

男性运动员睡眠障碍的神经机制探究:基于复杂网络模型

Exploring Neural Mechanisms Underlying Sleep Disorders in Male Athletes: A Complex Network Model Approach

李秦陇¹, 车开萱¹, Charles J. Steward², 赵 丽¹, 周 越^{1*}
LI Qinlong¹, CHE Kaixuan¹, Charles J. Steward², ZHAO Li¹, ZHOU Yue^{1*}

摘要:目的:通过使用无目标不加权及目标加权的复杂网络模型方法,分析睡眠障碍运动员睡前神经机能状态与睡眠质量的复杂作用方式,揭示运动员发生睡眠障碍的神经机能状态特征。方法:在睡眠实验室内使用多导睡眠仪监测 14 名男性睡眠障碍运动员 4 晚完整睡眠,并在睡前使用便携式脑电仪、超慢波涨落潮技术、Polar H10 心率胸带和心境状态量表,分别测试或评估中枢机能状态、脑内神经递质水平、自主神经状态以及情绪状态。基于测试数据分别建立无目标不加权,以及以睡眠质量为目标的加权复杂网络模型。结果:1)无目标不加权的复杂网络模型中,介数中心性结果提示,慌乱、精力和愤怒情绪、 α 抑制%、去甲肾上腺素(NE)和多巴胺、相邻窦性 R-R 间期差值大于 50 ms 所占百分比(PNN50)、平均 R-R 间隔、平均心率(MHR)和睡眠总时间是此网络的关键影响节点。特征向量中心性分析结果显示,上述指标中除 PNN50、NE 和 MHR 外,抑郁、紧张和疲劳情绪与其他指标仍是网络的重要连接节点。2)在以睡眠质量为目标的加权复杂网络模型中,目标介数中心性结果发现,情绪状态在到达睡眠质量指标的最短路径中出现频率最高(48.57%),其次神经递质和睡眠指标频率相同(14.29%),而中枢神经机能状态和自主神经状态出现的频率最低(11.43%)。目标特征向量中心性结果表明,情绪状态成为影响睡眠质量最重要的影响因素,出现频率为 82.86%,其次是自主神经状态出现频率为 8.57%,而中枢神经机能状态、神经递质和睡眠指标出现频率相同(2.86%)。结论:运动员睡眠障碍的主要表现为总时长短,睡眠期间觉醒时间长导致睡眠效率低。复杂网络模型方法揭示了情绪(主要为消极情绪)是睡眠质量低和睡眠障碍发生的主要影响节点和关键因素,其中愤怒、慌乱情绪与脑内神经递质(5-HT 和 DA)、中枢疲劳程度相关,中枢疲劳程度和自主神经协调性与精力状态相关。

关键词:睡眠质量;情绪状态;神经系统;复杂网络模型

Abstract: Objective: This study employs a complex network model approach, incorporating non-targeted unweighted and targeted weighted techniques, to investigate the intricate interactions between pre-sleep neural functioning and sleep quality in male athletes with sleep disorders. The objective is to uncover specific neural functional characteristics associated with sleep disorders in athletes. Methods: Fourteen highly trained athletes with sleep disorders were monitored over 4 nights using polysomnography. Before sleep, their central nervous system status, neurotransmitter levels in the brain, autonomic nervous system status and mood state were assessed using separate methods, including portable electroencephalograph, supra-slow encephalofluctogram technology, Polar H10 heart rate monitors and the profile of mood state questionnaire. Based on test data, a complex network model with non-targeted unweighted characteristics, as well as a weighted complex network model targeting sleep quality, has been established. Results: In the non-targeted unweighted network model, the betweenness centrality results indicate that emotions such as panic, energy and anger, α % inhibitory rate, norepinephrine (NE), dopamine, the proportion of NN50 divided by the total number of NN (R-R) intervals (PNN50), mean R-R interval, mean heart rate (MHR) and the total time of sleep are key influencing nodes

基金项目:

国家重点研发计划“科技冬奥”重点专项(2018YFF0300801)

第一作者简介:

李秦陇(1995-),男,在读博士研究生,主要研究方向为运动员训练监控与机能评定, E-mail: 2019210175@bsu.edu.cn。

*通信作者简介:

周越(1966-),男,教授,博士,博士研究生导师,主要研究方向为运动员训练监控与机能评定, E-mail: zhoyu@bsu.edu.cn。

作者单位:

1.北京体育大学,北京 100084;
2.考文垂大学,英国 考文垂 CV1 5FB
1.Beijing Sport University, Beijing 100084, China;
2.Coventry University, Coventry CV1 5FB, UK.

of this network. According to the results of eigenvector centrality analysis, in addition to PNN50, NE and MHR in the above indicators, depression, tension, fatigue and other indicators remain important connection nodes within the network. In the weighted complex network models targeting sleep quality, the results of the targeted betweenness centrality analysis find that the mood state indicator has the highest frequency in the shortest path to reach the sleep quality indicator (48.57%). In turn, neurotransmitters and sleep indicators, each with the same frequency (14.29%), are found. The central nervous system status and autonomic nervous system status exhibit the lowest frequency (11.43%). In the results of targeted eigenvector centrality, mood state emerges as the most important influencing factor on sleep quality, with a frequency of 82.86%. Following this is the autonomic nervous system status, with a frequency of 8.57%. Subsequently, the central nervous system status, neurotransmitters and sleep indicators each share the same frequency (2.86%). Conclusions: The primary manifestations of sleep disorders in athletes include a shortened total sleep duration and prolonged wake time during sleep, resulting in low sleep efficiency. Utilizing complex network modeling methods, the research has revealed that emotions, particularly negative emotions, serve as the primary influential nodes and key factors in the occurrence of poor sleep quality and sleep disorders. Among them, feelings of anger and anxiety are associated with brain neurotransmitters (5-HT and DA) and the level of central fatigue, while energy levels are associated with central fatigue and autonomic nervous system coordination.

Keywords: *sleep quality; mood state; nervous system; complex network model*

中图分类号: G804.2 **文献标识码:** A

运动员睡眠质量受年龄、心理/生理状况、环境和运动训练等多种因素的影响(Halson et al., 2021)。与非运动员相比,运动员的睡眠质量(如平均睡眠时间)均低于正常同龄人(Swinbourne et al., 2016),50%~78%的精英运动员患有睡眠障碍,其中22%~26%达到高度睡眠障碍(Gupta et al., 2017),这不利于身体机能恢复和运动表现提高(李啸天等, 2022)。现阶段运动员睡眠障碍的研究多以探究潜在的影响因素为主(Halson et al., 2021)。已有研究发现,运动员睡眠障碍的发生与自身中枢神经机能(Roth, 2007)、自主神经以及情绪(Halson, 2014; Li et al., 2024)等各种神经机能状态低下存在关联,多种因素产生复杂作用导致运动员睡眠障碍发生。然而,运动员睡眠障碍的主要影响节点和关键因素仍未有定论。

复杂网络模型方法是21世纪迅速发展的一门交叉学科。使用复杂网络模型方法分析相关问题时,需将所有变量视为节点,节点之间的相互关联作为链接,通过建立合适的模型帮助探究变量间的复杂关系。此方法已被广泛应用于自然科学领域,可揭示人类生命周期中的代谢变化(Barajas-Martínez et al., 2020)以及与睡眠阶段有关的拓扑结构(Bashan et al., 2012)等复杂问题。在体育科学研究中,无目标不加权及目标加权的复杂网络模型方法曾被应用于分析不同强度运动时机体疲劳过程的制约变量(Pereira et al., 2015),不同运动方式的关键影响因素(Breda et al., 2022; Pereira et al., 2018),以及有氧无氧能力制约因素(Kraemer et al., 2022)等一系列运动领域的复杂理论机制。在运动员睡眠质量的影响机制研究中,学者大多使用相关分析等方法探究单一因素与睡眠质量的关系(Andrade et al., 2019; Leduc et al., 2019; Li et al.,

