

中国人眼对表色色差辨别的实验研究¹⁾*

孙秀如 林志定 张家英 林仲贤 荆其诚

(中国科学院心理研究所, 北京, 100012)

郭淑琴

(北京大学心理系, 100871)

摘 要

报导了中国人眼对表色色差辨别的实验研究中彩色类特性实验结果。研究中对颜色所具有的明度、色调、彩度三个属性分别开展了实验研究。研究结果表明了颜色中的色调、明度和彩度的特性变化不影响人眼对表面色色差的识别。中国人眼对彩色系表色色差辨别时, 色差识别的量值 ΔE 值仅随感觉等级的不同而产生变化。将彩色类和非彩色类的实验结果进行比较时, 发现了彩色类各感觉等级的 ΔE 值均大于非彩色类的 ΔE 值。根据二个类别的实验结果, 研究者提出: 中国颜色体系中非彩色系样品和彩色系样品色度坐标值的色差宽容度分别为: 非彩色系 $\Delta E < 1.5$; 彩色系 $\Delta E < 3.0$ 的建议。根据该项技术指标制作的《中国颜色体系样册》中的 1322 个颜色样品, 经中国计量科学研究院在国家标准计量装置上测试, 将其结果和国际上已有的颜色体系样册中样品的色差比较时, 还是让人感到满意的。该项技术指标已作为《中国颜色体系》国家标准中颜色样品色差宽容度的技术参数。

关键词 表色, 色差, 宽容度, 中国颜色体系。

颜色分为非彩色和彩色两大类, 因而在开展“中国人眼对表色色差辨别的实验研究”时, 应充分考虑对这两大类的研究结果。人眼对非彩色类特性辨别的实验研究结果, 我们已在 1995 年心理学报第 3 期作了报道。现将人眼对彩色类特性辨别的实验研究和结果作一介绍。

1 实验设计的依据和原则

1.1 实验条件

根据中国颜色体系理论和编制原则的规定和在“中国颜色体系表面色目视评价方法”国家标准报批稿中的要求, 本研究所采用的实验条件(标准光源、照明及观察方向、观察背景环境和观察者、色差公式的选择、标准样品和比较样品之间色差 (ΔE) 级的控制及感觉等级的分类)均和非彩色类实验研究相一致, 故在此不再阐述。

1.2 实验样片

颜色中的彩色是指白-黑系列以外的各种颜色。它不仅具有非彩色类所具有的明度特性, 同时还具有彼此能相互区分的特性——色调。它们在颜色空间的同一个平面上形成一个首尾相接的色调环, 红-黄-绿-蓝-紫(见图 1)。此外, 彩色还具有彩度的特性, 它是反

1) 本文修改稿于 1995 年 10 月 10 日收到。

* 本研究系为国家自然科学基金会资助项目。

映彩色色貌浓淡的视觉特性值。在颜色空间中表示了具有相同明度值,相同色调的颜色的不同彩度是以离开中性灰的程度来表示。在图1的中心轴上的彩度为0,色调环上的各色调与中心轴的距离大小,表明了颜色彩度的大小,离中心轴越远,彩度越大。在开展中国人眼对彩色系表色色差识别特性及规律研究时,必须对彩色的三个基本属性——明度、色调、彩度在色差识别中的作用和影响开展研究,其实验结果不仅具有理论意义,同时具有应用价值。为了深入探讨人眼对彩色表色色差辨别的规律,我们首先要研制出本实验所需的各颜色样片,在色度特性上要符合以下三个条件:

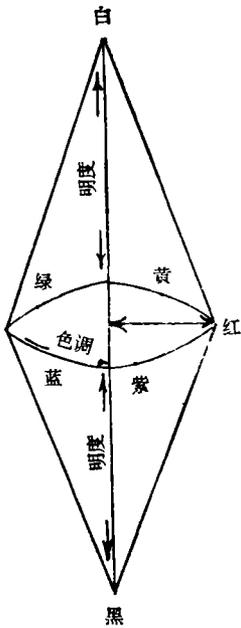


图1 色立体示意图

A: 明度特性: 实验样片为具有相同的色调、相同的彩度,高、中、低三个不同明度等级,即: $V=8.0$ 、 $V=5.0$ 、 $V=4.0$ 的色度特性系列。

