

颜色匹配函数 CMFs 研究进展

陈小莹, 孙瑞霞, 程凝璇, 蔡圣燕

(天津科技大学 轻工科学与工程学院, 天津 300457)

摘要: **目的** 综述国内外获取颜色匹配函数的研究方法和进展, 提出今后的发展趋势和研究方向, 以期获取个性化颜色匹配函数的深入研究提供参考。**方法** 概述颜色匹配函数的 2 种获取方法, 对影响观察者颜色匹配函数的众多因素进行分析和梳理, 对国内外已发表的颜色匹配函数进行分类介绍, 总结目前研究所面临的挑战和未来的发展方向。**结论** 建立个性化的颜色匹配函数是个复杂的过程, 需要将颜色科学、视觉生理学和心理物理学等学科结合才能够深入研究个性化颜色匹配函数。

关键词: 颜色匹配函数; 颜色匹配实验; 视觉模型; 生理因素; 个性化

中图分类号: TS01 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2021)17-0197-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.17.026

Research Progress of Color Matching Functions

CHEN Xiao-ying, SUN Rui-xia, CHENG Ning-xuan, CAI Sheng-yan

(Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China)

ABSTRACT: This paper aims to review the research techniques and progress of color matching functions at home and abroad, and puts forward the development trend and future research directions, so as to provide some reference for further research of personalized color matching functions. Firstly, the two techniques for obtaining color matching functions are introduced. Then the factors that affect the observer's color matching functions are analyzed and summarized. The color matching functions published at home and abroad are introduced according to their classification. At last, the current challenges and future development trends of color matching function researches are summarized. Establishing a personalized color matching function is a complicated process, and it is necessary to combine disciplines such as color science, visual physiology, and psychophysics to study personalized color matching functions in depth.

KEY WORDS: color matching function; color matching experiment; visual model; physiological factors; personalized

颜色匹配函数 (Color Matching Function, CMF) 是匹配等能光谱中各单色光所需要的红绿蓝三原色色光的数量, 是目前颜色度量和计算的基础数据^[1-2]。颜色匹配函数是匹配各光谱色所需要的三刺激值, 因此也称为光谱三刺激值。国际照明委员会 (CIE) 于 1931 年和 1964 年相继推出了标准视场和大视场条件下人群平均的颜色匹配函数, 广泛应用于颜色度量和计算。实际上在色觉正常的观察者之间存在着一定程度的差异, 这种差异会导致观察者同色异

谱现象。观察者同色异谱指由于不同观察者个体颜色视觉特性差异所引起的, 在一个观察者眼里具有相同色貌的 2 个色样对另一观察者来说却不相同的一种现象^[3]。导致个体视觉特性差异的原因有很多, 如观察者相关的生理心理因素, 如锥细胞光谱响应、年龄、性别、种族、个人喜好等各方面因素都会对颜色感觉产生影响^[4-6]。研究表明, 观察者颜色匹配函数的个性差异被低估^[7]。随着液晶显示器 LCD、发光二极管 LED、有机发光半导体 OLED 和激光等新开发的窄带

收稿日期: 2020-12-18

作者简介: 陈小莹 (1994—), 女, 天津科技大学硕士生, 主攻颜色科学与技术。

通信作者: 蔡圣燕 (1973—), 女, 博士, 天津科技大学副教授, 主要研究方向为颜色科学与技术、印刷图像质量检测。

光谱显示设备的出现,观察者同色异谱现象越来越凸显^[8],且这种现象目前还没有在颜色要求严格的工业应用上得到重视^[9],这将会促使个性化颜色匹配函数研究的深入开展。

