

蓝光谱丰富的  
白光研究与蓝光谱丰富的白光室外照明  
相关的视觉、环境及天文问题(续一)

郭菲 编译 国际暗夜空协会上海分部 (上海 200061)

**摘要** 日前, 室外照明正经历一个非常重要的变化过程。随着近年来固态照明的发展, 白光光源在室外照明中的使用有逐步增长的趋势。虽然这样的变化所带来的优势已经被广泛地推广, 如更好的显色性和视觉有效性、更高效、更低综合成本以及更高的市场接受度等等, 但相比于目前室外照明中最广泛使用的高压钠灯技术, 由于新光源的光谱能量分布不同所引起的对环境的潜在影响很少得以正式探讨。文章总结了夜间照明的光谱组成对大气、视觉、健康和环境方面的一些研究。物理学已建立的关于光线和大气间相互作用的科学表明, 白光光源中蓝色光谱辐射的增加会增加可见的天空辉光, 同时由于暗视觉敏感度的增加和散射效应, 从而对天文研究带来不利影响。虽然其他领域的研究尚未成熟, 但已有明显的证据表明, 另外的一些潜在负面影响也同时存在。为推广转换使用白光光源所做的视觉科学研究也同时表明, 这样的照明也有可能增加眩光, 并对低照度水平下人眼(特别是老年人)的适应能力产生负面影响。大部分关于照明对人体健康危害的研究证据表明生物钟紊乱和乳腺癌与此相关。光谱中的蓝光部分已被认为对人体中通过光照周期作用的内分泌系统影响关系最为密切, 从而导致褪黑激素的减少, 而褪黑激素可以抑制乳腺癌的产生和发展。虽然室外照明、自然光照(如通过卧室窗)以及室外照明中的蓝光部分之间并没有直接将它们结合起来, 但其中潜在的关联是显而易见的。日前关于光谱对于其他物种影响的研究很少, 但在这些已有的研究当中, 相比于其他光谱部分, 蓝光经常被证明有一些特别的影响, 如对海龟和昆虫等。虽然在得出确定的结论之前还需要做很多方面的研究, 但充分的证据表明在大规模替换白光光源之前需采取谨慎的方式和进一步研究。

**关键词** 蓝光谱; 白光; LED; 室外照明; 视觉; 环境; 天文

## 0 引言

大量推广使用白光光源已渐成为室外照明近期的发展趋势。但与此同时, 综合考虑到美观、光源效率的提高、降低运行费用以及视觉科学的新兴发展, 室外照明同时也面临一些不同或相反的发展趋势。但无论如何, 必须要认识到并不是所有的白光光源都是一样的, 有些白光光源会产生更多的蓝色部分光谱。同时随着对人类视觉研究的发展, 越来越多的证据表明 500 nm 以下波长的光会对人类产生不利的影响。当照明专业中大量研究论证白光在能见度上具有优势的同时, 很多其他学科的研究资料也显示出一些截然相反的有害结果。本文从流行病学、天文学、土壤保护、生物学以及视觉和照明等各学科方面做一个简要的概括。

在过去的数十年中, 室外场地和道路照明最普遍使用的是高强度气体放电灯(HID), 特别是高压钠灯(HPS)。与高压钠灯相比较, 白光光源的光谱输出会产生大量的蓝光光谱部分, 这在室外照明应用中是一个非常重要的变化。大部分高压钠灯的光辐射在 550~650 nm; 小于 500 nm 的部分占所有可见光(此处可见光定义为 400~650 nm)的 7%; 对于荧光灯(包括无极荧光灯)和金卤灯(MH)光源, 这个比例是 20%~50%(见图 1)。LED 的制造商表示, 随着发光二极管(LED)技术的发展, LED 光源有望比这个比例更低, 实际上一些制造商已经发布“低蓝光”的

LED 产品应用于室外照明。但不管是任何光源, 如果使用白光越来越多, 进入环境的蓝光光谱部分也会显著增加。

相关色温(CCT)常用于描述白光光源被感知的颜色, 但对于衡量光谱分布中有多少能量辐射是在蓝光部分, 这是一个不充分的指标。例如, 同样 CCT 的金卤灯和 LED 光源, 可以在 500 nm 以下波长的辐射有巨大的差异。此外, 金卤灯和 LED 光源的光谱可以存在辐射的尖峰将辐射能量集中在某些波段区间, 有些可能会对环境产生不利的影响。因此, 关于室外照明影响的探讨必须要关注到光源的光谱能量分布以及生物系统对光谱的反应。

一般而言, 固态 LED 照明在 500 nm 以下光谱辐射比重更大, 特别是市场上强调的所谓“冷白光”LED, 其蓝光部分较多, 在 450~460 nm 有较强的输出峰值, 因此值得特别关注。LED 具有很多潜在的优势, 包括提升人体功效和减少能源消耗。这个技术并不一定是有风险, 但以下所提出的内容表明这个问题的复杂性, 以及在室外照明中应用蓝光部分丰富的白光光源应给予足够重视。

国际暗夜空协会(International Dark-Sky Association)成立于 1988 年, 是一个为解决日益严峻的光污染问题而设立的国际性非赢利组织, 总部位于美国华盛顿, 旨在为防止光污染、保护宝贵的自然暗夜空资源提供专业的科学教育知识和相关领域服务。

本文以光线通过大气传播相关的物理过程为基础,对人的视觉和照明相关作用展开讨论,然后对人类健康及环境的影响作出简要概括,最后再考虑天文学和景观方面的相关问题。

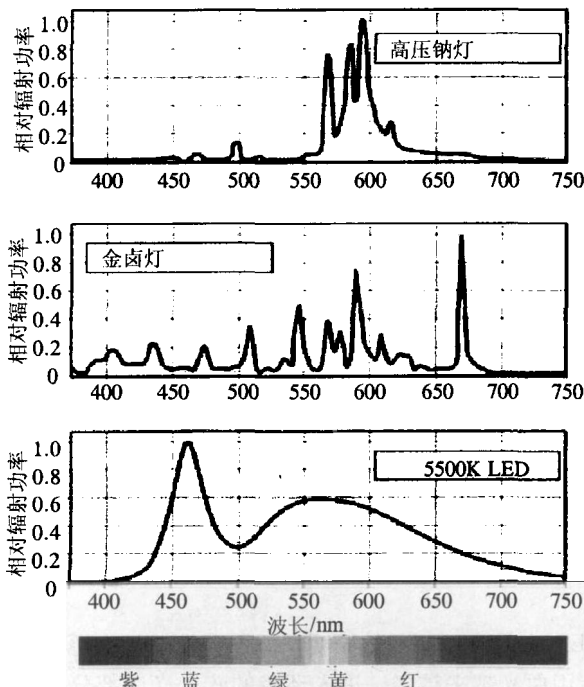


图1 高压钠灯、金卤灯和白光LED典型的光谱能量分布

### 1 物理过程

在19世纪和20世纪早期,光通过分子和悬浮微粒之间的相互作用现象已被发现,并在基础物理学中作了阐述。分子的散射最早是由 John William Strutt, Baron Rayleigh (Strutt, 1871) 发现,并从此被称为雷利散射 (Rayleigh Scattering)。雷利散射与波长和分子横截面 $\sigma_r$  紧密相关,散射强度与波长的四次方成反比。 $\sigma_r \propto \lambda^{-4}$ ..... (1)

