

中国人眼光谱相对视亮度 函数研究 I. 明视函数

陈永明 赫葆源 马谋超 许宗惠
纪桂萍 张增慧 汪慧丽 张嘉棠

中国科学院心理研究所

一、引 言

在可见光谱范围内 (380 nm—780 nm), 人眼对不同波长的辐射, 即各种颜色光, 具有不同的感受性。一般说来, 人眼对可见光谱中黄绿色的感受性最高, 对光谱两端的红色和紫色, 感受性就低得多。人眼对光谱不同区域视觉感受性不同的这种特点, 通常叫作光谱视亮度或光谱感受性, 并以其函数来表征, 称为光谱相对视亮度函数。它的图示, 就是光谱相对视亮度曲线¹⁾。

早在十九世纪初, 人们对可见光谱不同区域的视觉特性就曾进行过研究。1817 年, 弗朗霍弗 (Fraunhofer) 首次对阳光通过稜镜折射后产生的光谱各色进行了视觉比较。1883 年, 兰利 (Langley) 曾对光谱进行了能量测定。1887 年, 斯坦格 (Stenger) 指出, 人眼对光谱中绿色的视亮度最高。到廿世纪初, 戈德哈默 (Goldhammer) (1905 年) 提出用函数值来表示单色光辐射与视亮度之间的关系。此后, 对光谱视亮度的研究, 就有了广泛的开展, 如艾夫斯 (Ives) (1912 年)、纳丁 (Nutting) (1914 年)、科布伦茨 (Coblentz) 和艾默森 (Emerson) (1917 年)、里夫斯 (Reeves) (1918)、海德、福赛思 (Hyde, Forsythe) 和卡迪 (Cady) (1918 年)、吉布森 (Gibson) 和廷德尔 (Tyndall) (1923 年) 等^[1], 运用各种方法, 对人眼的光谱视亮度进行了认真的测量和研究。1923 年, 吉布森和廷德尔综合了这些研究的结果, 绘出了一条人眼光谱视亮度曲线, 并于 1924 年为国际照明协会 (CIE) 第六次会议正式采纳。1931 年, 此项结果与 CIE 标准观察者和色度坐标系统合为一体, 成为通常所说的 1931 年 CIE 光敏度曲线, 亦即 1931 年 CIE 标准观察者的光谱相对视亮度函数, 简称 CIE V_{λ} 函数或 CIE V_{λ} 曲线。

V_{λ} 函数是以人们看可见光谱中不同波长的色光时, 为使不同色光在视觉上产生同等亮度所需能量的倒数来定义的, 即 $V_{\lambda} = \frac{1}{E_{\lambda}}$ (V_{λ} 为相应于波长 λ 的光谱视亮度函数值, E_{λ} 为波长 λ 的单色光能量)。CIE V_{λ} 函数的峰值在 555 nm (黄绿色), 即 $\lambda_m = 555$ nm。

1) 名称很多, 如: 光谱视亮度函数 (Spectral luminosity function), 光谱视亮度因素 (Spectral luminosity factors), 相对发光效率函数 (Relative luminous efficiency function), 平均相对发光效率曲线 (Mean relative luminous efficiency curve), 视见函数 (Visibility function) 等, 都是同一意思。

V_{λ} 函数无论在理论上、实践上,都具有重要意义,它是光度学和色度学的主要依据之一。

此后,一些学者,曾对 $CIE V_{\lambda}$ 函数提出了一些异议^[2]。1951年,贾德(Judd)根据自己实验的结果,指出 $CIE V_{\lambda}$ 函数值在 460 nm 以下偏低,并提出了修正数据^[3]。另外, $CIE V_{\lambda}$ 函数,是根据对欧美白种人眼测定的材料合成的,没有包括其他人种的材料。因而,后来有好几位学者,曾对不同人种(埃及人、高加索人、中非人等)的光谱视亮度函数进行了测定。他们的结果表明,非白种人对 500 nm 以下波长的光谱视亮度函数要比 $CIE V_{\lambda}$ 函数值低一些^[4]。我国的人口占世界人口的很大比例,而且,随着我国社会主义建设和科学技术的发展,光度学和色度学的应用也愈迫切,因此,对中国人眼光谱视亮度的研究,考察人种不同是否会影响光谱视亮度,这是有重要意义的。同时,这也是发展彩色电视和彩色电影事业协作研究任务的内容之一。本工作是根据上述需要,对中国人眼明视 V_{λ} 函数进行了测定,并对不同年龄人眼的 V_{λ} 函数进行了比较。

