

紫外線殺菌效能探討

紫外線殺菌效能探討

葉純宜¹ 林明澄² 陳小妮¹ 王復德^{2,3,4}

台北榮民總醫院¹ 護理部² 感染管制室³ 內科部⁴ 感染科⁴ 國立陽明大學⁴ 醫學系

前 言

醫療院所病患聚集的地方，也是病菌容易散播的場所，病患、家屬、訪客或醫院內的工作人員，可能經由污染的空氣、醫療器材、設備、環境等，而引起感染的事件。臨床上，環境的清潔與消毒、醫療器材與設備的消毒與滅菌，方法與種類有許多選擇，唯一的目的就是希望減少病菌的傳播並達到降低感染的發生。臨床上屬於物理性消毒方法常見有紫外線消毒、巴斯德消毒或煮沸法，應用物理性消毒可避免化學物質的毒性殘存及對工作人員健康安全的危害。紫外線就是其中一項，利用輻射能的原理來達到消滅細菌、病毒的作用。

紫外線於 1801 年被發現，1877 年英國科學家利用紫外線照射，進行殺滅枯草桿菌、芽孢菌的實驗，證實它具有殺菌的能力，1937 年美國杜克大學的 Dr. Deryl Hart 有鑑於外科手術後，病患的手術部位傷口感染率一直偏高，為有效預防手術傷口的感染，提出多項有關手術室的感控政策，其中一項即是與工程師們合作，運用陽光消毒的原理，發明了人工紫外線裝置，將它放置在手術室內，以改善經空氣媒介污染的狀況，以減少懸浮在空氣中的微生物數目，以達到降低手術部位傷口感染的發生率[1]。1965 年 Sykes 等人發現波長介於 240-280nm 之間有殺菌的效果。由於紫外線是利用輻射源來進行殺菌，臨床上無法以消毒清潔劑或用水洗滌的物品，紫外線消毒仍是優先被考慮的方法。在國內有許多醫療院會採用紫外線照射燈進行空間或物品表面的消毒，但是臨床人員對於紫外線照射燈的認知程度，會影響紫外線照射燈之使用意願及正確性，而不當的使用亦會造成不必要的傷害[2]。

紫外線特性

光線的波長範圍很廣，人類眼睛可見的光線波長範圍大約從 400nm 至 730nm，紅色光波再上去之光波，屬於長波的紅外線，它的波長大約從 730nm 至 1,500nm，其帶有較高的能量，對人體的肌肉或其他組織有熱傳導的作用，但無殺菌的作用，而比紫色光波更短的光波就是紫外線了，它的波長大約從 400nm 至 230nm(表一)。太陽是地球紫外線最大的來源，地球因為有臭氧層的保護，使得在地球上所有的生物免受紫外線傷害。紫外線分為 3 類，簡稱為 UVA(400-320nm)、UVB(320-280nm)及 UVC(280-230nm)，這 3 類是依波長不同及被臭氧吸收的程度而區分。UVC 對大氣層的穿透力差，在經過臭氧層的時候就幾乎完全被高層的臭氧所吸收，所以輻射量不易到達地表；UVB 在經過臭氧層的時候有 98.9%的輻射被低層的臭氧吸收，只有將近 1.1%的量會到達地球表面；UVA 則完全不受臭氧的影響，不但會直接穿越臭氧層到達地表，而且也會穿過玻璃進入車內及室內。

對我們傷害程度最嚴重的是 UVC，不過它大部分被高層的臭氧吸收了，而且不容易到達地球表面，所以對我們影響幾乎是 0；大部分的 UVB 都被低層的臭氧吸收了，只有 1.1%會到達地球表面，目前我們比較擔心的是 UVB 對地球上的生態環境是有影響的，由於臭氧減少，使地表的 UVB 輻射量大幅增加(臭氧濃度減少

1%，陽光照在我們皮膚上的紫外線就會增加 2%)，反而對我們影響最嚴重，包括皮膚老化、曬傷、皮膚癌、眼睛及免疫系統的傷害；UVA 的影響在三種紫外線當中是最小最溫和的，但它不會被臭氧層吸收，所以其輻射幾乎完全到達地球表面，也是我們生活環境中接觸最多的紫外線，它的影響雖然不像 UVB 在短時間內就會造成像曬傷脫皮這種嚴重的傷害，但 UVA 的影響是慢性的，像女孩子比較擔心的黑斑就是因為長期累積了 UVA 所造成的，另外它也會使得受傷的皮膚不易復原，而且也可能誘發皮膚癌的發生，眼睛及免疫系統也同樣會受到影響，紫外線雖然對環境、動物、人類有傷害，但仍有些益處，如紫外線可以殺菌，幫助人類細胞製造維他命 D。三種紫外線的特性請見表二[3-6]。

