

外部噪音对弱视运动知觉影响的研究

张 杨,徐鹏景,仇祝平,周逸峰

(中国科学技术大学生命科学学院,安徽合肥 230027)

摘要:以水平方向运动的垂直光栅作为视觉刺激,在对比了15名屈光参差性弱视患者和19名正常对照被试的运动方向辨别成绩后发现,弱视眼和非弱视眼的对比敏感度比值在添加噪音前后均不随时间频率变化,且在各个时间频率下外部噪音对弱视患者和正常人运动知觉的影响大致相当.这表明弱视运动知觉时间信息处理系统大致完好,对于理解弱视损伤机制和制定治疗方案都具有启示意义.

关键词:屈光参差性弱视;运动方向辨别;外部噪音;时间频率;运动知觉

中图分类号:R339.14⁺⁵

文献标识码:A

Effects of external noise on motion perception in amblyopia

ZHANG Yang, XU Peng-jing, QIU Zhu-ping, ZHOU Yi-feng

(School of Life Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: There are two conflicting opinions about the mechanism of the motion perception deficit in amblyopia. One is that the deficit observed in temporal detection test ought to be accounted for by the deficit of the visual spatial information input from the amblyopic eye, while the other focuses on the temporal detection deficit of amblyopes. So far, no systematic research with external noise has been performed on the temporal perception of visual stimuli in amblyopia. In this study, we used drifting vertical sine-wave gratings under different temporal frequencies as stimuli, and compared the motion direction discrimination performances between fifteen anisometric amblyopes and nineteen normal controls in the conditions with and without external noise. It can be concluded that the contrast sensitivity ratios between amblyopic eyes and non-amblyopic eyes are independent on the temporal frequency, and the external noise has the equivalent impact on the temporal detection performance in amblyopes and normal controls. Thus, it reveals that the temporal perception pathway of amblyopes is intact. This study can help with understanding the impairment mechanisms of amblyopia and pursuing a suitable therapy for amblyopes.

Key words: anisometric amblyopia; motion direction discrimination; external noise; temporal frequency; motion perception

0 引言

关于弱视运动知觉损伤机制的研究一直存在争

议:一种观点认为,弱视运动知觉损伤是受到空间信息处理系统损伤的影响所致;另一种观点则认为时间信息处理系统损伤是原因所在.迄今为止还没有

收稿日期:2007-10-10;修回日期:2007-11-12

基金项目:国家自然科学基金(30630027)资助.

作者简介:张杨,女,1981年生,硕士研究生.研究方向:生物物理学. E-mail: zysdu@mail.ustc.edu.cn

通讯作者:周逸峰,博士/研究员. E-mail: zhouy@ustc.edu.cn

研究工作系统地弱视在噪音视觉刺激下的运动知觉情况进行检测。

弱视是指眼部无明显器质性病变,以功能性因素为主所引起的远视力小于等于 0.8,且不能纠正者^[1],一般分为斜视性弱视、屈光参差性弱视、形觉剥夺性弱视、屈光不正性弱视和先天性弱视五种类型。近年来,弱视危害的广度和深度都得到了广泛认同,对其研究也日趋深入。

弱视视功能损害大都表现为空间视觉(中心视力、空间定位能力和空间对比敏感度)异常^[2~4],与此同时损伤也体现于运动知觉^[5~8],但关于弱视运动知觉损伤机制的研究结果却存在争议。一种观点认为,弱视运动知觉损伤是因为空间信息处理系统受损所致,如 Bradley 等^[9]认为弱视表现出的闪光刺激(flicker stimuli)对比敏感度降低是由于弱视的空间视觉受损。另一种观点则认为弱视的时间信息处理系统受损是原因所在, Manny 等^[10]提出,尽管弱视在高时间频率低空间频率下基本正常,但在低时间频率高空间频率下却存在损伤。

