

基于不同颜色背景的人眼辨色阈值特性研究

曾 旺¹ 徐海松¹ 汪哲弘² M. Ronnier Luo³

¹ 浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027

² 杭州电子科技大学新闻出版学院, 浙江 杭州 310037

³ Department of Color Science, University of Leeds, Leeds LS2 9JT, UK

摘要 为了研究不同颜色背景对人眼辨色阈值特性的影响,在 CIE1976L* a* b* 平面上,基于心理物理学的交叉阶梯法测得国际照明委员会(CIE)推荐的 5 个基本颜色中心分别在该五个颜色背景下的辨色阈值。通过对辨色阈值椭圆的详细分析表明,同一颜色中心的辨色阈值在不同颜色背景下的局部视觉均匀性总体上保持相对稳定,而不同颜色中心的色度椭圆其长短半轴之比与背景颜色的色调角之间存在着一致的趋势。当背景颜色与中心颜色相同时,视觉辨色灵敏度最高,存在明显的 Crispening 效应。对于红色和蓝色中心以及黄色和蓝色背景,人眼的视觉辨色特性在红-绿方向受到的影响均小于黄-蓝方向。

关键词 视觉光学;视觉与色彩;辨色阈值;背景颜色;色度椭圆;交叉阶梯法

中图分类号 TN942.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0133001

Investigation of Color Discrimination Threshold Characteristics Under Different Chromatic Backgrounds

Zeng Wang¹ Xu Haisong¹ Wang Zhehong² M. Ronnier Luo³

¹ State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China

² College of Print Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou, Zhejiang 310037, China

³ Department of Color Science, University of Leeds, Leeds LS2 9JT, UK

Abstract In order to investigate the influence of different chromatic backgrounds on the color discrimination characteristics, the psychophysical experiment based on the interleaved staircase method is carried out on the CIE1976L* a* b* plane to obtain the color discrimination thresholds at the five CIE color centers under these five different background colors respectively. Detailed analysis on the fitted discrimination threshold ellipses indicates that the local visual uniformity, as a whole, is stable at the same color centre under different background colors, and the semi-axis ratios of individual chromatic ellipses at different color centers shows similar trends against the hues of background colors. The color discrimination sensitivity is highest when the colors of the center and the background are the same, which implies evidently the crispening effect. For the cases of red and blue centers or of yellow and blue backgrounds, the human color discrimination characteristics are less affected at the red-green direction than the yellow-blue direction.

Key words visual optics; vision and color; color-discrimination threshold; background color; chromatic ellipse; interleaved staircase method

OCIS codes 330.1720; 330.6130; 330.7310; 330.7320

1 引 言

现有的均匀颜色空间及色差评价模型大多受到

照明与观察条件的限制,如照明光源、照度水平、背景颜色、纹理和承载媒介等^[1,2]。在颜色评价的实

收稿日期: 2010-04-21; **收到修改稿日期**: 2010-06-08

基金项目: 浙江大学现代光学仪器国家重点实验室开放课题资助项目。

作者简介: 曾 旺(1986—),男,硕士研究生,主要从事颜色科学方面的研究。E-mail: lobem.Z@gmail.com

导师简介: 徐海松(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事颜色科学、光度学、色度学、光辐射测量和图像技术等方面的研究。E-mail: chsxu@zju.edu.cn(中国光学学会会员号:S040111212S)

际应用中,其照明与观察条件往往不同于建立模型所采用的参考条件,因此研究人眼在不同观察条件下的视觉辨色特性非常必要。由不同背景颜色所引起的参数效应是影响人眼辨色特性的一个重要因素^[3~5],对其深入的研究有助于了解人眼视觉的辨色机理,并为均匀颜色空间和色差评价模型的改善和发展提供重要的理论依据。

本文基于心理物理学的交叉阶梯法,在 CRT 显示器上产生相应的颜色刺激,测得 CIE 5 个基本颜色中心在该 5 个不同背景颜色观察条件下的辨色阈值,从而探讨背景颜色对人眼在阈值水平上颜色辨别特性的影响。

