

视觉实验前期色觉异常的检测和分类

马瑞青¹ 廖宁放¹ 篠森敬三²

¹北京理工大学光电学院光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081

²高知工科大学信息学院/综合研究所视觉·感性合并重点研究室, 高知 香美 782-8502

摘要 在色觉异常者的颜色视觉机制研究中, 实验前期需要对每个被试者的色觉类型进行检测和分类。采用常用的测验工具假同色图(石原表和标准色觉检查表), 色相排列(Farnsworth D-15 和 Farnsworth-Munsell 100-hue 测验)和定量检测工具剑桥色觉测试对7名色觉异常者(三名红色盲, 一名红色弱, 一名绿色盲, 两名绿色弱)进行了测验。通过与色盲检查镜的测验结果相比较, 分析了各测验工具在检测和分类中的优缺点。在此基础上, 给出了视觉实验前期色觉异常的检测和分类步骤。

关键词 视觉光学; 颜色视觉; 色觉异常; 检测和分类; 剑桥色觉测验; 视觉实验

中图分类号 O432 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0633001

Detection and Classification of Color Deficiency Before Vision Experiment

Ma Ruiqing¹ Liao Ningfang¹ Shinomori Keizo²

¹Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System of Ministry of Education,
School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

²School of Information/Vision and Affective Science Integrated Laboratory, Research Institute,
Kochi University of Technology, Kami, Kochi 782-8502, Japan

Abstract In the study of the color visual mechanism of color deficiency, the color types of each subject are detected and classified before experiment. 7 color deficiency subjects (three protanopes, one protanomalous, two deuteranomalous and one deuteranope) are participated in the test including pseudo-isochromatic plate tests (Ishihara and standard pseudo-isochromatic plates), hue ordering tests (Farnsworth D-15 and Farnsworth-Munsell 100-hue test) and quantitative measurement of color discrimination ability test (Cambridge color test). In comparison of test results with those of anomaloscope, the advantages and disadvantages of each test tool are analyzed. On this foundation, the procedure for detection and classification of color deficiency before vision experiments is described.

Key words visual optics; color vision; color deficiency; detection and classification; Cambridge color test; vision experiment

OCIS codes 330.1720; 330.5510; 330.1730

1 引 言

视网膜中感光细胞的缺失或变异导致一部分人颜色辨别能力缺失或减弱, 出现色觉异常。在我国, 色觉异常者在男性中的比例为 4.71%, 女性中的比例为 0.67%。最常见的色觉异常是红绿色觉异常。蓝黄色觉异常非常少见, 大约占总人口的 0.001%~0.002%。某些对颜色视觉有较高要求的行业, 如航空^[1]、交通、染织、印刷等, 会在入职时进行色觉异常检测以避免因辨色问题在实际工作中造成失误。另外, 在医学上的眼科检查^[2-4]中也会进行色觉异常检测。职业检测的要求是方便快捷, 采用的测验工具主要是假同色图和色相

收稿日期: 2015-09-27; **收到修改稿日期:** 2016-01-22

基金项目: 国家自然科学基金(61575020)、日本学术振兴会科学基金(24300085)

作者简介: 马瑞青(1985—), 女, 博士后, 主要从事色觉异常者的颜色感知、视觉心理物理学、颜色恒常性机制等方面的研究。E-mail: mrq153101@163.com

排列。

由于颜色辨别能力的缺失,色觉异常者在颜色匹配^[5]、色差阈值和颜色恒常性^[6-7]等颜色视觉方面均表现出异常。科学家们对色觉异常者的颜色视觉机制展开了广泛的研究,如颜色恒常性机制。颜色恒常性是指人对物体颜色的感知不因光源光谱和强度的变化而变化。如在标准光源和 LED 光源下,尽管白色的色度发生了变化,但人眼都能正确感知,在此基础上可以建立 LED 光源下人眼对白色的感知模型^[8]。了解颜色恒常性机制并进一步构建合适的颜色恒常性算法,对国画艺术品重建^[9]、照相机图像显示^[10]等有着重要的意义。为了达成颜色恒常性,人类视觉系统可以通过场景中物体提供的线索采取各种策略^[11-14]有意识地评估光源的颜色,进而在判断物体颜色时去掉这一部分颜色;也可以根据被照射的场景反射出的光对视网膜层的锥体光谱敏感度做出以适应新的光源^[15]。色觉异常者锥体的缺失或变异以及对应的色辨别能力的失去或减弱都会对颜色恒常性机制产生影响。此外,色觉异常类型对对比度机制^[16]、亮度信息感知^[17],以及与正常色觉者的明度阈值^[18]和色差阈值^[19]建模类似的研究也有直接影响。与职业检测相比,颜色视觉机制研究中对色觉异常的检测和分类精确度要求更高,且经常需要能定量地反应被验者的色辨别能力。

本文主要关注色觉异常者颜色视觉机制研究中的检测和分类问题,通过对色觉异常者的实际测验,将假同色图、色相排列、定量检测工具剑桥色觉测试的测验结果与色盲检查镜的测验结果进行比较,分析了各种测验工具的优缺点,为视觉实验前期色觉异常的检测和分类提供了参考依据。

