神经肌肉疲劳对业余运动员 RSI 的影响

——以及对 RSI 用于业余运动员神经肌肉疲劳监测的可行性探讨

周继业 [1]　姚兴敏 [2]　杨实践 [3]

1. 武汉体育学院运动医学院　湖北武汉　430079

2. 贵州大学体育学院　贵州贵阳　550025

3. 遵义医科大学运动健康学院　贵州遵义　563006

摘　要：目的：旨在探讨运动性神经肌肉疲劳对业余运动员反应力量指数（RSI）的即时影响和延迟影响，并探讨 RSI 作为运动员神经肌肉疲劳监测工具的可行性。方法：以 10 名有一定运动经历的男性作为实验对象，平均分为疲劳测试组（TTG）和对照测试组（CTG），两组受试者分别在进行限定内容的热身后，进行三种不同下落高度，且有一定间歇时长的跳深（Depth Jump）测试，每种下落高度共测试 5 次，并通过“Go Power”运动功率计测量出受试者的腾空高度与触地时间，再根据 RSI= 腾空高度 / 触地时间这一公式计算出两组受试者从三种不同高度台阶向下跳深（Depth Jump）分别得出的 RSI，每种高度各测试 5 次，然后统计所有受试者第一轮测试的所有 RSI 数据，分别计算出所有受试者在第一轮测试中每种下落高度的 RSI 平均值，随后 TTG 进行为期 1 天的限定内容的运动训练。训练结束后，立即对所有受试者进行第二轮 RSI 测试。训练结束 24h 后，再次对所有受试者进行第三轮测试。结果：伴随因运动而引发的神经肌肉疲劳，TTG 运动员在三种不同高度跳深所反映出的 RSI 均立即产生了明显的下降。结论：神经肌肉疲劳的产生会导致业余运动员的反应力量指数（RSI）立即出现一定程度的下降，而在 24h 后，运动员在特定条件下所表现出的 RSI 会出现延迟性降低 。因此，RSI 指标有可用于业余运动员的神经肌肉疲劳监测的可行性。

关键词：神经肌肉疲劳；反应力量指数；业余运动员；疲劳监测；RSI

前言

运动引起的神经肌肉疲劳主要分为中枢性和外周性，中枢神经疲劳（Central Fatigue）主要是指由于长时间或高强度的运动，导致中枢神经系统（CNS）功能下降，影响大脑发送神经冲动的能力，继而减少运动神经元激活肌肉的能力 [1]。而外周性神经肌肉疲劳主要涉及肌肉在经历高强度工作后的生理性衰退，例如能量储备耗尽，代谢物积累（如乳酸）以及肌肉纤维收缩机制受损 [3]。伴随体育运动训练朝着专业化的迈进，以及业余运动员竞技水平的持续提升，业余运动员水平的提升受训练计划安排这一因素的影响越来越大。而在训练计划安排中，有关神经肌肉疲劳监测这一问题也愈发显著。如果训练计划安排不当，那么在高强度的训练中，中枢神经系统容易陷入疲劳状态 [2]，从而对业余运动员的表现以及训练效率产生不利影响。

近些年来，现代运动训练因具备复杂性且强度颇高，而且业余运动员受限于条件缺乏成本低廉且便捷神经疲劳监测手段，所以业余运动员迫切需要更为简单有效的神经肌肉疲劳监测方式，以对神经肌肉疲劳进行预防并做出更高效的训练安排。RSI 通常在跳深（Depth Jump）测试中，通过空中时间和地面接触时间的比率来计算。具体计算公式为：RSI = 腾空高度 / 触地时间 [5]。RSI 常用于衡量运动员在快速牵张 – 缩短循环（SSC）中的表现能力，这是反映爆发力和弹跳力的关键指标 [4]，而且研究表明，SSC 能力还与下肢的弹性组织（如肌腱和肌肉 – 肌腱复合体）的刚度和弹性能量储存能力密切相关 [6]。所以 RSI 还能反映出受试者下肢弹性组织的弹性能量存储能力，而不仅仅只反映其肌肉爆发力，那么神经肌肉疲劳对 RSI 究竟有什么影响呢？

