

富氢气体对高强度运动后本体感觉和肌肉耐力的影响

董庚鑫¹, 李毅婷¹, 洪影露¹, 包大鹏²<https://doi.org/10.12307/2024.836>

投稿日期: 2023-11-16

采用日期: 2024-01-16

修回日期: 2024-02-03

在线日期: 2024-02-07

中图分类号:

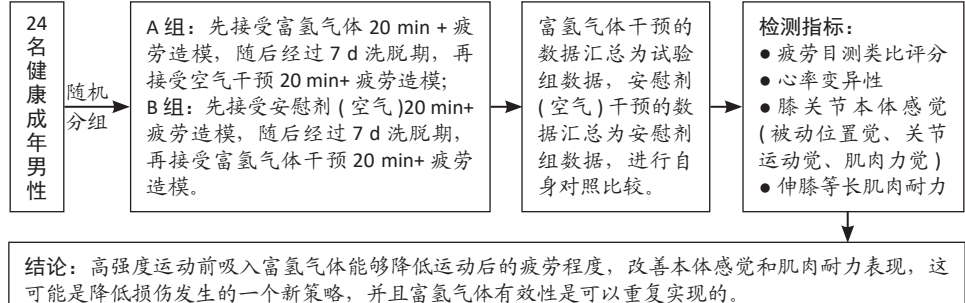
R459.9; R339.4; R153

文章编号:

2095-4344(2024)34-05413-06

文献标识码: A

文章快速阅读: 富氢气体对运动疲劳后本体感觉和肌肉耐力的影响



文题释义:

富氢气体: 为氢气和氧气浓度为2:1的混合气体, 吸入人体内的氢气最高浓度约为4.08%, 氧气的最高浓度不超过21.66%。

运动疲劳: 使用功率车, 经过等生理负荷疲劳模型造成的运动性疲劳状态。

摘要

背景: 氢气可以减轻剧烈运动引起的氧化应激, 改善疲劳状况。目前已有一些研究报道, 摄入富氢水或富氢气体对改善运动性疲劳和运动表现有潜在效果。

目的: 探究高强度运动前吸入富氢气体对运动疲劳后本体感觉和肌肉耐力表现的影响。

方法: 通过随机、双盲、交叉、重复测量的试验设计, 将24名健康成年男子随机分为A、B组, 每组12名, 在交叉前的试验第一阶段分别吸入20 min富氢气体和安慰剂气体(空气), 随后使用功率车建立疲劳模型, 在吸气前和疲劳后进行疲劳目测类比评分、心率变异性、膝关节本体感觉(被动位置觉、关节运动觉和肌肉力觉)和伸膝等长肌肉耐力测试。经过7 d洗脱期后, 在试验第二阶段两组交换干预方案并进行上述测试。分别对比2个阶段中A、B组结果的差异, 并整合两阶段结果, 对比氢气和安慰剂干预的差异。

结果与结论: ①在试验的第一阶段, 氢气组干预后的疲劳目测类比评分低于安慰剂组($P < 0.01$), 相邻R-R间期差值均方根、低频输出功率均值、高频输出功率均值和等长肌肉耐力值均大于安慰剂组($P < 0.05$), 被动位置觉和关节运动觉优于安慰剂组($P < 0.05$), 两组间肌肉力觉比较差异无显著性意义($P > 0.05$), 安慰剂组干预后的肌肉力觉差于干预前($P < 0.01$)。在试验的第二阶段, 氢气组与安慰剂组干预后所有测试结果的差异趋势同试验的第一阶段。整合后试验结果显示仍然是氢气组上述指标检测值优于安慰剂组($P < 0.05$)。②线性回归分析显示, 干预后疲劳目测类比评分和被动位置觉结果呈正相关($r=0.327$, $P=0.023$), 即高强度运动后主观疲劳程度越高被动位置觉结果越差。③结果表明, 高强度运动前吸入富氢气体能够降低运动后的疲劳程度, 从而改善本体感觉和肌肉耐力表现, 这可能是降低损伤发生的一个新策略, 并且富氢气体有效性是可以重复实现的。

关键词: 富氢气体; 安慰剂; 氧化应激; 运动疲劳; 本体感觉; 运动损伤

Effect of hydrogen-rich gas on proprioception and muscle endurance after high-intensity exercise

Dong Gengxin¹, Li Yiting¹, Hong Yinglu¹, Bao Dapeng²¹School of Sport Medicine and Physical Therapy, ²China Institute of Sport and Health Science, Beijing Sport University, Beijing 100084, China

Dong Gengxin, PhD candidate, School of Sport Medicine and Physical Therapy, Beijing Sport University, Beijing 100084, China

Corresponding author: Bao Dapeng, Researcher, China Institute of Sport and Health Science, Beijing Sport University, Beijing 100084, China

Abstract

BACKGROUND: Hydrogen, as an antioxidant, can reduce oxidative stress induced by strenuous exercise and achieve the effect of improving fatigue. Several studies have been reported on the potential effects of hydrogen-rich water or hydrogen-rich gas on improving exercise fatigue and athletic performance.

OBJECTIVE: To investigate the effects of hydrogen-rich gas inhalation prior to high-intensity exercise on proprioception and muscular endurance performance after exercise fatigue.

METHODS: Through a randomized, double-blind, crossover, and repeated measurement experimental design, 24 healthy men were randomly divided into group A and group B, with 12 in each group. In the first phase of the crossover experiment, group A inhaled hydrogen-rich gas (hydrogen group) for 20 minutes and group B inhaled placebo gas (air; placebo group) for 20 minutes. Then, cycle ergometers were used to establish the fatigue model. Visual analog fatigue scale, heart rate variability, knee joint proprioception (passive position perception, joint motion perception, and muscle force perception) and isometric knee extension muscle endurance were tested before and after intervention. After a 7-day washout period, two groups exchanged intervention methods and the

北京体育大学, ¹运动医学与康复学院, ²中国运动与健康研究院, 北京市 100084

第一作者: 董庚鑫, 男, 1996年生, 山西省阳泉市人, 汉族, 北京体育大学在读博士, 主要从事运动损伤预防与康复及运动恢复方面的研究。

通讯作者: 包大鹏, 研究员, 北京体育大学中国运动与健康研究院, 北京市 100084

<https://orcid.org/0000-0003-4656-1869> (董庚鑫)

引用本文: 董庚鑫, 李毅婷, 洪影露, 包大鹏. 富氢气体对高强度运动后本体感觉和肌肉耐力的影响 [J]. 中国组织工程研究, 2024, 28(34):5413-5418.



above tests were performed again in the second phase of the experiment. Differences between the results of groups A and B in the two phases were compared, and finally the results of the two phases were integrated to compare the overall differences between hydrogen intervention and placebo intervention.

