

·临床研究·

基于自然主义范式的脑卒中后失语症听理解和口语表达障碍皮层控制机制研究

朱光跃^{1,2}, 夏家怡^{1*}, 蒋奕晨², 裴松³, 黄宋余⁴, 李宁宁¹, 任宁娜¹

1 上海市第二康复医院, 上海 200441;

2 上海中医药大学康复医学院, 上海 201203;

3 上海市宝山区仁和医院, 上海 200443;

4 苏州市中医医院, 江苏 苏州 215007

* 通信作者: 夏家怡, E-mail: 532821681@qq.com

收稿日期: 2025-05-14; 接受日期: 2025-09-26

基金项目: 上海市卫生健康委员会卫生行业临床研究专项(20254Y0122); 上海市宝山区卫生健康委员会优青(育才)

培养计划项目(BSWSYC-2024-14, BSWSYC-2024-19); 上海市第二康复医院科研项目(Y2024-11)

DOI: 10.3724/SP.J.1329.2025.06009

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



摘要 目的 通过贴近真实场景的自然主义范式探索脑卒中后失语症(PSA)患者听理解和口语表达障碍的皮层控制机制。**方法** 选择2024年3月—2025年2月在上海市第二康复医院治疗的PSA患者(PSA组)26例, 另选择性别、年龄、文化程度相匹配的健康对照者(对照组)21例。所有受试者均在功能性近红外光谱技术(fNIRS)监测下进行听理解-口语表达任务。以自然问答的语言模式构成区块任务范式设计, 包括听具有简短故事情节问题、思考和回答3个部分, 整个范式重复6次。fNIRS监测区域包括双侧颞叶、顶叶和前额叶。采用西方失语症成套测验(WAB)和波士顿诊断性失语症测验(BDAE)评定受试者语言功能。采用fNIRS系统评价受试者听理解-口语表达任务时不同通道和脑区[颞上回(STG)、颞中回(MTG)、缘上回(SMG)、梭状回(FG)、角回(AG)、体感联合皮层(SAC)、初级感觉皮层(PSC)、初级运动皮层(PMC)、前运动区和辅助运动皮层(PMSC)、额下回三角部(PT)、额下回眼眶部(PO)、背外侧前额叶皮层(DLPFC)与额叶眼动区(FEF)]的皮层激活程度。分析PSA组听理解任务/口语表达任务中WAB听理解/自发语言评分、WAB-AQ评分和BDAE评分与皮层激活程度相关性。**结果** 在听理解任务中, 对照组表现为左右脑区明显激活, 其中右侧脑区的激活水平高于左侧, 包括STG($P=0.041$)、MTG($P=0.002$)、SMG($P=0.028$)等区域; PSA组脑区激活主要依赖于右侧Wernicke同源脑区, 包括STG($P=0.030$)、MTG($P=0.024$)等区域, 左侧脑区激活明显减少($P<0.05$)。在口语表达任务中, 对照组左侧Broca区及其相关区域明显激活, 包括PT($P=0.036$)、PO($P=0.001$)、PMC($P=0.002$), 右侧脑区呈对称性激活; PSA组表现为右侧脑区的代偿性激活, 包括PT($P=0.035$)、PO($P=0.002$)、PMC($P=0.017$), 而左侧脑区(尤其是Broca区)的激活明显下降($P<0.05$)。PSA患者WAB听理解评分与双侧DLPFC($r=-0.401$, $P=0.047$)、PMSC($r=-0.417$, $P=0.038$)、PMC($r=-0.414$, $P=0.040$)的激活程度相关。WAB自发语言评分与左侧DLPFC($r=-0.423$, $P=0.035$)、PMC($r=-0.400$, $P=0.048$)、PSC($r=-0.481$, $P=0.015$)的激活程度相关, 与右侧STG($r=-0.404$, $P=0.045$)的激活程度相关。**结论** PSA患者在听理解与口语表达任务中的皮层激活程度与语言功能障碍评分具有明显相关性, 右侧脑区在PSA康复中具有重要作用。

关键词 脑卒中; 失语症; 语言功能; 自然主义范式; 皮层控制

引用格式: 朱光跃, 夏家怡, 蒋奕晨, 等. 基于自然主义范式的脑卒中后失语症听理解和口语表达障碍皮层控制机制研究[J]. 康复学报, 2025, 35(6): 611-618.

ZHU G Y, XIA J Y, JIANG Y C, et al. Cortical control mechanisms of auditory comprehension and verbal expression impairment in patients with post-stroke aphasia based on the naturalistic paradigm [J]. Rehabil Med, 2025, 35(6): 611-618.