2 实验方案

2.1 颜色刺激

采用 CRT 显示器 Neso FD570A 产生实验所需的颜色刺激。为确保实验数据的可靠性和稳定性,设置显示器的相关色温约为 6500 K,并对亮度和对比度进行调整,使其白点和黑点的亮度分别为 104.53 cd/m^2 和 0.75 cd/m^2 。采用 PLVC 模型 (Piecewise linear assuming variation in chromaticity, 假设色度坐标可变的线性分段插值) 对显示器进行颜色特征化^[6]。由于研究的目的在于测量人眼在阈值水平的辨色特性,故为了获得较高的颜色辨别精度,利用抖动法 (Dithering method) 提高 CRT 所显示的颜色位数,使之从原来的单通道 8 bit 提高到 11 bit^[7]。

颜色刺激图样如图 1 所示,屏幕中央为以一个像素的黑色分隔线所隔开的四个 $1^\circ \times 1^\circ$ 视角大小的色块,其中三个色块显示为所选定的颜色中心,另一个色块则显示相应的测试色样。测试色样在 CIE1976L* a* b* 平面上相对于待测颜色中心在 8 个颜色方向上等角度间隔分布,色差步长由导航实

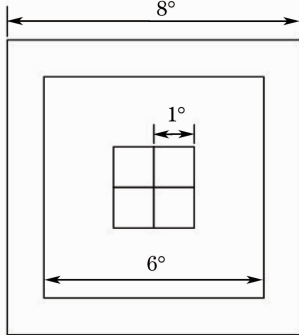


图 1 交叉阶梯法的测试刺激图样

Fig. 1 Test stimuli pattern used in the method of interleaved staircase

验确定。中央刺激色样位于 $6^\circ \times 6^\circ$ 视角的背景之上。背景外侧是 $8^\circ \times 8^\circ$ 的白色边框,其亮度值为 100 cd/m^2 ,色品坐标采用 D65 的对应参数。屏幕其余部分显示为黑色。实验中选取的颜色中心和背景颜色均为国际照明委员会 (CIE) 推荐的 5 个基本颜色,其色度参数列于表 1 中^[8]。由于刺激色样的大小约为 2° 视角,故在计算中采用 CIE 标准照明体 D65 和 CIE1931 标准色度系统。

表 1 测试颜色中心与背景颜色的 CIE1976L* a* b* 参数
Table 1 CIE1976L* a* b* chrominance parameters of the five test color centers and backgrounds

Color centers and backgrounds	L*	a*	b*	C _{ab} *	h _{ab}
Gray	62	0	0	0	0
Red	44	37	23	43.57	31.87
Yellow	87	-7	47	47.52	98.47
Green	56	-32	0	32	180
Blue	36	5	-31	31.4	279.16

实验开始前,显示器预热 2 h 以确保颜色显示的充分稳定,然后利用光谱辐射计 PR-650 测试并建立相应的特征化文件,测得五个颜色中心的实际值并计算其与目标值的色差。结果表明,五个颜色中心的颜色特征化平均色差为 $0.37\Delta E_{ab}^*$ 单位,最大为 $0.45\Delta E_{ab}^*$ 单位,最小为 $0.21\Delta E_{ab}^*$ 单位,与国内外相关实验数据比较可知,实验所采用的颜色特征化方法是有效可靠的^[9~11]。

2.2 实验过程

共有 7 名色觉正常的观察者参与实验,均为浙江大学在读研究生,观察距离为 500 mm。实验开始后,先是 2 min 屏幕全黑的暗适应过程,其后显示如图 1 所示的 1 min 亮适应过程,之后按照交叉阶梯法流程测定辨色阈值。每一个观察周期为 2 s,其中颜色刺激显示时间为 1200 ms,在颜色刺激显示之前和之后各有两个 200 ms 的背景色和黑色间隔显示过程。在背景色显示过程中,中央 4 个色块均显示颜色中心,背景保持不变。而在黑色间隔过程中,4 个色块和背景全部用黑色覆盖,白框保持不变,使观察者对白点充分适应并消除对被测颜色刺激的色适应带来的影响。

观察者的任务是判断 4 个色块中与其他 3 个不同的一个色块,并按下键盘上相应的应答键以保存判断结果,同时启动下一个观察周期。当观察者不能分辨出色块间的差异时必须强制选择其中的一个

色块。在全部颜色测试方向均达到 12 次折返后,此次观察过程结束,分别取各测试方向上最后 6 次折返点的平均值作为该方向的辨色阈值。

为了检验观察者重复性,所有观察者(7 人)均对每个颜色中心(5 个)和背景颜色(5 个)的组合重复观察两次,故实验共进行 $7 \times 5 \times 5 \times 2 = 350$ 次有效视觉评估。

