



运动训练负荷的多模态监控模式及实践策略 Multimodal Monitoring Models and Practical Strategies for Training Loads

陆施熠¹, 胡海旭^{1*}, 金成平², 田浩¹

LU Shiyi¹, HU Haixu^{1*}, JIN Chengping², TIAN Hao¹

摘要:在体育科学与技术领域,对运动训练负荷进行专业化和精确化的监控和施加被公认是高质量训练的重要前提,它对于优化训练过程并实现高质量的训练创新至关重要。采用文献资料调研和比较分析等方法,深入探讨了目前广受认可的外部 and 内部负荷监控方法的优劣和适用条件,并进一步提出基于项群特征和训练情景的多模态训练负荷监控模式,其实践要点包括多模态综合评估体能状态、个性化训练调整、利用技术工具和数据分析、强调恢复的重要性、持续跟踪和反馈。未来应加速推进以人工智能赋能多模态监控模式的中国实践。

关键词:内部负荷;外部负荷;训练负荷;主观强度感知;多模态监控

Abstract: In the field of sports science and technology, the specialized and precise monitoring and implementation of training loads has been recognized as a critical prerequisite for high-quality training, which is essential to optimize the training process and achieve high-quality training innovation. By means of systematic literature review, comparative analysis and other methods, this study delves into the strengths and weaknesses and the applicable conditions of the currently widely recognized external and internal load monitoring methods, and further introduces a multimodal training load monitoring model based on event-group characteristics and training scenarios. The practical applications of this model include a multimodal comprehensive evaluation of physical condition, personalized training adjustments, the use of technological tools and data analysis, an emphasis on the importance of recovery, and consistent tracking and feedback. Future efforts should accelerate the Chinese practice of multimodal monitoring models empowered by artificial intelligence.

Keywords: internal load; external load; training load; rating of perceived exertion (RPE); multimodal monitoring

中图分类号:G808.1 **文献标识码:**A

基金项目:
国家社会科学基金一般项目
(20BTY092)

第一作者简介:

陆施熠(2000-),男,在读硕士研究生,主要研究方向为运动训练理论与方法、竞技攀岩运动, E-mail: 2695748548@qq.com。

***通信作者简介:**

胡海旭(1983-),男,教授,博士,硕士研究生导师,主要研究方向为运动训练理论与方法, E-mail: hhx100000@163.com。

作者单位:

1.南京体育学院,江苏南京210014;
2.武汉理工大学,湖北武汉430070
1. Nanjing Sport Institute, Nanjing
210014, China;
2. Wuhan University of Technology,
Wuhan 430070, China.

精确的训练负荷量化被视为科学训练的关键。运动员的竞技能力和表现的持续增长,归因于系统的、持续且适当的训练负荷刺激所引起的短期响应,随后这些响应累积形成长期的慢性适应,即功能性适应,从而在关键比赛中适时出现良好的竞技状态。Impellizzeri等(2019)认为,在实施训练负荷时,必须平衡刺激与适应之间的动态关系,持续调整负荷以促使运动员在比赛之前获得良好的功能性适应。

广义的训练负荷是指施加于人体系统的刺激。该系统包括细胞成分、单个细胞、组织、一个或多个器官、系统,乃至整个人体,其刺激涉及生理学、物理学和心理学等多个方面。运动员对刺激的反应及刺激本身与训练内容的性质、强度和持续时间密切相关(胡海旭等,2021a)。基于运动训练实践视角,科研人员在2006年多哈亚运会科学大会上形成了内部负荷和外部负荷的训练负荷分类共识。外部负荷特指运动员的训练行为或物理变量,可以用重量、距离、时间、速度/速率和功率等指标测量;内部负荷是身体为应对外部负荷引发的要求而启动的实际心理生理反应,它可以通过心率(heart rate, HR)、

血乳酸、主观强度感知(rating of perceived exertion, RPE)和生化及分子反应等指标表征(Bourdon et al., 2017)。陈小平(2022)、胡海旭等(2021b, 2022)认为,即使是经验丰富的教练员,也难以仅凭主观观察来准确评估运动员的当前状态。因此,亟须借助于科技手段量化监控训练负荷与适应。

图1为运动训练负荷实施与监控预警环路模型。运动员会经历急性训练疲劳、长期应激反应和功能性与非功能性的训练过度等状态。负荷刺激不当会导致适应不良,甚至出现过度训练综合征,引发伤病。因此,基于专项和个体的精准动态化训练负荷监控和施加尤为必要。

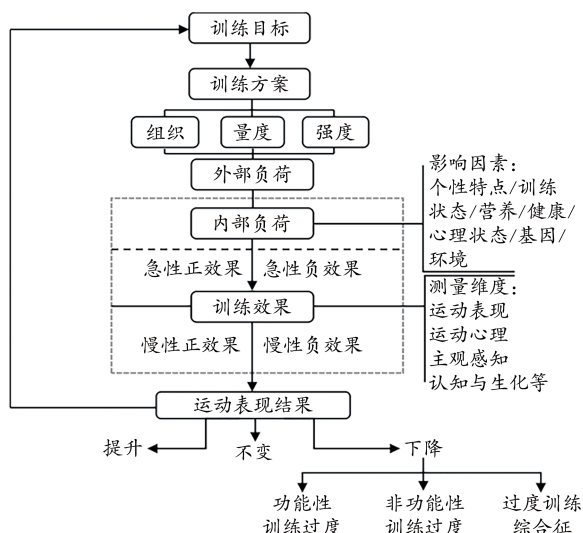


图1 运动训练负荷实施与监控预警环路(胡海旭等, 2022)

Figure 1. Training Load Implementation and Monitoring Early Warning Loop(胡海旭等, 2022)

基于上述,本研究系统分析了当前广受认可的内部和外部负荷监控方法,提出优化整合现有负荷监控方法的多模态监控模式策略,即为准确、安全地组织训练适应过程,围绕专项特征和训练情景(如训练和比赛期间的准备情况、运动负荷和恢复情况),集成并交互采用多种负荷监控方法的监控模式。

1 外部负荷的不同模态监控方法

1.1 基于人工观察的负荷监控

训练量与强度是训练负荷的2个核心变量。训练量包括训练的累计次数、总时长和总重量等,教练员和科研人员通常以此量化外部负荷,如在团体项目中训练或比赛的次数、时长,以及田径项目中训练的间歇时间、训练频率和距离等。Busso等(1990)在重量训练研究中尝试使用运动员的功率百分比与时间的乘积来量化训练负荷,旨在克服单纯依靠心率作为量化训练负荷指标的局限性。蔡旭旦等(2020)的研究比较了来自不同运动背景的越野滑雪运动员在集训前后3个月的训练日和训练时

长。结果显示,尽管2组运动员在6个月的专项训练中显示出相似性,但原中长跑运动员在专项小练习的时长上比原皮划艇运动员的训练时长约多15 h,突显出运动背景对训练适应性的影响。

在制定训练方案时,训练强度与训练量同样是量化外部负荷的关键,且常与训练内容安排相对应。表1呈现了1次体能训练的方案,结合训练计划与实际执行能更精确地量化外部负荷。若运动员因伤病、疲劳或技能短板而未能达到预定计划,教练员需要及时调整训练负荷。通过设置可量化的外部负荷参数,教练员和科研人员能够实时监控训练效果,并根据运动员的实际表现作出调整。

表1 体能训练计划中的外部负荷度量

Table 1 Measurement of External Load in Physical Training Program

项目	负荷
深蹲	4次×90% 1RM
徒手蹲跳	5次×4组
负重蹲跳	4次×20 kg
硬拉	4次×90% 1RM
单腿跳稳定落地	4次/侧×4组
负重弓步跳	4次/侧×20 kg
卧拉	4次×90% 1RM×4组
卧推	4次×90% 1RM
有氧	30 min

1.2 基于自动化技术的负荷监控

随着新信息技术的快速发展,全球定位系统(global positioning system, GPS)、数字视频分析(如ProZone™)等技术被广泛应用于运动模式分析,以便实时监控运动员的训练负荷。这种监控涵盖了运动员的移动、方向变化、速度和动作角度等,极大地增强了负荷监控的精确性和便利性。Schutz等(1997)在测定运动速度时采用了GPS,此后GPS便被广泛用于室外团体项目中的速度和轨迹监控。刘泳庆等(2021)的研究中应用了全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS),结合GPS、俄罗斯的全球导航卫星系统(global'naya navigatsionnaya sputnikovaya sistema, GLONASS)和星基增强系统(satellite based augmentation systems, SBAS),对越野滑雪运动员进行监控。该系统能够创建三维地图,详细记录运动员在不同雪质条件下的路径和海拔变化,实现对其分段速度和时间等外部训练负荷的精确监控。

GPS在线性和非线性运动中,无论是恒定速度还是变化速度都较为准确,但是在测量高速非线性运动时存在可信度较低的情况。在人口密集或封闭的区域GPS信号强度减弱,例如受室内环境干扰,监控篮球项目的精确度不及室外的足球项目。而且随着非线性运行和运动速度的增加,其测量结果的有效性降低。为此,学者们将Player-

Load™和IMA系统引入到篮球等室内运动项目的监控中。Ohgi等(2003)运用惯性传感器技术和佩戴在腕部的高频加速计,结合陀螺仪,精确监测了游泳中划水动作的阶段和训练负荷,展示了技术在不同运动项目中的应用潜力。

此外,视频分析技术能更加精确地记录运动员的技术动作细节及其发生频率,其优点还表现为不受比赛规则和环境的限制,成本也较低。张兴林(2010)应用视频分析技术对女子排球运动员的比赛动作进行统计,发现赛场上不同位置的运动员比赛负荷差异明显。

