

文章编号: 1004-7220(2024)04-0576-10

巴黎奥运周期竞技游泳运动生物力学研究进展

顾耀东, 汪 顺, 徐异宁
(宁波大学 体育学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 本文梳理了巴黎奥运周期内竞技游泳运动生物力学研究的最新进展, 通过分析运动生物力学在竞技游泳中的应用, 旨在揭示运动表现提升与损伤预防的关键因素, 主要涵盖技术分析 with 优化、研究方法 with 设备、表现评估 with 强化, 以及损伤预防 with 康复 4 个方面。巴黎奥运周期竞技游泳运动生物力学相关研究体现了运动生物力学在优化游泳技术动作、评估运动表现和预防运动损伤中具有重要作用。特别是最新的数据采集和分析设备, 如高精度传感器、人工智能与深度学习技术的发展, 使得对游泳技术的分析更加全面和精确。未来的研究应进一步结合多维度数据整合技术, 通过高精度运动捕捉、流体力学测量及智能分析, 深层次探索游泳技术的优化路径。

关键词: 运动生物力学; 竞技游泳; 技术优化; 伤病预防; 数据采集与分析

中图分类号: R 318.01 **文献标志码:** A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2024.04.002

Research Progress of Competitive Swimming Sport Biomechanics During Paris Olympic Games Period

GU Yaodong, WANG Shun, XU Yining

(Faculty of Sports Science, Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China)

Abstract: This review systematically polled the latest advancements in biomechanics research in competitive swimming during the Paris Olympic period together. By analyzing the application of biomechanics in competitive swimming, it reveals the key factors in performance improvement and injury prevention, mainly encompassing technique analysis and optimization, research method and equipment, performance evaluation and enhancement, and injury prevention and rehabilitation. Research related to biomechanics in competitive swimming for the Paris Olympic period highlights the significant role of biomechanics in optimizing swimming techniques, assessing athletic performance, and preventing injuries. Particularly, the advancement of sophisticated data collection and analysis equipment, such as high-precision sensors, artificial intelligence, and deep learning technologies, has made the analysis of swimming techniques more comprehensive and precise. Future research should further integrate multi-dimensional data technologies, employing high-precision motion capture, fluid mechanics measurement, and intelligent analysis to delve deeper into the pathways for optimizing swimming techniques.

Key words: sports biomechanics; competitive swimming; technique optimization; injury prevention; data collection and analysis

收稿日期: 2024-08-10; 修回日期: 2024-08-13

基金项目: 宁波市重大科技任务攻关项目 科技创新 2025 重大专项(2022Z196), 浙江省哲学社会科学规划领军人才培养课题 青年英才培育(22QNYC10ZD)

通信作者: 顾耀东, 教授, 博士生导师, E-mail: guyaodong@nbu.edu.cn

运动生物力学对竞技游泳运动的研究始于20世纪初,随着时间的推移,该领域的研究得到了国际泳联的推动,促进了大量相关成果的积累^[1]。在竞技游泳领域,运动生物力学的应用涵盖了运动表现分析、运动表现提升、竞技策略、伤病预防及康复,以及训练策略等多个方面^[2]。巴黎奥运周期,竞技游泳运动生物力学的相关研究正处于快速增长阶段,并呈现出显著的“头部效应”,一些高产出的研究机构和合作网络在该领域中占据主导地位,这些前沿研究的持续推进,将进一步提升竞技游泳运动的科学化水平,为运动员的训练和比赛提供更加精确的科学指导。

过去4年,新冠疫情极大地改变了全球体育赛事的安排,影响了里约、东京和巴黎奥运会间的奥运周期。由于各国防疫政策的差异,我国竞技游泳运动员的训练、比赛,以及相关运动生物力学研究的国际交流,均受到了不同程度的影响。基于该背景,系统梳理、总结巴黎奥运周期内竞技游泳运动生物力学研究的最新进展,对助力我国运动员的备战和参赛具有重要的价值。本文利用系统综述的方法,对巴黎奥运周期竞技游泳运动生物力学研究的前沿进展进行系统梳理,助力我国运动员参加巴黎奥运会,为未来我国竞技游泳运动生物力学相关研究提供有价值的参考和启示。

1 方法

1.1 文献检索策略和资料来源

本综述的主要中文检索词为“游泳”,次要中文检索词“生物力学”,主要英文检索词为“swim*”,次要英文检索词为“biomechanics*”,主要检索词和次要检索词之间的逻辑关联词为“和(and)”。文献资料来源为EBSCO(Sport-Discus)、Medline、PubMed、Scopus,以及“中国知网(CNKI)”数据库,文献类型包含经同行评议的国内外期刊论文,发表语言为中文或英文,发表时间为数据库创建自2024年7月。为了保证检索的全面,重点资料的参考文献列表也同时作为文献资料来源。

1.2 文献纳入与排除标准

本综述的文献纳入标准为:①研究对象为健全游泳运动员;②针对国际泳联(FINA)《FINA游泳规则》(2017年9月21日生效)中所规定的以竞速

为目的的室内竞技游泳项目,包含所有室内长池(50 m泳道)和短池(25 m泳道)项目^[3];③研究对象竞技水平达到国家级及以上水平,包含少年、青年和成年组;④发表时间为巴黎奥运会周期,即2022~2024年。本综述的排除标准为:①以残疾人为研究对象的文献;②针对铁人三项、公开水域游泳、花样游泳、水球、跳水、潜水等项目的研究文献;③受试者水平未达国家级水平,包含爱好者,中文论文中“省市级”及以下,英文论文中“regional(区域级)”及以下水平游泳运动员;④定性研究,无数据测量和量化分析。