B: 色调特性: 实验样片为具有相同的明度、相同的彩度,色调环上红、黄、绿、蓝、紫五个不同的主色调,即: $5R$ 、 $5Y$ 、 $5G$ 、 $5B$ 、 $5P$ 的色度特性系列。

C: 彩度特性: 实验样片为具有相同的色调、相同的明度,高、中、低三个不同彩度等级,即: $C=8$ 、 $C=6$ 、 $C=2$ 的色度特性系列。

性系列。

对上述所需系列样片的研制,仅依靠我国现有的传统的涂料配色工艺技术路线是无法达到其色度特性的要求的。为此我们引进了世界上先进的计算机配色、测色技术。采用美国 ACS 公司 2018 配色系统。经过反复的工艺制作,最终选取了实验研究中所需的 37 个颜色系列,计 606 个实验样片。采用了精度为 1% 的美国 ACS 公司 CS-5 分光光度计,进行了色度测试,确定了标准样片和比较样片之间的 ΔE 值。每个样片均以中国颜色体系中颜色标号方式: HV/C 即色调、明度/彩度给予标称。

2 实验方法

依据实验设计中所规定的照明和观察方向,实验时采用美国 ACS 公司标准光源灯箱中的人工模拟 D_{65} 照明光源,光线从垂直方向照射样片,人眼与样片之间夹角保持 45° ,夹角偏离不超过 10° 。实验样片为 3×3 厘米,双眼距样片的距离保持为 10° 视场。

标准样片置放在灯箱内,对应的比较样片随机放置在标准样片的上方,进行色差辨别时,要求观察者逐一的将比较样片和标准样片放在同一视场内的紧相邻接的位置上。比色时,观察者可将比较样片放置在标准样片的上、下、左、右方交替进行比较,尽可能地克服由于观察条件细微的差别所带来的影响。观察者可以反复进行比较,直到得出满意的感觉等级时为止。因目视评价时,每一组所需评价时间不长,一般情况下不会引起观察者的视觉疲劳。实验中,若观察者感觉到眼睛疲劳时,可随时休息,待恢复后,再继续评价。

3 实验结果和讨论

对结果统计处理是以心理物理统计学中的常规处理方法,将观察者对每个样片选择

表 1 同明度、同彩度不同色调色差辨别感觉值比较(ΔE)

HV/C	相似	微量差	可觉差	可识别	大差别	HV/C	相似	微量差	可觉差	可识别	大差别
5R 4/2	0.28	0.51	<3.19	4.16	5.62	5R 5/6	0.31	<2.36	2.36	6.00	8.38
5Y 4/2	—	0.60	—	4.00	6.20	5Y 5/6	0.59	1.53	1.69	—	6.04
5G 4/2	—	1.07	2.01	4.45	7.18	5G 5/6	0.54	1.84	2.84	7.51	9.13
5B 4/2	—	1.12	3.00	4.12	7.25	5B 5/6	0.60	1.08	2.90	5.60	7.30
5P 4/2	—	0.30	1.05	4.88	6.91	5P 5/6	0.32	1.03	2.93	5.25	7.47
5R 5/2	0.33	0.73	1.49	3.92	5.91	5R 8/4	—	1.07	2.31	6.39	9.69
5Y 5/2	—	0.60	1.83	2.78	6.18	5Y 8/4	—	1.96	—	3.76	8.78
5G 5/2	—	1.13	2.04	2.73	7.99	5G 8/4	0.27	0.80	1.49	2.05	>8.02
5B 5/2	—	0.95	1.20	4.00	6.24	5B 8/4	—	1.00	1.91	4.24	7.33
5P 5/2	—	0.62	1.05	3.98	6.85	5P 8/4	—	0.71	1.36	3.95	7.53
5R 8/2	—	0.71	2.00	4.40	5.36	5R 4/8	—	0.80	2.51	5.32	9.97
5Y 8/2	—	0.98	1.99	4.42	5.47	5Y 4/8	—	—	—	—	—
5G 8/2	0.32	1.21	2.67	4.76	9.87	5G 4/8	—	1.57	4.15	6.92	>10.39
5B 8/2	—	0.50	1.00	2.20	5.09	5B 4/8	—	—	—	—	—
5P 8/2	—	0.31	1.02	3.97	7.98	5P 4/8	—	0.59	2.01	4.21	8.68
5R 4/6	—	1.54	4.10	6.94	9.79	5R 5/8	—	0.83	2.10	4.57	>9.16
5Y 4/6	—	—	—	—	—	5Y 5/8	—	—	—	—	—
5G 4/6	—	1.93	4.08	6.07	>10.32	5G 5/8	—	0.83	2.49	8.03	>9.81
5B 4/6	—	1.84	3.56	4.23	8.73	5B 5/8	—	0.16	1.08	3.82	9.01
5P 4/6	—	1.06	1.14	2.96	8.16	5P 5/8	—	0.48	2.85	4.17	>7.34
						5Y 8/8	—	1.01	1.93	5.02	6.08

