



## 高强度间歇性运动前后高水平女子足球运动员 尿液代谢组学特征研究

赵 薇<sup>1</sup>, 王长权<sup>2\*</sup>, 侯莉娟<sup>2</sup>

(1. 西北师范大学, 甘肃 兰州 730070; 2. 北京师范大学, 北京 100875)

**摘要:**目的:采用液相色谱-质谱联用(LC-MS)的代谢组学方法,探究高水平女子足球运动员在一场比赛前后能量代谢调节的变化情况,旨在为女子足球运动员机能评定与训练监控提供理论依据。方法:选取参加2021年大学生女子超冠联赛半决赛的10名运动员作为实验对象,分别采集运动员比赛当天晨尿、赛前30 min和赛后30 min的尿样。所有数据经过转换、峰检测、归一化处理后再进行多元统计分析。结果:高强度间歇性运动前后高水平女子足球运动员尿样代谢物色谱图发生了显著变化。与赛前相比,赛后的乳酸、肌酸、丙酮酸、肌酐、L-缬氨酸、色氨酸、丙氨酸等代谢物显著上调(VIP>1.3且P<0.01),腺嘌呤、 $\beta$ -葡萄糖、酪氨酸、柠檬酸、琥珀酸等代谢物显著下降(VIP>1.4且P<0.01)。结论:1)高水平女子足球运动员在大强度比赛后显著变化的代谢物主要涉及ATP-CP系统、糖酵解系统、有氧化系统、神经调节系统以及氨基酸代谢系统;2)代谢组学方法能够为运动员在备战期和赛前的饮食与营养补充以及运动效果的评价提供更全面、更具针对性的数据分析与指导。

**关键词:**高强度间歇性运动;女子足球运动员;比赛;代谢组学

中图分类号:G804.7

文献标识码:A

代谢组学是一门关于生物体内源性代谢产物的整体及其变化规律的科学(李红娟, 2012),主要研究生物体代谢产物的综合组成以及机体在内外刺激条件下的代谢反应。代谢组学从代谢物层面展现了人体在运动过程中的内源性物质以及能量供应的基础来源,通过检测人体在运动后的代谢标志物探寻更多与运动相关的潜在生物指标的变化规律(崔海珍等, 2011;美国运动医学学会, 2014)。

传统的生物化学研究通常从分子层面探讨人体在运动时机体内的化学变化、能量转化和运动表现之间的关系,以及在急性运动和长期运动后人体代谢产物的变化和适应性反应。如一些研究通过测量血乳酸、肌糖原、血红蛋白、血糖、血脂、激素、肌酸激酶等指标以及心肺供能来反映运动员在不同强度、不同时间和不同类型的运动中所表现出来的无氧能力、有氧能力、乳酸耐受力和机体恢复能力等方面的差异和变化,从而有效评估运动员机能状态和训练效果(Asgar et al., 2017; Joyner et al., 2008; Vianna et al., 2011)。

代谢组学与传统生物化学方法在运动训练领域中的应用各有特点和优势。传统生物化学方法通常侧重于分析特定代谢物或代谢途径,聚焦于预先设定目标的变化

趋势,无法揭示未知代谢物的变化情况。相比之下,代谢组学方法具有高通量性和高灵敏度,能够同时检测数百到数千种代谢物,对代谢物的浓度范围敏感且可捕捉微小的代谢变化,包括小分子代谢物、脂质、蛋白质代谢产物等,实现全方位了解生物体内的代谢状态。此外,代谢组学方法还能够反映代谢网络之间的相互关系,如分析代谢通路交互作用以判断代谢物之间互补或竞争关系、正负相关关系等,有助于理解代谢物是如何参与体内能量代谢的不同阶段、物质转运的不同路径以及信号传导的不同表达。代谢组学方法不仅为了解运动员的生理状态和训练效果提供了新的视角,还为个性化的营养管理和训练优化提供了数据支撑。

目前,运用代谢组学方法从能量代谢的视角来研究集体球类项目女子运动员在高强度间歇性运动前后代谢物变化的报道相对较少。因此,本研究采用代谢组学

收稿日期:2022-07-28; 修订日期:2023-06-08

基金项目:教育部人文社会科学研究规划基金(21YJA890031)。

第一作者简介:赵薇(1988-),女,讲师,博士,主要研究方向为运动表现调控与代谢调节,E-mail:zhaowei8877@nwnu.edu.cn。

\*通信作者简介:王长权(1971-),男,教授,博士,博士研究生导师,主要研究方向为球类教学与训练、球类运动文化,E-mail:wangchangquan@vip.163。

方法,选取北京师范大学女子足球队主力队员在比赛前后的尿液进行分析,旨在为女子足球运动员机能评定与训练监控提供理论依据,为教练员科学设计足球专项训练方案、监控运动训练过程和评价运动表现提供参考。

## 1 研究对象与方法

### 1.1 研究对象

以北京师范大学参加2021年大学生女子超冠联赛半决赛(全场80 min、上下半场之间休息15 min)的10名运动员[年龄:(20.45±1.23)岁;身高:(1.67±0.07)m;体重:(57.89±3.98)kg;BMI:(21.65±3.41)kg/m<sup>2</sup>;训练年限:(7.33±2.08)年]为实验对象。为保证实验前后采样的一致性,事先向受试者介绍实验目的、采样要求(饮食、睡眠、能量补剂等)、采样时间点、采样方式以及采样流程。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 样品采集与预处理

根据研究目标确定采样比赛场序和时间,采样人员于比赛当天清晨6:30采集受试者晨尿中段15 mL,比赛开始前30 min和结束后30 min分别采集尿液15 mL。将样品标号后迅速放入干冰储存箱,随后放入-80 °C冰箱中保存备用。

#### 1.2.2 样品提取试剂、仪器及检测设备

本研究采用甲醇(67-56-1, ≥99.0%, Thermo)、乙腈(75-05-8, ≥99.0%, Thermo)、2-氯苯丙氨酸(103616-89-3, 98.5%, Aladdin)、甲酸(64-18-6, LC-MS grade, TCI)、甲酸铵(540-69-2, ≥99.0%, Sigma)、H<sub>2</sub>O(Milli-Q)等试剂,利用

