



团 体 技 术 报 告

T/CSA/TR 008-2019

类太阳光 LED 术语定义及相关问题研究

Terms and definitions for Sun-like LED and related issues research

版本：V01.00

2019-11-21 发布

国家半导体照明工程研发及产业联盟发布

目 录

前言	I
1 概述	1
2 类太阳光 LED 的目标光谱	1
2.1 概述	1
2.2 地表日光	2
2.3 标准照明体	2
2.4 目标光谱的选取建议	5
3 评价方法及相似性指标	6
3.1 可用于光谱功率分布相似性判定的方法	6
3.2 类太阳光 LED 拟合目标光谱的光谱范围选取	8
3.3 类太阳光 LED 拟合计算	8
4 健康照明评价方法综述	15
4.1 概述	15
4.2 光生物安全	16
4.3 视觉疲劳评价	17
4.4 视觉作业工作效率评价	17
4.5 节律健康评价	18
4.6 健康评价方法	19
5 类太阳光 LED 术语及下一步工作建议	20
5.1 术语建议	20
5.2 目标光谱建议	20
5.3 相似性计算建议	20
5.4 下一步工作建议	20
附录 A（资料性附录）“类太阳光”的目标光谱	22

前 言

本技术报告针对“类太阳光 LED”术语定义及相关问题，分析选取了目标光谱，给出光谱相似性的建议计算方法、计算案例，以及健康照明评价的研究现状，提出“类太阳光 LED”与目标光谱的相似程度要求的建议，以引导辩证的看待“类太阳光 LED”与健康照明的关系。

本技术报告由国家半导体照明工程研发及产业联盟（CSA）制定发布，版权归 CSA 所有，未经 CSA 许可不得随意复制；其它机构采用本技术报告内容制定标准需经 CSA 允许；任何单位或个人引用本技术报告的内容需指明本技术报告的编号。

到本技术报告正式发布为止，CSAS 未收到任何有关本文件涉及专利的报告。CSAS 不负责确认本文件的某些内容是否还存在涉及专利的可能性。

本技术报告主要起草单位：中国科学院半导体研究所、厦门信达光电物联科技研究院有限公司、南昌大学、厦门立达信照明有限公司、浙江阳光照明电器集团股份有限公司、常州市友晟电子有限公司、长春希达电子技术有限公司、常州市武进区半导体照明应用技术研究院、中关村半导体照明联合创新重点实验室等。

本技术报告主要起草人：杨华、陈友三、魏岚、李树强、许建兴、潘安宇、潘丽君、黄耀伟、郭群强、贺志强、阮程、汪洋、熊敬康、余湛、高伟。

浙江大学罗明教授、复旦大学戴奇研究员、易美芯光(北京)科技有限公司刘国旭常务副总裁、佛山市国星光电股份有限公司章金惠博士、厦门通裕科技有限公司徐虹首席技术官、中国科学院心理研究所黄昌兵研究员、复旦大学林燕丹教授、杭州远方光电信息股份有限公司光电科学研究院光学所李倩副所长为本报告的撰写提供了大量支持，在此一并表示感谢。

类太阳光 LED 术语定义及相关问题研究

1 概述

地表生物的生命过程和进化长期依赖于太阳光。随着 LED 照明技术和市场的发展,模拟太阳光的 LED 光源技术已经在不同的机构和企业开展了研究。相关的技术方案通常有 3 种,一为 LED 芯片(如紫光、蓝光等)激发多色荧光粉,具有输出光谱相对稳定、显色指数高、驱动电源无需单独设计、规模生产成本可控等优点,通用照明中要求高品质的市场前景乐观;二为不同波长、多个 LED 器件组合,LED 器件的峰值波长能够从紫外到红外实现全覆盖,通过调控不同波段的 LED 器件的光输出,可以获得形态多变的光谱,因 LED 器件峰值半宽相对较窄,模拟连续太阳光需要的器件数量较大,同时,面临驱动电源调控的高成本、输出用于照明的白光校准、不同 LED 器件光衰不一致性等问题,该技术方案规模用于普通照明暂不成熟;三为以上两种方法的混合方案。^[1,2]

本技术报告梳理了以往国际和国内标准中涉及的“太阳光谱”、“标准照明体”等概念,建议了“类太阳光 LED”相似度拟合的目标光谱;收集了各种典型光谱分布、“类太阳光 LED”光源光谱分布,并计算、分析了与目标光谱的相似性参数;分析了几种健康照明评价方法,包括视觉疲劳、视觉作业工作效率、节律健康等方面;最后,提出了“类太阳光 LED”的标准化工作建议。

本技术报告只针对“类太阳光 LED”的普通照明应用,不包含印刷工业、植物生长等光照应用。

2 类太阳光 LED 的目标光谱

2.1 概述^[3,4,5]

一般意义上的太阳光是指太阳这一距离地球最近的恒星发出的光(包括可见光和不可见光),以下定义引自《GB/T 2900.65-2004 电工术语照明》(修改采用自国际标准 IEC 60050(845):1987《国际电工词汇第 845 章:照明》)。

太阳辐射是指来自太阳发出的电磁辐射,地球外的太阳辐射是指发生在地球大气层外层范围的太阳辐射。

太阳光是指直接太阳辐射的可见部分(在涉及光辐射的光化学效应时,太阳光也用于表示超出可见光范围所延续的辐射)。直接太阳辐射是指经过大气选择性散射,作为平行光束到达地表的那部分地球外的太阳辐射。

天空光是指漫射天空辐射的可见光部分(在涉及光辐射的光化学效应时,天空光也用于表示超出可见光范围所延续的辐射)。漫射天空辐射是指到达地球时经由空气中微小颗粒、悬浮颗粒、云层颗粒或其他颗粒散射的那部分太阳辐射。

昼光是指白昼时全球太阳辐射的可见光部分(在涉及光辐射的光化学效应时,天空光也

用于表示超出可见光范围所延续的辐射)。全球太阳辐射是指直接太阳辐射与漫射天空辐射的组合辐射。

依据以上定义的阳光、天空光和昼光的光谱在不同的观察高度、入射角度以及大气条件下具有显著的变化和差异,典型如早中晚的光色变化(即使不考虑地表景物的散射成分)。

2.2 地表日光(太阳光, sunlight, the rays of the sun) [6]

在太阳能热系统性能、光伏系统性能、材料研究、生物研究和太阳模拟领域中,地面上太阳能的吸收比、反射比和透射比等是重要的参数。只有先知道有关太阳辐射的光谱强度分布情况,才能计算各类太阳能系统的性能参数,如用于太阳电池的电性能测试的“地面用太阳模拟器”等相关技术标准。

太阳光束穿过大气层的光学路径以其与太阳在天顶时光束到达海平面所通过的光学路径的比值来表示称为大气质量,可近似的由大气压力与标准大气压的比值和太阳高度角的正弦值倒数的乘积表示。在地球大气层外,记为 AM0, 太阳垂直入射的海平面处记为 AM1, 包括中国, 欧洲, 美国等大部分国家在内的中纬度地区对应天顶角 48 度, 记为 AM1.5。

GB/T 17683.1-1999《太阳能在地面不同接收条件下的太阳光谱辐照度标准第 1 部分:大气质量 1.5 的法向直射辐照度和半球向日射辐照度》(等同采用 ISO 9845-1:1992), 提供了一套标准光谱辐照度分布, 适用于在直射辐照度和半球向辐照度下确定太阳能热系统、光伏以及其他系统、部件与材料的相关性能; 其中, “太阳光谱辐照度 (E_λ)” 为在某一给定波长 λ 处, 单位波长间隔的太阳辐照度 E (单位: $W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1}$), 标准光谱的波长范围为 $0.305 \mu m \sim 4.045 \mu m$ 。其他相关标准如 ASTM E 891:1987《大气质量 1.5 的地面法向直射太阳光谱辐照度标准数据表》和 ASTM E 892:1987《大气质量 1.5 的 37° 倾斜表面上的地面太阳光谱辐照度标准数据表》等。

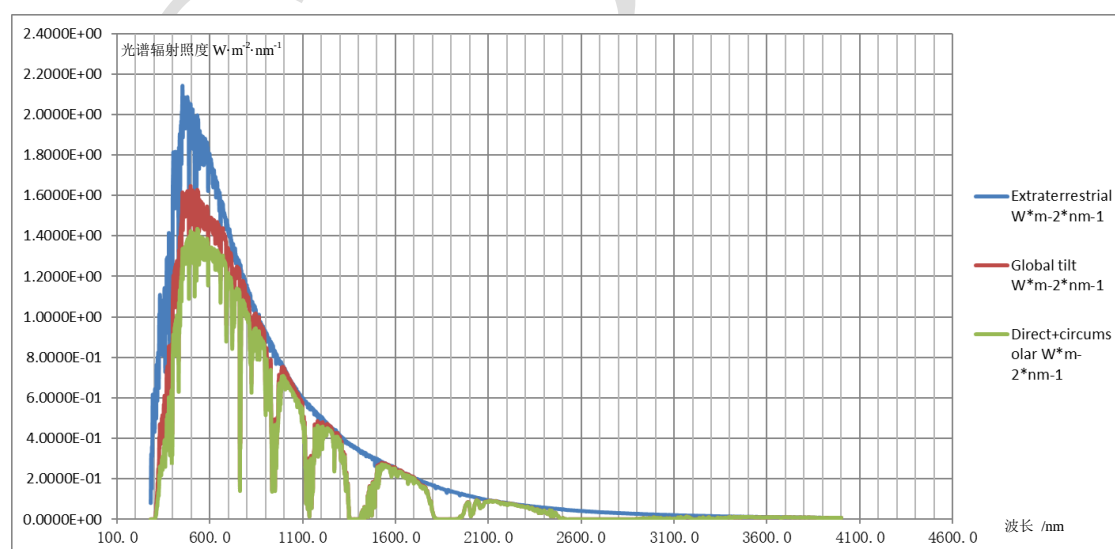


图 1 ASTM 太阳光在外部空间、直射、含环境散射的参考光谱

2.3 标准照明体 [7,8]

2.3.1 概述

在最新更新的 CIE 015:2018《色度学第四版（Colorimetry, 4th Edition）》中，建议了一组标准照明体用于一般色度学的相对光谱功率分布。国际照明委员会 CIE 最早于 1931 年和 1951 年定义了 CIE 光源 A、B、C，光源（source）是指一种光的物理发射体，例如灯或天空。而照明体（illuminants）是指经过定义的光谱能量分布，不一定是可实现的或可由光源提供，在 2018 版的定义中，没有推荐实现标准照明体的光源。

按照 GB/T 20146-2006《色度学用 CIE 标准照明体》（等同采用 CIE S 005:1999），色度学用 CIE 标准照明体有 2 种，CIE 标准照明体 A 是用来代表普通家庭用钨丝灯照明，其相对光谱能量分布就是普朗克辐射体在温度大约为 2856K 时的相对光谱能量分布；CIE 标准照明体 D65 是用来代表平均日光，并具有大约 6500K 的相关色温，应用于需要典型日光的所有色度计算中。日光的相对光谱能量分布随季节、一天当中所处的时刻及地理位置不同而变化。两种 CIE 标准照明体的相对光谱能量分布范围在 300nm~820nm。

在 ISO 3664:2009《Graphic technology and photography —Viewing conditions》（印刷技术和摄影的观察条件）标准中，D50 光源被认为是真正意义上观察颜色用的标准光源。对于标准光源的选择，我们国家建议选用 D65 光源，虽然它的相对光谱能量分布曲线没有 D50 光源平缓，但是 D65 光源更加接近正常阳光的色温，因而具有更贴近实际情况的显色性。其中，CIE 标准照明体 D50 代表相关色温为 5003K 的典型日光，在 CIE 1931 色品图上，其色品坐标为 $x=0.3457$, $y=0.3586$ 。CIE 标准照明体 D65 代表相关色温为 6504K 的典型日光，在 CIE 1931 色品图上，其色品坐标为 $x=0.3127$, $y=0.3291$ 。

2.3.2 标准照明体 A

CIE 照明体 A 用于表示典型的钨丝灯照明。它的相对光谱功率分布为温度约为 2855.5K 的普朗克辐射体（黑体）的光谱（该光谱定义在 300nm 至 830nm 范围内）；这一照明体用于许多校准程序。

照明体 A 的相对光谱功率分布 $S_A(\lambda)$ 由公式 1 确定：

$$S_A(\lambda) = 100 \left(\frac{560}{\lambda} \right)^5 \times \frac{\exp \frac{1.435 \times 10^7}{2848 \times 560} - 1}{\exp \frac{1.435 \times 10^7}{2848 \lambda} - 1} \quad \text{公式 (1)}$$

其中 λ 是以 nm 为单位的波长，这个光谱功率分布将波长 560nm 的值正则化为 100。

CIE 照明体 A 一般用工作在相关色温 2855.5K 的气体填充的钨丝灯再现。

2.3.3 照明体 B

CIE 照明体 B 代表相关色温约为 4900K 的直射阳光光谱，CIE 015:2018《色度学第四版（Colorimetry, 4th Edition）》中提及这一照明体不再使用。

2.3.4 照明体 C

CIE 照明体 C 代表相关色温约为 6800K 的平均日光光谱，CIE 015:2018《色度学第四版（Colorimetry, 4th Edition）》中提及这一照明体不在 CIE 标准中使用。

2.3.5 照明体 E

在许多实际的色度学计算中参考坐标是 $x=0.3333$, $y=0.3333$, 其可以使用波长无关的光谱功率分布函数获得; 由等能光谱定义的照明体, 也即 $S(\lambda)=1$, 使用“CIE 照明体 E”表示, 在许多实际的色度学计算中其波长范围为 380nm 至 780nm。

2.3.6 标准照明体 D65

CIE 照明体 D65 表示相关色温约为 6500K 的昼光情况, 其光谱记为 $S_{D65}(\lambda)$, CIE 用于色度学的照明体标准定义了它的光谱功率分布数值, 在附录表格中给出。该数据定义在 300nm 至 830nm 范围内。