文中拟总结颜色匹配函数的获取方法以及目前已发表的颜色匹配函数,并对其影响因素进行系统分析,以期为今后个性化颜色匹配函数的深入研究提供参考。

1 颜色匹配函数的获取方法

目前颜色匹配函数的获取方法可分为2类:直接通过颜色匹配实验得到;利用视觉模型进行估计。

1.1 颜色匹配实验

最基础的颜色匹配实验见图1,包括目标色光部分(等能光谱各单色光)、三原色混合部分(可调节比例)和视场部分。观察者通过调节红、绿、蓝三色光的强度改变混合光的颜色,直到2个区域的分界线消失,即认为红绿蓝混合光与目标色光匹配^[1]。由于光谱色纯度高,三原色混合无法实现匹配,因此需要将三原色之一加到光谱色一侧,见图2a^[10]。由于该方法匹配最大饱和度的光谱色,所以称为最大饱和度法。

颜色匹配实验的另一种方法是麦克斯韦方法,见图2b^[10-11]。视场一侧是固定白光,另一侧是待匹配的单色光和三原色中的任意2种色光,通过调节三者

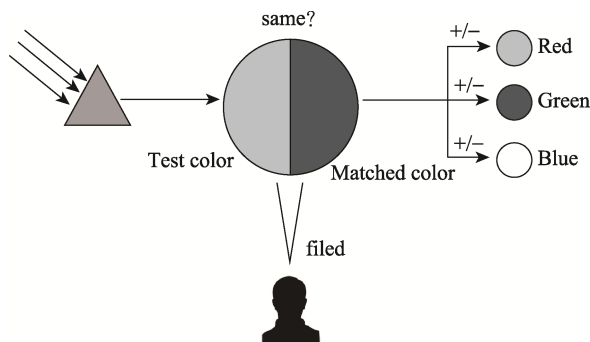


图1 最基础的颜色匹配实验
Fig.1 Most basic color matching experiment

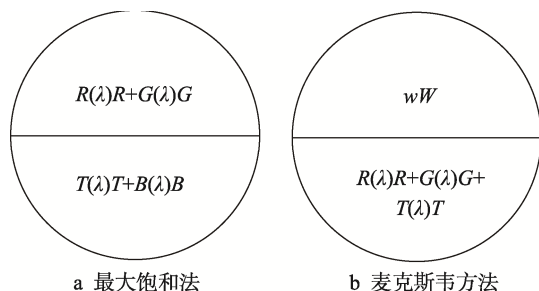


图2 匹配实验的2种方法
Fig.2 Two methods of matching experiments

比例达到与白光的匹配。这种方法使观察者一直匹配白色,能够保持眼睛的适应状态不变,理论上具有更大优势。研究表明,这2种方法获得的颜色匹配函数数据存在一定差异^[12]。目前使用较多的是最大饱和度法,CIE 1931-RGB系统标准色度观察者和CIE 1964补充色度观察者都采用最大饱和度法获得。

颜色匹配实验是获取颜色匹配函数的直接方法,但需要专门仪器,且需要进行相当多次的颜色匹配,对于个体颜色匹配函数的获取不甚方便。

1.2 视觉模型法

视觉模型法需要为数不多的颜色匹配就可以估计观察者视觉模型的生理参数。视觉模型生理参数主要与人眼中晶状体色素、黄斑色素和视细胞感光色素等密切相关。这3种色素有不同的光谱响应能力,受众多因素的影响。

1.2.1 晶状体色素

年龄是影响晶状体差异的最主要因素。有研究表明晶状体光学密度变化有一半由年龄引起,并且随着年龄增长而增长,60岁后增长更大,所以年轻人与老年人的颜色感觉存在较大差异^[13-15]。另外吸烟和糖尿病也会导致晶状体光学密度发生变化。吸烟使晶状体产生氧化作用,从而增加晶状体光学密度,同时也导致晶状体变脆,这种改变是不可逆的^[16]。糖尿病患者的高血浆葡萄糖水平会加速晶状体蛋白质的糖基化,加速晶状体变黄^[17]。有研究表明,角膜炎和白内障等疾病也会影响晶状体光学密度^[18]。

1.2.2 黄斑色素

黄斑色素在视网膜上分布不均匀,主要集中在中央凹,周围分布得较少^[19]。黄斑色素光学密度(MPOD)与视场、饮食密切相关^[20]。叶黄素和玉米黄素合成黄斑色素的主要原料,因此它们的摄入量直接影响黄斑色素光学密度,且成正比^[21-22]。

