

了解人眼明暗视觉,加深对临床视觉电生理的理解

黄厚斌^{1,2}

¹解放军总医院海南医院眼科,三亚 572013;²解放军总医院眼科医学部,北京 100853

Email:536273642@qq.com

【摘要】 临床视觉电生理检查对刺激光有着严格的制定标准和量化方法,其中涉及到人眼的明视觉和暗视觉感知概念。明视觉是在明亮环境下主要由视锥细胞参与的视觉感知活动,暗视觉是在黑暗环境下主要由视杆细胞参与的视觉感知活动。即使光源的额定功率相同,不同光谱光源在相同或不同的视觉环境下人眼所感知的亮度(光通量)也有所不同。为了使眼科医师和临床视觉电生理检查技师能够准确地理解视觉电生理国际标准中关于刺激光的设定机制和记录结果,本文详细介绍人眼明暗视觉概念、不同视觉环境下亮度的测量和表示、光源在明暗视觉下的光通量等基本概念,解读明暗视觉概念在临床视觉电生理中的应用。

【关键词】 明视觉;暗视觉;临床视觉电生理;刺激光强度;光通量;光视效能

基金项目: 军队后勤科研项目保健专项课题项目(23BJZ37);海南省卫生健康行业科研项目(22A200351);军委后勤保障部保健专项课题面上项目(19BJZ39)

DOI:10.3760/cma.j.cn115989-20220415-00164

Deepening the understanding of the mechanism of clinical electroretinography based on the photopic/scotopic vision of human eyes

Huang Houbin^{1,2}

¹Department of Ophthalmology, Hainan Hospital of PLA General Hospital, Sanya 572013, China; ²Senior Department of Ophthalmology, PLA General Hospital, Beijing 100853, China

Email:536273642@qq.com

【Abstract】 Visual electrophysiological examination has strict standards and quantitative methods for stimulating light, which involves the concepts of photopic and scotopic vision of human eyes. Photopic vision is a visual perceptual activity mainly involving cones in a bright environment, while scotopic vision is a visual perceptual activity mainly involving rod cells in a dark environment. Even if the rated power of the light source is the same, the brightness (luminous flux) perceived by human eyes is different for different spectral light sources in the same or different visual environments. To enable ophthalmologists and clinical visual electrophysiological examination technicians to accurately understand the setting mechanism and recording results of stimulating light in the international standard of visual electrophysiology, this paper introduced the basic concepts such as the concept of human eye photopic and scotopic vision, the measurement and expression of brightness in different visual environments, and the luminous flux of light sources under photopic and scotopic vision in detail, and interpreted the application of the concept of photopic and scotopic vision in clinical visual electrophysiology.

【Key words】 Photopic vision; Scotopic vision; Clinical electrophysiology of vision; Stimulus strength; Luminous flux; Luminous efficacy

Fund program: Health Care Special Project of PLA Logistics Research Fund (23BJZ37); Scientific Research Project of Health Industry in Hainan Province (22A200351); Special Scientific Research Project of the Logistic Support Department of the Chinese Military Committee (19BJZ39)

DOI:10.3760/cma.j.cn115989-20220415-00164

临床视觉电生理在眼科疾病的诊断中具有非常重要的意义,为了统一规范地进行临床视觉电生理检查,国际临床视觉电生理协会(International Society for Clinical Electrophysiology of Vision, ISCEV)对每项视觉电生理检查的方法和流程等都制订了严格的标准和量

化方法,并定期根据设备更新情况、临床应用过程中的问题和研究的最新进展进行修订和完善^[1-7]。临床视觉电生理检查主要通过不同光刺激和图形刺激诱导视路的生物电反应,以评估视觉系统的功能,因此对刺激光的量化设定有极高的要求,临床医生只有对相关的

光学概念和理论有一定的了解,才能更好地理解和解读 ISCEV 制定的临床视觉电生理检查国际标准指南。在视觉电生理检查中,光的量化主要涉及人眼感觉到的亮度。本文拟对明暗视觉概念、其与光源的关系及其在视觉电生理检查中的应用进行阐述,以助于临床医生对视觉电生理国际标准的解读。

