

## · 综 述 ·

## 单眼视功能损害对双眼视影响的研究进展

檀思蕾<sup>1,2</sup>, 陈捷敏<sup>2</sup>, 王 萌<sup>2</sup>, 周 姝<sup>2</sup>, 夏文涛<sup>2</sup>

(1. 苏州大学医学部法医学系, 江苏 苏州 215123; 2. 司法鉴定科学研究院 上海市法医学重点实验室 上海市司法鉴定专业技术服务平台, 上海 200063)

**摘要:** 双眼视是指在大脑高级中枢把来自两眼的视觉信号进行分析, 综合成一个完整的、具有立体感知觉印象的过程。在此过程中双眼相互影响使信号传出发生改变, 称为双眼相互作用。通过一系列主观及客观实验证实双眼相互作用大致可以分为增强、平均与抑制三种形式, 并且不同视觉状态下双眼相互作用的形式表现不同。日常生活中通常通过双眼相互作用对视觉信号进行加工, 从而使双眼视与单眼视之间存在一定的差异。单眼视功能损害后可影响该差异的程度, 从而影响双眼视。法医学鉴定工作者有必要对此深入研究, 更全面地了解单眼视功能损害对视觉功能的实际影响程度。本文就单眼视功能损害对双眼视影响的机制、研究方法以及在法医学中的应用前景进行综述。

**关键词:** 法医学; 视觉, 双眼; 综述; 视力损伤者; 视觉, 单眼; 视觉障碍

中图分类号: DF795.1 文献标志码: A doi: 10.3969/j.issn.1004-5619.2018.01.013

文章编号: 1004-5619(2018)01-0067-06

## Research Progress of the Effects of Monocular Visual Impairment on Binocular Vision

TAN Si-lei<sup>1,2</sup>, CHEN Jie-min<sup>2</sup>, WANG Meng<sup>2</sup>, ZHOU Shu<sup>2</sup>, XIA Wen-tao<sup>2</sup>

(1. Department of Forensic Medicine, Medical College of Soochow University, Suzhou 215123, China; 2. Shanghai Key Laboratory of Forensic Medicine, Shanghai Forensic Service Platform, Academy of Forensic Science, Shanghai 200063, China)

**Abstract:** Binocular vision refers to a progress of analysing and integrating the binocular visual signals into a whole and three-dimensional sensory perception by higher nerve centre. In this process, the interaction between the two eyes results in the changes of output signal, which is called binocular interaction. Through a series of subjective and objective experiments, it can be concluded that binocular interaction can be divided into three types: facilitation, summation and suppression, and the forms of binocular interaction in different visual states are different. In general, the visual signal is processed by binocular interaction, so that there are some differences between binocular vision and monocular vision. The extent of the difference can be affected by the damage of monocular vision and then affects the binocular vision. Thus, it is necessary for forensic scientists to further study the effects of the monocular visual impairment on visual function. Based on relevant data, this paper reviews the mechanism of the monocular visual impairment in binocular vision, the research methods and the application prospect in forensic science.

**Keywords:** forensic medicine; vision, binocular; review; visually impaired persons; vision, monocular; vision disorders

人类双眼视是指外界物体的形象分别落在两眼视网膜对应点上(主要指黄斑部), 图形信息转变为电信号沿视觉知觉系统传入大脑, 大脑高级中枢分析来

自两眼的视觉信号, 综合成一个完整的、具有立体感知觉印象的过程, 又称双眼单视。双眼视从低级到高级可分为同时知觉、融合、立体视觉三个层次。在这个过程中, 大脑皮质神经元通过调节双眼相互作用, 使双眼视与单眼视之间存在一定差异。单眼视功能损害可能改变双眼相互作用的形成, 从而影响双眼视。

## 1 双眼相互作用概述

### 1.1 定义及分类

双眼相互作用是指视觉系统中单眼视觉通路接

基金项目: “十三五”国家重点研发计划资助项目(2016YFC0800701); 上海市法医学重点实验室资助项目(17DZ2273200); 上海市司法鉴定专业技术服务平台资助项目(16DZ2290900)

