

## 应用营养

运动营养系列述评(二): $\alpha$ -酮戊二酸吴博隆<sup>1</sup>,方子龙<sup>3,4</sup>,刘飒娜<sup>2</sup>,于梅<sup>5</sup>,梁栋<sup>2</sup>,严翊<sup>1</sup>

- (1. 北京体育大学运动人体科学学院,北京 100084;2. 国家食品安全风险评估中心,北京 100022;  
3. 北京体育大学运动医学与康复学院,北京 100084;4. 运动营养北京市高等学校工程研究中心,  
北京 100084;5. 中国检验检测学会运动与营养测评分会,北京 100125)

**摘要:**  $\alpha$ -酮戊二酸(AKG)是三羧酸循环中间物,是碳水化合物、脂肪、蛋白质代谢物通过三羧酸循环为人体提供能量的关键物质,是运动诱导骨骼肌分泌的肌细胞因子,具有调控能量代谢、缺氧适应、炎症反应及抗氧化功能等生理功能。现有随机对照试验(RCT)结果表明,补充 AKG 的氨基酸盐衍生物 L-精氨酸- $\alpha$ -酮戊二酸(AAKG)有助于提高运动人群上肢肌肉力量、爆发力及无氧功能能力,但是研究数量少、样本量小,证据等级相对较低。当前,仅欧盟将 AKG 按营养成分管理,未来若考虑将 AKG 或 AAKG 在我国列入营养成分管理,仍需开展单因素有针对性的高质量 RCT 研究。

**关键词:** 运动营养;系列述评; $\alpha$ -酮戊二酸;L-精氨酸- $\alpha$ -酮戊二酸

中图分类号:R155 文献标识码:A 文章编号:1004-8456(2025)06-0573-07

DOI:10.13590/j.cjfh.2025.06.011

Series review and commentary on sports nutrition (part 2):  $\alpha$ -ketoglutarateWU Bolong<sup>1</sup>, FANG Zilong<sup>3,4</sup>, LIU Sana<sup>2</sup>, YU Mei<sup>5</sup>, LIANG Dong<sup>2</sup>, YAN Yi<sup>1</sup>

- (1. School of Sport Science, Beijing Sport University, Beijing 100084, China;2. China National Center for Food Safety Risk Assessment, Beijing 100022, China;3. School of Sport Medicine and Physical Therapy, Beijing Sport University, Beijing 100084, China;4. Beijing Sports Nutrition Engineering Research Center, Beijing 100084, China;5. Subcommittee on Sports and Nutrition Assessment of the China Inspection and Testing Society, Beijing 100125, China)

**Abstract:**  $\alpha$ -ketoglutarate (AKG), an intermediate of the tricarboxylic acid (TCA) cycle, serves as a key substrate for energy production from carbohydrate, lipid, and amino acid metabolites *via* the TCA cycle. It functions as a myokine secreted by skeletal muscle in response to exercise, regulating physiological processes including energy metabolism, hypoxia adaptation, inflammatory responses, and antioxidant functions. Current randomized controlled trials (RCT) indicate that supplementation with L-arginine  $\alpha$ -ketoglutarate (AAKG), an amino acid salt derivative of AKG, enhances upper-body muscle strength, power, and anaerobic work capacity in athletic populations. However, due to limited study numbers, small sample sizes, and relatively low evidence quality, the validity of these findings remains constrained. Regulatory frameworks currently classify AKG as nutritional ingredients only in the European Union. To support the potential inclusion of AKG or AAKG as nutritional ingredients in China, high-quality, single-factor controlled RCT remain imperative.

**Key words:** Sports nutrition; series review and commentary;  $\alpha$ -ketoglutarate; L-arginine  $\alpha$ -ketoglutarate

收稿日期:2025-01-27

基金项目:2025 高层次人才 2.4 专业技术团队能力提升专项;中央高校基本科研业务费专项资金资助课题(2024YDYY002)

作者简介:吴博隆 男 高级工程师 研究方向为运动营养与检验检测 E-mail: wubolong@bsu.edu.cn

通信作者:梁栋 女 副研究员 研究方向为营养与特殊膳食食品安全国家标准 E-mail: liangdong@cfsa.net.cn

严翊 女 教授 研究方向为运动与健康促进、运动应激的机体调控与营养干预、大众健身运动风险评估及健身指导 E-mail: yanyi@bsu.edu.cn

梁栋和严翊为共同通信作者

运动营养系类述评是以国内外运动营养食品营养成分为研究对象,通过代谢特点和生理功能、国内外批准管理情况、临床证据三级分析框架开展的系统性、系列性循证研究,以为食品安全国家标准制修订提供科学依据,也为运动营养实践提供参考<sup>[1]</sup>,本文主要对 $\alpha$ -酮戊二酸( $\alpha$ -Ketoglutarate, AKG)进行研究。