RESULTS AND CONCLUSION: In the first phase of the crossover experiment, the visual analog fatigue scale score of the hydrogen group after intervention was significantly lower than that of the placebo group ($P < 0.01$). The root mean square of the difference between the adjacent R-R, mean low-frequency output power, mean high-frequency output power, and isometric muscle endurance after intervention in the hydrogen group were significantly higher than those in the placebo group ($P < 0.05$). Passive position perception and joint motion perception after intervention in the hydrogen group were significantly better than those in the placebo group ($P < 0.05$). There was no significant difference in muscle force perception between the two groups ($P > 0.05$), but muscle force perception in the placebo group after intervention was significantly worse than that before intervention ($P < 0.01$). The difference trend of all test results after intervention in the two groups in the first phase of the experiment showed the same results in the second phase of the experiment. The integrated results also showed that the hydrogen group had better test values for the above indicators than the placebo group ($P < 0.05$). Linear regression analysis showed a positive correlation between post-intervention visual analog fatigue scale scores and passive position perception results ($r=0.327$, $P=0.023$), i.e., the higher subjective fatigue level after high-intensity exercise indicated the worse passive position perception results. To conclude, inhaling hydrogen-rich gas before high-intensity exercise can reduce the degree of fatigue after exercise, thereby improving proprioception and muscle endurance performance, which may be a new strategy to reduce the occurrence of injury. And its effectiveness can be achieved repeatedly.

Key words: hydrogen-rich gas; placebo; oxidative stress; exercise fatigue; proprioception; sports injury

How to cite this article: DONG GX, LI YT, HONG YL, BAO DP. Effect of hydrogen-rich gas on proprioception and muscle endurance after high-intensity exercise. Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu. 2024;28(34):5413-5418.

0 引言 Introduction

高强度运动后产生的运动性疲劳是影响后续运动能力和动作控制的重要原因^[1-3]。人体在疲劳后会出现力量下降、耐力降低、动作准确性和本体感觉灵敏度下降等一系列变化^[4-5]，不仅影响运动表现，还增加了运动损伤发生的概率^[6]。其中，本体感受灵敏度降低导致身体不能对失衡状况迅速做出反应，是发生关节损伤的一个重要因素^[7]，肌肉耐力的下降也可能影响动作质量^[8]，从而增加损伤的风险。因此，从降低高强度运动后的疲劳程度入手，进而控制本体感觉和肌肉耐力等素质能力的下降可能是降低运动损伤风险的一种途径。

自从2007年氢气被发现具有选择性抗氧化特性以来^[9]，其生物学效应被广泛关注。作为一种新型医用治疗气体，氢气抗氧化、抗炎和调节酸碱稳态的潜力已在运动科学相关领域得到证实，可以通过降低高强度运动后产生的氧化应激反应和调节酸碱平衡来减少自由基和乳酸等对机体产生的负面影响，进而改善疲劳状况^[10-13]。目前已有一些研究报道了摄入富氢水或富氢气体对改善运动性疲劳和运动表现有潜在效果^[14-17]。因此，作者假设摄入氢气可能会是一种通过降低高强度运动后的运动疲劳程度来改善本体感觉和肌肉耐力等素质能力下降的潜在有效手段。此次研究通过一项随机、双盲、交叉、重复测量试验探究了急性运动前吸入富氢气体对健康成年男子运动疲劳和本体感觉、肌肉耐力的影响，假设与安慰剂组（吸入空气）相比，吸入富氢气体能够通过改善疲劳程度来减少运动后本体感觉、肌肉耐力的下降，可能是一种降低运动损伤发生概率的手段。

1 对象和方法 Subjects and methods

1.1 设计 随机、双盲、交叉、重复测量的试验设计，试验第一、二阶段的数据分别使用独立样本 t 检验比较干预氢气组与安慰剂组间的差异。整合交叉前后 2 个阶段的数据后，使用双因素（组别 $\times$ 时间）重复测量方差分析检验氢气组和安慰剂组间的差异，分别检验交互效应、组别主效应和时间主效应，并进行 Bonferroni 事后成对比较。

1.2 时间及地点 试验于 2021 年 10-11 月在北京体育大学中国运动与健康研究院实验室完成。

1.3 对象 研究招募了 24 名健康成年男性，年龄 (21.33 ± 2.68) 岁，身高 (177.38 ± 4.53) cm，体质量 (70.71 ± 7.26) kg。考虑到顺序效应，按随机数字表法将 24 名受试者随机分为 A 组 ($n=12$) 和 B 组 ($n=12$)，用于交叉试验设计。在试验开始前，所有受试者均被告知参与此次研究所涉及到的相关益处和可能发生的风险，在收到对试验程序的详细解释后签署了《受试者知情同意书》。研究已得到北京体育大学运动科学实验伦理委员会批准，批准号：2021163H。

样本量计算：使用 G-Power 3.1.9.6 软件，预先估计研究所需样本量。功效值、I 类误差 α 、效应量分别设置为 0.80，0.05 和 0.30，计算出样本至少需要 24 人。

纳入标准：试验前 3 个月内至少有每天 2 h、每周 3 d 的训练习惯（包括阻力训练），并且能够进行高强度的功率车练习（至少能够连续以 150 W 的功率骑行 10 min）。试验前 6 个月内无下肢受伤史，无心血管、呼吸、内分泌疾病，不吸烟，不服用药物。

