



低氧环境、运动训练对红细胞免疫功能影响的研究进展

王玺¹,高炳宏^{2*}

摘要: 红细胞生物学领域研究正在经历一场悄无声息的变革。长期以来,红细胞被认为是氧气的载体,现在正逐渐成为天然免疫反应的重要调节剂。红细胞结合并清除血循环中的趋化因子和病原体,同时根据环境的不同,红细胞可以促进免疫激活,也可以维持免疫静止。低氧训练一直是运动科学研究领域的热点,越来越多的研究发现,在低氧训练过程中运动员疾病易感性增加,免疫力发生改变,作为天然免疫重要组成部分的红细胞免疫如何改变值得探讨,究竟低氧环境、运动训练与红细胞免疫之间有着怎样的联系。文章采用文献综述的方法,对国内外低氧、运动与红细胞免疫的研究进行总结与分析,为今后的研究提供理论参考。

关键词: 低氧;运动;红细胞免疫

中图分类号:G804 文献标志码:A 文章编号:1006-1207(2019)03-0093-06

DOI:10.12064/ssr.20190314

Research Progress on the Effects of Exercise Training on Erythrocyte Immunologic Function in Low Oxygen Environment

WANG Xi¹, GAO Binghong^{2*}

(1. Shanghai Research Institute of Sports Science, Shanghai 200030, China; 2. Shanghai University of Sport, Shanghai 200438, China)

Abstract: Research in the field of erythrocyte biology is undergoing a quiet transformation. Red blood cells have long been recognized as carriers of oxygen and are now becoming important regulators of innate immune responses. Red blood cells bond and remove chemokines and pathogens in the blood circulation. At the same time, depending on the environment, red blood cells can promote immune activation and maintain immune quiescence. Hypoxia training has always been a hot topic in the field of sports science research. More and more studies have found that athletes' disease susceptibility increases and immunity changes during hypoxia training. Red blood cells are an important component of innate immunity. It is worth discussing about how to change erythrocyte immunity and what is the connection among hypoxic conditions, exercise training and red erythrocyte immunity. This paper summarizes and analyzes the research on hypoxia, exercise and erythrocyte immunity at home and abroad by means of literature review, which provides a theoretical reference for future research.

