

DOI: 10.16289/j.cnki.1002-0837.2018.05.002

多参数自行车运动主观疲劳量化分级模型研究

王 伟, 刘晓辉, 李章勇*, 司华山, 陆 伟
(重庆邮电大学生物医学工程研究中心, 重庆 400065)

摘要: 目的 设计一种基于多参数的自行车运动主观疲劳量化评估方法, 可直观快捷反映骑行者疲劳程度, 降低运动过量造成的损伤。方法 首先模拟哈佛登阶实验对自愿者运动能力进行分级, 同步采集自愿者骑行时的踩踏频率、速度、功率、呼吸次数和心电, 并分析出自愿者心率变异性参数; 再基于模糊层次分析法建立适用于各人群的运动性疲劳量化评估模型。结果 各人群主观疲劳评估值与本文模型建立的疲劳评估值基本一致。用线性回归方程对疲劳评估模型进行验证分析, 发现各人群主观疲劳评估值与本文设计的疲劳评估模型评估值基本一致, 两者评估值的拟合直线效果良好, 且相关性系数 $Q > 0.95$, 显著水平系数 $P < 0.05$ 。结论 本文模型能有效实现自行车运动主观疲劳量化评估。

关键词: 自行车运动; 多参数; 运动性疲劳; 模糊层次分析法; 主观疲劳量化

中图分类号: R857.16 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-0837(2018)05-0496-06

Research on Quantitative Classification Model of Cycling Subjective Fatigue Based on Multiple Parameters. Wang Wei, Liu Xiaohui, Li Zhangyong, Si Huashan, Lu Wei. Space Medicine & Medical Engineering, 2018, 31(5): 496-501

Abstract: **Objective** To design a cycling subjective fatigue assessment method and to directly and accurately obtain the fatigue degree and thus reduce the damage caused by excessive exercise. **Methods** The simulated Harvard bench experiment was carried out to judge the athletic ability of the exercisers. The frequency, speed, power, respiration rate and the heart rate variability of volunteers were analyzed. Finally, based on the fuzzy analytic hierarchy process, a model for quantitatively evaluating the sports fatigue of each population was established. **Results** The subjective fatigue value of each group was consistent with that of the model. Linear regression equation was used to verify the fatigue evaluation model. It is found that the evaluation value of subjective fatigue of all groups is basically consistent with the evaluation value of the fatigue evaluation model designed in this paper. The linear fitting effect of the assessed values was good, the correlation coefficient Q was greater than 0.95, and the significant level coefficient P was less than 0.05. **Conclusion** The fatigue evaluation model based on multi-parameter can be used to evaluate the cycling fatigue quantitatively.

Key words: cycling; multi-parameters; motor fatigue; fuzzy analytic hierarchy process; subjective fatigue quantitative

Address correspondence and reprint requests to: Li Zhangyong. Biomedical Engineering Research Center of Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China

随着生活节奏的不断加快,人们的身心疲劳日趋严重。研究发现,自行车运动对人体的心脏、心理健康具有良好的保健作用^[1]。但许多运动者更关注于自身骑行时的运动量,反而忽略了运动过程中疲劳程度。孙慧珍^[2]发现人体的不合理运动容易造成血管和神经系统的损伤;饶志坚等^[3]发现自行车中长项目易引发运动伤病的发生概率,因此评估运动者的运动性疲劳程度显得尤为重要。

运动性疲劳作为体育科研中重要的课题,众多学者从各个方面进行了研究和探讨,取得了很多有价值的成果。主观测量方法常采用《主观感知疲劳评定量表》(Ratings of perceived exertion, RPE)、《疲劳量表-14》(FS-14)等^[4],但运动者易受外在环境和运动模式影响。客观评定方法主要依据摄氧量、尿检、血乳酸等指标检测,时效性较差,应用范围比较受限。白永超等^[5]采用模拟飞行系统的方式,预测运动者的疲劳状况,该方式泛

收稿日期: 2018-01-20 修回日期: 2018-05-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(61571070); 重庆市科委(物联网专项)项目(CSTC2015ZDCY-ZTX120002); 重庆市科委共性关键技术项目(CSTC2015SHMS-ZTX0098)