1.4 方法

1.4.1 试验设计 采用了随机、双盲、交叉、重复测量的试验设计，共进行两个阶段的试验（图 1）。

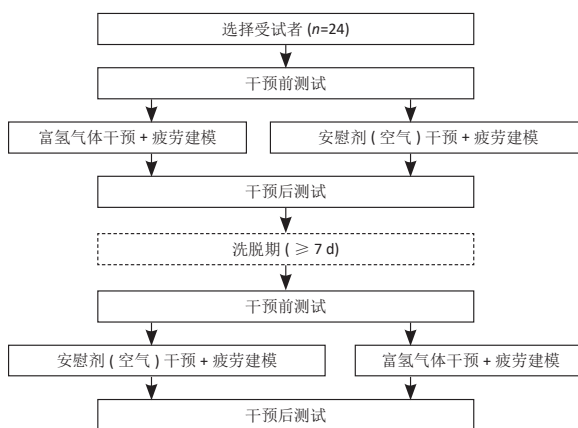


图 1 | 交叉试验设计过程

Figure 1 | Flow chart of the crossover trial

根据第五届国际运动生物化学会议 (1982 年) 对运动诱发疲劳的定义，不能维持当前的运动负荷被视为疲劳的标准。为确保每位受试者都达到了基本相同的疲劳水平，使用等生

理负荷建立疲劳模型。因此,在正式试验前首先进行了预试验,测试每位受试者的最大骑行功率和最大骑行时长,两组受试者的最大功率和骑行时长相比差异无显著性意义($P > 0.05$)。

试验的第一阶段,A组接受氢气干预(吸入富氢气体 20 min),B组接受安慰剂干预(吸入环境空气 20 min),吸气结束后立即进行功率车疲劳模型的建立。试验第一阶段结束后,间隔 7 d 作为氢气残留效应的洗脱期。试验的第二阶段,A、B 两组的干预方案进行交换,即 A 组接受安慰剂干预,B 组接受氢气干预。

每位受试者接受 2 次干预,并在每次干预前后进行疲劳目测类比分测试、心率变异性测试、膝关节本体感觉(被动位置觉、关节运动觉和肌肉力觉)测试和伸膝等长肌肉耐力测试。两阶段的测试时间、测试地点和测试顺序均相同,均由同一名试验人员进行测试和数据采集。最后将 2 个阶段接受氢气干预的结果合并为氢气组,接受安慰剂干预的结果合并为安慰剂组,整体比较了氢气和安慰剂干预的效果差异。另外,为了排除氢气干预顺序的影响、证明洗脱期的有效性并验证富氢气体的效果是否有可重复性,还分别分析和对比了试验第一、二阶段的测试结果。

在每次试验前的 48 h 内,要求受试者不进行剧烈运动,不摄入酒、咖啡和任何补充剂或药物,也不接受任何特定的恢复治疗。在测试当天,受试者摄入相同的食物并在测试前 2 h 无任何进食。

1.4.2 干预方案

(1) 吸气方案:富氢气体由氢氧发生器(福建智恒氢启健康科技有限公司,中国)制备,产生 1 800 mL/min 的氢氧混合气体(氢与氧的组成比为 2 : 1),并通过连接在气体发生器上的鼻吸管供应。由于技术限制,没有直接测量氢和氧吸入人体内的浓度,但有使用相同流量氢气生成设备的研究表明,健康成年人吸入氢气的最高浓度约为 4.08%,氧气的最高浓度不超过 21.66%^[15],与空气中的氧含量相比增加量很小。安慰剂气体(环境空气,0.000 05% 氢气,20.9% 氧气)由流量为 0 mL/min 的氢氧发生器连接一个鼻吸管提供。受试者报告没有发现 2 次吸气过程有不同。

(2) 疲劳模型建立方案:最大骑行功率($W_{\max}$)是通过在功率车(Ergoline GmbH, ergoselect 100, 德国)上进行递增负荷测试来确定的^[18]。受试者被要求在整个测试过程中保持骑行频率在 60–70 r/min。开始时以 30 W 负荷热身 3 min,然后以 50 W 负荷正式开始骑行,之后每 2 min 增加 20 W,直至受试者无法按照要求进行(至少满足以下 2 个条件):①心率: > 85% 的最大心率,最大心率 = $208 - (0.7 \times \text{年龄})$;②感知用力评分 > 7(Borg CR10 Scale®);③骑行频率:在强烈的口头鼓励下不能保持 60 r/min 超过 5 s。受试者可以在任何时间、以任何原因终止测试,特别是出现胸痛、呼吸短促、头晕或恶心等状况时。 $W_{\max}$ 的计算公式为: $W_{\max} = W_{\text{out}} + (t/120) \times 20 [W_{\text{out}}]$: 结束时的负荷(w); t : 结束时的时间(s))^[19]。

最大骑行时长($T_{\max}$)测试在完成了最大骑行功率测试至少 72 h 后进行。测试内容包括在 40% $W_{\max}$ 下进行 3 min 的热身,然后以 80% $W_{\max}$ 、60–70 r/min 的频率维持骑行,直至无法维持当前运动负荷(在强烈的口头鼓励下仍不能保持 60 r/min 超过 5 s)时结束测试,记录 $T_{\max}$ 。

每位受试者等生理负荷的疲劳模型为以 40% $W_{\max}$ 、60–70 r/min 热身 3 min,然后以 80% $W_{\max}$ 、60–70 r/min 骑行至 $T_{\max}$ ^[18]。

1.4.3 测试方案 干预前的测试顺序为:疲劳目测类比分测试,静息 5 min 测试心率变异性,被动位置觉测试,关节运动觉测试,肌肉力觉测试,(伸膝等长肌肉耐力测试。干预后的测试顺序为:疲劳目测类比分测试,伸膝等长肌肉耐力测试,肌肉力觉测试,被动位置觉测试,关节运动觉测试,静息 5 min 测试心率变异性。

1.5 主要观察指标

1.5.1 疲劳目测类比分测试 使用疲劳目测类比分反映受试者的主观疲劳程度。受试者在吸气干预前和疲劳建模后即刻分别在一条 10 cm 的直线上选择代表自我感觉疲劳程度的位置[起点(0 mm)代表无疲劳,终点(100 mm)代表极度疲劳,线段中点(50 mm)代表中等疲劳]来指定他们的主观疲劳水平^[20]。

