

引用格式: 李霖, 李帅齐, 吴翔宇, 等. 基于传递熵对反社会行为大脑效应连接模式的研究 [J]. 电子科技大学学报, 2025, 54(2): 288-293.
LI L, LI S Q, WU X Y, et al. Detecting abnormalities in the brain network associated with antisocial behavior using transfer entropy[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2025, 54(2): 288-293.

基于传递熵对反社会行为大脑效应 连接模式的研究



李霖¹, 李帅齐¹, 吴翔宇², 刘华生³, 王维³, 蒋伟雄^{1,2,4*}

(1. 浙江师范大学数理医学院, 金华 321004; 2. 浙江师范大学儿童文学研究中心, 金华 321004;
3. 中南大学湘雅三医院放射科, 长沙 410013; 4. 海盐县南北湖医学人工智能研究院, 海盐 314300)

摘要: 研究采用传递熵方法对反社会行为 (antisocial behavior, ASB) 个体的大脑功能异常进行了神经网络效应分析。结果显示, ASB 组的效应连接全局同步性显著下降, 同时节点的介数中心性和度中心性存在显著差异。其中, 右侧颞叶、左侧枕叶及梭状体的节点介数中心性显著降低, 而左侧额下回、脑岛和楔前叶则显著增加。节点度中心性的变化表现为右侧额中回等区域降低, 而双侧中央后回、左侧颞下回、脑岛等区域升高。此外, ASB 组在 14 个典型大脑网络中呈现显著不同的效应连接模式。这些发现为理解反社会行为的神经基础提供了重要启示。

关键词: 反社会行为; 脑网络; 节点中心性; 静息态功能 MRI; 传递熵

中图分类号: TP391.4; TP181 文献标志码: A DOI: 10.12178/1001-0548.2023325

Detecting abnormalities in the brain network associated with antisocial behavior using transfer entropy

LI Lin¹, LI Shuaiqi¹, WU Xiangyu², LIU Huasheng³, WANG Wei³, and JIANG Weixiong^{1,2,4*}

(1. College of Mathematical Medicine, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China;
2. The Research Center for Children's Literature, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China;
3. Department of Radiology, The Third Xiangya Hospital, Central South University, Changsha 410013, China;
4. Nanbei Lake Institute for Artificial Intelligence in Medicine, Haiyan 314300, China)

Abstract: In this study, the transfer entropy method is used to investigate the neural network effects on brain functional abnormalities in individuals with antisocial behavior (ASB). The results reveal a significant decrease in global synchronization properties within the ASB group, and most importantly, significant regional differences in nodal betweenness and nodal degree centrality. Particularly, individuals with ASB exhibit a significant decrease in nodal betweenness centrality in the right temporal lobe, left occipital lobe, and fusiform, coupled with a significant increase in the left inferior frontal gyrus, insula, and precuneus. Alterations in nodal degree centrality manifest a decrease in regions such as the right middle to medial frontal gyrus and superior occipital lobe, alongside an increase in regions such as the bilateral posterior central gyrus, left inferior temporal gyrus, and insula. Furthermore, the ASB group displays significantly different connectivity patterns across 14 typical brain networks. These findings provide important insights for understanding the neural basis of antisocial behavior.

Key words: antisocial behavior; brain network; nodal centrality; rs-fMRI; transfer entropy

反社会行为 (antisocial behavior, ASB) 表现为在行为上违反社会规范和法律, 如攻击、欺骗、盗窃或者其他形式的犯罪行为。这些行为一直以来都是心理学、精神病学和神经科学的研究焦点。通过

多方面的研究, 我们能够更深入地理解反社会行为的神经病理生理机制。

近年来, 越来越多的研究通过磁共振成像 (magnetic resonance imaging, MRI) 来深入探讨

收稿日期: 2023-12-19

基金项目: 教育部人文社科基金规划项目 (19YJAZH035); 浙江省金华市科技计划重点项目 (2024-3-026); 校地合作平台 (PTK12924003)

