

高度近视静息态脑功能网络的拓扑结构改变

陈聪,董红焕,王思佳,侯爱林,李冬月,郭明霞,梁猛

【摘要】 目的:基于图论的复杂网络方法,探讨高度近视患者(HM)与视力正常者(NC)之间静息态脑功能连接网络的拓扑结构变化。**方法:**采集 25 例高度近视患者及 27 例视力正常被试的静息态 fMRI 数据,以 BN246 脑图谱为模板,分别构建两组样本的脑功能网络,计算和比较两组间脑网络的全局属性:小世界性、脑网络全局效能、脑网络局部效能,并进一步对比各节点属性:节点度、节点效能、节点聚类系数和节点局部效能的组间差异。**结果:**HM 组和 NC 组的脑功能网络均具有小世界性,两组脑网络的小世界性在各稀疏度下均大于 1。与 NC 组比较,HM 组的网络局部效能显著降低($t=2.11$, $P<0.05$);HM 组中部分视觉相关脑区的节点属性发生改变,双侧颞下回和右内侧顶枕沟的节点聚类系数和节点局部效能显著降低(t 值分别为 4.54、4.56、3.73、3.72、3.79 和 3.82, P 值均 <0.001),右侧颞下回岛盖的节点聚类系数降低($t=4.15$, $P<0.001$),右侧尾状核的节点度、节点效能均提高($t=3.74$, $t=3.72$, P 值均 <0.001),左侧杏仁核的节点聚类系数降低($t=3.54$, $P<0.001$)。**结论:**高度近视人群的静息态脑功能连接网络具有小世界属性,但其视觉响应的注意力调制、视觉注意力及与情感相关的脑区节点属性发生了改变,提示高度近视者局部网络信息传递异常。

【关键词】 高度近视; 静息态; 功能磁共振成像; 脑网络; 拓扑结构

【中图分类号】 R445.2; R741.02 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1000-0313(2019)04-0392-07

DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2019.04.006

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Topological changes of resting-state functional brain network in high myopia CHEN Cong, DONG Hong-huan, WANG Si-jia, et al. School of Medical Imaging, Tianjin Medical University, Tianjin 300203, China

【Abstract】 Objective: To study the topological changes of the resting-state functional brain network between high myopia and normal visual subjects (control group, NC) using graph-based complex network approach. **Methods:** The resting-state fMRI data were collected from 25 subjects with high myopia (HM group) and 27 healthy volunteers with normal visual acuity. The functional brain networks of two groups were reconstructed and binarized with BN246 brain map as template. Between-group difference in the global properties such as small world, network global efficiency and network local efficiency were calculated and compared. Between-group differences in nodal properties of degree centrality, nodal efficiency, nodal clustering coefficient and nodal local efficiency were determined by two sample t -test. **Results:** The resting-state functional brain connection networks of both groups exhibited small-world topology. The network local efficiency of HM group was significantly lower than that of normal group ($t=2.11$, $P<0.05$). Compared with the control group, the high myopia group showed decreased nodal clustering coefficient and nodal local efficiency in the bilateral inferior temporal gyrus and the right medial parieto-occipital sulcus ($t=4.54$, 4.56 , 3.73 , 3.72 , 3.79 and 3.82 ; all $P<0.001$); decreased nodal clustering coefficient in the pars opercular of the inferior frontal gyrus ($t=4.15$, $P<0.001$); increased nodal degree and nodal efficiency in the right caudate nucleus ($t=3.74$ and 3.72 , $P<0.001$); and decreased nodal clustering coefficient of the left amygdale ($t=3.54$, $P<0.001$). **Conclusion:** The brain network of high myopia has small world attributes. But there are some changes of nodal properties in these regions related to attention-modulation of visual response, visual

作者单位:300203 天津医科大学影像学院脑功能实验室

作者简介:陈聪(1994-),女,湖北孝感人,硕士研究生,主要从事医学影像脑功能研究工作。

通讯作者:郭明霞, E-mail: guomx11@163.com

基金项目:天津市应用基础与前沿技术研究计划基金资助项目(15JCYBJC551000)

attention and emotion. The changes may indicate that the information transmission in some local networks is abnormal in high myopia. This study can provide a new perspective for understanding neural mechanisms of high myopia.

【Key words】 High myopia; Resting-state; Functional magnetic resonance imaging; Brain network; Topological structure

高度近视(high myopia, HM)是一种全球性的卫生健康问题,在中国成年人中患病率达 2%~5%^[1-2],在青少年中约为 1.19%^[3]。高度近视的定义为屈光度 $\leq -6.00\text{D}$ 并伴有玻璃体的轴向延长^[4],患者的视敏度和对比敏感度等视觉功能降低^[5-6],严重危害视力健康。高度近视的病因很复杂,目前普遍认为遗传因素和环境因素在其发生和发展中有重要作用。长期高度近视不仅可导致视网膜厚度降低和视网膜适应性下降等眼底结构的显著改变^[7-8],而且影响视觉信息在大脑内的传输处理和加工整合,继而影响视觉及视觉认知功能。近年来,已有研究中发现高度近视者视觉相关区域的脑白质密度发生了变化^[9]。此外,利用静息态功能 MRI 的相关研究结果显示高度近视者的脑功能发生了一定程度的改变^[10]。长期的视觉异常可导致脑组织的结构和功能发生改变。

