

用伪同色光谱图像检测色觉正常观察者的锥细胞光谱响应

何瑞丽, 黄敏*, 郭春丽, 习永惠

北京印刷学院印刷与包装工程学院, 北京 102600

摘要 为了能够快速、准确的检测色觉正常观察者的辨色差异, 从而对其红、绿、蓝三通道的锥细胞光谱响应进行研究, 设计并制作了由背景层(或和明度层)以及数字层组成的伪同色光谱图像, 其中背景层和数字层具有不同的光谱反射曲线, 经过照明光源以及人眼锥细胞光谱响应的共同作用, 使色觉正常的观察者产生不同的颜色感知差异。实验首先基于不同光谱原色的输出设备, 在不同的照明光源下, 制作出能够放大观察者差异的近同色异谱色样对。要求用不同颜色匹配函数计算近同色异谱色样对的 CIEDE2000 色差值, 有的色差在人眼辨色阈值之内, 有的色差人眼可明显识别。通过优化计算, 将放大观察者色觉差异的近同色异谱色样对应用于伪同色光谱图像的数字层和背景层, 并利用 Epson Stylus Pro7908 喷墨打印机和 OKI C9600 激光打印机分别输出伪同色光谱图像的背景层和数字层。同时组织了 72 名色觉正常的观察者(包含 55 名 18~25 岁的年轻观察者和 17 名 62~74 岁的老年观察者)分别在 D65 和 LED-5000K 两种光源下, 对伪同色光谱图像进行识读检验。识读结果表明, 伪同色光谱图像可以较为准确的判定年轻和老年观察者的视网膜锥细胞光谱响应是否老化。同种照明光源下, 年轻观察者可以识读出数字的伪同色光谱图像(②/④)老年观察者不能识读, 老年观察者可以识读的伪同色光谱图像(①/③)大多年轻观察者不能识读, 且 55 名年轻观察者中有 4 名观察者的目视结果与老年人相同。另外, 年轻观察者的锥细胞光谱响应与 CIE1964 和 CIE2006(age=25 y)颜色匹配函数较为一致, 而老年观察者的锥细胞光谱响应与 CIE1931 和 CIE2006(age=75 y)颜色匹配函数更为一致。对比颜色匹配函数的分布, 发现老年观察者的锥细胞光谱响应向长波段偏移, 同时由于屈光系统光学密度增加导致其锥细胞光谱响应有所降低。

关键词 伪同色光谱图像; 同色异谱色样对; 锥细胞光谱响应; 颜色匹配函数; 原色光谱

中图分类号: TN41 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)08-2454-08

引言

由于色觉正常的观察者具有不同的锥细胞光谱响应, 即使进入人眼的颜色刺激完全相同, 观察者也会产生不同的颜色感觉。同样的一对同色异谱颜色刺激, 对于一个观察者来说是匹配的, 但是对于另外一个观察者而言并不匹配, 这就是通常意义上的观察者同色异谱^[1]。为了量化描述观察者的同色异谱, 国际照明委员会(CIE)早期开展了大量工作, 于 1989 年提出了标准观察者偏差模型^[2](standard deviate observer, SDO), 但是后来的研究发现, 这种方法的预测结果远低于真实观察者的差异^[3]。CIE 国际照明委员会 CI-ETC1-36 分会, 于 2006 年推出了 CIE2006 颜色匹配函数计算模型^[4], 该模型考虑到观察者的年龄和视场角, 可生成 20

~80 岁不同年龄观察者在 1°~10°不同视场角的颜色匹配函数。但是研究表明, 即使同一年龄段的观察者, 也存在着个体间的辨色差异^[5]。

近年来随着不同呈色方式(显示设备、投影设备等)的多样化以及窄带光谱原色的出现, 进一步放大了观察者个体之间的差异性, 使得在跨媒体颜色传递和再现中, 观察者的同色异谱不可避免地成为一个较为严重的问题^[6]。随着年龄的增长, 人眼的晶状体、黄斑、视网膜等结构会出现一系列的变化^[7-8], 这使得观察者之间的辨色能力存在一定的差异, 尤其存在于年轻和老年两个年龄阶段的观察者之间^[9-10]。Asano 等^[10]基于四原色光谱的显示器和本课题组前期^[8]基于反射色开展的色差比较实验表明年轻观察者(18~25 岁)和老年观察者(60~74 岁)的目视色差结果呈负相关。上述对观察者锥细胞光谱响应的研究均是基于颜色匹配实验和目视

收稿日期: 2018-07-12, 修订日期: 2018-11-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(61675029, 61308081), 北京市教委科技创新提升项目(PXM2017_014223_000061)资助

作者简介: 何瑞丽, 女, 1993 年生, 北京印刷学院印刷与包装工程学院硕士研究生 e-mail: 695699402@qq.com

* 通讯联系人 e-mail: huangmin@bigc.edu.cn

比较实验,需要多次重复实验,工作量较大、耗时较长,很难投入到实际应用。基于此,2015年 Asano 在他的学位论文中提出了在显示设备上模拟产生由不同窄光谱原色组成的同色异谱图像,将观察者进行分类。但是受显示设备原色光谱分布的限制,实际很难产生这样的颜色刺激,Asano 对此也仅进行了理论上的计算分析。

