

DOI: 10.13376/j.cbls/2025067

文章编号: 1004-0374(2025)06-0672-10

优化运动员血清睾酮的营养策略及作用机制研究进展

郭俏凤¹, 陈笑然², 周 越^{1,3*}

(1 北京体育大学运动人体科学学院, 北京 100084; 2 国家体育总局秦皇岛训练基地, 秦皇岛 066000; 3 北京体育大学冰雪运动“一带一路”联合实验室, 北京 100084)

摘 要: 血清睾酮是监控及预测运动员机体恢复和运动表现的关键指标, 然而运动员在训练期间常会经历血清睾酮水平的下降, 这不仅削弱了训练效果, 还可能对健康产生不利影响。营养策略作为一种非训练手段, 具有促进恢复和主动提升睾酮水平的效果。本文旨在探讨运动员通过营养策略改善血清睾酮水平的有效途径及其作用机制, 以优化训练效果并提升竞技表现。基于运动对血清睾酮调控的主要机制, 结合高强度运动和耐力运动的特点, 本文梳理了能量与宏量营养素、膳食结构、微量元素、中草药和植物提取物干预等策略的潜在作用及其对睾酮水平的影响。未来研究将聚焦于不同营养干预方式在各训练阶段的协同应用, 以及女性运动员的特殊需求, 并借助组学技术和可穿戴设备为运动员提供精准的科学支持, 以实现血清睾酮水平的精准调控和运动表现的最大化。

摘 要: 睾酮; 运动员; 营养; 耐力运动; 高强度运动

中图分类号: G804.2; Q445 文献标志码: A

Research progress on nutritional strategies and mechanisms of action to optimize serum testosterone in athletes

GUO Qiao-Feng¹, CHEN Xiao-Ran², ZHOU Yue^{1,3*}

(1 College of Human Sport Science, Beijing Sport University, Beijing 100084, China; 2 Qinhuangdao Training Center of General Administration of Sport of China, Qinhuangdao 066000, China; 3 The "Belt and Road" Joint Laboratory of Winter Sports, Beijing Sport University, Beijing 100084, China)

Abstract: Serum testosterone is a key indicator for monitoring and predicting athletes' physical recovery and sports performance; however, athletes often experience a decline in serum testosterone levels during training, which affects training outcomes and health. Nutritional strategies, as a non-training means to adjust athletes' recovery needs, actively enhance testosterone levels. The aim of this paper is to explore effective pathways and mechanisms by which athletes can improve serum testosterone levels through nutritional strategies, thereby optimizing training effects and enhancing competitive performance. Based on the primary mechanisms by which exercise regulates serum testosterone, and in accordance with the characteristics of high-intensity and endurance exercises, this paper reviews nutritional strategies including regulating energy and macronutrient intake, improving dietary structure, and supplementing micronutrients, traditional Chinese medicine, and plant extracts. Future research should further focus on the synergistic application of different nutritional interventions at various training stages and the special needs of female athletes, and utilize omics technologies and wearable devices to provide more precise scientific support for athletes, achieving precise regulation of serum testosterone levels and maximizing sports performance.

Key words: testosterone; athlete; nutrition; endurance exercise; high-intensity exercise

收稿日期: 2024-12-28; 修回日期: 2025-03-03

基金项目: 国家体育总局国家队科研攻关项目“场地自行车奥运备战个性化膳食与运动营养综合保障”(23KJCX015)

*通信作者: E-mail: zhouy@bsu.edu.cn; Tel: 010-62989582

在竞技体育领域, 血清睾酮水平是影响运动员身体恢复和运动成绩的关键因素之一。血清睾酮具有促进骨骼肌蛋白质合成、增加肌肉力量和刺激红细胞生成等功能, 还与运动员的训练适应性、代谢调节和免疫功能密切相关^[1, 2]。因此, 维持适宜的血清睾酮水平对优化训练效果和提高竞技表现至关重要。然而, 运动员在训练期间经常遭遇血清睾酮水平下降的问题, 这不仅影响了训练效果, 还可能对运动员的长期健康产生不利影响^[3-6]。睾酮浓度受到遗传、年龄、性别、昼夜节律、营养和运动等影响。其中, 营养调控作为一项主动改善睾酮水平的非训练类策略, 能结合运动员的训练特点和恢复需求进行主动调控, 以帮助运动员达到最佳运动状态^[7, 8]。合理的营养策略可以有效地调控血清睾酮的合成、转化、降解及与蛋白结合等途径, 进而影响其在体内的浓度和生物活性^[8-10]。

为此, 本文旨在探讨并总结改善运动员血清睾酮的营养策略和作用机制的研究进展。通过分析运动调控血清睾酮骨骼肌代谢的主要机制, 进一步梳理了针对高强度运动和耐力运动的营养改善策略及其潜在机制。本文综合了能量与宏量营养素、膳食结构、微量元素、中草药和植物提取物干预等多个方面的研究成果, 旨在为运动员提供科学的营养指导, 以优化血清睾酮水平, 提高训练效果和竞技表现。

1 运动对血清睾酮的调控机制及其对骨骼肌代谢的影响

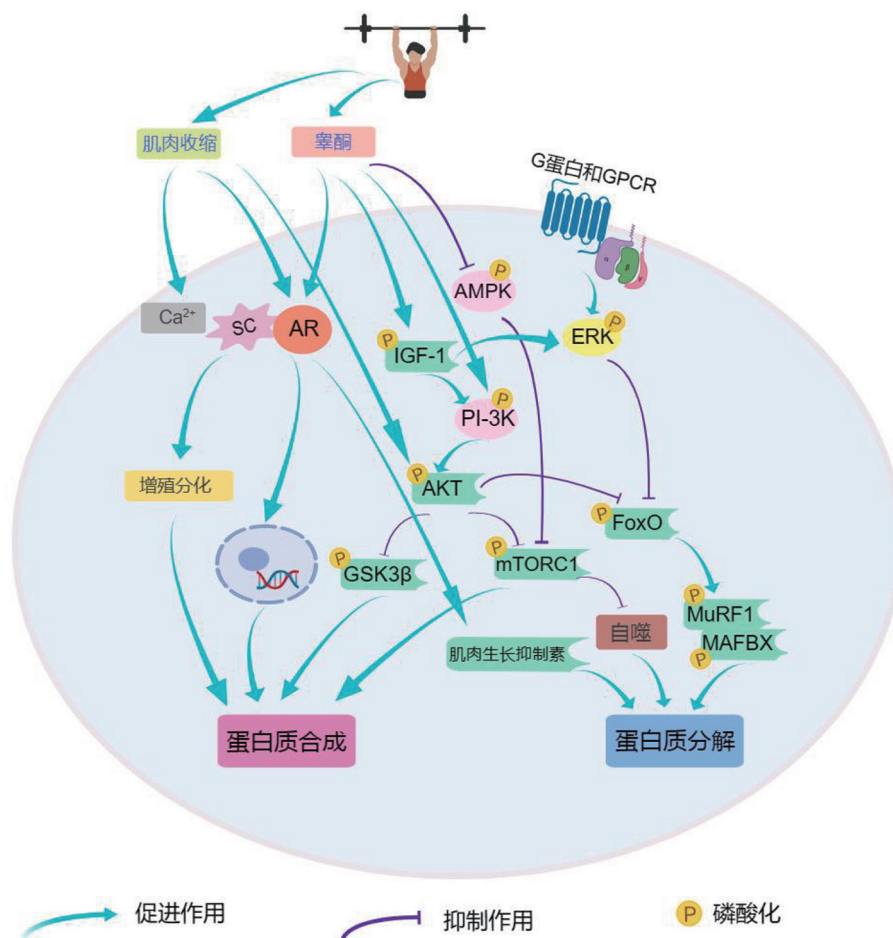
睾酮的分泌主要涉及下丘脑-垂体-性腺(hypothalamic-pituitary-gonadal, HPG)轴和下丘脑-垂体-肾上腺皮质(hypothalamic-pituitary-adrenal, HPA)轴, 前者通过垂体释放黄体生成素(luteinizing hormone, LH)和卵泡刺激素(follicle-stimulating hormone, FSH)作用于性腺释放睾酮, 是安静时男性睾酮的主要来源; 后者则由肾上腺皮质的促肾上腺皮质激素调控, 是女性睾酮的主要来源。其中, 女性不具有LH与性腺之间的反馈调节, 只能通过结合与游离廓清的方式维持游离睾酮的相对稳定^[11]。此外, 血清睾酮的分泌具有昼夜节律性, 主要受HPG轴和中枢生物钟基因的协同调控^[12]。在各因素影响下, 睾酮浓度通过以上合成、转化、降解及与蛋白结合等途径发生变化。

