

- dimensions[J]. Scientific World J, 2016,2016:4697467.
- 30 赵 红,杨智桥. 双骀垫功能矫治器及直丝弓固定矫治器联合治疗安氏Ⅱ类1 分类错骀畸形的效果研究[J]. 中国美容医学, 2013,22(14):1530-1533.
 - 31 孙 琦. AngleⅡ~1 错骀二期矫治减数对上气道稳定性的影响[D]. 石家庄:河北医科大学,2017.
 - 32 Creekmore TD. Where teeth should be positioned in the face and jaws and how to get them there[J]. J Clin Orthod, 1997, 31(9): 586-608.
 - 33 周 嫣,方志欣,黄敏方,等. Ⅰ类Ⅱ类均角骨面型拔牙矫治后上气道矢状径结构变化的初步临床观察[J]. 实用口腔医学杂志, 2012,28(4):509-513.
 - 34 陈钰文,金 婕,王 健,等. 深覆盖拔牙矫治后舌根、舌骨位置及上气道矢状径的变化分析[J]. 现代口腔医学杂志,2016,30(2):85-88.
 - 35 陈金东,朱 敏,聂 萍. 掩饰性治疗对成人骨性Ⅱ类错骀患者上气道及周围结构影响的研究[J]. 口腔医学,2012,32(2):73-76.
 - 36 傅露斯,俞洋洋,马丹丹,等. 安氏Ⅱ类1 分类成年女性患者强支抗内收前牙后上气道及周围结构变化的研究[J]. 中华口腔正畸学杂志,2016,23(4):216-223.
 - 37 Zhang J, Chen G, Li W, et al. Upper airway changes after orthodontic extraction treatment in adults: a preliminary study using cone beam computed tomography [J]. PLoS One, 2015, 10(11): e0143233.
 - 38 Keum BT, Choi SH, Choi YJ, et al. Effects of bodily retraction of mandibular incisors versus mandibular setback surgery on pharyngeal airway space: A comparative study[J]. Korean J Orthod, 2017,47(6):344-352.
 - 39 Hu Z, Yin X, Liao J, et al. The effect of teeth extraction for orthodontic treatment on the upper airway: a systematic review[J]. Sleep Breath,2015,19(2):441-451.
 - 40 Haddad S, Kerbrat JB, Schouman T, et al. Effect of dental arch length decrease during orthodontic treatment in the upper airway development. A review[J]. Orthod Fr,2017,88(1):25-33.
 - 41 Chang MK, Sears C, Huang JC, et al. Correlation of airway volume with orthognathic surgical movement using cone-beam computed tomography[J]. J Oral Maxillofac Surg,2015,73(12 Suppl):S67-S76.
 - 42 Jiang C, Yi Y, Jiang C, et al. Pharyngeal airway space and hyoid bone positioning after different orthognathic surgeries in skeletal class Ⅱ patients[J]. J Oral Maxillofac Surg,2017,75(7):1482-1490.
 - 43 Tan SK, Tang ATH, Leung WK, et al. Three-dimensional pharyngeal airway changes in dento-skeletal class Ⅱ patients after two-jaw orthognathic surgery with segmentation—a pilot study[J]. J Stomatol Oral Maxillofac Surg,2018,119(6):461-468.
 - 44 Louro RS, Calasans-Maia JA, Mattos CT, et al. Three-dimensional changes to the upper airway after maxillomandibular advancement with counterclockwise rotation: a systematic review and meta-analysis[J]. Int J Oral Maxillofac Surg,2018,47(5):622-629.
- [收稿日期 2019-12-24][本文编辑 韦 颖 潘洪平]

本文引用格式

聂改云,胡红云,梁 蓉,等. 骨性Ⅱ类错骀畸形对上气道形态影响的研究进展[J]. 中国临床新医学,2020,13(7):737-742.

