

基于脑电图的成年人和青少年精神分裂症 脑网络特征分析

陈贵苏*, 江绍萍#, 李如意

云南民族大学数学与计算机科学学院, 云南 昆明

收稿日期: 2025年5月23日; 录用日期: 2025年6月16日; 发布日期: 2025年6月25日

摘要

精神分裂症是一种严重的精神疾病, 影响患者的思维、情感和行为。研究利用71名成年精神分裂症患者及对照组的脑电图信号和84名青少年精神分裂症患者及对照组的脑电图信号进行分析, 基于定向传递函数构建了Delta、Theta、Alpha、Beta和Gamma频段的脑功能网络, 通过数据预处理、网络构建、阈值选择、特征提取与分析及可视化, 揭示患者与正常组脑功能网络特征差异。结果显示, 在不同频段下, 精神分裂症患者与正常组的脑功能网络特征存在显著差异, 且成年患者与青少年患者之间也有显著差异, 通过热图和圆环图的可视化结果也揭示了成年精神分裂症患者和青少年精神分裂症患者、成年精神分裂症患者和正常对照组、青少年精神分裂症患者和正常对照组在不同频段的脑网络连接模式异常, 这为理解该疾病的神经机制提供了新的视角, 并为临床诊断和干预提供了参考依据。

关键词

精神分裂症, 脑电图, 脑网络特征, 图论分析

Analysis of Brain Network Characteristics in Adults and Adolescents with Schizophrenia Based on Electroencephalography (EEG)

Guisu Chen*, Shaoping Jiang#, Ruyi Li

School of Mathematics & Computer Science, Yunnan Minzu University, Kunming Yunnan

Received: May 23rd, 2025; accepted: Jun. 16th, 2025; published: Jun. 25th, 2025

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 陈贵苏, 江绍萍, 李如意. 基于脑电图的成年人和青少年精神分裂症脑网络特征分析[J]. 应用数学进展, 2025, 14(6): 320-334. DOI: 10.12677/aam.2025.146323

Abstract

Schizophrenia is a severe mental disorder that affects patients' thinking, emotions, and behavior. This study analyzed electroencephalogram (EEG) signals from 71 adult schizophrenia patients and their controls, as well as 84 adolescent schizophrenia patients and their controls. Brain functional networks in the Delta, Theta, Alpha, Beta, and Gamma frequency bands were constructed based on the directed transfer function. Through data preprocessing, network construction, threshold selection, feature extraction, analysis, and visualization, the differences in brain functional network characteristics between patients and normal controls were revealed. The results showed significant differences in brain functional network characteristics between schizophrenia patients and normal controls across different frequency bands, as well as significant differences between adult and adolescent patients. Visualization results using heatmaps and circular graphs revealed abnormal brain network connectivity patterns in adult schizophrenia patients, adolescent schizophrenia patients, adult normal controls, and adolescent normal controls across different frequency bands. This provides new insights into the neural mechanisms of the disease and offers reference for clinical diagnosis and intervention.

Keywords

Schizophrenia, Electroencephalography (EEG), Brain Network Characteristics, Graph Theory Analysis

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

精神分裂症(Schizophrenia, SZ)是一种复杂精神障碍,通常表现为幻觉、妄想和认知功能障碍。根据世界卫生组织的统计,精神分裂症的终生患病率约为1%,并且该疾病对患者的生活质量和社会功能造成了显著影响[1]-[3]。近年来,脑电图(Electroencephalogram, EEG)作为一种无创性、非侵入性、高时间分辨率的脑功能成像技术,逐渐受到研究者的关注[4] [5]。EEG能够实时记录大脑的脑电活动,反映神经元的放电模式和脑区之间的相互作用。通过分析EEG信号,研究人员可以揭示精神分裂症患者在不同脑区之间的信息传递和功能连接的异常,从而为理解该疾病的神经生物学基础提供重要线索。

在精神分裂症的研究中,脑功能网络的构建和分析尤为重要[6] [7]。脑功能网络是指大脑不同区域之间的连接关系,通常通过图论方法进行分析。图论提供了一种量化的方式来分析脑网络的拓扑特征,例如聚类系数、特征路径长度和节点度等[8]-[10]。这些特征能够反映网络的整体连接性、信息传递效率和局部处理能力。Zawiślak-Fornagiel 等人[11]通过比较精神分裂症患者与健康对照组的脑电信号,发现患者在Alpha频段的功率显著降低,同时Theta频段功率提高,说明患上精神分裂症之后Alpha频段和Theta频段会改变,这些频段的改变揭示了精神分裂症与正常对照组的区别。Yeh 等人[12]通过对比静息态脑电图(Resting-state Electroencephalogram, rs-EEG),识别出SZ患者在Beta频段中较低的功率谱,显示出认知功能障碍与脑电活动的关系。Li 等人[13]利用排序熵(Permutation Entropy, PE)和复杂性指数(Complexity Index, CI)分析精神分裂症患者的EEG,结果表明患者的脑电信号复杂度显著低于健康个体,显示出在神经网络的动态交互方面的障碍。Cai 等人[14] [15]的研究进一步证实,在精神分裂症患者的脑网络中,功

能连接的强度和模式显著异常,这可能与临床表现诸如幻觉和妄想等症状密切相关。

在脑电图研究领域,格兰杰因果关系方法凭借其独特优势,在因效性脑网络研究中占据重要地位。黄登凤[16]率先提出因效性脑网络的概念,为后续研究奠定了基础。雷巧[17]运用基于格兰杰因果关系的 DTF 方法,对两组受试者的因果连接矩阵进行计算,并依据所得矩阵构建脑功能连接网络。经深入分析发现,在全局属性方面,正常人的网络全局效率较高,且与另一组存在显著性差异;在局部属性上,精神分裂症患者的大脑右半球额叶和颞叶分布着核心节点,其局部效率更高。祖红月[18]对相关数据处理后构建因效性脑网络,从多个维度剖析其属性,得出精神分裂症患者大脑功能连接存在病变,不同被试大脑活动状况及网络属性各异,且正常人脑网络局部和全局效率更低等结论。王润泽[19]聚焦精神分裂症患者听觉门控过程脑网络连接状态,基于听觉条件-测试范式下的 32 通道 EEGs,采用基于频域格兰杰因果的 DTF 方法计算因果连接矩阵。分析结果显示,精神分裂受试者在 High-beta 和 Gamma 频段的聚集系数和全局效率均显著高于正常受试者,这一发现揭示了患者在听觉门控抑制过程中脑网络存在异常连接、信息处理障碍以及相关复杂网络特性的改变。

尽管已有一些研究探讨了精神分裂症患者的脑电图特征,但关于不同年龄段患者脑功能网络的系统性分析仍然较为稀缺。姚明荣等人[20]-[22]主要围绕青少年精神分裂症展开,包括对青少年精神分裂症患者临床特征的对比分析以及青少年精神分裂症患者认知功能减退危险因素的探讨。印海翔等人[23]探究早发型精神分裂症与成年期首发精神分裂症在病前适应状态及临床特征上的区别。病前适应不良与精神分裂症的发病年龄紧密相连,且不同年龄段的发病在临床特征上展现出明显的差异,这为进一步深入研究精神分裂症的发病机制、制定针对性的防治策略以及开展个性化的临床治疗提供了重要的理论依据和实践指导,有必要在精神分裂症诊疗过程中考虑年龄因素。因此,本研究旨在通过对 71 名成年精神分裂症患者及对照组的脑电图信号和 84 名青少年精神分裂症患者及对照组的脑电图信号进行分析,构建不同频段的脑功能网络,并比较两组之间的网络特征差异。通过引入图论特征和定向传递函数(directed transfer function, DTF)方法,本研究将为理解精神分裂症的神经机制提供新的视角,并为临床诊断和干预提供参考依据。

