

· 脑血管疾病脑网络认识及功能保护专题 ·

烟雾病脑网络改变的研究进展

张钧泽 王雪彤 贺永 曹勇

100070 首都医科大学附属北京天坛医院神经外科 国家神经系统疾病临床医学研究中心
(张钧泽、曹勇); 100875 北京师范大学认知神经科学与学习国家重点实验室(王雪彤、
贺永)

通信作者: 曹勇, Email: caoyong@bjtth.org

DOI: 10.3969/j.issn.1009-6574.2023.02.005

【摘要】烟雾病是一种原因不明的进展性脑血管阻塞性疾病, 认知功能损害是其常见伴随症状, 严重降低了患者的生活质量。作为一种新兴的分析技术, 脑网络从宏观上研究大脑各区域间的交互, 对于深入了解大脑结构和功能、探索大脑疾病的发生发展机制和评估诊疗方法有重要作用。同时, 脑网络分析也为探索烟雾病的认知损伤机制以及认知损伤的诊断、治疗和预后评估提供了重要手段。现就烟雾病认知损伤相关脑网络的研究进行综述。

【关键词】烟雾病; 脑网络; 认知损伤; 血运重建术; 综述

Research progress of brain network changes in moyamoya disease Zhang Junze, Wang Xuotong,
He Yong, Cao Yong

Department of Neurosurgery, Beijing Tiantan Hospital, Capital Medical University, National Center for Clinical
Medical Research of Neurological Diseases, Beijing 100070, China (Zhang JZ, Cao Y); State Key Laboratory of
Cognitive Neuroscience and Learning, Beijing Normal University, Beijing 100875, China (Wang XT, He Y)

Corresponding author: Cao Yong, Email: caoyong@bjtth.org

【Abstract】Moyamoya disease (MMD) is a progressive cerebrovascular obstructive disorder with unknown causes. Cognitive impairment is a common concomitant symptom of MMD, which seriously reduces the quality of life. As a new analysis technology, brain network aims to study the interaction of various regions of the brain macroscopically, which plays an important role in deeply understanding the brain structure and function, exploring the occurrence and progression mechanism and evaluating diagnosis and treatment of brain diseases. Meanwhile, brain network also provides an important method for exploring the mechanism of cognitive impairment of MMD and the diagnosis, treatment and prognosis evaluation of cognitive impairment. This paper reviews the research on cognitive impairment related brain networks of MMD.

【Key words】Moyamoya disease; Brain network; Cognitive impairment; Revascularization;
Review

烟雾病(moyamoya disease)又称脑底异常血管网症, 是一种病因尚不完全明确的进行性脑血管疾病, 双侧颈内动脉末端及其在大脑 Willis 环的原发性进行性闭塞为本病的重要特点, 这种闭塞导致在大脑基底部分形成一些由侧支通路构成的异常血管网络以代偿原发病导致的脑缺血, 这些网状血管被称为“Moyamoya”血管(烟雾血管)。烟雾病患者可能出现短暂性脑缺血发作和缺血性卒中, 也可能出现认知障碍、头痛、运动障碍和癫痫发作^[1-2]。其中, 认知障碍是烟雾病的常见伴随症状, 主要体现在智力、记忆力和行为功能等方面, 极大地降低了患者的生活质量^[3]。

近年来, 功能磁共振成像(functional magnetic resonance imaging, fMRI)技术的发展提供了一种非侵入式的方式来探索人脑; 得益于现代医学影像技术的进步, 脑网络的概念应运而生^[4-6]。脑网络是由大脑中不同空间位置的皮层区域通过结构或功能联系而连接与整合形成的网络模式。它是人脑通过对节点和连接边的定义而抽象出的复杂网络结构。脑网络与人的认知功能和大脑疾病密切相关, 已广泛应用于各种医学研究中。脑网络理论为研究大脑神经系统之间的关系及其与行为的相关性提供了一个直观的框架^[7]。脑网络的分析和研究可以为人类探索大脑正常功能、研究神经系统疾病的发病机制、

诊断和治疗脑损伤以及改善精神疾病提供了有力的工具^[8-11]。近年来,越来越多的研究将脑网络分析方法应用于烟雾病研究,为研究烟雾病认知损伤的机制、诊治烟雾病和改善烟雾病预后提供了新的思路^[12-17]。现就烟雾病认知损伤的脑网络机制、脑网络分析方法、烟雾病外科手术治疗后的脑网络改变及未来展望进行总结。