新进展综述

微扫视的神经生理学研究现状

赵武校, 甘 露(综述), 蓝方方(审校)

基金项目: 广西医疗卫生适宜技术开发与推广应用项目(编号:S201639); 广西卫健委科研课题(编号:Z2016600); 广西壮族自治区人民医院科学基金项目

作者单位: 530021 南宁,广西壮族自治区人民医院视光科(广西视光中心)

作者简介: 赵武校(1979-),男,医学硕士,副主任医师,研究方向:视知觉学习与弱视。E-mail:zhaowx1210@163.com

通讯作者: 蓝方方(1974-),女,医学硕士,主任医师,研究方向:视知觉学习与屈光矫正。E-mail:87764803@qq.com

【摘要】近二十年来随着科学技术的进步,人们在微扫视的神经基础、生理效应以及认知的相互关系等方面有了重要发现。微扫视研究已成为视觉神经科学发展最快的研究领域之一,微扫视不仅是认识视觉本质的一种工具,而且对于弱视的基础和临床研究具有重要意义。该文就微扫视的神经生理学研究现状作一综述。

【关键词】微扫视; 神经基础; 生理效应; 弱视

【中图分类号】R 770.4 【文献标识码】A 【文章编号】1674-3806(2020)07-0742-05

doi:10.3969/j.issn.1674-3806.2020.07.25

Research status of neurophysiology of microsaccades ZHAO Wu-xiao, GAN Lu, LAN Fang-fang. Department of Optometry, the People's Hospital of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Nanning 530021, China

[Abstract] Over the past two decades, with the progress of science and technology, great findings of microsaccades in neural basis and physiological effects and its relationship with cognition have been achieved. The research of microsaccades has been one of the most rapid growing fields in visual neuroscience. It is not only a tool to understand the nature of vision, but also with great significance of both basic and clinical research in amblyopia. In this paper, we review the research status of neurophysiology of microsaccades.

[Key words] Microsaccades; Neural basis; Physiological effects; Amblyopia

众所周知,当人眼注视静止不动的视觉场景时,光感受器细胞对于恒定的光刺激容易适应,并会使视网膜上的影像褪色。为避免“视而不见”,人类以及许多脊椎动物的眼球,都采取注视性眼动的策略来防止这一生理现象^[1]。自 20 世纪 90 年代晚期以来,高速眼球追踪技术的发展使科研人员对注视性眼球运动,特别是微扫视的本质有了更多认识。本文将从神经生理学角度对微扫视领域的研究现状进行阐述,期望为今后开展相关工作提供参考。

1 微扫视运动的基本属性及其产生的神经学基础

1.1 微扫视运动的概念和基本属性 眼球运动对于形成连续、完整的视觉,认识我们周围的世界是非常重要的。其中,注视性眼球运动是一类微观的、不易察觉的眼球运动形式,对于正常视觉极其重要。它介于大的眼球运动形式之间,当我们注视特定目标时就会出现注视性眼球运动。经典研究揭示,在注视性眼球运动缺失的条件下,神经适应现象会跟着出现,此时被试者会发生“功能性变盲”——其所注视的、静止的目标会变得不可见^[2~4]。为了优化对静止目标的知觉,我们的双眼必须产生非常小幅度的运动(注视性眼球运动),主动刷新视网膜的输入信号来阻止知觉褪色现象。注视性眼球运动包括微扫视、漂移和震颤三种形式。微扫视是其中运动幅度最大和运动速度最快的一种形式,人眼的发生频率为 1~2 次/s^[4]。注视性眼球运动形成的运动轨迹非常飘忽不定,形似随意游走同时又具统计特性^[5,6]。微扫视运动埋藏于其他两种缓慢的运动形式(漂移和震颤)之中,其轨迹像弹道样弹跳(幅度 < 1°),大体上呈一小段线性运动。微扫视运动通过切换视网膜影像对抗神经适应现象,来保持注视时的可见性,并使视觉神经元对静止的刺激产生神经反应^[4,7,8]。目前普遍认为微扫视眼球运动是一种双眼的运动,并且它们在双眼间有着高度的同一性——在峰值速度与运动幅度间存在显著相关性表明双眼有着共同的起源^[9]。此外,微扫视眼球运动在水平与垂直方向上有着明确的偏向性。垂直方向在人类中