基于上述睾酮分泌的调控机制, 运动训练能够通过选择性调节蛋白质的合成与分解, 引发机体对

训练刺激的响应, 进而促进肌肉和其他组织的结构与功能变化。雄激素受体(androgen receptor, AR)与雄激素结合产生的生物效应, 取决于雄激素浓度、受体结合能力及受体活性。运动后, 睾酮从血液流向运动肌肉, 刺激肌肉蛋白质合成和肌内氨基酸摄取, 改善蛋白质平衡, 激活肌细胞内的AR, 促进骨骼肌细胞核数量增加以及肌卫星细胞的增殖与分化。此外, 运动可通过骨骼肌中的生物钟基因, 包括脑和肌肉芳香烃受体核转位蛋白1/昼夜节律运动输出周期蛋白(Bmal1/Clock)以及隐花色素1/周期蛋白1(Cry1/Per1), 调节AR的表达和活性, 影响睾酮的生物利用度^[13, 14]。睾酮主要通过胰岛素样生长因子1(insulin-like growth factor 1, IGF-1)/蛋白激酶B(protein kinase B, Akt)、细胞外调节蛋白激酶(extracellular signal-regulated kinase, ERK)/哺乳动物雷帕霉素靶蛋白(mammalian target of rapamycin, mTOR)、G蛋白偶联受体等途径调控骨骼肌蛋白合成^[15]。在AR依赖下, IGF-1通过Akt所介导的磷脂酰肌醇3-激酶(phosphoinositide 3-kinase, PI3K)/Akt/mTOR通路促进骨骼肌肥大, 运动后即刻补充高蛋白牛奶可以显著提高血清睾酮浓度和瘦体重, 这可能与PI3K/Akt/mTOR通路的激活有关^[8]。此外, Akt的活化可以显著抑制糖原合成酶激酶3 β (glycogen synthase kinase 3 beta, GSK3 β)的活性, 从而促进哺乳动物雷帕霉素靶蛋白复合体1(mammalian target of rapamycin complex 1, mTORC1)的磷酸化, 增加蛋白质合成^[16]。人参皂苷Rb1通过激活PI3K/Akt/GSK3 β 信号通路, 促进肌肉蛋白质合成, 增加肌肉质量^[17]。睾酮能快速改变细胞的代谢率、细胞增殖和凋亡, 其作用机制不仅依赖于基因组效应, 非基因组效应也发挥着重要作用。例如, G蛋白偶联受体可通过非基因组效应激活基质金属蛋白酶2/9和Ras蛋白磷酸化, 进而激活c-Raf原癌基因和丝裂原活化蛋白激酶, 最终催化ERK磷酸化, 提高肌肉质量^[16]。在睾酮不足时, 泛素-蛋白酶体系统将抑制蛋白质合成通路, 同时促进肌肉生长抑制素的表达和溶酶体自噬, 从而介导骨骼肌蛋白质的分解(图1)。

2 营养干预对运动员血清睾酮的影响及其潜在机制

本文围绕睾酮生理特性, 归纳了能量摄入、营养素以及营养补充品通过内分泌系统对血清睾酮水平的影响机制(图2)^[4, 7, 9, 18-21]。具体而言, 营养干



AKT: 蛋白激酶B; AMPK: AMP依赖的蛋白激酶; AR: 雄激素受体; ERK: 细胞外调节蛋白激酶; FoxO: 转录因子叉头框蛋白; GPCR: G蛋白偶联受体; GSK3 β : 糖原酶激酶3 β ; IGF-1: 胰岛素样生长因子1; MAFBX: 肌肉萎缩盒F基因; MuRF1: 肌肉特异性环指蛋白1; mTORC1: 哺乳动物雷帕霉素靶蛋白复合体1; PI-3K: 磷脂酰肌醇3-激酶; SC: 卫星细胞。

图1 运动影响骨骼肌蛋白质代谢的分子机制

预一方面通过影响 HPG 轴的关键激素, 实现从上游调控睾酮分泌; 另一方面, 影响血液循环中的睾酮转化以及游离睾酮与性激素结合球蛋白 (sex hormone-binding globulin, SHBG) 的结合, 进而调控游离睾酮的水平。接下来, 本文将针对高强度和耐力运动的特点, 详细探讨各类营养策略及其对血清睾酮的潜在影响, 包括能量与宏量营养素、膳食结构、微量元素的作用, 以及中草药和植物提取物调节血清睾酮的机制。

