

不同水平蛙泳运动员无氧能力与途中游阶段瞬时速度差异分析——基于统计参数映射

王雨珏¹, 赵一骁²

¹ 广东理工学院体育学院, 广东肇庆, 中国

² 广州应用科技学院体育科技学院, 广东广州, 中国

【摘要】基于统计参数映射法(Statistical Parametric Mapping, SPM), 探讨不同水平蛙泳运动员的无氧能力及100米蛙泳测试运动学特征差异, 旨在揭示高水平运动员的优势表现及其生理学和生物力学特征。14名运动员自愿参与本研究, 按照100米蛙泳成绩分为一级组($n=7$, 国际泳联积分: 616.71 ± 78.46 分)与二级组($n=7$, 国际泳联积分: 409.06 ± 62.4)。对两组不同水平的蛙泳运动员进行无氧功率自行车及100米蛙泳测试。采用独立样本T检验和统计参数映射法对不同水平的蛙泳运动员的无氧能力与100米蛙泳测试运动学特征差异进行分析。结果显示, 使用独立样本T检验时, 两组蛙泳运动员的无氧能力与瞬时速度均不存在显著差异。统计参数映射法时, 两组蛙泳运动员的无氧能力与瞬时速度均存在显著差异。一级组下肢无氧能力显著高于二级组, 100米蛙泳测试前程瞬时速度显著高于二级组。研究发现, 一级组运动员较高的下肢无氧能力与其更好的抗疲劳能力密切相关, 能够帮助其在比赛前期维持较高的瞬时速度, 统计参数映射法为揭示不同水平蛙泳运动员无氧能力和瞬时速度的阶段性差异提供了更为精准的分析工具, 能够帮助研究者更好地理解不同水平蛙泳运动员的关键特征。

【关键词】竞赛与训练; 无氧能力; 瞬时速度; 统计参数映射

1.引言

随着游泳项目竞技水平的不断提高, 对运动员运动表现数据进行详尽的分析不仅能够为教练员及运动员提供最为直接和客观的信息, 也能为研究人员提供可靠的科学依据, 提高运动员的成绩和竞技水平。对不同水平的游泳运动员运动表现数据进行对比分析, 是极具价值的, 因为其最为直接地提供了运动员的运动表现^[1]。

对于蛙泳项目来说, 其复杂程度远远超过自由泳、仰泳与蝶泳。许多研究者对影响100米蛙泳成绩的原因进行分析, 技术和无氧能力占据了主要的地位。研究者对运动员各个阶段的表现进行了分析, 100米蛙泳作为短距离游泳项目, 不同等级的运动员速度出现整体趋势是在出发时即达到最大速度, 此后, 速度急速下降^{[2][3][4]}。圈间平均速度至少下降了12.4%-18.9%甚至更多。因此, 对100米蛙泳各个阶段速度进行详细的分析是非常重要的, 这直接决定了教练员和运动员对技术的决策选择。但是关于游泳运动员如何在整个比赛中改变他们的速度分布的信息也很少, 尤其是蝶泳、仰泳和蛙泳项目。

对蛙泳运动员的比赛分析通常使用赛事视频进行分析^{[5][6][7][8][9]}, 研究者通常在赛事进

行时在游泳池的不同角度和方向放置摄像机, 将运动员全程划分为出发、途中游、转身阶段, 通过对游泳全程的阶段进行定义和区分, 计算运动员的平均速度与时间, 对比不同运动员的阶段内运动表现, 对数据进行分析和处理。对赛事数据进行分析。为了对运动员运动表现进行进一步分析, 研究人员使用三维运动捕捉系统对运动员水上、水下数据进行捕捉、采集与分析, 得出更为深入和详细的运动学数据。

相关研究中, 采集的运动学数据通常被简化为平均数据。研究者在研究中, 对游泳者的无氧能力数据和各项运动学数据进行均化, 再对规律进行总结与分析。采用传统的统计学方法会产生会产生的统计学偏差之一为在某个特定的范围内对数据进行提取, 没有对整个测量范围内的数据线进行提取, 导致连续型数据过分简化, 产生局部区域聚焦偏差^[10]。这个偏差的产生对游泳运动学数据进行分析是不利的, 数据使用者无法获得最为精准游效的数据分析结果。统计参数映射法(statistical parametric mapping, SPM)是一种适用于连续型变量的分析方法, 广泛运用于运动生物力学领域^{[11][12][13]}。