2022),但睡眠质量的影响是多因素相互作用的结果,故与复杂网络模型相比,此类方法无法阐明多种因素间的复杂作用,限制了研究结果的可信性。

因此,本研究旨在通过测试运动员睡前的神经机能状态、情绪状态及睡眠质量指标,并使用无目标不加权及以睡眠质量为目标的加权复杂网络模型方法,探究睡眠障碍的关键影响节点,揭示神经机能状态对运动员睡眠障碍的复杂作用机制。

1 研究对象与方法

1.1 研究对象

本研究根据以往复杂网络模型人数建立要求(Gobat-to et al., 2020; Pereira et al., 2015, 2018),招募自诉存在睡眠障碍的男性运动员,按照睡眠障碍标准及客观睡眠监测结果筛选出17人,实验过程脱落3人,最终纳入研究对象14人:匹兹堡睡眠量表初筛评分为(8.07±2.56)分,年龄为(20.86±1.29)岁,身高为(179.29±5.34)cm,体重为(71.50±9.01)kg,训练年限为(6.50±2.21)年,符合模型建立条件。其中,夏季项目10人(拳击、羽毛球、网球、足球、短跑),冬季项目4人(冰球、短道速滑)。本研究睡眠障碍筛选标准符合国际睡眠障碍分类(the international classification of sleep disorders-third edition, ICSD-3)诊断标准(高和, 2018):1)主诉睡眠潜伏期>30 min或睡后觉醒时间>30 min;2)失眠症状每周至少3晚;3)失眠症状持续时间>3个月;4)白天至少存在下述2项负面效应,如疲劳、体力下降、记忆力及注意力减退等;5)匹兹堡睡眠指数(Pittsburgh sleep quality index, PSQI)>5。另外,客观睡眠监测结果符合睡眠障碍标准的运动员纳入最终模型。

其他筛选标准:1)运动员技术等级均为国家二级及以上;2)年龄:18~25岁;3)学历:大学本科及以上;4)近期无精神刺激,未服用精神类药物或补剂;5)无午睡习惯(避免干扰夜间睡眠);6)实验前及过程中规律参与运动训练(训练频次3~5次/周)。

运动员自愿签署知情同意书,本研究已通过北京体育大学运动科学伦理委员会审查(批准号:2023277H),所有实验操作符合《世界医学协会赫尔辛基宣言》。

1.2 实验方案

1.2.1 实验流程

为避免测试误差,保证睡眠监测效率,本研究采取以下措施:1)为避免睡眠监测出现“首夜效应”,正式实验前在睡眠实验室进行1~2晚适应;2)所有运动员在睡眠实验室进行4次重复测试,每次测试间隔14天;3)每次测试前所有运动员均符合睡眠障碍标准;4)正式测试当天

运动员无午睡,不参与剧烈运动;5)由于睡前神经机能测试30~35 min即可完成,因此正式测试当晚,为避免影响睡眠,受试者需根据日常入睡时间提前40~50 min到达睡眠实验室参与实验。

正式测试完整流程:1)填写心境状态量表(profile of mood states, POMS);2)中枢神经机能状态评估:脑电(electroencephalogram, EEG)诱导试验;3)EEG诱导试验完成后约3 min即可恢复静息状态(Mendez et al., 2006),休息5 min以上,并观察恢复至静息状态后,再同步测试脑内神经递质和自主神经状态;4)神经机能状态测试结束后,佩戴睡眠仪监测整晚睡眠。睡眠监测期间,睡眠实验室温度控制在22~25℃,相对湿度为35%~45%。所有数据采集整理完成后使用复杂网络模型方法分析所有变量间的复杂关系(图1),探究运动员睡眠障碍的神经机制。

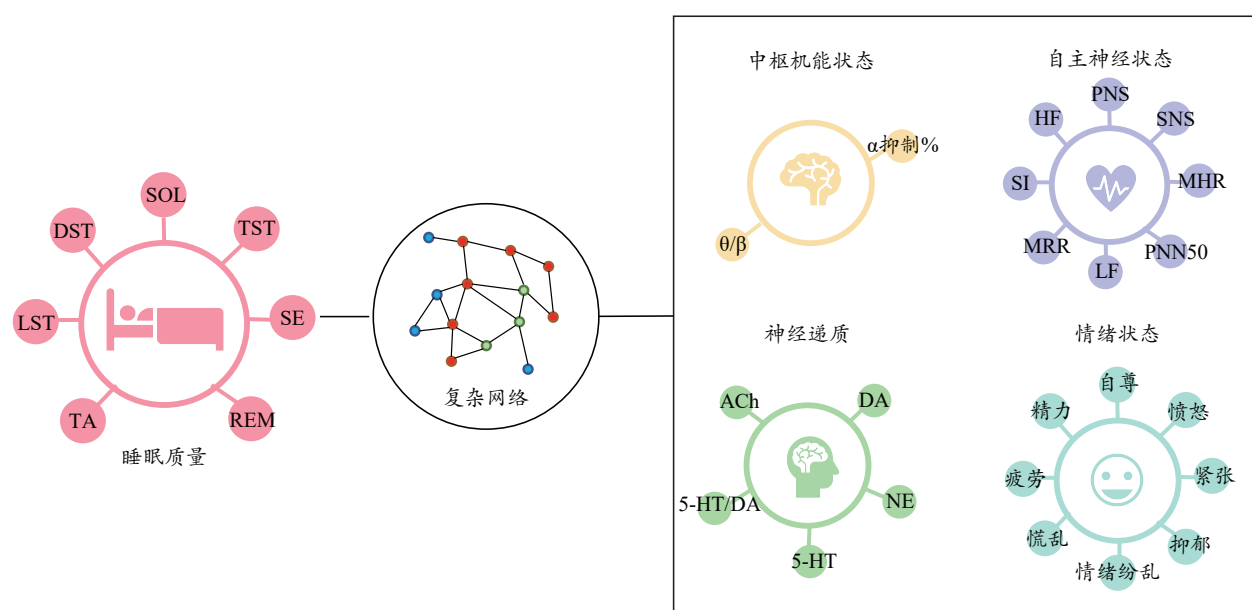


图1 基于睡眠质量与神经机能状态测试结果构建复杂网络模型

Figure 1. Construction of the Complex Network Model Based on the Results of Sleep Quality and Neurofunctional State

注:5-HT. 5-羟色胺;5-HT/DA. 5-羟色胺与多巴胺的比值;ACh. 乙酰胆碱;DA. 多巴胺;DST. 深睡眠;HF. 高频功率峰值;LF. 低频功率峰值;LST. 浅睡眠;MHR. 平均心率;MRR. 平均R-R间隔;NE. 去甲肾上腺素;PNN50. 相邻窦性R-R间期差值大于50 ms所占百分比;PNS. 副交感神经指数;REM. 快动眼睡眠;SE. 睡眠效率;SI. 应激指数;SNS. 交感神经指数;SOL. 睡眠潜伏期;TA. 觉醒期;TST. 睡眠时长; α 抑制%. 中枢疲劳程度; θ/β . 神经元能量代谢状态;下同。