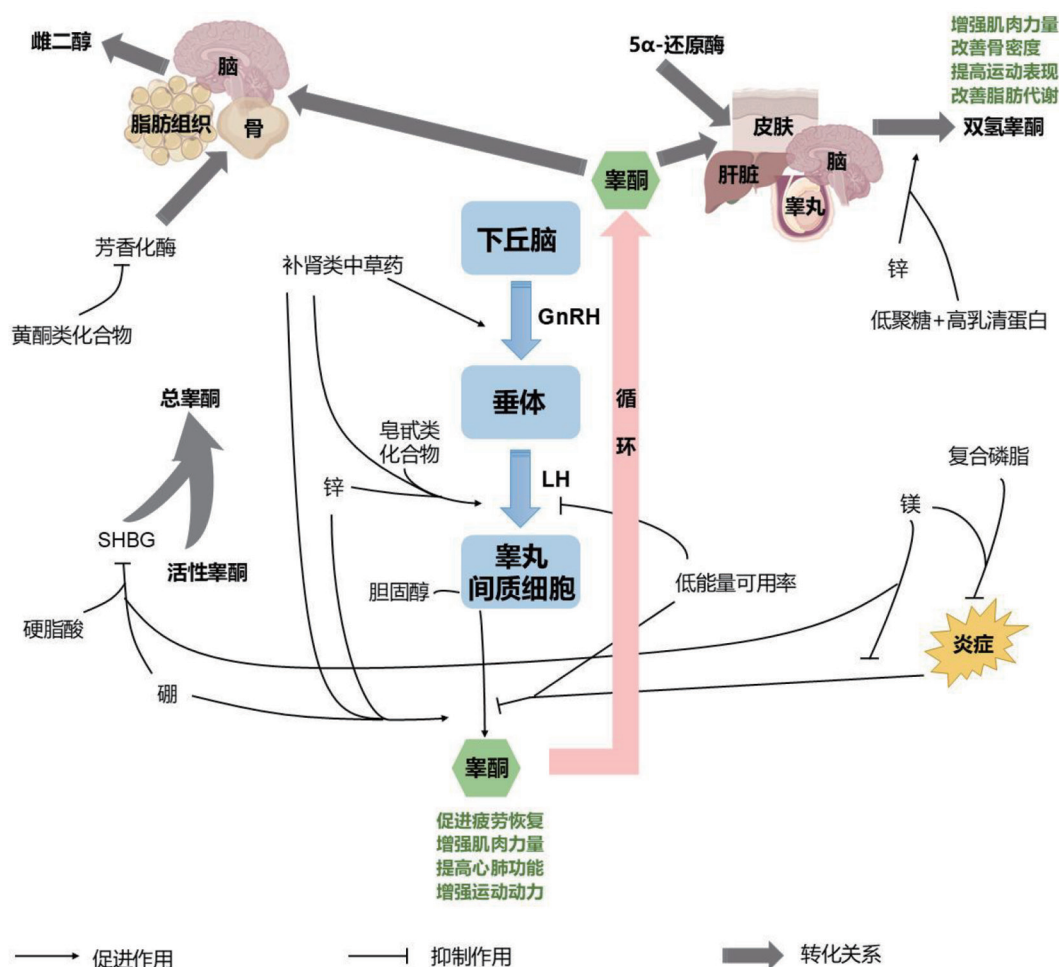
2.1 高强度运动下的营养策略对血清睾酮水平的调控作用

2.1.1 高强度运动对血清睾酮水平的影响及其生理机制

一次性短时间高强度运动后, 年轻男性的血清睾酮水平在 60 min 内快速上升至峰值 (约 650 ng/dL), 并在 4~6 h 后恢复, 基础值保持不变^[22]。引起

血清睾酮水平应答的一次性高强度运动需达到一定阈值, 且表现为力量项目运动员的升高幅度高于耐力运动员, 男子的应答反应高于女子^[11, 23]。综合目前研究结果, 运动强度超过 70% 一次最大重复重量 (one repetition maximum, 1RM), 运动时间超过 15 min, 间歇时间少于 150 s, 以大肌肉群为主, 先进行下肢运动后进行上肢运动, 配合快速离心速度, 引起血清睾酮的急性效应最强^[23-25]。高强度运动通过刺激 HPG 轴调节睾酮促进分泌, 同时激活肾上腺系统, 并通过刺激睾丸间质细胞膜上的 β_2 受体来促进睾酮的合成与分泌。此外, 肝脏血流量下降导致睾酮清除率下降, 血液浓缩促进雄烯二酮转为睾酮。

加压抗阻训练是一种创新且高效的高强度训练方法, 旨在通过血流的限制提高训练效果。一次性加压抗阻训练后运动员睾酮 / 皮质醇比值无显著



GnRH: 促性腺激素释放激素; LH: 黄体生成素; SHBG: 性激素结合球蛋白。

图2 能量和营养对睾酮的影响机制

变化,甚至发生短暂的下降,而长期干预可提高睾酮水平^[26,27]。优秀男子手球运动员进行为期2周,每周3次,训练压为200 mmHg的20%~30% 1RM深蹲、硬拉等力量练习,相比于70%~80% 1RM的传统增肌训练,机体睾酮等激素产生更多的良性变化,表现为2周后血清睾酮的下降趋势显著减缓,疲劳积累减少^[28]。睾酮分泌增加与血乳酸增加幅度高度相关,乳酸可能在其中起到信息分子的作用^[29]。加压形成局部肌肉缺氧环境,训练后乳酸缓慢地扩散至血液,或通过腺苷酸、钾离子等积累刺激痛觉神经,传入下丘脑进一步促进睾酮分泌,并启动一氧化氮合酶的合成和分泌,促进卫星细胞激活、增殖和分化,加强增肌效果^[28,30]。

由此可见,高强度运动主要依赖磷酸原和糖酵解系统供能,并具有高机械应力的特点,因此,造成的乳酸积累和局部缺氧刺激HPG轴和肾上腺系统,并且更容易因肌肉微损伤而刺激卫星细胞。

2.1.2 高强度运动的营养策略对血清睾酮水平的调节机制

高强度运动通过增加合成代谢需求、引发肌肉损伤和上调AR表达,增加了对睾酮的生理需求,并可能提高睾酮的肝外清除率。因此,高强度运动更需注重碳水化合物与蛋白质的补充质量,以调控蛋白质平衡,并辅以抗炎、增强免疫力和促进细胞修复的补剂。

2.1.2.1 能量与宏量营养素

禁食状态下进行抗阻运动后增加的睾酮水平在10 min内恢复到基线水平,而进食后进行抗阻运动则可维持约60 min^[11]。尽管碳水化合物和蛋白质是高强度项目运动员的主要能量来源,但单一补充的效果并不显著。例如,力量训练者在运动中和运动后额外补充碳水化合物4周,睾酮水平与安慰剂组的一致;足球运动员赛前8周连续补充大豆蛋白,睾酮水平也未显著变化^[31,32]。然而,糖与优质蛋白

的混合补充有助于最大化能量供应和肌肉恢复。对力量项目运动员训练前、中、后进行一次性补充发现, 摄入糖+蛋白质饮料更有利于运动后疲劳的恢复, 且糖: 蛋白质=6: 1的混合比例效果优于3: 1^[33]; 在运动后即刻和睡前30 min, 给予力量训练者高蛋白牛奶6周干预, 血清睾酮浓度、瘦体重和力量均显著提高。这与高蛋白摄入帮助夜间维持较高的氨基酸有关^[8]。同时, 若高强度运动安排在睾酮峰值的晨间, 补充快速吸收的碳水化合物和优质蛋白, 可协同睾酮的合成代谢作用, 最大化肌肉蛋白质合成速率^[34]。尽管高蛋白补充有利于肌肉蛋白质合成, 但需注意蛋白质摄入比例 $\geq 35\%$ 可能超过尿素循环能力, 使得糖皮质激素上调尿素循环, 抑制睾酮的分泌^[35]。此外, 乳清蛋白、支链氨基酸和谷氨酰胺等对高强度项目的男性和女性运动员的血清睾酮益处均已得到验证, 所以它们是蛋白补充剂中的较佳选择^[20, 36, 37]。

