

DOI:10.3969/j.issn.1005-202X.2024.12.011

医学信号处理与医学仪器

EEG在尼古丁成瘾领域中的应用研究

任志伟¹, 马宇欣¹, 薛婷¹, 董芳¹, 程永欣¹, 王娟¹, 董有为¹, 鹿益明¹, 喻大华², 袁凯³

1. 内蒙古科技大学数智产业学院, 内蒙古 包头 014010; 2. 内蒙古科技大学自动化与电气工程学院, 内蒙古 包头 014010; 3. 西安电子科技大学生命科学与技术学院, 陕西 西安 710071

【摘要】吸烟问题是当今社会的焦点问题,烟草中的尼古丁是导致成瘾和戒断困难的主要原因。长期使用尼古丁不仅会引起大脑神经振荡异常,还会损害奖赏回路以及情绪调节功能,从而降低神经可塑性,增加成瘾的敏感性。作为一种电生理信号,脑电(EEG)信号与认知功能、情绪调节、抑制控制以及睡眠等多种状态相关。在尼古丁成瘾领域中,EEG信号的变化被证实与成瘾者认知功能和抑制控制的异常有关。因此,通过EEG相关技术探讨尼古丁成瘾者的异常神经振荡模式,可以加深对尼古丁成瘾内在神经机制的理解,为尼古丁成瘾的干预与治疗提供科学依据。本文将从EEG在尼古丁成瘾研究中的应用现状以及技术现状两方面,对近年来国内外学者的研究进展和相关成果进行综述。研究发现,尼古丁成瘾者在睡眠质量、认知功能及抑制控制等方面存在明显的异常。此外,成瘾者的大脑功能连接、事件相关电位及脑电功率谱也发生显著变化。最后,本文对EEG信号在尼古丁成瘾领域的研究前景进行了展望,强调进一步探索EEG信号在成瘾机制、戒断反应及治疗效果评估中的潜在应用。

【关键词】脑电;尼古丁成瘾;睡眠;认知功能;综述

【中图分类号】R318

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2024)12-1537-06

Application of EEG in nicotine addiction research

REN Zhiwei¹, MA Yuxin¹, XUE Ting¹, DONG Fang¹, CHENG Yongxin¹, WANG Juan¹, DONG Youwei¹, LU Yiming¹, YU Dahua², YUAN Kai³

1. School of Digital and Intelligent Industry, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China; 2. School of Automation and Electrical Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China; 3. School of Life Sciences and Technology, Xidian University, Xi'an 710071, China

Abstract: Smoking is a major concern in today's society, and the nicotine in tobacco is the major cause of addiction and difficulty in withdrawal. Long-term use of nicotine not only results in abnormal neural oscillations in the brain, but also impairs reward circuits as well as emotion regulation, thus reducing neuroplasticity and increasing susceptibility to addiction. As electrophysiological signals, electroencephalogram (EEG) signals are associated with a variety of states including cognitive function, emotion regulation, inhibitory control, and sleep. The researches on nicotine addiction reveal that changes in EEG signals are associated with abnormalities in cognitive function and inhibitory control in nicotine addicts. Therefore, exploring the abnormal neural oscillation patterns of nicotine addicts through EEG-related techniques can deepen the understanding of the intrinsic neural mechanisms of nicotine addiction and provide a scientific basis for the intervention and treatment of nicotine addiction. Herein the study summarizes the research achievements of scholars at home and abroad in recent years from the aspects of the application status of EEG in nicotine addiction researches as well as the current technology. It is found that nicotine addicts have obvious abnormalities in sleep quality, cognitive function and inhibitory control. In addition, the functional brain connectivity, event-related potentials and EEG power spectra of addicts are significantly changed. Finally, an outlook on the research prospects of EEG signals in nicotine addiction is provided, emphasizing the potential applications of EEG signals in addiction mechanisms, withdrawal responses, and assessment of treatment efficacy.

Keywords: electroencephalogram; nicotine addiction; sleep; cognitive function; review

【收稿日期】2024-08-26

【基金项目】科技创新2030-“脑科学与类脑研究”重大项目(2022ZD0214500);国家自然科学基金(82260359, 82371500);内蒙古自然科学基金(2023QN08007);内蒙古自治区高等学校基本业务费

【作者简介】任志伟, 硕士研究生, 主要研究方向: 医学信号处理, E-mail: rzwl19123@163.com

【通信作者】喻大华, 教授, 主要研究方向: 医学信号处理, E-mail: fmydh@imust.edu.cn; 马宇欣, 硕士, 主要研究方向: 医学信号处理, E-mail: mayx0917@163.com