既往的研究中基于种子点的功能连接分析发现高度近视者多个脑区存在功能活动的异常变化^[10]。这种方法仅仅分析了感兴趣区与其它脑区之间的相关程度,而实际上,人的脑功能活动往往是多个脑区间相互联系、相互影响的网络协作方式。基于图论的复杂网络分析方法以全脑相关分析为基础,可以从整体的角度表征脑功能性网络的拓扑性质,揭示大脑功能网络的分离和整合的重要信息^[11]。因此,在本项研究中,我们利用基于图论的复杂网络分析方法来研究高度近视患者脑功能性网络的拓扑属性的变化,旨在为进一步了解异常视觉经验对脑功能的影响及其神经机制提供依据。

材料与方法

1. 研究对象

选取 52 例天津医科大学的在校学生,均为右利手。其中 25 例为高度近视者(HM 组),女 21 例,男 4 例,年龄 21~25 岁,平均 (23.36 ± 1.35) 岁,双眼屈光度 $\leq -6.00\text{D}$;27 例视力正常者作为对照组,女 13 例,男 14 例,年龄 18~25 岁,平均 (22.93 ± 1.86) 岁。本研究经天津医科大学伦理委员会批准,所有研究对象签署了知情同意书。

2. MRI 数据采集

使用 GE Signa HDx 1.5T 磁共振扫描仪。扫描中要求患者佩戴耳塞并在其头部周围填充泡沫,要求

患者保持双眼睁开,不佩戴眼镜,全身放松,尽量不做任何思考。扫描参数:梯度回波平面回波成像序列,TR 2000 ms,TE 60 ms,翻转角 90° ,成像矩阵 64×64 ,视野 $22\text{ cm} \times 22\text{ cm}$,层厚 5 mm,层间距 1 mm,共采集 184 个时间点,总扫描时间 368 s。

3. MRI 数据预处理

采用基于 MATLAB 平台的 DPABI 软件包(<http://rfmri.org/dpabi>),对所有被试的静息态功能 MRI 数据进行预处理:①去除前 4 个时间点的数据,以减小磁化矢量不稳定的影响;②时间层校正;③头动校正(剔除头部移动 $>2\text{ mm}$ 、转动角度 $>2^\circ$ 的图像);④空间标准化和平滑,将所有功能像配准到 MNI 空间,然后进行半高全宽为 $5\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 的平滑处理;⑤多重线性回归和滤波,采用多重线性回归法将 12 个头动参数、平均脑脊液信号以及平均白质信号从数据中剔除,最后进行带通滤波($0.01 \sim 0.08\text{ Hz}$)处理。

4. 脑功能网络的构建

基于 BN246 脑图谱模板(<http://atlas.brainnetome.org>),将全脑划分为 246 个脑区,提取每个脑区内所有体素的时间序列上的所有信号的平均值,将每个脑区定义为一个节点,计算每两个节点之间的 Pearson 相关系数,组成 246×246 的矩阵,构建大脑的功能连接网络。在图论中,全脑网络可表述为由节点(vertex, V)和边(edge, E)构成的集合图 $G(V, E)$ 。其中,上述 246 个脑区是图 G 的节点,而脑区之间的 Pearson 相关系数则为边。

5. 复杂网络的分析

在 $0.05 \sim 0.50$ 的网络稀疏度(sparsity, Sp)范围内计算网络连通性,得到在 $0.23 \leq \text{Sp} \leq 0.49$ 范围内全脑功能性网络保持全连通。同时在此稀疏度范围内,以 0.02 为步长,对功能性脑网络进行二值化处理。应用基于 MATLAB 平台的 GREYNA 软件(<http://www.nitrc.org/projects/gretna>)计算脑功能网络的全局属性和局部属性。全局属性包括小世界性、全局效能、局部效能,局部属性包括节点度、节点效能、节点聚类系数和节点局部效能。

局部属性:①节点度为网络中某节点与其它直接相关节点的边的数目(e_i),它反映了某个节点在网络信息传递中的作用,该值越大,代表此节点在大脑信

息传递中就越重要;②节点效能指节点*i*与整个网络中其它节点间信息传递的效率,反映了节点*i*的信息传输能力,其计算公式为:

$$E_{\text{nodal } i} = \frac{1}{(N-1)} \sum_{i,j \neq i} \frac{1}{d_{ij}}$$

(1)

其中 d_{ij} 是节点*i*与节点*j*之间最短路径的长度, d_{ij} 的倒数表示节点*i*与节点*j*之间信息传递的效能,*N*为网络中所有节点的数目;③节点聚类系数表示节点*i*的相邻节点之间的连接情况,反映了网络的集团化程度,聚类系数越大,脑区之间的功能分化能力越强,其计算公式为:

$$C_i = \frac{E_i}{K_i(K_i-1)/2}$$

(2)

其中 E_i 是节点*i*与相邻节点间实际相连的边数, $K_i(K_i-1)/2$ 是节点*i*与相邻节点间可能存在的最大连接边数;④节点的局部效能($E_{i-\text{local}}$),反映节点的局部信息传递效率,也就是节点*i*在其邻近节点构成的子图 G_i 内的信息传递效率。子图 G_i 的全局效能($E_{G_i-\text{global}}$)即为节点*i*的局部效能。

