· 综　　述 ·

光照和近视相关实验研究中光谱的规范化设置

张旭红　综述　沈晔　审校
浙江大学医学院附属第一医院眼科，杭州 310003
通信作者：沈晔，Email：idrshen@zju. edu. cn

【摘要】 光谱差异对近视影响的研究日益增多，但是各研究中光源的设置不尽相同。光作为一个物理量，可以进行辐射度量，主要检测光的能量特性；而光作为一个心理-物理量，则需要进行光度量，检测生物体对光的感受程度。不同的光测量工具则根据光电转化器件的反应曲线进行测量。实验中光源光谱设置的本质是控制生物体对光的感受性，因此在解读类似实验结果时需要特别注意光源设置差异的影响，在设置实验动物光照时需要考虑动物的感光色素吸收曲线以及动物的光谱光视效率曲线差异，建议根据光照度 200~300 lx 的水平，采用辐射计测量设置各组间光子通量密度一致。本文就光照和近视相关实验研究中光谱的规范化设置进行综述。

【关键词】 近视；光谱；光源设置
基金项目： 国家自然科学基金青年基金项目（82201194）；中国科学院战略性先导科技专项项目（XDA16040200）
DOI：10. 3760/cma. j. cn115989-20200630-00466

Normalized spectral settings in light- and myopia-related experimental studies

Zhang Xuhong, Shen Ye
Department of Ophthalmology, the First Affiliated Hospital, Zhejiang University School of Medicine, Hangzhou 310003, China
Corresponding author: Shen Ye, Email: idrshen@zju. edu. cn

[**Abstract**] There are more and more studies investigating the influence of spectral difference on myopia, but the settings of light sources are different in each study. As a physical quantity, light can be measured radiometrically, mainly to detect the energy properties of light. As a psychological and physical quantity, the light should be measured photometrically to detect the degree of light perception of the organism. Different optical measuring tools measure based on the response curve of the photoelectric conversion device. The essence of the light source spectrum setting in the experiment is to control the sensitivity of organisms to light. Therefore, special attention should be paid to the influence of light source setting differences when interpreting similar experimental results. When setting the light in animal experiments, it is necessary to consider the differences in the absorption curve of the animal´s photosensitive pigment and the curve of the animal´s spectral light efficiency. It is also suggested that a radiometer should be used to unify the photon flux density consistent among different groups based on 200-300 lx light intensity. In this paper, the normalization of spectral settings in experiments related to light and myopia was reviewed.

[**Key words**] Myopia; Spectrum; Light source setting
Fund program: The Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (82201194); The Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (XDA16040200)
DOI：10. 3760/cma. j. cn115989-20200630-00466

近视是基因和环境因素共同作用的结果，而环境中的光照因素显得尤其重要，包括光照的剥夺、强度、节律以及光谱的改变等[1-3]。近年来，随着光源技术的变革，生活中的各种照明光源、移动设备光源极大地影响着人们的生活。根据其发光原理的差异，区分这些光源的一个重要参数就是光谱。因此，光谱对近视的影响继光照强度和闪烁频率之后成为近视研究的新热点。但是光的度量本身是一个复杂的过程，如何控制动物实验中各对照组间光源的干预条件，成为不可回避的问题。本文就光照和近视相关实验研究中光谱的规范化设置进行综述。

1　不同类型光照和近视研究中光源设置的现状

光对近视影响的研究主要分为 2 类。一类是研究在白光条件下不同光强度、光色温、光照度、光照时间、周期和闪烁频率等对近视的影响，发现较低的光照强度、较短的光照时间、低

