

中国人眼光谱相对视亮度函数的研究*

赫葆源 马谋超 陈永明 许宗惠
纪桂萍 张嘉棠 张增慧 汪慧丽

中国科学院心理研究所

问 题

人眼对光谱各波长的灵敏度,是产生一种阈限反应或主观相等亮度所需要的辐射能量的倒数。它们原称光谱视亮度,现在我们称之为光谱相对视亮度^(5,1)。即使是等能光谱,各波长引起的相对视亮度也很不相同。具体测量时除绝对阈限法外,一般常用匹配法:使人眼将不同波长的光谱色光分别和一个固定强度的白色标准光作亮度匹配,达到匹配所需的光能取其倒数,即相对视亮度。以各波长中的视亮度相对于标定为1的视亮度为最大值,所获得的数值即各波长辐射的相对视亮度函数 $V(\lambda)$, 据此绘制的曲线即光谱视亮度曲线。人眼视觉按明度水平不同有明视觉和暗视觉,因此,相对视亮度函数也分为这两种,前者称为 $V(\lambda)$, 后者为 $V'(\lambda)$ 。两者各自的最大明度的波长有一定的位移,这就是朴金耶现象。

相对视亮度函数在有关光度学、色度学的实践中应用很广。例如对于发射连续光谱的光源,亮度计算公式为⁽⁶⁾

$$L = K_m \int V(\lambda) N(\lambda) d(\lambda)$$

这里 K_m 是决定于所选单位的一个常数, $N(\lambda)$ 是光源的光谱辐射。原则上,积分的极限是零和无限大,但当 $V(\lambda) = 0$, 即在可见光谱以外时,我们可以把这两个极限作为可见光谱的极限。光通量的度量公式为⁽⁷⁾

$$\Phi V(\lambda) = K_m \int V(\lambda) \Phi_{\theta}(\lambda) d(\lambda)$$

这里 $\Phi V(\lambda)$ 为光通量, $\Phi_{\theta}(\lambda)$ 为辐射通量, $K_m = 680$ 流明/瓦特。又如关于一个表面所显示的亮度,如我们称 L 为有光照明的一个给定表面的亮度或刺激效应,则可推导出 L 不仅取决于光源的辐照度分布 $H(\lambda)$ 和该表面的反射分布 $R(\lambda)$, 而且还依赖于人眼对被反射光的波长范围的相对视亮度。这关系可用下列公式表示⁽⁸⁾

$$L = H(\lambda)R(\lambda)V(\lambda)$$

* 本研究承我院物理研究所三室初贵荫等同志, 计量研究院光学室, 建筑科学院物理研究所, 电光源研究所等协助安装、调试、借用、测量、标定仪器; 中国人民解放军 80804 部队, 某警卫部队, 我院科仪厂, 东升人民公社大钟寺第九生产队等单位选派被试人员, 特致谢意!
光谱相对视亮度函数在光度学术语中通常称为相对光谱光效率 (relative spectral luminous efficiency)

由此可见 $V(\lambda)$ 应用的广泛性, 从而它在理论和实践方面的重要性日益增大的原因便不言而喻了。

对于人眼 $V(\lambda)$ 的测定开始于上个世纪初期, 其后很多人作过类似的研究工作。1924年国际照明学会(CIE)采取了其中用不同研究结果所合成的 $V(\lambda)$ 曲线, 成为后来 CIE1931 标准观察者的视亮度曲线⁽⁹⁾。

几十年来关于 $V(\lambda)$ 的研究和应用揭示出不少新问题^(11,12)。1975年十八届 CIE 会议附设的视觉委员会(TC1—4)主席 Kinney(1975)⁽¹⁰⁾ 综述报告, 提出各种条件, 如亮度级、视野大小、色觉特性, 是否存在 $V(\lambda)$ 不适当的使用问题。此外, CIE $V(\lambda)$ 的依据仅只是欧美白种人的数据, 关于这一问题, M. So, (1920)⁽¹³⁾、I. G. H. Ishak, (1952)⁽¹⁴⁾、M. H. Bornstein, (1973)⁽¹⁵⁾、R. A. Bone, 等(1971)⁽¹⁶⁾ 的研究结果并不一致, 所以是个有待进一步印证的问题。

基于上述理由, 我们进行了一系列的实验研究, 总标题为“中国人眼光谱相对视亮度函数的研究”下分“Ⅰ、明视函数”、“Ⅱ、暗视函数”、“Ⅲ、不同大小视野对 $V(\lambda)$ 的影响”和“Ⅳ、亮度级对光谱相对视亮度的影响”四个付标题。除每个付标题都各有其专门研究报告外, 现将整系列的实验研究及其结果作一综合介绍如下。