## 1 代谢特点和生理功能

AKG 作为三羧酸(Tricarboxylic acid, TCA)循环中间物,兼具 TCA 循环代谢底物和信号分子的双重功能<sup>[2]</sup>。在国内外运动营养研究领域,AKG 不仅作为营养成分被研究<sup>[3-6]</sup>,其作为运动诱导肌细胞因子<sup>[7]</sup>与运动促进健康生物标志物的作用而被广泛关注<sup>[8]</sup>。近年来,AKG 也是代谢综合征<sup>[9]</sup>、表观遗传学<sup>[10]</sup>、衰老<sup>[11]</sup>等与人类健康相关研究领域的热点。

碳水化合物、脂肪和蛋白质三大能源物质,分别经过糖酵解、 $\beta$  氧化、脱氨基进入 TCA 循环,通过有氧代谢为运动供能<sup>[12]</sup>。AKG 作为 TCA 循环中关键中间体,在 $\alpha$ -酮戊二酸脱氢酶复合体( $\alpha$ -Ketoglutarate dehydrogenase complex, KGDHC)催化下氧化脱羧,生成琥珀酰辅酶 A 和还原型烟酰胺腺嘌呤二核苷酸(Nicotinamide adenine dinucleotide, NADH)。琥珀酰辅酶 A 进一步转化为琥珀酸,驱动腺嘌呤核苷三磷酸(Adenosine triphosphate, ATP)合成;NADH 为电子传递链提供电子,促进氧化磷酸化<sup>[2]</sup>。

AKG 是氨基酸代谢的枢纽,谷氨酸和谷氨酰胺经 AKG 进入 TCA 供给能量,而在合成代谢中 AKG 则作为前体物质,参与非必需氨基酸的合成,维持蛋白质合成与分解代谢的动态平衡。除作为能量代谢底物外,AKG 也是代谢调控的信号分子,通过变构效应直接调控能量代谢和缺氧适应,并通过调控 KGDHC 活性间接影响炎症反应与抗氧化功能<sup>[2]</sup>。此外,AKG 是运动诱导骨骼肌分泌的肌细胞因子,通过 2-酮戊二酸受体 1(2-Oxoglutarate receptor 1, OXGR1)调控肌肉肥大和脂肪代谢<sup>[13]</sup>。

AKG 与氨基酸合成的鸟氨酸- $\alpha$ -酮戊二酸(Ornithine- $\alpha$ -ketoglutarate, OKG)还被应用于临床烧伤患者的术后恢复。OKG 通过刺激生长激素与胰岛素样生长因子-1 的分泌进而促进合成代谢,同时还可以调节谷氨酰胺代谢减轻氧化应激、炎症反应并改善免疫功能<sup>[14]</sup>,显著促进伤口愈合和组织修复<sup>[15]</sup>。该研究结果提示 AKG 和氨基酸组成的化合物具有促进蛋白质合成的作用,推测其同样可以促进骨骼肌的合成代谢,提升肌肉力量进而提高运动表现<sup>[16]</sup>。

## 2 应用效果研究证据

检索知网、万方、PubMed、Web of Science 数据库中发表于 2000 年及之后的 AKG 运动营养系统评价、荟萃分析和随机对照试验(Randomized controlled trial, RCT)。文献的初步纳入标准包括:研究设计中包含 AKG 或其衍生物的营养干预;营养干预期间实施运动训练,或在运动能力测评的前、中或后进行营养干预;研究对象包括运动员、运动人群或无运动习惯的健康成年人。排除会议论文。经检索,尚无 AKG 运动营养相关的系统评价和荟萃分析,初步纳入运动营养 RCT 文献 15 篇,但其中多项研究中 AKG 与其他营养物质或药物复配使用。进一步筛选,排除营养干预或安慰剂对照中,含有 AKG 或其氨基酸盐衍生物 L-精氨酸-AKG (L-Arginine alpha-ketoglutarate, AAKG)、OKG 以外功能性食品成分或药物的研究,如肌酸、咖啡因、 $\beta$ -羟基- $\beta$ -甲基丁酸酯、辛弗林、5-羟甲基糠醛等<sup>[17-26]</sup>。最终纳入符合标准的中英文 RCT 研究共 5 项<sup>[27-31]</sup>,其研究对象、试验设计、干预方法及结局指标见表 1。

