

精神疲劳及其神经机制

黄俊飞¹, 郭凯峰¹, 陈小异¹, 蒋军^{2*}

¹重庆师范大学教育科学学院, 重庆

²第三军医大学心理学院基础心理学系, 重庆

收稿日期: 2024年1月26日; 录用日期: 2024年3月19日; 发布日期: 2024年3月29日

摘要

精神疲劳是现代社会普遍存在的问题之一, 高强度的认知活动对个体的生活质量、工作效率、和心理健康都产生消极影响。文中重点介绍了精神疲劳的各种评估方法。这些方法包括主观评估工具, 如自我报告问卷, 以及客观的生理和行为指标, 如近红外、磁共振、脑电图等手段, 为精神疲劳的诊断和研究提供了重要工具。本文总结了现有的缓解精神疲劳的缓解和治疗方法: 心理咨询、程序性手段、药物治疗等方式。通过综合考虑认知、行为和神经科学的研究, 提供了一个多维度的精神疲劳视角。为理解精神疲劳提供了更深入的视角, 对相关领域的临床研究等实际应用具有一定意义。

关键词

精神疲劳, 神经机制, EEG

Mental Fatigue and Its Neural Mechanisms

Junfei Huang¹, Kaifeng Guo¹, Xiaoyi Chen¹, Jun Jiang^{2*}

¹School of Educational Sciences, Chongqing Normal University, Chongqing

²Department of Basic Psychology, School of Psychology, Third Military Medical University, Chongqing

Received: Jan. 26th, 2024; accepted: Mar. 19th, 2024; published: Mar. 29th, 2024

Abstract

Mental fatigue is one of the prevalent issues in modern society, where high-intensity cognitive activities negatively affect an individual's quality of life, work efficiency, and psychological health. The text highlights various assessment methods for mental fatigue. These methods include sub-

*通讯作者。

文章引用: 黄俊飞, 郭凯峰, 陈小异, 蒋军(2024). 精神疲劳及其神经机制. *心理学进展*, 14(3), 383-392.

DOI: 10.12677/ap.2024.143171

jective assessment tools, such as self-report questionnaires, and objective physiological and behavioral indicators, such as near-infrared spectroscopy, magnetic resonance imaging, and electroencephalography, providing essential tools for the diagnosis and research of mental fatigue. It summarizes existing mitigation and treatment methods for mental fatigue: psychological counseling, procedural methods, and pharmacological treatments. By considering cognitive, behavioral, and neuroscience research comprehensively, this article offers a multidimensional perspective on mental fatigue. It provides an in-depth view for understanding mental fatigue, having significant implications for practical applications in related fields' clinical research.

Keywords

Mental Fatigue, Neural Mechanisms, EEG

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

精神疲劳是现代社会中普遍存在的现象，不仅影响了个人的心理健康、生活质量，还可能对社会产生重大影响。精神疲劳对个体的认知和行为响应过程有显著影响，这种影响主要体现在注意力、工作记忆、反应时间以及决策能力的变化上(Jia et al., 2022)。可能导致个体情绪、动机和认知功能的暂时性下降(Ishii et al., 2014)，进而降低警觉性和增加认知障碍(Boksem & Tops, 2008)。一份来自英国中风幸存者、护理人员 and 卫生专业人员的共识报告指出，由于疲劳使人衰弱的后果以及对的机制和治疗方法的不完全理解，疲劳是十大研究重点(Pollock et al., 2014)。在极端情况下，疲劳甚至可能发展为慢性疲劳综合症(Yazdi & Sadeghniaat-Haghighi, 2015)。

神经功能的下降还可能导致对任务的厌恶增加，解决问题的能力 and 任务表现技能受损，对风险和努力的容忍度降低，以及错误或事故的增加。精神疲劳对社会经济造成的影响是多方面的，包括增加医疗成本、减少生产力和工作效率。精神健康问题导致的生产力损失，不仅包括因疾病缺勤的直接成本，还有在工作时因健康不佳而导致的工作效率低下。它影响日常交通(Itoh et al., 2000; LeDuc et al., 2005; Wise et al., 2019)、建筑(Li et al., 2019)和医疗保健(Bharathan et al., 2013; Nielsen et al., 2019)等生活生产领域。可能使得相关从业者在苛刻的环境中发生事故和产生伤害。即使在没有容易受伤的情况下，疲劳也会影响从业人员的心理健康(Ricci et al., 2007)。综上所述，精神疲劳对个人和社会都具有重大影响。了解这些影响对于评估和改善精神疲劳状态下的工作和生活表现具有重要意义。随着社会的快节奏和不断增长的竞争压力，精神疲劳已经成为一个备受关注的健康话题。

尽管精神疲劳在日常生活中广泛存在，但其确切的神经机制仍然是一个复杂而多层次的问题。本文旨在深入探讨精神疲劳的神经机制，从细胞水平到大脑区域的角度，以期加深我们对这一现象的理解。我们将概述目前已知的与精神疲劳相关的神经生物学基础，分析神经递质、神经通路和神经调控在精神疲劳中的作用，以及如何利用神经科学的进展来指导精神疲劳的治疗和管理策略。

随着神经科学领域的不断发展和技术的进步，我们正迈向更深入、更全面地理解精神疲劳的时代。通过本文的综述，我们希望为研究人员、临床医生和政策制定者提供一个有关精神疲劳的最新综合视角，以便更好地理解 and 应对这一挑战，提高社会的整体心理健康水平。