发生的频率较少,而斜向上的运动则更加罕见^[10]。

1.2 微扫视产生的神经学基础 数十年来,有关扫视和微扫视起源的实验证据一直非常缺乏。早期主要的神经生理学研究见于 Van Gisbergen 等^[11,12]报道的“当猴眼在扫视和微扫视时,上丘下流和展神经核附近的运动神经元呈激活状态”,以及 Munoz 和 Wurtz^[13]报道的“上丘侧柱(代表黄斑中心凹对应的目标位置)司微扫视功能的神经元和上丘尾区(代表周边视网膜对应的目标位置)司扫视功能的神经元会同样活跃”的重要发现。这些早期研究构成了微扫视与扫视共享生成部位的主要生理学证据。研究显示,微扫视的产生和扫视运动具有共同的神经起源^[14~16],上丘神经元的电活动是影响扫视运动^[16]和微扫视运动发生概率空间分布的主要原因^[15]。微扫视过程中,可观察到脑桥中缝的止神经元(omnipause neurons)活动降低^[17,18],并发现上丘存在一个连续性区域司眼球扫视运动的方向和幅度,它可移行至微扫视功能区^[15](这与之前的观察结果^[13]一致,微扫视功能区定位在上丘侧柱)。微扫视的神经活动有时也可发展成小幅度的自主性扫视运动,这与行为学证据即存在“微扫视-扫视连续区(microsaccade-saccade continuum)”的观点相一致:上丘侧柱失活可导致微扫视率降低^[15];小脑顶部眼球运动区域的单侧失活会影响视觉引导的扫视^[19,20]和微扫视^[21]指标。

1.3 微扫视产生的机制 尽管有确凿的证据显示微扫视和扫视具有共同的起源,但导致微扫视产生的机制尚未明确^[22]。当前的研究结果支持“微扫视运动是由神经噪声和固视偏差联合作用机制触发”的观点,二者所扮演作用的大小取决于固视偏差的大小^[22]。例如,当被试偏离凝视目标的范围达到或超过 0.5°时,校正性微扫视将会纠正这一偏差^[23,24];而当偏离范围小或不明显时,则由神经噪声来触发微扫视运动^[23]。针对微扫视产生机制的研究有助于澄清微扫视在注视性眼位校正中的作用。微扫视是由上丘电活动的波动所激发的,这会导致注视发

生偏差,但如果偏差足够大的话,又会激发产生校正性的微扫视运动^[22]。与这一观点相一致,大幅度的微扫视往往会伴随有相反方向的微扫视运动,产生很突然的方波跃动现象(square-wave jerks, SWJs)^[23]。微扫视同时也能校正眨眼引起的注视偏差^[25]。

2 微扫视运动的生理效应与功能

既往研究发现微扫视与视知觉^[8,26]、注意力^[27,28]以及认知^[29]等多方面关系密切,因而对于神经科学与眼科学疾病可能具有潜在的临床价值^[30]。

2.1 微扫视的生理效应 21 世纪初针对单个神经元进行的研究发现,在觉醒状态下,受微扫视眼动的激发,猴的 V1 区和外侧膝状体区放电频率增加,常呈现出爆发式动作电位。目前,针对微扫视所激发神经活动的观察已经拓展到外纹状皮层的多个区域。通过对微扫视所诱发的神经反应进行检测,人们对微扫视的生理效应有了以下几点认识^[31,32]:其一,大量源自视网膜区域的记录结果显示,当静止刺激存在时,微扫视诱发的神经活动会增加。这些增加量与微扫视介导的、对应于静止可视目标的视网膜感受野移位相一致。而相对于静止感受野的等量目标运动所产生的神经反应增加,可能与之相当。因此,视网膜感受野与视觉刺激的相互作用可以解释微扫视驱动的视网膜活动,后者通过激活视网膜-外侧膝状体通路将信息传递至视皮层区域。其二,当刺激不存在时,或者全视野存在均一刺激时,微扫视激发的反应常导致神经活动降低。这可能是微扫视生成环路或非经典感受野的视觉刺激所激发的脑活动产物。其三,微扫视激发的神经活动增加量往往大于微扫视激发的神经活动降低量。尽管不同研究之间存在差异,但微扫视调节视网膜区域神经活动的模式主要是通过视网膜运动和视网膜外的反应,而且这些反应通常比刺激视网膜产生的视觉反应要小些。