2. 方法

2.1. 数据集

本研究采用了两个数据集,具体信息如下:

第一个数据集来自莫斯科国立罗蒙诺索夫大学托管的可公开访问的精神分裂症数据库。这些文件采用“.eea”(标准 ASCII 数据)的形式,其中包括从标准 10-20 放置系统获得的时间序列数值,该数据集由 45 例 SZ 青少年患者和 39 例健康青少年的 16 个通道的脑电图记录构成,每个记录约为 16 分钟。采样率为 128Hz,ADC 分辨率为 24 位,从通道 Ch1-F7、Ch2-F3、Ch3-F4、Ch4-F8、Ch5-T3、Ch6-C3、Ch7-Cz、Ch8-C4、Ch9-T4、Ch10-T5、Ch11-P3、Ch12-Pz、Ch13-P4、Ch14-T6、Ch15-O1、Ch16-O2 记录信号。

第二个数据集来自开放数据集 Zenodo,该数据集记录了 71 名成年人受试者(包括 42 名 SZ 患者和 29 名健康个体),包括 32 个通道的脑电图数据,从通道 Ch1-FP1、Ch2-FZ、Ch3-F3、Ch4-F7、Ch5-T7、Ch6-C3、Ch7-CZ、Ch8-P1、Ch9-P3、Ch10-P5、Ch11-P7、Ch12-P9、Ch13-PO7、Ch14-PO3、Ch15-O1、Ch16-IZ、Ch17-FP2、Ch18-F4、Ch19-F8、Ch20-T8、Ch21-C4、Ch22-PZ、Ch23-P2、Ch24-P4、Ch25-P6、Ch26-P8、Ch27-P10、Ch28-PO8、Ch29-PO4、Ch30-POZ、Ch31-OZ、Ch32-O2 记录信号,采样率为 256 Hz。

2.2. 数据预处理

对于第一个数据集,首先,应用 0.5 Hz 至 30 Hz 的带通滤波器去除低频噪声和干扰,接着使用

小波变换分解信号,以提取和精神分裂症相关的不同频段信号成分。使用独立成分分析(Independent Component Analysis, ICA)去除由于头部运动和眼动引起的伪影,以进一步净化信号。为解决信号的幅度缩放和偏移效应,所有信号在输入模型之前都进行了 Z-score 标准化。

对于第二个数据集,首先进行带通滤波,提取 Delta 频段、Theta 频段、Alpha 频段、Beta 频段和 Gamma 频段的关键频率成分。在去除眼动和肌电伪影后,使用独立成分分析分离出功能相关的脑电活动成分。随后,计算不同通道间的协方差或相关性矩阵,作为构建脑功能连接网络的基础,并根据显著性设定阈值以去除弱连接。提取的网络特征包括节点度、聚类系数和特征路径长度等,从而量化网络拓扑和功能连接特性。

2.3. 脑功能网络构建

在数据预处理完成后,将 EEG 信号划分为 Delta (0.1~4 Hz)频段、Theta (4~8 Hz)频段、Alpha (8~12 Hz)频段、Beta (12~30 Hz)频段和 Gamma (30~40 Hz)频段五个频段。利用定向传递函数计算不同通道间的因果关系,构建脑功能网络矩阵。具体步骤如下:

(1) 频域分析,对每个频段进行快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT),获取各通道信号的频域表示。FFT 是一种常用的频域分析方法,它将时域信号转换为频域表示,通过数学运算揭示信号的频率成分和能量分布。对经过预处理的 EEG 信号,按照划分的频段进行提取。确保每个频段的数据具有良好的质量和代表性。首先,将 EEG 信号分割成若干个短窗口,以减少边界效应和噪声影响。窗口的大小和形状应根据信号特点和分析目的进行选择。然后进行离散傅里叶变换(Discrete Fourier Transform, DFT)计算,对于每个窗口内的信号,计算其离散傅里叶变换。DFT 的计算公式为:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-i \frac{2\pi}{N} kn}. \quad (1)$$

其中 $x(n)$ 是时域信号, $X(k)$ 是频域信号, N 是信号的采样点数, $k = 0, 1, \dots, N-1$ 。最后使用快速傅里叶变换算法,对 DFT 进行快速计算,提高计算效率。

(2) 建立多变量自回归模型(Multivariate Autoregressive Model, MVAR),描述不同通道信号之间的动态关系。MVAR 模型是一种用于描述多个时间序列变量之间动态关系的统计模型。它假设每个变量的当前值与过去的若干个值以及其他变量的过去值之间存在线性关系。 N 通道的脑电信号时间序列可描述为:

$$X(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_N(t)]^T. \quad (2)$$

其中 t 为时间,下标 N 为通道数。对于每一段脑电图信号,可以建立 p 阶 MVAR 模型:

$$X(t) = \sum_{n=1}^p A_n X(t-n) + E(t). \quad (3)$$

其中 A_n 为 $N \times N$ 系数矩阵, $E(t)$ 为白噪声向量,建立 MVAR 模型的关键步骤之一是选择合适的模型阶数,阶数 p 由贝叶斯信息准则(Bayesian Information Criterion, BIC)确定。将上式变换到频域得到:

$$X(f) = A^{-1}(f)E(f) = H(f)E(f). \quad (4)$$

其中 f 表示频率, $H(f)$ 表示传递函数, $H(f)$ 表示为:

$$H(f) = A^{-1} = \left(\sum_{n=1}^p A_n e^{2\pi i f n \Delta t} \right)^{-1}. \quad (5)$$

$$A_0 = -I. \quad (6)$$

其中, I 为单位矩阵。构建的 DTF 矩阵为

$$\gamma_{ij}^2(f) = \frac{|H_{ij}(f)|^2}{\sum_{m=1}^k |H_{im}(f)|^2}. \quad (7)$$

其中 $\gamma_{ij}^2(f)$ 为归一化的结果。

计算定向传递函数(Directed Transfer Function, DTF), 根据 MVAR 模型的传递函数形式, 对模型参数进行傅里叶变换, 从而得到频域中的传递函数表达式, 并计算不同频率下的传递函数值, 这些值反映了不同频率下通道间的信号传递关系。基于 MVAR 模型计算得到的定向传递函数值, 用于反映不同通道信号之间的因果关系和信息传递方向。DTF 的值可以通过传递函数的模值来计算, 即

$$DTF_{ij}(f) = \frac{|H_{ij}(f)|^2}{\sum_{k=1}^N |H_{ik}(f)|^2}. \quad (8)$$

其中 $H_{ij}(f)$ 是通道 i 到通道 j 的传递函数在 f 频率处的值, N 是通道总数。DTF 值的大小表示两个通道之间信息传递的强度, DTF 的值越大, 表示两个通道之间的信息传递越强, 当 DTF 值为正时, 说明信号从第一个通道传递到第二个通道; 反之, 若 DTF 值为负, 则表示信号从第二个通道传递到第一个通道。通过传递函数的模值计算得到的 DTF 值可以组成一个脑功能网络矩阵, 该矩阵的每个元素代表不同脑区或通道之间的 DTF 数值, 反映了脑网络中各个节点之间的因果关系和信息传递强度。为了直观分析脑网络的结构和特征, 利用可视化工具(如热图、网络图等)对该矩阵进行展示。这种可视化方法能够清晰呈现脑区之间的信息流向和连接模式, 从而帮助研究者更好地理解 and 解释复杂的脑功能互联关系, 为脑网络研究提供直观的支持。