第一作者: 王 伟,男,副教授,研究方向为医学信号检测与处理。E-mail: wangw@cqupt.edu.cn

* 通讯作者: 李章勇,男,教授,研究方向为医学信号检测与处理。E-mail: lizy@cqupt.edu.cn

化能力较好,但应用于个体时偏差较大。戈黎^[6]采用生理安全脉冲扫描躯体,再以电脑重构组织的方式构建疲劳模型,可以直观反映机体器官的疲劳程度,但耗时较长。相较而言,本文采用三角模糊层次分析法构建的量化模型可以更为快捷、准确地评估自行车运动者主观疲劳程度。

1 方法

1.1 自行车运动性疲劳模型

实验之前,对受试者的心肺功能进行测试。采用哈佛台阶实验^[7],对运动者进行简单的心肺耐力分级,以确定其所属的心肺耐力人群^[8],将人群分为运动能力差、运动能力稍差、运动能力一般、运动能力好,以及运动能力很好,共 5 级。

实验采用 TACX T2060 自行车 Ironman 智能骑行台模拟自行车户外运动的场景,尽可能使受试者有比较真实的户外运动感觉。利用智能骑行台记录受试者实时的骑行速度、功率以及踩踏频率。本研究选用的运动场景与受试者日常的户外骑行环境十分相似,该路段的总长为 6.08 km,平均坡度为 1.5%,最大坡度为 6.8%,受试者的真实骑行时间平均为 30 min。在实验过程中,要求受试者骑行时间与真实环境基本相似,同时佩戴生理信号记录器,实时记录心率和呼吸频率,测量心电并分析其心率变异性^[9]。其中心电信号主要包括:全部窦性心搏 RR 间期的标准差 (SDNN)、R-R 间期序列中,其相邻之差的绝对值大于 50 ms 的个数占总数的百分比 (PNN50)、低频带 (LF) 与高频带 (HF) 之比 LF/HF、李氏指数

(Lipschitz exponent, HLE)、相对分散度 (relative dispersion, HRD)。

首先要求受试者静坐 5 min,记录心率、呼吸率以及 HRV 信号,结合主观疲劳评价表对疲劳程度进行主观评价;其次要求受试者在不少于 15 km/h 情况下,按照自身的骑行节奏开始骑行,每隔 2 min 要求受试者对自身的疲劳状况进行主观评判。受试者骑行进入上坡阶段时,要求受试者在不少于 12 km/h 的情况下,按照自身的骑行节奏骑行,此期间每隔 30 s 询问 1 次受试者的疲劳感受。实验结束后,对 Ironman 智能骑行台以及 Zephyr BioHarness 便携式生理信号测量系统记录的信息进行统计分析,针对受试者主观疲劳评估的疲劳程度,对各个不同疲劳程度前后 2 min 的运动指标进行分析。表 1 为 30 名受试者骑行过程运动参数统计表。

1.2 疲劳量化评价方法

1.2.1 三角模糊数基本定义

当评判某些事物时,人们往往是给出“还行”“还可以”“挺好”等一些相对模糊的评判,而在表达这些模糊的评价时常常采用的是三角模糊数 ($f m t$)。

三角模糊数主要有 3 个基本定义:

1) 对于任意的 $x \in R$ 都有 $t(x) \in [0, 1]$ 与其相对应,且论域 R 必须是给定的模糊集,其中 $t(x)$ 作为 x 对论域 R 的隶属度, t 作为隶属函数。

