



安徽医科大学学报
Acta Universitatis Medicinalis Anhui
ISSN 1000-1492, CN 34-1065/R

《安徽医科大学学报》网络首发论文

题目：功能性近红外光谱技术预测围术期老年关节置换术患者术后谵妄的作用
作者：吴剑霄，张慕春，郭婧怡，杨立状，胡宪文
网络首发日期：2025-10-22
引用格式：吴剑霄，张慕春，郭婧怡，杨立状，胡宪文. 功能性近红外光谱技术预测围术期老年关节置换术患者术后谵妄的作用[J/OL]. 安徽医科大学学报.
<https://link.cnki.net/urlid/34.1065.r.20251021.1517.004>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

功能性近红外光谱技术预测围术期老年关节置换术患者术后谵妄的作用

吴剑霄¹，张慕春¹，郭婧怡¹，杨立状²，胡宪文¹

(¹安徽医科大学第二附属医院麻醉与围术期医学科，合肥 230601，²中国科学院合肥物质

科学研究院健康与医学技术研究所，合肥 230031)

摘要 目的 探讨功能性近红外光谱技术(fNIRS)监测下的神经影像学特征在围术期老年关节置换术患者发生术后谵妄(POD)中的作用，为临床早期预测提供依据。**方法** 纳入 105 例选择全身麻醉下行关节置换术的老年患者，于术前 1 天行简易精神状态评价量表(MMSE)对患者认知进行评估，手术开始前使用 fNIRS 监测患者执行任务态时的脑氧饱和度变化，并于术后 24、48、72 h 使用 3 分钟谵妄诊断量表(3D-CAM)评估患者 POD 的发生情况。进行脑网络分析并采用 Logistic 回归分析探究老年关节置换术患者术前执行任务态时 fNIRS 监测数据与 POD 的关系，并构建受试者工作特征曲线(ROC 曲线)评估诊断效能，Hosmer-Lemeshow 拟合优度检验检测模型拟合优度。**结果** 在 105 例患者中，有效分析例数为 100 例，其中 20 例(20%)发生 POD。脑网络分析显示 POD 组(0.069 ± 0.118)功能连接相关系数 r 值低于非 POD 组(0.073 ± 0.084)，其中右侧初级躯体感觉皮质-右侧初级运动皮层(RS1-RM1)、左侧前极区-右侧布罗卡三角区(LFP-RBA44)通道连接性低是 POD 发生的重要影响因素($P<0.05$)。基于此结果构建 ROC 曲线下面积分别为 0.797 与 0.784。Hosmer-Lemeshow 拟合优度检验结果显示模型拟合良好(均 $P>0.5$)。**结论** fNIRS 监测的脑氧饱和度数据提取出的神经影像学特征与围术期老年关节置换术患者发生 POD 的风险存在显著相关性，其中术前 RS1-RM1、LFP-RBA44 脑网络通道连接性低是 POD 发生的重要影响因素，依托 fNIRS 预测 POD 的发生有利于早期干预并降低围术期并发症风险，提升医疗质量，推动精准医疗实践。

关键词 功能性近红外光谱技术；术后谵妄；脑网络；相关性分析；ROC 曲线；预测

中图分类号 R 445.9

文献标志码 A

The role of functional near-infrared spectroscopy in predicting postoperative delirium in elderly patients undergoing perioperative joint replacement surgery

基金项目：安徽省重点研发项目(编号：2022e07020045)

作者简介：吴剑霄，女，硕士研究生；

胡宪文，男，教授，主任医师，博士生导师，通信作者，E-mail: huxianwen001@126.com

Wu Jianxiao¹, Zhang Muchun¹, Guo Jingyi¹, Yang Lizhuang², Hu Xianwen¹

(¹Dept of Anesthesia and Perioperative Medicine, The Second Hospital of Anhui Medical University, Hefei 230601; ²Institute of Health and Medical Technology, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031)

