

阿尔茨海默病患者脑网络动力学的重构:一项基于隐马尔可夫模型的研究

彭景,李傅尧,魏明清,时晶,田金洲

【摘要】 目的:阿尔茨海默病(AD)的病理机制与异常的动态功能脑网络密切相关,但传统静态分析方法难以捕捉其短时动态特征。本研究基于隐马尔可夫模型(HMM),探究 AD 患者与认知正常(CN)受试者的脑网络动力学差异及其与认知功能的相关性。**方法:**纳入阿尔茨海默病神经影像学计划(ADNI)数据库中 39 例 AD 患者以及性别、年龄相匹配的 40 例 CN 受试者的静息态功能磁共振成像(rs-fMRI)数据。进行预处理之后,通过 HMM 将全脑 90 个感兴趣区域(ROIs)的 BOLD 信号分解为离散的隐藏大脑状态,HMM 模型的关键参数—最优状态数(K)由最小自由能确定。计算反映大脑时间动态特性的状态占用比例、状态切换率、状态转移概率。统计分析使用双样本 *t* 检验比较两组状态占用比例、状态切换率的差异,非参数置换检验比较两组状态转移概率的差异。Spearman 相关性分析评估时间动态特性与认知评分的关联。**结果:**使用最小自由能来确定 HMM 模型最佳状态的数量为 $K=13$,AD 患者 HMM 状态 4 的占用比例显著高于 CN 组($P<0.05$,FDR 校正),且与简易精神状态量表(MMSE)评分呈负相关($r=-0.405$, $P=0.001$)。AD 组和 CN 组之间的状态切换率没有显著的统计学差异($P=0.145$)。状态转移概率分析显示 AD 组从状态 4 到状态 4($P=0.016$,FDR 校正)及状态 12 到状态 4($P=0.033$,FDR 校正)的转移概率显著增加,相关性分析结果显示状态 4 到状态 4($r=-0.348$, $P=0.002$)、状态 12 到状态 4($r=-0.269$, $P=0.016$)的转移概率均与 MMSE 评分呈显著负相关。HMM 状态 4 的激活减少主要发生在默认模式网络(DMN)核心脑区,而激活增加主要位于视觉空间网络(VSN)的核心脑区。**结论:**HMM 揭示了 AD 患者脑网络动态重组特征,表现为特定状态的异常持续激活及转移模式,并与认知功能下降显著相关。本研究为 AD 中大脑活动模式的动态重组提供了新的见解,并有助于更深入地理解 AD 认知功能障碍背后的神经机制。

【关键词】 阿尔茨海默病;磁共振成像;隐马尔可夫模型

【中图分类号】 R745.7;R445.2 **【文献标志码】** A **【文章编号】** 1000-0313(2026)02-0153-07

DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2026.02.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Reconfiguration of brain network dynamics in Alzheimer's disease: a hidden Markov model study PENG

Jing, LI Fu-yao, WEI Ming-qing, et al. Third Department of Neurology, Dongzhimen Hospital, Beijing University of Chinese Medicine, Beijing 100700, China

【Abstract】 Objective: The purpose of the study was to explore the differences in brain network dynamics between Alzheimer's disease (AD) patients and cognitively normal (CN) subjects and the correlation between the dynamics and cognitive function based on hidden Markov model (HMM).

Methods: This study included the resting-state functional magnetic resonance imaging (rs-fMRI) data from 39 AD patients and 40 CN subjects matched for sex and age from the Alzheimer's disease neuroimaging initiative (ADNI) database. After preprocessing, the BOLD signals of 90 regions of interest (ROIs) of the whole brain were decomposed into discrete hidden brain states by HMM, and the key parameter of HMM model—the optimal number of states (K) was determined by the minimum free energy. The state fractional occupancy, switching rate and transition probability were calculated to reflect the temporal dynamic properties of the brain. Two-sample *t* test was used to compare the differences in

作者单位:100700 北京,北京中医药大学东直门医院脑三科(彭景、魏明清、时晶、田金洲);100029 北京,北京中医药大学(彭景、李傅尧)

作者简介:彭景(1997—),女,四川会理人,博士研究生,主要从事中医药防治神经退行性病变。

通讯作者:田金洲,E-mail:jztian@hotmail.com

基金项目:北京中医药大学解码中医协同攻关项目资助(BZY-JMZY-2022-002)

