

激光与光电子学进展

色相测验和色盲检查镜对异常色觉的检测和分类

高强, 马瑞青*, 强彦

太原理工大学信息与计算机学院, 山西 太原 030024

摘要 异常色觉检测和分类经常在入职体检、异常色觉计算机辅助识别系统和颜色视觉机制基础研究中使

关键词 视觉光学; 颜色视觉; 异常色觉; 色相测验; 色盲检查镜

中图分类号 O432

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP220936

Detection and Classification of Color Deficiency Using Hue Tests and Anomaloscope

Gao Qiang, Ma Ruiqing*, Qiang Yan

College of Information and Computer, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China

Abstract The detection and classification of color deficiency is frequently required in occupational physical examination, computer-aided recognition systems for color deficiency, and basic research on color vision mechanisms. Twenty-two color deficient subjects (eight deuteranopes, two protanopes, six deuteranomalous trichromats, and six protanomalous trichromats) were tested using D-15, FM 100-Hue, and Neitz anomaloscope tests. By comparing the test results of D-15 and FM 100-Hue with those of the anomaloscope, the limitations of hue tests in detecting and classifying color deficiency were revealed. This study provides a reference for detecting and classifying color deficiency in various applications.

Key words visual optics; color vision; color deficiency; hue test; anomaloscope

1 引言

人类对物体颜色的感知,主要通过以下过程:首先,在光源照射下,物体表面的反射光谱被人眼视网膜中的3种光感受体接收,分别为L锥体、M锥体和S锥体。3种锥体接收到的信号进一步由2个彩色对立通道,分别为红-绿对立通道(L-M)和蓝-黄对立通道(S-(L+M)),和一个亮度通道(L+M)进行编码;然后,信号被进一步传递到大脑视觉皮层。

正常色觉者需要红、绿、蓝3种颜色来匹配出光谱中的所有颜色,被称为正常三色觉者。大部分人为正常三色觉者,但有小部分人由于遗传基因变异,视网膜中的L或M锥体发生缺失或变异,使其红绿颜色辨别能力下降,即红绿色觉异常者。红绿色觉异常又可分为4种类型:红色盲、绿色盲、红色弱和绿色弱。红色

盲由L锥体的缺失导致,而绿色盲由M锥体的缺失导致,他们可以用蓝色和黄色匹配出光谱中的所有颜色,被称为二色觉者。红色弱由L锥体的变异导致,而绿色弱由M锥体的变异导致,和正常色觉者一样红绿色弱需要红、绿、蓝3种颜色来匹配出所有颜色,只是前者需要更多的红色,而后者需要更多的绿色,红绿色弱被称为异常三色觉者。色弱者的颜色辨别能力在个体之间具有较大差异,有些色弱者的颜色辨别能力接近正常色觉者,而有些色弱者则接近色盲。红色盲和红色弱被称为红色觉异常或第一型色觉异常,绿色盲和绿色弱被称为绿色觉异常或第二型色觉异常。文献[1]表明,红绿色觉异常者在中国男性中的比例为4%~6.5%,在女性中的比例为0.4%~1.7%;在欧洲男性中的比例大约为8%,其中,红色盲大约占1%,绿色盲占1%,红色弱占1%,而绿色弱占5%。

收稿日期: 2022-03-08; 修回日期: 2022-03-17; 录用日期: 2022-03-30; 网络首发日期: 2022-04-10

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(61705011)、山西省应用基础研究计划青年基金(201901D211068)

通信作者: *mrq153101@163.com

在一些特定职业中,经常需要对人的颜色视觉能力进行检测和评估,由于其目的是高效地筛选出异常色觉者,并不需要在色盲和色弱,或红色觉异常和绿色觉异常之间进行分类,通常使用色盲检查图,具有快捷、方便以及敏感等特点。但在一些与异常色觉有关的颜色视觉机制研究中,需对异常色觉者的类型进行严格划分。如异常三色觉者的颜色辨别能力研究^[2],正常女性与携带异常色觉基因的女性在颜色视觉检测中的区别^[3],红绿色觉异常者的颜色恒常性机制研究^[4-5]。在这些研究中,实验前期对异常色觉的检测和分类基本都使用了色盲检查图、Farnsworth D-15(D-15)、Farnsworth-Munsell 100-Hue(FM 100-Hue)和色盲检查镜。D-15是FM 100-Hue的简化版,具有方便携带,检测用时较短的特点。目前也有各种基于计算机的FM 100-Hue和D-15测验^[6-7]被设计出来,即FM 100-Hue和D-15测验可以在各种电子显示设备上进行。色盲检查镜是目前公认的用于异常色觉检测和分类最准确的仪器,但其价格昂贵,携带不便,且需专业技术人员操作,不适用于大规模的临床检查。在颜色视觉机制研究^[8-10]中对异常色觉者的检测和分类时,测验工具作为最基础的筛查工具至关重要。文献^[11]通过对7名异常色觉者在各测验工具上进行检测和分类,给出了视觉实验前期异常色觉检测和分类的大概步骤。本文对22名异常色觉者进行了D-15、FM 100-Hue和色盲检查镜测验,深入分析了两种色相测验与色盲检查镜测验结果的对应关系,指出了两种色相测验在异常色觉检测和分类中的局限性。

