

研究報告

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

陳羿樺¹ 鄭霖澤¹ 陳奕君^{1*}

【摘要】植物保水劑在土壤中能將雨水或灌溉用水儲存吸收，具有吸水、儲水、保水的功能。纖維素衍生物製備水膠 (Hydrogel) 乾燥後製備乾膠 (Xerogel)，於混合後具有將水分保留於土壤之保水劑特性。本研究利用甲基纖維素 (Methyl cellulose, MC) 及羧甲基纖維素鈉 (Sodium carboxymethyl cellulose, NaCMC) 製備水膠，其中MC加入硫酸鉀製備具有室溫溫度敏感性纖維素水膠，NaCMC加入聚乙二醇二縮水甘油醚 (Polyethylene glycol diglycidyl ether, PEGDE) 製作具有化學交聯結構纖維素水膠，探討其對於砂土 (Sandy soil) 及森林土壤之保水性質之影響。由實驗結果得知，添加水膠可提升砂土含水量13%以上，保水力可延長8天以上，且含水量與保水力隨添加量之水膠增加而上升；添加水膠於惠蓀林場土壤亦能有效延長土壤保水力。兩種水膠土壤保水力以添加MC基質水膠之效果較佳。本研究結果顯示纖維素基質水膠具有做為植物保水劑的潛力。

【關鍵詞】纖維素衍生物、森林土壤、水膠、砂土、保水性。

Research paper

The Improvement of Water Retention in Sandy and Forest Soils by Different Cellulose-based Hydrogels

Yi-Hua Chen¹ Lin-Tse Cheng¹ Yi-Chun Chen^{1*}

【Abstract】Soil conditioner can absorb and retain rain water in the soil by slow releasing water and reducing water loss. Hydrogels that derived from cellulose derivatives can be transformed into xerogels by drying in the oven and applied as soil conditioners. In this study, hydrogels derived from methylcellulose (MC) and Sodium carboxymethyl cellulose (NaCMC) were used. The temperature-responsive hydrogel was prepared by blending MC with potassium sulfate (K_2SO_4) to modify the hydrophobic interaction and influences the gelation at room temperature. The NaCMC based hydrogels was crosslinked by polyethylene glycol diglycidyl ether (PEGDE). The results indicated that increasing the dosage of hydrogels increased the water-holding capacity of sandy soil. Sandy soil treated with hydrogel significantly improved the water-holding capacities by 13% and the water-retention time by 8 days. Water-retention capacities of forest soil

1. 國立中興大學森林學系。

Department of Forestry, National Chung Hsing University.

* 通訊作者，40227台中市南區興大路145號。

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

was also significantly improved. The MC based temperature-responsive hydrogel showed a better water-retention capacity than the NaCMC based hydrogels for both soil types. Our results suggested that the cellulose-based hydrogels have high potential to be applied as soil conditioners.

【Key words】 Cellulose derivatives; Hydrogel; Water retention property; Forest soil; Sandy soil.

一、前言

目前溫室效應造成全球暖化衝擊生態環境，且面對溫度升高與缺水問題 (Arnell 1999; Kummu et al. 2016)，有鑑於本校實驗林管理處之惠蓀林場與新化林場含有部分林地為砂質壤土 (王志強等2003; 童秋霞等 2002)，為克服新苗或保砂草類種植並對抗乾旱的天候，可應用植物保水劑作為吸水、儲水、保水的功能，植物保水劑為應用植物上的網狀交聯有機高分子，在土壤中能將雨水或灌溉用水儲存吸收，減少水分流失量，緩釋至土壤中，進而使植物根系水分充足，可應用於植物的種植，另用於改善生態環境、防風固砂等，植物保水劑可增加珍貴水資源的使用效率。

目前市面上使用的植物保水劑，已大量使用在植物栽培應用上，如在Hüttermann et al. (1999) 應用聚丙烯醯胺 (Polyacrylamine, PAM) 水膠做為保水劑，研究結果指出可增加 *Pinus halepensis* 缺水狀態之幼苗存活率。Akhter et al. (2004) 以聚甲基丙烯醯胺 (Poly (N, N-methyl-bis-acrylamide)) 和聚丙烯酸 (Poly (acrylic acid)) 水膠應用於砂質土壤保水，以大麥 (*Hordeum vulgare* L.)、小麥 (*Triticum aestivum* L.) 和鷹嘴豆 (*Cicer arietinum* L.) 進行試驗，研究結果指出水膠可有效增加土壤濕度和植物生長量。Chen et al. (2004) 應用商業品名為Stockosorb K410之Acrylamide/acrylic acid 共聚物架橋型水膠為土壤改質劑，使 *Populus euphratica* 可種植於含鹽土壤中，加入0.6%水膠後改善幼苗生長率，並使植物根長及根系表面積 (Root surface area) 增加。Orikiriza et al. (2009) 聚丙烯酸酯 (Polyacrylate) 水膠應用於缺水環境可提高植物存活率，其針對9種樹種進行試驗，