Key Words: hypoxia; exercise; erythrocyte immunity

自1981年Siegel等人首次提出“红细胞免疫”^[1]的概念至今,红细胞免疫一直是研究的热点。红细胞不仅可以运输氧气,免疫粘附IC(免疫复合物),

促进吞噬细胞对IC清除,而且红细胞表面含有多重天然免疫分子[CD35,CD44,CD55(补体衰变加速因子),CD59(膜反应性溶解抑制物),NK细胞增

收稿日期:2018-11-29

基金项目:上海市体育局科研攻关与科技服务课题(18JT004)。

第一作者简介:王玺,女,硕士,助理研究员。主要研究方向:运动人体科学。E-mail:wangxi19861223@sina.com。

* 通讯作者简介:高炳宏,男,博士,教授。主要研究方向:低氧训练和优秀运动员训练监控与机能评定。E-mail:gaobinghong@163.com。

作者单位:1.上海体育科学研究所,上海200030;2.上海体育学院,上海200438。



强因子^[12]等],它们共同作用使红细胞作为重要的天然免疫细胞调节免疫反应,从而构成机体免疫系统^[3]。

系统免疫学的研究不仅涉及白细胞免疫系统与其子系统(NK细胞子系统与T淋巴细胞子系统)之间的研究^[4],还包括红细胞免疫与其各个子系统之间的研究。因为白细胞总数少于血细胞的0.1%,其中只有68%的外周血白细胞是专业的吞噬细胞^[5],所以杀菌白细胞仅占有所有血细胞的0.068%,而红细胞占有所有血细胞的70%左右。红细胞接触细菌的机会比杀菌白细胞多1 200~1 500倍^[6]。嗜中性粒细胞在吞噬少量病原体后死亡,其寿命13 h到5.4 d^[7],而红细胞循环100~120 d。白细胞并不能识别、捕捉和吞噬血流中的病原体,但是对于许多病原体来说,吞噬作用对于增殖和传播是不可缺少的^[8]。这些数据都表明红细胞才是血液中具有吞噬病原体的最重要的细胞^[9]。郭峰等人经过一系列的实验证明形成了“红细胞天然免疫主干道理论”即“血液免疫反应路线图”理论^[10]:当致病原进入血循环后,激活补体系统,被补体系统调节的85%~90%致病原被红细胞表面CD35免疫粘附。同时,在其他免疫分子如CD55、CD59和EACKR的协助下,将致病原呈递给T细胞、B细胞、粒细胞和吞噬细胞等。红细胞天然免疫系统、血小板天然免疫系统、白细胞天然免疫系统、血浆补体天然免疫系统和淋巴细胞适应免疫系统共同构成了新的研究领域——系统血液固有免疫系统^[11]。

红细胞免疫研究始于探索红细胞免疫资料积累、应用以及红细胞在血液免疫反应中的地位与作用,发展到如今由我国专家郭峰率先提出“自然与分离实验体系”^[12],探索和探讨系统免疫学体外实验研究,红细胞免疫系统一直是免疫学研究的热点。

1 低氧环境对红细胞免疫功能的影响

有证据表明,天然免疫细胞比适应性免疫细胞更能维持低氧条件下的生存能力和功能^[13]。天然免疫细胞是古老的,在空气中氧气含量很少的情况下进化,已学会系统地应对缺氧环境,而适应性免疫的发展则发生在常氧环境^[14]。因此,缺氧环境是天然免疫的发源地。天然免疫和适应性免疫系统的整合导致淋巴细胞抗原受体的精细特异性,用于识别和驱除病原体^[15]。为了完成这一任务,天然免疫系统进化出了与发育中的淋巴细胞网络相互作用的能力,并应对常氧环境。红细胞免疫正是天然免疫系统的重要组成部分。

1.1 传统高原低氧环境对红细胞免疫功能的影响

长期居住在高原的人机体受到较强的辐射并产生过多的抗原以形成免疫复合物。而高原缺氧环境使红细胞代偿性提高,血流变慢,导致积累较多的免疫复合物^[16]。已有专家研究表明,随着海拔高度的增加,健康成年人与儿童红细胞免疫功能下降明显^[17,18]。刘兰等对西宁(2 260 m)、刚察(3 300 m)和甘德(4 080 m)3个不同海拔高度地区健康成年人红细胞免疫功能检查时发现RBC-C3bRR(红细胞受体花环成功率)甘德<刚察<西宁($P<0.01$)^[19]。高原低氧低压环境严重影响红细胞免疫功能,海拔越高,红细胞免疫功能越低。杜敏智等研究发现,高原地区不同年龄正常人红细胞免疫功能均低于平原人群,同时高原地区老年人RBC-C3bRR显著低于中青年人^[20,21]。不同移居时间的成年人(移居高原10~40年不等),移居时间越长,RBC-C3bRR越低,揭示高原地区人群不同年龄段的红细胞免疫功能随着年龄增长,移居时间越长,红细胞免疫功能低下越为明显。

可以看出,长时间的高原环境暴露影响红细胞免疫功能,导致继发性红细胞免疫功能下降,那么短时间的高原暴露对红细胞免疫功能是否存在同样的影响呢?石贵泉通过对40名急进海拔3 600 m地区的工作人员研究发现,进入高原第2天RBC-C3bRR急剧下降,第30天红细胞免疫功能已恢复至世居高原人水平,这是机体适应高原低氧环境的表现,但仍低于平原水平^[22]。司本辉等对急进高原战士的红细胞免疫研究得到相似的结果^[23]。

无论是世居高原者还是急进高原者其红细胞免疫功能均显著低于平原水平,这可能是由于一方面高原环境强辐射导致机体产生大量自由基难以清除,血液中免疫复合物产生增加,另一方面低氧刺激造成红细胞代偿增加,形态改变,血流减慢,血中免疫复合物堆积。红细胞表面C3b受体数量与功能都下降导致红细胞免疫功能下降。

