

睡眠剥夺影响认知领域的研究进展

杨 岩¹, 黄伟伟², 唐吉友^{2*}

¹山东大学齐鲁医学院, 山东大学附属千佛山医院神经内科, 山东 济南

²山东第一医科大学第一附属医院(山东省千佛山医院)神经病学, 山东省神经免疫研究所, 山东省风湿免疫病转化医学重点实验室, 山东 济南

收稿日期: 2023年2月21日; 录用日期: 2023年3月17日; 发布日期: 2023年3月24日

摘要

认知过程对于学习、工作、体育竞技、艺术等人类活动的表现至关重要。受睡眠稳态及昼夜节律影响, 人的认知行为表现在不同状态及不同时间下存在差异。并且各项认知领域受睡眠缺失的反应也有所不同。睡眠剥夺对认知功能的影响中以警觉注意力最为敏感, 这可能与各个区域大脑功能活动及网络联结的改变有关。睡眠缺失对长期记忆的形成可能不如警觉性敏感, 但记忆的编码、巩固和提取过程均会受到睡眠不足的限制, 尤其是编码功能更容易受到损害。本文就睡眠剥夺对注意力、记忆力的影响, 不同认知领域敏感性差异和认知昼夜节律等方面进行综述, 以提高人们对睡眠剥夺的认识。

关键词

睡眠剥夺, 认知, 注意力, 记忆力, 昼夜节律

Progress in Research on Sleep Deprivation Affecting Cognition

Yan Yang¹, Weiwei Huang², Jiyu Tang^{2*}

¹Department of Neurology, Shandong Provincial Qianfoshan Hospital, Cheeloo College of Medicine, Shandong University, Jinan Shandong

²Shandong Key Laboratory of Rheumatic Disease and Translational Medicine, Shandong Institute of Neuroimmunization, Department of Neurology, The First Affiliated Hospital of Shandong First Medical University & Shandong Provincial Qianfoshan Hospital, Jinan Shandong

Received: Feb. 21st, 2023; accepted: Mar. 17th, 2023; published: Mar. 24th, 2023

Abstract

Cognitive processes are crucial to the performance of human activities such as learning, work,

*通讯作者。

sports competition and art. Influenced by sleep homeostasis and circadian rhythm, people's cognitive behavior varies in different states and at different times. And each cognitive area responds differently to sleep loss. The most sensitive effect of sleep deprivation on cognitive function is alert attention, which may be related to changes in functional activity and network connections in various brain regions. Sleep deprivation may not be as sensitive to long-term memory formation as alertness, but memory encoding, consolidation, and retrieval are all limited by sleep deprivation, and coding functions are particularly impaired. This paper reviews the effects of sleep deprivation on attention, memory, sensitivity differences in different cognitive domains, and circadian rhythm, in order to improve people's understanding of sleep deprivation.

Keywords

Sleep Deprivation, Cognitive, Attention, Memory, Circadian Rhythm

Copyright © 2023 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

当今社会睡眠剥夺成为一个越来越普遍的现象。随着学习、工作的需求,睡眠不足的人口比例逐年增加。青少年、运动员、医护工作者等人群广泛受到了睡眠剥夺的干扰,睡眠剥夺引起的认知行为表现的下降为日常生活工作的管理带来了挑战。美国睡眠医学会推荐青少年维持健康所需的睡眠时间为每晚8~10小时[1]。然而,在美国72.2%的学生夜间睡眠小于8小时[2]。这种不良的睡眠卫生习惯导致青少年消极情绪的增加甚至发生抑郁,对青少年健康及学业造成多重不利影响[3]。此外,睡眠作为人类最基本的生命活动对机体能量的供应至关重要。目前得到广泛认可的是睡眠能量分配模型,该模型强调将有限的能量优化分配到基本生命活动中。生物活动的能量分配在睡眠和觉醒两种状态下以不同的方式共享以达到优化能量利用的效果。在清醒状态时减少对能量需求低的生物活动的能量分配,睡眠时机体则不再将能量继续消耗在清醒努力(觅食或繁衍)上,能量便分配到这些觉醒时能量需求低的生物活动中。因此,睡眠剥夺时依赖睡眠的生物活动未达到需求,分配在清醒努力上的生物活动能量不足,行为缺陷随之而来[4]。睡眠时长的减少对生理造成的负担容易引起慢性损伤进而影响运动员的表现[5]。研究发现在竞技运动员的各项训练中,对速度、战术策略及战术技巧有需求的运动受睡眠时长的改变明显[6]。轮班工作可能是睡眠剥夺的另一种表现形式,医疗卫生工作者因夜间随叫随到的工作性质睡眠不足和倦怠现象普遍存在。睡眠剥夺后的医生完成操作的时间延长,操作错误率增加为医疗安全带来隐患[7]。考虑到轮班工作带来的危害,《国际睡眠障碍分类》(第三版)已经提出了轮班工作障碍(shift work disorders, SWD)的诊断标准。睡眠剥夺对认知造成的影响是不可估量的,随着受到睡眠剥夺困扰人群的增加,越来越多的研究开始关注睡眠缺失对人类生活及健康的影响。

