

基于年龄分组的个体色度观察者色适应变换实验研究

陈倩雯, 陈蕴智*

(天津科技大学 轻工科学与工程学院, 天津 300457)

摘要: **目的** 本文旨在探讨不同年龄段的个体色度观察者在特定视场条件下色适应变换结果的分布规律。**方法** 划分连续的不同年龄构成的分组观察者, 基于 Monte Carlo 算法和个体色度观察者模型拟合生成相应年龄分组下的模拟个体观察者, 继而在设定的视场条件对各年龄分组观察者进行色适应变换。**结果** 得到年龄跨度 20~70 岁的 5 个年龄分组下, 共计 5 000 位拟合个体色度观察者, 在设定视场条件下的 60 万组对应色预测结果。**结论** 设定条件下, 年龄分组个体观察者的色适应结果分布存在分化, 其对不同色调参考色的敏感度也存在差异。此外, 标准色度观察者与个体色度观察者的色适应结果在特定条件下存在不同程度的偏差。

关键词: 色适应; 色适应变换; 年龄; 个体色度观察者; 离均色差; 离基色差

中图分类号: TS801.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)21-0294-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.21.037

Chromatic Adaptation Transformation Experiment of Individual Colorimetric Observers Grouped by Different Ages

CHEN Qian-wen, CHEN Yun-zhi*

(College of Light Industry Science and Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China)

ABSTRACT: The work aims to explore chromatic adaptation transformation rules of individual colorimetric observers grouped by different ages under specific view conditions. Observers were grouped in a continuous way according to different ages to generate individual observers based on the Monte Carlo algorithm and an individual colorimetric observer model. Then, chromatic adaptation transformations were then carried out on those modelling observers under certain view conditions. 5000 individual observers of five age groups ranging from 20 to 70 years old were generated. The prediction results of 600,000 sets of corresponding color under certain view conditions were obtained. It is found that chromatic adaptation results of individual observers are differentiated within different age groups. They also show color specificity in different references. Moreover, there are different degrees of deviations between the color adaptation results of standard colorimetric observer and individuals corresponding to different conditions.

KEY WORDS: chromatic adaptation; chromatic adaptation transformation; age; individual colorimetric observer; mean color difference from the mean; mean color difference from the standard

影响个体观察者色觉差异的因素十分庞杂, 既关乎先天遗传基因的生理差异, 也关乎后天营养、饮食习惯及疾病等因素^[1-4]。其研究覆盖生理、病理及心理物理等交叉领域, 是一个庞大而艰深的课题。然而

医疗、科学、工业等各领域的发展都有赖于学科边界的不断拓展和对未知的无尽探索, 明确个体视觉特性的相关影响因素, 并量化各因素的影响机制和相互关系对颜色科学及相关融合学科发展有着长足意义。

收稿日期: 2023-05-06

*通信作者

年龄因素是目前被普遍认可的影响个体色觉特性尤为显著的一个重要参数, 相对于其他因素其研究也最为广泛深入^[5-8]。此外, 跨越单一视场, 个体观察者在色适应场景下的对应色预测差异, 涉及 2 个视场的转换, 附加了色适应变换机制和对应色视场条件的牵制, 与之相关的研究还相对空白^[9-12]。

综合这两方面, 本文侧重探讨不同年龄段个体色度观察者的色适应变换结果的差异性规律。通过划分连续的不同年龄构成的 5 个分组观察者, 基于 Monte Carlo 算法和个体色度观察者模型^[12-14]拟合生成对应年龄分组下的模拟个体观察者。代入特定的视场条件进行个体观察者的色适应变换^[15], 并对各年龄分组的个体色度观察者对应的色预测结果的分布规律进行归纳探讨。

1 实验

1.1 条件设置

1.1.1 实验观察者

设置观察者的年龄范围在 20~70 岁, 在该年龄范围内按照每 10 岁的年龄跨度进行年龄组划分, 共划分 5 个不同年龄组, 每组人数相等, 各 1 000 人。基于 Monte Carlo 算法使用个体色度观察者模型 (Individual Colorimetric Observer Model), 在 2° 视角