2 研究方法

2.1 实验装置

本实验中使用了色盲检查图(俞自萍编著,第6版)、D-15测验、FM 100-Hue测验和色盲检查镜(OT-II, Neitz)4种检测工具。

色相测验工具与色盲检查镜的制备原理不同。色相测验是基于反射光的测验方法,通过对具有不同反射率的色棋进行排序,辨别观察者的色觉类型以及颜色辨别能力。色盲检查镜根据Rayleigh匹配原理制成,该匹配是指用红色光和绿色光去匹配黄色光,诊断观察者的L锥体和M锥体的功能,具体内容如下:

D-15由装在棋盘盒里的16个色棋组成,棋盘盒中最左侧的色棋固定不可移动,作为排序中的参考色棋,剩下的15个色棋可以在棋盘盒里移动,色棋号为1~15,色棋颜色由蓝色渐变为紫色。在D-15测验中,对色棋正确排序的,即判定观察者为正常色觉。如果排序结果中存在跨线,且方向与红色觉异常混淆轴的方向一致,则被判定为红色觉异常,与绿色觉异常混淆轴的方向一致,则被判定为绿色觉异常。

FM 100-Hue色相测验由分装在4个棋盘盒里的

93个色棋组成,每个棋盘盒两端的色棋是固定不可移动的,被作为排序中的参考色棋,剩下85个色棋可以在各自的棋盘盒里移动。棋盘盒一包含的色棋号为85和1~21,共22个色棋,色棋颜色由红色渐变为黄色;棋盘盒二包含的色棋号为22~42,共21个色棋,色棋颜色由黄色渐变为绿色;棋盘盒三包含的色棋号为43~63,共21个色棋,色棋颜色由绿色渐变为紫色;棋盘盒四包含的色棋号为64~84,共21个色棋,色棋颜色由紫色渐变为红色。FM 100-Hue测验用观察者对色棋进行排序后获得的总错误分(Total error score, TES)来表示他们的颜色辨别能力,总错误分越高,颜色辨别能力越差。对于正常色觉者, TES在0~20之间表示观察者具有较高水平的颜色辨别能力; TES在20~100之间表示观察者具有一般水平的颜色辨别能力; TES在100以上表示观察者具有较差水平的颜色辨别能力。FM 100-Hue测验也被用来检测红绿色觉异常者的颜色辨别能力,通过错误分形成错误轴的延伸方向来对红绿色觉异常进行检测和分类^[12]。当错误轴向红色盲或绿色盲混淆线方向延伸时,则观察者被判定为红色觉异常或绿色觉异常。值得注意的是,常有些正常色觉者在FM 100-Hue测验中的TES较高,与色盲或色弱者的TES接近,但正常色觉者的错误分分布没有明显的向某个方向延伸的特征。

Neitz色盲检查镜包含两个半圆视野,一半是由波长为589 nm的黄色光组成,另一半由波长为670 nm的红光和546 nm的绿光混和组成。两个控制按钮分别控制黄色光视野的亮度和混色光视野中红绿光的混合比例;黄色光视野的亮度刻度值可以从0(全黑)变化到87(纯黄),红绿光的混合比例刻度值可以从0(纯绿)变化到73(纯红)。通过调整红绿光的混合比例和黄色光视野的亮度值可达到混色光视野和黄色光视野的匹配,这两个参数也用来对异常色觉者进行精确的检测和分类。对于正常色觉者,只有当红绿光混合比例大约在40刻度,黄色光视野的亮度大约在15刻度时,两个视野才能匹配。对于绿色盲,当黄色光视野的亮度在大约15刻度时,红绿光混合比例从0变化到73都可以与黄色光视野匹配。对于红色盲,红绿光混合比例从0变化到73时也都与黄色光视野匹配,只是黄色光视野的亮度需从30变化到4刻度。对于绿色弱,由于其视网膜中M锥体对应的光敏感曲线向光谱中的长波长段偏移,在进行颜色匹配时,需要更多的绿色才能完成匹配,绿色弱对应的红绿光混合比例的取值范围比色盲要小,取值主要集中在0~40刻度范围内。相应地,红色弱对应的红绿光混合比例的取值主要集中在40~73刻度范围内。表1中给出了色盲检查镜在对异常色觉者进行分类时的标准。

表 1 Neitz 色盲检查镜对异常色觉者的分类标准

Table 1 Classification of type of deficiency by Neitz anomaloscope

Type of deficiency	Neitz anomaloscope
Protanopia	Monochromatic scale decreases from 30 to 4 with the increase of mixture scale from 0 to 73
Protanomaly	Monochromatic scale decreases with the increase of mixture scale from 40 to 73
Deuteranopia	Monochromatic scale remains 15 with the increase of mixture scale from 0 to 73
Deuteranomaly	Monochromatic scale remains 15 with the increase of mixture scale from 0 to 40

2.2 观察者

参加实验的观察者为 22 名红绿色觉异常者,年龄在 18~28 岁之间,均为太原理工大学的学生,其中 1 名观察者是美术专业的学生,其他观察者之前都没有任何颜色匹配和颜色辨别的经验。所有观察者依次参加了色盲检查图、D-15、FM 100-Hue 和色盲检查镜测验。观察者的异常色觉类型由 Neitz 色盲检查镜确定,包括 8 名绿色盲(7 名男性、1 名女性),2 名红色盲(均为男性)和 6 名绿色弱(3 名男性、3 名女性),6 名红色弱(均为男性)。所有观察者在参与实验前都签署了实验同意书。

