

中国人眼光谱相对视亮度 函数的研究

II 暗视函数

许宗惠 赫葆源 马谋超 张增慧
汪慧丽 张嘉棠 陈永明 纪桂萍

中国科学院心理研究所

一、引言

人眼作为光接受器,对于可见光谱内的不同波长的辐射有不同的视亮度或感受性。随着光照水平的变化,人眼的这种光谱感受性又有明显的变化:在明视条件下,正常人眼最敏感的部位在黄绿区内;在暗视条件下,敏感峰值向短波段推移,在蓝绿区。这种现象称为朴金耶(purkinje)位移。它是由网膜机能的双重性所决定的——明视觉主要是锥体细胞的功能,而暗视觉主要是棒体细胞的功能。

朴金耶效应对目视光度学来说,是一个不利条件。因为所有的光度值在朴金耶效应的范围内都丧失它们的实际意义。比如说,一种蓝绿光和一种红光在明视条件下,人眼看起来是一样亮的。但是在低网膜照明时,同样的这两种光,对暗适应的人眼来说,显然是波长短的光会亮得多。

由于实际存在着两种完全不同的目视光度系统。国际照明委员会(CIE)建议:在任何情况下,只要暗视觉被确信起一定作用,则应给出暗视觉和明视觉的两种光度值⁽¹⁾。

自从1825年朴金耶发现朴金耶效应以来, König(1891)、Houstoun(1913)、Hecht和Williams(1922)、Sloan(1928)、Weaver(1937)、Luckiesh和Taylor(1943)、Wald(1945)、Crawford(1949)等不少研究者都曾测定过在很低网膜照明下,充分暗适应的人眼的暗视函数⁽²⁾。

测定暗视函数, Crawford⁽³⁾的实验被认为比较满意。他的结果和Wald⁽⁴⁾使用阈限法所取得的结果很一致。1951年国际照明委员会决定根据他们的结果,采用了一组暗视函数,并认为它代表30岁以下的完全暗适应被试的平均暗视曲线,即所谓 CIE V'_λ 暗视函数,其峰值在 507nm 处。

有关暗视函数的主要实验,被测对象均是白种人。迄今为止,还未见国际照明委员会提出30岁以上的人的暗视函数。而年龄对 V'_λ 函数无疑是有一定的影响。

为此,我们测定了中国人眼的暗视函数 V'_λ 和年龄对 V'_λ 的影响。

二、实验方法、装置和程序

(一) 方 法

本实验采用明度匹配法,进行暗视函数的测定。这种方法是使用二个相邻刺激视场。一个视场,即标准视场,保持亮度恒定的白光作为标准。另一个比较视场,其波长和光辐射可以改变,也就是在可见光谱范围内,以一定间隔的波长作为比较刺激。受试者的任务就是调整每一个比较视场的亮度,使其变得与标准视场的亮度相同。

暗视觉也称为棒体视觉。在微光条件下,主要由棒体感受细胞起作用。中央窝没有棒体细胞,离开中央窝棒体细胞急剧增加,离中央窝 20° 的地方,棒体细胞的密度增至最大。我们采用了 20° 视场。视场分界线上有一红色注视点,以保证受试者用边缘视觉看视。

(二) 仪器装置

图 1 为本实验所使用的仪器装置示意图。光源 S_1 为溴钨灯(向阳牌,30V,400W,上灯三厂),由稳压电源供电。光束通过透镜 L 聚焦于单色仪(苏制 YM-2 型)入射狭缝。由单色仪出射的单色光束经暗箱中的三道中性漫透射玻璃 NF_1 、 NF_2 和 NF_3 漫射到直角反射棱镜 Pm_1 , 构成比较视场。光源和单色仪之间除透镜 L 外,还安置了中性铜网 NC (需要加强亮度时可取下)和中性无级光楔 NW (由可逆电动机 m 带动)。

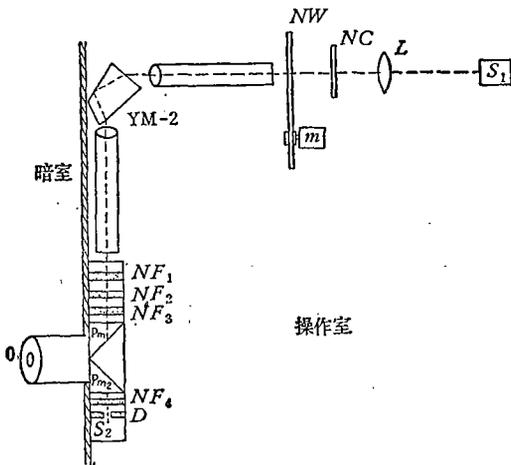


图 1. 实验装置示意图

(三) 实验程序

试验前,首先对受试者进行色盲和视力检查。主试按规定好的指导语说明实验目的和要求。然后让受试者进入暗室,暗适应40分钟。受试者经过练习,掌握判断标准后,开始正式实验。