2) 设 M 为论域 R 的模糊集,则 t_M 为 M 的隶属函数 $R \rightarrow [0, 1]$ 可表示为

表 1 各个疲劳阶段运动指标参数表
Table 1 Table of motion parameters of different fatigue stages

Indicators		Fatigue feeling				
		Easily	Slightly tired	Tired	Exhausted	
Subjective fatigue assessment	RPE	10.5 ± 2.6	13.8 ± 1.4	15.4 ± 0.8	17.7 ± 2.3	
	Stamp frequency	85.3 ± 5.5	70.7 ± 6.8	55.1 ± 3.6	47.2 ± 4.2	
Physical indicators	Speed	17.7 ± 3.4	14.1 ± 2.5	12.1 ± 2.2	9.9 ± 3.1	
	Power	90.2 ± 5.4	83.1 ± 7.5	66.3 ± 5.2	56.5 ± 4.6	
Physiological indexes	Heart rate	68.5 ± 7.5	136.6 ± 15.4	162.9 ± 14.7	183.4 ± 16.8	
	Breathing rate	15.3 ± 1.4	27.9 ± 3.4	37.6 ± 5.5	46.5 ± 3.8	
Heart rate variability (HRV)	Time domain	SDNN	60.8 ± 26.9	41.0 ± 22.5	44.4 ± 11.1	35.6 ± 8.7
		PNN50	63.3 ± 13.2	46.6 ± 8.5	20.0 ± 5.4	6.0 ± 3.8
	Frequency domain	LF/HF	2.2 ± 1.5	3.3 ± 2.1	6.7 ± 3.2	9.3 ± 6.5
	Nonlinear domain	HRD	5.8 ± 1.5	6.1 ± 1.3	6.8 ± 1.2	7.4 ± 1.4
		HLE	0.91 ± 0.03	1.06 ± 0.07	1.12 ± 0.06	1.21 ± 0.03

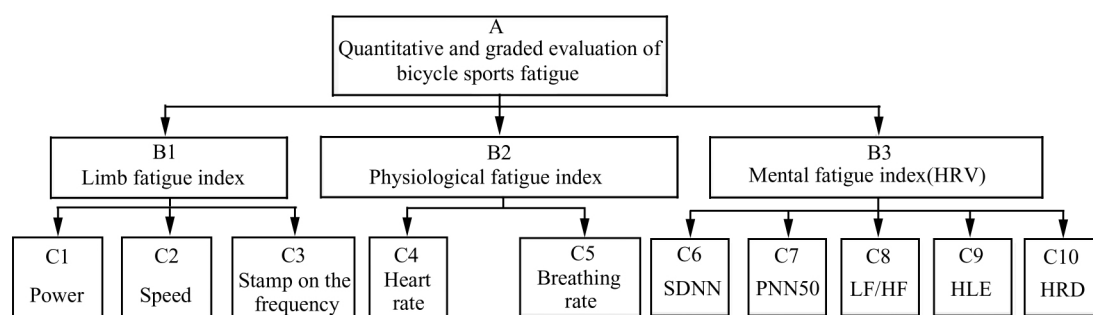


图 1 自行车运动性疲劳量化评价体系

Fig. 1 Quantitative evaluation system of bicycle sports fatigue

$$t_M(x) = \begin{cases} \frac{x-f}{m-f} & f \leq x \leq m \\ \frac{x-t}{m-t} & m \leq x \leq t \\ 0 & x \leq f \text{ or } x \geq m \end{cases} \quad (1)$$

其中 $f < m < t$, 且 f 与 t 的差值越大, 表示模糊程度越高。

3) 模糊数 $\alpha_i - \alpha_j$ 的可能度为

$$K(\alpha_i - \alpha_j) = \left[\frac{f_j - t_i}{(m_i - t_i) - (m_j - f_j)} \wedge 1 \right] \quad (2)$$

其中, 模糊算子 \wedge 表示取小。

1.2.2 自行车运动性疲劳量化评价体系

综合考虑自行车运动其骑行速度、运动量、心率变异性等因素, 对运动者疲劳状态进行评价, 最终确定肢体疲劳、生理疲劳、精神疲劳指标 (SDNN、PNN50、LF/HF、HLE 和 HRD) 等共 3 个一级指标, 以及呼吸率、心率、心率变异性、骑行功率等 10 个二级指标^[10-12], 建立自行车运动性疲劳量化评价体系, 如图 1 所示。

建立评价体系后, 由相关领域的工作人员或学者对同层次指标进行比较。采用 0.1 ~ 0.9 标度法^[13] 构造模糊互补判断矩阵。首先以总目标 A 为基准构建一级模糊互补判断矩阵, 具体表现形式如表 2 所示, 同理可构建二级指标互补矩阵。