实验条件和方法

1. 明视函数的测定 亮度匹配采用闪烁光度法, 单色光由 YM—2 型单色仪提供。各单色光分别与一恒定标准白光以 18 周秒的频率交替呈现。当两种光亮度不同时, 便看到一定的闪烁。被试者移动光楔, 调整单色光强度, 直到闪烁减到最小, 或不闪为止, 这时两种光的视亮度即已相等, 主试者记下光楔刻度, 借以换算单色光强度。标准光亮度为 30 尼特, 2° 视野, 中央看视。被试者色觉、视力均正常, 男女共 50 名, 其中 20—30 岁 30 名, 30 岁以上 20 名。测试波长自 404 至 700nm (毫微米), 每隔 10nm 选一波长作刺激点, 近峰值区增加 555nm 一个点, 各点波长宽度 5nm。实验步骤、能量测法详见付标题 I⁽¹⁾。

2. 暗视函数的测定 采用明度匹配法, 使用 20° 视野, 分成左右两半, 一半为亮度恒定的白光作为标准, 亮度级的 8.8×10^{-4} 尼特; 另一半为单色光。视野分界线上有一弱红色注视点, 以保证被试者使用边缘视觉看视。测试时被试者调节单色光强, 直到两半视野亮度匹配为止。单色波长自 420 至 640nm, 每隔 20nm 选一刺激点, 峰值附近增加 507 和 515nm 两个点, 每点波长宽度 5nm。标准组被试者为 13 名颜色视觉正常男女工作人员, 年龄 20—30 岁。实验步骤及能量测定详见本系列付标题 II 专门报告⁽²⁾。

3. 不同大小视野对 $V(\lambda)$ 的影响 实验设备和步骤等同于明视函数的测定⁽¹⁾。仅只对视野曾通过小孔光阑的计算加以大小的改变。被试者为五名有本系列测试经验的男女工作人员。共作过 $7^\circ 40'$ 和 $20'$ 两种大小视野的测试。在整理材料时引用了付标题 I 明度函数测定的结果和 CIE $V_{10}(\lambda)$ 以资比较。实验步骤等详见付标题 III 的专题报告⁽²⁾。

4. 亮度级对 $V(\lambda)$ 的影响 本实验使用了两种探测方法: 第一法完全按照明视 $V(\lambda)$ 的测试方法, 进行了四种亮度级的 $V(\lambda)$ 测定。这四种亮度级是 3、30、300 和 3000 尼特。通

过一个孔径为1.8毫米的人工瞳孔射入眼内，相应于网膜照度级7.62、76.2、762和7620td。另一法采用了差别阈限法，以第一法所得结果作为各亮度级各波长的标准亮度，每次分别以此为起点，先给出单色光，然后快速给出亮度的增量或减量。要求被试者在刚刚觉察到亮度已有差别时及时报告。主试者记录亮度的阈限差别，以便计算整理，与第一法比较，探讨亮度级与 $V(\lambda)$ 的关系。详细步骤见付标题 IV 的专题报告⁽⁴⁾。

结 果

1. 明视函数的测定 图 1 绘出 50 人测试结果的 $V(\lambda)$ 曲线，附有 CIE(1931) $V(\lambda)$ 曲线，以及 Judd 对其短波端的修正值。表明我们的曲线峰值位置和大部分走向都和 CIE $V(\lambda)$ 曲线吻合或接近；唯有在短波端我们的函数高于 CIE 曲线，但这却与 Judd 的修正值很接近。

图 2 是 30 岁以上和以下两组被试者 $V(\lambda)$ 曲线的比较。可以看出，由于年龄增长，光谱短波一侧， $V(\lambda)$ 函数值有降低的趋势。

