

感知觉学习对斜弱视患者视功能重建的研究进展

何娟,张黎

作者单位:(400042)中国重庆市,重庆医科大学附属第一医院眼科

作者简介:何娟,女,在读硕士研究生,医师。

通讯作者:张黎,女,医学博士,副主任医师,副教授,曾在天津眼科医院进修,师从我国著名的小儿眼科专家赵堪兴教授,2012年获国家留学基金委资助,作为访问学者在美国威尔士眼科医院研修一年,师从威尔士眼科医院儿科主任 Dr. Levin 和斜视矫正中心主任 Dr. Nelson,研究方向:小儿斜弱视。1371206849@qq.com
收稿日期:2015-06-24 修回日期:2015-10-13

Research progress of perceptual learning on the reconstruction of visual function in the patients with strabismus and amblyopia

Juan He, Li Zhang

Department of Ophthalmology, the First Affiliated Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing 400042, China

Correspondence to: Li Zhang. Department of Ophthalmology, the First Affiliated Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing 400042, China. 1371206849@qq.com

Received:2015-06-24 Accepted:2015-10-13

Abstract

• Strabismus and amblyopia are common clinical eye diseases. Chinese and international scholars have studied them with biotechnology and computer technology from many perspectives such as their pathogen, pathogenesis and treatment, and have made great progress. The categorical study of binocular visual function in patients with strabismus and amblyopia provides comprehensive and accurate insights on the neurological mechanism and corresponding biological model, which is conducive to discovering new methods for the clinical treatment of the diseases and reconstruction of visual function. This paper introduces the definition and mechanism of perceptual learning, and discusses the possible influence factors, the duration of the treatment effect and neural mechanism of perceptual learning. The further researches were needed on the aspects of the neural mechanism of strabismus and amblyopia, the specific mechanism of the reconstruction of visual function and influence factors of perception learning. In recent years, the research on the plasticity of cerebral nerves and perceptual learning is getting more deeply. Perceptual learning has been used in clinical treatment of strabismus and amblyopia and the restoration of binocular visual function, and has achieved gratifying results. Hereby, we present a literature review on the domestic and international researches concerning

the treatment of perceptual learning.

• **KEYWORDS:** strabismus and amblyopia; perceptual learning; binocular visual function; stereopsis

Citation: He J, Zhang L. Research progress of perceptual learning on the reconstruction of visual function in the patients with strabismus and amblyopia. *Guoji Yanke Zazhi (Int Eye Sci)* 2015;15(11):1913-1916

摘要

斜视、弱视是临床上常见的眼病,国内外学者运用生物和计算机技术对斜弱视的病因、发病机制及治疗等进行了多方位探讨和研究,并取得了很大的进展。斜、弱视患者的双眼视功能分类研究能使人们能够全面、准确地理解斜弱视发生的神经机制及匹配的生物模型,对寻求斜弱视临床治疗和视功能重建的新途径有所帮助。本文介绍了感知觉学习的定义及机制,并重点探讨了影响感知觉学习效果的可能因素、感知觉学习治疗效果的持续时间及神经机制。该领域未来需要在斜弱视发病的神经机制、感知觉学习重建斜弱视视功能的具体机制、影响感知觉学习效果的因素等方面做进一步研究。近年来,人们对大脑神经可塑性及感知觉学习的研究越来越深入,并应用于临床,治疗斜弱视,重建斜弱视患者双眼视功能,取得了令人欣喜的效果,现将感知觉学习治疗相关的国内外研究进展综述如下。