作者简介: 李霖, 主要从事认知神经机制方面的研究。

*通信作者 E-mail: wxjiang@zjnu.edu.cn

ASB 人群的大脑结构和功能。相关的影像研究表明, ASB 人群存在大脑结构和功能上的异常。文献 [1] 的研究发现即便在没有明显脑损伤的情况下, ASB 个体前额叶灰质体积减小了 11%。在随后的研究中, 研究者还发现精神病态反社会个体的胼胝体异常, 可能反映了非典型的神经发育程, 包括早期轴突修剪的停滞或白质髓鞘形成的增加^[2]。文献 [3] 的研究发现, 与对照组相比, ASB 群体显示出整体脑容积和颞叶减少, 而壳核容积增加。文献 [4] 对 43 项结构和功能成像研究进行的荟萃分析显示, 患有反社会行为的个体在前额叶结构和功能上显著降低。

使用静息态功能 MRI (resting-state functional MRI, rsfMRI) 对 ASB 人群的网络特性进行研究发现, ASB 群体的路径长度增加, 网络效率降低, 这意味着 ASB 人群全脑功能的全局整合能力降低^[5]。随后的研究发现了 ASB 人群动态神经回路的异常, 其中断可能与较少的认知控制和更多的反社会行为有关, 如高级控制网络与其他功能系统之间的网络动态功能连接^[6]。同时, 利用功能连接的动态性对反社会分数进行了有效地预测^[6]。文献 [7] 对 ASB 人群的静息态功能连接的荟萃分析显示, 杏仁核、中扣带皮层、腹侧后扣带皮层-楔前叶、腹内侧和背内侧前额叶皮层、前运动皮层和顶叶上小叶存在显著的连接异常。

尽管这些研究已经从多个方面深入探讨了 ASB 人群, 获得了丰富的成果。然而, 目前对 ASB 功能网络的研究主要基于无向连接, 以表征脑区之间的功能互动^[5-6], 但这些研究忽视了脑区之间的互动可能是有方向的, 即存在效应连接^[8]。传递熵 (transfer entropy, TE) 作为一种有向信息传递的测量方法^[9], 已被广泛用于检测时间过程之间的因果关系^[10]。相较于其他模型方法, 如动态因果建模 (dynamic causal modeling, DCM) 和 Granger 因果关系 (granger causality, GC), 这种测量方法具有不依赖于过程间相互作用假设的优点^[10], 从而非常适合探索大脑的有向连接分析^[11]。本文的研究旨在使用传递熵的方法来分析 ASB 人群大脑的效应连接, 从而从有向信息传递上来深入理解 ASB 的神经功能机理。

1 材料与方法

1.1 对象

本研究在某省少管所招募了 480 名志愿者, 年

龄均已满 18 岁, 但在入所时未满 18 岁。由经验丰富的心理专业人员使用 PDQ-4+ 对其进行了 ASB 测试, 其中 122 名志愿者得分达到或超过 4 分。这 122 人继续接受 2 名高级精神科医生进行的 PDI-IV 测试, 其中 35 名被确定为符合 ASB 标准。

最终, 研究对象包括 35 名符合 ASB 标准的受试者, 以及 18 名在年龄和教育程度上与之匹配的无 ASB 对照组。2 组受试者在年龄、教育年限及智商方面均无显著差异 ($P>0.05$), 如表 1 所示。受试者的违法行为主要包括盗窃、诈骗和抢劫。受试者均为右利手的男性, 在研究前至少 6 个月未接触酒精或非法药物, 没有严重头部创伤或精神障碍病史或当前诊断, 如抑郁症、焦虑症或精神分裂症。每位受试者在接受 MRI 扫描时都有 3 位少管所工作人员陪同。

