

各式白光 LED 的發光特性及展示有機材質文物之適用性探討

■ 張琳

在節能的趨勢下，LED 照明科技正是方興未艾的綠能產業，逐漸取代傳統燈具。值此照明產業變革的轉捩點，博物館與美術館該如何選擇適宜的 LED 燈，方能兼顧展示美學及文物保存呢？

前言

相較於無機材質文物之於環境變異的耐受度，有機材質文物易受溫溼度、有害氣體、有害生物、光線等劣化因子影響，更顯脆弱。典藏於博物館的文物或可藉由相關的保存方式，避免文物劣化，如：展場或展櫃微環境溫溼度控制，避免溫溼度劇烈震盪起伏影響文物的物、化性質改變，甚至生物性的滋襲；空調過濾、活性碳吸附、用材釋酸性檢測，以防範有害氣體侵襲；檢疫、防堵、隔絕等預防措施，以避免有害生物入侵展存環境，加熱、冷凍、低氧等物理方法及各式化學藥劑防治法等防除手段，以避免有害生物入侵、破壞。

但若就文物照明而言，一旦有機材質如：書畫、織品、漆器等文物被展示出來，接受自然光或各種人造光源的光能是無可避免，無紫外線的燈源是最基本的文物保存基本要求；然而，即使已排除紫外線的可見光照明，日積月累地光照仍會產生光化學反應，導致顏料及染料產生色變，紙絹黃化、漆器脆化，動物膠變性等劣化現象，且實為不可逆的傷害。本文旨在探討在節能的趨勢下，傳統燈具逐步被 LED

表一 17 種 LED 樣燈之發光特性 ☺ ☹ ☹

編號 #	燈源	CCT (K)	<500nm (%)	CRI	
	建議值		<15 ☺ 16 ~ 20 ☹ >21 ☹	> 90	
1	LED-A1	3988	19.13 ☹	95.4	
2	LED-A2	3815	19.00 ☹	96.34	
3	LED-B1	3944	19.97 ☹	93.04	
4	LED-B2	3947	19.47 ☹	93.37	
5	LED-C	4251	20.87 ☹	98.24 ¹	
6	LED-D	4102	22.56 ☹	96.82	
7	LED-D-T5	3834	19.33 ☹	94.72	
8	LED-D-3800	3810	19.13 ☹	93.37	
9	LED-D-3500	3559	17.3 ☹	94.47	
10	LED-E-COB	3892	17.34 ☹	88.93	
11	LED-E-BL	3797	18.49 ☹	91.24	
12	LED-F	3984	16.73 ☹	95.37	
13	LED-F-spot	4050	17.84 ☹	95.43	
14	LED-F-litebar	3980	19.74 ☹	97.69 ³	
15	LED-G-litebar	3788	14.65 ☺	93.87	
16	LED-G	3848	15.01 ☺	97.01	
17	LED-H-3000	3091	11.30 ☺	97.94 ²	

註：上標紅色數字係評比較優者

燈取代，肩負典藏、研究、展示、教育使命的博物館，如何兼顧文物保存及展示美學，為文物選擇適宜的燈源。

白光 LED 的發光原理與發光特性比較

一、LED 燈產生白光的方式¹

1. 藍光 LED 激發其互補色的黃色螢光粉，是目前市面上的主流產品。缺點有：(1) 藍光佔比高，不利有機材質文物之保存；(2) 因為藍光發光二極體發光波長會隨溫度提升而改變，進而造成白光顏色控

制不易；(3) 因發光紅色光譜較弱，造成低 R9 值，² 演色性不佳的現象。

2. 利用紅、綠、藍三種發光二極體調整其個別亮度來達到白光，具有高發光效率、高演色性優點，但同時也因不同顏色晶粒磊晶材料不同，因此使得成本偏高、控制線路設計複雜且混光不易。或者只用紅、綠或藍、黃兩顆互補色的 LED 調整其個別亮度來發出白光，這樣的白光結構最大的缺點就是造價較高，不利於商品化發展。