因此,如何设计合适的、能够放大观察者辨色差异的同色异谱色样对,从而检测观察者锥细胞光谱响应,是研究的关键所在。本文基于具有不同光谱原色的输出设备,进行光谱的优化组合,制作了伪同色光谱图像(由近同色异谱色样对组成)。同时组织了年轻(18~25岁)和老年(62~74岁)两个年龄段的观察者对伪同色光谱图像进行识读检验。研究结果可检测观察者视网膜上锥细胞的光谱响应差异,用于光谱颜色管理过程,在各个显示或输出设备上建立“与观察者相关”的特性文件,解决跨媒体颜色传递与再现中的同色异谱等问题。

1 伪同色光谱图像的设计

1.1 伪同色光谱图像的结构设计

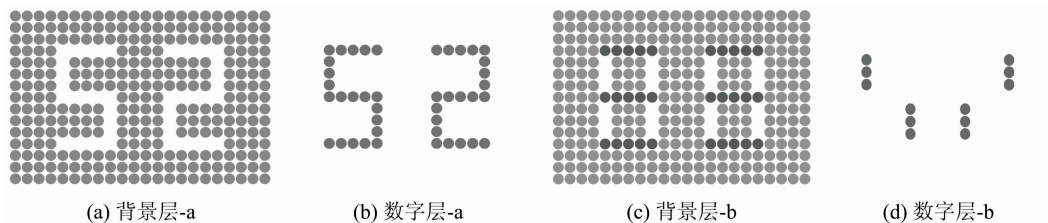


图 1 伪同色光谱图像的构成

(a): 背景层-a; (b): 数字层-a; (c): 背景层-b; (d): 数字层-b

Fig. 1 The composition of spectral pseudoisochromatic images

(a): Background layer-a; (b): Number layer-a; (c): Background layer-b; (d): Number layer-b

1.2 伪同色光谱图像的设计原则

基于反射色的伪同色光谱图像的制作关键在于找到能够放大观察者差异的近同色异谱色样对作为图像的数字层和背景层,数字层和背景层(近同色异谱色样对)的光谱优化组合流程如图 2 所示,主要分为以下几个过程:

(1)组合光谱对。反射色的颜色刺激是由物体的反射光谱和光源光谱共同作用产生的。首先选择不同的照明光源(S_1, S_2, S_3, \dots),同时用具有不同原色光谱的输出设备输出色度值 XYZ 相近的匀色色块,其光谱反射曲线形状不同($\rho_1, \rho_2, \rho_3, \dots$),将具有不同反射曲线的色块两两组合,分别计算其在不同光源照明下色样对的颜色刺激($\Phi_1 = S_1 \times \rho_1, \Phi_2 = S_1 \times \rho_2, \dots$)。

(2)颜色匹配函数。由于色觉正常观察者之间存在一定的辨色差异,选用 CIE 推荐的颜色匹配函数(CIE1931, CIE1964, CIE2006)表征不同观察者的视网膜锥细胞光谱响应函数。

(3)计算色差值。将(1)中选择的光源和色样对的颜色刺激光谱,(2)中的颜色匹配函数组合计算不同光源照明下每个颜色匹配函数对应色样对的三刺激值,以及两两组合的近

同色异谱色样对的 CIEDE2000^[13]色差值 ΔE_{00} 。

(4)目标函数。考虑到人眼的颜色分辨阈值^[14],目标函数要求同一色样对用不同颜色匹配函数计算得到的最大色差值 $\Delta E_{00\max} \geq 3$,最小色差值 $\Delta E_{00\min} \leq 1.5$ 。若该色样对满足要求,则分别作为伪同色光谱图像的数字和背景层输出;如不满足要求,则继续重复(1)~(3)的过程,直至找到满足要求的同色异谱色样对。

通过以上优化计算,优选出可以放大观察者差异的近同色异谱色样对,并应用于伪同色光谱图像数字层和背景层的输出。通过判断观察者是否可以识读出伪同色光谱图像中所对应的数字结果,检测不同色觉正常观察者的锥细胞光谱响应。

基于伪同色光谱图像中包含不同光谱反射曲线的部分,将光谱图像设计为数字层和背景层(或和明度层),二者对应图像中的不同位置,可以构成近同色异谱色样对,并利用具有不同原色光谱的输出设备先后对图像的数字层和背景层进行打印输出,从而制作放大观察者差异的伪同色光谱图像。

伪同色光谱图像的制作以现有的色盲检查图作为参考^[11-12],是由大小相同的圆点均匀排列组成,其直径大小为 5 mm。伪同色光谱图像结构设计分为两种:(1)由背景层-a 和数字层-a 组成,如图 1(a)和(b)所示;(2)由背景层-b 和数字层-b 组成,如图 1(c)和(d)所示,其中背景层-b 中包含构成数字“52”的明度层[图 1(c)中深色的圆点],要求明度层和背景层的 $a^* b^*$ 色度值相同,只是 L^* 值存在差异($\Delta L^* \geq 3$),这是为了放大伪同色光谱图像整体的色差,便于观察者构建数字轮廓。明度层和背景层作为一个整体,由同一设备输出,观察者均能清晰识读明度层。数字层由另一台设备输出,与明度层和背景层具有较大的光谱差异。另外,由于伪同色光谱图像的结构简单,为减小目视实验结果的不确定性,在图像中设计了 2 个数字,观察者需同时识读出这一对数字,才记为完全识读出。