随着全民健康素养提升三年行动的开展，以及业余运动员对于自身的健康状况以及竞技表现数据化的关注程度持续上升，这也推动着我们加大对运动性中枢神经疲劳的研

究力度。在此种情形之下，深入探讨运动性中枢神经疲劳对反应力量指数（RSI）所产生的影响，以及由此影响反推 RSI 测试应用于业余运动员神经肌肉疲劳监测的可行性，具备至关重要的理论价值与实践意义。

运动性神经肌肉疲劳对于业余运动员的表现与健康所产生的重要影响，促使对其展开深入研究具备显著意义。就运动员个体而言，明确运动性神经肌肉疲劳对反应力量指数（RSI）的影响，能够帮助业余运动员更为精准地量化自身的身体状况。比如，业余短跑运动员可以通过监测 RSI 这一指标，及时发现可能存在的神经肌肉疲劳迹象，并在长期的监测下进行合理的训练安排，规避过度训练引发的神经肌肉疲劳，实现运动表现的持续高效提升。

1 研究对象与方法

1.1 研究对象

10 名具有一定运动经历的男性，年龄（18+2）岁，身高（170+5）cm，体重（64+5）kg, 受试者在 2 个月内未经历运动损伤，生活作息规律，并处于完全恢复、充满水分的状态。参与者还被要求在研究期间不进行任何除研究要求之外的运动且受试者在实验过程中未出现运动损伤 。

1.2 测试方案

由于该实验旨在研究运动性神经肌肉疲劳对反应力量指数（RSI）的影响，并探讨 RSI 作为业余运动员神经肌肉疲劳监测工具的可行性。所以实验需要在第一轮测试中测量出受试者的初始 RSI 平均值，随后通过特定内容的训练使受试者处于神经肌肉疲劳状态，紧接着，在受试者的磷酸原供能系统以及 ATP 储备恢复到第一轮测试的水平后，进行第二轮 RSI 平均值测试，24 小时后再进行第三轮测试，最后通过三组实验数据的对照分析得出结论。

1.2.1 测试环境

户外、体感无风、地面干燥无积水、环境温度在 18–23 摄氏度之间，且有一个高 0.3m 的台阶、一个高 0.5m 的台阶、一个高 0.7m 的台阶，地面材质为沥青。

1.2.2 测试设备

“Go Power”运动功率计、卷尺、笔记本电脑。

1.2.3 一天中的固定测试时间

北京时间 14：00

1.2.4 受试者的疲劳状态

第一轮测试状态：所有受试者在此之前已充分休息，不疲劳；第二轮测试状态：TTG 经过特定内容训练后，相对 CTG 存在神经肌肉疲劳；CTG 未经训练，仅完成了第一轮测试，相对 TTG 不存在神经肌肉疲劳；第三轮测试状态：TTG 经过特定内容训练后，相对 CTG 存在神经肌肉疲劳，CTG 未经训练，仅完成了第一、二轮测试，相对 TTG 不存在神经肌肉疲劳。

1.2.5 测试前的热身方案

慢跑 10min，再走动休息 3min

1.2.6 测试方法以及测试流程

第一轮测试 : 所有受试者穿着轻便服饰、运动鞋，佩戴好“Go Power”运动功率计。

1. 以站立在高度分别为 0.3m、0.5m、0.7m 高的台阶上为起始姿势。

2. 从高处跳落在地面上，尽可能高地进行双腿跳动作。落地后尽可能地保持身体稳定。然后根据上述动作要求，在不同高度分别完成间歇时间为 0.5min、总次数为 5 次的重复跳跃。

3. 记录 5 次下落高度分别为 0.3m、0.5m、0.7m 的跳深的 RSI 数据，统计后计算出第一轮测试所有受试者的不同高度下的 RSI 平均值，并做记录。

4. 第一轮测试结束后，所有受试者休息 10min，TTG 随后进行 10 次 X4 组，每组间歇时长为 1min 的最大努力深蹲跳，紧接着完成 30mX4 组，每组间歇时长为 1min 的冲刺跑训练。（研究表明，最大意愿、相对高强度的跳跃和短跑训练方法会引发神经肌肉疲劳，这种疲劳由中枢和周围机制共同介导，需要 72h 才能完全恢复 [7]）

