

附录

附录 1 fNIRS 在脑激活模式评定中的可用性研究

作者	领域	研究目的	任务环境	被试	研究方法	结果简要	研究意义	其他技术指标
Hamann & Carstengerdes, 2022	心理负荷	研究通过控制心理疲劳, 分析逐步增加的心理负荷对 PFC 激活的影响。	模拟飞行	普通人员	被试执行飞行模拟任务时, 完成 n-back 和监测任务, fNIRS 用于评估其心理负荷。	随任务难度增加, 被试主观心理负荷得分越高, 绩效下降, 前额 θ 活动越高, PFC 的 HbR 浓度降低。	研究结果强调了在航空航天领域对机组人员的生理测量的实际效益。	EEG
Li et al., 2022	心理负荷	研究旨在结合 fNIRS 和 ECG 来检测在模拟飞行中个体多任务处理时心理负荷的变化。	模拟飞行	普通人员	被试在不同心理负荷水平下完成多任务测试, fNIRS 用于评估其心理负荷。	与低心理负荷条件的多任务处理相比, 被试在高心理负荷多任务处理中表现出更高的主观心理负荷报告得分、心率和 PFC 激活程度 (通过 HbO 变化来衡量), 绩效表现更差 (更长的反应时、更少的反应次数等)。	心率和 PFC 激活可用于检测在模拟飞行中个体多任务处理时心理负荷的变化。	ECG
Sun et al., 2019	工作负荷、认知疲劳	研究飞行员静态直立平衡功能和脑血氧参数对飞行负荷的影响。	模拟飞行 vs 实际飞行	1. 飞行员 2. 普通人员	1. NASA-TLX 用于评估比较被试在真实飞行与模拟飞行任务的工作负荷; 2. 平衡系统姿态记录仪和 fNIRS 用于评估模拟飞行任务组和休息组间的工作负荷。其中模拟飞行任务被试需要完成 4 项不同任务, 包括持续监控仪器、执行紧急任务、持续跟踪飞行目标和执行其他要求的任务。	1. 真实飞行和模拟飞行任务引起的工作负荷之间存在显著相关性; 2. 与休息组相比, 实验组在模拟飞行任务中的 rSO ₂ 更高以及 Δ HbR 降低更多。	模拟飞行任务能够模拟真实飞行任务的负荷和静态平衡, fNIRS 可用于评估飞行员的负荷/疲劳。	
Causse et al., 2017	心理负荷	改进 N-back 任务(数学计算结果代替经典 N-back 记忆内容)使其能针对飞行员等高脑力工作者测试其心理负荷。	实验室任务	普通人员	被试完成 3 种不同难度的 N-back 任务 (0-back、1-back、2-back), fNIRS 用于评估其心理负荷。	随任务难度增加, 被试认知能力下降, 表现为感受性 d'(Z 击中-Z 虚报)降低, 反应时增加, PFC 氧合水平增加, 特别地, 2-back 下, 左右 PFC 的 HbO 浓度变化均高于中心 PFC 处。	改进后的 N-back 任务能够产生高强度和持续性的心理负荷, 可以用来评估飞行员等个体的心理负荷。	眼动

附录 1（续）

作者	领域	研究目的	任务环境	被试	研究方法	结果简要	研究意义	其他技术指标
Causse et al., 2018	心理负荷、神经效率	考察飞行员在执行任务时与其心理负荷相关的大脑激活变化。	模拟飞行 vs. 实验室任务	飞行员	被试执行两种场景的任务：飞行场景(两种不同认知需求的着陆任务-容易着陆(无侧风和能见度高)；困难着陆(强烈侧风和能见度低))；实验室场景(选用 CANTAB 测试中空间能力测试和执行功能测试)。fNIRS 用于评估其心理负荷。	任务变得复杂时，PFC 的 HbO 浓度增加，HbR 浓度降低。但 PFC 激活强度(HbO 浓度)与任务表现的相关性不显著。	fNIRS 可应用于评估心理负荷，且可作为测量神经效率的一种工具。	
Ahlstrom et al., 2016	认知参与、决策	评估舱内使用便携式天气应用程序对飞行员行为的影响。	模拟飞行	飞行员	实验组被试使用手持便携式天气应用程序(该程序包括航空常规天气报告等，被试可以通过显示变焦来调节能见度、温度、结冰概率等图像);对照组被试没有天气应用程序。被试在视觉气象条件下驾驶飞机执行任务，同时避免危险天气，fNIRS 用于评估被试执行任务时心理负荷。	实验组的 PFC 氧合水平(HbO-HbR)显著高于对照组。.	研究结果支持了可以使用便携式天气显示程序而不会降低飞行员在与安全相关的飞行任务，行动和决策上的表现。	
Ahlstrom, 2015	认知参与	探讨天气显示符号的可识别性，评估天气显示符号对飞行员行为和决策的影响。	模拟飞行	飞行员	不同被试组使用不同的天气符号(即符号和颜色)，fNIRS 用于评估被试认知参与的同时测量被试天气显示使用、交流、天气回避等行为指标。	飞行员组在天气偏差，认知参与和天气显示使用方面存在差异(其中不同组间氧合水平存在差异)。	天气显示中的符号和颜色变化会导致感知不对称，从而影响飞行员的行为和决策。	
Durantín et al., 2014	心理负荷	评估 fNIRS 与 HRV 联合使用对飞行员在飞行模拟任务过程中心理负荷的预测潜力。	实验室任务	普通人员	被试执行驾驶飞机追随相同或无颜色目标飞机，同时需要对听觉警告信号作出反应。任务难度通过处理负荷和控制难度两个方面操纵。fNIRS 用于评估其心理负荷。	HbO 浓度和 HRV 对不同水平的心理负荷均敏感，HbO 随任务难度增加而增加，但在最高难度水平下 HbO 浓度下降以及 LF/HF 比率较低。	本研究显示了 fNIRS 进行实验的可行性，以及使用互补的行为(认知)和生理测量得出操作者功能状态的可能性。	HRV
Ayaz et al., 2012	心理负荷	研究心理负荷和专业知 识(相对水平的练习)对背外侧和腹外侧 PFC 血流动力学反应的影响。	模拟飞行	普通人员	1. fNIRS 用于评估其心理负荷。评估心理负荷：被试完成视觉识别 N-back 任务和两类 ATC 任务(语音和数据通信); 2. fNIRS 用于评估其心理负荷。评估专业知识：被试执行无人机模拟进近任务与模拟着陆任务。	随任务难度增加，结果显示出任务准确性的单调下降和响应时间增加，被试的 PFC 氧合水平(HbO-HbR)增加。	本文所报告的方法为开发复杂人机界面系统的必要战略需求提供了指导，并有助于评估操作员的绩效标准。	