紫外線殺菌原理

紫外線利用游離性的電磁輻射，主要作用於微生物的核酸、脫氧核糖核酸(DNA)、核糖核酸(RNA)等，導致其被破壞，對蛋白質等其他生化反應產生影響。若對 DNA 造成嚴重的損害，會使得細胞死亡，進而導致組織的損傷或死亡；對 DNA 較輕微的損害可以使細胞造成永久的改變，可能導致癌症，如果這一類的傷害發生在生殖細胞，會造成遺傳的改變即突變。1965 年 Sykes 等人發現波長介於 240-280nm 之間有殺菌的效果，屬於 UVC，具殺菌效果的紫外線釋放的能量比其他放射線(如~90 勻射線)來的低，因此對表面或固體物品穿透能力較差的，與~90 勻射線比較其殺菌效果亦較弱。

近代的工業生產的水銀燈管，90%以上所發射的紫外線波長為 253.7nm，因其具有最大的殺菌效力。紫外線對微生物的作用機轉是，核苷酸會吸收紫外線，特別是 253.7nm 的波長，而破壞微生物 DNA 結構，包括打斷磷酯鍵，暴露於高劑量的紫外線時 DNA 間發生交互鍵結，而破壞其原有功能。當微生物暴露於紫外線時，會啟動其另一個修復機制，一般有三種步驟，第一步為光修復方式(light repair; photo-reactivation)，與微生物具有的 photolyase 酵素有關；第二步為暗修復切斷方式(dark repair excision)，微生物在無光的情況下，會自動於損壞處進行重新組合及替換；最後步驟則是暗修復再組合(dark repair post-replication recombination)，作用在兩股互補 DNA 的組合連結[1,6-7]。

微生物與紫外線的關係

在所有的微生物中，革蘭氏陰性桿菌(gram negative rods)對紫外線最敏感，亦即最容易被殺死，其次就是葡萄球菌屬(*Staphylococcus* spp.)，鏈球菌屬(*Streptococcus* spp.)及細菌孢子，而黴菌孢子的抵抗力最高。Morris 於 1971 年證明病毒亦可被紫外線抑制，比細菌孢子較有敏感性，但比不產生孢子的細菌之抵抗力較高。1989 年 Watanabe 以實驗證明不具包膜的病毒，如腸病毒、小兒麻痺病毒，對紫外線的抗性比具有包膜的病毒如麻疹病毒、水痘病毒來得高。變性蛋白(prions)，如庫賈氏症病原(Creutzfeldt-Jakob disease; CJD)、Kuru disease 或 Gerstmann-Straussler Disease(GSS,為 CJD 之變種)等微生物對紫外線的抵抗力是所有微生物最強的。微生物對紫外線的抵抗力除了上述的說明，其他微生物可參考表三[1]。

影響紫外線消毒效果的因素

除了環境中的不同微生物對紫外線的抵抗力有差異外，另外也有些因素會影響紫外線的殺菌作用，如微生物的數量、生長的階段、微生物本身的修復機制、懸浮於空氣中的型態、有機物質的存在與否、環境溫度、紫外線的波長等。

1.微生物的數量(inoculumsize)：就如預期的，物品存在的微生物的數量愈多，就需要較高劑量的紫外線才可能達到殺死微生物的效果。

2.微生物生長階段或孢子形成的階段(stage of growth orgermination)：Tyrrell 等人研究 E. coli 的生長期，發現在早期的級數生長階段對紫外線的敏感性增加。Stafford 等人研究產生孢子的 Bacillus subtilis 及 Bacillusmegaterium，對紫外線的抗性比一般不產孢子的細菌高，而在孢子成形階段的紫外線的抗性便降低。

3.核苷酸修復機制(DNA repair processes)：許多細菌在適當的條件下，具有修復因紫外線所造成的損傷，有修復能力的菌種比無修復能力的菌種對紫外線較有抵抗能力。

4.懸浮的形態(type of suspension)：Bacillusubtilis 在灰塵(dust)的懸浮狀態對紫外線的抵抗力比在氣霧(aerosol)狀態高，在溼度較高的區域，因紫外線的穿透能力較差，因此殺菌的劑量亦要提高[1,8]。

5.有機物質的作用(effect of organic matter)：1972 年 Morris 曾研究以 Serratia marcescens 置於含有蛋白緩衝液、蛋白、牛奶，特別是血液或血清時，比單純僅有細菌的緩衝液所需的紫外線劑量要更高[9]。