DOI: 10.3724/SP.J.1329.2025.06009

©《康复学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 4.0 协议

© Rehabilitation Medicine, OA under the CC BY-NC-ND 4.0

脑卒中后失语症(post-stroke aphasia, PSA)是脑卒中后常见的功能障碍之一,约30% PSA患者在康复治疗中仍存在语言功能障碍,且在慢性期恢复更困难^[1]。由于PSA具有高度异质性,康复效果差异明显,准确识别其神经机制对于个性化康复策略制订具有重要意义^[2]。听理解和口语表达是语言功能的核心环节,涉及语音识别、语义加工、语法构建和语言输出等复杂认知和神经过程^[3]。这些过程由多个脑区协同控制,主要涉及颞叶、额叶和顶叶等脑区^[4]。传统研究常采用分解式实验范式,如词语流畅性测试、短语复述和图形命名等,以解析语言功能的不同组成部分^[5]。此类实验任务较抽象,难以全面反映现实情境中语言处理的复杂性^[6]。

自然主义范式通过模拟真实情境的语言任务研究大脑在自然语境中的语言加工模式,弥补传统实验范式的不足^[7-9]。研究显示,自然主义范式能更准确地反映语言理解和表达的动态过程,揭示更广泛的神经活动模式^[10-11]。功能性近红外光谱技术(functional near-infrared spectroscopy, fNIRS)因其操作简便、抗干扰性强、生态效度高,已被广泛应用于自然刺激下的皮层机制探讨^[12-13]。本研究将自然主义范式与传统实验范式结合,采用fNIRS实时监测评估PSA患者听理解与口语表达过程中皮层兴奋性动态变化,探索其皮层控制机制,为自然主义范式干预PSA提供理论依据。

1 临床资料

1.1 病例选择标准

1.1.1 诊断标准

1.1.1.1 脑卒中诊断标准 符合《中国各类主要脑

血管病诊断要点2019》^[14]有关脑梗死和脑出血的诊断标准。

1.1.1.2 PSA诊断标准 经西方失语症成套测验(Western Aphasia Battery, WAB)^[15]判定为PSA,包括口语表达、听理解、复述、命名等至少1项功能存在障碍。

1.1.2 纳入标准

1.1.2.1 脑卒中患者 ① 年龄18~86岁;② 性别不限;③ 发病时间1~6个月(亚急性期);④ 患者本人或家属知情同意,愿意参与本研究并签署知情同意书。

1.1.2.2 健康对照者 ① 年龄、性别与脑卒中患者相匹配;② 本人知情同意,愿意参与本研究并签署知情同意书。

1.1.3 排除标准 ① 既往有语言障碍、严重听力或视力障碍病史;② 有严重精神障碍或其他神经系统疾病影响语言功能;③ 合并严重的全身性疾病(如心肺功能不全)或其他无法完成试验的情况;④ 对fNIRS存在禁忌证(如严重头部皮肤病或光敏性疾病);⑤ 研究期间无法配合完成试验。

1.2 一般资料

选择2024年3月—2025年2月在上海市第二康复医院治疗的PSA患者(PSA组)26例,另选择性别、年龄、文化程度相匹配的健康对照者(对照组)21例。2组性别、年龄、文化程度等一般资料比较,差异均无统计学意义($P>0.05$),具有可比性。见表1。本研究经上海市第二康复医院医学伦理委员会审批(审批号:2024-17-01)。

表1 2组一般资料比较

Table 1 Comparison of general data between two groups

组别	例数	性别		年龄/($\bar{x}\pm s$,岁)	文化程度				脑卒中类型	
		男	女		文盲	小学	中学	大学	脑梗死	脑出血
对照组	21	10	11	65.52±12.15	2	6	11	2	—	—
PSA组	26	16	10	68.19±11.48	5	2	12	7	23	3

2 方法

2.1 观察指标

2.1.1 语言功能 采用WAB和波士顿诊断性失语症测验(Boston Diagnostic Aphasia Examination, BDAE)^[16]评定受试者语言功能。

2.1.1.1 WAB WAB包括自发语言、听理解、复述和命名4个维度,折算各项分值赋分为20、10、10、10分,并通过以下公式计算失语商(aphasia quotient, AQ)。

$$AQ=(\text{自发语言}+\text{听理解}+\text{复述}+\text{命名})\times 2$$

2.1.1.2 BDAE BDAE根据PSA的严重程度分为0~5级,等级越高,语言功能越好。

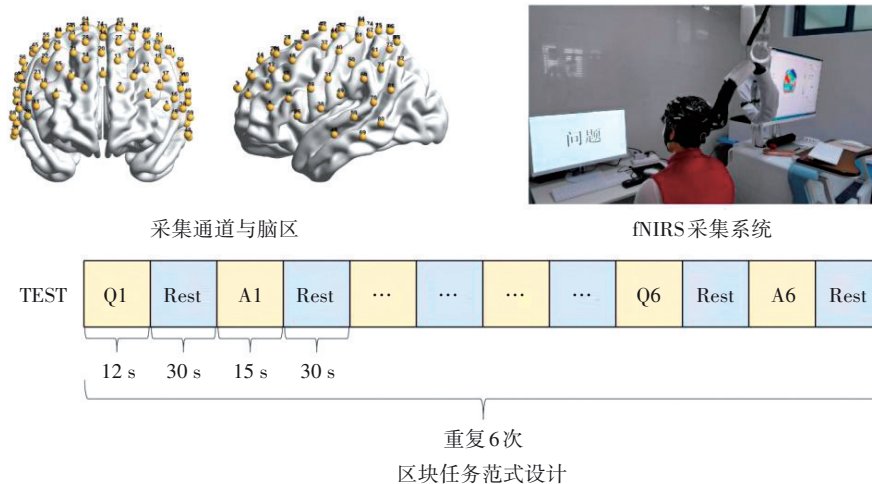
2.1.2 皮层激活程度

2.1.2.1 fNIRS数据采集 采用fNIRS系统(武汉资联虹康科技有限公司,型号:BS-2000L)评价受试者进行听理解-口语表达任务时不同通道和脑区[颞上回(superior temporal gyrus, STG)、颞中回(middle temporal gyrus, MTG)、缘上回(supramarginal gyrus, SMG)、梭状回(fusiform gyrus, FG)、角回(angular