综上所述, 目前尚不清楚不同水平的游泳运动员在整个蛙泳比赛中是如何改变他们的

速度分布的,且不同水平的游泳运动员在速度上的差异趋势是否于运动员无氧能力测试中的差异趋势相似。因此,本研究的目的是利用统计参数映射法,探究不同水平游泳运动员在100米蛙泳过程中的速度差异和无氧能力差异,识别造成该差异的具体阶段,从生理学和生物力学角度探讨不同等级运动员的差异特征。

2.研究方法

2.1 研究对象

14名高水平蛙泳运动员参与本研究。其中,7名蛙泳运动员被划分为一级组,年龄:(21.57 ± 1.13)岁,身高:(180.7 ± 5.88)厘米,体重:(70.42 ± 6.97)公斤,国际泳联积分:(616.71 ± 78.46)分,他们都有参与全国性游泳锦标赛的资格;7名蛙泳运动员被划分为二级组,年龄:(22.42 ± 3.55)岁,身高:(175.5 ± 8.52)厘米,体重:(68.42 ± 8.38)公斤,国际泳联积分:(409.06 ± 62.4)分,他们都有参与省级游泳锦标赛的资格。所有受试者自愿参加测试,身体健康,在实验前所有实验对象均被告知实验详细流程及步骤并填写知情同意书。

2.2 测试方案

2.2.1 100米蛙泳测试

测试前,受试者在一个标准的25m竞赛池中进行了标准的800m热身。为受试者粘贴标记球。标记球的粘贴参照JR Vas在2016年提出的蛙泳测试方案^[14],运动数据以100个样本/秒的速度采样。

使用Qualisys(Oqus7+)三维运动捕捉系统捕捉运动员水上、水下结合的运动表现,并使用定性跟踪管理器(QTM)软件。100m蛙泳测试所使用的运动捕捉系统涵盖水上、水下共19台摄像设备,其中包含16台运动捕捉相机(拍摄频率为100 Hz)以及3台高速摄像机(拍摄频率为24 Hz),三维运动捕捉系统与一个电子欧米茄计时系统同步,并进行了详细的校准^[15]。二维坐标系的起点分别是初始侧的游泳池壁边缘水平方向和垂直方向的水面。纵坐标轴和水平坐标轴的方向分别为向上和测试对象的游动方向。

所有的摄像头在校对及拍摄时均对准100m蛙泳途中游测试区域,全面捕捉受试者在100m蛙泳途中游中的动作,测试对象需要进行一个全力100米蛙泳游进测试。为了保证数据的准确性,测试对象执行以下标准:(1)水下蹬池壁出发;(2)蹬池壁后不做水下蝶泳腿及大划臂动作;(3)在研究者的监督下

动作执行国际泳泳运动联合会的最新标准。

2.2.2 无氧能力测试

上肢无氧运动能力参照Nindl(1995)^[16]和Kachaunov(2020)^[17]给出的测试方案,使用改良后的Mornark894E型无氧功率自行车进行测试。下肢无氧运动能力参照Inbar等(1996)^[18]和Guilherme等(2000)^[19]给出的测试方案,使用Mornark894E型无氧功率自行车进行测试。

上肢无氧运动能力测试时,受试者进行热身准备后。采用体重的5%为负荷,手摇自行车踏板进行30s无氧功率测试。下肢无氧运动能力测试时,采用体重的7.5%为负荷。调试功率自行车座椅,座椅高度应为受试者的跨高。受试者进行热身准备后,在有测试砝码的情况下进行30s最大速度骑行。在测试过程受试者无需考虑体能分配及节奏问题,全力全速进行测试,测试结束后进行放松。

2.3 数据分析与处理

Qualisys(Oqus7+)三维运动捕捉系统捕捉到的数据导入Qualisys Track Manager进行数据的初步分析及处理。受试者的瞬时速度是通过所有分析帧得到的(100帧/秒),数据采集为每个片段的平均值和时间序列数据。本文将0-50米的平均速度定义为前程平均速度,将51-100米的平均速度定义为后程平均速度。50米测试成绩为运动员前程成绩,100米测试成绩为运动员全程成绩。受试者在100米前后段的瞬时游泳速度定义为受试者左大转子、右大转子、左髌关节、右髌关节四点水平位移随时间变化的平均速度。对100米蛙泳前后段途中游数据进行周期化处理,并应用插值法来标准化每个周期的数据。首先确定周期的最小和最大时间,然后通过线性插值法生成该周期内均匀分布的101个数据点,最终将应用到每个周期的数据上,生成标准化后的周期数据集。用二阶巴特沃斯低通滤波器对受试者100米蛙泳时间序列数据进行平滑处理。为了最小化与过滤相关的端点数据失真,在这个过程中包含了50个额外的点以外的点(额外的点在过滤后被排除)。

