

DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.201902005



光源色域面积评价方法的比较分析

廖欣怡^{1,2}, 朱大庆^{1,2}, 庄其仁^{1,2}

(1. 华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021;
2. 华侨大学 福建省光传输与变换重点实验室, 福建 厦门 361021)

摘要: 比较多种光源色域面积指标,研究 3 种常用的光源色域面积指标的关系.选取 48 个光源,用其光谱进行数值计算,计算其全色域指数(GAI)、光色品质色域面积(CQS_QG)指标和 IES-TM-30-15 相对色域面积(RG),并分析这 3 个色域面积之间的关系.结果表明:QG 值与 RG 值的相关性最高,GAI 值与 QG 值, RG 值的相关性都不高;光源色域面积计算中,采用的颜色样本,颜色空间和参考光源对计算结果都有很大的影响.

关键词: 光源颜色品质;显色性;光源色域面积;颜色空间

中图分类号: TM 923 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2019)05-0683-08

Comparative analysis of methods for evaluating Gamut Area of Light Sources

LIAO Xinyi^{1,2}, ZHU Daqing^{1,2}, ZHUANG Qiren^{1,2}

(1. College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;
2. Fujian Key Laboratory of Light Propagation and Transformation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: The various gamut area index of light sources are compared and the relationship of three common gamut area index were studied. 48 light sources were selected for numerical calculation using their spectrum. The gamut area index (GAI), QG of the color quality scale (CQS_QG) and RG of the IES-TM-30-15 relative gamut of these light sources were calculated, and the correlations among the three color gamut areas index were analyzed. The results showed that the correlation between QG and RG was the highest, while the correlation between GAI and QG or RG was low. Additionally, the color sample set, color space and reference illuminant have a significant influence on the quantification of gamut area.

Keywords: color quality of light sources; color rendering; gamut area of light sources; color space

目前,照明行业内通用的评价光源显色性的显色指标(CRI)存在着诸多问题^[1-4].国际照明委员会(CIE)定义的光源显色性(光源颜色品质)是与参考标准光源相比较,光源显现物体颜色的特性^[5],而显色指标 CRI 只评价了光源的颜色保真性.CIE 分别研究评估新的光源颜色保真性的评价方法和除颜色保真性以外的光源颜色品质的评价方法^[6-7].近几年来,研究者提出了许多评价光源颜色品质的方法,其中,绝大多数研究者认为光源色域面积是光源颜色品质非常重要的组成部分,光源色域面积不仅能表征光源照射下物体表面颜色的彩度变化,还能在一定程度上评价人眼的颜色偏好性^[5,8-11].与显示行业内色域的概念有所不同,光源的色域面积是指颜色样本在某种光源照射下,计算出的在颜色空间中的色度坐标所围成的面积,可以表示在光源照射下物体表面颜色彩度的平均变化(与参考光源相比),即在光源

收稿日期: 2019-02-17

通信作者: 朱大庆(1966-),男,副教授,博士,主要从事照明与显示方向的研究. E-mail:zhudaqing@hqu.edu.cn.

基金项目: 福建省科技计划(高校产学研合作)重大项目(2016H6016);福建省光电技术与器件重点实验室开放课题(OPT201603)

照射下物体表面颜色的多彩性和生动性的程度^[9-13]. 目前,已经提出的评价光源色域面积的方法有很多. Thornton^[12] 提出颜色分辨性指标(CDI);Boyce 等^[14] 提出 FM 色域面积指标(FMG);Rea 等^[9] 提出全色域指数(GAI);Davis 等^[10] 提出光色品质色域面积指标(CQS_QG);David 等^[11] 提出 IES-TM-30-15 相对色域面积(RG);Teunissen 等^[15] 提出相对色域面积指标(RGAI). 本文对多种光源色域面积的评价方法进行概述,分析它们的异同点,并选取 48 个光源进行数值计算,研究分析照明行业内比较关注的 3 种光源色域面积指标 GAI,CQS_QG 和 IES-TM-30-15 RG 值的差异.

1 不同光源色域面积指标的比较

光源色域面积的计算流程基本一致,但计算过程中采用的颜色样本、颜色空间及参考光源各有不同. 6 种典型的色域面积计算中,采用的颜色样本、颜色空间和参考光源,如表 1 所示.