2.3.7 其他的照明体 D

CIE 015:2018《色度学第四版 (Colorimetry, 4th Edition)》中, 为了应用的标准化考虑, CIE 建议在可能的情况下使用 D65 光源。如果 D65 不适用, 标准建议了其他的昼光照明体 D50, D55 或 D75, 其数据在附录表格中给出, 该数据实验观察的范围是 330nm 至 700nm (该范围 1964 年由 Judd 等外推到 300nm 至 830nm, 在色度学使用时足够精确)。

如果以上 D 照明体都不能使用, 一个标称相关色温 T_{cp} 的昼光 D 照明体可以由下列公式计算。这些公式可以近似的计算出相关色温约等于标称值的照明体。

(a) 色度

在 1931 (x, y) 色度坐标中, 昼光 (D) 照明体定义为如下关系:

$$y_D = -3.000x_D^2 + 2.870x_D - 0.275 \quad \text{公式 (2)}$$

其中 x_D 在 0.250 和 0.380 之间。昼光 D 的相关色温 T_{cp} 与 x_D 的关系由基于 CIE1960 均匀色度图的普朗克轨迹法向的下列公式确定:

(1) 相关色温在约 4000K 至 7000K 之间

$$x_D = \frac{-4.6070 \times 10^9}{T_{cp}^3} + \frac{2.9678 \times 10^6}{T_{cp}^2} + \frac{0.09911 \times 10^3}{T_{cp}} + 0.244063 \quad \text{公式 (3)}$$

其中 T_{cp} 与是以 K 为单位的相关色温。

(2) 相关色温在大于 7000K 至约 25000K 之间

$$x_D = \frac{-2.0064 \times 10^9}{T_{cp}^3} + \frac{1.9018 \times 10^6}{T_{cp}^2} + \frac{0.24748 \times 10^3}{T_{cp}} + 0.237040 \quad \text{公式 (4)}$$

其中 T_{cp} 与是以 K 为单位的相关色温。

(b) 相对光谱功率分布

昼光 D 的相对光谱功率分布 $S_D(\lambda)$ 由下式计算得到:

$$S_D(\lambda) = S_0(\lambda) + M_1 S_1(\lambda) + M_2 S_2(\lambda) \quad \text{公式 (5)}$$

其中 $S_0(\lambda)$, $S_1(\lambda)$, $S_2(\lambda)$ 是波长 λ 的函数, 由附表给出。M1 和 M2 因子的值由色坐标 x_D 和 y_D 按照下式给出:

$$M_1 = \frac{-1.3515 - 1.7703x_D + 5.9114y_D}{0.0241 + 0.2562x_D - 0.7341y_D}$$

$$M_2 = \frac{0.0300 - 31.4424x_D + 30.0717y_D}{0.0241 + 0.2562x_D - 0.7341y_D}$$

公式 (6)

2.4 目标光谱的选取建议

2.4.1 目标光谱的选取依据

结合使用普朗克黑体辐射光谱、太阳标准辐射数据和 CIE 照明体 D 的相对光谱分布分别确定各主要目标光谱。

2.4.2 4000K 以下色温的目标光谱建议

相关色温在 4000K 以下光源采用黑体辐射光谱功率分布，其计算公式为：

$$u(\lambda, T) = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}$$

公式 (7)

其中 T 为黑体温度，h 为普朗克常数，c 为光速，k 为玻尔兹曼常数， λ 为辐射波长，c 为真空光速。

2.4.3 4000K 以上色温的目标光谱建议

相关色温在 4000K~25000K 的目标光谱采用 CIE 定义的昼光照明体 D 对应的光谱功率分布，其相对光谱分布由公式 3、4、5、6 共同确定。典型如照明体 D65 等可以直接引用 CIE 推荐的数据表格确定。

关于物理太阳光谱的适用。相关色温在 5245K、5515K、5915K 且差异在 $\pm 150K$ 以内的 LED 也可以采用 ASTM 太阳光谱功率分布在可见光区对应波段的的光谱功率分布为目标光谱。

关于 4000K~5000K 色温的目标光谱的说明。相关色温在 4000K~5000K 的黑体辐射光谱和照明体 D 的光谱都有定义，但是在 GB/T 26180-2010/CIE13.3-1995《光源显色性的表示和测量方法》中规定，除非有其他说明，具有低于 5000K 相关色温的基准照明体应为普朗克辐射体并且从 5000K 开始，应该与日光（昼光）的光谱能量分布相匹配。考虑昼光标准照明体和该区间内的普朗克辐射体的光谱分布具有较高的相似性，仍建议采用昼光照明体 D 作为 4000K~5000K 的目标光谱。

关于 4500K~5500K 色温的目标光谱的说明。IES TM30-15《IES Method for Evaluating Light Source Color Rendition》中考虑到计算显色能力参数的时候，在 5000K 左右的参考照明体光谱分布分别对应黑体辐射和昼光照明体 D，而这两种光谱分布具有一定的区别，因此建议采用两种光谱分布对色温差距参数的加权混合光谱分布作为参考照明体的光谱分布。这对于解决某些颜色可调光源在 5000K 处出现的显色参数异常。由于这一处理主要针对在特定色温下的显色参数问题，与本报告所研究的光谱相似程度问题没有直接关系，因此暂不引入这一处理方法。

3 评价方法及相似性指标

3.1 可用于光谱功率分布相似性判定的方法^[9-31]

判断光谱相似程度的方法包括相对差值、均方根、拟合度系数等曲线差异度量方法；加权的曲线差异度量方法；同色异谱指数方法；以及用于太阳能电池测试的日光模拟器分级方法等，对光谱功率分布进行适当处理后，通过下述公式进行计算。

a) 相对差值法（RE, Relative Error）

最直观的光谱差异评价方法是绝对差值法，也就是采用仿真光谱与目标光谱的差与目标光源光谱的积分比例，如下式（8）所示：

$$e(RE) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (|S_{LED} - S_{Target}|) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_{Target} d\lambda} \times 100\% \quad \text{公式（8）}$$

式中： S_{LED} 为归一化后的仿真光源相对光谱； S_{Target} 为归一化后的目标光源相对光谱； λ 为光谱的最小间隔波长； λ_1 为选取目标光谱范围的起始波长， λ_2 为选取目标光谱范围的终止波长（目标光谱范围的选取参考后文 3.2）。

b) 均方根法（RMS, root mean square error）

均方根，比较两个光谱差异的均方根，如下式（9）所示：

$$e(RMS) = \left[\frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (S_{LED} - S_{Target})^2 d\lambda}{n} \right]^{1/2} \quad \text{公式（9）}$$

c) 拟合度系数（GFC, Goodness-of-fit Coefficient）

拟合度系数计算方法如公式（10）所示，一般来说 $e > 0.999$ 是较好的拟合度，但是对 LED 调整和控制精度提出很高的要求，如下式（10）所示。

$$e(GFC) = \frac{\left| \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_{LED} S_{Target} d\lambda \right|}{\left[\left(\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_{LED}^2 d\lambda \right)^{1/2} \left(\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_{Target}^2 d\lambda \right)^{1/2} \right]} \quad \text{公式（10）}$$

*d) 加权的拟合系数法

可在以上各类此基础上增加视觉函数等参数进行加权计算就可以得到各类加权光谱曲线度量方法，但是目前尚未收集到足够的关于加权系数的研究。

*e) 同色异谱指数法

直接考虑光谱相似性的方法对于两条相似的光谱差别带来的色差异问题没有加以考虑，当然，在光谱相似性达到较高的程度后，色差异问题可能不再成为问题，但是在人们对光谱与色差异的数据积累尚不完整的条件下，作为相似性评价方法应该包括评价照明光源的颜色以及显色性能差别的内容。

在 CIE 出版物中没有推荐人工光源用于再现照明体 D65 和其他 D 照明体，CIE 昼光照明体模拟器的质量可以用更换照明体计算特殊同色异谱指数（使用匹配 D50, D55, D65 和 D75 的特定样品和 CIE1964 标准色度学观察者）进行评价。这个方法量化了匹配昼光照明体的样品在特使光源下的失配结果，其目的是量化测试源在色度学任务中再现 D 照明体的适用性，具体测试方法在 CIE51.2-1999 中描述。GB/T 7771-2008《特殊同色异谱指数的测定改变照明体》规定了 MI 的计算方法。CIE S 012/E:2004, ISO 23603:2005(E)《Standard

Method of Assessing the Spectral Quality of Daylight Simulators for Visual Appraisal and Measurement of Colour》给出了计算光源同色异谱指数的方法。其中提及：昼光模拟器与对应的 CIE 昼光照明体的 CIE 1976 u'_{10}, v'_{10} 的色差不要大于 0.015（依据 CIE015 计算）；满足上述要求的情况下，同色异谱指数（metamerism index, MI）用于分级，光谱模拟在可见光区（对应 M_v ）和紫外光区（对应 M_u ）分别定级，最终的分级是一个两字母组合，可见光区的分级在前。其中 A 表示 MI 值小于等于 0.25，而 E 表示大于 2.00。具体计算方法为：对于 M_v ，每种日光模拟器均采用 5 组虚拟非荧光色样对，利用给出的计算对应昼光照明体的 M_v 所采用的 5 组虚拟色样对的光谱反射率，计算该 5 组色样对在真实的日光模拟器照明和 CIE1964 标准色度观察者情况下的色差平均值，即为该日光模拟器的 M_v ，若为标准的昼光光谱，则 M_v 为 0。

在最新的 CIE 015: 2018《Color IME try, 4th Edition》中已经包含了其于 1972 年和 1989 年分别出版的《特殊同色异谱指数：改变照明体》和《特殊同色异谱指数：改变观察者》的内容。称两个比色样品是同色异谱的就是指这两个比色样品对于给定的参照光源和标准观察者具有相同的三刺激值但是在可见光区的光谱辐射分布不同。确定同色异谱指数的方法就是将参考照明体更换为光谱分布不同的测试照明体，或者将标准观察者更换为具有不同色匹配函数的测试观察者。测试两个样品的同色异谱性就是测试替代光源或者替代观察者导致的对同色异谱样品观察的色差。

这一方法涉及的计算方法主要是比色样品的被照射后光谱而非单纯的光源光谱，暂不作為本报告的评价路线。

f) 分区比对法

采用不同波长范围的光功率分布值与目标光谱的光功率分布值进行比较，并根据比较结果进行定性或半定量评价的方法。

如《GB/T 6495.9-2006/IEC60904-9:1995 光伏器件第 9 部分：太阳模拟器性能要求》规定标准光谱辐照度分布如表 1 所示。

表 1GB/T 6495.9-2006 中规定的标准光谱辐照度分布表

波长范围 (um)	波长占总辐照度的百分比
0.4~0.5	18.5
0.5~0.6	20.1
0.6~0.7	18.3
0.7~0.8	14.8
0.8~0.9	12.2
0.9~1.1	16.1

其中模拟器的等级划分如表 2 所示。

表 2 GB/T 6495.9-2006 中规定的标准光谱模拟器等级划分表

特性	等级 A	等级 B	等级 C
光谱匹配	0.75~1.25	0.6~1.4	0.4~2.0
辐照不均匀度	$\leq \pm 2\%$	$\leq \pm 5\%$	$\leq \pm 10\%$
辐照不稳定度	$\leq \pm 2\%$	$\leq \pm 5\%$	$\leq \pm 10\%$

这类方法简单明了，但是在分区较少时其代表性受限，分区过细其评价也会趋于平庸，且未考虑偏差的方向性问题。

3.2 类太阳光 LED 拟合目标光谱的光谱范围选取

在高光效人工照明应用中由于在可见光的紫光 and 红光段人的视觉函数值很低，能量分配在这些波段与所希望的较高的光效存在矛盾，因此在高光效的人工照明应用中，需要考虑视觉函数中的强度属性：

- (a) 明视觉函数中对应 0.01 的波长为 430nm 和 687nm；
- (b) 明视觉函数中对应 0.001 的波长为 410nm 和 720nm；
- (c) 明视觉函数中对应 0.0001 的波长为 390nm 和 750nm。

常见的光谱仪测试范围一般包括 380~780nm，能够涵盖以上 3 个波长范围。

建议在本报告的范围计算相似度的目标光谱的波长范围取 430nm~690nm，同时在可能的情况下对 380nm~430nm 的短波段和 680 nm ~780 nm 的长波段给出偏差度的比例说明及偏差度计算方式和范围。

这样兼顾了高效照明应用，也照顾了红外和紫外的需求。在一般的色度学应用中，紫光及紫外成分具有较大的应用意义，日常使用的测试仪器可以覆盖 380nm-780nm 的可见光波长范围，D 光源的波长范围是 300nm~780nm，在面向色度学的工业应用、面向动植物的农业紫外红外应用等领域可以将波长范围扩大到 380nm~780nm 或更大范围，也可将本报告的计算方法推广到某个特定的波长区间。

3.3 类太阳光 LED 拟合计算

3.3.1 目标光谱相似性计算步骤

按照如下步骤进行目标光谱的相似性计算：

- (1) 首先确定实验光谱的相关色温 CCT；
- (2) 根据实验光谱的色温按照建议的规则选择目标光谱；
- (3) 对实验光谱按照 560nm 的强度值进行归一化；
- (4) 对于表格中没有提供的目标光谱，通过 CIE 昼光计算公式进行计算；
- (5) 分别按照 3.1 提供的公式计算相似性指标 E，RMS，GFC；
- (6) 进行数据分析。