1.3 基于神经肌肉功能的负荷监控

适当的训练负荷能促使肌肉和神经系统进行适应性变化,从而提升力量、耐力和协调性。神经肌肉功能的评估,如反向纵跳(counter movement jump, CMJ)、等速力量测试和等惯性力量测试,是监控外部负荷的直接方法,这些测试尤其适用于评估团体运动项目中的负荷水平和监控训练效果(Debien et al., 2018; Ellis et al., 2022; Ferioli et al., 2018)。Cruz等(2018)和Heishman等(2019)研究指出,外部训练负荷与其后的CMJ表现存在明显的急性反比关系。这类监控方法既能提供神经肌肉信息,又能提供代谢信息,且操作简便、不易疲劳。此外,对神经肌肉功能的监测有助于更深入地理解与专项相关的生物力学表现,这是外部负荷监控中不可忽视的一部分。

2 内部负荷的不同模态监控方法

2.1 基于心率的负荷监控

2.1.1 训练冲量

20世纪30年代,心率监测被应用于400 m跑的训练中,发现运动员在120~180次/min的心率区间是400 m跑的专项训练强度。随着研究的深入,基于心率的负荷监控方法得到不断发展与完善(表2)。

Banister等(1975)提出了训练冲量(Trimp)这一概念,由训练时长与训练强度(以平均心率表示)的乘积得出。1982年,该研究组进一步提出疲劳适应模型,即人体在负荷刺激下,会同时出现疲劳和适应2种反应,这2种反应会根据负荷的大小进行调整,并且二者之间存在一定的关联。在此基础上,基于心率的Trimp算法被进一步发展,同时性别差异的加权系数也被纳入考虑范围。

为了简化算法并更准确地评估间歇训练的负荷,Ewards(1994)引入了心率区间概念,由运动时长与心率区间的权重系数的乘积得出运动负荷。在此基础上,Lucia(2003)根据摄氧量和乳酸阈值不同阶段时的心率,重新确定了该公式中权重系数的心率区间。Morton(1990)在Trimp模型的基础上,结合通气阈和呼吸补偿时的心率区间,确定强度的权重指标。Stagon(2007)根据乳酸代谢曲线和训练实践,提出非线性增长的权重系数。

Maniz等(2009)在总结前述Trimp算法的基础上,提

出了个体化训练冲量(iTrimp)的概念,其权重基于个体的心率与乳酸在增量运动中的响应,在标准乳酸阈值测试方案中获得数据。AmadorGarcía-Ramos等(2015)针对原始Trimp算法在估计运动和休息间隔时可能出现的偏差提出了Trimp累积法(Trimpc)。

2.1.2 心率变异性与心率恢复

心率变异性(heart rate variability, HRV)已被广泛认为是一种无创评估心脏自主调节功能的方法(Makivić et al., 2014)。由于HRV对疲劳、生理及心理压力等自主神经系统(autonomic nervous system, ANS)扰动的响应敏感,已被作为评估机体疲劳及运动强度的可靠指标(Achten et al., 2003)。Maniz等(2009)发现,当个体在中等强度下进行训练时HRV上升,但在高负荷训练时HRV下降,而当训练负荷降低后,HRV会恢复至初始水平。然而,Impellizzeri(2019b)持有不同的看法,指出如果HRV和心率恢复(heart rate recovery, HRR)是在训练后测量的,则与训练中负荷之间可能仅为间接关系,其测量的是运动后对内部负荷的反应(Makivić et al., 2013)。

HRR描述的是运动结束后心率的下降速率,被作为评估运动员的自主神经功能及其训练状态的关键指标。自主神经系统包括交感神经和副交感神经系统,两者共同调控心率。在运动过程中,心率的增加是由交感神经活动的增强和副交感神经活动的减弱共同作用的结果。交感神经活动会提高心率、心肌收缩力和电传导速度,而副交感神经活动则产生相反的效应。Daanen等(2012)指出,当HRR减慢,尤其是在训练负荷急剧增加时(如增加55%±22%),则意味着负荷过大。此结论得到Lamberts等(2010)的研究支持,该研究发现心率下降速度较慢的受试者在40 km的定时赛中相较于心率恢复快的受试者有较低的功率输出。

2.2 基于生理生化指标的负荷监控

训练后的人体代谢产物水平发生变化,通过监控运动员的生理生化指标可以评估其训练效果,以及身体适应性和疲劳情况。研究表明,血液(冯连世等,2006;李舒洁等,2022;孙志宏等,2022)、尿液(冯小龙等,2012;李志敢,1999;Machado et al., 2018)、唾液(刘敬祺等,2022;许毅泉等,2022;赵泽霖等,2017;Leicht et al., 2018; Monje et al., 2020)是评估运动员状态的关键指标。其中,血液指标中主要关注肌酸激酶、睾酮、尿素氮及红细胞;尿液指标中主要关注尿素和尿蛋白;唾液指标中关注免疫球蛋白A。1)肌酸激酶。运动后可导致肌酸激酶明显增高,且运动越剧烈、时间越长,肌酸激酶升高越明显。男性肌肉体积大,血清肌酸激酶活性较女性高。机体产生适应后,相同负荷训练后的肌酸激酶升高幅度减少。2)睾酮。睾酮的变化分析集中在急性运动反应与静息状态2种情况。一段时间训练后运动员血清睾酮若没有变

化,说明训练负荷不足,对运动员刺激不大,需要根据训练目的增加训练负荷;血清睾酮若出现下降,但下降幅度不大,说明训练负荷合理;如果血清睾酮下降幅度达 25% 以上,并且这种下降状态持续存在,则表明训练负荷安排过高,运动员未能充分恢复,应及时进行调整。3) 皮质醇。皮质醇水平与训练负荷密切相关。耐力型运动(强度超过 60% $\dot{V}O_{2max}$ 和力量训练均可导致皮质醇水平升高。在训练初期,皮质醇和睾酮的水平通常会呈现上升趋势,这是身体对于运动负荷的正常反应。然而,如果训练强

度过高或持续时间过长,导致进入过度疲劳状态而未能适当停歇,体内便会大量释放皮质醇,作为一种应对极端疲劳的防御机制(皮质醇的分泌主要是为了自我保护,通过促进葡萄糖生成、抑制炎症反应等途径来支持身体应对长期的运动压力)。随着训练的持续,皮质醇的分泌将维持在一个相对较高的水平。不过,对于经过良好训练和适应的运动员而言,在相同的运动负荷下,血清中皮质醇的上升速度可能会有所减缓,反映了身体对该运动负荷的适应和耐受性的提高。

表 2 Trimp 算法汇总
Table 2 Summary of Trimp Algorithm

分类依据	作者	算法公式
心率	Banister(1975)	提出 $Trimp = 1.92 \times \Delta HR_{ratio}$
	Banister(1991)	男子: $时间 \times \Delta HR_{ratio} \times 0.64e^{1.92 \times \Delta HR_{ratio}}$, 女子: $时间 \times \Delta HR_{ratio} \times 0.86e^{1.67 \times \Delta HR_{ratio}}$
	Banister(1993)	男子: $时间 \times \Delta HR_{ratio} \times 0.64e^{1.92 \times \Delta HR_{ratio}}$ 女子: $时间 \times \Delta HR_{ratio} \times 0.64e^{1.67 \times \Delta HR_{ratio}}$
	Maniz 等(2009)	时间 $\times \Delta HR_{ratio} \times Y_i$ 5 min 计算 1 次 Trimp Y_i 心率与乳酸变化的曲线(个体不同曲线不同)
	Amador García-Ramos 等(2015)	$\sum_{int=1}^n t_{int} \times k_1 \times \Delta HR_{ratio}$ 男 $k_1 = 0.64 \times e^{1.92 \times \Delta HR_{ratio}}$ 女 $k_1 = 0.86 \times e^{1.67 \times \Delta HR_{ratio}}$ t_{int} = 每个时间间隔的持续时间(min)
心率区间	Edwards(1994)	$T_{区间1} \times 1 + T_{区间2} \times 2 + T_{区间3} \times 3 + T_{区间4} \times 4 + T_{区间5} \times 5$ 区间 1 = 50%~60% HR_{max} 区间 2 = 60%~70% HR_{max} 区间 3 = 70%~80% HR_{max} 区间 4 = 80%~90% HR_{max} 区间 5 = 90%~100% HR_{max}
	Lucía 等(2003)	$T_{区间1} \times 1 + T_{区间2} \times 2 + T_{区间3} \times 3$ $T_{区间n}$ 为所在区间的时间 区间 1: $HR < 70\% \dot{V}O_{2max}$, $Bla < 2.5$ mmol/L 区间 2: $HR = 70\% \sim 90\% \dot{V}O_{2max}$, 2.5 mmol/L $< Bla < 4.0$ mmol/L 区间 3: $HR > 90\% \dot{V}O_{2max}$, $Bla < 4.0$ mmol/L
	Morton 等(1990)	$Trimp = 1 \times Trimp_1 + 2 \times Trimp_2 + 3 \times Trimp_3$ $Trimp_n = A_n \times B \times C$ A_n = 运动时间(min); $B = (HR_T - HR_B) / (HR_{max} - HR_B)$; $C = 0.64e^{DB}$; e = 自然对数(2.712); HR_T : 平均心率; HR_B : 基础心率; HR_{max} : 最大心率; $D = 1.92$ (男子)、 1.67 (女子); A_1 : $< HR_{VT}$ 时的运动时间; A_2 : $HR_{VT} < HR < HR_{RCP}$ 时的运动时间; A_3 : $> HR_{RCP}$ 时的运动时间; HR_{VT} : 70% $\dot{V}O_{2max}$ 所对应的心率; HR_{RCP} : 90% $\dot{V}O_{2max}$ 所对应的心率
Stagno 等(2007)	$T_{区间1} \times 1.25 + T_{区间2} \times 1.71 + T_{区间3} \times 2.54 + T_{区间4} \times 3.61 + T_{区间5} \times 5.16$ $T_{区间n}$ 为所在区间的时间 区间 1 = 65%~71% HR_{max} 区间 2 = 72%~78% HR_{max} 区间 3 = 79%~85% HR_{max} 区间 4 = 86%~92% HR_{max} 区间 5 = 93%~100% HR_{max}	