表 1 6 种典型的色域面积的计算要素
Tab. 1 Calculation elements of six typical gamut areas

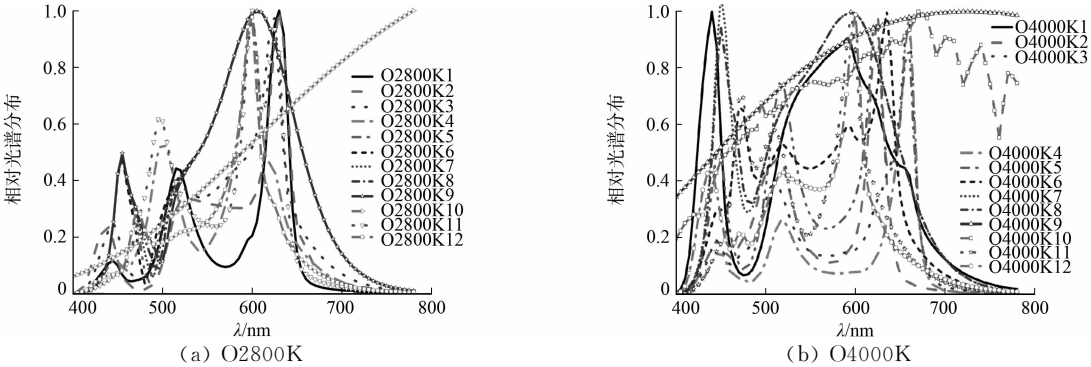
光源色域面积指标	年份	颜色样本(数量)	颜色空间	参考光源
CDI	1972	CIE TCS(8)	CIE 1960 UCS	照明体 C
FMG	1977	Farnsworth-Munsell 100 hue(85)	CIE 1960 UCS	照明体 C
GAI	2008	CIE TCS(8)	CIE 1976 UCS	等能照明体 E
CQS_QG	2010	Munsell samples(15)	CIE LAB	黑体辐射/D 照明体
IES-TM-30-15 RG	2015	CES(99/16)	CAM02-UCS	黑体辐射/混合/D 照明体
RGAI	2016	CIE TCS(8)	CAM02-UCS	黑体辐射/D 照明体

由表 1 可知:在 CDI,GAI 和 RGAI 的计算中,均采用计算显色指标 CRI 中使用的 8 个颜色样本(CIE TCS);FMG 采用了 Farnsworth-Munsell 100 hue 色样;CQS_QG 采用了 15 种比 CIE TCS 颜色更饱和的 Munsell samples 色样;IES-TM-30-15 RG 则是采用从 105 000 个生活中常见物品的颜色中选出的 99 个均匀分布的颜色色样(CES). 色域面积计算中,采用的颜色空间逐步更新,因此,计算光源色域面积时,更倾向于使用颜色空间更均匀、与感知色差相关程度更高的 CAM02-UCS^[16].

对于参考光源的选择,CDI,FMG 和 GAI 均采用固定的参考光源,而 CQS_QG,IES-TM-30-15 RG 和 RGAI 采用的参考光源由测试光源的色温决定. 在 CQS_QG 和 RGAI 的计算中,当测试光源色温小于 5 000 K 时,采用黑体辐射;当色温大于 5 000 K 时,采用 D 照明体. 在 IES-TM-30-15 RG 的计算中,当测试光源色温小于等于 4 500 K 时,采用黑体辐射;当测试光源色温大于等于 5 500 K 时,采用 D 照明体;而当测试光源色温大于 4 500 K,小于 5 500 K 时,采用黑体辐射与 D 照明体混合的光源^[11]. 光源色域面积计算中,参考光源的色域面积为 100,当测试光源的色域面积大于 100 时,表示光源照射下物体颜色饱和度增大;当色域面积小于 100 时,表示光源照射下物体颜色饱和度减小.

2 数值计算

为更好地分析 GAI,CQS_QG,IES-TM-30-15 RG 等 3 种光源色域面积间的关系,选取 48 组光源,按色温分成 4 组,记为 O2800K,O4000K,O5000K,O6500K,利用 MATLAB 计算它们的 GAI 值,CQS_QG 值和 IES-TM-30-15 RG 值. 48 组光源分别是实验室理论光源、市场购买的商业光源、CIE 标准光源和各种照明体,其光谱分布如图 1 所示. 图 1 中: λ 为波长. 表 2,3 分别为 48 个光源的光谱类型和部分