gyrus, AG)、体感联合皮层(somatosensory association cortex, SAC)、初级感觉皮层(primary somatosensory cortex, PSC)、初级运动皮层(primary motor cortex, PMC)、前运动区和辅助运动皮层(pre-motor and supplementary motor cortex, PMSC)、额下回三角部(pars triangularis Broca's area, PT)、额下回眼眶部(pars opercularis, PO)、背外侧前额叶皮层(dorsolateral prefrontal cortex, DLPFC)与额叶眼动区(frontal eye fields, FEF)]的皮层激活程度。该系统采用双波长激光二极管(690、830 nm),以10 Hz采样频率运行,包含27个光源和25个探测器,共形成89个通道,每个通道由1组光源-探测器构成,光极间距设置为3 cm。使用三维定位仪(武汉资联科技有限公司,型号:NirMap)记录参考标志点(Nz、Cz、AL、

RL)和光极的空间坐标。通道定位通过NIRS-SPM方法精确投射至皮层表面并映射到布罗德曼区。

自然主义范式包括来自日常生活中的不同对话问答题。所有受试者均在fNIRS监测下进行听理解-口语表达任务。以自然问答的语言模式构成区块任务范式设计,包括听具有简短故事情节问题、思考和回答3个部分。具体时间设置为:听问题(12 s)-休息(30 s)-回答(15 s)-休息(30 s),共重复6次,总任务时间8.7 min。在听问题模块中,向受试者播放提前录制好的语音问题,同时屏幕显示“问题”字样;在休息中,受试者可思考该问题的答案;在屏幕显示“请回答”字样后进入回答模块中,受试者可就该问题做出回答;结束后,再次进入休息,等待下一组问答。见图1。



注:Q为问题;A为回答。

Note: Q is question; A is answer.

图1 fNIRS光极分布和试验范例

Figure 1 fNIRS optode layout and experimental paradigm

2.1.2.2 fNIRS数据处理和分析 采用NIRS-KIT工具包对fNIRS数据进行处理和分析^[17]。

(1)信号转换 将原始光强信号转换为光学密度信号,并通过修正的比尔-朗伯定律计算相对氧合血红蛋白(oxyhemoglobin, HbO₂)浓度的变化。

(2)数据分析 对数据进行质量评估,剔除噪声信号;进行去趋势、头动校正(transformation displacement and displacement regression, TDDR)和带通滤波(0.01~0.2 Hz);使用一般线性模型对个体激活水平进行计算并获取个体通道 β 值;在个体水平的基础上进行组水平分析并进行错误发现率(false discovery rate, FDR)校正。

2.2 统计学方法

采用SPSS 22.0统计软件和Matlab R2017b软件

进行数据分析。计量资料服从正态分布以 $(\bar{x}\pm s)$ 表示,组间比较采用两独立样本 t 检验,组内比较采用配对样本 t 检验;计量资料不服从正态分布以 $M(P_{25}, P_{75})$ 表示,组间比较采用Mann-Whitney U 检验,组内比较采用Wilcoxon符号秩检验。计数资料组间比较采用 χ^2 检验。符合正态分布的数据相关性分析采用Pearson检验,不符合正态分布的采用Spearman检验。 $P<0.05$ 为差异具有统计学意义。

3 结果

3.1 2组不同任务中皮层激活程度比较

3.1.1 2组听理解任务中皮层激活程度比较 在自然主义范式听理解任务中,对照组右侧脑区表现为以Wernicke同源区激活增多为主,涉及脑区包括STG($P=0.041$)、MTG($P=0.002$)、SMG($P=0.028$)、

FG ($P=0.028$)、PSC ($P=0.027$)、PMC ($P=0.028$)、PT ($P=0.011$)、DLPFC ($P=0.014$)、FEF ($P=0.035$)。左侧脑区同样表现为以 Wernicke 区激活增多为主, 涉及脑区包括 STG ($P=0.011$)、PSC ($P=0.033$)、PMC ($P=0.018$)、SAC ($P=0.003$)。左侧脑区整体激活水平明显低于右侧 ($P<0.05$)。

PSA 组右侧脑区表现为以 Wernicke 同源区激活

增多为主, 涉及脑区包括 STG ($P=0.030$)、MTG ($P=0.024$)、FG ($P=0.022$)、PMSC ($P=0.018$)、PT ($P=0.018$)。左侧 Wernicke 区激活较少, 涉及脑区包括 MTG ($P=0.047$)、SAC ($P=0.018$)。左侧脑区整体激活水平明显低于右侧 ($P<0.05$)。与对照组比较, PSA 组双侧脑区激活均明显减弱, 主要依赖右侧脑区激活, 左侧脑区激活明显减少 ($P<0.05$)。见图 2。

