

近视的脑视觉研究现状及展望

龚胜¹ 综述 毕爱玲² 毕宏生³ 审校

¹山东中医药大学, 济南 250014; ²山东省眼病防治研究院 山东省中西医结合眼病防治重点实验室, 济南 250002; ³山东中医药大学附属眼科医院 山东省眼病防治研究院 山东省中西医结合眼病防治重点实验室, 济南 250002

通信作者: 毕宏生, Email: hongshengbi@163.com

【摘要】 眼接受外界光刺激产生的视觉信号经视觉通路到达视觉中枢, 经中枢加工整合形成的主观感觉称为脑视觉。脑视觉反映了从视网膜到视觉中枢整个视觉神经系统的功能。既往在电生理、磁共振成像(MRI)、功能性近红外光谱技术(fNIRS)等检测中均发现近视患者的脑视觉异常。电生理检查的异常人群主要为高度近视和病理性近视患者。MRI检查发现高度近视患者多个视觉相关脑区的结构和功能发生了异常改变。本团队近期应用近红外脑功能成像技术结合自主研发的设备对不同类型近视患者的脑功能进行了研究, 研究结果提示病理性近视患者的脑视觉和成年中度近视患者在不屈光矫正状态下的脑视觉均存在异常。近视儿童眼调节过程的脑视觉机制有待深入研究。本文从近视的分类, 近视的脑视觉研究方法以及近视的视觉电生理学、MRI、fNIRS研究等方面就近视的脑视觉研究现状及展望进行综述。

【关键词】 近视; 视网膜电图; 视觉诱发电位; 近红外光谱技术; 磁共振成像; 脑视觉

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC1710204); 国家自然科学基金面上项目(82074498)

DOI: 10.3760/cma.j.cn115989-20220204-00035

Research status and prospect on the cerebral vision in myopic patients

Gong Sheng¹, Bi Ailing², Bi Hongsheng³

¹Shandong University of Traditional Chinese Medicine, Jinan 250014, China; ²Shandong Academy of Eye Disease Prevention and Therapy, Shandong Provincial Key Laboratory of Integrated Traditional Chinese and Western Medicine for Prevention and Therapy of Ocular Diseases, Jinan 250002, China; ³Affiliated Eye Hospital of Shandong University of Traditional Chinese Medicine, Shandong Academy of Eye Disease Prevention and Therapy, Shandong Provincial Key Laboratory of Integrated Traditional Chinese and Western Medicine for Prevention and Therapy of Ocular Diseases, Jinan 250002, China

Corresponding author: Bi Hongsheng, Email: hongshengbi@163.com

【Abstract】 The visual signal generated by the eye receiving external light stimulation reaches the visual center through the visual pathway and is processed and integrated by the visual center to form a subjective sensation called cerebral vision. Cerebral vision reflects the function of the whole visual nervous system from the retina to the visual cortex. Abnormal cerebral vision has been found in myopes using electrophysiology, magnetic resonance imaging (MRI) and functional near-infrared spectroscopy (fNIRS). The abnormal electrophysiological results are mainly found in patients with high myopia and pathological myopia. MRI shows abnormal changes in the structure and function of several vision-related brain regions in patients with high myopia. Recently, by applying near-infrared brain function imaging technology combined with self-developed equipment, our team conducted a series of studies on the brain function of myopic patients and found that adult patients with moderate myopia and patients with pathological myopia have the abnormal cerebral vision. The mechanism of neural regulation of eye accommodation in myopic children needs further investigation. In this article, we reviewed the current status and outlook of myopic brain vision research in terms of myopia classification, myopic brain vision research methods, and myopic visual electrophysiology, MRI, and fNIRS studies.

【Key words】 Myopia; Electroretinography; Evoked potentials; Visual; Spectroscopy, near-Infrared; Magnetic resonance imaging; Cerebral vision

Fund program: National Key Research and Development Project (2019YFC1710204); National Natural



Science Foundation of China (82074498)

DOI:10.3760/cma.j.cn115989-20220204-00035

近视是全球范围内严重影响人们生活质量的公共卫生问题。2020 年统计数据显示,我国儿童青少年近视患病率高达 52.7%,居世界首位^[1-3]。近视发生的病理改变主要是以玻璃体腔延长为特征的眼轴增长^[4]。在视觉形成过程中,眼与大脑之间的联系密切。眼部组织结构的改变也可伴随视皮层和大脑的结构和功能改变。视网膜为外周脑,脑视觉是指从外周脑到大脑皮层整个通路的功能,包括视网膜到初级视皮层的视觉感知功能、视皮层对视觉信息的中枢整合作用,还包括记忆、情绪调节、思维认知等高级功能活动^[5]。目前为止,近视发生与大脑功能之间的因果关系尚不明确。本文从近视的分类、近视的脑视觉研究方法以及近视的视觉电生理学、磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)、功能性近红外光谱技术(functional near-infrared spectroscopy, fNIRS)研究等方面就近视的脑视觉研究现状及展望进行综述。

1 近视的分类

按有无调节因素参与,近视可分为假性近视、混合性近视和真性近视。假性近视定义为睫状肌麻痹前等效球镜度 ≤ -0.50 D,睫状肌麻痹后等效球镜度 > -0.50 D^[6]。真性近视是指经睫状肌麻痹后等效球镜度 ≤ -0.50 D,以眼轴增长为主要表现的器质性病变。混合性近视的标准为睫状肌麻痹前、后等效球镜度均 ≤ -0.50 D,且睫状肌麻痹前、后等效球镜度差值 > 0.50 D。