在日常体验中,较短波长的光易被散射,因此白天晴空会呈现为蓝色。相比于其他较长波长的光,人工光源发出的蓝光部分辐射更容易被分子散射。Garstang (1986, 1989) 使用以下的数值来表述天文学中以 550 nm 和 440 nm 波长为中心的 V 和 B 通带的广域光谱上散射分子截面的关系。

$$\sigma_r (550 \text{ nm}) = 4.6 \text{ e}10^{-27} \text{ cm}^2 \dots\dots\dots (2)$$

$$\sigma_r (440 \text{ nm}) = 1.136 \text{ e}10^{-26} \text{ cm}^2 \dots\dots\dots (3)$$

以上的比例关系 (11.36/4.6 $\approx$ 2.5) 表明 440 nm 的光线在分子中的散射约为 550 nm 光线的 2.5 倍。由于大部分光源辐射的光线是一定范围内的波长,某一给定光源辐射出的光线发生雷利散射的数量取决于该光源的光谱能量分布比重。不同光源有效的相对散射

可以通过雷利散射指数 (RSI) (Knox and Keith, 2003) 加以确定。对于一系列选定光源光谱的 RSI 与高压钠灯的 RSI 的比值可以参见图 2。

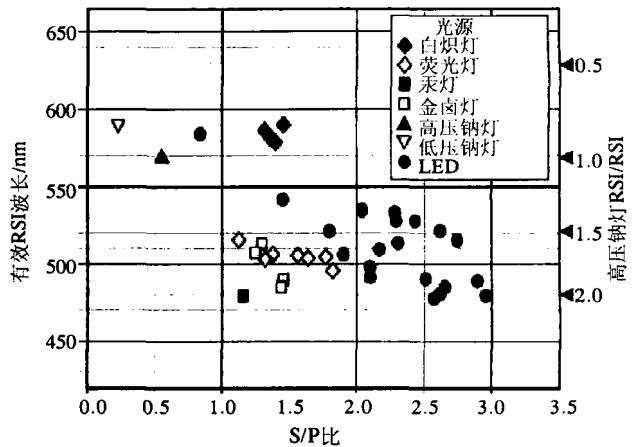


图2 相对于高压钠灯的雷利散射指数和选定光源的有效 RSI 波长以及它们的暗视觉/明视觉比率 (S/P)

以上结果显示,白光 LED 对分子的散射是高压钠灯的 1.2~2 倍;荧光灯为 1.5~1.7 倍,取样的金卤灯为 1.5~1.8 倍。

空气中并不是仅包含气体分子:特别是在较低的大气层中,悬浮微粒或微粒物质是非常重要的组成部分。光线和悬浮微粒的相互作用原理是有 Mie 和其他人发现的 (参见 Mie, 1908)。虽然这个原理比较复杂并且依赖于微粒的尺寸和组成,但对于那些较低的大气层中最重要的微粒,悬浮微粒的散射仍然显示短波长的光被散射的程度更大,特别是微粒的尺寸与波长成反比时 (Garstang, 1986):  $\sigma_r \propto \lambda^{-1}$ 。

相比于对分子的散射而言,在大部分情况下光对悬浮微粒总的散射程度更大 (Garstang, 1986),但要求的角度有所不同:悬浮微粒在前向散射程度比较大;也就是说,其散射光和它原来的人射光方向偏离不大。光对于气体分子的散射则更为均匀地发散到各个不同的方向。比较容易观测到受角度影响对悬浮微粒的散射光现象就是在白天蓝色天空中靠近太阳的部分,会更亮更白。尽管光对于悬浮微粒的散射总体而言比较严重,但人工照明引起的天空辉光主要是由雷利散射决定的,其结果与光的波长紧密相关。

在实际的大气中包含有气体分子和悬浮微粒,和光波长紧密相关的雷利散射虽然不能被消除,但也相对减弱。这意味着在有薄雾的大气中,例如在污染相对严重的城区中,天空看上去没有那么蓝或白。在这种情况下蓝光谱丰富的光源相比于高压钠灯等黄光源散射情况仍然比较严重,但相比于悬浮微粒较少的大气而言会相对好一些。

最后,我们看看各种形式的散射会产生的一些重要的影响。当光线通过大气长距离传输的时候,越来越多的光线会被散射掉,同时根据以上分析,由于波长关系,蓝光比黄光或红光损失更多。这种现象在薄雾天气下更为明显。平时我们较常看到的现象就是日落或太阳接近地平线时的红色云彩。对于人工照明,对蓝光的强烈散射在靠近光源的区域特别明显,如市区或城市附近,但随着距离的增加而有所减弱(Luginbuhl等,2010)。光散射的增加和光吸收之间的紧密联系必须严格加以理解。虽然随着距离的增加,对蓝光谱丰富的光影响会比黄光谱丰富的光相应减弱得更快,这种减弱是由城市附近区域内光线中短波长光引起的。换言之,远距离减少的影响是以近距离影响增加为代价的。对于清洁的大气,总体而言被散射的光比较少,但影响的范围会更大;对于有薄雾的大气,比较多的光线被散射,因此对天空辉光的总体影响会更大,但更集中于光源的周边区域。

## 2 人的视觉

一些研究表明,蓝光谱丰富的光线在某些情况下更有利于人类视觉。虽然Berman(1992)的研究只涉及明亮的室内照明,但他指出:“仅用明视觉照度是不能充分描述视觉系统的光谱反应”,应该还有其他尚未在CIE光适应曲线中描述潜在的相关光谱反应特性。但环境照明水平降低,人眼会对较低的照明水平调节适应,视觉功能会变得更加复杂。在夜间,人的室外视觉在存在人工照明的情况下与视网膜上的杆体细胞和锥体细胞均相关并复杂作用,视觉作业会混合暗视觉(杆体细胞)和明视觉反应(锥体细胞)。杆体细胞对蓝光波长更为敏感,为此会认为蓝光在低照明水平下对视觉更为有效,因此室外人工照明应该增加使用蓝光谱丰富的光源。

一些研究者(例如Ikeda and Shimozono, 1981; Sagawa and Takeichi, 1986; Trezona, 1991)已着手通过中心凹亮匹配对在中间照明水平下的视觉光谱反应的动态变化(Purkinje shift/Purkinji 漂移)加以调查研究(中间照明水平是指介于定义暗视觉反应极低照度水平和用于定义明视觉反应较高照度水平之间的照度水平);而另外一些研究者(如He等,1998, Lewis, 1999)则使用中心凹、旁中心凹以及其周边区域的刺激反应时间的方法。类似的文献已经被作为被中间视觉反应功能的基础,在这种情况下杆体细胞和锥体细胞同时都对视觉作用有贡献。然而,在中间视觉条件下的视觉特性在何种程度影响实际的照明应用还存在着一些不确定性。

