

屈光参差性弱视一阶光栅锐度和二阶纹理敏感度的感知能力

王家凤, 万茜茜, 赵云徽, 鲍宁, 陶黎明

引用: 王家凤, 万茜茜, 赵云徽, 等. 屈光参差性弱视一阶光栅锐度和二阶纹理敏感度的感知能力. 国际眼科杂志, 2024, 24(1): 42-47.

基金项目: 2021年度安徽省高校自然科学基金项目(No. KJ2021A0328); 2022年度安徽医科大学第二附属医院转化医学研究科研基金项目(No.2022ZHYJ05)

作者单位: (230601) 中国安徽省合肥市, 安徽医科大学第二附属医院眼科

作者简介: 王家凤, 毕业于安徽医科大学, 硕士, 主治医师, 研究方向: 眼视光、斜弱视。

通讯作者: 陶黎明, 毕业于中国科学技术大学, 博士, 主任医师, 博士研究生导师, 研究方向: 眼视光、斜弱视、白内障. taoliming@ahmu.edu.cn

收稿日期: 2023-07-24 修回日期: 2023-11-29

摘要

目的: 研究单眼屈光参差性弱视患者对一阶光栅锐度和二阶纹理敏感度的感知能力。

方法: 收集 2018-01/2022-12 于我院确诊的单眼屈光参差性弱视儿童 715 例 715 眼作为弱视组, 另选取矫正视力正常儿童 745 例 745 眼作为正常对照组。分别检测最佳矫正视力(BCVA)、一阶光栅锐度和(或)二阶纹理敏感度, 并分析不同程度弱视患者对一阶光栅锐度和二阶纹理敏感度的感知能力。

结果: 弱视组与正常对照组一阶光栅锐度(11.58 ± 6.10 vs 20.27 ± 3.47 , $P < 0.001$)、二阶纹理敏感度(0.33 ± 0.16 vs 0.12 ± 0.04 , $P < 0.001$)均有明显差异, 且轻中度弱视患者与重度弱视患者一阶光栅锐度(12.10 ± 6.23 vs 8.13 ± 3.70 , $P < 0.001$)和二阶纹理敏感度(0.32 ± 0.16 vs 0.37 ± 0.17 , $P < 0.05$)均有明显差异。

结论: 单眼屈光参差性弱视患者大脑皮层一阶视觉通路和二阶视觉通路均存在不同程度的损伤, 重度弱视患者较轻重中度弱视患者损伤更为严重。

关键词: 屈光参差性弱视; 视觉发育敏感期; 一阶光栅锐度; 二阶纹理敏感度; 视觉通路

DOI: 10.3980/j.issn.1672-5123.2024.1.08

Perception of first-order grating acuity and second-order spatial contrast sensitivity in anisometropia amblyopia

Wang Jiafeng, Wan Qianqian, Zhao Yunhui, Bao Ning, Tao Liming

Foundation items: Natural Science Research Project of Colleges and Universities in Anhui in 2021 (No. KJ2021A0328); Translational

Medical Research Project in Second Affiliated Hospital of Anhui Medical University in 2022 (No.2022ZHYJ05)

Department of Ophthalmology, the Second Hospital of Anhui Medical University, Hefei 230601, Anhui Province, China

Correspondence to: Tao Liming. Department of Ophthalmology, the Second Hospital of Anhui Medical University, Hefei 230601, Anhui Province, China. taoliming@ahmu.edu.cn

Received: 2023-07-24 Accepted: 2023-11-29

Abstract

• AIM: To study the perception of first-order grating acuity and second-order spatial contrast sensitivity in patients with monocular anisometropia amblyopia.

• METHODS: A total of 715 children (715 eyes) diagnosed as monocular anisometropia amblyopia in our hospital from January 2018 to December 2022 were collected as amblyopia group, and 745 children (745 eyes) with normal corrected visual acuity were collected. The best corrected visual acuity (BCVA), first-order grating acuity and/or second-order spatial contrast sensitivity were measured, respectively. The perception ability of amblyopia patients to first-order grating acuity and second-order spatial contrast sensitivity were analyzed.

• RESULTS: There were significant differences between amblyopia group and normal control group in the perception of first-order grating acuity (11.58 ± 6.10 vs. 20.27 ± 3.47 , $P < 0.001$) and second-order spatial contrast sensitivity (0.33 ± 0.16 vs 0.12 ± 0.04 , $P < 0.001$). And there were significant differences between mild-to-moderate amblyopia and severe amblyopia patients in first-order grating acuity (12.10 ± 6.23 vs. 8.13 ± 3.70 , $P < 0.001$) and second-order spatial contrast sensitivity (0.32 ± 0.16 vs. 0.37 ± 0.17 , $P < 0.05$).

