

研究報告

# 添加硫酸鉀之甲基／羥丙基甲基纖維素水膠之化學、熱及保水性質

陳羿樺<sup>1</sup> 陳奕君<sup>1\*</sup>

【摘要】水膠 (Hydrogel) 可改善土壤保水性質及提高農用化學品之效率，水膠可吸收並保留大量水分或水溶液，其原料為石油基或天然材料親水性高分子，其可使用物理或/和化學交聯方式製備，目前使用環境友善性之再生性資源開發於植物保水劑為研究發展趨勢，本研究以纖維素衍生物之甲基纖維素 (Methylcellulose, MC) 與羥丙基甲基纖維素 (Hydroxypropyl methylcellulose, HPMC) 為原料，並添加硫酸鉀 (Potassium sulfate,  $K_2SO_4$ ) 製備纖維素水膠。使用傅立葉轉換紅外線光譜儀 (Fourier transform infrared spectroscopy, FT-IR) 與熱重分析儀 (Thermogravimetric analyzer, TGA) 對MC與HPMC水膠進行化學結構與熱性質分析，並觀察乾膠膨潤形態與水膠保水力。由實驗結果得知，經溶解後再乾燥的MC及HPMC原料與原MC及 HPMC之化學結構無差異；於形態觀察中發現添加硫酸鉀之MC水膠與市售土壤改良劑 (Commercial soil conditioner, CS) 形態相似；由保水力結果證明纖維素基質水膠之保水性高於市售植物保水劑。

【關鍵詞】纖維素衍生物、水膠、羥丙基甲基纖維素、甲基纖維素、保水力。

Research Paper

## Chemical, thermal and moisture retention properties of methylcellulose and hydroxypropyl methylcellulose-based hydrogels blended with potassium sulfate

Yi-Hua Chen<sup>1</sup> Yi-Chun Chen<sup>1\*</sup>

【Abstract】Hydrogels has been shown to improve water retention capability and increase the efficiency of agricultural chemicals. Hydrogels can absorb and retain significant amount of water or other aqueous solutions. Hydrogels are prepared from petroleum-based or natural hydrophilic polymers thorough physical and/or chemical crosslinking methods. Nowadays, environmentally friendly natural materials have been developed to replace petroleum-based materials. Natural, environmentally and sustainable cellulose and

---

1. 國立中興大學森林學系。

Department of Forestry, National Chung Hsing University.

\* 通訊作者，40227臺中市南區興大路145號。

Corresponding author. 145 Xingda Rd., South Dist., Taichung City 40227, Taiwan. Email: chenyc@nchu.edu.tw.

their derivative can be used to prepare hydrogels. In this study, the temperature-responsive hydrogels were prepared by blending methyl cellulose (MC) or hydroxypropylmethyl cellulose (HPMC) with potassium sulfate ( $K_2SO_4$ ) to modify the hydrophobic interaction and influence the gelation at room temperature. Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) and thermogravimetric analyzer (TGA) were used to assess the appearance and moisture retention capability of the hydrogels. The results showed that MC and HPMC raw materials and hydrogels have the same chemical and thermal characteristics. The appearance of the  $K_2SO_4$  blended MC and HPMC hydrogels were similar to commercial soil conditioner (CS). Our results demonstrated that cellulose derivatived hydrogels have higher moisture retention capability than the CS hydrogel.

【Key words】 cellulose derivatives; hydrogel; hydroxypropylmethyl cellulose; methyl cellulose; moisture retention capability.

## 一、前言

凝膠 (Gel) 和水膠皆具有網狀交聯結構，分別為可吸收大量溶劑及水分，水膠包含親水性官能基，如OH、 $NH_2$ 、COOH、CONH、 $CONH_2$ 或 $SO_3H$  (Ullah et al. 2015)。水膠可吸收自身乾重數倍至千倍之水分，其網狀結構透過分子糾纏 (Molecular entanglements) 或二次力 (離子鍵、氫鍵或疏水作用力) 而結合在一起時稱為可逆或物理水膠；透過共價鍵結合稱為永久性或化學水膠 (Hoffman 2012; Gyles et al. 2017)。水膠可用於衛生產品、農業、藥物傳輸、密封、人造雪、食品添加劑、藥品、生物醫學、再生醫學、傷口敷料、生物分子或細胞分離及生物感測器等 (Ahmed 2015)，依照原料來源可分為合成水膠 (Synthetic hydrogel) 及天然水膠 (Natural hydrogel)，合成水膠之基質之如聚-N-異丙基丙烯醯胺 (Poly (N-isopropylacrylamide), NIPAAm) 或聚乙烯吡咯 (Poly (vinylpyrrolidone), PVP) 等高分子，天然者為基質可使用葡聚糖 (Glucan)、海藻酸鹽 (Alginate)、幾丁聚醣 (Chitosan)、明膠 (Gelatin)、澱粉 (Starch) 或纖維素等 (Kamoun et al. 2015)。