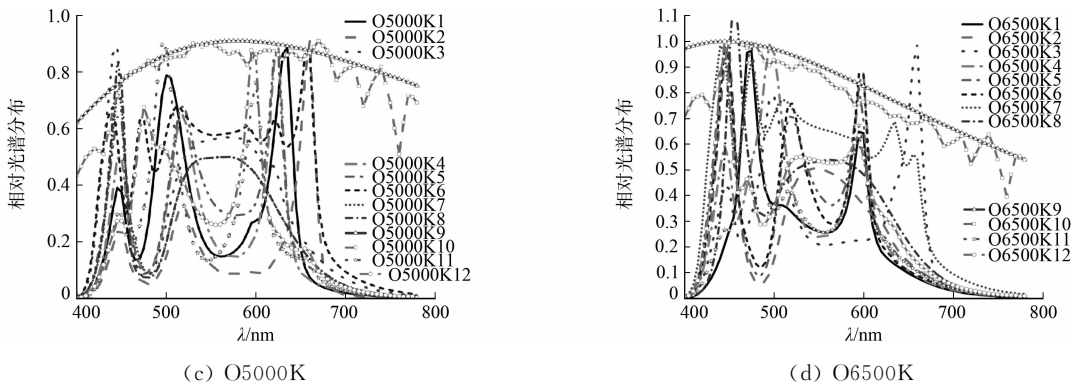


图 1 48 个光源的光谱分布

Fig.1 Spectrum distribution of 48 light sources

表 2 48 个光源的光谱类型

Tab.2 Spectral types of 48 light sources

序号	O2800K	O4000K	O5000K	O6500K
1	三波峰 (448/515/630)	双波峰 (蓝光 440+荧光粉)	四波峰 (445/500/595/635)	三波峰 (457/505/595)
2	三波峰 (439/520/625)	三波峰 (445/515/625)	三波峰 (445/520/660)	双波峰 (蓝光 440+荧光粉)
3	三波峰 (445/520/625)	三波峰 (445/510/660)	双波峰 (蓝光 440+荧光粉)	三波峰 (445/500/660)
4	三波峰 (445/500/600)	三波峰 (450/515/660)	三波峰 (445/515/625)	三波峰 (445/495/600)
5	双波峰 (蓝光 445+荧光粉)	四波峰 (445/515/620/660)	三波峰 (445/520/620)	三波峰 (445/520/590)
6	双波峰 (蓝光 445+荧光粉)	五波峰 (445/475/520/570/635)	六波峰 (440/475/510/590/620/660)	三波峰 (445/520/595)
7	双波峰 (蓝光 445+荧光粉)	双波峰 (蓝光 445+荧光粉)	双波峰 (蓝光 445+荧光粉)	六波峰 (440/475/510/590/635/655)
8	双波峰 (蓝光 445+荧光粉)	双波峰 (蓝光 445+荧光粉)	双波峰 (蓝光 445+荧光粉)	双波峰 (蓝光 440+荧光粉)
9	双波峰 (蓝光 445+荧光粉)	黑体辐射	黑体辐射	黑体辐射
10	A 光源	D40	D50	D65
11	三波峰 (495/600/625)	三波峰 (475/510/595)	四波峰 (445/495/600/655)	四波峰 (445/475/515/595)
12	双波峰 (472/600)	四波峰 (440/470/515/600)	五波峰 (445/475/495/595/635)	五波峰 (445/470/525/595/635)

表 3 48 个光源的部分色度参数

Tab.3 Part colorimetric characteristics of 48 light sources

序号	O2800K				
	x	y	T_c/K	Duv	CRI
1	0.453 0	0.408 2	2 780	−0.000 260	48
2	0.453 9	0.408 3	2 767	−0.000 340	86
3	0.450 3	0.409 4	2 829	0.000 453	93
4	0.449 0	0.408 4	2 842	0.000 211	67
5	0.450 6	0.406 7	2 803	−0.000 610	81
6	0.451 8	0.409 5	2 808	0.000 345	81
7	0.449 7	0.404 1	2 796	−0.001 510	81
8	0.449 2	0.401 8	2 785	−0.002 360	80
9	0.448 9	0.399 6	2 771	−0.003 170	80
10	0.447 6	0.407 4	2 855	0.000 014	100
11	0.449 4	0.408 3	2 835	0.000 153	69
12	0.451 2	0.410 7	2 827	0.000 858	63

