



功率-维持时间曲线与临界功率在预测自行车运动表现中的应用

乔杰

摘要:目的:确定根据临界功率预测一定功率下自行车运动员维持运动时间(Time to Exhaustion, TTE)的准确性。方法:对10名优秀耐力自行车运动员进行4次不同功率输出的TTE实验,功率设置分别为Wingate平均功率(P_{win})、最大摄氧量功率(P_{max})、通气无氧阈功率(P_{VT})和最大乳酸稳态对应的功率(P_{MLSS})。TTE实验共完成2次,第一次结果获得双参数临界功率(CP)及维持运动时间预测值(TTE_c)。第二次结果为维持运动时间测试值(TTE_m)。使用Shapiro-Wilk对数据进行正态分布检验。应用变异系数分析TTE的受试者内信度,配对T检验检测两组TTE之间的差异。结果:根据功率-时间曲线计算出的CP为(251±21)W。根据双参数公式,不同功率运动预测维持时间(TTE_c), P_{win} 为(00:54±00:09)mm:ss, P_{max} 为(03:31±00:42)mm:ss, P_{VT} 为(11:11±02:81)mm:ss, P_{MLSS} 为(65:53±10:12)mm:ss。第二次4种不同功率运动实验的TTE_m, P_{win} 为(00:31±00:07)mm:ss, P_{max} 为(03:48±00:34)mm:ss, P_{VT} 为(12:59±03:56)mm:ss, P_{MLSS} 为(59:24±10:35)mm:ss。与 P_{win} 的运动实测值相比,预测值TTE_c时间增加74.2% ($P<0.01$)。而 P_{max} 和 P_{VT} 的TTE_c与TTE_m相比,分别减少1%和7%,但无显著性差异。而较低强度 P_{MLSS} 的TTE_c较TTE_m增加了11% ($P<0.05$)。结论:应用CP预测一定输出功率的项目运动维持时间,最佳范围可能是2~15min的自行车运动项目。

关键词:自行车;临界功率;维持运动时间;预测

中图分类号:G804 文献标志码:A 文章编号:1006-1207(2021)03-0099-06

DOI:10.12064/ssr.20210314

Application of Power-duration Curve and Critical Power in Predicting Cycling Performance

QIAO Jie

(Shanghai No.2 Sports School, Shanghai 201100, China)

Abstract: Objective: To determine the accuracy of predicting the time to exhaustion (TTE) of cyclists under a certain power according to the critical power (CP). Methods: Four TTE experiments with different power outputs were conducted on 10 elite endurance cyclists. The power settings were Wingate average power (P_{win}), maximum oxygen uptake power (P_{max}), ventilatory anaerobic threshold power (P_{VT}), and the power corresponding to maximal lactate steady state (P_{MLSS}) respectively. The TTE test was completed twice. The CP and TTE_c (predicted value) were obtained in the first result, and the TTE_m (test value) was obtained in the second. Shapiro-Wilk was used to test the normal distribution of the data, the coefficient of variation was used to analyze the intra-subject reliability of TTE, and the paired T-test was used to detect the difference of TTE between the two groups. Results: The CP calculated according to the power-duration curve was 251±21w. According to the two-parameter formula, the TTE_c was 00:54±00:09mm:ss (P_{win}), 03:31±00:42mm:ss (P_{max}), 11:11±02:81mm:ss (P_{VT}) and 65:53±10:12mm:ss (P_{MLSS}) respectively. In the the second test, the TTE_m of four different power experiments was 00:31±00:07mm:ss (P_{win}), 03:48±00:34mm:ss (P_{max}), 12:59±03:56mm:ss (P_{VT}) and 59:24±10:35mm:ss (P_{MLSS}). Compared with the measured value of P_{win} , the TTE_c increased by 74.2% ($P<0.01$). Compared with the TTE_m, the TTE_c of the maximum oxygen uptake power (P_{max})

收稿日期:2020-04-17

作者简介:乔杰,男,学士,初级教练员。主要研究方向:运动训练学。E-mail:qiaojie870724@hotmail.com。

作者单位:上海市第二体育运动学校,上海 201100。



and the anaerobic threshold power (P_{VT}) decreased by 1% and 7% respectively, but there was no significant difference. While the TTEc of lower intensity P_{MLSS} increased by 11% compared with TTEm ($P < 0.05$). Conclusion: If the CP is used to predict the time to exhaustion at a certain output power, the best range may be the cycling event of 2 to 15 minutes.

