

使用有色固態與液態透明資材調整光質

方煒¹，李光軒²，饒瑞佶²

1. 國立台灣大學農業機械工程學系所教授
2. 國立台灣大學農業機械工程學研究所前研究生

摘 要

本研究使用光譜量測儀(spectroradiometer)量測30種有色的固態與液態透明資材在不同波段範圍的穿透率(透光率)並分析其調整光質之能力。當光線以光子數單位($\mu\text{mole/m}^2/\text{s}$)表示時，正午時太陽光光譜中紅光與遠紅光的光量比(R/FR值)在0.97~1.20之間，藍光與紅光的光量比(B/R值)在0.54~0.75之間。此些數值可透過有色的固態或液態透明資材來調整，進而改變在資材下方的作物的光形態發生(Photomorphogenesis)，從而影響其生長與分化。測試結果發現各式固態資材阻隔紅光或藍光的效果視顏色別與材質各有不同，阻隔遠紅光(或稱紅外光)的效果則普遍不佳。硫酸銅溶液可用來阻隔遠紅光(穿透率低)，其減少紅光的程度較少，減少藍光的程度更少，造成R/FR與B/R值均提高，溶液濃度與厚度增加均會增加效果。玻璃紙可用來阻隔紫外線，以橙色的效果為最佳，其同時允許同色光穿透；三層共擠壓PEP膜也可阻絕紫外線，但可提高R/FR值。部份光選擇性膜可擋紫外線，紅色光選擇性膜則可加強紅光，但不影響遠紅光，造成R/FR值的提高。簡言之，使用測試的固態資材可調整R/FR與B/R值的範圍分別達97.2%~23%與-96%~1083%，使用硫酸銅溶液可調整R/FR與B/R值的範圍分別達37%~501%與19~160%，此些研究成果可提供植物光形態發生研究與研發光選擇性膜之參考。

關鍵詞：光形態發生、光質、光選擇

USING COLORED SOLID AND LIQUID FILTERS TO ADJUST LIGHT QUALITY

Wei Fang¹, Kuan-Hsun Lee², Ruey-Chi Jao²

1. Professor, Graduate Institute and Department of Agricultural Machinery Engineering, National Taiwan University.
2. Former Graduate Students, Graduate Institute and Department of Agricultural Machinery Engineering, National Taiwan University.

ABSTRACT

The capability of altering the spectral distribution of sun light by using 30 types of solid state colored transparent materials and liquid solutions were investigated. When the amount of sun light was measured using the photon flux unit, i.e. $\mu\text{mole/}$

m²/s, the red (R): far-red (FR) ratio and blue (B): red (R) ratio during the solar noon were in the range of 0.97 to 1.2 and 0.54 to 0.75, respectively. These values can be altered using colored transparent materials and copper sulfate solutions, thus altering the photomorphogenesis response of the plant under the covers. All the solid state colored transparent materials tested were not able to block far-red light. Copper sulfate solutions can reduce red light and block far-red light from reaching the plant, thus B:R ratio and R:FR ratio can be increased. Values of R:FR ratio and B:R ratio can be further increased if the concentration and/or thickness of the solution increased. Glassy paper can block UV light and allows light with the same color to pass through. Coextruded three-layer film can block UV and increase R:FR ratio. Some of the photoselective films can block UV in some extends while red colored photoselective film can increase R light and has little effect on FR, thus increasing R:FR ratio. In conclusion, under the experimental conditions, the R:FR ratio can be altered from - 97.2% to 23% using solid state colored transparent materials and from 37% to 501% using blue copper sulfate solutions. The B:R ratio can be altered from - 96% to 1083% using solid state colored transparent materials and from 19% to 160% using blue copper sulfate solutions. The results of the study can be useful in studying the photomorphogenesis of plants and developing photoselective films.

Keywords : Photomorphogenesis, Light quality, Photoselective

一、前言

對植物而言，紅光(R)與遠紅光(FR)是光形態發生(Photomorphogenesis)反應的主要驅動源，此乃因光敏素(Pr與Pfr)吸收光譜的波峰便是落在這兩段波長。光形態發生所需光度很小，依實際作物別而不同，一般以紅光(600-700nm)與遠紅光(700-800nm)兩波段光量的比值(R/FR)做為影響的判斷標準。