附录 1（续）

作者	领域	研究目的	任务环境	被试	研究方法	结果简要	研究意义	其他技术指标
Menda et al., 2011	认知负荷	评估 fNIRS 对无人机飞行过程中(机载摄像和追逐视图)认知负荷高低状态的敏感性。	无人机模拟飞行	普通人员	被试分别在实验(追逐视图)条件、控制(机载摄像)条件下模拟飞行，fNIRS 用于评估被试的认知状态，同时记录被试模拟飞行的事件信息、飞机姿态高度和速度，以及控制器的运动数据。	被试在机载摄像条件下的平均氧合水平(HbO-HbR)高于追逐视图条件下，表明机载摄像条件下产生更高的认知负荷。	fNIRS 在无人机操作员执行视觉搜索/警戒任务中能够区分高低认知负荷。fNIRS 可能成为监测和改善无人机操作中人为因素的有力工具。	
Kikukawa et al., 2008	认知负荷	在考虑运动伪迹的情况下，使用 fNIRS 检查直升机飞行员在实际飞行过程中的认知相关的 PFC 血氧状态。	实际飞行	飞行员	被试驾驶 BK117 和 UH-60J 单旋翼直升机进行空中检查(包含驾驶舱休息，滑行，起飞，水平飞行，接近山顶和着陆)，进行了 9 架次飞行。fNIRS 用于评估其认知负荷。	随着直升机飞行认知需求的提高，被试的 HbO 浓度逐渐升高，HbR 浓度的变化相对较小。	fNIRS 为直升机飞行员的认知需求监测提供可行性。	
Takeuchi, 2000	心理压力	使用 fNIRS 测量了被试在压力任务中 PFC 血氧状态的变化。	模拟飞行	飞行员	被试在不同侧风难度下降落，设置 4 种风速：低难度，中低难度(21.6km / h)，中等高难度(28.8km / h)以及高难度(36.0 km / h)。fNIRS 用于评估其心理压力。	左 PFC 的 HbO 浓度随着风速的增加而增加，右 PFC 的 HbO 浓度和左右 PFC 的 HbR 浓度几乎没有变化。	fNIRS 测定的大脑氧合程度与心理压力的强度相对应。	
Reddy et al., 2022	技能训练水平、个体差异	研究旨在利用生态有效的双重任务、行为和大脑活动测量来研究技能习得和迁移的个体差异的影响。	无人机模拟飞行	普通人员	被试完成 3 个简单和 2 个困难的无人机模拟飞行任务（搜索和监视），其中简单和复杂任务主要区别在于实验模拟发生时间，简单任务发生在模拟的上午 11：00，而困难任务发生在模拟的晚上 8：00 或早上 6：00，fNIRS 用于评估其心理负荷。	任务练习可以改善行为绩效，PFC 的 HbO 浓度降低。此外，复杂任务会引起 PFC 内多区域的资源召集，特别是左前内侧 PFC，其 HbO 浓度增加，可能与任务切换有关。	多任务训练会导致个体差异，这些差异可能是由于个人偏好造成的。未来的研究应在评估多任务训练中的技能习得和迁移时考虑个体差异。	

附录 1 (续)

作者	领域	研究目的	任务环境	被试	研究方法	结果简要	研究意义	其他技术指标
Causse et al., 2019	飞行经验/ 技能训练 水平	调查飞行员群体中与年龄相关的执行绩效变化,以评估潜在认知随年龄增加的风险。	实验室任务	飞行员	三个年龄段(年轻,中年,年龄较大)被试完成 CANTAB 测试中两项任务(空间工作记忆能力和执行功能),fNIRS 用于评估被试 PFC 的 HbO 浓度变化。	被试 PFC 活动倾向随着任务难度增加而增加,任务绩效下降,HbO 增加;与年轻飞行员相比,老年飞行员在完成 CANTAB 测试时行为绩效较差,PFC 活动存在峰值(上限);当年龄组之间的行为表现相当或较年轻组仅轻微受损时,PFC 活动没有任务与年龄相关的差异。	有助于评估年长飞行员相比年轻飞行员可能增加的认知风险;飞行员的专业知识可能有助于维持认知能力。	
Choe et al., 2016	飞行经验/ 技能训练 水平	测试 tDCS 是否可以通过调节神经元功能,以改善飞机着陆程序的飞行模拟器训练期间的技能学习和绩效表现。	模拟飞行	普通人员	被试被随机分配四组之一:DLFPC 刺激、DLFPC 安慰、M1 刺激和 M1 安慰。所有被试每天进行一次模拟飞行训练,共 4 天。fNIRS 和 EEG 用来评估被试完成飞行模拟任务和 N-back 任务诱发的功能活动变化。	DLFPC 刺激组被试轻松着陆任务中 DLFPC 通道中 HbO 和 Hbtot 浓度减少。	tDCS 产生了更有效的神经激活,以巩固新学习的程序技能;通过 tDCS 可以提高认知和现实任务中技能的学习率;建立神经元功能与行为的联系。	EEG, tDCS,EOG
Hernandez-Meza et al., 2015	飞行经验/ 技能训练 水平	使用 fNIRS 评估被试学习模拟驾驶任务期间,其 PFC 的血流动力学反应与心理负荷,专业水平和任务绩效的变化之间的关系。	模拟飞行	普通人员	被试完成飞行模拟任务,包含遵守空中交通管制员提供的航向和高度,导航至航路点,控制垂直速度,完成平稳转弯以及遵守 C130-J 的安全准则。fNIRS 用于评估其 PFC 氧合水平。	在飞行模拟器任务中,被试的 PFC 氧合水平(HbO-HbR)随着专业技能发展而降低。	揭示了使用飞行模拟器进行飞行的复杂认知任务期间,飞行员专业技能发展对 PFC 皮层中血液动力学响应的影响。	

