

EFEITOS DA INTERVENÇÃO DE OXIGÊNIO MICRO-HIPERBÁRICO DE 4 SEMANAS NA FUNÇÃO DO SISTEMA OXIDANTE-ANTIOXIDANTE

EFFECTS OF A 4-WEEK MICRO-HYPERBARIC OXYGEN INTERVENTION ON OXIDATION-ANTIOXIDATION SYSTEM FUNCTION

EFFECTOS DE LA INTERVENCIÓN CON OXÍGENO MICRO-HIPERBÁRICO DURANTE 4 SEMANAS EN LA FUNCIÓN DEL SISTEMA OXIDACIÓN-ANTIOXIDACIÓN

Huan Zhu^{1,2} 
(Estudante de pós-graduação)
Guang Tian³ 
(Estudante de pós-graduação)
Yu Jin³ 
(Estudante de pós-graduação)
Jihan Zhuang³ 
(Estudante de pós-graduação)
Jiawei Zhao³ 
(Estudante de pós-graduação)
Binghong Gao³ 
(Professor universitário)

1. Shanghai University of Sport, Escola de Cinesiologia, Xangai, China.
2. Hubei University of Nationalities, Escola de Esportes, Enshi, China.
3. Shanghai University of Sport, Escola de Treinamento em Educação Física e Esportes, Xangai, China.

Correspondência:

Binghong Gao
200 Heng ren Road, Yang pu, Shanghai, China. 200082.
binghong.gao@hotmail.com

RESUMO

Introdução: A intervenção de oxigênio hiperbárico tem um efeito importante na função do sistema oxidativo-antioxidante do corpo. **Objetivo:** Verificar os efeitos de uma intervenção de oxigênio micro-hiperbárico de 4 semanas na função do sistema oxidante-antioxidante em atletas de skeleton. **Métodos:** O grupo de teste foi submetido a uma intervenção de oxigênio micro-hiperbárico a 1,3 ATA de 4 semanas, 4 vezes por semana e o grupo controle passou por recuperação natural. Os níveis de malondialdeído (MDA), proteína carbonila (PC), superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT), glutathiona peroxidase (GSH-PX), capacidade antioxidante total (T-AOC), uréia sanguínea (BU), creatina quinase (CK), testosterona (T) e cortisol (C) foram medidos na semana 0, semana 2 e semana 4 para ambos os grupos de atletas. **Resultados:** MDA, PC e CK do grupo de teste foram significativamente menores do que os valores do grupo controle ($p < 0,05$) na semana 4. SOD, CAT e T-AOC foram significativamente maiores no grupo de teste na semana 4 do que na semana 0 ($p < 0,05$) e significativamente maiores do que os valores para o grupo controle ($p < 0,05$). **Conclusão:** A intervenção de oxigênio micro-hiperbárico de 4 semanas a 1,3 ATA reduziu significativamente os níveis de estresse oxidativo, aumentou a atividade enzimática antioxidante e reduziu os níveis de fadiga relacionada ao exercício nos atletas de skeleton. **Nível de evidência II; Estudos terapêuticos - Investigação dos resultados do tratamento.**

Descritores: Oxigenação hiperbárica; Estresse oxidativo; Fadiga muscular.

ABSTRACT

Introduction: Hyperbaric oxygen intervention has an important effect on the function of the body's oxidation-antioxidant system. **Objective:** To verify the effects of a 4-week micro-hyperbaric oxygen intervention on oxidation-antioxidation system function in skeleton athletes. **Methods:** The experimental group underwent a 1.3 ATA HBO intervention for 4 weeks and the control group underwent natural recovery. The levels of MDA, PC, SOD, CAT, GSH-PX, T-AOC, BU, CK, T, and C of the two groups were measured at Week 0, Week 2, and Week 4. **Results:** The MDA, PC, and CK of the Exp group were significantly lower than Con group ($P < 0.05$) in Week 4. The SOD, CAT, and T-AOC of the Exp group were significantly higher in Week 4 than in Week 0 ($P < 0.05$) and significantly higher than the Con group values ($P < 0.05$). **Conclusions:** A four-week 1.3 ATA HBO intervention decreased the level of oxidative stress, increased the activity of antioxidant enzymes, and reduced the degree of exercise fatigue in skeleton athletes. **Level of Evidence II; Therapeutic studies - Investigating treatment results.**

Keywords: Hyperbaric oxygenation; Oxidative stress; Muscle fatigue.

