

Metabolomic profile changes following individual -endurance sports: A systematic review**Received:**

2025/11/16

Accepted:

2026/02/18

Online ISSN

3060-7078

Mansoureh Karimi¹

1.Department of Human science
and Sport Science, Faculty of
Sport Sciences, University of
Gonbad Kavoss, Iran.

Masome Nobahar²

2.Department of Physical
Education, Faculty of Educational
Sciences, Payame Noor
Tehran, Iran. University,

Correspondence:*Mansoureh Karimi**

Email:mansourehkarimiii@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0000-1271-4965>**ABSTRACT****Introduction:**

Physical exercise and sports activities induce substantial changes in the concentrations of numerous metabolites. Metabolites are small molecules (approximately ≤ 1.5 kDa) that are produced or consumed during intracellular metabolic reactions. Metabolomics, as a novel and promising analytical approach, enables comprehensive investigation of exercise physiology and metabolism-related adaptations. In sports science, the application of metabolomics to the study of exercise responses is often referred to as sportomics. The present systematic review provides a qualitative synthesis of metabolomics-based studies conducted over the past decade that examined exercise-induced changes in the human metabolome.

Materials and Methods:

This systematic review was conducted in accordance with the PRISMA guidelines. Human metabolomics studies reporting metabolite concentrations measured before and within 24 hours after endurance exercise in biological samples—including blood, saliva, urine, or sweat—were considered eligible. Relevant articles published between 2009 and 2025 were retrieved from PubMed, Google Scholar, and Web of Science. In addition, Persian-language studies published between 2001 and 2025 were identified through national databases, including the Iranian Research Institute for Information Science and Technology (IranDoc), Jihad Daneshgahi Scientific Information Database, and the National Journals Database (Magiran).

Results:

A total of 257 articles were initially identified. After removing duplicates, conducting full-text screening, and applying predefined eligibility criteria, 25 studies were included in the final analysis. The findings indicated that across different types of competitive sports, the concentrations of metabolites associated with energy metabolism and related metabolic pathways undergo dynamic alterations following exercise. Significant changes were reported in metabolites related to lipid, fatty acid, and carbohydrate metabolism, with more than 100 metabolites showing at least a twofold increase within a few hours after exercise. However, despite these acute metabolic responses, most metabolite levels returned to near baseline values within approximately 24 hours of recovery.

Conclusion:

The reviewed literature demonstrates that competitive endurance exercise induces continuous and dynamic changes in metabolite concentrations, particularly those involved in energy metabolism and associated biochemical pathways. This systematic synthesis provides a valuable reference for improving the understanding of exercise-induced metabolic regulation in humans and highlights the potential of metabolomics approaches in sports science research.

Keywords: Metabolomic profile, metabolite, physical exercise, sportomics

Extended Abstract**Introduction:**

Exercise training induces wide-ranging physiological and biochemical adaptations that directly influence health, performance, and recovery. Endurance and individual sports, in particular, provide valuable models for investigating energy metabolism, as they impose sustained metabolic demands on skeletal muscle and systemic energy pathways. The emergence of metabolomics—defined as the comprehensive analysis of small-molecule metabolites (<1.5 kDa)—has enabled researchers to identify metabolic signatures associated with exercise. These signatures reflect both cellular and systemic responses to physical activity and offer deeper insight into metabolic regulation during exercise.

Energy Substrates and Key Metabolic Pathways

Carbohydrates and Lipids: Carbohydrate metabolism, through glycolysis and oxidative phosphorylation, provides rapid ATP production, whereas lipid oxidation supports energy supply during prolonged activity. Metabolomic studies consistently report post-exercise increases in glucose intermediates, lactate, free fatty acids, glycerol, and acylcarnitines.

Amino Acids: Physical exercise influences amino acid turnover, with metabolites such as alanine, tyrosine, and valine frequently elevated after exercise, reflecting their contribution to gluconeogenesis and energy production.

Ketone Bodies: During prolonged exercise or glycogen-depleted states, ketone bodies—including 3-hydroxybutyrate—serve as alternative substrates for both skeletal muscle and the brain. Metabolomic evidence indicates a significant increase in these metabolites following endurance exercise.

Markers and Mechanisms of Adaptation

Lactate: Produced during high-intensity exercise, lactate accumulates rapidly and functions not only as an energy substrate but also as a signaling molecule involved in metabolic and training adaptations.

Acylcarnitines: These metabolites serve as indicators of mitochondrial fatty acid transport and oxidation. Their levels consistently increase after endurance exercise, reflecting enhanced mitochondrial utilization of lipids.

Tricarboxylic Acid (TCA) Cycle Intermediates: Metabolites such as succinate and malate are frequently elevated following endurance exercise, indicating increased flux through oxidative metabolic pathways.

Rationale for Metabolomic Studies in Sport

Traditional biomarkers, including hormonal and biochemical indicators, often fail to fully capture the complexity of physiological responses to exercise. Metabolomics, by simultaneously quantifying hundreds of metabolites across multiple biological fluids—including blood, urine, saliva, and sweat—provides a comprehensive overview of exercise-induced metabolic reprogramming. This approach, sometimes referred to as sportomics, offers new opportunities to identify biomarkers associated with performance, fatigue, and recovery, thereby bridging the gap between molecular physiology and applied sports science.

Research Findings:

Yan et al. (2009) reported increased concentrations of carbohydrate and fatty-acid metabolites alongside reduced amino acid levels following strength–endurance training in rowers.

Stander et al. (2018) demonstrated that marathon running produced substantial changes in serum metabolites, particularly those associated with carbohydrate metabolism, fatty acids, and TCA cycle intermediates.

Stander et al. (2020) observed that most metabolic disturbances returned to baseline within 24–48

hours after marathon competition, although some metabolites such as xylulose required longer recovery periods.

San-Millán et al. (2020) identified metabolic responses in elite cyclists and suggested that lactate accumulation is closely associated with improved endurance capacity and mitochondrial adaptation. Moreira et al. (2018), using Raman spectroscopy, detected urinary metabolites linked to athletic performance in swimmers.

Nieman et al. (2013) found that intensified endurance training induced significant changes in lipid and carbohydrate metabolites that persisted even after 14 hours of recovery.

Hoeg et al. (2020) reported that phosphatidylcholine concentrations were associated with ultramarathon performance.

Shi et al. (2020) observed significant increases in amino acid and lipid metabolites after marathon running, which were correlated with VO_2max and body composition.

Methodology:

This study was designed as a systematic review conducted in accordance with Cochrane recommendations and the PRISMA guidelines. A comprehensive search strategy was applied across major international databases, including Web of Science, Scopus, and PubMed, up to September 2024. Persian-language databases, including Magiran and SID, were searched up to February 2024. Keywords in both English and Persian included terms related to exercise, sport, elite athletes, specific individual sports (running, rowing, swimming, cycling), and metabolomics. Manual searches were also conducted through Google Scholar. Two independent reviewers screened the studies, and disagreements were resolved by a third reviewer.

Inclusion criteria consisted of original human studies examining metabolomic changes in individual sports, published in either English or Persian. Exclusion criteria included animal studies, theses, conference abstracts, non-randomized studies, and investigations limited to a single acute training session. Extracted data included study design, participant characteristics, exercise protocols, analyzed biofluids, metabolomic platforms used, and reported dietary interventions where applicable.

Findings:

A total of 25 eligible studies were included, covering endurance and individual sports such as running, rowing, swimming, and cycling. These studies utilized advanced metabolomic platforms—including GC-MS, LC-MS, CE-MS, UPLC-MS, and NMR spectroscopy—to quantify metabolic changes.

The findings consistently demonstrated significant post-exercise alterations in metabolites associated with carbohydrate metabolism (e.g., lactate, pyruvate, and glycolytic intermediates), lipid metabolism (free fatty acids, acylcarnitines, glycerol), amino acid metabolism (alanine, tyrosine, valine), and ketone body production (3-hydroxybutyrate and acetoacetate). More than 100 metabolites exhibited at least a twofold increase within several hours after exercise. Although these metabolic responses were pronounced, most metabolite concentrations returned to baseline within 24–48 hours of recovery. Furthermore, differences were observed across sports disciplines, with endurance sports producing more extensive metabolic alterations than power-based individual sports.

Discussion:

The reviewed evidence indicates that exercise induces dynamic, systemic, and time-dependent changes in the human metabolome. The immediate metabolic response is characterized by accelerated carbohydrate utilization and lactate accumulation, reflecting the rapid demand for ATP resynthesis. During prolonged exercise, increased lipid oxidation and ketogenesis indicate a metabolic shift toward alternative energy substrates. Amino acid metabolism also contributes to energy production,

particularly through gluconeogenesis during extended exercise.

The consistent elevation of acylcarnitines across studies highlights their role as potential biomarkers of mitochondrial fatty acid transport and oxidation. Recovery dynamics further demonstrate that while most metabolites return to baseline within approximately 24 hours, some metabolic pathways—such as nucleotide and pyrimidine metabolism—remain altered for longer periods. These findings suggest potential applications for metabolomics in monitoring recovery and physiological adaptation. Additionally, differences in metabolomic profiles between elite and non-elite athletes highlight the potential of metabolomics for performance profiling, fatigue assessment, and individualized training strategies.

Conclusion:

This systematic review provides a comprehensive synthesis of metabolomic changes associated with endurance and individual sports. Exercise consistently modulates metabolite concentrations across multiple metabolic pathways, particularly those related to energy metabolism. These findings highlight metabolomics as a promising approach for advancing the understanding of exercise physiology and its implications for athletic performance and health promotion. Future research should prioritize large-scale cross-sectional and case-control studies to better elucidate the interactions between exercise load, metabolite dynamics, and recovery processes. Such investigations may contribute to the development of evidence-based strategies for training, nutrition, and recovery management in both elite athletes and the general population.