表 2 模糊互补判断矩阵
Table 2 Fuzzy complementary judgment matrix

A	B1	B2	B3
B1	b_{11}	b_{12}	b_{13}
B2	b_{12}	b_{22}	b_{23}
B3	b_{13}	b_{32}	b_{33}

在表 2 中, 相对于总目标 $b_{ij} = (f_{ij}, m_{ij}, t_{ij})$,

f_{ij}, m_{ij}, t_{ij} 表示一级指标之间的重要程度, f_{ij}, m_{ij}, t_{ij} 分别表示最差的判断、最可能的判断和最好的判断。在构建的判断矩阵中 b_{ij} 必须符合 2 个条件:

$$b_{ii} = (0.5, 0.5, 0.5)$$

$$f_{ij} + t_{ji} = 1, m_{ij} + m_{ji} = 1, t_{ij} + f_{ji} = 1$$

1.2.3 确定各级指标权重

通常依照以下步骤得到各级指标的权重过程:

1) 确定同层次某个指标的模糊判断程度

$$m(x_i) = a_{i1} + a_{i2} + \cdots + a_{in} \quad i = 1, 2, 3, \cdots, n \quad (3)$$

2) 得到同层次其余指标的模糊判断层次

$$m(X) = m(x_1) + m(x_2) + m(x_3) \quad i = 1, 2, 3, \cdots, n \quad (4)$$

3) 判断某个指标对同层次指标的综合模糊层次

$$S_i = m(x_i) \times m(X)^{-1} \quad (5)$$

4) 确定同层次某个指标相对其他指标之间的权重

$$w(x_i) = K(S_i \geq S_1, S_2, \cdots, S_n) = \min K(S_i > S_k) \quad (6)$$

其中 $K = 1, 2, \cdots, n$, 且 $k \neq i$ 。

5) 进而可以得到某层次内各指标权重为

$$W = w_1(x_1), w_2(x_2), \cdots, w_n(x_n) \quad (7)$$

6) 由式 (7) 可以得到权重向量

$$W = w_1(x_1), w_2(x_2), \cdots, w_n(x_n) \quad (8)$$

由此方法可分别计算出一级指标和二级指标权重。

1.2.4 单因素模糊综合评判

模糊综合评判通常要建立评价的指标集 U 以及对应的评价等级集 V , 由决策者依据判断对评价指标进行评定, 进而得到指标的隶属度 M 。上文中

建立了10个二级指标,记为 u_1, u_2, \dots, u_{10} ;而评价等级集可设为 $V = (v_1, v_2, v_3, v_4)$,对应变化分别为很明显、变化明显、变化较明显、基本不变共4个等级^[14]。如果共有 N 人数对指标 u_i 做出评价,有 N_{ik} 人做出 v_k 等级的评价,进而可以计算出该指标的等级隶属度:

$$m_{ik} = \frac{N_{ik}}{N} (i = 1, 2, \dots, 10; k = 1, 2, 3) \quad (9)$$

指标 u_i 的等级隶属度 M_i 和评价指标集 U 的等级隶属度矩阵 M 分别为:

$$M_i = (m_{i1}, m_{i2}, m_{i3}, m_{i4}, m_{i5})$$

$$M = [M_1, M_2, M_3, \dots, M_{10}] \quad (10)$$

1.2.5 运动性疲劳度等级量化

为能更为简单快捷地对运动过程的疲劳程度进行判断,在结合RPE主观疲劳评估^[15]的基础上,简化疲劳评估等级: $P \leq 13$ 为轻松; $13 < P \leq 15$ 为稍许疲劳; $15 < P \leq 17$ 为疲劳; $P > 17$ 为力竭。