state fractional occupancy and switching rate between the two groups, and nonparametric permutation test was applied to compare the differences in state transition probability. Moreover, Spearman correlation analysis was used to assess the associations of dynamic properties with cognitive scores. **Results:** Using the minimum free energy to determine the number of optimal states of the HMM model was $K = 13$, and the fractional occupancy of HMM state 4 in AD patients was significantly higher than that in CN group ($P < 0.05$, FDR correction), which was negatively correlated with the mini-mental state examination (MMSE) score ($r = -0.405$, $P = 0.001$). There was no significant difference in the switching rate between the AD and CN groups ($P = 0.145$). The state transition analysis showed that the transition probability increased significantly from state 4 to state 4 ($P = 0.016$, FDR-corrected) and state 12 to state 4 ($P = 0.033$, FDR-corrected) in AD group. The results of correlation analysis showed that the transition probability from state 4 to state 4 ($r = -0.348$, $P = 0.002$) and state 12 to state 4 ($r = -0.269$, $P = 0.016$) were negatively correlated with MMSE score. The decreased activation of HMM state 4 mainly occurred in the core brain regions of the default mode network (DMN), while the increased activation was mainly located in the visuospatial network (VSN) regions. **Conclusion:** HMM revealed the reconfiguration of brain network dynamics in AD patients, which showed abnormal persistent activation and transfer patterns in specific states, and significantly related to cognitive decline. This study provides new insights into the dynamic reorganization of brain activity patterns in AD and contributes to a deep understanding of the neural mechanisms underlying cognitive dysfunction in AD.

【Key words】 Alzheimer disease; Magnetic resonance imaging; Hidden markov models

阿尔茨海默病 (Alzheimer's disease, AD) 作为最常见的神经退行性疾病, 以进行性认知功能衰退为核心临床特征, 其病理机制与 β -淀粉样蛋白 (amyloid β -protein, A β) 沉积、tau 蛋白缠结及脑网络功能解耦密切相关^[1]。随着全球老龄化进程加速, AD 的早期诊断与干预已成为神经科学领域的重大挑战。静息态功能磁共振成像 (resting-state functional magnetic resonance imaging, rs-fMRI) 技术能够检测大脑内在活动, 被广泛用于研究行为和认知障碍相关疾病的神经基础, 并为疾病的非侵入性诊断提供神经影像标志物^[2]。目前大部分 rs-fMRI 研究认为 fMRI 数据采集过程中大脑中的功能连接是保持静态且不变的。但是随着研究的深入, 越来越多的证据表明人脑本质上是一个动态系统, 其功能连接会随着时间的推移产生变化^[3-4]。因此, 传统静态功能连接分析方法可能忽略了大脑状态在短时间尺度上的动态重组特征, 限制了对其病理机制的深入解析^[5]。而大脑功能连接的动态分析作为神经影像学领域的新研究方向, 可为揭示 AD 认知功能障碍相关的神经机制提供新的视角。

滑动窗口分析是最常用于研究动态功能连接分析的方法, 但该方法对时间序列的瞬态变化缺乏敏感性, 而且结果高度依赖于预设窗口的宽度和步长^[6,7]。而隐马尔可夫模型 (hidden Markov model, HMM) 不仅能够极小时间尺度上捕捉脑功能活动的动态变化, 还能够规避最优窗口大小选择方面的局限性^[8,9]。此外, 证据表明大脑网络之间的动态转换并非完全随机,

而是随着时间的推移而重复^[10], HMM 可以发现这些隐藏的大脑状态以及状态之间可能的转换顺序。因此, HMM 不仅能够提供大脑功能活动的详细描述, 还能够捕捉大脑网络的时变特性, 为深入了解大脑的动态特性提供了新的工具。

当前, HMM 研究多聚焦于健康人群或精神疾病患者^[11,12], 针对 AD 的 HMM 动态网络研究仍处于初步探索阶段。本研究将 HMM 用于分析 AD 患者和认知正常 (cognitively normal, CN) 受试者的 rs-fMRI 数据, 以识别 AD 患者与 CN 受试者脑网络动力学特征差异, 以及差异特征与认知功能之间的相关性。

材料与方法

1. 研究对象

本研究数据来源于阿尔茨海默病神经影像学计划 (Alzheimer's disease neuroimaging initiative, ADNI)。共纳入基线时具有 rs-fMRI 数据的 39 例 AD 患者以及年龄、性别相匹配的 40 例 CN 受试者。AD 的纳入标准: 简易精神状态检查量表 (mini-mental state examination, MMSE) 评分为 20~26 分, 临床痴呆评定量表 (clinical dementia rating, CDR) 评分 ≥ 0.5 分, 且满足美国国立神经病、语言交流障碍和卒中研究所/阿尔茨海默病及相关疾病学会对可疑 AD 的诊断^[13]。CN 的纳入标准为性别、年龄与 AD 组受试者相匹配, 无记忆力下降, MMSE 评分为 24~30 分, CDR 评分为 0 分。该研究获得各个参与地点伦理审查委员会的

批准,所有受试者在进入队列研究时均签署了知情同意书。

2. Rs-fMRI 数据预处理

Rs-fMRI 数据采集使用德国 SIEMENS 3.0T 磁共振扫描仪,扫描参数为:重复时间(repetition time, TR)3000 ms,回波时间(echo time, TE)30 ms,翻转角 90° ,矩阵 448×448 ,层数 197 层,层厚 3.4 mm。所有 rs-fMRI 的预处理均使用 GRETNA 软件(<https://www.nitrc.org/projects/gretna>)。具体步骤包括将 DICOM 图像格式文件转换为 NIFTI 格式,依次进行时间层校正、头动校正(排除头动平移 >3 mm 或旋转 $>3^\circ$ 的受试者)、空间标准化、平滑处理(平滑核的半高宽为 6 mm)、去除协变量(如头动、脑脊液和脑白质信号),和带通滤波处理(0.01~0.08 Hz)。最后,基于自动解剖标记(automated anatomical labeling, AAL)模板提取 90 个大脑感兴趣区域(regions of interests, ROIs)的 BOLD 信号的平均时间序列。

