



# 公开级与轻量级赛艇运动员高原训练初期免疫应答特征的比较研究

高欢<sup>1</sup>, 王玉新<sup>1</sup>, 张昊楠<sup>1</sup>, 孟志军<sup>2</sup>, 高炳宏<sup>3\*</sup>

**摘要:**目的:探讨男子公开级与轻量级赛艇运动员初上高原阶段免疫应答差异。方法:以8名公开级和轻量级赛艇运动员为研究对象。初上高原前2周均以低强度有氧训练为主,上高原前和高原训练(2 280 m)1周调整后次日晨空腹采肘静脉血测量淋巴细胞亚群和血浆儿茶酚胺、肌红蛋白及皮质醇浓度。结果:(1)高原适应性训练1周后肌红蛋白浓度无显著变化,轻量级和公开级运动员T%和CD4+%显著降低,NK%显著升高;CD8+%和CD4+/CD8+无显著变化;轻量级和公开级运动员间淋巴细胞各亚群的变化均无显著交互效应。(2)高原适应性训练1周后轻量级和公开级运动员血浆多巴胺均显著下降(-18.66%vs. -9.88%);血浆肾上腺素和去甲肾上腺素均小幅升高,但无显著性改变;血浆肾上腺素、去甲肾上腺素和多巴胺组间均无显著交互效应。B%与血浆多巴胺呈中度显著正相关。结论:以低强度适应性训练为主的高原训练初期呈现出一定程度的免疫应激,表现为循环血T%、CD4+%显著下降,NK%显著升高,多巴胺显著降低。公开级与轻量级赛艇运动员间无显著应答差异。多巴胺可能与高原训练初期B细胞的应答调节密切相关。

**关键词:**赛艇;高原训练;免疫应答;儿茶酚胺

中图分类号:G86 文献标志码:A 文章编号:1006-1207(2021)01-0094-06

DOI:10.12064/ssr.20210113

## Comparison of the Immune Response to the Initial Stage of Altitude Training between Heavyweight and Lightweight Rowers

GAO Huan<sup>1</sup>, WANG Yuxin<sup>1</sup>, ZHANG Haonan<sup>1</sup>, MENG Zhijun<sup>2</sup>, GAO Binghong<sup>3\*</sup>

(1. Shanghai Research Institute of Sports Science & Shanghai Anti-Doping Agency, Shanghai 200030, China; 2. Yunnan Institute of Sport Science, Kunming 650041, China; 3. School of Physical Education and Training, Shanghai University of Sport, Shanghai 200438, China)

**Abstract:** Purpose: This study was designed to compare the immune response between heavyweight and lightweight rowers in the initial stage of altitude training. Method: Eight heavyweight and lightweight rowers were included. The main training content was low intensity aerobic training in the first two weeks of altitude training camp (2 280 m). Fasting venous blood in the morning before arriving at the altitude and one week after altitude training was collected to measure lymphocyte subsets, catecholamine and cortisol. Results: After one-week altitude adaptation training, no significant change was observed in the level of plasma myoglobin; Circulating T% and CD4+% were decreased significantly and NK% increased significantly in both weight-class rowers. No significant changes were observed in CD8+% and CD4+/CD8+. No interaction difference was founded in all lymphocyte subsets. Plasma dopamine decreased significantly both in heavyweight and lightweight rowers after

收稿日期:2020-03-31

基金项目:上海市体育局科技攻关课题(20J012);上海市科委科技支撑项目(15DZ1208001)。

第一作者简介:高欢,男,博士,副研究员,硕士生导师。主要研究方向:优秀运动员的训练监控及其代谢应答特征。

E-mail:gaohuan@shriss.cn。

\*通信作者简介:高炳宏,男,博士,教授,博士生导师。主要研究方向:优秀运动员训练监控。E-mail:gaobinghong@126.com。

作者单位:1.上海体育科学研究所(上海市反兴奋剂中心),上海 200030;2.云南省体育科学研究所,昆明 云南 650041;

