

【實務論壇】

博物館常用照明對文物危害潛勢探討

Studies on the Potential Damage of General Lighting in Museums to Cultural Property

張琳 Chang, Linⁱ

■ 摘要

博物館的展示照明除了能讓文物達到展示教育的功能，優質的燈光更能呈現文物之真實色彩，並兼顧文物保存。隨著科技進步帶動照明產業，由傳統螢光燈到光纖系統，乃至於現今號稱節能、使用壽命長的固態照明之一的發光二極體（LED）燈逐步消長。本文將探討各種文物照明之品質，並就文物保存的觀點，檢視近年來世界各國文物保存研究團隊對各種博物館常用人工光源對各類文物的變色效應之研究，並探討幾種博物館常用的人工光源對文物的破壞潛能。

關鍵詞：文物保存、文物照明、發光二極體燈

ⁱ 國立故宮博物院登錄保存處研究員（通訊作者 / linchang@npm.gov.tw）

■ Abstract

Lighting at museum is not only related to education of cultural property, but also includes conservation with actual appearance under high-end lighting. With the progress of technology, lighting is become a declining industry, from traditional fluorescent lamps to optical fiber system, and further to light-emitting diode (LED) lamps, which is one of the energy-saving and long-lifespan solid-state lighting. From the perspective of cultural property conservation, this study is going to discuss the quality of various lighting, to review recent researches on the discoloration influence of general artificial lighting at museum by worldwide research teams. Meanwhile, it is also explored the cultural property potential damage by different artificial lighting sources commonly used at museum.

Keywords: Conservation, Lighting, LED Lamp

ⁱ Researcher, National Palace Museum (Corresponding Author / linchang@npm.gov.tw)
Received Date: 2021/8/27; Accepted Date: 2022/2/7

一、前言

無論是自然光或人造光源，光總是文物劣化的重要因子，是為預防性文物保存的重要課題之一。尤其現今地球暖化現象日益嚴重，低耗能的 LED 燈十餘年來成為照明產業的主要趨勢，廣大的市場需求，促使各種型式固態照明（Solid-state Lighting, SSL）研發問市，以取代高耗能的傳統燈具。早期 LED 燈製造、封裝材料與技術造成散熱不良，進而影響使用壽命不如理想，以及演色性不佳等疑慮（張琳，2010），特別是對飽和紫色幾乎難以正確地顯色（Bolin & Ballard, 2017）。我國標準檢驗局參照國際電工委員會（IEC）所公布之國際標準，於 2002 年 11 月 15 日公布制定的 6 個國家標準，旨在提升產品品質及該產業之國際競爭力，其中 CNS15592（IEC62471）「光源及光源系統之光生物安全性」為 LED 光源與燈具之光生物安全評估標準，針對紅外線（IR）、紫外線（UV）及藍光對人體之眼睛及皮膚等部位所可能造成之危害程度，提供檢測與評估之依據，保障民眾健康（呂旻翰、陳文松，2014）。因此，高色溫的白光 LED 燈，具較強能量的藍光比例偏高，可能造成人及文物傷害之虞，宜審慎評估（張琳，2014）。

筆者亦針對藍光危害與熱危害，比較常用的 4 種文物照明燈源的破壞力為：LED 燈 > 博物館專用螢光燈 > 光纖照明系統複金屬燈 > 光纖照明系統石英鹵素燈（張琳，2014）。近年隨著 LED 燈產業

蓬勃發展，競爭者眾，品質良莠不齊（行政院消費者保護會，2020）；¹然而就在博物館及美術館順應潮流，逐步引進 LED 燈做為展示用燈之際，文物保存學者開始研究各種文物照明的利弊，期能在未臻成熟的照明產品，制定對文物傷害較低的準則。本文試就近年世界各國針對文物保存多個不同研究面向，比較包含傳統燈具及 LED 燈等常用的文物照明之品質與性能，俾供文物保存者或策展人評估、選擇展示燈具參考。