二、实验方法和装置

(一) 方法

测定光谱视亮度的方法有好几种。如:直接比较(direct comparison)法、阶梯(step-by-step)法、闪烁(flicker)法^[5]、临界频率(critical frequency)法^[5]等。一般认为,闪烁法要比其他方法更精确一些,而且,与其他方法相比,被试(特别是没有经验的被试)比较容易掌握这种实验方法。所以本工作也采用了闪烁法。

在闪烁法实验中,用一恒定的白光(作为标准光)与波长 λ_1 的单色光,以每秒 10—20 次的速率,重复地交替呈现。当单色光与标准光的亮度不相等时,被试看起来则产生一种

强弱交替的闪烁现象。当两者亮度相等时,则闪烁现象降至最小或消失。在实验过程中,要求被试调整单色光的强度,直到单色光与标准光的亮度相等,即产生最小闪烁现象为止。然后,再用波长为 λ_2 的单色光与标准光交替呈现。被试调整单色光 λ_2 的强度,使之与标准光的亮度相等,产生最小闪烁现象为止。依此进行,直至单色光 λ_i 。

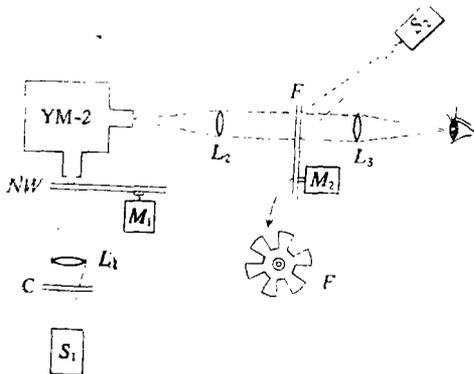


图1 实验装置示意图

S_1 单色光源 S_2 标准光源 YM-2 单色仪
 L_1 、 L_2 、 L_3 透镜 NW 中性光楔 C 铜网
 F 闪烁片 M_1 、 M_2 小电动机

(二) 仪器装置

图1为本实验所使用之仪器装置示意图。 S_1 为溴钨灯(向阳牌、30 V 400 W、上灯三厂),作为单色光光源。光束通过透镜 L_1 及中性无级光楔 NW,聚焦于单色仪(苏制 YM-2 型)入射狭缝。单色仪波长刻度,用该仪器

附件汞灯和氖灯谱线校正。由单色仪出射的单色光束,通过透镜 L_2 ,再以每秒 18 次的频率穿过闪烁片 F 的空档,到达观察筒中的透镜 L_3 ,并对网膜中央凹形成一个 2° 的视野。 S_2 为钨丝灯,作为恒定的标准光源。光束射到涂有氧化镁的闪烁片上,并由闪烁片以每秒 18 次的频率,与单色光交替地投射入观察筒,通过透镜 L_3 ,在网膜上形成一个与单色光

交替呈现的、重叠的 2° 视野。在本实验中, 标准光采用的亮度为 30 尼特 (cd/m^2) (用日制 BM-2 彩色亮度计在涂有氧化镁的闪烁片上测得)。NW 为中性无级光楔。此光楔由一个可逆转的小电动机带动, 由被试操作, 借以调整单色光强度。同时, 采用幻灯投射, 在观察筒周围白屏上, 产生一个大面积的背景光, 作为适应视野, 其亮度与标准光的亮度大致相等。