前言

尼古丁成瘾是全球范围内广泛存在的公共健康问题,严重影响吸烟者的身心健康,而吸烟是尼古丁成瘾的主要原因^[1]。据世界卫生组织(World Health Organization, WHO)的统计,全球约有11亿人吸烟,其中大多数为男性。尽管一些高收入国家的吸烟率呈下降趋势,但在中低收入国家,吸烟率依然较高,吸烟人数持续增加。全球每年因吸烟相关疾病死亡人数高达600多万^[2]。尼古丁是一种高度成瘾的物质,能够迅速激活大脑中的奖赏系统,导致生理和心理依赖^[3]。长期使用尼古丁会对身体造成多方面的负面影响^[4-5],包括认知功能受损、冲动性增加^[6]、决策能力降低^[7],以及与成瘾线索相关的记忆强烈等^[8-9]。此外,尼古丁会引起成瘾者的睡眠结构异常^[10]。因此,探讨尼古丁成瘾背后的神经机制将有助于尼古丁成瘾的干预与治疗^[11]。

在成瘾领域研究中,脑电(Electroencephalogram, EEG)技术被用于研究尼古丁、酒精、毒品等成瘾物质对大脑神经机制的影响^[12-14]。成瘾理论揭示了物质成瘾的一个共同特性,即药物线索反应的存在。具体表现为,与非成瘾者相比,成瘾者在面对烟雾类或中性类线索时,其生理和心理反应会表现出显著的差异^[15]。对吸烟相关线索的反应是吸烟成瘾者复吸的主要因素,成瘾者对香烟线索的大脑反应性活动可以预测其戒烟的持续能力。EEG具有毫秒级的时间分辨率,能够实时捕捉大脑活动的快速变化,可以用于研究大脑如何在不同的认知任务(如注意、记忆、决策)下的神经机制^[16-18],帮助揭示大脑认知过程和神经反应的动态变化。

EEG技术可以帮助更好地理解尼古丁成瘾背后的神经机制。先前的研究表明,尼古丁成瘾会引起吸烟者大脑振荡活动(如 α 波和 β 波)的变化,而这些变化可能与注意力和警觉性的改变有关^[19]。此外,EEG技术可以评估戒烟干预对大脑活动的影响,从而更好地帮助戒烟。由于尼古丁成瘾最大的来源是吸烟成瘾,所以对尼古丁成瘾与吸烟成瘾进行综述,以更好地提高对尼古丁成瘾的理解,为尼古丁成瘾的预防与治疗提供帮助。

1 EEG在尼古丁成瘾领域的应用研究现状

EEG信号是指通过电极记录到的大脑皮层神经元集体电活动。这种电活动反映了大脑在不同状态下的功能和信息处理,不同频段的EEG代表不同的脑功能活动。EEG信号根据频率可以分为5种常见的频段,每个频段与不同的认知或生理状态相关。 δ

波(0.5~4.0 Hz)主要与深度睡眠和无意识状态相关,通常在人的清醒状态下较为微弱。 θ 波(4~8 Hz)常与轻度睡眠、放松或者冥想状态相关,也与学习和记忆过程有关。 α 波(8~13 Hz)常见于清醒且放松的状态,尤其是在闭眼时,该信号主要出现于枕叶,但焦虑与紧张状态通常会引起 α 波活动减少。 β 波(13~30 Hz)主要与清醒状态下的警觉、注意力集中和思维活动有关,通常在前额叶皮层较为活跃。 γ 波(30~100 Hz)与高阶认知功能、记忆整合和知觉处理相关,通常在复杂任务或注意力高度集中的情况下活跃。

1.1 睡眠分析应用

尼古丁成瘾会导致睡眠异常^[20],作为一种强效的兴奋剂,尼古丁通过作用于中枢神经系统的乙酰胆碱受体^[21],增加神经递质的释放,从而干扰睡眠-觉醒周期,影响整体睡眠质量。因此,对尼古丁成瘾者的睡眠神经机制分析是十分必要的。一些研究表明,经皮尼古丁给药会影响睡眠的生理和自主神经系统^[22]。Choi等^[23]对非吸烟健康男性进行经皮尼古丁贴剂的睡眠EEG和心电图(Electrocardiogram, ECG)研究。结果显示,使用尼古丁贴片会影响睡眠连续性,减少总睡眠时间和睡眠效率,并导致快速眼动(Rapid Eye Movement, REM)睡眠增加。Truong等^[24]为确定吸烟与主观和客观睡眠质量之间的关系,通过从睡眠宏观与睡眠微观两个层面对睡眠EEG进行功率谱(Power Spectral Density, PSD)分析。结果显示,在非快速眼动(Non-Rapid Eye Movement, NREM)睡眠阶段,与既往吸烟者和从不吸烟者相比,目前吸烟者的睡眠EEG活动更快,表现出更高的 α 功率和更低的 δ 功率,进一步统计分析表明, δ 功率与吸烟强度之间存在剂量依赖性负相关。此外,为了更好地了解尼古丁和睡眠纺锤波之间的相互作用,O'Reilly等^[25]研究了睡眠纺锤波的持续时间、振幅以及纺锤波内振荡频率和密度(即每分钟纺锤波)的差异。研究结果表明,在尼古丁的作用下,纺锤波数量增加,且纺锤波的振幅更大,持续时间更长^[26]。