1.2.2 测试方法

1.2.2.1 睡眠质量

多导睡眠仪(polysomnography, PSG)(Natus Medical Inc., 加拿大)是睡眠监测的金标准,在本研究中用于监测整晚睡眠质量。本研究中综合评价睡眠质量的参考指标包括脑电、眼电、下颏电、血氧饱和度以及胸腹部活动状态。PSG数据采集频率为256 Hz,睡眠质量分析软件为RemLogic-E™,其分析系统依据美国睡眠医学学会制定的2.0版本标准,数据基于30 s的分段对睡眠的阶段和分期

进行判定。数据处理时,脑电和眼电信号的滤波设置为高通滤波0.3 Hz,低通滤波35 Hz。下颏电信号滤波设置为高通滤波10 Hz,低通滤波100 Hz,陷波滤波50 Hz。睡眠质量评价指标及分期标准(Berry et al., 2012):受试者睡前按下PSG的“开始”按钮标记准备入睡时间,该标记用于确定睡眠潜伏期(sleep onset latency, SOL),即从熄灯到进入睡眠周期开始的时间。总睡眠时长(total sleep time, TST)一般包含4~6个完整周期,每个周期可分为快速眼动期(rapid eye movement, REM)和非快速眼动期(non

rapid eye movement, NREM)的1~4期,将NREM期中的1期和2期合称为浅睡眠(light sleep time, LST),将3期和4期合称为深睡眠(deep sleep time, DST),最终可将每个睡眠周期划分为LST、DST和REM。觉醒时长(time awake, TA)是指进入睡眠周期后觉醒总时长。睡眠效率(sleep efficiency, SE)是指TST占睡眠总时间(准备入睡到睡醒)的占比。本研究判定客观睡眠质量的标准(Halson et al., 2021; Ohayon et al., 2017): TST<7 h/晚, SOL>30 min, TA>50 min, SE<75%, REM>41%, LST>80%, DST<5%, 则睡眠障碍客观发生。

1.2.2.2 中枢机能状态

EEG诱导试验用于评价运动员中枢机能状态,试验时使用Nation9128W便携式脑电仪(诺诚电气,中国)采集脑电信号,采用国际标准的10-20导联法佩戴电极。测试流程和测试时间:1)安静状态记录60 s以上;2)表象竞赛60 s以上;3)过度换气120~180 s。表象竞赛时 α 脑电波占比的抑制率(以下简称“ α 抑制%”)代表中枢疲劳程度,其计算公式为: α 抑制%=|表象竞赛 α %-安静状态 α %|/安静状态 α %,5级评分法(0~4分)代表中枢疲劳等级分别为最佳、正常、警戒、先兆疲劳及疲劳。过度换气状态下神经元代谢能量比值(θ/β)可评价中枢神经机能状态(李秦陇等, 2023)。

1.2.2.3 神经递质

超慢波涨落潮技术(supra-slow encephalofluorogram technology, SET)是无创测试脑内神经递质的方式(吴梅婷等, 2016)。使用Solar System SOLAR2000型号的SET脑电监测系统(太阳科技,中国)测试安静状态脑电信号18 min。数据分析时将脑波数据中以mHz为单位的脑电信号分层处理,其中4、5、7和11 mHz的超慢谱系分别与5-羟色胺(5-hydroxytryptamine, 5-HT)、乙酰胆碱(acetylcholine, ACh)、去甲肾上腺素(norepinephrine, NE)和多巴胺(dopamine, DA)的活动有关。神经递质测试结果为相对值,代表与神经递质相关频率脑电的占比(吴梅婷等, 2016)。

1.2.2.4 自主神经状态

心率变异性(heart rate variability, HRV)是评估心脏交感神经与副交感神经张力的常用指标(Santos-de-Araújo et al., 2022)。本研究使用Polar H10心率胸带(Polar Electro, 芬兰)记录R-R间期(2个QRS波中R波间的时间)数据,通过Kubios Hrv-standard软件截取5 min并计算HRV,用于评估自主神经状态(李秦陇等, 2022)。其中,副交感神经指数(parasympathetic nervous system index, PNS)相邻窦性R-R间期差值>50 ms所占百分比(proportion of successive NN intervals greater than 50 ms, PNN50)、平均R-R间期(mean RR, MRR)和高频功率(high frequency, HF)反映副交感神经活性。交感神经指数(sympathetic nervous system index, SNS)、平均心率(mean heart rate,

MHR)、压力指数(stress index, SI)和低频功率(low frequency, LF)反映交感神经活性。LF/HF反映了交感和副交感神经张力的平衡性。

1.2.2.5 心境状态

POMS是评价心境状态的综合性量表(祝蓓里, 1995)。此量表包括5个消极情绪分量表(愤怒、慌乱、紧张、抑郁和疲劳)和2个积极情绪分量表(精力和自尊),采用5级评分法(0~4分)。情绪纷乱值是对心境状态的综合评价,计算方法为5个消极情绪总得分减去2个积极情绪总得分,再加常数100。

1.2.3 复杂网络模型建立方法

本研究使用的复杂网络模型拓扑性质定义及计算公式如下。节点指存在相关关系,且用边相连的指标。度指与该节点连接的边的数量。介数属于全局特征量,反映了节点在整个网络中的作用和影响力。

网络中不相邻的节点 v_j 和 v_i 之间的最短路径会途经某些节点,如果某个节点 v_i 被许多其他最短路径经过,则表示该节点在网络中十分重要,介数 B_i 计算方法为:

$$B_i = \sum_{\substack{1 \leq j < l \leq N \\ j \neq i \neq l}} [n_{ji}(i)/n_{jl}(i)] \quad (1)$$

式(1)中, $n_{ji}(i)$ 为节点 v_j 和 v_l 之间的最短路径条数, $n_{jl}(i)$ 为节点 v_j 和 v_l 之间的最短路径经过节点 v_i 的条数; N 为网络中的节点总数。

介数中心性分析考虑的是节点在网络中的位置和在节点之间路径上的重要性,是一种基于路径的节点重要性指标。确定介数中心性的常用方法是计算通过某个节点的最短路径数,将网络的所有节点作为源,也作为目标(Gobatto et al., 2020; Pereira et al., 2015)。

设节点 v_i 的介数为 B_i ,其介数中心性 $C_B(v_i)$ 计算方法为:

$$C_B(v_i) = 2B_i / [(N-1)(N-2)] \quad (2)$$

特征向量中心性考虑了节点的度数以及与其相邻节点的重要性,也是节点重要度的测度之一。对于节点 v_i 令它的中心性值 x_i 正比于连到它的所有节点的中心性分值的总和,计算方法为:

$$x_i = \frac{1}{\lambda} \sum_{j=1}^N a_{ij} x_j \quad (3)$$

用向量描述,式(3)可用特征向量方程式表示:

$$Ax = \lambda x \quad (4)$$

式(3)和(4)中, λ 为常数; A 是具有特征值 λ 的邻接矩阵(Smoother et al., 2011)。

建立无目标不加权的复杂网络模型时仅考虑变量之间的相关性($P<0.05$),而不考虑相关系数(Gobatto et al., 2020; Kraemer et al., 2022)。在无目标不加权方法中,节点之间没有区别,即所有节点具有相同权重。

建立以睡眠质量为目标的加权复杂网络模型(Kraemer et al., 2022; Sousa et al., 2020)。在此方法中,节点间无论正相关或负相关都仅考虑相关性大小并赋予正权