冷冻离心机(湘仪, H1850-R)、混匀仪(Vortex Mixer, QL-866)、滤膜(Jin Teng, 0.22 μm PTFE)等仪器完成检测样品的提取。代谢组学检测仪器主要为液相色谱仪(Thermo, Ultimate3000)、质谱仪(Thermo, Q Exactive)。为了保证数据处理的完整性,样品采用质谱的正、负离子两种模式进行分析。

#### 1.2.3 数据统计方法

样品经LC-MS检测后,使用Proteowizard软件将原始数据转换为mzXML格式。采用XCMS软件包对数据进行峰检测和归一化,采用R.language ropls软件包进行多元统计分析。将各组样品质谱数据进行主成分分析(principal component analysis, PCA)和偏最小二乘法判别分析(partial least squares-discriminate analysis, PLS-DA)(马海峰等, 2015),以VIP>1且P<0.05作为筛选潜在差异代谢物的标准。所有化合物均通过BioDeep代谢组数据库进行潜在的生物标志物验证与筛选,再将筛选出来的生物标志物输入MetobAnalyst4软件进行相应的代谢通路分析,以P<0.05作为代谢通路筛选的标准。

## 2 结果

### 2.1 受试者的内部负荷情况

受试者比赛内部负荷的监测结果显示(表1),上下半场的平均心率、平均心率强度、最高心率以及最高心率强度均存在统计学差异,表明运动员在本场比赛中承受了中高强度的运动负荷。虽然受试者在上下半场的RPE之间无统计学差异,但比赛前的RPE平均值为2.1±4.3,上下半场结束后分别达到7.8±2.3和7.6±6.2,在一定程度上也表明机体产生了疲劳。

表1 受试者比赛心率和RPE监测结果(n=10)

Table 1 The Monitoring Results of the Subjects' Heart Rate and RPE during Competition (n=10)

时间点	平均心率/(b·min <sup>-1</sup> )	平均心率强度/%	最高心率/(b·min <sup>-1</sup> )	最高心率强度/%	RPE
赛前	68.2±3.2	—	—	—	2.1±4.3
上半场	169.6±1.5	86.4±2.4	193.4±2.3	96.2±1.4	7.8±2.3
下半场	161.7±4.3**	81.9±5.1**	189.1±6.9*	94.6±2.7*	7.6±6.2

注:\*P<0.05,表示上、下半场之间具有显著性差异;\*\*P<0.01,表示上、下半场之间具有十分显著性差异。

### 2.2 代谢组学实验数据质量控制结果

图1和图2中3个时段的基峰色谱图显示,不同时段尿样代谢物存在差异。PCA图中的质量控制(quality control, QC)样本呈簇集分布,说明数据重复性良好,正负离子模式系统稳定。潜在的特征峰变异系数(relative standard deviation, RSD)分别为79.9%和74.5%,均>70%,说明数据质量良好。

### 2.3 主成分分析结果

#### 2.3.1 比赛当天晨尿与赛前30 min尿样的主成分分析结果

图3a和图4a显示,虽然运动员比赛初始状态的尿样

样品分布呈离散状态,但R<sup>2</sup>分别为0.99和0.97(图3c、图4c),达到模型可解释度要求,表明受试者基础代谢状态基本可以满足后续研究的要求。

如图3b和图4b所示,在以主成分PC1和PC2组成的二维坐标中,受试者在运动前的代谢模型与基础状态有着明显的区分,且置换检验图(图3c、图4c)中Q<sup>2</sup>均>50%,说明正负离子模式下的PLS-DA模型未发生过拟合现象。

#### 2.3.2 比赛前后尿样的主成分分析结果

如图5b、6b所示,以主成分PC1和PC2组成的二维坐

标中,受试者运动前后的代谢模型出现了较为明显的区分,且置换检验图(图5c、图6c)中 $Q^2$ 分别为84.3%和

83.1%,均>50%,说明正负离子模式下的PLS-DA模型在多次检验中未发生过拟合现象。

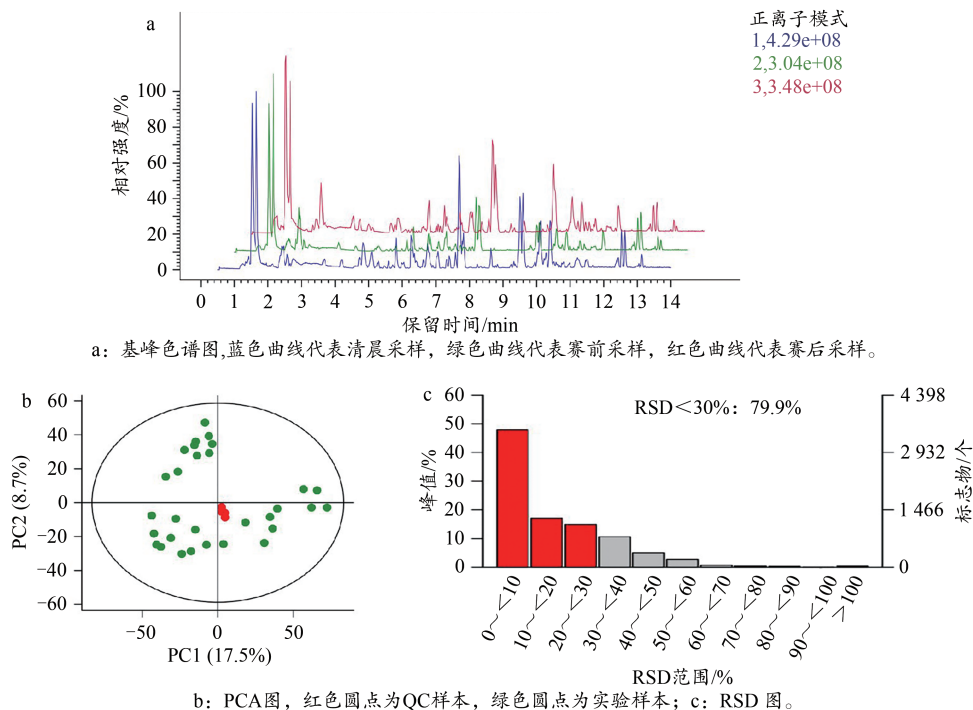


图1 不同时段基峰色谱图和质量分析图(正离子模型)

Figure 1. Base Peak Chromatograms and Quality Analysis Diagram in Different Time Periods (positive ion model)