5. 训练结束后，所有受试者被要求休息 10min(有研究发现，经过深蹲跳和其他高强度 SSC 活动后，尽管磷酸原系统在最初的几分钟内可以部分恢复，但完全恢复到运动前的基线水平需要更长的时间，通常在 5min 左右)，休息结束后重新完成测试前的热身方案，热身结束后所有受试者按照第一轮测试的流程完成第二轮测试，记录测试结果。

6.TTG 训练结束 24h 后，所有受试者再次遵循热身—测试流程，完成第三轮测试并做数据记录。

7. 对两组受试者的三轮测试结果进行统计对照，分析对照结果得出结论。

1.3 数据统计分析

运用 SPSS 29.0 统计学软件进行分析。

表 1 第一轮测试受试者在不同高度下的平均 RSI（TTG）

受试者编号	0.3m	0.5m	0.7m
1	2.212	2.1	1.754
2	1.664	2.13	2.412
3	1.94	2.03	1.89
4	1.92	1.62	1.96
5	2.07	2.01	1.93

表 2 第一轮测试受试者在不同高度下的平均 RSI（CTG）

受试者编号	0.3m	0.5m	0.7m
1	1.763	2.13	1.874
2	1.647	1.535	1.49
3	2.23	2.37	2.09
4	1.902	1.932	2.054
5	2.17	2.23	2.317

表 3 第二轮测试受试者在不同高度下的平均 RSI（TTG）

受试者编号	0.3m	0.5m	0.7m
1	1.872	1.962	1.54
2	1.842	2.094	2.104
3	1.732	1.905	1.66
4	1.89	1.42	1.76
5	1.89	1.863	1.823

表 4 第二轮测试受试者在不同高度下的平均 RSI（CTG）

受试者编号	0.3m	0.5m	0.7m
1	1.74	2.19	1.86
2	1.65	1.57	1.51
3	2.3	2．34	1.98
4	1.911	1.929	2.09
5	2.098	2.28	2.304

表 5 第三轮测试受试者在不同高度下的平均 RSI（TTG）

受试者编号	0.3m	0.5m	0.7m
1	2.112	1.8	1.722
2	1.98	1.892	1.91
3	1.89	1.873	1.632
4	1.956	1.437	1.793
5	1.979	1.887	1.76

表 6 第三轮测试受试者在不同高度下的平均 RSI（CTG）

受试者编号	0.3m	0.5m	0.7m
1	1.8	2.23	1.891
2	1.63	1.61	1.537
3	2.32	2.28	1.893
4	2.01	1.913	1.99
5	1.996	2.17	2.287

表 7 三轮测试三种不同高度跳深的 RSI 平均值对比（TTG）

	0.3m	0.5m	0.7m
第一轮	1.9612	1.9780	1.9892
第二轮	1.8452	1.8488	1.7774
第三轮	1.9834	1.7778	1.7634

表 8 三轮测试三种不同高度跳深的 RSI 平均值对比（CTG）

	0.3m	0.5m	0.7m
第一轮	1.9424	2.0394	1.9650
第二轮	1.9398	1.9922	1.9488
第三轮	1.9512	2.0406	1.9196