2.4. 阈值选择

为了简化网络结构并捕捉最显著的特征, 常使用绝对阈值法来确定合理的阈值范围。具体步骤为: 首先设定阈值范围在 0.06 到 0.6 之间, 并以 0.001 为步长进行遍历, 这种细粒度的步长有助于捕获阈值变化对网络特征的细微影响。在每个阈值上, 计算脑功能网络的拓扑参数, 这些参数可以包括聚类系数、局部效率、平均节点度和特征路径长度。本文选取平均节点度作为拓扑参数, 计算正常人和患者的平均节点度, 在精神分裂症患者和正常人的差异相对较大的情况下确定最佳阈值范围, 进一步找出最佳阈值, 最终得到青少年各个频段的最佳阈值为 0.13, 成年人各个频段的最佳阈值为 0.5, 得到最佳阈值后便于分析最佳阈值下各个频段脑功能网络的拓扑参数。

2.5. 特征提取与分析

在确定最佳阈值后, 计算网络的拓扑参数, 包括:

节点度: 是指网络中与某个节点相连的边的数量。节点度包括入度和出度, 入度表示指向该节点的边的数量, 出度表示从该节点出发的边的数量。为了便于比较不同规模的网络, 本研究进一步计算平均节点度, 即网络的节点度除以网络的节点总数, 计算公式如下:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^N k_i}{N}. \quad (9)$$

聚类系数：聚类系数是指网络中某个节点的相邻节点之间彼此连接的紧密程度。聚类系数反映了网络的局部聚集特性，能够揭示网络中节点之间的相互关系和信息传递方式。为了得到网络的平均聚类系数，本研究对所有节点的聚类系数进行平均，计算公式如下：

$$C = \frac{\sum_{i \in V} C_i}{N}. \quad (10)$$

特征路径长度：特征路径长度是指网络中所有节点对之间的最短路径长度的平均值。特征路径长度反映了网络的整体传输能力和信息传递效率，能够揭示网络的拓扑结构和功能特性。

局部效率：局部效率是指网络中某个节点及其相邻节点构成的子网络的信息传递效率。局部效率考虑了相邻节点之间的相互作用和信息传递能力，能够反映网络的局部结构和功能特性。为了得到网络的平均局部效率，本研究对所有节点的局部效率进行平均，计算公式如下：

$$E_{loc} = \frac{\sum_{i=1}^N E_{loc}(i)}{N}. \quad (11)$$

效率密度：网络中有效连接的数量与总连接数量的比值，反映网络的整体效率。效率密度是一种新的图论特征，它表示网络中全局效率和网络密度的乘积。效率密度的计算公式如下：

$$E(G) = d(G) \cdot E_{glob}. \quad (12)$$

其中， $E(G)$ 表示效率密度， $d(G)$ 表示网络密度， E_{glob} 表示全局效率。网络密度的计算公式为 $d(G) = \frac{2L}{N(N-1)}$ ，其中 L 是网络中实际存在的边数， N 是网络中的节点个数。全局效率的计算公式为

$$E_{glob} = \frac{\sum_{j \neq k \in V} \frac{1}{L_{j,i}}}{N(N-1)},$$

其中 L_{ij} 是节点 i 和节点 j 之间的最短路径长度，全局效率是一种衡量信息流量的标量，

是整个网络的资讯传送能力。

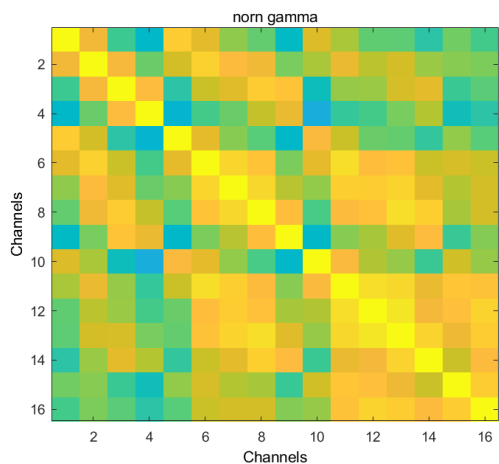
3. 结果

3.1. 网络连接模式

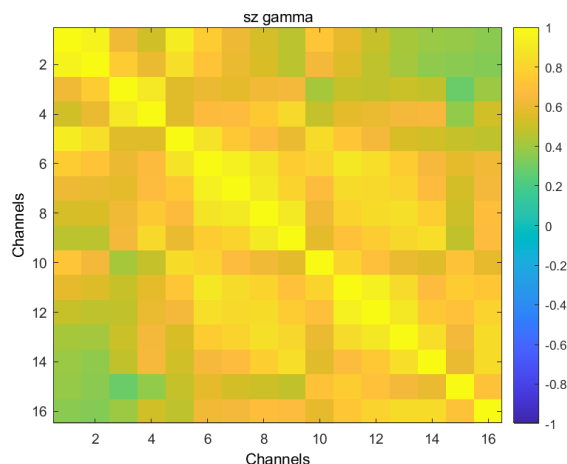
通过热图和圆环图对比正常组与精神分裂症组的脑功能网络，直观展示不同频段下脑功能网络的连接模式。在热图中，连接强度通过颜色深浅表示，而圆环图则清晰展示各个节点的连接情况。本文的热度图和圆环图一共有五组，即每个频段都有一组，每一组都包括了成年人和青少年的健康和患病的热度图和圆环图，因为反映出的特征具有类似结果，本文只保留 Gamma 频段的图像，如图 1。

由图 1(a)和图 1(b)，图 1(e)和图 1(f)可以看出，青少年患精神分裂症之后，在 Gamma 频段，脑网络的连接变得紧密了，相互之间的联系变多。由图 1(c)和图 1(d)，图 1(g)和图 1(h)可以看出，成年人患精神分裂症之后，在 Gamma 频段，脑网络的连接也变得紧密了，相互之间的联系更多。由图 1(a)和图 1(c)，图 1(e)和图 1(g)可以看出，正常的成年人在 Gamma 频段上的联系比正常的青少年之间的联系较紧密。由图 1(b)和图 1(d)，图 1(f)和图 1(h)可以看出，患精神分裂症的成年人在 Gamma 频段上的联系比青少年之间的联系更多。因此，由图 1 可知，无论是精神分裂症还是正常人，成年人在 Gamma 频段上的联系都比青少年紧密，相互之间的联系更多，但是在患上精神分裂症之后，无论是成年人还是青少年，在 Gamma 频段上，彼此之间的连接比正常对照组更加紧密，联系更多。