按照屈光度的高低,近视分为低度、中度和高度近视。屈光度数值在 -3.0 D 以下为低度近视。屈光度在 $-3.0 \sim -6.0$ D 为中度近视。高度近视为屈光度 ≤ -6.0 D,以眼轴进行性延长为解剖学特征。高度近视占青少年近视的 10% 以上,并且有随着年龄增长而升高的趋势^[7]。在成年人中,高度近视患病率约为 2.6%,是成人常见致盲原因之一^[8]。高度近视可出现近视性眼底病理改变,如后巩膜葡萄肿、漆裂纹、黄斑出血等^[9]。随着近视的不断加深,眼底损害的发生率升高,对视功能的影响也会逐渐增加。

按照屈光度的进展和眼底病理改变,近视可分为单纯性近视和病理性近视。单纯性近视屈光度较低,进展相对缓慢,矫正视力一般较好。病理性近视又称为进行性近视,临床特点为屈光度高,进展较快,伴有眼底病理改变。病理性近视患者可能携带相关的遗传致病基因,但目前为止,其遗传背景尚未完全阐明^[10]。依据病理性近视 meta 分析(META analysis for pathologic myopia, META-PM)等级分类中的病理改变:无近视性眼底病变(第 0 类)、豹纹状眼底(第 1 类)、弥散性脉络膜视网膜萎缩(第 2 类)、局灶性脉络膜视网膜萎缩(第 3 类)和黄斑病变(第 4 类),目前病理性近视被定义为 META-PM 分类中第 2 类及以上眼底病变的近视^[11]。亚洲地区病理性近视患病率为 0.9%~3.1%,高于非亚洲人群,是致盲的主要病因之一^[12]。

2 近视的脑视觉研究方法

近视患者脑视觉的常用研究方法有视网膜电图(electroretinogram, ERG)和视觉诱发电位(visual evoked potential, VEP)等视觉电生理检查、MRI、fMRI、fNIRS 等。

视觉电生理检查技术 ERG 和 VEP 被广泛应用于眼科临床。ERG 是光或图像刺激视网膜时从角膜和相应部位记录到的视网膜电反应,根据对视网膜的刺激条件不同可分为闪光 ERG(flash electroretinogram, FERG)、图形 ERG 和多焦 ERG(multifocal electroretinogram, mfERG)。VEP 是大脑枕叶区域记录到的对视觉刺激产生的电反应,是代表视网膜接受刺激、经视路传导至枕叶皮层而引起的电位变化。根据刺激条件不同可分为闪光 VEP(flash-visual evoked potential, FVEP)、图形 VEP(pattern visual evoked potential, PVEP)和多焦 VEP。应用 ERG 和 VEP 可诊断视觉通路的病变,客观、定量地辅助临床医生评价患者的视功能障碍。

MRI 是利用原子核在磁场内共振而生成影像的一种方法,具有较高的空间分辨率、无辐射损伤、可重复进行检测等优点,广泛应用于脑功能研究。基于体素的形态学测量方法(voxel-based morphometry, VBM)可定量检测出脑组织各组分的密度和体积。

fMRI 是在磁共振原理的基础上,根据人脑功能区被信号激活时脱氧血红蛋白含量变化及随之产生的局部磁共振信号的改变进行工作。既往应用 fMRI 对近视患者进行脑研究的主要方法有分数低频振幅(fractional amplitude of low-frequency fluctuation, fALFF)法、度中心(degree centrality, DC)法、基于种子点的功能连接(functional connectivity density, FCD)法、基于图论的复杂网络分析法等。fALFF 法是一种常用的静息态功能磁共振数据分析方法,能够反映局部脑区的神经活动强弱^[13]。DC 法是基于体素水平的分析方法,通过分析某个体素与大脑其他体素间的即时功能连接数量,反映该体素在脑网络中的功能重要性^[14]。FCD 法是通过每个体素和其周围体素之间的时间序列进行相关分析,侧重于通过不同脑区之间的功能连接来进行整合分析的方法之一^[15]。与 FCD 相比,基于图论的复杂网络分析进一步以全脑分析为基础,从整体角度表征脑功能网络的拓扑性质,揭示大脑功能^[16]。

fNIRS 是一种新兴的脑功能成像技术,在神经科学研究中使用越来越广泛,其原理是大脑活动会导致局部血流动力学变化。利用脑组织中氧合血红蛋白和脱氧血红蛋白对 600~900 nm 不同波长的近红外光吸收率的差异特性,实时检测大脑皮层的血流动力学变化,通过神经血管耦合规律反推大脑的神经活动情况^[17]。

3 近视的脑视觉研究现状

3.1 近视的视觉电生理学研究

近视患者在电生理检查中会提示存在视觉通路功能异常。FERG 检查发现,高度近视患者随着屈光度增加,其最大混合反应中的 a、b 波振幅显著降低,潜伏期显著延长,其中超高度近视患者与正常受试者之间差异更显著^[18]。mfERG 研究发现,与正视者相比,中度和高度近视患者潜伏期显著延长,中央环和 4 个象限内 P1 波振幅密度与眼轴长度和屈光度均呈负相关^[19]。一项为期 1 年的研究表明,儿童近视进展期在 49% 对比敏感度的 mfERG 刺激下中央环振幅下降,提示视网膜中心凹的功能存在异常^[20]。与同年龄正视儿童相比,近视儿童在 96% 对比敏感度刺激下,其黄斑区直接成分的振幅降低;而近视成年人在 49% 的对比敏感度刺激下,其诱发成分的振幅与正视成人相比显著下降^[21]。研究发现,近视屈光度数值 ≤ -12.00 D 时,眼底均会出现病理改变,成为病理性近视^[22-23]。相对于单纯高度近视,病理性近视屈光度更高、眼轴更长、最佳矫正视力更低且视网膜和脉络膜厚度更薄^[10]。mfERG 检测发现,病理性近视患者较正视眼和单纯近视者 P1 波振幅密度降低且潜伏期延长,随视网膜病变程度加重,振幅降低越多,潜伏期越延长^[19]。