3.上海体育学院 体育教育训练学院,上海 200438



one-week altitude training (-18.66% vs -9.88%), the plasma epinephrine and norepinephrine both increased slightly, but no significant change was observed; No significant interaction effects were founded in the level of epinephrine, norepinephrine and dopamine between the two weight-class rowers. Significant and positive correlations between plasma level of dopamine and circulating B% was observed. Conclusion: In the early stage of altitude training, which mainly consists of low-intensity aerobics, the immune system showed a stress in both heavyweight and lightweight class rowers. It exhibited the decrease in circulating T% and CD4<sup>+</sup>%, and the increase in NK% accompanied by the significant decreased level of plasma dopamine. But no statistical difference existed between the two weight-class rowers. Dopamine may play an important role in regulating the response of B lymphocyte to the initial stage of altitude training.

**Key Words:** rower; altitude training; immune response; catecholamine

高原训练在赛艇、自行车、中长跑、游泳等耐力项目中被广泛采用。一些运动员借助高原/低氧训练提高了运动能力,取得了优异成绩<sup>[1-3]</sup>。针对中长跑运动员和教练员的问卷调查表明,四分之三的运动员认为中等海拔高度下的高原/低氧训练对提高运动成绩有益<sup>[4]</sup>。目前的研究表明,高原/低氧训练改善有氧运动能力包括血液机制和非血液机制两个方面,如增加血容量和总血红蛋白质量<sup>[5-6]</sup>;促进骨骼肌线粒体和毛细血管生物合成,提高骨骼肌乳酸缓冲能力<sup>[7-9]</sup>。但高原/低氧暴露也会造成氧化损伤和炎症反应加剧<sup>[10-12]</sup>,引起肺动脉高压及过度通气<sup>[13]</sup>等一系列应激性改变。

肾上腺素(Adrenaline, ADR)、去甲肾上腺素(Noradrenaline, NA)、多巴胺(Dopamine, DA)均属于儿茶酚胺类物质。血浆、尿液中的 ADR、NA 和皮质醇(Cortisol, CRT)水平与交感-肾上腺系统的兴奋性和应激程度有关<sup>[14]</sup>。急性低氧暴露后循环血 ADR 升高<sup>[15-16]</sup>;NA 有报道升高,也有报道下降或不变<sup>[15,17-18]</sup>。高原低氧暴露初期,过高的动脉 ADR 和 NA 水平可能与急性高山病的发生有关<sup>[15,19]</sup>。研究发现免疫细胞内有儿茶酚胺受体,自身也能合成儿茶酚胺;外源性的儿茶酚胺可与免疫细胞内相应受体结合,调节免疫细胞的增殖分化;内源性儿茶酚胺可由中枢传递至外周直接调控免疫细胞功能<sup>[20-21]</sup>,中性粒细胞在其中发挥着桥梁作用<sup>[21-22]</sup>。针灸激活迷走神经后可调节肾上腺皮质 DA 的分泌,缓解炎症反应<sup>[23]</sup>。研究显示规律性运动可调控脑部 DA 受体的表达,从而反向调控大脑功能<sup>[24]</sup>。以上分析表明,高原训练期间的免疫应答可能与中枢调节密切相关,儿茶酚胺类递质可能在高原低氧适应过程中发挥着重要作用。初上高原时的 1~2 周是机体适应高原环境的重要阶段。高原训练实践中也发现,部分运动员初上高原阶段不易入睡、睡眠质量差,易患感冒、发烧、上呼吸道感

