

激光与光电子学进展

RGB-LED 光源的峰值波长对其显色性的影响

马瑞青*

太原理工大学信息与计算机学院, 山西 太原 030024

摘要 RGB-LED光源的显色质量主要通过显色指数、色域、观察者的颜色辨别能力和物体颜色的饱和度等指标来评价,然而从标准照明体D65变化到一个真实RGB-LED光源(色温为6500 K),某一Munsell色卡所对应的色度不匹配区域还未得到深入研究。首先分别改变蓝、绿、红色LED光源的峰值波长,通过高斯分布函数来生成模拟的RGB-LED光源光谱;然后计算从标准照明体D65变化到一个真实RGB-LED光源(色温为6500 K),12个Munsell色卡所对应的色度不匹配区域;最后分析5个真实的RGB-LED光源上的数据。研究表明,色卡所对应的色度不匹配区域与RGB-LED光源的一般显色指数呈负相关,即RGB-LED光源的一般显色指数越大,色卡所对应的色度不匹配区域越小。

关键词 视觉光学; RGB-LED光源; 一般显色指数; 同色异谱体体积; 峰值波长

中图分类号 O432

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2333002

Effect of Peak Wavelengths of RGB-LED Light Source on Its Color Rendering Property

Ma Ruiqing*

College of Information and Computer, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China

Abstract The color rendering quality of RGB-LED light source is mainly evaluated by color rendering index, gamut, color discrimination ability of observer and object color saturation. However, the possible chromaticity mismatch range that all spectral reflectances metameric to one surface under standard illuminant D65 would form under a RGB-LED light source with correlated color temperature 6500 K has not been thoroughly studied. First, the peak wavelengths of blue, green, and red LED light source were changed respectively, and the simulated RGB-LED light source spectrum was generated by Gaussian distribution function. Then, chromaticity mismatch areas under RGB-LED light source formed by all spectral reflectances metameric to 12 Munsell surfaces under standard illuminant D65 were calculated. Finally, the data of five real RGB-LED light sources were analyzed. The results show that the chromaticity mismatch region corresponding to the Munsell color card was negatively correlated with the general color rendering index of RGB-LED light source, that is, the larger the general color rendering index of RGB-LED light source, the smaller the chromaticity mismatch region corresponding to the Munsell color card.

Key words visual optics; RGB-LED light source; general color rendering index; metamer mismatch volume; peak wavelength

OCIS codes 330.1715; 330.1730; 330.1690

收稿日期: 2021-02-23; 修回日期: 2021-03-23; 录用日期: 2021-04-06

基金项目: 国家自然科学基金(61705011)、山西省应用基础研究计划青年基金(201901D211068)

通信作者: *mrq153101@163.com

1 引言

LED(Light-Emitting Diode)光源由于其具有寿命长和效率高等优势而被广泛地应用在生产生活中。白光LED、RGB-LED和多通道LED光源均可以产生不同色温的白光,其中RGB-LED光源和多通道LED光源能够精确控制光源的色度。多通道LED光源的显色质量较高,经常被用来模拟日光光谱^[1],但价格昂贵。RGB-LED光源可通过调整红、绿、蓝三色芯片的发光强度来合成任意色度的光源,且价格比多通道LED光源低。

国际照明委员会(CIE)使用一般显色指数(R_a)来度量光源的显色质量,与其他两种LED光源以及传统光源相比,RGB-LED光源的显色指数相对较小^[2-3]。但文献^[4-6]结果表明,单一的显色指数并不能完全体现RGB-LED光源的显色质量。虽然观察者在RGB-LED光源下的颜色的辨别能力降低^[4],但该光源可产生更大的色域^[4],使得物体颜色的饱和度更高^[5],颜色更鲜艳,观察者也因此更偏好RGB-LED光源^[6-7]。为了通过RGB-LED光源更好地合成不同色温的白光,一些研究以显色性^[8-9]、色温^[9]和光谱效率^[8,10]等指标来优化光源的光谱。

RGB-LED光源产生的不同色温的白光光谱是由三个窄带光谱组成的。两个具有不同光谱反射比的样品在D65光源下具有相同的三刺激值,但在RGB-LED光源所产生的白光下会出现色度不匹配的情况。这就是光源变化所引起的同色异谱现象,两个具有不同光谱反射比的物体在第一种光源下呈现出相同的颜色,而在第二种光源下呈现出不同的颜色。光源变化所引起的同色异谱现象主要以标准照明体D65为参比照明体,以照明体A和F为待测照明体进行研究,采用CIE提出的同色异谱指数来表示同色异谱程度,该指数计算的是两个样品在第二种光源下的色差^[11-12]。但是,对于给定的标准光源,如标准照明体D65下的一个三刺激值,所有产生此三刺激值的光谱反射比在RGB-LED光源下可能产生的三刺激值还尚未得到研究。这样的三刺激值集合是一个凸包,被称为同色异谱体^[13]。Logvinenko等^[14]选取最优的光谱反射比来计算边界上的点,可以确定同色异谱体;随后,他们采用这种方法计算了在参考白光变化到彩色光源(红、绿、蓝和黄色光源)的情况下,Munsell色卡所对应的同色异谱体,用来研究同色异谱对颜色恒常性的影响,其