2. 睡眠剥夺对认知领域的影响

2.1. 睡眠剥夺影响警觉注意力

2.1.1. 行为学表现

完全性睡眠剥夺及睡眠限制均会影响认知的各个方面,其中对警觉注意力的影响最为显著。警觉注意力是指在一段时间内对单调、没有智力挑战的任务保持稳定、集中注意力的能力,其在认知表现中占

有非常重要的地位。睡眠剥夺会降低持续注意力的行为表现，导致反应速度减慢及错误率增加，并且注意力的下降会随着任务时间的延长而恶化[8]。然而睡眠剥夺对注意力的影响不仅体现在身体精力的消耗，还会降低努力的动机从而使表现下降更明显。通过奖励机制可以增加睡眠剥夺后的努力动机，在一定程度上缓解注意力的下降。这种努力动机所引起的表现改变受到人群、认知水平及奖励分配的影响[9]。

2.1.2. 大脑活动与网络联结

随着脑功能 MRI (functional MRI, fMRI) 的应用，近年来急性睡眠剥夺对注意力相关脑功能活动的影响已经得到部分证实，它与大脑多个区域的功能活动与网络联结有关。睡眠缺失条件下执行注意力任务时，大脑背外侧前额叶皮层(dorsolateral prefrontal cortex, DLPFC)和顶叶沟的功能 MRI 信号减少。事实上睡眠剥夺不仅会影响前额叶和顶叶皮层的活动，而且与视觉空间注意力相关的纹外视皮层的活动也会减少，这些大脑活动的变化可以表现为关注特定刺激而忽略干扰的注意力缺陷[10]。睡眠剥夺也会引起丘脑活动的改变，尤其是休息不足的情况下，丘脑活动显著增加出现嗜睡、注意力减退[11]。此外，默认模式网络(default mode network, DMN)的不稳定性也与睡眠剥夺下注意力障碍有关。在选择注意力任务中默认模式网络活动增加意味着参与者的任务表现更慢、更不稳定[12]。检测大脑多个区域的血氧饱和度水平依赖(blood oxygenation level dependent, BOLD)信号的时间共变评估静息状态大脑功能联结情况，睡眠剥夺后默认模式网络内部及背侧注意力网络与腹侧注意力网络之间失去整合。因此，可以通过不同觉醒程度下功能联结状态的相对比例预测睡眠剥夺后警觉性下降的倾向[13]。

此外，还有研究利用事件相关电位(event-related potential, ERP)将行为反应与大脑电生理变化联系在一起，完全性睡眠剥夺下受觉醒状态影响的 P1 出现振幅减弱，轻度的睡眠限制下，N1、P1 未发生明显改变，然而反映内源性心理因素的 P3 出现衰减，偏侧化准备电位(lateralization preparation potential, LRP)降低，这反映了即使轻度的睡眠剥夺也会对警觉性和行为产生有害的结果[14]。

2.2. 睡眠剥夺影响记忆力

学习记忆的形成是一个复杂的过程包括信息的编码、巩固、提取。上述任意环节均会受睡眠不足的干扰改变大脑活动进而影响记忆的形成。

2.2.1. 编码

编码是对感觉通路和感觉分析阶段的输入信息进行登记的过程。他要求忽略干扰因素的同时将注意力集中并保持在刺激上，从而创建长期记忆的形成。睡眠障碍会损害长期记忆的编码，这与长期记忆相关过程(如注意力、工作记忆)的缺陷有关。这些缺陷可能依赖于慢波睡眠(slow wave sleep, SWS)的缺失，以 SWS 为主导的半晚的睡眠足以恢复编码能力，这支持 SWS 为后续编码刷新内存的观点[15]。然而记忆的编码能力不仅依赖于慢波睡眠，在慢性睡眠限制下 SWS 保留，记忆的编码仍然受到损害，这说明有其他睡眠阶段对记忆编码起作用。研究发现在长时间睡眠限制后，II 期睡眠及快速眼动期(rapid eye movement, REM)睡眠出现减少。这证实了 REM 睡眠及 II 期睡眠可能也对慢性睡眠剥夺的记忆编码起作用[16]。