世界各地的農業主要依賴大量水資源灌溉，約有70%淡水應用於生產農產品，然而乾

旱地區因氣候變遷及降雨頻率的改變導致作物產量下降，現今為提高農業水資源使用效率，將水膠應用於農業土壤之保水性提升，即為一種土壤改良劑，可改變土壤結構或物理性質進而穩定土壤團粒 (Soil aggregates) 的材料，由於乾旱/半乾旱的土壤有機質含量低，土壤中添加親水性水膠或腐植質 (Humus) 增加保水性，水膠亦可增加陽離子交換能力與土壤整體之物理性質 (Thombare et al. 2018)；合成水膠之吸水率及化學性質較天然者佳，其機械强度高可減緩降解速率並提升耐久性 (Ahmed 2015)，因其不易被生物降解且價格便宜，因此目前廣泛用於農業，目前用於土壤改良劑主要以聚丙烯酸酯 (Polyacrylates) 或聚丙烯醯胺 (Polyacrylamides, PAM) 為主，兩者皆為石油基原料對環境成本高，其降解產物對環境和健康造成危害，PAM不可被生物分解且PAM之單體為神經毒素，又聚丙烯酸酯分解後之丙烯酸對動物具低毒性，因此使用合成水膠於農業為須關注之議題 (Sadeghi et al. 2016)。

纖維素為地球上極為豐富的自然高分子，具備生物相容性、生物降解性、環境友好、低成本及可再生性，且纖維素含有羥基，為水膠所需之結構。本研究團隊曾利用聚乙二醇二縮水甘油醚 (Polyethylene glycol diglycidyl ether,

PEGDE) 作為化學交聯劑，改質羧甲基纖維素 (Sodium carboxymethyl cellulose, NaCMC) 製備具化學交聯之水膠，添加於砂質土壤可提升13%容水量並控制水分及附載物之釋放速率，且不同分子量及比例PEGDE可控制水膠膨潤率 (謝湘懿 2017；陳羿樺等 2018；何怡昕 2018)。MC與HPMC為溫度敏感性水膠材料，而硫酸鉀可作為植物營養中鉀肥的來源，本團隊先前研究MC與HPMC添加硫酸鉀所製作水膠之溶膠-凝膠轉變溫度分別由55.6°C及67.4°C降至27.8°C至35.1°C，MC和HPMC粉末則直接溶解於水中，製備為乾膠吸水膨潤率達20倍以上，掃描電子顯微鏡 (Scanning electron microscope, SEM) 結果顯示其乾燥水膠具有多孔性，添加硫酸鉀降低其孔洞尺寸，如直接使

用纖維素衍生物未具有孔洞性，因此於室溫可作為改良劑將水分釋放於土壤中，較高溫之環境下水膠成凝膠狀態可使水分不易散失，且經植物生長試驗證實水膠為無毒性，且添加硫酸鉀能改善水膠的機械強度，於土壤中能維持形態並增加土壤之物理性質；於肥料釋放實驗可降低肥料釋放速率 (Chen & Chen 2019)。

纖維素衍生物水膠為溫度敏感性且於土壤中具保水及緩釋肥料等優點，本研究則進一步探討纖維素衍生物水膠經由烘箱乾燥形成乾膠 (Xerogel)，比較纖維素基質原料與乾膠之FT-IR、TGA結構，並以市售產品為試驗之對照組，比較吸水膨潤形態及保水力，探討取代聚丙烯醯胺保水劑之潛力。

表1. 纖維素水膠之製備條件及代號。

Table 1. Preparation conditions and code names of cellulose hydrogels.

Code	Polymeric materials	Polymeric materials (w/v)		K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (M)
		Concentration		
MC-0	MC	2		0
HPMC-0	HPMC	2		0
MC-0.25	MC	2		0.25
HPMC-0.25	HPMC	2		0.25
CS*	Polyacrylamides	0		0

\* Commercial soil conditioner.