2.3 光源

所有色觉测验均在室内光源下进行,室内光源主要由日光灯管产生。光源的辐射光谱由光谱辐射度计(PR-655, Photo Research)从孟塞尔半光泽白色色卡上测量得到,相对光谱分布如图 1 所示。测量得到的室内光源的色温大约为 6100 K, CIE1976 $u'v'$ (色度坐标轴)色度值为(0.1953, 0.4781),在该光源照射下

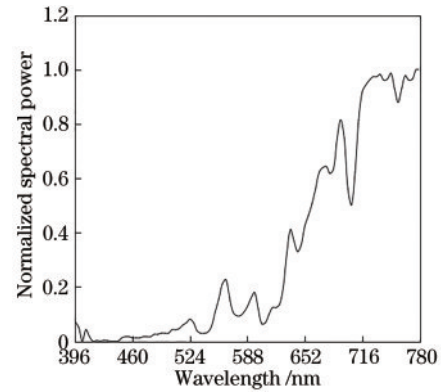


图 1 光源的相对光谱分布

Fig. 1 Relative spectral power distribution of illuminant

白色色卡上的亮度值为 370.7 cd/m^2 。

2.4 实验流程

整个实验流程,如图 2 所示。首先,所有观察者填写了实验同意书;然后,依次参与了色盲检查图、D-15、FM 100-Hue 和 Neitz 色盲检查镜测验。

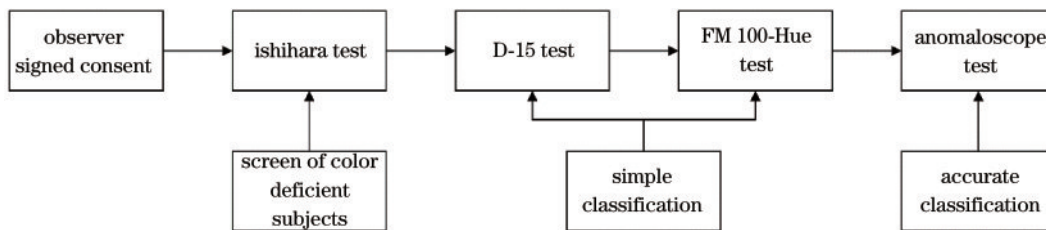


图 2 实验流程

Fig. 2 Experimental procedure

在使用色盲检查图进行测验时,观察者通过辨别图片内容,来进行正常色觉者和异常色觉者的区分。在 D-15 测验中,15 个色棋的顺序事先被打乱,观察者的任务是对 15 个色棋按照颜色的相似性进行排序。观察者完成排序后,实验人员将 15 个色棋的序号在记录纸上画出来,通过是否存在跨线确定观察者为正常色觉还是异常色觉,通过跨线的方向确定是红色觉异常还是绿色觉异常。在 FM 100-Hue 测验中,实验人员将每盒棋盘中可移动色棋的顺序打乱递给观察者,观察者通过比较相邻色棋间的细微颜色差异,按渐变顺序将色棋排列好,之后再对下一棋盘进行排序。4 个棋盘全部排好序后,实验人员将色棋序号输入到 FM 100-Hue 计分软件中,从而得到 TES 和错误分在极坐标图中的分布。在色盲检查镜测验中,实验人员

通过旋转混色按钮按照 $0 \rightarrow 73 \rightarrow 10 \rightarrow 60 \rightarrow 20 \rightarrow 50 \rightarrow 30 \rightarrow 40$ 的顺序以 5 个刻度值为步长交替设定红绿光混色比例,针对每个设定好的混色光值,观察者通过旋转单色按钮控制黄色光视野的亮度来匹配两个视野。

3 结果分析

所有观察者在 D-15、FM 100-Hue 和色盲检查镜测验中的结果,如表 2 所示。在 D-15 测验结果中,protan 表示观察者被 D-15 判定为红色觉异常,deutan 表示被判定为绿色觉异常,pass 表示观察者通过了 D-15 测验。在 FM 100-Hue 测验结果中,数字表示 FM 100-Hue 测验的 TES。在色盲检查镜测验结果中,all 表示观察者在所有红绿光混色比例刻度上均能与黄色光视野匹配,具体的数字表示从匹配最小值到匹配最大值。最

表 2 D-15、FM 100-Hue 和色盲检查镜对所有观察者的分类结果

Table 2 Classification results of D-15, FM 100-Hue and anomaloscope for all subjects

Subject No.	Gender	D-15	FM 100-Hue(TES)	Anomaloscope (Matching range)	Type of deficiency
1	M	deutan	152	all	deuteranopia
2	M	deutan	280	all	deuteranopia
3	M	pass	64	all	deuteranopia
4	M	deutan	152	all	deuteranopia
5	M	deutan	144	all	deuteranopia
6	M	deutan	184	all	deuteranopia
7	M	deutan	100	all	deuteranopia
8	F	deutan	80	all	deuteranopia
9	M	protan	160	all	protanopia
10	M	protan	48	all	protanopia
11	F	pass	76	18-26	deuteranomaly
12	F	pass	36	15-30	deuteranomaly
13	M	pass	36	0-25	deuteranomaly
14	F	pass	24	12-25	deuteranomaly
15	M	pass	128	0-40	deuteranomaly
16	M	pass	36	10-30	deuteranomaly
17	M	pass	88	0-65	extreme protanomaly
18	M	pass	72	45-70	protanomaly
19	M	pass	88	55-70	protanomaly
20	M	pass	48	60-70	protanomaly
21	M	pass	88	65-67	protanomaly
22	M	pass	64	40-70	protanomaly

