

男子赛艇运动员血浆代谢组学特征研究

姚安¹, 刘勇强², 林家仕¹

(1. 集美大学体育学院, 福建 厦门 361021; 2. 哈尔滨工业大学体育部, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:为探究男子赛艇运动员的血浆代谢组学特征,采用高效化学同位素标记 LC-MS 技术对 12 名男子赛艇运动员测功仪 2 000m 全力划前后的血浆差异代谢物和代谢通路进行分析。应用三级代谢物鉴定方法对代谢物进行结构鉴定,结合主成分分析(PCA)、偏最小二乘法判别分析(PLS-DA)和火山图分析等筛选出差异代谢物,并将差异代谢物进行可视化聚类分析、KEGG 注释与代谢通路分析。结果显示:男子赛艇运动员测功仪 2 000m 运动后检测到 423 种可信度较高的代谢物,与运动前相比共筛选出 26 种差异代谢物发生了显著变化,其中 17 种显著升高(VIP > 1, FC > 1.5, $P < 0.05$),9 种显著降低(VIP > 1, FC < 0.67, $P < 0.05$)。差异代谢物主要富集于牛磺酸和次牛磺酸代谢、泛酸盐和辅酶 A 生物合成、嘌呤代谢、嘧啶代谢和柠檬酸循环等生物代谢通路,其中,影响最大的是牛磺酸和次牛磺酸代谢。结论:男子赛艇运动员测功仪 2 000m 运动前后血浆代谢组学特征发生了显著变化,抗坏血酸、半胱氨酸和 3-亚砷-L-丙氨酸等多种氧化应激产物显著影响着赛艇运动员的运动表现,研究建议可将抗坏血酸作为赛艇运动员比赛或训练前后的重要营养补给,以提高运动能力和延缓疲劳造成的应激反应。

关键词:赛艇运动;测功仪;血浆;代谢组学

中图分类号:G 804.5

文献标识码:A

文章编号:1007-7413(2024)02-0053-09

Study on the Characteristics of Plasma Metabonomics of Male Rowers

YAO an¹, LIU Yongqiang², LIN Jiashi¹

(1. College of Physical Education, Jimei University, Xiamen 361021, China;

2. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Objective: To explore the characteristics of plasma metabolomics of male rowers, the plasma differential metabolites, and metabolic pathways of 12 male rowers before and after 2 000m full power rowing were analyzed by high-performance chemical isotope labeling LC-MS technology. Methods: The three-level metabolite identification method was used to identify the structure of metabolites, and the differential metabolites were selected by combining principal component analysis (PCA), partial least squares discriminant analysis (PLS-DA), and volcanic diagram analysis, and the differential metabolites were analyzed by visual cluster analysis, KEGG annotation, and metabolic pathway analysis. Results: After the 2 000m exercise, 423 metabolites with high reliability were detected by the ergometer of male rowers. Compared with before exercise, 26 different metabolites were screened out, of which 17 were significantly increased (VIP > 1, FC > 1.5, $P < 0.05$) and 9 were significantly decreased (VIP > 1, FC < 0.67, $P < 0.05$). The differential metabolites are mainly concentrated in taurine and hypotaurine metabolism, pantothenate and coenzyme A biosynthesis, purine metabolism, pyrimidine metabolism, and citric acid cycle, among which taurine and hypotaurine metabolism are the most influential. Conclusion: The characteristics of plasma metabolomics of male rowers have changed significantly before and after the 2 000m exercise. Many oxidative stress products such as ascorbic acid, Cysteamine, and 3 Sulfino L alanine have significantly affected rowers' sports performance. It is suggested that ascorbic acid can be used as an important nutritional supplement for rowers before and after competition or training to improve their sports ability and delay the stress reaction caused by fatigue.

Key words: rowing; dynamometer; plasma; metabonomics

收稿日期:2023-02-12

作者简介:姚安(1995—),男,福建厦门人,硕士。研究方向:运动人体科学。

林家仕(1980—),男,福建连江人,教授,博士。研究方向:体力活动与运动健康风险评估。(通信作者)

赛艇是一项力量-耐力主导的周期性有氧运动项目,国际大赛上的标准比赛距离通常为 2 000m,全程大约需要 5.5 ~ 8min^[1]。在赛艇运动的科学研究中,受艇型、水流、温度等诸多外部因素的影响,模拟水上划船的固定器械赛艇测功仪(Concept 2 美国)应运而生^[2]。赛艇测功仪可以用来评估赛艇运动员的运动表现、代谢能力和生理特性,如最大摄氧量(VO_{2max})、血乳酸水平以及与成绩密切相关的各种因素^[3],因此被广泛应用于赛艇运动的训练监控和比赛。

运动对人体代谢产生了深远影响,认识和理解运动引起的大量代谢产物和代谢途径的变化至关重要且具有挑战^[4]。不论是一次运动还是长期运动,都会引起机体物质和能量代谢的变化或者适应,且必然会在代谢物上有所体现^[5]。代谢物的检测、分析和鉴定是体现生理变化与表型相互关系的核心^[6]。代谢组学是一项旨在研究生理生化过程及其代谢产物的组学技术,它可以对细胞内外错综复杂的生化途径和最终产物进行研究^[7]。随着代谢组学技术的进步,竞技体育领域应用代谢组学的研究也有了许多新的尝试和突破。高欢^[8]等人应用代谢组学技术研究青少年赛艇运动员的代谢特征,在 4 周有氧训练中发现,支链氨基酸、谷氨酸、甘氨酸、丙氨酸等生糖氨基酸在青少年赛艇运动员训练的过程中有发挥了重要作用,还遴选出了血浆腺苷、肌苷等潜在生物标志物,这给青少年赛艇运动训练提供了新的视角和方向。鉴于此,本研究尝试采用高效化学同位素标记 LC-MS 代谢组学技术对男子赛艇运动员测功仪 2 000m 运动前后的血浆差异代谢物和代谢通路进行研究,目的是揭示男子赛艇运动员的血浆代谢组学特征,从而提高对赛艇运动项目的进一步认识,对达到最大化运动效果、促进运动员健康等提供科学有效的新思路。