运动后的恢复期至关重要,此时血清皮质醇水平的下降速度和恢复时间可以作为衡量运动员恢复能力和机能状态的指标。血清皮质醇如果下降缓慢,恢复时间延长,则可能指示运动员的恢复能力不足或身体状态不佳,需

调整训练计划或加强恢复策略。此外,体内雌激素水平、口服避孕药使用以及月经周期的不同阶段均会影响皮质醇的生物利用率和结合特性。4) 血红蛋白。运动员的血红蛋白水平与运动负荷之间存在一定的相关性,但这种

波动并非总是与运动负荷的变化完全一致。实际上,血红蛋白水平的变化反映了多种生理因素的综合作用,包括血液稀释(体液容量的增加)和红细胞的生成与破坏平衡等。大强度训练会引起血红蛋白水平的下降。若下降幅度 $>10\% \sim 15\%$,可能表明整体训练负荷较大,会影响运动表现;若下降幅度 $>20\%$,则可能提示训练负荷过度,不仅对体能产生不利影响,还可能威胁到运动员的健康状态,此时需要立即调整训练负荷。若调整3 d后能基本恢复训练前水平,表明恢复良好,训练量适宜。5)血尿素氮。血尿素氮是评估运动员训练强度和恢复状态的一个重要指标,主要反映了蛋白质代谢的情况以及肾脏功能的状况。普通人群的正常值为 $4 \sim 7 \text{ mmol/L}$,运动员训练后的血尿素氮水平如果超过 8 mmol/L ,运动员应该注意的是否存在过度训练的风险。具体评定方法:1)在训练课结束后20 min内采血测定,比运动前增加值超过 3 mmol/L 时,说明运动量过大,运动员已达疲劳阈值;增加值约为 2 mmol/L 时,说明运动量适中,运动员基本能适应当前运动量;增加值只有 1 mmol/L 左右时,说明运动量较小。2)次日晨取血测定,一般以降到 8 mmol/L 以下表明恢复良好,训练量适宜;没有明显下降或仍高于 8 mmol/L 则表明训练量过大。

2.3 基于课次主观强度感知(session-RPE)的负荷监控

session-RPE是一种简洁而有效的负荷监控策略,该方法操作简易且成本低,将运动员的内部负荷视为整体刺激的反应,记录训练引起的感知强度。

该方法是Forster(1995)结合Borg(1982)的RPE量表与Banister(1975)的疲劳与适应模型建立。其中,Borg(1982)基于Stevens(1957)的心理生理学“幂次法则”提出RPE量表,该量表是基于心理与生理双重影响的强度负荷指标,包括6-20量表、CR-10量表和CR-100量表。Forster(1995)将RPE量表与Banister(1975)的模型相结合,提出session-RPE的概念以量化负荷,其计算方法为: $s\text{-RPE (AU)} = \text{训练时长 (min)} \times \text{RPE 得分}$ 。

采集时间一般推荐在训练结束后30 min内记录RPE,但Forster(2001)、Uchida(2014)和Kraft(2014)对此存在不同观点。此外,Minganti(2011)和Rodriguez-Marroyo(2021)等研究发现,在计算session-RPE时,无论是否包括休息时间,其与心率之间的相关性没有显著差异。

值得一提的是,学界使用session-RPE的方法构建了急性-慢性负荷比(acute-chronic workload ratio, ACWR)模型,以评估运动员的运动损伤风险。ACWR的计算方法:最近1周的总训练负荷/(最近4周的总训练负荷/4)。其结果呈U型分布,其中 $0.8 \sim 1.3$ 为负荷适中(图2)。该模型已在多种运动中得到验证(如橄榄球、足球、网球、长跑等)。值得一提的是,Stares等(2018)发现澳式橄榄球运动员的ACWR与损伤风险显著相关。而在女子篮球中,周苏坡等(2019)

的研究表明1周和5周的时间窗口与损伤风险关联最高。

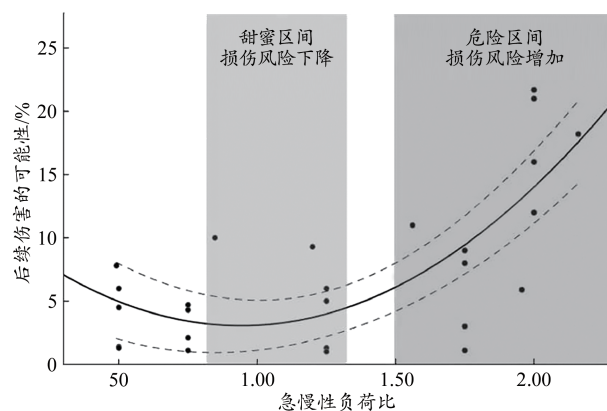


图2 ACWR与损伤风险之间的关系(Bourdon et al., 2017b)

Figure 2. Relationship between ACWR and Injury Risk (Bourdon et al., 2017b)

2.4 基于调查问卷与训练日记的负荷监控

调查问卷与训练日记作为非侵入性的训练负荷监控策略,为各类运动项目提供了简洁且易于应用的工具。然而,由于这2种方法主要依赖于运动员的主观感知数据,而这些数据可能受到社交和日常生活的多重因素干扰,从而使其精度可能存在偏差。因此,为确保监控的准确性,建议结合客观的监控手段。

目前,广受认可的问卷量表包括:情绪状态量表(profile of mood states, POMS)(Kreher et al., 2012)、运动员恢复压力问卷(recovery-stress questionnaire for athletes, RESTQ-Sport)(Nicolas et al., 2019)、运动员日常生活需求分析(daily analysis of life demands for athletes, DALDA)(Coutts et al., 2007)以及总恢复量表(total quality recovery, TQR)(Freitas et al., 2014)。其中,有研究提出,由于REST-QSport同时评估了压力与恢复2个维度,该量表在训练负荷监控中可能具有更高的适用性(Wallace et al., 2014)。还有研究发现,压力与皮质醇水平呈负相关,而无压力或低压力状态则与白细胞水平呈正相关(Saw et al., 2016)。进一步发现REST-QSport中的4个压力子量表与肌酸激酶水平存在正相关关系。

值得关注的是,Clemente等(2020)采用session-RPE和Hopper问卷对13名精英排球运动员在整个赛季中的每日感知负荷强度、肌肉酸痛、压力、疲劳和睡眠质量进行了持续评估,发现每周的训练负荷与肌肉酸痛、疲劳和压力的感知状态存在中到高度的相关性,且与每日的训练负荷相比,每周训练负荷的相关性更为显著。

2.5 基于睡眠质量的负荷监控

运动员的睡眠时长和质量对其表现和恢复至关重要。高质量的睡眠有助于大脑和身体从疲劳中恢复,而睡眠不足则可能干扰记忆力、认知技能的巩固和学习过

程,影响糖代谢,降低免疫系统效能。增加的训练负荷、比赛和训练日程的不确定性,以及追求优异成绩带来的心理压力和社交媒体使用(特别是夜间屏幕过度使用)等,都可能负面影响睡眠质量。

因此,在训练负荷监控中,对运动员睡眠质量的监测变得至关重要。睡眠监测方法主要包括主观量表评估和非侵入性的客观技术(表 3)。主观量表依赖运动员对其睡眠的个人评估,而非侵入性客观技术则通过设备对运

动员的脑电波、眼球移动等进行实时监控,以控制训练负荷对睡眠的潜在影响。Thornton 等(2017)对橄榄球运动员的训练负荷数据进行了记录,并结合其他生理指标发现,随着训练负荷的增加,运动员试图延长他们的睡眠时长。通过监控睡眠,可以更准确地评估训练负荷,进而有效调整以优化运动员的睡眠状况。Nakamura 等(2023)对顶级女子足球运动员的睡眠和心率变异指数进行了研究,结果显示训练和比赛负荷对睡眠持续时间有显著的影响。

表 3 睡眠质量监控方法

Table 3 Sleep Quality Monitoring Methods

分类依据	睡眠监控量表	主要监控内容
主观	匹兹堡睡眠质量指数(Pittsburgh sleep quality index)(Santiago et al., 2022)	睡眠质量、入睡时间、睡眠时间、睡眠效率、睡眠障碍、催眠药物、日间功能障碍
	失眠严重指数量表(insomnia sleep index)(Romdhani et al., 2022)	入睡困难、维持睡眠困难、早醒、睡眠模式评价、睡眠问题对日间活动的干扰、失眠问题对生活质量的影、当前睡眠问题的担忧程度
	嗜睡量表(epworth sleep in ess scale)(Nóbrega-júnior et al., 2020)	白天的困意、嗜睡程度
	清晨型与夜晚型量表(morningness-eveningness questionnaire)(Lastella et al., 2021)	昼夜节律
客观	Actigraphy 腕表式睡眠监控分析仪(Lopez-Flores et al., 2023) 非接触式睡眠监控与评估系统	睡眠各项指标

2.6 基于脑电图的负荷监控

脑电图(electroencephalogram, EEG)是精细评估和监控训练负荷诱发的大脑皮层神经响应的一项关键技术,通过精确捕捉和分析大脑在多种功能状态(如休息与运动)下的电活动(脑波),以非侵入性、安全地进行实时监控的方式,深入了解运动员大脑如何适应训练负荷变化。

