

利用近同色异谱样本评价同色异谱指数的性能

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2020.04.005

于俊彦 陈丹青

武汉大学

印刷与包装系

湖北 武汉 430079

摘要: 为了验证不同的同色异谱指数的评估性能,基于 Kubelka-Munk 配色理论并通过印刷适性仪打样得到的 4 组近同色异谱对,根据心理物理学实验方法中的比较法,组织 40 名色觉正常的观察者,对近同色异谱样本进行色差大小排序评估实验,通过相关系数来分析同色异谱指数客观评价和观察者主观评价之间的一致性。研究表明:特殊同色异谱指数评价模型,在 D50 和 TL84 光源下,主观评价之间的相关系数均高于 0.7;基于长中短锥体波长敏感加权的 (lms-MI) 一般同色异谱指数评价模型的相关系数均高于 0.55,由此可见特殊同色异谱指数和 lms-MI 模型的同色异谱程度评价性能较优。因此,在光谱配色和照明指示贴研制过程中,当在特定的 D50 和 TL84 光源下,可以选择特殊同色异谱指数作为同色异谱程度评价指数;当不依赖光源时, lms-MI 模型可作为评价依据以筛选最优光谱。

关键词: 同色异谱; 近同色异谱对; 特殊同色异谱指数; 一般同色异谱指数; 相关系数

中图分类号: O433

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2020)04-0030-09

引文格式: 于俊彦,陈丹青. 利用近同色异谱样本评价同色异谱指数的性能 [J]. 包装学报, 2020, 12(4): 30-38.

1 研究背景

在颜色复制领域,同色异谱现象具有非常重要的理论和实际意义。同色异谱色又称为条件等色,是指两个颜色在特定光源下的颜色效果一致,而在另一光源下不一致。在光谱配色技术中,通过同色异谱指数预测配方光谱与目标光谱之间的差异程度,配色精度的高低在一定程度上取决于同色异谱指数的预测能力。为了达到最佳配色效果,往往期望得到同色同谱,所以同色异谱指数的评价性能至关重要。在纺织、印刷、包装等色彩生产行业中,ISO 3664: 2000 *Viewing Conditions for Graphic Technology and*

Photography^[1]中已明确规定了标准环境和标准光源,光源的色温必须是 5 000~6 500 K,光源的显色指数大于 90,所以对光源的质量控制尤为重要。但传统的光源质量评估,大多是通过专业测量仪器测量待测光源的光谱功率分布,从而计算出光源显色性等相关光源参数^[2]并对光源质量进行定量判定,这类仪器普遍价格昂贵且操作耗时长。目前市面上瑞士印刷科学研究促进会、潘通等已经研制出简易、有效的用于光源检测的照明指示贴,此类照明指示贴在特定光源下呈现相似颜色,但随着光源的改变会出现显著颜色差异,以此对光源质量进行即时评估。为了确保照明指示贴检测光源质量的有效性和显著性,在实际生产

收稿日期: 2020-06-07

作者简介: 于俊彦(1996-),女,江苏盐城人,武汉大学硕士生,主要研究方向为颜色科学,

E-mail: Junyanyu@whu.edu.cn

中如何获得最大同色异谱程度的近同色异谱对是尤为关键的一步。总体来说,目前需要一种准确有效的同色异谱指数来衡量同色异谱程度。

在 CIE 15 技术报告^[3]中, CIE 推荐采用通过计算两个同色异谱样本之间色差,即特殊同色异谱指数,来评价同色异谱程度,其中, $L^*a^*b^*$ 色差公式是推荐使用的色差公式。同时,研究人员们相继提出了一系列与光源无关的一般同色异谱指数。I. Nimeroff 等^[4]提出了不依赖测试条件(观察者或测试光源)的一般同色异谱指数,简称 NY 模型,认为一对样本的光谱能量分布之间的差异量决定了同色异谱的程度。此外, J. A. Stephen Viggiano^[5]提出了以两个光谱之间差异的加权和来度量同色异谱程度的一般同色异谱指数,简称 GM 模型,权重随着不同波段的光谱刺激而有所不同。何国兴^[6]提出了以光谱视觉响应差异为基础的同色异谱程度评价方法,简称 Ham 模型。Chen D. Q. 等^[7]提出的基于长中短(long、middle and short, 简称 LMS)锥加权的一般同色异谱指数,简称 LMS-MI 模型。该指数更优于其他的一般同色异谱指数,但只通过仿真实验和基于人口采样统计抽样实验法对提出的一般同色异谱指数进行了性能验证,并未对同色异谱指数进行客观性能评估。

本研究基于 Kubelka-Munk 理论,利用印刷适性仪制备 4 组近同色异谱对,并组织 40 名观察者对 4 组近同色异谱对进行主观色差排序评价。通过主客观评价结果之间的相关性分析,从而验证同色异谱指数与主观评价的关联程度,以期得到一种较符合视觉特性的同色异谱评价指数。

2 主观实验验证

本章从主观分析的角度出发,通过心理物理学实验获取观察者在不同光源及色块尺寸组合条件下,对每组近同色异谱对之间色差大小的评价,并对实验结果进行分析。

2.1 实验样本的选定

本文根据 M. Pahjehfouladgaran 等^[8]提出的基于 Kubelka-Munk 理论的单常数光谱配色模型,进行目标配方的预测,具体技术路线如图 1 所示。由于本文的重点不在于此,详细的理论原理可参见文献[8-10],故重点介绍近同色异谱色样的制作过程。