注: CANTAB: Cambridge Neuropsychological Test Automatic Battery, 剑桥自动化成套神经心理测试; DLPFC: Dorsolateral Prefrontal Cortex, 背外侧前额叶皮层; ECG: Electrocardiogram, 心电图; EEG: Electroencephalogram, 脑电; EOG: electro-oculogram, 眼电; fNIRS: functional near-infrared spectroscopy, 功能性近红外光谱; HbO: oxy-hemoglobin, 氧合血红蛋白; HbR: deoxy-hemoglobin, 脱氧血红蛋白; Hbtot: total hemoglobin concentrations, 总血红蛋白浓度; HF: high frequency, 高频; HRV: heart rate variability, 心率变异性; LF: low frequency, 低频; M1: motor cortex, 运动皮层; NASA-TLX: NASA Task Load Index, NASA 任务负荷指数; PFC: prefrontal cortex, 前额叶皮层; rSO₂: regional cerebral oxygen saturation, 脑组织血氧饱和度; tDCS: transcranial direct current stimulation, 经颅直流电刺激。

附录 2 fNIRS 在识别脑激活模式中的准确性研究

作者	领域	研究目的	任务环境	被试	研究方法	BCI 算法	结果简要	研究意义	其他技术指标
Pan et al., 2022	认知疲劳	开展基于 fNIRS 的飞行员疲劳状态研究。	模拟飞行	飞行员	利用 fNIRS 记录飞行任务中飞行员 HbO 的变化, 对数据进行预处理, 确定有效样本 1080 个, 提取各通道 HbO 的均值、方差、标准差等, 将这些指标作为 SDAE 的输入, 用于训练飞行员疲劳状态识别模型。	SDAE、LDA、SVM	SDAE 模型的识别准确率为 91.32%, 比 LDA 模型和 SVM 模型分别高出 23.26% 和 15.97%。结果表明, 所建立的 SDAE 模型具有较高的识别精度, 能够准确识别飞行员的不同疲劳状态。	基于 fNIRS 的飞行员疲劳状态识别对于减少飞行员疲劳导致的飞行事故具有重要的现实意义。	
Verdière et al., 2018	认知参与	在模拟飞行的生态环境中使用 fNIRS 连通性评估飞行员认知参与的可行性。	模拟飞行	飞行员	被试执行手动或自动辅助着陆。fNIRS 用于评估其认知参与。	sLDA	1.手动着陆条件心理负荷显著高于自动着陆条件; 2.单个特征的分类: 基于小波相关性的 HbO 和 HbR 分类准确度平均 65.34% 和 59.94%, 协方差(62.93 和 56.03%), HbO 和 HbR 的曲线下面积(61.76 和 57.83%); 3.组合分类: 最佳组合(协方差-小波相关性)、基于 HbO 和 HbR 分类准确度分别为 66.4% 和 59.8%。	连通性指标比传统的氧合指标有更好的分类性能。	
Dehais et al., 2018	心理负荷、认知疲劳	开发基于 fNIRS-EEG 的 pBCI, 以推断飞行中的认知疲劳。	模拟飞行 vs 实际飞行	飞行员	被试在飞行模拟器和实际的轻型飞机上执行四种交通模式以及次要听觉任务。交通模式区分为高、低认知疲劳等级。fNIRS 用于评估其心理负荷。	基于 fNIRS-EEG 的分类器, sLDA	1.飞行员在实验的高认知疲劳组错过的听觉目标显著高于低认知疲劳组; 2.在飞行模拟器条件下认知疲劳高低的分类精度达到 87.2%, 在实际飞行条件下的分类精度达到 87.6%。	基于 fNIRS 和 EEG 的 pBCI 可以监视嘈杂环境中的心理状态。	EEG
Gateau et al., 2018	工作记忆负荷	实现基于 fNIRS 的在线 pBCI, 以区分高度生态飞机驾驶任务中的两个级别的工作记忆负荷。	模拟飞行 vs 实际飞行	飞行员	被试完成与 ATC 交互任务(高低工作记忆负荷)。fNIRS 用于评估其心理负荷。	SVM, MACD 滤波器	1.在真实的飞行条件下, 飞行员在完成认知要求较高的任务时, 比模拟器中的飞行员犯下了更多的错误, 并且 PFC 的激活程度更高; 2.对单个试验工作记忆负荷分类的评估显示, 在两种实验条件下, 其负荷分类准确性都很高(> 76%)。	在生态有效环境中开发基于 fNIRS 的 pBCI。	

附录 2 (续)