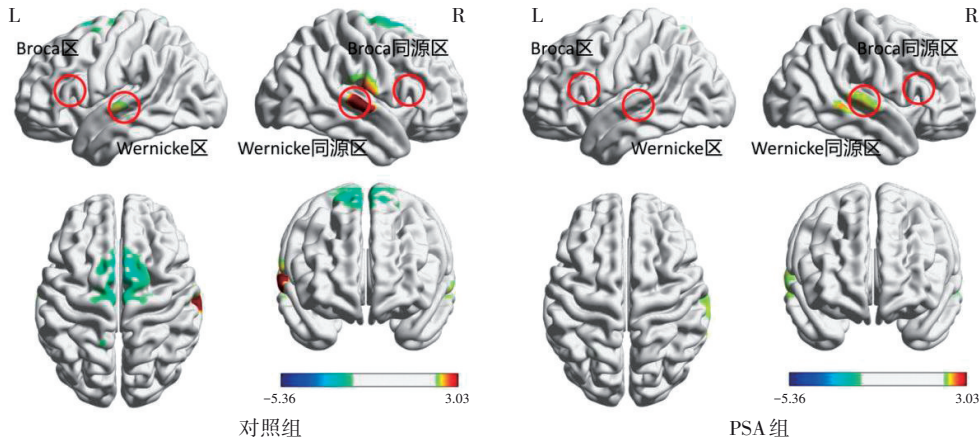


图2 2组听理解任务中皮层激活程度比较

Figure 2 Comparison of cortical activation levels between two groups during auditory comprehension tasks

3.1.2 2组口语表达任务中皮层激活程度比较 在自然主义范式口语表达任务中, 对照组左侧脑区表现为以 Broca 区激活增多为主, 涉及脑区包括 PT ($P=0.036$)、PO ($P=0.001$)、PMC ($P=0.002$)、PMSC ($P=0.013$)、DLPFC ($P=0.009$)、STG ($P=0.001$)、MTG ($P=0.006$)、PSC ($P=0.002$)。右侧同源脑区呈现对称性激活。PSA 组右侧脑区表现为以 Broca 同源区

代偿性激活增多为主, 右侧前额叶、颞叶和顶叶区广泛激活, 涉及脑区包括 PT ($P=0.035$)、PO ($P=0.002$)、PMC ($P=0.017$)、PMSC ($P=0.001$)、STG ($P=0.005$)、MTG ($P=0.001$)、PSC ($P=0.010$)。左侧 Broca 区激活明显减弱, 激活脑区包括 PT ($P=0.014$)、PO ($P=0.030$)、DLPFC ($P=0.014$)、STG ($P=0.002$)。左侧脑区整体激活水平明显低于右侧 ($P<0.05$)。与对照组比较, PSA 组激活主要集中在右侧脑区, 左侧脑区的激活明显减少 ($P<0.05$)。见图 3。

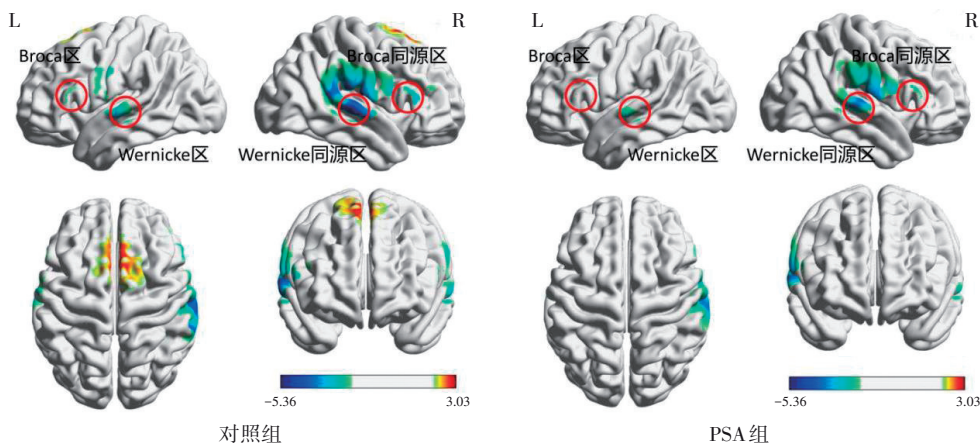


图3 2组口语表达任务中皮层激活程度比较

Figure 3 Comparison of cortical activation levels between two groups during verbal expression tasks

3.2 语言功能障碍评分与皮层激活程度相关性

3.2.1 PSA组听理解任务中WAB听理解评分、WAB-AQ评分和BDAE评分与皮层激活程度相关性 在自然主义范式听理解任务中,PSA患者WAB听理解评分与双侧DLPFC($r=-0.401, P=0.047$)、PMSC($r=-0.417, P=0.038$)、PMC($r=-0.414, P=0.040$)的激活程度相关;与左侧FEF($r=-0.520, P=$

0.008)、SMG($r=0.472, P=0.017$)的激活程度相关;与右侧PT($r=0.400, P=0.048$)、MTG($r=0.434, P=0.030$)的激活程度相关。WAB-AQ评分与左侧SMG($r=0.459, P=0.021$)、AG($r=0.434, P=0.030$)的激活程度相关。BDAE评分与左侧SMG($r=0.452, P=0.023$)的激活程度相关。见图4。