特别需要提出的是,不同的视觉性能测定方式会

形成不同中间视觉曲线。对于外围目标反应时间的测量表明当亮度达到 $1.0 \text{ cd/m}^2$ 时会出现“Purkinje 漂移”,而有些测量则要在适应水平低至10倍即 $0.1 \text{ cd/m}^2$ ,少数几个甚至低至 $0.01 \text{ cd/m}^2$ (Rea等,2004)。有些研究通过颜色路径来模拟中间视觉功能,这种情况下S锥体细胞比杆体细胞起到更大的作用(Walkey et al., 2006)。因为典型的室外照明水平通常只覆盖到中间视觉范围中比较明亮的那部分,所以具体的反应和影响眼睛对光谱敏感性是一个非常关键的问题。取决于不同的研究和视觉性能测定方式,中间视觉与室外照明设计的相关性有可能是非常有意义的,但也有可能这样的关联仅仅是理论上而言。

这方面的研究存在着一些不确定性,包括哪种视觉刺激是具决定性的,中间视觉光谱反应模式是如何构成,哪种视觉性能指标设计是最适合的,以及杆体细胞和锥体细胞之间的相互作用,中心凹、中心凹周边和外围对刺激的权重等等。所有这些因素如何与照度水平随时间的适应性之间相互关联,可能不一定能够通过最终通过一个统一的光度系统来实现,但也使这个研究领域变得非常有意思。有一点非常清楚的是,对于低照度水平下的视觉性能并不仅仅是暗视觉反应,而且中间视觉反应也不会是唯一的。

尽管中间视觉的照明水平具有复杂性和不确定性,虽然北美照明学会(IESNA)作为官方代表并没有明确表态,但一些评论家和生产厂商对于蓝光谱丰富照明产品的光输出推荐或实际上在使用一些修正因数(Lewin, 1999; U. S. Dept. of Defense, 2006; Berman and Josefowicz, 2009)。在这些修正因数经常被提及的同时,很多关于这方面的建议往往比提出者原所预期的更广泛地使用:如果你在网络上搜索名词“有效光通系数(lumen effectiveness multipliers)”和“瞳孔流明(pupil lumens)”会发现成千上万个结果,其中很多来自厂商的网站上。这些修正因数的应用在英国已经获得官方的认可(例如,BS 5489-2: 2003“道路照明设计规范”)。对于蓝光谱丰富的光,这样的加权修正更清楚地表述了相关照明的实际效率,从而也根本性调整了这些系统的经济性评价。

2009年11月15日,北美照明学会(IESNA)发布了一个立场声明。声明指出,除在IESNA其他文件中特别指出的例外,IESNA照明手册中定义所有IESNA的推荐值与视觉发光效率函数一起使用(IESNA, 2009)。而那些例如用于决定S/P比、“瞳孔流明(pupil lumens)”、“有效光通系数(lumen effectiveness multipliers)”(Lewin, 2001)等光谱加权函数均不被批准。

2009年4月1日,国际照明委员会(CIE)发布了中间视觉性能的技术委员会报告,详细地描述了一个推荐的中间视觉光度学系统(CIE 2009)。他们的结论是明视觉和暗视觉模式之间存在着一个对数线性转换,将眼睛的亮度和彩色系统加以调和,同时选择一个由Rea及其他人提出的USP系统(2004)和由Goodman及其他人提出的MOVE系统(2007)之间的上阈值。这个对数线性转换与实验室实验非常吻合。CIE由此而得出的中间视觉亮度调整不象对于蓝光谱丰富的光线的有效光通系数那么明显。虽然这个提出的中间视觉光度学系统从大量的研究中提炼出一个对于照明工程非常实用的系统,但它并没有解决以下关于中间视觉水平下蓝光谱丰富的光错综复杂的优势问题。

### 3 瞳孔反应

一些研究显示,与明视觉亮度相比,瞳孔的大小与蓝光光强的关联度更大(Barbur等,1992),尤其是在较低的照度水平下这种效果更加突出。蓝光谱丰富的光会使瞳孔收缩比黄光更小。虽然有时候杆体细胞(暗视觉)反应会综合作用,但研究表明瞳孔大小可能更依赖于对蓝光敏感的S锥体(Kimura和Young,1999)也就是锥体细胞和杆体细胞反应的结合,对490 nm波长具有最大敏感性(Bouma,1962),或者是一个L锥体减去M锥体的机理(Tsujimura等,2001)。

在较低的亮度水平下,较小的瞳孔和相应较低的视网膜照度可能会降低那些对与中心凹视觉或明视觉亮度更紧密相关作业的视觉性能。瞳孔大小是一个重要的可协变量,应该通过一系列性能作业去检验,而不仅仅是反应时间,同时对中心凹注视的视觉作业上低视网膜照度的结果没有被充分讨论。

### 4 适应

暗视觉过程比明视觉对光线感知阈值低得多(Blackwell,1946;Rose,1948)。然而,暗视觉和明视觉系统并不是独立可叠加的视觉通道。暗视觉活动表现在压制颜色(明视觉)的功能(Sugita等,1989),明视觉活动则压制低光的暗视觉功能(Stockman和Sharpe,2006),同时在中间视觉上限范围时杆体细胞逐步饱和,暗视觉敏感性降低(Stockman和Sharpe,2006)。人眼在明视觉和暗视觉模式间适应的时点和持续时间也至关重要。特别要提出的是,蓝光下会增加适应时间,而这个适应时间需要最大的暗适应敏感性(Bartlett,1965;Brown等,1969)。光色和暗适应之间的关系通常为军人和天文学家所利用,他们使用红光照明来保护暗视觉。

因此,暗视觉反应对低强度的蓝光最敏感,较高

强度(包括在中间视觉范围内)的蓝光,抑制了对黑暗的适应性,并表现为压制了暗视觉反应。现实中很多情况涉及眩光源、糟糕的均匀度、粗劣的过渡、大范围的照明水平变化和不同的适应时间尺度,因此以上的考虑是非常有意义的,但同时我们对此的理解也还是比较粗浅的。实验室的暗适应实验或在简化的道路设计中关于蓝光的视觉优势在某些应用中并不能很好地被体现出来。

### 5 眩光

室外被照环境中的眩光很少被量化,但它在人的视觉过程中扮演着一个非常重要的角色。它能够产生不舒适感觉,表现在它会引起转移注视、眨眼、斜视;或直接降低视觉性能——失能眩光(De Boer,1967)。最早期的研究发现蓝光会引起更多的眩光(de Boer和van Heemskerck Veeckens,1955)。之后的研究已经确认这个发现并且表明S锥体反应(峰值420 nm)比杆体(峰值505 nm)与不舒适眩光关系更为密切(Bullough等,2003;Kooi和Alferdinck,2004)。

在350~430 nm的蓝光也被证明会使人眼晶体产生荧光(Zuclich等,2005),会导致光幕亮度。对于汽车上眩目“蓝头灯”的抱怨说明蓝光较多的头灯比传统卤素头灯感觉眩光更严重(Macc等,2001)。Flanagan等人(1992)发现较高亮度水平的卤素灯并不会比较低亮度水平蓝光丰富的HID头灯产生更多的不舒适感觉。