Key Words: stroke; core; functional training; rehabilitation

自行车运动的特征是在持续时间内产生高输出功率的能力,这种能力可以概括为功率-持续时间(Power-Duration, PD)曲线,表示单位时间内所能维持的最大功率,或者推算某功率强度下运动员可以维持的最长时间。运动强度和持续时间是竞技训练中的关键因素,两者成反比。目前存在几个 PD 模型,其中双参数临界功率(Critical Power, CP)模型是研究模型中使用最多的^[1]。CP 模型表示为以下方程: $TTE = W' / (P - CP)$ 。其中 TTE 表示给定功率状态下运动维持时间; W' 是超过 CP 的可用功 (J); P 为整个运动持续时间的平均功率。CP 界定了维持细胞内稳态的最高输出功率,应用该公式可以预测在 CP 以上运动强度上任何给定输出功率下的运动维持时间 TTE^[2],这在训练中具有巨大的潜在应用价值。从理论上讲,CP 定义了肌肉代谢产物(如磷酸肌酸和氢离子)、血乳酸浓度和机体摄氧量稳态的阈值。与基于最大耗氧量百分比的经典方法相比,含 CP 运动强度的功率-时间参数模型可以更有效地反映运动能力^[3]。因此,越来越多的教练员应用 PD 计算运动员在给定距离内的最佳完成时间,并用于制订比赛中的体能分配^[4]。

尽管 CP 可能会受到先前活动的影响,但在训练和比赛中应用 CP 概念和强度控制(即保持恒定的速度或功率)可以防止肌肉代谢和内环境系统提前紊乱,导致力竭。事实上,从不同距离的比赛时间分析显示,在精英运动员中,CP 与呼吸阈值、最大乳酸稳态有关^[5]。在运动实践中,为了测量准确的 CP 值,受试者通常在不同日期内完成 3~5 次单独 TTE 测试。选择维持功率时间最短为 2 min,最长为 15 min^[6]的范围。因此,CP 的测定需要一系列 3~5 个恒定的工作速率,通常设置 24 h 的恢复时间,但这会导致测定周期过长。此外,CP 和 W' 还受到数学模型的影响(即线性与非线性,三参数与双参数双曲线模型的选择)、TTE 实验的持续时间、测试之间的恢复时间(30 min~24 h)等^[7]。

因此,尽管 CP 计算可以为教练员提供在更大的训练强度范围内规定训练时间的能力,但不同的测量方法限制了 CP 和 W' 的标准化,PD 在为训练提供强度和持续时间的建议适用性尚未得到充分证实。特别是尚不清楚使用 TTE 实验在 2~15 min 之间的 CP 是否能准确预测持续时间小于 1 min(即所有

短跑)或超过 30 min 比赛中的自行车成绩。本研究的目的是确定 CP(使用 4 个恒定功率和 2 个参数模型)是否能准确地预测高功率和低功率输出的 TTE,该范围的输出功率通常是训练有素的自行车运动员的强度范围。本研究最终目标对自行车教练员或运动员科学使用 CP 和 PD 曲线作为训练工具提供建议,避免在实际应用中产生误区,阻碍运动表现的发展。

1 研究方法

1.1 研究对象

10 名优秀男子耐力自行车运动员自愿参加本研究,平均年龄(23.1±2.9)岁,身高(178.4±5.6) cm,体重(72.6±6.8) kg。所有运动员至少有 5 年的训练背景,其中 6 名为健将级运动员,4 名为一级运动员,经常参加国内外的场地比赛和公路计时赛。

1.2 实验设计

运动员每天只进行一次测试,不同测试之间的间隔 48 h。运动员在进行 Wingate 无氧实验前的 48 h 内避免高强度训练(即心率 < 70% 最大心率)。Wingate 测试后 2 d,进行递增负荷运动实验(GXT),使用 20 W/min 的阶段增量,以确定与达到最大摄氧量(VO_{2max})和通气阈(VT)对应的平均输出功率 P_{max} 和 P_{VT} ^[8]。