次数之和超过辨别总数的 75% 作为级差界限的确定依据。60 名观察者的实验统计结果分别见表 1, 表 2, 表 3。

通过对表 1、表 2、表 3 中的实验结果分析, 可以看到中国人眼对彩色系表色色差辨别具有如下特性:

A. 当实验系列是对具有相同明度、彩度和不同色调——5R、5Y、5G、5B、5P 属性的颜色样片进行色差辨别时, 表 1 中的 37 个组系的结果表明, 人眼对不同色调的彩色色差进行辨别, 各感觉等级的 ΔE 值无显著趋向性差异。因“相同”感觉等级在任何一组系实验中均未有色差量值表现故表中未列出。在 37 个组系中除 5R4/2、5R5/2、5G8/2、5G8/4 组系外, 在“相似”级上无色差量值显示; “微量差”的 ΔE 值除 5G5/2 为 2.04 外, 其它均小于 2.0; “可觉差”的 ΔE 值除 5R4/2、5R4/6、5G4/6、5B4/6 外, 其它均 ≤ 3.0 ; “可识别差”的 ΔE 值除 5G5/8 为 8.03 外, 其它均小于 8.0; 而“大差别”级的 ΔE 值均在 5.0 以上。从表 1 中还可以看到 37 个组系中虽有个别的组列 ΔE 值有差异, 但差异并不明显。可以认为, 表 1 中的结果表明了人眼对彩色系表色色差的辨别其色差值的大小不受颜色所含有的色调属性变化的影响。

B. 当实验系列是对具有相同色调、彩度和不同的明度级 ($V=4$ 、 $V=5$ 、 $V=8$) 的颜色样片进行色差辨别时, 表 2 中的 37 个组系的实验结果表明了, 彩色系色差 ΔE 值的变化, 仅随着感觉等级的不同而不同, 即随着“相同”——“相似”——“微量差”——“可觉差”——“可识别”——“大差别”等级的改变, ΔE 值不断增大。而明度的变化, 无论是高明度 $V=$

表2 同色调、同彩度不同明度色差辨别感觉值的比较(ΔE)