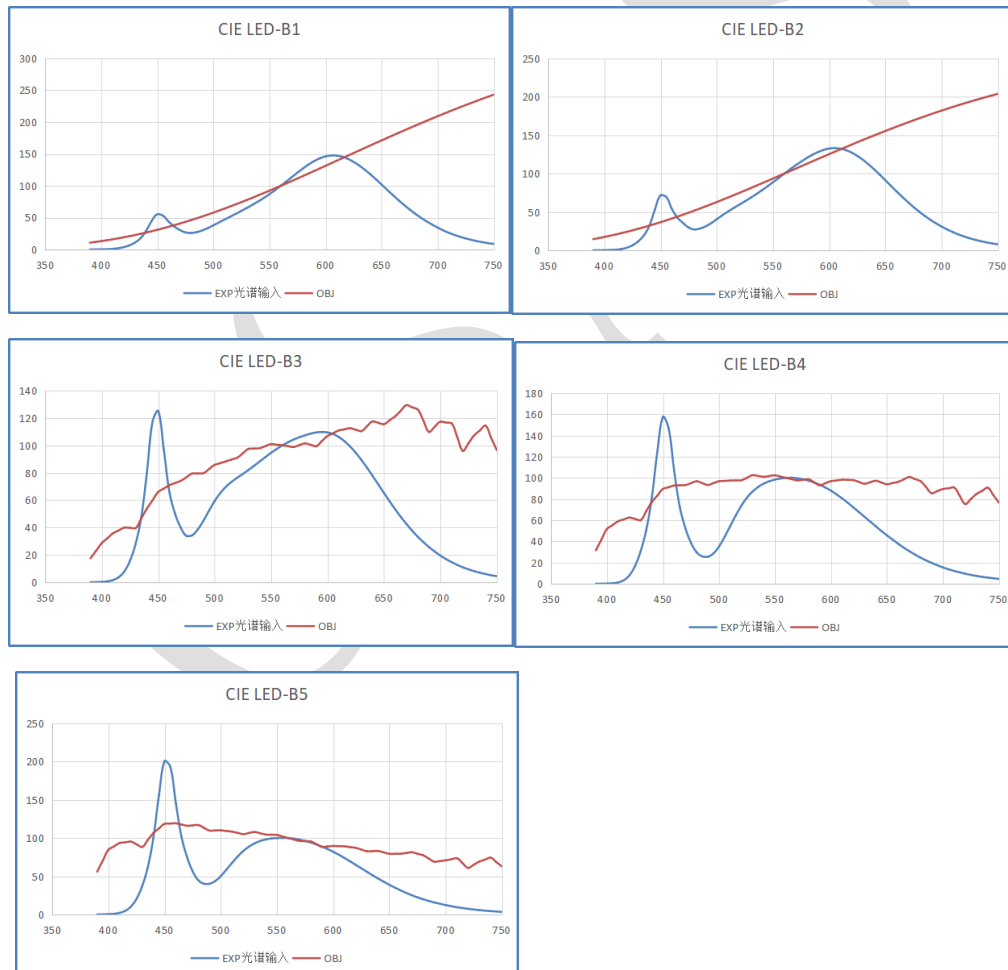
3.3.2 CIE9 种 LED 光源典型光谱相似性计算

CIE015: 2018 《Colorimetry, 4th Edition》中提到 9 种 LED 光源，相似性参数如表 3，

光谱示意图如图 2 所示。

表 3 CIE015: 2018 中提到 9 种 LED 光源相关性参数

CIE015 中的 LED 光谱类型	E 绝对 差值法	RMS 均方根法	GFC 拟合度 系数	CCT/K 色温	Duv 色偏差	Ra 一般 显色指数	Rf 色保真 度指数	Rg 色饱和 度
LED-B1	30.49%	44.44	0.9108	2773	-0.0007	82	84	97
LED-B2	29.71%	40.16	0.9192	2998	-0.0010	83	84	97
LED-B3	30.08%	33.82	0.9220	4103	-0.0007	85	85	97
LED-B4	34.86%	35.61	0.9059	5109	0.0005	77	77	95
LED-B5	32.78%	34.33	0.9153	6598	0.0009	80	79	94
LED-BH1	47.76%	63.99	0.7645	2851	-0.0003	92	85	106
LED-RGB1	57.67%	69.95	0.7296	2840	0.0043	57	71	105
LED-V1	15.29%	22.85	0.9750	2724	-0.0019	95	87	100
LED-V2	11.67%	13.68	0.9862	4070	0.0010	96	94	99



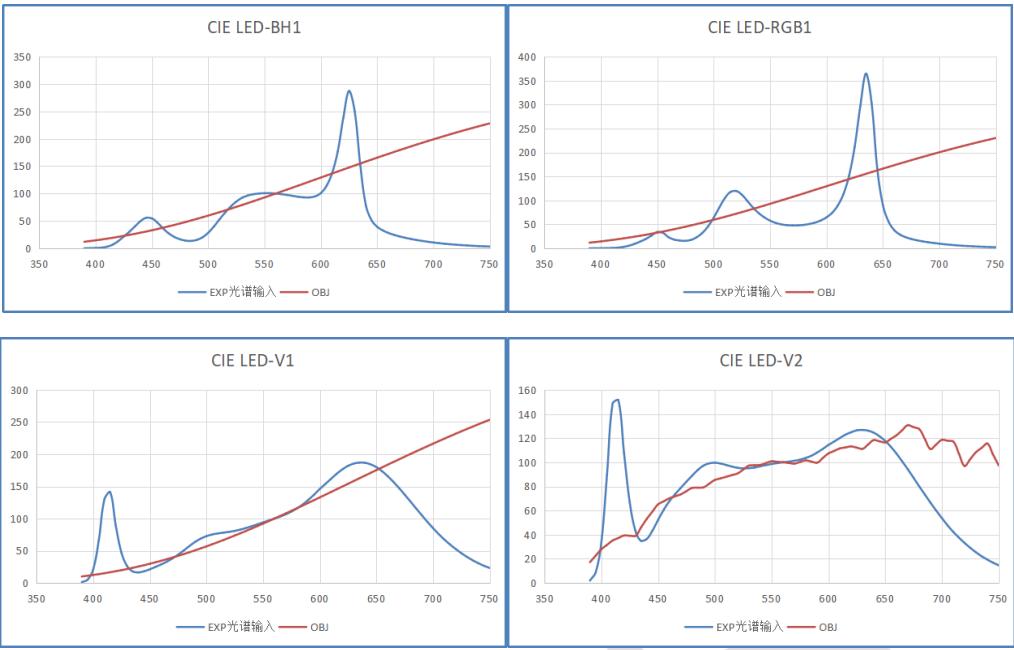


图 2 CIE015: 2018 中提到 9 种 LED 光源光谱示意图

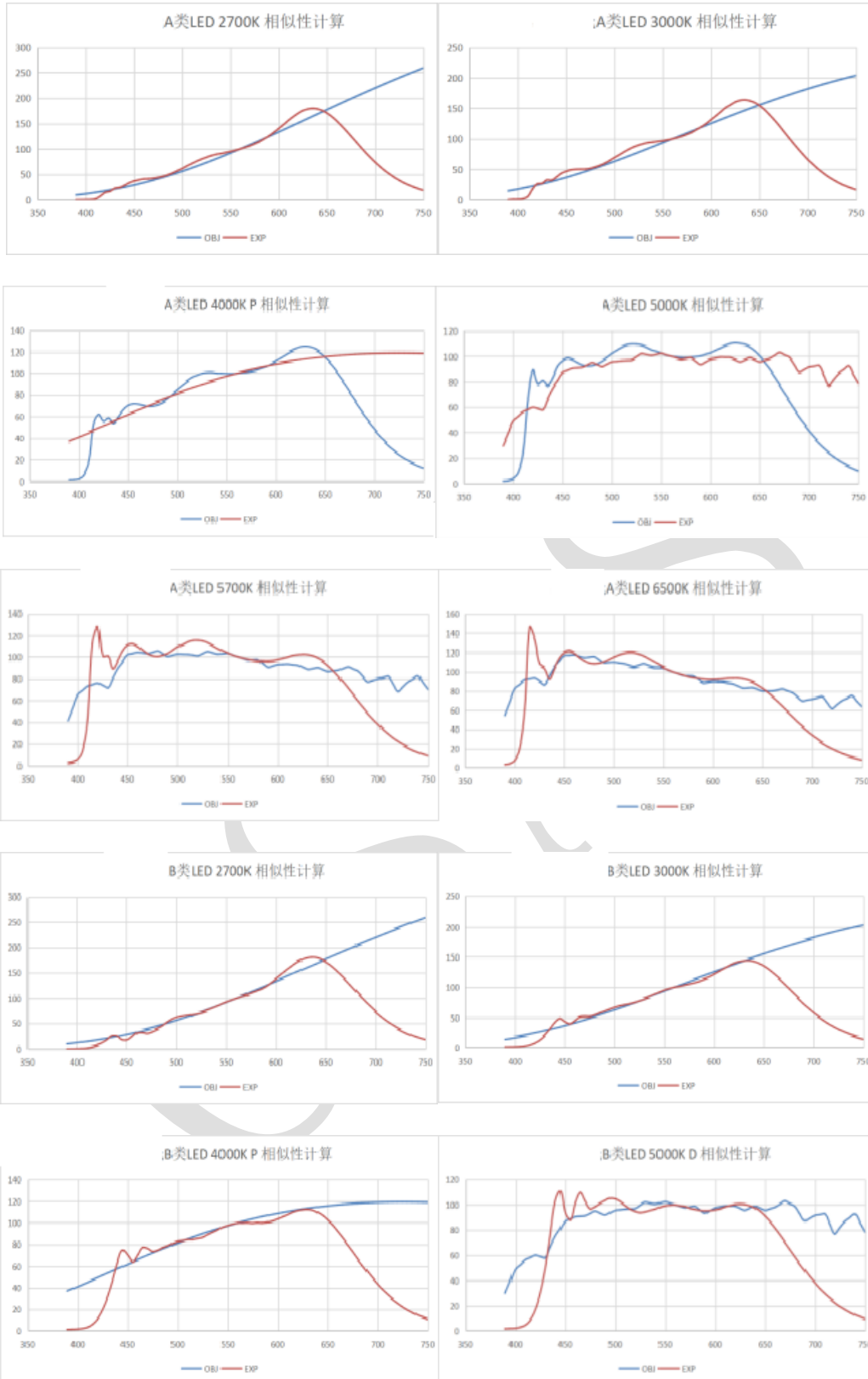
3.3.3 类太阳光 LED 相似性计算（荧光转换 LED）

1) 由 A 单位提供了 2 种技术方案共 12 种类太阳光谱的光谱结构，按照上述方式计算结果如表 4 所示。

表 4 A 单位荧光转化 LED 型 12 种类太阳光谱相关性参数计算结果

光谱类型	E 相对 差值法	RMS 均方根法	GFC 拟合度 系数	CCT/K 色温	Duv 色偏差	Ra 一般显色 指数	Rf 色保真 度指数	Rg 色饱和 度
A2700K	15.86%	28.5	0.9665	2639K	0	97.8	96	100
A3000K	12.22%	17.95	0.9808	3147K	-0.0005	98.0	97	101
A4000K	10.01%	13.78	0.9866	4121K	0.0009	97.1	98	101
A5000K	8.76%	9.81	0.9933	5217K	0.0014	96.8	98	102
A5700K	8.26%	9.09	0.9945	5842K	0.0019	97.5	97	102
A6500K	7.0%	8.18	0.9954	6531K	0.0049	97.2	98	101
B2700K	13.61%	23.45	0.9734	2778K	0.0022	97.2	95	97
B3000K	11.93%	22.21	0.9753	3062K	0.0011	97.3	96	99
B4000K	10.63%	16.52	0.9837	4080K	0.0032	98.4	94	98
B5000K	8.98%	11.73	0.9896	5100K	0.0022	97.3	96	100
B5700K	8.75%	11.60	0.9895	5860K	0.0013	96.8	96	100
B6500K	8.64%	11.70	0.9903	6552K	0.0027	98.2	96	99

光谱对照如图 3 所示。



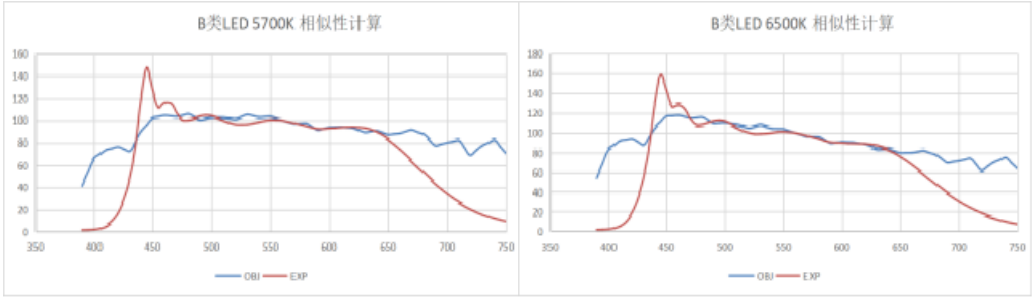


图3 A单位荧光转化LED型12种类太阳光谱示意图

2) 由B单位提供的3种类太阳光谱的光谱结构,按照上述方式计算结果如表5所示,光谱示意图如图4所示。

表5 B单位荧光转化LED型3种类太阳光谱相关性参数计算结果

光谱类型	E 相对 差值法	RMS 均方根法	GFC 拟合度 系数	CCT/K 色温	Duv 色偏差	Ra 一般显色 指数	Rf 色保真 度指数	Rg 色饱和 度
G3000K	12.55%	19.77	0.9779	3040	0.0006	96.5	97	100
G4000K	9.60%	13.89	0.9867	3912	0.0017	97.9	97	99
G5000K	7.66%	9.93	0.9926	5241	0.0027	97.7	98	100