受试者的无氧能力使用Mornark894E型无氧功率自行车进行测试。测试参数为峰值功率(W):整个测试中的功率峰值;平均功率(W):整个测试中的平均功率;最小功率(W):整个测试中的功率最小值;功率下降值(W):整个测试中功率的下降值;功率下降率(%):整个测试中功率的下降的百分比。

2.4 数理统计

本研究的统计分析过程均在 spss 26.0 软件(IBM 公司,索默斯,纽约,美国)和 MATLAB R2024a (MathWorks, Inc, 美国)中完成。(1)首先对所有收集的数据进行正态分布检验。数据的正态性检验采用 Shapiro-Wilk 检验,如所得数据符合正态分布,则采用参数检验方法进行统计学分析;若不符合正态分布,则采用 Box-Cox 变换 (Osborne, 2010) 进行转换。

(2)受试对象的身体形态学,上下肢无氧功率与 100 米蛙泳途中游中的所有数据的差异性分析采用配对样本 T 检验,以分析两组间的整体差异。显著性水平设定为 0.05。(3)为了进一步利用上下肢无氧功率与 100 米蛙泳途中游前后段的时间序列数据,采用由 t 统计量 (Pataky, 2010) 组成的一维统计参数映射 (spm) 进行配对样本 t 检验。SPM 分析是使用 SPM1D 分析包 (版本: M.0.4.10, <https://spm1d.org/>) 来进行的。SPM 分析的显著性水平设定为 0.05。

3.研究结果与分析

3.1 不同水平蛙泳运动员无氧能力与运动学特征参数及独立样本 T 检验结果

一级组与二级组运动员的年龄、身高、体重在统计学上均无显著差异 ($p=0.213\sim0.636$; $Es=0.538\sim0.567$)。一级组与二级组运动员的

个人最好成绩 (PB) 具有显著差异 ($p<0.01$, $Es=0.890$)。一级组与二级组运动员的国际泳联积分具有显著差异 ($p<0.01$, $Es=0.948$),

3.1.1 无氧能力参数分析

如表 1 所示,在上肢无氧能力方面,一级组运动员上肢峰值功率为 $367.21\pm143.35w$ 、平均功率为 $256.56\pm99w$ 、最小功率为 $125.55\pm87.69w$ 、功率下降率为 $241.66\pm103.84w$ 。二级组运动员上肢峰值功率为 $307.84\pm116.91w$ 、平均功率为 $227.35\pm95.12w$ 、最小功率为 $102.83\pm78.25w$ 、功率下降率为 $205.01\pm89.3w$ 。

如表 2 所示,一级组运动员下肢峰值功率为 $820.9\pm80.96w$ 、平均功率为 $607.47\pm79.17w$ 、最小功率为 $377.1\pm83.55w$ 、功率下降率为 $443.8\pm53.95w$ 。二级组运动员上肢峰值功率为 $684.06\pm146.39w$ 、平均功率为 $534.93\pm118.06w$ 、最小功率为 $320.15\pm115.63w$ 、功率下降率为 $363.92\pm129.06w$ 。在下肢无氧能力方面,一级组运动员与二级组运动员的上肢峰值功率、平均功率、最小功率、功率下降率在统计学上均不具有显著差异 ($p=0.051\sim0.202$, $Es=0.555\sim0.617$)。一级组运动员与二级组运动员的下肢峰值功率、平均功率、最小功率、功率下降率在统计学上均不具有显著差异 ($p=0.412\sim0.618$, $Es=0.539\sim0.548$)。

表 1.不同水平蛙泳运动员上肢无氧能力参数的描述性数据一览表

	一级组 (n=7)	二级组 (n=7)	P	Es
峰值功率 (w)	367.21±143.35	307.84±116.91	0.412	0.548
平均功率 (w)	256.56±99	227.35±95.12	0.584	0.541
最小功率 (w)	125.55±87.69	102.83±78.25	0.618	0.539
功率下降率 (w)	241.66±103.84	205.01±89.3	0.492	0.544

注: *表示 $p\leq0.05$ 则有显著性差异, **表示 $p\leq0.01$ 则具有极显著性差异, $p>0.05$ 则没有显著差异。

表 2.不同水平蛙泳运动员下肢无氧能力参数的描述性数据一览表

	一级组 (n=7)	二级组 (n=7)	P	Es
峰值功率 (w)	820.9±80.96	684.06±146.39	0.051	0.617
平均功率 (w)	607.47±79.17	534.93±118.06	0.202	0.568
最小功率 (w)	377.1±83.55	320.15±115.63	0.312	0.555
功率下降率 (w)	443.8±53.95	363.92±129.06	0.157	0.576