作者简介: 檀思蕾(1993—), 女, 硕士研究生, 主要从事法医学临床研究; E-mail: TSLmail123456@163.com

通信作者: 夏文涛, 男, 研究员, 硕士研究生导师, 主要从事法医学临床研究与鉴定; E-mail: xiawentao629@163.com

受信号刺激后通过两眼相互影响使信号传出发生改变。这一概念的提出基于以下假设:如果两眼对同一刺激的反应是各自独立的,那么双眼反应即应为两眼反应之和。1903年,PIPER等在研究视网膜中心凹及外周的视锥、视杆细胞暗适应时间过程的实验中,发现双眼反应并不等于两眼反应之和,暗适应15 min后可出现明显的双眼增强,从而从生理学角度认识到存在双眼相互作用<sup>[1]</sup>。1965年,WOLF等<sup>[2]</sup>认为双眼相互作用存在解剖学基础:视神经纤维存在部分交叉,即每个颞侧视网膜的神经纤维终止于同侧半球,而鼻侧视网膜的神经纤维却终止于对侧半球,并且通过检测不同视网膜部位亮度阈值,发现双眼相互作用是通过增强相应的视网膜区域信号刺激或者改变两侧半球之间的不平等信号刺激分布而实现的。HUBEL等<sup>[3]</sup>探讨弱视形成机制时发现,单眼剥夺比双眼剥夺对视觉系统造成的损害更大,认为双眼到皮层的投射之间存在竞争性相互作用。随后,关于人类双眼视功能的电生理学及心理物理学研究<sup>[4-5]</sup>进一步证实,双眼相互作用大致可以分为增强、平均与抑制三种形式。

双眼增强作用是指在多种视觉检测任务中双眼表现优于单眼,呈现两眼相互合作的结果,通常发生于两眼敏感性相当的情况,可分为双眼完全增强及部分增强作用。完全增强作用是指双眼反应优于两眼分别反应的总和( $B \geq 2M$ ,  $B$ 为双眼反应, $M$ 为两眼平均反应);部分增强作用是指双眼反应优于两眼的平均反应,但是低于两眼的反应总和( $M < B < 2M$ )。双眼平均作用是指双眼反应等于单眼平均反应( $B = M$ ),是两眼平等作用的结果。双眼抑制作用指双眼反应低于单眼平均反应( $B < M$ ),是两眼竞争的结果,通常发生于一眼敏感性降低<sup>[4-5]</sup>。

## 1.2 形成机制

关于双眼相互作用形成机制的探讨,最主要的争论焦点在于是否存在神经系统参与。目前关于双眼相互作用的神经机制仍然不清楚。最初有学者<sup>[6]</sup>提出了“概率性叠加”学说,该学说认为增强作用是由于双眼刺激条件给单眼输入提供了两次引起适当反应的检测概率,并且这种提高程度是可以预先估算的。若双眼表现优于“概率总和”的预期表现,那么所体现的双眼增强则反映神经总和。随后一些动物实验证明,双眼相互作用发生在神经层面。RODIECK<sup>[7]</sup>通过研究猫的细胞反应,认为双眼相互作用发生在外侧膝状体核(lateral geniculate nucleus, LGN)。也有学者<sup>[8]</sup>认为,双眼相互作用不一定涉及神经调节,视觉系统中存在双眼驱动皮层神经元与单眼驱动皮层神经元,双眼驱动皮层神经元决定双眼异化的程度,而单眼驱动皮层神

经元决定非特异性的眼间抑制,从而形成不同的双眼相互作用。

目前,双眼相互抑制作用的理论模型大致可分为早期加工模型、晚期加工模型、多层次-混合模型三种<sup>[9]</sup>。早期加工模型认为,双眼相互抑制作用是由于在视觉信息加工的初级视皮层(V1)或LGN水平上单眼神经元之间相互竞争所造成的,左(右)眼神经信号对右(左)眼神经信号的作用使右(左)眼的视觉映像处于阻断或者兴奋状态<sup>[10]</sup>。晚期加工模型认为,双眼相互作用发生在视觉通路的较晚阶段,并不在初级视皮层,而是起源于两眼刺激的神经表征间的竞争<sup>[11]</sup>。如HUBEL等<sup>[3]</sup>的研究发现佐证了这种模型。随着研究的深入,学者们<sup>[9]</sup>对双眼竞争发生在视觉信息加工过程的哪个层面有了更深刻的认识并提出了多层次-混合模型。该模型认为,相互作用不仅在单眼神经元之间存在,而且也存在于双眼模式选择神经元。不同方位调制特性神经元的存在,使得单眼神经元之间也存在模式竞争;而具有相同方位调制特性的单眼神经元间的兴奋交互作用则可以弱化竞争,甚至产生增强作用而促进双眼融合<sup>[12]</sup>。