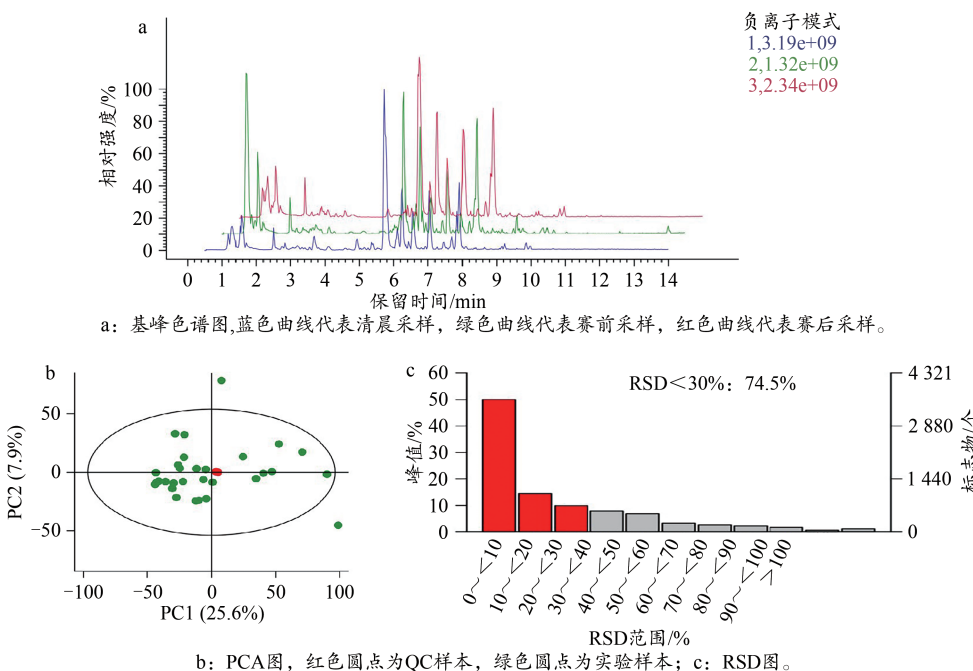


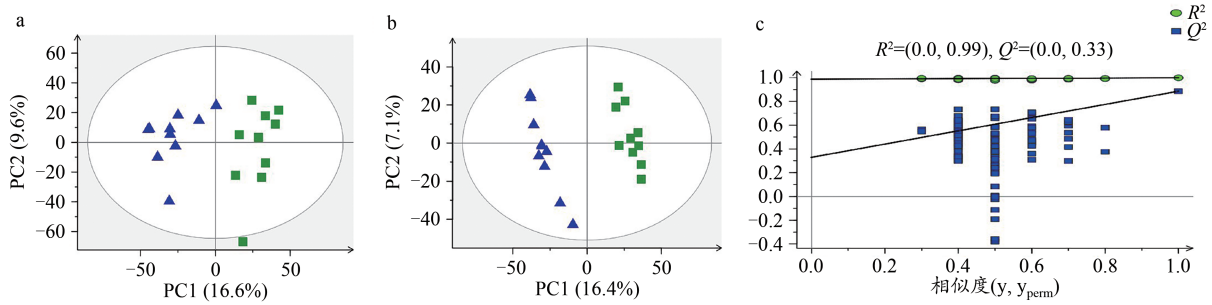
图2 不同时段基峰色谱图和质量分析图(负离子模型)

Figure 2. Base Peak Chromatograms and Quality Analysis Diagram in Different Time Periods (negative ion model)

#### 2.4 差异代谢物分析结果

如表2所示,受试者在赛前和赛后正、负离子模式下的差异代谢物共883种,将其进行显著性差异代谢物筛选发现,在比赛后受试者尿样中的乳酸、肌酸、丙酮酸、肌酐、L-缬氨酸、色氨酸、丙氨酸等代谢物显著上调(VIP >

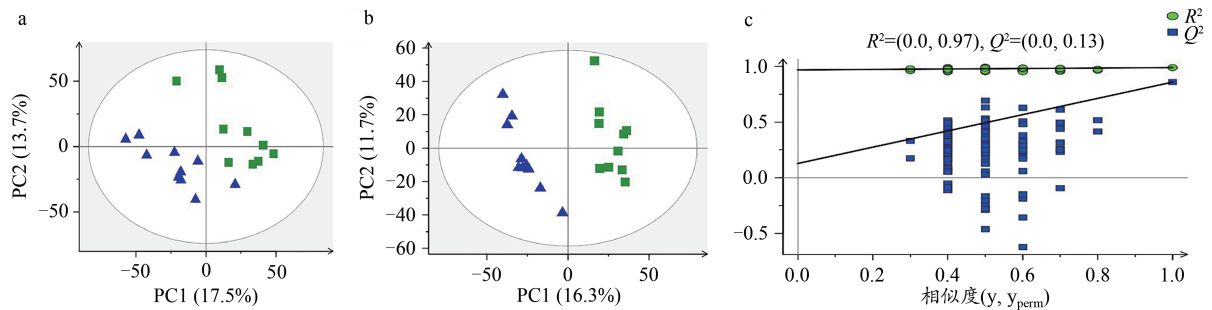
1.3且 $P < 0.01$ ),腺嘌呤、 $\beta$ -葡萄糖、酪氨酸、柠檬酸、琥珀酸等代谢物显著下调(VIP > 1.4且 $P < 0.01$ )。其中,乳酸(LAC)与丙酮酸(Pyr)的占比变化(图7)表明赛后不同位置运动员LAC/Pyr变化趋于一致,反映了运动员LAC/Pyr关系的位置特点。



a: 比赛当天晨尿与赛前30 min尿液PCA得分图; b: 比赛当天晨尿与赛前30 min尿液PSL-DA得分图; c: 比赛当天晨尿与赛前30 min尿液PSL-DA置换检验图。a和b中的正三角形代表晨尿样本, 正方形代表赛前尿样样本。

图3 晨尿与赛前30 min尿样分析图(正离子模型)