### 2.1 对运动耐力的影响

BRUCE 等<sup>[27]</sup>对 7 名男性自行车运动员开展的 RCT 研究结果显示,运动前 1 h 补充 0.2 g/(kg·BW/d)的 OKG 或安慰剂后,以 70% 最大摄氧量(Maximal oxygen uptake,  $VO_{2max}$ )强度进行功率自行车稳态运动,呼吸交换率、摄氧量、输出功率、运动后即刻血乳酸等参数组间无显著差异。CAMPBELL 等<sup>[28]</sup>对 35 名有抗阻运动习惯的健康男性研究发现,在连续 8 周的抗阻和耐力同期训练中补充 12 g/d AAKG 或安慰剂后,补充 AAKG 受试组心肺运动试验指标  $VO_{2max}$  和运动至力竭长(Time to exhaustion, TTE)与安慰剂组无显著差异。LIU 等<sup>[31]</sup>对 21 名无运动习惯的健康男性研究表明,连续 4 周有氧耐力运动训练中补充 0.2 g/(kg·BW/d)的 AKG 或安慰剂后,补充 AKG 受试组心肺运动试验指标  $VO_{2max}$  和通气无氧阈与安慰剂组无显著差异。GREER 等<sup>[30]</sup>对 12 名有抗阻运动习惯的健康男性研究结果显示,运动前补充 7.4 g AAKG 或安慰剂后进行肌肉耐力测试,补充 AAKG 受试组的俯卧撑和引体向上最多次数显著低于安慰剂组。

心肺运动试验测得的  $VO_{2max}$ 、TTE、各时间点血乳酸、乳酸阈或通气无氧阈,或恒定强度稳态运动测得的呼吸交换率、血乳酸是评估人体心肺功能、有氧运动能力及有氧耐力的核心指标。俯卧撑、仰卧起坐等特定肌肉克服特定负荷的最多次数,是评估局部肌群肌肉耐力的核心指标<sup>[32-33]</sup>。上述 4 项研究结果提示,4 周耐力运动训练中补充 0.2 g/(kg·BW/d)

AKG,或8周的抗阻耐力同期训练中补充12 g/d的AAKG,对健康青年男性运动人群无改善有氧耐力的应用效果;运动前单次补充0.2 g/(kg·BW)的OKG,对耐力类男子运动员急性运动测试中的有氧耐力表现无即刻提升作用;运动前单次补充7.4 g的AAKG,显著降低健康青年男性运动人群急性运动试验中的肌肉耐力表现。

2.2 对肌肉力量和爆发力的影响

CAMPBELL等<sup>[28]</sup>的研究显示,经8周的抗阻和耐力同期训练联合12 g/d AAKG或安慰剂干预后,AAKG受试组的卧推最多只能进行一次的抗阻能力(1 repetition maximum,1RM),及Wingate无氧功测试的最大无氧功率及疲劳指数显著高于安慰剂组,但伸膝力量测试结果组间无显著差异。LIU等<sup>[31]</sup>研究发现,4周耐力训练后继续补充1周0.2 g/(kg·BW/d)AKG,AKG受试组的伸膝力量测试指标等长峰值力距和等速峰值功率显著高于安慰剂组。

卧推或腿蹬1 RM的重量是测试上肢及胸背部,或下肢及臀部等肌肉力量的常用方法。Wingate无氧功是测试人体通过无氧代谢提供能量进行运动的能力,测得的最快速度蹬车30 s内的最大无氧功率、平均无氧功率和疲劳指数等是评估人体速度、力量和爆发力的核心指标。屈肘和伸膝力量测试则反应了肌肉等速收缩和等长收缩的肌肉力

量<sup>[32-33]</sup>。上述2项研究结果提示,8周的抗阻耐力同期训练中补充12 g/d的AAKG,对健康青年男性运动人群上肢肌肉力量和爆发力的提高有应用效果,但未改善下肢肌肉力量;4周耐力运动训练中补充0.2 g/(kg·BW/d)AKG并在恢复期继续补充1周,对健康青年男性运动人群下肢肌肉力量的提高有应用效果。

2.3 其他

BRUCE等<sup>[27]</sup>的研究假设是运动前补充OKG或谷氨酰胺是否能够通过提高TCA循环中间物(TCA cycle intermediates,TCAi)水平,提高中高等强度耐力运动初期有氧化代谢供能占比,降低糖酵解和磷酸肌酸-ATP供能系统占比。研究结果显示运动前补充OKG对骨骼肌TCAi水平无影响,而谷氨酰胺提升显著,但是即使TCAi水平改变也不会对中高等强度耐力运动初期的三大供能系统占比带来任何影响。WILLOUGHBY等<sup>[29]</sup>的研究并未评估7 d的12 g/d AAKG或安慰剂对有抗阻运动习惯的青年男性受试者运动表现的影响,而是考察了补充AAKG是否能够提高血液中一氧化氮代谢物水平即“氮泵”效果。研究结果显示抗阻运动能够显著提高血清中一氧化氮代谢物(Nitric oxide metabolites,NOx)水平,补充AAKG对NOx水平无额外影响。

表1  $\alpha$ -酮戊二酸运动营养应用效果研究总结  
Table 1 Summary of studies on the efficacy of  $\alpha$ -ketoglutarate in sports nutrition