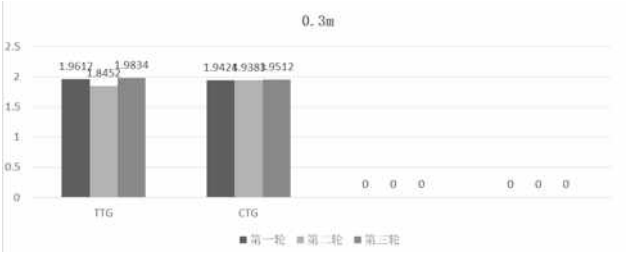

图 1 0.3m 高度跳深两组受试者的三轮测试 RSI 平均值

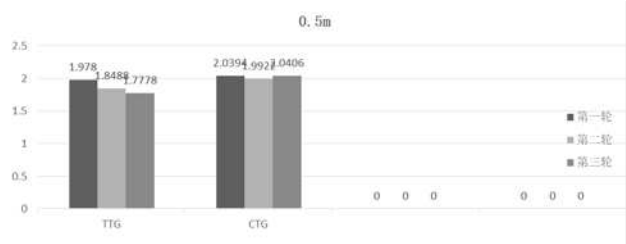

图 2 0.5m 高度跳深两组受试者的三轮测试 RSI 平均值

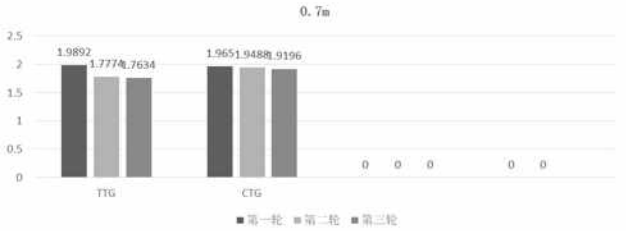

图 3 0.7m 高度跳深两组受试者的三轮测试 RSI 平均值

对实验数据进行分析发现，当跳深高度设置为 0.3m 时，TTG 组第二轮测试的 RSI 平均值对比第一轮下降了约 6%，第三轮对比第一轮无显著变化。而 CTG 组三轮测试的 RSI 平均值波动幅度小于 1%，故无显著变化；当跳深高度设置为 0.5m 时，TTG 组第二轮测试的 RSI 平均值对比第一轮测试下降了约 6.5%，第三轮对比第一轮下降了约 10%。而 CTG 组三轮测试的 RSI 平均值波动幅度小于 5%，故无显著变化；当跳深高度设置为 0.7m 时，TTG 组第二轮测试的 RSI 平均值对比第一轮下降了约 11%，第三轮对比第一轮下降了约 11%。而 CTG 组三轮测试的 RSI 平均值波动幅度小于 5%，故无显著变化。

1.4 实验结果分析

在此次针对运动性神经肌肉疲劳对反应力量指数（RSI）所产生影响展开的实验当中，我们发现运动性神经肌肉疲劳对业余运动员的反应力量指数（RSI）的确存在即时影响和延迟影响，就多次测试后计算出的 RSI 平均值而言，伴随因运动而引发的神经肌肉疲劳，TTG 运动员在三种不同高度跳深所反映出的 RSI 均立即产生了明显的下降，其中下降幅度

最小的是跳深高度设置为 0.3m 的 RSI，我们猜测这是由于从不同下落高度落下时，运动员的髋膝踝屈曲角不同，而从低高度落下时，运动员所受的冲击力更小，所以运动员的髋膝踝关节屈曲角也就越小，所动用的肌肉纤维也就越少，更大程度上依赖的是下肢的弹性组织吸收动能，储存为弹性势能然后释放，从而使运动员从地面上弹起，故我们猜测从低高度落下时，运动员下肢弹性组织对 SSC 能力的贡献比例，大于肌肉组织向心收缩对运动员 SSC 能力的贡献比例，这也就解释了为什么低高度下跳深所反映出的 RSI 受神经肌肉疲劳的影响更小，当然，这样仅仅是一种猜测，仍有待证实。

而在 24h 后的第三轮测试，TTG 运动员除了 0.3m 高度跳深的 RSI 恢复到了第一轮测试的水平，0.5m 和 0.7m 高度跳深的 RSI 相较于第一轮测试，均出现了显著下降，下降幅度约为 10%。尤为特殊的是三轮测试中运动员在 0.5m 高度跳深的 RSI 变化，在此高度设置下，运动员的 RSI 不仅在第一轮和第二轮测试中出现了下降，第三轮测试相较于第二轮，运动员的 RSI 也出现了一定程度的再次下降，这似乎说明了运动性神经肌肉疲劳不仅会使业余运动员的 RSI 产生即时降低，还会使业余运动员在特定条件下所表现出的 RSI 产生延迟性降低。反观 CTG 运动员，在三轮测试中，其在不同高度跳深所反映出的 RSI 均无显著变化。

2 RSI 用于业余运动员神经肌肉疲劳监测的可行性探讨

2.1 RSI 在用于神经肌肉疲劳监测时可能展现出的特殊性质

在探讨 RSI 用于运动员神经肌肉疲劳监测的可行性之前，首先要说明 RSI 的一个特殊性质：波动性，在实验过程中我们发现受试者在进行某个高度跳深的第一次 RSI 测试时，RSI 值相较于后面的几次测试往往会比较低，我们猜测这是由于运动员在心理和生理上都还没有准备好接受测试，而在后面的数次测试中，运动员往往又会测量出一次相较于其他次测量尤为高的 RSI 值，我们猜测这是由于运动员在多次跳跃中微调了其落地时的技术动作以及发力模式 [8]，通俗地说，就是运动员更“熟练”了，还有一种可能是运动员的多次跳深诱发了激活后增强效应（Post-activation Performance Enhancement, PAPE）。PAPE 是一种现象，通过进行高强度的预激活运动，可以在随后的一段时间内提升身体表现，如力量、速度和跳跃高度等 [9][12]。