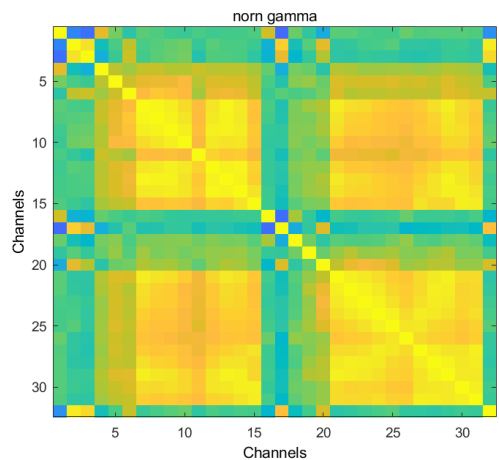
在 Alpha 频段、Beta 频段、Delta 频段和 Theta 频段上的脑功能网络图也呈现出与 Gamma 频段相似的特征,即在 Alpha 频段、Beta 频段、Delta 频段和 Theta 频段,不管是精神分裂症还是正常对照组,成年人在 Alpha 频段、Beta 频段、Delta 频段和 Theta 频段上的联系都比青少年紧密,相互之间的联系更多,



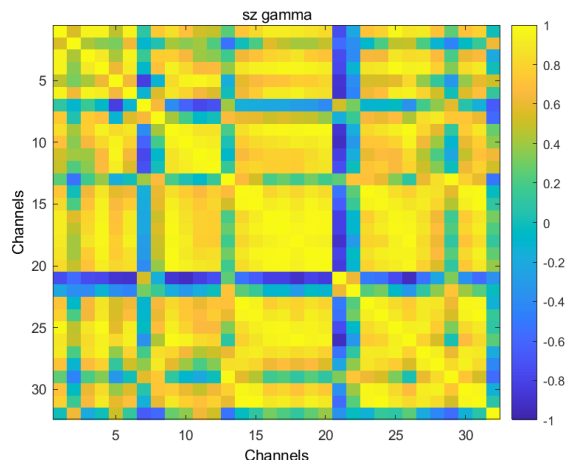
(a) 正常青少年的热度图



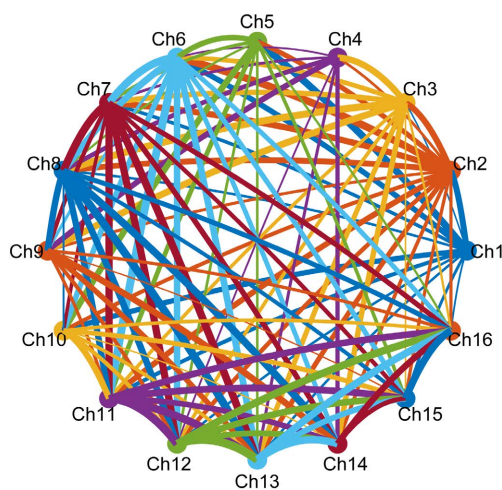
(b) 青少年 SZ 患者热度图



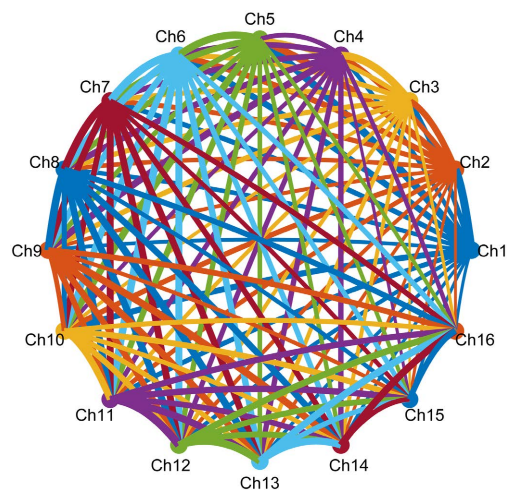
(c) 正常成年人的热度图



(d) 成年 SZ 患者热度图



(e) 正常青少年的圆环图



(f) 青少年 SZ 患者圆环图

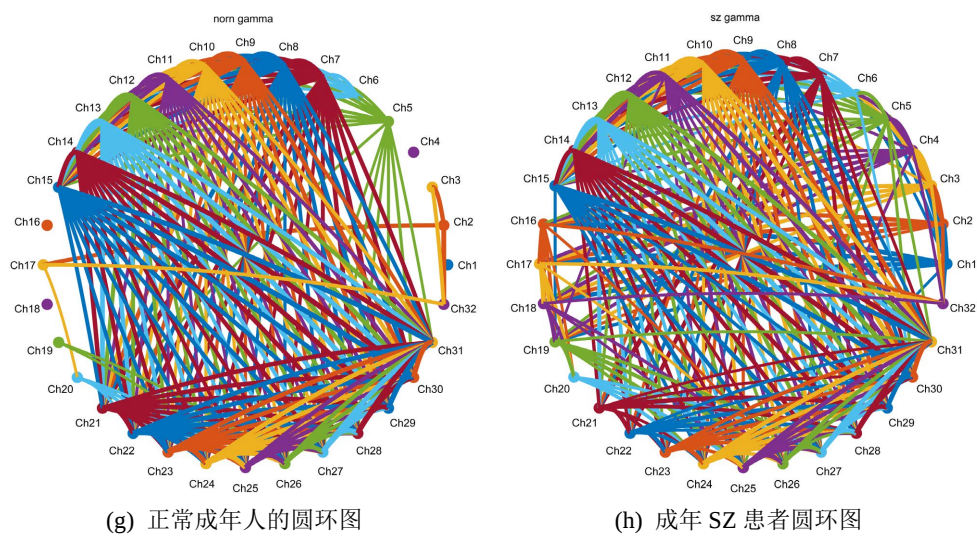


Figure 1. Brain functional network in the Gamma band
图 1. Gamma 频段脑功能网络图

但是在患上精神分裂症之后，无论是成年人还是青少年，在 Alpha 频段、Beta 频段、Delta 频段和 Theta 频段上，彼此之间的连接比正常对照组更加紧密，联系更多。

Gamma 频段在脑电活动中具有独特且关键的作用，与注意力、感知觉整合、工作记忆、语言处理、意识等高级认知功能密切相关。它能够在注意力集中时同步不同脑区的神经元活动，促进各脑区协同工作，并在感知觉整合中融合多感官信息。Gamma 频段是神经元同步放电的标志，其振荡功率高代表神经元同步性强，有助于高效的信息传递与复杂任务的执行。此外，Gamma 频段还参与神经可塑性，在学习和记忆形成过程中可能调节突触强度，推动新神经连接的建立与强化，使大脑功能能够根据经验和学习进行适应性调整。

大脑功能连接存在显著的个体差异。成年正常人群体的平均连接模式显示这 4 个通道无连接，但这并不代表所有个体均如此。此外，与成年患病群体及青少年正常群体相比，成年正常人的 Gamma 频段连接模式具有独特性，这与其大脑发育成熟和功能状态稳定密切相关。青少年的大脑处于发育阶段，可塑性强，神经连接不断优化，神经活动与连接变化更为活跃。与成年正常人稳定的大脑功能连接模式不同，青少年的大脑连接更加丰富且灵活。一些在成年人中表现为弱连接的脑区关系，在青少年中可能因大脑发育特点而强度较高，因此在相同算法和阈值设定下能够显示连接，表现为无断点。此外，青少年的神经环路尚未完全成熟定型，其连接模式与成年人存在显著差异，这也导致了图中表现的不同。