1 明暗视觉的定义

人眼视网膜存在视杆和视锥 2 种感光细胞,视杆细胞能感受弱光刺激,但不能分辨颜色和形觉;视锥细胞能感受强光刺激并分辨颜色和物体形状。视锥细胞一般仅与 1 个双极细胞发生突触联系,以确保明亮条件下每个视锥细胞能精准分辨外界物像的细节。而与视锥细胞明显不同,视网膜上多个视杆细胞同时与 1 个双极细胞发生突触连接,故在黑暗条件下通过几个,甚至数十个视杆细胞对外界的微弱光起总合作用。

根据对环境亮度变化的感知觉不同,可以把视觉分为明视觉 (photopic vision)、暗视觉 (scotopic vision) 和中间视觉 (mesopic vision)。从理论上来说,只有视锥细胞参与明视觉,只有视杆细胞参与暗视觉,但在现实活动中这种绝对意义的明暗视觉是不存在的。通常将在环境亮度超过 3.0 cd/m² 明亮环境下的视觉定义为明视觉,将在环境亮度低于 0.001 cd/m² 时黑暗环境下的视觉定义为暗视觉。明视觉又称视锥细胞视觉、中央视觉、中心视觉、昼光觉、线上视觉 (on-line, 位于视线上) (图 1, 表 1), 一般从白天晴朗的太阳光照到夜晚灯源照明下的视觉都属于明视觉范围。暗视觉又称视杆细胞视觉、边缘视觉、周边视觉、晚光觉、线外视觉 (off-line) (图 1, 表 1)。人眼黄斑区视网膜没有视杆细胞,视杆细胞密度从黄斑区向周边逐渐增加,在偏离视线约 15° 处的视网膜中达到最大。暗视觉的形成主要取决于视网膜无长突细胞,具体来说 A II 无长突细胞, A II 无长突细胞在内丛状层与双极细胞发生突触联系,捕获并调控视杆双极细胞的输入信息,将其重新分布给视锥双极细胞,视杆双极细胞与节细胞之间没有直接的突触联系。由于许多视杆细胞的感知觉相互作用,因而对物体成像细节并不清晰。介于明视觉和暗视觉之间者为中间视觉,如道路照明和明朗的月夜下的视觉^[8]。

从动物种系的特点来看,某些只在白昼活动的动物,如爬虫类和鸡、鸽、松鼠等,视网膜中光感受器以视锥细胞为主,它们只有明视觉;而只在夜间活动的动物,如猫头鹰等,视网膜中光感受器只有视杆细胞而不含视锥细胞,这些动物只有暗视觉。

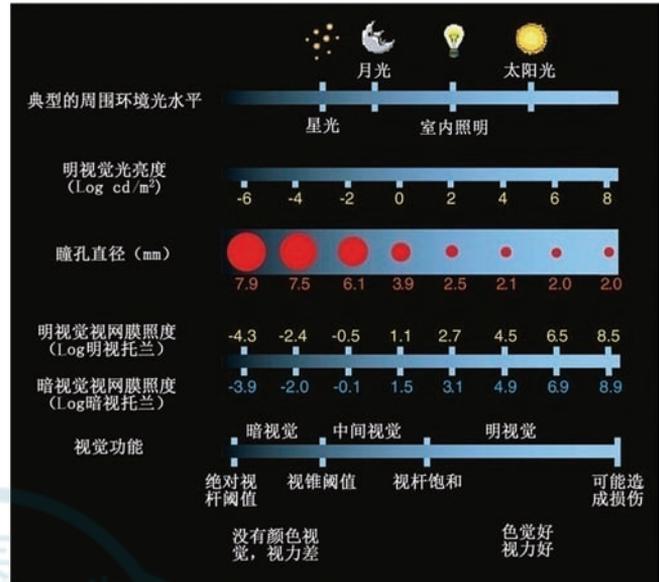


图 1 明视觉、暗视觉和中间视觉示意图 视网膜照度 (托兰) = 刺激光亮度 (cd/m²) × 瞳孔面积 (mm²), 即 1 托兰为亮度 1 cd/m² 的光线经 1 mm² 入射瞳孔面积照射到视网膜上的光强度^[8]

表 1 人眼明视觉和暗视觉的区别

项目或参数	明视觉	暗视觉
光感受器	视锥细胞	视杆细胞
光化学物质	锥体色素	视紫红质
对光敏感度	低	高
色觉	有色觉和黑白	无色觉, 仅黑白
所在视网膜区域	中心	周边
视网膜最敏感部位	中央凹	旁中央凹
适应速度	快 (5 min 或更少)	慢 (30 min 或更多)
空间分辨力 (视锐度)	高	低
工作光强	高、中等	低、中等
照明亮度	昼光 (>3 cd/m ²)	夜光 (<0.001 cd/m ²)
CIE 定义的视野	中央 2°	中央 20°
对闪烁光刺激反应	快	慢
对光进入瞳孔的角度	敏感	不敏感
光谱灵敏峰值 (nm)	555	507
最大光谱光效 (lm/W)	683	1 700