中彩色光源由安装彩色滤光片的投影仪产生^[15]。

本文主要关注从标准照明体D65变化到RGB-LED光源,12个Munsell色卡所对应的同色异谱体,以及红、绿、蓝三色芯片的峰值波长和光源的一般显色指数与同色异谱体体积之间的关系。

2 研究方法

2.1 RGB-LED光源光谱的模拟

文献^[16]中的分类颜色恒常性实验是在真实的RGB-LED光源下进行的。蓝色、绿色和红色LED光源的峰值波长分别为465,520,625 nm,光谱的半峰全宽(FWHM)分别为40,45,36 nm。为了使研究结果可以更好地应用在实际中,在生成模拟光谱的过程中,保持三色芯片的半峰全宽与上述RGB-LED光源一致,峰值波长分别围绕465,520,625 nm来改变,模拟光谱通过高斯分布函数来产生,最终模拟的RGB-LED光源光谱所对应的色度值与标准照明体D65一致。

保持绿色和红色LED光源的峰值波长(分别为520 nm和625 nm)不变,当蓝色LED光源的峰值波长取值为430,440,450,460,470 nm时,对应的5个模拟RGB-LED光源光谱如图1(a)所示。保持蓝色和红色LED光源的峰值波长(分别为465 nm和625 nm)不变,当绿色LED光源的峰值波长取值为510,530,540,550,560 nm时,对应的5个模拟RGB-LED光源光谱如图1(b)所示。保持蓝色和绿色LED光源的峰值波长不变,当红色LED光源的峰值波长取值为600,610,620,630,640 nm时,对应的5个模拟RGB-LED光源光谱如图1(c)所示。

为了对模拟光源的分析结果进行比较,本文还对文献^[16]中的5个真实RGB-LED光源进行分析,5个蓝色LED光源的峰值波长范围为452~468 nm,绿色LED光源的峰值波长范围为516~524 nm,红色LED光源的峰值波长范围为624~632 nm,对应的显色指数范围为33~56,其光谱分布、峰值波长和显色指数值参考文献^[16]。

2.2 同色异谱体的计算

采用Logvinenko等^[14]提出的方法计算从标准照明体D65变化到RGB-LED光源,12个Munsell色卡所对应的同色异谱体。12个Munsell色卡分别为5R5/6、2.5YR5/6、10YR5/6、7.5Y5/6、5GY5/6、2.5G5/6、10B5/6、7.5PB5/6、5P5/6、2.5RP5/6、10RP5/6和N5/(光谱反射比为19.77%),上述色卡

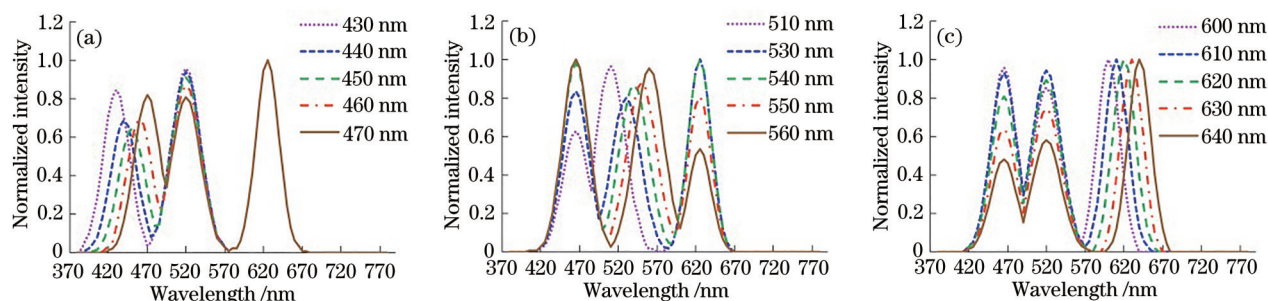


图 1 RGB-LED 在不同情况下的模拟光源光谱。(a)蓝色 LED 的峰值波长取不同值;(b)绿色 LED 的峰值波长取不同值;(c)红色 LED 的峰值波长取不同值

Fig. 1 Simulated light source spectra of RGB-LED under different conditions. (a) Peak wavelength of blue LED is different; (b) peak wavelength of green LED is different; (c) peak wavelength of red LED is different

