

基于图论的分裂型人格障碍多加权脑结构网络研究

齐守良^{1,2}, 张波¹, 李萌¹, 伍建林³
(1. 东北大学 中荷生物医学与信息工程学院, 辽宁 沈阳 110169; 2. 东北大学 医学影像计算教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110169; 3. 大连大学附属中山医院 放射科, 辽宁 大连 116001)

摘 要: 基于图论方法分析分裂型人格障碍 (SPD) 患者与健康对照在脑结构网络局部和全局参数上的差异. 根据 Brainnetome 脑图谱将大脑皮层划分为 246 个脑区, 利用扩散加权图像重建脑白质神经纤维束, 构建以神经纤维束条数、密度、长度和优化的密度为加权方式的脑结构网络. 计算网络节点参数和全局参数, 通过假设检验找出具有显著性差异的脑区. 结果发现, SPD 患者与健康人的脑结构网络在全局参数上无显著性差异; 在节点参数上, 6 个脑区存在显著性差异; 差异脑区在位置上显示出左右脑不对称性, 在功能上与认知、情感和感知高度相关. 研究结果可为疾病诊断治疗提供重要参考.

关 键 词: 分裂型人格障碍; 结构脑网络; 扩散加权成像; 图论; 脑白质神经纤维束

中图分类号: R 445.2 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2019)08-1093-06

Graph Theory Based Study on Multi-weighted Structural Brain Network of Schizotypal Personality Disorder

QI Shou-liang^{1,2}, ZHANG Bo¹, LI Meng¹, WU Jian-lin³
(1. Sino-Dutch Biomedical and Information Engineering School, Northeastern University, Shenyang 110169, China; 2. Key Laboratory of Medical Image Computing of Northeastern University (Ministry of Education), Shenyang 110169, China; Department of Radiology, the Affiliated Zhongshan Hospital of Dalian University, Dalian 116001, China. Corresponding author: QI Shou-liang, E-mail: qisl@bmie.neu.edu.cn)

Abstract: With graph theory methods, this study identified the differences in nodal and global parameters between schizotypal personality disorder (SPD) and healthy control (HC). Firstly, the whole brain was divided into 246 regions of interest (ROIs) based on the human Brainnetome Atlas, then the fiber bundles were reconstructed based on DWI images, and the structural networks were constructed by statistics under the four weighting methods: fiber number, fiber density, fiber length and optimized fiber density. Secondly, nodal and global parameters were calculated, and brain ROIs with significant differences were determined by two-sample *t*-tests between groups. The results show that there is no difference in global parameters, but in nodal scale, SPD is significantly different in six ROIs. The distribution of ROIs is asymmetric in the left and right hemisphere. The functions of ROIs are highly related to cognition, emotion and perception. These findings would help the diagnosis and treatment of SPD.

Key words: schizotypal personality disorder; structural brain network; diffusion weighted imaging; graph theory; fiber bundles

分裂型人格障碍 (schizotypal personality disorder, SPD) 以敏感多疑、思维奇特、缺乏人际交往能力等表现为特征, 被归为精神分裂症谱系障碍疾病^[1]. SPD 疾病相对于精神分裂症 (schizophrenia, SZ) 患病程度较轻, 但二者在脑影像及认知功能等方面具有很大的相似性^[2], 并且 SPD 患者一般不需要药物治疗, 可排除诸多影响大脑结构的干扰因素^[3]. 因此, 研究 SPD 患者脑结构对于探明该疾病和其他精神分裂症谱系障碍的患病机制具有重要帮助.

在宏观尺度的解剖结构上,人脑是一个由不同脑区(灰质和神经核团)和它们之间的连接(脑白质神经纤维束)而构成的网络,称之为结构脑网络^[4-5].借助于无创、在体的多模态磁共振影像,研究者可以构建不同个体的结构脑网络.具体地,利用 T1 加权图像和不同脑模板定义脑区,利用扩散加权成像技术(DWI)和纤维束追踪算法估计全脑的脑白质神经纤维束,从而确定每对脑区之间的结构连接强度^[6-7].图论是一种研究结构脑网络的强大数学工具,它将脑区定义为节点,结构连接定义为边,可以计算各种节点参数(节点度、节点中心性等)、模块参数、全局参数(聚类系数、特征路径长度等),从不同层次刻画脑网络特征^[8].