2 实验样本

2.1 照明光源

选用 Gretag Macbeth The Judge II 标准观察箱中的 D65, D50 和 A 光源和 THOUSLITE LED Cube 照明装置中的模拟不同色温(分别为 3 000, 4 000, 5 000 和 6 500 K)的

白光光源, 共计 7 种光源。用 Photo Research 655 光谱辐射计 (PR655) 分别测量 7 种光谱功率分布, 如图 3 所示。UP-Rtek MK350N 手持式照度计测量各光源的照度均为 1 000 lx 左右, 符合 CIE 推荐的观测条件, 且各光源的显色指数均在 90 以上。

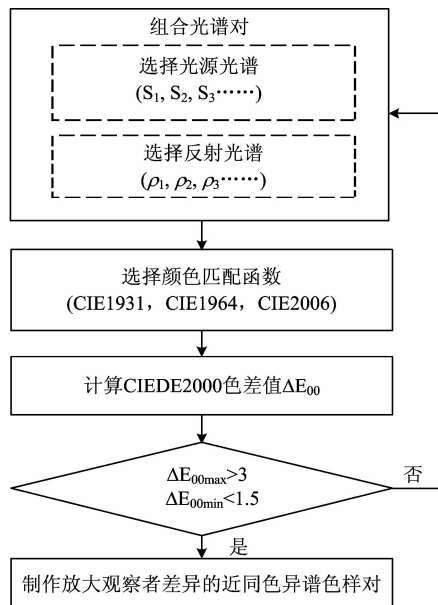


图 2 优化计算流程图

Fig. 2 The workflow of optimized calculation

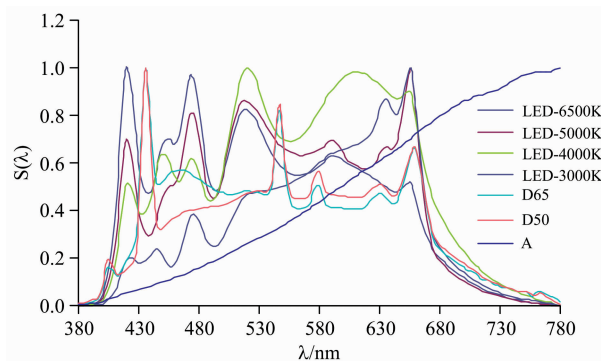


图 3 照明光源的相对光谱功率分布

Fig. 3 SPDs of different light sources

2.2 输出设备

选取了 Epson Stylus Pro7908 喷墨打印机, OKI C9600 激光打印机, Fuji Xerox 数码印刷机, HP-Indigo 数码印刷机以及 Heidelberg 胶印印刷机 5 种不同输出方式或不同型号的输出设备, 基于同种纸张 (120gsm 丰彩喷墨打印纸) 对叠印中性灰色块 ($L^* \approx 50$, $a^* \approx b^* \approx 0$) 进行打印 (印刷) 输出, 使用 eXact 分光光度计测量其光谱反射曲线如图 4 所示。

由图 4 可以看出, Epson Stylus Pro7908 喷墨打印机输出的光谱反射曲线较为平滑, 且与其他不同设备输出的反射曲线差别较大; Heidelberg 胶印印刷机和 HP-Indigo 数码印刷机输出中性灰的光谱反射曲线形状较为相似; 在短波段 (400~500 nm), OKI C9600 激光打印机输出的光谱反射曲

线与其他四台输出设备差异较大。由于选择的两台输出设备, 其光谱曲线形状需有较大差异, 同时考虑到制作成本与周期, 最终选择了 Epson Stylus Pro7908 喷墨打印机和 OKI C9600 激光打印机作为制作伪同色光谱图像的输出设备。

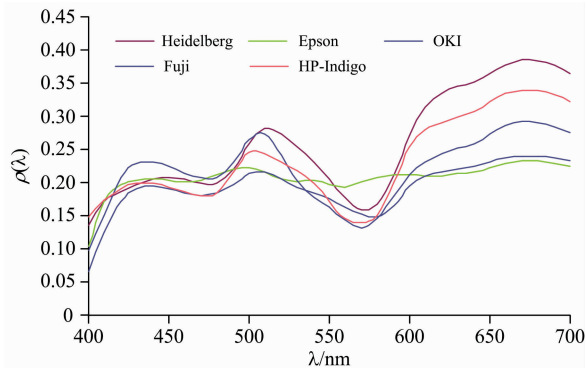


图 4 不同输出设备输出中性灰的光谱反射曲线

Fig. 4 The spectral reflectance of neutral gray samples printed by different equipments

2.3 颜色匹配函数

研究发现^[10], 随着观察者观察视场的减小和年龄的增长, 其锥细胞光谱响应分布具有相似的变化趋势。前期研究结果表明^[15], CIE1931 (2° 视场) 颜色匹配函数与老年观察者的目视结果一致性较好。故仅将 CIE1931 当作一个颜色匹配函数 (不考虑视场角的限制要求), 与 CIE1964 一起作为检验观察者锥细胞光谱响应的颜色匹配函数。另外由于本次图像的制作尺寸为 10 cm × 14 cm, 观察距离为 20~30 cm, 因此观察视场约为 13°, 属于大视场。故基于 CIE2006 生理模型, 计算生成 10° 视场下观察者年龄为 25 岁、35 岁、45 岁、55 岁、65 岁、75 岁 6 个颜色匹配函数 (以下分别简称 CIE2006-25y, CIE2006-35y, CIE2006-45y, CIE2006-55y, CIE2006-65y, CIE2006-75y)。CIE1931, CIE1964 以及 CIE2006 的 6 个颜色匹配函数在 $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ 三个通道的光谱响应如图 5 所示。