除受到视场、饮食的影响外,种族、性别和体脂百分比等也会影响黄斑色素光学密度。Howell等^[23]比较了亚洲人和白种人的样本,发现亚洲人的黄斑色素光学密度(MPOD)高于白人;Lannacone等^[24]发现白人的MPOD高于黑人。男性MPOD通常高于女性,因为男性运输叶黄素和玉米黄质的能力比女性更强^[23]。另外,体脂百分比增加会降低黄斑色素光学密度,因为脂肪组织会与视网膜争夺叶黄素和玉米黄质^[25]。

1.2.3 感光色素

晶状体和黄斑是视觉通道中的前受体,之后光辐射到达视网膜后面的感光层。感光层上的感光细胞接受光刺激,将光能转换为生物电,形成神经冲动传递给大脑皮层的视觉中枢,从而产生视觉。感光细胞上的感光色素包含2种变化,即感光色素峰值光密度变

化和感光色素最大波长位移变化^[26]。光线通过锥体细胞时会被不均匀过滤，即“自屏效应”。自屏效应导致感光色素光学密度发生改变，从而影响其光谱敏感范围。Thomas 等^[27]总结了引起感光细胞光学密度变化的影响因素有锥细胞外节长度、感光色素的浓度以及单个感光色素分子的量子效率等。此外，视场、年龄、遗传基因、瞳孔和视网膜照度也会影响感光色素的光学密度。随着年龄的增加，中央凹内的感光色素光学密度降低^[28]，而周围的感光色素光学密度增加^[24]；4°视场的感光色素受老化的影响最小^[29]；遗传基因序列的差异可能导致感光色素光学密度的变化^[30]。另外还有 2 个不易测量的影响因素，即进入瞳孔的光通量和视网膜照度。在低照度条件下，颜色匹配对光线进入瞳孔的位置具有较强的依赖性，而在高照度条件下依赖性很小（Stiles & Crowford 效应）。当照度过大时，感光色素的漂白作用使感光色素的光学密度降低^[31]。与晶状体和黄斑相比，关于感光色素的研究较少，这可能是因为相关的生理学实验比较困难。

对 3 种色素的影响因素进行了总结，见图 3。目前仅年龄和视场大小 2 个因素得到了量化。

影响因素	晶状体	黄斑	感光色素
年龄	▲		◇
视场		▲	▲
糖尿病	◇		
吸烟者	◇		
饮食摄入量		◇	
性别		◇	
种族		◇	
脂肪百分比		◇	
遗传			◇
瞳孔			◇
视网膜照度			◇

注：▲表示已经量化，◇表示尚未量化

图 3 3 种色素的影响因素

Fig.3 Factors that affect the three types of pigments

2 目前已发表的颜色匹配函数

目前已发表的颜色匹配函数并不多，根据个性化程度可分为平均观察者颜色匹配函数、个体观察者颜色匹配函数和分类观察者颜色匹配函数等 3 类。

2.1 平均观察者颜色匹配函数

CIE 1931 标准色度观察者和 CIE 1964 标准色度观察者都属于平均观察者颜色匹配函数，即表征人眼

平均颜色视觉特性。CIE 1931 标准色度观察者基于 W.D.Wright^[32]和 J.Guild^[33]的 2 组独立实验数据，他们分别组织了 10 名和 7 名观察者在 2°视场条件下进行颜色匹配。CIE 根据他们的实验数据得到并推介了 CIE 1931 标准色度观察者函数。

