

# RGB-LED 光源下光源色度对颜色恒常性的影响

马瑞青<sup>1,2\*</sup>, 廖宁放<sup>3</sup>

<sup>1</sup>北京理工大学深圳研究院, 广东 深圳 518057;

<sup>2</sup>太原理工大学信息与计算机学院, 山西 太原 030024;

<sup>3</sup>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

**摘要** 基于视觉心理物理学实验研究 RGB-LED 光源下的颜色恒常性。实验中, 观察者分别在白色和红、绿、蓝、黄 4 种彩色的 RGB-LED 光源下对 240 个孟塞尔(Munsell)色卡进行颜色分类。实验结果表明, 从白光变化到红色和绿色光源时, 颜色恒常性在各颜色类别上表现均较好, 与传统宽带光源下的表现接近; 变化到蓝色光源时, 颜色恒常性在棕、红、黄和橙色类别上表现较差; 变化到黄色光源时, 颜色恒常性在棕、红和橙色类别上表现较差。总体来说, 红色和绿色光源下的颜色恒常性比蓝色和黄色光源下的恒常性好。实验结果可为 RGB-LED 光源在实际中的设计和应用提供参考。

**关键词** 视觉光学; 颜色恒常性; 红绿蓝发光二极管光源; 颜色视觉

中图分类号 O432

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0933001

## Influence of Illuminant Chromaticity on Color Constancy Under RGB-LED Light Source

Ma Ruiqing<sup>1,2\*</sup>, Liao Ningfang<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Shenzhen Research Institute, Beijing Institute of Technology, Shenzhen, Guangdong 518057, China;

<sup>2</sup>College of Information and Computer, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China;

<sup>3</sup>Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System of Ministry of Education, School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

**Abstract** This study mainly investigates color constancy under RGB-LED light sources by visual psychophysics experiments. In the experiment, the subject is instructed to classify 240 Munsell surfaces under the neutral and four chromatic (red, green, blue, and yellow) illuminants produced by a RGB-LED lamp. The experimental results show that color constancy for each color category is relatively good when the light changes from the neutral to red and green, which is close to that of traditional broadband illuminants; color constancy for brown, red, yellow, and orange categories is bad when the light changes from the neutral to blue; color constancy for brown, red, and orange categories is bad when the light changes from the neutral to yellow. Overall, the color constancy under red and green illuminants is better than that under blue and yellow illuminants. These results can provide a reference for the design and application of RGB-LED light sources in practice.

**Key words** visual optics; color constancy; RGB-light emitting diode light sources; color vision

**OCIS codes** 330.1720; 330.1690; 330.5510; 330.1730

## 1 引 言

RGB-LED 灯包含窄带红光、绿光和蓝光 LED, 可以通过调节三基色灯光的亮度合成任意色度的光, 被广泛应用于家庭照明、路灯照明和工业照明等领域。目前对 RGB-LED 光源的研究主要集中于对

颜色质量的评价<sup>[1]</sup>, 如显色性<sup>[2-3]</sup>、色域<sup>[4]</sup>、颜色辨别<sup>[5]</sup>和颜色偏好<sup>[6]</sup>。研究表明, 与传统光源相比, RGB-LED 光源的显色性较差, 且在 RGB-LED 光源下观察者的颜色辨别能力降低, 但 LED 光源提高了被照射场景中的红绿色饱和度和, 使得场景更鲜艳。

收稿日期: 2019-03-21; 修回日期: 2019-04-13; 录用日期: 2019-05-05

基金项目: 国家自然科学基金(61705011, 61575020)

\* E-mail: mrq153101@163.com

颜色恒常性是指虽然光源的强度和光谱构成发生了变化,但仍能感知到物体表面本身的颜色没有发生变化。这主要由于人类视觉系统通过视网膜层到大脑视觉皮层的多级信息处理机制从复杂多变的环境中过滤掉光源颜色的影响,从而维持对物体颜色的稳定识别。颜色恒常性现象由 McCann 等<sup>[7]</sup>的实验验证:2 个具有不同反射率的色块分别由白光和彩色光照射,尽管在两种光源照射下 2 个色块在色彩空间中具有相同的色度坐标,即二者反射到人眼中形成的三刺激值完全一样,但 2 个色块被感知到具有不同的颜色。这个实验说明对物体颜色的感知取决于它本身的反射率,而不是光源照射后的辐射光谱。

颜色恒常性研究已有很长的历史<sup>[8]</sup>,主要通过视觉心理物理学方法进行。以往研究主要是基于传统宽带光源。在模拟环境下,光源光谱通过日光光谱基函数线性组合<sup>[9]</sup>来模拟;在真实环境下,光源光谱通过三色荧光灯混合生成<sup>[10]</sup>或者使用滤光片过滤日光<sup>[11]</sup>生成。通常,人类视觉系统并不能达到 100% 的颜色恒常性,在显示器模拟环境下测量得到的颜色恒常性约为 60%<sup>[8]</sup>,在真实环境下更高一些。宽带光源下的颜色恒常性研究表明,光源色度对颜色恒常性的表现没有影响,如 Delahunt 等<sup>[12]</sup>发现颜色恒常性程度在红、绿、蓝、黄色光源之间并没有显著不同。

本文让观察者分别在白色和红、绿、蓝、黄 4 种彩色的 RGB-LED 光源下,对 240 个孟塞尔(Munsell)色卡进行颜色分类,研究 RGB-LED 光源下颜色恒常性是否存在,及颜色恒常性表现是否受光源色度影响。