重。目标加权网络建立时,边的粗细由边连接的2个节点之间的 Spearman 相关系数决定(0.01~1.00,连接线越粗意味着相关性越高)。计算目标介数中心性得分时,最高 Spearman 相关系数(1,固定值)减去节点间 Spearman 相关系数作为节点之间的距离。计算目标特征向量中心性(eigenvector centrality)时基于其邻近节点的中心性和连接边的权重。边权重的计算方法为,与目标节点(睡眠质量)的接近程度(0.01~1.00,越大越接近)和由边连接的节点之间的 Spearman 相关系数(0.01~1.00,越大越好)的乘积。比如,当与目标节点(睡眠质量)直接连接时,该边权重与其各自的相关系数相等,与目标节点的二级连接相当于相关系数的0.5倍,而三级连接、四级连接和五级连接分别相当于0.250倍、0.1250倍和0.0625倍。因此,在计算目标特征向量中心性分数时,边权重是指节点的连接强度。基于以上,将存在相关关系($P<0.05$)的所有节点连接后,分别建立无目标不加权和以睡眠质量为目标的目标加权复杂网络模型,计算介数中心性及特征向量中心性,从而探讨指标间的复杂作用关系。

1.2.4 数据统计与分析

数据结果保留小数点后2位有效数字,以平均值±标准差($M\pm SD$)表示,使用中位数及95%置信区间(confidence interval, CI)辅助描述数据特征。Shapiro-Wilk法检验数据正态性,由于数据偏态分布,采用 Spearman 法进行相关分析建立复杂网络连接,对复杂网络模型中出现的最重要节点和关键因素与神经机能状态指标进行事后相关分析:0.10≤|r|<0.29为低相关,0.30≤|r|<0.49为中度相关,0.50≤|r|<0.69为高度相关,0.70≤|r|<0.89为非常高度相关,0.90≤|r|≤1.00为近似线性相关。 $P<0.05$ 表示具有统计学显著性。复杂网络模型中介数中心性和特征向量中心性使用 Python 3.9.3 程序中 NetworkX 2.5 数据库计算,Cytoscape 3.7.2 软件处理图像。

2 结果与分析

2.1 睡眠障碍运动员的睡眠质量和神经机能状态

本研究中睡眠障碍运动员存在的睡眠质量问题:习惯性睡眠总时长<7 h/夜,睡眠效率<75%,夜间觉醒总时间>50 min。从神经机能状态数据来看,睡眠障碍运动员中枢疲劳等级均值>2,已达到警戒状态。自主神经系统的副交感神经占主导作用。情绪状态中情绪纷乱值较高,说明睡眠障碍运动员消极情绪较多(表1)。

2.2 无目标不加权的复杂网络模型分析结果

图2所示为无目标不加权的复杂网络模型。介数中心性结果提示,慌乱、精力和愤怒情绪、 α 抑制%、NE和DA、PNN50、MRR、MHR和TST出现在最短路径上。特征向量中心性显示,上述指标中除PNN50、NE和MHR外,抑郁、紧张和疲劳情绪与其他指标是网络的重要连接节点(表2)。

表1 睡眠质量和神经机能状态测试结果

Table 1 Results of Sleep Quality and Neurofunctional Status

数据类型	网络节点	$M\pm SD$	中位数	95% CI	
睡眠质量	TST/min	412.77±63.39	416.20	396.17~429.37	
	SOL/min	17.57±22.34	9.75	11.72~23.42	
	SE/%	70.25±11.06	70.30	67.35~73.15	
	LST/%	24.92±11.61	22.75	21.88~27.96	
	DST/%	37.89±12.27	36.65	34.68~41.10	
	REM/%	37.19±15.17	35.85	33.22~41.16	
	TA/min	93.12±41.99	89.00	82.12~104.11	
中枢机能状态	α 抑制%	2.66±1.18	3.00	2.35~2.97	
	θ/β	2.63±1.37	2.35	2.27~2.99	
	神经递质	5-HT	20.01±5.38	19.86	18.6~21.42
		ACh	27.98±6.28	27.40	26.34~29.63
		DA	32.18±7.84	31.92	30.12~34.23
		NE	22.83±5.94	22.90	21.27~24.38
		5-HT/DA	0.70±0.38	0.58	0.60~0.80
自主神经状态	PNS	1.24±1.73	1.12	0.78~1.69	
	MRR/ms	1 002.45±164.73	985.50	959.3~1 045.59	
	HF/Hz	0.29±0.05	0.29	0.27~0.30	
	PNN50/%	45.20±27.06	52.22	38.11~52.28	
	SNS	-0.28±0.89	24.32	22.26~39.24	
	MHR/bpm	61.23±9.76	28.60	26.53~41.05	
	SI	7.42±3.03	1.97	2.70~4.98	
情绪状态	LF/Hz	-0.17±0.93	0.08	-0.41~0.08	
	LF/HF	0.79±0.74	0.54	0.60~0.99	
	紧张	7.80±2.64	8.00	7.11~8.49	
	愤怒	5.84±4.56	5.00	4.64~7.03	
	疲劳	6.20±4.26	5.00	5.08~7.31	
	抑郁	4.84±3.37	4.00	3.96~5.72	
	慌乱	5.95±3.01	6.00	5.16~6.73	
精力	自尊	10.21±2.04	10.50	9.68~10.75	
	精力	13.23±3.35	13.50	12.35~14.11	
	情绪纷乱	107.18±16.46	105.50	102.87~111.49	

注:神经递质结果用相对值表示,即与此神经递质相关频率的脑电的占比。

2.3 以睡眠质量为目标的加权复杂网络模型分析结果

基于各指标间的相关关系($P<0.05$)以及相关系数,构建得到加权复杂网络模型(图3)。根据各指标间的相关关系、相关系数以及连接等级,计算得到以所有睡眠质量为目标的目标加权网络模型的介数中心性和特征向量中心性分析结果(表3)。

以睡眠质量为目标的目标加权复杂网络模型的分析结果如表3所示,本研究主要讨论低于正常推荐值的睡眠质量指标。以TST为目标时,介数中心性结果表明,愤怒情绪是最重要的影响指标,而在特征向量中心性中,副交感神经兴奋性(PNN50)对TST的影响最大;以SE为目标时,目标介数中心性和特征向量中心性结果均表明运动员的精力情绪状态是对SE影响最大的节点和关键影响因素;

以 TA 为目标时,介数中心性和特征向量中心性均表明慌乱情绪是影响 TA 的最重要节点和关键因素。

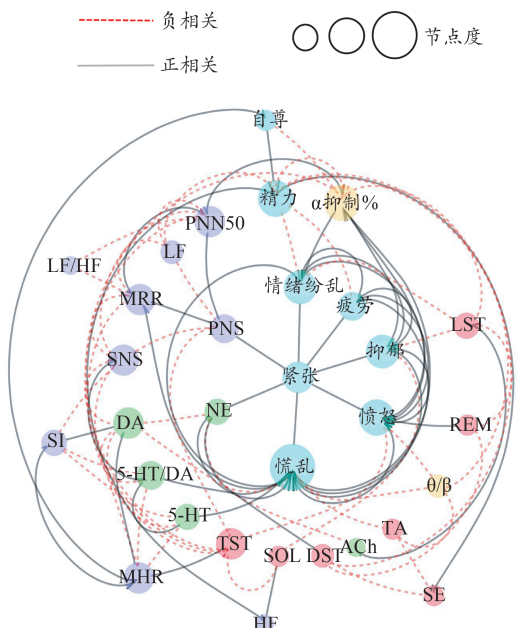


图2 无目标不加权的复杂网络模型

Figure 2. The Complex Network Model without Targeted Weighting

表2 无目标不加权中心性分析结果

Table 2 Results of Centrality Analysis in Non-targeted Unweighted Networks

重要性排名	介数中心性		特征向量中心性	
	网络节点	得分值	网络节点	得分值
1	慌乱	106.52	慌乱	1.00
2	精力	63.44	愤怒	0.79
3	α 抑制%	44.70	α 抑制%	0.76
4	TST	30.23	抑郁	0.72
5	NE	28.77	紧张	0.66
6	MRR	28.33	疲劳	0.62
7	愤怒	27.24	TST	0.50
8	PNN50	22.02	精力	0.49
9	DA	20.52	DA	0.49
10	MHR	20.07	MRR	0.47