一、烟雾病的认知功能损害

认知功能损害是烟雾病的常见伴随症状,一项系统性回顾研究显示,大约30%的烟雾病患者会有认知功能损害^[3]。烟雾病的认知损害在临床上主要表现为智力下降、记忆力减退和行为功能受损等方面^[2]。由于不同年龄段烟雾病患者神经系统的发育程度不同,不同年龄段烟雾病患者认知功能损害的主要表现也有所不同,成人烟雾病患者主要表现为执行功能受损,而儿童烟雾病患者则主要表现为智力受损^[18-24]。认知功能损害会极大地降低患者的生活质量,因此,近年来随着医疗技术的不断发展以及对烟雾病患者生活质量的愈发重视,越来越多的研究开始关注烟雾病患者的认知功能状态。

1. 儿童认知功能障碍: 儿童烟雾病的认知障碍主要表现为智力受损,智力也是儿童烟雾病中研究最多的认知参数之一。常用的智力测试方法是韦氏智力量表,包括韦氏儿童智力量表修订版(WISC-R)、韦氏儿童智力量表第三版(WISC-III)和韦氏学龄前和初级智力量表(WPPSI)等^[19, 25-26]。在一项研究中, Kuroda等^[25]测量了52例儿童患者的智力得分,发现烟雾病患儿智力受损的比例(智力评分<70分)显著高于健康人群(分别为15.4%和2.2%)。烟雾病也会导致儿童渐进性认知功能下降,研究者们通常使用连续的智力测试来分析整个疾病过程中认知功能的恶化。有学者根据闭塞程度定义的血管造影分期发现,狭窄会一直持续进展到青春期,并在20岁时稳定下来^[27-28]。此外, Ishii等^[19]发现年龄较大患儿(13~16岁)的智力受损程度小于低龄患儿(5~8岁); Imaizumi等^[29]也通过长期随访后发现,在患儿出现烟雾病认知损害的症状后,随着疾病的进展智力减退会越来越明显。这些研究提示及早发现烟雾病患儿的认知功能损害并及时进行干预将会有助于未来认知功能的改善。

2. 成人认知功能障碍: 成人烟雾病认知功能损害主要表现为执行功能受损。执行功能是有机体有意识地控制思想和行为的心理过程,协调多动认知加工过程。执行功能在成人烟雾病中的研究比在儿

童中更加广泛,主流的量表包括执行功能行为评定(Behavior rating index of executive function, BRIFF)、蒙特利尔认知评估(Montreal cognitive assessment, MoCA)、执行功能障碍综合征评估等量表^[3, 18]。Karzmark等^[21]对36例烟雾病患者的研究显示,执行功能是烟雾病患者认知功能受损严重的认知维度。Fang等^[30]通过对49例烟雾病患者的研究发现,成人烟雾病患者执行功能的许多方面明显低于健康对照组。成人烟雾病患者执行功能的各个方面,包括语义抑制、执行加工、工作记忆和持续注意力都显著受损,并且额叶灌注不足可能与烟雾病患者的工作记忆和语义抑制障碍有关。此外,与缺血性烟雾病患者相比,出血性烟雾病患者表现出更差的执行抑制、执行加工和语义抑制,但后者表现出更差的工作记忆和持续注意力。由于烟雾病发展渐进性的特点,在对日常活动能力的影响方面,烟雾病患者常常没有意识到其病情的严重性,因此,生活质量评估将是未来烟雾病认知研究的重点问题^[21, 31]。

二、脑网络的分析方法

脑网络分析的过程主要包含3个部分: 网络构建、网络表示和网络分析^[32]。网络构建是脑网络分析的第一步,该过程主要是将大脑磁共振影像信息或者大脑电生理信号数据表示为易于数学表达的图结构。网络表示是在已构建的脑网络中学习及提取特征的过程。网络分析是脑网络研究中核心的步骤,目前较为常见的分析及应用任务可以分为四大类: 组间差异分析、关联分析、个体分类预测和结构功能关系分析^[33-34]。

组间差异分析是基于特定假设寻找健康人对照与患者或不同人群之间的差异性。组间差异分析常通过统计学方法检验不同组之间的脑网络顺属性是否有统计学差异,以此来探索疾病状态下脑网络的异常情况^[35-36]。