• CONCLUSION: The first-order and second-order visual pathway of the cerebral cortex in children with monocular anisometropia amblyopia have different degrees of damage. The injury of severe amblyopia is more serious than that of mild-to-moderate amblyopia.

• KEYWORDS: anisometropia amblyopia; sensitive period of visual development; first-order grating acuity; second-order spatial contrast sensitivity; visual pathway

Citation: Wang JF, Wan QQ, Zhao YH, et al. Perception of first-order grating acuity and second-order spatial contrast sensitivity in anisometropia amblyopia. *Guoji Yanke Zazhi (Int Eye Sci)*, 2024, 24(1):42-47.

0 引言

弱视是视觉发育期内由于异常的视觉经验引起的单眼或双眼最佳矫正视力低于相应年龄的视力^[1],发病率约为2%~4%^[2-3]。对于弱视患者而言,外周视觉系统检查无器质性病变。因此,中枢视觉系统的损伤在弱视发病机制方面的研究是目前眼科学临床基础研究和视觉神经科学研究的热点。人类大脑视皮层有多个功能区域,不同的区域处理相应特定的视觉信息。这些皮层视觉区域又需要相互配合协同完成各种视觉信息的处理^[4]。而在日常视觉场景中,一阶刺激信息(亮度定义^[5])和二阶刺激信息(对比度调制^[6]、取向调制^[7]、运动调制^[8]和空间频率调制^[9])无处不在。这两类刺激信息的形式在日常生活中起着重要作用。因此,人类大脑视觉中枢对一阶刺激信息和二阶刺激信息的感知能力决定了视觉质量。

既往研究显示,成人弱视患者在处理一阶亮度定义的图案时存在加工缺陷,表现为特征性的低水平的感觉缺陷,包括空间分辨率降低^[10]、对比敏感度降低^[11-12]、空间准确性下降^[13]。进一步研究发现,成人弱视患者大脑视觉中枢对一阶刺激信息^[14]及二阶刺激信息^[15]处理均存在不同程度的功能缺陷。如弱视患者对二阶运动类型的图案表现出更高的空间和时间频率阈值和更窄的二阶图像可见度范围^[16]。然而目前的研究多局限于动物电生理实验,或仅针对少量成人弱视患者视觉皮层在处理一阶和二阶视觉信息时的功能损伤情况进行探讨。但弱视发病的危险期及弱视治疗的关键期均处于“视觉发育敏感期”^[17]。因此,对于“视觉发育敏感期”内弱视患者大脑皮层一阶和二阶视觉通路损伤情况的研究是揭示弱视发病机制的关键。临床工作中常通过观察视力评估弱视的严重程度,但弱视患者的空间视觉损伤有多种形式,轻中重度弱视是否也伴随着不同严重程度的空间视觉损伤目前还没有相关研究。鉴于此,本研究对屈光参差性弱视患者一阶光栅锐度和二阶纹理敏感度的感知能力进行研究,以此对屈光参差性弱视患者大脑皮层一阶和二阶视觉通路的损伤特征进行探讨,并分析不同程度弱视患者对一阶及二阶视觉信息的感知能力,以及屈光参差性弱视患者对一阶和二阶视觉信息感知能力的相关性,为弱视患者视皮层功能修复途径提供新策略。

1 对象和方法

1.1 对象 收集2018-01/2022-12于安徽医科大学第二附属医院眼科确诊的单眼屈光参差性弱视儿童715例715眼作为弱视组。纳入标准:(1)年龄5-12岁;(2)符合中华医学会眼科学分会斜视小儿眼科学组制定的《中国儿

童弱视防治专家共识(2021年)》^[18]中的相关诊断标准:

1)弱视:年龄5岁儿童弱视眼最佳矫正视力(BCVA) < 0.5 ,6岁及以上儿童弱视眼BCVA < 0.7 ;2)轻中度弱视:BCVA低于相应年龄视力正常值下限,且 ≥ 0.2 ;3)重度弱视:BCVA < 0.2 ;4)屈光参差性弱视:双眼远视性屈光不正,球镜屈光度数相差 ≥ 1.50 DS,或柱镜屈光度数相差 ≥ 1.00 DC,屈光度数较高眼为弱视眼;(3)智力发育良好,能理解并较好地配合检查。排除标准:(1)有眼部及全身器质性病变者;(2)既往有眼部外伤史以及眼部手术史者。另选取同期就诊的矫正视力正常儿童745例745眼作为正常对照组。纳入标准:(1)年龄5-12岁;(2)双眼最佳矫正视力均 ≥ 0.8 ; (3)智力发育良好,能理解并较好地配合检查。排除标准同弱视组。本研究经安徽医科大学第二附属医院医学伦理委员会批准,且所有资料的使用均取得了患者及其监护人的知情同意。