6.環境溫度的效應(effect of temperature)：大部份的微生物在低溫狀態下對紫外線的敏感度較高，但是 D. radiodurans 除外。

7.紫外線的波長(wave length of UV radiation)：一般以 253.7nm 的殺菌效果最佳，若比較 250-280nm 與大於 300nm 的波長時，以 250-280nm 的效果較好[1,8]。

人工紫外線燈

人工製造的紫外線原理則是將電流通過特有的氣體，透過撞擊變成激發狀態，當特有的氣體從激發狀態回到原來的狀態時，會把多餘的能量釋出，因此產生電磁輻射線，製造出紫外線光。隨著各種新型設計的紫外線燈管的不斷發展，紫外線照射燈的應用也不斷的擴大，除常見的物體表面消毒、空氣消毒外，新的紫外線消毒殺菌器也不斷的被研製成功。現在用於飲水的消毒、污水消毒、空氣淨化殺菌器、理髮工具消毒、餐飲用具消毒、票證消毒等等不勝枚舉，可見應用之廣。目前醫療界所使用的紫外線儀器，依壓力不同，分為低壓、中壓和高壓水銀燈。而臨床用來殺菌的紫外線燈屬於低壓水銀燈(又稱冷石英燈)，波長有 95% 以上強度集中在 253.7nm，也就是紫外線 C-最具備殺菌效果的波長範圍內。在臨床上依據消毒、殺菌的場所、時間及目的不同有下列主要幾種不同型式的紫外線殺菌設備：

1.上層空氣紫外線照射消毒：大多運用在手術室、通道、走廊，採持續性照射，為避免對人之眼睛及皮膚之傷害，應裝在離地 2-2.5 公尺的高度，照射範圍是手術室的上部空間，透過冷空氣下降，熱空氣上升的對流循環，不斷地消毒手術室內的空氣，降低手術室內微生物的數目。

2.移動式紫外線照射燈：適用於呼吸道隔離(結核菌、退伍軍人症等)與需嚴密隔離之病室終期消毒，病患離院或轉出後，將移動式紫外線照射燈置於病室內中央，以強烈光源，快速直射方式進行空氣、床褥等物品之表面進行消毒後，再以化學消毒劑作環境、設備表面的去污清潔及消毒處理。

3.空氣調節系統風管之紫外線裝置：將紫外線燈安裝在空氣調節系統的風管內，透過風扇，使空氣流經裝有紫外線的風管內，消毒後再送出，此種裝置紫外線已遠離人員，在安全方面，較無問題[10]。

臨床的應用及注意事項

實驗顯示，充分的紫外線照射可殺死結核菌，因此紫外線燈可以輔助其他設備作為空氣消毒之用，但要特別提醒，紫外線照射燈不能替代 HEPA 過濾網。不過可用於同一病房內再循環的空氣消毒，例如急診、結核病隔離或處置室、結核病候診區，或住院病人聚集的區域，使室內空氣通過裝有紫外線燈的管道，再返回室內形成再循環。管道照射系統發揮作用的關鍵，取決於室內的氣流模式，氣流模式要確保室內空氣氣流都能夠通過該管道以進行消毒。在下列特定情況，不建議使用紫外線燈。

1. 隔離病室出來的空氣，必須再循環進入醫療機構中的其他區域。則不建議使用管道紫外線系統代替 HEPA 過濾網。
2. 單獨使用紫外線不能代替 HEPA 過濾網或負壓排氣系統，在同一室內，同時使用紫外線和 HEPA 過濾網的效果，並不確保比單獨使用 HEPA 過濾網好，因此對於感染性病房的空氣消毒與潔淨，不可僅使用紫外線照射燈或 HEPA 的功用，因其結果並無法完成取代負壓隔離病房。
3. 如果紫外線安裝和使用不當而造成過度照射，將造成對醫療人員及其他病人的傷害(如皮膚的急慢性病變和視力影響)[11]。

一般的使用者，對燈管用了幾年？照射強度有多少？是否仍然有殺菌能力？無法作複查檢測，完全無法掌握。對於欲消毒而未被完全消毒之產品，照樣生產、銷售、使用而不管其帶菌狀況，實在是承擔著極大的風險。到底燈管的好壞要如何判定？要如何使用？以下幾項重點可供參考：