运动员在随后的 2 周内进行两次相同的 TTE 测试,实验流程如图 1 所示,分别使用 Wingate、 VO_{2max} 、VT 和最大乳酸稳态(MLSS)对应功率输出,以确保测量的重复性。实验在恒定的实验室环境条件下进行[即(22.0±2.2)°C,(40.5±5.4)%相对湿度]。TTE 与 TTEm 的第一组测试时间相隔 1 周,例如, P_{win} 测试均为周一上午。

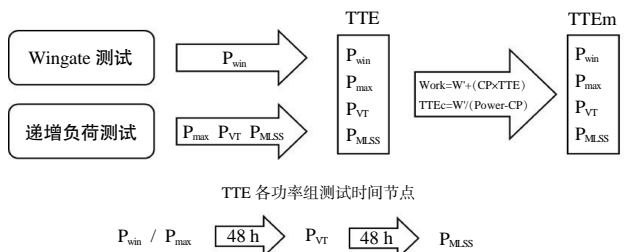


图 1 TTE 实验流程

Figure1 TTE Experimental Process



1.2.1 Wingate 实验

在机械制动的自行车测功器 (Monark894E, 瑞典) 中进行, 调整座位和把手的位置, 以接近每个受试者自己的自行车角度。受试者以自己选择的强度热身 5 min, 然后进行两次 5 s 的冲刺, 其间穿插着 30 s 的轻松骑行。整个测试从静止状态开始, 运动阻力系数设置为 0.75。受试者被要求保持坐姿, 并在整个测试过程中得到口头鼓励。记录 30 s 的平均功率

1.2.2 递增负荷测试

在 80~100 W 的标准化热身 5 min 后, 所有运动员完成 20 W/min 的递增运动方案直到力竭, 频率保持在 80 r/min^[8]。测试仪器采用呼吸分析仪 (Cosmed, 意大利) 记录耗氧量 (VO_2) 和二氧化碳产生量 (VCO_2), 并在每次测试前进行校准。持续监测心率 (PolarH7, 芬兰)。在实验开始时和实验结束后 3 min 采集血管血样评估乳酸浓度 (EKF 乳酸仪, 德国)。

1.2.3 通气无氧阈功率及最大摄氧量功率

通过两个连续阶段之间低于 1.5 mL/kg/min 的 VO_2 增加或通过二级标准 (即呼吸商大于 1.10, 心率大于 95% 年龄预测最大心率) 来确认最大摄氧量及其对应功率。对于 VT 的测定, GXT 期间的通气参数平均为每 10 s 一次, 并与对应功率作图。使用 VE/VO_2 和 VE/VCO_2 , 以及二氧化碳呼气末压力 ($P_{et}CO_2$) 降低的标准来确定 VT 及对应的功率^[9]。

1.2.4 最大乳酸稳态对应的输出功率

最近的数据表明, 10 W 的差异已经足以引起 MLSS 的变化^[9]。第一组对应 P_{MLSS} 的 TTE 实验是以 VO_{2max} 功率输出的 70% 下进行的^[10-11], 每 10 min 测量一次乳酸, 根据 4~5 次乳酸值曲线, 调整第二次 PMLSS, 但调节幅度小于 10 W。

1.2.5 CP、W' 和 TTE 的计算

除 Wingate 实验外, 所有测试均使用 Monark 839E 功率车进行, 以利于功率/阻力控制。在测试过程中, 受试者可以选择他们喜欢的踏频, 但基本要求 80~90 r/min, 而任何其他变量 (如运动时间、乳酸、心率等) 都是不可见的。所有的测试都从 5 min 的热身开始, 然后设定实验目标输出功率、心率和频率, 记录受试者不能保持 80 r/min 以上的骑行节奏时的 TTE。

分别以 P_{win} 、 P_{max} 、 P_{VT} 和 P_{MLSS} 完成 2 次 TEE 测试。第一次测试中输出的功率 (W) 乘以 TTE (s), 以获得功 (J)。根据公式: $Work=W'+(CP \times TTE)$ 将每次实验中完成的功与测量的耗尽时间 (TTE) 作图, 该