2 理论基础

物体表面的反射光谱被人眼的光感受体接收后,再经过人类色觉通道的一系列加工,进一步被传递到大脑视觉皮层,从而物体颜色被识别。关于颜色视觉的形成,1802年,托马斯·杨基于颜色匹配实验提出了三原色理论,即颜色的感知由视网膜中的红绿蓝三种光感受器完成。但三原色理论不能解释4种单一色红、绿、蓝、黄的存在以及色盲现象。1872年,赫林提出了对立色理论,即视网膜中有三个对立颜色通道,红-绿、蓝-黄以及黑-白。随着实验技术的发展,视网膜中三种感光色素的存在通过视网膜密度术^[20]、显微测谱术^[21]以及基因编码^[22]等方法得到证实;同时,通过细胞记录方法证实神经节细胞^[23]和外侧膝状体^[24]中存在对立颜色信号的处理。基于以上结果,形成了现代颜色视觉理论——将三色理论和对立通道理论结合形成的两阶段理论,如图1所示。第一阶段包含三种感光细胞,对光谱的吸收峰值分别在560 nm(称为长波长敏感锥体,简称为L锥体)、530 nm(中波长敏感锥体,简称M锥体),以及450 nm(短波长敏感锥体,简称S锥体)。第二阶段对第一阶段的信号进行编码,包含两个彩色对立通道和一个亮度通道,其中,红绿对立通道比较L和M锥体输出的信号,蓝黄对立通道比较S锥体输出的信号和L、M结合后输出的信号,亮度通道结合L和M锥体输出的信号。

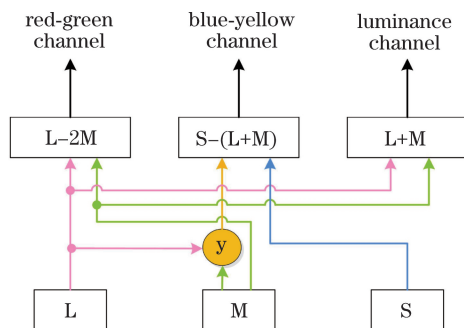


图1 第一阶段的三种锥体,第二阶段的两个彩色对立通道以及一个亮度通道

Fig. 1 Three kinds of cones at the first stage, two chromatic opponent channels and a luminance channel at the second stage

正常色觉者需要红、绿、蓝三种颜色匹配出光谱中的所有颜色,被称为正常三色色觉者。部分人由遗传基因决定,视网膜中的感光色素发生变异或缺失。感光色素的缺失使得色觉异常者只需两种颜色就可匹配出光谱中的所有颜色,称为二色色觉者。缺失L锥体,称为红色盲;缺失M锥体,称为绿色盲,二者均可用蓝

色和黄色匹配出任意颜色;缺失 S 锥体,称为蓝色盲,用红绿色匹配出任意颜色。需要注意的是红色盲和绿色盲均不能识别红绿颜色,但由于缺失的锥体不同,其亮度敏感函数也不同。如果同时缺失两种或三种色素,色觉异常者不能感知到任何颜色,称为全色盲。感光色素的变异指对光谱的吸收峰值发生偏移,对某一特定波长光敏感性降低,色觉异常者仍需要红绿蓝三种颜色匹配出任意颜色,但对某一种颜色的需求量会更多,称为异常三色觉者。L 锥体发生变异,称为红色弱;M 锥体发生变异,称为绿色弱;S 锥体变异,称为蓝色弱。色觉异常者的分类如图 2 所示。

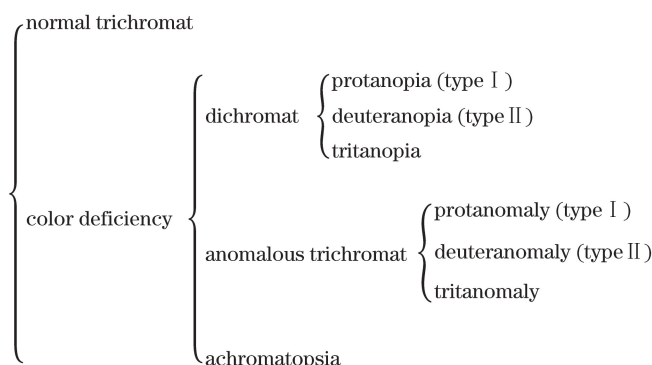


图 2 色觉异常的分类情况

Fig. 2 Classification of color deficiency

在对异常色觉进行分类时,首先区分是红绿色觉异常(L 或 M 锥体异常)还是蓝黄色觉异常(S 锥体异常)。如果是红绿色觉异常,继续区分是由 L 锥体异常引起的第一型色觉异常(Type I),还是 M 锥体异常引起的第二型色觉异常(Type II)。最后针对红色觉或绿色觉异常,区分色盲(L 或 M 锥体缺失)和色弱(L 或 M 锥体变异);针对蓝黄色觉异常,同样区分是色盲(S 锥体缺失)还是色弱(S 锥体变异)。

3 实验过程

被验者包括 7 个色觉异常者(全部为男性)和 5 个正常色觉者(三名女性,两名男性),年龄在 19~25 岁之间。色觉异常者的色觉类型通过 Neitz 色盲检查镜分为三个红色盲 P1、P2、P3,一个红色弱 AP1,一个绿色盲 D1,两个绿色弱 AD1、AD2。实验前,被验者均填写了检查同意书。