关键词:斜弱视;感知觉学习;双眼视功能;立体视

DOI:10.3980/j.issn.1672-5123.2015.11.20

引用:何娟,张黎.感知觉学习对斜弱视患者视功能重建的研究进展.国际眼科杂志 2015;15(11):1913-1916

0 引言

近年来,随着人们对大脑视觉神经可塑性认识的深入,感知觉学习的概念被逐步引入到斜视、弱视检查治疗领域,目前已进入临床应用阶段。斜视是指两眼视轴不能对齐,一只眼注视目标时,而另一只眼偏向目标的一侧(向内、向外、向上或向下)。当斜视发生时,机体为了避免复视和混淆视带来的不适,从一个眼睛产生的图像通常会被抑制。斜视不但严重影响外观,由于眼位偏斜带来复视和视混淆、产生单眼抑制和视网膜异常对应,导致纹状皮层中双眼视觉细胞明显减少,从而严重影响双眼视觉功能。斜视的治疗应重视双眼视的多级功能恢复,矫正视感知觉眼位是斜视治疗的关键一步,而双眼视整合和立体视的恢复应在斜视治疗中占有更重要的地位。尤其是对于具备条件的斜视患者,治疗斜视的首要目的应是修复患者的双眼视功能整合储备能力^[1]。弱视的治疗最终目的也是恢复双眼视功能。弱视是一种由于先天性或在视觉发育的关键期进入眼内的光刺激不够充分,剥夺了黄斑形成清晰物像的机会(视觉剥夺)和(或)两眼视觉输入不等

引起的清晰物像与模糊物像之间发生竞争(两眼相互作用异常)所造成的以空间视力损害为特征的单眼或双眼的视力疾患。感知觉学习是利用大脑视觉神经系统的可塑性,通过特定空间频率滤波算法图像生成和双眼能量平衡状态学习区建立,矫治和改善大脑神经系统的信号加工处理能力,从而达到治疗的目的。美国著名的视知觉科学家 Levi 已经证实感知觉学习可以有效地提高儿童弱视者的视觉能力^[2]。感知觉学习为斜弱视患者视功能的重建提供了新的治疗方法。

1 感知觉学习的定义及机制

感知觉学习在1963年首次被 Eleanor Gibson 提出,被定义为“对一系列刺激的感知实践和经验后的任何相对永久和一致的变化”,即通过重复实践和知觉任务训练,而出现长期而持久的感知性能的改善,是一种长期持续的视觉皮质的改变,它不同于认知和运动领域的学习,常常表现出刺激和任务的特异性。成人视觉系统的训练敏感性表明,感知系统不是静止的,包括在成人期。视觉系统能够主动适应和反映外界环境各种变化,从而导致发生结构和功能的改变,并维持一定时间的过程称为神经可塑性,它包括了生理性和病理性两个方面。神经系统的可塑性(指突触强度和数目发生变化的能力),是学习和记忆的基础。神经可塑性的形式包括经验诱导的树突增长或缩短、树突刺密度改变、突触功效改变,经验引起的皮层重组以及学习和实践引起神经系统血管生成。感知觉学习的研究在诠释成人感知系统的神经可塑性方面是具有理论意义的,而且能更好的理解在人类观察者的信息处理的局限性。许多研究表明灵长类动物以及人类的大脑,都有一定程度的神经可塑性,能够通过感知觉任务的重复练习或感知觉学习提高感知性能^[3]。目前有许多学者研究感知觉学习的神经-解剖机制,但其治疗斜视、弱视的确切机制还不清楚。现存的证据表明斜弱视的视觉系统的神经损伤主要发生在视觉皮层^[4]。感知觉学习可能导致性能和在视觉编码早期阶段的神经处理发生永久的变化,即经过有规律的练习视觉任务后,可以逐渐的引起对应的神经元或是某种神经递质的改变,从而提高感知性能。近几十年来,许多研究表明感知觉学习训练对视觉缺陷的患者的视力、对比敏感度、立体视功能等有显著提高,对于斜弱视视功能的重建也有显著疗效,其临床意义已经受到越来越多的关注。