1.5.2 心率变异性测试 心率变异性指的是窦性心律在一定时间内周期性改变的现象,是反映交感神经和副交感神经张力及其平衡的重要指标,可用于评价受试者的生理和心理负荷状态^[21]。当人体出现疲劳时,会打破原有的交感神经和副交感神经的动态平衡,这时心率变异性可以反映身体功能状态的生理基础^[22]。在吸气干预前和疲劳建模后,每位受试者佩戴心率带(Firstbeat Analytics, 芬兰)并静息 5 min(安静状态下采集更合理^[23]),测试两段安静状态时心率变异性的时域指标:相邻 R-R 间期差值均方根和全部正常 R-R 间期标准差;频域指标:低频输出功率均值和高频输出功率均值,这些指标能够反映人体疲劳状态。

1.5.3 膝关节本体感觉测试

被动位置觉测试:使用下肢持续被动康复机进行膝关节被动位置觉测试^[24]。将受试者膝关节屈曲至目标角度(膝关节本体感觉测试在屈曲 60° 最敏感^[25])并保持 5 s,同时要求受试者专心感受此角度的位置并记忆。测试前告知受试者在测试过程中要避免肌肉的主动收缩,并且要求受试者手握手持开关,佩戴眼罩和耳塞,去除视觉及听觉对本体感觉测试可能的影响。调整下肢持续被动康复机以 2 (°)/s 的速度从屈膝 0° 位置开始带动受试者的膝关节进行屈曲被动运动,当受试者感觉到之前定位的角度时,受试者按下手持开关的“停止”按钮,仪器将停止并在面板上显示其达到的角度,测试人员记录此时的数值。如此重复测试 3 次,每次测试后仪器回到 0° 的过程中,受试者腿部不与仪器接触,避免通过运动时长来判断位置。每一次的测试结果不反馈给受试者。取 3 次测试结果的平均值,再减去目标角度,从而得出自我复位角度和目标角度差值的绝对值,用于评价关节的被动位

置觉，角度差值的绝对值越小则被动位置觉越好。

关节运动觉测试：受试者下肢固定在下肢持续被动康复机上，调整膝关节屈曲 60° 为起始位置。受试者戴上眼罩及耳塞，去除视觉及听觉对本体感觉测试可能的影响，并手握手持开关。设定下肢持续被动康复机以 2 (°)/s 的速度移动肢体，在受试者准备好后，测试人员在仪器操作界面上随时按下“开始”按钮，受试者自我感觉膝关节有运动感时按下手持开关的“停止”按钮，仪器将停止并在面板上显示其达到的角度，测试人员记录此时的数值。如此重复测试 3 次，取平均值并减去起始角度，从而得出动受试者到达的真实位置与开始位置之间角度差值的绝对值，用于评价关节的运动觉，角度差值的绝对值越小则关节运动觉越好。

肌肉力觉：在等长收缩模式下考察受试者对 25% 最大伸膝等长收缩力量的复现能力。首先测试屈膝 60° 位置时的最大等长伸膝力量，计算出目标等长力量值 (25% 最大伸膝等长收缩力量)。使用 LINK 等长测力器 (KFORCE, 法国)，让受试者主动伸膝发力的同时看着平板显示的数值，使其尽可能维持在目标等长力量值，此时要求受试者专心去感受用力，保持 5 s。然后将平板拿开，要求受试者尽量复现之前的用力大小并保持 5 s。记录 5 s 内的平均值，共进行 3 次，每次中间休息 5 s。每一次的测试结果不反馈给受试者。取 3 次结果的平均值，再减去目标等长力量值，从而得出其差值的绝对值用于评价肌肉的力觉，力量差值的绝对值越小则肌肉力觉越好。

1.5.4 伸膝等长肌肉耐力测试 使用 LINK 等长测力器测试在屈膝 60° 位置时的等长肌肉耐力。要求受试者始终保持最大收缩状态，并且给予强烈的口头鼓励，直到研究人员给出“停止”口令。测试过程中研究人员全程监测平板中受试者等长收缩力量的实时数值，直到受试者力量下降到 1/2 最大力量以下时给出“停止”口令。

1.6 统计学分析 使用 IBM SPSS Statistics 25.0 软件进行统计分析。显著性水平设为 $P < 0.05$ 。使用夏皮罗-威尔克检验 (Shapiro-Wilk Test) 对数据进行正态性检验，符合正态分布的用 $\bar{x} \pm s$ 进行统计描述。试验第一、二阶段的数据，分别使用独立样本 t 检验比较干预前后组间的差异。整合交叉前后 2 个阶段的数据后，使用双因素 (组别 $\times$ 时间) 重复测量方差分析检验氢气组和安慰剂组的差异，分别检验交互效应、组别主效应和时间主效应，并进行 Bonferroni 事后成对比较。为了检验疲劳和本体感觉之间的关系，肌肉疲劳产生的代谢产物会影响肌梭放电阈值，主要影响被动位置觉^[26-27]，所以对干预后两组受试者的疲劳目测类比分和被动位置觉进行线性回归分析。该文统计学方法已经哈佛医学院老年研究所统计学专家审核。

2 结果 Results

2.1 参与者数量分析 24 名受试者均完成所有测试，全部进入结果分析。

2.2 A 组与 B 组受试者基本资料比较 两组受试者基本特征方面无显著性差异 ($P > 0.631$ ，表 1)。

表 1 | 研究对象基本特征
Table 1 | Fundamental characteristics of the study population

特征	总例 (24 人)	A 组 (12 人)	B 组 (12 人)	P 值
年龄 (岁)	21.33±2.68	21.17±2.41	21.50±3.03	0.768
身高 (cm)	177.38±4.53	177.83±4.04	176.92±5.11	0.631
体质量 (kg)	70.71±7.26	70.83±7.73	70.58±7.09	0.935
体质量指数 (kg/m ²)	22.45±1.93	22.38±2.02	22.53±1.93	0.862
最大骑行功率 (W)	209.17±30.35	213.33±34.99	205.00±25.76	0.513
最大骑行时长 (min)	20.49±8.27	19.02±6.94	21.97±9.50	0.394