表 1 两组受试者人口学特征

人口学特征	反社会行为组 (Mean±SD)	对照组 (Mean±SD)
年龄/岁	20.5±2.37	21.43±0.24
教育年限/年	8.15±1.36	9.73±0.52
IQ 分	106.66±12.90	106.84±16.68

本研究经中南大学湘雅三医院伦理委员会批准, 并在向所有参与者详细说明研究内容后, 获得其书面知情同意。

1.2 图像的获取和预处理

所有功能磁共振图像均在中南大学湘雅三医院使用西门子的 Avanto1.5T 磁共振成像系统获取。扫描时, 被试取仰卧位, 佩戴降噪耳机, 并使用海绵填充头部和线圈之间的空隙。功能像使用 T2 加权平面回波 (EPI) 序列, 主要扫描参数为: TR=2 s, TE=50 ms, FOV=24 cm, 层数=23, 层厚=5 mm, 层间距=1.20 mm, 翻转角=90°, 矩阵 64×64。结构像使用 T1 加权成像, 主要扫描参数为: TR=2.40 ms, TE=3.61 ms, 层数=160, 层厚=1.20 mm, 层间距=0.60 mm, FOV=240 mm, 体素为 1×1×1 mm³。

使用 FSL^[12] 对 rsfMRI 数据进行预处理, 包括移去前 10 个全脑图像, 切片时间校正、切片运动校正, 空间平滑 (6 mm 半高全宽), 带通滤波 (0.01~0.08 Hz), 对全局平均信号、白质信号和脑脊液 (CSF) 信号的回归, 对 24 个头部运动参数的回归和小波去噪^[13]。对每个受试者的 T1 加权图像, 使用 Freesurfer 得到大脑分割图像, 再把分割图像配准到 MNI 标准空间得到变换矩阵和逆矩阵^[14]。

为了更好地探索脑区和网络之间的异常, 本文采用了 2 个不同分辨率的模板: 基于脑区的 Shen268 模板 (去掉小脑) 和基于 14 个典型大脑网络的 CBN14 模板^[15]。Shen268 模板能够在更细微的脑区层面上检测异常, 而 CBN14 模板则侧重于经典的网络连接, 从网络层面揭示连接的异常。2 个模板的结果具有互补性, 有助于从脑区和网络 2 个层面更全面地理解 ASB 相关的大脑变化。经过预处理后, 把标准空间的这 2 个模板基于前面得到的矩阵和逆矩阵变换到个体 rsfMRI 空间, 以提取每个感兴趣脑区 (ROI) 或网络的平均时间序列。CBN14 将大脑分成 14 个功能系统, 即背侧/腹侧默认网络 (dorsal/ventral default mode network, dDMN/vDMN), 楔前叶 (precuneus, PRE), 前后显著网络 (anterior/post salience network, ASN/PSN), 左右执行控制网络 (left/right executive control network, IECN/rECN), 基底神经节网络 (basal ganglia network, BGN), 听觉网络 (auditory network, AUDN), 初级和高级视觉网络 (primary/high visual network, pVISN/hVISN), 感觉运动网络 (sensorimotor network, SMN), 视觉空间网络 (visuospatial network, VSN) 和语言网络 (language network, LAN)。

1.3 效应连接的计算和比较

使用传递熵 TE 来量化不同脑区或不同网络之间有向信息传递^[10], 其算法可以表示为^[9]:

$$T_{J \rightarrow I} = \sum p(i_{n+1}, i_n^{(k)}, j_n^{(l)}) \log \frac{p(i_{n+1}|i_n^{(k)}, j_n^{(l)})}{p(i_{n+1}|i_n^{(k)})} \quad (1)$$

式中, J 和 I 表示两个脑区时间序列; $T_{J \rightarrow I}$ 表示从 J 到 I 的传递熵; $i_n^{(k)}$ 和 $j_n^{(l)}$ 分别表示 I 和 J 的 k 和 l 阶静态马尔可夫过程表示; p 表示概率。详细的定义推导见文献 [10]。