## 二、材料與方法

### (一) 試驗材料

#### 1. 纖維素衍生物

MC (2%<sub>(aq)</sub>)，產品標示黏度為3,000-5,600 cps) 及HPMC (2%<sub>(aq)</sub>)，產品標示黏度為4,000 cps)，ACROS公司，赫爾，比利時。

#### 2. 化學藥品

硫酸鉀，購自Sigma-Aldrich公司，密蘇里州，美國。市售CS，白色粉末狀，購自農友種苗股份有限公司，大樹區，高雄市。

### (二) 試驗方法

#### 1. 纖維素衍生物粉末前處理

將纖維素衍生物粉末置於60°C真空烘箱乾燥隔夜去除水分。

#### 2. 製備纖維素衍生物水膠和乾膠

以蒸餾水或0.25 M之硫酸鉀水溶液配製濃度為2% (w/v) 之MC或HPMC溶液，以轉速500 rpm攪拌1.5 h使MC或HPMC溶解，靜置4°C環境獲得均勻透明溶液。將前述50 g之MC或HPMC溶液置於直徑9 cm培養皿，40°C環境乾

燥48 h形成乾膠。製備條件及樣品代號如表1所示。

### 3. FT-IR結構分析

使用儀器為傅立葉轉換紅外線光譜儀 (Perkin-Elmer Spectrum 100)，將纖維素衍生物及纖維素乾膠以60°C之真空烘箱乾燥，材料製備為薄膜進行穿透式檢測。測定光譜範圍4,000-650  $\text{cm}^{-1}$ ，解析度為4  $\text{cm}^{-1}$ ，掃描次數為4次。

### 4. TGA熱重分析

將纖維素乾膠磨碎後，取粒徑通過200 mesh篩網之纖維素衍生物原料及其製備之乾膠為試驗材料，使用60°C真空烘箱乾燥去除水分，採用儀器為熱重分析儀 (TGA; Perkin-Elmer Pyris 1)，測試環境氣體為氮氣。取乾燥之樣品置於白金坩鍋中，精稱之，測試時在氮氣環境下進行，測試之溫度範圍50-650°C，升溫速率10°C/min，由熱重 (Thermogravimetric, TG) 曲線及其導數熱重曲線 (Derivative thermogravimetry, DTG) 分析樣品熱裂解之重量變化。

### 5. 膨潤水膠外觀觀察

將乾膠磨碎後，取尺寸於10-20 mesh間之乾膠顆粒，精稱置於樣品瓶，以去離子水配製0.1、0.5、1、2及5% (w/v)，於30 min、3h及24 h觀察其膨潤水膠之外觀。

### 6. 水膠保水力測試

參考與修改前人文獻 (Raafat et al. 2012) 試驗方式，將纖維素乾膠 (10-20 mesh) 以去離子水配製濃度5% (w/v)，於室溫下 (25°C) 膨潤24 h，此時水膠於初始 ( $M_0$ ) 重量，置於室溫於不同時間點秤其重量 ( $M_t$ )。並計算其保水力 (Moisture retention)。

保水力 (Moisture retention) (%) =  $M_t/M_0 \times 100$

### 7. 統計分析

試驗採用SPSS (20) 套裝軟體進行變異數分析，透過Tukey's HSD檢定 (Tukey's honestly significant difference, HSD)，評估各組間之差異性 (信賴區間 95%)。

## 三、結果與討論

### (一) FT-IR結構分析

圖1A和B分別為MC、HPMC及其乾膠之FT-IR圖，MC在3,454  $\text{cm}^{-1}$ 為OH伸縮 (Stretching) 振動，2,920及2,830  $\text{cm}^{-1}$ 分別為C-H的對稱及不對稱伸縮振動 (Zhbakov 1966)，1,640  $\text{cm}^{-1}$ 為葡萄糖羰基 (Carbonyl) 之伸縮振動 (Biswas et al. 2013)，其他文獻指出1,640  $\text{cm}^{-1}$ 為纖維素非結晶區水分 (Yin et al. 2006) 或薄膜結合水之伸縮振動 (Khan et al. 2010; Tavera Quiroz et al. 2013)，1,460、1,380、1,320及950  $\text{cm}^{-1}$ 為O-CH<sub>3</sub>之變形 (Deformation) 振動 (Zhbakov 1966)，1,188  $\text{cm}^{-1}$ 為C-O-C之反對稱 (Anti-symmetric) 伸縮振動，1,050  $\text{cm}^{-1}$ 為骨架上C-O之伸縮振動 (Yin et al. 2006)。HPMC在3,485  $\text{cm}^{-1}$ 為OH伸縮振動，2,927  $\text{cm}^{-1}$ 為C-H之伸縮振動，1,634  $\text{cm}^{-1}$ 為非結晶區之水分，1,458及1,378  $\text{cm}^{-1}$ 分別為CH<sub>2</sub>與OH之剪切 (Scissoring) 及彎曲 (Bending) 振動，1,188  $\text{cm}^{-1}$ 為C-O-C之反對稱伸縮振動，1,063及943  $\text{cm}^{-1}$ 為C-O-C之伸縮振動 (Yin et al. 2006; Das et al. 2012; Ding et al. 2015)。由上述結果證明此即為MC和HPMC結構，且乾膠與原料具相同之吸收圖譜，表示乾膠製程未影響結構性質。