注: *表示 $p\leq0.05$ 则有显著性差异, **表示 $p\leq0.01$ 则具有极显著性差异, $p>0.05$ 则没有显著差异。

表 3.不同水平蛙泳运动员 100 米蛙泳运动学的描述性数据一览表

	一级组 (n=7)	二级组 (n=7)	P	Es
前程平均速度 (m/s ⁻¹)	1.68±0.34	1.76±0.16	0.595	0.54
后程平均速度 (m/s ⁻¹)	1.58±0.33	1.52±0.31	0.716	0.537
50 米测试成绩 (s)	36.6±1.92	39.91±1.92	0.03*	0.75
100 米测试成绩 (s)	78.26±3.71	87.02±5.18	0.07	0.71

注: *表示 $p\leq0.05$ 则有显著性差异, **表示 $p\leq0.01$ 则具有极显著性差异, $p>0.05$ 则没有显著差异。

3.1.2 瞬时速度与成绩

如表 3 所示,一级组运动员前程平均速度

为 $1.68 \pm 0.34 \text{ m/s}^{-1}$ ，后程平均速度为 $1.58 \pm 0.33 \text{ m/s}^{-1}$ 。二级组运动员前程平均速度为 $1.76 \pm 0.16 \text{ m/s}^{-1}$ ，后程平均速度为 $1.52 \pm 0.31 \text{ m/s}^{-1}$ 。一级组运动员和二级组运动员前程平均速度在统计学上不具有显著差异 ($p=0.595$, $Es=0.54$)，后程平均速度在统计学上不具有显著差异 ($p=0.716$, $Es=0.537$)。一级组运动员前 50 米成绩为 $36.6 \pm 1.92 \text{ s}$ ，100 米全程成绩为 $78.26 \pm 3.71 \text{ s}$ 。二级组运动员前 50 米成绩为 $39.91 \pm 1.92 \text{ s}$ ，100 米全程成绩为 $87.02 \pm 5.18 \text{ s}$ 。一级组运动员和二级组运动员前 50 米成绩在统计学上具有显著差异 ($p=0.03$, $Es=0.75$)。100 米全程成绩在统计学上不具有显著差异 ($p=0.07$, $Es=0.71$)。

3.2 不同等级蛙泳运动员无氧能力与运动学特征参数 SPM 检验结果

3.2.1 无氧能力 SPM 检验结果

图 1 展示了一级组和二级组蛙泳运动员在进行上肢无氧能力测试中的时间序列比较。基于时间序列分析方法对一级组和二级组蛙泳运动员 30s 上肢无氧能力结果进行对比发现，一级组与二级组蛙泳运动员在相同的时间范围内瞬时功率没有显著差异。

如图 2 所示，一级组和二级组蛙泳运动员在进行下肢无氧能力测试后，将 Wingate 功率自行车测试数据中的瞬时功率使用统计参数映射法 (SPM) 进行分析。基于时间序列分析法对一级组和二级组蛙泳运动员 30s 下肢无氧能力结果进行对比发现，一级组与二级组蛙泳运动员在相同的时间范围内瞬时功率具有显著差异，两组运动员在时间占比为 6%-40% 之间的瞬时功率出现了显著差异。