大量研究证明睡眠剥夺会引起记忆和学习障碍，从神经生物学角度分析，依赖海马的记忆处理过程受睡眠剥夺影响更敏感，可能与睡眠剥夺干扰人类内侧颞叶和双侧海马后部编码相关的功能活动有密切联系[17]。睡眠剥夺和睡眠缺失双向调节神经元之间的联结强度及稳定影响海马神经元的可塑性从而干扰记忆的编码[18]。睡眠与记忆形成的分子学机制还有待研究，睡眠剥夺时可能减弱了细胞内环磷酸腺苷(cyclic adenosine monophosphate, cAMP)-蛋白激酶 A (protein kinase A, PKA)信号通路，导致 cAMP-反应元件结合蛋白(reaction element binding protein, CREB)介导的基因转录、神经营养信号通路和谷氨酸受体表

达发生改变,从而损害海马神经元突触可塑性和记忆过程。当睡眠限制成为一种慢性疾病时,海马细胞增殖和发生减少,海马体积减小从而引起认知障碍及精神疾病的发生[19]。

2.2.2. 巩固

巩固是一个随时间推移而增强的表征。睡眠是记忆巩固的一个最佳条件,他可以加强并将短期记忆整合到长期记忆中。陈述性记忆的巩固受睡眠剥夺的影响可能不如编码更明显。研究发现 SWS 对巩固陈述性记忆至关重要,相对不受睡眠时长的限制,这解释了几个晚上的睡眠减少对陈述性记忆影响不明显的现象。并且睡眠剥夺对陈述性记忆没有长期的负面影响,一晚上的睡眠剥夺经过时间的推移可以得到恢复[16]。REM 睡眠对巩固非陈述性记忆、程序记忆和情绪记忆方面更重要[20]。研究发现快速眼动期的睡眠的减少不利于巩固情绪相关的记忆[21], Tempesta D 等人也发现当睡眠缺失或睡眠质量下降时,情绪记忆的巩固更消极[22]。此外一项研究报道,纺锤波增加的睡眠有更好的语言记忆,这对海马依赖相关的记忆巩固起到重要作用[23]。这也揭示了记忆的巩固依赖与多个睡眠阶段的协同作用。

2.2.3. 提取

提取是通过利用储存的信息创建意识表征或执行习得的行为。记忆储存在特定网络中需要重新激活才能对该事件重新认识及体验。提取过程由自由回忆、提示回忆及即将记住的刺激重现进行触发。研究发现相对其他过程而言,记忆的提取对睡眠剥夺具有一定的抵抗力,这与睡眠缺失注意力敏感机制形成鲜明对比,可能表明成功的信息提取需要更低的注意力。事实上睡眠剥夺涉及复杂认知过程,睡眠剥夺在复杂认知过程的影响下会导致记忆提取功能受损,这表现在睡眠不足时错误记忆的增加[16]。

