

环境亮度及瞳孔直径对人眼神神经对比敏感度的影响

赵冠华¹, 曹瑞丹¹, 张磊¹, 严伟明¹, 陈涛¹, 王斌¹, 丁一峰², 王美艳¹, 张作明¹

基金项目: 全军后勤科研重大项目 (No. AKJ11J002); 全军后勤科研重点项目 (No. BKJ14C008)

作者单位:¹(710032) 中国陕西省西安市, 第四军医大学航空航天医学系;²(710032) 中国陕西省西安市, 第四军医大学学员一旅五营十七连

作者简介: 赵冠华, 男, 在读硕士研究生, 研究方向: 视觉科学、眼视光学。

通讯作者: 张作明, 男, 教授, 副主任医师, 博士研究生导师, 研究方向: 视觉生理学、眼科医学. zhangzm@fmmu.edu.cn

收稿日期: 2016-08-07 修回日期: 2016-11-08

Effects of surround luminance and pupil diameter on neural contrast sensitivity function

Guan-Hua Zhao¹, Rui-Dan Cao¹, Lei Zhang¹, Wei-Ming Yan¹, Tao Chen¹, Bin Wang¹, Yi-Feng Ding², Mei-Yan Wang¹, Zuo-Ming Zhang¹

Foundation items: The Military Logistics of Major Scientific Research Projects (No. AKJ11J002); the Military Logistics of Scientific Research Projects (No. BKJ14C008)

¹Department of Clinical Aerospace Medicine, the Fourth Military Medical University, Xi'an 710032, Shaanxi Province, China;²Cadet Brigade, the Fourth Military Medical University, Xi'an 710032, Shaanxi Province, China

Correspondence to: Zuo-Ming Zhang. Department of Clinical Aerospace Medicine, the Fourth Military Medical University, Xi'an 710032, Shaanxi Province, China. zhangzm@fmmu.edu.cn

Received: 2016-08-07 Accepted: 2016-11-08

Abstract

• **AIM:** To analysis and compare the influence of surround luminance and pupil diameter on neural contrast sensitivity function (NCSF) and contrast sensitivity function (CSF).

• **METHODS:** Ten healthy male volunteers (10 eyes) were recruited in this study, and the right eye was tested in this experiment. Different surround luminance levels and glare were set by Vision Monitor System to measure CSF curves of normal pupil, 3.0mm pupil and 5.0mm pupil. Modulation transfer function (MTF) curves of 3.0mm pupil and 5.0mm pupil were measured by Optical Quality Analysis System. NCSF was the ratio of CSF and MTF.

• **RESULTS:** NCSF and CSF curves went downward

considerably and the curve waves shifted towards low spatial frequency as the surround luminance decreases. Compared with NCSF, the curve waves of CSF shifted towards lower spatial frequency. The change of CSF was affected by NCSF and MTF. When pupil diameter increases, MTF curve went downward. While the NCSF and CSF curves mounted up at low spatial frequency in the mesopic and photopic visual environment and showed downward trend at high spatial frequency in excessive bright environment or with glare. In the scotopic visual environment, the slight pupil diameter change cannot considerably affect CSF and NCSF curves.

• **CONCLUSION:** CSF is influenced by MTF and NCSF which reflects the function of the retina-brain neural system. The curve shape of CSF is similar to NCSF, but the curve wave is at lower spatial frequency. NCSF and CSF curves go downward as the surround luminance decreases. As the pupil diameter increases, NCSF and CSF curves mount up at low spatial frequency but show downward trend at high spatial frequency in excessive bright environment or with glare.

• **KEYWORDS:** contrast sensitivity; neural contrast sensitivity; luminance; pupil

Citation: Zhao GH, Cao RD, Zhang L, et al. Effects of surround luminance and pupil diameter on neural contrast sensitivity function. *Guoji Yanke Zazhi(Int Eye Sci)* 2016;16(12):2279-2284

摘要

目的: 研究环境亮度及瞳孔直径对神经对比敏感度函数(NCSF)的影响,并与对比敏感度函数(CSF)相比较。

方法: 招募健康男性志愿者10名,右眼作为受试者,以右眼为测试眼,利用视觉监视系统设置不同环境亮度并附加眩光,测量自然、3.0mm和5.0mm瞳孔时的CSF;利用视觉质量分析仪测量3.0mm和5.0mm瞳孔时的调制传递函数(MTF),根据CSF与MTF的比值求得NCSF。

结果: NCSF和CSF随环境亮度降低曲线整体下移,波峰向低频区移动,CSF更偏向低频区。CSF变化受NCSF和MTF共同作用,瞳孔开大,MTF下降,在明视觉环境和中间视觉环境中,NCSF和CSF上升,主要上升区为中低频区;当亮度较高或存在眩光源时,NCSF和CSF在中低频区上升不明显,在高频区有下降的趋势;在暗视觉环境中,小范围的瞳孔波动对NCSF和CSF没有显著影响。

