

微高压氧对运动性疲劳下心率变异性影响的研究进展

梁影^{1,2} 王玉新³ 李淼^{1,2} 向阳^{1,2} 乾佑玲^{1,2*} 朱欢^{1,2*}

¹湖北民族大学体育学院, 恩施土家族苗族自治州 445000;

²湖北民族大学运动科学研究中心, 恩施土家族苗族自治州 445000;

³上海体育科学研究所(上海市反兴奋剂中心), 上海 200030)

摘要 高强度训练所致的心率变异性(HRV)下降会诱发运动性疲劳产生, 并对运动员的运动表现产生不利影响, 因此高强度训练后应及时采取干预措施促进HRV恢复。作为一种新型疲劳消除方式, 微高压氧(MHBO)疗法能改善运动性疲劳状态下自主神经系统功能, 促进HRV恢复。但目前尚未有综述归纳总结MHBO疗法对运动性疲劳状态下HRV的干预效果。针对这一问题, 该研究将归纳总结MHBO对运动性疲劳状态下HRV的影响及作用机制, 并指出该领域的研究不足以及提出研究展望。研究表明: (1) 常氧环境下单次MHBO干预和持续4~8周MHBO干预均能促进运动性疲劳状态下HRV的恢复; (2) 高原低氧环境下4~6周MHBO干预能促进运动性疲劳状态下HRV的恢复; (3) 促进乳酸等代谢产物清除、调控神经递质分泌、抑制氧化应激反应是MHBO疗法促进HRV恢复的潜在机制; (4) HRV测量准确性不足, 缺少不良反应事件的记录、特殊环境下的研究证据不足以及缺乏个体差异性研究等是该领域尚需解决的问题。

关键词 微高压氧; 高强度训练; 运动性疲劳; 心率变异性; 自主神经系统功能

Research Progress on the Effects of Mild Hyperbaric Oxygen on Heart Rate Variability under Exercise-Induced Fatigue

LIANG Ying^{1,2}, WANG Yuxin³, LI Miao^{1,2}, XIANG Yang^{1,2}, QIAN Youling^{1,2*}, ZHU Huan^{1,2*}

¹School of Physical Education of Hubei Minzu University, Enshi Tujia and Miao Autonomous Prefecture 445000, China;

²Sports Science Research Center of Hubei Minzu University, Enshi Tujia and Miao Autonomous Prefecture 445000, China;

³Shanghai Research Institute of Sports Science (Shanghai Anti-Doping Agency), Shanghai 200030, China)

Abstract The decline in HRV (heart rate variability) caused by high-intensity training can trigger the occurrence of exercise-induced fatigue and has a negative impact on an athlete's performance. Therefore, timely intervention measures should be taken after high-intensity training to promote the recovery of HRV. As a new method for eliminating fatigue, MHBO (mild hyperbaric oxygen) therapy can improve the function of the autonomic nervous system under the condition of exercise-induced fatigue and promote the recovery of HRV. However, there is currently no review that summarizes the intervention effect of MHBO therapy on exercise-induced fatigue from the perspective of HRV. To address this issue, this study will summarize the influence and mechanism of MHBO on HRV in the state of exercise-induced fatigue, and clarify the research deficiencies in this field and propose research prospects. The research shows: (1) both single MHBO intervention in a normoxic environment and continu-

收稿日期: 2026-06-07 接受日期: 2026-07-24

湖北民族大学博士科研启动基金(批准号: BS25052)和2025年上海市体育科技项目(批准号: 25J018)资助的课题

*通信作者。Tel: 18372507797, E-mail: 1048396152@qq.com; Tel: 18817873692, E-mail: 1207105091@qq.com

Received: June 7, 2026 Accepted: July 24, 2026

This work was supported by the Doctoral Research Start-Up Fund of Hubei Minzu University (Grant No.BS25052) and the 2025 Shanghai Sports Science and Technology Project (Grant No.25J018)

*Corresponding authors. Tel: +86-18372507797, E-mail: 1048396152@qq.com; Tel: +86-18817873692, E-mail: 1207105091@qq.com

ous MHBO intervention for 4-8 weeks can promote the recovery of HRV under the condition of exercise-induced fatigue; (2) 4-6 weeks of MHBO intervention in a high-altitude hypoxic environment can promote the recovery of HRV under the condition of exercise-induced fatigue; (3) promoting the clearance of metabolic products such as lactic acid, regulating the secretion of neurotransmitters, and inhibiting oxidative stress responses are the potential mechanisms by which MHBO therapy promotes the recovery of HRV; (4) the measurement methods of HRV need to be optimized, there is a lack of records of adverse reaction events, insufficient research evidence in special environments, and a lack of individual difference studies, etc., which are the problems that still need to be solved in this field.

Keywords mild hyperbaric oxygen; high-intensity training; exercise induced fatigue; heart rate variability; function of the autonomic nervous system

心率变异性(heart rate variability, HRV)是指心脏节律的微小波动,即逐次窦性心搏R-R间期之间的微小时间差异,主要反映自主神经系统对心脏中窦房结的调节能力^[1]。在运动训练中,运动性疲劳所致的HRV下降会对运动员生理健康、运动能力及心理情绪等方面产生不利影响。首先,HRV下降会使心血管负荷过载、内分泌紊乱以及抑制免疫功能,导致人体生理机能下降^[2-3]。其次,HRV下降还会使人体最大摄氧量和力量爆发力下降^[4-6],严重影响人体运动能力。此外,HRV下降还会导致人体出现焦虑、注意力集中困难及决策反应迟缓等心理认知功能障碍,削弱运动动机^[7]。因此,运动性疲劳状态下采取有效的干预措施对促进运动员HRV恢复,改善运动员身体机能和提高运动表现有着重要意义。

微高压氧(mild hyperbaric oxygen, MHBO)干预是指暴露在1~2个绝对大气压(absolute atmosphere, ATA)、氧气浓度大于21%(多介于22%~39%)的环境下进行吸氧干预^[8-9]。MHBO干预能显著提高血液中的物理溶氧量和氧分压,增大血液与细胞间的氧压力差,提高氧气弥散效率并延长弥散距离,有效改善细胞的缺氧状态^[10]。由于缺氧造成的细胞内环境稳定性失调、应激反应等是疲劳导致HRV下降的核心机制^[11-12],所以MHBO是恢复HRV的潜在手段。此外,MHBO干预还具有绿色环保、无侵入性、副作用少、无兴奋剂风险及设备简单易操作等特点,适用于在运动训练中推广^[13-16]。但通过对相关文献梳理,发现已有的研究主要是基于整体视角归纳总结MHBO对运动性疲劳的干预效果^[9,13-14,17],尚未有研究从HRV角度阐述MHBO对运动性疲劳的干预效果。因此,现有的研究存在研究内容细化程度和研究深度不足等问题。针对这一问题,本研究以HRV为切入

点,归纳总结MHBO对运动性疲劳状态下HRV的干预效果及其作用机制,并明确该领域的研究不足以及提出研究展望。

1 单次MHBO疗法对运动性疲劳状态下HRV的急性干预效应

1.1 60 min MHBO对HRV的急性干预效应

在训练实践中,探讨MHBO的单次干预效果有着重要意义,其不仅可以为后续长期干预方案提供“时间”剂量参考,且有助于了解干预过程中可能存在的不良反应,为长期干预提供安全保障。Hu等^[18]研究发现,1.3 ATA-MHBO干预能加快力竭运动(由5.7 km/h逐渐增大11.8 km/h,坡度由7%逐渐增大到14%)后受试者R-R间期差值的均方根(root mean square of successive difference, RMSSD)、相邻R-R间期差值的标准差(standard deviation of successive difference, SDSD)等HRV指标和静息心率的恢复。在力竭运动中,随着运动强度的增大,机体会出现明显的缺氧状态,乳酸等代谢产物大量产生,导致细胞外液酸碱值下降、氧化应激损伤、代谢产物堆积等现象发生,造成自主神经功能障碍。MHBO疗法能提高动脉含氧量,改善细胞缺氧状态并诱导外周血管收缩。上述变化通过化学和压力感受器反射使副交感神经兴奋,并通过反馈机制使心率下降。

胡晓越等^[19]得出相似结论,60 min 1.3 ATA-MHBO能显著促进运动员温盖特最大无氧功率测试后心率的恢复。该研究认为,MHBO干预后运动员心率的变化与副交感神经的再激活有关。副交感神经可以刺激乙酰胆碱释放,乙酰胆碱与肌细胞膜上的受体结合引起膜通透性变化,促进钾离子外流,使细胞兴奋性下降,进而降低心率。但在胡晓越等^[19]