2.4 情绪状态与其他神经机能状态的相关性

由上述复杂网络模型的研究结果可见,情绪状态(愤怒、慌乱和精力)是造成运动员睡眠障碍的最重要节点和关键因素,因此对其和神经机能状态进行相关分析(表4)。愤怒值与 α 抑制%呈中度正相关($P < 0.05$),与 θ/β 呈低度正相关($P < 0.05$);慌乱值与5-HT($P < 0.01$)、5-HT/DA($P < 0.05$)和 α 抑制%($P < 0.05$)均呈中度正相关,与DA呈中度负相关($P < 0.05$);精力值与HF呈中度正相关($P < 0.05$),与MHR($P < 0.05$)和 α 抑制%($P < 0.01$)呈中

度负相关,与LF和 θ/β 呈低度负相关($P < 0.05$)。提示,消极情绪(愤怒和慌乱)增多可能与中枢机能状态下降和中枢疲劳程度增高存在联系,而积极情绪(精力)减小可能与副交感神经活性下降、交感神经活性增强以及中枢机能状态下降及中枢疲劳存在关系。

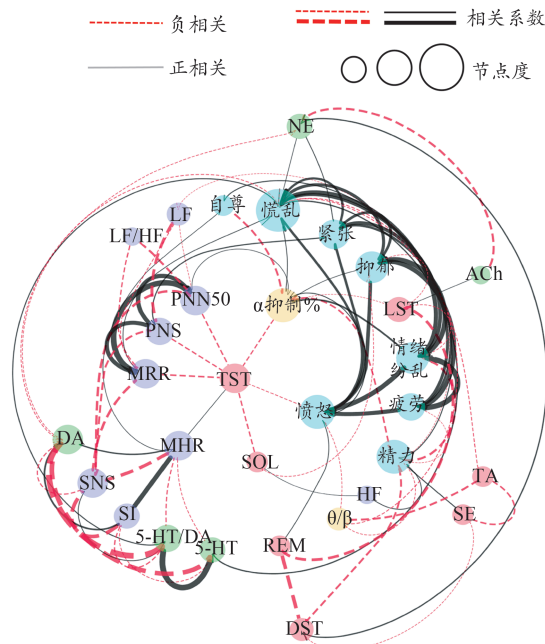


图3 加权复杂网络模型

Figure 3. Weighted Complex Network Model

3 讨论

正常、充足的睡眠可以使运动员最大程度恢复体能,而睡眠质量低和睡眠不足会给人体机能的恢复带来负面影响,进而削弱免疫系统和内分泌系统功能,同时还有可能影响运动员的思维和判断力,增加受伤的概率(黎涌明等, 2020; 齐华等, 2009)。因此,教练员及科研人员应重视和关注运动员睡眠质量问题。本研究通过对 14 名男性睡眠障碍运动员 4 次完整睡眠 PSG 监测发现,睡眠指标中 TST、SE 和 TA 均低于正常推荐值,客观说明了睡眠障碍运动员存在的睡眠问题(表 1)。在此基础上,本研究通过建立复杂网络模型,在无目标不加权的介数中心性和特征向量中心性结果中发现(表 2),情绪状态指标(慌乱)的得分最高,成为网络中的关键节点和最重要的影响因素。提示,慌乱情绪在睡眠障碍运动员中的重要性,也体现了与其他节点之间的密切联系。而在以睡眠质量为目标的目标加权复杂网络模型(表 3)中,目标介数中心性结果表明,情绪状态指标在到达睡眠质量目标的最短路径中出现频率最高(48.57%),其次是脑内神经递质和睡眠指标频率相同(14.29%),而中枢神经机能状态和自主神经状态出现的频率最低(11.43%)。目标特征向量中心性结果表明,情绪状态成为睡眠障碍运动员最重要的影响因素,

出现频率为82.86%,其次是自主神经状态出现频率为8.57%,而中枢神经机能状态、神经递质和睡眠指标出现频率相同(2.86%)。本研究基于睡眠障碍运动员建立复杂网络模型,无目标不加权的复杂网络模型结果为运动

员睡眠障碍机制的研究提供了应重点关注运动员心理状态和生理机能作用关系这一研究思路 and 方向,而以睡眠为目标的加权复杂网络模型结果进一步证实了情绪指标是影响睡眠质量、造成睡眠障碍的关键因素。

表3 以睡眠指标为目标的加权复杂网络模型的中心性分析结果

目标		主要影响网络节点(中心性分析得分值)				
		1	2	3	4	5
目标介数中心性	TST	愤怒(5.00)	α 抑制%(2.50)	MHR(2.00)	情绪纷乱(1.00)	PNN50(0.50)
	SOL	抑郁(8.50)	TST(5.00)	慌乱(2.50)	情绪纷乱(1.50)	愤怒(1.00)
	SE	精力(7.50)	NE(3.50)	情绪纷乱(2.00)	DA(2.00)	α 抑制%(1.50)
	LST	情绪纷乱(6.50)	α 抑制%(4.00)	慌乱(2.00)	PNN50(1.50)	REM(1.00)
	DST	精力(7.50)	NE(3.50)	情绪纷乱(2.00)	DA(2.00)	REM(1.50)
	REM	愤怒(6.00)	DST(5.50)	LST(2.00)	NE(2.00)	情绪纷乱(1.50)
	TA	慌乱(10.75)	情绪纷乱(2.00)	MRR(2.00)	θ/β (1.75)	精力(1.25)
	目标特征向量中心性	TST	PNN50(0.38)	MRR(0.38)	PNS(0.35)	愤怒(0.28)
	SOL	抑郁(0.54)	情绪纷乱(0.40)	疲劳(0.36)	愤怒(0.35)	慌乱(0.32)
	SE	精力(0.41)	情绪纷乱(0.40)	疲劳(0.32)	慌乱(0.31)	愤怒(0.26)
	LST	情绪纷乱(0.50)	抑郁(0.44)	愤怒(0.34)	疲劳(0.33)	慌乱(0.30)
	DST	精力(0.39)	REM(0.35)	情绪纷乱(0.30)	愤怒(0.24)	NE(0.23)
	REM	愤怒(0.51)	情绪纷乱(0.39)	抑郁(0.33)	疲劳(0.32)	慌乱(0.28)
	TA	慌乱(0.54)	情绪纷乱(0.37)	愤怒(0.32)	抑郁(0.32)	疲劳(0.31)