中华医学会杂志社 Chinese Medical Association Publishing House 版权所有 违者必究

频率的闪烁光会促进近视的发生和发展[4-6]，而高色温的类太阳光发光二极管（light-emitting diode，LED）延缓近视进展[7]；但也有研究认为闪烁光对近视无影响[2]。这类研究中所用的白光光源包括卤素灯、LED、荧光灯等[7-8]，而这些光源的光谱是不同的。因此，在同一个研究中不同组间采用相同的光源来设置不同的照度、色温、强度等条件可以进行相互比较（卤素灯除外，其光谱会随着功率的降低出现“红移现象”），但从光谱的角度来考虑，一种光源的实验结果却不能用于与其他不同光源的实验结果的比较。另一类是研究不同的光谱对近视的作用，目前大多数研究认为长波长光促进近视，而短波长光抑制近视，称之为色觉失衡性近视[3,9]；但是也有部分实验支持长波长光导致远视[10-11]。这些结论的差异，除了动物模型的差异所致，还可能与实验光源参数设置的差异有关。这类实验中需要控制各组间光源的光谱不同，而确保光的其他参数相同。目前常见的是用不同单色光设置各实验组的波长（光谱），如红光（630 nm）、绿光（530 nm）和蓝光（430 nm）等，而需要控制相同的条件常用的是照度、光的辐射功率或光子通量密度（photon flux density，PFD）等[12-13]，究竟采用哪种控制方式在目前的研究中没有统一。

光照对近视的影响深远而广泛，因此，在光照相关近视研究中建立统一的光源设置标准，对于实验的可靠性和结论的准确性具有重要意义。尤其是对于光谱相关的研究，目前的光源设置差异较大。

2　光度量中的物理量和心理-物理量转换

光的度量学（简称光度学）是对于光明暗程度的测量；与之对应的另一方面是光的辐射度量。任何一种测量都是建立在某一标准之上的，那么光度量的标准中需要一个标准光源（即铂点黑体）和标准光度观察者（即符合正常人群相对光谱灵敏度曲线的人）。为了测定人眼对不同波长光的敏感性程度，可以在产生相同亮度感觉的情况下，测出各种波长光的辐射功率 $\Phi v(\lambda)$。$\Phi v(\lambda)$ 越大，说明该波长光越不容易被人眼感觉，其倒数称作光谱光视效能 $K(\lambda)$，而 $K_{max}=K(555)$，因此任意波长光的 $K(\lambda)$ 与 K_{max} 的比值称为光谱光视效率 $V(\lambda)$（图 1）[14]，它是小于 1 的数[15-16]。上述物理量之间的计算公式如下：

$$V(\lambda)=\frac{\Phi_{max}}{\Phi(\lambda)}=\frac{K(\lambda)}{K_{max}}=\frac{K(\lambda)}{K(555)}$$

对于光本身来说，它是一个物理量，但是在度量它的时候，就成了一个心理-物理量。因为目前测量光谱光视效率曲线的方法不是客观的视觉电生理方法，而是在严格控制视网膜照度水平的情况下，通过心理物理学方法（如异色视亮度匹配法）测量[17]，在测量过程中由受试者通过观察主动报告结果而得到。

从单纯物理学（即辐射度量）的角度来说，光的产生是原子能量跃迁发生的，不同波长光子的产生需要释放不同的跃迁能量，并且波长越短，能量越高。一个特定光子的能量 $E=h\times v$（其中 h 是普朗克常数 6.63×10^{-34}，v 是光子的频率）。可见光子的能量与其频率成反比，换句话说，要发出同样多的蓝色光子与红色光子，前者需要更多的能量。光的颜色是按照频率划分的，波长由传播速度除以频率得出，不同传播媒介的传播速度不同，而频率不会改变，所以波长会变。在真空中光的速度即光速，是 3×10^{8} m/s，但是在我们日常实验和生活的空气中，光的速度近似于光速，所以我们一般理解为光子的频率（v）等同于光波的波长（λ），用来区分不同颜色的光。