تغییرات نیمرخ متابولیکی به دنبال ورزش‌های انفرادی و استقامتی: یک مطالعه مروری نظام‌مند

چکیده

تاریخ ارسال:

۱۴۰۴/۰۸/۲۵

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۱۱/۲۹

شاپا الکترونیکی

۳۰۶۰-۷۰۷۸

اهداف و زمینه مطالعه:

تمرین جسمانی و ورزش باعث تغییر غلظت بسیاری از متابولیت‌ها می‌شوند. متابولیت‌ها مولکول‌های کوچکی هستند (حدود ۱/۵ کیلو دالتون) که در جریان واکنش‌های متابولیکی درون سلولی تولید یا مصرف می‌شوند. متابولومیکس به عنوان ابزاری نوین و امیدوارکننده، امکان مطالعه دقیق فیزیولوژی ورزشی و تغییرات متابولیسم مرتبط با تمرینات ورزشی را فراهم می‌سازد و در علوم ورزشی با عنوان «اسپورتومیکس» شناخته می‌شود. این مرور نظام‌مند، ارزیابی کیفی ۲۵ مطالعه مبتنی بر متابولومیکس را ارائه می‌دهد که طی دهه گذشته به بررسی تغییرات متابولوم انسان ناشی از رقابت‌های ورزشی پرداخته‌اند.

روش‌های مرور و منابع داده‌ها:

در این مطالعه یک بازبینی سیستماتیک با پیروی از دستورالعمل‌های PRISMA صورت پذیرفته است و مطالعات متابولومیک انسانی که غلظت متابولیت‌ها را قبل و ظرف ۲۴ ساعت پس از ورزش استقامتی در خون، بزاق، ادرار یا عرق بدن گزارش کردند، مورد بررسی قرار گرفته است. از این رو، مقالات در بازه سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۵ میلادی از پایگاه داده‌های PubMed، Google Scholar و Web of Science جمع‌آوری و مورد بررسی قرار گرفتند. همچنین برای مقالات به زبان فارسی، پایگاه‌های اطلاعاتی شامل جهاد دانشگاهی، پژوهشگاه اطلاعات و مدارک علمی ایران (ایرانداک) و بانک اطلاعات نشریات کشور (مگیران)، از سال ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۴ مورد جستجو قرار گرفتند.

یافته‌ها و نتیجه‌گیری:

از میان ۲۵۷ مقاله اولیه مرتبط، پس از حذف موارد تکراری، غربالگری دقیق متن کامل و بررسی معیارهای از پیش تعیین‌شده، در نهایت ۲۵ مقاله واجد شرایط وارد مطالعه شدند. نتایج نشان داد که در انواع مختلف رقابت‌های ورزشی، میانگین غلظت متابولیت‌های مرتبط با متابولیسم انرژی و سایر مسیرهای متابولیکی اغلب به صورت مداوم دچار تغییر می‌شود. مطالعات، تغییرات قابل توجهی را در متابولیت‌های مرتبط با لیپیدها، چربی‌ها و کربوهیدرات‌ها گزارش کرده‌اند؛ به طوری که بیش از ۱۰۰ متابولیت طی چند ساعت پس از فعالیت ورزشی، دو برابر یا حتی بیش از آن افزایش یافته‌اند. با این حال، تغییرات متابولیتی حتی پس از فعالیت‌های ورزشی شدید، معمولاً پس از حدود یک روز دوره ریکاوری به سطوح نزدیک به پیش از تمرین بازمی‌گردند. در مجموع، این مجموعه داده حاصل از متابولیت‌های شناسایی شده می‌تواند به عنوان منبعی ارزشمند برای پژوهشگرانی که به مطالعه متابولیسم تمرین ورزشی در انسان علاقه‌مند هستند، مورد استفاده قرار گیرد.

واژگان کلیدی: نیمرخ متابولیکی، متابولیت، تمرین جسمانی، اسپورتومیکس

منصوره کریمی^۱

۱- گروه تربیت بدنی، دانشکده علوم انسانی و علوم ورزشی، دانشگاه گنبد کاووس، گلستان، ایران.

معصومه نوبهار^۲

۲- گروه تربیت بدنی، دانشکده علوم انسانی و علوم ورزشی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران.

* نویسنده مسئول: منصوره کریمی
ایمیل:

mansourehkarimiii@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0000-1271-4965>

مقدمه:

پاسخ‌های فیزیولوژیکی و متابولیکی بدن به ورزش و فعالیت‌های بدنی برای دهه‌ها توجه پژوهشگران را به خود جلب کرده است (۱، ۲). فعالیت بدنی حاد و مزمن باعث سازگاری‌های گسترده در اندام‌ها و سیستم‌های مختلف بدن شده که منجر به بهبود سلامتی می‌شود (۳). پیشرفت‌های فناورانه در سال‌های اخیر این امکان را برای محققان فراهم کرده است تا این سازگاری‌ها را با استفاده از رویکردهای سیستم‌های بیولوژیکی به صورت کمی ارزیابی کنند؛ به طوری که اطلاعات ژنتیکی، رونویسی ژن‌ها، پروتئومیکس و متابولومیکس به طور هم‌زمان مورد بررسی قرار می‌گیرند (۴، ۵). اجرای تمرینات ورزشی در ورزشکاران حرفه‌ای با تغییرات قابل توجهی در پروفایل متابولیکی خون همراه است که این تغییرات تا حد زیادی به نوع، شدت و مدت برنامه تمرینی وابسته هستند (۶، ۷). در حال حاضر، نشانگرهای رفتاری، بیوشیمیایی، هورمونی و ایمنی به طور معمول برای ارزیابی وضعیت بدنی ورزشکاران در طول دوره‌های تمرینی مورد استفاده قرار می‌گیرند (۸، ۹). با این حال، شواهد علمی نشان می‌دهد که این آزمون‌های متداول از حساسیت کافی برای تشخیص تفاوت‌های ظریف فیزیولوژیکی بین ورزشکاران و افراد گروه کنترل یا تمایز دقیق وضعیت قبل و بعد از تمرین برخوردار نیستند (۱۰، ۱۱). از این رو، نیاز به استفاده از رویکردهای جامع‌تر برای شناسایی تغییرات فیزیولوژیکی در مقیاس وسیع‌تر و در پاسخ به تمرین و ورزش احساس می‌شود. در این زمینه، متابولومیکس به عنوان رویکردی نوین و کارآمد معرفی شده است. متابولومیکس به مطالعه هم‌زمان و جامع متابولیت‌های کوچک با وزن مولکولی پایین اطلاق می‌شود که به عنوان سوپستراها، واسطه‌ها، محصولات نهایی و مولکول‌های سیگنال‌دهنده در واکنش‌های آنزیمی و مسیرهای متابولیکی شرکت دارند. از آنجا که متابولیت‌ها نقطه پایانی فرآیندهای بیوشیمیایی بالادستی محسوب می‌شوند، تغییرات آن‌ها بازتابی مستقیم از فنوتیپ عملکردی و وضعیت فیزیولوژیکی واقعی بدن هستند (۱۲، ۱۳). به همین دلیل، متابولومیکس ابزاری قدرتمند برای درک پاسخ‌های پیچیده بدن به محرک‌های فیزیولوژیکی مانند تمرین ورزشی به شمار می‌رود. کاربرد متابولومیکس در حوزه علوم ورزشی با عنوان اسپورتومیکس شناخته می‌شود که به بررسی جامع تغییرات مولکولی و متابولیکی ناشی از فعالیت بدنی و رقابت‌های ورزشی می‌پردازد (۱۴، ۱۵). در دهه گذشته، اسپورتومیکس امکان اندازه‌گیری کمی پروفایل‌های متابولیکی مرتبط با ورزش را در ورزشکاران حرفه‌ای فراهم کرده و به شناسایی نشانگرهای زیستی مرتبط با عملکرد ورزشی، پاسخ به خستگی، ریکاوری و حتی بروز اختلالات مرتبط با تمرین کمک کرده است (۱۶). رویکرد متابولومیکس غیرهدفمند این قابلیت را دارد که تغییرات متابولیکی ناشی از شرایط فیزیولوژیکی مختلف، از جمله وضعیت قبل و بعد از تمرین، را بدون فرض اولیه شناسایی کند. این ویژگی امکان کشف متابولیت‌های جدید و مسیرهای ناشناخته را فراهم می‌سازد و می‌تواند اطلاعات ارزشمندی را هم برای ورزشکاران حرفه‌ای و هم برای جمعیت عمومی ارائه دهد (۱۷). این تغییرات اغلب شامل متابولیت‌های مرتبط با متابولیسم گلوکز، لیپیدها، اسیدهای آمینه و مسیرهای تولید انرژی هستند (۶، ۱۰)، به ویژه متابولیت‌هایی که در سنتز آدنوزین تری فسفات (ATP)، بتا اکسیداسیون اسیدهای چرب آزاد و تولید اجسام کتونی نقش دارند (۱۷). برآوردها نشان می‌دهد که تاکنون بین ۱۱۴۱۰۰ تا ۲۱۷۹۲۰ متابولیت مختلف در بدن انسان شناسایی شده و بیش از ۴۶۰۰۰ متابولیت یا مسیر سیگنال‌دهی

متابولیسم مورد بررسی قرار گرفته است (۱۸). با این وجود، بخش قابل توجهی از مطالعات پیشین در حوزه متابولیسم ورزشی تنها تعداد محدودی از متابولیت‌ها را اندازه‌گیری کرده و اغلب به بررسی یک یا دو مسیر متابولیسمی در یک زمان محدود شده‌اند (۱۹). این رویکرد محدودکننده، درک جامع از تعاملات پیچیده میان فیزیولوژی ورزشی، متابولیسم سلولی و عملکرد ورزشی را با چالش مواجه می‌کند.