均在文献[17]的非对称颜色匹配实验中用来研究颜色恒常性,色卡的色调基本均匀分布在整个 Munsell 色环上。Logvinenko 等^[14]首先通过阶跃函数来选取最优的光谱反射比,然后计算同色异谱体边界上的点,最后由边界点来确定同色异谱体。

具体计算过程:针对每个 Munsell 色卡,首先通过 $m=5$ 的阶跃函数来得到大量随机的 5-转折点光谱反射比,然后从中选择 1000 个与该色卡在 D65 光源下形成同色异谱的光谱反射比,它们对应的三刺激值 (X_r, Y_r, Z_r) 与 Munsell 色卡的三刺激值 (X_0, Y_0, Z_0) 满足

$$\sqrt{(X_r - X_0)^2 + (Y_r - Y_0)^2 + (Z_r - Z_0)^2} < 1. \quad (1)$$

1000 个 5-转折点光谱反射比在 RGB-LED 光源下的三刺激值可以形成同色异谱体的边界,将其按照 $x = X/(X + Y + Z)$ 和 $y = Y/(X + Y + Z)$ 的函数关系投影到 CIE1931 的色度图中,能够形成色度不匹配区域^[14],其中 x 和 y 为 CIE1931 色度图坐标, X 、 Y 和 Z 为 CIE 色度系统的三刺激值。图 2 为从标准照明体 D65 变化到一个真实 RGB-LED 光源, Munsell 色卡 N5/所对应的色度不匹配区域,其中圆点表示 Munsell 色卡 N5/在 RGB-LED 光源下的色度值。

3 研究结果

图 3 为 15 个模拟 RGB-LED 光源的一般显色指数,图中用圆圈标出了 5 个真实 RGB-LED 光源的一般显色指数。一般显色指数是在色温为 6500 K 的情况下,对国际照明委员会规定的 8 种彩色样品的特殊显色指数取平均值计算得到。从图 3(a) 可以看到,当蓝色 LED 光源的峰值波长从 430 nm 变

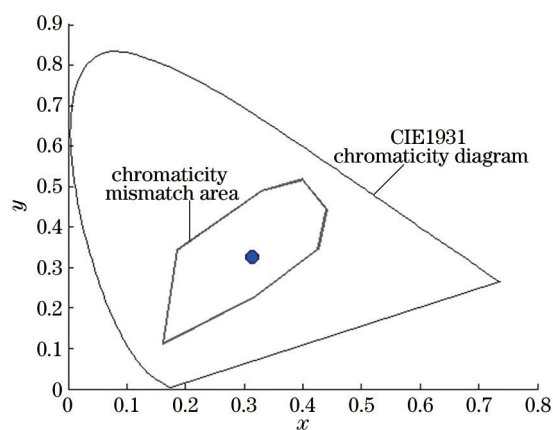


图 2 从标准照明体 D65 变化到一个真实 RGB-LED 光源, Munsell 色卡 N5/所对应的色度不匹配区域

Fig. 2 Chromaticity mismatch area of Munsell surface N5/ when a standard illuminant D65 was changed to a real RGB-LED light source

化到 470 nm 时,一般显色指数变化较小,基本维持在 40 左右。从图 3(b) 可以看到,当绿色 LED 光源的峰值波长为 510 nm 时,一般显色指数最小为 23,当波长从 510 nm 变化到 550 nm 时,显色指数逐渐增大,在 550 nm 处达到最大为 85,在 560 nm 处有所下降。从图 3(c) 可以看到,当红色 LED 光源的峰值波长从 600 nm 变化到 640 nm 时,一般显色指数从 74 逐渐下降到 19。从图 3 还可以看到,5 个真实 RGB-LED 光源的一般显色指数均较低。

苏治平等^[8]在色温为 5500 K 的条件下优化光谱,发现在三基色峰值波长分别为 465, 545, 615 nm 的情况下光源具有较大的显色指数。从图 3 可以看到,当三基色峰值波长取以上这些值时,对应的光源指数确实较大。杨华等^[18]系统研究了 6 种单色 LED 光源的峰值波长对白光(色温为 5500 K)显色指数的影响,所得结果与本文基本对应。