Eucalyptus grandis、*Eucalyptus citriodora*、*Pinus caribaea*、*Araucaria cunninghamii*、*Melia volkensii*、*Grevillea robusta*、*Azadirachta indica*、*Maesopsis eminii* 和 *Terminalia superba*，研究結果顯示水膠可增加植物水分吸收及生長量。Lucero et al. (2010) 以澱粉、聚丙烯酸 (Poly (acrylic acid)) 水膠為材料進行乾旱地區牧場草類恢復生長之研究，以 *Bouteloua eriopoda* 於溫室試驗，結果指出增加土壤濕度及根的生長深度。陳羿樺和陳奕君 (2017) 指出目前使用之合成水膠及天然基質水膠均有使用於植物保水之應用，然而目前使用植物保水劑以丙烯酸鹽類聚合而成之聚丙烯醯胺樹脂為主，而聚丙烯醯胺的製造是以石化原料合成為主，且食物暴露於丙烯醯胺環境下，則增加食入汙染食物的風險，丙烯醯胺影響人體的神經系統和生殖系統 (Friedman 2003)。

纖維素為自然界最豐富的再生性資源，為一種具有結晶結構的多醣類，是由直鏈狀的葡萄糖鏈所組成。纖維素應用已有悠久的歷史，傳統應用如紙、紡織品等，科技日新月異，纖維素使用於各種新領域，新應用日漸矚目，如液晶螢幕的基材 (Nogi & Yano 2008)、人工腎臟 (Artificial kidney) 的中空纖維 (Meltzer et al. 1968)、藥物組成 (Colombo et al. 1999; Gunduz et al. 2013)、食品添加物 (Suzuki & Makino 1999) 等。纖維素為長鏈狀結構，為工業上大量使用的材料，具有許多的衍生物，纖維素可做為水膠 (Hydrogel) 之應用。水膠是一種網狀交聯 (Crosslinking) 親水性高分子，其交聯方式可分為物理交聯和化學交聯 (Van Vlierberghe et al. 2011)，本身在水中會被膨潤 (Swelling)，同時可以在膨潤狀態下，吸住並保有巨量體積

的水，利用不同配方的比例，可控制其溫度敏感性、機械和吸水性質，纖維素水膠可應用於細胞培養 (Chen et al. 2006)、傷口敷料 (Czaja et al. 2006; Matthew et al. 1995)、保水劑 (Chang et al. 2010; Pan & Ragauskas 2012) 等。纖維素應用於多種民生用途，為高潛力的可再生性材料。

本團隊研發溫度敏感性 (Temperature responsive) 纖維素水膠和化學交聯纖維素水膠應用於增加土壤保水性，MC為負溫度敏感性水膠材料， K_2SO_4 可做為植物營養中的鉀肥來源，MC加入鹽類 K_2SO_4 ，水膠溶液-凝膠變化溫度由原 $60^\circ C$ 降至 $27^\circ C$ ，室溫下可做為植物保水劑釋放水份於土壤中，較高溫環境下水膠呈現凝穩定的膠態，使水分不易散失可降低，做為植物保水劑緩釋水份於土壤中，吸水膨潤率可達20倍以上 (陳羿樺 2017)。使用架橋劑可增加高分子網狀架橋結構，因此本研究以PEGDE做為化學交聯劑，改質纖維素基質水膠為具有化學交聯之水膠，可控制其水膠之顯微孔洞尺寸，因此可控制其水分及負載物之釋放速率 (謝湘懿 2017)。

藉由上述材料特性，本研究應用溫度敏感性MC水膠及PEGDE交聯CMCNa水膠於植物保水劑，經由烘箱乾燥後形成乾膠，探討乾膠之凝膠分率 (Gel fraction)，藉以了解高分子之網狀架橋密度，並已砂土及惠蓀林場森林土壤為試驗樣本，探討其含水量及保水力，並以原始土壤為空白組，市售保水劑為對照組，探討不同製備條件纖維素基質水膠提升土壤保水性之效益。

二、材料與方法

(一) 試驗材料

1. 纖維素衍生物

MC (2% (aq), 產品標示黏度為3000-5600 cps) 及NaCMC (1% (aq), 產品標示黏度為2500-4500 cps), Acros公司, 赫爾, 比利時。