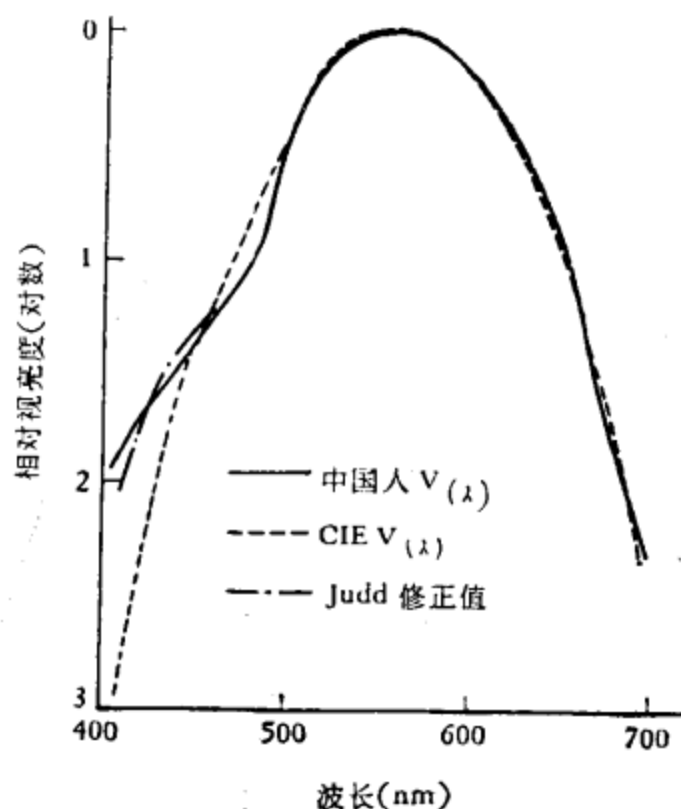


图 1 中国人 $V(\lambda)$ 与 CIE $V(\lambda)$ 比较 (附 Judd 修正值)

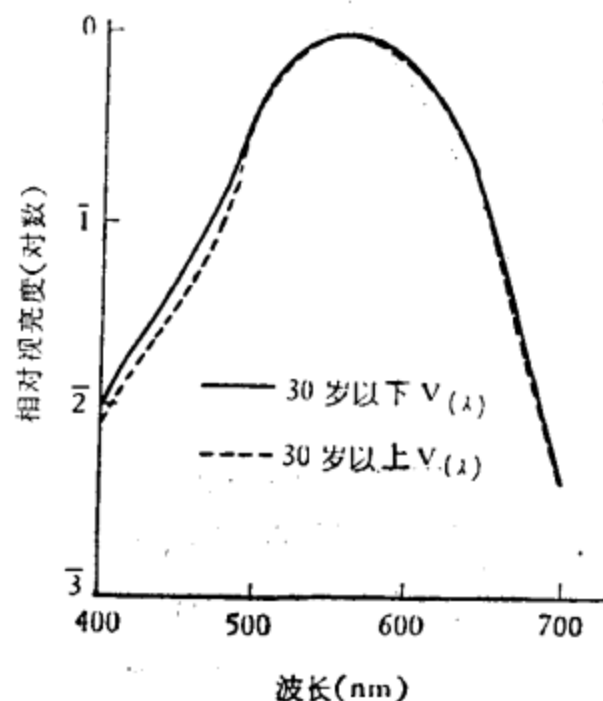


图 2 二个年龄组的 $V(\lambda)$ 曲线比较

2. 暗视函数的测定 图 3 是 13 名被试者的 $V(\lambda)$ 平均曲线，也附有 CIE $V'(\lambda)$ 。可以看出曲线形状相似，不过我们的曲线向长波方面稍有位移。

图 4 是我们 30 岁以上和以下的 $V(\lambda)$ 两条曲线的比较。可以看出随着年龄增长，短波一侧， $V'(\lambda)$ 函数有降低的趋势。

3. 不同大小视野对 $V(\lambda)$ 的影响 图 5 展示了不同大小视野的 $V(\lambda)$ 的比较。其中包括本实验所作的 $7^\circ 40'$ 和 $20'$ 两组数据、本系列研究 I 中 2° 视野的结果，以及 CIE $V_{10}(\lambda)$ 函数。从图中可见，在峰值短波一侧，随着视野的增大，函数显著提高，这情况在与小视野比较时尤其显出 $20'$ 视野 $V(\lambda)$ 有较大的下降。