RESUMEN

Introducción: La intervención con oxígeno hiperbárico tiene un efecto importante en la función del sistema oxidación-antioxidación del organismo. **Objetivo:** Verificar los efectos de una intervención con oxígeno micro-hiperbárico durante 4 semanas en la función del sistema oxidación-antioxidación en atletas de skeleton. **Métodos:** El grupo de prueba se sometió a una intervención con oxígeno micro-hiperbárico a 1,3 ATA durante 4 semanas, 4 veces a la semana, y el grupo de control se sometió a una recuperación natural. Se midieron los niveles de malondialdehído (MDA), carbonilo proteico (PC), superóxido dismutasa (SOD), catalasa (CAT), glutatión peroxidasa (GSH-PX), capacidad antioxidante total (T-AOC), urea en sangre (BU), creatina quinasa (CK), testosterona (T), y cortisol (C) en la semana 0, en la semana 2 y en la semana 4 para ambos grupos de atletas. **Resultados:** Los valores de MDA, CP y CK del grupo de prueba fueron significativamente inferiores a los del grupo de control ($p < 0,05$) en la semana 4. Los valores de SOD, CAT y T-AOC fueron significativamente mayores en el grupo de prueba en la semana 4 que en la semana 0 ($p < 0,05$) y significativamente mayores que los valores del grupo de control ($p < 0,05$). **Conclusión:** La intervención con oxígeno hiperbárico a 1,3 ATA durante 4 semanas redujo significativamente



Descritores: Oxigenación hiperbárica; Estrés oxidativo; Fatiga muscular.

DOI: http://dx.doi.org/10.1590/1517-8692202329012021_0330

Artigo recebido em 29/07/2021 aprovado em 14/04/2022

INTRODUÇÃO

A oxigenoterapia hiperbárica (HBO) refere-se à colocação do corpo humano em um ambiente com oxigênio puro, no qual a pressão é maior do que a pressão atmosférica para aumentar a dissolução de oxigênio físico e a pressão parcial de oxigênio no sangue, a diferença da pressão parcial de oxigênio entre o sangue e as células e a distância da difusão efetiva de oxigênio.¹ Durante o exercício físico, a HBO é usada principalmente para a reabilitação de lesões esportivas dos atletas.^{2,3} Além disso, diversos estudos também aplicaram a HBO para eliminar a fadiga induzida por exercícios e para recuperar a função física em atletas que se submetem a treinamento físico.^{4,5} Após a realização de exercícios de alta intensidade, a velocidade de recuperação do ácido láctico e da frequência cardíaca no grupo de intervenção de oxigênio hiperbárico foi significativamente mais rápida em comparação ao grupo controle, o que sugere que o oxigênio hiperbárico pode favorecer a eliminação da fadiga aguda periférica.⁴ Outro estudo sugere que a HBO contribui para a produção de força sustentada ao suprimir a progressão da fadiga muscular, além de contribuir para a prevenção do excesso de fadiga dos músculos agonistas para exercícios específicos que envolvam saltos repetidos.⁵ No entanto, alguns estudos identificaram que a intervenção de HBO em altas doses (pressão > 2 ATA) aumenta a formação de radicais livres, reduz a função do sistema oxidante-antioxidante, conduzindo à peroxidação lipídica e danos aos órgãos, o que resulta na ocorrência de fadiga crônica.^{6,7}

A fadiga induzida por exercícios é um fenômeno fisiológico complexo produzido através da interação de muitos fatores. A teoria de danos pelos radicais livres, a qual é aceita por muitos estudiosos, afirma que o exercício excessivo leva ao aumento da produção de radicais livres, causa desequilíbrio entre o estresse oxidativo e a capacidade antioxidante, degrada a coordenação e as funções nos sistemas endócrino, nervoso e imune, causa a redução da função corporal, além de provocar a geração de fadiga induzida por exercícios.^{8,9} O aumento do estresse oxidativo prejudica a função física dos atletas, o que não é favorável à recuperação após a realização de exercícios ou à eliminação da fadiga. A intervenção de oxigênio hiperbárico em altas doses pode aumentar o nível de estresse oxidativo no corpo, porém a intervenção em baixas doses pode não impactar de forma significativa o nível de estresse oxidativo ou até mesmo conseguir mobilizar o sistema de enzimas antioxidantes para proteger contra o dano oxidativo.

Estudos demonstraram que o oxigênio micro-hiperbárico a 1,3 ATA pode reduzir significativamente os metabólitos reativos de oxigênio no soro e o escore médio da escala analógica visual para eliminar a fadiga induzida por exercícios.¹⁰ A intervenção de oxigênio micro-hiperbárico a 1,25 ATA e a 1,7 ATA também pode regular a função do sistema antioxidante e proteger contra o dano oxidativo em pacientes diabéticos.^{11,12} Concluindo, os efeitos do oxigênio hiperbárico sobre a função do sistema oxidante-antioxidante talvez dependa do nível da pressão. A intervenção de oxigênio micro-hiperbárico pode gerar efeitos positivos sobre a função do sistema oxidante-antioxidante, porém é necessária a realização de mais estudos para que se confirme tal fato.