通过计算每个受试者对应于 2 个模板的有向传递熵网络, 得到了成对脑区或网络的时间序列之间的信息传递。使用去除小脑的 Shen268 模板生成的传递熵网络中, 首先评估了网络的小世界属性。小世界网络具有高聚类协同效率 (功能隔离) 和短特征路径长度 (功能整合)^[16]。为确保所有分析在小世界条件下进行, 计算了所有受试者在稀疏性从 5%~50% 范围内的小世界属性, 步长为 1%。

随后, 本文对 TE 网络进行全局和节点两个层面的分析。全局网络度量提供了整个网络的信息, 我们计算了全局效率 (efficiency)、全局同步性 (synchronization) 和全局层次性 (hierarchy),

以评估网络的整体效率和复杂性^[17]。节点网络度量提供了每个节点的信息, 本文计算了节点度中心性 (nodal degree centrality) 和节点介数中心性 (nodal betweenness centrality), 以反映每个节点在网络中的重要性^[18]。度中心性通过计算节点的连接边数来确定。在有向图中, 度分为入度和出度, 两者之和即为节点的度。度越大, 度中心性越高, 表示该节点在网络中具有更高的重要性。节点 v 的介数中心性的计算如下:

$$C_B(v) = \sum_{s \neq v \neq t \in V} \frac{\sigma_{st}(v)}{\sigma_{st}} \quad (2)$$

式中, V 表示节点组成的集合; σ_{st} 表示 s 到 t 的最短路径长度; $\sigma_{st}(v)$ 表示过节点 v 从 s 到 t 的最短路径长度。更多计算细节见文献 [19]。

为了避免网络二值化时因特定稀疏阈值所引起的偏差^[20-21], 本文计算了在呈现小世界拓扑的稀疏范围内每个度量曲线下的面积 (area under curve, AUC), 即:

$$\text{AUC}_M = \sum_{i=1}^N (M_i - (M_1 + M_N)/2) \times \text{AUC}_I \quad (3)$$

式中, M_i 表示在网络稀疏值 $i = [1, 2, \dots, N]$ 时对二值网络计算得到的全局或节点属性; AUC_I 为步长, 设定为 1%。研究表明, 采用 AUC 可以避免单一阈值选择带来的偏差, 从而提供稳健的结果^[20-21]。

根据获得的全局属性和节点属性面积, 随后进行组间比较。至于 CBN14 模板的网络, 直接对每一条有向连接进行了双样本 t 检验, 以确定与 ASB 相关的差异。

2 结果

2.1 与 ASB 相关的全局度量异常

小世界属性计算显示所有对象在 0.18 开始都显示出了小世界属性, 相应的所有网络属性 AUC 的计算基于 0.18~0.50, 步长 0.01。

通过双样本 t 检验对 ASB 人群和正常对照组的全局网络属性进行比较, 发现 ABS 组大脑网络的同步属性值较正常对照组显著下降 ($t=-3.036 2$, $p=0.003 9$)。这说明相较于正常人群, ASB 对象在不同脑区之间的信息传递协同性减弱。然而, 全局效率和全局层次性在 2 组人群中并没有观察到显著性差异。

2.2 与 ASB 相关的节点度量异常

与对照组相比, ASB 组 TE 网络的节点度量

显示出显著差异, 如图1所示, 颜色条表示 t 值, $t < 0$ 为 ASB 组低于 NC 组, $t > 0$ 为高于 NC 组。在 ASB 对象中, 节点介数中心性显示出右侧颞叶, 左侧枕叶及梭状体显著降低, 而左侧额下回, 脑岛和楔前叶则呈显著增加(图1a)。节点度中心性同样显示了显著差异, 右侧额中回延伸到额内侧回和枕上回呈显著降低, 而双侧中央后回、左侧颞下回、脑岛和右侧额内侧回则显著升高(图1b)。