2. 化學藥品

硫酸鉀 (Potassium sulfate, K_2SO_4) 與聚乙二醇二縮水甘油醚 (Polyethylene glycol diglycidyl ether, PEGDE) (Mn=500), 購自Sigma-Aldrich公司, 密蘇里州, 美國。市售土壤保水劑 (Commercial soil conditioner) 購自農友種苗股份有限公司, 大樹區, 高雄市。砂土購自信益建材股份有限公司 (Hsin-I Material Co., Ltd), 大里區, 台中市。本實驗之森林土壤於2017年6月採自南投縣惠蓀林場天然林。

(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 $60^\circ C$ 真空烘箱乾燥隔夜以去除水分。

2. 纖維素衍生物水膠和乾膠之製備

以蒸餾水或0.1 M之 K_2SO_4 水溶液配製濃度為2% (w/v) 之MC溶液，以轉速500 rpm攪拌1.5 hr使MC溶解，靜置 $4^\circ C$ 環境以獲得均勻透明溶液。本研究之NaCMC取代度為0.9，一脫水葡萄糖單元之分子量為234，故每1 g之NaCMC所含COOH為3.8 mmole，每1 g之PEGDE所含環氧基 (Epoxy group) 為4 mmole，另精秤NaCMC以蒸餾水配製2%溶液，取設定量PEGDE添加至NaCMC溶液，以轉速500 rpm攪拌，設定反應溫度為 $25^\circ C$ ，反應時間分別為2 hr，反應完成後得透明狀溶液並靜置於 $4^\circ C$ 環境。將前述兩者纖維素衍生物溶液置於培養皿 $40^\circ C$ 環境下，乾燥48 hr形成乾膠。前述製備條件及樣品代號如表1所示。

3. 凝膠分率

將乾膠裁剪為小試片，以去離子水潤洗去除未反應物，並以 $40^\circ C$ 烘箱乾燥。取乾燥樣品精稱重量 (W_0)，置於50 mL蒸餾水之樣品瓶中並於 $60^\circ C$ 水浴槽靜置24 hr，取出樣品去除表面水分，置於 $40^\circ C$ 烘箱乾燥後精稱重量 (W_{24})，以下列公式計算凝膠分率。

$$\text{凝膠分率 (\%)} = \frac{W_{24}}{W_0} \times 100\%$$

4. 土壤之含水量及保水力測試

表1. 水膠成分 (g) 和代號

Table 1. Weight (g) of raw materials and code of hydrogels

Code	MC	NaCMC	K ₂ SO ₄	PEGDE	Water
CMC	-	2	-	-	100
1D	-	2	-	1	100
3D	-	2	-	3	100
M	2	-	-	-	100
MK	2	-	1.74	-	100
P*	-	-	-	-	-

*P: Commercial soil conditioner.

砂土與森林土壤以40°C烘箱乾燥24 hr並過篩 (10 mesh)，乾膠以磨粉機磨碎並過篩 (10-20 mesh) 並添加0.5、1、2% (w/w) 於砂土。砂土與森林土壤保水量及保水力之樣品以下列四種方式處理。砂質和森林土壤試驗時間分別為2016年8月和2017年8月。(Gonçalves et al., 2016)

- (1) 乾燥土壤40 g
- (2) 乾燥土壤40 g加水膠0.8 g (乾重)
- (3) 乾燥土壤40 g加水膠0.4 g (乾重)
- (4) 乾燥土壤40 g加水膠0.2 g (乾重)

樣品置於直徑4.5 cm之聚氯乙烯管以兩層尼龍布密封及秤重 (W_0)。從樣品管柱頂部加入自來水直到水從底部流出，3 hr後再次秤重 (W_1)。以下列計算容水量 (Water-holding capacity, WH%)：

$$\text{容水量 (\%)} = \frac{W_1 - W_0}{40} \times 100\%$$

土壤保水力測試則將管柱置於室溫環境，每1-3天秤重 (W_2)，試驗期間為30天。以下列公式計算保水力 (Water-retention ratio, WR%)：

$$\text{保水力 (\%)} = \frac{W_2 - W_0}{W_1 - W_0} \times 100\%$$

5. 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 honest significant difference, HSD)，評估各組間之差異性 (信賴區間95%)。