## 2 双眼相互作用的研究方法

### 2.1 主观实验

#### 2.1.1 视力检测

视力,即视敏度,指分辨物体表面两点间最小距离(夹角),用于识别物体形状的能力<sup>[13]</sup>。在临床上,往往用Snellen视力表、朗多环形视力表或“E”字视力表来测量和评估视力水平,通常用目标(朗多环形视力表或“E”字视力表)的关键特征(C的开口或E的间隔)的大小作为视标的识别点。视力水平可影响双眼相互作用,其影响程度取决于两眼视力水平的差异。一项拉丁美洲实验室大样本调查<sup>[14]</sup>发现,正常人表现为双眼总和的机会是表现为双眼抑制的10倍。在低对比度时,正常人双眼视力可提高40%,甚至更多<sup>[15]</sup>。但是,双眼视力并非始终优于单眼。PARDHAN等<sup>[16]</sup>的实验就发现大部分受试者未表现出双眼增强。通常认为,双眼视力增强发生于较低亮度对比度或两眼间屈光参差不大时,当单眼视功能损害致两眼屈光参差较大或者亮度对比度较大,就会出现双眼抑制作用。有研究<sup>[17]</sup>进一步表明,当双眼之间屈光参差相差3D时,才会出现双眼抑制。目前,将双眼率(binocular ratio, BR)作为评价双眼优势的指标。测量视力时,BR等于双眼视力除以单眼中最好视力。检测视力时,视觉系统的双眼增强作用起着重要的功能<sup>[18]</sup>;当视力变差时,双眼视的优势更加明显;在低亮度下,双眼增强作

用能减轻单眼视功能差对生活质量的影

### 2.1.2 亮度检测

亮度检测实验是指双、单眼注视实验目标,观察目标亮度是否减弱,从而比较双眼与单眼阈上刺激时能够观察到的亮度差异。FECHNER等最早关注双眼亮度差异并提出了Fechner矛盾(Fechner's paradox),实验发现:若一眼正常视物,另一眼通过中等密度滤光片视物时,双眼亮度低于正常视物单眼;若去掉滤光片,那么观察亮度又会得到矛盾性的大幅度提高<sup>[9]</sup>。该研究虽然最早关注双眼亮度,但未能阐明是否发生了双眼相互作用。1943年,BARTLEY<sup>[20]</sup>从现象学及解剖学上解释了双眼产生亮度总和的原因,其在进行亮度匹配实验时发现:若减少单眼对照视标亮度,双眼所能观察到的实验视标会因亮度匹配而降低亮度;若对照视标亮度完全被阻挡,实验视标亮度会因与对照视标的亮度相匹配而减少44%,从而证明了双眼亮度检测上存在一定程度的双眼相互作用。

### 2.1.3 绝对阈值检测

PIPER等最初将暗适应的绝对阈值作为评判双眼增强作用的指标<sup>[1]</sup>。继PIPER之后,COOK<sup>[11]</sup>通过检测暗适应时间长度来测量单、双眼的绝对阈值,发现双眼阈值比单眼分别测量的阈值平均降低50%,证明双眼状态下具有更短的暗适应时间,呈现增强作用。随后,将阈值增量(增阈)作为评判双眼增强的指标<sup>[21]</sup>。增阈是指对能见度的提高程度。BATTERSBY等<sup>[21]</sup>探讨双眼增强与两眼前闪光时间分离关系时发现,若用5ms阈下闪光刺激一眼的相应区域,另一眼所产生的阈值增量将会明显下降,表明两眼前存在相互作用,但增强作用不明显。同时还发现,只有当闪光刺激了两眼相应的视网膜区域,才会出现双眼增强。LYTHGOE等<sup>[22]</sup>对于双眼阈值与单眼阈值之间的数值关系列出了以下计算公式:

$$Th_B = Th_M \div \sqrt{2}, \quad (1)$$

或者

$$1.4 Th_B = Th_M, \quad (2)$$

其中, $Th_M$ 为两眼平均绝对阈值, $Th_B$ 为双眼绝对阈值。若 $1.4 Th_B < Th_M$ ,则表示双眼增强。

### 2.1.4 闪烁融合检测

SHERRINGTON等<sup>[23]</sup>最早关注双眼闪烁灵敏度增强,在研究中枢神经系统的整合作用时,明确了多种反射弧的共同反射途径,这种共同途径是联合反射及对抗反射的基础。闪烁灵敏度通常以临界闪烁频率(critical flicker frequency,CFF)作为评价指标,CFF指的是能够引起闪光融合感觉的刺激的最小频率,高于这个频率则被感知为持续的图像。研究<sup>[24]</sup>发现,双眼

同时闪光的CFF大于双眼交替闪光的CFF,双眼交替闪光的CFF大于单眼闪光的CFF;说明在闪烁灵敏度检测时双眼具有增强作用。

### 2.1.5 对比度检测

对比度是指一幅图像中明暗区域最亮的白和最暗的黑之间不同亮度层级的差异,其数值为白色亮度与黑色亮度的比值,与测量的空间频率及时间频率呈负相关。多数研究将该数值作为研究双眼相互作用的指标。研究<sup>[25]</sup>表明,正常人双眼对比敏感度优于单眼。运用正弦光栅或普通光线刺激视网膜黄斑中心凹,双眼反应可提高 $\sqrt{2}$ 倍。CUESTA等<sup>[26]</sup>以对比敏感度函数(contrast sensitivity function,CSF)为指标,发现所有空间频率中双眼CSF值均高于单眼,但程度不一。但有些研究却未发现双眼优势。GILCHRIST等<sup>[27]</sup>通过放置中等密度滤光片于一眼前,造成两眼对比敏感度不等,导致了双眼对比敏感度结果低于单眼,证明存在双眼抑制作用。APKARIAN等<sup>[4]</sup>研究发现,双眼抑制发生在高空间频率,双眼增强发生在低空间频率,部分增强发生在对比度为0.2~0.3时,完全增强发生在对比度为0.5和0.8时,最大化增强在0.6~0.7时。贾武力<sup>[28]</sup>认为,对比度的双眼抑制是非敏感性存在,而双眼增强则具有敏感性,即只发生于一定的刺激阶段,并提出了双目增益控制模型(分为增强作用及抑制作用)和眼间增益控制理论。

## 2.2 客观实验

视诱发电位(visual evoked potential,VEP)指大脑枕叶皮层对视刺激产生的脑电反应,代表视网膜接受刺激后经视路传导至枕叶皮层而引起的脑内生物电位的变化,能反映视觉信息从视网膜到大脑皮层视觉中枢信息的传递过程,提供了对整个视通路功能的测试。VEP已成为不同视觉状态下客观评估视觉功能的一项检测手段,通常运用潜伏期及波幅来评价视功能。有很多学者将其运用于评估双眼相互作用性质及程度。

1985年,SREBRO<sup>[29]</sup>认为,双眼VEP比单眼VEP振幅总和大25%~30%,证实了双眼增强作用。有研究认为双眼VEP与单眼VEP具有相似的潜伏期,但是波幅远远超过单眼。2006年,ATES等<sup>[30]</sup>以豚鼠为实验对象研究VEP波形中的双眼相互作用,认为波形中P100波能显示相互作用神经元群的总电位,最能反映双眼相互作用。EYSTEINSSON等<sup>[31]</sup>认为,双眼VEP波幅优于单眼不是因为存在双眼增强作用,而是双眼抑制减弱,并提出了持续眼间抑制模型(tonic interocular suppression,TIS)。虽然运用VEP评估双眼视已十分广泛,但其结果易受较多因素影响,如空间频率、时间频率、刺激视角、连接电极尺寸等。