对被验者依次使用石原色觉检查表(国际 38 表版本),标准色觉检查表(SPP),Farnsworth D-15 测验,Farnsworth-Munsell 100-Hue 测验(FM 100-hue)以及剑桥色觉测验^[25]。实验中用到的色觉检验工具如图 3 所示。

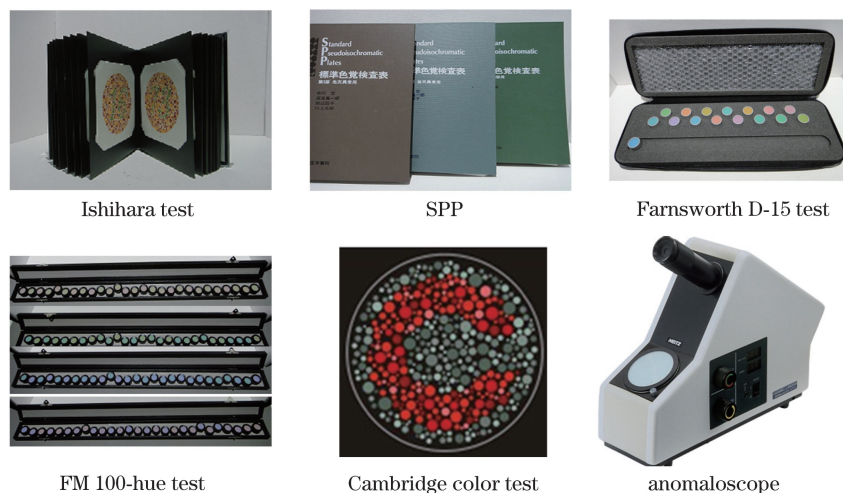


图 3 实验中所采用的色觉异常检验工具

Fig. 3 Tools for color deficiency detection in experiment

在石原表和标准色觉检查表中,被验者的任务是读出表中的数字。在 D-15 和 FM 100-hue 测验中,被验者的任务是按照颜色最相似对色帽进行排序。测验结束后,将色帽背面的编号记在记录单上,并作图。以上 4 种测验均在白色光源 (CIE 1931 色度坐标为(0.33, 0.35))照射下进行,照度为 500 lx。

剑桥色觉测验^[25]在暗室中进行。剑桥色觉测验的刺激物是灰色背景包围的“C”字母。刺激物的亮度信息范围设置为 8~18 cd/m²。被验者根据色度来判断 C 的开口。C 的色度会根据被验者的表现不停地调整,直到被验者刚好不能从背景中观察到 C 的开口。刺激物被显示在一个 19 英寸(48.26 cm)的 CRT 显示器(CPD-G220)上,显示器的显卡为视觉实验专用显卡(ViSaGe, CRS),可为每个 RGB 通道提供 14 位的分辨率。显示器的 gamma 矫正由 ViSaGe 的矫正软件控制色度仪(ColorCAL, CRS)完成。被验者通过按 CRS 响应盒(CB4, CRS)上对应的按钮来回答 C 的开口方向。测验总共包括了三个色度背景,对应的 CIE1976(u' , v')色度值分别为(0.1925, 0.5092)、(0.1978, 0.4684)和(0.2044, 0.4160)。针对每一种色度背景,测验时间大约是 20 min,每次测验是 1 h。每个被验者总共重复三次实验。观察距离为 243 cm,此时 C 开口处为 1°视角。

4 实验结果

4.1 石原表测验

表 1 为石原表测验中被验者针对每一类色图正确读出的数字总数。色图 1,正常色觉和异常色觉均可读出,实验结果显示所有异常色觉者和正常色觉者均可正确读出。色图 2~9,正常色觉者和异常色觉者读出的数字不一样。表 1 中显示正常色觉者读出了正常一栏的数字,而异常色觉者读出了异常一栏的数字,符合预期。色图 10~17,正常色觉者可以读出,异常色觉者读不出。表 1 显示正常色觉者读出了 8 个数字;异常色觉者,除了红色盲 P3 读出 1 个数字,其余的均读不出任何数字。色图 18~21,正常色觉者读不出,而异常色觉者可以读出。表 1 显示正常者读不出任何数字,第二型色觉异常者读出了所有数字,第一型色觉异常者读出了部分。色图 22~25 用来对第一型和第二型色觉异常分类。表 1 中,第二型色觉异常正确读出了二型一栏所有的数字;第一型色觉异常的表现不一,被验者 P3 还读出了第二型一栏所有的数字。色图 26~38 要求被验者辨别曲线,而不是数字,本文没有列出对应的结果。从以上结果看出,石原表可正确地检测出异常色觉者,但不能对第一型和第二型色觉异常进行分类。

表 1 石原表测验结果

Table 1 Results of Ishihara test

Type of plates		N1	D1	AD1	AD2	P1	P2	P3	AP1
Plates 2-9	Normal	8	0	1	0	0	0	1	0
	Deficient	0	8	5	4	5	4	6	3
Plates 10-17		8	0	0	0	0	0	1	0
Plates 18-21		0	4	4	4	1	2	3	2
Plates 22-25	Type I	4	0	0	0	2	0	0	1
	Type II	4	4	4	4	2	0	4	0