研究对象	试验设计	营养干预	运动干预	运动表现指标变化	生化及其他指标变化	参考文献
健康男性 自行车运动员 年龄24±1 (n=7)	安慰剂 双盲 交叉 随机对照试验	0.2 g/(kg·BW) OKG 或安慰剂,运动试 验前1 h口服,2周 洗脱期	70% VO <sub>2max</sub> 功率自行 车稳态运动10 min	→心肺运动试验测试指 标呼吸交换率、通气量、 输出功率、摄氧量	→ 血糖、血乳酸 ↑ 运动后即刻、运动后 10 min血浆中丙氨酸、 鸟氨酸(P<0.05)	[27]
					→ 运动后即刻、运动后 10 min股四头肌活检样 本中ATP、磷酸肌酸、肌 酸、乳酸、丙酮酸	
					→ 运动后即刻、运动后 10 min股四头肌活检样 本中柠檬酸、琥珀酸、苹 果酸、富马酸盐之和	
健康男性 有抗阻运动习惯 年龄38.9±5 (n=35)	安慰剂 双盲 随机对照试验	AAKG 12 g/d(n= 20)或安慰剂(n= 15),口服,8周	8周运动训练 其中,每周4次70%~ 85%最多只能进行一 次的抗阻能力(1RM) 训练,每周3次30 min 70%最大心率(HR <sub>max</sub> ) 有氧耐力训练	↑ 卧推1RM(P<0.05) ↑ Wingate无氧功测试 指标最大无氧功率、疲 劳指数(P<0.05) → VO <sub>2max</sub> 、TTE → 伸膝力量测试指标	↑ 空腹血糖、血红蛋白、 血浆中精氨酸水平(P< 0.005) → 体成分	[28]

续表

研究对象	试验设计	营养干预	运动干预	运动表现指标变化	生化及其他指标变化	参考文献
健康男性 有抗阻运动习惯 年龄 22.2±2.8 (n=24)	安慰剂 双盲 随机对照试验	AAKG 12 g/d(n=12)或安慰剂(n=12),口服,1周	营养干预前和第7日,各进行一次抗阻运动试验,肘屈肌70%~75% 1RM 15次/组×3组 营养干预期间,停止保持的抗阻运动习惯	未评估	↑ 运动前血浆L-精氨酸(P<0.05) → 运动前、运动后即刻、运动后30 min血清NOx ↓ 运动前血清非对称性二甲基精氨酸(ADMA)、L-精氨酸与ADMA比值(P<0.05) → 运动后即刻、运动后30 min血清ADMA	[29]
					↓ 第2组反手引体向上的个数(P<0.01)	
健康男性 有抗阻运动习惯 年龄 22.6±3.8 (n=12)	安慰剂 双盲 交叉 随机对照试验	7.4 g AAKG或安慰剂,运动试验前4 h和30 min分2次口服,1周洗脱期	抗阻运动试验,竭尽力引体向上×6组、俯卧撑×3组 运动试验前48~72 h无抗阻运动	↓ 3组正手引体向上的总个数(P<0.05) ↓ 3组正手引体向上、3组反手引体向上、3组俯卧撑的总个数(P<0.05)	未评估	[30]
健康男性 无运动习惯 年龄 25.8±5.7 (n=21)	安慰剂 双盲 随机对照试验	0.2 g/(kg·BW) AKG(n=9)或安慰剂(n=12),口服,5周	4周耐力运动训练 每周训练5次,每次30 min乳酸阈跑台稳态运动、3 min≥95% HRmax跑台运动×3组 4周训练课结束后1周恢复期,恢复期间除必要的身体活动外不进行任何运动训练	→ 第4周和第5周VO <sub>2max</sub> 、通气无氧阈 ↑ 第5周伸膝力量测试指标等长峰值力矩、等速峰值功率(P<0.05)	→ 血糖、胆固醇、甘油三酯、C-反应蛋白	[31]

注:“↑”“↓”“→”表示与安慰剂组的组间比较结果。其中,“↑”表示指标显著增加(P<0.05),“↓”表示指标显著降低(P<0.05),“→”表示无显著性差异(P≥0.05)

3 国内外批准管理情况

α-酮戊二酸又称为2-氧代戊二酸(2-Oxopentanedioic acid),CAS号328-50-7,分子式为C<sub>5</sub>H<sub>6</sub>O<sub>5</sub>,分子量146.1,美国、欧盟、加拿大和我国均将其作为食品添加剂管理<sup>[34-38]</sup>。2-氧代戊二酸作为食品用合成香料已列入《食品安全国家标准 食品添加剂使用标准》(GB 2760)<sup>[34]</sup>。联合国粮食和农业组织和世界卫生组织食品添加剂联合专家委员会评估<sup>[39-40]</sup>,对2-氧代戊二酸的每日允许摄入量“不作

具体规定”。美国食品药品监督管理局<sup>[35]</sup>、欧盟委员会<sup>[36]</sup>、加拿大卫生部<sup>[37]</sup>分别允许其作为调味剂、食用香料、风味增强剂用于食品。除食品添加剂外,欧盟委员会允许α-酮戊二酸钙用于食品补充剂<sup>[42]</sup>。AKG批准管理情况总结见表2。