2 结果与讨论

2.1 文献检索和筛选结果

本综述文献检索和筛选结果如图1所示。共纳入了40篇文献,其中2篇中文文献,38篇英文文献。经过对所纳入文献信息的提取和归纳,所有文献可被分为基于运动生物力学的竞技游泳技术分析和优化、研究方法及设备、表现评估和强化、损伤预防和康复4个方向。

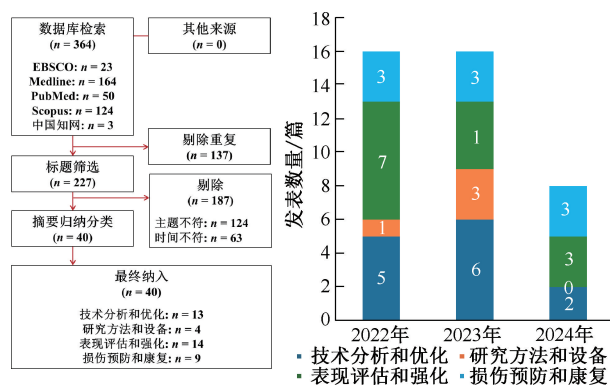


图1 文献检索和筛选结果

Fig. 1 Flow diagram of study search, screening, and selection

2.2 技术分析和优化

本综述纳入了13篇竞技游泳技术分析和优化相关研究,包含6篇文献综述和7篇实证研究,涉及研究对象或受试者的竞技水平从国家级到国际级不等,提供了全面的样本基础(见表1)。

巴黎奥运周期,基于运动生物力学的竞技游泳技术分析和优化研究主要涉及转身、划水和踢腿动作。Chainok等^[4]研究发现,转身时的蹬伸力冲量与转身时间显著相关,更高的蹬伸力冲量也带来了

表1 竞技游泳技术分析和优化相关文献

Tab. 1 Included studies about skill analysis and optimization for competitive swimming

文献	类型	人群	人数	性别比 (女/男)	主题	主要内容与结论
Ben-Zaken 等(2022)	文献综述	竞技游泳运动员	—	—	竞技游泳运动生物力学相关基因的多态性	研究了12个主要基因与竞技游泳运动生物力学特征和竞技表现的关系,发现竞技游泳运动生物力学特征和竞技表现受多个基因的共同影响
Nicol 等(2022)	文献综述	精英蛙泳运动员	38	—	精英蛙泳运动员的运动生物力学特征	近20年对精英蛙泳运动员运动表现的生物力学影响因素的实证研究主要集中在运动学、时间分析和神经肌肉活动,不同经验、水平、项目和性别之间存在差异,后续研究应针对个体进行进一步差异化分析
Correia 等(2023)	文献综述	400米自由泳运动员	651	—	400m自由泳运动表现的影响因素	划水效率、协调指数、氧耗和经济性影响400m自由泳运动表现,当流速1.34 m/s时,氧耗为 $58.8 \text{ mL} \cdot (\text{kg} \cdot \text{min})^{-1}$
Fernandes 等(2023)	文献综述	竞技游泳运动员	1 440	—	竞技游泳中的圈内速度变化	自由泳是被研究最多的泳姿。现有研究认为水上阶段速度的变化与协调指数、经济性以及疲劳等因素相关
Seifert 等(2023)	文献综述	—	—	—	4种游泳技术的协调性和划水参数	4种泳姿的协调性和划水参数因速度和划频的变化而异。当流速超过一定阈值后,手臂的协调模式从“追赶”模式转变为“重叠”模式,不同泳姿之间的流速阈值存在显著差异
Takagi 等(2023)	文献综述	自由泳运动员	—	—	基于流体动力学分析自由泳速度控制技术	分析了自由泳中的推进力和阻力,认为优化上肢推进力对提升自由泳速度的重要性
Chainok 等(2022)	实证研究	少年游泳运动员	18	—	混合泳中仰泳转蛙泳的转身技术	研究了4种不同转身技术的生物力学特征,提供了优化混合泳项目中仰泳转蛙泳技术的关键生物力学参数
Fernandes 等(2022)	实证研究	精英游泳运动员	27	—	自由泳冲刺时的水上和水下阶段的速度变化	水上阶段速度变化与平均速度不相关,水下阶段速度变化不受水上阶段速度变化的影响
Morais 等(2022)	实证研究	国家级游泳运动员	38	16/22	青年游泳运动员运动表现和生物力学影响因素的性别差异	青年游泳运动员运动表现和生物力学影响因素的分类不存在性别差异,女运动员可以与男运动员一起训练
Buoite Stella 等(2023)	实证研究	自由泳运动员	14	3/11	疲劳对肩部肌肉收缩的影响	疲劳会引起肩部肌肉的收缩特性变化,尤其是背阔肌和胸大肌。疲劳导致肩部肌肉径向收缩范围减少0.5 mm,肩关节伸展力减少0.03 N/kg
Puel 等(2023)	实证研究	精英女自由泳运动员	10	—	自由泳转身技术的运动生物力学分析	受试者平均水下转身时间2.89 s,平均流速1.88 m/s。更短的转身时间与更高的侧向冲量和更快的水下动作速率相关
Hank 等(2024)	实证研究	国家级游泳运动员	11	—	运动项目间躯干和肩部旋转力量的相互关系	游泳运动员躯干和肩部旋转力量存在显著性相关,且与其他运动项目之间存在显著差异
蔡炜程(2024)	实证研究	—	—	—	游泳技术改进的生物力学分析与应用	生物力学原理的综合运用可以显著提高游泳技术的动作效率和能量经济性