的研究中,未测量HRV的相关指标,这是该研究在指标设计中存在的不足。因此该结论是基于理论知识推导的间接证据,其力度和等级较弱,有待于进一步验证。此外,阮文军^[20]以具有中枢疲劳的射击运动员为研究对象,发现60 min MHBO(1.3~1.5 ATA)干预能够显著提升运动员RMSSD、全部窦性NN间期标准差(standard deviation of all normal-to-normal intervals, SDNN)、高频功率(high frequency, HF)、极低频功率(very low frequency, VLF)等HRV指标。射击是典型的长时间高强度的脑力活动,训练和比赛中易产生中枢疲劳。中枢疲劳会影响射击运动员的注意力、专注度、思考和决策等能力,进而影响运动表现。该研究显示,MHBO疗法能有效促进射击运动员中枢疲劳消除。基于中枢神经功能对射击运动员运动表现的影响,可将MHBO作为改善射击运动员赛前神经系统功能以及赛后促进中枢疲劳消除的重要手段。但由于该研究未设置对照组(静坐或静卧),因此无法确定MHBO疗法是否优于单一的静坐或静卧恢复,这是该研究在设计上存在的重要缺陷。即使未进行MHBO干预,60 min的休息(静坐或静卧)可能也会改善运动员的HRV。

以上研究均揭示,单次60 min MHBO疗法能促进高强度运动后HRV的恢复(表1)。但在上述研究中,受试者的疲劳状态和MHBO的干预时机存在差异。在Hu等^[18]、胡晓越等^[19]的研究中,干预时机是指力竭运动后的急性疲劳状态。急性疲劳状态下细胞存在明显的缺氧现象,并可能产生过量的自由基诱发氧化应激损伤^[21-22]。但在阮文军^[20]的研究中,运动员处于慢性疲劳状态(非训练的休息时段)。该疲劳状态是由于长期高强度训练而致的疲劳积累、功能状态下降低现象。在该状态下,细胞不存在急性缺氧,而是处于慢性缺氧状态。由于缺氧程度不同,HRV的变化可能存在差异,但MHBO对于两种疲劳状态下的HRV均显示出了良好的干预效果。基于这一发现,作者认为在急性疲劳期和慢性疲劳期中均可使用MHBO促进运动员HRV的恢复。但两种状态下MHBO的干预效果是否存在差异,尚缺乏对比研究,建议后续研究对比不同疲劳状态下MHBO对HRV的干预效果,进而为最佳干预时机的选择提供科学依据。

1.2 MHBO干预HRV的“时间-剂量”效应

有研究进一步探讨60 min内MHBO干预HRV的“时间-剂量”效应对运动后自主神经恢复的影响。张

晓炳等^[23]研究表明,20 min、30 min、45 min、60 min MHBO(1~2 ATA)干预均能改善射击运动员的HRV,但不具有正向的“时间-剂量”效应关系。其原因可能在于射击运动员训练负荷较小,运动时缺氧程度较轻,中枢疲劳程度较低,短时间的补氧干预即可达到良好的恢复效果。因此,随着MHBO干预时间的延长,不能进一步引起HRV的显著变化。这提示,对于射击运动员MHBO干预时间的选择,可根据运动员具体训练需要进行调整。对于训练课间的恢复(休息时间较短),可选择20 min的时间剂量。若在晚间睡前或恢复时间比较充足时,则建议延长治疗时长至60 min。学者李清正^[24]得出相似结论,20 min、30 min的MHBO(1.225~1.293 ATA)干预能够提高副交感神经活跃度及降低张力水平,但组间干预效果无显著性差异。该研究还发现,10 min的干预无法有效促进HRV的恢复^[24]。综合张晓炳、李清正两位学者的研究结果,认为至少持续20 min的MHBO干预才能促进大强度运动后HRV的恢复;随着时间的延长,干预效果不具有正向的“时间-剂量”效应关系。但该结论主要基于射击运动员和举重运动员而得出,不同运动项目的疲劳类型和疲劳程度存在差异,该结论是否适用于其他运动项目还需训练实践研究验证。

通过对上述研究梳理,发现相关研究中MHBO的干预时间主要介于20~60 min/次,并以60 min为主,未探讨60 min以上的时间-剂量所产生的干预效果。针对这一问题,Mihailovic等^[25]将干预时间延长至75 min,发现1.3 ATA-MHBO干预能显著促进自行车运动员力竭骑行后RMSSD等HRV指标的恢复,并提高后续的运动表现。但由于缺乏对比研究,尚不能确定75 min是否较60 min具有更佳的干预效果。理论上,随着补氧时间的延长(如超过60 min),MHBO疗法可能会带来更好的干预效果。但高剂量的MHBO疗法可能会通过活性氧(reactive oxygen species, ROS)介导的氧化应激损伤诱发中枢性氧中毒^[26]。因此,在使用高剂量(单次干预时间超过60 min)的MHBO疗法时应对其潜在的风险进行评估。

综上,常氧环境下单次MHBO能有效促进高强度运动后HRV的恢复(表1),但相关研究也存在局限性。首先,该结论仅局限于跑步、射击、自行车、举重等项目。不同运动项目的疲劳特征和疲劳程度具有差异性,如技心能主导类项目(以心理调控为主

导)以中枢神经系统疲劳为主要特征,但整体疲劳程度相对较轻;体能主导类运动后,运动员中枢疲劳与外周疲劳并存,疲劳程度更为显著,而技能主导类与技战术主导类项目(以技战术对抗为主导)的疲劳特征介于上述两类之间。由于疲劳程度不同,MHBO疗法对HRV的干预效果可能存在差异。但目前尚未发现有研究对比MHBO疗法对不同项目运动员HRV的干预效果。针对这一问题,建议后续研究针对不同运动项目,并且应根据其疲劳特点和程度,制定贴合训练实践和需求的MHBO干预剂量。另外,相关研究仅探讨了常氧环境下MHBO对HRV的干预效果,缺乏低氧环境下的相关研究。在训练实践中,高原低氧、人工低氧等已成为耐力性项目的强化训练手段^[27]。该环境下运动员面临自然缺氧和训练缺氧双重刺激,两种因素叠加所造成的疲劳程度可能更深,该状态下MHBO是否具有显著的干预效果尚不明确。此外,相关研究均未记录和监控运动员干预过程中出现的不良反应,这是相关研究普遍存在的问题。

2 周期性多次MHBO疗法对高强度运动后HRV的干预效应

2.1 常氧环境下周期性多次MHBO疗法对HRV的干预效应

在训练实践中,运动员每天都会承受高强度的训练负荷。为了次日拥有良好的训练状态,需要在高强度训练后及时进行恢复干预。单次MHBO对疲劳状态下HRV的干预效应能在长期干预过程中得到有效积累。谢元攀^[28]研究发现,2周(7次/周,60 min/次)1.3 ATA-MHBO干预能够有效改善拳击运动员的HRV参数,表现为SDNN、RMSSD、总功率(total power, TP)及HF增加,VLF和低频功率/高频功率(low frequency/high frequency, LF/HF)值显著降低。该研究还发现,MHBO干预可显著提高睡眠质量,具体表现为睡眠效率提高、深睡阶段比例增加、睡眠中断次数减少^[28]。有研究得出类似结论,6次MHBO干预能改善耐力运动员(每天进行90 min的高强度有氧训练)的主观睡眠质量以及提高大脑的供氧能力^[29]。睡眠质量和HRV之间有密切关系。有研究指出,睡眠剥夺会显著降低RMSSD,同时显著升高LF、LF/HF值,表明睡眠不足会导致副交感神经张力下降和交感神经优势增强,使身体倾向于战斗的应激状态^[30]。良好的睡眠

能进一步调节HRV的变化,促进自主神经功能恢复。这提示,在评价MHBO对HRV的干预效果时,同时也应关注运动员睡眠质量的变化。此外,MHBO对睡眠的干预效果可以持续存在多日。有研究在试验结束后对运动员进行回访,发现MHBO对睡眠的干预效果仍存在,表现为睡眠质量得到提升以及失眠时间提前^[20]。但该研究未明确回访的具体时间,因此无法明确干预效果的持续时间。