4.2 标准色觉检查表

表 2 为在第一部先天色觉检查表中被验者正确读出的数字总数。先天色觉检查表分为检测表和分类表。检测表用于检出色觉异常,正常一栏读对的数字在 8 个以上就可认为是正常色觉,否则为异常色觉。表 2 正常一栏中,正常色觉者 N1 读对的数字总数为 10 个,而所有异常色觉者的读数均少于 8 个;异常一栏中,正常和异常色觉者均能正确读出,说明先天色觉检查表可正确检出色觉异常。分类表用于区分第一型和第二型色觉异常,哪一栏读对的数字多则为哪个类型色觉异常。表 2 中,所有第二型异常者在二型一栏的读数均比一型一栏的多,而第一型色觉异常则相反,说明先天色觉检查表可在第一型和第二型色觉异常之间进行分类。

表 2 先天性色觉异常检查结果(SPP)

Table 2 Results of congenital color deficiency test (SPP)

		N1	D1	AD1	AD2	P1	P2	P3	AP1
Identification	Normal	10	3	0	0	1	0	5	2
	Deficient	10	9	10	6	10	10	9	10
Classification	Type I	5	0	0	0	5	5	5	5
	Type II	5	4	4	3	0	0	3	2

标准色觉检查表第二部为后天色觉检查用,此处被验者均显示为先天红绿色觉异常。第三部标准色觉检查是用来检测色觉异常属先天红绿色觉异常、先天蓝黄色觉异常还是后天的眼科疾病导致。第三部测验结果显示被验者均为先天红绿色觉异常。

4.3 Farnsworth D15 测验

将被验者排好序的色帽背后的数字依次记录下来,如果为正常色觉,则数字序列正常;数字序列混乱说明被验者不能正确区分颜色。表 3 为正常色觉者和异常色觉者在 D-15 测验中的色帽排列顺序,每个数字对应一个色貌。由表 3 可知,正常色觉者可进行正确排序;大部分色觉异常者不能进行正确排序,但红色盲 P3 和红色弱 AP1 可以像正常人一样准确的排序,说明 D-15 测验在色觉异常检测方面精度不高,容易漏掉一部分色觉异常者。

表 3 D-15 测验的色相排列结果

Table 3 Results of hue ordering in D-15 test

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
N1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
D1	1	2	15	14	3	13	4	5	12	11	6	10	7	9	8
AD1	1	15	2	14	3	13	4	12	5	11	6	10	7	9	8
AD2	1	15	2	14	3	13	4	12	5	11	6	10	9	8	7
P1	15	1	14	13	2	3	4	12	11	10	5	6	8	7	9
P2	15	1	14	2	13	6	9	7	8	10	5	11	4	12	3
P3	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
AP1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

在记录纸上将数字序列依次连接起来,如图 4 中黑色线所示。如果为正常色觉,则连接后的形状呈现半圆周。如果为异常,则连线跨过半圆周,称为跨线。图 4 中红色线和绿色线分别表示第一型色觉异常和第二型色觉异常混淆轴的位置。通过比较黑色跨线和混淆轴的方向是否一致,从而判断色觉异常的类型。图 4 为两个第一型色觉异常者 P1、P2 和两个第二型色觉异常者 AD1、AD2 的排序结果对应的图。图中显示绿色弱 AD1 和 AD2 的跨线与绿色盲线平行;红色盲 P1 和 P2 的跨线与红色盲线平行。未画出的绿色盲 D1 的表现与绿色弱 AD1、AD2 的表现一致。可见,D-15 测验对色觉异常在第一型和第二型之间可正确分类,但不能区分色盲和色弱,且检测结果还是定性的,不能精确地衡量被验者的颜色辨别能力。

4.4 FM100-hue 测验

图 5 为 FM 100-hue 测验结果分析所用记录纸的一部分,分别对应错误分的计算和错误分图。图 5(a)中,从上到下依次为正确的数字序列、被验者排好的序列、针对被验者排好的数字序列相邻两个数字作差、对相邻两个差继续求和、将求和后的数字减去 2。将最终计算得到的数字序列全部相加得到测验的错误分;将计算得到的数字序列依次画到图 5(b)所示的图中,得到错误分图。

FM 100-hue 测验用总错误分来表示颜色辨别能力高低,错误分越高,色辨别能力越低。对于正常色觉者来说,分数在 20~100 之间代表颜色辨别能力处于平均水平,在 0~16 之间代表颜色辨别能力较高,100 以上代表颜色辨别能力较低。色觉异常者的错误分普遍较高,色辨别能力较差。表 4 为测验中部分正常色觉者和部分异常色觉者 4 种色调排列对应的错误分以及总的错误分。正常者一栏显示,N2 的错误分仅为 8,色辨别能力高于平均水平;N1 和 N4 的色辨别能力低于平均水平,分数接近于色觉异常者。仅按照分数还不能够将正常色觉和异常色觉分开。