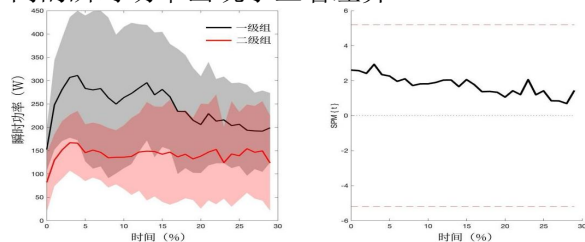


图 1.不同水平蛙泳运动员组间上肢无氧功率时间序列与 SPM 检验结果

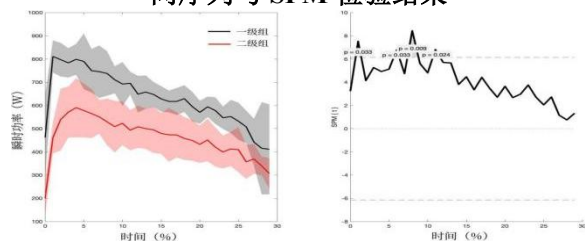


图 2.不同水平蛙泳运动员组间下肢无氧功率时间序列与 SPM 检验结果

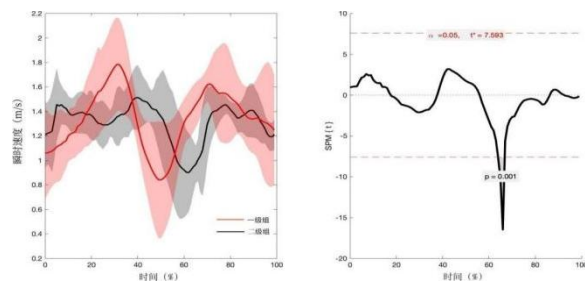


图 3.不同水平蛙泳运动员组间 100 米蛙泳途中游前程瞬时速度时间序列与 SPM 检验结果

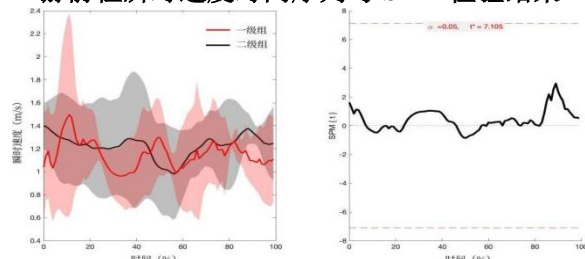


图 4.不同水平蛙泳运动员组间 100 米蛙泳途中游后程瞬时速度时间序列与 SPM 检验结果

3.2.2 瞬时速度 SPM 检验结果

如图 3 所示，一级组和二级组蛙泳运动员 100 米蛙泳途中游前程瞬时速度具有显著差异，两组运动员在前程在时间占比为 62%-65% 之间的瞬时速度，即全程时间占比的 31%-32.5% 出现了显著差异。如图 4 所示一级组和二级组蛙泳运动员 100 米蛙泳途中游后程瞬时速度不具有显著差异

4.讨论

4.1 独立样本 T 检验与统计参数映射法 (SPM) 的结果对比分析

本研究使用统计参数映射法 (SPM) 分析了不同水平蛙泳运动员的上肢和下肢无氧能力及 100 米测试中的运动学参数。结果表明，两组运动员在上肢无氧能力上没有显著差异，但在下肢无氧能力上存在显著差异。100 米蛙泳测试中，前程瞬时速度表现出显著差异，而后程瞬时速度则没有显著差异。独立样本 T 检验结果显示，不同水平的蛙泳运动员在年龄、身高、体重、上肢和下肢无氧能力各项指标、前程和后程平均速度、100 米成绩等方面均未表现出统计学上的显著差异，仅有前程成绩和最好成绩具有统计学显著性。

通过对比两种统计学方法，不同水平蛙泳运动员在无氧能力测试和 100 米测试中的参数对比结果截然不同。以往研究通常通过 P 值的大小来分析数据，并为 P 值设定了明确的界限，然而 P 值仅提供结果的概率。根据本研究的结果，虽然不同水平的蛙泳运动员在年龄、身高、体重等基础指标上无显著差异，但在使

用统计参数映射法对无氧能力和 100 米测试进行时间序列分析后, 显著差异得以揭示。

为了确保数据的准确性与可用性, 数据通过三次测试的平均值确定^[20], 在使用独立样本 T 检验对两组不同水平的蛙泳运动员数据进行分析 and 处理时, 使用的是均化后的数据。值得注意的是, 在对数据进行独立样本 T 检验后, 结果显示, 不同水平运动员无氧能力差异 Es 值为 0.541~0.617, 不同水平运动员 100 米蛙泳测试中各项指标的差异 Es 值为 0.537~0.75, 根据 Cohen 等^[21]和 Hopkins 等^[22]的研究, 尽管 P 值不显著, 但 Es 值的大小仍支持独立样本 T 检验结果, 表明两组运动员的无氧能力和运动学特征具有现实意义上的显著性。

统计参数映射法 (SPM) 解决了独立样本 T 检验的局限性。首先, SPM 使用的是瞬时数据而非均化后的数据, 从而避免了数据过度简化可能掩盖实际差异的问题。其次, SPM 能有效降低 I 型错误, 并校正统计检验结果的显著性水平。这是因为 SPM 通过处理瞬时数据, 保留了数据的时间或空间维度, 避免了均值分析可能带来的信息丢失。此外, SPM 应用了随机场理论 (Random Field Theory, RFT) 来校正多重比较引发的误差, 从而控制整体 I 型错误的发生概率。这使得 SPM 能够更精确地捕捉到时间序列中的局部差异, 避免因单次检验的假阳性误差导致的不准确结果。因此, 在对不同水平运动员的数据进行时间序列分析时, SPM 的结果与独立样本 T 检验有所不同, 能够揭示更为细致的差异。总之, 独立样本 T 检验虽然能够判断不同水平蛙泳运动员在无氧能力和 100 米测试中的差异, 但 SPM 可以揭示更具体的差异, 提供更深入的分析依据。