二、文物照明品質

由於 LED 燈並非全光譜的照明，且研發日新月異、產品參差不齊，為兼顧參觀者感受、文物保存及展示效果，下列特性可供評估 LED 燈作為文物照明的品質：

（一）演色性

國際照明委員會（International Commission on Illumination, 一般採法文縮寫 CIE）1965 年制定演色性（color rendering index, CRI）使用 8 種不飽和的顏色色樣為全光譜之傳統照明如螢光燈與自然光之間得演色性量測標準，博物館用燈 CRI 以大於 90 為佳。然而，面對非全光譜的 LED 燈，為改善 CRI 顏色飽和度與色樣不足的問題，美國國家標準暨技術研究院（National Institute of Standards and Technology, NIST）建議改以飽和度較高的 15 種標準色樣，做為評定光源品質的參數的顏色質量量表（color quality scale, CQS）（Davis & Ohno, 2006）。又，美國

¹ 依據 2020 年 6 月 9 日行政院消費者保護處公布市售 LED 燈泡抽樣檢測結果，品質項目（其中包括「光束維持率」（即壽命））不合格率高達 31%。

照明工程學會 (Illuminating Engineering Society, IES) 2015 年制定 TMS-30-15，跳脫孟塞爾顏色系統 (Munsell color system) 取樣，而是從生活中常見的 105,000 種、7 類物體選取飽和到～不飽和、亮～暗的 99 個標準色，並提供介於 4500～5500K 與待測光源色溫相同的參考光源，² 雙指標評量色彩保真度 (Color Fidelity, Rf; Rf 值 0-100，越接近 100 保真度越高) 及色彩飽和度 (Color Gamut, Rg; 當 Rf > 60, Rg 指數範圍為 60～140，測試光源的色彩飽和度未改變 Rg 質為 100，> 100 代表飽和度提高，< 100 代表飽和度降低)，同時還提供色彩向量圖 (color vector graphic) 提供各種顏色的色差及飽和度的改變的直觀資訊。

(二) 頻閃與色偏

美國西北太平洋國家實驗室 (Pacific Northwest National Laboratory, PNNL) 調查 25 項市售白熾燈、複金屬燈、電子安定器螢光燈、電磁安定器螢光燈、固態照明產品的頻閃問題 (圖 1)，從左下角至右上角頻閃愈趨嚴重；白熾燈、複金屬燈、螢光燈這三種傳統照明產品中，以螢光燈的頻閃普遍較嚴重，尤其部分電磁安定器的螢光燈與部分 LED 燈產品頻閃同樣較為嚴重 (右上角箭頭所示)；但如左下角箭頭所示的三個 LED 燈樣本優於傳統燈，幾乎沒有頻閃。顯示 LED 燈產品品質差異極大，應慎選之，以避免引起頭痛、容易疲勞、視力模糊、視力減弱，引發特定病症者癩

癩……等人體不適狀況。我國經濟部能源局針對室內照明燈具閃爍，須依據 CIE TN 006:2016 試驗條件使用係數檢測。

目前 LED 燈的調光機制除了脈衝寬度調變 (pulse width modulation, PWM)，可能造成頻閃 (張琳，2010)，還有恆電流降低 (constant current reduction, CCR)，電流一旦降太低，可能會造成色偏 (Michalski & Druzik, 2020)。可調光的 LED 燈量測時須符合 CIE TN006: 2016 之試驗要求：閃爍指數 (Flicker Index, FI) ≤ 0.02 、閃爍百分比 (Percent Flicker, PF) ≤ 2 ；最大輸出光為 20% 時，須符合 FI ≤ 0.05 、PF ≤ 5 。