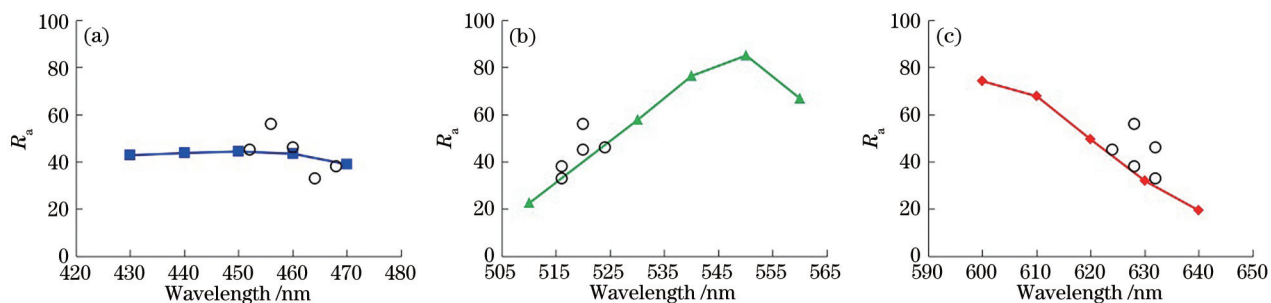


图3 模拟RGB-LED光源在不同情况下的一般显色指数。(a)蓝色LED的峰值波长取不同值;(b)绿色LED的峰值波长取不同值;(c)红色LED的峰值波长取不同值

Fig. 3 General color rendering indices of simulated RGB-LED light sources under different conditions. (a) Peak wavelength of blue LED is different; (b) peak wavelength of green LED is different; (c) peak wavelength of red LED is different

在从标准照明体 D65 变化到 15 个模拟 RGB-LED 光源的情况下, 12 个 Munsell 色卡所对应的同色异谱体体积与模拟光源的一般显色指数之间的关系如图 4(a) 所示。从图 4(a) 可以看到, 各色卡对

应的同色异谱体体积随着光源一般显色指数的增加而减小。相关系数 r 在 12 个色卡上的取值范围为 $-0.69 \sim -0.87$, 表明各色卡对应的同色异谱体体积与光源的一般显色指数呈负相关。

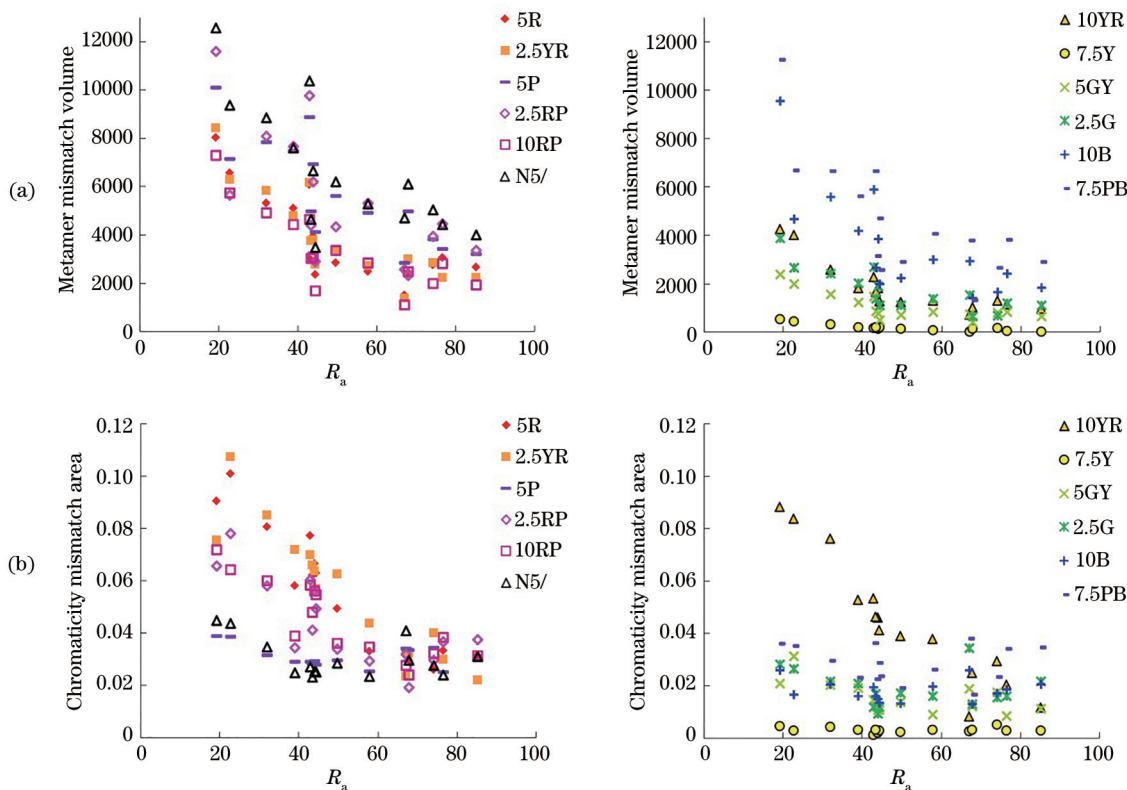


图4 模拟RGB-LED光源的一般显色指数与12个Munsell色卡对应的同色异谱体参数之间的关系。(a)同色异谱体体积;(b)色度不匹配区域面积

Fig. 4 Relationship between general color rendering indices of simulated RGB-LED light sources and parameters of metamer mismatch body that 12 Munsell color surfaces correspond to. (a) Metamer mismatch volume; (b) size of chromaticity mismatch area