染等易感性疾病。

赛艇男子轻量级(体重 < 72.5 kg)比赛项目于 1974 年世锦赛首次正式设项,1996 年正式进入奥运会。公开级运动员对体重没有限制,优秀男子轻量级赛艇运动员体脂含量约 10%<sup>[25]</sup>。控制体重是轻量级赛艇运动员日常训练和生活中不可避免的话题。急性减重多是通过节食、脱水实现,容易导致低血糖、血浆量减少和血液浓缩,有损身体健康和运动表现。国际赛艇联合会从保护运动员健康角度建议:男子轻量级赛艇运动员在赛前 5~6 个月时体重不应高于规定体重 5 kg,赛前 2~3 个月不高于规定体重 3 kg,比赛前 24 h 不应高于规定体重 1 kg<sup>[26]</sup>。但调查显示,与赛季准备期相比,轻量级赛艇运动员赛前阶段体重可减少约 8%,其中,至少一半的减重是在赛前最后一周<sup>[25]</sup>。轻量级赛艇运动员在多年系统训练和比赛过程中,历经多次减重-复重循环,理论上机体应激调节和适应能力更强,这可能对高原训练初期的免疫应答造成影响,这一应答差异可能与儿茶酚胺有关。

## 1 对象与方法

### 1.1 研究对象

公开级和轻量级男子赛艇运动员各 8 名,身体健康,无心脑血管病史。运动员基本信息如表 1 所示。

表 1 研究对象基本信息

Table 1 Basic Information of the Subjects

级别	年龄 / 岁	身高 / cm	体重 / kg
公开级	24.6±3.5	193.0±3.3	94.8±7.1
轻量级	26.5±3.3	184.6±2.4	70.9±0.7

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 主要训练内容

本次高原训练(海拔 2 280 m)是年度冬训的重



要组成部分。抵达高原后的第1周进行以低强度有氧训练为主的适应性训练，目的是让运动员尽快适应高原环境。

### 1.2.2 测试指标与方法

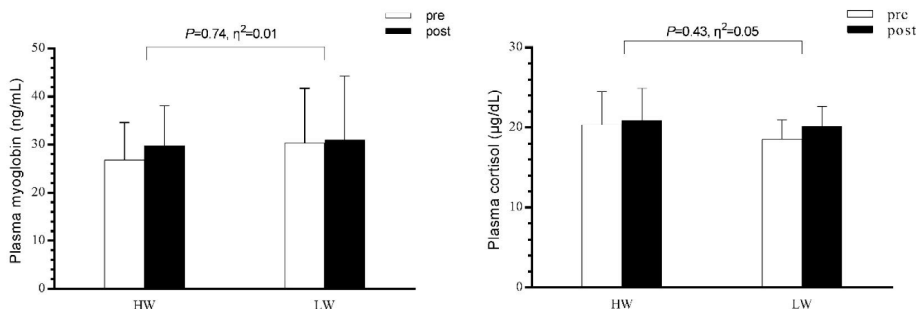
上高原前1周及抵达高原第1周调整1天后次日晨空腹肘静脉采血，其中，2 mL以乙二胺四乙酸二钾抗凝，测量T淋巴细胞(T%)、B淋巴细胞(B%)、NK细胞百分比(NK%)及CD4<sup>+</sup>T淋巴细胞(CD4<sup>+</sup>)、CD8<sup>+</sup>T淋巴细胞百分比(CD8<sup>+</sup>) (流式细胞术, BD FACSCalibur)和儿茶酚胺类指标(高效液相色谱法, Waters2695); 5 mL以肝素钠抗凝, 3 500 r/min离心15 min后，分离血浆, -80℃冻存，测量肌红蛋白(Myoglobin, MYO)和CRT(化学发光法, Beckman Access II)。

### 1.3 数据统计

公开级和轻量级两组运动员间各指标不同时间点的差异以重复测量方差分析进行比较(2×2); 组内各指标差异以配对T检验统计(双尾)。以双侧Person相关性检验探讨儿茶酚胺与淋巴细胞亚群的关系。所有结果以均数±标准差表示, 显著性水平为P<0.05, 0.05<P<0.1为存在显著差异的趋势。

## 2 研究结果

高原适应性训练1周后，公开级(Heavyweight, HW)和轻量级(Lightweight, LW)赛艇运动员血浆MYO和CRT略有升高，但与上高原前相比无显著差异; 两体重级别的运动员间MYO、CRT均无显著交互效应(图1)。



注: HW 为公开级, LW 为轻量级

图1 高原适应性训练1周后血浆MYO和CRT的变化

Figure 1 Changes of Plasma MYO and CRT after One-Week Altitude Adaptation Training