结论: NCSF能够反映视觉神经系统的功能,与MTF共同决定CSF。CSF曲线形状与NCSF相近,波峰更偏向低频区。环境亮度降低会使NCSF下降,CSF随之下降;瞳孔

开大会使 NCSF 在中低频区上升,CSF 随之上升,而环境较亮或存在眩光源时,NCSF 和 CSF 在高频区都有下降的趋势。

关键词:对比敏感度;神经对比敏感度;亮度;瞳孔

DOI:10.3980/j.issn.1672-5123.2016.12.28

引用:赵冠华,曹瑞丹,张磊,等.环境亮度及瞳孔直径对人眼神经对比敏感度的影响.国际眼科杂志 2016;16(12):2279-2284

0 引言

对比敏感度函数(contrast sensitivity function,CSF)是检查视觉功能的常用方法,反映了人眼在不同空间频率上的对比敏感特征,与视敏度相比,能够更好地反映视觉质量^[1]。CSF 受光学因素和神经因素共同影响,光学因素指屈光系统将外界物体成像于视网膜上的光学质量,可用调制传递函数(modulation transfer function,MTF)评价;神经因素指视网膜、视神经和大脑中枢构成的视觉神经系统处理图像的能力,可用神经对比敏感度函数(neural contrast sensitivity function,NCSF)评价^[2]。NCSF 与 CSF 的关系为:

$$NCSF = CSF / MTF^{[3-4]} \quad (1)$$

NCSF 能够排除光学因素,对神经因素进行评价。可用以比较不同光学质量者的视觉神经系统功能,有望应用于多焦点人工晶状体的神经适应研究、青光眼患者的早期 NCSF 改变,以及多发性硬化等神经系统疾病的早期诊断等^[2]。以往关于 NCSF 的研究所用亮度范围有一定的局限性^[5-6],对瞳孔的研究多集中于其对 MTF 的影响^[7-10]。本研究测量的环境亮度 $10^{-4} \sim 10^2 \text{ cd/m}^2$,探讨了明视觉、中间视觉、暗视觉环境及存在眩光源时 NCSF 和 CSF 曲线的变化特性及瞳孔直径带来的影响。

1 对象和方法

1.1 对象 实验受试者为第四军医大学本科男性学员 10 名 10 眼,受试年龄为 20.9 ± 0.88 岁,等效球镜度数为 -1.2 ± 0.93 ($-2.75 \sim 0D$)D。所有受检者均排除眼科手术史、角膜接触镜配戴史、一切影响视功能的器质性疾病和炎症及不能配合检查者,最佳矫正视力 ≥ 1.0 。实验过程中被试者的左眼被遮挡,以右眼作为实验眼进行观察。

1.2 方法 通过测量得出 CSF 与 MTF,利用公式(1)计算得出 NCSF。

1.2.1 CSF 的测量 采用 Monpack3 视觉监视系统(Vision Monitor System)测量 CSF。该仪器在测量 CSF 时,每个测量点至少测量 3 次,取后两次的平均值为结果,若这两次相差过大,则再次测量,直至得到两次相近的测量结果,再将这两次结果取均值。本实验设定环境亮度依次为 1.15×10^{-4} 、 1.15×10^{-3} 、 1.15×10^{-2} 、 1.15×10^{-1} 、1.15、11.5、115 cd/m^2 7 个亮度以及存在眩光源时的 115、11.5、1.15 cd/m^2 3 个环境亮度。设定 x 轴空间频率为 0.6、1.1、2.2、3.4、7.1、14.2、17.7、23.6、35.5 c/d ,以这 9 个测量点来绘制 CSF 曲线。为观察瞳孔直径对 NCSF 的影响,采用没有度数的镜片 2 片,分别贴上中心

