DOI:10.16016/j.2097-0927.202311060

沙漠干热环境下大鼠运动骨骼肌损伤评价指标的筛选

武堂晓[1],杨 曦[2],尹紫依[1,3],吴荧秋[1,3],吴吉利[3,4],惠华强[3] 830011 乌鲁木齐市,新疆医科大学公共卫生学院[1];830000 乌鲁木齐市,新疆军区总医院:科研教学科[2],卫勤部[3];832061 新疆维吾尔自治区石河子市,石河子大学医学院预防医学系[4]

[**摘要**] **目的** 使用西北特殊环境人工实验舱建立沙漠干热环境大鼠运动骨骼肌损伤模型,探讨沙漠干热环境下大鼠运动骨骼肌损伤的组织形态学和骨骼肌损伤相关等指标,筛选干热环境运动骨骼肌损伤评价指标。**方法** 18只8周龄雄性SD大鼠按随机数字表法分为(n=6):空白对照组(常温环境中自由运动)、常温运动组(常温环境中力竭运动)、干热运动组(干热环境中力竭运动)。3组大鼠先进行3 d的运动跑台适应性训练(速度为16 m/min,坡度为-16°,时间为5~10 min);常温运动组和干热运动组大鼠以19.3 m/min速度、-16°坡度运动至力竭结束,1次/d;干热运动组采用西北特殊环境人工实验舱模拟沙漠干热环境[温度(40±1) ℃,湿度(10±2) %]建立模型。实验连续6 d,取大鼠比目鱼肌组织观察病理学变化,通过血清学检测大鼠骨骼肌损伤标志物、炎症因子、氧化应激、激素等相关指标。**结果** 干热运动组骨骼肌损伤标志物肌酸激酶(concentrations of creatine kinase, CK)、肌酸激酶同工酶(creatine kinase isoenzyme, CK-MB)、肌型肌酸激酶(muscle-specific creatine kinase, CK-MM)的浓度均高于空白对照组、常温运动组(P<0.05);干热运动组炎症因子肿瘤坏死因子-α(tumor necrosis factor-α, TNF-α)、白介素-1β(interleukin-1β,IL-1β)、IL-6的浓度均高于空白对照组、常温运动组(P<0.05);干热运动组氧化应激丙二醛(malondialdehyde,MDA)的浓度均高于空白对照组、常温运动组(P<0.05);干热运动组超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)的浓度低于空白对照组、常温运动组(P<0.05);干热运动组睾酮(testosterone, T)的浓度均低于空白对照组、常温运动组(P<0.05);干热运动组皮质酮(corticosterone, Cort)的浓度高于空白对照组、常温运动组(P<0.05);干热运动组睾酮/皮质酮(testosterone/corticosterone, T/Cort)的浓度低于空白对照组、常温运动组(P<0.05);骨骼肌损伤标志物CK、CK-MB和CK-MM与促炎症细胞因子TNF-α、IL-1β和IL-6呈正相关(P<0.05);与MDA呈正相关,与抗氧化指标SOD呈负相关(P<0.05)、与激素水平Cort呈正相关,与T、T/Cort呈负相关(P<0.05)。**结论** 本研究构建出沙漠干热运动骨骼肌损伤动物模型,验证了沙漠干热环境较常温环境运动骨骼肌损伤程度大,筛选出TNF-α和IL-1β可作为评价损伤的间接指标。

[**关键词**] 沙漠干热环境;运动;骨骼肌损伤;肌酸激酶;炎症因子;氧化应激
[**中图法分类号**] R873.4;R122.2+1;R122.2+3;R685.4 [**文献标志码**] A

Screening of evaluation indicators for motor skeletal muscle injury in rats in hot and dry desert environment

WU Tangxiao[1], YANG Xi[2], YIN Ziyi[1,3], WU Yingqiu[1,3], WU Jili[3,4], HUI Huaqiang[3] [1]School of Public Health, Xinjiang Medical University, Urumqi, Xinjiang Uygur Autonomous Region, 830011; [2]Research and teaching department, [3]health service department, General Hospital of Xinjiang Military Command, Urumqi, Xinjiang Uygur Autonomous Region, 830000; [4]Faculty of Preventive Medicine, Shihezi University School of Medicine, Shihezi, Xinjiang Uygur Autonomous Region, 832061, China

[**Abstract**] **Objective** To explore the histomorphology and related indicators in a rat model of skeletal muscle injury in an artificial experimental chamber as special environment in Northwest China to

[**基金项目**] 自治区区域协同创新专项(科技援疆计划, 2022E02121);新疆维吾尔自治区研究生科研创新项目资助(XJ2023G190)
[**通信作者**] 惠华强,E-mail:3382161957@qq.com