1.2 急性尼古丁与吸烟戒断分析应用

急性尼古丁暴露是指短时间内摄入尼古丁,摄入方式通常包括吸烟、电子烟以及尼古丁替代疗法(如尼古丁贴片、口香糖等)。急性尼古丁暴露通常会引发健康非吸烟者的听觉皮层反应发生改变^[27]。Bowers等^[28]通过分析健康非吸烟成年男性在口服尼古丁口香糖后的静息态EEG,发现在急性尼古丁的作用下,健康非吸烟成年男性的前中央区域 α 振荡和顶叶/枕叶区域的 α 振荡功率增加。虽然有研究发现,急性尼古丁摄入可以改善非吸烟者对于无效提

示目标任务中的反应时间,但是关于该研究结果仍有所争议^[29]。为进一步探讨急性尼古丁对非吸烟者在空间定向任务中无效提示目标反应时间和脑电成分的影响,以及急性尼古丁是否会对内源或外源定向注意产生不同的效应,Meinke等^[30]利用事件相关电位(Event-Related Potential, ERP)方法研究了尼古丁对视觉空间选择性注意的影响,特别关注尼古丁在检测无效提示目标时的潜在促进作用。结果表明,在内源性提示情况下,急性尼古丁能够缩短健康非吸烟者对无效提示目标的反应时间;但在外源性提示情况下,两组之间无显著差异。ERP分析发现,早期ERP成分(P1和N1)在安慰剂和急性尼古丁条件下均表现出相似的注意调节,但后期成分在前中央区域显示出不同的调节模式。

吸烟戒断是指吸烟者停止或减少尼古丁摄入后的一段时间内所经历的生理和心理变化。与尼古丁相关的EEG研究表明,吸烟戒断对大脑的电活动有显著影响^[31],主要表现在不同频段的EEG变化以及诱发电位的改变^[32]。Oliver等^[33]研究了尼古丁戒断对奖赏加工机制的影响,结果表明,尼古丁戒断显著降低了额叶内侧负电位的振幅,验证尼古丁戒断会减弱奖赏信号的加工。这与吸烟者戒断期常见的情绪低落和对奖赏敏感性降低一致。进一步的研究也支持这一结论,Lee等^[34]通过对慢性吸烟者、戒烟者和非吸烟者的静息态EEG进行对比分析,发现 α 频段的EEG特征可以区分吸烟者和非吸烟者。戒烟者在足够戒烟期后EEG显示出可恢复的变化,提出了戒烟后的大脑活动存在一定的可逆性观点。然而,吸烟者在戒断期常伴随尼古丁戒断症状,如烟瘾增加和认知控制能力下降^[35],这些症状不仅增加了戒烟的难度,还可能导致复吸。为了更好地理解这些影响,Liu等^[36]通过Go/NoGo任务中的ERP分析,研究了青少年吸烟者在戒烟12 h后抑制控制能力的变化,结果显示,戒断12 h后,青少年吸烟者的N200潜伏期显著延长,提示戒断对抑制控制的负面影响,进而可能影响戒烟的成功率。

1.3 认知功能分析应用

尼古丁成瘾对认知功能的影响具有复杂性。急性尼古丁摄入能够短期内提升注意力和记忆力,但长期使用则会引起尼古丁依赖,从而造成认知功能受损^[37]。多项研究表明,吸烟者的EEG和抑制控制能力发生显著改变^[38-39],但关于静息状态下 α 相干性与青少年吸烟者抑制控制能力之间的具体联系仍然了解甚少。Wang等^[40]通过记录青少年吸烟者的静息态EEG,评估其 α 相干性变化,并通过Go/NoGo任务评估其抑制控制能力,以探讨 α 相干性与抑制控制表现

之间的关系。结果发现,青少年吸烟者抑制控制能力下降,前额叶-顶叶 α 相干性增加,且相关分析显示额叶区域的 α 相干性与NoGo任务中的错误数呈负相关。此外,Mashhoon等^[41]提出吸烟年龄对反应冲动性和抑制性控制的影响,研究发现,早期吸烟者在准确响应Go刺激、抑制吸烟相关刺激以及中性NoGo刺激的反应时,表现出比晚期吸烟者更大的困难。这表明早期吸烟者的反应冲动性增加,注意力下降,且反应抑制控制能力存在明显缺陷。