2.2 RSI 与其他监测方法的比较

在探讨 RSI 用于业余运动员神经肌肉疲劳监测的可行性的过程中，对 RSI 监测与其它监测方法进行比较具有重要意义。不同的监测方法在评估神经肌肉疲劳方面各有特点。

RSI 具有便于测量和记录、可靠有效以及成本低廉等优势，但也存在可能受运动员主观因素影响、无法区分中枢性和外周性疲劳、需长期且持续地监测并记录运动员的数据等局限性。

sEMG 信号可以用来识别肌肉疲劳的出现和发展。例如，通过 sEMG 信号的平均频率和中值频率的变化，可以监测肌肉疲劳的早期迹象 [10]，但其易受电极放置和皮肤状况影响，并且仅能测量局部肌肉活动，适用于研究肌肉疲劳的机制、诊断神经肌肉疾病和运动表现优化。

Omegawave 系统能够通过测量心率变异性 (HRV) 和直流电位 (DC potential) 等指标来评估运动员的疲劳状态。研究表明，这些生物信号可以反映运动员在训练和比赛后的恢复情况和心理压力水平，进而评估其身体和心理的准备状态 [11]。然而其设备昂贵且有一定使用门槛，对业余运动员的经济条件有比较高的要求。

问卷调查法简单易行且成本低廉，可用于评估主观疲劳感受并提供有关疲劳严重程度和影响的信息，然而可能受主观判断的影响、难以量化疲劳程度，适用于筛查疲劳症状、评估疲劳对日常生活的影响和运动表现监测 [13]。

综合来看，每种监测方法都有其独特的价值和适用范围。在实际应用中，应根据具体需求和自身条件选择合适的监测方法，以实现对业余运动员运动性神经肌肉疲劳的准确评估和监测量化。

2.3 RSI 监测的优化建议

在针对 RSI 应用于业余运动员神经肌肉疲劳监测的优化建议展开探讨时，需全方位考量诸多要素。考虑到前文所提到的 RSI 的特殊性质，为了进一步提升 RSI 用于监测神经肌肉疲劳的精准度与可信度，可通过多次测量后求平均值的方式对监测精确度予以优化，降低监测时 RSI 的误差来达到疲劳监测目的。同时，RSI 用于业余运动员神经疲劳监测不是一天两天就能完成的，在这之前需要长周期地跟踪监测，并记录运动员的历史 RSI，当监测人员把运动员历史 RSI 转换成折线图时，运动员的神经肌肉疲劳状态便一目了然。通过构建运动员的监测数据库，针对不同阶段、不同训练强度

下的 RSI 数据展开深入探究，能够为优化训练规划以及预防疲劳损伤提供更为坚实有力的支撑。

建立标准化的测量流程与操作规范同样关键，这意味着要保证不同的测量人员在不同的环境中均能依照统一的测量流程与标准展开操作，进而增强测量结果的精确性，提高数据的参考价值。

3 结论

运动性神经肌肉疲劳对业余运动员的反应力量指数（RSI）的确存在即时影响和延迟影响，就多次测试后计算出的 RSI 平均值来看，伴随因运动而引发的神经肌肉疲劳，TTG（实验组）运动员在三种不同高度跳深所反映出的 RSI 均立即产生了明显的下降，并且运动性神经肌肉疲劳不仅会使业余运动员的 RSI 产生即时降低，还会使业余运动员在特定条件下所表现出的 RSI 产生延迟性降低。反观 CTG（对照组）运动员，在三轮测试中，其在不同高度跳深所反映出的 RSI 均无显著变化。RSI 用于业余运动员神经疲劳监测不是一天两天就能完成的，在这之前需要长周期地跟踪监测，并记录运动员的历史 RSI，当监测人员把运动员历史 RSI 转换成折线图时，运动员的神经肌肉疲劳状态便一目了然了。通过构建运动员的监测数据库，针对不同训练周期、不同训练强度下的 RSI 数据展开深入探究，能够为优化训练安排以及预防过度训练提供更为坚实有力的支撑。

参考文献：

[1] Sadri, Kimiya & Khani, Mostafa & Sadri, Iraj. (2014). Role of Central Fatigue in Resistance and Endurance Exercises: An Emphasis on Mechanisms and Potential Sites. Sportlogia. 10. 65–80.