2097-0927/Copyright © 2024, 陆军军医大学(第三军医大学)。这篇开放获取文章遵循 CC BY 许可协议(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

stimulate a hot and dry desert environment in order to screen the evaluation indicators of skeletal muscle injury in a hot and dry environment. **Methods** Eighteen male SD rats (8 weeks old) were randomly divided into blank control group (room temperature, free movement), room temperature exercise group, and hot and dry exercise group, with 6 rats in each group. After the rats were subjected to adaptation training for 3 d (a 3-D exercise treadmill, speed: 16 m/min, slope: −16°, time: 5~10 min), the rats in the 2 exercise groups were subjected to a treadmill once per day at a speed of 19.3 m/min and a slope of −16° till the end of exhaustion, and those in the hot and dry exercise group were housed in an artificial experimental chamber at a temperature of (40±1) °C, a humidity of (10±2)%. After 6 d of continuous exercise, the rat soleus muscle tissue was taken to observe the pathological changes, and the serum samples were detected for skeletal muscle injury markers, inflammatory factors, oxidative stress related factors, hormones and other related indicators. **Results** When compared with the blank control group and the room temperature exercise group, the hot and dry exercise group had significantly higher concentrations of creatine kinase (CK), creatine kinase isoenzyme (CK-MB) and myotype creatine kinase (CK-MM) ($P<0.05$), elevated contents of TNF-α, IL-1β and IL-6 ($P<0.05$), raised malondialdehyde (MDA) content and lower superoxide dismutase (SOD) activity ($P<0.05$), lower testosterone (T) but higher corticosterone (Cort) levels and thus lower testosterone/corticosterone (T/Cort) ratio ($P<0.05$). The markers of skeletal muscle injury, CK, CK-MB and CK-MM were positively correlated with the pro-inflammatory cytokines, TNF-α, IL-1β and IL-6 ($P<0.05$), positively with the antioxidant indicator MDA but negatively with SOD ($P<0.05$), and positively correlated with Cort level and negatively with T level and T/Cort ratio ($P<0.05$). **Conclusion** A stable rat model of skeletal muscle injury in a hot and dry desert environment is successfully constructed. The severity of skeletal muscle injury is greater in rats in a hot and dry desert environment than those in a normal temperature environment. TNF-α and IL-1β are found to be indirect indicators to evaluate skeletal muscle injury in the environment.

[**Key words**] hot and dry desert environment; exercise; skeletal muscle injury; creatine kinase; inflammatory factors; oxidative stress

Supported by the Special Project of Regional Collaborative Innovation of Xinjiang Uygur Autonomous Region (Technology Assistance Plan for Xinjiang, 2022E02121) and the Project of Postgraduate Scientific Research and Innovation of Xinjiang Uygur Autonomous Region (XJ2023G190). Corresponding author: HUI Huaqiang, E-mail: 3382161957@qq.com

运动骨骼肌损伤是由于一时或长期反复的过度负荷导致的骨骼肌结构改变和功能障碍。偏心收缩引起的骨骼肌损伤,在临床上称为肌肉劳损,是在运动医学中治疗的最常见损伤之一[1]。沙漠干热地区具有夏季气温高、降水量少、昼夜温差大、植被稀少等特点[2],有很多油田钻井、采油作业及军事训练需要在此环境中完成。在此环境下作业,人体的各项生理机能变化较大、免疫力降低,可能会出现热应激、热衰竭和热休克,进而影响人群作业能力。因此,干热环境作业人群的健康、作业能力等问题是研究者重点关注的焦点之一。而近几年对于运动骨骼肌损伤的研究集中于常温环境和高温高湿环境[3],关于沙漠干热环境对运动骨骼肌损伤的研究有待深入。因此,本实验采用模拟西北特殊环境人工实验舱建立大鼠运动骨骼肌损伤的模型,探讨沙漠干热环境对运动骨骼肌损伤的影响,筛选干热环境运动骨骼肌损伤评价指标,为干热环境中运动骨骼肌损伤模型稳定构建提供前期基础,为干热环境运动骨骼肌损伤的防治和药物研发提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 实验动物

8周龄雄性SD大鼠18只,体质量(200±20)g,由新疆医科大学实验动物中心提供[生产合格证号:SCXK(新)2023-0002]。以国家标准啮齿类动物饲料分笼饲养,饲养环境温度为(21±1)℃,湿度(45±5)%,昼夜12 h节律,自由摄食和饮水。所有实验方案获新疆军区总医院伦理委员会审查批准伦(理批件号:DWLL20230403),符合3R原则。

1.2 主要实验设备和试剂

实验在由新疆军区总医院研制的西北特殊环境人工实验舱内进行,FT-200动物跑步机(成都泰盟软件有限公司),TS-12U生物组织脱水机(中国亚鹏),YB-6D型生物组织石蜡包埋机(湖北孝感亚光电子技术公司),LEICA RM213型组织切片机(德国徕卡公司),BI-2000医学图像分析系统(成都泰盟科技公司)。肌型肌酸激酶(muscle-specific creatine kinase, CK-MM)