(三) 程序

经色盲和视力检查, 选色觉和视力均正常的男女被试共 50 名。被试年龄 20—30 岁为 30 名, 30 岁以上者为 20 名。被试职业分别为解放军战士、工人、学生和科研人员。实验前, 先向被试说明本实验所使用之方法、目的和要求, 然后进入暗室, 对着背景视野大致适应 15 分钟。正式实验前, 先作若干次练习, 使被试熟悉本实验所用之方法和掌握判断的标准。

在正式实验中, 被试眼睛贴近观察筒口, 颌部放在头架上, 以保持固定的位置。测试波长范围是 404 nm—700 nm, 每隔 10 nm 或 20 nm 选一测试点, 在峰值处, 增加 555 nm 一点。每一测试点波长的宽度为 5 nm。被试通过调节光楔位置, 改变单色光强度, 达到产生最小闪烁。每一测试点都要求被试作二次调整, 主试记下每次调整的光楔刻度读数。在整个实验过程中, 要求被试始终保持同一的判断标准。

本实验中, 用真空热电偶(英制 FT-16 型玻璃窗口), 配用低电势直流电位差计(国产 UJ 31 型)和检流计(AC9/4 型), 在单色仪出射狭缝处测得每一测试波长单色光的辐射能量。再用光楔及铜网的透过率 (T) 进行加权, 算出各波长的光谱视亮度函数, 即:

$$V_{\lambda_1} = \frac{1}{E_{\lambda_1} T_1} \cdots \cdots V_{\lambda_2} = \frac{1}{E_{\lambda_2} T_2} \cdots \cdots V_{\lambda_i} = \frac{1}{E_{\lambda_i} T_i}$$

这里 V_{λ_i} 为波长 λ_i 的函数值, E_{λ_i} 为所测得的波长 λ_i 的辐射能, T_i 为光楔等透过率, 其余类推。然后, 把最大的 V_{λ} 值定为 1, 其余各值与它相比, 则获得一系列光谱相对视亮度函数值。

三、结果和讨论

(一) 结果

本工作对 30 名年龄在 30 岁以下的青年男女及 20 名年龄在 30 岁以上的成、老年男女进行了 V_{λ} 函数测定。表 1 列出了二个年龄组的 V_{λ} 函数值。其峰值在 555 nm。图 2 为表 1 函数值的图示。纵坐标为 V_{λ} 函数值, 用对数表示, 横坐标为波长 (nm)。从这里可以看出, 由于年龄的增长, 在光谱的短波一侧, V_{λ} 函数值有降低的趋势。

表 2 为本工作(50 人平均) V_{λ} 函数值与 CIE V_{λ} 的比较, 其中附有贾德对 CIE V_{λ} 短波端函数值的修正数据。图 3 为表 2 函数值的图示。从这里可以看出, 本工作所得 V_{λ} 函数值与 CIE V_{λ} 相比, 在短波端 ($< 450 \text{ nm}$) 的函数值要高一些, 接近贾德 1951 年的修正值, 而在 480 nm 处, 则比 CIE V_{λ} 值低一些, 形成一个凹。其余部分, 两者基本上是吻合的。

(二) 讨论

1. 峰值: 本工作所测得的 V_{λ} 函数值, 其峰值为 555 nm, 这和 CIE V_{λ} 峰值是一致的, 所测的 50 名被试中, 峰值绝大部分位于 555 nm 和 560 nm, 说明相当集中。为了进一步