右侧表示由色盲检查镜确定的异常色觉类型。

3.1 D-15 测验结果

由表 2 可知:被色盲检查镜确定为色弱的 12 名观察者全部通过了 D-15 测验,即被确定为正常色觉者。被色盲检查镜确定为色盲的 10 名观察者有 9 名未通过 D-15 测验,被确定为红色觉异常或绿色觉异常。此结果与以往的研究结果^[13]一致:色弱者在 D-15 测验中的通过率为 73.6%,远高于色盲的通过率(5.8%)。以上结果表明:D-15 测验可以很好地检验出色盲或颜色辨别能力接近色盲的色弱,但无法检出普通色弱。

3.2 FM 100-Hue 测验结果

色盲、色弱和正常色觉者的总错误分比较,如图 3 所示。其中,色盲的 TES 为参加实验的 10 名色盲的 TES 平均值;色弱的 TES 为 12 名色弱者的 TES 平均值;正常色觉者的 TES 为文献[14]中 20 名正常色觉者的 TES 平均值,误差线表示均值的标准误差。由图 3 可知,色盲 TES 为 136.4,高于色弱 TES(65.3),二者均高于正常色觉者 TES(21.6)。以色觉类型为因素的单因素方差分析表明,色觉类型对总错误分具有显著性的影响($F(2, 39) = 29.5, P < 0.001$)。通过 Bonferroni 校正的多重比较得知,色盲、色弱和正常色觉者两两之间存在显著性差异。

在对观察者的色觉检测中,FM 100-Hue 测验需通过 TES 和错误轴的延伸方向去判定观察者的色觉类型。图 3 中虽然色弱者的 TES 与正常色觉者存在显著性的差异,但该数值为 65.3,与代表正常色觉者一般

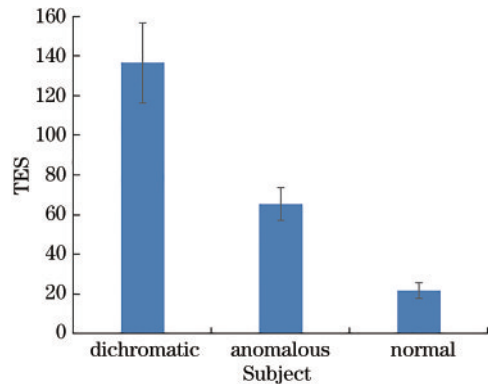


图 3 色盲、色弱和正常色觉者的 TES 比较

Fig. 3 Comparison of TES between dichromats, anomalous trichromats, and normal trichromats

颜色辨别能力的 TES 在 20~100 之间对应,因此从 TES 很难区分出观察者是色弱还是正常色觉者。图 3 中:色盲的 TES 为 136.4,显著高于正常色觉者,与代表正常色觉者较差颜色辨别能力的 TES > 100 对应。

TES 可沿着红-绿和蓝-黄轴划分为部分错误分 (Partial error score, PES)^[15],代表观察者的红-绿和蓝-黄颜色辨别能力的高低。红-绿轴上的 PES 为色棋 13~33 和 55~75 上的错误分总和。蓝-黄轴上的 PES 为色棋 1~12、34~54 和 76~85 上的错误分总和。色盲、色弱和正常色觉者在红-绿和蓝-黄轴上的 PES 比较,如图 4 所示。对于正常色觉者,红-绿轴和蓝-黄轴上的 PES 接近。对于色弱者,红-绿轴上的 PES 高于

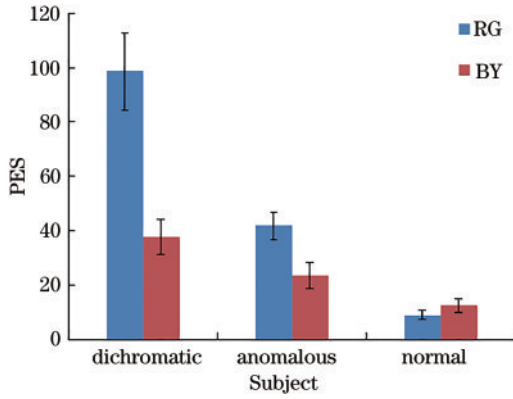


图 4 色盲、色弱和正常色觉者在红-绿和蓝-黄轴上的部分错误分的比较

Fig. 4 Comparison of PES along red-green axis and blue-yellow axis between dichromats, anomalous trichromats, and normal trichromats

蓝-黄轴。对于色盲,红-绿轴上的 PES 远高于蓝-黄轴上的 PES。这说明了色盲和色弱作为先天红绿异常色觉者,他们的红-绿颜色辨别能力与正常色觉者相比有了极大的减弱,尤其是色盲。通过对红-绿轴上的 PES 进行以色觉类型为因素的单因素方差分析得知,色盲(98.6)、色弱(41.75)和正常色觉者(9.1)两两之间存在显著性差异。而色盲、色弱和正常色觉者在蓝-黄轴上的 PES 之间的差异并不大。