基于图论的脑结构网络研究被广泛地应用于不同神经和精神疾病研究^[9].这些疾病被认为与大脑各部分的异常密切相关,这种异常可以通过脑结构网络的变化来呈现.例如,Tijms 等发现,与正常人相比,阿尔茨海默病(AD)患者的脑结构网络节点效率、聚类系数均有明显降低,这两个参数的降低说明了 AD 患者脑结构局部连接的减弱^[10].另外,脑结构网络已经成为研究创伤性脑损伤(TBI)疾病的重要方式.研究发现,TBI 患者与正常人相比具有更低的节点效率,更高的介数中心性,说明 TBI 患者具有脑网络长距离连接的损伤^[11-12].

以往对于 SPD 脑结构网络的研究较少,并且大部分研究集中于颞叶、额叶和纹状体^[13-16].本研究不局限于额叶和颞叶,而是在全脑范围系统地比较 SPD 和健康对照(HC)在网络参数上的差异.使用中国科学院 2016 年发布的 Brainnetome 脑图谱(它根据解剖和功能特征,将全脑分为 246 个感兴趣区)^[17]对脑区进行精细程度较高的划分,并且在统计纤维束计算结构网络的过程中,根据其条数、密度、经优化后的密度、长度 4 种加权方式来定义网络的权重,从多个角度综合考虑脑结构网络的变化.运用图论的方法,从局部和全局两个层面进行分析,经过假设检验得到 SPD 异于正常人的结构网络特征.

1 研究材料和方法

1.1 材料

本研究包括 20 名 18~21 岁男性 SPD 患者,同时选取 18 名 19~22 岁男性健康对照者.所有参与者均来自于对某大学 3 000 名大一学生的筛

查,即先经过明尼苏达多项人格测试(MMPI)对所有学生筛选,对精神分裂症因子得分高于 70 的男性继续进行分裂型人格问卷(SPQ)测试,最终经专业医师确定 SPD 患者.所有参与者均未进行过精神科类药物治疗或住院治疗,并且没有其他重要疾病.在采集之前,所有被试均签署知情同意书.

采集工作由一台安装 8 个通道头部线圈的 3T 西门子超导性磁共振扫描仪完成.其中 DWI 图像使用回波平面成像(EPI)序列,翻转角为 90°,激发次数 NEX 为 2 次,视场 FOV 为 256 mm×256 mm,重复时间 t_R 为 8 000 ms,回波时间 t_E 为 93 ms,扩散敏感因子 b 值为 1 000 s/mm²,梯度方向为 64 个.T1 加权图像使用磁化准备快速采集梯度回波序列(MPRAGE), t_R 为 1 900 ms, t_E 为 2.46 ms,翻转角为 9°,NEX 为 1 次,FOV 为 250 mm×218 mm.

1.2 方法

本文提出一种构建多种加权方式的脑结构网络并结合图论从不同层面对网络进行分析的方法.网络构建流程如图 1 所示:从 SPD 和 HC 的 DWI 和 T1 加权磁共振成像数据出发,首先使用 FSL^[18]工具包进行配准,得到 ICBM-152MNI 标准空间内每个参与者的 246 个感兴趣区(ROI);然后通过 Dsi_Studio 软件(<http://dsi-studio>).