Abstract Objective To explore the role of neuroimaging features monitored by functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) in postoperative delirium (POD) in elderly patients undergoing joint replacement during perioperative period, and to provide a basis for early clinical prediction. **Methods** A total of 105 elderly patients who underwent joint replacement under general anesthesia were included. The Mini-Mental State Examination (MMSE) scale was used to evaluate the patient's cognition one day before the operation. Before the start of the surgery, fNIRS was used to monitor the changes of cerebral blood oxygen saturation when the patient performed the task state. The 3-minute delirium diagnostic scale (3D-CAM scale) was used to evaluate the occurrence of POD at 24, 48 and 72 h after operation. Brain network analysis was performed and Logistic regression analysis was used to explore the relationship between fNIRS monitoring data and POD in elderly patients undergoing joint replacement surgery during preoperative task state. The receiver operating characteristic curve (ROC curve) was constructed to evaluate the diagnostic efficacy, and the Hosmer-Lemeshow goodness-of-fit test was used to test the goodness of fit of the model. **Results** Among 105 patients, 100 cases were effectively analyzed, of which 20 cases (20%) had POD. Brain network analysis showed that the r value of functional connectivity correlation coefficient in POD group (0.069 ± 0.118) was lower than that in non-POD group (0.073 ± 0.084). The low channel connectivity of right primary somatosensory cortex-right primary motor cortex (RS1-RM1) and left anterior pole-right Broca's triangle (LFP-RBA44) was an important factor affecting the occurrence of POD ($P < 0.05$). Based on this result, the area under the ROC curve was 0.797 and 0.784, respectively. The results of Hosmer-Lemeshow goodness-of-fit test showed that the model fitted well (all $P > 0.5$). **Conclusion** The neuroimaging features extracted from the cerebral oxygen saturation data monitored by fNIRS are significantly correlated with the risk of POD in elderly patients undergoing joint replacement during perioperative period. Among them, the low connectivity of preoperative

RS1-RM1 and LFP-RBA44 brain network channels is an important influencing factor of POD occurrence. Predicting the occurrence of POD based on fNIRS is conducive to the early intervention and risk reduction of perioperative complications, improving medical quality and promoting precision medical practice.

Key words functional near infrared spectroscopy; postoperative delirium; brain network; correlation analysis; ROC curve; prediction

Fund program Key Research and Development Program of Anhui Province (No.2022e07020045)

Corresponding author Hu Xianwen, E-mail: huxianwen001@126.com

术后谵妄(postoperative delirium, POD)是目前临床上高度关注的围术期医学重点问题。老年患者是 POD 的高风险人群,研究^[1-2]表明谵妄在关节手术术后发生率高达 15.2%~40%。目前临床上对于 POD 的研究主要集中在预防工作上^[3],而脑功能监测是围术期预防 POD 工作的重点。功能性近红外光谱技术(functional near-Infrared spectroscopy, fNIRS)是近年来一种新兴的监测脑功能光学成像技术。当人体受到外界刺激时,神经元活动的增加触发了信号转导及代谢反应过程,局部脑血流量会相应增加;通过发射近红外段光波检测局部氧合/脱氧血红蛋白浓度变化从而获得局部脑组织氧饱和度(regional cerebral saturation oxygenation, rScO₂),可实时监测认知功能障碍患者额叶皮质血流变化^[4]。目前,已有不少学者将 fNIRS 应用于神经退行性疾病及神经康复领域的研究,但该类型的研究多集中关注在认知障碍的患者脑功能情况。该研究旨在观察老年患者术前 fNIRS 任务态下的神经影像学特征,利用 Logistics 回归探究 fNIRS 任务态数据与 POD 发生的关系,分析其在预测老年患者 POD 事件发生中的作用。

1 材料与方法

1.1 病例资料

本研究为回顾性研究,样本来源于随机对照试验中的一部分,本研究通过安徽医科大学第二附属医院伦理委员会[批号: YX2024-141(修1)],所有参与研究的患者或家属在麻醉前均已签署知情同意书。纳入标准为 2024 年 8—12 月于安徽医科大学第二附属医院行全身麻醉下关节置换手术的患者,性别不限,年龄 60~80 岁,美国麻醉医师协会体格状况分级(American Society of Anesthesiologists, ASA) II~III 级。将脑血管意外史、入院前半年内服用精神类药物史、长期酗酒、术前进行简易精神状态评价(mini-mental state examination,

MMSE)量表评分不能配合评分测定和低于相应文化程度最低评分(文盲 ≤ 17 分,小学 ≤ 20 分,中学 ≤ 22 分,大学 ≤ 23 分)、视觉、听觉或语言交流障碍、肝肾功能障碍等患者排除在外。

1.2 方法

1.2.1 临床资料的收集

在术前1天经专业培训的第三方研究人员对患者进行MMSE评分,将符合纳入标准患者入组。入组患者禁饮禁食8h,于预麻间开放上肢静脉后行超声引导下髂筋膜神经阻滞(0.25%罗哌卡因40 mL)或者股神经阻滞(0.25%罗哌卡因30 mL),神经阻滞完成后5 min测定阻滞效果,神经支配区阻滞完全后使患者佩戴上fNIRS仪器,监测术前脑氧饱和度基线值。本试验任务态的设计是在神经影像学专家及有fNIRS研究经验的专业人员指导下完成,在自然对话的范式下,针对语言交流过程中涵盖的信息摄入、解析机制、信息的整合加工、思维应答以及指令输出等环节,通过采集任务态fNIRS数据,以此精准捕捉患者在上述语言交流过程中的脑氧合血红蛋白饱和度的实时动态变化。对话共有7组问题:①您的姓名是什么?②您的年龄是多少?③您今天要做的手术是什么?④您是否有高血压?