HV/C	相似	微量差	可觉差	可识别	大差别	HV/C	相似	微量差	可觉差	可识别	大差别
5R 4/2	0.28	0.51	<3.19	4.16	5.62	5G 4/6	—	1.93	4.08	6.07	>10.32
5R 5/2	0.33	0.73	1.49	3.92	5.91	5G 5/6	0.54	1.84	2.84	7.51	9.13
5R 8/2	—	0.71	2.00	4.40	5.36	5G 8/4	0.27	0.80	1.49	2.05	>8.02
5Y 4/2	—	0.60	—	4.00	6.20	5B 4/6	—	1.84	3.56	4.23	8.73
5Y 5/2	—	0.60	1.80	2.78	6.18	5B 5/6	0.60	1.08	2.90	5.60	7.30
5Y 8/2	—	0.98	1.99	4.42	5.47	5B 8/4	—	1.00	1.91	4.24	7.33
5G 4/2	—	1.07	2.01	4.45	7.18	5P 4/6	—	1.06	1.14	2.96	8.16
5G 5/2	—	1.13	2.04	2.73	7.99	5P 5/6	0.32	1.03	2.93	5.25	7.47
5G 8/2	0.32	1.21	2.67	4.76	9.87	5P 8/4	—	0.71	1.36	3.95	7.53
5B 4/2	—	1.12	3.00	4.12	7.25	5R 4/8	—	0.80	2.51	5.32	9.97
5B 5/2	—	0.95	1.20	4.00	6.24	5R 5/8	—	0.83	2.10	4.57	>9.16
5B 8/2	—	0.50	1.00	2.20	5.09	5Y 4/8	—	—	—	—	—
5P 4/2	—	0.30	1.05	4.88	6.91	5Y 5/8	—	—	—	—	—
5P 5/2	—	0.62	1.05	3.98	6.85	5Y 8/8	—	1.01	1.93	5.02	6.08
5P 8/2	—	0.31	1.02	3.97	7.98	5G 4/8	—	1.57	4.15	6.92	>10.39
5R 4/6	—	1.54	4.10	6.94	9.79	5G 5/8	—	0.83	2.49	8.03	>9.81
5R 5/6	0.31	<2.36	2.36	6.00	8.38	5B 4/8	—	—	—	—	—
5R 8/4	—	1.07	2.31	6.39	9.69	5B 5/8	—	0.16	1.08	3.82	9.01
5Y 4/6	—	—	—	—	—	5P 4/8	—	0.59	2.01	4.21	8.68
5Y 5/6	0.59	1.53	1.69	—	6.04	5P 5/8	—	0.48	2.85	4.17	>7.34
5Y 8/4	—	1.96	—	3.76	8.78						

8时、中明度 $V=5$ 时、还是低明度 $V=4$ 时,5R、5Y、5G、5B、5P的色差值在同一感觉等级上时无显著的趋向性的变化和区别。而是否可以认为,表面色所具有的明度属性变化不影响人眼对色差的识别。此结果与我们在非彩色类实验研究中得到的“两个系列的明度级无论是高明度、中明度或低明度的色差 ΔE 值均无明显的差异”^[1]的结果是相一致的。

C. 中国人眼对相同色调、明度和不同彩度的($C=2$ 、 $C=6$ 、 $C=8$)的颜色色差识别特性又怎样呢?从表3的实验结果中不难看出,彩度的变化,即 $C=2$ 、 $C=6$ 、 $C=8$ 时,5R、5Y、5G、5B、5P中的任何一组同色调、同明度的颜色色差识别的量值 ΔE 未随彩度从低饱和 \rightarrow 中饱和 \rightarrow 高饱和的不同,而有其规律性或趋向性的变化。结果并未随彩度的变化 ΔE 随同增大或减小。从本实验所得到的结果,我们认为,颜色所含有的彩度属性的变化不影响人眼对表面色色差的辨别。

根据上述的结果和分析,我们认为,中国人眼对彩色类表面色色差辨别时,色差识别的量值 ΔE 仅随感觉等级的不同而变异。颜色所具有的色调、明度和彩度三个属性的变化不影响人眼对表面色色差的识别。这一结论为我们制定中国颜色体系中彩色系样品色差宽容度的技术参数,提供了实验研究的依据。

将表2中的实验结果和非彩色类的实验结果相比较时^[1],我们清楚地看到(见表4),彩色类各感觉等级的 ΔE 值一般都大于非彩色类相对应的感觉等级的 ΔE 值。

由此结果,可否认人眼对白-黑系列色差的识别比对彩色类色差识别的视敏度要高

表 3 同色调、同明度不同彩度色差辨别感觉值的比较(ΔE)