表4 情绪状态与其他神经机能状态的相关性

Table 4 Correlation between Mood States and Other Neural Functional States

网络节点	愤怒	慌乱	精力
5-HT	0.06	0.36**	-0.10
ACh	-0.10	-0.15	0.09
DA	0.06	-0.31*	0.09
NE	0.11	0.28	-0.14
5-HT/DA	-0.04	0.33*	-0.10
PNS	0.22	0.22	0.12
MRR/ms	0.22	0.29	0.19
HF/Hz	-0.12	-0.15	0.30*
PNN50/%	0.17	0.21	0.16
SNS	-0.12	-0.18	0.13
MHR/bpm	-0.17	-0.26	-0.33*
SI	-0.01	-0.05	0.20
LF/Hz	-0.13	-0.03	-0.27*
LF/HF	0.14	-0.02	0.00
α 抑制%	0.31*	0.30*	-0.41**
θ/β	-0.29*	-0.24	-0.29*

注:* $P < 0.05$,** $P < 0.01$ 。

运动员情绪状态与睡眠质量问题间存在的密切联系在以往研究中已初步验证。运动员在长期高强度训练和备赛过程中会出现运动性疲劳,并伴随紧张和焦虑等消极情绪增多现象(Giandolini et al., 2016; Paris et al., 2021),导致睡眠质量下降,若未能及时发现并调节,则会影响运

动员的身心健康和比赛成绩(陈子豪等, 2023)。例如,高负荷训练、时差、夜间和清晨的训练/比赛等多个因素均会导致高水平运动员出现严重焦虑,这可能是影响睡眠质量的主要原因(Halson et al., 2021)。Juliff等(2015)在283名澳大利亚精英运动员中发现,睡眠不足的比例高达64%,并提出睡眠障碍的主要原因是运动员的竞争心理和紧张情绪过度。有研究发现在许多极限运动(如帆船、雪车等)中,运动员同样存在睡眠障碍问题,如睡眠中断现象非常普遍,这可能与比赛和训练压力相关(Hurdiel et al., 2014; Li et al., 2022)。提示,情绪状态对睡眠质量具有重要影响作用。另外,睡眠功能的神经代谢理论表明,睡眠有助于神经元和清醒状态的代谢需求恢复,而典型的夜间睡眠由不同的睡眠周期组成,不同神经元恢复需要又构成了不同的睡眠周期变化。其中,REM对于促进运动学习和情绪调整起到至关重要的作用(Peever et al., 2017)。本研究中,14名睡眠障碍运动员的睡眠周期中REM占比均值[(37.19±15.17)%]接近推荐值的最高阈值(41%),总计56次的睡眠监测中REM的占比超过阈值18次,而本研究中以REM为目标的加权网络模型揭示消极情绪(愤怒等)是REM异常变化的主要影响因素,这与睡眠的神经代谢理论相互验证,进一步说明了情绪状态影响睡眠质量的内在机制,而人体各项生理指标与心理状态间的密切联系(Kreibig et al., 2007)可能是情绪状态在复杂网络模型中成为影响睡眠质量关键因素的原因。

从多种方式导致运动员情绪状态改变产生睡眠问题的具体原因来看:一方面,高强度训练中情绪状态变差或心理压力过大会引起严重的白天嗜睡(Silva et al., 2012)、睡眠效率(Fietze et al., 2009)和睡眠持续时间(Anglem et al., 2008; Sargent et al., 2014)急剧下降等现象,造成这些不良睡眠模式的具体原因是主观疲劳、情绪紧张、自信心不足(Li et al., 2022; Taylor et al., 1997)以及身体/精神压力升高(Fietze et al., 2009)。有研究指出,运动员消极情绪的增多与中枢疲劳程度密切相关(李秦陇等, 2023)。与以往研究结果类似,本研究中情绪状态与神经机能状态的相关性分析结果提示(表4),愤怒值增多主要原因可能是中枢疲劳程度(α 抑制%和 θ/β)增加,慌乱值增多可能是大脑抑制性神经递质(5-HT)增多,兴奋性神经递质(DA)减少以及中枢神经疲劳程度增加引起。5-HT/DA被认为是反映中枢疲劳的敏感指标(Hormoznejad et al., 2019),而脑内5-HT增多和DA减少在合理变化范围内能够反映睡眠质量提高(Oh et al., 2019),但本研究未发现这一现象。另一方面,消极情绪过多通常与自主神经系统失调同时出现,一般表现为交感神经兴奋性升高,或者副交感神经兴奋性降低(Di Simplicio et al., 2012; Wang et al., 2013)。而运动训练产生的疲劳积累会进一步引起交感神经介导的生理反应,包括夜间心率增加和HRV降低等,从而导致睡眠质量低下,具体表现为睡眠潜伏期延长,睡眠周期紊乱(Costa et al., 2021; Oda et al., 2014)。与以往研究结果相似,本研究也发现精力情绪与MHR和LF分别呈中度和低度负相关($P < 0.05$),与HF呈中度正相关($P < 0.05$)。值得注意的是,精力情绪同时与 α 抑制%和 θ/β 分别呈中度和低度负相关($P < 0.05$)。提示,运动员精力状态不仅可能与自主神经活动的协调性密切相关,也受中枢疲劳程度影响。另有研究指出,下丘脑-垂体-肾上腺(hypothalamic-pituitary-adrenal, HPA)轴兴奋会对儿茶酚胺类物质产生动员作用,这可能是造成睡眠障碍的部分原因(Vargas et al., 2018),而儿茶酚胺类(DA和NE)等神经递质的变化在情绪控制方面也发挥着公认的作用(Radwan et al., 2019),本研究结果中最重要节点慌乱值($r=0.279, P=0.036$)以及紧张值($r=0.305, P=0.022$)与NE呈正相关关系(表4),也验证了这一点。

另外,运动员赛前焦虑也会导致睡眠模式恶化(Erlacher et al., 2011; Silva et al., 2012)。例如,睡眠质量(Silva et al., 2012)、效率(Fietze et al., 2009)和持续时间(Anglem et al., 2008)都在比赛前急剧下降。有研究指出,由于女性运动员受生理周期等因素干扰,睡眠质量易受训练产生的生理/心理压力以及外界环境变化的影响。与男性运动员相比,其生理/心理紊乱和睡眠障碍的因素存在一定差异(Miles et al., 2022)。因此,本研究只针对男性运动员睡眠障碍问题进行探究,未来研究可针对女性运

动员的睡眠障碍及性别差异等问题进行更深入的研究。关于睡眠不足致使运动能力受限的原因,一方面归因于有氧通路的损伤(Mougin et al., 1989),另一方面归因于运动员自身的感知觉变化(生理反应通常基本保持不变)(Horne et al., 1984; Martin, 1981)。感知疲劳的增加伴随着能量输出的减少,证实了疲劳发生的神经肌肉原因(Abbiss et al., 2005),这在一定程度上表明中枢神经驱动的减少与睡眠的神经理论之间存在关联(Stickgold, 2005; Walker et al., 2005)。虽然关于睡眠不足影响感知疲劳的研究存在一定矛盾,其机制仍不明确(Hajsalem et al., 2013; Mejri et al., 2014),但有部分研究发现睡眠不足对情绪调节(即情绪)存在显著影响(Axelsson et al., 2008; Kobayashi et al., 2007)。提示,运动过程中感知疲劳的变化可能也是情绪变化的结果(Temesi et al., 2013)。