2.1.2.2 膳食结构

生酮饮食因其在减脂和刺激相关激素分泌中的潜力, 常被应用于健美和力量运动员的研究中。然而, 生酮饮食对血清睾酮的影响尚有争议。与西方饮食相比, 一项研究发现8周生酮饮食显著降低健美运动员的总睾酮量^[38]; 相反, 另一研究则表明8周生酮饮食显著提高了抗阻训练者的总睾酮和游离睾酮水平^[39]。尽管睾酮水平在这些研究中发生了变化, 但受试者的肌力值并未出现显著改变。鉴于脂肪并非力量性和速度性项目的主要能量来源, 有学者尝试采用一种阶段性饮食干预策略: 在正常饮食后先施加4周的高脂低碳水饮食, 期间受试者血清睾酮值为 (546.67 ± 167.16) nmol/L; 随后, 受试者转为7天的低脂高碳水饮食, 以补充足够的碳水化合物并恢复无氧能力。结果显示, 睾酮水平 $[(643.14 \pm 186.52)$ nmol/L]和无氧能力在低脂高碳水饮食后回升至初始水平, 这提示该干预策略可能适用于无氧项目运动员的赛前减重期, 有助于在控制体重的同时维持睾酮水平和运动表现^[40]。

2.1.2.3 微量元素

锌作为睾丸组织中多种酶的共因子, 可抑制雌激素对睾酮的负向调节。锌的建议日摄入量为14~40 mg, 然而健美运动员的日补充量高达 (47.14 ± 9.65) mg, 但过量补充锌会干扰铜的吸收, 进而抑制免疫功能^[41]。镁一方面通过降低氧化应激和抗炎作用来维持睾酮水平, 另一方面可能使SHBG与睾酮结合受阻, 增加睾酮的生物利用度。跆拳道运动员连续

4周补充10 mg/kg 镁后, 游离睾酮水平从 (17.78 ± 4.45) pg/mL 提升至 (22.20 ± 4.15) pg/mL, 这一结果可能与镁的作用机制有关: 镁通过激活AMP依赖的蛋白激酶(AMP-activated protein kinase, AMPK), 抑制mTORC1的过度活化, 从而防止因能量可用性过低而导致的蛋白质分解。同时, AMPK的适度激活能够增强线粒体功能, 支持睾丸间质细胞的类固醇生成, 进而促进睾酮合成^[42]。此外, 一些研究显示硼元素和硒蛋白可能有助于提高睾酮水平, 但具体机制尚未阐明^[43]。

2.1.2.4 中草药和植物提取物

高强度运动因体力消耗过大、津液亏损等原因, 常导致肾阴亏损, 进而引发睾酮水平下降。中药以补肾为主, 补益气和抗氧化为辅, 促进雄激素及卵泡激素分泌。其机制包括调节内分泌、降低血乳酸水平、提高糖原储备、优化供能途径、减少蛋白质分解以维持氮平衡, 且适用于男性和女性。举重、摔跤和柔道运动员服用补肾助阳的中药后, 仅1周时间, 就能减缓大负荷训练所引起的睾酮下降趋势^[4, 9, 18, 19], 促进HPG轴功能。植物提取物类根据其影响睾酮水平的机制, 主要分为黄酮类化合物、皂苷类化合物、硬脂酸和复合磷脂。其中, 黄酮类化合物主要来源于大豆及其制品, 其分子结构与雌激素相似, 能够与雌激素受体发生竞争性结合。通过抑制芳香化酶的活性, 黄酮类化合物可以减少睾酮向雌激素的转化, 从而有效提升血清睾酮水平。不同剂量的大豆异黄酮在不同的组织中可表现出雌激素的激活或拮抗双重效应, 这种表现取决于组织局部的异黄酮浓度、内源性雌激素水平及其受体的丰度。刺蒺藜和人参中富含皂类化合物, 能刺激下丘脑促性腺激素释放激素(gonadotropin-releasing hormone, GnRH)促进LH以提高睾酮水平。当柔道运动员睾酮值低于个体正常值15%时, 鹿茸与蒺藜皂苷的联合使用比单纯调整训练负荷更能显著提升睾酮水平^[4]。硬脂酸广泛存在于荨麻和动物脂肪中, 它通过与SHBG结合, 促进睾酮从SHBG中解离, 从而增加游离睾酮的活性。复合磷脂能够稳定细胞膜成分, 减轻脂质过氧化损伤, 从而稳定血清睾酮水平, 可见于鸡蛋、红肉类、核桃和亚麻籽等食物。12周的大红菇红枣汤干预能同时改善速度项目和耐力项目运动员高强度训练期间的睾酮指数, 这主要归因于食用菌中多糖物质起到生物调节剂的作用^[44]。另外, 橘皮素联合乳清蛋白能减轻氧化应激, 以降低短跑运动员冬训期的皮质醇水平^[45]。

睾酮的合成与分泌不仅依赖于能量补充与蛋白质合成, 还基于代谢产物清除、肌肉的修复和免疫力提高。因此, 植物提取物的优势在于其化学成分的多样性和功能性, 能与其他补剂联合使用实现优势互补和协同增效。

2.2 耐力运动的营养策略对血清睾酮水平的调控作用

2.2.1 耐力运动对血清睾酮水平的影响及其生理机制

耐力项目运动员的安静血清睾酮指数通常低于短跑等速度项目运动员, 甚至低于普通人群。一部分原因是皮质醇释放更多, 另一部分是由于长时间运动引起的糖皮质激素增加, 通过反馈机制抑制 LH 和 FSH 的分泌, 进而抑制睾酮的合成^[44, 46, 47]。耐力运动以糖原耗竭和脂肪氧化为主要供能途径。在一些对运动员体重有严格要求的项目中, 节食和低能量摄入可能导致 HPG 轴的抑制, 进而引发男性和女性运动员“三联征”。能量可用性是指机体能够有效利用的能量占总能量的比例^[46]。低能量可用性的长跑精英(<30 kcal·kg FFM·d⁻¹)(fat-free mass, FFM)的睾酮浓度较中等能量可用性的长跑精英(30~45 kcal·kg FFM·d⁻¹)显著降低。当能量供应不足时, 机体会触发应激反应, 影响各生理系统的运作, 抑制睾酮分泌^[7, 48]。对于耐力项目运动员而言, 能量可用性不仅涉及能量的摄入与消耗, 还与供能底物的利用率密切相关。因此, 脂肪适应性成为其营养策略中需要重点考虑的问题。