ELISA 试剂盒(江莱生物科技有限公司),肿瘤坏死因子-α(tumor necrosis factor-α,TNF-α)、白介素-1β(Interleukin-1β,IL-1β)、IL-6、睾酮(testosterone,T)、皮质酮(corticosterone,Cort)ELISA 试剂盒(伊莱瑞特生物科技有限公司),肌酸激酶(creatine kinase,CK)肌酸激酶同工酶(creatine kinase isoenzymes,CK-MB)丙二醛(malondialdehyde,MDA)、超氧化物歧化酶(superoxide dismutase,SOD)试剂盒(北京索莱宝科技有限公司)。

1.3 实验分组及模型建立

大鼠适应性饲养 1 周,按随机数字表法分为(n=6):空白对照组(常温环境中自由运动)、常温运动组(常温环境中力竭运动)、干热运动组(干热环境中力竭运动)。正式实验前,3 组大鼠进行 3 d 的运动跑台适应性训练(速度为 16 m/min,坡度为-16°,时间为 5~10 min)。随后常温运动组和干热运动组大鼠于常温环境中测定力竭时间作为基础值,剔除运动能力超强和太弱的大鼠,休息 2 d 后,实验以 19.3 m/min 速度(相当于 76%的 VO_{2max})、-16°坡度运动至大鼠力竭结束。干热运动组采用西北沙漠特殊环境动物实验舱[4-5]建立沙漠干热环境大鼠运动骨骼肌损伤模型,设置温度(40±1)℃,湿度(10±2)%。

在大鼠进行离心运动时,肌肉抵抗体质量形成的运动负荷而进行离心收缩做功,而 16°是大鼠离心运动不打滑的最大斜度。研究表明,离心运动对肌肉伤害更大[6]。力竭判断标准:跑台过程中采用电刺激或毛刷机械刺激大鼠尾部,出现卧位跑、神情疲倦、反应迟钝、无法恢复运动、“逃避反应”极差、翻正反射消失[7]。运动实验 1 次/d,连续 6 d。

1.4 骨骼肌组织取材

运动实验结束后,用 3%戊巴比妥钠腹腔注射进行麻醉。下腔静脉采血,4 ℃、1 000×g 离心 10 min,分离血清,分装于-80 ℃低温冰箱贮存待测。迅速取出右侧后肢比目鱼肌,放入 4 ℃预冷的生理盐水,洗净血液滤纸吸干肌肉组织表面水分,一半置于 4%多聚甲醛溶液中固定 24 h,进行常规石蜡包埋,另一半快速冻存于液氮中,进行后期分子实验检测。

1.5 比目鱼肌病理切片的制备

取出已固定的比目鱼肌组织,浓度乙醇梯度脱水、包埋、切片,用 HE 染色试剂盒染色。HE 染色后在光学显微镜下观察并采集病理图片,描述组织病理变化。

1.6 观察相关指标

血清 CK、CK-MB 使用生化试剂盒检测;CK-MM、IL-6、TGF-α、IL-1β、T、Cort 使用酶联免疫吸附实验(ELISA)试剂盒检测;MDA 含量用硫代巴比妥酸法(thiobarbituric acid method,TBA)测定;超氧化物歧化酶(superoxide dismutase,SOD)活力用黄嘌呤氧化酶法(羟胺法)测定。

1.7 统计学处理

采用 SPSS 25.0 软件进行统计分析。符合正态分布的定量资料以 $\bar{x}\pm s$ 表示,两组间比较采用独立样本 t 检验,多组间比较采用方差分析,变量间相关性分析,采用 Pearson 相关分析。以 P <0.05 为差异有统计学意义。检验水准:α=0.05。

2 结果

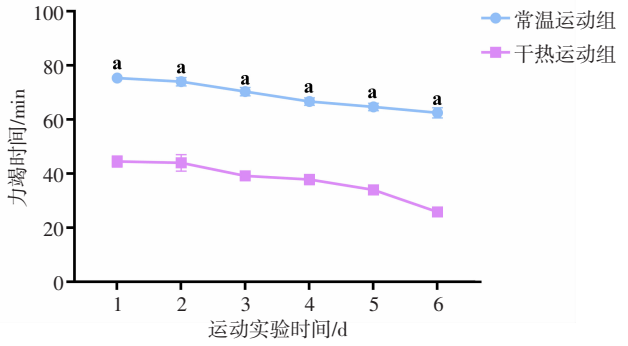
2.1 各组大鼠行为学改变

空白对照组大鼠精神状态良好、动作自如、反应灵敏;常温运动组大鼠力竭运动后精神萎靡、反应迟钝、动作缓慢、精神状态较干热运动组恢复快;干热运动组大鼠力竭运动后平躺于鼠笼角落、精神状态差、四肢瘫软无力、活动减少、饮水量增加。