3. 隐马尔可夫模型建立

HMM 的基本前提是 ROIs 内的 BOLD 时间序列活动动态可以分解为离散的隐藏大脑状态,这些状态会在所有个体之间重复和切换。特定的大脑状态代表了不同的时空激活模式。HMM 被应用于识别隐藏的大脑状态和状态之间可能的转换顺序,以揭示大脑活动的时间特性。HMM 假设平均任一时刻仅单一脑状态处于激活,且下一时刻状态仅依赖于当前状态。获得所有被试全脑 90 个 ROIs 的 BOLD 信号平均时间序列后,分别将 AD 组与 CN 组所有受试者的平均时间序列沿时间轴进行拼接,构建维度为 $197 \times 90 \times 79$ 的数据矩阵,以支持群组水平的 HMM 构建。最优状态数 K 通过最小自由能确定,确保模型在复杂度与拟合度间达到平衡。依据先前研究,在 2 到 15 个状态数量之间进行了迭代计算以确定最优状态数 $K^{[14]}$ 。

4. HMM 状态的时间特征分析

基于 HMM 提取的大脑状态特征,本研究对反映大脑时间动态特性的关键指标进行量化分析,具体包括①HMM 状态的占用比例:某一状态在整个时间序列中的累积持续时间占比;②状态切换率:单位时间内各个状态转移发生的频率;③状态转移概率:是 HMM 的核心参数,表示从起始状态转移到目标状态的概率。

5. 统计分析

使用 SPSS 22.0 软件对人口统计学资料数据进行分析。对计量资料先进行正态性检验,符合正态分布的计量资料以均数 \pm 标准差($\bar{x} \pm s$)来表示,组间差异比较采用样本 t 检验;不符合正态分布的计量资料以中位数[上、下四分位数]表示,组间比较采用 Mann-Whitney U 检验。计数资料以例数表示,组间比较采

用卡方检验。使用 Matlab 自定义代码对 HMM 状态占用比例和状态切换率进行双样本 t 检验,采用错误发现率(false discovery rate, FDR)进行多重比较校正, $P < 0.05$ 被认为差异具有统计学意义。使用非参数置换检验(nonparametric permutation testing, NPT)比较 AD 与 CN 组间的 HMM 状态转移概率差异。对 AD 组与 CN 组样本进行 5000 次随机置换,生成组间各状态全局动态指标差异的零分布,基于实际观测值与零分布的偏差计算 P 值,评估组间差异的统计学意义^[15]。最后使用 Spearman 相关性分析探索状态占用比例、状态转移概率与 MMSE 评分之间的相关性, $P < 0.05$ 设置为统计显著性阈值。

结果

1. 人口统计学资料(表 1)

两组在年龄、性别方面差异无统计学意义($P > 0.05$),但 AD 组的 CDR 评分均显著高于 CN 组,MMSE 评分显著低于 CN 组($P < 0.001$)。

表 1 受试者人口统计学资料

变量	AD 组 (n=39)	CN 组 (n=40)	P 值
年龄/岁	76.08 \pm 6.83	75.18 \pm 7.03	0.565 ^a
性别(男/女)/例	29/10	30/10	0.948 ^b
MMSE 评分	23(21,24)	29(27,30)	$<0.001^c$
CDR 评分	1(0.5,1)	0(0,0)	$<0.001^c$

注:^a表示样本 t 检验,^b表示卡方检验,^c表示 Mann-Whitney U 检验;AD 为阿尔茨海默病,CN 为认知正常,CDR 为临床痴呆量表,MMSE 为简易精神状态检查量表。

2. 状态识别

使用最小自由能来确定 HMM 模型状态的数量(图 1)。随着 HMM 状态数量的增加,最小自由能呈下降趋势,在状态数为 13 时达到最低,表明此时 HMM 模型复杂度与数据拟合度达到最优平衡,13 种状态的功能连接矩阵如图 2。

3. 阿尔茨海默病患者隐马尔可夫模型状态的异常动力学及与认知功能的相关性分析

利用 HMM 对每种大脑状态的占用比例进行了估计,所有被试各个状态占用比例矩阵如图 3a 所示。与 CN 相比,AD 患者 HMM 状态 4 的占用比例显著增加($P < 0.05$, FDR 校正),其余状态占比在两组间没有显著差异(图 3b),表明 AD 患者具有异常的脑微状态的时间重组模式。此外,相关性分析结果显示状态 4 的占用比例与 MMSE 评分显著负相关($r = -0.405$, $P = 0.001$, 图 3c),提示 AD 患者异常 HMM 状态动力学特征与认知功能下降有关。