作者	领域	研究目的	任务环境	被试	研究方法	BCI 算法	结果简要	研究意义	其他技术指标
Çakır et al., 2016	心理负荷	1.探索在模拟飞行环境中 fNIRS 实时评估心理负荷的潜力; 2.开发了 LDA 分类器来区分真实飞行模拟场景中低、中、高水平的心 理负荷。	模拟飞行	飞行员	被试执行模拟飞行场景任务, 研究者手动标记低、中、高心 理负荷场景。fNIRS 用于评估 其心理负荷。	LDA	使用单个飞行员的训练模型可以预测其余模拟飞行中 68%情况的心理负荷水平。	fNIRS 在现 实飞行模拟 环境中进行 实时评估心 理负荷的潜 力。	
Durantín et al., 2016	工作记忆负 荷	设计一个卡尔曼滤波器 来改善神经工程学应用 中的 fNIRS 信号。	模拟飞行	飞行员	1.被试执行数字序列记忆任务 时, fNIRS 用于评估其 PFC 活 动。收集的数据用于选择滤波 器参数 Q / R 的值; 2.被试在模拟飞行中执行 ATC 指令(高/低难度), 评估滤波算 法对信号的改善效果。	卡尔曼滤波	与传统的 IIR 滤波器相比, MACD 的统计效果更好; 与 MACD 和 IIR 滤波器相比, 卡尔曼滤波器的使用效果更 好。	卡尔曼滤波 器是一种实 时改善 fNIRS 信号 的合适方 法。	
Gateau et al., 2015	工作记忆负 荷	实现在线 fNIRS 预测系 统, 该系统集成了两个 互补估计器。基于 MACD 的实时状态估计 算法, 旨在识别飞行员的 瞬时心理状态(非任务 与任务状态); 基于 SVM 的在线分类器, 能够区 分任务难度(高低工作记 忆负荷)。	模拟飞行	飞行员	被试执行与 ATC 交互任务(高 低工作记忆负荷)。fNIRS 用于 评估其工作记忆负荷。	基于 MACD 的实时状态估 算; SVM	1.基于 MACD 的实时状态估计算法估计飞行员的心理 状态与其真实状态的匹配度好于随机性(62%的准确 度); 2. SVM 专用于评估单个试验工作记忆负荷, 80%的分 类精度。	这两个估算 器为进一步 基于 fNIRS 的被动脑机 接口开发建 立了可重用 库。	

注: ATC: air traffic control, 空中交通管制; EEG: Electroencephalogram, 脑电; fNIRS: functional near-infrared spectroscopy, 功能性近红外光谱; HbO: oxy-hemoglobin, 氧合血红蛋白; HbR: deoxy-hemoglobin, 脱氧血红蛋白; IIR: Infinite Impulse Response, 无限脉冲响应滤波器; LDA: Linear Discriminant Analysis, 线性判别分析; MACD: Moving Average Convergence Divergence, 移动平均收敛散度; pBCI: passive brain computer interface, 被动脑机接口; PFC: prefrontal cortex, 前额叶皮层; Q: 状态噪声; R: 测量噪声; sLDA: shrinkage Linear Discriminant Analysis, 收缩线性判别分析; SDAE: stacked denoising autoencoder, 堆叠式去噪自编码器; SVM: Support Vector Machine, 支持向量机。

附录 3 fNIRS 在特殊环境中的应用性研究

作者	领域	研究目的	任务环境	被试	研究方法	结果简要	研究意义	其他技术指标
Fresnel et al., 2021*	高过载	探索特技飞行员在经历急性+Gz 暴露其生理反应变化情况	实际飞行	飞行员	个案研究，飞行员在两次执飞任务中完成多个特技飞行机动，以此暴露于急性+Gz。fNIRS 用于评估其过载中的脑组织血氧变化。	被试飞行过程中，连续正、负 Gz 暴露对脑血流动力学改变有很大影响，特别是其与 HbO 浓度显著正相关。	fNIRS 提供了一些有价值的和敏感的指标监测飞行员飞行过程中暴露于多个和高+Gz 情形下的脑血流动力学反应。	
Gerega et al., 2020	高过载/离心训练	fNIRS 评估空军飞行员直立应激和下体负压时脑组织血氧状态	模拟离心功能的下体负压腔(lower body negative pressure)工作台	飞行员和普通人员	被试于工作台经历不同倾斜角度，如 0° ~+70°，0°，+70° ~ -30°。fNIRS 评估不同阶段的脑组织氧合水平。	普通人员在经历不同阶段时相比飞行员的 Hbtot 变化较大，根据 Hbtot 浓度可以将被试 100% 正确区分飞行员或普通人员。	fNIRS 可以作为一种重要的工具来筛选直立耐力和训练提高飞行员的+Gz 耐受性。	
Kobayashi et al., 2012	高过载/离心训练	探索被试在+Gz 暴露期间 fNIRS 记录的一般模式和个体差异。	离心机	飞行学员	被试暴露于+Gz，其中+Gz 水平由离心机的训练程序产生，包括逐渐运作(增长速率：0.1Gz / s)最大为 8Gz；快速运作，短期重复暴露(增长速率 1Gz/s)Gz 水平 4-7Gz 变化。fNIRS 用于评估其高过载过程中的脑组织血氧变化。	多数被试成功执行抗荷动作(anti-g straining maneuver)，并在+Gz 暴露期间保持或增加了 HbO 水平。与 HbO 反应相反，TOI 在 Gz 开始时的抗 G 应变操作期间或在离心机快速运作期间降低。	虽然 fNIRS 是一种有效的监测抗 G 机动性能的工具，但应根据颅内氧合结果谨慎评估。	
Tripp et al., 2009	高过载/离心训练	追踪 G-LOC 期间飞行员的 rSO ₂ 和行动表现。	离心机	普通人员	被试暴露于+Gz，其中+Gz 水平由计算机控制系统生成，包括两个加速度曲线：逐渐增加 0.1Gz/s 建立被试+Gz 容忍度；快速增加 3Gz/s，引起意识丧失。fNIRS 用于评估其高过载过程中的脑组织血氧变化。	在 G-LOC 发生后，离心停止不久，rSO ₂ 恢复到基线水平。然而，性能缺陷持续了 49.45 秒。	利用 rSO ₂ 损失、性能下降和 G-LOC 发作之间的联系开发一种预警系统，使飞行员能够采取有效行动避免 G-LOC 丧失能力。	