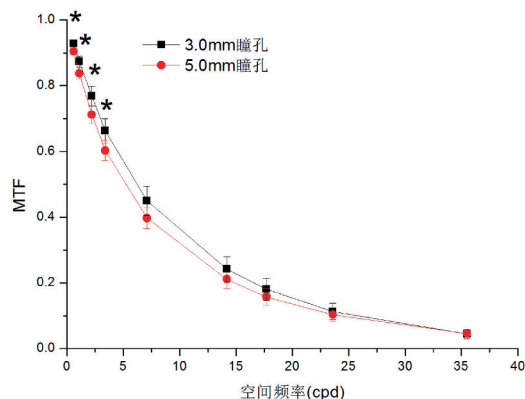


图1 3.0mm 和 5.0mm 瞳孔直径时 * $P < 0.05$ vs 5.0mm MTF。

有直径 3mm 和 5mm 圆孔的黑纸,作为限定瞳孔直径的小孔片^[9]。实验环境为暗室条件,受试者进入实验室之前,使用球柱镜片将右眼视力矫正到 ≥ 1.0 (从近眼第二个插片槽开始插片),记录球柱镜片度数。之后进入实验室,受试者坐于距刺激屏 2.0m 处,受试眼平视刺激屏,与刺激屏中心点位于同一水平线上,视线与刺激屏垂直。操作者坐于操作电脑前,电脑屏用红色遮光板遮挡,电脑桌面背景设为黑色。受试者戴上配镜框,左眼用黑片遮挡,从右眼第二个插片槽开始插入之前记录的球柱镜片。暗适应 20min 后,由暗至亮依次测量 CSF,以及存在眩光源时的 CSF,每个环境亮度下的 CSF 测量结束后,间隔 1min 后再开始下一个环境亮度下的测量,得出自然瞳孔时各个环境亮度下的 CSF 曲线。而后用复方托吡卡胺滴眼液将受试者右眼散瞳,待瞳孔散大到超过 5.0mm 后,在之前配镜的基础上,右眼近眼的第一个插片槽插入 3.0mm 小孔片,暗适应 20min,其他步骤同前,得出 3.0mm 瞳孔时不同环境亮度下的 CSF 曲线。而后再进行暗适应 20min,将 3.0mm 小孔片换成 5.0mm 小孔片,得出 5.0mm 瞳孔时不同环境亮度下的 CSF 曲线。

1.2.2 MTF 的测量 采用视觉质量分析仪(OQAS II)测量 MTF。在暗室条件下,待受试瞳孔自然散大到 $\geq 5.0\text{mm}$,依据 OQAS 标准操作程序进行视觉质量测量操作,将测量的瞳孔直径设置为 3.0mm,得出 3.0mm MTF 曲线;之后将测量的瞳孔直径设置为 5.0mm,重复测量得出 5.0mm MTF 曲线。

1.2.3 计算得出 NCSF 将 OQAS II 测得的 3.0mm 和 5.0mm MTF 的数据导入绘图软件 origin7.5 中,从曲线上截取 x 轴空间频率为 0.6、1.1、2.2、3.4、7.1、14.2、17.7、23.6、35.5 c/d 时的 MTF 值,输入到 Excel 中。将 Monpack3 测得的不同环境亮度下 3.0mm 和 5.0mm CSF 的数据导入 Excel 中,得出对应空间频率下的 CSF。利用公式(1),得出相应的空间频率下的 NCSF。用 origin7.5 做出各个环境亮度下不同瞳孔时的 CSF 和 NCSF 曲线。

统计学分析:采用 SPSS 19.0 软件进行统计学分析,采用重复测量方差分析法分析环境亮度对 CSF、NCSF 的影响,采用配对 t 检验法分析瞳孔直径对不同环境亮度下 CSF、NCSF 以及 MTF 的影响。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