实验时,由主试选择电压和增减铜网 NC 粗调单色光强度。受试者通过按键,自行改变中性光楔 NW 位置,直至看到两半视场保持相同亮度时停止按键。主试即刻记下读数,再移动 NW 位置,让受试者再作第二次调整。每一测试波长受试者都做升、降序各一次(暗 \Rightarrow 明)。

测试波长范围是 420—640nm,除峰值附近(500—520nm)增加两个波长(507nm 和 515nm)外,其余刺激均间隔20nm。共选定了14个测试刺激,每一刺激的宽度为 5mm。整

个实验程序一半是从短波开始,另一半从长波开始。

本实验用真空热电偶(英制FT-16型玻璃窗口),连接晶体管直流微伏计(国产JZW-1型)和直流数字电压表(国产PZ-5型),测得单色仪出射狭缝处的每个测试刺激的辐射能量。然后,再加权中性铜网、中性光楔和三块中性漫透射玻璃的透过率。

三、结果和讨论

实验的受试者为工人、解放军和机关干部。以30岁为界划分标准组和比较组。标准组(20—30岁)13人;比较组(30岁以上)11人。现将这两组实验结果及与之比较的CIE V'_λ 函数列于表1。

(一) 与CIE V'_λ 函数比较

1951年国际照明委员会规定暗视函数时指出, V'_λ 代表30岁以下青年人眼在完全暗适应条件下,对微光的光谱感受性。因此,我们以标准组的暗视函数与之比较更为合适。图2为表1内1、2栏函数值的图示,实线为本实验 V'_λ ,虚线为CIE V'_λ 。纵坐标为相对视亮度函数值,用对数表示,横坐标为波长(nm)。经比较表明,我们的 V'_λ 曲线与CIE V'_λ 曲线的形状比较相似。只是本实验的 V'_λ 峰值同CIE V'_λ 相比,向长波位移8nm(CIE曲线的最敏感点为507nm,而我们曲线的最敏感点为515nm)。从现有材料来看, V'_λ 函数的峰值并不一致:有些研究如Sloan,其峰值在500nm左右;Wald其峰值在505nm;而有的研究如Weaver^[6]则在513nm处。这与我们的实验结果颇为接近。但是,较多的研究材料如Hecht和Williams^[6]、Luckiesh和Taylor^[7]、Kinney^[6]等,其峰值都在510nm处。Stiles和Smith^[9]曾建议采用的那条平均暗视曲线的峰值也在510nm处。

我们认为本研究结果与CIE V'_λ 曲线的差别可能由于我们实验所采用的亮度水平(约 $8.8 \times 10^{-4} \text{cd/m}^2$)高于Crawford(约 $3 \times 10^{-5} \text{cd/m}^2$)和Wald(约 10^{-6}cd/m^2)的亮度而引起的。

对人眼能起作用的亮度刺激范围大约在 $10^{-6} \text{cd/m}^2 - 10^6 \text{cd/m}^2$ (包括明视觉、间视觉和暗视觉)。显然,人眼在完全暗适应条件下的绝对阈限,就是暗视的下限。暗视的上限