当视场大于 4°时，由于视杆细胞的参与以及视网膜中央凹黄斑色素的影响，颜色视觉会发生一定程度的改变^[34]。于是 CIE 推出了“CIE 1964 补充标准色度观察者光谱三刺激值”，该数据基于 Stiles, Burch^[35]和 N.I.Speranskaya^[36]在 10°视场下的 2 组颜色匹配实验，前者包括 49 名观察者，后者包括 27 名观察者。Stiles & Burch 的实验与 N.I.Speranskaya 实验的差异在于 Stiles & Burch 实验使用高亮度的颜色刺激以避免视杆细胞的参与，而 N.I.Speranskaya 实验使用了低亮度色刺激（比 Stiles & Burch 的低 30~40 倍），并且遮蔽了视场中心部分（2°），以消除麦克斯韦圆斑的影响（由于黄斑色素的存在导致视场中心不均匀）。Judd^[37]根据观察者人数将 2 组实验结果进行加权处理，并对后者的数据做了视杆细胞参与的修正，从而确定了 1964 补充标准色度观察者光谱三刺激值函数。一般情况下大视场的颜色匹配精度比小视场高 3 倍^[34]。

2.2 个体观察者颜色匹配函数

虽然 CIE 推出了平均观察者颜色匹配函数并得到了广泛应用，但实际上在颜色视觉正常的观察者中存在较大差异，20 世纪 80 年代初 CIE 开始关注该问题。E.Allen 从 Stiles & Burch 的 49 个观察者数据中选取了 20 个进行统计分析，首次提出标准偏差观察者（Standard Deviate Observer）和同色异谱指数概念^[38]。之后 CIE TC1-07 基于 Nayatani 等^[39]的研究结果推荐了标准偏差观察者模型，迄今为止，这是唯一一个量化观察者同色异谱的官方模型，但使用个体观察者实际数据进行评估时，该模型表现不佳。有研究表明，该模型低估了观察者的差异^[7]。

1996 年，Fairchild^[40]开发了一种颜色匹配函数的蒙特卡洛模型，该模型具有 4 个生理参数，分别是晶状体色素光学密度，黄斑色素光学密度，L 锥体细胞和 M 锥体细胞感光色素最大位移。2006 年 CIE TC1-36 分会推出了 CIE2006 生理模型^[41]，考虑了晶状体光学密度、黄斑色素光学密度和感光色素光学密度，其中晶状体光学密度主要与年龄相关，黄斑色素光学密度和感光色素光学密度与观察视场相关，即考虑了观察者年龄和视场大小，可产生 20~80 岁之间不同年龄、1°~10°之间不同视场组合的颜色匹配函数。

2015 年 Asano 开发了个性化色度观察者模型^[42]，见式（1）。

$$lms-CMFs=f(a,v,d_{lens},d_{macula},d_L,d_M,d_S,S_L,S_M,S_S)$$

(1)

式中: a 为年龄; v 为视场; d_{lens} 为晶状体色素光学密度与平均值的偏差(%); d_{macula} 为黄斑色素峰值光学密度与平均值的偏差(%); d_L, d_M, d_S 为锥体感光色素峰值光学密度与平均值的偏差(%); S_L, S_M, S_S 为 L, M 和 S 锥体感光色素的 λ 最大位移与平均值的偏差(%)。

当 $d_{\text{lens}}, d_{\text{macula}}, d_L, d_M, d_S, S_L, S_M, S_S$ 等于 0 时, Asano 开发的个性化色度观察者模型相当于 CIE2006 生理模型。该模型使用 Monte Carlo 模拟法表示给定年龄(或给定年龄分布)和视场的颜色匹配函数。使用 Monte Carlo 模拟技术实现模型需要选择年龄分布和视场作为输入值,然后选择年龄分布所对应 8 个生理参数的偏差值,最后生成所需数量的颜色匹配函数。导出生理参数偏差值需要从过去的研究中得到标准差,再将标准差缩小,以拟合颜色匹配数据。