另外,高超^[31]以钢架雪车运动员为研究对象,发现4周1.3 ATA-MHBO干预(4次/周,60 min/次)能显著降低钢架雪车运动员的LF/HF值,促进自主神经功能恢复。Hu等^[32]得出相似结论,该研究在最大强度的冲刺间歇训练后对受试者进行1.3 ATA-MHBO干预(4周,3次/周,60 min/次),发现LF、HF、LF/HF、RMSSD、SDNN、SDSD指标均得到显著改善,表明受试者自主神经功能得到显著改善。以上研究揭示,持续4周的MHBO干预能显著改善高强度运动后运动员的HRV。此外,马涛^[33]将干预时间延长到8周,发现1.3 ATA-MHBO干预(3次/周,60 min/次)可以有效调节高温高湿环境下平行大回转运动员的HRV,改善自主神经和中枢神经功能,并提升运动员的睡眠质量。在高温高湿训练环境下,长时间高负荷训练会导致机体体内的酶活性、大脑的血流速度及氧化能力明显降低,机体新陈代谢效率降低,更易诱发中枢疲劳^[34]。由于多方面的条件限制,该研究无法在训练后的急性疲劳期(训练结束后即刻)对运动员进行MHBO干预,而是选择训练日的晚间和休息日进行干预(慢性疲劳状态)。该研究结果对于指导运动训练实践具有重要现实意义。在训练实践中,由于训练环境及训练安排等限制,部分项目在训练后无法即刻进行MHBO干预,而是在慢性疲劳状态下进行MHBO干预,上述研究为该状态下MHBO的长期干预提供了理论支撑和应用依据。

综上,现有的研究表明常氧环境下持续4~8周MHBO(60 min/次,3~7次/周)干预能有效促进高强度运动后HRV的恢复(表1),该疗法可以作为促进该训练环境下运动员HRV恢复的有效方式。但上述研究在干预时间的选择上同样存在局限性,即均为60 min/次。另外,相关研究在干预时间选择上缺乏依据,需多参考其他研究。不同运动项目的疲劳特点不同,统一使用60 min/次的干预时间缺乏对运动项目特异性的考量。针对这一问题,在后续研究中急切需要

表1 有关MHBO对运动性疲劳状态下HRV影响的研究(按照参考文献在文中出现的先后顺序)

Table 1 Studies on the effects of MHBO on HRV under exercise-induced fatigue (in the order of reference citations in the text)

序号	研究对象	高强度类型	疲劳状态	MHBO干预方案	干预后HRV相关参数的改善情况	研究结论	参考文献
No.	Subjects	High-intensity exercise modality	Fatigue status	MHBO intervention protocol	Improvements in HRV-related parameters after intervention	Conclusions	References
1	Fourteen male physical education majors	Incremental load graded test	Acute fatigue	Sixty min MHBO (1.3 ATA) intervention and natural recovery, respectively	RMSSD, SDSD increased; the MHBO intervention group was superior to the natural recovery group	MHBO can significantly promote the recovery of HRV	[18]
2	Eleven short-track specialized athletes	30 s wingate maximal anaerobic power test	Acute fatigue	Sixty min MHBO (1.3 ATA) intervention and natural recovery, respectively	HR decreased significantly	MHBO can significantly promote the recovery of HRV	[19]
3	Ten shooting athletes (3 males, 7 females)	Pre-competition specialized technical training	Chronic fatigue	Sixty min MHBO (1.3-1.5 ATA) intervention	RMSSD, SDNN, HF, VLF increased significantly	MHBO can significantly promote the recovery of HRV	[20]
4	Fourteen shooting athletes (10 males, 4 females)	Pre-competition specialized technical training	Chronic fatigue	Twenty min, 30 min, 45 min, 60 min MHBO (1-2 ATA) interventions, respectively	SDNN, SDSD, RMSSD, TP, LF/HF increased, with no inter-group difference	MHBO can significantly promote the recovery of HRV, with no positive time-dose effect	[23]
5	Nine weightlifting athletes (6 females, 3 males)	Pre-competition specialized physical fitness and technical training	Chronic fatigue	Twenty min and 30 min MHBO (1.225-1.293 ATA) interventions, respectively	Parasympathetic nerve activity increased; resting heart rate and tension level decreased on average	MHBO for more than 20 min can significantly promote the recovery of HRV	[24]
6	Twelve male cyclists	Incremental load cycling training	Acute fatigue	Seventy-five min MHBO (1.3 ATA) intervention and natural recovery, respectively	R-R, lnRMSSD increased	MHBO can significantly promote the recovery of HRV	[25]
7	Nine female boxers	Specialized physical fitness and technical training	Chronic fatigue	Thirty min normobaric oxygen inhalation and 60 min MHBO (1.3 ATA, once per day for 2 weeks), respectively	SDNN, pNN50, RMSSD, NN50, TP, VLF, LF, HF, LF/HF, sleep efficiency and sleep ratio increased; sleep arousal times decreased	MHBO can significantly promote HRV recovery and improve sleep quality	[28]
8	Fourteen skeleton athletes (8 females, 6 males)	Specialized physical fitness training	Chronic fatigue	Sixty min MHBO (1.3 ATA, 4 times per week for 4 weeks) and natural recovery plus retraining, respectively	LF/HF decreased, with more pronounced changes in the MHBO group	MHBO can significantly promote the recovery of HRV	[31]
9	Twenty-four male physical education undergraduates	Wingate standard sprint interval training	Acute fatigue	Sixty min MHBO (1.3 ATA, 3 times per week for 4 weeks) and natural recovery, respectively	SDNN and RMSSD showed an upward trend in the MHBO group	MHBO can significantly promote the recovery of HRV	[32]
10	Sixteen parallel giant-slam athletes (8 females, 8 males)	Specialized physical fitness training	Chronic fatigue	Sixty min MHBO (1.3 ATA, 3 times per week for 8 weeks) and natural recovery plus retraining, respectively	TP, HF _{n.u.} , LF _{n.u.} , LF/HF and HR all decreased; changes were more pronounced in the MHBO group	MHBO can promote HRV recovery, which could not return to pre-training levels	[33]
11	Fifteen parallel giant-slam athletes (8 females, 7 males)	Specialized alpine skiing training	Chronic fatigue	Sixty min MHBO (1.3 ATA, 4 times per week for 4 weeks) and natural recovery plus sub-plateau winter training, respectively	TP, HF _{n.u.} increased; LF _{n.u.} , LF/HF decreased; changes were more pronounced in the MHBO group	MHBO can promote HRV recovery, which could not return to pre-training levels	[33]

续表1

序号	研究对象	高强度类型	疲劳状态	MHBO干预方案	干预后HRV相关参数的改善情况	研究结论	参考文献
No.	Subjects	High-intensity exercise modality	Fatigue status	MHBO intervention protocol	Improvements in HRV-related parameters after intervention	Conclusions	References
12	Twelve skeleton athletes (6 males, 6 females)	Track sliding training	Chronic fatigue	Sixty min MHBO (1.3 ATA, 4 times per week for 4 weeks) and natural recovery plus sub-plateau winter training, respectively	Nervous system function score increased and HR decreased; changes were more pronounced in the MHBO group	MHBO can significantly promote the recovery of HRV	[35]
13	Fifteen parallel giant-salom athletes (8 females, 7 males)	Specialized alpine skiing training	Chronic fatigue	Sixty min MHBO (1.3 ATA, 3 times per week for 6 weeks) and natural recovery plus high-altitude winter training, respectively	TP, HFn.u. increased; LFn.u., LF/HF, HR decreased; changes were more pronounced in the MHBO group	MHBO can promote HRV recovery, which could not return to pre-training levels	[37]

NN50: 相邻正常窦性心搏间期差值大于50 ms的个数; pNN50: NN50占总正常窦性心搏间期数的百分比。
NN50: number of interval differences of successive NN (normal-to-normal) intervals greater than 50 ms; pNN50: proportion of NN50 divided by the total number of NN intervals.

根据不同运动项目的疲劳特点和程度探讨不同时间—剂量的干预效果, 为长期干预提供时间依据。此外, 上述研究仅研究了4周和8周MHBO对HRV的干预效果。不同运动项目以及同一项目在不同训练年度时, 其阶段化的训练时间安排存在差异。因此, 为了更加贴合训练实践, 建议相关研究采取多样化的干预周期, 使研究结果更加贴合训练需求和训练实践。

2.2 高原低氧环境下周期性多次MHBO疗法对HRV的干预效应

与常压常氧环境相比, 高原环境主要表现为低氧并可能伴随着冷应激。因此与常规训练环境相比, 高原环境的大气压强较小, 空气较稀薄, 氧分压降低, 每次呼吸吸入的氧分子减少, 导致肺泡中的氧气含量下降, 进而降低血氧饱和度。有研究指出, 急性暴露于缺氧环境的机体可能通过代偿性增加血红蛋白和红细胞数量弥补缺氧症状, 但此时肺部毛细血管与肺泡之间的氧分压仍低于平原, 使得氧气在短时间内不能扩散到毛细血管, 造成血氧饱和度下降^[35]。此外, 运动员在冬季进行高原训练时还会面临冷应激。在冷环境下运动, 机体无氧代谢供能的比例增加, 肌乳酸和血乳酸水平明显升高, 导致机体内环境的酸化, 影响细胞的代谢活动, 进而引起更深的疲劳程度。