Qiu 等最新的研究^[11]表明,尽管屈光参差性弱视患者的弱视眼在光栅检测和光栅运动方向辨别能力上均弱于非弱视眼,但弱视眼和非弱视眼都满足同一规律,即光栅检测与光栅运动方向辨别的对比敏感度比值($CS(\text{detection})/CS(\text{discrimination})$)不

依赖于刺激的时间频率(temporal frequency, TF)变化,且对弱视眼而言,该比值大致为 1。据此,他们推测弱视眼运动方向辨别能力的损伤主要是由于低级皮层空间视觉受损造成,运动检测方面并无明显损害。

考虑到 Qiu 等的研究是以无噪音信号作为视觉刺激,而实际的视觉环境中时时处处充斥着各式外部噪音,且外部噪音的引入可以更全面地反映出视觉系统的工作状态,所以我们在本次工作中,以水平运动的垂直光栅为视觉刺激,并引入外部噪音,对 15 名单眼屈光参差性弱视患者和 19 名正常对照被试进行了光栅运动方向辨别能力测试。通过比较噪音对弱视眼、非弱视眼和正常眼的影响,来探究弱视眼运动知觉损伤的机制。

1 实验方法

1.1 被试

15 名 13~23 岁的单眼屈光参差性弱视患者(以 P01~P15 记)参与了实验(9 男 6 女, 19 ± 0.6 岁)。每名被试均经过适合的光学矫正,具体情况如表 1 所示。其中, P01~P05 参与了所有的测试; P06~P10 仅参与了无噪音情况下的测试; P11~P15 仅参与了有噪音情况下的测试。

19 名视力正常或矫正视力正常的成人被试作

表 1 弱视被试的各项指标

Tab. 1 Characteristics of the amblyopic observers

sub	gender	age	type	optical correction		visual acuity (MAR)	
				AE	NAE	AE	NAE
P01	F	19	A	+6.00/+0.75×42°	-0.75/-0.5×161°	4.0	1.0
P02	M	20	A	+3.50	Plano	3.3	1.0
P03	F	18	A	+6.00	Plano	5.0	0.7
P04	M	13	A	+8.00	-0.75/-0.25×90°	7.5	1.4
P05	M	16	A	+7.00/+1.00×100°	-0.50/-0.50×85°	2.8	1.1
P06	F	19	A	+4.00/+1.50×100°	Plano	3.3	1.0
P07	M	22	A	+1.00/+2.00×170°	-1.75	10.0	0.7
P08	F	20	A	+6.00/+2.00×175°	-1.50	4.0	1.0
P09	F	20	A	+6.75	Plano	5.0	1.0
P10	F	18	A	+3.50	Plano	2.5	1.0
P11	M	22	A	+3.00	Plano	2.5	1.0
P12	M	20	A	+3.50	Plano	3.3	1.0
P13	M	23	A	+2.50	Plano	1.3	1.0
P14	M	20	A	+4.75/0.75×80°	-1.00	5.0	1.0
P15	M	19	A	+3.50	Plano	1.7	0.5

【注】 F, female; M, male; A, anisometric amblyopia; AE, amblyopic eye; NAE, non-amblyopic eye; MAR, minimum angle of resolution.

为对照参与了实验(10 男 9 女, 22 ± 0.8 岁). 其中, 6 人参与了所有的测试; 6 人仅参与了无噪音情况下的测试; 另有 7 人仅参与了有噪音情况下的测试. 所有被试均不了解实验目的, 在实验前签署知情同意书.

1.2 实验设备及视觉刺激

实验所用到的视觉刺激呈现于 Sony G220 显示器, 通过在 Matlab7.0 环境下调用 Psychtoolbox 2.54 工具箱实现, 驱动显卡为 ATI 7500. 实验所用到的 14 位灰阶通过特殊电路实现^[12].