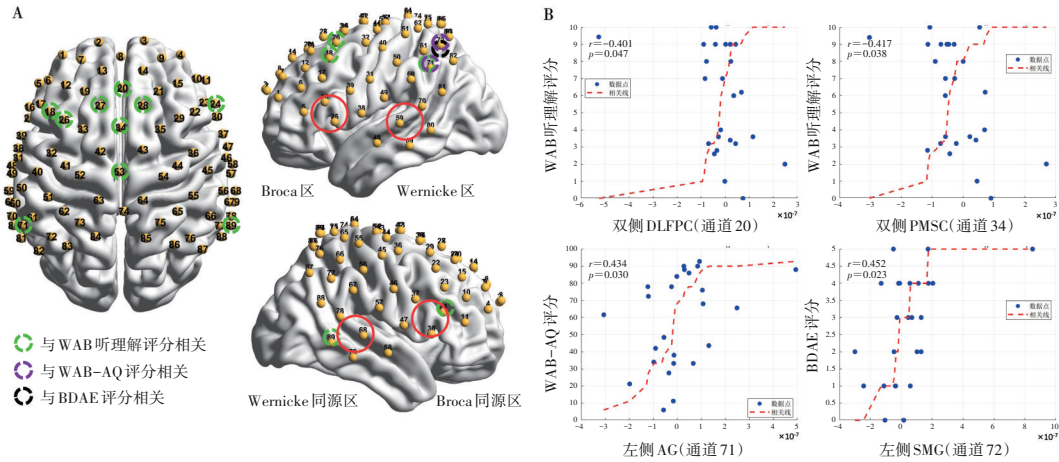


图4 PSA组听理解任务中WAB听理解评分、WAB-AQ评分和BDAE评分与皮层激活程度的相关性
Figure 4 Correlation between WAB auditory comprehension, WAB-AQ and BDAE scores and degree of cortical activation in the PSA group during auditory comprehension task

3.2.2 PSA组口语表达任务中WAB自发语言评分、WAB-AQ评分和BDAE评分与皮层激活程度相关性 在自然主义范式口语表达任务中,PSA组WAB自发语言评分与左侧DLPFC($r=-0.423, P=0.035$)、PMC($r=-0.400, P=0.048$)、PSC($r=-0.4812, P=0.015$)的激活程度相关;与右侧STG($r=-0.404, P=0.045$)的激活程度相关。WAB复述评分与左侧STG($r=-0.411, P=0.041$)、MTG($r=-0.418, P=0.038$)

的激活程度相关。WAB命名评分与左侧STG($r=-0.536, P=0.006$)的激活程度相关。WAB-AQ评分与左侧STG($r=-0.418, P=0.0378$)、PSC($r=-0.411, P=0.041$)的激活程度相关。BDAE评分与左侧DLPFC($r=-0.423, P=0.035$)、PMSC($r=-0.434, P=0.030$)、STG($r=-0.458, P=0.021$)、PSC($r=-0.492, P=0.013$)的激活程度相关;与右侧STG($r=-0.400, P=0.048$)的激活程度相关。见图5。

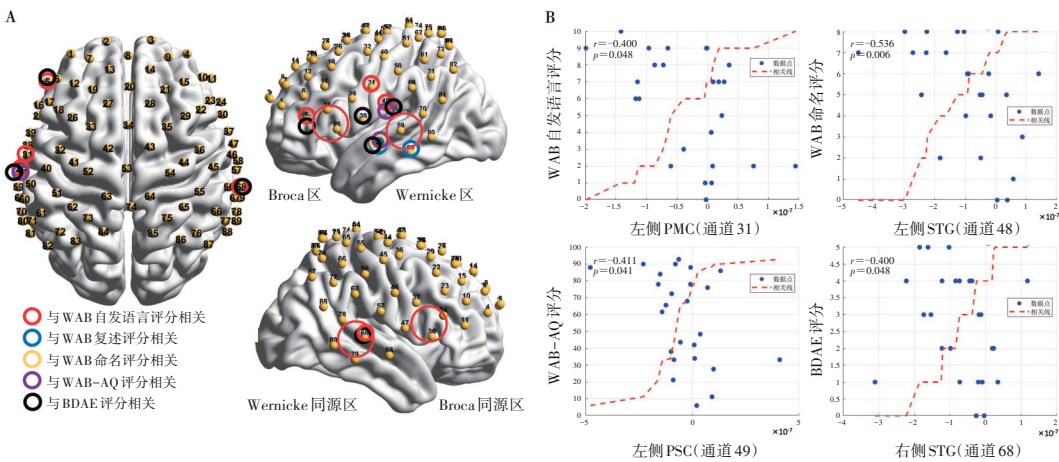


图5 PSA组口语表达任务中WAB自发语言评分、WAB-AQ评分和BDAE评分与皮层激活程度相关性
Figure 5 Correlation between WAB auditory comprehension, WAB-AQ and BDAE scores and degree of cortical activation in the PSA group during verbal expression tasks

4 讨论

自然主义范式通过提供真实场景的语言任务,弥补了传统实验范式在语境复杂性和动态交互方面的不足^[8,18]。本研究在fNIRS评估基础上设置了一种结合自然主义范式和区块设计的新型语言范式,结合WAB和BDAE评估PSA患者的语言功能损伤程度,初步探讨脑卒中后失语症患者听理解和口语表达连续任务中的皮层控制机制。