此外,联合应用 EEG 和神经肌电图(neuro-electromyography, ENMG)能够为研究人员和教练员提供运动员训练适应性的全面视角,涵盖大脑反应、肌肉活动及整体生理反应。这种综合评估有助于深入理解运动员的生理和神经反应机制,从而优化训练策略。张振民等(2002)的研究通过 EEG 探讨了中国乒乓球世界冠军的脑功能特征,发现脑电功率能量与运动员对训练负荷的应激水平密切相关,并与非冠军运动员存在显著差异。Ludyga 等(2017)研究了自行车训练中不同节奏对运动员前额叶 α/β 波比值的影响,发现高节奏训练可显著增加该比值。Del Percio 等(2009)通过高分辨率 EEG,研究直立状态下运动员的脑活动,探讨了神经效率与运动表现之间的关系。这些研究共同指出,脑电特征与运动员的训练响应及表现紧密相关。

3 不同模态负荷监控方法实践策略

本研究参考 Bourdon 等(2017)对各种训练负荷监控方法的实际应用进行的综合评价并加以补充完善,对不同监控方法的实用性进行分项评估,为训练从业者根据

实际调取恰当的监控方法提供参考(表 4)。

3.1 外部负荷监控方法实践策略

外部负荷具有非侵入性优势,适用性较广。需要注意的是,即使等量的外部负荷施加在不同的运动员上,由于各自的训练状态、营养状况、健康状况、心理状态和遗传等因素的不同,其内部负荷和适应性反应可能各异。因此,教练员在安排训练时,应将外部负荷监控数据作为参考,并结合运动员对训练负荷的实际反应以及其他各类因素,全面评估运动员的训练适应状况和竞技能力发展水平。

3.2 内部负荷监控方法实践策略

3.2.1 生理生化

在运动过程中,人体发生的生理和生化变化是对训练负荷的直接响应,这不仅反映了个体的应激能力,还表明了其对运动刺激的适应性。通过监测特定的生理和生化指标,研究人员和教练员能够准确评估运动员的训练效果,并据此优化训练计划。

策略建议:1)选择适合的指标:尽管生理生化监测适用于所有运动项目,但需要根据每个项目的特性和需求,选择合适的生理和生化指标。2)多次测量:大多数生化和激素指标需要多次测量以达到最佳效果。这可能需要复杂且昂贵的设备,并且数据分析过程可能较慢。3)设备和采集流程标准化:设备和采集流程的标准化程度会影响测试结果。例如,便携式血乳酸仪和实验室血乳酸仪在测定血乳酸值时可能存在偏差。4)考虑测试的影响因素:采血测试的侵入性可能会导致应激激素水平升高,

进一步影响测试结果。运动员在测试时的情绪和社会环境也可能对测试结果产生影响。5)考虑昼夜节律的影响:一些激素(如皮质醇和睾酮)会受到昼夜节律的影响。6)全面评估:需要结合运动员的体能测试结果、外部负荷监控数据以及生理生化指标,全面评估运动员的训练状态和生理反应。7)心理状态的了解:通过一对一交流,了解运动员的心理状态和个人感受,确保他们在最佳状态

下参与训练和比赛。综上,在实践中,教练员等需要理解生理生化监测方法的局限性,并寻找更有效的方法或手段来改进现有的测试和评估程序。同时,也要认识到生理生化指标仅是评估运动员训练效果和调整训练负荷的一个方面,必须结合其他信息,如运动员的心理状态、个体感受以及其他相关的测试和监控数据,才能更全面地理解运动员的身体状况和需要。

表4 内、外部训练负荷监控方法的实用性评估

Table 4 Evaluation of Practicability of Internal and External Training Loads Monitoring Methods

监测方法	成本	简易性	侵入性	稳定性	准确性	敏感性	适用项目/内容
外部负荷	时间	L	L	N	Y	Y	所有项目
	频率	L	L	N	Y	Y	所有项目
	距离	L	L	N	Y	Y	所有项目
	成套动作次数	L	L	N	Y	Y	所有项目
	训练模式	L	L	N	Y	Y	所有项目
	输出功率	L~M	L~M	N	Y	Y	体能主导类、其他项目的力量训练
	速度	L	L	N	Y	Y	竞速类,其他项目的速度、爆发力训练
	加速度	L~M	L~M	N	Y	Y	竞速类,其他项目的速度、爆发力训练
	神经肌肉测试(CMJ/SMJ等)	H	H	N	Y	Y	竞速类,其他项目的速度、爆发力训练、灵敏性训练、神经肌肉控制的训练等
	全球定位系统(GPS)	H	H	N	N/Y	Y	团体项目,跑动较多的项目,如足球、篮球、曲棍球等
内部负荷	时间运动分析(TMA)	H	H	N	Y	Y	所有项目
	主观负荷强度感知(RPE)	L	L	N	Y	Y	所有项目
	训练冲量	M~H	L~M	N	Y/N	Y	长距离有氧供能为主的训练,无氧高强度间歇训练不能适用
	心率变异性(HRV)/ 心率恢复(HRR)	M~H	L~M	N	Y/N	Y	所有项目
	血乳酸	M~H	L~M/H	Y	Y	Y	所有项目
	生理生化	H	H	Y	Y	Y	所有项目
	主观自我报告	L~M	L	N	Y	Y	所有项目
	脑电波监测	H	H	N	Y/N	Y	所有项目,尤其是技能为主导类表现准确性项群
	睡眠	L~M	L/H	N	Y	Y	所有项目

注:L,低等;M,中等;H,高等;L~M,低~中等;M~H,中~高等;N,否;Y,是。

3.2.2 心率

基于心率监控的 *Trimp* 是评估运动员训练负荷的重要工具。通过综合考虑训练时长、强度和心率等多个因素, *Trimp* 为训练的整体负荷提供了一个量化指标。这使得教练员和运动科学家能够详细描述和评估训练计划对运动员表现的具体影响。

策略建议:1)模型选择:选择适合特定运动项目和运动员个体差异的模型。Banister(1993)的 *Trimp* 模型和Edward(1994)的 *Trimp* 算法主要适用于耐力主导和心率变化显著的项目,如自行车;Manzi(2009)提出的 *iTrimp* 算法更适用于长跑和需要持续长距离奔跑的球类运动,以及非竞技运动员的训练负荷监控,也适用于心脏病患者的运动处方;Stagno(2007)的 *Trimp* 算法则专为团体项

目设计,特别是涉及大量长距离奔跑的项目,如足球、曲棍球和冰球等。2)实时监控和记录:通过定期监测和记录运动员的心率,可以精确评估运动员的训练负荷,并据此调整训练计划。3)认识局限性:心率受日间变异性、环境、训练时间、海拔等多因素影响,且可能存在设备滑脱等导致的监控间断和数据丢失。此外,在抗阻训练、高强度间歇训练和增强式训练中,心率可能并不是最佳的训练负荷衡量指标。4)结合其他监控手段:在利用心率监控方法的同时,还需要结合其他如生理生化指标等监控手段,进行训练负荷的全面评估。5)比赛中的应用:在比赛中,由于设备使用的限制,心率监控方法可能无法实施。此时,教练员需要更多地依赖运动员的感觉和经验,以及对运动员状态的判断。总体而言,基于心率监控的

Trimp 的实践策略需要考虑到多种因素,包括运动员的实际情况、训练的特点、监控设备的性能和功能,以及教练员的专业知识和技能。

3.2.3 HRV 与 HRR

实时监控运动员的训练负荷既关键又具挑战性。HRV 和 HRR 是评估训练负荷和身体应激反应的常用指标。尽管它们提供了宝贵的生理数据,但在实际应用中存在一定的局限性和挑战,需要精确的测量和解析以确保有效性。

策略建议:1)设备选择:监控 HRV 和 HRR 需要使用特定的设备,如 Garmin、Whoop 和 Omegawave 等。一些设备能实时追踪和分析 HRV 和 HRR 数据,选择合适的设备是确保数据准确性和实用性的关键一步。2)考虑运动员的舒适度:教练员应综合考虑设备的舒适度和实用性,必要时调整训练方案和设备选择,以支持运动员能在最佳状态下训练,同时获得准确的生理数据反馈。3)数据反馈的滞后性:一些设备(如 Omegawave)在训练前后进行的测试虽能提供全面的生理数据,但反馈不适合实时监控,更适用于长期训练效果评估。4)处理实际问题:在实践中,可能会遇到如高成本、数据传输中断和数据丢失等问题。这些都需要教练员制定应对策略。5)理解和应用数据:HRV 和 HRR 数据相对复杂,教练员需具备专业知识来准确解读 HRV 和 HRR 数据,以便合理调整训练计划。6)以运动员为中心:在选择和使用设备时,应以运动员的健康和训练效果作为中心,优先考虑其舒适度和设备的易用性,避免仅为了监控而设计训练。综合来看,选择和使用 HRV 和 HRR 监测设备时,需要考虑运动员的具体需求、设备性能及功能,并结合教练员的专业知识,以实现有效的实时训练负荷监控,促进运动员健康和表现提升。

3.2.4 session-RPE

session-RPE 是一种基于生理和心理自我感知的简便训练负荷监控方法,无需复杂昂贵的设备,可以用于量化训练负荷、设计阶段性训练策略、制定个性化训练计划和预防运动损伤。