### (二) 熱重分析

纖維素之熱重損失分為四個連續階段，第一階段發生於25-150°C，此階段為物理水之脫附 (Desorption)；第二階段發生於150-240°C，此階段為纖維素單體之脫水作用 (Dehydration)；第三階段發生於240-400°C，此階段為糖苷鍵 (Glycosidic linkage) 和C-O、C-C鍵之斷裂；第四階段發生於400°C以上，此階段為芳香烴化 (Aromatization) (Tang & Bacon 1964; Xin et al. 2015)。圖2A和B分別為MC、HPMC其乾膠之TG及DTG圖。表2為MC、HPMC其乾膠之熱重分析參數，MC、HPMC及其乾膠之起始熱裂解溫度為318-345°C，最快熱裂解溫度為358-366°C，其結果與前人文獻結果相似 (Shetty et al. 2015; Nadour et al.

2017)。乾膠之起始熱裂解溫度略高於原料，推測可能是高分子製備過程中，纖維素側鏈烷

基產生構型改變 (Conformational changes) 和物理交聯導致熱穩定性升高 (Trivedi et al. 2015)。

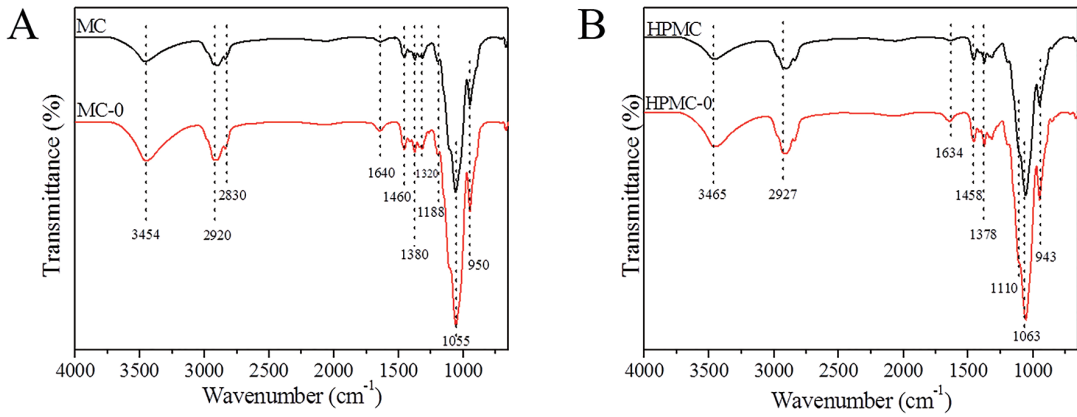


圖1. MC、HPMC及其乾膠之FTIR圖譜。  
Figure 1. FT-IR spectra of MC, HPMC and their xerogels.

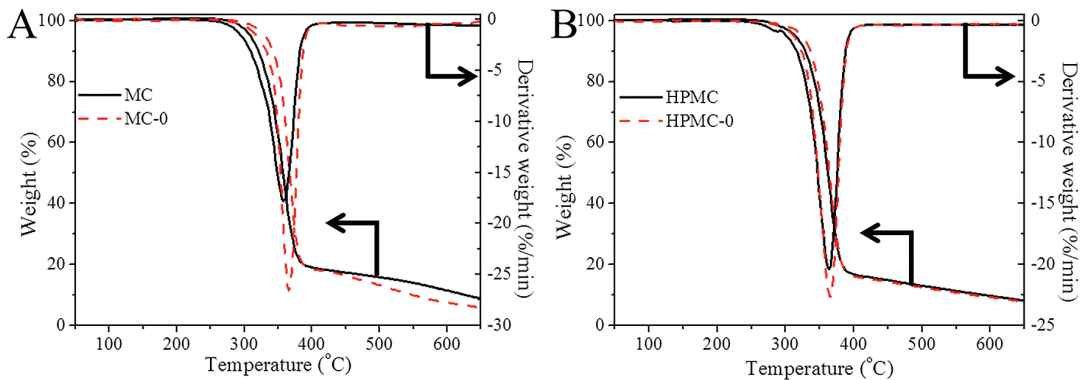


圖2. MC、HPMC及其乾膠之TGA與DTG曲線。  
Figure 2. TG and DTG curves TGA of MC, HPMC and their xerogels.

表2. MC、HPMC及其乾膠之TGA分析參數。  
Table 2. TGA parameters of MC, HPMC and their xerogels.

Sample	Onset temperature <sup>1</sup> (°C)	Peak temperature <sup>2</sup> (°C)	End temperature <sup>3</sup> (°C)	Max. WL rate (%/min) <sup>4</sup>	Char yield at 650°C (%)
MC	318	358	378	-18	9
MC-0	345	366	379	-27	6
HPMC	332	363	379	-20	8
HPMC-0	339	365	380	-23	7

<sup>1</sup> The initial decomposition temperature.  
<sup>2</sup> The temperature at the maximum rate of weight loss.  
<sup>3</sup> The final decomposition temperature.  
<sup>4</sup> The maximal weight-loss rate.