刺激信号为水平运动垂直正弦光栅, 在无噪音情况下, 刺激的亮度满足

$$L = L_0 \{1 + c \sin[2\pi(fx \pm \omega t) + \phi]\}, \quad (1)$$

有噪音情况下, 刺激的亮度满足

$$L = 0.5 \times L_0 \times n + 0.5 \times L_0 \{1 + c \sin[2\pi(fx \pm \omega t) + \phi]\}, \quad (2)$$

式(1), (2)中, L_0 代表平均亮度, c 代表光栅的对比度, f 代表光栅的空间频率(2 c/deg), ϕ 代表初始的随机相位, ω 代表时间频率(1, 2, 4, 8, 16 Hz), n 代表均匀分布的白噪音. 无噪音及有噪音刺激的平均亮度均为 27 cd/m^2 .

1.3 实验设计

整个实验要求被试在暗室中单眼完成, 非测试眼用不透明眼罩遮盖. 弱视患者弱视眼和非弱视眼均需测试, 测试眼的顺序在不同患者间得到平衡; 正常对照被试仅测试主视眼. 测试时, 被试距屏幕 1.14 m.

实验包括无噪音情况和有噪音情况下光栅运动方向辨别能力测试两个任务, 所有被试在完成无噪音任务测试后方可进行有噪音任务测试. 对每一测试任务, 弱视患者在完成一眼测试后方可进行另一眼的测试. 各眼的无噪音或有噪音测试均包含 5 组(blocks), 每个 block 包含 100 个测试(trials), 共 500 个 trials, 各时间频率随机出现在每个 trial 中, 被试在每个 block 结束时可自主选择是否休息. 每次测试前, 被试通过 20 个 trials 熟悉实验操作, 不同时间频率随机呈现其中. 每次测试约需时 40 min.

1.4 实验流程

实验采用强制二选一形式: 在每个 trial 中, 一个随机向左或是向右运动的光栅($2.0^\circ \times 2.0^\circ$)呈现于屏幕中心 250 ms, 被试需通过按键来报告光栅的运动方向, 判断完成后随即呈现下一个 trial. 在测试前的熟悉练习中, 以声音提示给出反馈信息: 被试回答错误无声音提示, 回答正确则出现声音提示. 在测

试过程中无任何反馈.

对比度阈值采用 2 进 1 (two-down one-up) 阶梯法测量: 当被试连续两次回答正确后, 刺激信号的对比度自动降低 10% ($c_{t+1} = 0.90c_t$); 当被试回答错误, 刺激信号的对比度自动增加 10% ($c_{t+1} = 1.10c_t$). 最终被试的平均正确率稳定在 70.7%.

2 实验结果

2.1 无噪音情况下的结果

在无噪音情况下, 弱视眼、非弱视眼和正常眼的运动方向辨别调制传递函数 (Modulated Transfer Function, MTF) 曲线(图 1(a)) 均显示带通特性. 非弱视眼的 MTF 曲线与正常眼无显著性差异 ($F(1, 20) = 0.213$, $P > 0.6$); 弱视眼的 MTF 曲线则显著低于非弱视眼和正常眼 ($F(1, 18) = 5.086$, $P < 0.05$; $F(1, 20) = 25.145$, $P < 0.01$). 这表明在无噪音情况下, 弱视眼的功能要远弱于正常眼, 这与之前相关工作中利用不同手段得到的结论相符^[6, 7, 13, 14]. 此外, 弱视眼、非弱视眼和正常眼的最大对比敏感度均出现在 6 Hz 左右(图 1(a)).