در پاسخ به این محدودیت‌ها، طی دو دهه گذشته فیزیولوژیست‌های ورزشی به‌طور فزاینده‌ای از روش‌های متابولومیک کم‌تهاجمی و غیرتهاجمی برای ارزیابی فنوتیپ متابولیسمی، وضعیت فیزیولوژیکی و بیوشیمی ورزشی استفاده کرده‌اند (۲۰، ۲۱). افزایش علاقه پژوهشگران به متابولومیکس در ورزش عمدتاً ناشی از توانایی این روش در اندازه‌گیری هم‌زمان چندین متابولیت در نمونه‌های زیستی مختلف مانند بزاق، ادرار و عرق است که امکان دستیابی به تصویری دقیق و مولکولی از اثرات ورزش را با حداقل مداخله فراهم می‌سازد (۱۸، ۲۲، ۲۳). علاوه بر این، قابلیت متابولومیکس در بررسی فرآیندهای متابولیسمی در زمان واقعی یا طی بازه‌های زمانی چندساعته تا چندروزه، دلیل دیگری برای گسترش کاربرد آن در فیزیولوژی ورزشی محسوب می‌شود.

بر این اساس، مرور نظام‌مند حاضر با هدف ارائه یک ارزیابی کیفی از مطالعات مبتنی بر متابولومیکس منتشرشده در دهه‌های اخیر انجام شده و به بررسی تغییرات متابولوم انسان در پاسخ به ورزش‌های استقامتی می‌پردازد. ورزش‌های استقامتی با ایجاد تغییرات پویا در پروفایل متابولومیک، نشان‌دهنده سازگاری‌های مهمی در متابولیسم انرژی، افزایش استفاده از لیپید و تعدیل پاسخ‌های التهابی هستند. این تغییرات معمولاً شامل افزایش اکسیداسیون اسیدهای چرب، تغییر در سطح اسیدهای آمینه و اصلاح ترکیب گونه‌های لیپیدی به منظور تامین نیازهای انرژی هوازی طولانی مدت ورزشکاران است. یافته‌های این بررسی می‌تواند چارچوبی مبتنی بر شواهد برای طراحی مطالعات آینده و توسعه رویکردهای تمرینی هدفمند در ورزش‌های استقامتی فراهم سازد.

روش تحقیق:

این پژوهش یک مطالعه مرور سیستماتیک است که بر اساس دستورالعمل کوکران و با استفاده از بیانیه پریزما (PRISMA) انجام شد.

روش جستجوی مقالات

در این مطالعه مروری، به منظور بررسی جامع تغییرات نیمرخ متابولومیک به دنبال ورزش‌های استقامتی، از یک استراتژی جستجوی دقیق و ساختار یافته استفاده شد. بدین منظور ابتدا جستجو برای مقالات فارسی در پایگاه‌های داده مگیران^۱ و مرکز اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی^۲ با استفاده از کلمات کلیدی "تمرین بدنی"، "ورزش"، "ورزشکاران نخبه"، "دوندگان"، "قایقرانان"، "شناگران"، "دوچرخه سواران"، "متابولیت"، "متابولومیک"، "اسپورتومیکس"، "استقامتی کاران" تا اسفند ماه ۱۴۰۳ انجام شد. سپس این کلید واژه‌ها با استفاده از عملگرهای بولی (AND, OR) به صورت ترکیبی برای جستجو در

1 . Magiran

2 . SID

بانک های اطلاعاتی برای جستجوی مقالات انگلیسی در پایگاه‌های اطلاعاتی وب آو ساینس^۱، اسکوپوس^۲ و پابمد^۳ بدون محدود کردن سال انتشار تا سپتامبر ۲۰۲۵ انجام شد. همچنین با استفاده از کلمات انگلیسی "Physical", "exercise", "Sport", "Eliteathletes", "Runners", "Rowings", "Swimmer", "Cyclists", "Metabolite", "Meta", "bolomics", "Sportomics", "Endurance athletes" صورت گرفت. سپس، جستجو به روش دستی در گوگل اسکولار^۴ نیز مورد استفاده قرار گرفت. جستجو پایگاه‌های اطلاعاتی توسط دو محقق به صورت مستقل انجام گردید. همچنین در صورت در دسترس نبودن متن کامل مقاله، با نویسنده مسئول مقاله به صورت ایمیل مکاتبه صورت گرفت.

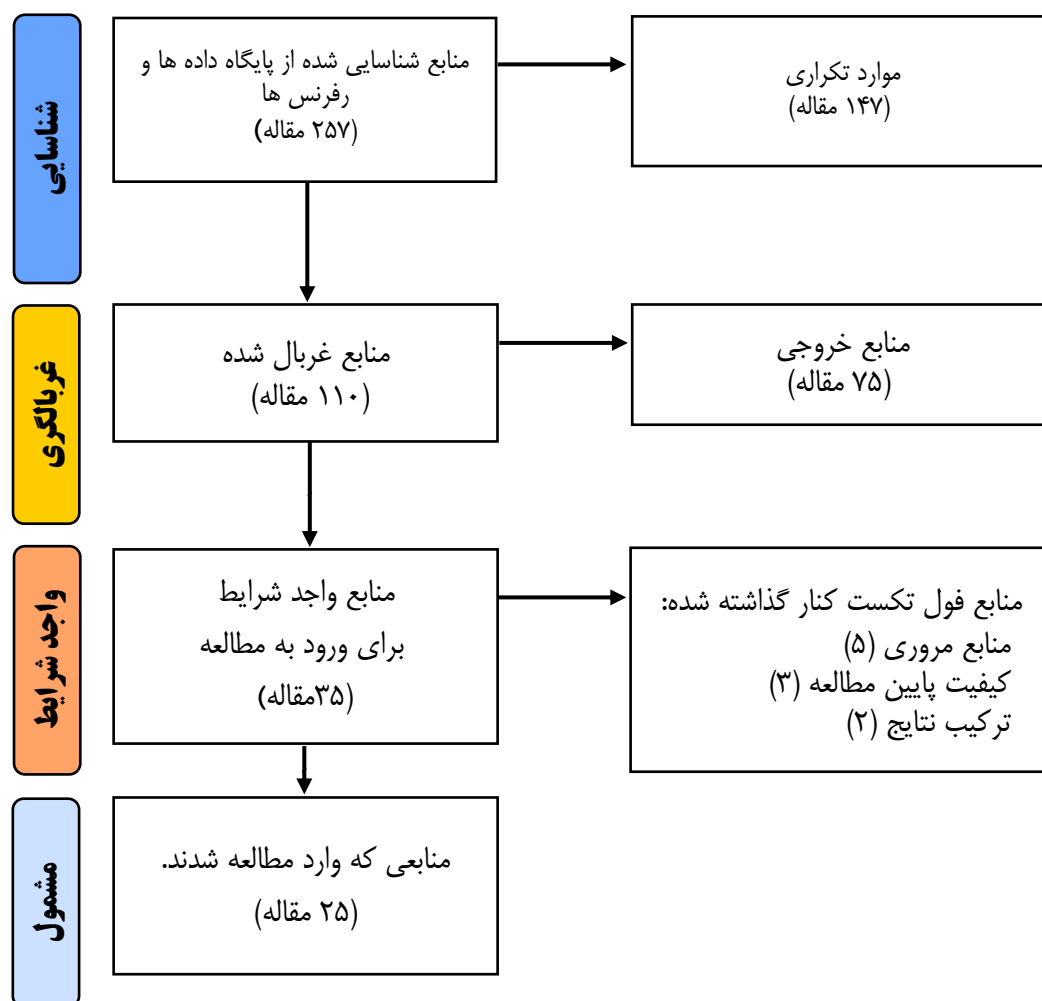
معیارهای ورود و خروج از تحقیق

برای انجام مطالعه سیستماتیک حاضر، مقالات با مشخصات زیر وارد مطالعه شدند. ۱- مطالعات انجام شده بر روی ورزشکاران رشته‌های انفرادی استقامتی؛ ۲- مطالعات منتشر شده به زبان‌های انگلیسی و فارسی؛ ۳- مطالعاتی که شناسایی متابولیت‌های جدید در ورزشکاران المپیک و استقامتی کاران را شامل شد. معیارهای خروج از مطالعه شامل پایان نامه‌ها، مقالات در همایش‌ها و مطالعاتی که بر روی حیوانات انجام شده بود. لازم به ذکر است که مطالعات غیرتصادفی شده^۵ (NRs) و مطالعات متقاطع^۶ از مطالعه حاضر خارج شدند. بررسی اولیه عنوان و چکیده مقالات به صورت مستقل توسط دو پژوهشگر انجام شد و در صورت بروز اختلاف نظر، تصمیم نهایی با توافق مشترک اتخاذ گردید.

استخراج داده‌ها

پس از انتخاب نهایی مقالات، متن کامل تمامی مطالعات واجد شرایط به دقت بررسی شد و فرآیند استخراج داده‌ها توسط دو پژوهشگر به صورت مستقل انجام گرفت. اطلاعات استخراج شده شامل نوع مطالعه، نام نویسنده یا نویسندگان، سال انتشار، ویژگی‌های آزمودنی‌ها، پلتفرم یا روش آنالیز متابولیت‌ها، طرح پژوهش و نوع نمونه بیولوژیکی مورد بررسی بود. جزئیات مربوط به فرآیند انتخاب و غربالگری مطالعات در شکل ۱ ارائه شده است.