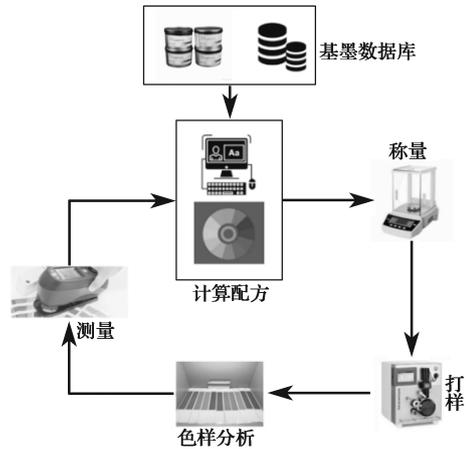


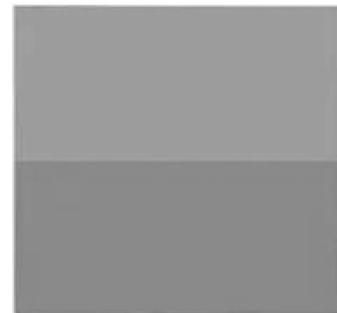
图 1 近同色异谱对的制作过程

Fig. 1 The preparation of near metameretic pairs

实验中,筛选了已具有商业应用价值的 Pantone 照明指示贴的一对近同色异谱色卡作为模拟的目标色,如图 2 所示。目标色块记为 E-1 和 E-2,该照明指示贴中的近同色异谱色只有在色温 5 000 K 以上,显色指数 Ra90 的光源下,才会显示相近的颜色。因为这是现有的能够获取比较标准的近同色异谱色卡,并且该色卡具有较明显的同色异谱现象。目标色对的光谱反射率曲线如图 3 所示。



a) 标准光源下



b) 非标准光源下

图 2 潘通照明指示贴

Fig. 2 Pantone lighting indicator

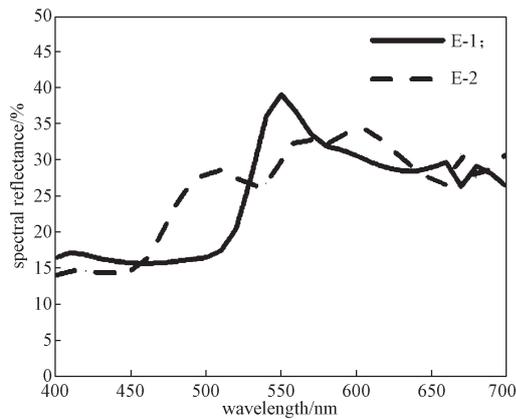


图3 目标颜色对的光谱反射率曲线

Fig. 3 The spectral reflectance curves of the target color pair

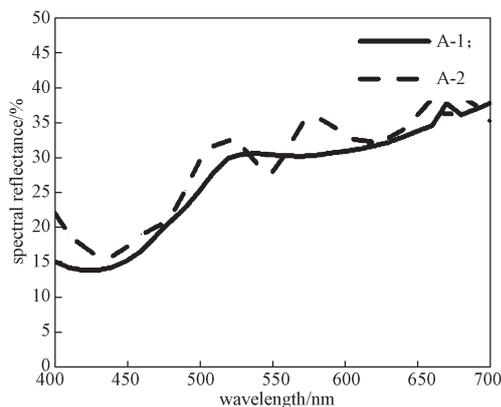
经过筛选后,确定 A-1 和 A-2、B-1 和 B-2、C-1 和 C-2、D-1 和 D-2 为 4 组具有明显同色异谱现象的色块样品。将样品和目标色对共 5 组近同色异谱对分别记为 A、B、C、D、E 组,并计算各组内色差,结果如表 1 所示。

样品的光谱反射率曲线如图 4 所示。F. W. Billmeyer 等^[1]研究发现,在可见光谱波段 400~700 nm 内,两个同色异谱色的光谱反射曲线,至少要有 3 个交叉点才有比较好的同色异谱特性。从图 4 可知,实验所选用的 4 组样品符合理论要求,可以用作主观实验的评价对象。