所有色盲的 FM 100-Hue 测验结果在极坐标图中的表示,如图 5 所示。其中,P 表示红色盲,D 表示绿色盲,N 表示正常色觉者。图 5 中:红色盲、绿色盲和蓝色盲混淆线的位置均一致,已在图 5(a)中给出标记。除了图 5(b)和图 5(c),其他色盲的错误轴均向混淆线方向延伸。图 5(a)中红色盲的错误轴基本向红色盲混淆线方向延伸;图 5(d)~图 5(j)中绿色盲的错误轴均向绿色盲混淆线方向延伸;图 5(k)和图 5(l)中两名

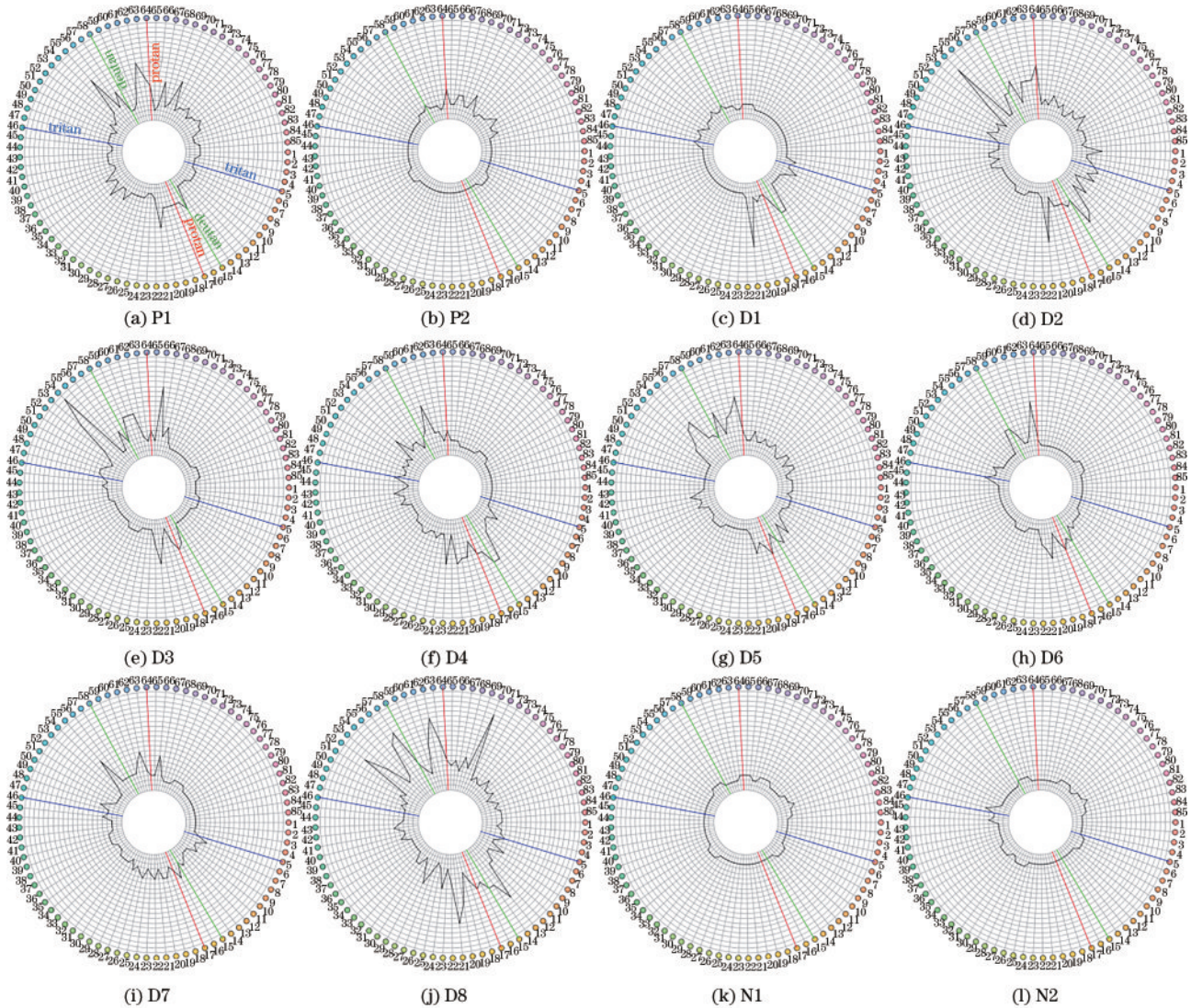


图 5 色盲的 FM 100-Hue 测验结果在极坐标图中的表示。(a)~(b)红色盲的测验结果;(c)~(j)绿色盲的测验结果;

(k)~(l)正常色觉者的测验结果

Fig. 5 Results of all dichromats in FM 100-Hue test represented in the polar diagrams. (a)~(b) Test results of protanopes;

(c)~(j) test results of deuteranopes; (k)~(l) test results of normal trichromats

正常色觉者的错误分在各个方向平均分布,没有形成错误轴。因此,FM 100-Hue 测验通过观察错误分的分布特征可区分出色盲还是正常色觉者,通过观察错误轴的延伸方向可区分出红色觉异常还是绿色觉异常。

值得注意的是,美术专业的观察者在 FM 100-Hue 测验中得到了很好的结果,对应表 2 中的 10 号以及图 5 中的 P2。在所有色盲者中,该观察者的 FM 100-Hue 测验 TES 为 48,是最低值,达到了正常色觉者的平均水平,且 TES 的分布没有明显特征。