三、結果與討論

(一) 水膠凝膠分率測試

水膠由溶膠 (Sol) 與凝膠 (Gel) 組成，其機械性質主要由不溶部分網狀交聯結構提供，隨凝膠分率越高，交聯密度越高 (Kokabi et al. 2007)，圖1為不同方式製備之水膠凝膠分率，試驗結果指出未添加交聯劑之CMC水膠凝膠分率為0%，添加1及3% PEGDE使水膠之凝膠分率分別提高至49及55%，證明添加交聯劑可增加水膠之交聯密度。物理水膠之結構相較於化學水膠較為不穩定，然而結果指出M之凝膠分率為95%，此因MC為負溫度敏感性水膠。經先前研究結果發現凝膠溫度約為56°C，於60°C之環境下可形成凝膠 (Chen et al. 2006)；表1顯示K₂SO₄佔MK乾膠重46.5%，而MK之凝膠分率為55%乃因K₂SO₄溶解於水中，造成重量損失。本試驗可證明溫度敏感性及化學交聯水膠皆有部分不溶部分網狀交聯結構，可維持水分於土壤中。

(二) 砂質土壤之容水量及保水力試驗

由於乾旱及半乾旱地區的砂質土壤保水量不佳，易導致雨水及灌溉水流失過多 (Yu et

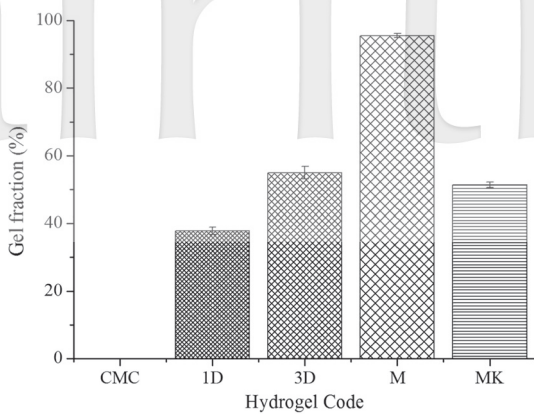


圖1. 不同組成物條件所製作水膠之凝膠分率。
Figure 1. The effect of formation on the gel fraction of hydrogels.

al. 2012), 造成農作物無法有效吸收水分, 為模擬保水不易地區之土壤含水量及保水力, 因此將砂土添加水膠及保水劑探討其保水性質。表2為砂質土壤添加0.5、1及2%之CMC、1D、3D、M、MK水膠後之土壤含水量, 砂土之含水量為30.6%, 表中所示添加水膠之含水量與砂土者有顯著差異, 證明添加水膠增加砂土含水量, 其含水量均在43.7%以上。添加CMC者具有最高含水量添加, 添加1D之含水量高於3D, 顯示高交聯密度使水分吸收較少; M水膠之含水量高於MK, 顯示添加鹽類後, 減少水

分吸收。而添加0.5、1及2% 市售保水劑P之含水量為47.0、47.8及54.8%。實驗結果指出纖維素基質水膠CMC、1D、M及MK具有高於市售土壤保水劑或相似之含水量。

圖3為砂土及其添加不同種類水膠及其比例之保水力, Demitri et al. (2013) 曾指出土壤含水量低於10-20%會使番茄萎凋, 因此試驗期間保水力低於10%即停止。結果顯示, 砂土之保水力於第10天即下降至2.7%, 添加0.5%水膠之保水力皆有增加5天以上的趨勢, 由此證實水膠吸水膨潤時, 可增加砂土保水力, 且保水力隨添加水膠比例上升。當添加量為2%時, CMC、1D、3D、M及MK組別之保水力低於10%的天數分別為第21、30、24、48及56天, 皆高於空白組之天數(8天), 顯示可維持植物所需水分的時間可延長。其中又以M及MK維持之天數高於第47天, 顯示以甲基纖維素為基質者結果最佳, Wang et al. (2008) 研究結果顯示當材料增加溫度敏感性鏈段長度則可增加其保水力, 顯示溫度敏感性區可增加保水力。且添加2% MK可維持至第54天之保水力為11.0%, 加入K₂SO₄之MK增加水膠的黏度(陳羿樺, 2017), 在砂質土壤中MK水膠易形成團塊, 使其延長保水力, 因此保水力維持時間高於M, 又化學交聯反應後影響水膠結構、膨潤

表2. 砂土添加不同比例水膠之含水量。

Table 2. Water-holding capacity of sandy soil mixed with various amount of hydrogels.