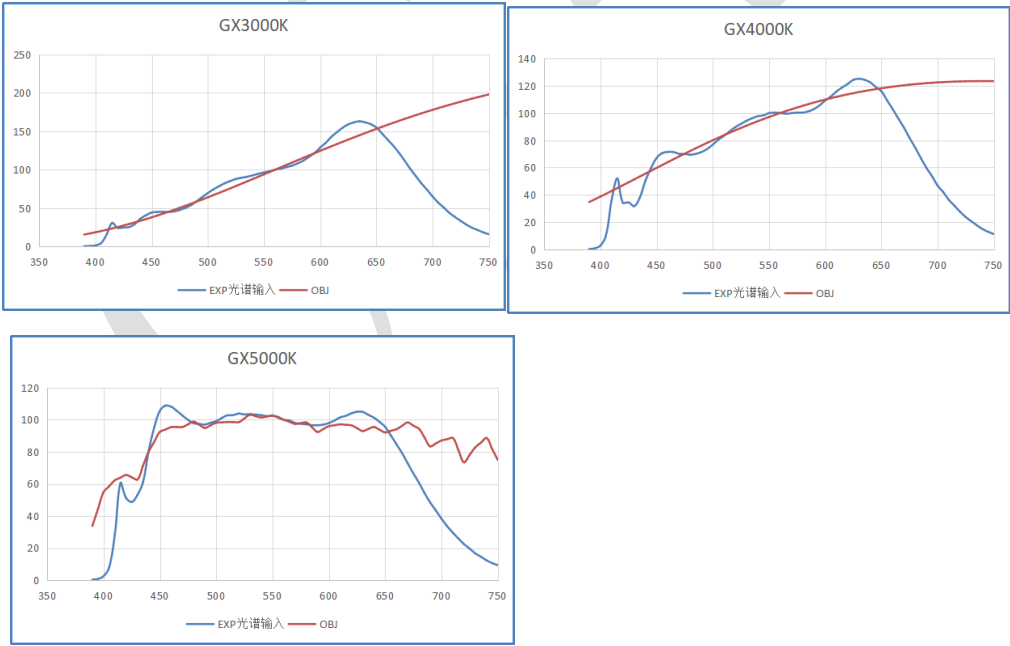


图4 B单位荧光转化LED型3种类太阳光谱示意图

3) 由C单位提供的6种类太阳光谱光谱结构,按照上述方式计算结果如表6所示,光谱示意图如图5所示

表 6 C 单位荧光转化 LED 型 6 种类太阳光谱相关性参数计算结果

光谱类型	E 相对 差值法	RMS 均方根法	GFC 拟合度 系数	CCT/K 色温	Duv 色偏差	Ra 一般显色 指数	Rf 色保真 度指数	Rg 色饱和 度
XD2800K	14.22%	24.52	0.9720	2795	0.0013	96	95	100
XD2700K	17.62%	30.84	0.9565	2695	-0.0012	94.5	95	100
XD4000K	11.24%	15.71	0.9860	4015	0.0004	96.7	98	101
XD4000K	12.36%	16.62	0.9815	4017	0.0037	97.4	97	100
XD5700K	10.00%	12.62	0.9885	5749	0.0028	97.0	98	101
XD5700K	10.82%	17.22	0.9871	5712	0.0012	96.3	97	103

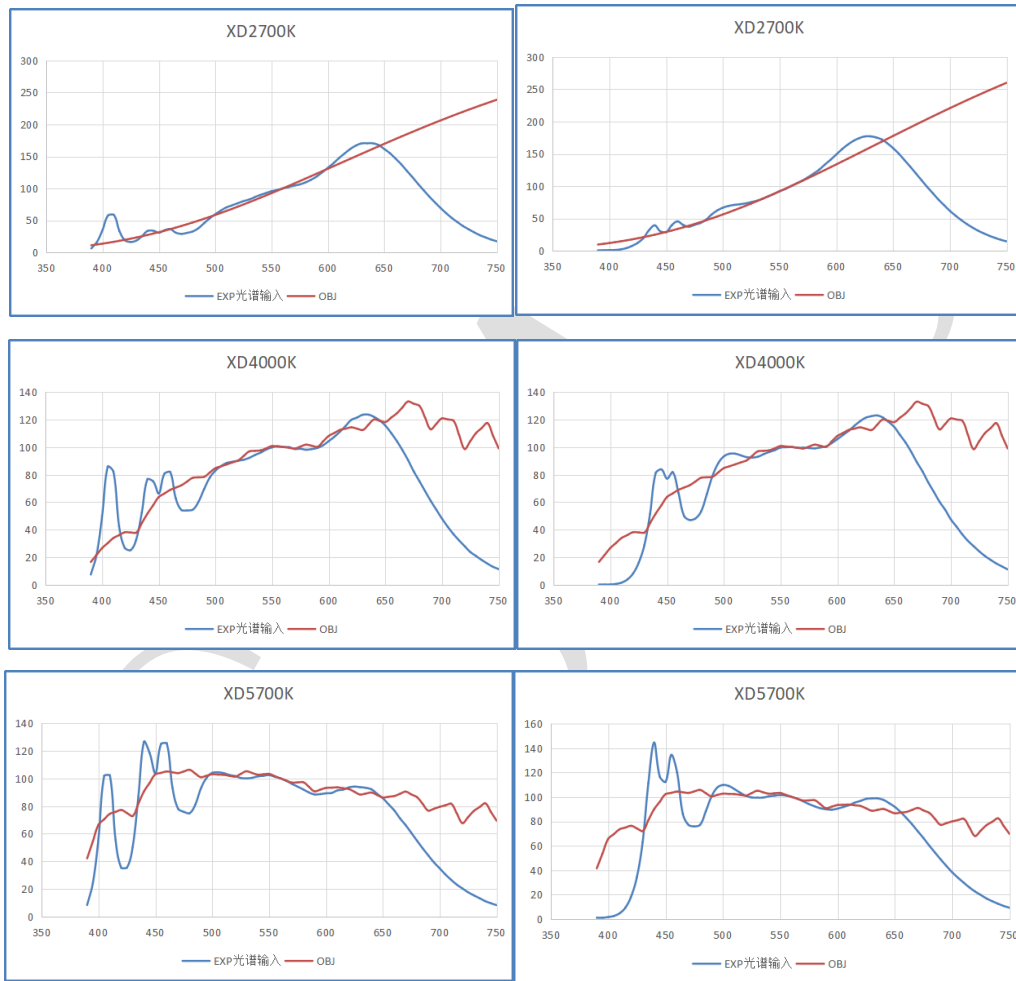


图 5 C 单位荧光转化 LED 型 6 种类太阳光谱示意图

3.3.4 多芯片组合技术类太阳光 LED 的相似性

1) 由 D 单位提供 5 芯片相关样品光谱计算结果如表 7 及图 6 所示。

表 7 D 单位多芯片组合型类太阳光谱相关性参数计算结果

光谱类型	E 相对 差值法	RMS 均方根法	GFC 拟合度 系数	CCT/K 色温	Duv 色偏差	Ra 一般显色 指数	Rf 色保真 度指数	Rg 色饱和 度
A2700K	65.30%	88.73	0.5355	2867K	0.0068	93.6	82	92

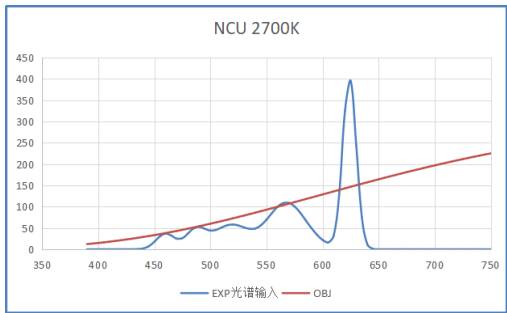


图 6 D 单位多芯片组合型类太阳光谱示意图

2) 由 E 单位提供的多芯片样品光谱计算结果如表 8 及图 7 所示。

表 8 E 单位多芯片组合型类太阳光谱相关性参数计算结果

光谱类型	E 相对 差值法	RMS 均方根法	GFC 拟合度 系数	CCT/K 色温	Duv 色偏差	Ra 一般显色 指数	Rf 色保真 度指数	Rg 色饱和 度
A6500K	8.55%	9.89	0.9934	6552	0.0007	95.2	96	101
A5700K	9.19%	9.35	0.9942	5751	0.0027	97	97	101

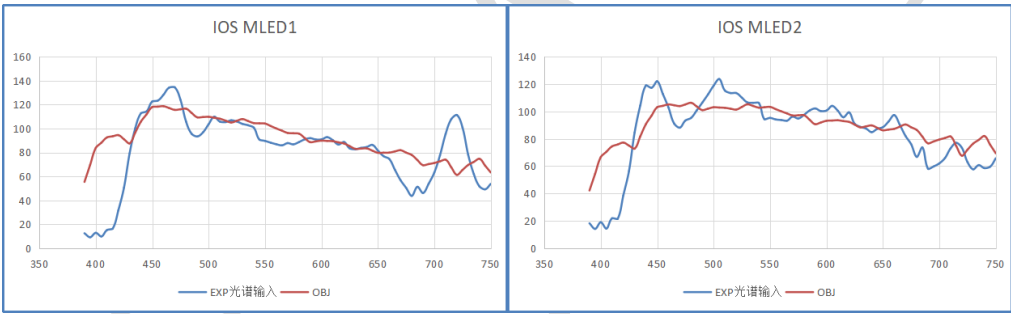


图 7 E 单位多芯片组合型类太阳光谱示意图

3.3.5 荧光灯的相似性计算

按照 3.3.1 步骤，进行目标光谱的相似性计算，节能灯和日光灯的主要结果如表 9 及图 8 所示。

表 9 传统光源不同光谱结构计算结果

荧光灯 样品	E 相对 差值法	RMS 均方根法	GFC 拟合度 系数	CCT/K 色温	Duv 色偏差	Ra 一般显色 指数	Rf 色保真 度指数	Rg 色饱和 度
日光灯 1	45.50%	48.92	0.8555	4897K	0.0286	66.4	75	78
节能灯 1	90.63%	127.65	0.3475	2773K	0.0041	83.4	77	102
节能灯 2	44.47%	52.12	0.8273	6469K	0.0072	77.5	80	89
节能灯 3	71.89%	83.29	0.6283	7020K	0.0039	85.1	84	102

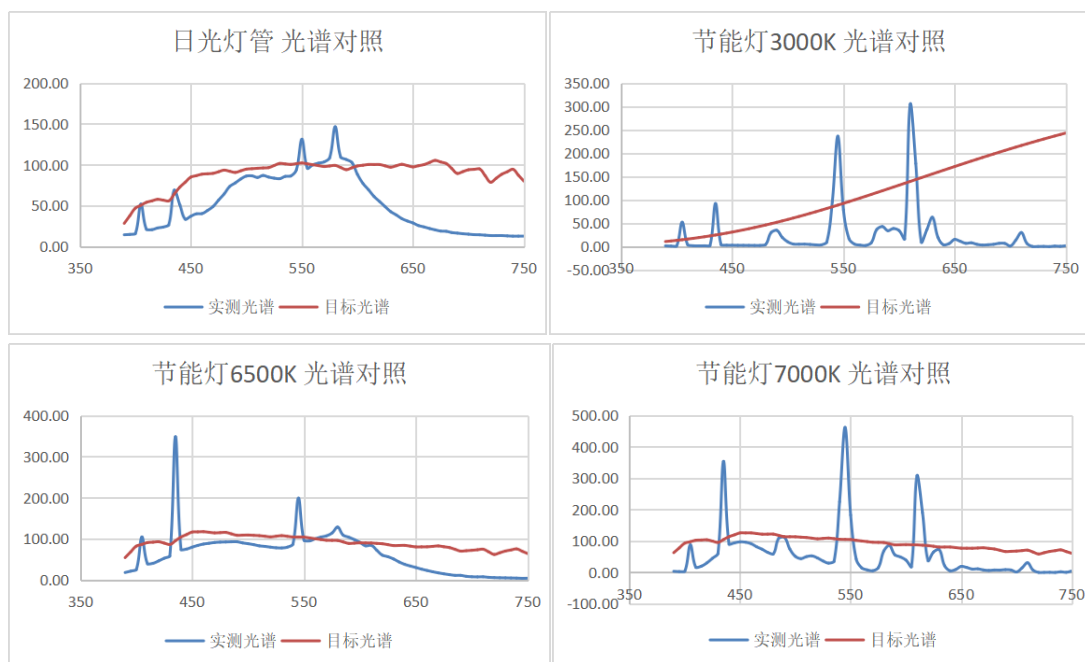


图8 传统光源不同光谱结构光谱示意图

详细的计算结果请参考附录。

3.3.6 小结

(1) 对比 E、RMS、GFC 三种相似性算法，可以看出从总的趋势上看这三个参数都可以大致体现 LED 光谱与目标光谱的相似程度的趋势，都能够在一定程度上体现类太阳光与不是类太阳光的光源光谱的区别。进一步考虑现有数据中 E 和 RMS 出现相反情况较多，而 GFC 与 RMS 具有相对较好的一致性，且其主要体现曲线的相似程度，与本报告所建议的光谱相似性的目的接近，因此建议“类太阳光 LED”采用参照色度参数指标的拟合度系数法；

(2) 定义“类太阳光 LED”为当目标光谱的拟合度系数 GFC 高于 0.95 时，色保真度指数 R_f 达到 95 以上（一般来说其一般显色指数 R_a 也大于 95）。

4 健康照明评价方法综述^[32-38]

4.1 概述

1948 年世界卫生组织（WHO）组织法中定义健康为：健康不仅为疾病或羸弱之消除，而系体格、精神与社会之完全健康状态（<https://www.who.int/zh/about/who-we-are/constitution>）。健康与舒适、安全、效率等概念有着紧密的联系但是同时存在明显的区别。人类对于光环境的研究经历了电光源广泛应用后的近百年时间，从最初的照明需求到照明质量需求，进而重视人的视觉和工效，现代意义的光与健康的内涵包括满足视觉需求的光照品质、满足生物节律和心理需求的调节甚至满足社会需求的光环境调节等。

健康照明可认为是指对于人的视觉、生理、心理等身心健康需求具有有益效果的照明技术、照明形式、照明设施和使用方法。长期来看，健康照明必然包括生物对自然环境下存在光照的周期性变化存在功能性适应，为实现特定功能目标而模仿或者设计的随时间变化照明