力量性和速度性项目运动员在耐力训练和高原

训练中同样面临睾酮恢复的挑战。篮球运动员 12 周耐力训练后睾酮下降 25%, 睾酮/皮质醇比值的下降超过 30%^[49]。男子举重国家队到亚高原训练后, 血清睾酮值呈现先下降后回升的变化特征^[50, 51]。开始出现的睾酮水平升高主要归因于此前一段时间的未训练状态。刚到高原时, 由于缺氧导致应激激素分泌增加, 抑制了睾酮的短期下降, 随着身体适应逐渐回升乃至超过正常水平。在高原初期, 无氧运动通过无氧糖酵解途径释放乳酸和其他代谢产物, 影响内分泌系统, 进而促进 GnRH 和 LH 的分泌, 从而提高睾酮水平。相比之下, 有氧运动主要通过增加机体能量需求激活交感神经系统, 刺激肾上腺髓质分泌肾上腺素和去甲肾上腺素, 同时刺激肾上腺皮质分泌皮质醇, 促进蛋白质分解提供糖原, 满足有氧运动所需的大量能量^[34, 52]。因此, 长时间耐力训练尤其要注意能源储备及运动后的 HPG 和 HPA 轴的调节恢复。

2.2.2 耐力运动的营养策略对血清睾酮水平的调节机制

尽管高强度运动和耐力运动的营养策略均旨在提升运动表现和促进恢复, 但两者的侧重点和实施方式各有不同(表 1)。高强度运动的营养策略更注重碳水化合物与蛋白质的混合补充时机, 以实现短期的能量补充和快速恢复, 从而直接维持睾酮水平。相比之下, 耐力运动的营养策略则更强调调整体的能量可用性和脂肪适应性, 注重长期的能量供应和代

表1 高强度运动与耐力运动调控血清睾酮的特点

比较维度	高强度运动	耐力运动
运动特点	短时间内高强度爆发, 磷酸原和糖酵解系统供能为主, 产生乳酸; 高机械应力, 易造成肌肉损伤, 刺激卫星细胞	长时间、中低强度的持续活动, 依赖有氧代谢持续供能, 尤其是脂肪氧化
对血清睾酮的调控特点	①达到一定训练量阈值后短期内睾酮水平上升, 肌肉中的AR激活 ^[22, 23, 25] ; ②由于肌肉损伤和修复需求, 血清睾酮要求增加, 以支持骨骼肌蛋白合成 ^[15, 24] ; ③乳酸积累和局部缺氧刺激HPG轴和肾上腺系统 ^[28, 30]	①安静水平下, 血清睾酮低于其他类型运动员 ^[44, 46] ; ②刺激HPA轴, 皮质醇升高, 负反馈抑制HPG轴的功能 ^[34, 52] ; ③糖皮质激素增加, 通过反馈机制抑制LH和FSH的分泌, 进而抑制睾酮的合成 ^[46, 52] ; ④低能量可用性导致HPG轴功能下降, 增加脂肪氧化, 影响性激素合成 ^[7, 48]
营养策略重点	①碳水化合物与蛋白质的混合补充, 特别是在运动后即刻和睡前摄入较高比例的蛋白质更佳 ^[8, 33] ; ②采用高脂低碳水饮食减重时, 结合赛前1周的低脂高碳水饮食可实现减重而不影响无氧能力 ^[39, 40] ; ③锌、镁等微量元素补充 ^[41, 42] ; ④补肾助阳的中药和植物提取物, 如黄酮类化合物、皂苷类化合物 ^[9, 18, 19]	①保证长时间训练的足够能量供应, 注重碳水化合物和脂肪的比例 ^[46, 53] ; ②同期训练时在力量训练后补充蛋白质; ③锌和硒补充对睾酮的效益只有在缺乏时才显现 ^[21] ; ④酉时服用中药效果佳; 黄芪、人参、熟地、当归、白术、当归和枸杞等是使用频率最高的中药; 补充剂联合使用植物提取物如藜藜皂苷、甜菜碱和大红菇等 ^[54-57]

AR: 雄激素受体; FSH: 卵泡刺激素; HPA: 下丘脑-垂体-肾上腺皮质; HPG: 下丘脑-垂体-性腺; LH: 黄体生成素

谢平衡, 以及对身体整体机能的调节。这种差异反映了两种运动类型对身体代谢和激素调控的不同需求, 也为运动员和教练提供了针对性的营养指导。

2.2.2.1 能量与膳食结构

与高强度运动关注蛋白质补充以促进肌肉修复和合成不同, 耐力运动的营养策略强调整体的能量可用性, 特别是碳水化合物和脂肪的比例, 以确保在长时间的训练和比赛中有足够的能量供应。优秀自行车运动员冬训期实施间歇性禁食(进食时间为10:00~18:00)后游离睾酮显著下降^[53]。虽然实验组与对照组(进食时间为7:00~21:00)的热量摄入保持一致, 但作者推测间歇性禁食产生了与热量限制类似的效果, 即这种禁食方式通过诱导低能量状态激活 AMPK, 同时抑制乙酰辅酶 A 羧化酶。这一过程促进了脂肪酸氧化和糖酵解, 增加了腺苷三磷酸(ATP)生成, 但同时也抑制合成代谢过程^[53]。此外, 血清睾酮以促进 II 型肌纤维肥大为主, 与耐力性项目运动员追求的 I 型纤维发展相冲突。所以在同期训练中, 蛋白质补充安排在有氧耐力随后的抗阻力量训练之后更有效, 这有助于刺激神经肌肉以及睾酮的合成。高碳水化合物饮食及高脂肪低碳水化合物饮食是目前耐力项目运动员的主流膳食结构, 旨在优化能量利用与脂肪适应。众多研究指出, 运动员在采用高脂肪低碳水化合物饮食或生酮饮食的初期阶段, 往往会经历能量水平的下降以及高强度运动表现的受损^[10, 58]。这种饮食结构的适应需要较长时间, 以实现脂肪适应(脂肪代谢的优化)。尽管中低强度的训练负荷在这种饮食模式下仍可维持, 但在高强度训练或赛前阶段, 运动员仍需通过短期高碳水化合物补充来超量恢复肌糖原储备。因此, 结合脂肪适应与高碳水化合物恢复的周期化饮食策略被认为是经过综合评估后较为有效的方法^[59, 60]。然而, 传统方法的睾酮测定方法较繁琐昂贵, 通常只能在较长干预周期结束后进行一次测量, 而免疫胶体金试纸条作为一种快速且高效的睾酮检测手段, 在周期化饮食策略研究中能够更频繁地获取数据, 从而更精确地评估营养干预的效果^[61]。

2.2.2.2 微量元素

目前研究显示维生素 D 的补充似乎与睾酮水平无显著相关性。一项针对包含力量与耐力项目的精英田径运动员为期 2 年的跟踪发现, 维生素 D 与睾酮水平不相关, 且极端剂量的使用并不能提高成绩^[62]。此外, 在对赛艇精英运动员进行为期 8 周维生素 D 补充后, 睾酮和睾酮/皮质醇比值虽均未见