Um evento esportivo de corrida de esqui chamado *skeleton* será uma das principais atrações que ocorrerá na China nos Jogos Olímpicos de Inverno de 2022. No momento, a equipe chinesa de *skeleton* está no estágio

crítico de preparação para os Jogos de Inverno de 2022. No processo de treinamento, o estímulo da carga de exercícios de alta intensidade pode causar o aumento de radicais livres, destruir a função do sistema oxidante-antioxidante, causar dano devido a estresse oxidativo e levar à geração da fadiga por exercício nos atletas. Portanto, a intervenção em tempo hábil após o treinamento para reduzir o nível de estresse oxidativo é útil para a recuperação da função física dos atletas e para a eliminação da fadiga. O objetivo do presente estudo é descobrir se um regime de intervenção de oxigênio micro-hiperbárico durante quatro semanas pode melhorar a função do sistema oxidante-antioxidante em atletas de *skeleton* durante o treinamento de verão. Supomos que a intervenção de oxigênio micro-hiperbárico de quatro semanas irá reforçar a função do sistema oxidante-antioxidante, estimular a recuperação da função corporal e reduzir o grau da fadiga induzida por exercícios.

MÉTODOS

Participantes

Dezoito atletas da equipe nacional chinesa de *skeleton*, que se preparam atualmente para os Jogos de Inverno de Beijing 2022, foram selecionados para o estudo. Todos os atletas eram física e mentalmente saudáveis. Eles foram divididos, randomicamente, em dois grupos: um grupo experimental e um grupo controle. Esse estudo está em conformidade com a Declaração de Helsinki (2000) da Associação Médica Mundial, e obteve a permissão do Comitê de Ética da Shanghai University of Sport (Número de aprovação: 102772020RT079). Todos os atletas envolvidos no estudo assinaram o termo de consentimento informado. A composição corporal foi testada com um analisador de composição corporal X-SCAN II (Coreia do Sul). Os dados demográficos e de condição física básica dos participantes constam na Tabela 1.

Regime de treinamento

A etapa de treinamento de verão (entre 23 de agosto e 21 de setembro) da equipe chinesa de *skeleton* em 2020 foi considerada como o estágio experimental do estudo. Todos os atletas foram treinados pelo mesmo grupo de treinadores e o seu plano de treinamento, a sua dieta e o tempo de descanso foram idênticos. O conteúdo do treinamento consistiu em treinamento de simulação de impulsão deslizante em solo e de treinamento físico.

Tabela 1. Dados demográficos dos participantes.

Índice	Grupo experimental	Grupo controle
Número (homem/mulher)	8 (4/4)	8 (4/4)
Idade (anos)	23,13±1,25	22,50±1,69
Altura (m)	1,76±0,06	1,81±0,06
Peso (kg)	73,38±10,68	75,89±10,68
IMC (peso/altura ²)	23,66±2,44	23,22±2,55
Porcentagem de gordura corporal (%)	14,57±2,96	13,71±2,12
Massa gorda do corpo (kg)	10,54±1,86	10,31±1,74
Massa magra do corpo (kg)	62,83±10,47	65,57±10,00
Treinamento profissional (anos)	3,93±1,54	3,79±1,68

Observação: Os dados são médias±DP. Não houve diferença significativa nos indicadores entre os dois grupos (P > 0,05) após o teste T.

Intervenção de oxigênio micro-hiperbárico a 1,3 ATA

Uma câmara de oxigênio hiperbárico portátil e o software associado (OxyMu International Hi-Tech Co., Ltd., Beijing) foram usados nas noites (19:00 horas às 20:00 horas) de segunda-feira, quarta-feira, sexta-feira e sábado de cada semana, para conduzir a intervenção de oxigênio micro-hiperbárico para os atletas no grupo experimental a uma pressão de 1,3 ATA. Os atletas se deitaram em uma cabine, na qual a pressão subiu para 1,3 ATA dentro de 5 minutos, permanecendo neste nível por 60 minutos. Os atletas que sentiram claustrofobia receberam aconselhamento psicológico profissional para evitar quaisquer alterações psicológicas associadas à intervenção. A pressão arterial e a frequência cardíaca (FC) basais foram medidas antes da entrada na cabine.

Medições do soro sanguíneo

Cinco milímetros de sangue foram coletados em três pontos no tempo: antes do experimento, na Semana 2 e na Semana 4 após os atletas jejuarem por 12 horas. Realizou-se a centrifugação do sangue em temperatura ambiente (3500 r/s, 5 min), e o sobrenadante foi armazenado a -80°C durante 30 minutos. A determinação dos níveis de MDA, PC, SOD, CAT, GSH-PX e T-AOC ocorreu através de colorimetria em microplaca ultravioleta, ensaio imunossorvente, luz visível, colorimetria e ensaio em microplaca, respectivamente. Os níveis de BU e CK foram determinados em um analisador bioquímico a seco de sangue total com três canais e tira reagente compatível (Reflotron Plus, EUA). Os níveis de T e C foram determinados por quimioluminescência. Todos os testes foram realizados por um pesquisador profissional.