在裸眼状态下,不同程度近视患者 PVEP 的 P100 波潜伏期和振幅均存在差异:随近视患者裸眼视锐度降低,P100 波潜伏期延长且振幅逐渐降低^[24]。PVEP 检测结果表明,在裸眼状态下,随着屈光度增加,高度近视患者 P100 波的振幅降低且潜伏期延长^[25]。也有研究发现,双眼屈光参差 >2.0 D 的成年近视患者非优势眼 PVEP 的 N75 波潜伏期较自身优势眼显著增加^[26]。上述电生理异常的原因是近视眼在未屈光矫正状态下检测,视网膜成像异常而导致。即使是在屈光矫正状态下,病理性近视患者 PVEP 的 N75 和 P100 波振幅相对于正常眼也均显著降低且潜伏期显著延长^[27]。由于视网膜的结构和功能异常,导致视网膜到大脑视皮层的信息传递功能存在异常,可能是病理性近视患者电生理结果异常的主要原因。近期,一项应用分离格栅(图形)视觉诱发电位(isolated-check visual evoked potential, icVEP)针对合并或未合并高度近视的原发性开角型青光眼患者的研究发现,在屈光矫正状态下,icVEP 检查的信噪比对区分青光眼是否合并高度近视具有一定的特异性,并且 icVEP 结果与视野中央 10° 的损伤表现出良好的一致性^[28]。

3.2 近视的 MRI 研究

脑视觉相关的脑区除枕叶之外,还涉及额叶、顶叶、颞叶、边缘系统、小脑、丘脑和脑干等。视皮层位于枕叶距状沟(距状裂)周围,包括楔叶和舌回。根据血氧水平依赖功能磁共振成像(blood oxygenation level-dependent functional magnetic resonance imaging, BOLD-fMRI)定位,视觉皮层又可分为位于枕叶的 V1、V2、V3 区和位于颞下回皮层后面的 V4 区和位于中颞区的 V5 区。前额叶皮层负责整合大脑其余部分的信息,其中,额中回含有头眼运动中枢,参与书写过程的头、眼运动协调;左侧额下回参与语义的整合加工;右侧额下回参与情绪和认知活动。顶上小叶参与躯体运动方向和空间位置信息的感知。顶下小叶(缘上回和角回)参与视觉、听觉、触觉等感觉信息的整合过程。绒球小结叶(前庭小脑)主要控制眼球的运动和躯体

的平衡。小脑前叶调节肌紧张,与头部和身体的本体感受等传入信息有关。丘脑是人体感觉核团的中继站,如丘脑内的外侧膝状体主要负责视觉信息的传导。海马旁回和扣带回均属于边缘系统,与认知、情绪、学习和记忆有重要关系。初级躯体感觉皮层和初级运动皮层分别位于中央后回和中央前回,协调躯体感觉和全身的自主运动。壳核属于豆状核,与尾状核同属于基底节,参与躯体的运动协调。中脑位于脑干,其内的动眼神经副核是视觉反射中枢^[29]。

BOLD-fMRI 研究表明,在视觉脑皮层中,右侧大脑半球为优势半球^[30]。在结构学方面,VBM 研究发现,与正常对照组相比,高度近视患者大脑视觉相关脑区和边缘系统的灰质体积发生改变,其右侧楔叶、舌回和右侧丘脑灰质体积减小;脑干、海马旁回、壳核的灰质体积则增加^[31]。

功能学方面,即使是在屈光矫正基础上,低度近视患者的脑认知功能也仍存在异常,主要表现在知觉眼位偏移、注视稳定性降低以及立体视正常率降低^[32]。静息态 fMRI 研究发现,与正视者相比,近视患者右侧小脑前叶和双侧丘脑的 fALFF 值显著降低;左侧白质(视辐射)、右前额叶皮质和左初级运动皮质/初级躯体感觉皮质的 fALFF 值显著增高^[33]。中高度近视患者的视觉信息整合、语言调控、行为与注意力调控的脑区存在功能下降,如双侧额下回、壳核(背侧纹状体)、岛叶等多个区域较正视者 fALFF 值显著降低。相反,近视患者视觉空间注意、认知处理和情绪调控的脑区功能更加活跃,如双侧中扣带回、双侧前扣带回、左侧中央后回以及左侧顶上小叶等区域 fALFF 值显著升高^[34]。

基于体素水平的 DC 法研究表明,高度近视患者左侧额中回、右侧额下回、左侧额叶内侧回、左侧顶下小叶的 DC 值均显著低于低度近视者,而右侧小脑前叶/脑干、右侧海马旁回、左侧尾状核的 DC 值均显著高于低度近视者,提示高度近视与低度近视之间的脑视觉神经机制也存在差异^[35]。DC 法研究高度近视患者静息态下的全脑网络发现,大脑视觉运动整合网络、感觉运动网络、边缘系统网络均存在异常^[36]。