(如有高血压,则继续询问)最近测的血压值大概多少?您患高血压多久了?您平时有没有吃降压药?具体是哪一种药?是否规律服用?今晨是否服用?⑤您是否有糖尿病?(如有,则继续询问)日常是否服用降糖药?具体是哪种药物?日常控制如何?⑥是否有其他基础疾病,比如心脏疾病、肺部疾病等?⑦您以前是否接受过其他手术?具体是什么时间行的什么手术?每组问题间隔大约5s,详细记录每组问题的开始与结束时间,并在采集到的fNIRS信号上进行时间戳标定。任务态采集结束后,患者转入手术室,在建立有创血压、心电图、指脉氧饱和度等基础监护后进行全身麻醉诱导。麻醉诱导:静注舒芬太尼0.25 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、依托咪酯0.2 mg/kg 、顺苯磺阿曲库铵0.2 mg/kg ,气管插管后接麻醉机行机械通气,吸入氧浓度(fractional inspired oxygen, FiO_2)60%,呼气末二氧化碳分压(end-tidal carbon dioxide partial pressure, PETCO_2)维持于35~45 mmHg。麻醉维持:丙泊酚4~8 $\text{mg}/(\text{kg}\cdot\text{h})$,瑞芬太尼0.1~0.3 $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{min})$,顺苯磺阿曲库铵3~4 $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{min})$ 。术中血压波动维持在基础血压的20%,脑电双频指数(bispectral index, BIS)值在45~60,并以此调节麻醉深度。术毕在患者达到常规气管拔管指征后,拔除气管导管,评估其意识状态,转运至麻醉恢复室监护。术后予以静脉镇痛泵行镇痛治疗(舒芬太尼2 $\mu\text{g}/\text{kg}$ +胃复安20 mg),术后第24、48、72 h行3分钟谵妄诊断量表(3-minute diagnostic interview for CAM-defined delirium, 3D-CAM)评分,术后3天内任意1天3D-CAM量表测评结果阳性则记录为该患者发生POD,谵妄包

括活动亢进型、活动抑制型以及混合型谵妄。记录术前患者的一般资料（如性别、年龄、身体质量指数、受教育程度、检验指标等）、术中麻醉药及血管活性药物用量、术中失血量、补液量及拔管后出现的并发症如苏醒期谵妄、术后低体温（定义为核心温度低于 36 度）等。记录患者入室后（T0）、诱导后（T1）、插管即刻（T2）、插管后 5 min（T3）、切皮（T4）、术中 1 h（T5）及手术结束（T6）各时间点的血流动力学指标。记录手术后第 1、2、3 天受试患者的视觉模拟评分（visual analogue scale, VAS）。

1.2.2 主要仪器

本试验使用近红外光谱成像设备（丹阳慧创医疗设备有限公司，型号：NirSmart II-3000A），该设备所配备的 fNIRS 头帽光极系统，包含 18 个发射探头与 18 个接收探头，其中光源与探头之间的间距精确设定为 30 mm。每 1 组发射探头与接收探头相互协作，构建起一个独立的信号采集通道，最终共计生成 35 个通道。采用 2 种不同波长（730 nm 和 850 nm）的近红外光，以 11Hz 的采样频率记录近红外光谱信号。根据修正的 Beer-Lambert 定律，获得氧合血红蛋白（oxyhemoglobin, HbO）和脱氧血红蛋白（reduced hemoglobin, HbR）的浓度变化^[5]，通过二者变化能够间接反映相应脑区神经活动。光极参照国际 10/20 系统放置，将获得的坐标转换为蒙特利尔神经研究所坐标空间（montreal neurological institute, MNI），并使用 NirSpace（丹阳慧创）的空间注册方法进一步投影到 MNI 标准脑模板，最终探头定位如图 1 所示。对患者执行任务态的同时使用 fNIRS 对患者的脑功能进行持续的监测，记录不同任务项目时 fNIRS 的监测数据变化。