3 实验数据分析

3.1 观察者精度

以每名观察者两次视觉实验结果之间的差异来评价观察者的测试重复性,而以单个观察者实验结果与所有观察者平均结果的差异作为观察者的测试准确度,且均用 STRESS 因子表示^[12]。实验 7 名观察者的平均测试重复性为 30.9 个 STRESS 单位,最大为 33.5,最小为 29.3;观察者的平均测试准确度为 24.2 个 STRESS 单位,最大为 25.8,最小是

23.2。与国内外已发表基于交叉阶梯法的辨色阈值实验数据相比较,基本处于同一水平,故实验获得的视觉测试数据是有效的^[10,13]。

3.2 辨色阈值椭圆

取全体观察者在各测试方向上辨色阈值的平均值分别作为相应方向上的观察者辨色阈值,并用最小二乘法拟合得到辨色阈值椭圆,其色度椭圆参数列于表 2 中,包括长半轴 A 、长短半轴比 A/B 、方位角 θ 以及面积平方根 $\sqrt{\pi AB}$ 。以椭圆轮廓在各测试方向上相距于颜色中心的距离与对应方向的平均辨色阈值之差异作为椭圆拟合精度,结果用 STRESS 因子表示,其平均拟合精度为 7.6 个 STRESS 单位,最好为 3.2,最差为 19.6。各个颜色中心在 5 个不同背景颜色下的色度椭圆如图 2 所示,其中横坐标表示 CIE1976L* a^* b^* 色品坐标中 a^* 的变化量,纵轴表示 b^* 的变化量。

表 2 5 个颜色中心在不同背景颜色下的色度椭圆参数

Table 2 Chromatic ellipse parameters for five color centers under different background colors

Color centers	Background colors	A	A/B	θ	$\sqrt{\pi AB}$
Gray	Gray	1.58	3.80	112.97	1.44
	Red	1.93	1.65	106.44	2.66
	Yellow	3.61	4.61	110.57	2.98
	Green	1.76	1.74	119.54	2.37
	Blue	1.99	2.75	102.72	2.12
Red	Gray	3.02	1.81	76.58	3.97
	Red	1.49	2.04	86.38	1.84
	Yellow	3.36	2.02	91.28	4.19
	Green	2.84	1.75	74.72	3.80
	Blue	3.76	2.82	75.02	3.96
Yellow	Gray	3.92	3.74	100.52	3.59
	Red	2.66	1.77	102.63	3.54
	Yellow	2.28	3.34	98.46	2.21
	Green	2.90	2.32	85.53	3.38
	Blue	3.34	2.81	96.13	3.53
Green	Gray	3.53	2.84	147.26	3.71
	Red	2.85	1.72	137.56	3.85
	Yellow	2.88	2.18	125.97	3.46
	Green	1.59	2.47	137.43	1.79
	Blue	3.42	4.36	127.49	2.91
Blue	Gray	3.64	6.23	123.42	2.59
	Red	3.37	3.02	122.22	3.44
	Yellow	4.93	7.11	125.20	3.28
	Green	3.91	7.17	131.13	2.59
	Blue	1.39	3.93	129.57	1.25