2.2 大鼠运动力竭时间分析

适应性运动 3 d 后,常温运动组[(87.17±4.54)min]和干热运动组[(83.33±1.75)min]大鼠在常温环境力竭时间差异无统计学差异(P>0.05)。

干热运动组力竭运动时间在 1、2、3、4、5、6 d 均显著低于常温运动组,差异有统计学意义(P<0.05)。以上结果说明干热环境对大鼠的运动能力有显著影响(图 1)。



a:P<0.05,与干热运动组比较

图 1 常温、干热运动组大鼠运动力竭时间分析 (n=6,$\bar{x}\pm s$)

2.3 大鼠比目鱼肌形态学变化

大鼠比目鱼肌 HE 染色观察显示(图 2):空白对照组形态结构正常,肌纤维结构完整、排列整齐、横纹明显,未见坏死、水肿、充血、炎症等病理性改变。常温运动组出现肌纤维排列疏松、断裂、坏死,部分巨噬细胞的浸润,组织间未见充血、水肿等病理性变化。干热运动组肌纤维出现肿胀、溶解、坏死,坏死的肌纤维数量明显增多,范围较大,肌纤维间隙可见大量淋巴细胞、巨噬细胞、成纤维细胞浸润。与空白对照组、常温运动组比较,干热运动组组织出现明显病理性改变。以上结果说明干热环境运动加重骨骼肌损伤。

2.4　大鼠血清肌损伤标志物检测

与空白对照组比较,常温运动组、干热运动组 CK、CK-MB、CK-MM 的浓度均显著升高,差异有统计学意义($P<0.05$);与常温运动组比较,干热运动组 CK、CK-MB、CK-MM 的浓度均显著升高,差异有统计学意义($P<0.05$)。以上结果说明干热环境加重大鼠骨骼肌损伤的程度(图 3)。

2.5　大鼠血清炎症因子检测

与空白对照组比较,常温、干热运动组 TNF-α、IL-1β、IL-6 的浓度显著升高,差异有统计学意义($P<0.05$);与常温运动组比较,干热运动组 TNF-α、IL-1β、IL-6 的浓度显著升高,差异有统计学意义($P<0.05$),见图 4。

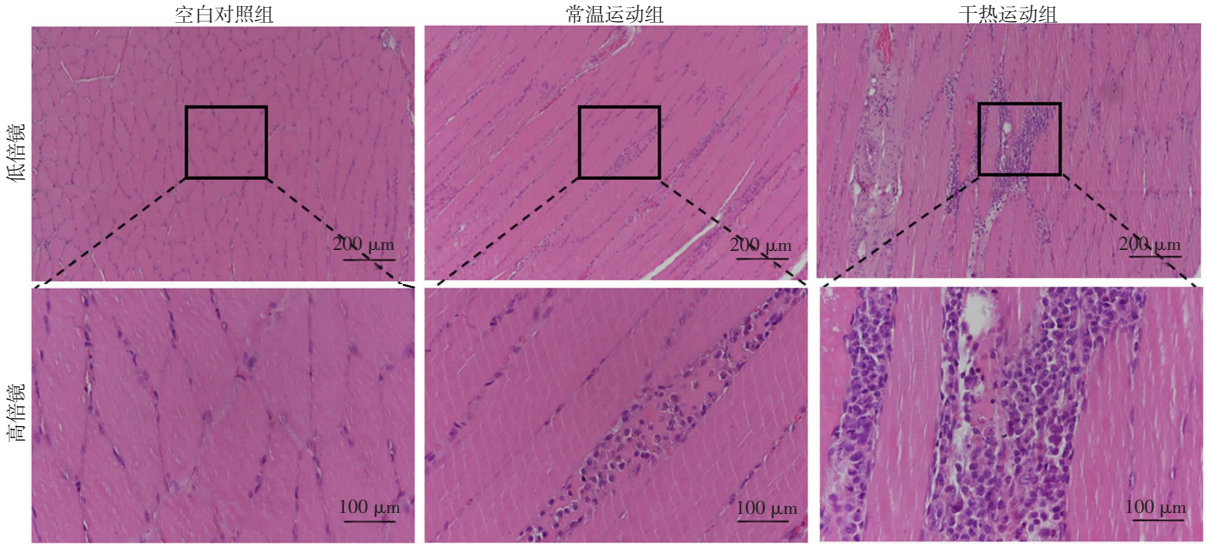
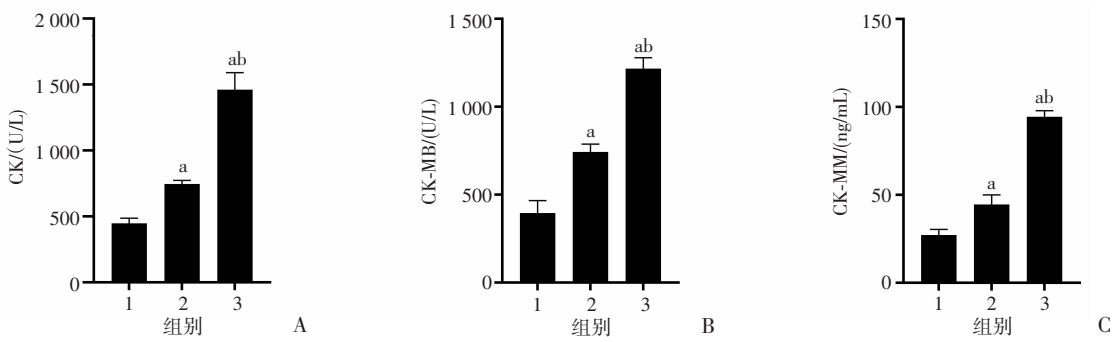
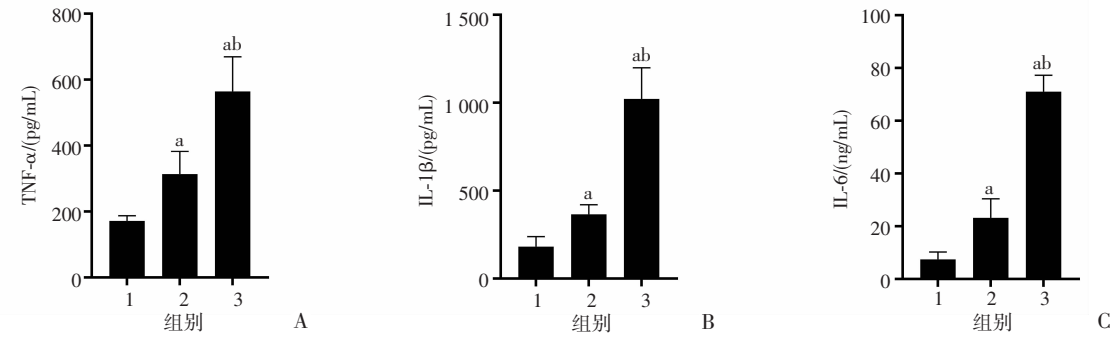