1.2 方法

1.2.1 眼科常规检查 采用标准对数视力表检查患者的裸眼视力、BCVA,裂隙灯检查屈光间质及眼底。

1.2.2 一阶光栅锐度和二阶纹理敏感度感知能力检查 采用皮层视知觉功能检测仪(合肥科飞视觉科技有限公司生产,图1)对患者一阶光栅锐度和二阶纹理敏感度感知能力进行检测^[19-20]。所有患者均在屈光矫正的情况下进行单眼测试,非测试眼使用不透光眼罩遮盖。检查过程中,患者头部由可调节高度的支架固定,以保证所有显示器均在被试中央凹处单眼观看,人眼到视标的距离为2.24 m。检测环境为灯光昏暗的房间里。测试前,先对患者讲解操作要点并进行操作训练,让患者理解并熟悉测试方法。测试时,患者根据指令完成测试任务,并通过手柄按键回答。当患者对单项任务回答“对-错”或者“错-对”转折点达到8次时,测试结束。测试过程中保持周围环境安静以防止外界干扰。

1.2.2.1 一阶光栅锐度感知能力 刺激为边缘模糊的正弦光栅,占5.5度视角,其中模糊部分占0.5度视角。刺激的呈现时间为150 ms。刺激呈现后,患者需要判断刺激的方位(45度朝向或135度朝向,图2),完成方位辨别任务。测试过程中,系统通过阶梯法实时调整刺激的空间频率,并评估患者完成任务的空间频率阈值。其对比度大于0.8,空间频率的变化范围是3-36周期/度。

1.2.2.2 二阶纹理敏感度感知能力 刺激为边缘模糊的、对比度调制的二阶正弦光栅,占5.5度视角,其中模糊部分占0.5度视角。刺激的呈现时间为150 ms。刺激呈现后,患者需要判断刺激的方位(45度朝向或135度朝向,图3),



图1 刺激呈现系统 A:视觉皮层功能检测系统,包含主机、分屏器和手柄,人眼到视标的距离为2.24 m;B:检测前对测试方法说明的示范指示牌;C:检测前屏幕中显示的测试方法。