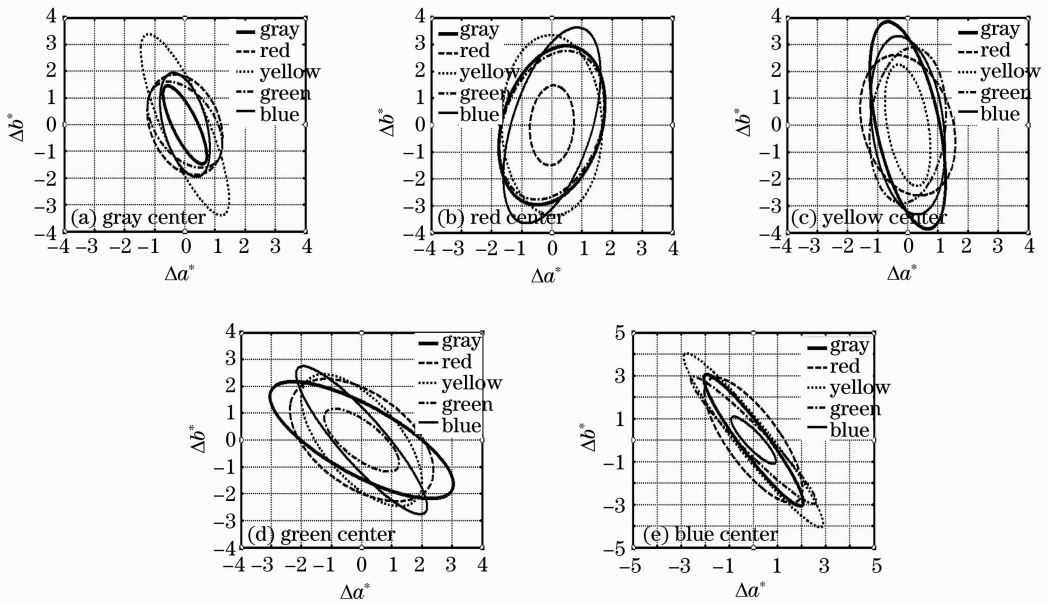


图 2 5 个颜色中心在不同背景颜色下的色度椭圆

Fig. 2 Chromatic ellipses for five color centers under different background colors

3.3 人眼辨色阈值特性

由表 2 和图 2 可知,同一颜色中心在 5 个不同背景颜色下的色度椭圆所对应的方位角相差不大。取这 5 个色度椭圆的平均方位角作为参照,则其方位角偏差均小于 10° ,表明在 a^*b^* 平面上人眼对于同一颜色中心在不同颜色背景下的局部视觉均匀性总体上保持相对稳定。

色度椭圆的长短半轴比 A/B 反映了人眼局部辨色特性,数值越接近 1,则局部视觉均匀性越好。图 3 给出了各个颜色中心在除灰色(无色调角)外的四种不同背景颜色(对应于横坐标的不同色调角)下的 A/B 值,其中为便于分析 A/B 值在整个色调环上的变化趋势而将红色背景下的 A/B 值重复一次(分别对应 32° 和 392° 色调角)。可见,五个颜色中心在 4 个颜色背景下的 A/B 值各不相同但均大于 1,其中蓝色中心的 A/B 值最大,红色中心的 A/B 值最小,表明在不同颜色背景下,蓝色中心的局部视觉均匀性最差,红色中心的视觉均匀性相对最好。同时,5 个颜色中心在不同背景颜色下的长短半轴比与背景颜色的色调角之间具有相似的变化趋势。在红色背景 (32° 色调角) 下的 A/B 具有最小值,而当背景颜色由红色变化为黄色 (99°) 时 A/B 值逐渐变大,说明黄色背景对人眼局部视觉均匀性的影响具有更明显的非线性。当背景颜色从黄色变化为绿色 (180°) 时,除绿色和黄色中心基本持平外,其余颜色中心的 A/B 值均变小,即局部视觉均匀性得到了改善。当背景颜色从绿色到蓝色 (279°) 变化时,除

蓝色中心外,其余颜色中心的 A/B 值变大;而当背景颜色从蓝色变为红色 (392°) 时,所有颜色中心的 A/B 值都变小。由此可知,不同颜色背景对椭圆长短半轴比的效应即对局部颜色辨别视觉均匀性的影响具有相近的变化趋势,但是对不同颜色中心的影响程度并不相同。

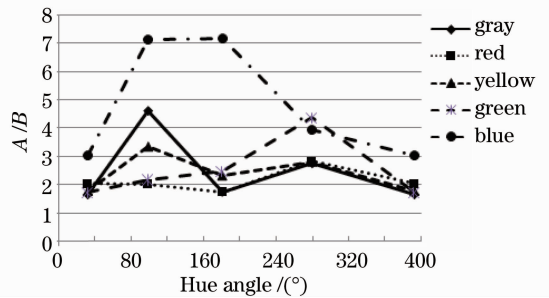


图 3 5 个颜色中心在不同背景颜色下的长短半轴比

Fig. 3 Semi-axis ratios of five color centers under different background colors

色度椭圆面积反映了人眼的视觉辨色灵敏度,椭圆面积越小,辨色灵敏度越高。由表 2 可见,当背景与测试中心的颜色相同时,色度椭圆面积明显小于其余各背景颜色所对应的椭圆面积,这与 Xin 等^[4,5]的实验结果一致,当背景颜色与样品颜色相近时人眼对样品颜色的视觉灵敏度最高,即所谓的 Crispening 效应^[14]。为了进一步分析背景颜色对色度椭圆面积的影响,对于每个颜色中心,以背景与对应中心具有相同颜色时的椭圆面积 S_0 为基准,计算其余四种颜色背景下的色度椭圆面积 S_i ($i=1, 2,$