续表
Continue table

序号	O4000K				
	x	y	T_c/K	Duv	CRI
1	0.381 5	0.377 5	3 976	1.87×10^{-5}	71
2	0.381 9	0.377 5	3 966	-7.22×10^{-5}	52
3	0.378 5	0.376 6	4 051	0.000 486	54
4	0.380 2	0.376 4	4 005	0.000 067	45
5	0.380 6	0.377 7	4 002	0.000 382	67
6	0.380 1	0.377 1	4 012	0.000 282	90
7	0.379 3	0.376 9	4 033	0.000 426	83
8	0.379 9	0.379 4	4 033	0.001 366	83
9	0.380 5	0.376 8	4 000	0.000 007	83
10	0.382 0	0.383 7	4 009	0.002 775	100
11	0.379 4	0.378 5	4 043	0.001 140	98
12	0.382 3	0.380 5	3 977	0.001 194	69

序号	O5000K				
	x	y	T_c/K	Duv	CRI
1	0.346 6	0.358 5	4 969	0.002 849	51
2	0.345 1	0.359 6	5 026	0.003 953	54
3	0.345 8	0.358 4	4 996	0.003 109	73
4	0.344 8	0.359 3	5 035	0.003 915	68
5	0.345 6	0.360 9	5 014	0.004 417	85
6	0.345 3	0.359 4	5 019	0.003 820	98
7	0.344 0	0.368 3	5 089	0.008 588	71
8	0.343 9	0.366 0	5 088	0.007 528	70
9	0.345 1	0.351 7	4 999	0.000 011	100
10	0.345 7	0.358 6	5 000	0.003 219	100
11	0.345 8	0.359 8	5 002	0.003 796	62
12	0.346 9	0.358 6	4 956	0.002 746	73

序号	O6500K				
	x	y	T_c/K	Duv	CRI
1	0.312 2	0.328 5	6 537	0.003 234	70
2	0.313 3	0.329 3	6 472	0.003 057	69
3	0.311 9	0.331 8	6 524	0.005 019	61
4	0.311 8	0.330 1	6 543	0.004 216	71
5	0.312 4	0.330 0	6 512	0.003 875	78
6	0.312 8	0.330 4	6 488	0.003 890	83
7	0.312 2	0.329 6	6 525	0.003 734	99
8	0.312 9	0.330 8	6 481	0.004 036	85
9	0.313 6	0.323 7	6 497	0.000 014	98
10	0.312 8	0.329 1	6 496	0.003 169	100
11	0.312 8	0.327 0	6 514	0.002 145	74
12	0.314 0	0.332 4	6 412	0.004 292	80

色度参数. 表 3 中: x,y 为色度坐标; T_c 为色温;Duv 为色偏移值.

将光谱数据导入 MATLAB 中,计算 48 种光源对应的 GAI 值,CQS_QG(简称 QG)值和 IES-TM-30-15 RG(简称 RG)值,结果如表 4 所示.

由表 4 可知:色温为 2 800,4 000,5 000 K 的光源的 GAI 值偏小,与 QG 值,RG 值相差很大,而色温为 6 500 K 的光源的 GAI 值与 QG 值,RG 值相差不大;除了个别光源(O4000K2,O4000K3,O4000K4,O5000K2)外,大部分光源的 QG 值,RG 值相差都不大.虽然 48 个光源的 GAI 值,QG 值和 RG 值各不相同,但是光源之间的 GAI 值,QG 值和 RG 值大小关系基本一致,除了光源 O2800K12,其 QG 值和 RG 值比其他同色温的光源都小,而 GAI 值比大部分同色温的光源都大.

表 4 48 个光源的 GAI,QG 和 RG 值
Tab.4 GAI, QG and RG values of 48 light sources

参数	O2800K											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
GAI	61	60	54	39	49	48	51	51	52	53	42	53
QG	110	109	99	73	90	90	90	89	88	97	78	72
RG	111	114	105	80	96	96	96	96	95	100	79	79

参数	O4000K											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
GAI	74	89	94	105	96	77	73	72	79	76	61	69
QG	96	112	119	133	121	99	95	94	102	103	80	90
RG	99	104	109	120	115	96	96	95	100	99	80	94

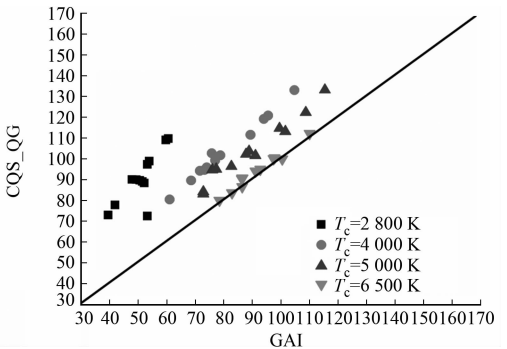
参数	O5000K											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
GAI	102	115	83	109	100	89	76	77	91	88	73	73
QG	113	133	96	122	115	104	95	95	102	102	83	84
RG	105	120	99	116	111	102	95	96	101	100	84	85