综上,越来越多的研究者将注意力放在个体观察者颜色匹配函数的模型化和量化上。

2.3 分类观察者颜色匹配函数

分类观察者颜色匹配函数是将采集到的颜色匹配函数进行有限分类,每个观察者从中找到最适合自己的分类。2011 年 Sarkar^[43]开发了一种用于推导色度观察者类别最小集合的方法,该方法采用聚类分析的 K-Mean 算法。首先将 Stiles & Burch^[32]的 47 个颜色匹配函数 CMF(原数据为 49 个,删除了 2 位观察者)和 CIE2006 生理模型^[38]的 61 个 CMF 组成一个 108 个 CMF 的集合,迭代 20 次,在 $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ 3 个通道分别聚为 5 类,产生 125 个分类 CMF;然后分别计算 125 个 CMF 与 Stiles & Burch 的 47 个 CMF 间的最小色差平均值,从而选择可表征 Stiles & Burch 观察者锥细胞响应的函数;最终选出 8 个 CMF 作为分类观察者颜色匹配函数。

2020 年黄敏教授^[44]将 K-Mean 算法换成了 K-Medoids 算法,将同样的 108 个 CMF 迭代 50 次,在 $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ 3 个通道分别聚为 5 类,产生 125 个分类 CMF;然后基于 CIE 推荐的 17 个颜色中心,将 108 个 CMF 分别与 125 个 CMF 做比较,代入 17 个颜色中心计算三刺激值,进而计算 DE2000 色差;最后以最小色差值为评价标准,选出 10 个 CMF 作为分类色度观察者函数。同年 Asano 也做了类似工作,通过其个性化色度观察者模型^[42]产生的 1000 个颜色匹配函数采用 K-Medoids 算法,也推导出了 10 个分类观察者颜色匹配函数^[45]。一般情况下,10 个类别足以表征正常观察者并用于个性化色彩成像。Asano 的 10 个分类 CMF 较黄敏教授的 10 个分类 CMF 差异性更大,尤其在短波处,其原因可能是 Asano 在建立个性化色度模型中考虑颜色匹配函数的影响因素更全面。

3 结语

显示设备和计算机技术正在经历变革,人们对显示设备的要求也越来越高,色度学需要超越传统的平均观察者颜色匹配函数,重视个体观察者之间的差异。目前个体颜色匹配函数的研究正逐渐开展。为了获得更精确的个体观察者颜色匹配函数,需要深入研究视觉生理学,在此基础上量化更多生理因素;然后通过心理物理学实验,收集更准确的观察者数据建立视觉模型。今后颜色科学、视觉生理学和视觉心理学将共同促进个体观察者颜色匹配函数的深入研究,为颜色领域的相关应用服务。

参考文献:

- [1] 刘浩学, 武兵, 徐艳芳, 等. 印刷色彩学[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2008: 55—62.
LIU Hao-xue, WU Bing, XU Yan-fang, et al. Printing Chromatics[M]. BeiJing: China Light Industry Pres, 2008: 55—62.
- [2] SHEVELL S K. The Science of Color[M]. Amsterdam: Elsevier, 2003: 105—141.
- [3] KUO, WEN-GUEY. Quantification of Metamerism and Colour Constancy[J]. Loughborough University of Technology, 1995: 15—24.
- [4] SMET K A G, YANDAN L, NAGY B V, et al. Cross-Cultural Variation of Memory Colors of Familiar Objects[J]. Optics Express, 2014, 22(26): 32308—32328.
- [5] FERNANDEZ S, FAIRCHILD M D, BRANUN K. Analysis of Observer and Cultural Variability While Generating "Preferred" Color Reproductions of Pictorial Images[J]. Society for Imaging Science and Technology, 2005, 49(1): 96—104.
- [6] SIK C. Styles or Cultural Background Does Influence the Colors of Virtual Reality Games?[J]. Acta Polytechnica Hungarica, 2014, 11(1): 97—119.
- [7] ALFVIN R L, FAIRCHILD M D. Observer Variability in Metameric Color Matches Using Color Reproduction Media[J]. Color Research & Application, 1997, 22(3): 174—188.
- [8] RAMANATH R. Minimizing Observer Metamerism in Display Systems[J]. Color Research & Application, 2009, 34(5): 391—398.
- [9] CHEN Qing-wen, FENG Lu, et al. Reviews on Observer Metamerism and Individual Color Vision Variability[C]// Advances in Graphic Communication, Printing and Packaging, Lecture Notes in Electrical Engineering, 2019: 23—30.
- [10] WYSZECKI G, STILES W S. Color Science: Concepts