注: CIE: 国际标准照明协会

2 不同视觉环境亮度的测量

在不同的亮度环境中,人眼调动的视锥细胞和视杆细胞数目和状态不同,随着环境亮度的变化,2 种细胞的活跃程度会发生变化 (表 2)^[9]。因此,对于同一光源,在暗视觉或中间视觉环境下,人眼对其亮度的感知与在明视觉环境下不同,而在同一亮度环境中人眼对不同波长的光敏感程度亦不同,能量相同的不同色光人眼能感觉出不同的明亮程度。

反映人眼亮度感觉的物理量是光通量,即光源单位时间内辐射能量的大小。同一波长的光在明视觉、

暗视觉、中间视觉环境下人眼感觉的亮度不同,即光通量不同。光视效能函数(即发光效率函数)是描述人眼对某一光谱视觉感知的平均灵敏度,该函数基于主观判断不同颜色光的亮度来描述对不同波长光的相对灵敏度,这一函数最初是通过目视法观测不同色温的灯泡而得出的。由于不同人眼的视觉特性有很大差异,不同观测者所观测的结果很难达到一致,所以必须规定标准视觉观测者。为获得最佳目视测量精度,还要对最适宜的视场、环境照度、光源分布温度、色差等进行标准化。受测试者主观因素的影响,无论用何种方法选择标准观测者都不能达到绝对准确。因此光通量的测定值与人眼感知并非绝对对应,但是其仍能够很好地代表人眼视觉的敏感度。自 1930 年始目视光度学逐渐转变为现代物理光度学,目前常用球形积分光度计测定光源的光通量,由于球内壁上反射光通量所形成的附加照度与光通量成正比,因此测定球壁的附加照度即可得出被测光源的光通量^[10]。

明视觉的光谱光视效能函数用 $V(\lambda)$ 表示,暗视觉的光谱光视效能函数用 $V'(\lambda)$ 表示。光视效能(简称光效)最大值为 1,即选择最大光效——明视觉下波长为 555 nm 的色光(光效 683 lm/W)和暗视觉下 507 nm 的色光(光效 1 700 lm/W)作为光效 100% 的标准。而其余波长下,光效函数值则是达到与单位能量下标准波长产生同样光通量所需能量的倒数(表 3)。因此,对于某一特定波长而言,其明视觉下光

效计算公式为 $\eta = \frac{\Phi}{W} = V(\lambda) \times K_m$,暗视觉下光效计算公

式为 $\eta' = \frac{\Phi'}{W} = V'(\lambda) \times K'_m$ 。其中 η 为明视觉下的光效,

Φ 为明视觉光通量, W 为光源的额定功率, $V(\lambda)$ 为明视觉的光谱光视效率, K_m 为明视觉时光效最大值 683 lm/W; η' 为暗视觉下的光效, Φ' 为暗视觉光通量(单位:lm), $V'(\lambda)$ 为暗视觉的光谱光视效率, K'_m 为暗视觉时光效最大值 1 700 lm/W。

CIE 最初根据多个具有正常视觉观测者的平均光谱灵敏度规定了明视觉光谱光视效能函数和暗视觉光谱光视效能函数,在 360~830 nm 范围内每隔 1 nm 给出具体函数值,其中明视觉光谱光视效能函数是对 1924 年给出的由 400~700 nm 每隔 10 nm 的 $V(\lambda)$ 值和 1931 年给出的从 380~780 nm 每隔 5 nm 的 $V(\lambda)$ 值进行平均,并经内插和外推修匀而得出。现在的明视觉曲线为 1978 年 Judd-Vos 修正的 2° 视角光谱光视效能函数曲线,暗视觉曲线为 1951 年 CIE 暗视觉光谱光视效能函数曲线(图 2)。整个暗视觉曲线 $V'(\lambda)$ 相

对于明视觉曲线 $V(\lambda)$ 向短波方向推移,长波端的能见范围减小,短波端的能见范围略有扩大。

表 2 不同亮度环境下视锥细胞和视杆细胞激活百分比(%)^[9]