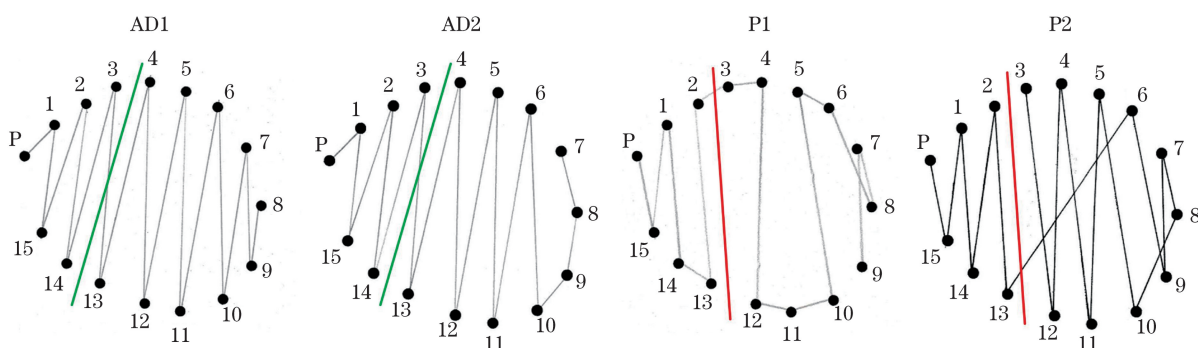


图 4 D-15 测验的分类结果

Fig. 4 Classification results in D-15 test

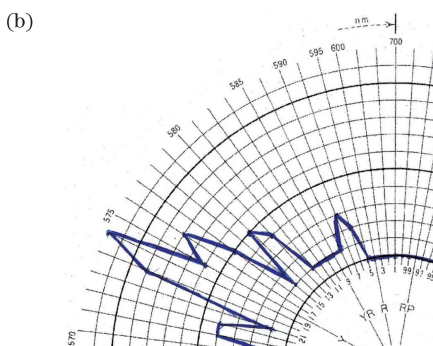
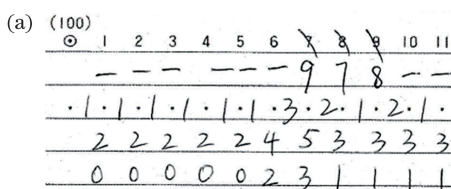


图 5 FM 100-hue 测验结果的分析。(a) 错误分的计算;(b) 错误分图

Fig. 5 Analysis of FM 100-hue test results. (a) Calculation of error scores; (b) chart of error scores

表 4 FM 100-hue 测验中的错误分

Table 4 Error scores in FM 100-hue test

	Color deficient subjects				Normal subjects				
	AD1	AD2	P1	AP1	N1	N2	N3	N4	N5
Red	75	84	100	52	20	0	4	15	4
Green	37	18	53	34	63	0	30	89	0
Blue	90	74	69	56	52	4	7	39	8
Purple	11	63	70	61	46	4	12	66	12
Total	213	239	292	203	181	8	53	209	24

图 6 中红色和绿色矩形分别表示第一型和第二型色觉异常对应的混淆轴的方向。黑色轨迹为根据被验者错误分画出的错误轴。FM 100-hue 测验通过观察错误轴是否朝特定方向延伸来判断色觉异常类型,错误轴的延伸方向与对应的第一型异常混淆轴一致,则为第一型色觉异常,反之亦然。N1 虽然错误分数点较高,接近于异常色觉者,但错误轴没有朝特定方向延伸,因此属于色辨别能力较低的正常色觉者。P1、AP1 的错误轴基本朝第一型色觉异常对应的方向延伸。AD1 的错误轴有延伸,但并没有朝第二型色觉异常方向延伸。

相比较前面的测验工具,FM 100-hue 测验已经能在一定程度上定量地描述色辨别能力,但是更适用于描述正常色觉者的色辨别能力^[14]。FM 100-hue 测验能通过错误轴检测出异常色觉,但在进行第一型和第二型色觉异常分类时并不是很精确。