比较各个颜色匹配函数在三个通道的峰值波长位置, 可见 CIE2006 的 6 个颜色匹配函数光谱响应曲线的峰值波长随着年龄的增长向长波段偏移, 尤其是在 $\bar{z}(\lambda)$ 通道。比较 8 个颜色匹配函数在三个通道的光谱响应峰值, CIE2006-75y 在 $\bar{x}(\lambda)$ 通道的响应峰值高于其他颜色匹配函数, CIE2006-55y 在 $\bar{z}(\lambda)$ 通道的响应较高, 而 8 个颜色匹配函数在 $\bar{y}(\lambda)$ 通道的光谱响应几乎不变。与其他颜色匹配函数相比, CIE1931 颜色匹配函数在三个通道的响应较低, 其变化趋势与 CIE2006-75y 颜色匹配函数较为接近, CIE1964 颜色匹配函数与 CIE2006-25y 颜色匹配函数的光谱响应曲线较为接近。

2.4 色差计算

基于 Epson Stylus Pro7908 喷墨打印机和 OKI C9600 激光打印机分别输出近同色异谱色样对, 分别代入 7 种光源, 8 个不同颜色匹配函数, 计算同种光源下近同色异谱色样对的 XYZ 三刺激值和 CIEDE2000 色差值。在特定光源下, 用 8 个颜色匹配函数计算得到的近同色异谱色样对 CIEDE2000

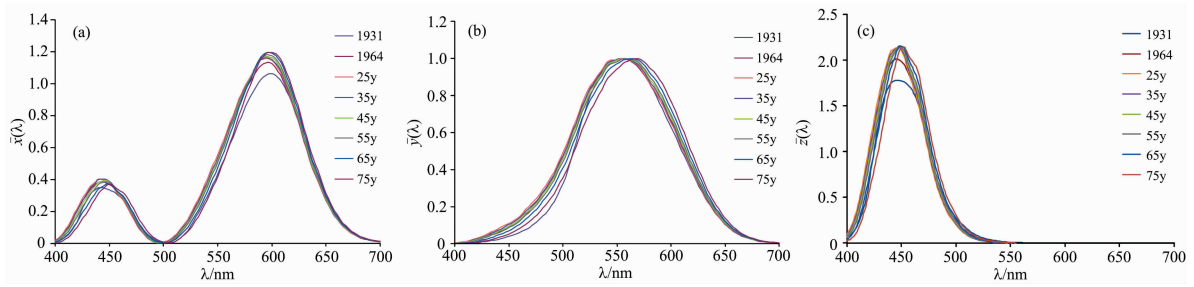


图 5 8 个颜色匹配函数在三个通道的光谱响应

(a): $\bar{x}(\lambda)$ 通道; (b): $\bar{y}(\lambda)$ 通道; (c): $\bar{z}(\lambda)$ 通道

Fig. 5 The spectral responses of eight CMFs in three channels

(a): $\bar{x}(\lambda)$ channel; (b): $\bar{y}(\lambda)$ channel; (c): $\bar{z}(\lambda)$ channel

色差值需满足优化组合过程中目标函数的要求。表 1 是在一次优化组合中, 近同色异谱色样对在 7 种光源下计算色差的极大值和最小值。

表 1 优化组合中近同色异谱对在 7 种光源下的 CIEDE2000 色差值

Table 1 The CIEDE2000 color-differences of nearly metamerism color patches under 7 light sources

ΔE_{00}	The Judge II viewing cabinet			LED Cube			
	A	D50	D65	3 000 K	4 000 K	5 000 K	6 500 K
MAX	2.27	1.56	3.48	2.17	1.01	3.04	2.40
MIN	1.12	0.87	0.91	1.06	0.17	1.33	1.13

经过多次优化组合发现, 相比较其他光源, 在 Gretag Macbeth The Judge II 标准观察箱中的 D65 光源(以下简称 D65)和 THOUSLITE LED Cube 照明装置模拟 5 000 K 色温的白光光源(以下简称 LED-5 000 K)照明下, 近同色异谱色

样对用不同颜色匹配函数计算得到的色差值差别较大。故本实验分别设计并制作了在了 D65 光源和 LED-5 000 K 光源下能够放大观察者差异性的近同色异谱色样对, 并将其应用于伪同色光谱图像的输出。UPRtek MK350N 手持式照度计测量 D65 和 LED-5000K 两种光源的色温、照度、显色指数分别为: 6 505 K, 5 015 K; 965 lx, 1017 lx; 93.8, 98.2。

3 伪同色光谱图像的输出

通过控制不同输出设备上光谱原色的比例, 基于 Epson Stylus Pro7908 喷墨打印机和 OKI C9600 激光打印机, 分别输出可以组成近同色异谱色样对的伪同色光谱图像的背景层和数字层。围绕 D65 光源和 LED-5 000 K 光源, 制作了四张不同的伪同色光谱图像(①②③④), 如图 6 所示, 其中图像①和②是针对 D65 光源制作的两张伪同色光谱图像; 图像③和④是针对 LED-5 000 K 光源下制作的图像, 不同的伪同色光谱图像需要在对应的光源下进行识读检验。