表面亮度 (cd/m ²)	视杆细胞	视锥细胞
10.0	18	82
4.80	27	73
1.60	38	62
0.32	60	40
9.50×10 ⁻²	82	18
3.00×10 ⁻³	92	8

表 3 明视觉和暗视觉的光谱光视效能函数^[11]

波长 (nm)	明视觉 $V(\lambda)$	暗视觉 $V'(\lambda)$
380	0.000 04	0.000 589
390	0.000 12	0.002 209
400	0.000 4	0.009 29
410	0.001 2	0.034 84
420	0.004 0	0.096 6
430	0.011 6	0.199 8
440	0.023	0.328 1
450	0.038	0.455
460	0.060	0.567
470	0.091	0.676
480	0.139	0.793
490	0.208	0.904
500	0.323	0.982
510	0.503	0.997
520	0.710	0.935
530	0.862	0.811
540	0.954	0.650
550	0.995	0.481
560	0.995	0.328 8
570	0.952	0.207 6
580	0.870	0.121 2
590	0.757	0.065 5
600	0.631	0.033 15
610	0.503	0.015 93
620	0.381	0.007 37
630	0.265	0.003 335
640	0.175	0.001 497
650	0.107	0.000 677
660	0.061	0.000 312 9
670	0.032	0.000 148 0
680	0.017	0.000 071 5
690	0.008 2	0.000 035 33
700	0.004 1	0.000 017 80
710	0.002 1	0.000 009 14
720	0.001 05	0.000 004 78
730	0.000 52	0.000 002 546
740	0.000 25	0.000 001 379
750	0.000 12	0.000 000 760
760	0.000 06	0.000 000 425
770	0.000 03	0.000 000 241 3
780	0.000 015	0.000 000 139 0

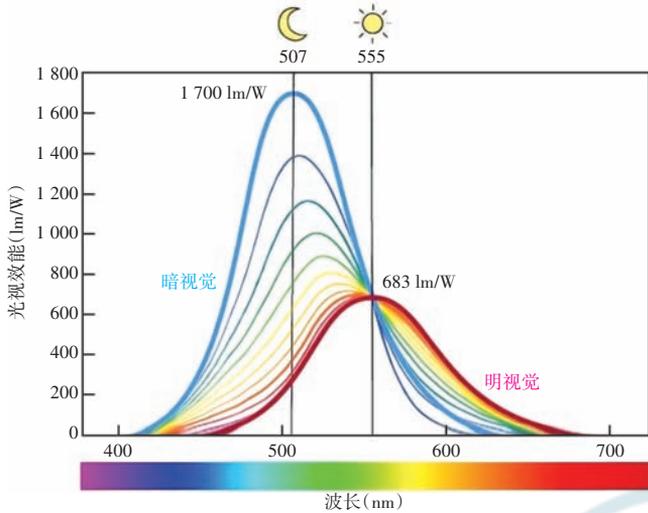


图 2 光谱光视效能函数曲线 在明视觉光谱光效函数曲线和暗视觉光谱光效函数曲线之间的许多曲线为中间视觉光谱光效函数曲线。暗视觉的最敏感光谱波长为 507 nm, 此时的最大光效可达 1 700 lm/W, 远大于明视觉最敏感光谱波长 555 nm 的最大光效 683 lm/W。明视觉曲线和暗视觉曲线相交处的波长为 555.8 nm, 几乎与明视觉最敏感光谱波长相符合, 此时与暗视觉有关的单色光光效同样为 683 lm/W^[12]

从光谱光视效能函数曲线可以得知, 在较明亮环境中, 黄、绿色看着最亮, 光谱两端的红色和紫色则暗得多, 如 2.5 W 的 400 nm 紫光才能引起与 1 mW 的 555 nm 绿光相同的亮暗感觉。能量不同的不同色光表现出不同的明亮程度, 说明不同波长的光辐射功率相等时其光通量并不相等。波长为 550 nm 的绿光与波长为 650 nm 的红光辐射功率相同时, 前者的光通量为后者的 10 倍[根据上述光效公式, 当两者 $K_m \times W$ 相同时, $V(\lambda 550) = 0.995$, $V(\lambda 650) = 0.107$, $\Phi(550)/\Phi(650) \approx 10$]。在明视觉条件下, 光通量的最大值在波长为 555 nm (即频率为 5.4×10^{14} Hz) 时位于光谱的绿黄区间。也就是说, 在明视觉环境下, 人的视觉对波长为 555 nm 的绿色光最为敏感, 此时光源的光效最大, 为 683 lm/W, 即有最大的光谱光效, $V(\lambda) = 1$, 达到最大值。在暗视觉条件下, 人眼最敏感的波长为 507 nm, 位于光谱蓝绿区间, 此时有最大的光谱光效, 为 1 700 lm/W, $V(\lambda) = 1$, 达到最大值。视杆细胞对大于 640 nm (红光) 的波长不敏感。