3,4)与 S_0 之比,即缩放因子 f_s 为

$$f_s = \sqrt{S_i} / \sqrt{S_0}. \quad (1)$$

缩放因子 f_s 的计算结果如表 3 所示,其反映了不同背景颜色对人眼视觉辨色灵敏度的影响程度, f_s 值越大表明相应的视觉灵敏度越低。由表 3 可知,当背景颜色不同于测试中心的颜色时,所有 f_s 值均远大于 1,说明当背景与中心的颜色不同时人眼的视觉辨色灵敏度明显降低。对于红色和黄色中心,不同于颜色中心的各种颜色背景所对应的 f_s 值相差不大,即其所对应的视觉灵敏度大致相同。而灰色、绿色和蓝色中心在不同于颜色中心的各种颜色背景下所对应的 f_s 值差异较大,最大值与最小值之间相差 0.5 以上,说明不同背景颜色对灰、绿和蓝色区的视觉灵敏度影响较大。另一方面,除基准色度椭圆($f_s=1$)外,黄色背景下的 f_s 值均为对应各颜色中心的四个颜色背景 f_s 值中的最大值或接近最大值,而蓝色背景下的 f_s 值均为对应颜色中心的最小值或接近最小值,表明人眼在黄色背景下的视觉灵敏度普遍较低,而在蓝色背景下的辨色灵敏度相对较高。

表 3 5 个颜色中心在不同背景颜色下的缩放因子

Table 3 Scaling factors of the five color centers under different background colors

Color centers	Background colors				
	Gray	Red	Yellow	Green	Blue
Gray	1.00	1.85	2.07	1.65	1.47
Red	2.16	1.00	2.27	2.06	2.15
Yellow	1.62	1.60	1.00	1.53	1.59
Green	2.08	2.15	1.94	1.00	1.63
Blue	2.08	2.76	2.63	2.07	1.00

为了便于比较不同背景颜色对 a^*b^* 平面上红-绿方向(a^* 轴)和黄-蓝方向(b^* 轴)辨色特性的影响,仍以背景颜色和颜色中心相同时的色度椭圆为基准,分别计算每个颜色中心其余 4 个颜色背景下的色度椭圆与基准椭圆在 a^* 轴和 b^* 轴上的截距差之比值 $\Delta a/\Delta b$,即

$$\Delta a/\Delta b = (a_i - a_0)/(b_i - b_0), \quad (2)$$

式中 a_i 和 b_i 分别表示与测试中心不同颜色的四种背景($i = 1, 2, 3, 4$)下色度椭圆在 a^* 和 b^* 轴上的截距, a_0 和 b_0 则分别为基准色度椭圆在 a^* 和 b^* 轴上的截距。

如表 4 所示的 $\Delta a/\Delta b$ 计算结果反映了背景颜色对 a^*b^* 平面上红-绿和黄-蓝方向人眼颜色视觉辨别特性的相对影响程度,该比值接近 1 则说明相应背景颜色对这两个颜色方向视觉辨色特性的影响

比较一致,因而也是视觉均匀性的一种表现。可见,除了红色背景下的绿色中心($\Delta a/\Delta b=1.03$)等极个别情况外,几乎所有的 $\Delta a/\Delta b$ 值明显偏离 1,说明各种背景颜色对红-绿和黄-蓝方向辨色特性的影响程度均不相同。 $\Delta a/\Delta b < 1$ 表示背景颜色对红-绿方向的影响小于黄-蓝方向,反之则对红-绿方向的影响大于黄-蓝方向。因此,由表 4 可知,对于红色和蓝色中心的不同颜色背景,或者在黄色和蓝色背景下的不同颜色中心,其对红-绿方向视觉辨色特性的影响均小于对黄-蓝方向的影响。

表 4 5 个颜色中心在不同颜色背景下的 $\Delta a/\Delta b$ 值

Table 4 Ratios of $\Delta a/\Delta b$ for the five color centers under different background colors