APKARIAN 等<sup>[32]</sup>发现正常人双眼增强作用会由于刺激的空间、时间频率而改变 1~5 倍。随后进一步研究<sup>[4]</sup>发现,空间频率从 1.0 c/deg 变到 1.2 c/deg 时反应波幅减少 60%,双眼增强作用也会较弱。

### 3 单眼视功能损害对双眼相互作用的影响及其临床应用

人类双眼视优于单眼,除了产生立体视外,很大程度是因为存在双眼相互作用。双眼间这种相互联系是与生俱来的,但是其维护与不断加强依赖于双眼视形成的关键时期。若关键时期存在不良视觉体验就很可能造成这种相互作用减弱甚至消失。目前,临床上逐渐重视双眼相互作用在疾病的诊断及预后评估方面的作用。

#### 3.1 屈光参差

双眼在一条或两条主子午线上的屈光力存在差异,且差异大于 1D 时,称为屈光参差。屈光参差时,由于双眼物像大小及清晰度不等,影响双眼融合功能和立体视觉的建立,可导致视功能障碍。CASTRO 等<sup>[33]</sup>发现,双眼间斯特列尔比(Strehl ratio)差异越大即像差越大,双眼增强的程度越低。同时,SCHOR 等<sup>[34]</sup>研究证明,眼间抑制作用可影响屈光参差者的单眼矫正视力。可见双眼相互作用与屈光参差之间存在一定的关联。另外,双眼相互作用与双眼融合及立体视的形成密切相关。屈光参差者双眼相互作用发生改变,视融合也随之发生变化。在生命早期视觉发育尚未成熟时发生屈光参差者,双眼视网膜像的清晰度不同,屈光度大的眼视网膜像更模糊,其视锥细胞和视杆细胞接受的刺激较少,使得视中枢得到的双眼神经冲动大小不等,则双眼的融合功能在双眼竞争作用和大脑皮层主动抑制机制的作用下被削弱<sup>[35]</sup>。如前文所述,双眼视力增强发生于两眼间屈光参差不大,当两眼屈光参差较大( $\geq 3D$ )时,就会出现双眼抑制作用<sup>[17]</sup>。

目前屈光参差的主要治疗手段为激光屈光矫正,并且双眼相互作用在屈光手术预后评估方面已经得以运用。BOXER WACHLER<sup>[36]</sup>以双眼相互作用的程度作为临床评价指标,认为激光角膜原位磨镶术(laser-assisted in situ keratomileusis, LASIK)后双眼注视力表现出更好的视力及对比敏感度。

#### 3.2 弱视与斜视

弱视是眼科临床常见眼病,是由于视觉系统发育的关键期(可塑期)进入眼内的视觉刺激不够充分剥夺了形成清晰物像的机会(形觉剥夺)和(或)两眼视觉输入不同引起清晰物像与模糊物像间发生竞争(双眼相互作用异常)所造成的单眼或双眼视发育障碍。斜视是指

任何一眼视轴偏离的临床现象,即当一眼注视正前方时,另一眼偏向其他方向。斜视患者因为双眼不能同时注视同一目标,大脑会主动抑制来自于斜视眼的视觉信号,长期的抑制最终会导致患者双眼视的丧失。人类弱视在大多数情况下会伴随着斜视出现。斜视性弱视必须通过抑制偏眼的图像来避免复视和视觉混淆的问题,这种抑制可以通过双眼相互作用实现。研究<sup>[37]</sup>发现,正常人黄斑中心凹与周围视网膜的双眼增强作用差异不明显,弱视者黄斑中心凹未发现双眼总和,而周围视网膜存在总和且其值与正常人基本相当。PINELES 等<sup>[38]</sup>通过双眼辨别背景复杂程度检测来研究斜视不伴弱视者双眼增强作用的程度,发现斜视可导致双眼增强减少甚至双眼抑制。RAVEENDRAN 等<sup>[39]</sup>发现斜视眼若固视得以稳定,双眼注视力提高后,双眼抑制程度会明显下降。目前,临床上将是否存在单眼抑制作为评价外斜视矫正术后双眼视功能恢复的指标。