### 6 老龄化眼睛

随着眼睛的老龄化,对于达到同样的视觉敏锐性,它要求更多的光线和更强的对比,同时对眩光更为敏感。由于眼睛的透明度降低,特别在偏蓝光波段,同时加上随年龄增长而减小的瞳孔尺寸,视网膜照度会更低(Boyce,2003)。虽然研究并未得出是否由于光谱影响的结论,但老年人的眼睛也更容易患白内障、黄斑变性、老花眼和青光眼。然而,由于蓝光谱丰富的光源会产生较多的不舒适眩光,同时老年人对眩光更为敏感,蓝光谱丰富的室外照明被认为对老年人的影响会比其他人群更多一些。在美国,年纪大于65岁的人群占总人口比例越来越多,在20世纪这个数值已比原来增加10倍,从现在到2030年有可能会再翻倍(美国人口普查局,2008)。

### 7 健康影响

人的生物钟是由视网膜中的非视觉光感受器调节,其反应功能峰值在位于光谱中蓝光部分的460 nm

附近(见图3);在夜间暴露在光线下,特别是在蓝光光谱丰富的光线,会抑制褪黑激素的产生(Brainard等,2001)。褪黑激素存在于在动物和人体内,有些植物体内也会存在。在人体内这种荷尔蒙调节人的睡眠规律,同时在免疫系统也扮演着重要角色。光线能被有效地应用于室外去改变生物节律,也能带来一些健康和生活方式的好处。室内照明完全由使用者控制,而人对室外照明的控制则相应少一些。夜间,例如道路、街区或邻居家的照明有可能会溢出到有人睡觉的屋里。一些研究表明,产生干扰的照明阈值是很低的。2006年,美国环境健康科学国家研究院已把夜间溢出人工光的影响作为一个特殊的课题加以研究(Stevenson,2007),并由美国医药协会形成了一个决议(2009)。令人吃惊的是,这个生物钟光感应系统在最近才被发现(Provencio等,2000),这表明我们对夜间溢出光,特别是蓝光光谱丰富的照明,可能产生的潜在影响的理解远远滞后于照明技术的开发和应用。在最近一个较为全面的回顾中,Stevens(2009)对超过一百篇与夜间照明对人类生物钟、褪黑激素产生和乳腺癌的影响研究相关的出版著作进行了总结。很多的实验室和流行病学研究表明褪黑激素产生如果被抑制,会导致乳腺癌的发生几率和恶化速度。此外,证据表明生活在被照明城区环境中的人们产生乳腺癌的几率更大,但患肺癌的几率并不会比平均值高,因为肺癌和褪黑素水平无关。并非所有潜在的复合因素已全部排除,而且对于现实情况中偶尔暴露在室外照明下,以及与该照明的光谱特性相关的关键性研究尚未公布。但是蓝光光谱丰富的光线对褪黑激素产生的影响,以及褪黑激素对人类癌症发生的影响,在实验室实验中是无可争辩的事实。Stevens总结道:“照明对这个地球上生物影响的水平——仅仅现在才刚刚被认识到。对人类健

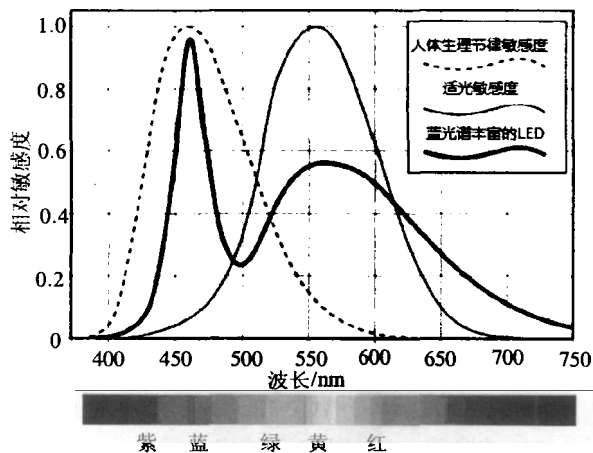


图3 典型的蓝光光谱丰富的LED光源光谱下人的光适应和生物钟敏感性曲线

康而言,在夜间光和生物钟紊乱带来的众多潜在的负面影响中,目前为止最大的证据是在乳腺癌上。没有一个实验可以证明其直接因果关系,正如一组研究也不能证明以上因素中的仅仅其中一个。但是,将它们综合考虑,流行病学和基础科学可能会得出一个因果性的“证据”(也就是专家的共识)。如果是这样,那么对于建筑界和照明界就可能存在一个机会与科学界协同工作,去开发一些新的照明技术可以更好地同时满足夜间和日间的生物钟系统。”

尽管室外照明和癌症之间的联系尚未被明确,但如果这个推断成立,这样的光线中蓝光成分将毫无疑问是一个更为危险的因素。

## 8 环境影响

人工照明主要试图满足人类的需要,但一旦应用在室外,它就会辐射到环境当中,有可能对其他生物产生无意识的后果(例如 Longcore 和 Rich, 2004; IESNA, 2008)。据估计,地球上大部分动物是在夜间活动的;夜间活动的倾向可能来源于躲避掠夺者、消暑、便于猎食或其他各种因素(例如, Rydell 和 Speakman, 1994)。夜间环境照明水平的改变可能会干扰动物栖息地导致其不能使用。环境中的人工照明因此可能会被认为对动物栖息地有长期的损害性。“光污染已证明会对自然环境中的行为和种群生态系统产生影响——由于变化的光环境导致定向和偏好问题,相应地也就会影响到动物的觅食、繁殖、迁徙和交流。”(Longcore 和 Rich, 2004)

自然主义者早在 1883 年就注意到人工光对野生动物的影响,在 1935 年就对光色在其中的重要作用有所了解(Rich 和 Longcore, 2006)。人工光和野生动物之间的关系很少会上升到研究层面,去了解那些相关问题的确定答案,比如引起干扰的照明阈值,或哪一部分光谱会影响某个物种的行为等。很多的研究只是涉及是否有光,而不是深入了解光谱能量分布和生物功能之间的联系。

然而,没有证据支持室外照明的光谱特性的变化不会产生生物反应。鲜有例子表明增加蓝色光辐射比黄光光谱丰富的照明对野生动物更有利。有一些例子表明较短波长光线与生态问题相关(例如, Frank, 1988; Wiltschko 和 Martin, 2000; Nightingale 等, 2006),虽然一些研究也指出光谱的其他部分也存在可能(例如, Philips 和 Borland, 1992; Wiltschko, 1993; Poot 等, 2008)。然而,蓝光在大气中散射增加,很多生物系统对蓝光比较敏感,并且对水下环境的穿透力更强(Clark 和 Oster, 1967),这意味着更多地使用蓝光光谱丰富的光源可能更易产生严重的环境后果。

(未完待续)

## 蓝光谱丰富的白光研究

# 与蓝光谱丰富的白光室外照明相关的视觉、环境及天文问题(续二完)

郭菲 编译 国际暗夜空协会上海分部 (上海 200061)