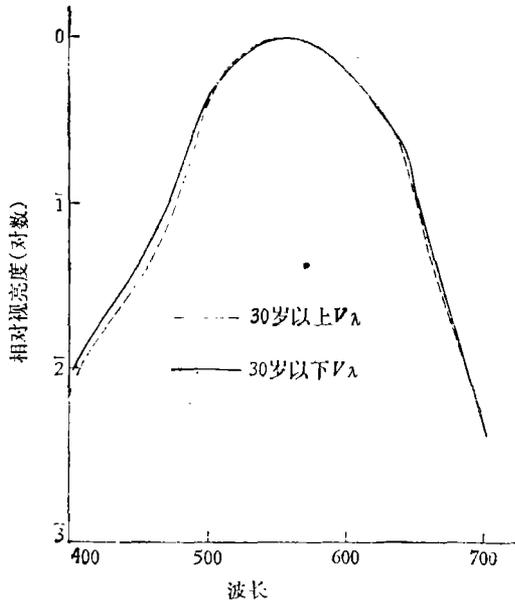


图 2 二个年龄组的 V_{λ} 曲线比较

表 1 二个年龄组的 V_{λ} 比较

波 长	年 龄 组	30 岁以下 年龄组 V_{λ}	30 岁以上 年龄组 V_{λ}
404		0.0106	0.0093
420		0.0195	0.0168
440		0.0318	0.0277
460		0.0637	0.0494
480		0.0990	0.0817
500		0.4005	0.3766
520		0.6576	0.6325
540		0.8913	0.9250
550		0.9525	0.9716
555		1	1
560		0.9917	0.9723
580		0.9030	0.8535
600		0.6372	0.6466
620		0.4254	0.4023
640		0.2340	0.2139
660		0.0527	0.0461
680		0.0159	0.0139
700		0.0049	0.0047

表 2 本工作 V_{λ} 与 CIE V_{λ} 及贾德修正值

波 长	本工作 V_{λ} (50 人平均)	CIE V_{λ}	贾德修正值 (51 年)
404	0.0101	0.0006	
420	0.0184	0.0040	0.0175
440	0.0301	0.0230	0.0397
460	0.0580	0.0600	
480	0.0920	0.1390	
500	0.3910	0.3230	
520	0.6475	0.7100	
540	0.9047	0.9540	
550	0.9601	0.9950	
555	1	1	
560	0.9839	0.9950	
580	0.8827	0.8700	
600	0.6410	0.6310	
620	0.4161	0.3810	
640	0.2260	0.1750	
660	0.0499	0.0610	
680	0.0150	0.0170	
700	0.0048	0.0041	

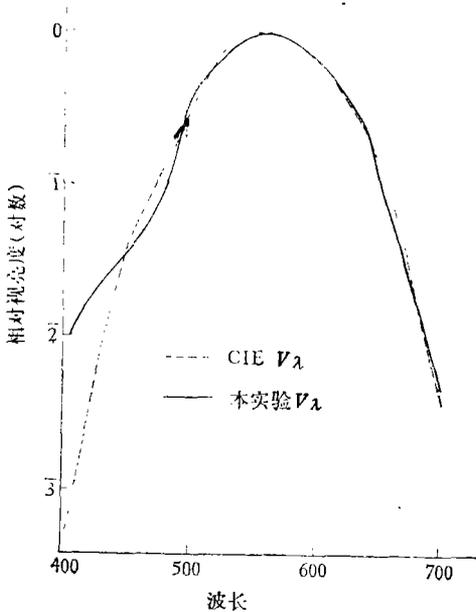


图 3 本工作 V_{λ} 与 CIE V_{λ} 曲线比较

考证峰值位置的可靠性,我们曾进行了峰值检验测定,结果见表 3。在 100 人次的测定中,峰值仍然集中于 555 nm,少数在 560 nm,其平均峰值为 555 nm,再次确证了 $\lambda_m = 555$ nm 是可靠的。过去,在某些学者的研究工作中,所得的 λ_m 是各不相同的,从 $\lambda_m = 550$ nm 到

$\lambda_m = 565 \text{ nm}$ 长短不等。有人认为, V_λ 峰值有向长波方向位移的倾向。但是, 从我们的结果来看, $CIE V_\lambda$ 的峰值是可靠的。

表3 V_λ 峰值检验

波 长	被 试	20 岁 以 下 (40 人次平均)	36—42 岁 (60 人次平均)	总 平 均 (归-化)
550		0.951	0.957	0.967
555		1	0.977	1
560		0.946	1	0.991
565		0.888	0.938	0.930

2. V_λ 函数的年龄变化 对 30 岁以下和 30 岁以上的二个年龄组的 V_λ 函数进行比较, 可以看出, 随着年龄的变化, V_λ 函数值也相应地产生一些变化。这种变化, 主要发生在光谱的短波一侧。实验所得结果表明, 在光谱短波一侧, V_λ 函数值随着年龄的增长而产生微小的, 但有规则地下降的趋势(见表 1 和图 2)。