作者製表

	R9 (飽和紅)	R11 (飽和綠)	R12 (飽和藍)	CQS	Rf (保真度) (值大為佳)	Rg (飽和度) > 100 😊 < 100	Duv -0.003 ~ +0.003 偏粉紅~偏綠色調	CRI+ CQS+ (Rf+Rg)
	> 90	> 90	> 90	> 90	0~100 (值大為佳)	> 100 😊 < 100	-0.003 ~ +0.003 偏粉紅~偏綠色調	
	77.51	95.87	77.21	95.11	86.01	100.99 😊	0.0011 ²	377.51
	86.99	97.65	73.68	92.84	90.69	98.38	0.0029	378.25
	76.38	84.86	92.04	95.44	94.57	105.59 😊 ¹	0.0082	388.64
	76.87	85.2	93.46	96.31	94.71	105.27 😊 ²	0.0058	389.66
	93.44 ²	98.26 ¹	95.24 ³	96.09	96.21 ³	99.39	0.0064	389.93 ³
	88.81	93.72	95.65 ²	98.2 ²	97.61 ²	101.37 😊	0.0016 ³	394 ²
	82.23	90.72	91.23	97.39 ³	95.32	101.40 😊 ³	0.0023	388.83
	93.44 ²	93.17	87.83	91.98	90.45	96.64	0.0035	372.44
	82.41	93.35	88.51	95.82	93.77	99.45	0.0009 ¹	383.51
	50.15	89.4	68.05	93.37	90.30	98.07	0.0094	370.67
	52.76	91.43	71.38	91.52	89.98	97.79	0.0024	370.53
	90.06	96.68 ²	74.19	94.47	93.32	98.14	0.0122	381.3
	88.40	96.32	75.65	95.16	93.86	98.68	0.0121	383.13
	94.93 ¹	95.63	97.63 ¹	98.4 ¹	98.1 ¹	101.3 😊	0.0028	395.49 ¹
	80.44	94.62	73.92	92.71	91.22	95.31	0.0147	373.11
	86.68	95.54	78.56	95.02	94.34	99.36	0.0115	385.73
	91.9	96.61 ³	84.99	95.64	94.99	99.46	0.0059	388.03