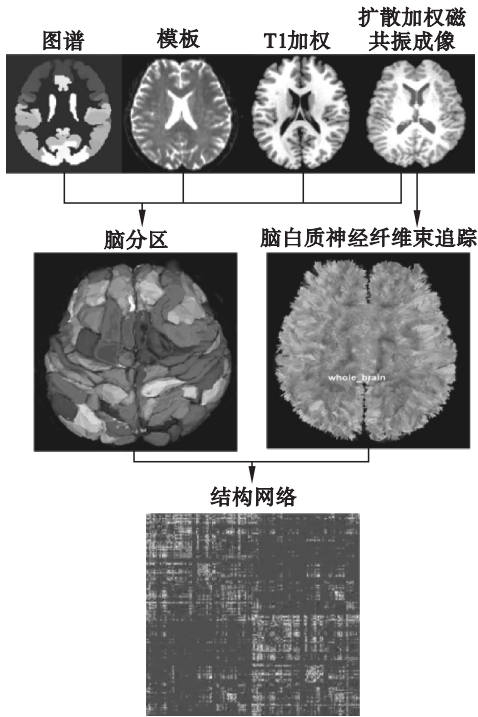


图 1 结构网络构建框架图
Fig. 1 Framework of constructing structural brain network

labsolver.org)实现全脑范围内白质神经纤维束的追踪,追踪过程使用确定性纤维束追踪算法^[19],保留 500 000 条长度在 20 ~ 200 mm 之间的纤维束。

实现脑区划分与纤维束追踪之后,继续统计各个感兴趣区之间的纤维束权重以构建邻接矩阵,本研究采取 4 种加权方式进行统计。

第一种是根据连接两个感兴趣区的纤维束条数加权,得到纤维束条数加权网络(fiber number weighted network, FN-N)^[20]:

$$W_{ij}^{FN} = N_{ij}. \quad (1)$$

式中 N_{ij} 表示连接 i, j 两个感兴趣区的纤维束条数。

第二种是根据两个感兴趣区的纤维束条数除以它们的平均体素数进行加权,所得网络称为纤维束密度加权网络(fiber density weighted network, FD-N)^[21]:

$$W_{ij}^{FD} = \frac{2N_{ij}}{V_i + V_j}. \quad (2)$$

式中 V_i 和 V_j 表示第 i, j 个脑区的体素数量。

第三种是根据两个感兴趣区的纤维束的平均长度加权,所得网络称为纤维束长度加权网络(fiber length weighted network, FL-N):

$$W_{ij}^{FL} = \frac{1}{N_{ij}} \sum_{s \in S_{ij}} l(s). \quad (3)$$

式中: S_{ij} 为所有连接 i, j 脑区的纤维束的集合; $l(s)$ 为第 s 条纤维束的长度。

第四种是根据两个感兴趣区的纤维束的倒数之和除以平均体素数加权,所得网络称为纤维束密度长度加权矩阵(fiber density corrected by length weighted network, FDL-N)^[22]:

$$W_{ij}^{FDL} = \frac{2}{V_i + V_j} \sum_{s \in S_{ij}} \frac{1}{l(s)}. \quad (4)$$

得到每个参与者 4 种加权方式的结构网络之后,从节点参数和全局参数两个层面对网络进行分析。在节点参数上选取节点度(Deg)、节点强度(Str)、局部效率(Eloc)和介数中心度(BC)4 个参数进行分析,从不同的层面表示各个脑区在全脑信息交流中的重要程度。全局网络参数选取特征路径长度、网络平均聚类系数、小世界属性 3 个参数进行分析,以表示网络的功能整合、功能分化能力和整体的效率。以上参数使用 BCT (brain connectivity tool box) 工具包^[23]进行计算。最后将结果进行 SPD 和 HC 组间的双样本 t 检验,分析具有显著性差异的脑区。

2 结果与讨论

2.1 四种加权方式下的脑结构网络

SPD 和 HC 两组被试均进行了脑白质纤维束的追踪,在 246 个感兴趣区内对纤维束进行 4 种加权方式的统计得到 4 种脑结构网络,并将矩阵进行归一化,结果如图 2 所示。对于每个参与者,50 万条纤维束中被计入邻接矩阵中的条数在 (13.5 ± 0.5) 万条范围内,初始矩阵的稀疏度在 0.75 ± 0.02 的范围内。继续将 FN-N 邻接矩阵中纤维束条数小于 5 条的边删除,用此矩阵优化其他 3 种加权方式的矩阵,经计算,网络的稀疏度在 0.85 ± 0.1 范围内,与以往构建 246 个感兴趣区的结构网络的研究相符^[6]。