实践策略建议:1)session-RPE 能提供关于训练强度和累积疲劳的信息,适用于日常训练的负荷监控,已被足球(Marynowicz et al., 2020; Roy et al., 2020)、篮球(Clemente et al., 2020; Ferioli et al., 2021)、橄榄球(Lupo et al., 2021; Weaving et al., 2014)、排球(Debien et al., 2018; Mendes et al., 2018)等球类项目所采用。2)session-RPE 有助于教练员从主观角度了解运动员在各种训练模式下的内部负荷并进行即时调控,通过跟踪周期性训练和逐步优化训练阶段,使运动员的适应性和表现最大化,同时降低受伤的风险。3)对于技术动作复杂、使用穿戴式监控设备受限的项目,如对抗性、技巧性和搏击类项目,session-RPE 是一种适宜的训练负荷监控方法。4)尽管 session-RPE 使用简单,计算方法简洁,并能进行个性化监

控,但它也有一定的局限性,主要表现在依赖于运动员的主观感觉,可能出现主观报告的 RPE 分值与实际存在差异,另外填写量表的时间、运动员对训练的回忆等因素也可能影响数据的准确性。因此,为了有效使用 session-RPE 方法,科研人员需要进行长期跟踪记录,建立符合运动员个性的训练负荷数据平台。

3.2.5 调查问卷与训练日记

主观自我报告的监控指标主要揭示运动员对训练负荷的心理响应。这些数据帮助深入理解运动员如何应对训练压力,帮助教练员根据反馈调整训练计划,以避免运动员从急性疲劳进展到过度训练综合征,从而保持训练效率和运动员健康。

实践策略建议:1)多种主观量表结合运用:综合运用多种主观量表,如幸福感问卷(Watson et al., 2018)、运动员日常生活需求分析(DALDA)、竞技状态焦虑量表-2(competitive state anxiety inventory-2, CSAI-2R)和奥维耶多睡眠问卷(Haischer et al., 2021; Olsson et al., 2021),以全面评估训练负荷对运动员的心理健康和睡眠的影响。2)从社会或环境因素分析:考虑社会和环境因素以获取生理和心率监控之外的信息,更能深入理解运动员的训练经验。3)持续广泛记录运动员的主观反馈:基于问卷调查和训练日记的主观自我报告监控是一种具有很高的可行性的方法,它适用于所有运动员,无需专门的设备和条件准备。由于主观影响因素较多,短期的跟踪记录,对运动员的训练负荷影响、训练生活习惯等的反馈偶然性较大,导致判断的准确性差。长期的记录有利于运动员的训练负荷反馈的判断。4)结合客观指标分析:单纯的主观自我报告有时无法完全揭示背后的具体问题,例如某些生理状况。因此,结合使用心理和生理的监控方法能提供更全面的视角。5)与运动员建立良好信任的关系:建立与运动员之间的信任关系也至关重要,以征询到准确的自我报告。6)保证量表内容的解释及表达的准确性:考虑到可能存在的文化和语言差异,量表内容的准确解释和表达尤为重要,以实现监控的有效性和准确性。

3.2.6 睡眠

应鼓励运动员通过简单有效的日记形式记录睡眠时间和感知到的睡眠质量。此外,监控运动员在训练前的睡眠状态,可以预测他们对训练负荷的刺激反应。对训练后的睡眠进行监控,可以衡量训练负荷的大小以及运动员对训练的适应程度。无论何种运动项目,睡眠监控都可以运用在训练负荷的监控中,尤其是通过日记记录和自我报告等简单的监控方式。

实践策略建议:1)考虑新设备的限制:虽然新兴的睡眠监控设备(如智能手表等)能够提供更丰富的数据,但因成本和舒适度等问题,可能不适合广泛应用。2)理解监控的挑战:虽然睡眠监控不能直接反映训练负荷,但能

间接提供相关信息。考虑到个体差异,收集基线数据对于理解运动员的训练响应至关重要。总体而言,通过合理运用和优化睡眠监控,教练员不仅可以对运动员的训练负荷进行有效监控,还可以通过改善运动员的睡眠质量和习惯,进一步提高他们的整体训练效果和比赛表现。

3.2.7 EEG

EEG对训练负荷的监测已经被证明是一种有效的策略,尤适用于技能主导类表现准确性项群,如射箭、射击等。EEG能够以非侵入性的方式捕捉运动员的神经系统以及大脑在训练负荷影响下的反应和适应变化。

实践策略建议:1)选择适合的项目:虽然EEG适用于多种运动项目,它在要求高度技术和集中注意力的项目中,如射箭和射击,表现尤为出色,推荐在这类项目中优先使用EEG进行监控。2)考虑设备的限制:EEG监控需要使用高精度的设备,这可能限制其在所有运动员中的普及。此外,头戴式设备可能在训练中对运动员造成干扰,因此,EEG监控的理想场景是在实验室环境中或训练前后进行。3)与其他监控手段结合:虽然EEG可以提供关于运动员神经系统反应的重要信息,但并不应作为唯一的监控手段,而是应该与其他方法(如自我报告问卷、生理生化指标监测等)结合使用,更全面地了解运动员的状态。总体上,尽管EEG监控存在一些实践中的限制,但其作为一种非侵入性的方法,能够提供关于运动员神经系统反应的重要信息,这对于理解训练负荷的影响和优化训练策略具有重要意义。

4 整合多模态的负荷监控模式及其实践策略

4.1 基于项群特征的专项化多模态负荷监控模式

运动引起的身心压力因运动专项特征而异,因此需要考虑运动项目的类型、特征、供能特点、制胜因素、训练需求、比赛特征等方面,整合多种负荷监控方法是获取精确训练监控的必要途径。为了更好地整合专项化循证实践,本研究基于项群理论(田麦久,2012)筛选出符合不同项群的多模态训练负荷监控方法(表5),旨在建立更加科学化、立体化的多模态负荷监控分类调取模式。教练员可以根据专项训练目的,所需要的监测目标,结合自身经验和参考本研究监控“工具箱”,调取多个相关适用监控方法,形成多模态下的训练负荷及其适应性监测结果,再以结果反馈优化调整训练计划,实现个性化、动态化、系统化的训练监控模式,高效提升运动员的训练适应和竞技能力。

4.2 基于训练情景的多模态负荷监控策略

运动训练活动是高度个性化的,除了专项特征需求不同,还存在典型的训练情境下的个体间、个体内反应差异,如环境条件、心理压力、运动员的训练状态或累积疲劳,以及训练前、中、后的监控任务。此外,个人运动项目的表现通常与外部和内部负荷的客观测量更相关,

因此可以更好地进行预测。然而,受到情境因素的影响,团体项目的表现更为复杂、随机且不可预测。一些具有高不确定性和高技术、战术、认知需求的个人运动(如格斗运动)与团体项目有一些共同特征,不能像其他身体要求高的个人运动(如田径、游泳)同样处理。由此,应考虑到在团体项目中,情境因素对内部和外部负荷关系的影响比在其他运动中更为重要,在其他运动中,表现更多地依赖于身体和生理能力。因此,根据表5中现有文献,及特定情景和时段(即准备、比赛、恢复),遴选多模态负荷监控策略更为必要。

4.2.1 案例一:足球运动员重复冲刺训练的多模态负荷监控[改编自Boullosa等(2023)]

在准备期的第3周,经过2周的被动冬季休息后,一支国家级别的二级联赛足球队开始恢复其重复冲刺的能力。这一阶段是继第1和第2周的常规和冲击小周期之后的赛前小周期。尽管训练量已显著减少,但由于之前小周的累积疲劳,一些球员可能仍处在疲劳状态。

训练策略上:1)放松训练与休息:球队在2d前进行了1次放松训练,随后休息1d,以此帮助球员恢复。2)强度训练:球员参加1次高要求的重复冲刺训练,以此恢复其冲刺能力。

球员评估与恢复上:1)评估指标:利用5级Likert量表评估肌肉酸痛和CMJ判断球员的恢复情况。2)诊断恢复不足:如果球员的CMJ能力下降超过最小显著变化(SWC)或肌肉酸痛得分达到3分或以上,认为恢复不足。3)评估心肺和神经肌肉状态:通过早间测量的主观疲劳评分和亚极限强度的运动测试评估心肺功能和神经肌肉状态。

训练调整上:1)完全恢复球员:符合条件的球员参加计划中的重复冲刺训练。2)部分恢复球员:若神经肌肉疲劳但心肺状态良好,则安排进行低神经肌肉负荷的有氧训练;反之,若心肺准备不足而神经肌肉状态良好,则推荐力量或力量导向训练。3)训练负荷等效:替代训练课的总负荷应与原计划的反复冲刺训练课相等。

4.2.2 案例二:篮球运动员的抗阻训练多模态负荷监控[改编自Boullosa等(2023)]

一支国家级别的职业男子篮球队,在最后一场比赛结束后48h,安排了1次早间抗阻训练,以确保球员在接下来的比赛和训练中能够保持最佳状态。

球员评估上:1)评估工具:使用5级Likert量表评估肌肉酸痛和CMJ。2)评估目的:确定参与上一场比赛的8名主力球员的神经肌肉恢复状态。

诊断与决策上:1)不完全恢复的标准:如果球员的CMJ能力下降超过最小显著变化(SWC)或肌肉酸痛得分达到3分或以上。2)矛盾反应处理:如果出现跳跃能力保持但肌肉酸痛得分高的情况,进行肌酸激酶测评以得出最终诊断。

表 5 基于不同项群的多模态负荷监控方法“工具箱”
Table 5 “Toolbox” of Multimodal Load Monitoring Methods Based on Different Event-Groups