12 个 Munsell 色卡所对应的色度不匹配区域面积与模拟光源的一般显色指数之间的关系如图 4(b) 所示。色卡 7.5Y、2.5G、10B、7.5PB、5P 和

N5/的色度不匹配区域面积与光源的一般显色指数不具有相关性, 色卡 5GY 上的相关性较弱 ($r = -0.6$), 其他色卡上二者存在较强的负相关关系,

相关系数 r 的取值范围为 $-0.77 \sim -0.94$ 。在与一般显色指数的关系方面,色度不匹配区域面积与同色异谱体体积的表现稍有不一致,这是因为当同色异谱体投影到 CIE1931 色度图上时未考虑亮度信息。对图 4(b) 进行仔细观察可以发现,与一般显色指数不具有相关性的色卡,其色度不匹配区域面积均较小,且随着一般显色指数的增加也不发生大的变化。

12 个色卡的平均同色异谱体体积和平均色度不匹配区域面积与模拟 RGB-LED 光源的一般显色指数之间的关系如图 5 所示,其中误差线表示平均值的标准误差,直线表示数据的线性拟合线。从图 5 可以看到,同色异谱体体积和色度不匹配区域面积均随着一般显色指数的增加而减小,二者均与光源的一般显色指数呈较强的负相关(r 分别为 -0.81 和 -0.90)。

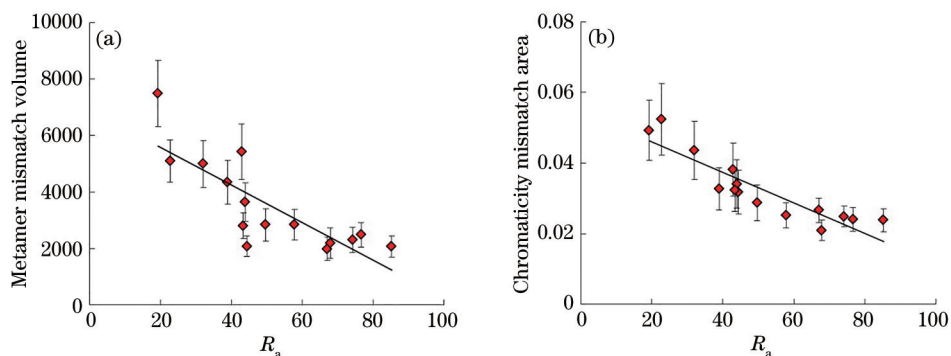


图 5 模拟 RGB-LED 光源的一般显色指数与 12 个 Munsell 色卡上平均的同色异谱体参数之间的关系。(a) 同色异谱体体积; (b) 色度不匹配区域面积

Fig. 5 Relationship between general color rendering indices of simulated RGB-LED light sources and parameters of metamer mismatch body averaged over 12 Munsell surfaces. (a) Metamer mismatch volume; (b) size of chromaticity mismatch area

在标准照明体 D65 变化到 5 个真实 RGB-LED 光源的情况下,12 个 Munsell 色卡所对应的同色异谱体体积和色度不匹配区域面积与光源的一般显色指数之间的关系如图 6 所示。从图 6 可以看到,同色异谱体体积与光源的一般显色指数呈负相关,相关系数的取值范围为从色卡 5P 所对应的 $r = -0.65$ 到色卡 7.5Y 所对应的 $r = -0.97$ 。除了色卡 10B ($r = -0.18$),其他 Munsell 色卡所对应的色

度不匹配区域面积与光源的一般显色指数均呈负相关,相关系数的取值范围为从色卡 2.5RP 所对应的 $r = -0.61$ 到色卡 5R 和 2.5YR 所对应的 $r = -0.97$ 。12 个色卡的平均同色异谱体体积和平均色度不匹配区域面积与真实 RGB-LED 光源的一般显色指数之间的关系如图 7 所示。从图 7 可以看到,二者与光源的一般显色指数均呈较强的负相关(r 分别为 -0.82 和 -0.98)。

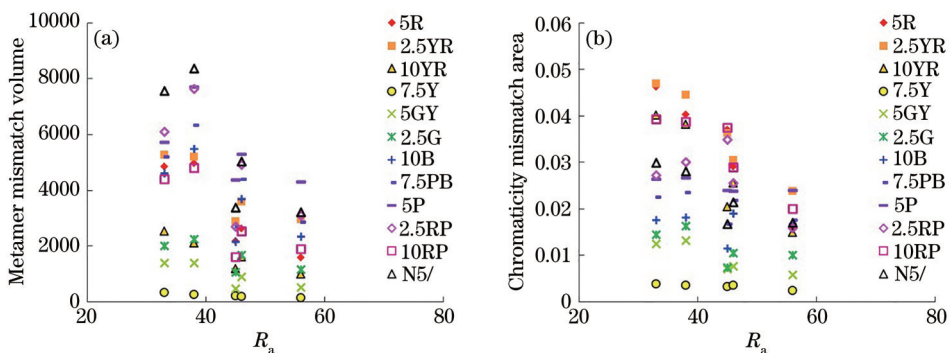


图 6 真实 RGB-LED 光源的一般显色指数与 12 个 Munsell 色卡对应的同色异谱体参数之间的关系。(a) 同色异谱体体积; (b) 色度不匹配区域面积