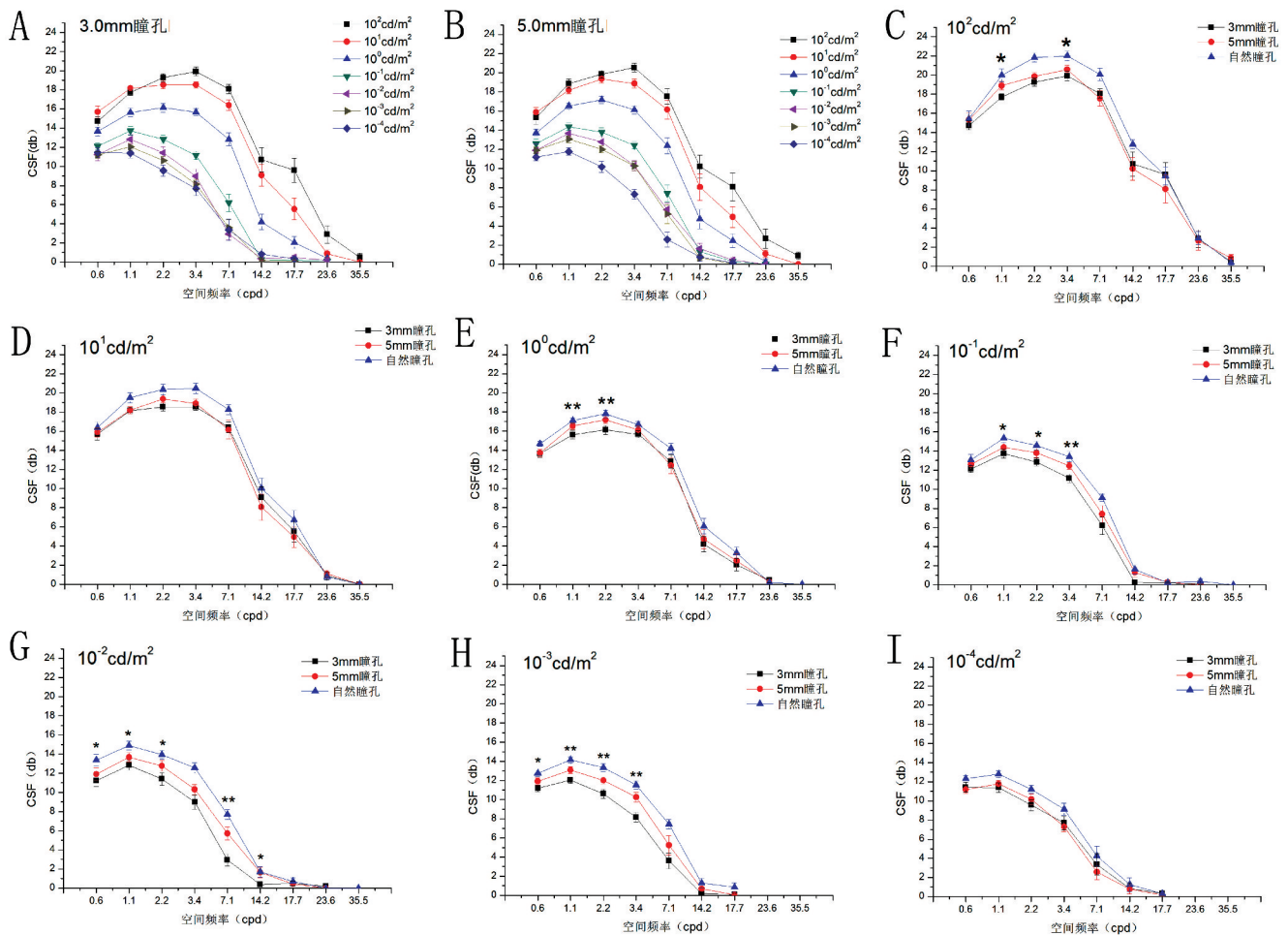


图2 不同瞳孔直径下各个环境亮度的CSF A:3.0mm瞳孔时不同环境亮度的CSF;B:5.0mm瞳孔时不同环境亮度的CSF;C: 10^2 cd/m²时不同瞳孔直径的CSF;D: 10^1 cd/m²时不同瞳孔直径的CSF;E: 10^0 cd/m²时不同瞳孔直径的CSF;F: 10^{-1} cd/m²时不同瞳孔直径的CSF;G: 10^{-2} cd/m²时不同瞳孔直径的CSF;H: 10^{-3} cd/m²时不同瞳孔直径的CSF;I: 10^{-4} cd/m²时不同瞳孔直径的CSF。* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$ vs 5.0mm CSF。

2 结果

2.1 不同瞳孔直径下的MTF曲线 利用OQAS II测量得出不同瞳孔时的MTF曲线(图1)。3.0mm MTF在0.6、1.1、2.2、3.4cpd上显著高于5.0mm MTF($P < 0.05$),说明屈光系统在3.0mm比5.0mm瞳孔时成像更清晰。从MTF走行趋势来看,空间频率越高,MTF越低,提示屈光系统不擅于分辨物体的细节。

2.2 不同瞳孔直径下各个环境亮度的CSF曲线 利用Monpack3测量得出各个环境亮度的CSF曲线(图2A~B)。随亮度降低,CSF曲线下移,波峰向低频区移动,提示视觉质量越差,越难以识别物体细节,越擅长识别物体的轮廓。重复测量方差分析结果如下:在各个空间频率下,不同环境亮度的CSF有显著性差异($P < 0.01$);在各个环境亮度下,不同空间频率的CSF有显著性统计学差异($P < 0.01$),且存在交互作用($P < 0.01$)。由亮至暗,在各个环境亮度下比较自然、3.0mm和5.0mm瞳孔直径的CSF(图2C~I)。自然瞳孔CSF始终在3.0mm和5.0mm CSF上方; 10^2 、 10^0 、 10^{-1} 、 10^{-2} 、 10^{-3} cd/m²时,5.0mm CSF在中低频区均显著高于3.0mm CSF($P < 0.05$); 10^1 、 10^{-4} cd/m²时,5.0mm和3.0mm CSF无统计学差异,这提示自然瞳孔能够通过

自身调节更好的适应不同的环境亮度,视物更加清晰。而瞳孔开大会提高中低频区的视觉质量,这种现象在中间视觉($10^0 \sim 10^{-3}$ cd/m²)下更明显。

2.3 不同瞳孔直径下各个环境亮度的NCSF曲线 利用公式(1)计算得出各个环境亮度的NCSF曲线(图3A~B)。随亮度降低,NCSF曲线下移,波峰由向低频区移动,提示视觉神经系统功能越差,越难以识别物体细节,越擅长识别物体的轮廓。重复测量方差分析结果如下:在各个空间频率下,不同环境亮度的NCSF有显著性统计学差异($P < 0.01$);在各个环境亮度下,不同空间频率的NCSF有显著性统计学差异($P < 0.01$),且存在交互作用($P < 0.01$)。由亮至暗,在各个环境亮度下比较3.0mm和5.0mm瞳孔直径的NCSF(图3C~I)。 $10^2 \sim 10^{-3}$ cd/m²时,5.0mm NCSF在中低频区均显著高于3.0mm NCSF,差异有统计学意义($P < 0.05$); 10^{-4} cd/m²时,5.0mm和3.0mm NCSF无统计学差异,这提示瞳孔开大会提高中低频区的视觉神经系统功能,这种现象在中间视觉下($10^0 \sim 10^{-3}$ cd/m²)下更明显。