4.2 无氧能力参数分析

统计参数映射法 (SPM) 结果显示下肢无氧能力存在显著差异, 且差异出现的时间较早, 大致出现在 Wingate 测试全程的 6%-40% 阶段, 但是在上肢无氧能力测试中两组运动员不存在差异。

在 100 米游泳比赛中, 无氧供能为 80% 以上, 在供能系统中占据主导地位, 在 100m 全力冲刺的过程中消耗的能量有很大一部分来自无氧供能^[2]。最近的研究探讨了陆地力量测试 (最大速度、最大重量) 结果和 100 米蛙泳测试运动学参数之间具有极强的相关关系。这些相关关系支持了关于上半身力量测量和推进拉力、下半身力量测量和推进踢腿之间的联系的假设^[23]。根据前人的研究, 在每个完整

的蛙泳周期中, 手臂的动作和腿部动作产生类似的推进力。例如, 在系绳游泳测试中, 由上肢和下肢引起的推进过程中测量到的系绳力的峰值和平均值是相似的^[24]。蛙泳划水产生的推进力不占主要地位, 蹬腿也能与划水产生大致相同的推进力, 但前人的研究表明, 蛙泳运动员在整个动作周期中用手臂加速身体的时间比用腿加速身体的时间更长, 在蛙泳中显然是一种重要的推进力^[25], 因此本研究将上肢无氧能力测试纳入研究。但由于蛙泳运动员腿部具有明显更大的推动表面积, 腿的肌肉群明显强于手臂^[26], 蛙泳中腿的动作能够比手臂的动作产生更大的水动力, 这些特征在创造蛙泳有效的推进力中起到了次要的作用。因此, 两组的下肢无氧能力存在显著差异, 上肢无氧能力不存在显著差异。

4.3 瞬时速度参数分析

统计参数映射法 (SPM) 结果显示, 不同水平蛙泳运动员在前程的瞬时速度具有显著差异, 且一级组前程瞬时速度显著高于二级组, 后程没有两组运动员中发现瞬时速度的差异。

从整体来看, 蛙泳是四种泳姿中技术最复杂的项目, 手臂动作与腿部动作变化较大, 由于其特殊的游进技术, 在水下的腿部和移臂动作以及臂腿协调的时机都会给游进过程中带来较大的阻力, 蛙泳每个前进周期中速度波动都很大, 因此蛙泳是四种泳姿中行进速度最慢的泳姿。在蛙泳游进过程中每个周期都会产生较大的推进力, 但是在收腿时速度会发生明显下降。国内外学者已经在研究中观察到, 在 100m 游进过程中, 平均速度将会下降 12.4%-15%^[24]。从性别来看, 全速游泳下男运动员的途中游平均速度下降了 16.1%, 女运动员平均速度下降了 18.9%^[27]。

短距离蛙泳项目, 尤其是 100 米项目中, 前程的成绩与整体比赛成绩之间的联系非常紧密。目前研究中的一项发现是, 优秀游泳运动员途中游的平均速度更快, 但这并不意味着他们在整个阶段的游泳速度比亚优秀游泳运动员更快^[1]。在 100 米蛙泳中, 运动员普遍采取积极的游泳策略^{[28][29]}, 优秀的运动员更加愿意在前程使用更高的速度已达到自己的目标。蛙泳项目中, 水平越高的运动员能够更好地协调上肢和下肢运动, 保持整个身体在滑行阶段的速度, 并克服阻力, 以最大限度地提高整个比赛的平均速度。本研究也出现了类似的结果, 即更高水平的蛙泳运动员在前程展现了更高

的瞬时速度,这是导致他们整体表现优于二级组的重要原因。

4.4 无氧能力与瞬时速度的相关性分析

在100米蛙泳比赛中,疲劳是影响比赛成绩的一个重要因素。在游泳中,速度与运动员产生的有效机械功率输出直接相关。前人研究表明,途中游速度的下降与最大功率输出的降低有关^[4]。100米蛙泳作为以无氧功能为主的运动项目,在持续全力60S左右的运动过程中,无氧系统供能占据主导地位,其供能的能力在一定程度上决定了运动员进行短时间、高功率运动的能力^[30]。