显著提高, 但改善了铁和血红蛋白, 以及皮质醇的反应^[63]。铁代谢与月经周期之间具有共生关系, 女性运动员的缺铁比例高于男性运动员。缺铁对耐力表现的负面影响可通过每天补充 100 mg 元素铁来控制^[64]。长时间训练导致大量出汗, 锌的流失增加而摄入不足, 容易引起缺锌, 进而导致睾酮浓度下降。一项针对公路自行车运动员的研究发现, 每日补充硫酸锌 30 mg, 4 周后其游离睾酮水平显著高于对照组^[21]。这表明, 在缺锌状态下, 锌补充可能通过增加外周组织中雄烯二酮向睾酮的转化, 以及降低睾酮的肝脏清除率和肝脏 5 α 还原酶活性, 从而优化睾酮代谢。然而, 当常规膳食中锌含量充足时, 额外补充锌和硒对提高血清睾酮水平的效果并不显著, 表明其效益主要在缺乏状态下才能显现^[21]。

2.2.2.3 中草药和植物提取物类

中药的种类和使用时机在改善运动性低睾酮血症方面得到了广泛的验证。与合成代谢类固醇不同, 中药主要通过调节身体的自然激素平衡来发挥作用, 而非直接提供外源性激素。在抗运动疲劳、增强免疫力和抗氧化方面, 使用频率较高的药物包括黄芪、人参、熟地、当归、白术、当归和枸杞等。动物研究发现, 黄芪多糖通过抑制 Toll 样受体 4/核因子 κ B 通路, 减少皮质醇对 HPG 轴的抑制作用^[65]; 枸杞多糖则通过减少自由基对睾丸间质细胞的损伤, 并激活 PI3K/Akt 通路, 促进睾酮的合成和分泌^[66]。此外, 含有千年健、党参、人参等成分的道安液能显著改善男子耐力运动员的睾酮水平^[54]。运动性低睾酮血症主属脾肾功能失调和肾气虚证, 最佳的服药时间是酉时(17:00~19:00), 这与肾的日节律精气峰值相吻合。除在 7:00 服用温阳中药和 20:30 服用滋阴中药外, 运动前、中、后和睡前也应补充糖和蛋白质饮料^[56]。中药尤其适用于耐力运动员脏腑调理, 并且其还能调节女性内分泌, 改善女性卵巢的睾酮分泌功能, 从而提高女性的睾酮水平^[19, 67]。此外, 蒺藜皂苷、甜菜碱和大红菇等植物提取物也能改善耐力项目运动员的血清睾酮/皮质醇比值。蒺藜皂苷中的原薯蓣皂苷元提高 3 β -脱氢酶活性, 促进睾酮合成, 并改善 LH 的分泌, 从而缓解大负荷训练下 HPG 轴的抑制^[56]。甜菜碱作为一种有机渗透剂, 具有稳定蛋白质结构的作用, 并通过增加 IGF-1 激活 AKT/mTOR 途径, 促进蛋白质合成^[57]。多酚类化合物如白藜芦醇和果蔬多酚, 长期补充被认为可以提高运动表现, 并间接影响睾酮的合成与分泌^[68]。这些植物提取类药物往往与前

述补充剂联合使用,一方面直接促使机体自身生成和分泌内源性睾酮,另一方面通过调节代谢和免疫系统,协同恢复睾酮水平。

最后,鉴于过往对该领域女性运动员的研究较少,本文未能充分参考调控女性运动员血清睾酮的营养手段和研究结果。基于月经周期对血清睾酮水平的影响规律,建议女性运动员在卵泡期(雌激素水平较高,血清睾酮水平相对较低)注重优质蛋白质的补充,以支持肌肉修复和合成;而在黄体期(血清睾酮水平较高且代谢活跃),则建议增加碳水化合物的摄入和锌的补充,以满足较高的能量需求并防止能量可用性不足^[69]。然而,目前仍未建立针对女性运动员月经状态(包括月经周期和口服避孕药)的监测指南。有学者根据睾酮与雌激素之间的关系,联用皮质醇、睾酮和雌二醇,观察三者之间的协调波动以综合反映女性的性激素水平^[70]。此外,基于日历数据建立女性运动员的个人月经档案及激素波动规律,并在睾酮研究中增加样本量、于月经周期相同阶段进行测量,同时采用混杂因素统计模型以降低数据变异性^[71]。未来对女性运动员的追踪研究,尤其是考虑月经周期和口服避孕药使用的影响,将有助于完善女性运动员生物护照的类固醇激素板块,并进一步探索满足女性特殊需求的营养策略,以优化睾酮水平。

3 小结与展望

运动员在训练期间常面临血清睾酮低的问题,这不仅影响机体恢复,还制约了运动表现的提升。本文针对高强度运动和耐力运动的特点,梳理了优化运动员血清睾酮水平的营养策略及其潜在机制。高强度运动后血清睾酮水平的变化与运动强度、时间、间歇时间等因素密切相关。高强度运动由于合成代谢需求高、肌肉损伤以及AR表达上调,对睾酮水平的要求更高。因此,其营养策略以提高糖原储备、促进骨骼肌快速修复以维持氮平衡为重。相比之下,耐力运动的营养策略更侧重于能量可用性、脂肪适应性及HPG和HPA轴的调节,涵盖能量摄入、膳食结构调整、微量元素补充以及中草药和植物提取物的应用。

在营养策略的研究中,当前研究多集中于探讨营养素的种类、补充时机和剂量,而对不同营养干预方式在各训练阶段的协同应用关注不足。在周期化饮食中,以睾酮为结局指标的研究也较为匮乏。未来研究可借助免疫胶体金试纸条等技术手段,增

强睾酮检测的便利性和时效性,从而更精准地评估饮食结构调整对运动表现的长期影响。此外,镁、硼和硒蛋白等微量元素对运动员睾酮恢复的长期作用尚需深入研究。代谢反应受个体遗传与环境因素共同影响,近年来,基于组学技术和可穿戴设备的个体化营养研究逐渐兴起,有望为运动员恢复、运动表现提高以及训练计划优化提供更精准的科学支持。

[参 考 文 献]