项群	外部负荷	内部负荷	
		主观指标	客观指标
技能主导表现难美性项群(Bradshaw et al., 2012; Patel et al., 2021; Schneider et al., 2020; Sergiev, 2021)	动作次数、动作套数、成套训练动作的间歇时间、现场视频分析等	session-RPE、情绪状态量表、运动员恢复压力问卷、运动员日常生活需求分析、总恢复量表、训练日记等	生理生化监控、HRV 与 HRR 指标监控、脑功能与神经系统监控、睡眠
技能主导表现准确性项群(郭明方等, 2003; 韩梦圆, 2023; 李稚, 2016; 张晓峰, 2021; Zhu, 2021)	训练时长、动作的稳定性、间歇时间、组数等	生理生化监控、HRV 与 HRR 指标监控、脑功能与神经系统监控(尤为适用)、心率、睡眠	生理生化监控、HRV 与 HRR 指标监控、脑功能与神经系统监控(尤为适用)、心率、睡眠
技能主导格斗对抗性项群(Besson, 2023; Bok et al., 2022; Chaabene et al., 2018; Turner et al., 2017)	动作次数、动作套数、成套训练动作的间歇时间、现场视频分析等	生理生化监控、HRV 与 HRR 指标监控、脑功能与神经系统监控、CMJ、以心率为基础的训练冲量(以有氧供能为主体能训练中的负荷监控为主)、睡眠	生理生化监控、HRV 与 HRR 指标监控、脑功能与神经系统监控、CMJ、以心率为基础的训练冲量(以有氧供能为主体能训练中的负荷监控为主)、Ewards 的训练冲量在羽毛球、排球的战术训练中进行监控、睡眠
技能主导隔网对抗性项群(Freitas-Junior et al., 2019; Gielen et al., 2022; Murphy, 2013; Oliveira et al., 2018; Weiss et al., 2017)	动作次数、间歇时间、移动距离、现场视频分析、进攻频率、防守频率、防守面积(排球)、起跳次数(羽毛球、排球)	生理生化监控、HRV 与 HRR 指标监控、CMJ、脑功能与神经系统监控、以心率为基础的训练冲量(以有氧供能为主体能训练中的负荷监控为主)、睡眠等	生理生化监控、HRV 与 HRR 指标监控、CMJ、以心率为基础的训练冲量(以有氧供能为主体能训练中的负荷监控为主)、睡眠等
技能主导同场对抗性项群(丁轶建等, 2020; Guthrie et al., 2023; Moreira et al., 2016; Schapschroer et al., 2016; Silva et al., 2022)	停止或跑动次数、慢跑或低速跑时间及速度、中速跑步冲刺或最高速度跑步时间及速度、低强度的移动或特定的动作次数、中等强度洗牌或特定动作次数、高强度洗牌或特定动作次数、跳次数或高度、加速度仪、GPS、PlayerLoad _{TM} 、IMA 系统、现场视频分析	训练时长、间歇时间、组数、完成训练的重量(举重)、n%1RM(一次反复最大重量)	生理生化监控、HRV 与 HRR 指标监控、脑功能与神经系统监控、CMJ、以心率为基础的训练冲量(以有氧供能为主体能训练中的负荷监控为主)、血乳酸、睡眠
体能主导快速力量性项群(Cristina-Souza et al., 2019; Goes et al., 2023; Malone et al., 2020; Sandau et al., 2022; Van Erp et al., 2019)	训练时长、间歇时间、组数、速度、频率	训练时长、间歇时间、组数、速度、频率、GPS(长距离、冬季越野滑雪等)	生理生化监控、HRV 与 HRR 指标监控、脑功能与神经系统监控、Banister Trimp、Maniz Trimp、Amador García-Ramos Trimp、Edwards Trimp、Lucia Trimp、Stagno Trimp、睡眠
体能主导速度性项群(刘恩其, 2022; 曾远生, 2018; Cristina-Souza et al., 2019; Goes et al., 2023; Van Der Zwaard et al., 2023)	训练时长、间歇时间、组数、速度、频率、GPS		
体能主导耐力性项群(朱娜等, 2016; Pyne, 1999; Van Erp Hoozemans et al., 2019)			

训练安排上: 1) 神经肌肉恢复不完全的球员: 进行与理疗师的恢复课程。2) 部分恢复的球员: 执行原定训练计划的 1/2 进行训练。3) 完全恢复的球员: 按照基于速度的训练方法, 与未参赛的球员一起完成抗阻训练。

恢复与调整上: 在训练后的下午, 安排低体能负荷的战术课程。在比赛后 72 h 的技术战术课程前, 再次使用同样的监控工具评估球员的神经肌肉恢复状态, 以做出个别化的训练决策。

4.3 多模态负荷监控模式的实践要点

1) 多模态综合评估体能状态。使用多种工具和方法

评估运动员的体能状态, 包括外部负荷(如运动量和强度)和内部负荷(如心率、HRV、肌肉疲劳)。采用主观强度感知评分、CMJ 测试以及心肺和神经肌肉准备状态等的评估, 全面了解运动员的恢复情况和训练准备状态。

2) 个性化训练调整。根据运动员的具体恢复情况和体能状态, 个性化调整训练计划和强度。完全恢复的运动员可以参与高强度训练, 恢复不足的运动员应进行适度强度或恢复性训练。在运动员出现不同恢复状态时(如神经肌肉疲劳与心肺准备状态不一致), 选择适合的训练类型以促进特定功能的恢复。

3)利用技术工具和数据分析。利用可穿戴设备、移动应用程序和视频分析等技术工具收集训练数据,以便实时监控运动员的表现和负荷。对收集到的数据进行综合分析,利用科学方法和算法评估运动员的负荷和恢复状态,以指导训练实施。

4)强调恢复的重要性。在高强度训练和比赛后,强调运动员恢复的重要性,包括足够的休息、适当的营养补给、恢复训练和康复再生支持。监控运动员的恢复进程,确保他们在参与下一次高强度训练或比赛前得到充分的恢复。

5)持续跟踪和反馈。建立一个持续的监控和反馈机制,以便教练员和运动员可以根据监控结果及时调整训练策略。鼓励运动员积极参与自我监控和反馈,提高他们对训练负荷和个人恢复需求的认识。

5 结语

本研究综述了运动训练负荷监控的方法与趋势,分为外部与内部负荷监控。外部负荷监控涉及人工观察、自动化技术至神经肌肉功能评估,旨在测量和调节训练的强度、频率、时间和类型等。内部负荷监控侧重于心率、生理生化指标、主观报告、睡眠和脑电图,评估训练对身体的影响。每种方法揭示了训练负荷对心理生理、物理学和生物力学的不同影响,展现了各自的优势与局限。因此,需要识别在不同专项和特定训练环境中更有效的方法,以更好地监控训练过程,并建立综合多种负荷监测的多模态负荷监控模式,根据运动项目的特点、特定情境下运动员的个性化需求和新兴技术的优势,建立科学化、立体化的负荷监控模式。未来应在借助数字智能化技术寻找最佳多模态负荷监控方面做更深入的中国实践和实证研究,以更好地促进运动员训练的急性和长期适应,系统高效地提高竞技能力。

参考文献:

- 蔡旭旦,毛丽娟,张蓓,等,2020.不同来源项目运动员越野滑雪长期训练运动能力变化:基于运动机能监控的研究[J].中国体育科技,56(12):44-55.
- 陈小平,2022.竞技运动训练发展的主要趋势:科学化[J].中国体育教练员,30(2):4-6.
- 丁轶建,马修·斯宾瑟,2020.中国女子手球队运动员的训练负荷特征分析[J].首都体育学院学报,32(2):186-192.
- 冯连世,冯美云,冯伟权,2006.运动训练的生理生化监控方法[M].北京:人民体育出版社:54-69.
- 冯小龙,廖小华,邓行意,等,2012.大学生中长跑运动员赛前训练监控中尿液指标的变化分析[J].湖南工业大学学报,26(2):16-18.
- 郭明方,周志宏,何平,等,2003.对射击运动员训练实施心理与行为医学监测分析[J].中国运动医学杂志(4):410-411.
- 韩梦圆,2023.世界级冬季两项男运动员11年训练监控解析[J].中国体育教练员,31(1):16-17.

- 胡海旭,金成平,2021a.智能化时代的个性化训练:机器学习应用研究进展与数字化未来[J].体育学研究,35(4):9-19.
- 胡海旭,杨国庆,2021b.数字化转型:点燃当代竞技运动训练变革新引擎[J].北京体育大学学报,44(11):81-98.
- 胡海旭,杨国庆,2022.我国备战巴黎奥运会周期缩短的运动训练调控策略[J].北京体育大学学报,45(12):90-108.
- 李舒洁,孟志军,2022.世居高原男子竞走运动员部分血液生化指标参考范围的建立及年龄分布特征[J].中国运动医学杂志,41(7):518-522.
- 李志敢,1999.不同负荷运动时几项尿液生化指标的变化[J].广州体育学院学报(4):35-38.
- 李稚,2016.我国优秀运动员脑功能特征及其训练监控应用的研究[D].上海:上海体育大学.
- 刘恩其,2022.天津男子400米跑运动员闫志鹏备战第十四届全运会赛前训练负荷及调控[D].天津:天津师范大学.
- 刘敬祺,苏浩,芦建东,等,2022.业余冰球运动员一次性HIIT训练后混合饮料补充对唾液SIgA、LZM、AMS的影响[J].辽宁体育科技,44(3):69-74.
- 刘泳庆,蔡旭旦,张蓓,等,2021.卫星导航系统在越野滑雪比赛训练中的应用[J].卫星应用(4):36-39.
- 孙志宏,张蓓,张妍,等,2022.不同专项训练对越野滑雪优秀男子运动员身体机能的影响:基于血液生化指标监控[J].宁波大学学报(理工版),35(3):115-120.
- 田麦久,刘大庆,2012.运动训练学[M].北京:人民体育出版社:20-26.
- 许毅焱,赵永才,高炳宏,2022.唾液:应用于运动训练领域的潜力生物样本[J].上海体育学院学报,46(10):84-94.
- 张晓峰,2021.男子多向飞碟运动员身体运动功能训练方法组合与负荷变化特征研究[D].北京:首都体育学院.
- 张兴林,2010.我国优秀排球运动员比赛负荷及专项身体素质的位置特征研究[J].中国体育科技,46(4):20-42.
- 张振民,周末艾,蔡振华,等,2002.中国乒乓球世界冠军运动员脑功能特征研究[J].中国运动医学杂志(5):452-457.
- 曾远生,2018.优秀短跑运动员赛前训练负荷及机能状态的生化监控[J].成都体育学院学报,44(4):86-91.
- 赵泽霖,汪宏莉,2017.高温环境运动口服咖啡因对耐力运动员体温调节及唾液sIgA、溶菌酶的影响[J].沈阳体育学院学报,36(4):64-69.
- 周苏坡,袁鹏,2019.职业女子篮球运动员联赛准备期损伤特征调查研究:以江苏女子篮球运动员为例[J].体育科研,40(3):86-92.
- 朱那,汤强,杨子伟,2016.基于TRIMP优秀女子竞走运动员高原训练模式研究[C].北京:中国体育科学学会运动生理与生物化学分会:35-36.
- ACHTEN J, JEUKENDRUP A E, 2003. Heart rate monitoring: Applications and limitations[J]. Sports Medicine (Auckland, N.Z.), 33(7):517-538.
- BANISTER E W, CALVERT T W, SAVAGE M V, et al., 1975. A systems model of training for athletic performance[J]. Aust J Sports Med, 7: 57-61.
- BANISTER E, 1991. Modeling elite athletic performance[J]. Physiologist Elite Athletes, 69(3): 403-424.
- BANISTER E, FITZ-CLARKE J R, 1993. Plasticity of response to equal quantities of endurance training separated by non-training in humans[J]. J Therm Biol, 18(5):587-597.