参数	O6500K											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
GAI	78	86	110	86	91	93	98	87	100	97	83	86
QG	80	90	112	87	94	95	100	91	100	100	84	91
RG	80	95	104	90	99	100	100	92	102	100	84	95

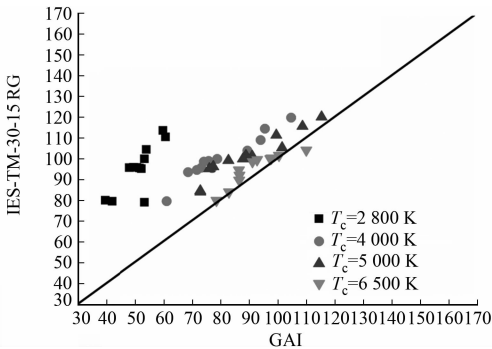
3 实验结果与分析

将 48 个光源的 3 种色域面积指标进行两两比较,结果如图 2 所示。

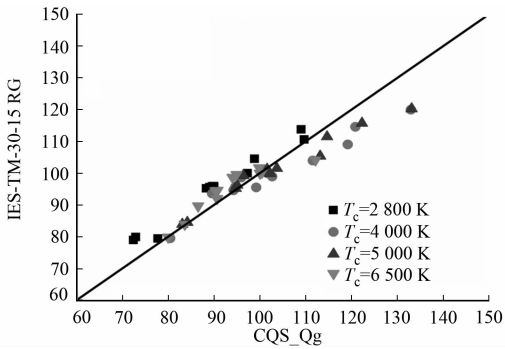
由图 2(a)可知:色温为 2 800,4 000,5 000 K 光源的 GAI 值普遍比 QG 值小,尤其是色温为 2 800 K 的光源;色温为 6 500 K 光源的 GAI 值与 QG 值较相近;这 48 个光源的 GAI 值与 QG 值的相关性系数为 0.529 3,其中,色温为 2 800 K 的光源的 GAI 值与 QG 值的相关性系数为 0.646 2,而色温为 4 000,5 000,6 500 K 光源的 GAI 值与



(a) GAI 值与 QG 值的比较



(b) GAI 值与 RG 值的比较



(c) QG 值与 RG 值的比较

图 2 48 个光源 3 种色域面积计算值的比较

Fig. 2 Comparison of three gamut indexes values of 48 light sources

QG 值的相关性系数分别为 0.988 2,0.963 9,0.968 3。

由图 2(b)可知:色温为 2 800,4 000,5 000 K 光源的 GAI 值普遍比 RG 值小,尤其是色温为 2 800 K 的光源,色温为 6 500 K 光源的 GAI 值与 RG 值比较相近;GAI 值与 RG 值的相关性系数为 0.353 8,其中,2 800 K 光源的 GAI 值和 RG 值的相关系数为 0.658 0,而 4 000,5 000,6 500 K 光源的 GAI 值与

RG 值的相关系数分别为 0.933 5,0.912 5,0.789 5.

由图 2(c)可知:48 个光源的 QG 值和 RG 值比较相近. 对于这 48 种光源,QG 值与 RG 值的相关性系数平均值为 0.907 6,其中,色温为 2 800,4 000,5 000,6 500 K 光源的 QG 值与 RG 值的相关性系数分别为 0.972 8,0.946 6,0.965 2 和 0.845 5.

通过上述比较可知,GAI 值与 QG 值,RG 值的总体相关性不高,但是按色温不同单独比较分析,发现低色温光源的 GAI 值与 QG 值,RG 值的相关性不高,而高色温光源的 GAI 值与 QG 值,RG 值的相关性较高,这是由于色域面积计算过程中采用了不同的参考光源.

为了更好地说明色域面积计算过程中参考光源的影响,将 GAI 值计算过程中使用的参考光源替换成 CQS_QG 计算过程中使用的参考光源,计算出的色域面积记为 GAI_BD. 将所计算得到 48 个光源的 GAI_BD 值,与 GAI 值,CQS_QG 值,IES-TM-30-15 RG 值进行比较,如图 3 所示.