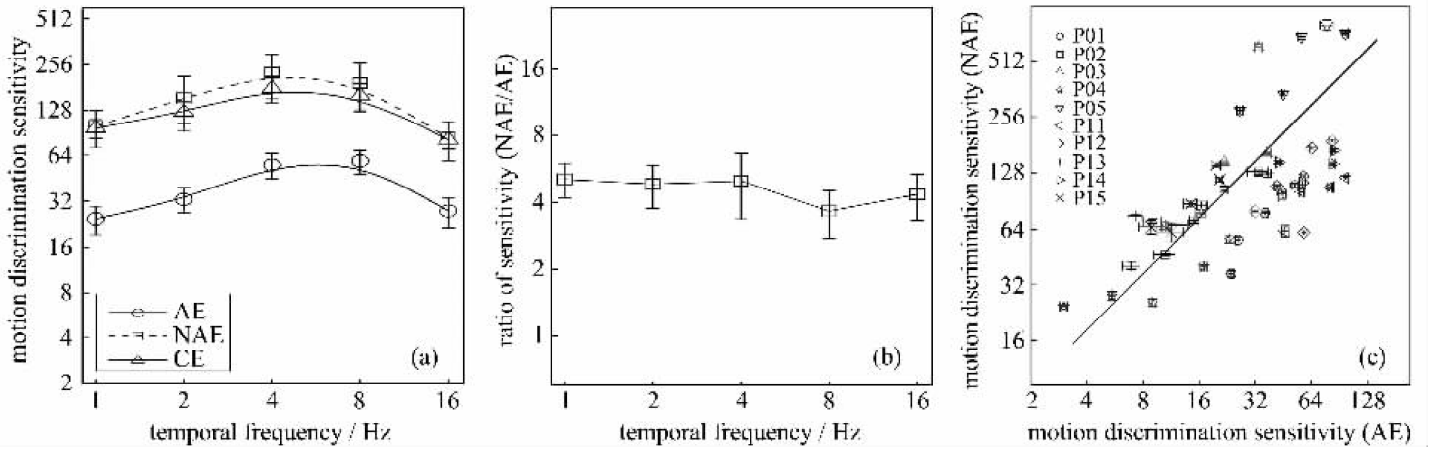
图 1(b) 显示在无噪音情况下, 对比敏感度比值 (CS(NAE)/CS(AE)) 在各个时间频率下大致相等, 平均值为 4.6 ± 0.5 ; 回归分析也表明该比值与时间频率关系曲线的斜率和 0 无显著性差异 ($r = 0.09$, $P > 0.5$).

由于弱视被试个体差异较大, 我们在图 1(c) 中给出了无噪音情况下所有被试在各时间频率下的非弱视眼对比敏感度与相应弱视眼对比敏感度的散点图. 从图中可以看出, 各数据点围绕斜率为 4.6 的比值线分布, 与图 1(b) 中平均值情况相符.

2.2 噪音背景下的结果

在有噪音情况下(图 2(a)), 非弱视眼 MTF 曲线与正常眼无显著性差异 ($F(1, 21) = 0.389$, $P > 0.5$); 而弱视眼的 MTF 曲线显著低于非弱视眼和正常眼 ($F(1, 18) = 25.046$, $P < 0.01$; $F(1, 21) = 38.869$, $P < 0.01$). 添加噪音后的 MTF 曲线簇较之无噪音情况下稍向右偏, 弱视眼、非弱视眼和正常眼的最大对比敏感度出现在 8 Hz 左右, 噪音使各测试眼的 MTF 平均最优频率提高了 2.5 dB.