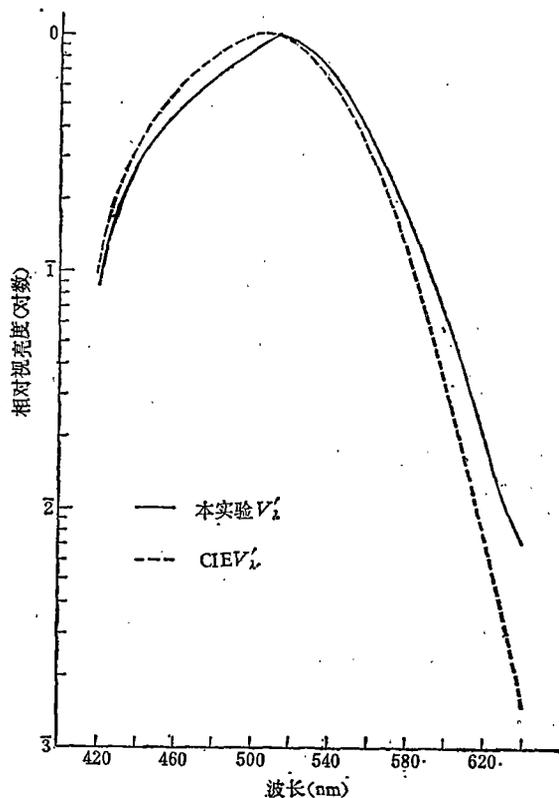


图2 本工作 V'_λ 与CIE V'_λ 曲线比较

表 1 暗 视 函 数

波 长	CIE V_{λ}'	本 工 作 V_{λ}'	
		标准组(30岁以下)	比较组(30岁以上)
420	0.0966	0.087909	0.065841
440	0.3281	0.291075	0.213028
460	0.567	0.458961	0.381501
480	0.793	0.647472	0.593475
500	0.982	0.831870	0.820517
507	1	0.916677	0.925215
515	0.975	1	1
520	0.935	0.919084	0.922512
540	0.650	0.720789	0.782948
560	0.3288	0.384828	0.387964
580	0.1212	0.168257	0.184253
600	0.0332	0.065436	0.063256
620	0.00737	0.018679	0.016562
640	0.001497	0.007017	0.005368

是多少呢? Walters 和 Wright 用 2° 视场在不同亮度水平下做实验, 表明如网膜照明不超过百分之几个“楚兰德”(troland), 也就是用自然瞳孔看视低于 $10^{-3}\text{cd}/\text{m}^2$ 亮度时, 那么暗视曲线仍然有效。Teele^[10] 指出: 在 $1000\text{ml}-0.5\text{ml}$ 左右的亮度范围内, 人眼对短波的感受性不断提高, 对长波的感受性不断下降。尤其在 $200\text{ml}-1\text{ml}$ 之间, 这种变化特别显著。当人眼达到对亮度低于 0.5ml 的适应时, 视见效应曲线又重新达到稳定。虽然有关相对视亮度的文章中提到暗视的上限约为 $10^{-3}\text{cd}/\text{m}^2$, 但是, 实际上要确定它的上限是困难的。另外 Kinney^[11] 的实验证明了在 0.1ml 范围内, 随着阈限以上的亮度提高, 相对视亮度曲线不是没有变化。其峰值甚至能够变化到 520nm 以上; 国际照明委员会第十六届会议上, 记载了人眼对于介于 $10^{-5}-100\text{cd}/\text{m}^2$ 之间的几种不同亮度级适应的光谱感受性。在这些不同亮度水平上的相对视亮度函数各不相同, 其中包括 $10^{-3}\text{cd}/\text{m}^2$, $10^{-4}\text{cd}/\text{m}^2$ 和 $10^{-5}\text{cd}/\text{m}^2$ 时的函数值也不完全一致^[12]。本研究 V_{λ}' 和 CIE V_{λ}' 曲线的差别, 可能是由于人眼对不同亮度的暗适应造成的: 我们所使用的接近间视的亮度水平容易使网膜边缘的椎体细胞发生作用。

(二) 年龄对 V_{λ}' 函数的影响

国际照明委员会并没有对 30 岁以上的被试进行 V_{λ}' 函数的测定。超过 30 岁, 它会发生什么变化呢? 我们以标准组和比较组的实验结果进行比较。图 3 表明这二条曲线的形状基本一致, 它们的峰值都在 515nm 。看来年龄对峰值似乎没有影响。峰值附近的函数几乎完全重合。它们在光谱长波一侧的函数未见系统的差异。唯独值得注意的差别是在短波段, 即 30 岁以上的受试者的 V_{λ}' 函数在短波一侧比 30 岁以下的低。国际照明委员会曾指出, 对 30 岁以上年纪的人的眼睛, 现有的有限资料指出在光谱蓝端, 暗视函数值趋于减小^[13]。我们的实验结果证实了这一点。

视亮度函数显然决定于网膜感光系统的光谱感受性。然而黄斑色素和眼内光学介质的存在, 对它也有一定影响。黄斑色素的密度基本上是不随年龄变化的。况且, 黄斑色素

密集在中央窝,它对 V'_λ 函数(边缘视觉)的影响,似乎可以不予考虑。角膜和眼睛内部液体吸收一些紫光和紫外光,而且角膜、玻璃体等都随年龄的增长而不断变黄。但是,它们比起水晶体对 V'_λ 函数的影响来说,显然,后者是主要的。Said和Weale⁽⁹⁾通过光密度实验对水晶体的变黄过程予以定量化,发现随着年龄的增长,不仅水晶体的总透过率有所降低,而且愈益变黄,以致光谱短波的相对透过率变得更低。他们认为这种变化的物理原因是水晶体色素浓度的相加累积和光散射。Mellerio⁽¹⁰⁾获得了与Said和Weale相似的实验结果。就摘除水晶体的受试者(aphakic)来说,他们对紫光和紫外光的 V'_λ 函数会有很大提高⁽¹¹⁾。我们实验的结果是与上述材料一致的。