更快的转身后水下速度。Puel 等^[5]的研究则通过水下三维动作分析,筛查了与转身时间相关的所有运动生物力学变量,发现在转身期间的身体水平面产生的力量,对转身后的水下速度和转身动作的效率存在显著影响。基于这些运动生物力学研究优化技术动作,可以显著提高游泳表现,这在实际训练中具有重要意义。

另一个研究热点是出水阶段的速度控制以及每个折返周期内的速度变化。速度的变化体现了游泳过程中推力与阻力的动态平衡,可以指导运动员在不同速度下进行相应的技术调整。Fernandes 等^[6]研究显示,在短距离竞技游泳项目中的出水阶段,阻力与速度的立方成正比,这意味着运动员需要极为精确地控制手部划水动作的攻水角,以最大化推进力。而 Takagi 等^[7]通过文献综述指出,运动员通常选择增加划水频率来提高速度,但当划水频率超过一定上限后,推进力反而会下降。基于以上研究的结果,教练员和运动员可以更好地理解并优化不同速度下的技术策略,从而提高比赛成绩。

长距离项目中的运动员肌肉疲劳以及动力学分析也是一个重要的研究话题。其中,肩部肌肉的疲劳是研究关注的重点,Stella 等^[8]研究表明,肩关节复合体相关的肌肉疲劳,尤其是背阔肌和胸大肌的疲劳,会增加游泳运动损伤的风险。同时,Hank 等^[9]的研究则强调了躯干和肩部力量肌肉在游泳中的协同效应,认为游泳运动员躯干和肩部旋转力量存在显著性相关,且与其他运动项目之间存在显著差异。这些发现为不同竞技游泳项

目的训练计划设计提供了科学依据,有助于避免疲劳相关的运动损伤,提升运动员的运动表现,延长运动生涯。

此外,青少年与成年游泳运动员在运动生物力学特征上的差异,也是被关注的研究领域。Morais 等^[10]通过聚类分析将青少年国家级游泳运动员分为不同组别,发现男女性运动员在生物力学特征上的交互影响,表明性别差异在青少年阶段对训练和表现的影响显著。Nicol 等^[11]的系统综述同样表明,不同性别和经验水平的运动员在蛙泳技术上存在生物力学差异。

最后,研究还涉及到游泳技术的细化与优化。例如,Seifert 等^[12]详细归纳了 4 种游泳泳姿中的协调指数划水效率,发现 4 种泳姿中的协调指数和划水效率因泳速和划频的变化而异。

然而,尽管在巴黎奥运周期内发表的相关研究揭示了许多关键的竞技游泳运动生物力学规律及原理,但依旧存在一定的局限性。例如,对于精英运动员之间不同技术的细微差异,以及这些差异对长期训练后运动表现的累积效应以及剂量效应,还需要更多的后续研究进行深入探讨。此外,对于打腿动作在游泳推进中起到的具体效果,目前依旧存在争议,需要进一步模拟研究和实验验证,来揭示其内在力学机制^[13]。

2.3 研究方法和设备

本综述纳入了 4 篇竞技游泳运动生物力学研究方法与设备相关文献,包含 2 篇文献综述和 2 篇实证研究(见表 2)。

表 2 竞技游泳运动生物力学研究方法与设备相关文献

Tab. 2 Included studies about skill analysis and optimization for competitive swimming

文献	类型	人群	人数	性别 (女/男)	方法或设备	主要内容与结论
Lopes 等(2022)	文献综述	竞技游泳运动员	75	—	数值模拟与实验验证	迎水横截面积和技术是决定水中阻力的关键因素
Kwok 等(2023)	文献综述	自由泳运动员	16	—	水下表面肌电图	综合了 16 篇文献,认为水下表面肌电图法可以用于评价自由泳表现,重点应研究下肢和躯干肌肉
Quental 等(2023)	实证研究	游泳运动员	—	—	逆动力学方法	计算游泳动作中的运动员所受到的内部力和外部力,发现与先前研究所报告一致
Sequeira 等(2023)	实证研究	游泳运动员	—	—	逆动力学方法	集成开源软件和全身生物力学模型,发现自由泳划水动作过程中,关节力矩从远端到近端逐渐增加,与先前研究所报告一致