所有色弱者的 FM 100-Hue 测验结果在极坐标图

中的表示,如图 6 所示。其中,AP 表示红色弱,AD 表示绿色弱。由图 6 可知,大多数色弱者的错误分分布没有形成清晰的错误轴,而是非常接近正常色觉者。这表明 FM 100-Hue 测验从错误分分布特征很难区分出色弱还是正常色觉者。

结合图 5 和图 6 可知,在 FM 100-Hue 测验中如果 TES 较高,即超过正常色觉者的一般水平,与较差水平对应,且错误轴向混淆线方向延伸,则可被判定为色盲或颜色辨别能力接近色盲的色弱。普通色弱由于其 TES 和错误分分布特征均与正常色觉者接近,FM 100-Hue 测验很难将其与正常色觉者区分。

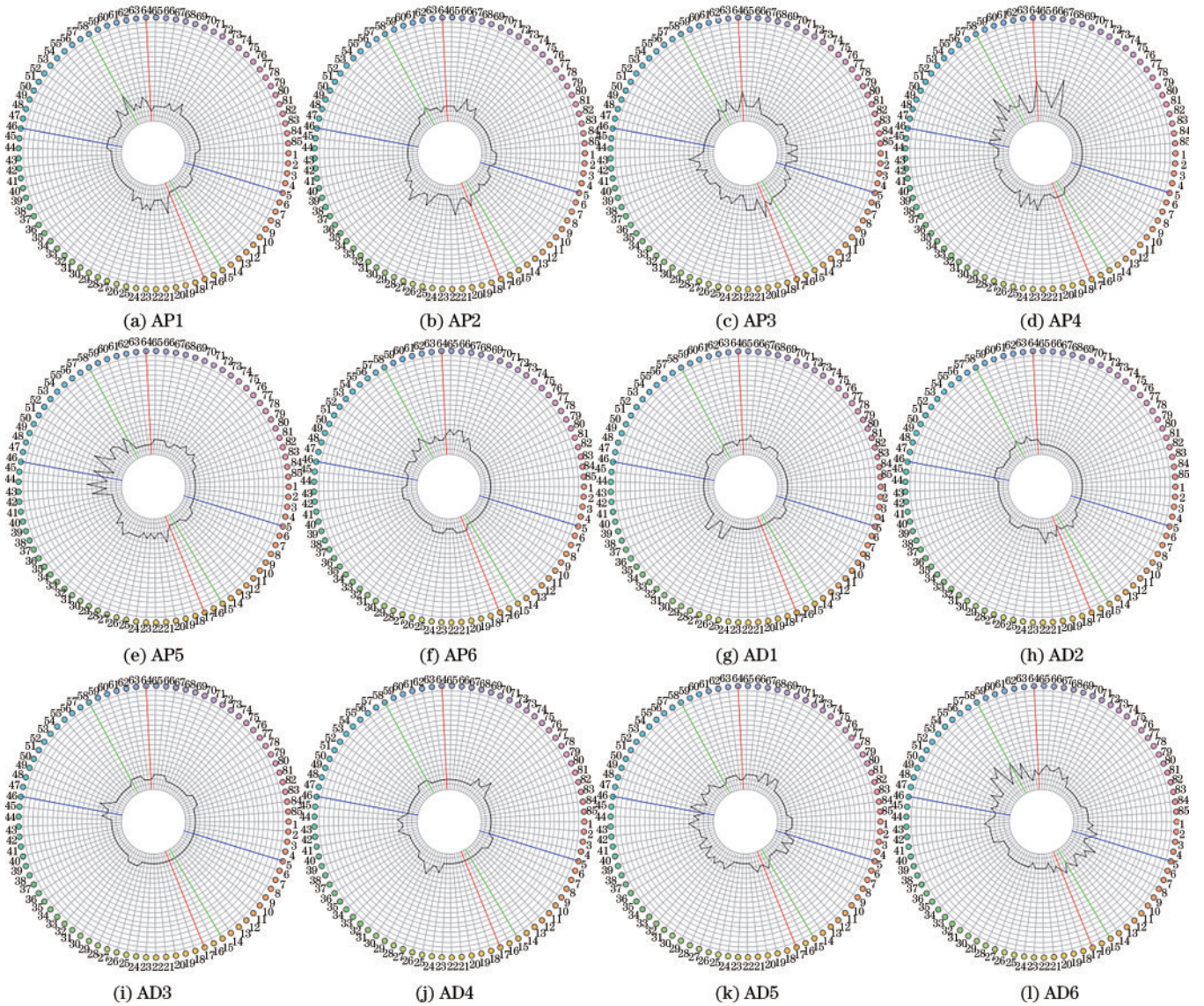


图 6 色弱者的 FM 100-Hue 测验结果在极坐标图中的表示。(a)~(f)红色弱的测验结果;(g)~(l)绿色弱的测验结果

Fig. 6 Results of all anomalous trichromats in FM 100-Hue test represented in the polar diagrams. (a)~(f) Test results of protanomalous trichromats; (g)~(l) test results of deuteranomalous trichromats

3.3 与色盲检查镜测验结果的比较

由表 2 可知,色盲在色盲检查镜测验中可以在所有混色光刻度上与黄色光匹配,而色弱只在某些混色光刻度上匹配。匹配范围,即匹配的混色光刻度最大

值和最小值的差,可以表明色弱者的严重程度。如果匹配最小值和最大值位于刻度 0~40 之间,表明观察者为绿色弱,匹配范围越大,说明色弱对绿色的敏感性越低;如果位于刻度 40~73 之间,表明观察者为红色