Análise de dados

Os dados relevantes são apresentados aqui como médias e desvios padrão (médias±DP). Usou-se o software SPSS 25.0 (IBM, Estados Unidos) para a realização da análise dos dados. A normalidade dos dados foi determinada com o uso de um teste de Kolmogorov-Smirnov.

Houve o uso de uma análise de variância (ANOVA) com dois fatores (tratamento e tempo) com medições repetidas para a análise das alterações de cada índice nos dois grupos em diferentes semanas, com um teste de Bonferroni para a pós-comparação. O nível de significância foi determinado para $P < 0,05$.

RESULTADOS

Conforme mostrado na Tabela 2, houve interações grupo por tempo relevantes em MDA, PC, SOD, CAT e T-AOC. MDA e PC na Semana 4, os quais foram substancialmente inferiores em comparação à Semana 0 ($P < 0,05$); SOD, CAT e T-AOC na Semana 4 foram significativamente mais altos em comparação à Semana 0 ($P < 0,05$). Na Semana 4, MDA e PC no grupo experimental estavam consideravelmente mais baixos do que no grupo controle ($P < 0,05$); SOD, CAT e T-AOC estavam significativamente mais altos no grupo experimental do que no grupo controle ($P < 0,05$). Não houve interações grupo por tempo significativas em GSH-PX ($P > 0,05$).

Conforme mostrado na Tabela 3, houve interações grupo por tempo significativas em CK. No grupo controle, CK na Semana 4 estava significativamente mais alto do que na Semana 0 ($P < 0,05$). Na Semana 4, CK no grupo controle estava substancialmente mais alto do que no grupo experimental ($P < 0,05$). Não houve interações grupo por tempo relevantes em BU, T, C ou T/C ($P > 0,05$), mas ocorreu o aumento de BU no grupo controle. O nível de T/C no grupo experimental sofreu leve alta, enquanto apresentou redução no grupo controle.

DISCUSSÃO

Consistente com a nossa hipótese, um regime de intervenção de oxigênio micro-hiperbárico a 1,3 ATA durante 4 semanas reduziu, de forma significativa, o nível de estresse oxidativo e melhorou a capacidade antioxidante, o que pode interferir positivamente na recuperação dos estados funcionais do corpo, além de diminuir o grau de fadiga por exercícios em atletas de *skeleton* durante o treinamento de verão.

Tabela 2. Estresse oxidativo, índices de capacidade antioxidante dos dois grupos por semana.

Índice	Grupo	Semana 0	Semana 2	Semana 4	Interação - Tempo x Grupo
MDA (nmol/ml)	Con	8,33±1,56	7,85±1,35	8,84±1,07	F = 9,686, p = 0,002
	Exp	8,50±0,92	7,49±1,12	5,82±0,99#	
PC (nmol/mgprot)	Con	1,25±0,07	1,22±0,07	1,27±0,09	F = 11,486, p = 0,001
	Exp	1,24±0,13	1,19±0,07	1,06±0,08*#	
SOD (U/mL)	Con	16,76±2,72	16,46±2,05	15,96±1,82	F = 7,593, p = 0,006
	Exp	16,22±2,40	18,63±2,45	19,96±1,42*#	
CAT (U/mL)	Con	6,98±0,64	6,22±2,75	5,98±0,84	F = 4,029, p = 0,041
	Exp	6,53±1,16	6,84±1,16	8,34±0,46*#	
GSH-PX (mmol/L)	Con	18,85±3,43	21,89±2,89	21,17±3,30	F = 0,910, p = 0,425
	Exp	19,70±2,80	21,25±2,36	23,59±2,61	
T-AOC (mmol/L)	Con	0,70±0,04	0,74±0,14	0,66±0,07	F = 5,812, p = 0,015
	Exp	0,71±0,11	0,75±0,11	0,90±0,07*#	

Observação: * $P < 0,05$ vs. indicadores correspondentes na Semana 0 do grupo experimental. # $P < 0,05$ vs. indicadores correspondentes na Semana 4 do grupo controle.

Tabela 3. Índices de monitoramento de fadiga por exercícios dos dois grupos por semana.

Índice	Grupo	Semana 0	Semana 2	Semana 4	Interação - Tempo x Grupo
BU (nmol/ml)	Con	6,41±1,06	5,30±1,34	7,89±0,86	F = 2,942, p = 0,086
	Exp	6,49±0,90	5,34±1,36	6,62±0,83	
CK (U/mL)	Con	182,00±22,17	200,63±66,33	280,50±41,05*#	F = 9,360, p = 0,003
	Exp	177,75±22,88	196,88±50,71	192,19±27,39	
T (ng/dl)	Con	366,63±361,38	350,13±332,93	317,00±295,33	F = 1,664, p = 0,225
	Exp	358,38±348,30	363,75±348,08	363,63±336,04	
C (ug/dl)	Con	20,08±3,09	20,16±2,66	19,31±1,37	F = 0,298, p = 0,747
	Exp	19,60±3,50	18,83±3,50	19,00±2,87	
T/C	Con	18,99±19,37	17,37±17,04	16,29±15,17	F = 0,794, p = 0,472
	Exp	18,85±19,60	20,66±21,46	20,12±19,30	

Observação: * $P < 0,05$ vs. indicadores correspondentes na Semana 0 do grupo controle; # $P < 0,05$ vs. indicadores correspondentes na Semana 4 do grupo experimental.