与组间差异分析相比,关联分析更为关注网络结构与关联对象之间的隐含关系。关联对象可以是不同模态的影像数据、认知量表得分、基因数据等。在单变量关联分析中,最常用的方法是计算网络结构属性与关联对象之间的相关系数;在多变量的关联分析中,最常使用的方法是回归模型和典型相关模型^[37-39]。

个体分类预测是借助一些模式识别或机器学习的方法,对疾病进行缺血事件风险预测、术前和预后评估等。相较于以上两种分析方法,个体分类预测任务更侧重于以数据驱动的方式学习疾病的各

种临床、基因等信息,发现它们与脑网络之间的隐含关系,并以此自动地完成对疾病的相关预测,可用于直接指导或者辅助临床医生诊断疾病和评估预后,具有重要的临床意义^[40-44]。

脑功能网络的连接指大脑结构网络上不同节点记录的神经活动信号之间的动态协调性。结构功能关系分析,是将结构脑网络和功能脑网络两种模态的信息融合,分析其之间的相关性,数据处理量更大、信息更多^[45-46]。

由于大脑和疾病的复杂性,仅从单一模态中寻找对疾病敏感生物标志是非常困难的,融合多个模态的信息比仅使用单一模态可以获取更好的分类精度和更准确的分类结果,为我们理解大脑结构和功能之间的关系提供了重要的线索,有助于理解结构网络组织模式对大脑功能形成的作用以及大脑功能的塑造对大脑结构的影响^[47-49]。值得注意的是,由于多模态巨大的特征量和计算量,传统的统计分析方法通常不能很好地胜任多模态的脑网络分析,现在越来越多的研究者将机器学习的方法用在特征学习、特征筛选和关联分析中,从而更好地在多模态数据中寻找与疾病相关的特征^[50-52]。

三、烟雾病认知损伤的脑网络机制

烟雾病引起认知损伤的机制较为复杂,其中慢性脑缺血引起的脑显微结构损伤在烟雾病导致认知功能损伤的机制中起关键作用。烟雾病患者颈内动脉的进行性狭窄导致大脑供血下降,持续的慢性缺血进而导致大脑白质中轴突密度和大脑皮层中树突密度的下降,降低了大脑神经网络的复杂程度,减少了大脑神经元之间的联系,损伤了脑网络的结构连通性,最终导致认知功能损伤。此外,一些研究还提示大脑白质比皮质更易受慢性缺血的影响^[53-56],这是因为神经元的髓鞘结构主要集中于大脑白质,而髓鞘对缺血的耐受性比神经元胞体要低,因此烟雾病引起的大脑缺血性损伤更容易伤及髓鞘,影响了白质纤维束的传输的功能,导致脑网络解剖结构连通性的破坏,使脑网络无法高效完成甚至中断大脑对大脑电生理信号的传导,从而损伤认知功能区域^[57]。

脑白质的缺血性损伤可能会损害大脑区域的解剖连接,从而产生认知功能障碍。Bos 等^[58]研究证明,成人烟雾病的认知障碍是由大脑低灌注等导致的缺血性损伤产生的结果。Liu 等^[59]使用弥散张量成像(diffuse tensor imaging, DTI)检测了 12 例烟雾病患者的脑白质完整性,发现了各向异性分数、平均

扩散率、轴向扩散率、径向扩散率等 DTI 参数在丘脑前辐射、额枕下束、上纵束、钩状束和下纵束的白质微结构的变化,这种微结构的改变可能会损伤大脑节点间的连通性。Calviere 等^[60]通过对 14 例烟雾病患者执行功能障碍的研究发现,额叶白质的轻微缺血性损伤可能是执行功能障碍的原因,且发现利用扩散加权成像(diffusion weighted imaging, DWI)计算的表观扩散系数(apparent diffusion coefficient, ADC)可用于检测细微结构且可能用于检测有脑缺血和认知障碍风险的患者,以便在早期进行治疗干预。

脑功能网络的分析发现,烟雾病患者的认知损伤与功能连接的受损及功能网络拓扑属性异常有关。He 等^[15]通过静息态 fMRI 和动脉自旋标记分析烟雾病患者的脑灌注、独立网络成分、神经认知和脑网络拓扑结构来评估其脑功能表现。结果表明烟雾病患者的脑功能连接明显少于健康对照,脑血流障碍和脑网络连接受损可能是认知功能下降的重要原因。该研究还发现烟雾病患者的额叶度中心性明显下降,由于额叶控制着广泛的认知功能,这说明该区域脑网络的损伤对患者的神经认知有相当大的影响。