### (三) 水膠外觀觀察

Sannino et al. (2009) 報告指出混用細顆粒水膠於土壤可能形成一層基質/凝膠混合物 (Substrate/gel mixture)，進一步限制土壤空氣和水的流動；反之，分散顆粒狀的水膠可使土壤產生良好的空氣流動，且氧氣可促進植物根部伸展及大量吸收水分與營養 (Lemon & Erickson 1955)，本試驗觀察不同水膠和去離子水重量比於室溫環境膨潤之外觀形態，了解其應用於土壤之空氣流通性。

圖3為不同濃度0.1、0.5、1、2及5%CS

於室溫下0.5、3及24 h之外觀，粉末固體形態CS吸水逐漸膨潤為水膠形態，重量比0.5%之CS於2 h後呈現無流動性水膠，為分散顆粒形態，而重量比大於1%則可於0.5 h後形成水膠團塊。圖4為不同重量比纖維素基質乾膠膨潤24 h之外觀，重量比小於5%之乾膠無法完全形成水膠，仍具有流動性，而5%之MC-0和MC-0.25膨潤後可凝結成無流動性之水膠，5%之HPMC-0和HPMC-0.25則仍具有流動性，5%之MC-0.25水膠膨潤形態與CS相似，接近分散顆粒形態。

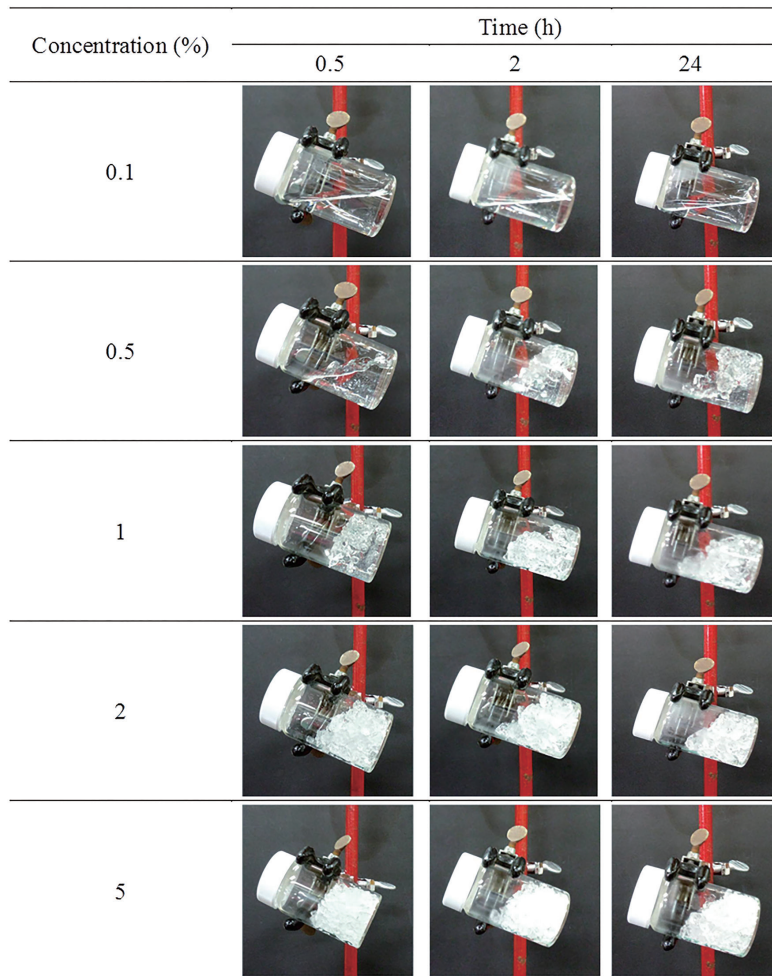


圖3. 不同重量比商用保水劑於去離子水之外觀形態。

Figure 3. The photographs with different weight ratio of swollen CS in deionized water after 0.5, 2 and 24 h.