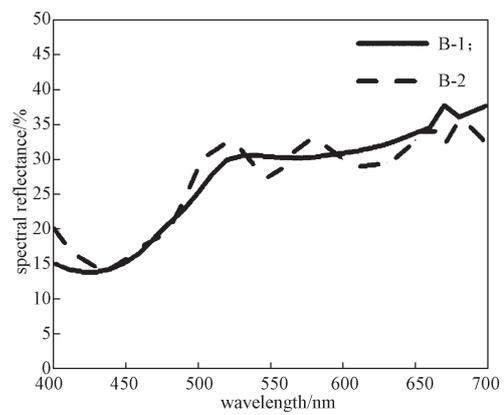
表 1 5 组色块在不同光源下的色差

Table 1 Color difference of five pairs of samples under different illuminants

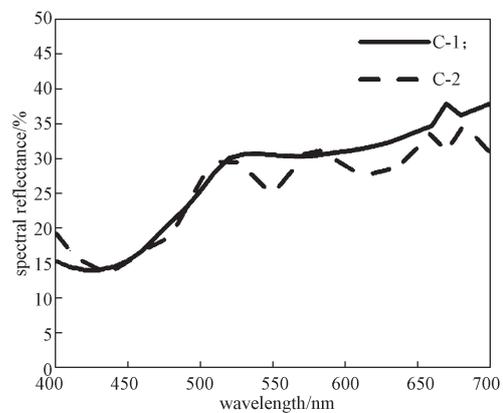
组别	$\Delta E_{00}(D65)$	$\Delta E_{00}(D50)$	$\Delta E_{00}(A)$	$\Delta E_{00}(TL84)$
A	1.872 7	1.836 6	1.691 5	3.445 6
B	2.006 3	2.045 1	2.108 2	1.729 1
C	1.846 6	1.885 9	1.984 4	3.417 7
D	1.516 3	1.616 2	2.035 8	1.309 4
E	2.334 6	1.243 3	2.447 8	7.721 6



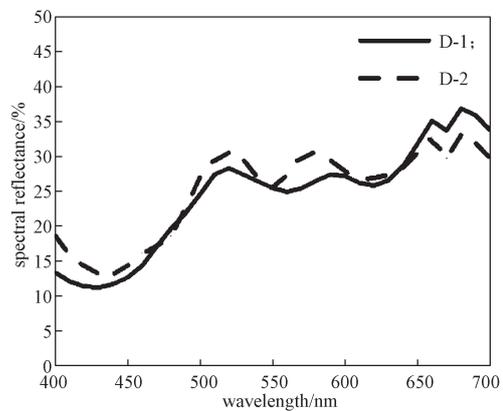
a) A 组



b) B 组



c) C 组



d) D 组

图 4 近同色异谱对的光谱反射率曲线

Fig. 4 The spectral reflectance curves of near metameric

2.2 同色异谱评估模型的主观实验验证

本实验使用的设备主要包括 Macbeth Spectral Light III X-rite 标准灯箱,杭州远方 SPIC-300AW 照度计等。灯箱尺寸为 60 cm × 65 cm × 89 cm (宽 × 长 × 高),灯箱背景和四周均为中性灰(N7)。实验选取标准灯箱中 D50、A 和 TL84 作为实验光源,使用照度计以 0°/45° 测量了光源的光谱信息,获得的技

术参数如表 2 所示。截取 400~700 nm 的波长范围的数据以消除系统误差, 波长采样间隔为 10 nm。3 种实验光源的相对光谱功率分布曲线如图 5 所示。

表 2 标准灯箱的性能

Table 2 Performance of standard light box

光源	色温 /K	照度 /lx
D50	4 791	1 266.6
A	2 770	1 340.0
TL84	3 742	1 235.8

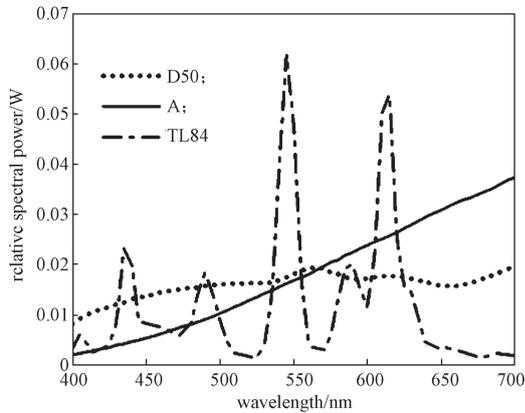
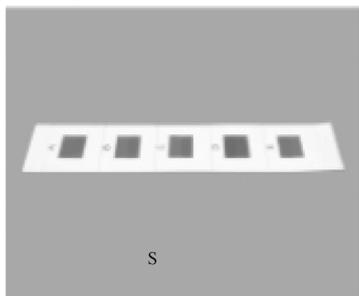


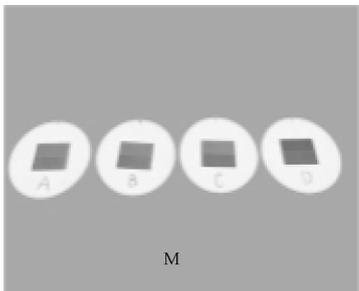
图 5 实验光源的光谱功率分布曲线

Fig. 5 The spectral power distribution curves of experimental illuminants

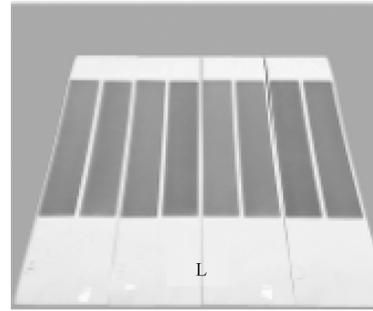
实验共有 3 组不同大小的色块样本, 尺寸分别为 2.5 cm × 2.5 cm、5 cm × 5 cm、10 cm × 40 cm, 如图 6 所示。此外, 样本距离标准光源 65 cm, 观测视角为 45°。实验在暗室中进行, 观察者坐在灯箱前进行实验, 如图 7 所示。



a) 小号



b) 中号



c) 大号

图 6 不同尺寸的实验样本

Fig. 6 Samples under different sizes

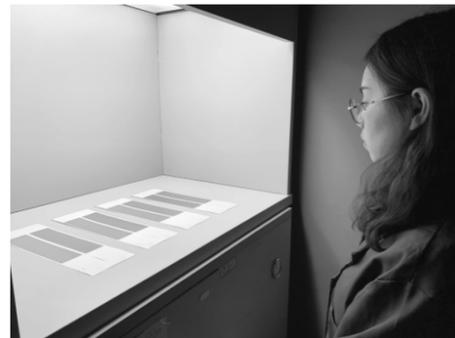


图 7 实验现场

Fig. 7 Experimental scene

40 名观察者^[12-13], 男女各 20 人, 年龄范围为 20~30 岁 (平均年龄为 24 岁, 年龄标准差为 1.46), 均通过色觉测试且事先不知道实验内容。实验时, 观察者穿上中性灰色实验服以消除衣服对于视觉观察的影响。