美国食品药品管理食品安全与应用营养中心分别于2005年和2008年驳回了AAKG<sup>[43]</sup>和辛弗林L-精氨酸-α-酮戊二酸(Synephrine L-arginine alpha-ketoglutarate, SAAKG)<sup>[44]</sup>作为新膳食成分(New dietary

表2 α-酮戊二酸作为食品成分在国内外的批准管理情况

Table 2 Approval status of α-ketoglutarate as a food ingredient in China and abroad

国家/地区	类别	批准物质名称	使用范围和最大使用量	参考文献
中国	食品用合成香料	2-氧代戊二酸	配制成食品用香精用于各类食品(GB 2760—2024表B.1食品类别除外),按生产需要适量使用	[34]
美国	调味剂/辅料	2-Oxopentanedioic acid	无特别说明	[35]
	食用香料	2-Oxoglutaric acid	按GMP使用	[36]
欧盟	食品补充剂原料	Alpha-ketoglutarate calcium	需符合2002/46/EC《关于食品补充剂的成员国相似法案》的规定及成员国实施细则中对钙的剂量上限	[42]
加拿大	风味增强剂	2-Oxoglutaric acid	无特别说明	[37]
澳新	未批准	——	——	[38,41]



ingredient, NDI) 的申请, 驳回理由为申请材料未能证明所申请成分属于 NDI 法定范围、化学结构准确性、建议食用方法与食用量下的安全性。澳大利亚新西兰食品标准局在 2010 年驳回了 OKG<sup>[45]</sup>作为新食品原料用于运动辅助配方食品的申请, 驳回理由为申请材料形式审查未通过, 缺失 OKG 安全性评估、膳食暴露量评估、运动表现测评、食品产业影响分析等关键科学数据。

#### 4 小结及展望

AKG 通过其能量代谢底物与信号调控分子的双重角色, 在能量供给和骨骼肌运动应激适应中发挥重要作用, 具有提高运动表现的应用潜力。现有 RCT 证据表明, 补充 AAKG 有助于提高运动人群上肢肌肉力量、爆发力及无氧功能能力; 补充 AKG 或 AAKG 对运动人群的有氧耐力表现无改善效果; 运动前单次补充 AAKG 降低运动人群急性运动的肌肉耐力表现; 补充 AKG 或 AAKG 对运动人群下肢肌肉力量是否具有改善效果尚不明确。

当前, 除欧盟外, AKG 在我国、美国及加拿大均按照食品添加剂管理。此外, 现有 RCT 研究数量少、样本量小, 故 AKG 作为运动营养食品成分的科学证据尚不充分。未来, 若考虑将 AKG 纳入营养成分管理, 建议优先开展有针对性的单因素研究, 补充口服 AKG 或 AAKG 对肌肉力量、爆发力及无氧功能能力的影响研究, 并探索剂量-效应关系。