1 研究对象与方法

1.1 实验对象

本研究选取了 12 名男子赛艇运动员作为研究对象,运动等级均为国家一级,年龄 18.58 ± 1.88 岁,身高 190 ± 5.38 cm,体重 90.92 ± 13.70 kg,训练年限为 4.5 ± 1.73 年。受试者无烟酒习惯、无心血管疾病和长期运动损伤,测试前 1 个月内无伤病。他们均签署了知情同意书,并获得了集美大学校科技伦理委员会

的批准和监督(编号:JMU202204030)。

1.2 主要仪器和试剂

赛艇测功仪(Concept 2 美国)、心率带(Polar Accurex Plus, Polar Elector Oy, 芬兰)、冷冻高速离心机(Centrifuge 5424R 德国)、-80℃超低温冰箱(美菱中国)、1290 超高效液相色谱(Agilent 美国)、6546 四级杆-飞行时间质谱仪(Agilent 美国)、甲酸和甲醇(Fisher Scientific 德国)、phase C18 column 色谱柱(Agilent 美国)等。

1.3 运动干预及样本采集

调整好赛艇测功仪的阻力和坐距,所有运动员以 16 桨/min 的负荷进行 10min 准备活动后静坐 5min 进行 2 000m 测功仪测试。在运动前、后使用含有抗凝剂的紫色试管采集肘静脉血样,容量不少于 2ml。采样完成后需立即将血液样本经 3 000rpm 离心 10min,随后提取上层血浆至 EP 管内,用干冰做临时保存,待实验结束后放置 -80℃冰箱储存,以用作代谢组学分析。运动员在测试前 24h 内不做剧烈运动,保持正常作息且身体机能状态良好。测试过程中,教练员全程跟随,给予口头鼓励和运动监督,并使用 Polar 心率带对运动员心率进行监测。运动员在测试期间正常饮食饮水,不限制热量供应,但不允许服用任何营养补剂或药物。

1.4 代谢组学分析

本实验使用高效化学同位素标记-液质联用(High Performance Chemical Isotope Labeling LC-MS, HP-CIL LC-MS)技术对血浆样本进行分析,样品制备使用丹磺酰标记试剂盒。

1.4.1 样品前处理

(1) 样本分装

所有样品解冻并涡旋后,取 30 μ L 血浆至对应的 1.5mL 离心管中,分为 3 个部分,以供一通道分析(30 μ L/通道)、备份样本和混合样本制备。对混合样本的制备,从每个样本中吸取 40 μ L 血浆并合并成一个样本,并标记以作为参考样本。

(2) 蛋白沉淀

在含有 30 μ L 血浆的离心管中加入 90 μ L 预冷的质谱级甲醇,充分涡旋和低速离心后,置于 -20℃冰箱静置 60min,然后对样品进行 4℃恒温高速离心(12 000rpm, 10min)。完成后提取 90 μ L 的上清液至离心管,并使用氮气吹干。

(3) 胺类/酚类代谢组的标记

每个样本加入 25 μ L 质谱级水复溶样本,严格按

照标准操作流程及试剂盒要求进行样品标记。首先加入 12.5 μ L 的缓冲液试剂 A,37.5 μ L 的¹²C 标记试剂 B.12(用于单独样本与混合样本的标记)或¹³C 标记试剂 B.13(仅用于混合样本标记),在涡旋混匀后置于 40℃ 条件下孵育 45min,完成后加入 7.5 μ L 试剂 C,将过量的标记试剂进行淬灭,并将混合溶液在 40℃ 条件下孵育 10min。最后,加入 30 μ L pH 调节试剂 D。

(4) 样品混合

使用 LC-UV 对标记后的胺类/酚类次级代谢组进行定量,根据定量结果,将等量的¹³C 标记的混合样品加入到¹²C 标记的单独样品中以进行液质分析。在液质分析前,同时准备质控样本,即将¹³C 标记的混合样品和¹²C 标记的混合样品等体积充分混匀后作为质控样本。所有样本制备完成后进行液质分析。

1.4.2 液质分离

如表 1 所示,液质分离的条件严格按照标准操作流程(Rapid LC-MS Analysis for HP-CIL Metabolomics Platform)进行。同时,每 10 个样本进行一次质控样本与保留时间校准样品的分析,以监测仪器运行稳定性。

表 1 UHPLC-Q-TOF/MS 液质分离条件

名称	联用条件
色谱质谱仪器	Agilent 1290 LC linked to Agilent 6546 Q-TOF Mass Spectrometer (安捷伦 1290 超高效液相色谱-6546 四级杆-飞行时间质谱仪)
色谱柱	Agilent eclipse plus reversed-phase C18 column (150x2.1mm, 1.8 μ m particle size)
流动相 A	0.1% (v/v) 甲酸-水
流动相 B	0.1% (v/v) 甲酸-乙腈
洗脱梯度	$t = 0\text{min}$, 25% MPB; $t = 10\text{min}$, 99% MPB; $t = 13\text{min}$, 99% MPB; $t = 15\text{min}$, 99% MPB; $t = 15.1\text{min}$, 25% MPB; $t = 18\text{min}$, 25% MPB
流速	400 μ L/min.
柱温	40℃
扫描范围	m/z 220 ~ 1 000