全局属性:①小世界性是指具有较高集群系数和最短路径长度的高效网络,为了量化小世界属性,通常以随机网络为基准,将脑网络的聚类系数和特征路径长度与随机网络进行比较,满足标准化聚类系数($\gamma = C_{\text{real}}/C_{\text{random}} > 1$)和标准化路径长度($\lambda = L_{\text{real}}/L_{\text{random}} < 1$)即为具有小世界属性。为了方便计算,将上述两个指标统一为 $\sigma(\sigma = \gamma/\lambda)$ 来衡量小世界性,当 $\sigma > 1$ 时认为脑功能网络具有小世界属性;②全局效能(E_{global})是衡量网络在全局并行传递信息效率的一项指标,其计算公式为:

$$E_{\text{global}} = \frac{1}{N(N-1)/2} \sum_{i,j, i < j} \frac{1}{d_{ij}}$$

(3)

其中 $N(N-1)/2$ 为节点*i*在网络中可能存在的最大连接边数;③局部效能(E_{local})是分析网络局部信息传递效率的量化指标,它反映了网络防御随机攻击的能力。网络的局部效能为所有节点局部效能的平均值。

6. 统计学处理

对两组被试在各个网络稀疏度下的全局属性相关指标分别进行双样本 *t* 检验,加入性别和图像帧位移量(frame-wise displacement,FD)作为协变量,以 $P=0.05$ 为阈值检验其显著性。将各个稀疏度下的节点属性的度量值连成一条曲线,然后计算这条曲线下的面积称为某节点属性的 AUC。对不同网络稀疏度下两组被试节点属性度量值的曲线下面积(AUC)分别进行双样本 *t* 检验,加入性别和 FD 值为协变量,以 $P=0.001$ 为阈值检验其显著性。如果某节点的节点属性度量值的 AUC 经双样本 *t* 检验结果显示组间差

异显著,再对该节点的节点属性在各个网络稀疏度下($0.23 \leq SP \leq 0.49$,步长 0.02)分别进行双样本 *t* 检验,加入性别和 FD 值为协变量。以 $P=0.001$ 为阈值检验其显著性。

结 果

1. 一般临床资料

高度近视组与正常对照组间被试的年龄差异无统计学意义($t=1.35, P=0.34$)。两组被试的视力检查结果及组内比较见表 1。每组内双眼裸眼视力的差异均无统计学意义($P>0.05$)。

表 1 近视组与对照组的视力

组别	左眼	右眼	<i>t</i> 值	<i>P</i> 值
HM 组				
裸眼	0.10±0.00	0.09±0.10	0.37	0.71
矫正	1.04±0.08	1.03±0.07	0.36	0.72
NC 组	1.31±0.33	1.31±0.32	0.04	0.97

2. 脑功能网络属性

两组的静息态脑功能连接网络均显示出典型的小世界性。高度近视组中脑功能网络的小世界性在各个稀疏度下($0.23 \leq SP \leq 0.49$,步长 0.02)均高于对照组(图 1),但组间差异无统计学意义($P>0.05$)。

在各个稀疏度下两组被试静息态脑功能连接网络的全局效能见图 2,不同稀疏度下全局效能两组间的差异均无统计学意义($P>0.05$)。

在 0.23~0.49 连续 14 个稀疏度下,高度近视组的静息态脑功能连接网络的局部效能较对照组均显著降低(图 3),差异均有统计学意义($t=2.11 \sim 2.27$,未校正 $P<0.05$)。

与对照组比较,高度近视组静息态下脑功能连接网络中右侧尾状核的节点度的 AUC 显著增大($t=3.74$,未校正 $P>0.001$),在网络全连通的各稀疏度下,高度近视组右侧尾状核的节点度均高于对照组(图 4),且在 $0.23 \leq Sp \leq 0.49$ 的条件下组间差异有统计学意义($t=3.52 \sim 3.89, P<0.001$)。

相对于对照组,高度近视组右侧尾状核节点效能的 AUC 提高($t=3.72$,未校正 $P<0.001$)。在网络全连通的各稀疏度下,高度近视组右侧尾状核的节点效能高于对照组(图 5),在部分稀疏度下($0.23 \leq Sp \leq 0.37, Sp=0.41, 0.45 \leq Sp \leq 0.49$)组间差异有统计学意义($t=3.47 \sim 3.86, P<0.001$)。

高度近视组和对照组中静息态脑功能连接网络的节点聚类系数值及比较见图 6。与对照组比较,高度近视组在双侧颞下回、右内侧顶枕沟、右侧额下回岛盖和左侧杏仁核节点聚类系数的 AUC 降低(*t* 值分别为 4.54、3.73、3.79、4.15 和 3.54,未校正 $P<0.001$)。