1.2 模拟低氧环境对红细胞免疫功能的影响

已有医学研究表明高压氧(HBO)治疗可以显著改善红细胞免疫功能,而潜水员由于低压缺氧,红细胞天然免疫功能下降^[24]。陈勇锐在模拟常压失事潜艇环境中人血细胞表面CD55、CD59分布变化的研究中发现,红细胞表面CD55与低氧暴露时间呈正相关,CD59变化不明显;淋巴细胞表面CD55、CD59表达与氧分压(PO_2)呈正相关,与二氧化碳分压(PCO_2)呈负相关,揭示低氧环境可能诱导免疫细胞



激活,从而影响红细胞免疫功能的变化^[25]。

无论是高原低氧环境还是人工模拟低氧环境,都会对红细胞免疫产生一定的影响。长时间暴露在低氧环境下,红细胞免疫功能由降低逐渐趋于稳定。低氧环境是影响红细胞免疫功能的重要因素。

2 运动训练对红细胞免疫功能的影响

运动是调节机体免疫功能的一种应激方式。运动影响免疫功能的程度取决于运动强度、运动时间等因素。适量的有氧训练可以提高免疫功能,降低患病的风险,但大负荷高强度的运动训练可能会导致免疫功能受到抑制,并提高对疾病的易感性,从而影响运动员的健康水平和运动能力。

2.1 运动强度对红细胞免疫功能的影响

国外学者研究发现低强度的运动训练 1 h 前后,红细胞 CD35 与 CIC(循环免疫复合物)无明显变化,当进行大强度的运动训练时,CIC 升高且清除缓慢^[26]。研究认为,机体进行剧烈运动,引起组织损伤,释放抗原,从而 IC 升高,吞噬细胞因为受体有限,不能完全清除 IC,所以 IC 清除缓慢。而国内研究结果并不相同,胡琪琛等研究发现小强度运动(45% VO_{2max})和大强度运动(85% VO_{2max})均可引起 RBC-C3bRR 和 RBC-ICR(红细胞免疫复合物花环率)的下降和红细胞免疫功能下降,但不同强度结果无显著性差异^[27]。裴新贞等对 SD 大鼠进行 4~8 周的大强度游泳训练后,发现其 RBC-C3bRR 和 RBC-ICR 变化一致,呈明显下降趋势,红细胞免疫功能降低^[28]。姜振在不同负荷跑台训练对大鼠红细胞免疫功能变化研究中发现,大强度间歇性训练抑制红细胞免疫功能,但是中等强度的训练能够促进红细胞免疫功能^[29]。

可以看出,国内研究一致认为大强度的运动训练会抑制红细胞免疫功能,但是对于训练强度的划分并无统一标准,这也可能是对于中小强度训练时,国内外研究结果不尽相同的原因之一。另一方面,国外研究多集中于 CD35 等红细胞表面分子的研究,而国内研究多集中于花环实验,存在一定的偏差。有研究认为短时间高强度运动可以增强红细胞免疫功能。叶路等发现小鼠急性运动 2 h 后 RBC-C3bRR 增加明显^[30]。宋亚军发现小鼠在力竭运动后 RBC-C3bRR 显著增高^[31]。其原因可能是急性运动可以有效增加循环血容量,RBC 相对增多,红细胞免疫粘附能力自然增强。由此可以发现训练时间的长短同样是影响红细胞免疫功能的重要指标。