四、烟雾病手术后脑网络的改变

烟雾病的治疗旨在改善脑灌注和减少新血管的形成,从而预防未来的出血和(或)缺血事件。外科血运重建可以恢复大脑血流动力学损伤,进而保护患者免于神经认知功能障碍。烟雾病外科血管重建方式主要包括直接吻合术、间接吻合术以及联合吻合术。直接吻合术包括:颞浅动脉-大脑中动脉吻合术、颞浅动脉-大脑前动脉旁路术等;间接吻合术包括:脑-硬脑膜血管融合术(EDS)、脑-颞肌贴敷术(EMS)、脑-硬脑膜动脉颞肌血管贴敷术(EDAMS)、颅骨多点钻孔术、颅骨膜转移术等^[61-63]。研究表明,血运重建术能显著降低烟雾病患者缺血性卒中的风险并改善患者的临床预后。血运重建术可以改善烟雾病患者的脑血流供应,减轻慢性缺血对大脑认知功能的损害,提高烟雾病患者的生活质量^[56, 64-66]。

目前,部分关于烟雾病手术的认知研究发现,在接受外科手术治疗的患者中,其术后的脑网络连接性和完整性较术前有一定程度的改善^[13, 16, 67-68]。Sakamoto 等^[13]的一项针对烟雾病患者手术前后脑网络连接变化的研究表明,手术治疗后的网络连接与术前相比发生了显著变化,默认模式网络(default mode network, DMN)连接恢复正常。这可能反映了血管重建的成功。研究还显示这种术后大脑神经

网络的变化非常普遍,不仅见于血管重建的同侧半球,也见于对侧,这说明虽然手术部位是局部的,但对脑网络的影响可能是普遍的。Lei 等^[68]对 14 例烟雾病手术患者的研究发现,颅内搭桥术后只有右额叶局部血流动力学的变化和认知能力的变化相一致,且右侧背外侧前额叶皮质振幅可作为术后执行控制功能改善的定量预测指标。该研究初步证实了术后灌注改善与手术血运重建之间的正相关关系,且在所有额叶区域都观察到了这种相关性。上述研究表明,烟雾病患者术后认知的改善可能与烟雾病患者术后脑网络的重建密切相关。

五、总结和展望

烟雾病导致的不同程度的认知功能损害严重影响了患者的日常生活,降低了患者的生活质量,需要及时进行预防和干预,其中外科手术是缓解烟雾病认知功能障碍的重要方式。作为理解人脑的认知过程和脑疾病机制的工具,脑网络分析可以探索脑认知功能障碍与烟雾病相关的潜在结构性和功能性破坏之间的关联,帮助研究者探索烟雾病认知损伤机制、协助医生制定烟雾病的诊疗方案和对烟雾病手术治疗的预后评估。

目前烟雾病认知相关的脑网络研究,尤其是烟雾病手术相关的脑网络临床研究数量较少,烟雾病认知相关的脑网络外科在临床应用方面仍存在挑战。未来应当有更多的临床研究将脑网络分析方法应用于烟雾病的临床诊疗中,在实际的临床场景中去改进脑网络的分析方法和推广脑网络外科在烟雾病诊疗中的应用^[69]。随着脑网络分析方法的不断改进和在临床诊疗中越来越多的应用,脑网络可能为烟雾病的机制研究、诊断和治疗提供更加高效的方法。