- 1.紫外線劑量是照射強度與照射時間的乘積[K(殺菌劑量)=I(照射強度)×t(照射時間)]。從公式得知，高強度短時間與低強度長時間之照射其效果是相同的。
- 2.紫外線燈管是以天然水晶為材料之純石英玻璃管所製造，或用高硼砂玻璃管，其特性與效果都有相當之差異。純石英管其紫外線穿透率大於 80%，高硼砂玻璃管的紫外線穿透率為小於 50%，以消毒殺菌為主要訴求應考慮用石英玻璃管所製造的紫外線燈管。
- 3.紫外線之穿透能力差，因此燈管上之灰塵、油漬都會直接影響其穿透能力，所以新燈管在使用前，應用紗布沾 75%(V/V)酒精的擦拭燈管，清除油漬、手汗及灰塵。使用中之燈管亦應定期擦拭清潔，以免影響紫外線穿透率及照射強度。
- 4.紫外線照射燈的操作方法，必須依照使用手冊正確操作，依照燈管可使用時數，定期更換石英燈管，使用單位或安裝廠商應定期做照射強度檢測，發現強度不夠之燈管應立即更換。
- 5.使用時窗戶必須拉上窗簾，以避免人員直視紫外線，造成眼睛傷害，並於門口上掛上警示牌或將房門上鎖，以免他人誤入。

6.消毒時，應保持房間內清潔與乾燥，相對濕度由 33%增加到 56%時，殺菌效能減少為原來的 1/3。另外，當空氣中塵粒達到 800-900 個/cm³ 時，其殺菌的效能降低 20%至 30%。

7.殺菌過程應將空調打開，讓室內氣體自然對流，以達到最佳的殺菌效果。

8.在連續殺菌或殺菌中遇特殊狀況需進入消毒區域，須戴上具有過濾紫外線的護目鏡始可進入，以避免眼角膜受傷。防護面罩應用普通玻璃(戴眼鏡)或透光塑膠片，因為普通玻璃對紫外線幾乎完全無法透過的。

9.紫外線無法照射到的部份會造成殺菌不完全的現象，因此應將燈管旋開，使其往外延伸，可使殺菌範圍及弧度增大，儘量將床褥、棉被等物品展開並定時予翻面，可使殺菌效果提高。

10.若病室面積過大，應移動機器至未殺菌之區域再次進行殺菌，或使用二台以上紫外線照射燈同時進行殺菌，因為當紫外線照射強度高於 70 μ w/cm² 時(1w = 103mw = 106 μ w)，才能發揮理想的消毒功能，當照射強度低於 40 μ w/cm² 時，即使時間增長，其殺菌效果並不理想[12-18]。

結 語

紫外線已被廣泛運用在消毒殺菌，但是消毒效率與許多因素有關，其中紫外線照射劑量是一項很重要的因素。目前使用紫外線照射燈，最普遍存在的問題是，對燈管照射強度之衰退未被使用者所重視，認為燈只要亮著，就一定具有殺菌能力。紫外線為非可見光，低壓放電燈中之紫藍色光芒為汞蒸氣壓，雖然汞蒸氣壓的強度與紫外線有其關聯性，但是並不直接代表紫外線之強度。因此不能以此可見光波段之紫藍色光芒之強弱，來判斷紫外線之強弱。其中尚有石英玻璃之光衰，及紫外線穿透率等系數。這也就是說，紫外線之強度無法用肉眼來判定。

有些人習慣以對於紫外線燈管的好壞、優劣，都以一般使用日光燈的觀念來評估，以目視其可見光芒的強弱，及可見光芒之游離度來判定好壞。這樣的方法，極易被誤解，而將未具有消毒殺菌能力之燈管繼續使用，當然也將未被徹底消毒殺菌之物品，誤認為已完成消毒殺菌而加以使用，因而導致感染、中毒、致病之結果，而找不到致病之原因，豈不因小失大。近來許多實驗證據與結論，大大地提供紫外線消毒效率的控制，有利於紫外線消毒系統照射劑量精確測量的模式發展及未來以紫外線為主之消毒系統的設計。

表一 光波表

γ 射線	X 光	紫 外 線	可 見 光	紅 外 線	微 波	電 視 傳 送 電 波	收 音 機 傳 送 音 波
10 ⁻¹¹ - 10 ⁻¹⁶ m	10 ⁻⁹ - 10 ⁻¹⁰ m	230- 400nm	400- 730nm	730nm- 1,500nm	1,500nm- 10 ⁻³ m	1-10 ⁻³ m	1-10 ³ m