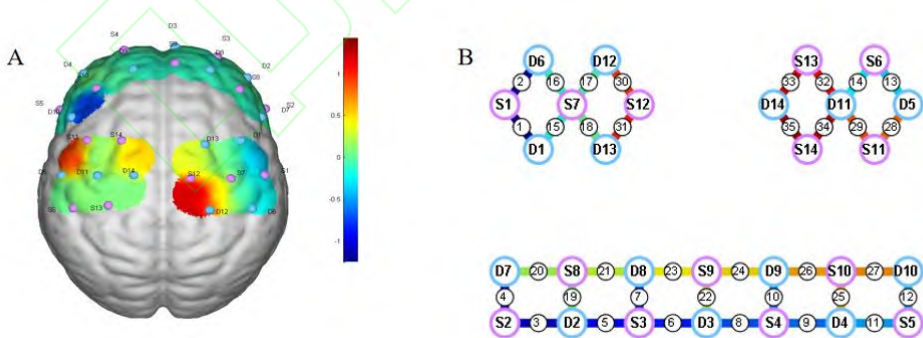


图 1 各探头与通道定位图

Fig.1 Probe and channel positioning diagram

A: The fNIRS optical pole coordinate brain map distribution; B: The optical pole coordinate plane distribution, where S represents the transmitting probe and D is the receiving probe. Each pair of transmitting probes and receiving probes forms a measurement channel.

1.3 统计学处理

采用 IBM SPSS 27.0、R 语言 4.5.0 和 Nirspark 对各项数据做统计分析。定性资料采用频数百分比 (%) 表示，定量资料符合正态分布时采用 ($\bar{x} \pm s$) 表示，非正态分布时采用 $M(P_{25}, P_{75})$ 表示。对于采集到的 fNIRS 监测数据，在神经心理学专家的指导下进行脑网络分析。使用 NirSpark 软件中的 Network 模块对脑功能连通性进行分析。提取患者术前 fNIRS 任务态时的数据，得到每个通道的 HbO 时间序列。采用运动标准差和样条插值法 (SDThresh=6, AMPThresh=0.5) 对头皮和探头相对滑动引起的运动伪影进行修正，使用截止频率为 0.01~0.2 Hz 的带通滤波器去除生理噪声（如呼吸、心脏活动和低频信号漂移）。计算 2 个通道 HbO 时间序列之间的 Pearson 相关系数 r ，定义为两个通道之间的功能连接 (functional connectivity, FC)， r 值越大，代表两通道之间的相关性越强；将得到的 r 值进行 Fisher 转化，使用 Z 值表示其正态分布并进行 t 检验，采用错误发现率 (false discovery rate - benjamini - hochberg method, FDR-BH 法) 校正。单因素分析采用 Mann-Whitney U 检验、卡方检验、秩和检验，根据单因素分析结果将 $P < 0.05$ 的变量纳入多因素 Logistic 回归分析。在 R 语言中绘制受试者工作特征曲线 (receiver operator characteristic curve, ROC) 并计算曲线下面积 (area under the curve, AUC)、灵敏度、特异度、约登指数。并使用 Hosmer-Lemeshow 拟合优度检验 (Hosmer-Lemeshow Goodness-of-Fit Test) 验证模型拟合优度。所有统计显著性水平设为 $P < 0.05$ [6-7]。

2 结果

2.1 两组基础资料与术后疼痛评分的比较

本研究共纳入患者 105 例，其中因术中心跳骤停脱落 1 例，随访脱落 4 例患者，POD 发生共 20 例，术后未发生谵妄患者共 80 例。对于两组患者一般资料的结果分析如表 1、2 所示，其中筛选出年龄、术前白蛋白、ASA 分级、手术部位以及苏醒期不良反应均为影响 POD 的自变量 ($P < 0.05$)。

表 1 两组患者基础资料的比较 [$M(P_{25}, P_{75}), n(\%), \bar{x} \pm s$]
Tab.1 Comparison of general information between two groups of patients [$M(P_{25}, P_{75}), n(\%), \bar{x} \pm s$]

Variable	Non-POD group ($n=80$)	POD group ($n=20$)	$t/z/\chi^2$	P value
Age (years)	71 (65, 77)	72 (69, 86)	-2.11	0.035

Female	52 (65.00)	14 (70.00)	-0.26	0.793
SpO ₂	98 (97, 99)	96 (95.50, 98.50)	-1.94	0.052
Pre-MAP	100.07 ±1.46	102.15 ±6.84	-0.65	0.526
Pre-MMSE	25.05 ±2.32	24.00 ±1.73	1.56	0.122
BMI (kg/m ²)	25.01 ±3.02	23.12 ±4.37	1.75	0.084
ASA			-3.13	0.047
II	73 (91.30)	15 (75.00)		
III	7 (8.80)	5 (25.00)		
Education level			-1.01	0.414
Illiteracy	35 (43.80)	12 (60.00)		
Primary school	27 (33.80)	3 (15.00)		
Middle school	15 (18.80)	4 (20.00)		
College or higher	3 (3.80)	1 (5.00)		
Operation sites			-2.00	0.022
Knee joint	43 (53.80)	5 (25.00)		
Hip joint	37 (46.30)	15 (75.00)		
RBC	4.14 ±0.44	3.88 ±0.47	1.97	0.052
Hb	122.66 ±13.36	118.69 ±14.28	0.99	0.325
Alb	38.47 ±3.04	35.75 ±2.77	-0.85	0.003
BUN	6.11 ±1.57	6.30 ±2.06	-0.39	0.700
WBC	6.06 (5.02, 7.22)	6.82 (4.82, 7.46)	-0.62	0.538
ALT	16.00 (12.00, 21.00)	16.05 (11.50, 20.00)	-0.57	0.572
AST	21.00 (18.00, 25.00)	21.50 (17.25, 24.75)	-0.32	0.748
Cr	52.00 (45.00, 59.00)	48.50 (39.00, 62.00)	-1.13	0.261
Vasoactive agents			-1.56	0.118
No	12 (85.70)	3 (14.30)		
Yse	68 (80.00)	17 (20.00)		