#### 参考文献

- [1] 梁栋, 吴博隆, 严翊, 等. 运动营养系列述评(一): 我国运动营养食品标准现状、问题及对策[J]. 中国食品卫生杂志, 2025, 37(3): 278-284.
- LIANG D, WU B L, YAN Y, et al. Series review and commentary on sports nutrition (part 1): current status, issues, and strategies of sports nutrition food standards in China[J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2025, 37(3): 227-283.
- [2] MAILLOUX R J. The emerging importance of the  $\alpha$ -keto acid dehydrogenase complexes in serving as intracellular and intercellular signaling platforms for the regulation of metabolism[J]. Redox Biology, 2024, 72: 103155.
- [3] GOODMAN C, PEELING P, RANCHORDAS M K, et al. A to Z of nutritional supplements: dietary supplements, sports nutrition foods and ergogenic aids for health and performance--Part 21[J]. British Journal of Sports Medicine, 2011, 45(8): 677-9.
- [4] KERKSICK C M, WILBORN C D, ROBERTS M D, et al. ISSN exercise & sports nutrition review update: research & recommendations[J]. Journal of the International Society of Sports Nutrition, 2018, 15(1): 38.
- [5] 朱丹琳, 肖卫华.  $\alpha$ -酮戊二酸的生理功能及其在运动训练中的应用研究进展[J]. 中国运动医学杂志, 2021, 40(12): 1001-1006.
- ZHU D L, XIAO W H. Physiological functions of  $\alpha$ -ketoglutaric acid and research progress in its application to exercise training[J]. Chinese Journal of Sports Medicine, 2021, 40(12): 1001-1006.
- [6] XU M, ZHANG Q, LIU X, et al. Impact of alpha-ketoglutarate on skeletal muscle health and exercise performance: a narrative review[J]. Nutrients, 2024, 16(22): 3968.
- [7] RAGLAND T J, MALIN S K. Exercise increases TCA intermediate concentrations during low-calorie diet independent of insulin resistance among women with obesity[J]. Physiological Reports, 2024, 12(7): e15987.
- [8] YANG Y R, KWON K-S. Potential roles of exercise-induced plasma metabolites linking exercise to health benefits[J]. Frontiers In Physiology, 2020, 11: 602748.
- [9] 李雨含, 王瑗, 袁泉.  $\alpha$ -酮戊二酸在代谢综合征中的研究进展[J]. 四川大学学报(医学版), 2024, 55(3): 783-792.
- LI Y H, WANG Y, YUAN Q. Research progress of alpha-ketoglutarate in metabolic syndrome[J]. Journal of Sichuan University(Medical Sciences), 2024, 55(3): 783-792.
- [10] BOON R, SILVEIRA G G, MOSTOSLAVSKY R. Nuclear metabolism and the regulation of the epigenome[J]. Nature Metabolism, 2020, 2(11): 1190-203.
- [11] ASADI SHAHMIRZADI A, EDGAR D, LIAO C-Y, et al. Alpha-ketoglutarate, an endogenous metabolite, extends lifespan and compresses morbidity in aging mice[J]. Cell Metabolism, 2020, 32(3): 447-456.
- [12] KENNEY W L, MURRAY R. Exercise physiology[M]// Maughan R J. Sports nutrition. West Sussex: John Wiley & Sons, 2014: 20-35.
- [13] YUAN Y, XU P, JIANG Q, et al. Exercise-induced  $\alpha$ -ketoglutaric acid stimulates muscle hypertrophy and fat loss through OXGR1-dependent adrenal activation[J]. The EMBO Journal, 2020, 39(7): e103304.
- [14] AVENELL A, SMITH T O, CURTAIN J P, et al. Nutritional supplementation for hip fracture aftercare in older people[J]. The Cochrane Database of Systematic Reviews, 2016, 11(11): CD001880.
- [15] COUDRAY-LUCAS C, LE BEVER H, CYNOBER L, et al. Ornithine alpha-ketoglutarate improves wound healing in severe burn patients: a prospective randomized double-blind trial versus isonitrogenous controls[J]. Critical Care Medicine, 2000, 28(6): 1772-1776.
- [16] CURRELL K, MOORE D R, PEELING P, et al. A-Z of nutritional supplements: dietary supplements, sports nutrition foods and ergogenic aids for health and performance - part 28[J]. British Journal of Sports Medicine, 2012, 46(1): 75-76.
- [17] BROWN A C, MACRAE H S H, TURNER N S. Tricarboxylic-acid-cycle intermediates and cycle endurance capacity[J]. International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism, 2004, 14(6): 720-729.
- [18] LITTLE J P, FORBES S C, CANDOW D G, et al. Creatine, arginine alpha-ketoglutarate, amino acids, and medium-chain triglycerides and endurance and performance[J]. International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism, 2008, 18