2.2 微扫视的功能与相关机制 微扫视的生理功能曾引起争议,究其原因可能与早期研究局限于实验室的非自然环境,以及长期缺乏对视线进行空间定位的技术有关。目前的证据主要集中在以下三大假说:(1)注视位置的控制。实验发现,微扫视有利于较长时间保持精确注视于某一点;精准注视于某一点(4')会比注视均一区域时产生更高频率、更小幅度的微扫视;精准注视时,漂移与随后的微扫视是反方向的;微扫视频率与漂移速度正相关、微扫视幅度与漂移曲线负相关^[33]。这些特点说明微扫视是注视性眼动策略的组成部分。神经生理学方面的观

点认为,微扫视可抑制扫视的生成,阻止扫视移向视野周边的目标。在注视过程中,上丘吻侧的深层组织保持持续的神经活动,当注视线索发生偏移时神经活动减弱、抑制减轻,使得扫视移向视野中的其他目标。与扫视的生成相似,上丘吻侧用群编码的方式对注视稳定性进行控制,微扫视是丘脑活动暂时失衡的结果,注视偏差会导致这种失衡并引起微扫视生成,最终恢复新的平衡^[33]。(2)阻止视觉感知的消退。如前所述,微扫视通过切换视网膜影像对抗神经适应现象,来保持注视时视觉感知的连续性。针对该学说存在争论^[33]:①目前的眼球追踪系统在不限头部活动的情况下其分辨率为 1',自然环境中视网膜影像的运动速度达到 2°/s,所以自然注视条件下视知觉褪色缺乏现实意义;②在特定情况下,眼球运动被抑制而头部可活动时并未体验到视知觉褪色现象,但在躯体完全麻痹时反而可发生视知觉褪色现象;③经历数秒至数分钟的注视稳定刺激时可检测到对比敏感度发生衰减,但在简短地注视刺激目标时(与自然注视相当)却并未被观察到此种变化;④改变刺激的对比度、频率或减少视网膜影像的移动,均未引起微扫视频率增加。以上实验证据提示在简短的自然注视时,视网膜影像褪色并不特别重要;此外,将实验室研究结果外推到自然环境中时需要谨慎。(3)探查精细的空间细节。既往通过穿针实验或瞄准实验发现,微扫视频率是减少的,并据此推断微扫视不利于保持清晰视力。但该结论并不严谨:①在执行精细的视觉运动任务接近结束时微扫视频率减少并不意味着微扫视在此之前未提供有益的帮助信息;②以往在非自然场景中得到的维持注视时较高的微扫视频率,不宜作为自然场景中微扫视的基线值;③单就微扫视频率来判断微扫视是否提供有益的功能并非最佳途径,而通过检测微扫视将视觉刺激如何精准地投射到黄斑中心凹应是最直接可靠的方式。为此,Rucci 和 Poletti^[34]研发出了自带注视校准程序的高清眼球追踪系统,该系统可以检测在执行精细的视觉运动任务(比如穿针)过程中微扫视是如何移动注视中心的。通过虚拟现实环境更好地控制可变因素——实验任务要求被试操控手柄来平移细小的横条(“线”),将其穿入静止竖条中央的小孔(“针眼”);与真实的穿针类似,设定刺激目标 < 1° 视角,确保其影像能完全投射到黄斑中心凹范围内。在此基础上连续开展了一组实验。结果证实,此实验过程中微扫视平均频率低于静止注视时的频率,且在接近实验完成时微扫视频率也