### 9 对野生动物产生干扰的例子

众多研究资料表明海龟由于人工照明而迷失方向。幼龟通常会受到人工光而不是海洋的自然光的吸引从沙滩爬向大海,因而降低了生存率(例如 McFarlane, 1963; Witherington, 1992; Salmon, 2006)。四种大西洋海龟具有类似的趋光性反应,而同一种铁头海龟对 450 nm 光和 600 nm 光的趋光性反应会有十倍的差异(Witherington 和 Martin, 2000)。此外,并不只是一些较近的光源,甚至是远距离的天空辉光也可能产生类似的反应(Salmon, 2006)。值得注意的是,根据濒危动物条例,所有筑巢于墨西哥湾海岸和甚至向北远至 Cape Cod 的大西洋海岸的六种大西洋海龟已被列为濒危物种(Plotkin, 1995)。

含有强烈的蓝光和紫外成分的光源对昆虫有特别的吸引力(Frank, 1988),即使是具有较宽光谱的白炽灯光源一般而言不会被认为其蓝光谱丰富,但众所周知在家居照明中也会吸引昆虫。目前缺乏已公布的关于紫外和蓝光对昆虫的相对吸引程度方面的研究,虽然一些未公开的研究表明紫外比蓝光更易吸引昆虫,而蓝光比黄光更易吸引昆虫。在人工照明区域里的昆虫经常由于趋光性而被捕捉,同时灯光也会吸引昆虫从自然栖息地离开而进入被照明区域,或者妨碍昆虫从一个区域迁徙到另外一个区域(Eisenbeis, 2006)。因此,在一设定光源的距离内会对昆虫产生较大影响。那些较少短波辐射的光源如白炽灯和低压钠灯,可以大大降低或减少趋光性反应。

大多数蝙蝠是以昆虫为食,长期以来被观察到夜间在光源附近捕食。这个现象导致一个复杂的具有潜

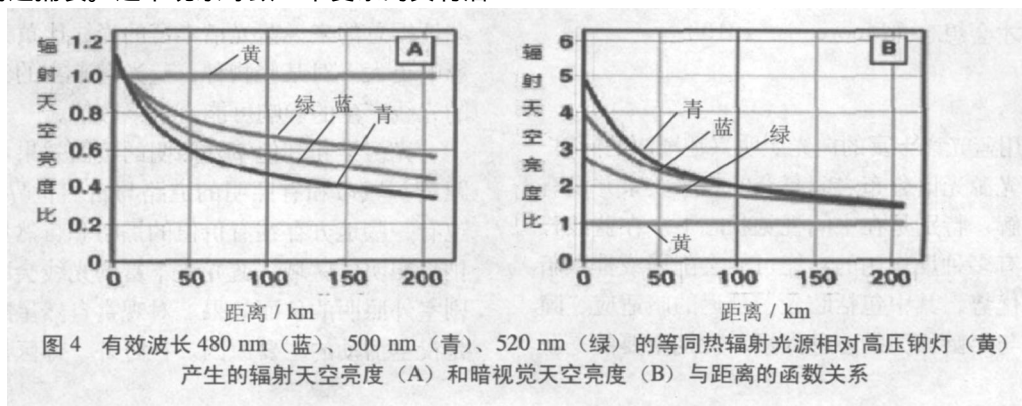
在危害的生态变化——灯光将蝙蝠的食物聚集在它们日常的栖息地之外,可能会导致到捕食地点需要更远的飞行距离,改变它们的日常饮食规律,并改变蝙蝠物种间的竞争平衡(Rydell, 2006)。

### 10 野生动物生理节奏的破坏

光周期是动物王国中主导信号之一;动物的光周期的反应通常是由黑暗和白昼的长度所触发。光是一种强有力的动因并在生物学上起到非常活跃的作用(皇家环境污染委员会, 2009)。对于人类,生物钟控制着复杂的日常和季节性的内分泌功能。它们支配着动物的迁移、生殖和捕食的各种行为(Rich 和 Longcore, 2006, 皇家委员会, 2009)。在哺乳动物中,蓝光谱丰富的光线同步生物钟功能的趋势非常普遍(Berson 等, 2002),有证据表明两栖动物(Hailman 和 Jaeger, 1974; Buchanan, 2006)和浮游生物(Moore 等, 2000; Gehring 和 Rosbash, 2003)也是如此。

### 11 天空辉光,天文学和自然夜景

在接近光源的地方,比如说城区内或靠近城区,蓝光谱丰富的光源产生更强的散射导致更多的天空辉光(Luginbuhl 等, 2010; 图 4)。最蓝的光源会比高压钠灯或低压钠灯多产生 15%~20% 的辐射天空辉光。这种效果结合到视觉观测,比如对普通的观星者和业余天文爱好者,暗适应视觉对短波长光线更敏感。在相对较暗的城郊或郊区,眼睛完全或基本完全处于暗适应状态,人工照明产生的天空辉光亮度,蓝光谱丰富的白光比高压钠灯高 3~5 倍,和低压钠灯相比更是达到 15 倍。



在与光源距离较远的地方,例如在世界上最高品质的天文观测台址,蓝光丰富的光源引发的辐射天空辉光少于高压钠灯(图4A)。但是,对于黑暗适应的人眼,在典型的大气环境中至少200公里以内,远距离的蓝光丰富的光源还是会比高压钠灯产生的天空亮度更高(图4B)。

虽然与高压钠灯相比,蓝光丰富的光源产生的辐射天空辉光随距离增加衰减得更快,但是必须认识到蓝光丰富的光线会影响那些原本基本不受人工照明产生天空辉光的区域。高压钠灯仍然是很多地方占主导地位的区域照明技术,几乎对夜空光谱不会产生蓝光影响。在那些使用低压钠灯的区域,夜空光谱中蓝光成分会被影响得更少(Luginbuhl, 1999)。从天文科学的观点而言,这些增加短波长光线的影响会由于自然夜空在短波长下会更暗而被综合(440 nm下的天空的亮度大概只有550 nm下的45%)。最终效果是在同等数量的光线下,由于不同的对比度原因蓝光丰富的光源比高压钠灯对大部分天文台的天文研究影响程度更大。

在天空的上部(天顶70°范围内)增加的人工辐射对科学天文观测影响最大。在各种影响的比较中,人类观测者所见的夜空环境受到人眼视觉对光源光谱组成的光谱敏感性和城市上空的光顶外观之间的相互作用的影响较大。对适应黑暗的人眼,所谓对蓝光丰富的光源“暗适应优势”(抑或在本案中为劣势)可以被完全体现出来。例如,一定数量给定的人工照明(以辐射单位测量,而不是以感光的流明数)从夜空中( $S/P$ 比值为3)散射,会显得与同样数量的高压钠灯产生的光( $S/P$ 比值为0.6)的5倍那么亮。对很多郊区和自然区域包括国家公园(Duriscoe等,2007)产生重大影响的城区上空的光穹顶,越来越多地使用蓝光丰富的白光光源会增加对100公里或以外区域的影响(Luginbuhl等,2010)。逐渐消失的自然星空引发的文化问题难以量化。但这些影响会涉及相当大一部分的人类居民,而不是通常我们认为仅仅在讨论夜空的价值时才会想起(Moore等,2010)。