- (5): 493-508.
- [19] GATTERER H, GREILBERGER J, PHILIPPE M, et al. Short-term supplementation with alpha-ketoglutaric acid and 5-hydroxymethylfurfural does not prevent the hypoxia induced decrease of exercise performance despite attenuation of oxidative stress [J]. *International Journal of Sports Medicine*, 2013, 34(1): 1-7.
- [20] MARIACHER C, GATTERER H, GREILBERGER J, et al. Effects of antioxidant supplementation on exercise performance in acute normobaric hypoxia [J]. *International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism*, 2014, 24(2): 227-235.
- [21] JUNG Y P, EARNEST C P, KOOZEHCHEAN M, et al. Effects of ingesting a pre-workout dietary supplement with and without synephrine for 8 weeks on training adaptations in resistance-trained males [J]. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, 2017, 14: 1.
- [22] JUNG Y P, EARNEST C P, KOOZEHCHEAN M, et al. Effects of acute ingestion of a pre-workout dietary supplement with and without p-synephrine on resting energy expenditure, cognitive function and exercise performance [J]. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, 2017, 14: 3.
- [23] GATTERER H, BÖCKSTEINER T, MÜLLER A, et al. 5-hydroxymethylfurfural and alpha-ketoglutaric acid as an ergogenic aid during intensified soccer training: A placebo controlled randomized study [J]. *Journal of Dietary Supplements*, 2020, 17(2): 161-172.
- [24] KACZKA P, KUBICKA K, BATRA A, et al. Effects of co-ingestion of  $\beta$ -hydroxy- $\beta$ -methylbutyrate and l-arginine  $\alpha$ -ketoglutarate on jump performance in young track and field athletes [J]. *Nutrients*, 2021, 13(4): 1-14.
- [25] KÖSSLER F, MAIR L, BURTSCHER M, et al. 5-hydroxymethylfurfural and  $\alpha$ -ketoglutaric acid supplementation increases oxygen saturation during prolonged exercise in normobaric hypoxia [J]. *International Journal for Vitamin and Nutrition Research*, 2021, 91(1-2): 63-68.
- [26] KRUSZEWSKI M, MERCHELSKI M, KRUSZEWSKI A, et al. Effects of multi-ingredient pre-workout supplement and caffeine on bench press performance: A single-blind cross-over study [J]. *Nutrients*, 2022, 14(9): 1-13.
- [27] BRUCE M, CONSTANTIN-TEODOSIU D, GREENHAFF P L, et al. Glutamine supplementation promotes anaplerosis but not oxidative energy delivery in human skeletal muscle [J]. *American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism*, 2001, 280(4): E669-E675.
- [28] CAMPBELL B, ROBERTS M, KERKSICK C, et al. Pharmacokinetics, safety, and effects on exercise performance of L-arginine alpha-ketoglutarate in trained adult men [J]. *Nutrition (Burbank, Los Angeles County, Calif)*, 2006, 22(9): 872-81.
- [29] WILLOUGHBY D S, BOUCHER T, REID J, et al. Effects of 7 days of arginine-alpha-ketoglutarate supplementation on blood flow, plasma L-arginine, nitric oxide metabolites, and asymmetric dimethyl arginine after resistance exercise [J]. *International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism*, 2011, 21(4): 291-299.
- [30] GREER B K, JONES B T. Acute arginine supplementation fails to improve muscle endurance or affect blood pressure responses to resistance training [J]. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 2011, 25(7): 1789-1794.
- [31] LIU Y, LANGE R, LANGANKY J, et al. Improved training tolerance by supplementation with  $\alpha$ -Keto acids in untrained young adults: a randomized, double blind, placebo-controlled trial [J]. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, 2012, 9(1): 37.
- [32] 国家体育总局. 国家体育总局关于发布体育行业标准《运动员营养品功效评价程序和方法》的公告 [EB/OL]. (2014-08-13) [2025-05-30]. <https://www.sport.gov.cn/n4/n23362064/n23362030/n23708992/n23709046/c23709933/content.html>. General Administration of Sport of China. Announcement of the general administration of sport of china on issuing the sports industry standard *procedures and methods of evaluation on efficacy of sports nutrition supplements* [EB/OL]. (2014-08-13) [2025-05-30]. <https://www.sport.gov.cn/n4/n23362064/n23362030/n23708992/n23709046/c23709933/content.html>.
- [33] 国家体育总局体育器材装备中心. 关于对《运动营养品功效评价程序和方法》行业标准公开征求意见的通知 [EB/OL]. (2021-06-22) [2025-05-30]. <https://www.sport.gov.cn/zbzx/n5639/c23469196/content.html>. Equipment and Facilities Center of the General Administration of Sport of China. Notice of call for comments on the sports industry standard *procedures and methods of evaluation on efficacy of sports nutrition supplements* [EB/OL]. (2021-06-22) [2025-05-30]. <https://www.sport.gov.cn/zbzx/n5639/c23469196/content.html>.
- [34] 中华人民共和国国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. 食品安全国家标准 食品添加剂使用标准: GB 2760—2024[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024. National Health Commission of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation National Standardization Administration. National food safety standard standards for use of food additives: GB 2760—2024[S]. Beijing: China Standards Press, 2024.
- [35] U.S. Food and Drug Administration. Substances Added to Food (formerly EAFUS) [DB/OL]. (2024-04-17) [2025-05-30]. <https://www.cfsanappsexternal.fda.gov/scripts/fdcc/index.cfm?set=FoodSubstances&id=OXOPENTANEDIOICACID>.
- [36] European Union. Commission Implementing Regulation (EU) No 872/2012 of 1 October 2012 adopting the list of flavouring substances provided for by Regulation (EC) No 2232/96 of the European Parliament and of the Council, introducing it in Annex I to Regulation (EC) No 1334/2008 of the European Parliament and of the Council and repealing Commission Regulation (EC) No 1565/2000 and Commission Decision 1999/217/EC [EB/OL]. [2025-05-30]. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32012R0872#d1e457-1-1>.
- [37] Government of Canada. Natural Health Products Ingredients Database Chemical Substance - 2-Oxoglutaric acid [DB/OL]. (2024-06-06) [2025-05-30]. <https://webprod.hc-sc.gc.ca/nhp-id-bdipn/ingredReq?id=1362>.
- [38] Food Standards Australia New Zealand. Additives [DB/OL]. (2019-06-20) [2025-05-30]. <https://www.foodstandards.gov.au/>