4.1 在自然主义范式听理解任务中,PSA患者表现为以右侧Wernicke同源区为主的激活模式及代偿机制

本研究结果显示,对照组在自然主义范式听理解任务中表现出右侧脑区激活增多,如STG、MTG、SMG、PSC等。自然主义范式下,语言理解不仅依赖语音和语义的加工,还涉及情感语义、语调、语境和复杂故事情节的处理。右侧脑区,尤其是STG、MTG、PSC,在整合非语言信息方面表现突出,反映了右半球在自然语言处理中的重要作用^[19]。功能磁共振成像(functional magnetic resonance imaging, fMRI)研究显示,多感官信息沿PSC-颞上沟通路逐级整合,并与高级认知功能密切相关^[20]。顶叶区域被明显激活,可能与其涉及多模态信息的整合和语义记忆检索有关。左侧Wernicke区在语音理解和语义核心处理任务中发挥主导作用。PSA患者的左侧Wernicke区激活明显减少,反映出核心语言理解功能的损伤。右侧脑区表现出代偿性激活,尤其是右侧颞叶和顶叶区域(如STG、MTG和TG),这表明在左侧语言中枢受损的情况下,右侧脑区在语义记忆的调取和语境分析中起到代偿性作用^[21]。左侧额叶激活增强表明PSA患者需要更多的认知努力以弥补损伤,结合右侧脑区的激活,提示其语言理解过程变得更加依赖额外资源。TURKELTAUB^[22]研究表明,随着刺激增多,以及随之而来的对这些刺激内容的有意识处理需求,认知负荷(如注意力)的需求会增加。进一步相关性分析发现,双侧脑区(特别是DLPFC、PMSC和PMC)的同步激活可能代表了一种自适应机制,即双侧半球试图接管部分语言处理功能。但是,由于语言加工效率较低,PSA患者仍表现出明显的听理解障碍。

4.2 在自然主义范式口语表达任务中,PSA患者表现为右侧Broca同源区的激活模式及代偿机制

本研究结果显示,在自然主义范式口语表达任

务中,对照组主要依赖左侧Broca区(包括PT和PO)及其相关区域(如PMC、PMSC)进行语言生成。这些区域在语法加工、语言计划和语音生成中起到核心作用。右侧脑区(如Broca同源区和STG)也表现出辅助性激活,可能与范式中涉及的非语言信息(如语调调控和情感表达)加工有关^[23]。而PSA患者左侧Broca区及其周围区域激活明显减少,提示语言生成功能的核心中枢受损。在口语表达任务中表现出右侧脑区的代偿性激活,尤其是右侧Broca同源区(如PT和PO)和右侧额叶皮层。这种激活可能反映了PSA患者尝试通过右侧脑区参与语言生成过程,但效率可能低于对照组。真实语境和复杂语言整合的需求使得右侧脑区在PSA患者中的代偿功能尤为重要^[24]。HARMON等^[25]研究表明,即使PSA症状不明显的患者将注意力分散在口语话语和并发任务时,语言处理能力也会明显下降。WAB自发语言、复述、命名、AQ、BDAE评分与各脑区的相关性分析发现,口语表达评分与左侧脑区(包括DLPFC、PMC、PSC、STG、MTG、PMSC)的激活程度相关,而PSA患者左侧语言优势半球的功能下降,导致语言输出不稳定或需要额外的认知努力来完成语言生成任务,可能促使右半球的代偿。这与ZHOU等^[26]研究结果相似。

4.3 右侧脑区参与自然主义范式听理解与口语表达的连续过程

本研究显示,听理解任务中右侧脑区的激活水平与口语表达任务中的语言生成能力密切相关。这提示,右侧脑区可能在语言的理解到生成的过渡过程中起到桥梁作用。这与TRUZMAN等^[27]研究结果相似。对照组左侧脑区(如Broca区和Wernicke区)负责语言生成和核心语义处理,而右侧脑区主要参与情感语调、语境分析和语音调控^[4]。这种左右分工模式使语言处理具有高度的效率和灵活性。TILTON-BOLOWSKY等^[28]研究显示,PSA患者右侧脑区在语言康复中具有重要作用。右侧颞叶、额叶和顶叶区域明显被激活反映了大脑的神经可塑性^[29]。这种代偿模式为PSA患者康复训练提供了新的方向,如通过语调、情境模拟和语音强调练习,有望增强右侧脑区功能。此外,结合神经调控技术(如经颅磁刺激、经颅直流电刺激),强化跨半球连接,也可以促进左右脑区的功能重组和整合^[30]。

5 小 结

PSA患者在听理解与口语表达任务中的皮层激活程度与语言功能障碍评分具有明显相关性,右侧脑区在PSA康复中具有重要作用。自然主义范式提供了更真实的语言处理场景,有助于捕捉PSA患者在日常交流中的语言加工特点,其动态和复杂性能在一定程度上揭示传统实验任务无法观测到的语言机制。但本研究仍存在一定局限性,如样本量偏小,仅分析PSA患者在自然主义范式下的语言加工模式,未能根据病灶位置或语言障碍类型进行亚型细分,这在一定程度上限制了研究结果的外推性和针对性;未采集静息态fNIRS数据,无法对任务态与静息态的脑网络差异进行对比分析。下一步研究还需扩大样本量;通过病灶部位和语言障碍类型等进行分层分析,增加静息态数据采集,深入探索不同PSA亚型的皮层代偿机制;结合fMRI或脑电图等多模态影像技术以提高数据的精确性;通过整合自然主义范式,设计贴近患者日常生活的训练方案为干预PSA患者提供更多循证依据。