Sample	Amount of hydrogel (%)			
	0	0.5	1	2
Sandy soil	30.6 ± 1.3 ^a	-	-	-
CMC	-	59.1 ± 7.1 ^{bcd}	57.8 ± 4.9 ^{def}	62.3 ± 7.6 ^f
1D	-	52.5 ± 4.3 ^{bcd}	53.6 ± 13.8 ^{bcd}	57.3 ± 4.1 ^{ef}
3D	-	43.7 ± 4.1 ^{bc}	41.2 ± 4.7 ^b	46.1 ± 4.7 ^{bcd}
M	-	51.6 ± 4.4 ^{bcd}	54.5 ± 4.3 ^{cdef}	56.9 ± 4.3 ^{def}
MK	-	47.0 ± 4.6 ^{bcd}	47.0 ± 4.6 ^{bdc}	54.0 ± 4.1 ^{cdef}
P	-	47.0 ± 7.7 ^{bcd}	47.8 ± 8.7 ^{bcd}	54.8 ± 8.2 ^{cdrf}

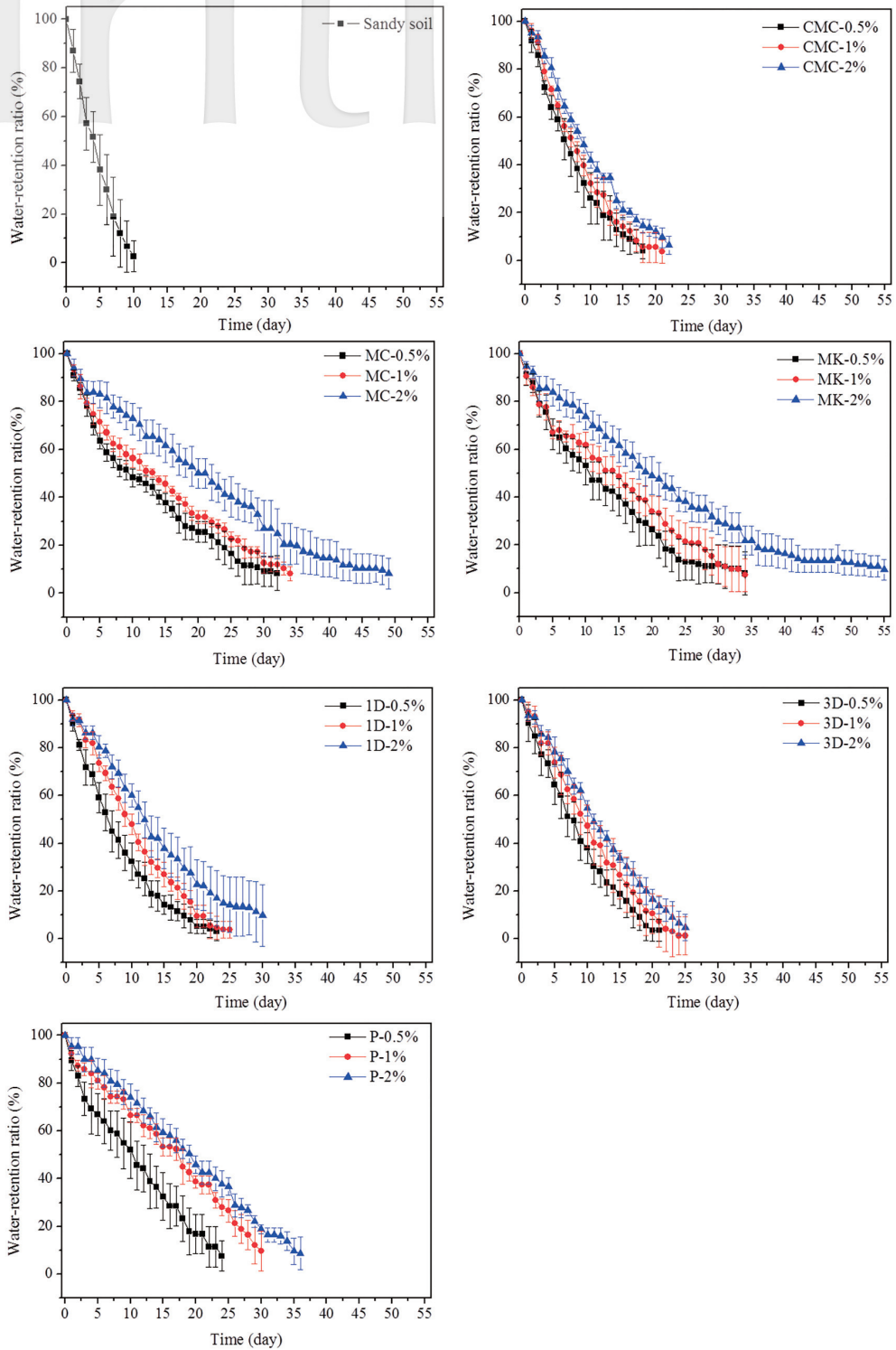


圖3. 砂土添加不同比例水膠及土壤保水劑之保水力。

Figure 3. Water retention of sandy soils and theirs mixed with various amount of hydrogels and commercial soil conditioners.