在研究方法方面,近年来,运动捕捉数据和流体动力估算结合的研究方法,为竞技游泳运动生物力学分析提供了新的视角。Lopes等^[14]的系统综述回顾了用于估算游泳中阻力的实验方法,指出运动员迎水横截面积和技术水平是影响阻力大小的关键因素。Quental等^[15]提出了一种基于Swumsuit软件的多系统动力学的方法,该方法使用逆向动力学分析计算游泳动作中的运动员所受到的内力和外力,并验证了该方法的有效性。此外,Sequeira等^[16]同样利用Swumsuit软件开发了估算游泳过程中流体动力的逆向动力学分析框架。该研究采用全身生物力学模型,计算自由泳划水过程中的流体力和关节力矩。结果显示,自由泳划水过程中,关节力矩从远端到近端逐渐增加。

在研究设备方面,随着设备的迭代和发展,传统方法得到了优化,高速摄像、三维运动捕捉、肌肉电信号采集和分析以及惯性加速度计等传统设备在过去无法实现水下应用,而如今不仅开发出了水下使用的版本,还与计算机科学技术相结合,解决了数据储存、信号同步以及误差修正等技术难题。例如,无线肌电图技术的应用,使得运动员在游泳过程中的肌肉活动记录更加精准和便捷。无线肌电图技术消除了有线设备的限制,提供了更自然的数据,帮助教练和研究人员实时获取并分析肌肉活动数据^[17]。同时,近年来我国自主研发的游泳无标记动作识别与分析系统(见图2),通过建立多维度,全天候的智能游泳训练设备,利用基于视频的人工智能运动识别系统和运动评估关键技术,对采集的

运动视频进行智能解析并输出人体运动三维坐标,实现运动员速度的监控,并提取分段成绩进行关键技术分析,进而结合世界纪录及冠军模型技术特征进行评估和指导反馈^[18]。

2.4 表现评估和强化

在巴黎奥运周期内,基于运动生物力学的竞技游泳运动表现评估和强化策略的研究涌现出许多前沿课题。本综述共纳入了15篇相关文献,包含6篇文献综述和9篇实证研究(见表3)。

在竞技游泳运动表现评估和分析方面,首先,体型特征是影响游泳表现的一个重要因素。Alves等^[19]的系统综述综合了2001~2021年发表的43项研究,发现更高的身高、更长的臂展以及更大的瘦体重,与更优划水效率和协调指数显著相关。这表明体型特征对游泳运动表现有显著影响,可以基于这些数据优化选材和训练。其次,Hotub等^[20]探讨了下肢爆发力与水下海豚腿动作运动生物力学参数之间的关系,发现运动员在垂直纵跳测试中的下肢爆发力与水下海豚腿阶段的游速之间存在显著的强相关性,尤其是男性运动员。该结果强调了陆地力量训练的重要性,其所提供的爆发力收益可以直接转化为运动员在水中的运动表现。此外,近年来的研究还进一步证实了运动生物力学参数在预测和评估游泳运动表现中的价值及可靠性,Monteiro等^[21]研究表明,运动生物力学参数在渐进性长期游泳训练计划中对运动员表现评估和预测具有高可重复性和可靠性,证实了运动生物力学参数对游泳运动表现评估的价值。Silva等^[22]的系统综述则分析了不同因素对自由泳协调指数和运动表现的影响,强调了动作稳定性和协调性对于优化运动员的技术和提高比赛成绩至关重要。此外,水下阶段的运动表现也是竞技游泳运动表现评估的重要内容。Ruiz-Navarro等^[23]的系统综述分析了波动式水下技术的关键生物力学因素,发现打腿频率、足见垂直速度、身体波动传递速度和髋关节角速度是关键变量。Veiga等^[24]研究发现,在规则范围内有控制地增加水下阶段,可以获得更大速度优势,这类研究为教练训练和比赛计划的制定提供了科学依据。最后,长距离游泳项目以及不同年龄组运动员在游泳过程中的生物力学参数变化也是研究重点之一。Morais等^[25]通过统计参数映射算法,

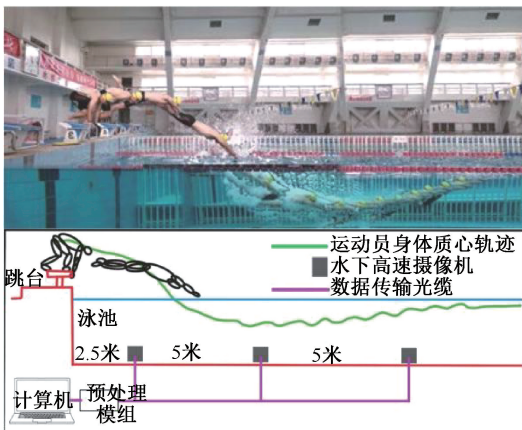


图2 游泳无标记动作识别与分析系统

Fig. 2 Marker-less motion capture and analysis system for swimming

表3 基于运动生物力学的竞技游泳表现评估和强化相关文献

Tab.3 Included studies about performance assessment and enhancement for competitive swimming based on sports biomechanics