Fig. 6 Relationship between general color rendering indices of real RGB-LED light sources and parameters of metamer mismatch body that 12 Munsell surfaces correspond to. (a) Metamer mismatch volume; (b) size of chromaticity mismatch area

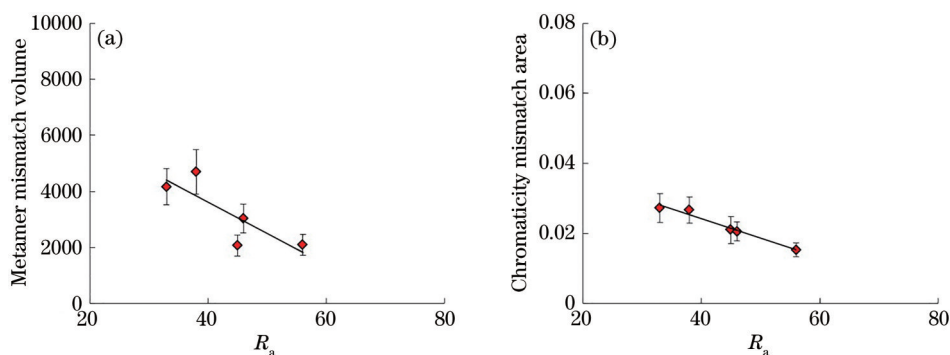


图7 真实RGB-LED光源的一般显色指数与12个Munsell色卡上平均的同色异谱体参数之间的关系。(a)同色异谱体体积；(b)色度不匹配区域面积

Fig. 7 Relationship between general color rendering indices of real RGB-LED light sources and parameters of metamer mismatch body averaged over 12 Munsell surfaces. (a) Metamer mismatch volume; (b) size of chromaticity mismatch area

4 分析与讨论

在标准照明体D65变化到RGB-LED光源的情况下,色卡所对应的同色异谱体体积与RGB-LED光源的一般显色指数呈负相关是符合预期的。一般显色指数越小,色卡在RGB-LED光源和标准照明体D65下的色差越大,那么所有在标准照明体D65下形成同色异谱的色卡在RGB-LED光源下也会产生颜色差别更大的其他颜色,则对应的同色异谱体体积就会更大。研究结果还表明,色度不匹配区域面积与RGB-LED光源的一般显色指数在色卡7.5Y、2.5G、10B、7.5PB和5P上无相关关系。为了说明产生这一结果的原因,本文计算了240个明度值为5/,彩度值为/6,且包含所有色调的Munsell色卡在标准照明体D65和RGB-LED光源下的色差 ΔE_{ab}^* ,色差 ΔE_{ab}^* 是在CIE1976 $L^*a^*b^*$ 色空间中计算得到的,其中 L^* 表示明度, a^* 和 b^* 表示色度, a^* 表示红/绿, b^* 表示蓝/黄。色差的表达式为

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

式中: ΔL^* 表示色卡在标准照明体D65和RGB-LED光源下 L^* 值之间的差异; Δa^* 为 a^* 值之间的差异; Δb^* 为 b^* 值之间的差异。图8为240个Munsell色卡在模拟和真实RGB-LED光源所产生的光源(色温为6500 K)与标准照明体D65之间的色差 ΔE_{ab}^* ,其中横坐标上的色卡从5R开始按Munsell色环的顺时针排序,依次为5R,7.5R,10R,2.5YR,5YR,7.5YR, ..., 10RP,2.5R,5R。色差值越大,表示色卡在RGB-LED光源下的色度值与标准照明体D65的差距越大,RGB-LED光源的显色性越差。

从图8(a)可以看到,当蓝色LED光源的峰值波长取不同值时,5个模拟RGB-LED光源所对应的色差值曲线非常接近,说明蓝色LED光源峰值波长的改变对光源显色性的影响较小;色差值在两处达到了最小,这两处大概对应色卡10Y和10PB,色差在2.5YR、2.5G到2.5B这些色卡上较大。从图8(b)可以看到,当绿色LED光源的峰值波长取不同值时,5个模拟RGB-LED光源所对应的色差值曲线差异较大;当峰值波长为540 nm和550 nm时,光源可获得相当小的色差;当峰值波长为530 nm和560 nm时,色差有所增大;当峰值波长为510 nm时,色差变得相当大;当色差较大时,色差在所有色卡上所呈现的趋势与图8(a)相似。从图8(c)可以看到,色差在240个色卡上的变化趋势也与图8(a)相似;当红色LED光源的峰值波长从600 nm逐渐增加到640 nm时,色卡10Y和10PB所对应的色差几乎没有发生变化,其他色卡上的色差逐渐增大。从图8(d)可以看到,5个真实RGB-LED光源下色差在色卡上的变化趋势与图8(a)相似。