1.4.3 数据清理

将 30 个数据样本分成三组分别进行标记,其中

12 个标记为 A 组(运动前),12 个标记为 B 组(运动后),6 个质控样本标记为 QC 组(质量控制)。其中,只有在至少一个组的 80% 的样本中均出现的代谢物得以保留,以去除不稳定信息。经过滤后,每组数据按照总有用信号比进行归一化处理。

1.5 统计与分析

应用三层级代谢物鉴定方法对检测到的代谢物进行结构鉴定,通过 IsoMS Pro 1.2.15 软件进行主成分分析(PCA)和偏最小二乘法分析(PLS-DA),以区分各组间代谢轮廓的总体差异。采用火山图分析及 VIP 值遴选出差异代谢物,并使用 MetaboAnalyst 5.0 代谢组学分析平台对差异代谢物进行聚类热图分析、KEGG 注释和代谢通路分析。结合 NovaMT 代谢组学数据库与 HMDB 在线数据库等匹配得到的差异代谢物,搜索特定代谢物的 m/z 峰的精确分子质量数据来注释潜在生物标志物,并评估它们的生物学作用。

2 研究结果

2.1 代谢物鉴定结果

应用三层级代谢物鉴定方法对检测到的血浆代谢物进行结构鉴定。如图 1 所示,根据精确分子量和保留时间,层级 1 匹配衍生化标准品数据库(CIL Library),层级 2 关联代谢物数据库(LI Library),层级 3 匹配 My Compound ID 数据库(包括 0 级、1 级和 2 级反应数据库)。在检测到 2 010 个特征代谢物峰里面,有 1 837 个峰(91.4%)可以被准确鉴定或推定匹配。其中,423 个代谢物通过可信度较高(通过层级 1 和层级 2 鉴定)的方法鉴定或推定到,可以用来做进一步的分析(如代谢通路分析)。

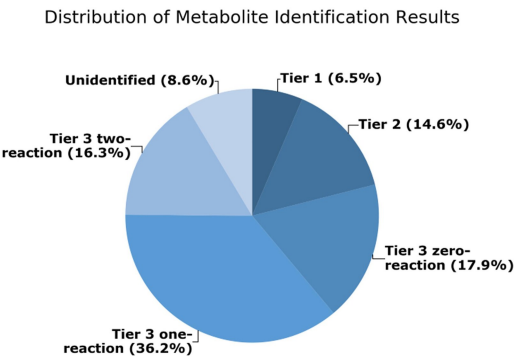


图 1 三层级代谢物鉴定分布图

2.2 多元统计分析结果

采用无监督主成分分析方法 (PCA) 对所有数据进行分析,如图 2 所示,A(赛前安静值)、B(2 000m 运动后即刻)之间存在差异,但并未显著分离。经过滤,每组数据按总有用信号比进行归一化处理,所有样品均处于 95% 的置信区间。

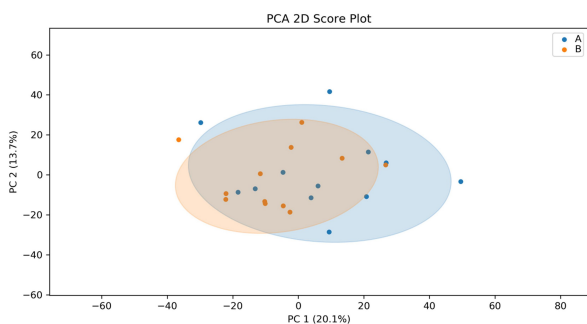


图 2 主成分分析图

如图 4、图 5 所示,对 PLS-DA 分析模型进行交叉验证和置换检验,以检验模型对准确性和拟合情况。交叉验证(图 4)的结果为 $R^2 = 0.964$, $Q^2 = 0.793$,所有值均在稳定范围内,说明所构建的模型良好,未出

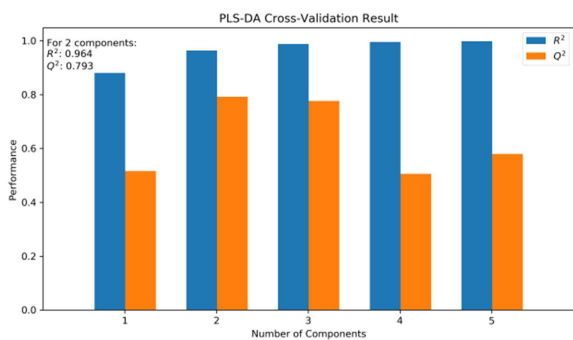


图 4 交叉验证图

2.3 火山图分析结果

通过差异倍数(FC 值)和 P 值绘制火山图, P 值来自 paired t-test,FC 值通过计算 B 组与 A 组的平均值比值得到。如图 6 所示,当 $FC > 1.5$ 或 < 0.67 , $P < 0.05$ 作为差异代谢物标准时,结果显示共有 84 个代谢物满足 $FC > 1.5$ 和 $P < 0.05$,64 个代谢物满足 $FC < 0.67$ 和 $P < 0.05$ 。^[9] 其中,有 8 个差异代谢物通过层级 1 的数据库鉴定,18 个差异代谢物通过层级 2 的数据库鉴定,113 个差异代谢物通过层级 3 的