从明视状态转入暗视状态时, 人眼的光谱敏感性会随之发生改变, 即普金野位移 (Purkinje shift) 或普金野效应 (图 3), 主要表现为光谱敏感曲线峰值位置的改变, 由明视曲线峰值位于 555 nm 转变到暗视曲线峰值 507 nm。例如, 2 种不同颜色 (如橙色和蓝色) 的花在白昼时人们的主观亮度相差不多, 但在强月光下, 蓝花显得比橙花亮一些。这一现象首次为捷克医生

Purkinje 所描述, 他发现清早时红色比其他颜色更暗, 随着天亮时环境亮度增加, 先是蓝色最鲜艳, 当天大亮时绿色和黄色则变得最为明亮。

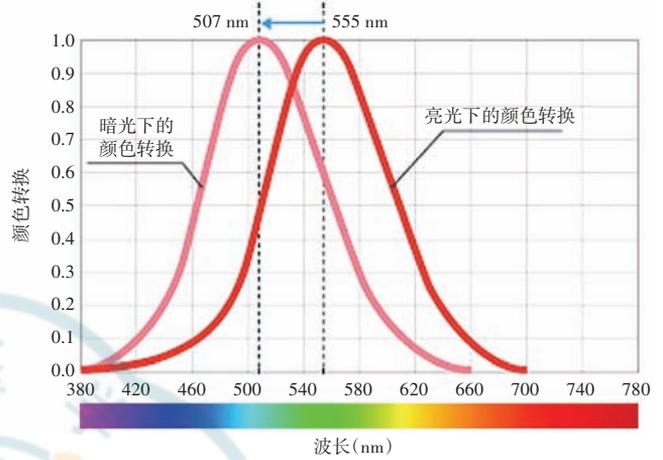


图 3 普金野位移

3 光源在明暗视觉下的光通量

现行的照明设计标准及光源生产企业给出的光源参数均是在明视觉条件下制定及测定的。光源的光通量 (Φ) 可按公式 $\Phi = K_m \int_{380}^{780} \Phi_{e\lambda} V(\lambda) d(\lambda)$ 计算^[10], 其中 K_m 为明视觉的最大光谱光效 683 lm/W, $\Phi_{e\lambda}$ 为光谱辐射通量即单位波长间隔内的辐射通量, $V(\lambda)$ 为明视觉的光谱光效, $d(\lambda)$ 为可见光范围内的单位波长间隔。从公式可见光源光通量是在 380~780 nm 可见光范围内人眼所感知到的光源所发出的辐射能量按 $V(\lambda)$ 曲线积分的面积。

在暗视觉条件下, 照明光源的光通量 (Φ') 可按公式 $\Phi' = K'_m \int_{380}^{780} \Phi_{e\lambda} V'(\lambda) d(\lambda)$ 计算^[10], 其中, Φ' 为暗视觉光通量 (单位: lm); K'_m 为暗视觉时光效最大值 1 700 lm/W, $V'(\lambda)$ 为暗视觉的光谱光效。暗视觉光通量是在可见光范围内人眼所感知到的光源所发出的辐射能量按 $V'(\lambda)$ 曲线积分的面积, 此时的 K'_m 为 1 700 lm/W。

不同的光源具有不同的光谱 (图 4), 例如荧光灯含有三基色荧光粉 (峰值波长为 611 nm 发红光的氧化钪、峰值波长为 541 nm 发绿光的多铝酸镁、峰值波长为 450 nm 发蓝光的多铝酸镁钡), 按不同比例混合可形成不同的光谱组合和不同的色彩。全光谱灯包含紫外光、可见光、红外光的光谱曲线, 并且在可见光部分中红绿蓝的比例与阳光近似, 其发出的光最近似自然光线。