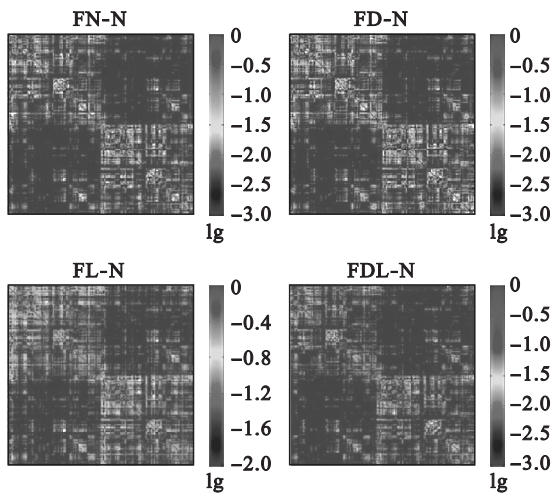


图 2 四种加权方式的邻接矩阵
Fig. 2 Four types of weighted adjacent matrixes

2.2 节点参数分析结果

对以上优化后的 4 种加权方式的网络分别计算 4 个节点参数 Deg, Str, BC 和 Eloc,并对每一个节点进行 SPD 和 HC 组间的双样本 t 检验。本文将显著性水平设定为 0.05,对具有差异的感兴趣区($P < 0.05$)的数量和位置进行统计,并记录在多种加权网络中节点参数出现显著性差异超过两次的共有节点,结果如表 1 所示。

从脑区位置来看,4 个节点参数具有显著性差异的脑区均呈现明显的左右脑不对称性,具有显著性差异的脑区的数量在左右脑的分布比例分别为 5:0,10:1,7:3,5:3,左脑发生变化的脑区明显多于右脑。

继续筛选显著性水平低于 0.01 的脑区以及 2 种以上节点参数体现出显著性差异的脑区,得到 6 个重要差异脑区,分别为左脑额叶的额下回

表 1 四种加权网络中节点参数具有显著性差异的节点数量以及共有节点

节点参数	节点数量				共有节点的编号*
	FN-N	FD-N	FL-N	FDL-N	
Deg	5	5	6	5	15,32,33,79,121
Str	17	8	8	9	15,32,58,64,69,79,85,115,116,121,123,210
BC	8	9	7	10	24,31,34,35,66,82,116,174,188,210
Eloc	30	11	10	4	11,47,56,91,96,209,210,230

* 编号所对应脑区名称、位置和功能可参见文献[2].

背侧区(29, IFG. A44d)、中央前回的尾侧腹外侧区(63, PrG. A6cvl)、颞叶的颞上回中部(69, STG. A38m)、顶叶的顶上小叶的中央后区(131, SPL. A51)、右脑岛叶的背侧不规则岛状脑区(174, INS. dld)和皮质下核的外侧杏仁核(214, Amyg. lAmyg),编号与英文缩写可参见文献[2],位置如图 3 所示.