Como, se sabe, o treinamento de alta intensidade pode aumentar o nível de estresse oxidativo, criar uma sobrecarga de Ca^{2+} no citoplasma, reduzir a excitabilidade dos músculos e a função de contração muscular, além de induzir à ocorrência de fadiga por exercícios. O dano por estresse oxidativo também pode causar a disfunção vasodilatadora e reduzir o fluxo sanguíneo.¹³ Essa redução do fluxo sanguíneo microvascular não apenas afeta a eliminação oportuna de resíduo metabólico após o exercício, como também interfere no transporte e na troca de matéria e energia durante o exercício, o que pode provocar a geração de fadiga induzida por exercícios e influenciar o desempenho físico. Portanto, é muito importante realizar as medições da intervenção para melhorar a função do sistema oxidante-antioxidante após o treinamento.

Em nosso estudo, houve uma redução expressiva no nível de MDA e PC no grupo Exp (experimental) em quatro semanas de intervenção de oxigênio micro-hiperbárico, o que indica que a intervenção reduziu o nível de estresse oxidativo. Tal efeito é coerente com os resultados do estudo realizado por Kim em 2011, em que o tratamento com oxigênio micro-hiperbárico diminuiu o estresse oxidativo e o escore de fadiga na Escala Visual Analógica, enquanto promovia a eliminação da fadiga.¹⁰ A hipóxia é um importante fator na geração de radicais livres derivados do oxigênio. O oxigênio hiperbárico pode melhorar a dissolução de oxigênio no sangue e a pressão parcial de oxigênio, além de expandir a diferença da pressão parcial de oxigênio entre o sangue e o tecido, melhorar o estado de hipóxia do corpo e o fornecimento de oxigênio, acelerar a eliminação de radicais livres e reduzir o nível de estresse oxidativo. No entanto, alguns estudos demonstraram que a intervenção de oxigênio micro-hiperbárico não exerce efeito significativo sobre os níveis dos metabólitos de espécies reativas de oxigênio,¹⁴ ou 8-OHdG,¹⁵ o qual funciona como um marcador do dano oxidativo sobre o DNA. Além disso, outro estudo descobriu que a fadiga psicológica causada por exercícios de alta intensidade pode ser melhorada, de forma precoce, sem alterações no estresse oxidativo através da intervenção de oxigênio micro-hiperbárico.¹⁶ As diferenças em nossos achados podem estar relacionadas à dose da intervenção. A maioria dos estudos acima foi conduzida durante uma ou poucas intervenções de oxigênio micro-hiperbárico, o que pode não ter sido suficiente para produzir efeitos relevantes sobre o corpo. Nesse estudo, conduzimos 16 repetições independentes de intervenção de oxigênio micro-hiperbárico em atletas durante um regime de quatro semanas, demonstrando assim, efeitos positivos.

Alguns estudos também comprovaram que a intervenção de HBO pode aumentar o nível de estresse oxidativo. Na ausência de substâncias antioxidantes, a intervenção de HBO em altas doses pode elevar o nível de estresse oxidativo e aumentar o nível de quebras da cadeia de DNA. Além disso, há uma relação de dose-resposta positiva com a pressão do oxigênio hiperbárico e o tempo de intervenção.¹⁷ A oxigenoterapia hiperbárica em longo prazo (15 sessões) resultou em aumentos significativos nos níveis de ROM (ruptura de membranas) e MDA na ausência de suplementação de antioxidante em um estudo anterior.¹⁸ A intervenção de HBO em longo prazo parece aumentar o nível de estresse oxidativo, mas o uso da intervenção de HBO por pesquisadores, anteriormente, excedeu 2 ATA, o que representa uma diferença de pressão significativa em comparação ao nosso nível de oxigênio micro-hiperbárico (1,3 ATA). Acreditamos que a pressão de oxigênio hiperbárico acima de 2 ATA pode aumentar a produção de radicais livres ativos e elevar o nível de estresse oxidativo. Quando a pressão é mantida dentro de uma variação adequada, não ocorrerá o aumento da produção de radicais livres e poderá haver a aceleração da eliminação de radicais livres e a redução do nível de estresse oxidativo. Contudo, falta à nossa conclusão evidência de pesquisa suficiente e é necessário que haja mais estudos que a comprovem.