条件具有特定价值,包括对时间周期、照明强度、光谱功率分布、光场空间分布等特性的人工控制。同样的,健康照明与光品质有着密切联系的同时又显著区别的关系。在 2013 年 CIE 发布了 CIE 205: 2013 《Review of Lighting Quality Measures for Interior Lighting with LED Lighting Systems》中列明的光品质指标包括:光分布、眩光、显色性和颜色偏好、频闪等 4 项主要指标。而健康照明的品质主要指照明用光契合使用需求的程度,最终也会体现在如强度、分布、动态、颜色特性、光谱特性等方面,但主要是指这些照明特性针对不同的场景和情境具有的功能性需求,如改善工作效率、视疲劳、脑负荷以及睡眠质量等方面,对健康照明品质研究所采用的方式一般包括主观问卷和量表、生理生化指标测试、行为观察等。

与健康照明相关的生理生化参数指标众多,常规如生理指标瞳孔变化,自主神经系统(Autonomic Nervous System, ANS)的生理反应如心率、血压、心电、呼吸、肌电等,中枢神经系统(Central Nervous System, CNS)的生理信号如近红外光谱脑血氧(Near-Infrared Spectroscopy Cerebral Oxygen Saturation)、脑电图(Electroencephalogram, EEG)、事件相关电位(Event-related Potential, ERP)、功能性磁共振成像(functional Magnetic Resonance Imaging, fMRI)、正电子发射断层扫描(Positron Emission Computed Tomography, PET)等;生化指标褪黑素水平、皮质醇含量等;这些生理生化指标的变化可以在一定程度上反应身体状态的变化,有助于客观的进行健康照明实验研究,它们与身体健康属性的量化关系也在逐步构建中。

健康照明常用的主观评价方法,主观评价一般通过自我报告如问卷或量表的形式完成,主要用于舒适、主观疲劳、情绪、认知、睡眠质量等高级功能的评估和测量,是健康照明实验中最常见的方法。经过大量实验的实践,已经有了多种形式的主观评价测量工具,如视觉生活质量量表(Visual Function Questionnaire, VFQ)、疲劳程度量表(Fatigue Scale, FS-14)、自我情绪评定量表(Self-Assessment Manikin, SAM)、视觉标尺量表(Visual analogue scale, VAS)、产品情绪量表(Product Emotion Measurement, PrEmo)、被试口头报告等。除此以外,心理学、临床医学等方面常用的焦虑自评量表(Self-rating Anxiety Scale, SAS)、抑郁自评量表(Self-rating Depression Scale, SDS)、汉密尔顿焦虑量表(Hamilton Anxiety Scale, HAMA)、汉密尔顿抑郁量表(Hamilton Depression Scale, HAMD)、睡眠质量量表(Pittsburgh Sleep Quality index, PSQI)等也常用于健康照明相关的研究。

与光相关的健康属性有许多种,可能与其存在联系的指标和测量方法更是种类繁多,重要的是在于建立总体研究的架构并找出其中的联系。下面分别概要描述照明在安全、舒适、疲劳、视觉功能、非视觉功能等方面的影响和相关评价方法。

4.2 光生物安全

光生物安全是光健康领域首先要解决的问题,主要研究光对生物机体的安全性影响。光生物安全主要包括光物理化学作用和光吸收产生的热作用的安全性影响。这方面的机理和标准化研究涵盖细胞毒理、动物模型(鼠、兔、鸡、猴)等实验,相对较成熟,但由于物种差异,光生物安全的研究在具体应用场景中仍有较大深化空间。

一般来说光照射皮肤部分光线进入表皮和真皮,短波辐射可能会损伤 DNA 导致晒伤,

同时激发产生的活跃自由基会对遗传物质和蛋白等产生不良作用。长波辐射带来的热辐射也会导致皮肤损伤。光照射眼睛会产生与皮肤类似的反应，同时不适当的光照会损伤视网膜和晶状体。国际上针对 LED 的光生物危害的研究没有发现一般照明对人体有害。美国能源部的研究发现，在同样色温和光输出下，LED 并不比其他光源释放更多的蓝光能量。

基于现有的研究，在同样色温和光输出下白光 LED 照明产品不会造成蓝光危害的风险增加，但一方面由于人类视觉系统结构和最常用的动物模型（鼠、兔、鸡等）存在显著差异，另一方面由于光对生物体的影响常表现为慢性累积性过程，可能和细胞离体培养有显著差异，因此现有光生物安全的结论还需要进行深入研究。

4.3 视觉疲劳

人们对于光环境的直观感受是构建健康照明体系的前提，可包括在短期和长期置于特定光环境中的视觉主观体验和相应的情绪反应（喜欢或厌恶等），通常可通过主观打分进行报告。

视觉疲劳是一种不当用眼或长期用眼后产生的非特异性症状的综合症，包括视觉模糊、头痛、眼干、复视等症状。视疲劳的评价常用主观问卷评分法直接测量不适感的评价方法，在评价各种症状方面简便易行，但容易受被试情绪和认知状态影响，结果可能不稳定。视疲劳也常用眼视光学手段进行检查和判定，常用指标有调节反应、调节微波动、集合性调节与集合的比率（Convergence accommodation/convergence ratio, CA/C 比率）、调节性集合与调节的比率（Accommodative convergence/accommodation ratio, AC/A 比率）、泪膜破碎时间等。蔡建奇等人研究了在不同光照环境下的短期视觉任务中睫状肌的调节能力的不同变化，睫状肌的调节能力可用调节（ACC）来表示，高阶像差（HOAs）可以有效地指征晶状体的变化，人眼的疲劳知觉一般会与 ACC 和 HOAs 等眼生理参数有关。

视疲劳还会显著影响视锐度、对比敏感度、闪光融合频率、运动检测、双眼整合能力等多种视觉功能，也是目前进行视疲劳测评的常见指标。通过观察视疲劳对心率、血压、脉搏、瞳孔等指标的影响也有报道。视疲劳相关评测可选指标和方法较多，尚需进行更多标准化研究工作，对相关指标和视觉疲劳及视觉表现之间的关系进行深入研究。

4.4 舒适性

舒适是与疲劳密切相关又明显不同的概念，与照明相关的包括视觉舒适和心理舒适两方面，一般采用量表的方式进行主观评测。

与舒适性有关的主观评价量表涵盖舒适、主观疲劳、情绪、认知、睡眠质量等高级功能的评估和测量，如视觉生活质量量表（Visual Function Questionnaire, VFQ）、疲劳程度量表（Fatigue Scale, FS-14）、自我情绪评定量表（Self-Assessment Manikin, SAM）、视觉标尺量表（Visual analogue scale, VAS）、产品情绪量表（Product Emotion Measurement, PrEmo）、被试口头报告等。除此以外，心理学、临床医学等方面常用的焦虑自评量表（Self-rating Anxiety Scale, SAS）、抑郁自评量表（Self-rating Depression Scale, SDS）、汉密尔顿焦虑量表（Hamilton Anxiety Scale, HAMA）、汉密尔顿抑郁量表（Hamilton Depression Scale, HAMD）、睡眠质量量表（Pittsburgh Sleep Quality index, PSQI）等。

某些生理生化指标也可用于舒适性的评价，但其涵义需要进一步厘清。

4.5 视觉功能（作业工效评价）

视觉系统是人类和外部世界交互的主要感知觉通道，正常的视觉功能对于日程生活至关重要。健康光环境对视觉功能有保护作用，有害光环境则可能对视觉功能产生不利影响，视觉功能良好的结果并不总是与舒适性的结果相同。

对视觉功能来说常见测量指标包括影响视力、对比敏感度、闪光融合频率、运动检测能力、颜色知觉、双眼整合能力等多种视觉功能，测量方法包括偏主观的 Yes-No 方法、客观阶梯法 (staircase) 和基于贝叶斯阈值预计理论方法等，刺激则多以物理层面容易度量的点、线段和光栅等视标为主。

视觉工效可看做视觉功能一种特殊形式，常通过完成特定任务的反应时或正确率加以表征，也可表达为在特定时间内的任务完成情况进行评价，涉及任务多为视觉搜索或阅读等。评价的方法包括如：专注和注意力水平的 D2 测试，阅读测试，书写测试，在复杂图案中寻找目标形状的发现测试、PVT/PVSAT/MATB-II 等。

4.6 非视觉功能（节律和睡眠）

光照不仅产生视觉效应，亦可通过非视觉通道，对人体健康产生广泛而重要的影响。研究表明，人的昼夜节律、警觉性、情绪以及内分泌功能等都会受到所处光环境因素的影响，包括光照强度、光谱能量分布、光照时间和持续时长等。不适的光环境可扰乱昼夜节律，进而对人体健康造成负面影响，诱发诸如肥胖、糖尿病、失落、情绪失调、生殖系统疾病等慢性疾病；合适的光环境则可促进节律健康，进而对人体健康产生长期的正面影响。

本世纪初，视网膜上第三类感光细胞 *intrinsically photosensitive retinal ganglion cells* (ipRGCs) 的发现成为光生物学研究的突破性进展。与传统的视网膜上锥状细胞和杆状细胞提供视觉功能不同，ipRGCs 具有非视觉感光功能：可接受光照刺激，并将非视觉光信号传递至视神经交叉上核 (suprachiasmatic nucleus, 或 SCN)，进而影响和调节包括生物钟等人体内多种生理机制。其中最为典型的例子为光照抑制人体褪黑激素 (Melatonin) 的分泌。褪黑激素是一类荷尔蒙，当其在血液中的浓度达到一定浓度时可使人产生困意，利于睡眠。通过上述途径，光照刺激可最终影响人体内部生物钟及睡眠周期。

人体内在生物钟周期平均为 24.2 小时并存在个体差异，而自然日光则为生物钟提供了同步校准的外部“授时因子”，从而帮助人体节律周期与地球 24 小时的自转周期同步，并适应当地的昼夜交替节奏。随着近年来 LED 光源技术和光生物学研究的发展，在室内环境中利用人工照明实现节律健康效果已成为可能。目前，为量化光照对人体生理节律的影响，研究人员提出了多种节律照明度量方法，其中较受关注的包括昼夜节律刺激值法 (Circadian Stimulus, 即 CS) 以及视黑素等效勒克斯法 (Equivalent Melanopic Lux, 即 EML)。需要指出的是，上述两种方法给出的数值存在一定差异，其准确性评价是目前节律照明的一个重要研究内容。

对于非视觉功能的测试方法主要包括对褪黑素、皮质醇等参量的生化监测，对脑电、运动等指标的生理监测，对节律、睡眠等效应影响的主观量表等。

同济大学林怡开展了基于办公室健康照明需求的光谱非视觉生物效应研究,探讨了人工照明进行节律补偿的可行性,结果显示一定的高色温、强光照明有利于在日间抑制褪黑色素分泌,提高觉醒度,进而利于人员工作效率和节律健康。浙江大学罗明教授团队先后采用可调多通道 LED 照明系统进行多项动态光及静态光的研究。如 Ye 等 (2018) 在不同色温范围,色温变化速度、CS 等条件下,由年青被测者进行动态光实验。Wang, 等 (2018) 在不同色温,照度、CS 等条件下,由儿童被测者进行静态光实验。通过包括问卷,正负情绪量表在内的主观评价结合生理信号测量的手段,研究照明对警觉性,眼疲劳,睡意,睡眠质量等生理的影响。[29-30]

非视觉生物效应是健康照明的重要约束性因素, CIES026/E:2018 《CIE System for Metrology of Optical Radiation for ipRGC-Influenced Responses to Light》中给出了五种非视觉响应(α -opic)的名词和定义,包括 S-cone-opic, M-cone-opic, L-cone-opic, rhodopic, melanopic 等,定义了 α -opic 的响应谱、光谱加权函数、辐射通量、光通量效率、出射度、辐照度、昼光的光通量效率、等价昼光亮度、等价昼光照度、昼光效率等参数,并给出了这五种非视觉效应的关于波长的响应谱,如图 9 所示。

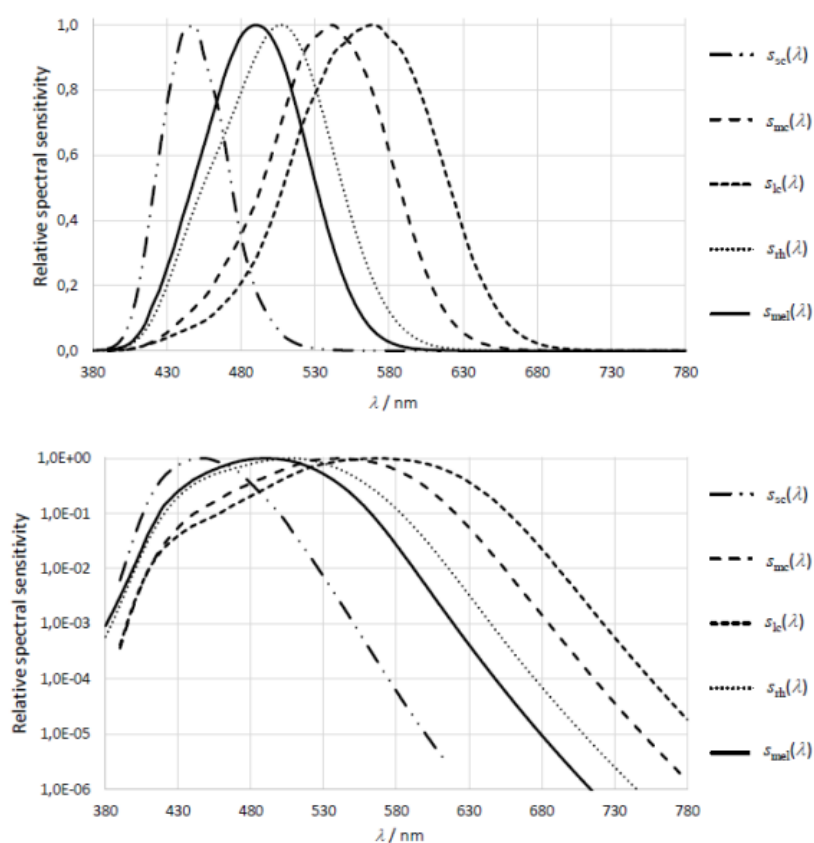


Figure 1 — The five α -opic action spectra as given in Table 2, $s_{sc}(\lambda)$, $s_{mc}(\lambda)$, $s_{lc}(\lambda)$, $s_{rh}(\lambda)$ and $s_{mel}(\lambda)$ respectively, plotted against wavelength, λ , using a linear (top) and logarithmic (bottom) scale for the relative spectral sensitivity