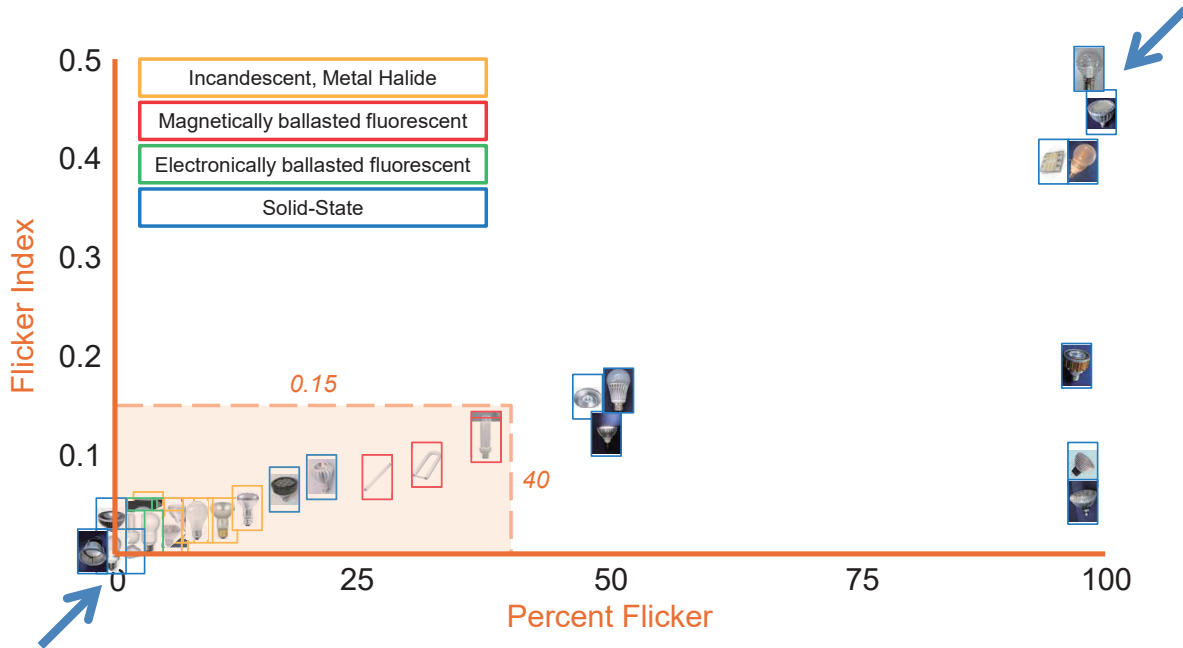
(三) 眩光指數及色容差

選擇適當燈具類型、加裝如光學透鏡、格柵等附件，解決不舒適眩光指數 (discomfort glare index, CGI)。1995 年國際照委員會 (CIE) 發布新的眩光評量系統「統一眩光指數」(unified glare rating, UGR)，UGR 數值高代表具有顯著令人不適的眩光，而數值低於 10 的照明系統則不會產生不舒適感 (經濟部，1998)。我國經濟部能源局針對室內照明燈具統一眩光指數 (Unified Glare Rating, UGR) 測試條件及方法應符合 CIE 117 試驗，品質要求統一眩光指數實測值應 ≤ 19.0 、演色性實測值應 ≥ 80.0 ，且不得低於標示值減 3 (Davis & Ohno, 2006)。此外，色容差 (Standard Deviation Colour Matching, SDCM)³ 也可做為評估 LED 燈品質的參數之一 (翁誌勵，2015)。

² CRI 所使用的參考光源低於 5000K 時使用黑體輻射，高於 5000K 時使用自然光模型，存在 5000K 的突變問題，因此 TMS-30-15 在 4500K-5500K 的範圍內使用了黑體輻射與自然光模型混合的光譜作為參考光源，補正 5000K 反射光譜。

Frame of Reference for All Products

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY | Energy Efficiency & Renewable Energy



SSL products can be in the same range as conventional products, but can also be wildly different

14

圖 1. 美國西北太平洋國家實驗室調查 25 項市售白熾燈、複金屬燈、電磁安定器螢光燈、電子安定器螢光燈、固態照明產品的頻閃結果

Fig 1. The percent flicker and flicker index of 25 commercially lighting products investigated by PNNL .