文献	类型	人群	人数	性别 (女/男)	方法或设备	主要内容与结论
Alves 等(2022)	文献综述	青少年游泳运动员	43	—	体型与游泳表现关系	身高和臂展对自由泳有优势,体重和瘦体重有利于更好的划水效率和协调指数
Hohub 等(2022)	实证研究	精英游泳运动员	34	—	跳跃高度与水下海豚腿表现相关性	跳跃高度与游泳速度的相关性不如下肢力量显著,尤其对于男性运动员($R=0.5468$, $P=0.023$ 和 $R=0.5411$, $P=0.025$)
Monteiro 等(2022)	实证研究	竞技游泳运动员	40	—	渐进性长期游泳训练计划中监控生物力学参数可靠性与可重复性	生物力学参数重复性分析显示变量的低离散度(0.49%~9.94%),表明具有高重复性,适用于监测表现
Ruiz-Navarro 等(2022)	文献综述	竞技游泳运动员	—	—	水下波状游泳运动表现的影响因素	水下踢腿频率、身体波动传播速度和髋关节角速度是关键因素,但需进一步研究肌肉激活和力量差异的影响
Silva 等(2022)	文献综述	自由泳运动员	—	—	自由泳上肢协调性	上肢协调性随生理和个人因素变化,无最佳协调模式
Veiga 等(2022)	实证研究	国家队青年游泳运动员	12	—	自由泳项目水下阶段长度	控制增加水下阶段可优化比赛时的竞技表现,但容易增加主观疲劳程度
West 等(2022)	文献综述	竞技游泳运动员	—	—	水下波状式游泳速度的影响因素	足尖的垂直加速度和打腿频率与水下速度高度相关($R>0.90$)
Morais 等(2023)	实证研究	青年游泳运动员	120	60/60	不同年龄运动员游速	对游速变化进行综合分析可用来探究不同年龄组游泳运动员的技术特征。
Raineteau 等(2023)	实证研究	精英游泳运动员	8	8	基于线性传感器游泳运动生物力学分析	阻力-速度曲线与100 m和200 m自由泳的表现相关,其中最大相对阻力与100 m自由泳表现的相关系数为0.63
Rodríguez González 等(2023)	文献综述	游泳运动员	26	14/12	力量训练对游泳表现的影响	力量训练对中短距离游泳表现有积极影响,建议与传统训练分开安排
Tsoltos 等(2023)	实证研究	游泳运动员	8	8	陆地力量训练对游泳表现的延迟效应	陆地力量训练后上肢功能可能下降,但不会影响次日游泳训练的运动表现
Bretonneau 等(2024)	实证研究	精英游泳运动员	—	—	疲劳对游泳训练减量期后表现影响	减量期前的疲劳水平会影响运动表现,减量组表现提升($+1.80 \pm 1.36\%$),对照组表现下降($-0.49 \pm 1.58\%$),差异达到统计学显著性($P<0.05$)
Fernandes 等(2024)	实证研究	竞技游泳运动员	—	—	竞技游泳中的训练强度分区	在优化技术的前提下,基于生物力学数据对训练强度进行分区可提高训练效果
Price 等(2024)	文献综述	青年游泳运动员	43	—	青少年游泳表现的身体素质决定因素	力量训练与游泳运动表现的提升相关。力量、肌肉力量和瘦体重有利于青少年游泳表现,而体脂率的影响需进一步研究

分析了不同年龄组游泳运动员的速度变化差异, Raineteau 等^[26]基于线性传感器设备,测试并分析了100 m和200 m自由泳比赛中的阻力-速度曲线特征及其影响因素,揭示了不同距离比赛中运动员阻力-速度曲线的差异^[25-26]。

在运动表现强化方面,Rodríguez González 等^[27]的系统综述探讨了陆地力量训练对游泳表现产生影响的生物力学机制,发现力量训练不仅能提升运动员的力量和爆发力,还能改善划水效率和推进力,从而提高整体游泳速度。同时,Tsoltos 等^[28]探

讨论了陆地力量训练对游泳运动表现的效果,发现陆地力量训练能有效优化游泳过程中上肢的生理力学参数,这种分析方法帮助教练制定更科学的训练计划,以优化不同距离比赛的表现。Bretonneau 等^[29]探讨了预先疲劳干预对赛前调整训练期内运动员表现的影响,发现预先疲劳干预后的运动员在赛前调整训练期的表现更佳,表明通过合理的训练安排和疲劳管理,可以优化运动员的竞技状态,提升比赛表现。

训练方法的多样化和个性化也是巴黎奥运周期的热门研究主题。Fernandes 等^[30]提出了一种基于生物力学参数的游泳训练强度区域划分法,系统地控制和评估训练强度,帮助运动员在不同强度下维持技术动作的稳定性和效率,提高训练效果。Price 等^[31]的系统综述则讨论了青少年游泳运动员的体能表现决定因素,强调监控运动生物力学参数在强化在游泳表现中的重要性。多样化和个性化还包括了针对特定技术特征的专项训练。West

等^[32]的系统综述分析了水下波动式游泳表现的決定因素,发现足尖垂直加速度和踢腿频率与游速密切相关,针对性地优化这些技术细节,可以显著提高运动员的整体表现。

然而,尽管现有研究揭示了许多关键的生物力学原理和强化策略,但仍存在一些研究空白需要进一步探索。首先,不同游泳技术间细微差异的研究较少,特别是这些差异对长时间训练累积影响的研究尚不充分。此外,尽管陆地力量训练被证明对游泳表现有显著积极影响,但不同类型的力量训练在实际应用中的最优组合尚未明确。未来的研究应更加注重多模态数据的整合和应用,通过结合高精度运动捕捉、力量测量、肌电图技术和心理评估,全面分析和优化游泳技术动作。