MHBO疗法能通过提高供氧能力和恒温效应有效促进HRV的恢复。朱欢^[35]研究发现, 冬训亚高原低氧环境下, 4周1.3 ATA-MHBO(4次/周, 60 min/次)干预

能提高国家钢架雪车运动员运动后中枢神经功能状态得分以及综合准备状态得分。在该研究中, 运动员处于低温低氧的训练环境, 且训练内容为危险系数较高的赛道高速滑行训练。多种因素的叠加可能会使运动员发生较为明显的自主神经功能紊乱, 而MHBO干预能有效促进运动员HRV的恢复。另外, 该研究的干预时间也是训练日的晚间和非训练的休息日, 运动员处于慢性疲劳状态。因此, 该研究也再次佐证了MHBO对慢性疲劳状态下HRV的干预效果。但该研究仅测量了运动员干预前后自主神经系统功能的评分, 未进一步分析HRV相关指标的变化。因此, 该研究仅能从整体上明确MHBO对HRV的干预效果, 无法明确HRV的具体变化特点, 这是该研究在指标设计上的缺陷。

学者马涛^[33]的研究弥补了这一缺陷。该研究发现在冬训亚高原低氧环境下, 4周1.3 ATA-MHBO干预(4次/周, 60 min/次)能提高国家平行大回转运动员TP、归一化高频功率(high-frequency power in normalized units, HFn.u.)等指标水平, 并使LF/HF下降。另外, 该研究还发现试验后干预组运动员的匹兹堡睡眠质量得分显著低于对照组, 表明高原环境下MHBO也能有效地改善运动员的睡眠质量。马海林等^[36]得出类似结论, 该研究发现30 d(共计20次, 60 min/次)MHBO干预能显著提高高原移居者HF水平, 并使LF、LF/HF及匹兹堡睡眠质量得分显著下降, 且试验结束后的第15天干预效果仍存在。由于缺氧、

训练不适应等原因,运动员在高原训练中易出现睡眠问题,不仅影响训练质量,且会诱发疾病的产生。上述研究为高原训练期间使用MHBO疗法改善睡眠质量提供了有力的证据支持。此外,马涛等^[37]还探讨了高原低氧环境下MHBO对HRV的干预效果。该研究发现,与自然恢复相比,6周(4次/周,60 min/次)1.3 ATA-MHBO干预对平行大回转运动员HRV具有更好的调节作用,表明MHBO能促进运动员自主神经功能恢复。但整个冬训期间训练强度较大,加上低温低氧刺激(海拔介于2 500~3 000米,温度为-24℃到-13℃,使运动员产生较深的中枢疲劳,试验后两组运动员部分HRV指标仍未恢复到试验前水平,表明运动员的自主神经功能未完全恢复。该研究提示,当多种因素导致运动员疲劳较深时,可能需要改善MHBO的干预方案,以获得更佳的干预效果。

综上,现有的研究表明自然低氧环境下,4~6周MHBO干预(4次/周,60 min/次)能有效促进大强度运动后HRV的恢复(表1)。另外,目前各类高压氧舱内部装备温度控制系统^[15,38],可避免运动员因高原冷应激而加剧疲劳,进而优化MHBO疗法的干预效果。但上述研究在干预时间、运动项目等方面存在局限性。首先,上述研究的干预时间均为60 min/次,未探究其他干预时间对HRV的干预效果。就马涛等^[37]学者的研究结果而言,单次60 min的MHBO干预并不能完全逆转高原环境下运动员HRV的变化。因此,建议后续研究探讨60 min以上的时间剂量对高原低氧低温环境下HRV的干预效果,进而为该环境下运动员疲劳的消除提供更有效的方法。其次,上述研究仅涉及钢架雪车、平行大回转等冬季奥运会项目,对夏季奥运会项目的研究缺失。对于游泳、赛艇等夏季奥运会项目,高原训练和人工低氧训练均是重要的训练手段,但目前尚未有研究探讨MHBO在这些项目中的应用研究。因此,拓展应用项目并探讨人工低氧环境下MHBO对HRV的干预效果十分必要。

3 MHBO干预改善大强度运动后HRV的潜在机制

3.1 促进乳酸等代谢产物的清除

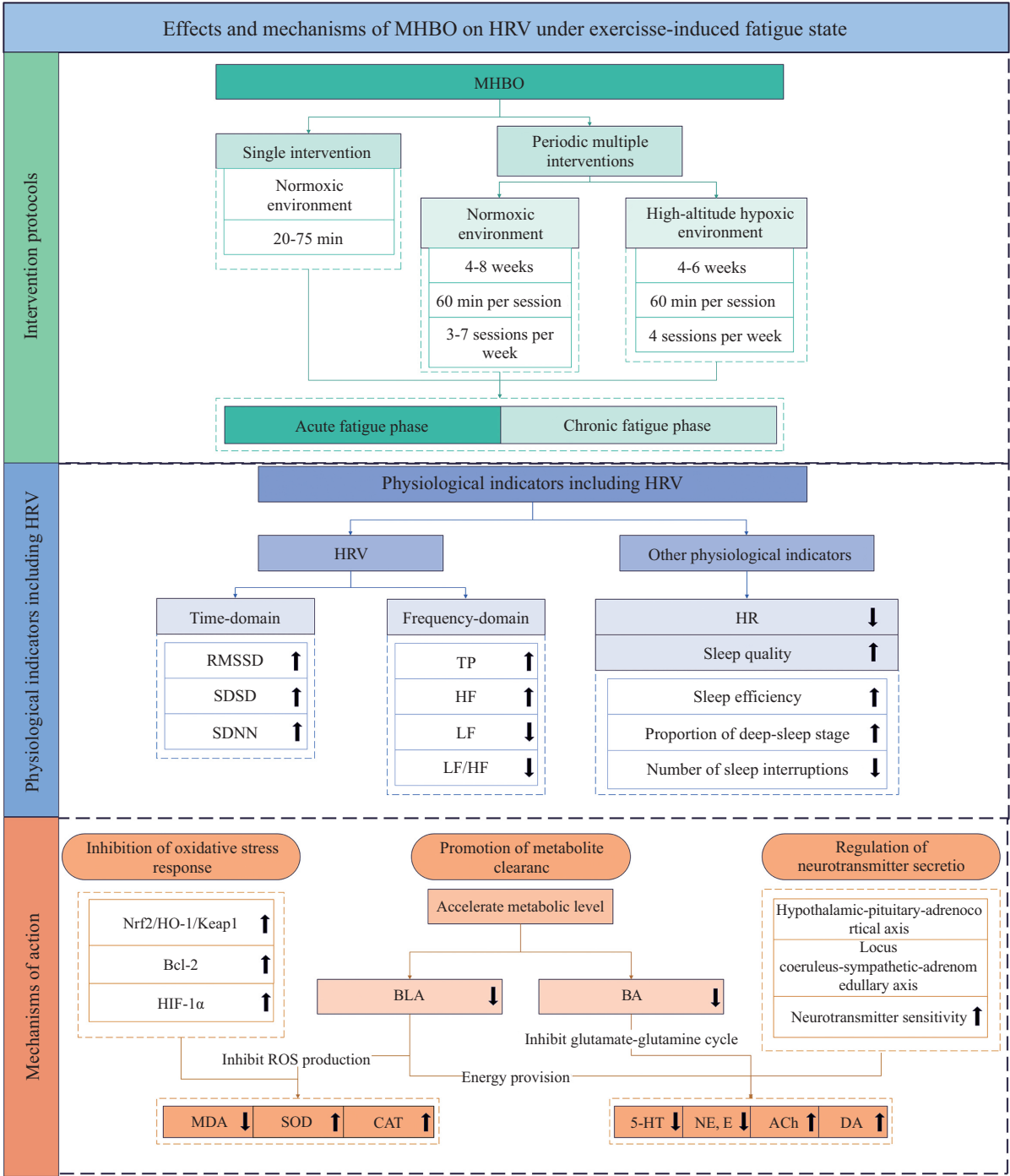
HRV主要反映自主神经系统功能,而自主神经系统受大脑皮层、边缘系统(通过脑干)等中枢神经系统的调控。大强度运动后乳酸等代谢产物会在中