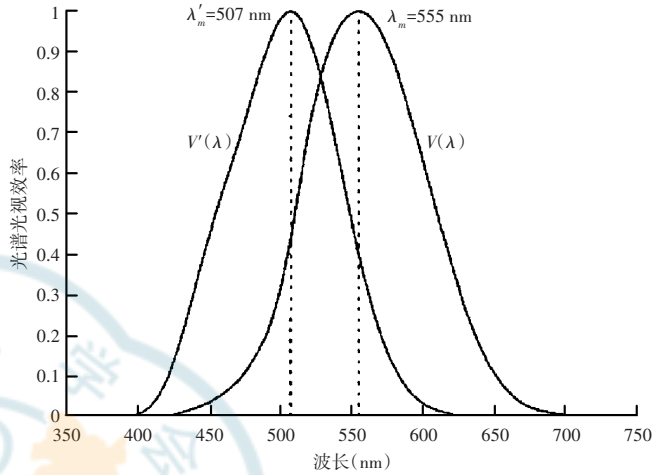

图 1　国际照明委员会测定的明视觉和暗视觉光谱光视效率函数曲线[14]　对于明视觉，$\lambda=555$ nm 时为黄绿光，$V(\lambda)=1$，亮度感觉最大；其余波长光的 $V(\lambda)<1$，亮度感觉减弱；当 $\lambda<425$ nm 或 >700 nm 时，$V(\lambda)=0$，说明人眼已经没有亮度感觉。而对于暗视觉，当 $\lambda=507$ nm 时人眼亮度感觉最大，当 $\lambda<380$ nm 或 >630 nm 时人眼没有亮度感觉

从心理-物理（即光度量）的角度来说，首先，不同的光感受器感光色素对不同波长光的敏感性不同，蓝光光子的能量虽大，但是对人眼视觉系统来说它并不会更容易被看到。这可能也是蓝光容易发生损伤的原因，当光子不能产生光化学反应，那可能就产生了更多的热效应或者机械效应。其次，不同物种的光谱光视效率曲线不同，结合人眼的光谱光效率函数，产生了一套光度量指标，其中 4 个最主要的基本参数如表 1 所示。

表 1　光度学中的 4 个基本参数

指标	定义	单位
光通量	单位时间内某一波段的辐射能量和该波段的相对视见率的乘积	lm
光强度	光源在单位立体角内发出的光通量	cd
照度	被照明面单位面积上得到的光通量	lx
亮度	单位面积在其法线方向上单位立体角内发出的光通量	cd/m^2

其中照度就是我们在动物实验中较常采用的指标。除了光源功率（mW）是 1 个纯物理指标，上述 4 个都是心理-物理指标，而且是根据人眼的光谱光视效率曲线设定的。对于实验动物，如常用的豚鼠来说，其光谱光视效率曲线与人眼不同，其感受到同等亮度的蓝光和绿光，应该不是等值的人眼指标中的“照度”。可见，实验中适合动物眼的光学参数设置更加复杂。

3　设备检测对物理量和心理-物理量检测原理的差异

虽然上述提到的4个指标是心理-物理指标，但是其依然

中华医学会杂志社 Chinese Medical Association Publishing House 版权所有 违者必究

可以用非心理-物理学方法测量出来，也就是用照度计、亮度计等检测设备。目前在动物实验中也采用各种设备，如最近的一项研究采用智能 CCD 光谱仪（美国 B & W Tek 公司）[3]、本课题组前期研究中采用的光谱照度分析仪（OHSP-350C，杭州虹谱公司）[18] 以及其他研究中采用的 IL-1700 辐射仪（美国 International Light Technologies 公司）[13] 等。这些设备测量的参数不同，其检测原理也不一致。

对于一般的照度计来说，它是建立在国际照明委员会 CIE 认可的人群光谱光视效率曲线上，根据光谱与人眼视觉关系的原理制成的。采用光敏电阻作为光电转化器件，如硫化镉、硫化铅等，它们都具有在特定波长的光照射下，阻值迅速减小的特性[19]。光敏电阻器对光的敏感性（即光谱特性）与人眼对可见光的响应很接近，只要是人眼可感受的光，都会引起其阻值变化，但是其敏感光谱范围与人眼不是完全匹配的，也就是说它可能会检测到人眼看不到的光，而且其灵敏度会随着使用时间的延长而下降[20]。照度计在不同光谱下的敏感性也有差异。这样的检测结果用于实验条件的控制会产生较大的误差。