下拟合生成共计 5 000 组模拟个体色度观察者的视锥响应光谱反射率函数, 其归一化后的视锥响应函数如图 1 所示。

1.1.2 待匹配参考色

选择 ColorChecker 色标作为色适应变换来源端视场 (Source Field) 待匹配的参考色。ColorChecker 是一个 4×6 的色标, 共计 24 个颜色中心, 包括 18 个彩色和 6 个非彩色。其中彩色覆盖了经典的色调范围, 包括了常见人种的肤色, 深肤色和浅肤色, 以及典型的记忆色, 例如天空的颜色、树叶的颜色以及花朵的颜色等。

1.1.3 适应场光源

适应场光源选择了色适应最常用的光源对 D65-A, 设置来源端视场 (Source Field) 的光源为 D65 标准照明体, 目标端视场 (Target Field) 的光源为 A 光源。

1.2 实验流程

实验流程如图 2 所示, 5 组不同年龄分组的 Monte Carlo 个体色度观察者, 逐队逐人次分别对 ColorChecker 标准色标内的 24 个参考色依次进行对应色实验。对应色实验视场条件保持稳定, 始终在 D65-A 的匹配光源和 2° 视场观察条件下进行, 并记录所有观察者在所有视场条件下的对应色预测的全部结果。

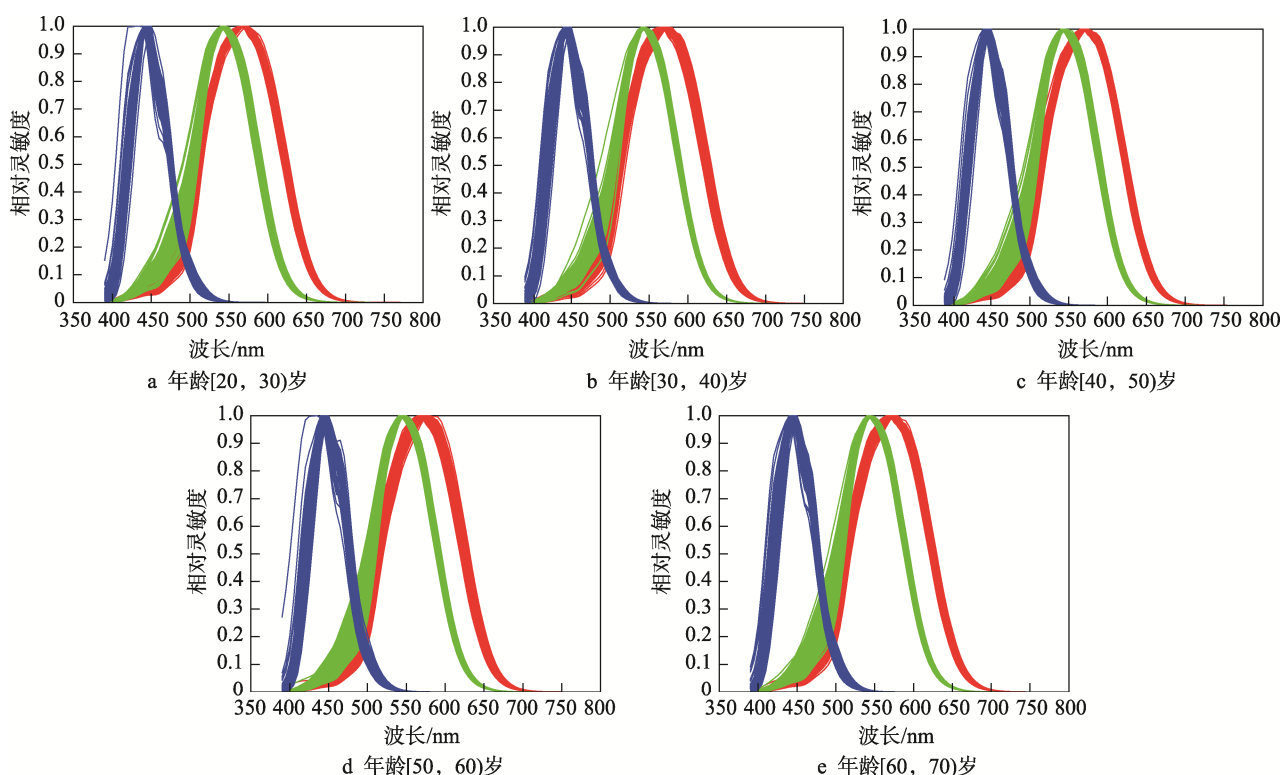


图 1 Monte Carlo 年龄分组个体色度观察者在 2° 视角下归一化后的视锥响应函数
Fig.1 Normalized lms-CMFs of Monte Carlo individual observers grouped by different ages under field size of 2°