是降低的;但在实验初始阶段,即被试在调整线、针眼对位过程中微扫视很频繁,其频率比自由场景注视时所检测到的微扫视频率高 5 倍。接着,为测试微扫视的功能,研究者将实验任务进行重新设定,要求被试:(a)当“线”非常接近“针眼”但尚未穿入时即刻终止;(b)控制横条(“线”)平移幅度、匀速穿过竖条中央小孔(“针眼”)。该设定可确保被试对横条的位置调整是基于错位的判断、并可排除任务完成前的注意力变化。实验检测到:当“线”接近“针眼”时,微扫视幅度逐渐变小且越来越频繁;绝大多数注视成簇落在“线”上或者“针眼”上,极少超出这两个区域。这说明微扫视以非常精准的方式将视线转向注视目标,很少落在目标无关区域。随后,通过评估微扫视后即刻进行的“线”、“针眼”位置调整概率,以及改变线的位置后即刻发生的微扫视概率,对微扫视与操控横条平移之间的潜在关系进行分析发现,每次微扫视在“线”与“针眼”之间转换后,被试都会重新对位。这说明微扫视是为了判断“线”与“针眼”的对位关系,即被试利用微扫视从视觉场景中获取有用信息。如前所述,实验设定的刺激大小已足以确保其被注视时影像完全投射到黄斑中心凹内,但在执行视觉任务过程中仍然可检测到被试的微扫视。从解剖学角度分析,视锥细胞密度无论是在黄斑中心凹之外还是之内,均随偏心程度的增加而降低;其中,视锥细胞高密度区范围 $<0.032^{\circ}$ ^[35]。所以,以上实验证据支持黄斑中心凹存在一个特殊的狭小区域,微扫视可能是优先将注视目标精准投影到该区域(或类似于优选注视区)以保持高清晰视力,以利于空间细节辨认。注视性眼球运动受多个脑区神经机制的控制。上丘和小脑中后部共同决定注视位置的保持,以及是否启动扫视和追随运动来转向其他位置。其中,注视位置的保持依赖于上丘的视网膜拓扑图上目标相关活动的平衡,以及来自小脑中后部的调节信号。微扫视作为最大的注视性眼动成分,与扫视共享神经机制的控制^[36]。

3 微扫视研究带给弱视诊疗的启示

在视觉活动中,眼球运动系统必须适时校正注视性眼动才能形成清晰、连续、稳定的视觉,因为眼动过少会导致视知觉褪色,而眼动过多则会导致视觉模糊或不稳定。如果注视性眼球运动受损将会扰乱这一精细的平衡功能。因此,懂得如何区分正常注视和病理性注视可能有助于鉴别和早期诊断视觉系统疾病,以及对病情和治疗反应进行量化。一些研究已开始关注弱视患者在病理条件下微扫视的特

点。例如,弱视眼存在注视性眼球运动缺陷是公认的观点^[37~39]。作为注视性眼动最主要的成分,微扫视有 3 个相对稳定、较为特异的参数:频率、幅度和方向性。高速眼动追踪系统已发现屈光参差性弱视患者的弱视眼在单眼注视时会出现微扫视频率下降、幅度增加的现象,此变化与弱视严重程度相关^[38],但对侧眼的微扫视与正常眼比较差异无统计学意义($P > 0.05$)。因此,Shi 等^[40]建议将微扫视运动参数用于弱视眼动功能的客观评估。另有针对斜视性弱视的研究^[41]发现,当弱视眼受抑制情况发生改善、双眼黄斑同时注视目标(共轭)时,可观察到弱视眼注视稳定性的短暂性提高。

4 结语

综上所述,基于注视性眼动理论,对弱视眼微扫视的临床评估可能有助于判断弱视的临床转归。考虑到弱视复发的现象,弱视治疗不应止步于黄斑注视性质和视力的正常,而应该上升到注视性眼动正常或稳定的层面^[42]。这可能为弱视的临床和科研工作产生导向作用。