如表2所示，公开级和轻量级运动员，T%和CD4<sup>+</sup>%显著降低，CD8<sup>+</sup>%和CD4<sup>+</sup>/CD8<sup>+</sup>无显著变化; B%均下降，仅公开级运动员表现出统计学意义上的显著降低; NK%均显著升高。两体重级别运动员间T%、

B%、NK%及CD4<sup>+</sup>%、CD8<sup>+</sup>%、CD4<sup>+</sup>/CD8<sup>+</sup>的变化均无显著交互效应; 但轻量级运动员B%和NK%的变化幅度均大幅低于公开级运动员。

表2 高原训练初期淋巴细胞亚群的变化

Table 2 Changes of Lymphocyte Subsets at the Initial Stage of Altitude Training

指标	组别	高原前	高原1周后	Δmean	P(交互效应)	η²(效应量)
T%	公开级	72.25±10.41	67.02±13.49 <sup>▲</sup>	-7.23%	0.76	0.01
	轻量级	64.16±6.87	57.94±8.76 <sup>▲</sup>	-9.69%		
B%	公开级	10.87±3.17	7.66±3.15 <sup>▲</sup>	-29.50%	0.48	0.04
	轻量级	12.57±5.59	10.49±4.73	-16.55%		
NK%	公开级	13.67±9.35	21.50±12.44 <sup>▲</sup>	57.28%	0.91	<0.01
	轻量级	20.69±9.85	28.05±9.17 <sup>▲</sup>	35.57%		
CD4 <sup>+</sup> %	公开级	33.16±4.70	26.78±7.27 <sup>▲</sup>	-19.24%	0.74	0.01
	轻量级	31.77±9.00	26.24±6.29 <sup>▲</sup>	-17.41%		
CD8 <sup>+</sup> %	公开级	29.23±4.95	26.63±7.75	-8.89%	0.36	0.06
	轻量级	28.72±7.19	28.57±9.80	-0.52%		
CD4 <sup>+</sup> CD8 <sup>+</sup>	公开级	1.16±0.23	1.09±0.45	-6.03%	0.46	0.04
	轻量级	1.22±0.61	1.05±0.49	-13.93%		

注: ▲表示组内高原前与高原1周后比较P<0.05; Δmean为平均值变化幅度=100%×(高原1周后-高原前)/高原前。



如表 3 所示,高原适应性训练 1 周后,公开级和轻量级运动员 ADR、NA 无显著性改变,无显著交互效应;仅 DA 显著下降,两体重级别运动员间 DA 虽无组间交互效应,但公开级与轻量级间下降幅度相

差较大(-18.66% vs. -9.88%,  $P=0.23$ )。DA 仅与 B% 呈中度正相关( $P=0.01, r=0.43$ ),与淋巴细胞其他亚群均无显著相关性。

表 3 高原训练初期血浆肾上腺素、去甲肾上腺素和多巴胺的变化

Table3 Changes of Plasma Epinephrine, Norepinephrine and Dopamine at the Initial Stage of Altitude Training

指标	组别	高原前	高原 1 周后	$\Delta$ mean	$P$ (交互效应)	$\eta^2$ (效应量)
ADR( $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ )	公开级	97.42±19.58	102.99±21.05	5.72%	0.98	<0.01
	轻量级	102.81±13.49	108.60±14.41	5.63%		
NA( $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ )	公开级	518.61±19.64	549.89±63.76	6.03%	0.56	0.23
	轻量级	525.66±22.31	542.76±30.28	3.25%		
DA( $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ )	公开级	112.23±18.32	91.29±9.28 <sup>▲</sup>	-18.66%	0.23	0.10
	轻量级	104.67±15.58	94.33±9.37 <sup>▲</sup>	-9.88%		

注:▲表示组内高原前与高原 1 周后比较  $P<0.05$ ;  $\Delta$ mean 为平均值变化幅度 =  $100\times(\text{高原 1 周后} - \text{高原前}) / \text{高原前}$ 。