## 12 结论

在对使用蓝光丰富的白光照明兴趣渐浓的同时,视觉性能和光源光谱分布之间复杂的相互关系并没有被充分地了解,特别是在中间视觉状态下。在蓝波长的范围内,有多种反作用的功能可能会削弱或摧毁暗适应刺激的优势,其中包括眩光、延迟的暗适应、瞳孔压缩以及与年龄相关的各种因素。特别重要的是获

得这些优势所需要的亮度阈值。大部分的室外照明水平位于中间视觉范围的高区,蓝光丰富的光线在中间视觉低区或暗视觉水平下的优势不应被错误地应用在较亮的范围条件下。

仅仅是粗略地认知蓝光丰富的白光照明的优势,人们可能会假设推断,与降低光适应照度一样,蓝光丰富的白光照明允许更低照度水平的潜在可能性会有助于减少对环境的影响。这种假设并不正确。实际上,这种情况会对人类、野生动物和与蓝光丰富的白光相关的天文资源都会产生更多的有害影响。首先,短波长在大气中的散射比长波长更甚,而且观测被人工照明引起天空辉光污染天空的暗适应人眼对蓝波长丰富的光线更为敏感。与高压钠灯相比,蓝光丰富的白光光源散射会增加1.1~1.2倍;对于暗适应的人眼,这些光线在附近观测时会感觉亮3~5倍。因此,蓝光丰富的光线会极大程度地恶化光源附近的可见天空光,并且这种影响会扩展到很大的距离范围。

其次,从远距离天文观测站的天文观测方面而言,蓝光丰富的照明光源短波长辐射增加了自然条件下相对较暗且不受光谱蓝光部分污染(高压钠灯和低压钠灯)的天空光。由此产生对比度的降低也影响天文设施的有效性。

目前夜间光线对健康方面影响的认知,特别是夜间蓝光丰富的光线,尚未能得出一个明确的结论。但是,短波长辐射和影响人类生物钟系统对蓝光敏感的光感反应,以及短波长辐射抑制褪黑激素的产生,都表明至少在夜间广泛使用蓝光丰富的光源应该认真加以考虑。对这个领域的研究迫在眉睫且势在必行,因为很多研究已经表明,其中存在潜在的严重影响。

光生物学表明夜间蓝光丰富的光线非常有可能改变动物王国中的生物节律和光适应周期。在这方面的研究尚在初期阶段,其证据已广泛涉及整个动物世界。黄光丰富的光线例如高压钠灯,或甚至是单色的黄光例如低压钠灯,在很多情况下对环境是较为理想的,但也存在着值得注意的例外。然而,根据这些证据总的来说蓝光丰富的光线比黄光对野生动物影响更大。对某些物种,蓝光丰富的光线和无蓝光的光线产生的影响可能会相差数倍。

光污染和其他室外照明的负面效果可以达到较远距离。城市和有照明的道路与自然世界交织在一起,也有一些地方存在有价值的黑暗和自然星空。在高压钠灯照明的区域,蓝光丰富的光线会明显改变并加剧室外照明的负面效果。对观赏自然星空美景的渴求也是夜空活动的主要原因。在野外、郊区甚至城郊条件

下只有纯粹的暗视觉功能。因此  $S/P$  比率对观察夜空的观测者起到反作用——光线的暗适应成分越高，感知到的光污染越严重。即使是远至 200 公里处蓝光已经大部分散射掉了，蓝光光谱丰富的光线与高压钠灯相比对天文观测的负面影响还是严重得多，特别是在干净的大气中。

目前对蓝光光谱丰富的白光室外照明的趋势将导致 500 nm 以下波长的辐射极大地增加。这将非常可能会对生态系统、观赏夜空、天文研究、人类健康产生不利影响。如果照明设计师、制造商和公众对这些负面的结果给予重视，那么应该制订描述较短波长光源光谱可能产生不利结果的参数。显色指数、相关色温、以及  $S/P$  (暗适应/明适应) 比率等参数并不能有效地界定已知明显影响的范围。此外，更好的参数指标有助于照明科学去探索与中间视觉条件以及 Purkinje 漂移、瞳孔尺寸、适应性及眩光等相关的复杂视觉问题。光源的选择和筛选可以去限制 500 nm 以下的波长，这样的光线一般而言会表现出黄色色调，同时也能保证暗适应视觉，减少负面效果。

注：蓝光光谱丰富的光将常用于联系所有类型的白光。这个术语是相对于黄光谱丰富的光源（主要是高压钠灯），一般定义为波长小于 500 nm 的各部分蓝光。虽然讨论中的一些光源确实是发出蓝颜色的光，但这个术语并不是指看上去是蓝色的光。例如蓝光光谱丰富的白光光源包括荧光灯、各种相对色温的白光 LED、无极灯和金卤灯等。

#### 参考文献

- [1] American Medical Association, 2009, Resolution of the American Medical Association on Lighting, June 15, 2009, [http://current.com/news/90214626\\_ama-officially-supports-light-pollution-reduction.htm](http://current.com/news/90214626_ama-officially-supports-light-pollution-reduction.htm)
- [2] Barbur, J. L., Harlow, A. J., and Sahraie, A., 1992, "Pupillary responses to stimulus structure, colour and movement," *Ophthalmic and Physiological Optics*, 12: 137-141.
- [3] Bartlett, N. R., 1965, "Dark and Light Adaptation," in *Vision and Visual Perception*, Graham, C. H. (ed), New York: John Wiley and Sons, Inc., chapter 8.
- [4] Berman, S., 1992, "Energy efficiency consequences of scotopic sensitivity," *Journal of the Illuminating Engineering Society*, winter 1992, pp. 3 - 14.
- [5] Berman, S. and Josefowicz, J., 2009, "Incorporating Spectrum Effects for Brightness Perception and Visual Detection at Mesopic Light Levels," LED Roadway Lighting Ltd.
- [6] Berson, D. M., Dunn, F. A. and Takao, M., 2002, "Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock," *Science* 295: 1070 - 1073.
- [7] Blackwell, H. R., 1946, "Contrast threshold of the human eye," *Journal of the Optical Society of America*, 36(11): 624-643.
- [8] Bouma, H., 1962, "Size of the static pupil as a function of wavelength and luminosity of the light incident on the human eye," *Nature*, 193: 690 - 691.
- [9] Boyce, P., Akashi, Y., Hunter, C. M., Bullough, J. D. 2003, "The impact of spectral power distribution on the performance of an achromatic visual task," *Lighting Research and Technology*, 35: 141 - 156.
- [10] Brainard, G. C., et al., 2001, "Action spectrum for melatonin regulation in humans: evidence for a novel circadian photoreceptor," *Journal of Neuroscience*, 21: 6405 - 6412.
- [11] Brown, J. L., Metz, J. W. and Yohman, J. R., 1969, "Test of scotopic suppression of the photopic process," *Journal of the Optical Society of America*, 59: 1677 - 1678.
- [12] Buchanan, B. W., 2006, "Observed and potential effects of artificial night lighting on anuran amphibians," in *Ecological consequences of artificial night lighting*, Rich, C., and Longcore, T. (eds.), Island Press, Washington, D. C., pp. 192 - 220.
- [13] Bullough, J. D., van Derlofske, J., Fay, C. R., and Dee, P. A., 2003, "Discomfort glare from headlamps: interactions among spectrum, control of gaze and background light level," in *Lighting Technology*, Warrendale, PA. Society of Automotive Engineers, pp: 21 - 25.
- [14] Campbell, F. W., 1957, "The depth of field of the human eye," *Optica Acta*, 4: 157 - 164.
- [15] Clarke, G. L., and Oster, R. H., "The Penetration of the Blue and Red Components of Daylight into Atlantic Coastal Waters and its Relationship to Phytoplankton Metabolism," *The Biological Bulletin*, 1967: 59-75.
- [16] Commission Internationale de l'Éclairage (CIE), 2009, Recommended System for Visual Performance Based Mesopic Photometry. CIE Technical Committee 1-58 — Visual Performance in the Mesopic Range.
- [17] de Boer, J. B., 1967, "Public lighting," Eindhoven, The Netherlands: Philips Technical Library.
- [18] de Boer, J. B. and van Heemskerck Veeckens, J. F. T., 1955, "Observations on discomfort glare in street lighting," *Proceedings of the Commission Internationale de l'Éclairage*, Zurich, Switzerland.
- [19] Duriscoe, D. M., Luginbuhl, C. B., and Moore, C. A., 2007, "Measuring Night-Sky Brightness with a Wide-Field CCD Camera," *Pub. Astron. Soc. Pacific*, 119: 192 - 213.
- [20] Eisenbeis, G., 2006, "Artificial night lighting and insects: attraction of insects to streetlamps in a rural setting in Germany," in *Ecological Consequences of Artificial Night Lighting*, Rich, C., and Longcore, T. (eds), Island Press, Washington, D. C., pp. 281 - 304.
- [21] Flannagan, M. J., Gellatly, M. J., Luoma, J., and Sivak, M., 1992, "A field study of discomfort glare from high-intensity discharge headlamps." Report No. HS-041 319, UMTRI-92-16, University of Michigan Transportation Research Institute, Ann Arbor, MI.
- [22] Frank, K. D., 1988, "Impact of Outdoor Lighting on Moths: An Assessment," *Journal of the Lepidopterists' Society*, 42: 63 - 93.
- [23] Garstang, R. H., 1986, "Model for Night Sky Illumination," *Pub. Astron. Soc. Pacific*, 98: 364 - 375.
- [24] Garstang, R. H., 1989, "Night-Sky Brightness at Observatories and Sites," *Pub. Astron. Soc. Pacific*, 101: 306 - 329.
- [25] Gehring, W. and Rosbash, M., 2003, "The coevolution of