参考文献

- Martinez-Conde S, Macknik SL. Fixational eye movements across vertebrates: comparative dynamics, physiology, and perception[J]. *J Vis*, 2008, 8(14): 21–28.
- Riggs LA, Ratliff F. The effects of counteracting the normal movements of the eye[J]. *J Opt Soc Am*, 1952, 42:872–873.
- Ditchburn RW, Ginsborg BL. Vision with a stabilized retinal image[J]. *Nature*, 1952, 170(4314):36–37.
- Martinez-Conde S, Macknik SL, Hubel DH. The role of fixational eye movements in visual perception[J]. *Nat Rev Neurosci*, 2004, 5(3):229–240.
- Engbert R, Kliegl R. Microsaccades keep the eyes' balance during fixation[J]. *Psychol Sci*, 2004, 15(6):431–436.
- Shlesinger MF. Physics in the noise[J]. *Nature*, 2001, 411(6838): 641.
- Martinez-Conde S, Macknik SL, Hubel DH. Microsaccadic eye movements and firing of single cells in the striate cortex of macaque monkeys[J]. *Nat Neurosci*, 2000, 3(3):251–258.
- Martinez-Conde S, Macknik SL, Troncoso XG, et al. Microsaccades counteract visual fading during fixation[J]. *Neuron*, 2006, 49(2): 297–305.
- Collewijn H, Kowler E. The significance of microsaccades for vision and oculomotor control[J]. *J Vis*, 2008, 8(14):20–21.
- Bosman CA, Womelsdorf T, Desimone R, et al. A microsaccadic rhythm modulates gamma-band synchronization and behavior[J]. *J Neurosci*, 2009, 29(30): 9471–9480.
- Van Gisbergen JA, Robinson DA, Gielen S. A quantitative analysis of generation of saccadic eye movements by burst neurons[J]. *J Neurophysiol*, 1981, 45(3):417–442.