資料來源：引自 *SSL Flicker Fundamentals and Why We Care*, N. J. Miller, F. FIES, & M. Poplawski, 2014 (https://www1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/miller_poplawski_flicker_lightfair2014.pdf)

(四) 其他

選擇良好的封裝技術以解決發熱問題，以免造成櫃內增溫影響相對濕度。此外，LED 燈具光生物安全須符合 CNS15592 及 IEC/TR62778 無風險等級。另博物館若

為提供高效率的照明解決方案，藉由感測器收集資料、共享大數據分析，引進智慧照明控制系統之燈具及智慧照明控制系統須保固五年以上（經濟部，2020）。

³ 色容差是判定色彩的偏移變化，5 個「麥克亞當橢圓（MacAdam Ellipse）」越接近中心值越小，表示偏移越小。5 以上的色容差值其色偏就顯而易見了。

三、博物館常用人工光源導致變色效應之近年研究

文物受光劣化的因素有：（一）受光體文物本身若為有機材質對光敏感性高，易受光能量破壞，如織品、書畫、漆器等；（二）光源的傷害性，如：長波長紅外線的熱效應及短波長紫外線的高能量；（三）照光的時間長短，由於文物受光的傷害是不可逆的，因此必須嚴控年累積照度；（四）檢測光源的光譜能量分布（Spectrum Power Distribution, SPD）及各種文物色彩吸收、反射光譜，可供解析破壞函數（damage function）及作用光譜（action spectra）（Rosenfeld, 2017; 徐方圓等人，2016; 張琳，2021）。針對上述劣化因素，茲整理近年世界各國研究團隊研究博物館常用人工光源的質與量，並探討其對各類文物材質及各種顏料、染料的顏色變化之影響。

義大利 Piccablotto (2015) 以色溫暖白（warm white）、中性白（neutral white）、冷白（cool white）LED 燈及未濾除紫外線的石英鹵素燈（WW-MR）（LED 的 UVA 均低於 $0.6\mu\text{W}/\text{lm}$ ，但 WW-MR 高於 $30\mu\text{W}/$

lm ），連續照射藍色羊毛標準片（ISO Blue Wool Standard, BWS）1, 2, 3 及染有紅、黃、藍、紫等 8 種染料的絲質樣本，經過超過九個月總曝光量為 $64.9 \text{ Mlx}\cdot\text{h}$ 後，比較各種樣本褪色效應（圖 1）；結果若以 CIE 量測標準，越高色溫的 LED 燈危害潛能越大；但若以輻射測量分析（radiometric analyses），高色溫 LED 燈破壞性並不會比含紫外線的傳統燈具（石英鹵素燈）高，意即 LED 燈的危害潛勢不總是與色溫直接相關。另，BWS 在最高色溫 LED 燈，反而比低色溫石英鹵素燈褪色更慢；LED 燈或可以色溫初步預測材質降解，但若以經 LED 燈照射後 BWS 的色差值（ ΔE ）評估褪色效應，卻是與 LED 燈的色溫呈反比（表 1）（Piccablotto et al., 2015）；這與 Miller 與 Druzik (2012) 研究結果相符，推測係吸收光譜因素；因 BWS 的藍色試片原本就吸收黃光、反射藍光，因此對 3000K 偏黃的色光，特別是全光譜比值較高的鹵素燈，吸收量相對高，故產生較快的褪色效應（張琳，2014）。因此，在光劣化檢測標準中，BWS 是否為現今盛行的 LED 燈最佳光劑量指標（light dosimeter）是有待商榷的（Piccablotto et al., 2015）。

表 1. 各種光源照射導致 ISO BWS 1、2 明顯褪色 ($\Delta E^*_{ab} = 1$) 的光劑量閾值

Tab 1. Threshold light dose causing just noticeable fade ($\Delta E^*_{ab} = 1$) on BWS ISO 1 and ISO2 grade.

光源	色溫 (K)	造成明顯褪色的照光量 ($\text{lx}\cdot\text{h}$)	
		ISO BWS-1	ISO BWS-2
WW-LED1	2580	~ 11,000	~ 50,000
WW-LED2	2853	~ 12,000	~ 55,000
WW-LED3	3371	~ 17,000	~ 80,000
NW-LED	3892	~ 14,000	~ 70,000
CW-LED	6985	~ 27,000	~ 130,000
WW-MR	3032	~ 8,000	~ 45,000

資料來源：Piccablotto et al. (2015).