## 2 基本理论

### 2.1 颜色恒常性的测量方法

比较常用的测量颜色恒常性的 3 种心理物理学方法为<sup>[8]</sup>不对称颜色匹配、非彩色调整和颜色命名。在不对称颜色匹配实验中,观察者在测试光源(一般为彩色光源)下调整色块的颜色使得它与参照光源(一般为白色光源)下的标准色块看起来像从同一张纸上剪下来的。在非彩色调整实验中,观察者在测试光源下调整色块的颜色使得它看起来是非彩色的。两种方法均适用于显示器上的模拟环境。

颜色命名方法是按固定数目的颜色词汇,如 Berlin 等<sup>[13]</sup>提出的 11 个基本颜色词汇,对色卡进

行颜色分类,通过度量从参考光源变化到测试光源时,色卡颜色命名的变化,来测量颜色恒常性。颜色命名方法可在短时间内获得实际场景中的大量色卡数据。Troost 等<sup>[14]</sup>在模拟环境下比较颜色命名方法和不对称颜色匹配方法在颜色恒常性研究中的优缺点,并称颜色命名方法可以可靠地测量物体颜色稳定识别的程度。Olkkonen 等<sup>[10-11]</sup>通过颜色命名的方法研究了模拟场景和真实场景中宽带光源下的颜色恒常性。总体来说,颜色命名方法可通过收集占据色彩空间大多数区域的色卡数据准确快速地测量实际场景中的颜色恒常性。

### 2.2 颜色恒常性指数

量化颜色恒常性的程度主要通过某一色彩空间中比较观察者的观察值和理论值之间的差异确定,有两种颜色恒常性指数被用来定量地表示颜色恒常性的好坏,Arend 等<sup>[15]</sup>提出的 CI (Constancy Index) 和 Troost 等<sup>[14]</sup>提出的 BR (Brunswick Ratio)。图 1 所示为在 CIE 1976  $u'v'$  色度图中某一色块的标准色度坐标( $u'_s, v'_s$ )、观察色度坐标( $u'_o, v'_o$ )和理论色度坐标( $u'_p, v'_p$ ),与文献<sup>[14-15]</sup>中的图 3 所示类似。其中, $d_{sp}$ 为标准值与理论值之间的欧氏距离, $d_{op}$ 为观察值与理论值之间的欧氏距离, $d_{so}$ 为标准值与观察值之间的欧氏距离。颜色恒常性指数 CI 被定义为  $1 - d_{op}/d_{sp}$ ; BR 被定义为  $d_{so}/d_{sp}$ 。除了 BR, Troost 等还定义角度偏移量  $\theta$  为颜色恒常性的大小。角度偏移量  $\theta$  越小,颜色恒常性表现越好。

以测量从参考白光 D65 变化到相关色温为 10000 K 的测试光源的颜色恒常性为例。色块的标准色度值为某一个色块如 Munsell R 5/8 在参考白光 D65 下的色度值;理论色度值为色块 R 5/8 在相关色温为 10000 K 的测试光源下的理论值,通过色块 R 5/8 的光谱反射率、光源的辐射光谱及颜色匹配函数三者的乘积计算得到;观察色度值为观察者以颜色恒常性任务为指导在测试光源下观察到的值。

当观察者的观察值与色块在测试光源下的理论值相同时,颜色恒常性达到 100%,对应的颜色恒常性指数为 1。当观察者在测试光源下的观察值与色块在参考白光下的标准值相同时,说明观察者只是根据色块表面的辐射光谱识别颜色,而不是根据色块本身的反射率识别,此时颜色恒常性不存在,对应的颜色恒常性指数为 0。

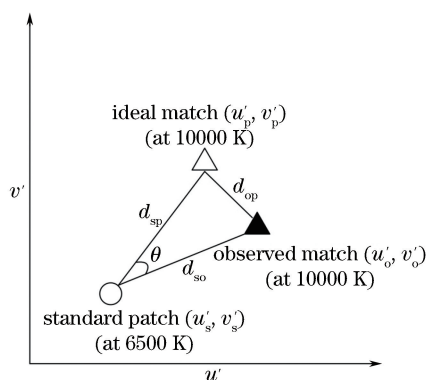


图 1 颜色恒常性指数计算中各色度坐标示意图  
Fig. 1 Diagram of chromaticity coordinates in color constancy index calculation

### 3 实验方法

#### 3.1 实验装置

实验在暗室中一个尺寸为 36 cm×36 cm×36 cm 的观察箱中进行。实验场景如图 2 所示,箱子侧面、背面及底部均用反射率约为 25% 的灰色纸覆盖,箱子中放置水果模型和 Macbeth ColorChecker 24 标准色卡来模拟实际生活中多颜色的观察背景。基于脉冲宽度调制(PWM)的 RGB-LED 光源安装在箱子顶部。光源的蓝、绿、红光 LED 峰值波长分别为 465,520,625 nm,光谱分布的半峰全宽(FWHM)分别为 40,45,36 nm。光源在色温为 6500 K 时的一般显色指数 CIE-R<sub>a</sub> 为 30。实验过程中,色卡被放置在箱子底部,观察者以 45° 角观察色卡,眼睛离色卡的距离约为 45 cm,观察者看不到箱子顶部的光源。