- [1] Vanny PJ, Moon J. Physiological and psychological effects of testosterone on sport performance: a critical review of literature. *Sport J*, 2015
- [2] Steiner JL, Fukuda DH, Rossetti ML, et al. Castration alters protein balance after high-frequency muscle contraction. *J Appl Physiol* (1985), 2017, 122: 264-72
- [3] Bezuglov E, Ahmetov II, Lazarev A, et al. The relationship of testosterone levels with sprint performance in young professional track and field athletes. *Physiol Behav*, 2023, 271: 114344
- [4] 余军标,樊雨生,莫琳.比较运动营养和负荷调整两种方法对柔道运动员训练后的恢复效果. *中国临床康复*, 2006, 10: 32-4
- [5] 何子红,张传光,文舫,等.优秀女子摔跤运动员过度训练预警方法(血液指标)的研究. *中国体育科技*, 2018, 54: 45-51
- [6] 李秀红,高亚辉,杨静,等.优秀短距离场地自行车运动员赛前减量训练安排研究. *山东体育学院学报*, 2018, 34: 105-9
- [7] Zamir A, Ben-Zeev T, Hoffman JR. Manipulation of dietary intake on changes in circulating testosterone concentrations. *Nutrients*, 2021, 13: 3375
- [8] Pourabbas M, Bagheri R, Hooshmand Moghadam B, et al. Strategic ingestion of high-protein dairy milk during a resistance training program increases lean mass, strength, and power in trained young males. *Nutrients*, 2021, 13: 948
- [9] 任大全,张艳秋,许志勇,等.补肾益气类中药对古典跤运动员运动性疲劳恢复的研究. *陕西中医*, 2009, 30: 1347-9
- [10] Volek JS, Freidenreich DJ, Saenz C, et al. Metabolic characteristics of keto-adapted ultra-endurance runners. *Metabolism*, 2016, 65: 100-10
- [11] Hooper DR, Kraemer WJ, Focht BC, et al. Endocrinological roles for testosterone in resistance exercise responses and adaptations. *Sports Med*, 2017, 47: 1709-20
- [12] Kandeger A, Selvi Y, Tanyer DK. The effects of individual circadian rhythm differences on insomnia, impulsivity, and food addiction. *Eat Weight Disord*, 2019, 24: 47-55
- [13] 夏雨,丁海丽,傅泽铤.大负荷运动后时钟基因Bmal1调控骨骼肌线粒体结构功能的作用机制. *中国病理生理杂志*, 2022, 38: 325-32
- [14] 丁海丽,傅泽铤,夏雨.大负荷运动后骨骼肌核心时钟基因Bmal1/Clock、Cry1/Per1的节律性振荡变化趋势.

- 中国体育科技, 2023, 59: 90-7
- [15] Gharahdaghi N, Phillips BE, Szewczyk NJ, et al. Links between testosterone, oestrogen, and the growth hormone/insulin-like growth factor axis and resistance exercise muscle adaptations. *Front Physiol*, 2021, 11: 621226
- [16] Fu S, Yin L, Lin X, et al. Effects of cyclic mechanical stretch on the proliferation of L6 myoblasts and its mechanisms: PI3K/Akt and MAPK signal pathways regulated by IGF-1 receptor. *Int J Mol Sci*, 2018, 19: 1649
- [17] 李骁君, 王斌, 赖晓红, 等. 人参提取物达玛烷苷元对人体运动后肌糖原恢复的影响及机制研究. *山东体育学院学报*, 2014, 30: 65-70
- [18] 刘波, 张世明, 马建, 等. 中药消除运动性疲劳临床研究之二——内服中药“肾王膏”消除男子摔跤运动员运动性肾阴不足临床疗效观察. *中国运动医学杂志*, 2010, 29: 321-3
- [19] 李骁君, 王广峰, 赵兰革, 等. 复方理气中药对女子举重运动员血清GH水平及内分泌功能影响的研究. *山东体育学院学报*, 2001, 17: 40-2
- [20] Hamarsland H, Nordengen AL, Nyvik Aas S, et al. Native whey protein with high levels of leucine results in similar post-exercise muscular anabolic responses as regular whey protein: a randomized controlled trial. *J Int Soc Sports Nutr*, 2017, 14: 43
- [21] Shafiei Neek L, Gaeini AA, Choobineh S. Effect of zinc and selenium supplementation on serum testosterone and plasma lactate in cyclist after an exhaustive exercise bout. *Biol Trace Elem Res*, 2011, 144: 454-62
- [22] Fink J, Schoenfeld BJ, Nakazato K. The role of hormones in muscle hypertrophy. *Phys Sportsmed*, 2018, 46: 129-34
- [23] Kraemer WJ, Ratamess NA. Hormonal responses and adaptations to resistance exercise and training. *Sports Med*, 2005, 35: 339-61
- [24] Cintineo HP, Arent MA, Antonio J, et al. Effects of protein supplementation on performance and recovery in resistance and endurance training. *Front Nutr*, 2018, 5: 83
- [25] Gepfert M, Trybulski R, Stastny P, et al. Fast eccentric movement tempo elicits higher physiological responses than medium eccentric tempo in ice-hockey players. *Int J Environ Res Public Health*, 2021, 18: 7694
- [26] Laurentino GC, Loenneke JP, Ugrinowitsch C, et al. Blood-flow-restriction-training-induced hormonal response is not associated with gains in muscle size and strength. *J Hum Kinet*, 2022, 83: 235-43
- [27] Chen YT, Hsieh YY, Ho JY, et al. Running training combined with blood flow restriction increases cardiopulmonary function and muscle strength in endurance athletes. *J Strength Cond Res*, 2022, 36: 1228
- [28] 赵之光, 程金娜, 魏文哲, 等. 加压训练和传统增肌训练对优秀男子手球运动员部分激素及生物活性因子的影响. *中国体育科技*, 2019, 55: 20-9
- [29] 刘玉琳, 叶琼, 刘昊为. 加压结合抗阻训练对糖耐量减低人群骨密度、胰岛素敏感性、肌力、激素分泌影响研究. *中国骨质疏松杂志*, 2018, 24: 1451-8
- [30] Loenneke JP, Thrower AD, Balapur A, et al. Blood flow-restricted walking does not result in an accumulation of metabolites. *Clin Physiol Funct Imaging*, 2012, 32: 80-2
- [31] Krings BM, Waldman HS, Shepherd BD, et al. The metabolic and performance effects of carbohydrate timing in resistance trained males undergoing a carbohydrate restricted diet. *Appl Physiol Nutr Metab*, 2021, 46: 626-36
- [32] McAdam JS, Lyons KD, Beck DT, et al. Whey protein supplementation effects on body composition, performance, and blood biomarkers during Army initial entry training. *Front Nutr*, 2022, 9: 807928
- [33] 文安, 王启荣, 方子龙, 等. 糖-蛋白质饮料对男力量运动员一次抗阻运动后部分血清指标的影响. *西安工业大学学报*, 2014, 34: 870-7+95
- [34] Riachy R, McKinney K, Tuvdendorj DR. Various factors may modulate the effect of exercise on testosterone levels in men. *J Funct Morphol Kinesiol*, 2020, 5: 81
- [35] Okun JG, Conway S, Schmidt KV, et al. Molecular regulation of urea cycle function by the liver glucocorticoid receptor. *Mol Metab*, 2015, 4: 732-740
- [36] 曲梓怡, 胡玲. 谷氨酰胺对女子曲棍球运动员大负荷训练周期中血尿素和血清睾酮的影响. *辽宁体育科技*, 2010, 32: 37+40
- [37] Ghaderi M, Azizbeigi K. Hormonal responses to acute resistance exercise after branched-chain amino acids supplementation. *Int Med J*, 2015, 22: 1-5
- [38] Paoli A, Cenci L, Pompei P, et al. Effects of two months of very low carbohydrate ketogenic diet on body composition, muscle strength, muscle area, and blood parameters in competitive natural body builders. *Nutrients*, 2021, 13: 374
- [39] Vidić V, Ilić V, Toskić L, et al. Effects of calorie restricted low carbohydrate high fat ketogenic vs. non-ketogenic diet on strength, body-composition, hormonal and lipid profile in trained middle-aged men. *Clin Nutr*, 2021, 40: 1495-502
- [40] Michalczyk MM, Chycki J, Zajac A, et al. Anaerobic performance after a low-carbohydrate diet (LCD) followed by 7 days of carbohydrate loading in male basketball players. *Nutrients*, 2019, 11: 778
- [41] Nichols QZ, Ramadoss R, Stanzione JR, et al. Micronutrient supplement intakes among collegiate and masters athletes: a cross-sectional study. *Front Sports Act Living*, 2023, 5: 854442
- [42] Cinar V, Polat Y, Baltaci AK, et al. Effects of magnesium supplementation on testosterone levels of athletes and sedentary subjects at rest and after exhaustion. *Biol Trace Elem Res*, 2011, 140: 18-23
- [43] 袁延福, 赵瑞朋. 含硒蛋白运动补剂对网球运动员运动表现的影响. *食品研究与开发*, 2023, 44: 231-2
- [44] 龚希丹. 大红菇红枣汤对训练中机体血清睾酮和皮质醇激素的影响. *中国食用菌*, 2021, 40: 111-7
- [45] Liu M, Mo SW, Qin CL, et al. Effects of the combination of tangeretin and whey protein on testosterone and cortisol in sprinters at winter training season. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol*, 2021, 37: 678-82
- [46] Cupka M, Sedliak M. Hungry runners - low energy availability in male endurance athletes and its impact on performance and testosterone: mini-review. *Eur J Transl Myol*, 2023, 33:11104