结合公式(3)~(9),可以得到运动各指标的权重,为量化运动者的疲劳等级,本研究构建了公式(11)~(13),从而得到疲劳值。

$$Z_{Bi} = (W_{B1} \cdot Y_{C1} + W_{B2} \cdot Y_{C2} + \dots + W_{Bi} \cdot Y_{Ci}) \cdot W_{A1}, i = 1, 2, \dots, 10 \quad (11)$$

$$Z = Z_{B1}R_1 + Z_{B2}R_2 + \dots + Z_{Bi}R \quad (12)$$

$$P = \frac{Z}{10} \times 5.6 \quad (13)$$

其中 P 为疲劳度常数; Y_{ci} 为实时运动指标参数值。

2 结果与分析

2.1 确定指标权重

教练团根据三角模糊数的使用原则对评价指标做出评判,根据教学经验及学术水平确定3位教练的评判信息权重分别为0.4, 0.3, 0.3。专家1针对总目标A做出的一级指标模糊互补判断矩阵如表3所示。

由专家1作出的模糊判断矩阵,结合式(3)~式(8)可得出一级指标 B_i 相对于总目标A的权重向量为:

$$W_1 = (0.4011, 0.3614, 0.2375)$$

同理可得教练2和教练3判断结果为:

$$W_2 = (0.3902, 0.3715, 0.2385)$$

表3 专家1总目标A模糊互补矩阵
Table 3 Fuzzy complementary matrix of total objective A by expert 1

A	B1	B2	B3
B1	(0.5, 0.5, 0.5)	(0.5, 0.6, 0.6)	(0.5, 0.7, 0.5)
B2	(0.4, 0.4, 0.5)	(0.5, 0.5, 0.5)	(0.6, 0.7, 0.6)
B3	(0.5, 0.3, 0.5)	(0.4, 0.3, 0.4)	(0.5, 0.5, 0.5)

$$W_3 = (0.3864, 0.3635, 0.2501)$$

综合3位教练的意见可得:

$$W_A = 0.4W_1 + 0.3W_2 + 0.3W_3$$

$$= (0.3934, 0.365, 0.2416)$$

利用同样方法得到二级指标 C_{ij} 相对于一级指标 B_i 的权重向量。各级指标权重如表4所示。

2.2 确定指标模糊隶属度

采用发放问卷的形式向评审团征求对自行车运动性疲劳量化评价二级指标的单因素模糊综合评判意见。结合式(9)得到评判结果,以 B_1 工作性能对应的二级指标为例,如表5所示。

由此可得 B_1 工作性能对应的二级指标的等级隶属度矩阵为:

$$M_{B1} = \begin{bmatrix} 0.3568 & 0.4861 & 0.1610 & 0 \\ 0.2642 & 0.6123 & 0.1235 & 0 \\ 0.1994 & 0.3712 & 0.2643 & 0.1651 \end{bmatrix}$$

同理可得到:

$$M_{B2} = \begin{bmatrix} 0.5102 & 0.3486 & 0.1412 & 0 \\ 0.3625 & 0.3445 & 0.1564 & 0.0766 \end{bmatrix}$$

$$M_{B3} = \begin{bmatrix} 0.4369 & 0.3414 & 0.2215 & 0 \\ 0.3683 & 0.4011 & 0.1563 & 0.0744 \\ 0.1243 & 0.1524 & 0.5547 & 0.1788 \\ 0.0500 & 0.1853 & 0.4632 & 0.3015 \\ 0.1012 & 0.1436 & 0.4261 & 0.3291 \end{bmatrix}$$

2.3 评价与分析

指标权重向量 W 和二级指标单因素模糊综合评判结果能够得到一级指标的模糊评判结果以及总目标模糊评判结果,分别为 R_1, R_2, R_3 和 R_0 。

$$R_1 = W_{B1} \cdot M_{B1} = (0.2780, 0.5002, 0.1764, 0.0468)$$

可知自行车运动过程中运动性疲劳度评价体系中肢体疲劳指标的评级为变化大,其等级的隶属度为50.02%。

$$R_2 = W_{B2} \cdot M_{B2} = (0.4490, 0.3671, 0.1477, 0.0330)$$

表 4 评价体系中各级指标权重系数
Table 4 Weight coefficient of each index in evaluation system

First layer index	Weight coefficient W_{Ai}	Secondary layer index	Weight coefficient W_{Bi}
Physical indicators	0.3934	Stamp frequency	0.3468
		Speed	0.3698
		Power	0.2834
Physiological indexes	0.365	Heart rate	0.6289
		Breathing rate	0.3711
HRV	0.2416	SDNN	0.2041
		PNN50	0.1847
		LF/HF	0.2285
		HRD	0.1941
		HLE	0.1896