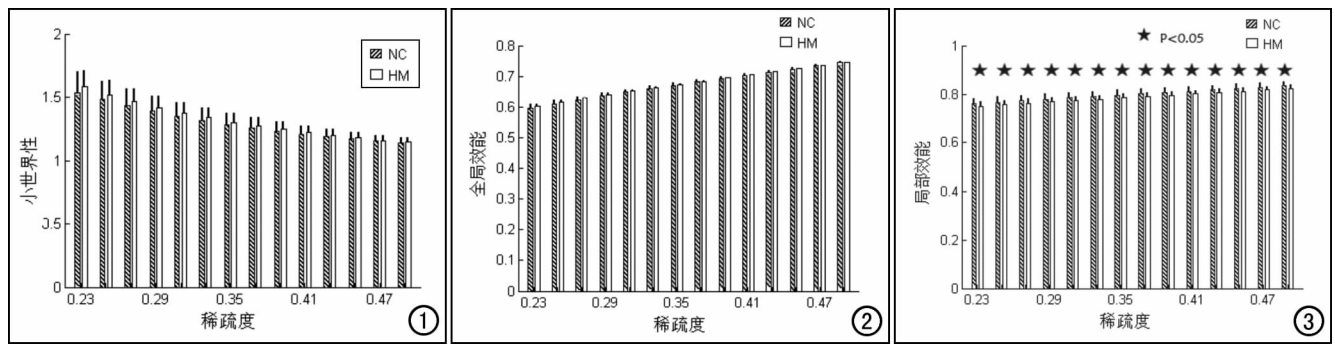


图 1 两组被试静息态脑功能连接网络的小世界性的直方图分析。图 2 两组被试静息态脑功能连接网络的全局效能的直方图分析。图 3 两组被试静息态脑功能连接网络的局部效能的直方图分析。

全连通网络在各稀疏度下,高度近视组左侧颞下回的节点聚类系数均显著降低;右侧颞下回的节点聚类系数在 $0.23 \leq Sp \leq 0.27$ 和 $0.33 \leq Sp \leq 0.43$ 范围内均显著降低($t = 3.22 \sim 4.00, P < 0.001$);右内侧顶枕沟的节点聚类系数在 $0.31 \leq Sp \leq 0.49$ 范围内均显著降低($t = 2.29 \sim 4.61, P < 0.001$);右侧额下回岛盖的节点聚类系数在 $0.23 \leq Sp \leq 0.41$ 和 $0.45 \leq Sp \leq 0.49$ 范围内均显著降低($t = 3.50 \sim 4.44, P < 0.001$);左侧杏仁核的节点聚类系数在不同 Sp 下均降低,但组间差异均无统计学意义($P > 0.001$)。

高度近视组和对照组静息态脑功能连接网络的节点局部效能值见图 7。高度近视组中双侧颞下回、右内侧顶枕沟 AUC 的节点局部效能显著降低(t 值分别

为 4.56、3.72 和 3.82,未校正 $P < 0.001$)。在全连通网络各稀疏度下,高度近视组中左侧颞下回节点局部效能均显著低于对照组($t = 3.53 \sim 4.76, P < 0.001$);高度近视组中右侧颞下回节点局部效能能在 $0.23 \leq Sp \leq 0.27$ 、 $0.33 \leq Sp \leq 0.43$ 下显著降低($t = 3.10 \sim 3.99, P < 0.001$);高度近视组中右内侧顶枕沟节点局部效能能在 $0.29 \leq Sp \leq 0.49$ 范围内显著降低($t = 2.92 \sim 4.61, P < 0.001$)。