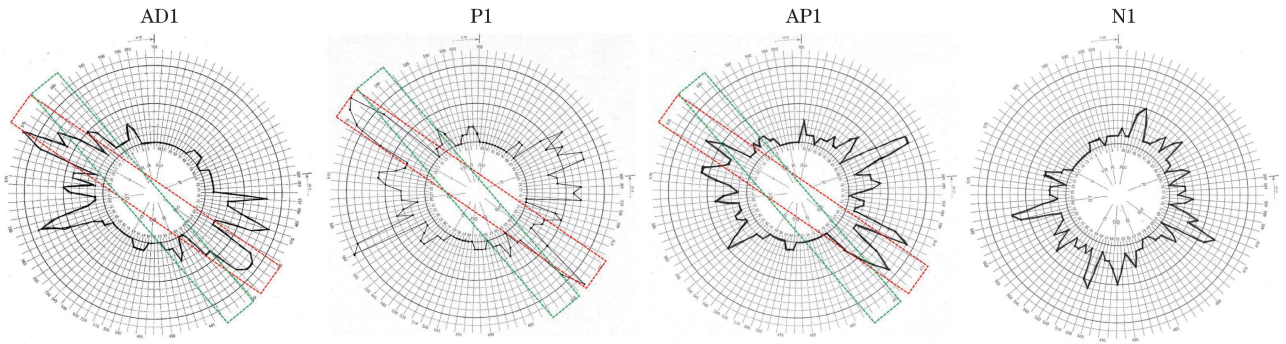


图 6 FM 100-hue 测验中的错误分图

Fig. 6 Charts of error scores in FM 100-hue test

4.5 剑桥色觉测验

图 7 为被验者在剑桥色觉测验中得到的三个色度背景对应的颜色辨别阈值在 CIE1976 颜色感知空间中的表示。黑色十字表示被验者分别在中心色度点的 20 个方向上通过 staircase 过程得到的辨别阈值。通过使得椭圆的中心等于背景色度点,最小化椭圆和数据点之间的距离的平方和,获得拟合椭圆。正常色觉者的色辨别椭圆非常小,且长短轴比例较小,通常小于 2.0。图 7 中 N1 和 N2 的色辨别椭圆均较小,为正常色觉,N1 比 N2 的要大,说明 N1 的色辨别能力比 N2 低;其余色辨别椭圆均较大,属于色觉异常。测验通过三个色辨别椭圆长轴的指向来区分第一型和第二型色觉异常:指向红色盲混淆点($u' = 0.656, v' = 0.501$)^[15],为第一型色觉异常;指向绿色盲混淆点($u' = -1.217, v' = 0.782$),为第二型异常。P1、P2、P3 和 AP1 的椭圆长轴均指向红色盲混淆点方向;D1、AD1、AD2 的椭圆长轴指向绿色盲混淆点方向,说明剑桥色觉测验可区

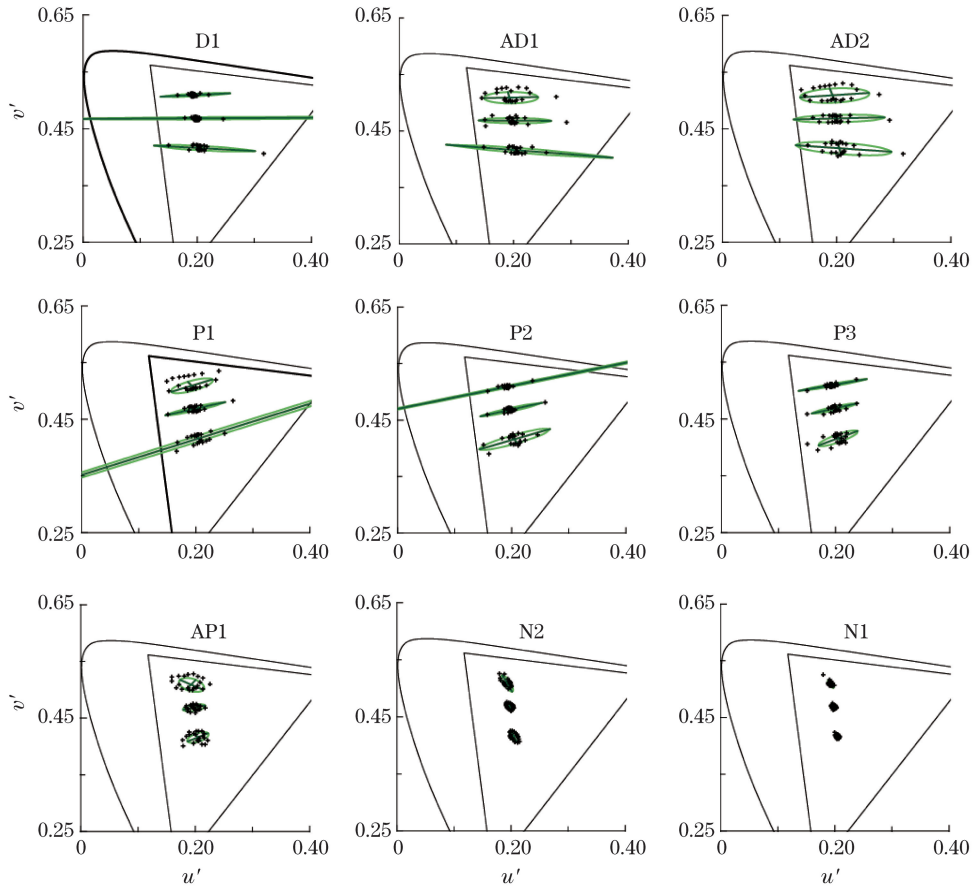


图 7 剑桥色觉测验得到的色辨别椭圆

Fig. 7 Color discrimination ellipsoids obtained from the Cambridge color test

分第一型和第二型色觉异常。测验通过椭圆的大小来区分色盲和色弱:如果色辨别椭圆较大,且延伸到色域外面,则可能为色盲;如果椭圆大小介于正常色觉和色盲之间,则可能为色弱。据此推断,图 7 中 P1、P2 的椭圆延伸到色域外,为色盲;P3 可能为色盲或重度色弱;D1、AD1、AD2 的椭圆均延伸到色域外,为色盲。但显然 P3、AD1、AD2 的判断与色盲检查镜的结果不符。可见,剑桥色觉测验虽然能在均匀颜色感知空间中量化各种类型被验者的颜色辨别能力,但不能区分色盲和重度色弱。