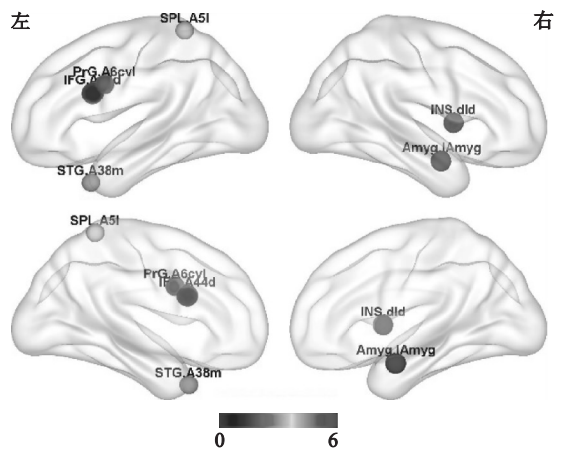


图 3 六个显著性差异最大的脑区

Fig. 3 Six ROIs with the most significant difference

各脑区的功能可由 BrainMap 数据库 (<http://www.brainmap.org/taxonomy>) 中的行为

域元数据标签确定,使用似然比(likelihood ratio, LR)来度量.6 个脑区功能似然比的汇总结果如图 4 所示^[17].可以发现,这 6 个脑区的功能很大程度上与语言认知、记忆认知、快乐和厌恶的情感、身体感知相关($LR > 3$),也与视觉感知、注意力、身体认知以及想象力相关($LR < 3$).4 个参数的改变情况和对应的 P 值如表 2 所示.

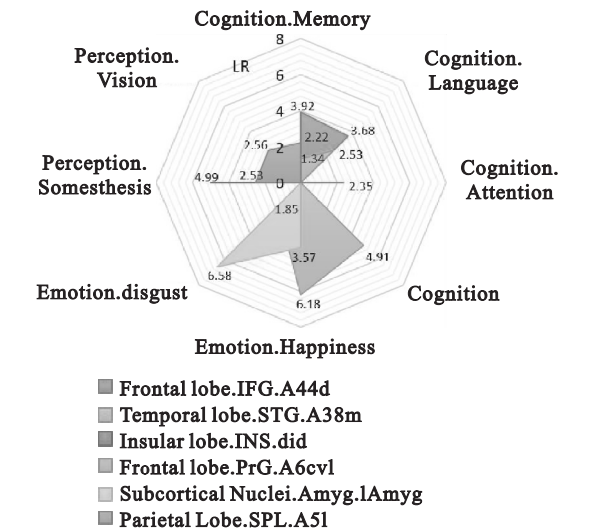


图 4 六个脑区功能的汇总

Fig. 4 Function aggregate of six ROIs

表 2 六个差异脑区的节点参数的变化及显著性差异

Table 2 Change of nodal parameters and P value of significant difference									
编号*	英文名称缩写	Deg	P	Str	P	BC	P	Eloc	P
29	IFG. A44d	升高	0.020 4	升高	0.015 9	—	—	—	—
63	PrG. A6cvl	升高	0.037 8	升高	0.013 9	—	—	—	—
69	STG. A38m	—	—	—	—	升高	0.032 3	—	—
131	SPL. A51	—	—	—	—	升高	0.034 6	—	—
174	INS. dld	—	—	降低	0.006 2	降低	0.028 3	降低	0.009 8
214	Amyg. lAmyg	—	—	—	—	—	—	降低	0.008 8

* 编号和英文缩写所对应脑区的位置和功能可参见文献[2].

从 6 个差异脑区的位置看,一半分布在额叶和颞叶,与以前的研究中提出的颞叶和额叶脑区改变较大的结论相符.并且左脑颞叶的颞上回

(STG)脑区也多次被证实在 SPD 和 SZ 患者中存在体积和纤维束各向异性(fractional anisotropy, FA)的差异^[24],本研究继续证实了这一脑区在网

络参数上的改变,即与正常人相比,SPD 和 SZ 患者具有更高的介数中心度,因此颞上回是与 SPD 和 SZ 均高度相关的重要位置.从颞上回脑区的功能看,它很大程度上和情感、认知相关,与 SPD 患者在情感和对事物的看法上异于常人,性情孤独、容易焦虑的病症可能有很大的联系.

左脑额叶的额下回背侧区和中央前回尾侧腹外侧区节点度和节点强度均有显著升高,说明这两个脑区在 SPD 患者中的重要程度要高于健康对照组.而有研究发现 SZ 患者额下回和中央前回存在体积减小的现象,并且额下回皮层厚度也减小^[25],而本研究在对大脑精细分区的前提下,发现 SPD 这两个脑区存在节点参数的改变,因此它们很可能在精神分裂症谱系疾病中具有重要角色,并且对于研究该类疾病的患病机制和治疗具有重要意义.从功能上看,这两个脑区均与语言和记忆相关,可能与 SPD 患者出现讲话方式特别、逻辑性差等特征有关.