#### 3.3 黄斑变性

黄斑是视网膜上视敏度最高的区域,通常反映中心视力,其损伤后对视功能的影响很大。目前研究最多的为年龄相关性黄斑变性(age-related macular degeneration, AMD)。因双眼视输入的差异过大,导致双眼增强作用受损,表现为双眼抑制作用。许多患者表现为遮蔽受损眼,使用健眼视物时视力优于双眼视物。2002 年,VALBERG 等<sup>[40]</sup>研究 AMD 双眼与单眼的对比敏感度发现,大多数患者在中、低等空间频率可表现为双眼抑制。TARITA-NISTOR 等<sup>[41]</sup>研究发现,正常组与 AMD 组双眼增强作用、抑制作用在频率分布上存在不同。可见,双眼相互作用在研究黄斑变性方面存在一定意义。

#### 3.4 白内障

白内障指凡是各种原因如年龄相关性退变、遗传、局部营养障碍、免疫与代谢异常、外伤、中毒、辐射等引起晶状体代谢紊乱,导致晶状体蛋白质变性而发生混浊,从而发生视物模糊。现有研究<sup>[42]</sup>认为,白内障与双眼相互作用之间存在一定关系。单眼白内障时双眼对比敏感度低于单眼对比敏感度,若遮蔽白内障眼,则对比敏感度升高,提示白内障患者存在双眼抑制。白内障可致眩光,从而造成双眼抑制。通过测量双眼抑制的程度可以评估白内障的程度并预估手术效果,如 TSAOUSIS 等<sup>[43]</sup>研究表明,双眼多焦点人工晶状体植入术后,在任何距离均可产生双眼增强。

## 4 法医学应用及展望

在法医学鉴定实践中,如何准确、客观地评估被鉴定人外伤后视功能的损害程度一直是眼外伤鉴定

工作者需要解决的重点和难点问题。如何科学设计视觉功能障碍的评定标准,是客观、准确鉴定的前提和基础。不久前废止的《道路交通事故受伤人员伤残评定》(GB 18667—2002)以及两院三部发布实施的《人体损伤程度鉴定标准》《人体损伤致残程度分级》中均仍以“最高矫正视力”作为视功能水平的评定依据,但“最高矫正视力”未考虑其在日常生活中的适用性,更未考虑双眼相互作用的存在,不能真实反映实际生活中的视力状况。随着 WHO 于 2003 年提出以“日常生活视力”作为评价视力损害的依据以来,这一概念越来越受到司法鉴定人的关注。在日常生活中,人们通常使用适度的矫正视力,并依靠双眼的协同作用来完成生活和工作。若能以此作为衡量视力损害的评定指标,可望更为接近被鉴定人实际的日常生活状况,具有现实意义与法律意义。《劳动能力鉴定 职工工伤与职业病致残等级》(GB/T 16180—2014)采用了 1958 年第 18 届世界眼科学会大会《关于统一眼科残废率报告》中提出的“视力减弱补偿率”,将双眼视力视为一个整体,要求依据外伤愈合后双眼最终的视力状况确定残级,符合该标准有关伤病关系处理的基本原则<sup>[4]</sup>。然而,在涉及侵权责任法范围内的人身损害赔偿中,因仅需针对受伤眼进行定残与赔偿,难以完全按照上述方法进行操作。但是,眼外伤司法鉴定实践中,若同样的损伤发生在不同视力水平的左(右)眼上,其损伤后果及致残率是明显不同的。例如,被鉴定人伤前右眼屈光度为-2.50 D,矫正视力为 1.2;左眼屈光度为-8.00 D,矫正视力仅为 0.3。此时左眼被拳击致伤造成黄斑损伤与右眼被拳击致伤造成黄斑损伤相比,其损害后果的致残率有很大差异。诸如此类,若仅仅对受伤眼进行评定,则忽略了损伤对其日常生活能力的影响。《劳动能力鉴定 职工工伤与职业病致残等级》(GB/T 16180—2006)所提出的“视力减弱补偿率”虽然能评价最终远视力的致残率,但该评价标准是以 20 世纪 50 年代欧美专家的评估结果为基础的,在科学论证方面显得不足。