辐射计的测量中不需要根据光谱与人眼视觉的关系来转化，其测出光源作为单纯物理量的值，无关物种光谱光视效率曲线差异的影响，更具有通用性和可比性。光谱与辐射强度有确定的关系[21]，但是照度（lx）与辐射功率（mW/m^2）以及 PFD[$mmol/(m^2 \cdot s)$]之间的转换，由于其光源依赖性，需要复杂的公式转化，有专门的研究提供特定光源的转化方式[20]。

4　近视研究中光谱控制的实质

光子是光线中携带能量的粒子。从光源的角度来说，光子主要有光子的频率（与波长、能量相关）和光子的数量（即 PFD）2 个参数（图 2）。而光的前述 4 个度量指标其实都是这 2 个参数的综合，因为他们是在一定的时间、空间等限定条件下的生理-物理学指标。而对于眼的光谱（频率）研究来说，是应该在光的 2 个特征中限定 1 个（数量）而改变另 1 个（频率），还是限定总体感受而改变其中 1 个（频率），这可能需要同时考虑研究的可行性和现实的意义 2 个方面的取舍。

从研究目的出发应该是考虑限制 1 个而改变另 1 个，这也随之发生视觉感受差异的问题。视觉感受其实是 1 个综合的结局，可能涉及视觉通路和非视觉通路的总体反应。关于感受的评估有 3 个层次：第 1 个层次是不同的视锥细胞感光色素的光敏感性差异，其随着波长变化的曲线称为光色素吸收曲线，一般用光度计的方法测量色素对光的吸收特点[22]；第 2 个层次是客观视网膜视觉通路对不同波长光的反应，即光谱敏感度曲线，一般用客观的视网膜视觉电生理的方式测量，常用的是闪光视网膜电图，通过特定条件的光适应以及控制光条件可以测定到特定视锥细胞的反应电图；第 3 个层次就是真正的所谓感受性，即递增阈值光谱灵敏度函数，从字面上来看与第 2 个层次是一样的，但是其检测方法是行为学的感受性反应（如强迫选择触表饮水实验），类似于人眼的光谱光视效率函数的测量，用的是主观的心理物理学方法[23]。而对视觉感受进行限定，一般采用视觉电生理的方法来检测[13]，很少用行为学实验来评估，这 2 个在研究实践上均不具备推广性。

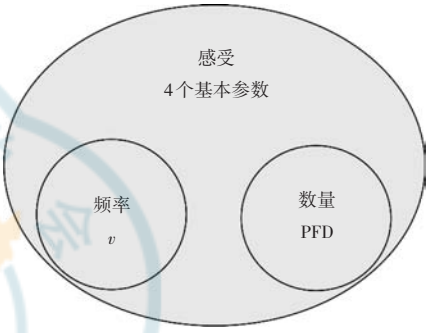

图 2　光谱研究中需要控制的参数之间的关系　PFD：光子通量密度

从现实的意义上来说，主观感受性一致受个体差异和行为学实验条件的干扰较大。而且，只对实验选中的动物进行感受性一致的控制并不能代表整个动物群体。正确的操作应该是选择较大样本的动物，测出该动物群体的特征性光谱光视效率曲线，然后根据该曲线控制光源参数，而这样的操作显然还得不到测量技术上的支持。因此，比较可行的方法是在实验设计中控制相同的光子数量，这也是目前大多数研究所采用的控制方法。

5　结合目前实验中光谱设置的差异及影响给出的统一操作建议

从目前光谱和近视相关研究的实验设置中来看，也均有提及控制光子数一致或者是根据实验动物的光谱敏感曲线设置的光源，但是具体操作未写明，也没有指出所控制一致的动物感受性指标。对照分析发现光源的设置千差万别，其实验结果也有差异（表 2）。