参考文献

- [1] Rehabilitation and Recovery of People with Aphasia after Stroke (RELEASE) Collaborators. Predictors of poststroke aphasia recovery: a systematic review-informed individual participant data meta-analysis [J]. *Stroke*, 2021, 52(5): 1778-1787.
- [2] VITTI E, HILLIS A E. Treatment of post-stroke aphasia: a narrative review for stroke neurologists [J]. *Int J Stroke*, 2021, 16(9): 1002-1008.
- [3] ROGER E, RODRIGUES DE ALMEIDA L, LOEVENBRUCK H, et al. Unraveling the functional attributes of the language connectome: crucial subnetworks, flexibility and variability [J]. *Neuroimage*, 2022, 263: 119672.
- [4] SHAH-BASAK P, BOUKRINA O, LI X R, et al. Targeted neuro-rehabilitation strategies in post-stroke aphasia [J]. *Restor Neurol Neurosci*, 2023, 41(3/4): 129-191.
- [5] YANG C H, ZHANG T Y, HUANG K Q, et al. Increased both cortical activation and functional connectivity after transcranial direct current stimulation in patients with post-stroke: a functional near-infrared spectroscopy study [J]. *Front Psychiatry*, 2022, 13: 1046849.
- [6] TU J X, RIM K, YE B Y, et al. Dense Paraphrasing for multimodal dialogue interpretation [J]. *Front Artif Intell*, 2024, 7: 1479905.
- [7] MATYJEK M, KITA S, TORRALBA CUELLO M, et al. Multisensory integration of speech and gestures in a naturalistic paradigm [J]. *Hum Brain Mapp*, 2024, 45(11): e26797.
- [8] SONKUSARE S, BREAKSPEAR M, GUO C. Naturalistic stimuli in neuroscience: critically acclaimed [J]. *Trends Cogn Sci*, 2019, 23(8): 699-714.
- [9] KRÖLL J P, FRIEDRICH P, LI X, et al. Naturalistic viewing increases individual identifiability based on connectivity within functional brain networks [J]. *Neuroimage*, 2023, 273: 120083.
- [10] GARIBYAN A, SCHILLING A, BOEHM C, et al. Neural correlates of linguistic collocations during continuous speech perception [J]. *Front Psychol*, 2022, 13: 1076339.
- [11] KHOSLA M, NGO G H, JAMISON K, et al. Cortical response to naturalistic stimuli is largely predictable with deep neural networks [J]. *Sci Adv*, 2021, 7(22): eabe7547.
- [12] YOO S H, SANTOSA H, KIM C S, et al. Decoding multiple sound-categories in the auditory cortex by neural networks: an fNIRS study [J]. *Front Hum Neurosci*, 2021, 15: 636191.
- [13] CRIVELLI D, SABOGAL RUEDA M D, BALCONI M. Linguistic and motor representations of everyday complex actions: an fNIRS investigation [J]. *Brain Struct Funct*, 2018, 223(6): 2989-2997.
- [14] 中华医学会神经病学分会, 中华医学会神经病学分会脑血管病学组. 中国各类主要脑血管病诊断要点 2019 [J]. *中华神经科杂志*, 2019, 52(9): 710-715.
Chinese Society of Neurology, Chinese Stroke Society. Diagnostic criteria of cerebrovascular diseases in China (version 2019) [J]. *Chin J Neurol*, 2019, 52(9): 710-715.
- [15] LI B X, DENG S Z, ZHUO B F, et al. Effect of acupuncture vs sham acupuncture on patients with poststroke motor aphasia: a randomized clinical trial [J]. *JAMA Netw Open*, 2024, 7(1): e2352580.
- [16] FONG M W M, VAN PATTEN R, FUCETOLA R P. The factor structure of the Boston diagnostic aphasia examination, third edition [J]. *J Int Neuropsychol Soc*, 2019, 25(7): 772-776.
- [17] HOU X, ZHANG Z, ZHAO C, et al. NIRS-KIT: a MATLAB toolbox for both resting-state and task fNIRS data analysis [J]. *Neurophotonics*, 2021, 8(1): 010802.
- [18] THÉZÉ R, GIRAUD A L, MÉGEVAND P. The phase of cortical oscillations determines the perceptual fate of visual cues in naturalistic audiovisual speech [J]. *Sci Adv*, 2020, 6(45): eabc6348.
- [19] MALE A G, SMITH C A, GOULDTHORP B. An ERP study of hemispheric differences in perceptual representations of language reveals meaning attribution in the right hemisphere and constituents of the N400-effect [J]. *Brain Lang*, 2021, 219: 104963.
- [20] WEI W, BENN R A, SCHOLZ R, et al. A function-based mapping of sensory integration along the cortical hierarchy [J]. *Commun Biol*, 2024, 7(1): 1593.
- [21] ROSS E D. Affective prosody and its impact on the neurology of language, depression, memory and emotions [J]. *Brain Sci*, 2023, 13(11): 1572.
- [22] TURKELTAUB P E. Redefining recovery from aphasia [J]. *Cogn Behav Neurol*, 2015, 28(4): 244-245.
- [23] SEYDELL-GREENWALD A, CHAMBERS C E, FERRARA K, et al. What you say versus how you say it: Comparing sentence comprehension and emotional prosody processing using fMRI [J]. *Neuroimage*, 2020, 209: 116509.