2.5 损伤预防和康复

本综述共纳入了 9 篇发表于巴黎奥运会周期的相关文献,包含 6 篇实证研究和 3 篇文献综述(见表 4)。

表 4 基于运动生物力学的竞技游泳损伤预防和康复相关文献

Tab. 4 Included studies about injury prevention and rehabilitation for competitive swimming based on sports biomechanics

文献	类型	人群	人数	性别比 (女/男)	方法或设备	主要内容与结论
Kreulen 等(2022)	文献综述	游泳运动员	—	—	—	游泳肩部是最常受影响的关节,动作不当可导致损伤。
Noronha 等(2022)		游泳运动员	—	—	视频分析疲劳监测	2D 视频分析技术可用于疲劳管理
闫慧等(2022)		游泳运动员	80	—	针刺联合五步复位推拿	针刺联合五步复位法可以改善腰椎间盘游泳运动员的脊柱稳定性,减轻腰椎压力
Chen 等(2023)	实证研究	游泳运动员	—	—	表面肌电信号处理	肌肉力量与肌电信号强度呈比例关系
Haghpanah 等(2023)	实证研究	游泳运动员	—	—	不同关节损伤风险研究	肩关节力矩最大,肩关节损伤风险 10%
Steele 等(2023)	系统综述	女性运动员	1 574	—	肩部损伤风险因素	肩伤风险因素包括重复使用量和运动时间等,受伤风险比为 2.04
Hsu 等(2024)		游泳运动员	—	—	游泳运动员腰痛	游泳运动员的腰椎退行性椎间盘病变和背痛的风险较高,需进一步研究游泳生物力学对脊柱的影响
Hsu 等(2024)	系统综述	游泳运动员	—	—	脊柱损伤风险	游泳运动员容易因过度使用导致的脊柱损伤,需了解 4 种泳姿对脊柱的作用
Szabó 等(2024)		青年游泳运动员	54	—	体态矫正训练	24 周体态矫正训练显著减少肩部发生率 and 疼痛评分

损伤预防方面,Haghpanah 等^[33]研究指出,肩部承受的力矩是肘部的 3 倍,是游泳运动中最易受

伤的部位,损伤风险约为 10%。同时,Steele 等^[34]的系统综述指出,运动时间长短是女性游泳运动员

肩部损伤的主要风险因素。此外, Hsu 等^[35]在系统综述中指出, 游泳运动员患腰椎退行性椎间盘病和腰痛的概率显著更高, 其原因可能是脊柱的重复性屈伸和旋转。上述部位的损伤与游泳特有的生物力学特征密切相关, 游泳动作需要运动员在水中进行复杂的全身协调运动, 包括肩部和上肢的大范围动作, 会对上肢关节及关节周结缔组织产生较大的负荷, 导致劳损和慢性伤病。研究还表明, 运动员的受伤往往与其运动技术和训练强度密切相关。例如, Chen 等^[36]通过实时监测肌电信号, 评估游泳肌肉的疲劳和损伤程度。研究发现, 游泳后肌肉损伤的恢复过程中, 肌电信号强度与肌肉力量存在正相关关系, 这表明在肌肉疲劳和恢复阶段, 肌肉可能因为高强度训练而受伤。Noronha 等^[37]利用可穿戴设备和机器学习算法, 从 35 个潜在参数中筛选出了 15 个可用于实时监控游泳疲劳的敏感性因素, 帮助教练员和运动员在训练和比赛过程中, 实时监控运动员的疲劳和状态, 预防运动损伤的发生, 维持运动表现。

损伤康复方面, 闫慧等^[38]探讨了针刺联合五步复位法对游泳运动员腰椎突出的治疗效果, 发现该疗法可以改善脊柱稳定性, 减轻腰椎压力。Kreulen 等^[39]研究指出, 通过调整训练技术和加强肩部力量训练, 可以有效降低肩部损伤的风险, 优化运动员的生物力学特征。同时, 康复训练是损伤恢复的重要环节。Szabó 等^[40]研究发现, 24 周的姿势纠正训练可以显著减少了青少年游泳运动员前肩疼痛的发生率和疼痛程度, 优化运动员体态, 减少不良姿势对肩部和脊柱的负荷, 预防损伤。

尽管当前的研究已经揭示了许多竞技游泳运动员损伤预防与康复的关键因素, 但仍存在一些研究空白。如现有研究多集中于单一部位的损伤, 缺乏对多部位损伤综合防治的系统研究。未来的研究应进一步结合高精度运动捕捉和实时生物力学分析设备, 发展更加精确和个性化的损伤预防和康复方案, 如基于深度学习的动作分析等(见图 3)。

3 总结

巴黎奥运周期, 运动生物力学在竞技游泳中的相关应用研究已取得显著进展, 这不仅丰富了竞技游泳的技术理论, 还在实践中为运动员提供了科学

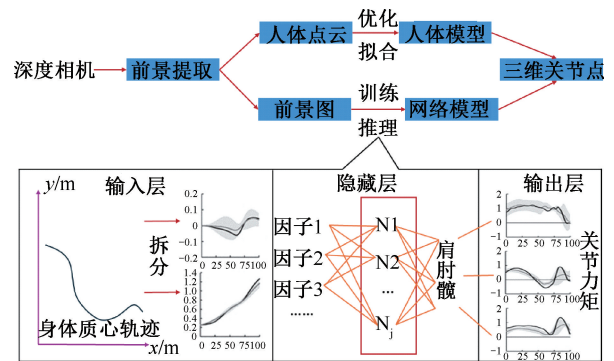


图 3 基于视频和神经网络算法的三维关节净力矩预测

Fig. 3 Three-dimensional joint net moment prediction based on video and neural network algorithm