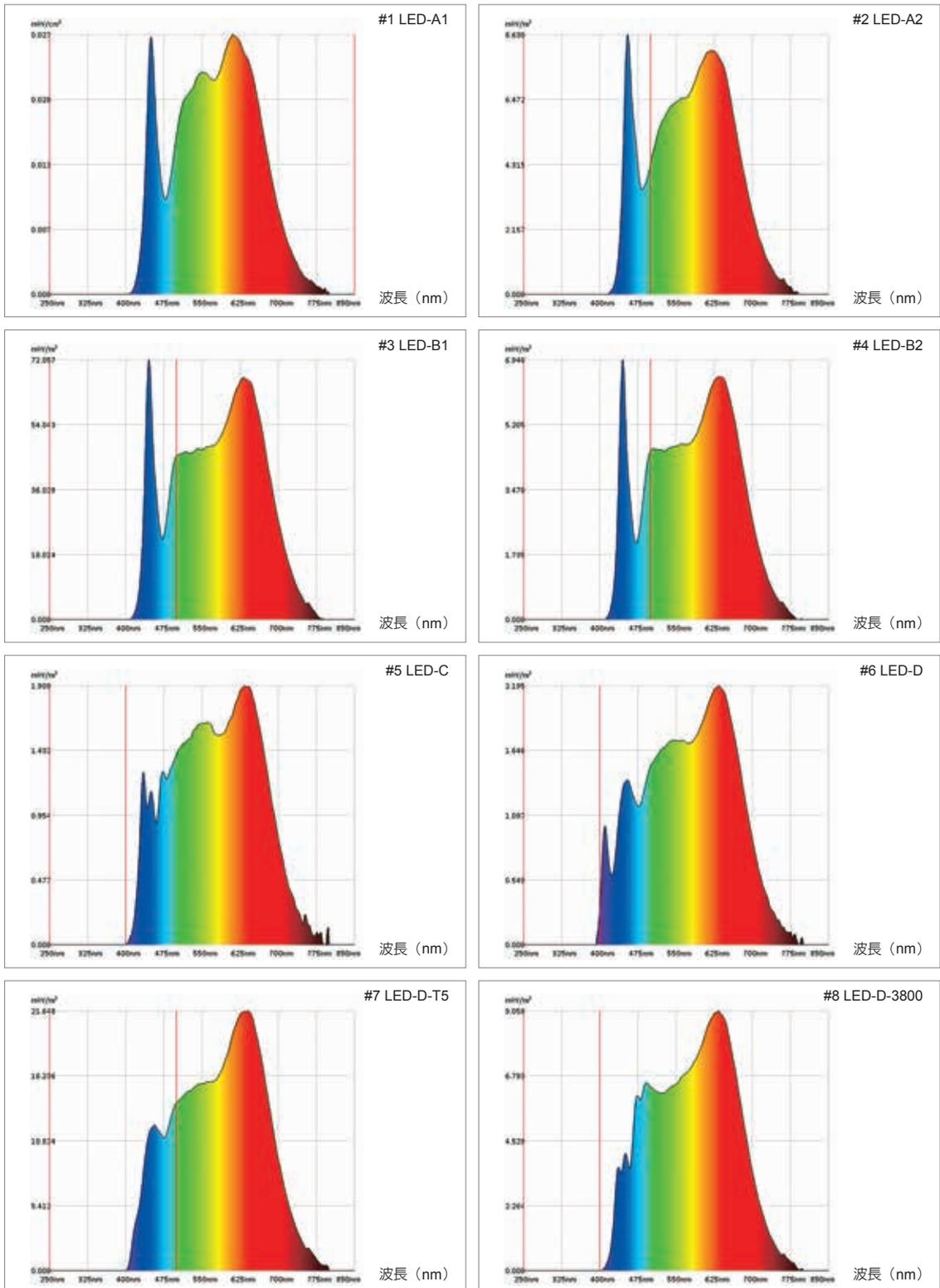


圖 1-1 17 種 LED 燈源之光譜圖 (由左至右, 再上而下: 表一 #1 ~ #8) 。 作者量測

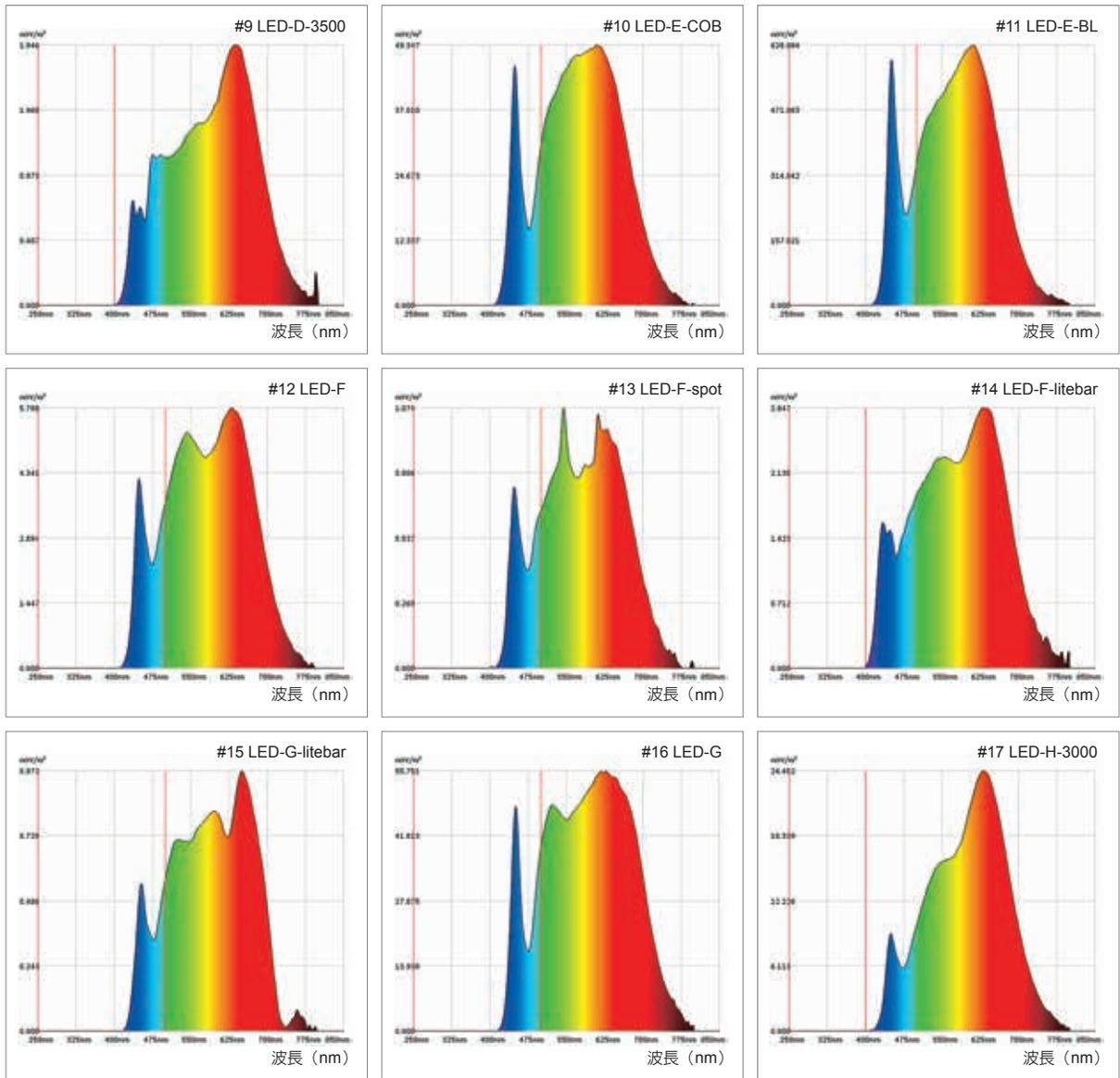


圖 1-2 17 種 LED 燈源之光譜圖（由左至右，再上而下：表一 #9 ~ #17）。 作者量測

3. 用紫外光 LED 激發紅、藍、綠三原色的螢光粉，三波長白光 LED 具有高演色性優點，但卻有發光效率不高的缺點；且須將紫外光阻絕於白光 LED 結構內，否則紫外光不僅對人眼的傷害大，亦不利有機材質文物之保存。

二、各種白光 LED 的發光特性比較

試將 17 種白光 LED 樣燈之發光特性列表一及其光譜圖於圖 1。由表一顯示：無論是 1965 年國際照明委員會（International Commission on Illumination，一般採法文縮寫 CIE）以 8 種柔調的顏樣制定的演色性（color rendering index,

CRI)、2006年美國國家標準暨技術研究院(National Institute of Standards and Technology, NIST)以15種標準色樣制定的顏色質量量表(color quality