Em nosso estudo, SOD, CAT e T-AOC aumentaram consideravelmente no grupo Exp após a intervenção de oxigênio micro-hiperbárico por quatro semanas, indicando que tal intervenção aumentou a função do sistema antioxidante e reduziu o dano causado por radicais livres às células, o que é consistente com os achados de alguns pesquisadores.^{11,12} A intervenção de oxigênio micro-hiperbárico a 1,25 ATA¹¹ e a 1,7 ATA¹² pode regular a função do sistema antioxidante e proteger contra o dano oxidativo em pacientes diabéticos. Porém, outros pesquisadores chegaram a conclusões diferentes. Em um estudo anterior, o tratamento de HBO (15 sessões) reduziu, de modo expressivo, as atividades de SOD e CAT, mas não produziu alteração significativa em GSH-Px na ausência de suplementos de antioxidantes.¹⁸ A atividade de SOD diminuiu em todos os indivíduos após 24 horas de exposição a 2 ATA e a 2,4 ATA, respectivamente, mas o nível de GSH-Px diminuiu apenas no ambiente a 2,4 ATA.¹⁹ Acreditamos que a pressão de HBO ainda é a principal razão para a diferença entre os nossos resultados e aqueles dos estudos mencionados acima, pois a atividade das enzimas antioxidantes parece diminuir uma vez que a pressão excede um determinado nível. Contudo, tal conclusão também precisa ser confirmada por mais estudos.

A melhora da função do sistema oxidante-antioxidante pode acelerar a eliminação de radicais livres, promover a recuperação do corpo e a supressão da fadiga por exercícios.^{8,9} A fim de avaliar as alterações da função física dos atletas, testamos os níveis de BU, CK, T e C. BU é o produto da decomposição de proteínas, que é um índice importante para avaliar a fadiga induzida por exercícios. Em nosso estudo, o nível de BU foi consideravelmente mais alto no grupo Con (controle) após quatro semanas de treinamento, indicando que o regime de treinamento causou fadiga física nos atletas. No entanto, o nível de BU no grupo Exp não sofreu alterações relevantes sob a mesma carga de treinamento, o que indica que a intervenção de oxigênio micro-hiperbárico de quatro semanas estimulou a recuperação do fornecimento de energia derivada de glicogênio e reduziu a proporção funcional de proteínas após a fadiga. A HBO melhora a hipóxia dos rins, promove a recuperação da função renal, acelera a eliminação de ureia, favorecendo dessa forma, a recuperação corporal dos atletas e aliviando a fadiga por exercícios.

Usa-se a CK (creatinina quinase) para avaliar a adaptação muscular à intensidade dos exercícios e lesões após a realização de exercícios.^{20,21} Quando a membrana muscular é danificada ou há alteração em sua permeabilidade, a CK flui para o sangue da membrana, sendo um processo mais intenso se o dano à membrana celular ocorrer devido ao estresse oxidativo. Em nosso estudo, o nível de CK foi consideravelmente mais alto no grupo Con após quatro semanas de treinamento, indicando que o treinamento de verão de alta intensidade causou certo dano às células musculares dos atletas. Porém, o nível de CK não foi significativamente elevado no grupo Exp, o que sugere que a intervenção de oxigênio micro-hiperbárico de quatro semanas reparou o dano às membranas das células musculares e eliminou a fadiga no músculo esquelético. O resultado encontrado em nosso estudo é coerente com os resultados do estudo realizado por Aunampai em 2011, em que três sessões de oxigenoterapia hiperbárica a 1,7 ATA reduziu o nível de CK após saltos verticais máximos repetidos.²² Contudo, muitos pesquisadores acreditam que a intervenção de HBO não pode reduzir efetivamente o nível de CK após exercícios intensos.²³⁻²⁵ Quatro sessões de intervenção de HBO a 1,2 ATA e a 2 ATA²³ e cinco sessões a 2,5 ATA²⁴ falharam em melhorar a dor muscular e os níveis de CK induzidos por contrações centrífugas em estudos anteriores. Navid *et al.* chegaram a uma conclusão semelhante.²⁵ Para resultados de pesquisa diferentes, a dose de intervenção de HBO e o padrão de exercícios podem ser razões importantes, mas é necessário que se realizem estudos adicionais para a confirmação de tal fato.