- blue-light photoreception and circadian rhythms," *Journal of Molecular Evolution*, 57: S286 – S289.
- [26] Goodman, T., et al., 2007, "Mesopic Visual Efficiency IV: A model with relevance to night-time driving and other applications," *Lighting Research and Technology*, 39: 365 – 392.
- [27] Hailman, J. P. and Jaeger, J. G., 1974, "Phototactic responses to spectrally dominant stimuli and use of colour vision by adult anuran amphibians: a comparative survey," *Anim. Behav.* 22: 757 – 795.
- [28] He, Y., Bierman, A., Rea, M., 1998, "A system of mesopic photometry," *Lighting Research Technology*, 30: 175 – 181. Ikeda, M. and Shimoazono, H., 1981, "Mesopic luminous-efficiency function," *Journal of the Optical Society of America*, 71: 280 – 284.
- [29] Illuminating Engineering Society of North America (IESNA), 2008, "Light and Human Health: An Overview of the Impact of Optical Radiation on Visual, Circadian, Neuroendocrine and Neurobehavioral Responses." New York. Publication TM-18-08.
- [30] Illuminating Engineering Society of North America (IESNA), 2009, "Use of Spectral Weighting Functions for Compliance with IES Recommendations," PS-02-09.
- [31] Kimura, E. and Young, R. S. L., 1999, "S-cone contribution to pupillary responses evoked by chromatic flash offset," *Vision Research*, 39: 1189 – 1197.
- [32] Knox, J. F. and Keith, D. M., 2003, "Sources, Surfaces and Atmospheric Scattering: The Rayleigh Scatter Index," paper presented at the International Dark-Sky Association Annual General Meeting, March 2003.
- [33] Kooi, F. L. and Alferdinck, J. W. A. M., 2004, "Yellow lessens discomfort glare: physiological mechanism (s)," Report for the US Air Force, F-WR-2003-0023-H.
- [34] Lewin, I., 2001, "Lumen Effectiveness Multipliers for Outdoor Lighting Design," *Journal of the Illuminating Engineering Society*, Summer, 2001, pp. 40 – 52.
- [35] Lewin, I., 1999, "Lamp Color and Visibility in Outdoor Lighting Design," developed from a Paper Delivered to the 1999 Conference of the Institution of Lighting Engineers, Portsmouth, England.
- [36] Lewis, A., 1999, "Visual performance as a function of spectral power distribution of light sources used for general outdoor lighting," *Journal of the Illuminating Engineering Society*, 28: 37 – 42.
- [37] Longcore, T. and Rich, C., 2004, "Ecological light pollution," *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2: 191-198.
- [38] Luginbuhl, C. B., 1999, "Why Astronomy Needs Low-Pressure Sodium Lighting," in *Preserving the Astronomical Sky: Proceedings of the 196th Symposium of the International Astronomical Union*, 12-16 July 1999, R. J. Cohen, W. T. Sullivan III, (eds.), Astronomical Society of the Pacific, San Francisco, pp. 81 – 86.
- [39] Luginbuhl, C. B., Boley, P. A., Keith, D. M. and Moore, C. A., 2010, "The Impact of Light Source Spectral Distribution and Atmospheric Aerosols on Sky Glow," in preparation.
- [40] Mace, D. et al., 2001, "Countermeasures for Reducing the Effects of Headlight Glare," a report prepared for the AAA Foundation for Traffic Safety, Washington, DC.
- [41] McFarlane, R. W., 1963, "Disorientation of loggerhead hatchlings by artificial road lighting," *Copeia*, 1963: 153.
- [42] Mie, G., 1908, "Beitrage zur Optik trüber Medien, speziell kolloidaler Metallosungen," *Leipzig, Ann. Phys.* 330: 377.
- [43] Moore, C. A., Richman, A. M. and Chamberlain, V. D., 2010, "Finding Inspiration in the Face of Endangered Starry Nights," in *Proceedings of the Sixth International Conference on The Inspiration of Astronomical Phenomena*, Venice 18-23 Oct. 2009, ASP Conference Series (in press).
- [44] Moore, M. V., et al., 2000, "Urban light pollution alters the daily vertical migration of *Daphnia*," *Verhandlungen der Internationalen Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie*, 27: 779 – 782.
- [45] Nightingale, B., Longcore, T., and Simenstad, C. A., 2006, "Artificial night lighting and fishes," in *Ecological Consequences of Artificial Night Lighting*, Rich, C. and Longcore, T. (eds.), Island Press, Washington, D. C., pp. 257 – 276.
- [46] Phillips, J. B. and Borland, S. C., 1992, "Behavioral evidence for the use of a lightdependent magnetoreception mechanism by a vertebrate," *Nature* 359: 142 – 144.
- [47] Plotkin, P. T. (ed.), 1995, "National Marine Fisheries Service and U. S. Fish and Wildlife Service Status Reviews for Sea Turtles Listed under the Endangered Species Act of 1973," National Marine Fisheries Service, Silver Spring, Maryland.
- [48] Provencio, I., et al., 2000, "A novel human opsin in the inner retina," *Journal of Neuroscience*, 20: 600 – 605.
- [49] Poot, H., et al., 2008, "Green light for nocturnally migrating birds," *Ecology and Society* 13: 47.
- [50] Rea, M., Bullough, J., Freyssonier-Nova, J., Bierman, A., 2004, "A proposed unified system of photometry," *Lighting Research & Technology*, 36: 85.
- [51] Rich, C. and Longcore, T., (eds.), 2006, "Ecological Consequences of Artificial Night Lighting," Washington D. C., Island Press.
- [52] Rose, A., 1948, "The Sensitivity Performance of the Human Eye on an Absolute Scale," *Journal of the Optical Society of America*, 38: 196 – 208.
- [53] Royal Commission on Environmental Pollution, 2009, *Artificial Light in the Environment*, The Stationary Office, 11/2009.
- [54] Rydell, J., 2006, "Bats and their insect prey at streetlights," in *Ecological Consequences of Artificial Night Lighting*, Rich, C., and Longcore, T., (eds), Island Press, Washington, D. C., pp. 43 – 60.
- [55] Rydell and Speakman, 1994, "Evolution of nocturnality in bats: Potential competitors and predators during their early history," *Biological Journal of the Linnean Society*, 54: 183 – 191.
- [56] Salmon, M., 2006, "Protecting sea turtles from artificial night lighting at Florida 'soceanic beaches," in *Ecological Consequences of Artificial Night Lighting*, Rich, C., and Longcore, T., (eds), Island Press, Washington, D. C., pp. 141 – 168.
- [57] Sagawa, K. and Takeichi, K., 1986, "Spectral luminous efficiency function in the mesopic range," *Journal of the Optical Society of America*, 3: 71.
- [58] Stevens, R. G., et al., 2007, "Meeting Report: The Role of Environmental Lighting and Circadian Disruption in Cancer and Other Diseases," in *Environ Health Perspectives* 115: 1357-1362.