利益冲突 文章所有作者共同认可文章无相关利益冲突

作者贡献声明 论文构思、资料收集、论文撰写为张钧泽、王雪彤,论文修订为曹勇、贺永

参 考 文 献

- [1] Kazumata K, Tha KK, Narita H, et al. Chronic ischemia alters brain microstructural integrity and cognitive performance in adult moyamoya disease[J]. *Stroke*, 2015, 46(2): 354-360. DOI: 10.1161/STROKEAHA.114.007407.
- [2] Scott RM, Smith ER. Moyamoya disease and moyamoya syndrome[J]. *N Engl J Med*, 2009, 360(12): 1226-1237. DOI: 10.1056/NEJMr0804622.
- [3] Kronenburg A, van den Berg E, van Schooneveld MM, et al. Cognitive functions in children and adults with moyamoya vasculopathy: a systematic review and meta-analysis[J]. *J Stroke*, 2018, 20(3): 332-341. DOI: 10.5853/jos.2018.01550.
- [4] Bullmore E, Sporns O. The economy of brain network organization[J]. *Nat Rev Neurosci*, 2012, 13(5): 336-349. DOI: 10.1038/nrn3214.
- [5] Jiao Y, Lin F, Wu J, et al. Plasticity in language cortex and white matter tracts after resection of dominant inferior parietal lobule arteriovenous malformations: a combined fMRI and DTI study[J]. *J Neurosurg*, 2020, 134(3): 953-960. DOI: 10.3171/2019.12.JNS191987.
- [6] Jiao Y, Zhang JZ, Zhao Q, et al. Machine learning-enabled determination of diffuseness of brain arteriovenous malformations from magnetic resonance angiography[J]. *Transl Stroke Res*, 2021. DOI: 10.1007/s12975-021-00933-1.
- [7] Bassett DS, Sporns O. Network neuroscience[J]. *Nat Neurosci*, 2017, 20(3): 353-364. DOI: 10.1038/nn.4502.
- [8] Glasser MF, Smith SM, Marcus DS, et al. The human connectome project's neuroimaging approach[J]. *Nat Neurosci*, 2016, 19(9): 1175-1187. DOI: 10.1038/nn.4361.
- [9] Beaty RE, Benedek M, Silvia PJ, et al. Creative cognition and brain network dynamics[J]. *Trends Cogn Sci*, 2016, 20(2): 87-95. DOI: 10.1016/j.tics.2015.10.004.
- [10] Sporns O. Contributions and challenges for network models in cognitive neuroscience[J]. *Nat Neurosci*, 2014, 17(5): 652-660. DOI: 10.1038/nn.3690.
- [11] Petersen SE, Sporns O. Brain networks and cognitive architectures[J]. *Neuron*, 2015, 88(1): 207-219. DOI: 10.1016/j.neuron.2015.09.027.
- [12] Zheng G, Lei Y, Li Y, et al. Changes in brain functional network connectivity in adult moyamoya diseases[J]. *Cogn Neurodyn*, 2021, 15(5): 861-872. DOI: 10.1007/s11571-021-09666-1.
- [13] Sakamoto Y, Okamoto S, Maesawa S, et al. Default mode network changes in moyamoya disease before and after bypass surgery: Preliminary report[J]. *World Neurosurg*, 2018, 112: e652-e661. DOI: 10.1016/j.wneu.2018.01.117.
- [14] Lei Y, Song B, Chen L, et al. Reconfigured functional network dynamics in adult moyamoya disease: a resting-state fMRI study[J]. *Brain Imaging Behav*, 2020, 14(3): 715-727. DOI: 10.1007/s11682-018-0009-8.
- [15] He S, Liu Z, Wei Y, et al. Impairments in brain perfusion, executive control network, topological characteristics, and neurocognition in adult patients with asymptomatic moyamoya disease[J]. *BMC Neurosci*, 2021, 22(1): 35. DOI: 10.1186/s12868-021-00638-z.
- [16] Kazumata K, Tha KK, Uchino H, et al. Mapping altered brain connectivity and its clinical associations in adult moyamoya disease: a resting-state functional MRI study[J]. *PLoS One*, 2017, 12(8): e0182759. DOI: 10.1371/journal.pone.0182759.
- [17] Christen T, Jahanian H, Ni WW, et al. Noncontrast mapping of arterial delay and functional connectivity using resting-state functional mri: a study in moyamoya patients[J]. *J Magn Reson Imaging*, 2015, 41(2): 424-430. DOI: 10.1002/jmri.24558.
- [18] Weinberg DG, Rahme RJ, Aoun SG, et al. Moyamoya disease: functional and neurocognitive outcomes in the pediatric and adult populations[J]. *Neurosurg Focus*, 2011, 30(6): E21. DOI: 10.3171/2011.3.FOCUS1150.
- [19] Ishii R, Takeuchi S, Ibayashi K, et al. Intelligence in children with moyamoya disease: evaluation after surgical treatments with