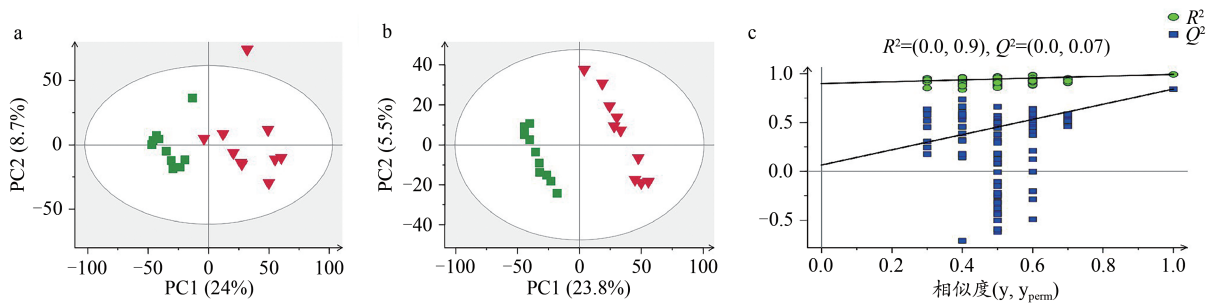
Figure 3. Analysis of Urine Samples at the Morning and 30 Minutes before the Competition (positive ion model)



a: 比赛当天晨尿与赛前30 min尿液PCA得分图; b: 比赛当天晨尿与赛前30 min尿液PSL-DA得分图; c: 比赛当天晨尿与赛前30 min尿液PSL-DA置换检验图。a和b中的正三角形代表晨尿样本, 正方形代表赛前尿样样本。

图4 晨尿与赛前30 min尿样分析图(负离子模型)

Figure 4. Analysis of Urine Samples at the Morning and 30 Minutes before the Competition (negative ion model)



a: 比赛前后尿液PCA的得分图; b: 比赛前后尿液PSL-DA得分图; c: 比赛前后尿液PSL-DA置换检验图。a和b中的正方形代表赛前尿样样本, 倒三角形代表赛后尿样样本。

图5 比赛前后尿液样本的多元分析图(正离子模型)

Figure 5. Multivariate Analysis of Urine Samples at before and after the Competition (positive ion model)

### 2.5 差异代谢通路分析结果

对不同时段运动员尿样中显著变化的生物标志物进一步筛选, 并运用KEGG代谢通路和MetPA数据库剔除受干扰的代谢通路。由于代谢物的产生并非一条路径, 某一代谢物会富集在多条代谢通路中, 故根据代谢通路重要性、相对中心性筛选确定代谢通路。如表3所示, 运动员在比赛前后主要代谢物所富集的代谢通路共10条, 其中, 变化最为显著( $P < 0.05$ )的代谢通路为: 糖酵解/糖异生、磷酸戊糖代谢、酪氨酸代谢、柠檬酸代谢、缬氨酸、亮

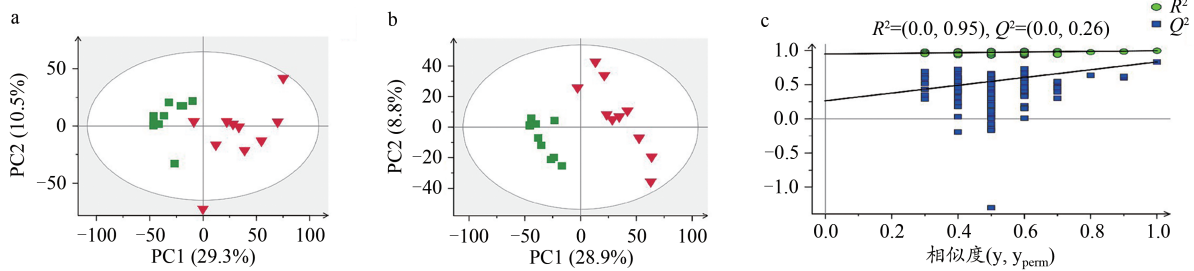
氨酸和异亮氨酸代谢等。

### 3 讨论

由研究结果可知, 运动竞赛对女子足球运动员的机体代谢变化产生了非常显著的影响, 并且与其他代谢物相比, 与能量相关的代谢物在比赛前后的变化更为明显。足球运动员在比赛中良好的运动表现很大程度上取决于其加速能力、反复冲刺能力、控球能力以及有氧耐力, 在比赛过程中机体的磷酸肌酸和糖酵解利用率相对较高。

研究发现在运动前后共有16种差异代谢物和10条代谢通路,其中,差异代谢物主要包括丙酮酸、异柠檬酸、次黄嘌呤、苹果酸、 $\beta$ -葡萄糖、乳酸、酪氨酸、柠檬酸、缬氨酸等,差异代谢通路主要包括柠檬酸代谢、葡萄糖代谢(糖

酵解、有氧代谢)、氧化应激、氨基酸代谢以及脂质代谢等,以上差异代谢物及其所富集的通路主要与能量代谢系统、神经代谢系统、氧化应激反应以及支链氨基酸代谢密切相关。



a: 比赛前后尿液PCA的得分图; b: 比赛前后尿液PSL-DA得分图; c: 比赛前后尿液PSL-DA置换检验图。a和b中的正方形代表赛前尿样本,倒三角形代表赛后尿样本。

图6 比赛前后尿液样本的多元分析图(负离子模型)

Figure 6. Multivariate Analysis of Urine Samples at before and after the Competition (negative ion model)

表2 受试者赛前、赛后尿样差异代谢物的变化情况

Table 2 Changes of Urine Metabolites at before and after the Competition

序号	代谢物名称	VIP	差异倍数	P	FDR	涉及主要通路	ppm	KEGG
1	丙酮酸	1.77	0.076	<0.001 ↑	0.005	酪氨酸代谢	0.42	C00022
2	肌酐	1.73	0.418	0.001 ↑	0.006	肌酸代谢	4.46	C00791
3	次黄嘌呤	1.64	0.019	<0.001 ↑	0.005	嘌呤代谢	1.77	C00262
4	异柠檬酸	1.63	0.149	<0.001 ↑	0.005	柠檬酸循环	0.61	C00311
5	缬氨酸	1.61	0.550	0.001 ↑	0.009	氨基酸代谢	0.15	C00183
6	$\beta$ -葡萄糖	1.60	0.513	0.002 ↓	0.011	糖酵解/糖异生	1.67	C00221
7	苹果酸	1.49	0.320	0.002 ↑	0.010	柠檬酸循环	4.46	C00149
8	琥珀酸	1.49	2.670	0.002 ↓	0.010	柠檬酸循环	0.09	C00042
9	谷氨酸	1.45	0.360	0.001 ↑	0.008	丙氨酸、谷氨酸代谢	0.26	C00025
10	丙氨酸	1.36	0.590	0.006 ↑	0.018	酪氨酸代谢	2.52	C00099
11	色氨酸	1.33	0.280	0.009 ↑	0.025	氨基酸代谢	1.75	C00078
12	乳酸	1.24	0.055	0.000 ↑	0.005	糖酵解/糖异生	2.29	C00186
13	酪氨酸	1.14	0.207	0.001 ↓	0.006	多巴胺神经突触	2.92	C00082
14	柠檬酸	1.09	3.670	0.006 ↓	0.018	柠檬酸循环	2.55	C00158
15	腺嘌呤	1.08	2.007	0.021 ↓	0.046	嘌呤代谢	3.02	C00147
16	肌酸	1.04	0.273	0.007 ↑	0.025	甘氨酸、丝氨酸、苏氨酸代谢	4.91	C00300