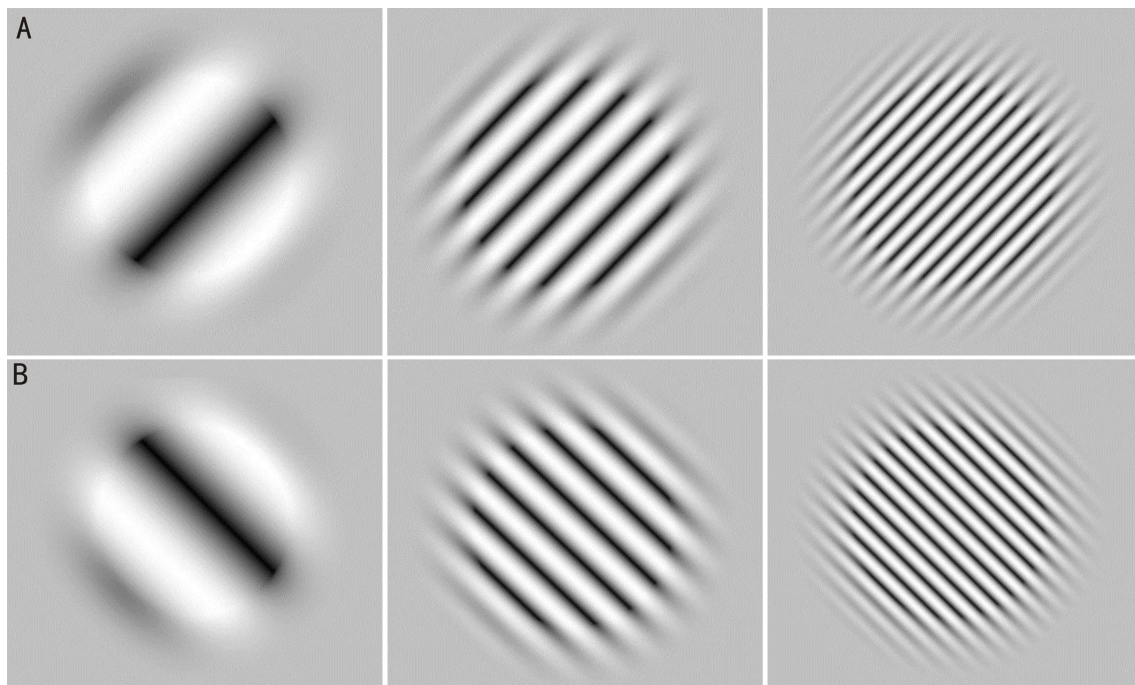


图2 不同空间频率的一阶光栅锐度范式图 A:45度朝向;B:135度朝向。

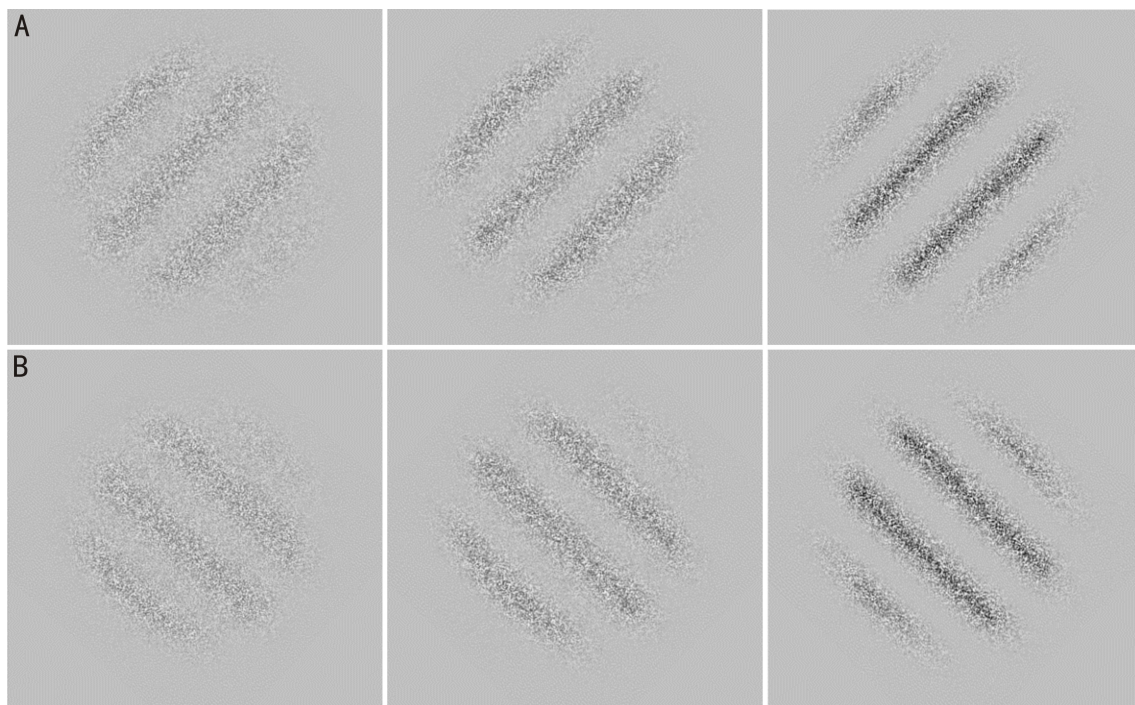


图3 不同对比度下的二阶纹理敏感度范式图 A:45度朝向;B:135度朝向。

完成方位辨别任务。系统通过阶梯法实时调整刺激的对比度,并评估患者完成任务的对比度阈值。刺激的空间频率为1.0周期/度,对比度的变化范围是0.005-1.000。刺激采用对比度为1.0的白噪音作载波。为有效降低载波中一阶(亮度)信息对二阶纹理信息的干扰,刺激采用动态载波,每50 ms变换1次,即整个刺激呈现期间,使用了3幅不同的白噪音载波。

统计学分析:采用SPSS 24.0统计软件对数据进行统计分析。计量资料均符合正态分布,采用均数±标准差($\bar{x} \pm s$)表示,两组间比较采用独立样本 t 检验。计数资料采用频数表示,两组间比较采用 χ^2 检验。用Pearson相关分析法进行相关性分析。 $P < 0.05$ 认为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 纳入患者的一般资料 将接受一阶光栅锐度感知能力检测的弱视组和正常对照组受试者纳入试验1,接受二阶纹理敏感度感知能力检测的弱视组和正常对照组受试者纳入试验2。

试验1中,弱视组356例356眼,其中男167例,女189例,平均年龄 8.04 ± 1.94 岁,BCVA(LogMAR)为 0.45 ± 0.25 ;正常对照组410例410眼,其中男191例,女219例,平均年龄 7.93 ± 1.94 岁,BCVA(LogMAR)为 0.03 ± 0.05 ,两组受试者性别、年龄差异无统计学意义($\chi^2 = 0.01, P = 0.93; t = -0.82, P = 0.41$),BCVA差异有统计学意义($t = -31.02, P < 0.001$)。