HV/C	相似	微量差	可觉差	可识别	大差别	HV/C	相似	微量差	可觉差	可识别	大差别
5R 4/2	0.28	0.51	<3.19	4.16	5.62	5B 5/2	—	0.95	1.20	4.00	6.24
5R 4/6	—	1.54	4.10	6.94	9.79	5B 5/6	0.60	1.08	2.90	5.60	7.30
5R 4/8	—	0.80	2.51	5.32	9.97	5B 5/8	—	0.16	1.08	3.82	9.01
5Y 4/2	—	0.60	—	4.00	6.20	5P 5/2	—	0.62	1.05	3.98	6.85
5Y 4/6	—	—	—	—	—	5P 5/6	0.32	1.03	2.93	5.25	7.47
5Y 4/8	—	—	—	—	—	5P 5/8	—	0.48	2.85	4.17	>7.34
5G 4/2	—	1.07	2.01	4.45	7.18	5R 8/2	—	0.71	2.00	4.40	5.36
5G 4/6	—	1.93	4.08	6.07	>10.32	5R 8/4	—	1.07	2.31	6.39	9.69
5G 4/8	—	1.57	4.15	6.92	>10.39	5R 8/8	—	—	—	—	—
5B 4/2	—	1.12	3.00	4.12	7.25	5Y 8/2	—	0.98	1.99	4.42	5.47
5B 4/6	—	1.84	3.56	4.23	8.78	5Y 8/4	—	1.96	—	3.76	8.78
5B 4/8	—	—	—	—	—	5Y 8/8	—	1.01	1.93	5.02	6.08
5P 4/2	—	0.30	1.05	4.88	6.91	5G 8/2	0.32	1.21	2.67	4.76	9.87
5P 4/6	—	1.06	1.14	2.96	8.16	5G 8/4	0.27	0.80	1.49	2.05	>8.02
5P 4/8	—	0.59	2.01	4.21	8.68	5G 8/6	—	—	—	—	—
5R 5/2	0.33	0.73	1.49	3.92	5.91	5B 8/2	—	0.50	1.00	2.20	5.09
5R 5/6	0.31	<2.36	2.36	6.00	8.38	5B 8/4	—	1.00	1.91	4.24	7.33
5R 5/8	—	0.83	2.10	4.57	>9.16	5B 8/8	—	—	—	—	—
5Y 5/2	—	0.60	1.80	2.78	6.18	5P 8/2	—	0.31	1.02	3.97	7.98
5Y 5/6	0.59	1.53	1.69	—	6.04	5P 8/4	—	0.71	1.36	3.95	7.53
5Y 5/8	—	—	—	—	—	5P 8/8	—	—	—	—	—
5G 5/2	—	1.13	2.04	2.73	7.99						
5G 5/6	0.54	1.84	2.84	7.51	9.13						
5G 5/8	—	0.83	2.49	8.03	>9.81						

表 4 非彩色类和彩色类色差感觉等级的 ΔE 的比较

感觉等级	相似 (ΔE)	微量差 (ΔE)	可觉差 (ΔE)	可识别 (ΔE)	大差别 (ΔE)
非彩色类	—	<1.5	<2.5	<5.0	<10.0
彩色类	—	<2.36	<4.0	<8.0	>10.0

些。这一比较结果使我们认识到,在确定中国颜色体系中彩色系样品色差宽容度时,可以与非彩色系样品色度值色差宽容度有所不同,可适当放宽。因此将色差值确定为: $\Delta E < 3.0$ 、部分高明度、高饱和度颜色样品的 ΔE 还可适当放宽。我们认为这一量值的确定,不仅符合中国人眼颜色识别的特性,对颜色样品的工艺制作具有十分重要的意义。根据非彩色类实验的结果,我们提出了中国颜色体系中非彩色系样品色度值色差宽容度: $\Delta E < 1.5$ 。根据本实验的结果,我们将彩色系样品色差值 ΔE 定为小于 3.0,两者之间相差一倍。这个差别不仅使得颜色样品工艺制作中色度值的合格率数量增多,同时使工艺成本和加工时间等都得到了效益。

根据中国人眼对表色色差辨别实验研究的结果所提出的中国颜色体系中颜色样品色差宽容度定为: 非彩色系 $\Delta E < 1.5$ 。彩色系 $\Delta E < 3.0$ 、部分高明度、高饱和度的颜色样品