甘藍膨大的球莖，在藍光下容易形成，而在綠光下不會形成。結球白菜的初期結球過程，紅光有促進葉菜結球的形成，而藍光則有抑制的作用(郭等人, 1990)。紅光也可以促進植物根部生長，且蔬果內許多水溶性色素的產生，也都需要有強的紅光；光線中若有高的紅光與遠紅光光量子數比(R/FR)則會抑制頂芽優勢，促成側枝生長。如植物在完全紅光的環境中生長，植株節間會較長而莖較細且葉片細小；只要有少許的藍光就可以改善。在短波長(藍光)下生長的植株節間較短而莖較粗，但藍光同時加上遠紅光則可逆轉純藍光造成的節間較短現象。Reddy et al. (1996)發現抑制遠紅光可使菊花的株高減少 20-24%，同

時葉片有較多的葉綠素，呈深綠色，對番茄苗亦有類似的效果。

除了光形態發生的影響外，McCree (1972)及 Inada (1976)指出光譜中的紅光(R, 600~700nm)與藍光(B, 400~500nm)比其它波長的光更有助於光合作用。饒與方(1996a, b; 1997a, b)調查 18 種市售螢光燈管的光譜，除建立各燈管在不同安裝高度下光量與光譜之計算公式，計算各燈管的 R/FR 與 B/R 值與進一步量出不同燈管組合下的 R/FR 與 B/R 值之外，更導出各燈管在光照、光能與光量子三種單位下的轉換因數，並針對組織培養室內使用人工光源的情形建立電腦模擬軟體。有關 B/R 值之探討請參見 Hoenecke et al. (1992), Yanagi et al. (1996)與 Okamoto et al. (1996)之論文。

由於塑膠布製造技術的進步與對光質及植物生理的進一步瞭解，近年來溫室用覆蓋膜已由過去的單純只是提供透光且能遮風擋雨的功能進步為可滿足耐候、保溫、防塵、防滴、防霧等不同商業目標，再進一步轉化為對植物栽培有更積極用途的角色，如提供抗病毒、光選擇、光轉化等涉及光質調整的功能。最具代表性的兩類商業資材即為光選擇性膜(photoselective film)與三層共擠

壓膜。光選擇性膜的設計主要是在膜的結構裏添加不同物質以達某特定功能，所使用的膜多為低密度聚乙烯(LDPE, low density polyethylene)。三層共擠壓膜常見的設計則為結合 LDPE 與乙烯醋酸鹽聚合物(EVA, ethylene vinyl acetate copolymer)。

紫光與紫外線不僅是植物體內色素(葉綠素、花青素等)形成的條件，而且對磷、鋁的吸收、維生素C的形成，角質層的發展，乾物質的累積，病害與徒長的防止，都起很大的作用(陳, 1987)。紫外線依波長可分為UVC(200-280nm)、UVB(280-315nm)與UVA(315-380nm)，前二者均不利作物栽培，UVA之取捨則視作物而定。UVA會引發玫瑰花瓣的黑化，降低商品價值，同時也會促成昆蟲(如蚜蟲、白蠅、牧草蟲與噬菜蟲等)與牠們傳遞的病毒的生成而造成傷害。透明或藍色光選擇性膜可以濾掉高至 380nm 的紫外線輻射，所以可以防止玫瑰花瓣的黑化，同時能有效的減少菌孢形成，對害蟲的繁殖能力有所控制，所以又稱為抗病毒(anti-virus)膜。透明者透光率較高，藍色者可適用於日照強烈的地區如本省。

在設施栽培的番茄或胡瓜的維生素C含量，往往不如露地栽培的高，主要便是由於設施栽培中UVA較少的緣故。玫瑰、油桃、梨與茄子等花類與水果如果長時間缺乏UVA的照射便會抑制色素的形成。紫色光選擇性膜即針對此需要允許UVA通過以促進特殊色素的形成。另外，設施內若使用蜜蜂來授粉，少了UVA其授粉效果也不會好。

紅色光選擇性膜內加紅色螢光劑可以將綠黃波段的光轉化為紅光，由於植物對後者的感受度

為較高，所以可加強光合作用的活動；其同時可增加 R/FR 值，此改變為造成植物形態改變的訊號以降低頂芽優勢，使得產出更多的花、梗與果。此種紅色螢光膜的實際成效已於玫瑰、太陽花、番茄等的栽培上證實，尤其是玫瑰花的收成上增加了 20-30% (Lebidakis, 1997)。

表 1 所示為三層共擠壓膜常見的兩種組合，第一種其內外層均為 LDPE，中間為 EVA，此種三層共擠壓膜又簡稱 PEP 膜，三個字母分別為 PE、EVA 與 PE 的首字。第二種之中內層均為 EVA，簡稱 PEE 膜。EVA 是一種會吸收紅外線的材質，所以在晚間可減少了熱的流失，另一方面，高溫下它會軟化與變形，因此在溫暖地區有使用上的困難。同時它也是一種極性材質，表面會吸附灰塵，在短期使用後即會失去透明度。在三層共擠壓結構裡，將 EVA 夾入位於兩層 LDPE 間當作中間層，這樣它的好處可以保留而其他兩種缺點則可以去除。