一项 FCD 法研究显示,高度近视患者喙外侧前额叶皮层和缘上回的灰质体积相对于正常人减小,前额叶的脑功能连接水平与高度近视裸眼视力之间存在正相关关系,高度近视患者扣带回皮质与楔前叶之间的功能连接降低,扣带回与注意和行为调控的脑区,如颞下回、缘上回和前额叶之间的功能连接水平也降低^[37]。高度近视患者静息态脑功能网络的拓扑属性发生异常改变,表现为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,右侧额下回岛盖、左侧杏仁核的节点聚类系数降低;右侧尾状核的节点度、节点效能均提高,提示高度近视患者视觉注意力及与情感相关的脑区节点属性发生了改变^[38]。高度近视患者多个脑区功能活动存在异常变化,如内侧前额叶与双侧额中回、角回、颞中回等多个脑区功能连接密度增高;后扣带回与右侧小脑、额前回、眶内侧缘上回的功能连接也增强^[39]。

3.3 近视的 fNIRS 研究

有研究报道,在正常眼前放置即使是 +1.00 D 的凸透镜透

导近视,也可观察到由于模糊视觉导致的视皮层血氧水平降低^[40-41]。近期本团队应用 fNIRS 结合自主研发的设备对不同近视患者的脑功能进行了研究,结果发现成年正视者与中度近视患者在裸眼状态下接受黑白棋盘格翻转视觉刺激时,中度近视患者视皮层的氧合血红蛋白相对含量显著低于正视者,屈光矫正后上述差异消失;给予正视者佩戴正透镜后,视皮层氧合血红蛋白水平较戴镜前显著下降,摘掉透镜后,正视者氧合血红蛋白含量又可恢复至正常水平^[42]。将病理性近视分为 A 组(病理性近视患者 2 级、3 级近视性黄斑病变)和 B 组(病理性近视患者 4 级近视性黄斑病变),在低、高空间频率棋盘格翻转视觉刺激下,病理性近视 A 组和 B 组分别与正视组比较,氧合血红蛋白相对含量均显著下降,而病理性近视 A 组与 B 组间比较差异无统计学意义^[43]。神经影像学研究发现,近视引起的模糊视觉体验和长期异常的视觉信息传入会对大脑的结构和功能造成显著影响^[40,44-46]。近视患者视网膜接收异常的视觉信号或视网膜内视觉信号传导存在异常均可导致大脑无法接收到正确完整的视觉信息进行处理加工,从而影响视觉功能。

3.4 其他研究

有研究应用光学相干断层扫描(optical coherence tomography, OCT)和视觉电生理方法对高度近视和正常眼的视网膜和视路功能进行比较,结果发现高度近视眼视网膜神经纤维层厚度变薄;P1 波反应密度值减小,振幅降低,潜伏期延长,提示高度近视患者的视网膜结构和功能以及视觉通路均表现出显著差异性^[48]。

4 近视脑视觉研究的意义及展望

视觉电生理研究发现真性近视患者的神经功能改变多为视网膜成像模糊导致。病理性近视患者即使在光学矫正状态下,电生理检测依然可以发现功能异常,这与病理性近视患者严重的眼底病理改变有直接关系。有研究指出,近视患者黄斑中心凹视神经纤维层厚度与眼轴长度和脑视觉功能存在一定的相关性^[47]。从研究结果来看,近视患者神经电生理的变化多是近视进展过程中伴随的结果,而非近视发生的原因。

MRI 脑研究揭示了高度近视患者多个脑区的结构和功能发生异常改变。功能异常的脑区多发生在与视觉直接或间接关联、与认知和心理活动相关的脑区。除视皮层外,近视患者 fMRI 检测功能降低的脑区还包括额叶、顶叶、丘脑等部位,功能有所增强的脑区包括海马旁回、扣带回、躯体感觉区(中央后回)和脑干等。由于视觉电生理检测仅针对枕叶视皮层,研究的大脑区域相对局限。今后,应用脑电图或脑电图结合 fMRI 的方法,从视路和脑功能网络方面开展近视与脑视觉的关系研究将有可能揭示近视患者的神经心理或行为学变化的机制。

有研究者提出近视发生和发展的巩膜缺氧学说,并得到了国际认可^[48]。该学说认为,脉络膜变薄、血流减少,使巩膜缺氧,导致巩膜细胞外基质重塑,最终形成近视^[49-50]。该学说提出者发现,近距离阅读不仅可以引起睫状肌紧张,晶状体凸度增大,还可以引起脉络膜厚度变薄,血流减少^[51]。持续的脉络

膜厚度变薄、血流减少可以加剧巩膜缺氧和巩膜细胞外基质重塑。引起持续脉络膜变薄、血流减少的机制,其中是否有脑视觉机制的参与,有待今后进一步研究。

视近物时人眼会发生近反射,该反射需要大脑中枢的调控,其反射弧不仅包含视网膜、视神经、初级视皮层等视路结构,还包括视皮层纹状外区、中脑动眼神经副核、睫状神经节等多个神经核团。应用正电子发射断层扫描(positron emission tomography, PET)研究发现,正常人在视近、视远的调节过程中,枕叶视觉区域、小脑半球、小脑蚓部和颞叶皮质功能增强^[52]。眼调节功能异常是导致假性近视的主要因素。在视近状态转变为视远状态时,假性近视眼的睫状肌持续紧张、不能完全放松,因此外界光线聚焦于视网膜之前^[53]。有临床病例报道,颅脑外伤也可引起患者出现假性近视状态^[54]。因此,有理由推测假性近视患者在进行眼调节相关的视觉任务过程中可能存在视皮层等高位中枢的功能异常。此外,有研究报道真性近视儿童存在眼睫状肌形态肥厚等变化^[55]。睫状肌是眼调节反应中各级中枢作用的最终靶器官,因此真性近视患者在眼调节相关的视觉活动过程中也可能存在脑视觉的异常,其机制仍有待深入研究。