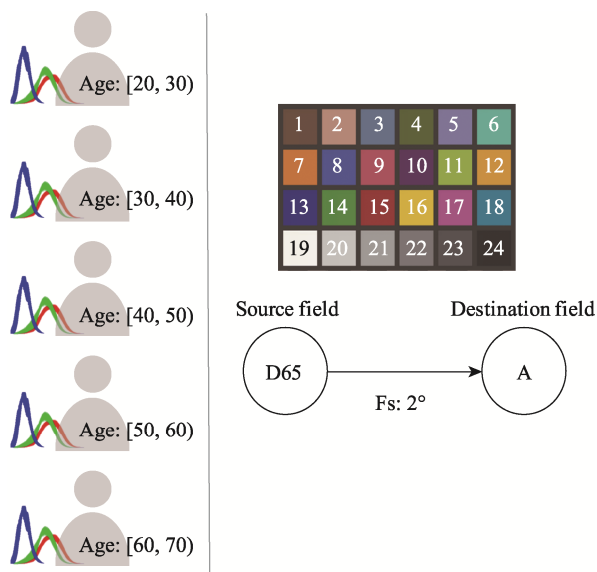


图2 年龄分组观察者在2°视角下的对应色实验
Fig.2 Chromatic adaptation experiment of observers grouped by different ages under field size of 2°

2 结果分析与讨论

2.1 个体色度观察者对应色预测相对偏差的评价指标

由于个体色度观察者的色觉差异,不同个体色度观察者在相同的适应场条件下,对于同一个参考色的对应色预测结果色度值必然是离散的。而表征对应色的XYZ色度值所在的空间是一个三维色空间,且并不是一个完全均匀的色空间,因此要表征三维色空间中2个离散的颜色坐标点的偏差大小,只能用色差公式进行计算。现行的色差公式种类有很多,本文默认采用CIE DE2000色差公式。

为了从不同维度量化个体差异的相对偏差的显著程度,设计了2个色差评价指标,分别为离基色差(The Mean Color Difference from the Standard, MCDS)和离均色差(The Mean Color Difference from the Mean, MCDM)。这2个评价指标的算法原理和相互关系如图3所示。

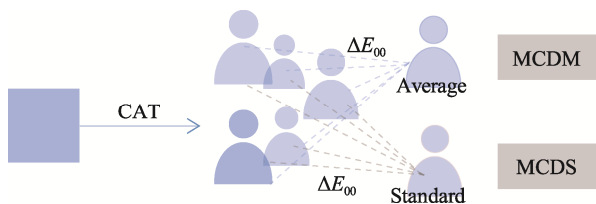


图3 MCDM和MCDS计算原理
Fig.3 Computational schematics of MCDM and MCDS

2.1.1 离基色差

为了标定个体色度观察者对应色预测的相对偏

差,需要找到一个参量作为基准,因此相对于个体色度观察者取CIE标准观察者作为参考观察者。在同样的色适应视场条件下,计算个体色度观察者和参考观察者对应色预测结果的色差大小,作为个体色度观察者对应色预测的相对偏差的评价指标,用离基色差 E_{MCDS} 表示,其计算式如式(1)所示。

$$E_{MCDS} = \frac{\sum_{i=1}^N f_{\Delta E} (L^*a^*b^*_{\text{target-indiv-}i}, L^*a^*b^*_{\text{target-sd}})}{N} \quad (1)$$

式中: i 为个体色度观察者的观察者编号; N 为参与观察者的总人数; $L^*a^*b^*_{\text{target-indiv-}i}$ 为第 i 位个体色度观察者的对应色预测结果的 $L^*a^*b^*$ 色度值; $L^*a^*b^*_{\text{target-sd}}$ 为CIE标准色度观察者的对应色预测结果,具体依据视角参数进行取值的 $L^*a^*b^*$ 色度值; $f_{\Delta E}$ 为色差函数(CIE DE2000色差公式)。