的色差 ΔE 可适当放宽。这两个技术参数经全国颜色标准化技术委员会确认, 已作为国家标准物质 GSB A 26003—94《中国颜色体系样册》中的色差宽容度技术参数。

中国计量科学研究院在国家标准计量装置上, 选用范围为 380nm 至 780nm (全部可见光谱区), 照明/观察条件是以 0/45 作为标准条件, 对《中国颜色体系样册》中的 1332 个颜色样品进行了光谱反射特性测试, 计算出三刺激值和色度坐标, 并给出了在 D_{65} 标准照明体, 10° 视场的色度学数据。

为了考核依据上述提出的色差宽容度研制成的《中国颜色体系样册》中样品色度实际达到的精确度, 我们将中国计量科学研究院的测试结果与中国颜色体系色空间中的理论值之间进行了色差计算, 结果见表 5。我们又将得到的结果与 Billmeyer 等人^[2]和 Smith 等人^[3]对日本 C. C. 5000、瑞典 NCS、德国 DIN6164 及美国 OSA-UCS 颜色体系中样品色度测试得到的色差结果进行了比较。

表 5 中国颜色体系、NCS、DIN6164、OSA-UCS 及 C. C. 5000 颜色体系颜色样品的色差(ΔE)比较

颜色体系	色样品总数	$\Delta E \leq 1.0$		$1.0 < \Delta E \leq 3.0$		$\Delta E < 3.0$	
		个数	%	个数	%	个数	%
中国颜色体系	1322	262	19.81	850	64.29	210	15.88
NCS	1378	17	1.24	279	20.25	1082	78.51
DIN6164	581	103	17.72	442	76.08	36	6.20
OSA-UCS	558	249	44.62	255	45.69	54	9.67
C. C. 5000	1325	93	7.00	822	62.00	410	31.00

由结果可见, 中国颜色体系颜色样品的平均色差小于瑞典 NCS 体系和日本 C. C. 5000 体系样品的色差, 和德国 DIN6164 体系的色差相当, 略低于美国 OSA-UCS 体系的色差。OSA-UCS 体系色差较小的原因在于它的 558 个色样品色度值处于中等明度、中等彩度的范围内, 工艺较易实现。

根据中国人眼对表色色差辨别的实验研究所确定的中国颜色体系中颜色样品色差宽容度, 为我国今后工业产品的颜色质量规范化管理和检验也提供了科学依据。

参 考 文 献

- 1 孙秀如, 林志定, 张家英. 中国人眼对表色色差辨别的实验研究, 心理学报, 1995, 27(3): 231—240.
- 2 Billmeyer F W, loppnow G R. Accuracy of Munsell Notations in Two Japanese Color Order Systems, Color Research and Application, 1988, 13(4): 235—242.
- 3 Smith N S, Whitfield T W A, Wiltshire T O. The Accuracy of the NCS, DIN and OSA-UCS Colour Atlases, Color Research and Application, 1990, 15(2): 111—116.

DISCRIMINATION OF COLOR DIFFERENCE OF SURFACE

Sun Xiuru Lin Zhiding Zhang Jiaying

Lin Zhongxian Jing Qicheng

(*Institute of Psychology, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100012*)

Guo Shuqin

(*Department of Psychology, Beijing University*)

Abstract

This research reported the results of discrimination of color difference of surface color. Three color attributes—hue, brightness and saturation were investigated in this study respectively. The results indicated that the changes of the character of hue, brightness and saturation had influence in discrimination of color difference of surface color, the value of discrimination of color difference (ΔE) only changed with the difference of sensation level. Comparing the results of chromatic color with the achromatic color, it was found that the values of ΔE of various sensation level of chromatic color system were higher than that of the values of ΔE of achromatic color system. According to these results, the author suggested that color tolerances of samples of the chromatic color system and achromatic color system in the Chinese Color System were: achromatic color system $\Delta E < 1.5$, chromatic color system $\Delta E < 3.0$. These technique data were already used for color tolerances of color samples in the Chinese Color System.

Key words surface color, color difference, tolerance, Chinese color system.