综上所述,除眼科检查 OCT、VEP 和 ERG 等发现近视患者的视网膜结构和功能以及视觉通路均与正视者存在差异以外, MRI、PET 和 fNIRS 等脑视觉功能研究也发现了近视患者多个脑区的结构和功能发生异常改变,但近视的发生和发展与近视患者脑视觉异常改变的因果关系及其机制目前尚不清楚。此外,脑视觉功能也受心理作用的影响。今后,应用 fNIRS 或脑电图、fMRI 和脑视觉相关心理学检查相结合的方法,从脑视觉神经系统、脑视觉认知功能和心理作用方面开展研究,将有可能揭示近视与脑视觉的关系及其机制。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] 吴进川,杨贵奇,唐敏,等.泸州市中小学生近视流行病学调查及相关因素分析[J].西南医科大学学报,2020,43(4):396-400. DOI: 10.3969/j.issn.2096-3351.2020.04.015.
Wu JC, Yang GQ, Tang M, et al. Epidemiological investigation of myopia and analysis of its related factors in primary and secondary school students in Luzhou, China[J]. J Southwest Med College, 2020, 43(4):396-400. DOI:10.3969/j.issn.2096-3351.2020.04.015.
- [2] 来坚,李能,王琼琼,等.2018—2020 年杭州市西湖区青少年近视流行病学调查[J].中国预防医学杂志,2021,22(6):418-422. DOI: 10.16506/j.1009-6639.2021.06.004.
Lai J, Li N, Wang QQ, et al. Prevalence of myopia among school students and its influencing factors in Xihu district of Hangzhou during 2018 and 2020[J]. China Prevent Med, 2021, 22(6):418-422. DOI: 10.16506/j.1009-6639.2021.06.004.
- [3] 樊泽民,黄象好.综合防控儿童青少年近视 3 年工作成效与下一步工作重点[J].中国学校卫生,2021,42(12):1765-1767. DOI:10.16835/j.cnki.1000-9817.2021.12.002.
Fan ZM, Huang XH. Comprehensive prevention and control of myopia in children and adolescents: progress in the past three years and future priorities[J]. Chin J School Health, 2021, 42(12):1765-1767. DOI: 10.16835/j.cnki.1000-9817.2021.12.002.
- [4] 李茜,王红星,白伶俐,等.学龄儿童近视眼屈光状态与生物学参数的相关性分析[J].中国医刊,2021,56(6):686-688. DOI:10.