4. 阿尔茨海默病患者隐马尔可夫模型状态之间的异常过渡模式及与认知功能的相关性分析

AD 患者和 CN 之间的状态切换率没有显著的统

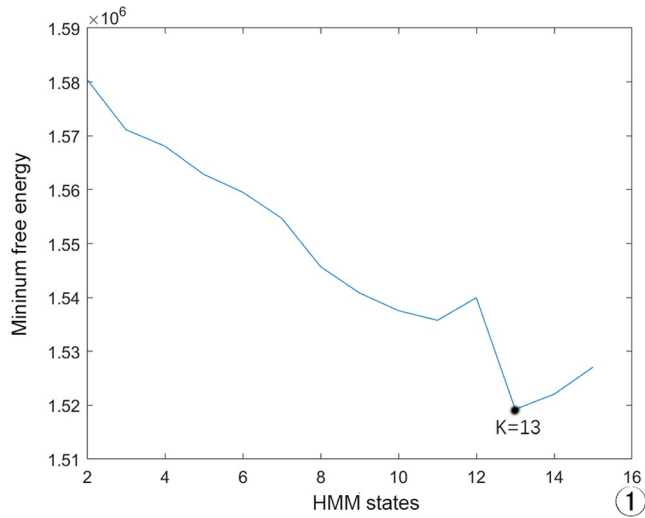


图 1 HMM 状态数(K)-最小自由能曲线。

计学差异($P=0.145$,图 4a),表明 AD 患者和 CN 在整个时间进程中具有相似的脑网络动态模式。此外,我们使用置换检验(5000 次)分析比较了 AD 患者和 CN 之间 HMM 状态转移概率的差异(图 4b)。与 CN 相比,AD 患者从 HMM 状态 4 和状态 12 到状态 4 的转移概率显著增加(状态 4 到状态 4: $P=0.016$,FDR 校正;状态 12 到状态 4: $P=0.033$,FDR 校正)。表明 AD 患者 HMM 状态之间存在显著的异常模式。相关性分析结果显示状态 4 到状态 4($r=-0.348$, $P=0.002$,图 4c)、状态 12 到状态 4($r=-0.269$, $P=0.016$,图 4d)的转移概率均与 MMSE 评分呈显著负相关,提示 AD 患者 HMM 异常过渡模式与认知功能下降有关。

5.状态的大脑激活图

AD 患者全脑网络状态的空间激活图以状态 4 为主(图 5)。HMM 状态 4 的激活减少发生在默认模式网络(default mode network,DMN)核心脑区:右侧楔前叶、右侧前扣带回、右侧后扣带回、双侧额中回、双侧额上回、左侧中央后回,增加主要发生在视觉空间网络(visuospatial network,VSN)核心脑区:双侧颞中回、双侧颞上回、双侧顶下小叶、左侧枕中回等脑区。

讨论

本研究基于 rs-fMRI 技术,通过 HMM 对 AD 患者脑网络动态特性进行建模分析。首次系统地揭示了 AD 患者脑功能状态呈现显著的时间重组特征及异常转移模式,这些发现为阐释 AD 认知功能障碍的脑网络动力学机制提供了新的理论依据。

HMM 通过分析大脑活动的状态和状态转移概率来探索复杂的大脑活动。本研究将自由能最小化原则引入 AD 脑网络 HMM 动态建模,基于自由能曲线确定最优状态数($K=13$),显著提升了模型对大脑状态特征的捕捉能力,为后续分析提供了更鲁棒的工具^[16]。通过分析 13 种 HMM 状态的动力学特征,发现 AD 组患者在状态 4 的占用比例显著升高,且与认知功能呈显著负相关,表明状态 4 可能是 AD 的特征性大脑状态,其激活与认知功能下降有关。状态 4 时空特征表现为 DMN 核心脑区的激活减少,包括楔前叶、前扣带回、后扣带回、额上回等脑区。既往研究发现在认知正常的 APP、PSEN1 基因突变携带者及