MCDS指标计算的是个体色度观察者和标准观察者在相同条件下的对应色预测的色差大小,从而可以用MCDS来表征相同条件下个体色度观察者模型和标准色度观察者模型的精度误差大小。MCDS的取值越大,表示标准观察者与个体色度观察者在相同条件下的对应色预测结果误差越大,说明标准观察者色度模型不能准确表征个体色度观察者的对应色预测结果。MCDS的取值越小,表示标准观察者与个体色度观察者在相同条件下的对应色预测结果更接近,说明标准观察者色度模型能够近似表征个体色度观察者的对应色预测结果。

2.1.2 离均色差

将样本个体色度观察者组内所有观察者对应色预测的结果取均值,以平均对应色预测结果作为参考坐标,利用色差公式分别计算各个观察者的对应色预测结果与平均对应色预测结果之间的色差大小,表征各个观察者的视觉特异性相对样本平均水平的显著程度。

选择样本观察者的均值作为基准参量,标定个体色度观察者对应色预测的相对偏差。计算逐位个体色度观察者的对应色预测结果与样本个体色度观察者预测结果的色度均值之间的色差,作为衡量观察者之间个体差异显著程度的指标,用离均色差 E_{MCDM} 表征,其计算式如式(2)所示。

$$E_{MCDM} = \frac{\sum_{i=1}^N f_{\Delta E} (L^*a^*b^*_{\text{target-indiv-}i}, L^*a^*b^*_{\text{target-indiv-ave}})}{N} \quad (2)$$

式中: $L^*a^*b^*_{\text{target-indiv-ave}}$ 为对 N 位个体色度观察者所预测得到的目标视场下的对应色取平均后得到的 $L^*a^*b^*$ 色度值。

MCDM的结果表征个体色度观察者与样本均值之间的色差大小。MCDM取值越大,说明该样本个体色度观察者的对应色预测结果与样本均值之间的

相对偏差越大,即个体色度观察者之间的对应色预测结果差异更显著。反之,MCDM 的取值越小,则说明个体色度观察者的对应色预测结果更加趋同,个体色度观察者之间的对应色预测差异比较模糊。

2.1.3 MCDS 和 MCDM 的关系

假设 MCDS 与 MCDM 的结果取值相等,则说明在特定色适应变换条件下,CIE 标准观察者的对应色结果与实际样本个体色度观察者对应色预测的均值结果相当。在这种理想条件下,说明 CIE 标准观察者达到了最初 CIE 拟定标准观察者的初衷,即用标准色度观察者的结果来表征理想条件下样本观察者的平均结果。如果 MCDS 与 MCDM 的结果出现偏差,说明在特定色适应变换条件下,CIE 标准观察者的对应色结果偏离于实际样本个体色度观察者的均值,也说明此时使用标准观察者色适应模型进行计算时,其结果会

相对偏离个体色度观察者的实际色适应结果。

2.2 实验结果归纳与分析

将计算得到的 2°视角的 5 组 Monte Carlo 年龄分组观察者的离基色差 MCDS 和离均色差 MCDM 结果,分别整理在表 1 和表 2 中。其中分组观察者对 24 个参考色的对应色预测结果的离基色差 MCDS 的平均取值范围为 1.378~2.255,均值为 1.792,最大取值对应的是分组年龄范围最小的[20, 30)岁的观察者,最小取值对应的是分组年龄范围在[50, 60)岁的观察者。

分组观察者对 24 个参考色的对应色预测结果的离基色差 MCDM 的平均取值范围为 1.215~1.482,均值为 1.384。最大取值对应的是分组年龄为[30, 40)岁的观察者,最小取值对应的是分组年龄范围在[50, 60)岁的观察者。

表 1 Monte Carlo 年龄分组观察者在 2°视角下的 MCDS 结果
Tab.1 MCDS results of Monte Carlo observers grouped by different ages under field size of 2°