右脑皮质下核的杏仁核节点效率显著降低,说明 SPD 患者在此区域的信息交流效率低于健康人.多个对 SZ 的研究发现,SZ 患者杏仁核体积低于正常人^[26],所以在 SPD 患者中很可能存在杏仁核的病变.并且杏仁核的功能与情感有很大的关联,SPD 患者出现情感上异于常人的病症很可能与杏仁核信息传递效率的降低相关.

岛叶的背侧不规则岛状区域是变化程度最大的脑区,它的节点强度、介数中心度和节点效率均显著下降.SZ 患者的岛叶体积小于正常人^[27-28],这与 SPD 患者亦是相似的.岛叶的背侧不规则岛状脑区主要控制人身体的感知,它在脑结构网络中信息传递能力的下降可能导致了 SPD 患者出现穿着奇怪、易产生幻觉等感知上的异常.

顶叶的顶上小叶中央后区介数中心度显著上升,以前针对 SPD 很少有关于此脑区的研究.此区域在功能上与身体和视觉上的感知、记忆和注意力上的认知功能相关,可以很好地解释 SPD 患者感知异常、易产生幻觉、出现记忆问题等病症.

综上所述,从网络节点参数上看,这 6 个脑区和正常人具有显著性差异;从功能上看,它们与 SPD 患者的病症表现十分接近,与疾病相关的一些特征可以在这 6 个脑区的功能中得到合理解释.因此这 6 个脑区的发现对 SPD 病理机制的研究和诊断治疗,以及研究与精神分裂症的联系具有重要意义.

2.3 全局参数分析结果

全局参数的计算结果表明,在显著性水平为

0.05 的情况下,聚类系数、特征路径长度、小世界属性均无显著性差异,其均值如表 3 所示.说明 SPD 患者脑结构网络的整体工作效率并无显著变化,患病程度较轻.

表 3 SPD 和 HC 全局网络参数的平均值
Table 3 Average of global parameters in SPD and HC

全局参数		FN-N	FD-N	FL-N	FDL-N
平均聚类系数	HC	2.421 9	2.554 4	1.169 6	2.194 5
	SPD	2.494 1	2.568 8	1.171 8	2.196 5
特征路径长度	HC	1.316 2	1.259 5	1.049 0	1.234 7
	SPD	1.371 4	1.280 0	1.048 5	1.246 1
小世界属性	HC	1.846 8	2.032 1	1.115 0	1.783 1
	SPD	1.853 3	2.018 2	1.117 6	1.774 6

3 结 论

1) 分裂型人格障碍患者与健康人全局网络参数无显著性差异,患病未导致脑结构网络整体工作效率下降.

2) 在局部网络参数上发现与健康人具有显著性差异的 6 个脑区.从在大脑的位置分布上看,6 个差异脑区体现出明显的左右脑不对称性,病变在左脑更为显著.

3) 6 个差异脑区在功能上与认知、情感和感知功能高度相关,为精神分裂症谱系疾病的病症提供合理的解释,对于研究精神分裂症谱系疾病的患病机制、临床诊断和治疗具有重要意义.

参考文献:

[1] Kendler K S, Gruenberg A M, Strauss J S. An independent analysis of the Copenhagen sample of the Danish Adoption Study of Schizophrenia[J]. *Archives of General Psychiatry*, 1982,39(11):1257-1261.

[2] Fervaha G, Remington G. Neuroimaging findings in schizotypal personality disorder: a systematic review[J]. *Progress in Neuro-Psychopharmacology & Biological Psychiatry*,2013,43:96-107.

[3] Siever L J, Koenigsberg H W, Harvey P, et al. Cognitive and brain function in schizotypal personality disorder[J]. *Schizophrenia Research*,2002,54(1):157-167.

[4] Sporns O, Tononi G, Kötter R. The human connectome: a structural description of the human brain[J/OL]. *PLOS Computational Biology*, 2005 [2018-05-10]. <https://journals.plos.org/ploscompbiol/article?id=10.1371/journal.pcbi.0010042>.