表注：最大骑行时长表示预试验中受试者以 80% 最大骑行功率能够维持的骑行时长。

2.3 交叉前后两阶段 A 组和 B 组受试者的测试结果 见表 2。

干预前，试验两个阶段的 A、B 组组间所有测试结果比较差异均无显著性意义 ($P > 0.05$)。在试验的第一阶段，干预后 A 组的疲劳目测类比分有低于 B 组的趋势，相邻 R-R 间期差值均方根、低频输出功率均值、高频输出功率均值和等长肌肉耐力值均有大于 B 组的趋势，被动位置觉、关节运动觉和肌肉力觉有优于 B 组的趋势。在试验的第二阶段，B 组与 A 组干预后所有测试结果的差异趋势同试验的第一阶段。

2.4 整合后氢气组和对照组的测试结果 整合交叉前后 2 个阶段的结果，氢气组和安慰剂组所有干预前测试结果比较差异均无显著性意义 ($P > 0.05$)，见表 2。

疲劳目测类比分的主交互效应显著 (时间 $\times$ 组别) ($F=9.395$, $P=0.005$, 偏 $\eta^2=0.290$)。组别的主效应显著 ($F=8.260$, $P=0.009$, 偏 $\eta^2=0.264$)，时间的主效应显著 ($F=310.585$, $P < 0.001$, 偏 $\eta^2=0.931$)。干预后氢气组受试者疲劳目测类比分显著低于安慰剂组 ($F=11.392$, $P=0.003$, 偏 $\eta^2=0.331$)。

相邻 R-R 间期差值均方根的主交互效应不显著 (时间 $\times$ 组别) ($F=3.786$, $P=0.066$, 偏 $\eta^2=0.159$)。组别的主效应显著 ($F=4.654$, $P=0.043$, 偏 $\eta^2=0.189$)，时间的主效应显著 ($F=50.463$, $P < 0.001$, 偏 $\eta^2=0.716$)。干预后氢气组受试者相邻 R-R 间期差值均方根显著高于安慰剂组 ($F=9.574$, $P=0.006$, 偏 $\eta^2=0.324$)。

全部正常 R-R 间期标准差的主交互效应不显著 (时间 $\times$ 组别) ($F=0.710$, $P=0.409$, 偏 $\eta^2=0.034$)。组别的主效应不显著 ($F=2.460$, $P=0.132$, 偏 $\eta^2=0.110$)，时间的主效应显著 ($F=55.080$, $P < 0.001$, 偏 $\eta^2=0.734$)。干预后氢气组和安慰剂组受试的全部正常 R-R 间期标准差比较差异无显著性意义 ($F=0.756$, $P=0.395$, 偏 $\eta^2=0.036$)。

低频输出功率均值的主交互效应不显著 (时间 $\times$ 组别) ($F=0.349$, $P=0.561$, 偏 $\eta^2=0.017$)。组别的主效应不显著 ($F=0.429$, $P=0.520$, 偏 $\eta^2=0.021$)，时间的主效应显著 ($F=28.761$, $P < 0.001$, 偏 $\eta^2=0.590$)。干预后氢气组受试者低频输出功率均值显著大于安慰剂组 ($F=7.783$, $P=0.011$, 偏 $\eta^2=0.280$)。

高频输出功率均值的主交互效应不显著 (时间 $\times$ 组别) ($F=0.941$, $P=0.344$, 偏 $\eta^2=0.045$)。组别的主效应不显著 ($F=0.796$, $P=0.383$, 偏 $\eta^2=0.038$)，时间的主效应显著 ($F=17.380$, $P < 0.001$, 偏 $\eta^2=0.465$)。干预后氢气组受试者高频输出功率均值显著大于安慰剂组 ($F=5.198$, $P=0.034$, 偏 $\eta^2=0.206$)。

表 2 | 氢气组与安慰剂组试验 2 个阶段和整合后测试结果

Table 2 | Testing results in the two phases of the experiment and the integrated results in the hydrogen group and placebo group

测试项目		试验第一阶段		试验第二阶段		整合后结果	
		A 组 (n=12)(氢气干预)	B 组 (n=12)(安慰剂干预)	A 组 (n=12)(安慰剂干预)	B 组 (n=12)(氢气干预)	氢气组 (n=24)	安慰剂组 (n=24)
疲劳目测类比分 (mm)	干预前	9.75±8.45	9.34±7.52	17.67±9.78	19.21±12.44	14.48±11.47	13.50±9.53
	干预后	65.17±20.90	78.17±16.70	75.67±10.08	67.75±14.84	66.46±17.77	76.92±13.55 ^a
心 相 邻 R-R 间期差值均方根 (ms)	干预前	58.40±28.61	45.11±30.96	53.97±28.14	43.95±23.80	51.04±28.19	50.69±30.82
	干预后	17.08±10.20	7.05±4.79	8.55±7.16	16.31±14.00	15.93±12.17	7.95±6.10 ^a
变 全 部 正 常 R-R 间期标准差 (ms)	干预前	64.82±29.00	59.92±25.10	56.74±14.89	62.62±23.75	65.93±26.94	59.13±21.38
	干预后	33.63±13.35	26.43±15.02	27.32±18.19	28.89±14.41	30.57±14.27	27.54±16.37
异 性 低 频 输 出 功 率 均值 (ms²)	干预前	1 584.34±1 260.76	1 478.98±909.57	1 512.74±1 127.52	1 417.69±900.50	1 563.48±1 136.56	1 548.14±1 052.71
	干预后	526.36±455.44	373.08±754.34	361.85±386.92	543.12±668.93	547.37±581.12	379.86±596.54 ^a
高 频 输 出 功 率 均值 (ms²)	干预前	2 406.75±2 100.21	2 479.23±3 016.18	2 287.15±1 734.22	2 467.37±2 811.59	2 530.65±2 585.87	2 538.48±2 540.20
	干预后	462.96±803.23	121.75±167.16	78.57±9.91	372.09±493.53	430.48±671.54	103.65±135.40 ^a
本 体 被 动 位 置 觉 (°)	干预前	9.63±3.77	11.96±3.17	10.43±4.31	12.59±4.75	11.11±4.46	11.19±3.78
	干预后	13.63±4.57	17.55±3.49	18.15±6.17	14.60±4.15	14.11±4.30	17.85±4.91 ^a
感 关 节 运 动 觉 (°)	干预前	0.88±0.56	1.18±1.04	1.03±0.24	1.18±0.99	1.03±0.80	1.10±0.74
	干预后	1.49±0.63	2.82±2.49	1.75±0.63	2.01±1.50	1.75±1.16	2.28±1.86 ^a
肌 肉 力 觉 (kg)	干预前	2.65±1.69	1.98±1.29	1.98±1.29	2.51±1.85	2.58±1.73	1.98±1.26
	干预后	1.94±1.37	3.03±2.27	4.06±2.24	3.42±2.61	2.68±2.17	3.54±2.26 ^b
等 长 肌 肉 耐 力 (s)	干预前	72.27±22.10	72.35±29.62	67.63±17.61	65.77±19.72	69.02±20.75	69.99±23.95
	干预后	48.61±12.76	44.90±17.71	41.87±10.89	48.61±10.98	48.61±11.64	43.38±14.46 ^a