5 结果分析

在实验过程中,石原表首先正确检出所有 7 个被验者为色觉异常者。标准色觉检查表表明 7 个被验者为先天红绿色觉异常且 P1、P2、P3 为一型色觉异常,AD1、AD2、D1 为二型色觉异常。D-15 测验进一步显示 P1、P2 为一型色觉异常,AD1、AD2、D1 为二型色觉异常,但没有检出 AP1 和 P3 为色觉异常。FM 100-hue 正确检出被验者为色觉异常,但第二型色觉异常的分类结果不确定。剑桥色觉测验显示 P1、P2 为一型色盲,P3 为较严重的一型色弱,AP1 为普通的一型色弱,D1、AD1、AD2 为二型色盲。综合分析 5 种测验结果可得出,P1 和 P2 为一型色盲;P3 和 AP1 为一型色弱;D1、AD1、AD2 为二型色盲。显然 P3、AD1、AD2 的测验结果与色盲检查镜的测验结果不一致;色盲检查镜结果显示 P3 为一型色盲,AD1、AD2 为二型色弱。表 5 给出了实验中各测验工具对 7 名色觉异常者的检测和分类结果,以及对应的各测验工具的检测和分类能力的描述。

表 5 实验中各测验工具比较
Table 5 Comparison of color vision tests in experiment

Tests	Detection and classification results	Detection and classification ability
Ishihara	P1, P2, P3, AP1, D1, AD1, AD2 →color deficiency	Detect, but cannot classify the color deficiency.
SPP	P1, P2, P3, AP1→Type I D1, AD1, AD2→Type II	Detect the congenital color deficiency and classify between Type I and Type II.
Farnsworth D-15	P1, P2→Type I P3, AP1→normal color vision D1, AD1, AD2→Type II	Classify between Type I and Type II, but cannot detect some color deficiency.
FM 100-hue	P1, P2, P3, AP1, D1, AD1, AD2 →color deficiency	Estimate the color discrimination ability of normal observers well, but does not work well in the classification of color deficiency.
Cambridge Color Test	P1, P2→protanopia P3→protanopia or severe protanomaly AP1→simple protanomaly D1, AD1, AD2→deutanopia	Provide individual color discrimination ellipsoids in CIE1976 diagram and classify between type I and type II, but cannot classify between dichromat and severe anomalous trichromat.
Anomaloscope	P1, P2, P3→protanopia AP1→protanomaly D1→deutanopia AD1, AD2→deuteranomaly	Classify between Type I and Type II, and between dichromat and anomalous trichromat.

本文 5 种检测工具的配合使用在区分第一型和第二型色觉异常以及色盲和一般色弱方面与色盲检查镜的结果一致,但在区分色盲和重度色弱时不一致。由于视觉实验对被验者色觉类型的确定有非常高的要求,不能正确区分色盲和重度色弱,使得常用的测验工具不能代替色盲检查镜。基于以上结果,可得到一个视觉实验前期色觉异常的检测和分类流程,如图 8 所示。首先通过石原表大面积筛选出色觉异常者,再对筛选出的色觉异常者通过色盲检查镜进行精确分类。在满足了精确分类的要求后,可根据实验实际情况选择性地使用其他测验工具。在有些情况下,要求研究对象是某种特定类型的色觉异常者,则可以通过色相排列有目的地快速筛选出所需要的异常类型,随后用色盲检查镜进行更精确的检验。剑桥色觉测验则可给出被验者在均匀颜色感知空间中的色辨别能力,为基于视觉心理物理学方法的颜色视觉机制的研究提供了极大的便利。

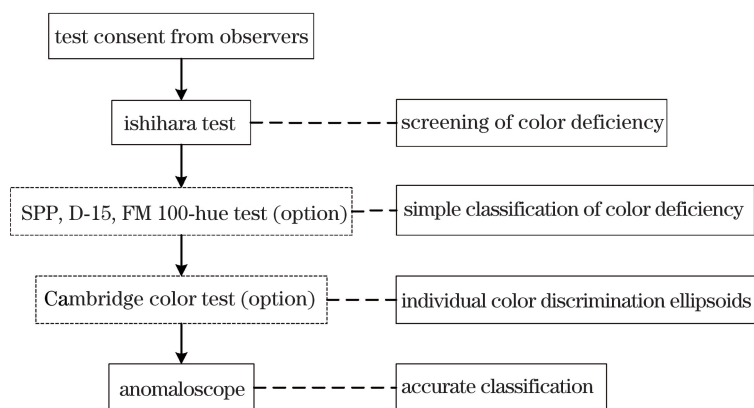


图 8 色觉异常的检测和分类流程

Fig. 8 Procedure of detection and classification of color deficiency

6 结 论

假同色图和色相排列工具是根据色度图中的色盲混淆线设计,而色盲混淆线是基于大多数色盲得到的平均值,因此这两种工具可以大致筛选出色觉异常者,但不能进行精确分类。先天性色觉异常由两个方面定义:1)感光色素发生了缺失或变异;2)在颜色匹配实验中与正常人相比表现异常。虽然剑桥色觉测验可得到被验者个人的色差阈值,但这并不代表能准确地预测被验者在颜色匹配中的表现。色盲检查镜的设计正好采用了颜色匹配这一原理,被验者通过调整红色和绿色的比例来与黄色匹配,所用红色和绿色的比例反应出被验者的色觉类型;红色盲和绿色盲可以接受任意比例,红色弱需要比正常人多多的红色,而绿色弱需要更多的绿色。通过对五种常用色觉异常检测工具进行实际测验和分析,为颜色视觉机制研究前期色觉异常的检测和分类提供了一个参考方案。结果表明,五种常用测验工具的检测和分类精确度低于色盲检查镜。色盲检查镜仍是目前此类实验前期不可缺少的测验工具。但色盲检查镜本身也存在不能很好地预测颜色辨别能力的缺点。在将来的工作中,还需要进一步研究色盲检查镜的使用对实验结果的影响。