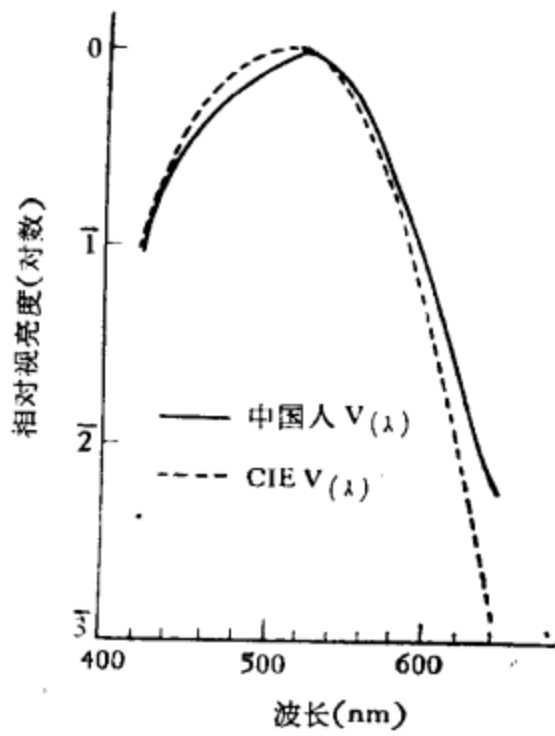


图 3 本工作 $V'(\lambda)$ 与CIE $V'(\lambda)$ 曲线比较

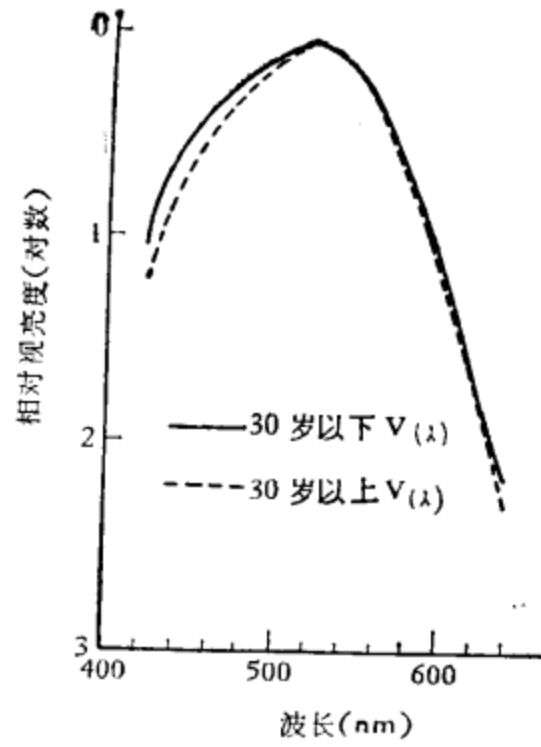


图 4 二个年龄组的 $V'(\lambda)$ 曲线比较

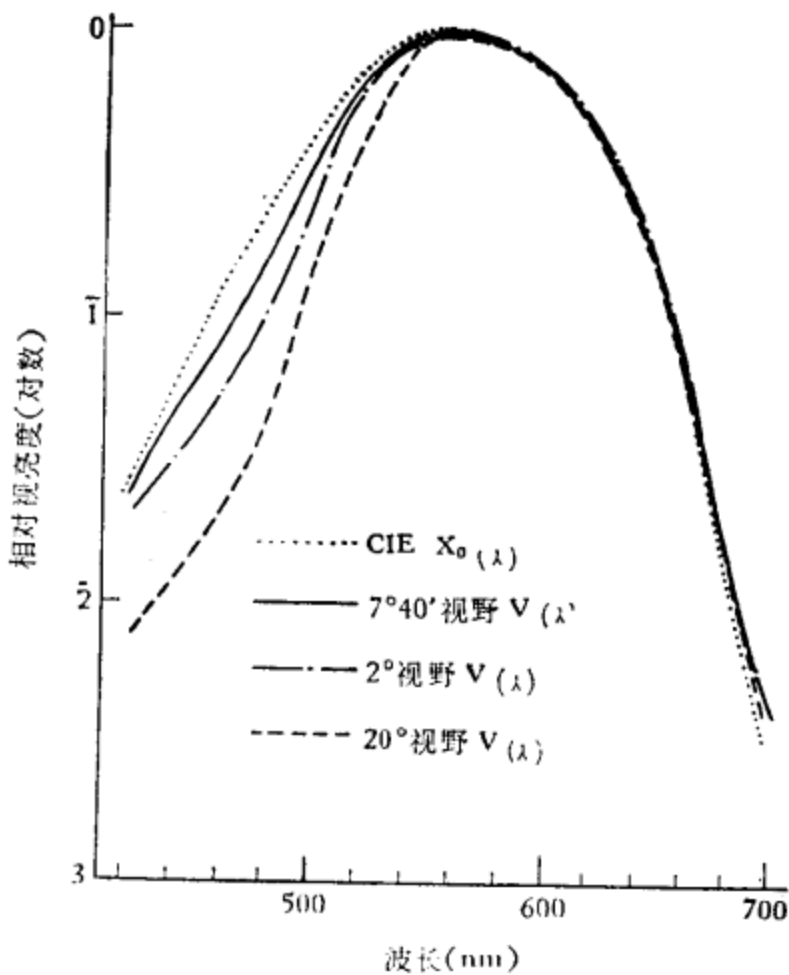


图 5 四种不同大小视野的 $V(\lambda)$ 的比较

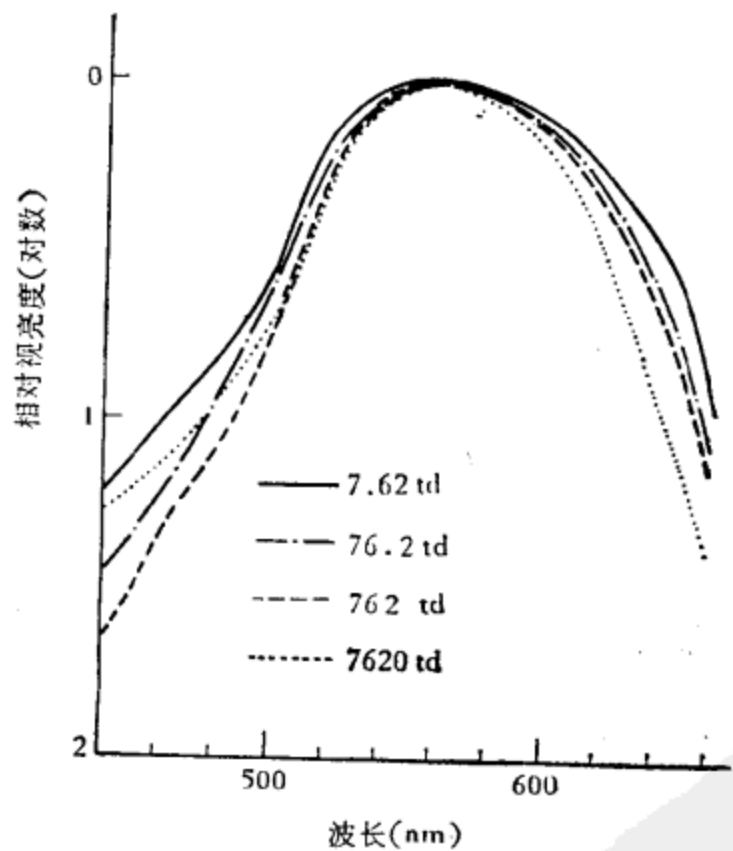


图 6 四种亮度级的光谱相对视亮度

4. 亮度级对 $V(\lambda)$ 的影响 图 6 和 7 画出了四种亮度级的 $V(\lambda)$ 曲线, 其中图 6 使用的是闪烁光度法, 图 7 是明度差别阈限获得的结果。可以看出, 这两种测试方法的结果同样表明: 随着亮度的提高, $V(\lambda)$ 曲线变得狭窄了。附带说明, 本实验中76.2td (亮度为30尼特) 的 $V(\lambda)$ 函数与本系列研究 I 明视函数⁽¹⁾相比较, 彼此亮度相同, 其结果也很近似, 可以相互印证。