如上所述,单眼损伤致视功能下降后对双眼视会造成不同的影响,法医学鉴定工作者有必要对此进一步研究,更全面地了解上述案件情况下损伤对视觉功能的影响程度。如能建立可靠的检验与评估方法,将为视觉功能致残率的提出提供基础数据和理论基础,为日常生活视力全面引入我国眼外伤鉴定的法医学标准提供有力的技术保障,也必将推进眼外伤法医学鉴定水平的持续提高。

#### 参考文献:

- [1] COOK T W. Binocular and monocular relations in foveal dark adaptation[J]. *Psychological Monographs*, 1934,45(3):i-86.
- [2] WOLF E, ZIGLER M J. Excitation of the peripheral retina with coincident and disparate test fields[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1965,55(11): 1517-1519.
- [3] HUBEL D H, WIESEL T N, LEVAY S. Plasticity of ocular dominance columns in monkey striate cortex[J]. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, 1977, 278(961):377-409.
- [4] APKARIAN P A, NAKAYAMA K, TYLER C W. Binocularity in the human visual evoked potential: facilitation, summation and suppression[J]. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*, 1981,51(1):32-48.
- [5] NEWMAN N J, WOLFE J M, STEWART M I, et al. Binocular visual function in patients with a history of monocular optic neuritis[J]. *Clinical Vision Sciences*, 1991,6(2):95-107.
- [6] BLAKE R, FOX R. The psychophysical inquiry into binocular summation[J]. *Attention Perception & Psychophysics*, 1973,14(1):161-185.
- [7] RODIECK R W. Central nervous system: afferent mechanisms[J]. *Annu Rev Physiol*, 1971,33:203-240.
- [8] SMITH E L III, CHINO Y M, NI J, et al. Residual binocular interactions in the striate cortex of monkeys reared with abnormal binocular vision[J]. *J Neurophysiol*, 1997,78(3):1353-1362.
- [9] TONG F, MENG M, BLAKE R. Neural bases of binocular rivalry[J]. *Trends Cogn Sci*, 2006,10(11): 502-511.
- [10] MUELLER T J. A physiological model of binocular rivalry[J]. *Vis Neurosci*, 1990,4(1):63-73.
- [11] LOGOTHETIS N K, LEOPOLD D A, SHEINBERG D L. What is rivalling during binocular rivalry? [J]. *Nature*, 1996,380(6575):621-624.
- [12] BLAKE R. A neural theory of binocular rivalry[J]. *Psychol Rev*, 1989,96(1):145-167.
- [13] 汪芳润. 视力认识及检查方法学进展[J]. *中国学校卫生*, 1992,13(2):104-106.
- [14] AZEN S P, VARMA R, PRESTON-MARTIN S, et al. Binocular visual acuity summation and inhibition in an ocular epidemiological study: the Los Angeles Latino eye study[J]. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2002, 43(6):1742-1748.
- [15] MEESE T S, GEORGESON M A, BAKER D H. Binocular contrast vision at and above threshold[J]. *J Vis*, 2006,6(11):1224-1243.
- [16] PARDHAN S, GILCHRIST J. Binocular contrast summation and inhibition in amblyopia. The influence of the interocular difference on binocular contrast sensitivity[J]. *Doc Ophthalmol*, 1992,82(3):239-248.
- [17] LEON A, DONAHUE S P, MORRISON D G, et al.