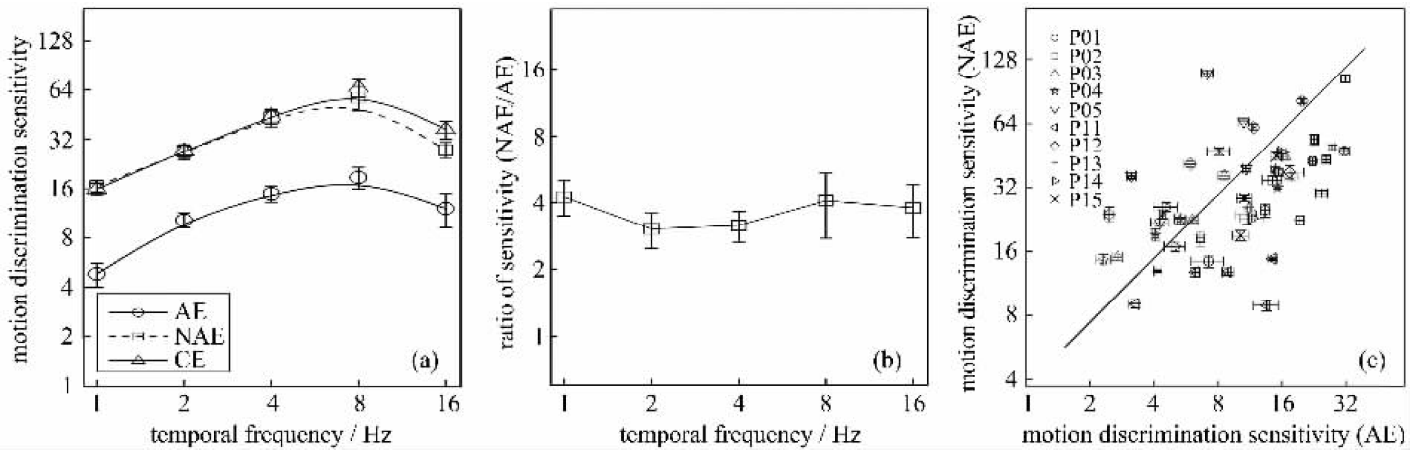
图 2(b) 显示, 在有噪音情况下, 对比敏感度比值 (CS(NAE)/CS(AE)) 也不随时间频率变化, 这与无噪音情况下类似. 回归分析也表明该比值曲线的斜率与 0 无显著性差异 ($r = 0.038$, $P > 0.7$), 平



The error bars represent one standard error

图 1 无噪音情况下,弱视眼(AE)、非弱视眼(NAE)及正常对照被试主视眼(CE)运动方向辨别 MTF 曲线(a);非弱视眼与弱视眼的平均对比敏感度比值($CS(NAE)/CS(AE)$)(b)与所有被试非弱视眼与弱视眼对比敏感度关系散点图(c)

Fig. 1 In the tasks without noise, MTF of AE, NAE and CE (a); Average motion sensitivity ratios between NAE and AE ($CS(NAE)/CS(AE)$) (b); Scatter plots of NAE and AE's motion discrimination sensitivity (c)



The error bars represent one standard error

图 2 有噪音情况下,弱视眼、非弱视眼及正常对照被试主视眼运动方向辨别 MTF 曲线(a);非弱视眼与弱视眼的平均对比敏感度比值($CS(NAE)/CS(AE)$)(b)与所有被试非弱视眼与弱视眼对比敏感度关系散点图(c)

Fig. 2 In the tasks with noise, MTF of AE, NAE and CE (a); Average motion sensitivity ratios between NAE and AE ($CS(NAE)/CS(AE)$) (b); Scatter plots of NAE and AE's motion discrimination sensitivity (c)

均值为 3.7 ± 0.4 , 与无噪音情况下相比亦无显著性差异 ($F(1,8)=0.438, P>0.5$).

考虑到弱视被试个体差异较大,我们在图 2(c)中给出了有噪音情况下,所有被试在各时间频率下的非弱视眼对比敏感度与相应弱视眼对比敏感度的散点图.数据点围绕斜率为 3.7 的比值线分布,与图 2(b)中平均值情况相符.