在实验开始之前, 观察者进行 5~10 min 暗适应, 与此同时, 实验人员介绍实验流程及注意事项。实验人员将颜色样本放置在灯箱的下平面上, 并随机摆放样本的位置和播放光源的顺序。实验过程中只有一种评估方法, 即色差大小排序。观察者需要在特定光源下以升序 1~5 评价 5 组近同色异谱对之间的色差, 其中 1 代表最小色差, 而 5 代表最大色差。实验过程中, 实验人员指示观察者进行评价, 观察者在每种光源下先适应一段时间再进行判断。为了验证每位观察者组内稳定性, 在不告知观察者的情况下播放一次之前的光源, 即每个观察者总共需要观察 4 种光源场景下的样本。因此, 在心理学实验中, 共计有 $40 \times 4 \times 3 = 480$ 组 (观察者人数 × 光源种数 × 样本型号数) 色差排序结果, 一组排序结果即为一组实验数据。

3 客观评价方法

3.1 特殊同色异谱指数

CIE51 公布的特殊同色异谱指数方法^[3]: 对特定的参考光源(推荐 D65 光源)和标准观察者, 以及具有相同三刺激值的两个颜色, 在不同的相对光谱能量分布的另一照明光源(推荐 A 光源)下, 所造成的两个样品的色差, 其特殊同色异谱指数越小, 说明同

色异谱程度越低。鉴于 CIEDE2000 色差公式^[14-15](简记为 ΔE_{00}) 在视觉均匀性方面的优势, 本文均采用 CIEDE2000 色差公式。

分别计算出制备的 4 组近同色异谱对之间的特殊同色异谱指数, 并对其结果按升序排序, 其中颜色匹配函数采用的是 CIE1931 和 CIE1964 标准色度系统。排序结果如表 3 所示。

表 3 不同光源下样本色差及排序结果

Table 3 Color difference and ranking results for samples under different illuminants

色度系统	样本组别	D50			A			TL84		
		ΔE_{00}	排序		ΔE_{00}	排序		ΔE_{00}	排序	
CIE1931	A	1.8692	2	2	1.7067	1	1	3.9258	4	4
	B	2.0485	4	4	2.2818	3	3	1.8103	2	2
	C	1.8955	3	3	2.0214	2	2	3.6480	3	3
	D	1.8279	1	1	2.4757	4	4	1.2350	1	1
	E	2.0991	5		3.9708	5		9.7683	5	
CIE1964	A	1.8366	3	2	1.6915	1	1	3.4456	4	4
	B	2.0451	5	4	2.1082	4	4	1.7291	2	2
	C	1.8859	4	3	1.9844	2	2	3.4177	3	3
	D	1.6162	2	1	2.0358	3	3	1.3094	1	1
	E	1.2433	1		2.4478	5		7.7216	5	

3.2 一般同色异谱指数

与 CIE 推荐的可用于光源质量检测的特殊同色异谱指数不同, 一般同色异谱指数是基于两个目标光谱曲线之间的本质差异进行同色异谱程度的预测, 与光源无关, 具有很大的灵活性。下面简要介绍几种一般同色异谱指数计算模型。

设一条光谱曲线为 R_1 , 另外一条光谱曲线为 R_2 , $R_1(\lambda)$ 、 $R_2(\lambda)$ 分别为 R_1 、 R_2 在波长 λ 下对应的的光谱反射率, $S(\lambda)$ 为波长 λ 所对应的相对光谱能量。 $x(\lambda)$ 、 $y(\lambda)$ 、 $z(\lambda)$ 为 3 个标准观察者匹配函数。

1) 一般同色异谱评价指数 NY 模型

I. Nimeroff 等^[4] 提出, 根据 3 个标准观察者匹配函数 $x(\lambda)$ 、 $y(\lambda)$ 、 $z(\lambda)$, 对光谱差异进行加权, 见式(1); 然后再计算得到一个同色异谱指数 I_{NY} , 见式(2)。

$$\begin{cases} M_x^2 = \sum_{\lambda} [x(\lambda)|R_1(\lambda) - R_2(\lambda)|]^2, \\ M_y^2 = \sum_{\lambda} [y(\lambda)|R_1(\lambda) - R_2(\lambda)|]^2, \\ M_z^2 = \sum_{\lambda} [z(\lambda)|R_1(\lambda) - R_2(\lambda)|]^2, \end{cases} \quad (1)$$