2.4 眩光对CSF和NCSF测量的影响 利用Monpack3测出3.0mm和5.0mm瞳孔下存在眩光源时的CSF曲线

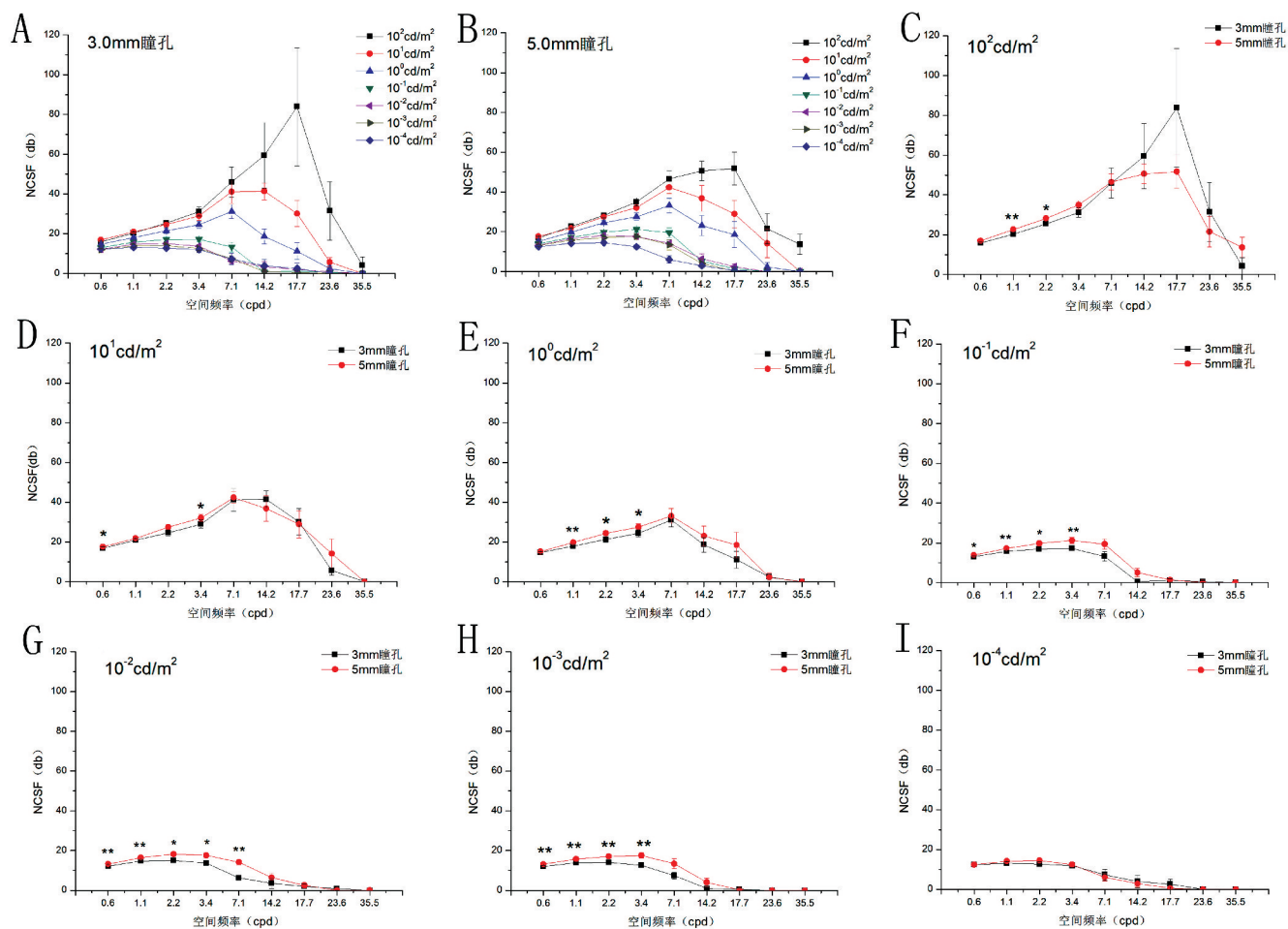


图3 不同瞳孔直径下各个环境亮度的NCSF A:3.0mm瞳孔时不同环境亮度的NCSF;B:5.0mm瞳孔时不同环境亮度的NCSF;C:10²cd/m²时不同瞳孔直径的NCSF;D:10¹cd/m²时不同瞳孔直径的NCSF;E:10⁰cd/m²时不同瞳孔直径的NCSF;F:10⁻¹cd/m²时不同瞳孔直径的NCSF;G:10⁻²cd/m²时不同瞳孔直径的NCSF;H:10⁻³cd/m²时不同瞳孔直径的NCSF;I:10⁻⁴cd/m²时不同瞳孔直径的NCSF。* P<0.05, ** P<0.01 vs 5.0mm NCSF。