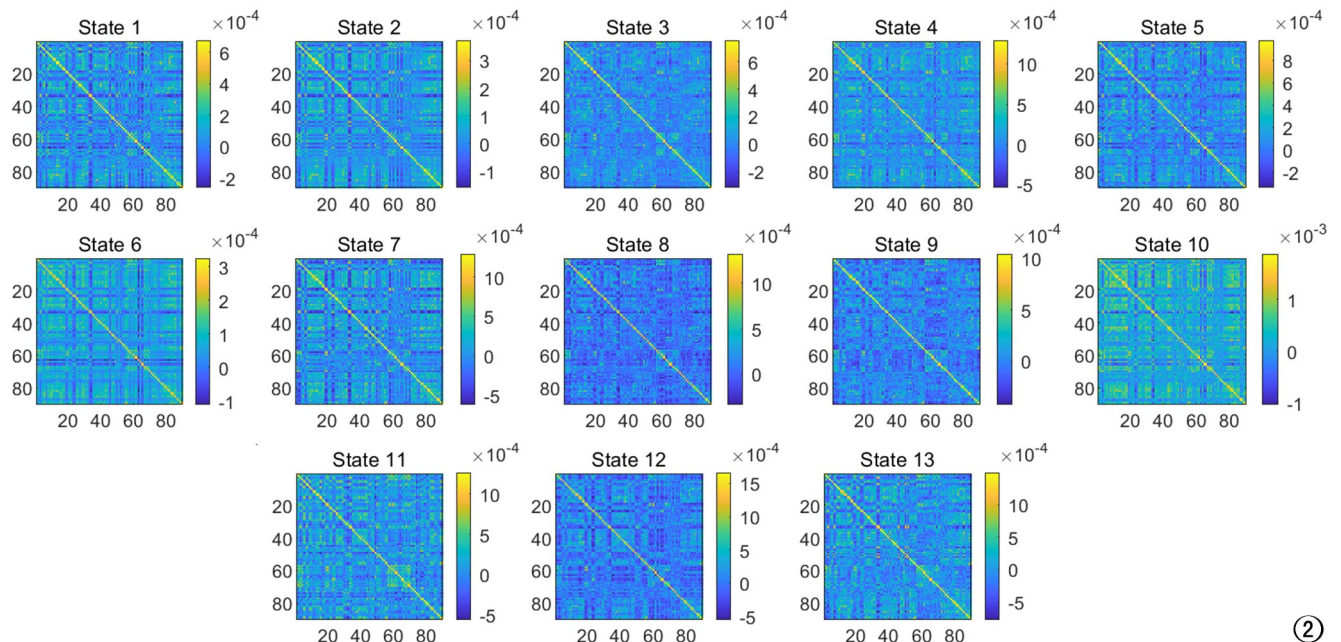


图 2 HMM 确定的 13 种状态的功能连接矩阵。

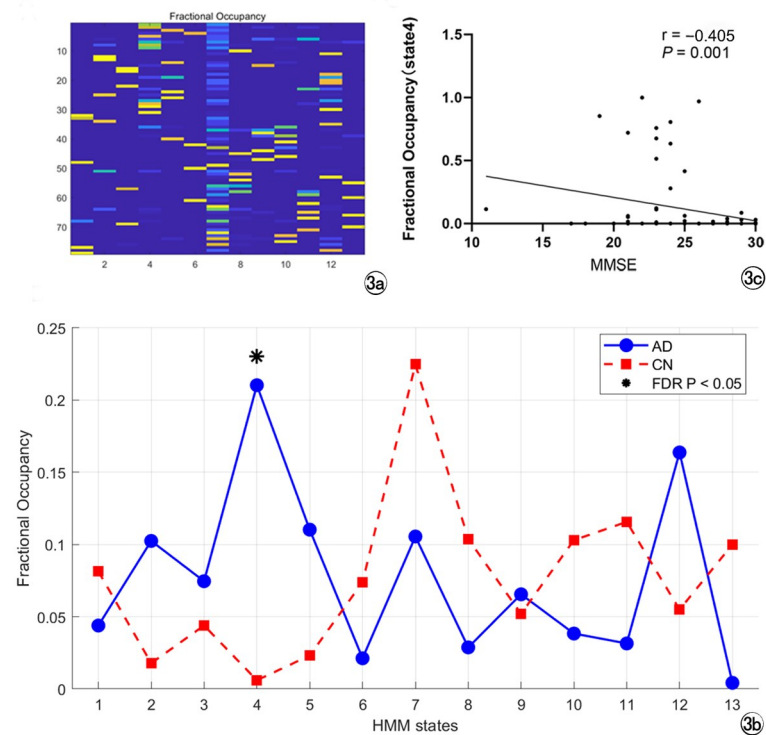


图3 HMM异常动力学及与认知功能的相关性分析。a) 状态占用比例矩阵;b) AD组与CN组HMM状态占用比例差异:蓝色代表AD患者,红色代表CN患者,* $P < 0.05$;c) 状态4的占用比例与MMSE评分的相关性分析($r = -0.405, P = 0.001$)。

APOE $\epsilon 4$ 等位基因携带者中,DMN的功能变化发生于临床症状出现之前^[17]。进一步研究证实,在AD患者中,DMN内具有高水平的A β 和tau蛋白沉积、脑萎缩和代谢减退等情况,表明DMN容易受到AD病理的影响^[18-20]。与既往一项整合HMM和脑磁图的研究结果类似,AD患者相较于认知正常者,其DMN内神经活动自发同步性较低且稳定性较差,可能是AD患者记忆及其他高级认知功能受损的神经基础^[21]。此外,状态4的空间特征还表现为VSN核心脑区:颞中回、颞上回、顶下小叶顶等脑区的激活增加。其中,顶下小叶是顶叶的重要组成部分,包含角回和缘上回,在空间定向、语言和多模态信息整合等高级认知功能中发挥关键作用^[22]。先前研究发现相较于健康对照组,AD患者顶下小叶功能连接增强^[23]。同时,在一项任务态fMRI研究中,AD患者在执行联想任务时表现出顶叶脑区的过度激活,可能反映了AD患者通过增加额顶网络功能活动以代偿联想记忆功能缺陷的神经机制^[24]。因此,我们推测VSN脑区激活的增加可能是对功能受损DMN的一种代偿机制。