如表 1 所示，面對太陽的外層為 LDPE，不會吸附灰塵，所以膜可保持透明，含有紫外線穩定劑可增加耐候性。中層是含高VA成份的EVA，其內除添加紫外線穩定劑外，尚有紅外線吸收劑可加強保溫與抗霧添加物能緩慢的移轉至內層以補充該層消耗的抗霧添加物。抗霧添加物是一種稱為表面活性劑(surfactant)的化學物質，可以降低膜與水間的表面張力，使水氣無法在膜的表面形成水滴，而改形成一薄層的水流向膜的邊緣。朝向作物的內層有使用 LDPE 者(PEP 膜)亦有使用含低 VA 成份的 EVA 者(PEE 膜)，後者尤其能吸引由中層朝向此方向移動的抗霧添加物以增加膜的抗霧速率。三層共擠壓膜的另一重要優點即

表 1 常見的兩類三層共擠壓膜的組成與添加物

Table 1 Components and additives of two types of 3 layers co-extruded films

	PEP 膜與添加劑 PEP film and additives	PEE 膜與添加劑 PEE film and additives
外層 Outer layer	LDPE 加紫外線穩定劑	LDPE 加紫外線穩定劑
中層 Middle layer	EVA 加紫外線穩定劑、 紅外線吸收劑	EVA(high VA) 加紫外線穩定劑、紅外 線吸收劑、抗霧添加物
內層 Inner layer	LDPE 加紫外線穩定劑、 抗霧添加物	EVA(low VA) 加紫外線穩定劑、殺蟲 劑抵制物、抗霧添加物

是允許添加物在不同層再分配，使得它們更有效 (Lebidakis, 1997)。

當太陽光穿透溫室的被覆資材後，其光譜會因為各波段被吸收及反射程度的不同而改變。就設施栽培者而言，瞭解被覆資材對太陽光譜的影響與瞭解各波段的光對於作物生理的影響是非常重要的。另外，溫室內常因過度密植或光照缺乏造成植莖柔弱細長，一般常添加化學藥劑來克服此問題，近來發現增加藍光或抑制遠紅光對於培育壯苗及決定栽培密度有特別重要意義。本研究

針對多種有色的固態與液態透明資材調整光質之能力做詳細探討，旨在提供植物光形態發生研究、克服溫室內幼苗徒長問題與研發新型被覆資材之參考。

二、材料與方法

(一) 試驗材料

如表 2 所示，本研究使用 18 種固態資材與 1

表 2 調整光質之試驗用資材
Table 2 Materials tested in adjusting the quality of light

固態資材 solid state materials			液態資材 liquid state material
台聚塑膠布 colored transparent plastic films	三層共擠壓與光選擇性溫室覆蓋膜 3 layers co-extruded and photosensitive greenhouse glazing	市售玻璃紙 commercially available glassy papers	硫酸銅溶液 copper sulfate solution
塑膠布，紅色，(P110, red)	三層共擠壓膜 (3 layers co-extruded film, PEP film)	紅色 (red)	濃度 (concentration) : 10g/l, 厚度 (thickness) : 0.1, 0.3, 0.5cm
塑膠布，橙色，(P863, orange)		橙色 (orange)	濃度 (concentration) : 20g/l, 厚度 (thickness) : 0.1, 0.3, 0.5cm
塑膠布，黃色，(P867, yellow)	光選擇性膜，紅色 (photosensitive film, red)	黃色 (yellow)	濃度 (concentration) : 30g/l, 厚度 (thickness) : 0.1, 0.3, 0.5cm
塑膠布，綠色 (P872, green)	光選擇性膜，藍色 (photosensitive film, blue)	綠色 (green)	濃度 (concentration) : 40g/l, 厚度 (thickness) : 0.1, 0.3, 0.5cm
塑膠布，藍色，(234, blue)	光選擇性膜，紫色 (photosensitive film, purple)	藍色 (blue)	
塑膠布，紫色，(P641, purple)	光選擇性膜，透明 (photosensitive film, transparent)	紫色 (purple)	
塑膠布，白色，(WH09, white)			

種液態資材，前者包括7種不同顏色的農用透明塑膠布、1種三層共擠壓 PEP 溫室覆蓋膜、4種光選擇性溫室覆蓋膜與6種市售玻璃紙；液態資材為使用硫酸銅溶液調配成4種濃度，量測時測試3種溶液厚度合計12種組合，總計30個測試組。