2 感知觉学习在斜弱视治疗中的应用

2.1 感知觉学习提高弱视患者视力

弱视是视觉发育期由于单眼斜视、未矫正的屈光参差、高度屈光不正及形觉剥夺引起的单眼或双眼最佳矫正视力低于相应年龄的视力;或双眼视力相差2行及以上,视力较低眼为弱视^[5]。因此,视力对弱视患者来说非常重要。从1996年开始 Levi 等^[6-7]最早将知觉学习应用于成人弱视患者,发现成人弱视经过训练后视力仍然可以有所提高。Li 等^[8]研究表明弱视儿童(年龄7~10岁)通过重复的位置辨别任务训练,部分受试者训练后表现出 Snellen 视力的提高(约26%),并指出感知觉学习技术可能会成为一种有效治疗弱视的新方法。Levi 等^[7]在对11例成人弱视的研究中发现所有的受试者通过知觉学习训练以后游标视力(Vernier acuity)均有明显的提高。Xi 等^[9]报道的知觉学习治疗弱视的进一步研究结果提示,青少年及成人弱视经知觉学习视力可获得明显提高,立体视也可得到明显改

善,而且立体视的提高并不依赖于视力的提高,说明知觉学习不同于传统的治疗手段,可有效改善患者的双眼视功能,有助于弱视患者双眼视功能的重建。Chen 等^[10]研究结果表示遮盖组视力提高2行或以上者达96%,感知觉学习组达76%;遮盖组平均遮盖时间为37.3wk(522.2h),感知觉学习组平均遮盖时间为29.5h。所以,知觉学习治疗弱视具有治疗周期较短和起效速度较快的特点,同时还

2.2 感知觉学习改善双眼视

立体视觉是双眼对三维空间各种物体的远近、前后、深浅和凹凸的相互关系的感知能力,是人和其他高等动物特有的最高级视功能,其通常用人眼分辨最小双眼视差角度的能力来表达^[11]。立体视觉的发育是一个极其复杂并不断完善的过程,良好的双眼视功能是获取正常立体视觉的必要前提。斜弱视患者异常的视觉发育经历造成单眼抑制和双眼间异常视网膜对应,视觉中枢的双眼性神经细胞刺激减少,从而影响立体视觉的正常发育,并使立体视觉出现不同程度的损害^[12]。

对于斜视患者而言,手术矫正眼位是关键的一步,为双眼视功能的重建和恢复创造了眼位条件,只有建立了健全的双眼视功能,才真正的达到了功能治愈的目的。Fatima 等^[13]研究发现部分患者斜视手术后能恢复或重建双眼视功能,但研究对象较少。斜视患者由于早期不正常的视觉经历,部分患者眼位矫正后皮层功能的异常依然存在,所以双眼视觉并没有恢复正常,而感知觉学习训练能重建相关的视觉皮层处理通路,从而促进患者双眼视功能的重建,使斜视患者达到功能性的治愈标准。Paffen 等^[14]认为大脑神经系统具有可塑性,感知觉学习是通过特定的视觉刺激或任务训练激活不同的视觉信号通路,矫治和改善大脑神经系统的信号加工处理能力,从而达到治疗的目的。目前已有研究证明弱视患者通过感知觉学习,可以获得显著地视觉能力改善。感知觉学习系统内容包括脱抑制、双眼交互平衡、内外融合力、立体视训练等,其中主要是通过脱抑制建立同时知觉,纠正异常视网膜对应,增加融合功能,在参数层面做推拉学习从而促进立体视恢复。感知觉学习系统根据每位患者双眼视功能的缺损位点来设计训练内容,使患者分步骤、个性化的进行感知觉学习训练。感知觉学习的训练模式因为借助了网络数据库平台以及游戏的训练形式,患儿容易接受并能长期坚持训练,依从性较高,是一个值得推广的斜弱视视功能重建的治疗方法。感知觉学习系统可以对斜弱视患者的知觉眼位、对比敏感抑制度、精细立体视、大范围立体视、运动立体视等方面进行检查,对患者的双眼视功能状态进行科学的分类和治疗,且能提高患者的对比敏感度、定位敏感度、深度知觉等。