图 9 五种非视觉效应 α -opic 的波长相关响应谱

4.7 光健康高级功能

光除对视觉系统结构和视觉功能产生影响外,还可能对注意、学习和记忆、决策等高级认知过程产生影响,研究方法既有行为观察,也有实验研究。有研究发现认知高照度照明条件下被试的工作记忆、分配注意、持续性注意的反应正确率明显高于低照度照明环境,而选择注意任务则不受照明环境的影响,显示光对注意系统的影响可能具有选择性;晨间蓝光增强照明对于学生的认知处理速度和关注力都有正面效应(Keis et al.,2014);在记忆巩固阶段进行蓝光暴露对于短期记忆有促进效应;当人们在高照度照明环境下进行人际沟通时态度更随和,暴力行为或吵架行为明显减少(aan het Rot, Moskowitz, & Young, 2008);个体在低照度、暖色温的照明环境下容易表现出较多的利他行为,如对他人的态度更积极,自愿付出较多的时间去帮助他人,倾向于通过合作而非逃避的方式去解决人际冲突或矛盾(Baron et al., 1992)。整体而言,高级认知功能评价目前缺乏系统化研究,研发方法标准化程度不足,结果之间也难以进行比较。现有的方法包括任务观察、可穿戴跟踪测试、面部表情捕捉、语音语调识别、肢体动作捕捉、行为观察、视频信号分析和电磁信号分析等方法。

5 类太阳光 LED 术语及下一步工作建议

5.1 术语建议

类太阳光 LED: 以 LED 作为发光体通过不同的光谱组合技术在可见光区域模拟地表太阳光光谱组成的光源。应用于人工照明时希望达到健康、舒适等目的。

根据本技术报告的计算,建议与目标光谱的拟合度系数 GFC 大于 0.95 时且色保真度指数 Rf 值大于 95 时,称为“类太阳光 LED”。

5.2 目标光谱建议

建议结合使用普朗克黑体辐射光谱和 CIE 照明体 D 的相对光谱分布分别确定各主要目标光谱,同时保留太阳标准辐射数据的选项。具体如下:

- (a) 相关色温在 4000K~25000K 的目标光谱采用 CIE 定义的昼光光谱功率分布;
- (b) 相关色温在 4000K 以下光源采用黑体辐射光谱功率分布(包括 4000K 作为选项)
- (c) 相关色温在 5245K、5515K、5915K 且差异在 ± 150 K 以内的 LED,制造商也可以用采用太阳光谱功率分布典型色温值的光谱功率分布为目标光谱进行计算;
- (d) 考虑目标光谱范围建议选为 430~690nm。

5.3 相似性计算建议

按照如下步骤进行目标光谱的相似性计算:

- (1) 首先确定实验光谱的相关色温 CCT;
- (2) 根据实验光谱的色温按照建议的规则选择目标光谱;
- (3) 对实验光谱按照 560nm 的强度值进行归一化;
- (4) 对于表格中没有提供的目标光谱,通过 CIE 昼光计算公式进行计算;
- (5) 分别按照 3.1 提供的公式计算拟合度系数 GFC。

5.4 下一步工作建议

根据相似性计算方法的实际使用积累更多数据，进一步优化并做出修正，为健康照明、人本照明的评价提供可靠的技术基础。

目前来看，“类太阳光 LED”并不能简单等同于“健康照明光源”；“类太阳光 LED”作为健康照明光源被广泛认可，需要首先推出测试便捷统一、数据可重复可对比的健康照明评价方法，然后在此基础上，积累更多数据支撑。

健康照明各评价方法标准的制定将在更大范围内协商一致，有利于形成产业共识。同时，健康照明方法的标准制定、数据的积累需要研究机构、企业、测试机构的协作和共同努力。

CSA

附录 A

（资料性附录）

“类太阳光”的目标光谱

A.1 光谱选取的原则和太阳光谱的比较

报告对于之前提到的相关术语进行梳理、分析，目前常用相关术语有“日光”、“CIE 照明体”等，尚有部分标准规定了“天空光”等内容，本报告在整理相关标准、文献等文件，给出建议作为目标的太阳光光谱功率分布。

目标光谱功率分布是本报告所指代表某种太阳光光谱的一组确定的光谱功率分布。

考虑到以下因素：

1、太阳能辐射标准数据是根据恒星模型和大气吸收模型计算得到的数据，不能很好的覆盖有代表性的色温，但是其基于基本物理原理，具有较强的实际意义；

2、CIE 照明体 A 由 2885.5K 的普朗克（黑体）辐射计算得到，基于基本物理原理，在低色温区有较强的代表性；

3、CIE 照明体 D 代表白天的日光，具有明确的计算方式，且可以覆盖约 4000K~25000K 的色温范围；

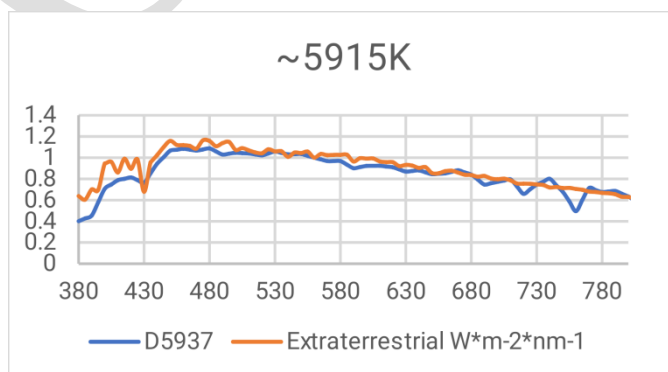
因此在没有其他更新资料的条件下，本报告倾向于结合使用普朗克黑体辐射光谱、太阳标准辐射数据和 CIE 照明体 D 的相对光谱分布分别确定各主要目标光谱，具体如下：

- （a）相关色温在 4000K~25000K 采用 CIE 定义的日光光谱功率分布；
- （b）相关色温在 4000K 以下采用黑体辐射光谱功率分布（包括 3000K 的典型色温）
- （c）相关色温在 5245K、5515K、5915K 且差异在 ± 150 K 以内的 LED 也可以用采用太阳光谱功率分布典型色温值的光谱功率分布为目标光谱。

报告比较了部分不同来源的日光光谱，具体如下：

（1）对空间日光光谱、地表直射日光光谱和地表散射日光光谱进行了色度学分析，其分别对应 5245K、5515K 和 5915K 相关色温，按照 CIE 规定的 D 光源计算方法计算了这些色温对应的 D 光源光谱分布。

如图 A.1 所示：



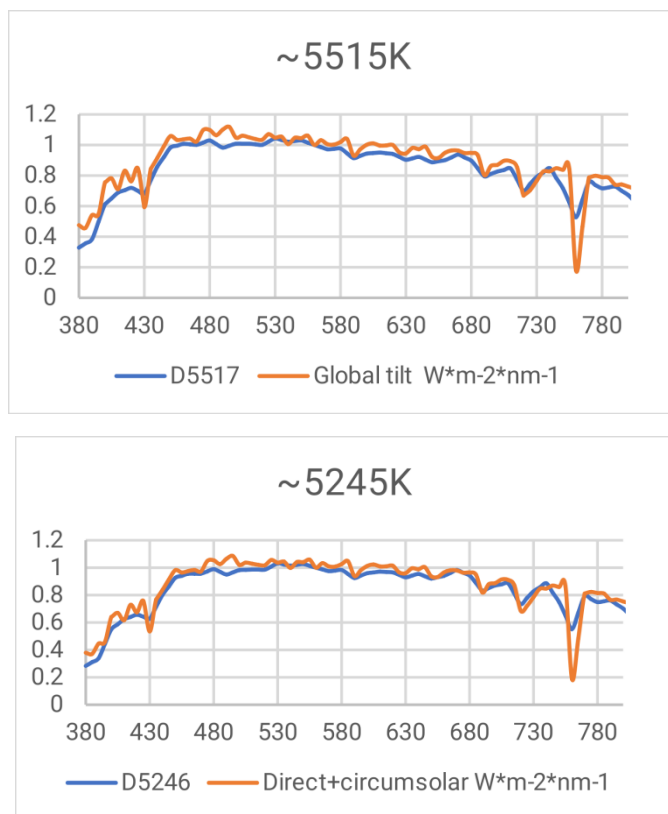


图 A.1 按 CIED 光源计算方法 5245K、5515K 和 5915K 相关色温应的 D 光源光谱分布示意图

可以观察到这三个典型色温处 D 光源与太阳光谱的差异较小，主要差别存在于 430nm 以下的部分。因此建议在 5000K~6000K 范围内 5245K、5515K 和 5915K 几个色温点附近保留 ASTM 日光光谱作为目标光谱备选方案。

(2) 对于 4000K 的特殊情况，给出 4000K 的 D 光源及 4000K 黑体辐射的相对光谱功率分布对照，如图 A.2 所示。



图 A.2 报告建议的 4000K 的 D 光源及 4000K 黑体辐射的相对光谱功率分布对照图

两者具有较强的相似性，但是在紫光 and 红光段存在一定差别，建议保留备选方案。

A.2 ASTM 太阳光光谱功率分布

ASTM 太阳光光谱功率分布如表 A.1 所示。

表 A.1 ASTM 太阳光光谱功率分布表

波长 nm	空间日光 $W \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1}$	地表日光 $W \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1}$	含环境地表日光 $W \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1}$
380	0.638567	0.475421	0.379258
385	0.604815	0.456954	0.370773
390	0.700952	0.540699	0.445624
395	0.697088	0.547978	0.458119
400	0.945409	0.755834	0.640258
405	0.960246	0.780936	0.669683
410	0.860582	0.71133	0.616786
415	0.99037	0.831615	0.728533
420	0.895297	0.762008	0.674394
425	0.982643	0.847218	0.757067
430	0.678611	0.593365	0.534639
435	0.956887	0.844776	0.767648
440	1.024636	0.915807	0.838009
445	1.100224	0.991791	0.914164
450	1.158455	1.058005	0.981933
455	1.120381	1.032836	0.964705
460	1.118309	1.037381	0.975072
465	1.110862	1.041384	0.983763
470	1.085666	1.022863	0.971871
475	1.164614	1.098033	1.048559
480	1.157895	1.097761	1.053895
485	1.108063	1.063976	1.025842
490	1.137738	1.100678	1.064796
495	1.148376	1.118385	1.085379
500	1.072788	1.048236	1.020811
505	1.090258	1.060719	1.036591
510	1.069429	1.050271	1.028892
515	1.049832	1.038942	1.020354
520	1.041433	1.03365	1.017609
525	1.079507	1.070624	1.056487
530	1.059351	1.047897	1.036591
535	1.06103	1.053935	1.044443
540	1.007839	1.005767	0.998323
545	1.049272	1.047151	1.041089
550	1.043113	1.044708	1.040403
555	1.057671	1.060651	1.058317
560	1	1	1

表 A.1 ASTM 太阳光光谱功率分布表 (续 1)

波长 nm	空间日光 $W \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1}$	地表日光 $W \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1}$	含环境地表日光 $W \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1}$
565	1.035274	1.031275	1.033313
570	1.023516	1.005156	1.0093
575	1.026876	1.00251	1.008157
580	1.026876	1.018996	1.02569
585	1.027996	1.03962	1.047187
590	0.964054	0.930054	0.938863
595	0.995521	0.970692	0.981095
600	0.991041	1.000882	1.012197
605	0.992721	1.010516	1.022869
610	0.965286	0.996336	1.009072
615	0.958567	0.997083	1.010367
620	0.958007	0.999932	1.013798
625	0.920493	0.95156	0.96562
630	0.932251	0.94464	0.959674
635	0.924972	0.980868	0.99596
640	0.903135	0.972863	0.988108
645	0.910974	0.988263	1.003964
650	0.854423	0.922252	0.937567
655	0.852744	0.915807	0.931544
660	0.87234	0.949254	0.965696
665	0.87738	0.964315	0.981171
670	0.858903	0.963094	0.979799
675	0.839306	0.946947	0.963485
680	0.836506	0.947693	0.964324
685	0.820269	0.9327	0.949383
690	0.828108	0.801967	0.81918
695	0.803471	0.862551	0.879555
700	0.796193	0.869946	0.887025
705	0.802352	0.896472	0.913935
710	0.786114	0.893826	0.911267
715	0.755991	0.853935	0.871169
720	0.755151	0.668589	0.685623
725	0.753919	0.704206	0.722221
730	0.747872	0.765604	0.784723
735	0.743057	0.826187	0.846242
740	0.718365	0.827341	0.847614
745	0.723404	0.847829	0.86934
750	0.713326	0.837246	0.859354

表 A. 1 ASTM 太阳光光谱功率分布表 (续 2)

波长 nm	空间日光 $W \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1}$	地表日光 $W \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1}$	含环境地表日光 $W \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1}$
755	0.715062	0.840095	0.863013
760	0.704927	0.180488	0.188413
765	0.6972	0.465407	0.48313
770	0.680067	0.787517	0.811557
775	0.676372	0.798575	0.823372
780	0.667973	0.789417	0.814682
785	0.664838	0.786024	0.811785
790	0.655319	0.740163	0.765742
795	0.631579	0.741655	0.767343
800	0.629787	0.727612	0.753613
805	0.615957	0.7154	0.7415
810	0.621501	0.71635	0.743162
815	0.620997	0.607347	0.632162
820	0.601344	0.584722	0.609079