2. 精神疲劳的定义及相关理论

2.1. 精神疲劳的概念

疲劳可以分为精神疲劳和身体疲劳两种类型,均由过度的精神或身体活动引起,导致个体的精神或身体活动能力和效率降低。精神疲劳是身体或心理负荷失衡时,人的组织、器官甚至整个机体的工作能力暂时或持续下降的现象,这通常源于长期的高强度认知活动,也称为认知疲劳(Van Cutsem et al., 2017)。暂时性的精神疲劳在文献中被称为急性精神疲劳(van der Linden, 2011)。任务引起的认知负荷和花在任务上的时间调节任务期间和任务后经历的急性精神疲劳程度。动机和执行任务的预期成本和收益决定了个人为完成任务所付出的努力,从而调节心理疲劳的程度。在本文中,疲劳和精神疲劳交替使用,表示急性精神疲劳。

2.2. 精神疲劳相关理论

资源耗竭理论(Resource Depletion Theory)。Baumeister 等(1998)认为,抑制系统的功能就像一块肌肉,由一种可以消耗的能量资源所维持。该理论强调自我控制的资源是有限的,个体有意识地行动会消耗这些资源、导致能量耗竭。Pattyn 等人提出过载频谱来解释精神疲劳(Pattyn et al., 2018),与资源耗竭理论相似,精神疲劳状态下的表现下降可能与负荷不足或超负荷有关,这可能会导致个体参与度下降或动机减少。负荷不足状态下个体对任务感到无聊、进而导致表现下降(Kurzban et al., 2013);长时间的高负荷下,任务被评价为困难,个体的资源耗尽、无法维持良好表现也导致表现下降。

认知干扰理论(Cognitive Interference Theory)认为,精神疲劳可能源于认知过程中的干扰,如任务无关思维和注意力分散。这些干扰消耗了有限的认知资源,从而影响了任务性能和产生了精神疲劳感(Smallwood & Schooler, 2006, 2015)。

压力恢复理论(Stress Recovery Theory)更多地被用来解释自然环境对人类心理的恢复效应,但它也可以被用来理解精神疲劳的恢复过程。该理论认为,接触自然环境可以促进从心理压力和疲劳中的恢复,因为自然环境提供了一种低压力、有益于恢复注意力的环境(Kaplan & Kaplan, 1989)。

3. 精神疲劳的评估方法

评估精神疲劳的方法包括主观评价和客观测量两种方式。主观评价分为个体自我报告和他人观察评价两种。自我报告方法中,常用的量表包括卡罗琳斯卡嗜睡量表(Karolinska Sleeping Scale, KSS)、视觉模拟量表(Visual Analog Scale for Fatigue, VAS-F)、多维度疲劳量表(Multidimensional Fatigue Inventory, MFI)和疲劳严重性量表(Fatigue Severity Scale, FSS)。一些研究指出,主观心理疲劳往往先于任务表现的下降出现(Kanfer, 2011)。虽然任务表现被视为疲劳评估的黄金标准,在高动机水平的情况下,个体可能能够在精神疲劳状态下保持稳定的表现水平(van der Linden, 2011)。主观评价法有良好的信度、效度。然而,由于个体差异,主观评价可能不足以反映真实状况。

客观评估方法则涉及行为表现和生理指标。行为学数据在认知神经中起着重要的作用。目前,主流的脑力疲劳诱发方式有睡眠剥夺和持续认知任务两种形式。大多数诱发心理疲劳的认知任务都采用TOT(Time-on-task)范式(Boksem et al., 2006),行为表现体现在认知任务后的行为反应时和准确率的下降。睡眠剥夺方法则显示了疲劳对大脑活动的影响,张朋等人(2023)采取睡眠剥夺的办法对疲劳进行研究,发现脑力疲劳越严重,在大脑皮层处所检测到的快节律波活动能量减少,而慢节律波的活动能量增大。Li 等人采用长时间的心算任务诱发了被试者的精神疲劳(Li et al., 2020),大多数受试者在60分钟心算任务后就表现出了明显的疲劳,15~30分钟后,所有受试者都出现了疲劳发展的脑电迹象(Trejo et al., 2015)。N-back

实验范式可以实现认知控制功能,以及短时记忆动态刷新功能,因此高强度的 N-back 任务也被用于精神疲劳的诱发。Wylie 等人(2020)使用重复执行的 N-back 任务实现认知精神疲劳,同时采集功能磁共振成像数据,任务每隔一阶段就对精神疲劳进行评估。结果表明,随着精神疲劳程度的增加,被试知觉确定性下降。

精神疲劳涉及人体各个系统及感官,疲劳状态下的生理学指标都会有不同程度变化。因此许多学者从生理指标入手,根据不同生理学指标的变化对精神疲劳进行评定。如心率变异性、唾液酶、近红外。