-
- 1 . Web of Science
 - 2 . Scopus
 - 3 . PubMed
 - 4 . Google Scholar
 - 5 . A non-randomized study
 - 6 . Crossover



شکل ۱. فرآیند انتخاب مقاله مطابق با دستورالعمل‌های PRISMA

یافته‌ها:

در این قسمت ویژگی‌های مطالعات و خلاصه نتایج در دو بخش کلی استقامتی و انفرادی شامل ۲۵ مطالعه مورد بررسی قرار گرفته است.

موجودات زنده سیستم‌های پایداری هستند حتی اگر مولکول‌های موجود در موجودات دائماً در تعداد بی‌شماری از واکنش‌های شیمیایی تغییر کنند، همچنان پایدار می‌ماند. از این‌رو، متابولیت‌ها مولکول‌هایی هستند که در واکنش‌های متابولیکی موجود زنده تغییر می‌کنند یا واکنش نشان می‌دهند (۲۴، ۲۵). متابولومیک یکی از جدیدترین علوم اومیکس (omics) است که امکان تجزیه و تحلیل کمی و کیفی همزمان متابولیت‌های مختلف موجود در نمونه‌های بیولوژیکی را فراهم می‌کند. این سنجش از طریق استفاده از پلتفرم‌های مختلف مبتنی بر طیف سنجی جرمی^۱ (MS) مانند الکتروفورز مویرگی-طیف سنجی جرمی^۲ (CE-MS)، کروماتوگرافی مایع-طیف سنجی جرمی^۳ (LC-MS) و/یا کروماتوگرافی مایع فوق العاده-طیف سنجی جرمی^۴ (UPLC-MS)

1 . Mass spectrometry

2 . Capillary Electrophoresis-Mass Spectrometry

3 . Liquid chromatography-mass spectrometry

4 . Ultra-Performance Liquid Chromatography-mass spectrometry

کروماتوگرافی گازی - طیف سنجی جرمی^۱ (GC-MS)، یا طیف سنجی تشدید مغناطیسی هسته ای^۲ (NMR) حاصل می شود (۲۶).

ماهیت پیچیده و ترکیبی ارگانیسم انسان به پاسخ‌های ورزشی، استفاده از متابولومیک را به روشی مفید برای پر کردن شکاف‌های درک فعلی ما از پاسخ‌های سلولی مرتبط با انجام تمرینات ورزشی، تبدیل می‌کند (۲۷). در کمتر از دو دهه گذشته، تعداد قابل توجهی از مطالعات از رویکرد متابولومیکس برای بررسی تأثیر مداخلات مختلف تغذیه‌ای و ورزشی بر اختلالات و تغییرات متابولیتی در طول فعالیت ورزشی و نیز فرآیند ریکاوری پس از تمرینات طولانی مدت و پرفشار استفاده کرده‌اند. متابولومیکس به دلیل قابلیت اندازه‌گیری و شناسایی همزمان تغییرات صدها متابولیت از مسیرهای متابولیکی متنوع، ابزاری ایده‌آل برای ارزیابی پاسخ‌های متابولیکی بدن به مداخلات حاد ورزشی به شمار می‌رود. با توجه به این ویژگی‌ها، فیزیولوژیست‌های ورزشی در سال‌های اخیر به‌طور فزاینده‌ای از رویکرد متابولومیکس در مطالعات ورزشی بهره گرفته‌اند تا پاسخ‌های سلولی، بافتی و اندامی بدن به انواع خاصی از تلاش‌های فیزیکی را با دقت بیشتری بررسی کنند (۱۸، ۲۸). در این راستا، جدول ۱ نمای کلی از مطالعات پیشین منتشر شده را ارائه می‌دهد که به کاربرد تجزیه و تحلیل متابولومیکس در ورزشکاران رشته‌های انفرادی - استقامتی پرداخته‌اند.

بر اساس گزارش پژوهشگران نخستین مطالعه‌ای که به‌طور رسمی به کاربرد متابولومیکس در حوزه ورزش پرداخت، در سال ۲۰۱۰ توسط لوئیس و همکاران منتشر شد (۶). افزون بر این، مطالعه مروری حاضر نخستین مطالعه‌ای است که به‌صورت اختصاصی به بررسی کاربرد متابولومیکس در ورزش‌های انفرادی و استقامتی می‌پردازد. از مجموع مطالعات شناسایی‌شده، ۱۱ مطالعه بر روی دوندگان، ۸ مطالعه بر روی دوچرخه‌سواران، ۲ مطالعه بر روی قایقرانان و ۴ مطالعه دیگر بر روی سایر رشته‌های ورزشی انجام شده است.

جدول ۱. خلاصه‌ای از مطالعات منتشر شده مربوط به بررسی تغییرات نیمرخ متابولومیکس مربوط به ورزش‌های انفرادی و استقامتی

نویسنده و سال انتشار	آزمودنی‌های مطالعه	پلت فرم بررسی متابولیت	طرح تحقیق	نمونه مورد بررسی	یافته‌ها
Yan et al. (2009) (10)	۲۸مرد پاروزن جوان	GCTOF-MS	دو هفته قایقرانی و تمرینات قدرتی	سرمی	افزایش غلظت کربوهیدرات‌ها، اسیدهای چرب، واسطه‌های TCA، کتون‌ها و کاهش غلظت اسیدهای آمینه نشان داده شد که بیانگر تغییر متابولیک بین سیستم‌های مختلف سوسترای سوخت بود. افزایش اسیدهای چرب زنجیر فرد و اسیدهای- α هیدروکسی نشان داده شد که استفاده از اکسیداسیون α و اتوفاژی را به عنوان مکانیسم‌های جایگزین تولید انرژی عنوان کرد.
Stender et al. (2018) (29)	۳۱ دهنده ماراتن ۱۹ مرد و ۱۲ زن	GC-TOFMS	۴۲ کیلومتر دوی ماراتن	سرمی	۷۰ متابولیت شیمیایی شناسایی شد. کربوهیدرات‌ها، اسیدهای چرب، واسطه‌های TCA، کتون‌ها و اسیدهای آمینه؛ اسیدهای چرب با زنجیره فرد و اسیدهای هیدروکسی را بیشترین متابولیت‌های تولید شده در نظر گرفت.
Stender et al. (2020) (30)	۱۶ دهنده ماراتن ۱۰ مرد و ۶	GC-TOFMS;	مسابقه دوی ماراتن	سرمی	۶۱ متابولیت شیمیایی شناسایی شد که شامل اسیدهای آمینه، اسیدهای چرب، TCA، کربوهیدرات‌ها و واسطه‌های مرتبط با آن بود. همچنین فعال شدن گلیکوزنز، سنتز نوکلئوتیدهای وابسته به

1. Gas Chromatography-Mass Spectrometry
2. Nuclear Magnetic Resonance Spectrometer

یوریدین، سنتز پروتئین و غیرفعال شدن اتوفازی سلولی نیز رخ داد.	زن				
همبستگی مقادیر زیادی متابولیت با تجمع لاکتات، سازگاری‌های متابولیکی را نشان داد که همراه با بهبود ظرفیت استقامتی ایجاد شد. در دوچرخه سواری افزایش متابولیت‌های TCA و پیش سازهای کوآنزیم A ایجاد شد. این پاسخ‌ها متناسب با تجمع لاکتات رخ می‌دهد، که نشان دهنده ارتباط بین شبکه‌های افزایش یافته میتوکندری و توانایی حفظ بار کاری بالاتر است.	۲۱ مرد دوچرخه سوار	UHPLC-MS	تمرین درجه بندی شده، تست دوچرخه سواری تا حد خستگی	سرمی	Sen Milan et al. (2020) (31)
متابولیت‌هایی مانند کراتین، اجسام کتون، فسفات و ترکیبات نیتروژنی شناسایی شدند.	۲۳ شناگر حرفه ای ۱۵ مرد و ۸ زن	RS ¹	۶ کیلومتر شنا در ۱۵۰ دقیقه	ادرار	Mori Yera et al. (2018) (32)
۷۵ متابولیت شیمیایی شناسایی شد. بلافاصله پس از ۳ روز تمرین، ۲۲ مورد متابولیت مربوط به متابولیسم لیپید/کارتینین، ۱۳ متابولیت مربوط به متابولیسم اسید آمینه/پپتید، متابولیسم هموگلوبین/پورفیرین و واسطه‌های چرخه کربس شناسایی شد.	۱۵ دونه استقامت	UPLC-MS/MS,	بیش از ۲/۵ ساعت دویدن	سرمی	Niemann et al. (2013) (33)
از ۱۵ متابولیت برتر، پنج متابولیت مربوط به تولید گلوکاتیون کبد، هشت مورد به متابولیسم کربوهیدرات، لیپید و اسید آمینه و دو مورد واسطه TCA بودند.	۱۴ دوچرخه سوار	GC-MS	۷۵ کیلومتر دوچرخه سواری	پلاسما	Niemann et al. (2012) (34)
۲۲۱ متابولیت شیمیایی شناسایی شده با ورزش تغییر کردند. همه به جز ۲۶ متابولیت مربوط به متابولیسم لیپید و کارتینین بودند. بزرگترین تغییرات برای کتون‌ها، اسیدهای چرب دی کربوکسیلات و اسیدهای چرب با زنجیره بلند دیده می‌شود.	۱۹ مرد دوچرخه سوار	UPLC-MS/MS, GC-MS	۷۵ کیلومتر دوچرخه سواری	پلاسما	Niemann et al. (2014) (35)
۵۹۰ متابولیت شناسایی شد که شامل متابولیت‌هایی بود که عمدتاً از مسیر لیپید بودند.	۲۴ مرد دونه	UPLC-MS/MS GC-MS	دویدن روی تردمیل با ۷۰ درصد تا آستانه خستگی VO2max	پلاسما	Niemann et al. (2017) (36)
تمرین با میانگین توان خروجی MMP ₄ (برای ۴۲ روز) در طی ۲۴ ساعت اول، ۷ روز و ۲۱ روز پس از آخرین خونگیری کاهش یافت و سهم متابولیت‌های مسیر هوازی کاهش یافت.	۱۰ دونه استقامت	LC-MS	تمرینات معمول ورزشکاران + ۴ جلسه ۶ × ۱۰۰۰ متر با ۹۰ درصد حداکثر سرعت دویدن هوازی، به مدت یک هفته (همراه با ۱۴ روز در معرض هیپوکسی)	پلاسما	Lauer et al. (2017) (37)
تفاوت‌های متمایزی در بیان ژن و متابولیت‌ها شامل متابولیسم انرژی، لیپیدها، سیگنال دهی انسولین و عملکرد قلبی عروقی بین دو گروه بود.	۹ دوچرخه سوار و ۸ نفر گروه کنترل	NMR	مسابقه دوچرخه سواری	ادرار	Mokherji et al. (2014) (38)
تغییرات قابل توجه در متابولیت‌های مسیرهای متابولیک، از جمله لیپیدها، ویتامین‌ها، اسیدهای آمینه، پورین، هیستیدین، بیوتیک‌ها و موارد دیگر برجسته کردند.	۱۴ دونه نخبه	LC-MS	تست دویدن تدریجی روی تردمیل	پلاسما	Monran et al. (2020) (39)
متابولیت‌های اصلی انرژی در طیف‌های NMR شناسایی شدند.	۷ ورزشکار استقامتی	NMR	دوچرخه سواری با ۷۰ درصد VO2peak تا حد واماندگی	پلاسما	Kirwan et al. (2009) (40)