- The age-dependent effect of anisometropia magnitude on anisometropic amblyopia severity[J]. *J AAPOS*, 2008,12(2):150-156.
- [18] SCHWARZ C, MANZANERA S, ARTAL P. Binocular visual performance with aberration correction as a function of light level[J]. *J Vis*, 2014,14(14):6.
- [19] 王光霁. 双眼视觉学[M].2版.北京:人民卫生出版社, 2011.
- [20] BARTLEY S H. Some parallels between pupillary 'reflexes' and brightness discrimination[J]. *Journal of Experimental Psychology*, 1943,32(2):110-122.
- [21] BATTERSBY W S, DEFABAUGH G L. Neural limitations of visual excitability: after-effects of subliminal stimulation[J]. *Vision Res*, 1969,9(7):757-768.
- [22] LYTHGOE R J, PHILLIPS L R. Binocular summation during dark adaptation[J]. *J Physiol*, 1938,91(4):427-436.
- [23] SHERRINGTON C S. On binocular flicker and the correlation of activity of 'corresponding' retinal points[J]. *British Journal of Psychology*, 1904,1(1):26-60.
- [24] ANSTIS S, HO A. Nonlinear combination of luminance excursions during flicker, simultaneous contrast, afterimages and binocular fusion[J]. *Vision Res*, 1998,38(4):523-539.
- [25] VEDAMURTHY I, SUTTLE C M, ALEXANDER J, et al. A psychophysical study of human binocular interactions in normal and amblyopic visual systems[J]. *Vision Res*, 2008,48(14):1522-1531.
- [26] CUESTA J R, ANERA R G, JIMÉNEZ R, et al. Impact of interocular differences in corneal asphericity on binocular summation[J]. *Am J Ophthalmol*, 2003,135(3):279-284.
- [27] GILCHRIST J, PARDHAN S. Binocular contrast detection with unequal monocular illuminance[J]. *Ophthalmic Physiol Opt*, 1987,7(4):373-377.
- [28] 贾武力. 双眼功能平衡与可塑性[D].北京:中国科学院研究生院,2015.
- [29] SREBRO R. Localization of visually evoked cortical activity in humans[J]. *J Physiol*, 1985,360:233-246.
- [30] ATES K, DEMIRTAS S, GOKSOY C. Binocular interactions in the guinea pig's visual-evoked potentials[J]. *Brain Res*, 2006,1125(1):26-30.
- [31] EYSTEINSSON T, BARRIS M C, DENNY N, et al. Tonic interocular suppression, binocular summation, and the visual evoked potential[J]. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 1993,34(8):2443-2448.
- [32] APKARIAN P, NAKAYAMA K, TYLER C W. Binocular interactions in steady state visual evoked responses[J]. *Soc Neurosci Abstr*, 1977,111:551.
- [33] CASTRO J J, JIMÉNEZ J R, HITTA E, et al. Influence of interocular differences in the Strehl ratio on binocular summation[J]. *Ophthalmic Physiol Opt*, 2009,29(3):370-374.
- [34] SCHOR C, ERICKSON P. Patterns of binocular suppression and accommodation in monovision[J]. *Am J Optom Physiol Opt*, 1988,65(11):853-861.
- [35] LEMA S A, BLAKE R. Binocular summation in normal and stereoblind humans[J]. *Vision Res*, 1977,17(6):691-695.
- [36] BOXER WACHLER B S. Effect of pupil size on visual function under monocular and binocular conditions in LASIK and non-LASIK patients[J]. *J Cataract Refract Surg*, 2003,29(2):275-278.
- [37] PARDHAN S, WHITAKER A. Binocular summation in the fovea and peripheral field of anisometropic amblyopes[J]. *Curr Eye Res*, 2000,20(1):35-44.
- [38] PINELES S L, LEE P J, VELEZ F, et al. Effects of visual noise on binocular summation in patients with strabismus without amblyopia[J]. *J Pediatr Ophthalmol Strabismus*, 2014,51(2):100-104.
- [39] RAVEENDRAN R N, BABU R J, HESS R F, 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.
- [40] VALBERG A, FOSSE P. Binocular contrast inhibition in subjects with age-related macular degeneration[J]. *J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis*, 2002,19(1):223-228.
- [41] TARITA-NISTOR L, GONZÁLEZ E G, MARKOWITZ S N, et al. Binocular interactions in patients with age-related macular degeneration: acuity summation and rivalry[J]. *Vision Res*, 2006,46(16):2487-2498.
- [42] QUILLEN D A. Effect of unilateral exudative age-related macular degeneration on binocular visual function[J]. *Arch Ophthalmol*, 2001,119(11):1725-1726.
- [43] TSAOUSIS K T, PLAINIS S, DIMITRAKOS S A, et al. Binocularity enhances visual acuity of eyes implanted with multifocal intraocular lenses[J]. *J Refract Surg*, 2013,29(4):246-250.
- [44] 刘冬梅,章艾武,夏文涛.《劳动能力鉴定 职工工伤与职业病致残等级》条款的变化与解读[J].*法医学杂志*, 2015,31(2):156-159.

(收稿日期:2017-02-21)

(本文编辑:王亚辉)