心率变异性(HRV)是指窦性心率在一定时间内周期性改变的现象,正常情况下 HRV 受自主神经系统调节。研究发现,自主神经系统的活动对于精神疲劳是十分敏感的,因此能够反映自主神经功能短时间变化的心率变异性可以用来对精神疲劳进行评价(Wehrens et al., 2012)。心率变异性的分析方法主要有时域分析法、频域分析法和非线性分析法,TAELMAN 通过时域分析法发现,HRV 在精神疲劳前后变化很敏感(Taelman et al., 2011)。王晓琳等人(2021)也证实了心率变异性在清醒状态和精神疲劳状态具有显著性差异。Suzuki 等人(2011)发明了一种非接触式红外雷达远程测量 HRV 的方法,可以更方便地实时测量和分析 HRV。鉴于其准确性及其发展趋势,心率变异性将会是评价精神疲劳的一项重要指标。

非侵入性眼球追踪和 EOG 设备提供了一个独特的机会来评估自然环境下的精神疲劳,不会通过提问、要求额外的任务来干扰受试者。比起近红外来更加便携、无创、和可穿戴,是一种持续跟踪生理信号的理想设备。有学者将眼睛度量分为以下类别:瞳孔、闭眼的百分比、眨眼、扫视、注视、微扫视、眼部漂移和眼睛活动(Bafna & Hansen, 2021)。Gao 等人使用眨眼时间、眨眼时间、眨眼时间、眨眼时间、眨眼间隔、闭眼速度、复眼速度、眨眼能量、慢眼动持续时间和比例、快速眼动次数(REM)、眼持续时间和能量,使用支持向量机(SVM)进行对疲劳进行分类(Gao et al., 2015)。Bahill & Stark (1975)是第一批研究疲劳对扫视特征的影响的研究人员。研究发现,疲劳的参与者的眼跳持续时间增加,而眼跳的幅度和速度降低。Di Stasi 等人(2016)在驾驶的疲劳任务中以及在驾驶任务前后的引导扫视任务中进行了注视记录,绘制了来自疲劳参与者的扫视峰值速度与扫视幅度的数据,与预期的主序列曲线一致。

近红外光谱技术是一种应用于组织血氧参数的检测,反应血氧代谢情况的无创监测技术。已有研究将其与疲劳结合,前额叶皮层作为执行功能的重要区域,其活动的增加反映了大脑为处理和维持任务相关信息而作出的努力。在持续的认知任务中,大脑的某些区域(如前额叶皮层)会显示出活动增强的现象,表明大脑在长时间的任务中为维持表现而作出努力(Heiland et al., 2021)。日本学者研究发现,产生疲劳状态的被试者通过功能性近红外光谱技术,能够监测到脑组织额叶血氧参数明显的降低(Suda et al., 2009)。后有学者在模拟精神疲劳状态下,对精神疲劳者不同行为状态下的脑部血氧参数进行监测,开创了近红外光谱技术在脑力疲劳领域的研究(Soshi et al., 2010)。研究人员将该技术应用于驾驶疲劳的研究(Li et al., 2009),为该技术进一步应用于脑力疲劳领域研究奠定了基础。

唾液由口腔腺体分泌,分泌量大,它的易得性也使得唾液比其他的生化指标更有对疲劳进行评估的优势。唾液的某些成分来自血液,故唾液的情况在一定程度上反应了内环境的变化。唾液的分泌受味觉、视觉、嗅觉等外部刺激,也受机体内部的状态和免疫功能的影响。已有文献表明唾液中的免疫球蛋白 IgA、唾液淀粉酶和糖皮质激素与疲劳、应激状态密切相关(Nater et al., 2005)。

更有研究表明疲劳会导致生理失活和葡萄糖消耗,在这两种生理情况下认知能力都有下降趋势(Van Cutsem et al., 2022)。以上几种方法都揭示了疲劳与生理变化之间的联系。

4. 精神疲劳的神经机制

精神疲劳涉及大脑多个区域和网络的交互。近年来的研究利用功能磁共振(fMRI)和脑电图(EEG)等工具,揭示了与精神疲劳相关的大脑活动模式和神经网络的变化。在功能磁共振成像中, BOLD 对比提供

了揭示整个大脑代谢的能力,前扣带皮层区域的错误激活与疲劳有关,有研究发现前扣带皮层通常被认为在精神疲劳中起着关键作用(Wylie et al., 2017)。长时间的认知活动还会导致大脑功能网络的重组。有研究通过对健康参与者在长时间认知任务后进行的功能性磁共振成像(fMRI)分析,指出精神疲劳并不与大脑奖励回路的活动改变相关联,而是表现为任务相关网络的活动降低和默认模式网络(DMN)活动的增加(Gergelyfi et al., 2021),这种网络重组可能是大脑适应持续认知负荷和维持任务表现的一种策略(Peng et al., 2021)。随着疲劳的积累,大脑会启动代偿机制以试图维持认知的表现(Mizuno et al., 2011),这些改变反映了大脑在资源有限的情况下,如何通过重新分配和优化使用这些资源来应对长时间的认知需求。