附录 3（续）

作者	领域	研究目的	任务环境	被试	研究方法	结果简要	研究意义	其他技术指标
Kurihara et al., 2007	高过载/离心训练	测量不同水平+Gz 暴露时飞行员的 PFC 氧合情况，以确定在高+Gz 暴露时失去意识和没有意识的被试之间的差异。	离心机	飞行员	被试在七种离心机曲线下的表现，Gz 水平为 4 至 8 Gz，增长速率为 0.1 至 6.0 Gz/s。fNIRS 用于评估其高过载过程中的脑组织血氧变化。	在加速导致意识丧失的飞行员的 PFC 的 TOI 下降了 15%。	证明了 TOI 对于评估抗 G 保护系统的效果是有用的。然而，由于个体对脑氧合减少的敏感性差异很大，PFC 的 TOI 和 HbO 浓度的变化不能预测 G-LOC。	
Ryoo et al., 2004	高过载/离心训练	研究 rSO ₂ 的相对变化与 G-LOC 发作的关系，探讨其是否可以作为意识丧失的预测指标。	模拟飞行	普通人员	被试暴露在+6, +8 和+10 Gz 三种水平下，研究 G-LOC 在持续 15s +Gz 和重复短时+Gz 脉冲的血流动力学变化。fNIRS 用于评估其高过载过程中的脑组织血氧变化。	持续+ Gz 运行期间 rSO ₂ 的下降较小，但 ICAP 更长，而脉冲运行期间 rSO ₂ 水平的平均下降更大，ICAP 较短。	rSO ₂ 下降幅度与 ICAP 长度的关系表明，+Gz 暴露类型可能是影响 G-LOC 事件性质和深度的因素。这些结果可以纳入高性能飞机驾驶员个人防护装备的闭环控制系统的设计中。	
Bouak et al., 2019	急性缺氧/低氧环境	研究缺氧暴露对情绪和表现等的影响	低压舱	飞行员	被试分别 2 天，每天 6 小时暴露于 8000 或 9900 英尺海拔高度，然后完成模拟飞行任务和认知测试。fNIRS 用于评估脑区血氧浓度(rSO ₂)。	rSO ₂ 受海拔高度影响显著下降，但在暴露 6 小时内，该值保持稳定，在被试认知或模拟飞行性能方面没有观察到负的下降。	在没有补充氧气的情况下暴露于轻度缺氧长达 6 小时的被试，没有观察到表现缺陷的明确证据。	
Bouak et al., 2018	急性缺氧/低氧环境	在 8000 和 14, 000 英尺之间研究了急性轻度缺氧缺氧和身体活动对模拟飞行任务的生理测量，体征和症状，情绪，疲劳，认知和性能的影响。	低压舱	飞行员	实验设置 4 种高度(8000、10000、12000、14000 英尺)和 3 种运动体力消耗水平。在每次运动后，被试完成认知任务测试，fNIRS 用于评估脑区血氧浓度(rSO ₂)。	rSO ₂ 受海拔高度和运动水平增加的影响。rSO ₂ 在高海拔(14000 英尺)显著减少，运动会加剧这种减少。	轻度缺氧对较低海拔（即 8000 和 10000 英尺）的飞行员绩效没有明显的影响。	

附录 3（续）

作者	领域	研究目的	任务环境	被试	研究方法	结果简要	研究意义	其他技术指标
Phillips et al., 2015	急性缺氧 /低氧环境	建立急性缺氧对认知、心理运动和知觉能力的影响，并记录这些能力完全恢复至暴露前水平所需的时间。	低氧呼吸装置	普通人员(有飞行体检记录)	被试低氧暴露前、期间和暴露后 60 分钟、120 分钟和 24 小时接受一系列关于视力、对比敏感度、色觉、执行控制和反应时间的测试。fNIRS 用于评估其低氧暴露期间的血氧水平。	被试低氧暴露期间对比敏感度，色觉和主观负荷受到不同程度的影响，但在恢复常氧后不久又恢复到基线水平；相反，反应时间和局部脑氧饱和度 rSO ₂ ，直到暴露 24 小时后才回到基线水平。	低氧暴露后某些性能特征会受到损害，有些会持续相当长的一段时间。缓解措施应更多地集中于预防低氧暴露，而不是仅仅依靠培训操作员来早期识别低氧症状并对其做出反应。	

注：由于 Fresnel 等(2021)文章检索过程中无法获取全文，故无法知悉其 fNIRS 设备规格等信息，因此未在后续“附录 4 fNIRS 设备或探针设置与规格”等表中报告；fNIRS：functional near-infrared spectroscopy，功能性近红外光谱；G-LOC：+Gz-induced loss of consciousness，+Gz 引起的意识丧失；Hbtot：total hemoglobin concentrations，总血红蛋白浓度；ICAP：incapacitation time，失能时间；PFC：prefrontal cortex，前额叶皮层；rSO₂：regional cerebral oxygen saturation，脑组织血氧饱和度；TOI：tissue oxygenation index，组织氧合指数(反映脑内氧气生成变化的)。