2.3 改善双眼视功能的传统方法

遮盖疗法是弱视的传统治疗方法,通过遮盖优势眼,强制性地避免了优势眼对弱视眼的抑制,从而提高弱视眼的视力。虽然,遮盖可有效提高弱视眼的视力,但遮盖健眼造成患者失去双眼同时视的机会,不利于双眼视功能重建。Wallace 等^[15]对弱视遮盖治疗后立体视的恢复状况进行研究,结果显示,即使弱视眼视力恢复到正常,患者仍然存在立体视的缺陷。另外,遮盖治疗有可能会形成遮盖性弱视^[16]。遮盖疗法是弱视虽然广泛用于青少年弱视治疗,但是其对弱视患者双眼视功能的恢复欠佳。国内外大量的临床研究表明同视

机训练对于斜弱视患者重建双眼视功能有效,但由于同视机价格比较昂贵、对操作人员要求也较高,所以未能广泛应用于临床。目前,也有学者采用 Cheiroscope 实体镜对斜弱视患者进行立体视训练,结果显示训练后立体视均有提高,认为实体镜在双眼视训练中有较好的应用前景^[17],但缺乏大量临床研究证明且需要家长陪同训练,依从性较差。上述传统治疗方法内容固定、枯燥,操作困难性较大,不能显著改善立体视,且难以积极主动参与并长期坚持,依从性较差。

3 影响感知觉学习效果的可能因素

3.1 术后眼位 术后眼位对于斜视患者立体视的恢复是至关重要的,所以手术矫正眼位是治疗斜视很关键的一步,也是重建斜视患者术后视功能的基本前提。早在 40 多年前 Hubel 和 Wiesel 建立了一个简单模型,他们认为早期不正常的视觉经历导致大脑皮层功能发生了重大的改变^[18]。而斜视患者双眼视功能的缺损与大脑皮层的改变是有关联的,这种大脑皮层的重大改变使得这部分患者即使眼位被矫正,双眼视觉功能的恢复依然很困难,不过也有文献报道部分间歇性外斜视患者手术矫正眼位后双眼视功能得以恢复。目前大量的研究表明,大脑皮层具有很大程度的可塑性,而这种大脑皮层的可塑性能被长期、规律的感知觉学习训练所加强。因此,手术矫正眼位后,可以通过感知觉学习训练来重建斜视患者的双眼视功能,但术后的眼位是否为正位是一个很关键的问题。正常的眼位是双眼同时视,形成立体视觉的前提条件。所以,在临床工作中应尽量保证斜视手术后的眼位为正位,避免欠矫或过矫,否则会影响术后双眼视功能的重建,甚至会使患者双眼视功能进一步丧失。

3.2 年龄 斜弱视大部分在出生后短期内即发生,如不及时治疗,会影响双眼单视功能的正常发育,引起双眼视功能异常。人的双眼视功能随着年龄的增长发育成熟,2~6 岁为视觉发育的敏感期。通常认为,在视觉发育敏感期双眼视功能被破坏,仍有机会可塑性修复,如果错过了视觉发育的敏感期,细胞膜层面的改变是原有通道的修复不可逆转。随着感知觉学习的概念被提出,近年来人们对感知觉学习的深入研究表明,即使错过了视觉发育敏感期,大脑皮层仍有很大程度的可塑性,仍然可能重建其他通道来恢复双眼视觉功能。目前,有些学者认为年龄可能不是感知觉学习效果差异的重要因素。Li 等^[8,19]的研究表明感知觉学习对成人弱视患者(≥ 18 岁)的双眼视功能有明显提高,而对儿童弱视患者的双眼视功能的提高相对较少。Polat 等^[20]和 Chen 等^[10]的研究也表明感知觉学习对弱视患者双眼视功能及视力的提高与年龄无明显相关关系。Lal 等^[21]对 21 例斜视术后患者进行研究表明成人斜视术后视功能是有可能恢复的。斜视患者术后视功能的重建与弱视患者视力的提高是否类似,与年龄有无相关,仍需要进一步研究,未得到明确的证实。