scale, CQS),或2015年美國照明工程協會(Illuminating Engineering Society, IES)以99個標準色樣制定的TMS-30-15,由雙指標Rf(Color Fidelity)、Rg(Color Gamut)評量色彩保真及飽和性等國際通用的演色指標,³都顯示色溫4000K左右的LED的演色性大於90的可及性大多沒問題。但若細究R9(飽和紅)、R12(飽和藍),則差異性頗大,當光譜中存在紫光,與R12(飽和藍)呈現正相關。惟,短波長高能量的紫光對於有機材質的危害性不容小覷,用於有機材質文物照明須謹慎評估;但或可適用於青、藍、多彩的銅器、瓷器及琺瑯等無機材質文物之照明。

各種燈源的演色效果

比較石英鹵素燈、複金屬燈、博物館用螢光燈等傳統燈具與LED的演色效果(如表二),由圖2各種燈源的光譜圖顯示LED燈已漸漸趨向全光譜,但卻缺乏可見光光譜中最短波長的紫光,因此對飽和紫幾乎難以正確地顯色。⁴從圖2的光譜圖亦窺見缺乏紫色波段的LED燈,其飽和藍的表現顯著較全光譜的傳統燈具低,這也就可以理解為何汝窯在LED燈的照射之下,無法如在螢光燈下顯現雨過天青的純淨透徹的視覺效果,但若選擇如表一R12值大於95的#5、#6、#14燈源,或可達到較佳的顯色效果。就多彩的書畫而言,若能選擇R1~R15值大於90、甚至大於95,是顯色性更優的LED光源。