農用透明塑膠布由台聚公司加工實驗所提供，分別為紅、橙、黃、綠、藍、紫與白色，其型號如表2所示。玻璃紙則為採購自坊間的一般文具店，包括：紅、橙、黃、綠、藍、紫等六色。溫室覆蓋膜則為本省業者由希臘進口的三層共擠壓 PEP膜與由以色列進口的四種光選擇性膜（以SUNSELECTOR為產品名稱），包括：藍、紅、紫色膜與透明膜。硫酸銅溶液為唯一的液態資材，溶液的濃度分別為10、20、30與40 g/l，溶液盛於0.1mm厚的玻璃容器內，測試的溶液厚度分別為0（比較用之背景值）、0.1、0.3與0.5cm。

(二) 試驗設備

本研究使用可攜式光譜量測儀(Portable Spectroradiometer, LI-1800, LI-COR)，量測波長範圍為300-1100nm，量測間隔為5nm。光線由LI-1800正面上方的半透明的餘弦接受器(Cosine Receptor)進入，先經一反射鏡轉向，再經過7波段的濾光轉輪(Filter Wheel)後，只剩下單一波段的光被允許通過而進入單光器(Holographic Grating Monochromator)。本設備允許通過濾光轉輪的波段為1、2、5或10nm，可透過指令予以設定。濾光轉輪同時提供第8個不透光的光柵做全暗的校正。進入單光器的光線經由出口狹縫(Exit Slit)投射到矽偵測器(Silicon Detector)，將光量訊號轉成電子訊號，再由內部微處理器接收處理。

(三) 試驗方法

光譜量測儀的感測頭置於可水平固定試驗材料的量測架的正下方1cm處，僅在正午時分進行測量。首先移開測試資材量測第一次的太陽光光譜（穿透前），緊接著將資材水平安置於量測架上量第二次光譜（穿透後），每組穿透前與穿透後光譜的量測時間間隔在10秒內。

本研究探討的波段包括：紫外線(UV，300-400nm)、藍光(B，400-500nm)、紅光(R，600-

700nm)、遠紅光(FR，700-800nm)與光合作用有效光(PAR，400-700nm)。波長範圍在300-400nm之間應包括UVA與部份的UVB與紫光，但為了說明方便統稱為紫外線；其它如400-500nm亦包括紫、藍與綠光，統稱為藍光；紅光與遠紅光的定義亦同此原因。所有涉及光量之量測與計算均使用光子數(μ mole/m²/s)單位。

各波段的穿透率可經由穿透後各波段的光量除以穿透前各波段之光量求出。紅光與遠紅光光量之比值以R/FR表示，藍光與紅光光量之比值以B/R表示。太陽光穿透透明資材前之R/FR與B/R雖會隨著天候狀況改變，但變化幅度不大，太陽光穿透透明資材後之R/FR與B/R則隨著透明材質之不同而有頗大的差異，換言之，此些有色的透明資材具有調整光質的能力，其在各波段的調整能力以R/FR變化率與B/R變化率為代表。'R/FR變化率'等於穿透後R/FR值減去穿透前R/FR值再除以穿透前R/FR值。B/R變化率之計算可類推。

三、結果與討論

以下依固、液態資材分類探討太陽光穿透各透明資材後光譜中R/FR值、B/R值、二者之變化率及各波段範圍之穿透率。

(一) 固態資材調整 R/FR 與 B/R 值

由表3中第二欄“穿透前R/FR值”之數值可知，正午時分太陽光的R/FR值在0.97至1.20之間。又如表3所示在所有的固態資材中有五種材質可提高R/FR值，分別為三層共擠壓PEP膜、光選擇性紅色膜、橙色玻璃紙、黃色塑膠布(P867)與橙色塑膠布(P863)；其餘除黃色玻璃紙不影響R/FR值外，均會降低R/FR值；R/FR值減少最多的前三名分別是藍色、綠色與紫色玻璃紙。

如表3所示，太陽光在穿透三層共擠壓膜前之R/FR值為1.05而穿透後R/FR值為1.3，依前述計算方式可知變化率為(1.3-1.05)/1.05等於23.8%。所測試的固態資材可調整太陽光光譜之R/FR值的變化率在-97.2%至+23.8%。

表 3 太陽光穿透各固態資材前後之 R/FR 值及其變化率

Table 3 The red light vs. far-red light (R/FR) ratio and the percentage of variation of solar irradiation before and after transmitted through various solid-state colored transparent films