Adverse events			-5.62	<0.001
No	77 (85.60)	13 (14.40)		
Yes	3 (30.00)	7 (70.00)		
Propofol dose	382.23±124.60	356.24±103.34	0.53	0.651
Remifentanyl dose	1 621.01±47.23	1 551.32±39.04	0.25	0.213
Total fluids	600 (500, 900)	500 (500, 875)	-0.43	0.666
EBL	100 (100, 200)	100 (100, 175)	-0.45	0.653
MAP-CV	0.16±0.05	0.14±0.06	0.69	0.200
IPH	19 (23.75)	4 (20.00)	-0.34	0.632
Rescue analgesia	23 (28.75)	6 (30.00)	-0.27	0.563

SpO₂: pulse oxygen saturation; Pre-MAP: preoperative mean arterial pressure; Pre-MMSE: preoperative mini-mental state examination; BMI:body mass index; RBC: red blood cell; Hb: hemoglobin; Alb: Albumin; BUN: blood urea nitrogen; WBC: white blood cell; ALT: alanine aminotransferase; AST: aspartate aminotransferase; Cr: Creatinine; EBL: estimated blood loss; IPH: intraoperative hypothermia; MAP-CV: coefficient of variation of mean arterial pressure,the standard deviation of MAP divided by the mean of MAP, multiplied by 100% .

表 2 两组患者术后疼痛评分比较 ($\bar{x} \pm s$)

Tab.2 Comparison of postoperative pain scores between two groups of patients ($\bar{x} \pm s$)

Postoperative pain	Non-POD group	POD group	<i>t</i>	<i>P</i> value
Day1-rseting pain	4.25±1.87	3.31±1.44	1.74	0.085
Day1-MEP	6.20±5.84	4.92±0.86	0.79	0.433
Day2-rseting pain	2.45±1.43	2.15±1.14	0.72	0.471
Day2-MEP	3.19±1.47	3.31±1.03	-0.27	0.787
Day3-rseting pain	1.06±1.02	0.92±0.76	0.45	0.651
Day3-MEP	1.55±0.97	1.23±0.83	1.11	0.270

MEP: movement-evoked postoperative pain.

2.2 两组脑网络分析比较

fNIRS 脑氧饱和度数据处理后的脑网络分析结果如图 2 所示。图 2A、2B 分别为 POD 组与非 POD 组大脑双侧额叶、顶叶各通道间总平均相关系数矩阵图，由图可得 POD 组任务

态 FC 相关系数 r 值 (0.069 ± 0.118) 低于非 POD 组 (0.073 ± 0.084)。对得到的两组所有通道 Pearson 相关系数 r 值进行正态分布 Z 值转换,转换后进行 t 检验并将得出的 P 值进行 FDR 校正,校正后得出右侧初级躯体感觉皮质—右侧初级运动皮层 (primary somatosensory cortex-primary motor cortex, RS1-RM1) 与左侧前极区—右侧布罗卡三角区 (frontopolar area-pars opercularis part of Broca's area, LFP-RBA44) 具有显著性意义 (均 $P<0.05$)。

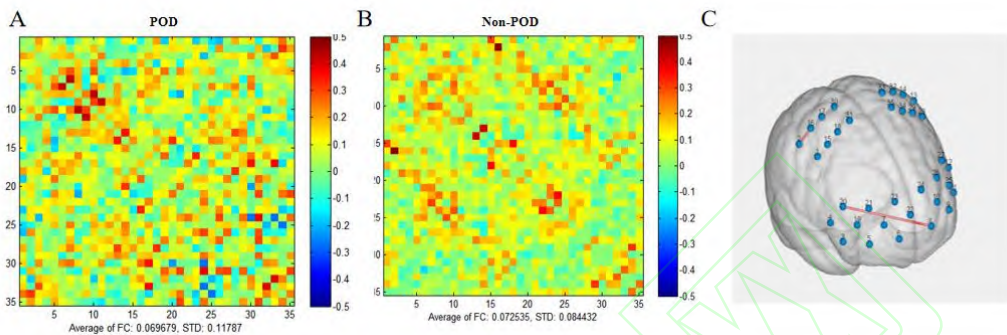


图 2 两组患者脑网络分析功能连接矩阵图

Fig.2 Functional connectivity matrix of brain network analysis for two groups of patients

A, B: The horizontal and vertical axes of the matrix diagram are acquisition channels, and the diagonal is the coefficient of each channel, which is set to 0; C: Differences between groups in the actual channel, the red line indicates a connection with a significant difference ($P_{adjusted}<0.05$).