枢神经系统内过度蓄积,进而抑制中枢神经功能。适量的乳酸能为神经元的活动提供能量,但过度的乳酸堆积会对神经元产生抑制作用,加深中枢疲劳程度。因高耗能、弱抗氧化等特点,神经元易受到氧化应激损伤。过多的乳酸会影响正常线粒体的功能,导致更多的线粒体活性氧自由基产生,诱导神经元产生氧化应激损伤^[39]。MHBO疗法可提升动脉血氧含量与大脑的供氧能力,加快高强度运动后乳酸的清除,抑制线粒体自由基的产生^[40]。乳酸是大脑细胞能量代谢的后备力量,通过星形胶质细胞-神经元乳酸穿梭等方式在大脑中转运,其在供氧充分的情况下通过三羧酸循环产生三磷酸腺苷(adenosine triphosphate, ATP),为中枢神经细胞提供能量。随着脑细胞中乳酸的清除,细胞外液的pH值等得到恢复,细胞内环境稳态得以重建,为神经系统功能的恢复创造有利条件。

大强度运动后氨的大量蓄积也会抑制神经元的功能。首先,血氨蓄积通过降低 Na^+/K^+ -ATP酶活性、影响钙离子转运与信号转导、破坏离子通道功能等影响离子转运,降低神经细胞的兴奋性^[41]。其次,高浓度氨还会直接干扰神经细胞内ATP的合成,抑制三羧酸循环,造成神经细胞供能紊乱和内环境稳态紊乱,进一步加剧神经元的受损^[42]。MHBO通过提高大脑神经细胞的供氧能力、抑制糖酵解代谢以及改善有氧代谢为血氨转化成尿素、谷氨酰胺提供能量,进而促进血氨代谢,加快血氨清除速率^[30]。MHBO还能减少肌氨释放,促进肝脏对氨的清除。随着血氨水平的下降,离子转运过程、神经元的供能等得到恢复,为提高神经细胞兴奋性提供条件。此外,伴随着血氨水平的下降,谷氨酸-谷氨酰胺循环得到恢复,进而调控神经递质的分泌(图1)。但受检测手段和人体试验的限制,目前相关研究主要是检测血乳酸和血氨含量的变化,未直接对脑脊液中血乳酸和血氨的含量进行检测。针对这一问题,建议后续研究通过动物实验探讨脑脊液乳酸和氨水平的变化。

3.2 调控神经递质分泌

高强度运动后神经递质的分泌紊乱是造成神经系统疲劳的重要诱因,且神经递质的传递过程可直接影响心脏自主神经系统的调节功能^[42]。兴奋性递质和抑制性递质通过作用于突触后膜上的受体,共同调节神经元的兴奋性。长时间高强度运动会影



MHBO: 微高压氧; HRV: 心率变异性; HR: 心率; RMSSD: R-R间期差值的均方根; SDSD: 相邻R-R间期差值的标准差; SDNN: 全部窦性NN间期标准差; TP: 总功率; HF: 高频功率; LF: 低频功率; LF/HF: 低频功率/高频功率; Nrf2/HO-1/Keap1: 核因子E2相关因子2/血红素氧合酶1/Kelch样ECH相关蛋白1; Bcl-2: B细胞淋巴瘤-2; HIF-1 α : 缺氧诱导因子-1 α ; BLA: 血乳酸; BA: 血氨; 5-HT: 5-羟色胺; NE: 去甲肾上腺素; E: 肾上腺素; ACh: 乙酰胆碱; DA: 多巴胺; ROS: 活性氧; MDA: 丙二醛; SOD: 超氧化物歧化酶; CAT: 过氧化氢酶。图中向上箭头代表指标水平升高, 向下箭头代表指标水平降低。

MHBO: mild hyperbaric oxygen; HRV: heart rate variability; HR: heart rate; RMSSD: root mean square of successive difference; SDSD: standard deviation of successive difference; SDNN: standard deviation of all normal-to-normal intervals; TP: total power; HF: high frequency; LF: low frequency; LF/HF: low frequency/high frequency; Nrf2/HO-1/Keap1: nuclear factor erythroid 2-related factor 2/heme oxygenase-1/Kelch-like ECH-associated protein 1; Bcl-2: B-cell lymphoma-2; HIF-1 α : hypoxia-inducible factor-1 α ; BLA: blood lactic acid; BA: blood ammonia; 5-HT: 5-hydroxytryptamine; NE: norepinephrine; E: epinephrine; ACh: acetylcholine; DA: dopamine; ROS: reactive oxygen species; MDA: malondialdehyde; SOD: superoxide dismutase; CAT: catalase. The upward arrow indicates an increase in the index value, and the downward arrow indicates a decrease in the index value.

图1 MHBO对运动性疲劳状态下HRV的影响及作用机制

Fig.1 Effects and mechanisms of MHBO on HRV under exercise-induced fatigue

响兴奋性递质和抑制性递质的分泌,如使5羟色胺和多巴胺的分泌失衡,表现为5羟色胺浓度升高,而多巴胺水平下降,这种神经递质的分泌不平衡会加深中枢疲劳的程度^[43]。此外,高温高湿环境下运动会使多巴胺水平进一步降低,加重中枢神经疲劳^[44]。由此可见,高强度训练所造成的神经递质紊乱是诱发中枢疲劳产生的重要因素。

MHBO干预能有效缓解运动员中枢疲劳时的神经递质紊乱状态。耿治中^[45]发现,MHBO干预可通过改善能量代谢和细胞氧供状态,促进运动员乙酰胆碱、多巴胺的生成以及抑制5羟色胺、肾上腺素、去甲肾上腺素等神经递质的释放。多巴胺等神经递质的合成与释放等过程均需要依赖机体的有氧代谢提供大量的ATP。如前所述,MHBO干预能提高细胞的供氧能力、优化线粒体功能,进一步将乳酸进行氧化代谢,为多巴胺等神经递质的合成提供能量(图1)。此外,MHBO干预还能抑制肾上腺素、去甲肾上腺素等神经递质的释放^[45]。在作用机制上,MHBO可能通过调控下丘脑-垂体-肾上腺皮质轴和蓝斑-交感-肾上腺髓质轴的功能抑制儿茶酚胺激素的释放(图1)。此外,MHBO环境下,增强突触间隙中神经元对相关神经递质的敏感性可能也是调控上述神经递质释放的重要原因(图1)。

3.3 抑制氧化应激反应

大强度运动后神经元线粒体耗氧量剧增、缺血-再灌注、炎症激活及血脑屏障通透性增加,导致脑组织ROS大量生成、抗氧化储备耗竭,形成氧化-抗氧化失衡,引发大脑氧化应激^[46]。另外,大强度运动会使血液中肾上腺素、去甲肾上腺素等儿茶酚胺激素升高,进一步加剧氧化反应。研究发现,去甲肾上腺素通过 α 受体/蛋白激酶C/核因子 κ B途径促进烟酰胺腺嘌呤二核苷酸磷酸氧化酶2(nicotinamide adenine dinucleotide phosphate oxidase 2, NOX2)表达,从而引发氧化应激^[47]。另外,儿茶酚胺浓度升高会使交感神经过度兴奋,细胞和线粒体的耗能增加,电子流转加快,进而产生更多的自由基。神经元对自由基的敏感性较高,过多的自由基会造成神经细胞脂质、蛋白质及DNA的氧化损伤,改变神经细胞膜的流动性,引发线粒体功能障碍、钙稳态失衡与神经炎症反应,导致神经细胞功能受损甚至凋亡。有研究发现,大强度运动后机体氧化应激程度增加,不仅损伤中枢神经系统,且会造成心脏自主神经系统

功能的损伤^[48]。由此可见,大强度训练所产生的氧化应激反应会损伤神经系统功能,使自主神经等出现功能障碍。

多项研究指出,高强度运动后采取MHBO干预能降低血清丙二醛(malondialdehyde, MDA)含量,并提高超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)、过氧化氢酶(catalase, CAT)活性^[40,49]。在这个过程中,MHBO主要通过提高氧分压激活转录因子和基因表达水平,提高抗氧化酶活性,减弱氧化应激反应^[50]。核因子E2相关因子2(nuclear factor erythroid 2-related factor 2, Nrf2)/血红素氧合酶1(heme oxygenase-1, HO-1)/Kelch样ECH相关蛋白1(Kelch-like ECH-associated protein 1, Keap1)通路能够通过转导含NOD样受体家族pyrin结构域蛋白3(NOD-like receptor family pyrin domain-containing protein 3, NLRP3)和半胱氨酸天冬氨酸蛋白酶3(cysteine-aspartic acid protease-3, Caspase-3)信号分子调节肝组织脂质过氧化、自由基损伤和内皮细胞的功能障碍,是人体内抗氧化应激的关键转录通路^[51]。MHBO干预能够通过提高氧分压,激活Nrf2,活化的Nrf2进入细胞核与抗氧化反应元件(antioxidant response element, ARE)结合,形成Nrf2-ARE信号通路^[52]。通过此通路,能够促进抗氧化酶的合成。同时,Nrf2参与细胞防御机制时会作用于几种已知的酶,其中包括HO-1,这些酶可以减少自由基负荷。HO-1是Nrf2蛋白下游的关键因子,MHBO干预能够通过ROS/p38丝裂素活化蛋白激酶(p38 mitogen activated protein kinase, p38 MAPK)/Nrf2通路诱导HO-1表达,HO-1通过催化血红素氧化代谢,产生一氧化氮,保护神经细胞免受氧化应激损伤^[53-54]。