如图 3 所示,A、B 样本在空间上明显分离,表明不同分段之间差异代谢物含量发生了显著变化。采用有监督偏最小二乘判别分析(PLS-DA)进一步检查代谢差异,可以有效的对组间观察值进行区分,并且能够找到导致组间区别的影响变量。^[9]

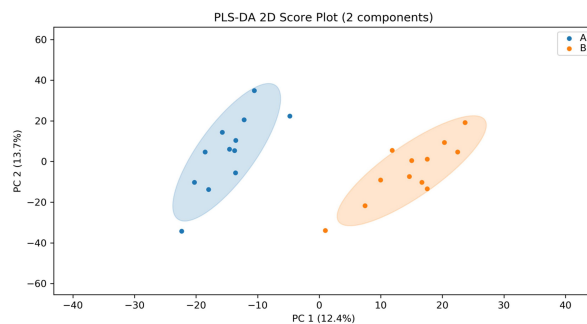


图 3 偏最小二乘法判别分析图

现过度拟合,且具有很高的准确性和预测能力。置换检验(图 5)的结果 $P < 0.01$,表明获得对模型可靠,可以提取潜在变量的 VIP 值,进行差异代谢物筛选。

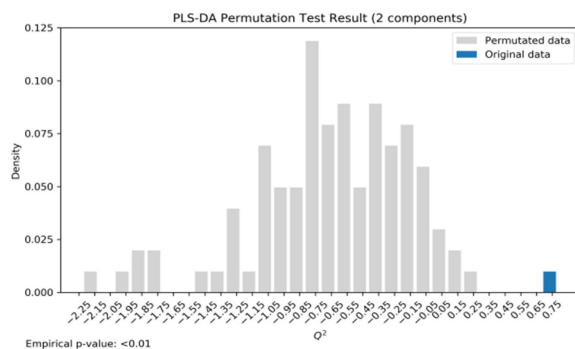


图 5 置换检验图

MCID 数据库推测鉴定。由于层级 3 所鉴定的代谢物是通过代谢反应生成的预测代谢物,所以不纳入本研究范畴。如表 2 所示,在男子赛艇测功仪 2 000m 运动前后共筛选出 26 种显著变化的差异代谢物,其中 17 种显著上升($VIP > 1$, $FC > 1.5$, $P < 0.05$),9 种显著下降($VIP > 1$, $FC < 0.67$, $P < 0.05$)。

2.4 热图分析

如图 7 所示,对最终筛选的 26 种差异代谢物进行层次聚类热图分析,将相同变化特征的差异代谢物

归为一类,可以直观的看出运动前后差异代谢物的变化特征^[9]。

2.5 代谢通路分析结果

以 Global Test 作为富集分析方法, Relative-betweenness Centrality 作为拓扑分析方法,将显著变化的差异代谢物进行 KEGG 注释,并导入 MetaboAnalyst

5.0 进行代谢通路分析。如图 8 所示,男子赛艇测功仪 2 000m 运动前后的差异代谢物主要富集于牛磺酸和次牛磺酸代谢、泛酸盐和辅酶 A 生物合成、嘌呤代谢、嘧啶代谢和柠檬酸循环等生物代谢通路。其中,影响值和 *P* 值最高的是牛磺酸和次牛磺酸代谢,参与该代谢通路的代谢物有 3-亚砷-L-丙氨酸和半胱胺。