图 2　HE 染色观察各组大鼠比目鱼肌形态学变化



a:$P<0.05$,与空白对照组比较;b:$P<0.05$,与常温运动组比较
1:空白对照组;2:常温运动组;3:干热运动组

图 3　3 组大鼠血清 CK(A)、CK-MB(B)、CK-MM(C)水平变化　($n=6,\bar{x}\pm s$)

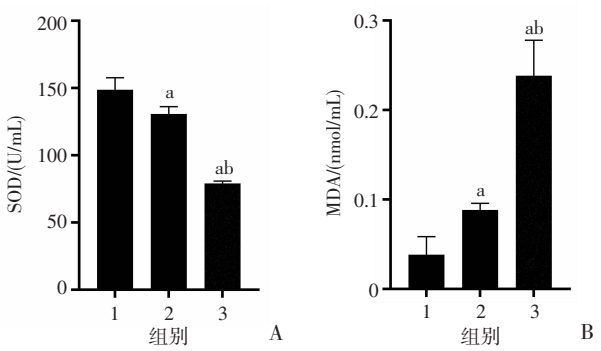


a:$P<0.05$,与空白对照组比较;b:$P<0.05$,与常温运动组比较
1:空白对照组;2:常温运动组;3:干热运动组

图 4　3 组大鼠血清炎症因子 TNF-α(A)、IL-1β(B)、IL-6(C)水平　($n=6,\bar{x}\pm s$)

2.6 大鼠血清氧化应激检测

与空白对照组比较,常温、干热运动组 SOD 的浓度显著降低,MDA 浓度显著升高,差异有统计学意义($P<0.05$);与常温运动组比较,干热运动组 SOD 的浓度显著降低,MDA 浓度显著升高,差异有统计学意义($P<0.05$),见图 5。