另外,B细胞淋巴瘤-2(B-cell lymphoma-2, Bcl-2)作为一种参与抑制细胞凋亡的蛋白,能够对抗氧自由基,减轻氧自由基对神经细胞的损害。HBO疗法能促进Bcl-2蛋白表达,抑制细胞凋亡^[55]。此外,氧分压/氧含量升高还会激活缺氧诱导因子-1 α (hypoxia-inducible factor-1 α , HIF-1 α),HIF-1 α 能够稳定存在并进入细胞核与HIF-1 β 形成异源二聚体,激活下游基因表达,减少细胞耗氧量并降低ROS水平^[56]。伴随着自由基的清除和细胞抗氧化能力的提升,神经细胞内的线粒体功能得到恢复,进而促进脑源性神经营养因子(brain-derived neurotrophic factor, BDNF)释放,增强BDNF/TrkB/CREB信号通路的活性,促进突触和轴突形成,增强神经的可塑性,促进神经功能恢复。

综上, MHBO疗法可能通过加快代谢产物清除、调控神经递质分泌、抑制氧化应激反应等路径促进高强度运动后HRV的恢复(图1), 且上述路径的作用机制存在一定关联。但整体上, 目前有关MHBO疗法改善HRV的机制研究仍较少, 且多数研究属于间接证据链或基于理论知识推导而出, 相关研究的证据力度和等级较低。另外, 较少有研究深入到相关基因信号通路探讨深层次内在的机制通路。此外, 有关不同机制路径间的协同或相互作用的研究也较为浅显, 其内在的逻辑关系尚不清晰。因此, 提高相关研究的证据力度、等级以及明确不同机制路径间的相互作用是后续需要重点解决的问题。

4 研究不足与研究展望

4.1 HRV测量方法有待优化

HRV的测量易受环境(温度、海拔等)、水合状态、药物及情绪等因素的干扰, 因此如何保证测量结果的客观性是面临的现实难题, 仅单次测量可能无法保证测量结果的科学性。有研究指出, 鉴于HRV单日测量波动可达6.5%, 应使用“7 d滚动平均值”来评估趋势, 可以有效减少“II型错误”, 更真实地反映自主神经系统的适应性^[57]。但在训练实践中, 使用“7 d滚动平均值”也会存在弊端。7 d内混杂干扰因素(如不同训练内容、营养补充、心理状态波动等)过多, 也会对测量结果产生影响。综合以上因素, 建议在训练实践中将“7 d滚动平均值”更换为24 h滚动平均值, 并在24 h内多次测量HRV的变化, 以获得更为精确的数值。

但即使将测试周期缩短为24 h, 日间的多种因素可能也会对HRV产生影响。为了避免日间因素的影响, 有学者建议在慢波睡眠(迷走神经占主导的安静睡眠阶段)中量化HRV, 通过特定标准界定慢波睡眠时段, 并分析该时间段HF、RMSSD等迷走神经指标的变化^[58]。该种测量方法能较好地避免日间各种因素的影响。但在训练实践中, 该种测量方法的应用研究较少, 迫切需要验证。此外, 即使在可控的环境下, 身体体位、呼吸模式也会影响HRV时域指数(尤其是RMSSD)。有研究指出仰卧位的迷走神经HRV指标最高, 其次是坐姿、站姿, 建议优先选择坐姿以避免迷走神经指标饱和(尤其针对高强度训练者)^[58]。但在训练实践中, 对于HRV的测试位置多为仰卧状态。因此, 若想坐姿测量在运动训练中被采

纳可能会面临诸多困难。综上所述, 不同于严格控制的实验条件, 训练环境下HRV的测量会受到诸多因素的影响, 如何在复杂的训练环境下获得相对准确的测量数据尚需更多的训练实践探索。

4.2 缺少不良反应事件的记录

虽然MHBO疗法能促进HRV恢复, 但在干预过程中可能会出现氧中毒、氧化应激损伤、耳鸣、耳痛、血压升高等不良现象^[59]。氧中毒是高压氧干预治疗中常见的不良事件, 虽然提高血液氧分压能改善运动员的缺氧状态, 但氧分压过高可能引起氧中毒, 使中枢神经系统功能紊乱, 出现恶心、抽搐、焦虑、困惑和头晕等氧中毒症状。另外, 氧分压过高会使部分氧分子发生还原, 产生超氧阴离子、过氧化氢、羟自由基等ROS, 并超出机体的清除能力, 引起氧化应激损伤^[60-61]。Bosco等^[62]研究发现, 运动员经过连续20次1.5 ATA-MHBO(每天1次、90 min/次)干预后, 血液中ROS含量、脂质过氧化水平显著升高及总抗氧化能力(total antioxidant capacity, T-AOC)显著下降。另外, 由于鼓膜内外气压的差异以及颅内血管收缩等原因, 可能会出现气压伤、耳痛等不良反应。有研究指出, 即使是国内最高水平的钢架雪车运动员, 在MHBO干预过程中也有个别运动员出现头痛、耳鸣等不良反应^[16]。此外, 市场的MHBO舱多为单人氧舱, 其体积和内部空间较小, 易使运动员发生幽闭恐惧症, 甚至引起严重的心理恐慌和心理应激。但通过对相关文献的梳理, 很少有研究记录干预过程中出现的不良反应, 更是缺乏对发生率的统计, 这是目前该领域相关研究存在的重要缺陷。因此, 在MHBO干预过程中, 应记录运动员出现的不良反应及发生率, 并在安全前提下确定最优的干预剂量, 这也是目前迫切需要解决的现实问题。

4.3 特殊环境下的研究证据不足

MHBO对HRV的干预效果可能受温度、湿度、氧浓度等环境因素的影响。不同环境可能通过改变机体生理状态和应激程度, 导致干预效果呈现出环境特异性。目前, 相关研究仅对高原低氧环境下MHBO的干预效果进行研究, 而对其他特殊环境的研究存在缺失, 如人工低氧、高温高湿等特殊环境。虽然人工低氧和高原低氧均属于低氧环境, 但在训练模式上存在很大差异, 如人工低氧环境有高住高练、低住高练、高住低练等模式^[63]。基于低氧训练模式的多样化, 其已成为我国有氧项目的常用强化

训练模式,在运动训练中有着广泛的应用。在不同低氧训练模式下,MHBO对运动员HRV的干预效果可能不同。另外,有关高温高湿环境下的研究也较为缺乏。高温高湿环境下运动员的疲劳程度更深,可能会引起HRV产生更大的变化。当前,奥运会、田径世锦赛等世界重大赛事都是在夏季高温高湿的环境下进行。但在该环境下,MHBO对HRV的干预效果尚不明确。为了使运动员在比赛时具有良好的身体机能和竞技状态,建议后续研究探讨高温高湿环境下MHBO对HRV的干预效果,为赛前运动员疲劳的消除提供高效的方法。

4.4 干预效果的个体差异性关注不足

现有的研究主要从整体上探讨MHBO对运动性疲劳状态下HRV的影响,缺乏对干预效果个体差异性的关注。首先,不同运动员对MHBO疗法的耐受能力存在差异。朱欢等^[6]研究指出,虽然同属于高水平的钢架雪车运动员,但在MHBO干预过程中仍有个别运动员出现不良反应,这不仅会降低运动员的依从性,且会使干预质量下降。由于出现不良反应,干预过程中的升压和降压时间会延长,进而减少正式的干预时间,弱化干预效果。另外,由于运动耐受能力以及身体机能的不同,即使在相同运动负荷下不同运动员的疲劳程度和HRV的变化特点也不尽相同。此外,HRV的变化也具有个体差异性,相同的MHBO疗法可能会产生不同的干预效果。综上,相关研究应注重干预效果的个体差异性,并根据个体特点制定针对性的干预方案,以提高MHBO疗法的应用价值。

5 结论

(1) 常氧环境下单次MHBO干预和持续4~8周MHBO干预均能促进运动性疲劳状态下HRV的恢复。(2) 高原低氧环境下4~6周MHBO干预能促进运动性疲劳状态下HRV的恢复。(3) 促进乳酸等代谢产物清除、调控神经递质分泌、抑制氧化应激反应是MHBO疗法促进HRV恢复的潜在机制。(4) HRV测量准确性不足、缺少不良反应事件的记录、特殊环境下的研究证据不足以及缺乏个体差异性研究等是该领域尚需解决的问题。

参考文献 (References)

[1] Tiwari R, Kumar R, Malik S, et al. Analysis of heart rate variability and implication of different factors on heart rate variability [J].