表 2　列举几项光谱研究中光源设置的参数

光谱设置方法	参考文献	光子数 [$mmol/(m^2 \cdot s)$]	光辐射功率（mW/m^2）				实验结果
			430 nm	480 nm	530 nm	白光	
光子数一致（PFD）	Liu 等[13]	3.0×10^{-3}	1 770	-	700	740	6.1 D 更近视（绿光 *vs* 蓝光）
	Hu 等[24]	2.2	-	-	-	-	M 视锥细胞增加（绿光 *vs* 白光）
感受性一致（视觉电生理反应）	Wang 等[25]	-	-	4.6×10^6	1.1×10^7	8.0×10^6	1.9 D 更近视（绿光 *vs* 蓝光）；视黑素蛋白增加（绿光 *vs* 白光）
	Liu 等[13]	-	460	-	750	400	5.0 D 更近视（绿光 *vs* 蓝光）

注：PFD：光子通量密度；-：未提及

中華醫學會雜誌社 Chinese Medical Association Publishing House 版权所有 违者必究

表 3　按照上述方法计算而得的应该设置的光源功率/光子数

光谱设置方法	参考文献	光子数 [mmol/(m^2·s)]	光辐射功率(mW/m^2)				实验结果
			430 nm	480 nm	530 nm	白光	
光子数一致(PFD)	Liu 等[13]	3.0×10^{-3}	835.38	-	704.3	-	6.1 D 更近视(绿光 *vs* 蓝光)
	Hu 等[24]	2.2	-	-	-	-	M 视锥细胞增加(绿光 *vs* 白光)
感受性一致(视觉电生理反应)	Wang 等[25]	18.4/46.5	-	4.6×10^{6}	1.1×10^{7}	8.0×10^{6}	1.9 D 更近视(绿光 *vs* 蓝光);视黑素蛋白增加(绿光 *vs* 白光)
	Liu 等[13]	$1.6\times10^{-3}/3.3\times10^{-3}$	460	-	750	400	5.0 D 更近视(绿光 *vs* 蓝光)

注:PFD:光子通量密度;-:未提及

4 项研究均以豚鼠作为实验对象,前 2 项均按照光子数一致来设置光源,设定的光子数相差了 3 个数量级。在后 2 项研究中根据豚鼠感受性一致(视觉电生理)设置,与前 2 个"随着波长减小-功率越大"的基本规律相反,此外两者之间在数量级上差别也很大。

由于波长不同,能量不同,因此控制了一样的光子数后所需要的功率不同。在特定的波长下,1 mol 光子产生的光功率为 $E=(h\times c\times NA)/\lambda$,其中 h 为普朗克常数,c 为光速,NA 为摩尔常数,λ 为波长。而控制了一样的照度,所需的功率也不同。但是光子数量一致可以从直接测得特定波长下固定的辐射功率来获取,比视觉电生理更容易实现。通过上述方法计算,按照其设定的光子数,对应波长的辐射功率如表 3 所示。

可见在 430 nm 处,Liu 等[13]设置的辐射功率与我们的理论计算相差了近 1 倍,考虑了光谱波长范围的影响后还是偏大;而 Liu 等[13]和 Wang 等[25]在 480 nm 和 530 nm 处的辐射功率计算所得的光子数不相等,差 1 倍多,并且 2 个研究之间差了 4 个数量级。从实验结果来看,Liu 等[13]用 2 周大的豚鼠开始光照 12 周,绿光比蓝光近视偏移 6.1 D,而 Wang 等[25]用 10 d 大的豚鼠开始光照 8 周,绿光比蓝光近视偏移 1.9 D,两者相差较大。有研究证实,增加光照强度可以保护近视[6],那么这部分近视差异就无法判断是因为光照强度高所致,还是光照时间短所致,亦或是 PFD 差异所致。在这样的实验光源设置中,得出的实验结果不一定准确,若要与其他类似研究结果进行横向比较更加困难。虽然有研究认为,按照同光子数和同感受性(视觉电生理反应水平一致)能诱导出相近的近视或者远视性结果[13],或者在探讨近视表型的情况下允许放宽这方面的要求,但是在具体研究其分子或者细胞机制时,还是有必要控制较细微一致的光谱光照条件。