Hogue et al. (2020)(41)	۱۰۲ دونه فوق مارا تن	QTOF-MS/MS Plasma	یک رقابت فوق مارا تن (۱۶۱ کیلومتر)	پلازما	چهار ترکیب، فسفاتیدیل کولین‌ها (PCs) نشان داده شده که دوندگان سریع انتهای مسیر دوی تن سطح کولین پایین تری نسبت به بازیکنان کندتر در پایان مسابقه داشتند.
Chorl et al. (2009)(42)	۲۴ دوچرخه سوار	GC-TOF-MS	۹۰ دقیقه کار با دوچرخه ارگومتر	سرمی	نشانگر کاتابولیک ۳-متیل هیستیدین کاهش یافت.
Mitchell et al. (2009) (43)	۴۴ قایقران	NMR	۱۰۰۰ متر رکاب زدن با شدت بالا-۵۰ دقیقه با شدت زیر پیشینه	پلازما و ادرار	بررسی پروفایل‌های متابولیک پلازما و ادرار، نشان داد تأثیر نوشیدنی ورزشی مبتنی بر چای سبز را بر سطح گلوکز، سترات و لاکتات در پلازما و بر سطح استون، ۳-OH-بوتریات و لاکتات در ادرار نشان داد. افزایش سطح کافئین و اسید هیپوریک در ادرار نشان دهنده جذب اجزای عصاره چای سبز بود.
Schader et al. (2020)(25)	۷۶ دونه مارا تن	LC-ESI-MS/MS	مسابقه مارا تن	پلازما	افزایش قابل توجه غلظت پلاسمایی آسیل کارنیتین‌ها ^۱ (AC)، نسبت (پالمیتوئیل کارنیتین + استئاروئیل کارنیتین)/کارنیتین آزاد که به عنوان نماینده‌ای برای فعالیت آنزیم میتوکندریایی کارنیتین پالمیتوئیل ترانسفراز و متابولیت‌های مرتبط با آرژنین استفاده شد، همچنین اکثر AA ^۲ و فسفولیپیدها کاهش یافت. سطح پلاسمایی AA و فسفولیپیدها ۲۴ و ۷۲ ساعت پس از مسابقه به شدت افزایش یافت. غلظت پلاسمایی متابولیت‌های مرتبط با آرژنین و AC پس از مسابقه در افراد با عملکرد پایین در مقایسه با افراد با عملکرد بالا، بالاتر بود، که نشان دهنده تجمع اسیدهای چرب و تکیه بر کاتابولیسم پروتئین برای تأمین انرژی پس از رویداد مارا تن بود.
Shi et al. (2020)(44)	۲۰ دونه مارا تن	UHPLC-MS/MS and GC-TOF/MS	مسابقه مارا تن	سرمی	تجزیه و تحلیل متابولیک نشان داد که در مقایسه با قبل از مسابقه، متابولیت‌های اسید پیروویک، اسید گلیسیریک، اسید مالیک، اسید سیس-اکونیتیک، اسید گالاکتورونیک، متیل فوماریک اسید، مالتوتریوز و سایرین به طور قابل توجهی پس از رقابت افزایش یافت. گلوکز آمین و O-succinyl-L-و هموسیستین به طور قابل توجهی کاهش یافت. شاخص های اسید آمینه مانند آلانین، ال-تیروزین و فنیل آلانین پس از ورزش در مقایسه با قبل از ورزش به طور معنی داری افزایش یافت، در حالی که سرین، والین و آسپاراژین به طور معنی داری کاهش یافت. شاخص‌های متابولیسم لیپید، گلیسرول، اسید گلیسیریک، اسید اکتانویک و اسید کوئینیک به طور معنی داری افزایش یافت. تتوفیلین، گزانتین و سایر شاخص‌های متابولیسم کافئین به طور قابل توجهی افزایش یافت.
Niemann et al. (2012)(45)	۳۱ دونه مارا تن	UPLC-MS/MS, GC-MS	دو ساعت و ۳۰ دقیقه دوی تن برای سه روز با شدت ۷۰ درصد VO2max	پلازما	۱۵ متابولیت شناسایی شد متابولیسم کربوهیدرات، لیپید و اسید آمینه و دو مورد واسطه‌های چرخه TCA بودند.
Goncalves et al. (2012)(46)	۳۰ جیجتسوکار	UHPLC-MS/MS	۶ دقیقه مسابقه جیجتسوکار	سرم	افزایش لنفوسیت‌ها و آمونیاک به طور همزمان توسط مکمل آرژنین کاهش یافت. افزایش لنفوسیت‌های سرم می‌تواند به تغییرات در آمونمی و متابولیسم آمونیاک مربوط باشد.
Neal et al. (2013)(47)	۱۲ دوچرخه سوار	NMR	۶ هفته تمرین دوچرخه سواری	ادرار	هیچ تغییری در فعالیت آنزیم میتوکندری پس از تمرین مشاهده نشد.

1. Acylcarnitines
2. Amino acids

نشانگرهای سازگاری متابولیک عضلانی تا حد زیادی بدون تغییر بودند. بیشتر نشانگرهای متابولیک استرس متابولیک سلولی بدون تغییر بودند.					
Bruce et al. (2010)(48)	۱۰ دوچرخه سوار	GC-TOF-MS	دو دقیقه دوچرخه سواری با شدت ۵۰-۹۰ درصد Wmax تا حد واماندگی	پلازما	در رابطه با متابولیسم انرژی و اسید آمینه و استرس اکسیداتیو متابولیت‌های اساسی شناسایی شدند.
Pike et al. (2014)(49)	۱۰ دوچرخه سوار	GC/MS	یک جلسه تمرین HIIT با ۷۲ درصد VO2 max و تمرین MOD با ۶۶ درصد VO2 max	پلازما	۴۹ متابولیت شیمیایی شناسایی شد. ۲۹ مورد با ورزش تغییر کرد. ۱۱ مورد با تمرین HIIT ^۱ و MOD ^۲ تغییر کردند؛ ۱۳ متابولیت فقط با تمرین HIIT تغییر کردند؛ ۵ مورد فقط با MOD تغییر کردند. اکسیداسیون کربوهیدرات و اکسیداسیون چربی، گلوکز و لاکتات در ساعت صفر (ابتدای تمرین) در HIIT در مقایسه با MOD بالاتر بود.
Al-Khalifi et al. (2018)(50)	۱۹۱ ورزشکار نخبه ۱۷۰ مرد، ۲۰ زن	UHPLC-LC/MS	شرکت در رویداد های ملی و بین المللی	سرم	۷۴۳ متابولیت شیمیایی شناسایی شد؛ متابولیت‌های استرس اکسیداتیو مشترک در ورزش‌های پر قدرت و با استقامت بالا به‌طور یکسان دیده شدند. مسیرهای استروئیدی و پلی آمینی در استقامتی-کاران برجسته تر بود. استرول‌ها، پورین‌های حاوی آدنین و متابولیت‌های انرژی با قدرت بیشتر آشکار شدند.
Hu et al. (2018)(51)	۹ مرد دوندۀ فوق ماراثن	UHPLC LC-MS/	یک مسابقه تایم تریل ۸۰.۵ کیلومتری خودگام بر روی تردمیل	پلازما	۴۴۶ متابولیت شیمیایی شناسایی شد، تعداد زیادی از اسیدهای آمینه پس از ۸۰.۵ کیلومتر کاهش یافتند و متابولیسم اسیدهای چرب با افزایش تشکیل اسیدهای چرب غیراشباع و تا حدی اکسید شده با زنجیره متوسط و ترکیبات اسیدهای چرب با کاربنتین‌ها تحت تأثیر قرار گرفت.