附录 4 fNIRS 设备或探针设置与规格

作者	领域	fNIRS 设备	监控通道数	使用波长(nm)	采样频率(Hz)	电极距离(cm)
Hamann & Carstengerdes, 2022	心理负荷	NIRSport2	15		10	2.6~3.9
Li et al., 2022	心理负荷	OctaMon CW fNIRS 设备	8	760 和 850	2	3.5
Sun et al., 2019	工作负荷、认知疲劳	TASH-100			2	
Causse et al., 2017	心理负荷	CW fNIR 设备(fNIR Devices LLC)	16	730 和 850	2	
Causse et al., 2018	心理负荷、神经效率	fNIR 100 (Biopac)	16	730 和 850	2	2.5
Ahlstrom et al., 2016	认知参与、决策	CW fNIRS 设备	16	730 和 850	2	
Ahlstrom, 2015	认知参与	CW fNIRS 设备	16	730 和 850	2	
Durantín et al., 2014	心理负荷	fNIR 100 (Biopac)	16		2	
Ayaz et al., 2012	心理负荷	CW fNIR 设备 (fNIR Devices LLC)	16		2	2.5
Menda et al., 2011	认知负荷、情景意识		16			
Kikukawa et al., 2008	认知负荷	NIRO-300G 和 Hamamatsu Photonics				4
Takeuchi, 2000	心理压力	NIRO-500 和 Mamamatsu- hotonichs	2	730 和 850	2	4.5
Pan et al., 2022	认知疲劳	Gowerlabs LUMO 系统	108	730 和 850	10	
Verdière et al., 2018	认知参与	NIRx Medical Technologies	42	760 和 850	7.8125	最大 3
Dehais et al., 2018	心理负荷、认知疲劳	NIRSport NIRX	12		8.93	
Gateau et al., 2018	工作记忆负荷	fNIR 100 (Biopac)		730 和 850	2	2.5
Çakır et al., 2016	心理负荷	fNIRS 系统	16	730、805 和 850	2	2.5
Durantín et al., 2016	工作记忆负荷	fNIR 100 (Biopac)	16		2	
Gateau et al., 2015	工作记忆负荷	fNIR 100 (Biopac)	16		2	
Reddy et al., 2022	技能训练水平、个体差异	fNIR Imager 1200 (fNIR Devices LLC)	18	750 和 830	10	1、2.5
Causse et al., 2019	飞行经验/技能训练水平	fNIR 100 (Biopac)	16	730 和 850	2	2.5
Choe et al., 2016	飞行经验/技能训练水平	NIRSport NIRX	20	760 和 850	8	3.5
Hernandez-Meza et al., 2015	飞行经验/技能训练水平	CW fNIR 设备	16	730 和 850	2	2.5
Gerega et al., 2020	高过载/离心训练	6 通道 fNIRS 系统	6	735 和 850		2 和 3
Kobayashi et al., 2012	高过载/离心训练	NIRO-150		775、810 和 850	2	4
Tripp et al., 2009	高过载/离心训练	Somentics				

附录 4(续)

作者	领域	fNIRS 设备	监控通道数	使用波长(nm)	采样频率(Hz)	电极距离(cm)
Kurihara et al., 2007	高过载/离心训练	NIRO-300G		775、810 和 850	2	4
Ryoo et al., 2004	高过载/离心训练	NIRS 系统		810 和 840	33.33	4.4
Bouak et al., 2019	急性缺氧/低氧环境	EQUANOX 传感器				
Bouak et al., 2018	急性缺氧/低氧环境				0.25	
Phillips et al., 2015	急性缺氧/低氧环境	INVOS 5100C			0.2	

注: CW: continuous wave, 连续波; fNIRS: functional near-infrared spectroscopy, 功能性近红外光谱。

附录 5 fNIRS 数据收集规范

作者	人数	总试次(条件数)	单次 trial 时长	基线时长(类型、何时)	监控脑区	探针参考系统
Hamann & Carstengerdes, 2022	35	[8]			PFC	
Li et al., 2022	26	3 [3]	180 s	1 min(局部, 每次任务开始前)	PFC	
Sun et al., 2019	50(阶段 2)	8 [2]	20 min	20 min(全局, 任务开始前)	PFC	
Causse et al., 2017	10(记录 fNIRS 数据)	30 [3]	54s(试次间休息 18s)		PFC	
Causse et al., 2018	26 (阶段 1) 18 (阶段 2)	2 [2], [3]	2.5 to 3 min (1 阶段) ~20 s (2 阶段)	10 s (全局, 每次任务开始前)	PFC	
Ahlstrom et al., 2016	70	1 [1]	20 min		双侧 PFC	
Ahlstrom, 2015	24	1 [3]	25 min		PFC	
Durantini et al., 2014	12	160 [4]	~10 s	10 s	PFC	
Ayaz et al., 2012	7	160 [2]	2 h~3 h/20 次	(局部, 每个任务开始时的休息时 间)	背侧和腹侧 PFC	10/20 国际系统
Menda et al., 2011	11	6 [2]		20 s(局部, 每次飞行前闭眼休息)	PFC	
Kikukawa et al., 2008	4	1	2 h		双侧 PFC	
Takeuchi, 2000	9	4 [4]	<3 min	1 min (局部, 每个任务开始时的 休息时间)	PFC	
Pan et al., 2022	30	1	10 min		PFC	
Verdière et al., 2018	12	8 [2]	6 min	飞机巡航阶段飞行员被要求放 松, 以此为基线	PFC 和枕叶	
Dehais et al., 2018	4	1 [4]	50 min			
Gateau et al., 2018	14	20 [2]				
Çakır et al., 2016	8	4		10 s		
Durantini et al., 2016	18(飞行模拟)	40 [2]	~30 s		PFC	
Gateau et al., 2015	19	40 [2]	~30 s		PFC	
Reddy et al., 2022	13	30 [5]	2 min		PFC	
Causse et al., 2019	61		30 min	10 s(全局, 实验前放松 2 min 后)	PFC	
Choe et al., 2016	32	20		1 min(实验前后休息状态)		

附录 5 (续)

作者	人数	总试次(条件数)	单次 trial 时长	基线时长(类型、何时)	监控脑区	探针参考系统
Hernandez-Meza et al., 2015	10	1[1]	1 h		PFC	
Gerega et al., 2020	24	[3]	~14 min	180 s(局部, 阶段前静息)	PFC 和运动皮层	
Kobayashi et al., 2012	22	[5]		30s(全局, 离心开始前的平 均值)	右侧 PFC	
Tripp et al., 2009	6	[2]	5 min	10 s(全局, 实验阶段之前)	右侧 PFC	
Kurihara et al., 2007	141	7		30 s(全局, 离心开始前的平 均值)	PFC	
Ryoo et al., 2004	9	[6]				
Bouak et al., 2019	17	[2]		(全局, 低氧暴露前)	PFC	
Bouak et al., 2018	16	[12]		(全局, 实验开始前)	PFC	
Phillips et al., 2015	19	4 [4]	30 min		双侧 PFC	