表二 不同種類紫外線的特性

紫外線分類	UV-A	UV-B	UV-C
物理特性-波長	315-400nm	280-315nm	280-230nm
到達地表輻射量	佔 UV 的 98.9%	佔 UV 的 1.1%	幾乎 0
對人體的傷害力	最弱	次之	最強
與臭氧層的關係	可穿透臭氧層	多數為平流層臭氧所吸收／因臭氧層破壞而增加	高層臭氧吸收
疾病原兇	達真皮層損傷彈性纖維、傷害皮膚微血管	短時間即造成傷害	
皮膚方面的傷害	皺紋老化色斑。受傷皮膚不易復原亦可能引發皮膚癌	曬傷及黑素瘤、皺紋老化	
眼睛方面的傷害	白內障、眼部周圍皮膚癌—視網膜變質與退化，免疫系統遭受破壞	白內障、眼部周圍皮膚癌—視網膜變質與退化，免疫系統遭受破壞	
防護措施	頗多爭議	SPF15 以上防曬用品	

表三 各類微生物對紫外線殺菌的
抵抗力

抵抗程度	微生物
高度	Prions 如庫賈氏症 <i>Deinococcus radiodurans</i> <i>Bacillus subtilis</i> / <i>Bacillus globigii</i> spores <i>Sarcina lutea</i>
中度	<i>M. spaeroides</i> <i>Salmonella typhinurium</i> <i>Saccharomyces</i> spp. <i>Streptococcus lactis</i> Protozoa
低度	Legionellae Vacinia virus <i>Escherichia coli</i> <i>Staphylococcus aureus</i> <i>Proteus vulgaris</i> Brewer's yeast T3 coliphage

參考文獻

1. Gardner JF, Peel MM: Introduction to sterilization and disinfection and infection control. Edinburgh: Churchill Livingstone 1991;221-2.
2. Skyes, G: Disinfection and sterilization. 2nd ED. London: E. & F.N. Spon 1965:92-4.
3. 呂怡靜：紫外線光電療。廖文炫，張梅蘭，蔡美文，王淑芬合編，物理因子治療學。台北：合記出版社。2002:213-40。
4. 趙清貴，林淑端合譯。日光紫外輻射生物學，華香園出版社，1988:239 頁。
5. Urbach F: Potential carcinogenic effects for human skin of ultraviolet radiation of 253.7 nm wavelength. Presented at: Centers for Disease Control consultant meeting on ultraviolet germicidal irradiation. Atlanta 1991;Dec:10-11.
6. Matsui MS, DeLeo VA: Longwave ultraviolet radiation and promotion of skin cancer. Cancer Cells 1991;3:8-12.
7. Peak MJ, Peak JG, Canes BA: Induction of direct and indirect single-strand breaks in human cell DNA by far- and near-ultraviolet radiations: action spectrum and mechanisms. Photochem. Photobiol 1987;45:381-7.
8. Hanawalt PC, PK Cooper, AK Ganesan, et al: DNA repair in bacteria and mammalian cells. Annu Rev Biochem 1979;48:783-836.
9. Morris EJ : The practical use of ultraviolet radiation for disinfection purposes. Med Lab Tech 1972;29:41-7
10. Russell AD, Hugo WB, Ayliffe GAJ: Principles and practice of disinfection, preservation and sterilization, 2nd ed. London: Blackwell Scientific Publications.1992:545-56.
11. 陸坤泰主編。結核病院內感染控制指引。台北：行政院衛生署疾病管制局出版。2004:47-8。
12. Permutt S: The impact of ultraviolet light on transmission of infection. Presented at: American College of Chest Physicians/American Thoracic Society/National Heart, Lung, and Blood Institute consensus conference: institutional infection control measures for tuberculosis in the era of multidrug resistance. Chicago. 1993;13.
13. Nardell EA: Interrupting transmission from patients with unsuspected tuberculosis: A unique role for upper-room ultraviolet air disinfection. Am J Infect Control 1995;23:156-64.
14. Riley RL: Ultraviolet air disinfection: rationale for whole building irradiation. Infect Control Hosp Epidemiol 1994;15:324-5.
15. Centers for Disease Control and Prevention: Guidelines for preventing the transmission of Mycobacterium tuberculosis in health-care facilities, MMWR 1994;43(RR-13):1-132.

16.Riley RL, Nardell EA: Clearing the air: the theory and application of ultraviolet air disinfection. *Am Rev Respir Dis* 1989;139:1286-94.

17.Macher JM: The use of germicidal lamps to control tuberculosis in health care facilities. *Infect Control Hosp Epidemiol* 1993;14:723-9.

18.Macher JM, Alevantis LE, Chang YL, et al: Effects of ultraviolet germicidal lamps on airborne microorganisms in an outpatient waiting room. *Appl Occup Environ Hyg* 1992;7:505-13.