直线的 y 截距表示 W' , 而斜率表示 CP。

一旦获得每个人的 CP 和 W' , 就使用下面的方程式^[12]求出每个功率输出计算的耗尽时间 (即计算的 TTEc): $TTEc=W'/(Power-CP)$, 其中 W' 表示 CP 强度以上的可用功, 单位为 J。TTEc 表示该功率运动的预测维持时间。

本研究选择了使用 4 个对应功率确定 CP 方案, 因为在建立 CP 模型时, 应该使用不同持续时间的耗尽时间实验, 来最小化各种因素对实验的影响。然而, MLSS 实验期间耗尽的时间超过 1 h, 而且以前没有使用过如此长的实验来计算 CP。这可能会在计算 CP 时产生一些方法论上的误差。此外, 本实验方案选择双参数模型是运动科学和运动生理学中最常用的 CP 模型, 因为它对运动表现的预测相对简单且准确^[2]。

1.3 统计分析

使用 Shapiro-Wilk 对数据进行正态分布检验, 应用 CV 分析 TTE 的受试者内信度, 配对 T 检验检测每个实验中使用 CP 和 W' 计算的 TTE (第一组测试) 和使用 CP 和 W' 测量的 TTE (第二组测试) 之间的差异, 使用的统计软件为 Sigmaplot 14.0, 显著性 $P < 0.05$ 。

2 研究结果与分析

2.1 功率与 TTE

第一次测试 TTE 结果: P_{win} 为 (809±71) W, P_{max} 为 (407±29) W, P_{VT} 为 (308±30) W, P_{MLSS} 为 (275±23) W; 根据功率-时间曲线计算出 CP 为 (251±21) W (表 1)。

表 1 第一组不同功率-持续时间测试数据结果

Table 1 Power-duration Test Data Results of the First Group

	平均功率/ (W)	维持时间/ (mm:ss)	乳酸/ (mmol·L ⁻¹)	最大心率/ (b·min ⁻¹)
Wingate	809±71	0.30±0:05	10.3±2.8	179±9
VO_{2max}	407±29	3:45±0:51	14.0±2.1	186±14
VT	308±30	12:54±6:25	14.8±3.3	167±7
MLSS	275±23	54:55±8:33	4.6±1.9	166±12

在第一组测试中, 使用每一位运动员数据导出的 CP 和 W' 计算 TTEc, 不同功率预测时间分别为 P_{win} 为 (00:54±00:09) mm:ss, P_{max} 为 (03:31±00:42) mm:ss, P_{VT} 为 (11:11±02:81) mm:ss, P_{MLSS} 为 (65:53±10:12) mm:ss, 各功率阈值范围如图 2 所示。

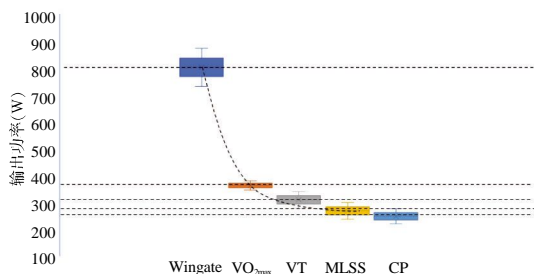
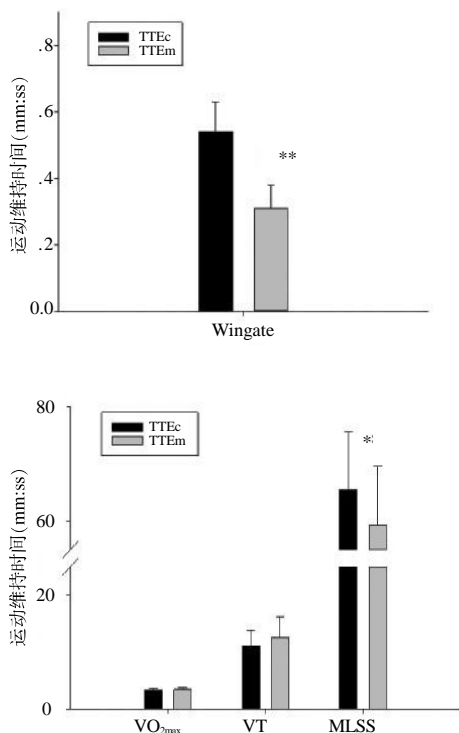