指导。未来的研究应进一步结合多维度数据整合技术, 通过高精度运动捕捉、流体力学测量及智能分析, 深入探索游泳技术的优化路径。基于当前研究成果, 我国应积极借鉴国际先进经验, 加强竞技游泳运动生物力学的研究和一线训练中的应用, 持续提升我国竞技游泳的科学化水平。

利益冲突声明: 无。

作者贡献声明: 顾耀东负责论文选题和修改, 论文撰写和修改; 汪顺负责文献搜集整理; 徐异宁参与文献收集整理, 初稿撰写。

参考文献:

- [1] 李之俊. 第 12 届国际游联世界游泳医学大会简介 [J]. 体育科研, 1997, 18(2): 16-19.
- [2] VILAS-BOAS JP. Swimming biomechanics: From the pool to the lab and back [J/OL]. Sports Biomech, 2023, doi: 10.1080/14763141.2023.2237003.
- [3] LI M, GRAHAM J. Rule changes in water polo-History, FINA 2018 new rules, and literature review [J]. Open Sports Sci J, 2021, 14(1): 82-85.
- [4] CHAINOK P, DE JESUS K, MOURÃO L, et al. Biomechanical features of backstroke to breaststroke transition techniques in age-group swimmers [J]. Front Sports Act Living, 2022(4): 802967-802978.
- [5] PUEL F, MORLIER J, PYNE D, et al. Kinematic and dynamic analyses of the front crawl tumble turn in elite female swimmers [J]. Sports Biomech, 2023, 22(12): 1683-1699.
- [6] FERNANDES A, AFONSO J, NORONHA F, et al. Intracycle velocity variation in swimming: A systematic scoping review [J]. Bioengineering, 2023, 10(3): 308-332.

- [7] TAKAGI H, NAKASHIMA M, SENGOKU Y, *et al.* How do swimmers control their front crawl swimming velocity? Current knowledge and gaps from hydrodynamic perspectives [J]. *Sports Biomech*, 2023, 22(12): 1552-1571.
- [8] BUOITE STELLA A, CARGNEL A, RAFFINI A, *et al.* Shoulder tensiomyography and isometric strength in swimmers before and after a fatiguing protocol [J]. *J Athl Train*, 2023, 59(7): 738-744.
- [9] HANK M, MIRATSKY P, FORD KR, *et al.* Exploring the interplay of trunk and shoulder rotation strength: A cross-sport analysis [J]. *Front Physiol*, 2024(15): 1371134-1371144.
- [10] MORAIS JE, BARBOSA TM, NEIVA HP, *et al.* Young swimmers' classification based on performance and biomechanical determinants: Determining similarities through cluster analysis [J]. *Mot Control*, 2022, 26(3): 396-411.
- [11] NICOL E, PEARSON S, SAXBY D, *et al.* Stroke kinematics, temporal patterns, neuromuscular activity, pacing and kinetics in elite breaststroke swimming: A systematic review [J]. *Sports Med-Open*, 2022, 8(1): 75-99.
- [12] SEIFERT L, CARMIGNIANI R. Coordination and stroking parameters in the four swimming techniques: A narrative review [J]. *Sports Biomech*, 2023, 22(12): 1617-1633.
- [13] CORREIA RA, FEITOSA WG, CASTRO FAS. Kinematic, arm-stroke efficiency, coordination, and energetic parameters of the 400-m front-crawl test: A meta-analysis [J]. *Front Sports Act Living*, 2023(5): 977739-977750.
- [14] LOPES TJ, MORAIS JE, PINTO MP, *et al.* Numerical and experimental methods used to evaluate active drag in swimming: A systematic narrative review [J]. *Front Physiol*, 2022(13): 938658-938674.
- [15] QUENTAL C, SIMÕES F, SEQUEIRA M, *et al.* A multibody methodological approach to the biomechanics of swimmers including hydrodynamic forces [J]. *Multibody Syst Dyn*, 2023, 57(3-4): 413-426.
- [16] SEQUEIRA M, SIMÕES F, QUENTAL C, *et al.* Biomechanical framework for the inverse dynamic analysis of swimming using hydrodynamic forces from swimsuit [J]. *Comput Methods Biomech Biomed Eng*, 2023, 26(12): 1443-1451.
- [17] KWOK WY, SO BCL, NG SMS. Underwater surface electromyography for the evaluation of muscle activity during front crawl swimming: A systematic review [J]. *J Sports Sci Med*, 2023, 22(1): 1-16.
- [18] 孙冬, 宋杨, 岑炫震, 等. 基于计算机视觉的运动动作无标记识别技术研究进展 [J]. *上海体育大学学报*, 2021, 45(9): 70-85.
- [19] ALVES M, CARVALHO DD, FERNANDES RJ, *et al.* How anthropometrics of young and adolescent swimmers influence stroking parameters and performance? A systematic review [J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2022, 19(5): 2543.
- [20] HOŁUB M, GŁYK W, BARON J, *et al.* Correlations of jump height and lower limb power during jump tests with biomechanical parameters of dolphin kick in swimming [J]. *Acta Bioeng Biomech*, 2022, 24(3): 33-39.
- [21] MONTEIRO AS, CARVALHO DD, ELÓI A, *et al.* Repeatability of ventilatory, metabolic and biomechanical responses to an intermittent incremental swimming protocol [J]. *Physiol Meas*, 2022, 43(7): 075009-075030.
- [22] SILVA AF, SEIFERT L, FERNANDES RJ, *et al.* Front crawl swimming coordination: A systematic review [J/OL]. *Sports Biomech*, 2022, doi: 10.1080/14763141.2022.2125428.
- [23] RUIZ-NAVARRO JJ, CUENCA-FERNÁNDEZ F, SANDERS R, *et al.* The determinant factors of undulatory underwater swimming performance: A systematic review [J]. *J Sports Sci*, 2022, 40(11): 1243-1254.
- [24] VEIGA S, PLA R, QIU X, *et al.* Effects of extended underwater sections on the physiological and biomechanical parameters of competitive swimmers [J]. *Front Physiol*, 2022(13): 815766-815775.
- [25] MORAIS JE, MARINHO DA, COBLEY S, *et al.* Identifying differences in swimming speed fluctuation in age-group swimmers by statistical parametric mapping: A biomechanical assessment for performance development [J]. *J Sports Sci Med*, 2023, 22(2): 358-366.
- [26] RAINETEAU Y, NICOLAS G, BIDEAU B, *et al.* Associations between load-velocity profiling and race parameters of elite swimmers in the 100 and 200 m freestyle events [J]. *Front Sports Act Living*, 2023(5): 1326106-1326114.
- [27] RODRÍGUEZ GONZÁLEZ L, MELGUIZO-IBÁÑEZ E, MARTÍN-MOYA R, *et al.* Study of strength training on swimming performance. A systematic review [J]. *Sci Sports*, 2023, 38(3): 217-231.
- [28] TSOLTOS A, ARSONIADIS G, TSOLAKIS C, *et al.* Delayed effect of dry-land strength training sessions on swimming performance [J]. *J Funct Morphol Kinesiol*, 2023, 8(3): 87-97.
- [29] BRETONNEAU Q, MORALES-ARTACHO A, PLA R, *et al.* Effect of the pre-taper level of fatigue on the taper-induced changes in performance in elite swimmers [J]. *Front Sports Act Living*, 2024(6): 1353817-1353828.
- [30] FERNANDES RJ, CARVALHO DD, FIGUEIREDO P.