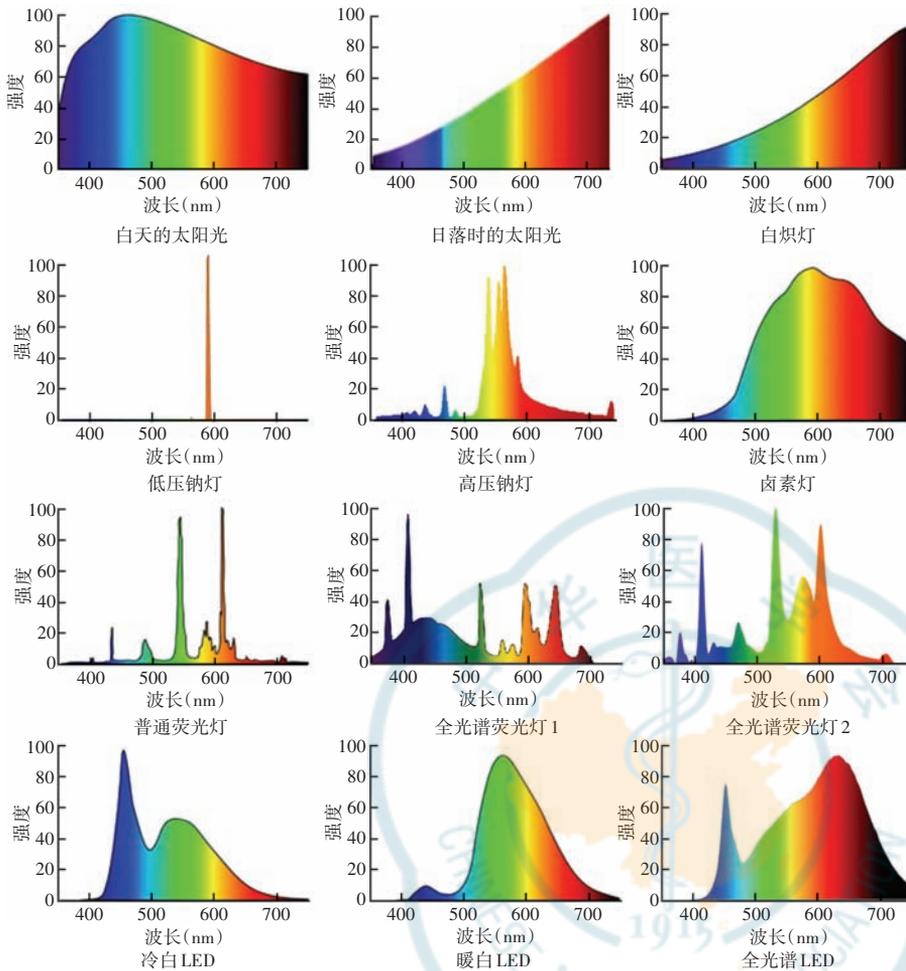


图 4 部分光源的光谱图 日落时太阳光的光谱与白炽灯类似。白炽灯和卤素灯(卤素灯是白炽灯的一种变种)的光谱主要位于长波段,包括红外光,因此在暗视觉环境下亮度有限,且发热作用明显。钠灯利用钠蒸气放电产生可见光,分为低压钠灯和高压钠灯,低压钠灯的工作蒸气压不超过几个 Pa,高压钠灯的工作蒸气压大于 0.01 MPa,低压钠灯的放电辐射集中在 589.0 nm 和 589.6 nm 的 2 条双 D 谱线上,接近明视觉曲线的最高值(555 nm)。荧光灯和 LED 均可有不同波段的光谱,LED 的光谱更全、更广。在蓝绿光部分(507 nm 附近)有辐射能量光谱的灯,在暗视觉下的光效会显著提高

不同光谱光源人眼所感知的亮度不同,即使它们的功率相同。为了使光源在明、暗视觉环境下均有很好的亮度,需要使光源在明视觉和暗视觉下均有较丰富的光谱能量,即既有有效光谱刺激视锥细胞(光谱波长在 555 nm 附近最佳),又有有效光谱刺激视杆细胞(光谱波长在 507 nm 附近最佳)。通常使用暗明亮度比值(scotopic/photopic ratio, S/P),即暗视觉下光通量与明视觉下光通量的比值来表征光源的光谱在暗视觉情况下的有效程度^[11,13]。部分光源的 S/P 见表 4。

光源的 S/P 通常在出厂前即已测量好并标注在光源的技术参数上,我们可以据此计算出光源在暗环境下的实际照明能力。例如,明视觉下光通量为 20 000 的高压钠灯,其 S/P 为 0.5;明视觉下光通量为 5 000 的 LED 灯,其 S/P 为 2.0,则 LED 灯暗视觉下的光通量 = 5 000 lm × 2.0 = 10 000 lm,高压钠灯暗视觉