- CYRIL B, XAVIER D, MATHIEU S, et al., 2023. Compliance to training load and heart rate variability monitoring in young Swiss judokas[J]. *SEMS-J*, 71(1): 28-34.
- BOK D, JUKIĆ N, FOSTER C, 2022. Validation of session ratings of perceived exertion for quantifying training load in karate kata sessions[J]. *Biol Sport*, 39(4): 849-855.
- BORG G A V, 1982. Psychophysical bases of perceived exertion[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 14: 377-381.
- BOURDON P C, CARDINALE M, MURRAY A, et al., 2017. Monitoring athlete training loads: Consensus statement[J]. *Int J Sports Physiol Perform*, 12(Suppl 2): S2161-S2170.
- BOULLOSA D, CLAUDINO J G, FERNANDEZ-FERNANDEZ J, et al., 2023. The fine-tuning approach for training monitoring[J]. *Int J Sports Physiol Perform*, 18(12): 1374-1379.
- BRADSHAW E J, HUME P A, 2012. Biomechanical approaches to identify and quantify injury mechanisms and risk factors in women's artistic gymnastics[J]. *Sports Biomech*, 11(3): 324-341.
- BUSSO T, HÄKKINEN K, PAKARINEN A, et al., 1990. A systems model of training responses and its relationship to hormonal responses in elite weight-lifters[J]. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 61(1-2): 48-54.
- CHAABENE H, NEGRA Y, BOUGUEZZI R, et al., 2018. Tests for the assessment of sport-specific performance in olympic combat sports: A systematic review with practical recommendations [J]. *Front Physiol*, 9: 386.
- CLEMENTE F M, SILVA A F, CLARK C C T, et al., 2020. Analyzing the seasonal changes and relationships in training load and wellness in elite volleyball players [J]. *Int J Sports Physiol Perform*, 15(5): 731-740.
- CLEMENTE F M, TELES BREDT S G, MOREIRA PRAÇA G, et al., 2020. Relationships between wellness status and perceived training load on daily and weekly bases over a basketball season[J]. *Kinesiology*, 52(1): 151-156.
- COUTTS A J, SLATTERY K M, WALLACE L K, 2007. Practical tests for monitoring performance, fatigue and recovery in triathletes[J]. *J Sci Med Sport*, 10: 372-381.
- CRISTINA-SOUZA G, MARIANO A C S, SOUZA-RODRIGUES C C, et al., 2019. Monitoring training load in runners, throwers and sprinters/jumpers during a preparatory training camp[J]. *JPEs*, 19: 173-177.
- CRUZ I F, PEREIRA L A, KOBAL R, et al., 2018. Perceived training load and jumping responses following nine weeks of a competitive period in young female basketball players[J]. *PeerJ*, 6: e5225.
- DEBIEN P B, MANCINI M, COIMBRA D R, et al., 2018. Monitoring training load, recovery, and performance of brazilian professional volleyball players during a season [J]. *Int J Sports Physiol Perform*, 13(9): 1182-1189.
- DEL PERCIO C, BABILONI C, MARZANO N, et al., 2009. "Neural efficiency" of athletes' brain for upright standing: A high-resolution EEG study[J]. *Brain Res Bull*, 79(3): 193-200.
- EDWARDS S, 1994. The heart rate monitor book[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 26(26): 647.
- ELLIS M, MYERS T, TAYLOR R, et al., 2022. The dose-response relationship between training-load measures and changes in force: time components during a countermovement jump in male academy soccer players[J]. *Int J Sports Physiol Perform*, 17(11): 1634-1641.
- FERIOLI D, BOSIO A, BILSBOROUGH J C, et al., 2018. The preparation period in basketball: Training load and neuromuscular adaptations[J]. *Int J Sports Physiol Perform*, 13(8): 991-999.
- FERIOLI D, SCANLAN A T, CONTE D, et al., 2021. The business end of the season: A comparison between playoff and regular-season workloads in professional basketball players [J]. *Int J Sports Physiol Perform*, 16(5): 655-662.
- FOSTER C, FLORHAUG J A, FRANKLIN J, et al., 2001. A new approach to monitoring exercise training[J]. *J Strength Cond Res*, 15(1): 109-115.
- FOSTER C, HECTOR L L, WELSH R, et al., 1995. Effects of specific versus cross-training on running performance [J]. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 70(4): 367-372.
- FREITAS V H, NAKAMURA F Y, MILOSKI B, et al., 2014. Sensitivity of physiological and psychological markers to training load intensification in volleyball players [J]. *J Sports Sci Med*, 13: 571-579.
- FREITAS-JUNIOR C G, FORTES L D, SANTOS T M, et al., 2019. Effect of different training strategies with the use of weight vests on the internal load in volleyball athletes [J]. *Rev Bras Cineantropom Desempenho Hum*, 21: e57233.
- GARCÍA-RAMOS A, FERICHE B, CALDERÓN C, et al., 2015. Training load quantification in elite swimmers using a modified version of the training impulse method [J]. *Eur J Sport Sci*, 15(2): 85-93.
- GIELEN J, MEHUY S, BERCKMANS D, et al., 2022. Monitoring internal and external load during volleyball competition [J]. *Int J Sports Physiol Perform*, 17(4): 640-645.
- GOES J C B, ARAUJO G H O, PESERICO C S, 2023. Avaliação do desempenho físico, monitoramento da carga interna de treinamento e da tolerância ao estresse de corredores velocistas durante o período preparatório geral [J]. *Rev Bras Prescr Fisiol Exerc*, 17(107): 42-54.
- GUTHRIE B, JAGIM A R, JONES M T, 2023. Ready or not, here I come: A scoping review of methods used to assess player readiness via indicators of neuromuscular function in football code athletes [J]. *J Strength Cond Res*, 45(1): 93.
- HAISCHER M H, COOKE D M, CARZOLI J P, et al., 2021. Impact of cognitive measures and sleep on acute squat strength performance and perceptual responses among well-trained men and women [J]. *J Strength Cond Res*, 35(1): S16-S22.
- HEISHMAN A D, DAUB B D, MILLER R M, et al., 2019. Monitoring external training loads and neuromuscular performance for division I basketball players over the pre-season [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 19(1): 204-212.
- IMPELLIZZERI F M, MARCORÀ S M, COUTTS A J, 2019a. Internal and external training load: 15 years on [J]. *Int J Sports Physiol Perform*, 14(2): 270-273.
- IMPELLIZZERI F M, MARCORÀ S M, COUTTS A J, 2019b. Internal and external training load: 15 years on [J]. *Int J Sports Physiol Perform*, 14(2): 270-273.
- KRAFT J A, GREEN J M, THOMPSON K R, 2014. Session Ratings of perceived exertion responses during resistance training bouts