表注：与同时间氢气组比较，^a $P < 0.05$ ；与同组干预前比较，^b $P < 0.05$ 。

被动位置觉的交互效应显著 (时间 × 组别) ($F=9.158$, $P=0.006$, 偏 $\eta^2=0.285$)。组别的主效应不显著 ($F=3.303$, $P=0.082$, 偏 $\eta^2=0.126$)，时间的主效应显著 ($F=57.047$, $P < 0.001$, 偏 $\eta^2=0.713$)。干预后氢气组受试者被动位置觉 (与目标角度的差值) 显著优于安慰剂组 ($F=7.905$, $P=0.010$, 偏 $\eta^2=0.256$)。

关节运动觉的交互效应不显著 (时间 × 组别) ($F=2.249$, $P=0.147$, 偏 $\eta^2=0.089$)。组别的主效应显著 ($F=5.987$, $P=0.022$, 偏 $\eta^2=0.207$)，时间的主效应显著 ($F=25.288$, $P < 0.001$, 偏 $\eta^2=0.524$)。干预后氢气组受试者关节运动觉 (与起始角度的差值) 显著优于安慰剂组 ($F=4.355$, $P=0.048$, 偏 $\eta^2=0.159$)。

肌肉力觉的交互效应显著 (时间 × 组别) ($F=4.865$, $P=0.038$, 偏 $\eta^2=0.175$)。组别的主效应不显著 ($F=0.106$, $P=0.747$, 偏 $\eta^2=0.005$)，时间的主效应显著 ($F=8.548$, $P=0.008$, 偏 $\eta^2=0.271$)。氢气组受试者干预前后的肌肉力觉 (与目标力量的差值) 比较差异无显著性意义 ($F=0.046$, $P=0.831$, 偏 $\eta^2=0.002$)，安慰剂组受试者干预后的肌肉力觉显著差于干预前 ($F=14.675$, $P=0.001$, 偏 $\eta^2=0.390$)。

伸膝等长肌肉耐力的交互效应显著 (时间 × 组别) ($F=5.193$, $P=0.032$, 偏 $\eta^2=0.184$)。组别的主效应不显著 ($F=0.829$, $P=0.372$, 偏 $\eta^2=0.035$)，时间的主效应显著 ($F=45.239$, $P < 0.001$, 偏 $\eta^2=0.663$)。干预后氢气组受试者等长肌肉耐力显著大于安慰剂组 ($F=5.197$, $P=0.032$, 偏 $\eta^2=0.184$)。

2.5 线性回归分析结果 对受试者干预后的疲劳状况 (用疲劳目测类比分指标代表) 和本体感觉情况 (用被动位置觉数据代表, 即与目标角度的差值) 进行线性回归分析。结果显示疲劳目测类比分和被动位置觉显著相关 ($r=0.327$, $P=0.023$)，即在高强度运动后主观疲劳程度越高被动位置觉结果越差, 见图 2。

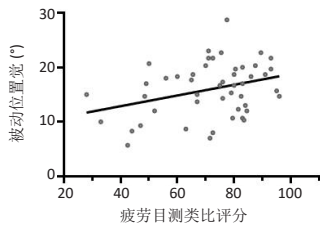


图 2 | 疲劳目测类比分和被动位置觉的关系
Figure 2 | Relationship between visual analog fatigue scale scores and passive position perception

2.6 不良事件 试验过程中, 受试者在干预过程中和结束后均未报告任何不良反应, 干预过程未对受试者造成不良影响。

3 讨论 Discussion

此次研究首次对高强度运动前吸入富氢气体的效果进行探究, 观察氢气是否能够通过延缓疲劳来改善本体感觉和肌肉耐力, 在后续运动过程中可能会减少运动损伤发生的风险。结果表明, 高强度运动前吸 20 min 富氢气体能够有效降低运动后的主观疲劳感受和心率变异性反应的客观疲劳, 相较于安慰剂组, 吸入富氢气体后高强度运动时主要运动关节的本体感觉 (包括被动位置觉、关节运动觉和肌肉力觉) 和肌肉耐力都明显更好, 而本体感觉、肌肉耐力差是损伤发生的重要原因, 因此运动前吸富氢气体可能有防伤的潜力。通过疲劳目测类比分与被动位置觉的线性回归分析, 提示了氢气对本体感觉作用效果的原理之一是氢气能够降低运动性疲劳, 并且通过分析对比交叉设计前后两阶段各自的结果发现, 氢气的作用效果是可以重复实现的, 与氢气干预的顺序无关, 7 d 的洗脱期足以消除氢气的残留效应。

以往研究发现, 运动后饮用富氢水或吸入富氢气体对疲劳恢复有益, 富氢水需要饮用一段时间后会有效果^[16], 而富氢气体会产生即刻效应^[15], 这可能与气体中氢气含量比液体中更多, 并且气体更易在体内扩散有关。从应用的实践角度出发, 减少由疲劳引起的运动损伤的发生和运动后的恢复一样重要, 而运动前吸入会产生即刻效应的富氢气体, 是影