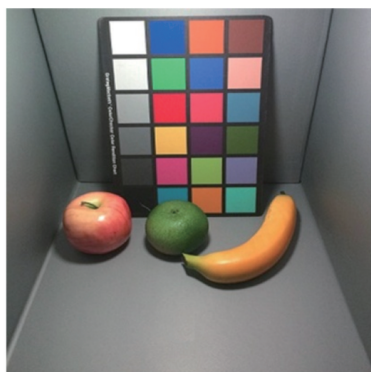


图 2 实验场景图  
Fig. 2 Diagram of experimental scene

#### 3.2 光源和色卡

令参考白光的色度与 D65 光源一致,在 CIE 1976  $u'v'$  色度图中的坐标为 (0.1978, 0.4684)。红、绿、蓝、黄色光源在 CIE 1976  $u'v'$  色度图中的

坐标如图 3 所示,其与参考白光色度坐标之间的欧氏距离均为 0.045 个单位。

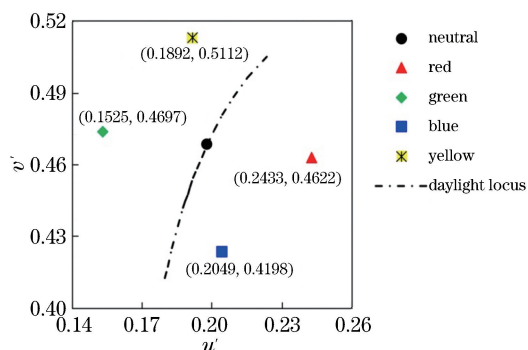


图 3 参考白光和 4 种彩色光源在 CIE 1976  $u'v'$  色度图中的色度坐标  
Fig. 3 CIE 1976  $u'v'$  chromaticity coordinates of the neutral and four chromatic illuminants

RGB-LED 光源产生参考白光和 4 种彩色光源的过程为用远程遥控板调整 LED 光源的颜色和强度,同时通过光谱辐射仪测量 LED 光源照射下白板的色度值和亮度值,当色度值达到预先定义的参考白光或 4 种彩色光源的值,且亮度值为 25 cd/m<sup>2</sup> 时,则将此光源固定在遥控板上的某一按钮中,在实验中通过此按钮来控制该光源的开与关。最终,通过 RGB-LED 光源产生的白光和 4 种彩色光源的相对光谱分布如图 4 所示,其中红、蓝、黄色光源的曲线在大约 625 nm 处重合,并将传统宽带光源 D65 的相对光谱分布作为参考。

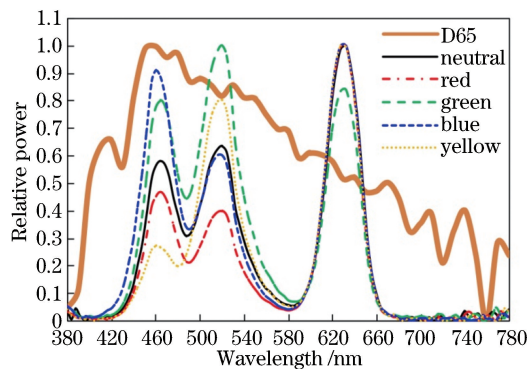


图 4 RGB-LED 光源所产生的参考白光和 4 种彩色光源的相对光谱分布  
Fig. 4 Relative spectral power distributions of the neutral and four chromatic illuminants produced by the RGB-LED light source

实验采用 Munsell Book of Color Glossy 中明度值为 5 的所有色卡,总共为 240 个,包括 40 个包含的所有彩度值的色相值。240 个色卡的光谱反射率通过分光光度计直接测量获得。在计算色卡在不



同光源下的色度值时,因 CIE1931 颜色匹配函数对年轻观察者表现较差<sup>[16]</sup>,采用 Judd-Vos 矫正的颜色匹配函数<sup>[17]</sup>,光谱在 380 ~ 780 nm 范围内间隔 10 nm 取样。

### 3.3 观察者

7 名观察者(4 名男性和 3 名女性,年龄为 22~25 岁)参与了红色和绿色光源下的实验。5 名观察者(4 名男性和 1 名女性,年龄为 24~31 岁)参与了蓝色和黄色光源下的实验。所有观察者均拥有正常或矫正后正常的视敏度,及石原表检测为正常的颜色视觉。

### 3.4 实验流程

实验的任务是针对每个放在指定位置的色卡,说出它对应的颜色类别,且这个颜色类别只能是 Berlin 等<sup>[13]</sup>提出的 11 个基本颜色类别之一。11 个基本颜色类别用中文和英文给出:红色(red),绿色(green),蓝色(blue),黄色(yellow),橙色(orange),粉色(pink),紫色(purple),棕色(brown),灰色(gray),黑色(black)和白色(white)。实际上,由于所有色卡的 Munsell 明度值为 5,在光源照射下它们的亮度值没有明显地高于或低于灰色背景的亮度值,因此实验中任何观察者均没有使用白色和黑色。

参加红色和绿色光源下实验的 7 个观察者,每个观察者需要完成 4 组实验,每组实验对应 1 种光源,4 组实验分别对应参考白光、红色光源、绿色光源和参考白光。每组实验开始前,观察者首先适应参考白光照射下的场景 5 min,然后在对应光源下完成 240 个色卡的颜色命名,240 个色卡按照随机顺序依次被实验者手动放置在指定位置。第 1 次参考白光下色卡的颜色命名作为训练过程,第 2 次参考白光下色卡的颜色命名作为度量彩色光源下颜色恒常性的参照值。