注: ↑.与赛前相比,赛后标志代谢物增加; ↓.与赛前相比,赛后标志代谢物减少;VIP.OPLS-DA第一主成分变量重要性值;FDR.校正之后的P值;ppm.检测分子量与理论分子量的误差;KEGG.化合物编号。

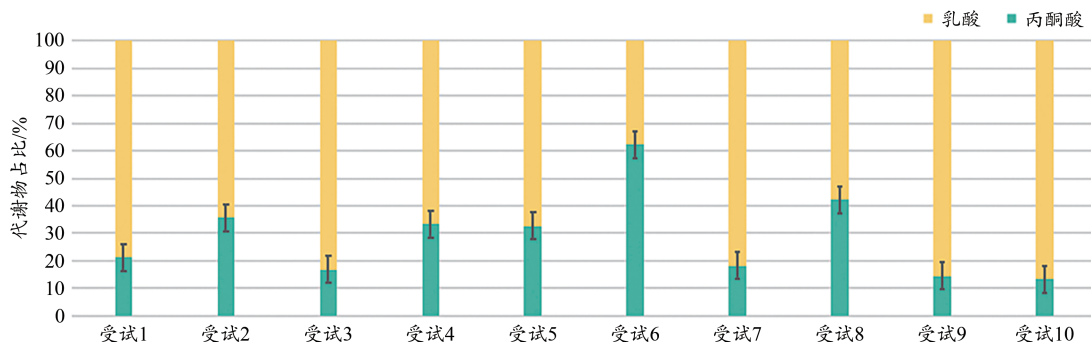


图7 大学女子足球运动员赛后30 min乳酸与丙酮酸的占比

Figure 7. Percentage of Lactate and Pyruvate in Female Soccer Players at 30-min after the Competition

表3 足球比赛前后主要代谢物所富集的代谢通路

序号	代谢通路名称	Total	Hits	Raw·P	Impact
1	丙氨酸、天冬氨酸代谢	28	10	0.006	0.61
2	多巴胺神经突触	12	4	0.010	0.50
3	酪氨酸	78	17	0.000	0.46
4	缬氨酸、亮氨酸、异亮氨酸	23	7	0.002	0.38
5	精氨酸代谢	78	17	0.000	0.28
6	柠檬酸循环	20	7	0.001	0.25
7	嘌呤代谢	95	10	0.030	0.21
8	甘氨酸、丝氨酸代谢	50	11	0.000	0.20
9	糖酵解/糖异生	31	4	0.020	0.11
10	磷酸戊糖代谢	35	4	0.030	0.03

### 3.1 能量代谢系统

#### 3.1.1 ATP-CP代谢系统

肌酐是人体肌肉内磷酸肌酸的代谢产物,几乎所有由代谢产生的肌酐均会随尿液排出体外,因此,尿肌酐排出量可以作为评定磷酸肌酸供能的重要生化指标(运动生物化学编写组,1987)。研究显示,女子足球运动员在比赛后尿液中的肌酐、肌酸等与无氧代谢相关的潜在生物标志物发生了显著变化,且竞技水平更高的运动员肌酐变化幅度更为明显,提示无氧代谢系统在足球比赛的能量供应过程中贡献率较高。以上结果与以往的研究结果基本一致,如一些研究发现足球(白冰怡,2021;Guo et al.,2020; Quintas et al.,2020)、橄榄球(Hudson et al.,2021)、田径(孙涛,2018)、篮球(Khoramipour et al.,2021)、排球(Zhou et al.,2021)等项目的运动员在比赛和训练后的尿液中肌酸和肌酐含量均呈上升趋势,说明高能磷酸系统在短时间、高强度运动项目中的供能作用十分显著。磷酸肌酸在线粒体和肌原纤维之间扮演着传递高能磷酸化化合物的角色,可快速拾取线粒体产生的高能磷酸盐,并通过磷酸肌酸支链将这些高能基团转运至肌原纤维,因此磷酸肌酸可视为连接两者之间的“高能磷酸桥”(Gabr et al.,2011)。磷酸肌酸作为高能磷酸系统供能的前体物,为骨骼肌提供了能量缓冲。

在足球比赛中,ATP-CP代谢系统参与了能量供应,ATP降解则会产生次黄嘌呤代谢物,如次黄嘌呤和尿酸。次黄嘌呤和腺嘌呤作为嘌呤核苷酸的合成前体,在能量传递和存储中发挥关键作用,从而影响ATP的生成与维持。已有研究表明,机体内腺嘌呤的含量升高说明其作为能量来源的前体物被更有效地利用(Tullson et al.,1991)。Pitti等(2019)研究发现,在足球比赛后,乳酸、琥珀酸、葡萄糖和丙酮酸含量的显著增加影响了嘌呤循环的活动性,导致腺苷脱氨酶和腺苷酸激酶的增加,改善了线粒体内能量代谢活动。

#### 3.1.2 糖酵解系统

研究结果显示,女子足球运动员在比赛后尿液中的 $\beta$ -葡萄糖降低、丙酮酸含量升高,提示在比赛过程中糖酵解系统参与了机体的能量供应。在高强度的足球比赛中,葡萄糖和脂肪通过氧气分解产生ATP的速率通常无法满足肌肉持续收缩所需的能量。因此,糖酵解成为一种重要的能量供应辅助途径。尽管其产能效率相对较低,但在高强度运动中却发挥着关键作用。一方面,在足球运动中,机体需要同时依赖不同的代谢途径来满足能量需求;另一方面强调了无氧糖酵解代谢在足球比赛供能中的重要性(Bangsbo et al.,2007)。