脑电(EEG)也是常用于研究精神疲劳的主要方法之一,它是一种被广泛应用的无创性大脑皮层活动的可靠监测工具,通过放置于头皮的金属电极来追踪脑内神经元的电活动。脑电具有毫秒级的时间分辨率,能够对神经活动进行非侵入性评估,相较于其它神经成像技术,EEG更为经济、便携,能够灵敏地捕捉到一些罕见的、短暂的大脑活动事件。脑电信号分析方法近年来日趋成熟,在时域、频域、时频域及空间域等多个层面得到了广泛应用。已有多项研究表明,静息状态下的theta和alpha波段的功率谱密度与疲劳程度有关。静息状态下的脑电图与alpha功率呈强负相关,而theta功率与主观睡意(Strijkstra et al., 2003)呈正相关。随着精神疲劳的增加,alpha节律功率增加,闭眼时减少(Putilov & Donskaya, 2014)。脑电图的这些变化可用于检测精神疲劳(Tian et al., 2018),这对驾驶疲劳估计(Hu & Min, 2018)尤为重要和意义。由此可以看出,脑电图已成为探索精神疲劳的神经机制和检测的最有效的技术手段。在与精神疲劳相关的研究中,一些研究人员将alpha1(8~10 Hz)和alpha2(10~13 Hz)特征进行了统计分析来估计精神疲劳,并报告alpha1波段更于疲劳检测(Li et al., 2017)。Sun将alpha1频带应用于心理疲劳分类,对疲劳具有较高的预测精度(Sun et al., 2014)。theta和alpha脑电图波段的功率谱密度与受试者所经历的疲劳程度共同变化,alpha和theta的功率谱密度在疲劳状态下比正常状态下更大(Trejo et al., 2015)。

与其他分析方法不同,脑电微状态分析可以同时考虑来自所有电极的电压信号,以此计算大脑功能状态的全局表征,在高时间分辨率下识别全局脑功能状态的不连续以及非线性变化,有助于揭示大脑神经活动的产生及发展机制。它反映了脑电信号的诸多神经生理学特征,微状态分析方法的不断丰富与完善,为脑电信号提供了新的量化方法。脑电微状态也与静息状态网络相关。一些相关研究已经报道了微状态的变化,如精神分裂症患者、阿尔茨海默症(Shigemizu et al., 2020)、抑郁症、睡眠剥夺(An et al., 2023)、认知障碍(Delgado-Alvarado, 2016)。目前少有文献将精神疲劳与微状态结合起来,Li等人(2023)研究了模拟飞行任务引起的精神疲劳对脑电微状态的影响,发现长时间飞行任务后,疲劳状态下微状态D减少以及微状态C增加。这表明脑电微状态为评估飞行疲劳提供了可能。在经过心算任务后,发现与任务状态下的微状态相比,静息状态下微状态C增加,D减少(Kim et al., 2021)。关于精神疲劳下的微状态分析较少,因此,本研究将EEG微状态分析方法运用到精神疲劳脑电信号处理中,为精神疲劳提供更多的电生理指标。

除了微状态分析,事件相关电位的振幅和潜伏期也是脑电特征之一。单个ERP成分反映了不同的认知过程。N2负波峰值在刺激呈现的200~300 ms后,反映了冲突监测。P3正波在刺激呈现300~500 ms后,反映了与抑制运动反应相关的后期认知过程(Folstein & Van Petten, 2007)。而P3振幅作为任务投入的已知生理指标(Hopstaken et al., 2015)。Van Cutsem等人(2018)的研究详细描述了咖啡因-麦芽糊精含漱液对精神疲劳效应的影响,研究了精神疲劳状态下事件相关电位的变化,发现P2波幅降低。在理论上,P2被认为是注意力资源分配的衡量标准,经常与精神疲劳效应相关(Carlson, 2021)。对精神疲劳研究有关的其他ERP包括P3(可分为P3a、P3b)(Magnuson et al., 2021)、N1(Jacquet et al., 2020)等。

5. 精神疲劳的缓解手段

随着研究者对精神疲劳成因及影响研究的展开,部分学者也开始探索其治疗方法,以减弱精神疲劳对学习生活的影 响,包括心理疗法、程序性干预和药物治疗。

普通的生活方式调整和一些心理疗法可以缓解日常生活中精神疲劳。保证充足的睡眠、健康的饮食、定期的体育训练,以增强身体和认知的抗压能力。是缓解精神疲劳的基础措施(Johansson et al., 2022)。认知行为疗法(CBT)和心理咨 询对于处理精神疲劳背后的心理因素(如压力、焦虑、抑郁)有所帮助。这些治疗方法旨在改变不利的思维模式,教授应对策略,以更好地管理日常压力,帮助个体识别和改变导致疲 劳的负面思维模式和行为习惯(Johansson et al., 2022)。自我调节和正念干预在神经障碍中的疲劳应用较为广泛,正念基础的干预(MBI)被用于注意力管理、认知和情感灵活性来促进自我调节,因此被认为是减轻 疲劳的有效方法(Immink, 2014)。

对于神经障碍患者的认知疲劳,有研究者采取程序性干预,如经颅直流电刺激,取得了积极结果(Walker et al., 2019)。Nikooaharf Salehi 等人(2022)运用经颅直流电刺激对专业游泳运动员心理疲劳和身体表现的影响,发现左侧 DLPFC 的阳极 tDCS 可减少 50 米游泳时精神疲劳给运动员带来的不良影响。Tiware 等人(2024)通过重复经颅磁刺激对于纤维肌痛综合征的慢性疼痛、疲劳、认知模糊等症状进行干预,均有显著效果,这为认知疲劳的神经机制和治疗提供了新的理论依据。也有研究表明,针灸可以改善整体神经功能,缓解情绪变化、疲劳和认知障碍,对于疲劳改善具有一定意义(Zhu et al., 2024)。随着科学技术的进步,有学者认为能够利用虚拟现实(VR)模拟真实情境以缓解精神疲劳(Assaf et al., 2023)。