A. 3 CIE 照明体相对光谱功率分布

CIE 照明体相对光谱功率分布如表 A.2 所示。

表 A. 2 CIE 照明体相对光谱功率分布表

λ nm	Standard illuminant A	Standard illuminant D65	Illuminant	Illuminant	Illuminant	Illuminant
			C	D50	D55	D75
300	0.930483	0.0341000	0.00	0.019	0.024	0.043
305	1.12821	1.66430	0.00	1.035	1.048	2.588
310	1.35769	3.29450	0.00	2.051	2.072	5.133
315	1.62219	11.7652	0.00	4.914	6.648	17.470
320	1.92508	20.2360	0.01	7.778	11.224	29.808
325	2.26980	28.6447	0.20	11.263	15.936	42.369
330	2.65981	37.0535	0.40	14.748	20.647	54.930
335	3.09861	38.5011	1.55	16.348	22.266	56.095
340	3.58968	39.9488	2.70	17.948	23.885	57.259
345	4.13648	42.4302	4.85	19.479	25.851	60.000
350	4.74238	44.9117	7.00	21.010	27.817	62.740
355	5.41070	45.7750	9.95	22.476	29.219	62.861
360	6.14462	46.6383	12.90	23.942	30.621	62.982
365	6.94720	49.3637	17.20	25.451	32.464	66.647
370	7.82135	52.0891	21.40	26.961	34.308	70.312

表 A.2 CIE 照明体相对光谱功率分布表 (续 1)

λ nm	Standard illuminant A	Standard illuminant D65	Illuminant	Illuminant	Illuminant	Illuminant
			C	D50	D55	D75
375	8.76980	51.0323	27.50	25.724	33.446	68.507
380	9.79510	49.9755	33.00	24.488	32.584	66.703
385	10.8996	52.3118	39.92	27.179	35.335	68.333
390	12.0853	54.6482	47.40	29.871	38.087	69.963
395	13.3543	68.7015	55.17	39.589	49.518	85.946
400	14.7080	82.7549	63.30	49.308	60.949	101.929
405	16.1480	87.1204	71.81	52.910	64.751	106.911
410	17.6753	91.4860	80.60	56.513	68.554	111.894
415	19.2907	92.4589	89.53	58.273	70.065	112.346
420	20.9950	93.4318	98.10	60.034	71.577	112.798
425	22.7883	90.0570	105.80	58.926	69.746	107.945
430	24.6709	86.6823	112.40	57.818	67.914	103.092
435	26.6425	95.7736	117.75	66.321	76.760	112.145
440	28.7027	104.865	121.50	74.825	85.605	121.198
445	30.8508	110.936	123.45	81.036	91.799	127.104
450	33.0859	117.008	124.00	87.247	97.993	133.010
455	35.4068	117.410	123.60	88.930	99.228	132.682
460	37.8121	117.812	123.10	90.612	100.463	132.355
465	40.3002	116.336	123.30	90.990	100.188	129.838
470	42.8693	114.861	123.80	91.368	99.913	127.322
475	45.5174	115.392	124.09	93.238	101.326	127.061
480	48.2423	115.923	123.90	95.109	102.739	126.800
485	51.0418	112.367	122.92	93.536	100.409	122.291
490	53.9132	108.811	120.70	91.963	98.078	117.783
495	56.8539	109.082	116.90	93.843	99.379	117.186
500	59.8611	109.354	112.10	95.724	100.680	116.589
505	62.9320	108.578	106.98	96.169	100.688	115.146
510	66.0635	107.802	102.30	96.613	100.695	113.702
515	69.2525	106.296	98.81	96.871	100.341	111.181
520	72.4959	104.790	96.90	97.129	99.987	108.659
525	75.7903	106.239	96.78	99.614	102.098	109.552
530	79.1326	107.689	98.00	102.099	104.210	110.445
535	82.5193	106.047	99.94	101.427	103.156	108.367
540	85.9470	104.405	102.10	100.755	102.102	106.289
545	89.4124	104.225	103.95	101.536	102.535	105.596
550	92.9120	104.046	105.20	102.317	102.968	104.904

表 A.2 CIE 照明体相对光谱功率分布表 (续 2)

λ nm	Standard illuminant A	Standard illuminant D65	Illuminant	Illuminant	Illuminant	Illuminant
			C	D50	D55	D75
555	96.4423	102.023	105.67	101.159	101.484	102.452
560	100.000	100.000	105.30	100.000	100.000	100.000
565	103.582	98.1671	104.11	98.868	98.608	97.808
570	107.184	96.3342	102.30	97.735	97.216	95.616
575	110.803	96.0611	100.15	98.327	97.482	94.914
580	114.436	95.7880	97.80	98.918	97.749	94.213
585	118.080	92.2368	95.43	96.208	94.590	90.605
590	121.731	88.6856	93.20	93.499	91.432	86.997
595	125.386	89.3459	91.22	95.593	92.926	87.112
600	129.043	90.0062	89.70	97.688	94.419	87.227
605	132.697	89.8026	88.83	98.478	94.780	86.684
610	136.346	89.5991	88.40	99.269	95.140	86.140
615	139.988	88.6489	88.19	99.155	94.680	84.861
620	143.618	87.6987	88.10	99.042	94.220	83.581
625	147.235	85.4936	88.06	97.382	92.334	81.164
630	150.836	83.2886	88.00	95.722	90.448	78.747
635	154.418	83.4939	87.86	97.290	91.389	78.587
640	157.979	83.6992	87.80	98.857	92.330	78.428
645	161.516	81.8630	87.99	97.262	90.592	76.614
650	165.028	80.0268	88.20	95.667	88.854	74.801
655	168.510	80.1207	88.20	96.929	89.586	74.562
660	171.963	80.2146	87.90	98.190	90.317	74.324
665	175.383	81.2462	87.22	100.597	92.133	74.873
670	178.769	82.2778	86.30	103.003	93.950	75.422
675	182.118	80.2810	85.30	101.068	91.953	73.499
680	185.429	78.2842	84.00	99.133	89.956	71.576
685	188.701	74.0027	82.21	93.257	84.817	67.714
690	191.931	69.7213	80.20	87.381	79.677	63.852
695	195.118	70.6652	78.24	89.492	81.258	64.464
700	198.261	71.6091	76.30	91.604	82.840	65.076
705	201.359	72.9790	74.36	92.246	83.842	66.573
710	204.409	74.3490	72.40	92.889	84.844	68.070
715	207.411	67.9765	70.40	84.872	77.539	62.256
720	210.365	61.6040	68.30	76.854	70.235	56.443
725	213.268	65.7448	66.30	81.683	74.768	60.343
730	216.120	69.8856	64.40	86.511	79.301	64.242

表 A.2 CIE 照明体相对光谱功率分布表 (续 3)

λ nm	Standard illuminant A	Standard illuminant D65	Illuminant	Illuminant	Illuminant	Illuminant
			C	D50	D55	D75
735	218.920	72.4863	62.80	89.546	82.147	66.697
740	221.667	75.0870	61.50	92.580	84.993	69.151
745	224.361	69.3398	60.20	85.405	78.437	63.890
750	227.000	63.5927	59.20	78.230	71.880	58.629
755	229.585	55.0054	58.50	67.961	62.337	50.623
760	232.115	46.4182	58.10	57.692	52.793	42.617
765	234.589	56.6118	58.00	70.307	64.360	51.985
770	237.008	66.8054	58.20	82.923	75.927	61.352
775	239.370	65.0941	58.50	80.599	73.872	59.838
780	241.675	63.3828	59.10	78.274	71.818	58.324

A.4 不同相关色温的 CIE 昼光照明体 D 计算所需参数

不同相关色温的 CIE 昼光照明体 D 计算所需参数如表 A.3 所示。

表 A.3 计算 CIE 昼光照明体 D 相对光谱分布所需参数表

λ /nm	$S_0(\lambda)$	$S_1(\lambda)$	$S_2(\lambda)$
300	0.04	0.02	0.00
305	3.02	2.26	1.00
310	6.00	4.50	2.00
315	17.80	13.45	3.00
320	29.60	22.40	4.00
325	42.45	32.20	6.25
330	55.30	42.00	8.50
335	56.30	41.30	8.15
340	57.30	40.60	7.80
345	59.55	41.10	7.25
350	61.80	41.60	6.70
355	61.65	39.80	6.00
360	61.50	38.00	5.30
365	65.15	40.20	5.70
370	68.80	42.40	6.10
375	66.10	40.45	4.55
380	63.40	38.50	3.00
385	64.60	36.75	2.10
390	65.80	35.00	1.20

表 A.3 计算 CIE 昼光照明体 D 相对光谱分布所需参数表 (续 1)

λ/nm	$S_0(\lambda)$	$S_1(\lambda)$	$S_2(\lambda)$
395	80.30	39.20	0.05
400	94.80	43.40	-1,10
405	99.80	44.85	-0,80
410	104.80	46.30	-0,50
415	105.35	45.10	-0,60
420	105.90	43.90	-0,70
425	101.35	40.50	-0,95
430	96.80	37.10	-1,20
435	105.35	36.90	-1,90
440	113.90	36.70	-2,60
445	119.75	36.30	-2,75
450	125.60	35.90	-2,90
455	125.55	34.25	-2,85
460	125.50	32.60	-2,80
465	123.40	30.25	-2,70
470	121.30	27.90	-2,60
475	121.30	26.10	-2,60
480	121.30	24.30	-2,60
485	117.40	22.20	-2,20
490	113.50	20.10	-1,80
495	113.30	18.15	-1,65
500	113.10	16.20	-1,50
505	111.95	14.70	-1,40
510	110.80	13.20	-1,30
515	108.65	10.90	-1,25
520	106.50	8.60	-1,20
525	107.65	7.35	-1,10
530	108.80	6.10	-1,00
535	107.05	5.15	-0,75
540	105.30	4.20	-0,50
545	104.85	3.05	-0,40
550	104.40	1.90	-0,30
555	102.20	0.95	-0,15
560	100.00	0.00	0.00
565	98.00	-0,80	0.10
570	96.00	-1,60	0.20
575	95.55	-2,55	0.35

表 A.3 计算 CIE 昼光照明体 D 相对光谱分布所需参数表 (续 2)

λ/nm	$S_0(\lambda)$	$S_1(\lambda)$	$S_2(\lambda)$
580	95.10	-3,50	0.50
585	92.10	-3,50	1.30
590	89.10	-3,50	2.10
595	89.80	-4,65	2.65
600	90.50	-5,80	3.20
605	90.40	-6,50	3.65
610	90.30	-7,20	4.10
615	89.35	-7,90	4.40
620	88.40	-8,60	4.70
625	86.20	-9,05	4.90
630	84.00	-9,50	5.10
635	84.55	-10,20	5.90
640	85.10	-10,90	6.70
645	83.50	-10,80	7.00
650	81.90	-10,70	7.30
655	82.25	-11,35	7.95
660	82.60	-12,00	8.60
665	83.75	-13,00	9.20
670	84.90	-14,00	9.80
675	83.10	-13,80	10.00
680	81.30	-13,60	10.20
685	76.60	-12,80	9.25
690	71.90	-12,00	8.30
695	73.10	-12,65	8.95
700	74.30	-13,30	9.60
705	75.35	-13,10	9.05
710	76.40	-12,90	8.50
715	69.85	-11,75	7.75
720	63.30	-10,60	7.00
725	67.50	-11,10	7.30
730	71.70	-11,60	7.60
735	74.35	-11,90	7.80
740	77.00	-12,20	8.00
745	71.10	-11,20	7.35
750	65.20	-10,20	6.70
755	56.45	-9,00	5.95
760	47.70	-7,80	5.20

表 A.3 计算 CIE 昼光照明体 D 相对光谱分布所需参数表 (续 3)

λ/nm	$S_0(\lambda)$	$S_1(\lambda)$	$S_2(\lambda)$
765	58.15	-9,50	6.30
770	68.60	-11,20	7.40
775	66.80	-10,80	7.10
780	65.00	-10,40	6.80
785	65.50	-10,50	6.90
790	66.00	-10,60	7.00
795	63.50	-10,15	6.70
800	61.00	-9,70	6.40
805	57.15	-9,00	5.95
810	53.30	-8,30	5.50
815	56.10	-8,80	5.80
820	58.90	-9,30	6.10
825	60.40	-9,55	6.30
830	61.90	-9,80	6.50