弱,匹配范围越大,说明色弱对红色的敏感性越低。表 2 中:显示所有绿色弱对应的匹配最小值和最大值都位于刻度 0~40 范围内;除了 1 名红色弱的匹配最小值和最大值分别为 0 和 65,包含了正常色觉者的匹配范围,属于极端红色弱,其余的红色弱对应的匹配最小值和最大值都位于刻度 40~73 范围内。

值得注意的是,表 2 中参与实验的 12 名色弱者中有 10 名在色盲检查镜测验中的匹配范围 ≤ 30 刻度,且均通过了 D-15 测验。此结果与以往的研究结果^[16]类似:当匹配范围 > 30 刻度时,大多数(84%)绿色弱者没有通过 D-15 测验,即匹配范围 > 30 刻度时,D-15 的通过率显著降低。

为了研究色盲检查镜测验中匹配范围的大小是否可预测色弱者在 FM 100-Hue 测验中的表现,图 7 比较了 12 名色弱者在色盲检查镜测验中的匹配范围与 FM 100-Hue 测验中的 TES。由图 7 可知,色盲检查镜的匹配范围与 FM 100-Hue 测验的 TES 之间不存在相关关系,皮尔森相关系数 r 为 0.32。这表明当色弱者在色盲检查镜测验中的匹配范围增加,即他们对红色或绿色光的敏感性降低时,在 FM 100-Hue 测验中获得的 TES 不会相应地增加。

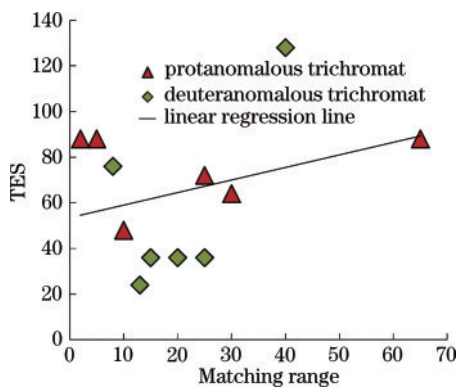


图 7 12 名色弱者在色盲检查镜测验中的匹配范围与 FM 100-Hue 测验中的 TES 比较

Fig. 7 Comparison of the matching range in anomaloscope and TES in FM 100-Hue test for 12 anomalous trichromats

以上结果表明:当色盲检查镜测验的匹配范围 ≤ 30 刻度时,色弱者的颜色辨别能力较好,大多数可以通过 D-15 测验,且在 FM 100-Hue 测验中的 TES 也较低 ($TES < 100$),基本对应代表正常色觉者一般颜色辨别能力的错误分范围。

4 分析与讨论

从实验结果可知,D-15 和 FM 100-Hue 测验在对异常色觉者的检测和分类中性能基本一致,如果事先未进行色盲检查图测验,D-15 和 FM 100-Hue 只能筛选出色盲或重度色弱,无法区分普通色弱与正常色觉者。色盲检查图是非常敏感的测验工具,可以检出轻微色弱^[17]。因此,如果想区分普通色弱和色盲(包括一

些颜色辨别能力接近色盲的色弱),可采用色盲检查图和 D-15 测验或 FM 100-Hue 测验相结合的方法。在使用色盲检查图检测出观察者是异常色觉的情况下,如果观察者通过了 D-15 测验,则被判定为普通色弱;如果没有通过 D-15 测验,则可被判定为色盲或重度色弱。在 FM 100-Hue 测验中,如果获得的 TES 非常高,且错误分沿着明确的轴分布,则被判定为色盲或重度色弱;如果 TES 较低,且没有清晰的错误轴,则被判定为普通色弱。与 FM 100-Hue 测验相比,D-15 测验具有色棋少,测验时间短的优点,且已有研究^[18]表明 D-15 在异常色觉诊断中的敏感性高于 FM 100-Hue。因此,在一些异常色觉计算机辅助识别系统中进行异常色觉检测和分类时可以采用色盲检查图和 D-15 测验相结合的方法。

不同的研究对色觉测验工具的要求有较大差别,此时应该考虑其高效性、准确性和价格等因素。大多数关于颜色视觉机制的研究需对异常色觉类型进行精确分类,如文献[4-5]研究的是色盲和色弱者的颜色恒常性机制,明确观察者的色觉类型具有重要意义。但有个别研究没有使用色盲检查镜,也能达到预期的效果,如文献[19]讨论的是优化的 LED 光源是否能提高异常色觉者的颜色辨别能力,仅使用了色盲检查图和 D-15 对观察者进行了测验,在 D-15 测验中产生明显跨线的观察者,认定其为重度异常色觉,否则为轻度异常色觉。本研究结果表明:通过对研究内容侧重点的判断来选取较为适合的测验工具是非常必要的。

5 结 论

异常色觉的检测和分类经常需要在对辨色有特定要求的行业体检中、异常色觉计算机辅助识别系统中关于异常色觉者的颜色视觉机制研究中进行。不同的领域对异常色觉的检测和分类提出了不同的需求,职业体检中要求检测要非常敏感,尽量不漏掉任何的异常色觉者。异常色觉计算机辅助识别系统由于要根据异常色觉者类型做出对应的处理,所以除了能检测出异常色觉,还需对异常色觉进行一定程度的分类,但由于检测和分类都在计算机系统中进行,因此还需对应的测验工具能够高效而快速。在颜色视觉机制研究中,对异常色觉者的分类的准确性要求最高,需明确观察者是哪种锥体的缺失或变异而导致的异常以及异常程度。比较了 D-15 和 FM 100-Hue 与色盲检查镜之间的测验结果,指出色相测验在异常色觉分类方面存在的局限性,为各个领域异常色觉检测和分类步骤提供了参考依据。

参 考 文 献

- [1] Birch J. Worldwide prevalence of red-green color deficiency[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2012, 29(3): 313-320.