- Training zones in competitive swimming: A biophysical approach [J]. *Front Sports Act Living*, 2024(6): 1363730-1363737.
- [31] PRICE T, CIMADORO G, LEGG HS. Physical performance determinants in competitive youth swimmers: A systematic review [J]. *BMC Sports Sci Med Rehabil*, 2024, 16(1): 20-39.
- [32] WEST R, LORIMER A, PEARSON S, *et al.* The relationship between undulatory underwater kick performance determinants and underwater velocity in competitive swimmers: A systematic review [J]. *Sports Med-Open*, 2022, 8(1): 95-118.
- [33] HAGHPANAH SA, KHOSROWPOUR E, HEMATIYAN MR. An adaptive integral terminal sliding mode controller to track the human upper limb during front crawl swimming [J]. *Eur J Sport Sci*, 2023, 23(4): 499-509.
- [34] STEELE M, LAVORGNA TR, O'CONNELL S, *et al.* Risk factors for shoulder injuries in female athletes playing overhead sports: A systematic review [J]. *South Med J*, 2023, 116(7): 662-663.
- [35] HSU C, GENOVESE T, MCINNIS KC. Assessing the risk of lumbar degenerative disc disease associated with swimming: A systematic review [J/OL]. *PM R*, 2024, doi: 10.1002/pmrj.13138.
- [36] CHEN W, LI X, WANG DAN, *et al.* Research on sports biomechanics in the repair of swimming muscle injury [J]. *J Mech Med Biol*, 2023, 23(3): 2240018-2240027.
- [37] NORONHA A, SHAHANE NM, SARKAR BK, *et al.* Fatigue detection in athletes using sensor based application [J]. *NeuroQuantology*, 2022, 20(9): 3692-3698.
- [38] 闫慧, 齐峰. 针刺联合五步复位法治疗游泳运动员椎间盘突出的临床效果评价 [J]. *医用生物力学*, 2022, 37(3): 550-554.
- YAN H, QI F. Clinical effect evaluation of acupuncture combined with five-step reduction for treating swimmers with intervertebral disc herniation [J]. *J Med Biomech*, 2022, 37(3): 550-554.
- [39] KREULEN RT, SPIKER A, HEINLEIN SA, *et al.* Evidence-based musculoskeletal care for swimmers: A critical analysis review [J]. *JBJS Rev*, 2022, doi: 10.2106/JBJS.RVW.21.00200.
- [40] SZABÓ D, KISS G, TÉKUS E, *et al.* Therapeutic effectiveness of postural treatment on youth swimmers' anterior shoulder pain—An interventional study [J]. *Appl Sci*, 2024, 14(4): 1486-1498.