德國 Farke 等人 (2016) 以螢光燈、鹵素燈、低壓複金屬燈及 LED 燈等 4 種光源照射塗有紅、橙、黃、紫、藍等 6 種天然染料的絲、棉、毛織品，雲杉試片上塗有蠟、亞麻子油、蟲膠，以及羊皮紙、檔案紙板、紙張等試樣，結果在照光初期很快就有肉眼無法辨識的變色效應。水彩的變色差異大，如藤黃在 3,120 小時照光後，變色 48 CIELAB 色差單位，相對地，赭土在照射 6,000 小時後僅變色 2 CIELAB 色差單位；除了藤黃照光極易變色，另洋紅、茜草紅、茜草紫紅都是對光極敏感的；當同時進行化學檢測，也顯示反射率與物質降解的明確關係。紙質樣品於鹵素燈下變色較小，各種材料變色效應取決於光源，螢光燈對光敏感材質引起的變色效應較其他光源尤甚，但另三種光源並無顯著差異，此結果顯示長久以來慣用的螢光燈亦須審慎評估對於文物是否安全 (Farke et al., 2016)。

徐方圓等人 (2016) 同樣就博物館常用照明螢光燈、鹵素燈及 LED 燈光源對白坯及包含黃、橙黃、紅、深紅及靛藍等 7 種植物染料絲綢的反射光譜研究，結果顯示：3 種光源以鹵素燈對各種染料的褪色效應最小，但因染料不同，引發褪色敏感的波段各異，如：對蘇木的褪色效應為鹵素燈 \approx 去藍光 LED 燈 (色溫 3079K，演色性 CRI=28) $<$ 3000K LED $<$ 4000K LED，對黃蘗褪色效應則去藍光 LED 燈 $<$ 鹵素燈 $<$ 3000K LED $<$ 4000K LED，但對其他

染料則未必能減緩褪色速率。在相同照度下，傳統的鹵素燈、螢光燈對蘇木染色絲綢的褪色效應小於 LED 燈，又同類型的燈具中，較低色溫者變色效應較小 (徐方圓等人, 2017)。

德國 Villmann 與 Weickhardt (2017) 認為電磁輻射光化效率取決於波長，故選定 8 個 400 ~ 660nm 特定波長的 LED 燈，照射塗佈在聚氯乙烯板混有黏合劑的 40 種染料與顏料，由各種色樣的反射光譜及顏色變化評估各光譜分量估計各種光源的破壞力。初步歸納結論為只要是輻射能被吸收，其隨著波長越短，破壞潛力越大；接受光照輻射量越多，最易引起漂白，尤其是含有多種化學物質的有機染料。然而，實驗中所選用於中世紀書籍的染料或顏料，受輻射破壞的過程相當複雜，甚至和 BWS 對應比較，尚無法總結出可以解釋各種色樣改變的簡單模式；但從各種特定波長照射色樣產生的反射率透過數學算式疊加，有助於估算多色光源的輻照度，可能導致變色的潛力 (Villmann et al., 2019)。

Michalski 與 Druzik (2020) 提出篩選優良的文物照明用 LED 燈的基本原則：除了選擇符合節能標章的產品，CRI \geq 90，R9 \geq 90，⁴Duv-0.003 ~ +0.003，⁵在同一的展示空間的 LED 燈能選擇相同色溫者，建議 3000K 是較能符合所有目的的好選擇。

⁴ CIE 制定第 9 個色樣 (紅色) 的演色性。

⁵ 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。

四、常用人工光源對文物的破壞潛能評估

為了解人工光源的各種發光特性，茲以國立故宮博物院近年使用的文物照明種類，以量測波長 250nm ~ 850nm 之光譜儀（SRI 2000-UV，尚澤光電，臺灣新竹）量測各種光源的色溫、演色性、500nm 以下比例，及演算藍光危害與熱危害加權函數乘積和（表 2）。

6 種光源的相對破壞力，由藍光危害與熱危害之加權函數的乘積和比較結果為：LED(4000K) > 博物館專用螢光燈 > 光纖系統（複金屬燈）> LED(3000K)-L > 光纖系統（石英鹵素燈）> LED(3000L)-S；另，由 < 500nm 比例比較結果為：博物館專用螢光燈 > 光纖系統（複金屬燈）> 光纖系統（石英鹵素燈）> LED(4000K) > LED(3000K)-L > LED(3000K)-S。綜觀上述兩種評估 6 種光源的相對破壞力，博物館專用螢光燈的光譜與 4000K 的 LED 燈相當，甚至較優質的 3000K 之 LED 燈高出甚多；此或可呼應上述德國 Farke 等人