表二 各種燈源、色溫及調光比之發光特性

編號 #	燈源/建議值	CCT (K)	CRI	<500nm (%) ^註	R9 (飽和紅)	R11 (飽和綠)	R12 (飽和藍)	
			> 90	< 15 😊 16 ~ 20 😐 > 21 😞	> 90	>90	> 90	
1	石英鹵素燈	2702	97.97 ¹	6.9 😊	88.65	98.12 ³	97.62 ¹	
2	光纖—複金屬	3962	91.42	24.23 😞	44.75	92.52	87.26	
3	博物館用螢光燈	4239	97.55 ³	22.46 😞	94.24 ²	98.51 ¹	93.87 ³	
4	博物館螢光燈 100%+LED 投射燈 5%	4478	97.86 ²	22.86 😞	96.35 ¹	98.09	96.77 ²	
5	LED 可變色調燈 60%+LED 投射燈 5%	4474	95.93	22.7 😞	91.89 ³	98.16 ²	64.61	
6	LED 可變色溫條燈	4434	96.29	21.55 😞	89.98	97.46	65.91	
7	LED 可變色溫條燈	5999	94.81	29.53 😞	84.66	95.42	60.54	

註：< 500nm 之數據僅供有機材質文物參考

LED 燈用於有機材質文物的適宜性

LED 燈是新型的照明科技，逐步成為當今照明產業的主流。如上所言，用藍光激發黃色螢光粉，是目前 LED 照明產業之主流，由於光譜的雙峰結構（如表一 #10、#11 即是典型的藍光激發黃色螢光粉的 LED 光譜圖之雙峰結構），使得在色彩的演色效果相較於全光譜的螢光燈、複金屬燈略顯不足，特別是多彩的書畫、織品等文物更顯相形失色；再者，不論是採藍光激發黃光或紫外線、短波紫外光激發三原色螢光粉產生的白光，在可見光中屬於短波、高能量的藍、紫光比例亦隨著色溫升高而增加，使得原本就對光相對敏感的書畫及織品，尤其是顯現黃、紅色的有機顏料、染料，及年久泛褐的千年古書畫，在日積月累地接受高能量的藍光照射下，將倍受質變、色變的威脅，故尤

須慎選適宜的燈源！

有鑑於此，加拿大文物保存中心（Canadian Conservation Institute, CCI）建議選用 LED 的原則之一：在同一展廳用相同的色溫，選擇 3000K 的色溫會是一個皆大歡喜、較令人覺得舒適的選擇！⁵事實上，由表二各種色溫的 LED 各項演色指數顯示，低色溫者並不遜於高色溫者，且色溫越低，其波長小於 500nm 藍光比越低，更有利於有機材質的保存！

倘若策展人仍是偏好高色溫，那就得慎選高品質的白光 LED 燈，如：演色性高於 90，包括 CRI、CQS、TM-30-15 評量色彩保真度（Rf 值）及飽和度（Rg 值），及顯示紅、綠、藍三原色飽和性的 R9、R11、R12 高於 90，以及由 Duv⁶ 值判斷白光是否偏粉紅或偏綠等特性多元評估，選擇展示各類文物最適合的 LED 燈。⁷如表一各種 LED 的發光特性各有特色，除了檢視光譜，若將上述三專業組織所制定的演色指數加總比較，或可客觀地選擇到演色效果較佳的 LED 燈源。

作者製表

	CQS	Duv	Rf (保真度)	Rg (飽和度)
	> 90	-0.003 ~ +0.003 (偏粉紅~偏綠色調)	0~100 (值大為佳)	>100 😊 <100 😞
	95.85 ³	0.0016 ²	50.49	152.00 😊 ¹
	91.59	0.0012 ¹	92.79 ²	98.46 😞
	97.60 ¹	0.0042	87.53	100.88 😊 ²
	96.43 ²	0.0032	94.93 ¹	98.85 😞 ³
	93.42	0.002 ³	88.95	97.97 😞
	94.6	0.0047	89.91 ³	97.87 😞
	92.81	0.0092	88.33	96.69 😞