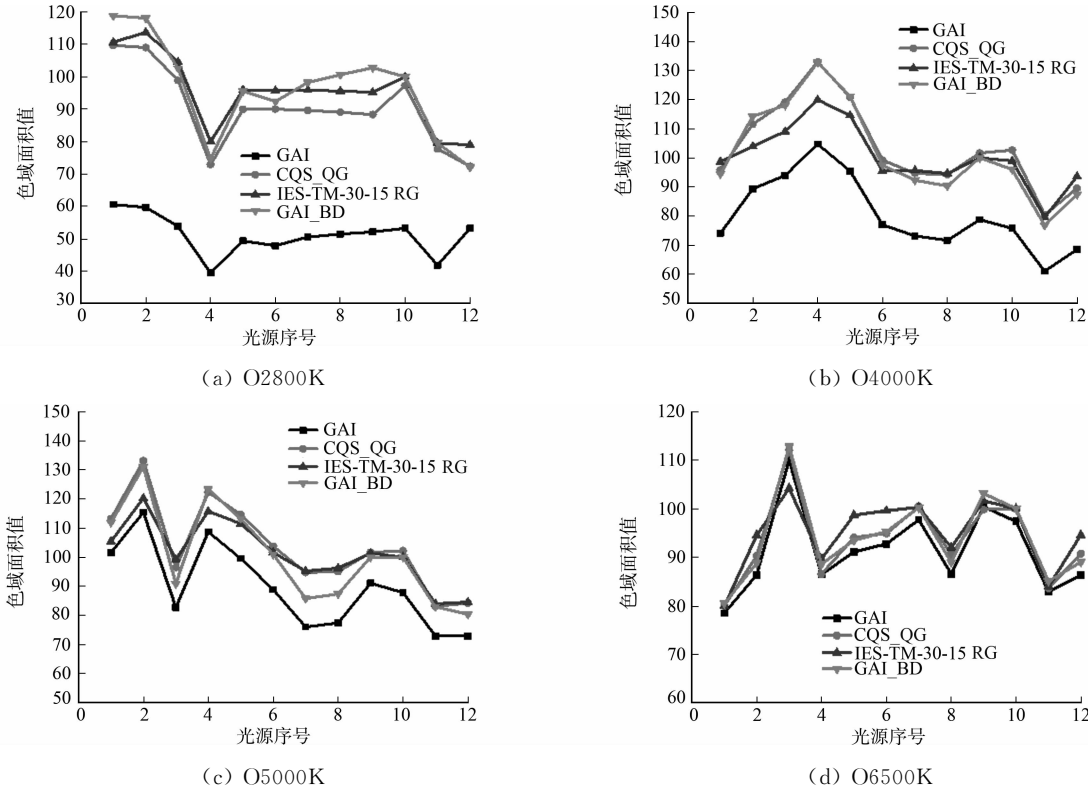


图 3 48 个光源的 GAI,QG,RG 和 GAI_BD 值

Fig. 3 GAI, QG, RG and GAI_BD values of 48 light sources

由图 3 可知:对于低色温的光源,它们的 GAI_BD 值明显比 GAI 值大. 这是因为 GAI 值的计算采用固定参考光源,即相关色温为 5 455 K 的等能照明体 E,而 QG 值,RG 值和 GAI_BD 的计算采用参考光源,需根据测试光源的色温选择. 研究表明,采用固定参考光源计算光源色域面积时,对低色温的光源来说,计算出的色域面积值都小于实际的颜色感知值^[16]. 由图 3 还可知:O2800K12 光源的 GAI 值比大部分同色温光源的 GAI 值大,QG 值和 RG 值比同色温光源的都小,原因可能是 GAI 值计算中使用的颜色样本分布不均匀,且光源颜色饱和度较高. O2800K12 的光谱类型是双波峰型,且 2 个峰都比较窄,光源的颜色饱和度较高,其中,橙光占比达到 28.75%.

把 GAI 值计算流程中的颜色样本替换成计算 CQS_QG 值时采用的 15 个分布更均匀的颜色样本,计算的色域面积记为 GAI_15. 比较 O2800K 光源的 GAI 值和 GAI_15 值,如表 5 所示. 由表 5 可知:O2800K12 的 GAI_15 值仅为 39,比同色温其他光源的 GAI_15 值都小. 也就是说,颜色样本的均匀性会影响光源色域面积的计算结果,尤其是对高饱和度的光源,采用分布不均匀的颜色样本计算得到的色域面积值可能会虚高.