3. 睡眠剥夺对认知领域影响的差异

急性睡眠剥夺对各项认知领域的影响差异很大,一项荟萃分析研究了短期睡眠剥夺对 6 个认知领域速度和准确性的影响,结果显示睡眠剥夺后各项认知领域均受到不同程度的损害,复杂度更高的任务受到的影响相对较少,而简单注意力和警惕任务受到的影响较大[24]。类似的是 June C. Lo 和 John A. Groeger 等人对 36 名健康受试者进行睡眠剥夺的对照研究,结果显示无论是部分性睡眠剥夺还是完全睡眠剥夺对警觉性、持续注意力的影响均要大于对执行功能的影响[25]。针对这一类现象目前提出了三个假说 1) 注意力控制假说:这个假说强调了“自下而上”的任务特征。Pilcher 等人发现睡眠剥夺后复杂认知任务的表现并没有下降,而警觉性及简单任务的表现下降明显,因此将认知任务分为警戒任务与认知任务。警戒任务单一枯燥完成简单,需要更多的“自上而下”的注意力控制;而复杂任务完成有一定难度,需要“自上而下”的注意力控制更少。由于睡眠剥夺后“自上而下”的注意力控制能力减弱,因此简单的任务更容易受到睡眠缺失影响[26]。2) 神经心理假说:不同认知领域受睡眠剥夺敏感性差异可能与特定的脑功能区活动有关,Harrison 和 Horne 回顾了以往文献发现睡眠剥夺与前额叶皮质(prefrontal cortex, PFC)认知功能存在联系,并在年轻人中完成了 36 小时睡眠剥夺后的精神认知测试,结果发现即刻记忆、语言流畅性、反应抑制等与 PFC 相关的认知功能损害,而复杂记忆未发现明显损害[27] [28]。后来 MRI 功能影像学进一步证实了睡眠剥夺后多个大脑区域的激活程度发生改变,尤其是与额顶叶为主的注意力网络活动的减少及双侧丘脑网络活动的激活[29]。睡眠剥夺后大脑区域活动的调解是复杂的,根据目前研究发现与其他认知区域的大脑活动及网络联结相比,前额叶皮质区域控制的认知领域更容易受睡眠剥夺影响。3) 警觉性假说:研究发现各项任务的注意力和警觉性对睡眠剥夺均很敏感。因此有学者认为注意力与警觉性是持续存在的,复杂任务的完成建立在警觉性及注意力的基础上[30]。但这一研究对解释睡眠剥夺后高级神经功能无明显受损的机制中存在疑点。目前关于各项认知领域受睡眠剥夺存在差异的具体机制还未解释清楚,以上三种假说从不同角度解释了睡眠剥夺对认知领域的影响,在一定程度上具有协同性,

但也有各自缺陷。

4. 睡眠剥夺影响认知的生理机制

急性睡眠剥夺对认知功能的损害与昼夜节律紊乱、睡眠减少、疲惫等因素有关，其中昼夜节律失调和睡眠障碍是影响认知的重要原因，尤其是一些复杂任务的完成受昼夜节律过程及睡眠稳态过程的双重调节更明显。

睡眠稳态受到睡眠和觉醒的反馈调节，觉醒时间过长产生睡眠压力增多使机体主动入睡；相反，睡眠又可以清除睡眠压力而倾向于觉醒，二者相互转化维持平衡。主观感受与认知行为随着睡眠压力的增加呈现逐渐衰减的状态。昼夜节律又称为生物钟，是一种内源性的生物节律，周期约 24 小时，生物钟起源于下丘脑前部视交叉上核，视交叉上核由一大群具有自主节律的神经元组成，这些神经元的节律周期在 24 ± 8 小时，他们之间通过相互联系实现同步化，形成约 24 小时的昼夜节律。国内外研究表明个体的主观感受与认知行为在一天中不断发生变化，而且我国与西方国家在认知昼夜节律上存在略微差异。在西方国家认知能力最低水平出现在夜间和清晨；认知能力的高水平出现在下午和傍晚[31]。而在我国上午 9 点时主观感受与认知能力处于较好的状态，傍晚 19 点时表现有所下降。这一现象可能与中西方文化背景、作息时间及进食时间的差异有关[32]。当睡眠不足时昼夜节律对认知行为的调节更明显，因此睡眠剥夺后的清晨会有更多的嗜睡，完成任务的错误率更高、表现更差。

5. 总结

综上所述，睡眠剥夺对警觉注意力、记忆力等多项认知领域的行为学表现产生了不利的影响，这可能与多个区域的大脑活动与网络联结发生改变有关，其中以前额叶皮质为主的注意力控制活动受损更为明显。记忆的编码、巩固与提取过程均依赖睡眠的补充，SWS 睡眠对记忆的编码及陈述性记忆的巩固至关重要，REM 睡眠对记忆的巩固以非陈述性记忆为主。虽然其他阶段的睡眠研究较少，但也对长期记忆的形成有不可或缺的影响。睡眠剥夺对各项认知领域的影响存在差异，这一机制目前还未清楚，注意力控制假说、神经心理假说及警觉性假说可以从不同角度解释当前研究的结果。此外，睡眠剥夺对认知的影响受昼夜节律与睡眠稳态的双重调节，这一结果导致了不同睡眠时间及不同时间点的认知水平存在差异。目前认知的损害还未有更好的决策，因此科学睡眠的形成对注意力、记忆的保护至关重要。