统计参数映射法(SPM)结果显示,不同水平蛙泳运动员的下肢无氧能力差异出现在Wingate测试全程的6%-40%阶段,在100米蛙泳测试中,瞬时速度差异出现在前程62%-65%的阶段,即全程阶段占比的31%-32.5%出现了显著差异。由上可知,不同水平组运动员在下肢无氧能力和瞬时速度出现差异的时间阶段重叠,即一级组蛙泳运动员在下肢无氧能力测试和100米测试中前段无氧能力显著高于二级组,100米蛙泳测试前程阶段瞬时速度显著高于二级组。

总而言之,一级组蛙泳运动员在下肢无氧能力测试中展现出更好的功率输出能力,在100米蛙泳测试中前程展现出更高的瞬时速度。前人研究发现,运动员无氧运动能力与短距离蛙泳腿平均速度有显著的相关性^[31]。在100米全力游泳过程中,运动员消耗的能量中很大一部分来自无氧代谢,无氧代谢导致运动员在运动过程中产生乳酸,在短距离游泳项目中血液中的乳酸浓度达到10-20 mmol l⁻¹^[32]。机体中积累的氢离子干扰肌肉收缩机制,从而导致产生的肌肉力量的减少,在由疲劳产生的肌肉力量减小的前提下,运动员无法维持原有的蛙泳划幅,试图通过增加划频来维持原有的速度。在游进过程中随着运动时间的不断增加,供能由糖酵解功能系统逐渐取代了磷酸原系统并产生乳酸堆积,从而影响运动员中枢系统及肌肉系统的供能,疲劳使运动员的推进阶段与非推进阶段的时间占比发生变化,从而导致了手臂协调发生相应的变化,最终造成了速度的下降。

5.结论

不同水平的蛙泳运动员在无氧能力与瞬时速度上具有显著差异。高水平蛙泳运动员在下肢无氧能力输出功率和100米蛙泳前程瞬时速度上均显著优于低水平运动员。具体而言,

高水平运动员的下肢无氧能力使其在比赛过程中具备更强的抗疲劳能力,尤其是在前程阶段能够保持更高的瞬时速度,从而取得更优异的比赛成绩。因此,良好的下肢无氧能力是高水平蛙泳运动员能够在比赛中脱颖而出的关键因素。统计参数映射法(SPM)为研究运动员的生理与运动学特征提供了更为精确的分析工具,为教练员和运动员制定更加科学的训练计划提供了重要指导,从而帮助运动员在比赛中游出更好的成绩。

参考文献

- [1] Gonjo T, Olstad B H. Differences between elite and sub-elite swimmers in a 100 m breaststroke: a new race analysis approach with time-series velocity data[J]. *Sports Biomechanics*, 2023, 22(12): 1722-1733.
- [2] Stirn I, Jarm T, Kapus V, et al. Evaluation of muscle fatigue during 100-m front crawl[J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2011, 111(1): 101-113.
- [3] Seifert L, Chollet D, Chatard J C. Kinematic changes during a 100-m front crawl: effects of performance level and gender[J]. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 2007, 39(10): 1784-1793.
- [4] Toussaint HM, Carol A, Kranenborg H, Truijens MJ. Effect of fatigue on stroking characteristics in an arms-only 100-m front crawl race[J]. *Med Sci Sports Exercises* 2006, 38:1635-1642
- [5] 林洪, 何新中, 周晓东, 等. 我国优秀女子50m自由泳运动员刘湘的比赛技术分析[J]. *中国体育科技*, 2018, 54(5): 123-126.
- [6] 高捷, 陶旻, 袁绍婷, 等. 我国高水平男子400m自由泳运动员比赛数据参数及技术特征的研究[J]. *北京体育大学学报*, 2017, 40(1): 90-95.
- [7] 杨红春, 林辉杰. 基于函数型主成分方法对孙杨1500m自由泳比赛中泳速波动特征的研究[J]. *北京体育大学学报*, 2015, 38(2): 67-71.
- [8] Morais, J. E., Marinho, D. A., Arellano, R., & Barbosa, T. M. (2019). Start and turn performances of elite sprinters at the 2016 European championships in swimming. *Sports Biomechanics*, 18(1), 100-114.
- [9] Marinho, D. A., Barbosa, T. M., Neiva, H. P., Silva, A. J., & Morais, J. E. (2020). Comparison of the start, turn and finish performance of elite swimmers in 100 m and 200 m races. *Journal of Sports Science &*