- 3969/j. issn. 1008-1070. 2021. 06. 032.
- [5] 王育良, 张传伟, 阎丽. 脑视觉[M]. 北京: 人民军医出版社, 2013, 8: 3-57.
Wang YL, Zhang CW, Yan L. Cerebral vision [M]. Beijing: People's Military Medical Press, 2013, 8: 3-57.
- [6] Kang MT, Jan C, Li S, et al. Prevalence and risk factors of pseudomyopia in a Chinese children population: the Anyang Childhood Eye Study[J]. Br J Ophthalmol, 2021, 105(9): 1216-1221. DOI: 10.1136/bjophthalmol-2020-316341.
- [7] 沈理通, 荣飏, 郑蓉蓉, 等. 2018 年度厦门市儿童青少年近视基线调查[J]. 预防医学论坛, 2019, 25(6): 441-443.
Shen LT, Rong B, Zheng RR, et al. Baseline survey on myopia among children and adolescents, Xiamen city, 2018[J]. Prevent Med Tribune, 2019, 25(6): 441-443.
- [8] Xu C, Pan C, Zhao C, et al. Prevalence and risk factors for myopia in older adult east Chinese population [J/OL]. BMC Ophthalmol, 2017, 17(1): 191 [2022-09-20]. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29029601/. DOI: 10.1186/s12886-017-0574-4.
- [9] 訾迎新, 金明. 高度近视眼底改变的最近研究进展[J]. 眼科新进展, 2019, 39(12): 1197-1200.
Zi YX, Jin M. The latest research advances of fundus changes in high myopia[J]. Rec Adv Ophthalmol, 2019, 39(12): 1197-1200.
- [10] Ohno-Matsui K, Wu PC, Yamashiro K, et al. IMI pathologic myopia [J/OL]. Invest Ophthalmol Vis Sci, 2021, 62(5): 5 [2022-09-20]. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8083114/. DOI: 10.1167/iov. 62. 5. 5.
- [11] Ohno-Matsui K, Kawasaki R, Jonas JB, et al. International photographic classification and grading system for myopic maculopathy [J]. Am J Ophthalmol, 2015, 159(5): 877-883. DOI: 10.1016/j.ajo. 2015. 01. 022.
- [12] Wong YL, Saw SM. Epidemiology of pathologic myopia in Asia and worldwide[J]. Asia Pac J Ophthalmol (Phila), 2016, 5(6): 394-402. DOI: 10.1097/APO. 0000000000000234.
- [13] 邹文锦, 李日鹏, 黄建伟, 等. 基于体素形态学脑灰质体积改变及静息态比率低频振幅分析首发精神分裂症青年患者[J]. 中国医学影像技术, 2018, 34(12): 1782-1786. DOI: 10.13929/j. 1003-3289. 201804039.
Zou WJ, Li RP, Huang JW, et al. Voxel-based morphological analysis of brain gray matter volume changes and resting-state fractional amplitude of low-frequency analysis in young patients with first episode schizophrenia[J]. Chin J Med Imaging Technol, 2018, 34(12): 1782-1786. DOI: 10.13929/j. 1003-3289. 201804039.
- [14] 王辉, 陈楠, 李坤成, 等. 度中心度方法对基底节区脑梗死患者人脑功能连接组的研究[J]. 磁共振成像, 2016, 7(10): 727-731. DOI: 10.12015/issn. 1674-8034. 2016. 10. 002.
Wang H, Chen N, Li KC, et al. Degree centrality in the human functional connectome of basal ganglia stroke patients[J]. Chin J Magn Reson Imaging, 2016, 7(10): 727-731. DOI: 10.12015/issn. 1674-8034. 2016. 10. 002.
- [15] 韩永良, 李咏梅, 罗琦, 等. 视神经脊髓炎患者功能连接密度变化的静息态 fMRI 研究[J]. 磁共振成像, 2018, 9(1): 33-37. DOI: 10.12015/issn. 1674-8034. 2018. 01. 007.
Han YL, Li YM, Luo Q, et al. Functional connectivity density alterations at resting state in neuromyelitis optica patients[J]. Chin J Magn Reson Imaging, 2018, 9(1): 33-37. DOI: 10.12015/issn. 1674-8034. 2018. 01. 007.
- [16] 汪耀, 孙雅文, 徐群, 等. 皮质下血管性认知障碍的脑功能网络研究[J]. 中华行为医学与脑科学杂志, 2015, 24(8): 698-701. DOI: 10.3760/cma. j. issn. 1674-6554. 2015. 08. 007.
Wang Y, Sun YW, Xu Q, et al. Analysis of functional brain networks in patients with subcortical vascular cognitive impairment [J]. Chin J Behav Med Brain Sci, 2015, 24(8): 698-701. DOI: 10.3760/cma. j. issn. 1674-6554. 2015. 08. 007.
- [17] 范金, 曾露瑶, 钟冬灵, 等. 功能性近红外光谱技术的 10 年发展: CiteSpace 知识图谱可视化分析[J]. 中国组织工程研究, 2021, 25(23): 3711-3717.