试验 2 中,弱视组 359 例 359 眼,其中男 183 例,女 176 例,平均年龄 7.65 ± 1.89 岁,BCVA(LogMAR)为 0.51 ± 0.24 ;正常对照组 335 例 335 眼,其中男 162 例,女 173 例,平均年龄 7.60 ± 1.93 岁,BCVA(LogMAR)为 0.05 ± 0.06 ,两组受试者性别、年龄差异无统计学意义($\chi^2 = 0.47, P = 0.49; t = -0.36, P = 0.72$),BCVA 差异有统计学意义($t = -35.06, P < 0.001$)。

2.2 一阶光栅锐度感知能力 试验 1 中,弱视组和正常对照组一阶光栅锐度分别为 11.58 ± 6.10 、 20.27 ± 3.47 ,差异有统计学意义($t = 23.73, P < 0.001$)。根据弱视的严重程度将弱视组患者分为轻中度弱视和重度弱视,轻中度弱视患者 310 例 310 眼,其中男 148 例,女 162 例,平均年龄 8.01 ± 1.86 岁,一阶光栅锐度 12.10 ± 6.23 ;重度弱视患者 46 例 46 眼,其中男 19 例,女 27 例,平均年龄 8.24 ± 2.38 岁,一阶光栅锐度 8.13 ± 3.70 ;轻中度弱视和重度弱视患者性别、年龄差异无统计学意义($\chi^2 = 0.67, P = 0.41; t = -0.62, P = 0.54$),一阶光栅锐度差异有统计学意义($t = -6.10, P < 0.001$)。

2.3 二阶纹理敏感度感知能力 试验 2 中,弱视组和正常对照组的二阶纹理敏感度分别为 0.33 ± 0.16 、 0.12 ± 0.04 ,差异有统计学意义($t = -24.07, P < 0.001$)。根据按弱视的严重程度将弱视组患者分为轻中度弱视和重度弱视,轻中度弱视患者 303 例 303 眼,其中男 154 例,女 149 例,平均年龄 7.69 ± 1.88 岁,二阶纹理敏感度 0.32 ± 0.16 ;重度弱视患者 56 例 56 眼,其中男 29 例,女 27 例,平均年龄 7.45 ± 1.96 岁,二阶纹理敏感度为 0.37 ± 0.17 ;轻中度弱视和重度弱视患者性别、年龄差异无统计学意义($\chi^2 = 0.02, P = 0.89; t = -0.90, P = 0.37$),二阶纹理敏感度差异有统计学意义($t = 2.13, P = 0.034$)。

2.4 一阶光栅锐度和二阶纹理敏感度感知能力的相关性 筛选出同时进行一阶光栅锐度和二阶纹理敏感度感知能力检测的单眼屈光参差性弱视患者 111 例 111 眼, Pearson 相关性分析结果显示,一阶光栅锐度和二阶纹理敏感度呈负相关($r = -0.442, P < 0.001$),见图 4。

3 讨论

本研究结果显示,单眼屈光参差性弱视患者对一阶光栅锐度的感知能力较正常儿童明显降低,且重度弱视患者较轻中度弱视患者对一阶光栅锐度的感知能力更差。同样,单眼屈光参差性弱视患者对二阶纹理敏感度的感知能力较正常儿童也明显降低,且重度弱视患者较轻中度弱视患者对二阶纹理敏感度的感知能力更差。提示屈光参差性弱视患者大脑皮层一阶视觉通路和二阶视觉通路均存在不同程度损伤,且弱视越严重,一阶视觉通路和二阶视觉通路损伤程度越严重。屈光参差性弱视患者一阶视觉通路的损伤会伴随二阶视觉通路的损伤。

既往研究表明,弱视患者存在显著的一阶信息感知能力下降^[14]。Simmers 等^[21]研究检测了 11 例成人弱视患者的一阶全局运动处理能力,结果发现成人弱视患者存在一阶全局运动处理缺陷,这些缺陷与对比敏感度缺陷无关,且在对比度定义的刺激下比亮度定义的刺激下这种缺陷更显著,因此推测弱视患者皮层缺陷的部位包含了纹外皮