人脑作为高度复杂的动态系统,通过功能状态间的平滑连续切换维持认知功能的正常运作^[25]。揭示此类动态转换规律,对理解AD患者认知障碍的脑功能可塑性及衰退机制具有重要价值。本研究采用HMM对全脑13种功能状态间的切换率进行量化分析。结果显示AD患者组与CN组的脑状态整体切换率无显著统计学差异($P > 0.05$),表明AD患者脑网络动态的病理特征主要体现在特定状态间的异常转移偏好,而非整体切换率的改变。状态间转移概率分析显示出状态4到状态4及状态12到状态4的转移概率显著增强,且二者与MMSE评分呈显著负相关。状态4异常持续占用比例及转移概率升高,提示AD患者中特定功能模式被异常强化,脑网络倾向于重复激活同一功能模式,并阻碍了网络向其他状态的正常转移,这可能与AD的认知功能下降有关。

本研究首次揭示了AD患者在不同时间尺度上的大脑状态重组和多种过渡模式,为阐释AD认知障碍的病理生理机制提供了全新视角,但仍存在一些局限性:首先,本研究的样本量相对有限,未来可在更大规模的研究中进一步验证本研究结果的稳健性。其次,HMM假设当已知某个时间点的状态时方可以推断下

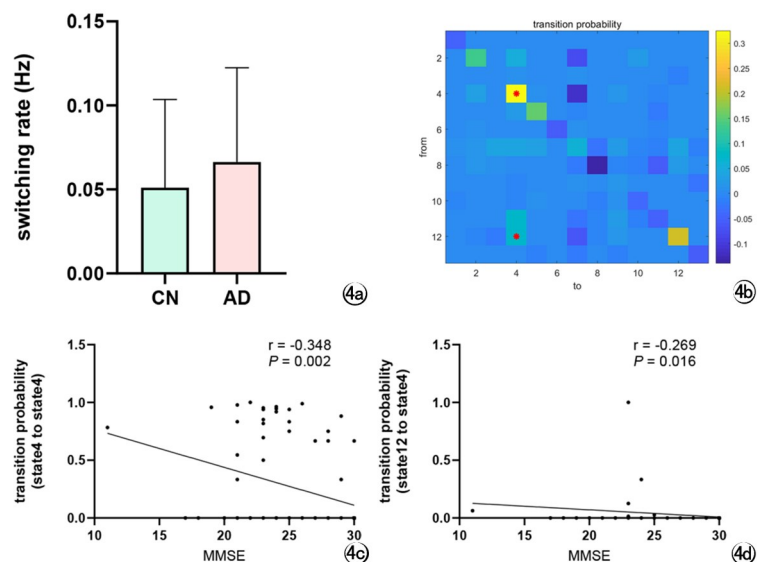


图4 HMM状态之间的异常过渡模式及与认知功能的相关性分析。a) AD组与CN状态切换率差异;b) AD组和CN组HMM状态转移概率差异:黄色代表AD组相较于CN转移概率增加,蓝色代表AD组相较于CN转移概率减少,* $P < 0.05$;c) 状态4到状态4的转移概率与MMSE评分的相关性分析($r = -0.348, P = 0.002$);d) 状态12到状态4的转移概率与MMSE评分的相关性分析($r = -0.269, P = 0.016$)。