感知学习是一种特殊的非陈述性学习,与感官皮层的经验依赖性、神经可塑性有关。Beer等^[42]认为尼古丁通过作用于乙酰胆碱受体,可能有助于提高感知学习中的记忆巩固效果,并通过纹理辨别任务来评估尼古丁对学习记忆巩固的影响。研究发现,尼古丁组的P300波峰比对照组更早(570 ms vs 630 ms),这表明在感知学习的记忆巩固中急性尼古丁起促进作用。

2 EEG在尼古丁成瘾领域的技术研究现状

EEG技术可以有效预测尼古丁成瘾者的烟瘾程度^[43],并在尼古丁成瘾预测和干预方面起重要作用。随着EEG技术的快速发展,尼古丁成瘾研究也在快速推进。常用的EEG方法包括PSD、ERP以及功能连接(Functional Connection, FC)等。这些技术通过实时监测和动态分析脑电活动,深入揭示成瘾行为的神经机制,为成瘾干预提供科学依据。

2.1 基于EEG的PSD分析

PSD在尼古丁成瘾研究领域较为广泛,其可以通过不同频段的EEG与特定的认知功能或状态相结合,从而在成瘾干预和治疗中发挥重要作用^[44]。Zhang等^[45]通过对尼古丁成瘾者睡眠EGG进行PSD分析发现,吸烟者在睡眠期间的 α 功率百分比高于非吸烟者,而 δ 功率百分比比较低。在NREM睡眠期间,吸烟者表现出较少的 α 功率和更多的 δ 功率。Meng等^[46]通过额叶静息态 θ -PSD分析,研究了神经反馈训练在治疗尼古丁成瘾的神经机制。研究表明,经过两次神经反馈后,额叶和顶后区域的静息态 θ -PSD发生了显著变化,且进一步统计分析发现神经反馈训练前后的 θ -PSD存在显著的正相关。此外,Hasan等^[47]在脑电域分析识别吸烟者和非吸烟者的研究中提出,吸烟者的PSD和快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)明显高于非吸烟者。

2.2 基于EEG的ERP分析

ERP是一种特殊的脑诱发电位,通常与特定的感觉、认知以及运动相关的事件密切相关^[48-49]。在尼古丁成瘾研究中,ERP技术可以用于深入分析尼古丁和

吸烟对大脑认知过程的影响。通过记录大脑对特定刺激(如吸烟相关图片或声音)的时间锁定反应,ERP能够精确捕捉尼古丁成瘾者在认知、情感和行为上的神经活动变化。

Walter^[50]于1960年首次发表了关于认知ERP成分的研究,以此为契机,开启了ERP研究的新纪元。1982年,Woodson等^[51]首次提出尼古丁对视觉诱发电位(Visual Evoked Potential, VEP)的影响,主要表现在VEP波幅和潜伏期的变化。然而,尼古丁对VEP波幅的影响也因个体而异,尤其是在吸烟者与非吸烟者之间^[52]。Durukan等^[53]指出,在急性吸烟期后,与VEP相关的P100振幅降低,潜伏期增加。此外,Eski等^[54]通过评估最近吸烟率升高对VEP的影响发现,尽管对照组和吸烟组患者左右眼P100潜伏期均延长,但差异无统计学意义。Rajbhandari等^[55]在吸烟状况与VEP和视觉反应时间(Visual Reaction Time, VRT)关系的研究中提出,吸烟者的VRT较非吸烟者更短,但VEP与非吸烟者相似。文献综述表明,吸烟对VEP振幅和潜伏期的影响尚无最终共识。

尼古丁成瘾不仅会影响VEP,还会影响听觉诱发电位(Auditory Evoked Potentials, AEP)。AEP是在听觉系统受到声音刺激时,大脑皮层所产生的电信号。作为一种兴奋剂,尼古丁对AEP的波幅^[56],潜伏期及不同的AEP成分都会产生一定的影响^[57]。通过对比吸烟者在吸烟前后EEG和AEP的变化,Domino^[58]发现吸烟者在短期戒烟后,与AEP相关的P3响应较差,但在恢复吸烟后得到了增强。表明吸烟倾向于恢复戒烟者的认知功能,但并不能超过非吸烟者。此外,Kodaira等^[59]就尼古丁是否能逆转老年小鼠皮层神经振荡的年龄相关变化问题做出研究,其中包括老年听力损失问题。结果显示,尼古丁能够逆转老年小鼠EEG的衰老相关变化,但对听觉脑干响应无显著影响。可能是因为短期急性尼古丁摄入对AEP影响不显著。