程度及應用，根據陳羿樺 (2017) 研究顯示，CMC、M及MK之平衡膨潤率高於1D與3D，因此M與MK具有較高之保水力，而CMC水膠結構易崩解，導致保水力較低。

(三) 森林土壤之含水量與保水力試驗

表2為森林土壤添加0.5、1及2%之CMC、1D、3D、M及MK水膠之含水量，砂土之含水量為30.6%。表中所示森林土壤空白組及添加水膠組別之含水量無顯著差異，證明森林土壤已具備高度含水量，含水量達63.5%，添加0.5-2%本研究所製備之水膠和市售植物保水劑皆無顯著提高含水量。添加水膠對森林土壤之保水率無明顯影響，前人研究指出關刀溪生態研究區之天然林土壤屬於黏土性質 (許博行和郭孟斯 1999)，證明森林土壤已具備高度含水量，含水量達63.5%以上。

圖4為森林土壤及其添加不同種類水膠及其比例之保水力。結果顯示，森林土壤之保水力於第14天即下降至9.8%，添加0.5%水膠之森林土壤保水力亦皆有增加的趨勢，由此證實水膠吸水膨潤時，可增加保水力。CMC、M、MK及P之保水力隨添加水膠比例上升，然而1D之添加量增加則無顯著提升保水力。當添加量為2%時，CMC、M、MK、1D及3D組別之

保水力低於10%的天數分別為第22、35、29、20及18天，皆高於空白組之天數 (14天)，這顯示可維持植物所需水分的時間可延長，添加水膠可增加保水力，其中又以M及MK維持之天數皆高於第29天，與砂質土壤相反MK所延長之天數低於M，推測其因森林土壤與M水膠混合性較佳。CMC及化學交聯水膠1D與3D結果與前述砂質土壤相似，保水力低於10%的天數為18-22天，此結果因為CMC結構易崩解及化學交聯水膠平衡膨潤率低。森林土壤可大量吸收水分，但無法長時間保留水分，顯示土壤種類影響土壤保水劑性質，經結果顯示土壤添水膠可延長其保水力之天數，並可做為保水劑有助於增加森林土壤保水性質，未來可助於樹木初植保水所用。

四、結論

以交聯劑PEGDE製備之羧甲基纖維素化學水膠可增加凝膠分率；甲基纖維素基質水膠於60°C環境之凝膠分率可高達95%以上。透過土壤保水試驗得知，本研究製備之溫度敏感性及化學架橋結構水膠於砂土試驗中，添加0.5%不僅使土壤保水量提升13%以上，亦使保水力增加8天以上。保水量與保水力隨添加量之增

表3. 森林土壤添加不同比例水膠及土壤保水劑之含水量。

Table 3. Water-holding capacity of forest soil mixed with various amount of hydrogels and commercial soil conditioners.

Sample	Amount of sample (%)			
	0	0.5	1	2
Forest soil	63.5 ± 1.4 ^a	-	-	-
NaCMC	-	61.5 ± 4.5 ^a	67.5 ± 3.8 ^a	68.5 ± 4.5 ^a
1D	-	58.0 ± 5.8 ^a	64.5 ± 2.1 ^a	62.5 ± 3.3 ^a
3D	-	61.0 ± 2.2 ^a	64.5 ± 2.1 ^a	62.5 ± 3.3 ^a
M	-	62.5 ± 4.1 ^a	63.5 ± 5.4 ^a	64.0 ± 5.2 ^a
MK	-	64.0 ± 2.1 ^a	66.5 ± 1.8 ^a	64.0 ± 2.2 ^a
P	-	63.5 ± 6.8 ^a	64.0 ± 4.0 ^a	67.5 ± 2.7 ^a