A testosterona e o cortisol são indicadores importantes da capacidade física dos atletas.^{26,27} Quando os atletas estão fatigados, os níveis de testosterona caem e os níveis de cortisol sobem, levando à elevação do catabolismo e à redução do anabolismo. Os efeitos da intervenção de oxigênio hiperbárico sobre a testosterona e o cortisol séricos ainda é um ponto controverso, principalmente pelo fato de as alterações dos níveis de testosterona e de cortisol não estarem apenas relacionadas ao estímulo da carga de exercício (intensidade e quantidade), mas também serem afetadas por estados psicoemocionais e pelo metabolismo.²⁸ Para os atletas de judô, a intervenção de HBO não exerceu efeito significativo sobre o cortisol ou a testosterona total após o treinamento de alta intensidade.²⁹ Mas, o nível de testosterona em mergulhadores aumentou após o tratamento de reabilitação de HBO.³⁰ Em nosso estudo, o nível de testosterona/cortisol no grupo Con reduziu consideravelmente antes e após o treinamento, o que indica que os atletas estavam em um estado de fadiga e que seu catabolismo foi reforçado durante o treinamento de verão. Apesar disso, a testosterona/o cortisol no grupo Exp aumentou, o que sugere que a intervenção de HBO promoveu o anabolismo, inibiu o catabolismo e melhorou as funções corporais durante todo o processo de treinamento.

CONCLUSÕES

Os resultados desse estudo demonstram que uma intervenção de HBO a 1,3 ATA de quatro semanas melhorou a função do sistema oxidante-antioxidante, o que pode interferir positivamente na recuperação dos estados funcionais do corpo e reduzir o grau de fadiga por exercícios em atletas de *skeleton* durante o treinamento de verão. Assim, acreditamos que a intervenção de oxigênio hiperbárico a 1,3 ATA pode ser usada para estimular a recuperação da função física e a eliminação da fadiga em atletas.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece aos treinadores e aos atletas por sua cooperação ativa durante o experimento. O professor Binghong Gao recebeu financiamento do Programa Nacional Principal de Pesquisa e Desenvolvimento (2019YFF0301603) do Ministério da Ciência e Tecnologia da China.

Todos os autores declararam não haver qualquer potencial conflito de interesses referente a este artigo.

CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES: Cada autor contribuiu individual e significativamente para o desenvolvimento deste artigo. BG e HZ: idealizaram e projetaram o estudo; HZ, GT, YJ, JZ, JJ e BG: conduziram os experimentos; HZ: analisou os dados e fez o esboço da primeira versão do manuscrito; BG: realizou a revisão crítica do manuscrito. Todos os autores leram e aprovaram o manuscrito.