2.3 基于EEG的FC分析

FC是指大脑不同区域之间在执行特定任务或是静息状态时的同步活动,是描述电极与电极或脑区与脑区之间信号的统计学关系,它反映相关脑区在处理信息过程中的相关关系与协调工作方式。

尼古丁成瘾背后的神经机制一直备受关注,而相干性分析是研究脑区FC的重要手段,在理解成瘾行为的神经基础上发挥了关键作用。Bu等^[60]在研究中表明,低 θ 脑电相干性能够显著预测尼古丁成瘾者的香烟渴求变化。而Li等^[61]在探讨尼古丁成瘾催眠治疗的神经基础研究中发现,催眠诱导的吸烟厌恶暗示会引起EEG中 δ 和 θ 频率的相干性显著增加, α

和 β 频率的相干性显著降低。这种变化可能反映了催眠诱导后意识的改变。更重要的是,右额叶和左后区之间的 δ 一致性能够预测催眠厌恶暗示后对香烟渴求的减少。此外,Li等^[62]在研究催眠疗法对尼古丁成瘾疗效的过程中,将功能性磁共振成像(functional Magnetic Resonance Imaging, fMRI)和EEG相结合,得出催眠疗法增加前额叶-岛叶之间FC的结论。类似结果在其他影像学研究中也得到验证,许多fMRI研究通过静息态和任务态的FC分析,揭示了尼古丁成瘾对青少年脑网络的影响^[63-64],验证了成瘾行为对FC的改变。这些研究结果表明,FC的变化在尼古丁成瘾的治疗和干预中起着重要作用。

3 总结与发展趋势

本文综述了近年来利用EEG在尼古丁成瘾研究领域中的研究进展。首先,概述了EEG在该领域中的应用研究现状,包括睡眠分析、急性尼古丁与吸烟戒断效应及认知功能评估等方面的研究成果。其次,介绍了EEG在尼古丁成瘾研究中的技术研究现状,特别是基于EEG的PSD、ERP和FC等方法的应用。最后,本文对研究的内容进行了总结,并探讨了未来的研究方向。未来的研究可以进一步提高对尼古丁成瘾干预与治疗,以更好地应对尼古丁成瘾对人类健康带来的危害。

尼古丁成瘾的EEG研究在理解尼古丁对大脑的作用机制、成瘾过程以及戒断症状中起着重要作用。然而,这一研究领域在展现出广阔研究前景的同时也面临着诸多挑战。首先,EEG本质上是复杂易变的,且与个体差异、环境因素和精神状态等多重因素有关。例如,尼古丁对EEG活动的影响可能在不同个体、不同脑区之间表现出异质性,使研究难度增加。其次,传统EEG数据分析方法如PSD和ERP可能无法全面捕捉尼古丁对复杂神经网络的影响,现有方法的局限性可能导致对尼古丁作用机制的理解不够深入。尼古丁成瘾是一个长期、渐进的过程,研究其对大脑的长期影响需要长期随访和复杂的实验设计。由于伦理和实践的限制,长时间开展动态研究具有一定挑战性。戒断期间的EEG变化复杂多样,不同个体表现出的戒断症状及其对应的脑电模式存在显著差异,增加了对戒断过程研究的难度。尽管EEG在时间分辨率上具有优势,但在空间分辨率上存在不足,如何将EEG技术与其他成像技术(如fMRI、PET)相结合,以获得更全面的脑功能机制,仍然是一大难题。

未来的研究应该更加关注个体差异,探索个性化研究与干预将更有助于全面理解尼古丁成瘾机

制,同时,借助机器学习和深度学习等主流算法,研究者可以更好地处理和分析复杂的EEG数据,精准识别出尼古丁成瘾相关的特定模式。这些技术不仅可以预测成瘾行为的发展、评估个体对戒烟治疗的反应,而且还能帮助识别潜在的治疗靶点。其次,随着技术的进步,便携式EEG设备的普及将使得大规模、长期的现场研究成为可能。未来的研究可以更容易在自然环境中采集数据,从而更真实地反映尼古丁成瘾对人们在日常生活中认知功能的影响。最后,EEG技术可以提供更精细的时间分辨率,与fMRI等技术的多模态融合将进一步提升尼古丁成瘾EEG研究的深度和广度。