2.2 运动时间对红细胞免疫功能的影响

研究表明短时间(10 min)中等强度跑步运动后,健康人 RBC-C3bRR 和 RBC-ICR 显著增高,红细胞免疫功能增强^[32]。在长时间(100 min)跑步运动后,红细胞数目与红细胞免疫功能均增加,且二者呈显著正相关,揭示红细胞免疫功能增强的部分是由于红细胞数目的增加导致,而红细胞数目的增加可能与运动中耗氧量增加及血液相对浓度有关^[33]。宋亚军等人在研究恒定功率下 3 种不同运动时间(15 min,30 min,45 min)对红细胞免疫功能影响中发现,3 种不同运动时间均会引起 RBC-C3bRR 显著降低,且下降程度与运动时间相关;45 min 组运动后 RBC-ICR 显著增高^[34]。裴新贞等将健康大鼠分组进行游泳训练(2 周,4 周,6 周,8 周)。研究发现,训练 4 周组大鼠 RBC-C3bRR 和 RBC-ICR 显著下降,训练 8 周组大鼠 RBC-C3bRR 和 RBC-ICR 较 4 周组显著下降,与对照组具有高度显著性差异^[35]。动物和人体实验的结果均表明,不同运动持续时间会对红细胞免疫产生不同的影响,且随着运动时间的增加,影响越显著。

2.3 运动水平对红细胞免疫的影响

胡琪琛等研究发现,大强度运动(85% VO_{2max})引起 RBC-C3bRR 和 RBC-ICR 下降时,无训练经验者下降显著^[27]。黄海等人研究发现体育系女生(经常参加运动)与医学系女生(不经常参加运动)在进行相同的跑台运动后即刻 RBC-C3bRR 均显著高于安静值,但两组无显著差异,恢复 1 h 后,医学组显著降低,体育组无明显降低^[36]。运动后体育组即刻 RBC-ICR 显著降低,恢复 1 h 后升高。揭示长期运动训练经验对运动应激有良好的适应性,可以使红细胞表面 SOD(超氧化物歧化酶)含量和活性增高,增强红细胞抵御自由基损伤的能力,保持细胞活性,增强免疫力。有专家认为长期训练的运动员红细胞免疫促进因子与普通人在安静状态下无差异,但是红细胞免疫抑制因子明显低于普通人^[37]。在进行相同小负荷的定量运动后,运动员恢复期 RBC-C3bRR 下降斜率显著低于普通人,表明长期运动可以提高运动应激状态下红细胞免疫促进因子活性,从而增强红细胞免疫功能。

然而,国外研究与国内研究的结果并不相同。研究显示,自行车运动员与普通人在安静时红细胞 CR1 与 CIC 无明显差异。经过 1 h 自行车运动(75% VO_{2max})后,CR1 与 CIC 也无明显变化。国内外研究结果的不同可能与运动负荷、测定方法、测试指标等



因素不同有关。譬如国内研究多采用花环实验,而国外则测试 CD35 等因子,具体情况有待进一步的研究。

3 低氧训练对红细胞免疫功能的影响

在我国,低氧训练被界定为利用人工低氧环境进行训练或刺激的辅助性训练方法^[38]。低氧训练由传统高原训练和人工模拟低氧训练构成。人工模拟低氧训练由高住低训(HiLo)、高住高练低训(HiHiLo)、低住高训(LoHi)和间歇性低氧训练(IHT)构成。无论是传统的高原训练,还是模拟低氧训练都有其不可替代的优势,低氧训练可以在保持正常运动训练的条件下,通过暴露于低氧环境,从而提高运动员机体运输氧气的的能力。同样低氧训练也有着不可忽略的弱势。近年来越来越多的报道发现,在低氧训练过程中,患病风险增加,同时免疫力下降。Tiollier 等人研究发现越野滑雪运动员在 3 周 HiLo 过程中,随着海拔高度的增加,sIgA 持续下降($P < 0.05$),且在 HiLo 结束后的 2 周都尚未恢复至训练前水平^[39]。短道速滑运动员在进行 4 周 IHT 训练后对疾病的抵抗力下降^[40],赛艇运动员在进行 3 周的 HiHiLo 的第一周即出现免疫抑制的现象^[41]。有研究发现在低氧条件下训练比单纯的低氧环境或者单纯的运动训练对免疫功能的损伤更加严重,其中低氧为最主要的影响因素^[42]。对于不同低氧训练模式下运动员各种身体机能状态与运动状态的研究越来越多,作为免疫系统重要组成部分的红细胞免疫,在低氧训练中的研究结果较少且多集中于 HiLo 和 HiHiLo。