长期的精神疲劳和认知障碍在轻度创伤性脑损伤是很常见的, 哌醋甲酯治疗组的精神疲劳、抑郁和焦虑有显著改善(Johansson et al., 2020)。一项非随机对照临床试验研究了草酸乙酰乙酯(Oxaloacetate)治疗慢性疲劳综合症(ME/CFS)和长期 COVID 疲劳患者的效果,该研究发现,草酸乙酰乙酯通过改善新陈代谢异常,有助于减轻疲劳症状(Cash & Kaufman, 2022)。也有一些研究表明,红景天草药可能有助于提高身体表现和缓解精神疲劳(Ishaque et al., 2012)。中药也可以用于治疗慢性疲劳综合症(Walker et al., 2019)。

6. 小结与展望

精神疲劳是一种影响广泛的心理健康问题,其对个体和社会的影响远远超出了我们最初的认知。本文综述为我们提供了有关精神疲劳的全面视角,涵盖了多个方面,包括定义、评估方法、神经机制、研究方法以及未的可能研究方向。

首先,我们明确了精神疲劳的定义,它被描述为一种心理和生理状态,通常与长时间的认知活动、情感压力或生活事件相关。精神疲劳的核心特征包括持久的疲劳感、认知功能下降、情绪不稳定以及对任务的兴趣减退。这一定义为我们提供了一个清晰的起点,以便更深入地探讨这一话题。

其次,精神疲劳的评估方法多种多样,也是疲劳研究中一个关键的问题。我们讨论了主观评估方法,如自我报告问卷,以及客观测量方法,包括生理指标和行为表现。客观测量方法的发展使研究人员能够更准确地捕捉和量化精神疲劳,神经机制的研究揭示了精神疲劳的大脑基础。在神经机制方面,我们深入研究了脑电图(EEG)在精神疲劳研究中的应用。我们关注了微状态分析和事件相关电位(ERP)的 EEG 信号分析方法。微状态分析揭示了不同认知状态之间的转换,为精神疲劳的神经机制提供了动态视角。同时,ERP 研究揭示了与特定认知任务相关的脑电活动,有助于理解精神疲劳与认知任务之间的关系。神经机制的研究,能够更深入理解精神疲劳如何在大脑水平上产生影响。在疲劳的治疗技术方面,我们总结了认知行为疗法、程序性干预、药物治疗的方法。

综合而言,精神疲劳是一个复杂而重要的研究领域,涵盖了心理学、神经科学、医学等多个学科。

通过深入研究其定义、评估方法和神经机制，我们能够更好地理解精神疲劳对个体和社会的影响，为未来的研究和临床实践提供了有价值的见解，未来的研究可以在多个方面展开。比如，我们需要更深入地探讨精神疲劳的个体差异，了解不同个体或群体之间受到精神疲劳影响的程度；跨学科研究将有助于更全面地理解精神疲劳，心理学、神经科学、医学和工程等多个交叉领域的研究。

参考文献

- 王晓琳, 赵磊, 张维, 伏云发(2021). 基于 HHT 和核函数选择的情绪特征提取与识别. *南京大学学报(自然科学版)*, 57(3), 502-511. <https://doi.org/10.13232/j.cnki.jnju.2021.03.019>
- 张朋, 等(2023). 基于 EEG 信号特征的脑力疲劳快速检测方法. *北京航空航天大学学报*, 49(1), 145-154. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2021.0211>
- An, X. et al. (2023). Changes in Electroencephalography Microstates Are Associated with Reduced Levels of Vigilance after Sleep Deprivation. *Brain Research*, 1825, Article 148729. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/38128810>
<https://doi.org/10.1016/j.brainres.2023.148729>
- Assaf, A. H. et al. (2023). Detection and Recuperation of Mental Fatigue. *Journal of Behavioral and Brain Science*, 13, 15-31. <https://doi.org/10.4236/jbbs.2023.132002>
- Bafna, T., & Hansen, J. P. (2021). Mental Fatigue Measurement Using Eye Metrics: A Systematic Literature Review. *Psychophysiology*, 58, e13828. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/33825234>
<https://doi.org/10.1111/psyp.13828>
- Bahill, A. T., & Stark, L. (1975). Overlapping Saccades and Glissades Are Produced by Fatigue in the Saccadic Eye Movement System. *Experimental Neurology*, 48, 95-106. [https://doi.org/10.1016/0014-4886\(75\)90225-3](https://doi.org/10.1016/0014-4886(75)90225-3)
- Baumeister, R. F. et al. (1998). Ego Depletion: Is the Active Self a Limited Resource? *Journal of Personality and Social Psychology*, 74, 1252-1265. <https://doi.org/10.1037//0022-3514.74.5.1252>
- Bharathan, R. et al. (2013). Call-Associated Acute Fatigue in Surgical Residents—Subjective Perception or Objective Fact? A Cross-Sectional Observational Study to Examine the Influence of Fatigue on Surgical Performance. *World Journal of Surgery*, 37, 1176-1177. <https://doi.org/10.1007/s00268-013-1911-2>
- Boksem, M. A. et al. (2006). Mental Fatigue, Motivation and Action Monitoring. *Biological Psychology*, 72, 123-132. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16288951>
<https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2005.08.007>
- Boksem, M. A., & Tops, M. (2008). Mental Fatigue: Costs and Benefits. *Brain Research Reviews*, 59, 125-139. <https://doi.org/10.1016/j.brainresrev.2008.07.001>
- Carlson, J. M. (2021). A Systematic Review of Event-Related Potentials as Outcome Measures of Attention Bias Modification. *Psychophysiology*, 58, e13801. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/33682161>
<https://doi.org/10.1111/psyp.13801>
- Cash, A., & Kaufman, D. L. (2022). Oxaloacetate Treatment for Mental and physical Fatigue in Myalgic Encephalomyelitis/Chronic Fatigue Syndrome (ME/CFS) and Long-COVID Fatigue Patients: A Non-Randomized Controlled Clinical Trial. *Journal of Translational Medicine*, 20, Article No. 295. <https://doi.org/10.1186/s12967-022-03488-3>
- Delgado-Alvarado, M. (2016). Biomarkers for Dementia and Mild Cognitive Impairment in Parkinson's Disease. *Movement Disorders*, 31, 861-881. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/27193487>
<https://doi.org/10.1002/mds.26662>
- Di Stasi, L. L. et al. (2016). Effects of Long and Short Simulated Flights on the Saccadic Eye Movement Velocity of Aviators. *Physiology & Behavior*, 153, 91-96. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/26597121>
<https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2015.10.024>
- Folstein, J. R., & Van Petten, C. (2007). Influence of Cognitive Control and Mismatch on the N2 Component of the ERP: A Review. *Psychophysiology*, 45, 152-170. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2007.00602.x>
- Gao, X.-Y. et al. (2015). Evaluating Driving Fatigue Detection Algorithms Using Eye Tracking Glasses. In *The 2015 7th International IEEE/EMBS Conference on Neural Engineering (NER)* (pp. 767-770). IEEE. <https://doi.org/10.1109/NER.2015.7146736>
- Gergelyfi, M. et al. (2021). Mental Fatigue Correlates with Depression of Task-Related Network and Augmented DMN Activity but Spares the Reward Circuit. *NeuroImage*, 243, Article 118532. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2021.118532>
- Heiland, E. G. et al. (2021). Frequent, Short Physical Activity Breaks Reduce Prefrontal Cortex Activation but Preserve Working Memory in Middle-Aged Adults: ABBaH Study. *Frontiers in Human Neuroscience*, 15, Article 719509. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/34602995>