a:$P<0.05$,与空白对照组比较;b:$P<0.05$,与常温运动组比较
1:空白对照组;2:常温运动组;3:干热运动组

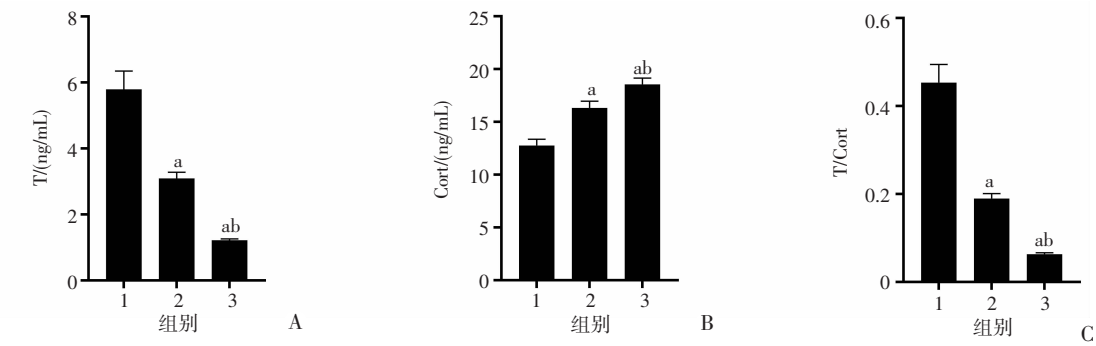
图 5 3 组大鼠血清氧化应激 MDA(A)、SOD(B)水平的检测结果 ($n=6,\bar{x}\pm s$)

2.7 大鼠血清激素水平检测

与空白对照组比较,常温、干热运动组 Cort 的浓度显著升高,T、T/Cort 的浓度显著降低,差异有统计学意义($P<0.05$);与常温运动组比较,干热运动组 Cort 浓度显著升高,T、T/Cort 的浓度显著降低,差异有统计学意义($P<0.05$),见图 6。

2.8 骨骼肌损伤标志物与炎症因子、氧化应激、激素的相关性分析

CK、CK-MB 和 CK-MM 的含量反映大鼠骨骼肌损伤程度。骨骼肌损伤标志物 CK、CK-MB 和 CK-MM 与促炎症细胞因子 TNF-α、IL-1β 和 IL-6 呈正相关($P<0.05$);与氧化指标 MDA 呈正相关,与抗氧化指标 SOD 呈负相关;与激素水平 Cort 呈正相关,与 T、T/Cort 呈负相关($P<0.05$)。以上结果说明骨骼肌损伤与炎症反应、氧化应激、激素水平存在一定相关性,并且骨骼肌损伤标志物与炎症因子、氧化应激的相关性比激素相关性更强。



a:$P<0.05$,与空白对照组比较;b:$P<0.05$,与常温运动组比较
1:空白对照组;2:常温运动组;3:干热运动组

图 6 3 组大鼠血清激素水平 T(A)、Cort(B)、T/Cort(C)的检测结果 ($n=6,\bar{x}\pm s$)

表 1 干热环境下运动大鼠骨骼肌损伤标志物与炎症因子、氧化应激、激素的相关性分析

检测指标	CK		CK-MB		CK-MM	
	r	*P*	*r*	*P*	*r*	*P*
炎症因子						
TNF-α	0.892	<0.05	0.899	<0.05	0.888	<0.05
IL-1β	0.927	<0.05	0.924	<0.05	0.976	<0.05
IL-6	0.961	<0.05	0.937	<0.05	0.959	<0.05
血清氧化应激指标						
SOD	−0.967	<0.05	−0.964	<0.05	−0.965	<0.05
MDA	0.944	<0.05	0.944	<0.05	0.969	<0.05
激素水平						
T	−0.859	<0.05	−0.871	<0.05	−0.801	<0.05
Cort	0.885	<0.05	0.949	<0.05	0.842	<0.05
T/Cort	−0.845	<0.05	−0.873	<0.05	−0.772	<0.05

3 讨论

中国气候变化蓝皮书(2023)中显示,全球气候变暖趋势仍在持续,2022年中国夏季平均气温等气候变化指标创下新高。另外,2023年全国各地出现了有史以来的极端高温[8],极端热环境是指人们在生活和生产过程中接触到的高温高湿环境,主要存在于钢铁、铸造、采矿等制造业或某些军事环境中[9]。在此环境中作业,使人体产生热应力,出现体温、心率、血压等生理参数的改变,使作业人群感到疲劳、意识模糊,使得工作效率低下,现场事故发生的概率增加。

骨骼肌是运动系统的主动部分,而运动骨骼肌损伤是一个复杂的生理生化过程,是一时或长期反复的过度负荷导致的骨骼肌的结构改变和功能障碍。高温环境中运动大量脱水可导致循环血量减少,机体肌肉组织血流量会出现比较显著的变化,肌肉工作能力较快[10]。以往的运动骨骼肌损伤模型建立方法,着重于常温环境和高温高湿环境以及游泳模型,国内目前少见报道有研究关注干热环境下大鼠运动骨骼肌损伤模型,为了丰富对高温环境运动骨骼肌损伤模型的研究,本次实验通过模拟西北沙漠干热环境,建立大鼠运动骨骼肌损伤模型,探讨沙漠干热环境对大鼠运动骨骼肌损伤的影响,为沙漠干热环境骨骼肌损伤后续的防治提供基础条件。