响后续运动中疲劳程度的手段,并且通过观察与发生损伤高度相关的本体感觉和肌肉耐力指标验证了该手段的可行性。但富氢气体对运动疲劳产生效果的量效关系目前还不明确,以往研究吸入富氢气体的时长分为 20 min 和 60 min^[15, 28-29],并且都有显著效果,考虑实际应用时比赛或训练前的省时性,此次研究选择了吸入 20 min 的方案,证明了运动前吸入 20 min 已经能够产生效果,但最佳的吸入量(浓度和时长)还需要进一步的探究。

氢气抗疲劳的原因可能来自于它强大的抗氧化和酸碱缓冲能力,可以选择性清除有害的自由基和抵消运动引起的代谢变化(特别是抑制大量乳酸的产生)^[11]。剧烈运动可能通过多种途径诱发氧化应激,增加活性氧的产生(如引起线粒体内电子泄漏、儿茶酚胺的自氧化、降低还原型烟酰胺腺嘌呤二核苷酸磷酸活性)或肌肉缺血-再灌注^[30]。活性氧的增加会诱导脂质、蛋白质和 DNA 氧化损伤,影响线粒体电子转移和 ATP 生成减少^[31-32],导致有氧途径变得低效,增加无氧途径的利用率,从而导致无机磷酸盐和乳酸水平升高^[31];还会改变肌肉收缩蛋白(肌肉收缩)和钙泵(肌肉控制)^[33],诱导细胞内钙离子增加和细胞内酶失活^[34],并改变肌肉收缩的动作电位和干扰肌肉内钾离子转运系统^[35],这些都会导致肌肉疲劳和功能下降^[35-36],表现为肌肉力量、耐力等降低。而肌肉疲劳产生的代谢产物(包括缓激肽、花生四烯酸、前列腺素 E2、钾和乳酸)会激活痛觉感受器,增加肌梭放电的阈值(主要影响关节位置觉^[26-27]),并因此改变 α - γ 共激活来改变外周本体感觉系统^[37]。因此,从剧烈运动后产生疲劳、破坏本体感觉和肌肉功能表现的机制着手,氢气选择性地清除有害的自由基、降低活性氧和氧化应激水平,降低运动后的乳酸水平可能是其能够产生此次研究结果的重要原因。虽然氢气抗氧化抗疲劳的机制还在进一步的探究中,但其作用效果已在此次研究中得到了证实。

作为一项初步探究,该研究找到了一种通过在运动前补充无不良反应的外源性抗氧化剂来减少后续运动中的疲劳程度方法,它还能够改善疲劳后的本体感觉和肌肉耐力表现,从而在一定程度上降低了引起损伤发生的风险。但研究只从宏观表现上证明了富氢气体的作用,间接指出其可能通过减少本体感觉等素质的降低来影响损伤的发生情况,并无直接预防损伤的证据,接下来还应该继续追踪探究运动前吸富氢气体是否能够降低损伤发生率。还应该以宏观表现为基础,继续深挖潜在的微观机制,找出氢气产生作用的明确原理和证据,为实际应用提供基础理论支撑。另外,未来应该检测具体吸入体内的氢气含量,有利于明确氢气缓解疲劳的量效关系,明确最佳的吸入浓度和时长,以完善氢气干预的方案。

结论:在高强度运动前吸入 20 min 富氢气体能够减少运动后的疲劳程度,改善本体感觉和等长肌肉耐力的表现,并且本体感觉的改善与运动疲劳的改善有关。交叉试验设计发现富氢气体的有效性是可以重复实现的,这可为降低损伤的发生提供了一个新策略。

作者贡献:董庚鑫进行试验设计,包大鹏评估实验设计与可行性并提供试验器材及场地,董庚鑫、李毅婷和洪彰露完成试验测试,董庚鑫完成资料收集和数据处理分析,董庚鑫完成论文撰写,包大鹏和李毅婷进行文章审核。

前瞻性临床研究数据共享声明:文章作者同意:①可以在一定范围内开放研究参与者去标识的个体数据;②可以在一定范围内开放共享文章报告结果部分的去标识个体基础数据,包括正文、表、图及附件;③可以在一些情况下开放研究方案和知情同意书等相关文档;④全文开放获取数据的时间是从文章出版后即刻,并无终止日期。

利益冲突:文章的全部作者声明,在课题研究和文章撰写过程中不存在利益冲突。

开放获取声明:这是一篇开放获取文章,根据《知识共享许可协议》“署名-非商业性使用-相同方式共享 4.0”条款,在合理引用的情况下,允许他人以非商业性目的基于原文内容编辑、调整和扩展,同时允许任何用户阅读、下载、拷贝、传递、打印、检索、超级链接该文献,并为之建立索引,用作软件的输入数据或其它任何合法用途。

版权转让:文章出版前全体作者与编辑部签署了文章版权转让协议。

出版规范:该研究遵守《随机对照临床试验研究报告指南》(CONSORT 指南)。文章出版前已经过专业反剽窃文献检测系统进行 3 次查重。文章经小同行外审专家双盲外审,同行评议认为文章符合期刊发表宗旨。