Current Cardiology Reviews, 2021, 17(5): e160721189770.

[2] Weber C S, Thayer J F, Rudat M, et al. Low vagal tone is associated with impaired post stress recovery of cardiovascular, endocrine, and immune markers [J]. European Journal of Applied Physiology, 2010, 109(2): 201-211.

[3] Sammito S, Thielmann B, Bockelmann I. Update: factors influencing heart rate variability: a narrative review [J]. Frontiers in Physiology, 2024, 15: 1430458.

[4] Balakarthikeyan V, Jais R, Vijayarangan S, et al. Heart rate variability based estimation of maximal oxygen uptake in athletes using supervised regression models [J]. Sensors, 2023, 23(6): 3251.

[5] 王子龙, 张秋霞, 卢梦雅, 等. 体脑混合疲劳对橄榄球运动员下肢爆发力、心率变异性的影响研究[J]. 中国体育科技, 2025, 61(2): 3-13.

Wang Z L, Zhang Q X, Lu M Y, et al. Research on the effects of physical and mental mixed fatigue on lower limb explosive power and heart rate variability in American football players [J]. China Sport Science and Technology, 2025, 61(2): 3-13.

[6] Addleman J S, Lackey N S, Deblauw J A, et al. Heart rate variability applications in strength and conditioning: a narrative review [J]. Journal of Functional Morphology and Kinesiology, 2024, 9(2): 93.

[7] Sun H, Soh K G, Mohammadi A, et al. The restorative effects of nature exposure on the self-regulation resources in mentally fatigued soccer players: a randomized controlled trial [J]. Journal of Sports Science & Medicine, 2024, 23(4): 882-894.

[8] Takemura A, Eda N, Saito T, et al. Mild hyperbaric oxygen for the early improvement of mood disturbance induced by high-intensity exercise [J]. The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness, 2022, 62(2): 250-257.

[9] 瞿超艺, 黄鹏, 耿雪, 等. 微压氧疗在运动医学领域中的应用研究进展[J]. 中国运动医学杂志, 2023, 42(11): 919-924.

[10] Ishihara A. Mild hyperbaric oxygen: mechanisms and effects [J]. The Journal of Physiological Sciences, 2019, 69(4): 573-580.

[11] Fornasiero A, Skafidas S, Stella F, et al. Cardiac autonomic and physiological responses to moderate-intensity exercise in hypoxia [J]. International Journal of Sports Medicine, 2019, 40(14): 886-896.

[12] 潘颖, 赵彦, 田宜鑫, 等. 离心运动伴不同程度的血流限制对外周疲劳及心脏自主神经功能的效应研究[J]. 中国体育科技, 2021, 57(2): 28-36.

Pan Y, Zhao Y, Tian Y X, et al. Effects of eccentric exercise under different levels of blood-flow restriction on peripheral fatigue and cardiac autonomic function [J]. China Sport Science and Technology, 2021, 57(2): 28-36.

[13] 向阳, 朱欢, 文凡, 等. 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[J]. 生命科学, 2025, 37(2): 158-169.

Xiang Y, Zhu H, Wen F, et al. Research progress and training application strategies of periodic multiple hyperbaric oxygen therapy on exercise fatigue after high-intensity training [J]. Chinese Bulletin of Life Sciences, 2025, 37(2): 158-169.

[14] 向阳, 胡江平, 刘琦, 等. 单次高压氧治疗运动性疲劳: 常用监控指标的干预效果评价[J]. 中国组织工程研究, 2026, 30(28): 7355-7363.

Xiang Y, Hu J P, Liu Q, et al. Single hyperbaric oxygen for exercise-induced fatigue: an evaluation using conventional

- monitoring indicators [J]. Chinese Journal of Tissue Engineering Research, 2026, 30(28): 7355-7363.
- [15] 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[J]. 按摩与康复医学, 2023, 14(6): 70-75.
- Qu C Y, Huang P, Feng Y W, et al. The research progress on effects of mild hyperbaric oxygen therapy in various disease adjuvant treatment and prevention field [J]. Chinese Manipulation and Rehabilitation Medicine, 2023, 14(6): 70-75.
- [16] 朱欢, 刘琦, 向阳, 等. 4周微压氧干预对优秀钢架雪车运动员微循环功能的影响[J]. 中国运动医学杂志, 2026, 45(3): 185-193.
- Zhu H, Liu Q, Xiang Y, et al. Study on the effect of 4-week micro-pressure oxygen intervention on microcirculation of national skeleton athletes [J]. Chinese Journal of Sports Medicine, 2026, 45(3): 185-193.
- [17] 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[J]. 中国运动医学杂志, 2021, 40(5): 393-401.
- [18] Hu Z P, Guo W J, Wu H. A study on the effect of acute hyperbaric oxygen intervention on aerobic endurance [J]. Journal of Physiological Anthropology, 2025, 44(1): 22.
- [19] 胡晓越, 任喆, Takashi Kawabata. 微高压氧干预对高强度运动后机体恢复及其后续无氧运动表现的影响[J]. 首都体育学院学报, 2026, 38(1): 91-101, 116.
- Hu X Y, Ren Z, Kawabata T. Effects of micro-hyperbaric oxygen intervention on physiological recovery and subsequent anaerobic performance following high-intensity exercise [J]. Journal of Capital University of Physical Education and Sports, 2026, 38(1): 91-101, 116.
- [20] 阮文军. 微压氧舱恢复对中枢疲劳射击运动员自主神经系统的影响[J]. 体育科技文献通报, 2024, 32(7): 41-45, 58.
- Ruan W J. The impact of micro-pressurized oxygen chamber recovery on the autonomic nervous system of centrally fatigued shooting athletes [J]. Bulletin of Sport Science & Technology, 2024, 32(7): 41-45, 58.
- [21] 刘猛, 莫仕围, 章政. 高压氧联合虾青素干预对英式橄榄球运动员急性运动性疲劳消除效果的研究[J]. 中国体育科技, 2024, 60(9): 3-13.
- Liu M, Mo S W, Zhang Z. Research on the effects of hyperbaric oxygen therapy combined with astaxanthin intervention on the elimination of acute exercise-induced fatigue in rugby players [J]. China Sport Science and Technology, 2024, 60(9): 3-13.
- [22] Supruniuk E, Górski J, Chabowski A. Endogenous and exogenous antioxidants in skeletal muscle fatigue development during exercise [J]. Antioxidants, 2023, 12(2): 501.
- [23] 张晓炳, 冯本余, 窦志勇, 等. 微压氧对山西省优秀射击射箭运动员疲劳消除影响的研究[J]. 体育师友, 2022, 45(3): 27-30, 39.
- [24] 李清正. 微压氧对精英举重运动员疲劳消除影响的初步研究[C]//第十一届全国体育科学大会论文摘要汇编. 南京: 中国体育科学学会, 2019: 4737-4738.
- [25] Mihailovic T, Bouzigon R, Bouillod A, et al. Post-exercise hyperbaric oxygenation improves recovery for subsequent performance [J]. Research Quarterly for Exercise and Sport, 2023, 94(2): 427-434.
- [26] Harch P G, Rhodes S. Acute and chronic central nervous system oxidative stress/toxicity during hyperbaric oxygen treatment of subacute and chronic neurological conditions [J]. Frontiers in Neurology, 2024, 15: 1341562.
- [27] Salgado R M, Ryan B J, Seeley A D, et al. Improving endurance exercise performance at high altitude: traditional and nontraditional approaches [J]. Exercise and Sport Sciences Reviews, 2025, 53(1): 10-22.
- [28] 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.
- [29] Qu C Y, Xu M X, Lorenzo S, et al. Mild hyperbaric oxygen therapy on subjective sleep quality, aerobic, anaerobic exercise test, brain and muscle tissue oxygenation response in Chinese university male athletes after muscle fatigue [J]. BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation, 2026, 18(1): 181.
- [30] Zhang S L, Niu X D, Ma J K, et al. Effects of sleep deprivation on heart rate variability: a systematic review and meta-analysis [J]. Frontiers in Neurology, 2025, 16: 1556784.
- [31] 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.
- [32] Hu Z P, Guo W J, Wu H. Synergistic effects of immediate post-sprint interval training low-dose hyperbaric oxygen on aerobic and anaerobic performance and recovery indicators: a four-week randomized controlled trial [J]. European Journal of Applied Physiology, 2026, 126(3): 1531-1547.
- [33] 马涛. 微高压氧干预对国家平行大回转运动员不同环境训练后运动性疲劳消除效果的研究[D]. 上海: 上海体育大学, 2024.
- [34] Yu P Q, Fan Y Z, Wu H. Effects of caffeine-taurine co-ingestion on endurance cycling performance in high temperature and humidity environments [J]. Sports Health, 2024, 16(5): 711-721.
- [35] 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.
- [36] 马海林, 杨熙玥, 苏瑞, 等. 高压氧干预对高海拔移居者睡眠质量、抑郁状况及HRV的调节效应[J]. 四川师范大学学报(自然科学版), 2024, 47(5): 569-575, 566.
- Ma H L, Yang X Y, Su R, et al. The improvement of sleep quality, depression and HRV in young immigrants in Tibet by hyperbaric oxygen treatment [J]. Journal of Sichuan Normal University (Natural Science), 2024, 47(5): 569-575, 566.
- [37] 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[J]. 北京体育大学学报, 2023, 46(7): 13-27.
- Ma T, Gao B H. Research on the effect of hyperbaric oxygen intervention on fatigue elimination in parallel giant slalom athletes after winter plateau training [J]. Journal of Beijing Sport University, 2023, 46(7): 13-27.
- [38] 赵杰修, 房国梁, 资薇, 等. 冬季项目的体能训练和训练监控关键技术的研究进展[J]. 北京体育大学学报, 2022, 45(1): 25-34.
- Zhao J X, Fang G L, Zi W, et al. Progress in the physical training and key training monitoring technologies for winter sports [J]. Journal of Beijing Sport University, 2022, 45(1): 25-34.
- [39] Jia L L, Liao M X, Mou A D, et al. Rheb-regulated mitochondrial pyruvate metabolism of Schwann cells linked to axon stability [J]. Developmental Cell, 2021, 56(21): 2980-2994.e6.
- [40] Qu C Y, Xu M X, Lorenzo S, et al. Effects of mild hyperbaric oxygen therapy on timing sequence recovery of muscle fatigue in Chinese university male athletes [J]. Journal of Exercise Science & Fitness, 2024, 22(4): 305-315.
- [41] Hadjihambi A, Arias N, Sheikh M, et al. Hepatic encephalopathy: a critical current review [J]. Hepatology International, 2018, 12(S1): 135-147.
- [42] 管露露, 戚博特, 冯读硕, 等. 神经递质及其受体在运动中枢性