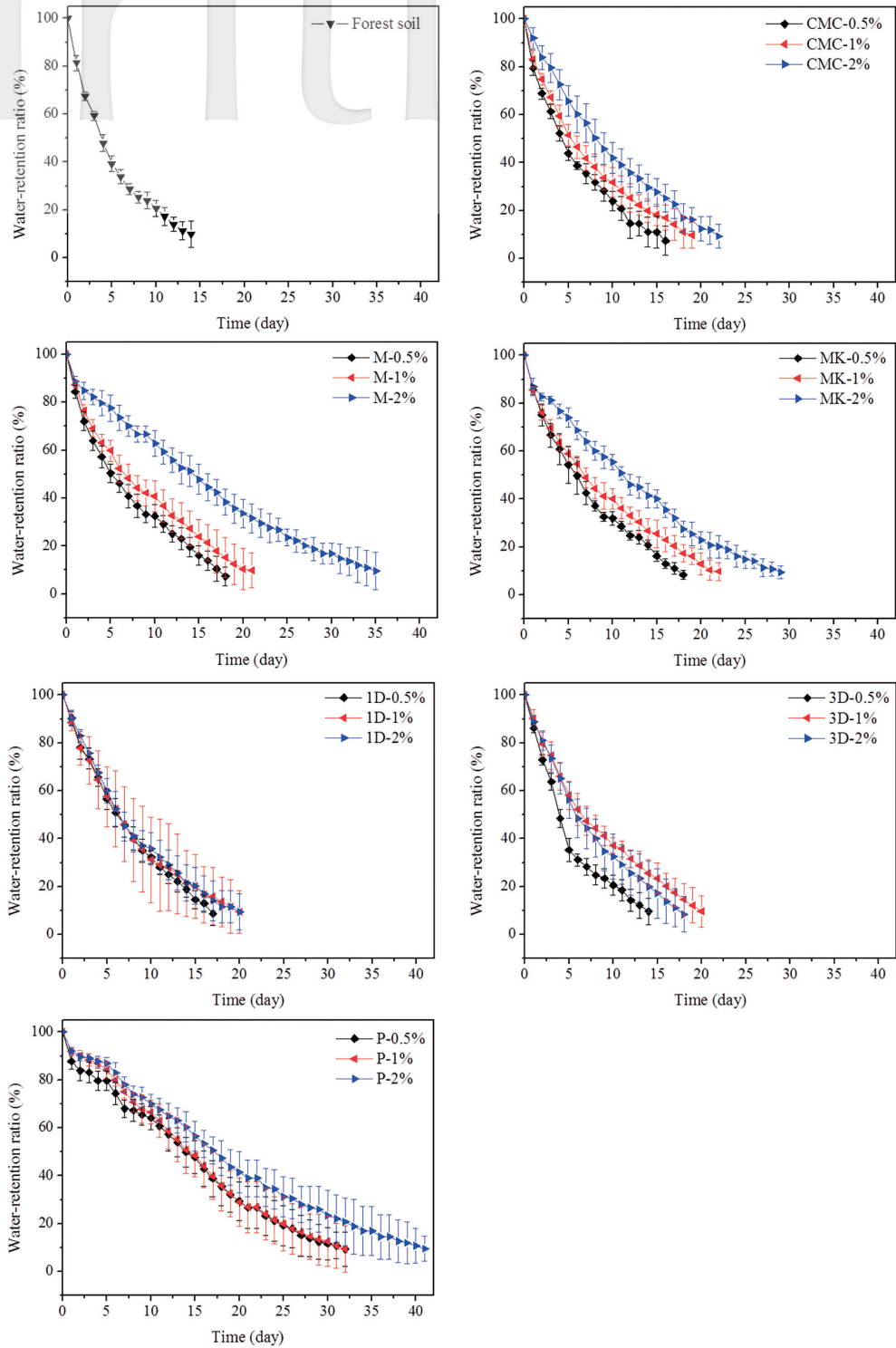


圖4. 森林土壤添加不同比例水膠及土壤保水劑之保水力。

Figure 4. Water retention of forest soils and their mixed with various amount of hydrogels and commercial soil conditioners.

加而上升；添加乾膠於森林土壤亦能效延長土壤保水力之天數。綜合上述結果，本研究製備之水膠可應用於乾旱或難以保持水分之砂質土壤地區極具潛力。

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 (105-2313-B-005-006-) 補助，特此申謝。