下的光通量 = 20 000 lm × 0.5 = 10 000 lm,实际上 2 种灯具在暗环境下的明亮程度一样。

又如,某 400 W 的金属卤化物灯(金卤灯)厂家测定的光效为 54.6 lm/W, S/P 为 1.497,则其明视觉下的光通量为 400 × 54.6 = 21 840 lm,暗视觉下的光通量为 21 840 × 1.497 = 32 541 lm。某 200 W 的电磁感应灯厂家测定的光效为 81 lm/W, S/P 为 1.96,则其明视觉下的光通量为 200 × 81 = 16 200 lm,暗视觉下的光通量为 16 200 × 1.96 = 31 752 lm。因此,这 2 种灯具所提供的夜间照明能力类似,但是电磁感应灯所消耗的能量却仅为金卤灯的一半。

4 明暗视觉概念在视觉电生理检查中的应用

4.1 对闪光刺激强度在明暗视觉下的规定

视觉电生理检查的刺激信号是光,因此对刺激光及背景光均有严格要求,如全视野视网膜电图(full-field electroretinography, fERG)对记录每个反应的刺激光强度,即给定时间内在相应方向单位面积单位立体角内发出的光通量均进行了严格限定。由前所述,在明暗环境下,这个光通量不同,因此,ISCEV 分别对在明视觉环境下和

表 4 部分光源的 S/P

光源	S/P
低压钠灯	0.20
高压钠灯	0.40-0.60
暖白荧光灯	1.00
冷白荧光灯	1.46
暖白 LED	1.35
暖白金属卤化物灯	1.25
冷白金属卤化物灯	1.80
4100K LED	1.54
5000K LED	1.96
6500K LED	2.14

注:S/P:暗明亮度比值

暗视觉环境下刺激光强度(给定时间内的积分光亮度)做了规定。例如暗适应 3.0ERG 的刺激光强度在明视觉环境下为 $3.0 \text{ cd} \cdot \text{s}/\text{m}^2$, 在暗视觉环境下为 $7.5 \text{ cd} \cdot \text{s}/\text{m}^2$, 指的是同一刺激光源必须同时满足这 2 个参数条件^[1]。如果不了解明暗视觉的概念, 就无法理解这些参数的意义。

4.2 红光在视觉电生理的应用

明适应视觉电生理检查的目的是分离和评估视锥系统的功能, 检查过程中需要进行明适应及强闪光刺激。根据明暗视觉光谱光视效能函数, 也可在暗光环境下检查和评估视锥系统的功能, 这就是暗适应红色闪光 ERG, 特别适合一些不能耐受标准 fERG 明适应环境下明亮刺激检查的患者。采用的刺激光谱 650 nm 红光位于暗视觉光谱光效函数的长波最尾端, 但其明视觉光谱光效能函数仍有相当的数值(图 3, 表 3), 因此可反映暗适应下视锥细胞的功能^[14]。同样, 在暗适应环境下进行 ERG 检查时, 技术人员是在红光环境下进行操作, 能够有效避免环境光线对视网膜的刺激, 从而获得特定光强和光通量条件下的记录结果。

总之, 明视觉和暗视觉是与明适应、暗适应完全不同的概念, 而且很难理解, 但只有正确认识和了解这些概念, 才能准确地理解视觉电生理国际标准中关于刺激光的设定和记录结果等临床视觉电生理概念, 才能正确地设定参数、准确地开展视觉电生理方面的临床和基础科研。