3.3 感知觉任务 感知觉学习通过特定的带图像交互的感知觉任务激活不同的视觉皮层通路,矫治由于早期不正常的视觉经历大脑皮层发生的改变。感知觉任务的图像交互方式也可能是影响感知觉学习效果的重要因素。Polat 等^[20]的研究显示用和目标不同距离的高对比度侧翼训练“横向交互”,对弱视患者的对比敏感度和 Snellen 敏锐度有明显提高。Polat 等认为是这种高对比度侧翼训练引起了这种提高。然而,Zhou 等^[22]运用没有侧翼的感知

觉任务对弱视患者进行训练,弱视患者的对比敏感度和 Snellen 敏锐度也得到了等效的提高^[23]。但是,Polat 等的研究(有侧翼的感知觉训练任务)对弱视患者视觉敏锐度的提高比其他的研究所要显著。目前尚不清楚,是否是包含侧翼的训练引起的这种差异。目前有很多研究,利用不同的感知觉训练任务对弱视患者进行反复的训练,对弱视患者视力和立体视的提高程度都不相同,也可能是感知觉学习的持续时间和弱视的严重程度导致了这种差异。

3.4 感知觉学习训练的持续时间 感知觉学习训练的持续时间似乎对感知觉学习的效果有着重要的影响。目前很重要的问题是斜弱视患者感知觉学习时间剂量-效果关系没有公认的指标。有研究表明感知觉学习训练持续的时间越长,弱视患者的视力及立体视改善效果越好,而且感知觉学习训练的时间可能与其弱视的严重程度成正相关关系,严重的弱视可能需要的训练时间更长,需要接近 50h(3500 次练习)才能达到稳定时期^[24]。如果这一结果可以推广到斜视患者,也许有人会认为,视功能受损严重的斜视患者需要的训练时间更长。斜视患者术后视功能的重建训练时间与弱视患者双眼视功能提高是否类似,尚未有研究,还需进一步探讨。对于斜视术后患者双眼视功能改善开始有明显疗效和达到基本治愈所需要的训练时间并没有统一的说法,有很强的个体差异性。对于感知觉训练的频次,目前国内大多是每天 2 次,每次训练时间为 30min,训练频率与双眼视功能重建效果是否有关联目前尚不清楚。

3.5 睡眠 睡眠对于各种类型长时程记忆的形成和巩固非常重要。就感知觉学习而言,正常睡眠或者只是训练后短暂的小睡^[25]都有助于学习效果的产生和巩固,而剥夺睡眠后知觉学习就不能发生^[26]。所以,睡眠对感知觉学习的效果也有一定的影响。

3.6 感知觉学习训练的依从性 对于视功能的重建训练,患者的依从性尤为重要。感知觉学习训练采用网络方式,对于不同视功能障碍的患者提供针对性、个体化的跟踪式调节式感知觉任务训练,内容形象、生动,训练形式简单、方便,增加了患者兴趣和训练的主动参与性,提高了依从性。

4 感知觉学习治疗效果的持续时间

对于正常视觉的成人,感知觉学习的效果常常被认为是持久的。目前,也有一些关于感知觉学习对弱视患者的效果的持久性的文章出现。Polat 等^[20]对进行感知觉学习后的弱视患者进行研究,分别于停止训练 3、6、9、12mo 后检查视功能,发现视功能只有很少的减退。Zhou 等^[22]报告弱视患者视功能几乎完全保留至停止感知觉学习训练的 18mo 后,而 Chen 等^[10]报告说,92% 受试者改进的视觉敏锐度保留长达 8mo。因此,感知觉学习引起的视觉改善似乎是持久的。但是,感知觉对于斜视患者术后视功能重建的效果的持续时间尚未研究,根据感知觉学习引起的是一种长期持续的视觉皮质的改变这一理论,可以推断斜视术后双眼视功能恢复的效果也可能长期保持。

5 感知觉学习改善视功能的可能原理

很多研究显示,感知觉学习可以有效提高斜视、弱视患者视力和立体视。有许多研究尝试解释感知觉学习提高双眼视功能的原理。一种观点认为感知觉学习使视觉通路中的对于某些局部特征敏感的神经元早期即发生神经反应改变^[27-28]。另一种观点是,感知觉学习性能的改