材料* materials*	穿透前 R/FR 值 R/FR ratio before transmitted	穿透後 R/FR 值 R/FR ratio after transmitted	變化率 % of variation
三層共擠壓膜 3 layers co-extruded PEP film	1.05	1.30	+23.8
光選擇性膜，紅色 photoselective film, red	1.05	1.16	+10.5
玻璃紙，橙色 glassy paper, orange	1.08	1.14	+5.5
塑膠布，黃色 (P867) plastic film, yellow	1.06	1.10	+3.8
塑膠布，橙色 (P863) plastic film, orange	1.07	1.10	+2.8
玻璃紙，黃色 glassy paper, yellow	1.04	1.04	+0.0
光選擇性膜，透明 photoselective film, transparent	1.05	1.03	-1.9
塑膠布，白色 (WH09) plastic film, white	1.09	1.06	-2.8
塑膠布，紅色 (P110) plastic film, red	1.07	1.04	-2.8
光選擇性膜，紫色 photoselective film, purple	1.04	1.00	-3.8
塑膠布，紫色 (P641) plastic film, purple	1.09	1.04	-4.6
塑膠布，綠色 (P872) plastic film, green	1.08	0.98	-9.3
玻璃紙，紅色 glassy paper, red	1.20	1.0	-16.6
光選擇性膜，藍色 photoselective film, blue	1.05	0.82	-21.9
塑膠布，藍色 (234) plastic film, blue	1.09	0.80	-26.6
玻璃紙，紫色 glassy paper, purple	0.97	0.44	-54.6
玻璃紙，綠色 glassy paper, green	1.07	0.17	-84.1
玻璃紙，藍色 glassy paper, blue	1.07	0.03	-97.2

* 依變化率之大小順序由正向負方向排列

* listed from positive to negative in the degree of '% of variation'.

表 4 太陽光穿透各固態資材前後之 B/R 值及其變化率

Table 4 The blue light vs. red light (B/R) ratio and the percentage of variation of solar irradiation before and after transmitted through various solid-state colored transparent films

材料* materials*	穿透前 B/R 值 B/R ratio before transmitted	穿透後 B/R 值 B/R ratio after transmitted	變化率 % of variation
玻璃紙，藍色 glassy paper, blue	0.6	7.1	+1083
塑膠布，藍色 (234) plastic film, blue	0.61	0.84	+37
光選擇性膜，藍色 photoselective film, blue	0.55	0.66	+20
玻璃紙，綠色 glassy paper, green	0.66	0.70	+6
塑膠布，紫色 (P641) plastic film, purple	0.63	0.66	+5
塑膠布，綠色 (P872) plastic film, green	0.61	0.62	+2
光選擇性膜，紫色 photoselective film, purple	0.55	0.55	+0
塑膠布，白色 (WH09) plastic film, white	0.61	0.58	-5
光選擇性膜，透明 photoselective film, transparent	0.54	0.51	-5
塑膠布，黃色 (P867) plastic film, yellow	0.61	0.56	-8
玻璃紙，紫色 glassy paper, purple	0.66	0.60	-9
塑膠布，橙色 (P863) plastic film, orange	0.60	0.53	-11
光選擇性膜，紅色 photoselective film, red	0.55	0.39	-29
三層共擠壓膜 3 layers co-extruded PEP film	0.55	0.25	-54
塑膠布，紅色 (P110) plastic film, red	0.62	0.23	-63
玻璃紙，紅色 glassy paper, red	0.64	0.12	-81
玻璃紙，黃色 glassy paper, yellow	0.56	0.04	-92
玻璃紙，橙色 glassy paper, orange	0.75	0.026	-96

* 依變化率之大小順序由正向負方向排列

* listed from positive to negative in the degree of '% of variation'.

由表 4 中第二欄“穿透前 B/R 值”之數值可知，正午時分太陽光的 B/R 值在 0.54 至 0.75 之間。又如表 4 所示在所有的固態資材中，B/R 值增加最多的前三名分別為藍色玻璃紙、藍色塑膠布(234)與綠色玻璃紙，前者的 B/R 值達 7.1，比其他資材的 B/R 值高出甚多。B/R 值減少最多的前三名分別是橙色、黃色與紅色玻璃紙，尚小於 0.12。所測試的固態資材可調整太陽光譜之 B/R 值的變化率在 -96% 至 +1083%。光選擇性紫色膜不影響 B/R 值。

(一) 固態資材之穿透率

如表 5 所示，不同波段範圍有不同的穿透率，如綠、藍與紫色玻璃紙在全量測光譜(300-1100nm)的穿透率尚在 0.54 以上，但在 PAR 範圍的穿透率則在 0.32 以下。就全量測光譜(300-1100nm)而言，所有的固態資材中的穿透率在 0.54 至 0.89 之間。穿透率最高的前三名分別是光選擇性紫色膜、黃色塑膠布(P867)與紅色玻璃紙，而穿透率最低的是藍色玻璃紙。