#### 3.1.3 有氧供能系统

脂肪酸代谢在人体能量供应过程中扮演着关键角色,是长时间、低强度运动的主要供能途径之一,与此相关的代谢物变化与足球运动员的运动表现密切相关(Jensen,2003)。随着运动负荷的增加,能量消耗速率显著上升,激活了机体的脂肪分解和三羧酸循环通路,从而满足运动的能量需求。本研究中的缬氨酸、色氨酸和异亮氨酸在赛后显著增加,表明在比赛过程中机体的TCA循环和氨基酸代谢增强,有氧代谢发挥重要作用。缬氨酸、色氨酸以及异亮氨酸在有氧代谢过程中的作用已在多项研究中得到证实。如Lee等(2021)和Tian等(2001)研究发现,缬氨酸在长时间有氧运动过程中起到了重要的能量供给作用,并且与运动后的肌肉恢复密切相关;色氨酸代谢途径中的5-羟色氨酸在氧气利用和代谢调控中发挥关键作用。Pintus等(2022)研究表明,意大利甲级职业联赛的足球运动员在赛季前、赛前和赛后不同时间点上的马尿酸、次黄嘌呤、3-羟基丁酸、柠檬酸和肌酸等代谢物发生了显著变化。Berton(2017)、Dudzinska(2010)和Goodwin(2007)的研究显示,在长时间运动中,三羧酸循环的中间产物明显增加,这表明有氧供能系统得到充分调动。

### 3.2 神经代谢系统

氨基酸代谢过程产生的氨会引起肌肉和中枢神经系统疲劳(Pitkanen et al.,2003)。研究结果显示,与赛前相比,女子足球运动员在赛后的色氨酸、谷氨酸、酪氨酸等代谢物均发生了显著变化,与之前相关研究结果一致(Hackney et al.,2013)。在有氧环境中色氨酸被氧化为5-羟色胺(5-HT),而5-HT作为人体最重要的神经递质,对中枢神经系统起到抑制作用。Wilkinson等(2010)研究表明,脑细胞中色氨酸含量的增加会导致5-HT神经递质活动频率增加,造成运动员决策能力下降。这些变化与机体承受的外部负荷之间存在正向相关(Dunstan et al.,2017;Meeusen et al.,2006)。当比赛进入运动员无法适应的运动强度时会出现运动能力和认知功能的下降(Özgülün et al.,2010)。相关的研究结果也支持以上观点,如有研究发现足球运动员神经疲劳导致的注意力下

降和决策负担可能是影响上下半场运动表现差异的因素之一(Jordet et al., 2007; Nédélec et al., 2012)。

### 3.3 氧化应激反应

自由基的产生和抗氧化防御系统之间的不平衡导致机体处于氧化应激状态。无氧代谢产生的LAC/Pyr变化可以作为判断机体内环境氧化应激状态的指标(Sutton et al., 1980)。剧烈运动导致的氧化应激增强降低了参与糖酵解、三羧酸循环和ATP代谢相关酶的含量,阻碍葡萄糖代谢速率,导致机体内稳态失衡(Karlsen et al., 2005)。研究结果显示,女子足球运动员赛后的LAC/Pyr变化与已有研究结果并不一致(Sakaguchi et al., 2019),推测其原因可能为机体代谢对运动的反应取决于运动强度和持续时间。此外,次黄嘌呤与氧化应激之间也存在密切关系,它能够促使机体产生更多自由基,破坏细胞内平衡,从而增加细胞氧化损伤的风险。而且运动强度对机体内的次黄嘌呤水平会产生一定影响(Militello et al., 2021; Sahlin et al., 1999)。如有研究发现中高强度运动能够导致机体内的次黄嘌呤代谢迅速增加,产生更多的能量供给,并伴随着乳酸积累与疲劳堆积,因此增加了次黄嘌呤对运动的调控作用。而低运动强度后次黄嘌呤的变化并不明显(Ogino, 2000; Wlodarczyk, 2020; Zielinski, 2015)。与氧化应激相关代谢物的改变能够在一定程度上反映机体的疲劳状态,通过影响氧化应激相关通路能够提高运动员的耐力水平和免疫功能(Finau et al., 2006; Power et al., 2020)。

### 3.4 支链氨基酸代谢

支链氨基酸是机体从外界食物蛋白中获得的必需氨基酸,由缬氨酸、亮氨酸和异亮氨酸组成。研究表明,支链氨基酸不仅对于治疗疾病和健康促进有积极作用,而且对于缓解机体疲劳和骨骼肌酸痛、合成蛋白质、增强机体能量供应也有着非常重要的作用(Chang et al., 2015)。研究结果显示,赛后支链氨基酸代谢通路所涉及的缬氨酸和异亮氨酸含量显著升高,表明在比赛中支链氨基酸代谢在能量代谢中占有一定比例,但其具体机制还有待进一步深入研究。此外,还有研究提出补充支链氨基酸能够有效缓解运动员在训练过程中产生的中枢疲劳,如Chang等(2015)对男女手球运动员进行了训练前补给支链氨基酸的研究发现,与安慰剂组相比,干预组的中枢疲劳程度明显降低。足球比赛具有多情景转换的特点,运动员能够在疲劳状态下保持对外界刺激的快速反应十分重要,适当补充乳清蛋白有利于维持肌肉功能。

## 4 启示

4.1 模拟比赛情境的训练设计是影响运动员训练效果的重要因素之一

运动训练适应是机体在重复训练下产生的累积效应。

训练适应的结果既要保证为机体提供动能的能量存储,更要关注提高机体能量的可利用性和经济性,满足各种条件下能源物质的再合成(Hawlet et al., 2010)。随着比赛时间延长和运动负荷的积累,运动员传球的合理性、跑动的经济性、决策的准确性等方面逐渐偏离比赛的实际需求。在训练实践中,应结合足球运动项目负荷特征,注重从能量代谢视角复盘比赛情境,在此基础上对足球专项训练进行设计、实施、监测与评价,以此有针对性地提高训练效果。

4.2 竞赛认知能力的保持是提高运动员竞技表现的关键因素之一

通常情况下,无论是教练员、运动员还是科研人员更多关注的是比赛中的机能能力,但对于集体球类项目来讲,除了以上因素,在复杂的动态比赛环境中决定运动表现和运动决策的要素还包括神经系统和心理调节能力。在运动过程中除了骨骼肌需要大量的能量供应以外,神经代谢系统也需要一定的能量供应,由此说明神经系统像骨骼肌系统一样,同样需要通过反复的训练增加其适应竞赛环境的要求,以此改善运动员在运动过程中由于能量供应不充分导致的竞技表现下降,保证其技、战术水平的正常发挥。