2.3 外部噪音的影响

为了进一步研究弱视眼、非弱视眼和正常眼在外部噪音影响下的差异,我们计算并比较了完成所有测试的 5 名弱视患者(P01~P05)和 6 名正常对照被试在无噪音和有噪音两种任务下的对比敏感度,发现:尽管在有噪音情况下,三类测试眼的对比敏感度与无噪音情况下相比,都有了显著性降低(弱

视眼 $F(1,8)=6.886, P<0.05$;非弱视眼 $F(1,8)=6.788, P<0.04$;正常眼 $F(1,10)=20.515, P<0.01$),但在各个时间频率下,各测试眼的对比敏感度比值($CS(\text{without noise})/CS(\text{with noise})$)之间却无显著性差异(如图 3 示),初步表明无论对于弱视眼还是正常眼,噪音所影响的仅仅是对比敏感度,并没有影响对运动信息的处理.统计分析显示,各测试眼在两种任务下的对比敏感度比值($CS(\text{without noise})/CS(\text{with noise})$)满足:①弱视眼和非弱视眼无显著性差异($F(1,8)=0.340, P>0.5$);②非弱视眼和正常眼无显著性差异($F(1,9)=0.313, P>0.5$);③弱视眼和正常眼也无显著性差异($F(1,9)=0.02, P>0.8$).

根据上述分析我们认为,在光栅运动方向检测

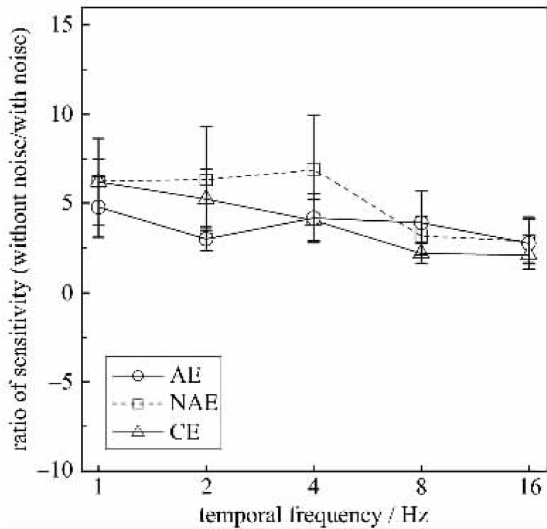


图 3 弱视眼、非弱视眼和正常眼在无噪音情况和有噪音情况下的平均对比敏感度比值 (CS(without noise)/CS(with noise))

Fig. 3 Average motion sensitivity ratios (CS(without noise)/CS(with noise)) for AE, NAE, and CE.

The error bars represent one standard error

任务中,三种类型的测试眼从噪音中提取信号的能力大致相当。

3 讨论

本研究在无噪音及有噪音情况下测试了屈光参差性弱视患者及正常对照被试的运动光栅运动方向辨别能力,并在弱视眼、非弱视眼与正常眼间进行了一系列的比较.结果表明弱视眼的光栅运动方向辨别能力显著低于非弱视眼和正常眼,但在无噪音及有噪音情况下,非弱视眼和弱视眼对比敏感度比值 (CS(NAE)/CS(AE)) 均不随时间频率变化,且弱视眼、非弱视眼和正常眼在噪音添加前后的对比敏感度比值 (CS(without noise)/CS(with noise)) 均无显著性差异。

如前所述,目前在弱视运动知觉损伤机制的研究中存在着两种观点:①损伤来自于空间信息处理系统缺损;②损伤来自于时间信息处理系统缺损.在本工作中我们发现,无噪音情况下非弱视眼和弱视眼之间的对比敏感度比值 (CS(NAE)/CS(AE)) 不随时间频率变化,这提示弱视眼的时间信息处理系统是大致完好的.在前人的研究中有很多关于弱视时空频率关系的研究. Bradley 等^[9]发现,闪光刺激出现的敏感度降低主要是因为弱视眼的空间视觉损伤所致; Rentschler 等^[15]的研究结果也表明相对于时间频率而言,时空对比敏感度的损伤更多地依赖于空间频率.最近, Qiu 等^[11]采用运动光栅对弱视