- [24] ROSS E D. Disorders of vocal emotional expression and comprehension; The aprosodias [J]. *Handb Clin Neurol*, 2021, 183: 63–98.
- [25] HARMON T G, JACKS A, HALEY K L, et al. Dual-task effects on story retell for participants with moderate, mild, or no aphasia: quantitative and qualitative findings [J]. *J Speech Lang Hear Res*, 2019, 62(6): 1890–1905.
- [26] ZHOU L, TAO Y, CIMINO J J, et al. Terminology model discovery using natural language processing and visualization techniques [J]. *J Biomed Inform*, 2006, 39(6): 626–636.
- [27] TRUZMAN T, ROCHON E, MELTZER J, et al. Simultaneous normalization and compensatory changes in right hemisphere connectivity during aphasia therapy [J]. *Brain Sci*, 2021, 11(10): 1330.
- [28] TILTON-BOLOWSKY V, STOCKBRIDGE M D, HILLIS A E. Re-mapping and reconnecting the language network after stroke [J]. *Brain Sci*, 2024, 14(5): 419.
- [29] GIGLIO L, OSTAREK M, WEBER K, et al. Commonalities and asymmetries in the neurobiological infrastructure for language production and comprehension [J]. *Cereb Cortex*, 2022, 32(7): 1405–1418.
- [30] LIEPERT J. Repetitive transcranial magnetic stimulation for improving post-stroke aphasia – Enough evidence for clinical routine use? [J]. *Clin Neurophysiol*, 2022, 140: 165–166.

Cortical Control Mechanisms of Auditory Comprehension and Verbal Expression Impairment in Patients with Post-Stroke Aphasia Based on the Naturalistic Paradigm

ZHU Guangyue^{1,2}, XIA Jiayi^{1*}, JIANG Yichen², PEI Song³, HUANG Songyu⁴, LI Ningning¹, REN Ningna¹

¹ The Second Rehabilitation Hospital of Shanghai, Shanghai 200441, China;

² School of Rehabilitation Medicine, Shanghai University of Traditional Chinese Medicine, Shanghai 201203, China;

³ Renhe Hospital of Baoshan District, Shanghai 200443, China;

⁴ Suzhou Hospital of Traditional Chinese Medicine, Suzhou, Jiangsu 215007, China

*Correspondence: XIA Jiayi, E-mail: 532821681@qq.com

ABSTRACT Objective To explore the cortical control mechanisms of auditory comprehension and verbal expression impairment in patients with post-stroke aphasia (PSA) based on a naturalistic paradigm that closely mimics real-world scenarios. **Methods** A total of 26 PSA patients (PSA group) treated in the Second Rehabilitation Hospital of Shanghai from March 2024 to February 2025 were enrolled, along with 21 gender, age, and education-matched healthy controls (control group). All participants completed an auditory comprehension-verbal expression task under functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) monitoring. A block-task paradigm was designed based on a natural question-answer language model, consisting of three phases: listening to questions embedded in short narratives, thinking, and responding, with the entire paradigm repeated six times. The fNIRS monitoring regions encompassed the bilateral temporal, parietal, and prefrontal lobes. The Western Aphasia Battery (WAB) and the Boston Diagnostic Aphasia Examination (BDAE) were used to evaluate language function. The fNIRS system was used to assess cortical activation levels in various channels and brain regions, including the superior temporal gyrus (STG), middle temporal gyrus (MTG), supramarginal gyrus (SMG), fusiform gyrus (FG), angular gyrus (AG), somatosensory association cortex (SAC), primary somatosensory cortex (PSC), primary motor cortex (PMC), pre-motor and supplementary motor cortex (PMSC), pars triangularis of Broca's area (PT), pars opercularis (PO), dorsolateral prefrontal cortex (DLPFC), and frontal eye fields (FEF), during auditory comprehension and verbal expression tasks. Correlations between WAB auditory comprehension/verbal expression scores, WAB-AQ scores, BDAE scores, and cortical activation levels in the PSA group during auditory comprehension and verbal expression tasks were analyzed. **Results** In the auditory comprehension task, the control group showed significant bilateral brain activation, with higher activation levels in the right hemisphere than the left, including the STG ($P=0.041$), MTG ($P=0.002$), and SMG ($P=0.028$). In contrast, cerebral activation in the PSA group was predominantly dependent on the homologous regions of Wernicke's area in the right hemisphere, including the STG ($P=0.030$) and MTG ($P=0.024$), with significantly reduced activation in the left hemisphere ($P<0.05$). During the verbal expression task, the control group showed pronounced activation in the left Broca's area and related regions, including the PT ($P=0.036$), PO ($P=0.001$), and PMC ($P=0.002$), with symmetrical activation in the right hemisphere. The PSA group demonstrated compensatory activation in the right hemisphere, including the PT ($P=0.035$), PO ($P=0.002$), and PMC ($P=0.017$), while activation in the left hemisphere (particularly Broca's area) decreased significantly ($P<0.05$). WAB auditory comprehension scores in patients with PSA were correlated with the activation levels in the bilateral DLPFC ($r=-0.401$, $P=0.047$), PMSC ($r=-0.417$, $P=0.038$), and PMC ($r=-0.414$, $P=0.040$). WAB spontaneous speech scores were correlated with activation levels in the left DLPFC ($r=-0.423$, $P=0.035$), PMC ($r=-0.400$, $P=0.048$), and PSC ($r=-0.481$, $P=0.015$), as well as with activation in the right STG ($r=-0.404$, $P=0.045$). **Conclusion** The cortical activation during auditory comprehension and verbal expression tasks in PSA patients is significantly correlated with language function impairment scores, emphasizing the crucial role of the right hemisphere in PSA recovery.

KEY WORDS stroke; aphasia; language function; naturalistic paradigm; cortical control

DOI:10.3724/SP.J.1329.2025.06009