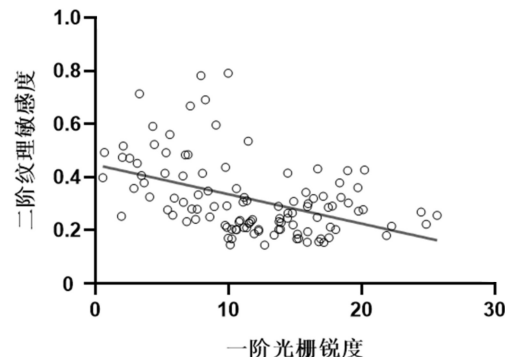


图 4 单眼屈光参差性弱视患者一阶光栅锐度与二阶纹理敏感度的相关性。

质,特别是背侧通路。Simmers 等^[22]研究还发现成人弱视患者存在一阶全局定向和一阶全局运动整合的加工缺陷,这些缺陷包括对于亮度定义的刺激和对比度定义的刺激。Muckli 等^[13]运用功能磁共振技术评估 8 例成人弱视患者弱视眼接受一阶光栅刺激引起的皮质反应,发现在较低视觉中枢(V1/V2),正常眼和弱视眼对光栅刺激均可引起强烈的皮质反应,而在较高视觉中枢(V3a/Vp, V4/V8, 枕侧复合体)弱视眼对光栅刺激的反应逐渐降低,表明弱视眼的一阶刺激信息传递到更高视觉中枢的处理水平时受到了越来越多的损害,这为成人弱视患者对一阶刺激信息感知能力下降提供了有力的证据。本研究结果提示,儿童屈光参差性弱视患者对一阶光栅锐度刺激信息的感知能力较正常儿童明显降低。与既往研究不同,本研究对大样本量“视觉发育敏感期”内屈光参差性弱视患者的大脑视觉通路损伤情况进行检测,并与既往研究^[16,23-24](1000、250 ms)不同的是本研究中的刺激呈现持续的时间较小(150 ms)。本研究发现儿童屈光参差性弱视患者与成人弱视患者一样,对一阶刺激信息的感知能力明显降低。综合上述研究结果表明,弱视患者在“视觉发育敏感期”内即表现为对一阶刺激信息感知能力缺陷,如在“视觉发育敏感期”内没有及时治疗弱视,至成年后对一阶刺激信息感知能力仍然缺陷。因此,弱视患者大脑皮层一阶视觉通路损伤可能是弱视患者视功能损害的中枢机制。

目前对于二阶刺激信息感知能力的研究主要集中在成人弱视患者。Wong 等^[25]采用静态一阶和二阶刺激信息检测任务对 5 例成人弱视患者和 3 例对照观察者的弱视眼和非弱视眼进行检测,发现 4 例弱视患者均表现出对二阶刺激信息感知功能的缺陷。Mansouri 等^[15]研究使用了另一种方向辨别任务(垂直和水平)研究 8 例成人弱视患者对静态二阶刺激的感知,同样发现弱视患者存在显著的二阶刺激信息感知功能缺陷,且这些缺陷不能由已知的一阶信息感知功能缺陷所解释。Simmers 等^[22]研究了成人弱视患者对一阶和二阶平移运动的知觉,同样发现弱视眼表现为对二阶全局定向整合的加工缺陷,且对于运动性刺激的感知缺陷,二阶刺激信息的感知比一阶刺激信息的感知损伤更严重。Simmers 等^[16]又使用了一项包含 4 种不同二阶刺激(对比度、闪烁、大小和视觉噪音方向的调制)的运动方向辨别任务对 3 例成人弱视患者进行检测,发现与正常人相比,弱视患者不仅在一阶运动信息的处理

上受到损害,且对二阶图像表现出更高的阈值和更窄的可见性窗口,并提出弱视个体之间存在显著差异,表明对于严重的弱视患者来说,环境中运动的某些二级(纹理)线索实际上是看不见的。Tang等^[24]使用了与本研究类似的对比度定义的运动方向辨别任务(向左和向右)对成人弱视患者进行检测,Zhou等^[26]使用了二阶对比度双眼整合任务对成人弱视患者进行检测,尽管上述检测为不同类型的二阶刺激信息检测任务,但研究结果均发现弱视眼对二阶刺激信息的感知能力非常差。而本研究对大样本量“视觉发育敏感期”的屈光参差性弱视患者进行研究,与上述研究不同,本研究中所使用的二阶纹理刺激信息有效滤过了一阶刺激信息的影响,研究结果更可靠。本研究发现,儿童屈光参差性弱视患者对二阶纹理刺激信息的感知能力较正常儿童也明显降低,提示这种对二阶纹理刺激信息的感知能力缺陷如不及时干预将持续至成年。因此,对于“视觉发育敏感期”的弱视患者及时治疗至关重要。