3.2. 脑功能网络特征

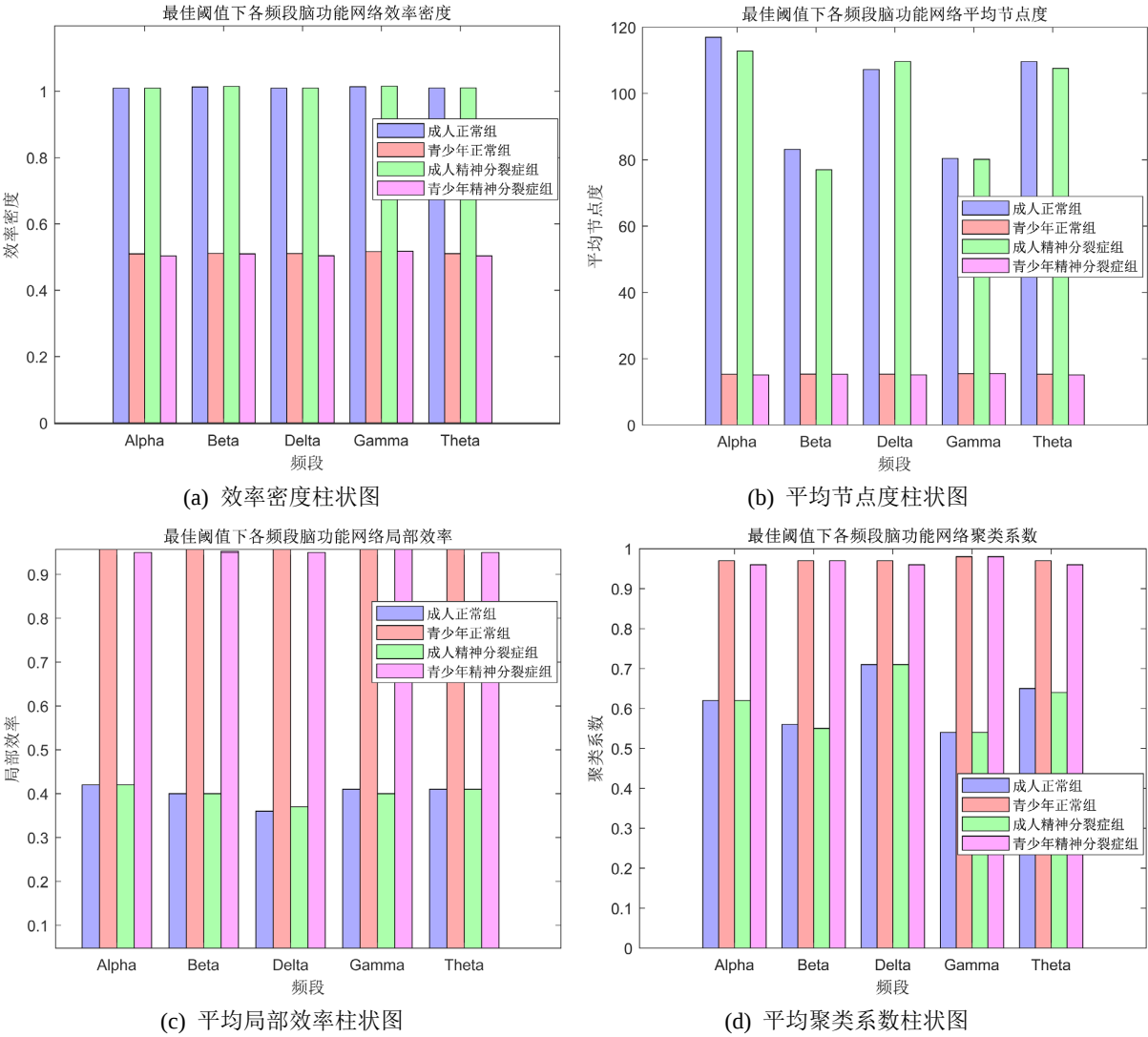
通过计算效率密度、平均节点度、平均聚类系数、平均局部效率和特征路径长度等脑功能网络特征，可以看出在不同频段下，精神分裂症患者的脑功能网络特征与正常组存在显著差异，成年人和青少年在精神分裂症患者和正常人之间也存在显著差异。

在最佳阈值下，各个频段脑功能网络的效率密度如表 1 所示，由统计结果分析可知，在各个频段，成年精神分裂症的效率密度均比正常人的效率密度高。而青少年除了 Gamma 频段外，其余四个频段中，精神分裂症患者脑功能网络的效率密度均小于正常人脑功能网络的效率密度，其差异在 Delta 频段和 Theta 频段最为突出，其余均不明显。在各个频段上，成年正常人和成年精神分裂症患者的脑功能网络的

效率密度均比青少年较高,但是相比正常人,青少年精神分裂症患者和成年精神分裂症患者之间的差距较大,如图 2(a)所示。

Table 1. Efficiency density of brain functional networks across frequency bands at optimal threshold
表 1. 最佳阈值下各频段脑功能网络效率密度

频段	成人正常	青少年正常	成人患病	青少年患病
Alpha	1.0096	0.5096	1.0098	0.5034
Beta	1.0130	0.5111	1.0147	0.5097
Delta	1.0098	0.5106	1.0099	0.5041
Gamma	1.0138	0.5165	1.0155	0.5176
Theta	1.0100	0.5103	1.0102	0.5038



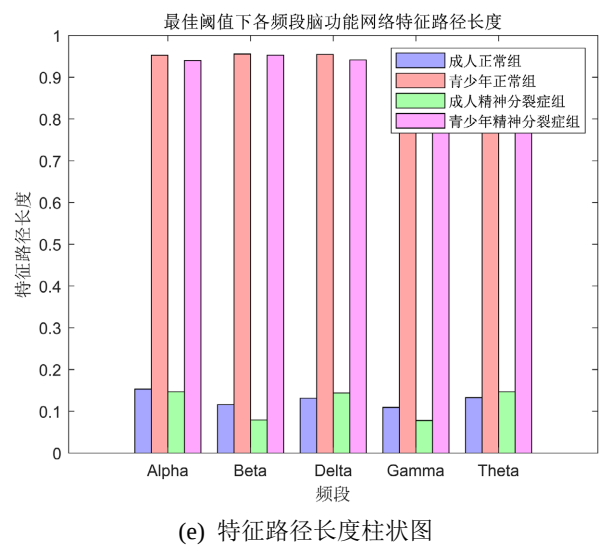


Figure 2. Characteristics of brain functional networks across frequency bands at optimal threshold
图 2. 最佳阈值下各频段脑功能网络特征

在最佳阈值下，各个频段脑功能网络的平均节点度如表 2 所示，由统计结果分析可知，除了 Delta 频段，青少年和成年人的精神分裂症患者的脑功能网络的平均节点度均比正常人高。成年人中，精神分裂症患者和正常人差异较明显的是 Beta 频段和 Alpha 频段，其次是 Delta 频段和 Theta 频段，较不明显的是 Gamma 频段。青少年中，精神分裂症患者和正常人差异较明显的是 Alpha 频段、Delta 频段和 Theta 频段，较不明显的是 Beta 频段和 Gamma 频段。在成年人中，平均节点度最高的是 Alpha 频段，其次是 Delta 频段和 Theta 频段，最低的是 Beta 频段和 Gamma 频段。在青少年中，精神分裂症患者和正常人的平均节点度较高的都是 Gamma 频段，精神分裂症患者的平均节点度较低的是 Beta 频段，最低的是 Alpha 频段、Delta 频段和 Theta 频段；正常人的平均节点度较低的是 Beta 频段、Delta 频段和 theta 频段，最低的是 Alpha 频段。青少年和成年人相比，成年人的平均节点度均比青少年的高，而且差距明显，如图 2(b) 所示。在平均节点度方面，对于青少年精神分裂症患者，可以看到在 Alpha 频段上的脑功能网络的平均节点度显著降低，而对于成年人，精神分裂症患者的脑功能网络的平均节点度在 Alpha 频段上最高，成年精神分裂症患者和青少年精神分裂症患者在 Alpha 频段上的差距较大，精神分裂症患者的某些关键节点的平均节点度显著降低，表明信息传递的中心性下降。