善是基于高水平的认知过程^[29]。人类的视觉加工是按照等级加工模式处理的,视觉信息从低级视皮层到高级视觉中枢逐渐完成加工过程。视觉认知始于视网膜,经外侧膝状体核投射到视皮层,再向具有进一步处理功能的大脑皮层辐射。有学者提出了双眼视觉的双通道理论^[30],即在纹外皮层阶段,信息处理通过两条在解剖和功能上不同的视觉通路来完成,一条是背侧视觉通路:从V1到背侧枕顶皮层,与视觉刺激的空间位置和运动信息加工有关,即“where”通路;另一条是腹侧视觉通路,从V2区通过视皮层V4区到腹侧枕颞皮层,与客体特征有关,包括形状、颜色、大小及质地等,即“what”通路。形状知觉结合空间位置知觉的情况下,背侧和腹侧通路是共同兴奋的。可见不同的视觉加工通路并不是完全分离的,两者之间存在许多重要的交通,这是视觉信息在高级阶段能够完成整合加工的结构基础。最近,国内外眼科界科学家研究了视觉双通路双眼视觉双通路,揭示了斜弱视的缺损机制及为寻求斜弱视治疗的新方法提供了重要的理论依据。此外,Xiao等^[29]提出视网膜的早期视觉皮层是感知觉学习的神经基础的概念,感知觉学习是通过这种大脑皮层的神经可塑性实现立体视功能的改善。感知觉学习引起的视功能改善也可能是因为被观察者学会更好的控制斜视及弱视眼的调节,但这个解释似乎也不太可能完全解释感知觉学习的效果。Hess等^[31]在最近的研究中发现,斜视与弱视患者的双眼视觉通路的功能是正常的,只不过被抑制了,当抑制去除之后,双眼视功能就会表现出来。目前,对于感知觉学习如何改善视功能这个问题,有许多不同的观点,尚未达成一致,还需更深入详尽的研究。

6 问题与展望

斜、弱视一直是研究的热点问题,从病因、发病机制、治疗方式及双眼视功能的重建都取得了较大的进步,尤其是随着视知觉研究的临床应用,为斜弱视双眼视功能的重建提供了新的治疗方法。但仍有许多问题需要我们继续探讨,如斜弱视发病的神经机制、感知觉学习重建斜弱视视功能的具体机制、影响感知觉学习效果的因素等。感知觉学习对斜、弱视视功能的重建的研究有助于斜视的临床治疗,具有重要的临床意义。

参考文献

- 1 牛兰俊. 斜视治疗应重视双眼视觉功能的恢复. 中华眼科杂志 2005;41(7):577-579
- 2 Neri P, Levi DM. Spatial resolution for feature binding is impaired in peripheral and amblyopic vision. *J Neurophysiol* 2006;96(1):142-153
- 3 Buonomano DV, Merzenich MM. Cortical plasticity: from synapses to maps. *Annu Rev Neurosci* 1998;21:149-186
- 4 Kiorpes L. Visual processing in amblyopia; *Animal Studies. Strabismus* 2006;14(1):3-10
- 5 中华医学会眼科学分会斜视与小兒眼科学组. 弱视诊断专家共识(2011年). 中华眼科杂志 2011;47(8):768
- 6 Levi DM, Polat U. Neural plasticity in adults with amblyopia. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. Proc Natl Acad Sci U S A* 1996;93(13):6830
- 7 Levi DM, Polat U, Hu YS. Improvement in Vernier acuity in adults with amblyopia - Practice makes better. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 1997;38(8):1493
- 8 Li RW, Young KG, Hoenig P. Perceptual learning improves visual performance in juvenile amblyopia. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2005;46