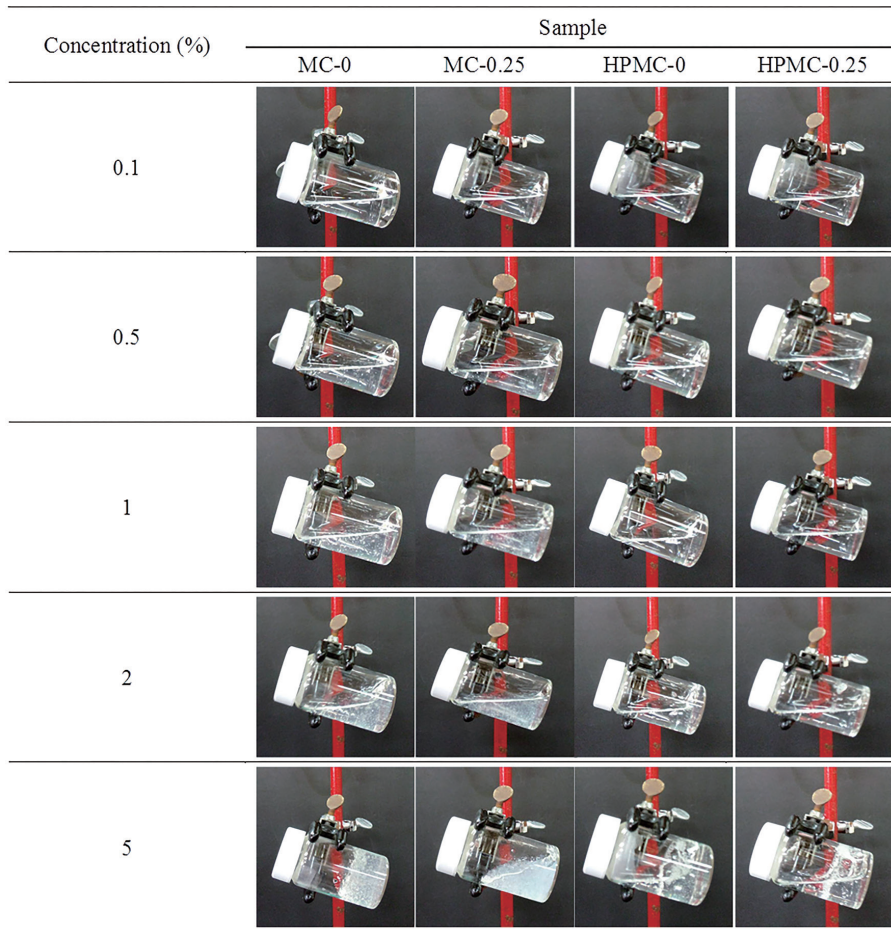


圖4. 不同重量比MC-0、M-0.25、HPMC-0及H-0.25水膠於去離子水膨潤24 h之外觀形態。  
Figure 4. The photographs with different weight ratios of swollen MC-0, M-0.25, HPMC-0 and H-0.25 in deionized water after 24 h.

(四) 水膠保水力測試

水膠可吸收及保存大量水分，本試驗探討CS、MC-0、HPMC-0及含0.25 M  $K_2SO_4$ 之M-0.25及H-0.25水膠於室溫環境之保水性，以水為空白組，圖5為不同天數之保水力結果，結果顯示樣品之保水力隨時間延長而下降，由表3可知水、CS、MC-0、HPMC-0、M-0.25及H-0.25水膠於第12天之保水力分別為40、39、52、55、52及45%，統計結果顯示MC-0、HPMC-0及M-0.25水膠相較於CS及空白組具有顯著較高之保水力。而水、CS、MC-0、

HPMC-0、M-0.25及H-0.25水膠於第20天之保水力分別為9、10、25、29、28及18%，水於22天蒸發，MC-0、HPMC-0及M-0.25水膠保水力顯著高於空白組及CS。水膠最低保水力者為H-0.25，於室溫環境膨潤無法形成凝膠態，其上層大部分為水溶液。結果證實纖維素基質水膠之保水力較市售土壤改良劑佳，此與先前研究可增加砂質土壤保水率結果相同，實驗過程發現水分逐漸散失後，纖維素衍生物水膠聚集現象，而CS則為顆粒分散之形態 (Chen & Chen 2019)。