Table 2. Average node degree of brain functional networks across frequency bands at optimal threshold
表 2. 最佳阈值下各频段脑功能网络平均节点度

频段	成人正常	青少年正常	成人患病	青少年患病
Alpha	116.96	15.29	112.79	15.10
Beta	83.16	15.33	77.01	15.29
Delta	107.25	15.32	109.68	15.12
Gamma	80.40	15.49	80.13	15.53
Theta	109.65	15.31	107.60	15.11

在最佳阈值下，各频段脑功能网络的平均局部效率有以下特征如表 3 所示，在各个频段，青少年脑

功能网络的平均局部效率均高于成年人，其中 Delta 频段表现尤为明显。成年正常人中，Delta 频段的脑功能网络平均局部效率较低，成年精神分裂症患者同样是 Delta 频段较低。在成年人中，正常人在 Delta 频段上脑功能网络的平均局部效率低于精神分裂症患者，在 Gamma 频段上则相反，正常人高于精神分裂症患者，其他频段上相同。在青少年中，精神分裂症患者和正常人的脑功能网络平均局部效率在 Gamma 频段最高，其余频段次之，且在 Gamma 频段二者均为 0.97，而在其他频段，正常人的平均局部效率高于精神分裂症患者。此外，在正常人中，青少年和成年人的脑功能网络平均局部效率在 Delta 频段的差距最为明显；在精神分裂症患者中，青少年和成年人的这一差距同样在 Delta 频段最为显著，如图 2(c)所示。

在平均局部效率方面，不管是青少年还是成年人，在各个频段上，均是正常人的平均局部效率较高，精神分裂症患者的平均局部效率低下，说明精神分裂症患者大脑中神经元之间的连接或许存在广泛的损伤或异常，像突触连接减少、白质纤维束完整性受损，致使信息在局部脑区传递效率降低。对于青少年患者，或反映出大脑发育滞后、神经连接建立与完善过程受阻。从信息处理角度看，各频段对应脑功能区域内，患者信息传递存在障碍，无法有效处理局部信息，严重影响脑区功能。而且大脑各局部脑区处理后的信息整合也因局部效率低下出现问题，致使患者在认知、情感、行为上表现出不协调和紊乱，如思维混乱、语言表达异常、情绪调节失控等。

Table 3. Average local efficiency of brain functional networks across frequency bands at optimal threshold
表 3. 最佳阈值下各频段脑功能网络平均局部效率

频段	成人正常	青少年正常	成人患病	青少年患病
Alpha	0.42	0.96	0.42	0.95
Beta	0.40	0.96	0.40	0.95
Delta	0.36	0.96	0.37	0.95
Gamma	0.41	0.97	0.40	0.97
Theta	0.41	0.96	0.41	0.95

在最佳阈值下，各个频段脑功能网络的平均聚类系数如表 4 所示，由统计结果分析可知，在各个频段，成年人的脑功能网络的平均聚类系数均比青少年的低。在成年人中，正常人和精神分裂症患者的脑功能网络的平均聚类系数在 Delta 频段最高，其次是 Alpha 频段和 Theta 频段，最低的是在 Beta 频段和 Gamma 频段。在青少年中，精神分裂症患者和正常人在 Beta 频段和 Gamma 频段上的脑功能网络的平均聚类系数是相同的，在其他频段上，精神分裂症患者的脑功能网络的平均聚类系数较低于正常人。在正常情况下，成年人的脑功能网络的平均聚类系数较低于青少年，在 Beta 频段和 Gamma 频段上最明显；在患精神分裂症的情况下，成年人的脑功能网络的平均聚类系数也是较低于青少年，在 Beta 频段和 Gamma 频段上最明显，如图 2(d)所示。平均聚类系数较高说明了脑功能网络在面对局部节点故障时，具有更好的容错能力，因为信息可通过邻居节点之间的连接进行重新路由，所以通过分析平均聚类系数可以深入了解大脑的工作机制和精神分裂症的发生机制，这是一个重要的不可或缺的特征。在患病之后会导致脑功能网络的局部聚集性变弱，大脑之间的连接性较为稀疏，信息在局部区域内的传播可能受到限制，导致信息传播的延迟或阻碍，这也反映出大脑功能的紊乱。

在最佳阈值下，各个频段脑功能网络的特征路径长度如表 5 所示，对各频段脑功能网络的特征路径长度分析发现：无论是正常人还是精神分裂症患者，成年人在各频段的脑功能网络特征路径长度均低于青少年。在成年人中，正常人的脑功能网络特征路径长度在 alpha 频段最高，Delta 频段和 Theta 频段较

高；而精神分裂症患者在 Alpha 频段、Delta 频段和 Theta 频段最高，Beta 频段和 Gamma 频段较低，仅为最高频段的一半。在青少年中，正常人在各频段的脑功能网络特征路径长度差异不明显，而精神分裂症患者在 Gamma 频段较高，Beta 频段次之，但差距均不显著。进一步对比，在成年人的 Alpha 频段、Beta 频段和 Gamma 频段，正常人的脑功能网络特征路径长度高于精神分裂症患者，Delta 频段和 Theta 频段则相反；在青少年的所有频段，正常人的特征路径长度均高于精神分裂症患者。此外，在正常人中，成年人比青少年的脑功能网络特征路径长度低，其中 Beta 和 Gamma 频段差距最明显，Delta 和 Theta 频段次之，Alpha 频段最不明显；在精神分裂症患者中，同样成年人相对于青少年的脑功能网络特征路径长度较低，且在 Beta 频段和 Gamma 频段最明显，如图 2(e)所示。在脑功能网络的复杂架构中，特征路径长度的数值变化蕴含重要功能意义：从神经信息学角度，较长的特征路径长度意味着大脑各区域间信息传递需经历更多神经节点跳转或更长神经传导通路，导致信息交流延迟，显著降低大脑整合多源信息及执行复杂认知任务的效率；较短的特征路径长度则反映出大脑网络具有良好拓扑属性，各区域间能通过高效神经连接实现信息快速交换与协同处理，为完成复杂认知任务提供有力支持。神经科学领域诸多研究表明，当大脑遭受脑损伤或神经退行性疾病侵袭时，脑功能网络的特征路径长度往往会显著增加，揭示出大脑网络结构完整性遭到破坏、神经连接受损，进而导致信息传递功能受损，使大脑正常功能难以维持。

Table 4. Average clustering coefficient of brain functional networks across frequency bands at optimal threshold
表 4. 最佳阈值下各频段脑功能网络平均聚类系数

频段	成人正常	青少年正常	成人患病	青少年患病
Alpha	0.62	0.97	0.62	0.96
Beta	0.56	0.97	0.55	0.97
Delta	0.71	0.97	0.71	0.96
Gamma	0.54	0.98	0.54	0.98
Theta	0.65	0.97	0.64	0.96

Table 5. Characteristic path length of brain functional networks across frequency bands at optimal threshold
表 5. 最佳阈值下各频段脑功能网络特征路径长度