张纓等研究发现足球专项大学生在 HiLo 10 h 后,机体 RBC-C3bRR、RBC-ICR 显著升高,并伴随着免疫抑制因子活性升高、免疫促进因子活性降低的趋势^[43]。揭示急性低氧暴露后,红细胞免疫功能处于亢进或者紊乱的状态。随着 HiLo 持续时间的增长,在 4 周训练结束后,周帆扬等发现 RBC-C3bRR 显著下降($P < 0.01$),RBC-ICR 显著升高($P < 0.01$),揭示长时间的 HiLo 导致红细胞免疫功能继发性降低^[44]。赵永才等通过游泳运动员进行 2 周 HiLo (2 800 m) 后研究发现,RBC-C3bRR 显著降低,揭示 2 周 HiLo 可以抑制红细胞免疫粘附功能^[45]。

随着研究的不断深入与科学的不断进步,对于 HiLo 对红细胞免疫的影响也逐渐由花环实验的定性分析转入红细胞表面免疫因子的定量分析研究当中。罗琳等通过 4 周 HiHiLo 过程中足球运动员红细胞 CD35 数量及活性研究发现,CD35 数量在实验过程中呈下降趋势,但对照组(常氧训练组)较实验组

(HiHiLo)CD35 下降更为明显^[46]。研究认为低氧环境导致机体促红细胞生成素(EPO)增多,红细胞数量增多,导致红细胞 CD35 数量增加。朱荣通过研究发现 4 周 HiLo 过程中足球运动员红细胞表面 CD59 表达水平先下降后升高^[47],而赵永才等人在 2 周 HiLo 过程中发现游泳运动员 CD59 呈现先上升后下降的趋势,且 CD55 与 CD59 变化一致,但是 CD59 上升快下降也快^[45],这与朱荣等人的研究结果并不相同。分析其原因,一方面,赵永才等人在 HiLo 开始后进行一次测试,而朱荣等人仅有两次测试点,所以二人测试时间的不同可能导致结果的不同;另一方面,二人 HiLo 的时间并不相同,且运动员专项训练的负荷也存在差异。王玺等人在对赛艇运动员进行 3 周 HiLo 过程中发现红细胞表面 CD55 与 CD59 呈现相似的变化趋势,均为先上升后下降,恢复期内再次升高且高于训练前水平,并且尝试分析在 HiLo 训练过程中红细胞免疫与免疫机能的联系^[48]。研究发现在红细胞免疫与 T 淋巴细胞免疫变化出现了不同步性,在低氧训练开始阶段作为免疫第一道防线的红细胞免疫先于其他免疫系统作出反应,而随着低氧训练时间的增加及运动训练的双重刺激,在红细胞表面免疫分子的指引下,T 淋巴细胞免疫开始发挥作用^[48]。国外已有报道证明红细胞天然免疫主干道在系统血液快速固有免疫炎症反应中具有向淋巴细胞传递信息的重要作用^[49],尤其是红细胞表面 CR1 可与致病原形成 CD35/CD58/CD2 三联复合体,避免大量的免疫复合物封闭 T 淋巴细胞表面,促发 TCR/CD3 的形成,起到抗原呈递作用,有利于 T 细胞功能的发挥,从而调控 T 淋巴细胞等免疫细胞的功能^[50]。

现阶段,低氧训练对红细胞免疫的影响多集中于 HiLo,一方面低氧训练作为针对专业运动员进行训练的手段,对于科研人员进行研究的可控性较低,存在较多的不可控因素,另一方面,在对专业运动员进行研究时,受到训练等条件限制,对照组较少或者没有,并不能按照科研目的进行研究,多是作为辅助训练手段。李玉周等利用低氧舱模拟海拔 4 000 m 高原低氧环境观察 SD 大鼠经过 4 周不同低氧训练模式后,红细胞免疫调节因子及其免疫功能的变化规律^[51]。研究发现高住对照组与低住对照组相比,红细胞免疫抑制显著提高,RBC-ICR 显著性升高($P < 0.01$)。研究者认为,单纯低氧因素对红细胞免疫抑制因子活性的影响最大,并总结 4 周低氧训练后红细胞免疫功能由强到弱大致规律为:低住对照组 > 高住低练组 > 高住对照组 > 高住高练组^[51]。