V_λ 函数的年龄变化, 是和人眼的年龄特点相联系的。 V_λ 函数反映视网膜的光谱感受性特征, 但光是通过光学介质和黄斑色素才到达视网膜的。因此, 它们对 V_λ 函数会有一些影响。光学介质(主要是水晶体)和黄斑色素是否随年龄而发生变化? 关于这个问题, 许多学者曾进行过探讨^[6]。

博恩 (Bone) 和 斯帕罗克 (Sparrock)^[7] (1971 年) 的报告指出, 黄斑色素密度与年龄大小没有什么联系。在他们的报告中, 二个年龄组 (20 岁以下和 30 岁以上) 的黄斑色素对波长 460 nm 的最大光密度, 分别为 0.52 和 0.53。这表明, 黄斑色素的光密度对不同年龄组来说, 基本上是不变的。威利 (Weale)^[8] (1963 年) 也作出过同样的结论。因此, 一般认为, 黄斑色素对 V_λ 函数的年龄变异没有什么影响。

许多研究表明, 人眼的光学介质会随着年龄的变化而发生变化。如威利^[9]指出, 随着年龄的增长, 人眼的角膜变黄, 同时产生了角膜光散射。年龄愈大, 散射也愈增加。但是, 在光学介质中, 主要是水晶体随着年龄的增长而愈益变黄、变厚, 造成晶体光密度的增加。塞特 (Said) 和威利^[10]证明, 随着年龄的增长, 水晶体光密度系统地增加, 在光谱的短波一侧, 这种现象更明显一些。他们认为, 这是由于水晶体色素浓度增加和光散射 (Rayleigh 型散射) 的结果。梅勒里奥 (Mellerio)^[11] 曾在二个年龄组中测量了水晶体中心对五个波长的光密度, 其结果与塞特和威利是类似的, 即水晶体的光密度随年龄的增长而增加。而且, 晶体光密度随年龄增长的速度, 向光谱短波一侧逐步加快。我们实验所得的结果显然是晶体这一点所造成的。

水晶体对光谱短波一侧的光密度随年龄而增加的现象, 在颜色视觉的心理物理学研究中也得到了确证。赖特 (Wright) 曾指出, 颜色匹配随着年龄而发生变化。这是由于年龄的增长, 前感受器对光谱兰端的吸收增加的缘故。拉多克 (Ruddock)^[12, 13] 就年龄对颜色视觉的影响作了详细的研究。例如, 在白点色度坐标的测定中, 可以观察到年龄的显著影响。他指出, 随着年龄的增长, 由于光学介质对蓝光的传递率不断降低, 引起白点向

光谱轨迹位移,并且认为,水晶体光密度的变化,是引起这种位移的最主要因素。拉多克还测定了五个年龄组对6个波长(600、560、530、515、460、420 nm)的 V_{λ} 函数值。结果表明, V_{λ} 函数值随年龄而变化的现象,主要表现在光谱的短波一侧。也就是说,在光谱的短波一侧, V_{λ} 函数值随年龄的增长而出现系统地降低的趋势。在光谱的长波一侧,这种变化是不规则的。我们实验的结果,也是与上述情况一致的。

3. 和1924年CIE V_{λ} 的比较:本工作所测得的光谱相对视亮度函数,与CIE V_{λ} 基本上是吻合的,仅在短波一端,比CIE V_{λ} 要高一些。这种情况在国外近年的一些研究中,也是常常遇到的。不少研究者认为,在光谱短波端,CIE V_{λ} 人为地定得偏低。因此,如前所述,贾德于1951年曾提出建议,对CIE V_{λ} 460 nm以下的函数值应加以修正。即使根据贾德提高了的修正数值,一些学者仍然认为还是偏低。例如拉多克^[13]测量了420 nm和460 nm的 V_{λ} 值,结果,比相应波长的CIE V_{λ} 值要高得多。这些研究和本工作测定的结果是一致的,均说明了CIE V_{λ} 在短波端的值偏低一些。