【参考文献】

- [1] Tiwari RK, Sharma V, Pandey RK, et al. Nicotine addiction: neurobiology and mechanism[J]. J Pharmacopuncture, 2020, 23(1): 1-7.
- [2] GBD 2019 Chronic Respiratory Diseases Collaborators. Global burden of chronic respiratory diseases and risk factors, 1990-2019: an update from the global burden of disease study 2019[J]. EClinicalMedicine, 2023, 59: 101936.
- [3] Le Foll B, Piper ME, Fowler CD, et al. Tobacco and nicotine use[J]. Nat Rev Dis Primers, 2022, 8(1): 19.
- [4] McGrath-Morrow SA, Gorzkowski J, Groner JA, et al. The effects of nicotine on development[J]. Pediatrics, 2020, 145(3): e20191346.
- [5] Leslie FM. Unique, long-term effects of nicotine on adolescent brain[J]. Pharmacol Biochem Behav, 2020, 197: 173010.
- [6] Rass O, Ahn WY, O'Donnell BF. Resting-state EEG, impulsiveness, and personality in daily and nondaily smokers[J]. Clin Neurophysiol, 2016, 127(1): 409-418.
- [7] 王正玺. 青少年吸烟成瘾者抑制控制缺失的脑电生理特征研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2023.
Wang ZX. The EEG study of inhibition control impairments in adolescent smokers [D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2023.
- [8] Robbins TW, Ersche KD, Everitt BJ. Drug addiction and the memory systems of the brain[J]. Ann N Y Acad Sci, 2008, 1141: 1-21.
- [9] Xue YX, Deng JH, Chen YY, et al. Effect of selective inhibition of reactivated nicotine-associated memories with propranolol on nicotine craving[J]. JAMA Psychiatry, 2017, 74(3): 224-232.
- [10] 张士迪. 基于PSG的青少年吸烟成瘾者的睡眠状态研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2022.
Zhang SD. Sleep status of adolescent smoking addicts based on PSG [D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2022.
- [11] Picciotto MR, Kenny PJ. Mechanisms of nicotine addiction[J]. Cold Spring Harb Perspect Med, 2021, 11(5): a039610.
- [12] Dousset C, Kajosch H, Ingels A, et al. Preventing relapse in alcohol disorder with EEG-neurofeedback as a neuromodulation technique: a review and new insights regarding its application[J]. Addict Behav, 2020, 106: 106391.
- [13] Yang BH, Gu XL, Xu D, et al. A study on EEG-NIRS testing of drug users' brain function under visual induction[C]//Proceedings of the 2020 9th International Conference on Computing and Pattern Recognition. New York, NY, USA: ACM, 2021: 85-89.
- [14] Marvi N, Haddadnia J. The quantification of the effect of substance abuse on brain behavior based on electroencephalogram signals: a comprehensive review [J]. J Fundam Ment Health, 2022, 24(6): 361-70.
- [15] 姜垣, 刘黎香. 全面无烟是全民健康的保障[J]. 中华流行病学杂志, 2017, 38(5): 565-566.
Jiang Y, Liu LX. Importance of smoke-free for healthy China [J]. Chinese Journal of Epidemiology, 2017, 38(5): 565-566.
- [16] Soufineyestani M, Dowling D, Khan A. Electroencephalography (EEG) technology applications and available devices[J]. Appl Sci, 2020, 10(21): 7453.
- [17] 陈泉宇, 随力, 李丽. 脑电神经反馈训练在提高工作记忆中应用的研究与挑战[J]. 中国医学物理学杂志, 2022, 39(8): 987-991.
Chen XY, Sui L, Li L. Advances and challenges of EEG neurofeedback training in improving working memory [J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2022, 39(8): 987-991.
- [18] 刘灿灿, 张芸芸, 赵广超, 等. 脑内 θ 振荡与学习记忆的关系研究进展[J]. 神经解剖学杂志, 2022, 38(1): 103-106.
Liu TT, Zhang YY, Zhao GC, et al. Research progress on the relationship between brain θ oscillations and learning and memory[J]. Chinese Journal of Neuroanatomy, 2022, 38(1): 103-106.
- [19] Conley AC, Key AP, Taylor WD, et al. EEG as a functional marker of nicotine activity: evidence from a pilot study of adults with late-life depression[J]. Front Psychiatry, 2021, 12: 721874.