ColorChecker 色标	E _{MCDS}					平均值
	[20, 30)岁	[30, 40)岁	[40, 50)岁	[50, 60)岁	[60, 70)岁	
1	1.625	1.277	1.128	0.922	1.395	1.270
2	3.415	2.621	2.274	1.846	2.577	2.547
3	1.998	1.635	1.439	1.210	1.687	1.594
4	1.013	0.870	0.811	0.787	1.140	0.924
5	2.243	2.070	1.768	1.473	1.885	1.888
6	3.023	2.306	2.004	1.753	2.189	2.255
7	1.666	1.180	1.005	0.782	1.006	1.128
8	1.388	1.321	1.116	0.971	1.258	1.211
9	2.363	1.787	1.545	1.172	1.590	1.692
10	0.876	0.905	0.862	0.775	1.011	0.886
11	0.874	0.788	0.744	0.726	1.068	0.840
12	1.312	0.957	0.856	0.722	0.954	0.960
13	1.424	1.286	1.067	0.860	1.035	1.134
14	0.760	0.677	0.616	0.606	0.840	0.700
15	2.684	2.030	1.788	1.408	1.992	1.981
16	1.226	0.988	0.923	0.850	1.255	1.048
17	1.501	1.295	1.167	0.961	1.266	1.238
18	3.162	2.484	2.217	1.896	2.528	2.457
19	5.413	4.423	3.883	3.400	4.546	4.333
20	4.634	3.785	3.307	2.835	3.811	3.675
21	3.903	3.199	2.798	2.406	3.279	3.117
22	3.260	2.672	2.337	2.004	2.752	2.605
23	2.534	2.079	1.822	1.572	2.193	2.040
24	1.830	1.502	1.318	1.132	1.605	1.477
平均值	2.255	1.839	1.617	1.378	1.869	1.792

表 2 Monte Carlo 年龄分组观察者 2°视角下的 MCDM 结果
Tab.2 MCDM results of Monte Carlo observers grouped by different ages under field size of 2°

ColorChecker 色标	E_{MCDM}					平均值
	[20, 30)岁	[30, 40)岁	[40, 50)岁	[50, 60)岁	[60, 70)岁	
1	1.088	1.057	1.092	0.880	0.928	1.009
2	1.966	1.933	2.042	1.743	1.846	1.906
3	1.407	1.377	1.345	1.036	1.073	1.248
4	0.699	0.741	0.743	0.661	0.748	0.718
5	1.880	1.892	1.655	1.144	1.212	1.556
6	1.431	1.482	1.587	1.463	1.669	1.526
7	0.917	0.856	0.895	0.757	0.758	0.837
8	1.170	1.209	1.025	0.714	0.743	0.972
9	1.358	1.322	1.409	1.103	1.122	1.263
10	0.850	0.890	0.841	0.658	0.712	0.790
11	0.662	0.702	0.696	0.627	0.716	0.681
12	0.795	0.763	0.784	0.702	0.721	0.753
13	1.166	1.161	0.988	0.675	0.635	0.925
14	0.511	0.554	0.542	0.487	0.564	0.532
15	1.544	1.521	1.642	1.332	1.389	1.486
16	0.840	0.851	0.867	0.793	0.879	0.846
17	1.118	1.135	1.121	0.842	0.862	1.016
18	1.804	1.794	1.895	1.676	1.747	1.783
19	3.438	3.557	3.576	3.044	3.105	3.344
20	3.011	3.073	3.071	2.541	2.589	2.857
21	2.562	2.610	2.604	2.143	2.208	2.425
22	2.146	2.179	2.173	1.780	1.849	2.026
23	1.661	1.683	1.678	1.373	1.447	1.568
24	1.221	1.228	1.225	0.988	1.050	1.142
平均值	1.469	1.482	1.479	1.215	1.274	1.384

2.2.1 不同年龄分组观察者平均色度的 MCDS 和 MCDM 总体分布结果

首先忽略进行色适应变换的 24 个参考色具体的色度差异,对 2°视角下的 5 组年龄分组下所有参考色的 MCDS 和 MCDM 结果整体求平均,可以计算得到分组年龄观察者平均色度条件下的总体 MCDM 和 MCDS 分布,如图 4 所示。

如图 4 可见,分组年龄观察者的 MCDM 的分布情况相对稳定,其中[50, 70)岁年长者的离均色差结果比相对更年轻的[20, 50)岁的分组年龄观察者的离均色差结果稍许偏低。说明实验条件下,50 岁以前的色适应个体差异更为显著,[50, 70)岁的老年个体的色适应差异反而相对削弱。