式中 M_x 、 M_y 、 M_z 分别为根据标准观察者匹配函数 $x(\lambda)$ 、 $y(\lambda)$ 、 $z(\lambda)$ 将光谱差异加权处理后的结果;

$$I_{NY} = (M_x^2 + M_y^2 + M_z^2)^{\frac{1}{2}}. \quad (2)$$

2) 一般同色异谱评价指数 GM 模型

J. A. Stephen Viggiano^[5] 提出使用线性近似光谱差异值的方法, 取两个光谱差值的绝对值并进行加权, 最终得到 GM 指数,

$$I_{GM} = \sum_{\lambda} w(\lambda) |R_1(\lambda) - R_2(\lambda)| = \sum_{\lambda} w(\lambda) |\beta(\lambda)|. \quad (3)$$

式中: $\beta(\lambda)$ 是两个光谱曲线之间的差值; $w(\lambda)$ 根据式(4)计算,

$$w(\lambda) = \left[\left(\frac{dL^*}{d\beta(\lambda)} \right)^2 + \left(\frac{da^*}{d\beta(\lambda)} \right)^2 + \left(\frac{db^*}{d\beta(\lambda)} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (4)$$

其中 L^* 、 a^* 和 b^* 关于 $\beta(\lambda)$ 的导数, 可通过链式法则计算。

3) 一般同色异谱评价指数 Ham 模型

根据杨赫姆霍尔兹学说, 何国兴^[6] 运用两模糊子集平均汉明(Hamming)距离的概念, 提出了以光谱视觉响应差异为基础的 Ham 指数,

$$I_{ham} = \frac{\sum_{\lambda} S(\lambda)^{\frac{1}{3}} \left| [R_1(\lambda)]^{\frac{1}{3}} - [R_2(\lambda)]^{\frac{1}{3}} \right|}{n}. \quad (5)$$

在给定照明 D65 下, 式(5)中权重函数取归一

化光谱功率分布 $S(\lambda)$ 。

4) 一般同色异谱指数 LMS-MI 模型

Chen D. Q. 等^[7]提出了一种更符合人类 LMS 锥体感知基础的一般同色异谱指数 I_{lms} 。

首先对每个波长的光谱差异分别进行加权, 如式

(6) 所示,

$$\begin{cases} M_{x, \text{lms}}^2 = \sum_{\lambda} [x_{\text{lms}}(\lambda)(R_1(\lambda) - R_2(\lambda))]^2, \\ M_{y, \text{lms}}^2 = \sum_{\lambda} [y_{\text{lms}}(\lambda)(R_1(\lambda) - R_2(\lambda))]^2, \\ M_{z, \text{lms}}^2 = \sum_{\lambda} [z_{\text{lms}}(\lambda)(R_1(\lambda) - R_2(\lambda))]^2. \end{cases} \quad (6)$$

式中 $x_{\text{lms}}(\lambda)$ 、 $y_{\text{lms}}(\lambda)$ 、 $z_{\text{lms}}(\lambda)$ 分别为 3 个标准观察者匹配函数 $x(\lambda)$ 、 $y(\lambda)$ 、 $z(\lambda)$, 经过归一化的 LMS 视锥响应灵敏度 (经 Vos 和 Walraven 修正的 LMS 视锥响应灵敏度), 并按式 (7) 计算,

$$\begin{bmatrix} x_{\text{lms}}(\lambda) \\ y_{\text{lms}}(\lambda) \\ z_{\text{lms}}(\lambda) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.8951 & 0.2664 & -0.1614 \\ -0.7502 & 1.7135 & 0.0367 \\ 0.0389 & -0.0685 & 1.0296 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(\lambda) \\ y(\lambda) \\ z(\lambda) \end{bmatrix}. \quad (7)$$

从而计算出一个包含三维信息的同色异谱指数 I_{lms} 。

$$I_{\text{lms}} = (M_{x, \text{lms}}^2 + M_{y, \text{lms}}^2 + M_{z, \text{lms}}^2)^{\frac{1}{2}}. \quad (8)$$

为进一步对一般同色异谱指数模型的评价效果进行分析和论证, 本节中拟对先前研究者们提出的几种典型的 NY 模型^[4]、GM 模型^[5]、Ham 模型^[6]及 LMS-MI 模型^[7]进行验证, 并基于 2.1 节中获得的 4 组样本分别得到不同模型下的结果, 如表 4 所示。然后对几种模型的有效性进行主客观相关性分析, 以期找到一种符合人眼视觉特性的评价模型。

表 4 一般同色异谱指数结果及排序

Table 4 Results for numerical values and ranking of general metameric indices

样本组别	LMS-MI 模型		NY 模型		GM 模型		Ham 模型	
	指数值	排序	指数值	排序	指数值	排序	指数值	排序
A	16.55	4	48.37	4	15.23	4	0.16	4
B	10.57	1	34.20	1	8.84	1	0.10	1
C	13.65	3	37.26	2	11.50	2	0.11	2
D	13.39	2	39.73	3	12.23	3	0.13	3

4 实验结果分析与评价

4.1 排序评价结果的相关性

假设一组排序评价结果为 P , 另外一组的排序评

价结果为 Q , 其中 P_i 是第 i 组近同色异谱对在 P 中对应的排序值, Q_i 是第 i 组近同色异谱对在 Q 中对应的排序值。下面介绍几种讨论任意两组排序评价结果之间相关性的方法。

1) 斯皮尔曼等级相关系数 (C_{SR})