- <https://doi.org/10.3389/fnhum.2021.719509>
- Hopstaken, J. F. et al. (2015). A Multifaceted Investigation of the Link between Mental Fatigue and task Disengagement. *Psychophysiology*, *52*, 305-315. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25263028>
<https://doi.org/10.1111/psyp.12339>
- Hu, J., & Min, J. (2018). Automated Detection of Driver Fatigue Based on EEG Signals Using Gradient Boosting Decision Tree Model. *Cognitive Neurodynamics*, *12*, 431-440. <https://doi.org/10.1007/s11571-018-9485-1>
- Immink, M. A. (2014). Fatigue in Neurological Disorders: A Review of Self-Regulation and Mindfulness-Based Interventions. *Fatigue: Biomedicine, Health & Behavior*, *2*, 202-218. <https://doi.org/10.1080/21641846.2014.957042>
- Ishaque, S. et al. (2012). *Rhodiola rosea* for Physical and Mental Fatigue: A Systematic Review. *BMC Complementary and Alternative Medicine*, *12*, Article No. 70. <https://doi.org/10.1186/1472-6882-12-70>
- Ishii, A. et al. (2014). Neural Mechanisms of Mental Fatigue. *Reviews in the Neurosciences*, *25*, 469-479. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24926625>
<https://doi.org/10.1515/revneuro-2014-0028>
- Itoh, K. et al. (2000). Eye-Movement Analysis of Track Monitoring Patterns of Night Train Operators: Effects of Geographic Knowledge and Fatigue. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, *44*, 360-363. <https://doi.org/10.1177/154193120004402721>
- Jacquet, T. et al. (2020). Persistence of Mental Fatigue on Motor Control. *Frontiers in Psychology*, *11*, Article 588253. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.588253>
- Jia, H. et al. (2022). Effects of Mental Fatigue on Risk Preference and Feedback Processing in Risk Decision-Making. *Scientific Reports*, *12*, Article No. 10695. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-14682-0>
- Johansson, B. et al. (2020). Follow-Up after 5.5 Years of Treatment with Methylphenidate for Mental Fatigue and Cognitive Function after a Mild Traumatic Brain Injury. *Brain Injury*, *34*, 229-235. <https://doi.org/10.1080/02699052.2019.1683898>
- Johansson, B. et al. (2022). [Mental Fatigue—Possible Explanations, Diagnostic Methods and Possible Treatments]. *Läkartidningen*, *119*, Article 21073.
- Kanfer, R. (2011). Determinants and Consequences of Subjective Cognitive Fatigue. In P. L. Ackerman (Ed.), *Cognitive Fatigue: Multidisciplinary Perspectives on Current Research and Future Applications* (pp. 189-207). American Psychological Association. <https://doi.org/10.1037/12343-009>
- Kaplan, R., & Kaplan, S. (1989). *The Experience of Nature: A Psychological Perspective*. Cambridge University Press.
- Kim, K. et al. (2021). EEG Microstate Features According to Performance on a Mental Arithmetic Task. *Scientific Reports*, *11*, Article No. 343. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/33431963>
<https://doi.org/10.1038/s41598-020-79423-7>
- Kurzban, R. et al. (2013). An Opportunity Cost Model of Subjective Effort and Task Performance. *Behavioral and Brain Sciences*, *36*, 661-679. <https://doi.org/10.1017/S0140525X12003196>
- LeDuc, P. A. et al. (2005). Involuntary Eye Responses as Measures of Fatigue in US Army Apache Aviators. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, *76*, C86-C91.
- Li, F. et al. (2019). Proactive Mental Fatigue Detection of Traffic Control Operators Using Bagged Trees and Gaze-Bin Analysis. *Advanced Engineering Informatics*, *42*, Article 100987. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474034619305609>
<https://doi.org/10.1016/j.aei.2019.100987>
- Li, G. et al. (2017). A New Method for Human Mental Fatigue Detection with Several EEG Channels. *Journal of Medical and Biological Engineering*, *37*, 240-247. <https://doi.org/10.1007/s40846-017-0224-6>
- Li, G. et al. (2020). The Impact of Mental Fatigue on Brain Activity: A Comparative Study Both in Resting State and Task State Using EEG. *BMC Neuroscience*, *21*, Article No. 20. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/32398004>
<https://doi.org/10.1186/s12868-020-00569-1>
- Li, W. et al. (2023). EEG Microstate Changes According to Mental Fatigue Induced by Aircraft Piloting Simulation: An Exploratory Study. *Behavioural Brain Research*, *438*, Article 114203. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/36356722>
<https://doi.org/10.1016/j.bbr.2022.114203>
- Li, Z. et al. (2009). Assessment of Cerebral Oxygenation during Prolonged Simulated Driving Using Near Infrared Spectroscopy: Its Implications for Fatigue Development. *European Journal of Applied Physiology*, *107*, 281-287. <https://doi.org/10.1007/s00421-009-1122-6>
- Magnuson, J. R. et al. (2021). Development and Recovery Time of Mental Fatigue and Its Impact on Motor Function. *Biological Psychology*, *161*, Article 108076. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/33716108>
<https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2021.108076>
- Mizuno, K. et al. (2011). Mental Fatigue Caused by Prolonged Cognitive Load Associated with Sympathetic Hyperactivity.