频段	成人正常	青少年正常	成人患病	青少年患病
Alpha	0.1532	0.9526	0.1467	0.9402
Beta	0.1158	0.9556	0.0793	0.9528
Delta	0.1312	0.9545	0.1438	0.9415
Gamma	0.1092	0.9662	0.0779	0.9685
Theta	0.1327	0.9538	0.1467	0.9409

通过研究可知，在成年人中，精神分裂症患者的脑功能网络特征与正常人存在差异：在 Alpha 频段、Beta 频段和 Theta 频段，其平均节点度高于正常人，Delta 频段则相反，Gamma 频段差异不明显；平均聚类系数在 Beta 频段和 Theta 频段高于正常人，其他频段无显著差异；特征路径长度在 Beta 频段和 Gamma 频段高于正常人，Delta 频段和 Theta 频段低于正常人，而效率密度和平均局部效率与正常人无明显差距。在青少年中，仅 Gamma 频段精神分裂症患者的效率密度高于正常人，其余频段均更低；正常人的脑功能

网络平均局部效率在 Alpha 频段、Beta 频段、Delta 频段和 Theta 频段均高于患者，平均聚类系数和特征路径长度在 Alpha 频段、Delta 频段和 Theta 频段也更高。进一步对比发现，在各个频段，无论精神分裂症患者还是正常人，成年人脑功能网络的效率密度和平均节点度均高于青少年，尤其在 Alpha 频段、Delta 频段和 Theta 频段，平均节点度差距明显；相反，成年人的平均局部效率、平均聚类系数和特征路径长度均低于青少年，如图 2 所示。

4. 讨论

本研究得到精神分裂症患者在各个频段上的脑网络连接比正常人的连接更为紧密，该结论不是孤立的，在早期的 EEG 研究中就有一些研究发现精神分裂症患者在某些脑网络或特定区域的功能连接增强，而非普遍的连接减弱。Whitfield-Gabrieli 等人[24]发现精神分裂症患者在默认模式网络内部连接增强，尤其是前扣带和后扣带之间。Manoliu 等人[25]发现精神分裂症患者的凸显网络功能连接增强，可能与异常情绪处理和幻觉有关。Liang 等人[26]使用 EEG 研究发现，部分精神分裂症患者(尤其是阳性症状突出者)表现出全脑功能连接增强，而非减弱。Damaraju 等人[27]使用动态功能连接分析发现，精神分裂症患者在特定时间窗口内表现出连接增强，而非静态分析中的普遍减弱。

但以往的研究中，存在脑网络连接减弱的结论，这是由于不同的数据采集，不同的研究方法，不同的疾病亚型导致的。首先，本文采用的是两个数据集一起比较，分别是青少年和成年人的 EEG 数据，分析了青少年和成年人在不同频段的各个特征和脑功能连接程度，以往的研究利用的是儿童，青少年，成年人的数据集，注重于同一数据单独对比，较少有不同数据集之间的比较。其次，研究方法不同也会导致得到的结论不一样，以往对精神分裂的研究中，有研究的是全局属性，也有局部属性，有动态功能连接的，也有静态分析的，这些情况都可能导致研究的结果会有所偏差。并且研究采取的采集方法也有影响，有些研究是利用神经影响数据(如结构 MRI、功能 MRI 和扩散张量成像 DTI)，也有利用 EEG 和 MEG 来进行精神分裂症的脑功能网络连接程度的研究。当然，疾病的不同，利用同样的方法也不会得到相同的结果，李昕等人[28]利用图论和 DTF 方法研究了帕金森疾病，得到了在较高频段(Delta 频段和 Theta 频段)的连接程度较为紧密，而在(Alpha 频段、Beta 频段和 Gamma 频段)的连接程度较为稀疏，可以看出患病后在不同频段，脑功能连接有增强也有减弱的，所以不能用同样的规律来解释不同疾病不同数据的功能连接程度。最后，精神分裂症作为一种高度异质性的精神障碍，临床上可以划分为不同的亚型，这些亚型在症状表现、病理机制和治疗反应上都存在显著差异。精神分裂症不同临床亚型可能对应特异的网络异常模式：阳性症状(如幻觉)与突显网络和全脑功能连接增强相关[24] [26]，而阴性症状(如情感淡漠)多伴随前额叶连接减弱[29]。本研究样本中阳性症状患者占比偏高，可能部分解释了为何整体呈现连接增强趋势。未来需通过大样本亚型分层分析进一步验证这一假设。

本文采用的数据集不一致是本文研究的一大局限性，两个数据集的采样率和通道数不一样，虽然预处理使用了降采样及标准化处理，以减少技术性偏差，但因为数据的本身偏差可能会引入额外的误差，所以未来研究要使用更统一的数据集，以免造成不必要的误差。

5. 结论与展望

在脑功能网络构建方面，本文基于定向传递函数来构建脑功能网络，同时选用热图和圆环图两种表示方法来对比正常人和精神分裂症患者的脑功能网络，得到无论是正常人还是精神分裂症患者，成年人在 Alpha 频段、Beta 频段、Delta 频段、Gamma 频段和 Theta 频段上的脑网络联系普遍比青少年更紧密；并且在患上精神分裂症后，不管是成年人还是青少年，在 Alpha 频段、Beta 频段、Delta 频段、Gamma 频段和 Theta 频段上脑网络的连接都会变得更加紧密。通过对不同频段的分析，本文为理解精神分裂症的神经机制提供了新的视角，同时为临床诊断和治疗提供了参考依据。

在脑电信号特征分析方面, 本文通过分析效率密度、平均局部效率、平均聚类系数、平均节点度和特征路径长度。发现在最佳阈值下, 对各个频段脑功能网络的多种特征(包括效率密度、平均节点度、平均局部效率、平均聚类系数、特征路径长度)进行统计分析: 成年人精神分裂症患者的效率密度在各频段均高于成年正常人, 青少年精神分裂症患者则除 Gamma 频段外低于正常青少年; 平均节点度除 Delta 频段外, 青少年精神分裂症患者和成年精神分裂症患者均比正常人高, 且成年精神分裂症患者平均节点度高于青少年精神分裂症患者。不管是正常还是患病, 平均局部效率方面, 青少年均高于成年人; 平均聚类系数方面, 成年人均低于青少年; 特征路径长度方面, 成年人均低于青少年。各特征在不同频段下正常人与患者、成年人与青少年之间存在不同程度的差异表现。未来的研究可以进一步探讨这些脑网络特征与临床表现之间的关系, 为精神分裂症的早期诊断和干预提供新的思路。

展望未来, 随着深度学习算法的飞速发展, 可将其创新性地应用于对精神分裂症相关脑网络特征的研究中, 通过对青少年未患病、青少年患病、成年未患病、成年患病群体进行精准分析。利用深度学习算法对脑电图进行处理, 建立脑网络发育的动态预测模型。运用生成对抗网络等前沿深度学习技术, 模拟不同治疗手段对患者脑网络的影响。通过生成虚拟的治疗后脑网络状态, 并与实际治疗效果进行对比验证, 算法能够快速筛选出对不同成年患者最为有效的治疗策略。同时, 利用深度学习算法分析成年患者脑网络特征与治疗反应、症状复发等临床现象之间的复杂关系, 为临床治疗决策提供有力支持。通过上述基于深度学习算法的四分类研究, 有望全面解析精神分裂症在不同年龄段、患病与否状态下的神经生物学机制, 为早期精准诊断、高效干预以及个性化治疗提供全新的技术手段和科学依据, 推动精神分裂症临床防治领域实现质的飞跃。