بحث:

در این مطالعه، تغییرات غلظت متابولیت‌ها در خون و سایر مایعات زیستی انسان طی بازه زمانی ۲۴ ساعت پس از انجام تمرینات انفرادی-استقامتی مورد بررسی قرار گرفت. مطالعه حاضر نخستین تحلیل جامع از یافته‌های مطالعات متابولومیک است که بر پایه داده‌های استخراج‌شده از ورزشکاران رشته‌های انفرادی-استقامتی انجام شده و با بهره‌گیری از روش‌های متنوع تحلیلی، ترکیب متابولیتی مایعات زیستی مختلف را ارزیابی می‌کند.

با وجود ناهمگونی‌های قابل توجه در طراحی پژوهش‌ها، نوع نمونه‌های زیستی و روش‌های آنالیز، الگوهای مشابهی از تغییرات در غلظت برخی متابولیت‌ها، به‌ویژه اسیدهای چرب و آسیدل کاربنتین‌ها، پس از فعالیت ورزشی گزارش شده است. این یافته‌ها نشان‌دهنده نقش کلیدی این ترکیبات در پاسخ متابولیکی بدن به تمرینات استقامتی هستند. با این حال، در برخی مطالعات، تغییرات متفاوت و حتی متضادی در غلظت بعضی متابولیت‌ها مشاهده شده است که احتمالاً ناشی از تفاوت در شدت و مدت تمرین، سطح آمادگی جسمانی آزمودنی‌ها، وضعیت تغذیه‌ای و زمان نمونه‌گیری پس از فعالیت ورزشی است. مجموعه داده‌های تلفیقی حاصل از این مطالعه مروری، امکان شناسایی و تبیین این تفاوت‌ها را فراهم ساخته و می‌تواند به درک عمیق‌تر سازوکارهای زمینه‌ساز این تغییرات کمک کند.

1 . High-Intensity Interval Training

2 . Moderate-intensity continuous exercise

مطابق با گزارش‌های پیشین، فعالیت ورزشی موجب تغییرات معنادار در غلظت متابولیت‌هایی می‌شود که به‌طور مستقیم در متابولیسم انرژی نقش دارند (۱۴). نیاز سریع و قابل توجه بدن به بازسازی ATP در طول ورزش، چالشی اساسی برای حفظ هموستاز متابولیکی به شمار می‌رود (۵۲). در نتیجه، با آغاز تمرینات ورزشی، جریان بسیاری از مسیرهای متابولیکی دچار تغییر شده و این امر به نوسانات قابل توجه در غلظت متابولیت‌های مرتبط با این مسیرها در خون و سایر مایعات زیستی منجر می‌شود. این تغییرات بازتاب‌دهنده بسیج و مصرف منابع انرژی مختلف، از جمله کربوهیدرات‌ها و تری‌آسیل‌گلیسرول‌ها، برای تأمین نیازهای متابولیکی عضلات فعال هستند. شواهد نشان می‌دهد که در طی فعالیت‌های استقامتی، اجسام کتونی نیز تولید شده و اسیدهای آمینه می‌توانند از طریق ورود به مسیر گلوکونئوز، در حفظ سطح گلوکز خون مشارکت داشته باشند (۱۸،۴۹). کربوهیدرات‌ها عمدتاً از طریق مسیرهای گلیکولیتیک و فسفوریلاسیون اکسیداتیو برای تولید ATP متابولیزه می‌شوند. در این میان، لاکتات یکی از متابولیت‌هایی است که به‌طور گسترده در مطالعات ورزشی اندازه‌گیری شده و به‌عنوان شاخصی مهم برای ارزیابی توان استقامتی و شدت تلاش فیزیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد (۵۱).

پس از فعالیت، سطح لاکتات و پیرووات در مایعات بدن افزایش می‌یابد، در حالی که غلظت برخی دیگر از ترکیبات مانند فورمات (یک آنیون با فرمول شیمیایی CHOO^- یا HCOO^-)، اجسام کتونی و قندهایی نظیر رامنوز کاهش می‌یابد. چرخه تری کربوکسیلیک اسید^۱ (TCA) از استیل‌کوآی مشتق شده از کربوهیدرات‌ها، اسیدهای چرب یا اسیدهای آمینه برای تولید نیکوتین آمید آدنین دی‌نوکلئوتید^۲ (NADH) و در نهایت سنتز ATP استفاده می‌کند. تمرین ورزشی منجر به افزایش واسطه‌های این چرخه، به‌ویژه در مرحله ابتدایی (تا ۳۰ دقیقه پس از تمرین)، در خون و ادرار می‌شود (۵۲).

براساس یافته‌های ارائه‌شده در جدول ۱، بخش قابل توجهی از متابولیت‌هایی که پس از تمرین افزایش می‌یابند، به لیپیدها و مسیرهای مرتبط با متابولیسم چربی تعلق دارند. از جمله مهم‌ترین این ترکیبات می‌توان به گلیسرول، اسیدهای چرب آزاد و آسیل‌کارتینین‌ها اشاره کرد. طی فعالیت بدنی، فعال‌سازی آنزیم‌های لیپاز منجر به تجزیه تری‌آسیل‌گلیسرول‌های ذخیره‌شده در بافت چربی و آزادسازی اسیدهای چرب و گلیسرول می‌شود. این ترکیبات پس از ورود به جریان خون، توسط عضلات اسکلتی برداشت شده و برای تأمین انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرند (۵۳).

تحلیل‌های ترکیبی مطالعات نشان داده‌اند که غلظت تمامی انواع اسیدهای چرب آزاد، شامل اسیدهای چرب اشباع و غیراشباع با زنجیره‌های کوتاه، متوسط و بلند، طی ۲۴ ساعت پس از تمرین افزایش می‌یابد. افزون بر این، هرچه زمان نمونه‌گیری به پایان تمرین نزدیک‌تر باشد، شدت این افزایش غلظت بیشتر گزارش شده است (۲۵،۵۰). این الگو بیانگر نقش محوری لیپیدها در تأمین انرژی طی فعالیت‌های استقامتی و دوره ریکاوری اولیه پس از تمرین است.

اسیدهای چرب جذب‌شده توسط عضلات برای ورود به میتوکندری نیازمند یک سیستم انتقال چندمرحله‌ای هستند که در آن کارتینین نقش اساسی ایفا می‌کند و منجر به تشکیل ترکیبات واسطه‌ای به نام آسیل‌کارتینین‌ها می‌شود (۵۲). اگرچه این ترکیبات درون سلول تشکیل می‌شوند، اما مطالعات متابولومیک افزایش قابل توجه سطح آسیل‌کارتینین‌ها را در خون و سایر مایعات زیستی پس از تمرین گزارش کرده‌اند که می‌تواند بازتابی از افزایش شار بتا‌اکسیداسیون و یا اشباع موقت ظرفیت اکسیداسیون میتوکندریایی باشد.

در طول فعالیت‌های ورزشی شدید، گلوکز خون و گلیکوژن عضلانی به منابع اصلی تأمین انرژی تبدیل می‌شوند. این منابع از

1 . Tricarboxylic acid cycle

2 . Nicotinamide adenine dinucleotide

طریق مسیر گلیکولیز متابولیزه شده و منجر به افزایش غلظت پیرووات و لاکتات در حین و بلافاصله پس از تمرین می‌گردند. شواهد نشان می‌دهد که اگرچه غلظت این متابولیت‌ها در خون معمولاً حدود یک ساعت پس از تمرین کاهش می‌یابد، اما حضور آن‌ها در ادرار می‌تواند تا ۲۴ ساعت پس از فعالیت قابل اندازه‌گیری باقی بماند. برخلاف لاکتات و پیرووات، سایر واسطه‌های گلیکولیتیک معمولاً در خون مشاهده نمی‌شوند، زیرا اغلب به‌صورت فسفریله در داخل سلول باقی مانده و امکان خروج آن‌ها از غشای سلولی محدود است (۵۴، ۵۰).

در جریان مسابقات سنگین و فعالیت‌های ورزشی با شدت بالا، شار چرخه TCA افزایش یافته و غلظت برخی از متابولیت‌های این چرخه، از جمله مالات، در خون بالا می‌رود (۵۴، ۵۲). نتایج چندین مطالعه نشان داده است که متابولیت‌هایی نظیر سوکسینات و مالات، به‌ویژه در مراحل ابتدایی تمرینات شدید استقامتی بیشترین افزایش غلظت را نسبت به سایر زمان‌ها نشان می‌دهند (۳۱، ۴۰).

در شرایطی مانند فعالیت‌های طولانی‌مدت یا تمرین در حالت ناشتا که ذخایر کربوهیدراتی بدن کاهش می‌یابد، کبد به‌منظور حفظ تأمین انرژی، مسیرهای متابولیکی جایگزین مانند کتوژنز و گلوکونئوژنز را فعال می‌کند (۵۴، ۴۲). در این وضعیت، اجسام کتون نظیر ۳-هیدروکسی‌بوتیرات و استواسات از اسیدهای آمینه کتوزنیک مانند لوسین و لیزین تولید شده و وارد جریان خون می‌شوند. به‌طور هم‌زمان، اسیدهای آمینه گلوکوزنیک نظیر والین و گلیسین در مسیر گلوکونئوژنز برای تولید گلوکز مورد استفاده قرار می‌گیرند (۲۵). افزایش غلظت این ترکیبات و نیز متابولیت‌های حاصل از تجزیه سوبستراها مانند ۲-اکسی‌ایزوالرات پس از تمرین به‌وضوح گزارش شده است.

در مسیر گلوکونئوژنز، اسیدهای آمینه گلوکوزنیک ابتدا به پیرووات و سپس به آلانین تبدیل شده و وارد گردش خون می‌شوند. آلانین در کبد مجدداً به پیرووات و در نهایت به گلوکز تبدیل می‌شود و بدین ترتیب در حفظ گلوکز خون نقش ایفا می‌کند. هم‌زمان، ترکیبات حاصل از تجزیه این اسیدهای آمینه، از جمله N-استیل‌فیل‌آلانین و ۴-هیدروکسی‌فیل‌پیرووات نیز افزایش می‌یابند که نشان‌دهنده افزایش کاتابولیسم اسیدهای آمینه در پاسخ به فعالیت ورزشی است (۹، ۵۰).