注: PFC: prefrontal cortex, 前额叶皮层。

附录 6 fNIRS 信号质量控制处理

作者	信号质量控制	运动伪迹去除方法	试验次数、渠道、参与者排除	信号处理流
Hamann & Carstengerdes, 2022		利用 gamma 血流动力学响应函数建立一般线性模型，将 n-back 水平作为预测因子，短距离通道作为额外的预测因子，以便在统计上控制生理混淆和运动伪迹。		
Li et al., 2022	小波变换对原始数据进行平滑处理，减小高频噪声分量；血流动力学响应函数作为低通滤波器被用来减少高频生理噪声如心跳。			
Sun et al., 2019			由于实验过程中某些仪器出现故障，部分学员的数据无法纳入分析。	
Causse et al., 2017			一个被试的通道 5 和 11、另一个被试的通道 5 和 15	截止频率为 0.01 Hz ~0.1 Hz 且阶数为 20 的 FIR 滤波器
Causse et al., 2018	去除饱和和光极(平均浓度值低于-15 $\mu\text{mol/L}$ 或高于 +15 $\mu\text{mol/L}$)		在着陆场景下 1 名被试的 1 个通道排除，实验室环境下另一个被试的 3 个通道被排除，缺失值由该被试在所有其他可用光极上计算的平均浓度代替。	截止频率为 0.02-0.40 Hz 且阶数为 20 的 FIR 滤波器； 基于相关性的信号改善算法用于消除尖峰信号并改善信号质量(基于 HbO 和 HbR 之间假设的负相关性)；然后目视检查数据并移除所有饱和和光极
Ahlstrom et al., 2016			一名飞行员的数据丢失	
Ahlstrom, 2015				
Durant et al., 2014				
Ayaz et al., 2012	排除光强度高于模数转换器限制的饱和和通道	排除高运动伪迹和低信噪比试验	两名受试者因运动伪迹被排除在外。	具有有限脉冲响应的低通滤波器、截止频率为 0.1 Hz 且阶数为 20 的 FIR 滤波器
Menda et al., 2011		数据首先清除运动伪迹		FIR 滤波器，截止频率为 0.2 Hz
Kikukawa et al., 2008				
Takeuchi, 2000				

附录 6 (续)

作者	信号质量控制	运动伪迹去除方法	试验次数、渠道、参与者排除	信号处理流
Pan et al., 2022		样条插值		0.01 Hz 的低通滤波器和 0.2 Hz 的高通滤波
Verdière et al., 2018		小波插值		3 阶截止频率 0.01 Hz 的高通滤波器和 5 阶截止频率 0.5 Hz 的低通滤波器
Dehais et al., 2018		样条插值		5 阶截止频率 0.01 Hz 的高通滤波器和 3 阶截止频率 0.5 Hz 的低通滤波器
Gateau et al., 2018	检查光级信号是否饱和			
Çakır et al., 2016				
Durantín et al., 2016	包括具有良好 Q/R 值的信号(状态噪声方差/测量噪声方差)			卡尔曼滤波器
Gateau et al., 2015	包括具有良好 Q/R 值的信号(状态噪声方差/测量噪声方差)			卡尔曼滤波器
Reddy et al., 2022	去除饱和 (>4500), 高暗电流值 (>200), 波长与环境测量值之间高相关的通道	基于小波的运动伪迹去除去除突变峰值		截止频率为 0.005 和 0.1 Hz 的高通和低通 FIR 滤波器
Causse et al., 2019			由于一名被试的 fNIRS 数据不可用, 排除其数据	FIR 滤波器, 基于相关性的信号改进算法过滤尖峰伪像, 并根据 HbO 和 HbR 之间的假定负相关性提高信号质量
Choe et al., 2016				带通滤波器(0.01 Hz~2 Hz)
Hernandez-Meza et al., 2015			饱和及被低估的通道被排除	具有有限脉冲响应的低通滤波器、截止频率为 0.1 Hz 且阶数为 20 的 FIR 滤波器
Gerega et al., 2020				
Kobayashi et al., 2012				
Tripp et al., 2009				
Kurihara et al., 2007			由于在+Gz 暴露期间缺少被试右侧 PFC 数据, 故只是用左侧完整的数据。	

附录 6（续）

作者	信号质量控制	运动伪迹去除方法	试验次数、渠道、参与者排除	信号处理流
Ryoo et al., 2004				带通滤波器(0.01 Hz、1 Hz)
Bouak et al., 2019				
Bouak et al., 2018				
Phillips et al., 2015			rSO ₂ 测试值不大于 50 时，不能表征被试大 脑皮层中 rSO ₂ 浓度，故排除 4 名被试	

注：FIR：Finite Impulse Response，有限长单位冲激响应滤波器，又称为非递归型滤波器；HbO：oxy-hemoglobin，氧合血红蛋白；HbR：deoxy-hemoglobin，脱氧血红蛋白；PFC：prefrontal cortex，前额叶皮层；