的运动感知系统损伤进行了研究,提出屈光参差性弱视患者弱视眼运动方向辨别能力的损伤主要是由于低级皮层空间视觉受损所致.在本研究中,除了无噪音情况下的结果与 Qiu 等的结果一致外,我们还研究了在有噪音情况下,非弱视眼和弱视眼之间的对比敏感度比值与时间频率的关系,也可以得出非弱视眼和弱视眼之间的对比敏感度比值 (CS(NAE)/CS(AE)) 不随时间频率变化的结论,从而进一步证实了弱视时间信息处理系统是大致完好的.这也与在时间视觉相关领域得到的其他研究结果一致,如 Manny 等^[16]的研究结果表明弱视眼的关键融合频率与非弱视眼的关键融合频率没有显著性差异.结合 Qiu 等的研究结果,我们推测弱视运动知觉损伤是空间信息处理系统缺损所致。

我们的研究结果还显示,在各个时间频率下,弱视眼、非弱视眼和正常眼在噪音添加前后的对比敏感度比值 (CS(without noise)/CS(with noise)) 大致相当(图 3),这也为弱视眼时间信息处理系统的完好性提供了另一例证。

由于正弦光栅各个局部小块(local patch)的运动方向一致,因而我们的研究工作主要关注弱视的局部运动过程^[11].鉴于此,上述结果表明弱视眼、非弱视眼与正常眼从噪音环境中提取局部运动信号的能力大致相当.而 Simmers 等^[5,7]在采用随机点(全局运动刺激)的测试中发现,当平衡了弱视眼和正常眼之间的低级皮层输入差异后,弱视眼在全局运动方向辨别任务中的成绩仍然明显低于正常眼.前人的研究工作^[17~19]指出全局运动包含两个步骤:初级视皮层(primary visual area, V1)的局部运动处理和纹外皮层(如 MT, MST)的全局运动整合.与之相结合,我们推测,弱视的全局运动损伤可能发生在纹外皮层,这也与 Qiu 等的观点^[11]一致。

早在上世纪 70 年代,就有学者意识到知觉学习具有潜在的治疗弱视的功效^[20].后续的研究则不断地对通过知觉学习治疗弱视的可行性进行探索: Zhou 等^[21]认为弱视患者可以通过正弦光栅检测任务来提高弱视眼在空间频率下的对比敏感度,进而减小弱视眼与正常眼之间的差异; Levi 等^[22]、 Chung 等^[23]和 Polat 等^[24]的工作也都表明知觉学习可以改善成人弱视患者的空间视觉.考虑到弱视眼的运动知觉损伤主要来自于空间信息处理系统,我们推测对屈光参差性弱视患者进行知觉学习训练不仅能提高其在各个空间频率下的对比敏感度,还

能达到改善运动知觉的效果,这在临床眼科医学中具有潜在的应用价值.

致谢 在实验过程中,中国科学技术大学校医院的陈林义院长和安徽医科大学第一附属医院眼科的陶黎明主任医师、封利霞副主任医师都给予了我们极大的支持,在此谨向他们致以最诚挚的谢意.

参考文献 (References)