四、结 论

(1) 测定了30岁以下13名年轻人的 V'_λ 函数。结果表明,整个曲线与CIE V'_λ 曲线的形状基本一致,只是曲线向长波段位移,峰值在515nm。

(2) 通过不同年龄组的 V'_λ 函数的比较,表明二曲线峰值完全重合,长波段也未见系统的差异。唯短波段 V'_λ 有随年龄增大而下降的趋势。

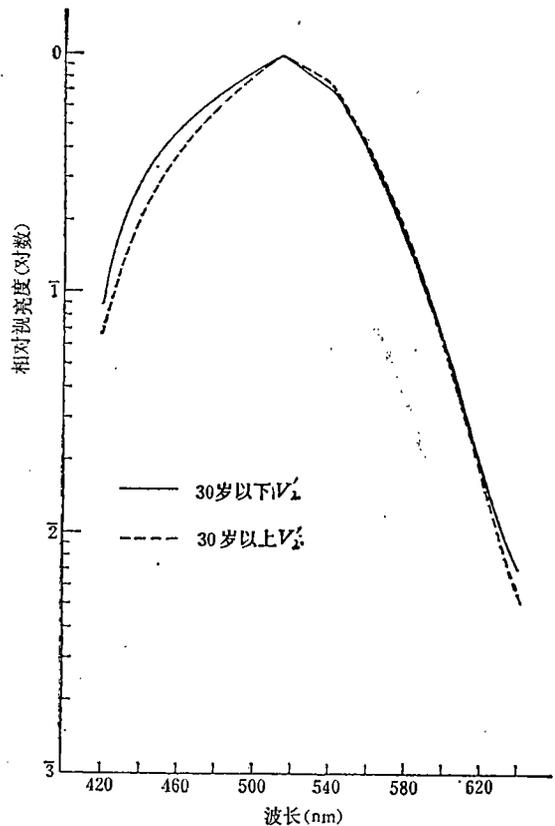


图3 二个年龄组的 V'_λ 曲线比较

参 考 文 献

- {1} CIE Publication №18, Principles of Light Measurements, 1970
- {2} Le Grand Y.: Light, Colour and Vision, chap 6, 1968
- {3} Crawford B. H.: The scotopic visibility function, Proc. Phys. Soc., B 62.2, 1949
- {4} Wald G.: Human vision and Spectrum, Science, 101, 653, 1945
- {5} Weaver K. S.: The Visibility of radiation at low intensities, J. O. S. A., 27, №36, 1937
- {6} Hecht S. and Williams R. E., J. Gen. Physiol., 5, 1.引自{5}, 1922
- {7} Luckiesh M. and Taylor A. H.: A Summary of researches in Seeing at low brightness-levels, Illum., Eng. (N. Y.), 38, 189, 1943
- {8} Kinney J. A. S.: Sensitivity of the eye to spectral radiation at scotopic and mesopic intensity levels, J. O. S. A., 45, 1955
- {9} Stiles W. S. and Smith, T.: A mean Scotopic visibility curve, Proc. phys. Soc., 56, 251, 1944
- {10} Teele R.: Photometer for luminescent materials, J. O. S. A., 35, 1945
- {11} Kinney J. A. S.: Comparison of scotopic, mesopic and photopic spectral sensitivity curves, J. O. S. A., 48, 1958

- (12) International commission on Illumination, *Jin A.*, 162, 1967
- (13) Said F. S. and Weale R. A., The Variation with age of the spectral transmissivity of the living crystalline lens, *Gerontologia (Basel)* 3, 213, 1959
- (14) Mellerio J.: Light absorption and Scatter in the human lens, *Vision, Res.*, 11, 129, 1971
- (15) Le Grand Y.: The Spectral luminosity, In *Handbook of Sensory Physiology*, VII/4, Visual Psychophysics, chap 15, 1973

A SERIAL STUDY ON THE RELATIVE SPECTRAL LUMINOSITY AMONG CHINESE PEOPLE II. SCOTOPIC RELATIVE SPECTRAL LUMINOSITY

Xu Zong-hui He Bao-yuan et al.

(*Institute of Psychology Academia Sinica*)

Scotopic relative spectral luminous efficiency functions have been determined with brightness matching method at $8.8 \times 10^{-4} \text{cd/m}^2$. There was a dim red fixation point on the upper edge of a visual field which had a diameter subtending 20° at the eye, and was divided vertically into two equal parts, one was the standard, and the other illuminated with various comparison lights. Two age groups of subjects were used, one below 30 and the other above 30 years, including 13 and 11 normal vision subjects respectively. 14 points were selected for measurement in wavelength ranging from 420 to 640 nm.

The results indicated:

- 1) The average maximum spectral sensitivity of the subjects equals to 515 nm. It is slightly higher than that of CIE V'_λ which occurs at about 507 nm.
- 2) The comparison between two age groups shows that V'_λ values decrease in the short wave side of spectrum with the increase of age.