[5] Sporns O. *Networks of the brain* [M]. Cambridge: MIT Press,2010.

[6] Qi S, Meesters S, Nicolay K, et al. Structural brain network: what is the effect of LiFE optimization of whole brain tractography? [J/OL]. *Frontiers in Computational Neuroscience*, 2016 [2018-05-10]. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fncom.2016.00012/full>.

[7] Qi S, Meesters S, Nicolay K, et al. The influence of construction methodology on structural brain network measures: a review[J]. *Journal of Neuroscience Methods*, 2015,253:170-182.

- [8] Rubinov M, Sporns O. Complex network measures of brain connectivity: uses and interpretations [J]. *NeuroImage*, 2010, 52(3): 1059–1069.
- [9] Bullmore E, Sporns O. Complex brain networks: graph theoretical analysis of structural and functional systems [J]. *Nature Reviews Neuroscience*, 2009, 10(3): 186–198.
- [10] Tijms B M, Wink A M, Haan W D, et al. Alzheimer's disease: connecting findings from graph theoretical studies of brain networks [J]. *Neurobiology of Aging*, 2013, 34(8): 2023–2036.
- [11] Caeyenberghs K, Leemans A, de Decker C, et al. Brain connectivity and postural control in young traumatic brain injury patients: a diffusion MRI based network analysis [J]. *NeuroImage: Clinical*, 2012, 1(1): 106–115.
- [12] Stam C J. Modern network science of neurological disorders [J]. *Nature Reviews Neuroscience*, 2014, 15(10): 683–695.
- [13] Yueji S, Liang Z, Shasheekant A S, et al. Decreased fractional anisotropy values in two clusters of white matter in patients with schizotypal personality disorder: a DTI study [J]. *Behavioural Brain Research*, 2016, 310: 68–75.
- [14] Nakamura M, McCarley R W, Kubicki M, et al. Fronto-temporal disconnection in schizotypal personality disorder: a diffusion tensor imaging study [J]. *Biological Psychiatry*, 2005, 58(6): 468–478.
- [15] Lener M S, Wong E, Tang C Y, et al. White matter abnormalities in schizophrenia and schizotypal personality disorder [J]. *Schizophrenia Bulletin*, 2015, 41(1): 300–310.
- [16] Chan C C, Szeszko P R, Wong E, et al. Frontal and temporal cortical volume, white matter tract integrity, and hemispheric asymmetry in schizotypal personality disorder [J]. *Schizophrenia Research*, 2018, 197: 226–232.
- [17] Fan L, Li H, Zhuo J, et al. The human brainnetome atlas: a new brain atlas based on connectional architecture [J]. *Cerebral Cortex*, 2016, 26(8): 3508–3526.
- [18] Jenkinson M, Beckmann C F, Behrens T E, et al. FSL [J]. *NeuroImage*, 2012, 62(2): 782–790.
- [19] Yeh F C, Verstynen T D, Wang Y, et al. Deterministic diffusion fiber tracking improved by quantitative anisotropy [J/OL]. *PLOS One*, 2013 [2018–05–13]. <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0080713>.
- [20] Zhang Z, Liao W, Chen H, et al. Altered functional-structural coupling of large-scale brain networks in idiopathic generalized epilepsy [J]. *Brain*, 2011, 134(10): 2912–2928.
- [21] Buchanan C R, Pernet C R, Gorgolewski K J, et al. Test-retest reliability of structural brain networks from diffusion MRI [J]. *NeuroImage*, 2014, 86(2): 231–243.
- [22] Hagmann P, Cammoun L, Gigandet X, et al. Mapping the structural core of human cerebral cortex [J/OL]. *PLOS Biology*, 2012 [2018–05–16]. <https://journals.plos.org/plosbiology/article?id=10.1371/journal.pbio.0060159>.
- [23] Rubinov M, Sporns O. Complex network measures of brain connectivity: uses and interpretation [J]. *NeuroImage*, 2010, 52(3): 1059–1069.
- [25] Amann B L, Canales-Rodríguez E J, Madre M, et al. Brain structural changes in schizoaffective disorder compared to schizophrenia and bipolar disorder [J]. *Acta Psychiatrica Scandinavica*, 2016, 133(1): 23–33.
- [26] Knöchel C, Reuter J, Reinke B, et al. Cortical thinning in bipolar disorder and schizophrenia [J]. *Schizophrenia Research*, 2016, 172(1/2/3): 78–85.
- [27] Mahon P B, Eldridge H, Crocker B, et al. An MRI study of amygdala in schizophrenia and psychotic bipolar disorder [J]. *Schizophrenia Research*, 2012, 138(2/3): 188–191.
- [28] Ivleva E I, Bidesi A S, Thomas B P, et al. Brain gray matter phenotypes across the psychosis dimension [J]. *Psychiatry Research*, 2012, 204(1): 13–24.