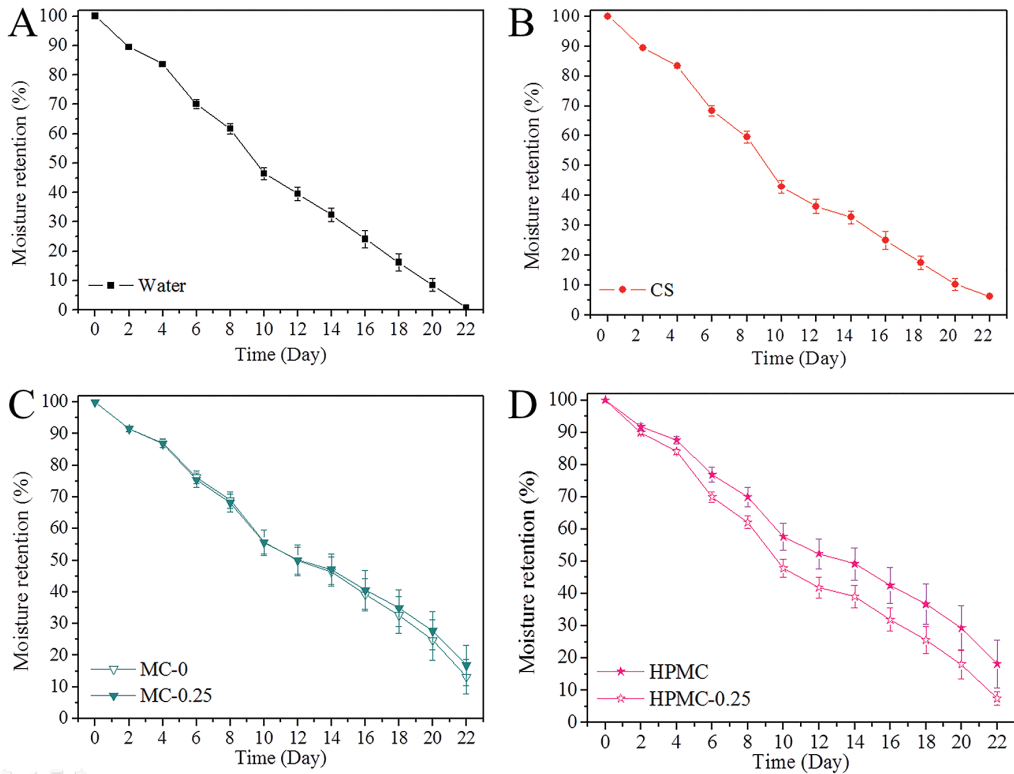


圖5. 水(A)、CS (B)、MC基質(C)及HPMC基質(D)水膠之保水率。

Figure 5. Moisture retention of water (A), CS (B), MC-based (C) and HPMC-based (D) hydrogels.

表3. 水(A)、CS(B)、MC基質(C)及HPMC基質(D)水膠之保水率統計結果。

Table 3. Statistical tests of moisture retention of water, CS, MC and HPMC hydrogels.

Sample	Moisture retention (%)					
	Time (Day)	4	8	12	16	20
Water		84 <sup>a</sup>	62 <sup>a</sup>	40 <sup>a</sup>	24 <sup>a</sup>	9 <sup>a</sup>
CS		84 <sup>a</sup>	61 <sup>a</sup>	39 <sup>a</sup>	25 <sup>ab</sup>	10 <sup>ab</sup>
MC-0		88 <sup>cd</sup>	71 <sup>c</sup>	52 <sup>b</sup>	39 <sup>cd</sup>	25 <sup>cd</sup>
HPMC-0		88 <sup>d</sup>	71 <sup>c</sup>	55 <sup>b</sup>	42 <sup>d</sup>	29 <sup>de</sup>
MC-0.25		88 <sup>cd</sup>	70 <sup>c</sup>	52 <sup>b</sup>	41 <sup>d</sup>	28 <sup>de</sup>
HPMC-0.25		84 <sup>ab</sup>	64 <sup>ab</sup>	45 <sup>a</sup>	32 <sup>bc</sup>	18 <sup>bc</sup>

#### 四、結論

本研究使用甲基纖維素及羥丙基甲基纖維素製備纖維素衍生物水膠，並觀察其基本性質。試驗結果指出，MC及HPMC兩者經過

溶解及再乾燥後與原先材料之化學結構無差異，可直接參考原材料之化學相容性；MC及HPMC乾膠之熱穩定性略高於原料。纖維素衍生物基質乾膠可與去離子水以重量比5%



配製，並於24 h後形成凝膠態，其中以5%之M-0.25水膠膨潤後與市售土壤改良劑之形態較為相似，且MC-0、HPMC-0及M-0.25水膠保水力顯著高於市售保水劑。本試驗製備之纖維素水膠製備過程無衍生其他物質之問題並保有良好的保水性質，可模擬於大氣環境之下，未來可做為傷口敷料或其他生醫材料應用之參考。

### 致謝

本研究承蒙國立中興大學實驗林研究計畫(1061011A-8)和科技部計畫補助(104-2313-B-005-035-; 105-2313-B-005-006-; 107-2311-B-005-010-MY3)，特此申謝。