Color centers	Background colors				
	Gray	Red	Yellow	Green	Blue
Gray		0.84	0.37	1.23	0.35
Red	0.70		0.50	0.79	0.40
Yellow	0.31	1.80		0.71	0.44
Green	1.84	1.03	0.63		0.26
Blue	0.49	0.64	0.61	0.94	

4 结 论

在 CIE1976L* 空间 a^*b^* 平面上,基于心理物理学交叉阶梯法的视觉实验测得 CIE 五个基本颜色中心分别在该 5 个颜色背景下的辨色阈值,并探讨了不同背景颜色对人眼视觉辨色特性的影响。由实验数据的分析可知,同一颜色中心在不同颜色背景下的辨色阈值椭圆其方位角基本一致,但色度椭圆的长短半轴比和面积均与背景颜色有着密切的相关性,由此讨论了不同色区的视觉均匀性,并且验证了明显 Crispensing 效应的存在。同时,发现不同背景颜色对红-绿方向和黄-蓝方向视觉辨色特性的影响各不相同,但尚需进一步深入研究。因此,在建立和研究均匀颜色空间及色差公式时应充分考虑背景颜色对人眼视觉辨色特性的复杂影响。

参 考 文 献

- Xu Haisong. Color Information Engineering [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2005. 84~88
- 徐海松. 颜色信息工程 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2005. 84~88
- G. Sharma, W. Wu, E. N. Dalal. The CIEDE2000 color-difference formula: implementation notes, supplementary test data, and mathematical observations [J]. *Color Res. Appl.*, 2005, **30**(1): 21~30
- Cui Guihua, Li Wei, Fan Qiumei *et al.*. Study of parametric effects in colour difference evaluation using CRT display [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(4): 426~432

- 崔桂华, 李 为, 范秋梅 等. 用阴极射线管显示器研究影响色差知觉的因素[J]. 光学学报, 2001, **21**(4): 426~432
- 4 J. H. Xin, C. C. Lam, M. R. Luo. Investigation of parametric effects using medium colour-difference pairs [J]. *Color Res. Appl.*, 2001, **26**(5): 376~383
- 5 G. Cui, M. R. Luo, B. Rigg. Colour-difference evaluation using CRT colours. Part II: parametric effects[J]. *Color Res. Appl.*, 2001, **26**(5): 403~412
- 6 J. B. Thomas, J. Y. Hardeberg, I. Foucherot. The PLVC display color characterization model revisited [J]. *Color Res. Appl.*, 2008, **33**(6): 449~460
- 7 J. M. Buhmann, D. W. Fellner, M. Held *et al.*. Dithered color quantization[C]. Proc. Eurographics, 1998, **17**(3): 219~231
- 8 A. R. Robertson. CIE guidelines for coordinated research on colour-difference evaluation[J]. *Color Res. Appl.*, 1978, **3**(3): 149~151
- 9 Shi Junsheng, Yao Juncai, Yu Hongfei *et al.*. Measurement of luminance contrast sensitivity function of human visual system on cathode ray tube display[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4): 744~748
- 石俊生, 姚军财, 余鸿飞 等. 用显示器测量人眼衬比度敏感函数[J]. 光学学报, 2007, **27**(4): 744~748
- 10 Wang Zhehong, Xu Haisong. Study on color discrimination threshold using CRT display part I: analysis of experimental data and human color vision characteristics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6): 1139~1144
- 汪哲弘, 徐海松. 用阴极射线管显示器研究辨色阈值 I: 实验数据及人眼颜色视觉特性分析[J]. 光学学报, 2007, **27**(6): 1139~1144
- 11 J. H. Xin, C. C. Lam, M. R. Luo. Evaluation of the crispening effect using CRT-displayed colour samples[J]. *Color Res. Appl.*, 2003, **29**(5): 374~380
- 12 M. Melgosa, R. Huertas, R. S. Berns. Performance of recent advanced color-difference formulas using the standardized residual sum of squares index[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2008, **25**(7): 1828~1834
- 13 H. Xu, H. Yaguchi. Visual evaluation at scale of threshold to suprathreshold color difference[J]. *Color Res. Appl.*, 2005, **30**(3): 198~208
- 14 Liao Ningfang, Shi Junsheng, Wu Wenmin. The Conspectus of Color Information Management for Digital Images[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2009. 64~65
- 廖宁放, 石俊生, 吴文敏. 数字图文图像颜色信息管理概论[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2009. 64~65