综上,本研究揭示了情绪(主要是消极情绪)是睡眠质量变化和睡眠障碍发生的主要影响因素。由于运动员大强度训练和备赛导致的消极情绪增多,神经机能状态和自主神经协调性下降,中枢疲劳程度、脑内神经递质和自主神经状态与情绪状态密切相关,即情绪与神经机能状态在复杂的作用方式下共同调节睡眠-觉醒周期。因此,无论是情绪状态对睡眠质量的直接影响,或是与神经机能状态的相互影响下对睡眠的间接作用,都可能是情绪状态在睡眠障碍运动员中发挥关键作用的原因。根据本研究结果,建议选择能够改善睡眠障碍运动员神经机能状态和情绪状态进而提高睡眠质量的干预措施,以减少睡眠障碍对运动员造成的负面影响。比如,在非比赛期获得更多的“储备”睡眠,帮助运动员促进机能恢复,缓解运动员对关键时期睡眠质量不佳的焦虑;短时间(< 60 min)的午间小憩不仅可以补充夜间睡眠不足,还可以改善运动员机能恢复和情绪状态;生物反馈训练和正念训练等均可有效调节运动员消极情绪和神经机能状态,改善睡眠质量,提高训练质量和运动表现。

4 结论

1) 运动员睡眠障碍的主要表现为总时长短,睡眠期间觉醒时间长导致睡眠效率低。

2) 复杂网络模型方法揭示了情绪(主要为消极情绪)是睡眠质量低和睡眠障碍发生的主要影响节点和关键因素。

3) 愤怒、慌乱情绪与脑内神经递质(5-HT和DA)、中枢疲劳程度相关,而中枢疲劳程度和自主神经协调性则与精力状态相关。

参考文献:

- 陈子豪, 贾君强, 2023. 部分睡眠剥夺对运动员运动表现影响的研究进展[J]. 哈尔滨体育学院学报, 41(2): 79-87.
高和, 2018. 《国际睡眠障碍分类》(第三版)慢性失眠障碍的诊断标

- 准[J]. 世界睡眠医学杂志, 5(5): 555-557.
- 李秦陇, 车开萱, 施明强, 等, 2023. HRV 与 EEG 生物反馈训练对中枢疲劳运动员的影响[J]. 中国体育科技, 59(8): 14-20.
- 李秦陇, 张亮, 李博雅, 等, 2022. 冬训备赛期间优秀雪车运动员睡眠质量及影响因素[J]. 体育科研, 43(2): 31-38.
- 李啸天, 李博, 李叶梓, 等, 2022. 优秀运动员睡眠与运动表现: 问题分析、影响因素、改善策略[J]. 中国运动医学杂志, 41(11): 896-906.
- 黎涌明, 李啸天, 2020. 睡眠对提升精英运动员竞技表现的作用及研究方向[J]. 上海体育学院学报, 44(7): 36.
- 齐华, 周越, 2009. 利用心率变异指标评价运动员睡眠质量[J]. 中国体育科技, 45(6): 83-86.
- 吴梅婷, 林岭, 刘建秀, 2016. 脑超慢涨落技术在我国体育领域应用研究现状[J]. 中国运动医学杂志, 35(4): 394-399.
- 祝蓓里, 1995. POMS 量表及简式中国常模简介[J]. 天津体育学院学报, 10(1): 35-37.
- ABBISS C R, LAURSEN P B, 2005. Models to explain fatigue during prolonged endurance cycling[J]. Sports Med, 35(10): 865-898.
- ANDRADE A, BEVILACQUA G, CASAGRANDE P, et al., 2019. Sleep quality associated with mood in elite athletes [J]. Phys Sportsmed, 47(3): 312-317.
- ANGLEM N, LUCAS S J, ROSE E A, et al., 2008. Mood, illness and injury responses and recovery with adventure racing[J]. Wilderness Environ Med, 19(1): 30-38.
- AXELSSON J, KECKLUND G R, AKERSTEDT T, et al., 2008. Sleepiness and performance in response to repeated sleep restriction and subsequent recovery during semi-laboratory conditions [J]. Chronobiol Int, 25(2/3): 297-308.
- BARAJAS-MARTÍNEZ A, EASTON J F, RIVERA A L, et al., 2020. Metabolic physiological networks: The impact of age[J/OL]. Front Physiol, 11: 587994 [2023-11-15]. https://www.researchgate.net/publication/343493503_Metabolic_Physiological_Networks_The_Impact_of_Age. DOI: 10.3389/fphys.2020.587994.
- BASHAN A, BARTSCH R P, KANTELHARDT J W, et al., 2012. Network physiology reveals relations between network topology and physiological function[J/OL]. Nat Commun, 3: 702 [2023-11-15]. <http://arxiv.org/pdf/1203.0242v1>. DOI: 10.1038/ncomms1705.
- BERRY R B, BUDHIRAJA R, GOTTLIEB D J, et al., 2012. Rules for scoring respiratory events in sleep: Update of the 2007 AASM manual for the scoring of sleep and associated events. Deliberations of the sleep apnea definitions task force of the American Academy of Sleep Medicine[J]. J Clin Sleep Med, 8(5): 597-619.
- BREDA F L, MANCHADO-GOBATTO F B, DE BARROS SOUSA F A, et al., 2022. Complex networks analysis reinforces centrality hematological role on aerobic-anaerobic performances of the Brazilian Paralympic endurance team after altitude training[J]. Sci Rep, 12(1): 1148.
- COSTA J A, FIGUEIREDO P, NAKAMURA F Y, et al., 2021. Monitoring individual sleep and Nocturnal heart rate variability indices: The impact of training and match schedule and load in high-level female soccer players[J]. Front Physiol, 12: 678462.
- DI SIMPLICIO M, COSTOLONI G, WESTERN D, et al., 2012. Decreased heart rate variability during emotion regulation in subjects at risk for psychopathology[J]. Psychol Med, 42(8): 1775-1183.
- ERLACHER D, EHRENSPIEL F, ADEGBESAN O A, et al., 2011. Sleep habits in German athletes before important competitions or games[J]. J Sports Sci, 29(8): 859-866.
- FIETZE I, STRAUCH J, HOLZHAUSEN M, et al., 2009. Sleep quality in professional ballet dancers[J]. Chronobiol Int, 26(6): 1249-1262.
- GIANDOLINI M, VERNILLO G, SAMOZINO P, et al., 2016. Fatigue associated with prolonged graded running [J]. Eur J Appl Physiol, 116(10): 1859-1873.
- GOBATTO C A, TORRES R S, MOURA F A, et al., 2020. Corresponding assessment scenarios in laboratory and on-court tests: Centrality measurements by complex networks analysis in young basketball players[J]. Sci Rep, 10(1): 8620.
- GUPTA L, MORGAN K, GILCHRIST S, 2017. Does elite sport degrade sleep quality? A systematic review[J]. Sports Med, 47(7): 1317-1333.
- HAJSALEM M, CHTOUROU H, ALOUI A, et al., 2013. Effects of partial sleep deprivation at the end of the night on anaerobic performances in judokas[J]. Bio Rhythm Res, 44(5): 815-821.
- HALSON S L, 2014. Sleep in elite athletes and nutritional interventions to enhance sleep[J]. Sports Med, 44 (Suppl 1): S13-S23.
- HALSON S L, SARGENT C, ROACH G D, et al., 2021. Sleep and the athlete: Narrative review and 2021 expert consensus recommendations[J]. Br J Sports Med, 55(7): 356-368.
- HORMOZNEJAD R, ZARE J A, MANSOORI A, 2019. Effect of BCAA supplementation on central fatigue, energy metabolism substrate and muscle damage to the exercise: A systematic review with Meta-analysis[J/OL]. Sport Sci Health, [2023-11-15]. DOI: 10.1007/s11332-019-00542-4.
- HORNE J A, PETTITT A N, 1984. Sleep deprivation and the physiological response to exercise under steady-state conditions in untrained subjects[J]. Sleep, 7(2): 168-179.
- HURDIEL R, VAN DONGEN H P, ARON C, et al., 2014. Sleep restriction and degraded reaction-time performance in Figaro solo sailing races[J]. J Sports Sci, 32(2): 172-174.
- JULIFF L E, HALSON S L, PEIFFER J J, 2015. Understanding sleep disturbance in athletes prior to important competitions [J]. J Sci Med Sport, 18(1): 13-18.
- KOBAYASHI F, YAMAMOTO K, TSUBOI H, et al., 2007. Five-hour sleep restriction for 7 days increases subjective sleepiness[J]. Ind Health, 45(1): 160-164.
- KRAEMER M B, GARBUIO A L P, KANEKO L O, et al., 2022. Associations among sleep, hematologic profile, and aerobic and anaerobic capacity of young swimmers: A complex network approach [J]. Front Physiol, 13: 948422.
- KREIBIG S D, WILHELM F H, ROTH W T, et al., 2007. Cardiovascular, electrodermal, and respiratory response patterns to fear- and sadness-inducing films[J]. Psychophysiology, 44(5): 787-806.
- LEDUC C, JONES B, ROBINEAU J, et al., 2019. Sleep quality and quantity of international rugby sevens players during pre-season[J]. J Strength Cond Res, 33(7): 1878-1886.
- LI Q, STEWARD C J, CULLEN T, et al., 2022. Presleep heart-rate variability biofeedback improves mood and sleep quality in Chinese Winter Olympic Bobsleigh Athletes [J]. Int J Sports Physiol Perform, 17(10): 1516-1526.