3.1 干热环境对大鼠运动力竭时间的影响

本实验通过模拟西北沙漠干热环境,结合运动骨骼肌损伤,比较在常温环境和干热环境下,大鼠比目鱼肌组织的病理变化及特异性骨骼肌损伤指标,为建立稳定可复制的沙漠干热环境大鼠运动骨骼肌损伤实验模型提供实验基础。通过大鼠的运动力竭时间对比,发现干热运动组的力竭时间较常温运动组的时间明显减短,说明干热环境对大鼠的运动能力造成一定程度的影响,使大鼠力竭状态提前到达。

3.2 干热环境对大鼠骨骼肌损伤标志物的影响

血清生化指标对于评估实验动物的器官功能或损伤改变情况起着决定性或提示性作用,是临床医学和生物医学研究的重要数据。CK是骨骼肌能量代谢的关键酶之一,CK-MB、CK-MM是运动后骨骼肌纤维通透性增高以及肌肉细微损伤判断的生物标志物[11]。本研究发现,干热运动组CK、CK-MB、CK-MM活性明显高于空白对照组和常温运动组,说明干热环境下的力竭运动增强了大鼠骨骼肌肌细胞膜的通透性,加重了CK-MM泄漏至血清中。

3.3 干热环境对大鼠血清炎症因子、氧化应激、激素水平的影响

运动性骨骼肌损伤会引起炎症反应的激活,并且导致炎性细胞的聚集和促炎因子的释放,TNF-α、IL-1β、IL-6等可以间接反映骨骼肌炎症反应的敏感性指标,并且与骨骼肌损伤程度呈正相关[12]。本研究发现,干热运动组TNF-α、IL-1β、IL-6活性明显高于空白对照组和常温运动组,这说明干热环境下的大强度力竭离心运动产生的张力对肌纤维的牵拉造成的损伤,导致局部血管通透性和血流状况的改变,持续加速了炎症反应的发生。

运动性骨骼肌损伤也会导致氧化应激的加剧,SOD和MDA是评价氧化应激过程中常用的两个指标。MDA的含量表明自由基损害造成的脂质过氧化程度,SOD而是机体内清楚自由基重要的抗氧化酶之一[13]。本研究发现,与空白对照组和常温运动组比较,干热运动组MDA、SOD的活性水平也发生显著改变,说明在干热环境力竭运动过程中会导致比目鱼肌内氧化应激和抗氧化水平系统的失衡。

睾酮是体内主要的雄激素,是体内促合成激素,运动可以调节血清睾酮的变化;皮质酮是机体内的促分解激素,可以减少机体内的蛋白质合成,致使机体内的运动能力有所下降,睾酮与皮质酮比值(T/Cort)作为衡量合成代谢分解、代谢平稳指标,以反映机体运动能力及疲劳程度[14]。本研究发现,与空白对照组和常温运动组比较,干热运动组T、Cort、T/Cort的活性水平也发生显著改变,这说明在干热环境力竭运动增强了大鼠骨骼肌损伤的程度。

3.4 干热环境骨骼肌损伤标志物与炎症因子、氧化应激、激素水平相关性分析

本研究进一步探讨了骨骼肌损伤标志物与炎症因子、氧化应激、激素水平的相关性,发现骨骼肌损伤标志物CK、CK-MB和CK-MM浓度越高,促炎症细胞因子TNF-α、IL-1β和IL-6浓度越高;氧化指标MDA浓度越高,抗氧化指标SOD浓度越低;激素水平Cort越高,T浓度、T/Cort比值越低;另外炎症因子、氧化应激的相关性较激素水平的相关性更强,提示干热环境骨骼肌损伤指标与炎症反应、氧化应激反应、激素水平之间存在一定的相关性,可通过检测血清炎症因子、氧化应激等评估骨骼肌损伤提供参考依据。

以上结论在比目鱼肌组织病理变化中也同样得到了验证。与空白对照组比较,常温运动组和干热运动组均表现出不同程度的肌肉组织损伤表现,与常温运动组比较,干热运动组比目鱼肌出现肌肉坏死,细胞核消失,可见淋巴细胞、成纤维细胞、巨噬细胞等,与血清

生化指标的结果相一致,这也说明了干热环境可以加重骨骼肌损伤的形成。

因此,结合上述几项检测指标的变化,发现干热因素加重了骨骼肌损伤的严重程度,缩短了力竭时间,TNF-α、IL-1β 等可作为评价干热环境运动骨骼肌损伤的间接指标。本研究建立了沙漠干热环境运动骨骼肌损伤模型,为进一步研究奠定基础。如实现骨骼肌损伤防治端口迁移、提升沙漠干热环境作业人群工作时效、降低或避免骨骼肌损伤带来的一系列严重问题。

参考文献:

[1] DUEWEKE J J, AWAN T M, MENDIAS C L. Regeneration of skeletal muscle after eccentric injury[J]. J Sport Rehabil, 2017, 26(2): 171-179. DOI: 10.1123/jsr.2016-0107.