目前对弱视特征的认知包括单眼视觉功能降低(如视觉敏锐度^[27]、对比敏感度^[12])和双眼视觉缺陷(如双眼整合^[28]、眼间抑制^[29]和立体视觉^[30-32])。研究证实,单眼视觉功能(如对比敏感度^[33])和双眼视觉功能(如立体视觉^[34]、眼间抑制^[35])均与弱视的严重程度具有相关性。而既往还没有相关研究探讨不同程度弱视患者一阶刺激信息和二阶刺激信息的感知能力情况。Simmers等^[16]研究提出,弱视个体之间存在显著的差异性,对于重度弱视患者,环境中运动的某些二阶(纹理)线索将无法感知,但该研究仅对3例成人弱视患者进行了分析。本研究发现,重度弱视患者较轻中度弱视患者对一阶光栅锐度的感知能力和二阶刺激信息的感知能力都更差,提示重度弱视患者的大脑皮层一阶视觉通路和二阶视觉通路损伤程度更严重。这就意味着严重的弱视将无法感知周围环境中的某些视觉信息,这对弱视患者的生活及工作会带来严重的影响。但这种损伤也有可能和弱视的类型有关,其他类型弱视患者在不同视觉信息处理通路上的损伤特征需要进一步研究。

本研究进一步筛选出同时检测了一阶光栅锐度和二阶纹理敏感度的屈光参差性弱视患者,发现一阶光栅锐度和二阶纹理敏感度之间存在显著相关性。Wong等^[25]研究发现,成人弱视患者对二阶空间信息的感知功能损伤,且这种损伤大于一阶空间输入的损伤,提示二阶空间信息的损伤具有单独的损伤机制。Simmers等^[22]研究比较了同一成人弱视患者在一阶和二阶刺激下的全局运动和全局定向编码缺陷的比率,结果发现二阶运动刺激比一阶运动刺激在整体运动加工中的缺陷要广泛得多,且在两种类型的刺激中,二阶全局运动加工缺陷显著大于全局定向编码缺陷。而本研究中屈光参差性弱视患者的一阶光栅锐度和二阶纹理敏感度之间存在显著相关性,提示弱视患者对一阶信息感知功能的损伤会伴随着二阶信息感知功能的损伤,弱视患者大脑的一阶视觉通路与二阶视觉通路可能存在关联性。

综上所述,儿童屈光参差性弱视患者大脑皮层一阶视觉通路和二阶视觉通路均存在不同程度的损伤,且重度弱

视患者较轻中度弱视患者大脑皮层一阶视觉通路和二阶视觉通路损伤程度更为严重。儿童屈光参差性弱视患者一阶视觉通路的损伤会伴随二阶视觉通路的损伤。本研究有助于阐明弱视患者视功能损害和修复的中枢机制,加深理解弱视患者视觉神经系统对不同视觉信息感知能力的重要性,并有望为弱视患者开发新型视皮层功能修复途径提供新策略。

参考文献

- [1] Levi DM. Rethinking amblyopia 2020. *Vis Res*, 2020, 176: 118-129.
- [2] 符竹筠, 刘虎. 2017年美国眼科学会弱视临床指南解读. *中华实验眼科杂志*, 2019, 28(7): 566-568.
- [3] Wallace DK, Repka MX, Lee KA, et al. Amblyopia preferred practice pattern®. *Ophthalmology*, 2018, 125(1): 105-142.
- [4] Johnson AP, Jr Baker CL. First- and second-order information in natural images: a filter-based approach to image statistics. *J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis*, 2004, 21(6): 913-925.
- [5] Cavanagh P, Mather G. Motion: The long and short of it. *Spat Vis*, 1989, 4(2): 103-129.
- [6] Schofield AJ, Georgeson MA. Sensitivity to modulations of luminance and contrast in visual white noise: separate mechanisms with similar behaviour. *Vision Res*, 1999, 39(16): 2697-2716.
- [7] Reynaud A, Hess RF. Properties of spatial channels underlying the detection of orientation-modulations. *Exp Brain Res*, 2012, 220(2): 135-145.
- [8] Meso AI, Hess RF. Visual motion gradient sensitivity shows scale invariant spatial frequency and speed tuning properties. *Vision Res*, 2010, 50(15): 1475-1485.
- [9] Elleberg D, Allen HA, Hess RF. Second-order spatial frequency and orientation channels in human vision. *Vision Res*, 2006, 46(17): 2798-2803.
- [10] Min SH, Mao Y, Chen SJ, et al. Modulation of mean luminance improves binocular balance across spatial frequencies in amblyopia. *iScience*, 2022, 25(7): 104598.
- [11] Mao Y, Min SH, Chen SJ, et al. Binocular imbalance in amblyopia depends on spatial frequency in binocular combination. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2020, 61(8): 7.
- [12] Jia Y, Ye QQ, Zhang SL, et al. Contrast sensitivity and stereoacuity in successfully treated refractive amblyopia. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2022, 63(1): 6.
- [13] Muckli L, Kiess S, Tonhausen N, et al. Cerebral correlates of impaired grating perception in individual, psychophysically assessed human amblyopes. *Vision Res*, 2006, 46(4): 506-526.
- [14] Qiu ZP, Xu PJ, Zhou YF, et al. Spatial vision deficit underlies poor sine-wave motion direction discrimination in anisometric amblyopia. *J Vis*, 2007, 7(11): 7.1-7.16.
- [15] Mansouri B, Allen HA, Hess RF. Detection, discrimination and integration of second-order orientation information in strabismic and anisometric amblyopia. *Vision Res*, 2005, 45(18): 2449-2460.
- [16] Simmers AJ, Ledgeway T, Hutchinson CV, et al. Visual deficits in amblyopia constrain normal models of second-order motion processing. *Vision Res*, 2011, 51(18): 2008-2020.
- [17] 刘虎, 赵堪兴. 视觉发育敏感期及其可塑性机制的研究. *眼科新进展*, 2004, 24(5): 395-397.
- [18] 中华医学会眼科学分会斜视与小儿眼科学组, 中国医师协会眼科医师分会斜视与小儿眼科学组. 中国儿童弱视防治专家共识