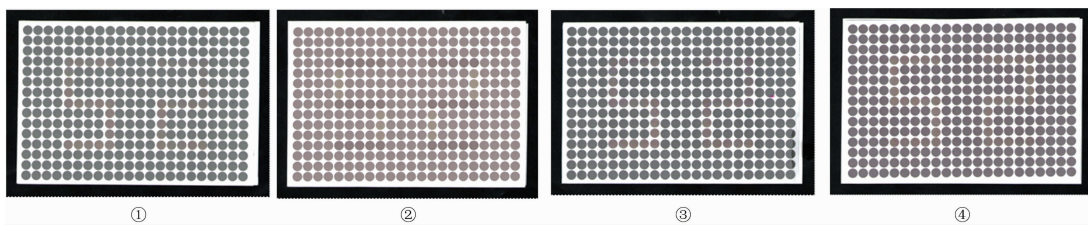


图 6 4 张伪同色光谱图像

Fig. 6 Four spectral pseudoisochromatic images

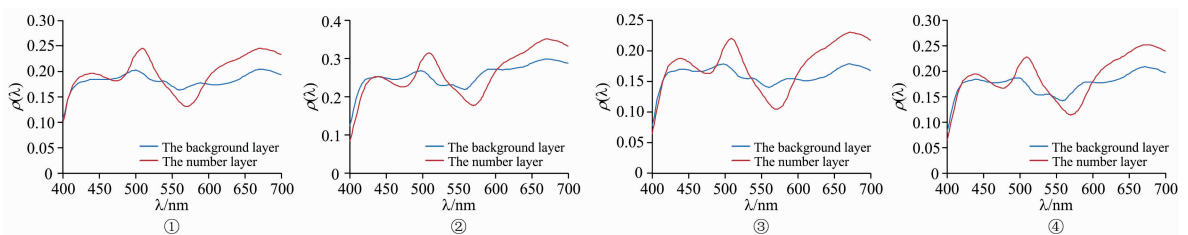


图 7 四张伪同色光谱图像中数字层和背景层的光谱反射曲线

Fig. 7 The spectral reflectance of background layer and number layer in four spectral pseudoisochromatic images

伪同色光谱图像的结构组成有两种方式,其中图 6(a),(c)和(d)的 3 张伪同色光谱图像是由数字层-a 和背景层-a 组成,而图 6(b)的伪同色光谱图像是由数字层-b、以及背景层-b(包含明度层)组成。用 eXact 分光光度计分别测得 4 张伪同色光谱图像背景层和数字层的光谱反射曲线如图 7 所示,并将其分别代入对应的 D65 和 LED-5 000 K 光源及 CIE1931

和 CIE1964 颜色匹配函数得到伪同色光谱图像各组成部分的 $L^* a^* b^*$ 色度值如表 2 所示。4 张伪同色光谱图像的数字层和背景层在对应光源照明下(图像①②在 D65 光源下;图像③④在 LED-5 000 K 光源下)用 8 个不同颜色匹配函数计算得到的 CIEDE2000 色差值如图 8 所示。

表 2 对应光源下 4 张伪同色光谱图像各组成部分的 $L^* a^* b^*$ 色度值

Table 2 The $L^* a^* b^*$ colorimetric values for each component of four images under corresponding light sources

Layer	Image①		Image②			Image③		Image④	
	Background	Number	Background	Lightness	Number	Background	Number	Background	Number
L^*	49.27	49.65	56.72	51.70	56.90	46.87	46.15	48.02	47.82
a^*	-0.21	1.98	4.97	4.87	3.54	0.35	2.33	4.79	3.61
b^*	-1.21	-2.22	-0.48	-0.25	-0.35	-2.98	-4.49	-3.18	-3.03
L_{i0}^*	49.38	49.89	56.79	51.98	57.07	47.00	46.44	48.15	48.06
a_{i0}^*	-0.87	0.12	3.99	3.89	1.73	-0.39	0.13	3.61	1.51
b_{i0}^*	-0.90	-1.67	-0.28	0.09	0.14	-2.65	-3.82	-2.93	-2.47

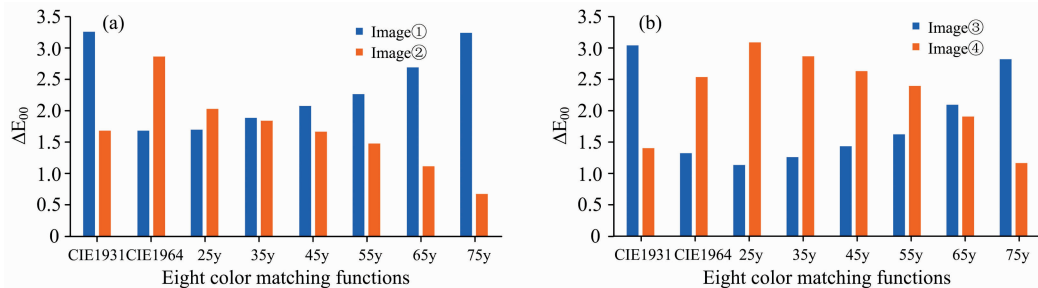


图 8 不同光源照明下 4 张伪同色光谱图像数字层和背景层的色差比较

(a) D65 光源照明下①②图像的色差; (b) LED-5 000 K 光源照明下③④图像的色差

Fig. 8 Comparison of color difference of four spectral pseudoisochromatic images under two light sources