图2 第一组测试各阈值功率及计算临界功率值范围示意图

Figure2 Range Diagram of Threshold Powers and Calculated Critical Powers Tested in the First Group

2.2 预测维持时间 TTEc 与实测成绩 TTEm 的差异

第二次 4 种不同功率运动实验实测的 TTEm: P_{win} 为(00:31±00:07) mm:ss, P_{max} 为(03:48±00:34) mm:ss, P_{VT} 为(12:59±03:56) mm:ss, P_{MLSS} 为(59:24±10:35) mm:ss。与 P_{win} 强度的 TTEm 相比, TTEc 时间增加 74.2% ($P < 0.01$)。而 P_{max} 和 P_{VT} 的 TTEc, 与 TTEm 相比, 分别减少 1% 和 7%, 但无显著性差异。最后, 在较低强度 P_{MLSS} 运动的 TTEc 较 TTEm 增加了 11% ($P < 0.05$) (图 3)。



注: * 表示 TTEc 与 TTEm 相比差异具有显著性, $P < 0.05$; ** 表示 TTEc 与 TTEm 相比差异具有极显著性, $P < 0.01$ 。

图3 预测时间 TTEc 与实测成绩 TTEm 的差异分析
Figure3 Difference Analysis between the Predicted Time TTEc and the Measured Result TTEm

2.3 可靠性分析

在两组重复实验中, TTEm 在 MLSS 时的 CV 最低 (6.5%), 随着运动强度的增加, VT、 VO_{2max} 和 Wingate 均值的 CV 分别增加 8.4%、9.1% 和 6.6%。

3 讨论

为了提供以科学为基础的个性化训练方案, 不同功率输出或速度下的可维持时间是非常重要的参考因素。在自行车运动员的训练和比赛中, 随着移动功率计的使用率增加, 大大提升了人们对功率-持续时间关系的兴趣^[13-14]。本文的分析结果提示, 在职业自行车运动员中, 用 CP 计算的 TTE 高估了高功率 (Wingate 功率) 和低功率输出 (MLSS 功率) 的持续时间, 因此, 在自行车短距离项目 (30~60 s) 或者超过 1 h 的运动项目中, 预测运动表现或者应用 CP 确定运动强度具有一定的局限性或者误差。

在运动实践中, TTE 可以通过 PD 公式和 CP 计算获得预测值。然而, 在功率输出持续时间小于 2 min 或大于 15 min 的情况下, 这些 TTE 预测可信度是否会发生变化还值得商榷。本研究的研究结果中, 用 PD 曲线公式计算的 CP 值, 预测出 TTEc 高估了 P_{win} 和 P_{MLSS} 的持续时间, 高估了 MLSS 功率输出的 11% (图 2)。根据 CP 计算, 在 MLSS 强度下进行训练将导致训练时间增加 11%。然而, 由于 MLSS 在相对较低的功率输出下出现, 即 VO_{2max} 功率输出的 $68\% \pm 3\%$, 额外的持续时间并不能增强训练有素的运动员的有氧能力。相反, 根据 VT 强度对应输出功率计算的 TTEc 比测量的 TTEm 低估了 7%, 与之前的研究结果相似, 在 10 min 内的 PD 曲线和 CP 预测的成绩, 与实际运动表现没有显著性差异。

研究结果中 CP 在递增负荷运动测试计算出最大摄氧量功率时的 TTEc 与 TTEm (图 2) 相吻合。表明在这种情况下, 在使用递增方案获得的 VO_{2max} 对应的输出功率, CP 是 TTEc 的可靠估计值。按照递增负荷测试方案的经典方法, Billat 等人^[15]报道, 自行车运动员、皮划艇运动员、游泳运动员和跑步运动员的 TTEc 分别为 (03:42±01:31) mm:ss、(06:16±02:14) mm:ss、(04:47±02:40) mm:ss 和 (05:21±01:24) mm:ss。此外, Faina 等^[16]报道的自行车运动员、皮划艇运动员和游泳运动员的 TTE 分别为 (03:45±01:34) mm:ss、(05:56±01:25) mm:ss 和 (05:02±02:16) mm:ss。本文数据在 (03:00±04:45) mm:ss 之间, 与上文报道中的 TTE 基本一致。