- LI Q L, SHI M Q, STEWARD C J, et al., 2024. A comparison between pre-sleep heart rate variability biofeedback and electroencephalographic biofeedback training on sleep in national level athletes with sleep disturbances[J]. *Appl Psychophysiol Biofeedback*, 49(1): 115-124.
- MARTIN B, 1981. Effect of sleep deprivation on tolerance of prolonged exercise [J]. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 47(4): 345-354.
- MEJRI M A, HAMMOUDA O, ZOUAOUI K, et al., 2014. Effect of two types of partial sleep deprivation on Taekwondo players' performance during intermittent exercise [J]. *Bio Rhythm Res*, 45(1): 17-26.
- MENDEZ O E, BRENNER R P, 2006. Increasing the yield of EEG [J]. *J Clin Neurophysiol*, 23(4): 282-293.
- MILES K H, CLARK B, FOWLER P M, et al., 2022. What are the sleep characteristics of elite female athletes? A systematic review with Meta-analysis [J]. *Biol Sport*, 39(3): 751-763.
- MOUGIN F, DAVENNE D, SIMON-RIGAUD M L, et al., 1989. Disturbance of sports performance after partial sleep deprivation [J]. *C R Seances Soc Biol Fil*, 183(5): 461-466.
- ODA S, SHIRAKAWA K, 2014. Sleep onset is disrupted following pre-sleep exercise that causes large physiological excitement at bedtime [J]. *Eur J Appl Physiol*, 114(9): 1789-1799.
- OH J, PETERSEN C, WALSH C M, et al., 2019. The role of co-neurotransmitters in sleep and wake regulation [J]. *Mol Psychiatry*, 24(9): 1284-1295.
- OHAYON M, WICKWIRE E M, HIRSHKOWITZ M, et al., 2017. National Sleep Foundation's sleep quality recommendations: First report [J]. *Sleep Health*, 3(1): 6-19.
- PARIS H L, SINAI E C, SHEI R J, et al., 2021. The influence of carbohydrate ingestion on peripheral and central fatigue during exercise in hypoxia: A narrative review [J]. *Eur J Sport Sci*, 21(10): 1423-1435.
- PEEVER J, FULLER P M, 2017. The biology of REM sleep [J]. *Curr Biol*, 27(22): R1237- R1248.
- PEREIRA V H, GAMA M C, SOUSA F A, et al., 2015. Complex network models reveal correlations among network metrics, exercise intensity and role of body changes in the fatigue process [J]. *Sci Rep*, 5: 10489.
- PEREIRA V H, GOBATO C A, LEWIS T G, et al., 2018. Computational and complex network modeling for analysis of sprinter athletes' performance in track field tests [J/OL]. *Front Physiol*, 9: 843 [2023-11-15]. <https://europepmc.org/article/PMC/6043640>. DOI: 10.3389/fphys.2018.00843.
- RADWAN B, LIU H, CHAUDHURY D, 2019. The role of dopamine in mood disorders and the associated changes in circadian rhythms and sleep-wake cycle [J]. *Brain Res*, 1713: 42-51.
- ROTH T, 2007. Insomnia: Definition, prevalence, etiology, and consequences [J]. *J Clin Sleep Med*, 3(5 Suppl): S7-S10.
- SANTOS-DE-ARAÚJO A D, SHIDA-MARINHO R, PONTES-SILVA A, 2022. Heart rate variability (HRV): Checklist for observational and experimental studies [J]. *Autoimmun Rev*, 21(11): 103190.
- SARGENT C, HALSON S, ROACH G D, 2014. Sleep or swim? Early-morning training severely restricts the amount of sleep obtained by elite swimmers [J]. *Eur J Sport Sci*, 14(Suppl 1): S310-S315.
- SILVA A, QUEIROZ S S, WINCKLER C, et al., 2012. Sleep quality evaluation, chronotype, sleepiness and anxiety of Paralympic Brazilian athletes: Beijing 2008 Paralympic Games [J]. *Br J Sports Med*, 46(2): 150-154.
- SMOOT M E, ONO K, RUSCHEINSKI J, et al., 2011. Cytoscape 2.8: New features for data integration and network visualization [J]. *Bioinformatics*, 27(3): 431-432.
- SOUSA R, LULA-ROCHA V, TOUTAIN T, et al., 2020. Preferential interaction networks: A dynamic model for brain synchronization networks [J/OL]. *Physica A*, 554: 124259 [2023-11-15]. https://econpapers.repec.org/article/eeephsm/v_3a554_3ay_3a2020_3ai_3ac_3as0378437120300704.htm. DOI: 10.1016/j.physa.2020.124259.
- STICKGOLD R, 2005. Sleep-dependent memory consolidation [J]. *Nature*, 437(7063): 1272-1278.
- SWINBOURNE R, GILL N, VAILE J, et al., 2016. Prevalence of poor sleep quality, sleepiness and obstructive sleep apnoea risk factors in athletes [J]. *Eur J Sport Sci*, 16(7): 850-858.
- TAYLOR S R, ROGERS G G, DRIVER H S, 1997. Effects of training volume on sleep, psychological, and selected physiological profiles of elite female swimmers [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 29(5): 688-693.
- TEMESI J, ARNAL P J, DAVRANCHE K, et al., 2013. Does central fatigue explain reduced cycling after complete sleep deprivation? [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 45(12): 2243-2253.
- VARGAS I, VGONTZAS A N, ABELSON J L, et al., 2018. Altered ultradian cortisol rhythmicity as a potential neurobiologic substrate for chronic insomnia [J]. *Sleep Med Rev*, 41: 234-243.
- WALKER M P, STICKGOLD R, 2005. It's practice, with sleep, that makes perfect: Implications of sleep-dependent learning and plasticity for skill performance [J]. *Clin Sports Med*, 24(2): 301-317.
- WANG S M, YEON B, HWANG S, et al., 2013. Threat-induced autonomic dysregulation in panic disorder evidenced by heart rate variability measures [J]. *Gen Hosp Psychiatry*, 35(5): 497-501.

(收稿日期: 2023-12-21; 修订日期: 2024-02-10; 编辑: 尹航)