- [2] Boehm A E, Bosten J, MacLeod D I A. Color discrimination in anomalous trichromacy: experiment and theory[J]. *Vision Research*, 2021, 188: 85-95.
- [3] Dees E W, Baraas R C. Performance of normal females and carriers of color-vision deficiencies on standard color-vision tests[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2014, 31(4): A401-A409.
- [4] Álvaro L, Linhares J M M, Moreira H, et al. Robust colour constancy in red-green dichromats[J]. *PLoS One*, 2017, 12(6): e0180310.
- [5] Ma R Q, Kawamoto K I, Shinomori K. Color constancy of color-deficient observers under illuminations defined by individual color discrimination ellipsoids[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2016, 33(3): A283-A299.
- [6] Ghose S, Parmar T, Dada T, et al. A new computer-based Farnsworth Munsell 100-hue test for evaluation of color vision[J]. *International Ophthalmology*, 2014, 34(4): 747-751.
- [7] Almustanyir A, Alduhayan R, Alhassan M, et al. Quantitative scoring methods of the Farnsworth D15 and Waggoner computerized D15 color vision tests in clinical practice[J]. *Color Research & Application*, 2021, 46(6): 1194-1204.
- [8] 史春洁, 朱斐. 基于色貌模型 CIECAM02 和 CIECAM16 的观察者色觉差异研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(19): 1933001.
Shi C J, Zhu F. Research on color vision differences of observers based on color appearance model CIECAM02 and CIECAM16[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(19): 1933001.
- [9] 杨泽鹏, 解凯, 李桐, 等. 多通道置信度加权颜色恒常性算法[J]. *光学学报*, 2021, 41(11): 1133002.
Yang Z P, Xie K, Li T, et al. Color constancy with multi-channel confidence-weighted method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(11): 1133002.
- [10] 马瑞青, 廖宁放, 强彦, 等. 同色异谱在二维模拟场景下对颜色恒常性的影响[J]. *光学学报*, 2021, 41(18): 1833001.
Ma R Q, Liao N F, Qiang Y, et al. Effect of metamer mismatching on color constancy in two-dimensional simulated scenes[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(18): 1833001.
- [11] 马瑞青, 廖宁放, 篠森敬三. 视觉实验前期色觉异常的检测和分类[J]. *光学学报*, 2016, 36(6): 0633001.
Ma R Q, Liao N F, Shinomori K. Detection and classification of color deficiency before vision experiment[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(6): 0633001.
- [12] Birch J. Use of the Farnsworth-Munsell 100-Hue test in the examination of congenital colour vision defects[J]. *Ophthalmic & Physiological Optics*, 1989, 9(2): 156-162.
- [13] Evans B E W, Rodriguez-Carmona M, Barbur J L. Color vision assessment-1: visual signals that affect the results of the Farnsworth D-15 test[J]. *Color Research & Application*, 2021, 46(1): 7-20.
- [14] 马瑞青, 高强, 李雪田. 不同色温标准光源下正常色觉者颜色辨别能力的研究[J]. *太原理工大学学报*, 2022, 53(5): 918-923.
Ma R Q, Gao Q, Li X T. Color discrimination ability of normal observers under standard illuminants with different correlated color temperatures[J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2022, 53(5): 918-923.
- [15] Smith V C, Pokorny J, Pass A S. Color-axis determination on the Farnsworth-Munsell 100-hue test[J]. *American Journal of Ophthalmology*, 1985, 100(1): 176-182.
- [16] Birch J. Failure of concordance of the Farnsworth D15 test and the Nagel anomaloscope matching range in anomalous trichromatism[J]. *Visual Neuroscience*, 2008, 25(3): 451-453.
- [17] Birch J. Identification of red-green colour deficiency: sensitivity of the Ishihara and American Optical Company (Hard, Rand and Rittler) pseudo-isochromatic plates to identify slight anomalous trichromatism[J]. *Ophthalmic & Physiological Optics*, 2010, 30(5): 667-671.
- [18] 李鑫, 张明悦, 李少军. Farnsworth-Munsell 100 Hue test 与 Magnetic Farnsworth D15 在空勤人员色觉异常诊断中敏感性的对比研究[J]. *航空航天医学杂志*, 2017, 28(12): 1424-1426.
Li X, Zhang M Y, Li S J. Research and comparison of Farnsworth-Munsell 100 Hue test and Magnetic Farnsworth D15 in sensitivity in the diagnosis of abnormal color vision in aircrew[J]. *Journal of Aerospace Medicine*, 2017, 28(12): 1424-1426.
- [19] Flinkman M, Nakauchi S. Illuminations that improve color discrimination ability of people with red-green color vision deficiency[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2017, 34(10): 1914-1923.