从图8可以看到,色卡7.5Y、2.5G、10B、7.5PB和5P所对应的色差值一直较小,说明RGB-LED光源对这些色卡的显色性一直较好,不会随着光源三色芯片峰值波长的变化而产生较大变化,所以它们的色度不匹配区域面积也较小,不会随着光源一般显色指数的变化而产生较大变化。

本文在固定三色芯片带宽的前提下,研究了三色芯片峰值波长对RGB-LED光源显色性的影响。三色芯片的带宽会对RGB-LED光源的显色性产生较大影响的原因^[5]:带宽越小,RGB-LED光源照射下的色卡颜色将越向三色芯片峰值波长

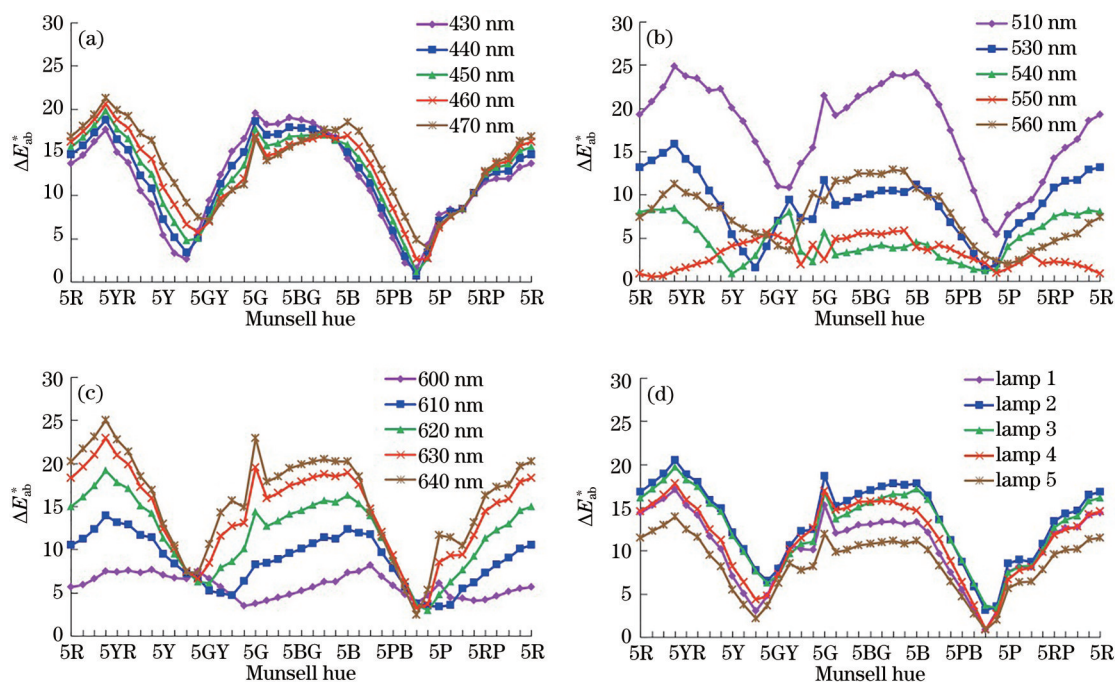


图 8 240 个 Munsell 色卡在标准照明体 D65 与模拟或真实 RGB-LED 光源之间的色差。(a) 模拟的蓝色 LED 的峰值波长取不同值; (b) 模拟的绿色 LED 的峰值波长取不同值; (c) 模拟的红色 LED 的峰值波长取不同值; (d) 标准照明体 D65 与 5 个真实 RGB-LED 光源之间的色差

Fig. 8 Color differences of 240 Munsell surfaces between standard illuminant D65 and simulated or real RGB-LED light sources. (a) Peak wavelength of blue LED of simulated light source is different; (b) peak wavelength of green LED of simulated light source is different; (c) peak wavelength of red LED of simulated light source is different; (d) color differences between standard illuminant D65 and real RGB-LED light sources