- [47] 张绍岩, 韩春友, 刘纲, 等. 优秀运动员血清睾酮和皮质醇激素水平在长期运动训练中的变化. 中国运动医学杂志, 1996, (04): 292-5
- [48] Escalante G, Barakat C, Tinsley GM, et al. Nutrition, training, supplementation, and performance-enhancing drug practices of male and female physique athletes peaking for competition. *J Strength Cond Res*, 2023, 37: e444-54
- [49] 汤仑, 朱兴国, 蒋云龙. 耐力训练对江苏U18男篮运动员血常规的影响. 南京体育学院学报, 2021, 20: 46-50
- [50] 张丽琴. 柔术运动员亚高原训练前后身体机能和体成分变化特征的研究. 山东体育科技, 2023, 45: 58-63
- [51] 赵鹏, 李清正, 路瑛丽. 备战2008年奥运会国家男子举重队运动员亚高原训练效果评价. 体育科研, 2008, 29: 52-5
- [52] Viru A, Karelson K, Smirnova T. Stability and variability in hormonal responses to prolonged exercise. *Int J Sports Med*, 1992, 13: 230-5
- [53] Moro T, Tinsley G, Longo G, et al. Time-restricted eating effects on performance, immune function, and body composition in elite cyclists: a randomized controlled trial. *J Int Soc Sports Nutr*, 2020, 17: 65
- [54] 楼静, 张根生, 陈春枝, 等. 田径运动员赛前训练期身体机能评定及营养恢复探讨. 北京体育大学学报, 2003, 26: 770-2
- [55] 廖春海, 李世成, 熊静宇, 等. 择时营养补充对大学生中长跑运动员运动能力的影响. 山东体育学院学报, 2012, 28: 57-64
- [56] 崔恩. 补充蒺藜皂甙对中长跑运动员睾酮、EPO和红细胞相关参数的影响. 首都体育学院学报, 2013, 25: 170-3
- [57] Nobari H, Cholewa JM, Castillo-Rodríguez A, et al. Effects of chronic betaine supplementation on performance in professional young soccer players during a competitive season: a double blind, randomized, placebo-controlled trial. *J Int Soc Sports Nutr*, 2021, 18: 67
- [58] Zinn C, Wood M, Williden M, Chatterton S, et al. Ketogenic diet benefits body composition and well-being but not performance in a pilot case study of New Zealand endurance athletes. *J Int Soc Sports Nutr*, 2017, 14: 22
- [59] Webster CC, Swart J, Noakes TD, et al. A carbohydrate ingestion intervention in an elite athlete who follows a low-carbohydrate high-fat diet. *Int J Sports Physiol Perform*, 2018, 13: 957-60
- [60] 车开萱, 李秦陇, 杨俊超, 等. 优化运动表现的营养策略——周期化营养. 中国运动医学杂志, 2023, 42: 739-48
- [61] 周越, 杨苗苗, 张俊芬, 等. 半定量检测血睾酮浓度的免疫胶体金试纸条: 中国, CN203786125U[P]. 2014-08-20
- [62] Krzywański J, Pokrywka A, Młyńczak M, et al. Is vitamin D status reflected by testosterone concentration in elite athletes? *Biol Sport*, 2020, 37: 229-37
- [63] Mielgo-Ayuso J, Calleja-González J, Urdampilleta A, et al. Effects of vitamin D supplementation on haematological values and muscle recovery in elite male traditional rowers. *Nutrients*, 2018, 10: 1968
- [64] Badenhorst CE, Goto K, O'Brien WJ, et al. Iron status in athletic females, a shift in perspective on an old paradigm. *J Sports Sci*, 2021, 39: 1565-75
- [65] Guo M, Gao J, Jiang L, et al. Astragalus polysaccharide ameliorates renal inflammatory responses in a diabetic nephropathy by suppressing the TLR4/NF- κ B pathway. *Drug Des Devel Ther*, 2023, 17: 2107-18
- [66] Qi Y, Duan G, Fan G, et al. Effect of *Lycium barbarum* polysaccharides on cell signal transduction pathways. *Biomed Pharmacother*, 2022, 147: 112620
- [67] 邹军, 李丽辉, 江岩, 等. 中药生脉饮对女子散打运动员夏训期体能与免疫功能的影响. 中国运动医学杂志, 2012, 31: 113-8
- [68] Somerville V, Bringans C, Braakhuis A. Polyphenols and performance: a systematic review and meta-analysis. *Sports Med*, 2017, 47: 1589-99
- [69] McNulty KL, Elliott-Sale KJ, Dolan E, et al. The effects of menstrual cycle phase on exercise performance in eumenorrheic women: a systematic review and meta-analysis. *N Z Med J*, 2020, 50: 1813-27
- [70] Edwards DA, Turan B. Within-person coupling of estradiol, testosterone, and cortisol in women athletes. *PeerJ*, 2020, 8: e8402
- [71] Dupuit M, Meignié A, Chassard T, et al. On-field methodological approach to monitor the menstrual cycle and hormonal phases in elite female athletes. *Int J Sports Physiol Perform*, 2023, 18: 1169-78