基金项目

项目名称: 云南省研究生优质课程建设项目《高等概率论》(无编号)。

参考文献

- [1] Ritsner, M.S. and Ratner, Y. (2019) Predicting Predischage Anhedonia among Inpatients with Schizophrenia and Schizoaffective Disorders. *Journal of Nervous & Mental Disease*, **207**, 12-21. <https://doi.org/10.1097/nmd.0000000000000923>
- [2] Hu, M., Zong, X., Mann, J.J., Zheng, J., Liao, Y., Li, Z., et al. (2016) A Review of the Functional and Anatomical Default Mode Network in Schizophrenia. *Neuroscience Bulletin*, **33**, 73-84. <https://doi.org/10.1007/s12264-016-0090-1>
- [3] McCutcheon, R.A., Reis Marques, T. and Howes, O.D. (2020) Schizophrenia—An Overview. *JAMA Psychiatry*, **77**, 201-210. <https://doi.org/10.1001/jamapsychiatry.2019.3360>
- [4] 鲁在清. 脑电图的发现及发展简史[J]. 现代电生理学杂志, 2012, 19(2): 113-115.
- [5] Yen, C., Lin, C. and Chiang, M. (2023) Exploring the Frontiers of Neuroimaging: A Review of Recent Advances in Understanding Brain Functioning and Disorders. *Life*, **13**, Article 1472. <https://doi.org/10.3390/life13071472>
- [6] Zhang, H., Zhou, Q., Chen, H., Hu, X., Li, W., Bai, Y., et al. (2023) The Applied Principles of EEG Analysis Methods in Neuroscience and Clinical Neurology. *Military Medical Research*, **10**, Article No. 67. <https://doi.org/10.1186/s40779-023-00502-7>
- [7] 李璇. 基于模式分解的脑功能网络的构建及分类研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 东南大学, 2019.
- [8] 梁夏, 王金辉, 贺永. 人脑连接组研究: 脑结构网络和脑功能网络[J]. 科学通报, 2010, 55(16): 1565-1583.
- [9] 邢阳阳, 马旭峰, 尹鸿峰. 基于图论的脑电数据脑功能网络构建研究[J]. 黑龙江科学, 2023, 14(6): 36-39.
- [10] 李昕, 王欣, 安占周. 基于脑功能网络分析的孤独症儿童辅助干预效果研究[J]. 自动化学报, 2021, 47(11): 2654-2663.
- [11] Zawislak-Fornagiel, K., Ledwoń, D., Bugdol, M., Romaniszyn-Kania, P., Małcki, A., Gorzkowska, A., et al. (2023) The Increase of Theta Power and Decrease of Alpha/Theta Ratio as a Manifestation of Cognitive Impairment in Parkinson's Disease. *Journal of Clinical Medicine*, **12**, Article 1569. <https://doi.org/10.3390/jcm12041569>
- [12] Yeh, T., Huang, C.C., Chung, Y., Park, S.Y., Im, J.J., Lin, Y., et al. (2023) Resting-State EEG Connectivity at High-

- Frequency Bands and Attentional Performance Dysfunction in Stabilized Schizophrenia Patients. *Medicina*, **59**, Article 737. <https://doi.org/10.3390/medicina59040737>
- [13] Li, Y., Tong, S., Liu, D., Gai, Y., Wang, X., Wang, J., *et al.* (2008) Abnormal EEG Complexity in Patients with Schizophrenia and Depression. *Clinical Neurophysiology*, **119**, 1232-1241. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2008.01.104>
- [14] Cai, M., Wang, R., Liu, M., Du, X., Xue, K., Ji, Y., *et al.* (2022) Disrupted Local Functional Connectivity in Schizophrenia: An Updated and Extended Meta-Analysis. *Schizophrenia*, **8**, Article No. 93. <https://doi.org/10.1038/s41537-022-00311-2>
- [15] Singh, S., Kumar, M., Sharma, A., Modi, S., Kaur, P., Bhatia, T., *et al.* (2015) Disrupted Functional Connectivity in Schizophrenia: A Resting State fMRI Study. *European Psychiatry*, **30**, 907. [https://doi.org/10.1016/s0924-9338\(15\)30707-0](https://doi.org/10.1016/s0924-9338(15)30707-0)
- [16] 黄登凤. 基于 PDC 的注意相关脑电因效网络分析[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
- [17] 雷巧. 精神分裂症患者的 EEG 因效性网络分析[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
- [18] 祖红月. 基于格兰杰因果的精神分裂听觉门控脑网络的研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津医科大学, 2017.
- [19] 王润泽. 基于格兰杰因果的精神分裂症患者因效性脑网络分析[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2019.
- [20] 姚明荣, 陈爱学, 袁天懿, 等. 57 例青少年首发精神分裂症患者临床特征分析[J]. 当代医学(学术版), 2008(Z1): 84-86.
- [21] 薛坚. 青少年首发精神分裂症患者临床特征分析[J]. 北方药学, 2013, 10(4): 140-141.
- [22] 张梁, 赵林, 张飞龙, 等. 首发青少年精神分裂症患者认知功能障碍的危险因素分析[J]. 河南医学高等专科学校学报, 2023, 35(6): 627-630.
- [23] 印海翔, 张晨, 王晓良, 等. 青少年期与成年期首发精神分裂症前适应状态及临床症状的对照分析[J]. 四川精神卫生, 2008, 21(4): 199-201.
- [24] Whitfield-Gabrieli, S., Thermenos, H.W., Milanovic, S., Tsuang, M.T., Faraone, S.V., McCarley, R.W., *et al.* (2009) Hyperactivity and Hyperconnectivity of the Default Network in Schizophrenia and in First-Degree Relatives of Persons with Schizophrenia. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **106**, 1279-1284. <https://doi.org/10.1073/pnas.0809141106>
- [25] Manoliu, A., Riedl, V., Zherdin, A., Mühlau, M., Schwerthöffer, D., Scherr, M., *et al.* (2013) Aberrant Dependence of Default Mode/Central Executive Network Interactions on Anterior Insular Salience Network Activity in Schizophrenia. *Schizophrenia Bulletin*, **40**, 428-437. <https://doi.org/10.1093/schbul/sbt037>
- [26] Liang, M., Zhou, Y., Jiang, T., Liu, Z., Tian, L., Liu, H., *et al.* (2006) Widespread Functional Disconnectivity in Schizophrenia with Resting-State Functional Magnetic Resonance Imaging. *Neuro Report*, **17**, 209-213. <https://doi.org/10.1097/01.wnr.0000198434.06518.b8>
- [27] Damaraju, E., Allen, E.A., Belger, A., Ford, J.M., McEwen, S., Mathalon, D.H., *et al.* (2014) Dynamic Functional Connectivity Analysis Reveals Transient States of Dysconnectivity in Schizophrenia. *NeuroImage: Clinical*, **5**, 298-308. <https://doi.org/10.1016/j.nicl.2014.07.003>
- [28] 李昕, 张晴, 张莹, 等. 基于脑电图的帕金森轻度认知障碍功能网络特征分析[J]. 计量学报, 2024, 45(1): 135-144.
- [29] 艾桂局, 金铭, 邵全明, 等. 精神分裂症患者内在病耻感与生活质量的关系: 自尊及阴性症状严重程度的链式作用路径[J]. 四川精神卫生, 2025, 38(2): 172-177.