[2] 赵全成, 徐强, 张凯, 等. 湿热海岸沙漠环境特征与干热沙漠环境特征对比分析[J]. 装备环境工程, 2023, 20(8): 128-135. DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2023.08.017.
ZHAO Q C, XU Q, ZHANG K, *et al*. Comparative analysis of environmental characteristics between hot and humid coastal desert and hot and dry desert[J]. Equip Environ Eng, 2023, 20(8): 128-135. DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2023.08.017.

[3] HUANG W, HUI H Q, XU J P, *et al*. Study on the antifatigue effect of compound amino acid capsules[J]. Cell Microbiol, 2022, 2022: 6593811. DOI: 10.1155/2022/6593811.

[4] BEDFORD T G, TIPTON C M, WILSON N C, *et al*. Maximum oxygen consumption of rats and its changes with various experimental procedures[J]. J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol, 1979, 47(6): 1278-1283. DOI: 10.1152/jappl.1979.47.6.1278.

[5] ARMSTRONG R B, OGILVIE R W, SCHWANE J A. Eccentric exercise-induced injury to rat skeletal muscle[J]. J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol, 1983, 54(1): 80-93. DOI: 10.1152/jappl.1983.54.1.80.

[6] 张胜年, 陆爱云. 骨骼肌运动损伤实验研究中的动物模型[J]. 中国运动医学杂志, 2000, 19(2): 185-188. DOI: 10.16038/j.1000-6710.2000.02.030.
ZHANG S N, LU A Y. Animal model in experimental study of skeletal muscle sports injury[J]. Chin J Phys Med, 2000, 19(2): 185-188. DOI: 10.16038/j.1000-6710.2000.02.030.

[7] 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]. Int J Environ Res Public Health, 2021, 18(18): 9755. DOI: 10.3390/ijerph18189755.

[8] 王苗. 全球气候持续变暖,我们该如何应对[J]. 科学之友, 2023(9): 46-47.
WANG M. The global climate continues to warm, how should we deal with it[J]. Friend Sci Amateurs, 2023(9): 46-47.

[9] 吕石磊. 极端热环境下人体热耐受力研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.
LYU S L. Research on human heat tolerance under extreme heat environment[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007.

[10] GIBBONS T D, AINSLIE P N, THOMAS K N, *et al*. Influence of the mode of heating on cerebral blood flow, non-invasive intracranial pressure and thermal tolerance in humans[J]. J Physiol, 2021, 599(7): 1977-1996. DOI: 10.1113/JP280970.

[11] 文韬, 孙小华. 一次大强度运动对少年单跳运动员血浆CK、CKMM、CKMB 亚型的影响[J]. 广州体育学院学报, 2004, 24(4): 37-40. DOI: 10.13830/j.cnki.cn44-1129/g8.2004.04.012.
WEN T, SUN X H. The effects of acute exercise on plasma CK and CK isoforms in young athletes[J]. J Guangzhou Phys Educ Inst, 2004, 24(4): 37-40. DOI: 10.13830/j.cnki.cn44-1129/g8.2004.04.012.

[12] 张帅军, 唐月梅, 张大鼎, 等. 刺梨果粉缓解过度训练大鼠骨骼肌氧化应激损伤效果的研究[J]. 食品工业科技, 2022, 43(12): 338-346. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021090352.
ZHANG S J, TANG Y M, ZHANG D D, *et al*. Effect of *Rosa roxburghii* tratt powder on alleviating oxidative stress injury of skeletal muscle in overtrained rat[J]. Sci Technol Food Ind, 2022, 43(12): 338-346. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021090352.

[13] 刘建宇. 中等强度运动对去卵巢大鼠子宫刺激、骨骼肌MDA 含量及 SOD、GSH-PX 活性的影响[J]. 山东体育科技, 2012, 34(5): 73-76. DOI: 10.14105/j.cnki.1009-9840.2012.05.001.
LIU J Y. Effects of moderate-intensity exercise on uterus, MDA content, SOD and GSH-PX activity in ovariectomized rats[J]. Shandong Phys Sci Technol, 2012, 34(5): 73-76. DOI: 10.14105/j.cnki.1009-9840.2012.05.001.

[14] 娄春善, 曹建民, 郭娴, 等. 牛蒡子对运动训练大鼠睾酮及相关激素含量和抗运动疲劳能力的影响[J]. 中国实验方剂学杂志, 2015, 21(4): 153-157. DOI: 10.13422/j.cnki.syfjx.2015040153.
LOU C S, CAO J M, GUO X, *et al*. Effect of arctii fructus on testosterone content, correlated hormones content and exercise capacity in rats receiving exercise training[J]. Chin J Exp Tradit Med Formulae, 2015, 21(4): 153-157. DOI: 10.13422/j.cnki.syfjx.2015040153.

(**收稿**:2023-11-13;**修回**:2024-03-13)

(编辑 邓强庭)