C_{SR} 的计算公式为

$$C_{\text{SR}} = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^N d_i^2}{N(N^2 - 1)}, \quad (9)$$

式中: d_i 为 P_i 和 Q_i 之间的秩差异;

N 为近同色异谱对的样品组数。

C_{SR} 的绝对值越大, 则两组评价结果之间的相关性越高, 其取值范围为 $[-1, 1]$ 。

2) 肯德尔秩相关系数 (C_{KR})

C_{KR} 的计算公式为

$$C_{\text{KR}} = \frac{M_c - M_{\text{dc}}}{\frac{1}{2}N(N-1)}, \quad (10)$$

式中: M_c 为 P 和 Q 中拥有一致性的元素对数;

M_{dc} 为 P 和 Q 中拥有不一致性的元素对数。

如果 $P_i < P_j$ 且 $Q_i < Q_j$, 或者 $P_i > P_j$ 且 $Q_i > Q_j$, 则认为两组排序的单调性是一致的。 C_{KR} 的绝对值越大, 则两组评价结果之间的相关性越高, 其取值范围为 $[-1, 1]$ 。

3) 皮尔逊线性相关系数 (C_{PL})

C_{PL} 的计算公式为

$$C_{\text{PL}} = \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})(Q_i - \bar{Q})}{\left[\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \left[\sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q})^2 \right]^{\frac{1}{2}}}, \quad (11)$$

式中 \bar{P} 、 \bar{Q} 分别为 P 、 Q 中数值的平均值。

C_{PL} 的绝对值越大, 则两组评价结果之间的相关性越高, 其取值范围为 $[-1, 1]$ 。

4) 标准化残差和 (C_{STR})

C_{STR} 的计算公式为,

$$C_{\text{STR}} = 100 \sqrt{\frac{(P_i - FQ_i)^2}{\sum_{i=1}^N P_i^2}}, \quad (12)$$

式中 $F = \frac{\sum_{i=1}^N P_i Q_i}{\sum_{i=1}^N Q_i^2}$ 。

用 C_{STR} 评价两组评价结果之间的相关性，如果 C_{STR} 值越小，则说明两组数据之间的相关性越高，其取值范围为 $[0, 100]$ 。

4.2 组间观察者稳定性分析

选取 D50 光源作为实验中的重复光源，对于同一名观察者，设第一次排序评价结果为 P ，第二次排序评价结果为 Q 。为了评估观察者在前后 D50 光源下的评价稳定性，分别计算 C_{SR} 、 C_{KR} 、 C_{PL} 、 C_{STR} 的值，最终取所有观察者排序评价结果的平均值 \bar{C}_{SR} 、 \bar{C}_{KR} 、 \bar{C}_{PL} 、 \bar{C}_{STR} ，结果如表 5 所示。 \bar{C}_{SR} 、 \bar{C}_{KR} 、 \bar{C}_{PL} 值越接近于 1， \bar{C}_{STR} 值越接近于 0，则说明数据的有效性越高。从表中数据可知，组间观察者的稳定性较高，特别是 \bar{C}_{STR} 值比文献 [16-17] 中的 31 和 32 小很多。

表 5 不同色块尺寸下的组间观察者差异结果

Table 5 Results for inter-observer variability under different sample sizes

样本类别	参 数			
	\bar{C}_{SR}	\bar{C}_{KR}	\bar{C}_{PL}	\bar{C}_{STR}
S_5	0.755 0	0.665 0	0.665 0	23.553 8
S_4	0.690 0	0.608 3	0.608 3	23.957 6
M_4	0.775 0	0.666 7	0.666 7	23.120 8
L_4	0.730 0	0.666 7	0.666 7	22.085 2
平均	0.737 5	0.651 7	0.651 7	23.179 4

注： S_4 、 S_5 分别表示小尺寸的 4 组和 5 组色块， M_4 表示中尺寸的 4 组色块， L_4 表示大尺寸的 4 组色块。

4.3 特殊同色异谱指数分析

从前文可知，在大尺寸色块样本下的观察者组内数据的稳定性更高，所以本节只选取大尺寸色块的主观评价结果作相关的分析。为了衡量在不同光源^[18]下主客观结果之间的相关程度，分别计算了相关系数 \bar{C}_{SR} 、 \bar{C}_{KR} 、 \bar{C}_{PL} ，结果如图 8 所示。

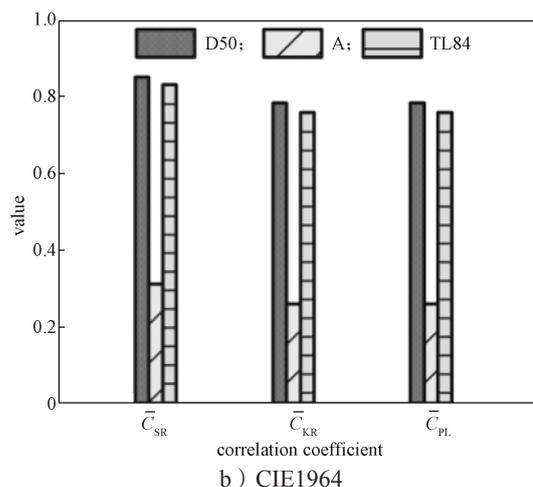
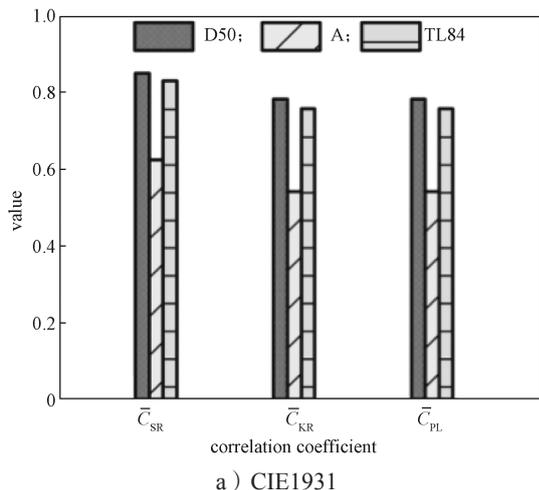