(图4A~C),并利用公式(1)计算得出相应NCSF曲线(图4D~F)。存在眩光源时,随亮度降低,CSF和NCSF均下移,波峰向低频区移动,提示识别物体能力下降,越难以识别物体的细节,越擅长识别物体的轮廓。重复测量方差分析结果如下:眩光条件时,CSF、NCSF在不同环境亮度上有显著统计学差异($P<0.01$);CSF、NCSF在不同空间频率上有显著统计学差异($P<0.01$),且CSF、NCSF在环境亮度和空间频率上存在交互作用($P<0.01$)。10²~10⁰cd/m²时,3.0mm和5.0mm CSF无统计性差异;10²cd/m²时,5.0mm NCSF在3.4c/d上显著高于3.0mm NCSF,差异有统计学意义($P<0.05$),而在23.6c/d上显著低于3.0mm NCSF,差异有统计学意义($P<0.05$),10¹~10⁰cd/m²时,3.0mm和5.0mm NCSF无统计性差异,这提示存在眩光时,瞳孔开大,中低频区的视觉质量不会得到显著提高(仅NCSF在10²cd/m²时,3.4cpd上有统计性差异),而从X轴截止频率上看,5.0mm曲线反而低于3.0mm曲线,在高频区也有低于3.0mm曲线的趋势,说明瞳孔开大反而会降低高频区的视觉质量,干扰对物体细节的识别。

3 讨论

早期测量NCSF的方法是利用激光干涉的原理,将很

高空间频率的正弦光栅条带直接投射到视网膜上^[4,11]。这种方法虽然避开了屈光系统的影响,但激光的相干噪声和散斑^[12]等现象会影响测量的精度,而且这种技术只能测量某种波长下的NCSF,具有一定的局限性^[5],目前在眼科临床与研究中多采用CSF和MTF的比值得到NCSF^[2-3,5,13]。其中关键的技术问题是MTF的获得,OQAS II应用780nm的近红外点光源,直接对点光源在视网膜上所成图像进行傅立叶变换,得到点扩散函数(point scatter function, PSF),该函数反映了点光源投射到视网膜后发生的光强度以及其位置偏差,能够全面地反映眼内光学成像质量的信息,提供了光线在光学系统的散射和高阶像差的综合结果,其具有客观准确、操作简便等特点^[14-15]。因此,应用OQAS II得出的NCSF更为准确、客观、便捷。MTF主要受瞳孔直径影响。当瞳孔小于1.5mm,衍射比球差对光学质量影响更大,2~3mm时,衍射和球差共同影响光学质量,直径达到4mm时,视觉分辨力相对稳定。以后随着瞳孔直径的增加,球差逐渐增大,此时屈光系统光学质量下降^[7]。本实验瞳孔设置为3.0和5.0mm,经OQAS II检测,3.0mm MTF要高于5.0mm MTF,说明3.0mm瞳孔时的光学质量要高于5.0mm瞳孔。