2.3 老年关节置换术患者发生 POD 的多因素分析

以是否发生 POD 为因变量, RS1-RM1、LFP-RBA44 两通道相关系数 r 值为自变量, 将年龄、ASA 分级、白蛋白、手术部位与苏醒期不良反应作为协变量纳入多因素 Logistic 回归分析, 计算结果如表 3, 结果显示, 调整年龄、ASA 分级、白蛋白、手术部位和苏醒期不良反应后, RS1-RM1、LFP-RBA44 两个通道相关系数 r 值是 POD 的影响因素 ($P<0.05$), RS1-RM1 与 LFP-RBA44 两个通道的偏回归系数为负数, 认为二者为术后 POD 的保护因素。见表 3。

表 3 多因素二元 Logistic 回归分析结果

Tab.3 Results of multivariate binary Logistic regression analysis

Variable	β value	OR (95% CI)	P value
RS1-RM1	-2.878	0.050 (0.005, 0.511)	0.046
LFP-RBA44	-4.012	0.006 (0, 0.338)	0.028
Age (years)	-0.052	0.949 (0.822,1.097)	0.480

ASA	5.394	0.289 (0.004,1.344)	0.131
Alb (g/L)	-0.617	0.569 (0.262,1.231)	0.181
Operation sites	-0.747	0.924 (0.089,9.559)	0.638
Adverse events	5.357	0.102 (0.005,2.208)	0.146

2.4 RS1-RM1、LFP-RBA44 相关系数 r 值及联合预测对 POD 的 ROC 曲线分析

由图 3 所示, RS1-RM1 的 AUC=0.797 (95% CI: 0.657, 0.937), 约登指数为 0.564, 灵敏度为 89.7%, 特异度为 66.7%, 截断值为 0.103; LFP-RBA44 的 AUC=0.784 (95% CI: 0.651, 0.917), 约登指数为 0.519, 灵敏度为 76.9%, 特异度为 75%, 截断值为-0.06; 联合预测曲线下面积 AUC=0.844 (95% CI: 0.721, 0.967)。经 delong 检验比较 3 种模型的 ROC 曲线差异性, 将 3 种曲线两两比较发现两个预测指标的预测能力差异无统计学意义 ($P=0.873$), 联合预测相较单个指标并未显著提高预测能力 ($P=0.610$ 、 0.521)。Hosmer-Lemeshow 拟合优度检验结果显示两个单个指标的回归模型拟合优度较高 ($\chi^2=2.198$ 、 6.842 , $P=0.974$ 、 0.554)。

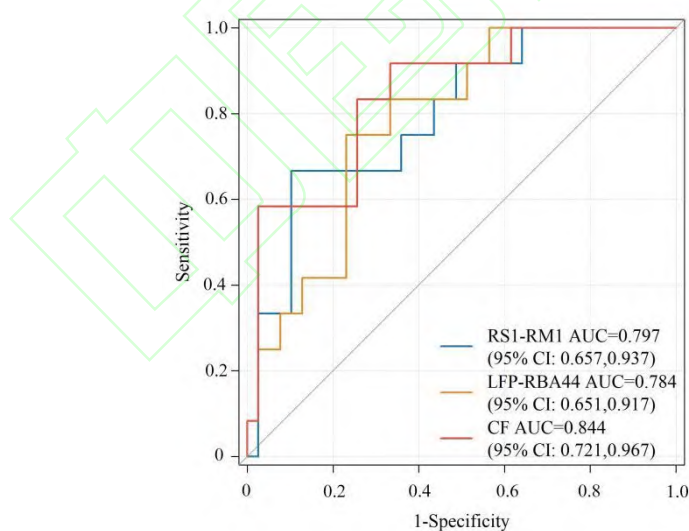


图 3 两通道及联合预测 ROC 曲线

Fig. 3 Two-channel and combined prediction ROC curve

3 讨论

fNIRS 技术可以直接生成绘制人脑的皮层功能图,并提供任务态下的脑皮质激活和脑网络通道连接变化的情况,这些信息在病情评估、干预治疗及疗效评价等方面有着重要的临床意义^[8]。