基金项目

国家自然科学基金(81471345)。

参考文献

- [1] Paruthi, S., Brooks, L.J, D'Ambrosio, C., *et al.* (2016) Consensus Statement of the American Academy of Sleep Medicine on the Recommended Amount of Sleep for Healthy Children: Methodology and Discussion. *Journal of Clinical Sleep Medicine*, **12**, 1549-1561. <https://doi.org/10.5664/jcsm.6288>
- [2] Wheaton, A.G., Jones, S.E., Cooper, A.C. and Croft, J.B. (2018) Short Sleep Duration among Middle School and High School Students—United States, 2015. *Morbidity and Mortality Weekly Report*, **67**, 85-90. <https://doi.org/10.15585/mmwr.mm6703a1>
- [3] Kansagra, S. (2020) Sleep Disorders in Adolescents. *Pediatrics*, **145**, S204-S209. <https://doi.org/10.1542/peds.2019-20561>
- [4] Schmidt, M.H. (2014) The Energy Allocation Function of Sleep: A Unifying Theory of Sleep, Torpor, and Continuous Wakefulness. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, **47**, 122-153. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2014.08.001>
- [5] Chandrasekaran, B., Fernandes, S. and Davis, F. (2020) Science of Sleep and Sports Performance—A Scoping Review. *Science & Sports*, **35**, 3-11. <https://doi.org/10.1016/j.scispo.2019.03.006>
- [6] Kirschen, G.W., Jones, J.J. and Hale, L. (2020) The Impact of Sleep Duration on Performance Among Competitive