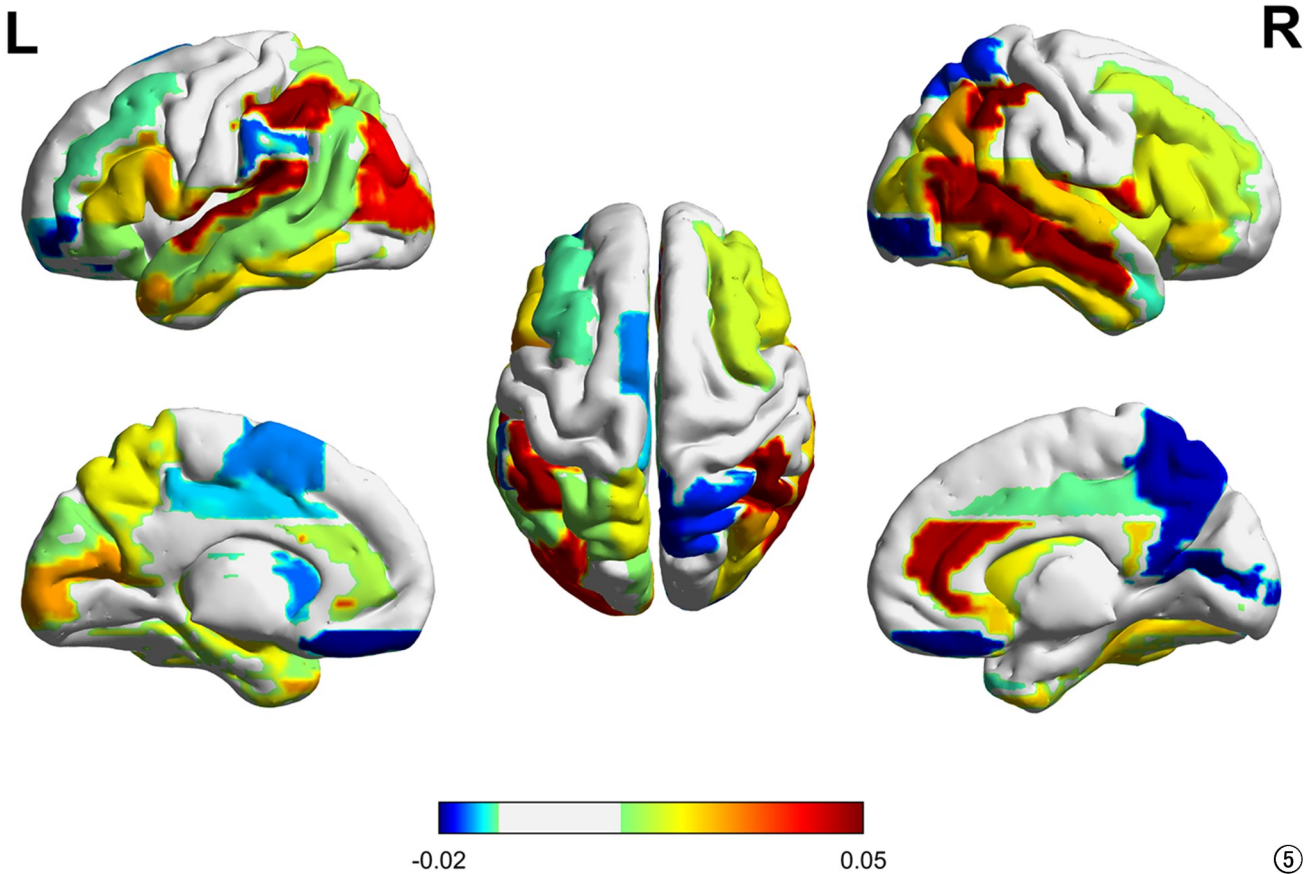


图 5 HMM 状态 4 激活图,红色代表激活增加,蓝色代表激活减少,L 代表左侧,R 代表右侧。

一个时间点的状态,即短程依赖,忽略了脑动力学的长程时间相关性^[26]。上述假设可能限制模型对复杂神经动态特征的刻画能力,未来可结合非马尔可夫模型(如隐半马尔可夫模型)提升建模精度。最后,HMM 的状态数是一个自由参数,本研究依据最小自由能确定。因此,该状态数是基于当前数据的最佳状态数,可能导致跨数据集的普适性受限。

参考文献:

- [1] Masters CL, Bateman R, Blennow K, et al. Alzheimer's disease[J]. Nat Rev Dis Primers, 2015, 1:15056.
- [2] Zhao J, Du YH, Ding XT, et al. Alteration of functional connectivity in patients with Alzheimer's disease revealed by resting-state functional magnetic resonance imaging [J]. Neural Regen Res, 2020, 15(2):285-292.
- [3] Chang C, Glover GH. Time-frequency dynamics of resting-state brain connectivity measured with fMRI[J]. Neuroimage, 2010, 50(1):81-98.
- [4] 马强,张亚楠,任延德,等.产后抑郁症患者动态低频振幅变化的静息态功能磁共振成像研究[J].放射学实践,2025,40(7):840-845.
- [5] Allen EA, Damaraju E, Plis SM, et al. Tracking whole-brain connectivity dynamics in the resting state[J]. Cereb Cortex, 2014, 24(3):663-676.
- [6] Vidaurre D, Llera A, Smith SM, et al. Behavioural relevance of spontaneous, transient brain network interactions in fMRI [J]. Neuroimage, 2021, 229:117713.
- [7] Preti MG, Bolton TA, Van De Ville D. The dynamic functional connectome: state-of-the-art and perspectives [J]. Neuroimage, 2017, 160:41-54.
- [8] Quinn AJ, Vidaurre D, Abey Suriya R, et al. Task-evoked dynamic Network analysis through hidden markov modeling [J]. Front Neurosci, 2018, 12:603.
- [9] Demirtaş M, Tornador C, Falcón C, et al. Dynamic functional connectivity reveals altered variability in functional connectivity among patients with major depressive disorder [J]. Hum Brain Mapp, 2016, 37(8):2918-2930.
- [10] Vidaurre D, Smith SM, Woolrich MW. Brain network dynamics are hierarchically organized in time [J]. Proc Natl Acad Sci USA, 2017, 114(48):12827-12832.
- [11] Zhang X, Yang L, Lu J, et al. Reconfiguration of brain network dynamics in bipolar disorder: a hidden Markov model approach [J]. Transl Psychiatry, 2024, 14(1):507.
- [12] Lin P, Zang S, Bai Y, et al. Reconfiguration of brain Network dynamics in autism spectrum disorder based on hidden markov model [J]. Front Hum Neurosci, 2022, 16:774921.
- [13] McKhann G, Drachman D, Folstein M, et al. Clinical diagnosis of Alzheimer's disease: report of the NINCDS-ADRDA work group under the auspices of department of health and human services task force on Alzheimer's disease [J]. Neurology, 1984, 34(7):939-944.
- [14] Moretto M, Silvestri E, Zangrossi A, et al. Unveiling whole-brain