（2016）提出螢光燈較其他光源引起變色尤甚的論點。

總之，若就具高能量 < 500nm 比例及藍光與熱危害等可能破壞文物的潛勢而言，較低色溫的石英鹵素燈光纖系統及 3000K 的 LED 燈或許較其他種類的人工光源相對來得安全。

五、結論與討論

螢光燈可見光譜趨近日光，演色性佳，然而發光效率較低、較為耗電，再加上頻閃問題，與現今節能趨勢相違，勢將逐漸被淘汰，故博物館或美術館應及早因應，選擇更優化的替代燈具。

固態照明之一的 LED 燈，是符合環保、節能的選項之一，然而，若博物館用在對光耐受性極低的有機材質文物，一旦使用調光器（dimmer）降低照度，仍有頻閃、色偏等品質優劣的問題；又，由於大部分白光 LED 燈由藍光激發黃色螢光粉產生白光的特殊發光原理，可能與全光譜光源的褪色機制迥異；近年或有

表 2. 國立故宮博物院近年使用的文物照明種類，以光譜儀量測各種光源的色溫、演色性、500nm 以下藍光比例及藍光危害與熱危害乘積和。

Tab 2. The CCT, CRI, the blue wave band ratio in the LED spectrum less than 500nm, and the product of blue light hazard and thermal hazard of various light sources used in the National Palace Museum in recent years.

光源種類	型式	色溫 (K)	演色性 (CRI)	< 500nm 比例 (%)	$\Sigma RI(B(\lambda) + R(\lambda))$ 註
博物館專用螢光燈	T8	4396.5	94.5	22.51	48.8952
複金屬燈	光纖系統	3648	94.9	20.14	40.9892
石英鹵素燈	光纖系統	3479.4	84.2	17.92	31.8042
LED (4000K)	微型軌道燈	3964.7	94.9	17.48	49.3693
LED (3000K)-S	微型軌道燈	3028.1	94.3	11.69	30.5495
LED (3000K)-L	線型燈	2998	92.83	12.53	32.2734

註： $\Sigma RI(B(\lambda) + R(\lambda))$ ：依據 IEC62471: 2006 演算藍光危害與熱危害加權函數乘積和（照度約 50lx）。

資料來源：作者量測、演算。

以 415 ~ 420nm 藍紫光激發多色螢光粉發展出類似太陽光的全光譜 LED 燈，惟仍屬開發階段，產品穩定性、顯色效果及對文物的輻照度，尚待評估。Villmann 與 Weickhardt (2017) 在實驗中所選用於中世紀書籍的染料或顏料，受輻射破壞的複雜過程，與 BWS 對應比較，尚無法總結出可以解釋各種色樣改變的簡單模式，是否正可詮釋 Piccablotto 等人 (2015) 所提 BWS 可否為現今盛行的 LED 燈最佳光劑量 (light dosimeter) 指標之質疑？

為了避免劣質 LED 燈傷害到脆弱的書畫、紙類、織品等有機材質文物，國立

故宮博物院針對文物保存的角度擬具《國立故宮博物院文物展覽保存維護要點》(2016)，其中針對文物照明規範：用於有機材質文物之 LED 燈以低色溫為佳，藍光比例應低於 15%，且波峰亦不高於最高波峰的 1/2 (Miller & Druzik, 2012)，期能以最優化的條件篩選 LED 燈，以避免劣質 LED 燈傷害文物。現今因應世界潮流博物館、美術館對 LED 照明的需求量逐漸增加，希望能加速研發對藝術品傷害性更低的 LED 照明產品，早日能有兼顧文物保存及完美呈現文物真實色彩的高品質 LED 燈面世。