- special reference to changes in cerebral blood flow[J]. 1984, 15(5): 873-877. DOI: 10.1161/01.str.15.5.873.
- [20] Hogan AM, Kirkham FJ, Isaacs EB, et al. Intellectual decline in children with moyamoya and sickle cell anaemia[J]. *Dev Med Child Neurol*, 2005, 47(12): 824-829. DOI: 10.1017/s001216220500174x.
- [21] Karzmark P, Zeifert P, Tan S, et al. Effect of moyamoya disease on neuropsychological functioning in adults[J]. *Neurosurgery*, 2008, 62(5): 1048-1051; discussion 1051-1052. DOI: 10.1227/01.neu.0000325866.29634.4c.
- [22] Festa JR, Schwarz LR, Pliskin N, et al. Neurocognitive dysfunction in adult moyamoya disease[J]. *J Neurol*, 2010, 257(5): 806-815. DOI: 10.1007/s00415-009-5424-8.
- [23] Karzmark P, Zeifert P, Bell-Stephens T, et al. Neurocognitive impairment in adults with moyamoya disease without stroke[J]. *Neurosurgery*, 2012, 70(3): 634-638. DOI: 10.1227/NEU.0b013e3182320d1a.
- [24] 王康. 烟雾病认知功能障碍相关研究进展[J]. *济宁医学院学报*, 2020, 43(2): 123-126. DOI: 10.3969/j.issn.1000-9760.2020.02.012.
Wang K. Research progress of cognitive dysfunction in moyamoya disease[J]. *J Jining Med Univ*, 2020, 43(2): 123-126.
- [25] Kuroda S, Houkin K, Ishikawa T, et al. Determinants of intellectual outcome after surgical revascularization in pediatric moyamoya disease: a multivariate analysis[J]. *Childs Nerv Syst*, 2004, 20(5): 302-308. DOI: 10.1007/s00381-004-0924-4.
- [26] Williams TS, Westmacott R, Dlamini N, et al. Intellectual ability and executive function in pediatric moyamoya vasculopathy[J]. *Dev Med Child Neurol*, 2012, 54(1): 30-37. DOI: 10.1111/j.1469-8749.2011.04144.x.
- [27] Ezura M, Yoshimoto T, Fujiwara S, et al. Clinical and angiographic follow-up of childhood-onset moyamoya disease[J]. *Childs Nerv Syst*, 1995, 11(10): 591-594. DOI: 10.1007/bf00300998.
- [28] Fukui M. Guidelines for the diagnosis and treatment of spontaneous occlusion of the circle of Willis ('moyamoya' disease). Research Committee on Spontaneous Occlusion of the Circle of Willis (Moyamoya Disease) of the Ministry of Health and Welfare, Japan[J]. *Clin Neurol Neurosurg*, 1997, 99 Suppl 2: S238-240.
- [29] Imaizumi C, Imaizumi T, Osawa M, et al. Serial intelligence test scores in pediatric moyamoya disease[J]. *Neuropediatrics*, 1999, 30(6): 294-299. DOI: 10.1055/s-2007-973508.
- [30] Fang L, Huang J, Zhang Q, et al. Different aspects of dysexecutive syndrome in patients with moyamoya disease and its clinical subtypes[J]. *J Neurosurg*, 2016, 125(2): 299-307. DOI: 10.3171/2015.7.JNS142666.
- [31] Guzman R, Lee M, Achrol A, et al. Clinical outcome after 450 revascularization procedures for moyamoya disease. Clinical article[J]. *J Neurosurg*, 2009, 111(5): 927-935. DOI: 10.3171/2009.4.JNS081649.
- [32] 黄嘉爽, 接标, 丁卫平, 等. 脑网络分析方法及其应用[J]. *数据采集与处理*, 2021, 36(4): 648-663. DOI: 10.16337/j.1004-9037.2021.04.003.
Huang JS, Jie B, Ding WP, et al. Brain Network Analysis: Method and Application[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2021, 36(4): 648-663.
- [33] Rossini PM, Di Iorio R, Bentivoglio M, et al. Methods for analysis of brain connectivity: An ifcn-sponsored review[J]. *Clin Neurophysiol*, 2019, 130(10): 1833-1858. DOI: 10.1016/j.clinph.2019.06.006.