所在的色调方向偏移; 带宽增大会提高 RGB-LED 光源的显色性, 光源照射下的色卡颜色将向标准照明体的颜色靠近。

5 结 论

RGB-LED 光源在生产 and 生活中应用广泛, 但对其显色质量的评价主要集中于显色指数、饱和度和观察者偏好等, 样品在 RGB-LED 光源下的同色异谱不匹配问题还未得到深入研究。本文从标准照明体 D65 变化到一个真实 RGB-LED 光源, 计算了某一 Munsell 色卡所对应的色度不匹配区域, 分析了不同 Munsell 色卡的色度不匹配区域面积与 RGB-LED 光源的一般显色指数之间的关系。研究结果建立了 RGB-LED 光源三色芯片的峰值波长、一般显色指数和色度不匹配区域面积三者之间的关系, 一方面可为 RGB-LED 光源的设计提供参考依据, 另一方面可为基于 Munsell 色卡的颜色视觉研究提供参考依据。值得注意的是, 本文得到的色度不匹配区域面积是理论上最大的值, 而观察者实际感知到的值还有待进一步通过视觉心理物理学

实验来研究。

参 考 文 献

- [1] Wang H M, Tang F, Xue P. A solar spectrum synthesis method based on monochrome LED[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(9): 093004.
王宏民, 唐帆, 薛萍. 基于单色 LED 的太阳光谱合成方法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(9): 093004.
- [2] Li C, Ronnier Luo M, Li C J, et al. The CRI-CAM02UCS colour rendering index[J]. Color Research & Application, 2012, 37(3): 160-167.
- [3] Mahler E, Ezrati J J, Viénot F. Testing LED lighting for colour discrimination and colour rendering [J]. Color Research & Application, 2009, 34(1): 8-17.
- [4] Royer M P, Houser K W, Wilkerson A M. Color discrimination capability under highly structured spectra[J]. Color Research & Application, 2012, 37(6): 441-449.
- [5] van der Burgt P, van Kemenade J. About color rendition of light sources: the balance between

- simplicity and accuracy[J]. *Color Research & Application*, 2010, 35(2): 85-93.
- [6] Boissard S, Fontoynt M. Optimization of LED-based light blendings for object presentation[J]. *Color Research & Application*, 2009, 34(4): 310-320.
- [7] Zhou M X, Zhu D Q, Liao X Y. Relationship between spectrum and color gamut area of LED light sources[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(23): 232302.
周孟欣, 朱大庆, 廖欣怡. LED光源的光谱与色域面积关系[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(23): 232302.
- [8] Su Z P, Chen Y, Guo C W, et al. Study on color matching of multi-chromatic white LED[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2013, 34(6): 971-974.
苏治平, 陈宇, 郭春威, 等. 多基色白光LED的配色研究[J]. *半导体光电*, 2013, 34(6): 971-974.
- [9] Tian H J, Hu Y, Chen T, et al. Spectral optimization of a mixed white light-emitting diode (LED) cluster comprising a red/green/blue/cyan/yellow/warm white LED[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(8): 0823001.
田会娟, 胡阳, 陈陶, 等. 基于红/绿/蓝/青/黄/暖白6色LED的白光光谱优化方法[J]. *光学学报*, 2020, 40(8): 0823001.
- [10] Yao Q. Spectral efficiency performance optimization research on three-chips of LED[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(8): 083003.
姚其. 三芯片LED光谱效率性能优化研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(8): 083003.
- [11] Zhang F Z, Xu H S, Feng H. Spectral matching method for improving metamerism quality of LED daylight simulator[J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2017, 28(2): 23-27.
章夫正, 徐海松, 丰恒. 提升LED日光模拟器同色异谱质量的光谱匹配方法[J]. *照明工程学报*, 2017, 28(2): 23-27.
- [12] Gu H T. Evaluation of measuring indices and the lighting quality of LEDs[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
顾海婷. LED光源照明品质及评价指数研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [13] Wyszecki G, Stiles W S. *Color science: concepts and methods, quantitative data and formulae*[M]. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 1982.
- [14] Logvinenko A D, Funt B, Godau C. Metamer mismatching[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2014, 23(1): 34-43.
- [15] Logvinenko A D, Funt B, Mirzaei H, et al. Rethinking colour constancy[J]. *PLoS One*, 2015, 10(9): e0135029.
- [16] Ma R Q, Liao N F, Yan P F, et al. Categorical color constancy under RGB-LED light sources[J]. *Color Research & Application*, 2018, 43(5): 655-674.
- [17] Ma R Q, Kawamoto K I, Shinomori K. Color constancy of color-deficient observers under illuminations defined by individual color discrimination ellipsoids[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2016, 33(3): A283-A299.
- [18] Yang H, Yang Y M, Li Y, et al. Effect of LED peak wavelength on multi-spectral combination white light color parameters[J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2020, 31(1): 31-35, 107.
杨华, 杨宇铭, 李燕, 等. LED峰值波长对多光谱组合白光色参数的影响[J]. *照明工程学报*, 2020, 31(1): 31-35, 107.