参 考 文 献

- Zeng Xiaoming, Meng Changliang. Application of panel D-15 method in physical examination of flight cadet candidates [J]. *International Journal of Ophthalmology*, 2013, 13(9): 1933-1934.
曾晓明, 蒙昌亮. Panel D-15 检查法在招收飞行学员中的应用[J]. *国际眼科杂志*, 2013, 13(9): 1933-1934.
- Cole B L, Lian K Y, Lakkis C. Using clinical tests of colour vision to predict the ability of colour vision deficient patients to name surface colours[J]. *Ophthalmic Physiol Opt*, 2007, 27(4): 381-388.
- 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 Physiol Opt*, 2010, 30(5): 667-671.
- Huang Shizhou, Wu Dezheng, Luo Taiqin, *et al.*. The clinical application of different brightness and different saturation D-15 tests[J]. *Eye Science*, 2000, 16(2): 84-86.
黄时洲, 吴德正, 罗苔青, 等. 不同明度和不同饱和度 D-15 试验的临床应用[J]. *眼科学报*, 2000, 16(2): 84-86.
- Barbur J L, Rodriguez-Carmona M, Harlow J A, *et al.*. A study of unusual Rayleigh matches in deutan deficiency[J]. *Vis Neurosci*, 2008, 25(3): 507-516.
- Baraas R C, Foster D H, Amano K, *et al.*. Color constancy of red-green dichromats and anomalous trichromats[J]. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2010, 51(4): 2286-2293.
- Rüttiger L, Mayser H, Sérey L, *et al.*. The color constancy of the red-green color blind[J]. *Color Res Appl*, 2001, 26(S1): S209-S213.
- Wang Q, Xu H, Cai J. Chromaticity of white sensation for LED lighting[J]. *Chin Opt Lett*, 2015, 13(7): 073301.
- Qin Feng, Yang Weiping, Yang Jia, *et al.*. Research on image reconstruction of traditional Chinese painting art based on radiance information matching[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(10): 1033001.
秦 锋, 杨卫平, 杨 葭, 等. 基于亮度信息匹配的国画艺术品图像重建研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(10): 1033001.

- 10 Zhang X, Wang Q, Yang G, *et al.*. Acquiring multi-spectral images by digital still cameras based on XYZLMS interim connection space[J]. *Chin Opt Lett*, 2014, 12(11): 113302.
- 11 Buchsbaum G A. A spatial processor model for object colour perception[J]. *J Franklin Inst*, 1980, 310(1): 1-26.
- 12 Land E H, McCann J J. Lightness and retinex theory[J]. *J Opt Soc Am*, 1971, 61(1): 1-11.
- 13 Uchikawa K, Fukuda K, Kitazawa Y, *et al.*. Estimating illuminant color based on luminance balance of surfaces[J]. *J Opt Soc Am A*, 2012, 29(2): A133-A143.
- 14 Golz J, MacLeod D I A. Influence of scene statistics on colour constancy[J]. *Nature*, 2002, 415: 637-640.
- 15 Von Kries J. Sources of color science[J]. *Chromatic adaptation*, 1970: 109-119.
- 16 Boehm A E, MacLeod D I A, Bosten J M. Compensation for red-green contrast loss in anomalous trichromats[J]. *J Vis*, 2014, 14(13): 19.
- 17 Paramei G V, Bimler D L, Cavonius C R. Effect of luminance on color perception of protanopes[J]. *Vision Res*, 1998, 38(21): 3397-3401.
- 18 Lu Zhiping, Liu Zhen, Zhang Jianqing. Model of simplified ambient contrast and just-noticeable lightness threshold[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(9): 0933002.
卢智平, 刘 真, 张建青. 简易环境光对比度与恰可察觉明度阈值建模[J]. *光学学报*, 2014, 34(9): 0933002.
- 19 Wang Z H, Xu H S. Evaluation of small suprathreshold color differences under different background colors[J]. *Chin Opt Lett*, 2014, 12(2): 023301.
- 20 Rushton W A. Densitometry of pigments in rods and cones of normal and color defective subjects[J]. *Invest Ophthalmol*, 1966, 5(3): 233-241.
- 21 Marks W B, Dobbie W H, Macnichel J R. Visual pigments of single primate cones[J]. *Science*, 1964, 143(3611): 1181-1183.
- 22 Nathans J, Piantanida T P, Eddy R L, *et al.*. Molecular genetics of inherited variation in human color vision[J]. *Science*, 1986, 232(4747): 203-210.
- 23 Gouras P. Identification of cone mechanisms in monkey ganglion cells[J]. *J Physiol*, 1968, 199(3): 533-547.
- 24 De Valois R L, Abramov I, Jacobs G H. Analysis of response patterns of LGN cells[J]. *J Opt Soc Am*, 1966, 56(7): 966-977.
- 25 Regan B C, Reffin J P, Mollon J D. Luminance noise and the rapid determination of discrimination ellipses in colour deficiency[J]. *Vision Res*, 1994, 34(10): 1279-1299.