### 3 分析与讨论

本研究发现,以低强度有氧适应性训练为主的高原训练初期,公开级和轻量级赛艇运动员 T%、CD4<sup>+</sup>% 均显著下降,NK% 显著升高,表现出一定程度的免疫应激现象,但两体重级别运动员间的应答无显著不同。公开级和轻量级运动员循环血 ADR、NA 未发生显著改变,DA 均显著下降(-18.66%、-9.88%),且 DA 与 B% 呈中等正相关,提示 DA 可能在高原训练初期 B 细胞的应答调节中发挥重要作用。

运动和低氧环境是两个独立应激源。一般来说,每周中等负荷下的规律有氧运动,对免疫系统和机体抗炎能力的改善有益;急性运动或大强度运动则会造成一定损害<sup>[27-28]</sup>。耐力项目运动员淋巴细胞抗凋亡能力显著强于普通人<sup>[29]</sup>,而低氧暴露不但可快速激活交感-肾上腺系统调节免疫机能,也可经低氧诱导因子信号途径调节免疫细胞活性和炎症因子的分泌<sup>[30-32]</sup>。高海拔的急性低氧暴露可抑制 T 淋巴细胞增殖<sup>[33-34]</sup>,运动员进行高原/低氧训练时受低氧环境和运动缺氧的双重作用,缺氧程度加剧,理论上免疫应激会更为剧烈。高原训练实践中发现,强度较低的高原冬训初期白细胞计数下降,随着对高原训练的持续又逐渐回升<sup>[35-36]</sup>。强度较大的高原环境下的比赛或训练,淋巴细胞计数在高原训练 1 周后即开始下降,甚至持续 2~3 周不能恢复<sup>[37-39]</sup>。NK 细胞对低氧暴露较为敏感,急性和慢性高原暴露后循环血中 NK 显著增多<sup>[40-41]</sup>。本研究发现高原适应训练 1 周后,两体重级别运动员骨骼肌损伤程度相近,总 T% 和 CD4<sup>+</sup>% 显著下降,NK% 显著升高,呈现出一定程度的免疫应激现象,与上述报道结果相似;两体重级别运动员虽未表现出统计学上显著的免疫应答差异,

但公开级运动员 NK% 升高幅度是轻量级运动员的 1.6 倍,B% 和 CD8<sup>+</sup>% 下降幅度是轻量级运动员的 1.8 倍、17.1 倍,而 CD4<sup>+</sup>/CD8<sup>+</sup> 轻量级运动员下降幅度是公开级运动员的 2.3 倍,以上分析提示,高原适应训练 1 周后两体重级别运动员在免疫应答方面可能仍有所差别,需今后加大样本量进一步深入研究。

无高原或低氧暴露经历的普通人急性低氧暴露后,交感神经活性增强,多项研究报道 ADR 和 NA 显著升高<sup>[15-16]</sup>。但与运动员高原训练或低氧训练相关的研究仍不多见。与平原训练比较,在中等海拔高度(1 800~3 000 m)的高原环境中大强度间歇训练后血浆 ADR、NA 及中性粒细胞升高幅度更大<sup>[42]</sup>。3 375 m 真实高原、模拟常压低氧和模拟低压环境下中低强度运动 2 h 后血浆 ADR、NA 均显著升高;不同低氧模式下 ADR 的应答存在显著差异<sup>[43]</sup>。血浆 ADR 和 NA 可反映交感肾上腺的兴奋性<sup>[44]</sup>,CRT 与肾上腺皮质的生理应激程度有关。有研究表明与有多次高原训练经验运动员相比,初次参加高原训练的运动员对高原环境更敏感<sup>[44]</sup>。本研究中,两个体重级别运动员 ADR、NA 及 CRT 较高原前小幅升高,但无统计学意义上的显著改变,这可能与运动员历经多年系统训练,并经常性地开展高原训练,对高原低氧环境能够较好地适应有关。