表 5 B1 实时运动指标模糊综合评判结果
Table 5 B1 real-time motion index fuzzy comprehensive evaluation results

Evaluation index	Change more obviously	Change significantly	Change obviously	Basically unchanged
Power	0.3568	0.4831	0.1610	0
Speed	0.2642	0.6123	0.1235	0
Stamp frequency	0.1994	0.3712	0.2643	0.1651

表 6 各个人群运动疲劳程度表
Table 6 Degree of exercise fatigue of various groups

Crowd	Evaluation	Easily	Slightly tired	Tired	Exhausted
Worst($n = 3$)	Subjective assessment	12.70	14.64	16.86	19.71
	Model evaluate	12.82	14.76	16.94	19.54
Bad($n = 10$)	Subjective assessment	12.12	14.18	16.22	19.24
	Model evaluate	12.52	14.36	16.32	19.12
General($n = 7$)	Subjective assessment	11.71	13.83	15.76	18.54
	Model evaluate	11.43	14.13	15.87	18.24
Better($n = 6$)	Subjective assessment	10.54	13.54	15.25	17.82
	Model evaluate	10.64	13.74	15.35	17.98
Best($n = 4$)	Subjective assessment	10.33	12.89	15.03	17.18
	Model evaluate	10.12	13.25	15.14	17.35
Average	Subjective assessment	11.52	13.84	15.82	18.57
	Model evaluate	11.60	14.07	15.93	18.49

可知自行车运动过程中运动性疲劳度评价体系中生理疲劳指标的评级为变化大,其等级隶属度为 44.90%。

$$R_3 = W_{B3} \cdot M_{B3} = (0.2145, 0.2418, 0.3745, 0.1755)$$

可知自行车运动过程中运动性疲劳度评价体系中生理疲劳指标的评级为变化不大,其等级隶属度为 37.45%。

由以上结果可知:所选择的运动参数的整体评价为变化明显,3 项指标的评判结果中,2 项是变化明显,1 项为变化较明显,整体的评价为变化明显,说明在自行车运动性疲劳评价体系中各个

参数指标之间相关性较为明显,利用各个指标之间的权重以及公式(11)~(13)能够对自行车运动者的疲劳程度进行量化分级。

$$R = W_A \cdot [R1 \ R2 \ R3] = (0.3381, 0.3918, 0.2279, 0.1531)$$

用模糊层次分析法,结合公式(11)~公式(13)和表 1 中参数指标得到受试者不同疲劳阶段疲劳评估模型的 P 值,表 5 中各人群主观疲劳评估 RPE 值与 P 值,情况具体如表 6 所示。

分析表 6 可知,基于模糊层次分析基于模糊层次分析法的自行车运动性疲劳评估模型可以实现骑行者的疲劳程度进行的评估。同时对模型评

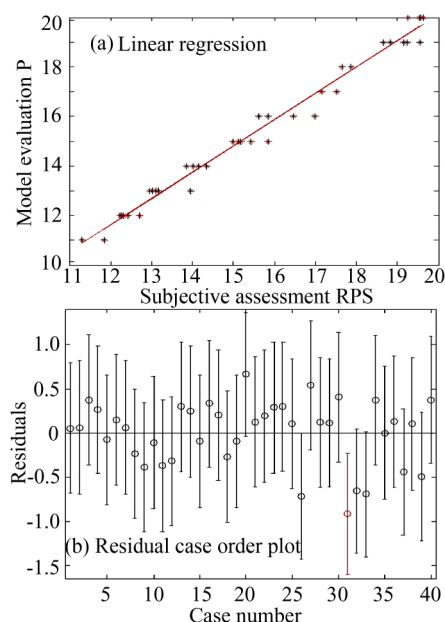


图2 运动能力稍差人群线性回归图和残差图

Fig. 2 People with slightly lower mobility: linear regression and residual case order plot