参加蓝色和黄色光源下实验的 5 个观察者,每个观察者也需要完成 4 组实验,对应参考白光、蓝色光源、黄色光源和参考白光。每组实验过程与上述相同。

### 3.5 数据分析

通过改进 Arend 等<sup>[15]</sup>提出的颜色恒常性指数 CI 来度量各颜色类别的颜色恒常性。在改进后的 CI 中,针对某一个颜色类别,标准色度值( $u'_s, v'_s$ )为观察者在参考白光下命名为此种颜色的所有色卡的  $u'v'$  色度值的平均值;理论色度值( $u'_p, v'_p$ )为参考白光下命名为此种颜色的所有色卡在彩色光源下理论计算得到的  $u'v'$  色度值的平均值;观察色度值

( $u'_o, v'_o$ )为彩色光源下观察者实际命名为此种颜色的所有色卡的  $u'v'$  色度值的平均值。因此,某一个颜色类别的颜色恒常性指数为

$$I = 1 - d_{op}/d_{sp}, \quad (1)$$

恒常性指数为 1,代表颜色恒常性达到 100%;恒常性指数为 0,代表颜色恒常性不存在。

角度偏移量  $\theta$  也被用来与恒常性指数一起度量颜色恒常性的程度。角度偏移量  $\theta$  的定义为

$$\theta = \arccos[(u'_o - u'_s)(u'_p - u'_s) + (v'_o - v'_s)(v'_p - v'_s)]/(d_{so}d_{sp}), \quad (2)$$

角度越大,说明观察者在彩色光源下得到的观察值越偏离理论值的方向,颜色恒常性越差;角度越小,观察值越接近理论值的方向,颜色恒常性越好。

## 4 实验结果

理论上,两次实验结果中,每个颜色类别的质点(命名为此种颜色的所有色卡的  $u'v'$  色度值的平均值)应该完全重合。表 1 为所有观察者在两次实验中得到的各颜色类别质点在 CIE 1976  $u'v'$  色度图中的欧氏距离。没有值的部分是由于其中一次或两次参考白光实验中没有出现这个颜色类别。如果两次实验结果得到的某一颜色类别的质点完全重合,则欧氏距离为 0。由表 1 可知,大多数情况下,各颜色类别在两次实验结果中的质点之间的距离非常小,在 0.015 个单位以下,说明观察者对色卡的颜色分类过程比较稳定。某些观察者在一些颜色类别上的欧氏距离稍大,大约为 0.03 个单位,如观察者 #7, #8 和 #9 在红色类别上,及观察者 #7 和 #9 在粉色类别上的欧氏距离。导致这种情况的部分原因是在作为训练过程的第一次参考白光实验中,观察者对颜色分类任务还不太熟悉。此外,橙色类别质点之间的欧氏距离在观察者 #6, #7 和 #8 上均较大,原因是命名为橙色的色卡数量较少,使得两次实验得到的质点不易趋于稳定。

图 5(a)所示为红色和绿色光源实验中,在第二次参考白光、红色和绿色光源下各颜色类别色卡数占总的色卡数(240 个)的百分比,数据为 7 个观察者的平均值。图 5(b)所示为蓝色和黄色光源实验中,各颜色类别色卡数占总的色卡数的百分比,数据为 5 个观察者的平均值。由图看出,被命名为绿色的色卡最多,约占总色卡数的 25%;被命名为灰色的色卡约占总色卡数的 10%;橙色和黄色的色卡数最少,少于总色卡数的 5%。



表 1 各观察者在两次参考白光实验中得到的各颜色类别质点在 CIE 1976  $u'v'$  色度图中的欧氏距离  
Table 1 Euclidean distances of centroids of nine color categories in CIE 1976  $u'v'$  chromaticity diagram obtained by two experiments which use neutral illuminant for each subject

| Category | Euclidean distance |          |          |          |          |          |          |          |          |
|----------|--------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|          | Sub. # 1           | Sub. # 2 | Sub. # 3 | Sub. # 4 | Sub. # 5 | Sub. # 6 | Sub. # 7 | Sub. # 8 | Sub. # 9 |
| Red      | 0.005              | 0.001    | 0.013    | 0.007    | 0.008    | 0.005    | 0.027    | 0.029    | 0.028    |
| Green    | 0.004              | 0.001    | 0.008    | 0.004    | 0.013    | 0.005    | 0.006    | 0.007    | 0.002    |
| Blue     | 0.002              | 0.003    | 0.006    | 0.008    | 0.013    | 0.003    | 0.004    | 0.008    | 0.001    |
| Brown    | 0.013              | 0.003    | 0.004    | 0.007    | 0.028    | 0.015    | 0.007    | 0.013    | 0.007    |
| Purple   | 0.005              | 0.013    | 0.011    | 0.010    | 0.002    | 0.012    | 0.012    | 0.025    | 0.006    |
| Pink     | 0.011              | 0.014    | 0.002    | 0.002    | 0.003    | 0.012    | 0.036    | 0.005    | 0.032    |
| Gray     | 0.005              | 0.001    | 0.008    | 0.002    | 0.004    | 0.004    | 0.002    | 0.002    | 0.007    |
| Yellow   |                    |          |          | 0.008    |          |          |          |          | 0.017    |
| Orange   |                    |          |          | 0.023    |          | 0.044    | 0.063    | 0.058    | 0.014    |