در مجموع، این مطالعات دیدگاهی منحصربه‌فرد از متابولیسم ورزشکاران نخبه ارائه می‌دهند؛ ورزشکارانی که بالاترین سطح عملکرد را هم در طول تمرین و هم در شرایط رقابتی به نمایش می‌گذارند. بسیاری از ورزشکاران مورد بررسی، از جمله دوندگان و دوچرخه‌سواران، در سطح بین‌المللی رقابت کرده و از قهرمانان برجسته رشته‌های خود محسوب می‌شوند. از این‌رو، پروفایل‌های متابولومیک به‌دست‌آمده، بینشی نوین نسبت به بیوانرژتیک و فیزیولوژی متابولیکی عملکرد بهینه انسان فراهم می‌کنند. همچنین نشان داده شده است که استفاده از نمونه‌های زیستی در دسترس مانند خون، ادرار و حتی بافت، امکان انجام این نوع مطالعات را فراهم ساخته و زمینه کاربرد نتایج آن را نه‌تنها در ورزشکاران نخبه، بلکه در جمعیت عمومی نیز مهیا می‌سازد.

محدودیت‌های مطالعات قبلی و پیشرفت‌های بالقوه مانند سایر فناوری‌های اومیکس، متابولومیک ورزشی به‌طور

مداوم در حال رشد و بهبود بی‌وقفه است بررسی مقالات منتشر شده نشان می‌دهد که بسیاری از تحقیقات متابولومیک در ورزشکاران استقامتی از ثبات آماری کافی برخوردار نبوده‌اند. به عنوان مثال، استفاده گسترده از آمار چندمتغیره در مطالعات با حجم نمونه کوچک و فقدان اصلاح برای یافته‌های نادرست، باعث کاهش قدرت آماری و اعتبار نتایج شده است. در حالی که رعایت چنین اقدامات احتیاطی امروزه در اکثر مطالعات اومیکس، استاندارد تلقی می‌شود، بسیاری از مطالعات متابولومیک ورزشی گذشته فاقد این ویژگی‌ها بودند. علاوه بر این، فقدان کمی‌سازی مطلق متابولیت‌ها، امکان مقایسه مستقیم نتایج بین مطالعات را تقریباً غیرممکن کرده است. این موضوع عمدتاً ناشی از تفاوت در طراحی مطالعات، پلتفرم‌های تحلیلی متنوع (GC-MS در مقابل NMR در مقابل LC-MS) و روش‌های شناسایی و تعیین مقدار متابولیت‌ها است. بدون شک، اگر قرار است متابولومیک ورزشی فراتر از مرحله پژوهشی توسعه یابد، نیاز به پروتکل‌های سخت‌گیرانه و استاندارد شده مشابه آنچه در مطالعات بالینی متابولومیک به رسمیت شناخته شده، ضروری است.

با این حال، طراحی مطالعات تجربی متابولومیک در ورزش طی یک دهه گذشته به‌طور قابل توجهی پیشرفت کرده و انتظار می‌رود که این روند بهبود ادامه یابد (۱۴). پیشرفت‌های تکمیلی در جمع‌آوری داده‌های استاندارد، تحلیل آماری و پروتکل‌های گزارش‌دهی نیز به افزایش مقایسه‌پذیری و ارتقای کیفیت کلی مطالعات کمک می‌کند.

علاوه بر این، یک هدف مهم برای تحقیقات آینده متابولومیک ورزشی، ترکیب و ادغام تکنیک‌های دیگر اومیکس مانند ژنومیک، رونویسی و پروتئومیکس در طراحی مطالعات خواهد بود. استفاده همزمان از این روش‌ها امکان درک جامع و دقیق‌تر از فیزیولوژی و زیست‌شناسی ورزشکاران را فراهم می‌آورد و تعامل میان بیان ژن‌ها، پروتئین‌ها و متابولیت‌ها با محیط را به تصویر می‌کشد. چنین رویکرد یکپارچه‌ای می‌تواند پایه‌ای محکم برای بهبود عملکرد ورزشی و توسعه مداخلات تغذیه‌ای و تمرینی مبتنی بر شواهد فراهم آورد.

نتیجه‌گیری:

مطالعات نشان داده‌اند که رویکرد چند گانه در علوم اومیکس، شامل رویکردهای پروتئومیکس، ژنومیکس، ترانس کریپتومیکس، این امکان را برای مربیان ورزشی، فیزیولوژیست‌های ورزشی و متخصصان تغذیه فراهم می‌آورد که با طراحی رژیم‌های غذایی و برنامه‌های تمرینی بهینه، عملکرد ورزشکاران نخبه را بهبود بخشند. در عمل، پژوهشگران بر این باورند که در حوزه متابولومیک ورزشی باید توجه بیشتری به مطالعات انسانی شود و طراحی مطالعات با تمرکز بر شرایط واقعی و عملی انجام گیرد.

استفاده از روش‌های جمع‌آوری نمونه غیرتهاجمی، نظیر ادرار و بزاق، می‌تواند فرآیند مطالعات را در این زمینه تسهیل کرده و پایایی داده‌ها را در شرایط واقعی تمرینات ورزشی افزایش دهد. با توجه به کاربردهای اولیه و پیشرفت‌های مستمر، انتظار می‌رود که به‌کارگیری رویکردهای چندگانه در اومیکس علوم ورزشی نه تنها در ارتقا عملکرد ورزشکاران نخبه، بلکه در زمینه تمرینات بالینی و بهبود سلامت عمومی نیز رشد و توسعه یابد.

تضاد منافع

نویسندگان تصریح می‌کنند که هیچ گونه تضاد منافی در مطالعه حاضر وجود ندارد.

تشکر و قدردانی^۱

بدین وسیله از همه اساتید گرانقدری که در تکمیل این مقاله مروری نظرات ارزشمند خود را ارائه نمودند، صمیمانه سپاسگزاری می‌شود. در این مطالعه از هیچگونه حمایت مالی استفاده نشده است.

حامی مالی^۱

این مطالعه هیچ گونه حامی مالی نداشته است.

مشارکت نویسندگان^۲

همه نویسندگان در نگارش مقاله یا بازنگری آن سهیم بودند و همه با تایید نهایی مقاله حاضر، مسئولیت دقت و صحت مطالب مندرج در آن را می‌پذیرند.

نویسنده اول: گردآوری مطالب، تحلیل داده ها و نگارش پیشنهادی مقاله.

نویسنده دوم: طراحی مطالعه، نظارت بر گردآوری داده‌ها و ویرایش مقاله.

نویسنده اول و دوم: تحلیل آماری، تفسیر یافته ها و بازنگری نهایی مقاله.

استفاده اخلاقی از ابزار مبتنی بر هوش مصنوعی

من از Consensus (<https://consensus.app/search/>) برای یافتن ادبیات دانشگاهی مرتبط، بازنویسی و/یا کاهش سرقت ادبی و ExplainPaper (<https://www.explainpaper.com/dashboard>) برای کمک به درک استدلال‌های موجود در منابع استفاده کرده‌ام.

منابع:

1. Al-Khelaifi F, Diboun I, Donati F, Botrè F, Alsayrafi M, Georgakopoulos C, et al. A pilot study comparing the metabolic profiles of elite-level athletes from different sporting disciplines. *Sports Med Open*. 2018;4:1-15. [In Persian]
2. Belhaj MR, Lawler NG, Hoffman NJ. Metabolomics and lipidomics: expanding the molecular landscape of exercise biology. *Metabolites*. 2021;11(3):151.
3. Bogdanis GC. Effects of physical activity and inactivity on muscle fatigue. *Front Physiol*. 2012;3:142.
4. Bongiovanni T, Dessì A, Noto A, Sardo S, Finco G, Corsello G, et al. Sportomics: metabolomics applied to sports. The new revolution? *Eur Rev Med Pharmacol Sci*. 2019;23(24):11011-11019.
5. Bruce SJ, Breton I, Decombaz J, Boesch C, Scheurer E, Montoliu I, et al. A plasma global metabolic profiling approach applied to an exercise study monitoring the effects of glucose, galactose and fructose drinks during post-exercise recovery. *J Chromatogr B*. 2010;878(29):3015-3023.
6. Chittaro Y, Monnerat C, Sanchez A, Gonseth Y. Swiss National Coleoptera Databank. 2020.