- Behavioral and brain Functions*, 7, Article No. 17. <https://doi.org/10.1186/1744-9081-7-17>
- Nater, U. M. et al. (2005). Human Salivary Alpha-Amylase Reactivity in a Psychosocial Stress Paradigm. *International Journal of Psychophysiology*, 55, 333-342. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2004.09.009>
- Nielsen, H. B. et al. (2019). Short Time between Shifts and Risk of Injury among Danish Hospital Workers: A Register-Based Cohort Study. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*, 45, 166-173. https://www.sjweh.fi/show_abstract.php?abstract_id=3770
<https://doi.org/10.5271/sjweh.3770>
- Nikooharf Salehi, E. et al. (2022). Transcranial Direct Current Stimulation Reduces the Negative Impact of Mental Fatigue on Swimming Performance. *Journal of Motor Behavior*, 54, 327-336. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/34433377>
<https://doi.org/10.1080/00222895.2021.1962238>
- Pattyn, N. et al. (2018). Bridging Exercise Science, Cognitive Psychology, and Medical Practice: Is “Cognitive Fatigue” a Remake of “The Emperor’s New Clothes”? *Frontiers in Psychology*, 9, Article 1246. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.01246>
- Peng, Y. et al. (2021). Functional Connectivity Analysis and Detection of Mental Fatigue Induced by Different Tasks Using Functional Near-Infrared Spectroscopy. *Frontiers in Neuroscience*, 15, Article 771056. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/35368967>
<https://doi.org/10.3389/fnins.2021.771056>
- Pollock, A. et al. (2014). Top 10 Research Priorities Relating to life after Stroke—Consensus from Stroke Survivors, Caregivers, and Health Professionals. *International Journal of Stroke*, 9, 313-320. <https://doi.org/10.1111/j.1747-4949.2012.00942.x>
- Putilov, A. A., & Donskaya, O. G. (2014). Alpha Attenuation Soon after Closing the Eyes as an Objective Indicator of Sleepiness. *Clinical and Experimental Pharmacology and Physiology*, 41, 956-964. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/1440-1681.12311>
<https://doi.org/10.1111/1440-1681.12311>
- Ricci, J. A. et al. (2007). Fatigue in the US Workforce: Prevalence and Implications for Lost Productive Work Time. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 49, 1-10. <https://doi.org/10.1097/01.jom.0000249782.60321.2a>
- Shigemizu, D. et al. (2020). Prognosis Prediction Model for Conversion from Mild Cognitive Impairment to Alzheimer’s Disease Created by Integrative Analysis of Multi-Omics Data. *Alzheimer’s Research & Therapy*, 12, 145. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/33172501>
<https://doi.org/10.1186/s13195-020-00716-0>
- Smallwood, J., & Schooler, J. W. (2006). The Restless Mind. *Psychological Bulletin*, 132, 946-958. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.132.6.946>
- Smallwood, J., & Schooler, J. W. (2015). The Science of mind Wandering: Empirically Navigating the Stream of Consciousness. *Annual Review of Psychology*, 66, 487-518. <https://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev-psych-010814-015331>
<https://doi.org/10.1146/annurev-psych-010814-015331>
- Soshi, T. et al. (2010). Sleep Deprivation Influences Diurnal Variation of Human Time Perception with Prefrontal Activity Change: A Functional Near-Infrared Spectroscopy Study. *PLOS ONE*, 5, e8395. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0008395>
- Strijkstra, A. M. et al. (2003). Subjective Sleepiness Correlates Negatively with Global Alpha (8 - 12 Hz) and Positively with Central Frontal Theta (4 - 8 Hz) Frequencies in the Human Resting Awake Electroencephalogram. *Neuroscience Letters*, 340, 17-20. [https://doi.org/10.1016/S0304-3940\(03\)00033-8](https://doi.org/10.1016/S0304-3940(03)00033-8)
- Suda, M. et al. (2009). Subjective Feeling of Psychological Fatigue Is Related to decreased Reactivity in Ventrolateral Prefrontal Cortex. *Brain Research*, 1252, 152-160. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2008.11.077>
- Sun, Y. et al. (2014). Functional Cortical Connectivity Analysis of Mental Fatigue Unmasks Hemispheric Asymmetry and Changes in Small-World Networks. *Brain and Cognition*, 85, 220-230. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2013.12.011>
- Suzuki, S. et al. (2011). An Approach to Remote Monitoring of Heart Rate Variability (HRV) Using Microwave Radar during a Calculation Task. *Journal of Physiological Anthropology*, 30, 241-249. <https://doi.org/10.2114/jpa2.30.241>
- Taelman, J. et al. (2011). Time-Frequency Heart Rate Variability Characteristics of Young Adults during Physical, Mental and Combined Stress in Laboratory Environment. In *The 2011 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society* (pp. 1973-1976). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IEMBS.2011.6090556>
- Tian, S. et al. (2018). Mental Fatigue Estimation Using EEG in a Vigilance Task and Resting States. In *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society* (pp. 1980-1983). IEEE. <https://doi.org/10.1109/EMBC.2018.8512666>
- Tiwari, V. K. et al. (2024). Effect of Neuronavigated Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation on Pain, Cognition and