对于不同的波长,其光-电转换效率不同,因为激发出蓝光需要更多的电能,所以总的来说波长越长,其光-电转化效率越高,与波长的关系是线性的(图 3),这与我们上述公式推导的理论计算结果相近。

更为重要的是,在现实实验中,所采用的光源都具有一定的波长范围,因此实际测得的 PFD 与理论计算值有一定的偏差,但是不会差别太大。因此,除了建议设置 PFD 相同,还建议有条件的可以直接购买可以测量 PFD 的光谱仪进行直接测量,或者可以通过普通光谱仪测出来的光谱数据在 uSpectrum 软件(UPRtek, version 1.0)中进行 PFD 的计算。至于设置的 PFD 数值,我们建议按照白光照度能达到 200~300 lx 的亮度下所具有的 PFD 来设置,因为 200~300 lx 的照度是相关国家实验动物管理办法中建议的动物房的照度,这与 Liu 等[13]所设置的水平一致,相比之下,Hu 等[24]设置的 PFD 水平过高。因此,统一便于医学专业的科研人员操作的光源设置方法非常必要。对于上述设置和概念的理解也有助于对不同研究结果进行更好的解读。

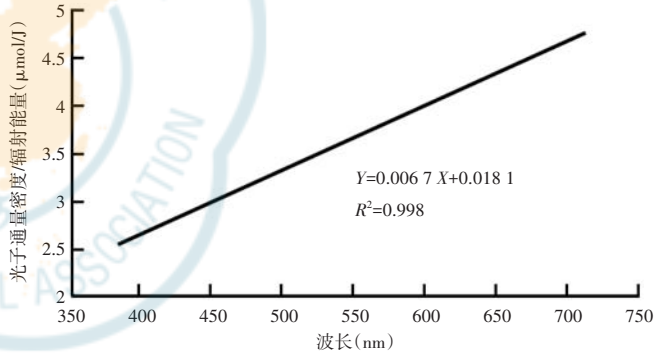

图 3　根据 uSpectrum 软件计算出的不同波长光-电转化效率曲线

综上所述,在光谱和近视的研究中,首先,需要根据动物感光细胞的光谱敏感性来选择实验波长;其次,需要控制光子数量一致而光谱不一致,这样可达到视觉感受不一致的效果,这个不一致是因为眼对不同波长光敏感性不同。这也说明,单纯光谱(频率分布)的影响其实是对相同光子数不同反应的基础。而我们给出的详细分析、简单转换公式和测量分析方法可以为以后的研究提供参考。

利益冲突　所有作者均声明不存在利益冲突

志谢　感谢温莹莹和郭东煜对文章的指导

参考文献

[1] Morgan IG, French AN, Ashby RS, et al. The epidemics of myopia: aetiology and prevention[J]. Prog Retin Eye Res, 2018, 62: 134-149. DOI: 10.1016/j.preteyeres.2017.09.004.

[2] Lin G, Taylor C, Rucker F. Effect of duration, and temporal modulation, of monochromatic light on emmetropization in chicks[J]. Vision Res, 2020, 166: 12-19. DOI: 10.1016/j.visres.2019.11.002.

[3] Strickland R, Landis EG, Pardue MT. Short-wavelength (violet) light protects mice from myopia through cone signaling[J/OL]. Invest

中華醫學會雜誌社 Chinese Medical Association Publishing House 版权所有 违者必究

Ophthalmol Vis Sci, 2020, 61 (2): 13 [2022-07-10]. https://pubmed. ncbi. nlm. nih. gov/32049342/. DOI: 10. 1167/iovs. 61. 2. 13.