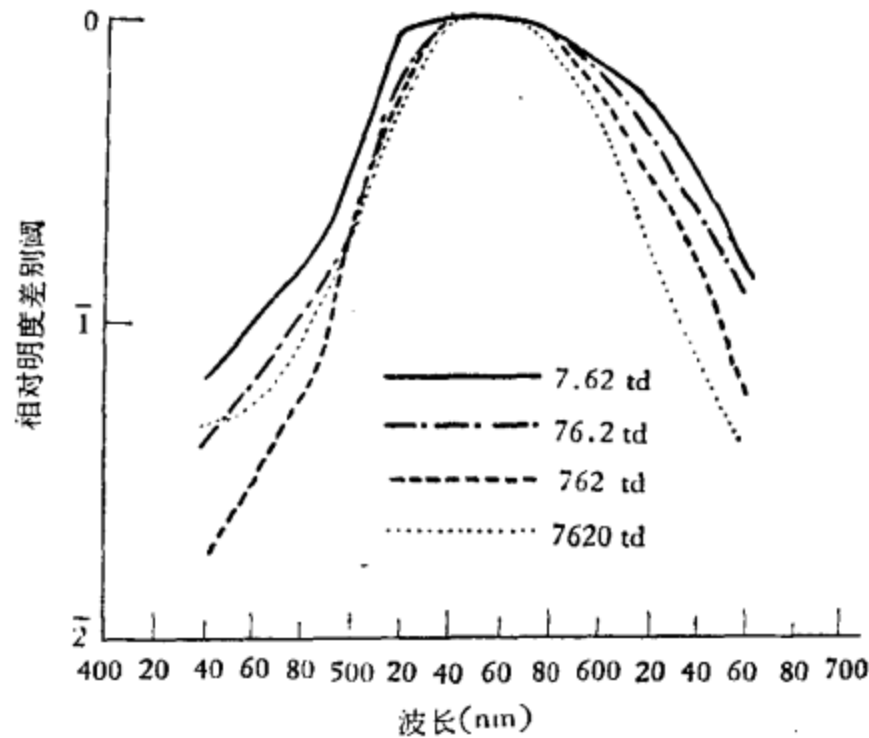


图 7 不同亮度级的相对明度差别阈限 (作为波长的函数) 的比较。

讨 论

(1)、明视函数的测定, 发现中国人眼明视光谱相对视亮度函数与 CIE $V(\lambda)$ 尤其是经 Judd 修正后, 无显著的差别。关于 $V(\lambda)$ 是否要受人种不同的影响这一问题, 曾有过一些争论和怀疑, 如 So (1920)⁽¹³⁾, Ishak (1952)⁽¹⁴⁾ 等认为人种学上的差异不会对 $V(\lambda)$ 有影响, 但其实验材料似尚不够充分。据 Bornstein (1973)⁽¹⁵⁾ 的论据, 认为小于 500nm 的波长, 色素深的人要比色素浅的人函数较低。这一论点似乎又同 Bono、Sparrock (1971)⁽¹⁶⁾ 所作不同种族、年龄、不同肤色或眼睛颜色的人, 其黄斑色素的密度无显著差别这一推断显然矛盾。总之, 目前世界上对这一问题似乎尚无确切结论。关于这一问题的详细讨论可参看本系列研究 I “明视函数”⁽¹⁾ 的本文及其参考文献。反回来看本研究相应的结果, 可能支持人种差别不反映在 $V(\lambda)$ 上这一论断。

(2)、我们测得的暗视函数 $V'(\lambda)$ 揭示, 其结果与 CIE 的 $V'(\lambda)$ 相比较稍向长波一侧位移约 8nm。其原因可能从追溯据以制定 CIE $V'(\lambda)$ 曲线的两项研究来寻求, 一项是 Wald (1954)⁽¹⁷⁾, 其亮度级约 10^{-6} 尼特; 另一项是 Crawford (1949)⁽¹⁸⁾, 亮度级约 3×10^{-5} 尼特。本研究中暗视 $V(\lambda)$ 的亮度级约 8.8×10^{-4} 尼特, 较上述两项研究都高。据 Kimmey (1958)⁽¹⁹⁾ 的资料, 亮度增加, 视亮度曲线会发生位移, 峰值甚至能够至 520nm 以上。关于这一点, 间视觉中视觉受器之间相互作用可以作为旁证⁽⁶⁾。进一步的讨论可参看本系列研究 II “暗视函数”及其参考文献⁽²⁾。

(3)、视野不同大小对 $V(\lambda)$ 影响的研究, 显示了在短波一侧大视野比小视野的相应 $V(\lambda)$ 值较高。图 5 所示 10° 、 $7^\circ 40'$ 、 2° 和 $20'$ 视野的比较, 其中前两种视野已包含中央窝外部分, 后两种则只限于中央窝内。因此, 上述差别可用中央窝内黄斑色素对短波有吸

收作用,以及中央窝外感受体比中央窝内的敏感这一论据来解释。关于这个问题深入的讨论,请参看本系列研究Ⅲ的本文及其参考文献。(3)

CIE(1931) $V'(\lambda)$ 和(1964) $V_{10}(\lambda)$ 之间也有一定的差别。为此,CIE规定了它们对不同大小视野的使用范围。据我们实验的结果,可以看到不同大小视野的 $V(\lambda)$ 短波一侧很不相同,尤其是接近点光源的20'视野更表现了明显的区别。因此,我们认为对待小视野的 $V(\lambda)$ 问题,是值得进一步探讨的。

(4)、从我们的系列研究Ⅳ的结果可以看到,单色光的相对视亮度曲线随亮度级的增高而变狭(如图6、7所示)。这结果与Wilson(1964)⁽²⁰⁾等人关于光谱感受性与亮度级无关的说法不一致,而与Sporling⁽²¹⁾、Sloan⁽²²⁾等人的有关结果趋向相同。至于亮度增高导致长波区域感受性降低,早有Ives(1912)⁽²³⁾等人研究、描述过,并称之为逆朴金耶效应(inverse Purkinje effect)。后来有人继续作了表证⁽²⁴⁾,其中有些细节和我们一致,有些则不然。前人发现的研究结果的矛盾,有人曾试图以是否使用闪烁光度法来解释,这是我们所不能同意的。因为我们的实验设计使用了闪烁光度法和差别阈限法两条探索途径,得到了一致的结果,我们认为这是颇有说服力的。(有关的详细讨论和参考文献,请参阅本系列研究Ⅳ⁽⁴⁾)。