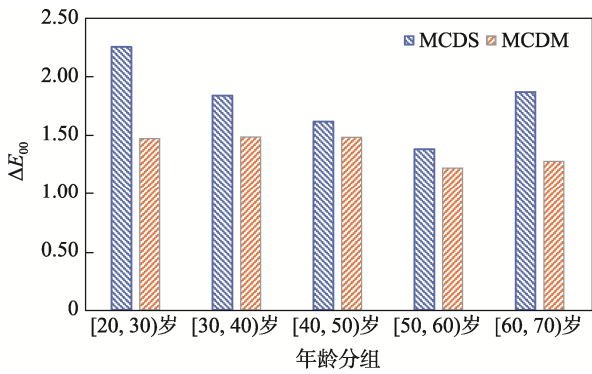


图 4 分组年龄观察者 2°视角下的平均色度的 MCDM 和 MCDS 分布
Fig.4 MCDM and MCDS distribution of average chroma of observers grouped by different ages under field size of 2°

同样情况下各组年龄观察者的 MCDS 总体数据波动情况比 MCDM 要更加显著, 其分布形状呈现一个两头高中间低的 U 形。说明在 2° 视角下, 对于 30 ~ 60 岁偏中间年龄阶段的标准观察者, 色适应模型的对应色预测结果与实际个体色度观察者的对应色结果更加贴合, 而对于 60 岁以上的老年观察者和 30 岁以下的青年观察者, 标准观察者色适应模型的对应色预测结果与实际个体色度观察者的对应色预测结果存在更显著的偏差。

2.2.2 不同色度平均年龄观察者的 MCDS 和 MCDM 总体分布结果

为了初步了解个体色度观察者对不同色相的 24 个参考色的色适应结果的整体分布情况, 先忽略具体的年龄分组, 对每个参考色下 5 组年龄分组的观察者的 MCDM 和 MCDS 结果取均值, 得到平均年龄的个体色度观察者对 ColorChecker 24 个参考色的 MCDM 和 MCDS 分布, 如图 5 所示。

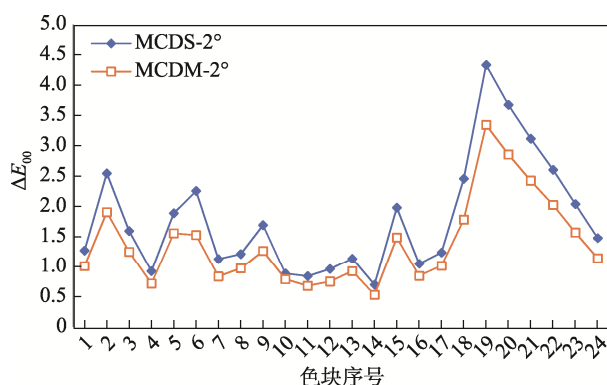


图 5 Monte Carlo 平均年龄观察者的 MCDS 和 MCDM 结果

Fig.5 MCDS and MCDM results of Monte Carlo individuals at the average age (The horizontal coordinate indicates the color lumps numbered 1-24 in the ColorChecker color code)

色序 19 ~ 24 是亮度呈梯度下降的 6 个非彩色参考色。由图 5 可见, 非彩色段的数据点连线几乎呈直线。说明对于非彩色参考色, 个体观察者的色适应结果差异的显著程度与亮度呈正相关, 亮度越大, 对应色预测结果的个体分布越离散。通过数值比较可见, 亮度较高的非彩色要比彩色参考色的色适应个体差异更显著。

MCDS 和 MCDM 在图 5 中呈现近似的数据分布规律, 但蓝色的 MCDS 数据分布曲线整体显著高于另外一条数据分布线, 说明在具体数据取值上 MCDS 的结果比 MCDM 的结果整体偏高。尤其对于彩色参考色中的 2 号浅肤色和 6 号蓝绿色参考色, 以及非彩色参考色中亮度较高的浅色中性色, MCDS 与 MCDM 之间的偏差更为显著。说明 2° 视角下, 标准观察者色适应模型的色度误差比实际分组年龄观察者对应色预测的平均结果更偏大, 尤其是彩色中的个别颜色和

中性参考色中亮度更高的浅色中性色。

就具体取值而言, 2° 视角下年龄分组观察者平均观察者的 MCDS 的范围为 0.700 ~ 4.333, 均值为 1.792。最大取值对应的参考色为色序 19 的白色参考色 (White, $R=243$ 、 $G=243$ 、 $B=242$), 最小取值对应的参考色为色序 14 的绿色参考色 (Green, $R=70$ 、 $G=148$ 、 $B=73$), 见图 6a、c 的 2 个色块。MCDM 值分布范围为 0.532 ~ 3.344, 均值为 1.384。最大取值和最小取值同样对应色序 19 和 14 的 2 个参考色。另外彩色参考色中 MCDM 与 MCDS 的最大取值的对应色的参考色均为色序 2 的浅肤色参考色 (Light Skin, $R=194$ 、 $G=150$ 、 $B=130$), 见图 6b 中间色块。一定程度上, 说明在 2° 视角下年龄分组观察者对高亮度非彩色和彩色中的浅肤色更加敏感, 因此样本观察者中不同观察者对应色匹配结果更加离散, 而对绿色的包容性更强, 即样本观察者中不同观察者对应色匹配结果更加集中。