(a): Color difference of ①② images under D65 light source;

(b): Color difference of ③④ images under LED-5 000 K light source

图 8(a)中, D65 照明光源下, 伪同色光谱图像①/②中数字层和背景层用 CIE2006(age=25 y, 35 y, 45 y, 55 y, 65 y, 75 y)6 个颜色匹配函数代入计算的色差值随着年龄的增长而增加/降低。图像①用 CIE1931 和 CIE2006-75y 颜色匹配函数计算得到的色差最大(分别为 3.26 和 3.24), 如果观察者识读出图像①中的数字, 则说明该观察者的锥细胞响应与 CIE1931 和 CIE2006-75y 较为一致; 图像②用 CIE1964 颜色匹配函数计算得到的色差最大(2.87), 如果观察者能识读出图像②中的数字, 则说明该观察者的锥细胞响应与 CIE1964 较为相近。若观察者不能准确识读出图像①②中的数字或者同时识读出图像①②中的数字, 则说明观察者的锥细胞响应函数介于两类颜色匹配函数之间。

同样地, LED-5 000 K 照明光源下, 制作的伪同色光谱图像③④类似于 D65 光源照明下的图像①②, 可以根据观察者对图像③④的识读结果, 检测观察者的锥细胞光谱响应。

4 目视评价实验

由于本实验制作的伪同色光谱图像数字较为单一且色差

差别不是很大, 为避免观察者对数字的记忆, 同时减小观察者无法识读的压力, 使目视数据更加准确, 从新编色觉检查图(李春慧, 1994 年第 2 版)中挑选出 4 张和伪同色光谱图像相似的图形作为目视评价的测试样本(图 9 所示)。由于组织的观察者在实验开始前, 已进行了色盲检测, 因此对挑选的 4 张色盲检查图的目视结果在后续不做分析和讨论。

实验开始前, 将照明光源预热 10 min, 同时告知观察者: (1)本实验选取的图像中确实有比较难识读的或者不能识读的数字, 属于正常现象; (2)为了保证图像的清洁, 在目视实验过程中, 观察者不得随意触碰或改变图像的位置。观察者在实验过程中, 需正坐在灯箱前, 保持 0/45 的观察角度, 观察距离 20~30 cm。由实验组织者从 8 张检测图中随机选取一张, 水平放置于灯箱中央, 观察者须以眼睛观测的第一印象为准, 于 10 s 内对检测图中的数字进行识读。由实验组织者记录下观察者的识读结果, 观察者识读 8 张检测图需要 3~5 min。

实验共组织了 72 名色觉正常的观察者识读伪同色光谱图像, 其中 55 名 18~25 岁的年轻观察者(男生 21 人, 女生 34 人), 平均年龄为 22 岁, 均为北京印刷学院印刷或包装工

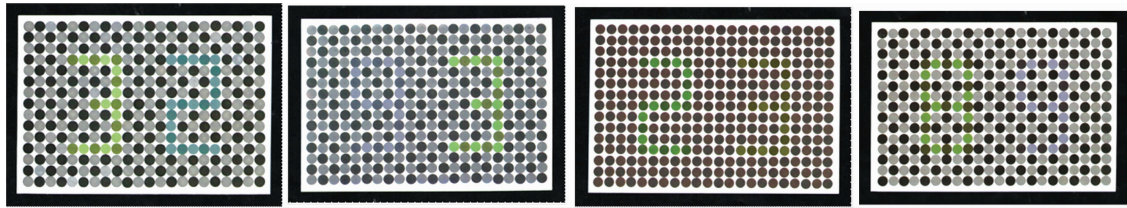


图 9 挑选的 4 张色盲检查图

Fig. 9 Four selected color vision testing charts

程专业的学生；17 名 62~74 岁的老年观察者(11 男 6 女)，平均年龄 68 岁，其中 3 人为北京印刷学院的退休教师，具有印刷专业相关背景知识。

5 结果与讨论

将两种照明光源下观察者对伪同色光谱图像的识读结果进行统计，如表 3 所示，每种光源下观察者的识读结果有：两张伪同色光谱图像均可识读；均不能识读；只能识读其中一张。表 4 中的“√”代表观察者可以准确识读伪同色光谱图像中的数字，“×”代表观察者不能识读伪同色光谱图像中的数字。

表 3 两种光源下观察者识读 4 张伪同色光谱图像的结果

Table 3 Reading results of four spectral pseudo-chromatic images by observers under two light sources

	D65 light sources				LED-5 000 K light sources			
	①	②	NO. young	NO. old	③	④	NO. young	NO. old
Result 1	√	×	4	13	√	×	4	17
Result 2	×	√	48	0	×	√	43	0
Result 3	√	√	2	0	√	√	4	0
Result 4	×	×	1	4	×	×	4	0
sum			55	17			55	17