- (2021年). 中华眼科杂志, 2021,57(5):336-340.
- [19] Reynaud A, Tang Y, Zhou YF, et al. Second-order visual sensitivity in the aging population. *Aging Clin Exp Res*, 2019,31(5):705-716.
- [20] 刘雪梅, 封利霞. 远视力正常的糖尿病患者二阶运动光栅感知能力的初步研究. *中华眼外伤职业眼病杂志*, 2020,42(8):570-574.
- [21] Simmers AJ, Ledgeway T, Hess RF, et al. Deficits to global motion processing in human amblyopia. *Vision Res*, 2003,43(6):729-738.
- [22] Simmers AJ, Ledgeway T, Hess RF. The influences of visibility and anomalous integration processes on the perception of global spatial form versus motion in human amblyopia. *Vision Res*, 2005,45(4):449-460.
- [23] Schofield AJ, Ledgeway T, Hutchinson CV. Asymmetric transfer of the dynamic motion aftereffect between first- and second-order cues and among different second-order cues. *J Vis*, 2007,7(8):1.
- [24] Tang Y, Liu CY, Liu ZJ, et al. Processing deficits of motion of contrast-modulated gratings in anisometric amblyopia. *PLoS One*, 2014,9(11):e113400.
- [25] Wong EH, Levi DM, McGraw PV. Is second-order spatial loss in amblyopia explained by the loss of first-order spatial input? *Vision Res*, 2001,41(23):2951-2960.
- [26] Zhou JW, Liu R, Feng LX, et al. Deficient binocular combination of second-order stimuli in amblyopia. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2016,57(4):1635-1642.
- [27] Birch EE, Jost RM, Hudgins LA, et al. Dichoptic and monocular visual acuity in amblyopia. *Am J Ophthalmol*, 2022,242:209-214.
- [28] Huang CB, Zhou JW, Lu ZL, et al. Deficient binocular combination reveals mechanisms of anisometric amblyopia: signal attenuation and interocular inhibition. *J Vis*, 2011,11(6):10.1167/11.6.44.
- [29] Hamm L, Chen ZD, Li JR, et al. Interocular suppression in children with deprivation amblyopia. *Vis Res*, 2017,133:112-120.
- [30] 王家凤, 刘贺婷, 陶黎明. 屈光参差性弱视与斜视性弱视临床疗效的比较. *国际眼科杂志*, 2022,22(2):211-214.
- [31] 陈英, 吕露, 刘芸, 等. 4D数字化弱视斜视矫治系统对远视性屈光不正性及屈光参差性弱视的疗效观察. *国际眼科杂志*, 2021,21(2):321-324.
- [32] Chen YY, Yao ZM, He ZF, et al. A joint lateral motion-stereo constraint. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2022,63(1):32.
- [33] 邓斯元, 吕忠林, 李劲嵘. 对比敏感度检测方法及其在弱视诊疗中的应用. *国际眼科纵览*, 2019,43(3):204-210.
- [34] 周靖晶, 戴鸿斌. 弱视儿童与正常儿童 P-VEP 及立体视的差异性研究. *中国斜视与小儿眼科杂志*, 2021,29(2):12-15.
- [35] Shiraiishi Y, Wakayama A, Matsumoto F, et al. The association between improvement of stereoacuity and suppression in the treatment of anisometric amblyopia. *Clin Ophthalmol*, 2023,17:1545-1553.