- [20] Page S, Gibson M, Munafò MR, et al. Exploring the role of nicotine and smoking in sleep behaviours: a multivariable Mendelian Randomisation study[J/OL]. medRxiv. (2024-08-02). <https://doi.org/10.1101/2024.08.01.24311349>.
- [21] Singh N, Wanjari A, Sinha AH. Effects of nicotine on the central nervous system and sleep quality in relation to other stimulants: a narrative review[J]. Cureus, 2023, 15(11): e49162.
- [22] Lossius K, de Saint Martin A, Myren-Svelstad S, et al. Remarkable effect of transdermal nicotine in children with CHRNA4-related autosomal dominant sleep-related hypermotor epilepsy[J]. Epilepsy Behav, 2020, 105: 106944.
- [23] Choi JB, Lee YJ, Jeong DU. Transdermal nicotine patch effects on EEG power spectra and heart rate variability during sleep of healthy male adults[J]. Psychiatry Investig, 2017, 14(4): 499-505.
- [24] Truong MK, Berger M, Haba-Rubio J, et al. Impact of smoking on sleep macro- and microstructure[J]. Sleep Med, 2021, 84: 86-92.
- [25] O'Reilly C, Chapotot F, Pittau F, et al. Nicotine increases sleep spindle activity[J]. J Sleep Res, 2019, 28(4): e12800.
- [26] 包畅, 张思敏, 王丹, 等. 丘脑网状核介导睡眠纺锤波形成的机制研究进展[J]. 神经解剖学杂志, 2022, 38(2): 237-240.
Bao C, Zhang SM, Wang D, et al. Rearearch progress on the mechanism of thalamic reticular nucleus mediating sleep spindle formation[J]. Chinese Journal of Neuroanatomy, 2022, 38(2): 237-240.
- [27] Knott V, Impey D, Philippe T, et al. Modulation of auditory deviance detection by acute nicotine is baseline and deviant dependent in healthy nonsmokers: a mismatch negativity study [J]. Hum Psychopharmacol, 2014, 29(5): 446-458.
- [28] Bowers H, Smith D, de la Salle S, et al. COMT polymorphism modulates the resting-state EEG alpha oscillatory response to acute nicotine in male non-smokers[J]. Genes Brain Behav, 2015, 14(6): 466-476.
- [29] Griesar WS, Zajdel DP, Oken BS. Nicotine effects on alertness and spatial attention in non-smokers[J]. Nicotine Tob Res, 2002, 4(2): 185-194.
- [30] Meinke A, Thiel CM, Fink GR. Effects of nicotine on visuo-spatial selective attention as indexed by event-related potentials [J]. Neuroscience, 2006, 141(1): 201-212.
- [31] Donohue SE, Harris JA, Loewe K, et al. Electroencephalography reveals a selective disruption of cognitive control processes in craving cigarette smokers[J]. Eur J Neurosci, 2020, 51(4): 1087-1105.
- [32] Lee H, Jeon Y, Yoo C, et al. Persistent and reversible impacts of smoking on resting-state EEG in chronic smokers and successful long-term abstainers [J/OL]. medRxiv. (2022-06-21). <https://doi.org/10.1101/2022.06.19.22276601>.
- [33] Oliver JA, Evans DE, Addicott MA, et al. Nicotine withdrawal induces neural deficits in reward processing[J]. Nicotine Tob Res, 2017, 19(6): 686-693.
- [34] Lee H, Jeon Y, Yoo C, et al. Persistent impacts of smoking on resting-state EEG in male chronic smokers and past-smokers with 20 years of abstinence[J]. Sci Rep, 2023, 13(1): 3907.
- [35] Cui YT, Dong F, Li XJ, et al. Electrophysiological evidence of event-related potential changes induced by 12 h abstinence in young smokers based on the flanker study[J]. Front Psychiatry, 2020, 11: 424.
- [36] Liu C, Dong F, Li YD, et al. 12 h abstinence-induced ERP changes in young smokers: electrophysiological evidence from a Go/NoGo study [J]. Front Psychol, 2019, 10: 1814.
- [37] Yin JS, Yuan K, Feng D, et al. Inhibition control impairments in