四、结 论

(1) 对30名年龄在30岁以下及20名年龄在30岁以上的男女被试进行了 V_{λ} 函数测定,其峰值在555 nm。

(2) 所得结果(50人平均)与CIE相比较,在光谱短波一端,本工作的函数值高于CIE V_{λ} 值,其余部分,基本上是吻合的,说明人种不同对 V_{λ} 无明显影响。

(3) 随着年龄的增长,在光谱短波一侧的 V_{λ} 值,产生微小的,但有规则地降低的趋势。

本实验工作是在物理所、计量院、建科院物理所等兄弟单位的协助下完成的。谨向上述兄弟单位和有关同志表示衷心的感谢!

参 考 文 献

- [1] Le Grand Y., Light, Colour and Vision. (1968)
- [2] Gibson K. S., Spectral Luminosity Factors. J. O. S. A. Vol. 30, 51 (1940)
- [3] Wyszecki G. and Stiles W. S., Color Science. (1967)
- [4] Bornstein M. H., Color Vision and Color Naming: A psychophysiological Hypothesis of Cultural Difference. (1973)
- [5] Bornstein M. H., and Lawrence E. M., Photopic Luminosity Measured by the Method of Critical Frequency. Vision Res. Vol. 12, 2023 (1972)
- [6] Jameson D. and Hurvich L. M., Handbook of Sensory physiology. Vol. VII/4 460. (1972)
- [7] Bone, R. A. and Sparrock J. M., Comparison of Macular Pigment Densities in Human Eyes. Vision Res Vol. 11, 1057—1064. (1971)
- [8] Weale R. A., The Ageing Eye. Lewis, London, (1963) 转引自(7)
- [9] Weale R. A., Retinal Illumination and Age. Transaction Illum. Soc. Vol. 26, 95—100, (1961) 转引自(6)
- [10] Said F. S. and Weale R. A., The Variation With Age of the Spectral transmissivity of the Living Human Crystalline Lens. Gerontologia (Basel) 3: 213—231 (1959)
- [11] Mellerio J., Light Absorption and scatter in the Human Lens. Vision Res. Vol. 11, 129—141, (1971)
- [12] Ruddock K. H., The Effect of Age upon Colour Vision——I: Response in the Receptoral

System of the Human Eye. Vision Res. Vol. 5, 37—45, (1965a)

- [13] Ruddock K. H., *The Effect of Age upon Colour Vision — II: Change with Age in Light Transmission of the Ocular Media. Vision Res. Vol. 5, 47—58, (1965b)*

A SERIAL STUDY ON THE RELATIVE SPECTRAL LUMINOSITY AMONG CHINESE PEOPLE I. PHOTOPIC RELATIVE SPECTRAL LUMINOSITY

Chen Yong-ming He Bao-yuan et al.

This study was undertaken by using the flicker method with 50 normal vision adult subjects. The visual field subtended two degrees and the level of luminance was 30 cd/m^2 . 18 points, with separations of 10 or 20 nm, were selected for measurement in the wavelength range of 404 to 700 nm. Subjects of two age groups were used: below 30 and above 30 years of age. The results obtained were as follows.

First, the average maximum spectral sensitivity of 50 subjects, was found to be at 555 nm, which is in close agreement with the CIE V_λ . Most of the subjects had a maximum value at 555 nm or 560 nm, which showed that it is considerably concentrated. Furthermore, another verification of the maximum value was made, the result again was proved to be valid.

Second, comparison was made between the two age groups. It indicates that there is a variation with age in the short wave end of the spectrum, where the V_λ value smoothly decreases as age increases.

Third, at the extreme short wavelength end of the spectrum (below 460 nm), the relative sensitivity obtained by the present study is significantly higher than that of CIE, it is rather coincided with the result revised by D. B. Judd in 1951.

Fourth, aside from the deviation mentioned above, the shape of the relative spectral luminosity curve of Chinese people is basically similar to the CIE V_λ . This finding in turn suggests that there is likely no significant ethnological difference between white and yellow races in this respect.