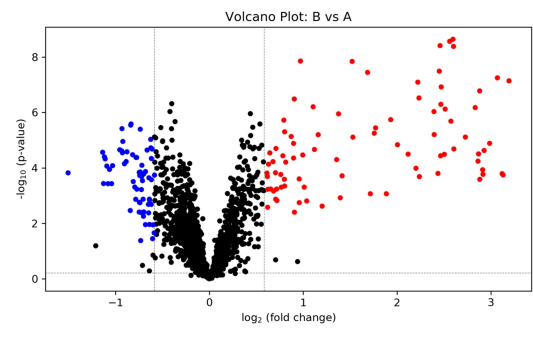


图 6 差异代谢物火山图

注:log₂(FoldChange) 表示代谢物在不同分组中的表达倍数变化, -log₁₀(p-value) 表示差异显著性水平。每个圆点代表一种代谢物

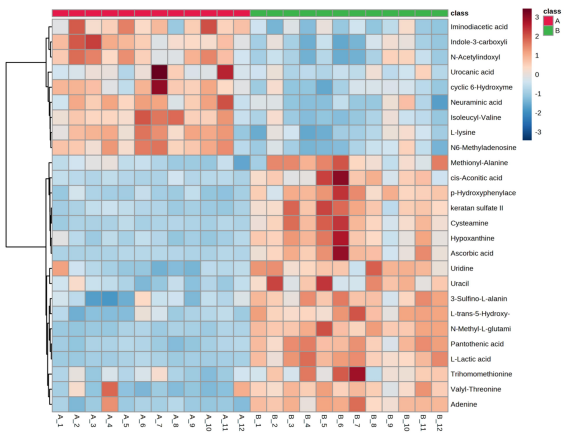


图 7 层次聚类热图分析

注:横坐标为不同组别对应的受试者,纵坐标为差异代谢物名称,不同颜色的小方块代表差异代谢物在不同组别的表达量

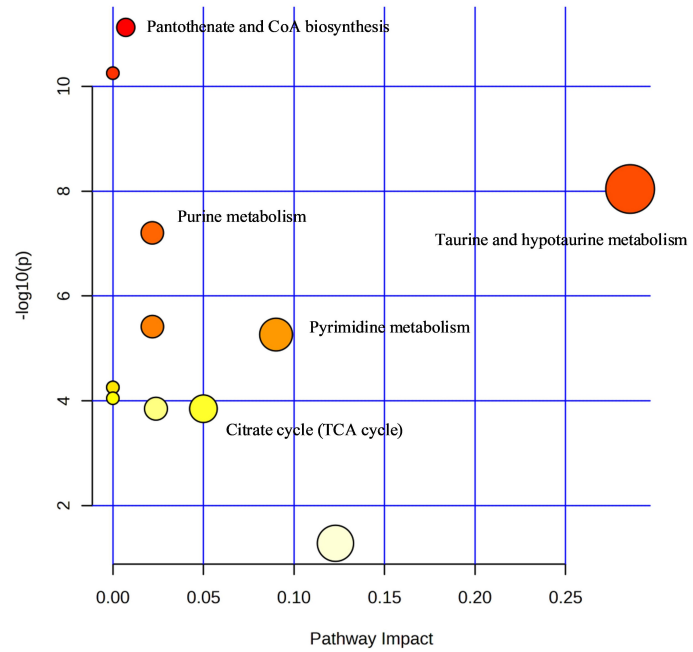


图 8 差异代谢物富集通路特征图

注:图中气泡代表代谢通路,气泡所在横坐标和气泡大小表示该通路在拓扑分析中的影响程度,气泡越大影响越大,气泡所在纵坐标和气泡颜色表示富集分析的 *P* 值,颜色越深 *P* 值越小,富集程度越显著

表 2 差异代谢物一览表

代谢物名称	峰位/ppm	保留时间 /s	FC 值	分子式	VIP 值	趋势
N-甲基-L-谷氨酸(N-Methyl-L-glutamic acid)	0.54	300.00	5.50	C ₆ H ₁₁ NO ₄	2.70	↑
L-乳酸(L-Lactic acid)	1.54	294.2	8.39	C ₃ H ₆ O ₃	2.64	↑
泛酸(Pantothenic acid)	0.53	225.60	2.87	C ₉ H ₁₇ NO ₅	2.62	↑
对羟基苯乙酰甘氨酸(p-Hydroxyphenylacetyl-glycine)	5.75	325.20	3.41	C ₁₀ H ₁₁ NO ₄	2.47	↑
L-反式-5-羟基-2-哌啶羧酸 (L-trans-5-Hydroxy-2-piperidinecarboxylic acid)	0.05	326.60	1.96	C ₆ H ₁₁ NO ₃	2.45	↑
半胱胺(Cysteamine)	9.62	574.8	6.09	C ₂ H ₇ NS	2.34	↑
硫酸角质素 II,降解产物 1 (keratan sulfate II, degradation product 1)	9.99	572.90	2.89	C ₇ H ₆ O ₃	2.34	↑
腺嘌呤(Adenine)	6.93	369.70	2.67	C ₅ H ₅ N ₅	2.32	↑
3-亚砷-L-丙氨酸(3-Sulfin-L-alanine)	0.38	81.70	2.23	C ₃ H ₇ NO ₄ S	2.25	↑
抗坏血酸(Ascorbic acid)	2.10	330.80	7.27	C ₆ H ₈ O ₆	2.25	↑
次黄嘌呤(Hypoxanthine)	0.29	253.40	2.56	C ₅ H ₄ N ₄ O	2.24	↑
N6 甲基腺苷(N6-Methyladenosine)	2.99	136.70	0.57	C ₁₁ H ₁₅ N ₅ O ₄	2.24	↓
异亮氨酸-缬氨酸(Isoleucyl-Valine)	1.08	263.30	0.35	C ₁₁ H ₂₂ N ₂ O ₃	2.22	↓
尿苷(Uridine)	0.04	228.70	1.86	C ₉ H ₁₂ N ₂ O ₆	2.19	↑
N-乙酰吲哚(N-Acetylindoxyl)	0.41	426.50	0.65	C ₁₀ H ₁₁ NO	2.12	↓
吲哚-3-羧酸(Indole-3-carboxylic acid)	0.67	425.40	0.62	C ₉ H ₇ NO ₂	2.11	↓
L-赖氨酸(L-lysine)	0.46	126.90	0.61	C ₆ H ₁₄ N ₂ O ₂	2.07	↓
尿嘧啶(Uracil)	0.34	288.10	1.60	C ₄ H ₄ N ₂ O ₂	2.05	↑
环 6-羟基褪黑激素(cyclic 6-Hydroxymelatonin)	0.64	371.10	0.65	C ₁₃ H ₁₄ N ₂ O ₃	2.00	↓
顺乌头酸(cis-Aconitic acid)	7.15	214.6	3.70	C ₆ H ₆ O ₆	1.99	↑
亚氨基二乙酸(Iminodiacetic acid)	0.35	195.20	0.60	C ₄ H ₇ NO ₄	1.99	↓
神经酰胺(Neuraminic acid)	1.17	112.90	0.64	C ₉ H ₁₇ NO ₈	1.99	↓
甲氧基-丙氨酸(Methionyl-Alanine)	6.52	245.60	1.57	C ₈ H ₁₆ N ₂ O ₃ S	1.95	↑
缬氨酸-苏氨酸(Valyl-Threonine)	1.28	189.80	1.87	C ₉ H ₁₈ N ₂ O ₄	1.79	↑
三氢蛋氨酸(Trihomomethionine)	0.51	375.10	1.63	C ₈ H ₁₇ NO ₂ S	1.75	↑
尿刊酸(Urocanic acid)	0.43	325.70	0.60	C ₆ H ₆ N ₂ O ₂	1.14	↓