4.3 运动营养的合理补给是运动员保持良好竞技状态的有效手段之一

依据能量代谢物的特性,保持机体内代谢环境的动态平衡不仅需要依靠内部物质的相互作用,还需要依靠外部摄取营养来满足机体在不同环境下的物质代谢和能量代谢需求。运动员通过合理摄入碳水化合物和蛋白质等营养物质,有助于为机体提供运动所需的能量,促进骨骼肌恢复,防止肌肉组织的细胞损伤,改善肌细胞的氧化代谢,延迟运动疲劳,维持机体水电平衡,从而提高与保持运动表现。

## 5 结论

1)高水平女子足球运动员在大强度比赛后显著变化的代谢物主要涉及ATP-CP系统、糖酵解系统、有氧氧化系统、神经调节系统以及氨基酸代谢系统。

2)代谢组学方法能够为运动员在备战期和赛前的饮食与营养补充以及运动效果的评价提供更全面、更具针对性的数据分析与指导。

### 参考文献:

- 白冰怡, 2021. 不同力量素质训练周期U18男子足球运动员尿液雄激素代谢特征的研究[D]. 成都: 成都体育学院.
- 崔海珍, 陈家旭, 2011. 亚健康脾虚证的尿液代谢组学研究[J]. 山东中医杂志, 30(7): 468-470.
- 李红娟, 2012. 体力活动与健康促进[M]. 北京: 北京体育大学出版社.

- 马海峰, 吴瑛, 2015. 基于核磁共振的中、长跑运动员大负荷训练课 30 min 后尿液代谢组学特征的研究[J]. 体育科学, 35(7):48-57.
- 美国运动医学学会, 2014. ACSM 运动测试与运动处方指南[M]. 北京: 北京体育大学出版社.
- 孙涛, 2018. 男子中长跑运动员竞赛、训练及针刺调控核磁共振代谢组学特征研究[D]. 上海: 上海体育学院.
- 运动生物化学编写组, 1987. 运动生物化学[M]. 北京: 人民体育出版社.
- ASGHAR N, IMAN Y, KARAMATOLLAH R, et al., 2017. Blood lactate level in elite boy swimmers after lactate tolerance exercise test[J]. Biomed Res Ther, 4(5):1318-1326.
- BANGSBO J, IAIA F M, KRUSTRUP P, 2007. Metabolic response and fatigue in soccer[J]. Int J Sport Physiol, 2(2), 111-127.
- BENEDICT C, HALLSCHMID M, LASSEN A, et al., 2011. Acute sleep deprivation reduces energy expenditure in healthy men[J]. Am J Clin Nutr, 93(6):1229-1236.
- BERTON R, CONCEI M S, LIBARDI C A, et al., 2017. Metabolic time-course response after resistance exercise: A metabolomics approach[J]. J Sports Sci, 35(12):1211-1218.
- BLOCK K P, BUSE M G, 1990. Glucocorticoid regulation of muscle branched-chain amino acid metabolism[J]. Med Sci Sports Exer, 22(3):316-324.
- CHANG C K, CHANG CHIEN K M, CHANG J H, et al., 2015. Branched-chain amino acids and arginine improve performance in two consecutive days of simulated handball games in male and female athletes: A randomized trial[J]. PLoS One, 10(3): e0121866.
- DUDZINSKA W, LUBKOWSKA A, DOLEGOWSKA B, et al., 2010. Adenine, guanine and pyridine nucleotides in blood during physical exercise and restitution in healthy subjects[J]. Eur J Appl Physiol, 110:1155-1162.
- DUNSTAN R H, SPARKES D L, MACDONALD M M, et al., 2017. Diverse characteristics of the urinary excretion of amino acids in humans and the use of amino acid supplementation to reduce fatigue and subhealth in adults[J]. Nutr J, doi:10.1186/s12937-017-0240-y.
- GABR R E, EL-SHARKAWY A M M, SCHÄR M, et al., 2011. High-energy phosphate transfer in human muscle: Diffusion of phosphocreatine[J]. Am J Physiol Cell Physiol, 301(1):C234-C241.
- GOROSTIAGA E M, NAVARRO-AMÉZQUETA I, CALBET J A L, et al., 2012. Energy metabolism during repeated sets of leg press exercise leading to failure or not[J]. PLoS One, 7(7): e40621.
- GUO F, XIANG R, WANG Y M, et al., 2020. Screening of different metabolites in teenage football players after exercise fatigue[J]. Chinese J Appl Physiol, 36(5):465-470.
- HACKNEY A C, WALZ E A, 2013. Hormonal adaptation and the stress of exercise training: The role of glucocorticoids[J]. Trends Sport Sci, 20(4):165-171.
- HAWLET J A, BURKE L M, 2010. Carbohydrate availability and training adaptation: Effects on cell metabolism[J]. Exerc Sport Sci Rev, 38(4):152-60.
- HUDSON J F, PHELAN M M, OWENS D J, et al., 2021. "Fuel for the Damage Induced": Untargeted metabolomics in Elite Rugby Union Match Play[J]. Metabolites, doi:10.3390/metabo11080544.
- JENSEN M D, 2003. Fate of fatty acids at rest and during exercise: Regulatory mechanisms[J]. Acta Physiol Scand, 178(4):385-390.
- JOYNER M J, COYLE E F, 2008. Endurance exercise performance: The physiology of champions[J]. J Physiol, 586(1):35-44.
- JORDET G, HARTMAN E, VISSCHER C, et al., 2007. Kicks from the penalty mark in soccer: The roles of stress, skill, and fatigue for kick outcomes[J]. J Sports Sci, 25(2): 121-129.
- KARLSEN A, BLOMHOFF R, GUNDERSEN T, 2005. High-throughput analysis of vitamin C in human plasma with the use of HPLC-with monolithic column and UV-detection[J]. J Chromatogr B Analyt Technol Biomed Life Sci, 824:132-138.
- KHORAMIPOUR K, GAEINI A A, SHIRZAD E, et al., 2021. Metabolic load comparison between the quarters of a game in elite male basketball players using sport metabolomics[J]. Eur J Sport Sci, 21(7):1022-1034.
- LEE S, GULSETH H L, LANGLEITE T M, et al., 2021. Branched-chain amino acid metabolism, insulin sensitivity and liver fat response to exercise training in sedentary dysglycaemic and normoglycaemic men[J]. Diabetologia, 64(2): 410-423.
- MEEUSEN R, WATSON P, DVORAK J, 2006. The brain and fatigue: New opportunities for nutritional interventions?[J]. J Sports Sci, 24(7):773-782.
- MILITELLO R, LUTI S, PARRI M, et al., 2021. Redox homeostasis and metabolic profile in young female basketball players during in-season training [J]. Healthcare (Basel), doi: 10.3390/healthcare9040368.
- NÉDÉLEC M, MCCALL A, CARLING C, et al., 2012. Recovery in soccer: Part I-post-match fatigue and time course of recovery[J]. Sports Med, 42(12): 997-1015.
- NIEMAN D C, SHANELY R A, LUO B E, et al., 2014. Metabolomics approach to assessing plasma 13 and 9 hydroxyoctadecadienoic acid and linoleic acid metabolite responses to 75 km cycling[J]. Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol, 307(1): R68-R74.
- OGINO K, KINUGAWA T, OSAKI S, et al., 2000. Ammonia response to constant exercise: Differences to the lactate response[J]. Clin Exp Pharmacol Physiol, 27(8): 312-318.
- ÖZGÜNEN K, KURDAK S, MAUGHAN R, et al., 2010. Effect of hot environmental conditions on physical activity patterns and temperature response of football players [J]. Scand J Med Sci Sports, 20(s3):140-147.
- PINTUS R, BONGIOVANNI T, CORBU S, et al., 2022. Sportomics in professional soccer players: Metabolomics results during pre-season[J]. J Sports Med Phys Fitness, 61(2):324-330.
- PITKANEN H, NYKANEN T, KNUUTINEN J, et al., 2003. Free amino acid pool and muscle protein balance after resistance exercise[J]. Med Sci Sports Exer, 35:784-792.
- PITTI E, PETRELLA G, DI MARINO S, et al., 2019. Salivary metabolome and soccer match: Challenges for understanding exercise induced changes [J]. Metabolites, doi: 10.3390/metabo9070141.
- POWERS S K, DEMINICE R, OZDEMIR M, et al., 2020. Exercise-induced oxidative stress: Friend or foe? [J]. J Sport Health Sci,