低氧训练受到低氧和运动的双重刺激。在低氧



训练的初期,机体受到低氧环境的影响 EPO 代偿性提高,红细胞免疫功能增强,之后随着低氧训练时间的增加,训练负荷对机体的刺激加重,红细胞免疫功能开始下降。大强度的运动训练导致红细胞免疫功能下降的原因可能是因为当运动负荷较大时,红细胞破裂畸变增多,红细胞异常情况增加,其结果是红细胞数量减少,血红蛋白含量减少,从而导致红细胞不能发挥正常的生理功能,进而导致红细胞的免疫功能下降。而红细胞免疫功能下降也影响了其他免疫细胞(如 T 淋巴细胞等)与细胞因子(IL2 与 IL6 等)的激活,削弱了红细胞对其他免疫细胞的免疫增强作用,使调控失衡^[52],进而导致整个免疫系统受损,使整个免疫系统紊乱,机体机能状态下降。低氧环境对红细胞免疫的影响则主要是通过影响 EPO 来实现。EPO 在调节红细胞免疫上起到重要的作用,它不仅可以改善贫血功能,促进红细胞分化,增加红细胞计数,而且可以抑制 RBC-ICR 的表达,促进 RBC-C3BRR 的生成。EPO 可以增加 SOD 的表达,稳定红细胞膜,改善红细胞膜的蛋白质构象和增加膜脂流动性,维持红细胞膜内外的渗透压,从而使红细胞膜上的受体(CD35 等)免疫粘附功能增强。

4 小结与未来展望

红细胞的免疫功能为我们提供了一个未被充分研究和潜在丰富的研究领域^[53]。目前,低氧训练对红细胞免疫影响的研究多集中于 HiLo,而对于像传统高原训练与 LoHi 以及 IHT 条件下红细胞免疫情况如何改变还没有研究报道。低氧训练对红细胞免疫影响的机制尚不清楚。医学上已有研究报道艾灸以及锌的补充可以从一定程度上改善红细胞免疫功能,调节 T 淋巴细胞免疫功能,以提高机体整体免疫功能^[54,55]。这些手段是否适用于低氧训练过程中的运动员,尚待深入研究。

参考文献:

- [1] Siegel I., Lin Liu T., Gleicher N. The red cell immune system[J]. *Lancet*, 1981,2(8246):556-566.
- [2] Barros M. M., Yamamoto M., Figueiredo M. S., et al. Expression levels of CD47, CD35, CD55 and CD59 on red blood cells and signal-regulatory protein- α , β on monocytes from patients with warm autoimmune hemolytic anemia[J]. *Transfusion*, 2009, 49(1): 154-160.
- [3] 郭峰. 红细胞天然免疫与获得性免疫[J]. *自然杂志*, 2004, (4):194-199.
- [4] Dai R. W. From engineering cybernetics to cyberspace for workshop of metasynthetic engineering[J]. *Chin J Nat*, 2005, 27(6):366-370.
- [5] Gordon S. Macrophages and the immune response. In: Paul EW, editor. *Fundamental immunology*[M]. Philadelphia: Lippincott-Raven, 1999:533-545.
- [6] Minasyan H. Mechanisms and pathways for the clearance of bacteria from blood circulation in health and disease [J]. *Pathophysiology*, 2016, 23:61-66.
- [7] Lahoz-Beneytez J., Elemans M., Zhang Y., et al. Human neutrophil kinetics: modeling of stable isotope labeling data supports short blood neutrophil half-lives[J]. *Blood*, 2016, 127: 3431-3438.
- [8] Schutze G. E., Buckingham S. C., Marshall G. S., et al. Human monocytic ehrlichiosis in children[J]. *Pediatr Infect Dis. J.*, 2007, 26(6): 475-479.
- [9] Hayk M. Phagocytosis and oxycytosis: two arms of human innate immunity[J]. *Immunologic Research*, 2018, 31: 665-670.
- [10] 郭峰. 红细胞天然免疫主干道理论与现代系统免疫学[J]. *自然杂志*, 2006(2):79-83.
- [11] 郭峰. 免疫原快速激活系统血液固有免疫反应研究思路的演变与创新[J]. *中国医药生物技术*, 2010, 5(1):15-18.
- [12] 郭峰. 现代系统免疫学的形成与发展[J]. *中国免疫学杂志*, 2010(1):88-91.
- [13] Sica A., Melillo G., Varesio L. Hypoxia: a double-edged sword of immunity[J]. *J. Mol. Med.*, 2011, 89: 657-665.
- [14] Webster K. A. Evolution of the coordinate regulation of glycolytic enzyme genes by hypoxia[J]. *J. Exp. Biol.*, 2003, 206: 2911-2922.
- [15] Cooper M. D., Alder M. N. The evolution of adaptive immune systems[J]. *J. Cell*, 2006, 124: 815-822.
- [16] 司本辉, 张庆成, 吴康智, 等. 急进高原战士低氧环境对红细胞免疫功能影响的研究[J]. *高原医学杂志*, 2000, 10(3):37-39.
- [17] 宋济范, 周晶萍, 叶俊雄, 等. 高原地区人群红细胞免疫粘附功能观察[J]. *高原医学杂志*, 1995, 5(6):12-14.
- [18] 石泉贵. 现代红细胞免疫学[M]. 上海: 第二军医大学出版社, 2002:262-264.
- [19] 刘兰, 褚以德, 陆天顺, 等. 高原地区红细胞免疫功能的观察[J]. *高原医学杂志*, 1998, 8(1):53-55.
- [20] 杜智敏, 刘崇礼. 高海拔地区不同年龄正常人红细胞免疫功能测定及分析[J]. *高原医学杂志*, 1999, 9(1):38-39.
- [21] 杜智敏, 刘崇礼. 高原地区不同移居时间正常人红细胞免疫功能测定[J]. *解放军预防医学医学杂志*, 1999, 17(3):219.
- [22] 石泉贵. 快速进入高原对世居藏族红细胞免疫粘附功