- equated for total work but differing in work rate[J]. *J Strength Cond Res*, 28(2): 540-545.
- KREHER J B, SCHWARTZ J B, 2012. Overtraining syndrome: A practical guide[J]. *Sports Health: A Multidisciplinary Approach*, 4(2): 128-138.
- LAMBERTS R P, SWART J, CAPOSTAGNO B, et al., 2010. Heart rate recovery as a guide to monitor fatigue and predict changes in performance parameters [J]. *Scand J Med Sci Sports*, 20(3): 449-457.
- LASTELLA M, MILLER D J, QUILELLI M, et al., 2021. The impact of chronotype on the sleep and training responses of elite female australian footballers.[J]. *Clocks Sleep*, 3(4): 528-535.
- LEICHT C A, GOOSEY-TOLFREY V L, BISHOP N C, 2018. Exercise intensity and its impact on relationships between salivary immunoglobulin A, saliva flow rate and plasma cortisol concentration[J]. *Eur J Appl Physiol*, 118(6): 1179-1187.
- LOPEZ-FLORES M, SUAREZ-IGLESIAS D, RODRIGUEZ-MARROYO J A, 2023. Actigraphy-based sleep parameters in wheelchair basketball athletes: influence of training and competition load[J]. *Sleep Sci*, 16(1): 97-101.
- LUCÍA A, HOYOS J, SANTALLA A, et al., 2003. Tour de france versus vuelta a espana: Which is harder?[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 35(5): 872-878.
- LUDYGA S, HOTTENROTT K, GRONWALD T, 2017. Four weeks of high cadence training alter brain cortical activity in cyclists[J]. *J Sports Sci*, 35(14): 1377-1382.
- LUPO C, UNGUREANU A N, BOCCIA G, et al., 2021. Internal-training-load monitoring, notational and time-motion analyses, psychometric status, and neuromuscular responses in elite rugby union[J]. *Int J Sports Physiol Perform*, 16(3): 421-428.
- MACHADO J C Q, VOLPE C M O, VASCONCELLOS L S, et al., 2018. Quantification of ngal in urine of endurance cycling athletes[J]. *J Phys Act Health*, 15(9): 679-682.
- MAKIVIĆ B, NIKIĆ M D, WILLIS M S, 2013. Heart rate variability (HRV) as a tool for diagnostic and monitoring performance in sport and physical activities[J]. *JEPonline*, 16(3): 103-131.
- MALONE S, HUGHES B, COLLINS K, et al., 2020. Methods of monitoring training load and their association with changes across fitness measures in hurling players[J]. *J Strength Cond Res*, 34(1): 225-234.
- MANZI V, CASTAGNA C, PADUA E, et al., 2009. Dose-response relationship of autonomic nervous system responses to individualized training impulse in marathon runners[J]. *Am J Physiol Heart Circ Physiol*, 296(6): H1733-1740.
- MANZI V, IELLAMO F, IMPELLIZZERI F, et al., 2009. Relation between individualized training impulses and performance in distance runners[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 41(11): 2090-2096.
- MARYNOWICZ J, KIKUT K, LANGO M, et al., 2020. Relationship between the session-RPE and external measures of training load in youth soccer training. [J]. *J Strength Cond Res*, 34(10): 2800-2804.
- MENDES B, PALAO J M, SILVÉRIO A, et al., 2018. Daily and weekly training load and wellness status in preparatory, regular and congested weeks: A season-long study in elite volleyball players[J]. *Res Sports Med*, 26(4): 462-473.
- MINGANTI C, FERRAGINA A, DEMARIE S, et al., 2011. The use of session RPE for interval training in master endurance athletes: Should rest be included [J]. *J Sports Med Phys Fitness*, 51(4): 547-554.
- MONJE C, RADA I, CASTRO-SEPULVEDA M, et al., 2020. Effects of a high intensity interval session on mucosal immune function and salivary hormones in male and female endurance athletes[J]. *J Sports Sci Med*, 19(2): 436-443.
- MOREIRA A, BRADLEY P, CARLING C, et al., 2016. Effect of a congested match schedule on immune-endocrine responses, technical performance and session-RPE in elite youth soccer players[J]. *J Sports Sci*, 34(24): 2255-2261.
- MORTON R H, FITZ-CLARKE J R, BANISTER E W, 1990. Modeling human performance in running [J]. *J Appl Physiol*, 69(3): 1171-1177.
- MURPHY A P, 2013. Methods of external and internal training load monitoring in elite tennis environments[J]. *Aust. Strength Cond*, 21(2):96-102.
- NAKAMURA F Y, COSTA J A, TRAVASSOS B, et al., 2023. Intra-individual relationships between training loads and heart-rate variability in high-level female futsal players: A longitudinal study[J]. *Int J Sports Physiol Perform*, 18(3): 306-312.
- NICOLAS M, VACHER P, MARTINENT G, et al., 2019. Monitoring stress and recovery states: Structural and external stages of the short version of the RESTQ sport in elite swimmers before championships[J]. *J Sport Health Sci*, 8(1): 77-88.
- NÓBREGA-JÚNIOR J C N, DORNELAS A A, ANDRADE E A M D, et al., 2020. Inspiratory muscle training in the severity of obstructive sleep apnea, sleep quality and excessive daytime sleepiness: A placebo-controlled, randomized trial [J]. *Nat Sci Sleep*, 12: 1105-1113.
- OHGI Y, ICHIKAWA H, HOMMA M, et al., 2003. Stroke phase discrimination in breaststroke swimming using a tri-axial acceleration sensor device[J]. *Sports Engineering*, 6(2): 113-123.
- OLIVEIRA W K, JESUS K D, ANDRADE A D, et al., 2018. Monitoring training load in beach volleyball players: A case study with an Olympic team[J]. *Motriz Rev Educ Fis*, 24(1): e1018155.
- OLSSON L F, GRUGAN M C, MARTIN J N, et al., 2021. Perfectionism and burnout in athletes: The mediating role of perceived stress[J]. *J Clin Sport Psychol*, 16(1): 55-74.
- PATEL T S, MCGREGOR A, WILLIAMS K, et al., 2021. The influence of growth and training loads on injury risk in competitive trampolines gymnasts[J]. *J Sports Sci*, 39(23): 2632-2641.
- PYNE D, 1999. Monitoring physical training loads in swimmers[J]. *Swim Austr*, 15(2): 5-9.
- RODRÍGUEZ-MARROYO J A, GONZÁLEZ B, FOSTER C, et al., 2021. Effect of the cooldown type on session rating of perceived exertion[J]. *Int J Sports Physiol Perform*, 16(4): 573-577.
- ROMDHANI M, FULLAGAR H H K, VITALE J A, et al., 2022. Lockdown duration and training intensity affect sleep behavior in an international sample of 1 454 elite athletes[J]. *Front Physiol*, 13: 904778.

(上接第 45 页)

- ROY X, COMTOIS A S, SERCIA P, 2020. Use of the session-rpe method to quantify in-season training loads in canadian university football players[J]. *JASC*, 28(4): 47-56.
- SANDBAU I, GRANACHER U, 2022. Long-term monitoring of training load, force-velocity profile, and performance in elite weightlifters: A case series with two male olympic athletes [J]. *J Strength Cond Res*, 36(12): 3446-3455.
- SANTIAGO L C S, LYRA M J, GERMANO-SOARES A H, et al., 2022. Effects of strength training on sleep parameters of adolescents: A randomized controlled trial [J]. *J Strength Cond Res*, 36(5): 1222-1227.
- SAW A E, MAIN L C, GASTIN P B, 2016. Monitoring the athlete training response: Subjective self-reported measures trump commonly used objective measures: A systematic review[J]. *Br J Sports Med*, 50(5):281-91.
- SCHAPSCHRÖER M, BAKER J, SCHORER J, 2016. Exploring the interaction of physical exercise load and pattern recall performance in female handball players[J]. *Exp Brain Res*, 234(6): 1713-1723.
- SCHNEIDER C, WIEWELHOVE T, MCLAREN S J, et al., 2020. Monitoring training and recovery responses with heart rate measures during standardized warm-up in elite badminton players[J]. *PLoS One*, 15(12): e0244412.
- SCHUTZ Y, CHAMBAZ A, 1997. Could a satellite-based navigation system (GPS) be used to assess the physical activity of individuals on earth?[J].*Eur J Clin Nutr*, 51(5): 338-339.
- SERGIEV G, 2021. Monitoring and analysis of training load of 12-13-year-old male gymnasts for 1-year training period[J]. *Trakia J. Sci*, 19: 451-456.
- SILVA A D A, REIS H H T, MARINS J C B, 2022. Physiological basis of the thermography application for training load control in soccer: A brief review[J]. *Rev Bras Futebol*, 15(3): 3-19.
- STAGNO K M, THATCHER R, VAN SOMEREN K A, 2007. A modified TRIMP to quantify the in-season training load of team sport players[J]. *J Sports Sci*, 25(6): 629-634.
- STARES J, DAWSON B, PEELING P, et al., 2018. Identifying high risk loading conditions for in-season injury in elite australian football players[J]. *J Sci Med Sport*, 21(1): 46-51.
- STEVENS S S, 1957. On the psychophysical law[J]. *Psychol Rev*, 64(3):153-181.
- TAYLOR R J, SANDERS D, MYERS T, et al., 2018. The Dose-response relationship between training load and aerobic fitness in academy rugby union players[J]. *Int J Sports Physiol Perform*, 13(2): 163-169.
- THORNTON H R, DELANEY J A, DUTHIE G M, et al., 2017. Effects of preseason training on the sleep characteristics of professional rugby league players[J].*Int J Sports Physiol Perform*, 13(2): 176-182.
- TURNER A N, BUTTIGIEG C, MARSHALL G, et al., 2017. Ecological validity of the session rating of perceived exertion for quantifying internal training load in fencing[J].*Int J Sports Physiol Perform*, 12(1): 124-128.
- UCHIDA M C, TEIXEIRA L F M, GODOI V J, et al., 2014. Does the timing of measurement alter session-rpe in boxers?[J].*J Sports Sci Med*, 13(1): 59-65.
- VAN DER ZWAARD S, OTTER R T A, KEMPE M, et al., 2023. Capturing the complex relationship between internal and external training load: a data-driven approach[J].*Int J Sports Physiol Perform*, 18(6): 634-642.
- VAN ERP T, FOSTER C, DE KONING J J, 2019. Relationship between various training-load measures in elite cyclists during training, road races, and time trials[J]. *Int J Sports Physiol Perform*, 14(4): 493-500.
- WALLACE L K, SLATTERY K M, COUTTS A J, 2014. A comparison of methods for quantifying training load: Relationships between modelled and actual training responses[J]. *Eur J Appl Physiol*, 114(1): 11-20.
- ZHU C, 2021. EEG and central nervous system transmitter on athletes training[J]. *Rev Bras Med Esporte*, 27(7): 703-705.

(收稿日期:2023-12-11; 修订日期:2024-01-10; 编辑:尹航)