通过上述比较还可知,QG 值与 RG 值的相关性最高,按色温不同单独分析,发现色温为 6 500 K 的光源的 QG 值与 RG 值的相关性降低. 除了 O6500K3 光源的 QG 值比 RG 值大,同色温其他光源的 QG

值都小于或等于 RG 值(表 4). 将 QG 值和 RG 值计算流程中使用的颜色样本互相替换, 计算的色域面积分别记为 QG_99 和 RG_15. 比较 O6500K 光源的 QG 值, QG_99 值和 RG 值, RG_15 值, 如表 6 所示. 由表 6 可知: O6500K 光源的 RG 值和 RG_15 值基本没有差别, 而 QG 值和 QG_99 值相差较大, 尤其是有尖锐波峰的光源.

表 5 O2800K 光源的 GAI 和 GAI_15 值
Tab. 5 GAI and GAI_15 values of O2800K source

参数	O2800K											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
GAI	61	60	54	39	49	48	51	51	52	53	42	53
GAI_15	55	57	53	40	51	49	52	53	53	54	41	39

表 6 O6500K 光源的 QG_99 和 RG_15 值
Tab. 6 QG_99 and RG_15 values of O6500K source

参数	O6500K											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
QG	80	90	112	87	94	95	100	91	100	100	84	91
QG_99	101	110	118	129	131	142	102	105	102	100	101	106
RG	80	95	104	90	99	100	100	92	102	100	84	95
RG_15	81	94	103	89	97	97	100	92	102	100	85	94

为了更好地说明颜色样本和颜色空间在色域面积计算过程中的影响, 比较 48 种光源的 QG 值, QG_99 值, RG 值和 RG_15 值, 结果如图 4 所示. 图 4 中: 1~12 为 O2800K 光源; 13~24 为 O4000K 光源; 25~36 为 O5000K 光源; 37~48 为 O6500K 光源.

由图 4 可知: 48 个光源的 RG 值和 RG_15 值相差不大, QG 值和 QG_99 值相差却很大. QG 值计算中采用的颜色样本都是高饱和度的, 而 RG 值计算中采用的颜色样本既有高饱和度也有中等饱和度, Royer^[17]提出使用全是高饱和度的颜色样本计算色域面积时, 光源色域面积可能会被压缩, 这也是 48 个光源的 QG_99 值比 QG 值大很多的原因. 研究表明, RG 值计算中使用的 CAM02-UCS 要比 QG 值使用的 CIE LAB 更均匀, 使用 CIE LAB 颜色空间计算的色域面积呈现为红-绿轴为长轴的椭圆状^[11, 16-17]. 这也是 48 个光源的 RG 值和 RG_15 值相差不大, 而 48 个光源的 QG 值和 QG_99 值相差很大的原因.

综上所述, GAI 值与 QG 值, RG 值之间的相关性不高, 而 QG 值和 RG 值之间的相关性较高, 且色域面积计算中采用的参考光源的颜色样本和颜色空间对计算结果有影响. 目前, 大多研究者倾向于采用 CAM02UCS 和根据测试光源的色温选择参考光源来计算光源色域面积^[16-17]. 虽然光源色域面积值能评价各个颜色彩度的平均变化, 光源的色域面积越大, 照射下的物体表面颜色越鲜艳, 光源也更受人喜欢, 但是对于色域面积值相同的光源来说, 色域面积值提供的信息有限. 因此, 除了关注色域面积的大小外, 还需要关注光源的色域面积形状. 目前, 关于色域面积形状的研究有许多^[18-19], 但是, 若要量化色域形状并最终引进照明行业, 还有许多工作要做.

4 结束语

对光源色域面积的评价方法进行概述, 选取 48 个不同色温和光源类型的光源, 计算其 GAI 值, CQS_QG 值和 IES-TM-30-15 RG 值, 分析这三者之间的关系. 虽然光源色域面积的计算方法不尽相同, 但是光源色域面积计算过程中采用的颜色样本、颜色空间与参考光源都各不相同. 通过比较分析 48 个光源的 GAI 值, QG 值和 RG 值发现: QG 值与 RG 值的相关性较高, GAI 值与 QG 值, RG 值的相关

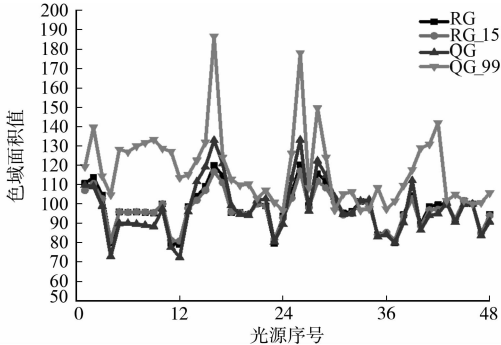


图 4 48 个光源的 QG, QG_99, RG 和 RG_15 值
Fig. 4 QG, QG_99, RG and RG_15 values of 48 light sources

性都不高;对同色温光源的 GAI 值,QG 值和 RG 值进行比较分析发现,4 000,5 000,6 500 K 光源的 GAI 值与 QG 值,RG 值的相关性都比较高.色域面积计算过程中采用的颜色样本、颜色空间和参考光源对计算的结果都有影响,大多研究者推荐采用多色温的参考光源,适量颜色饱和度不一的颜色样本和更先进的颜色空间来计算光源色域面积.