參考文獻

- 行政院消費者保護會 (2020 年 6 月 9 日)。〈公布 LED 燈泡品質檢測及標示查核結果！〉(新聞稿)。2021 年 6 月 12 日檢索自 <https://cpc.ey.gov.tw/Page/6C059838CA9744A8/332f6e8b-798a-4263-b429-58485b3bdd1c>
- 呂旻翰、陳文松 (2014)。《一般室內照明用燈源之光生物安全性分析》。2021 年 6 月 12 日檢索自經濟部標準檢驗局。 <https://www.bsmi.gov.tw/bsmiGIP/wSite/public/Data/fl477637937289.pdf>
- 徐方圓、吳來明、施超歐、賀冰 (2017)。〈博物館照明對蘇木染色絲綢的影響研究〉，《文物保護與考古科學》，29 (1)，8-13。
- 徐方圓、吳來明、徐雪萍、方柳靜、施超歐 (2016)。〈從光譜角度研究博物館照明對染色絲綢的影響〉，《文物保護與考古科學》，28 (1)，24-32。
- 翁誌勵 (2015)。〈博物館選用 LED 光源色溫之探討〉，《文化資產保存學刊》，34，51-65。
- 國立故宮博物院 (2016 年 10 月 7 日)。《國立故宮博物院文物展覽保存維護要點》。
- 張琳 (2010)。〈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》，13，75-78。
- 張琳 (2014)。〈LED 燈應用於文物展示照明之可行性——兼談藍光危害〉，《博物館學季刊》，28 (4)，121-132。
- 張琳 (2021)。〈打開天窗說「亮」話——文物的照明探討〉，《故宮文物月刊》，117，116-121。
- 經濟部能源局 (1998 年 11 月 17 日)。《室內照明燈具節能標章能源效率基準及標示方法》。
- 經濟部能源局 (2020 年 12 月 31 日)。《最適化智慧照明示範推廣補助計畫作業要點》。
- Bolin, C. A., & Ballard, M. W. (2017). Assessing LED lights for visual changes in textile colors. *JAIC*, 56(1), 3-14.
- Davis, W., & Ohno, Y. (2006). Development of a Color Quality Scale. Retrieved July 10, 2020, from <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.568.8399&rep=rep1&type=pdf>
- Farke, M., Binetti, M., & Hahn, O. (2016). Light damage to selected organic materials in display cases: A study of different light sources. *Studies in Conservation*, 61, 83-93. <https://doi.org/10.1179/2047058414Y.0000000148>
- Michalski, S., & Druzik, J. (2020). LED Lighting in Museums and Art Galleries. *Canadian Conservation Institute Technical Bulletin*, 36. Retrieved June 11, 2021, from <https://www.canada.ca/en/conservation-institute/services/conservation-preservation-publications/technical-bulletins/led-lighting-museums.html>
- Miller, N. J., & Druzik, J. R. (2012). Demonstration of LED retrofit lamps at an exhibit of 19th century photography at the Getty Museum. U.S. Department of Energy. Retrieved May 22, 2021,

from <http://www.connectingtocollections.org/wp-content/uploads/2011/08/Getty-Gateway-Demo-Assessment-of-LED-Retrofit-Lamps.pdf>

Piccablotto, G., Aghemo, C., Pellegrino, A., Iacomussi, P., & Radis, M. (2015). Study on conservation aspects using LED technology for museum lighting. *Energy Procedia*, 78, 1347-1352.

Rosenfeld, S. (2017). Selecting a Spectrum of Light to Reduce Risk to Museum Collections. International Exchange Service, Smithsonian Institution. Retrieved February 18, 2022, from [https://www.energy.gov/sites/default/files/2017/02/f34/rosenfeld_](https://www.energy.gov/sites/default/files/2017/02/f34/rosenfeld_engineered_longbeach2017.pdf)

[engineered_longbeach2017.pdf](https://www.energy.gov/sites/default/files/2017/02/f34/rosenfeld_engineered_longbeach2017.pdf)

Villmann, B., & Weickhardt, C. (2017). Wavelength dependence of light induced changes in reflectance spectra of selected dyes and pigments. *Studies in Conservation*, 63(2), 104-112. <https://doi.org/10.1080/00393630.2017.1345088>

Villmann, B., Peltri, G., & Weickhardt, C. (2019). Modeling of light-induced changes in reflectance spectra: A predictive tool for the effect of an arbitrary spectral irradiance. *Studies in Conservation*, 64(1), 54-61. <https://doi.org/10.1080/00393630.2018.1486529>