REFERÊNCIAS

- Li T, Wang YR, Feng CQ, Li Q, Ran Q, Chen B, et al. Hyperbaric oxygen therapy for spinal cord injury: a protocol for systematic review and meta-analysis. *Medicine (Baltimore)*. 2020;99(49):e23536-9.
- Kazuyoshi Y, Mitsuhiro E, Yuji T, Fukuda J, Koga H. Effects of hyperbaric oxygen therapy on recovery acceleration in Japanese professional or semi-professional rugby players with grade 2 medial collateral ligament injury of the knee: A comparative non-randomized study. *Undersea Hyperb Med*. 2019;46(5):647-54.
- Chen CY, Chou WY, Ko JY, Lee MS, Wu RW. Early recovery of exercise-related muscular injury by HBO. *Biomed Res Int*. 2019;6289380-9.
- Park SH, Park SJ, Shin MS, Kim CK. The effects of low-pressure hyperbaric oxygen treatment before and after maximal exercise on lactate concentration, heart rate recovery, and antioxidant capacity. *J Exerc Rehabil*. 2018;14(6):980-4.
- Shimoda M, Enomoto M, Horie M, Miyakawa S, Yagishita K. Effects of hyperbaric oxygen on muscle fatigue after maximal intermittent plantar flexion exercise. *J Strength Cond Res*. 2015;29(6):1648-56.
- Mihaljević Z, Matić A, Stupin A, Rasic L, Jukić I, Drenjančević I. Acute hyperbaric oxygenation, contrary to intermittent hyperbaric oxygenation, adversely affects vasorelaxation in healthy sprague-dawley rats due to increased oxidative stress. *Oxid Med Cell Longev*. 2018;7406027.
- Zhou Q, Huang G, Yu X, Xu W. A novel approach to estimate ROS origination by hyperbaric oxygen exposure, targeted probes and specific inhibitors. *Cell Physiol Biochem*. 2018;47(5):1800-8.
- Ma C, Deng Y, Xiao R, Xu F, Li M, Gong Q, et al. Anti-fatigue effect of phlorizin on exhaustive exercise-induced oxidative injury mediated by Nrf2/ARE signaling pathway in mice. *Eur J Pharmacol*. 2022;918:174563.
- Wan JJ, Qin Z, Wang PY, Sun Y, Liu X. Muscle fatigue: general understanding and treatment. *Exp Mol Med*. 2017;49(10):e384-93.
- Kim S, Yukishita T, Lee K, Yokota S, Nakata K, Suzuki D, et al. The effect of mild-pressure hyperbaric therapy (Oasis O2) on fatigue and oxidative stress. *Health*. 2011;3(7):432-6.
- Tepić S, Petković A, Srejić I, Jeremić N, Zivković V, Lončarević S, et al. Impact of hyperbaric oxygenation on oxidative stress in diabetic patients. *Undersea Hyperb Med*. 2018;45(1):9-17.
- Gu N, Nagatomo F, Fujino H, Takeda I, Tsuda K, Ishihara A. Hyperbaric oxygen exposure improves blood glucose level and muscle oxidative capacity in rats with type 2 diabetes. *Diabetes Technol Ther*. 2010;12(2):125-33.
- Conti FF, Brito Jde O, Bernardes N, Dias DS, Malfitano C, Morris M, et al. Positive effect of combined exercise training in a model of metabolic syndrome and menopause: autonomic, inflammatory, and oxidative stress evaluations. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol*. 2015;309(12):R1532-9.
- Ishihara A. Exposure to mild hyperbaric oxygen increases blood flow and resting energy expenditure but not oxidative stress. *J Sci Res Rep*. 2014;3(14):1886-96.
- Kawada S, Fukaya K, Ohtani M, Kobayashi K, Fukusaki C. Effects of pre-exposure to hyperbaric hyperoxia on high-intensity exercise performance. *J Strength Cond Res*. 2008;22(1):66-74.
- Takemura A, Eda N, Saito T, Shimizu K. Mild hyperbaric oxygen for the early improvement of mood disturbance induced by high-intensity exercise. *J Sports Med Phys Fitness*. 2021;62(2):250-7.
- Gröger M, Radermacher P, Speit G, et al. Genotoxicity of hyperbaric oxygen and its prevention: what hyperbaric physicians should know. *Diving Hyperb Med*. 2008;38(4):200-5.
- Benedetti S, Lamorgese A, Piersantelli M, et al. Oxidative stress and antioxidant status in patients undergoing prolonged exposure to hyperbaric oxygen. *Clin Biochem*. 2004;37(4):312-7.
- Korpinar Ş, Uzun H. The Effects of hyperbaric oxygen at different pressures on oxidative stress and antioxidant status in rats. *Medicina (Kaunas)*. 2019;55(5):205-13.
- Barranco T, Tvarijonavičiute A, Teclis F, Carrillo JM, Sánchez-Resalt C, Jimenez-Reyes P, et al. Changes in creatine kinase, lactate dehydrogenase and aspartate aminotransferase in saliva samples after an intense exercise: a pilot study. *J Sports Med Phys Fitness*. 2018;58(6):910-6.
- Santos Silva LJ, Monteiro de Magalhães NA, Oliveira Gonçalves LC, Alves PRL, Almeida AC, Andrade CMB. Kinetics of muscle damage biomarkers at moments subsequent to a fight in Brazilian Jiu-Jitsu practice by disabled athletes. *Front Physiol*. 2019;23(10):1055-63.
- Aunampai A, Pinthong M, Chaunchaiyakul R, Sinpermsukskul O. Effect of hyperbaric oxygen exposure on muscle recovery from exercise-induced muscle damages. *J Spor Scie Techno*. 2016;16(2):79-88.
- Babul S, Rhodes EC, Taunton JE, Lepawsky M. Effects of intermittent exposure of hyperbaric oxygen for the treatment of an acute soft tissue injury. *Clin J Sport Med*. 2004;13(3):138-47.
- Germain G, Delaney J, Moore G, Lee P, Lacroix V, Montgomery D. Effect of hyperbaric oxygen therapy on exercise-induced muscle soreness. *Undersea Hyperb Med*. 2003;30(2):135-45.
- Navid M, Michinari H, Lindsey R, Levine BD, Guilliod R. Hyperbaric oxygen therapy in sports musculoskeletal injuries. *Med Sci Sports Exerc*. 2019;52(6):1420-6.
- Minuzzi LG, Rama L, Chupel MU, Rosado F, Kuga GK, Gaspar RC, et al. Immune-endocrine responses and physical performance of master athletes during the sports season. *J Cell Biochem*. 2019;120(4):551-7.
- Stephenson BT, Leicht CA, Tolfrey K, Goosey-Tolfrey V. A multi-factorial assessment of elite paratriathletes' response to two weeks of intensified training. *Int J Sports Physiol Perform*. 2019;14(7):911-7.
- Joseph JJ, Golden SH. Cortisol dysregulation: the bidirectional link between stress, depression, and type2 diabetes mellitus. *Ann N Y Acad Sci*. 2017;1391(1):20-34.
- Branco BH, Fukuda DH, Andreato LV, Santos JFS, Esteves JVD, Franchini E. The Effects of hyperbaric oxygen therapy on post-training recovery in Jiu-Jitsu athletes. *PLoS One*. 2016;11(3):e0150517.
- Passavanti G, Tanasi P, Brauzzi M, Pagni MR, Aloisi AM. Can hyperbaric oxygenation therapy (HOT) modify the blood testosterone concentration?. *Urologia*. 2010;77(1):52-6.