本研究首次尝试在围术期这一特殊背景下,以 fNIRS 任务态下的脑区功能连接水平作为认知储备评估时的特征指标,为认知储备功能减退的高风险围术期老年 POD 患者提供潜在的神经影像学标志物,从而推动 fNIRS 成为有效识别围术期潜在 POD 患者的重要辅助手段,弥补传统量表和传统成像技术的不足。

既往已有研究探讨 fNIRS 测量前额叶皮质能否作为认知功能障碍的筛查工具, Baik et al^[9]采用基于静息态 fNIRS 构建的有效连接网络,发现轻度认知障碍 (mild cognitive impairment, MCI) 组右侧前额叶与左侧前额叶的耦合强度均显著低于健康对照组水平,提示脑区间的有效连接水平降低可能是 MCI 患者认知功能受损的重要标志。此外, Katzorke et al^[10]发现 MCI 患者在执行语义言语流利度测试 (verbal fluency test, VFT) 任务期间,其前额叶皮质激活情况较正常组明显减弱。运用静息态 fMRI 对 34 例非心脏手术的老年患者 POD 进行研究,发现 POD 患者术前默认网络、突显网络、中央执行网络核心脑区的全脑功能连接强度广泛降低,这些研究支持脑网络连接障碍是 POD 的最终共同途径^[11]。

RS1-RM1 负责身体左侧的痛温触觉、本体感觉的处理以及左侧身体的自主运动、协调复杂动作的执行,二者连接实现“感觉—运动整合”。这一过程可能与谵妄患者出现感知错乱、定向力障碍有关,同时由于疾病原因导致的长期卧床制动可能减少大脑初级运动皮层活跃程度,该连接的减弱可能反映运动反馈的缺失。LFP-RBA44 参与高级认知功能如工作记忆、决策制定、社会认知及情景记忆整合等多项活动,负责语言产生、语言加工以及语调情感调节等功能。LFP-RBA44 功能连接降低提示高级认知功能与语言功能失调,直接与谵妄核心症状相关联。在既往的多项^[12-13]试验中,手术后出现注意力测试受损以及认知障碍与中枢神经系统炎症增加、血脑屏障破坏有关。因此,RS1-RM1、LFP-RBA44 功能连接降低的机制可能与局部脑氧供需与代谢失衡、慢性炎症与疼痛刺激细胞氧化应激反应有关。

需要指出的是,任务态下大脑激活程度比静息态下的脑网络指标更能客观有效地辅助认知相关评估模型的构建^[14-16]。当认知任务要求较复杂时,大脑由静息状态转为激活状态,具体会体现在不同脑区及脑区间通道连接的激活,从而积极调动和协调功能运作,以此来优化认知任务的完成。

本研究存在一定的局限性,由于时间以及条件限制,未能进行脑激活板块的分析,且通道未覆盖至全部脑区。另外,本研究样本量较少,关于提取出的两种通道作为预测模型及外

部验证数据支撑不够充分,且未讨论该方法对患者的长期影响,未来可以联合功能磁共振成像、脑电图,并进一步行大样本多中心的前瞻性研究来证实本研究结果。

综上所述,通过本研究可以明确老年患者 fNIRS 任务态下的脑神经网络影像学特征与 POD 发生风险具有显著相关性, fNIRS 有望成为 POD 早期干预中监测脑功能的重要工具之一。

参考文献

- [1] Hight D, Ehrhardt A, Lersch F, et al. Lower alpha frequency of intraoperative frontal EEG is associated with postoperative delirium: A secondary propensity-matched analysis[J]. J Clin Anesth, 2024, 93: 111343. doi: 10.1016/j.jclinane.2023.111343.
- [2] 中国老年医学学会麻醉学分会. 中国老年患者术后谵妄防治专家共识(2022 版)[J]. 国际麻醉学与复苏杂志, 2023, 44(1): 1-27. doi: 10.3760/cma.j.cn321761-20220915-10005.
- [2] Anesthesiology Branch of Chinese Society of Geriatrics. Expert Consensus on Prevention and Treatment of Postoperative Delirium in Elderly Patients in China (2022 Version) [J]. Int J of Anesth Resus, 2023, 44(1): 1-27. doi: 10.3760/cma.j.cn321761-20220915-10005.
- [3] 李 珺, 钱 景, 方攀攀, 等. 老年脊柱手术术后谵妄患者的前额脑电特征[J]. 安徽医科大学学报, 2023, 58(10): 1773-7. doi: 10.19405/j.cnki.issn1000-1492.2023.10.028.
- [3] Li J, Qian J, Fang P P, et al. Frontal EEG characteristics of elderly patients with postoperative delirium after spinal surgery[J]. Acta Univ Med Anhui, 2023, 58(10): 1773-7. doi: 10.19405/j.cnki.issn1000-1492.2023.10.028.
- [4] Herold F, Wiegel P, Scholkmann F, et al. Applications of functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) neuroimaging in Exercise-Cognition science: a systematic, methodology-focused review[J]. J Clin Med, 2018, 7(12): 466. doi: 10.3390/jcm7120466.
- [5] 刘晓军, 贾在申, 黑飞龙. 基于近红外光谱技术的局部氧饱和度监测在体外循环中的应用[J]. 中国体外循环杂志, 2024, 22(5): 423-9. doi: 10.13498/j.cnki.chin.j.ecc.2024.05.14.
- [5] Liu X J, Jia Z S, Hei F L. Detection of regional oxygen saturation in cardiopulmonary bypass based on near-infrared spectroscopy[J]. Chin J Extracorp Circ, 2024, 22(5): 423-9. doi: 10.13498/j.cnki.chin.j.ecc.2024.05.14.
- [6] 刘泽腾. 基于 fNIRS 对注意缺陷多动障碍儿童执行功能及脑功能活动的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2023. doi: 10.27661/d.cnki.gzhnu.2023.001141.