图 8 不同光源下主客观评价结果之间的相关性

Fig. 8 Correlation between subjective and objective evaluation results under different illuminants

从图 8 可知，在 D50 和 TL84 光源下，相关系数均在 0.7 以上，表明主客观评价之间具有较高的相关性。说明本研究所制作的近同色异谱对更偏向于检测 D50 和 TL84 光源，针对于 D50 和 TL84 光源，特殊同色异谱指数的客观评价较符合主观评价。另外，在 A 光源下，由 CIE1931 计算的客观评价与主观评价的相关系数值均高于 0.5，而在 CIE1964 下的相关系数值均在 0.3 以下。因此由 CIE1931 计算的客观评价与主观评价更为接近；同时也说明，进行色差评估时，在某些情况下 CIE1964 计算性能并非一定优于 CIE1931，这一结论与文献 [19] 一致。

4.4 一般同色异谱指数分析

一般同色异谱指数能预估在某种光源下的最大同色异谱程度。本研究使用不同的一般同色异谱指数计算了 4 组近同色异谱对之间的同色异谱程度值，并对其排序。非自然光源尤其是 F 光源的光谱功率分布均围绕某些颜色窄带化，造成近同色异谱对之间的色差更加明显，为了更好地反映一般同色异谱指数客观评价与主观评价之间的相关性，故选取在 TL84 光源下观察者的评价结果，如表 6 所示。

从表 6 可知，3 种尺寸 (L_4 、 M_4 、 S_4) 的色块样本，在 4 种一般同色异谱指数模型下的相关系数 (\bar{C}_{SR} 、 \bar{C}_{KR} 、 \bar{C}_{PL}) 的最大值均在 LMS-MI 指数模型下出现。由此可知 LMS-MI 模型评价结果优于其他的模型，此结论与文献 [7] 中的仿真验证结果一致。

由于在一般同色异谱指数 LMS-MI 模型下，计算出来的主客观评价的相关性最高，因此推断，

LMS-MI 模型是 4 种模型中最符合人眼视觉特性的一般同色异谱指数模型。

表 6 一般同色异谱指数与主观评价之间的关系

Table 6 Correlation between general metameric indices and subjective evaluation

模型	相 关 系 数								
	L_4			M_4			S_4		
	\bar{C}_{SR}	\bar{C}_{KR}	\bar{C}_{PL}	\bar{C}_{SR}	\bar{C}_{KR}	\bar{C}_{PL}	\bar{C}_{SR}	\bar{C}_{KR}	\bar{C}_{PL}
lms-MI	0.700 0	0.6250	0.625 0	0.765 0	0.616 7	0.616 7	0.675 0	0.575 0	0.575 0
GM	0.440 0	0.3417	0.341 7	0.360 0	0.300 0	0.300 0	0.315 0	0.241 7	0.241 7
NY	0.440 0	0.3417	0.341 7	0.360 0	0.300 0	0.300 0	0.315 0	0.241 7	0.241 7
Ham	0.440 0	0.3417	0.341 7	0.360 0	0.300 0	0.300 0	0.315 0	0.241 7	0.241 7

5 结语

本文利用制备的 4 组近同色异谱对主观验证了不同的同色异谱指数模型的评价性能。研究表明,无论是基于 CIE1931 或 CIE1964,在 D50 和 TL84 光源下,相关系数均达到 0.7 以上,可知特殊同色异谱评价性能优异。一般同色异谱指数中 LMS-MI 模型的客观评价与主观评价之间的相关系数 \bar{C}_{SR} 、 \bar{C}_{KR} 、 \bar{C}_{PL} 均在 0.55 以上,其他模型评价相关系数均在 0.45 以下,可见 LMS-MI 模型的同色异谱程度评价性能较优。因此,在光谱配色和照明指示贴研制过程中,当在特定的 D50 和 TL84 光源下,可以选择特殊同色异谱指数作为同色异谱程度评价指数,当不依赖光源时 LMS-MI 指数可作为评价依据,以筛选最优光谱。但本文中仅有一组色度较接近的颜色的近同色异谱对,没有涵盖广泛的色域范围,为确保研究结论的普适性,之后将针对不同的颜色开展相关的研究。

参考文献:

- [1] ISO. Viewing Conditions for Graphic Technology and Photography: ISO 3664:2000[S]. [S. 1.]: ISO, 2009: 1-20.
- [2] 谢雯,陈丹青,万晓霞.面向光源类型检测的同色异谱对的构建方法[J].激光与光电子学进展,2019,56(22):223004.
XIE Wen, CHEN Danqing, WAN Xiaoxia. Construction Method of Metameric Pairs for Illuminant Detection[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(22): 223004.
- [3] CIE. Colorimetry: CIE15:2004[R]. Vienna: CIE, 2004: 24-26.
- [4] NIMEROFF I, YUROW J A. Degree of Metamerism[J]. Journal of the Optical Society of America, 1965, 55(2): 185-190.
- [5] STEPHEN VIGGIANO J A. Perception-Referenced Method for Comparison of Radiance Ratio Spectra and Its Application as an Index of Metamerism[C]//9th Congress of the International Colour Association. Rochester: International Colour Association, 2002. DOI: 10.1117/12.464650.
- [6] 何国兴.光谱模糊匹配评价同色异谱程度[J].东华大学学报(自然科学版),2006,32(1):73-75.
HE Guoxing. Assessment of the Degree of Metamerism for the Spectral Fuzzy Matching[J]. Journal of Donghua University (Natural Science), 2006, 32(1): 73-75.
- [7] CHEN D Q, XIE W, WAN X X. Study on Metamerism Degree Evaluation Based on Wavelength Sensitive Cone Weighting Algorithm[J]. Color Research & Application, 2019, 44(6): 894-909.
- [8] PAHJEHFOULADGARAN M, KAARNA A. Spectral Matching Functions and Ellipse Mappings in Search for More Uniform Chromaticity and Color Spaces[J]. Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems, 2010. DOI:10.1007/978-3-642-17688-3_9.
- [9] KARBASI A, MORADIAN S, ASIABAN S. Improving the Performance of Computer Color Matching Procedures[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2008, 25(9): 2251-2262.
- [10] 赵德方,黄新国.基于 Kubelka-Munk 理论的光谱配色算法研究[J].包装学报,2017,9(1):46-52.
ZHAO Defang, HUANG Xinguo. Research of Spectral Color Matching Algorithm Based on Kubelka-Munk[J]. Packaging Journal, 2017, 9(1): 46-52.
- [11] BILLMEYER F W, SALTZMAN M. Principles of Color Technology[M]. 2nd ed. New York: John Wiley and Sons Inc., 1981: 143-146.
- [12] LIU Y, LIU Q, HUANG Z, et al. Optimising Colour Preference and Colour Discrimination for Jeans Under 5 500 K Light Sources with Different Duv Values[J]. Optik, 2020, 208: 163916.
- [13] CHO Y J, CUI G H, LUO R, et al. The Impact of Viewing Conditions on Observer Variability for Cross-

- Media Colour Reproduction[J]. *Coloration Technology*, 2019, 135(3): 234–243.
- [14] LUO M R, CUI G, RIGG B. The Development of the CIE 2000 Colour-Difference Formula: CIEDE2000[J]. *Color Research & Application*, 2001, 26(5): 340–350.
- [15] LUO M R. CIE 2000 Color Difference Formula: CIEDE2000[C]//9th Congress of the International Colour Association. Rochester: International Colour Association, 2002. DOI: 10.1117/12.464549.
- [16] GU H T, POINTER M R, LIU X Y, et al. Quantifying the Suitability of CIE D50 and a Simulators Based on LED Light Sources[J]. *Color Research & Application*, 2017, 42(4): 408–418.
- [17] HUANG M, LIU H X, CUI G H, et al. Testing Uniform Colour Spaces and Colour-Difference Formulae Using Printed Samples[J]. *Color Research & Application*, 2012, 37(5): 326–335.
- [18] AKBARINIA A, GEGENFURTNER K R. Color Metamerism and the Structure of Illuminant Space[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2018, 35(4): B231.
- [19] 黄敏, 何瑞丽, 史春洁, 等. 比较法测试不同颜色匹配函数的性能[J]. *光谱学与光谱分析*, 2018, 38(7): 2241–2249.
- HUANG Min, HE Ruili, SHI Chunjie, et al. Test the Performances of Different Color Matching Functions with the Method of Comparison[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2018, 38(7): 2241–2249.
- (责任编辑: 邓光辉)

Evaluation of the Performance of Metamerism Indices with the Near Metamers

YU Junyan, CHEN Danqing

(School of Printing and Packaging, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: To verify the evaluation performance of different metamerism indices, based on the Kubelka-Munk color matching theory, four sets of near metamerism pairs were obtained through the printing suitability instrument proofing. Based on the comparison method in the psychophysical experimental method, 40 observers with normal color vision were organized to carry out the color difference ranking evaluation experiment. Correlation coefficients were used to analyze the consistency between objective evaluation of metamerism indices and subjective evaluation of observers. The research results showed that the correlation coefficients between the special metamerism index and the subjective evaluation under D50 and TL84 light sources were both higher than 0.7, and the correlation coefficients of the general metamerism index model based on the long, medium and short cone wavelength sensitivity weighting algorithm were higher than 0.55, indicating that the evaluation performance of the metamerism degree of the special metamerism and the lms-MI model was better. Therefore, in the development of spectral color matching and lighting indicator, special metamerism index could be selected as the metamerism degree evaluation index under illuminant D50 and TL84, while the lms-MI model could be used to select the best spectrum when the light source was not dependent.

Keywords: metamerism; near metameric pair; special metamerism index; general metamerism index; correlation coefficient