就紫外線(UV 300-400nm)波段範圍而言，玻璃紙、光選擇性膜與三層共擠壓 PEP 膜的穿透率均低，除紅色玻璃紙為 0.35 之外，其餘皆小於 0.3；穿透率最低為三層共擠壓 PEP 膜、綠、橙與黃色玻璃紙，均小於 0.08。

就藍光(B, 400-500nm)波段範圍而言，橙與黃色玻璃紙可濾掉藍光，穿透率尚低於 0.06。藍與紫色玻璃紙的穿透率也不高，分別為 0.33 與 0.37；光選擇性藍色與紫色膜則分別有 0.78 與 0.9 的高穿透率。

就紅光(R, 600-700nm)波段範圍而言，藍色玻璃紙可濾掉紅光，穿透率只有 0.02。紅色玻璃紙與三層共擠壓 PEP 膜則有高於 0.9 的穿透率，後者可轉化其它波段的光線，使紅光穿透率大於 1。

就遠紅光(FR, 700-800nm)波段範圍而言，所有固態資材阻隔遠紅光的能力均不佳，白色塑膠布(WHO9)的遠紅光穿透率達 0.59 為最低，其它都在 0.68 以上，光選擇性紫色膜與紅、綠、紫色玻璃紙的遠紅光穿透率更在 0.9 以上。

就光合作用有效光(PAR, 400-700nm)範圍而

言，黃色塑膠布(P867)的 PAR 穿透率達 0.89 為最高，藍色玻璃紙的 PAR 穿透率只有 0.12 為最低。

(二) 液態資材之穿透率

如表 6 所示，當太陽光穿透厚度為 0.3cm、濃度 40g/l 之硫酸銅溶液時，遠紅光(700-800nm, FR)波長範圍的穿透率為 0.06，已是所剩不多。表 6 中並未列出所有試驗數據，更詳細之資料請參見李(1997)之論文。

在所有液態資材的測試組合中，波長範圍在 300-600nm 的光線皆有高的穿透率(在 0.9 以上)，波長在 600nm 以後，穿透率則有下降的趨勢，尤其是在 700nm 以後，下降更是明顯。當具有高濃度時(30g/l、40g/l)，波長大於 700nm 的遠紅光幾乎都被濾掉了，穿透率低於 0.2。

(三) 液態資材調整 R/FR 與 B/R 值

硫酸銅溶液可阻止遠紅光(FR)穿透，但允許紫外線與藍光(B)通過(高的穿透率)，此溶液以水為溶劑亦會吸收紅光(R)。FR 與 R 相比，以前者減少較多，所以 R/FR 值可提高；B 與 R 相比，以後者減少較多，所以 B/R 值可提高。表 6 最右側之兩欄顯示其變化率均為正值。

如圖 1 所示，硫酸銅溶液厚度為 0.5cm 對 R/FR 值之影響與厚度為 0.3cm 者相去不遠，四種濃度下皆如此。R/FR 值隨著硫酸銅溶液的厚度與濃度之增加而有增加的趨勢(圖 1)。在所有液態資材的測試組合中，R/FR 變化率達增加 37% 至 501%；溶液厚度為 0.1cm，濃度為 10g/l 時，R/FR 值為 1.58 為最小；當溶液厚度為 0.5cm，濃度為 40g/l 時，R/FR 值為 7.15 為最大。

如圖 2 所示，B/R 值隨著硫酸銅溶液的厚度與濃度之增加而有增加的趨勢。在所有液態資材的測試組合中，B/R 變化率達增加 19% 至 160%；當溶液厚度為 0.1cm，濃度為 10g/l 時，B/R 值為 0.67 為最小；當溶液厚度為 0.5cm，濃度為 40g/l 時，B/R 值為 1.74 為最大。

表 5 各固態資材在不同波段之太陽光穿透率
 Table 5 The solar transmittance of various solid-state colored transparent films in different wavebands.