注:FC 值为差异倍数,差异代谢物 FC >1.5 或 <0.67, $P < 0.01$; ↑ 表示代谢物浓度升高, ↓ 表示代谢物浓度降低

如图 9 所示,a、b、c 分别代表牛磺酸和次牛磺酸代谢、嘧啶代谢、泛酸盐和辅酶 A 生物合成,这三条代谢通路的影响值或 P 值较高。其中,C00606 和 C01678 是 3-亚砷-L-丙氨酸和半胱胺,在牛磺酸和次

牛磺酸代谢过程中作为中间产物;C00299 和 C00106 是尿苷和尿嘧啶,在嘧啶代谢过程中作为中间产物;C00864 是泛酸,它和尿嘧啶在泛酸盐和辅酶 A 生物合成过程中作为中间产物。

应激、信号通路调节和突触传递中发挥多种作用^[22]。本研究还有多种与 GLU 相关的差异代谢物,如尿刊酸、神经氨酸和环 6-羟基褪黑激素,与运动前相比运动后显著减少。尿刊酸是组氨酸分解转化为 GLU 的中间产物,神经氨酸存在于人体所有的细胞中,对神经系统的轴索、树突、髓鞘的合成和功能维护有重要作用^[23],而褪黑激素也可以通过犬尿氨酸途径产生神经效应,产生影响谷氨酸神经传递的化合物^[24]。

3.2 有氧代谢对男子赛艇运动员血浆代谢的影响

血浆中的柠檬酸(CA)和顺乌头酸是线粒体代谢中与运动变化联系最紧密的代谢物,本研究中顺式乌头酸与运动前相比运动后升高了 3.70 倍,并且参与到柠檬酸代谢(TCA 循环)。顺乌头酸属于一类有机化合物,被称为三羧酸及其衍生物。在 TCA 循环过程中,顺乌头酸作为 CA 的催化剂,将 CA 催化为异柠檬酸进而完成 TCA 循环过程^[25]。TCA 循环也被称作三羧酸循环,是能量代谢的关键环节,在此过程中,葡萄糖通过糖酵解生成丙酮酸并进一步转化为草酰乙酸进入循环,该循环产生的活性氢最终经过氧化磷酸化产生大量 ATP,是有氧代谢最主要的供能方式^[26],还能在许多物质的生物合成提供中间体^[27]。而本研究中对羟基苯乙酰甘氨酸也是有氧代谢指标之一,它与运动前相比运动后升高了 3.41 倍。研究表明,大负荷运动后甘氨酸含量呈上升趋势,与本研究一致,甘氨酸浓度上升可能是机体脂肪酸代谢供能比例上升的标志^[28]。L-赖氨酸也可以作为脂肪酸代谢的标志物,它是人类必需氨基酸之一,在肝脏中进行分解代谢,主要通过肝线粒体中的糖苷途径分解,导致乙酰 CoA 的产生^[29],也可以通过产生肉碱帮助脂肪酸代谢,随后肉碱将脂肪酸穿梭到线粒体进行 β 氧化^[30]。

3.3 嘌呤代谢、嘧啶代谢对男子赛艇运动员血浆代谢的影响

本研究还发现了腺嘌呤、次黄嘌呤、尿嘧啶、尿苷等嘌呤代谢和嘧啶代谢产物在赛艇运动后显著增加。嘌呤代谢产物被认为是判断运动效果的主要指标,ATP 需求的增加会导致嘌呤的增加^[31],特别是次黄嘌呤这一通路的激活需要高强度的运动参与^[32]。Shi 等^[33]研究发现,力竭运动后次黄嘌呤会显著增加。腺嘌呤是脱氧核糖核酸(DNA)和核糖核酸(RNA)中重要的嘌呤碱,这些含氮碱涉及许多生物过程,如能量传递、细胞信号传导等^[34]。腺嘌呤的代谢过程是运动刺激在低氧环境下的作用,与运动诱导

血液扩张、ATP 合成和葡萄糖摄取等变化有关^[35]。运动中腺嘌呤及其核苷产物腺苷的含量改变是核苷酸降解的表现。尿苷是 RNA 和 DNA 合成所必需的嘧啶核苷酸,在糖、脂肪、蛋白质等物质代谢过程中发挥作用。它可以通过多种间接反应影响脂肪代谢^[26]。尿嘧啶是 RNA 中常见的天然嘧啶,其碱基与腺嘌呤配对,在 DNA 中被胸腺嘧啶取代。在人体内,尿苷能够生物合成尿嘧啶,这是由尿苷磷酸化酶 2 介导的,尿嘧啶和相关的类似物还可以增加某些合成信使 RNA 中的蛋白质生成,减少免疫刺激^[36]。尿嘧啶和泛酸是泛酸盐和辅酶 A 生物合成的中间产物,泛酸被称作维生素 B5,也是脂肪酸合成类固醇和形成乙酰辅酶 A 所必需的物质。研究发现,泛酸不仅可以促进脂肪酸氧化作用,还可以保护机体细胞的完整,对抗脂质过氧化^[37],因此,在碳水化合物、蛋白质和脂肪的代谢和合成中起关键作用。

