大学学报, 2019, 26: 101-5
- [26] 滕进忠, 袁春华, 郭洋琴, 等. 高压氧对疲劳大鼠肾损伤的保护作用研究. 中国运动医学杂志, 2013, 32: 525-8
- [27] 刘青红, 成国华, 樊丹, 等. 高压氧预处理对中长跑运动后运动性疲劳的影响. 中国社区医师, 2021, 37: 176-7

- [28] Ishihara A. Mild hyperbaric oxygen: mechanisms and effects. *J Physiol Sci*, 2019, 69: 573-80
- [29] Burman F. Low-pressure fabric hyperbaric chambers. *S Afr Med J*, 2019, 109: 12574
- [30] 谢蕊, 韩扬, 王敏, 等. 微高压氧治疗临床疗效初探. *中华航海医学与高气压医学杂志*, 2020, 27: 597-600
- [31] 晋宇. 高压氧干预对上海帆船运动员微循环功能的影响[D]. 上海: 上海体育学院, 2022
- [32] Zhu H, Tian G, Jin Y, et al. Effects of a 4-week micro-hyperbaric oxygen intervention on oxidation-antioxidation system function. *Revista Brasileira de Medicina do Esporte*, 2023, 29: 1-5
- [33] Qu CY, Xu MX, Lorenzo S, et al. Effects of mild hyperbaric oxygen therapy on timing sequence recovery of muscle fatigue in Chinese university male athletes. *J Exerc Sci Fit*, 2024, 22: 305-15
- [34] 瞿超艺, 黄鹏, 徐旻霄, 等. 1周不同时间微压氧干预对大鼠耐力运动后疲劳消除的影响与作用[C]. 中国体育科学学会. 第十三届全国体育科学大会论文摘要集, 2023: 3
- [35] 章政. 高压氧联合虾青素对橄榄球运动员运动性疲劳消除的效果及潜在机制的研究[D]. 上海: 上海体育学院, 2023
- [36] 陈希, 徐莉, 董英芳, 等. 康复疗养对高原官兵皮质醇影响的研究. *中国疗养医学*, 2014, 23: 486-7
- [37] 高超. 四周高压氧干预对优秀钢架雪车运动员心率变异性的影响[D]. 上海: 上海体育学院, 2021
- [38] 朱欢, 高炳宏. 高原训练期间赛艇运动员微循环血流速度的变化与Hb, BU, CK关系的研究. *河南师范大学学报(自然科学版)*, 2016, 44: 176-82
- [39] 李悦, 石莉红. 红细胞免疫调控功能的研究进展. *中国细胞生物学报*, 2022, 44: 59-67
- [40] Bosco G, Paganini M, Giacon TA, et al. Oxidative stress and inflammation, microRNA, and hemoglobin variations after administration of oxygen at different pressures and concentrations: a randomized trial. *Int J Environ Res Public Health*, 2021, 18: 9755-71
- [41] 赵莹. 高压氧对中长跑运动员心率变异性的影响[D]. 北京: 北京体育大学, 2013
- [42] 徐莉, 李小涛, 张昆龙, 等. 康复疗养中高压氧疗法对高原官兵心率变异性频域指标的影响. *心脏杂志*, 2015, 27: 55-7
- [43] 谢元攀. 吸氧干预对女子拳击运动员睡眠质量的影响[D]. 北京: 首都体育学院, 2016
- [44] 朱欢. 钢架雪车运动员运动性疲劳特征分析及高压氧恢复干预措施研究. *体育科技文献通报*, 2022, 30: 14-6+110
- [45] 朱欢. 高压氧干预对国家钢架雪车运动员微循环功能的影响及运动性疲劳消除效果研究[D]. 上海: 上海体育学院, 2023
- [46] 王文龙, 张瀚月, 米靖, 等. 高氧训练对运动表现的影响系统综述. *中国运动医学杂志*, 2022, 41: 643-51
- [47] Davies MJ, Clark B, Garvican-Lewis LA, et al. The potential to change pacing and performance during 4000-m cycling time trials using hyperoxia and inspired gas-content deception. *Int J Sports Physiol Perform*, 2019, 14: 949-57
- [48] 马国东, 罗冬梅, 徐飞, 等. 模拟海拔4800m急性低氧运动对肌氧饱和度的影响. *北京体育大学学报*, 2011, 34: 54-7
- [49] 朱欢, 胡庆华, 彭爱萍, 等. 长期太极拳运动对中老年人膝关节皮肤微血管反应性、经皮氧分压的影响. *中国应用生理学杂志*, 2020, 36: 321-3+84
- [50] 戈鹏. 不同训练人群肌氧饱和度与运动强度评价指标相关性的研究[D]. 上海: 上海体育学院, 2019
- [51] Yeung SS, Ting KH, Hon M, et al. Effects of cold water immersion on muscle oxygenation during repeated bouts of fatiguing exercise: a randomized controlled study. *Medicine*, 2016, 95: e2455-63
- [52] de Oliveira GV, Nascimento LADD, Volino-Souza M, et al. Beetroot-based gel supplementation improves handgrip strength and forearm muscle O saturation but not exercise tolerance and blood volume in jiu-jitsu athletes. *Appl Physiol Nutr Metab*, 2018, 43: 920-7
- [53] Lin HI, Chu SJ, Perng WC, et al. Hyperbaric oxygen attenuates cell growth in skin fibroblasts cultured in a high-glucose medium. *Wound Repair Regen*, 2008, 16: 513-9
- [54] 于秋红, 刘亚玲, 王丛, 等. 不同氧分压对大鼠PC12细胞生存的影响. *中华航海医学与高气压医学杂志*, 2020, 25: 239-43
- [55] Boussi-Gross R, Golan H, Fishlev G, et al. Hyperbaric oxygen therapy can improve post concussion syndrome years after mild traumatic brain injury - randomized prospective trial. *PLoS One*, 2013, 8: e79995
- [56] 张冉, 赵鹏. 微压氧对大强度训练大鼠氧化应激的影响. *体育科研*, 2018, 39: 89-93
- [57] 瞿超艺, 黄鹏, 冯亦唯, 等. 微压氧疗在疾病辅助治疗及预防中的相关研究进展. *按摩与康复医学*, 2023, 14: 70-5
- [58] Heyboer Rd M, Wojcik SM, Smith G, et al. Effect of hyperbaric oxygen therapy on blood pressure in patients undergoing treatment. *Undersea Hyperb Med*, 2017, 44: 93-9
- [59] 黎涌明, 李啸天. 睡眠对提升精英运动员竞技表现的作用及研究方向. *上海体育学院学报*, 2020, 44: 36