材料 materials	太陽光穿透率 solar transmittance						
	波段 wavebands	300-1100nm	300-400nm	400-500nm	600-700nm	700-800nm	400-700nm
	Total	UV	B	R	FR	PAR	
塑膠布，紅色 (P110) plastic film, red		0.58	0.49	0.26	0.70	0.72	0.42
塑膠布，橘色 (P863) plastic film, orange		0.78	0.72	0.72	0.82	0.79	0.78
塑膠布，黃色 (P867) plastic film, yellow		0.87	0.75	0.82	0.90	0.86	0.89
塑膠布，綠色 (P872) plastic film, green		0.79	0.65	0.73	0.71	0.78	0.75
塑膠布，藍色 (234) plastic film, blue		0.66	0.46	0.68	0.50	0.68	0.55
塑膠布，紫色 (P641) plastic film, purple		0.72	0.71	0.74	0.71	0.74	0.69
塑膠布，白色 (WH09) plastic film, white		0.58	0.18	0.55	0.58	0.59	0.56
三層共擠壓膜 3 layers co-extruded PEP film		0.75	0.04	0.47	1.06	0.85	0.68
光選擇性膜，紅色 Photoselective film, red		0.75	0.11	0.62	0.87	0.79	0.71
光選擇性膜，藍色 Photoselective film, blue		0.74	0.12	0.78	0.64	0.82	0.67
光選擇性膜，紫色 Photoselective film, purple		0.89	0.27	0.90	0.89	0.93	0.87
光選擇性膜，透明 Photoselective film, transparent		0.78	0.29	0.73	0.77	0.79	0.75
玻璃紙，紅色 glassy paper, red		0.79	0.35	0.16	0.90	0.92	0.44
玻璃紙，橘色 glassy paper, orange		0.61	0.08	0.03	0.87	0.82	0.45
玻璃紙，黃色 glassy paper, yellow		0.74	0.04	0.06	0.85	0.85	0.61
玻璃紙，綠色 glassy paper, green		0.58	0.03	0.15	0.15	0.91	0.32
玻璃紙，藍色 glassy paper, blue		0.54	0.25	0.33	0.02	0.77	0.12
玻璃紙，紫色 glassy paper, purple		0.63	0.32	0.37	0.41	0.90	0.27

表 6 在各不同濃度與厚度下液態資材之太陽光穿透率與 R/FR 值及 B/R 值之變化率
Table 6 The solar transmittance in different wavebands and percentage of variation on R/FR and B/R of solar irradiation transmitted through liquid-state material in different concentrations and thickness.

硫酸銅溶液 copper-sulfate solution		穿透率 solar transmittance					變化率 % of variation	
厚度 thickness , cm	濃度 concentration, g/L	300-400nm UV	400-500nm B	600-700nm R	700-800nm FR	400-700nm PAR	R/FR %	B/R %
0.1	10	0.94	0.92	0.77	0.56	0.89	+37	+19
	20	0.93	0.90	0.75	0.41	0.85	+81	+32
	30	0.93	0.88	0.56	0.24	0.81	+129	+57
	40	0.92	0.90	0.58	0.2	0.73	+185	+67
0.3	10	0.94	0.94	0.73	0.4	0.87	+82	+38
	20	0.93	0.94	0.64	0.22	0.82	+192	+65
	30	0.93	0.93	0.45	0.1	0.72	+333	+109
	40	0.91	0.81	0.39	0.06	0.66	+501	+160

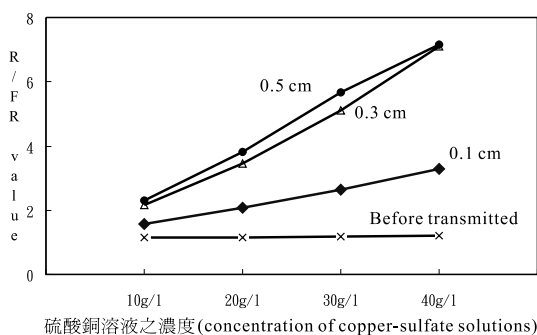


圖 1 太陽光穿透不同濃度與厚度之硫酸銅溶液前與穿透後之紅光與遠紅光比值 (R/FR)

Fig.1 The red light vs. far-red light (R/FR) ratio of solar irradiation before and after transmitted through various concentrations and thickness of copper-sulfate solutions.

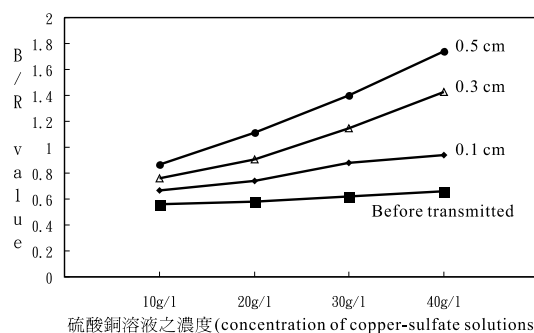


圖 2 太陽光穿透不同濃度與厚度之硫酸銅溶液前與穿透後之藍光與紅光比值 (B/R)

Fig.2. The blue light vs. red light ratio (B/R) of solar irradiation before and after transmitted through various concentrations and thickness of copper-sulfate solutions.