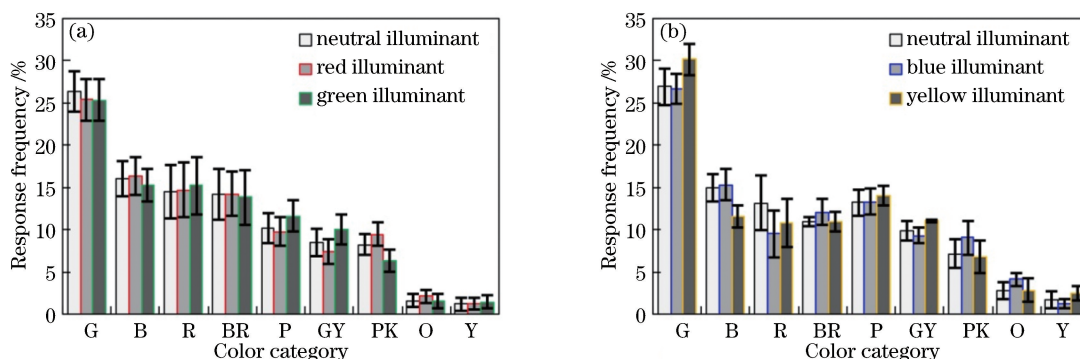


图 5 各颜色类别色卡数占总色卡数(240 个)的百分比。(a)红色和绿色光源实验中 7 个观察者的平均值;(b)蓝色和黄色光源实验中 5 个观察者的平均值。误差线表示观察者的均值的标准误差。G:绿色,B:蓝色,R:红色,BR:棕色,P:紫色,GY:灰色,PK:粉色,O:橙色,Y:黄色

Fig. 5 Response frequency of each color category. (a) Average data of 7 subjects in experiments which use red and green illuminants; (b) average data of 5 subjects in experiments which use blue and yellow illuminants. Error bars represent standard error of mean. G: green, B: blue, R: red, BR: brown, P: purple, GY: gray. PK: pink, O: orange, Y: yellow

图 6 所示为其中一个观察者的数据。图 6(a)~(d)中,浅色标志表示 240 个色卡在参考白光下的 CIE 1976  $u'v'$  色度值,标志的颜色代表该色卡在参考白光下由观察者给出的颜色分类,此处指观察者在第二次参考白光实验中给出的颜色分类,通过取所有被划分为同一颜色类别色卡的  $u'v'$  色度值的平均值,可得到该颜色类别的标准色度值  $u'_s v'_s$ 。深色标志表示 240 个色卡在红、绿、蓝、黄色 4 种光源下计算得到的 CIE 1976  $u'v'$  色度值,标志的颜色代表该色卡在彩色光源下由观察者给出的颜色分类,通过取所有被划分为同一颜色类别色卡的  $u'v'$  色度值的平均值,可得到该颜色类别的观察色度值

$u'_o v'_o$ 。很明显,当光源从参考白光向彩色光源变化时,所有色卡的色度值相应地发生变化,如图 6(a)~(d)中深色标志相对浅色标志发生了偏移,说明存在一定的颜色恒常性。其他观察者的数据均呈现出相同的趋势,即从参考白光变化到彩色光源时,各颜色类别区域均发生了偏移,由于篇幅限制,这里没有全部列出。

在图 6 所示数据基础上,根据(1)式,计算出每个观察者在 4 种彩色光源下各颜色类别上的颜色恒常性指数。图 7(a)为 4 种彩色光源下所有观察者对各颜色类别的平均颜色恒常性指数。值得注意的是,由于实验中只有 2 个观察者使用黄色,4 个观察