- Athletes: A Systematic Literature Review. *Clinical Journal of Sport Medicine*, **30**, 503-512.
- [7] Banfi, T., Coletto, E., D'Ascanio, P., et al. (2019) Effects of Sleep Deprivation on Surgeons Dexterity. *Frontiers in Neurology*, **10**, Article 595. <https://doi.org/10.3389/fneur.2019.00595>
- [8] Hudson, A.N., Van Dongen, H.P.A. and Honn, K.A. (2020) Sleep Deprivation, Vigilant Attention, and Brain Function: A Review. *Neuropsychopharmacology*, **45**, 21-30. <https://doi.org/10.1038/s41386-019-0432-6>
- [9] Massar, S.A.A., Lim, J., Sasmita, K. and Chee, M.W.L. (2019) Sleep Deprivation Increases the Costs of Attentional Effort: Performance, Preference and Pupil Size. *Neuropsychologia*, **123**, 169-177. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2018.03.032>
- [10] Langner, R. and Eickhoff, S.B. (2013) Sustaining Attention to Simple Tasks: A Meta-Analytic Review of the Neural Mechanisms of Vigilant Attention. *Psychological Bulletin*, **139**, 870-900. <https://doi.org/10.1037/a0030694>
- [11] Long, Z., Zhao, J., Chen, D. and Lei, X. (2021) Age-Related Abnormalities of Thalamic Shape and Dynamic Functional Connectivity after Three Hours of Sleep Restriction. *PeerJ*, **9**, e10751. <https://doi.org/10.7717/peerj.10751>
- [12] Krause, A.J., Simon, E.B., Mander, B.A., et al. (2017) The Sleep-Deprived Human Brain. *Nature Reviews Neuroscience*, **18**, 404-418. <https://doi.org/10.1038/nrn.2017.55>
- [13] Chee, M.W.L. and Zhou, J. (2019) Functional Connectivity and the Sleep-Deprived Brain. In: Van Dongen, H.P.A., Whitney, P., Hinson, J.M., Honn, K.A. and Chee, M.W.L., Eds., *Progress in Brain Research*, Vol. 246, Academic Press, Cambridge, 159-176. <https://doi.org/10.1016/bs.pbr.2019.02.009>
- [14] Stojanovski, B., Benoit, A., Van Den Berg, N., et al. (2019) Sustained Vigilance Is Negatively Affected by Mild and Acute Sleep Loss Reflected by Reduced Capacity for Decision Making, Motor Preparation, and Execution. *Sleep*, **42**, Article ID: zsy200. <https://doi.org/10.1093/sleep/zsy200>
- [15] Tononi, G. and Cirelli, C. (2014) Sleep and the Price of Plasticity: From Synaptic and Cellular Homeostasis to Memory Consolidation and Integration. *Neuron*, **81**, 12-34. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2013.12.025>
- [16] Cousins, J.N. and Fernandez, G. (2019) The Impact of Sleep Deprivation on Declarative Memory. In: Van Dongen, H.P.A., Whitney, P., Hinson, J.M., Honn, K.A. and Chee, M.W.L., Eds., *Progress in Brain Research*, Vol. 246, Academic Press, Cambridge, 27-53. <https://doi.org/10.1016/bs.pbr.2019.01.007>
- [17] Abel, T., Havekes, R., Saletin, J.M. and Walker, M.P. (2013) Sleep, Plasticity and Memory from Molecules to Whole-Brain Networks. *Current Biology*, **23**, R774-R788. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2013.07.025>
- [18] Fuchsberger, T. and Paulsen, O. (2022) Modulation of Hippocampal Plasticity in Learning and Memory. *Current Opinion in Neurobiology*, **75**, Article ID: 102558. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2022.102558>
- [19] Kreutzmann, J.C., Havekes, R., Abel, T. and Meerlo, P. (2015) Sleep Deprivation and Hippocampal Vulnerability: Changes in Neuronal Plasticity, Neurogenesis and Cognitive Function. *Neuroscience*, **309**, 173-190. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2015.04.053>
- [20] Ackermann, S. and Rasch, B. (2014) Differential Effects of Non-REM and REM Sleep on Memory Consolidation? *Current Neurology and Neuroscience Reports*, **14**, Article No. 430. <https://doi.org/10.1007/s11910-013-0430-8>
- [21] Wiesner, C.D., Pulst, J., Krause, F., et al. (2015) The Effect of Selective REM-Sleep Deprivation on the Consolidation and Affective Evaluation of Emotional Memories. *Neurobiology of Learning and Memory*, **122**, 131-141. <https://doi.org/10.1016/j.nlm.2015.02.008>
- [22] Tempesta, D., De Gennaro, L., Natale, V. and Ferrara, M. (2015) Emotional Memory Processing Is Influenced by Sleep Quality. *Sleep Medicine*, **16**, 862-870. <https://doi.org/10.1016/j.sleep.2015.01.024>
- [23] Fogel, S.M. and Smith, C.T. (2011) The Function of the Sleep Spindle: A Physiological Index of Intelligence and a Mechanism for Sleep-Dependent Memory Consolidation. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, **35**, 1154-1165. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2010.12.003>
- [24] Lim, J. and Dinges, D.F. (2010) A Meta-Analysis of the Impact of Short-Term Sleep Deprivation on Cognitive Variables. *Psychological Bulletin*, **136**, 375-389. <https://doi.org/10.1037/a0018883>
- [25] Lo, J.C., Groeger, J.A., Santhi, N., et al. (2012) Effects of Partial and Acute Total Sleep Deprivation on Performance across Cognitive Domains, Individuals and Circadian Phase. *PLOS ONE*, **7**, e45987. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0045987>
- [26] Pilcher, J.J., Band, D., Odle-Dusseau, H.N. and Muth, E.R. (2007) Human Performance under Sustained Operations and Acute Sleep Deprivation Conditions: Toward a Model of Controlled Attention. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, **78**, B15-B24.
- [27] Harrison, Y. and Horne, J.A. (2000) The Impact of Sleep Deprivation on Decision Making: A Review. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, **6**, 236-249. <https://doi.org/10.1037/1076-898X.6.3.236>
- [28] Harrison, Y., Horne, J.A. and Rothwell, A. (2000) Prefrontal Neuropsychological Effects of Sleep Deprivation in

- Young Adults—A Model for Healthy Aging? *Sleep*, **23**, 1067-1073. <https://doi.org/10.1093/sleep/23.8.1f>
- [29] Ma, N., Dinges, D.F., Basner, M. and Rao, H. (2015) How Acute Total Sleep Loss Affects the Attending Brain: A Meta-Analysis of Neuroimaging Studies. *Sleep*, **38**, 233-240. <https://doi.org/10.5665/sleep.4404>
- [30] Lim, J. and Dinges, D.F. (2008) Sleep Deprivation and Vigilant Attention. *Annals of the New York Academy of Sciences*, **1129**, 305-322. <https://doi.org/10.1196/annals.1417.002>
- [31] Valdez, P. (2018) Homeostatic and Circadian Regulation of Cognitive Performance. *Biological Rhythm Research*, **50**, 85-93. <https://doi.org/10.1080/09291016.2018.1491271>
- [32] 麦子峰, 孙瑞, 张群, 等. 个体行为的昼夜节律效应: 来自华南地区的证据[J]. 心理与行为研究, 2019, 17(2): 185-192.