- 9(5): 415-425.
- SAHLIN K, TONKONOGI M, SO DERLUND K, 1999. Plasma hypoxanthine and ammonia in humans during prolonged exercise[J]. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 80(5):417-422.
- SUTTON J R, TOEWS C J, WARD G R, et al., 1980. Purine metabolism during strenuous muscular exercise in man[J]. *Metabolism*, 29(3):254-260.
- SAKAGUCHI C A, NIEMAN D C, SIGNINI E F, et al., 2019. Metabolomics-based studies assessing exercise-induced alterations of the human metabolome: A systematic review [J]. *Metabolites*, 9(8): 164.
- TULLSON P C, TERJUNG R L, 1991. Adenine nucleotide metabolism in contracting skeletal muscle [J]. *Exerc Sport Sci Rev*, 19: 507-537.
- TIAN R, MUSI N, D'AGOSTINO J, et al., 2001. Increased adenosine monophosphate-activated protein kinase activity in rat hearts with pressure-overload hypertrophy [J]. *Circulation*, 104 (14) : 1664-1669.
- VIANNA J M, CASTRO A, PANZA P, et al., 2011. Muscle recovery after a session of resistance training monitored through serum creatin kinase: 1964 [J]. *Med Sci Sport Exer*, 43 (5 Suppl 1) : 395-396.
- WILKINSON D J, SMEETON N J, WATT P W, 2010. Ammonia metabolism, the brain and fatigue; revisiting the link[J]. *Prog Neurobiol*, 91(3):200-219.
- WLODARCZYK M, KUSY K, SLOMINSKA E, et al., 2020. Change in lactate, ammonia, and hypoxanthine concentrations in a 1-year training cycle in highly trained athletes: Applying biomarkers as tools to assess training status[J]. *J Strength Cond Res*, 34(2) : 355-364.
- ZIELINSKI J, KUSY K, 2015. Hypoxanthine: A universal metabolic indicator of training status in competitive sports[J]. *Exerc Sport Sci Rev*, 43(4) : 214-221.
- ZHOU W, ZENG G, LYU C, et al., 2021. The effect of strength-endurance training on serum and urine metabolic profiles of female adolescent volleyball athletes[J]. *Physiol Int*, 108(2):285-302.

## Urinary Metabolomic Profile of High-Level Female Soccer Players at before and after High-Intensity Interval Training

ZHAO Wei<sup>1</sup>, WANG Changquan<sup>2\*</sup>, HOU Lijuan<sup>2</sup>

1. Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China; 2. Beijing Normal University, Beijing 100875, China

**Abstract:** Objective: To investigate the changes of energy metabolism regulation in high-level female football players before and after a match through the liquid chromatography-mass spectrometry (LC-MS), so as to provide theoretical reference for the assessment of female football players' performance and monitoring the training. Methods: 10 female athletes who participated in the semi-finals of the 2021 College Women's Super Champion League were participated in this study. The urine samples in the morning, 30 minutes before and 30 minutes after the competition were collected. Data were converted, peak detected, and normalized for multivariate statistical analysis. Results: Significant differences in urine metabolite chromatograms were observed at before and after intermittent high-intensity interval training. Compared with before exercise, metabolites including lactate, creatine, pyruvate, creatinine, L-valine, tryptophan and alanine were significantly up-regulated after exercise (VIP>1.3 and  $P<0.01$ ), the adenine,  $\beta$ -glucose, tyrosine, citric acid and succinic acid were decreased significantly (VIP>1.4 and  $P<0.01$ ). Conclusions: 1) The metabolic changes observed in high-level female soccer players after intense matches mainly involve the ATP-CP system, glycolysis system, aerobic oxidation system, neural regulation system, and amino acid metabolism system; 2) Metabolomics methods can provide more comprehensive and targeted data analysis and guidance for athletes' diet and nutrition supplementation during preparation and pre-competition period as well as evaluation of their performance.

**Keywords:** high-intensity interval training; female soccer player; competition; metabolomics