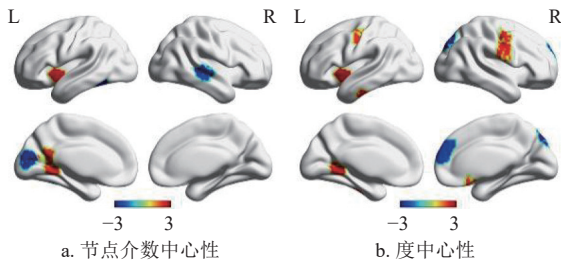


图1 ASB 组存在显著差异的脑区

2.3 与 ASB 相关的子网络效应连接异常

对 14 个典型大脑子网络的传递熵进行组间分析表明, 两组人群展现出不同的效应网络模式(图2a~图2d)。通过双样本 t 检验, 观察到 ASB 人群相对于正常对照组在以下 4 个方向的效应连接中存在显著降低(图2e): 从初级视觉网络(pVIS)到基底节网络(BGN) ($t = -2.09, p = 0.0413$)、高级视觉网络(hVIS)到语言网络(LAN) ($t = -2.89, p = 0.0056$)、腹侧默认模式网络(vDMN)到楔前叶(PRE) ($t = -2.42, p = 0.0192$), 以及语言网络(LAN)到腹侧默认模式网络(vDMN) ($t = -2.01, p = 0.0492$) 显著降低。这些结果在一定程度上与全局同步性的显著降低相一致。图2e中蓝色为 ASB 组低于 NC 组, 红色为高于 NC 组。

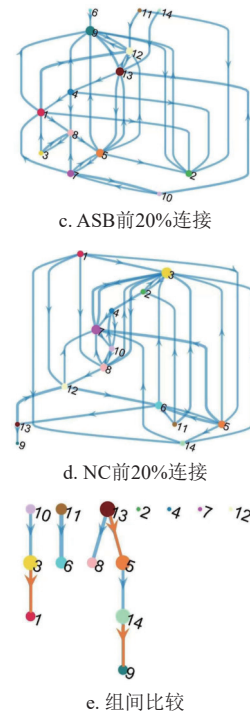
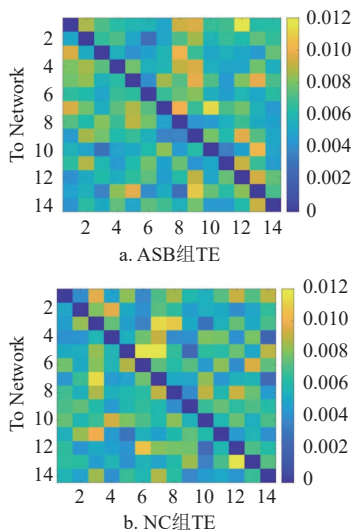


图2 子网络传递熵比较

与此同时, 从腹侧默认模式网络(vDMN)到高级视觉网络(hVIS) ($t = 2.03, p = 0.0475$)、基底节网络(BGN)到前显著网络(ASN) ($t = 2.05, p = 0.0458$) 以及高级视觉网络(hVIS)到后显著网络(PSN) ($t = 2.09, p = 0.0414$) 的效应连接显著升高。

2.4 全局信号回归的影响

本文对比了回归与不回归全局信号的结果, 发现全局信号回归(global signal regression, GSR)对 CBN14 模板的网络效应连接影响较小, 仅在语言网络到腹侧默认模式网络的连接上出现了微弱显著性差异, 而其余 6 条显著连接结果保持一致。在 268 个脑区模板中, 无论是否使用 GSR, 全局属性的同步性指标均显著; 在节点中心性分析中, 回归后的结果仅比不回归多出一个显著脑区, 其余 12 个脑区结果保持一致。此外, GSR 在介数中心性方面的影响略大, 但在不回归时获得的 8 个显著脑区中, 有 6 个在回归后的结果中依然保持显著。