[4] Karouta C, Ashby RS. Correlation between light levels and the development of deprivation myopia [J]. Invest Ophthalmol Vis Sci, 2014, 56(1): 299-309. DOI: 10. 1167/iovs. 14-15499.

[5] Tian T, Zou L, Wu S, et al. Wavelength defocus and temporal sensitivity affect refractive development in guinea pigs [J]. Invest Ophthalmol Vis Sci, 2019, 60(6): 2173-2180. DOI: 10. 1167/iovs. 18-25228.

[6] Zheng H, Tse DY, Tang X, et al. The interactions between bright light and competing defocus during emmetropization in chicks [J]. Invest Ophthalmol Vis Sci, 2018, 59(7): 2932-2943. DOI: 10. 1167/iovs. 17-22973.

[7] Cai J, Hao W, Guo Y, et al. Influence of LED correlated color temperature on ocular physiological function and subjective perception of discomfort [J/OL]. IEEE Access, 2018, 6: 25209-25213 [2022-07-10]. https://ieeexplore. ieee. org/stamp/stamp. jsp? tp = &arnumber = 8197370.

[8] Lan W, Yang Z, Feldkaemper M, et al. Changes in dopamine and ZENK during suppression of myopia in chicks by intense illuminance [J]. Exp Eye Res, 2016, 145: 118-124. DOI: 10. 1016/j. exer. 2015. 11. 018.

[9] Rucker F. Monochromatic and white light and the regulation of eye growth [J]. Exp Eye Res, 2019, 184: 172-182. DOI: 10. 1016/j. exer. 2019. 04. 020.

[10] Gawne TJ, Ward AH, Norton TT. Long-wavelength (red) light produces hyperopia in juvenile and adolescent tree shrews [J]. Vision Res, 2017, 140: 55-65. DOI: 10. 1016/j. visres. 2017. 07. 011.

[11] Smith EL 3rd, Hung LF, Arumugam B, et al. Effects of long-wavelength lighting on refractive development in infant Rhesus monkeys [J]. Invest Ophthalmol Vis Sci, 2015, 56(11): 6490-6500. DOI: 10. 1167/iovs. 15-17025.

[12] Li W, Lan W, Yang S, et al. The effect of spectral property and intensity of light on natural refractive development and compensation to negative lenses in guinea pigs [J]. Invest Ophthalmol Vis Sci, 2014, 55(10): 6324-6332. DOI: 10. 1167/iovs. 13-13802.

[13] Liu R, Qian YF, He JC, et al. Effects of different monochromatic lights on refractive development and eye growth in guinea pigs [J]. Exp Eye Res, 2011, 92(6): 447-453. DOI: 10. 1016/j. exer. 2011. 03. 003.

[14] Fotios S, Goodman T. Erratum: proposed UK guidance for lighting in residential roads [J]. Lighting Res Technol, 2012, 44(1): (69-83). DOI: 10. 1177/1477153511432678.

[15] Qi D, Hao L, Yi L, et al. Spectral optimization simulation of white light based on the photopic eye-sensitivity curve [J/OL]. J Applied Physics, 2016, 119(5): 053103 [2022-07-10]. https://xueshu. baidu. com/usercenter/paper/show? paperid = 08ed47e0c2c37bba41b7dd21485dd70f&site = xueshu_se&hitarticle = 1. DOI: 10. 1063/1. 4941396.

[16] 迈克·伍德, 施端. 新旧明视觉光谱光视效率曲线 [J]. 演艺科技, 2021, 186(10): 1-4.

[17] Ji Y, Li W, Liu M, et al. Effect of optical filters and light source spectra on the spectral luminous efficiency function measurement [J]. Opt Rev, 2020, 27(2): 149-155. DOI: 10. 1007/s10043-020-00577-w.