D65 照明光源下，13 名老年观察者和 4 名年轻观察者可识读伪同色光谱图像①，不可识读图像②的数字；而 48 名年轻观察者正好相反：可识读图像②，不可识读图像①的数字。同样地，LED-5 000 K 照明光源下，所有老年观察者和 4 名年轻观察者只可读图像③，而大多数年轻观察者(43 名)只可识读图像④。这说明，年轻和老年观察者存在着较为明显的辨色差异。另外，D65 光源下只可识读图像①的 4 名年轻观察者和 LED-5 000 K 光源下只可识读图像③的 4 名年轻观察者仅有 1 人是同一名观察者，其余 3 名并不相同。这就进一步说明，观察者的锥细胞响应会受到颜色刺激光谱的影响^[10]。

为了进一步研究观察者的锥细胞光谱响应，将观察者的目视结果与伪同色光谱图像的色差计算结果(图 8 所示)进行比较，13 名老年观察者和 4 名年轻观察者可以识读出伪同色光谱图像①中的数字，说明这些观察者的锥细胞响应函数与 CIE1931 和 CIE2006-75y 两个颜色匹配函数较为一致。分析

CIE1931 和 CIE2006-75y 两个颜色匹配函数的光谱曲线可知，其锥细胞光谱响应在三个通道的响应较低，同时向长波段有一定的峰值偏移。而伪同色光谱图像②中数字层和背景层用 CIE1964 颜色匹配函数计算的 CIEDE2000 色差最大(2.87)，48 名年轻观察者可识读其中的数字，说明这些观察者的锥细胞响应函数与 CIE1964 更为接近。D65 照明光源下，3 名年轻观察者都可识读或者都不可识读两张图像，说明这 3 名年轻观察者的锥细胞响应介于 CIE2006(age=25 y, 35 y, 45 y)三个颜色匹配函数之间。由 D65 光源下的目视结果可以发现，年轻观察者和老年观察者有着明显的辨色差异，同样的图像①，大部分老年人可以识读其中的数字，但是多数年轻观察者却不能识读；同样的光谱图像②，大部分年轻观察者可以识读其中的数字，但是老年观察者却不能识读。

LED-5 000 K 照明光源下，所有老年观察者和 4 名年轻观察者可识读出图像③中的数字，且该图中背景层和数字层用 CIE1931 和 CIE2006-75y 颜色匹配函数计算得到的 CIEDE2000 色差较大(分别为 3.04 和 2.82)，表明可以用 CIE1931 或 CIE2006-75y 颜色匹配函数来表征这些观察者的锥细胞响应函数。43 名年轻观察者可以识读图像④中的数字，且该图中背景层和数字层用 CIE2006-25y 颜色匹配函数计算得到的 CIEDE2000 色差最大(3.09)，表明可以用 CIE2006-25y(或 CIE1964)颜色匹配函数来表征这些年轻观察者的锥细胞响应函数。余下的 8 名年轻观察者都可识读或者都不可识读 LED-5 000 K 光源下的两张图像，说明他们的锥细胞光谱响应介于这些颜色匹配函数之间，不能用某一颜色匹配函数进行表征。

通过对两种照明光源下观察者的目视结果分析可以发现，年轻和老年观察者的辨色差异较为明显，同样的伪同色光谱图像，老年观察者识读结果的一致性优于年轻观察者；同样的观察者对于不同的伪同色光谱图像(不同的颜色刺激)，其锥细胞光谱响应会呈现不同的目视结果，且观察者之间的辨色差异较为明显，仅用平均人眼颜色视觉特性，不足以表征个体观察者的锥细胞光谱响应。

6 结论

为了快速、准确的检测色觉正常观察者的锥细胞光谱响应差异，从而对其进行分类，基于不同原色光谱的输出设备，制作了四种不同的伪同色光谱图像，组织了 72 名观察者在两种照明光源下对伪同色光谱图像进行识读检验。将观察

者的识读结果和伪同色光谱图像背景层与数字层的 CIEDE2000 色差值进行比较, 结果表明: 制作的伪同色光谱图像可以较为准确地分类年轻和老年观察者。大多数年轻和老年观察者的识别结果相反, 年轻观察者的锥细胞响应与 CIE1964 和 CIE2006-25y 颜色匹配函数较为一致, 老年观察者的锥细胞响应与 CIE1931 和 CIE2006-75y 颜色匹配函数更为一致。同时年轻观察者中有 4 人视网膜锥细胞响应与同年龄段的观察者有一定的差异, 与老年观察者有相同的识读结

果, 而老年观察者群体对颜色的辨别能力较为稳定, 该年龄段对颜色分辨能力的离散性小于年轻观察者。

受现有输出设备原色光谱的限制, 现有伪同色光谱图像的颜色种类和色差大小受到了限制, 今后可进一步增加伪同色光谱图像中的原色个数, 从而扩大数字层和背景层的色差, 同时在图像中加入更多的颜色使图像丰富多彩, 分类更多年龄段个体观察者的锥细胞光谱响应。