DA 是联系中枢神经系统和免疫系统的重要递质。除 D1 型受体外,5 种 DA 受体中的 D2~D5 型受体在 T 淋巴细胞、单核细胞低表达,中性粒细胞和嗜酸性粒细胞为中度表达,B 细胞和 NK 细胞呈高表达<sup>[45]</sup>。DA 可通过上调 D5 受体的表达,抑制已激活的 NK 细胞<sup>[46]</sup>。电刺激坐骨神经和迷走神经后肾上腺 DA 分泌增多,并与 D1 型受体结合后可抑制炎



性因子分泌<sup>[23]</sup>。外源性 DA 可缓解脑部因低氧所致的细胞凋亡、氧化应激和神经炎症反应的增加<sup>[47]</sup>。内源 DA 增多可抑制低氧通气反应<sup>[48]</sup>。抑制 DA 重吸收有助于缓解长时间运动所致的中枢疲劳<sup>[49]</sup>。本研究观察到高原训练 1 周后 DA 显著降低,同时 B% 下降,DA 与 B% 呈中等正相关,提示高原训练初期可能发生了迷走神经兴奋性降低,炎症反应增强的情况;NK% 的显著升高可能与 DA 降低所致的 NK 抑制减弱有关。DA 在高原训练初期的应激与适应中可能发挥着重要作用,其机制值得深入研究。

#### 4 结论

以低强度适应性训练为主的高原训练初期呈现出一定程度的免疫应激,表现为循环血 T%、CD4<sup>+</sup>% 显著下降,NK% 显著升高,DA 显著降低;公开级与轻量级赛艇运动员间无显著应答差异;DA 可能与高原训练初期 B 细胞的应答调节密切相关。

#### 参考文献:

- [1] Pugliese L., Serpiello F. R., Millet G. P., et al. Training diaries during altitude training camp in two olympic champions: an observational case study[J]. *J. Sports Sci. Med.*, 2014, 13(3):666-672.
- [2] 高炳宏,王道,陈坚,等. LoHi 和 HiHiLo 训练对女子赛艇运动员运动能力影响的比较研究[J]. *体育科学*, 2005 (11):35-41+44.
- [3] 马国强,李之俊,梁效忠,等. 4 周 1900m 高原训练对男子短距离自行车运动员无氧代谢能力的影响[J]. *中国体育科技*, 2013, 49(04):60-67.
- [4] Turner G., Fudge B. W., Pringle J., et al. Altitude training in endurance running: perceptions of elite athletes and support staff[J]. *J. Sports Sci.*, 2019, 37(2):163-172.
- [5] Gore C. J., Sharpe K., Garvican-Lewis L. A., et al. Altitude training and haemoglobin mass from the optimised carbon monoxide rebreathing method determined by a meta-analysis[J]. *Br J Sports Med*, 2013, 47(Suppl 1): 31-39.
- [6] Wehrin J. P., Marti B., Hallén J. Hemoglobin mass and aerobic performance at moderate altitude in elite athletes [J]. *Adv. Exp. Med. Biol.*, 2016, 903:357-374.
- [7] Vogt M., Puntchart A., Geiser J., et al. Molecular adaptations in human skeletal muscle to endurance training under simulated hypoxic conditions[J]. *J. Appl. Physiol.*, 2001, 91(1):173-182.
- [8] Hoppeler H., Vogt M., Weibel E. R., et al. Response of skeletal muscle mitochondria to hypoxia[J]. *Exp. Physiol.*, 2003, 88(1):109-119.
- [9] Gore C. J., Clark S. A., Saunders P. U. Nonhematological mechanisms of improved sea-level performance after hypoxic exposure[J]. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 2007, 39 (9):1600-1609.