讨论

本研究探讨了高度近视者静息态脑功能连接网络的拓扑结构,结果表明高度近视人群的脑网络表现出小世界性,但是网络的局部效能所有稀疏度下都降

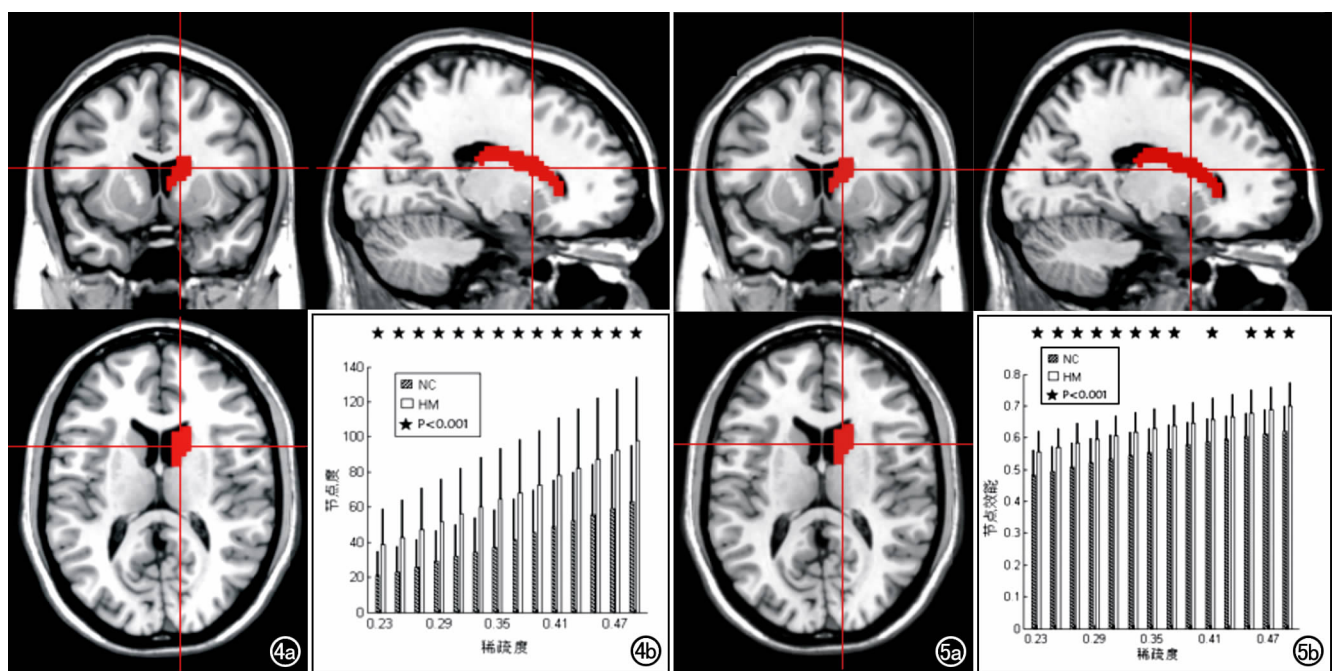


图 4 高度近视组和对照组静息态脑功能连接网络节点度的 AUC 比较。a) 两组脑功能网络的节点度的 AUC 差异显著的脑区;b) 各稀疏度下两组中右侧尾状核节点度的柱形图(为组间比较 $P < 0.001$)。

图 5 高度近视组和对照组静息态脑功能连接网络的节点效能比较。a) 两组脑功能网络的节点效能差异显著的脑区;b) 各稀疏度下右侧尾状核节点效能的柱形图(为组间比较 $P < 0.001$)。

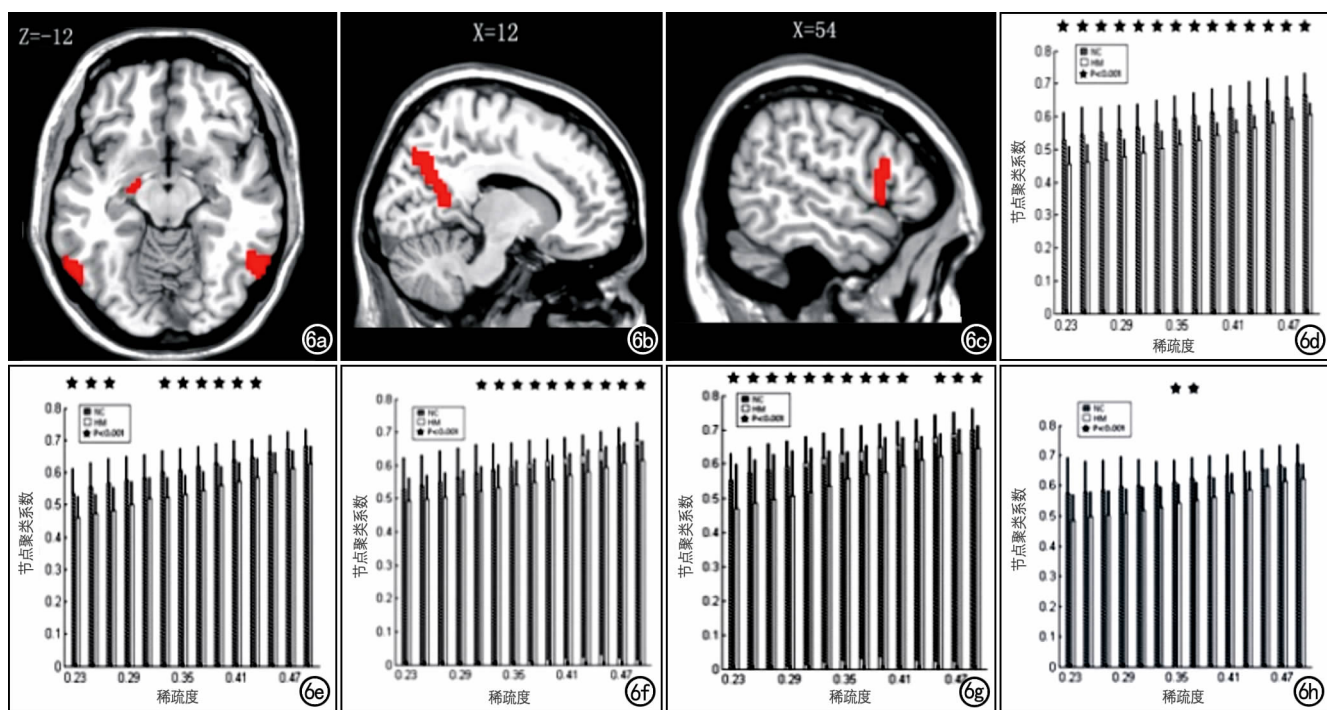


图6 高度近视组和对照组静息态脑功能连接网络的节点聚类系数的比较。a)横轴面 MRI 图像上红色区域为两组间节点聚类系数差异显著的脑区为双侧颞下回、左侧杏仁核;b)矢状面 MRI 图像上红色区域为两组间节点聚类系数差异显著的脑区为右内侧顶枕沟;c)矢状面 MRI 图像上红色区域为两组间节点聚类系数差异显著的脑区为右侧额下回岛盖;d)左侧颞下回在各稀疏度下的柱形图($P < 0.001$);e)右侧颞下回在各稀疏度下的柱形图($P < 0.001$);f)右内侧顶枕沟在各稀疏度下的柱形图($P < 0.001$);g)右侧额下回岛盖在各稀疏度下的柱形图($P < 0.001$);h)左侧杏仁核在各稀疏度下的柱形图($P < 0.001$)。