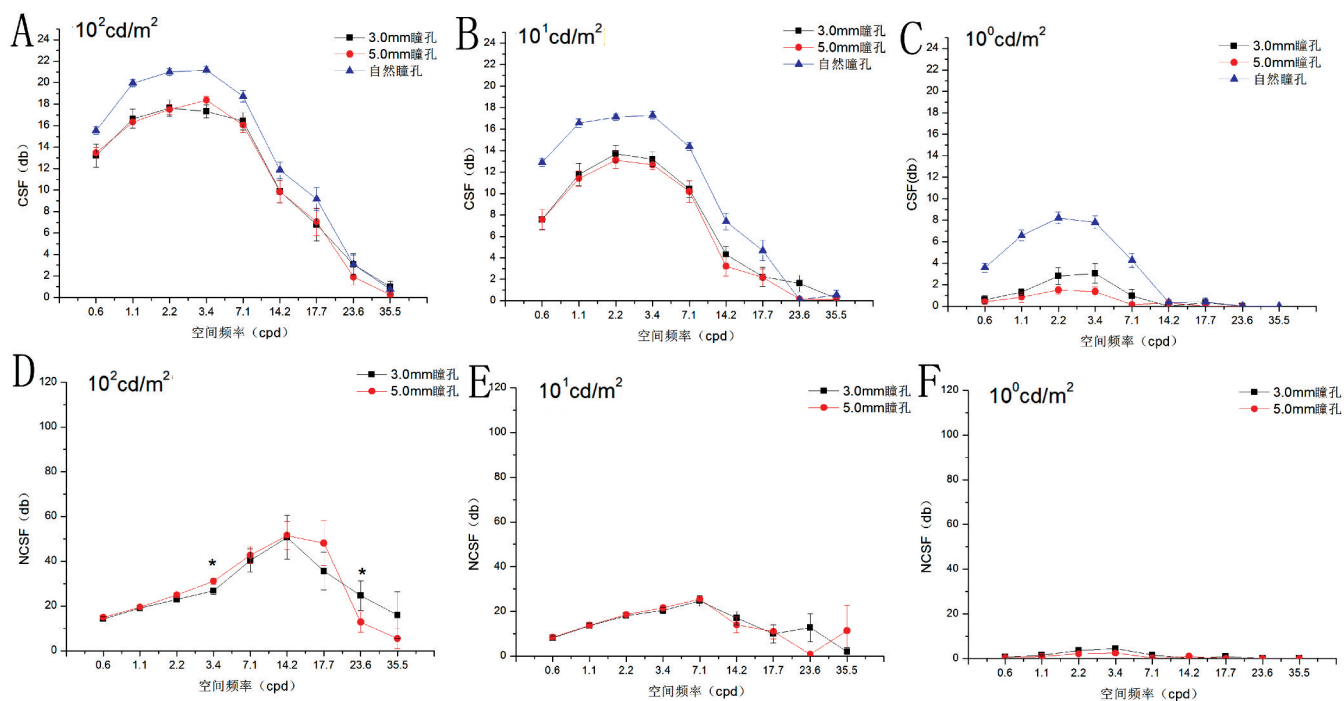


图4 眩光对CSF和NCSF的影响 A:眩光影响下 10^2 cd/m^2 时不同瞳孔直径的CSF;B:眩光影响下 10^1 cd/m^2 时不同瞳孔直径的CSF;C:眩光影响下 10^0 cd/m^2 时不同瞳孔直径的CSF;D:眩光影响下 10^2 cd/m^2 时不同瞳孔直径的NCSF;E:眩光影响下 10^1 cd/m^2 时不同瞳孔直径的NCSF;F:眩光影响下 10^0 cd/m^2 时不同瞳孔直径的NCSF。

皮层下的视觉加工通道主要分为两种,即大细胞通道和小细胞通道,它们在视网膜上出现结构上的分离。分布于视网膜外周部的视杆细胞接收视觉信息输入后通过视神经束传导至外侧膝状体的大细胞层,集中于视网膜中央凹附近的视锥细胞则将所接收的视觉信息传入小细胞层^[16-17]。这两个通道是可以对不同空间频率的信息进行加工,大细胞通道对模糊的轮廓等低频信息敏感。小细胞通道对高空间频率信息敏感^[18-19]。

环境亮度降低时,视网膜上感光细胞接受到的光信号变弱,视觉质量下降,NCSF下移;小细胞通道受到的影响更显著,识别物体细节的能力变的更差,相对更擅于识别低空间频率、大视角的物体,NCSF波峰左移,所以在漆黑的夜晚只能看到物体的轮廓。而瞳孔直径变大时,更多的视网膜周边细胞得到光信号刺激,大细胞通道功能提高,NCSF在中低频区上移,识别物体轮廓能力增强;而存在眩光源时,过强的光线会干扰小细胞通道的功能,NCSF在高频区下降,X轴截止频率也随之下降,识别物体细节能力减弱,所以夜间瞳孔会开大以更好地识别物体,而光线过亮时瞳孔会缩小,一方面保护视网膜免受光损伤,一方面也能提高分辨物体细节的能力。

视觉神经系统是对亮度的敏感部位,是识别物体的主要因素,而屈光系统会聚光线的同时,会一定程度降低视觉质量,对识别物体有一定干扰作用,这种作用越往高频区越明显。CSF受MTF和NCSF共同决定,与NCSF曲线形状相近,都为倒“U”形,而MTF为“L”形递减曲线,当NCSF在高频区达到波峰时,MTF处于较低水平,此时CSF的波峰受NCSF和MTF共同影响,较NCSF更靠近低频区。当环境亮度降低时,CSF和NCSF变化相近,曲线下

移、波峰左移。当瞳孔开大时,MTF下降,若NCSF在中低频区明显上升(中间视觉环境下),CSF将随NCSF上升,若环境很亮或存在眩光时,NCSF在中低频区上升不明显,CSF将可能没有变化。而在高频区,NCSF几乎不变或下降,CSF就很可能随MTF下降。在暗视觉环境中,NCSF处于较低水平,从3.0mm到5.0mm这样小幅度的瞳孔改变不足以对NCSF和CSF造成显著影响,故在结果中两条曲线没有显著差异。而此时自然瞳孔可以开到7mm甚至更大,所以自然瞳孔CSF仍旧在3.0mm、5.0mm CSF上方。