- [10] Rosenberger P., Schwab J. M., Mirakaj V., et al. Hypoxia-inducible factor-dependent induction of netrin-1 dampens inflammation caused by hypoxia[J]. *Nat. Immunol.*, 2009, 10(2):195-202.
- [11] Eckle T., Faigle M., Grenz A., et al. A2B adenosine receptor dampens hypoxia-induced vascular leak[J]. *Blood*, 2008, 111(4):2024-2235.
- [12] Irrarázaval S., Allard C., Campodónico J., et al. Oxidative Stress in Acute Hypobaric Hypoxia[J]. *High Alt. Med. Biol.*, 2017, 18(2):128-134.
- [13] Woods D. R., Allen S., Betts T. R., et al. High altitude arrhythmias[J]. *Cardiology*, 2008, 111(4):239-246.
- [14] White D. Autonomic cardiac regulation during acute and chronic hypoxia assessed by spectral analysis of R-R interval variability[M]. Burlington: Queess City Printers Inc, 1997: 124-133.
- [15] Kanstrup I. L., Poulsen T. D., Hansen J. M., et al. Blood pressure and plasma catecholamines in acute and prolonged hypoxia: Effects of local hypothermia[J]. *J. Appl. Physiol.*, 1999, 87(6):2053-2058.
- [16] Goldfarb-Rumyantzev A. S., Alper S. L. Short-term responses of the kidney to high altitude in mountain climbers[J]. *Nephrol. Dial. Transplant*, 2014, 29(3):497-506.
- [17] Mazzeo R. S., Child A., Butterfield G. E., et al. Catecholamine response during 12 days of high-altitude exposure (4 300 m) in women[J]. *J. Appl. Physiol.*, 1998, 84(4):1151-1157.
- [18] Rostrup M. Catecholamines, hypoxia and high altitude [J]. *Acta. Physiol. Scand.*, 1998, 162(3):389-399.
- [19] Kamimori G. H., Ryan E. J., Otterstetter R., et al. Catecholamine levels in hypoxia-induced acute mountain sickness[J]. *Aviat. Space Environ. Med.*, 2009, 80(4): 376-380.
- [20] Jiang J. L., Qiu Y. H., Peng Y. P., et al. Immunoregulatory role of endogenous catecholamines synthesized by immune cells[J]. *Acta Physiologica Sinica*, 2006, 58(4): 309-317.
- [21] Chavan S. S., Tracey K. J. Essential Neuroscience in Immunology[J]. *J. Immunol.*, 2017, 198(9):3389-3397.
- [22] Kanashiro A., Hiroki C. H., da Fonseca D. M., et al. The role of neutrophils in neuro-immune modulation[J]. *Pharmacol Res.*, 2020, 151:104580.
- [23] Torres-Rosas R., Yehia G., Pena G., et al. Dopamine