(下转第45页)

——小结：需要进一步的实践和研究。

5 具有较高的发光效能和安装的灵活性

这是 LED 的强势所在：

- 发光效率高，但眩光需要控制；
- 体积小，但散热问题比较突出；
- 使用安全电压，但与市电的接口需要处理；
- 控制灵活，利于节能；
- 频繁启动对寿命影响甚小；

——小结：在应用过程中，如何突出 LED 的优势并适应室内应用的趋势，统一标准，避免机械模仿和替代传统光源。

6 关于光生物安全性

——人类进化了几百万年，接触非自然只有近百年，眼睛不可能进化得这么快。

——一个不能忽视的问题就是高辐射和蓝光对视网膜的危害。

——相关的标准已有发布，国际非电离辐射委员会（ICNIRP）发布的指导方针：

- CIE S 009 E2009 “灯和灯系统的光生物安全性”
- IEC60825 系列，IEC62471-2006
- GB/T20145-2006（等同 IEC）。
- 蓝光照明引起的非视觉生物效应。

——小结：对视网膜没有发育完成的少年儿童活动场所要慎用。

7 具有合适的足够吸引人的性价比

- LED 用于室内很少会有政府买单；
- LED 用于室内的成本增加与节能效益的平衡；
- LED 要像 iPhone 和 iPad 那样提高自身附加值；
- 提高质量，让使用者放心满意。

——小结：开发产品——打开市场——规模化生产——降低成本。

8 结论

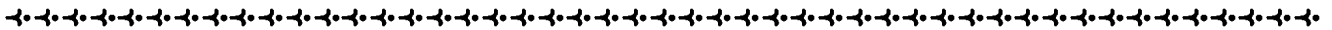
——毋庸置疑，以 LED 为代表的新一代照明光源必将取代那些低效、体积大和控制困难的传统光源；

——LED 从发光器件到照明光源的道路远没有走完，目前的成绩和不足都在激励我们继续前进；

——对 LED 来说，进入室内应用市场必须有其满足的要求产品。

——感谢与会各位专家的精辟见解和精彩表现，此次辩论会必将为我国 LED 在室内照明应用中起到不可忽视的作用。

通讯员



(上接第28页)

[59] Stevens, R. G., 2009, "Light-at-night, circadian disruption and breast cancer: assessment of existing evidence," *International Journal of Epidemiology*, 38: 963 - 970.

[60] Stockman, A, Sharpe, L. T., 2006, "Into the twilight zone: the complexities of mesopic vision and luminous efficiency," *Ophthalmic and Physiological Optics*, 26: 225 - 39.

[61] Strutt, J. W., 1871, "On the light from the sky, its polarization, and colour," *Philosophical Magazine XLI*, pp. 107 - 120, 274 - 279.

[62] Sugita, Y., Suzuki, H. and Tasaki, K., 1989, "Human Rods are Acting in the Light and Cones are Inhibited in the Dark," *Tohoku Journal of Experimental Medicine*, 157: 365 - 372.

[63] Sugita, Y. and Tasaki, K., 1988, "Rods also participate in human color vision," *Tohoku Journal of Experimental Medicine*, 154: 57 - 62.

[64] Trezona, P. W., 1991, "A system of mesopic photometry," *Color Research and Application*, 16: 202 - 216.

[65] Tsujimura, S., Wolffsohn, J. S. and Gilmartin, B., 2001, "A linear chromatic mechanism drives the pupillary response," *Proceedings: Biological Sciences*, 268: 2203 - 2209.

[66] U. S. Census Bureau. July 8, 2008, [www.census.gov/population/socdemo/statbriefs/agebrief.html](http://www.census.gov/population/socdemo/statbriefs/agebrief.html)

[67] U. S. Department of Defense, 2006, "UNIFIED FACILITIES CRITERIA (UFC) Design: Interior and Exterior Lighting and Controls," UFC 3-530-01.

[68] Walkey, H. C., Harlow, J. A. and Barbur, J. L., 2006, "Characterising mesopic spectral sensitivity from reaction times," *Vision Research*, 46: 4232 - 4243.

[69] Wiltshko, W., Munro, U., Ford, H. and Wiltshko, R., 1993, "Red light disrupts magnetic orientation in migratory birds," *Nature*, 365: 525 - 527.

[70] Witherington, B. E., 1992, "Behavioral responses of nesting sea turtles to artificial lighting," *Herpetologica*, 48: 31 - 39.

[71] Witherington, B. E., and Martin, R. E., 2000, "Understanding, assessing, and resolving light-pollution problems on sea turtle nesting beaches," 2nd ed. rev., Florida Marine Research Institute Technical Report TR-2.

[72] Zuclich, J. A. et al., 2005, "Veiling Glare: the visual consequences of near-UV/blue light induced fluorescence in the human lens," *Ophthalmic Technologies XV*. Manns, et al., (eds.), *Proceedings of the SPIE*, 5688: 440 - 447.