估值与主观评估值构造线性回归模型,这里列举了运动能力稍差人群的残差图,如图2(a)和图2(b),可以看出数据的残差均包含零点,且拟合直线的相关系数为0.9886($P < 0.05$),说明模糊评估值与主观疲劳感觉值之间差别不大。

3 结论

本文通过监测运动者骑行时,踩踏频率、速度、功率、心率、呼吸率以及心电等指标的变化,结合模糊层次分析法构建了一种多参数自行车运动主动疲劳量化模型,以定性和定量方式对受试者的主观疲劳程度作出评估,能高效评估骑行者的疲劳程度,具有良好的推广和普及性,可实现实时疲劳评估。

【参考文献】

- [1] 贾东奇. 有氧功率自行车训练对偏瘫患者和健康人心血管反应的影响分析[J]. 中国全科医学, 2016, 19(24): 2991-2993.
- [2] 孙慧珍. 青少年自行车运动员运动损伤的探讨[J]. 青少年体育, 2016(5): 49-50.
- [3] 饶志坚, 常芸, 王世强, 等. 长期大强度耐力运动对心脏的不利影响[J]. 体育科学, 2016, 36(6): 46-54.
- [4] Chagnon A, Carre B, Willmann P, et al. Cycling ability of γ -butyrolactone-ethylene carbonate based electrolytes[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2017, 150(9): A1255-A1261.
- [5] 白永超, 刘涛, 张冀聪, 等. 基于通用型模拟飞行系统的脑力状态评定台研制[J]. 航天医学与医学工程, 2018, 31(1): 67-71.
- [6] 戈黎. 人体功能状态检测系统对运动疲劳的检测评估[J]. 当代体育科技, 2015, 5(7): 14-15.
- [7] Donath L, Roth R, Hohn Y, et al. The effects of Zumba training on cardiovascular and neuromuscular function in female college students[J]. European Journal of Sport Science, 2014, 14(6): 569-577.
- [8] Donath L, Zahner L, Cordes M, et al. Aerobic endurance training recommendations based on subjective ratings of perceived exertion in healthy seniors[J]. Journal of Aging & Physical Activity, 2013, 21(1): 100-111.
- [9] Marquis K, Maltais F, Lacasse Y, et al. Effects of aerobic exercise training and irbesartan on blood pressure and heart rate variability in patients with chronic obstructive pulmonary disease[J]. Journal of the Canadian Thoracic Society, 2008, 15(7): 355-360.
- [10] Aldred R, Woodcock J, Goodman A. Does more cycling mean more diversity in cycling[J]. Transport Reviews, 2016, 36(1): 28-44.
- [11] 白杰, 冯传宴, 杨坤. 飞行员脑力负荷生理测量方法研究进展[J]. 航天医学与医学工程, 2016, 29(2): 150-156.
- [12] Smith B, Wärlind D, Arneth A, et al. Implications of incorporating N cycling and N limitations on primary production in an individual-based dynamic vegetation model[J]. Biogeosciences, 2016, 11(7): 2027-2054.
- [13] Ruiz-Padillo A, Torija AJ, Ramos-Ridao AF, et al. Application of the fuzzy analytic hierarchy process in multi-criteria decision in noise action plans: Prioritizing road stretches[J]. Environmental Modeling & Software, 2016, 81: 45-55.
- [14] Brisswalter J, Wu SSX. Age difference in efficiency of locomotion and maximal power output in well-trained triathletes[J]. European Journal of Applied Physiology, 2014, 114(12): 257-258.
- [15] Papavasiliou AS, Nikaina I, Bouros P, et al. Botulinum toxin treatment in upper limb spasticity: Treatment consistency[J]. European Journal of Paediatric Neurology, 2012, 16(3): 237.
- [16] Black MI, Jones AM, Blackwell JR, 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.
- [17] 荣海波, 张世明. 张世明教授运动性疲劳中医分型诊断标准[J]. 成都中医药大学学报, 2017, 40(4): 72-73.
- [18] Rong HB, Zhang SM. A brief introduction to the improvement of the classification of TCM diagnosis of sports fatigue by professor Zhang Shiming[J]. Journal of Chengdu University of Traditional Chinese Medicine, 2017, 40(4): 72-73.

(责任编辑: 廖苹)