結語

若單就各種燈呈現色彩的特性，傳統燈具較 LED 燈更能真實呈現文物的色彩。可惜傳統燈具在現代節能的趨勢下面臨停產的問題。此外，高色溫的 LED 就真的比較清晰、真實嗎？對人眼而言，最敏感的波長為 555nm，屬於綠光的波段；以圖 2 #6、#7 為例，#7 近 6000K 較 #6 約 4500K 的綠光波峰比還低，且 #7 的幾種演色指數都不如 #6，如此的效果應是策展人不樂見的。

在 LED 晶片研發及封裝技術逐年進步之下，白光 LED 波長小於 500nm 以下的藍光比逐漸降低，甚至較同樣發出白光的螢光燈、複金屬燈來得低，就文物保存的角度而言是正向的！

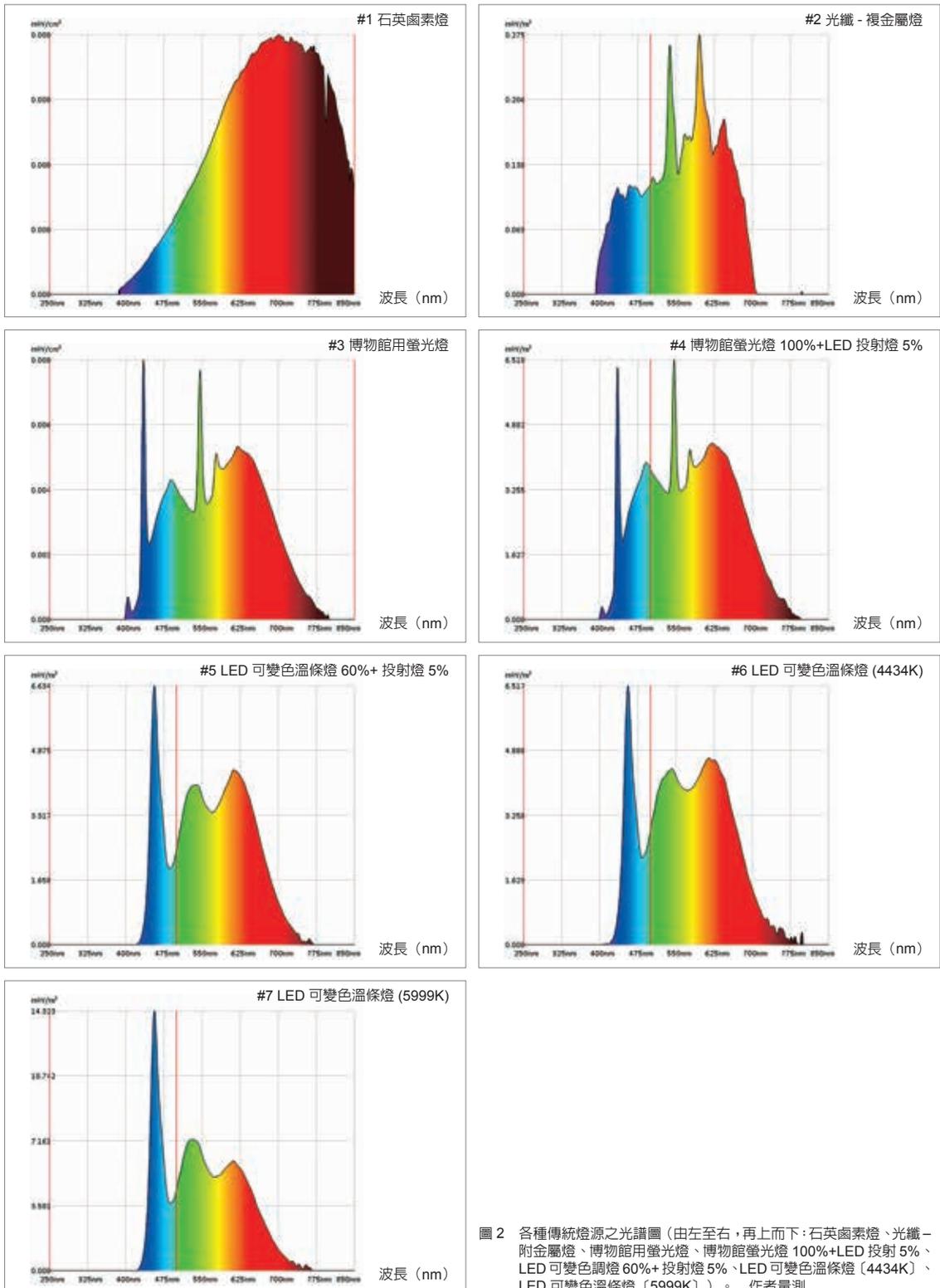


圖 2 各種傳統燈源之光譜圖 (由左至右, 再上而下: 石英鹵素燈、光纖-附金屬燈、博物館用螢光燈、博物館螢光燈 100%+LED 投射燈 5%、LED 可變色調燈 60%+ 投射燈 5%、LED 可變色溫條燈 [4434K]、LED 可變色溫條燈 [5999K])。作者量測

惟，只要是光都是能量，會破壞文物本身材質或造成染料、顏料褪色、變色；而白光 LED 主要由藍光激發黃色螢光粉或紅綠藍混光者，在藍光、綠光、紅光的波段，都有寬廣的主要波峰，對文物而言，其吸收光譜就有特定波段，易造成互補色的染料或顏料質變。因此，除了檢視 LED 燈光譜各波段比例勻稱度以避免特別突出的波長被特定顏色吸收造成質變之外，若能以接近全光譜的白光 LED 燈，或選擇可調色溫之燈具、或以調整光色溫的降溫、升溫片，

使有機材質文物主色調特定敏感波段之吸收光譜降低，或許也是可行的權宜之計。

多彩的有機材質，如：書畫、織品等文物而言，如何顯現真實色彩，照明燈具扮演了相當重要的角色。雖然文物保存與展示之間一直存在著衝突，若以多元評估演色指標，再加以文物保存的角度提出相關參考因子及建議值，或許有助於 LED 業者精進研發展示效果與文物保存得能兼容並蓄的理想燈具——這是我們的期待。

作者任職於本院登錄保存處

註釋：