参考文献:

[1] AAZAMI M A,JALILI E. Method of measuring and specifying colour rendering properties of light sources, CIE Publication 13.3-1995, Central Bureau Of the CIE, Vienna, Austria, 1995, 20 pp, \$ 76 (members)/\$ 114 (non-members)[J]. Color Research and Application,2010,20(3):212. DOI:10.1002/col.5080200313.

[2] WALTER W. How meaningful is the CIE color rendering index? [J]. Lighting Design and Application,1981,11(2):13-15.

[3] SEIM T. In search of an improved method for assessing the colour rendering properties of light sources[J]. Lighting Research and Technology,1985,17(1):12-22. DOI:10.1177/14771535850170010401.

[4] WORTHEY J A. Color rendering: Asking the question[J]. Color Research and Application,2003,28(6):403-412. DOI:10.1002/col.10193.

[5] 胡威捷,汤顺青,朱正芳. 现代颜色技术原理及应用[M]. 北京:北京理工大学出版社,2007.

[6] HOUSER K W,WEI Minchen,DAVID A,*et al.* Review of measures for light-source color rendition and considerations for a two-measure system for characterizing color rendition[J]. Optics Express,2013,21(8):10393-10411. DOI:10.1364/OE.21.010393.

[8] GUO Xin,HOUSER K W. A review of colour rendering indices and their application to commercial light sources [J]. Lighting Research and Technology,2004,36(3):183-197. DOI:10.1191/1365782804li112oa.

[9] REA M S,FREYSSINIER-NOVA J P. Color rendering: A tale of two metrics[J]. Color Research and Application, 2008,33(3):192-202. DOI:10.1002/col.20399.

[10] DAVIS W,OHNO Y. Color quality scale[J]. Optical Engineering,2010,49(3):033602(1-16). DOI:10.1117/1.3360335.

[11] DAVID A,FINI P T,HOUSER K W,*et al.* Development of the IES method for evaluating the color rendition of light sources. [J]. Optics Express,2015,23(12):15888-15906. DOI:10.1364/OE.23.015888.

[12] THORNTON W A. Color-discrimination index[J]. Journal of the Optical Society of America,1972,62(2):191-194. DOI:10.1364/JOSA.62.000191.

[13] WEI Minchen,HOUSER K W,DAVID A,*et al.* Colour gamut size and shape influence colour preference[J]. Light-ing Research and Technology,2016,49(8):992-1014. DOI:10.1177/1477153516651472.

[14] BOYCE P R,SIMONS R H. Hue discrimination of light sources[J]. Lighting Research and Technology,1977,9(3):125-140. DOI:10.1177/096032717700900301.

[15] TEUNISSEN C,VAN DER H F,POORT S,*et al.* Characterising user preference for white LED light sources with CIE colour rendering index combined with a relative gamut area index[J]. Lighting Research and Technology, 2016,49(4):461-480. DOI:10.1177/1477153515624484.

[16] ROYER M P,HOUSER K W,DAVID A. Chroma shift and gamut shape: Going beyond average color fidelity and gamut area[J]. LEUKOS The Journal of the Illuminating Engineering Society of North America,2017,14(3):149-165. DOI:10.1080/15502724.2017.1372203.

[17] ROYER M P. Comparing measures of gamut area[J]. LEUKOS The Journal of the Illuminating Engineering Socie-ty of North America,2018,15(1):1-25. DOI:10.1080/15502724.2018.1500485.

[18] WEI Minchen,HOUSER K W. Systematic changes in gamut size affect color preference[J]. LEUKOS The Journal of the Illuminating Engineering Society of North America,2017,13(1):23-32. DOI:10.1080/15502724.2016.1192402.

[19] ESPOSITO T,HOUSER K W. Models of colour quality over a wide range of spectral power distributions[J]. Lighting Research and Technology,2018,4:1-22. DOI:10.1177/1477153518765953.

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:吴逢铁)