- (9):3161
- 9 Xi J, Jia WL, Feng LX, et al. Perceptual learning improves stereoacuity in amblyopia. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2014;55(4):2384-2391
- 10 Chen PL, Chen JT, Fu JJ, et al. A pilot study of anisometropic amblyopia improved in adults and children by perceptual learning: an alternative treatment to patching. *Ophthalmic Physiol Opt* 2008;28(5):422-428
- 11 Blake R, Wilson H. Binocular vision. *Vision Res* 2011;51(7):754-770
- 12 Greenwood JA, Tailor VK, Sloper JJ, et al. Visual acuity, crowding, and stereo-vision are linked in children with and without amblyopia. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2012;53(12):7655-7665
- 13 Fatima T, Amitava AK, Siddiqui S, et al. Gains beyond cosmesis: Recovery of fusion and stereopsis in adults with longstanding strabismus following successful surgical realignment. *Indian J Ophthalmol* 2009;57(2):141
- 14 Paffen CL, Verstraten FA, Vidny ánszky Z. Attention - based perceptual learning increases binocular rivalry suppression of irrelevant visual features. *J Vis* 2008 8(4):25
- 15 Wallace DK, Lazar EL, Melia M, et al. Stereoacuity in children with anisometropic amblyopia. *J Aapos* 2011;15(5):455-461
- 16 Longmuir S, Pfeifer W, Scott W, et al. Effect of occlusion amblyopia after prescribed full-time occlusion on long-term visual acuity outcomes. *J Pediatr Ophthalmol Strabismus* 2013;50(2):94-101
- 17 陈燕燕, 苏炎峰, 陈洁. Cheiroscope 实体镜在斜弱视儿童立体视训练中的应用. 眼视光学杂志 2006;8(4):267-268
- 18 Grgbrendan T, Paul V. MAW Understanding the neural basis of amblyopia. *Neuroscientist* 2004;10(2):106-117
- 19 Li RW, Klein SA, Levi DM. Prolonged Perceptual Learning of Positional Acuity in Adult Amblyopia; Perceptual Template Retuning Dynamics. *J Neurosci* 2008;28(52):14223-14229
- 20 Polat U, Ma - Naim T, Belkin M, et al. Improving vision in adult amblyopia by perceptual learning. *Proc Natl Acad Sci U S A* 2004;101(17):6692-6697
- 21 Lal G, Holmes JM. Postoperative stereoacuity following realignment for chronic acquired strabismus in adults. *J Am Assoc Pediatr Ophthalmol Strabismus* 2002;6(4):233-237
- 22 Zhou Y, Huang C, Xu P, et al. Perceptual learning improves contrast sensitivity and visual acuity in adults with anisometropic amblyopia. *Vision Res* 2006;46(5):739-750
- 23 Huang CB, Zhou Y, Lu ZL. Broad bandwidth of perceptual learning in the visual system of adults with anisometropic amblyopia. *Proc Natl Acad Sci U S A* 2008;105(10):4068-4073
- 24 Li RW, Provost A, Levi DM. Extended perceptual learning results in substantial recovery of positional acuity and visual acuity in juvenile amblyopia. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2007;48(11):5046-5051
- 25 Mednick S, Nakayama K, Stickgold R. Sleep-dependent learning: A nap is as good as a night. *Nat Neurosci* 2003;6(7):697-698
- 26 Atienza M, Cantero JL, Stickgold R. Posttraining sleep enhances automaticity in perceptual discrimination. *J Cogn Neurosci* 2004;16(1):53-64
- 27 Fahle M. Perceptual learning: A case for early selection. *J Vis* 2004;4(10):879-890
- 28 Fahle M. Learning to tell apples from oranges. *Trends Cogn Sci* 2005;9(10):455-457
- 29 Xiao LQ, Zhang JY, Wang R, et al. Complete transfer of perceptual learning across retinal locations enabled by double training. *Current Biology* 2008;18(24):1922-1926
- 30 Vogels R. Mechanisms of visual perceptual learning in macaque visual cortex. *Topics Cognitive Sci* 2010;2(2):239-250
- 31 Hess RF, Mansouri B, Thompson B. Restoration of binocular vision in amblyopia and strabismus. *Strabismus* 2011;19(3):110-118