- [34] Rubinov M, Sporns O. Complex network measures of brain connectivity: Uses and interpretations[J]. *Neuroimage*, 2010, 52(3): 1059-1069. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2009.10.003.
- [35] Tomson SN, Schreiner MJ, Narayan M, et al. Resting state functional mri reveals abnormal network connectivity in neurofibromatosis 1[J]. *Hum Brain Mapp*, 2015, 36(11): 4566-4581. DOI: 10.1002/hbm.22937.
- [36] Leroux E, Delcroix N, Dollfus S. Left fronto-temporal dysconnectivity within the language network in schizophrenia: An fmri and dti study[J]. *Psychiatry Res*, 2014, 223(3): 261-267. DOI: 10.1016/j.psychres.2014.06.002.
- [37] Westphal AJ, Wang S, Rissman J. Episodic memory retrieval benefits from a less modular brain network organization[J]. *J Neurosci*, 2017, 37(13): 3523-3531. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.2509-16.2017.
- [38] Dubois J, Galdi P, Paul LK, et al. A distributed brain network predicts general intelligence from resting-state human neuroimaging data[J]. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, 2018, 373(1756): 20170284. DOI: 10.1098/rstb.2017.0284.
- [39] Beaty RE, Seli P, Schacter DL. Network neuroscience of creative cognition: Mapping cognitive mechanisms and individual differences in the creative brain[J]. *Curr Opin Behav Sci*, 2019, 27: 22-30. DOI: 10.1016/j.cobeha.2018.08.013.
- [40] Wee CY, Yap PT, Li W, et al. Enriched white matter connectivity networks for accurate identification of mci patients[J]. *Neuroimage*, 2011, 54(3): 1812-1822. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2010.10.026.
- [41] Dey S, Rao AR, Shah M. Exploiting the brain's network structure in identifying adhd subjects[J]. *Front Syst Neurosci*, 2012, 6: 75. DOI: 10.3389/fnsys.2012.00075.
- [42] Watanabe T, Kessler D, Scott C, et al. Disease prediction based on functional connectomes using a scalable and spatially-informed support vector machine[J]. *Neuroimage*, 2014, 96: 183-202. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2014.03.067.
- [43] Huang J, Zhu Q, Wang M, et al. Coherent pattern in multi-layer brain networks: application to epilepsy identification[J]. *IEEE J Biomed Health Inform*, 2020, 24(9): 2609-2620. DOI: 10.1109/JBHI.2019.2962519.
- [44] Huang J, Zhou L, Wang L, et al. Attention-diffusion-bilinear neural network for brain network analysis[J]. *IEEE Trans Med Imaging*, 2020, 39(7): 2541-2552. DOI: 10.1109/TMI.2020.2973650.
- [45] Bullmore E, Sporns O. Complex brain networks: Graph theoretical analysis of structural and functional systems[J]. *Nat Rev Neurosci*, 2009, 10(3): 186-198. DOI: 10.1038/nrn2575.
- [46] Passingham RE, Stephan KE, Kötter R. The anatomical basis of functional localization in the cortex[J]. *Nat Rev Neurosci*, 2002, 3(8): 606-616. DOI: 10.1038/nrn893.
- [47] Honey C, Sporns O, Cammoun L, et al. Predicting human resting-state functional connectivity from structural connectivity[J]. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 2009, 106(6): 2035-2040. DOI: 10.1073/pnas.0811168106.
- [48] Stephan KE, Hilgetag CC, Burns GA, et al. Computational