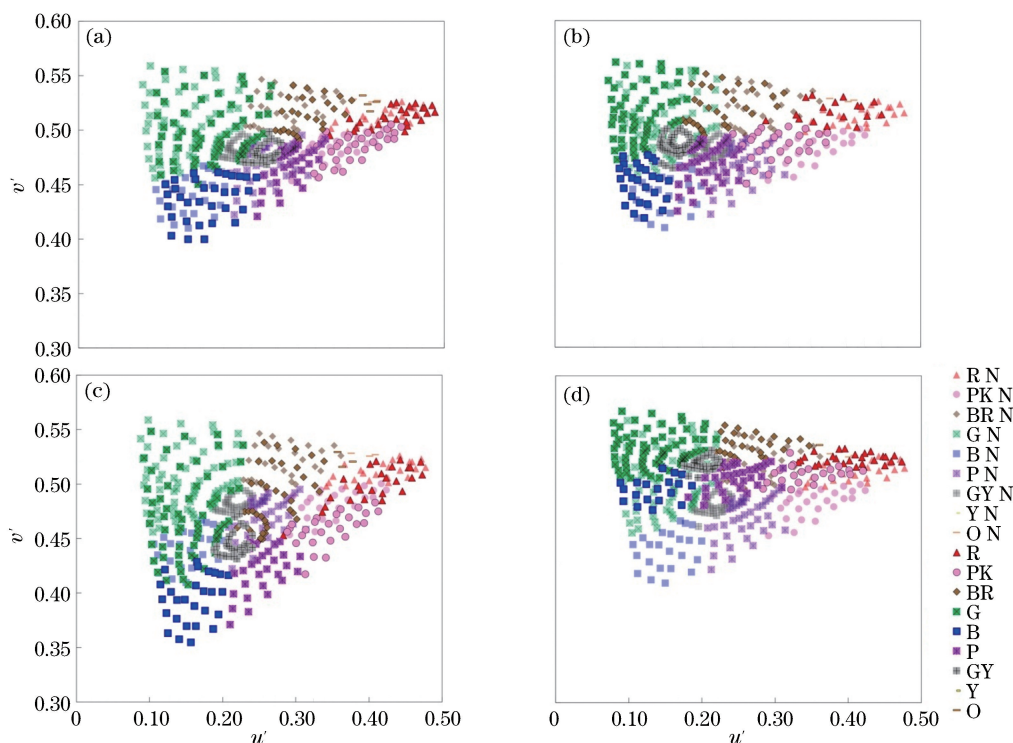


图 6 其中一个观察者在第二次参考白光下的分类结果与 4 种彩色光源下的分类结果的对比。(a)红色光源;(b)绿色光源;(c)蓝色光源;(d)黄色光源。在颜色类别后面加 N,表示参考白光下的颜色类别

Fig. 6 Comparison of the classification results under neutral illuminant and four chromatic illuminants for one subject.

(a) Red illuminant; (b) green illuminant; (c) blue illuminant; (d) yellow illuminant. Category name plus N denotes color category under the neutral illuminant

者使用橙色,因此黄色和橙色的数据为 2 个和 4 个观察者的平均值。由图中误差线可知,在绿色光源下的所有颜色类别上,各观察者之间的颜色恒常性指数差异非常小;在红色光源下,除了橙色,在其他颜色类别上,各观察者之间的差异也非常小;在蓝色和黄色光源下,各观察者之间在棕、红和橙色类别上的差异较大,其他类别上较小。

以往基于宽带光源的分类颜色恒常性研究<sup>[10]</sup>表明:在所有颜色类别上,最低的颜色恒常性指数为稍大于 0.6,图 7(a)中把 0.6 作为一个比较标准。由图中可看出,在所有光源下,灰、绿、蓝、紫和粉色的颜色恒常性指数均较高,大于或等于 0.6。棕、红、黄和橙色类别的颜色恒常性指数在红色和绿色光源下较高,大于或等于 0.6。在蓝色光源下,棕色类别的颜色恒常性指数低于 0.6;红色类别的颜色恒常性指数几乎为 0;黄色和棕色类别的颜色恒常性指数甚至为负值。在黄色光源下,棕、红和橙色的表现与蓝色光源下类似,而黄色类别表现不同,有较高的颜色恒常性指数。蓝色和黄色光源下,部分颜色类别的颜色恒常性指数几乎为 0 或者为负值,这是由于从参考白光变化到这两种彩色光源时,光谱变化所引起

的这些颜色类别质点的变化非常小。

图 7(b)为 4 种彩色光源下总的颜色恒常性指数。数据为所有颜色类别和观察者的平均值。由图中看出,蓝色和黄色光源下的颜色恒常性指数明显低于红色和绿色光源下。由误差线看出,蓝色和黄色光源下,各观察者之间的颜色恒常性指数差异较大,远大于红色和绿色光源。

图 8(a)为 4 种彩色光源下各颜色类别的平均角度偏移量。由图中可看出,在红色和绿色光源下,所有颜色类别的角度偏移量均较小。在蓝色光源下,棕、红、黄和橙色类别上的角度偏移量较大。在黄色光源下,棕、红和橙色类别上的角度偏移量较大。图 8(b)中蓝色和黄色光源下的角度偏移量明显大于红色和绿色光源。

图 7 和图 8 共同表明:在红色和绿色光源下,颜色恒常性在所有颜色类别上表现均较好;在蓝色光源下,颜色恒常性在棕、红、黄和橙色类别上表现较差;在黄色光源下,颜色恒常性在棕、红和橙色类别上表现较差。此外,4 种彩色光源下的颜色恒常性程度从大到小依次为:绿色光源、红色光源、黄色光源和蓝色光源。

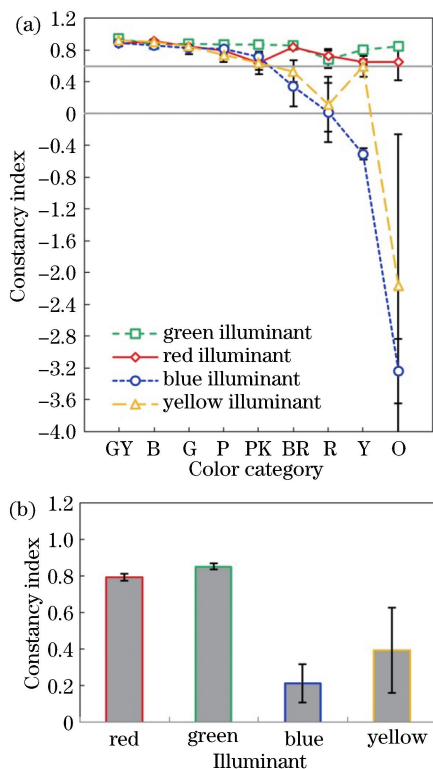


图 7 颜色恒常性指数。(a) 4 种彩色光源下各颜色类别上的恒常性指数；(b) 4 种彩色光源下总的恒常性指数。图 7(a) 和 7(b) 中的数据均为观察者的平均值。误差线表示观察者的均值的标准误差