CIE(1931) $V(\lambda)$ 曲线原是以明视光谱感受性的不变性为前提而广泛应用的。现在看来,这种假设的真实性已值得怀疑。第十八届CIE会议所属视觉委员会主席Kinney⁽¹⁰⁾提出现用的 $V(\lambda)$ 标准曲线在各种不同条件下是否可能产生误用问题,并不是没有根据的。当然如何划分使用范围更为恰当,是有待进一步探索的问题。从亮度水平对 $V(\lambda)$ 的影响来看,有可能推论 $V(\lambda)$ 是三种锥体细胞的总合结果,它们的相互作用是随着不同亮度水平而发生变化的。如果确是这样,则其机制便值得深入探讨了。

结 束 语

本课题系列地研究了有关中国人眼光谱相对视亮度函数的一些问题,包括明视 $V(\lambda)$ 和暗视 $V'(\lambda)$ 的测定,不同大小视野条件下的 $V(\lambda)$ 曲线,以及不同亮度级对 $V(\lambda)$ 的影响。从这一系列研究的结果,可以得出下列结论:

(1)、中国人眼光谱相对视亮度曲线,与CIE相应的曲线相比较无显著差别。可以推论,人种学的差异对光谱视亮度没有重要影响。

(2)、随着年龄的增长,光谱短波一侧 $V(\lambda)$ 和 $V'(\lambda)$ 函数都有降低的趋势。

(3)、在四种不同大小的视野条件下,在峰值的短波一侧,随视野的增大, $V(\lambda)$ 表现了系统的升高,长波一侧无可见的变化。

(4)、在四种亮度级的条件下,随亮度级的增高, $V(\lambda)$ 曲线整个形状变狭。这一现象提示了对现在CIE $V(\lambda)$ 函数的恰当使用范围问题,应作进一步的考虑。

参 考 文 献

- (1) 陈永明等1978年,中国人眼光谱相对视亮度函数的研究, I, 明视函数, 中国科学院心理研究所, 待发表

- (2) 许宗惠等：中国人眼光谱相对视亮度函数的研究，Ⅰ，暗视函数，中国科学院心理研究所，待发表，1978年
- (3) 纪桂萍等：中国人眼光谱相对视亮度函数的研究，Ⅱ，不同大小视野对 $V(\lambda)$ 的影响，中国科学院心理研究所，待发表，1978年
- (4) 马谋超等：中国人眼光谱视亮度函数的研究，Ⅳ，亮度级对光谱相对视亮度的影响，中国科学院心理研究所，待发表，1978年
- (5) Stevens, S. S. (Ed), Handbook of Experimental Psychology, 814
- (6) Le Grand, Y. 原著，张增慧等译，光谱视亮度，1975年
- (7) Thomas, W., Jr(Ed), SPSE Handbook of Photographic Science Engineering, Section2, 1973
- (8) Woodworth et al, Experimental Psychology, 3rd ed. Chapt. 9, 1971
- (9) Le Grand, Y., Light, Colour & Vision, 1968
- (10) Kinney, J. A. S., CIE, TC-14 "Vision". 引自山中俊夫，照明学会杂志，昭和51年，60卷，11，596—599，1975
- (11) Hsia, Y. (夏云) et al., 3rd, Vision Visual Perception, 1965
- (12) Wagner, G. et al, J. O. S. A. V. 62. 16. 1972
- (13) So, M., Proceedings of the Japanese Mathematics Physics Society, V. 2. 177—184 1920. 引自 Bornstein, M. H. Psycho. Bull., V.80. 4. 1973
- (14) Ishak, I. G. H, J. O. S. A., V. 42. 534, 1952
- (15) Bornstein, M. H., Psych. Bull., V.80, No4, 1973
- (16) Bone, R. A. et al. Vision Resarch, V. 11. 1057—1064, 1971
- (17) Wald, G., Science, V. 101. 653, 1945
- (18) Crawford, B. H., Proc. Phys. Soc., B, 63. 321, 1949
- (19) Kinney, J. A. S., J. O. S. A., V. 48. 3. 1958
- (20) Wilson, B. C., Doctoral Dissertation, New York Uni., 引自 D. H. Krantz, in Handbook of Sensory Physiology, V. VII. 4ed. by Jamson, D., et al. 1964
- (21) Sperling, H. G. et al., J. O. S. A, V. 49. 983—989, 1959
- (22) Sloan, L. L., Psych. Monog., V. 38. no. 173. 引自 Marks, L. E., 1974. Sensory Processes, 65—67. 1928
- (23) Ives, H. E., Phil. Mag., 24. 引自 Wright W. D., The Measurement of Colour, 77, 1912
- (24) Thomson, L. L., J Physiol., V.106. 368—377, 1947