- adolescent smokers: electrophysiological evidence from a Go/NoGo study[J]. *Brain Imaging Behav*, 2016, 10(2): 497-505.
- [38] Dong F, Li XJ, Zhang YM, et al. Abnormal resting-state EEG power and impaired inhibition control in young smokers[J]. *Neurosci Lett*, 2021, 761: 136120.
- [39] 刘畅, 董芳, 王宪福, 等. 基于 Go/NoGo 任务的青年吸烟者抑制控制能力的事件相关电位研究[J]. *中国医学物理学杂志*, 2019, 36(10): 1228-1232.
- Liu C, Dong F, Wang XF, et al. Event-related potential study on inhibitory control ability of adolescent smokers based on Go/NoGo task[J]. *Chinese Journal of Medical Physics*, 2019, 36(10): 1228-1232.
- [40] Wang ZX, Dong F, Sun YN, et al. Increased resting-state alpha coherence and impaired inhibition control in young smokers[J]. *Front Neurosci*, 2022, 16: 1026835.
- [41] Mashhoon Y, Betts J, Farmer SL, et al. Early onset tobacco cigarette smokers exhibit deficits in response inhibition and sustained attention [J]. *Drug Alcohol Depend*, 2018, 184: 48-56.
- [42] Beer AL, Vartak D, Greenlee MW. Nicotine facilitates memory consolidation in perceptual learning[J]. *Neuropharmacology*, 2013, 64: 443-451.
- [43] Luigjes J, Segrave R, de Joode N, et al. Efficacy of invasive and non-invasive brain modulation interventions for addiction [J]. *Neuropsychol Rev*, 2019, 29(1): 116-138.
- [44] Mokhtar AS, Fuad N, Marwan ME, et al. Electroencephalogram (EEG) pattern for human smoke habit[EB/OL]. <http://eprints.uthm.edu.my/7289/1/6.pdf>.
- [45] Zhang L, Samet J, Caffo B, et al. Power spectral analysis of EEG activity during sleep in cigarette smokers[J]. *Chest*, 2008, 133(2): 427-432.
- [46] Meng QJ, Zhu Y, Yuan Y, et al. Resting-state electroencephalography theta predicts neurofeedback treatment 4-month follow-up response in nicotine addiction[J]. *Gen Psychiatr*, 2023, 36(4): e101091.
- [47] Hasan MM, Hasan N, Rahman A, et al. Effect of smoking in EEG pattern and time-frequency domain analysis for smoker and non-smoker [C]//2019 International Conference on Computer, Communication, Chemical, Materials and Electronic Engineering (IC4ME2). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2019: 1-4.
- [48] Helfrich RF, Knight RT. Cognitive neurophysiology: event-related potentials[J]. *Handb Clin Neurol*, 2019, 160: 543-558.
- [49] Tüttenberg SC, Wiese H. Event-related brain potential correlates of the other-race effect: a review[J]. *Br J Psychol*, 2023, 114 Suppl 1: 24-44.
- [50] Walter WG. The control of consciousness[J]. *Anaesthesia*, 1960, 15: 105-122.
- [51] Woodson PP, Bättig K, Rosecrans JA. Effects of nicotine on visually evoked EEG potentials[J]. *Soz Praventivmed*, 1982, 27(5): 242-243.
- [52] Knott V, Shah D, Fisher D, et al. Nicotine and attention: event-related potential investigations in nonsmokers[J]. *Clin EEG Neurosci*, 2009, 40(1): 11-20.
- [53] Durukan AH, Gundogan FC, Erdem U, et al. The acute effect of cigarette smoking on pattern visual evoked potentials [J]. *Doc Ophthalmol*, 2006, 112(1): 23-29.
- [54] Eski MT, Yabalak A, Şahan H, et al. Effects of smoking on pattern visual evoked potentials[J]. *Med Rec*, 2023, 5(2): 299-303.
- [55] Rajbhandari Pandey K, Panday DR, Limbu N, et al. Effect of smoking on visual evoked potential (VEP) and visual reaction time (VRT)[J]. *Asian J Med Sci*, 2020, 11(2): 9-13.
- [56] Baiduc RR, Mullervy S, Berry CM, et al. An exploratory study of early auditory evoked potentials in Cannabis smokers[J]. *Am J Audiol*, 2020, 29(3): 303-317.
- [57] Potgurski DS, Ribeiro GE, Silva DP. Occurrence of changes in the auditory evoked potentials of smokers: systematic review of the literature[J]. *Codas*, 2023, 35(4): e20210273.
- [58] Domino EF. Effects of tobacco smoking on electroencephalographic, auditory evoked and event related potentials[J]. *Brain Cogn*, 2003, 53(1): 66-74.
- [59] Kodaira M, Tsuruhara A, Motomura E, et al. Effects of acute nicotine on prepulse inhibition of auditory change-related cortical responses [J]. *Behav Brain Res*, 2013, 256: 27-35.
- [60] Bu JJ, Ma R, Fan C, et al. Low-theta electroencephalography coherence predicts cigarette craving in nicotine addiction[J]. *Front Psychiatry*, 2019, 10: 296.
- [61] Li XM, Ma R, Pang LJ, et al. Delta coherence in resting-state EEG predicts the reduction in cigarette craving after hypnotic aversion suggestions[J]. *Sci Rep*, 2017, 7(1): 2430.
- [62] Li XM, Chen LJ, Ma R, et al. The top-down regulation from the prefrontal cortex to insula via hypnotic aversion suggestions reduces smoking craving[J]. *Hum Brain Mapp*, 2019, 40(6): 1718-1728.
- [63] 胡一婷. 基于静息态功能连接的青少年吸烟成瘾者大脑奖赏系统研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2022.
- Hu YT. Research on the brain reward circuits of adolescent smoking addicts based on resting-state functional connectivity[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2022.
- [64] 解晓燕. 基于动态功能连接的青少年吸烟者静息态脑网络研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2022.
- Xie XY. Research on the resting state brain network of adolescent smokers based on dynamic functional connection[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2022.

(编辑: 薛泽玲)