利益冲突 作者声明不存在任何利益冲突

志谢 特别感谢河南省眼科研究所雷博, 解放军总医院海南医院眼科陈兰兰、伍桐、邓弥、朱志鸿、谢海南、陈泽华, 以及北京理工大学李冬等在本文撰写中给予的意见和建议

参考文献

- [1] McCulloch DL, Marmor MF, Brigell MG, et al. ISCEV standard for full-field clinical electroretinography (2015 update) [J]. Doc Ophthalmol, 2015, 130(1): 1-12. DOI: 10. 1007/s10633-014-9473-7.
- [2] Marmor MF, Fulton AB, Holder GE, et al. ISCEV standard for full-field clinical electroretinography (2008 update) [J]. Doc Ophthalmol, 2009, 118(1): 69-77. DOI: 10. 1007/s10633-008-9155-4.
- [3] Robson AG, Nilsson J, Li S, et al. ISCEV guide to visual electrodiagnostic procedures [J]. Doc Ophthalmol, 2018, 136(1): 1-26. DOI: 10. 1007/s10633-017-9621-y.
- [4] Constable PA, Bach M, Frishman LJ, et al. ISCEV standard for clinical electro-oculography (2017 update) [J]. Doc Ophthalmol, 2017, 134(1): 1-9. DOI: 10. 1007/s10633-017-9573-2.
- [5] Hood DC, Bach M, Brigell M, et al. ISCEV standard for clinical multifocal electroretinography (mfERG) (2011 edition) [J]. Doc Ophthalmol, 2012, 124(1): 1-13. DOI: 10. 1007/s10633-011-9296-8.
- [6] Bach M, Brigell MG, Hawlina M, et al. ISCEV standard for clinical pattern electroretinography (PERG): 2012 update [J]. Doc Ophthalmol, 2013, 126(1): 1-7. DOI: 10. 1007/s10633-012-9353-y.
- [7] Odom JV, Bach M, Brigell M, et al. ISCEV standard for clinical visual evoked potentials: (2016 update) [J]. Doc Ophthalmol, 2016, 133(1): 1-9. DOI: 10. 1007/s10633-016-9553-y.
- [8] Stockman A, Sharpe LT. Into the twilight zone: the complexities of mesopic vision and luminous efficiency [J]. Ophthalmic Physiol Opt, 2006, 26(3): 225-239. DOI: 10. 1111/j. 1475-1313. 2006. 00325. x.
- [9] 傅强, 伍永安, 黄伟, 等. 基于人眼视觉特性的 LED 照明技术 [J]. 光学与光电技术, 2010, 8(4): 91-95. DOI: 10. 3969/j. issn. 1672-3392. 2010. 04. 023.
Fu Q, Wu YA, Huang W, et al. LED illumination techniques based on human's visual sense [J]. Opt Optoelect Technol, 2010, 8(4): 91-95. DOI: 10. 3969/j. issn. 1672-3392. 2010. 04. 023.
- [10] 桂垣, 杨晓晴. 非明视觉条件下照明评估标准的探讨 [J]. 电气应用, 2010, 29(11): 44-47.
- [11] 倪孟麟, 张莹, 张志宏, 等. 暗视觉测量及中间视觉评价体系——以 1980A 彩色亮度计为测试工具 [J]. 灯与照明, 2014, 38(3): 1-3, 10. DOI: 10. 3969/j. issn. 1008-5521. 2014. 03. 002.
Ni ML, Zhang Y, Zhang ZH, et al. Evaluation system of dark vision measurement and mesopic-to color luminance meter 1980A as test tools [J]. Light & Lighting, 2014, 38(3): 1-3, 10. DOI: 10. 3969/j. issn. 1008-5521. 2014. 03. 002.
- [12] 黄厚斌. 临床视觉电生理学习精要 [M]. 郑州: 河南科学技术出版社, 2020: 21-24.
- [13] 姚其, 居家奇, 程雯婷, 等. 不同光源的人体视觉及非视觉生物效应的探讨 [J]. 照明工程学报, 2008, 19(2): 14-19. DOI: 10. 3969/j. issn. 1004-440X. 2008. 02. 003.
Yao Q, Ju JQ, Cheng WT, et al. Discussion on the visual and non-visual biological effect of different light sources [J]. China Illuminating Engineering J, 2008, 19(2): 14-19. DOI: 10. 3969/j. issn. 1004-440X. 2008. 02. 003.
- [14] Thompson DA, Fujinami K, Perlman I, et al. ISCEV extended protocol for the dark-adapted red flash ERG [J]. Doc Ophthalmol, 2018, 136(3): 191-197. DOI: 10. 1007/s10633-018-9644-z.

(收稿日期: 2022-11-15 修回日期: 2023-06-05)

(本文编辑: 刘艳 施晓萌)

广告目次

瑞秀复(眼科用生物羊膜) 广州瑞泰生物科技有限公司……封二

同息通(曲安奈德注射液) 广东省医药进出口公司珠海公司……前插页

沃丽汀(卵磷脂络合碘片) 广东泰恩康医药股份有限公司……前插页

中华医学期刊 全文数据库 《中华医学杂志》社有限公司……封三

迈达科技 天津迈达医学科技股份有限公司……封底