Fan J, Zeng LY, Zhong DL, et al. Development of functional near-infrared spectroscopy in recent 10 years: a visual analysis using CiteSpace [J]. Chin J Tissue Engineer Res, 2021, 25(23): 3711-3717.
- [18] 傅东红, 胡甸萍, 浦丽娟, 等. 视觉诱发电位和视网膜电图对高度近视眼视功能的评估[J]. 中国临床康复, 2004, 8(25): 5269-5271. DOI: 10.3321/j. issn. 1673-8225. 2004. 25. 044.
Fu DH, Hu DP, Pu LJ, et al. Evaluation of visual function in patients with high myopia by using flash electroretinogram and pattern visual evoked reponse[J]. Chin J Clin Rehabil, 2004, 8(25): 5269-5271. DOI: 10.3321/j. issn. 1673-8225. 2004. 25. 044.
- [19] Kader MA. Electrophysiological study of myopia [J]. Saudi J Ophthalmol, 2012, 26(1): 91-99. DOI: 10.1016/j.sjopt. 2011. 08. 002.
- [20] Ho WC, Kee CS, Chan HH. Myopia progression in children is linked with reduced foveal mfERG response[J]. Invest Ophthalmol Vis Sci, 2012, 53(9): 5320-5325. DOI: 10.1167/iov. 12-10185.
- [21] Ho WC, Kee CS, Chan HH. Myopic children have central reduction in high contrast multifocal ERG response, while adults have paracentral reduction in low contrast response[J]. Invest Ophthalmol Vis Sci, 2012, 53(7): 3695-3702. DOI: 10.1167/iov. 11-9379.
- [22] 聂孝敏, 冯萍. 病理性近视的眼底损害与屈光度分析[J]. 中国中医眼科杂志, 2005, 15(2): 93-94. DOI: 10.3969/j. issn. 1002-4379. 2005. 02. 013.
- [23] 王舜杏, 美国华, 詹宇坚. 儿童和青少年高度近视眼底损害与屈光度的关系[J]. 中国中医眼科杂志, 2001, 11(1): 20-22. DOI: 10.3969/j. issn. 1002-4379. 2001. 01. 007.
Wang SX, Guan GH, Zhan YJ. A study on the relationship between fundus damage and diopter in children and youths with high myopia [J]. J Tradit Chin Ophthalmol, 2001, 11(1): 20-22. DOI: 10.3969/j. issn. 1002-4379. 2001. 01. 007.
- [24] 李倩倩, 刘小琴, 陈溪萍. 模式翻转视诱发电位 P100 与视敏度的相关性[J]. 法医学杂志, 2011, 27(2): 91-93, 101. DOI: 10.3969/j. issn. 1004-5619. 2011. 02. 003.
Li QQ, Liu XQ, Chen XP. Correlation of pattern reversal visual evoked potentials P100 with visual acuity [J]. J Foren Med, 2011, 27(2): 91-93, 101. DOI: 10.3969/j. issn. 1004-5619. 2011. 02. 003.
- [25] 石一宁, 郑红, 陈建华. 高度近视眼多焦视网膜电图和传统视觉电生理改变与中低度近视的对比研究[J]. 国际眼科杂志, 2007, 7(4): 1042-1045. DOI: 10.3969/j. issn. 1672-5123. 2007. 04. 047.
Shi YN, Zheng H, Chen JH. A comparative study of M-ERG and ERG changes between high and lower myopia eyes with high risk factor of retinal detachment [J]. Int Eye Sci, 2007, 7(4): 1042-1045. DOI: 10.3969/j. issn. 1672-5123. 2007. 04. 047.
- [26] Wang Q, Wu Y, Liu W, et al. Dominant eye and visual evoked potential of patients with myopic anisometropia [J/OL]. Biomed Res Int, 2016, 2016: 5064892 [2022-09-23]. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4909916/. DOI: 10.1155/2016/5064892.
- [27] 钟文东. 病理性近视眼黄斑区的图形视觉诱发电位特点[J]. 中国眼耳鼻喉科杂志, 2000, 5(2): 11-13. DOI: 10.14166/j. issn. 1671-2420. 2000. 02. 009.
Zhong WD. The characteristics of the pattern-visual evoked potential in the pathologic myopia eye's macular [J]. Chin J Ophthalmol Otorhinolaryngol, 2000, 5(2): 11-13. DOI: 10.14166/j. issn. 1671-2420. 2000. 02. 009.
- [28] Wang X, Li RS, Wei YH, et al. Applications of the isolated-check visual evoked potential in primary open angle glaucoma with or without high myopia [J]. Int J Ophthalmol, 2021, 14(5): 704-713. DOI: 10.18240/ijo. 2021. 05. 10.
- [29] 芮德源, 朱雨岚, 陈立杰. 临床神经解剖学[M]. 2 版. 北京: 人民卫生出版社, 2015, 10: 379-554.
Rui DY, Zhu YL, Chen LJ. Clinical neuroanatomy [M]. 2nd Edition. Beijing: People's Medical Publishing House, 2015, 10: 379-554.
- [30] 周扬, 王健. 视皮层分区及其 fMRI 研究进展[J]. 现代生物医学进