### 五、引用文獻

- Ahmed EM (2015) Hydrogel: Preparation, characterization, and applications: A review. *Journal of Advanced Research* 6: 105-121.
- Biswas A, Kim S, Selling GW, Cheng HN (2013) Microwave-assisted synthesis of alkyl cellulose in aqueous medium. *Carbohydrate Polymers* 94: 120-123.
- Chen YC, Chen YH (2019) Thermo and pH-responsive methylcellulose and hydroxypropyl methylcellulose hydrogels containing  $K_2SO_4$  for water retention and a controlled-release water-soluble fertilizer. *Science of the Total Environment* 655: 958-967.
- Das R, Panda AB, Pal S (2012) Synthesis and characterization of a novel polymeric hydrogel based on hydroxypropyl methyl cellulose grafted with polyacrylamide. *Cellulose* 19(3): 933-945.
- Ding C, Zhang M, Li G (2015) Preparation and characterization of collagen/hydroxypropyl methylcellulose (HPMC) blend film. *Carbohydrate Polymers* 119: 194-201.
- Gyles DA, Castro LD, Silva JOC, Ribeiro-Costa RM (2017) A review of the designs and prominent biomedical advances of natural and synthetic hydrogel formulations. *European Polymer Journal* 88: 373-392.
- Hoffman AS (2012) Hydrogels for biomedical applications. *Advanced Drug Delivery Reviews* 64: 18-23.
- Kamoun EA, Chen X, Mohy Eldin MS, Kenawy ERS (2015) Crosslinked poly (vinyl alcohol) hydrogels for wound dressing applications: A review of remarkably blended polymers. *Arabian Journal of Chemistry* 8: 1-14.
- Khan RA, Salmieri S, Dussault D, Uribe-Calderon J, Kamal MR, Safrany A, Lacroix M (2010) Production and properties of nanocellulose-reinforced methylcellulose-based biodegradable films. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 58: 7878-7885.
- Lemon ER, Erickson AE (1955) The principle of the platinum micro-electrode as a method of characterizing soil aeration. *Soil Science* 79: 383-392.
- Nadour M, Boukraa F, Ouradi A, Benaboura A (2017) Effects of methylcellulose on the properties and morphology of polysulfone membranes prepared by phase inversion. *Materials Research* 20: 339-348.
- Raafat AI, Eid M, El-Arnaouty MB (2012) Radiation synthesis of superabsorbent CMC based hydrogels for agriculture applications. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B* 283: 71-76.
- Sadeghi SH, Hazbavi Z, Younesi H, Bahramifar N (2016) Trade-off between runoff and sediments from treated erosion plots and polyacrylamide and acrylamide residues. *Catena* 142: 213-220.
- Sannino A, Demitri C, Madaghiele M (2009) Biodegradable cellulose-based hydrogels:

- design and applications. *Materials* 2: 353-373.
- Shetty GR, Rao BL, Asha S, Wang Y, Sangappa Y (2015) Preparation and characterization of silk fibroin/hydroxypropyl methyl cellulose (HPMC) blend films. *Fibers and Polymers* 16: 1734-1741.
- Tang, MM, Bacon R (1964) Carbonization of cellulose fibers-I. Low temperature pyrolysis. *Carbon* 2: 211-220.
- Tavera Quiroz MJ, Lecot J, Bertola N, Pinotti A (2013) Stability of methylcellulose-based films after being subjected to different conservation and processing temperatures. *Materials Science and Engineering: C* 33: 2918-2925.
- Thombare N, Mishra S, Siddiqui MZ, Jha U, Singh D, Mahajan GR (2018) Design and development of guar gum based novel, superabsorbent and moisture retaining hydrogels for agricultural applications. *Carbohydrate Polymers* 185: 169-178.
- Trivedi MK, Branton A, Trivedi D, Nayak G, Mishra R, Jana S (2015) Characterization of physicochemical and thermal properties of biofield treated ethyl cellulose and methyl cellulose. *International Journal of Biomedical Materials Research* 3: 83-91.
- Ullah F, Othman MBH, Javed F, Ahmad Z, Akil HM (2015) Classification, processing and application of hydrogels: A review. *Materials Science and Engineering: C* 57: 414-433.
- Xin S, Yang H, Chen Y, Yang M, Chen L, Wang X, Chen H (2015) Chemical structure evolution of char during the pyrolysis of cellulose. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 116: 263-271.
- Yin J, Luo K, Chen X, Khutoryanskiy VV (2006) Miscibility studies of the blends of chitosan with some cellulose ethers. *Carbohydrate Polymers* 63(2): 238-244.
- Zhbankov RG (1966) *Infrared Spectra of Cellulose and its Derivatives*. Springer-Verlag, US.
- 何怡昕 (2018) 製備纖維素基質交聯水膠及其於親水與疏水性藥物控制釋放之性質。國立中興大學森林學系碩士學位論文。
- 陳羿樺、鄭霖澤、陳奕君 (2018) 應用不同製備條件之纖維素水膠改良砂質與森林土壤保水性之探討。林業研究季刊40(1): 31-40。
- 謝湘懿 (2017) 羧甲基纖維素鈉-聚乙二醇水膠之製備及其在農業之應用。國立中興大學森林學系碩士學位論文。