耐力训练在很大程度上依赖于功率输出接近或高于 VT 的范围^[17], 但是, 最近的研究结果显示, 当



使用递增方案时,与VT相关的功率不应用于规定恒定负荷运动,因为 VO_2 成分会逐渐增加代谢需求^[18]。因此,不确定CP计算的TTE与TTE_m之间的差异程度是否与漂移的 VO_2 相关。

与之前报道相比,本研究在MLSS工作负荷下测得的TTE数据略低。Baron等^[19]对职业自行车运动员研究报告用于MLSS的TTE为(56:00±08:30) mm:ss,有几个因素可以解释在类似功率输出下出现较弱的耐力的原因。首先,本研究中受试者相对比较年轻,基础摄氧量水平较国际自行车运动员有显著差异;其次,在骑行过程中,尽管不限制运动员补水补液,但大部分运动员在整个过程中几乎没有补水,这可能导致核心温度的增加和肌肉糖原的耗竭。这些因素基本可以解释本研究结果中在MLSS功率输出下较短的TTE。

最近Mattioni^[20]研究表明,根据CP计算高估了MLSS的TTE约8%,本研究结果为高估11%。笔者认为导致这一结果的原因为CP可能类似于较高功率输出的生理阈值,即呼吸补偿点(VT阶段)。而根据PD公式计算的CP值,一般介于VT和MLSS功率之间,在数值更接近MLSS。最近在职业自行车运动员和田径运动员的研究报道中认为,现代训练很大程度上以VT相近的运动强度为目标,较长时间的训练根据CP衍生的TTE造成的低估可能会导致运动适应的停滞。事实上,CP在概念上等同于MLSS,尽管从实践经验上讲,CP通常比MLSS的输出功率更高^[9]。因此,在应用PD公式预测MLSS功率下的运动成绩时,可能会发生较大的误差。

另外,分析结果也同样提示,CP针对高输出功率(Wingate平均值)时的TTE,严重高估了自行车运动员的维持能力,实测在31s范围,而TTE_c达到54s左右,高估了74%。如根据TTE计算出的所需工作负荷进行自行车冲刺训练,将导致运动员过度训练或受伤风险的增加。最近的一项研究表明,与三参数拟合相比,双参数的双曲线拟合在2min以下的运动表现可能高估了TTE^[13]。在该研究中,健康、中等活动度的受试者,能够对在562W的功率下维持24s的有效踏蹬时间。自行车运动员在实际训练中,基本遵循Wingate测试结果,确定冲刺训练强度,较少使用CP估算。而其他项目,例如田径可能会涉及CP和W'计算的TTE,本研究结果提示,在短跑间歇训练过程中,不应使用临界功率预测来计算TTE。

将功率输出与持续时间的数据拟合成曲线的形式,并计算临界功率,可以估算出大范围运动强度下

的TTE。因此,CP的使用对教练员而言非常有吸引力,因为它可以改善和精确他们的训练方案,可在每种运动强度下纳入基于科学的持续时间建议。然而,本研究根据相对重要的4个功率输出阈值分析,第一次将CP估计的TTE_c值与真实的TTE_m进行比较。结果发现,应用递增负荷测试获得最大摄氧量的功率,与CP估计的TTE是相适应的。但是它高估了MLSS和Wingate均值功率的TTE,而在一定程度上低估了VT功率输出的TTE。如果CP的TTE计算不正确,将导致规定的运动训练周期要么太短而不能产生应有的训练适应,要么要求时间过长或强度过高而导致过早的力竭和过度训练。

本研究也存在一些限制因素,由于受试者为自行车中长项目的职业运动员,测试方案采用20W/min递增模式进行测试,与非传统的每3min增加50W的模式;原因是这种呈现形式更有利于自行车职业运动员输出功率与 VO_2 之间的关系^[13]。因此,本文研究结论对使用传统递增方案的结果可能有所不同。另外,本文4个运动强度形成PD与CP的计算过程中, P_{min} 与 P_{max} 差距较大,数据点范围相对不均匀,可以影响曲线幅度。