- 展, 2006, 6(9): 79-81. DOI: 10. 3969/j. issn. 1673-6273. 2006. 09. 029.
- Zhou Y, Wang J. The functional organization of the visual cortex and progress from fMRI [J]. Prog Modern Biomed, 2006, 6(9): 79-81. DOI: 10. 3969/j. issn. 1673-6273. 2006. 09. 029.
- [31] Huang X, Hu Y, Zhou F, et al. Altered whole-brain gray matter volume in high myopia patients: a voxel-based morphometry study [J]. Neuroreport, 2018, 29(9): 760-767. DOI: 10. 1097/WNR. 0000000000001028.
- [32] 刘芸, 何花, 阎丽, 等. 低度近视青少年的脑视觉认知功能评估 [J]. 国际眼科杂志, 2020, 20(1): 9-15. DOI: 10. 3980/j. issn. 1672-5123. 2020. 1. 03.
- Liu Y, He H, Yan L, et al. Evaluation of cerebral visual functions in low myopic adolescents [J]. Int Eye Sci, 2020, 20(1): 9-15. DOI: 10. 3980/j. issn. 1672-5123. 2020. 1. 03.
- [33] Cheng Y, Huang X, Hu YX, et al. Comparison of intrinsic brain activity in individuals with low/moderate myopia versus high myopia revealed by the amplitude of low-frequency fluctuations [J]. Acta Radiol, 2020, 61(4): 496-507. DOI: 10. 1177/0284185119867633.
- [34] 胡裕翔, 周荃, 李宇平, 等. 应用静息态功能磁共振成像分数低频振幅技术研究中高度近视患者大脑活动的异常改变 [J]. 眼科新进展, 2017, 37(3): 239-243. DOI: 10. 13389/j. cnki. rao. 2017. 0060.
- Hu YX, Zhou Q, Li YP, et al. A resting-state fMRI study on brain functional activity changes in moderate and high myopia patients using fractional amplitude of low frequency fluctuation [J]. Rec Adv Ophthalmol, 2017, 37(3): 239-243. DOI: 10. 13389/j. cnki. rao. 2017. 0060.
- [35] Cheng Y, Yan L, Hu L, et al. Differences in network centrality between high and low myopia: a voxel-level degree centrality study [J]. Acta Radiol, 2020, 61(10): 1388-1397. DOI: 10. 1177/0284185120902385.
- [36] Hu YX, He JR, Yang B, et al. Abnormal resting-state functional network centrality in patients with high myopia: evidence from a voxel-wise degree centrality analysis [J]. Int J Ophthalmol, 2018, 11(11): 1814-1820. DOI: 10. 18240/ijo. 2018. 11. 13.
- [37] Zhai L, Li Q, Wang T, et al. Altered functional connectivity density in high myopia [J]. Behav Brain Res, 2016, 303: 85-92. DOI: 10. 1016/j. bbr. 2016. 01. 046.
- [38] 陈聪, 董红焕, 王思佳, 等. 高度近视静息态脑功能网络的拓扑结构改变 [J]. 放射学实践, 2019, 34(4): 392-398. DOI: 10. 13609/j. cnki. 1000-0313. 2019. 04. 006.
- Chen C, Dong HH, Wang SJ, et al. Topological changes of resting-state functional brain network in high myopia [J]. Radiol Pract, 2019, 34(4): 392-398. DOI: 10. 13609/j. cnki. 1000-0313. 2019. 04. 006.
- [39] Zhang XW, Dai RP, Cheng GW, et al. Altered amplitude of low-frequency fluctuations and default mode network connectivity in high myopia: a resting-state fMRI study [J]. Int J Ophthalmol, 2020, 13(10): 1629-1636. DOI: 10. 18240/ijo. 2020. 10. 18.
- [40] Mirzajani A, Sarlaki E, Kharazi HH, et al. Effect of lens-induced myopia on visual cortex activity: a functional MR imaging study [J]. AJNR Am J Neuroradiol, 2011, 32(8): 1426-1429. DOI: 10. 3174/ajnr. A2551.
- [41] Elbel GK, Kaufmann C, Schaefer S, et al. Refractive anomalies and visual activation in functional magnetic resonance imaging (fMRI): a versatile and low-cost MR-compatible device to correct a potential confound [J]. J Magn Reson Imaging, 2002, 15(1): 101-107. DOI: 10. 1002/jmri. 10031.
- [42] Zhang Y, Lin X, Bi A, et al. Changes in visual cortical function in moderately myopic patients: a functional near-infrared spectroscopy study [J]. Ophthalmic Physiol Opt, 2022, 42(1): 36-47. DOI: 10. 1111/opo. 12921.
- [43] 曹宁, 张颖, 毕爱玲, 等. 病理性近视患者空间频率相关的大脑视觉皮层功能活动变化 [J]. 眼科新进展, 2021, 41(5): 428-433. DOI: 10. 13389/j. cnki. rao. 2021. 0089.
- Cao N, Zhang Y, Bi AL, et al. Spatial frequency-related function of visual cortex in patients with pathologic myopia [J]. Rec Adv Ophthalmol, 2021, 41(5): 428-433. DOI: 10. 13389/j. cnki. rao. 2021. 0089.
- [44] 黄煜峰, 周逸峰. 基于功能连接的屈光参差性弱视觉网络损伤研究 [J]. 北京生物医学工程, 2018, 37(3): 246-251. DOI: 10. 3969/j. issn. 1002-3208. 2018. 03. 005.
- Huang YF, Zhou YF. Research on visual network of anisotropic amblyopia with functional connectivity [J]. Beijing Biomed Engineer, 2018, 37(3): 246-251. DOI: 10. 3969/j. issn. 1002-3208. 2018. 03. 005.
- [45] Wu KR, Yu YJ, Tang LY, et al. Altered brain network centrality in patients with adult strabismus with amblyopia: a resting-state functional magnetic resonance imaging (fMRI) study [J/OL]. Med Sci Monit, 2020, 26: e925856 [2022-09-23]. https://www. ncbi. nlm. nih. gov/pmc/articles/PMC7693780/. DOI: 10. 12659/MSM. 925856.
- [46] 王浩然, 张希, 王天月, 等. 屈光参差性弱视觉儿童脑网络功能连接的 fMRI 研究 [J]. 天津医科大学学报, 2018, 24(6): 484-488.
- Wang HR, Zhang X, Wang TY, et al. fMRI study of brain functional connectivity in children with anisotropic amblyopia [J]. J Tianjin Med Univer, 2018, 24(6): 484-488.
- [47] 强薇, 张小娟, 曹楠珺, 等. 近视患者光学相干断层成像与多焦视网膜电图的变化 [J]. 国际眼科杂志, 2017, 17(6): 1073-1076. DOI: 10. 3980/j. issn. 1672-5123. 2017. 6. 16.
- Qiang W, Zhang XJ, Cao NJ, et al. Change of optical coherence tomography and multifocal electroretinography in myopia patients [J]. Int Eye Sci, 2017, 17(6): 1073-1076. DOI: 10. 3980/j. issn. 1672-5123. 2017. 6. 16.
- [48] Wu H, Chen W, Zhao F, et al. Scleral hypoxia is a target for myopia control [J/OL]. Proc Natl Acad Sci U S A, 2018, 115(30): E7091-E7100 [2022-09-30]. https://pubmed. ncbi. nlm. nih. gov/29987045/. DOI: 10. 1073/pnas. 1721443115.
- [49] Zhang S, Zhang G, Zhou X, et al. Changes in choroidal thickness and choroidal blood perfusion in guinea pig myopia [J]. Invest Ophthalmol Vis Sci, 2019, 60(8): 3074-3083. DOI: 10. 1167/iov. 18-26397.
- [50] Wu H, Zhang G, Shen M, et al. Assessment of choroidal vascularity and choriocapillaris blood perfusion in anisomyopic adults by SS-OCT/OCTA [J/OL]. Invest Ophthalmol Vis Sci, 2021, 62(1): 8 [2022-09-30]. https://www. ncbi. nlm. nih. gov/pmc/articles/PMC7797932/. DOI: 10. 1167/iov. 62. 1. 8.
- [51] Huang F, Huang S, Xie R, et al. The effect of topical administration of cyclopentolate on ocular biometry: an analysis for mouse and human models [J/OL]. Sci Rep, 2017, 7(1): 9952 [2022-09-30]. https://www. ncbi. nlm. nih. gov/pmc/articles/PMC5577254/. DOI: 10. 1038/s41598-017-09924-5.
- [52] Richter HO, Costello P, Sponheim SR, et al. Functional neuroanatomy of the human near/far response to blur cues: eye-lens accommodation/vergence to point targets varying in depth [J]. Eur J Neurosci, 2004, 20(10): 2722-2732. DOI: 10. 1111/j. 1460-9568. 2004. 03743. x.
- [53] Mirzajani A, Ghorbani M, Rasuli B, et al. Effect of induced high myopia on functional MRI signal changes [J]. Phys Med, 2017, 37: 32-36. DOI: 10. 1016/j. ejmp. 2017. 04. 004.
- [54] Chan RV, Trobe JD. Spasm of accommodation associated with closed head trauma [J]. J Neuroophthalmol, 2002, 22(1): 15-17. DOI: 10. 1097/00041327-200203000-00005.
- [55] Shi J, Zhao J, Zhao F, et al. Ciliary muscle morphology and accommodative lag in hyperopic anisotropic children [J]. Int Ophthalmol, 2020, 40(4): 917-924. DOI: 10. 1007/s10792-019-01264-9.

(收稿日期: 2022-10-04 修回日期: 2023-06-25)

(本文编辑: 刘艳 施晓萌)