- and Methods, Quantitative Data and Formulae, 2nd[J]. Color Research and Application, 1983, 8(4): 262—263.
- [11] MAXWELL J C. On the Theory of Compound Colours, and the Relations of the Colours of the Spectrum[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1859, 10: 404—409.
- [12] TREZONA P W. Maxwell and Maximum Saturation Methods of Colour Matching: Some Sources of Error[C]// CIE Symposium on Advanced Colorimetry, CIE publication x007, Central bureau of the CIE, Vienna, Austria, 1993: 88—90.
- [13] ARTIGAS J M, ADELINA F, AMPARO N, et al. Spectral Transmission of the Human Crystalline Lens in Adult and Elderly Persons: Color and Total Transmission of Visible Light[J]. Investigative Ophthalmology & Visual Ence, 2012, 53(7): 4076—4084.
- [14] BERENDSCHOT, TOS T J M. Lens Aging in Relation to Nutritional Determinants and Possible Risk Factors for Age-Related Cataract[J]. Arch Ophthalmol, 2002, 120(12): 1732—1737.
- [15] 周钧. 颜色与视觉[J]. 江苏纺织, 2014(6): 27—30.
ZHOU Jun. Color and Vision[J]. Jiangsu Textile, 2014(6): 27—30.
- [16] HAMMOND B R, WOOTEN B R, NANEZ J E, et al. Smoking and Lens Optical Density[J]. Ophthalmic & Physiological Optics the Journal of the British College of Ophthalmic Opticians, 2010, 19(4): 300—305.
- [17] LUTZE M, BRESNICK G H. Lenses of Diabetic Patients 'Yellow' at an Accelerated Rate Similar to Older Normals[J]. Investigative Ophthalmology & Visual Ence, 1991, 32(1): 194—199.
- [18] BHOSALE P, BERNSTEIN P S. HPLC Measurement of Ocular Carotenoid Levels in Human Donor Eyes in the Lutein Supplementation Era[J]. Investigative Ophthalmology & Visual Science, 2007, 48(2): 543—549.
- [19] 卢蓉. 黄斑色素的研究近况[J]. 国际眼科纵览, 2000, 24(4): 240—244.
LU Rong. Recent Research on Macular Pigment[J]. International Ophthalmology Overview, 2000, 24(4): 240—244.
- [20] MORELAND J D, ALEXANDER E C. Effect of Macular Pigment on Colour Matching with Field Sizes in the 1° to 10° Range[J]. Documenta Ophthalmologica Proceedings, 1997, 59: 363—368.
- [21] CIULLA T A, CURRAN-CELANTANO J, COOPER D A, et al. Macular Pigment Optical Density in a Midwestern Sample[J]. Ophthalmology, 2001, 108(4): 30—737.
- [22] BONE R A, LANDRUM J T, GUERRA L H, et al. Lutein and Zeaxanthin Dietary Supplements Raise Macular Pigment Density and Serum Concentrations of These Carotenoids in Humans[J]. Journal of Nutrition, 2003, 133(4): 992—998.
- [23] HOWELLS O, EPERJESI F, BARTLETT H. Macular Pigment Optical Density in Young Adults of South Asian Origin[J]. Investigative Ophthalmology & Visual Ence, 2013, 54(4): 2711—2719.
- [24] IANNACCONE A, MURA M, GALLAHER K T, et al. Macular Pigment Optical Density in the Elderly: Findings in a Large Biracial Midsouth Population Sample[J]. Investigative Ophthalmology & Visual Science, 2007, 48(4): 1458—1465.
- [25] NOLAN J, O'DONOVAN O, KAVANAGH H, et al. Macular Pigment and Percentage of Body Fat[J]. Investigative Ophthalmology & Visual Ence, 2004, 45(11): 3940—3950.
- [26] ASANO Y. Individual Colorimetric Observers for Personalized Color Imaging[D]. Rochester: Munsell Color Science Laboratory, Rochester Institute of Technology, 2015: 6—12.
- [27] THOMAS P B M, FORMANKIEWICZ M A, MOLLON J D. The Effect of Photopigment Optical Density on the Color Vision of the Anomalous Trichromat[J]. Vision Research, 2011, 51(20): 2224—2233.
- [28] SWANSON W H, FISH G E. Age-Related Changes in the Color-Match-Area Effect[J]. Vision Research, 1996, 36(14): 2079—2085.
- [29] ELSNER A E, BERK L, BURNS S A, et al. Aging and Human Cone Photopigments[J]. Journal of the Optical Society of America A, Optics and Image Ence, 1988, 5(12): 2106—2112.
- [30] NEITZ J, NEITZ M, HE J C, et al. Trichromatic Color Vision with Only Two Spectrally Distinct Photopigments[J]. Nature Neuroscience, 1999, 2(10): 884—888.
- [31] BURNS S A, ELSNER A E. Color Matching at High Illuminances: Photopigment Optical Density and Pupil Entry[J]. Journal of the Optical Society of America A-optics Image Science & Vision, 1993, 10(2): 221—230.
- [32] WRIGHT D W. Are-Determination of the Trichromatic Coefficients of the Spectral Colours[J]. Trans Opt Soc, 1929, 30(4): 141—164.
- [33] GUILD J. The Colorimetric Properties of the Spectrum[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1932, 230: 149—187.
- [34] HU Xin. A Study of the Variation in Color Matching Functions with Respect to Field Size and Primary Set[D]. Lincoln: University of Nebraska, 2004: 12—66.
- [35] STILES W S, BURCH J M. National Physical Labora-