4 参考文献 References

- [1] 邹利民,毛丽娟,伍健,等.疲劳与非预期应对女子足球运动员侧切动作中膝关节生物力学的影响[J].中国体育科技,2019,55(7):14-21.
- [2] 张颖慧,丁昊,苏健蛟.运动性疲劳对横踢技术动作特征及其击打速度的影响研究[J].武汉体育学院学报,2020,54(6):87-94.
- [3] 岳文雨.运动性疲劳特征的研究综述[J].中国体育科技,2003,39(10):51-54.
- [4] WRIGHT CJ, ARNOLD BL. Fatigue's effect on eversion force sense in individuals with and without functional ankle instability. J Sport Rehabil. 2012;21(2): 127-136.
- [5] 张秋霞,张林,王国祥.局部肌肉疲劳对踝关节本体感觉的影响[J].体育科学,2011,31(3):68-73,80.
- [6] GERLACH KE, WHITE SC, BURTON HW, et al. Kinetic changes with fatigue and relationship to injury in female runners. Med Sci Sports Exerc. 2005;37(4):657-663.
- [7] HIEMSTRA LA, LO IK, FOWLER PJ. Effect of fatigue on knee proprioception: implications for dynamic stabilization. J Orthop Sports Phys Ther. 2001;31(10):598-605.
- [8] 颜天民,郭层城.我国竞技体操落地稳定性的现状与应重视的问题——析肌肉耐力对落地稳定性的影响[J].中国体育科技,1992(8):21-27,37,49.
- [9] OHSAWA I, ISHIKAWA M, TAKAHASHI K, et al. Hydrogen acts as a therapeutic antioxidant by selectively reducing cytotoxic oxygen radicals. Nat Med. 2007;13(6):688-694.
- [10] OHTA S. Molecular hydrogen as a preventive and therapeutic medical gas: initiation, development and potential of hydrogen medicine. Pharmacol Ther. 2014;144(1):1-11.
- [11] OSTOJIC SM. Molecular hydrogen in sports medicine: new therapeutic perspectives. Int J Sports Med. 2015;36(4):273-279.
- [12] OSTOJIC SM. Hydrogen Gas as an Exotic Performance-Enhancing Agent: Challenges and Opportunities. Curr Pharm Des. 2021;27(5):723-730.
- [13] LEBARON TW, LAHER I, KURA B, et al. Hydrogen gas: from clinical medicine to an emerging ergogenic molecule for sports athletes 1. Can J Physiol Pharmacol. 2019;97(9):797-807.
- [14] AOKI K, NAKAO A, ADACHI T, et al. Pilot study: Effects of drinking hydrogen-rich water on muscle fatigue caused by acute exercise in elite athletes. Med Gas Res. 2012;2:12.
- [15] SHIBAYAMA Y, DOBASHI S, ARISAWA T, et al. Impact of hydrogen-rich gas mixture inhalation through nasal cannula during post-exercise recovery period on subsequent oxidative stress, muscle damage, and exercise performances in men. Med Gas Res. 2020;10(4):155-162.
- [16] DONG G, FU J, BAO D, et al. Short-Term Consumption of Hydrogen-Rich Water Enhances Power Performance and Heart Rate Recovery in Dragon Boat Athletes: Evidence from a Pilot Study. Int J Environ Res Public Health. 2022;19(9):5413.
- [17] BOTEK M, KHANNA D, KREJČÍ J, et al. Molecular Hydrogen Mitigates Performance Decrement during Repeated Sprints in Professional Soccer Players. Nutrients. 2022;14(3):508.
- [18] HOLGADO D, TROYA E, PERALES JC, et al. Does mental fatigue impair physical performance? A replication study. Eur J Sport Sci. 2021;21(5):762-770.
- [19] BARZEGARPOOR H, AMOOZI H, RAJABI H, et al. The Effects of Performing Mental Exertion during Cycling Exercise on Fatigue Indices. Int J Sports Med. 2020;41(12):846-857.
- [20] LEE KA, HICKS G, NINO-MURCIA G. Validity and reliability of a scale to assess fatigue. Psychiatry Res. 1991;36(3):291-298.
- [21] 王兴泽,于杰,陈佩杰.基于心率变异性监测中医刮痧抗运动性疲劳的效果[J].上海体育学院学报,2021,45(7):76-83.
- [22] HEBISZ RG, HEBISZ P, ZATOŃ MW. Heart Rate Variability After Sprint Interval Training in Cyclists and Implications for Assessing Physical Fatigue. J Strength Cond Res. 2022;36(2):558-564.
- [23] 崔小珠,王人卫.应用心率变异性指标评价优秀耐力运动员机能状态研究进展[J].体育科学,2015,35(12):75-79,93.
- [24] 王大武,白定群,邵岚,等.下肢康复机器人训练对脑卒中偏瘫侧膝关节本体感觉的影响[J].中国康复医学杂志,2016,31(9):950-954.
- [25] 李玉周,胡英琪,李国平.本体感觉测试的敏感性角度指标选取研究[J].中国运动医学杂志,2013,32(8):696-701.
- [26] PROSKE U. What is the role of muscle receptors in proprioception? Muscle Nerve. 2005;31(6):780-787.
- [27] FORESTIER N, TEASDALE N, NOUGIER V. Alteration of the position sense at the ankle induced by muscular fatigue in humans. Med Sci Sports Exerc. 2002;34(1):117-122.
- [28] JAVORAC D, STAJER V, RATGEER L, et al. Short-term H2 inhalation improves running performance and torso strength in healthy adults. Biol Sport. 2019;36(4):333-339.
- [29] KOROLJEV D, STAJER V, JAVORAC D, et al. Hydrogen inhalation positively affects cardiometabolic risk factors in men and women aged 65 years or older: a preliminary report. Eur Geriatr Med. 2018;9(5):729-730.
- [30] BLOOMER RJ. Effect of exercise on oxidative stress biomarkers. Adv Clin Chem. 2008;46: 1-50.
- [31] REID MB, HAACK KE, FRANCHEK KM, et al. Reactive oxygen in skeletal muscle. I. Intracellular oxidant kinetics and fatigue in vitro. J Appl Physiol (1985). 1992;73(5):1797-1804.
- [32] COOMBES JS, ROWELL B, DODD SL, et al. Effects of vitamin E deficiency on fatigue and muscle contractile properties. Eur J Appl Physiol. 2002;87(3):272-277.
- [33] GOLDFARB AH. Nutritional antioxidants as therapeutic and preventive modalities in exercise-induced muscle damage. Can J Appl Physiol. 1999;24(3):249-266.
- [34] EVANS WJ. Vitamin E, vitamin C, and exercise. Am J Clin Nutr. 2000;72(2 Suppl):647S-652S.
- [35] FINAUD J, LAC G, FILAIRE E. Oxidative stress: relationship with exercise and training. Sports Medicine (Auckland, N.Z.). 2006;36(4):327-358.
- [36] POWERS SK, DEMINICE R, OZDEMIR M, et al. Exercise-induced oxidative stress: Friend or foe? J Sport Health Sci. 2020;9(5):415-425.
- [37] PEDERSEN J, LÖNN J, HELLSTRÖM F, et al. Localized muscle fatigue decreases the acuity of the movement sense in the human shoulder. Med Sci Sports Exerc. 1999;31(7):1047-1052.

(责任编辑:GW, ZN, WL, YJ)