1. Funding

2. Author Contributions

7. Chorell E, Moritz T, Branth S, Antti H, Svensson MB. Predictive metabolomics evaluation of nutrition-modulated metabolic stress responses in human blood serum during the early recovery phase of strenuous physical exercise. *J Proteome Res.* 2009;8(6):2966-2977.
8. Dunn WB, Broadhurst DI, Atherton HJ, Goodacre R, Griffin JL. Systems level studies of mammalian metabolomes: the roles of mass spectrometry and nuclear magnetic resonance spectroscopy. *Chem Soc Rev.* 2011;40(1):387-426.
9. Egan B, Hawley JA, Zierath JR. SnapShot: exercise metabolism. *Cell Metab.* 2016;24(2):342-342.e1.
10. Gabriel BM, Zierath JR. The limits of exercise physiology: from performance to health. *Cell Metab.* 2017;25(5):1000-1011.
11. Gonçalves LC, Bessa A, Freitas-Dias R, Luzes R, Werneck-de-Castro JPS, Bassini A, et al. A sportomics strategy to analyze the ability of arginine to modulate both ammonia and lymphocyte levels in blood after high-intensity exercise. *J Int Soc Sports Nutr.* 2012;9:1-9.
12. Goto K, Ishii N, Sugihara S, Yoshioka T, Takamatsu K. Effects of resistance exercise on lipolysis during subsequent submaximal exercise. *Med Sci Sports Exerc.* 2007;39(2):308-315.
13. Grazioli E, Dimauro I, Mercatelli N, Wang G, Pitsiladis Y, Di Luigi L, et al. Physical activity in the prevention of human diseases: role of epigenetic modifications. *BMC Genomics.* 2017;18:111-123.
14. Hodgson AB, Randell RK, Jeukendrup AE. The metabolic and performance effects of caffeine compared to coffee during endurance exercise. *PLoS One.* 2013;8(4):e59561.
15. Høeg TB, Chmiel K, Warrick AE, Taylor SL, Weiss RH. Ultramarathon plasma metabolomics: phosphatidylcholine levels associated with running performance. *Sports.* 2020;8(4):44.
16. Howe CC, Alshehri A, Muggeridge D, Mullen AB, Boyd M, Spendiff O, et al. Untargeted metabolomics profiling of an 80.5 km simulated treadmill ultramarathon. *Metabolites.* 2018;8(1):14.
17. Johnson CH, Ivanisevic J, Siuzdak G. Metabolomics: beyond biomarkers and towards mechanisms. *Nat Rev Mol Cell Biol.* 2016;17(7):451-459.
18. Karamanou M, Androutsos G. Antoine-Laurent de Lavoisier (1743–1794) and the birth of respiratory physiology. *Thorax.* 2013;68(10):978-979.
19. Karimi M, Bahrami A, Foroutan R, Gaeini AA. Skeletal muscle metabolomics analysis after high-intensity interval training in rats fed a high-fat diet. *Daneshvar Med.* 2024;31(5):69-91. [In Persian]
20. Khoramipour K, Sandbakk Ø, Keshteli AH, Gaeini AA, Wishart DS, Chamari K. Metabolomics in exercise and sports: a systematic review. *Sports Med.* 2022:1-37.
21. Kirwan GM, Coffey VG, Niere JO, Hawley JA, Adams MJ. Spectroscopic correlation analysis of NMR-based metabonomics in exercise science. *Anal Chim Acta.* 2009;652(1-2):173-179.
22. Lac G, Maso F. Biological markers for the follow-up of athletes throughout the training season. *Pathol Biol.* 2004;52(1):43-49.
23. Lawler NG, Abbiss CR, Raman A, Fairchild TJ, Maker GL, Trengove RD, et al. The influence of blood removal on pacing during a 4-minute cycling time trial. *Int J Sports Physiol Perform.* 2017;12(8):1085-1092.
24. Lewis GD, Gerszten RE. Toward metabolomic signatures of cardiovascular disease. *Circ Cardiovasc Genet.* 2010;3(2):119-121.
25. Miccheli A, Marini F, Capuani G, Miccheli AT, Delfini M, Di Cocco ME, et al. The influence of a sports drink on the postexercise metabolism of elite athletes investigated by NMR-based metabolomics. *J Am Coll Nutr.* 2009;28(5):553-564.

26. Mirdar S, Nobahar M, Safiri H, Sadeghpour B. The effects of one progressive session exercise per week on some hepatic enzymes in active females. 2008. [In Persian]
27. Moreira LP, Silveira L Jr, Pacheco MTT, da Silva AG, Rocco DDFM. Detecting urine metabolites related to training performance in swimming athletes using Raman spectroscopy and principal component analysis. *J Photochem Photobiol B*. 2018;185:223-234.
28. Mukherjee K, Edgett BA, Burrows HW, Castro C, Griffin JL, Schwertani AG, et al. Whole blood transcriptomics and urinary metabolomics define adaptive biochemical pathways of high-intensity exercise in masters athletes. *PLoS One*. 2014;9(3):e92031.
29. Neal CM, Hunter AM, Brennan L, O'Sullivan A, Hamilton DL, DeVito G, et al. Six weeks of polarized training-intensity distribution leads to greater adaptations than a threshold model in trained cyclists. *J Appl Physiol*. 2013.
30. Nicholson JK, Connelly J, Lindon JC, Holmes E. Metabonomics: a platform for studying drug toxicity and gene function. *Nat Rev Drug Discov*. 2002;1(2):153-161.
31. Nieman DC, Gillitt N, Jin F, Henson DA, Kennerly K, Shanely RA, et al. Chia seed supplementation and disease risk factors in overweight women: a metabolomics investigation. *J Altern Complement Med*. 2012;18(7):700-708.
32. Nieman DC, Gillitt ND, Henson DA, Sha W, Shanely RA, Knab AM, et al. Bananas as an energy source during exercise: a metabolomics approach. *PLoS One*. 2012;7(5):e37479.
33. Nieman DC, Gillitt ND, Sha W. Identification of a select metabolite panel for measuring metabolic perturbation in response to heavy exertion. *Metabolomics*. 2018;14:1-8.
34. Nieman DC, Mitmesser SH. Potential impact of nutrition on immune system recovery from heavy exertion: a metabolomics perspective. *Nutrients*. 2017;9(5):513.
35. Nieman DC, Sha W, Pappan KL. IL-6 linkage to exercise-induced shifts in lipid-related metabolites. *J Proteome Res*. 2017;16(2):970-977.
36. Nieman DC, Shanely RA, Gillitt ND, Pappan KL, Lila MA. Serum metabolic signatures induced by a three-day intensified exercise period persist after recovery. *J Proteome Res*. 2013;12(10):4577-4584.
37. Nieman DC, Shanely RA, Luo B, Meaney MP, Dew DA, Pappan KL. Metabolomics assessment of plasma lipid metabolites after 75-km cycling. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol*. 2014;307(1):R68-R74.
38. Ormsbee MJ, Thyfault JP, Johnson EA, Kraus RM, Choi MD, Hickner RC. Fat metabolism and acute resistance exercise in trained men. *J Appl Physiol*. 2007;102(5):1767-1772.
39. Patti GJ, Yanes O, Siuzdak G. Metabolomics: the apogee of the omics trilogy. *Nat Rev Mol Cell Biol*. 2012;13(4):263-269.
40. Peake JM, Tan SJ, Markworth JF, Broadbent JA, Skinner TL, Cameron-Smith D. Metabolic and hormonal responses to high-intensity interval versus continuous exercise. *Am J Physiol Endocrinol Metab*. 2014;307(7):E539-E552.
41. Pitsiladis Y, Maughan R. Effects of exercise and diet manipulation on prolonged exercise in heat and cold. *J Physiol*. 1999;517(3):919-930.
42. Qi S, Li X, Yu J, Yin L. Research advances in the application of metabolomics in exercise science. *Front Physiol*. 2024;14:1332104.
43. Ra SG, Maeda S, Higashino R, Imai T, Miyakawa S. Metabolomics of salivary fatigue markers in soccer players. *Appl Physiol Nutr Metab*. 2014;39(10):1120-1126.
44. Sahlin K, Górski J, Edstrom L. Influence of ATP turnover on IMP formation in rat skeletal muscle. *Am J Physiol Cell Physiol*. 1990;259(3):C409-C412.
45. San-Millan I, Stefanoni D, Martinez JL, D'Alessandro A, Nemkov T. Assessment of metabolic responses to exercise in elite cyclists. *Med Sci Sports Exerc*. 2020;52(7S):1076.

46. San-Millán I, Stefanoni D, Martinez JL, Hansen KC, D'Alessandro A, Nemkov T. Metabolomics of endurance capacity in world tour cyclists. *Front Physiol.* 2020;11:578.
47. Schader JF, Haid M, Cecil A, Schoenfeld J, Halle M, Pfeufer A, et al. Metabolite shifts induced by marathon competition differ by fitness level. *Metabolites.* 2020;10(3):87.
48. Shi R, Zhang J, Fang B, Tian X, Feng Y, Cheng Z, et al. Runners' metabolomic changes following marathon. *Nutr Metab.* 2020;17:1-12.
49. Silva C, Perestrelo R, Silva P, Tomás H, Câmara JS. Breast cancer metabolomics: from analytical platforms to multivariate analysis. *Metabolites.* 2019;9(5):102.
50. Stander Z, Luies L, Mienie LJ, Keane KM, Howatson G, Clifford T, et al. Altered human serum metabolome induced by marathon. *Metabolomics.* 2018;14:1-11.
51. Stander Z, Luies L, Mienie LJ, Van Reenen M, Howatson G, Keane KM, et al. Unaided recovery of marathon-induced serum metabolome alterations. *Sci Rep.* 2020;10(1):11060.
52. Verdú E, Homs J, Boadas-Vaello P. Physiological changes associated with sedentary lifestyle and modulation by exercise. *Int J Environ Res Public Health.* 2021;18(24):13333.
53. Wang Z, Zhu H, Xiong W. Advances in mass spectrometry-based multi-scale metabolomics. *Sci Bull.* 2023;68(19):2268-2284.
54. Wilkinson DJ, Crossland H, Atherton PJ. Metabolomic and proteomic applications to exercise biomedicine. *Transl Exerc Biomed.* 2024;1(1):9-22.
55. Wishart DS, Guo A, Oler E, Wang F, Anjum A, Peters H, et al. HMDB 5.0: the human metabolome database for 2022. *Nucleic Acids Res.* 2022;50(D1):D622-D631.
56. Yan B, Wang G, Lu H, Huang X, Liu Y, Zha W, et al. Metabolomic investigation of endogenous metabolites in professional athletes. *J Appl Physiol.* 2009;106(2):531-538.