3 结束语

本研究采用了传递熵进行神经网络的有向分析, 揭示了反社会行为个体在多个方面的显著异常。首先, 在全局度量方面, ASB 组大脑网络的同步性指标显著下降, 反映了不同脑区之间信息传递协同性的减弱。进一步的节点度量分析显示,

ASB 组在特定脑区的介数中心性和节点度中心性上存在显著差异, 这些脑区异常与之前关于反社会行为的研究结果一致, 进一步支持了额颞脑区及皮下层区域在该人群中存在异常的观点^[4]。此外, 基于 14 个典型大脑网络的效应连接分析表明, ASB 组的网络连接模式显著不同于正常对照组。这些发现揭示了 ASB 个体在全球和局部神经网络层面的广泛异常。

特别是不同功能子网络之间的效应连接减弱, 为研究者理解 ASB 群体的神经机制提供了重要线索。如基底神经节网络 (BGN) 在运动调节和奖励处理中起重要作用^[20]。初级视觉网络 (pVIS) 到 BGN 连接的减弱可能反映了 ASB 个体在刺激响应和行为抑制方面的不足, 这在冲动控制和决策过程中可能导致不当行为的发生^[4]。高级视觉网络 (hVIS) 与语言网络 (LAN) 的连接减弱可能影响 ASB 个体的视觉信息解读和语言处理的整合能力。已有研究表明, 视觉和语言网络之间的连接在社会线索识别和情境判断中至关重要^[21]。ASB 个体该连接的减弱可能导致对他人情感和意图的理解力下降, 进而影响社会互动^[3]。腹侧默认模式网络 (vDMN) 与楔前叶的连接减弱可能与 ASB 个体在自我反省和情绪调节方面的能力下降有关。vDMN 在自我相关信息处理和情绪调节中起到关键作用, 而楔前叶与情绪评估和记忆整合密切相关^[7]。该连接的削弱提示 ASB 个体在情绪处理和社交行为上可能存在缺陷^[1]。此外, 语言网络到腹侧默认模式网络的连接削弱可能反映了 ASB 个体在语言表达和自我相关思维整合方面的不足。vDMN 与情绪调节和自我意识有关, 该连接的减弱可能导致 ASB 个体在社交情境中无法有效调节语言和情绪表达^[1]。另一方面, 其他 3 条连接的增强可能暗示了一种功能补偿机制^[22], 这种补偿效应被认为是大脑在结构或功能紊乱时通过神经可塑性所产生的适应性变化^[23]。这些有向性连接的异常有助于本文从效应连接角度深入理解反社会行为的神经基础, 为未来研究和干预提供了参考。

需要注意的是, 由于研究群体的特殊性, 样本量存在一定限制, 影响了结果的显著性和普适性。此研究计划在未来收集更多数据, 以进一步验证并提升结果的稳健性和普适性。