References

- [1] Fairchild M D, Heckaman R L. *Color Research & Application*, 2016, 41(2): 115.
- [2] International Commission on Illumination(CIE). *CIE Publication No. 80*, 1989.
- [3] Rich D C, Jaliljani J. *Color Research & Application*, 1995, 20(1): 29.
- [4] International Commission on Illumination(CIE). *CIE Publication No. 170*, 2006.
- [5] Shi C, Huang M, Liu Y, et al. *China Academic Conference on Printing & Packaging and Media Technology*. Springer, Singapore, 2016. 123.
- [6] Long D L, Fairchild M D. *Smpete Motion Imaging Journal*, 2016, 125(3): 18.
- [7] Fu Chengyang, Xiao Kaida, Karatzas D, et al. *Chinese Optics Letters*, 2011, 9(5): 053301.
- [8] HUANG Min, CUI Gui-hua, LIU Yu, et al(黄敏, 崔桂华, 刘瑜, 等). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2015, 35(10): 2802.
- [9] HE Rui-li, HUANG Min, GUO Chun-li, et al(何瑞丽, 黄敏, 郭春丽, 等). *Laser & Optoelectronics Progress(激光与电子学进展)*, 2018, 55(3): 033301.
- [10] Asano Y, Fairchild M D, Blondé L, et al. *Observer Variability in Image Color Matching on a LCD Monitor and a Laser Projector*. *Color and Imaging Conference*, 2014.
- [11] Ionica V, Gastaud P. *Journal Français Dophtalmologie*, 1996, 19(11): 679.
- [12] Sorkin N, Rosenblatt A, Cohen E, et al. *Optom. Vis. Sci.*, 2016, 93(7): 667.
- [13] Luo M R, Cui G, Rigg B. *Color Research and Application*, 2001, 26(5): 340.
- [14] HUANG Min, LIAO Ning-fang, LIU Hao-xue, et al(黄敏, 廖宁放, 刘浩学, 等). *Acta Optica Sinica(光学学报)*, 2008, 28(3): 599.
- [15] HUANG Min, HE Rui-li, SHI Chun-jie, et al(黄敏, 何瑞丽, 史春洁, 等). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2018, 38(7): 2241.

The Spectral Pseudoisochromatic Images for Testing Retinal Cone Spectral Responses of Observers with Normal Color Vision

HE Rui-li, HUANG Min*, GUO Chun-li, XI Yong-hui

School of Printing and Packaging Engineering, Beijing Institute of Graphic Communication, Beijing 102600, China

Abstract In order to test the variability in color discrimination among observers with normal color vision and study the spectral responses of cone cells in R, G, B three channels, the spectral pseudoisochromatic images consisting of background layer, lightness layer and number layer, which have different spectral reflectance were designed and created. By interacting with the light source and the spectral response of the human cone cells, different observers perceive various color differences. The obtained visual results were used to further study the difference of human perception on the metameric color pairs. The experiments were based on different output equipments with different primary inks producing different spectral reflectances, and the metameric color pairs were created under different light sources, which can amplify the observer's variability. For the CIEDE2000 color difference calculated by different color matching functions, some were within the threshold of color discrimination, and some could be clearly recognized. By optimizing calculation, the nearly metameric color pairs, which can magnify the color discrimination of observers, were applied to design the number and background layers of the spectral pseudoisochromatic image. The Epson inkjet printer and OKI laser printer were used to print the number layer and background layer of the pseudoisochromatic spectral image correspondingly. 72 color-normal observers, including 55 young observers aged from 18 to 25 and 17 old observers aged from 62

to 74, were organized to view and test the images under D65 and LED-5000K light sources respectively. The visual results showed that the spectral pseudochromatic images can be successfully used to classify whether the spectral response of retinal cone cells is aging or not. Under the same light source, young observers can read the numbers in images (②/④) that the old observers can't read, while the old observers can read the numbers in images (①/③) that most young observers can't read, and 4 of the 55 young observers have the same visual results as the elderly. In addition, the spectral responses of young observers were consistent with the CIE1964 and CIE2006 (age=25 y) Color Matching Functions(CMFs), while the spectral response of old observers were more consistent with the CIE1931 and CIE2006 (age=75 y) CMFs. It was found that the cone cell spectral responses of old observers were shifted to the long wavelength, and the spectral responses decreased due to the increase of the optical density of the ocular system.

Keywords Spectral pseudoisochromatic images; Metameric color patches; Cone cell spectral response; Color matching functions; Primary color spectrum

(Received Jul. 12, 2018; accepted Nov. 26, 2018)

* Corresponding author

关于《光谱学与光谱分析》调整审稿费收费标准的通知

尊敬的《光谱学与光谱分析》广大作者、读者：本刊自 2018 年 7 月 1 日以后登记的稿件向投稿作者收取审稿费 200 元/篇，在您投稿之前，为免受经济损失，请您必须考虑：

1. 没有创新的一般性稿件，请您不要投稿。
2. 没有国家级基金资助的稿件，请您不要投稿。
3. 不是光谱专业的稿件，请您不要投稿。
4. 与其他文章重合率超过 10% 的稿件，请您不要投稿。

所投稿件经初审通过后，作者会收到缴纳审稿费的通知。请作者及时从我刊网站(<http://www.gpxygpx.com>)查询稿件是否处于交审稿费状态，在收到通知后，请及时缴纳审稿费；如在 10 天之内没有收到您的审稿费，被视为自动放弃，我刊不再受理。交费后我刊开据增值税电子普通发票，并传至作者提供的电子邮箱，作者可自行打印。

联系电话：010-62181070，62182998

电子邮箱：chngpxygpx@vip.sina.com

感谢您多年来对《光谱学与光谱分析》的支持和厚爱！

《光谱学与光谱分析》期刊社

2018 年 6 月 30 日