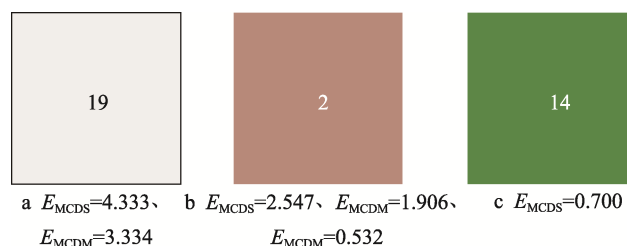


图 6 MCDM 和 MCDS 取极值对应的参考色

Fig.6 Reference color corresponding to maximum or minimum value of MCDM and MCDS

2.2.3 分组观察者具体各参考色的 MCDM 和 MCDS 分布

对于 ColorChecker 24 个参考色中的每个参考色, 将分组观察者在 2° 视角下对应色预测结果分别计算 MCDM 值和 MCDS 值。5 组不同年龄组的结果见图 7 和图 8。

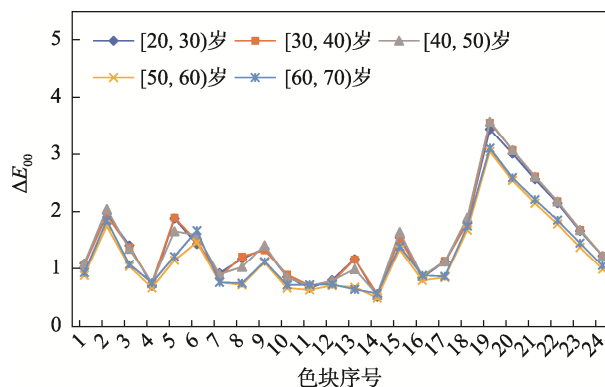


图 7 不同年龄分组观察者在 2° 视角下 ColorChecker 对应色预测结果的 MCDM 分布

Fig.7 MCDM distribution of ColorChecker corresponding color prediction results of observers grouped by different ages under field size of 2°

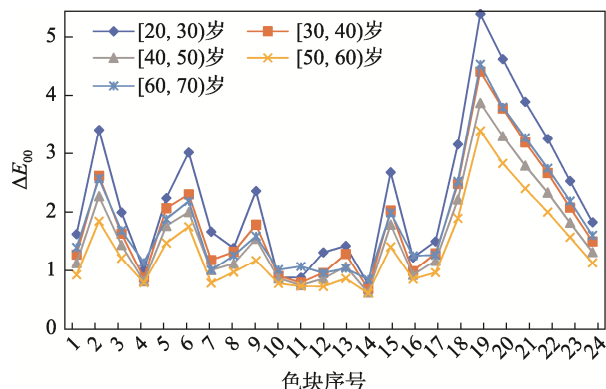


图8 不同年龄分组观察者在2°视角下ColorChecker对应色预测结果的MCDM分布

Fig.8 MCDM distribution of ColorChecker corresponding color prediction results of observers grouped by different ages under field size of 2°

如图7所示,以50岁为年龄分界线,其中[20, 50)岁的分组年龄观察者的MCDM结果分布相对集中且重合度高,说明不同年龄个体差异变化不大。类似的,[50, 70)岁的个体观察者结果分布相对集中且高度重合,但数值相对偏低。尤其对于非彩色参考色,这一分化情况更加显著。

如图8所示,在同样条件下,5组不同年龄分组的MCDM分布结果相较于MCDM分布结果更加冗杂。从数值大小的分布来看,MCDM偏差由大到小的年龄分组排序依次是[20, 30)岁、[60, 70)岁、[30, 40)岁、[40, 50)岁、[50, 60)岁。说明标准观察者的色适应模型对[20, 30)岁和[60, 70)岁的个体色度观察者的对应色预测精度最低;在[30, 60)岁的年龄范围内,岁数越小,标准观察者的色适应模型的预测精度越低。