3.4 其他

除此以上差异代谢物,本研究还发现了一些次生代谢产物和“预期”代谢物在运动后发生显著变化,如 L-反式 5-羟基-2-嘧啶羧酸,可作为防御或信号分子发挥作用,属于一类有机化合物。如甲氧基-丙氨酸、缬氨酸-苏氨酸和异亮氨酸-缬氨酸等是蛋白质消化或蛋白质分解代谢不完全的产物,具有生理或细胞信号传导作用,大多数只是蛋白质进一步水解后进入特定氨基酸降解途径的中间产物。

4 结论

与运动前相比运动后男子赛艇运动员血浆代谢组学特征发生了显著改变,抗坏血酸、半胱氨酸和 3-亚砷-L-丙氨酸等多种氧化应激产物显著影响着赛艇运动员的运动表现,研究建议可将抗坏血酸作为赛艇运动员比赛或训练前后的重要营养补给,以提高运动能力和延缓疲劳造成的应激反应。

参考文献

- [1] KIM J, KIM E-K. Nutritional strategies to optimize performance and recovery in rowing athletes[J]. *Nutrients*, 2020, 12(06): 1685.
- [2] SMITH T B, HOPKINS W G. Measures of rowing performance[J]. *Sports Medicine*, 2012, 42(04): 343-358.
- [3] MÄESTU J, JÜRIMÄE J, JÜRIMÄE T. Monitoring of performance and training in rowing[J]. *Sports Medicine*, 2005, 35(07): 597-617.

- [4] HOFFMAN N J. Omics and exercise: Global approaches for mapping exercise biological networks[J]. Cold Spring Harbor Perspectives in Medicine, 2017, 7(10): a029884.
- [5] IZMAILOV G N. Constrains on an uniform model for Dark Matter and Dark Energy[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 2081(01): 012022.
- [6] LIU R, BAO Z-X, ZHAO P-J, et al. Advances in the study of metabolomics and metabolites in some species interactions [J]. Molecules, 2021, 26(11): 3311.
- [7] RINSCHEN M M, IVANISEVIC J, GIERA M, et al. Identification of bioactive metabolites using activity metabolomics [J]. Nature Reviews Molecular Cell Biology, 2019, 20(06): 353-367.
- [8] 高欢, 孟志军, 李涛, 等. 青少年赛艇运动员有氧耐力训练的代谢应答特征[J]. 中国体育科技, 2021, 57(01): 29-37.
- [9] 林家仕, 姚安, 蒋国用, 等. 赛艇测功仪 2000m 全力划过程中不同分段的血液代谢组学研究[J]. 中国运动医学杂志, 2023, 42(07): 527-539.
- [10] NYBERG M, FIORENZA M, LUND A, et al. Adaptations to speed endurance training in highly trained soccer players [J]. Medicine & Science in Sports & Exercise, 2016, 48(07): 1355-1364.
- [11] CHOW L S, GERSZTEN R E, TAYLOR J M, et al. Reply to 'Lactate as a major myokine and exerkine'[J]. Nature Reviews Endocrinology, 2022, 18(11): 713-713.
- [12] 汪军, 周越, 孙君志, 等. 质疑与思考: 运动生理学研究的十个问题[J]. 成都体育学院学报, 2021, 47(01): 118-124.
- [13] 李真真, 王志锋, 康道峰, 等. 力竭运动过程中大鼠纹状体抗坏血酸的动态变化及对胞外 Glu 含量的调节[J]. 沈阳体育学院学报, 2017, 36(05): 70-75.
- [14] SANTOS DE LIMA K, SCHUCH F B, CAMPOGOGARA RIGHI N, et al. Effects of the combination of vitamins C and E supplementation on oxidative stress, inflammation, muscle soreness, and muscle strength following acute physical exercise: meta-analyses of randomized controlled trials [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2022(28): 1-14.
- [15] ZYCHOWSKA M, JASTRZĘBSKI Z, CHRUSCINSKI G, et al. Vitamin C, A and E supplementation decreases the expression of HSPA1A and HSPB1 genes in the leukocytes of young polish figure skaters during a 10-day training camp [J]. Journal of the International Society of Sports Nutrition, 2015, 12(01): 27-31.
- [16] 谢天宁, 林岩, 邱兴华. 基于洛杉矶-北京迁徙人群的大气污染暴露相关急性健康效应标志物的代谢组学研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2019, 55(03): 501-508.
- [17] NAQUET P, KERR E W, VICKERS S D, et al. Regulation of coenzyme a levels by degradation: the 'ins and outs'[J]. Progress in Lipid Research, 2020, 78: 101028.
- [18] CUISINIER C, WARD R J, FRANCAUX M, et al. Changes in plasma and urinary taurine and amino acids in runners immediately and 24 h after a marathon[J]. Amino Acids, 2001, 20(01): 13-23.
- [19] CORDEIRO L M S, GUIMARÃES J B, WANNER S P, et al. Inhibition of tryptophan hydroxylase abolishes fatigue induced by central tryptophan in exercising rats[J]. Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports, 2014, 24(01): 80-88.
- [20] HUBBARD T D, MURRAY I A, PERDEW G H. Indole and typtophan Metabolism: Endogenous and dietary routes to ah receptor activation [J]. Drug Metabolism and Disposition, 2015, 43(10): 1522-1535.
- [21] 范子玲, 许楚楚, 舒适, 等. 基于 GC/MS 技术的产后卵巢静止奶牛血浆代谢谱分析[J]. 中国农业科学, 2017(15): 3042-3051.
- [22] JOHNSON M E, SALVATORE M F, MAIOLO S A, et al. Tyrosine hydroxylase as a sentinel for central and peripheral tissue responses in Parkinson's progression: Evidence from clinical studies and neurotoxin models[J]. Progress in Neurobiology, 2018, 165: 1-25.
- [23] GUBAREVA L V., WEBSTER R G, HAYDEN F G. Comparison of the activities of zanamivir, oseltamivir, and RWJ-270201 against clinical isolates of influenza virus and neuraminidase inhibitor-resistant variants [J]. Antimicrobial Agents and Chemotherapy, 2001, 45(12): 3403-3408.
- [24] MEDEIROS G C, GREENSTEIN D, KADRIU B, et al. Treatment of depression with ketamine does not change plasma levels of brain-derived neurotrophic factor or vascular endothelial growth factor [J]. Journal of Affective Disorders, 2021, 280: 136-139.
- [25] 刘艳环, 马国栋, 刘克敏. 耐力训练对非酒精性脂肪肝小鼠肝脏氧自由基代谢的影响[J]. 西安体育学院学报, 2010, 27(01): 84-89.
- [26] URASAKI Y, PIZZORNO G, LE T T. Chronic uridine administration induces fatty liver and pre-diabetic conditions in mice[J]. Plos One, 2016, 11(01): e0146994.
- [27] CAO B, LIU S, YANG L, et al. Changes of differential urinary metabolites after high-intensive training in teenage football players[J]. BioMed Research International, 2020, 20: 1-9.