(上接第 1092 页)

- [5] Candès E J, Romberg J, Tao T. Robust uncertainty principles: exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(2): 489–509.
- [6] Donoho D L. Compressed sensing [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(4): 1289–1306.
- [7] 郑毅贤, 江浩森, 金波, 等. 基于自适应压缩感知的图像去噪方法 [J]. 通信技术, 2013, 46(3): 74–76, 79.
(Zheng Yi-xian, Jiang Hao-miao, Jin Bo, et al. An image denoising scheme based on adaptive compressive sensing [J]. *Communications Technology*, 2013, 46(3): 74–76, 79.)
- [8] Candès E J. Compressive sampling [C]//Proceedings of the International Congress of Mathematicians. Madrid, Spain, 2006: 1433–1452.
- [9] 吴昊, 鲁周迅. Symlets 小波和子空间联合增强下的语音识别 [J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(5): 141–145.
(Wu Hao, Lu Zhou-xun. Speech recognition based on combined enhancement of Symlets wavelet and subspace [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2011, 47(5): 141–145.)
- [10] Candès E J. The restricted isometry property and its implications for compressed sensing [J]. *Comptes Rendus Mathématique*, 2008, 346(9/10): 589–592.
- [11] Baraniuk R, Davenport M, Devore R, et al. A simple proof of the restricted isometry property for random matrices [J]. *Constructive Approximation*, 2008, 28(3): 253–263.
- [12] Candès E J, Tao T. Near-optimal signal recovery from random projections: universal encoding strategies? [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(12): 5406–5425.
- [13] Zhang G, Jiao S, Xu X, et al. Compressed sensing and reconstruction with bernoulli matrices [C]//2010 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA). New York: IEEE, 2010: 455–460.
- [14] Haupt J, Bajwa W U, Raz G, et al. Toeplitz compressed sensing matrices with applications to sparse channel estimation [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2010, 56(11): 5862–5875.
- [15] Tropp J A, Gilbert A C. Signal recovery from random measurements via orthogonal matching pursuit [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2007, 53(12): 4655–4666.
- [16] Needell D, Tropp J A. CoSaMP: iterative signal recovery from incomplete and inaccurate samples [J]. *Applied and Computational Harmonic Analysis*, 2009, 26(3): 301–321.
- [17] Mallat S G, Zhang Z. Matching pursuits with time-frequency dictionaries [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1993, 41(12): 3397–3415.
- [18] Moody G B, Mark R G. The impact of the MIT-BIH arrhythmia database [J]. *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*, 2001, 20(3): 45–50.
- [19] Zhang Y, Liu C, Wei S, et al. ECG quality assessment based on a kernel support vector machine and genetic algorithm with a feature matrix [J]. *Journal of Zhejiang University (Science C)*, 2014, 15(7): 564–573.
- [20] Xing J Z. Compressed sensing [EB/OL]. [2018–7–11]. https://github.com/Jozir/Compressed_Sensing.git.
- [21] Chae D H, Alem Y F, Durrani S, et al. Performance study of compressive sampling for ECG signal compression in noisy and varying sparsity acquisition [C]//2013 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. Vancouver, 2013: 1306–1309.