低。进一步研究发现,高度近视人群的节点属性发生显著改变,双侧颞下回和右内侧顶枕沟的节点聚类系数和节点局部效能降低,右侧额下回岛盖的节点聚类系数降低,右侧尾状核的节点度和节点效能增高,左侧杏仁核的节点聚类系数降低。

人脑是一个复杂的互连网络,不断整合多个脑区之间的信息。已有研究表明,大脑也具有小世界网络的各项拓扑属性^[12]。在本研究中,高度近视组和对照组中脑功能网络同样都具有小世界性,意味着高度近视人群的脑网络在信息传输和处理方面总体上保证高效率。此外,两组被试脑功能网络的小世界性并无显著差异,提示在脑网络整体属性方面高度近视组与对照组间的差异可能并无明显,其脑网络的构建较为均质。

虽然两组中脑网络的整体属性无明显差异,但是在高度近视组中观察到各个网络稀疏度下脑网络的局部效能均明显降低。全局效能反映了整个大脑网络综合处理信息的能力,局部效能主要反映了大脑网络内密集互连的区域处理信息的能力^[13]。本研究结果表明,高度近视人群的脑网络信息传递的效率在全局层面得以保留,但是在一些特定区域的信息传递效率发

生了改变。高度近视组中许多脑区节点的局部效能降低也进一步支持这一结论。

本研究中观察到高度近视组双侧颞下回和右内侧顶枕沟的节点聚类系数和节点局部效能均降低,右侧额下回岛盖的节点聚类系数降低。颞下回位于腹侧视觉通路的最后阶段,也是视觉区域中唯一包含了对视觉对象具有选择性响应的神经元区域^[14-15]。它与额叶和记忆相关皮质的联系较紧密^[16-17],从额叶到腹侧视觉区域的“反馈”预测这种处理途径,可能形成自上而下的注意力调制的解剖学基础^[18]。在猴子的动物行为学实验中,可观察到颞下回区域在注意力调解下会过滤掉与目标不相关的信息^[19]。通过神经群体解码的方法也观察到定位引导的注意力对颞下回神经元识别和解码特定对象的信息具有重要影响^[20]。在之前关于高度近视的研究中,也发现颞下回的短程功能连接密度较正常对照组有所降低^[10]。因此,我们认为高度近视人群的双侧颞下回节点聚类系数和节点局部效能降低与视觉响应的选择性注意力异常调制相关。右内侧顶枕沟作为连接枕叶皮层和楔前叶的“桥梁”,接收视觉皮层的信息,传递给楔前叶,完成自下而上的视觉信息整合^[21-23]。高度近视者的背内侧顶枕沟的节点