(下转第 74 页)

- 83-86.
- [10]提醒! 教育厅发布 5 个大学本科预警专业! 附:近十年红牌专业! [EB/OL]. (2021-11-07) [2022-06-08]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1715722767739008108&wfr=spider&for=pc>.
- [11]教育部. 普通高等学校本科专业类教学质量国家标准 [EB/OL]. (2018-01-30) [2022-06-08]. http://www.moe.gov.cn/jyb_xwfb/xw_fbh/moe_2069/xwfbh_2018n/201801/t20180130_325932.html.
- [12]王涛,赵子建. 专业认证与学科评估背景下体育教师教育专业课程体系改革的问题及策略[J]. 体育学刊, 2020, 27(04):98-104.
- [13]胡永红,吴郡兰,艾安丽. 我国体育教育专业认证工作存在的问题与优化路径[J]. 体育学刊, 2021, 28(02):72-79.
- [14]李志义,王泽武. 成果导向的课程教学设计[J]. 高教发展评估, 2021, 37(03):91-98 + 113.
- [15]吕帅,朱淦,赵磊. 基于成果导向理念的教育改革实践与探索——以英国邓迪大学为例[J]. 重庆高教研究, 2017, 5(02):101-106.
- [16]初红艳,程强,刘志峰,等. 基于成果导向与学生中心的教学设计及学习效果评价[J]. 教育教学论坛, 2018(25):1-5.
- [17]张高文,赵西坡,李学锋. 基于 OBE 理念的人才培养目标评价机制的构建与实施[J]. 大学教育, 2019(01):17-19.
- [18]李朝阳,张新萍,仇亚宾. “四年一贯制”大学体育综合课程:第一课堂与第二课堂高度融合[J]. 体育学刊, 2020, 27(05):96-101.

[责任编辑 江国平]

(上接第 61 页)

- [28]马海峰, 吴瑛. 基于核磁共振的中、长跑运动员大负荷训练课 30min 后尿液代谢组学特征的研究[J]. 体育科学, 2015, 35(07):48-57.
- [29]LEANDRO J, HOUTEN S M. Saccharopine, a lysine degradation intermediate, is a mitochondrial toxin[J]. Journal of Cell Biology, 2019, 218(2):391-392.
- [30]SCHWÖBBERMEYER H, WÜNSCHERS R. Mavisto: a tool for biological network motif analysis[J]. Methods in Molecular Biology, 2012(08):22.
- [31]KHORAMIPOUR K, GAEINI A A, SHIRZAD E, et al. Metabolic load comparison between the quarters of a game in elite male basketball players using sport metabolomics[J]. European Journal of Sport Science, 2021, 21(7):1022-1034.
- [32]DASKALAKI E, EASTON C, G. WATSON D. The application of metabolomic profiling to the effects of physical activity[J]. Current Metabolomics, 2015, 2(4):233-263.
- [33]SHI R, ZHANG J, FANG B, et al. Runners' metabolomic changes following marathon[J]. Nutrition & Metabolism, 2020, 17(1):19.
- [34]WANG X, ZHANG J, WEI Y, et al. A copper-based metal-organic framework/graphene nanocomposite for the sensitive and stable electrochemical detection of DNA bases[J]. The Analyst, 2020, 145(5):1933-1942.
- [35]ZIELIŃSKI J, KUSY K. Training-induced adaptation in purine metabolism in high-level sprinters vs. triathletes[J]. Journal of Applied Physiology, 2012, 112(4):542-551.
- [36]KORMANN M S D, HASENPUSCH G, ANEJA M K, et al. Expression of therapeutic proteins after delivery of chemically modified mRNA in mice[J]. Nature Biotechnology, 2011, 29(2):154-157.
- [37]SLYSHENKOV V S, OMELYANCHIK S N, MOISEENOK A G, et al. Protection by pantothenol and beta-carotene against liver damage produced by low-dose gamma radiation[J]. Acta Biochimica Polonica, 1999, 46(2):239-248.

[责任编辑 江国平]