- [6] Liu Z T. Study on executive function and brain functional activities of children with attention deficit hyperactivity disorder based on fNIRS[D]. Changsha: Central South University, 2023. doi: 10.27661/d.cnki.gzhnu.2023.001141.
- [7] 姜林鸿, 刘晓丹, 孙萍萍, 等. 运动想象训练对卒中后患者上肢运动功能恢复的影响及静息态 fNIRS 脑网络特征研究[J]. 中国康复医学杂志, 2023, 38(11): 1505-13.
- [7] Jiang L H, Liu X D, Sun P P, et al. Effects of motor imagery training on the recovery of upper extremity motor function in poststroke patients and characteristics of resting-state fNIRS brain network[J]. Chin J Rehabil Med, 2023, 38(11): 1505-13.
- [8] Expert consensus on clinical application of near-infrared brain functional imaging technology writing group. 近红外脑功能成像临床应用专家共识[J]. 中国老年保健医学, 2021, 19(2): 3-9.
- [8] Expert consensus on clinical application of near-infrared brain functional imaging technology writing group. Expert consensus on clinical application of near-infrared brain functional imaging technology[J]. Chin J Geriatr Care, 2021, 19(2): 3-9.
- [9] Baik J S, Ko M H, Ko S H, et al. Assessment of functional near-infrared spectroscopy by comparing prefrontal cortex activity: a cognitive impairment screening tool[J]. Alzheimer Dis Assoc Disord, 2022, 36(3): 266-8. doi: 10.1097/WAD.0000000000000475.
- [10] Katzorke A, Zeller J B M, Müller L D, et al. Decreased hemodynamic response in inferior frontotemporal regions in elderly with mild cognitive impairment[J]. Psychiatry Res Neuroimaging, 2018, 274: 11-8. doi: 10.1016/j.psychresns.2018.02.003.
- [11] van Montfort S T, van Dellen E, Stam C J, et al. Brain network disintegration as a final common pathway for delirium: a systematic review and qualitative meta-analysis[J]. Neuroimage Clin, 2019, 23: 101809. doi: 10.1016/j.nicl.2019.101809.
- [12] Zhao Q, Wan H, Pan H, et al. Postoperative cognitive dysfunction-current research progress[J]. Front Behav Neurosci, 2024, 18: 1328790. doi: 10.3389/fnbeh.2024.1328790.
- [13] Dow C T, Kidess Z. Proposing Bromo-epi-androsterone (BEA) for perioperative neurocognitive disorders with Interleukin-6 as a druggable target[J]. J Clin Anesth, 2025, 101: 111736. doi: 10.1016/j.jclinane.2024.111736.

- [14] Cole M W, Ito T, Cocuzza C, et al. The functional relevance of task-state functional connectivity[J]. J Neurosci, 2021, 41(12): 2684-702. doi: 10.1523/JNEUROSCI.1713-20.2021.
- [15] Neiman E S, Seyffert M, Richards A, et al. Epilepsy with continuous spikes and waves during slow wave sleep in a child diagnosed with pervasive developmental disorder-not otherwise specified[J]. Sleep Med, 2010, 11(8): 799-802. doi: 10.1016/j.sleep.2010.04.006.
- [16] Lu W, Zeng L, Wang J, et al. Imitating and exploring the human brain's resting and task-performing states *via* brain computing: scaling and architecture[J]. Natl Sci Rev, 2024, 11(5): nwae080. doi: 10.1093/nsr/nwae080.