- dynamics in normal aging through hidden markov models[J]. Hum Brain Mapp, 2022, 43(3):1129-1144.
- [15] Lu L, Li F, Li H, et al. Aberrant dynamic properties of whole-brain functional connectivity in acute mild traumatic brain injury revealed by hidden Markov models[J]. CNS Neurosci Ther, 2024, 30(3):e14660.
- [16] Vidaurre D, Quinn AJ, Baker AP, et al. Spectrally resolved fast transient brain states in electrophysiological data[J]. Neuroimage, 2016, 126:81-95.
- [17] Foo H, Mather KA, Jiang J, et al. Genetic influence on ageing-related changes in resting-state brain functional networks in healthy adults: a systematic review[J]. Neurosci Biobehav Rev, 2020, 113:98-110.
- [18] Schultz AP, Chhatwal JP, Hedden T, et al. Phases of hyperconnectivity and hypoconnectivity in the default mode and salience Networks track with amyloid and tau in clinically normal individuals[J]. J Neurosci, 2017, 37(16):4323-4331.
- [19] Ingala S, Tomassen J, Collij LE, et al. Amyloid-driven disruption of default mode network connectivity in cognitively healthy individuals[J]. Brain Commun, 2021, 3(4):fcb201.
- [20] Palmqvist S, Schöll M, Strandberg O, et al. Earliest accumulation of β -amyloid occurs within the default-mode network and concurrently affects brain connectivity[J]. Nat Commun, 2017, 8(1):1214.
- [21] Sitnikova TA, Hughes JW, Ahlfors SP, et al. Short timescale abnormalities in the states of spontaneous synchrony in the functional neural networks in Alzheimer's disease[J]. Neuroimage Clin, 2018, 20:128-152.
- [22] Wang J, Xie S, Guo X, et al. Correspondent functional topography of the human left inferior parietal lobule at rest and under task revealed using resting-state fMRI and coactivation based parcellation[J]. Hum Brain Mapp, 2017, 38(3):1659-1675.
- [23] Wang Z, Xia M, Dai Z, et al. Differentially disrupted functional connectivity of the subregions of the inferior parietal lobule in Alzheimer's disease[J]. Brain Struct Funct, 2015, 220(2):745-762.
- [24] Pariente J, Cole S, Henson R, et al. Alzheimer's patients engage an alternative network during a memory task[J]. Ann Neurol, 2005, 58(6):870-879.
- [25] Gu S, Betzel RF, Mattar MG, et al. Optimal trajectories of brain state transitions[J]. Neuroimage, 2017, 148:305-317.
- [26] Vidaurre D, Abeysuriya R, Becker R, et al. Discovering dynamic brain networks from big data in rest and task[J]. Neuroimage, 2018, 180(Pt B):646-656.

(收稿日期:2025-05-26 修回日期:2025-09-29)

欢迎订阅 2026 年《放射学实践》

《放射学实践》是由国家教育部主管,华中科技大学同济医学院主办,与德国合办的全国性影像学学术期刊,创刊至今已 41 周年。遵照同行评议、价值导向、等效应用原则,国内各大学会、协会、组织机构通过科技工作者推荐、专家评议、结果公示等规定程序,《放射学实践》杂志入选中国科协发布 10 大领域《我国高质量科技期刊分级目录》业内认可的较高水平期刊。《放射学实践》杂志再次入选 2023 年版北京大学和北京高校图书馆期刊工作研究会共同主持的国家社会科学基金项目“学术期刊评价及文献计量学研究”研究成果——《中国核心期刊要目总览》。

本刊坚持服务广大医学影像医务人员的办刊方向,关注国内外影像医学的新进展、新动态,全面介绍 X 线、CT、磁共振、介入放射及放射治疗、超声诊断、核医学、影像技术学等医学影像方面的新知识、新成果,受到广大影像医师的普遍喜爱。

本刊为中国科学引文数据库(CSCD)核心库来源期刊、《中文核心期刊要目总览》收录期刊、中国科技核心期刊、中国高质量科技期刊分级目录临床医学领域医学影像学期刊,并在中国学术期刊分区中位列 Q1 区。

主要栏目:论著、继续教育园地、专家荐稿、研究生展版、图文讲座、本刊特稿、实验研究、传染病影像学、影像技术学、外刊摘要、学术动态、请您诊断、病例报道、知名产品介绍、信息窗等。

本刊为月刊,每册 25 元,全年定价 300 元。

国内统一刊号:ISSN 1000-0313/CN 42-1208/R 邮政代号:38-122

电话:(027)69378385

E-mail:fsxsjzz@163.com 网址:http://www.fsxsj.net

编辑部地址:430199 武汉市蔡甸区中法新城同济医院专家社区别墅 C 栋