四、結論

本研究調查 30 種不同顏色之固態與液態透明資材在不同波段範圍的透光率與其調整光質之能力，可作為植物光形態發生研究與光選擇性膜研發之參考。

當光線以光子數單位(μ mole/m²/s)表示時，太陽光的 R/FR 值在 0.97~1.20 之間，B/R 值在

0.54~0.75 之間。就使用的資材而言，R/FR 值可調整的變化率在-97.2%~23.8% (固態資材) 與 37%~501% (液態資材)。B/R 值可調整的變化率在-96%~1083% (固態資材) 與 19~160% (液態資材)。

由於紫外線(300-400nm)對玻璃紙的穿透率均小於 0.35，所以可用玻璃紙來濾除紫外線；穿透率最低者為綠、橙與黃色玻璃紙，均小於 0.08。

所有固態資材對遠紅光(700-800nm)範圍的光線均有高的穿透率，所以阻隔的效果不佳，必需使用硫酸銅溶液。硫酸銅溶液可提高 R/FR 值及 B/R 值，且有隨溶液濃度與厚度之增加而增加的趨勢。就提高 R/FR 值之效果而言，厚度 0.5cm 與 0.3cm 相差不大；當濃度達到 30g/l 或以上，700~800nm 的遠紅光部份絕大部份都可被濾掉。

硫酸銅溶液可大幅濾除遠紅光，在植物光形態發生的研究上有實用的價值，但在溫室產業的應用上仍頗難落實。設計中可配合中空的硬質雙層塑膠板為溫室被覆資材，以抽水與集水裝置進行硫酸銅溶液的循環輸送。中、長程的研發重點應是找出具有相當於硫酸銅溶液的選擇性光質吸收劑直接應用在溫室被覆資材的製造上，使具有吸收/濾除遠紅光的功能。

五、誌謝

本研究進行期間承蒙台聚公司加工實驗所技術發展處王進雄先生，台中區農業改良場高德鈺研究員與本系系友兼資材進口業者謝政達先生提供部份測試資材，謹此致謝。

六、參考文獻

- 李光軒。1997。調整光質的方法及其對波士頓高苣種苗栽培之影響。碩士論文。台北：台灣大學農業機械工程學研究所。
- 陳寶玉。1987。溫室建築與溫室植物生態。台北：五洲。
- 郭忠吉、陳惠美、陳秀珠。1990。精緻蔬菜生產與光的管理。出自“精緻蔬菜產銷研討會專集”，張學琨主編，81-89。桃園：台灣省桃園區農業改良場。
- 饒瑞估，方煒。1996a。組織培養室中使用螢光燈管的光環境電腦模擬軟體之建立。農業機械學刊 5 (4): 11-18。
- 饒瑞估，方煒。1996b。螢光燈管光譜分析與合成。台大農學院學報 36(3): 205-215。
- 饒瑞估，方煒。1997a。螢光燈管光量及光譜計算公式之建立。中國園藝 43 (1): 50-60。
- 饒瑞估，方煒。1997b。螢光燈管照明單位與光量子單位轉換常數之探討。中國園藝 43(2): 141-148。
- Fang, W. and R.C. Jao. 1996. Simulation of light environment with fluorescent lamps and design of a movable light mounting fixture in a growing room. *Acta Horticulturae* 440: 181-186.
- Hoenecke, M.E., R.J. Bula and T.W. Tibbits. 1992. Importance of blue photon level for lettuce seedlings grown under red light-emitting diodes. *HortScience* 27: 427-430.
- Inada, K. 1976. Action spectra for photosynthesis in higher plants. *Plant and Cell Physiol.* 17: 355-365.
- Lebidakis, M. 1997. Use of specialty plastic films for improved yields in greenhouse. *Plastika Kritis Sa., Greece.*
- McCree, K. J. 1972. The action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants, *Agric. Meteorol.* 9: 191-216.
- Okamoto, K., T. Yanagi and S. Takita. 1996. Development of plant growth apparatus using blue and red led as artificial light source. *Acta Horticulturae* 440: 111-116.
- Reddy, V.K., N.C. Rajapakse and R.E. Young. 1996. The influence of spectral composition on growth and development of chrysanthemum plants. *Acta Horticulturae* 440: 292-297.
- Yanagi, T., K. Okamoto and S. Takita. 1996. Effect of blue, red and blue/red lights of two different PPF levels on growth and morphogenesis of lettuce plants. *Acta Horticulturae* 440: 117-122.

收稿日期：1998 年 9 月 22 日

修改日期：1998 年 11 月 19 日

接受日期：1999 年 9 月 7 日