1. Lucychang, 〈簡述 LED 發光原理〉, 《LEDinside》2007 年 10 月 1 日 <https://www.ledinside.com.tw/knowledge/20071001-894.html> (檢索日期: 2023 年 6 月 17 日); 蘇忠傑, 〈白光 LED 封裝技術〉, 《國立臺灣科技大學電資學院官方網站·科技新知》<https://www.ceecs.ntust.edu.tw/p/412-1001-129.php?Lang=zh-tw> (檢索日期: 2023 年 6 月 17 日)。
 2. Ri 值表示特定顏色的真實顯色的指數, i (0 ~ 15) 代表 CRI 演色指數所採之 15 個試驗色, Ri 值 0 ~ 100, 越高代表真實性越佳。R9、R11、R12 分別代表飽和紅、飽和綠、飽和藍。
 3. 張琳, 〈博物館常用照明對文物危害潛勢探討〉, 《文化資產保存學刊》, 58 期 (2021.12), 頁 89-99。
 4. C. A. Bolin & M. W. Ballard, "Assessing LED lights for visual changes in textile colors," *JAIC* 56, no.1 (2017): 3-14.
 5. S. Michalski & J. Druzik, "LED Lighting in Museums and Art Galleries," *Canadian Conservation Institute Technical Bulletin* 36, 2020, accessed June 11, 2021, <https://www.canada.ca/en/conservation-institute/services/conservation-preservation-publications/technical-bulletins/led-lighting-museums.html>
 6. Duv: CIE 制訂一個色彩標準 $U^*V^*W^*$, 是一個在色度平面 (UV) 及亮度軸 (W) 所構成的三維空間。 $\Delta u, v$ 是在 UV 色度平面與理想白光的偏差值, 負值是偏粉紅色調, 正值則是偏綠色調。
 7. 張琳, 〈發光二極體燈做為文物展示照明之可行性探討〉, 《文化資產保存學刊》, 13 期 (2010.9), 頁 75-78。
-