- 能的影响[J].西南国防医药,2000, 10(5):303-304.
- [23] 司本辉,张庆成,吴康智,等.急进高原战士低氧环境对红细胞免疫功能影响的研究[J].高原医学杂志,2000, 10(3):37-39.
- [24] 杨沛,陈伟,龚敏,等.高压氧治疗后红细胞免疫功能的变化及临床意义[J].中国现代医学杂志.2003,13(6): 14-16.
- [25] 陈勇锐,孟森,张军,等.模拟常压失事潜艇环境人血细胞表面 CD55、CD59 分布的变化.中国应用生理学杂志[J].2007,23(2):226-228.
- [26] Morera D., Mackenzie S.A. Is there a direct role for erythrocytes in the immune response?[J]Vet. Res., 2011, 42: 89.
- [27] 胡琪琛,郭峰,翁玉泉,等.训练及不同强度运动队红细胞免疫功能的影响[J].中国免疫学杂志,1995,8(11):24-25.
- [28] 裴新贞.长时间大强度运动后 SD 大鼠红细胞免疫功能的变化[J].深圳中西医结合杂志,2001,5(3):264-268.
- [29] 姜振,柏建清.不同负荷跑台训练大鼠红细胞免疫功能及血浆 β -内啡肽的变化[J].中国组织工程研究与临床康复.2007,11(24):4726-4729.
- [30] 叶路,董小青.急性运动对小鼠红细胞免疫粘附功能的影响[J].中国运动医学杂志,1998,17(2):157.
- [31] 宋亚军.力竭运动对小鼠红细胞免疫功能的影响[J].北京体育大学学报,2000,2(3):24-30.
- [32] 陈愉宁,张盈华,张利朝,等.健康人跑步前后红细胞免疫功能的变化[J].中国运动医学杂志,1999,18(3):226-227.
- [33] 张利朝,张盈华,陈愉宁,等.健康人运动前后红细胞免疫功能与细胞数的变化及关系[J].细胞与分子生物学杂志,2001,17(2):197-199.
- [34] 宋亚军,郝梅.恒定功率不同持续时间运动队红细胞免疫功能的影响[J].体育与科学,1999,5(3):15-19.
- [35] 裴新贞,程悦.不同游泳运动时间训练对大鼠红细胞免疫粘附功能的影响[C].北京:2002年第九届全国运动医学学术会议,2002:57.
- [36] 黄海,郝选明,胡晓燕,等.红细胞免疫功能对定量负荷特点的实验研究[J].中国运动医学杂志,1999,18(4): 375-377.
- [37] 郝选明,黄海,胡晓燕,等.红细胞免疫功能对有氧运动的适应性变化特征[J].体育科学,1999,29(6):77-81.
- [38] 王蕾,高炳宏,陈佩杰.HiHiLo 研究进展[J].中国运动医学杂志,2010,29(3):353-358.
- [39] Tiollier E., Schmitt L., Burnat P., et al. Living high-training low altitude training: effects on mucosal immunity [J]. Eur. J. Appl. Physiol., 2005. 94: 298-304
- [40] 姚大为.我国优秀速滑运动员 IHT 的生理生化及免疫监控体系研究[D].沈阳:东北师范大学博士学位论文.2013:6.
- [41] 高欢,李涛,高炳宏,等.3200mHiHiLo 免疫和炎症反应应答特征及其对有氧能力的影响[J].体育科学,2018, 38(4),54-60.
- [42] 金其贵,胡要娟,金爱娜.不同模式的低氧运动训练对大鼠肠道体液免疫功能的影响[J].中国运动医学杂志,2015,34(8):764-769
- [43] 张纓,周帆扬,胡杨,等.急性低氧暴露对足球运动员红细胞免疫功能及调节因子的影响[J].中国运动医学杂志,2004,23(2):130-132.
- [44] 周帆扬,张纓,胡杨,等.4周高住低训对红细胞免疫功能的影响[J].体育科学,2003,23(6):132-135.
- [45] 赵永才,高炳宏,丁树哲.高住低练对游泳运动员红细胞免疫分子表达及供能的影响[J].体育科学,2010,6(3):15-20.
- [46] 罗琳,张纓.高住高练低训对足球运动员红细胞 CD35 数量及活性变化的影响[J].中国运动医学杂志,2006, 25(4):395-398.
- [47] 朱荣,张纓,王芳.不同低氧训练方式对红细胞调控 T 淋巴细胞免疫及其功能的影响[J].体育科学,2007,27(3):68-71.
- [48] 王玺,高炳宏.3周高住低训对优秀运动员红细胞免疫与免疫机能的影响[J].中国运动医学杂志,2014,33(11): 1054-1059.
- [49] Stoiber H., Pruenster M., Ammann C. G., et al. Complement-opsonized HIV:the free rider on its way to infection[J].Mol. Immunol, 2005, 42(2):153-160.
- [50] Lee K. C., Chang C.Y., Chuang Y. C., et al. Measurement of human erythrocyte C4d to erythrocyte complement receptor 1 ratio in cardiac transplant recipients with acute symptomatic allograft failure[J] Transplant Proc., 2008, 40(8):2638-2642.
- [51] 李玉周,王蕊,张纓.不同低氧训练方式对大鼠红细胞免疫调节因子及其功能的影响[J].西安体育学院学报,2009,26(2):202-205.
- [52] De Back D. Z., Kostova M.,Van karaaij T. K., et al. Of macrophages and red blood cells;a complex love story [J].Front. Physiol., 2014, 5: 9.
- [53] Luck A., Igor E., Nilam S. As Modulators of Innate Immunity The Evolving Erythrocyte:Red Blood Cell[J].J. Immunol., 2018, 201:1243-1351.
- [54] 李红,章晓霜.艾灸对运动员红细胞免疫功能与 T 细胞亚群的影响[J].中国针灸,2013,33(5):415-418.
- [55] 田军,邵媛仙,李素芳.不同血清锌水平小儿外周血 T 淋巴细胞亚群及红细胞免疫状态的变化研究[J].实用预防医学,2017,24(6):741-742.

(责任编辑:刘畅)