- tory Colour-Matching Investigation: Final Report[J]. *Optica Acta*, 1959, 6: 1—26.
- [36] SPERANSKAYA N I. Determination of Spectral Color Co-Ordinates for Twenty-Seven Normal Observers[J]. *Optics and Spectroscopy*, 1959, 7: 424—428.
- [37] JUDD D B. Judd's Method for Calculating the Tristimulus Values of the CIE 10° Observer[C]// CIE Symposium on Advanced Colorimetry, CIE Publication x007, Central Bureau of the CIE, Vienna, Austria, 1993: 107—114.
- [38] ALLEN E. An Index of Metamerism for Observer Differences[C]// Proceedings of the Proceedings of the 1st AIC Congress, Color, 1970: 771—783.
- [39] NAYATANI Y, TAKAHAMA K, SOBAGAKI H. A Proposal of New Standard Deviate Observers[J]. *Color Research & Application*, 1983, 8(1): 47—56.
- [40] FAIRCHILD M. Modeling Observer Metamerism through Monte Carlo Simulation[R]. OSA Annual Meeting, 1996.
- [41] VIENOT F. Fundamental Chromaticity Diagram with Physiological Axes[J]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2002, 4421: 565—570.
- [42] ASANO Y, FAIRCHILD M D, BLONDE L. Individual Colorimetric Observer Model[J]. *Plos One*, 2016, 11(2): 1—19.
- [43] SARKAR A. Identification and Assignment of Colorimetric Observer Categories and Their Applications in Color and Vision Sciences[D]. Suisse: School of Computer and Communication, 2011: 108—148.
- [44] 黄敏, 郭春丽, 何瑞丽, 等. 用聚类分析的方法分类观察者颜色匹配函数[J]. *光谱学与光谱分析*, 2020, 40(2): 454—460.
- HUANG Min, GUO Chun-li, HE Rui-li, et al. Study on the Differences of Cone Fundamentals Between Young and Old Observers[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2020, 40(2): 454—460.
- [45] ASANO Y, FAIRCHILD M D. Categorical Observers for Metamerism[J]. *Color Research & Application*, 2020, 45(4): 576—585.