本研究探讨了环境亮度和瞳孔直径这两个因素对NCSF的影响,并与CSF进行比较,结合MTF,采用双通道技术分析光学因素和神经因素对视觉质量的影响。但本研究计算NCSF仍有一些不足,在测量固定瞳孔的CSF时,采用的是受试散瞳后用小孔片遮挡的方法,而测量MTF时,是在暗室环境下待受试瞳孔自然散到大于5.0mm,这其中可能有调节的因素对结果造成干扰。此外,测量NCSF时是用常规配镜的方法对受试眼进行校正,而测量MTF时,是利用OQAS II自动校正。这两种校正方法均能排除低阶像差,但方式不同,也可能对结果造成影响,这些问题需要以后进一步研究。

人眼的视觉质量由光学因素和神经因素共同决定,光学因素可以用屈光系统MTF作为检测指标,神经因素可以用NCSF作为检测指标。白内障、圆锥角膜等屈光系统病变都会使MTF发生改变,而糖尿病视网膜病变、视网膜黄斑病变以及大脑神经中枢病变都会使NCSF改变。NCSF对视觉神经系统相关疾病的科学研究、早期诊断、功能测定以及预后随访都有重要意义。明确正常人NCSF

受环境亮度、瞳孔直径影响的曲线特性对深入认识 NCSF、推动 NCSF 在科研、临床上的应用都有着积极作用。

评价人眼视觉功能质量,从光学因素和神经因素两方面评价更为科学,将 NCSF、MTF 以及 CSF 作为检测指标要比单一 CSF 检测更为全面、细致。对飞行员、驾驶员等一些视功能要求较高特殊行业从业者来说,检测特定环境亮度的 CSF 能够预示其在特定环境中识别不同对比、不同大小目标的能力,针对特定的工作环境,应用相应环境亮度下的 CSF 更能选拔出适合的从业者。如选拔夜航飞行员,应用暗环境的 CSF 检测就更为合适。在 CSF 的基础上,检测 MTF 并得出 NCSF,能够更清晰地了解其视觉功能状况。对于 CSF 异常者,MTF 和 NCSF 能够提示功能改变发生的位置,对疾病的诊疗更有帮助。

参考文献

- 1 Hou F, Lu Z. Comparisons of contrast sensitivity functions measured by two different qCSF implements. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2014; 55(13):770
- 2 Michael R, Guevara O, de la Paz M, et al. Neural contrast sensitivity calculated from measured total contrast sensitivity and modulation transfer function. *Acta Ophthalmologica* 2011;89(3):278
- 3 Liu T, Wang ZQ, Wang Y, et al. Measurements of retinal aerial image modulation (AIM) for white light based on wave-front aberration of human eye. *Optik* 2010;121(1):101-106
- 4 Campbell FM, Green DG. Optical and retinal factors affecting visual resolution. *J Physiology* 1965;181(3):576-593
- 5 葛婧菁,王肇圻.神经对比敏感度的亮度变化机制研究. *激光与光电子学进展* 2010;47(12):125-130
- 6 Robert AS. Luminance-dependent changes in mesopic visual contrast sensitivity. *J Physiology Online* 1973;230(1):115-135

- 7 王雁.波前像差与临床视觉矫正.北京:人民卫生出版社 2011:67,75
- 8 连慧芳,汤欣,王娟.年龄及瞳孔直径对成人正视眼调制传递函数的影响. *中华眼科杂志* 2010;46(3):227-232
- 9 薛庆.屈光图高度与高阶像差、MTF 值的关系及对白内障术后焦深和立体视的影响研究. *天津医科大学* 2013
- 10 徐高平,余翔,薛丽霞,等.人眼不同瞳孔直径波前像差特性分析. *光电工程* 2005;32(7):38-41
- 11 Dressler M, Rassow B. Neural contrast sensitivity measurements with a laser interference system for clinical and screening application. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 1981;21(5):737-744
- 12 Felipe A, Artigas JM, Pons AM. Human contrast sensitivity in coherent Maxwellian view: effect of coherent noise and comparison with speckle. *J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis* 1997;14(5):972-983
- 13 赵豪欣,戴云,周逸峰,等.基于波前技术的人眼神经对比敏感度测量. *光学学报* 2012;32(4):315-319
- 14 Saad A, Saab M, Gatinel D. Repeatability of measurements with a double-pass system. *J Cataract Refract Surg* 2010;36(1):28-33
- 15 邢晓杰,宋慧,汤欣.应用 OQAS 双通道系统对人工晶状体眼视觉质量评估可重复性研究. *中国实用眼科杂志* 2014;32(10):1163-1168
- 16 Livingstone MS, Hubel DH. Psychophysical evidence for separate channels for the perception of form, color, movement, and depth. *J Neurosci* 1987;7(11):3416-3468
- 17 任丽坤.空间频率与视野位置在面孔识别中的作用. *河北大学* 2014
- 18 Livingstone MS, Hubel DH. Do the relative mapping densities of the magno- and parvocellular systems vary with eccentricity? *J Neurosci* 1988;8(11):4334-4339
- 19 Bullier J. Integrated model of visual processing. *Brain Res Brain Res Rev* 2001;36(2-3):96-107