- [1] 中华眼科学会全国儿童斜视弱视防治学组. 弱视的定义、分类及疗效评价标准[J]. 中国斜视与小兒眼科杂志, 1996, 4(3): 97.
- [2] Li R M, Levi D M. Characterizing the mechanisms of improvement for position discrimination in adult amblyopia [J]. *Journal of Vision*, 2000, 4(6): 476-487.
- [3] Levitt H. Transformed Up-Down Methods in Psychoacoustics[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1971, 49(2B): 467-477.
- [4] Barbeito R, Bedell H E, Flom M C. Does impaired contrast sensitivity explain the spatial uncertainty of amblyopes? [J]. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 1988, 29(2): 323-326.
- [5] Simmers A J, Ledgeway T, Hess R F. The influences of visibility and anomalous integration processes on the perception of global spatial form versus motion in human amblyopia[J]. *Vision Res*, 2005, 45(4): 449-460.
- [6] Kiorpes L, Tang C, Movshon J A. Sensitivity to visual motion in amblyopic macaque monkeys [J]. *Visual Neuroscience*, 2006, 23(2): 247-256.
- [7] Simmers A J, Ledgeway T, Hess R F, et al. Deficits to global motion processing in human amblyopia[J]. *Vision Research*, 2003, 43(6): 729-738.
- [8] Mansouri B, Allen H A, Hess R F. Detection, discrimination and integration of second-order orientation information in strabismic and anisometric amblyopia [J]. *Vision Res*, 2005, 45(18): 2 449-2 460.
- [9] Bradley A, Freeman R D. Temporal sensitivity in amblyopia: An explanation of conflicting reports[J]. *Vision Research*, 1985, 25(1): 39-46.
- [10] Manny R E, Levi D M. Psychophysical investigations of the temporal modulation sensitivity function in amblyopia: Spatiotemporal interactions[J]. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 1982, 22(4): 525-534.
- [11] Qiu Zhuping, Xu Pengjing, Zhou Yifeng, et al. Spatial vision deficit underlies poor sine-wave motion direction discrimination in anisometric amblyopia[J]. *Journal of Vision*, 2007, 7(11): 1-16.
- [12] Li Xiangrui, Lu Zhonglin, Xu Pengjing, et al. Generating high gray-level resolution monochrome displays with conventional computer graphics cards and color monitors[J]. *J Neurosci Methods*, 2003, 130(1): 9-18.
- [13] Anderson S J, Holliday I E, Harding G F A. Assessment of cortical dysfunction in human strabismic amblyopia using magnetoencephalography (MEG)[J]. *Vision Research*, 1999, 39(9): 1 723-1 738.
- [14] Kabasakal L, Devranolu K, Arslan O, et al. Brain SPECT evaluation of the visual cortex in amblyopia[J]. *J Nucl Med*, 1995, 36(7): 1 170-1 174.
- [15] Rentschler I, Hilz R, Brettel H. Amblyopic abnormality involves neural mechanisms concerned with movement processing[J]. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 1981, 20(5): 695-700.
- [16] Manny R E, Levi D M. Psychophysical investigations of the temporal modulation sensitivity function in amblyopia: Uniform field flicker [J]. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 1982b, 22(4): 515-524.
- [17] Sunaert S, Van Hecke P, Marchal G, et al. Motion-responsive regions of the human brain [J]. *Experimental Brain Research*, 1999, 127(4): 355-370.
- [18] Mikami A, Newsome W T, Wurtz R H. Motion selectivity in macaque visual cortex: I. Mechanisms of direction and speed selectivity in extrastriate area MT [J]. *Journal of Neurophysiology*, 1986, 55(6): 1 308-1 327.
- [19] Mikami A, Newsome W T, Wurtz R H. Motion selectivity in macaque visual cortex: II. Spatiotemporal range of directional interactions in MT and V1 [J]. *Journal of Neurophysiology*, 1986, 55(6): 1 328-1 339.
- [20] Campbell F W, Hess R F, Watson P G, et al. Preliminary results of a physiologically based treatment of amblyopia[J]. *British Journal of Ophthalmology*, 1978, 62(11): 748-755.
- [21] Zhou Yifeng, Huang Changbing, Xu Pengjing, et al. Perceptual learning improves contrast sensitivity and visual acuity in adults with anisometric amblyopia [J]. *Vision research* 2006, 46(5): 739-750.
- [22] Levi D M, Polat U, Hu Yingsheng. Improvement in Vernier acuity in adults with amblyopia. Practice makes better [J]. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 1997, 38(8): 1 493-1 510.
- [23] Chung S T, Li R W, Levi D M. Identification of contrast-defined letters benefits from perceptual learning in adults with amblyopia[J]. *Vision Research*, 2006, 46(22): 3 853-3 861.
- [24] Polat U, Ma-Naim T, Belkin M, et al. Improving vision in adult amblyopia by perceptual learning[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2004, 101(17): 6 692-6 697.