Fig. 7 Color constancy index. (a) Constancy index of each color category under four chromatic illuminants; (b) overall indices under four chromatic illuminants. Data in Fig. 7(a) and Fig. 7(b) are average values of subjects. Error bars represent standard error of mean

## 5 分析与讨论

基于某一特定峰值波长和特定带宽的 RGB-LED 光源得到本文结果。实际中不同的 RGB-LED 光源的峰值波长和带宽都会有所不同，从而显色性也会不同。如果 RGB-LED 光源的显色性接近本文光源，则预计颜色恒常性表现也将与本文结果相似。这里主要讨论与本文光源显色性接近的 RGB-LED 光源的可能峰值波长范围，此处，保持带宽相一致。利用高斯分布模拟三种色光光谱，组合三种色光光谱使光源色度等于 D65 光源的色度。计算 240 个 Munsell 色卡在模拟光谱下的 CIE  $L^*a^*b^*$  值和本文光源所产生白光(色度值与 D65 光源的相同)下的 CIE  $L^*a^*b^*$  值，它们之间的色差  $\Delta E_{ab}^*$  为

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (3)$$

图 9(a) 为当绿光和红光 LED 的峰值波长与本

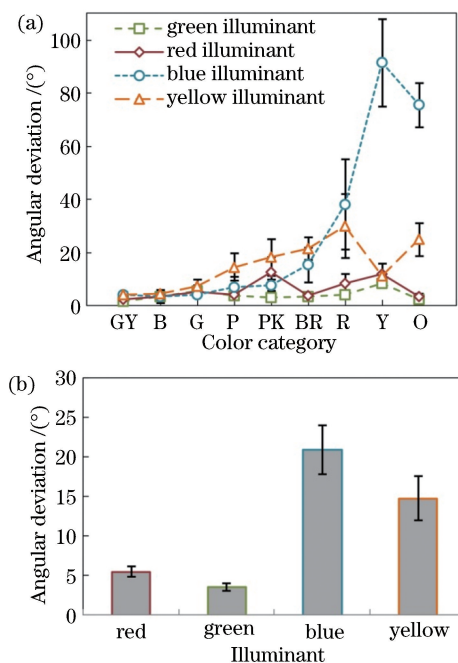


图 8 角度偏移量。(a) 4 种彩色光源下各颜色类别上的角度偏移量；(b) 4 种彩色光源下总的角度偏移量。图 8(a) 和 8(b) 中的数据均为观察者的平均值。误差线代表均值的标准误差

Fig. 8 Angular deviation. (a) Angular deviation for each color category under four chromatic illuminants; (b) overall angular deviations under four chromatic illuminants. Data in Fig. 8(a) and Fig. 8(b) are average values of subjects. Error bars represent standard error of mean

文 LED 光源相同(分别为 520 nm 和 625 nm)，蓝光 LED 的峰值波长取不同值时，240 个 Munsell 色卡在模拟光谱(混合光的色度值一直保持与 D65 光源的一致)和本文白光下色差的平均值。图中，当蓝光 LED 的峰值波长在 440~480 nm 之间时，240 个色卡上的平均色差都在 6 以内。其中，峰值波长在 440 nm 时，色差最大，接近于 6；在 470 nm 时最小，接近于 2。图 9(b) 为绿光 LED 的峰值波长取不同值时对应于 240 个色卡上的色差平均值。由图可看出，绿光 LED 的峰值波长的变化所引起的色差与蓝光 LED 相比较。只有峰值波长在 510, 515, 525, 530 nm 时，240 个色卡上的平均色差小于 6，其中在 515 nm 处，平均色差最小为 3。图 9(c) 为当红光 LED 的峰值波长取不同值时对应的平均色差。当峰值波长在 615, 620, 630 nm 时，色差小于 4；在 605, 610, 635, 640, 645 nm 时，平均色差在 4~6 之间。

根据色差与视觉感受之间的关系<sup>[18]</sup>，当色差



在 3~6 时,视觉感受为感觉到,可以接受;当色差小于 3 时,刚刚感觉到。结合图 9 中所示的结果,当蓝、绿、红光 LED 的峰值波长围绕本文 RGB-

LED 光源的峰值波长小范围变动时,预计对应的 RGB-LED 光源下的颜色恒常性表现将接近本文的结果。

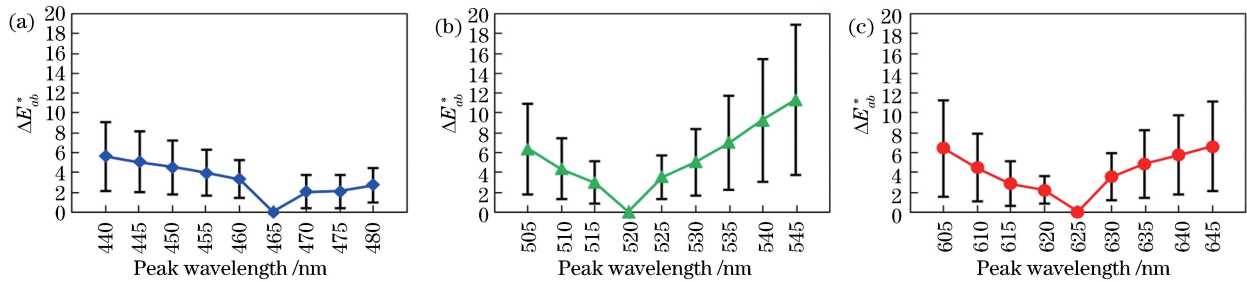


图 9 当蓝、绿、红光 LED 取不同峰值波长时,240 个 Munsell 色卡在模拟光谱和本文白光下的色差的平均值。

(a)蓝光 LED;(b)绿光 LED;(c)红光 LED。误差线代表标准差

Fig. 9 Average color difference between simulated spectra and the value under neutral illuminant in this study over 240 Munsell surfaces when the peak wavelengths of blue, green, and red LEDs are different. (a) Blue LED; (b) green LED; (c) red LED. Error bars represent standard deviations