4 结论

应用双参数临界功率模型预测一定输出功率的运动维持时间,高估了较高输出功率(Wingate功率)和低功率输出(MLSS功率)的持续时间。因此,预测自行车运动表现的最佳范围可能是2~15min的运动项目。

参考文献:

- [1] Poole D. C., Burnley M., Vanhatalo A., et al. Critical power: An important fatigue threshold in exercise physiology[J]. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 2016, 48(11):2320-2334.
- [2] Jones A. M., Vanhatalo A. The 'critical power' concept: Applications to sports performance with a focus on intermittent high-intensity exercise[J]. *Sports Medicine*, 2017, 47(1):65-78.
- [3] Mann T., Lamberts R. P., Lambert M. I. Methods of prescribing relative exercise intensity: Physiological and practical considerations[J]. *Sports Medicine*, 2013, 43(7): 613-625.
- [4] Vanhatalo A., Jones A. M., Burnley M. Application of critical power in sport[J]. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 2011, 6(1):128-136.



- [5] Keir D. A., Pogliaghi S., Murias J. M. The respiratory compensation point and the deoxygenation break point are valid surrogates for critical power and maximum lactate steady state[J]. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 2018, 50(11):2375-2378.
- [6] Morton R. H. The critical power and related whole-body bioenergetic models[J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2006, 96(4):339-354.
- [7] Karsten B., Hopker J., Jobson S. A., et al. Comparison of inter-trial recovery times for the determination of critical power and W' in cycling[J]. *Journal of Sports Sciences*, 2017, 35(14):1420-1425.
- [8] Lucía A., Hoyos J., Pérez M., et al. Heart rate and performance parameters in elite cyclists: A longitudinal study[J]. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 2000, 32(10):1777-1782.
- [9] Iannetta D., Inglis E. C., Fullerton C., et al. Metabolic and performance-related consequences of exercising at and slightly above MLSS[J]. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 2018, 28(12):2481-2493.
- [10] Lillo-Bevia J. R., Pallarés J. G. Validity and reliability of the cycleops hammer cycle ergometer[J]. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 2018, 13(7):853-859.
- [11] de Barros C. L. M., Mendes T. T., Mortimer L. á. C. F., et al. Maximal lactate steady state is altered in the heat [J]. *International Journal of Sports Medicine*, 2011, 32(10):749-753.
- [12] Bishop D., Jenkins D. G., Howard A. The critical power function is dependent on the duration of the predictive exercise tests chosen[J]. *International Journal of Sports Medicine*, 1998, 19(2):125-129.
- [13] Vinetti G., Taboni A., Bruseghini P., et al. Experimental validation of the 3-parameter critical power model in cycling[J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2019, 119(4):941-949.
- [14] Black M. I., Jones A. M., Blackwell J. R., et al. Muscle metabolic and neuromuscular determinants of fatigue during cycling in different exercise intensity domains[J]. *Journal of Applied Physiology*, 2017, 122(3):446-459.
- [15] Billat V. L., Hill D. W., Pinoteau J., et al. Effect of protocol on determination of velocity at VO_2 max and on its time to exhaustion[J]. *Archives of Physiology and Biochemistry*, 1996, 104(3):313-321.
- [16] Faina M., Billat V., Squadrone R., et al. Anaerobic contribution to the time to exhaustion at the minimal exercise intensity at which maximal oxygen uptake occurs in elite cyclists, kayakers and swimmers[J]. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 1997, 76(1):13-20.
- [17] Esteve-Lanao J., Foster C., Seiler S., et al. Impact of training intensity distribution on performance in endurance athletes[J]. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 2007, 21(3):943-949.
- [18] Iannetta D., de Almeida Azevedo R., Keir D.A., et al. Establishing the VO_2 versus constant-work-rate relationship from ramp-incremental exercise: Simple strategies for an unsolved problem[J]. *Journal of Applied Physiology*, 2019, 127(6):1519-1527.
- [19] Baron B., Noakes T. D., Dekker J., et al. Why does exercise terminate at the maximal lactate steady state intensity?[J]. *British Journal of Sports Medicine*, 2008, 42(10):828-833.
- [20] Mattioni Maturana F., Fontana F. Y., Pogliaghi S., et al. Critical power: How different protocols and models affect its determination[J]. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 2018, 21(7):742-747.

(责任编辑:刘畅)