- 疲劳中的作用机制[J]. 生物化学与生物物理进展, 2025, 52(6): 1321-1336.
- Guan L L, Qi B T, Feng D S, et al. The mechanisms of neurotransmitters and their receptors in exercise central fatigue [J]. *Progress in Biochemistry and Biophysics*, 2025, 52(6): 1321-1336.
- [43] 王其飞, 杜兴彬, 孔健达. 中枢疲劳的神经生理基础及运动诱发机制[J]. 中国组织工程研究, 2025, 29(32): 6979-6988.
- Wang Q F, Du X B, Kong J D, et al. Neural physiological basis and exercise-induced mechanism of central fatigue [J]. *Chinese Journal of Tissue Engineering Research*, 2025, 29(32): 6979-6988.
- [44] Fehling P C, Haller J M, Lefferts W K, et al. Effect of exercise, heat stress and dehydration on myocardial performance [J]. *Occupational Medicine*, 2015, 65(4): 317-323.
- [45] 耿治中. 高温高湿与低氧环境训练的运动性疲劳特征及冷水浴与微高压氧恢复效果的研究[D]. 上海: 上海体育大学, 2025.
- [46] Schottlender N, Gottfried I, Ashery U. Hyperbaric oxygen treatment: effects on mitochondrial function and oxidative stress [J]. *Biomolecules*, 2021, 11(12): 1827.
- [47] Wang Y M, Dong H K, Dai M, et al. Norepinephrine promotes oxidative stress in vascular adventitial fibroblasts via PKC/NFκB-mediated NOX2 upregulation [J]. *Redox Report*, 2025, 30(1): 2494314.
- [48] 杨晓磊, 刘亮, 龚玉根, 等. 运动疲劳与氧化应激[J]. 中国中医药现代远程教育, 2020, 18(18): 88-91.
- Yang X L, Liu L, Gong Y G, et al. Sports fatigue and oxidative stress [J]. *Chinese Medicine Modern Distance Education of China*, 2020, 18(18): 88-91.
- [49] Zhu H, Tian G, Jin Y, et al. Effects of a 4-week micro-hyperbaric oxygen intervention on oxidation-antioxidation system function [J]. *Revista Brasileira de Medicina do Esporte*, 2023, 29: e2021_0330.
- [50] Choudhury R. Hypoxia and hyperbaric oxygen therapy: a review [J]. *International Journal of General Medicine*, 2018, 11: 431-442.
- [51] 孔海军, 张亮, 熊伟, 等. 游泳运动可能通过调控 Nrf2/HO-1/Keap1 通路改善尼古丁胁迫大鼠肝损伤[J]. 山东体育学院学报, 2023, 39(6): 110-118.
- Kong H J, Zhang L, Xiong W, et al. Swimming may improve liver injury in rats under nicotine stress by regulating Nrf2/HO-1/Keap1 pathway [J]. *Journal of Shandong Sport University*, 2023, 39(6): 110-118.
- [52] Schottlender N, Gottfried I, Ashery U. Hyperbaric oxygen treatment: effects on mitochondrial function and oxidative stress [J]. *Biomolecules*, 2021, 11(12): 1827.
- [53] Huang G Y, Diao J L, Yi H J, et al. Signaling pathways involved in HSP32 induction by hyperbaric oxygen in rat spinal neurons [J]. *Redox Biology*, 2016, 10: 108-118.
- [54] 周磊, 史承勇, 范茂丹, 等. 高压氧对TBI大鼠脑组织中氧化因子表达情况和Nrf2通路的影响[J]. 现代生物医学进展, 2024, 24(7): 1240-1243, 1265.
- Zhou L, Shi C Y, Fan M D, et al. Effects of hyperbaric oxygen on oxidative factor expression and Nrf2 signaling pathway in brain of rats with traumatic brain injury [J]. *Progress in Modern Biomedicine*, 2024, 24(7): 1240-1243, 1265.
- [55] 姜振, 张林. 高压氧对递增负荷训练大鼠腓肠肌P53、Bcl-2蛋白表达的影响[J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2009, 13(7): 1309-1312.
- Jiang Z, Zhang L. Hyperbaric oxygen effects on the expression of P53 and Bcl-2 protein of gastrocnemius muscle in rats following incremental training [J]. *Journal of Clinical Rehabilitative Tissue Engineering Research*, 2009, 13(7): 1309-1312.
- [56] 王芳芳, 王楠, 袁恒荣, 等. 高压氧疗法对神经退行性疾病的作用机制及应用研究进展[J]. 生理学报, 2025, 77(2): 318-326.
- Wang F F, Wang N, Yuan H R, et al. Progress on the mechanism and application of hyperbaric oxygen therapy for neurodegenerative diseases [J]. *Acta Physiologica Sinica*, 2025, 77(2): 318-326.
- [57] Bestwick-Stevenson T, Toone R, Neupert E, et al. Assessment of fatigue and recovery in sport: narrative review [J]. *International Journal of Sports Medicine*, 2022, 43(14): 1151-1162.
- [58] Nakamura F Y, Gantois P, Giannaki C, et al. Heart rate variability as a means of assessing workload effects and recovery during exercise training [M]//*Fundamentals of recovery, regeneration, and adaptation to exercise stress: an integrated approach*. Cham: Springer, 2025: 303-316.
- [59] Zhang Y Y, Zhou Y J, Jia Y Y, et al. Adverse effects of hyperbaric oxygen therapy: a systematic review and meta-analysis [J]. *Frontiers in Medicine*, 2023, 10: 1160774.
- [60] Chidanand D, Cheruku R, Perla N S, et al. Impact of supplemental oxygen on cardiovascular physiology [J]. *Cells*, 2026, 15(10): 871.
- [61] Gasier H G, Kovach J, Porter K. Repeated hyperbaric oxygen exposure accelerates fatigue and impairs SR-calcium release in mice [J]. *Journal of Applied Physiology*, 2025, 138(2): 415-425.
- [62] Bosco G, Paganini M, Giacon T A, et al. Oxidative stress and inflammation, microRNA, and hemoglobin variations after administration of oxygen at different pressures and concentrations: a randomized trial [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 18(18): 9755.
- [63] 包大鹏, 郭振向, 周开祥, 等. 低氧训练模式的演进与发展理念[J]. 体育与科学, 2025, 46(5): 94-102.
- Bao D P, Guo Z X, Zhou K X, et al. Evolution and developmental paradigms of hypoxic training modalities [J]. *Sports & Science*, 2025, 46(5): 94-102.