- consumer/additives/additiveoverview.
- [39] Food and Agriculture Organization of the United Nations. Online Edition: "Specifications for Flavourings" [DB/OL]. [2025-05-30]. <https://www.fao.org/food/food-safety-quality/scientific-advice/jecfa/jecfa-flav/details/en/c/455/>.
- [40] World Health Organization. Evaluations of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives (JECFA) [DB/OL]. [2025-05-30]. <https://apps.who.int/food-additives-contaminants-jecfa-database/Home/Chemical/3415>.
- [41] Food Standards Australia New Zealand. Novel food - Record of views formed in response to inquiries [DB/OL]. (2023-04-04) [2025-05-30]. <https://www.foodstandards.gov.au/business/novel/novelrecs>.
- [42] European Commission. Food and Feed Information Portal Database [DB/OL]. (2023-10-18) [2025-05-30]. <https://ec.europa.eu/food/food-feed-portal/screen/novel-food-catalogue/search>.
- [43] U.S. Food and Drug Administration. NDI 259 - L-Arginine alpha ketoglutarate (2:1) from MTC Industries, Inc [EB/OL]. (2017-01-13) [2025-05-30]. <https://www.regulations.gov/document/FDA-2005-S-0518-0013>.
- [44] U.S. Food and Drug Administration. NDI 545 - Synephrine L-Arginine Alpha-Ketoglutarate from SciAn Laboratories, LLC [EB/OL]. (2017-05-15) [2025-05-30]. <https://www.regulations.gov/document/FDA-2008-S-0664-0175>.
- [45] Food Standards Australia New Zealand. Application A1053 -Ornithine alpha-Ketoglutarate in Sports Foods [EB/OL]. (2023-12-06) [2025-05-30]. <https://www.foodstandards.gov.au/food-standards-code/applications/applicationa1053orni4913>.

[上接第557页]

**著作或编著:**[序号] 主要责任者. 文献题名[文献类型标志]. 其他责任者. 版本项(版次为第一版的不用标明). 出版地:出版者,出版年:起页-止页.

举例 图书:[3] 吴阶平,裘法祖,黄家驷. 外科学[M]. 4版. 北京:人民卫生出版社, 1979: 82-93.

译著:[4] ZIEGLER E E, FILER L J. 现代营养学[M]. 闻之梅,陈君石,译. 7版. 北京:人民卫生出版社, 1998: 126-129.

**著作中的析出文献:**[序号] 析出文献主要责任者. 析出文献题名[文献类型标志]//原文献主要责任者. 原文献题名. 版本项. 出版地:出版者,出版年:析出文献起页-止页.

举例 [5] 白书农. 植物开花研究[M] // 李承森. 植物科学进展. 北京:高等教育出版社, 1998: 146-163.

**会议文献中的析出文献:**[序号]析出文献主要责任者. 析出文献题名[文献类型标志/文献载体标志]//会议文献主要责任者. 会议文献题名:其他题名信息. 出版地:出版者,出版年:析出文献起页-止页[引用日期]获取和访问路径.

举例 [6] 董家祥,关仲英,王兆奎,等. 重症肝炎的综合基础治疗[C]//张定凤. 第三届全国病毒性肝炎专题学术会议论文汇编,南宁,1984. 北京:人民卫生出版社, 1985: 203-212.

**科技报告:**著录格式同著作或编著.

举例 [7] World Health Organization. Factors regulating the immune response: report of WHO Scientific Group [R]. Geneva:WHO,1970:1-74.

**法令、条例:**[序号]主要责任者. 题名[文献类型标志]. 公布日期.

举例 [8] 中华人民共和国全国人民代表大会. 中华人民共和国著作权法[A]. 2012-03-31.

**标准:**[序号]主要责任者. 标准名称:标准编号[文献类型标志]. 出版地:出版者,出版年.

举例 [9] 全国文献工作标准化技术委员会第七分委员会. 科学技术期刊编排格式:GB / T 3179—1992 [S]. 北京:中国标准出版社,1992.

**电子文献:**[序号]主要责任者. 题名[文献类型标志 / 文献载体标志]. 出版地:出版者,出版年(更新或修改日期) [引用日期]. 获取和访问路径.

举例 [10] 肖钰. 出版业信息迈入快道 [EB/OL]. (2001-12-19) [2002-04-15]. <http://www.creader.com/news/20011219/200112190019.html>.

**专利文献:**[序号]专利申请者. 题名:专利国别,专利号[P]. 公告或公开日期.

### 3 声明

本刊已进入中国所有主要期刊数据库,本刊所付稿酬已包含这些数据库的稿酬。编辑部对来稿将作文字性修改,若涉及内容修改会与作者商榷。编辑部收到稿件后,于3个月内通知处理意见。投稿6个月如未收到修稿或录用通知,作者可自行处理稿件,所收稿件纸质版概不退还。来稿一经采用,即收取版面费,按规定向作者支付稿酬,并赠送杂志。

### 4 投稿

投稿请登录《中国食品卫生杂志》网站 <http://www.zgspws.com>,并同时邮寄单位介绍信和稿件纸版1份(需第一作者、通信作者和副高以上作者签名)。来稿中应有清楚完整的作者通信地址、联系电话和E-mail地址。编辑部地址:北京市朝阳区广渠路37号院2号楼802室《中国食品卫生杂志》编辑部 邮政编码:100021 电话:010-52165596 E-mail:spws462@163.com