- mediates vagal modulation of the immune system by electroacupuncture[J]. *Nat. Med.*, 2014, 20(3):291-295.
- [24] Robison L. S., Swenson S., Hamilton J., et al. Exercise reduces dopamine D1R and increases D2R in rats: Implications for addiction[J]. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 2018, 50(8):1596-1602.
- [25] Morris F. L., Payne W. R. Seasonal variations in the body composition of lightweight rowers[J]. *Br. J. Sports Med.*, 1996, 30(4):301-304.
- [26] Slater G., Rice A., Jenkins D., et al. Body mass management of lightweight rowers: nutritional strategies and performance implications[J]. *Br. J. Sports Med.*, 2014, 48(21):1529-1533.
- [27] Kruger K., Mooren F. C. Exercise-induced leukocyte apoptosis[J]. *Exerc. Immunol. Rev.*, 2014, 20:117-134.
- [28] Wang J. S., Huang Y. H. Effects of exercise intensity on lymphocyte apoptosis induced by oxidative stress in men[J]. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 2005, 95(4):290-297.
- [29] Alack K., Krüger K., Weiss A., et al. Aerobic endurance training status affects lymphocyte apoptosis sensitivity by induction of molecular genetic adaptations[J]. *Brain. Behav. Immun.*, 2019, 75:251-257.
- [30] Mazzeo R. S. Altitude, exercise and immune function[J]. *Exerc. Immunol. Rev.*, 2005, 11:6-16.
- [31] Wang J. S., Wu M. H., Mao T. Y., et al. Effects of normoxic and hypoxic exercise regimens on cardiac, muscular, and cerebral hemodynamics suppressed by severe hypoxia in humans[J]. *J. Appl. Physiol.*, 2010, 109(1):219-229.
- [32] Taylor C. T., Colgan S.P. Regulation of immunity and inflammation by hypoxia in immunological niches[J]. *Nat. Rev. Immunol.*, 2017, 17(12):774-785.
- [33] Facco M., Zilli C., Siviero M., et al. Modulation of immune response by the acute and chronic exposure to high altitude[J]. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 2005,37(5):768-774.
- [34] Wilder-Smith A., Mustafa F. B., Peng C. M., et al. Transient immune impairment after a simulated long-haul flight[J]. *Aviat. Space Environ. Med.*, 2012, 83(4):418-423.
- [35] 陶晓黎.游泳运动员高原训练某些生理生化指标的训  
练监控研究[J].*体育科学研究*,2005,9(1):80-81+84.
- [36] 樊蓉芸.游泳项目青海高原训练期间血象指标的分析  
[J].*青海体育科技*,2008,42(2):7-10.
- [37] 刘海平.1999 青藏高原自行车拉力赛期间运动员生  
理机能研究报告[J].*北京体育大学学报*,2000,24(2):  
186-188.
- [38] 陶小平,陶新连.我国优秀男子皮划艇运动员“能力主  
导型”高原训练期间机能指标变化[J].*天津体育学院  
学报*,2010,25(2):130-133.
- [39] 邹飞,刘振宇,康凯,等.5 周高原训练对优秀自行车运  
动员 WBC、RBC、HGB 和 HCT 影响的研究[J].*山东  
体育学院学报*,2009,25(9):38-44.
- [40] Facco M., Zilli C., Siviero M., et al. Modulation of im-  
mune response by the acute and chronic exposure to hi-  
gh altitude[J]. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 2005,37(5):  
768-774.
- [41] Ermolao A., Travain G., Facco M., et al. Relationship  
between stress hormones and immune response during  
high-altitude exposure in women[J]. *J. Endocrinol In-  
vest.*, 2009,32(11):889-894.
- [42] Niess A. M., Fehrenbach E., Strobel G., et al. Evalua-  
tion of stress responses to interval training at low and  
moderate altitudes[J]. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 2003,35  
(2):263-269.
- [43] Woods D. R., O'Hara J. P., Boos C. J., et al. Markers  
of physiological stress during exercise under conditions  
of normoxia, normobaric hypoxia, hypobaric hypoxia,  
and genuine high altitude[J]. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 2017,  
117(5):893-900.
- [44] 孟志军,高炳宏,高欢.高原训练对男子赛艇运动员 E-  
PO 和红细胞系等指标影响的研究[J].*体育科技*,2012,  
33(02):75-80+85.
- [45] McKenna F., McLaughlin P. J., Lewis B. J., et al. Dopa-  
mine receptor expression on human T- and B-lympho-  
cytes, monocytes, neutrophils, eosinophils and NK cells:  
a flow cytometric study[J]. *J. Neuroimmunol*, 2002, 132  
(1-2): 34-40.
- [46] Mikulak J., Bozzo L., Roberto A., et al. Dopamine in-  
hibits the effector functions of activated NK cells via the  
upregulation of the D5 receptor[J]. *J. Immunol.*, 2014,  
193(6): 2792-2800.
- [47] Brew N., Azhan A., den Heijer I., et al. Dopamine trea-  
tment during acute hypoxia is neuroprotective in the de-  
veloping sheep brain[J]. *Neuroscience*, 2016, 316: 82-93.
- [48] Bialkowska M., Zajac D., Mazzatenta A., et al. Inhibi-  
tion of peripheral dopamine metabolism and the ventila-  
tory response to hypoxia in the rat[J]. *Adv. Exp. Med.  
Biol.*, 2015, 837: 9-17.
- [49] Connell C., Thompson B., Turuwhenua J., et al. Effects  
of dopamine and norepinephrine on exercise-induced ocu-  
lomotor fatigue[J]. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 2017, 49  
(9): 1778-1788.

(责任编辑:刘畅)