Q：状态噪声；R：测量噪声；rSO₂：regional cerebral oxygen saturation，脑组织血氧饱和度。

附录 7 fNIRS 数据分析

作者	DV 的开始时间和持续时间	DV	统计分析	报告了多项更正
Hamann & Carstengerdes, 2022		ΔHbR	一般线性模型	FDR
Li et al., 2022	每个条件的平均 ΔHbO (基于基线)	ΔHbO	一般线性模型 单因素重复测量方差分析	Bonferroni 校正
Sun et al., 2019		ΔHbO , ΔHbR , ΔHbtot , rSO_2	重复测量方差分析比较休息对照组和模拟飞行实验组之间的差异以及测量前后的差异。	
Causse et al., 2017		ΔHbO , ΔHbR		
Causse et al., 2018	HbO 和 HbR 浓度在每个条件下的所有试验中取平均值	ΔHbO , ΔHbR	方差分析用于测试关于在任务期间增加难度是否会导致任务表现相	
Ahlstrom et al., 2016	DV 是对照组和实验组的平均值	$\text{HbO} - \text{HbR}$		
Ahlstrom, 2015	DV 是飞行场景期间的平均值	$\text{HbO} - \text{HbR}$	贝叶斯估计	
Durantini et al., 2014	每个条件的平均 ΔHbO (基于基线)	ΔHbO (相对于 10 秒基线)	重复测量方差分析: 被试内因素“处理负荷”和“控制难度”, 以及每个通道的 ΔHbO	
Ayaz et al., 2012	DV 在各阶段训练中取平均值且相对于基线水平	$\text{HbO} - \text{HbR}$	重复测量方差分析	FDR
Menda et al., 2011	刺激前后 100s, 每个通道的平均值	ΔHbO 、 ΔHbR 、 ΔHbtot (相对于局部基线)	Mann-Whitney U 非参数检验	
Kikukawa et al., 2008	DV 是飞行场景中各个阶段平均值	ΔHbO , ΔHbR		
Takeuchi, 2000	ΔHbO 的最大振幅	ΔHbO (相对于开始时的值)	三因素方差分析	
Pan et al., 2022	DV 是飞行场景中各个阶段相应时间窗口(15 s)的均值	ΔHbO 及其相关的氧合测量(如峰值、平均值、方差等)		
Verdière et al., 2018	DV 是飞行场景中各个阶段平均值	ΔHbO , ΔHbR 及其相关的氧合测量(如峰值、平均值、方差等)	二分类分类器(基于二项分布)、重复测量方差分析比较不同特征的分	Tukey's HSD
Dehais et al., 2018		小波相干性指标	小波相干性度量, 计算时频空间中的局部相关系数, 基于 fNIRS-EEG 的分类器 sLDA	
Gateau et al., 2018	fNIRS 的数据针对每个试验的响应窗口进行处理和记录。			

附录 7 (续)

作者	DV 的开始时间和持续时间	DV	统计分析	报告了多项更正
Çakır et al., 2016		HbO 和 HbR 信号的平均值、标准偏差、坡度、最小值、最大值和范围值,以及一个特征载体, 包括平均值、标准偏差、坡度和 HbO 和 HbR 信号的范围测量	LDA 分类器	
Durantín et al., 2016		Δ HbO、 Δ HbR	两因素方差分析(16 个通道, 三个难度级别)、SVM 分类器	
Gateau et al., 2015	在每个时间窗口内对每个通道的 DV 进行平均	Δ HbO、 Δ HbR(与基线相比)	两因素重复测量方差分析	
Reddy et al., 2022	试次开始后 15 s~试次结束前 15 s 这个时间窗口内对每个通道的 DV 进行平均	Δ HbO、 Δ HbR, 利用 HbO 和 HbR 等计算相对效率和相对卷入	线性混合效应回归模型	FDR
Causse et al., 2019	Δ HbO 浓度变化在每个条件的所有试验中平均	Δ HbO	三因素重复测量方差分析任务伴随 HbO 浓度变化	Fisher 检验(Fisher's least significant difference, LSD)
Choe et al., 2016	被试执行任务期间的血氧变化平均值	Δ HbO, Δ HbR, Δ HbT	t 检验	
Hernandez-Meza et al., 2015		HbO - HbR	两因素重复测量方差分析	FDR
Gerega et al., 2020		Δ HbT	单因素方差分析	
Kobayashi et al., 2012	离心机加速前基线期开始到相对失能阶段之后持续测量 HbO。	Δ HbO、TOI		
Tripp et al., 2009	离心机加速前基线期开始到相对失能阶段之后的 5 分钟恢复期结束, 持续测量 rSO ₂ 。	Δ rSO ₂	方差分析	
Kurihara, et al., 2007	+Gz 暴露期间与基线浓度相比的变化值	Δ HbO, Δ HbR, TOI, % Δ TOI	方差分析	Tukey 事后检验
Ryoo et al., 2004		Δ rSO ₂	方差分析	Fisher 最小二乘差异事后检验

附录 7（续）

作者	DV 的开始时间和持续时间	DV	统计分析	报告了多项更正
Bouak et al., 2019	整个实验过程中连续收集血氧仪数据，包括暴露前（基线）和暴露后。	ΔrSO_2	配对样本 t 检验；三因素重复测量方差分析	
Bouak et al., 2018	ΔrSO_2 的比较基于每个活动窗口的最后 5 分钟数据	ΔrSO_2	两因素重复测量方差分析	
Phillips et al., 2015	被试低氧暴露结束后 30min 的认知评估期间的平均变化值	ΔrSO_2	单因素方差分析	

注：DV：dependent variable，因变量；EEG：Electroencephalogram，脑电；FDR：False Discovery Rate，错误发现率；fNIRS：functional near-infrared spectroscopy，功能性近红外光谱；HbO：oxy-hemoglobin，氧合血红蛋白；HbR：deoxy-hemoglobin，脱氧血红蛋白；Hbtot：total hemoglobin concentrations，总血红蛋白浓度；LDA：Linear Discriminant Analysis，线性判别分析； rSO_2 ：regional cerebral oxygen saturation，脑组织血氧饱和度；sLDA：shrinkage Linear Discriminant Analysis，收缩线性判别分析；SVM：Support Vector Machine，支持向量机；TOI：tissue oxygenation index，组织氧合指数(反映脑内氧气生成变化的)。