A SYSTEMATIC STUDY ON THE RELATIVE SPECTRAL LUMINOSITY AMONG CHINESE PEOPLE

He Bao-yuan Ma Mou-chao Chen Yong-ming

Xu Zhong-hui Ji Gui-ping Zhang Jia-tang

Zhang Zeng-hui Wang Hui-li

The works on relative luminous efficiencies, or $V(\lambda)$, had been studied by many researchers, and proved to be very useful in both theoretical and practical fields of vision and colour technology. In the years 1924 and 1951, the spectral sensitivity curves for photopic and scotopic visions were established by the C. I. E. respectively. But in the 18th session of C. I. E., which was held in 1975, the chairman of the committee of vision, J. A. S.

Kinney had raised the question whether there exist misuses of $V(\lambda)$ or not in its applications. Together with other disagreements concerning $V(\lambda)$, this inquiry suggested us to think of the appropriateness of the application of C. I. E. $V(\lambda)$ in China, where the people differed ethnologically from the observers of C. I. E. $V(\lambda)$. For this reason, we undertook a serial study on the relative spectral luminosity among Chinese people, the result we obtained reads as follows: (1) Both photopic and scotopic relative spectral luminosity of Chinese people are rather coincident with or run very close to those of C. I. E. and especially that with D. B. Judd's revision. These findings in turn support such opinions which suggested that there is likely no significant ethnological difference in this respect. (2) Both photopic and scotopic relative spectral luminous efficiency functions increase with age on the short wave side of the spectrum. (3) Under the conditions of 4 sizes of visual angle, the results show that as the size of visual field increases, $V(\lambda)$ heightens on the short wavelength side accordingly. (4) Under the conditions of 4 luminosity levels, the $V(\lambda)$ curves become slender when the luminosity rose.



视场亮度变化对视觉对比感受性的影响*

焦书兰 荆其诚 喻柏林

中国科学院心理研究所

前 言

人的视觉系统对一定视场亮度适应以后, 视场亮度突然改变产生视觉的调整过程, 表现为对比感受性的变化。这是生活实践中经常遇到的情形。比如, 汽车司机突然从亮度较高的公路照明转向较暗的公路照明; 仪表监视人员在看了暗的环境之后, 突然阅读亮度高的仪表盘; 工厂的工人在注视了亮度高的对象之后, 有时须将眼睛移向较暗的工作对象。所有上述情况对视觉感受性造成的影响, 我们称为过渡适应效果。

工业实际照明条件常出现两种情况:

(1) 工作者在稳定注视较高亮度视场中的工作对象后, 有时须将眼睛转向较低亮度视场中的工作对象, 然后再返回观察较高亮度视场的工作对象。由于视场亮度不同, 产生了过渡适应效果, 而造成视觉感受性的降低。我们称这一过渡适应效果为亮—暗—亮视觉反应。

(2) 工作者在稳定注视较高亮度视场的对象后, 有时需观察另一较低亮度视场的对象。我们称这一过渡适应效果为亮—暗视觉效应。

本研究是根据我国照明设计的具体情况, 研究亮—暗—亮和亮—暗两种视觉效应所导致的视觉感受性的损失。目的在于找出在上述情况下保持良好视觉感受性的视场亮度比例关系。

实 验 方 法

实验在 $2.25 \times 5.58 \times 1.7$ 米木板制小室内进行, 小室四面墙壁、地板均用白纸裱糊, 并粉刷白色涂料, 小室顶棚布置有不同功率 (100、60、20、15W) 的白炽灯共33支。在白炽灯下面距顶棚 35cm 处安装透明有机玻璃格栅, 以使室内照明均匀。(见图1) 照明电源由稳压装置控制。小室顶棚的一般照明, 作为过渡适应视场亮度照明 (L_i), 小室的一侧墙壁上是被试观察的视场, 视场正中距地面 1.2 米亮度是呈现刺激的快门。在小室内被试座位的左后侧安放一台功率为300W的幻灯机, 投射到一面积为 $22\text{cm} \times 34\text{cm}$ 的白色视场上, 作为辅助亮度 (ΔL_i) 照明, 叠加在过渡适应视场上, 而形成被试观察的固

* 本研究是国家建委主办工业企业照明标准编制组的研究项目之一, 研究工作得到建筑科学研究院物理所的大力支持和帮助, 特此致谢。