- Medicine, 19(2), 397-407.
- [10] MULLINEAUX D R, BARTLETT R M, BENNETT S, 2001. Re-search design and statistics in biomechanics and motor control [J]. J Sports Sci, 19 (10): 739-760.
- [11] 邢睿, 张璟, 周兴龙, 等. 不同水平射箭运动员撒放阶段动作特征的差异研究——基于统计参数映射 [J]. 中国体育科技, 2023, 59(12): 3-9. DOI: 10.16470/j.csst.2023076.
- [12] 梅齐昌, 相亮亮, 李建设, 等, 2021. 基于一维统计参数映射分析跑者跑步地面反作用力差异 [J]. 医用生物力学, 36 (5): 684-691
- [13] 张马森, 周兴龙, 刘卉, 2022. 基于统计参数映射分析跑鞋跟掌落差对下肢关节负荷的影响 [J]. 医用生物力学, 37 (6): 1158-1164.
- [14] Vaz J R, Olstad B H, Cabri J, et al. Muscle coordination during breaststroke swimming: comparison between elite swimmers and beginners[J]. Journal of sports sciences, 2016, 34(20): 1941-1948
- [15] Haner, S., Svärm, L., Ask, E., & Heyden, A. (2015). Joint under and over water calibration of a swimmer tracking system. Proceedings of the International Conference on Pattern Recognition Applications and Methods, 2, 142-149.
- [16] Nindl, B. C., Mahar, M. T., Harman, E. A., & Patton, Lower and upper body anaerobic performance in male and female adolescent athletes[J]. Medicine and Science in Sports and Exercise, (1995) 27(2), 235-241
- [17] Kachaunov M, Petrov L. Upper body anaerobic power and freestyle swimming performance[J]. Journal of Physical Education and Sport, 2020, 20(4): 1957-1963.
- [18] Inbar, O., and Bar-Or, O. and Skinner, G. The Wingate Anaerobic Test[J]. Human Kinetics, Champaign Illinois: 1996, 8-9.
- [19] Guilherme L, Guglielmo A, Denadai B S. Assessment of anaerobic power of swimmers: the correlation of laboratory tests on an arm ergometer with field tests in a swimming pool[J]. The Journal of Strength & Conditioning Research, 2000, 14(4): 395-398
- [20] David R. Mullineaux, Roger M. Bartlett & Simon Bennett (2001): Research design and statistics in biomechanics and motor control, Journal of Sports Sciences, 19:10, 739-760
- [21] Cohen, J. (1992). A power primer. Psychological Bulletin, 112, 155±159
- [22] Hopkins K D, Hester P R. The noncentrality parameter for the F distribution, mean squares, and effect size: an examination of some mathematical relationships[J]. Educational and psychological measurement, 1995, 55(6): 998-999.
- [23] Nicol E, Pearson S, Saxby D, et al. The association of range of motion, Dryland strength-power, anthropometry, and velocity in elite breaststroke swimmers[J]. International Journal of Sports Physiology and Performance, 2022, 17(8): 1222-1230.
- [24] Yeater RA, Martin RB, White MK, Gilson KH. Tethered swimming forces in the crawl, breast and backstrokes and their relationship to competitive performance. Journal of Biomechanics, 1980; 14: 527-537
- [25] Maglisho EW. Swimming fastest. Human Kinetics. Leeds. 2003; 229
- [26] VORONTSOV, A. R., and D. A. BINEVSKY. Swimming speed, stroke rate and stroke length during maximal 100 m freestyle of boys 11-16 years of age. In: Biomechanics and Medicine in Swimming IX, J. C. Chatard (Ed.). Universite de Saint-Etienne: SaintEtienne, 2003, pp. 195-200
- [27] Seifert L, Chollet D, Chatard JC (2007) Kinematic changes during a 100-m front crawl: effects of performance level and gender. MedSci Sports Exerc 39(10):1784-1793
- [28] Skorski S, Faude O, Caviezel S, Meyer T. Reproducibility of pacing profiles in elite swimmers. Int J Sports Physiol Perform. 2014;9(2):217-25.
- [29] Oxford SW, James RS, Price MJ, Payton CJ, Duncan MJ. Changes in kinematics and arm-leg coordination during a 100-m breaststroke swim. J Sports Sci. 2017;35(16):1658-65.
- [30] 李芳成著. 运动生理生化及相关理论分析与应用. 中国水利电力出版社. 2016
- [31] Strzała M, Krężałek P, Kaca M, et al. Swimming speed of the breaststroke kick[J]. Journal of Human Kinetics, 2012, 35: 133.
- [32] Bonifazi M, Martelli G, Marugo L, Sardela F, Carli G (1993) Blood lactate accumulation in top level swimmers following competition. J Sports Med Phys Fitness 33:13-18