[2] Batson, Glenna. “Exercise-Induced Central Fatigue[J].” Journal of Dance Medicine Science,2013(17):53–62.

[3]S. Boyas, A. Gu é vel,Neuromuscular fatigue in healthy muscle: Underlying factors and adaptation mechanisms,Annals of Physical and Rehabilitation Medicine,Volume 54, Issue 2,2011,Pages 88–108,ISSN 1877–0657,https://doi.org/10.1016/j.rehab.2011.01.001.

[4] 施文轩 , 麻秀广 , 李俊平 . 反应力量指数与运动能力之间关系的研究进展 [C]// 中国体育科学学会 . 第十三届全国体育科学大会论文摘要集——专题报告 (体能训练分会). 北京体育大学 ;,2023:3.DOI:10.26914/c.cnkihy.2023.067382.

[5] Louder T, Thompson BJ, Banks N, Bressel E. A Mixed-Methods Approach to Evaluating the Internal Validity of the Reactive Strength Index. Sports (Basel). 2019 Jun 27;7(7):157. doi: 10.3390/sports7070157. PMID: 31252627; PMCID: PMC6680983.

[6] Wdowski, M., Rosicka, K., & Hill, M. (2023). Influence of lower-limb muscular and tendon mechanical properties and strength on countermovement jump performance.The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness, 63(1), 16–22.https://doi.org/10.23736/S0022-4707.22.13567-X.

[7] Medicine & Science in Sports & Exercise 50(12):p 2526–2535, December 2018. | DOI: 10.1249/MSS.0000000000001733.

[8] Walsh, Mark1; Arampatzis, Adamantios2; Schade, Falk2; Br ü ggemann, Gert-Peter2. The Effect of Drop Jump Starting Height and Contact Time on Power, Work Performed, and Moment of Force. Journal of Strength and Conditioning Research 18(3):p 561–566, August 2004.18(3):p 561–566.

[9] Li, J., Soh, K.G. & Loh, S.P. The impact of post-activation potentiation on explosive vertical jump after intermittent time: a meta-analysis and systematic review. Sci Rep 14, 17213 (2024). https://doi.org/10.1038/s41598-024-67995-7.

[10] Coraggio, G., Cera, M., Cirelli, M., & Valentini, P. P. (2024). Review and comparison of linear algorithms to quantify muscle fatigue based on sEMG signals. Ergonomics, 1 - 19. https://doi.org/10.1080/00140139.2024.2349962.

[11] Heishman, Aaron D.1,2; Curtis, Michael A.2; Saliba, Ethan1,3; Hornett, Robert J.2; Malin, Steven K.1,4; Weltman, Arthur L.1,4. Noninvasive Assessment of Internal and External Player Load: Implications for Optimizing Athletic Performance. Journal of Strength and Conditioning Research 32(5):p 1280–1287, May 2018.

[12] 司旭 . 激活后增强效应研究的文献综述 [J]. 当代体育科技 ,2024,14(21):5–7.DOI:10.16655/j.cnki.2095–2813.2024.21.002.

[13] 李正 , 李啸天 . 主观疲劳量表（RPE）评估大学生足球运动员训练内部负荷的实证研究 [C]// 中国体育科学学会 . 第十三届全国体育科学大会论文摘要集——墙报交流 (运动训练学分会)（一）. 中南大学体育教研部 ; 武汉体育学院运动训练学院 ;,2023:3.DOI:10.26914/

c.cnkihy.2023.079922.

作者简介：

周继业（2005—），男，汉族，贵州安顺人，本科在读，武汉体育学院运动医学院研究方向：运动人体科学；

姚兴敏 (1998–), 女，汉族，贵州安顺人，硕士在读，贵州大学，研究方向 : 运动训练。