3 结语

年龄范围从20~70岁的5组各1 000位不同年龄分组的Monte Carlo拟合个体色度观察者,在2°视角下对ColorChecker 24个参考色的对应色预测结果的分布规律归纳如下:

1)以50岁为分界,[20, 50)岁的较年轻个体观察者比[50, 70)岁的老年观察者的色适应差异更为显著。相较于彩色参考色,非彩色参考色下这一年龄分化的趋势更为显著,但这2个年龄段之间的年龄差异影响并不显著。

2)标准观察者色适应模型对[30, 60)岁偏中间年龄的对应色预测结果与实际个体色度观察者更加贴合,且在该年龄段内岁数越大贴合度越高,而对60岁以上的老年观察者和30岁以下的年轻观察者的对应色预测结果与实际个体的偏差更为显著。

3)个体观察者对色适应参考色中亮度较高的非彩色比彩色参考色更为敏感,对应色预测结果更加离散。

4)对于非彩色参考色,个体色度观察者的色适应差异与亮度参数呈比较规律的正相关。而对于彩色

参考色,其光谱特性应该要比亮度特性对观察者的色适应机制的影响更为显著。

参考文献:

- [1] CHEN Qian-wen, FENG Lu, LI Ya-lin, et al. Reviews on Observer Metamerism and Individual Color Vision Variability[C]// Proceedings of 2018 9th China academic conference on printing and packaging, Jinan, 2019: 23-30.
- [2] EMERY K J, WEBSTER M A. Individual Differences and Their Implications for Color Perception[J]. Current Opinion in Behavioral Sciences, 2019, 30: 28-33.
- [3] HAMMOND B R, WOOTEN B R, NÁÑEZ J E, et al. Smoking and Lens Optical Density[J]. Ophthalmic & Physiological Optics, 1999, 19(4): 300-305.
- [4] LI Jia-ye, HANSELEAR P, SMET K A G. Impact of Color Matching Primaries on Observer Matching: Part II-Observer Variability[J]. LEUKOS, 2022, 18(2): 127-144.
- [5] GUERRY E, CELINE C, BECHERAS E, et al. Influence of Chromatic and Lighting on the Visual Environment of the Elderly: A Critical Literature Review[J]. Color Research & Application, 2021, 46(1): 117-124.
- [6] POKORNY J, SMITH V C, LUTZE M. Aging of the human lens[J]. Applied Optics, 1987, 26(8): 1437-1440.
- [7] NEMCSICS A, TAKÁČ J. Change in Colour Preference in 50 Years Duration and Its Dependence on Age[J]. Color Research & Application, 2019, 44(4): 622-629.
- [8] POMPE M T. Color Vision Testing in Children[J]. Color Research & Application, 2020, 45(5): 775-781.
- [9] CAI Sheng-yan, CHEN Qian-wen, WANG Hai-feng. A New Method to Evaluate a Corresponding Colors Dataset Based on Its Two Derived Transforms[J]. Color Research & Application, 2017, 42(2): 150-155.
- [10] CAI Sheng-yan, SUN Yan, SUN Rui-xia, et al. A Method to Prepare Reference Colors for Chromatic Adaptation Experiments[J]. Color Research and Application, 2022, 47(4): 892-899.
- [11] CAI Sheng-yan, FAIRCHILD M D. Individual Corresponding Colors Data and Chromatic Adaptation Transforms[C]// 24th Color and Imaging Conference, 2016, San Diego: 248-253.
- [12] LI Yi-qian, CHEN Si-yuan, WEI Min-chen, et al. Consideration of Degree of Chromatic Adaptation for Reproducing Illuminated Scenes[J]. Color Research & Application, 2022, 47(3): 605-614.
- [13] ASANO Y, FAIRCHILD M D, BLONDÉ L. Individual Colorimetric Observer Model[J]. PLoS One, 2016, 11(2): 1-19.
- [14] ASANO Y, FAIRCHILD M D. Categorical Observers for Metamerism[J]. Color Research & Application, 2020, 45(2): 576-585.
- [15] 陈倩雯. 基于观察者同色异谱的色适应变换研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2021.

CHEN Qian-wen. Research of Chromatic Adaptation Transform Based on Observer Metamerism[D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2021