- Cortical Excitability in Fibromyalgia Syndrome. *Neurological Sciences*. <https://doi.org/10.1007/s10072-024-07317-x>
- Trejo, L. J. et al. (2015). EEG-Based Estimation and Classification of Mental Fatigue. *Psychology*, 6, 572-589. <https://doi.org/10.4236/psych.2015.65055>
- Van Cutsem, J. et al. (2017). The Effects of Mental Fatigue on Physical Performance: A Systematic Review. *Sports Medicine*, 47, 1569-1588. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/28044281>
<https://doi.org/10.1007/s40279-016-0672-0>
- Van Cutsem, J. et al. (2018). A Caffeine-Maltodextrin Mouth Rinse Counters Mental Fatigue. *Psychopharmacology (Berl)*, 235, 947-958. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/29247343>
<https://doi.org/10.1007/s00213-017-4809-0>
- Van Cutsem, J. et al. (2022). A Drop in Cognitive Performance, Whodunit? Subjective Mental Fatigue, Brain Deactivation or Increased Parasympathetic Activity? It's Complicated! *Cortex*, 155, 30-45. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2022.06.006>
- van der Linden, D. (2011). The Urge to Stop: The Cognitive and Biological Nature of Acute Mental Fatigue. In P. L. Ackerman (Ed.), *Cognitive Fatigue: Multidisciplinary Perspectives on Current Research and Future Applications* (pp. 149-164). American Psychological Association. <https://doi.org/10.1037/12343-007>
- Walker, L. A. S. et al. (2019). Cognitive Fatigability Interventions in Neurological Conditions: A Systematic Review. *Neurology and Therapy*, 8, 251-271. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/31586303>
<https://doi.org/10.1007/s40120-019-00158-3>
- Wehrens, S. M. et al. (2012). Heart Rate Variability and Endothelial Function after Sleep Deprivation and Recovery Sleep among Male Shift and Non-Shift Workers. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*, 38, 171-181. <https://doi.org/10.5271/sjweh.3197>
- Wise, J. M. et al. (2019). Fatigue in Long-Haul Truck Drivers: A Concept Analysis. *Workplace Health & Safety*, 67, 68-77. <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/2165079918800509>
<https://doi.org/10.1177/2165079918800509>
- Wylie, G. R. et al. (2017). The Relationship between Outcome Prediction and Cognitive Fatigue: A Convergence of Paradigms. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 17, 838-849. <https://doi.org/10.3758/s13415-017-0515-y>
- Wylie, G. R. et al. (2020). Using Signal Detection Theory to better Understand Cognitive Fatigue. *Frontiers in Psychology*, 11, Article 579188. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/33519595>
<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.579188>
- Yazdi, Z., & Sadeghniaat-Haghighi, K. (2015). Fatigue Management in the Workplace. *Industrial Psychiatry Journal*, 24, 12-17. <https://doi.org/10.4103/0972-6748.160915>
- Zhu, W. et al. (2024). Acupuncture for Ischemic Stroke: Where Are We Now? *Acupuncture and Herbal Medicine*. https://journals.lww.com/ahm/fulltext/9900/acupuncture_for_ischemic_stroke_where_are_we_now_.66.aspx
<https://doi.org/10.1097/HM9.000000000000094>