A.5 类太阳光相似度参数与色度参数计算表

报告中计算涉及各光谱色度学和拟合程度结果如表 A.4 所示。

A. 4 典型光谱的色度学与拟合程度计算结果

		Rf	Rg	CCT	Ra	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12	R13	R14	R15	Duv	E	RMS	GFC
CIE015 : 2018	CIE1	83	97	2736K	82	79.8	90.45	96.61	77.95	79.32	87.55	82.89	59.82	12.67	77.72	75.02	71.43	82.01	98.66	73.95	-0.0006	30.49	44.44	0.9108
	CIE2	84	97	3000K	83	80.95	90.33	96.43	79.45	80.38	86.6	84.75	63.53	17.64	76.83	76.46	68.18	82.9	98.15	75.95	-0.0009	29.71	40.16	0.9192
	CIE3	85	97	4102K	85	83.6	89.3	93.29	84.74	83.73	84.91	88.25	71.06	23.71	74.36	83.7	66.9	84.74	96.21	79.22	-0.0005	30.08	33.82	0.922
	CIE4	77	95	5103K	77	75.28	81.44	83.36	76.71	75.24	72.95	84.95	65.4	-1.66	53.35	72.32	47.75	76.21	90.31	72.53	0.0006	34.86	35.61	0.9059
	CIE5	80	94	6584K	80	78.98	84.38	85.07	80.28	79.16	76.8	87.59	70.56	6.85	59.99	77.2	51.65	80.32	91.56	76.58	0.001	32.78	34.33	0.9153
	CIE6	85	106	2853K	92	98.75	93.58	81.59	89.59	95.23	92.73	92.23	91.03	71.78	77.54	89.74	74.31	98.24	86.6	96.23	-0.0002	47.76	63.99	0.7645
	CIE7	68	105	2839K	58	49.12	79.99	83.4	36.85	48.33	62.81	71.21	29.66	-31.55	53.84	15	52.22	55.09	88.03	52.62	0.0043	57.67	69.95	0.7296
	CIE8	91	100	2727K	95	95.29	96.44	98.33	92.49	92.93	91.21	97.69	98.22	97.69	91.74	88.21	71.91	95.07	99.06	97.11	-0.002	15.29	22.85	0.975
	CIE9	95	99	4075K	96	95.62	96.11	96.29	95.21	94.93	92.71	97.25	97.73	95.1	90.66	93.18	84	95.53	98.26	97.37	0.0009	11.67	13.68	0.9862
A 单位	YX01	96	100	2779K	97	97	98.11	98.76	96.12	96.68	95.13	98.11	97.88	94.72	96.89	92.63	94.02	96.83	98.25	99.53	0	15.86	28.5	0.9665
	YX02	97	101	3085K	97	95.97	97.86	98.39	95.04	95.85	95.32	99.35	99.26	98.65	96.26	91.77	94.47	96.04	98.13	97.91	-0.0005	12.22	17.95	0.9808
	YX03	98	101	4080K	98	97.97	99.68	97.63	96.8	98.22	98.76	99.48	99.15	99.41	99.55	94.83	99.35	98.25	98.08	99.17	0.0009	10.01	13.78	0.9866
	YX04	98	102	5098K	97	96.76	98.73	98.39	94.76	96.23	97.13	98.97	97.76	95.51	97.27	92.59	94.75	97.17	98.57	97.32	0.0014	8.76	9.81	0.9933
	YX05	97	102	5859K	97	96.66	99.32	97.22	93.74	96.14	98.17	97.75	96.07	92.38	98.63	91.9	94.31	97.42	98.01	96.71	0.0019	8.26	9.09	0.9945
	YX06	98	101	6552K	98	99.09	98.86	97.77	96.4	98.12	99.04	98.57	98.2	98.83	98.07	94.96	96.35	99.26	98.59	98.81	0.0049	7	8.18	0.9954
	YX07	95	97	2641K	98	99.48	99.05	98.49	97.58	98.82	96.66	97.08	95.13	88.88	98.4	95.29	95.63	99.16	98.52	97.39	0.0022	13.61	23.45	0.9734
	YX08	96	99	3165K	98	99.29	99.55	99.45	98.14	98.86	98.39	97	95.04	89.18	99.23	99.08	94.2	99.49	99.01	97.42	0.0011	11.93	22.21	0.9753
	YX09	94	98	4119K	97	97.9	98.96	98.74	94.72	96.8	98.97	95.73	94.21	88.48	98.15	95.96	87.93	98.14	99.31	95.75	0.0032	10.63	16.52	0.9837
	YX10	96	100	5213K	97	98.23	97.21	96.35	96.85	97.66	95.8	95.79	96.59	97.47	93.52	97.84	92.64	98.05	98.02	98.35	0.0022	8.98	11.73	0.9896
	YX11	96	100	5836K	97	98.06	98.06	98.25	97.45	97.85	96.63	96.61	96.95	96.89	96.26	98.62	89.53	98.55	99.14	98.06	0.0013	8.75	11.6	0.9895
	YX12	96	99	6520K	97	98.16	98.51	97.65	96.27	97.8	97.23	96.03	95.75	93.69	96.85	98.25	88.18	99.27	98.67	97.38	0.0027	8.64	11.7	0.9903

表 A.4 典型光谱的色度学与拟合程度计算结果 (续 1)

		Rf	Rg	CCT	Ra	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12	R13	R14	R15	Duv	E	RMS	GFC
B 单位	GX1	97	100	3059K	97	96.11	98.33	97.74	94.7	95.96	95.88	99.48	98.74	98.41	97.04	91.48	95.51	96.38	97.82	98.09	0.0006	12.55	19.77	0.9779
	GX2	97	99	3906K	99	98.99	99.49	97.86	98.64	99.11	99.25	98.47	98.76	97.91	98.68	98.75	92.78	98.82	98.11	98.8	0.0017	9.6	13.89	0.9867
	GX3	98	100	5220K	98	98.08	98.31	99.12	98.27	97.99	97.1	97.73	98.55	98.42	96.5	97.48	94.66	97.97	99.37	98.5	0.0027	7.66	9.93	0.9926
C 公司	XD1	95	100	2796K	98	98.95	98.86	94.99	95.74	98.42	99.57	98.37	97.9	92.37	96.26	93.59	95.66	99.48	96.19	98.4	0.0013	14.22	24.52	0.972
	XD2	95	100	2698K	96	99.17	98.21	96.66	99.46	99.02	93.75	93.04	88.38	77.03	96.03	96.36	90.93	99.4	98.77	95.05	-0.0012	17.62	30.84	0.9565
	XD3	98	101	4007K	98	98.58	99.11	95.52	96.45	98.91	98.92	97.86	97.36	96.2	97.23	95.33	94.2	99.29	96.98	98.51	0.0004	11.24	15.71	0.986
	XD4	97	100	4007K	99	99.15	98.82	97.45	97.58	99.31	99.24	98.88	99.23	99.7	98.16	95.22	91.15	98.63	98.38	98.65	0.0037	12.36	16.62	0.9815
	XD5	98	101	5720K	98	99.12	97.87	96.22	96.7	98.98	97.63	97.83	98.72	97.73	95.41	96.19	92.99	98.55	97.79	99.13	0.0028	10	12.62	0.9885
	XD6	97	103	5678K	97	97.75	99.34	97.23	95.47	97.65	98.08	98.01	96.26	90.76	98.79	93.5	94.64	98.39	98.33	97.01	0.0012	10.82	17.22	0.9871
A 大学	NC01	82	92	2873K	94	95.53	97.09	95.99	90.96	96.07	94.94	90.9	89.11	87.58	94.42	91.32	83.85	97.33	95.89	93.28	0.0068	65.3	88.73	0.5355
A 研究所	IOS01	96	101	6516K	96	94.04	95.65	97.22	95.25	94.74	94.3	96.52	96.29	89.54	90.36	93.33	91.54	93.9	98.12	94.72	0.0007	8.55	9.89	0.9934
	IOS02	97	101	5730K	97	97.08	98.19	97.49	95.11	96.27	96.22	99.22	99.05	98.06	93.81	91.6	96.82	97.05	98.11	99.09	0.0027	9.19	9.35	0.9942
传统灯具	P6	75	78	4900K	66	56.15	78.12	89.84	58.01	61	75.47	78.52	34.79	-93.31	56.62	53.29	59.02	61.54	92.18	40.56	0.0286	0.455	48.92	0.8555
	P4	77	100	2750K	83	97.56	95.91	51.4	90.85	88.87	83.83	89.86	63.32	-11.36	52.16	82.13	46.96	93.5	66.22	91.46	0.0055	0.9063	127.65	0.3475
	P7	80	89	6464K	78	71.53	84.73	92.7	75.11	76.05	81.53	83.33	55.67	-39.96	63.98	70.63	77.07	74.79	95.3	62.94	0.0072	0.4447	52.12	0.8273
	P1	84	102	7008K	85	96.75	92.19	57.01	86.5	92.72	82.47	87.33	88	57.03	54.58	83.81	68.76	95.76	72.06	94.45	0.0034	0.7189	83.29	0.6283

参考文献

- [1] “拟合自然光谱技术”项目验收报告
- [2] Sunlike 产品说明书
- [3] GBT 2900.65-2004 电工术语照明, (IEC60050 (845)1987), 中华人名共和国国家标准, 2004
- [4] 《天体物理学》
- [5] 《光学》, 高等教育出版署, 赵凯华, 钟锡华, 1997.
- [6] GB/T 17683.1-1999 《太阳能在地面不同接收条件下的太阳光谱辐照度标准第 1 部分:大气质量 1.5 的法向直接日射辐照度和半球向日射辐照度》
- [7] CIE 015:2018, Colorimetry, 4th Edition, TECHNICAL REPORT
- [8] ISO 3664:2009, Graphic technology and photography —Viewing conditions
- [9] I. Fryc1, S. W. Brown and Y. Ohno, The Spectrally Tunable LED light Source – Design and Development Issue.
- [10] D. B. Judd, D. L. MacAdam, and G. Wyszecki, Spectral distribution of typical daylight as a function of correlated color temperature, J. Opt. Soc. Am. 54, 1031–1040 (1964).
- [11] E. R. Dixon, Spectral distribution of Australian daylight, J. Opt. Soc. Am. 68, 437–450 (1978).
- [12] V. D. P. Sastri and S. B. Manamohanan, Spectral distribution and colour of north sky at Bombay, J. Phys. D 4, 381–386 (1971).
- [13] V. D. P. Sastri and S. R. Das, Typical spectral distributions and color for tropical daylight, J. Opt. Soc. Am. 58, 391–398 (1968).
- [14] CIE 192:2010 , PRACTICAL DAYLIGHT SOURCES FOR COLORIMETRY , TECHNICAL REPORT
- [15] CIE 205:2013, REVIEW OF LIGHTING QUALITY MEASURES FOR INTERIOR LIGHTING WITH LED LIGHTING SYSTEMS, TECHNICAL REPORT
- [16] Neng-Chung Hu, Chin-Chuan Wu, Shih-Feng Chen, and Horng-Ching Hsiao , Implementing dynamic daylight spectra with light-emitting diodes, 1 July 2008 / Vol. 47, No. 19 / APPLIED OPTICS
- [17] CIE 51.2-1999 , A METHOD FOR ASSESSING THE QUALITY OF DAYLIGHT SIMULATORS FOR COLORIMETRY, TECHNICAL REPORT
- [18] S. W. Brown, C. Santana, and G. P. Eppeldauer, Development of a tunable LED-based colorimetric source, J. Res. Nat'l. Inst. Stands. Technol. 107, 363-371, 2002.
- [19] I. Fryc, S. W. Brown, G. P. Eppeldauer, Y. Ohno, A spectrally tunable solid-state source for radiometric, photometric, and colorimetric applications, Proceedings of SPIE, 5530, 150 – 159, 2004.
- [20] I. Fryc1, S. W. Brown and Y. Ohno, Spectral matching with an LED-based spectrally

tunable light source, Fifth International Conference on Solid State Lighting, edited by Ian T. Ferguson, John C. Carrano, Tsunemasa Taguchi, Ian E. Ashdon, Proc. of SPIE Vol. 5941 (SPIE, Bellingham, WA, 2005)

[21] S. W. Brown, J. P. Rice, J. E. Neira, B. C. Johnson, Spectrally Tunable Sources for Advanced Radiometric Applications, Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol. 111, 401-410 (2006)

[22] Jay Guoxu Liu, Wei Tang, Yonghao Qin, Guoxi Sun, Chongyu Shen, "Quantitative Analysis of Full Spectrum LEDs for High Quality Lighting", 2018 IEEE Proceedings: 15th China International Forum on Solid State Lighting: International Forum on Wide Bandgap Semiconductors China (SSLChina: IFWS), Pages 95-99 (DOI: 10.1109/IFWS.2018.8587355)

[23] 陈风, 袁银麟, 郑小兵, 吴浩宇, LED 的光谱分布可调光源的设计, 光学精密工程, 第 16 卷, 第 11 期, 2060~2064, 2018 年 11 月

[24] Brown S W, Santana C, Eppeldauer G P, Development of a tunable LED-based colorimetric source[J]. J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol, 2002,107(4):363-371

[25] 王凌云, 王立辉, 苏拾, 张健, 张国玉, 基于 LED 峰值的太阳光谱合成方法, 发光学报, 第 39 卷, 第 4 期, 555~560, 2018 年 4 月

[26] 张玉宝, 董礼, 张国英, 基于有效集算法的大功率单色 LED 太阳光谱模拟仿真, 第 39 卷, 第 6 期, 862~868, 2018 年 6 月

[27] 朱继亦, 任建伟, 李葆勇, 等. 基于 LED 的光谱可调光源的光谱分布合成, 发光学报, 第 61 卷第 6 期, 882~887, 2010 年

[28] 甘汝婷, 郭震宁, 林介本, 等. 遗传算法在 LED 光源光谱匹配技术中的应用, 光子学报, 第 43 卷第 7 期, 172~177, 2014 年

[29] 徐广强, 张竞辉, 曹冠英, 等. 大功率单色 LED 拟合日光光谱, 真空与技术学报, 第 36 卷第 1 期, 1~5, 2016 年

[30] 倪俊雄, 白廷柱, 徐英莹. LED 可变光谱光源的多光谱拟合反演研究[J]. 光谱学与光谱分析, 3(6) 1606-1010, 2012 年

[31] 胡友丽, 袁银麟, 吴浩宇, 等. 光谱可调积分球光源的光谱匹配算法研究[J]. 应用光学, 35(3), 473-483, 2014 年

[32] 郝洛西, 曹亦潇, 崔哲, 曾堃, 邵戎镝, 光与健康的研究动态与应用展望, 照明工程学报, 2017 年 12 月第 28 卷第 6 期

[33] 蔡建奇, 高伟, 郭娅, 郝文涛, 杜鹏, 温蓉蓉, 杨晓祥, 健康照明的基础研究和标准研制的探讨, 照明工程学报, 2017 年 12 月

[34] 郭琳, 张昕, 健康光环境的范围界定与标准衔接问题, 照明工程学报, 2017 年 12 月第 28 卷第 6 期

[35] 王晓静, 段延龙, 牟同升, 健康照明的评价方法及其标准化的新进展, 照明工程学报, 2017 年 12 月第 28 卷第 6 期

[36] 蔡建奇, 王媛媛, 杜鹏, 等. 基于视觉生理指标的发光二极管光健康影响. 中华眼

视光学与视觉科学杂志, 2016, 18 (9) : 513-516.

[37] 郑建, 牟同升, 何涛, 应用于儿童的 LED 光源蓝光危害评价方法研究, 中国生物医学工程学报, 第 36 卷第 4 期, 487~490, 2016 年

[38] 陈尧东, 郝洛西, 崔哲, 中性色调起居室光照环境人因工学研究, 照明工程学报, 第 25 卷, 第 4 期, 29~34, 2014 年

CSA