五、引用文獻

- Akhter J, Mahmood K, Malik K, Mardan A, Ahmad M, Iqbal M (2004) Effects of hydrogel amendment on water storage of sandy loam and loam soils and seedling growth of barley, wheat and chickpea. *Plant Soil and Environment* 50: 463-469.
- Arnell NW (1999) Climate change and global water resources. *Global Environ Change* 9, Supplement 1: S31-S49.
- Chang C, Duan B, Cai J, Zhang L (2010) Superabsorbent hydrogels based on cellulose for smart swelling and controllable delivery. *European Polymer Journal* 46: 92-100.
- Chen CH, Tsai CC, Chen W, Mi FL, Liang HF, Chen SC, Sung HW (2006) Novel living cell sheet harvest system composed of thermoreversible methylcellulose hydrogels. *Biomacromolecules* 7: 736-743.
- Chen S, Zomporodi M, Fritz E, Wang S, Hüttermann A (2004) Hydrogel modified uptake of salt ions and calcium in *Populus euphratica* under saline conditions. *Trees* 18: 175-183.
- Colombo P, Bettini R, Peppas NA (1999) Observation of swelling process and diffusion front position during swelling in hydroxypropyl methyl cellulose (HPMC) matrices containing a soluble drug. *Journal of Controlled Release* 61: 83-91.
- Czaja W, Krystynowicz A, Bielecki S, Brown Jr RM (2006) Microbial cellulose-the natural power to heal wounds. *Biomaterials* 27: 145-151.
- Demitri C, Scalera F, Madaghiele M, Sannino A, Maffezzoli A (2013) Potential of Cellulose-Based Superabsorbent Hydrogels as Water Reservoir in Agriculture *International Journal of Polymer Science* 2013: 1-6.
- Friedman M (2003) Chemistry, biochemistry, and safety of acrylamide. *A Review Journal of Agricultural and Food Chemistry* 51: 4504-4526.
- Gonçalves AAL, Fonseca AC, Fabela IGP, Coelho JFJ, Serra AC (2016) Synthesis and characterization of high performance superabsorbent hydrogels using [bis2-(methacryloyloxy) ethyl] phosphate as crosslinker. *Express Polymer Letters* 10: 248-258.
- Gunduz O, Ahmad Z, Stride E, Edirisinghe M (2013) Continuous generation of ethyl cellulose drug delivery nanocarriers from microbubbles. *Pharmaceutical Research* 30: 225-237.
- Hüttermann A, Zomporodi M, Reise K (1999) Addition of hydrogels to soil for prolonging the survival of *Pinus halepensis* seedlings subjected to drought. *Soil and Tillage Research* 50: 295-304.
- Kokabi M, Sirousazar M, Hassan ZM (2007) PVA-clay nanocomposite hydrogels for wound dressing. *European Polymer Journal* 43: 773-781.
- Kummu M, Guillaume JHA, de Moel H, Eisner S, Flörke M, Porkka M, Siebert S, Veldkamp TIE, Ward PJ (2016) The world's road to water scarcity: shortage and stress in the 20th

- century and pathways towards sustainability. *Scientific Reports* 6: 38495.
- Lucero ME, Dreesen DR, VanLeeuwen DM (2010) Using hydrogel filled, embedded tubes to sustain grass transplants for arid land restoration. *Journal of Arid Environments* 74: 987-990.
- Matthew IR, Browne RM, Frame JW, Millar BG (1995) Subperiosteal behaviour of alginate and cellulose wound dressing materials. *Biomaterials* 16: 275-278.
- Meltzer TH, Gutfreund K, Kulshrestha VK, Stake AM (1968) Optimized cellulose membranes for artificial kidney dialysis applications. *ASAIO Journal* 14: 12-18.
- Nogi M, Yano H (2008) Transparent nanocomposites based on cellulose produced by bacteria offer potential innovation in the electronics device industry. *Advanced materials* 20: 1849-1852.
- Orikiriza LJ, Agaba H, Tweheyo M, Eilu G, Kabasa JD, Huttermann A (2009) Amending soils with hydrogels increases the biomass of nine tree species under non-water stress conditions. *Clean-Soil, Air, Water* 37: 615-620.
- Pan S, Ragauskas AJ (2012) Preparation of superabsorbent cellulosic hydrogels. *Carbohydrate Polymers* 87: 1410-1418.
- Suzuki Y, Makino Y (1999) Mucosal drug delivery using cellulose derivatives as a functional polymer. *Journal of Controlled Release* 62: 101-107.
- Van Vlierberghe S, Dubrue P, Schacht E (2011) Biopolymer-Based Hydrogels As Scaffolds for Tissue Engineering Applications: A Review. *Biomacromolecules* 12: 1387-1408.
- Wang B, Xu XD, Wang, ZC, Cheng SX, Zhang XZ., Zhuo, RX (2008) Synthesis and properties of pH and temperature sensitive P (NIPAAm-co-DMAEMA) hydrogels. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 64: 34-41.
- Yu J, Shi JG, Dang PF, Mamedov AI, Shainberg I, Levy GJ (2012) Soil and polymer properties affecting water retention by superabsorbent polymers under drying conditions soil. *Science Society of America Journal* 76: 1758-1767.
- 王志強、歐辰雄、呂金誠 (2003) 惠蓀林場日本扁柏林下樹種之組成及其多樣性之研究。林業研究季刊 25(2) : 25-42。
- 許博行、郭孟斯 (1999) 關刀溪森林生態系三種林分之土壤理化性質及土壤水化學成分。林業研究季刊 21(3) : 1-14。
- 陳羿樺、陳奕君 (2017) 水膠於土壤保水性及農用化學品傳輸之應用簡介。林業研究季刊。印行中。
- 陳羿樺 (2017) 纖維素水膠和氣凝膠製備及其農業之應用。國立中興大學森林學系碩士學位論文。
- 童秋霞、鍾政偉、葉美智、汪家夷 (2002) 社區居民對新化林場森林功能之認知與期望。林業研究季刊 24(2) : 13-20。
- 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。