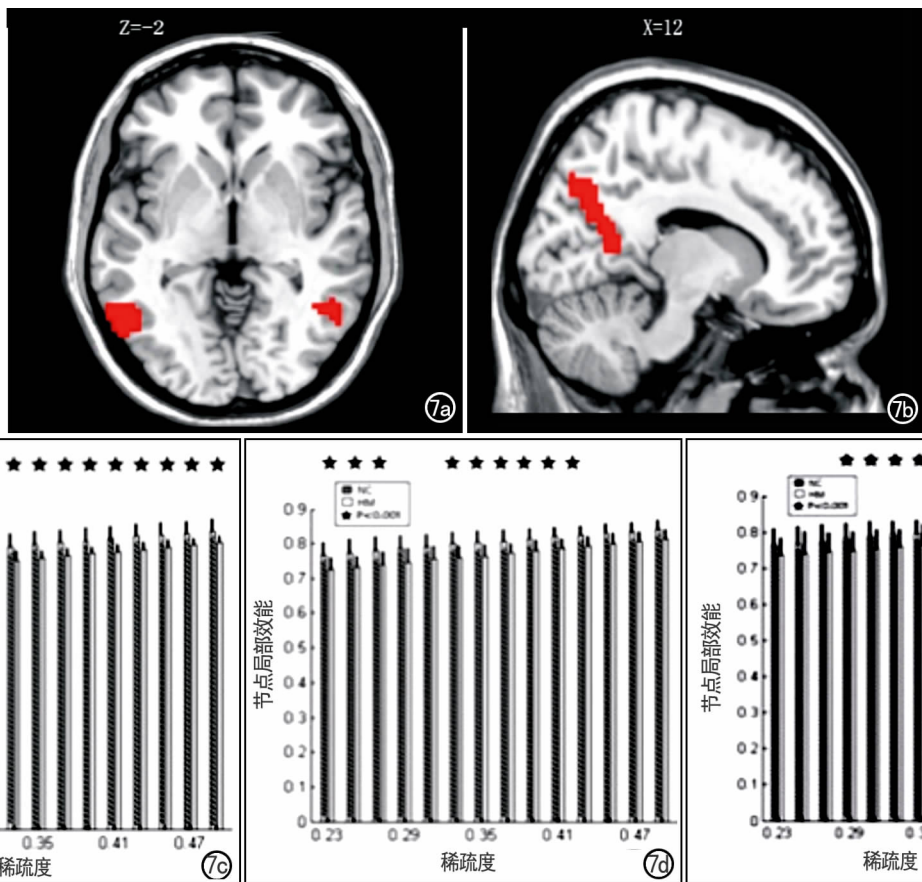


图 7 高度近视组和对照组静息态脑功能连接网络的节点局部效能的比较。a)横轴面 MRI 图像上红色区域为两组脑功能网络的节点局部效能有显著差异的脑区为双侧颞下回;b)矢状面 MRI 图像上红色区域为两组间节点聚类系数差异显著的脑区为右内侧顶枕沟;c)左侧颞下回在各稀疏度下的柱形图(* $P < 0.001$);d)右侧颞下回在各稀疏度下的柱形图(* $P < 0.001$);e)右内侧顶枕沟在各稀疏度下的柱形图(* $P < 0.001$)。

聚类系数和节点局部效能降低,可能与背内侧顶枕沟作为视觉皮层向上传递信息的媒介作用减弱有关。额下回岛盖为腹侧注意网络的关键脑区,腹侧注意网络负责监测环境中的突显刺激^[24]。我们认为高度近视者的右侧额下回岛盖的节点聚类系数降低可能与其对视觉突显刺激的重新定向反应能力减弱有关。

在本研究中,高度近视组右侧尾状核的节点度和节点效能均增高。尾状核中有非常大的视觉接收领域,解剖学研究表明,灵长类动物的尾状核主要从颞叶、顶叶和额叶等皮层间接接收视觉信息^[25-27]。尾状核也是哺乳动物的基底节接收感觉运动信息的主要结构。它涉及视觉运动行为,并有助于控制视觉引导的动眼神经和骨骼运动功能^[28]。尾状核中巨大的视觉感受野可以快速检测到环境中的变化,识别物体,并且提供刺激的空间位置信息。这可能会促进和增强尾状核的运动功能,有助于提高目标导向的准确性和速度^[29]。基于以上分析,尾状核中增高的节点度和节点效能,都表征了高度近视人群的尾状核对视觉信息传递效率提高,这可能是在视觉信息输入减少或模糊的

情况下,尾状核必须加强对运动功能的控制从而保证视觉目标导向行为的准确性和速度。

本研究结果还显示,高度近视组中右侧杏仁核的节点聚类系数降低。杏仁核具有情绪调制视觉处理功能^[30],不仅接受来自视觉系统的感觉输入,也投射到腹侧视觉系统的所有皮质,包括颞下回和初级视觉皮层等^[31]。大量研究表明,青光眼等有眼患的群体比正常人更容易产生焦虑情绪^[32-33]。利用复杂网络分析方法,发现青光眼患者杏仁核参与的情感调节方面也存在损伤^[34]。因此,我们认为高度近视人群的杏仁核节点聚类系数降低提示患者确实存在情绪反应的异常。

总之,通过比较高度近视者与视力正常者的静息态脑功能连接网络的拓扑结构,发现高度近视人群的某些拓扑属性确实发生了改变,主要是与视觉相关的注意力调控以及情绪视觉属性调制脑区的节点属性发生了显著异常。以上研究进一步证实高度近视患者的脑功能发生了改变。未来应该从其它方向来证实这些异常背后的潜在机制,进一步深入研究高度近视患者的脑功能变化。

参考文献:

- [1] He M, Huang W, Li Y, et al. Refractive error and biometry in older Chinese adults; the Liwan eye study[J]. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2009, 50(11): 5130-5136.
- [2] Liang YB, Wong TY, Sun L. Refractive errors in a rural Chinese adult population the Handan eye study[J]. *Ophthalmology*, 2009, 116(11): 2119-2127.
- [3] Fan DS, Lam DS, Lam RF, et al. Prevalence, incidence, and progression of myopia of school children in Hong Kong[J]. *Invest Ophthalmol Visual Sci*, 2004, 45(4): 1071-1075.
- [4] 文宝红, 杨鸽, 程敬亮, 等. MR 三维成像在高度近视中的应用探讨[J]. *放射学实践*, 2016, 31(8): 709-711.
- [5] Chui TY, Yap MK, Chan HH, et al. Retinal stretching limits peripheral visual acuity in myopia[J]. *Vision Res*, 2005, 45(5): 593-605.
- [6] Liou SW, Chiu CJ. Myopia and contrast sensitivity function[J]. *Curr Eye Res*, 2001, 22(2): 81-84.
- [7] Wolsley CJ, Saunders KJ, Silvestri G, et al. Investigation of changes in the myopic retina using multifocal electroretinograms, optical coherence tomography and peripheral resolution acuity[J]. *Vision Res*, 2008, 48(14): 1554-1561.
- [8] Ho WC, Ng YF, Chu PH, et al. Impairment of retinal adaptive circuitry in the myopic eye[J]. *Vision Res*, 2011, 51(3): 367-375.
- [9] Li Q, Guo M, Dong H, et al. Voxel-based analysis of regional gray and white matter concentration in high myopia[J]. *Vision Res*, 2012, 58(4): 45-50.
- [10] Zhai L, Li Q, Wang T, et al. Altered functional connectivity density in high myopia[J]. *Behav Brain Res*, 2016, 303: 85-92.
- [11] Rubinov M, Sporns O. Complex network measures of brain connectivity: uses and interpretations[J]. *Neuroimage*, 2010, 52(3): 1059-1069.
- [12] Latora V, Marchiori M. Efficient behavior of small-world networks[J/OL]. *Phys Rev Lett*, 2001, 87(19): 198701. DOI: 10.1103/PhysRevLett. 87. 198701
- [13] Bassett DS, Bullmore E. Small-World Brain Networks[J]. *Neuroscientist*, 2006, 12(6): 512-523.
- [14] Desimone R, Bruce C. Stimulus-selective properties of inferior temporal neurons in the macaque[J]. *J Neurosci*, 1984, 4(8): 2051-2062.
- [15] Tanaka K. Inferotemporal cortex and object vision[J]. *Ann Rev Neurosci*, 1996, 19(19): 109-139.
- [16] Axmacher N, Schmitz DP, Wagner T, et al. Interactions between medial temporal lobe, prefrontal cortex, and inferior temporal regions during visual working memory: a combined intracranial EEG and functional magnetic resonance imaging study[J]. *J Neurosci*, 2008, 28(29): 7304-7312.
- [17] Miyashita Y. Inferior temporal cortex; where visual perception meets memory[J]. *Ann Rev Neurosci*, 1993, 16(1): 245-263.
- [18] Kastner S, Ungerleider LG. Mechanisms of visual attention in the human cortex[J]. *Ann Rev Neurosci*, 2003, 23(1): 315-341.
- [19] Moran J, Desimone R. Selective attention gates visual processing in the extrastriate cortex[J]. *Science*, 1985, 229(4715): 782-784.
- [20] Zhang Y, Meyers EM, Bichot NP, et al. Object decoding with attention in inferior temporal cortex[J]. *Proc Nat Acad Sci of USA*, 2011, 108(21): 8850-8855.
- [21] He Y, Wang JH, Wang L, et al. Uncovering intrinsic modular organization of spontaneous brain activity in humans[J/OL]. *Plos One*, 2009, 4(4): e5226. DOI: 10.1371/journal.pone.0005226
- [22] Margulies DS, Vincent JL, Kelly C, et al. Precuneus shares intrinsic functional architecture in humans and monkeys[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2009, 106(47): 20069-20074.
- [23] Pflugshaupt T, N? sberger M, Gutbrod K, et al. Bottom-up visual integration in the medial parietal lobe[J]. *Cerebr Cor*, 2014, 26(3): 943-949.
- [24] Corbetta M, Patel G, Shulman GL. The reorienting system of the human brain: from environment to theory of mind[J]. *Neuron*, 2008, 58(3): 306-324.
- [25] Ungerleider LG, Gaffan D, Pelak VS. Projections from inferior temporal cortex to prefrontal cortex via the uncinate fascicle in rhesus monkeys[J]. *Exper Brain Res*, 1989, 76(3): 473-484.
- [26] Shipp S, Blanton M, Zeki S. A visuo-somatomotor pathway through superior parietal cortex in the macaque monkey: cortical connections of areas V6 and V6A[J]. *Eur J Neurosci*, 1998, 10(10): 3171-3193.
- [27] Parthasarathy HB, Schall JD, Graybiel AM. Distributed but convergent ordering of corticostriatal projections: analysis of the frontal eye field and the supplementary eye field in the macaque monkey[J]. *J Neurosci Offic J Soc Neurosci*, 1992, 12(11): 4468-4488.
- [28] Nagy A, Paróczy Z, Márkus Z, et al. Drifting grating stimulation reveals particular activation properties of visual neurons in the caudate nucleus[J]. *Eur J Neurosci*, 2008, 27(7): 1801-1808.
- [29] Gombkötő P, Rokszin A, Berényi A, et al. Neuronal code of spatial visual information in the caudate nucleus[J]. *Neurosci*, 2011, 182(3): 225-231.
- [30] 吴凡, 王海宝, 余永强. 情绪记忆中杏仁核和海马作用的 fMRI[J]. *放射学实践*, 2010, 25(3): 276-279.
- [31] Amaral DG, Behniea H, Kelly JL. Topographic organization of projections from the amygdala to the visual cortex in the macaque monkey[J]. *Neurosci*, 2003, 118(4): 1099-1120.
- [32] Erb C, Batra A, Lietz A, et al. Psychological characteristics of patients with normal-tension glaucoma[J]. 1999, 237(9): 753-757.
- [33] Karsenas AG, Crisp AH. Symptoms without signs in outpatients attending ophthalmology clinics[J]. *Bri Ophthalmol*, 1978, 62(5): 340-343.
- [34] Wang J, Li T, Wang N, et al. Graph theoretical analysis reveals the reorganization of the brain network pattern in primary open angle glaucoma patients[J]. *Eur Radiol*, 2016, 26(11): 1-11.

(收稿日期: 2018-09-28 修回日期: 2018-12-09)