[18] Wen Y, Jin L, Zhang D, et al. Quantitative proteomic analysis of scleras in guinea pig exposed to wavelength defocus [J/OL]. 2021, 243: 104248 [2022-07-10]. https://pubmed. ncbi. nlm. nih. gov/33964483/. DOI: 10. 1016/j. jprot. 2021. 104248.

[19] 许正磊. 简介几种各具特色的硅光敏器件 [J]. 电子世界, 2019, 5: 195-196. DOI: 10. 19353/j. cnki. dzsj. 2019. 05. 104.

[20] 陈景玲. 实用光源的 lx 与 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ 的转换关系 [J]. 河南农业大学学报, 1998, 32(2): 199-202. DOI: 10. 16445/j. cnki.

[21] Thimijan RW, Heins RD. Photometric, radiometric, and quantum light units of measure: a review of procedures for interconversion [J/OL]. Hortscience, 1983, 18(6): 818-822 [2022-07-10]. https://www.semanticscholar. org/paper/Photometric% 2C-Radiometric% 2C-and-Quantum-Light-Units-A-Thimijan-Heins/c8c02e1c2ec78d30299abdf48696b8a7ce4e6d7f.

[22] Tan N, Mukai Y, Okawa R, et al. Visual pigments and spectral sensitivity of juvenile sutchi catfish (Pangasianodon hypophthalmus Sauvage 1878) [J]. J Applied Ichthyol, 2018, 34(6): 1314-1319. DOI: 10. 1111/jai. 13792.

[23] Jacobs GH, Deegan JF. Spectral sensitivity, photopigments, and color-vision in the guinea-pig (cavia-porcellus) [J]. Behav Neurosci, 1994, 108(5): 993-1004. DOI: 10. 1037//0735-7044. 108. 5. 993.

[24] Hu M, Hu Z, Xue L, et al. Guinea pigs reared in a monochromatic environment exhibit changes in cone density and opsin expression [J]. Exp Eye Res, 2011, 93(6): 804-809. DOI: 10. 1016/j. exer. 2011. 09. 013.

[25] Wang F, Zhou J, Lu Y, et al. Effects of 530 nm green light on refractive status, melatonin, MT1 receptor, and melanopsin in the guinea pig [J]. Curr Eye Res, 2011, 36(2): 103-111. DOI: 10. 3109/02713683. 2010. 526750.

（收稿日期：2022-07-20　修回日期：2023-03-02）

（本文编辑：刘艳　施晓萌）

读者·作者·编者

本刊投稿方式

初次投稿作者请按照下列步骤投稿：登陆中华医学会网站（http://www. cma. org. cn）→点击页面右上角的“注册”→选项注册账号→返回首页→点击页面右下方的“申请成为杂志作者”成为本刊作者进行投稿。投稿时请使用 Word 格式（. doc 文件类型），投稿后请注意自留原稿，并保留论文相关的原始资料，以备稿件修改补充所用。投稿后请从“业务中心”下载“中华医学会系列杂志论文投送介绍信及授权书（中文版）”，填写有关项目并请每位作者亲笔签字，加盖第一作者单位公章后寄 2 份至本刊编辑部，其中作者签名顺序和作者单位著录名称应与投稿时文章中著录的相一致，如有变更应由每位作者同意并请通信作者告知编辑部。投稿请注意：（1）在非公开刊物发表的稿件、学术会议交流的文章不属于一稿两投，但投稿时应向编辑部说明，非中文文字期刊已发表的文稿再次在本刊投稿须征得首次发表期刊和本刊编辑部的同意。（2）作者须告知与该研究有关的利益冲突，如该研究被某机构资金资助的声明等利益关系。（3）如涉及保密问题，需附有关部门审查同意发表的证明。

（本刊编辑部）

中華醫學會雜誌社 Chinese Medical Association Publishing House 版权所有 违者必究