## 6 结 论

RGB-LED 光源下的颜色恒常性取决于光源色度。红色和绿色光源下,颜色恒常性表现接近于传统宽带光源。蓝色光源下,棕、红、黄和橙色的颜色恒常性较差。黄色光源下,棕、红和橙色的颜色恒常性较差。蓝色和黄色光源下其他颜色类别上的颜色恒常性表现接近于传统宽带光源。该结果为 RGB-LED 光源在实际中的设计和应用提供了价值参考。在实际中需要特别注意,当 RGB-LED 光源为蓝色和黄色时,会引起部分颜色恒常性的缺失。本文研究结果是基于某一种具有特定峰值波长和带宽的 RGB-LED 光源得到的,如果其他 RGB-LED 光源的显色性与本文光源接近,则颜色恒常性表现预计与本文结果一致;如果显色性远差于本文光源,或者介于本文光源与宽带光源之间,则它们的颜色恒常性表现还需要进一步实验验证。

## 参 考 文 献

- [1] Zhang F Z, Xu H S, Wu X M, *et al.* Towards universal evaluation method for color quality of light sources [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35 (8): 0833001.  
章夫正, 徐海松, 吴晓玫, 等. 面向光源颜色质量普适评价方法的研究 [J]. *光学学报*, 2015, 35 (8): 0833001.
- [2] Lai C D, Zhuang Q R, Zhang X T, *et al.* Comparison of CQS and CRI for color rendering evaluation of light source [J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2017, 28(2): 46-51.  
赖传杜, 庄其仁, 张晓婷, 等. 显色指数 CQS 和 CRI

对光源显色性评价的差异分析 [J]. *照明工程学报*, 2017, 28(2): 46-51.

- [3] Whitehead L A, Mossman M A. A Monte Carlo method for assessing color rendering quality with possible application to color rendering standards [J]. *Color Research and Application*, 2012, 37 (1): 13-22.
- [4] Hashimoto K, Yano T, Shimizu M, *et al.* New method for specifying color-rendering properties of light sources based on feeling of contrast [J]. *Color Research and Application*, 2007, 32(5): 361-371.
- [5] Royer M P, Houser K W, Wilkerson A M. Color discrimination capability under highly structured spectra [J]. *Color Research and Application*, 2012, 37(6): 441-449.
- [6] Bodrogi P, Brückner S, Khanh T Q, *et al.* Visual assessment of light source color quality [J]. *Color Research and Application*, 2013, 38(1): 4-13.
- [7] McCann J J, McKee S P, Taylor T H. Quantitative studies in retinex theory a comparison between theoretical predictions and observer responses to the "color Mondrian" experiments [J]. *Vision Research*, 1976, 16(5): 445-458.
- [8] Foster D H. Review: color constancy [J]. *Vision Research*, 2011, 51(7): 674-700.
- [9] Judd D B, MacAdam D L, Wyszecki G, *et al.* Spectral distribution of typical daylight as a function of correlated color temperature [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1964, 54 (8): 1031-1040.
- [10] Olkkonen M, Hansen T, Gegenfurtner K R. Categorical color constancy for simulated surfaces [J]. *Journal of Vision*, 2009, 9(12): 6.
- [11] Olkkonen M, Witzel C, Hansen T, *et al.*

- Categorical color constancy for real surfaces [J]. Journal of Vision, 2010, 10(9): 16.
- [12] Delahunt P B, Brainard D H. Does human color constancy incorporate the statistical regularity of natural daylight?[J]. Journal of Vision, 2004, 4(2): 1.
- [13] Berlin B, Kay P. Basic color terms: their universality and evolution[M]. Berkeley: University of California Press, 1969.
- [14] Troost J M, de Weert C M M. Naming versus matching in color constancy [J]. Perception & Psychophysics, 1991, 50(6): 591-602.
- [15] Arend L E, Reeves A, Schirillo J, *et al.* Simultaneous color constancy: papers with diverse Munsell values[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1991, 8(4): 661-672.
- [16] Huang M, He R L, Guo C L, *et al.* Test and optimization of different color matching functions for different aged observers [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(3): 0333001.  
黄敏, 何瑞丽, 郭春丽, 等. 不同年龄观察者颜色匹配函数的测试及优化 [J]. 光学学报, 2018, 38(3): 0333001.
- [17] Vos J J. Colorimetric and photometric properties of a 2° fundamental observer [J]. Color Research & Application, 1978, 3(3): 125-128.
- [18] Liao N F, Shi J S, Wu W M. An introduction to digital color management system [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2009.  
廖宁放, 石俊生, 吴文敏. 数字图文图像颜色管理系统概论[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2009.