参考文献

- [1] RAINE A, LENCZ T, BIHRLE S, et al. Reduced prefrontal gray matter volume and reduced autonomic activity in antisocial personality disorder[J]. *Archives of General Psychiatry*, 2000, 57(2): 119-127.
- [2] RAINE A, LENCZ T, TAYLOR K, et al. Corpus callosum abnormalities in psychopathic antisocial individuals[J]. *Archives of General Psychiatry*, 2003, 60(11): 1134-1142.
- [3] BARKATAKI I, KUMARI V, DAS M, et al. Volumetric structural brain abnormalities in men with schizophrenia or antisocial personality disorder[J]. *Behavioural Brain Research*, 2006, 169(2): 239-247.
- [4] YANG Y, RAINE A. Prefrontal structural and functional brain imaging findings in antisocial, violent, and psychopathic individuals: A meta-analysis[J]. *Psychiatry Research: Neuroimaging*, 2009, 174(2): 81-88.
- [5] JIANG W, SHI F, LIAO J, et al. Disrupted functional connectome in antisocial personality disorder[J]. *Brain Imaging and Behavior*, 2017, 11(4): 1071-1084.
- [6] JIANG W, ZHANG H, ZENG L L, et al. Dynamic neural circuit disruptions associated with antisocial behaviors[J]. *Human Brain Mapping*, 2021, 42(2): 329-344.
- [7] DUGRÉ J R, POTVIN S. Impaired attentional and socio-affective networks in subjects with antisocial behaviors: A meta-analysis of resting-state functional connectivity studies[J]. *Psychological Medicine*, 2021, 51(8): 1249-1259.
- [8] CAO J, ZHAO Y, SHAN X, et al. Brain functional and effective connectivity based on electroencephalography recordings: A review[J]. *Human Brain Mapping*, 2022, 43(2): 860-879.
- [9] SCHREIBER T. Measuring information transfer[J]. *Physical Review Letters*, 2000, 85(2): 461-464.
- [10] WU Z, CHEN X, GAO M, et al. Effective connectivity extracted from resting-state fMRI images using transfer entropy[J]. *IRBM*, 2021, 42(6): 457-465.
- [11] LYU H, LIU J, CHEN Q, et al. Brain effective connectivity analysis facilitates the treatment outcome expectation of sound therapy in patients with tinnitus[J]. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 2023, 31: 1158-1166.
- [12] JENKINSON M, BANNISTER P, BRADY M, et al. Improved optimization for the robust and accurate linear registration and motion correction of brain images[J]. *NeuroImage*, 2002, 17(2): 825-841.
- [13] YIN W, LI T, MUCHA P J, et al. Altered neural flexibility in children with attention-deficit/hyperactivity disorder[J]. *Molecular Psychiatry*, 2022, 27(11): 4673-4679.
- [14] AVANTS B B, TUSTISON N J, SONG G, et al. A reproducible evaluation of ANTs similarity metric performance in brain image registration[J]. *NeuroImage*,

- 2011, 54(3): 2033-2044.
- [15] MEER J N V, BREAKSPEAR M, CHANG L J, et al. Movie viewing elicits rich and reliable brain state dynamics[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 5004.
- [16] WU Q, LEI H, MAO T, et al. Test-retest reliability of resting brain small-world network properties across different data processing and modeling strategies[J]. *Brain Sciences*, 2023, 13(5): 825.
- [17] HIRSCH F, WOHLSCHLAEGER A. Graph analysis of nonlinear fMRI connectivity dynamics reveals distinct brain network configurations for integrative and segregated information processing[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2022, 108(4): 4287-4299.
- [18] JI T, REN X, LONG T, et al. Aberrant topological properties of brain functional network in children with obstructive sleep apnea derived from resting-state fMRI[J]. *Brain Topography*, 2023, 36(1): 72-86.
- [19] BRANDES U. A faster algorithm for betweenness centrality[J]. *The Journal of Mathematical Sociology*, 2001, 25(2): 163-177.
- [20] CAO H, MCEWEN S C, FORSYTH J K, et al. Toward leveraging human connectomic data in large consortia: Generalizability of fMRI-based brain graphs across sites, sessions, and paradigms[J]. *Cerebral Cortex*, 2019, 29(3): 1263-1279.
- [21] JIANG W, ZHOU Z, LI G, et al. Mapping the evolution of regional brain network efficiency and its association with cognitive abilities during the first twenty-eight months of life[J]. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 2023, 63: 101284.
- [22] VALK S L, BERNHARDT B C, TRAUTWEIN F M, et al. Structural plasticity of the social brain: Differential change after socio-affective and cognitive mental training[J]. *Science Advances*, 2017, 3(10): e1700489.
- [23] IRAJI A, CHEN H, WISEMAN N, et al. Compensation through functional hyperconnectivity: A longitudinal connectome assessment of mild traumatic brain injury[EB/OL]. [2023-12-01]. <https://doi.org/10.1155/2016/4072402>.

编辑 张莉