- 12 Otero-Millan J, Macknik SL, Langston RE, et al. An oculomotor continuum from exploration to fixation[J]. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 2013,110(15):6175-6180.
- 13 Munoz DP, Wurtz RH. Fixation cells in monkey superior colliculus. I. Characteristics of cell discharge[J]. *J Neurophysiol*, 1993, 70(2):559-575.
- 14 Rolfs M, Kliegl R, Engbert R. Toward a model of microsaccade generation; the case of microsaccadic inhibition[J]. *J Vis*, 2008, 8(11):5.1-23.
- 15 Hafed ZM, Goffart L, Krauzlis RJ. A neural mechanism for microsaccade generation in the primate superior colliculus[J]. *Science*, 2009, 323(5916):940-943.
- 16 Hafed ZM, Goffart L, Krauzlis RJ. Superior colliculus inactivation causes stable offsets in eye position during tracking[J]. *J Neurosci*, 2008, 28(32):8124-8137.
- 17 Van Horn MR, Cullen KE. Coding of microsaccades in three-dimensional space by premotor saccadic neurons[J]. *J Neurosci*, 2012,32(6):1974-1980.
- 18 Brien DC, Corneil BD, Fecteau JH, et al. The behavioural and neurophysiological modulation of microsaccades in monkeys[J]. *J Eye Movement Res*, 2009,3(2):1-12.
- 19 Goffart L, Chen LL, Sparks DL. Deficits in saccades and fixation during muscimol inactivation of the caudal fastigial nucleus in the rhesus monkey[J]. *J Neurophysiol*, 2004,92(6):3351-3367.
- 20 Robinson FR, Straube A, Fuchs AF. Role of the caudal fastigial nucleus in saccade generation. II. Effects of muscimol inactivation[J]. *J Neurophysiol*, 1993,70(5):1741-1758.
- 21 Guerrasio L, Quinet J, Büttner U, et al. Fastigial oculomotor region and the control of foveation during fixation[J]. *J Neurophysiol*, 2010,103(4):1988-2001.
- 22 Otero-Millan J, Macknik SL, Serra A, et al. Triggering mechanisms in microsaccade and saccade generation; a novel proposal[J]. *Ann N Y Acad Sci*, 2011,1233:107-116.
- 23 Otero-Millan J, Serra A, Leigh RJ, et al. Distinctive features of saccadic intrusions and microsaccades in progressive supranuclear palsy[J]. *J Neurosci*, 2011,31(12):4379-4387.
- 24 Comsweet TN. Determination of the stimuli for involuntary drifts and saccadic eye movements[J]. *J Opt Soc Am*, 1956,46(11):987-993.
- 25 Khazali MF, Pomper JK, Thier P. Blink associated resetting eye movements (BARMs) are functionally complementary to microsaccades in correcting for fixation errors[J]. *Sci Rep*, 2017,7(1):16823.
- 26 Hafed ZM, Chen CY, Tian X. Vision, Perception, and Attention through the Lens of Microsaccades: Mechanisms and Implications[J]. *Front Syst Neurosci*, 2015,9:167.
- 27 Meyberg S, Sinn P, Engbert R, et al. Revising the link between microsaccades and the spatial cueing of voluntary attention[J]. *Vision Res*, 2017, 133:47-60.
- 28 Xue L, Huang D, Wang T, et al. Dynamic modulation of the perceptual load on microsaccades during a selective spatial attention task[J]. *Sci Rep*, 2017, 7(1):16496.
- 29 Piras A, Raffi M, Persiani M, et al. Effect of heading perception on microsaccade dynamics[J]. *Behav Brain Res*, 2016, 312:246-252.
- 30 Martinez-Conde S. Fixational eye movements in normal and pathological vision[J]. *Prog Brain Res*, 2006, 154:151-176.
- 31 Snodderly DM. A physiological perspective on fixational eye movements[J]. *Vision Res*, 2016, 118:31-47.
- 32 Martinez-Conde S, Otero-Millan J, Macknik SL. The impact of microsaccades on vision: towards a unified theory of saccadic function[J]. *Nat Rev Neurosci*, 2013, 14(2):83-96.
- 33 Poletti M, Rucci M. A Compact Field Guide to the Study of Microsaccades: Challenges and Functions[J]. *Vision Res*, 2016, 118:83-97.
- 34 Rucci M, Poletti M. Control and Functions of Fixational Eye Movements[J]. *Annu Rev Vis Sci*, 2015, 1:499-518.
- 35 Curcio CA, Sloan KR, Kalina RE, et al. Human photoreceptor topography[J]. *J Comp Neurol*, 1990, 292(4):497-523.
- 36 Krauzlis RJ, Goffart L, Hafed ZM. Neuronal control of fixation and fixational eye movements[J]. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, 2017,372(1718). pii: 20160205.
- 37 Chung ST, Kumar G, Li RW, et al. Characteristics of fixational eye movements in amblyopia: Limitations on fixation stability and acuity[J]. *Vision Res*, 2015,114:87-99.
- 38 Shaikh AG, Otero-Millan J, Kumar P, et al. Abnormal Fixational Eye Movements in Amblyopia[J]. *PLoS One*, 2016, 11(3):e0149953.
- 39 Otero-Millan J, Macknik SL, Martinez-Conde S. Fixational eye movements and binocular vision[J]. *Front Integr Neurosci*, 2014, 8:52.
- 40 Shi XF, Xu LM, Li Y, et al. Fixational saccadic eye movements are altered in anisometropic amblyopia[J]. *Restor Neurol Neurosci*, 2012, 30(6):445-462.
- 41 Raveendran RN, Babu RJ, Hess RF, et al. Transient improvements in fixational stability in strabismic amblyopes following bifoveal fixation and reduced interocular suppression[J]. *Ophthalmic Physiol Opt*, 2014,34(2):214-225.
- 42 Alexander RG, Macknik SL, Martinez-Conde S. Microsaccade Characteristics in Neurological and Ophthalmic Disease[J]. *Front Neurol*, 2018, 9:144.

[收稿日期 2018-05-22][本文编辑 韦颖 潘洪平]

本文引用格式

赵武校,甘露,蓝方方.微扫视的神经生理学研究现状[J].中国临床新医学,2020,13(7):742-746.