- analysis of functional connectivity between areas of primate cerebral cortex[J]. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, 2000, 355(1393): 111-126. DOI: 10.1098/rstb.2000.0552.
- [49] Moeller K, Willmes K, Klein E. A review on functional and structural brain connectivity in numerical cognition[J]. *Front Hum Neurosci*, 2015, 9: 227. DOI: 10.3389/fnhum.2015.00227.
- [50] Misis B, Betzel RF, de Reus MA, et al. Network-level structure-function relationships in human neocortex[J]. *Cereb Cortex*, 2016, 26(7): 3285-3296. DOI: 10.1093/cercor/bhw089.
- [51] Zhao S, Zhao Q, Jiao Y, et al. Radiomics analysis for predicting epilepsy in patients with unruptured brain arteriovenous malformations[J]. *Front Neurol*, 2021, 12: 767165. DOI: 10.3389/fneur.2021.767165.
- [52] Carlson HL, Craig BT, Hilderley AJ, et al. Structural and functional connectivity of motor circuits after perinatal stroke: a machine learning study[J]. *Neuroimage Clin*, 2020, 28: 102508. DOI: 10.1016/j.nicl.2020.102508.
- [53] Hara S, Hori M, Murata S, et al. Microstructural damage in normal-appearing brain parenchyma and neurocognitive dysfunction in adult moyamoya disease[J]. *Stroke*, 2018, 49(10): 2504-2507. DOI: 10.1161/STROKEAHA.118.022367.
- [54] Kazumata K, Tokairin K, Sugiyama T, et al. Association of cognitive function with cerebral blood flow in children with moyamoya disease[J]. *J Neurosurg Pediatr*, 2019; 1-7. DOI: 10.3171/2019.7.Peds19312.
- [55] Li J, Liu X, Zhang D, et al. Cognitive performance profile in pediatric moyamoya disease patients and its relationship with regional cerebral blood perfusion[J]. *Front Neurol*, 2019, 10: 1308. DOI: 10.3389/fneur.2019.01308.
- [56] Nakamizo A, Amano T, Michiwaki Y, et al. Long-term neurocognitive outcomes in patients with adult moyamoya disease[J]. *World Neurosurg*, 2018, 119: e441-e448. DOI: 10.1016/j.wneu.2018.07.179.
- [57] Catchlove SJ, Pipingas A, Hughes ME, et al. Magnetic resonance imaging for assessment of cerebrovascular reactivity and its relationship to cognition: a systematic review[J]. *BMC Neurosci*, 2018, 19(1): 21. DOI: 10.1186/s12868-018-0421-4.
- [58] Bos D, Vernooij MW, Elias-Smale SE, et al. Atherosclerotic calcification relates to cognitive function and to brain changes on magnetic resonance imaging[J]. *Alzheimers Dement*, 2012, 8(5 Suppl): S104-111. DOI: 10.1016/j.jalz.2012.01.008.
- [59] Liu Z, He S, Xu Z, et al. Association between white matter impairment and cognitive dysfunction in patients with ischemic moyamoya disease[J]. *BMC Neurol*, 2020, 20(1): 302. DOI: 10.1186/s12883-020-01876-0.
- [60] Calviere L, Ssi Yan Kai G, Catalaa I, et al. Executive dysfunction in adults with moyamoya disease is associated with increased diffusion in frontal white matter[J]. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*, 2012, 83(6): 591-593. DOI: 10.1136/jnnp-2011-301388.
- [61] Choi JU, Kim DS, Kim EY, et al. Natural history of moyamoya disease: Comparison of activity of daily living in surgery and non surgery groups[J]. *Clin Neurol Neurosurg*, 1997, 99 Suppl 2: S11-S18. DOI: 10.1016/s0303-8467(97)00033-4.
- [62] Houkin K, Kuroda S, Nakayama N. Cerebral revascularization for moyamoya disease in children[J]. *Neurosurg Clin N Am*, 2001, 12(3): 575-584, ix.
- [63] Scott RM, Smith JL, Robertson RL, et al. Long-term outcome in children with moyamoya syndrome after cranial revascularization by pial synangiosis[J]. *J Neurosurg*, 2004, 100(2 Suppl Pediatrics): 142-149. DOI: 10.3171/ped.2004.100.2.0142.
- [64] Zeifert PD, Karzmark P, Bell-Stephens TE, et al. Neurocognitive performance after cerebral revascularization in adult moyamoya disease[J]. *Stroke*, 2017, 48(6): 1514-1517. DOI: 10.1161/STROKEAHA.116.016028.
- [65] Ando T, Shimada Y, Fujiwara S, et al. Revascularisation surgery improves cognition in adult patients with moyamoya disease[J]. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*, 2020, 91(3): 332-334. DOI: 10.1136/jnnp-2019-321069.
- [66] Miki K, Samura K, Kawashima M. Effectiveness of combined direct and indirect revascularization for moyamoya disease with concurrent congenital rubella syndrome[J]. *World Neurosurg*, 2020, 138: 1-6. DOI: 10.1016/j.wneu.2020.02.081.
- [67] Kazumata K, Tha KK, Tokairin K, et al. Brain structure, connectivity, and cognitive changes following revascularization surgery in adult moyamoya disease[J]. *Neurosurgery*, 2019, 85(5): E943-e952. DOI: 10.1093/neuros/nyz176.
- [68] Lei Y, Li YJ, Guo QH, et al. Postoperative executive function in adult moyamoya disease: a preliminary study of its functional anatomy and behavioral correlates[J]. *J Neurosurg*, 2017, 126(2): 527-536. DOI: 10.3171/2015.12.JNS151499.
- [69] Stam CJ. Modern network science of neurological disorders[J]. *Nat Rev Neurosci*, 2014, 15(10): 683-695. DOI: 10.1038/nrn3801.

(收稿日期: 2022-07-12)

(本文编辑: 赵金鑫)